

녹색·기후기술 정책지원 연구

[국가 온실가스 감축 목표달성을 위한 이행방안 및
제도적 기반마련 연구 - 수소 및 CCUS를 중심으로 -]
온실가스 감축 목표 달성을 위한 수소경제 및
CCUS 산업 클러스터 활성화 방안 연구

A Study on Implementations Plans to Activate Hydrogen Economy
and CCUS Industry Cluster for Achievement of the National
Greenhouse Gas Reduction Target

2022. 12.

녹색·기후기술 정책지원 연구

[국가 온실가스 감축 목표달성을 위한 이행방안 및
제도적 기반마련 연구 - 수소 및 CCUS를 중심으로 -]
온실가스 감축 목표 달성을 위한 수소경제 및
CCUS 산업 클러스터 활성화 방안 연구

A Study on Implementations Plans to Activate Hydrogen Economy
and CCUS Industry Cluster for Achievement of the National
Greenhouse Gas Reduction Target

2022. 12.

제 출 문

국가녹색기술연구소 소장 귀하

본 보고서를 “국가 온실가스 감축 목표달성을 위한 이행방안 및 제도적 기반마련 연구 - 수소 및 CCUS를 중심으로 -” 의 보고서로 제출합니다.

2022. 12.

주관연구기관명 : 국가녹색기술연구소

부 서 명 : 정책연구부

연구책임자 : 박 철 호

연 구 원 : 김 형 주

: 강 문 정

: 김 민 철

: 신 현 하

: 여 준 호

: 최 고 봉

: 김 소 은

: 김 준 우

: 서 선 재

: 한 민 지

: 곽 민 주

요 약 문

I. 서 론

□ 제1절 연구의 배경 및 목적

- 주요국은 온실가스 감축목표 달성 및 탄소중립 실현을 위한 중점기술 중 하나로 수소 및 CCUS(Carbon Capture, Utilization, and Storage)를 지목하고 관련 기술개발 및 육성에 필요한 제반사항을 정비하고 있으며, 이는 온실가스 감축목표를 달성하고 탄소중립을 실현하기 위하여 핵심기술 분야 중심의 추진전략 및 구체적인 이행방안을 마련하는 것이 중차대한 과제임을 뜻함
 - 수소의 경우 에너지 전환을 위한 청정에너지로 각광받고 있고, 이러한 이유로 주요국들은 수소 경제를 목표로 다양한 방안을 수립 중에 있음
 - CCUS는 특히 온실가스 배출감축이 어려운 주요 산업공정에서 탄소 배출을 대폭 감축하는 데 핵심적인 역할을 담당한다는 점에서 기술혁신이 필수적으로 고려되어야 하는 분야로 지목됨
- 무엇보다 탄소중립을 중심으로 주요국의 입법정책이 더욱 정치해지고, 자국의 기술 및 산업경쟁력 확보를 위해 녹색보호무역주의를 강화하고 있는 상황에서 탄소중립을 위한 기술 및 산업에 대한 경쟁력 확보가 곧 국가경쟁력이라는 점을 상기할 필요가 있음
- 우리나라의 국가계획 및 법제 또한 수소 및 CCUS 기술을 발전·산업 부문 온실가스 감축을 위한 핵심기술 수단으로 제시하면서 수소와 CCUS를 탄소중립의 핵심수단으로 상정하고 있음
- 그러나 구체적인 이행방안 측면에서 수소 및 CCUS 각각에 대한 현황 진단과 기술 및 산업경쟁력 향상을 위한 구체적인 정책방안이 미비한 상황임
 - 수소의 경우, 국제 비교를 통한 우리나라 수소경제의 각 가치사슬에 대한 엄밀한 현황 진단을 바탕으로 한 이행방안의 마련이 필요함
 - CCUS의 경우에도 장기 저탄소 산업구조로의 전환을 위한 구체적인 이행방안이 미비한 상황임
- 이러한 상황에서 국내 입법정책 현황 및 동향 등을 종합하여 국가경쟁력 제고를 위한 국내 정책 방향을 구체화하고, 수소 및 CCUS 각각에 대한 구체적인 정책방안을 모색할 필요가 있음에 따라 본 연구는 “수소경제 선도시장 잠재력 진단 및 활성화 방안 마련” 과 “CCUS

정책방안 우선순위 선정 및 세부전략 마련” 을 목표로 상정하고, 연구결과를 도출하고자 함

□ 제2절 연구내용 및 추진체계

- 본 연구는 수소경제 및 CCUS 산업클러스터 촉진을 제고하여 온실가스를 감축하기 위한 제도적 방안을 모색하는 것에 중점을 두고 있음
 - (수소) 선도시장 접근법을 활용하여 국내 수소경제 가치사슬의 각 부문이 국제적으로 선도시장을 형성할 수 있는 잠재력이 존재하는지 진단하고, 진단 결과를 바탕으로 전문가 자문을 실시하여 국내 수소경제 활성화 방안을 마련함
 - (CCUS) 온실가스 감축 목표달성을 위한 CCUS 정책 이행방안 및 세부 추진전략 마련을 위해 既 도출된 8대 생태계 조성방안을 중심으로 설문조사를 실시하여 도출결과를 바탕으로 정책 이행방안 및 세부 추진전략을 마련함
- 이를 위해 본 연구는 (STEP1)온실가스 감축을 위한 국내외 수소 및 CCUS 관련 현황을 조사 및 분석하고, (STEP2)국내 수소 가치사슬 선도시장 분석 및 국내 수소 활성화를 위한 이행방안 도출과 (STEP3)온실가스 감축 목표 달성 이행을 위한 CCUS 정책방안 우선순위 선정 및 세부전략 마련을 병렬적으로 수행하고, 각 목표에 부합하는 차별화된 방식으로 연구가 수행될 수 있도록 단계별 핵심 사항 및 연구방법론을 차별화함
- 아울러 실효성 있고, 효능감 높은 정책도출을 위해 기술·산업계 및 연구진들로 구성된 “전문가 자문회의” 와 도출된 연구내용 및 성과를 공유하여 기존의 정책방안을 고도화할 수 있도록 “국내 수소 및 CCUS 유관기관과의 연계망” 을 포함하여 연구 추진 체계를 구성함
- 이를 통해 국내 탄소중립 추진전략에서 제시되고 있는 수소 및 CCUS 관련 정책목표와 방향 등의 성공적인 이행을 도모하고, 지속가능성 및 국가 경쟁력을 제고할 수 있도록 방향성을 제시함

II. 수소 선도시장 분석 및 국내 수소경제 활성화 방안

□ 제1절 방법론 및 설계

- (방법론) 본 연구는 국내 수소 생태계의 가치사슬별 선도시장 형성 잠재력을 분석하기 위해 선도시장 접근법을 활용함
 - 선도시장은 성공적인 혁신의 국제적 확산과정이 처음 시작되고, 다양한 서비스를 통해 유지 및 확장되는 특정 지리적 영역의 재화 또는 서비스 시장을 말함(European Commission, 2005)
 - 선도시장 접근법은 상기 선도시장 형성의 잠재력 또는 가능성을 판단하기 위한 방법론으로, 분석대상 국가별 선도시장을 형성할 만한 이점 요인(Advantage Factor)의 현재 수준을 지표를 활용하여 측정한 후, 국가 간 비교를 통해 선도시장을 형성할 가능성이 높은

국가를 파악하는 방법론임

- 선도시장 접근법에서 활용되는 이점 요인으로는 대표적으로 가격 이점, 수요 이점, 이전 이점, 수출 이점, 시장구조 이점, 규제 이점이 있음

○ (본 연구의 설계) 본 연구는 주요 8개국(한국, 중국, 일본, 미국, 독일, 프랑스, 영국, 호주)을 대상으로 선도시장 분석을 수행하였으며, 수소경제를 구성하고 있는 각 가치사슬별로 선도시장 잠재력을 평가함

- 특히 본 연구에서는 선도시장 접근법에서 일반적으로 활용되는 이점 요인 외에, 필수적인 원자재 및 투입요소를 원활히 확보할 수 있는 환경을 평가하는 조달 이점(Procurement Advantage)을 제안하여 사용하였으며, 시장집중도 계산을 위한 자료 확보가 어려운 시장구조 이점을 제외함
- 수소경제의 가치사슬별 선도시장 형성 잠재력을 평가하기 위한 이점 요인과 측정지표는 다음의 표와 같음

〈수소 가치사슬별 이점 요인과 측정지표 종합〉

이점 요인	측정지표		
	생산부문	저장·운송부문	활용부문
가격 이점	그린수소 생산효율 (%)	수소액화플랜트 규모 (톤/일)	연료전지 발전단가 (원/kWh)
수요 이점	(1) 수소차 보급률 (대/100만 명) (2) 탄소 다배출 업종 비중 (%)	(1) 수소차 보급률 (대/100만 명) (2) 탄소 다배출 업종 비중 (%)	(1) 수소차 보급률 (대/100만 명) (2) 탄소 다배출 업종 비중 (%)
이전 이점	전체 그린수소 특허 중 해당 국가의 특허 비중 (%)	전체 수소 저장·공급·활용 특허 중 해당 국가의 특허 비중 (%)	전체 연료전지 특허 중 해당 국가의 특허 비중 (%)
수출 이점	-	-	연료전지 수출 점유율 (%)
규제 이점	청정수소 범위 법제화 여부 (Y/N)	수소의 저장 및 운송 관련 기준 법제화 여부 (Y/N)	저공해차량 의무판매 규정 존재 여부 (Y/N)
조달 이점	총발전량 대비 재생에너지 발전량 비중 (%)	국내 수소 생산량 (백만 톤)	국내 수소 생산량 (백만 톤)

- 각 이점 요인의 측정결과를 이론적 정규화 방법과 최소-최대(Min-Max) 정규화 방법을 통해 0점부터 100점까지의 값을 가지도록 정규화(Normalization)하였음
- 선도시장 분석과 함께, 한국의 지향점과 효과적인 정책방안을 도출하기 위하여 국내 수소 생산, 저장·운송, 활용부문의 산·학·연 전문가 25인으로 구성된 전문가 자문단을 운영함

□ 제2절 선도시장 접근법을 활용한 국내 수소 산업 진단

- (수소 생산부문) 분석대상 8개국의 수소 생산부문의 선도시장 형성 잠재력을 진단한 결과는 하기와 같음
 - 가격 이점은 그린수소 생산효율이 가장 높은 일본(62.43%)이 가장 컸으며, 한국(55%)은 그린수소 생산효율이 가장 낮아 가격 이점이 가장 작은 것으로 분석됨
 - 수요 이점을 수소차 보급률을 활용하여 측정했을 때 한국(100만 명 당 194.92대)에 가장 많은 수소차가 보급되어 있어 수요 이점이 가장 컸으며, 탄소 다배출 업종 비중을 기준으로 측정할 경우 한국(5.64%)은 중국(9.72%)에 이어 두 번째로 수요 이점이 높았음
 - 그린수소(수전해) 분야의 특허는 중국이 33.72%를 점유하고 있어 이전 이점이 가장 큰 것으로 나타났고, 한국은 8.25%를 점유하고 있어 중국, 미국, 일본에 이어 4위를 차지함
 - 규제 이점의 경우 청정수소 범위의 법제화 여부를 활용하여 바이너리(binary)로 측정하였으며, 한국은 미국, 독일, 프랑스와 함께 청정수소 범위가 법제화되어 있어 규제 이점이 존재하는 것으로 평가됨
 - 조달 이점은 각 국가의 총발전량 중 재생에너지 발전량 비중으로 측정하였으며, 한국의 재생에너지 발전량 비중은 4.71%로 그린수소 생산을 위한 조달 이점이 가장 낮고 독일(39.80%) 및 영국(37.33%)과 큰 격차를 보임

- (수소 저장·운송부문) 분석대상 8개국의 수소 저장·운송부문의 선도시장 형성 잠재력을 진단한 결과는 하기와 같음
 - 수소액화플랜트 규모로 가격 이점을 측정했을 때, 가장 큰 생산규모(252톤/일)의 액화플랜트를 보유하고 있는 미국이 가격 이점이 가장 컸으며, 한국에는 수소액화플랜트가 존재하지 않아 가격 이점이 가장 작았음
 - 수요 이점의 측정은 수소 생산부문과 동일하며, 한국은 수소차 보급률 기준으로 가장 수요 이점이 크고 탄소 다배출 업종 비중을 기준으로 두 번째로 수요 이점이 큰 것으로 나타남
 - 이전 이점은 수소 저장·운송부문의 특허 점유율로 측정하였으며, 미국이 22.45%의 특허를 점유하여 가장 이전 이점이 높았고, 한국(9.32%)은 미국, 중국, 일본, 독일에 이어 이전 이점이 5위로 평가됨
 - 규제 이점은 수소의 저장·운송 관련 기준이 법제화되어 있는지 여부로 측정하였으며, 중국을 제외한 나머지 국가들은 모두 법제화가 되어 있는 것으로 조사되어 규제 이점이 존재하는 것으로 평가됨
 - 조달 이점은 현재 자국 내 수소 생산량을 활용하여 측정했으며, 약 2,500만 톤을 생산하고 있는 중국의 조달 이점이 가장 컸으며 한국은 약 200만 톤을 생산하여 네 번째로 조달 이점이 큰 것으로 분석됨

- (수소 활용부문) 분석대상 8개국의 수소 활용부문의 선도시장 형성 잠재력을 진단한 결과는 하기와 같음
 - 가격 이점은 연료전지 발전단가로 측정하였으며 발전단가가 가장 낮은 수준인 미국에 비하

여 한국은 240원/kWh 수준으로, 미국 및 유럽국가에 이어 큰 가격 이점을 가지고 있는 것으로 나타남

- 수요 이점의 측정은 상기 수소 생산 및 저장·운송부문과 동일하며, 한국은 수소차 보급률로 측정했을 때 가장 큰 수요 이점을 가지고, 탄소 다배출 업종 비중으로 측정했을 때 두 번째로 큰 수요 이점을 가지는 것으로 분석됨
- 연료전지 특허를 활용하여 이전 이점을 측정했으며, 일본은 전세계 연료전지 특허의 약 3분의 1을 차지하여 이전 이점이 가장 컸고, 한국(9.77%)은 일본, 중국, 미국에 이어 네 번째로 큰 이전 이점을 가지는 것으로 나타남
- 수출 이점은 연료전지 수출 점유율을 활용하여 측정했으며 중국이 두드러지게 큰 수출 이점을 가진 반면, 한국은 11.1%를 점유하여 분석대상 국가 중 수출 이점이 2위인 것으로 나타남
- 규제 이점은 저공해차량 의무판매 규제의 존재 여부로 측정했으며, 한국 및 중국, 미국은 해당 의무판매 규제가 존재하여 규제 이점이 존재하는 것으로 분석됨
- 조달 이점은 수소 저장·운송부문과 같은 측정지표를 활용하여 평가했으며, 한국은 8개국 중 네 번째로 조달 이점이 큰 것으로 나타남

○ (종합 진단) 측정지표를 활용하여 각 이점 요인을 평가한 결과를 정규화하여 각 부문별 및 수소경제 가치사슬 전체에 대해서 종합점수를 산정한 결과는 하기와 같음

- 수소 생산부문에서 수소차 보급률을 수요 이점의 측정지표로 활용할 경우 한국(58.57점)이 가장 높은 선도시장 형성 잠재력을 가진 것으로 분석되었으며, 탄소 다배출 업종 비중으로 수요 이점을 측정할 경우 중국(59.67점)이 가장 높은 잠재력을 가지고 한국은 중국, 미국에 이어 세 번째로 높은 잠재력을 가짐
- 수소 저장·운송부문에 대해서는 수요 이점의 측정지표와 관계없이 미국이 가장 높은 선도시장 잠재력을 가지고 있는 것으로 분석되었으며, 한국은 수소차 보급률을 수요 이점으로 반영할 경우 2위(49.04점)이나 탄소 다배출 업종 비중을 반영할 경우 4위(39.40점)의 잠재력을 가짐
- 수소차 보급률로 수요 이점을 측정했을 때 수소 활용부문에서 선도시장 형성의 잠재력이 가장 높은 국가는 중국(59.61점)이고 한국(55.23점)은 2위를 차지한 것에 반해, 탄소 다배출 업종 비중으로 수요 이점을 측정하면 중국(75.80점)의 잠재력이 가장 높으며 한국(47.19점)은 3위를 차지함
- 수소경제 전체 가치사슬을 종합하여 선도시장 잠재력을 평가했을 때, 수소차 보급률로 수요 이점을 측정했을 때, 한국은 미국(57.70점)에 이어 두 번째로 높은 잠재력(54.30점)을 가지고 있으나, 탄소 다배출 업종의 비중으로 수요 이점을 측정할 경우 중국(64.55점) 및 미국(58.12점)에 이어 세 번째로 높은 잠재력(45.26점)을 가진 것으로 나타남

□ 제3절 국내 수소 산업 관련 주요 이슈 및 현안

- 수소 가치사슬별(생산, 저장·운송, 활용) 선도시장 분석결과를 활용하여 전문가 자문단 운영을 위한 설문을 설계하였으며, 각 부문의 전문가를 대상의 각 수소 가치사슬별 국내 현황을 파악하고 주요 장애요인 및 해결방안을 발굴하기 위한 설문조사를 진행하였음

- 전문가 설문조사 결과를 바탕으로 국내 수소경제 활성화에 있어 8대 주요 장애요인을 하기와 같이 도출함
 - (수소 생산 및 보급을 위한 인프라 부족) 전반적으로 수소 관련 인프라가 부족하다는 의견이 주를 이루었으며, ▲수소 충전소 및 공급망 부족, ▲핵심소재 및 기술의 높은 해외 의존도로 인한 수소 생산 및 도입 인프라 부족, ▲지역중심 수소허브도시 구축 필요 등의 의견이 제시됨
 - (수소전문업체 및 관련 기업 부족) 수소전문업체 및 관련 기업의 모수가 부족하여 이를 확대하기 위한 적극적인 지원을 마련할 필요가 있으며, 특히 ▲핵심소재 분야 관련 업체 육성 및 ▲중소기업의 성공사례 마련이 필요함
 - (수소 산업 육성을 위한 지원제도 및 기준 미흡) 수소 산업에 관련된 법·제도가 아직 미흡하여 이를 조속히 마련해야 한다는 의견이 대부분이었으며, 특히 ▲관련 설비 및 시설에 대한 안전기준 마련, ▲청정수소 인증 범위에 대한 명확한 기준 제시 및 인증제의 조속한 시행에 대한 필요성이 지적됨
 - (수소 설비에 대한 낮은 주민수용성) 기존에 이슈가 되었던 수소 설비 관련 사고 등으로 인해 폭발 및 가스 유출에 대한 위험성이 강조되어 수소에 대한 부정적인 인식이 자리 잡아 수소 관련 설비 및 시설에 대한 주민수용성이 낮아지게 되었고, 사업 초기의 수용성이 중장기적인 국가목표 달성 여부 및 추진속도에 영향을 줄 수 있는 만큼 이를 개선하기 위한 방안 마련이 시급함
 - (수요 강점 대비 편중된 국내 수소시장) 수소 관련 국내시장이 아직 활성화되지 않아 유인요소가 부족한 실정이며, 특히 ▲수소 수요처 다양성 부족과 ▲국내 관련 산업 및 기술 개발의 다양성 도모 등이 주요 이슈로 언급되었음
 - (플랜트 운영 및 관련 실증사업 경험 부족) 수소 전주기적으로 원천기술 및 실증사업 경험이 부족하여 이에 대한 적극적인 정부 지원을 요구하는 목소리가 높았으며, 독자적인 대형 플랜트 기술을 확보하고 신재생에너지와의 효율적인 연계가 필요하다는 의견이 있었음
 - (높은 해외 기술 의존도) 현재 수소제조·연료전지·수소저장 기술의 경우 기술수준 부문과 기초연구 및 응용개발연구 역량 부문에서 볼 때, 미국·일본·EU 등 주요 기술국 대비 부족한 수준을 보유하고 있어 해외 기술에 대한 의존도가 높은 만큼, 이를 해결하기 위한 국가 차원의 수소 전주기적인 R&D 지원이 필요함
 - (수요와 공급의 불균형) 국내 수소 수요 및 공급의 적절한 지점까지의 확대가 필요하며, 수소 공급의 안정화 및 차후 국가계획에 따른 수소 공급량에 맞춘 수소 수요처 확대 및 다양화를 통한 전체 수요량 확대가 필요함

□ 제4절 국내 수소경제 활성화를 위한 방안 도출

- 상기에서 제시된 8대 주요 장애요인에 대응하고 국내 수소경제 활성화를 도모하기 위한 이행방안 및 정책을 도출하기 위하여, 전문가 설문조사 결과를 토대로 내부 연구진 브레인스토밍을 통해 8개의 주요 수소경제 활성화 이행방안을 제시함

- (수소 전주기 원천기술 확보 및 기술개발 촉진) ▲광전극, ▲수소취성이 낮은 수소 배관, ▲연료전지, ▲수소 터빈 등 각 가치사슬별 다양한 분야의 기술개발이 필요함을 언급함과 동시에 단일 부문이 아닌 수소 전주기적으로 원천기술을 확보하고 관련 기술개발을 촉진하는 것이 필수적이라는 의견이 많았으며, 이를 위해 既 수립된 국가계획 및 로드맵 이행에 보다 박차를 가하고 이에 필수적으로 수반되어야 하는 정책적·제도적·재정적 기반을 단단히 할 필요가 있음
- (수소 관련 전주기 인프라 구축) 수소 가치사슬 내 각 부문별 안정성을 제고하기 위해 수소 관련 인프라를 확충하고 더욱 빈틈없이 기반을 다질 필요가 있으며, ▲민간 주도의 수소충전소 보급 확대, ▲대규모 재생에너지단지 조성 및 그린수소 생산을 위한 계통 연계, ▲해외도입을 위한 민간 인프라 투자 지원, ▲LNG 기지 - 수소 액화플랜트 연계, ▲배관망 확충, ▲이산화탄소 포집 및 활용 혹은 판매를 위한 체계 마련 등 전주기적인 관점에서 전반적인 인프라의 증대가 필요함
- (수소산업 활성화를 위한 규제 완화 및 제도 마련) ▲청정수소 인증제 및 청정수소발전 의무화제도 등 수소 관련 제도의 제정 및 시행, ▲규제 샌드박스 및 규제자유특구 운영, ▲관련 설비 및 시설에 대한 명확한 안전기준 및 규정 설립 및 개정 등을 통해 관련 실증사업 및 설비 운영에 대한 적합성을 확보하여 보다 적극적인 이해관계자들의 참여를 유도할 필요가 있음
- (수소전문기업 육성 및 사업화 촉진) 기업 후보군을 추가적으로 발굴하여 효율적인 지원 체계를 바탕으로 이를 지원함으로써 수소전문기업으로 발전시키고, 이를 성공사례로써 활용하여 적극적으로 홍보하여 추가적인 기업 후보군을 모색할 수 있는 선순환 구조의 체계 마련이 필요하고, 관련 기술의 상용화 및 사업화 전략 수행에 있어 효율적인 지원을 도모하기 위한 진행 프로세스 및 지원체계의 효율화와 합리화가 요구됨
- (수소 수요처 확대 및 다양화를 통한 시장 활성화) 국내 수소 수요를 확대하기 위해 수소 수요에 대한 잠재력이 있는 산업을 조기 발굴하여 관련 기술확보를 위한 지원을 제공할 필요가 있으며, 각 가치사슬별로 다양한 부문의 수소 수요처를 발굴해 수소 활용 다양성을 증진함으로써 안정성을 확보하는 것이 필요함
- (사회적 수용성 제고를 통한 수소경제 이행 촉진) 수소에 대한 인식 전환을 위해 ▲과학적 사실에 근거한 적극적인 홍보방안 마련, ▲이익 공유 및 일자리 창출 등 지역 사회에 경제적 이익 제공을 통한 경제적 효용성 증진, ▲설비 방문 프로그램 운영 및 관련 운영 정보 열람 서비스 제공 등을 통한 수소 관련 배경지식 제공 등의 방안을 수립하여 수소 관련 시설 및 설비에 대한 주민수용성을 제고할 필요가 있음
- (신재생에너지 보급 및 청정수소 생산 역량 확보) 에너지 안보 증진 및 시스템 안정성 확보를 위해 관련 인허가 제도의 개선 및 일원화, 지역 이익 공유제 등을 통한 주민수용성 증진, 설비 확대를 위한 부지 확보 등을 통해 신재생에너지 보급의 기반을 마련하고 나아가 신재생에너지 설비의 대용량화를 통해 재생에너지 보급을 확대하여 이를 수소 생산과 연계함으로써 청정수소 생산에 대한 역량을 강화할 필요가 있음
- (수소 해외 수입처 확보를 위한 국제협력 강화) 차후 국가 수소 공급량 목표치 달성을 위해 해외수소의 도입 혹은 해외 청정수소 생산이 수소 공급 방안 중 하나로 고려되고 있

는 만큼, 재생에너지가 풍부하고 대용량 이산화탄소 처리가 가능한 해외 주요국과 국가 간 협력 및 민간 업체를 포함한 컨소시엄 구축 등을 통해 다각도적인 협력체계를 구축할 필요가 있음

III. 국내 CCUS 산업 활성화를 위한 산업 클러스터 조성방안

□ 제1절 CCUS 정책 우선순위 도출

- 선행연구로 도출된 8대 생태계 조성방안과 그에 따른 세부 전략을 구체화하기 위하여 8대 생태계 조성방안 중 최우선으로 해결되어야 할 정책과제를 선정하기 위해 AHP와 설문조사를 구성한 혼합 방법론으로 산·학·연 전문가를 대상으로 조사를 시행하였음
- 분석결과 “CCUS 산업 활성화를 위한 산업 클러스터 조성” 이 최우선 정책과제로 선정되었음에 따라 해당 결과를 바탕으로 본 연구는 CCUS 산업 활성화를 위한 산업클러스터 조성을 중심으로 구체적인 세부 이행방안을 검토하고 정책적 시사점을 도출하고자 함

□ 제2절 CCUS 산업 클러스터 이론적 검토 및 국내외 사례조사

- CCUS 산업클러스터는 “이산화탄소 포집·활용·운송·저장 기술개발 및 산업을 영위하는 기업의 집적단지로서, 연구개발, 실증화 등을 지원하기 위하여 기업, 연구소, 대학 등을 상호 연계하고, 관련 전문인력 양성, 창업 사업화 촉진, 제품홍보 및 시장 진출을 지원하기 위한 진흥 시설의 총체” 로 요약될 수 있음
- 탄소중립 실현의 핵심기술로서 CCUS 기술 상용화 필요성이 절실하고 CCUS 사업은 잠재성이 높은 시장으로 평가받고 있지만, 여전히 고정 비용 등이 매우 높아 기업의 자발적인 참여를 기대하기 어려우며, 이와 같은 이유로 CCUS 기술개발 및 산업클러스터의 조성은 정책의존도가 매우 높음
- (CCUS 산업클러스터 국내 사례) CCUS 산업 활성화를 위한 산업클러스터 조성 필요성에도 불구하고, 현재 국내에는 조성된 CCUS 산업클러스터가 없기 때문에 관련 입법·정책 현황은 기존에 구축되어 있는 클러스터와 CCUS 산업 동향을 중심으로 파악할 수 있음
 - 국내 클러스터 조성 근거는 개별법에 근거하거나 「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률(이하: 산업집적법)」에 근거를 두고 있는 경우로 나누어 볼 수 있으며, CCUS 산업 클러스터에 대한 개별법이 존재하지 않고 형성되어 있는 CCUS 산업 클러스터가 현재까지 부재한 상태이기 때문에 산업집적법을 중심으로 CCUS 산업 클러스터의 조성 및 연계 방안을 예측해 볼 수 있음
- (CCUS 산업 클러스터 해외 사례) 대표적으로 CCUS 산업이 발달되어 있는 영국과 미국의 사례를 살펴봄으로써 국내 도입 시사점을 분석함

- 영국은 기업·에너지·산업전략부(Department for Business, Energy and Industrial Strategy, BEIS)를 중심으로 주축이 되어 CCUS 클러스터 조성을 진행 중이며, East Coast Cluster가 선정되어 선정된 클러스터 연결을 위한 개별 프로젝트를 진행 중이며 최종 재정 투자 대상 선정만을 남겨놓고 있는 상황임
- 미국은 10개의 상업용 CCUS 시설을 갖춘 국가로 에너지부(DOE)의 지원으로 다수의 연구 및 실증 프로젝트를 진행 중이며, 세계 최대 규모의 이산화탄소 파이프라인 네트워크(8000km)의 보유로 향후 텍사스 주 휴스턴, 루이지애나 주 등 잠재적 위치에 허브 및 클러스터 개발이 가능할 것으로 보임

□ 제3절 국내 CCUS 산업 클러스터 여건 분석

- (여건 분석 쟁점 및 접근법) CCUS 산업 클러스터 여건 분석을 수행하기에 앞서, 여건 분석의 체계를 정립하기 위해 주요 쟁점을 검토함
- (유망 저장소) CCUS 산업 클러스터의 유망 권역을 도출하기 위해 산업통상자원부와 해양수산부의 국내 해양 이산화탄소 저장소를 조사 결과를 검토하였으며, 현재까지 군산 분지와 울릉 분지의 저장소가 유망한 것으로 판단됨
- (유망 권역) 군산분지와 울릉분지 저장소를 중심으로 인접한 국가산업단지를 선정하여 각각 군산권역과 울릉권역으로 명명한 뒤 여건을 분석함
- (여건 분석 기준) 군산권역과 울릉권역의 CCUS 산업 클러스터 조성(지정) 여건을 분석하기 위해, 영국이 CCUS 클러스터 개발 시 활용한 적격성 심사 기준 중 ‘CCUS 클러스터 정의와의 부합성’을 활용·수정하여 기준을 마련함
- (군산권역의 업종 여건) 군산권역은 블루수소 생산거점의 가능성이 높고 상대적으로 대규모의 탄소를 저장할 수 있다는 강점이 있음
- (울릉권역의 업종 여건) 울릉권역은 군산권역에 비해 기반시설이 일부 조성되어 있고 탄소 다배출 제조업과 발전업, 탄소활용업종이 다수 분포되어 있다는 강점이 있음

□ 제4절 국내 CCUS 산업 클러스터 조성 방안 도출

- 본 절에서는 CCUS 산업 클러스터 여건 분석을 바탕으로 CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 이슈진단 및 장애요인을 분석하고, 이를 해결하기 위한 5대 핵심과제를 도출함

〈여건 분석을 통한 장애요인 분석 및 그 해결을 위한 5대 핵심과제〉

연번	여건 분석 결과 및 이슈	5대 핵심과제
1	CCUS 산업 클러스터의 기반시설 부족	탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 물리적 연계 구축
2	국가 주요 탄소 다배출 지역과의 거리가 멀	지리적 거리가 먼 탄소 다배출 업종의 위치와 이산화탄소 저장소와의 물리적 연계(이산화탄소 수송 등) 방안 마련
3	클러스터 입주 참여도 제고 필요	클러스터 입주 기원 지원 방안 마련
4	클러스터 인근 주민들의 부정적 인식	CCUS 산업 클러스터 인근 주민 수용성 제고 방안 마련
5	클러스터 활성화를 위한 유인책 미흡	CCUS 산업 클러스터 참여기업과 배출권거래제와의 연계 방안 마련

○ CCUS 산업 클러스터 이슈 진단

- (상업적 운영 개시 시점) 향후 CCUS 산업 클러스터를 조성함에 있어 적격성 기준 중 하나로 상업적 운영 개시 가능 시점을 검토하는 것은 2050 탄소중립 이행을 위해 매우 중요한 기준점이 됨에 따라 전문가를 대상으로 설문조사를 실시하여 적격성 판단을 위한 상업적 운영 개시 시점에 대한 의견(기준: '23~'50년)을 수렴하였고, 연구진들의 분석결과 ▲2030 NDC 달성 필요성, ▲산업 성장의 기회 획득, ▲기술 종속 가능성 등을 고려했을 때, '30년을 적격성 판단을 위한 상업적 운영개시 시점으로 하는 것이 적절할 것으로 판단되었음
- (선결과제) CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 이슈진단 및 장애요인을 분석하고, 이를 해결하기 위한 제도적·기술적 방안을 모색하기 위해 산·학·연 전문가 29명을 대상으로 서면 자문을 진행하였으며, 이를 바탕으로 본 연구에서는 아래와 같이 각각에 대한 해결 방안을 중요도 순으로 도출하였음
- (CCU 제품 및 기술 범위) CCU는 생산되는 제품의 수명 주기에 따라 탄소가 다시 대기 중으로 배출될 수 있어 CCU 제품 및 기술 범위에 따라 CCUS 산업 클러스터 내 비즈니스 모델 등이 달라질 수 있음. 이에 본 연구에서는 CCUS 산업 클러스터 내 CCU 기술/제품 포함 범위를 아래의 순으로 설정하는 것이 적합할 것으로 판단하였음

□ 제5절 CCUS 산업 클러스터 조성

○ 본 절에서는 CCUS 산업클러스터 여건 분석을 바탕으로 CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 이슈진단 및 장애요인을 분석하고, 이를 해결하기 위한 제도적·기술적 방안을 모색함

○ CCUS 산업 클러스터 이슈 진단

- (상업적 운영 개시 시점) 전문가를 대상으로 설문조사를 실시하여 적격성 판단을 위한 상업적 운영 개시 시점에 대한 의견(기준: '23~'50년)을 수렴하였고, 연구진들의 분석결과 ▲2030 NDC 달성 필요성, ▲산업 성장의 기회 획득, ▲기술 종속 가능성 등을 고려했을 때, '30년을

적격성 판단을 위한 상업적 운영개시 시점으로 하는 것이 적절할 것으로 판단되었음

- (선결과제) CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 이슈진단 및 장애요인을 분석하고, 이를 해결하기 위한 제도적·기술적 방안을 모색하기 위해 산·학·연 전문가 29명을 대상으로 서면 자문을 진행하였고, ▲탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 물리적 연계 구축(57%), ▲CCUS 산업 클러스터 참여기업과 배출권거래제와의 연계 방안 마련(22%), ▲CCUS 산업 클러스터 인근 주민수용성 제고방안 마련(10%), ▲지리적 거리가 먼 탄소 다배출 업종의 위치와 이산화탄소 저장소와의 물리적 연계(이산화탄소 수송 등) 방안 마련(7%)과 ▲클러스터 입주기업 지원방안 마련(4%) 등의 순으로 선결과제가 선정되었으며, 이를 바탕으로 본 연구에서는 각각에 대한 해결방안을 중요도 순으로 도출하였음
- (CCU 제품 및 기술 범위) 본 연구에서는 CCU 제품 및 기술범위에 대한 설문을 바탕으로 분석을 실시하였고, CCU가 전 세계적으로 연구개발 단계에 있다는 점을 고려하여 기술 및 제품의 범위는 가능한 한 확대하여 인정하되, 정부지원이나 감축인증과 관련해서는 가중치를 달리하는 것이 적합할 것으로 판단하였음

○ CCUS 산업 클러스터 조성 방안

- (탄소 다배출 산업과의 연계 방안)
 - 파이프라인의 문제점으로 지목되는 안정성 확보와 과도한 비용에 대한 해결방안으로 누수 탐지, 예측, 대응 기술의 개발, 부식 대책 마련, 파이프라인 영향평가, 설계기준 마련과 고속도로 이용료 징수모델을 차용한 비즈니스 모델 등의 개발이 요구됨
 - 운반선을 활용하는 방법은 현재 기술 수준과 국내 교통인프라 등(항만, 건조시설, 상하역 비용 등)을 고려했을 때 적합하지 않은 방안으로 사료되나, 향후 해외 수송을 고려했을 때 전용 운반선 기술개발은 병행될 필요가 있으며, 이에 대한 정부 지원이 요구됨
- (유망저장소와의 장거리 연계 방안)
 - 파이프라인은 높은 투자비와 운영비에 따른 경제성 문제, 대상 지역의 주민 수용성 문제가 있음에 따라 인프라 관련한 정부의 투자·운영 지원, 산업단지 건설에 대한 면세사업 지정, 투자비 절감 지원, 배출권거래제와의 적극적인 연계, 주민 수용성 제고를 위한 안전성 확보 및 정보제공이 절실히 요구됨
 - 운반선은 대량 수송에 유용할 것으로 판단되나 관련 인프라 구축 및 기술개발 등이 필수적임에 따라 운반선 활용도를 높이기 위해서는 암모니아/LPG/CO₂ 호환 수송 선박개발, 액화 저장 기술의 보완, 저장 기술개발 촉진이 수반되어야 할 것으로 판단됨
- (클러스터 입주기업 지원방안)
 - CCUS 클러스터 조성을 위한 클러스터 입주기업 지원이 주요 방안으로 분석되며, 구체적인 내용으로 ▲부지 임대료 부담금 감면, ▲각종 세제 혜택 제공, ▲국가 재정 사업에 대한 우선권 제공, ▲투자 촉진을 위한 정부 보조금 지원, ▲규제 특례 적용이 요구됨
 - 지원대상 기술에 대한 조건 정의, 대상 기술과 다른 감축기술과의 비교를 통한 역차별 가능성을 배제하고, 감축기여도 평가기준을 설계해야 함
- (주민 수용성 확보방안)
 - CCUS 산업활성화를 위한 입지선정에 주민 수용성이 절대적임에도 CCUS 산업시설 등에 대한

주민들의 수용성은 매우 낮은 수준으로 파악되며, 이를 해결하기 위한 방안으로 ▲안전성 확보를 위한 추가 투자, ▲CCUS 기술 및 산업에 대한 정보 제공, ▲산업클러스터 지역의 일자리 창출 도모, ▲산업 클러스터 이익 공유가 고려되어야 함

- CCUS 기술 및 산업에 대한 자체판단이 가능할 수 있도록 주민건강, 복지방해요인, 환경영향, 비용, 장·단점 등에 대한 적절하고 전반적인 정보 제공, 양방향 소통이 가능한 방식의 정보제공방안 마련(예:교육기관 지정 등), 기존일자리 종사자 재교육, 통합관제시스템 구축, 보험의무가입 등을 통해 주민수용성을 제고하여야 함
- (배출권거래제와의 연계 방안)
 - 배출권거래제와의 연계는 기업 및 산업 유인 측면에서 가장 효과적인 정책방안으로 분석되었으며, 이를 위해서는 ▲이산화탄소 활용방안에 대한 경제적 모델 마련, ▲이산화탄소 감축량산정 방법론 마련, ▲감축량 인증제도 확립, ▲배출권가격 인상이 필요함
 - ESG 평가제도와 연동, 기술개발 촉진과 산업육성 측면을 고려하여 감축인정 조건의 단계적 강화, 국제적 인증기준과의 정합성 제고, 다양한 제품에 대한 방법론 구축, 주요국과의 Alliance 체결과 지속적인 모니터링 체계 구축, 범부처전담부서 마련, 명확한 Scope 선정, 배출권으로 얻은 이익은 이산화탄소 저감 기술에 투자할 수 있도록 정책이 수반되어야 함
- (기타 조성 방안)
 - 장기적인 관점에서 탄소 다배출 업종과의 연계 외에 이산화탄소 기반의 화학 플랫폼을 조성하여, 이를 바탕으로 지속 가능한 사업으로의 전환을 유도할 필요가 있음
 - 배출권거래제 외에도 탄소세를 제정하여 탄소배출 산업군에 부과하는 방식으로 자금 조달의 유용성을 제고하여야 함(단, 이중과세 문제를 해결할 수 있도록 제도설계 필요)
 - 폐쇄대상인 석탄화력과 관련한 CCUS 기술 실증을 줄이는 등 국가 재정 집중도 개선을 통해 이산화탄소 포집 기술 상용화 등 우선순위를 설정할 필요가 있음
 - 정책변화로 발생할 수 있는 시장의 혼란상황을 막을 수 있도록 장기계획 수립 및 단계적 집행체계의 구축이 필요함

IV. 결 론

□ 제1절 요약 및 결론

- 선도시장 분석 결과, 한국은 수소차 보급률을 수요 이점의 측정 지표로 활용할 경우 미국의 뒤를 이어 두 번째로 선도시장 잠재력이 높은 것으로 나타났고, 탄소 다배출 업종의 비중을 지표로 활용할 경우 중국과 미국에 이어 세 번째로 선도시장 잠재력이 높은 것으로 평가됨
- 수소차의 경우, 한국이 정책적 의지를 갖고 보급을 촉진해 온 수소 사용처인 만큼, 여타 국가 대비 높은 보급률을 기록함에 따라 단기적으로 강한 수요 이점으로 작용함
- 탄소 다배출 업종의 비중은 분석대상 국가 중 높은 수준이나 수소차 보급률 대비 국가 간 격차가 적은 만큼, 상대적으로 낮게 수요 이점이 평가되었음

- 국내 수소경제 활성화를 위한 이슈와 장애요인을 진단하고, 이에 대한 해결방안을 수렴한 결과, 8대 주요 이슈 및 현안을 도출함과 동시에 수소경제 활성화를 위한 총 8개의 방안을 수립함
 - 수소경제 활성화에 있어 8대 주요 이슈 및 현안은 ① 수소 생산 및 보급을 위한 인프라 부족, ② 수소전문업체 및 관련 기업 부족, ③ 수소 산업 육성을 위한 지원제도 및 기준 미흡, ④ 수소 설비에 대한 낮은 주민수용성, ⑤ 수요 강점 대비 편중된 국내 수소시장, ⑥ 플랜트 운영 및 관련 실증사업 경험 부족, ⑦ 높은 해외 기술 의존도, ⑧ 수소 공급과 수요의 불균형으로 정리됨
 - 이를 해결하기 위해, 수소경제 활성화를 위한 방안으로는 ① 수소 전주기 원천기술 확보 및 기술개발 촉진, ② 수소 관련 전주기 인프라 확충, ③ 수소산업 활성화를 위한 규제 완화 및 제도 마련, ④ 수소전문기업 육성 및 사업화 촉진, ⑤ 수소 수요처 확대 및 다양화를 통한 시장 활성화, ⑥ 사회적 수용성 제고를 통한 수소경제 이행 촉진, ⑦ 신재생에너지 보급 및 청정수소 생산 역량 확보, ⑧ 수소 해외 수입처 확보를 위한 국제협력 강화 등 총 8개의 방안이 도출됨

- 국내 CCUS 산업 클러스터 조성 시 산업 및 지역의 특성을 고려하여 기존에 구축된 클러스터와의 연계성을 통해 시너지 효과를 유도하는 방안을 고려할 필요가 있음
 - 산업통상자원부와 해양수산부의 국내 해양 이산화탄소 저장소 조사를 살펴본 결과, 군산 분지와 울릉 분지의 저장소가 유망한 것으로 판단됨
 - 여건 분석 결과 울릉권역은 군산권역에 비해 기반시설이 일부 조성되어 있고 탄소 다배출 제조업과 발전업, 탄소활용업종 다수 분포되어 있다는 데에서 강점이 있음. 한편, 군산권역은 블루수소 생산거점의 가능성이 높고 상대적으로 대규모의 탄소를 저장할 수 있다는 데에서 강점을 보이는 것으로 정리됨

- CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 이슈와 장애요인을 진단해 보고 제도적·기술적 방안을 모색해 본 결과 5가지 선결과제를 도출해 냈음
 - 우선 국내에 CCUS 산업 클러스터를 조성함에 있어서 상업적 운영 개시 시점은 ▲2030 NDC 달성 필요성, ▲산업 성장의 기회 획득, ▲기술 종속 가능성 등을 고려했을 때, ‘30년이 적합할 것으로 보임
 - 5가지 선결과제는 ① 탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 물리적 연계 구축, ② CCUS 산업 클러스터 참여기업과 배출권거래제와의 연계방안 마련, ③ CCUS 산업 클러스터 인근 주민 수용성 제고 방안 마련, ④ 지리적 거리가 먼 탄소 다배출 업종의 위치와 이산화탄소 저장소와의 물리적 연계(이산화탄소 수송 등) 방안 마련, ⑤ 클러스터 입주 기업 지원방안 마련으로 정리됨

□ 제2절 주요 시사점

- 한국이 수소경제의 선도시장을 형성하기 위하여 수소경제의 각 부문별로 기술적 성과가

창출될 수 있는 강한 정책적 지원이 요구됨

- 한국 수소경제의 선도시장 잠재력은 수요 이점 측면에서 비교우위를 가지는 데에서 기인하며, 가격 이점 및 이전 이점 등 기술적 성과로부터 창출될 수 있는 이점은 주요국에 비해 낮음
- 수소경제의 혁신이 기술주도(technology push)의 특성을 보일 경우, 한국이 높은 선도시장 잠재력을 보유하고 있다고 하더라도 실제 선도시장 형성으로 연결되기 어려울 수 있음

○ 탄소 다배출 업종에서 실제 수소경제 각 부문에 대한 강한 혁신 수요를 창출하기 위하여 수소경제로의 전환 지원이 필요함

- 한국은 구조적으로 탄소 다배출 업종의 비중이 높아 수요 이점이 높게 측정되었으나, 실제 혁신에 대한 수요는 탄소 다배출 업종에서 수소를 활용할 때 본격적으로 발생할 것으로 기대됨
- 국내 탄소 다배출 업종에서 수소 활용과 설비전환이 확대될 수 있도록 효과적인 정책방안이 요구되며, 이는 탄소 다배출 업종의 탈탄소화와 동시에 수소경제의 혁신을 견인하는 큰 수요 이점이 될 수 있음

○ 수소경제에 있어서 비교우위를 유지하기 위해, 한국에서 시행되고 있는 현재의 규제를 개선하거나 새로운 규제의 도입을 검토할 필요가 있음

- 기술적 성과의 창출에 비해 규제는 비교적 빠르게 마련할 수 있으며, 분석대상 국가가 모두 동일한 규제를 가진다고 가정할 때 한국의 수소경제 선도시장 형성 잠재력은 희석되는 결과를 보임
- 일찍이 수소경제 구축을 추진해 오면서 마련해 온 규제의 비교우위를 유지하기 위해, 현 규제의 효과성을 검토하여 수정하거나, 수소법에 근거하여 추가적인 혁신을 유도할 수 있는 규제의 마련이 필요할 것으로 판단됨

○ 각각의 선결과제와 함께 도출된 장애요인과 해결방안을 살펴볼 때 CCUS 산업에 대한 일관적인 정책 추진과 장기계획 수립이 선결과제임

- 국내 탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 연계방안에서 파이프라인, 저장 탱크 등의 인프라 건설이 필수적으로 이 부분에 있어 경제성 보완에 대한 정부 지원, 투자비용 감축 지원을 고려해야 함
- 클러스터 입주기업 지원 및 배출권거래제와의 연계에 있어서 중장기적 관점에서의 제도 정비 및 글로벌 CCUS 시장을 염두에 둔 정책 마련이 필요함
- 주민 수용성 확보 및 배출권거래제와의 연계에 있어서 공론화 과정 및 의견수렴 과정이 필수적으로 이를 통해 CCUS 기술 및 산업에 대한 정확한 정보의 공유 및 객관적인 기준 설계를 위한 논의를 해나갈 수 있을 것임

S U M M A R Y

I. Introduction

Research Background and Rationale

- Major countries and Korean governments are accelerating eco-friendly and low-carbon policies, such as declaring carbon neutrality and establishing Green New Deal policies. In this regard, major countries including Korea are paying attention to hydrogen and CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) as the core technologies for achieving greenhouse gas reduction goals and realizing carbon neutrality.
- Above all, it is necessary to remember that securing competitiveness in technology and industry for carbon neutrality is national competitiveness at a time when major countries' legislative policies centered on carbon neutrality have become more politicized and green protectionism is strengthened.
 - Hydrogen and CCUS technologies are presented in the '2050 Carbon Neutral Scenario' as key technological means for reducing greenhouse gas in the power generation and industrial sectors, but there is no concrete implementation plan for the transition to a long-term low-carbon industrial structure.
 - The demand for research on the roadmap for greenhouse gas reduction in all sectors to achieve the national greenhouse gas reduction goal is increasing. It is necessary to come up with a strategy and implementation plan.
- Accordingly, this study intends to present an effective implementation plan to achieve the national greenhouse gas reduction goal by diagnosing the current status of the domestic hydrogen value chain and deriving comprehensive CCUS policy priorities. This study consists of two parts: “Diagnosing the potential of the hydrogen economy leading market and preparing measures for revitalization” and “Selecting priorities for CCUS policy measures and preparing detailed strategies” .

Research Method

- This study focuses on seeking institutional policy measures to reduce greenhouse gases by enhancing the hydrogen economy and promoting the CCUS industrial cluster.
 - (Hydrogen) The study diagnoses whether each value chain of domestic hydrogen economy has the potential to form a lead market globally by applying lead market approach, and design the implementation plan to activate domestic hydrogen economy by conducting a survey for relevant experts based on the analysis results.

- (CCUS) A survey was conducted based on the eight policy options that were derived from the previous research conducted in 2021. Policy implementation plans and detailed implementation strategies were prepared to achieve the greenhouse gas reduction goal.
- To this end, this study investigates and analyzes domestic and overseas hydrogen and CCUS-related status for greenhouse gas reduction (STEP1), then analyzes the domestic hydrogen value chain leading market and derives implementation plans for domestic hydrogen activation (STEP2). And finally, prioritizing CCUS policy measures and preparing detailed strategies to achieve gas reduction goals is performed in parallel (STEP3). Thus, core issues and research methodologies are differentiated for each step.

II. Lead market analysis of hydrogen market and implementation plan to activate domestic hydrogen market

□ Section 1 The methodology and framework of lead market analysis

- (Methodology) This study applied lead market analysis to analyze how much potential each value chain of domestic hydrogen ecosystem has to lead global market
 - Lead market means the goods or service market in specific geographical region in which the international expansion of successful innovation gets started first and is sustained and expanded through various types of services
 - Lead market analysis is the methodology to assess the potential and possibility of aforementioned lead market formation which figures out the country which has the highest lead market potential based on the comparative analysis among countries by applying the current status of advantage factors as indicators
 - Price advantage, demand advantage, transfer advantage, market structure advantage, and regulation advantage are the representative indicators widely used for lead market analysis
- (Framework) This research analyzed lead market potential targeting major eight countries (Republic of Korea, China, Japan, United States of America, Germany, France, United Kingdom, and Australia) and assessed it in each value chain of hydrogen economy
 - Especially, this study suggested and applied procurement advantage which assesses the environment which allows required resource or expenditures, and excluded market structure advantage due to the lack of data to estimate market concentration

<The factors and the indicators of each hydrogen value chain>

Factor	Indicator		
	Hydrogen Production	Hydrogen Storage & Transport	Hydrogen Application
Price Advantage	The production efficiency of green hydrogen (%)	Hydrogen liquefaction plant size (ton/day)	The unit cost of fuel cell power generation (₩/kWh)
Demand Advantage	(1) Number of hydrogen car (vehicle/million people) (2) The share of carbon-intensive industries (%)	(1) Number of hydrogen car (vehicle/million people) (2) The share of carbon-intensive industries (%)	(1) Number of hydrogen car (vehicle/million people) (2) The share of carbon-intensive industries (%)
Transfer Advantage	The share in green hydrogen patents (%)	The share in relevant patent (%)	The share in fuel cell patents (%)
Export Advantage	-	Relevant export market share (%)	The share in fuel cell export (%)
Regulation Advantage	Clean hydrogen certification system (Y/N)	Regulation related to hydrogen storage & transport (Y/N)	Regulation of mandatory purchase of FCEVs (Y/N)
Procurement Advantage	The share of renewable power generation (%)	Hydrogen production amount (million ton/year)	Hydrogen production amount (million ton/year)

- To cope with the limitation caused by the functional unit of indicators and estimate cumulative score, the analysis result of advantage indicators are normalized to be scored range from 0 to 100. (The efficiency of green hydrogen production, the share of renewable power generation, and regulation advantage indicators are normalized based on theoretical normalization methodology and the rest are based on Min-Max normalization methodology)
- The expert consultation team including 25 experts from industry, academia, and research sector was organized to figure out the future direction of Korea and efficient political methodology(10 experts in hydrogen production, 10 experts in hydrogen storage and transport, and 5 experts in hydrogen application)

Section 2 Diagnosis of domestic hydrogen industry applying lead market approach

- (Hydrogen production) The analysis result of the lead market potential of eight major countries in hydrogen production is described below.
 - Japan has highest price advantage with highest green hydrogen production efficiency (62.43%), and Korea shows the least amount of price advantage due to lowest green hydrogen production efficiency(55%)
 - In demand advantage based on hydrogen vehicle penetration rate, Korea has the largest demand advantage as it has 194.92 hydrogen vehicles per million people, and took second

- place(5.64%) following to China(9.72%) based on carbon-intensive industry rate
- China shows the largest transfer advantage as it occupies 33.72% of patents in green hydrogen(electrolysis) part, and Korea took fourth place by occupying 8.25% following to China, USA, and Japan
 - Regulation advantage is assessed in a binary term by applying whether the country legislated the range of clean hydrogen or not, and the result shows that Korea, USA, Germany, and France has regulation advantage as they legislated it.
 - Procurement advantage is estimated based on the share of renewable energy power generation, and the result demonstrates that Korea has the least procurement advantage among target countries as the share of renewable energy power generation in Korea is 4.71%, which shows a large gap with Germany(39.5%) and UK(37.33%)
- (Hydrogen storage and transport) The analysis result of the lead market potential of eight major countries in hydrogen storage and transport is described below.
- USA has the largest price advantage as it has the largest size of hydrogen liquefaction plant(252 tons/day), and Korea has the least advantage due to the lack of plant.
 - The assessment of demand advantage in hydrogen storage and transport is same with the assessment in hydrogen production, and Korea shows the largest demand advantage based on hydrogen vehicle penetration rate and second largest advantage based on the share of carbon-intensive industry.
 - Transfer advantage is analyzed by utilizing the share of relevant patents. USA has the largest transfer advantage by occupying 22.45% of patents, and Korea took fifth place by occupying 9.32%, following to USA, China, Japan, and Germany.
 - Regulation advantage is estimated based on the legislation of the relevant standards, and the result demonstrates that all the major countries except China have regulation advantage.
 - Procurement advantage is identified based on domestic hydrogen production. China has the largest procurement advantage with 25 million tons of hydrogen production, and Korea took fourth place with 2 million tons.
- (Hydrogen application) The analysis result of the lead market potential of eight major countries in hydrogen application is described below.
- Price advantage is estimated based on the unit cost of fuel cell power generation, and Korea has price advantage(240 won/kwh) following to USA and European countries.
 - The assessment of demand advantage same with the aforementioned demand advantage assessment in hydrogen storage and transport. and Korea shows the largest demand advantage based on hydrogen vehicle penetration rate and second largest advantage based on the share of carbon-intensive industry.
 - The share of occupying fuel cell patents is applied as an indicator to assess transfer advantage, and the result depicts that Japan has the largest transfer advantage by occupying 1/3 of global fuel cell patents and Korea takes fourth place following to Japan,

China, and USA.

- Transfer advantage is estimated by adopting the share of patents exports. China shows the largest transfer advantage, and Korea took second place by occupying 11%.
 - Regulation advantage is identified based on the legislation of mandatory purchase of FCEVs, and Korea, China, and USA has regulation advantage as they has the regulation of mandatory purchase.
 - The same indicator is applied to assess procurement advantage, and Korea took fourth place among eight major countries
- (Comprehensive analysis) The comprehensive analysis result by normalizing the analysis results of indicators in each value chain is described below.
- In hydrogen production, Korea shows the highest lead market potential(58.57) by utilizing the penetration rate of hydrogen vehicle as the indicator for demand advantage, and China has the highest potential(59.67) in terms of the share of carbon-intensive industry as the indicator, while Korea took third place in same condition.
 - In hydrogen storage and transport, USA contains the highest lead market potential regardless of the indicator for demand advantage, and Korea took second place with the penetration rate of hydrogen vehicle, and fourth place if the share of carbon-intensive industry is applied.
 - While China has the highest lead market potential in hydrogen application in both analysis results with two different indicators(59.61 and 75.80 respectively), Korea took second place(55.23) considering the penetration rate of hydrogen vehicle, and took third place(47.19) when the share of carbon-intensive industry is applied as an indicator for demand advantage

□ Section 3 The major issues of domestic hydrogen industry

- Based on the results of lead market analysis in each hydrogen value chain, the survey to understand the current status of each hydrogen value chain and identify major obstacles and following solutions is proceeded with an expert team including 25 experts(10 experts in hydrogen production, 10 experts in hydrogen storage and transport, and 5 experts in hydrogen application)
- Based on the results of expert survey, the eight major obstacles to activate hydrogen economy is figured out as below.
- (Lack of infrastructure for hydrogen production and supply) There are many opinions pointing out the lack of hydrogen infrastructure in overall, including ▲lack of hydrogen filling station and supply chain, ▲lack of infrastructure for hydrogen production and supply due to the high dependence on foreign material and technology, and ▲the necessity of regional-centered hydrogen hub city construction
 - (Lack of hydrogen-specialized and relevant firms) It is required to build active support

plan to expand the number of hydrogen-specialized firms and relevant companies, including fostering the firms related to core materials and figuring out the successful case of small and medium-sized enterprise(SME) as a role model.

- (Lack of support system and standards to foster hydrogen industry) Many experts emphasized the urgency of relevant legislation related to hydrogen industry including regulation and policy, pointing out ▲the safety standards of relevant equipment and facilities, and ▲the clear standards about the range of clean hydrogen certification and the prompt implementation of certification system
- (Low public acceptance of hydrogen facilities) As the negative recognition on hydrogen is placed due to the danger of explosion and gas leakage accidents, the public acceptance of hydrogen equipment and facilities has been decreased. As the public acceptance in the early stage can affect on the national target accomplishments in mid- to long-term, it is urgent to design the solution to enhance it.
- (Narrow and biased domestic hydrogen market) Due to the immature domestic hydrogen-related market, there is a lack of attraction for stakeholders, and relevant issues such as an insufficient hydrogen demand and a lack of the diversity of domestic relevant industry and technology development are mentioned.
- (Lack of the experience of plant operation and relevant demonstration project) As currently Korea has a shortage of original technologies and demonstration experiences, the respondents mentioned that it is necessary to offer systematic government support, secure large-scale plant technology, and connect with renewable energy resource.
- (High dependence on foreign technology) In terms of technology standards and applied development research capacity in hydrogen production · hydrogen storage · fuel cell technology, Korea has the high dependence on foreign technology due to a lack of competitiveness compared to major countries such as USA · Japan · EU. To solve this issue, it is required to support R&D throughout the entire hydrogen cycle at the national level.
- (Unbalanced hydrogen demand and supply) It is required to expand domestic hydrogen demand and supply to the point appropriate to activate and secure hydrogen market by stabilizing hydrogen supply chain and diversifying hydrogen demand.

□ Section 4 The implementation plan to activate hydrogen economy

- To deal with aforementioned eight major obstacles and design implementation plan and policy to activate domestic hydrogen economy, eight major implementation plans to activate hydrogen economy is suggested by internal brainstorming based on the results of expert survey
- (Secure the original technologies among all hydrogen value chains and stimulate relevant R&D) As the respondents mentioned that it is necessary to secure original technologies and stimulate relevant R&D in overall hydrogen value chain, it is required to fasten the implementation of established national plan and roadmap and strengthen political · systematical · financial infrastructure that must be accompanied.

- (Expand the hydrogen infrastructure covering all the value chains) It is required to expand and solidify hydrogen-related infrastructure through the entire hydrogen cycle to improve the stability of each hydrogen value chain, including ▲expanding the supply of hydrogen refueling stations led by the private sector, ▲establishment of large-scale renewable energy complex and grid connection for green hydrogen production, ▲Support for private infrastructure investment for overseas introduction, ▲linkage between LNG base and hydrogen liquefaction plant, ▲the expansion of pipeline network, ▲establishing a system for capturing, using, or selling carbon dioxide
- (Relieve regulations and design policy to activate hydrogen industry) It is necessary to induce the participation of relevant stakeholders by securing consistency in related demonstration projects and facility operation through ▲the enactment and implementation of hydrogen-related systems such as clean hydrogen certification and CHPS, ▲the operation of regulatory sandbox and special regulation-free zone, ▲the establishment and revision of clear safety standards and regulations for relevant facilities and equipments, etc.
- (Foster hydrogen-specialized firms and stimulate commercialization) It is required to establish a system for a virtuous cycle by discovering company candidates and supporting them based on an efficient support system to develop them into a hydrogen specialized company, and using this as a successful case to actively promote other potential company candidates. Also, it is needed to enhance the efficiency of the process and support system and rationalize them to promote efficient support in the commercialization of relevant technologies and implementation of commercialization strategy
- (Activate the market by expanding and diversifying hydrogen demand) In order to expand domestic hydrogen demand, it is required to discover the industry which has the potential for hydrogen demand and support them to secure relevant technologies. Also, to secure the stability of hydrogen demand, it is needed to diversify hydrogen application by discovering hydrogen demand in various fields of each hydrogen value chain.
- (Stimulate hydrogen economy implementation by enhancing public acceptance) In order to change the perception of hydrogen, it is required to improve the public acceptance of hydrogen-related facilities and equipment by ▲preparing an active publicity plan based on scientific background, ▲increasing economic utility by providing economic benefits to local communities such as profit sharing and job creation, ▲providing hydrogen-related background knowledge by operating facility visit program and related operation information viewing service, etc.
- (Secure renewable energy supply and clean hydrogen production capacity) In order to promote energy security and system stability, it is needed to establish the infrastructure of renewable energy supply by ▲improving and unifying relevant licensing systems, ▲enhancing the public acceptance through profit sharing, and ▲securing site for facility expansion, expand renewable energy supply by expanding the capacity of renewable energy facilities, and connect with hydrogen production to foster the capacity of clean hydrogen production

- (Strengthen international cooperation to secure hydrogen importer) As the introduction of foreign hydrogen or foreign clean hydrogen production is considered as one of the hydrogen supply methods to achieve the national hydrogen supply target, it is required to cooperate with major countries which has abundant renewable energy resource and the capacity to treat large amount of carbon dioxide by conducting governmental cooperation system and establishing a consortium including private companies.

III. A Study on How to Create a CCUS Industrial Cluster

Section 1. Derivation of Policy Priorities

- A survey was constructed and conducted to prioritize the 8 policy options that were derived from the previous research conducted in 2021, “A Study on Promotion Plan of an Domestic CCUS industrial Ecosystem for Transitioning to a Decarbonized Society” .
- As a result of the survey analysis, “Creating a CCUS industrial cluster” was selected as the top policy task, this study aims to review detailed implementation plans and derive policy implications focusing on the creation of a CCUS industrial cluster.

Section 2. Theoretical Review and Necessity and Domestic and Overseas Case Study of a CCUS Industry Cluster

- Concept and Significance of CCUS Industrial Cluster
 - The CCUS Industrial Cluster is an “industrial complex for companies engaged in the development and industry of carbon dioxide capture, utilization, transportation, and storage technology” . It can be summarized as “the totality of promotion facilities to support human resource training, start-up commercialization, product promotion, and market entry” , but the ultimate goal is carbon neutrality and sustainability beyond securing industrial competitiveness.
- Necessity to create a CCUS industrial cluster
 - As a core technology for realizing carbon neutrality, the need for commercialization of CCUS technology is urgently needed. Also, the CCUS business is evaluated as a market with high potential, yet it is still difficult to expect voluntary participation from companies due to high fixed costs. For these reasons, CCUS technology development and the formation of industrial clusters is highly policy dependent.
- Domestic case
 - As there is currently no CCUS industry cluster in Korea, the current status of legislation and policies can be identified focusing on existing clusters and trends in the CCUS industry.

- The grounds for creating a domestic cluster can be divided into cases based on individual laws or the 「Industrial Cluster Activation and Factory Establishment Act (hereinafter: Industrial Clustering Act)」. It is possible to predict the formation and linkage of the CCUS industrial cluster centering on the Industrial Clustering Act.
- As the domestic cluster creation plan adopts a strategy to build and upgrade clusters through synthesizing strengths of each industry and region, the CCUS industry cluster can also consider ways to induce synergy through cooperation with existing clusters.

○ Overseas Case 1: UK

- Above all, the UK is specifying CCUS cluster development, pointing to CCUS as a key measure to achieve carbon neutrality and the most core technology to lead the green industrial revolution at the forefront.
- The full-fledged CCUS cluster development is being promoted by the Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS). Until now ('22.11.), the UK has gone through a series of processes for Track-1, and the process has been divided into two major stages: Phase-1 and Phase-2.
- As a result, East Coast Cluster, Hynet, and Scottish Cluster were selected, and individual projects to connect to the selected cluster were recruited, leaving only the final financial investment target selection.

○ Overseas Case 2: USA

- The United States is a country with 10 commercial CCUS facilities and is leading the development and distribution of CCUS. Also, the country is striving for RD&D, market development, and infrastructure construction through CCS-related policy support.
- The capture capacity of carbon dioxide at CCUS facilities in the United States is approximately 25 million tons per year, two-thirds of the world's capacity. Furthermore, there are major CCUS R&D underway and numerous demonstration scale projects in operation including DOE(Department of Energy)'s National Laboratory.
- US CCUS-related policies can be divided into three categories: 1) research, development and demonstration (RD&D), 2) market development, and 3) infrastructure construction. Since 2020, CCS has been mainstreamed in energy and climate policy as a number of bills have been introduced.
- Most carbon dioxide sources in the United States are located close to potential storage sites. As the United States has the world's largest network of carbon dioxide pipelines (8000 km), it could be the basis for developing hubs and clusters that will connect future emission points to carbon dioxide storage and EOR(Enhanced Oil Recovery) sites.

□ Section 3. Analysis of CCUS Industry Cluster Conditions in Korea

- (Issues for analysis) Prior to carrying out the CCUS industry cluster condition analysis,

major issues are reviewed to establish a system for condition analysis.

- (Promising storage) The Ministry of Trade, Industry and Energy and the Ministry of Oceans and Fisheries reviewed the results of the survey to derive promising areas of the CCUS Industrial Cluster, and so far, the repositories of Gunsan Basin and Ulleung Basin are considered promising.
- (Promising area) National industrial complexes adjacent to Gunsan Basin and Ulleung Basin reservoirs were selected and named as the Gunsan Area and the Ulleung Area.
- (Condition analysis criteria) In order to analyze the conditions for the establishment of CCUS industrial clusters in the Gunsan or the Ulleung regions, the criteria were prepared by utilizing and modifying the “conformity with the definition of the CCUS cluster” among the eligibility criteria used by the UK.
- (Comparison of conditions in promising regions) The Ulleung area has advantages in that it has more infrastructure compared to the Gunsan area, and has many carbon emission manufacturing, power generation, and carbon utilization industries.

□ Section 4. CCUS Industry Cluster Creation

- In this section, issue diagnosis and obstacle factors for creating a CCUS industrial cluster are analyzed based on the analysis of CCUS industrial cluster conditions, and institutional and technical measures are sought to solve these problems.
- Diagnosis of CCUS Industrial Cluster Issues
 - (Commencement of commercial operation) Opinions on the timing of commercial operation start for judgment were collected (ranging from '23 to '50), and most of the respondents answered that 30 years should be taken as the starting point of commercial operation for eligibility determination.
 - (Prerequisites) A questionnaire was conducted on the prerequisites to be resolved in relation to the establishment of the CCUS industrial cluster and the start of commercial operation. The most important prerequisite derived was establishing physical links between carbon emission industry and carbon dioxide storage and utilization.
 - (Scope of CCU products and technologies) A survey was conducted on the CCUS product and technology scope, and as a result of the survey, the appropriate CCUS product and technology scope were: 1) allowed for all CCU technologies and products (69%), 2) only products that can be permanently reduced (15%), 3) others (12%), and 4) excluding products that immediately emit carbon, such as the conversion of CO₂ into fuel (4%).

○ CCUS Industry Cluster Formation Plan

- In order to derive the CCUS industry cluster creation plan, based on the prerequisites discussed above, 1) linkage with a high-carbon emitting industry, 2) long-distance linkage with promising storage, 3) support for cluster resident companies, 4) plan to secure resident acceptance, and 5) linkage with emission trading system are selected as key issues. Major obstacles and solutions are introduced.
- (Linkage with a high-carbon emitting industry) Considering the domestic situation, a method of connecting a short-distance pipeline and using a medium-to-long-distance transport truck was proposed. As measures to secure pipeline stability, leak detection, prediction, and response technology development, provision of pipe corrosion countermeasures, impact assessment, and design standards have also been mentioned.
- (Long-distance linkage with promising storage) The problems of economic feasibility due to high investment and operation costs, and the problem of acceptability of residents in the surrounding areas were commonly pointed out. As a solution, government support for investment and operation, designation of duty-free projects for construction in industrial complexes, support for reduction of investment costs, and active connection with the emission trading system were suggested to supplement the economic feasibility.
- (Support for cluster resident companies) There was an opinion that it is necessary to periodically renew the rent reduction or exemption target through a regular qualification examination. Considering that CCUS is difficult to see as a profitable business from the perspective of a company, there was an opinion that it is necessary to increase the participation of companies by applying the same tax benefit method regardless of the corporate size.
- (Plan to secure resident acceptance) The respondents emphasized that the CCUS law needs to be prepared as soon as possible and safety management regulations need to be specified in the law. In addition, the necessity of establishing a window through which continuous dialogue and opinions can be collected was suggested to resolve residents' anxiety.
- (Linkage with emission trading system) Respondents reviewed the emission trading system from the perspective of expanding the subsidy that would enable government support and investment in large companies that develop CCU technology, and that would preserve the production cost in consideration of CARPEX (Capital Expenditures) and OPEX (Operating Expenditures).

IV. Conclusion

□ Section 1. Summary and Conclusion

- As a result of lead market analysis, Korea shows second highest lead market potential after United States of America in the case of utilizing the number of hydrogen vehicles as the indicator of demand advantage, and third highest potential following to

China and United States of America when applying the share of carbon intensive industries.

- In the case of hydrogen vehicle, as Korea has stimulated its dissemination as the major sector of domestic hydrogen usage with political willingness, it affected as strong demand advantage in short-term by showing higher penetration rate compared to other major countries
 - The share of carbon intensive industries in Korea is high among the major countries, but it has lower demand advantage compared to the number of hydrogen vehicles as the gap between major countries is smaller
- As a result of diagnosing the issues and obstacles for the activation of domestic hydrogen economy and designing potential solutions, eight major issues are derived and following eight implementation plans to activate hydrogen economy are established
- Eight major issues of hydrogen economy activation includes ① lack of infrastructure for hydrogen production and supply, ② lack of hydrogen-specialized and relevant firms, ③ lack of support system and standards to foster hydrogen industry, ④ low public acceptance of hydrogen facilities, ⑤ narrow and biased domestic hydrogen market, ⑥ lack of the experience of plant operation and relevant demonstration project, ⑦ high dependence on foreign technology, and ⑧ unbalanced hydrogen demand and supply
 - To solve the aforementioned issues and promote hydrogen economy, ① securing the original technologies among all hydrogen value chains and stimulate relevant R&D, ② expanding the hydrogen infrastructure covering all the value chains, ③ relieving regulations and design policy to activate hydrogen industry, ④ fostering hydrogen-specialized firms and stimulating commercialization, ⑤ activating the market by expanding and diversifying hydrogen demand, ⑥ stimulating hydrogen economy implementation by enhancing public acceptance, ⑦ securing renewable energy supply and clean hydrogen production capacity, and ⑧ strengthening international cooperation to secure hydrogen importer are suggested as potential implementation plans.
- When creating a domestic CCUS industry cluster, it is necessary to consider a method of inducing synergy effect through linkage with the existing cluster in consideration of the characteristics of the industry and region.
- According to the Ministry of Trade, Industry and, Energy and the Ministry of Oceans and Fisheries' survey of domestic marine carbon dioxide reservoirs, the reservoirs in Gunsan Basin and Ulleung Basin are considered promising.
 - As a result of the analysis of the conditions, the Ulleung region has some strength compared to the Gunsan region in that it has some infrastructure, and there are many carbon-emitting manufacturing, power generation, and carbon utilization industries. On the other hand, the Gunsan region is summarized as showing strength in that it has a high

possibility of a blue hydrogen production base and can store a relatively large amount of carbon.

- As a result of diagnosing issues and obstacles for the creation of the CCUS industry cluster and seeking institutional and technical measures, five prior tasks were derived.
 - First of all, in creating a CCUS industrial cluster in Korea, the start of commercial operation is expected to be in '30, considering ▲ the need to achieve 2030 NDC, ▲ the acquisition of industrial growth opportunities, and ▲ the possibility of technology dependence.
 - The five pre-requisites are ① establish a physical link between a carbon-heavy industry and carbon dioxide storage and utilization sites, ② prepare a plan for linking CCUS industrial cluster participating companies with the emission trading system, ③ prepare a plan to increase the acceptance of residents near the CCUS industrial cluster, ④ arranged as a plan to physically link carbon dioxide storage with the location of a distantly geographically distant carbon-emitting industry (e.g. carbon dioxide transport), and ⑤ prepare a plan to support companies moving into clusters

□ Section 2. Major implications

- For Korea to form a leading market for the hydrogen economy, strong policy support is required to create technological achievements in each sector of the hydrogen economy.
 - Korea's hydrogen economy's leading market potential comes from having a comparative advantage in terms of demand advantage, and the advantages that can be created from a technological performance such as price advantage and transfer advantage are low compared to major countries
 - If the innovation of the hydrogen economy shows the characteristics of technology push, it may be difficult to lead to the formation of an actual leading market even if Korea has a high potential for a leading market.
- To create strong demand for innovation in each sector of the hydrogen economy in the industry with high carbon emissions, support for the transition to the hydrogen economy is needed.
 - Structurally, Korea has a high proportion of carbon-emitting industries, so the demand advantage was measured to be high, but demand for innovation is expected to occur in earnest when hydrogen is used in carbon-emitting industries.
 - Effective policy measures are required so that hydrogen utilization and facility conversion can be expanded in domestic carbon-emitting industries.
- In order to maintain a comparative advantage in the hydrogen economy, it is necessary to improve the current regulations in Korea or review the introduction of new regulations.
 - Regulations can be prepared relatively quickly compared to the creation of technological

achievements, and assuming that all analyzed countries have the same regulations, Korea's potential to form a leading hydrogen economy market is diluted.

- To maintain the comparative advantage of regulations that have been established while promoting the establishment of a hydrogen economy early on, it is judged that it is necessary to review and revise the effectiveness of the current regulations, or to prepare regulations that can induce additional innovation based on the hydrogen law.
- When looking at the obstacles and solutions derived along with each prior task, consistent policy promotion and long-term planning for the CCUS industry are the prior tasks.
- Infrastructure construction such as pipelines and storage tanks is essential in the connection between domestic carbon-emitting industries and carbon dioxide storage and utilization sites.
 - In support of cluster resident companies and linking with the emission trading system, it is necessary to prepare policies in consideration of the global CCUS market and system improvement from a mid- to long-term perspective.
 - To secure resident acceptance and link with the emission trading system, the process of public discussion and opinion gathering are essential, so that accurate information on CCUS technology and industry can be shared and discussions can be held for objective standard design.

목 차

제1장 서론	1
제 1 절 연구의 배경 및 목적	3
1. 연구배경 및 필요성	3
2. 연구의 목적	4
제 2 절 연구내용 및 추진체계	4
1. 연구의 내용 및 방법	4
2. 연구의 추진체계	6
제2장 수소 선도시장 분석 및 국내 수소경제 활성화 방안	9
제 1 절 방법론 및 설계	11
1. 선도시장 접근법의 이론적 배경	11
2. 연구 방법 및 설계	17
제 2 절 선도시장 접근법을 활용한 국내 수소 산업 진단	38
1. 수소 생산부문 진단	38
2. 수소 저장·운송부문 진단	45
3. 수소 활용부문 진단	51
4. 종합 진단	58
제 3 절 국내 수소 산업 관련 주요 이슈 및 현안	67
1. 수소 생산 및 보급을 위한 인프라 부족	67
2. 수소 전문업체 및 관련 기업 부족	69
3. 수소산업 육성을 위한 지원제도 및 기준 미흡	70
4. 수소 설비에 대한 낮은 주민수용성	71
5. 수요 강점 대비 편중된 국내 수소시장	72
6. 수소 플랜트 및 관련 실증사업 경험 부족	73
7. 높은 해외 기술 의존도	74
8. 수소 공급과 수요의 불균형	75

제 4 절 국내 수소경제 활성화를 위한 방안 도출	77
1. 수소 전주기 원천기술 확보 및 기술개발 촉진	77
2. 수소 관련 전주기 인프라 확충	78
3. 수소산업 활성화를 위한 규제 완화 및 제도 마련	79
4. 수소전문기업 육성 및 사업화 촉진	81
5. 수소 수요처 확대 및 다양화를 통한 시장 활성화	81
6. 사회적 수용성 제고를 통한 수소경제 이행 촉진	82
7. 신재생에너지 보급 확대를 통한 청정수소 생산 역량 확보	83
8. 수소 해외 수입처 확보를 위한 국제협력 강화	84

제3장 국내 CCUS 산업 활성화를 위한 산업 클러스터 조성방안 85

제 1 절 CCUS 정책 우선순위 도출	87
1. 개요	87
2. 내용	88
3. 결과	89
제 2 절 CCUS 산업 클러스터 이론적 검토 및 국내외 사례조사	91
1. CCUS 산업 클러스터 개념과 의의	91
2. CCUS 산업 클러스터 조성 필요성	93
3. 국내 사례	96
4. 해외 사례	102
제 3 절 국내 CCUS 산업 클러스터 여건 분석	131
1. 개요	131
2. CCUS 산업 클러스터 유망 권역(안)의 업종 여건	142
3. CCUS 산업 클러스터 유망 권역(안)의 기반시설 여건	151
4. 종합분석	153
제 4 절 국내 CCUS 산업 클러스터 조성 방안 도출	156
1. 개요	156
2. 국내 CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 주요 이슈 진단	156
3. CCUS 산업 클러스터 조성 방안	166

제4장 결 론	181
제 1 절 요약 및 결론	183
제 2 절 주요 시사점	186
참고문헌	191
별첨	201
[별첨 1] CCUS 정책 우선순위 도출을 위한 정책과제별 평가지표 가중치 결과	203
[별첨 2] CCUS 정책 우선순위 도출 결과	204
[별첨 3] 수소 선도시장 분석(생산부문) 설문조사지	205
[별첨 4] 수소 선도시장 분석(저장·수송 부문) 설문조사지	216
[별첨 5] 수소 선도시장 분석(활용 부문) 설문조사지	228
[별첨 6] CCUS관련 정책 우선순위 마련을 위한 지표선정관련 전문가 설문조사	240
[별첨 7] CCUS 산업 클러스터 조성방안 설문조사지	252
[별첨 8] 수소 서면자문 명단	264
[별첨 9] CCUS 서면자문 명단	265

표 목 차

<표 2-1> 선도시장 접근법의 주요 이점 요인	13
<표 2-2> 수소 생산부문의 이점 요인과 측정지표	20
<표 2-3> 수소 저장·운송부문의 이점 요인과 측정지표	25
<표 2-4> 수소 활용부문의 이점 요인과 측정지표	30
<표 2-5> 수소 가치사슬별 이점 요인과 측정지표 종합	35
<표 2-6> 수소 생산부문의 각 이점 요인별 진단 결과 정규화	59
<표 2-7> 수소 저장·운송부문의 각 이점 요인별 진단 결과 정규화	61
<표 2-8> 수소 활용부문의 각 이점 요인별 진단 결과 정규화	63
<표 2-9> 수소경제 가치사슬 진단 결과	65
<표 2-10> 지역 수소산업 생태계 구축 현황	68
<표 2-11> 국내 수소 관련 기술 수준 및 연구단계별 역량	74
<표 3-1> CCUS 정책 우선순위 선정 시 고려해야 할 평가항목	88
<표 3-2> CCUS 정책 우선순위 선정 질문 문항 예시	89
<표 3-3> CCUS 정책 우선순위 선정 결과	90
<표 3-4> 전문가 자문을 통한 CCUS 기술수준분석 결과	95
<표 3-5> 산업단지의 종류	97
<표 3-6> 성장유망산업 분류체계	98
<표 3-7> 성장유망산업 특화도 분석 지표	99
<표 3-8> 성장유망산업의 지역별 특화도 및 집적도	99
<표 3-9> CCUS 기술 개발 주요 이슈	101
<표 3-10> CCUS 클러스터 진행 Track 구분 및 선정 단계	108
<표 3-11> Phase-1 정량평가 지표별 가중치와 내용	109
<표 3-12> 부문별 주요 적격성 심사기준	113
<표 3-13> Phase-2 정량평가 지표별 가중치와 내용(전력부문)	114
<표 3-14> Phase-2 정량평가 지표별 가중치와 내용(산업부문)	115
<표 3-15> Phase-2 정량평가 지표별 가중치와 내용(수소부문)	116
<표 3-16> 클러스터별 적격성 심사 통과 프로젝트와 최종 선정 프로젝트	117
<표 3-17> 미국의 대규모 상업용 CCUS 프로젝트 현황(2020년도 기준)	120

<표 3-18> 미국 CCS 정책 추진 연혁	123
<표 3-19> DOE의 탄소포집저장 시설 관련 예산 변화	127
<표 3-20> 국내 유형별 산업단지 현황(2022년 2분기 기준)	133
<표 3-21> CCUS 산업 클러스터 여건 분석의 주요 쟁점 및 본 연구의 접근법	134
<표 3-22> 유망 저장소 인근 CCUS 산업 클러스터 유망 권역 도출 결과	137
<표 3-23> 군산권역 및 울릉권역 광역지방자치단체 기초 경제 현황	138
<표 3-24> 군산권역 국가산업단지 기초 현황(2021년도 4분기 기준)	139
<표 3-25> 울릉권역 국가산업단지 기초 현황(2021년도 4분기 기준)	139
<표 3-26> 영국의 CCUS 클러스터 적격성 심사 기준과 본 연구로의 활용	140
<표 3-27> 군산권역의 업종별 입주업체 및 생산액 분포	144
<표 3-28> 군산권역의 탄소 다배출 제조업 입주업체 및 생산액 분포	144
<표 3-29> 군산권역 인근 LNG 복합화력발전소	145
<표 3-30> 군산권역 인근 LNG 인수기지(천연가스 생산기지)	146
<표 3-31> 군산권역의 탄소활용업종 입주업체 및 생산액 분포	147
<표 3-32> 울릉권역의 업종별 입주업체 및 생산액 분포	148
<표 3-33> 울산권역의 탄소 다배출 제조업 입주업체 및 생산액 분포	149
<표 3-34> 울릉권역 인근 LNG 복합화력발전소	150
<표 3-35> 울릉권역 인근 LNG 인수기지(천연가스 생산기지)	150
<표 3-36> 울릉권역의 탄소활용업종 입주업체 및 생산액 분포	151
<표 3-37> CCUS 산업 클러스터 유망 권역 비교	153
<표 4-1> 국내 CCUS 산업 클러스터 핵심과제 및 과제별 주요 시사점	187

그림 목 차

[그림 1-1] 수소 분야의 연구 프로세스 및 주요 내용	5
[그림 1-2] CCUS 분야의 연구 프로세스 및 주요 내용	6
[그림 1-3] 연구 추진 체계	7
[그림 2-1] 수소 생산부문의 가격 이점	38
[그림 2-2] 수소 생산부문의 수요 이점: 수소차 보급률	40
[그림 2-3] 수소 생산부문의 수요 이점: 탄소 다배출 업종 비중	41
[그림 2-4] 수소 생산부문의 이전 이점	42
[그림 2-5] 수소 생산부문의 규제 이점	43
[그림 2-6] 수소 생산부문의 조달 이점	45
[그림 2-7] 수소 저장·운송부문의 가격 이점	46
[그림 2-8] 수소 저장·운송부문의 수요 이점: 수소차 보급률	47
[그림 2-9] 수소 저장·운송부문의 수요 이점: 탄소 다배출 업종 비중	47
[그림 2-10] 수소 저장·운송부문의 이전 이점	48
[그림 2-11] 수소 저장·운송부문의 규제 이점	49
[그림 2-12] 수소 저장·운송부문의 조달 이점	51
[그림 2-13] 수소 활용부문의 가격 이점	52
[그림 2-14] 수소 활용부문의 수요 이점: 수소차 보급률	53
[그림 2-15] 수소 활용부문의 수요 이점: 탄소 다배출 업종 비중	53
[그림 2-16] 수소 활용부문의 이전 이점	54
[그림 2-17] 수소 활용부문의 수출 이점	55
[그림 2-18] 수소 활용부문의 규제 이점	56
[그림 2-19] 수소 활용부문의 조달 이점	57
[그림 2-20] 국가별 수소 생산부문의 선도시장 잠재력 진단 결과(평균)	59
[그림 2-21] 수소 저장·운송부문의 선도시장 잠재력 진단 결과(평균)	61
[그림 2-22] 수소 활용부문의 선도시장 잠재력 진단 결과(평균)	63
[그림 2-23] 수소경제 전 가치사슬 선도시장 잠재력 진단 결과	65
[그림 2-24] 수소경제 전 가치사슬 선도시장 잠재력 진단 결과(동일한 규제 이점 상정)	66
[그림 2-25] 수소경제 활성화를 위한 주요 이슈·현안 및 세부 방안	67

[그림 2-26] 수소전문기업 업종 현황	69
[그림 2-27] 수소전문기업 규모 현황	70
[그림 2-28] 2022년 수소 분야 신규 기술개발 지원 규모(단위: 억 원)	73
[그림 3-1] CCUS 산업생태계 육성을 위한 주요 이슈·현안 및 생태계 조성방안	87
[그림 3-2] 연구수행 방안	88
[그림 3-3] CCUS 생태계 조성방안 정책 우선순위 선정 방법	88
[그림 3-4] 평가항목별 가중치 산정 결과	90
[그림 3-5] Michael E. Porter의 국가경쟁력 결정 모형으로서의 다이아몬드 모델	92
[그림 3-6] 산업클러스터, 각종 클러스터 등과의 관계	92
[그림 3-7] CCUS 미래 시장 규모 예측	94
[그림 3-8] CCS 상용화 지점	94
[그림 3-9] 전 세계 이산화탄소 저장 후보지와 잠재량	95
[그림 3-10] 클러스터링을 통한 산학연 네트워크 구축 및 운영의 기본모형	97
[그림 3-11] 영국 및 G7국가의 GDP와 온실가스 감축 변동 추이 비교	103
[그림 3-12] 영국 유망 CCUS 클러스터와 이산화탄소 저장소 및 CCUS 네트워크	105
[그림 3-13] 영국 산업 클러스터 위치와 이산화탄소 배출량	106
[그림 3-14] 영국의 원자력, 해상 풍력 및 CCUS 건설 비율에 따른 이산화탄소 (예상)저감량 비교	106
[그림 3-15] 영국의 CCUS 개발 계획('35년 기준)	107
[그림 3-16] 영국 산업 클러스터 위치와 이산화탄소 배출량	111
[그림 3-17] Track-1에서 선정된 CCUS 클러스터 개발 계획	112
[그림 3-18] CCUS 비즈니스 모델 개념도	119
[그림 3-19] 지속 가능한 발전 시나리오에서 미국의 이산화탄소 포집	121
[그림 3-20] 미국의 이산화탄소 발생원 및 잠재적인 저장소 지도	121
[그림 3-21] 광범위한 CCS 배포를 지원하는 미국의 CCS 정책의 세 가지 범주	122
[그림 3-22] 미국에서 제정된 주요 CCS 정책의 타임라인	124
[그림 3-23] 연도별 45Q 혜택의 변화	126
[그림 3-24] 텍사스의 식염수 지층 및 활성 유전에서 CO ₂ 저장용량의 합성 지도	128
[그림 3-25] 지역 직접공기포집 허브 구축 일정	129
[그림 3-26] 미국의 DOE FEED 설계 연구, 지역 배포 프로젝트, CarbonSAFE 이니셔티브 사이트	130
[그림 3-27] 국내 CO ₂ 저장소 유망구조 분포도	136

[그림 3-28] 유망 저장소 인근 CCUS 산업 클러스터 유망 권역 위치137

[그림 3-29] 울릉분지 동해가스전의 조감도(좌)와 위치도(우)153

[그림 3-30] CCUS 산업 클러스터 상업적 운영을 위한 선결과제 중요도158

[그림 3-31] 전체 배출권 총 거래 규모 및 가격 추이161

[그림 3-32] 국가별 배출권 거래제 가격162

C O N T E N T S

Chapter 1	Introduction	1
Section 1	Research background and objective	3
Section 2	Research contents and methodology	4
Chapter 2	Lead market analysis of hydrogen market and implementation plan to activate domestic hydrogen market	9
Section 1	The methodology and framework of lead market analysis	11
1.	Theoretical background of lead market approach	11
2.	Methodology and framework	17
Section 2	Diagnosis of domestic hydrogen industry applying lead market approach	38
1.	Diagnosis of hydrogen production	38
2.	Diagnosis of hydrogen storage and transport	45
3.	Diagnosis of hydrogen application	51
4.	Comprehensive diagnosis	58
Section 3	The major issues of domestic hydrogen industry	67
1.	Lack of infrastructure for hydrogen production and supply	67
2.	Lack of hydrogen-specialized and relevant firms	69
3.	Lack of support system and standards to foster hydrogen industry	70
4.	Low public acceptance of hydrogen facilities	71
5.	Narrow and biased domestic hydrogen market	72
6.	Lack of the experience of plant operation and relevant demonstration project	73
7.	High dependence on foreign technology	74
8.	Unbalanced hydrogen demand and supply	75
Section 4	The implementation plan to activate hydrogen economy	77
1.	Secure the original technologies and stimulate relevant R&D	77
2.	Expand the hydrogen infrastructure covering all the value chains	78

3. Relieve regulations and design policy to activate hydrogen industry	79
4. Foster hydrogen-specialized firms and stimulate commercialization	81
5. Activate the market by expanding and diversifying hydrogen demand	81
6. Stimulate hydrogen economy implementation by enhancing public acceptance	82
7. Secure renewable energy supply and clean hydrogen production capacity	83
8. Strengthen international cooperation to secure hydrogen importer	84
Chapter 3 A Study on How to Create a CCUS Industrial Cluster	85
Section 1 Derivation of Policy Priorities	87
1. Overview	87
2. Contents	88
3. Results	89
Section 2 Theoretical Review and Necessity of a CCUS Industry Cluster	91
1. Concept and Significance of CCUS Industrial Cluster	91
2. Necessity to create a CCUS industrial cluster	93
3. Domestic case	96
4. Overseas case	102
Section 3 Analysis of CCUS Industry Cluster Conditions in Korea	131
1. Overview	131
2. Business conditions in the promising area of CCUS industry cluster	142
3. Infrastructure conditions in the promising area of CCUS industry cluster ..	151
4. Comprehensive analysis	153
Section 4 CCUS Industry Cluster Creation	156
1. Overview	156
2. Diagnosis of CCUS Industrial Cluster Issues	156
3. CCUS Industry Cluster Formation Plan	166
Chapter 4 Conclusion	181
Section 1 Summary and Conclusion	183
Section 2 Major Implications	186

제1장

서론

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 목적

1. 연구배경 및 필요성

주요국 및 우리나라 정부는 탄소 중립을 선언하고, 탈탄소 사회전환을 위하여 그린뉴딜 정책을 수립하는 등 친환경·저탄소 정책 기조를 가속화하고 있으며, 각국은 탄소 중립을 이행을 위한 핵심수단으로 친환경 에너지 및 기술발굴에 집중하고 있다. 특히 주요국은 온실가스 감축 목표 달성 및 탄소중립 실현을 위한 중점기술 중 하나로 수소 및 CCUS(Carbon Capture, Utilization, and Storage)를 지목하며, 관련 기술개발 및 육성에 필요한 제반사항을 정비하고 있다. 이와 같은 동향은 탄소중립 및 국가온실가스감축목표 이행을 위한 핵심기술 분야 중심의 추진전략과 구체적인 이행방안 마련의 중요성을 방증한다.

탄소중립이라는 전 세계적 과제와 더불어 에너지 집약적 제조업 기반의 산업구조를 가진 우리나라는 탄소중립으로의 전환적 과정에 있어서 기술 및 산업경쟁력을 제고할 수 있는 방안을 동시에 모색해야 할 필요가 있다. 탄소중립을 중심으로 주요국의 입법정책이 더욱 정치해지고, 자국의 기술 및 산업경쟁력 확보를 위해 녹색보호무역주의를 강화하고 있는 상황에서 탄소다배출 업종에 대한 구체적인 방안 없이 이행되는 탄소중립은 국가경쟁력을 약화시킬 수 있다. 이는 곧 탄소중립을 위한 기술 및 산업에 대한 경쟁력확보가 국가경쟁력임을 말해준다.

한편, IEA(2020)는 2070 글로벌 탄소중립 시나리오에서 CCUS를 활용한 온실가스 감축 기여 정도를 약 15%로 전망하면서 CCUS의 중요성을 강조한 바 있다. CCUS는 특히 온실가스 배출감축이 어려운 주요 산업공정에서 탄소배출을 대폭 감축하는데 핵심적인 역할을 담당한다는 점에서 기술혁신이 필수적으로 고려되어야 하는 분야다. 수소의 경우에도 화석연료를 대체할 신재생에너지로의 전환이 강조되면서, 에너지 전환을 위한 청정에너지원으로 각광받고 있고, 이러한 이유로 우리나라를 포함한 주요국들은 수소경제를 목표로 다양한 방안을 수립 중에 있다.

우리나라만의 상황으로 한정하여 살펴보았을 때, 지난 '21년에 최종 발표된 '2050 탄소중립 시나리오'를 비롯한 국가계획 및 법제는 수소 및 CCUS 기술을 발전·산업 부문 온실가스 감축을 위한 핵심기술 수단으로 제시한 바 있다. 우리나라 또한 수소와 CCUS를 탄소중립의 핵심수단으로 상정하고 있는 것이다. 그러나 구체적인 이행방안 측면에서 수소 및 CCUS 각각에 대한 현황 진단과 기술 및 산업경쟁력 향상을 위한 구체적인 정책방안이 미비한 상황이다. 예컨대 수소의 경우, '21년에 수립한 「제1차 수소경제 이행 기본계획」을 통해 국가 비전으로써 '수소경제 선도'를 명문화하였으나, 세계 주요국과의 비교를 통한 우리나라 수소경제의 현 위치에 대한 진단과 그에 따른 수소경제 활성화 방안은 부재하다. CCUS의 경우에도 장기 저탄소 산업구조로의 전환을 위한 구체적인 이행방안이 미비한 상황이다.

2. 연구의 목적

본 연구는 온실가스 감축 목표달성과 탄소중립 실현을 위한 핵심 사항으로 수소 및 CCUS를 특정하고, 국내 입법정책 현황 및 동향 등을 종합하여 국가경쟁력 제고를 위한 국내 정책 방향을 구체화하고자 한다. 나아가 각각에 대한 구체화된 정책을 도출하기 위해 “수소 선도시장 분석 및 국내 수소 경제 활성화 방안” 과 “국내 CCUS 산업 활성화를 위한 산업클러스터 조성방안” 을 마련하여 실효성 있는 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 이행방안을 마련하고자 한다.

제 2 절 연구내용 및 추진체계

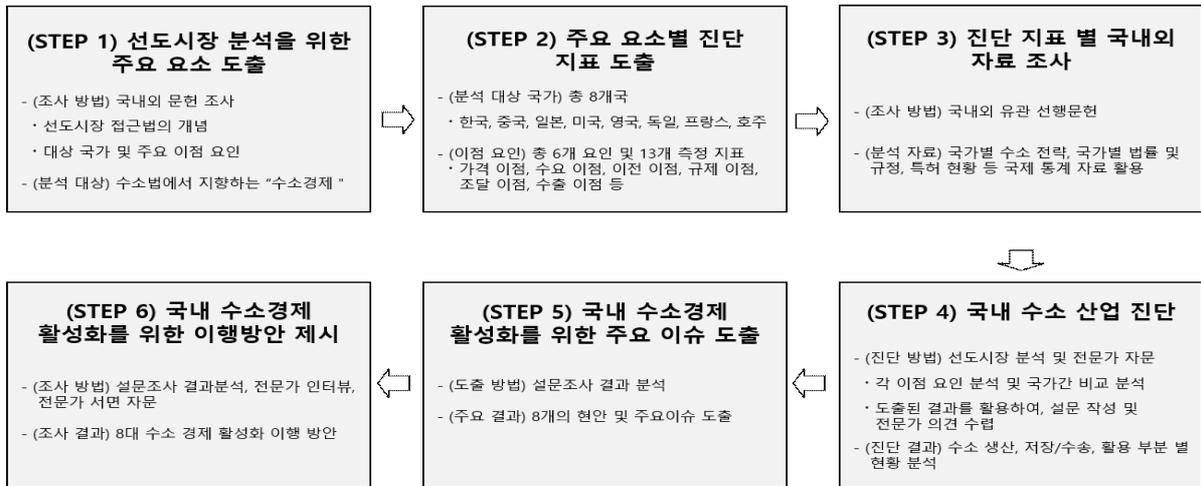
1. 연구의 내용 및 방법

본 보고서에서는 “수소 선도시장 분석 및 국내 수소경제 활성화 방안” 과 “국내 CCUS 산업 활성화를 위한 산업클러스터 조성방안” 으로 크게 2가지 파트로 나누어 연구를 수행하여 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 이행방안 및 제도적 기반을 마련하고자 한다.

가. 수소 선도시장 분석 및 국내 수소경제 활성화 방안

수소 관련 국내외 선행문헌을 조사하여, 선도시장 분석을 위한 주요 요소를 도출하고, 선도시장 분석을 위한 대상 국가와 총 6개의 이점 요인과 13개의 측정지표를 선정하였다. 선정된 측정지표를 기반으로 “수소 생산”, “저장·운송”, “활용” 으로 크게 3가지 부문으로 구분하여, 3가지 부분별 이점 요인과 측정지표를 설정하고, 국가별 수소 전략, 국가별 법률 및 규정, 특히 현황 등 국제 통계자료를 활용하여, 선도시장 분석 및 국내 수소산업을 진단하였다. 최종적으로 진단된 결과를 토대로, 국내 수소 분야의 산·학·연 중심으로 구성된 전문가 26명을 대상으로 서면자문을 수행하여, 국내 수소경제 활성화를 위한 지향점을 마련하고, 주요 이슈, 이행방안을 마련하였다. 보다 구체적인 수소 분야의 연구 프로세스 및 주요 내용은 아래의 [그림 1-1] 같이 도식하여 정리하였다.

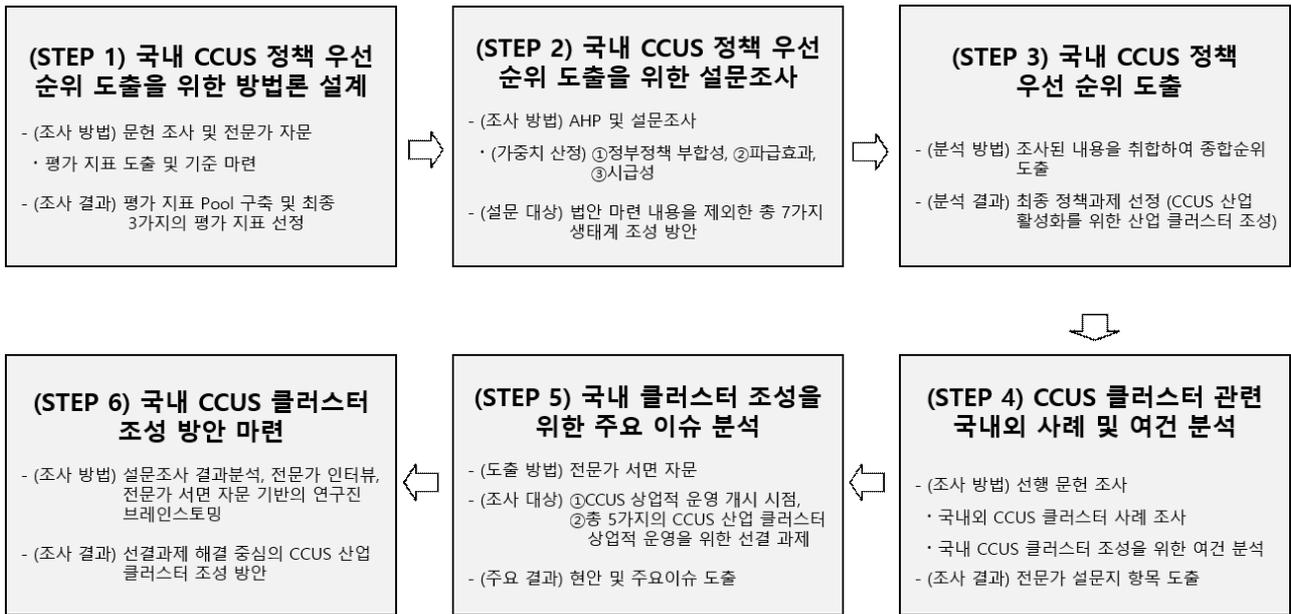
[그림 1-1] 수소 분야의 연구 프로세스 및 주요 내용



나. 국내 CCUS 산업 활성화를 위한 산업클러스터 조성방안

2021년에 도출된 8대 국내 CCUS 생태계 조성방안 중 현재 범부처 차원에서 마련 중인 CCUS 법안을 제외하고, 총 7개의 생태계 조성방안 중 정책 우선순위가 가장 높은 정책과제를 선정하기 위한 평가지표 및 기준을 마련하고, 국내 CCUS 분야의 산·학·연 중심의 전문가 10인을 대상으로 AHP 및 설문조사를 수행하여, “CCUS 산업 활성화를 위한 산업클러스터 조성”을 최종 정책 과제로 도출하였다. 아울러 CCUS 클러스터 관련 국내외 사례 조사 및 여건 분석을 추가적으로 진행하여, CCUS 상업적 운영개시 시점 및 총 5가지의 CCUS 산업 클러스터 상업적 운영을 위한 선결과제를 도출하고, 전문가 서면 자문 질의서를 작성하여, 국내 CCUS 분야의 산·학·연 중심의 전문가 29인을 대상으로 서면 자문을 수행하였다. 이를 기반으로 본 과제 연구원들과의 브레인스토밍을 통해 최종적으로 국내 CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 주요 이슈 및 방안을 체계적으로 제시하였다. 보다 구체적인 CCUS 분야의 연구 프로세스 및 주요 내용은 아래의 [그림 1-2]과 같이 도식하여 정리하였다.

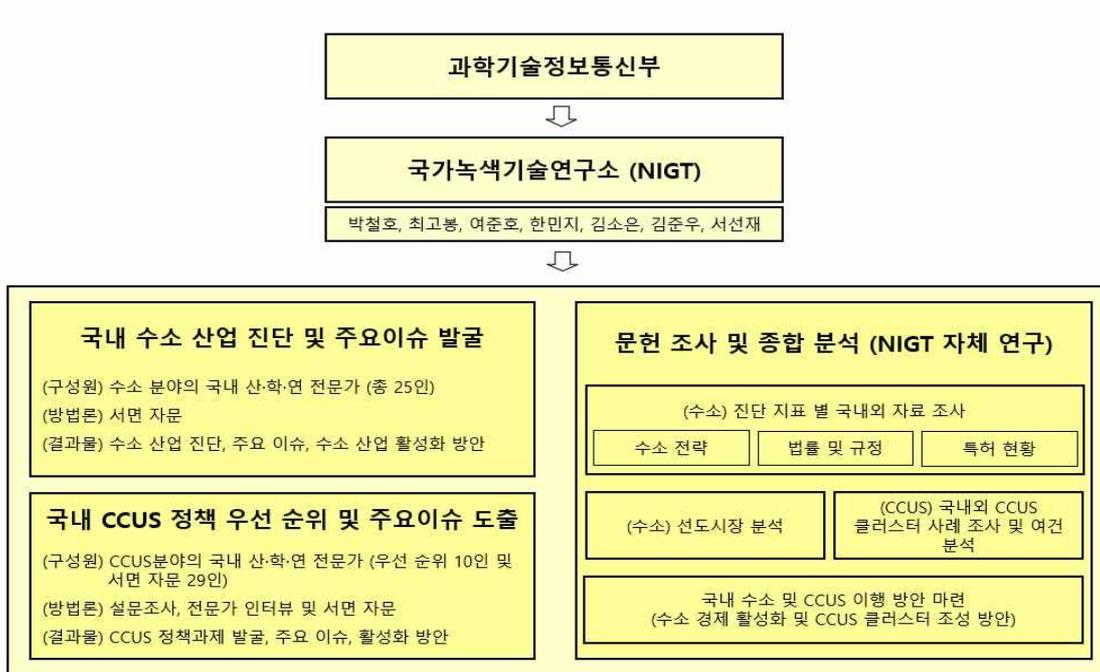
[그림 1-2] CCUS 분야의 연구 프로세스 및 주요 내용



2. 연구의 추진체계

아래의 [그림 1-3]와 같이, 본 연구진은 국내 수소산업 진단을 위한 진단 지표 도출 및 국가별 통계자료 분석을 통해 선도시장 분석, 국내 CCUS 분야의 정책 우선순위 도출을 위한 방법론 설계, 국내외 CCUS 클러스터 사례 및 여건 분석 등을 자체적으로 연구 수행하였고, 국내 수소 및 CCUS 관련 전문가 대상의 서면 자문 및 설문조사를 기반으로 국내 수소경제 활성화를 위한 방안과 국내 CCUS 클러스터 조성방안을 모색하였다.

[그림 1-3] 연구 추진 체계



제2장

수소 선도시장 분석 및 국내 수소경제 활성화 방안

제 2 장 수소 선도시장 분석 및 국내 수소경제 활성화 방안

제 1 절 방법론 및 설계

1. 선도시장 접근법의 이론적 배경

가. 선도시장과 선도시장 접근법의 개념

본 연구는 국내 수소 생태계의 가치사슬별로 선도시장(Lead Market)을 형성할 만한 잠재력이 존재하는지 분석하기 위하여 선도시장 접근법(Lead Market Approach)을 활용하였다. ‘선도시장’이란 성공적인 혁신의 국제적 확산과정이 처음 시작되고, 다양한 서비스를 통해 유지 및 확장되는 특정 지리적 영역의 재화 또는 서비스 시장을 말한다(European Commission, 2005: quoted in European Union, 2011)¹⁾. 즉, 선도시장은 국제적으로 확산되는 혁신적인 재화나 서비스가 처음으로 도입된 곳임과 동시에 그 혁신이 지속적으로 유지되고 확장되는 특성을 가지는 시장으로, 재화 또는 서비스의 혁신을 ‘선도’ 하는 시장으로 이해할 수 있다. 이와 같은 선도시장의 개념에 따라 본 연구에서 분석하고자 하는 ‘수소 생태계의 가치사슬별 선도시장 잠재력’이란, 수소 생태계의 생산, 저장·운송, 활용부문별로 혁신이 시작되어 국제적으로 확산되며 내부에서 혁신이 지속적으로 활발히 이루어질 수 있는 특성의 수준 또는 역량이라고 할 수 있다.

우리나라는 수소경제를 선도하겠다는 비전을 가지고 있는 바, 국내 수소 생태계의 선도시장 잠재력에 대한 엄밀한 현황 진단이 요구된다. 우리나라는 세계에서 최초로 제정된 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」에 의거한 법정계획인 「제1차 수소경제 이행 기본계획」에서 ‘수소경제 전주기 생태계 구축으로 청정수소경제 선도’를 비전으로 선포한 바 있으며, 이 비전은 국가 내부의 안정적인 수소경제 구축을 넘어 전 세계적으로 수소경제를 선도하는 국가로서의 지위를 확보하겠다는 정책적 의지가 포함되어 있다. 이와 같은 비전을 실현하기 위해서는 주기적으로 국내 수소 생태계에 대하여 선도시장 잠재력을 진단하고, 해당 진단 결과를 바탕으로 수소 관련 정책의 수정·보완이 이루어져야 할 필요가 있다.

선도시장을 형성할 만한 잠재력 또는 가능성의 존재 여부를 판단하거나 가늠하기 위한 방법론 중 하나로 ‘선도시장 접근법’이 있다. ‘선도시장 접근법’은 통상 Beise(2004)²⁾ 및 Beise and Rennings(2005)³⁾가 마련한 방법론적 틀에 따라, 분석대상이 되는 국가별로 선도시장을 형

1) European Commission(2005), *Communication from the Commission - Implementing the Community Lisbon Programme: A Policy Framework to Strengthen EU Manufacturing - Towards a More Integrated Approach for Industrial Policy*, Brussels: Communication from the Commission quoted in European Union (2011), *Final Evaluation of the Lead Market Initiative*, Brussels: European Commission.

2) Beise M.(2004), “Lead Markets: Country-specific Drivers of the Global Diffusion of Innovations” *Research Policy*, 33(6-7), pp.997-1018.

3) Beise M. and Rennings K.(2005), “Lead Markets and Regulation: a Framework for Analyzing the International Diffusion of Environmental Innovations” *Ecological Economics*, 52(1), pp.5-17.

성할 만한 환경 및 조건 등의 ‘이점 요인(Advantage Factor)’ 을 지표(Indicator) 등을 활용하여 현재 수준을 측정하고, 국가 간 비교를 통해 상대적으로 어떠한 국가가 선도시장을 형성할 만한 잠재력이 높은지 판단하는 방법론이다. 선도시장 접근법은 현재의 이점 요인을 측정하고 이를 기반으로 미래의 가능성을 판단하는 방법론이라는 점에서, 현재 전 세계적으로 초기 단계인 수소경제의 선도시장 형성 가능성을 정량적으로 분석하는 데에 적합한 방법론이라고 할 수 있다. 또한, 선도시장 접근법은 각 이점 요인별 현재 수준을 기반으로 선도시장 잠재력을 판단하므로, 각 이점 요인별 강점과 약점을 바탕으로 세부적인 정책적 시사점을 도출해 낼 수 있다는 장점이 있다.

선도시장 접근법의 최종 목적은 이점 요인을 통해 선도시장 형성의 잠재력을 가늠하는 데에 있으며, 이점 요인이 선도시장 형성에 중요한 역할을 하는지 논리적 타당성 측면의 검토는 요구되나 ‘특정 이점 요인이 실제 선도시장 형성에 영향을 미치는 이점 요인이다(또는 아니다)’ 라는 통계적 가설검증에 최종 목적이 있지는 않다. 통상적인 선도시장 접근법은 상기 가설이 참인 명제라는 전제하에, 분석대상과 비교하여 이점이 상대적으로 크면 선도시장 형성의 잠재력이 크다는 결정론적 방법(Deterministic Method)에 기반을 두고 있다고 할 수 있다. 선도시장 접근법이 결정론적 방법에 근간을 두고 있는 만큼, 선도시장 접근법을 통해 한 국가가 특정 분야에 대해 선도시장을 형성할 만한 잠재력이 존재하는지 분석을 수행할 때는 우선 논리적으로 타당한 이점 요인의 설정이 중요하다고 할 수 있다, 즉, 한 국가의 어떠한 요인(이점 요인)에 의해 그 나라에서 채택한 혁신이 내부적으로 유지되고 확장됨과 동시에 국제적으로 확산될 수 있는지 검토가 필요하며, 선도시장 형성에 지대한 영향을 미치거나 선도시장 형성에 영향을 미칠 가능성이 높은 요인의 선택이 필요하다.

나. 선도시장 접근법의 주요 이점 요인

선도시장 접근법에 대해 체계적인 틀을 마련한 Beise(2004)는 선도시장 형성 메커니즘을 소비자 이론에 근거하여 설명했다⁴⁾. Beise(2004)는 혁신에 대한 동일한 채택 의사(Willingness to Adopt)를 가지지만 초기에 다른 제품 디자인⁵⁾을 선호하는 두 국가를 상정하고, 기존의 진부한 제품(Old Product)과 경쟁하는 두 디자인 또는 상호 경쟁하는 두 디자인을 상정했다. Beise(2004)에 따르면, 지연시장(Lag Market)의 채택(소비) 패턴의 변화로 인하여 결국 두 나라는 모두 초기에 한 나라(선도시장)에서 선호되는 하나의 혁신적인 디자인을 채택하게 되는데, 그 과정은 크게 상대가격, 상대적 편익, 가용 예산(Available Budget) 메커니즘으로 설명할 수 있다. Beise(2004)의 메커니즘에 따르면, 선도시장의 혁신적인 디자인은 ① 지연시장에서 지연시장 디자인의 가격에 대한 선도시장 디자인의 가격(상대가격)이 하락하거나, ② 지연시장 디자인 대비 선도시장의 혁신 디자인을 채택함으로써 얻을 수 있는 편익이 증가하거나, ③ 지연시장 소비자의 소득이 증가

4) 본 문단에서 설명한 Beise(2004)의 세 가지의 메커니즘은 지연시장에서 선도시장의 디자인을 채택하여 혁신적인 디자인 채택에 대한 국가 간 선후행 관계를 설명하는 메커니즘으로 이해할 수 있으나, 본 절에서 정의한 선도시장의 정의 중 ‘다양한 서비스를 통해 혁신이 유지되고 확장’되는 메커니즘을 설명하는 데에는 한계점이 있다. 그러나 Beise(2004)가 이점 요인으로 제시한 수요 이점의 의미(혁신에 대한 수요를 증가시키는 환경적 조건)를 보았을 때 암묵적으로 ‘다양한 서비스를 통해 혁신이 유지되고 확장’되는 메커니즘 역시 혁신에 대한 수요로 설명하고 있는 것으로 판단된다.

5) Beise(2004)에 따르면 디자인이란 단순히 특정 제품 등의 외관의 형태만 의미하는 것이 아니라 기술 사양, 소프트웨어, 제조법, 기술 또는 기술궤적(Technological Trajectory) 등을 의미한다.

하여 가용 예산 증가로 인해 지연시장에서 채택되게 된다. 따라서 상기와 같은 메커니즘을 통해 (예비)선도시장에서 채택한 혁신적인 디자인이 시차(Time lag)를 두고 두 국가 모두가 채택하는 지배적인 디자인이 되는 것이다.

Beise(2004)는 상기와 같은 메커니즘에 기반하여, 해당 메커니즘을 촉발시킬 수 있는 주요 요인 및 기타 고려요인을 종합하여 선도시장을 형성하는 데 영향을 미치는 이점 요인 5개를 제안했으며, 후속적으로 Beise and Rennings(2005)⁶⁾이 1개의 이점 요인을 추가적으로 제안하였다. Beise(2004)와 Beise and Rennings(2005)의 연구를 종합하면 선도시장 접근법의 이점 요인은 총 6개로, ① 가격 이점, ② 수요 이점, ③ 이전 이점, ④ 수출 이점, ⑤ 시장구조 이점, ⑥ 규제 이점이다(<표 2-1> 참고). 이상의 요인은 선도시장 접근법을 활용할 때 주로 고려되는 이점 요인으로, 일반적으로 선도시장을 형성하는 데 영향을 미치는 요인으로 이해할 수 있다.

<표 2-1> 선도시장 접근법의 주요 이점 요인

이점 요인	설 명
가격 이점	상대적으로 가격 경감이 가능한 조건을 가짐
수요 이점	초기에 강한 수요를 발생시키는 특성을 가짐
이전 이점	다른 국가 사용자가 인지하는 혜택이 증가하거나, 특정 국가의 수요 조건이 해외로 이전되는 환경을 가짐
수출 이점	한 국가에서 선호되는 디자인이 외국의 선호를 포함하는 것을 촉진하는 조건을 가짐
시장구조 이점	시장구조가 경쟁적인 특성을 가짐
규제 이점	한 국가의 법률체계가 혁신적인 아이디어를 낼 수 있도록 압력을 가하는 특성을 가짐

자료: Beise(2004), Beise and Rennings(2005), Rennings and Smidt(2008), Cleff and Rennings(2016)을 바탕으로 저자 정리

(1) 가격 이점(Price Advantage)

가격 이점은 다른 나라의 디자인 가격 또는 국제적인 가격변동과 비교하여, 한 국가(선도시장)에서 선호되는 혁신적인 디자인이 상대적으로 가격이 낮아질 수 있는 조건이다(Rennings and Smidt, 2008)⁷⁾. 즉, 다른 조건이 모두 동일하다는 가정 하에, 특정 국가에서 채택된 혁신적인 디자인 A가 다른 나라에서 채택된 디자인 B에 비하여 가격 경감이 가능할 경우, 디자인 A는 디자인 B를 대체하여 국제적으로 지배적인 혁신 디자인이 되고, 디자인 A를 채택한 국가가 선도시장

6) Beise M. and Rennings K.(2005), 앞의 논문, p.7.

7) Rennings K. and Smidt W.(2008), "A Lead Market Approach Towards the Emergence and Diffusion of Coal-fired Power Plant Technology", *Economia Politica*, 27(2) 참조.

이 될 가능성이 높다는 것을 의미한다.

가격의 경감은 다양한 요인으로부터 발생할 수 있다. Cleff and Rennings(2016)⁸⁾은 학습효과(Learning Effect) 또는 규모의 경제(Economies of Scale) 등 비용의 감축을 유발할 수 있는 효과가 실현되거나 또는 자본비용 또는 노동비용과 같은 투입물의 비용 감축을 통해 발생할 수 있다고 설명했다. 즉, 특정 혁신적인 디자인의 지속적인 생산 경험 축적으로 인해 생산비용을 감소시킬 수 있거나(Learning-by-Doing), 지속적인 연구개발을 통한 비용을 감축시킬 수 있는 경우(Learning-by-Searching) 학습효과를 통해 혁신적인 디자인의 가격을 경감시킬 수 있으며, 디자인 A의 생산이나 관련 산업이 규모의 경제의 특성이 존재하는 경우 디자인 A의 생산 규모 증대를 통해 디자인의 가격을 경감시킬 수 있다. 또한 직접적으로 디자인 A의 생산에 투입되는 자본 또는 노동 등의 투입비용이 절감될 경우 디자인 A의 가격을 경감시킬 수 있다.

(2) 수요 이점(Demand Advantage)

수요 이점은 다른 나라에 비해서 특정 나라(선도시장)가 혁신에 대해 초기에 강한 수요를 발생시키는 특성을 가지고 있을 때 발생하는 이점이다(Cleff and Rennings, 2016). 예컨대, 특정 혁신적인 디자인의 개발 초기에 수요가 높은 국가 A와 수요가 낮은 국가 B가 존재할 경우, 수요가 높은 국가 A는 국가 B에 비해 해당 혁신적인 디자인을 시기적으로 일찍 채택하게 될 가능성이 높다. 또한 국가 A에서는 혁신적인 디자인이 내부적으로 빠르게 확산·보급되며, 해당 디자인에 대한 지속적인 생산이나 연구개발을 통해 상기와 같은 가격 이점이나 아래에서 설명할 이전 이점 등을 확보할 가능성이 높다고 할 수 있다.

수요 이점과 관련하여, 특정 지배적인 디자인의 국제적 확산과정을 설명하는 전 세계적인 수요의 경향성은 소득의 증가로 이해되었다(Dekimpe *et al.*, 2000: quoted in Beise, 2004).⁹⁾ 즉, 소득이 높은 국가 A에서 먼저 강한 수요 이점이 발생하게 되고, 전 세계적인 소득 증가 추세로 인해 국가 A에서 채택한 수요가 전 세계적으로 확산된다는 것이다. 그러나 Beise(2004)는 최근 국가 간 1인당 소득의 차이가 미비하여 상기와 같은 트렌드로 이해하는 데에는 한계가 존재할 수 있으며, 소득의 증가 외에 기술, 경제, 생태, 사회, 환경적 트렌드에 의해 상기와 같은 확산과정이 발생할 수 있다고 지적했다.

(3) 이전 이점(Transfer Advantage)

이전 이점은 특정 국가에서 선호되는 혁신적인 디자인에 대해서 다른 국가 사용자가 인지하는 혜택이 증가하거나, 특정 국가의 수요 조건이 해외로 적극적으로 이전되는 환경으로부터 발생하는 이점이다(Rennings and Smidt, 2008). 즉, 특정 국가(선도시장)에서 채택된 혁신적인

8) Cleff T. and Rennings K.(2016), "Are There First Mover Advantages for Producers of Energy-efficient Appliances? The Case of Refrigerators", *Utilities Policy*, 42, pp.42-50.

9) Dekimpe M., Parker P., and Sarvary M.(2000), "Multi-market and Global Diffusion: A Research Agenda" in *New-Product Diffusion Models*, pp.49-74. quoted in Beise M.(2004), 앞의 논문, pp.997-1018.

디자인 A에 대해서 다른 국가의 사용자 역시 디자인 A에 대한 유용성, 혜택 등을 충분히 인지할 수 있고, 다른 국가에서 디자인 A에 대한 수요를 발생시킬 수 있는 환경이 특정 국가 내에 조성되어 있는 경우 이전 이점이 존재하여 선도시장이 될 가능성이 높다는 것을 의미한다. Beise(2004)에 따르면 이와 같은 이점 이점은 실증효과(Demonstration Effect)라고 이해할 수도 있는데, 혁신적인 디자인이 개념적 수준에서 나아가 실물로써 구체화되고 채택될 경우, 개념적 수준에서 내재적으로 가지고 있는 불확실성이 감소하며 그 유용성이 증명되어 구체적인 혜택을 소비자들이 인지할 수 있기 때문이다.

이전 이점이 발생하는 다른 메커니즘으로는 한 나라에서 선호되는 디자인이 사업가, 군인, 관광객, 다국적 기업에 의해 적극적으로 해외에 이전되거나, 다수의 사용자가 사용함으로써 재화 또는 서비스의 사용 가치가 향상되는 네트워크 효과¹⁰⁾에 의한 확산이 있다(Beise, 2004). 단, Beise(2004)는 독점적인 권리를 갖는 혁신 디자인의 경우 비독점적인 디자인에 비해 국제적 확산과정이 어렵다고 지적하고 있다. 비독점적인 디자인의 경우 ① 모방을 통해 넓은 규모로 확산되거나, ② 다양한 사용자 및 생산자에 의해 개선되고, ③ 특정 기업에 의한 소유 정도가 낮아 해외에서 채택되기 쉬우나, 독점적인 디자인의 경우 다양한 방식을 통한 확산과 개선이 어렵고, 일반적인 국가들은 특정 해외기업이 모든 소유권 보유한 자산에 대해 지원을 꺼려하기 때문이다(Beise, 2004).

(4) 수출 이점(Export Advantage)

수출 이점은 특정 국가에서 선호되는 혁신적 디자인에 외국의 선호를 포함하는 것을 촉진하는 조건에서 발생하는 이점이다(Rennings and Smidt, 2008). 즉, 혁신 디자인 A가 특정 국가(선도시장)에서 선호되는 디자인이지만 다른 국가의 선호가 포함되어 있어 수출을 통해 전 세계적으로 확산될 수 있을 때 수출 이점이 존재한다고 할 수 있다. 반대로 혁신 디자인 A가 특정 국가에서 선호되는 디자인이지만 다른 국가의 선호가 일절 반영되어 있지 않은 아웃라이어인 경우, 수출을 통해 국제적으로 확산되기 어렵다. 이와 관련하여 Beise(2004)는 국제적으로 다양한 환경 조건의 분포 중 중앙에 위치한 국가는 다소 극단적인 환경 조건을 가진 국가에 비해 해외에서 더 성공적으로 경쟁할 수 있다고 설명했다.

Beise(2004) 및 Rennings and Smidt(2008)는 특정 국가의 선호 디자인에 다른 국가의 선호가 포함되는 메커니즘(수출 이점 발생 메커니즘)을 ① 국내 시장과 해외 시장 간 유사성, ② 외국 및 국제 문제와 요구에 민감한 국내 수요, ③ 기업의 수출 경험을 토대로 설명했다. 이상의 메커니즘 중 ‘외국 및 국제 문제와 요구에 민감한 국내 수요’는 시장의 상황과 조건이 유사하지는 않지만, 한 국가(선도시장)의 사용자가 국제 문제에 민감하여 기업으로 하여금 해당 문제를 인지하고 대응하도록 요구하는 경우이며, 대표적으로 기후변화에 의한 피해는 크지 않은 국가의 사용자이나 국내 기업에게 친환경성, 탄소중립이라는 가치를 요구하는 것에서 사례를 찾아볼 수 있다(Beise, 2004).

10) 단 Rennings and Smidt(2008)은 일본의 팩스 사용 사례를 지적하며 네트워크 효과의 경우 국가 내에서의 확산에는 일반적이지만, 국가 간의 확산(예컨대 일본의 팩스 사용이 미국으로의 확산)에서는 덜 일반적이라고 지적하고 있다.

(5) 시장구조 이점(Market Structure Advantage)

시장구조 이점은 혁신적인 디자인의 관련시장(Relevant market)이 완전경쟁(Perfect Competition) 시장에 가까울수록 발생하는 이점이다. Beise(2004)는 지역시장에서의 경쟁은 기술적 우수성, 실행 가능성, 우수한 비용-편익 관계를 달성할 수 있게 하며, 이로 인해 지역시장이 국제적인 선호도와 가치 있는 혁신 디자인을 식별할 수 있는 가능성을 제고한다고 설명했다. 또한 Beise(2004)는 경쟁을 통해 비용 절감을 유발할 수 있으며, 비용 절감을 통해 가격 경쟁적인 디자인을 창출해낼 수 있다고 지적했다.

경쟁에 의한 가격하락 및 비용 절감 메커니즘은 다음과 같이 설명할 수 있다. 혁신적인 디자인 A를 채택한 국가가 있다고 상정하자. 만약 해당 국가의 디자인 A 관련시장이 완전경쟁 시장에 가까우면 디자인 A의 시장 가격이 생산자의 한계비용(Marginal Cost)과 유사하게 결정되며 생산자의 이윤은 0에 가깝게 형성된다. 따라서 디자인 A는 독점 및 일부 과점시장 등 디자인 A의 시장 가격이 생산자의 한계비용보다 높게 결정되는 불완전경쟁 시장에 비해 낮은 가격이 형성될 수 있다. 또한, 기업들의 A 생산비용이 대칭적인 초기 상황(Symmetric Firms)에서 비용 절감이 가능할 경우, 기업은 0을 초과하는 이윤을 획득하거나 시장점유율을 추가적으로 확보할 수 있다. 따라서 기업에게는 비용 절감의 유인이 존재하며 이로 인해 디자인 A와 관련된 설비, 기술개발 등의 투자를 확대하여 디자인 A 가격이 더 낮아질 수 있다.

(6) 규제 이점(Regulation Advantage)

규제 이점은 Beise(2004)의 연구에 이어 Beise and Rennings(2005)가 추가적으로 제안한 요인으로, 법률체계가 기업이 중장기적 규모로 계획할 수 있도록 하는 동시에 혁신적인 아이디어를 낼 수 있도록 압력을 가하는 경우에 발생한다(Beise and Rennings, 2005). 즉, 규제 이점은 한 국가의 규제나 지원 정책이 분석 대상이 되는 디자인에 대하여 기업이 혁신적인 아이디어를 창출할 수 있도록 유인을 제공하는 경우에 발생할 가능성이 높다. Beise and Rennings(2005)는 환경규제가 종종 환경 효율적(Eco-efficient)인 혁신의 창출과 채택을 촉진하기 위해 도입되었다는 점에 착안하여, 선도시장 접근법에 있어 규제 이점의 고려를 제안하였다. Beise and Rennings(2005)는 풍력 발전과 승용차 연료효율 기술에 관한 사례연구를 통해 분야에 따라 그 정도는 다르지만 규제 이점이 선도시장의 형성에 영향을 미친다는 결과를 도출하였다.

규제 이점의 메커니즘은 외부성(Externality)으로 인한 시장실패(Market Failure) 발생 시 정부가 개입하는 메커니즘으로 이해할 수 있다. Beise and Rennings(2005)의 사례인 환경 혁신(Environmental Innovation)의 경우 혁신의 과정과 확산의 과정에서 긍정적인 외부효과가 발생하는데¹¹⁾, 이때 긍정적인 외부효과를 포함한 사회적 편익(Social Benefit)은 혁신 주체의 사적 편익(Private Benefit) 보다 높게 형성되어 사회적으로 적정 수준의 혁신이 생산되지 않는다. 이 때

11) Beise and Rennings(2005)는 환경 혁신이 혁신과 확산의 과정에서 두 번의 긍정적 외부효과가 발생한다고 하여 이중 외부성(Double Externalities)을 가진다고 명명했다.

혁신 주체의 사적 편익을 사회적 편익 수준으로 상향시킬 수 있도록 보조금 등의 제도를 활용할 수 있으며, 이를 통해 정부의 시장개입 전보다 더 많은 혁신을 생산시킬 수 있다.

2. 연구 방법 및 설계

가. 선도시장 접근법의 기본 방향

(1) 선도시장 접근법의 분석 대상

선도시장 접근법을 통해 특정 국가가 선도시장을 형성할 만한 잠재력이 존재하는지 분석하기 위하여 우선 선도시장 접근법의 분석대상을 설정해야 한다. 본 연구는 국내 수소경제 활성화를 위한 정책적 방안을 마련하는 데 그 목적이 있다. 수소경제는 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제2조제1호에 따라 ‘수소의 생산 및 활용이 국가, 사회 및 국민생활 전반에 근본적 변화를 선도하여 새로운 경제성장을 견인하고 수소를 주요한 에너지원으로 사용하는 경제산업구조’를 말하며, 단순히 특정 부문을 지칭하는 것이 아닌 다양한 부문을 아우르는 총체적인 경제구조를 의미한다고 볼 수 있다. 이에 따라 선도시장 접근의 분석대상을 하나의 개별적 부문에 국한하는 것이 아닌 수소법에서 지향하는 ‘수소경제’ 전체를 분석대상으로 설정하는 것이 적절하다고 판단된다.

다만, 선도시장 접근법의 적용 측면에서 수소경제 ‘전체’를 분석대상으로 설정하여 선도시장의 각 이점 요인을 분석하는 것은 분석 설계와 절차상의 복잡성을 증대시키며, 한국의 수소경제의 국제적 선도 가능성을 세부 요소별로 자세하게 진단하는 데 한계가 있다. 예컨대 수소경제와 관련된 기술은 수소의 생산, 저장·운송, 활용 등 가치사슬별로 다양한 기술이 산재해 있어 각 부문의 모든 기술을 고려하여 선도시장 접근법을 적용하는 것은 현실적으로 어려우며, 각 부문의 모든 기술을 고려할 수 있다고 하더라도 결과의 해석 측면에서도 간결하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 수소경제 전체를 분석대상으로 설정하되, 수소경제를 구성하고 있는 하위부문으로 나누어 각각 선도시장 접근법을 적용했으며, 하위부문에 대한 분석을 바탕으로 종합적인 결과를 도출하였다.

수소경제를 구성하고 있는 하위부문은 수소 생태계의 가치사슬에 따라 ① 수소 생산, ② 수소 저장·운송, ③ 수소 활용으로 구분할 수 있으며, 본 연구는 각각의 부문을 선도시장 접근법의 분석대상으로 설정하였다. 단, 수소 생산부문은 ‘그린수소 생산’ 부문을 분석대상으로 설정하였다¹²⁾. 수소는 최종적으로 거래되는 재화의 물리적 속성 측면에서 동질성(Homogeneity)을 만족하더라도 그 생산과정에서 탄소배출의 속성에 따라 크게 그린수소, 블루수소, 그레이수소 등 색상으로 흔히 구분되며, 생산기술에 따라 수전해 수소, 추출 수소, 부생 수소로 구분할 수 있다. 분석의 대상이 되는 그린수소는 물을 전기분해 하여 생산한 수전해 수소의 일종으로 재생에너지 전

12) 수소의 저장·운송과 수소 활용부문 또한 해당 부문을 구성하는 하위부문으로 구분할 수 있으나, 각 이점 요인들을 평가·측정할 수 있으며 국가 간 비교가 가능한 지표의 구축에 한계가 있어 별도로 구분하지 않았다.

력을 활용하여 수소를 생산할 때 직접배출량과 간접배출량이 모두 없는 수소이다. 「제1차 수소경제 이행 기본계획」에서 명시한 바와 같이 한국은 청정수소¹³⁾의 생산을 목표로 하는바 그린수소와 블루수소 중 궁극적인 수소생산의 지향점인 그린수소 생산을 연구대상으로 설정하였다.

(2) 본 연구의 추가 이점 요인: 조달 이점(Procurement Advantage)

본 연구의 선도시장 접근에서는 이점 요인으로 앞서 설명한 6개의 이점 요인 외에 ‘조달 이점(Procurement Advantage)’이라는 요인을 추가하여 분석하였다. 본 연구에 포함된 조달 이점이란 수소경제의 각 부문별로 선도시장을 형성할 수 있는 데 필수적인 원자재 및 투입요소를 수월히 충분한 양을 조달할 수 있는 조건이다. 충분한 원자재의 조달은 선도시장 내부에서 단순히 기술적 개념의 설계나 연구실 규모의 실증이 아닌 대규모의 실증, 상용화, 사업화 과정에서 경험을 축적하고 실제로 수소경제의 각 부문이 상업적으로 운영되고 확산될 때 필수적으로 요구되는 사항이다. 예컨대 수소 활용부문에서 수소를 원활히 조달할 수 있는 국가 A와 수소를 원활히 조달할 수 없는 국가 B가 있다고 하자. 수소를 원활히 조달할 수 있는 국가 A는 기존에 다른 에너지나 원료를 활용하는 부문에서 수소 활용과 관련된 기술을 빠르게 채택하여 대체하고 확산시킬 수 있으나, 국가 B의 경우 기술의 채택 및 대체와 확산이 상대적으로 더딜 것으로 예상된다.

수소경제 각 부문의 원자재의 조달은 가격 이점에서 투입요소의 비용 측면으로 접근할 수도 있으나, 투입요소의 비용이 투입요소의 가격 측면의 접근이라면 원자재의 조달은 투입요소의 공급안보적 측면의 접근이므로 별도의 요인으로 구분하였다. 즉, 가격 이점에서의 투입요소 비용은 얼마나 저렴한 비용으로 투입요소를 투입할 수 있는지에 관한 접근이며, 본 연구에서 고려하고자 하는 원자재의 조달은 생산자의 조업에 있어서 투입요소를 물리적으로 확보 가능한지에 관한 접근이다. 특히 수소경제 관련된 원자재 시장(예컨대 수소 생산을 위한 재생에너지 전력의 국제거래 또는 수소 활용을 위한 수소의 국제거래)은 국제거래가 이루어지는 석유, 철광석 등 다른 원자재 시장과는 달리 아직 성숙되지 않은 상황이므로, 수소경제 초기에 관련 원자재의 원활한 조달 여부는 수소경제 선도시장의 형성에 필수적인 고려할 조건이라고 판단된다.

(3) 분석대상 국가

선도시장 분석을 수행하기 위해서는 상호 비교할 수 있는 분석대상 국가를 선정해야 한다. 본 연구는 국내 수소경제 생태계의 가치사슬별로 선도시장 형성 잠재력을 분석하는 것에 1차적인 목표가 있다. 따라서 선도시장의 비교대상국은 수소경제를 추진하는 국가 또는 수소의 생산, 저장·운송, 활용부문의 활성화를 추진하는 국가라고 할 수 있으며, 가능한 한 상기에 해당하는 모든 국가를 분석대상에 포함하여 분석할 필요가 있다. 특정 일부 국가가 아닌 수소 활성화를 추진하는 모든 국가가 비교 대상이 되어야, 분석결과의 오차를 최소화하여 국내 수소경제의 선도시장

13) 동 계획에 청정수소의 명확한 정의는 포함되어 있지 않으나 ‘국내의 청정수소 생산주도’ 전략 하에 그린수소 생산과 블루수소 생산이 포함되어 있다. 참고로 2022년 6월 10일 개정된 「제1차 수소경제 이행 기본계획」에는 청정수소에 대한 정의가 제2조제7호의2에 포함되어 있으며, 수소의 형태와 생산 및 수입 과정에서의 온실가스 배출량에 따라 무탄소수소, 저탄소수소, 저탄소수소화합물로 구분하고 있다.

잠재력을 정확히 분석할 수 있기 때문이다.

단, 수소경제 가치사슬의 각 부문 및 각 요인에 대한 지표자료 취득의 한계로 인해 현실적으로 수소경제 또는 수소의 생산, 저장·운송, 활용부문의 활성화를 추진하는 국가 전체를 분석대상으로 설정하기에 어려움이 따른다. 수소경제 또는 수소의 생산, 저장·운송, 활용은 탄소중립 목표달성을 위한 수단 중 하나이므로, 전 세계 주요국들은 자국 내 수소 부문의 활성화를 위해 관련 정책을 발표해오고 있으며 다양한 수소 프로젝트를 진행해 오고 있다. IEA(2021)¹⁴⁾에 따르면 국가 수소 전략을 발표한 국가는 한국을 포함하여 총 38여 개 국가¹⁵⁾이며(2021년 10월 기준), Hydrogen Council(2022)¹⁶⁾은 2022년 5월 기준 전 세계적으로 680개의 프로젝트가 발표되었는데, 그 중 2030년까지 실행될 프로젝트는 534개이며 총 2,400억 규모라고 조사 결과를 발표했다. 국가 수소 전략이 既 구축된 국가를 분석대상으로 한정할 경우 38개국만 분석대상이 되나, 38개국에 대하여 각국의 수소 생산, 저장·운송, 활용부문의 각 이점을 동일한 기준(지표)으로 측정할 수 있는 자료를 구축하기 어려웠다.

이에 본 연구에서는 자료구축의 가능성을 고려하되, 한국을 포함한 주요 선진국 및 핵심 국가 간의 비교가 가능하도록 분석대상 국가를 선정하였다. 본 연구의 분석대상 국가는 한국, 중국, 일본, 미국, 영국, 독일, 프랑스, 호주로 총 8개국이다. 분석대상 국가 중, 중국은 정부의 정책하에 빠르게 기술혁신이 발생하고 있는 것으로 평가되어 본 연구의 분석대상에 포함했다. 중국은 연구와 특허에서 세계 1위 기술을 배출하였고 2015년부터 SCI 논문 수에서 미국을 추월하기 시작한 국가로(KISTEP 차이나포럼, 2021)¹⁷⁾, 2019년부터 수소산업 육성지원을 본격화하였으며(김나연·이성규, 2021)¹⁸⁾ 2021년에는 ‘국민경제와 사회발전 14.5계획(2021-2025년) 및 2035년 장기 목표’를 통해 수소 등 미래선도산업 관련 계획을 수립하고 기술연구를 강화하겠다는 계획을 밝힌 바 있다(에너지경제연구원, 2021)¹⁹⁾. 또한 유럽 국가 중 영국은 한민지 외(2022)²⁰⁾가 설명하였듯이 브렉시트 이후 유럽연합에서 벗어나 「녹색산업혁명 10대 중점 계획」²¹⁾ 등 독자적인 탄소중립 이행방안을 마련해 오고 있다는 점에서 분석대상에 포함했다. 마지막으로 호주는 선진국 중 수소 수출국의 지위를 확보하고자 하는 국가 중 하나²²⁾로 호주 외 7개국과 비교하여 다른 특성의 정책적 목표를 가지고 있다는 점에서 분석대상에 포함했다.

14) IEA(2021), *Global Hydrogen Review 2021*, IEA Publication 참조.

15) IEA(2021)에 따르면 2019년 6월까지의 한국과 일본만 국가 수소 전략을 발표하고, 그 이후 13개국(호주, 캐나다, 칠레, 체코, 프랑스, 독일, 헝가리, 네덜란드, 노르웨이, 포르투갈, 러시아, 스페인, 영국)이 유럽위원회(European Commission)에 따라 수소 전략을 발표했다. 또한, 콜롬비아는 2021년 9월 말에 전략을 발표할 예정이며, 이탈리아와 폴란드는 공청회를 위한 수소 전략을 공개하였고, 추가적으로 20개 이상의 국가에서 수소 전략을 마련하고 있다(IEA, 2021).

16) Hydrogen Council and McKinsey & Company(2022), *Hydrogen Insights 2022*, Hydrogen Council and McKinsey & Company.

17) 문유현 외(2021), 「기술 패권 시대의 대중국 혁신 전략」, 『KISTEP Issue Paper』, 305 참조.

18) 김나연·이성규(2021), 「중국 수소산업 현황 및 정책」, 『세계 에너지시장 인사이트』, 21(19), pp.32-35.

19) 에너지경제연구원(2021), 「중국, ‘14.5계획 및 2035년 장기 목표’에서 에너지부문 정책 방향 설정」, 『세계 에너지시장 인사이트』, 21(6), pp.3-20.

20) 한민지 외(2022), 「영국의 CCUS 클러스터 개발 추진현황 및 정책적 시사점」, 『GTC Brief』, 3(2), pp.1-14.

21) HM Government(2020a), *The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution*, HM Government 참조.

22) 관계부처 합동(2021), 「제1차 수소경제 이행 기본계획」

나. 이점 요인과 측정지표

앞서 설명한 바와 같이 결정론적 방법론인 선도시장 접근법을 활용하여 분석할 때, 분석대상에 대하여 선도시장 형성에 영향을 미치는 적절한 이점 요인을 설정하는 것이 중요하다. 또한 이점 요인의 설정 후, 설정된 이점 요인을 객관적으로 측정할 수 있고 국가 간 비교가 가능하며 실제 분석을 위해 가용자료를 구축할 수 있는 지표의 설정이 중요하다. 본 연구에서는 Beise(2004) 및 Beise and Rennings(2005)이 제안한 6개의 이점 요인을 중심으로 하되, 상기 선도시장 접근법의 기본 방향에서 설명한 조달 이점을 포함하여 수소 생태계 가치사슬의 각 부문별로 이점 요인을 설정하였다. 또한 각 국가별 수소 전략 및 OECD, UN, IRENA²³⁾에서 발간하고 있는 국제 통계를 중심으로 각 이점 요인별 측정 지표를 선정했다. 각 부문별 이점 요인과 측정 지표는 하기와 같다.

(1) 생산부문

수소 생산부문에 대해서 이점 요인으로 ① 가격 이점, ② 수요 이점, ③ 이전 이점, ④ 규제 이점, ⑤ 조달 이점을 설정했으며, 수출 이점과 시장구조 이점은 제외했다. 수소 생산부문에 대해서 각 이점 요인을 선정한 근거와 이점 요인을 측정할 수 있는 지표에 대한 설명은 하기와 같다(<표 2-2> 참고).

<표 2-2> 수소 생산부문의 이점 요인과 측정지표

이점 요인	측정 지표
가격 이점	그린수소 생산효율 (%)
수요 이점	(1) 수소차 보급률 (대/100만 명) (2) 탄소 다배출 업종 비중 (%)
이전 이점	전체 그린수소 특허 중 해당 국가의 특허 비중 (%)
규제 이점	청정수소 범위 법제화 여부 (Y/N)
조달 이점	총 발전량 대비 재생에너지 발전량 비중 (%)

자료: 저자 작성

□ 가격 이점

첫 번째, 가격 이점의 경우, 한 국가에서 채택한 수소 생산 시스템 A가 다른 국가에서 채택한 시스템 B에 비해 가격 경감이 가능할 경우, 수소 생산 시스템 A가 국제적으로 채택 및 확산될 가능성이 높으므로 가격 이점을 포함하였다. 가격 이점의 측정지표로는 그린수소 생산 시 소

23) 국제재생에너지기구(International Renewable Energy Agency)

요되는 전력소비량 대비 생산되는 수소의 열량으로 계산되는 ‘그린수소 생산효율’을 지표로 채택하였다. 그린수소 생산효율을 제외한 다른 조건이 모두 같다고 가정할 때, 그린수소 생산효율이 높을수록 동일한 투입비용하에서 더 많은 양의 그린수소를 생산할 수 있으며 그린수소 생산부문의 가격 경쟁력을 제고할 수 있다.

그린수소 생산효율 외에 직접적인 가격 지표로 ‘그린수소 생산가격’과 투입비용 측면에서 ‘재생에너지 발전단가’를 가격 이점의 측정지표로 고려할 수 있다. 그러나 그린수소 생산가격과 재생에너지 발전단가는 국가 고유의 전력가격이 포함되거나 재생에너지 발전 여건이 반영되므로, 다른 국가에 적용될 때 그 국가가 기존에 채택하고 있던 시스템과 비교한 가격경쟁력을 담보하지 못한다. 따라서 그린수소 생산가격 및 재생에너지 발전단가는 특정 국가 내에서 상대적인 가격 경감이 가능한 조건이나, 해당 가격 경감이 국제적 채택 및 확산과정에 반드시 긍정적인 영향을 미친다고 하기 어렵다.

□ 수요 이점

두 번째, 한 국가에서 수소 생산에 대한 수요가 높게 형성되어 있을 때, 수소 생산부문의 혁신에 대하여 강한 수요가 발생하고 빠르게 수소 생산 시스템이 확산될 수 있으므로 수요 이점을 수소 생산부문의 이점 요인으로 포함하였다. 수소 생산에 대한 수요는 수소의 최종 사용처의 규모로 측정할 수 있으며, 수요 이점의 측정지표로 단기적인 수요로 인구당 수소차 보급량으로 계산되는 ‘수소차 보급률’과 장기적인 수요로 국가 경제에서 차지하는 ‘탄소 다배출 업종의 비중²⁴⁾’을 고려할 수 있다. Cleff and Rennings(2016)에 따르면 수요 이점은 ‘초기에 강한 수요를 발생시키는 조건’이므로, 현재 수소를 사용할 수 있는 수소차 보급률 지표가 수소 생산부문의 수요 이점을 측정하는 데 타당하다고 할 수 있다.

다만, 수소 수요량의 측면에서 탄소 다배출 업종의 활용은 비록 장기적인 수요에 가까우나, 2050탄소중립위원회(2021)²⁵⁾에서 산출한 바와 같이 2050년 국내 산업부문의 수소 수요는 1,060만 톤으로 수송부문의 수소 수요 220만 톤(B안 기준)에 비해 약 5배 가까이 큰 규모이다. 특히 철광석으로부터 철강을 생산하는 일차 철강생산(Primary Steelmaking)의 경우²⁶⁾ 수소환원제철이 핵심적인 탄소감축 수단이며, 이는 기존의 석탄 기반 코크스 환원제를 수소로 대체하는 것을 골자로 한다. 탄소 다배출 업종은 설비전환 시점을 고려했을 때 수소차 보급에 비해 장기적인 수요에 가까우나 핵심적인 수소 수요처라고 할 수 있다. 즉, 탄소 다배출 업종은 장기적으로 수소 수요를 견인할 것으로 전망되는 핵심 수요처이며, 탄소 다배출 업종의 강한 수요는

24) 철강, 석유화학, 시멘트 업종을 위시한 탄소 다배출 업종에서 수소는 탄소배출 저감과 탄소중립을 달성하기 위한 핵심적인 연·원료이며, 장기적으로 기후변화 대응을 위한 탄소 다배출 업종의 설비전환이 발생할 경우 해당 업종에서의 수소 수요가 늘어날 것으로 기대된다. 따라서 탄소 다배출 업종의 비중은 장기적으로 수소의 수요를 발생시킬 수 있는 요소라고 할 수 있다.

25) 2050탄소중립위원회(2021), 「2050 탄소중립 시나리오 세부 산출근거」

26) 세계철강협회에 따르면, 2019년 전로강 생산량은 한국이 약 4천 8백만 톤이며, 중국 8억 9천 3백만 톤, 일본 7천 5백만 톤, 미국 2천 7백만 톤, 독일 2천 8백만 톤, 프랑스, 1천만 톤, 영국 6백만 톤, 호주 4백만 톤 규모이다(World Steel Association(2020), *Steel Statistical Yearbook 2020 concise version*, World Steel Association))

자국 내에서의 원활한 수소 확보와 사용을 위한 수소 가치사슬 혁신 수요를 발생시킬 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 수소차 보급률을 지표로 활용한 결과와 함께 탄소 다배출 업종의 비중을 지표로 활용한 결과도 동시에 제시하였다.

□ 이전 이점

세 번째, 이전 이점의 경우, 특정 국가에서 채택한 수소 생산부문의 설계나 시스템의 효율성이나 강점을 해외에서 인지할 경우, 해당 설계 또는 시스템이 해외로 확산되기 용이하므로 수소 생산부문의 이점 요인으로 이전 이점을 포함하였다. 수소 생산부문의 현재 연구개발 단계에 초점이 맞추어져 있으므로, 각 국가에서 수행하고 있는 연구개발의 성과에 대해서 해외 국가에서 얼마나 그 성과를 잘 인지하고 있는지 측정하는 방식으로 접근하였다. 해외에서 인지할 수 있는 연구개발의 성과는 대표적으로 그린수소 관련 국제 학술지 논문 게재와 그린수소 관련 국제 특허의 출원·등록, 기술 이전 등이 있다. 본 연구에서는 연구개발 성과 중 비교적 국제 통계가 체계적으로 구축된 특허를 활용하여 수소 생산부문의 이전 이점을 측정하였다.

단, Beise(2004)가 지적하였듯이 혁신적인 디자인에 대한 독점적 권리는 오히려 국제적 확산을 저해하는 요인으로 작용할 수 있다. 혁신적인 기술에 대하여 독점적 소유권을 인정하는 특허의 경우, Beise(2004)가 지적한 것과 같이 국제적 확산을 어렵게 만드는 요인으로 해석할 수 있으며, 이에 따라 수소 생산부문의 이전 이점을 측정하는 데에 적절하지 않다고 할 수 있다. 그러나, 현재 전 세계적으로 구체적인 그린수소 생산시스템의 배치가 활발하지 않고 기술적으로 대규모 및 고효율의 그린수소 생산 연구가 진행되고 있는 상황에서, 기술적 우수성을 해외에서 인지할 수 있는 채널로써 특허 출원·등록이 유용하다고 판단하여 그린수소 특허를 이전 이점의 측정지표로 활용했으며, 구체적으로 전 세계 그린수소 특허 중 특정 국가의 특허가 차지하는 비중을 계산하여 활용했다.

수소 특허와 관련된 통계는 OECD 통계와 IRENA 통계에서 확인할 수 있다. OECD는 환경부문에서 ‘환경 관련 기술의 혁신(Innovation in Environment-related Technologies)’ 통계를 제공하고 있으며, 환경 관련 기술의 종류별로 OECD 회원국 및 비OECD 회원국이 보유하고 있는 특허수 데이터베이스가 구축되어 있다. 해당 통계에서 수소 관련 특허는 ‘수소 기술(Hydrogen Technology)’로 분류되어 있으며, 특허의 패밀리 사이즈(Family Size)를 지정할 수 있고 특정 특허에 대해서 국가의 기여(Country Fractional Value)가 반영되어 있다는 장점이 있다. 단, 수소는 일종의 생태계를 형성하고 있는바, OECD 통계에서 제공하고 있는 수소 기술이 수소 생산부문에 한정된 기술인지 확인하기 어려우며, 나아가 수소 생산부문의 기술이라고 하더라도 수소 생산 중 그린수소 생산으로의 한정 여부를 확인하기 어렵다.

IRENA가 제공하고 있는 수소 관련 특허 통계는 ‘혁신과 기술(Innovation & Technology)’ 부문 중 ‘활성화 기술 특허(Enabling Technologies Patents)’ 항목에서 확인할 수 있다. IRENA는 수소 관련 기술 중 ‘그린수소(수전해)’ 기술을 별도로 구분하였으며, 각 국가별로 보유하고 있는

그린수소(수전해) 특허를 제공하고 있다. 따라서 IRENA의 통계는 수소 생산부문 중 그린수소의 생산과 관련된 분야에 한하여 특허 자료를 취득할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 구체적으로 통계 데이터베이스에서 조사대상인 그린수소 특허의 패밀리 사이즈에 대한 기준이 명확하지 않아 국제 특허 외에 국내 특허가 다수 포함되어 있을 가능성이 있다.

본 연구에서는 기술에 초점을 맞추고자 IRENA에서 제공하는 특허 통계를 활용하여, 분석 대상 국가의 그린수소 특허수가 전 세계 그린수소 특허수에서 차지하는 비중으로 이전 이점을 측정하였다. 단, 상기 언급한 바와 같이, IRENA의 특허 통계는 국내에만 출원·등록된 특허가 포함되어 있을 가능성이 있으며, 해당 특허의 기술은 해외에서 그 유용성을 쉽게 인지할 수 있다고 판단하기 어렵다. 그럼에도 불구하고, IRENA의 통계는 그린수소의 생산에 한정하여 자료를 제공하고 있다는 점과, 국내 특허 또한 연구의 성과물로서 간접적 및 장기적으로 해외로 이전될 가능성이 높다고 판단하여 IRENA 통계를 활용하였다.

□ 규제 이점

네 번째, 그린수소 생산부문의 혁신은 연구개발 단계와 혁신의 확산과정에서 긍정적인 외부성이 존재하며, 적절한 수단의 규제를 통해 혁신의 창출을 확대시킬 수 있으므로 규제 이점을 포함하였다. 본 연구에서는 수소 생산부문의 규제 이점을 측정하기 위한 지표로 청정수소 범위의 법제화를 선택하였다. 생산부문의 규제 지표로는 청정수소 범위의 법제화 외에도 가령 청정수소인증제 시행 여부와 2050년 수소의 사용 비중 등 여러 가지 지표를 고려할 수 있다. 그러나 청정수소 범위의 법제화는 청정수소인증제 시행 및 수소의 사용 비중을 측정 가능하도록 만드는 전제라는 점에서 생산과 관련하여 선도시장 형성 가능성 여부를 식별할 대표적인 지표라고 판단된다.

상기와 같은 이유하에서 청정수소 범위 법제화가 수소 생산에 미치는 영향력을 기술하면 다음과 같다. 첫째, 청정수소 범위의 법제화는 수소 생산이 한 축을 이루는 이른바 수소경제(Hydrogen Economy) 실현에 대한 정부의 적극적인 의지를 반영한 결과물이라는 점에서 상징적인 의미가 있다. 둘째, 수소 생산에 대한 정부의 의지가 내포된 청정수소 범위의 법제화는 향후 수소 생산을 위하여 풀어야 할 과제(가령, 개질방식을 통한 수소 생산에서 발생하는 온실가스 문제 및 부생수소 생산을 위한 열분해 과정에서 배출하는 온실가스 배출 문제)를 해결할 수 있도록 지방의 투자를 독려할 수 있다. 셋째, 청정수소의 범위를 어디까지로 설정할 것인가를 두고 오늘날 블루수소·핑크수소·그린수소 등 여러 가지 의견들이 제시되고 있는 상황에서,²⁷⁾ 청정수소 범위의 법제화는 이 과정을 통하여 구체화된 형태의 수소에 대한 기업의 집중적인 투자 및 개발을 가능하도록 만들어 결과적으로 수소의 생산을 가속화할 수 있다. 이 점은 청정수소 범위의 불명확성이 수소 생산에 대한 기업의 불확실성을 키운다는 지적으로부터 예상 가능하다.²⁸⁾

27) 최민경(2022), 「‘블루수소’에 이어 ‘핑크수소’까지...“청정수소 범위 넓혀야”」, 『머니투데이』, 6.21, 2022.10.19. 접속, <https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2022062015523569337>

28) 신재근(2021), 「수소법 개정 ‘산 넘어 산’...속타는 기업들」, 『한국경제』, 12.28, 2022.10.19. 접속, <https://www.wowtv.co.kr/NewsCenter/News/Read?articleId=A202112280123>

□ 조달 이점

다섯 번째, 대표적인 그린수소 생산방식은 물을 원료로 하여 재생에너지 전력을 투입하여 물을 분해하는 것으로(수전해), 그린수소의 생산을 위해서는 물과 재생에너지 전력의 조달이 필수적이다. 따라서 그린수소 생산의 원료와 연료를 충분히 조달할 수 있는 환경은 지속적인 그린수소 생산의 경험을 축적하고 내부적인 대규모 확산 시 중요한 요인이므로 본 연구는 수소 생산부문의 이점 요인으로 조달 이점을 포함하였다. 조달 이점의 측정지표로는 물 및 재생에너지 전력의 공급량의 규모를 활용하여 측정할 수 있으며, 본 연구에서는 한 국가의 총발전량 대비 재생에너지 발전량으로 계산할 수 있는 재생에너지 발전량 비중을 지표로 활용했다.

단, 총발전량 대비 재생에너지 발전량의 비중을 조달 이점의 측정지표로 활용하는 데에는 일부 쟁점이 존재한다. 첫 번째, 해당 지표에는 충분한 규모의 물 공급이 배제되어 있다. 수소 생산에 있어서 물 또한 핵심적인 원료라고 할 수 있다. 그러나, 그린수소에서의 핵심은 수전해 기술을 적용하되 간접적인 이산화탄소 배출이 없는 재생에너지 전력을 활용한다는 것에 있으므로 본 연구는 재생에너지 전력 공급량 규모를 중심으로 측정지표를 설정하였다.

두 번째, 각 국가의 수소 생산을 위한 그리드 활용 전략에 따라 해당 지표는 적절하지 못할 수 있다. 예컨대 수소 생산을 위해 재생에너지 전력의 일부에 대하여 배타적인 활용이 가능할 경우, 재생에너지 발전량 비중 지표가 적절할 수 있다. 그러나 대규모 재생에너지 도입으로 인한 출력제한(Curtailment) 수단의 대체재로 그린수소 생산을 활용할 경우, 현재 재생에너지 발전의 출력제한의 규모가 더 적절한 지표일 수 있다. 그러나 본 연구의 분석대상 국가인 8개 국가에 대해서 상호 비교할 수 있는 재생에너지 발전 출력제한 규모 자료를 구축하는 데 제약이 있었으며, 재생에너지 발전의 출력제한 역시 대규모의 재생에너지 전력공급에서 일부 기인하는 바가 있으므로 재생에너지 발전량 비중을 지표로 활용했다.

□ 제외된 이점 요인

본 연구는 생산부문에 대해서 현재 거래되고 있는 수소 및 수소 생산 관련 설비의 성격에 근거하여 Beise(2004)가 제안한 수출 이점을 이점 요인에서 제외했다. Rennings and Smidt(2008)의 설명을 활용하면, (그린)수소 생산부문에서의 수출 이점은 특정 국가에서 선호되는 수소 생산부문의 혁신적인 디자인에 외국의 수소 생산부문 디자인에 대한 선호를 포함하는 것을 촉진하는 조건에서 발생한다고 할 수 있다. 수출 이점은 수출 경험(수출량 또는 수출시장 점유율)과 관련된 지표를 통해 측정할 수 있는데, 통상 수출 경험이 많을수록 단순히 자국의 선호도만 반영하는 것이 아니라 외국의 선호도를 반영하는 것에 민감하기 때문이다.

그린수소 생산부문과 관련한 수출 경험은 생산부문의 산출물로서의 수소 또는 생산부문의 핵심 기기와 관련된 수출 경험으로부터 측정하는 것을 고려할 수 있다. 그러나 산출물로서의 수소(그린수소)는 동일한 물성을 가지고 있기 때문에 과거의 수출 경험을 토대로 해외의 선호도가 반

영되어 있는지 판단하기 어렵다. 수소 생산부문의 핵심 기기는 수전해 설비라고 할 수 있는데, 이는 전기도금용·전기분해용·전기영동(泳動)용 기기(HS 854330)로 분류될 것으로 판단되며 무역통계 자료가 既 구축되어 있다. 그러나 현재 거래되고 있는 수전해 설비가 상업적인 그린수소 생산을 위한 거래라고 판단하기 어렵다.

또한 본 연구는 실질적인 국가 간 비교의 어려움으로 인해 시장구조 이점을 수소 생산부문의 이점 요인에서 제외했다. 수소 생산부문에서 시장구조 이점은 수소 생산부문에 다수의 업체가 존재하여²⁹⁾ 조성된 경쟁적인 시장환경으로부터 발생한다고 할 수 있다. 시장의 경쟁 정도는 통상 허핀달-허쉬만 지수(HHI, Herfindal-Hershman Index) 또는 상위기업 집중률 등 기업의 시장 점유율(Market Share)을 활용하여 시장집중도(Market Concentration)를 측정하는 지수로 측정하며, 시장집중도가 낮을 경우 경쟁적이라고 판단하게 된다. 따라서 수소 생산부문의 시장구조 이점을 측정하기 위해서는 (그린)수소를 생산하는 기업의 시장 점유율(또는 해당 기업의 매출액과 전체 시장규모) 자료가 요구된다. 그러나 현재 그린수소를 상업적으로 생산하여 판매하는 기업은 존재하지 않거나 소수일 것으로 예상되므로, 경쟁을 측정할 수 있는 시장이 존재하지 않거나 국가 간 차이가 없을 것으로 판단하여 제외했다.

(2) 저장·운송부문

수소 저장·운송부문의 이점 요인으로는 생산부문의 이점 요인과 동일하게 ① 가격 이점, ② 수요 이점, ③ 이전 이점, ④ 규제 이점, ⑤ 조달 이점을 설정했으며, 수출 이점과 시장구조 이점을 포함하지 않았다. 수소 저장·운송부문에 대해서 각 이점 요인을 선정한 근거와 선정된 이점 요인의 측정 지표에 대한 설명은 하기와 같다(〈표 2-3〉 참고).

〈표 2-3〉 수소 저장·운송부문의 이점 요인과 측정지표

이점 요인	측정 지표
가격 이점	수소액화플랜트 규모 (톤/일)
수요 이점	(1) 수소차 보급률 (대/100만 명) (2) 탄소 다배출 업종 비중 (%)
이전 이점	전체 수소 저장·공급·활용 특허 중 해당 국가의 특허 비중 (%)
규제 이점	수소의 저장 및 운송 관련 기준의 법제화 여부 (Y/N)
조달 이점	국내 수소 생산량 (백만 톤)

자료: 저자 작성

29) 엄밀히 말하여 경쟁 시장의 경제주체는 다수의 생산자와 다수의 소비자로 구성되어 있으며, 다수의 생산자가 존재하나 유일한 소비자만 존재할 경우 수요 독점(Monopsony)적인 환경이 형성된다.

□ 가격 이점

첫 번째, 한 국가에서 채택한 수소 저장·운송 시스템 A가 다른 국가에서 채택한 시스템 B에 비해 가격 경감이 가능할 경우, 수소 저장·운송 시스템 A가 국제적으로 채택 및 확산될 가능성이 높으므로 수소 저장·운송부문의 이점 요인으로 가격 이점을 포함했다. 수소 저장·운송부문은 크게 저장과 운송으로 나눌 수 있고 수소의 상태에 따라 다양한 기술적 옵션을 선택할 수 있으므로, 개념적으로 가격 이점의 지표로 활용할 수 있는 지표 또한 다양하다. 본 연구에서는 가능한 한 다양한 지표를 고려하고 해당 지표들을 하나의 지표로 통합하고자 하였으나 현재의 기술개발 단계에서 취득할 수 있는 자료가 제한적이었으며, 결과적으로 ‘수소 액화플랜트 규모’를 수소 저장·운송부문의 가격 이점 측정지표로 활용했다.

수소 저장·운송부문의 가격 이점을 측정하는 데 개념적으로 활용 가능한 지표로는, 수소액화 에너지효율, 수소 튜브트레일러 압력, 수소 배관망 압력, 수소 액화플랜트 규모 등이 있다. 수소액화 에너지효율은 액화되는 수소 대비 투입되는 에너지로 표현되며, 수소를 액화하는 데 얼마나 많은 양의 에너지가 소비되는지를 나타내는 지표이다. 즉, 그린수소 생산효율과 동일하게 해당 효율이 높을수록 동일한 투입비용하에서 더 많은 양의 수소를 액화하여 저장할 수 있으며, 수소 액화저장의 가격 경쟁력을 제고할 수 있다.

수소 튜브트레일러 압력과 수소 배관망 압력은 기체수소의 운송과 관련된 지표로, 수소 튜브트레일러의 압력은 기체수소를 튜브트레일러 차량으로 운송 시 운송가능한 규모를 나타내며 수소 배관망 압력은 배관망을 통해 운송할 수 있는 거리를 나타낸다. 즉, 다른 조건이 모두 동일할 때, 수소 튜브트레일러의 압력이 높을수록 한 번에 대규모의 운송이 가능하여 운송에 소요되는 비용을 절감할 수 있다. 또한 마찬가지로 수소 배관망 압력이 높을수록 승압 없이 장거리에 위치한 수요처까지 수소를 운송할 수 있어 비용 절감이 가능하다.

수소 액화플랜트 규모는 일간 또는 연간 생산량으로 나타내는 수소 액화플랜트의 생산규모로, 기체수소로부터 액화수소를 만들어 낼 수 있는 생산능력을 나타낸다. 이는 절대적인 크기를 나타내는 지표이며 수소액화 에너지효율과 같이 직접적으로 투입 대비 산출로 표현되는 기술적 효율을 나타내는 지표가 아니다. 그러나 본 연구에서는 대규모의 수소 액화플랜트를 보유하고 활용할 때, 사용함으로써 획득할 수 있는 지식 스톡의 지속적인 축적을 통해 ‘사용에 의한 학습효과(Learning-by-Using)’가 발생할 수 있다는 점에 착안하여 수소 액화플랜트 규모를 측정지표로 고려하였다.

상기 열거한 수소 저장·운송 부문의 가격 이점을 측정할 수 있는 지표 중, 분석대상 8개 국가에 대해서 상호 비교 가능한 자료를 구축할 수 있는 지표는 수소 액화플랜트 규모였으며, 수소액화 에너지효율, 수소 튜브트레일러 및 수소 배관망 압력에 대한 각 국가별 현재의 기술적 수준은 일부 국가에 대해서만 국가 수소전략 및 2차 자료를 통해 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구는 자료의 제약으로 인해 수소 액화플랜트 규모를 수소 저장·운송 부문의 가격 이점 측정지표로 활용했으며, 이는 수소의 저장·운송 부문의 단면만 나타낸다는 데에서 한계가 있다.

□ 수요 이점

두 번째, 수소의 저장·운송에 대하여 강한 수요를 발생시키는 환경이 형성되어 있을 때, 수소 저장·운송부문에 대한 혁신의 요구가 발생하고 내부적으로 저장·운송 시스템 및 서비스가 빠르게 마련될 수 있다. 따라서 본 연구는 수요 이점을 수소 저장·운송부문의 이점 요인으로 설정했다. 수소의 저장·운송에 대한 수요는 수소 생산과 마찬가지로 수소의 최종 사용처로부터 발생할 수 있으며, 수소 생산부문과 동일하게 수소차 보급률 또는 탄소 다배출 업종의 비중을 지표로 활용하여 두 경우의 결과를 병렬적으로 제시하였다.

□ 이전 이점

세 번째, 수소 저장·운송부문의 이점 요인으로 이전 이점을 포함하였으며, 이는 수소 저장·운송부문 혁신의 유용성을 해외에서 인지할 수 있을 때 해당 혁신 디자인이 해외로 확산되기 수월하기 때문이다. 수소 생산부문과 유사하게 수소 저장·운송부문은 효율적인 시스템을 구축하기 위해 연구개발 단계에 있으며, 통계 데이터베이스가 상대적으로 체계적으로 구축되어 있는 특허 자료를 활용하여 측정지표를 설정했다. 수소 생산부문에서 논의한 바와 같이, 특허는 독점적 권리를 부여하는 것으로 확산을 저해하는 요인일 수 있으나 연구개발 단계에서 기술의 강점을 해외에 인지시킬 수 있는 수단이 될 수 있으므로 특허 자료를 활용했다.

수소 저장·운송부문의 특허는 IRENA에서 제공하고 있는 ‘활성화 기술 특허(Enabling Technologies Patents)’에서 일부 확인할 수 있다. 단, 생산부문과 관련된 그린수소(수전해) 기술의 특허수 자료와 달리, 저장·운송부문과 관련된 특허는 수소의 저장·공급·활용³⁰⁾으로 분류되어 활용부문의 기술을 포함하여 제공하고 있다. 따라서 IRENA가 제공하고 있는 각 국가별 수소의 저장·공급·활용 특허수를 수소 저장·운송부문의 이전 이점 측정지표로 활용할 때, 활용부문의 포함으로 인해 특허수가 과대추정되거나 결과에 왜곡이 발생할 수 있다는 한계점이 존재한다. 예컨대, 수소의 저장·운송부문에서 국제적으로 많은 양의 특허를 등록하고 있으나 활용부문의 특허수가 적어 수소의 저장·공급·활용 특허수의 총계가 적을 때, 해당 국가는 수소의 저장·운송부문에서 이전 이점이 실제로 매우 높지만 분석상에서 저평가 될 수 있다. 이와 같은 한계점이 존재할 때 IRENA와 같이 제공목적에 부합하게 재분류된 특허 통계 데이터베이스가 아닌 국제표준의 특허분류 체계를 따르는 특허 통계 데이터베이스를 활용하여 본 연구의 목적에 맞게 수소 저장·운송부문의 특허 자료를 구축할 수 있으나, 이는 과업의 범위를 벗어난다고 판단했다. 이에 따라 본 연구는 수소 저장·운송부문의 이전 이점을 측정하기 위하여, 한계점이 존재하나 IRENA가 제공하고 있는 수소의 저장·공급·활용 특허수를 바탕으로 전체 특허 대비 특정 국가의 특허가 차지하는 비중을 계산하여 활용했으며, 이전 이점의 측정은 과대추정되었거나 일부 왜곡이 발생했을 수 있다는 한계점이 있다.

30) IRENA의 통계 데이터베이스에는 ‘Hydrogen (storage and distribution and applications)’으로 분류되어 있다.

□ 규제 이점

네 번째, 수소 저장·운송부문의 혁신 역시 일종의 환경 혁신의 범주로 이해할 때, Beise and Rennings(2005)가 설명한 이중 외부성(Double Externalities)이 발생할 수 있으며, 규제를 활용한 정부의 개입을 통해 혁신의 활동을 확대하여 사회적으로 적절한 수준의 혁신을 창출할 수 있다. 이에 따라 수소 저장·운송부문에 대해서도 규제 이점을 포함하였다.

본 연구에서는 수소 저장·운송 부문에서 선도시장으로서의 잠재력 보유 여부를 판단하기 위한 지표로 수소 저장·운송 관련 기준의 법제화를 선택하였다. 탄소중립이라는 목표달성을 위하여 세계 각국이 탄소세 및 온실가스 배출권거래제도 등을 시행함에 따라 온실가스 배출이 없거나 적은 그린수소·블루수소 등의 생산이 가속화 될 것이라고 판단되는 가운데, 수소 저장·운송 관련 기준의 법제화는 글로벌 시장을 선도하기 위한 위치 선점에 있어 다음과 같은 기여할 것으로 판단되기 때문이다. 첫째, 수소 저장·운송 관련 기준의 법제화는 수소 저장 및 운송 과정에서 발생한다고 지적되는 폭발사고와 독성가스 배출의 위험을 예방 가능하도록 만들어 주민수용성을 제고할 수 있다. Ladenburg *et al.*(2009)의 선행연구 결과에 따르면, 주민수용성의 확보가 중장기적 수소경제 실현에 중요한 요인이 될 가능성이 높은 만큼³¹⁾ 수소 저장·운송 기준의 법제화는 불가피한데, 구체적으로 이는 다음의 방법을 통하여 안전성과 주민수용성을 획득할 수 있을 것으로 사료된다. 우선, 운송과 관련하여 수소는 운송 상태가 기체인지 혹은 액체인지에 따라 운송방식이 세 가지(파이프라인·튜브트레일러·액화탱크로리)로 분류되는데, 수소 운송·저장 기준의 법제화는 저장·운송의 상태 및 방식에 대한 유형별 전주기적 안전관리 규제체계 마련의 당위성을 제공할 수 있다. 최근 한국에서는 수전해 과정을 거쳐 분리된 수소의 저장과정에서 산소를 걸러낼 수 있는 안전장치의 부재와 저압수소에 대한 규제 미비 등이 원인이 되어 수소탱크가 폭발하면서 수소의 위험성에 대한 인식이 확산된 바 있는데, 유형별 안전기준 등의 내용이 포함된 수소 운송·저장 법률은 이 같은 참사를 미연에 방지하도록 만들 수 있다. 다음으로, 저장과 관련하여 고압의 압축을 통하여 탱크 및 트레일러에 저장되는 수소가스는 압축수준이 무려 700배에 달하여 위험성이 존재한다고 하는데,³²⁾ 수소 저장 관련 내용의 법제화는 위와 같은 문제에 대응하기 위한 연구³³⁾가 진행될 수 있도록 보조금 지급을 가능하도록 만들 수 있다.

다음으로, 수소 저장·운송 관련 기준의 법제화는 수소의 저장 및 운송 과정에서 발생하는 과도한 비용을 절감시킬 수 있다는 이유에서 선도시장의 잠재력 보유 여부를 식별하는 적절한 지표라고 판단된다. 예컨대, 수소의 운송과 관련하여 해당 법률에는 기존에 화석연료의 운송을 위하여 사용되었던 파이프라인을 기체 수소의 파이프라인으로 용도를 변경하는 내용을 규정할 수 있다. 이는 대량의 수소 운송을 가능하게 하는 저가의 선택지로, 수소 운송을 위하여 새로운 파이프라인을 건설할 때보다 10~25%의 비용 절감 효과가 발생한다는 점에서 경제적이다.³⁴⁾ 이 점에 대

31) 이지훈(2021), 「전주·완주 수소시범도시 주민수용성 분석」, 『New & Renewable Energy』, 17(4), p.29.
 32) 양인범(2021), 「한국전기연구원, 액체수소 생산 및 장기 저장 기술 개발 성공」, 『가스신문』, 10.19, 2022.10.20. 접속, <http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=101291>
 33) 최근 한국전기연구원에서는 수소 저장 과정에서의 위험성 해결을 위하여 ‘제로보일오프(Zero Boil-off)’ 기술을 개발하였는데, 법제화에 따른 각종 지원정책하에서 이러한 혁신적 기술이 지속적으로 개발되리라 본다.
 34) 김소연(2021), 「진정한 수소경제 실현하려면...생산·저장·운송 ‘삼박자’ 맞아 떨어져야」, 『동아사이언스』, 8.14, 2022.10.19. 접속,

하여 운송·생산 등 민간 전문가 26명으로 구성된 독일의 국가수소위원회(NWR)는 “기존의 기반 시설을 사용할 경우 시스템의 비용이 절감되고 실현이 가속화되며 환경 개입을 피하여 사회적 수용이 증가한다” 라고 주장한 바 있다.³⁵⁾

□ 조달 이점

다섯 번째, 수소의 저장·운송부문의 구축과 서비스를 활성화하는 데 필요한 원자재 및 투입 요소는 크게 설비 측면과 서비스 측면으로 나누어서 고려해 볼 수 있다. 먼저 저장·운송부문의 설비 측면에서는 각종 설비를 제작·건설하기 위한 강재 등의 중간재와 철광석과 같은 자원의 조달이 필요하다. 즉, 충분한 양의 중간재와 자원을 수월히 조달할 수 있을 때, 그렇지 못한 다른 국가에 비해서 빠르게 내부적으로 구축·확산될 수 있기 때문이다. 한편, 저장·운송부문이 제공하는 서비스 측면에서는 실제 저장·운송 설비 및 인프라 구현되고 운영되기 위해서 서비스 대상 품목인 수소가 필요하다. 수소의 저장·운송부문은 설비의 기술적 설계와 제작을 넘어 실제 수소를 저장하고 운송하는 서비스를 제공하는 가치사슬이며, 해당 가치사슬의 실증이나 사업화를 위하여 서비스 대상 품목의 확보가 필수적이다.

본 연구에서 새롭게 도입한 조달 이점은 원자재 및 투입요소의 공급안보적인 측면을 고려하기 위한 것이라는 점을 감안하여, 본 연구는 상기의 두 측면 중 저장·운송부문이 제공하는 서비스 측면에서 충분한 양의 수소를 생산·공급할 수 있는지를 ‘현재 국내 수소생산량’의 지표로 판단하여 조달 이점을 측정했다. 수소는 현재 국제적인 거래가 일부 이루어지고 있으나, 수소경제 구축을 위한 청정수소의 대규모 국제거래는 아직 제한적인 상황이다. 특히 자국내에서 충분한 양의 수소를 공급하지 못할 것으로 판단되는 국가 간의 수소 해외 도입처 확보 경쟁이 심화될 것으로 예상되며, 수소 해외 도입처를 확보하더라도 국제 운송을 위한 운반선 도입 및 변환·재변환 플랜트 건설 등 장기간·대규모의 거래비용이 소요될 것으로 예상된다. 따라서 자국 내에서 충분한 양의 수소를 생산·공급할 수 있는 능력은 수소 저장·운송 가치사슬 초기의 구축과 운영에 필수적이며, 선도시장 형성을 위한 이점으로 작용할 수 있다.

물론 상기에서 설명한 바와 같이, 수소 저장·운송설비의 측면에서 중간재와 원자재의 확보도 필수적이며, 특히 낮은 질량의 수소를 대규모로 안전하게 저장할 수 있는 설비가 필요하다는 점에서 수소 저장·운송용 중간재의 확보의 중요성이 크다고 할 수 있다. 현재 수소 저장·운송 설비 제작·건설을 위해 기술적으로 우수한 중간재가 거래되고 있다고 판단하기 어렵지만, 강재는 국제적으로 다수의 공급자가 존재하며 활발히 거래되고 있는 재화라고 판단된다. 수소 공급 인프라의 구축 초기에 기술 수준의 차이에 따라 중간재의 원활한 수급에 어려움이 있을 수 있으나, 기존 중간재 시장의 성숙도와 강재와 같은 고체 형태의 재화는 물리적 운송이 용이하다는 점을 감안할 때, 상대적으로 수소의 조달 능력이 더 중요하다고 판단했다.

<https://m.dongascience.com/news.php?idx=48642>

35) Appunn K.(2021), “Use Existing Infrastructure for Hydrogen to Reduce System Costs, Accelerate Transition – Govt Advisors”, *Clean Energy Wire*, 6.19, 2022.10.20. 접속, <https://www.cleanenergywire.org/news/use-existing-infrastructure-hydrogen-reduce-system-costs-accelerate-transition-govt-advisors>

□ 제외된 이점 요인

본 연구는 수소 저장·운송부문에 대해서 수소 생산부문과 동일하게 수출 이점과 시장구조 이점을 이점 요인에서 제외했다. 수출 이점의 경우 저장·운송부문의 설비와 유사한 성격·목적의 튜브트레이일러, 탱크로리, 가스저장용 용기, 파이프라인 수출의 시장 점유율 지표를 활용하여 측정하는 것을 고려할 수 있다. 그러나 현재 거래되고 있는 상기 열거한 재화들이 수소의 저장·운송에 활용할 목적으로 거래되는 것인지 판단하기 어렵다. 이에 따라 상기 재화의 수출은 수소 저장·운송부문 혁신에 대한 해외의 선호도가 반영되었다고 하기 어려우므로 수출 이점을 제외하였다.

또한 시장구조 이점의 경우, 수소 저장·운송용 설비를 생산하는 기업의 시장 점유율 자료를 활용하여 시장집중도를 측정하여 지표로 활용하는 방안을 고려할 수 있다. 추가적으로 잠재적인 시장진입 가능성을 고려하여 기타 가스 저장·운송용 설비를 생산하는 기업까지 포함하여 시장집중도를 측정하여 지표를 구축하는 방안도 존재한다. 시장집중도를 측정하기 위해서, 각 국가별로 수소 및 가스 저장·운송용 설비 생산부문의 매출액 합계(또는 생산액 합계)로 표현되는 시장의 규모와 해당 시장에서 각 기업의 매출액(또는 생산액)의 자료가 요구된다. 그러나 한국을 포함한 분석대상 8개 국가에서 수소 및 가스 저장·운송용 설비를 생산하는 업체의 실적 정보가 대다수 공개되지 않아 자료를 구축하는 데 한계가 존재했으며, 이에 따라 본 연구는 수소 저장·운송부문의 시장구조 이점을 제외하고 분석했다.

(3) 활용부문

수소 활용부문에 대해서 이점 요인으로 ① 가격 이점, ② 수요 이점, ③ 이전 이점, ④ 수출 이점, ⑤ 규제 이점, ⑥ 조달 이점을 설정했으며, 시장구조 이점을 제외했다. 수소 활용부문의 선도시장 분석을 위한 이점 요인의 선정 근거와 이점 요인의 측정지표에 대한 설명은 다음과 같다 (<표 2-4> 참고).

<표 2-4> 수소 활용부문의 이점 요인과 측정지표

이점 요인	측정 지표
가격 이점	연료전지 발전단가 (원/kWh)
수요 이점	(1) 수소차 보급률 (대/100만 명) (2) 탄소 다배출 업종 비중 (%)
이전 이점	전체 연료전지 특허 중 해당 국가의 특허 비중 (%)
수출 이점	연료전지 수출 점유율 (%)
규제 이점	저공해차량 의무판매 규정 존재 여부 (Y/N)
조달 이점	국내 수소 생산량 (백만 톤)

자료: 저자 작성

□ 가격 이점

첫 번째, 가격 이점의 경우, 한 국가에서 채택한 수소 활용 설비 A가 다른 국가에서 채택한 설비 B에 비해 가격경쟁력이 존재하는 경우, 수소 활용 설비 A가 국제적으로 채택 및 확산될 가능성이 높으므로 가격 이점을 포함하였다. 가격 이점의 측정지표로는 수소 활용 설비의 직접적인 가격 지표로, 동일한 발전량 대비 소요되는 발전 비용으로 표현되는 ‘연료전지 발전단가’와 ‘수소차의 가격’을 고려할 수 있다. 그러나 상용화된 수소차의 경우, 수소차를 출시한 국가가 한국(현대)과 일본(토요타, 혼다)으로 제한적이므로, 수소차 가격의 국가 간 비교를 수행하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 연료전지 발전단가를 수소 활용부문의 가격 이점을 측정하는 지표로 활용했다.

□ 수요 이점

두 번째, 국가 내부적으로 수소 활용에 대하여 높은 수요가 형성되어 있을 때, 수소 활용부문에 대한 혁신과 내부적인 수소 활용처의 확산이 가속화될 수 있으므로 본 연구는 수요 이점을 수소 활용부문의 이점 요인으로 포함했다. 수소 활용부문의 혁신에 대해서 컨센서스를 형성하고 있는 개념적 정의는 없으나, 각 국가에서 개발하고자 하는 개선되거나 새로운 형태의 연료전지 및 수소차 또는 탄소 다배출 업종에 적용할 수 있는 연·원료 대체기술을 혁신이라고 할 경우, 수소 활용에 대한 수요 역시 생산 및 저장·운송 부문과 마찬가지로 수소의 최종 사용처로부터 발생할 수 있다. 따라서 수소 활용부문에 대해서도 앞서 설명한 수소 생산 및 저장·운송부문과 동일하게 수소차 보급률 또는 탄소 다배출 업종의 비중을 지표로 활용하여 두 경우의 결과를 제시하였다.

□ 이전 이점

세 번째, 수소 활용부문의 선도시장 형성을 위한 이점 요인으로 이전 이점을 포함하였으며, 이전 이점의 측정지표로 IRENA에서 제공하고 있는 연료전지 특허수 통계를 활용했다. 이는 수소 활용부문의 혁신에 대해서도 해당 혁신의 유용성을 해외에서 충분히 인지할 수 있을 때 국제적인 확산이 수월하기 때문이다. 수소를 활용하기 위한 기술은 탄소 다배출 업종에서의 연·원료 대체, 수소차, 연료전지, 수소발전 등 다양하므로 하나의 대표성 있는 기술을 선택하기 어려우나, 연료전지는 수소차(수소연료전지차)의 핵심 시스템임과 동시에 다양한 전력 수요처에서 활용할 수 있으며 수소 활용기술 중 비교적 국제비교가 가능한 통계가 체계적으로 구축되어 있어 연료전지를 중심으로 이전 이점을 측정하고자 했다.

단, 인산 연료전지(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC), 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC) 등 일부 연료전지는 기술적으로 성숙되어 상용화되어 있으므로³⁶⁾ 이미 국제적으로 그 유용성에 대하여 충분히 인지하고 있을 가능성이 높다고 판단되며, 연

36) 김호건(2021), 「연료전지 개요와 현황」, 『K 뉴딜산업 INSIGHT 보고서-3』, 한국수출입은행 해외경제연구소 참조.

구개발 단계에서의 측정지표로 활용할 수 있을 것으로 판단되는 특허수 지표가 적절하지 않을 수 있다. 그러나 연구개발이 활발하게 이루어지고 있는 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)³⁷⁾나, 과학기술정보통신부·한국에너지기술연구원(2021)이 지적하였듯이 기존의 연료전지는 천연가스 연료를 사용하는 데 반해 수소의 활용처로의 연료전지는 청정수소 전용 시스템 설계가 요구된다는 점³⁸⁾에서 특허수를 측정지표를 활용할 수 있는 측면도 존재한다고 판단된다.

상기와 같은 근거로, 특허수 통계를 활용하고자 할 때 연구개발이 요구되는 세부 연료전지 기술 및 시스템에 국한하여 특허 통계를 취득하여 이전 이점을 측정하는 것이 적절하다고 판단된다. 연료전지 특허수 통계를 제공하고 있는 IRENA 및 OECD는 세부 기술별로 특허를 구분하지 않고 연료전지(Fuel Cells)로 일괄 분류하여 통계를 제공하고 있어 측정지표로 사용하기에 한계점이 존재한다. 그러나 수소 저장·운송부문에서 설명하였듯이 특허 분류체계를 따르는 특허 통계 데이터베이스를 활용하여 특허를 분석하는 것은 본 연구의 과업 범위를 벗어난다고 판단했으며, 수소 생산 및 저장·운송부문에서의 이전 이점 측정지표와 자료의 일관성을 유지하기 위하여 IRENA의 국가별 연료전지 특허수 자료를 지표로 활용했다.

□ 수출 이점

네 번째, 수소 활용부문에서 수출 이점이란 한 국가에서 선호되는 수소 활용부문의 디자인에 외국의 선호가 포함되는 것을 촉진하는 조건에서 발생하는 이점으로, 상용화된 연료전지 및 수소차가 이미 국제적으로 거래되고 있는바 수소 활용부문에서 수출 이점을 이점 요인으로 포함했다. 수출 이점은 무역통계에 기반하여 한 국가의 특정 재화 수출량 또는 수출시장 점유율 등의 지표를 활용하여 측정할 수 있으며, 수출이 활발하다는 것은 해당 수출품에 외국의 선호가 반영되어 있음에 일부 기인하기 때문이다.

수소 활용부문과 관련된 대표적인 수출품목은 앞서 언급한 연료전지와 수소차가 있다. 범위가 넓은 수소 활용부문의 특성상 단순히 연료전지 또는 수소차의 수출이 수소 활용부문의 수출 이점을 측정하기 위한 대표성 있는 품목이라고 단언하기 어렵다. 그러나 앞서 이전 이점에서 설명한 바와 같이 연료전지는 전력을 소비하는 다양한 부문에서 활용할 수 있으며, 수소 활용부문의 관련 설비 중 국제적으로 거래가 되고 있는 설비라는 점에서 연료전지 무역자료를 토대로 수출 이점을 측정하고자 했다. 연료전지의 무역자료는 OEC(The Observatory of Economic Complexity)의 무역통계를 활용하였으며, 전 세계 연료전지 수출량 대비 특정 국가의 연료전지 수출량으로 계산할 수 있는 ‘연료전지 수출 점유율’을 수출 이점 측정지표로 활용했다.

□ 규제 이점

다섯 번째, 수소 활용부문의 혁신 또한 생산 및 저장·운송부문과 유사한 메커니즘으로, 적절

37) *ibid.*

38) 과학기술정보통신부·한국에너지기술연구원(2021), 「(탄소중립 기술혁신 추진전략) 10대 핵심기술 개발 방향」

한 규제를 통해 혁신의 창출을 확대할 수 있기 때문에 규제 이점을 포함했다. 본 연구에서는 수소 활용부문의 규제 이점을 측정하기 위한 지표로 저공해차량 의무판매 규정의 존재 여부를 선택하였다.³⁹⁾ 저공해차량 의무판매 규정은 자동차 판매업자로 하여금 전체 판매량 중 정부가 정한 만큼의 비율을 전기차, 수소차 등 저공해차량으로 판매하도록 하는 규정인데,⁴⁰⁾ 그로부터 다음의 효과를 기대할 수 있기 때문이다. 첫째, 정부 및 지방자치단체가 주도하여 일정 비율의 저공해차량 판매를 의무화하는 것은 초기 단계에서 이들 차량의 입지가 시장경쟁 가운데 안정적으로 정착할 수 있도록 발판을 마련해줄 수 있다. 이와 함께 의무판매 비율이 저공해차량의 개발현황과 판매현황 등에 대한 종합적인 고려 아래에서 재조정되는 만큼, 중장기 단계에서 또한 마찬가지로 저공해차량은 자동차 시장에서 위와 같은 입지를 차지할 수 있을 것이라고 예상된다. 일례로, 무공해차량(Zero-emission Vehicle, ZEV) 의무판매 제도를 시행하고 있는 캘리포니아에서 의무판매 비율은 2018년 기준 4.5%에서 매년 2.5% 상승하고 있고 미국의 무공해자동차 40% 이상이 캘리포니아에서 판매되고 있는데 이는 무공해차량 의무판매 제도와 무공해차량 판매상승 간의 관련성을 보여준다고 할 수 있다(Hardman *et al.*, 2018).⁴¹⁾ 셋째, 저공해차량 의무판매 규정은 이들 차량에 대한 소비자의 자발적 구매를 이끌어낼 것으로 판단된다. 의무판매 규정이 저공해차량의 비용 효율적 도입(Roll-out)을 촉진하기 위하여 시장경쟁을 활용하는 만큼,⁴²⁾ 소비자는 비교적 저렴한 가격에 저공해차량을 구매할 수 있기 때문이다. 여기서 수소경제로의 진입에 따라 저공해차량에 대하여 제공되고 있는 여러 지원제도(가령, 소비세 및 취득세 감면, 고속도로 통행료 할인, 주차장 이용요금 할인 등)와 비교적 저렴한 연비는 저공해차량 구매를 보다 촉진할 것으로 판단된다.

□ 조달 이점

여섯 번째, 수소의 활용부문을 활성화하는 데 조달이 필요한 원자재 및 투입요소는 크게 설비 측면과 서비스 측면으로 나누어서 고려해 볼 수 있다. 수소 활용의 설비 측면에서 안정적인 조달이 필요한 원자재는 연료전지의 백금(Platinum)이 있다. 연료전지 설비는 수소와 산소의 화학반응을 촉진하기 위한 전극촉매가 필수적이며 주로 백금 촉매를 사용하고 있다(강석호·이창미·임동희, 2016)⁴³⁾. 백금은 희소금속(Rare Metal) 중 하나로, 지각 내 부존량이 적거나 추출이 어려우며(산업통상자원부, 2021)⁴⁴⁾, 이에 따라 일반적인 금속에 비하여 수급 불안정의 가능성이 크고 가격이 높게 형성되는 경향성을 가진다. 따라서 백금의 안정적인 조달은 연료전지의 지속적인 보급을 위해 필수적으로 요구된다. 수소를 활용한다는 서비스 측면에서 조달 이슈로 접근할 경우, 수소의 저장·운송부문과 같이 수소 활용 서비스를 이용하기 위한 수소가 필요하

39) 여기서 저공해차량이란 무공해차량을 포함한 것으로, 대표적으로 수소전기차, 전기자동차 그리고 하이브리드자동차 등이 있다.

40) 대한민국은 저공해차량 의무판매 규정과 함께 국가기관 등에 대한 저공해차량 의무구매 규정을 시행하고 있다. 저공해차량 의무구매 규정은 국가기관 등에게 일정 비율의 저공해차량 구입을 의무화하는 내용으로, 최근 환경부는 국가기관 등의 저공해자동차 구매·임차 의무비율을 현행 제1종 저공해자동차 80%에서 100%로 상향하는 내용의 개정안을 제안하였다.

41) Hardman S. *et al.*(2018), "Driving the Market for Plug-in Vehicles: Understanding ZEV Mandates", *Policy GUIDE* 참조.

42) Birkett E.(2020), "Route '35: How a California-style ZEV Mandate Can Deliver the Phase-out of Petrol and Diesel Cars", *Policy Exchange*, p.14.

43) 강석호·이창미·임동희, 「연료전지 산소환원반응 향상 위한 백금 촉매의 구조적 특성: 밀도범함수이론 연구」, 『대한환경공학회지』, 대한환경공학회, 38(5), pp.242-248.

44) 산업통상자원부 보도자료(2021), 「"희소금속 안심국가" 실현을 위한 「희소금속 산업 발전대책 2.0」 수립」

다. 수소의 활용은 수소를 사용하는 설비의 제작에서 그치는 것이 아니라, 실제 수소를 투입하여 활용 목적에 맞는 산출물을 획득하는 것으로, 수소 활용부문의 확산 및 활성화를 위하여 수소의 원활한 공급이 필수적이다.

본 연구의 선도시장 분석에서 새롭게 도입한 조달 이점은 각 부문의 공급안보적인 측면을 고려하기 위한 것이며, 상기 연료전지의 백금과 수소 모두 공급안보 측면에서 중요한 투입요소이다. 그러나, 조달이 필요한 투입요소의 범용성으로 판단할 때, 수소의 활용이라는 서비스를 제공하기 위하여 수소의 조달이 더 필수적이라고 사료된다. 또한, 대체 가능성 측면에서도 수소는 ‘수소경제’의 핵심으로 대체할 수 없는 것인데 반해, 연료전지 전극의 백금은 대체 가능성이 일부 존재하는 것으로 판단된다. 연료전지 분야에서는 연료전지의 가격 경쟁력을 확보하기 위하여 전극촉매에서 백금의 비중을 낮추거나 대체하기 위한 연구가 지속적으로 수행되어 오고 있으며, 연구의 수행성과와 실제 백금의 비중이 낮아진 전극을 포함한 연료전지의 상용화 사이에는 큰 간극이 존재하나, 가시적인 성과가 존재한다⁴⁵⁾. 상기와 같은 차이점을 고려하여, 본 연구는 수소 활용부문의 조달 이점을 측정하기 위해 현재 충분한 양의 수소를 조달할 수 있는지 여부를 중심으로 접근했으며, 수소 저장·운송부문과 동일하게 ‘현재 국내 수소생산량’을 지표로 활용하여 조달 이점을 측정했다.

□ 제외된 이점 요인

본 연구는 수소 활용부문에 대한 선도시장 분석에서 다른 부문과 동일하게 자료취득의 제약으로 인해 시장구조 이점을 이점 요인에서 제외했다. 수소 활용부문의 시장집중도를 산정하기 위하여 우선 활용부문을 관련시장(Relevant Market)별로 구분할 필요가 있으며, 활용부문의 설비를 기준으로 시장을 구분할 경우 크게 수소차, 연료전지, 가스터빈 등으로 구분할 수 있다. 이어서 시장집중도를 산정하기 위하여 각 관련시장에 참여하고 있는 기업의 시장점유율 계산이 요구되며, 이를 위해 각 관련시장에 포함되어 있는 기업의 관련상품(Relevant Goods) 생산(매출)실적 자료와 전체 관련시장 규모 자료가 필요하다. 그러나 기업의 세부적인 실적 정보가 공개되어 있지 않은 경우가 다수 존재하며, 추가적으로 연료전지의 경우 세부 기술별로 주 사용처가 다양하기 때문에 관련시장의 획정에 대한 논의가 필요하다. 수소차의 경우 판매대수를 활용하여 시장 점유율을 산정할 수 있을 것으로 판단되나, 소수의 수소차 생산업체가 존재하고 수소차 시장이 크게 성숙되지 않은 상황이므로, 한 국가의 허핀달-허쉬만 지수가 다른 국가에 비해 낮다고 하더라도⁴⁶⁾ 수소차 시장에 국가간 실질적인 경쟁도 차이가 존재한다고 해석하기 어려울 것으로 판단된다.

45) 한국의 기초과학연구원은 2019년 연료전지의 백금 촉매를 대체할 수 있는 비(非)귀금속 나노 촉매를 개발하여 원천기술을 확보한 바 있다(권예슬(2019), 「값비싼 백금 촉매, 구멍 송송 뚫린 나노 촉매로 대체」, 『ibs 기초과학연구원 Research News』, ibs 기초과학연구원, 1.10, 2022.10.21. 접속, https://www.ibs.re.kr/cop/bbs/BBSMSTR_000000000735/selectBoardArticle.do?nttId=16724).

46) 시장집중도를 측정하는 허핀달-허쉬만 지수는 지수의 값이 높을수록 시장이 집중되어 있다는 것을 나타낸다.

다. 분석결과의 정규화 및 종합

이상에서 설명한 수소경제 생태계의 가치사슬별 선도시장 접근법에 따르면, 각 가치사슬(생산, 저장·운송, 활용)의 선도시장 형성 잠재력은 5개 및 6개의 이점 요인으로 평가된다(〈표 2-5〉참고). 각 이점 요인의 측정지표는 고유의 단위를 가지고 있으므로, 특정 수소 부문 내에서 각 이점 요인의 절대적 수준을 상호 비교하기 어려우며 타 국가와 비교한 서수적 차원(해당 국가가 차지한 순위)에서의 비교만 가능하다. 또한, 측정지표의 고유 단위로 인해 각 부문의 종합적인 선도시장 형성 잠재력을 평가하기 어렵다.

〈표 2-5〉 수소 가치사슬별 이점 요인과 측정지표 종합

이점 요인	측정지표		
	생산부문	저장·운송부문	활용부문
가격 이점	그린수소 생산효율 (%)	수소액화플랜트 규모 (톤/일)	연료전지 발전단가 (원/kWh)
수요 이점	(1) 수소차 보급률 (대/100만 명) (2) 탄소 다배출 업종 비중 (%)	(1) 수소차 보급률 (대/100만 명) (2) 탄소 다배출 업종 비중 (%)	(1) 수소차 보급률 (대/100만 명) (2) 탄소 다배출 업종 비중 (%)
이전 이점	전체 그린수소 특허 중 해당 국가의 특허 비중 (%)	전체 수소 저장·공급·활용 특허 중 해당 국가의 특허 비중 (%)	전체 연료전지 특허 중 해당 국가의 특허 비중 (%)
수출 이점	-	-	연료전지 수출 점유율 (%)
규제 이점	청정수소 범위 법제화 여부 (Y/N)	수소의 저장 및 운송 관련 기준 법제화 여부 (Y/N)	저공해차량 의무판매 규정 존재 여부 (Y/N)
시장구조 이점	-	-	-
조달 이점	총 발전량 대비 재생에너지 발전량 비중 (%)	국내 수소 생산량 (백만 톤)	국내 수소 생산량 (백만 톤)

자료: 저자 작성

상기와 같은 한계점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 각 측정지표를 0점 이상 100점 이하의 점수로 표현될 수 있도록 정규화(Normalization)하였다. 측정지표의 정규화는 크게 이론적 정규

화와 샘플 내 측정지표의 최소-최댓값을 활용한 최소최대(Min-Max) 정규화로 구분할 수 있다. 이론적 정규화는 측정지표에 이론적인 최댓값이 존재할 경우, 최댓값을 100점으로 설정하고 최댓값을 기준으로 상대적인 점수를 매기는 방법이다. 반면 최소최대 정규화는 정규화 대상인 측정지표들 중 최댓값을 가지는 지표에 100점을 부여하고 최솟값을 가지는 지표에 0점을 부여하는 방식이다⁴⁷⁾.

예컨대, A라는 측정지표가 이론적으로 최대 80의 값만 가질 수 있는 경우, 최댓값 80을 100점으로 설정하고 최댓값을 기준으로 상대적인 점수를 매기는 방법이 타당할 수 있다. 만약 이론적 최댓값(80)이 존재하는데도 불구하고, 정규화 대상인 측정지표의 최댓값(예컨대, 50)을 기준으로 최소최대 정규화를 적용할 경우 이론적으로 프론티어에 존재하지 않음에도 100점을 부여받게 된다는 한계점이 있다.

본 연구에서 선정한 이점 요인 측정지표 중, 그린수소 생산효율, 총 발전량 대비 재생에너지 발전량, 청정수소 범위 법제화 여부 등 규제 이점의 측정지표는 이론적 정규화를 적용할 수 있다. Bruce *et al.*(2018)에 따르면 1kg의 수소를 생산하는 데 열역학적으로 최소 40kWh의 전력이 소비되므로⁴⁸⁾, 수소의 저위발열량(Lower Heating Value, LHV) 약 33.34kWh/kg-H₂을 기준으로 그린수소 생산효율은 약 83.35%의 이론적 수치를 가진다. 또한, 총 발전량 대비 재생에너지 발전량의 비중은 최대 100%를 초과할 수 없으며, 규제 이점의 측정지표는 존재의 여부를 측정하기 때문에 ‘존재한다’와 ‘존재하지 않는다’의 바이너리(Binary) 값을 가지게 된다. 따라서 이들 측정지표에 대해서는 이론적 정규화 방법을 적용하여 최소 0점부터 최대 100점의 값을 가질 수 있도록 정규화하였다⁴⁹⁾.

상기의 측정지표를 제외한 나머지 측정지표에 대해서는 최소최대 정규화 방법을 적용하였다. 단, 이전 이점을 측정하는 특허수의 비중이나, 탄소 다배출 업종의 비중, 연료전지 수출 점유율은 이론적으로 100%를 초과할 수 없으므로 이론적 정규화 방법을 적용할 수 있다. 그러나, 현실적으로 기술경쟁이 심화되고 있는 현 상황에서 한 나라가 특정 부문의 특허를 독점하는 상황을 상정하기 어려우며, 탄소 다배출 업종으로만 구성된 경제구조를 상정하기 어렵다. 또한, 지역별 매장량 편중이 심한 자원과 달리 제조업의 산출물 역시 특정 국가가 모든 수출을 점유하는 상황을 상정하기 어렵다. 따라서 세 측정지표는 이론적으로 100%를 초과할 수는 없으나 최소최대 정규화 방법을 적용하였다.

최소최대 정규화 방법을 적용한 값의 해석상 유의해야 할 점이 존재한다. 유의해야 할 점은 최소최대 정규화 방법을 통해 도출된 점수는 본 연구의 분석대상 국가 8개국 내에서의 상대적

47) (정규화 대상 값 - 최솟값) / (최댓값 - 최솟값) × 100으로 계산할 수 있으며, 정규화 대상 값이 측정지표 중 가장 높은 값(최댓값)일 경우 100으로 계산되고 가장 낮은 값(최솟값)일 경우 0으로 계산된다. 단, 연료전지 발전단가는 낮을수록 가격 이점이 큰 것이므로, [1 - (정규화 대상 값 - 최솟값) / (최댓값 - 최솟값)] × 100으로 계산할 수 있다.

48) Bruce S. *et al.*(2018), *National Hydrogen Roadmap*, CSIRO 참조.

49) 단, 총 발전량 대비 재생에너지 발전량은 단위가 백분율(%)이므로 측정지표의 값과 정규화된 값이 일치한다고 할 수 있으며, 규제 이점 측정지표 역시 존재한다에 1을 부여하고 존재하지 않는다에 0을 부여할 경우 결과적으로 정규화 값과 일치한다.

인 점수로, 이점 요인의 절대적인 수준이 아니라는 것이다. 따라서 최소최대 정규화 방법으로 정규화된 측정지표가 0일 경우 해당 요인에 대해 전 세계에서 가장 낮은 잠재력을 가지고 있다고 해석할 수 없으며, 반대로 정규화된 값이 100이라고 하더라도 가장 높은 잠재력을 가지고 있다고 해석할 수 없다.

측정지표의 정규화에 이어 수소경제의 각 가치사슬 부문별 종합점수와 가치사슬 전체의 종합점수를 산정했다. 종합점수를 산정하기 위하여 각 이점 요인의 중요도와 각 부문별 중요도를 가치판단이나 이론적 검토, 계층화 분석기법(Analytical Hierarchy Process, AHP)을 통해 평가하여 가중치를 산정할 필요가 있다. 그러나 본 연구는 수소경제의 각 가치사슬 부문별 선도시장 형성의 잠재력을 판단하기 위한 초기 단계의 연구이자, 중요도를 판단하는 데 있어 배경 지식이 될 수 있는 구축사례가 존재하지 않는 수소경제에 대한 분석이므로, 모든 이점 요인과 부문이 동일한 중요도를 가진다는 가정하에 동일한 가중치를 부여하여(산술평균) 부문별 종합점수와 가치사슬 전체의 종합점수를 산정했다.

본 연구는 이상의 선도시장 분석과 함께, 한국의 지향점과 효과적인 정책방안을 도출하기 위해 국내 수소 분야의 산·학·연 전문가 25인으로 구성된 전문가 자문단을 운영하였다. 전문가 자문단은 수소 생산(10인), 저장·운송(10인), 활용(5인)의 분과별로 운영하였으며, 선도시장 분석 결과에 기반하여 ① 한국이 수소 각 부문을 선도하기 위하여 각 이점 요인별 목표로 해야 할 지향점과 ② 현재의 주요 장애요인 및 이슈, ③ 장애요인 및 이슈를 해결하기 위한 방안에 대하여 설문을 진행했다⁵⁰⁾. 전문가 자문단 운영을 통해 도출할 수 있었던 ① 지향점은 제2장 제2절에서 각 부문의 진단 결과와 함께 논의하였다. 본 지향점은 분석대상 국가별 이점 요인 측정 결과를 바탕으로 전문가 자문단이 제시한 우리나라의 지향점으로, 우리나라가 목표로 해야 할 성과지표이자, 현재 국내 이점 요인 수준과의 차이(Gap)로부터 수소경제 선도를 위해 요구되는 정책의 강도를 보여줄 수 있다. ② 장애요인 및 이슈와 ③ 해결방안에 대해 수렴된 전문가 의견은 종합적으로 검토·비교한 후, 추가적인 사례조사와 주요국의 수소 관련 정책 등을 검토하고 일부 벤치마킹하여, 국내 수소 산업 관련 주요 이슈 및 현안(제2장 제3절)과 국내 수소경제 활성화 방안(제2장 제4절)을 도출하였다.

50) 각 부문별 설문의 내용은 [별첨 3, 4, 5]와 같다.

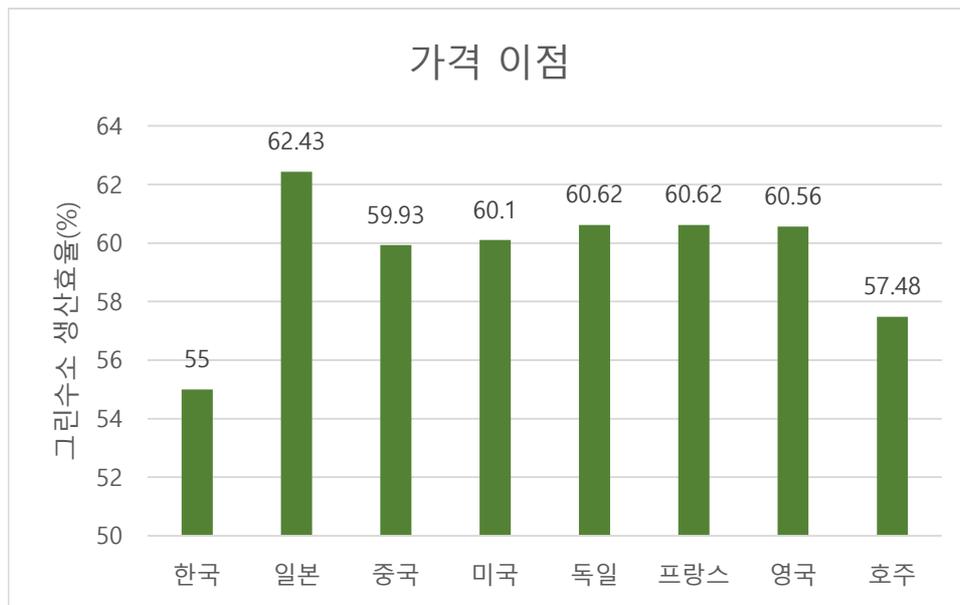
제 2 절 선도시장 접근법을 활용한 국내 수소 산업 진단

1. 수소 생산부문 진단

가. 가격 이점

수소 생산부문의 가격 이점을 측정하기 위한 지표는 그린수소 생산효율이며, 분석대상 국가별 그린수소 생산효율은 [그림 2-1]과 같다. 관계부처합동(2021)에 따르면 한국의 수전해 효율은 저위발열량(LHV)를 기준으로 55% 수준⁵¹⁾인 것으로 알려져 있다. 이에 비하여 일본을 비롯한 선진국들은 약 60% 내외의 효율 수준을 가지고 있으며, 수소 생산부문의 선도시장 형성에 있어서 한국과 비교하여 높은 가격 이점을 가지고 있는 것으로 판단된다. 한국의 그린수소 생산효율에 대해서, 본 연구의 전문가 자문단은 평균적으로 2050년까지 74%의 효율을 달성해야 한다고 응답했다. 이는 「제1차 수소경제 이행 기본계획」에서 제시한 목표 77%보다 소폭 작은 수치로, 현재 국내 효율 수준보다 약 19%p 개선되어야 하는 수준이며, 주요 선진국을 기준으로도 약 14%p 개선되어야 하는 수준이다.

[그림 2-1] 수소 생산부문의 가격 이점



자료: 관계부처합동(2021), 경제산업성(2020), Energy Iceberg(2020), US DOE(2020), Clean Hydrogen Partnership(2022), BEIS(2021), Bruce *et al.*(2018)을 바탕으로 저자 작성

가장 큰 가격 이점이 있는 것으로 판단되는 일본의 경우, 일본 경제산업성(2020)에 따르면 고분자전해질(Polymer Electrolyte Membrane, PEM) 수전해장치(시스템) 에너지소비량 실증치는 4.6kWh/Nm³ ~ 4.8kWh/Nm³ 수준으로, 실증치 중 최댓값 4.8kWh/Nm³을 적용하여 저위발열량

51) 관계부처 합동(2021), 「제1차 수소경제 이행 기본계획」

기준 효율을 계산할 경우 약 62.43%이다⁵²⁾. 중국의 경우 PEM의 에너지 비용이 3.8kWh/Nm³ ~ 5.0kWh/Nm³의 범위를 가지는데(Energy Iceberg, 2020)⁵³⁾ 가장 높은 에너지 비용 5.0kWh/Nm³을 적용할 경우 약 59.93%의 효율을 달성한 것으로 판단된다. 중국 역시 그린수소 생산효율이 50%대이나, 한국과 효율수준의 차이가 약 5%p로 그 차이가 크며, 60%에 근접한 효율을 달성하였다.

미국, 유럽의 그린수소 생산효율은 60% 이상의 효율을 가지고 있어 전반적으로 가격 이점이 높았으나, 호주는 가격 이점이 상대적으로 높지 않은 것으로 나타났다. 미국의 그린수소 생산효율은 약 60.1%로 계산되었는데, 이는 Peterson *et al.*(2020)⁵⁴⁾이 미국의 PEM 수전해 설비 기반 수소생산 비용을 계산하는 데 활용된 투입변수(총 전력사용 효율)를 바탕으로 계산한 결과이다. 독일과 프랑스에 대해서는 별도의 구분된 자료 대신 EU의 자료를 동일하게 적용하였으며, Clean Hydrogen Partnership(2022)이 정리한 2020년 당시 최신의 PEM 수전해설비의 수소 생산효율(55kWh/kg-H₂)⁵⁵⁾을 바탕으로 계산할 경우 약 60.62%의 효율을 가지고 있는 것으로 판단된다. 영국은 독일 및 프랑스보다 소폭 작은 60.56%의 그린수소 생산효율을 가지고 있으며, 미국과 유사하게 수소 생산비용을 추정하기 위해 사용된 투입변수(전력 전환 효율)를 활용하여 계산했다. 영국 기업에너지산업전략부에 따르면 PEM 수전해설비의 전력 전환 효율은 1.4kWh_e/kWh-H₂이며(medium 기준)(BEIS, 20210)⁵⁶⁾, 고위발열량(Higher Heating Value, HHV)을 기준으로 작성된 위 효율을 저위발열량으로 변환하여 활용했다. 호주는 Bruce *et al.*(2018)이 제시한 현재 수전해 설비의 효율 54kWh/kg-H₂ ~ 58kWh/kg-H₂ 중 최댓값을 활용하여 계산하였으며, 그 효율은 약 57.5% 수준으로 한국 다음으로 효율이 낮았다.

나. 수요 이점

수소 생산부문의 수요 이점은 앞서 설명한 바와 같이 수소차 보급률과 탄소 다배출 업종의 비중 두 개의 지표로 측정했다. 먼저 단기적으로 빠르게 수소 생산에 대한 수요를 발생시킬 수 있는 수소차 보급률은 Samsun *et al.*(2021)⁵⁷⁾이 정리한 2020년 말 기준 각 나라에 보급되어 있는 연료전지차 수 자료와 OECD의 인구통계⁵⁸⁾를 활용하여 계산하였으며, 그 결과는 [그림 2-2]와 같다. 수소차 보급률을 기준으로 수소 생산부문의 수요 이점을 진단할 경우, 그동안 정책적으로 수소차 보급정책을 시행해 온 한국이 인구 100만 명 당 약 195대의 수소차가 보급되어 있어 가장

52) 經濟産業省(2020), 「水素・燃料電池戦略ロードマップの達成に向けた対応状況」

53) Yuki(2020), “2019 China Hydrogen Market Review: Investment & Production”, *Energy Iceberg*, 2.12, 2022.10.21. 접속, <https://energyiceberg.com/china-hydrogen-market-2019/>

54) Peterson D., Vickers, J., and DeSantis D.(2020), “DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record 19009: Hydrogen Production Cost from PEM Electrolysis-2019”, *DOE* 참조.

55) Clean Hydrogen Partnership(2022), *Clean Hydrogen Joint Undertaking: Strategic Research and Innovation Agenda 2021-2027*, Clean Hydrogen Partnership.

56) BEIS(2021e), *Hydrogen Production Costs 2021 Annex: Key Assumptions and Outputs for Production Technologies*, BEIS 참조.

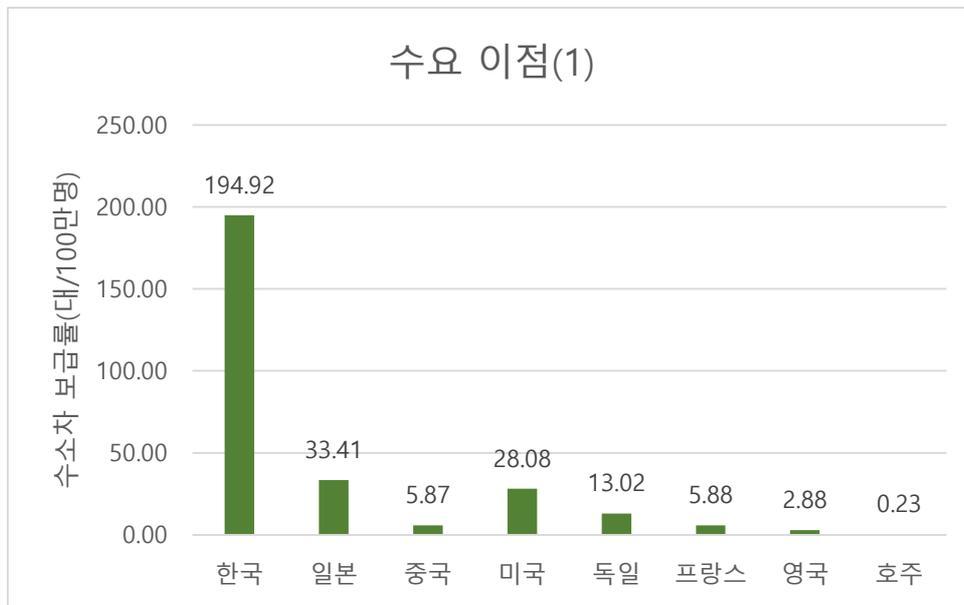
57) Samsun R. *et al.*(2021), *Deployment Status of Fuel Cells in Road Transport: 2021 Update*, Forschungszentrum Jülich GmbH.

58) OECD, “OECE Statistics”, *OECD.Stat*, <https://stats.oecd.org>, 2022.10.21. 접속.

수요 이점이 큰 것으로 나타났다. 수소차의 보급과 관련하여 본 연구의 전문가 자문단은 2050년 까지 약 27.0% 수소차가 보급되어야 한다고 응답했다⁵⁹⁾. 이는 2021년 자동차 등록대수 2,500만 대⁶⁰⁾를 기준으로 약 675만 대의 수소차가 보급되었을 때 달성할 수 있는 수치이며, 약 1만 대가 보급되어 있는 현재에 비해 675배에 해당하는 수치이다.

한국 다음으로 수소차 보급률이 높은 국가는 일본과 미국으로, 일본은 인구 100만 명 당 약 33대가 보급되어 있으며 미국은 인구 100만 명 당 약 28대가 보급되어 있다. 일본과 미국은 한국 다음으로 수소차 보급률이 높고, 다음으로 수소차 보급률이 높은 독일에 비하여 2배 이상 큰 보급률을 기록하고 있으나, 한국의 수소차 보급률이 약 6~7배 더 높아 상대적으로 수요 이점의 수준에 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 일본과 미국에 이어서 다음으로 독일(13.02대/100만 명), 프랑스(5.88대/100만 명), 중국(5.87대/100만 명), 영국(2.88대/100만 명) 순서로 수소차 보급률이 큰 것으로 나타났으며, 호주의 경우 수소차 보급률이 인구 100만 명 당 0.23대로 가장 수요 이점이 낮은 것으로 평가되었다. 중국의 경우 수소차 보급대수의 규모 측면에서는 8,443대로 한국 10,093대에 이어서 2위였으나 인구에 의해 실질적인 보급률은 낮게 측정되었다.

[그림 2-2] 수소 생산부문의 수요 이점: 수소차 보급률



자료: Samsun *et al.*(2021) 및 OECD Statistics를 바탕으로 저자 작성

다음으로, 장기적으로 대규모의 수요를 발생시킬 수 있는 탄소 다배출 업종이 국가 경제에서 차지하는 비중을 활용하여 수요 이점을 판단하였다. 탄소 다배출 업종이 국가 경제에서 차지하는 비중은 총부가가치 대비 탄소 다배출 업종의 부가가치 비중으로 계산하였으며, OECD 통계의 산업연관표(2018년 기준)를 활용했다⁶¹⁾. 탄소 다배출 업종은 석유화학, 시멘트 철강업종과

59) 단 본 응답의 경우 표준편차가 약 17.4%p로 전문가 의견의 차이가 다소 컸다.

60) KOSIS 국가통계포털, 국가통계포털 1인당 자동차 등록대수,

https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1YL20731, 2022.10.25. 접속.

연계될 수 있도록, OECD 산업연관표 상에서 코크스 및 석유정제품 제조업(Coke and Refined Petroleum Products), 화학 물질 및 화학제품 제조업(Chemical and Chemical Products), 기타 비금속 광물제품 제조업(Other Non-metallic Mineral Products), 1차 금속 제조업(Basic Metals)을 선정했다.

[그림 2-3]과 같이 한국을 비롯한 중국, 일본의 동아시아 3개국은 다른 국가에 비해 국가경제에서 탄소 다배출 업종이 차지하는 비중이 상대적으로 높아, 제조업 분야에서 대규모의 수소 수요 창출 측면에서 이점이 높은 것으로 나타났다. 동아시아 3개국 중 탄소 다배출 업종의 비중이 가장 높은 국가는 중국으로 국가경제 중 9.72%가 탄소 다배출 업종에 해당하여 수요 이점이 가장 높은 것으로 판단되며, 이어서 한국(5.64%)과 일본(4.12%) 순서로 탄소 다배출 업종의 비중이 높았다.

동아시아 3개국 대비 미국 등 5개국의 탄소 다배출 업종의 비중은 낮았으며, 장기적으로 제조업 분야에서 대규모의 수소 수요를 창출할 수 있는 이점은 한국, 중국, 일본보다 낮은 것으로 나타났다. 해당 국가 중 독일이 3.05%로 탄소 다배출 업종의 비중이 가장 높았으며, 독일 다음으로 미국(2.66%), 프랑스(1.86%), 호주(1.29%), 영국(1.26%) 순서로 국가 경제에서 탄소 다배출 업종이 큰 비중을 차지하고 있었다.

[그림 2-3] 수소 생산부문의 수요 이점: 탄소 다배출 업종 비중



자료: OECD Statistics를 바탕으로 저자 작성

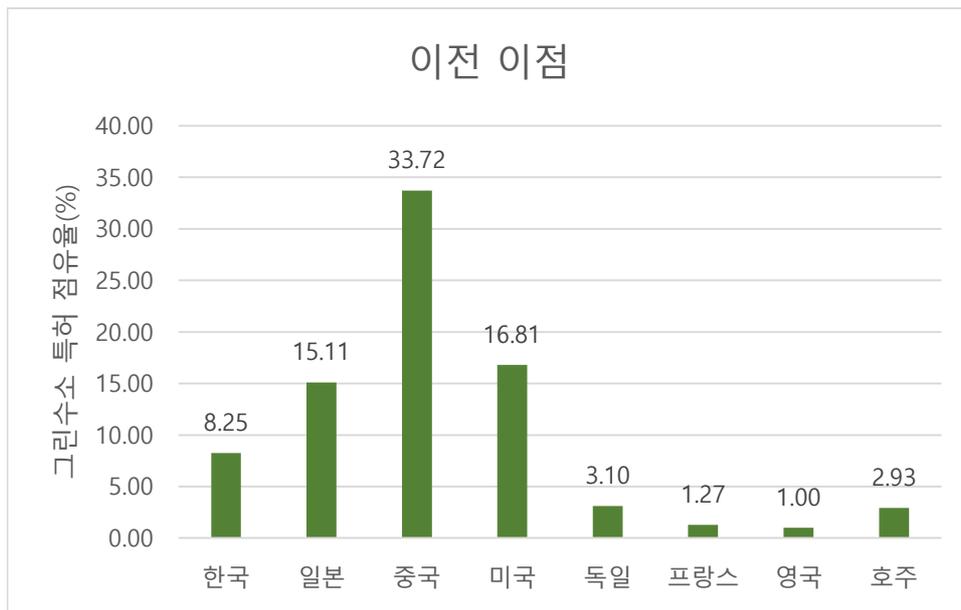
61) 국민계정의 다른 통계자료를 활용하여 각 국가별 탄소 다배출 업종의 비중을 계산할 수 있으나 중국에 대해서는 다른 분석 대상 국가와 산업분류 등에서 일관성 있는 자료를 취득하기 어려웠으며, 이에 따라 중국에 대한 통계도 제공하고 있는 OECD가 산업연관표를 활용했다.

다. 이전 이점

수소 생산부문의 이전 이점은 전체 그린수소(수전해) 특허 중 각 국가가 차지하는 비중으로 측정하였으며, 제2장 제1절에서 언급한 바와 같이 IRENA의 특허 통계를 활용하였다. 전체 그린수소(수전해) 특허와 분석대상 8개국의 특허에 대해서 2000년부터 2019년 총 20년간의 누적 특허수를 계산하여 점유율을 분석하였으며 그 결과는 [그림 2-4]와 같다. 전체 그린수소 특허 중 분석대상 8개국이 차지하고 있는 비중은 총 82%로 본 연구의 분석대상 국가가 전세계 그린수소 특허의 절대 다수를 차지하고 있다고 할 수 있다. 그린수소 특허 중 가장 높은 비중을 차지하고 있는 국가는 중국으로 전체 그린수소 특허 중 33.72%를 차지하고 있다. 이는 전체 특허의 약 3분의 1에 해당하는 규모이며, 분석대상 국가 중 가장 이전 이점이 높은 것으로 분석되었다.

미국과 일본의 경우 전체 그린수소 특허 중 각각 16.81% 및 15.11%를 차지하고 있어, 중국 다음으로 이전 이점이 높은 것으로 분석되었으나, 중국에 비하여 그린수소 특허 점유율이 절반 수준으로 그 차이가 크다. 한국의 그린수소 특허 점유율은 8.25%로 분석대상 국가 중 4위를 차지하였으며, 분석대상 국가 중 중간 순위의 이전 이점을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 한국의 그린수소 특허 점유율은 비록 미국과 일본의 특허 점유율에 비해 절반 정도의 수준이지만, 한국 하위의 독일, 프랑스, 영국, 호주보다 2배를 초과하는 특허를 점유하고 있다. 한국에 이어 독일(3.10%), 호주(2.93%), 프랑스(1.27%), 영국(1.00%) 순서로 그린수소 특허를 점유하고 있었으며, 상위 4개국에 비하여 이전 이점이 낮은 것으로 판단된다. 본 연구의 전문가 자문단은 한국의 그린수소 특허가 2050년까지 약 22.2%의 점유율을 달성하는 것을 목표로 할 필요가 있다고 응답했는데, 이는 현재 일본과 미국의 점유율을 상회하며, 현재 한국의 그린수소 특허 점유율의 약 2.7배에 해당한다.

[그림 2-4] 수소 생산부문의 이전 이점



자료: IRENA Statistics를 바탕으로 저자 작성

라. 규제 이점

수소 생산부문의 규제 이점은 분석 국가 내에 청정수소의 범위가 법제화 되어있는지 여부를 판단하여 측정했으며, 그 결과는 [그림 2-5]와 같다. 본 연구의 분석결과에 의하면 분석대상 8개국 중 절반에 해당하는 국가는 청정수소의 범위가 법제화되어 있어(한국, 미국, 독일, 프랑스) 그린수소 생산부문의 혁신과 투자를 촉진시키는 이점으로 작용할 것으로 판단된다. 그러나 청정수소에 대한 범위를 법제화하지 않은 것으로 조사된 일본, 중국, 영국, 호주의 경우 규제 이점이 법적으로 정의된 국가에 비하여 규제 이점이 상대적으로 미약할 것으로 판단된다.

한국은 세계 최초로 제정된 수소법에 수소의 생산·수입 등의 과정에서 발생하는 온실가스를 기준으로 하여 청정수소를 다음의 세 가지로 분류 및 정의하고 있다. 첫째는 수소의 생산·수입 등의 과정에서 온실가스를 배출하지 않는 무탄소수소이다. 둘째는 수소의 생산·수입 등의 과정에서 온실가스를 일정 기준 이하로 배출하는 저탄소수소이다. 셋째는 저탄소수소화합물이다(제2조7의2). 국내 청정수소의 온실가스 배출 기준과 관련하여 본 연구의 전문가 자문단은 국제기준⁶²⁾과 유사하게 설정할 필요가 있다고 의견을 모았으나, 청정수소 인증제 도입 시의 혼란을 최소화하고 수소 공급·수요처를 유지하기 위해 단계별로 배출 기준을 강화할 필요가 있다는 의견을 제시하였다.

[그림 2-5] 수소 생산부문의 규제 이점



자료: 수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률, Energy Policy Act of 2005, Erneuerbare-Energien-Gesetz 2021, Code de l'énergie을 바탕으로 저자 작성

62) 예컨대 EU의 경우 천연가스 추출수소 생산의 이산화탄소 배출량 $91g_{-eq}/MJ_{H_2}$ 을 기준으로 이산화탄소를 60% 이상 감축할 수 있는 수소부터 저탄소 프리미엄 수소라고 인증한다.

미국의 경우 비교적 최근인 2021년 11월 5일에 대략 1조 2,000억 달러 규모의 ‘인프라 투자 및 일자리법’ (Infrastructure Investment and Jobs Act)이 통과되었는데, 여기서는 청정수소를 수소 1kg 생산 시 배출되는 온실가스가 이산화탄소 환산량으로 2kg 이하인 수소로 정의하고 있다(42 U.S. Code § 16166).⁶³⁾ 독일의 경우 재생에너지법(Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG)은 생산 목적과 관계 없이 녹색수소를 생산하는데 사용되는 전기의 재생에너지부담금을 면제하고 있다. 여기서 녹색수소로 인정되기 위해서는 ‘재생에너지법과 해상풍력에너지법 시행에 관한 규칙’ (Erneuerbare-Energien-Verordnung, EEG)에 의하여 녹색수소 생산공장에서 연중 첫 5,000 전부하시간 안에서 전기화학적으로 생산되어야 하며, 그 전기는 다음의 기준을 충족하여야 한다. 첫째로는 재생에너지법 제3조 제21호의 범위 안에 있는 재생에너지 생산공장에서 생산된 전기이어야 한다. 둘째로는 재생에너지법이나 열병합발전법(CHP Act)의 어떠한 지원도 받지 않아야 한다. 셋째로는 적어도 80%의 전기가 독일 입찰지역(Bidding Zone) 내 재생 가능한 에너지 생산공장에서 생성되거나 독일 입찰지역과 전기적으로 연결된 입찰지역에 위한 공장들에서 20%까지 생성되어야 한다.

프랑스의 경우 청정수소는 에너지법(Code de l'énergie) 제811-1조에 의하여 다음의 세 가지로 분류된다. 첫째로는 재생 가능한 수소로, 이는 재생 가능한 에너지원에 의하여 생산된 전기를 사용하여 생산되거나 하나 이상의 재생 가능한 에너지원을 전적으로 사용한 기술에 의하여 생산된 수소로, 생산과정에서 이산화탄소의 양이 부령(Ministerial Order)에 따라 설정된 한계점 이하로 방출된 것을 말한다. 둘째로는 저탄소 수소로, 재생 가능한 수소로 인정되기 위하여 요구되는 양의 이산화탄소를 방출하여야 하나, 재생 가능한 에너지원을 사용함으로써 생산되는 것이 필요하지 않은 수소이다. 셋째로는 탄소질 수소로, 재생 가능한 수소도 저탄소 수소도 아닌 수소이다.

라. 조달 이점

그린수소 생산을 위한 재생에너지 전력의 조달 가능성에 초점을 맞추어 각 국가별 총 발전량 대비 재생에너지 발전량 비중으로 조달 이점을 측정하였다. 총 발전량 대비 재생에너지 발전량 비중은 IRENA에서 제공하고 있는 각 국가별 발전량과 재생에너지 발전량 통계자료를 활용했으며, 2019년을 기준으로 독립형(off-grid) 발전량도 포함하여 측정했다. 각 국가별 총 발전량 대비 재생에너지 발전량의 비중은 [그림 2-6]과 같으며, 재생에너지 발전 비중이 30%를 초과한 국가(독일, 영국)가 존재하는 반면, 한국은 5% 미만을 기록한 것으로 나타났다. 한국은 분석대상 8개 국가 중 재생에너지 발전 비중이 가장 낮은 국가로, 재생에너지 발전 비중이 낮은 만큼 (그린)수소 생산에 있어서 조달 이점이 가장 열악한 국가로 분석되었다. 특히, 분석대상 국가 중 한국 다음으로 조달 이점이 낮은 국가는 미국이지만 재생에너지 발전 비중이 17.47%로 한국에 비해 약 4배 정도 높은 발전 비중을 기록하여 조달 이점 간의 차이가 큰 것으로 분석되었다. 그린수소 생산을 위해 재생에너지 전력의 공급은 필수적인바, 본 연구의 전문가 자문단도 재생에너지 발전량 비중을 높일 필요가 있다고 응답했다. 전문가 자문단은 2050년까지 달성해야 하는 실현 가능한 재생에너지 발전량 비중은 평균적으로 47.5%⁶⁴⁾라고 응답했으며, 이는 현재의 약

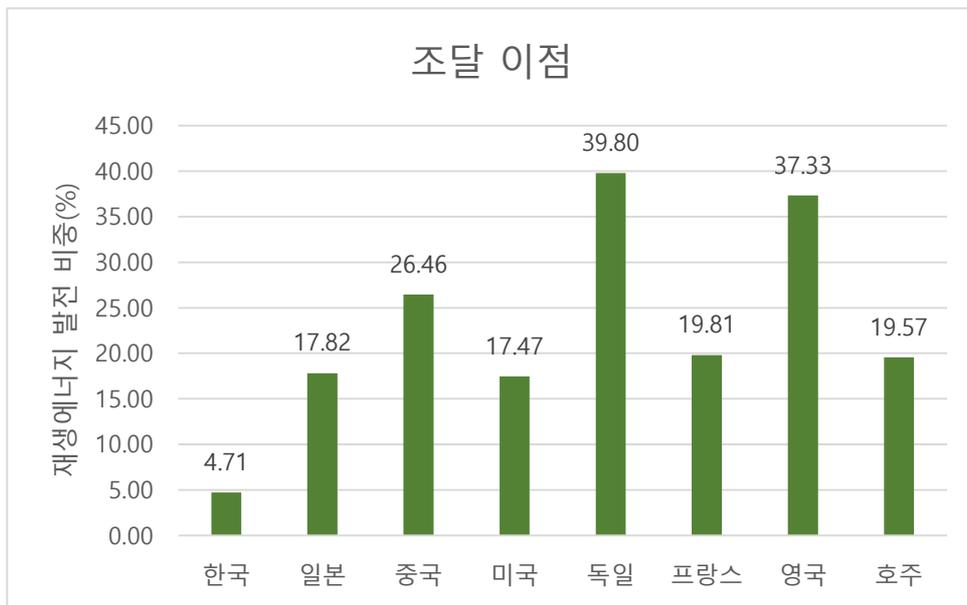
63) 박찬오(2022), 「미국의 원자력 수소 개발 동향과 시사점」, 『세계 원전시장 인사이트』, 에너지경제연구원, p.7.

64) 단, 실현 가능한 재생에너지 발전량 비중은 전문가 응답 간 편차가 컸으며 최소 20%에서 최대 70%의 범위를 보였다.

10배에 해당하는 비중으로 신속한 재생에너지 발전 확대가 요구됨을 의미한다.

그린수소 생산의 조달 이점은 독일이 가장 높은 것으로 분석되었으며, 영국 또한 독일에 버금가는 조달 이점을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 독일의 총발전량 대비 재생에너지 발전량의 비중은 39.80%로 약 40% 수준이며, 영국은 37.33%를 기록하였다. IRENA 통계에 따르면 2019년 기준 독일과 영국에서 가장 많은 발전량을 기록한 재생에너지는 풍력발전으로, 재생에너지 발전량 중 각각 52% 및 53%를 차지하며 두 국가의 재생에너지 발전량을 견인했다. 영국과 독일에 이어 중국의 재생에너지 발전량 비중이 26.46%로 세 번째로 조달 이점이 높은 것으로 나타났으며, 프랑스(19.81%), 호주(19.57%), 일본(17.82%), 미국(17.47%)은 약 18% 내외의 재생에너지 발전량 비중을 가지고 있어 비슷한 수준의 조달 이점을 가지고 있는 것으로 분석되었다.

[그림 2-6] 수소 생산부문의 조달 이점



자료: IRENA Statistics를 바탕으로 저자 작성

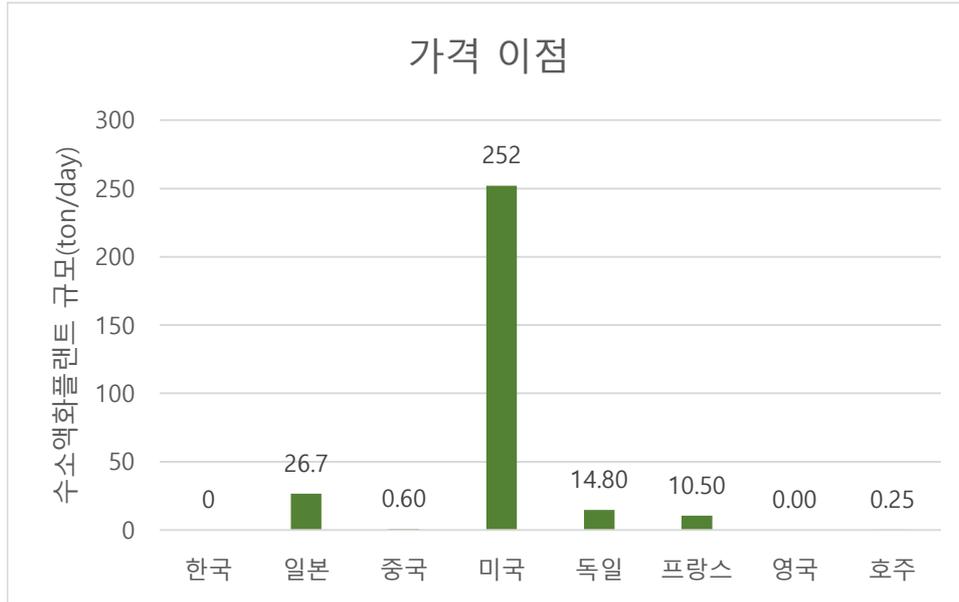
2. 수소 저장·운송부문 진단

가. 가격 이점

수소 액화플랜트 규모를 활용하여 수소 저장·운송부문의 가격 이점을 측정한 결과는 [그림 2-7]과 같다. 분석대상 국가 8개국 중 현재 운영 중인 수소 액화플랜트가 존재하지 않는 한국과 영국은 가장 낮은 가격 이점을 가지는 것으로 분석되었다. 가장 큰 규모의 수소 액화플랜트를 보유한 국가는 미국이며 수소 저장·운송부문에서 가장 높은 가격 이점을 가지고 있는 것으로 분석되었다. Verfondern *et al.*(2021)에 따르면 미국 내에서 운영 중인 수소 액화플랜트는 온타리오(20톤/일), 나이아가라폴스(38톤/일), 새크라멘토(5톤/일), 페이스(29톤/일), 매킨토시(24톤/일), 이스트시카고(30톤/일)에 위치하고 있으며, 2021년 운영 예정인 카슨(10톤/일)과 라 포르테(28톤/일)의 액화플랜

트를 포함할 경우 미국의 수소 액화플랜트 규모는 하루에 252톤의 액화수소를 생산할 수 있는 규모이다⁶⁵⁾.

[그림 2-7] 수소 저장·운송부문의 가격 이점



자료: Verfondern *et al.*(2021) 및 IEA(2022)를 바탕으로 저자 작성

미국에 이어 두 번째로 가격 이점이 높은 일본의 경우 하루에 총 26.7톤의 액화수소를 생산할 수 있는 규모의 액화플랜트를 운영 중이며, 오이타(1.9톤/일), 키미즈(0.2톤/일), 사카이(10.2톤/일), 이치하라(5.1톤/일), 슈난(5.1톤/일), 하리마(4.2톤/일)에 위치하고 있다(Verfondern *et al.*, 2021). 일본의 수소 액화플랜트 규모는 분석대상 국가 중 2위이나 미국에 비해 약 10분의 1 규모이며 가격 이점의 수준에 큰 차이가 있는 것으로 분석되었다.

독일과 프랑스는 각각 세 번째 및 네 번째로 가격 이점이 높은 국가인 것으로 분석되었다. 독일은 잉골슈타트(Ingolstadt)와 로이나(Leuna)에 각각 4.5톤/일 및 10.3톤/일⁶⁶⁾ 규모의 수소 액화플랜트를 운영하고 있어 하루에 총 14.8톤의 액화수소를 생산할 수 있는 규모이다. 프랑스는 와지어/릴(Waziers/Lille)에 10.5톤/일의 수소 액화플랜트를 운영하고 있다. Verfondern *et al.*(2021)에 따르면 중국의 경우 베이징에 1995년에 상업적 운영이 시작된 0.6톤/일 규모의 수소 액화플랜트가 존재한다. 호주는 일본과 함께 HESC(Hydrogen Energy Supply Chain) 프로젝트를 진행하며 최근 헤이스팅스(Hastings)에 0.25톤/일 규모의 실증 수소 액화플랜트를 확보한 바 있다(IEA, 2022)⁶⁷⁾.

65) Verfondern K. *et al.*(2021), *Handbook of Hydrogen Safety: Chapter on LH2 Safety(ver: 4.0)*, PRES-LHY 참조.

66) Verfondern *et al.*(2021)의 정리에 따라 기존에 운영 중이던 5.3톤/일의 액화플랜트와 2021년 운영 예정인 두 번째 액화플랜트의 규모를 합한 값이다.

67) IEA(2022), *Global Hydrogen Review 2022*, IEA Publication 참조.

나. 수요 이점⁶⁸⁾

수소 저장·운송부문의 수요 이점은 단기적인 수요로 수소차 보급률과 장기적인 수요로 국가 경제에서 탄소 다배출 업종이 차지하는 비중을 측정지표로 활용했다. 수소차 보급률로 수요 이점을 측정했을 때, 현재 한국이 가장 널리 수소차가 보급되어 있으며 이에 따라 가장 수요 이점이 높은 것으로 분석되었다([그림 2-8] 참고). 장기적으로 강한 수소 수요를 가질 것으로 예상되는 탄소 다배출 업종의 비중으로 수요 이점을 측정했을 때는 중국이 수요 이점이 가장 높으며 한국은 중국에 이어 두 번째로 수요 이점이 높은 것으로 분석되었다([그림 2-9] 참고).

[그림 2-8] 수소 저장·운송부문의 수요 이점: 수소차 보급률



자료: Samsun *et al.*(2021) 및 OECD Statistics를 바탕으로 저자 작성

[그림 2-9] 수소 저장·운송부문의 수요 이점: 탄소 다배출 업종 비중



자료: OECD Statistics를 바탕으로 저자 작성

68) 수소 저장·운송부문의 수요 이점 측정 지표는 수소 생산부문의 측정 지표와 동일하므로, 분석결과에 대한 자세한 설명은 상기 수소 생산부문의 설명으로 같음한다. (제2장 제2절의 1, 나. 수요 이점 참고)

다. 이전 이점

수소 저장·운송부문의 이전 이점을 측정하기 위하여 IRENA가 제공하고 있는 수소 저장·공급·활용 특허를 활용하여 각 국가가 차지하고 있는 특허의 비중을 계산했으며, 그 결과는 [그림 2-10]과 같다. 수소 생산부문과 마찬가지로 2000년부터 2019년간 총 누적 통계 수를 대상으로 점유율을 계산했으며, 분석대상 8개국이 차지하고 있는 수소 저장·운송부문의 특허는 약 85%로, 수소 생산부문(82%)과 마찬가지로 전 세계 특허의 대다수를 차지하고 있다. 또한 수소 생산부문과 유사하게, 수소 저장·운송부문 역시 이전 이점이 높은 그룹(미국, 중국, 일본, 독일, 한국)과 낮은 그룹(프랑스, 영국, 호주)으로 구분할 수 있다.

이전 이점이 가장 높은 국가는 미국으로 전 세계 수소 저장·운송부문의 특허 중 22.45%를 차지하고 있다. 단, 수소 생산부문에서 가장 많은 특허를 점유하고 있는 중국의 점유율 33.72%보다 10%p 이상 낮은 점유율을 가지고 있어 수소 저장·운송부문의 이전 이점은 한 국가로의 집중이 상대적으로 작은 것으로 분석되었다. 미국에 이어 중국(18.01%)과 일본(17.56%)이 많은 비중의 특허를 점유하고 있어 수소 저장·운송부문의 이전 이점이 높은 것으로 분석되었다. 독일과 한국의 특허 비중은 각각 12.58% 및 9.32%로 이전 이점이 높은 그룹에 속했으나, 이전 이점이 높은 그룹 중에서도 상위 국가와 비교하여 약 5%p 이상 차이가 나는 점유율 가지는 것으로 조사되었다. 한국의 수소 저장·운송부문 특허에 대해서 본 연구의 전문가 자문단은 2050년까지 약 18%의 특허를 점유할 수 있도록 목표로 해야 한다고 응답했으며, 현재 점유하고 있는 특허의 약 두 배에 해당하는 수치이다.

수소 저장·운송부문에서 낮은 이전 이점을 가지고 있는 것으로 분석된 국가는 프랑스, 영국, 호주이며 각각 1.61%, 0.86%, 2.37%의 특허를 차지하고 있다. 낮은 이전 이점을 가지고 있는 국가들은 수소 생산부문에 있어서도 낮은 이전 이점을 가지고 있는 국가들이다. 다만 독일의 경우 수소 생산부문에서는 이전 이점이 낮았으나, 수소 저장·운송부문에서는 이전 이점이 상대적으로 높았다.

[그림 2-10] 수소 저장·운송부문의 이전 이점



자료: IRENA Statistics를 바탕으로 저자 작성

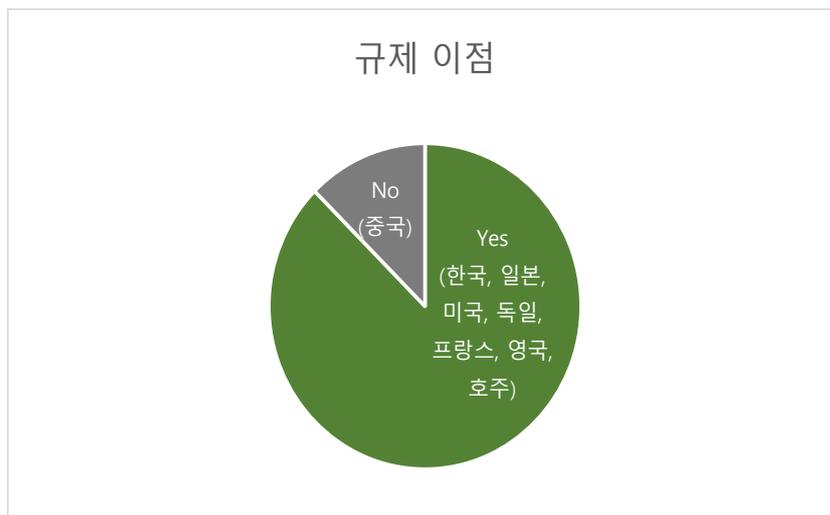
라. 규제 이점

수소 저장·운송부문의 규제 이점은 분석 국가 내에 수소의 저장 및 운송 관련 규제가 존재하는지 여부를 판단하여 측정했으며, 그 결과는 [그림 2-11]과 같다. 본 연구의 분석결과에 의하면 분석대상 8개국 중 7개국에서 수소의 저장 및 운송 관련 규제가 확인되어(한국, 일본, 미국, 독일, 프랑스, 영국, 호주) 안전성이 보장된 수소 저장 및 운송의 혁신적 개발을 촉진할 것으로 판단된다. 그러나 수소의 저장 및 운송에 대한 관련 규제가 확인되지 않은 중국의 경우 이 점을 제도화한 국가에 비하여 규제 이점이 상대적으로 미약할 것으로 판단된다.

한국의 경우 수소법은 국가와 지방자치단체가 청정수소 보급에 필요한 시책의 수립과 추진할 것을 규정하고 있다(제3조 제1항). 또한, 수소사업자에게 수소산업의 발전을 위하여 필요한 기술개발 외에도 수소의 환경친화적 저장 및 운송을 위하여 노력할 것을 규정하고 있다(제3조 제2항). 이외에도 「고압가스안전관리법」은 고압가스의 한 종류로 시안화수소를 규정하면서(제2조), 사업자 등이 저장소 사용 전에 그에 관한 안전관리규정을 정하고 이를 허가관청, 신고관청 및 등록관청에 신고할 것을 규정하고 있다(제11조). 한국의 수소 저장·운송부문의 규제에 대하여 안전을 위해 규제는 반드시 필요하다고 응답하면서도, 현재 지나친 규제에 의해 수소경제 초기의 시장 활성화에는 다소 부정적인 영향을 미친다고 의견을 밝혔다.

일본의 경우 「고압가스보안법」(高压ガス保安法)이 수소의 저장 및 운송에 관하여 규정하고 있다. 그 내용을 몇 가지 살펴보면 여기서는 수소를 고압가스의 한 종류로 이해하며(제2조 제4호), 수소의 저장이 경제산업성령에 정해진 기술상의 기준에 따라 이루어져야 함을 규정하고 있다(제15조). 그리고 수소의 운송을 위해서는 이동용기에 대하여 경제산업성령에 정하는 보안상 필요한 조치가 강구되어야 한다고 규정되어 있다(제23조 제1항).

[그림 2-11] 수소 저장·운송부문의 규제 이점



자료: 수소법, 고압가스안전관리법, 高压ガス保安法, EnWG 및 Dangerous Goods Safety Act 2004 등을 바탕으로 저자 작성

미국의 경우 수소의 운송은 ‘파이프라인 및 유해물질안전관리청’ (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, PHMSA)이 연방규정 49 CFR Parts 192에 근거하여 규제하고 있는데, 해당 규정에는 파이프라인을 통한 천연 및 기타 가스의 운송을 위하여 준수해야 하는 최소한의 기준이 명시되어 있다. 수소의 저장은 ‘산업안전보건청’ (Occupational Safety and Health Administration, OSHA)이 연방규정 29 CFR Parts 1910. 103에 근거하여 규제하고 있는데, 해당 규정에는 수소 저장의 위치와 함께 시험, 감독 그리고 환기 등의 기준이 명시되어 있다.⁶⁹⁾ 프랑스의 경우 수소의 저장과 관련한 구체적 사항은 광업법(Code minier)에 규정되어 있다. 그리고 수소의 운송과 관련해서는 파이프라인이 기존의 천연가스 네트워크일 경우 에너지법 제831-2조와 제832-2조가 적용된다.⁷⁰⁾

독일의 경우 에너지산업법(Energiewirtschaftsgesetz, EnWG)은 제3조 제14호에서 수소를 에너지의 한 유형으로 정하고 있다. 이러한 전제 아래에서 여기서는 에너지 공급 네트워크 운영자에게 에너지 공급 네트워크의 안전하고 신뢰할 수 있으며 효율적인 운영, 유지 및 확장 등의 의무를 규정하고 있다(제11조). 또한, 수소 네트워크 운영자에게 수소 운전자 간 파이프라인 및 저장 인프라를 구현하는 데에 필요한 범위 내에서 서로 협력해야 할 의무가 있음을 규정하고 있다(제28j조). 영국의 경우 수소의 운송을 규제하는 규정에는 ‘가스 안전(관리) 규정’ (Gas Safety (Management) Regulations 1996)과 ‘파이프라인 안전 규정’ (Pipeline Safety Regulations 1996)이 있다. 그리고 수소의 저장을 규제하는 규정에는 ‘계획(위험물질) 규정’ (The Planning (Hazardous Substances) Regulations 2015)이 있는데, 여기서는 현장에 5톤 이상 수소가 존재하는 사업장의 운영자에게 안전·비상계획 및 대형사고 예방정책의 이행을 의무화하고 있다.⁷¹⁾ 호주의 경우 수소의 저장 및 운송은 달리 명시되지 않는다면 일반적으로 ‘위험물안전법 2004(Dangerous Goods Safety Act 2004)’에 따라 규제된다.⁷²⁾

마. 조달 이점

현재 자국 내 수소 생산량을 지표로 활용하여, 수소 저장·운송부문의 조달 이점을 측정된 결과는 [그림 2-12]와 같다. 분석대상 국가 8개국 중 현재 수소 생산량이 가장 많은 국가는 중국으로, 현재 2,500만 톤을 생산하고 있으며 수소 경제 구축 초기에 대량의 수소를 조달할 수 있어 가장 조달 이점이 높은 것으로 판단된다. 중국에 이어 수소 저장·운송부문의 조달 이점이 높은 국가는 미국으로 현재 1,000만 톤의 수소를 생산하고 있다. 중국과 미국을 제외한 국가의 수소 생산량은 중국 및 미국에 비해 상대적으로 적어 조달 이점이 낮은 것으로 분석되었다. 한국, 일본, 독일이 약 200만 톤의 수소를 생산하고 있으며, 프랑스, 영국, 호주는 약 100만 톤에 못 미치는 수준의 수소를 생산하고 있다.

69) Rivkin, C. et al.(2015), “Hydrogen Technologies Safety Guide”, *NREL*, p.14.

70) Lazerges R. et. al.(2021), “Clean hydrogen in France”, *Allen & Overy*, p.5.

71) Borda N. et al.(2022), “Hydrogen in tomorrow’s world: Destination or aspiration”, *Energy Transition*, p.52.

72) Department of Mines, Industry Regulation and Safety(2022), “Dangerous Goods Safety Guide: Storage, Handling and Production of Hydrogen”, *Government of Western Australia*, p.2.

[그림 2-12] 수소 저장·운송부문의 조달 이점



자료: CSIS(2021, 2022), US Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, KOTRA(2021), SNECI(2021), Marsh(2022), CEFC Australian Market Study(2021)를 바탕으로 저자 작성

본 연구의 전문가 자문단은 수소의 조달과 관련하여, 2050년까지 실현 가능한 목표로서 국내 수소 생산량이 전체 공급량 대비 약 23.3%를 달성해야 한다는 응답을 했다. 이는 「2050 탄소중립 시나리오」의 국내 생산량 비중(A안 20.1%, B안 17.9%)에 비해서 소폭 확대된 수치이며, 「제1차 수소경제 이행 기본계획」의 2050년 수소 공급량 2,790만 톤을 기준으로 계산했을 때 국내에서 약 650만 톤 규모의 수소를 생산해야 한다는 의미이다. 한편 국내 생산분 23.3%를 제외한 나머지 수소 공급량에 대해서 전문가 자문단을 대상으로 수입처의 우선순위를 조사한 결과, 평균적으로 호주가 1.3위로 가장 높았으며, 중동(1.9위), 러시아(3.3위), 북아프리카(3.5위)로 조사되었다.

3. 수소 활용부문 진단

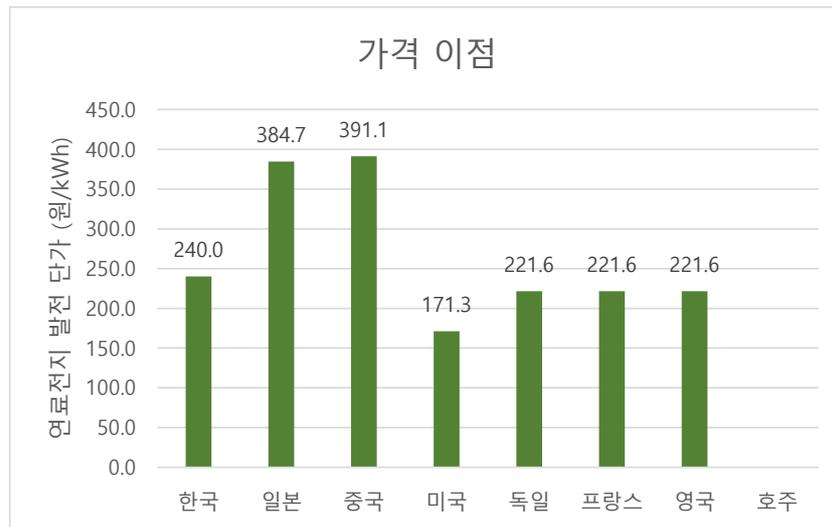
가. 가격 이점

수소 활용부문의 가격 이점은 가격의 직접적인 지표인 연료전지 발전단가로 측정하여 비교하였으며, 수소 활용부문의 가격 이점은 [그림 2-13]과 같다. 연료전지 발전단가 자료는 Scataglini *et al.* (2015), Hydrogen Europe(2020), 한국에너지기술연구원(2021), KDB미래전략연구소(2021), 에너지경제연구원(2021)에서 발췌하였으며, 유럽 3국의 경우 유럽연합에서 발표한 자료를 바탕으로 동일하게 적용하였고, 미국의 경우 논문에서 제공하고 있는 5개 주의 연료전지 발전단가의 평균을 적용하여 연료전지 발전단가를 산정하였다.

8개의 분석대상 국가 중 미국이 연료전지 발전단가(171.3원/kWh)가 가장 낮아 수소 활용부문에서 가장 높은 가격 이점이 있는 것으로 분석되었다. 유럽 3국(독일, 프랑스, 영국)의 연료전지 발전단가는 221.6원/kWh이며 미국에 이어 두 번째로 가격 이점이 높은 것으로 분석되었다. 한국

의 경우 연료전지 발전단가가 240.0원/kWh로 가격 이점이 5위인 것으로 분석되었으며, 일본과 중국은 분석대상 국가 중 가장 가격 이점이 적은 것으로 나타났다. 한편, 한국의 연료전지 발전단가에 대해서 향후 2050년까지 현재 수준에서 절반 수준인 124.2원/kWh를 달성해야 한다는 전문가 자문단의 의견이 있었으며, 이는 「수소경제 활성화 로드맵」⁷³⁾상의 2040년 목표 131원/kWh보다 낮게 제시되었다.

[그림 2-13] 수소 활용부문의 가격 이점



자료: Scataglini *et al.*(2015), Hydrogen Europe(2020), 한국에너지기술연구원(2021), KDB미래전략연구소(2021), 에너지경제연구원(2021)의 자료를 바탕으로 저자 재작성

나. 수요 이점⁷⁴⁾

수소 활용부문의 수요 이점은 수소 생산 및 저장·운송부문과 마찬가지로 자국 내 수소차 보급률과 탄소 다배출 업종이 국가경제에서 차지하는 비중으로 측정하였다. 먼저 단기적으로 빠르게 수소의 수요를 견인할 수 있는 수소차 보급률로 수소 활용부문의 수요 이점을 측정한 결과는 [그림 2-14]와 같고, 장기적으로 강한 수소의 수요를 견인할 수 있는 탄소 다배출 업종의 비중으로 수소 활용부문의 수요 이점을 측정한 결과는 [그림 2-15]와 같다.

수소차 보급률 측면에서 수소 활용부문의 수요 이점이 가장 높은 국가는 한국(백만 명 당 194.92대)으로 분석되었으며, 두 번째로 수요 이점이 높은 국가인 일본(백만 명 당 33.41대)에 비하여 약 6배 높은 보급률을 가지고 있었다. 탄소 다배출 업종의 비중 측면에서 수소 활용부문의 수요 이점이 가장 높은 국가는 중국(9.72%)이었으며, 한국은 두 번째로 수요 이점이 높은 국가인 것으로 분석되었다.

73) 관계부처 합동(2019), 「수소경제 활성화 로드맵」

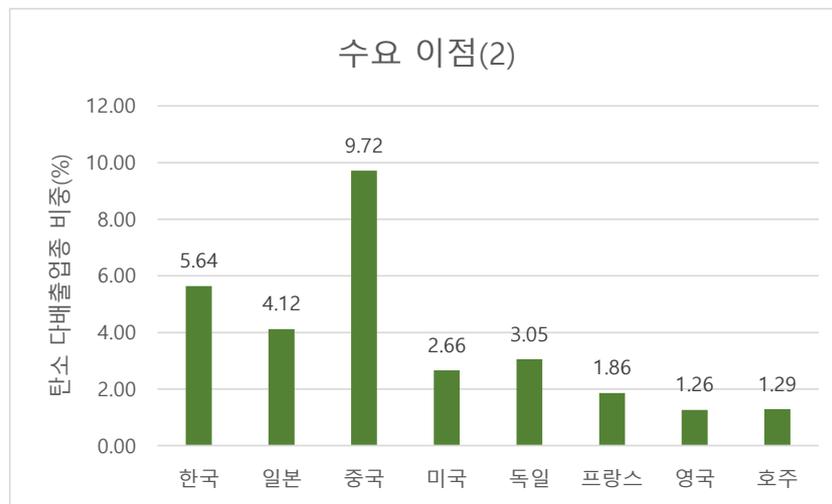
74) 수소 활용부문의 수요 이점 측정 지표는 수소 생산부문의 측정 지표와 동일하므로, 분석결과에 대한 자세한 설명은 상기 수소 생산부문의 설명으로 같음한다. (제2장 제2절의 1, 나. 수요 이점 참고)

[그림 2-14] 수소 활용부문의 수요 이점: 수소차 보급률



자료: Samsun *et al.*(2021) 및 OECD Statistics를 바탕으로 저자 작성

[그림 2-15] 수소 활용부문의 수요 이점: 탄소 다배출 업종 비중



자료: OECD Statistics를 바탕으로 저자 작성

다. 이전 이점

수소 활용부문의 이전 이점은 2000년부터 2019년까지 누적 전 세계 연료전지 특허 중 각 국가가 차지하고 있는 연료전지 특허의 비중으로 측정하였으며, 분석대상 국가 8개국의 이전 이점을 측정한 결과는 [그림 2-16]과 같다. 본 연구의 분석대상 국가 전체가 차지하고 있는 연료전지 특허의 비중은 약 90%로, 수소 생산부문(82%) 및 수소 저장·운송부문(85%)과 유사하게 높은 비중을 차지하고 있다. 또한, 수소 활용부문의 이전 이점은 수소 저장·운송부문과 유사하게 한국, 일본, 중국, 미국, 독일이 상대적으로 많은 특허를 점유하고 있었으며, 프랑스, 영국, 호주가 상대적으로 적은 특허를 점유하고 있었다.

수소 활용부문에서 이전 이점이 가장 높은 국가는 일본으로 전체 연료전지 특허 중 33.05%를 차지하고 있다. 수소 생산부문에서는 중국(33.72%)이 이전 이점이 가장 높고, 저장·운송부문에서는 미국(22.45%)이 이전 이점이 가장 높으므로, 수소의 각 가치사슬별로 이전 이점이 높은 국가는 각기 다른 것으로 분석되었다. 일본 다음으로 수소 활용부문의 이전 이점이 높은 국가는 미국(18.79%)과 중국(18.41%)이었으며, 수소경제 생태계의 각 가치사슬의 이전 이점은 미국, 중국, 일본이 강점을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 일본, 미국, 중국에 이어 수소 활용부문에서 높은 이전 이점을 가진 국가는 한국과 독일이었다. 전체 연료전지 특허 중 한국은 9.77%를 차지하였으며, 독일은 6.72%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 본 연구의 전문가 자문단은 한국의 연료전지 특허 점유율이 2050년까지 현재의 약 두 배 수준인 18% 달성을 목표로 해야한다는 의견을 제시하였으며, 이는 현재 중국과 미국의 점유율 수준이다.

수소 활용부문에서 이전 이점이 낮은 국가그룹은 호주, 프랑스, 영국으로, 호주는 1.75%의 연료전지 특허를 점유하고 있었으나 프랑스와 영국은 각각 0.71% 및 0.67%의 특허를 점유하여 1% 미만의 점유율을 보였다. 호주, 프랑스, 영국은 수소 생산, 저장·운송, 활용부문 모두에 대해서 이전 이점이 낮은 국가로 분류되었다.

[그림 2-16] 수소 활용부문의 이전 이점



자료: IRENA Statistics를 바탕으로 저자 작성

라. 수출 이점

수소 활용부문의 경우 국제적으로 거래되고 있는 연료전지의 수출 점유율 비중을 활용하여 수출 이점을 측정했으며 연료전지의 무역에 관한 데이터는 OEC(The Observatory of Economic Complexity)의 무역통계⁷⁵⁾를 활용하였다. 각 주요국의 연료전지 수출 점유율은 [그림 2-17]과 같다. 분석대상 국가 8개국 중 연료전지 수출 점유율이 가장 큰 국가는 중국으로 가장 수소 활용부문의 수출 이점이 높

75) 연료전지 품목 파악을 위한 HS 코드는 850780(Electric accumulators; other than lead-acid, nickel-cadmium, nickel-iron, nickel-metal hydride and lithium-ion, including separators, whether or not rectangular (including square)를 활용하였다. <https://oec.world/en/profile/hs/electric-accumulators-nes>

은 것으로 분석되었으며, 전 세계 연료전지 수출시장 중 약 38%를 점유하고 있었다. 중국에 이어 수소 활용부문의 수출 이점이 높은 국가는 한국으로, 약 11.10%의 연료전지 수출시장을 점유하고 있었다. 한국의 연료전지 수출에 대하여 본 연구의 자문단은 2050년까지 실현가능한 지향점으로, 현재의 약 두 배 수준인 18.75%의 수출 점유율을 달성해야 한다고 응답했다.

독일과 일본은 중국 및 한국에 이어 수소 활용부문의 수출 이점이 높았으며, 약 8% 내외의 연료전지 수출 점유율을 차지하고 있었다. 독일과 일본은 각각 7.94% 및 7.49%의 점유율을 차지하고 있어 한국과 약 4%p의 차이를 보였다. 미국은 독일과 일본의 약 절반 수준인 3.71%의 점유율을 차지하고 있는 것으로 분석되었다.

프랑스, 영국, 호주는 다른 국가에 비해서 수출 이점이 매우 낮은 것으로 분석되었다. 프랑스의 연료전지 수출은 전세계 수출 중 약 0.7%를, 영국의 경우 약 0.6%를 차지하고 있어, 중국의 약 55분의 1 수준이었고, 한국에 비해 약 15분의 1 수준인 것으로 분석되었다. 호주의 경우 연료전지 수출 점유율이 0.07%로 활용부문 수출 이점이 가장 열악한 것으로 분석되었다.

[그림 2-17] 수소 활용부문의 수출 이점



자료: OEC(HS Code:850780)를 바탕으로 저자 작성

마. 규제 이점

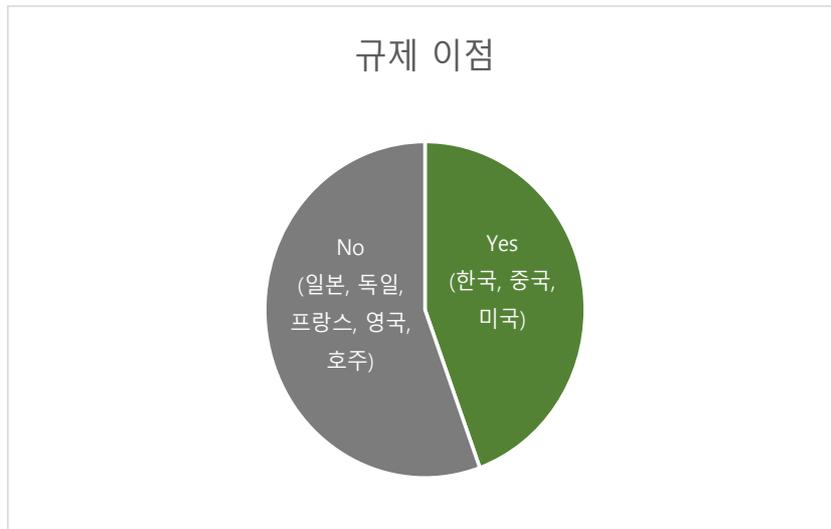
수소 활용부문의 규제 이점은 분석 국가 내에 저공해차량 의무판매 규제가 존재하는지 여부를 판단하여 측정했으며, 그 결과는 [그림 2-18]과 같다. 본 연구의 분석결과에 의하면 분석대상 8개국 중 3개국에서 저공해차량 의무판매 규제가 확인되어(한국, 미국, 중국) 향후 시장에서 저공해차량의 입지를 공고히 하는 이점으로 작용할 것으로 판단된다. 그러나 저공해차량 의무판매 규제가 확인되지 않은 일본, 독일, 프랑스, 영국 및 호주의 경우에는 이 점을 제도화한 국가에 비하여 규제 이점이 상대적으로 미약할 것으로 판단된다.

한국의 경우 「대기환경보전법」 제58조의2에서 환경부장관이 산업통상자원부 등 관계 중앙행정기관의 장과 협의하여 자동차판매자가 연간 보급하여야 할 저공해자동차의 목표를 매년 고시할 것을 규정하고 있다. 만일 자동차판매자가 연간 저공해자동차 보급목표를 달성하지 못할 경우 환경부장관은 그에게 대통령령으로 정하는 매출액에 100분의 1을 곱한 금액을 초과하지 아니하는 범위 내에서 자동차 보급 기여금을 부과·징수할 수 있다.

미국의 경우 캘리포니아는 1998년도부터 시행한 무공해차량(Zero-emission Vehicle) 프로그램을⁷⁶⁾ 통하여 이전 3년간의 평균 자동차판매량을 기준으로 하여 분류된 대형업체(Large Volume Manufacturer, LVM)와 중형업체(Intermediate Volume Manufacturer, IVM)에 대해 일정 비율 이상의 무공해차량 판매를 의무화하고 있다.⁷⁷⁾ 의무할당량을 미충족할 경우 ‘캘리포니아 대기자원위원회’ (California Air Resources Board, CARB)는 ‘캘리포니아 보건·안전법’ (California Health and Safety Code 43211 (b))에 근거하여 자동차업체에게 1 크레딧(일정 비율) 당 5,000달러의 과징금을 부과한다.

중국의 경우 미국 캘리포니아에서 시행 중인 무공해차량 프로그램의 수정된 형태로서 신에너지차량(New-energy Vehicle, NEV) 의무판매제도, 즉 NEV 정책을 2019년도부터 시행하고 있다. 이 제도는 중국에서 자동차를 3만대 이상 생산 및 수입하는 자동차업체에게 일정 비율의 신에너지차량(전기차, 수소연료전지차 등) 판매를 의무화하는 것으로,⁷⁸⁾ 판매비율은 2019년도에는 10%, 2020년도에는 12%, 2025년도에는 20%로 할당되었다.

[그림 2-18] 수소 활용부문의 규제 이점



자료: 대기환경보전법, California Health and Safety Code 등의 자료를 바탕으로 저자 작성

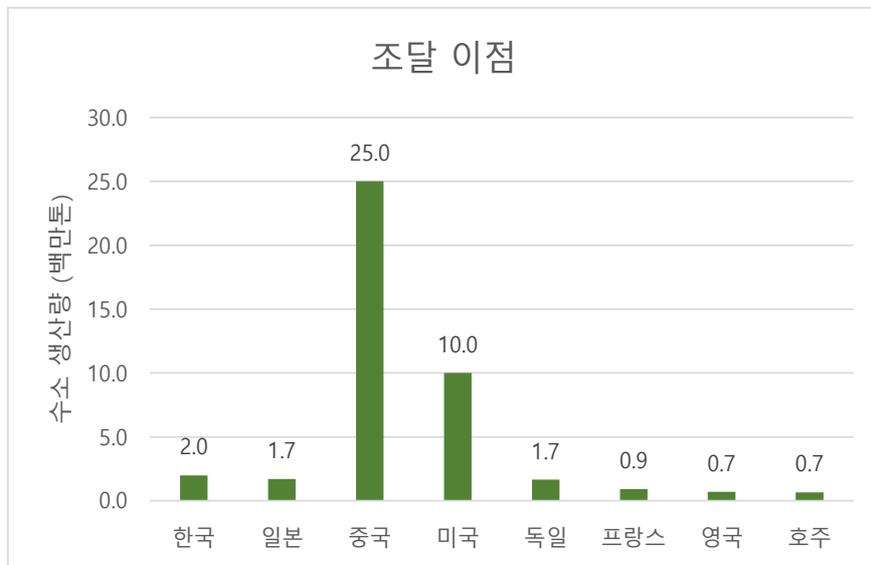
76) Moawad, B. et al.(2019), “California and Québec’s ZEV Mandates Description”, *Navius Research*, p.2.
 77) 강소라(2017), 「친환경자동차 의무판매제 도입의 비판적 검토」, 『KERI Brief』, 16, KERI 한국경제연구원, p.3.
 78) 손영욱 외(2018), 「친환경차 장기목표 수립을 위한 정책환경 연구」, 한국자동차공학회, p.88.

바. 조달 이점⁷⁹⁾

수소 활용부문의 조달 이점을 측정된 결과는 [그림 2-19]와 같다. 수소 활용부문의 조달 이점은 각 국가별 수소 생산량을 지표로 활용하였으며, 수소 생산량이 가장 많은 국가는 중국(2,500만 톤)인 것으로 나타났다. 중국 다음으로 미국이 1,000만 톤의 수소를 생산하고 있어 조달 이점이 두 번째로 높은 것으로 나타났으며, 나머지 6개 주요국과 큰 격차를 보이는 것으로 분석되었다.

독일, 한국, 일본이 약 200만 톤 내외의 수소를 생산하고 있어 중국과 미국 다음으로 수소 활용부문의 조달 이점이 높은 것으로 분석되었으며, 프랑스, 영국, 호주는 100만 톤 미만의 수소를 생산하고 있는 것으로 분석되었다. 중위 3개국과 하위 3개국의 경우, 약 두 배 가량의 조달이점 격차를 보여주고 있으나, 중위권 그룹 또한 2위인 미국 대비 1/5, 1등인 중국 대비 1/25의 조달 이점을 나타내어 상위권과의 조달 이점에서의 격차가 상대적으로 더욱 큰 것으로 분석되었다.

[그림 2-19] 수소 활용부문의 조달 이점



자료: CSIS⁸⁰⁾(2021, 2022), US Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, KOTRA(2021), SNECI(2021), Marsh(2022), CEFC⁸¹⁾(2021)를 바탕으로 저자 작성

79) 수소 활용부문의 조달 이점 측정 지표는 수소 저장·운송부문의 측정 지표와 동일하므로, 분석결과에 대한 자세한 설명은 상기 수소 저장·운송부문의 설명으로 같음한다. (제2장 제2절의 2, 마. 조달 이점 참고)

80) 미국 전략국제문제연구소(Center for Strategic and International Studies)

81) 호주 청정에너지금융공사(Clean Energy Finance Corporation)

4. 종합 진단

가. 수소 생산부문

상기 제2장 제2절의 1 수소 생산부문 진단을 바탕으로 각 이점 요인의 측정 결과를 정규화한 결과는 <표 2-6>과 같고, 각 국가별 이점 요인 측정 결과를 바탕으로 종합 점수를 산정한 결과를 그림으로 도시할 경우 [그림 2-20]과 같다. 가격 이점의 경우 그린수소 생산의 이론적 효율(83.35%)을 기준으로 정규화하였으며, 규제 이점은 청정수소의 범위가 법제화되어 있을 경우 100점, 법제화되어 있지 않은 경우 0점을 부여하였다. 조달 이점은 이론적으로 가능한 재생에너지 발전량의 비중(100%)을 기준으로 정규화하였다. 나머지 이점에 대해서는 최소최대법을 이용하여 분석대상 국가 8개국 내의 상대적인 점수로 정규화하였다.

수소차 보급률을 반영하여 수요 이점을 측정할 경우, 수소 생산부문에서 선도시장 형성의 잠재력이 가장 큰 국가는 한국으로 분석되었다. 한국은 수요 이점(1)과 규제 이점에서 높은 수준의 이점이 있음과 동시에 타 국가와의 큰 차이로 인해 수소 생산부문에서 가장 높은 선도시장 형성 잠재력을 가진 것으로 분석되었다. 또한, 아직 본격적인 청정수소 인증제의 시행 전이지만 수소법에 청정수소의 범위를 법제화하고 있어 규제 측면에서도 다른 국가에 비해 강점이 존재한다. 다만, 전 세계적인 수소경제 관련 입법 트렌드 및 필요성에 따라 중국과 일본이 청정수소 범위를 법제화할 경우, 중국의 종합점수는 60.25점을 달성하여 한국을 초과하고, 일본의 종합점수는 50.57점을 차지하여 한국에 이어 2위로 상승하게 될 것으로 예상된다.

한국은 이전 이점과 조달 이점에서 낮은 점수를 기록하였다. 한국의 수소 생산부문 이전 이점의 점수는 22.15점으로 독일, 프랑스, 영국, 호주에 비해서는 점수가 높았으나, 선도적으로 수소 생산부문의 특허를 점유하고 있는 중국, 미국, 일본에 비해서는 점수가 낮았다. 또한, 한국의 수소 생산부문의 조달 이점의 점수는 471점으로 분석대상 국가 중 가장 낮은 점수를 기록했다. 즉, 한국은 내부적으로 수소 생산부문의 혁신을 유도할 수 있는 수요 이점과 규제 이점 측면에서는 강점을 가지고 있으나, 해외로 자국 내 혁신을 확산시키고(이전 이점) 내부적으로 그린수소 생산을 채택·확산시킬 수 있는(조달 이점) 이점은 부족한 것으로 분석되었다.

아직 수소 사용이 본격화되지는 않았으나 많은 양의 수소를 소비할 것으로 예상되는 탄소 다배출 업종을 수요 이점의 측정에 반영할 경우(수요 이점(2)), 한국은 중국과 미국에 이어 세 번째로 수소 생산부문에서 선도시장 형성 잠재력을 가진 것으로 분석되었다. 한국은 탄소 다배출 업종 비중 측면에서도 수요 이점이 우수한 것으로 평가되었으나, 미국은 이전 이점 측면에서 한국 및 독일에 비해 우수했고 독일은 조달 이점 측면에서 한국 및 미국에 비해 우수했다. 즉, 중국을 제외한 세 추격국가 한국, 미국, 독일은 각각 혁신에 대한 내부 수요, 해외 확산, 내부 확산 측면에서 강점을 가지고 있는 것으로 분석되었다.

상기 언급한 가정과 동일하게, 중국과 일본이 청정수소 범위를 법제화 할 경우, 수요 이점(2)를 반영한 중국의 종합점수는 79.67점으로 타 국가와 큰 격차로 가장 높은 선도시장 잠재력을 가지게 된다. 또한 기존에 한국보다 낮은 잠재력을 가지고 있는 것으로 평가된 일본은 53.93점으로 평가되

어 중국에 이어 두 번째로 수소 생산부문의 선도시장 잠재력이 존재할 것으로 예상된다.

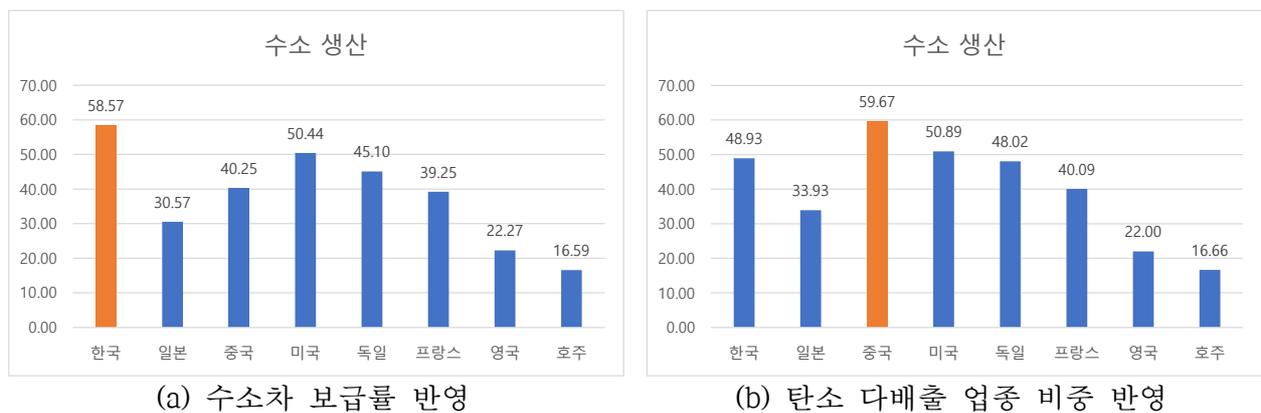
〈표 2-6〉 수소 생산부문의 각 이점 요인별 진단 결과 정규화

이점 요인	한국	일본	중국	미국	독일	프랑스	영국	호주
가격 이점	65.99	74.90	71.90	72.11	72.73	72.73	72.66	57.48
수요 이점(1)	100.00	17.04	2.89	14.30	6.57	2.90	1.36	0.00
수요 이점(2)	51.77	33.81	100.00	16.55	21.16	7.09	0.00	0.35
이전 이점	22.15	43.11	100.00	48.32	6.41	0.82	0.00	5.88
규제 이점	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00
조달 이점	4.71	17.82	26.46	17.47	39.80	19.81	37.33	19.57
종합(1)*	58.57	30.57	40.25	50.44	45.10	39.25	22.27	16.59
종합(2)*	48.93	33.93	59.67	50.89	48.02	40.09	22.00	16.66

* 종합(1)은 수요 이점(1)(수소차 보급률)을 바탕으로 계산한 평균 점수이며, 종합(2)는 수요 이점(2)(탄소 다배출 업종 비중)을 바탕으로 계산한 평균 점수임

자료: 저자 작성

[그림 2-20] 국가별 수소 생산부문의 선도시장 잠재력 진단 결과(평균)



자료: 저자 작성

나. 수소 저장·운송부문

상기 제2장 제2절의 2 수소 저장·운송부문 진단에서 설명한 각 이점 요인의 측정 결과를 정규화하고 종합점수를 산정한 결과는 각각 <표 2-7>과 [그림 2-21]과 같다. 수소 저장·운송부문의 이점 요인 중 규제 이점은 수소 저장·운송 관련 기준이 법제화되어 있을 경우 100점, 법제화되어 있지 않은 경우 0점을 부여하였다. 나머지 이점에 대해서는 최소최대법을 이용하여 분석대상 국가 8개국 내의 상대적인 점수로 정규화하였다.

수소차 보급률을 반영하여 수요 이점을 측정한 경우(수요 이점(1))와 탄소 다배출 업종 비중을 반영하여 수요 이점을 측정한 경우(수요 이점(2)) 모두, 미국이 수소 저장·운송부문에서 가장 높은 선도시장 형성 잠재력을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 미국은 대규모의 수소 액화플랜트를 보유하고 있고 수소 저장·운송부문에 다수의 특허를 보유하고 있어, 가격 이점과 이전 이점이 가장 높은 것으로 평가되었다. 또한 법률에 의해 수소 저장·운송 기준을 마련해 두고 있어 규제 이점 역시 존재하는 것으로 평가되었다.

한국의 경우, 한국이 강점을 가지고 있는 수소차 보급률을 반영하여 수요 이점을 측정했을 때 48.93점을 기록하여, 수소 저장·운송부문에서 종합적으로 미국에 이어 두 번째로 선도시장 형성 잠재력이 높은 것으로 분석되었다. 한국은 미국에 비하여 초기에 수소 저장·운송부문의 혁신에 대한 빠른 수요를 창출해낼 수 있다는 점에서 미국에 비해 수요 이점이 높았다. 그러나 가격 이점, 이전 이점, 조달 이점 측면에서 모두 미국에 비해 낮은 이점을 가지고 있는 것으로 분석되었다.

한국에 이어 일본(41.86점), 중국(36.51점) 순서로 잠재력이 높은 것으로 평가되었다. 일본과 중국은 수요 이점(수소차 보급률) 측면에서는 한국에 비해 비교열위에 있으나, 일본은 수소 액화플랜트를 운영하고 있어 가격 이점의 측면과 다수의 수소 저장·운송 관련 특허를 보유하고 있어 이전 이점의 측면에서 비교우위에 있는 것으로 평가되었다. 또한, 중국은 일본과 마찬가지로 이전 이점의 측면과, 현재 대량의 수소를 생산하고 있어 조달 이점 측면에서 비교우위를 가지는 것으로 평가되었다. 즉, 한국은 주변 국가인 일본 및 중국과 비교하여 초기에 빠른 수소 수요를 창출해낼 수 있다는 데에서 강점을 가지고 있으나, 한국이 가지고 있는 혁신을 해외로 인지시키거나(이전 이점) 저장·운송부문 설비 운영을 통한 가격 경감의 가능성(가격 이점), 수소 저장·운송 서비스의 내부적 확산 잠재력(조달 이점)은 상대적으로 미약했다. 따라서 일본과 중국이 빠른 혁신 유도를 위해 초기 수소 수요처 확대를 정책적으로 확대할 경우, 수소 저장·운송 부문의 선도시장 형성 잠재력 순위는 변동될 가능성이 있다.

특히 상기와 같은 가능성은 탄소 다배출 업종의 비중으로 수요 이점을 평가했을 때 실제로 확인할 수 있다. 탄소 다배출 업종의 비중을 수요 이점으로 반영할 경우 중국이 가장 높은 수요 이점(100점)을 가지게 되며, 일본(33.81점)은 한국(51.77점)에 비해 여전히 낮은 수요 이점을 가지고 있으나, 수소차 보급률을 반영했을 때보다 수요 이점 차이가 줄어들게 된다. 이에 따라 다배출 업종의 비중으로 수요 이점을 평가하고 수소 저장·운송부문의 선도시장 잠재력을 종합적으로 평가했을 때, 중국이 55.93점으로 미국에 이어 두 번째로 선도시장을 형성할 잠재력이 있는 것으로 평가되며, 중국

다음으로는 일본(45.21점) 및 한국(39.28점) 순서로 잠재력이 있는 것으로 평가된다.

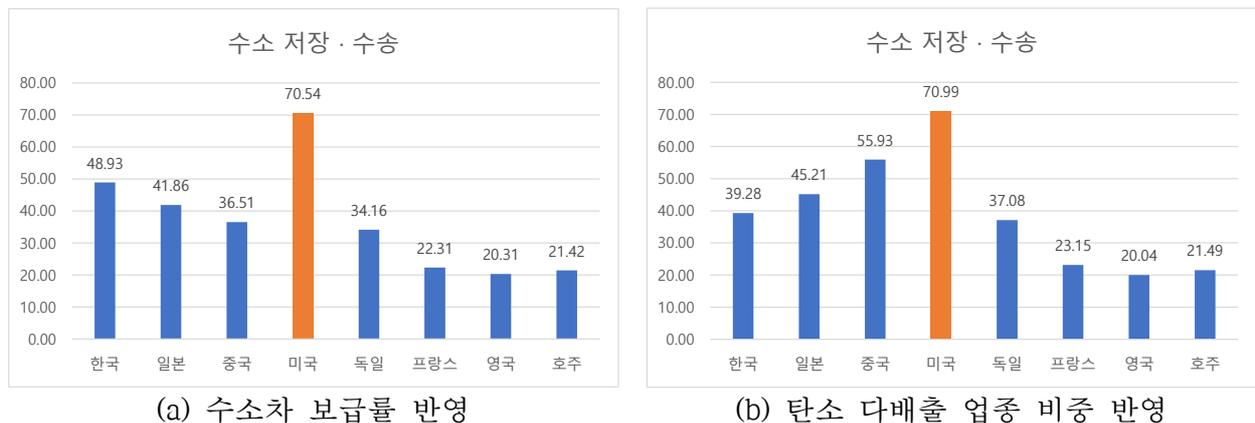
<표 2-7> 수소 저장·운송부문의 각 이점 요인별 진단 결과 정규화

이점 요인	한국	일본	중국	미국	독일	프랑스	영국	호주
가격 이점	0.00	10.60	0.24	100.00	5.87	4.17	0.00	0.10
수요 이점(1)	100.00	17.04	2.89	14.30	6.57	2.90	1.36	0.00
수요 이점(2)	51.77	33.81	100.00	16.55	21.16	7.09	0.00	0.35
이전 이점	39.18	77.34	79.42	100.00	54.28	3.46	0.00	7.00
규제 이점	100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
조달 이점	5.45	4.31	100.00	38.40	4.11	1.03	0.21	0.00
종합(1)*	48.93	41.86	36.51	70.54	34.16	22.31	20.31	21.42
종합(2)*	39.28	45.21	55.93	70.99	37.08	23.15	20.04	21.49

* 종합(1)은 수요 이점(1)(수소차 보급률)을 바탕으로 계산한 평균 점수이며, 종합(2)는 수요 이점(2)(탄소 다배출 업종 비중)을 바탕으로 계산한 평균 점수임

자료: 저자 작성

[그림 2-21] 수소 저장·운송부문의 선도시장 잠재력 진단 결과(평균)



자료: 저자 작성

다. 수소 활용부문

제2장 제2절의 3 수소 활용부문 진단을 정규화하여 0점에서 100점 사이의 점수를 가지도록 나타낼 경우 <표 2-8>과 같으며, 각 요인의 정규화 점수를 평균하여 그림으로 도시할 경우 [그림 2-22]와 같다. 수소 활용부문의 이점 요인 중 규제 이점은 저공해차 의무판매 규정이 있는 경우 100점, 규정이 없는 경우 0점을 부여하였다. 나머지 이점에 대해서는 최소최대법을 이용하여 정규화하였으며, 분석대상 국가 중 상대적인 점수를 나타낸다.

수소차 보급률을 반영하여 수요 이점을 측정했을 때, 중국, 한국, 미국의 3개 국가가 다른 국가에 비해 수소 활용부문에서 높은 선도시장 형성 잠재력을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 해당 국가 중 중국(59.61점)이 수소 활용부문에서 가장 선도시장 형성의 잠재력이 높은 것으로 평가되었으며, 한국(55.23점), 미국(53.04점)의 순서로 선도시장 형성의 잠재력이 높았으며 최대 점수 차이가 약 6점으로 점수 차이가 크지 않았다. 한국은 분석대상 국가 중 가장 높은 수소차 보급률을 기록하여 수요 이점이 가장 높았으나, 이전·수출·조달 이점 측면에서 중국에 비해 낮은 이점을 가진 것으로 평가되었다. 특히 이전 이점과 조달 이점은 미국과 중국에 비해 가장 낮은 이점을 가진 것으로 평가되었다. 즉, 한국은 수소 활용부문에서 내부적인 혁신 수요 형성은 빠르게 이루어질 수 있을 것으로 판단되지만, 수소의 조달과 창출된 혁신의 유용성을 해외에서 인지하는 것은 미국 및 중국과 비교하여 제약적일 것으로 판단된다.

탄소 다배출 업종의 비중을 반영하여 수요 이점을 측정한 경우에도 중국(75.80점)이 가장 높은 잠재력을 가진 것으로 분석된다. 중국의 인구대비 수소차 보급은 다른 국가에 비해서 저조하나, 자국 내 경제를 구성하고 있는 탄소 다배출 업종의 비중이 크므로 향후 장기적으로 수소 활용부문 혁신에 대한 높은 수요가 창출될 것으로 판단되며, 이에 따라 선도시장 형성 잠재력이 높게 평가되었다. 중국에 이어 미국(53.42점), 한국(47.19점)이 뒤를 이었다. 한국은 수소차 보급률이 아닌 탄소 다배출 업종의 비중으로 수요 이점을 계상하였을 때도 중국과 미국에 이어 3위를 기록하여 큰 수요 이점이 있는 것으로 평가되지만, 중국과 미국 또한 기존 국가 경제에서 차지하고 있는 탄소 다배출 업종으로 인해 점수가 상승했다. 따라서 수요 이점(1)에 비해 국가 간 점수 차이가 줄어들어 다른 이점(가격 이점, 이전 이점, 조달 이점)에서 비교우위를 가지고 있는 미국이 한국보다 더 높은 선도시장 잠재력을 가지는 것으로 평가되었다.

한국에 비해 수소 활용부문에서 선도시장 형성 잠재력이 낮은 일본과 독일의 경우, 현재 한국과 종합점수 차이가 크다. 그러나 해당 국가에 적절한 규제가 도입될 경우 종합점수 간의 차이는 더욱 줄어들 것으로 기대된다. 예컨대 일본과 독일도 차량 판매자에게 저공해차 판매의 의무를 부과하는 규제가 마련될 경우, 두 국가 모두 규제 이점이 100점이 되며, 수요 이점(2)을 반영하여 계상할 경우 종합점수는 각각 43.43점 및 40.30점이 산출된다. 즉, 비단 현재의 분석상 한국이 수소 활용부문에서 높은 선도시장 형성 잠재력을 가진 국가그룹에 속한다고 하더라도, 수소 활용부문 혁신을 위한 다른 국가의 규제 도입 등 정부개입으로 상대적 잠재력이 낮아질 수 있음

을 시사한다.

〈표 2-8〉 수소 활용부문의 각 이점 요인별 진단 결과 정규화

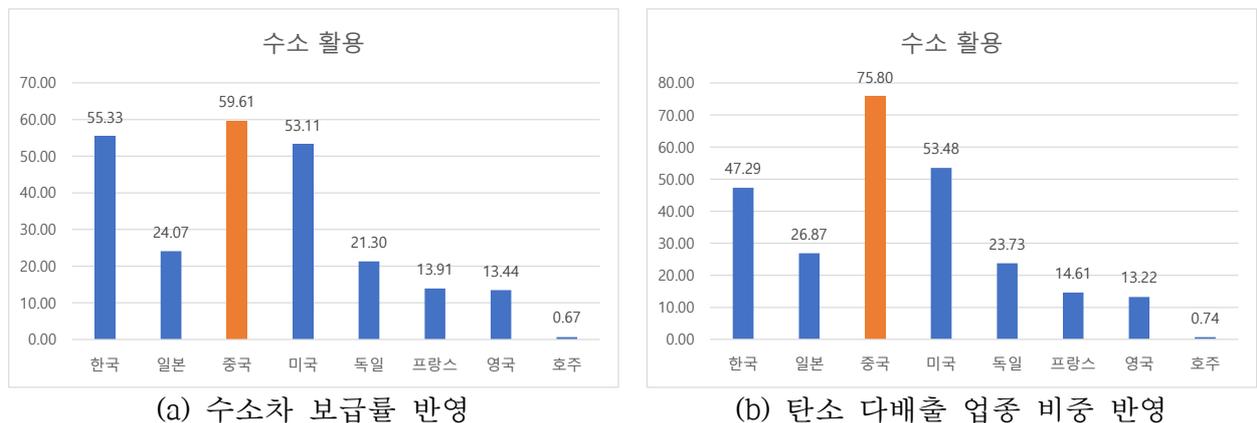
이점 요인	한국	일본	중국	미국	독일	프랑스	영국	호주 ¹⁾
가격 이점	68.75	2.93	0.00	100	77.12	77.12	77.12	-
수요 이점(1)	100.00	17.04	2.89	14.30	6.57	2.90	1.36	0.00
수요 이점(2)	51.77	33.81	100.00	16.55	21.16	7.09	0.00	0.35
이전 이점	28.10	100.00	54.79	55.96	18.68	0.12	0.00	3.34
수출 이점	29.08	19.56	100.00	9.60	20.75	1.66	1.37	0.00
규제 이점	100.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
조달 이점	5.45	4.31	100.00	38.40	4.11	1.03	0.21	0.00
종합(1)*	55.23	23.97	59.61	53.04	21.21	13.81	13.34	0.67
종합(2)*	47.19	26.77	75.80	53.42	23.64	14.50	13.12	0.74

* 종합(1)은 수요 이점(1)(수소차 보급률)을 바탕으로 계산한 평균 점수이며, 종합(2)는 수요 이점(2)(탄소 다배출 업종 비중)을 바탕으로 계산한 평균 점수임

주 1) 호주의 경우 가격 이점을 제외하고 종합점수를 계산하였음

자료: 저자 작성

[그림 2-22] 수소 활용부문의 선도시장 잠재력 진단 결과(평균)



자료: 저자 작성

라. 수소경제 가치사슬 종합

이상에서 논의한 수소경제의 각 가치사슬 부문(생산, 저장·운송, 활용)별 진단 결과를 바탕으로, 수소경제 가치사슬 전체에 대해서 종합점수를 산출한 결과는 <표 2-9> 및 [그림 2-23]과 같다.

먼저 수소차 보급률로 측정한 수요 이점(1)을 반영한 경우, 수소경제 전 가치사슬에 대한 선도시장 잠재력은 미국이 57.70점으로 가장 높은 것으로 분석되었다. 미국은 수소 저장·운송 부문에서 가장 높은 선도시장 잠재력(70.54점)을 가지고 있는 것으로 평가되었으며, 수소 생산 부문과 활용부문에서도 각각 두 번째와 세 번째로 높은 선도시장 형성 잠재력(각 50.44점 및 53.04점)을 가지고 있는 것으로 평가되었다. 한국의 경우 미국에 이어 두 번째로 수소경제 전 가치사슬의 선도시장 형성 잠재력이 높은 것으로 분석되었다. 한국의 종합점수는 54.30점으로, 생산부문에서는 선도시장 형성 잠재력이 분석대상 국가 중 가장 높았으나, 저장·운송부문과 활용부문에서는 각각 미국과 중국에 이어 2위인 것으로 평가되었다.

탄소 다배출 업종의 비중으로 측정한 수요 이점(2)을 반영할 경우 중국이 수소경제 전 가치사슬에 대해서 선도시장 잠재력이 가장 높은 것으로 평가되었다. 중국은 탄소 다배출 업종의 비중이 가장 높은 국가로, 향후 탄소 다배출 업종에서 수소 활용기술이 적극적으로 보급될 경우 장기적으로 큰 수소의 수요가 발생할 것으로 기대된다. 수요 이점(2)을 반영하여 종합점수를 산정했을 때, 한국은 중국, 미국에 이어 세 번째로 수소경제 전 가치사슬의 선도시장 잠재력이 높은 것으로 분석되었다.

본 연구는 추가적으로 분석대상 국가가 모두 동일한 종류 및 강도의 규제를 가지고 있다고 상정하고 규제 이점의 점수에 100점을 부여하여 수소경제 전 가치사슬의 종합점수를 산정했으며, 그 결과는 [그림 2-24]와 같다. 아직 산업 및 시장이 형성되지 않아 자생적으로 혁신이 창출되기 어려운 수소경제의 구축 초기 단계에 규제 등 다양한 제도적 기반마련은 필수적으로 요구되는 사항이다. 규제의 설계 단계와 실제 규제가 시행되고 그 효과를 피드백하는 단계에서 엄밀한 분석이 요구되는바, 수소경제 촉진을 위한 적절한 규제는 단기간 내에 마련하기 어렵다. 그러나 제도적 기반은 정부의 정책적 의지에 따라 다른 기술적 성과에 비해 상대적으로 신속히 마련될 수 있는바, 이점 요인 중 국가 간 편차가 큰 규제 이점에 의한 효과를 배제하고 선도시장 형성의 잠재력을 분석하기 위하여 본 추가분석을 수행했다.

수요 이점(1)을 반영했을 때, 모든 국가가 각 부문에 대해서 동일한 규제를 마련한 경우 중국이 가장 높은 선도시장 잠재력을 가지는 것으로 분석되어, 미국을 추월한 것으로 나타났다. 또한, 일본의 경우 한국과의 격차를 절반 이상 좁힐 수 있는 수준의 선도시장 잠재력을 가질 수 있는 것으로 분석되었다. 수요 이점(2)을 반영할 경우, 가장 높은 선도시장 잠재력은 여전히 중국이 가질 것으로 예상되며, 한국은 일본과 순위가 바뀌어 네 번째로 선도시장 잠재력이 높은 국가로 평가된다. 또한, 한국은 일본보다 낮은 선도시장 잠재력을 가졌던 독일과의 격차가 줄어드는 것으로 분석되었다.

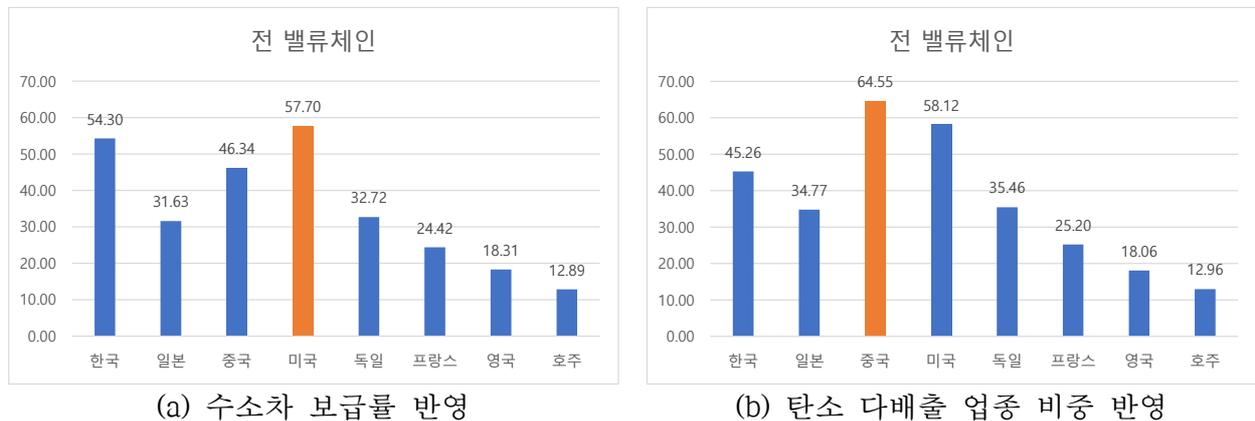
〈표 2-9〉 수소경제 가치사슬 진단 결과

부문		한국	일본	중국	미국	독일	프랑스	영국	호주
수요 이점(1) 반영	생산	58.57	30.57	40.25	50.44	45.10	39.25	22.27	16.59
	저장·운송	48.93	41.86	36.51	70.54	34.16	22.31	20.31	21.42
	활용	55.23	23.97	59.61	53.04	21.21	13.81	13.34	0.67
수요 이점(2) 반영	생산	48.93	33.93	59.67	50.89	48.02	40.09	22.00	16.66
	저장·운송	39.28	45.21	55.93	70.99	37.08	23.15	20.04	21.49
	활용	47.19	26.77	75.80	53.42	23.64	14.50	13.12	0.74
종합(1)*		54.30	31.63	46.34	57.70	32.72	24.42	18.31	12.89
종합(2)*		45.26	34.77	64.55	58.12	35.46	25.20	18.06	12.96

* 종합(1)은 수요 이점(1)(수소차 보급률)을 바탕으로 계산한 평균 점수이며, 종합(2)는 수요 이점(2)(탄소 다배출 업종 비중)을 바탕으로 계산한 평균 점수임

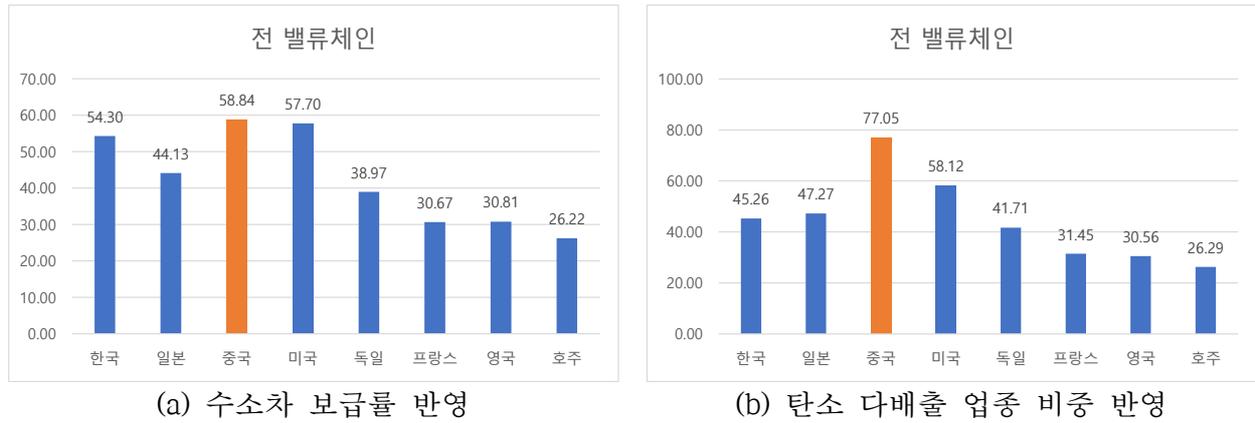
자료: 저자 작성

[그림 2-23] 수소경제 전 가치사슬 선도시장 잠재력 진단 결과



자료: 저자 작성

[그림 2-24] 수소경제 전 가치사슬 선도시장 잠재력 진단 결과(동일한 규제 이점 상정)



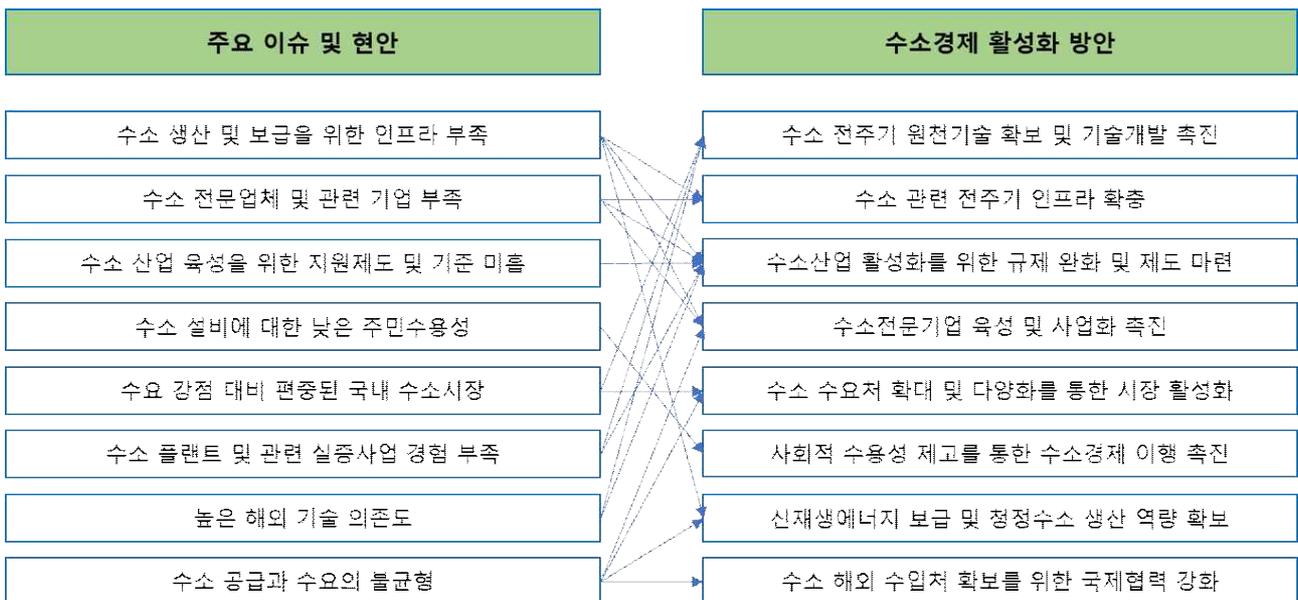
자료: 저자 작성

제 3 절 국내 수소 산업 관련 주요 이슈 및 현안

수소경제 활성화를 위한 각 가치사슬별 주요 이슈를 진단하고 그에 따른 수소경제 활성화 이행방안 마련을 위하여, 주요국과의 비교분석을 통한 선도시장 잠재력 진단결과를 토대로 국내 산·학·연 전문가 25명을 대상으로 주요 장애요인 및 이슈와 그에 따른 해결방안을 발굴하기 위하여 서면 자문을 진행하였다. 서면 자문은 수소 가치사슬별로 생산(10명), 저장·운송(10명), 활용(5명)으로 분과를 나누어 진행하였으며, 서면 자문의 내용은 ① 한국의 지향점, ② 현재의 장애요인 및 이슈, ③ 장애요인 및 이슈의 해결방안으로 구성했다.

제2장 제1절에서 설명하였듯이, ① 한국의 지향점은 제2장 제2절에서 선도시장 분석의 결과와 함께 논의하였으며, 본 제2장 제3절과 제4절에서는 ② 장애요인 및 이슈와 ③ 그 해결방안에 대한 의견을 종합적으로 검토한 후 추가적인 사례조사와 문헌조사를 통해 국내의 주요 이슈 및 현안(제2장 제3절)과 수소경제 활성화 방안(제2장 제4절)을 도출하였다. 특히, 수소경제 가치사슬 전체에 공통으로 적용되는 항목과 각 가치사슬에 특화된 항목으로 나누어 자문 결과를 분석하였고, 이를 바탕으로 8개 주요 장애요인 및 이슈를 도출함과 동시에 그에 따른 해결방안을 포함한 수소경제 활성화 이행방안을 제시하였다. 본 연구에서 도출한 수소 관련 주요 이슈 및 현안과 수소경제 활성화 방안을 도시화할 경우 [그림 2-25]와 같다.

[그림 2-25] 수소경제 활성화를 위한 주요 이슈·현안 및 세부 방안



자료: 저자 작성

1. 수소 생산 및 보급을 위한 인프라 부족

전체 수소경제 가치사슬에 걸쳐 수소 관련 인프라가 부족하다는 의견이 다수 존재했다. 수소

수요 측면에서 볼 때, 현재 설치·운영되고 있는 수소충전소의 수가 절대적으로 부족하고, 수소 공급망이 아직 체계적으로 구축되지 않아, 국내는 수소 수요자가 수소를 원활히 공급받기에 충분한 여건이 조성되지 않은 것으로 판단된다. 특히, 수소충전소의 경우 최근 3년간 빠른 보급 추세를 보여주고 있으나, 낮은 경제성으로 인해 운영에 있어 적자를 면하지 못하고 있는 실정이며⁸²⁾, 추후 추가적인 수소충전소의 구축이 제한될 가능성이 있다. 이를 극복하기 위해, 수소충전소 구축에 대하여 충분한 경제적 유인이 존재하는 환경을 조성하고, 직간접적으로 수소충전소 구축을 지원할 수 있는 방안의 마련이 요구된다.

또한, 기술의 해외 의존도가 높아 수소 생산 및 공급을 위한 인프라를 구축하는 데 제약이 존재한다는 의견이 있었다. 수소 공급 자체는 지속적으로 확대되고 있으나, 그린·블루수소 기술은 선도국 대비 4~7년의 기술격차가 존재하는 만큼(관계부처합동, 2021), 선도국과의 기술격차를 좁히고 국내기술 중심의 청정수소 생산을 위한 설비를 신속하게 확보하는 것이 시급한 실정이다. 특히, 수소의 효과적인 저장·운송을 위한 수소 액화플랜트 관련 기술의 경우, 국내의 기술 수준이 낮고, 국내 그린수소의 공급 방안이 구체화·안정화되지 않았을 뿐만 아니라, 경쟁력 있는 가치사슬을 구축하는 것이 어렵다는 의견이 있었다. 수소 액화플랜트는 인프라 구축을 위한 가장 핵심적인 기술 중 하나로 꼽히는 만큼, 안정적인 액화플랜트 기술 확보 및 실증을 통해 수소 저장 및 운송 기반을 마련하는 것이 중요하다.

수소 생산 및 수요가 활발한 지역을 중심으로 수소허브도시를 구축하는 것이 필요하다는 의견 또한 제시되었다. 2022년 기준 3개 지역의 수소 시범도시, 5개 지역의 규제특구, 5개 지역의 클러스터가 구축되어 운영되고 있다(〈표 2-10〉 참고). 이에 더해, 2019년 발표한 「수소 시범도시 추진전략」을 통해 2030년까지 전국의 10%, 2040년까지 전국의 30%에 수소도시를 조성할 것이라는 계획을 밝힌 바 있다. 하지만, 낮은 경제성과 핵심기술의 부족, 주민수용성 문제 등으로 인해 수소도시의 완전한 실현까지는 아직 요원한 실정이다. 따라서, 적극적인 국가지원 정책 및 산·학·연 협력을 기반으로 한 단계적인 이슈 해결이 필수적으로 요구된다.

〈표 2-10〉 지역 수소산업 생태계 구축 현황

<p>● 시범도시</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 울산 : 부생수소를 도심 내 건물·충전소 활용 · 전주·완주 : 수소생산 CO₂ 활용, 수소 체험관 조성 · 안산 : 시화호 재생에너지 접목 등 친환경 도시 	
<p>● 클러스터</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 인천, 전북(생산) · 울산(모빌리티) · 강원(저장·운송) · 경북(연료전지) 	
<p>● 규제특구</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 울산(그린모빌리티) · 충남(수소에너지 전환) · 부산(암모니아 선박) · 강원(액화수소) · 충북(그린수소) 	

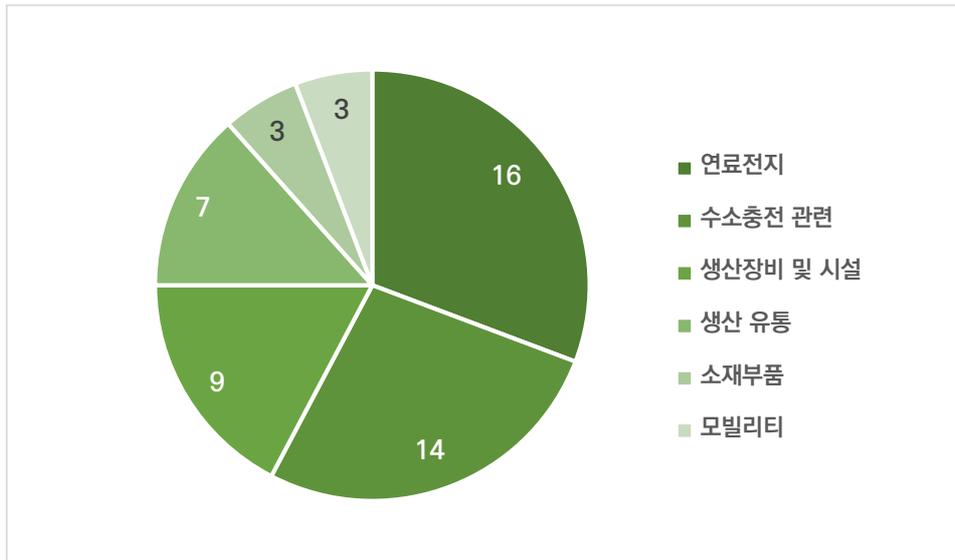
자료: 관계부처 합동(2021), 제1차 수소경제 이행 기본계획, 10면.

82) 관계부처합동(2021), 「제1차 수소경제 이행 기본계획」

2. 수소 전문업체 및 관련 기업 부족

수소경제 가치사슬의 모든 부문에 기여하는 시장참여자로서, 수소경제를 이끌어 갈 수 있는 수소 전문업체 및 관련 기업의 육성은 가장 우선시되어야 할 과제 중 하나이며, 이를 해결할 수 있는 국가 지원사업 및 정책을 조속히 마련할 필요가 있다. 현재 한국 정부는 2040년까지 수소전문기업⁸³⁾ 1,000개 지정을 목표로, 기술 R&D 및 사업화 등 다양한 지원사업을 진행해 오고 있다. 특히, 2021년 시행된 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」에 따라 처음 11개의 수소전문기업을 선정 한 이후, 2022년 8월 기준 총 49개의 수소전문기업이 선정되어 사업에 참여하고 있다⁸⁴⁾. 그러나, 「제1차 수소경제 이행 기본계획」 상 목표치인 2025년까지 100개, 2030년까지 500개의 수소전문기업 지원을 달성하기 위해서는 다수의 기업이 수소 사업에 참여할 수 있도록 촉진할 필요가 있다.

[그림 2-26] 수소전문기업 업종 현황



자료: 수소융합얼라이언스 고시자료를 바탕으로 저자 재작성

수소전문기업 육성의 장애요인으로는 핵심소재 분야 관련 업체의 부족과 성공사례 부재, 짧은 경력으로 인한 노하우 부족 등이 제시되었다. 수소융합얼라이언스에서 발표한 자료에 따르면, 2022년 8월 기준 수소전문기업 중 연료전지 관련 기업이 16개, 수소 충전 관련 기업이 14개, 장비 및 시설 관련 기업이 9개, 생산 및 유통 관련 기업이 7개, 모빌리티 관련 기업과 소재부품 관련 기업이 각각 3개로 조사되었다⁸⁵⁾⁸⁶⁾([그림 2-26] 참고). 수소전문기업의 분포에서 알 수 있듯이, 다수의 수소전문기업이 참여하고 있는 주 사업분야는 연료전지 및 수소 충전 분야이며, 핵심 소재 분야의 전문기업

83) 수소전문기업이란 수소산업과 관련된 사업을 영위하는 기업으로, 총매출액 중 수소사업과 관련된 매출액이 차지하는 비중이 일정 기준 이상이거나, 총매출액 대비 수소사업 관련 연구개발 등에 대한 투자금액이 차지하는 비중이 일정 기준 이상인 기업을 말한다. (수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률, 제2조의 3)

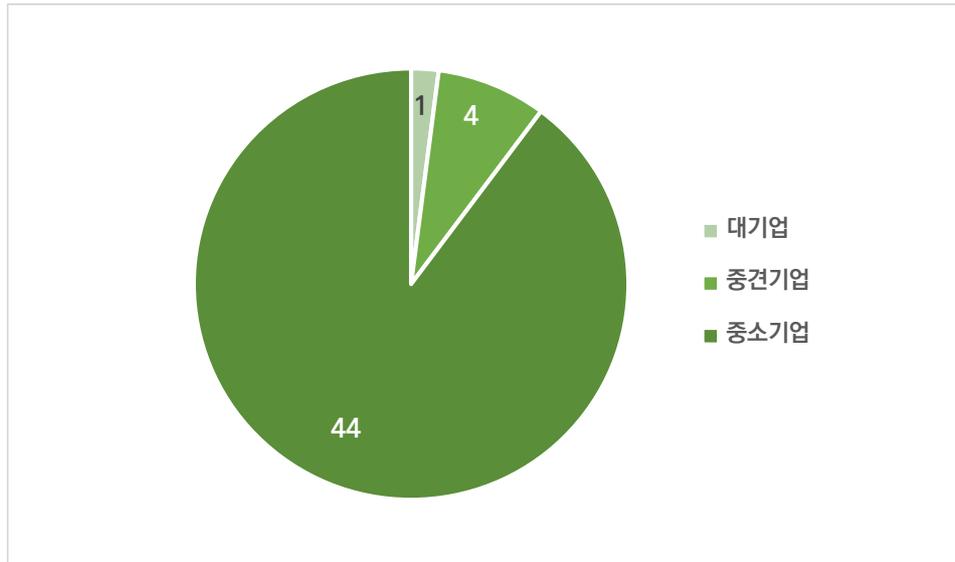
84) 수소융합얼라이언스(2022), 수소전문기업 지정 현황(2022년 8월 기준), https://www.h2korea.or.kr/sub/sub03_01.php?boardid=notice&mode=view&idx=145&sk=&sw=&offset=&category=, 2022. 10.21. 접속.

85) 해당 기업 중 3개사는 2개의 분야에서 사업을 영위하고 있다.

86) 수소융합얼라이언스(2022), 앞의 홈페이지 참조.

은 다소 부족한 실정이다. 또한, 전체 수소전문기업의 약 90%는 중소기업으로([그림 2-27] 참고), 중소기업의 장애요인을 해결하고 다수의 성공사례가 창출될 수 있는 정부의 지원이 필요하다. 비즈니스 모델의 개선을 통한 경제성 증대 및 적절한 기술 R&D 지원을 바탕으로 현재 선정된 수소전문기업들의 비약적인 성장을 끌어낼 수 있는 경우, 수소전문기업 육성 지원사업에 대한 충분한 유인을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

[그림 2-27] 수소전문기업 규모 현황



자료: 수소융합얼라이언스 고시자료를 바탕으로 저자 재작성

3. 수소산업 육성을 위한 지원제도 및 기준 미흡

현재 수소산업을 육성하기 위한 제도적 기반이 부족하고, 다방면의 규제 개선이 필요하다는 의견이 다수 존재했다. 수소의 생산 측면의 경우, 청정수소 인증 범위에 대한 명확한 법적·제도적 기준이 필요하다는 점이 부각되었다. 이와 관련하여 지난 '22년 6월, 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률(이하 수소법)」 일부개정을 통해 청정수소 인증제가 도입되었다. 동법에 의거 청정수소 인증제는 “청정수소의 사용을 촉진하기 위하여 생산·수입 등의 과정에서 배출되는 이산화탄소량 등 대통령령으로 정하는 인증기준을 충족하는 수소 또는 수소화합물에 대하여 등급별 청정수소 인증”을 하는 것을 뜻한다.⁸⁷⁾ 청정수소 인증제가 도입됨에 따라 청정수소의 정의와 청정수소 중심의 수소경제 생태계 구축기반이 마련되었으나, 동법은 시행일이 미정임에 따라 인증제 시행 일자 또한 명확하게 정해진 바가 없다. 다만, 시행일자와 관련하여 지난 '22년 7월 산업통상자원부는 ‘수소경제 투자 활성화를 위한 산업계 간담회’를 개최하고, 수소 생산 방식과 국제동향 및 국내 산업 현황 등을 고려하여 2024년 즈음 인증제를 본격적으로 시행할 계획이라고 밝힌 바 있다⁸⁸⁾. 상기 제도를 시행함에 있어 다양한 형태의 수소를 보다 폭넓게 활용할 수 있게끔 할 뿐만 아니라 명확한 제도적 기준을 제시하고, 청정수소의 생산이나 활용에 대해 가시적인 기업 혜택을

87) 수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률, [시행 미정] [법률 제18889호, 2022. 6. 10., 일부개정]

88) 윤병효(2022), 「청정수소 발전제도 2023년, 인증제도 2024년 시행 가닥」, 『전기신문』, 7.20, 2022.11.1. 접속, <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=306872>

마련함으로써 수소 사업을 영위하는 기업에게 인센티브를 제공할 필요가 있을 것이다. 이에 더해, 국내에서의 청정수소 인증 획득이 해외에서도 동등한 지위의 수소로 인정받을 수 있도록 국제인증 확보 또한 고려되어야 한다.

신재생에너지공급의무화제도(Renewable Portfolio Standard, RPS)로부터 수소 연료전지 발전을 분리하고 청정수소발전의무화제도(Clean Hydrogen Portfolio Standard, CHPS)의 신설 등이 논의되는 과도기적인 시기인만큼, 기업의 적극적인 참여가 저해될 수 있다는 지적이 있었다. RPS 이행에 따라 발급되는 신재생에너지공급인증서(Renewable Energy Certificate, REC)는 초기 수소경제 활성화에 많은 기여를 했다고 평가받는다. 특히 수소 연료전지 발전의 경우 전체 REC 발급량의 16% 이상을 차지할 만큼 RPS의 이행 수단으로 많이 활용되었다. 그러나 수소 연료전지 발전이 LNG 복합화력발전의 탄소배출량과 비교하여 탄소배출량 개선 효과가 거의 없는 것으로 지적되면서 RPS를 통한 탄소중립 이행에 문제가 있다는 의견이 제시되었다. 이에 따라 개정된 수소법은 RPS를 대체하는 청정수소 인증제를 도입하면서 기존의 RPS에서 수소 연료전지 발전이 분리될 수 있도록 설계되었다. 탄소중립 이행을 위해 청정수소를 선별하고 명확한 탄소감축 효과를 보이는 수소 발전을 중심으로 보급을 촉진하겠다는 의지가 담긴 것으로 볼 수 있다. 그러나 기존의 REC의 혜택을 받던 기업들은 관련 제도의 변화로 인해 사업 활성화에 당분간 제동이 걸릴 수 있다는 목소리가 나온다.

또한, 수소 저장 및 운송 측면에서 볼 때, 수소 액화플랜트에 대한 안전기준이 부족하다는 의견이 있었다. 김현진 외(2021)가 지적하였듯이 액화수소의 경우 액화수소의 생산·저장·운송·활용 등에 대한 안전기준이 전반적으로 미흡하다고 보여지는 만큼, 이에 따른 전주기적인 안전기준 마련이 촉구되고 있다⁸⁹⁾. 2021년 기준 액화수소 도입을 위한 안전기준에 관련하여 총 27건의 제·개정이 필요하다고 제시하고 있으며, 운반차량, 생산·저장 관련 주요 설비 및 시설, 충전시설 및 설비 관련 제조기준이 없어 양산이 불가하거나 시공 및 운영이 불가한 상황이다(김현진 외, 2021). 따라서, 수소경제 활성화에 대한 국가계획 목표 달성 및 보급 확장의 효율성을 증대하기 위해 적합한 법·제도를 조속히 마련할 필요가 있다.

4. 수소 설비에 대한 낮은 주민수용성

수소 인프라를 확충하기 위한 정부의 적극적인 노력에도 불구하고, 수소 관련 설비에 대한 낮은 주민수용성은 수소경제를 활성화하는 데 있어서의 주요 장애요인 중 하나로 지적되어 왔다. 이는 수소뿐만 아니라 에너지 시설의 도입에 있어서 공통적으로 발생해 온 장애요인 중 하나로, 수소 관련 설비의 경우, 강릉 과학단지 수소탱크 폭발사고 사례 등으로 인해 소위 수소폭탄으로 인식하거나, 수소 누출로 인한 피해를 염려하는 등 지역사회 인근에 수소 관련 설비의 도입에 대해 부정적인 시각이 존재한다. 특히, 사업 초기의 주민수용성이 수소경제 활성화를 위한 국가계획상의 목표 달성에 있어 중장기적으로 중요한 요인 중 하나로 작용할 수 있기 때문에(이지훈, 2021)⁹⁰⁾, 수소 관련 시설에 대한 주민수용성 개선을 위한 적극적인 정부의 움직임이 요구된다. 이를 극복하기 위해

89) 김현진 외, 「국내 액화수소 안전기준 제·개정을 통한 수소산업 안전성 확립」, 『KIGAS』, 한국가스학회, 25(6), pp. 98-105.

90) 이지훈(2021), 앞의 논문, pp.28-35.

과학적 분석에 기반한 안전성을 보다 적극적으로 홍보하고, 지역 사회의 성장을 도모할 수 있게끔 경제적 효용성을 높이는 것이 필요하다.

5. 수요 강점 대비 편중된 국내 수소시장

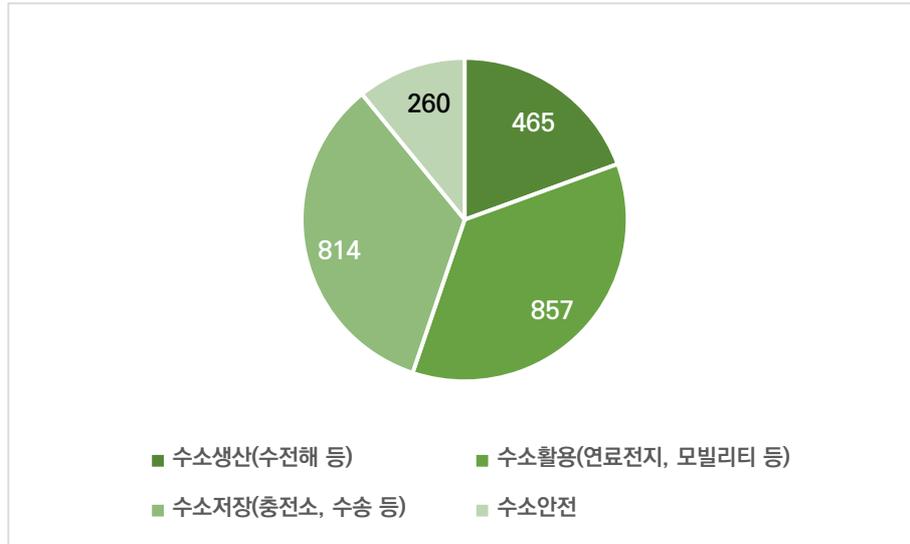
수소경제 활성화를 촉진하고 수소 가치사슬별 안정적인 기반을 마련하기 위해 국내 수소시장의 성장 및 확장이 필요하다. 국내 수소시장의 현황을 살펴보면 수소 관련 산업 및 기술 개발이 특정 분야에 편중되어 있다는 의견이 있었다. 현재 국내 수소차 및 연료전지 분야의 경우 2018년 이후 3년간 보급 규모가 각각 17배, 2배로 증가하며 거대한 약진을 보여 왔고, 높은 수준의 기술을 확보한 바 있다(관계부처합동, 2021)⁹¹⁾. 하지만, 수소차와 연료전지를 제외한 수소 활용처가 현저하게 부족하여 수소 수요 확대를 통한 시장 확대를 꾀하기가 어려운 시점이다. 예를 들어, 액화수소의 경우 우주선의 연료로 사용하는 미국, 일본, 유럽 등 여타 선진국과는 달리 국내의 경우 등유(Kerosene)를 기반으로 한 연료를 사용하므로 선진국에 비해 항공우주 분야의 수소 수요가 제약적이다. 또한, 대규모의 수소 사용이 가능한 석유화학, 철강, 시멘트 등 탄소 다배출 업종의 경우 아직 수소 사용기술을 개발 중에 있다. 연료전지의 경우 많은 투자를 통해 비약적인 발전을 보인 바 있으나, 수출보다는 내수에 초점을 맞춘 만큼, 국내시장만으로 성장시키는 것에는 한계가 있다는 지적이 있었다.

수소시장 확대를 위해, 국내 R&D의 다양성 또한 확보해야 한다는 의견이 있었다. 국내 수소 관련 기술 R&D의 경우, 산업 부문과 마찬가지로 수소차·연료전지·수소충전소 등 활용 부문에 크게 집중되어, 여타 관련 생산·저장·운송·소재 기술 등에 대한 투자가 부족하다는 점을 지적했다. 지난 2020년 전국경제인연합회는 지난 5년간 정부의 수소 R&D 투자의 경우 활용 분야가 52%를 차지하고 있어 균형 있는 R&D 투자가 이루어지지 않는다는 점을 지적한 바 있다. 2022년 4월 산업통상자원부에서 발표한 2022년 수소 분야 신규 R&D 지원 계획을 살펴보면, 수소산업 전주기 분야의 신규 R&D 과제에 지원 예정인 예산 규모는 총사업비 기준 2,396억 원으로, 각 부문별로 ▲수소 생산 부문이 19%, ▲수소 활용 부문이 36%, ▲수소 저장·운송 부문이 34%, ▲수소 안전 관련 부문이 11%를 차지하고 있다⁹²⁾. 수소 저장·운송 부문에 대한 R&D 투자가 증대된 것은 고무적으로 볼 수 있으나, 수소경제 각 가치사슬의 안정적인 시장성장을 위해 수소 생산 부문 또한 투자 규모를 증대하여 보다 균형 있는 수소 전주기 투자가 필요하다고 판단된다.

91) 산업통상자원부(2021), 「제1차 수소경제 이행 기본계획」

92) 산업통상자원부 보도자료(2022), 「'26년 연간 1,000톤 그린수소 생산 실증 지원」

[그림 2-28] 2022년 수소 분야 신규 기술개발 지원 규모(단위: 억 원)



자료: 산업통상자원부(2022)를 바탕으로 저자 재작성

6. 수소 플랜트 및 관련 실증사업 경험 부족

국내 수소 플랜트 및 관련 실증사업 경험이 부족하다는 지적이 있었다. 국내 활용부문의 경우, 다양한 수소차 및 연료전지 기술을 바탕으로 세계적인 경쟁력을 갖추고 있다는 평가를 받고 있으나, 생산 및 저장·운송부문은 실증사업 경험과 원천기술 부족으로 인해 상용화 단계까지는 아직 요원한 실정이다. 수소 생산부문은 올해 초 경북 구미 내 국내 최초로 고체산화물 수전해 기술에 기반한 수소 생산 실증화 사업에 성공한 바 있고 한국수력원자력 또한 대용량 청정수소 생산 및 저장 플랜트 구축을 계획하는 등 다양한 노력과 성과가 있었다. 그러나 여전히 추가적인 실증사업 혹은 연계사업을 기획하여 기술을 더욱 고도화하고 대규모 실증 시설에 대한 운영 기록을 축적하는 것이 필요하며, 적극적으로 신재생에너지와 연계할 수 있는 플랜트 기술을 개발하여 실증사업을 진행함으로써 신재생에너지 연계형 플랜트 기반을 견고히 할 필요가 있다. 이에 더해, 축적된 경험을 바탕으로 점진적으로 용량을 확대하여 대규모 수소 플랜트 설비를 확충하고 이에 대한 효율적인 운영이 차세대 수소경제 기반 마련을 위해서 필수적이라고 볼 수 있다.

저장·운송부문의 경우 또한 생산부문과 유사한 상황으로, 액화플랜트 기술이 부족한 만큼 그에 관한 실증사업 경험 또한 부족한 실정이다. 고압저장용기 및 저장탱크 관련 기술 또한 실증화 단계 진입이 시급하다는 지적이 있었다. 현재 2021년부터 창원시에서 액화수소플랜트를 건설하여 2023년 상업운전을 시작하는 것을 목표로 하는 프로젝트를 진행하고 있고, 가치사슬 전 부문에 걸친 실증사업을 통한 액화수소 산업의 상용화를 목표로 지정된 강원 규제자유특구 또한 올해 액화수소 저장을 위한 용기 및 탱크 제작과 이를 바탕으로 한 액화수소 저장 및 운송을 목표로 실증과제에 착수했다. 최근 관련 실증사업 및 플랜트 건설의 중요성이 부각되어 이에 적극적으로 투자가 진행되는 것은 고무적으로 판단되나, 생산 부문과 마찬가지로 추후 실증사업 및 플랜트 운용 계획을 더욱 확장하여 최적화함으로써 안정적인 운용 데이터를 확보하는 것이 필요하다.

7. 높은 해외 기술 의존도

전반적인 가치사슬에서 수소 관련 기술 역량이 부족하다는 지적이 많았다. 국가녹색기술연구소(녹색기술센터)의 2020년 기후기술 수준조사 보고서에서 조사한 44대 기후기술별 국내 기술수준을 살펴보면, ▲수소제조 기술의 경우 최고기술보유국 대비 80%(격차 3년), ▲연료전지 기술의 경우 85%(격차 2년), ▲수소저장 기술의 경우 76.5%(격차 3년)인 것으로 나타났다(녹색기술센터, 2020)⁹³. 국내 기초연구 및 응용개발연구 역량을 보면 ▲수소제조 기술 부문에서 각각 60.8점과 54.2점, ▲연료전지 기술 부문에서 63점과 71.1점, ▲수소저장 기술 부문에서 각 62.5점과 65.3점의 결과를 보여준다. 전반적으로 수소 관련 국내 연구 역량 및 기술 수준이 시간의 경과에 따라 상승세를 보여주고 있어 이는 긍정적으로 평가되나, 아직 미국·일본·EU 등 주요 기술국과 비교할 때 부족한 기술 수준 및 연구 역량을 보여주는 만큼, 국가 차원의 수소 전주기적인 R&D 지원이 필요하다.

〈표 2-11〉 국내 수소 관련 기술 수준 및 연구단계별 역량

기술 구분	기술수준(%)	기술격차(년)	기초연구역량(점)	응용개발연구역량(점)
수소제조	80	3	60.8	54.2
연료전지	85	2	63.0	71.1
수소저장	76.5	3	62.5	65.3

자료: 녹색기술센터(2020)를 바탕으로 저자 재작성

수소 저장 및 운송 부문의 경우, 액화플랜트 설계 기술 및 수소 관련 핵심기술의 해외 의존도가 높다는 의견이 있었다. 특히, 액화수소 저장 및 운송 시 자연적으로 발생하는 수소의 증발 혹은 기화 문제(증발가스, Blow-Off Gas, BOG)를 완화할 수 있는 기술이 부족한 실정이다. 증발가스의 경우, 수소 자원의 낭비뿐만 아니라 수소 누출로 인한 안전성 문제까지 야기할 수 있는 만큼, 이를 해결하기 위한 기술이 필수적으로 요구된다. 2022년 신규 수소 관련 국가 R&D 과제에 하루 1.5%의 BOG 성능을 갖춘 1톤급 액화수소 저장탱크 개발 및 충전·공급 기술개발 실증이 포함되어 있어 관련 기술에 대한 국가의 적극적인 의지를 엿볼 수 있으나, 이와 같은 R&D 투자가 더욱 많이 이루어져야 한다는 의견이 있었다. 따라서, BOG 이슈 완화를 위한 리사이클 기술 개발에 더욱 박차를 가할 필요가 있다.

수소 생산부문의 경우, 차세대 핵심 수소 생산 기술 중 하나인 수전해 기술 역량이 부족하다는 의견이 많았다. 이에 더해, 블루수소 생산에 필수적인 CCS 기술 개발 또한 충분한 속도를 내지 못하고 있다는 점이 지적되었다. 특히, 대용량 수소 생산 기술 개발 및 그 상용화는 선진기술국 대비 많이 부족한 실정이며, 이로 인해 안정적인 수소 생산 기반을 마련하는 것이 현재까지는 어렵다고 판단된다. 플랜트 설계 및 핵심기자재 기술의 부족으로 인해 해외 기술 의존도가 심화되는 한편, 에너지 안보 측면에서의 이슈 또한 제기되고 있다. 수소 플랜트의 경우 주요국 혹은 기업들이 시장을 이미 선점하여 상대적으로 진입장벽이 높은 분야 중 하나로 꼽히고 있다⁹⁴. 특

93) 오상진 외(2020), 「2020년 기후기술 수준조사」, 녹색기술센터 참조.

94) 윤용승 외(2019), 「상용급 가스 액화 플랜트 기술개발 기획 최종 보고서」, 국토교통과학기술진흥원 참조.

히, 주요국 혹은 주요 기업들과의 협력을 통한 공동기술개발 혹은 사업을 진행하더라도 주요 기술에 대한 이전이 쉽게 이루어지지 않아 종속적 관계가 이루어져 해외 기업들의 국내시장 점유율이 상승하며, 독자적으로 대형 플랜트를 국산화하는 것이 어려운 실정이라는 지적이 있었다. 따라서, 구미 수소 생산 플랜트와 같이 사업 초기에 공동기술개발의 형태 등을 통해 주요 기업의 선진 기술개발 역량과 노하우를 학습하되, 이를 바탕으로 독자적인 기술개발을 통해 국산화하여 대형 플랜트 기술을 확보하는 것이 중요하다고 사료된다.

수소 전주기를 아울러 공통적으로 관련 소재 및 제품, 기술의 국산화가 필요하다는 의견이 많았다. 현재 수소 관련 핵심 기술과 필수 소재 및 제품은 전반적으로 높은 해외의존도를 보이고 있다. 따라서, 자원안보 차원에서 차별화된 R&D 지원제도 및 인센티브 제도 등의 정부 지원을 바탕으로, 핵심기술을 국산화하고 필수적인 소재와 제품의 자체 생산·조달이 가능한 국내 산업이 형성될 수 있는 구체적인 방안이 요구된다.

8. 수소 공급과 수요의 불균형

시장 활성화를 위해서는 시장 내 충분한 공급과 수요가 확보됨과 동시에, 서로 균형을 이루는 것이 중요하다. 충분한 공급과 수요가 확보되지 않는다면 시장 자체가 형성되기 어렵고, 공급 혹은 수요 중 어느 한쪽이 부족한 경우에는 지나치게 높은 수소가격이 형성되어 수소 소비자 및 소비기업의 부담이 증가하거나(초과수요), 지나치게 낮은 수소가격이 형성되어 생산자의 수익성이 악화(초과공급)되기 때문이다. 이는 국내 수소 시장 내에서도 동일하게 나타난다. 현재 수소시장 활성화에 있어 주요 장애요인 중 하나로 거론되는 것 중 하나가 바로 수소 수요처의 부족 또는 수소 공급량의 부족이다. 수소 수요처의 부족은 수소 생산업체의 사업 확장에 대한 유인을 감소시키며, 수소 공급량의 부족은 수소 사용자로 하여금 제때 원·연료를 공급받지 못하는 불편을 제공하고 비싼 수소가격으로 인해 수소 관련 시스템 및 설비를 활용할 유인을 감소시킨다.

수요 측면을 먼저 살펴보자면, 현재 계획 및 설치 중에 있는 수소 생산 관련 설비의 생산가능량을 고려해볼 때, 수소 수요처 자체가 부족하다는 의견이 있었다. 수소 수요처가 확실하지 않고 수요량이 부족한 만큼, 기업 입장에서 적극적으로 수소생산 및 공급을 위한 산업에 뛰어들기에 어려움이 있다는 것이다. 이를 해결하기 위해, 정부는 「제1차 수소경제 이행 기본계획」 과 「2050 탄소중립 시나리오」 등 다양한 정책 계획에서 수요처 발굴의 중요성을 언급하고, 이를 구체화하여 사업을 진행할 것을 명시한 바 있다. 다양하고 충분한 수요처 확보를 통해 시장 유인요소를 강화하여 산업계로 하여금 시장에 참여할 수 있는 동기를 부여한 것이다.

공급 측면의 경우, 수소 공급 확대가 계획에 따라 이루어진다면 차후에는 문제없이 진행될 수 있으나, 당장 현재 수소 공급 자체가 부족하다는 지적이 있었다. 수소 생산 및 공급업체가 아직 부족하기 때문에 원활하지 못한 수소 공급 문제가 발생하게 되었다는 것이다. 이에 더해, 최근 고유가 및 원료 수입 차질 이슈 또한 공급 문제를 야기하는 것에 영향을 미쳤다는 의견이 있었다. 이로 인해, 최근 충북·강원·전북 등 지방 각 시·군에서 공급업체 내 설비 고장, 충전소 부족, 행

정구역 내 수소 생산 및 공급기지 부재 등의 원인으로 인해 수소 공급이 원활하지 않아 충전 대란 사태가 다양한 곳에서 발생한 바 있다. 정부 및 지방자치단체의 적극적인 정책에 힘입어 수소차 자체의 보급률은 증가하였으나, 이를 위한 충전 및 수소 공급 인프라는 아직 미진하여 차후 수소 활용에 대한 소비자들의 인식에 대한 미래가 불투명한 만큼, 인식의 전환을 위해서는 관련 문제를 조속히 해결해야 할 필요가 있다.

제 4 절 국내 수소경제 활성화를 위한 방안 도출

1. 수소 전주기 원천기술 확보 및 기술개발 촉진

국내 수소경제를 활성화하고 추후 수소 산업을 선도하기 위해서는 수소 전주기의 원천기술을 확보하고 관련 기술개발을 촉진하는 것이 필수적이다. 이는 수소경제로의 전환을 천명한 이후로 정부 또한 다각도적으로 체계적인 정책 및 로드맵을 마련하여 이행해 온 바 있다. 예컨대, 2019년 정부에서 발표한 「수소경제 활성화 로드맵」과 「수소 기술개발 로드맵」에서 원천기술의 부족을 지적하며 효율적인 기술개발 및 실증을 위한 정책 방안 마련을 제시한 바 있고, 이는 2021년 발표한 「제1차 수소경제 이행 기본계획」에서도 동일하게 명시되었다. 원천기술 확보의 필요성을 인지하고 이미 효율적인 정책을 수립한 만큼, 국가계획 이행에 보다 박차를 가하고 그 과정에 있어 필요한 정책적·제도적·재정적 기반을 조속히 마련할 필요가 있다.

수소경제의 각 가치사슬 부문 및 세부 부문별 필요한 기술에 대한 다양한 의견이 제시되었다. 생산부문에서는, 그린수소 생산에 활용되고 있는 광전극의 손상을 방지하고 내구성을 높이는 것이 필요하며, 광전극 구조·소재 등 현재의 광전극을 개선할 수 있는 기술개발 및 실증연구를 위한 지원이 필요하다는 의견이 있었다. 또한, 현재 화석연료 기반의 수소 생산 과정에서 발생하고 있는 이산화탄소 배출에 대한 해결방안을 마련하는 것이 필요하다는 지적이 있었다. 이를 해결하기 위해, CCUS 기술의 조속한 상용화를 통해 효율적인 연계방안을 마련하여 기존의 그레이수소를 블루수소로 전환하는 것이 필요하다.

저장 및 운송 부문에서는 수소 배관의 수소취성(Hydrogen Embrittlement)을 해결할 수 있는 기술을 개발하는 것이 필요하다는 의견이 있었다. 현재 국내에서는 기존에 구축되어 있는 천연가스 배관망을 활용하여 도시가스에 수소를 혼합하여 활용하는 방안이 논의되고 있다. 현재 산업통상자원부는 도시가스 수소혼입 실증 추진단을 발족하여 가스공사 평택인수기지를 대상으로 단계별 실증연구를 진행하고 있다. 이 과정에 있어, 파이프라인의 균열 및 손상을 야기할 수 있는 수소취성 문제의 해결은 시스템 정착에 있어 주요한 요소 중 하나로 판단되고 있다. 그러나 현재 관련 연구 결과 및 실증 데이터가 부족하여 명확한 해결책을 제시하기에 다소 어려움이 있는 상황이다. 따라서, 체계적인 R&D 지원을 바탕으로 관련 실증연구 및 원천기술 개발에 보다 박차를 가하여, 수소취성 문제를 해결할 수 있는 파이프라인 구축 기술을 갖추는 것이 선결과제라고 판단된다.

활용부문에서는 연료전지의 효율 및 내구성 향상에 대한 언급이 있었다. 연료전지는 현재 한국이 강점을 가지고 있는 분야 중 하나이다. 현재 글로벌 연료전지 시장은 미국과 한국, 일본이 주도하고 있으며, 한국의 경우 초기 신재생에너지 보급정책과 수소경제 활성화 로드맵에 따라 지속적으로 기술 R&D 지원 및 각종 제도 마련을 통해 연료전지 관련 산업을 육성하여 글로벌 연료전지 강국으로 거듭난 바 있다. 이를 지속적으로 이어가기 위해, 연료전지 스택 개선 등을 통한 효율 향상 및 내구성 증진에 대한 연구를 통해 독보적인 기술을 마련할 필요가 있다. 또한, 수소 터빈 관련 기술 개발을 통해 성능 개선을 도모해야 한다는 의견이 제시되었다. 수소 터빈 기술은 수소

를 가스 터빈 발전의 연료로 사용하는 기술로, 기존 LNG 연료와 혼소하여 활용하는 방식과 수소 및 암모니아만 활용하는 전소 방식의 두 가지로 나누어져 있다⁹⁵⁾. 수소 터빈 기술은 여타 국가 대비 에너지 자원이 충분하지 않은 국내 상황을 고려할 때 필수적으로 상용화해야 하는 기술 중 하나인 만큼⁹⁶⁾, 수소 분야의 기술성숙도를 높여 원가 절감을 통해 경제성을 확보하고, 수소 터빈 기술 개발을 통해 발전 효율을 보다 제고할 필요가 있다고 판단된다.

이와 같이, 원천기술 확보 및 지속적인 기술개발은 수소경제 활성화를 위해 특정 분야만이 아닌 전 가치사슬을 아울러 진행되어야 할 필요가 있다. 이를 효율적으로 뒷받침하기 위해, 주요 장애요인을 효과적으로 해결하기 위한 적재적소에 맞는 정책적·제도적 기반 마련 또한 반드시 수반되어야 한다.

2. 수소 관련 전주기 인프라 확충

수소경제 전주기에 걸쳐 안정적인 인프라를 확충하는 것은 수소경제 활성화에 있어 필수 불가결한 요소 중 하나이다. 이는 2019년 발표된 「제1차 수소경제 이행 기본계획」에서도 동일하게 언급되어 있으며, 정부는 수소 유통 인프라와 수소 배관망 구축, 수소 충전소 확대 등을 제시하며 빈틈없는 인프라 구축 계획을 발표한 바 있다. 상기 계획에 따른 효과·효율적인 인프라 구축을 위해, 다양한 기술적·정책적 지원과 시스템 및 체계 마련이 필요하다.

먼저, 민간 주도의 수소충전소 보급을 확대해야 한다는 의견이 있었다. 이는 시장주도형 수소경제 정착을 위해서 반드시 이행되어야 하는 인프라 구축 방안 중 하나로 판단되고 있다. 민간 투자의 규모를 확대하기 위해서는 경제성이 담보되어야 하는 만큼, 융복합형 수소충전소 운영, 측정 방식의 차이로 인한 운영 손실을 저감을 위한 규제 개선, 핵심부품의 국산화 등의 다양한 방안을 통해 경제성 향상을 도모할 필요가 있다. 현재 「제1차 수소경제 이행 기본계획」에서는 수소차 보급 초기(~ '25년)에 공공주도로 충전소를 구축하고, 수소차 보급 성숙기(~ '40년)에는 민간 주도로 수소충전소를 도시 중심으로 배치하겠다는 계획을 제시하고 있다. 시장구축의 마중물 마련과 균형적인 수소충전소 보급 차원에서 공공주도의 충전소 보급 또한 필수적이나, 시장 메커니즘을 통한 수소충전소 사업 활성화를 위해 수소충전소 보급에 민간의 역할이 확대될 수 있도록 상기와 같은 방안이 조속히 마련될 필요가 있다.

또한, 대규모 재생에너지단지를 조성하여 그린수소의 효율적인 생산을 위한 계통 연계가 필요하다는 의견이 제시되었다. 현재 재생에너지 공급의 부족은 그린수소 생산에 큰 장애요인 중 하나이다. 이를 극복하기 위해 대규모 재생에너지단지를 조성함과 동시에, 재생에너지 기반 전력의 활용을 저해하는 전력계통의 불안정 이슈 또한 필수적으로 해결해야 한다는 지적이 있었다. 따라서, 전력계통에 부하를 주는 잉여전력을 그린수소 생산에 활용할 수 있게끔 대규모 재생에너지단지 근처에 수소 생산설비를 비치하여 연계 운영을 하는 방안을 고려할 필요가 있다.

95) 이종민(2022), 「수소·암모니아 가스터빈 발전의 기술 동향 및 전망」, 『에너지포커스』, 에너지경제연구원, 19(1) 참조.

96) 이종민(2022), 앞의 논문 참조.

해외도입을 위한 민간 인프라 투자 지원이 필요하다는 지적도 있었다. 현재 청정수소를 바탕으로 한 수소경제 활성화를 도모하기 위해서는 국내 수소 생산만으로는 목표치를 달성하기 쉽지 않은 만큼, 해외에서 생산한 청정수소를 효율적으로 도입하기 위한 민간 인프라 마련이 시급하다는 것이다. 해외 청정수소 도입을 위해서는 수소 액화·액상 기술, 수소 운반선 기술, 액화플랜트 기술 등 다양한 기술이 확보되어야 하며, 이를 바탕으로 해외 생산지에서 수소의 변환 플랜트-수소 운반선-국내 수소 인수기지로 연결되는 가치사슬을 주도적으로 건설 및 운영할 필요가 있다. 이 과정에 있어, 민간 중심의 참여를 이끌어내어 시장 주도형 인프라 구축을 도모하는 것을 고려해볼 수 있다. 이는 현재 중장기적인 과제 중 하나로 고려되고 있는 만큼, 수소융합얼라이언스(H2KOREA)나 코리아 H2 비즈니스 서밋 등 기업체들이 포함되어 있는 협의체와 협력하여 단계적으로 그 기반을 마련해 나갈 필요가 있다.

이외에도 냉열에너지 확보를 위한 LNG 기지 근처 액화플랜트 구축, 주요 수소 생산 및 인수 기지 근처 배관망 확보, 수소생산 과정에서 이산화탄소를 포집 및 활용 혹은 판매할 수 있는 체제 마련 등 다양한 의견이 제시되었다. 특정 가치사슬 부문에 국한된 것이 아닌 전주기적으로 인프라 구축에 대한 필요성이 강조되고 있는 만큼, 민관 협력(Public Private Partnership; PPP)을 통해 유기적인 연계가 가능한 효율적인 수소경제 인프라를 마련하는 것이 필요하다.

3. 수소산업 활성화를 위한 규제 완화 및 제도 마련

현재 국내 수소 산업의 경우 안정적인 시장이 아직 형성되지 않은 단계로, 인프라 마련·기업 유인·주민 수용성 확보·시장 활성화 등 다양한 과제가 남아있는 실정이다. 조속한 시장 형성 및 인프라 구축을 위해 관련 규제 완화 및 차별화된 지원제도 마련이 적극적으로 고려되어야 한다.

먼저 청정수소 인증제 및 청정수소발전의무화제도(Clean Hydrogen Portfolio Standards; CHPS) 등 청정수소의 사용을 촉진하는 제도의 조속한 제정 및 실행을 요구하는 의견이 있었다. 상기 두 제도의 경우, 2022년 5월 「수소경제 육성 및 수소안전관리에 관한 법률」 일부개정법률안 대안이 가결되면서 제도 구축에 대한 법적 기반이 마련된 바 있다. CHPS 제도의 경우, 전기사업자에게 수소 발전량 구매 및 공급에 대한 의무를 부과함으로써 수소발전의 확대를 목적으로 하며, 이는 궁극적으로 수소의 생산과 사용을 촉진함으로써 수소경제 활성화를 위한 기반이 된다. CHPS 제도의 활성화를 통해 수소 가치사슬의 활성화를 도모하고, 청정수소 인증제를 통해 참여 기업들에게 가시적인 인센티브를 제공하는 제도 간 연계가 이루어진다면 수소경제 활성화를 위한 기반 마련을 보다 앞당길 수 있을 것으로 기대된다. 특히, EU와 일본, 중국 등 여타 주요국에서도 다양한 수소 생산 관련 여건을 고려한 자국에 특화된 청정수소 인증제의 세부 기준 및 등급을 마련하고 있는 만큼, 한국 또한 국내 특성을 반영한 청정수소 인증 등급 및 세부 기준을 조속히 마련하여 수소 기업의 상업적 운영을 지원함에 있어 제도적 혼란과 공백을 최소화할 필요가 있다. 이에 더해, 국내 청정수소 인증제의 국제 표준화를 이루어낼 수 있다면, 국내 기업의 국제경쟁력을 확보할 수 있어 글로벌 시장 진출에 도움을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

또한, 규제 샌드박스 및 규제자유특구 운영을 통해 다양한 잉여 재생에너지원 및 대규모 연계 운전 실적을 확보할 필요가 있다는 지적이 있었다. 규제 샌드박스란 사업자로 하여금 신기술 기반의 신제품 혹은 서비스를 특정 조건 아래서 우선적으로 출시하여 그 가치 및 경제성을 시험하고 검증할 수 있도록 규제 적용의 범위를 축소하여 주는 것을 의미하며, 이를 바탕으로 규제 개선이 필요한 부분을 발굴하여 이를 반영하고자 하는 것을 목표로 하는 제도이다⁹⁷⁾. 규제자유특구는 지역 투자 및 일자리 창출을 통해 지역 균형발전을 도모하고 전략·혁신산업을 육성하기 위해 특정 지역 대상으로 관련 규제를 완화해 주는 제도이다⁹⁸⁾. 수소 관련 규제자유특구의 경우 2019년 11월 울산이 수소 그린모빌리티 규제자유특구로 지정된 이후로 현재 충청북도(그린수소), 강원도(액화수소), 충청남도(수소에너지전환), 부산(암모니아 친환경에너지), 경남(암모니아 혼소 연료추진시스템 선박특구)을 포함하여 총 6개가 지정되어 운영 중에 있다⁹⁹⁾. 허나, 규제자유특구로 지정되었음에도 불구하고 여전히 다양한 규제가 걸림돌로 작용했던 점, 국비 지원이 부족한 점, 사업 진행의 프로세스가 명확하지 않았던 점, 부처 간 업무 및 의견 조율을 위한 컨트롤타워가 부족한 점 등이 아쉬운 점으로 지적된 바 있다. 추후 규제자유특구를 확대하고 보다 효율적으로 운용하기 위해서 관련 규제의 적극적인 완화와 명확한 사업 진행 프로세스 제공 및 국비 지원을 보장할 필요가 있다. 또한, 전반적인 업무를 조율해 줄 컨트롤타워를 확실하게 마련하고, 규제자유특구사업의 후속 사업 모델을 기획하여 제도적으로 지원함으로써 상용화에 이바지하는 것이 참여 기업으로 하여금 자생력을 확보할 수 있게 함으로써 수소경제 활성화에 큰 도움을 줄 것이라 판단된다. 이에 더해, 효율적인 규제 샌드박스 확장 및 운영을 통해 수소전문기업의 사업 활동을 지원하고, 대규모 실증사업에 대한 운전 실적 축적하는 것이 필요하다.

수소 관련 설비 및 시설에 대한 안전 기준과 규정의 설립 및 개정이 시급하다는 의견이 있었다. 현재 수소경제 활성화를 위해 수소 전주기에 걸친 수소 신기술의 개발과 도입에 박차를 가하고 있는 만큼, 신기술에 대한 안전 기준 및 규정 설립은 중요한 선결과제 중 하나로 언급되고 있다. 이를 위해, 정부는 2021년 11월 발표한 「제1차 수소경제 이행 기본계획」에서 수소 전주기적인 안전기준 마련 및 합리성 증진을 위한 규제 개선을 명시한 바 있으며, 산업통상자원부는 수소 안전관리 정책위원회를 구성하여 필요한 안전기준 및 현장 의견 수렴을 통한 규제 개선안을 발굴하고, 이를 바탕으로 2022년 11월까지 「수소 전주기 안전관리 종합계획」을 수립할 것임을 발표하였다. 수립 과정 중 산·학·연 전문가들의 의견을 적극적으로 반영하여 현 실태에 최적화된 종합계획을 발표하는 것이 필요할 뿐 아니라, 추후 추가로 발굴된 이슈 및 신기술 도입으로 인한 새로운 이슈에 효율적으로 대응하고 이를 즉각적으로 반영하여 안전관리의 합리성을 증진하기 위해, 주기적으로 이를 검토하고 새롭게 개정할 수 있는 정기적인 검토위원회를 설립하여 운영하는 것 또한 고려해볼 수 있다.

97) 규제정보포털, 「규제샌드박스」,

https://www.better.go.kr/sandbox/info/sandbox_intro.jsp, 2022.10.21. 접속.

98) 중소벤처기업부, 「규제자유특구란」,

<http://rfz.go.kr/?menuno=66>, 2022.10.21. 접속.

99) ① 중소벤처기업부 보도자료, 「친환경 이동수단(모빌리티) 관련 규제자유특구 3개 신규지정!」,

<https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156519697>, 2022.10.21. 접속.

② 중소벤처기업, 「부산 암모니아 친환경에너지 규제자유특구」,

<http://rfz.go.kr/?menuno=258>, 2022.10.21. 접속.

4. 수소전문기업 육성 및 사업화 촉진

수소전문기업의 육성은 수소 생태계를 조성하고 참여 기업의 경쟁력을 제고하기 위해 필수적으로 이루어져야 하는 선결과제 중 하나이다. 현재 정부의 지원을 바탕으로 수소융합얼라이언스(H2KOREA)는 수소산업 진흥을 전담하는 기관으로서 ‘수소전문기업 플러스(+) 1000’ 사업을 추진하여, 중장기적인 수소전문기업 육성 전략을 시행하고 있다. 수소전문기업을 2030년까지 500개, 2040년까지 1,000개를 지정하고 그에 따른 다방면적인 혜택을 제공함으로써 국제 수소 시장에서의 확실한 위치 선점을 목적으로 하고 있으며, 현재까지 2022년 8월 기준 총 49개의 기업을 선정하여 지원 중에 있다. 수소전문기업 모수의 지속적인 증가는 매우 긍정적으로 판단되나, 분야의 다양화와 핵심소재·부품·장비 관련 전문기업 육성이 필요하다는 의견이 있었다. 이를 위해, 기업이 다양한 분야의 수소 사업에 진출할 수 있도록 수소 전주기에 따른 원천기술 관련 R&D 지원을 확대하고, 참여 희망 기업을 대상으로 얼라이언스 참여를 촉구하거나 수소 공급사·발전사와의 컨소시엄을 구성하는 등 기업 간 교류 강화를 통해 수소 공급망 내 참여 기회를 확대하는 것이 필요하다. 이에 더해, 사업장 부근 또는 산업단지 내 자체 수소 생산 및 공급 인프라를 구축하여, 수소전문기업으로 하여금 보다 쉽게 경제성을 확보할 수 있게끔 한다면, 효율적인 성공사례를 도출할 수 있을 것으로 기대될 뿐 아니라, 우수 사례를 바탕으로 한 적극적인 홍보를 통해 여타 기업의 참여를 촉구할 수 있는 유인요소로써 작용할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 수소 관련 기술의 상용화 및 그에 따른 사업화 전략 수행을 위한 효율적인 지원체계가 마련되어야 한다는 의견이 있었다. 이는 현재 규제자유특구 운용과 관련하여 제기되고 있는 이슈 중 하나로, 관련 기업의 참여에 있어 사업 진행 프로세스 및 지원체계의 효율화가 필수적이라는 지적이 있었다. 특히, 대기업 수준의 시스템 생산업체 육성을 목표로 적극적인 지원이 이루어진다면, 사업화 기간을 단축할 수 있어 보다 조속히 수소경제의 기반을 마련할 수 있을 것이라는 의견 또한 제시되었다. 따라서, 기존 인허가 절차를 간소화하고 각종 사업 진행 프로세스를 현장 조건을 반영하여 최적화하는 것이 필요하며, 이를 지원하기 위한 체계적인 정부 및 지자체의 프로그램 마련하는 것을 고려해야 한다.

5. 수소 수요처 확대 및 다양화를 통한 시장 활성화

수소 생산 규모의 성장에 비해 수소 수요가 더딘 성장을 보이고 있는 만큼, 추가적으로 지속 가능한 수소 수요처를 발굴하여 수소 시장의 안정적인 수요 규모를 확보함으로써 전반적인 시장의 활성화를 달성하는 것이 필요하다는 의견이 다수 존재했다. 현재 국내 다양한 기업들이 신속하게 수소 생산량을 증대하는 방향으로 사업 계획을 마련하여 진행 중에 있으나, 연·원료 수요처에서 수소 활용으로의 전환이 상대적으로 늦어 수소 시장이 충분히 활성화되지 않아 어려움이 있다는 것이다. 시장 형성 초기에 수소 수요는 수소차 및 연료전지 등 수소 활용 부문의 에너지원으로써의 용도가 강조되었으나, 향후 수소환원제철 및 합성 나프타 제조 등 산업용 수소 수요가 추가적으로 창출될 것으로 전망되는 만큼, 2050 탄소중립 시나리오에서는 추후 수소 수요를 2050년 기준 최대 2,790만톤까지 예측한 바 있다. 이와 같이, 잠재적인 수소 수요

가 충분히 예측되는 만큼, 이를 조기에 파악하여 발굴함으로써 시장 활성화의 기반을 마련하는 것이 수소경제 활성화의 측구에 큰 도움이 될 것이라 전망된다.

단순히 수소 수요처를 발굴하는 것에 그칠 것이 아니라, 각 가치사슬별로 다양한 부문의 수소 수요처를 발굴하는 것 또한 필요하다. 이는 「제1차 수소계획 이행 기본계획」에서도 명시된 바 있다. 현 국내의 수소의 경우 활용처가 수소차 및 연료전지 관련 부문에 다소 집중되어 있는 만큼, 수요 확보를 통한 시장 견인과 시장 확대를 통한 여타 부가적인 시너지 효과를 도모하는 데 어려움이 있어, 다양한 수소 활용처 발굴 및 모빌리티의 다양성 확보가 필요하다. 따라서, 추후 수소 모빌리티 부문에서 승용차 대비 상용차에 대한 투자 및 R&D를 촉구하고, 산업계 내 수소 활용이 요구되는 친환경 신기술 개발에 체계적인 지원을 제공하는 등 수소 활용처의 다변화를 추구하는 것이 요구된다.

6. 사회적 수용성 제고를 통한 수소경제 이행 촉진

신기술 및 새로운 설비 도입에 있어 초기의 주민 수용성은 중장기적으로 주요하게 작용하는 요인 중 하나로 평가되는 만큼, 수소 관련 설비 및 시설에 대한 이해관계 갈등 해결 및 주민 수용성 증대를 위한 다양한 정책방안을 마련하여 국민적 공감대를 형성하는 것이 필수적이다. 첫째로, 수소 인프라의 안전성에 대해 과학적 사실에 근거한 적극적인 홍보 방안 마련이 필요하다. 수소 관련 설비의 경우, 안전성을 문제로 한 주민의 거센 반대에 부딪히는 경우가 다수 발생해 왔다. 이는 수소 생산 시설뿐만 아니라, 수소 모빌리티 및 수소충전소 등 여타 수소 부문 설비 설치에 대해서도 동일하게 발생해왔다. 지난 2012년 발생한 구미 불화수소 누출사고부터 최근 2019년 강릉 수소탱크 폭발 사고와 포스코 광양제철소 폭발 사고 등 수소 관련 설비 및 시설에서의 안전사고 사례들이 주민의 불안감을 증폭시키는 것에 영향을 미친 것으로 판단된다. 예를 들어, 지난 2020년 양재수소충전소를 설치할 때 많은 주민들이 폭발에 대한 위험성을 이유로 들며 불안감을 호소한 바 있다. 또한, 인천과 강릉, 횡성, 함안 등지에서 진행된 수소연료전지발전소 설립 계획도 마찬가지로 주민의 반대로 인해 정부 사업허가에 난항을 겪었다. 이 과정에서, 안전성의 충분한 확보가 이루어졌다는 것에 대한 명확한 설명이 부족하다는 의견이 있었다. 따라서, 수소 관련 인프라 확충 시 인근 주민들로 하여금 충분히 불안감을 해소할 수 있도록 과학적 사실에 근거하여 안전성에 관한 홍보를 진행할 필요가 있다. 안전관리자가 직접 주민 대표로 하여금 시설 내를 점검하고 안전성 관리 지침을 확인할 수 있게끔 하며, 관련 운영 정보를 열람할 수 있도록 권한을 부여하거나 주기적인 운영 자료를 제공한다면 이 효과는 더욱 증폭될 것이라 전망된다. 특히, 수소 및 관련 설비에 대한 충분한 배경지식을 보유한 경우 주민 수용성이 증대된다는 연구 결과가 있는 만큼¹⁰⁰⁾, 관련 지식을 효율적으로 제공할 수 있는 적극적인 홍보 방안이 절실하다.

또한, 지역 사회에 경제적 이익을 제공하여 효용성을 제고하는 방안 또한 고려할 수 있다. 지역 사회와의 이익 공유 혹은 추가적인 경제적 이익 창출 또한 주민수용성 증진에 큰 기여를

100) 이지훈(2021), 앞의 논문 참조.

할 수 있는 요인 중 하나로 지적된 바 있다. 이 효과는 산업 기반이 부족한 지역의 경우 더욱 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 전망된다. 따라서, 주민들로 하여금 수소 기반 산업의 주체적인 이해관계자 중 하나로서 참여할 수 있게끔 하여 이익 공유 제도를 확충함으로써 경제적 유인요소를 창출하는 방안을 고려해 볼 수 있다. 또한, 지방자치단체와의 협력을 통해 추가적인 일자리를 창출하거나 지역 산업과 연계하여 보다 비약적으로 성장할 수 있는 시너지 효과를 도모한다면 수소 관련 사업에 대한 인식을 효과적으로 제고할 수 있을 것으로 예상된다.

신재생에너지 사업의 경우, 초기 단계에서 주민수용성 관련 문제로 인해 반대에 부딪히는 사례는 지속적으로 발생해 왔다. 이는 탄소중립 기술과 관련 사업에 대해서도 같은 양상을 보이고 있다. 기후변화에 대한 대응과 탄소중립 달성에 대한 중요성은 이미 다양한 매체를 통해 널리 알려진 바 있으나, 관련 기술에 대한 배경 지식 및 도입에 대한 수용성은 다소 부족한 실정이다. 따라서, 수소 전주기적 기술에 대한 전반적인 이해도 증진을 위해 정부 및 지자체 차원에서 다양한 홍보 방안을 마련할 필요가 있다. 예를 들어, 공식 홍보 채널을 통한 영상물 제공, 방송사와의 협력을 통한 다큐멘터리 혹은 광고 제작, 수소시설 견학 프로그램 등을 제공하여 지속적인 수소 인식 개선에 대한 노력이 이루어져야 한다. 이에 더해, 연령대와 환경에 따른 수용 정도에 차이가 있는 만큼¹⁰¹⁾, 이에 특화된 교육 프로그램을 마련하여 운영함으로써 전 세대 및 계층에 걸쳐 수소에 대한 수용성을 증진하는 것을 고려해볼 수 있다. 이를 통해, 단순히 단기적인 설비 도입에 대한 수용뿐만 아니라, 중장기적으로 수소경제 기반 마련 및 수소경제로의 전환에 있어 주민들의 이해도와 인지도를 높이는 것이 필요하다.

7. 신재생에너지 보급 확대를 통한 청정수소 생산 역량 확보

청정수소 생산량 확대에 있어 지속 가능한 신재생에너지원 확보 및 보급 확대는 필수적으로 수반되어야 하는 요소 중 하나이다. 2050 탄소중립 시나리오에 따르면, 현재 정부는 2050년 기준 약 2,790만 톤의 수소를 청정수소의 형태로 공급하는 것을 목표로 청정수소 체계로의 전환을 추구하고 있다. 현재 개정된 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」에서는 청정수소의 범위에는 수소의 생산 혹은 수입 과정 내 온실가스를 배출하지 않는 수소인 무탄소수소, 대통령에서 정의한 기준 이하의 온실가스를 배출하는 수소인 저탄소수소와 동일한 기준을 보유한 수소화합물인 저탄소수소화합물이 포함되어 있다. 따라서, 청정수소 체계의 안정성 확보를 위해서는 관련 기술의 발전과 동시에 안정적인 신재생에너지 보급 방안을 확보하는 것이 필요하다.

여타 선진국의 사례에서도 동일하게 재생에너지와 수소의 연계를 꾀하는 정책 기조를 엿볼 수 있다. 독일의 경우, 2030년까지 전체 에너지의 50%에 달하는 재생에너지 보급 기반을 마련하고, 이를 활용한 수전해 수소 생산을 바탕으로 한 수소경제와의 융합을 도모하는 정책을 추진하고 있다¹⁰²⁾. 호주 또한 「호주국가수소전략」을 바탕으로, 빅토리아·퀸즐랜드·타즈메니아·캔버라 주 등지에서 재생에너지 비중을 증대하고 이를 바탕으로 한 수소 생산 기술을 개발하고 산업을 발굴

101) 이지훈(2021), 앞의 논문 참조.

102) 관계부처 합동(2019), 「수소경제 활성화 로드맵」

하는 것에 초점을 맞추고 있다¹⁰³⁾. 이를 바탕으로 볼 때, 신재생에너지 보급의 확대와 이를 수소 생산과 연계하는 것은 범국가적인 추세라고 볼 수 있으며, 국내 수소 생산 체계 또한 신재생에너지 보급 확대를 통해 생산 역량을 제고해야 할 필요가 있다고 판단된다.

우리나라 또한 「제5차 신재생에너지 기본계획」을 통해 신재생에너지 보급 목표와 전략을 제시한 바 있고, 이를 바탕으로 한 탄소중립 및 수소경제 이행 전략을 수립하여 이행하고 있다. 현재 우리나라는 2034까지 최종 에너지 대비 총 13.7%의 신재생에너지를 보급하는 것을 목표로 하고 있으며, 이를 바탕으로 재생에너지 연계 수전해 실증 등 청정수소 생산 체계의 상용화를 추진하고 있다¹⁰⁴⁾. 그러나 여타 선진국의 사례와 비교해 볼 때, 지역적 한계 및 경제적 문제, 주민수용성 등의 문제로 인해 신재생에너지 보급 확대가 어려운 상황이다. 특히, 최근 들어 러시아-우크라이나 간 전쟁의 여파로 인해 에너지 수급에 난항을 겪고 있는 만큼, 청정수소의 공급을 단순히 해외에 절대적으로 의존하기보다 국내 신재생에너지 보급 확대를 통해 수소 안보를 증진하고 시스템의 안정성을 확보하는 것이 필요하다. 이를 위해, 관련 인허가 제도의 개선 및 일원화, 지역 이익 공유제 등을 통한 주민수용성 증진, 설비 확대를 위한 부지 확보 등을 통해 신재생에너지 보급의 기반을 견고히 할 필요가 있다고 판단된다.

8. 수소 해외 수입처 확보를 위한 국제협력 강화

국내 수소 공급 현황을 살펴보면, 단순히 국내 생산만으로는 충분히 그 수요를 맞추기가 쉽지 않은 실정이다. 현 국내 수소 수요는 2021년 기준 약 22만 톤으로, 2050 탄소중립 시나리오에 따르면 향후 2,790만 톤까지 증가될 것으로 예상되고 있다. 이에 맞춘 공급량 목표치를 달성하기 위해서 해외수소의 도입 혹은 해외 청정수소 생산이 효과적인 방안 중 하나로 고려되고 있다. 이를 위해, 현재 정부는 수소유통활용 전주기 구축 프로젝트인 H2 STAR(H2 Supply - Transportation - Application - Relationship) 프로젝트를 진행하고 있으며, 호주, 사우디, 아랍에미리트, 러시아 등 후보국을 선정하여 해외 재생에너지 개발을 목표로 수소 전주기 사업에 참여하고 있다. 여타 선진국 또한 동일한 계획 하에 과제를 진행하여 수소 공급에 박차를 가하고 있다. 예를 들어, 일본의 경우 2011년부터 호주와 수소공급망 시범사업(Hydro Energy Supply Chain; HESC)을 통해 해외 수소 생산 및 국내 도입을 진행해 왔으며, 2022년 초 세계 최초의 액화수소 전용 운반선 스이소(水素, 수소)프런티어(Suiso Frontier) 호를 개발 및 건조하여 액화수소를 운반해 온 바 있다. 상기 프로젝트를 진행하며, 일본은 호주 연방정부 및 빅토리아 주 정부와 긴밀하게 협력하며, 각국 대표 에너지 및 인프라 기업을 초청하여 컨소시엄을 구성해 운영함으로써 관련 기술개발 및 운영 계획을 세웠다. 우리나라 또한 재생에너지가 풍부하고 대용량 이산화탄소 처리가 가능한 해외 주요국과의 협력에 있어, 국가 간 협력과 민간 업체를 포함한 컨소시엄 구축을 통해 긴밀하게 서로의 입장을 조율하고 현지 상황 및 입지를 효율적으로 반영한 협력 구축안을 마련할 필요가 있다.

103) S&T GPS(2021), 「주요국 수소경제 정책과 시사점」, 『이슈분석』, 195 참조.

104) 산업통상자원부(2020), 「제5차 신재생에너지 기본계획」; 산업통상자원부(2021), 「제1차 수소경제 이행 기본계획」

제3장

국내 CCUS 산업 활성화를 위한 산업 클러스터 조성방안

제 3 장 국내 CCUS 산업 활성화를 위한 산업클러스터 조성방안

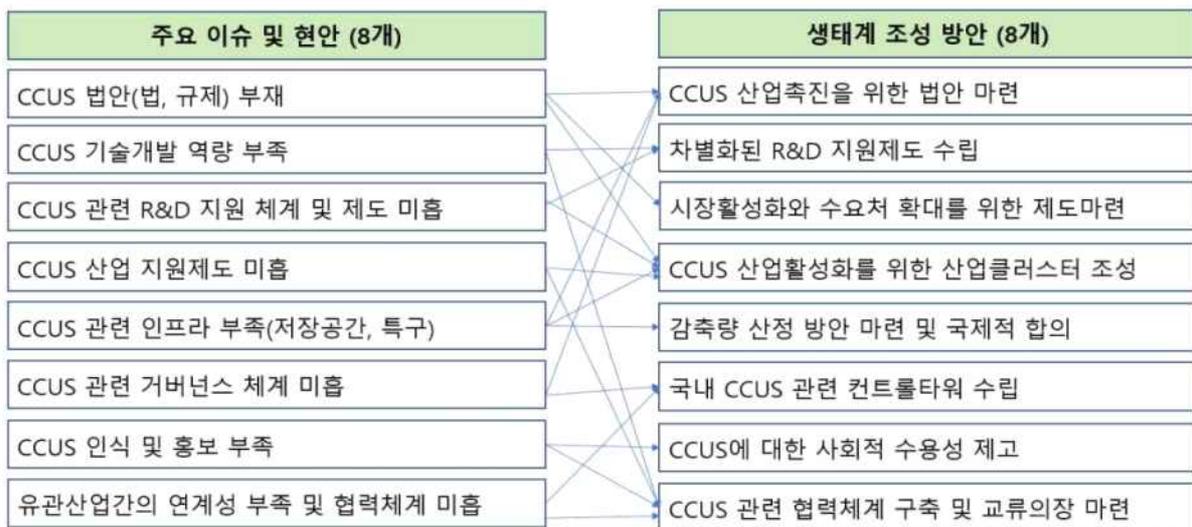
제 1 절 CCUS 정책 우선순위 도출

1. 개요

CCUS 기술은 정부가 발표한 ‘2050 탄소중립 시나리오’ 및 ‘CCU 기술혁신 로드맵’ 등에서 온실가스 감축을 위한 핵심기술 수단으로 제시되어 있으나, 구체적인 이행방안은 부재한 실정이다. 이에 따라 지난 ‘21년 본 연구의 선행연구로써 「탈탄소 사회전환을 위한 국내 CCUS 산업생태계 육성방안 연구」가 수행되었다.

해당 선행연구는 탄소중립을 위한 산업부문의 핵심요소인 CCUS 산업 혁신 생태계를 종합적으로 파악하고, 국내 CCUS 산업 혁신 생태계 조성방안을 마련하기 위하여 진행되었으며, 연구결과 중 하나로 CCUS 산업생태계 조성을 위한 8개의 주요 이슈와 현안 및 8대 생태계 조성방안이 아래 [그림 3-1]과 같이 도출되었다.

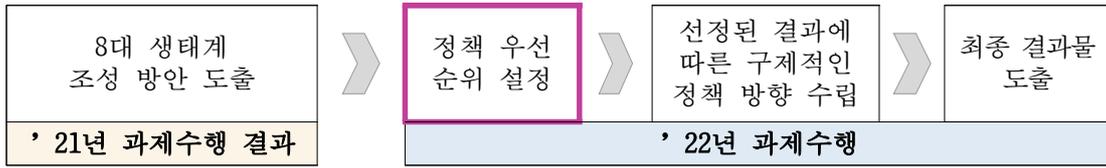
[그림 3-1] CCUS 산업생태계 육성을 위한 주요 이슈·현안 및 생태계 조성방안



자료: 김민철 외(2021), 2021-004, 110면.

선행연구는 상기 도출된 8대 생태계 조성방안에 필요한 세부전략을 제시하였다. 이에 따라 본 연구는 제시된 세부전략을 추진하기 위한 구체적인 방안을 마련하기 위하여 8대 생태계 조성방안 중 최우선으로 해결되어야 할 정책과제를 선정하고자 하였다.

[그림 3-2] 연구수행 방안

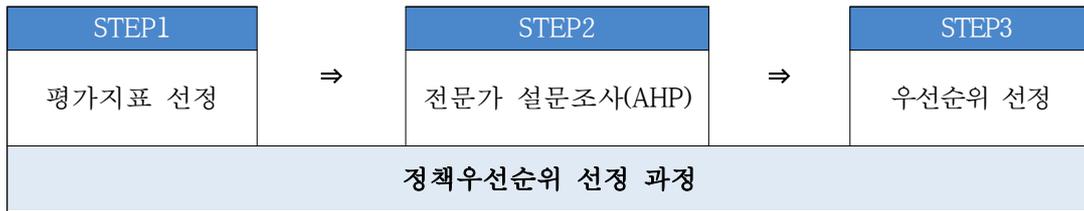


자료: 저자 작성

2. 내용

8대 생태계 조성방안 중 “CCUS 산업촉진을 위한 법안 마련”은 범부처 차원에서 수행 중에 있음에 따라 해당방안을 제외한 7대 생태계 조성방안을 바탕으로 최우선 정책과제를 선정하고자 하였다. 정책과제 선정에 위해 이를 위해 ① (STEP1) CCUS 정책 우선순위 도출을 위한 평가지표 선정, ② (STEP2) 전문가 대상 설문조사를 통한 평가지표 가중치 도출, ③ (STEP3) CCUS 세부 정책방안별 우선순위 도출을 단계적 과정으로 수립하였다.

[그림 3-3] CCUS 생태계 조성방안 정책 우선순위 선정 방법



자료: 저자 작성

첫 번째 단계(STEP1)로 CCUS 정책 우선순위 도출을 위한 평가지표 선정을 위한 연구진 내브의 브레인스토밍이 있었다. 이를 통해 마련된 주요 평가지표를 바탕으로 탄소중립관련 전문가(외부 전문가 6인, 내부 연구진 6인)로 구성된 본 연구의 총괄위원회 12인과 해당 평가지표 구성의 타당성 등에 대해 논의하고 최종 평가지표와 고려사항을 다음 <표 3-1>와 같이 도출하였다.

<표 3-1> CCUS 정책 우선순위 선정 시 고려해야 할 평가항목

평가지표	설명
정부정책 부합성	정부정책과의 연계성, 국고지원의 당위성 및 효율성, 기후변화 완화·지연효과, 에너지 절감효과, 온실가스 저감효과
파급 효과	경제사회산업에 미치는 영향, 국가경쟁력 제고, 지역경제 활성화, 부가가치 및 취업 유발효과, 정책의 효과성
시급성	내용 추진의 시의 적절성, 신속한 대응 필요성

자료: 저자 작성

두 번째 단계(STEP2)로써 국내 산·학·연 전문가 10인을 대상으로 상기 도출된 평가항목에 대한 중요도 측정과 정책 우선순위 도출을 위한 설문 조사를 수행하였다. 설문은 ① 정책 우선순위 선정을 위해 각 평가기준 항목들의 중요도를 측정하기 위한 AHP(계층분석법)와 ② 7대 생태계 조성방안을 평가기준 항목별로 평가하는 내용으로 구성하였다. 이때, 특정 항목이 타 항목에 비해 얼마나 더 중요한지를 평가하기 위한 기준은 7점 척도를 사용하였다.

〈표 3-2〉 CCUS 정책 우선순위 선정 질문 문항 예시

〈응답 예시〉							
■ ABCDE 프로그램은 정부정책 부합성은 조금 낮고, 시급성은 보통이라는 의미입니다.							
정책과제	ABCDE						
정부정책 부합성	①	②✓	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통이다	조금 높다	높다	매우 높다
시급성	①	②	③	④✓	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통이다	조금 높다	높다	매우 높다

자료: 저자 작성

3. 결과

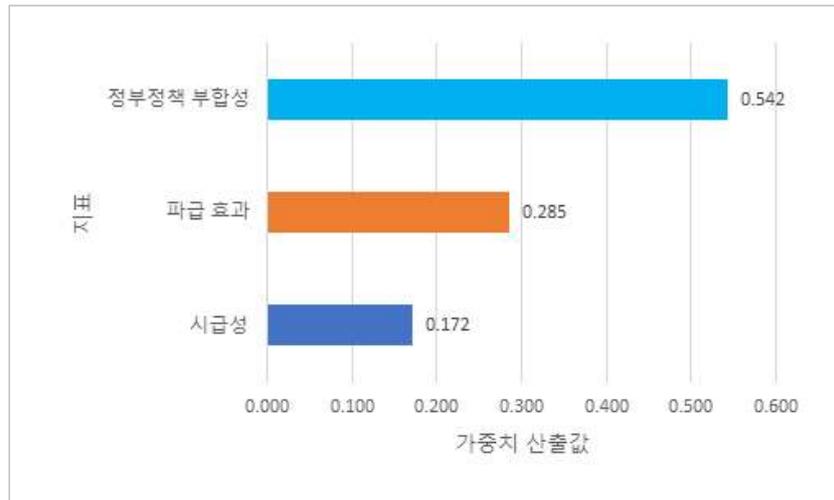
평가기준 항목 중요도 설문결과 중요도는 ① 정부정책 부합성, ② 파급효과, ③ 시급성 순으로 도출되었으며, 7대 생태계 조성방안 중 최우선 정책과제는 “CCUS 산업 활성화를 위한 산업클러스터 조성” 이 최우선 정책과제로 선정되었다.

구체적으로 결과도출 과정 및 결과도출 현황을 살펴보면 다음과 같다. 우선, 평가기준 항목 설문 응답을 바탕으로 각각 항목에 가중치를 부여하여 상대적 중요도를 측정하였다. 상대적 중요도(가중치)를 측정한 결과는 [그림 3-4]와 같으며, 평가기준 중 ① 정부정책 부합성이 0.542로 가장 높은 중요도를 가지는 것으로 측정되었다. 정부정책 부합성에 이어, ② 파급효과(0.285)와 ③ 시급성(0.172) 순서로 중요도가 높은 것으로 측정되었다.

평가기준의 가중치를 측정한 이후, 7대 생태계 조성방안과 관련한 응답결과 각각에 대한 점수를 책정한 후 상기 도출된 가중치를 적용하여 최우선 정책과제를 도출하였다. 상기한 바와 같이 “CCUS 산업 활성화를 위한 산업 클러스터 조성” 이 58.840점으로 최우선 정책과제로 선정되었으며, “시장활성화와 수요처 확대를 위한 제도마련” (57.470점), “차별화된 R&D 지원제도 수립” (55.416점)이 각각 2위 및 3위의 우선도를 가지는 정책과제로 평가되었다(〈표 3-3〉 참고).

도출된 결과에 따라 하기에서는 “CCUS 산업 활성화를 위한 산업 클러스터 조성” 을 중심으로 구체적인 세부 이행방안을 검토하고 정책적 시사점을 도출하고자 한다.

[그림 3-4] 평가항목별 가중치 산정 결과



자료: 저자 작성

<표 3-3> CCUS 정책 우선순위 선정 결과

순위	정책과제	점수
-	CCUS 산업촉진을 위한 법안 마련	과제수행종료
1	CCUS 산업활성화를 위한 산업클러스터 조성	58.840
2	시장활성화와 수요처 확대를 위한 제도마련	57.470
3	차별화된 R&D 지원제도 수립	55.416
4	국내 CCUS 관련 컨트롤 타워 수립	51.761
5	감축량 산정 방안 마련 및 국제적 합의	48.938
6	CCUS 관련 협력체계 구축 및 교류의 장 마련	47.337
7	CCUS에 대한 사회 수용성 제고	46.138

자료: 저자 작성

제 2 절 CCUS 산업 클러스터 이론적 검토 및 국내외 사례조사

1. CCUS 산업 클러스터 개념과 의의

클러스터(Cluster)는 무리, 송이, 집체라는 뜻으로 통상 ‘사람·동물 등의 집합체나 무리’를 가리키며, 현재에 와서 산업클러스터, 정치·행정클러스터, 종교클러스터 등 각종 분야와 연계하여 광범위하게 사용되는 용어로 자리 잡았다.¹⁰⁵⁾ 그러나 당초 클러스터라는 용어는 국가경쟁력 강화를 위한 방안으로 산업에 한정된 개념이었으며, 1990년대 경영전략의 최고 권위자로 알려져 있는 Michael E. Porter가 그의 저서 「국가의 경쟁우위(The Competitive Advantage of Nations)」¹⁰⁶⁾에서 지리적 집합체의 효과 및 중요성을 언급한 이후에 연구가 활발하게 전개되기 시작하였다.¹⁰⁷⁾

Michael E. Porter는 국가의 경쟁우위를 판단하기 위한 기본단위를 ‘산업’으로 상정하고, ‘산업클러스터’를 국가 경쟁우위를 분석하기 위한 이해의 틀로 보면서 지리적 집적의 필요성과 의미를 강조하였다.¹⁰⁸⁾ 즉, Michael E. Porter는 클러스터의 개념을 산업부문에 한정하여 ‘특정 분야의 상호 연관된 회사 및 기관의 지리적 집합체’라고 정의하고, 그 안에는 관련 산업과 경쟁에 있어 중요한 여타의 다른 기관 및 기계, 서비스, 인프라, 제조업체, 기술을 포함하여 기술을 지원하는 정부기관 및 대학과 싱크탱크 등을 포함한 기타 기관이 포함되어 있다고 보았다.¹⁰⁹⁾

해당 개념 및 구성요소에 따르면 산업클러스터는 산업과 관계되어 있는 기관 등과 해당 기관 등을 둘러싸고 있는 활동의 집합체로써 제도적, 지리적, 경제적으로 긴밀한 상호 연계를 맺고 있는 전략적으로 형성된 총체로 볼 수 있다.¹¹⁰⁾ 다시 말해 산업클러스터는 단순히 물리적·지리적 공간의 연계를 넘어 ‘경쟁 및 분업 체계’를 구축함으로써 산업혁신 및 경쟁력 강화를 이끌어내는 제도적 환경으로 이해된다.¹¹¹⁾ 따라서 제도적 환경으로서의 산업클러스터의 조성은 지속적인 산업혁신과 경쟁력 강화를 결정한다는 점에서 중요한 의의가 있다.

이때 사용된 다이아몬드 모델([그림 3-5] 참조)은 특정 산업의 경쟁력 창출 및 유지에 영향을 미치는 요소를 생산조건, 수요조건, 관련 지원사업, 기업 전략, 구조 및 경쟁 등으로 분류하고 정부 및 기회를 기타 변수로 규정하고 있다.

105) 권오혁(2017), 「산업클러스터의 개념과 범위」, 『대한지리학회지』, 대한지리학회, 52(1), p.58.

106) Porter M.(1990), “The Competitive Advantage of Nations”, *Harvard Business Review*, 68(2) 참조.

107) 권오혁(2017), 앞의 논문, 56면; 한상일·유평준, 「혁신클러스터의 발전과 집단화전략: 원주의료기기클러스터의 사례」, 『정부학연구』, 고려대학교 정부학연구소, 14(2), p.75.

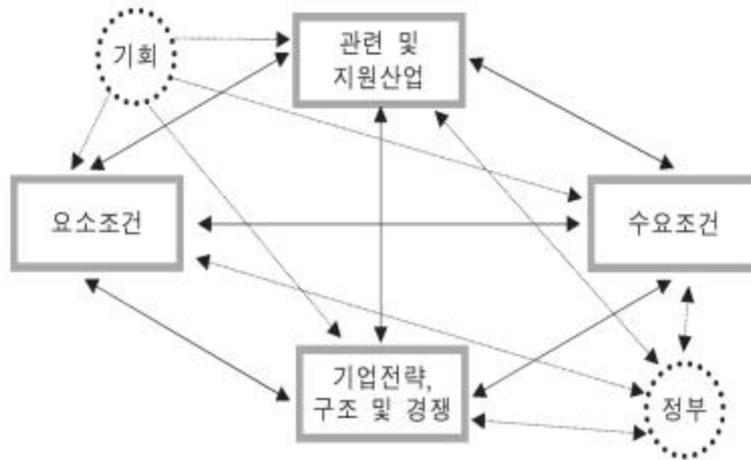
108) 이철우(2001), 「포터(Michael E. Porter)의 국가경쟁력 이론」, 『공간이론의 산책』, 국토연구원, 235, p.63.

109) Porter M.(1998), “Clusters and the New Economics of Competition”, *Harvard Business Review*, 76(6), p.3.

110) 권오혁(2017), 앞의 논문, p.57.

111) 이철우(2001), 앞의 논문, p.65.

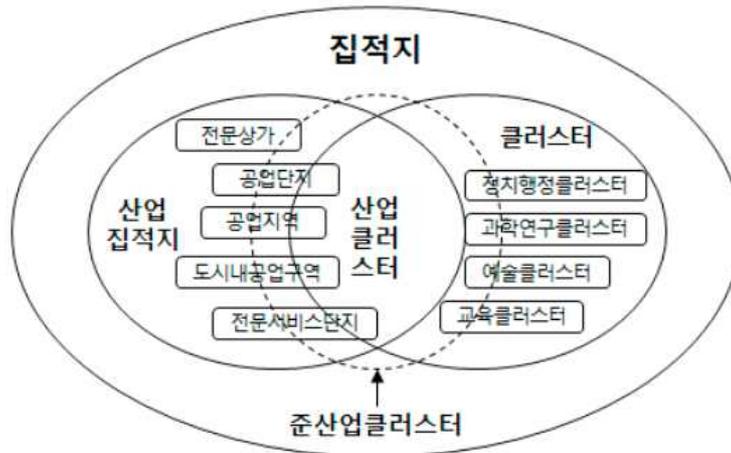
[그림 3-5] Michael E. Porter의 국가경쟁력 결정 모형으로서의 다이아몬드 모델



자료: Michael E. Porter(1990), 과학기술&ICT 정책·기술 동향(2017), 6면 재인용

국내에 조성되어 있는 각종 클러스터 또한 Michael E. Porter가 제시한 산업클러스터의 개념 정의와 크게 유리되지 않으며, 산업혁신 및 경쟁력 강화에 더하여 인력양성, 일자리 창출 등 지역 경제 발전 및 활성화를 염두에 두고 있다는 정도가 차이점일 수 있다.¹¹²⁾

[그림 3-6] 산업클러스터, 각종 클러스터 등과의 관계



자료: 권오혁(2017), 68면.

대표적으로 법에서 정하는 클러스터의 종류는 「녹색융합클러스터의 조성 및 육성에 관한 법률」에 따른 '녹색융합클러스터', 「해양산업클러스터의 지정 및 육성 등에 관한 특별법」에 따른 '해양산업클러스터', 「식품산업진흥법」에 따른 '국가식품클러스터', 「우주개발 진흥법」에 따른 '우주

112) 권오혁(2017), 앞의 논문, 65면.

산업클러스터’, 「정보통신 진흥 및 융합 활성화 등에 관한 특별법」에 따른 ‘양자정보통신산업클러스터’와 「축산법」에 따른 ‘국가축산클러스터’ 등이 있으며, 관련법에 따른 클러스터의 정의는 통상 “관련 산업과 연관 산업의 집적 및 융복합을 촉진하고 그와 관련한 연구개발, 실증화 등을 지원하기 위하여 기업, 연구소, 대학 등을 상호 연계하여 조성된 지역”을 말한다.

그러나 여기에서 말하는 산업클러스터의 거시적인 목적은 국가경쟁력강화와 지역 경제 발전이지만, 핵심은 지리적 인접성을 중심으로 모인 집합체들의 경쟁관계와 독립성을 핵심가치 및 특성으로 상정하고 상호연계성을 바탕으로 클러스터를 조성하여 이를 산업과 기업의 경영전략으로 수립하기 위한 하나의 매개체로 사용한다는 점에서 CCUS의 산업생태계 활성화를 위한 클러스터 조성과는 그 목적과 필요성에서 약간의 차이가 있다.

우선, CCUS 산업클러스터는 탄소중립이라는 전 세계적 목표에 따라 CCUS 기술의 본격적인 상용화가 필요하다는 목적의식이 포함되어 있다는 점에서 기존 산업클러스터와의 차별성을 보인다. 기존 산업클러스터의 조성이 산업경쟁력 확보라는 측면에서 상호연계성을 바탕으로 경쟁 및 분업체계의 구축에 초점이 있었다면, CCUS 산업클러스터는 탄소중립 및 지속개발목표(Sustainable Development Goals, SDGs)와 기업의 사회적 책임(Corporate Social Responsibility, CSR)을 넘어 기업의 ESG(Environmental, Social, Governance) 경영 측면에서 공존공영(共存共榮)의 가치를 달성하는데 방점이 있다고 할 수 있다.

즉, CCUS 산업클러스터는 “이산화탄소 포집·활용·운송·저장 기술개발 및 산업을 영위하는 기업의 집적단지로서, 연구개발, 실증화 등을 지원하기 위하여 기업, 연구소, 대학 등을 상호 연계하고, 관련 전문인력 양성, 창업 사업화 촉진, 제품홍보 및 시장 진출을 지원하기 위한 진흥 시설의 총체”로 요약될 수 있으나 궁극적인 목적은 산업경쟁력확보를 넘어 탄소중립 및 지속가능성에 있다.

따라서 CCUS 산업클러스터 조성의 핵심은 개별 기업 등의 자체 경쟁력 제고에 우선순위가 있다기 보다는 CCUS 산업생태계를 구성하는 개별 주체들의 상호연계를 바탕으로 경쟁 및 협력을 통한 탄소중립을 이행하고, 나아가 지속가능한 성장과 발전을 달성하는 것에 방점이 있다고 할 수 있다. 이에 따라 CCUS 산업클러스터는 경제적 공동체를 바탕으로 국내 기업의 성장 및 발전을 도모하고, 국제변화 등과 같은 외부 환경변화에 대응할 수 있는 시스템을 구축함으로써 거시적인 목표인 탄소중립을 이행하고 이를 통해 국가경쟁력 제고를 달성하는 데 목적과 의의가 있다고 할 것이다.

2. CCUS 산업 클러스터 조성 필요성

CCUS 산업클러스터는 낮은 기술완성도와 부족한 경제성으로 인해 형성된 시장이 매우 초기단계임에 따라 기존의 클러스터를 구성하는 산업과 비교하여 미래 시장 규모 측정이 상당히 어려운 것이

현실이며, 조사업체에 따라 편차가 매우 크게 나타난다.

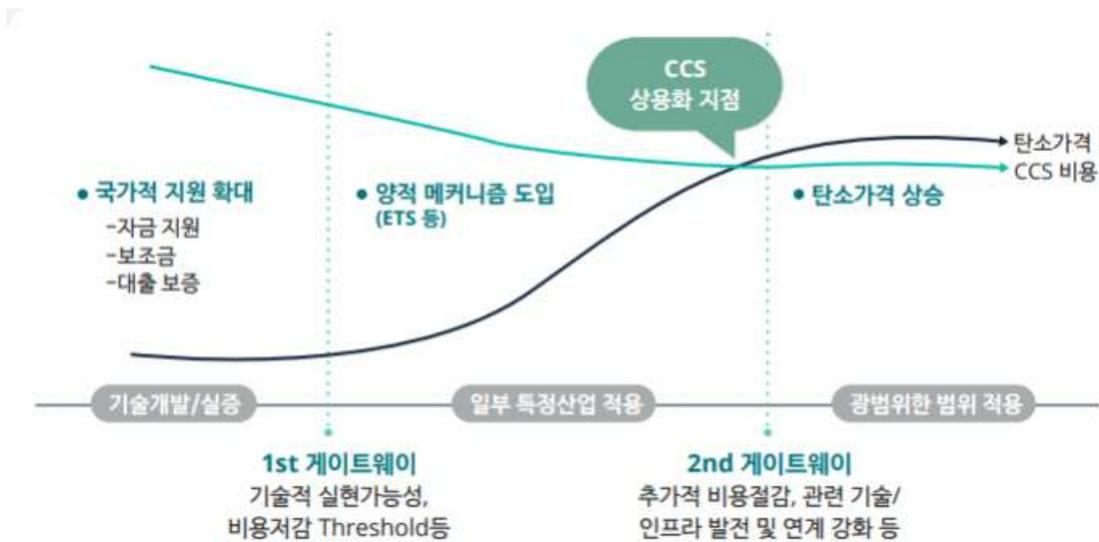
[그림 3-7] CCUS 미래 시장 규모 예측



자료: The Business Research Company(2022), Research and Markets(2022), bcc Research(2022)를 바탕으로 저자 작성

편차를 고려하여 CCUS 시장 형성을 예측하였을 때, 완만한 성장이 예상된다고 하더라도 CCUS는 초기 투자비용과 고정 비용이 매우 높은 시장이다. 즉, 탄소중립 실현의 핵심기술로서 CCUS 기술 상용화 필요성이 절실하고 CCUS 사업은 잠재성이 높은 시장으로 평가받고 있지만, 여전히 고정 비용 등이 매우 높아 기업의 자발적인 참여를 기대하기 어려우며, 이와 같은 이유로 CCUS 기술개발 및 산업클러스터의 조성은 정책의존도가 매우 높다.

[그림 3-8] CCS 상용화 지점



자료: 딜로이트 재작성 IEA(2017) 자료 기반, Deloitte Insights(2021), 14면

더욱이 국내 CCUS 기술수준은 주요 선진국에 비해 낮은 편이며, 수치로 비교해 보았을 때 선도

국 대비 약 79.2%의 기술수준과, 약 4.9년의 기술격차를 보이고 있다. 기술별로 살펴보면 이산화탄소 포집 약 85%, 활용 약 80%, 저장 약 75%의 기술 수준을 보유하고 있어 저장부문의 기술격차가 가장 큰 것으로 나타나고 있다.¹¹³⁾

<표 3-4> 전문가 자문을 통한 CCUS 기술수준분석 결과

구분	기술수준(%)					기술격차(년)				
	한국	미국	EU	일본	중국	한국	미국	EU	일본	중국
전체	79.2	100.0	99.3	88.8	80.7	4.9	0.0	0.2	2.5	3.9
포집	83.9	100.0	98.2	97.0	84.5	4.5	0.0	0.3	1.1	3.2
저장	75.0	100.0	98.6	86.7	85.1	6.5	0.0	0.2	3.9	4.4
활용	78.0	99.0	100.0	81.8	71.6	3.8	0.0	0.0	2.4	4.2

자료: 한국에너지기술연구원(2021), 46면.

특히 CCU 기술의 경우 기술적 난이도가 매우 높아 상대적으로 기술개발이 어렵고, CCS 기술은 2000년대 초에 연구개발이 시작되었음에도 국내 지리적 한계로 인한 저장장소의 부족 등을 원인으로 명확한 한계에 직면하고 있는 상황임에 따라 CCUS 산업형성에 난항이 예상된다.

[그림 3-9] 전 세계 이산화탄소 저장 후보지와 잠재량

단위: 백만톤 CO₂



자료: Global CCS Institute, Global status of CCS(2020), p.28.

따라서 개별 산업의 유사성을 바탕으로 경쟁을 유도하고, 시너지 효과를 증대하기 위한 기존의 클러스터 조성 방식을 CCUS 산업클러스터 조성방안으로 대입하기에는 많은 한계가 있다. 예컨대 언급한 바와 같이 CCUS는 완성된 기술이 아니기 때문에 관련 산업 및 연관 산업이 CCUS

113) 한국에너지기술연구원과 타 기관에서 수행된 내용의 종합결과에 따른다; 김경택 외(2001), 「CCUS 심층 투자 분석 보고서: 탄소중립 구현을 위한 CCUS 기술 개발 여정」, 한국에너지기술연구원, 2021-1, 46면 이하 참조.

기술범위의 설정에 따라 상이할 수 있으며, 상호 영향을 주고받을 수 있는 시장이 형성되어 있다고 보기 어렵기 때문에 CCUS 산업을 확산하기 위한 산업가치사슬 형성이 미흡하여 클러스터 조성에 다양한 변수가 존재할 수밖에 없다.¹¹⁴⁾ 즉, CCUS 산업은 CCUS R&D 초기 단계에서부터 소비단에 이르기까지 부가가치의 창출을 위한 일련의 생산과정인 가치사슬(Value Chain)이 형성되었다고 보기 어려운 상황이다.

유사한 맥락으로 CCUS 기술은 현재까지 경제성이 매우 낮기 때문에 상업적 활용을 위해서는 가야 할 길이 매우 지난하다. 일례로 CCUS 기술 중 하나인 이산화탄소 저장기술(CCS)을 개발 및 적용하기 위해서는 이산화탄소 저장을 위한 저장소선정에 있어서 탐사 및 시추 과정이 선제되어야 하는데 해당 과정에 드는 비용이 천문학적이고, 결과를 장담하기 어려워 단일 사업자가 투자를 결정하기가 쉬운 사안이 아니다. 또한 이산화탄소 활용기술(CCU) 및 이산화탄소 저장기술에는 포집된 이산화탄소와 이를 수송할 방안이 연계되지 않으면 비용 상승으로 인해 경제성이 낮아질 수 있기 때문에 포집설비에 드는 비용을 비롯하여 수송 방법의 경제성 확보가 상업화의 관건이다.

즉, CCUS 산업의 ▲높은 초기 투자비용, ▲낮은 경제성, ▲높은 정책의존도, ▲집중적 기술개발 촉진의 필요성 등을 종합적으로 판단했을 때, CCUS 클러스터 조성은 기존의 산업별 클러스터와의 연계, 탄소배출산업과의 연계, 유망 저장소와의 연계 등 최적의 방안을 모색하고, 이를 통해 규모의 경제를 달성함과 동시에 산업 가치사슬을 구성하여 기술개발을 촉진하고, 경제성 향상과 상업적 활용을 증대하기 위해 필수적이다.

3. 국내 사례

가. 개요

CCUS 산업 활성화를 위한 산업 클러스터 조성필요성에도 불구하고, 현재 국내에는 조성된 CCUS 산업 클러스터가 없기 때문에 관련 입법·정책 현황은 기존에 구축되어 있는 클러스터와 CCUS 산업 동향을 중심으로 파악해볼 수 있다.

국내 클러스터 조성 근거는 ‘녹색융합클러스터’, ‘해양산업클러스터’, ‘우주산업클러스터’, ‘양자정보통신산업클러스터’ 등과 같이 개별법에 근거하고 있는 경우와 「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률(이하: 산업집적법)」에 근거를 두고 있는 경우가 있다.

「산업집적법」은 ‘03년도 참여정부가 발표한 “국정비전과 국정과제”에서¹¹⁵⁾ 국가균형발전의 핵심 지역산업정책 중 하나로 클러스터를 도입하면서 「공업배치 및 공장설립에 관한 법률」을 개정하여 마련된 법률이다. 개별법에 근거한 클러스터 이외에는 「산업집적법」에 근거하여 클러스터가

114) 서선재·김요섭·박철호(2022), 「국내 CCUS 산업생태계 조성 및 활성화 방안 연구」, 『한국기후변화학회』, 13(3), p.318면.

115) 대통령직인수위원회(2003), 「참여정부 국정비전과 국정과제」, p.20.

조성되며, 「산업직접법」 제22조의3는 기존의 산업단지를 단순 생산 공간이 아닌 산학연의 상호 연계와 협력의 공간인 클러스터로 전환하여 지식 및 기술창조와 생산성 제고를 도모하기 위하여 “산업집적지 경쟁력 강화 사업 추진계획의 수립 등” 을 규정하고 있다.

[그림 3-10] 클러스터링을 통한 산학연 네트워크 구축 및 운영의 기본모형



자료: 한국산업단지공단(KICOX) 홈페이지 산업집적지경쟁력강화사업 사업개요

「산업직접법」에서 말하는 “산업집적”이란, “기업, 연구소, 대학 및 기업지원시설이 일정 지역에 집중함으로써 상호연계를 통하여 상승효과를 만들어 내는 집합체를 형성하는 것”을 뜻하며, 대상이 되는 산업단지는 동법 제2조 제14호에서 정하는 “국가산업단지”, “일반산업단지”, “도시첨단산업단지” 및 “농공단지”로, 해당 내용의 구체적인 정의는 「산업입지 및 개발에 관한 법률」에 따른다.

<표 3-5> 산업단지의 종류

구분	특징 및 목적
국가 산업단지	- 2개 이상의 특별시·광역시·도에 걸치는 지역 - 국가기간산업·첨단과학기술산업 육성 - 낙후지역의 개발 촉진
일반 산업단지	- 산업의 지방분산 및 지역경제 활성화
도시첨단 산업단지	- 지식산업, 문화산업 등 첨단산업 육성
농공단지	- 농·어촌 지역의 소득증대를 위한 산업 유치

자료: 한국산업단지공단(KICOX) 홈페이지 산업단지 관리

나. 제4차 산업집적활성화 기본계획과 클러스터 연계

「산업집적법」 제3조 제1항에 따라 지난 '19년 12월 「산업집적활성화 기본계획」이 고시되었다.¹¹⁶⁾ 본 계획은 제3차 기본계획('14~'18년)이 만료됨에 따라 마련된 제4차 기본계획('19~'23년)으로 관계부처협의 및 지속가능발전위원회의 심의를 거쳐 최종 발표되었다. 제3차 기본계획이 경제협력권 연계 및 지역투자 활성화에 중점이 있었다면, 제4차 기본계획은 산업의 친환경화·스마트화, 창업활성화를 위한 규제완화, 스마트산단 및 청년 일자리 창출 등을 주요 골자로 하고 있다는 점에서 차별화된다.¹¹⁷⁾ 이에 따라 제4차 기본계획은 지역별 산업구조와 성장유망산업의 집적현황을 분석하고, 이를 토대로 지속가능한 신성장동력을 마련하는데 역점을 두었다.

이를 위해 본 계획은 「국토기본법」에 따른 “제4차 국토종합계획”, 「국가균형발전 특별법」에 따른 “국가균형발전 5개년 계획”, 「산업입지 및 개발에 관한 법률」에 따른 “산업입지수급계획”을 비롯하여 국가지속가능발전목표(K-SDGs)¹¹⁸⁾ 등 이미 수립되어 있는 관련 계획 및 목표를 고려했으며, 성장유망산업의 도출을 위해 “산업부 12대 신산업¹¹⁹⁾, 기재부 8대 핵심 선도 산업,¹²⁰⁾ 4차산업혁명위원회 12대 지능화 혁신프로젝트¹²¹⁾, 과기정통부 13대 혁신성장동력 분야¹²²⁾”를 중점 검토하였다.¹²³⁾ 해당 분석을 통해 도출된 성장유망산업은 다음 <표 3-6>과 같이 ‘주력산업’과 ‘혁신성장 신산업’으로 분류된다.

<표 3-6> 성장유망산업 분류체계

구분	내용	산업
주력산업	생산, 고용, 부가가치 측면에서 주도적으로 경제발전을 이끌어가는 전후방 연계효과가 큰 산업	01 자동차, 02 조선, 03 일반기계, 04 철강, 05 석유화학, 06 섬유, 07 가전, 08 정보통신기기, 09 디스플레이, 10 반도체
혁신성장 신산업	기술발전 및 혁신을 바탕으로 변화·융합하여 새로운 시장창출 및 산업화 가능 산업	01 건강·진단, 02 센서·측정, 03 에너지, 04 전기·전자, 05 정보통신, 06 지식서비스, 07 첨단제조·자동화, 08 화학·신소재, 09 환경·지속가능

자료: 산업통상자원부(2019), 48면 참조하여 재작성

116) 산업통상자원부 고시 제2019-220호

117) 산업통상자원부(2019), 「산업집적활성화 기본계획」, p.3.

118) 기본계획수립에 고려된 국가지속가능발전목표는 ▲7.에너지의 친환경적 생산과 소비, ▲8.좋은 일자리 확대와 경제성장, ▲9.산업혁신과 사회기반시설 확충, ▲11.지속가능한 도시와 주거지다.

119) 전기·자동차, 스마트·친환경선박, IoT 가전, 로봇, 바이오헬스, 항공·드론, 프리미엄 소비재, 에너지신산업, 첨단신소재, AR·VR, 차세대디스플레이, 차세대반도체(신산업 민·관협의회(2016), 「신산업 창출을 위한 정책과제」).

120) 스마트공장, 미래차, 핀테크, 바이오헬스, 스마트팜, 스마트시티, 에너지신산업, 드론(관계부처 합동(2019), 「8대 핵심 선도 사업 세부추진계획」).

121) 의료, 제조, 이동체, 금융물류, 농수산업, 에너지, 시티, 교통, 복지, 환경, 안전, 국방(관계부처 합동·대통령직속4차산업혁명위원회(2017), 「4차 산업혁명 대응계획 I-KOREA 4.0」)

122) 스마트시티, 가상증강현실, 자율주행차, 빅데이터, 맞춤형헬스케어, 지능형로봇, 드론, 신재생에너지, 차세대통신, 첨단소재, 지능형반도체, 혁신신약. 인공지능(관계부처 합동(2018), 「혁신성장동력 시행계획」).

123) 산업통상자원부(2019), 앞의 보고서, 4면.

제4차 기본계획은 성장유망산업 분류에 따라 개별 산업의 특화도와 집적도를 분석하고, 특성에 맞는 발전방향을 제시하고자 하였다. 분석방법에 따라 집적도의 경우 “전국 대비 종사자 수의 절대적 비중이 높은 지역”을, 특화도는 “특정산업의 지역 간 특화도와 지역 내 비중”을 뜻하며, 이때 특화도는 상대집중지수(NOHI, Nam-Oh-Hong Index)를 활용하여 주력산업은 지역별 종사자수와 부가가치액을 기준으로 하고, 혁신성장 신산업은 지역별 종사자 수를 기준으로 도출되었다.¹²⁴⁾

〈표 3-7〉 성장유망산업 특화도 분석 지표

지표명	산식	판별
NOHI	$NOHI_{ij} = \frac{n_{ij} - E_{ij}}{n_{ij}} \frac{n_{ij}}{n \cdot j} \times 100$ <p>※ $E_{ij} = np_{i \cdot} p_{\cdot j}$ 이며, p_{ij}는 한 조사대상이 범주 A_i와 B_j에 속할 확률이고 $p_{i \cdot} (=n_{i \cdot}/n)$는 범주 A_i에 속할 확률, $p_{\cdot j} (=n_{\cdot j}/n)$는 범주 B_j에 속할 확률을 의미함</p>	0을 기준으로 0 보다 크면 한 지역에서 해당산업은 집중(특화)되어 있다고 볼 수 있음

자료: 산업통상자원부(2019), 12면.

〈표 3-8〉 성장유망산업의 지역별 특화도 및 집적도

구분	해당지역			
	집적도	특화도		
	종사자 수 기준	종사자 수 기준	부가가치액 기준	
주 력 산 업	자동차	경기, 울산, 경남, 충남, 경북	대구, 광주, 울산, 세종, 충북, 충남, 전북, 경북, 경남	대구, 광주, 울산, 경기, 충북, 충남, 경북, 경남
	조선	경남, 울산, 전남	울산, 전남, 경남	울산, 전남, 경남
	일반기계	경기, 경남, 인천, 충남	대구, 인천, 경기, 충남, 경북, 경남	대구, 인천, 광주, 경기, 충남, 경남
	철강	경북, 경기, 충남, 경남	부산, 인천, 울산, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남	부산, 인천, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남
	석유화학	경기, 전남, 울산	대전, 울산, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북	울산, 충남, 전북, 전남
	섬유	경기, 대구, 경북, 서울	부산, 대구, 울산, 경기, 경북	부산, 대구, 울산, 경기, 경북
	가전	경기, 경남, 인천	대구, 인천, 광주, 경기, 경북, 경남	인천, 광주, 경북, 경남
	정보통신기기	경기, 경북, 서울	인천, 경기, 경북	경기, 경북

124) 산업통상자원부(2019), 앞의 보고서, 12면.

구분		해당지역		
		집적도	특화도	
			중사자 수 기준	중사자 수 기준
디스플레이	경기, <u>충남</u> , <u>경북</u>	경기, <u>충북</u> , <u>충남</u> , <u>경북</u>	경기, <u>충남</u> , <u>경북</u>	
	반도체	경기, <u>충북</u> , <u>충남</u>	경기, <u>충북</u> , <u>충남</u>	경기, <u>충북</u>
혁신성장 신산업	건강·진단	<u>서울</u> , 경기	<u>서울</u> , 대구, 인천, 대전, 경기, <u>충북</u>	-
	센서·측정	<u>서울</u> , 경기	<u>서울</u> , 대전, 경기, <u>경북</u>	-
	에너지	<u>서울</u> , 경기, <u>경남</u>	대전, 울산, 경기, <u>충북</u> , <u>충남</u> , 전남, <u>경북</u> , <u>경남</u>	-
	전기·전자	<u>서울</u> , 경기, <u>충남</u>	인천, 경기, <u>충북</u> , <u>충남</u> , <u>경북</u>	-
	정보·통신	<u>서울</u> , 경기	<u>서울</u> , 경기	-
	지식서비스	<u>서울</u> , 경기	<u>서울</u>	-
	첨단제조·자동화	<u>서울</u> , 경기, <u>경남</u>	울산, 경기, <u>충남</u> , 전남, <u>경남</u>	-
	화학·신소재	경기, <u>충남</u> , <u>경북</u>	인천, 울산, 경기, <u>충북</u> , <u>충남</u> , 전남, <u>경북</u>	-
	환경·지속가능	<u>서울</u> , 경기, <u>경남</u>	대전, 울산, 경기, <u>충북</u> , <u>충남</u> , 전남, <u>경북</u> , <u>경남</u>	-

주) 밑줄 친 지역은 해당 기준을 모두 공통으로 충족하는 지역을 의미함

자료: 산업통상자원부(2019), 13면

제4차 기본계획은 상기 도출된 성장유망산업의 지역별 특화도 및 집적도를 고려하여 지역별 성장 유망산업 육성방안을 제시하고, 지역 및 산업간 연계를 바탕으로 클러스터 구축 및 고도화 전략을 수립하고자 하고 있다. 클러스터 구축 및 고도화 전략은 부산의 경우 철강 섬유에 강점을 보이고 있음에 따라 해당 산업을 지역 특화산업으로 정의하고 관련 산업의 성장 동력을 추구하며, 경남의 경우 조선, 철강에 특화하여 융복합화를 추진하고, 지식기반 기계 클러스터 허브로 도약하는 것을 예시로 들 수 있다.¹²⁵⁾

다. CCUS 산업 클러스터 연계방안

125) 산업통상자원부(2019), 앞의 보고서, 18면.

상기 언급한 바와 같이 국내 클러스터 조성방안은 각 산업별·지역별 강점을 종합하여 상호 연계를 통해 클러스터를 구축하고 이를 고도화 하는 전략을 택하고 있다. 이와 같은 방안을 미루어 보았을 때, 국내 CCUS 산업 클러스터는 기존 클러스터 조성방안과 정합성을 제고하고 유기적 연계를 이루어낼 수 있도록 산업 및 지역의 특성을 고려하여 기존에 구축된 클러스터와의 연계를 통해 시너지 효과를 유도하는 방안을 고려할 수 있을 것이다. 우선, CCUS는 완성된 기술이 아니기 때문에 다음 <표 3-9>와 같은 개별 기술에 따른 주요 이슈와 CCUS 산업 클러스터 조성방안을 연계해 볼 수 있다.

<표 3-9> CCUS 기술 개발 주요 이슈

구분	이슈	내용
CO ₂ 포집	공정격상	✓ 탄소중립 이행을 위해서는 이산화탄소 감축이 핵심임에도 주요 선진국과 비교하였을 때 포집설비 규모가 작은 수준임.
	산업공정 포집기술	✓ 온실가스 다배출 산업(철강, 시멘트, 석유화학 등)에 포집 기술을 적용하여 이산화탄소 감축을 이뤄내야 함에도 관련 기술개발이 미비함.
	경제성 확보	✓ 포집비용이 매우 높아 기업 참여 유인이 부족하여 정부의 기술개발 투자 및 제도적 지원 등을 통한 경제성 확보가 필요한 현실임.
	탄소중립 목표 이행	✓ 탄소중립 목표를 이행하기 위해서는 감축을 넘어 마이너스 배출 기술에 대한 투자가 필요함.
CO ₂ 저장	저장소 탐사 및 확보	✓ 우리나라는 지리적 한계로 인해 저장소가 부족하고, 실증 경험이 미비하여 대규모 저장이 어려운 현실에 놓여있음.
	독자기술 개발	✓ 선도국은 대규모 실증 프로젝트를 실행하여 원천기술을 확보하고 노하우를 축적하였으나 우리나라의 경우 관련 기술확보가 부족하고 실증 경험이 매우 부족함.
CO ₂ 활용	공정격상	✓ 선도국의 경우 화학전환 및 광물탄산화 등 관련 기술이 제품화 단계에 진입했으나, 우리나라의 경우 대부분 초기 연구단계 또는 파일럿 실증 연구에 머무르고 있음.
	경제성 확보	✓ 화학전환, 광물화전환 등을 통해 생산된 제품의 대부분은 열역학적 한계로 인해 석유화학 기반의 제품보다 경제성이 부족함에 따라 높은 투자비용과 리스크로 인해 기업의 자발적 참여유인이 부족함.

자료: 한국에너지기술연구원(2021), CCUS 심층 투자분석 보고서, VII면 참조 저자 재작성

예컨대 이산화탄소 포집에 유리한 탄소 다배출 산업인 철강, 석유화학산업이 집적되어 있는 산업단지(경북, 충남, 울산, 전남 등)를 중심으로 CCUS 산업과 연계하여 클러스터를 조성함으로

써 탄소 다배출 산업에 포집기술을 적용하여 산업공정 포집기술의 다양성을 확보하도록 하고, 포집설비 규모를 확대하여 공정을 격상하는 방안을 고려할 수 있다. 탄소 다배출 산업과 연계하여 클러스터를 조성할 경우, 이산화탄소 수송 등에 필요한 비용을 절감하여 경제성 확보가 용이할 수 있으며, 온실가스 감축에 효과적으로 기여할 수 있다는 장점이 있다. 이를 통해 산업집적지역 혁신과 경쟁력 제고를 도모할 수 있다.

또한 이산화탄소 활용의 경우, 상용화 제품 후보군을 기준으로 예컨대 광물탄산화에 필요한 알카리성 산업부산물을 쉽게 얻을 수 있는 제철공장 또는 시멘트공장단지와 연계하는 방안도 고려 가능하다. 아울러 지리적 한계로 인해 국내 저장소가 부족함에 따라 이산화탄소 유망 저장소와 주변 산업시설을 분석하여 이산화탄소 저장기술 및 산업과 연계하는 방안도 유의미할 수 있다. 그 밖에 혁신성장 신산업으로써 에너지 전환 측면에서 수소, 암모니아 관련 산업과 연계하여 CCUS 산업 클러스터를 조성하고, 새로운 신 성장 동력을 마련하는 방법도 고려할 수 있을 것이다.¹²⁶⁾

4. 해외 사례

가. 영국¹²⁷⁾

(1) 추진배경

지난 '21년 11월, 영국 글래스고에서 제26차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP26)가 개최되었다. COP26은 매년 개최되던 당사국총회가 COVID-19로 인해 2년 만에 개최됐다는 점에서도 주목받았지만, 특히 개최지가 탄소사회를 열었던 산업혁명의 발상지인 영국이라는 점에서도 이목이 집중되었다. 탄소사회의 중심지였던 영국이 기후변화 대응의 선봉을 자처하면서 탄소중립사회를 이끌어가고 있기 때문이다. 그 중심에는 영국의 선도적인 법률정비가 있었다.¹²⁸⁾

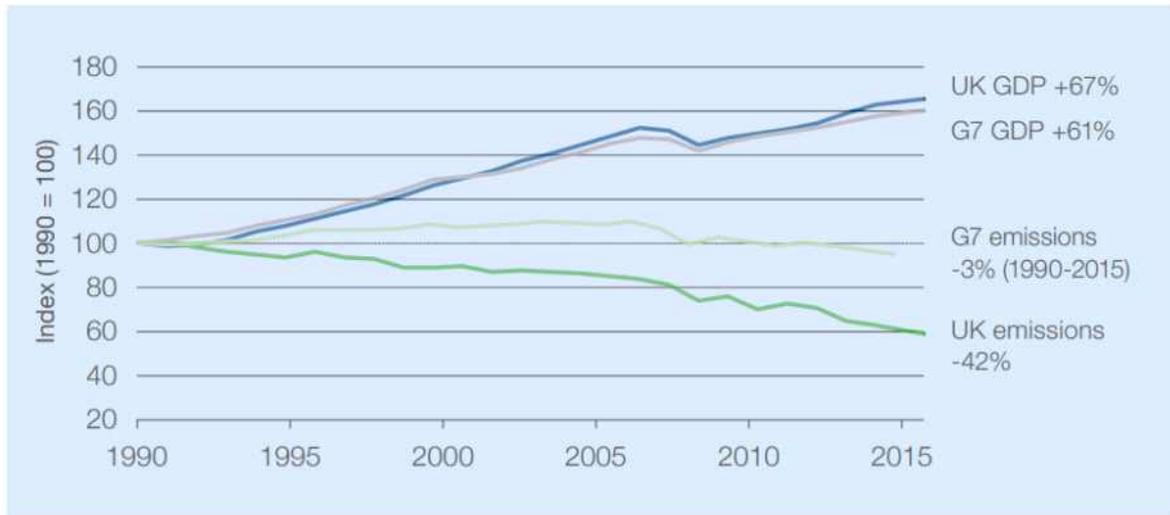
영국은 교토의정서 가입 이후, 유럽연합 회원국으로서 기후변화대응을 위한 제반마련에 박차를 가해왔으며, 그 결실은 '08년에 제정된 「기후변화법(Climate Change Act of 2008)」으로 나타났다. 해당 법률은 세계 최초의 기후변화 대응 법률로써 2050년까지 1990년 대비 최소 80%의 온실가스를 감축하겠다는 목표를 담고 있다. 해당 법률이 제정된 이후, 영국은 경제성장과 함께 탄소감축이 동시에 일어나는 탈동조화(decoupling)를 성공적으로 도출할 수 있었다는 평가를 받는다.

126) 이와 관련하여 국내 CCUS 산업클러스터 조성방안을 위한 구체적인 분석은 하기의 제3장 제4절 CCUS 산업 클러스터 여건 분석 참조.

127) 본 내용은 [R2210101] “국가 온실가스 감축 목표달성을 위한 이행방안 및 제도적 기반마련 연구 - 수소 및 CCUS를 중심으로 -”의 일환으로 수행된 한민지 외(2022), 앞의 논문을 기초로 작성되었으며, 많은 부분 그대로 인용되었음을 밝힌다.

128) 이해경(2021), 「영국 「기후변화법」의 이행현황 및 국내적 시사점」, 『외국 입법·정책 분석』, 국회입법조사처, 1, p.2.

[그림 3-11] 영국 및 G7국가의 GDP와 온실가스 감축 변동 추이 비교



자료: BEIS(2018), Annual report and accounts, p.29.

브렉시트(Brexit) 이후¹²⁹⁾ 영국의 기후변화 대응 정책은 새로운 국면을 맞이하게 된다. 영국이 유럽연합 회원국 지위에서 벗어남에 따라 유럽연합의 배출권거래제(EU-ETS), 유럽투자은행(European Investment Bank, EIB) 등 관련 인프라를 사용할 수 없게 됨에 따라 새로운 기반을 마련해야 했기 때문이다. 이에 따라 영국은 독자적인 탄소중립 이행방안을 마련하고, 글로벌 선두주자로서 기후변화 대응을 이끌어 나가기 위해 제도적 기반을 새롭게 정비하였다. 우선, '19년에는 「기후변화법」을 개정하여 '2050 탄소중립'을 법제화하고, 「녹색산업혁명 10대 중점계획('20.11.)」,¹³⁰⁾ 「에너지 백서('20.12.)」¹³¹⁾ 「산업부문 탈탄소 전략('21.3.)」,¹³²⁾ 「넷제로 전략(21.10.)」,¹³³⁾ 「CCUS 투자 로드맵('22.4.)」¹³⁴⁾ 등 선제적인 기후변화 대응 입법·정책을 수립하였다.

특히 「녹색산업혁명 10대 중점계획」은 공업중심의 산업·경제 전환을 이끌었던 산업혁명의 발상지에서 '녹색산업'을 통해 다시 한번 산업혁명의 중심지로 재도약하여 기후변화 대응 리더십과 주도권을 확보하겠다는 영국의 의지와 계획을 보여준다. 해당 계획은 '20년 1월 31일에 유럽연합 탈퇴협약(Official Journal of the European Union)을 체결한 이후 처음 마련된 기후변화 대응 정책으로써 영국의 기후변화 대응과 탄소중립 이행의 향후 독자적인 방향성을 제공해 주는 계획서이자 지침서라는 점에서 의의를 갖는다.

129) 영국(Britain)의 유럽연합 탈퇴(exit)를 뜻하는 브렉시트는 `20년 1월 31일자로 체결된 탈퇴협약(Official Journal of the European Union, L29/7)에 따라 이행되었다. `20년 12월 31일까지의 탈퇴 준비기간이 끝난 후, 영국은 `21년 1월 1일자로 유럽연합 회원국에서 공식 제외되었다.

130) HM Government(2020a), 앞의 보고서 참조.

131) HM Government(2020b), *Energy White Paper: Powering Our Net Zero Future*, HM Government 참조.

132) HM Government(2021a), *Industrial Decarbonisation Strategy*, HM Government 참조.

133) HM Government(2021b), *Net Zero Strategy: Build Back Greener*, HM Government 참조.

134) BEIS(2022), *Carbon Capture, Usage and Storage (CCUS): Investor Roadmap*, BEIS 참조.

「녹색산업혁명 10대 중점계획」은 기후변화 대응과 동시에 혁신추진, 수출 기회 증대와 영국 전역의 녹색 일자리 창출 및 성장을 위해 ① 해상풍력발전, ② 저탄소 수소성장 주도, ③ 원자력 신기술 보급, ④ 무공해 차량 전환 가속화, ⑤ 친환경 대중교통이용, 자전거타기 및 걷기, ⑥ 무공해 항공 및 녹색선박, ⑦ 녹색 빌딩, ⑧ CCUS 기술에의 투자, ⑨ 환경보호 및 보전, ⑩ 녹색금융 및 혁신을 핵심 내용으로 제시하고 있다.¹³⁵⁾

이 중 CCUS는 탄소중립 이행의 핵심방안이자 녹색산업혁명을 선봉에서 이끌 가장 핵심적인 기술로 지목받고 있으며, 해당 계획 이후 발표된 영국의 다양한 정책에서도 같은 논조가 유지되고 있다.¹³⁶⁾ 이에 따라 영국은 CCUS 기술개발을 위해 ‘25년까지 10억 파운드(약 1조 6100억 원)를 투자한다고 밝혔으며, 개발 및 운영시기를 달리하여 ‘20년대 중반까지 2개의 산업 클러스터에 CCUS 설비를 배치(Track-1)하고, ‘30년까지 2개의 산업 클러스터에 추가 배치(Track-2)하겠다고 공언하였다.¹³⁷⁾ 이를 통해 매년 20~30Mt의 이산화탄소를 저감하겠다고 밝혔다.¹³⁸⁾

(2) 영국의 CCUS 클러스터 개발

(가) 개요

영국은 CCUS 개발을 위한 구체적인 계획 수립 전, 「CCUS 비용절감을 위한 태스크포스(CCUS Cost Challenge Taskforce): 이하 CCUS 태스크포스」을 결성하였다. 이는 CCUS 필요성에도 불구하고 현재 기술수준에 비추어 보았을 때, CCUS 기술의 경제성이 현저히 낮은 수준임에 따라 해당 기술을 상용화하고, 대규모로 적용하기 위해서는 비용절감 방안을 우선적으로 수립해야 한다는 문제의식에서 출발하였다. CCUS 태스크포스는 ▲최저비용 탈탄소화, ▲세계 최고의 기술개발과 ▲경제성·생산성 향상을 위한 투자 극대화 등을 핵심의제로 ‘18년 2월과 3월 두 번의 회담을 거친 후 같은 해 7월 “CCUS 비용절감을 위한 태스크포스 보고서: 청정성장 이행(Delivering clean growth: CCUS Cost Challenge Taskforce report)” 을 발표하였다.¹³⁹⁾

135) BEIS(2021d), *Cluster Sequencing for Carbon Capture Usage and Storage Deployment: Phase-2 Background and Guidance for Submissions*, BEIS, p.10.

136) BEIS(2022), 앞의 보고서 참조; HM Government(2022), *British Energy Security Strategy*, HM Government 참조; Oil and Gas Authority(2021) *Carbon Capture and Storage etc.*

137) BEIS(2021d), 앞의 보고서, p.10.

138) BEIS(2022), 앞의 보고서 참조.

139) CCUS 태스크포스와 관련하여 더욱 자세한 사항은 다음 홈페이지 <https://www.gov.uk/government/groups/ccus-cost-challenge-taskforce> 참조.

[그림 3-12] 영국 유망 CCUS 클러스터와 이산화탄소 저장소 및 CCUS 네트워크

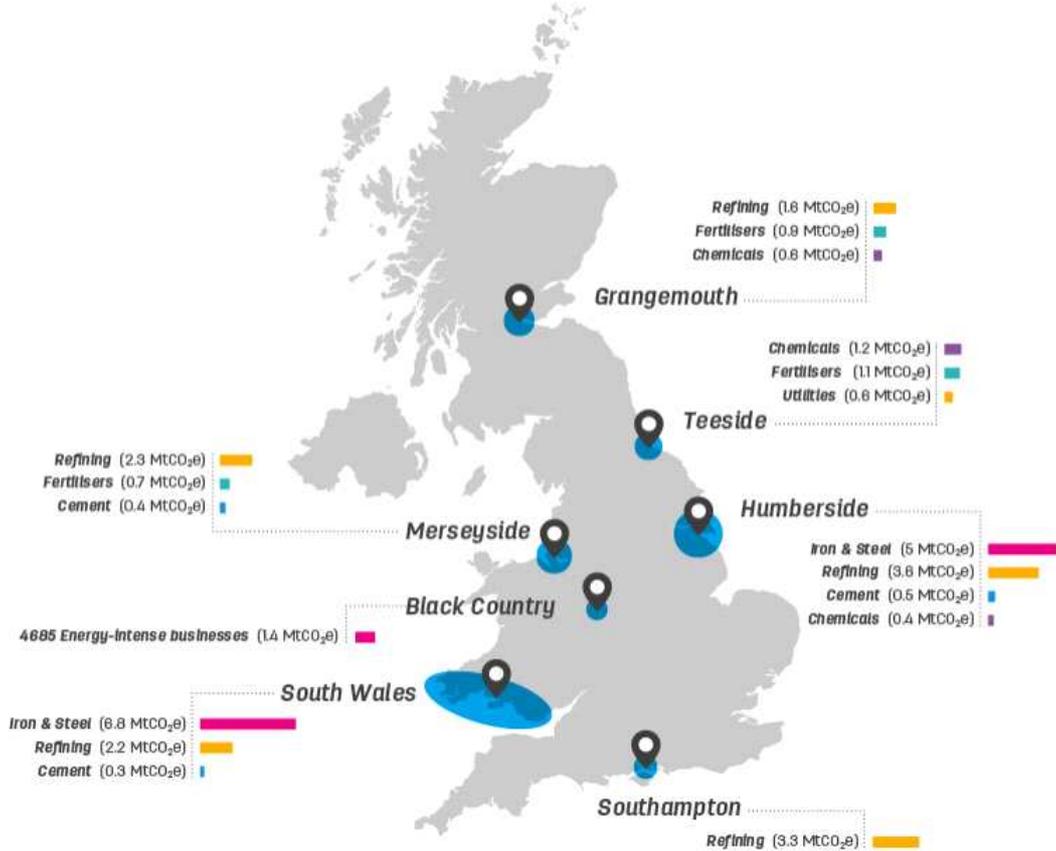


자료: CCUS Cost Challenge Taskforce Report(2018), p.17, 19.

해당 보고서에서는 [그림 3-12]와 같이 Grangemouth, Teesside, Humberside, Merseyside, South Wales 등 5개의 산업클러스터를 잠재적 CCUS 클러스터로 판단하고, 영국 동부 해안지역을 주된 저장소로 평가하였다.

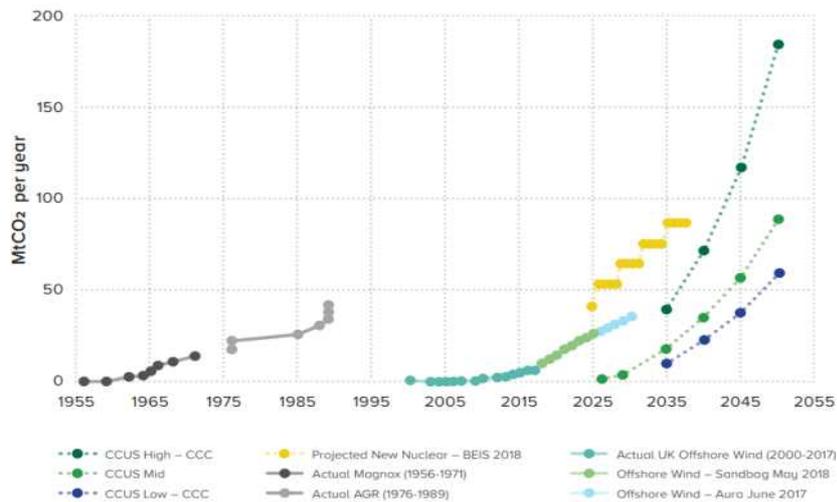
이와 같은 평가에는 전체 산업에서 배출되는 온실가스의 50%가 Grangemouth, Teesside, Humberside, Merseyside, Black Country, South Wales, Southampton 등 7개의 산업클러스터에서 발생되며, 해당 클러스터의 온실가스 배출이 영국 전체 배출량의 16%에 해당할 정도로 상당함에 따라, 철강, 시멘트와 바이오메스 등 산업 시설에서 직접 이산화탄소를 포집할 경우 대규모 포집이 가능하고 규모의 경제를 달성할 수 있다는 판단이 포함되어 있다([그림 3-13] 참조).

[그림 3-13] 영국 산업 클러스터 위치와 이산화탄소 배출량



자료: Repowering the Black Country 홈페이지¹⁴⁰⁾

[그림 3-14] 영국의 원자력, 해상 풍력 및 CCUS 건설 비율에 따른 이산화탄소 (예상)저감량 비교



자료: CCUS Cost Challenge Taskforce Report(2018), p.18.

140) CCUS 태스크포스와 관련하여 더욱 자세한 사항은 다음 홈페이지 <https://www.gov.uk/government/groups/ccus-cost-challenge-taskforce> 참조.

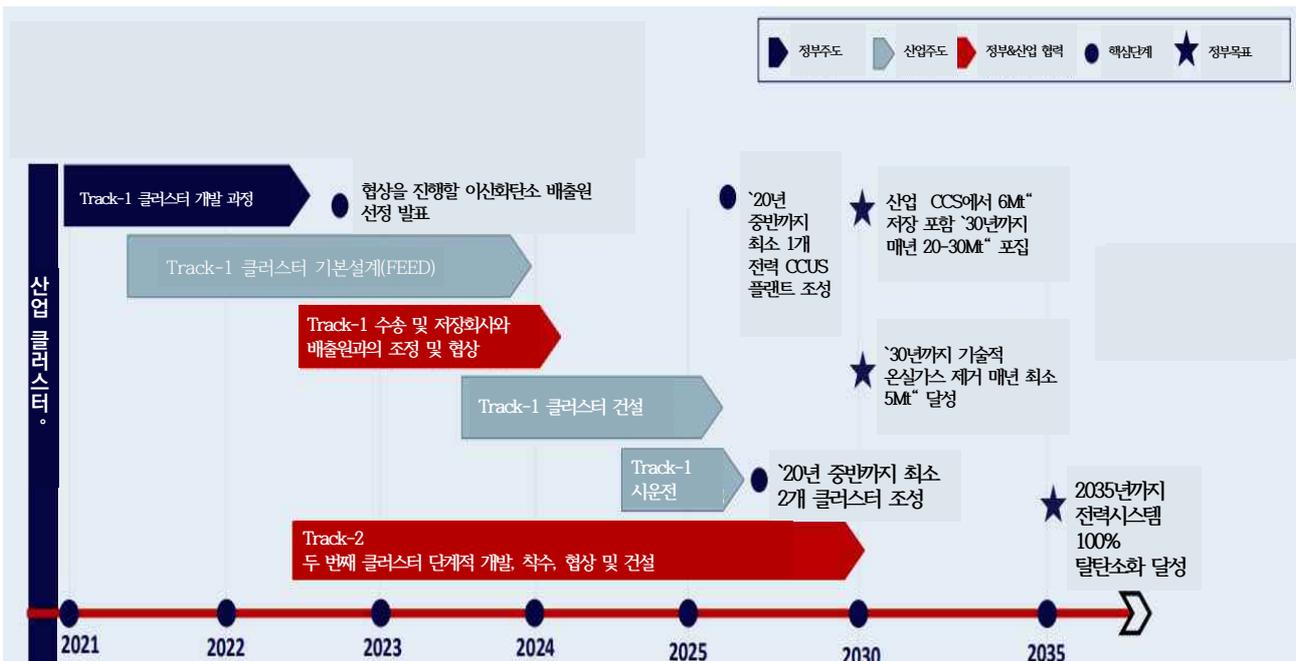
이와 관련하여 CCUS 태스크포스 보고서는 기후변화위원회(The Committee on Climate CC)의 권고를 인용하면서, CCUS 클러스터의 이산화탄소 저감 잠재력을 [그림 3-14]와 같이 분석하고 있다.

우선, 기후변화위원회는 「기후변화법」에 따라 2050 탄소중립을 이행하기 위해서는 2050년까지 매년 100 MtCO₂ (최대 180 MtCO₂)을 포집해야 한다고 권고하면서, 첫 번째 CCUS 클러스터를 '26년까지 운영하고, 규모를 계속 늘려 포집용량을 확대할 것을 제안하고 있다. 이는 규모의 경제를 달성하여 비용을 절감하기 위한 조치의 일환으로 '30년까지 매년 최소 10 MtCO₂, '35년까지 매년 최소 20 Mt “를 감축하기 위한 것이다. 즉, CCUS 클러스터를 구축하여 산업을 형성하고, 예상되는 위험 등을 제거하여 계획된 기간 동안 필요한 규모만큼 확장하기 위한 첫 번째 단계로 CCUS 클러스터 구축과 운영이 필요함을 역설한 것이다.

아울러 CCUS 태스크포스 보고서는 동부 해안을 유망 저장지로 선정하고, 이를 CCUS 클러스터와 연계하는 네트워크 구조를 제안하고 있는데, 이는 유럽연합 회원국가와 연계하여 이산화탄소를 수입하는 상황까지를 염두에 두고 잠재력을 극대화하기 위한 조치다.

CCUS 태스크포스 보고서 발표 이후, 상기 언급한 「녹색산업혁명 10대 중점계획」이 공포되었고 해당 계획에서 '30년까지 총 4개의 산업 클러스터에 CCUS를 배치하겠다는 계획이 포함되었다. 즉, CCUS 클러스터는 기존의 산업클러스터를 중심으로 조성되며, 이를 위해 아래 [그림 3-15]와 같은 개발 계획이 수립되었다.

[그림 3-15] 영국의 CCUS 개발 계획('35년 기준)



자료: UK(2022), CCUS Investor Roadmap

(나) CCUS 클러스터 개발 추진 현황

영국의 CCUS 클러스터 개발은 기업·에너지·산업전략부(Department for Business, Energy and Industrial Strategy, BEIS)가 주축이 되어 추진하고 있으며, 「녹색산업혁명 10대 중점계획」에서 명시하고 있는 바와 같이 목표운영 시점에 따라 두 개의 Track으로 구분되어 진행된다(<표 3-10> 참조).

<표 3-10> CCUS 클러스터 진행 Track 구분 및 선정 단계

구분	내용		
Track-1	'20년 중반까지 배치가 가능한 클러스터를 순서대로 선정함(초기 클러스터)		
	Track-1 선정 단계		
	Phase-1	⇒	phase-2
'20년 중반에 배치할 수 있는 가장 적합한 클러스터 사업자(Cluster Organisations)를 선정하고, 잠정적으로 순서를 부여함	Track-1 클러스터에 연결하기 위한 포집시설(산업, 전력, 수소) 전반에 걸쳐 개별 프로젝트를 모집하고, 프로젝트를 선정함		
Track-2	'30년까지 배치 가능한 두 개의 클러스터를 추가 발표함		

자료: 한민지 외(2022)를 바탕으로 저자 작성

현재('22.11.)까지 영국은 Track-1에 대한 일련의 과정을 거쳐 왔으며, 해당 과정은 크게 Phase-1과 Phase-2 등 크게 두 단계로 나누어 진행되고 있다. 순서에 따라 Phase-1에 대한 절차는 종료('21.5.7.~'21.10.25)되었으며, Phase-2('21.11.8. 시작 주~'23.2분기) 또한 막바지 결정단계에 있다. 구체적인 내용을 살펴보면 다음과 같다.

Phase-1에서는 Track-1 클러스터 선정과정의 첫 단계로 클러스터 예비 사업자로부터 신청서를 받았다. 총 5개의 클러스터(DelphiNus, East Coast Cluster, Hynet, Scottish Cluster, V Net Zero)가 지원하였으며, 해당 클러스터를 대상으로 다음의 ① 적격성(Eligibility)심사, ② 정량평가(Evaluation) 및 ③ 포트폴리오(Portfolio) 검토가 진행되었다.

적격성 심사는 ▲'30년 운영 가능성, ▲영국 내 위치 여부, ▲CCUS 클러스터 정의와의 부합성 등 3가지 기준으로 평가되었다. 해당 기준은 다음과 같은 고려를 바탕으로 선정되었다. 우선, '30년 운영 가능성과 관련하여, 당초 Track-1의 운영목표 시점은 '20년 중반이었다. 그러나 해당 목표를 달성할 수 있는 클러스터 신청이 없을 경우 계획에 차질이 생길 것을 우려하여 유연성을 확보하되, 선정 이후 10년 이내에 운영 가능한 프로젝트 준비도 파악을 위해 적합한 운영 가능 시점을 '30년으로 판단하였다. 다음으로 평가기준 중 영국 내 위치여부는 영국 전역의 넷제로 뿐만 아니라 스코틀랜드(Scotland)와 웨일스(Wales)의 각각 2045년과 2050년 탄소중립 목

표를 달성하기 위한 판단장치다. 즉, CCUS 클러스터가 영국 전역에 제공될 수 있도록 협력 및 접근방식 개발을 염두에 두고 있는 것이다. 마지막 평가기준인 CCUS 클러스터 정의와의 부합성은 “육·해상 네트워크와 해상 저장설비 등 이산화탄소 수송 및 저장 네트워크로써 탄소포집 프로젝트의 첫 번째 단계”인 클러스터 정의와 일치하여야 한다.

다음으로 정량평가는 ① 실현가능성(30%), ② 감축 잠재력(25%), ③ 경제적 기여도(20%), ④ 비용 적합성(15%), ⑤ 학습 및 혁신(10%) 등 총 5가지 기준으로 실행되며, 각 기준을 우수성에 따라 총 5단계(low/1-2점, low-Medium/3-4점, Medium/5-6점, Medium-High/7-8점, High/9-10점)의 10점 척도로 평가한 후 각각의 가중치를 곱하여 최종 점수를 결정한다. 각각의 요소에서 고려하는 사항과 가중치는 아래 <표 3-11>와 같다.

<표 3-11> Phase-1 정량평가 지표별 가중치와 내용

평가지표	가중치	내용
실현가능성	30%	<ul style="list-style-type: none"> - CCUS 클러스터의 상업적 운영가능일자*에 부합하는지 여부를 신뢰성과 증거에 입각하여 판단함 * 저장기에 이산화탄소를 지속적으로 주입하기 시작한 날
감축 잠재력	25%	<ul style="list-style-type: none"> - ‘30년 전까지 저장(가능)량이 가장 높은 프로젝트에 최고점을 부여하고, ‘30년까지 운영시작이 가능함과 동시에 저장 수송라이센스획득업체(T&SCo.)*와 MOU를 체결해야함 * 저장 및 수송서비스를 공급하기 위한 라이선스를 획득한 업체(이하: T&SCo.)로서, T&SCo.는 저장장소에 주입된 이산화탄소가 명시된 요구사항을 준수하는지 확인할 책임 등이 있으며, 수송 저장 네트워크의 개발, 건설, 자금조달, 운영, 유지보수, 확장 및 해체 등과 관련한 계획 및 관리작업 등을 수행함¹⁴¹⁾ - ‘30년 이후의 미래잠재가능성, 추가 배출 저감 능력, T&SCo. 네트워크 확장 및 개발가능성 등 검토함 - 탄소집약도를 검사하며, CCUS 인프라 건설 및 운영 단계에서 얼마나 많은 CO₂가 배출되는지 여부를 검사하여 탄소 집약도를 낮추는 프로세스에 높은 점수를 부여함
경제적 기여도	20%	<ul style="list-style-type: none"> - 지속가능한 경제성장 지원을 위한 정부목표에 부합하는지 여부를 직·간접적인 잠재적 기여도로 평가함
비용 적합성	15%	<ul style="list-style-type: none"> - 균등화비용(Levelised Cost of Abatement, LCOA)을 평가하며, 클러스터 전체에 들어간 비용*을 클러스터 전체 운영

평가지표	가중치	내용
		<p>에서 감축된 이산화탄소량(NPV)으로 나누어 계산하며, 균등화비용이 가장 낮은 곳에 최고점을 부여함</p> <p>* 건설 및 운영기간에 걸쳐 연간 기준으로 개발비용, 자본비용 및 교체비용을 포함</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> $\frac{\text{클러스터 전체에 들어간 비용}(PV)}{\text{클러스터 전체 운영에서 감축된 이산화탄소량}(NPV)} = \text{균등화비용}(LCOA)$ </div>
학습 및 혁신	10%	<ul style="list-style-type: none"> - 핵심 지식 산출물 결과를 생성 및 공유할 의지를 평가함 - 핵심 지식 산출물이 미래 클러스터 및 프로젝트에 도움이 될 만한지 여부를 판단함 - 시장개척 가능성이 있는 기술을 포함하여 혁신적인 기술 개발에 높은 점수를 부여함 - 녹색교통허브와 같은 지역 내 다른 탈탄소화 이니셔티브와 시너지 효과를 얻을 수 있는지 여부를 판단함 - '25년과 '30년에 각각 1GW와 5GW의 저탄소 수소를 생산하기 위한 정부 목표 기여가능성을 평가함

자료: BEIS(2021), Cluster Sequencing for Carbon Capture Usage and Storage Deployment: Phase-1
참조 저자 작성

추가적으로 포트폴리오 검토를 위해 ① 다수의 저장소의 존재여부, ② 저장유형의 다양성, ③ 배출프로젝트의 다양성, ④ 부담능력 등이 종합적으로 평가된다. 우선, 다수의 저장소 존재여부가 중요한 이유는 드물게 영구적인 오류 또는 일시적인 중단이 발생할 경우 해당 클러스터에서 다른 장소로 이산화탄소를 이동 및 저장할 수 있도록 하기 위함이다. 이는 클러스터 복원력을 높이기 위한 조치이며, 여러 저장소를 운영할 경우 향후 Track-2를 포함한 CCUS 개발에 있어서 필요한 저장요건을 완화할 수 있다는 점에서도 고려할 만한 사항이다. 다음으로 염수 대수층 및 고갈된 유전 및 가스전 등과 같은 다양한 저장유형은 향후 비용확실성을 향상시키고 클러스터를 다양한 방법으로 활성화할 수 있다는 점에서 중요하다. 나아가 배출프로젝트의 다양성은 산업뿐만 아니라 전력, 수소 등 다양한 시설에 적용가능성을 염두에 두고 이를 평가에 포함하기 위한 기준이 된다.¹⁴²⁾ 마지막으로 부담능력은 해당 클러스터에 소요되는 자본 및 수익이 적정수준을 유지해야 하며, 투자되는 자본이 너무 많을 경우 부담능력을 초과할 수 있음을 염두에 둔 지표다.

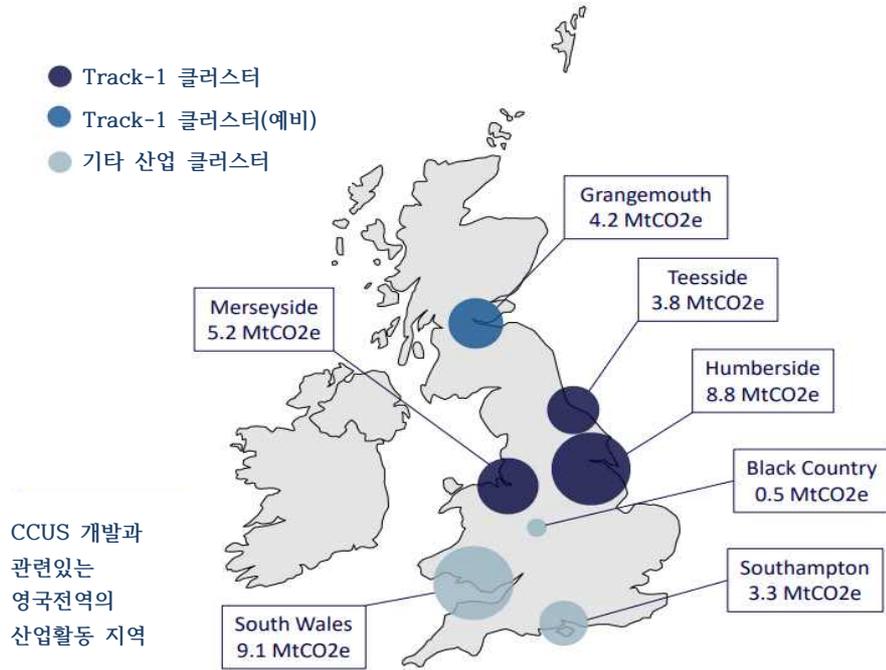
상기 언급한 내용을 바탕으로 심사가 진행되었으며, 신청한 5개의 클러스터(DelpHYnus, East Coast Cluster, Hynet, Scottish Cluster, V Net Zero) 전체가 1차 단계인 적격성 단계를 모

141) BEIS(2021b), *Carbon Capture, Usage and Storage: An Update on the Business Model for Transport and Storage*, BEIS, p.9.

142) 이와 관련하여 HyNet 클러스터와 저탄소 수소플랜트를 연계하는 수소공급프로그램에 대한 보고서가 발표되기도 하였다, Prgressive Energy, Johnson Matthey, and SNC-LAVALIN(2019), *BEIS Hydrogen Supply Programme: HyNet Low Carbon Hydrogen Plant(Phase 1 Report for BEIS)*, Prgressive Energy, Johnson Matthey, and SNC-LAVALIN 참조.

두 통과하였고, 이 중 2개의 클러스터(East Coast Cluster 및 Hynet)와 1개의 예비 클러스터(Scottish Cluster)가 다음 단계를 통과하여 최종 선정되었다.

[그림 3-16] 영국 산업 클러스터 위치와 이산화탄소 배출량



자료: CCUS Investor Roadmap(2022), p.8

선정된 클러스터 중 하나인 East Coast Cluster는 영국 동부 Teesside와 Humberside 두 지역과 저장소로 북해 남부의 Endurance 대염수층을 활용할 계획이다. 해당 클러스터에서 포집, 수송 및 저장되는 이산화탄소량은 연간 최대 2,700만 톤으로 예상된다.¹⁴³⁾ 아울러 Hynet은 영국 서부의 Liverpool, Manchester 및 웨일즈 북부지역에 구축할 예정이며, 리버풀의 경우 가스전을 활용하여 ‘30년까지 연간 1,000만 톤의 이산화탄소 저장이 예상된다.¹⁴⁴⁾

143) Gardiner J.(2021), “The Humber and Teesside Join Forces to Form the East Coast Cluster and Decarbonise Almost Half of UK Industrial Cluster Emissions”, *Net Zero Teesside*, 6.8, 2022.10.12. 접속, <https://www.netzero-teesside.co.uk/news/the-humber-and-teesside-join-forces-to-form-the-east-coast-cluster-and-decarbonise-almost-half-of-uk-industrial-cluster-emissions/>

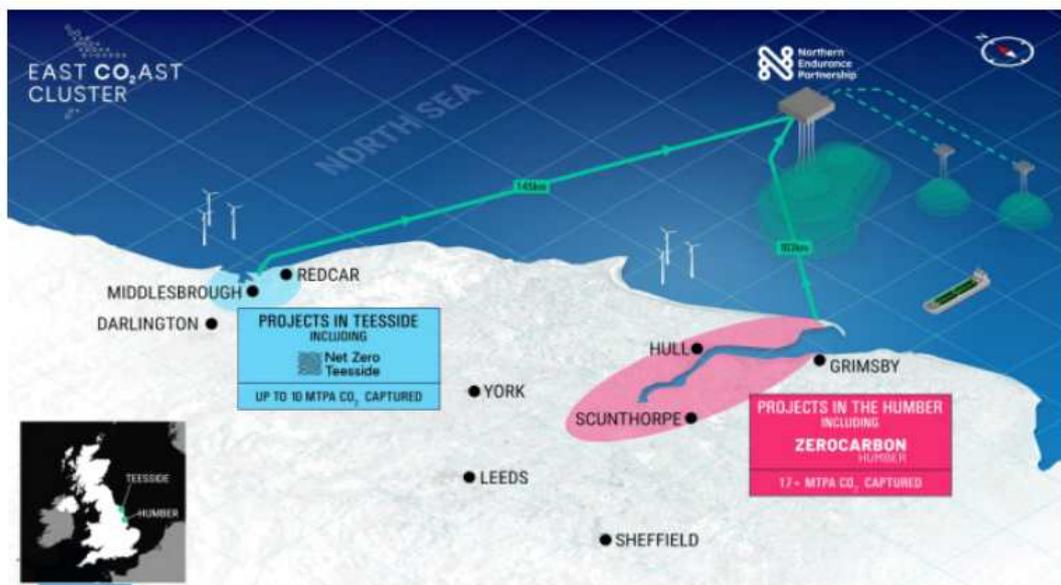
144) Johnson Matthey *et al.*(2021), *HyNet Low Carbon Hydrogen Plant(Phase 2 Report for BEIS)*, p.14.

[그림 3-17] Track-1에서 선정된 CCUS 클러스터 개발 계획



자료: Hynet Hydrogen Pipeline 홈페이지¹⁴⁵⁾

East Coast Cluster의 개발계획



자료: East Coast Cluster 홈페이지¹⁴⁶⁾

145) <https://www.hynethydrogenpipeline.co.uk>, 2022.10.19. 접속.

선정결과에 따라 2개의 클러스터(East Coast Cluster 및 Hynet)가 Track-1 협상에 참여하게 되었으며, 최종 결정에 따라 지원을 받게 된다. 만약, 정부가 선정된 클러스터의 참여 중단을 결정할 경우 예비클러스터가 대신 참여할 수 있게 된다. 이에 따라 East Coast Cluster 및 Hynet가 ‘20년 중반까지 클러스터 운영을 위한 정부지원을 받게 되었으며, 예비클러스터로 선정된 Scottish Cluster는 다음 단계인 Phase-2와 연계하여 만약의 상황을 대비하게 된다.

영국 정부는 Phase-1에서 두 개의 클러스터를 선정하고, 곧바로 Phase-2 계획에 돌입하였다. Phase-2는 선정된 클러스터를 위한 개별 프로젝트를 선정하는 과정이며, Track-1 또는 예비 클러스터와 연계하기 위한 발전, 산업 및 수소부문 프로젝트에 대한 평가를 진행하였다. Phase-2는 Phase-1과 동일하게 적격성심사와 정량평가를 진행한다. 이후, 제3차 최종후보 선정 과정(Shortlisting Process)에서 제약조건 등의 요소를 고려하여 개별 프로젝트를 선정하고, 후속 협상을 진행하게 된다. 개별 프로젝트는 부문별 특성이 상이함에 따라 해당 특성을 반영할 수 있도록 각각의 적격성 심사기준을 적용하며, 구체적인 심사기준은 다음 <표 3-12>와 같다.

<표 3-12> 부문별 주요 적격성 심사기준¹⁴⁷⁾

부문	주요 적격성 심사기준
발전	<ul style="list-style-type: none"> 발전연료 제약: 천연가스 발전만 참여 대상 포집효율 하한: 최소 90%를 달성할 수 있어야 함.
산업	<ul style="list-style-type: none"> 산업 제약: 열병합발전 및 영국 SIC 코드 5~33(광업 및 제조업)에 속하는 업종 <ul style="list-style-type: none"> - 단, SIC 코드 24.36 핵연료 제조업은 제외함. - 업종 중 석유·가스, 수소, 폐기물 관리, 열병합 발전은 별도의 적격성 심사 기준 존재. - 수소는 기존의 회색수소 생산 시설(부산물 또는 중간재로써 회색수소 생산은 제외)에 CCUS 설비를 개보수하는 것만 산업부문에 참여 가능하며, 신규 설비는 수소 부문에 참여 가능. 기술 제약: CCU 프로젝트는 제외함. <ul style="list-style-type: none"> - CCS 및 CCU 프로젝트의 조합은 Phase-2에 참여할 수 있으나, 포집된 이산화탄소를 수송 및 저장 네트워크에 공급하는 것에 대해서만 지원을 하며 포집된 이산화탄소를 활용하는 것은 지원하지 않음. - 영구적인 감축을 가져오는 CCU에 한해서 비즈니스 모델을 적용시키도록 합의가 되었으나 추가적인 복잡성의 증대로 제외되었으며 정책의 변화에 따라 변경될 수 있음. 포집효율 하한: 85% <ul style="list-style-type: none"> ※ 서비스로서의 탄소포집(Capture as a Service, Caas) 업종*도 참여 가능
수소	<ul style="list-style-type: none"> 신규 CCUS 적용 수소생산 설비에 한함

* CaaS는 서비스로서 한 기업이 다른 기업의 탄소배출량을 포집하는 메커니즘을 말함.

자료: 한민지 외(2022), GTC Brief Vol.3 No.2, 7면 재인용

146) <https://eastcoastcluster.co.uk/>, 2022.10.19. 접속.

147) BEIS(2021d), 앞의 보고서 참조.

‘22년 3월, Phase-2에서 진행된 적격성 심사에서 Track-1에서 선정된 클러스터를 기준으로 East Coast Cluster에서는 25개(발전부문 6개, 수소부문 4개, 산업부문 15개), Hynet에서는 11개(발전부문 1개, 수소부문 2개, 산업부문 8개)와 예비클러스터인 Scottish Cluster에서는 5개(발전부문 1개, 수소부문 2개, 산업부문 2개) 프로젝트 등 총 41개의 개별 프로젝트가 통과되었다.

이후 이어지는 정량평가는 Phase-1과 동일한 지표와 가중치를 갖으며, 각 기준을 우수성에 따라 총 5단계(low/1점, Medium/2점, Medium/3점, Medim-High/4점, High/5점)의 10점 척도로 평가한다. 각 부문별 정량평가를 위한 구체적인 내용은 아래 <표 3-13>, <표 3-14> 및 <표 3-15>와 같다.

<표 3-13> Phase-2 정량평가 지표별 가중치와 내용(전력부문)

평가지표	가중치	내용																																	
실현가능성	30%	- 프로젝트의 상업적 운영가능일자*를 신뢰성과 증거에 입각하여 판단하고, 최고점(5점)은 늦어도 '27년 12월까지 상업적운영이 가능할 경우에 부여됨 * 프로젝트가 운영되기 시작하고 포집된 이산화탄소를 영구저장소로 이동한 날로 봄																																	
배출감축	25%	- 배출량 감축 평가는 각 프로젝트의 전력시스템의 탈탄소화 가능성을 평가하며, 기준 조건 동안 생산된 전기의 kWh당 대기 중으로 방출되는 잔여 CO ₂ eq을 바탕으로 측정함(단위전력에 대한 온실가스 발생량, gCO ₂ e/kWh) <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> $\text{탄소집약도} = \frac{\text{시간당 } CO_2e \text{ 발생량} - \text{시간당 } CO_2e \text{ 포집량}}{\text{시간당 전력생산량}(kWh)}$ </div> - 탄소감축을 평가함에 탄소집약도는 아래 기준에 따라 점수가 차등 부여됨 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>점수</th> <th>탄소집약도(기준 대비%)*</th> <th>탄소집약도(gCO₂e/kWh) 예시**</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5</td><td>0.00% ≤ X < 2.50%</td><td>0.0 ≤ X < 8.2</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>2.50% ≤ X < 5.00%</td><td>8.2 ≤ X < 16.4</td></tr> <tr><td>4</td><td>5.00% ≤ X < 7.50%</td><td>16.4 ≤ X < 24.5</td></tr> <tr><td>3.5</td><td>7.50% ≤ X < 10.0%</td><td>24.5 ≤ X < 32.7</td></tr> <tr><td>3</td><td>10.0% ≤ X < 12.5%</td><td>32.7 ≤ X < 40.9</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>12.5% ≤ X < 15.0%</td><td>40.9 ≤ X < 49.1</td></tr> <tr><td>2</td><td>15.0% ≤ X < 17.5%</td><td>49.1 ≤ X < 57.3</td></tr> <tr><td>1.5</td><td>17.5% ≤ X < 20.0%</td><td>57.3 ≤ X < 65.4</td></tr> <tr><td>1</td><td>20.0% ≤ X < 22.5%</td><td>65.4 ≤ X < 73.6</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>22.5% ≤ X</td><td>73.6 ≤ X</td></tr> </tbody> </table> <p style="font-size: small; margin-top: 5px;">* 기준은 H Class CCGT 플랜트의 탄소집약도인 327.2g *e/kWh를 기준으로 계산됨 ** 해당 탄소집약도는 이해의 편의를 위해 제공된 수치임</p>	점수	탄소집약도(기준 대비%)*	탄소집약도(gCO ₂ e/kWh) 예시**	5	0.00% ≤ X < 2.50%	0.0 ≤ X < 8.2	4.5	2.50% ≤ X < 5.00%	8.2 ≤ X < 16.4	4	5.00% ≤ X < 7.50%	16.4 ≤ X < 24.5	3.5	7.50% ≤ X < 10.0%	24.5 ≤ X < 32.7	3	10.0% ≤ X < 12.5%	32.7 ≤ X < 40.9	2.5	12.5% ≤ X < 15.0%	40.9 ≤ X < 49.1	2	15.0% ≤ X < 17.5%	49.1 ≤ X < 57.3	1.5	17.5% ≤ X < 20.0%	57.3 ≤ X < 65.4	1	20.0% ≤ X < 22.5%	65.4 ≤ X < 73.6	0.5	22.5% ≤ X	73.6 ≤ X
점수	탄소집약도(기준 대비%)*	탄소집약도(gCO ₂ e/kWh) 예시**																																	
5	0.00% ≤ X < 2.50%	0.0 ≤ X < 8.2																																	
4.5	2.50% ≤ X < 5.00%	8.2 ≤ X < 16.4																																	
4	5.00% ≤ X < 7.50%	16.4 ≤ X < 24.5																																	
3.5	7.50% ≤ X < 10.0%	24.5 ≤ X < 32.7																																	
3	10.0% ≤ X < 12.5%	32.7 ≤ X < 40.9																																	
2.5	12.5% ≤ X < 15.0%	40.9 ≤ X < 49.1																																	
2	15.0% ≤ X < 17.5%	49.1 ≤ X < 57.3																																	
1.5	17.5% ≤ X < 20.0%	57.3 ≤ X < 65.4																																	
1	20.0% ≤ X < 22.5%	65.4 ≤ X < 73.6																																	
0.5	22.5% ≤ X	73.6 ≤ X																																	
경제적 기여도	20%	- 경제적 기여도는 ▲일자리 수와 질, ▲공급망 조달 과정의 투명성, ▲CCUS 기술에의 투자, ▲경제적 기여도의 확장성 등을 바탕으로 평가되며, 이 중 경제적 기여도의 확장성은 영국 전역을 기준으로 지역균형경제성장에 이바지할 수 있는 정도를 측정함																																	
비용 적합성	15%	- 프로젝트와 관련된 예상비용(개발비용, 자본지출, 운영비용 등)비용 추정치와 신뢰도, 자금조달방법, 예상되는 저탄소발전의 가능성, 유지보수비용 등을 종합적으로 고려하여 판단함																																	
학습 및 혁신	10%	- 혁신 기술 개발 기여도와 지식 생산 및 정보공유의지 등을 평가함																																	

자료: BEIS(2021d)를 바탕으로 저자 작성

〈표 3-14〉 Phase-2 정량평가 지표별 가중치와 내용(산업부문)

평가지표	가중치	내용
실현가능성	30%	<ul style="list-style-type: none"> - 프로젝트의 상업적 운영가능일자*를 신뢰성과 증거에 입각하여 판단함 * 배출된 이산화탄소를 이산화탄소 저장소로 지속적으로 공급하기 시작한 날을 의미하며, CaaSco(포집전문회사: 자체 포집 시설을 도입하기 어려운 경우 전문회사를 통해 포집을 실시하게 함)의 경우 CaaSco에서의 이산화탄소 주입이 작동조건을 충족하는 것으로 확인된 경우를 뜻함.
배출감축	25%	<ul style="list-style-type: none"> - 이산화탄소 감축 효과(50%), 총 이산화탄소 감축량(40%)과 미래 감축잠재력(10%)을 기준으로 나누어 가중치를 부여하고, 각각의 프로젝트에서 제공하는 이산화탄소 배출 감축량을 정부 목표와 비교하여 평가함 - (이산화탄소감축효과) 가장 높은 점수(5점)는 적합성평가보다 높은 수준의 포집 목표(95% 또는 그 이상)를 달성할 것으로 예상되는 프로젝트에게 부여하며, 최저 기준은 85%임. - (총 이산화탄소 감축량) 프로젝트에서 제안하고 있는 포집 및 저장되는 이산화탄소량을 15년간 기준('30년까지 연간 6MtCO₂, 2035년까지 연간 9MtCO₂)에 맞게 포집 및 저장하여야 함 - (미래 감축잠재력) 계약기간인 15년 이후 배출량 감소와 관련한 장기적인 저감 잠재력 예측정보를 제공해야 하며, 미래 포집 능력을 개발하기 위한 계획을 정성적으로 설명할 수 있어야 함
경제적 기여도	20%	<ul style="list-style-type: none"> - 경제적 기여도는 ▲일자리 수와 질, ▲공급망 조달 과정의 투명성, ▲CCUS 기술에의 투자, ▲경제적 기여도의 확장성 등을 바탕으로 평가되며, 이 중 경제적 기여도의 확장성은 수소 및 CCUS 산업성장을 촉진하기 위한 그린산업의 일종으로 영국이 추진하고 있는 Superplace¹⁴⁸⁾ 개발(수송과 전력부분의 그린산업화)에 기여할 수 있어야 함
비용 적합성	15%	<ul style="list-style-type: none"> - 균등화비용(LCOA)를 계산하여 비용평가의 건전성을 검사함 $\frac{\text{포집플랜트전체설비운영비용(기준: 파운드)(PV)}}{\text{포집플랜트전체운영에서 감축된 이산화탄소량(기준: 톤)(NPV)}} = \text{균등화비용(LCOA)}$
학습 및 혁신	10%	<ul style="list-style-type: none"> - 새로운 분야에서 탄소포집을 적용하고, 다른 탈탄소 혁신 프로그램과 시너지를 유발할 수 있을 경우에 높은 점수를 부여함

자료: BEIS(2021d)를 바탕으로 저자 작성

148) 영국의 Superplace와 관련하여 다음 홈페이지 The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution (HTML version) - GOV.UK (www.gov.uk) (22.10.13 최종방문) 참조.

<표 3-15> Phase-2 정량평가 지표별 가중치와 내용(수소부문)

평가지표	가중치	내용
실현가능성	30%	<ul style="list-style-type: none"> - 프로젝트가 '27년 말까지 운영될 수 있는지 여부를 고려하며, 프로젝트 계획이 수소생산 플랜트와 연계할 수 있는지 여부를 검토함 - 평가기준은 수소발전소가 '27년 말까지 안정적으로 운영 및 제공될 수 있다는 점과 상업적·기술적 준비를 갖추고 있다는 점에 대해 얼마만큼 정부에게 확신을 줄수 있는지 여부가 핵심임
배출감축	25%	<ul style="list-style-type: none"> - 수소의 CO₂ e 배출 집약도(60%), 총 배출감축 평균(40%)을 기준으로 나누어 가중치를 부여하고, 각각의 프로젝트에서 제공하는 이산화탄소 배출 감축량을 평가함 - 이때, 배출집약도는 업스트림 배출을 포함하여 수소생산에서의 배출집약도를 고려하는 것과 마찬가지로 수소플랜트의 포집률, 이산화탄소 압축, 수송 및 저장으로 인한 배출영향을 고려함 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>[수소의 탄소집약도 계산방법]</p> <p>CO₂ e intensity of hydrogen (g CO₂ e/kg H₂) = a + b + c</p> <p>a = Upstream supply CO₂ e intensity (g CO₂ e /kgH₂)</p> <p>b = CO₂ e intensity associated with hydrogen production (g CO₂ e /kgH₂)</p> <p>c = CO₂ e intensity associated with CO₂ transportation (g CO₂ e /kgH₂)</p> </div>
경제적 기여도	20%	<ul style="list-style-type: none"> - 경제적 기여도는 ▲일자리 수와 질, ▲공급망 조달 과정의 투명성, ▲수소 기술에의 투자 ▲ 경제적 기여도의 확장성 등을 바탕으로 평가되며, 이 중 경제적 기여도의 확장성은 Superplace가 될 가능성이나 탈탄소 프로그램과의 시너지 효과를 고려함
비용 적합성	15%	<ul style="list-style-type: none"> - 비용적합성은 추정되는 비용의 건전성을 체크하고, 해당 건전성을 평가하기 위하여 수소비용을 하기에 따라 계산함 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px; text-align: center;"> $\frac{PV(2050년까지 비용)}{NPV(2050년까지 수소생산)} = \text{수소비용}$ </div> <ul style="list-style-type: none"> - PV는 2050년까지 전체 건설 및 운영기간에 걸쳐 연간기준으로 개발 비용, 자본 비용 및 교체 비용을 포함한 운영 총비용을 포함하여 계산되며, NPV는 2050년까지 수소 생산의 순 현재 가치를 뜻하고 수소 전달 및 저장 비용과 이산화탄소 수송 저장네트워크 비용 추정치를 포함하여 계산함
시장 개발 및 학습	10%	<ul style="list-style-type: none"> - 시장개발을 위해 프로젝트 계획이 구체적으로 어떻게 기여할 수 있는지 여부를 판단하며, 수소 네트워크 인프라의 개발 및 통합계획과 기타 수소 경제에 이바지할 수 있는지 여부를 평가함 - 핵심 지식 산출물을 생성하고 이를 공유하려는 의지를 평가함

자료: BEIS(2021d)를 바탕으로 저자 작성

해당 정량평가를 모두 거친 후, 지난 '22.8월에 총 20개의 프로젝트가 최종 프로젝트(shortlisted projects)로 선정되었다. 적격성심사 통과 프로젝트와 최종 선정 프로젝트의 구체적인 내용은 다음 <표 3-16>와 같다.

<표 3-16> 클러스터별 적격성 심사 통과 프로젝트와 최종 선정 프로젝트

발전부문	
클러스터명	프로젝트명
East Coast Cluster	<ul style="list-style-type: none"> • VPI Humber Zero • Whitetail Clean Energy ◇ • Net Zero Teesside Power ◇ • Alfanar CCGT Teesside • Keadby 3 Carbon Capture Power Station ◇ • C.GEN Killingholme
Hynet	<ul style="list-style-type: none"> • Making Net Zero Possible - Grain
Scottish Cluster	<ul style="list-style-type: none"> • Peterhead Carbon Capture Power Station
수소부문	
클러스터명	프로젝트명
East Coast Cluster	<ul style="list-style-type: none"> • H2NorthEast◇ • Uniper Humber Hub Blue Project • bpH2Teesside ◇ • Hydrogen to Humber (H2H) Saltend ◇
Hynet	<ul style="list-style-type: none"> • Project Cavendish • HyNet Hydrogen Production Project (HPP) ◇
Scottish Cluster	<ul style="list-style-type: none"> • Acorn Hydrogen • Fife Hydrogen Hub
산업계 포집부문	
클러스터명	프로젝트명
East Coast Cluster	<ul style="list-style-type: none"> • STV 1+2 Energy from Waste Carbon Capture Project • STV 3 Energy from Waste Carbon Capture Project • Tees Valley Energy Recovery Facility Project (TVERF) ◇ • Altalto Immingham waste to jet fuel • Lighthouse Green Fuels • Redcar Energy Centre ◇ • Humber Zero - Phillips 66 Humber Refinery ◇ • Prax Lindsey Oil Refinery Carbon Capture Project ◇ • ZerCaL250 ◇ • Teesside Hydrogen CO₂ Capture ◇

	<ul style="list-style-type: none"> • Saint-Gobain Glass Carbon Capture Project • Norsea Carbon Capture ◆ • CF Fertilisers Billingham Ammonia CCS ◆ • Teesside Green Energy Park Limited • North Lincolnshire Green Energy Park
Hynet	<ul style="list-style-type: none"> • Viridor Runcorn Industrial CCS ◆ • Protos Biofuels ◆ • Protos Energy Recovery Facility • Hanson Padeswood Cement Works carbon capture and storage project ◆ • CF Fertilisers Ince Capture Plant • Buxton Lime Net Zero ◆ • Carbon Dioxide Capture Unit - EssarOil UK ◆ • Emerge CCS
Scottish Cluster	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ Extraction from St Fergus Gas at SAGE Terminal • Acorn Capture

● 적격성 통과 프로젝트

◆ 최종 선정 프로젝트

자료: 영국 정부 홈페이지 참조¹⁴⁹⁾

해당 선정결과가 모든 프로젝트와 재정적 지원이 연계됨을 뜻하는 것은 아니며, 협상과정을 거쳐 최종 재정 투자 대상이 선정될 예정이다. 계획안에 따라 '23년 2분기부터 재정투자를 허용하는 지원 및 프로젝트 할당과 관련된 결정이 있을 것으로 보인다.

(3) 제도적 기반 마련

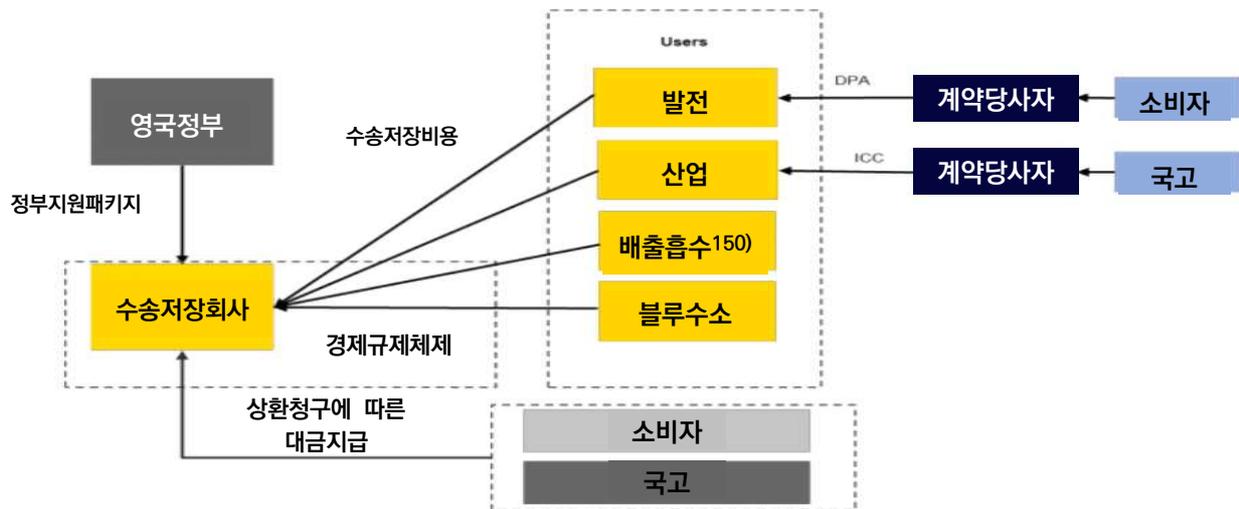
영국은 CCUS 클러스터 선별 외에도 이를 뒷받침하기 위한 제도적 기반마련에 박차를 가하고 있다. 우선, 영국 정부는 CCUS 인프라 구축 전략 비용으로 CCUS 인프라 기금(CCUS Infrastructure Fund, CIF) 10억 파운드(1,500억 환율 기준 약 1조 5967억 원)를 지원하겠다고 밝혔으며, 이 중 산업 탈탄소화 챌린지를 통해 해양 저장 및 육상 인프라를 위한 설계 작업 지원 용으로 4천만 파운드가 사용되었다. 아울러 영국은 CCUS를 수소와 긴밀하게 연계하여 탈탄소화를 가속화하고 있으며, 이를 위한 투자의 일환으로 수소 및 산업용 CCUS 비즈니스 모델에 1억 4천만 파운드를 배정하였다.

영국은 직접적인 재정적 투자 외에도 다양한 비즈니스 모델을 개발하여 CCUS의 부족한 경제성을 보완하고 기업의 투자유인을 확대하기 위한 노력을 하고 있다. 예컨대 재생에너지 차

149) ① Cluster sequencing Phase-2: eligible projects (power CCUS, hydrogen and ICC), March 2022 - GOV.UK (www.gov.uk) ② Cluster sequencing Phase-2: shortlisted projects (power CCUS, hydrogen and ICC), August 2022 - GOV.UK (www.gov.uk)

액계약제도모델(Renewables Contracts for Difference, CfD)에 기반한 CCUS에 대한 차액전력 계약(Dispatchable Power Agreement, DPA) 모델을 개발하여 탄소포집이 가능한 발전소 설치를 지원하여 탄소 포집 설비를 갖춘 발전소가 그렇지 않은 발전소보다 안정적인 수익확보가 가능(최초 15년)하도록 하고, 투자자들의 수익률과 더불어 탄소 포집에 투자한 수송 저장 비용을 회수할 수 있도록 하고 있다. 이와 더불어 안정적인 시장을 마련하기 위해 산업용 탄소포집계약(Industrial Carbon Capture Contracts, ICC Contracts)모델을 개발하여 장기적인 수익에 대한 확실성을 제공함으로써 투자를 활성화 하고자 하고 있다. ICC 계약은 이산화탄소 포집을 장려하기 위해 영국정부가 탄소배출기업에게 포집된 이산화탄소 톤당 지불금을 제공하여 곧바로 운영비용, 수송 저장 비용 등을 충당할 수 있게 하는 계약을 말한다.

[그림 3-18] CCUS 비즈니스 모델 개념도



자료: BEIS(2020), Carbon Capture, Usage and Storage, p. 20¹⁵¹⁾

이와 더불어 CCUS 이외에도 온실가스 제거를 위한 대기중직접탄소포집저장(Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) 및 바이오에너지탄소포집저장(Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS)과 같은 다양한 기술시장을 마련하고 이에 대한 상업적 프레임워크를 구축하고자 하고 있다. BECCS는 탄소포집저장기술을 바이오에너지 전환 프로세스에 적용하는 것으로 DACCS와 함께 탄소감축을 넘어 배출흡수기술(Negative Emissions Technologies, NETs)로 주목받고 있다. 이에 따라 영국 정부는 NETs에 대한 기술을 확보하기 위해 투자를 지속하고 이와 관련된 지속가능한 기준을 개발하여 온실가스제거 비즈니스 모델을 계속해서 수립해 나갈 예정이라고 밝혔다.

아울러 영국은 CCUS 공급망을 촉진하고 강화하기 위한 방안의 하나로 에너지공급망 태스크포스(UK Energy Supply Chain Taskforce)를 발족하고 에너지 공급망 개발기회를 극대화하고 있다.

150) 직접포집이나 바이오에너지 등을 뜻한다.

151) BEIS(2020), Carbon Capture, Usage and Storage An update on business models for Carbon Capture, Usage and Storage

또한 영국에 기반을 두고 있는 회사의 해외진출을 돕고, CCUS 계약을 체결하는 데 우위를 점할 수 있도록 “Fit for CCUS” 프로그램을 개발하고 있다.

나. 미국

(1) 미국 CCUS 개요¹⁵²⁾

미국은 10개의 상업용 CCUS 시설을 갖춘 국가로 CCUS 개발 및 배포에 선두를 달리고 있으며, 해당 시설들의 이산화탄소 포집 용량은 연간 약 2,500만 톤으로 전 세계 용량의 3분의 2에 달한다. 현재 건설 중인 CCUS 시설이 완료되면 연간 약 4,600만 톤을 추가할 프로젝트가 20여 개에 이르고 있는 상황이다. 미국의 기존 CCUS 프로젝트의 대부분은 천연가스 처리 및 합성 천연가스, 비료, 수소 및 바이오에탄올 생산을 포함한 저비용의 포집 기회와 연관이 있다. 10개의 기존 프로젝트 중 하나를 제외한 모든 프로젝트는 원유 회수증진(Enhanced Oil Recovery, EOR) 작업을 위해 포집된 이산화탄소 판매에서 수익을 얻고 있다(〈표 3-17〉 참조). 또한, 에너지부(Department of Energy, DOE)의 국립 연구소를 비롯하여 주요 CCUS R&D가 진행 중이고 수많은 파일럿 및 실증 규모 프로젝트도 운영되고 있다.

〈표 3-17〉 미국의 대규모 상업용 CCUS 프로젝트 현황(2020년도 기준)

순번	프로젝트명	가동연도	추출원	포집용량 (Mt/년)	주 저장방식
1	Terrel Natural Gas Plants	1972	천연가스	0.5	EOR
2	Enid fertiliser	1982	비료 생산	0.7	EOR
3	Shute Creek gas processing facility	1986	천연가스 공정	7.0	EOR
4	Great Plains Synfuels(Weyburn/Midale)	2000	합성/천연가스 공정	3.0	EOR
5	Century plan	2010	천연가스 공정	8.4	EOR
6	Air Products steam methane reformer	2013	수소 생산	1.0	EOR
7	Lost Cabin Gas Plant	2013	천연가스 공정	0.9	EOR
8	Coffeyville Gasification	2013	비료 생산	1.0	EOR
9	Petra Nova	2017	석탄 발전	1.4	EOR
10	Illinois Industrial	2017	에탄올 생산	1.0	Dedicated*

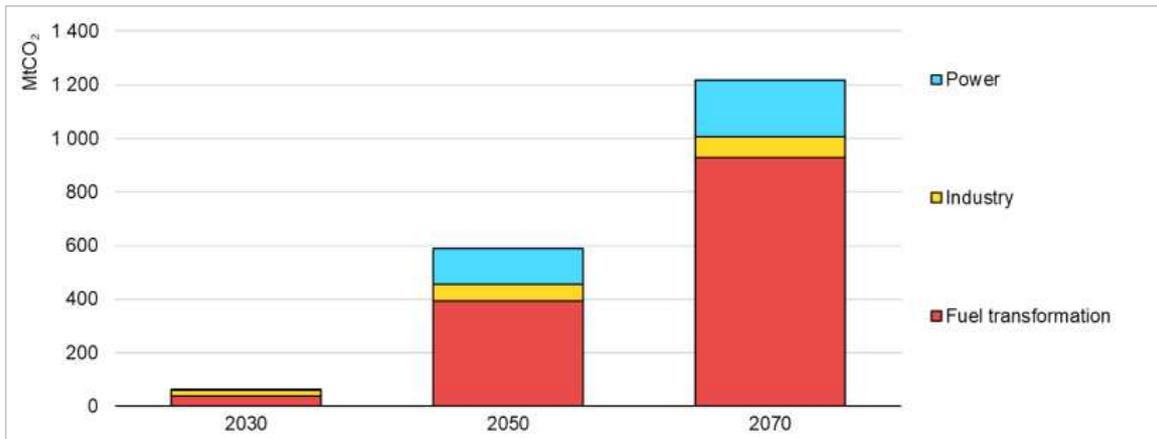
*: 저장방식 중 ‘Dedicated’ 는 포집된 이산화탄소를 재사용하지 않고 지층 등에 주입해 저장하는 것을 의미함

자료: IEA(2020), pp. 25-26에서 미국 프로젝트만 저자 정리

152) 해당 부분은 IEA(2020), *Energy Technology Perspectives 2020: CCUS in Clean Energy Transitions*, IEA Publication, pp.129-132를 바탕으로 작성하였다.

미국에서 CCUS 프로젝트는 지속가능한 발전 시나리오 기간 동안 가속화될 것으로 예측되고 있다. 이산화탄소 포집은 해당 시나리오에서 2070년까지 약 1,200 MtCO₂에 도달하며 그 중 95% 이상이 영구적으로 저장되는 것으로 나타나고 있다. 대부분의 포집 시설은 연료 변환(Fuel Transformation) 및 가스 화력 발전을 포함한 전력 부문(Power)에 초점을 맞추고 있는 것을 알 수 있다([그림 3-19] 참조).

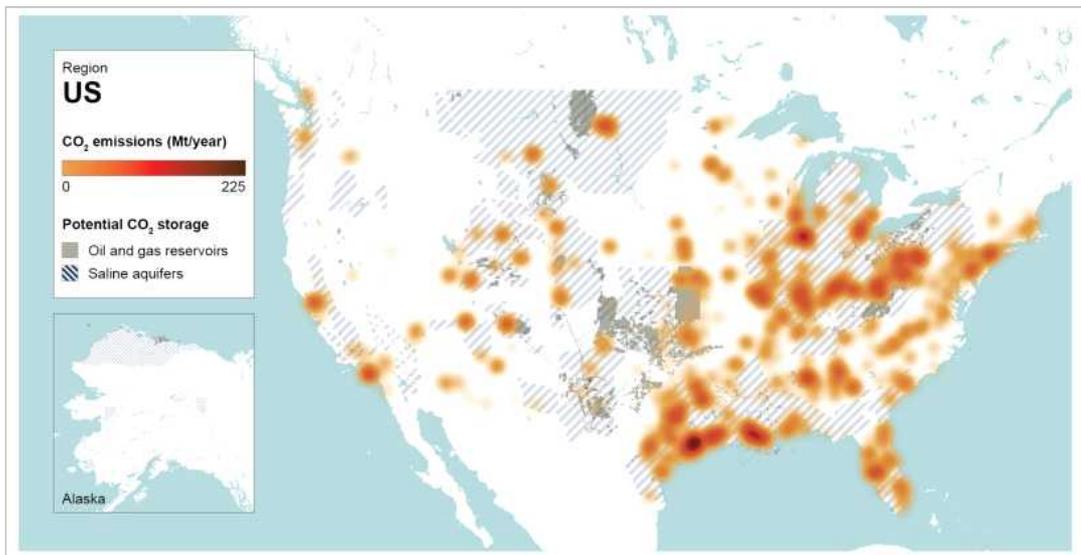
[그림 3-19] 지속 가능한 발전 시나리오에서 미국의 이산화탄소 포집



자료: IEA(2020), p. 130

미국의 잠재적 이산화탄소 저장 용량은 약 800Gt으로 추정되며 이는 미국 전체의 배출량의 160년 치에 해당한다고 한다. 잠재 저장소의 약 3분의 2는 육지에 있는데 대부분이 염수층(Saline Aquifer)에 있는 것을 알 수 있다([그림 3-20] 참조).

[그림 3-20] 미국의 이산화탄소 발생원 및 잠재적인 저장소 지도



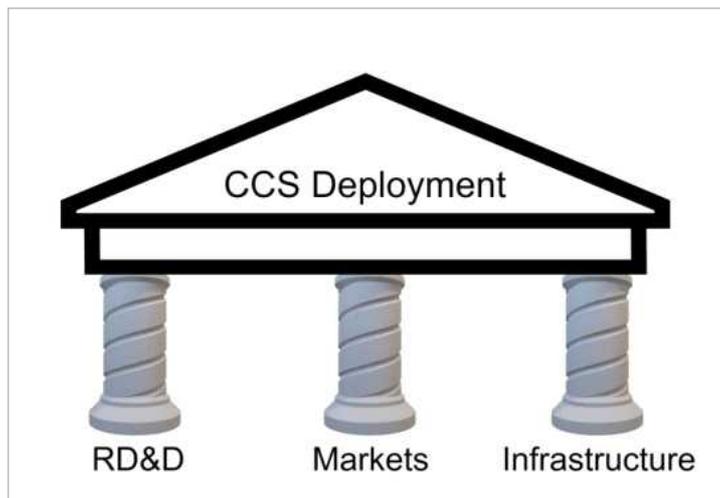
자료: IEA(2020), p. 132; DOE/NETL(2015), NATCARB/ATLAS 재인용

[그림 3-20]에서 볼 수 있듯이 미국 내의 대부분 이산화탄소 배출원은 잠재적 저장소와 가깝게 자리하고 있다. 배출량의 85%를 차지하는 산업 시설과 발전소의 약 80%가 잠재적 저장소에서 100km 이내에 있으며, 발전소의 75%는 50km 이내에 위치하고 있다. 이러한 거리를 환산하면 현재 기존 CCUS 시설 사이의 파이프라인을 통해 이산화탄소가 수송되는 평균 거리는 약 180km이고 최대값은 약 375km이다. 미국은 세계 최대 규모의 이산화탄소 파이프라인 네트워크(8,000km)를 보유하고 있어 향후 배출 지점을 이산화탄소 저장소 및 EOR 사이트에 연결할 수 있는 기반이 마련되어 있음을 알 수 있다.

(2) 미국 CCUS 관련 정책

미국 CCUS 관련 정책은 ① 연구, 개발 및 시연(RD&D), ② 시장개발, ③ 인프라 구축 세 가지 범주¹⁵³⁾로 구별된다. 먼저 첫 번째 범주에서 소규모 연구부터 대규모 실증까지 기술 발전을 위한 지원을, 두 번째 범주에서는 기업이 관련 설비에 투자하는 정책을, 세 번째 범주에서는 일반적인 규제, 허가, 면허 및 인용에 더하여 공통의 운송 파이프라인 또는 기타 운송 경로 구축을 포함하고 있다(Bright, 2021, p.4). Bright(2021)에 의하면 CCS 연구, 개발 및 시연의 첫 번째 범주는 전 세계적으로 지원된 최초의 정책적 범주로 결과적으로 CCS 기술 발전을 위한 가장 강력한 지원을 제공한 바 있다. 다음으로, 시장 개발에 해당하는 정책의 예로는 일정량의 저탄소 에너지 생성을 요구하는 세금 공제, 탄소 가격, 탄소 거래 시장, 규정 및 표준 등이 있다(Bright, 2021, p.4).

[그림 3-21] 광범위한 CCS 배포를 지원하는 미국의 CCS 정책의 세 가지 범주



자료: Bright(2021), p.4

153) 원문에는 Pillars라고 표현되어 있어 직역하면 기둥으로 해석되나 여기서는 범주라 표현하였다.

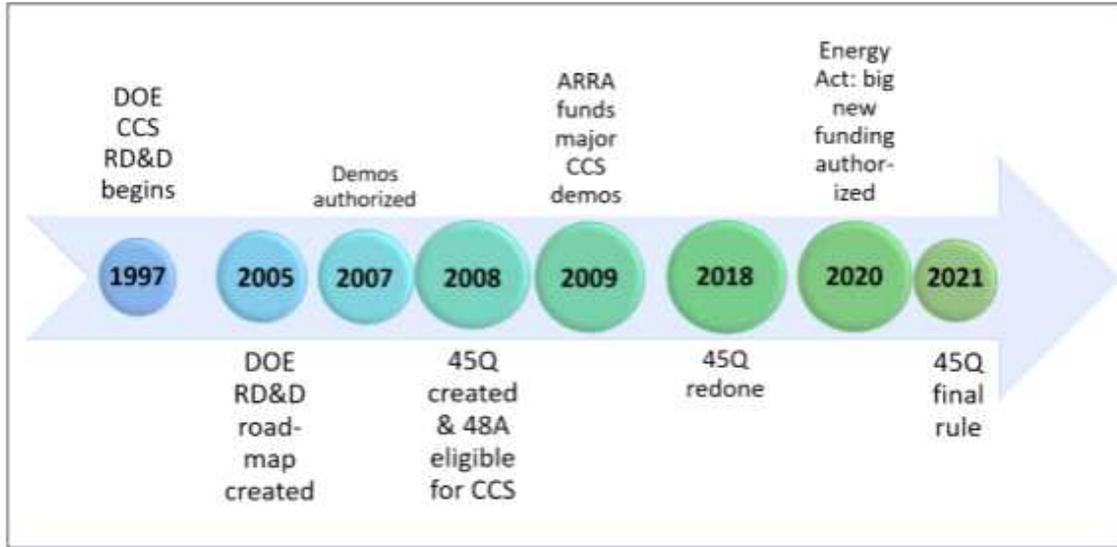
〈표 3-18〉 미국 CCS 정책 추진 연혁

연도	내용	세부내용
1997년	에너지부(DOE)의 CCS 연구개발 개시	1972년 텍사스주 테렐에 글로벌 CCS시설이 생긴 이래 1997년에서야 미 의회는 미국 에너지부의 화석에너지국(Office of Fossil Energy)을 통해 CCS RD&D 자금을 지출하기 시작함
2005-2007년	에너지부(DOE)의 CCS RD&D 프로그램의 첫 승인	미 의회는 2005년 에너지정책법(Energy Policy of 2005)을 통과시켜 에너지부의 CCS RD&D 프로그램에 대한 10년 승인 로드맵을 제시함. 이는 2007년 에너지독립보안법(Energy Independence and Security Act of 2007)이 통과되면서 포획, 운송, 저장을 통합한 7개 대규모 시범사업을 승인하며 더욱 강화되었음
2008-2009년	최초로 중요한 CCS 시장개발 및 지출 법률 통과	2008년 개정된 에너지 개선 및 연장법안(Energy Improvement and Extension Act of 2008)과 2009년 3월 통과된 미국 경기회복 및 재투자법(American Recovery and Reinvestment Act, ARRA)*의 통과로 CCS에 대한 시장개발 및 RD&D에 대한 지원이 이루어짐
2018년	45Q 초당적 예산법 개정	초당적 예산법의 45Q 세액 공제 개정은 CCS 가치 제고에 새로운 활력을 불어넣었는데, 이 법안은 45Q 세금 공제의 가치를 EOR 및 비EOR 이산화탄소 활용의 경우에는 이산화탄소 1톤(tCO ₂)당 35달러로, 이산화탄소 저장소의 경우 이산화탄소 1톤(tCO ₂)당 50달러로 상향 조정함
2020년	에너지법(Energy Act)으로 CCS RD&D 승인 수준을 3배 확대함	2020년 12월 말 통과된 에너지법(Energy Act)으로 CCS RD&D 허가는 대폭 강화되었으며 총 67억 2천만 달러가 2021-25 회계연도 중 CCS를 위한 지출 금액으로 승인됨
2021년	재무부(DOT)와 국세청(IRS)의 45Q 최종 지침	재무부와 국세청은 2021년 2월 45Q 세액공제 시행을 위한 최종 지침을 발표한 바 있는데, 본 지침은 CCS 프로젝트 구축 방법에 대한 투명성을 확립하여 CCS 투자자와 개발자에게 45Q 세액 공제의 전체 가치를 적시에 달성하는 방법을 확립하였음

* ARRA는 CCS 활동에 34억 달러를 지출했으며, 이 중 26억 5천만 달러가 9개의 대규모 시연 프로젝트에 사용되었음

자료: 석호영·김동련(2021), pp.310-311 내용 바탕으로 저자 정리

[그림 3-22] 미국에서 제정된 주요 CCS 정책의 타임라인



자료: Bright(2021), p. 5

<표 3-18>과 [그림 3-22]을 통해서 미국의 주요 CCS 정책의 추진 연혁을 간략하게 살펴볼 수 있다. 최초 1997년 DOE에서 CCS RD&D를 시작한 이래 2005~2009년 사이에 주요 CCS 관련 기틀이 마련되었다고 볼 수 있다. 2005년 DOE의 RD&D 로드맵을 시작으로 2007년 시범 사업이 승인되었고, 2008년에 CCS 시장 개발 및 지출 법률 통과로 45Q가 신설된 바 있다. 45Q 세액 공제는 2018년 개정이 되었고, 2021년 최종적으로 지침으로 확립되었다. 또한, 2020년 에너지 법안으로 인하여 CCS RD&D 허가가 대폭 강화된 바 있다.

Global CCS Institute(2020)에 의하면, 미국에서는 2020년에 CCS가 에너지 및 기후 정책으로 주류화되었는데, 보고서는 이를 초당적 상원 기후 협의회(bipartisan Senate Climate Caucus)의 개최, 하원에서 민주당 의원들이 초안한 기후변화에 관한 선택 보고서(Select Report on Climate Change)에 CCS를 핵심기술로 포함, 45Q 입법을 강화하기 위한 다수의 법안에 대한 초당적 지지의 결과로 설명하고 있다(p.36). 2021년에는 첫 3개월 동안 미국 하원과 미 상원 의원들은 탄소 포집 및 저장(CCS) 배치를 가속화 하는 것을 목표로 하는 5가지 법안을 도입한 바 있다(Bright, 2021, p.2)

CCS는 또한 미국 내 많은 주에서 받아들여지고 있는데, 대표적으로 캘리포니아가 있다. 캘리포니아는 미국 내 영향력이 높은 주로써 전력을 탈탄소화 하기 위해 CCS의 활용을 채택하였고 CCS를 안정적이고 신뢰할 수 있는 전력망의 필수 요소로 여기고 있다. 미국 다른 주에서도 탄소 중립 달성을 공약하고 있고, 가장 최근에는 루이지애나 주가 이를 발표한 바 있다. 대규모 산업기반이 있는 루이지애나 주에서 탄소 중립 달성을 위해서 대규모 CCS가 필요할 거라 예상된다(Global CCS Institute, 2020, p. 36). 한편, 미국 환경 보호국(EPA)은 지하 식수원을 보

호하기 위한 권한하에 지하 주입 제어(Underground Injection Control, UIC) 프로그램 및 관련 규정을 통해 이산화탄소 주입을 규제하고 있다. EPA가 UIC 프로그램에 대한 최소 표준 및 기준을 설정하는 동안 대부분의 주에서는 EOR용 이산화탄소 주입정(Class II 회수정으로 분류됨)을 규제하고 허용할 책임이 있다(Jones and Lawson, 2022).

(가) CCS(Carbon Capture and Sequestration¹⁵⁴), 탄소 포집 및 격리) 관련 법안¹⁵⁵)

최근 미국 의회에서 제안되고 제정된 CCS 관련 법안은 연방 CCS 연구 및 개발(R&D) 활동 및 자금 지원, 파이프라인 및 탄소 격리 세금 공제를 다룬 바 있다. CCS를 다루는 법안 또는 그 조항은 2021년 통합 세출법¹⁵⁶(P.L. 116-260)의 일부로 제정된 바 있다. 2021년 통합 세출법(P.L. 116-260)의 일환으로 의회는 DOE CCS 연구 프로그램을 재승인하였다. 다른 조항에서 이 법은 DOE의 연구 범위를 비석탄 응용 분야(예: 천연 가스 화력 발전소, 기타 산업 시설)로 확장하였고, 또한 DOE 탄소 활용 연구 프로그램 및 직접적인 공기 포집과 관련된 특정 활동(예: DAC 기술)도 승인하였다.

기반시설투자 및 고용법(Infrastructure Investment and Jobs Act, IIJA)는 이 확장된 범위를 기반으로 하여 P.L.이 승인한 여러 프로그램에 대한 추가 지출을 제공할 것이다. P.L. 117-169, 흔히 2022년 인플레이션 감소법(Inflation Reduction Act of 2022)이라고 알려진 조항에는, 다른 조항들 중 특정 시설에 대한 세액공제 금액을 늘리고, 착공 기한을 연장하는 45Q 세액공제와 관련된 조항들이 여러 개 포함되어 있다.

(나) 45Q¹⁵⁷): “전 세계적으로 가장 진보적인 CCS 관련 인센티브”

미국은 다양한 연료 및 생산 방법에 에너지 세금 공제를 제공한 오랜 역사가 있다. 청정에너지 배치의 맥락에서 세금 공제는 청정에너지 배치 및 투자를 촉진하기 위해 연방 정부가 선호하는 인센티브 구조가 되었다. 예를 들어 에너지 효율 투자에 대한 세금 공제, 태양 에너지에 대한 연방 투자 세금 공제(ITC) 및 풍력에 대한 생산 세금 공제(PTC)가 있으며, 모두 많은 양의 재생 에너지 용량을 제공한 바 있다. 청정에너지 개발업자가 세금을 내야 할 만큼의 수익성이 있는지에 따라 세액공제를 청구할 수 있게 되면서 이러한 세액공제를 통해 청정에너지 자금조달 시장이 발달해 왔다. 이러한 조세 형평 파트너십을 통해 공제를 청구할 수 없는 개발자는 투자자(조세 형평 투자자)와 협력하여 자금조달을 할 수도 있다.

미국 세금 코드의 관련 섹션 이름을 따서 명명된 탄소 산화물 격리 크레딧(45Q)은 이산화

154) 통상적으로 CCS에서 S는 Storage를 지칭하나, 미국 정부의 공식 문서 상에서 Storage 대신 Sequestration이 사용되었기에 해당 파트에서는 본 단어를 인용하였다.

155) Jones A. and Lawson A.(2022), *Carbon Capture and Sequestration (CCS) in the United States*, Congressional Research Service 참조.

156) Consolidated Appropriations Act, 2021

157) 해당 부분은 Beck(2020)을 바탕으로 작성하였다.

탄소, 일산화탄소 및 아산화탄소에 적용된다. 활용, 3차 오일 주입 또는 지층에 영구적으로 저장되는 탄소 산화물에 대해 일정 금액의 금전적 크레딧을 제공하는 것을 목적으로 하고 있다. 45Q는 2008년에 처음 제정되었으며, 그 당시에는 EOR(Enhanced Oil Recovery)을 통한 저장에는 \$10/tCO₂을, 지층 저장에는 \$20/tCO₂를 제공하도록 제정되었다.

2018년 45Q는 초당적 예산법(Bipartisan Budget Act)의 일부로 개혁되어 연간 CO₂ 포집 최소값을 낮추고 가치를 높이며 기업이 크레딧을 청구할 수 있는 더 큰 유연성을 제공함으로써 추가 산업 및 응용 분야에 대한 자격을 확대하였다. 지층 저장을 위해 \$50/t CO₂, EOR 회수를 위해 \$35/tCO₂ 를 받을 수 있도록 금액이 증가한 바 있다.

[그림 3-23] 연도별 45Q 혜택의 변화

TYPE OF CO ₂ STORAGE/USE	MINIMUM SIZE OF ELIGIBLE CARBON CAPTURE PLANT BY SIZE (ktCO ₂ /YR)			RELEVANT LEVEL OF TAX CREDIT GIVEN IN OPERATIONAL YEAR (USD/tCO ₂)									
	POWER PLANT	OTHER INDUSTRIAL FACILITY	DIRECT AIR CAPTURE	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	LATER
	DEDICATED GEOLOGICAL STORAGE	500	100	100	28	31	34	36	39	42	45	47	50
STORAGE VIA EOR	500	100	100	17	19	22	24	26	28	31	33	35	INDEX LINKED
OTHER UTILISATION PROCESSES*	25	25	25	17	19	22	24	26	28	31	33	35	

*Each CO₂ source cannot be greater than 500 ktCO₂/yr. Any credit will only apply to the portion of the converted CO₂ that can be shown to reduce overall emissions.

자료: Beck(2020), p. 2

또한, 45Q는 캘리포니아 저탄소 연료 표준(California Low Carbon Fuel Standard) CCS 프로토콜을 포함하되 이에 국한되지 않는 주 및 지방 청정에너지 인센티브를 보완하고 결합할 수 있는 연방세금 공제를 제공하고 있다. 이 인센티브는 현재 CO₂ 배출이 세계적인 문제임을 인식하고 직접 공기 포집뿐만 아니라 운송 연료의 수명 주기 배출을 줄이는 CCS 시설에 대해 \$200/tCO₂에 가까운 금액을 제공한다. 45Q와 함께 작동할 수 있는 정책의 다른 예는 청정 에너지 표준 및 지역 투자 세금 공제, 다양한 보조금 및 대출 프로그램이 있다.

(다) DOE CCS 프로그램

DOE는 주로 FECM(화석 에너지 및 탄소 관리 연구, 개발, 시연 및 배포 프로그램)을 통해 통합 CCS 시스템의 세 가지 주요 단계 측면에 대한 R&D 자금을 지원해 온 바 있다. <표 3-19>에서 볼 수 있듯이 CCS 중심의 R&D는 2010년부터 DOE FECM 내의 석탄 프로그램 영역의 메인으로 자리잡게 되었다(Jones and Lawson, 2022, p. 18).

Jones and Lawson(2022)에 따르면 미국 의회는 DOE의 CCS 활동을 위한 자금을 추가로 제

공하였는데, 2009년 미국 경기회복 및 재투자법(ARRA)에서 34억 달러를 제공한 바 있다. 2021년 기반시설투자 및 고용법(IIJA)은 새로운 탄소포집 시설 및 상업용 탄소 저장 시설 건설을 위한 자금을 포함하여 추가 자금을 85억 달러 제공하기로 결정하였다(Jones and Lawson, 2022, p. 22).

〈표 3-19〉 DOE의 탄소포집저장 시설 관련 예산 변화

연도	FECM 전체	탄소포집저장 및 발전 시스템		
		합계	탄소포집	저장 및 활용
FY2010	659,770	393,485	-	-
FY2011	434,052	389,688	58,703	330,985
FY2012	337,074	359,320	66,986	292,334
FY2013	498,715	341,864	63,725	278,139
FY2014	570,431	392,202	92,000	300,202
FY2015	571,000	400,000	88,000	312,000
FY2016	632,000	430,000	101,000	329,000
FY2017	668,000	423,800	101,000	322,800
FY2018	726,817	481,117	100,671	380,446
FY2019	740,000	486,230	100,671	385,559
FY2020	750,000	490,800	117,800	373,000
FY2021	750,000	446,800	126,300	320,500

자료: Jones and Lawson(2022); S&T GPS 웹사이트¹⁵⁸⁾에서 재인용

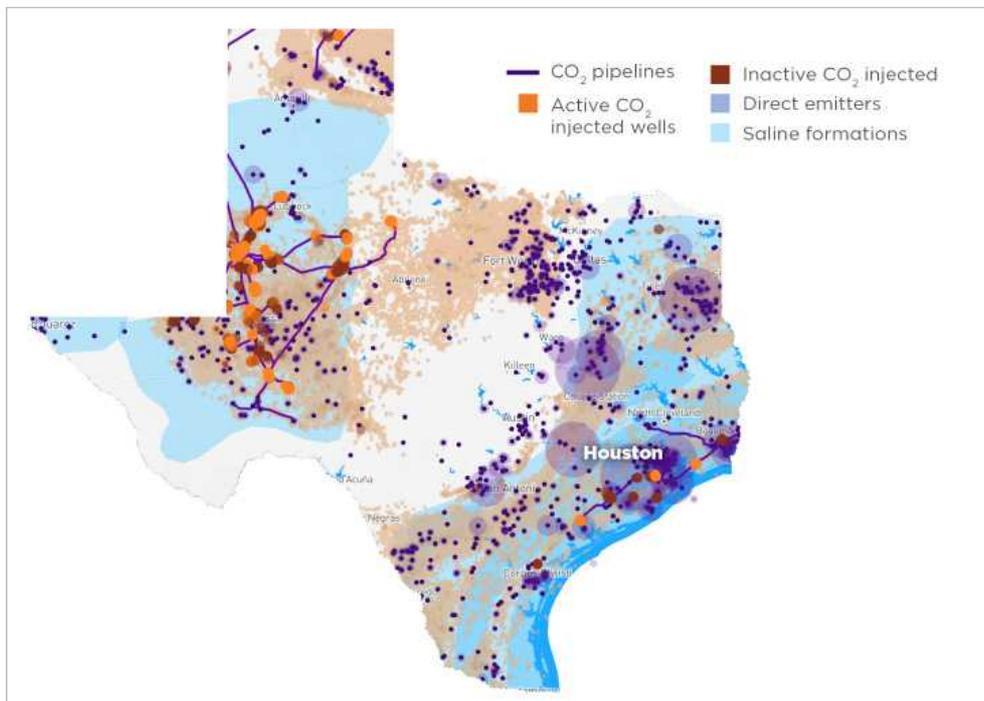
(3) 미국 내 잠재적 CCUS 허브 및 클러스터 개발

미국의 새로운 CCUS 시설에 대한 기회는 주로 배출원이 집중되고 이산화탄소 저장이 가능하며 EOR에 이산화탄소가 필요한 고도로 산업화된 지역인 걸프 연안과 텍사스에 있을 것으로 기대되고 있다. 일례로 Friedmann, Argawal and Bhardwaj(2021)는 미국의 주요 정유 및 석유 화학 중심지인 텍사스 주의 휴스턴을 잠재적인 탄소 중립의 허브 위치로 보고 있는데, 휴스턴은 산업과 화석 연료 발전소가 밀집되어 있다. 연구자들은 보고서를 통해 휴스턴이 영국의 티사이드(Teesside)와 유사한 환경임을 지적하며, [그림 3-24]에서와 같이 휴스턴이 가장 크고 많은 배출원을 보유하고 있으며 이산화탄소 저장을 위한 지하 공극이 충분함을 언급하고 있다(Friedmann, Argawal and Bhardwaj, 2021, p. 10).

158) S&T GPS(2021), 「미국, 탄소포집저장 기술 및 지원 정책 현황 발표」

다만 같은 보고서에서 이러한 특성은 텍사스에 해당하지만 루이지애나에도 해당할 수 있음을 지적하며, 국가 차원에서 멕시코만 지역은 탈탄소화를 가속화하고 국가 차원에서 경쟁력을 향상시키는 여러 허브를 유치할 수 있다는 점을 명시하고 있다(Friedmann, Argawal and Bhardwaj, 2021, p. 13). 지역적으로 루이지애나와 텍사스는 동일한 노동력 풀, 자본 및 무역 기회를 놓고 경쟁하고 있으며, 이러한 맥락에서 루이지애나가 주로서 저탄소 정제 및 탄소 저장 자원에 대한 접근에 있어 리더십을 보여 왔다는 점은 주목할 만하다.

[그림 3-24] 텍사스의 식염수 지층 및 활성 유전에서 CO₂ 저장용량의 합성 지도



자료: Friedmann, Argawal and Bhardwaj(2021), p. 12

(가) DOE 지역 직접공기포집(DAC) 허브 구축 지원

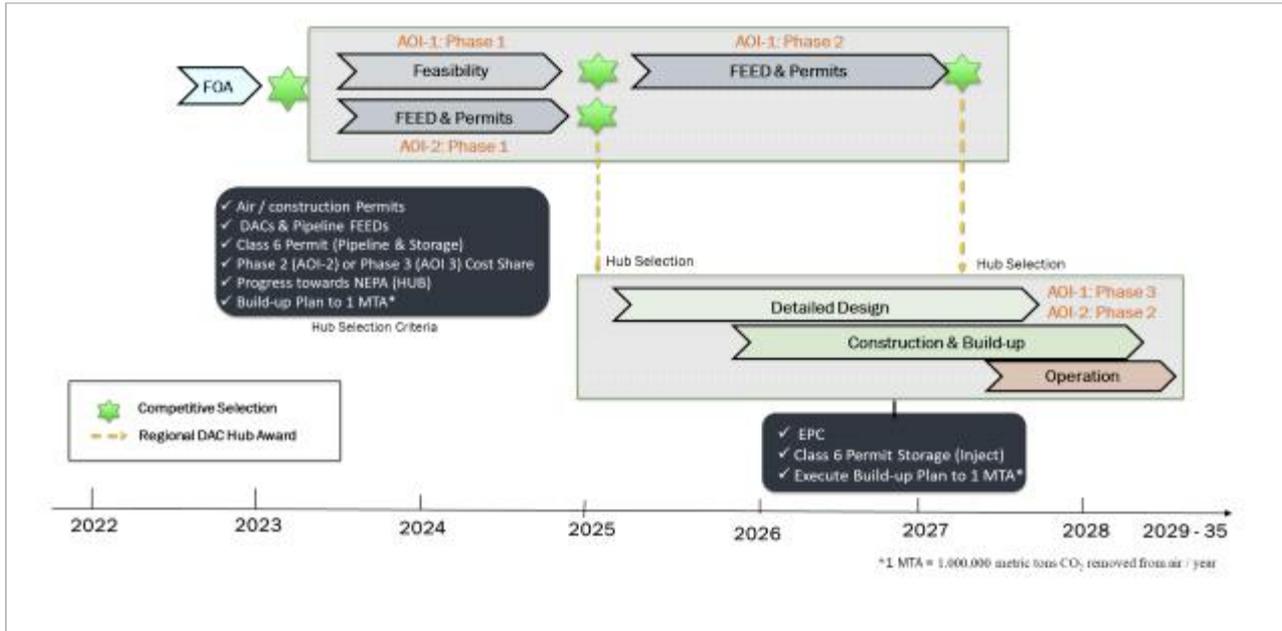
2022년 5월 DOE는 2021년에 통과된 초당적 인프라법(Bipartisan Infrastructure Law)을 통해 CCS 프로그램에 할당된 35억 달러의 자금을 집행하기 위한 의향서(Notice of Intent, NOI)를 공개하였다(DOE, 2022.05.19.)¹⁵⁹⁾. ‘지역 직접공기포집 허브(Regional Direct Air Capture Hubs)’로 명명된 동 프로그램은 4개의 대규모 지역 직접공기포집(Direct Air Capture, DAC)¹⁶⁰⁾ 허브 구축을 지원할 것이며, 각 허브는 이산화탄소 흡수(Carbon Dioxide Removal, CDR) 네트워크로 구성

159) DOE(2022), “Biden Administration Launches \$3.5 Billion Program To Capture Carbon Pollution From The Air”, *Renewable Carbon News*, 5.19, 2022.10.14. 접속, <https://www.energy.gov/articles/biden-administration-launches-35-billion-program-capture-carbon-pollution-air-0>

160) DAC는 대기 중에서 이산화탄소를 분리하는 과정으로, 분리된 탄소는 지하에 영구 저장되거나 대기 중으로 다시 배출되지 못하도록 콘크리트와 같이 수명이 긴 제품의 생산원료로 전환된다. 산업설비나 발전소에서 이용되는 탄소포집 시스템은 탄소의 대기 중 배출을 발생단계에서 포집한다는 점에서 DAC와 차이가 있다.

될 것이다. 지역 직접공기포집 허브로 선정되는 각 프로젝트는 대기 중에서 포집된 탄소의 수송이나 저장, 최종 활용(End Use)을 실증할 것이며, 최소 연간 100만 톤의 이산화탄소를 포집해 영구적으로 저장하게 될 예정이다.

[그림 3-25] 지역 직접공기포집 허브 구축 일정



자료: DOE(2022.05.19.)

DOE는 1단계에 대해 약 1억 6,000만 달러, 2~4단계에 대해 약 21억 달러의 자금을 제공할 계획으로, 1단계에서 약 12개의 프로젝트가 2~4단계에서 6개의 프로젝트가 선정될 예정이다. 각 프로젝트 당 1단계 400만~1,500만 달러, 2~4단계 1억 7,500만~5억 달러 범위일 것으로 예상되며, 탄소 포집 시범 프로젝트 프로그램의 모든 단계에는 최소 50%의 수혜자 비용 분담 요건이 있다.

(나) DOE CarbonSAFE 이니셔티브¹⁶¹⁾

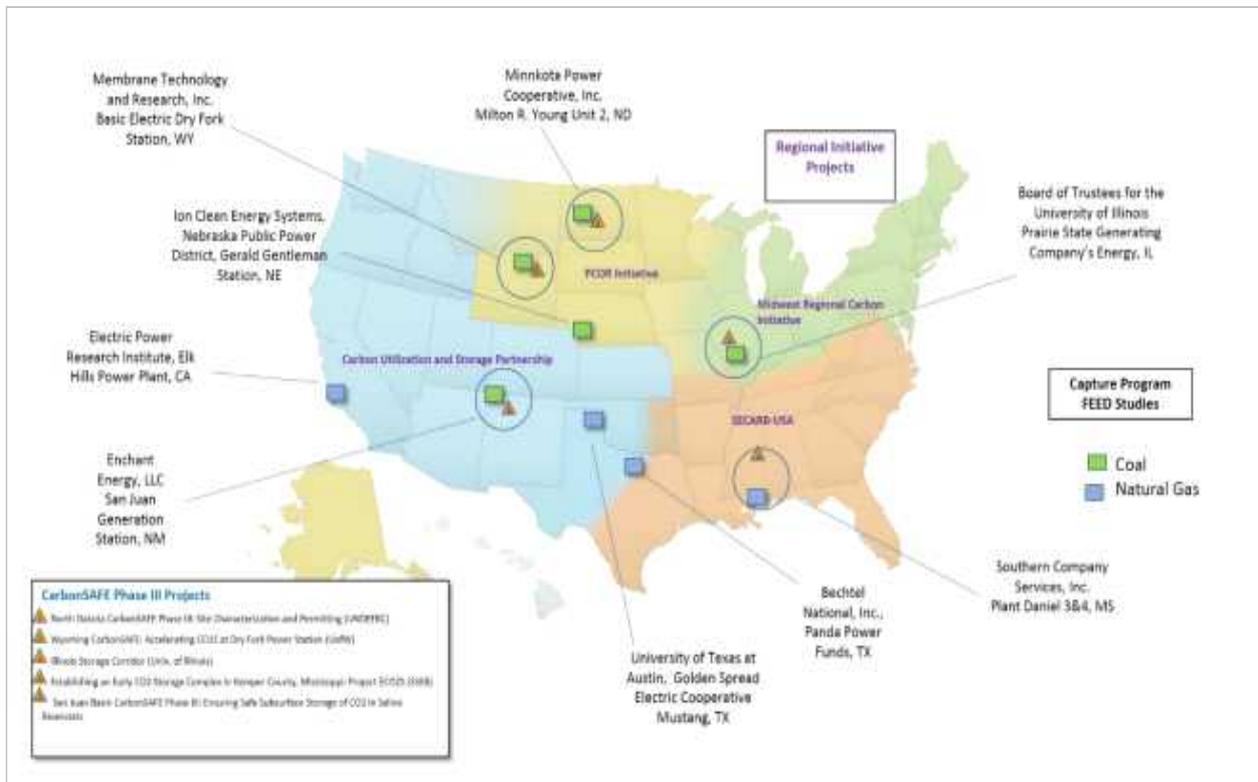
DOE는 탄소 저장 프로그램으로 RCSP(Regional Carbon Sequestration Partnership) 이니셔티브를 2003년부터 지원해 오며, 다양한 퇴적 환경에서 1,100만 미터 톤 이상의 포집된 CO₂를 누적 저장한 소규모 및 대규모 주입 테스트를 수행해 온 바 있다. RCSP 이니셔티브가 거의 완료됨에 따라 DOE는 2019년부터 7개 RCSP의 후속 과제를 지원하고 있다. 현재 알래스카를 포함한 미국 본토를 포괄하는 4개 지역으로 통합된 이 새로운 “지역 이니셔티브” 프로젝트는 CCUS 배포를 가속화하기 위해 기존 지역 이해 관계자 기반에 기술 지원을 제공하고 있다.

DOE는 RCSP 프로젝트에서 얻은 교훈을 활용하여 탄소 저장 보증 시설 기업(CarbonSAFE)

161) 해당 부분은 CEQ(2021)을 바탕으로 작성하였다.

이니셔티브를 통해 포집된 CO₂의 상업적 규모(연간 주입당 100만 미터 톤 이상) 저장을 해결 하고 있다. CarbonSAFE 이니셔티브는 5천만 미터 톤 이상의 CO₂를 안전하게 저장할 수 있는 용량을 갖춘 상업용 규모의 CO₂ 저장 단지를 특성화, 허가 및 건설하기 위한 다년간 이루어지는 여러 단계의 프로젝트이다. 현재 DOE는 특성화 및 EPA UIC 클래스 VI 허가 단계에 있는 5개의 CarbonSAFE 프로젝트를 지원하고 있다. [그림 3-26]에서 볼 수 있듯이 5개의 CarbonSAFE 프로젝트는 DOE의 탄소 포집 프로그램이 지원하는 상업용 규모의 고급 용매 및 멤브레인 포집 시스템에 대한 총 9개 중 5개의 FEED(Front End Engineering Design) 연구와 통합되었다. 이러한 포집 시스템은 현재 사용 가능한 기술과 비교하여 비용과 에너지 요구 사항 모두에서 단계적으로 감소할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

[그림 3-26] 미국의 DOE FEED 설계 연구, 지역 배포 프로젝트, CarbonSAFE 이니셔티브 사이트



자료: CEQ(2021), p. 45

제 3 절 국내 CCUS 산업 클러스터 여건 분석

1. 개요

CCUS는 이산화탄소의 배출부터 활용 및 저장까지 이산화탄소라는 재화의 흐름에 따라 가치사슬을 형성하고 있는바, CCUS의 상용화 및 산업 생태계의 활성화를 촉진하기 위하여 모든 부문이 유기적으로 연계된 집적체인 산업 클러스터를 형성할 필요가 있다. 특히 CCUS 가치사슬은 이산화탄소 파이프라인으로 대표되는 네트워크 산업 특성도 가지고 있으며 규모의 경제를 달성하기 위하여 이러한 클러스터의 필요성이 더 대두된다. 이에 따라 본 절에서는 국내 이산화탄소 유망 저장소 인근의 국가산업단지를 중심으로 이산화탄소 배출 업종과 활용 업종을 조사·분석하여, 국내에 CCUS 산업 클러스터를 조성할 수 있는 권역이 형성되어 있는지 검토하였다.

가. 여건 분석의 주요 쟁점

본격적인 여건 분석에 앞서, 여건 분석의 체계 정립을 위해 검토해야 하는 주요 쟁점을 살펴보고자 한다. 첫 번째 쟁점은 CCUS 산업 클러스터의 조성 방식이다. 본 연구의 제3장 제2절에서 논의한 바와 같이 CCUS 산업 클러스터의 개념을 국내에 물리적으로 구체화하기 위하여, ‘신규로 산업단지를 조성하는 방식’ 과 ‘기존의 산업단지를 특구로 지정하는 방식’ 의 두 가지 방식을 고려할 수 있다. 신규로 산업단지를 조성하는 방식은 CCUS 산업 클러스터를 조성하기 위하여 적정입지를 선정하는 단계부터 시작하여 CCUS 산업 클러스터를 구성하는 각 부문 및 업종의 기업체를 모집하는 방식이다. 신규로 산업단지를 조성하는 방식은 입주기업 모집을 통해 CCUS 산업 클러스터를 형성하므로, 현재 기업체의 사업장 위치 및 분포 등의 제약 조건에 크게 구속되지 않고 CCUS 산업 클러스터를 조성할 수 있다. 그러나 신규로 산업단지를 조성하는 방식은 적정입지를 선정하는 과정에서 국토교통부 「산업입지의 개발에 관한 통합지침」 제7조에 따라 입지수요 및 공급가격의 수준, 공업용수·도로·철도·항만·전력·통신·폐기물처리시설 및 하·폐수처리시설 등 기반시설 확보의 용이성 등 다양한 사항에 대하여 종합적인 검토가 요구된다.¹⁶²⁾

기존의 산업단지를 특구로 지정하는 방식은 인근에 유망 저장소가 존재하며 탄소 다배출 업종 및 활용 업종이 다수 분포하는 국가산업단지 및 일반산업단지 등의 단독 산업단지 또는 지리적으로 인접한 소수의 단지를 CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 특구로 지정하는 방식이다. 기존의 산업단지를 CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 특구로 지정할 경우, 해당 산업단지의 입지 선정과정에서 상기 국토교통부 지침 제7조에 따른 검토가 선행되었을 것으로 추정되므로 일반론적인 입지 검토에 대한 요구는 낮은 것으로 판단된다. 그러나 CCUS 산업 생태계

162) 「산업입지의 개발에 관한 통합지침」 제7조

관련 기업을 모집하는 것이 아니라 기존에 사업을 영위하고 있는 기업체가 존재하는 산업단지를 특구로 지정하기 때문에 유망 저장소와 근거리 내에 존재하여 저장소와 산업단지 간의 물리적 연계 용이성, 기존 산업단지 내에 탄소 다배출 업종 및 활용업종의 존재 여부 등에 대한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 첫 번째 쟁점에 대하여 연구의 범위를 고려하여 두 번째 방식인 기존의 산업단지를 CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 특구로 지정하는 방식을 선택하여 논의를 진행하였다. 즉, 기존의 단독 또는 소수의 산업단지에 대해서 CCUS 산업 클러스터로 지정·조성할 수 있을지 그 여건을 검토한다. 단, 국내에 CCUS 산업 클러스터를 조성할 때 실제 어떠한 방식으로 접근하여 조성할 것인지에 대해서 아직 구체적으로 밝혀진 바가 없다. 향후에 첫 번째 방식인 CCUS 산업 클러스터를 위한 신규 산업단지를 개발하는 방식으로 접근한다고 하더라도, 본 연구는 실제 개발 진행 시 수반되는 입지 검토 또는 실효성 분석에 대한 비교군으로 활용할 수 있다는 데에서 의의를 가진다.

단, 본 연구에서 선택한 ‘기존의 산업단지를 특구로 지정하는 방식’이 현행 규정에 근거하여 진행될 수 있는지 사전에 검토해볼 필요가 있다. 산업단지의 지원에 관한 규정으로 「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」에서 산업집적의 활성화를 위해 특정 지구의 지정에 관한 규정을 살펴볼 수 있으며, 제22조의6에 따른 CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 첨단투자지구로 지정할 수 있는 것으로 판단된다. ‘첨단투자’라 함은 동법 제2조8의2에 정의된 바와 같이 「산업발전법」 제5조제1항에 따라 고시된 첨단제품의 연구·생산을 목적으로 하거나 「조세특례제한법」 제121조의2제1항제1호에 따른 신성장동력산업기술을 수반하는 사업을 영위하기 위한 목적으로 하는 투자를 말한다. 즉, CCUS가 첨단투자의 기준에 부합하는 기술인 경우 동법 제22조의6제3항에 따른 첨단투자지구 지정요건을 검토하여 CCUS 산업 클러스터로의 적격성이 높은 산업단지를 첨단투자지구로 지정할 수 있을 것으로 보인다. 특히 CCUS는 「산업발전법」 제5조제1항에 따라 산업통상자원부장관이 고시한 「첨단기술 및 제품의 범위」에 명시되어 있는 기술¹⁶³⁾이며, 「조세특례제한법」 제121조의2제1항제1호에 따라 동법 시행령에서 명시하고 있는 신성장·원천기술¹⁶⁴⁾에 해당한다. 따라서 본 연구에서 선택한 기존의 산업단지를 특구로 지정하여 CCUS 산업 클러스터로 조성하는 방식은 CCUS 기술의 특성상 첨단투자지구 지정 방식으로 진행될 수 있는 가능성이 낮지 않은 것으로 판단된다¹⁶⁵⁾.

또한 기존의 산업단지를 CCUS 산업 클러스터 특구로 지정하는 방식으로 접근할 때, 분석과정에서 발전업 및 수소생산 업종이 배제될 가능성이 있다. 한국산업단지공단의 국가산업단지 통계에는 국가산업단지의 입주업체를 업종별로 구분하고 있으나 제조업 위주로 구분되어 있으며,

163) 「첨단기술 및 제품의 범위」 별표 1

164) 「조세특례제한법 시행령」 제116조의2제2항 및 별표 7

165) 본 문단에서 논의한 것은 기존 산업단지를 특구로 지정하는 방식이 가능한지 여부를 「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」의 첨단투자지구 지정에 근거하여 탐색적으로 검토한 것으로, 본 방식의 실현가능성은 실제 첨단투자지구 지정요건 등의 엄밀한 검토가 필요하다.

발전업 또는 전기업에 대한 분류 없이 기타, 비제조 업종에 대한 분류만 존재한다¹⁶⁶⁾. 또한 블루수소 등 수소생산은 아직 활성화되지 않은 업종으로 현황을 파악하기 어렵다. 화석연료를 활용한 발전과 블루수소 생산의 경우 대규모의 이산화탄소를 배출하고 CCUS에 대한 수요가 높으므로 CCUS 산업 클러스터에 포함될 필요성이 있다. 따라서 본 연구는 기존의 산업단지를 중심으로 그 여건을 분석하되, 인근의 화력발전소 및 수소 생산계획 지역과의 연계 가능성도 함께 고려한다.

두 번째 쟁점은 본 연구에서 고려할 산업단지의 범위이다. 이는 첫 번째 쟁점에서 본 연구가 선택한 기존의 산업단지를 특구로 지정하는 방식과 연결되는 쟁점으로, 연구를 수행함에 있어서 어느 유형의 산업단지까지 고려하여 여건을 분석할 것인가에 대한 쟁점이다. 「산업입지 및 개발에 관한 법률」 제2조제8호에 따르면 산업단지는 크게 국가산업단지, 일반산업단지, 도시첨단산업단지, 농공단지로 구분된다¹⁶⁷⁾. 본 연구에서는 탄소 다배출 업종 및 활용업종이 다수 분포되어 있는 산업단지를 특구로 지정하는 방식을 고려하므로, 산업단지의 정의상 국가산업단지와 일반산업단지가 관련성이 높을 것으로 판단된다¹⁶⁸⁾.

〈표 3-20〉 국내 유형별 산업단지 현황(2022년 2분기 기준)

단지유형	단지수(개)	지정면적(천㎡)	산업시설구역 분양률(%)
국 가	47	799,817	97.9
일 반	701	555,117	93.7
도시첨단	38	9,216	71.2
농 공	476	77,265	96.5
총 합	1,262	1,441,415	95.7

자료: 한국산업단지공단(2022a)를 바탕으로 저자 작성

한국산업단지공단(2022a)에 따르면 2022년 2분기 기준 산업단지는 총 1262개로, 일반산업단지가 701개로 가장 많으며 농공단지(476개), 국가산업단지(47개), 도시첨단산업단지(38개) 순서로 구성되어 있으며(〈표 3-20〉 참조)¹⁶⁹⁾, 국가산업단지와 일반산업단지는 총 748개가 존재한다. 본 연구에서는 분석의 복잡성과 산업단지별 자료취득 가능성을 고려하여 한국산업단지공단 관할의 국가산업단지 31개만 연구의 범위에 포함시켰다¹⁷⁰⁾171).

166) 「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제2조 제18호에 따르면 입주기업체는 산업단지에 입주하여 제조업, 지식산업, 정보통신산업, 자원비축시설, 그 밖에 대통령령으로 정하는 산업을 운영하려는 자이며, 동법 시행령 제6조제5항제8호에 따르면 대통령령으로 정하는 산업으로 전기업이 포함되어 있다.

167) 「산업입지 및 개발에 관한 법률」 제2조제8호 각 목

168) 도시첨단산업단지는 지식산업·문화산업·정보통신산업, 그 밖의 첨단산업의 육성과 개발 촉진을 위하여 지정되는 산업단지이며, 농공단지는 농어촌지역에 농어민의 소득 증대를 위한 산업을 유치·육성하기 위하여 지정된 산업단지이다(「산업입지 및 개발에 관한 법률」 제2조 제8호 다목 및 라목).

169) 한국산업단지공단(2022b), 전국산업단지현황통계 통계표(2022년 2분기 기준),

https://www.kicox.or.kr/user/bbs/BD_selectBbsList.do?q_bbsCode=1036&q_clCode=1 (2022.10.11. 접속)

170) 2021년 12월 기준, 대전 대덕연구개발특구(연구개발특구진흥재단), 충남 대죽자원비축(한국석유공사) 등 국가산업단지

세 번째 쟁점은 연구절차 상에서의 쟁점으로, 탄소저장소 제약 조건의 사전고려 여부이다. 즉, ① 먼저 탄소저장소의 제약 조건 없이 본 연구의 범위인 31개 국가산업단지를 검토 및 비교한 후, 탄소저장소의 제약 조건을 검토하는 방법과, ② 탄소저장소의 제약 조건을 고려하여 국가산업단지로 구성된 유망 권역을 도출하고 검토한 뒤, 유망 권역 간 비교를 수행하는 방법으로 다르게 접근할 수 있다. 본 연구에서는 두 번째 방법인 탄소저장소의 제약 조건을 첫 단계에서부터 고려하는 접근법을 선택하였다. 즉, 상기 두 번째 쟁점에서 언급한 본 연구의 범위인 31개 국가산업단지 중 유망 탄소저장소 인근의 유망 권역을 도출하고, 유망 권역 간 비교를 수행했다. 첫 번째 방법은 한국산업단지공단 관할의 국가산업단지 전체에 대해 여건을 검토할 수 있다는 데에서 그 의의를 찾을 수 있으나, 탄소저장이 포함되어 있는 CCUS 산업 클러스터 여건을 분석하고 유사한 결과를 도출하는 데에 다소 추가적인(Redundant) 연구인력 및 비용이 소요된다는 한계점이 있다. 단, CCUS 산업 클러스터가 아닌 저장소 연계를 제외한 CCUS 산업 클러스터의 특구 지정 등을 판단하기 위해서는 전체 산업단지에 대한 검토가 필요하며 첫 번째 접근 방법이 더 적합할 것으로 판단된다.

이상의 쟁점을 정리하여 CCUS 산업 클러스터 여건 분석의 체계를 정립하면 <표 3-21>과 같다. 본 연구는 CCUS 산업 클러스터의 조성을 위하여 기존의 단독 산업단지 또는 소수의 산업단지를 특구로 지정하는 방식으로 접근한다. 특구의 지정은 우선적으로 유망 탄소저장소와 인접한 산업단지로 구성된 유망 권역을 도출하고, 유망 권역들이 CCUS 산업 클러스터로 지정되기 위해 적합한지 그 여건을 검토한다. 이때 본 연구에서 고려하는 산업단지는 한국산업단지공단 관할 국가산업단지만 고려한다.

<표 3-21> CCUS 산업 클러스터 여건 분석의 주요 쟁점 및 본 연구의 접근법

연번	쟁점	본 연구의 접근법
1	CCUS 산업 클러스터의 조성 방식	기존 산업단지를 특구로 지정하는 방식 + 인근 화석연료 발전소 및 수소생산 계획 지역과의 연계
2	CCUS 산업 클러스터 지정에 고려할 산업단지의 범위	한국산업단지공단 관할 국가산업단지 31개소
3	탄소저장소 제약 사전고려 여부	국내 유망 탄소저장소 제약을 사전에 고려

자료: 저자 작성

분류되어 있으나 한국산업단지공단의 관할 단지가 아닌 단지가 16개 존재하며, 한국산업단지공단의 국가산업단지 산업동향 통계 조사대상이 아니다.

171) 동두천 국가산업단지의 경우 관할단지 변경에 따라 2022년 6월부터 국가산업단지 산업동향 통계에 포함되나, 본 연구는 2021년 12월을 기준으로 수행했으므로 제외하였다.

나. CCUS 산업 클러스터 여건 분석의 대상 지역

(1) 국내 유망 저장소와 CCUS 산업 클러스터 유망 권역(안)

산업통상자원부와 해양수산부의 국내 해양 이산화탄소 저장소 유망구조와 저장 가능 용량 평가 결과 발표¹⁷²⁾에 따르면, 기술적 평가기준과 사업추진 여건 평가 기준을 종합적으로 고려하여 평가하였을 때, 현재까지 국내 이산화탄소 저장 유망구조¹⁷³⁾는 서해의 군산분지와 동해의 울릉분지에서 확인되며 그 저장 가능 용량은 7.33억 톤(군산분지 5.4억 톤, 울릉분지 1.93억 톤)인 것으로 평가되었다. ([그림 3-27] 참고). 특히 울릉분지에는 동해 제1·2 가스전의 생산종료로 인한 사업부지 수준의 저장소도 존재하며, 해당 가스전을 활용하여 CCS 통합 실증사업을 추진할 계획인 것으로 알려져 있다. 따라서 현재의 평가 및 기술 수준에서 확인된 바로는 군산분지와 울릉분지가 이산화탄소 저장소로 활용하기에 상대적으로 적합한 것으로 판단되며, 군산분지와 울릉분지의 저장소를 활용할 수 있는 육지의 인접 국가산업단지를 CCUS 산업 클러스터 유망 권역(안)으로 설정하고자 한다.

산업통상자원부·해양수산부(2021)는 국내 저장 유망구조의 저장 가능 용량뿐만 아니라 2단계 잠재지층에서 유망구조 수준(울릉분지 사면저장소 및 현무암대지 제주동편저장소)의 저장소를 2억 톤 추가하는 경우와 기술개발을 통한 저장 효율 향상을 상정하여 최대 이산화탄소 저장 규모를 추정하였다. 특히 현무암대지 제주동편저장소는 저장 유망구조로 밝혀진 군산분지 및 울릉분지와 다른 분지에 위치한 저장소로, 인접한 여수·광양 등 석유화학과 철강 업종에서 활용가능성이 높을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구에서는 보수적으로 접근하여 현재 평가결과 유망구조로 드러난 군산분지와 울릉분지의 저장소만 고려하였다.

군산분지와 울릉분지 인근의 국가산업단지는 한국산업단지공단의 전국 산업단지 현황지도¹⁷⁴⁾를 통해 파악할 수 있다¹⁷⁵⁾. 군산분지의 저장소와 인접한 국가산업단지로는 전북의 군산국가산업단지를 중심으로, 군산2국가산업단지, 익산국가산업단지와 충남의 장항국가생태산업단지가 존재한다¹⁷⁶⁾. 본 연구에서는 이상의 네 개의 국가산업단지를 군산분지 CCUS 산업 클러스터 유망 권역(이하 군산권역)으로 구분하였다. 울릉분지의 저장소와 인접한 국가산업단지로는 울산의 온산국가산업단지 및 울산·미포국가산업단지를 중심으로, 경북 포항의 포항국가산업단

172) 산업통상자원부·해양수산부 보도자료(2021), 「합동 연구단, 국내 이산화탄소 포집 및 저장(CCS) 유망 저장소 7.3억 톤으로 평가」

173) 유망구조는 총 4단계로 구성되어 있는 이산화탄소 저장소 평가 단계의 세 번째 단계에 해당하는 평가 대상으로, 마지막 평가 단계인 4단계의 사업부지 직전의 평가 대상에 해당함(산업통상자원부·해양수산부, 2021)

174) 한국산업단지공단(2021), 산업단지현황지도(2021년 12월 말 기준),

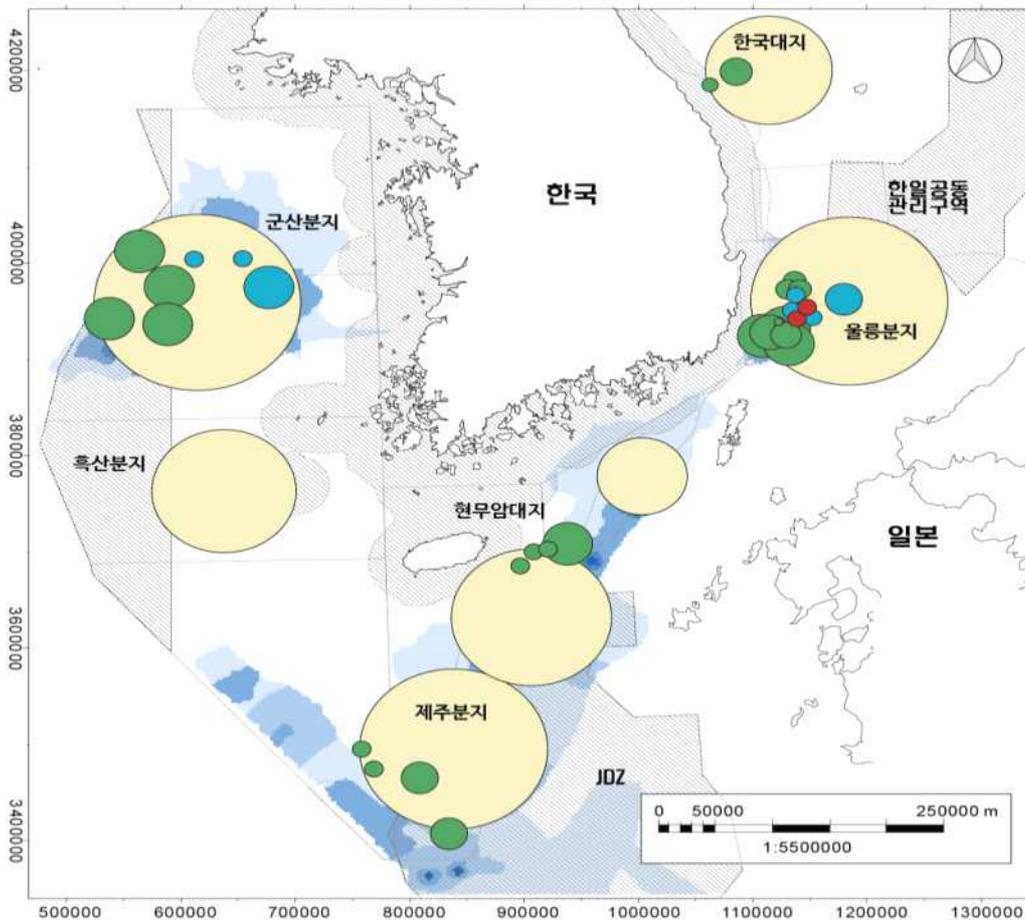
<https://www.kicox.or.kr/home/mwrc/policyRsrch/fdrmpblicitn/fdrmpblicitn04.jsp> (2022.10.11. 접속)

175) 유망 저장소 인근의 국가산단을 엄격히 도출하기 위해서는 지리정보시스템 등을 활용하여 저장소와 산단 간의 직선거리 및 네트워크 상의 거리 등을 측정할 필요가 있으나 본 연구는 탐색적 연구라는 점에서 해당 방법론은 연구의 범위를 벗어 나며, 본 연구에서는 군산 및 충남·전북 경계 인근의 국가산업단지와 포항 및 울산의 국가산업단지를 선정하였다.

176) 한국산업단지공단 비관할 국가산업단지로는 새만금지구국가산업단지, 고정국가산업단지, 전주탄소소재국가산업단지가 있으며 익산시의 국가식품클러스터는 한국산업단지공단의 관할이나 절대다수가 음식료품 제조 사업체로 구성되어 있어서 제외하였다.

지와 포항블루밸리국가산업단지가 존재한다. 군산권역과 마찬가지로, 본 연구는 이상 네 개의 울릉분지 인접 국가산업단지를 울릉분지 CCUS 산업 클러스터 유망 권역(이하 울릉권역)으로 구분하였다([그림 3-27] 및 <표 3-22> 참고).

[그림 3-27] 국내 CO₂ 저장소 유망구조 분포도



< 단계별 국내 CO₂ 저장 유망구조 규모 >

해역	1단계 (퇴적분지)	2단계** (잠재지층)	3단계 (유망구조)	4단계 (사업부지)
범례				
서해	94.0	15.4	5.4	-
남해	196	13.6	-	-
동해	314.6	56.8	1.93	0.14
총 계	604.6	85.8	7.33	0.14

* 원의 크기는 저장용량 규모 (중간값)

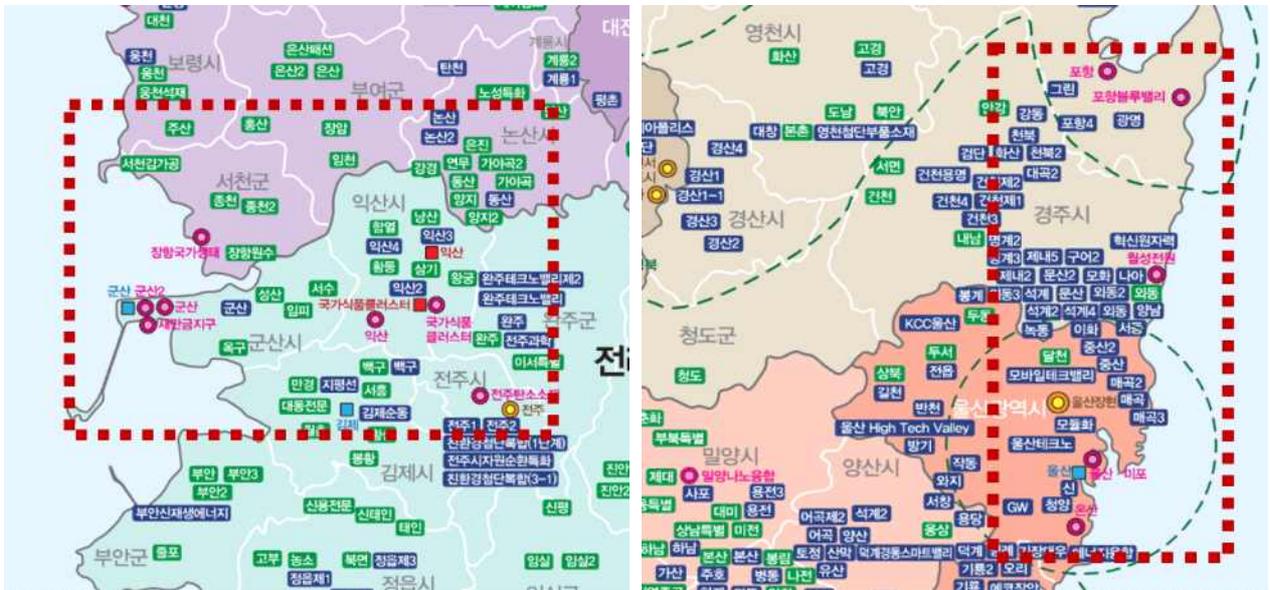
** 2단계 잠재지층 저장소 추가개발을 통해 2억톤 규모 유망구조 저장소 추가 확보
자료: 산업통상자원부·해양수산부(2021)

<표 3-22> 유망 저장소 인근 CCUS 산업 클러스터 유망 권역 도출 결과

CCUS 산업 클러스터 유망 권역	유망 저장소	저장소 규모 (억 톤)	인근 국가산업단지
군산권역	군산분지	5.4	군산, 군산2, 익산, 장항국가생태
울릉권역	울릉분지	1.93	온산, 울산·미포, 포항, 포항블루밸리

자료: 저자 작성

[그림 3-28] 유망 저장소 인근 CCUS 산업 클러스터 유망 권역 위치



자료: 한국산업단지공단 전국 산업단지 현황지도를 활용하여 저자 수정·작성

(2) 군산권역 및 울릉권역의 광역지방자치단체 기초 경제 현황

군산권역이 포함된 전라북도 및 충청남도과 울산권역이 포함된 울산광역시 및 경상북도의 기초경제 현황은 <표 3-23>과 같다. 군산권역 광역지방자치단체(전북 및 충남)의 지역내총생산은 2020년 기준 약 168조 원이며, 산업별로 보았을 때 서비스업과 제조업의 부가가치가 각각 66조 원(42.82%) 및 64조 원(41.85%)으로 비슷한 규모로 구성되어 있다. 군산권역 광역지방자치단체(전북 및 충남)의 경제활동인구는 약 220만 명 수준이다. 울릉권역 광역지방자치단체(울산 및 경북)의 경우 지역내총생산이 약 175조 원으로 전북 및 충남보다 큰 규모이다. 또한 울산 및 경북은 부가가치를 기준으로 산업 중 제조업(75조 원, 48.14%)이 서비스업(62조 원, 39.57%)보다 큰 산업구조를 가지고 있다. 울릉권역 광역지방자치단체(울산 및 경북)의 경제활동인구는 약 210만 명 수준이다.

〈표 3-23〉 군산권역 및 울릉권역 광역지방자치단체 기초 경제 현황

구 분	군산권역 (전북, 충남)	울릉권역 (울산, 경북)
1. 지역내총생산(백만 원) ¹⁾	168,351,541	175,134,903
2. 총부가가치(백만 원) ²⁾	152,978,525	155,969,385
농업, 임업 및 어업	7,834,538 (5.12)	5,916,214 (3.79)
광업	233,076 (0.15)	203,235 (0.13)
제조업	64,019,213 (41.85)	75,088,538 (48.14)
전기·가스·증기 및 공기 조절 공급업	5,178,981 (3.39)	4,941,011 (3.17)
건설업	10,203,305 (6.67)	8,100,260 (5.19)
서비스업	65,509,412 (42.82)	61,720,127 (39.57)
3. 경제활동인구(천 명) ³⁾	2,245	2,055

주 1) 지역내총생산은 2020년 명목기준 자료임

2) 총부가가치는 2020년 명목기준 자료이며, 괄호 안은 각 산업부문이 총부가가치 중 차지하는 비중(%)을 나타냄

3) 경제활동인구는 2021년도 하반기 기준임

자료: 국가통계포털, 시도별 경제활동별 국내총생산(지역내총생산, 총부가가치) 및 행정구역(시도)/성별 경제활동인구(경제활동인구)를 바탕으로 저자 작성

(3) 군산권역 및 울릉권역의 국가산업단지 기초 현황

상기에서 논의한 바와 같이 본 연구에서 군산분지 CCUS 산업 클러스터 유망 권역(군산권역)은 군산국가산업단지, 군산2국가산업단지, 익산국가산업단지, 장항국가생태산업단지로 구성되어 있으며, 해당 국가산업단지의 기초 현황은 〈표 3-24〉와 같다. 군산권역 중 군산, 군산2, 익산국가산업단지는 조성이 완료된 상태이며, 장항국가생태산업단지는 조성이 진행 중인 국가산업단지이다. 군산권역 중 군산2국가산업단지가 면적, 입주업체수, 고용규모, 생산액 측면에서 가장 큰 국가산업단지이며, 생산액은 3조 7백억 원 규모(2021년도 4분기 누계 기준)이다. 군산2 국가산업단지 다음으로 군산국가산업단지가 생산액 기준 두 번째 규모의 국가산업단지이며, 2021년도 말 3조 1백억 원 규모를 생산했다.

이어서 울릉분지 CCUS 산업 클러스터 유망 권역(울릉권역)은 울산·미포국가산업단지, 온산국가산업단지, 포항국가산업단지, 포항블루벨리국가산업단지로 구성되어 있으며, 해당 국가산업단지의 기초 현황은 〈표 3-25〉와 같다. 울릉권역의 국가산업단지는 모두 조성 중에 있으나, 울산·미포, 온산국가산업단지는 100% 분양된 상태이며, 포항국가산업단지는 86%의 분양률을 보이고 있다. 울릉권역의 경우 군산권역에 비해 상대적으로 대규모의 국가산업단지로 구성되어

있다. 울산·미포 국가산업단지의 2021년 4분기 기준 누계 생산액은 약 116조 2백억 원 규모로, 온산 및 포항국가산업단지의 생산액을 합한 것보다 큰 규모이며, 군산권역의 생산액 합(8조 4천억 원 규모)보다 10배를 초과하는 생산 규모이다. 울산·미포국가산업단지에 이어서 온산국가산업단지와 포항국가산업단지는 동기에 각각 50조 5천억 원, 19조 6천억 원을 생산하여 큰 생산액 규모를 가지는 국가산업단지이다.

〈표 3-24〉 군산권역 국가산업단지 기초 현황(2021년도 4분기 기준)

구 분	군산	군산2	익산	장항국가생태
위치	전북 군산시	전북 군산시	전북 익산시	충남 서천군
조성상태	완료	완료	완료	조성 중
지정면적(천 m ²)	13,702	50,459	1,336	2,751
분양률 (%)	100	100	100	67
입주업체(개사)	207	565	294	20
가동업체(개사)	173	466	266	8
고용현황(명)	4,424	5,002	3,120	368
누계생산(백만 원)	3,103,425	3,706,164	1,464,776	76,883

자료: 한국산업단지공단(2022b)¹⁷⁷⁾를 바탕으로 저자 작성

〈표 3-25〉 울릉권역 국가산업단지 기초 현황(2021년도 4분기 기준)

구 분	울산·미포	온산	포항	포항블루밸리
위치	울산 남구	울산 울주군	경북 포항시	경북 포항시
조성상태	조성 중	조성 중	조성 중	조성 중
지정면적(천 m ²)	48,444	25,939	37,868	6,080
분양률 (%)	100	100	86	20
입주업체(개사)	812	329	107	16
가동업체(개사)	667	267	93	2
고용현황(명)	89,475	14,669	11,924	X ¹⁾
누계생산(백만 원)	116,234,469	50,500,116	19,567,030	X

주 1) 가동업체 개수가 2개 이하인 경우 업체정보보호를 위하여 X로 표기함

자료: 한국산업단지공단(2022b)를 바탕으로 저자 작성

177) 한국산업단지공단(2022a), 전국산업단지현황통계 통계표(2021년 4분기 기준).

다. CCUS 산업 클러스터 여건 분석 기준

상기 유망 권역에 대해서 CCUS 산업 클러스터를 조성(지정)할 수 있는 여건을 분석하기 위하여 적격성 여부를 판단할 수 있는 기준이 필요하다. 여건 분석의 주요 쟁점 중 첫 번째 쟁점에서 유망 저장소와의 접근성, 산업단지 내의 탄소 다배출 업종 및 활용업종의 존재 여부 등을 간략히 언급하였으나, 적격성을 판단하기 위해 그보다 체계적인 기준의 마련이 요구된다. 그러나 현재까지 공개된 국내 보고서 또는 정부문건 등에서 CCUS 산업 클러스터의 조성에 관한 기준이나 고려요소 등에 관한 내용은 찾아보기 어렵다. 이에 따라 본 연구는 해외의 사례이나 그 적격성(Eligibility) 심사 기준이 명확한 영국의 Track-1 CCUS 클러스터 개발 시 활용된 기준을 일부 차용 및 변경하여 활용하였다(〈표 3-26〉 참고).

〈표 3-26〉 영국의 CCUS 클러스터 적격성 심사 기준과 본 연구로의 활용

연번	영국	본 연구(한국)	활용 여부
1	2030년 이내 상업 운영 가능여부	2040년(또는 특정 연도) 이내 상업 운영 가능여부	X (현재 상태에서 검토하기 어려움)
2	영국 내 위치 여부	한국 내 위치여부	X (연구의 범위상 모두 부합하여 활용하지 않음)
3	CCUS 클러스터 정의와의 부합성	CCUS 산업 클러스터 정의와의 부합성	O
3-1	CO ₂ 수송 및 저장 설비	CO ₂ 수송 및 저장 설비	O
3-2	탄소포집 프로젝트 (발전 · 산업 · 수소)	탄소 다배출 업종 (제조업 · 발전업 · 수소생산)	O
3-3	-	탄소활용 업종	추가

자료: BEIS(2021a) 및 저자 작성

영국 기업 · 에너지 · 산업전략부(Department for Business, Energy and Industrial Strategy, BEIS)(2021a)에 따르면, 본격적인 정량 평가에 앞서 적격성 심사를 위해 ① 2030년 이내 상업 운영 가능성, ② 영국 내 위치 여부, ③ CCUS 클러스터 정의와의 부합성의 세 가지 기준에 따라 제출된 클러스터 신청서를 평가한다¹⁷⁸⁾. BEIS(2021a)의 적격성 심사 기준을 차용하여 국내에 적용할 경우, ① 2040년¹⁷⁹⁾(또는 특정 연도) 이내 상업 운영 가능성, ② 한국 내 위치 여부, ③

178) BEIS(2021c), *Cluster Sequencing for Carbon Capture Usage and Storage Deployment: Phase-1*, BEIS 참조.

179) 2050탄소중립위원회(2021)의 2050 탄소중립 시나리오 세부 산출근거(2021.10)에 따르면 2040년~2060년을 저장소 집중 활용 기간으로 상정했다.

CCUS 산업 클러스터 정의와의 부합성으로 변경하여 적격성 심사를 수행할 수 있다.

다만 본 연구에서 적격성 여부를 판단할 때 각 CCUS 산업 클러스터 유망 권역별로 ① 2040년(또는 특정 연도) 이내 상업 운영 가능성 여부는 판단하기 어렵다. 본 연구는 국가산업단지를 중심으로 여건을 검토하는 데 그 목적이 있으며, 실제로 유망 권역 또는 특정 국가산업단지에 대한 CCUS 산업 클러스터 조성 계획이 존재하지 않아 해당 계획이 2040년 또는 특정 연도 이내에 실현될 수 있을지 판단하기 어렵다. 또한 본 연구의 분석 대상은 국내에 존재하는 국가산업단지이므로, ① 적격성 심사 기준 ② 한국 내 위치 여부는 모든 유망 권역에 부합하는 기준이다. 따라서 본 연구에서는 CCUS 산업 클러스터의 여건을 분석함에 있어서 ③ CCUS 산업 클러스터 정의와의 부합성을 중심으로 검토했다.

CCUS 산업 클러스터 정의와의 부합성을 중심으로 여건을 분석하기 위해서는 CCUS 산업 클러스터의 정의를 다시금 살펴볼 필요가 있다. BEIS(2021a)는 CCUS 클러스터를 육·해상 네트워크와 해상 저장설비 등 이산화탄소 수송 및 저장 네트워크와, 발전·산업·수소 부문의 탄소포집 프로젝트를 포괄하는 개념으로 정의하고 있다. 즉, 영국은 CCUS 클러스터의 적격성 심사 시 크게 기반 시설(수송 및 저장 설비)과 탄소배출원(발전·산업·수소 부문)으로 나누어 정의하고 있으며, 무형의 개념적 정의가 아닌 유형의 물리적 설비를 기준으로 정의하고 있다고 볼 수 있다.

단, 영국은 CCUS 클러스터의 정의에 탄소활용 부문은 포함되어 있지 않으며, 실제로 Track-1 CCUS 클러스터 개발 시 탄소활용 단독 프로젝트는 제외되었다. 이에 대해 BEIS(2021b)은 당초 탄소활용 부문은 영구적인 감축을 가져오는 활용부문에 한해서 CCUS 클러스터 상업 운영을 위한 비즈니스 모델을 적용하도록 합의가 되었으나 복잡성의 증대로 제외되었다고 밝히고 있다¹⁸⁰⁾. 한국도 영국의 CCUS 클러스터 정의와 마찬가지로 탄소활용 부문을 제외하기에는 현실적인 여건상 어려움이 있다. 석유·가스 매장량이 풍부하고 유전 개발을 진행해 온 영국과 달리, 국내는 탄소를 지중에 저장할 여건이 상대적으로 열악하여 탄소 제거를 위해 단순히 저장만 고려하는 것은 어려운 상황이라고 할 수 있다. 이에 따라 본 연구는 국내 탄소저장 여건의 상대적 열악함과 탐색적 차원에서 CCUS 산업 클러스터 여건을 검토하는 데 목표가 있다는 것을 감안하여, 영구적 감축 가능 여부와 비즈니스 모델 개발 가능 여부를 고려하지 않고 “CCUS 산업 클러스터”의 정의에 일반적인 탄소활용도 포함시켰다. 물론 탄소활용은 탄소활용을 통해 생산되는 재화의 내구재적 특성에 따라 영구에 가까운 탄소 감축이 가능하거나 소비함과 동시에 다시금 탄소가 배출되기도 하므로, 궁극적인 탄소 감축을 위하여 엄격하게 기술의 범위를 선정해야 할 필요가 있다. 또한 CCUS 산업 클러스터가 실제 상업적으로 운영되기 위해서는 해당 클러스터 내에서 탄소활용 부문에 적용시킬 수 있음과 동시에 탄소저장 부문의 비즈니스 모델과 상충되거나 클러스터의 경제적 잉여를 감소시키지 않는 적절한 비즈니스 모델을 개발할 필요가 있다.

180) BEIS(2021a), *Carbon Capture, Usage and Storage: An Update on the Business Model for Industrial Carbon Capture*, BEIS 참조.

따라서 최종적으로 본 연구에서 적용한 CCUS 산업 클러스터 여건 분석 기준은 다음과 같다. 여건 분석의 기준은 BEIS(2021a)의 적격성 심사 기준을 따르되, CCUS 산업 클러스터 정의와의 부합성을 중심으로 유망 권역에 대해서 CCUS 산업 클러스터를 조성(지정)할 수 있는 여건을 분석한다. CCUS 산업 클러스터는 유형의 물리적 설비를 기준으로, ① 이산화탄소 수송 및 저장 설비와 ② 탄소포집 프로젝트를 수행할 수 있는 충분한 탄소 다배출 업종(제조업·발전업·수소생산), ③ 탄소활용 프로젝트를 수행할 수 있는 업종이 포괄되어 있는 개념으로 정의한다. 이에 따라 본 연구는 CCUS 산업 클러스터 유망 권역에 대하여 CCUS 산업 클러스터의 상기 정의와의 부합한 여건을 가지고 있는지 검토한다.

2. CCUS 산업 클러스터 유망 권역(안)의 업종 여건

본 연구에서는 산업단지의 국가승인통계(승인번호: 제399004호)인 ‘주요 국가산업단지 산업동향’ 통계¹⁸¹⁾의 산업분류에 따라 군산권역과 울릉권역의 탄소 다배출 업종 중 제조업과 탄소활용업종의 여건을 분석하였다. 탄소 다배출 제조업으로는 해당 통계의 산업분류 중 석유화학, 비금속, 철강업종을 고려하였으며, 탄소활용업종으로는 석유화학, 음식료, 비금속업종을 고려하였다. 탄소활용업종은 2021년에 발표된 「이산화탄소 포집·활용(CCU) 기술혁신 로드맵(안)」¹⁸²⁾의 분야별 기술혁신 전략을 바탕으로, CO₂ 화학전환, 생물전환, 광물탄산화를 통해 생산되는 최종재화를 기준으로 선정하였다.

탄소 다배출 업종 중 발전업의 경우, 상기 여건 분석의 쟁점에서 언급하였듯이, CCUS 산업 클러스터 유망 권역의 인근에 화석연료 기반 화력발전소가 존재하는지 검토하였다. 발전업에 대한 검토는 전력거래소 전력통계정보시스템이 제공하고 있는 발전설비 자료 중, ‘LNG 복합화력’의 발전기 세부내역(소재지)¹⁸³⁾을 활용하였다. 화석연료 기반 발전소는 일부 비상용 전원으로 활용하는 중유발전을 제외하고 크게 석탄 화력발전과 LNG 복합화력발전으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 「2050 탄소중립 시나리오」와 「이산화탄소 포집·활용(CCU) 기술혁신 로드맵(안)」에 반영되어 있는 LNG 복합화력발전만 고려하였다.

탄소 다배출 업종 중 수소생산의 경우, 발전업과 마찬가지로 CCUS 산업 클러스터 유망 권역의 인근에 블루수소 생산 가능성이 있는지 검토하였다. 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제5조에 의한 법정계획인 「제1차 수소경제 이행 기본계획」¹⁸⁴⁾에 따르면 블루수소의 생산거점을 구축하기 위하여 현재 5개의 수소 클러스터에 추가로 ‘블루수소 클러스터’를 신규로 조성하는 계획을 검토한다고 명시되어 있다. 그러나 동 계획에서 밝히고 있는 LNG 인수기지 인근이라는 입지 조건 이외에, 동 계획 및 기타 정부문건에서 블루수소 클러스터의 구체적인 입지 등에 대한 정보를 찾기가 어

181) 한국산업단지공단(2021), 2021년 주요 국가산업단지 산업동향 각 월 통계표, https://www.kicox.or.kr/user/bbs/BD_selectBbsList.do?q_bbsCode=1036&q_clCode=1 (2022.10.11. 접속)

182) 관계부처 합동(2021), 「이산화탄소 포집·활용(CCU) 기술혁신 로드맵(안)」

183) 전력거래소 전력통계정보시스템(2020), 발전기 세부내역(2020년 기준), <https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkfaFcIIdtlChart.do?menuId=020600> (2022.10.11. 접속)

184) 관계부처 합동(2021), 「제1차 수소경제 이행 기본계획」

럽다. 따라서 본 연구에서는 「제1차 수소경제 이행 기본계획」에 따라 LNG 인수기지 인근에 블루수소 생산거점이 조성될 가능성이 높다고 판단하여, 국내 LNG 인수기지의 위치를 기반으로 CCUS 산업 클러스터 유망 권역과의 연계 가능성을 검토했다.

가. 군산권역

(1) 제조업

군산분지의 탄소저장소와 군산국가산업단지, 군산2국가산업단지, 익산국가산업단지, 장항국가생태산업단지로 구성된 군산권역에는 2021년 12월 기준 총 1,086개사의 업체가 입주해 있으며, 이 중 제조업 업체는 총 966개사가 입주해 있다. 입주업체 중 가장 많은 업종은 기계로 총 293개사가 입주해 있으며, 이어서 석유화학(137개사) 및 운송장비(137개사), 기타제조업(134개사) 업체가 다수 입주해 있다(〈표 3-27〉 참고). 군산권역에 입주해 있는 제조업 중, 탄소 다배출 업종에 해당하는 석유화학, 비금속, 철강업종에는 각각 137, 26, 51개의 업체가 입주해 있으며, 전체 제조업 업체 중 약 22%가 탄소 다배출 업종에 해당한다(〈표 3-28〉 참고).

군산권역의 생산액을 기준으로 검토했을 때, 2021년 12월 말 기준 누계 생산액(비제조업 제외)은 약 8조 4천억 원 규모이며, 이 중 석유화학이 약 1조 7천억 원 규모로 제조업 생산액 중 약 20%를 차지하고 있고 이어서 철강과 기계(각 약 1조 6천억 원, 19%) 업종이 많은 생산액을 기록했다(〈표 3-27〉 참고). 군산권역의 입주 제조업 중 탄소 다배출 업종인 석유화학, 비금속, 철강업종의 2021년 생산액은 3조 3천억 원 규모로 군산권역 생산액의 40%를 차지한다¹⁸⁵⁾ (〈표 3-28〉 참고).

185) 2021년 1월 장항국가생태산업단지의 업종별 생산실적 통계가 공개되지 않았으므로 각 업종의 생산액은 1월 장항국가생태산업단지의 생산액을 제외한 생산액이며, 각 업종의 비중은 2021년 1월 장항국가생태산업단지의 총 생산실적이 반영된 군산권역의 2021년 총 생산액을 바탕으로 계산하였다.

<표 3-27> 군산권역의 업종별 입주업체 및 생산액 분포

구 분	입주업체 ¹⁾ (개 사)	생산액 ²⁾ (억 원)
음 식 료	28	14,466.9
섬유의복	57	299.6
목재종이	39	837.1
석유화학	137	16,846.7
비 금 속	26	400.1
철 강	51	16,060.4
기 계	293	16,012.2
전기전자	64	2,711.0
운송장비	137	15,054.8
기 타	134	765.7
비 제 조	120	N/A
총 계	1,086	83,512.5

주 1) 입주업체는 2021년 12월 기준임

2) 생산액은 2021년 누계 생산액이며, 각 업종별 생산액에는 장항국가생태산업단지의 2021년 1월 업종별 생산액이 제외되어 있어 업종별 생산액의 합과 총계가 일치하지 않음

자료: 한국산업단지공단 2021년 주요 국가산업단지 산업동향 각 월 통계표를 바탕으로 저자 작성

<표 3-28> 군산권역의 탄소 다배출 제조업 입주업체 및 생산액 분포

구 분	입주업체 ¹⁾ (개 사)	전체 제조업 입주업체 중 비중 (%)	생산액 ²⁾ (억 원)	전체 제조업 생산액 중 비중 ³⁾ (%)
석유화학	137	14.2	16,846.7	20.2
비 금 속	26	2.7	400.1	0.5
철 강	51	5.3	16,060.4	19.2
총 계	214	22.2	33,307.2	39.9

주 1) 입주업체는 2021년 12월 기준임

2) 생산액은 2021년 누계 생산액이며, 각 업종별 생산액에는 장항국가생태산업단지의 2021년 1월 업종별 생산액이 제외되어 있음

3) 전체 제조업 생산액은 장항국가생태산업단지의 2021년 1월 총 생산액이 반영된 군산권역 총생산액 대비 비중임

자료: 한국산업단지공단 2021년 주요 국가산업단지 산업동향 각 월 통계표를 바탕으로 저자 작성

(2) 발전업

군산권역 인근의 LNG 복합화력발전소로는 서부발전 군산발전본부의 LNG 복합화력발전소(전북 군산시)와 중부발전 보령발전본부의 LNG 복합화력발전소(충남 보령시)가 있다¹⁸⁶⁾. 군산발전본부의 LNG 복합화력발전의 총 용량은 718.4MW이며, 보령발전본부의 LNG 복합화력발전 용량은 총 1,350MW이다. 또한 「제9차 전력수급기본계획」¹⁸⁷⁾에 LNG 연료전환 계획이 반영된 보령 석탄화력발전 5호기 500MW까지 고려할 경우¹⁸⁸⁾, 군산권역 인근의 LNG 복합화력발전의 총 용량은 2,568.4MW로 평가된다(〈표 3-29〉 참고). 군산권역 인근의 두 LNG 복합화력발전소 중, 군산발전본부의 발전소는 군산시내에 위치하기 때문에 군산권역의 국가산업단지와 연계하기가 용이할 것으로 판단된다. 그러나 보령발전본부의 발전소는 군산권역으로부터 약 50km 거리에 소재하고 있으므로, 군산발전본부에 비해 군산권역과 연계하는 데 있어서 다수의 비용이 소요될 것으로 예상된다.

〈표 3-29〉 군산권역 인근 LNG 복합화력발전소

발전본부	발전사	소재지	발전용량
군산발전본부	서부발전	전북 군산시	718.4MW
보령발전본부	중부발전	충남 보령시	1,350MW + 500MW ¹⁾
합 계	-	-	2,568.4MW

주 1) LNG 연료전환이 계획되어 있는 보령 석탄 화력발전 5호기 용량임

자료: 전력거래소 전력통계정보시스템 발전기 세부내역(2020년 기준)을 바탕으로 저자 작성

(3) 수소생산

상기 밝힌 바와 같이 「제1차 수소경제 이행 기본계획」에 따라 블루수소 생산거점의 조성 가능성이 높은 국내 LNG 인수기지 위치를 중심으로 수소생산과의 연계 가능성을 검토했다. 국내 LNG 인수기지(천연가스 생산기지¹⁸⁹⁾)는 공기업인 한국가스공사가 운영하는 기지와 민간사업자가 운영하는 기지로 구분할 수 있다. 「제14차 장기 천연가스 수급계획 (2021~2034)」¹⁹⁰⁾에 따르면 2021년 1월 기준, 운영 중인 LNG 인수기지는 총 7개로, 한국가스공사가 운영하는 인천,

186) 충남에는 보령발전본부 외에도 민간발전사인 GS EPS의 LNG 복합화력발전소(충남 당진시)와 씨지앤대산전력의 LNG 복합화력발전소(충남 서산시)가 존재하나, 충남 북부에 위치하여 본 여건 검토에서는 제외하였다.

187) 산업통상자원부(2020), 「제9차 전력수급기본계획」

188) LNG로의 연료전환이 계획된 보령 석탄화력발전 5호기와 6호기 중, 5호기의 경우 2013년 인천으로 이전한 보령 LNG 복합화력발전 4호기 부지에 신규 건설되나 6호기의 경우 경남 함안으로 이전하는 것으로 알려져 있다.

189) LNG 수송선으로 도입되는 LNG는 생산지에서 하역되어 저장 탱크에 보관되었다가 다시 기화되어 전국 배관망으로 송출된다(한국가스공사(2022), 천연가스사업 생산현황(2022.1.1. 기준), <https://www.kogas.or.kr:9450/site/koGas/1030303010000>)

190) 산업통상자원부(2021), 「제14차 장기 천연가스 수급계획 (2021~2034)」

평택, 통영, 삼척, 제주기지(공사 5개)와 GS에너지와 SK E&S가 공동투자한 보령LNG터미널에서 운영하는 보령기지, 포스코에너지가 운영하는 광양기지(민간 2개)가 있다. 또한 건설예정인 기지(4개¹⁹¹), 2021년 1월 기준)를 고려할 경우 총 11개의 LNG 인수기지가 존재한다.

운영 중 및 건설예정인 LNG 인수기지 중, 군산권역 인근에 존재하는 LNG 인수기지는 보령 LNG터미널의 보령기지가 있다. 산업통상자원부(2021)에 따르면 보령 LNG 인수기지는 총 4기 80만kL의 저장탱크와 부두설비로 1개의 선좌를 운영 중에 있으며 추가적으로 3기 총 60만kL의 저장탱크와 1개의 선좌를 건설할 예정이다(2021년 1월 기준). 건설계획에 따라 보령LNG터미널이 완공될 경우 총 7기 및 140만kL의 저장탱크와 2개의 선좌를 운영하게 된다(<표 3-30> 참고).

<표 3-30> 군산권역 인근 LNG 인수기지(천연가스 생산기지)

생산기지	소재지	저장용량 ¹⁾	부두설비 ²⁾
보령LNT터미널	충남 보령시	140만kL	2선좌
합 계	-	140만kL	2선좌

주 1), 2) 저장용량과 부두설비는 2021년 1월 기준 건설계획을 반영한 수치임

자료: 산업통상자원부(2021)을 바탕으로 저자 작성

(4) 탄소활용업종

군산권역(군산국가산업단지, 군산2국가산업단지, 익산국가산업단지, 장항국가생태산업단지)에 입주해 있는 제조업 중, 탄소활용 부문에 참여가 가능할 것으로 예상되는 석유화학, 음식료¹⁹², 비금속 업종(탄소활용업종)은 2021년 말 기준으로 각각 137개, 28개, 26개 업체가 입주해 있다. 전체 제조업 업체 966개 중 탄소활용업종의 비중은 약 20%이다. 군산권역의 탄소활용업종의 생산액은 2021년 말 기준 약 3조 2천억 원 규모로, 석유화학 1조 7천억 원, 음식료 1조 4천억 원, 비금속 4백억 원 규모로 구성되어 있다. 석유화학, 음식료, 비금속 업종이 생산액에서 차지하는 비중은 약 38%이다¹⁹³(<표 3-31> 참고).

191) 한국가스공사 제5기지(당진), 코리아에너지터미널(KET, Korea Energy Terminal) 울산기지, 한양 여수기지, 통영에코파워 통영기지 (2021년 1월 기준)(산업통상자원부, 2021)

192) 이산화탄소 포집·활용(CCU) 기술혁신 로드맵(안)에 따르면 이산화탄소 생물전환을 통해 이산화탄소를 소재화할 경우 화장품·식품·의약품 소재가 산출되므로 음식료 업종을 포함하였다.

193) 각 업종의 생산액은 2021년 1월 장항국가생태단지의 생산액이 제외된 생산액이며, 각 업종의 생산액 비중은 2021년 1월 장항국가생태산업단지의 총 생산액이 반영된 군산권역의 2021년 총 생산액을 바탕으로 계산하였다.

〈표 3-31〉 군산권역의 탄소활용업종 입주업체 및 생산액 분포

구 분	입주업체 ¹⁾ (개 사)	전체 제조업 입주업체 중 비중 (%)	생산액 ²⁾ (억 원)	전체 제조업 생산액 중 비중 ³⁾ (%)
석유화학	137	14.2	16,846.7	20.2
음 식 료	28	2.9	14,466.9	17.3
비 금 속	26	2.7	400.1	0.5
총 계	191	19.8	31,713.7	38.0

주 1) 입주업체는 2021년 12월 기준임

2) 생산액은 2021년 누계 생산액이며, 각 업종별 생산액에는 장항국가생태산업단지의 2021년 1월 업종별 생산액이 제외되어 있음

3) 전체 제조업 생산액은 장항국가생태산업단지의 2021년 1월 총 생산액이 반영된 군산권역 총생산액 대비 비중임

자료: 한국산업단지공단 2021년 주요 국가산업단지 산업동향 각 월 통계표를 바탕으로 저자 작성

나. 울릉권역

(1) 제조업

울릉분지의 탄소저장소와 울산·미포국가산업단지, 온산국가산업단지, 포항국가산업단지, 포항블루밸리국가산업단지로 구성된 울릉권역¹⁹⁴⁾에는 2021년 12월 기준 비제조업종을 포함하여 총 1,265개의 업체가 입주해 있으며, 제조업은 총 1,134개 업체가 입주해 있다. 제조업에 해당하는 업체 중 가장 많은 수의 업체가 입주해 있는 업종은 석유화학으로 321개의 업체가 입주해 있으며, 이어서 기계(297개), 운송장비(188개) 업종에 다수의 업체가 입주해 있다(〈표 3-32〉 참고). 석유화학을 제외한 제조업 중 탄소 다배출 업종인 철강과 비금속은 각각 93개 및 36개의 업체가 입주해 있어, 탄소 다배출 업종은 총 450개의 업체가 입주해 있다. 탄소 다배출 업종은 울릉권역의 제조업 입주업체 중 약 40%를 차지한다(〈표 3-33〉 참고).

194) 포항블루밸리국가산업단지의 경우 2021년 업종 생산액 및 총생산액이 공개되지 않았으며, 따라서 울산권역 전체의 업종별 생산액과 총생산액에는 포항블루밸리국가산업단지의 생산액이 제외되어 있는 수치이다.

<표 3-32> 울릉권역의 업종별 입주업체 및 생산액 분포

구 분	입주업체 ¹⁾ (개 사)	생산액 ²⁾ (억 원)
음 식 료	9	2,757.5
섬유의복	11	52.8
목재종이	16	10,407.1
석유화학	321	799,939.9
비 금 속	36	9,010.0
철 강	93	356,091.1
기 계	297	46,526.0
전기전자	132	22,788.6
운송장비	188	615,307.3
기 타	31	135.9
비 제 조	130	N/A
총 계	1,264	1,863,016.1

주 1) 입주업체는 2021년 12월 기준임

2) 생산액은 2021년 누계 생산액이며, 각 업종별 및 총생산액에는 포항블루벨리국가산업단지의 생산액이 제외되어 있음

자료: 한국산업단지공단 2021년 주요 국가산업단지 산업동향 각 월 통계표를 바탕으로 저자 작성

울릉권역 입주업체의 생산액을 기준으로 2021년 누계 생산액 중 가장 많은 비중을 차지하는 업종은 석유화학이다. 석유화학 업종은 2021년 한 해 약 80조 원을 생산했다. 석유화학 다음으로 운송장비와 철강의 생산액 규모가 컸으며, 각각 61조 5천억 원 및 35조 6천억 원을 생산했다(<표 3-32> 참고). 탄소 다배출 업종인 비금속의 경우 2021년 9천억 원을 생산하였으며, 탄소 다배출 업종의 생산액을 합산할 경우 2021년 총 116조 5천억 원의 생산액을 기록하였다. 탄소 다배출 업종의 생산액은 2021년 울릉권역 총생산액의 약 62%를 차지한다(<표 3-33> 참고).

〈표 3-33〉 울산권역의 탄소 다배출 제조업 입주업체 및 생산액 분포

구 분	입주업체 ¹⁾ (개 사)	전체 제조업 입주업체 중 비중 (%)	생산액 ²⁾ (억 원)	전체 제조업 생산액 중 비중 (%)
석유화학	321	28.3	799,939.9	42.9
비 금 속	36	3.2	9,010.0	0.5
철 강	93	8.2	356,091.1	19.1
총 계	450	39.7	1,165,041	62.5

주 1) 입주업체는 2021년 12월 기준임

2) 생산액은 2021년 누계 생산액이며, 각 업종별 및 총생산액에는 포항블루벨리국가산업단지의 생산액이 제외되어 있음

자료: 한국산업단지공단 2021년 주요 국가산업단지 산업동향 각 월 통계표를 바탕으로 저자 작성

(2) 발전업

울릉권역 인근의 LNG 복합화력발전소로는 동서발전 울산발전본부의 LNG 복합화력발전소(울산 남구)와 남부발전의 자회사인 코스포영남파워가 운영하는 LNG 복합화력발전소(울산 남구), 남부발전 부산발전본부의 LNG 복합화력발전소(부산 사하구), 민간발전사인 부산정관에너지가 운영하는 LNG 복합화력발전소(부산 기장군)가 존재한다¹⁹⁵⁾. 인근의 LNG 복합화력발전소 중 가장 큰 규모인 울산발전본부의 LNG 복합화력발전소는 가스터빈 8대와 증기터빈 4대로 구성되어 있으며, 총 용량은 2,071.9MW이다. 또한 울산 남구에 소재하고 있는 코스포영남파워의 LNG 복합화력발전은 가스터빈과 증기터빈 각 1대로 구성되어 있고 총 발전용량은 442.8MW이다. 울릉권역의 검토 대상인 LNG 복합화력발전소 중 두 번째로 발전용량이 큰 부산 사하구의 LNG 복합화력발전은 단위용량이 150,000kW인 가스터빈 8대와 증기터빈 4대로 구성되어 있으며 총 발전용량은 1,800MW이다. 부산의 민간발전사인 부산정관에너지가 운영하는 LNG 복합화력발전은 총 45.8MW의 규모로 구성되어 있다(〈표 3-34〉 참고). 울릉권역 인근의 LNG 복합화력발전소 중, 울산·미포국가산업단지와 온산국가산업단지가 소재한 울산에 위치하고 있는 동서발전과 코스포영남파워의 LNG 복합화력발전소가 산업단지 및 저장소와의 연계가 수월할 것으로 판단된다. 또한 남부발전이 운영하고 있는 부산발전본부의 LNG 복합화력발전소는 동서발전의 발전소의 규모보다 작으나 타 발전소에 비해 큰 규모로 구성되어 있어 탄소활용업종 및 탄소저장소로 대규모의 이산화탄소 공급이 가능할 것으로 보인다. 그러나 남부발전의 부산발전 본부는 울릉권역 중 울산·미포국가산업단지와 온산국가산업단지까지의 거리가 약 50km에 달하기 때문에, 국가산업단지와 연계하는 데 타 LNG 복합화력발전소에 비해 높은 비용이 소요될 것으로 판단된다.

195) 경북에는 남부발전이 운영하는 LNG 복합화력발전소가 안동시에 존재하나, 본 연구에서는 울릉분지 및 울산 내 국가산업단지 간의 거리 고려하여 제외하였다.

〈표 3-34〉 울릉권역 인근 LNG 복합화력발전소

발전본부	발전사	소재지	발전용량
울산발전본부	동서발전	울산 남구	2,071.9MW
-	코스포영남파워	울산 남구	442.8MW
부산발전본부	남부발전	부산 사하구	1,800.0MW
-	부산정관에너지	부산 기장군	45.8MW
합 계	-	-	4,360.5MW

자료: 전력거래소 전력통계정보시스템 발전기 세부내역(2020년 기준)을 바탕으로 저자 작성

(3) 수소생산

울릉권역의 수소생산과의 연계 가능성 또한 군산권역과 마찬가지로 블루수소 생산거점의 조성 가능성이 높은 국내 LNG 인수기지 위치를 중심으로 검토하였다. 「제14차 장기 천연가스 수급계획 (2021-2034)」에 따르면 2021년 1월 기준 운영 중인 LNG 인수기지(천연가스 생산기지) 중 울릉권역 인근의 기지는 없는 것으로 판단되나, 건설예정인 기지로 코리아에너지터미널(KET, Korea Energy Terminal)이 울산에 구축될 예정이다. 코리아에너지터미널은 한국석유공사, SK가스, 싱가포르 MOLCT가 공동으로 참여하는 LNG 인수기지로, 동 계획에 따르면 총 43만kl의 저장탱크 2기와 부두설비로 1선좌를 건설할 예정이다(〈표 3-35〉 참고).

〈표 3-35〉 울릉권역 인근 LNG 인수기지(천연가스 생산기지)

생산기지	소재지	저장용량1)	부두설비2)
코리아에너지터미널	울산	43만kl	1선좌
합 계	-	43만kl	1선좌

주 1), 2) 저장용량과 부두설비는 2021년 1월 기준 건설계획을 반영한 수치임

자료: 산업통상자원부(2021)을 바탕으로 저자 작성

(4) 탄소활용업종

울릉권역(울산·미포국가산업단지, 온산국가산업단지, 포항국가산업단지, 포항블루밸리국가산업단지)의 입주업체 중, 탄소활용업종인 석유화학, 음식료, 비금속 업종은 2021년 12월 기준 각각 321개, 9개, 36개의 업체가 입주해 있으며, 전체 제조업 입주업체 1,134개 업체 중 약 32%를 차지한다. 생산액을 기준으로 했을 때 탄소활용업종의 생산액은 81조 2천억 원 규모로, 석유화학업종의 생산액(약 80조 원)이 대부분을 차지한다. 탄소활용업종 생산액은 울릉권역의

생산액 186조 3천억 원 중 약 44%를 차지한다¹⁹⁶⁾(〈표 3-36〉 참조).

〈표 3-36〉 울릉권역의 탄소활용업종 입주업체 및 생산액 분포

구 분	입주업체1) (개 사)	전체 제조업 입주업체 중 비중 (%)	생산액2) (억 원)	전체 제조업 생산액 중 비중 (%)
석유화학	321	28.3	799,939.9	42.9
음 식 료	9	0.8	2,757.5	0.1
비 금 속	36	3.2	9,010.0	0.5
총 계	366	32.3	811,707.4	43.6

주 1) 입주업체는 2021년 12월 기준임

2) 생산액은 2021년 누계 생산액이며, 각 업종별 및 총생산액에는 포항블루밸리국가산업단지의 생산액이 제외되어 있음

자료: 한국산업단지공단 2021년 주요 국가산업단지 산업동향 각 월 통계표를 바탕으로 저자 작성

3. CCUS 산업 클러스터 유망 권역(안)의 기반시설 여건

CCUS는 국내에서 개별 기술을 중심으로 기술개발이 진행되어 왔으며, 개별 기술을 통합한 실증사업은 최근에 추진되고 있다. 따라서 현재는 CCUS에 요구되는 이산화탄소 파이프라인 등 수송시설과 저장소 설비 등 기반시설의 현황과 건설추진 계획에 관한 자료를 취득하기 어려우며, 상기 업종 여건과 같이 통계자료를 활용하여 여건 분석을 수행하는 데에 한계가 존재한다. 따라서 CCUS 산업 클러스터 유망 권역의 기반시설 여건은 주요 기관의 보도자료 및 뉴스 기사를 통해 발표된 CCUS 기반시설에 관한 정보를 중심으로 검토하였다.

가. 군산권역의 기반시설 여건

가스전이 개발된 동해의 울릉분지와는 달리 서해 군산분지는 유가스전이 개발된 바가 없으므로 그 기반시설 구축 정도가 울릉권역에 비해 미비하다. 그러나 현재 다부처가 참여하는 「다부처 대규모 CCS 통합실증 및 CCU 상용화 기반구축」 사업의 일환으로 수행되는 「대심도 해양 탐사 시추를 통한 대규모 저장소 확보」 과제에서 이산화탄소 저장소 후보지의 대심도 시추를 위해 시추 플랫폼을 2022년 7월 1일 완공한 바가 있다¹⁹⁷⁾¹⁹⁸⁾. 산업통상자원부(2022)에 따르면 해당 시추 플랫폼을 이

196) 울릉권역의 생산액은 포항블루밸리국가산업단지의 업종별 및 총생산액이 제외된 수치이다.

197) 한국지질자원연구원(2022), 「서해 군산분지 해양 대심도 탐사 시추 플랫폼 기공식」, 『한국지질자원연구원』, 7.6, 2022.10.13. 접속, https://www.kigam.re.kr/gallery.es?mid=a10703010000&bid=0003&b_list=8&act=view&list_no=3159&nPage=2&vlist_no_npage=0&keyField=&keyWord=&orderBy=

198) 박경석(2022), 「국내 해양 시추를 통해 대규모 CO2 저장소 후보지 탐사 개시」, 『에코타임스』, 7.1, 2022.10.19. 접속, <http://www.ecotiger.co.kr/news/articleView.html?idxno=41545>

용하여 2022년 7월부터 11월까지 국내 대륙붕 서해 심부지층을 대상으로 1차 시추를 진행하여 CO₂ 저장소 후보지 존재 유무를 확인할 계획이며, 2차 시추(2023.2~2023.6) 및 3차 시추(2023.7~2023.11)를 통해 저장 용량을 평가하고 저장소 후보지로 활용 가능 여부를 최종 판단할 계획이다.

완공된 시추 플랫폼의 향후 재사용 계획 또는 재사용 여부는 밝혀진 바는 없다. 하기 서술할 울릉권역의 기반시설 여건 사례와 김지환·최정현(2017)의 연구에서 밝힌 유가스전 생산설비를 재사용할 경우 저장비용의 절감이 가능하다는 점에서 향후 이산화탄소 저장사업 운영 시 완공된 시추 플랫폼을 해상 플랫폼으로 재사용 가능성 여부를 검토해볼 수 있다. 그러나 울릉분지의 동해가스전과 김지환·최정현(2017)의 사례는 엄밀히 생산단계의 생산 플랫폼에 관한 사례 및 연구이므로, 플랫폼의 주목적이 대심도 탐사 시추(탐사단계)인 시추 플랫폼과는 목적 측면에서 차이가 있어 명확한 판단이 어렵다.

나. 울릉권역의 기반시설 여건

군산분지와 달리 울릉분지에서는 한국석유공사에 의해 동해가스전(동해-1, 2 가스전)을 개발 및 생산한 바 있으며 동해가스전 운영에 사용된 해상 플랫폼 및 파이프라인 등 기반시설이 존재한다(그림 3-29) 참조). 한국석유공사에 따르면 동해-1 가스전과 동해-2 가스전은 각각 2004년 7월 11일과 2016년 7월에 생산이 개시되어 해저 배관을 통해 육상으로 천연가스와 초경질원유를 공급하였으며, 2021년 12월 31일 가스공급이 최종 종료되었다¹⁹⁹⁾. 그리고 과학기술정보통신부(2020)에 따르면 고갈된 동해가스전을 활용하여 「다부처 대규모 CCS 통합실증 및 CCU 상용화 기반구축」 사업의 「동해가스전을 활용한 중규모(30~50만톤)CCS 통합실증 모델 개발」 과제가 계획되었고²⁰⁰⁾, 현재 산업통상자원부는 ‘ 「동해가스전을 활용한 CCS 중규모 실증 인프라 구축사업」 지자체(포집원 포함) 선정 공고’ 를 발표했다. 이종수(2022)에 의하면 동해가스전을 활용한 탄소저장은 기존의 자원개발 생산시설, 해상 플랫폼, 해저 수송배관 등을 다시 활용함으로써 비용 절감이 가능해 경제적인 것으로 알려져 있다²⁰¹⁾.

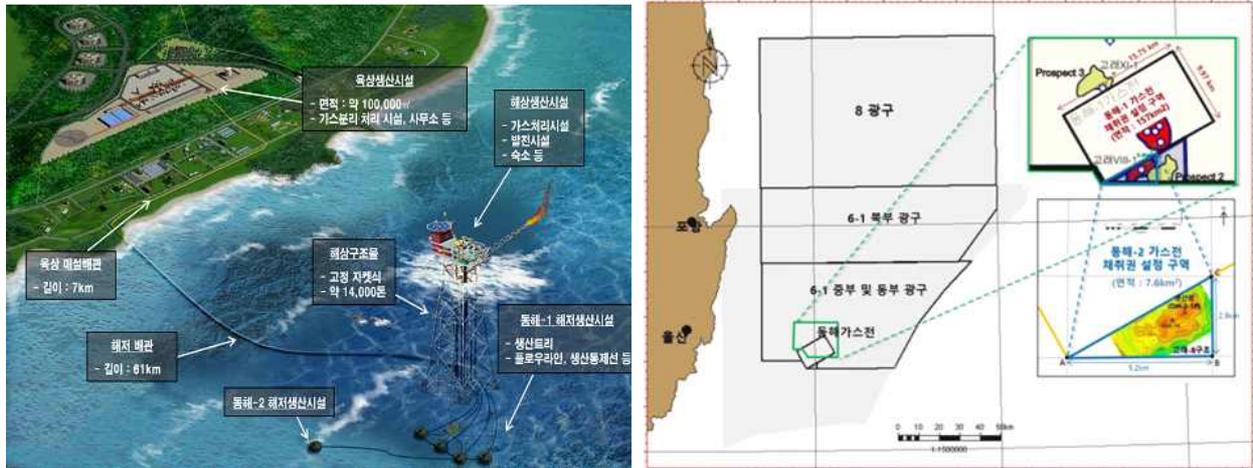
울릉분지의 유망구조가 사업부지로 선정되어 CCUS 산업 클러스터를 조성할 때, 본 동해가스전 기반 CCS 기반시설을 재사용할 수 있을지 여부는 해상 플랫폼과 (현)유망구조 저장소와의 파이프라인 연결 가능성, 기존 기반설비의 노후화 여부 등 추가적인 기술 검토가 필요하다. 그러나 시추 플랫폼만 존재하는 군산권역에 비하여 울릉권역에는 CCS 실증사업에 사용될 기반시설이 존재한다는 데에서 기반시설 여건은 더 우수하다고 판단된다.

199) 정종학(2021), 「동해-1, 2 가스전 현황」, 『한국석유공사』, 12.31, 2022.10.13. 접속, https://www.knoc.co.kr/sub03/su_b03_1_4.jsp

200) 과학기술정보통신부(2020), 「 「다부처 대규모 CCS통합실증 및 CCU 상용화 기반구축」 2021년도 시행계획(안)」

201) 이종수(2022), 「동해가스전, '블루수소' 생산 기폭제 된다」, 『월간수소경제』, 1.1, 2022.10.18. 접속, <https://h2news.kr/mobile/article.html?no=9481>

[그림 3-29] 울릉분지 동해가스전의 조감도(좌)와 위치도(우)



자료: 한국석유공사 홈페이지

4. 종합분석

이상 상기에서 논의한 국내 CCUS 산업 클러스터 유망 권역의 여건 분석 결과를 요약하면 <표 3-37>과 같다. 본 연구에서는 국내 유망 탄소저장소를 중심으로 CCUS 산업 클러스터 권역을 설정하였으며, 서해 군산분지를 저장소로 활용하는 군산권역(군산국가산업단지, 군산2국가산업단지, 익산국가산업단지, 장항국가생태산업단지)과 동해 울릉분지를 저장소로 활용하는 울릉권역(울산·미포국가산업단지, 온산국가산업단지, 포항국가산업단지, 포항블루밸리국가산업단지)을 검토했다.

<표 3-37> CCUS 산업 클러스터 유망 권역 비교

구 분		군산권역	울릉권역	
국가산업단지 구성		군산, 군산2, 익산, 장항국가생태	울산·미포, 온산, 포항, 포항블루밸리	
탄소 저장	위치	서해 군산분지	동해 울릉분지	
	저장규모	5.4억 톤	1.93억 톤	
탄소 포집	제조업	업종	업종	
		입주업체 (개사)	입주업체 (개사)	
		생산액 (억 원)	생산액 (억 원)	
		석유화학	137	16,846.7
		비금속	26	400.1
		철강	51	160,060.4
총계	214	33,307.2		
		업종	업종	
		입주업체 (개사)	입주업체 (개사)	
		생산액 (억 원)	생산액 (억 원)	
		석유화학	321	799,939.9
		비금속	36	9,010.0
		철강	93	356,091.1
		총계	450	1,165,041

구 분		군산권역			울릉권역		
	발전업 ¹⁾	2,568.4 MW			4,360.5 MW		
	수소생산 ²⁾	140만 kl			43만 kl		
탄소 활용	활용업종	업종	입주업체 (개사)	생산액 (억 원)	업종	입주업체 (개사)	생산액 (억 원)
		석유화학	137	16,846.7	석유화학	321	799,939.9
		음식료	28	14,466.9	음식료	9	2,757.5
		비금속	26	400.1	비금속	36	9,010.0
		총계	191	31,713.7	총계	366	811,707.4
기반시설		시추 플랫폼 존재			동해가스전 설비 존재		

주 1) LNG 복합화력발전 용량만 반영하였으며 보령 석탄 화력발전 5호기 연료전환 계획을 반영함

2) 수소생산은 LNG 인수기지(천연가스 생산기지)의 저장탱크 용량임

자료: [그림 3-27], [그림 3-29], <표 3-22>, <표 3-28>~<표 3-31>, <표 3-33>~<표 3-36> 참조

산업통상자원부·해양수산부(2021)의 유망구조 평가에 따르면 군산권역의 탄소저장소의 규모는 5.4억 톤이며 울릉권역의 규모는 1.93억 톤이다. 유망구조의 저장규모 평가라는 데에서 한계점이 존재하나, 군산권역의 규모가 약 2.8배 더 큰 규모이므로 저장소의 규모 측면에서는 군산권역이 더 유리한 조건이라고 할 수 있다. 단, 권이균 외(2019)에 따르면 군산분지의 경우 탐사시추 결과에 따라 실질적으로 저장할 수 있는 용량이 하향될 가능성이 있으므로²⁰²⁾, 실제 저장소의 용량의 규모 비교는 현재 추진하고 있는 탐사시추 결과에 따라 변동될 가능성이 있다.

군산권역과 울릉권역의 탄소 다배출 업종을 비교할 경우, 탄소 다배출 제조업과 발전업 측면에서는 울릉권역에 유리한 여건이 있는 것으로 검토되었으며, 수소생산 측면에서는 군산권역에 유리한 여건이 있는 것으로 검토되었다. 탄소 다배출 제조업의 경우 울릉권역에 입주업체수와 생산액의 규모가 모두 군산권역을 상회하였다. 특히 울릉권역에는 국내 대기업의 대규모 일관제철소 및 정유·석유화학 플랜트가 위치하고 있어 대규모 탄소포집 프로젝트를 수행할 수 있는 여건(탄소배출 수준, 투자비용 등)이 충분할 것으로 판단되며, 국가 전체의 관점에서 CCUS를 통해 온실가스 배출을 줄이는 것에 대한 사회적 편익이 우수할 것으로 판단된다. 다만 두 권역에는 국내 주요 시멘트 생산공장이 포함되어 있지 않으며, 두 권역에서 지리적으로 멀리 떨어져 있는 충북 내륙지역 및 강원도 동해안에 시멘트 생산설비(킬른 플랜트)가 위치하고 있으므로 시멘트 부문의 CCUS 연계 방안에 대한 검토가 필요하다.

탄소 다배출 업종 중 발전업 측면에서도 울릉권역이 더 유리한 여건인 것으로 검토되었다. 울릉권역의 LNG 복합화력발전 용량은 총 4,360.5MW로, 군산권역의 용량인 2,568.4MW에 비하여 약 1,700MW 더 많은 용량 규모이다. 단, 이는 CCUS 산업 클러스터의 활용방안에 따라 달

202) 권이균 외(2019), 「대규모 CCS통합실증 및 CCU 상용화 기반 구축 공동기획연구」, 공주대학교 산학협력단 참조.

라질 수 있는 여건으로, 전력믹스의 탈탄소 과정에 존재하는 석탄 화력발전을 CCUS와 연계할 경우 그 결과가 달라지게 된다. 중부발전이 운영하고 있는 보령발전본부 및 신보령발전본부의 석탄 화력발전의 총 용량은 약 4,538.1MW급²⁰³⁾으로, 군산권역에 이를 연계할 경우 군산권역의 총 탄소 다배출 발전업의 규모는 7,106.5MW이다.

탄소 다배출 업종 중 수소생산은 블루수소 생산거점 조성 가능성이 높은 LNG 인수기지(천연가스 생산기지)의 저장탱크 용량을 근거로 여건을 검토하였다. 군산권역의 저장탱크 용량은 140만kl로 울릉권역(43만kl)에 비해 약 3.3배 많은 용량이 운영 및 건설계획 중에 있다. 단, 이는 앞서 설명한 바와 같이 블루수소 생산설비의 규모가 아닌 LNG 인수기지를 중심으로 검토했다는 점에서 한계가 있으며, 구체적인 블루수소 생산거점의 조성 계획에 따라 다시 검토할 필요가 있다.

군산권역과 울릉권역의 탄소활용업종을 비교할 경우, 탄소 다배출 제조업과 마찬가지로 입주업체의 개수와 생산액 측면에서 모두 울릉권역이 더 유리한 여건에 있는 것으로 분석되었다. 단, 음식료 업종²⁰⁴⁾의 경우 군산권역에 더 많은 입주업체가 위치해 있고 더 큰 규모의 생산액을 기록하였다.

CCUS 산업 클러스터의 기반시설을 중심으로 두 권역을 비교할 경우, 울릉권역이 더 유리한 여건이 형성되어 있다고 판단된다. 울릉권역에는 동해가스전 생산과 천연가스 공급에 사용되었던 해상 플랜트 및 파이프라인이 존재하고, 현재 고갈된 동해가스전에 이를 활용하여 CCS 실증사업을 추진할 계획이다. 단, CCS 실증사업에 사용될 예정인 동해가스전 설비를 본격적인 울릉분지 저장소 개발 및 CCUS 산업 클러스터 구축에 재사용할 수 있을지 여부는 추가적인 기술 검토가 필요하다.

203) 보령발전본부의 석탄 화력발전 3, 4, 6, 7, 8호기와 신보령발전본부의 1, 2호기의 용량을 반영한 용량이며, LNG 복합화력 발전소 규모에 기합산한 보령발전본부 석탄 화력발전 5호기의 용량은 제외했다.

204) 앞서 설명한 바와 같이 이산화탄소 생물전환의 산출물인 화장품·식품·의약품 소재를 근거로 음식료 업종을 탄소활용업종에 포함시켰다.

제 4 절 국내 CCUS 산업 클러스터 조성 방안 도출

1. 개요

상기 언급한 바와 같이 CCUS 산업은 ▲높은 초기 투자비용, ▲낮은 경제성 ▲집중적 기술 개발 촉진의 필요성 등을 종합적으로 살펴보았을 때 정책의존도가 매우 높게 나타난다. 더욱이 CCUS가 중요한 온실가스 감축 기술이라는 점에서 기후변화 대응이라는 사회적 도전과제 해결을 위한 임무지향중심의 정책설계가 요구된다.

이에 따라 본 연구에서는 CCUS 산업클러스터 여건분석을 바탕으로 CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 이슈진단 및 장애요인을 분석하고, 이를 해결하기 위한 제도적·기술적 방안을 모색하기 위해 산·학·연 전문가 29명을 대상으로 서면 자문을 진행하였다. 서면 자문은 관련 이슈 진단 부문(29명 전원)과 세부 선결과제 부문으로 나누어 진행하였으며, ① 탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 물리적 연계 구축(5명), ② CCUS 산업 클러스터 참여기업과 배출권거래제와의 연계방안 마련(6명), ③ CCUS 산업 클러스터 인근 주민 수용성 제고 방안 마련(6명), ④ 지리적 거리가 먼 탄소 다배출 업종의 위치와 이산화탄소 저장소와의 물리적 연계(이산화탄소 수송 등) 방안 마련(6명), ⑤ 클러스터 입주 기업 지원방안 마련(6명) 등 총 5개의 세부 선결과제를 고려하였다. 특히 CCUS 산업 클러스터 조성방안을 도출하기 위해 전문가 자문 결과를 바탕으로 각 세부 선결과제별 장애요인 및 이슈를 분석하였고, 그에 따른 해결방안 및 이행방안 등을 제시하였다. 본 연구에서 도출한 CCUS 산업 클러스터 조성방안을 위한 주요 이슈 및 장애요인과 해결방안은 하기와 같다.

2. 국내 CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 주요 이슈 진단

가. 상업적 운영 개시 시점

본 연구에서는 CCUS 산업클러스터 여건분석을 검토함에 있어 영국의 CCUS 클러스터 적격성 심사 기준을 일부 차용하여 검토하였다. 이때, 영국에서 채택하고 있는 적격성 심사기준의 하나인 상업적 운영 개시 시점('30년)을 국내 상황에 직접 적용하기는 어려워 해당 내용에 대한 판단은 배제하고 국가산업단지를 중심으로 여건 분석만을 시행하였다. 그러나 향후 CCUS 산업 클러스터를 조성함에 있어 적격성 기준 중 하나로 상업적 운영 개시 가능 시점을 검토하는 것은 2050탄소중립 이행을 위해 매우 중요한 기준점이 됨에 따라 전문가를 대상으로 설문 조사를 실시하여 적격성 판단을 위한 상업적 운영 개시 시점에 대한 의견을 수렴하였다.

의견수렴을 위해 상업적 운영 개시 시점을 2023년부터 탄소중립 목표 종료시점인 2050년 범위로 설정하고, 국내 탄소중립 시나리오가 저장소 집중 활용기간 시작점을 2040년으로 제시하고 있음에 따라 이를 고려하여 응답할 것을 명시하였다.

본 연구의 전문가들 대부분은 적격성 기준을 마련함에 있어 '30년을 가장 적합한 상업적 운영 개시 시점으로 보고 있었다. 이는 상향된 2030 NDC 목표에서 정하는 CCUS 감축률(총 10.3백만톤CO₂eq)을 달성하기 위해서는 최소한 '30년에 CCUS 산업 클러스터의 상업적 운영이 개시되어야 하기 때문인 것으로 보인다. 만약 '30년까지 상업적 운영이 개시되지 않을 경우 전체 2030 NDC 달성에 큰 부담으로 작용하여 결과적으로 감축목표 이행이 어렵기 때문이다.

이는 산업성장의 기회측면에서도 생각해 볼 수 있는 대목이다. 상기 언급한 바와 같이 영국 및 미국이 CCUS 기술개발 및 상용화에 공격적으로 임하고 있음에 따라 국내 CCUS 산업클러스터 운영이 늦어질 경우 산업성장의 기회를 놓치게 되고 국가경쟁력 저하로 인한 기술 종속이 우려되기 때문이다. 더욱이 최근 미국발 인플레이션 감축 법(Inflation Reduction Act, IRA) 등이 발효되면서 기후변화에 대응하기 위한 다양한 입법조치가 마련됨에 따라 탄소중립 핵심 기술인 CCUS에 대한 기술개발 및 사업 가속화가 예상되고, 이로 인한 국내 기업의 타격이 예상됨에 따라 신속한 대처가 필요한 시점이라는 점도 염두에 두어야 할 대목이다.

통상 CCUS 산업 클러스터를 조성함에 있어 계획수립(1년), 자금확보(1~2년), 플랜트 건설(1.5년)과 시운전(1년) 등의 소요기간(4.5~5.5년)이 필요하다는 점을 고려한다면, '30년을 목표로 하는 상업적 운영개시가 현실성 있는 목표설정으로 보이며, 해당 운영에서 나온 실적을 바탕으로 집중 활용 시점을 설정하는 것도 방법이 될 수 있을 것이다. 이는 CCUS에 대한 시민들의 인식개선 측면에서 상업적 운영개시를 통해 CCUS가 안전하다는 인식을 심어주고 수용성을 확보하여 CCUS 기술개발 및 사업화를 확대하는데 밑바탕이 될 수 있을 것이다.

물론 낙관적으로 생각한다면, CCUS 산업 클러스터 조성은 현재 다수의 과제들이 실증단계로 진행되고 있고, 적합한 기존의 산업 클러스터와 연계하는 것을 고려했을 때 '30년보다 이른 시기에 상업적 운영이 가능하도록 목표를 설정할 수 있을 것이다. 그러나 CCS의 경우 저장소의 적합성에 대해 단기간에 결론을 도출하기 어려우며, 충분한 연구 및 자료 축적이 바탕이 되어야 한다는 점을 생각해볼 필요가 있다. 더욱이 풍력, 태양광 등 재생에너지 등에 대한 주민들의 수용성이 낮다는 점을 고려하였을 때 CCUS에 대한 주민들의 수용성 또한 높지 않을 수 있다는 점을 고려해야 한다. 즉, 국내로 한정하여 CCUS 기술개발 및 상용화를 가정했을 때 주민수용성 확보와 민원 해소에 상당한 기간이 소요될 것으로 예상된다. 따라서 단기간(2~3년) 내에 CCUS 산업클러스터를 조성하고 이를 상용화하는 것은 현실적으로 어려운 것으로 사료된다.

따라서 2030NDC 달성가능성, 산업경쟁력 제고, 주민수용성 등을 고려하였을 때, 상업적 운영 개시 시점은 '30년으로 설정하고, 늦어도 이 기간 내에 CCUS 상업적 운영이 가능하도록 CCUS 산업 클러스터를 조성하도록 계획을 수립하는 것이 적절할 것으로 보인다.

나. CCUS 산업 클러스터 상업적 운영을 위한 선결과제

CCUS 산업 클러스터 조성 및 상업적 운영 개시와 관련하여 다음 “① 탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 물리적 연계 구축, ② 지리적 거리가 먼 탄소다배업종의 위치와 이산화탄소 저장소와의 물리적 연계(이산화탄소 수송 등) 방안 마련, ③ 클러스터 입주 기업 지원 방안 마련, ④ CCUS 산업 클러스터 인근 주민수용성 제고방안 마련, ⑤ CCUS 산업 클러스터 참여기업과 배출권거래제와의 연계방안 마련” 등의 선결과제가 논의되고 있다.

본 연구는 상기 선결과제 중 가장 중점적으로 고려해야 하는 사항을 도출하기 위해 전문가 중심의 설문을 실시하였다.

[그림 3-30] CCUS 산업 클러스터 상업적 운영을 위한 선결과제 중요도



자료: 저자 작성

[그림 3-30]에서 나타난 바와 같이 ▲탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 물리적 연계 구축(57%)이 가장 핵심적인 선결과제로 도출되었으며, ▲CCUS 산업 클러스터 참여기업과 배출권거래제와의 연계방안 마련(22%), ▲CCUS 산업 클러스터 인근 주민수용성 제고방안 마련(10%), ▲지리적 거리가 먼 탄소다배업종의 위치와 이산화탄소 저장소와의 물리적 연계(이산화탄소 수송 등) 방안 마련(7%)과 ▲클러스터 입주 기업 지원방안 마련(4%)이 그 뒤를 이었다.

하기에서는 CCUS 산업 클러스터의 상업적 운영을 위한 선결과제를 중요도 순으로 적시하고, 각각에 대한 선정 사유를 분석하고자 한다.

(1) 탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 물리적 연계 구축

전문가들은 “탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 물리적 연계 구축”을 가장 중요한 선결과제라고 판단하였으며, 해당과제는 그 다음 응답비율과 비교했을 때에도 압도적인 우위를 보였다. 이는 CCUS기술수준과 CCUS기술 및 산업이 갖고 있는 취약점에 대한 보완방안으로 판단된다.

그간 CCUS 기술은 가장 주요한 탄소중립 핵심기술임에도 불구하고, 경제성 부족으로 인해 기업들의 자발적 참여가 어렵다는 점이 가장 큰 문제점으로 지목되어 왔다. 즉, CCUS 산업 클러스터의 상업적 운영을 위해서는 CCUS 모델이 비용·효과적이어야 함에도 현재 상황에서는 경제성이 매우 부족하고, 더 나아가 시너지효과를 유도하기 위한 산업가치사슬이 형성되어 있지 않다는 점을 난점으로 볼 수 있다. 이를 보완할 수 있는 일차적인 방법은 포집에서 저장 및 활용까지 최 근거리에서 해결할 수 있도록 산업을 집적화하는 것이다. 이를 경제성과 CCU 및 CCS의 개별 기술로 나누어 분석해보면 아래와 같다.

우선, CCU의 경우를 살펴보자. CCU제품 가격은 기존 제품 가격보다 월등히 높게 설정될 수밖에 없는 구조에 있다. 이산화탄소 포집과 활용비용을 고려할 경우 CCU제품 단가가 기존 제품 단가보다 월등히 높기 때문이다. 만약 제품 단가에 수송비용까지 추가로 더해지게 된다면 CCU제품의 사업성 확보는 불가능에 가깝다. 이에 따라 경제성을 향상시킬 수 있는 방법은 탄소 다배출 산업과 CCU 기업이 물리적으로 가깝게 연계될 수 있도록 클러스터를 형성하여 원료확보의 용이성을 담보할 수 있도록 하는 것이다.

CCU를 ▲기존의 생산공정을 개선하거나 일부만 신규공정으로 대체하는 경우와 ▲전체 공정을 신규로 추진하고자 하는 기업으로 구분하는 경우에도 동일한 결과가 도출된다. 전자의 경우 기업이 보유하고 있는 기존 시장의 활용이 가능하고, 생산공정 재개에 필요한 시간 및 투자비를 줄일 수 있다는 점에서 기존 산업과의 연계가 유리하고, 후자의 경우에도 건설, 시운전, 품질검증 등에 필요한 시간 및 자본을 확보해야 한다는 점을 고려한다면 기존 시장 대비 경쟁력 확보 방안으로 단가를 최대한 낮추는 방안을 고려했을 때 물리적·지리적 제한을 극복하는 방안이 중요하기 때문이다.

CCS 또한 CCU와 마찬가지로 물리적 연계가 필수적으로 보인다. CCS와 관련하여 현재 산업부 주도로 2025년을 목표로 하는 “동해가스전을 이용한 중규모 CCS 통합실증사업”이 첫발을 뗐다. 그러나 현재까지 검증된 저장소와 전환 단지가 본격적으로 운영되지 않고 있으며, 해당 실증사업이 상업화 전 단계라는 점을 고려했을 때 탄소배출이 많은 산업과 인근의 이산화탄소 저장기지를 물리적으로 근접하도록 해야 한다. 왜냐하면, 기존의 인프라를 최대한 활용하여 이산화탄소를 실시간으로 수송 가능하게 만드는 것은 초기 시범사업이나 실증사업비를 줄일 수

있다는 점에서 경제성 확보를 가능하게 하는 방안이기 때문이다. 물리적 연계방안의 중요성에 대한 이와 같은 결론은 국내 탄소 다배출 업종의 분포도에서도 도출될 수 있다. 탄소 다배출 업종은 현재 강원도(시멘트, 발전), 동남권(제철, 석유화학), 남부권(제철, 석유화학, 발전)과 서부권(발전, 제철)으로 분포되어 있다. 그러나 동해가스전을 이용한 CCS 통합실증사업이 보여주고 있는 바와 같이 현재 상황에서 가장 현실적인 이산화탄소 저장소는 동해가스전임에도 동남권을 제외하고는 탄소 다배출 업종이 밀집되어 있는 지역과 유망저장소와의 상당거리가 떨어져 있다. 즉, 물리적 연계가 이루어지지 않는다면 이산화탄소 수송을 위한 파이프라인 건설 비용문제 등 다양한 문제가 수반될 수 있다는 뜻이다.

파이프라인 건설은 비용측면뿐만 아니라 안전성과도 긴밀하게 연계되는 대목이다. 이산화탄소를 저장 또는 활용하기 위해서는 포집처에서 이산화탄소를 운송해야 하는데 이 과정이 상당히 까다롭다. 우선, 이산화탄소를 운송하기 위해서는 이산화탄소를 액화해야 하는 과정을 거쳐야 한다. 이때 필요한 임계압력과 온도는 72.8atm, 31.1°C이다.²⁰⁵⁾ 따라서 저압으로 이산화탄소를 액화하여 저장하려면 온도를 낮추어야 하고, 고온에서 이산화탄소를 액화하기 위해서는 고압이 요구된다. 이산화탄소를 저장소 또는 활용처까지 공급하기 위해서 주로 파이프라인을 사용하게 되는데 이산화탄소 수송을 위한 파이프라인은 천연가스 배관보다 2배 이상 높은 압력이 요구되기 때문에 기존의 천연가스 배관보다 파손의 위험성이 높다. 따라서 이산화탄소 포집처와 활용 또는 저장소와 거리가 멀어 장거리 파이프라인을 활용할 경우 압력으로 인한 폭발위험성이 커지고, 지하에 매설한 파이프라인의 경우 신속대응이 어려울 수 있음에 따라 안전성 확보에 문제가 있을 수 있다. 즉, 이산화탄소 액화를 위한 온도와 압력 등 물리적 조건이 일정하도록 유지하기 위해서는 탄소 다배출 산업과 활용처 및 저장소가 물리적으로 가까운 것이 유리하다.

향후 각각의 기술이 발전하여 충분히 성숙될 경우 상기 언급한 물리적 연계 중요성은 약화될 수 있다. 그러나 현재 국내 CCUS의 기술성숙도를 염두에 두었을 때, CCUS R&D와 실증확대를 위해서는 이산화탄소의 배출-활용처-저장의 선순환 구조가 확립되어야 하며, 배출-포집-수송-활용/저장의 물리적 연계가 선행될 필요할 것으로 사료된다.

(2) CCUS 산업 클러스터 참여기업과 배출권거래제와의 연계방안 마련

전문가들은 CCUS 산업 클러스터 참여기업과 배출권거래제를 연계하는 것이 매우 중요(22%)하다고 답변하였다. 이와 같은 답변의 배경에는 CCUS의 경제성부족을 보완할 수 있는 방안으로 배출권거래제가 유용하다고 생각하기 때문인 것으로 판단된다.

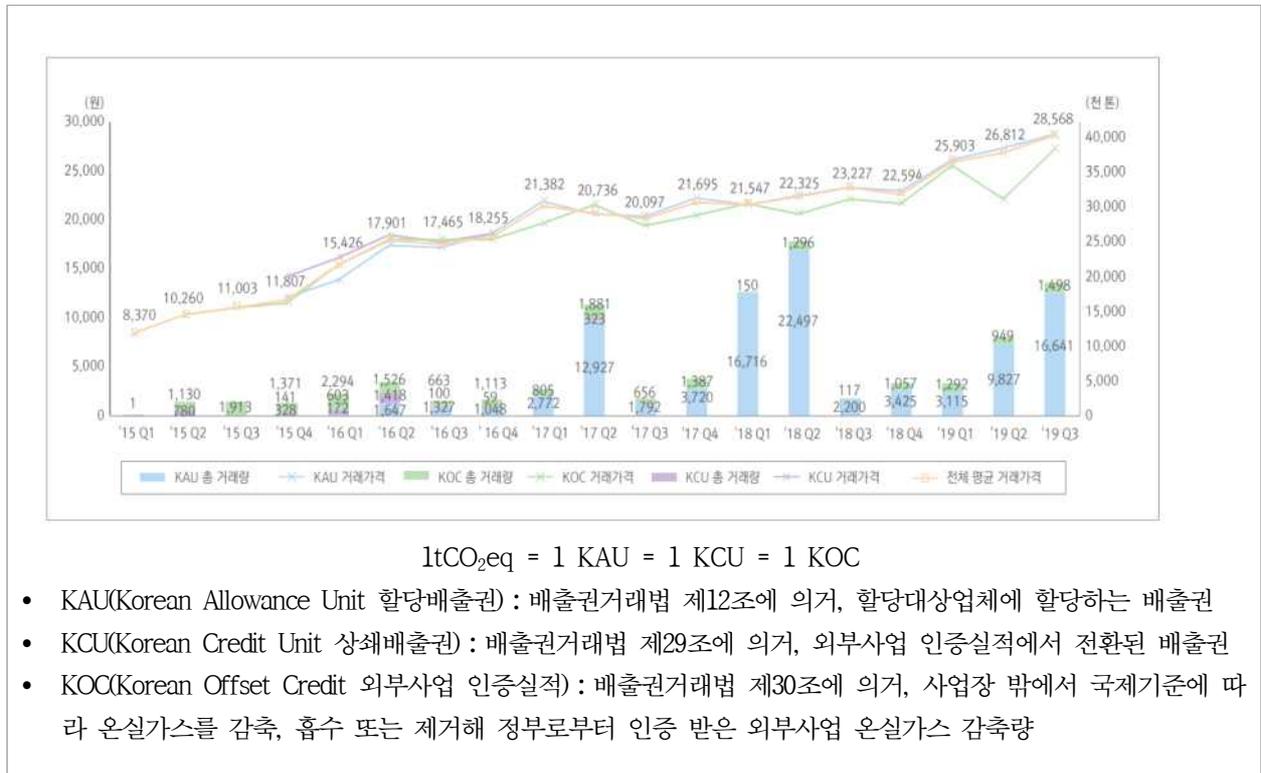
여러 번 지적한 바와 같이 CCUS는 정책 의존도가 상당히 높은 분야이고, 정부의 적극적인 재정지원이 필요한 기술이자 사업이다. 그러나 장기적인 관점에서 정부 지원금은 분명한 한계가 있으며, 기업의 자생력을 키우고 시장원리에 따라 CCUS 산업이 성장하도록 하기 위해서는 정부

205) 박지원·이윤우(2004), 「초임계 이산화탄소용 계면활성제를 이용한 청정 기술」, 『Clean Technology』, 10(3), p.150.

지원 이외의 다른 경제성 확보방안이 마련되어야 한다. 이 점에서 배출권거래제는 효과적인 방안이 될 수 있다. 왜냐하면 온실가스 다배출 기업은 대표적인 규제인 배출권을 CCUS기술을 통한 감축량으로 상쇄하고, 잉여 배출권을 거래하여 경제적 이득을 확보할 수 있다면, 이것이 곧 CCUS를 개발하고 산업화하는데 강력한 유인이 될 것이기 때문이다.

그러나 현재 상황에서 배출권을 통한 경제적 이득 확보는 상당히 어려운 구조에 있다. 왜냐하면 국내의 배출권 가격을 비교해 보았을 때, 국내 배출권 가격은 상당히 낮은 수준이기 때문이다. [그림 3-31]과 [그림 3-32]에서 보는 바와 같이 국내 탄소배출권가격은 1tCO₂eq당 3만원 내외임에 반해, 거래 규모와 국내 영향력이 큰 시장인 유럽연합의 탄소배출권가격은 87달러(1달러 1,436.60원 기준 약 한화 125000원)로 원/달러 환율 강세를 고려한 일시적인 상승세를 가정하더라도 국내 배출권 가격과 격차가 상당하다.

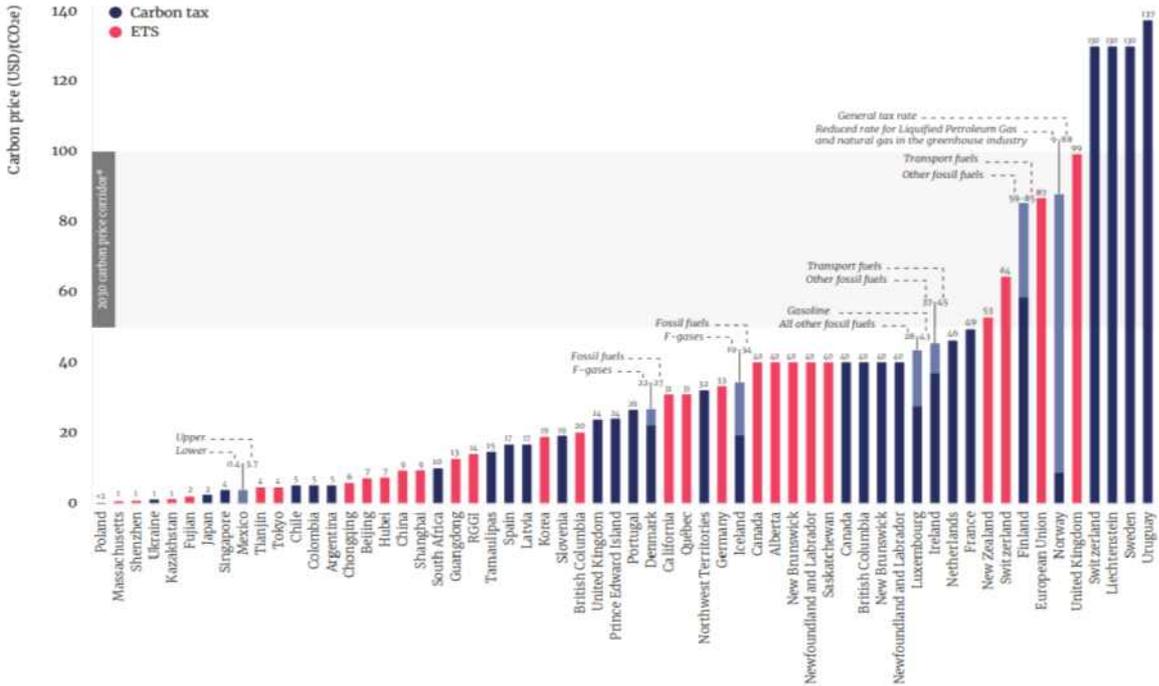
[그림 3-31] 전체 배출권 총 거래 규모 및 가격 추이



자료: 환경부 온실가스종합정보센터(2020), 2018 배출권거래제 운영결과 보고서, 3, 7면.

[그림 3-32] 국가별 배출권 거래제 가격

(기준: '22.4.1.)



자료: World bank(2022), State and Trends of Carbon Pricing 2022, p.26

즉, 현재 소요비용은 CCS를 기준으로 전체 비용이 \$100~150/tCO₂ 가량으로 추산되며, 이 중 약 70% 이상이 포집에 들어간다고 했을 때,²⁰⁶⁾ 국내 배출권 가격으로는 해당 비용을 상쇄하기 어렵다. 결과적으로 현재 배출권 가격과 CCUS 산업 전반에 걸쳐 투자되는 비용을 고려했을 때, CCUS로 감축하는 온실가스 양을 배출권으로 전환 받는다고 하더라도 CCUS에 투자한 비용을 회수하기에는 매우 부족하다는 뜻이다.

이에 따라 민간 주도의 CCUS 산업 활성화를 보장하기 위해서는 배출권거래제와 연계방안을 모색하되, CCUS를 통한 감축량으로 전환 받을 수 있는 배출권 가격을 높이는 것을 고려할 필요가 있다.

(3) CCUS 산업 클러스터 인근 주민수용성 제고방안 마련

응답자들 중 10%는 주민수용성 제고방안 마련이 CCUS 산업 클러스터 활성화를 위한 선결 과제 중 하나라고 지목하였다. 이는 주민 수용성이 확보되지 않을 경우, 사업 전체가 좌초될 수 있다는 우려에서 비롯된 것으로 보인다. 비근한 예로 태양광, 풍력 및 연료전지 등 신재생 에너지 발전 사업을 추진하는 경우에도 해당 시설이 화석연료를 사용하는 발전시설보다 환경영향이 훨씬 적음에도 불구하고 지역 주민의 반대로 사업추진 자체가 무산되는 경우가 매우

206) 윤여일(2021), 「탄소중립 해결책으로 CCUS 기술이 급부상 중!」, 『기술과 혁신』, 453(3) 참조.

빈번하다는 점이 주민수용성의 중요성을 방증한다.

주민 수용성은 이산화탄소에 대한 사회적 인식과 매우 긴밀하게 연계될 수 있다. 현재 이산화탄소에 대한 일반 국민들의 인식이 곱지만은 않다. 더욱이 기후변화의 원인으로 이산화탄소가 지목되면서 이산화탄소가 나쁘다는 인식이 더욱 깊게 자리하고 있는 것으로 보인다. 법제상으로도 이산화탄소는 예외적인 경우를 제외하고 폐기물로 간주되어 왔다. 무엇보다 국민들이 액화 이산화탄소를 위험 물질인 고압가스로 인식하고 있는 경우가 많기 때문에 사업모델이 아무리 좋다고 하더라도 이산화탄소 저장 및 활용시설이 들어서는 클러스터를 조성함에 있어 수용성이 높지 않을 것으로 예측된다.

주민들의 인식뿐만 아니라 이미 발생한 경험칙에 의한 심리적인 반발도 무시할 수 없는 상황이다. 대표적인 사례로 영일만 CCS 사건이 있다. 산업통상자원부는 '16년 12월 말부터 보령화력발전소에서 포집한 이산화탄소를 포항제철소 부근 해상분지에 주입하면서 연도별 저장 계획을 이행하고 있었다. 그러던 중 지난 '17년 11월 경북 포항에서 5.4규모의 지진이 발생하면서, 영일만 CCS가 지진을 유발한 것이 아니냐는 논란이 일었다. 여기에 CCS와 지진유발 사이에 상당한 인과관계가 있다는 미국 과학자들의 연구결과가 발표되면서 논란은 더욱 거세졌다.²⁰⁷⁾ 향후 전문가 조사단이 포항지진과 영일만 CCS 저장 실증사업 사이의 연관성이 없다고 밝혔음에도 불구하고, 포항 지역 주민들의 반발은 가라앉지 않았다.²⁰⁸⁾ 이러한 이유로 영일만 CCS 실증사업은 존폐위기에 놓이게 되었고, 결국 주민수용성 확보를 실패한 CCS 사업시설은 '23년까지 철거가 결정되었다. 주민수용성이 확보되지 않을 경우 현재 추진되고 있는 “동해가스전을 이용한 중규모 CCS 통합실증사업” 또한 영일만 CCS 전철을 밟을 수 있음을 생각해볼 필요가 있다.

즉, 이산화탄소 누출 가능성, 고압 파이프라인 폭발사고와 지진 등과 관련하여 안전성을 확보하고, 주민들의 이해를 높이는 노력이 선행되지 않을 경우 CCUS 사업은 시작도 전에 좌초될 수 있음에 따라 주민 수용성은 매우 중요하다.

(4) 지리적 거리가 먼 탄소 다배출 업종의 위치와 이산화탄소 저장소와의 물리적 연계(이산화탄소 수송 등) 방안 마련

응답자들 중 일부는 지리적 거리가 먼 탄소 다배출 업종의 위치와 이산화탄소 저장소와의 물리적 연계(이산화탄소 수송 등) 방안을 마련해야 한다는 점을 강조하였다(7%). 이는 탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소의 물리적 연계방안과 밀접하게 연결되어 있다. 언급한 바와 같이 경제성 확보를 위해서는 탄소 다배출 산업과 이산화탄소의 저장소를 연계하는 것은 중요하기 때문이다.

207) 정휘(2017), 「포항 앞바다 '탄소 포집 저장기술(CCS)' 지진유발 가능성 경고」, 『프레시안』, 12.7, 2022.10.17. 접속, <https://www.pressian.com/pages/articles/178756>

208) 김성진(2019), 「포항 CCS사업 '지진과 무관' 조사결과에도 재개 결정 늦춰」, 『연합뉴스』, 5.24, 2022.10.17. 접속, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20190524111800003>

그러나 국내에는 이산화탄소를 저장할 수 있는 저장소와 저장량이 매우 한정적이다. CCS기술은 신기술이 아니며, 이전부터 존재해왔던 기술임에도 불구하고 지금까지 기술격차를 극복하지 못했던 이유는 국내 저장소 부족이 주요한 원인 중 하나로 보인다. 따라서 국내 저장소와의 연계도 중요하지만, 한 단계 더 나아가 해외 저장소와의 연계를 염두에 둘 필요가 있다. 이때 필요한 것이 수송 방안임에 따라 해외로의 이산화탄소 수송에 있어서 어떤 수송수단이 가장 최적의 방안일지, 경제성 확보에 유리할지 여부 등을 심도 있게 논의할 필요가 있다.

현재 진행되고 있는 “동해가스전을 이용한 중규모 CCS 통합실증사업”의 경우에도 총 1,200만톤(연간 40만 톤)의 이산화탄소를 저장하기 위한 CCS 상용화의 첫발을 떤 것으로 알려져 있지만, 이는 국내에서 발생하고 있는 이산화탄소의 누적 발생량 대비 현저히 부족한 저장량으로 30년 이후에는 저장 공간이 꼭 차게 됨에 따라 활용 가능성이 현저히 떨어질 수 있다. 같은 맥락에서 국내 저장소만을 염두에 둘 경우 국내 2030 NDC 목표 달성이 어려울 수 있음에 따라 국가 NDC 달성을 위한 해외 저장소 모색은 매우 중요하다. 따라서 탄소 다배출 산업과 해외 저장소를 물리적으로 연계하는 방안을 모색하고, 저장소를 확보하는 것이 중요할 것이다.

즉, CCUS 산업클러스터를 조성함에 있어서 국내 저장뿐만 아니라 해외 저장까지를 염두에 두고 관련 업체 및 수송 방안을 모두 아우르는 관점에서 조성방안을 마련해야 한다.

(5) 클러스터 입주기업 지원방안 마련

클러스터 입주기업 지원방안 마련(4%)은 선결과제 중 가장 후순위로 지목되었으나, 국가의 재정적 지원책이 중요하다는 측면에서 상기 언급한 배출권거래제 등과 유리되지 않은 답변으로 판단된다. 클러스터 입주기업 지원방안이 중요한 이유는 CCUS 분야의 기술개발 및 사업화의 불확실성 때문이다. 즉, 정부가 입주기업의 시장 진입 실패를 보완하기 위해 R&D, 인프라 구축을 적극적으로 지원해야 기업의 참여유인을 높일 수 있다. 즉, 투자유인이 제공되지 않을 경우 기업의 자발적인 참여를 기대하기는 매우 어려움에 따라 탄소세, 배출권을 통한 자금확보 확대 및 인센티브 제공 등을 고려할 필요가 있다.

다. CCU 제품 및 기술 범위

본 연구는 CCUS 산업클러스터 내에 포함시켜야 할 CCU 제품 및 기술의 범위에 대한 전문가의 의견을 수렴하였다. CCU는 생산되는 제품의 수명주기에 따라 탄소가 다시 대기 중으로 배출될 수 있기 때문에 CCU 제품 및 기술범위를 어디까지 보느냐에 따라 CCUS 산업 클러스터 내 비즈니스 모델 등이 달라질 수 있기 때문이다. 예컨대 영국의 경우 CCUS 클러스터라는 개념적 범위 내에 CCU를 포함시키고 있으나, 탄소중립 목표 달성을 위하여 “영구적으로 탄소 감축이 가능한 탄소활용”에 한하여 클러스터 범위 내에 인정되는 CCU 기술 및 제품으로 보

고 있다.²⁰⁹⁾

고려할 수 있는 CCU 기술 및 제품의 범위는 크게 ① 영구적 감축이 가능한 제품만 허용(탄소광물화, 건축자재 활용 등), ② 전 CCU 기술 및 제품에 대하여 허용으로 나누어 볼 수 있다. 각각은 장단점이 명확하며, 이는 아래와 같이 요약될 수 있다.

우선, 영구적 감축이 가능한 제품의 경우 탄소중립에 대한 기여도가 확실할 수 있다는 점에서 긍정적이다. 만약 탄소가 다시 배출된다면, 중장기적으로 실질적인 탄소중립에 기여하기 어렵고, CCUS 정책에 혼란을 야기할 가능성이 있기 때문이다. 더 나아가 상업적으로 오용될 가능성 또한 높다. 영구적 감축이 가능한 제품은 그렇지 않은 제품에 비해 기술적 난이도가 높음에 따라 투입되는 노동력과 비용 또한 많을 수 있다. 만약 영구적 감축 이외의 제품이 허용된다면, 탄소 다배출 기업이나 기술개발 기업들은 대부분 감축 효과가 부족한 분야에 집중할 가능성이 높다. 이는 재원낭비는 물론이고, 기후변화에는 효과적으로 대응할 수 없다는 한계가 분명하다. 따라서 규모가 작다고 하더라도 실질적으로 감축이 되는 기술에 높은 인센티브를 부여하여 기술개발 및 투자를 유도하는 것이 장기적인 관점에서 적합한 방안일 수 있다. 이는 녹색보호무역주의가 가속화되고 있는 상황에서 더욱 중요할 수 있다. 향후 CCU 제품을 수출할 때 경쟁력을 확보하기 위해서는 국내뿐만 아니라 국제적인 기준에 따라 인증되어야 하는데 탄소가 다시 배출될 경우 국제기준에 부합하지 못할 가능성이 높고, 이 경우 제품 및 기술경쟁력에서 뒤쳐질 수 있는 원인을 제공하기 때문이다.

그러나 기술선도 측면에서는 전 CCU 기술 및 제품을 허용하는 것도 유의미할 수 있다. CCU 기술은 CCS 기술보다 기술난이도가 상당히 높기 때문에 현시점에서 감축 영향 정도를 구분자로 고려하기보다는 적용 가능한 모든 분야를 광범위하게 설정한 후 다양한 기술개발 및 제품생산에 초점을 맞추는 것이 향후 기술선도 및 경쟁력확보 측면에서 유의미할 수 있기 때문이다. 특히 기술적 허들이 높고 경제성 확보가 가능한 상업 제품의 완성까지 장기간 소요가 불가피한 상황에서 후보 제품의 범위를 넓히는 것은 상용화 가능한 기술 종류를 넓힐 수 있다는 점에서 중요하다. 또한, 상기 언급한 ‘영구적 감축’의 경우 해당 정의는 기술개발 및 기술 융합 등에 따라 언제든지 다른 방향으로 변화할 수 있기 때문에 보수적인 관점으로 접근할 경우 허용범위가 지엽적이고, 대상이 지나치게 협소하게 설정될 수 있어 기술의 진전 속도를 느리게 할 여지가 있다. 그러나 지나치게 허용범위를 넓게 설정할 경우, 탄소중립이라는 목적달성이 불가능할 수 있기 때문에 시장 활성화 측면에서 가능한 한 범위를 확대하되, 실질적인 감축효과 달성을 위해 제품의 수명주기, 전환 공정으로 인한 화석연료 사용 감소 등의 관계를 모색하여 가중치를 달리 정하는 것도 필요할 것이다. 이는 중장기적인 관점에서 유럽연합 등 해외정책 및 국제기준과 부합하는 방향으로 관련 범위를 좁혀나간다는 측면에서도 이해될 수 있다. CCU 기술 및 제품의 범위를 넓게 선정하더라도 향후 해외정책 및 국제기준에 부합하도록

209) 그러나 CCU에 대한 비즈니스 모델 개발의 어려움으로 인해 현재 CCUS 클러스터 개발 및 상업적 운영에 탄소활용 업종을 포함시키고 있지는 않다.

규제 및 산업생태계를 조성해야 향후 CCU 기술 및 제품의 경쟁력확보가 가능하기 때문이다.

CCU 기술 및 제품 범위는 현재 가용 가능한 기술 수준을 고려할 필요가 있다. 현재 CCU는 전 세계적으로 연구개발 단계에 있음에 따라 기술 및 제품의 범위는 가능한 한 확대하여 고려하되, 정부지원이나 감축인증과 관련해서는 가중치를 달리하는 것이 현재 상황에서는 현실적으로 보인다. 그러나 이 경우에 있어서도 일정 기간을 정하여 기술 및 제품 범위를 허용하되, 기술 및 제품경쟁력 등을 고려하여 해당 기간이 지난 후에는 영구적 감축이 가능한 제품만을 대상으로 지원 및 인증가능성을 좁히는 방안을 모색해야 할 것이다.

3. CCUS 산업 클러스터 조성 방안

가. 선결과제 해결 중심 CCUS 산업 클러스터 조성 방안

상기에서는 CCUS 산업클러스터 조성을 위해 고려해야 할 선결과제를 살펴보았다. 전문가들의 견해를 고려했을 때, 각각의 과제는 경중을 다르게 부여할 수 있으나 이들 모두는 CCUS 산업클러스터 조성을 위해 해결되어야 사안이라는 점에서 각각에 대한 장애요인을 분석하고, 해결방안을 모색하는 것이 필수적이다.

이에 따라 하기에서는 앞서 살펴본 다섯 가지 선결과제를 중심으로 주요 장애요인을 분석한 후, 이를 제도적·기술적으로 해결할 수 있는 방안을 모색해 보고자 한다. 하기에 서술되는 중점사항은 전문가 자문단 운영을 통해 도출할 수 있었던 주요 내용을 중심으로 분석되었다.

(1) 탄소 다배출 산업과의 연계 방안

상기에서는 탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 물리적 연계구축을 경제성 확보 등의 측면에서 매우 중요하게 다루었으며, 본 연구에서는 해당 사항이 CCUS 산업클러스터 조성을 위해 선결되어야 할 주요 과제라는 점을 지적한 바 있다. 여기서 간과할 수 없는 사항이 연계 방안으로서의 수송방법이다. 탄소 다배출 업종에서 포집 후 자체활용하지 않는 한, 아무리 탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처를 물리적으로 가깝게 연계한다고 하더라도 원료가 되는 이산화탄소 공급을 위해서는 ‘수송’이 필수적이기 때문이다. 이에 따라 하기에서는 탄소 다배출 산업과 연계방안을 수송 측면에서 살펴보기 위해 ▲파이프라인 활용, ▲운반선 이용, ▲수송 트럭 사용방안을 분석하고, 마지막으로 ▲탄소 다배출 업종에서 포집 후 자체 활용하는 방법을 고려해 보기로 한다.

(가) 파이프라인을 통한 저장소·활용처로의 수송

파이프라인 활용은 포집된 이산화탄소를 대량으로 운송하는데 매우 효과적인 수단이다. 그

러나 장거리 운송의 경우 고압으로 인한 파이프라인 파손 우려, 파손으로 인한 폭발 우려, 사고 시 즉시 처리 한계 등이 파이프라인을 통한 이산화탄소의 수송에 있어 고질적인 문제점으로 지적된다.²¹⁰⁾ 이와 같은 우려는 곧바로 인근 주민들의 반발로 이어질 수 있다는 점에서 주민수용성과도 긴밀하게 연계될 수 있는 사안이다. 특히 파이프라인이 길어지면 길어질수록 액화된 이산화탄소의 수송시간이 늘어남에 따라 위험은 더욱 증가할 수 있기 때문에 파이프라인을 활용하기로 한다면 저장소나 활용처를 탄소 다배출 산업 인접 지역에 위치하도록 계획하는 것이 효과적일 것이다. 다만, 이 경우에 있어서도 해안에 위치한 발전소의 경우 파이프라인 수송에 한계가 있기 때문에 파이프라인을 통한 수송이 능사는 아닐 수 있다. 더 나아가 파이프라인 건설은 대규모 투자 사업이기 때문에 건설비용이 과다하게 발생할 수 있어 CCUS 비용증가로 이어질 수 있다는 점도 고려해볼 사항이다.

국내 상황을 고려하여 효과적인 파이프라인 사용방법을 숙고해 본다면, 탄소 다배출 산업 또는 이산화탄소 공급처와 저장 및 활용처가 물리적으로 근거리일 경우 파이프라인을 사용하되, 장거리일 경우 파이프라인 사용은 지양하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 또한 파이프라인의 문제점이 상기 언급한 바와 같이 크게 안전성 부족과 과다한 비용이기 때문에 각각을 해결하기 위한 방안으로 다음을 고려할 수 있다. 우선, 파이프라인 안정성 확보를 위해 누설 탐지, 예측, 대응 기술 개발 및 배관 부식 대책, 영향 평가, 설계 기준을 마련해야 한다. 이와 같은 방안을 마련한 후 주민 수용성 개선을 위한 설명회를 개최하여 주민들의 우려를 해소한다면, 사업을 더욱 용이하게 이행할 수 있을 것으로 보인다. 비용 측면에서는 고속도로와 같이 파이프라인 설비를 정부 또는 지자체에서 투자하여 마련하고, 향후 파이프라인 이용료를 징수하는 방안을 비즈니스 모델로 고려해볼 수 있다.

(나) 운반선을 통한 저장소·활용처로의 수송

수송방안 중 하나로 운반선을 통한 방식을 고려해 볼 수 있다. 그러나 문제는 액화된 이산화탄소를 수송하기 위해서는 전용 운반선이 필요하며, 이와 관련한 국내기술 수준은 높지 않다는 점이다. 다만, 국내에서 보유하고 있는 LNG, LPG 화물창 기술 등을 고려했을 때, 전용 운반선구현은 크게 문제가 되지 않을 것으로 보인다. 그럼에도 운반선을 통한 수송은 비용 측면에서 심도있게 숙고할 필요가 있는 대목이다. 왜냐하면, 운반선에 적재 및 하역을 위한 상·하역 비용이 별도로 발생하고, 운반선 접안을 위한 항만시설이 추가로 건설되어야 하는 점을 생각할 때 비용이 과다하게 발생할 수 있기 때문이다. 또한 운반선은 내륙에서의 활용에 한계가 있다는 점도 생각해볼 문제다.

상기와 같은 내용을 종합해 보았을 때 운반선 활용은 국내상황에 적합하지 않은 수송 방안으로 사료된다. 특히 국내 해상 운송 거리가 단거리인 만큼 전용 운반선 건조 및 항만 시설

210) 이와 관련하여 일부 전문가들은 파이프라인 관련 장치의 국산 제품이 신뢰성이 낮다는 점을 문제점으로 지적하면서 관련 분야 기술개발 지원을 통한 국산화 및 성능에 대한 신뢰성 확보가 필요하다는 점을 언급하기도 하였다.

건조 비용이 과다하게 소요될 것으로 예상됨에 따라 운반선은 득보다 실이 더 클 것으로 판단된다. 그러나 해외수송을 고려한다면, 전용 운반선 기술개발은 병행되어야 하며, 이와 관련하여 기술개발 촉진을 위한 정부 지원이 필요할 것으로 보인다.

(다) CO₂ 수송 트럭을 통한 저장소·활용처로의 수송

수송 트럭을 통한 수송은 주로 해안에 위치한 국내 발전소, 석유화학산업, 제철소와 내륙 시멘트사를 고려해 볼 때 유리한 측면에 많다. 그러나 수송 트럭을 활용할 경우 이산화탄소를 액화하여 압축하는 과정이 필요하기 때문에 수송 트럭에 대한 관련 규제를 검토해 볼 필요가 있다. 왜냐하면 고압가스운반 기준 및 고압가스 차량 운반기준은 「고압가스안전관리법」에 따라야 하는데 액화된 이산화탄소가 고압가스로 분류될지 여부가 논란이 될 수 있기 때문이다. 따라서 향후 수송 트럭을 이용하여 이산화탄소를 수송한다고 한다면, 액화된 이산화탄소의 정의와 수송 트럭에 대한 관계 법제를 명확하게 할 필요가 있다. 아울러 수송 트럭을 사용함에 있어 발생할 수 있는 탄소배출 또한 고려해 보아야 할 문제다. 이산화탄소를 저장하기 위해 CCUS를 활용하면서 이산화탄소를 배출할 경우 감축효과가 반감될 수 있기 때문이다.

결과적으로 수송 트럭을 활용한 수송은 저장소나 활용처가 탄소 다배출 업종 지역에 인접하지 않을 경우, 충분한 진출입로가 확보된 경우 등에 한정하여 운행하는 것이 적절할 것으로 보인다. 이때에도 수송 용량 및 거리에 따라 경제성 문제가 큰 이슈가 될 수 있으므로 사전에 충분한 검토를 통해 진행이 필요할 것으로 보인다. 수송 트럭이 운송할 수 있는 이산화탄소량에는 한계가 있음에 따라 아무리 대규모 탱크로리를 이용한다고 하더라도 일정 수준 이상의 이산화탄소 수송이 어렵고, 대규모 수송의 경우 그에 따른 연료 사용 증가와 탄소배출 등이 동시에 일어나기 때문이다.

(라) 탄소 다배출 업종에서의 포집 후 자체 활용

수송 없이 탄소 다배출 업종에서 포집 후 자체 활용하는 방안 또한 고려해 볼 수 있다. 그러나 해당 방안은 아래와 같은 사유 등으로 인하여 명확한 한계가 존재한다. 우선, 발전소, 석유화학산업, 시멘트산업, 제철소 등의 탄소 다배출 업종에서 이산화탄소를 자체활용한다는 것은 현재로서는 현실성이 부족하며, 탄소 다배출 업종에서 포집 후 자체 활용이 가능하다고 하더라도 동종업종일 경우 제약사항이 크게 존재하지 않을 수 있겠으나 이종업종일 경우에는 신규 사업 추진에 따르는 각종 위험을 감수해야 한다는 점에서 문제가 있다. 또한 자체활용의 경우 저장 및 활용을 위한 시설 및 설비에 대한 투자, 관련 인력 확충 등 상당한 재원이 요구될 수 있다는 점에서 CCUS 전문기업과 비교했을 때 효율성이 매우 떨어질 수 있다. 자체활용이 효과적으로 이루어지기 위해서는 자체활용에 대한 비용-효용 검토가 이루어져야 하고, 실행에 필요한 가용 재원의 확보가 필요하며, 자체 활용 시 고압가스 취급에 대한 규제가 없는지 등에 대한 면밀한 검토가 필요할 것이다. 그러나 종합적인 내용을 살펴보았을 때, 자체활용은 현재

로서는 적합한 방안이 아니며, 전문가들 또한 같은 이유로 공통된 의견을 피력한 바 있다.

(2) 유망저장소와의 장거리 연계

탄소 다배출 산업과의 연계 방안이 CCU와 CCS 모두에 해당하는 사항이라고 한다면, 유망저장소와의 연계방안은 CCS를 염두에 둔 사항이라고 할 수 있다. 유망저장소와의 연계 또한 수송방안을 고려한 것으로 탄소 다배출 산업과의 연계 방안과 마찬가지로 ▲장거리 파이프라인 건설, ▲운반선 활용, ▲CO₂ 수송 트럭 활용, ▲비연계 및 자체 활용으로 나누어 살펴볼 수 있다.

(가) 장거리 파이프라인 건설

장거리 파이프라인 건설은 높은 투자비와 운영비에 따른 경제성 문제, 배관 이송 시 배관이 지나가는 주변 지역의 주민 수용성 문제 발생이 있을 수 있다. 또한, 파이프라인 배관의 소재, 저장 장소 환경에 따른 이산화탄소 상변화 데이터를 수집하여 파이프라인에 대한 안정성 확인이 필요하다. 다만, 이러한 장애 요인이 초기에 크게 염려할 사항이 아닐 수 있어 가능한 곳부터 시범 사업을 통해 타당성 검토 후 영역을 넓힐 수 있을 것으로 보인다.

이에 대한 해결 방안으로, 투자 및 운영에 대한 정부 지원, 산업 단지 내 건설 시 면세 사업 등 지정 혹은 투자비용 감축 지원, 배출권거래제와의 적극적 연계로 경제성 부분을 보완하는 방안을 모색할 수 있다. 주민 수용성 개선을 위해서는 배관 수송 시의 인근 지역에 대한 인센티브 및 인근 지역과 연계할 수 있는 방안을 고려해 볼 수 있다. 일례로 배관 수송 인근지역에 대규모 시설 재배 단지가 있을 경우 이송 시 이와 연계하는 방안을 검토할 수 있고, CO₂ 공급 예상량을 판단하여 클러스터를 분산 적용함으로써 주민 수용성을 높이는 방안으로 접근할 수 있을 것이다. 파이프라인 배관의 경우 기술적인 완성도가 높은 기술이지만 배관의 재질, 사양, 설치 및 모니터링 방법 등에 대한 표준화 작업이 필요하다.

(나) 운반선 활용

운반선 활용은 저장된 CO₂의 원활한 이송, 운반선 건조 비용과 부두에 건설할 CO₂ 보관장소, 항만 시설 등 인프라 구축에 대한 우려가 있을 수 있다. 또한, 선박 수송의 경우 대량으로 수송하는 것이 경제성 측면에서 우수한데 대상 항만이 운영하고자 하는 선박의 수송에 적합한 인프라를 갖추었는지와 어떤 방식으로 항만을 개선할 것인지에 대한 인프라 이슈에 대한 고민이 필요하다. 이에 초기 사업엔 많은 기업이 참여하지 않을 수 있어 장거리 배출단지에서는 운반선을 도입이 필요하나 근거리에서 파이프라인 사업으로 데이터 축적이 우선일 수 있다는 점을 고려해야 한다. 또한, 어민들과의 마찰(주민 수용성) 이슈도 발생 가능함에 따른 홍보 강화 등의 대안 마련도 필요하다.

해결 방안으로는 기존의 산업단지 항구의 적극 활용, 운반 시 액화 기술의 보완, 저장소로의 효과적인 저장 기술 개발이 있을 수 있다. 특히 선박 제조 시 암모니아/LPG/CO₂ 호환 수송이 가능하도록 제조하여 향후 국외 저장처에도 활용할 수 있도록 하고, CO₂ 수송 선박에 대해서는 국제 해사 기구가 요청하는 탄소감축량에 대해서 혜택 지원을 고려해야 한다.

(다) CO₂ 수송 트럭 활용

수송 트럭을 통한 수송은 수송 비용이 높아 경제성 확보가 어려울 것이라 예측된다. 특히, CO₂ 수송 트럭은 소규모 및 단거리 이송에만 집중해야 할 것으로 판단되는데 현재 CO₂ 수송은 20톤 탱크로리를 사용하고 있으며 1일 1만톤의 CO₂를 대상으로 할 경우 500대의 탱크로리가 이동함에 따라 CO₂ 배출량이 많아지고 교통량이 증가하는 문제가 발생할 가능성이 있기 때문이다. 또한, 수송 트럭을 사용할 때에 중간에 CO₂ 터미널을 구축하여 지역별 허브를 통해 중소기업이나 소규모 배출 기업의 도움을 주는 방안을 고민해보아야 한다.

이에 대하여 수송 트럭을 활용한 수송은 단거리 및 소량 운송 이외에는 검토의 의미가 없을 수 있고 전문가들의 의견도 공통적으로 이를 지적하였다. 다만, 수송 트럭 사용과 관련하여 수송을 위한 액화탄산 컨테이너 규격화, 탄산 수송 화물차에 대한 보조금 지급, 수소 트럭의 연료 공급용 수소 스테이션 근처에 액화탄산 중간 저장소 건립을 통해 경제성을 확보하는 방안도 있을 수 있다. 특히, 초기에 배출권거래제와의 적극적 연계로 경제성 부분을 보완할 수 있을 것으로 보인다.

(라) 비연계 및 자체 활용

비연계 및 자체 활용에 관하여는 전문가들 모두 한목소리로 장애요인이 많다는 의견을 제시하였고 연구진도 이에 동의하는 바이다. 우선, 대량으로 다른 전환물질로의 전환 시 경제성 문제가 있고 대량의 이산화탄소 저장이 불가능하다. 또한, 현재 자체 활용할 수 있는 CCUS 아이템 및 기술이 부족한 상황이다. 특정 공정의 경우 자체적으로 CO₂를 포집하여 자원화할 수 있으나 그 규모가 작고 공정의 특성에 따라 차이가 많이남에 따라 자체 활용에 따른 CO₂ 저감량은 미미하다고 판단된다.

이에 대한 해결 방안으로 자체 활용에 대한 혜택을 제공하고, 지방자치단체 지원 시설의 확대, 메탄올을 활용한 수소 캐리어 지원 시설의 확대하는 방안을 고려해 볼 수 있다. 제도적(법, 정책)으로 모든 기술과 제품에 대해 오픈하되 안 되는 것만 금지하는 네거티브 규제의 실시도 대안이 될 수 있다. 또한, 산업 CCUS 클러스터 내에서의 활용 기술(CCU)의 개발이 필요하며 해당 CCU 기술의 개발 및 적용 시 CO₂ 배출량 저감에 대한 크레딧의 배분 방법 등에 대한 표준화 및 규정 마련 등의 제도적 차원의 지원이 필요하다. 비연계 및 자체 활용을 위해서는 CCUS 기술 아이템 도출 및 기술 개발, 클러스터 내의 활용 및 CO₂, CO₂ 자원화를 위한 원

재료의 네트워크 구축 및 분배, 활용에 대한 인프라 구축이 선결되어야 한다.

(3) 클러스터 입주기업 지원방안 마련

기업의 참여유인을 제고한다는 측면에서 클러스터 입주기업 지원방안 마련은 CCUS 클러스터 조성을 위한 주요 방안 중 하나다. 클러스터 입주기업을 지원하는 방안에는 여러 가지 방법이 있을 수 있겠으나, 하기에서는 ▲부지 임대료 부담금 감면, ▲각종 세제 혜택 제공, ▲국가 재정사업에 대한 우선권 제공, ▲투자 촉진을 위한 정부 보조금 지원, ▲규제 특례 적용을 큰틀로 상정하고, 각각에 대한 내용을 살펴보겠다.

(가) 부지 임대료 부담금 감면

부지 임대료 부담금 감면과 관련하여서는 전문가들이 언급한 장애요인은 딱히 없으나 CCUS 특화 업체의 엄격한 자격심사가 필요하다는 점이 지적되고 있다. 특히, 선택한 CCU 제품 생산기술이 기업의 필요성에 부합된다면 상기 지원은 플러스로 작용할 것이라 예상되고 CCU 제품생산을 신규로 추진하고자 하는 기업도 동일 효과를 얻을 것으로 보이나 시장진입 실패 원인 분석기준이 없을 경우 눈먼 돈이 될 수 있기 때문이다. 또한, 타 부담금 감면 사업과의 중복성이 있을 수 있기에 형평성 강화 기준의 필요성이 제시된다.

이에 대한 해결 방안으로, 입주 자체만으로 또한 장기 입주라는 이유로 클러스터 특혜를 향유하지 않도록 통제-관리도 가능한 역할자(조성운영자)를 정하고, 동 역할자를 중심으로 입주내 자율적인 운영이 이루어지도록 환경 조성할 수 있겠다. 또한, 정기적인 자격심사로 임대료 감면 대상을 정기적으로 갱신하고 투명한 운영을 위해서 CCU 제품 생산공정 구축, 운영 방안 제출 및 서류, 현장검토(착수 시), 지원 중 사업장 검토, 생산제품 시장진입 자료제출(매출실적 등)을 하도록 운영하는 방안 마련이 필요하다. 클러스터 입주기업의 성격과 사업 기여도를 고려하여 임대료, 세제 혜택, 보조금, 규제 특례 등에 대한 각각의 규정 마련과 함께 동 사업의 성격 고려 시 장기적 성격의 사업임을 고려하여 중장기적인 관점에서 방안 마련을 고민해보아야 한다.

(나) 각종 세제 혜택 제공

CCS와 달리 CCU는 관행적으로 CO₂를 활용하고 있는 공정들이 있음에 따라 해당 기술과 신기술을 구분하여 혜택을 제공하여야 한다는 우려가 있다. 또한, 세제 혜택 제공이 오히려 입주 기관의 단발적 수혜 경향을 유도하게 되는 역작용을 보일 수 있을 거라는 전문가의 우려도 존재하는 상황이다.

해결방안으로 우선 CO₂ 활용으로 인해 온실가스 배출이 저감 및 회피될 수 있는 기술이 무엇인지 면밀하게 판단하여 지원 대상 기술에 대한 조건을 구체적으로 정의하는 것이 필요하

다. 특히 CCUS는 기업 입장에서 수익사업으로 보기 어려운 상황임을 고려하여 일반적 기준인 대기업, 중견기업, 중소기업으로 세제 혜택을 차별화하기보다는 동일한 세제 혜택 방식을 적용하여 기업의 참여도를 제고하는 방향도 검토해 볼 수 있다. 또한, 클러스터의 성과는 입주 기관 단독보다는 입주 기관 간 협업으로 얻어지는 것이 바람직한바, 기대효과를 극대화하기 위해서 제반 세제 혜택을 해당 기업에만 부여하는 것이 아니라 협력 관계에 있는 해당 기업들(협력群)에게 부여하고, 기업 간에 세제 혜택을 기여도에 따라 배분하는 방안을 모색하는 방법도 고려해 볼 수 있다.²¹¹⁾

(다) 국가 재정사업에 대한 우선권 제공

국가재정사업 우선권은 개발을 촉진하는 지원방안에서는 우선 클러스터 입주와 무관하게 우수 기업을 선정하는 별도 기준의 마련이 필요한 것으로 보인다. 특히, 우선권 제공 대상을 특화(제품 종류, 품질기준, 생산단가 등 기준 마련)한 후 시행 여부를 재검토해야 한다. 또한, 클러스터 입주 여부에 따라 동일사업을 영위하는 기업 간의 영업성과 차등화에 대한 전문가의 의견도 있었기에 이에 대한 고민도 필요하다.

이에 대하여 국가재정사업 우선 참여 대상 평가 기준 수립 및 운영이 필요하다는 전문가 의견이 다수 제시되었다. 다만, CCUS 분야의 동일 기술 및 제품을 다루는 기업들 간에 클러스터 입주 여부가 기업 역량 및 사업성과를 평가하는 잣대로 여겨져 직접적 영향을 끼치게 하는 것이 시장 공정성을 저해할 수도 있다. 이에 클러스터 입주환경 개선을 도모하는 간접적 영향 분야에의 지원, 우선권 제공 기준 부합 여부, 우선권 설정이 바람직한지 면밀한 제도적 검토하에 이를 시행해야 할 것이다.

(라) 투자 촉진을 위한 정부 보조금 지원

보조금 지원과 관련하여서는 다른 감축 기술 대비 CO₂활용 기술이 더 차별화된 혜택을 받아야 할 이유가 있는지, CCU 기술과 경합할 수 있는 다른 감축 기술이 있는지 판단한 뒤에 역차별이 발생하지 않도록 보조금을 설계하여야 할 것으로 보인다. 또한, 보조금은 투자 촉진과 개발 가속화를 위한 역할만 수행하도록 설계가 되어야 하지 대상 업체의 주 수입원이 되는 구조가 되면 안 된다는 우려를 표시한 전문가도 있었던 바, 이에 대한 고민이 필요하다. 특정 입주 기관에 대한 특혜 제공, 타 보조금 지원 사업과의 형평성, 보조금 중복 수혜가 발생하지 않도록 하는 제도의 마련이 필요하다.

이에 대한 해결 방안으로 근본적으로 시장경쟁력을 확보할 방안이 정해져 있으므로 정부

211) 더 나아가서는 “Tax credit 이전” (거래가능 Tax credit: 동 Credit을 다른 기업에 양도 가능토록 하면 세금부담이 상대적으로 큰 기업이 동 양도권리를 구매할 재무적 유인이 발생함. 누진세율의 영향으로 구매한 공제권리로 인해 기존보다 낮은 세율을 적용한다면 더욱 큰 절세 기회로 양도가치가 커질 수 있는 효과가 있음)과 같이 부여받은 credit의 양도차익 수익도 가능한 새로운 세제 지원모델 scheme도 검토해볼 수 있다.

보조금 지원 분야 최소화 및 그 실효성 검증이 필요하겠다. 또한, 보조금은 기술개발 기간이 아닌 초기 상용화 과정에서 수익을 보전하는 구조로 설계되어야 한다. 지역경제에의 기여도가 객관적이고 공정하게 측정되고, 투자 결정에 반영되도록 정부 보조금 지원 및 수혜기관 선정에 있어서 이해관계자 관점별로 기대효과를 정량화하고, 의사결정에 활용하는 비용-편익분석(CBA, Cost-Benefit Analysis)의 적극적인 도입을 제안할 수 있다.

(마) 규제 특례 적용

규제 특례 적용과 관련하여서는 초기 CCU 제품이 시장진입을 위해 필요하나 관련 법 정비로 단기간 내에 종료하는 것을 고려해 보아야 한다. 특히, 규제 특례에 따른 의무 기여도의 사후적인 검증이 어렵기에 클러스터 내 적용 사업장의 성격에 따른 규제 특례 공통 또는 차별 적용하는 방안에 대한 검토도 필요하다.

이에 대하여 규제 특례는 임시방편으로 탄소 중립 산업생태계 구축과 연계한 관련 법령을 관련 부처의 책임하에 5년 이내에 정비 및 정리될 수 있도록 추진하는 방안이 있을 수 있다. 특히, CCUS 클러스터를 국내 특정 지역에 분산 조성한다고 하지만, 동 클러스터의 입주 기관이 국내기관이어야 하고 클러스터의 타겟 시장이 글로벌 CCUS 시장을 염두로 한 전략적 클러스터이어야 하는 점을 고려해야 한다. 장기적으로 그리고 궁극적으로 CCUS 기술·산업·시장에서 하나의 중요 허브로 자리 잡아야만 하기에 인센티브와 같은 재정적 지출보다는 규제 해제 구역으로서 창의적 성과가 발현되는 여건 조성이 육성정책으로 더 중요하다고 판단된다.

(4) 주민 수용성 확보방안

본 연구에서 진단한 바에 따르면, 중요도 측면에서 CCUS 산업 활성화를 위한 입지선정에 주민 수용성이 절대적임에도 CCUS 산업시설 등에 대한 주민들의 수용성은 매우 낮은 수준으로 파악되었다. CCUS 산업 클러스터 상업적 운영을 위한 선결과제 도출에서 분석한 바에 따르면, 주민 수용성을 저해하는 요인으로 안전성, 이산화탄소에 대한 인식(예: 폐기물)과 이를 개선하기 위한 정보 부족 등이 지목된다.

한편, 최근 주민 수용성 증대의 일환으로 일자리 창출을 도모하고, 이익 공유체계를 구축하는 방안이 활발하게 논의되고 있는 바, 하기에서는 다음의 ▲안전성 확보를 위한 추가 투자, ▲CCUS 기술 및 산업에 대한 적절한 정보 제공, ▲일자리 창출 도모, ▲산업 클러스터 이익 공유 등을 중심으로 장애요인 및 주요 이슈와 해결방안을 도출하였다.

(가) 안전성 확보를 위한 추가 투자

CCUS 안전성 확보에 있어 우려되는 사항으로 현재 기술수준 및 경험으로 예측할 수 없는

자연재해(지진 등)과 같은 안전이슈가 있다. 이와 더불어 액화된 이산화탄소가 예기치 않게 폭발할 수 있다는 점도 주요 장애요인 중 하나다. 더욱이 '22년 1월에 시행된 「중대재해 처벌 등에 관한 법률」에 따라 CCUS 사업 또는 사업장을 운영하는 사업주, 경영책임자와 법인 등이 CCUS 기술개발 및 사업운영에서 발생한 사고로 인해 관련 법률에 따라 처벌될 수 있기 때문에 안정성 확보를 위한 투자는 주민 수용성 제고뿐만 아니라 기업의 경영 리스크 감소를 위한 주요 방안 중 하나로 볼 수 있다.

상기 언급된 장애요인과 우려사항들을 해결하기 위해서는 무엇보다 CCUS 법률이 조속히 마련되고, 해당 법률에 안전관리규정이 명시되는 것이 중요하다. 이와 더불어 사고발생으로 인한 손해를 배상할 수 있도록 보험 의무가입 등의 제도적 장치를 마련하고, 안전관련 교육 실시와 더불어 운송 및 저장 등의 실시간 감시·예측·제어를 위한 통합관제시스템 구축이 필요할 것으로 보인다. 이와 같은 제도적 방안을 뒷받침하기 위한 안전예산 확보와 안전 전담인력 배치의 중요성 또한 필수사항이다.

아울러 주민의 불안을 해소하기 위한 지속적인 대화와 의견 수렴을 위한 창구마련도 필요하다. 자연재해(지진) 등 발생가능한 이슈에 대한 사전예측연구를 수행과 결과공유 또한 주민의 불안을 해소하기 위한 방안 중 하나로 고려해 볼 수 있을 것이다.

(나) CCUS 기술 및 산업에 대한 적절한 정보 제공

주민수용성을 극대화할 수 있는 가장 효과적인 방안은 기술 및 산업에 대한 적절한 정보 제공일 것이다. 정보제공이 지속적이고 명확하게 이루어지지 않을 경우, CCUS 산업 관련 가짜 뉴스(Fake News) 및 허위조작정보(Disinformation)가 유통될 수 있으며, 이에 따른 주민 민원 발생가능성이 높아질 수 있다. 또한 현재로서는 CCUS 기술 및 산업정보를 공유할 수 있는 교육 플랫폼이나 지역별로 특화된 CCUS 홍보 및 교육기관 또는 제도적 장치가 부재함에 따라 부족한 정보가 지역이기주의(not in my backyard, NIMBY)를 심화시킬 가능성 또한 배제할 수 없다.

이를 해결하기 위해서는 주민들의 눈높이에 맞는 명확한 설명이 수반되어야 할 것이다. 기술적으로 어려운 용어들로 치장된 설명으로는 주민들의 이해를 높일 수 없기 때문이다. 설명을 함에 있어서도 주민들 스스로 CCUS 기술 및 산업에 대한 판단이 가능할 수 있도록 주민건강, 복지방해요인, 환경영향, 비용, 장·단점 등에 대한 적절하고 전반적인 정보 제공이 필수적이다. 정보제공 방식에 있어서도 기존에는 일회성 방식인 포럼, 공청회 등이 제시되어 왔으나, 지속적이고 양방향 소통이 가능한 방식으로 정보가 제공되도록 교육기관을 지정하고 이를 활성화하는 것이 더욱 효과적일 것이다.

(다) 일자리 창출 도모

일자리 창출 등 경제적 효과 증대는 주민 수용성을 확보하기 위한 유효한 방안으로 언급되고 있다. 특히 CCUS 산업 클러스터는 산업규모가 매우 큰 거대한 신산업임에 따라 일자리 창출에 효과적일 수 있다. 그러나 새로운 산업이 추가적으로 생긴다는 측면에서는 일자리 창출에 긍정적일 수 있지만, 탄소산업에서 탈탄소산업으로의 전환과정에서 기존의 산업을 대체한다는 측면에서 CCUS 산업 클러스터를 바라본다면, CCUS 산업클러스터에서 생기는 일자리는 결국 기존 산업의 일자리가 없어지면서 만들어지는 대체일자리 형식으로 이해될 수 있다. 이 경우 일자리 자체가 국가 전체적으로 많이 늘어나는 것이 아닐 수 있기 때문에 이에 대한 사전 연구와 일자리 확대를 위한 고려가 뒷받침될 필요가 있을 것이다.

따라서 기존 일자리 종사자들을 재교육하여 CCUS 클러스터에 투입할 수 있도록 하는 방안을 모색할 필요가 있으며, 일자리 전환을 위한 지역 현실에 맞는 법제도 정비가 수반되어야 한다. 아울러 지역 일자리 창출이 가능하도록 지역 내 학교와의 취업 연계, 인프라 구축을 염두에 두고 CCUS 산업 클러스터가 일자리 창출 효과가 있다는 점을 주민들에게 홍보한다면 인식 전환과 수용성을 제고할 수 있을 것으로 보인다.

(라) 산업 클러스터 이익 공유

CCUS 산업 클러스터를 조성함에 있어 지역사회와의 이익 공유는 수용성 확보를 위한 필수 사항이다. 그러나 문제는 CCUS가 장기적인 관점의 전체 후생 측면에서 경제성이 높다고 판단될 수 있지만, 현재 상황에서 이익이 도출될 수 있는 구조가 아니라는 데 있다. 즉, 이익 공유를 당장 실현하기 어렵다는 뜻이다. 더 나아가 향후 이익이 발생한다고 하더라도 적절한 이익배분 방법에 대한 합의모델이 부족하다는 점도 현재 상황에서는 한계점으로 지적될 수 있다.

이에 대한 해결 방안 중 하나로 광주형 일자리 사례를 참고해볼 수 있다. 광주형 일자리 사례는 광주광역시에서 최초로 구상한 “노사상생형 일자리 창출 모델”로 양극화해소 및 양질의 일자리 창출에 대한 해법 모색을 사회적 대화로 모색함과 동시에 노사 관계와 산업혁신을 바탕으로 사회통합형 일자리를 창출하기 위한 지역혁신운동이다. 핵심과제는 ▲적정임금, ▲적정노동시간, ▲노사책임경영, ▲원하청관계개선 등으로 광주광역시-현대자동차 자동차공장 투자협약 체결을 바탕으로 출범한 (주)광주글로벌모터스가 대표적이다. 해당 사례를 벤치마킹하여 정부와 산업간의 협약을 통해 CCUS 산업클러스터를 마련하고, 일자리 창출 등을 통한 지역사회 공헌방안을 모색하는 것이 이익 공유의 한 방안이 될 수 있을 것이다. 즉, 지역 온실가스 감축을 통한 환경개선 효과를 정부와 산업 간의 협약을 통해 공유하고 일자리 창출로 이익을 공유할 수 있도록 하는 방안을 고려해볼 수 있다. 이익공유 모델에 있어서는 태양광 이익 공유제 등을 벤치마킹하는 것도 고려해 볼 수 있을 것이다.

한편, 이익 공유의 중요성과 더불어 창출된 이익 사용방안과 사용처에 대한 고려도 필요하다. 사업을 통해 발생한 이익이 지역 주민의 복지·환경개선을 위해 사용될 수 있도록 해야 주민수용성을 높이고 지속 가능한 사업이행이 가능할 것이기 때문이다. 이를 위해서는 CCUS 산업 클러스터로 이익을 보는 사람과 피해를 보는 사람을 명확히 하고 이에 대한 사전분석을 통한 사회적 합의 도출과 이를 바탕으로 한 이익 공유가 가능하도록 지자체별 적절한 제도 수립이 수반되어야 할 것이다. 또한 안정적 수익을 지역사회가 공유할 수 있도록 주민들의 직접 참여를 보장하고, 중장기적으로 일반 국민들도 참여할 수 있는 방안을 검토하는 것도 유의미할 수 있다.

(5) 배출권거래제와의 연계방안

본 연구의 진단결과에 따르면, 기업 및 산업 유인 측면에서 가장 효과적인 정책방안은 배출권거래제와의 연계로 나타났다. CCUS 산업 클러스터 상업적 운영을 위한 선결과제 도출에서 분석한 바에 의하면, CCUS와 배출권을 연계함에 있어서 상대적으로 낮은 배출권 가격, 국제 배출권 시장과의 연동을 위한 방법론 마련, CCU 제품의 허용범위 기준에 따른 인증방법의 차등 등을 주요 논제로 설정할 수 있다. 이에 따라 하기에서는 ▲이산화탄소 활용방안에 대한 경제적 모델 마련, ▲이산화탄소 감축량 산정 방법론 마련, ▲감축량 인증제도 확립, ▲배출권 가격 인상 등을 바탕으로 장애요인 및 주요 이슈와 해결방안을 도출하기로 한다.

(가) 이산화탄소 활용방안에 대한 경제적 모델 마련

이산화탄소 활용과 관련한 경제적 모델을 마련함에 있어 가장 주요한 장애요인은 CCUS 사업구조에서 찾을 수 있다. 탄소 다배출 기업들은 대부분 대기업으로 현재 제도상 국가 지원을 받기 어렵고, 배출권 가격 또한 매우 낮아 CCUS로 감축인증을 받는다고 하더라도 경제성 확보가 어렵다. 경제성을 높이는 방안으로 배출권거래제 등을 활용한다고 하더라도 현재 상황에서 CCUS는 대기업과 탄소 다배출 업종을 중심으로 기술개발이 이루어지고 있기 때문에 결과적으로 탄소를 배출하는 공해기업들이 인센티브로 받게 되는 탄소배출권거래 혜택으로 배출권 장사를 한다는 도덕적 비판에 직면할 수 있음도 우려사항 중 하나다. 나아가 이산화탄소 활용을 위한 경제적 모델을 마련한다고 하더라도 어떤 조건(영구감축, 이산화탄소활용 전제품 등)에서 감축을 인정할 것인지 여부에 따라 수익모델이 달라질 수 있다는 점도 장애요인 중 하나다.

이를 해결하기 위한 방안으로 다음을 고려해볼 수 있다. 우선, CCU 기술을 개발하는 대기업에 정부지원 및 투자를 활성화할 수 있도록 하고, CAPEX(Capital Expenditures)와 OPEX(Operating Expenditures)를 고려하여 생산단가를 보전할 수 있을 만한 지원금 확대 측면에서 배출권거래제를 검토하는 것이다. 이와 관련하여 배출권 거래를 통한 부의 축적 논란을 해결하기 위해 사회적으로 충분히 납득할 수 있을 만한 ESG 평가제도와 연동하는 것도 필요할 것으로 보인다. 그러나 국내에

는 법적 구속력 있는 ESG 평가제도가 부재함에 따라 ESG 평가제도를 배출권거래제와 연동하기 위해서는 관련 제도에 대한 법적 정비가 수반되어야 할 것이다.²¹²⁾ 나아가 이산화탄소 활용 조건과 관련하여 감축 인정 범위를 단계적으로 설정하여 업계에 공지할 필요가 있다. 이와 관련하여 CCU 기술 수준에 대한 진단을 고려할 필요가 있다. 상기 선결과제에서 언급한 바와 같이 CCU는 기술적 허들이 높고, 경제성 확보가 가능한 상업 제품을 완성하기 위해서는 장기간이 소요될 것으로 예상됨에 따라 CCU 후보 제품의 범위를 넓히는 것이 매우 중요하다. 이에 따라 감축인정 조건을 처음부터 강화하는 것보다는 기술개발 촉진과 산업육성 측면에서 단계적으로 강화하되, 국제적 인증기준과의 정합성 제고를 염두에 둘 필요가 있다.

(나) 이산화탄소 감축량 산정 방법론 마련

CCUS를 배출권거래제와 연계하기 위해서는 이산화탄소 감축량 산정을 위한 방법론 마련이 필수적이다. 그러나 모두가 인정할 수 있는 객관적인 기준 마련이 가능할 것인지 여부는 대답하기 어려운 난제다. 우리나라는 UNFCCC에 제출한 NDC에 CCUS를 활용한 감축목표를 포함시키고 있으면서도, CCU 기술을 활용한 감축량 산정 방법론이 부재하여 민간기업이 CDM 및 외부 감축사업에 등록 가능한 탄소배출권으로 인증 받지 못하는 실정이기 때문이다. 또한 CCU의 경우 화학·생물전환과 광물탄산화 등의 다양한 기술이 존재함에 따라 동일한 방법론을 적용하기 어렵고, 이러한 이유로 활용기술별 저감효과를 검증할 수 있는 개별 방법론이 필요하다는 것도 객관적 기준 마련에 걸림돌로 작용할 수 있다. 이와 더불어 상기 언급한 “이산화탄소 활용방안에 대한 경제적 모델 마련”과 관련하여 어디까지를 감축으로 볼 것인지에 대한 문제가 감축량 산정에 있어 다시 발생할 수 있다. 또한 이산화탄소 활용, 운송 및 저장 시 누출된 배출량에 대한 검증방안과 책임소재 입증 등에 대한 문제 발생 소지도 장애요인 중 하나다.

상기 문제를 해결하기 위해서는 객관적인 기준 마련을 위한 공론화 과정과 민관협동 방식의 연구 및 전문가 회의 구성·운영이 필요하다. 아울러 유관업계의 의견을 충분히 수렴하여 감축량 산정을 위한 방법론 수립에 참고하는 것도 중요할 것으로 보인다. 결과적으로 CCUS를 배출권거래제와 연계하는 이유는 기업의 참여 유도를 위한 것임에 따라 유관업계의 의견수렴이 필수적이기 때문이다. 아울러 특정 제품이 아닌 다양한 제품에 대한 방법론을 구축하고, CCU 제품별 빠른 방법론 개발이 가능할 수 있도록 전문화된 협회 또는 연구소를 설립하는 것도 고려해 볼 수 있다. 이와 더불어 국제적으로 통용되는 산정방법을 마련해야 함에 따라 주요 국과의 협약을 체결하고 지속적인 모니터링 체계를 구축할 필요도 있다. 이는 감축방법론뿐만 아니라 경제모델구축에서도 고려된 사항으로 CCUS 기술은 궁극적으로 국내뿐만 아니라 해외에서도 통용될 수 있는 기술성숙도를 갖고 있어야 하며, 이를 통해 국제적으로 감축분 인정이 가능해야 하기 때문이다.

212) ESG 법제화와 관련하여 한민지(2021), 「ESG체제에 따른 유럽연합의 대응과 동향」, 『법과기업연구』, 11(2), 서강대학교 법학연구소 참조.

(다) 감축량 인증제도 확립

감축량 인증제도 확립 필요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 그러나 현재 상황에서 객관적 인증기관, 인증장비, 인증방법 등의 부재와 같은 극복해야 할 난제들이 많은 상황이다. 무엇보다 CCUS 기술 및 제품에 대한 객관적인 감축량 인증이 가능할 만큼 인증기관의 전문성이 충분한지 여부를 담보할 수 없는 상황에서 관련 기술 및 제품에 대한 다양한 해석이 존재할 수 있고, 이에 대해 납득할 수 있을 만한 객관적인 근거가 부족하다는 것이 가장 큰 문제다. 이는 감축방법론과 기술 및 제품 기준에 대한 명확한 사회적 합의가 도출되지 않은 상황에서 더욱 두드러진다.

이를 해결하기 위한 방안으로 다음과 같은 내용을 고려해 볼 수 있다. 우선, CCUS 기술이 탄소중립이라는 국가적 목표를 달성하는 데 주요한 기술이라는 점에서 환경부, 산업부, 과기부, 국토해양부 등을 연계한 범부처 전담부서(예: 탄소감축량 인증과)를 마련하고 전담인력을 배치하는 것이 필요할 것으로 보인다. 이를 통해 산업체 및 연구기관에서 감축량 인정 신청 시 이에 대한 평가 및 인증을 지원하도록 하도록 할 수 있을 것이다. 범부처 전담부서를 마련함에 있어서 특히 환경부와 과학기술정보통신부의 역할이 매우 중요할 것으로 보인다. 현재 배출권 거래제 주무부처는 환경부이며, 「기후변화대응 기술개발 촉진법」에 따라 CCUS 기술은 온실가스 감축기술로 분류될 수 있음에 따라 과학기술정보통신부 소관으로 이해될 수 있기 때문이다. 이에 따라 환경부는 감축량 인증제도 도입에 있어 산업계 등의 의견을 충분히 수렴하여 배출권거래제 취지와 부합하도록 감축량 인증제도를 마련하고, 과학기술정보통신부는 기술개발을 촉진할 수 있도록 인증제도 설계를 뒷받침하는 것이 필요할 것으로 보인다. 또한, 기업과 정부 모두 동일한 장비 및 방법으로 감축량 확인을 할 수 있도록 하여 객관성을 담보할 필요가 있다. 아울러 감축량 산정에 있어서도 명확한 Scope를 정하기 위해 법제정비가 이루어져야 할 것으로 보인다. 왜냐하면, 연료 및 원료의 생산단계에서 발생하는 이산화탄소와 기업의 제품 생산과정에서 발생하는 이산화탄소는 달리보아야 하기 때문이다. 즉, 명확한 Scope가 마련되어 있지 않을 경우 인센티브 제공방향 등을 고려한 감축량 인증이 제대로 이루어지지 않을 수 있음에 따라 각각의 규제를 달리할 필요가 있다.

(라) 배출권가격 인상

언급한 바와 같이 국내 배출권은 상대적으로 낮은 편에 속하며, 이는 경제성이 확보되지 않은 CCUS 사업에 장애요인으로 작용할 수 있다. 이에 따라 배출권 가격 인상은 불가피한 조치로 보이며, 배출권 가격을 인상할 경우 배출권 가격이 CCUS 산업활성화에 명확한 경제적 유인으로 기능할 것으로 보인다. 그러나 한편으로는 배출권 가격을 인상할 경우 포집설비의 경제성 확보는 가능할 수 있지만, 배출권 가격의 상승으로 기업들이 포집 설비를 과다하게 설치할 경우 오히려 공급과잉이 발생하고, 포집된 이산화탄소를 처리하지 못할 경우 결과적으로 좌초 자산이 될 가능성이 높다는 점 또한 생각해 볼 필요가 있다. 또한, 단순히 배출권 가격만을 인

상할 경우 CCUS 투자보다 경제성이 높은 다른 감축 방안을 검토하여 오히려 CCUS 산업 활성화에 저해요인으로 작용할 수도 있다. 아울러 대기업의 경우 계열사 등의 감축 노력을 통하여 잉여 배출권을 판매하고, 이를 통한 수익확보가 가능한 구조로 이어질 수 있지만, 중소기업 등 단일사업자의 경우 배출권 가격 인상이 고스란히 구매 부담으로 이어질 수 있다는 점 또한 생각해 볼 문제다.

따라서 배출권 가격은 높이되, 배출권으로 얻은 이익을 이산화탄소 저감 기술에 투자할 수 있도록 정책을 마련해야 할 필요가 있다. 또한 배출권 가격 인상으로 인해 발생하는 이산화탄소 포집 및 공급과잉으로 기업에서 투자한 설비의 좌초자산 방지를 위해 별도의 지원제도를 고려해야 할 것으로 보인다.

(마) 국제 배출권 거래시장 마련

배출권거래제와의 연계방안 중 하나로 국제배출권 거래시장 마련이 논의되고 있다. 그러나 '15년부터 시작된 국내 배출권거래시스템이 아직 자리를 잡지 못한 것으로 판단되며, 해외 배출권거래와의 연계는 감축량 산정 방법론 차이, 할당방식의 차이, 국내외 시장구조의 차이 등으로 인해 국내 기업이 상대적으로 불리할 수밖에 없다는 것을 생각해볼 필요가 있다.

따라서 국제 배출권 거래시장 마련은 향후 국내 CCUS 분야의 국제적 입지 구축이 가능하여 경쟁력이 확보된 후에 고려해볼만한 사항으로 사료된다. 여기에 있어서도 정부의 지원은 절대적일 것으로 보인다. 이때 고려해야 할 것은 국내 방법론이 국제적으로 통용될 수 있도록 의 견반영에 힘써야 하며, 국제 표준안을 마련하되, 국내 배출산업 중심의 규제체계를 정치하게 규정해야 할 필요가 있다는 점이다. 그러나 국내 배출산업 중심의 규제체계를 국제적으로 통용될 수 있도록 규정하기 위해서는 해당 규제가 국제법에 위반되지 않는지 여부가 반드시 검토되어야 한다. 유럽연합에서 마련한 탄소국경조정제도(CBAM)의 경우에도 자국우선주의에 입각한 제품보호가 아니냐는 목소리가 있어 GATT/WTO협정 위반여부가 논란이 된 바 있다. 해당 사례 등을 고려하여 국제법을 위반하지 않는 선에서 국내 경쟁력을 제고할 수 있는 방안을 강구해야 하며, CCUS 기술 및 제품에 대한 국가간 협약이 원활하게 체결될 수 있도록 방법론 개발 및 책임검토가 이루어져야 할 필요가 있다.

나. 기타 조성 방안

상기 언급된 내용 외에도 CCUS 산업 클러스터 조성에 있어 염두에 두어야 할 사항은 다음과 같다.

우선, CCUS 산업 클러스터 조성 초기 단계에서 탄소 다배출 산업과의 연계는 필수적이다. 그러나 탈탄소사회로의 전환에 있어 화석연료가 점차 감소할 것이라는 점을 고려했을 때

CCUS 산업클러스터는 향후 화석연료 중심이 아닌 지속가능한 사업 아이템과 연계될 필요가 있다. 이와 관련하여 석유화학단지 등 탄소 다배출 산업 중심의 CCUS 클러스터 구축보다 장기적인 관점에서 이산화탄소를 중심으로 CCUS 클러스터를 구축해야 하며, 중소기업 및 대기업의 집적화 단지를 마련함으로써 이산화탄소를 원료로 다양한 화학제품을 만들 수 있도록 정책을 마련할 필요가 있다는 견해를 참고해 볼 만하다.

또한, 국내에서 활용되고 있는 배출권 가격을 조정하여 경제성을 확보하는 방안 이외에도 탄소 가격제의 다른 종류인 탄소세를 제정하여 탄소배출 산업군에 부과하는 등 다양한 자금조달방안을 마련할 필요도 있을 것이다. 탄소세는 보다 구체적이고 강력한 동참을 유도해야 한다는 측면에서 매우 중요한 수단일 수 있다. 탄소경제에서 탈탄소경제로 전환하는 시점에서 탄소 다배출 업종 중심의 산업구조를 갖고 있는 우리나라는 상대적으로 불리한 상황에 놓여있으며, 지금의 문화적·상업적 혜택을 모두 포기하고 탄소 중립으로 진입하기에는 많은 난관이 존재하기 때문이다. 즉, 산업군별로 탄소중립을 위한 전담팀을 구성하고, 정부나 지자체에서 일시를 정하여(예: 2030년 지자체별 CO₂ 감축 40% 감축을 위한 화석연료 기반 산업체에 탄소세 부여 등) 보다 구체적이고 강력한 동참을 유도해야 한다는 점에서 탄소세를 고려해볼 필요가 있다. 다만, 배출권거래제와 탄소세를 동시에 부과했을 때 발생할 수 있는 이중과제 문제를 해결하는 방향으로 제도적 설계가 이루어져야 할 것이다.

아울러 CCUS 기술개발과 관련하여 다양한 실증사업이 이루어지고 있으나 국가 재정이 한정되어 있다는 점을 고려했을 때 ‘선택과 집중’의 지혜가 필요할 것으로 보인다. 2050탄소중립 시나리오에 따르면 석탄화력은 폐쇄 대상임에도 500MW급 석탄화력발전소 기준 연간 300만 톤의 이산화탄소를 포집·액화하는 데 들어가는 투자비는 약 6500억 원 수준의 고가임에 따라 탄소 다배출 산업 중 석탄화력에 집중된 국가 연구비 지원을 중단하고, 시멘트, 석유화학(NCC, 블루수소)의 포집 기술 상용화에 집중할 필요가 있기 때문이다.

그 밖에 CCUS 산업을 신산업으로 육성하기 위해서는 일관적인 정책 추진이 필요하며, 정권이 바뀌더라도 CCUS 기술개발 및 산업화 정책이 장기적인 관점에서 지속 가능한 방식으로 추진되고, 정책변화로 발생할 수 있는 시장의 혼란상황을 막을 수 있도록 장기계획 수립 및 단계적 집행체계의 구축이 필요할 것이다.

제4장



결론

제 4 장 결 론

제 1 절 요약 및 결론

본 연구는 온실가스 감축 목표달성과 탄소중립 실현을 위한 핵심 사항으로 수소 및 CCUS를 특정하고, 국내 입법정책 현황 및 동향 등을 종합하여 국가경쟁력 제고를 위한 국내 정책 방향을 구체화하고자 하였다. 각각에 대한 구체화된 정책을 마련하기 위해 “수소 선도시장 분석 및 국내 수소경제 활성화 방안”과 “국내 CCUS 산업 활성화를 위한 산업클러스터 조성방안”을 분석하였고, 하기와 같은 결과를 도출하였다.

2장에서는 선도시장 접근법을 활용하여, 한국이 추진하고자 하는 수소경제의 각 가치사슬(생산, 저장·운송, 활용부문)별로 선도시장을 형성할 수 있는 잠재력이 존재하는지 분석하였다. 한국을 포함하여 일본, 중국, 미국, 독일, 프랑스, 영국, 호주의 8개국을 대상으로, 각 부문의 선도시장 잠재력을 진단할 수 있는 이점 요인(advantage factors)과 이점 요인을 측정할 수 있는 지표를 선정했으며, 분석대상 국가 간 비교를 통해 한국의 비교우위 및 비교열위에 있는 이점 요인을 검토하고, 이점 요인을 종합하여 선도시장 형성 잠재력을 판단했다.

선도시장 분석 결과는 수요 이점의 측정 지표 선택에 따라 다소 차이가 존재했다. 단기적으로 빠른 수요를 창출할 수 있는 수소차 보급률을 수요 이점의 측정지표로 활용할 경우, 수소 생산부문에서 가장 선도시장 잠재력이 높은 국가는 한국인 것으로 나타났다. 또한 수소 저장·운송부문과 수소 활용부문에서는 미국이 가장 선도시장 잠재력이 높았으며, 한국이 미국의 뒤를 이어 두 번째로 선도시장 잠재력이 높은 것으로 나타났다. 마지막으로 수소경제 가치사슬 전체를 고려하여 선도시장 형성 잠재력을 평가했을 때, 한국은 미국에 이어 두 번째로 선도시장 형성 잠재력이 있는 것으로 평가되었다. 수소차는 한국이 정책적 의지를 갖고 보급을 촉진해 온 수소 사용처로, 다른 국가에 비해 큰 격차를 가지고 높은 수소차 보급률을 기록하고 있으며, 이에 따라 단기적으로 수소 각 부문의 혁신을 요구하는 강한 수요 이점으로 작용했다.

장기적으로 강한 수요를 창출할 것으로 기대되는 탄소 다배출 업종의 비중을 수요 이점의 측정지표로 활용했을 때, 수소 생산부문에서는 중국과 미국에 이어 세 번째로 선도시장 잠재력이 높은 것으로 평가되었다. 또한 수소 저장·운송부문에서는 네 번째로 선도시장 잠재력이 높은 것으로 분석되어, 미국, 중국, 일본에 비해 잠재력이 낮았다. 수소 활용부문에서도 마찬가지로 네 번째로 선도시장 잠재력이 높았으며, 중국, 미국, 일본이 각각 1, 2, 3위를 기록했다. 수소경제 전 가치사슬을 고려할 경우 한국의 선도시장 잠재력은 3위인 것으로 진단되었다. 탄소 다배출 업종의 비중은 분석대상 국가 중 높은 수준이나 수소차 보급률에 비해 큰 격차를 보이지 않는다. 따라서 수소차 보급률에 비해 상대적으로 낮게 수요 이점이 평가되었다.

선도시장 접근법을 적용한 결과를 바탕으로 전문가 자문단을 운영하여 수소 각 가치사슬별로 수소경제 활성화에 있어 주요 장애요인과 그에 따른 해결방안을 수립하였다. 수립된 전문가 의견을 종합적으로 비교하고 검토한 후, 추가적인 사례조사와 각국의 수소 정책을 검토하여 국내 수소경제 활성화에 있어 8대 주요 이슈 및 현안을 도출하고, 이를 해결하기 위한 수소경제 활성화 방안을 수립하였다. 전문가 설문조사에서 총 8개의 주요 장애요인(① 수소 생산 및 보급을 위한 인프라 부족, ② 수소전문업체 및 관련 기업 부족, ③ 수소 산업 육성을 위한 지원제도 및 기준 미흡, ④ 수소 설비에 대한 낮은 주민수용성, ⑤ 수요 강점 대비 편중된 국내 수소시장, ⑥ 플랜트 운영 및 관련 실증사업 경험 부족, ⑦ 높은 해외 기술 의존도, ⑧ 수소 공급과 수요의 불균형)이 도출되었으며, 이를 효율적으로 해결하고 수소경제를 활성화하기 위해 총 8개의 방안을 수립하였다.

먼저, 광전극, 수소취성이 낮은 수소 배관, 연료 전지, 수소 터빈 등 수소 전주기적으로 필요 기술을 발굴하고 개발하여 적극적으로 원천기술을 확보하여 기술적 기반 마련이 요구되고, 이와 동시에 신재생에너지 보급 기반을 마련하고 이를 수소 생산과 연계하여 청정수소 생산에 대한 역량을 강화할 필요가 있다. 그리고 민간 주도의 수소충전소 보급 확대, 대규모 재생에너지 단지 조성 및 그린수소 생산을 위한 계통 연계, 해외도입을 위한 민간 인프라 투자 지원, LNG 기지와 수소 액화플랜트의 연계, 수소 배관망 확충, 이산화탄소 포집 및 활용 혹은 판매를 위한 체계 마련 등 수소 전주기적으로 인프라를 확충하여 수소산업의 안정성을 제고함과 동시에, 인근 주민들을 대상으로 한 경제적 이익 공유 및 홍보 방안 마련을 통해 다양한 수소 설비에 대한 주민수용성을 증진하는 것이 필요하다. 또한, 청정수소 인증제 및 청정수소발전의무화제도 등 수소 관련 제도를 조속히 제정하고 시행하며, 규제 샌드박스 및 규제자유특구 운영을 보다 확대하고, 수소 관련 설비 및 시설에 대한 명확한 안전규정을 설립하고 부족한 부분을 개정하는 등 각종 규제 이슈에 대처하고 필요한 제도를 조속히 마련하여 관련 사업 및 설비 운영에 대한 정합성을 마련하는 것이 요구된다. 이에 더해, 수소전문기업을 발굴하고 이를 육성하여 홍보 영상을 제작함으로써 다시금 기업 후보군을 유인할 수 있는 선순환적인 구조를 마련하는 것이 필요하며, 사업 진행 프로세스 및 지원체계의 효율화 및 합리화가 필수적이다. 수소 수요에 대한 잠재력이 있는 산업을 조기 발굴하고 이를 지원함으로써 신규 수소 수요처를 발굴함과 동시에 이를 다양화하여 수소 수요의 안정성을 확보하는 것 또한 고려해야 할 방안 중 하나로 꼽을 수 있다. 마지막으로, 해외 수소의 도입 혹은 해외 청정수소 생산이 차기 주요 수소 공급 방안 중 하나인 만큼, 풍부한 재생에너지원과 대용량 이산화탄소 처리 역량이 있는 해외 주요국과 다각도적인 협력체계를 구축하여 수소 해외 수입처를 확보하여 수소경제 활성화에 이바지할 필요가 있다.

3장에서는 2021년도 1차년도 연구 결과를 바탕으로 8대 생태계 조성방안 중 최우선적으로 해결되어야 할 정책과제를 찾고자 하였고 그 결과 “CCUS 산업 활성화를 위한 산업 클러스터 조성”이 선정되었다. 이에 본 연구에서는 CCUS 산업 클러스터 여건 분석을 진행하고 이를 바탕으로 CCUS 산업 클러스터 조성 방안을 도출하고자 하였다.

첫 번째 단계로 CCUS 산업 클러스터의 개념과 의의를 검토하였다. 개념적으로 CCUS 산업클

러스터는 “이산화탄소 포집·활용·운송·저장 기술개발 및 산업을 영위하는 기업의 집적단지로서, 연구개발, 실증화 등을 지원하기 위하여 기업, 연구소, 대학 등을 상호 연계하고, 관련 전문인력 양성, 창업 사업화 촉진, 제품홍보 및 시장 진출을 지원하기 위한 진흥 시설의 총체”로 요약될 수 있고, 궁극적인 목적은 산업경쟁력확보를 넘어 탄소중립 및 지속가능성에 두고 있다고 볼 수 있다. 국내에는 CCUS 산업 클러스터가 아직 조성되어 있지 않은 바 다른 클러스터 조성 사례에 비추어 볼 때, 국내 CCUS 산업 클러스터는 기존 클러스터 조성방안과 정합성을 제고하고 유기적 연계를 이루어낼 수 있도록 산업 및 지역의 특성을 고려하여 기존에 구축된 클러스터와의 연계를 통해 시너지 효과를 유도하는 방안을 고려할 수 있을 것이다.

두 번째 단계로 국내 CCUS 산업 클러스터 여건 분석을 수행하였다. CCUS 산업 클러스터 여건 분석 수행 시, 여건 분석의 체계 구축을 위해 다음과 같이 주요 쟁점을 검토하였다. 첫째, CCUS 산업 클러스터 조성 방식은 기존의 산업단지를 중심으로 여건을 분석하되 인근 화석연료 발전소와 수소 생산 계획 지역과의 연계를 고려하였다. 둘째, CCUS 산업 클러스터 지정에 고려할 산업단지의 범위로는 자료 취득 제약을 고려하여 한국산업단지공단 관할의 국가산업단지 31개를 포함하는 것으로 결정하였다. 셋째, 국내 탄소저장소 제약 조건을 고려하여 유망 권역을 도출하고 이에 대한 여건을 분석하였다.

유망 권역 도출을 위해 산업통상자원부와 해양수산부의 국내 해양 이산화탄소 저장소 조사 결과를 살펴본 결과, 군산분지와 울릉분지의 저장소가 유망한 것으로 판단하였다. 군산권역과 울릉권역의 CCUS 산업 클러스터 조성 여건을 분석하기 위해, 영국이 CCUS 클러스터 개발 시 활용한 적격성 심사 기준 중 ‘CCUS 클러스터 정의와의 부합성’을 활용·수정하여 기준을 마련하였다. 여건 분석에서 사용된 CCUS 산업 클러스터의 정의는 유형의 물리적 설비를 기준으로 ① 이산화탄소 수송 및 저장설비와 ② 탄소포집 프로젝트를 수행할 수 있는 충분한 탄소 다배출 업종, ③ 탄소활용 프로젝트를 수행할 수 있는 업종이 포함되어 있는 개념으로 한국의 저장소 여건을 고려하여 탄소활용 업종을 포함한 점이 영국 CCUS 클러스터 정의와의 핵심적인 차이라고 할 수 있다.

군산분지에서는 유가스전이 개발된 바 없어 관련 기반시설이 존재하지 않으나 최근 저장소 탐사를 위해 대심도 시추 플랫폼이 완공된 바 있으며, 울릉분지의 경우 동해가스전 생산에 사용된 기반시설이 존재하며 CCS 실증사업에 다시 활용할 것으로 알려져 있다. 여건 분석 결과 울릉권역은 군산권역에 비해 기반시설이 일부 조성되어 있고 탄소 다배출 제조업과 발전업, 탄소활용 업종 다수 분포되어 있다는 데에서 강점을 가지며, 군산권역은 블루수소 생산거점의 가능성이 높고 상대적으로 대규모의 탄소를 저장할 수 있다는 데에서 강점을 가진다는 것으로 정리되었다.

이러한 여건 분석을 바탕으로 전문가 대상 설문문을 통해 CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 이슈와 장애요인을 진단해보고 제도적·기술적 방안을 모색해 보았다. 우선 국내에 CCUS 산업 클러스터를 조성함에 있어서 상업적 운영 개시 시점은 ▲2030 NDC 달성 필요성, ▲산업 성장의 기회

획득, ▲기술 종속 가능성 등을 고려했을 때, ' 30년이 적합할 것으로 보인다.

다음으로 CCUS 산업클러스터 조성을 위한 선결과제 도출을 위해 2021년에 수행된 「탈탄소 사회 전환을 위한 국내 CCUS 산업생태계 육성 방안 연구」 과제의 연구 결과를 바탕으로, 연구진 브레인스토밍이 진행되었다. 이를 바탕으로 CCUS 산업 클러스터 조성을 위한 5대 선결과제(① 탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 물리적 연계 구축, ② CCUS 산업 클러스터 참여기업과 배출권거래제와의 연계방안 마련, ③ CCUS 산업 클러스터 인근 주민 수용성 제고 방안 마련, ④ 지리적 거리가 먼 탄소 다배출 업종의 위치와 이산화탄소 저장소와의 물리적 연계(이산화탄소 수송 등) 방안 마련, ⑤ 클러스터 입주 기업 지원방안 마련)가 도출되었다. 해당 선결과제를 중심으로 전문가 자문단을 대상으로 한 설문조사를 진행하여 각 선결과제에 대한 이슈 및 장애요인을 진단함과 동시에 그에 대한 제도적·기술적 방안을 모색하였다.

제 2 절 주요 시사점

현재 한국은 수소경제의 각 부문별로 선도시장을 형성하는 데 있어 높은 잠재력을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 단, 한국의 높은 잠재력은 수요 이점 측면에서 비교우위를 가지는 데에서 기인하므로, 내부적으로 각 부문의 혁신을 유도할 수 있는 강한 수요는 존재하는 것으로 판단되나, 효율·규모·단가 등 가격 경쟁력을 갖출 수 있는 이점(가격 이점)과 특허를 통해 한국의 혁신을 해외에 인지시킬 수 있는 이점(이전 이점)은 분석대상 국가 중 상대적으로 비교열위에 있다는 것이 한계점으로 파악된다. 일반적인 기술혁신의 창출과 관련하여, 수요가 견인하는지(demand pull) 기술이 주도하는지(technology push) 명백히 밝혀진 바는 없으나, 만약 수소경제 각 부문의 혁신이 주로 기술주도 측면에서 이루어지는 경향성이 존재하는 경우, 현재 한국의 선도시장 잠재력 진단 결과는 실제 선도시장 형성으로 이어지는 것을 담보하기 어렵다. 따라서 본 연구의 선도시장 분석결과는 단순히 한국이 우수한 잠재력을 가지고 있는 것으로 결론지어질 수 있는 것이 아니라, 기술적 성과로부터 창출될 수 있는 이점들에 대하여 강한 정책적 지원이 마련되어야 함을 시사한다.

수소경제 각 부문의 기술개발에 대한 지원과 함께, 수소 사용처의 확대 또는 수소경제로의 전환 지원 또한 균형적으로 진행되어야 한다. 한국은 선도적인 정책에 의해 달성한 높은 수소차 보급률과 탄소 다배출 업종이 높은 비중으로 존재하는 구조적 특성에 의해 높은 수요 이점을 가진 것으로 평가되었다. 수소차 보급률은 현재 보급되어 있는 운송수단이라는 점에서, 수소경제 구축 초기에 혁신에 대한 수요를 창출할 수 있는 명백한 수소 사용처라고 판단된다. 그러나 탄소 다배출 업종의 경우, 한국을 비롯하여 다른 국가에서도 본격적인 수소 활용을 위한 대대적인 전환이 발생하기 전의 단계이며, 실제로 혁신에 대한 요구의 발생 정도는 탄소 다배출 업종에서의 수소 활용기술 보급 수준 또는 수소 활용설비로의 전환되는 규모에 종속적일 것으로 판단된다. 따라서 각 국가에서 탄소 다배출 업종의 전환 정책 및 전환 정도에 따라 실제 혁신에 대한 내부적 수요는 차이가 발생할 수 있으며, 한국보다 탄소 다배출 업종의 비중이

작은 국가에서도 빠른 전환을 통해 한국보다 높은 수요 이점을 가질 수 있다. 즉, 한국 경제의 구조적 특성을 활용하여 수소경제를 선도하기 위하여, 국내 탄소 다배출 업종의 수소 활용과 설비전환이 확대될 수 있도록 효과적인 정책방안이 요구되며, 이는 탄소 다배출 업종의 탈탄소화와 동시에 수소경제 각 부문의 혁신을 견인하는 큰 수요 이점이 될 수 있다.

수요 이점 측면과 함께, 한국의 수소경제 선도시장 형성 잠재력은 다른 국가와 비교하여 규제 이점에 의해 높은 평가를 받은 측면이 존재한다. 기술적 성과의 창출에 비해 규제는 비교적 빠르게 마련될 수 있음에 따라 모든 국가가 동일한 규제를 마련한 경우를 상정하여 추가분석을 수행했을 때, 한국의 선도시장 잠재력은 한국보다 높은 수준의 잠재력을 보유하고 있는 국가와 그 격차가 확대되거나, 한국보다 낮은 수준의 잠재력을 보유하고 있는 국가와 격차가 축소되었으며, 낮은 수준의 잠재력을 보유하고 있는 국가에 의해 역전되기도 하였다. 즉, 다른 국가에서 향후 신속히 수소경제와 관련한 규제를 마련할 경우, 다른 국가와 비교하여 한국의 수소경제 선도시장 잠재력의 우위성이 희석되게 된다. 따라서 혁신을 유도할 수 있는 규제 이점에 대하여 비교우위를 유지하기 위해서, 일찍이 시행하고 있는 수소경제 구축 전략의 성과를 기반으로 현재 존재하고 있는 규제의 효과성을 검토하여 수정하거나, 수소법에 근거하여 추가적으로 혁신을 유도할 수 있는 규제를 마련하여 정책의 효과성과 강도 측면을 강화할 필요성이 있다.

또한, 국내 CCUS 산업 클러스터 형성에 있어, 각각의 선결과제와 함께 도출된 장애요인과 해결방안을 기반으로 다음 <표 4-1>와 같은 시사점을 도출하였다. 주요 시사점을 요약해 보면, 첫째로 국내 탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 연계방안에서 파이프라인, 저장 탱크 등의 인프라 건설이 필수적으로, 이 부분에 있어 경제성 보완에 대한 정부 지원, 투자비용 감축 지원이 필요하다. 또한, 이산화탄소 수송, 탄소 다배출 업종에서의 이산화탄소 자체 활용에서 규제 개선을 위한 면밀한 검토가 필요하다고 볼 수 있겠다. 둘째, 클러스터 입주 기업 지원 및 배출권거래제와의 연계에 있어서 중장기적 관점에서의 제도 정비 및 글로벌 CCUS 시장을 염두에 둔 정책 마련이 필요하다. 특히, 혜택 대상의 기술 조건을 면밀히 검토하여 세제 혜택, 보조금 지원, 규제 특례 지원에 대해 타 기업 간 형평성이 유지되고 타 감면 사업과의 중복성이 없도록 해야 할 것이다. 셋째, 주민 수용성 확보 및 배출권거래제와의 연계에 있어서 공론화 과정 및 의견수렴 과정이 필수적으로, 이를 통해 CCUS 기술 및 산업에 대한 정확한 정보의 공유 및 객관적인 기준 설계를 위한 논의를 해나갈 수 있을 것이다.

<표 4-1> 국내 CCUS 산업 클러스터 핵심과제 및 과제별 주요 시사점

핵심과제	주요 시사점
탄소다배출산업과이산화탄소 저장소 및 활용처와의 물리적 연계 구축	- 파이프라인의 문제점으로 지목되는 안정성 확보와 과도한 비용에 대한 해결방안으로 누수탐지, 예측, 대응기술의 개발, 부식대책 마련, 파이프라인 영향 평가, 설계기준 마련과 고속도로 이용료 징수모델

핵심과제	주요 시사점
	<p>을 차용한 비즈니스모델 등의 개발이 요구됨</p> <ul style="list-style-type: none"> - 운반선을 활용하는 방법은 현재 기술수준과 국내 교통인프라등(항만, 건조시설, 상하역비용 등)을 고려했을 때 적합하지 않은 방안으로 사료되나, 향후 해외수송을 고려했을 때 전용 운반선 기술개발은 병행될 필요가 있으며, 이에 대한 정부 지원이 요구됨
<p>CCUS 산업 클러스터 참여기업과 배출권거래제와의연계 방안 마련</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ① 이산화탄소 활용방안에 대한 경제적 모델 마련, ② 이산화탄소 감축량 산정 방법론 마련, ③ 감축량 인증제도 확립, ④ 배출권가격 인상이 필요 - 감축인정 조건의 단계적 강화, 국제적 인증기준과의 정합성 제고, 다양한 제품에 대한 방법론 구축, 주요국과의 Alliance 체결과 지속적인 모니터링 체계 구축, 범부처전담부서 마련, 명확한 Scope선정, 배출권으로 얻은 이익은 이산화탄소 저감 기술에 투자할 수 있도록 정책이 수반되어야 함
<p>CCUS 산업 클러스터 인근 주민 수용성 제고 방안 마련</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ① 안전성 확보를 위한 추가 투자, ② CCUS 기술 및 산업에 대한 정보 제공, ③ 산업클러스터 지역의 일자리 창출 도모, ④ 산업 클러스터 이익 공유가 고려되어야 함 - CCUS 기술 및 산업에 대한 자체판단이 가능할 수 있도록 주민건강, 복지방해요인, 환경영향, 비용, 장·단점 등에 대한 적절하고 전반적인 정보 제공, 양방향 소통이 가능한 방식의 정보제공방안 마련 (예:교육기관 지정 등), 기존일자리 종사자 재교육, 통합관계시스템 구축, 보험의무가입등을 통해 주민수용성을 제고 하여야 함
<p>지리적 거리가 먼 탄소다배출업종의위치와 이산화탄소 저장소와의 물리적 연계(이산화탄소 수송 등) 방안 마련</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 인프라 관련한 정부의 투자·운영 지원, 산업단지 건설에 대한 면세사업 지정, 투자비 절감 지원, 배출권거래제와의 적극적인 연계, 주민수용성 제고를 위한 안전성확보 및 정보제공이 절실히 요구됨 - 운반선 활용도를 높이기 위해서는 암모니아/LPG/CO₂ 호환수송 선박개발, 액화저장기술의 보완, 저장기술 개발촉진이 수반되어야 할 것으로 판단됨
<p>클러스터 입주기업 지원방안</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ① 부지 임대료 부담금 감면, ② 각종 세제 혜택 제공,

핵심과제	주요 시사점
	<p>③ 국가 재정 사업에 대한 우선권 제공, ④ 투자 촉진을 위한 정부 보조금 지원, ⑤ 규제 특례 적용이 요구됨</p> <ul style="list-style-type: none"> - 지원대상 기술에 대한 조건 정의, 대상 기술과 다른 감축기술과의 비교를 통한 역차별 가능성을 배제하고, 감축기여도 평가기준을 설계해야 함
기타 조성 방안	<ul style="list-style-type: none"> - 장기적인 관점에서 탄소다배출업종과의연계외에이산화탄소 기반의 화학 플랫폼을 조성하여, 이를 바탕으로 지속가능한 사업으로의 전환을 유도할 필요가 있음 - 배출권거래제 외에도 탄소세를 제정하여 탄소배출 산업군에 부과하는 방식으로 자금 조달의 유용성을 제고하여야 함(단, 이중과제 문제를 해결할 수 있도록 제도설계 필요) - 폐쇄대상인 석탄화력과 관련한 CCUS 기술 실증을 줄이는 등 국가 재정 집중도 개선을 통해 이산화탄소 포집 기술 상용화 등 우선순위를 설정할 필요가 있음 - 정책변화로 발생할 수 있는 시장의 혼란 상황을 막을 수 있도록 장기계획 수립 및 단계적 집행체계의 구축 필요

자료: 저자 작성

참 고 문 헌

[국문자료]

2050탄소중립위원회(2021), 「2050 탄소중립 시나리오 세부 산출근거」

강석호·이창미·임동희(2016), 「연료전지 산소환원반응 향상 위한 백금 촉매의 구조적 특성: 밀도범함수이론 연구」, 『대한환경공학회지』, 대한환경공학회, 38(5)

장소라(2017), 「친환경자동차 의무판매제 도입의 비판적 검토」, 『KERI Brief』, 16, KERI 한국경제연구원

과학기술정보통신부(2020), 「「다부처 대규모 CCS통합실증 및 CCU 상용화 기반구축」 2021년도 시행계획(안)」

과학기술정보통신부·한국에너지기술연구원(2021), 「(탄소중립 기술혁신 추진전략) 10대 핵심기술 개발 방향」

관계부처 합동(2018), 「혁신성장동력 시행계획」

관계부처 합동(2019a), 「8대 핵심 선도사업 세부추진계획」

_____ (2019b), 「수소경제 활성화 로드맵」

관계부처 합동(2021a), 「이산화탄소 포집·활용(CCU) 기술혁신 로드맵(안)」

_____ (2021b), 「제1차 수소경제 이행 기본계획」

관계부처 합동·대통령직속4차산업혁명위원회(2017), 「4차 산업혁명 대응계획 I-KOREA 4.0」

권오혁(2017), 「산업클러스터의 개념과 범위」, 『대한지리학회지』, 대한지리학회, 52(1)

권이균 외(2019), 「대규모 CCS통합실증 및 CCU 상용화 기반 구축 공동기획연구」, 공주대학교 산학협력단

규제정보포털, 「규제샌드박스」, 2022.10.21. 접속, https://www.better.go.kr/sandbox/info/sandbox_intro.jsp

김경택 외(2001), 「CCUS 심층 투자 분석 보고서: 탄소중립 구현을 위한 CCUS 기술 개발 여정」, 한국에너지기술연구원, 2021-1

김나연·이성규(2021), 「중국 수소산업 현황 및 정책」, 『세계 에너지시장 인사이트』, 21(19)

김현진 외(2021), 「국내 액화수소 안전기준 제·개정을 통한 수소산업 안전성 확립」, 『KIGAS』, 한국가

스학회, 25(6)

김호건(2021), 「연료전지 개요와 현황」, 『K 뉴딜산업 INSIGHT 보고서-3』, 한국수출입은행 해외경제연구소
대통령직인수위원회(2003), 「참여정부 국정비전과 국정과제」

문유현 외(2021), 「기술 패권 시대의 대중국 혁신 전략」, 『KISTEP Issue Paper』, 305

박지원·이윤우(2004), 「초임계 이산화탄소용 계면활성제를 이용한 청정 기술」, 『Clean Technology』, 10(3)

박찬오(2022), 「미국의 원자력 수소 개발 동향과 시사점」, 『세계 원전시장 인사이트』, 에너지경제연구원

산업통상자원부 보도자료(2021), 「“희소금속 안심국가” 실현을 위한 「희소금속 산업 발전대책 2.0」 수립」

산업통상자원부 보도자료(2022), 「'26년 연간 1,000톤 그린수소 생산 실증 지원」

산업통상자원부(2019), 「산업집적활성화 기본계획」

산업통상자원부(2020a), 「제5차 신재생에너지 기본계획」

_____ (2020b), 「제9차 전력수급기본계획」

산업통상자원부(2021a), 「제14차 장기 천연가스 수급계획 (2021~2034)」

_____ (2021b), 「제1차 수소경제 이행 기본계획」

산업통상자원부·해양수산부 보도자료(2021), 「합동 연구단, 국내 이산화탄소 포집 및 저장(CCS) 유망
저장소 7.3억 톤으로 평가」

서선재·김요섭·박철호(2022), 「국내 CCUS 산업생태계 조성 및 활성화 방안 연구」, 『한국기후변화학
회』, 13(3)

석호영·김동련(2021), 「미국의 CCUS 법제도 현황」, 『토지공법연구』, 96(0), pp. 303-324

손영욱 외(2018), 「친환경차 장기목표 수립을 위한 정책환경 연구」, 한국자동차공학회

신산업 민·관협의회(2016), 「신산업 창출을 위한 정책과제」

에너지경제연구원(2021), 「중국, ‘14.5계획 및 2035년 장기 목표’에서 에너지부문 정책 방향 설정」,
『세계 에너지시장 인사이트』, 21(6)

오상진 외(2020), 「2020년 기후기술 수준조사」, 녹색기술센터

- 윤여일(2021), 「탄소중립 해결책으로 CCUS 기술이 급부상 중!」, 『기술과 혁신』, 453(3)
- 윤용승 외(2019), 「상용급 가스 액화 플랜트 기술개발 기획 최종 보고서」, 국토교통과학기술진흥원
- 이종민(2022), 「수소·암모니아 가스터빈 발전의 기술 동향 및 전망」, 『에너지포커스』, 에너지경제연구원, 19(1)
- 이지훈(2021), 「전주·완주 수소시범도시 주민수용성 분석」, 『New & Renewable Energy』, 17(4)
- 이철우(2001), 「포터(Michael E. Porter)의 국가경쟁력 이론」, 『공간이론의 산책』, 국토연구원, 235
- 이혜경(2021), 「영국 「기후변화법」 의 이행현황 및 국내적 시사점」, 『외국 입법·정책 분석』, 국회입법조사처, 1
- 한국산업단지공단(2022a), 전국산업단지현황통계 통계표(2021년 4분기 기준)
- 한국산업단지공단(2022b), 전국산업단지현황통계 통계표(2022년 2분기 기준)
- 한상일·유평준(2008), 「혁신클러스터의 발전과 집단화전략: 원주의료기기클러스터의 사례」, 『정부학연구』, 고려대학교 정부학연구소, 14(2)
- 한민지(2021), 「ESG체제에 따른 유럽연합의 대응과 동향」, 『법과기업연구』, 11(2), 서강대학교 법학연구소
- 한민지 외(2022), 「영국의 CCUS 클러스터 개발 추진현황 및 정책적 시사점」, 『GTC Brief』, 3(2)
- S&T GPS(2021), 「주요국 수소경제 정책과 시사점」, 『이슈분석』, 195
- S&T GPS(2021), 「미국, 탄소포집저장 기술 및 지원 정책 현황 발표」, 『주요동향』, 202

[해외자료]

- Beck, L.(2020), *The US Section 45Q Tax Credit for Carbon Oxide Sequestration: An Update*, Global CCS Institute
- BEIS(2020), *Carbon Capture, Usage and Storage: An Update on Business Models for Carbon Capture, Usage and Storage*, BEIS
- BEIS(2021a), *Carbon Capture, Usage and Storage: An Update on the Business Model for Industrial Carbon Capture*, BEIS

- _____(2021b), *Carbon Capture, Usage and Storage: An Update on the Business Model for Transport and Storage*, BEIS
- _____(2021c), *Cluster Sequencing for Carbon Capture Usage and Storage Deployment: Phase-1*, BEIS
- _____(2021d), *Cluster Sequencing for Carbon Capture Usage and Storage Deployment: Phase-2 Background and Guidance for Submissions*, BEIS
- _____(2021e), *Hydrogen Production Costs 2021 Annex: Key Assumptions and Outputs for Production Technologies*, BEIS
- BEIS(2022), *Carbon Capture, Usage and Storage (CCUS): Investor Roadmap*, BEIS
- Beise M. and Rennings K.(2005), “Lead Markets and Regulation: a Framework for Analyzing the International Diffusion of Environmental Innovations” *Ecological Economics*, 52(1)
- Beise M.(2004), “Lead Markets: Country-specific Drivers of the Global Diffusion of Innovations”, *Research Policy*, 33(6-7)
- Birkett E.(2020), “Route ‘35: How a California-style ZEV Mandate Can Deliver the Phase-out of Petrol and Diesel Cars”, *Policy Exchange*
- Borda N. et al.(2022), “Hydrogen in tomorrow’s world: Destination or aspiration”, *Energy Transition*
- Bright, M.(2021), *Surveying the U.S. Federal CCS Policy Landscape in 2021*, Global CCS Institute.
- Bruce S. et al.(2018), *National Hydrogen Roadmap*, CSIRO
- CEFC(2021), “Australian Hydrogen Market Study”, *CEFC*
- Clean Hydrogen Partnership(2022), *Clean Hydrogen Joint Undertaking: Strategic Research and Innovation Agenda 2021-2027*, Clean Hydrogen Partnership
- Cleff T. and Rennings K.(2016), “Are There First Mover Advantages for Producers of Energy-efficient Appliances? The Case of Refrigerators”, *Utilities Policy*, 42
- Dekimpe M., Parker P., and Sarvary M.(2000), “Multi-market and Global Diffusion: A Research Agenda” in *New- Product Diffusion Models*
- Department of Mines, Industry Regulation and Safety(2022), “Dangerous Goods Safety Guide: Storage, Handling and Production of Hydrogen”, *Government of Western Australia*

- European Commission(2005), *Communication from the Commission - Implementing the Community Lisbon Programme: A Policy Framework to Strengthen EU Manufacturing - Towards a More Integrated Approach for Industrial Policy*, Brussels: Communication from the Commission quoted in European Union (2011), *Final Evaluation of the Lead Market Initiative*, Brussels: European Commission
- Friedmann, S. J., Argawal, M. and A. Bhardwaj(2021). *Evaluating Net-Zero Industrial Hubs in the United States: A Case Study of Houston*, Columbia University: Center on Global Energy Policy.
- Global CCS Institute(2020), *Global status of CCS 2020*, Australia.
- Hardman S. *et al.*(2018), “Driving the Market for Plug-in Vehicles: Understanding ZEV Mandates”, *Policy GUIDE*
- HM Government(2020a), *The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution*, HM Government
- _____ (2020b), *Energy White Paper: Powering Our Net Zero Future*, HM Government
- _____ (2021a), *Industrial Decarbonisation Strategy*, HM Government
- _____ (2021b), *Net Zero Strategy: Build Back Greener*, HM Government
- HM Government(2022), *British Energy Security Strategy*, HM Government
- Hydrogen Council and McKinsey & Company(2022), *Hydrogen Insights 2022*, Hydrogen Council and McKinsey & Company.
- IEA(2020), *Energy Technology Perspectives 2020: CCUS in Clean Energy Transitions*, IEA Publication
- IEA(2021), *Global Hydrogen Review 2021*, IEA Publication
- IEA(2022), *Global Hydrogen Review 2022*, IEA Publication
- Johnson Matthey *et al.*(2021), *HyNet Low Carbon Hydrogen Plant(Phase 2 Report for BEIS)*
- Jones A. and Lawson A.(2022), Carbon Capture and Sequestration (CCS) in the United States, *Congressional Research Service*
- Lazerges R. *et. al.*(2021), “Clean hydrogen in France”, *Allen & Overy*
- Moawad, B. *et al.*(2019), “California and Québec’s ZEV Mandates Description”, *Navius Research*
- Peterson D., Vickers, J., and DeSantis D.(2020), “DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record 19009:

Hydrogen Production Cost from PEM Electrolysis-2019”, *DOE*

Porter M.(1990), “The Competitive Advantage of Nations”, *Harvard Business Review*, 68(2)

_____(1998), “Clusters and the New Economics of Competition”, *Harvard Business Review*, 76(6)

Progressive Energy, Johnson Matthey, and SNC·LAVALIN(2019), *BEIS Hydrogen Supply Programme: HyNet Low Carbon Hydrogen Plant(Phase 1 Report for BEIS)*, Progressive Energy, Johnson Matthey, and SNC·LAVALIN

Rennings K. and Smidt W.(2008), “A Lead Market Approach Towards the Emergence and Diffusion of Coal-fired Power Plant Technology”, *Economia Politica*, 27(2)

Rivkin, C. et al.(2015), “Hydrogen Technologies Safety Guide”, *NREL*

Samsun R. et al.(2021), *Deployment Status of Fuel Cells in Road Transport: 2021 Update*, Forschungszentrum Jülich GmbH

Verfondern K. et al.(2021), *Handbook of Hydrogen Safety: Chapter on LH2 Safety(ver: 4.0)*, PRESLHY

World Steel Association(2020), *Steel Statistical Yearbook 2020 concise version*, World Steel Association

경제산업부(2020), 「수소·연료전지전략로드맵의 달성을 위한 대응방안」

[웹사이트]

권예슬(2019), 「값비싼 백금 촉매, 구멍 송송 뚫린 나노 촉매로 대체」, 『ibs 기초과학연구원 Research News』, ibs 기초과학연구원, 1.10, 2022.10.21. 접속, https://www.ibs.re.kr/cop/bbs/BBSMSTR_00000000735/selectBoardArticle.do?nttId=16724

김성진(2019), 「포항 CCS사업 '지진과 무관' 조사결과에도 재개 결정 늦춰」, 『연합뉴스』, 5.24, 2022.10.17. 접속, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20190524111800003>

김소연(2021), 「진정한 수소경제 실현하려면...생산·저장·운송 ‘삼박자’ 맞아 떨어져야」, 『동아사이언스』, 8.14, 2022.10.19. 접속, <https://m.dongascience.com/news.php?idx=48642>

박경석(2022), 「국내 해양 시추를 통해 대규모 CO2 저장소 후보지 탐사 개시」, 『에코타임즈』, 7.1, 2022.10.19. 접속, <http://www.ecotiger.co.kr/news/articleView.html?idxno=41545>

- 수소융합얼라이언스(2022), 수소전문기업 지정 현황(2022년 8월 기준), 2022.10.21. 접속, https://www.h2korea.or.kr/sub/sub03_01.php?boardid=notice&mode=view&idx=145&sk=&sw=&offset=&category=
- 신재근(2021), 「수소법 개정 ‘산 넘어 산’...속타는 기업들」, 『한국경제』, 12.28, 2022.10.19. 접속, <https://www.wowtv.co.kr/NewsCenter/News/Read?articleId=A202112280123>
- 양인범(2021), 「한국전기연구원, 액체수소 생산 및 장기 저장 기술 개발 성공」, 『가스신문』, 10.19, 2022.10.20. 접속, <http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=101291>
- 이종수(2022), 「동해가스전, ‘블루수소’ 생산 기폭제 된다」, 『월간수소경제』, 1.1, 2022.10.18. 접속, <https://h2news.kr/mobile/article.html?no=9481>
- 전력거래소 전력통계정보시스템(2020), 발전기 세부내역(2020년 기준), 2022.10.11. 접속, <https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkfaFcIDtlChart.do?menuId=020600>
- 정종학(2021), 「동해-1, 2 가스전 현황」, 『한국석유공사』, 12.31, 2022.10.13. 접속, https://www.knoc.co.kr/sub03/sub03_1_4.jsp
- 정휘(2017), 「포항 앞바다 ‘탄소 포집 저장기술(CCS)’ 지진유발 가능성 경고」, 『프레시안』, 12.7, 2022.10.17. 접속, <https://www.pressian.com/pages/articles/178756>
- 중소벤처기업, 「부산 암모니아 친환경에너지 규제자유특구」, 2022.10.21. 접속, <http://rfz.go.kr/?menuno=258>
- 중소벤처기업부 보도자료, 「친환경 이동수단(모빌리티) 관련 규제자유특구 3개 신규지정!」, 2022.10.21. 접속, <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156519697>
- 중소벤처기업부, 「규제자유특구란」, 2022.10.21. 접속, <http://rfz.go.kr/?menuno=66>
- 최민경(2022), 「‘블루수소’에 이어 ‘핑크수소’까지...“청정수소 범위 넓혀야”」, 『머니투데이』, 6.21, 2022.10.19. 접속, <https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2022062015523569337>
- 한국가스공사(2022), 천연가스사업 생산현황(2022.1.1. 기준), 2022.10.21. 접속, <https://www.kogas.or.kr:9450/site/koGas/1030303010000>
- 한국산업단지공단(2021), 2021년 주요 국가산업단지 산업동향 각 월 통계표, 2022.10.11. 접속, https://www.kicox.or.kr/user/bbs/BD_selectBbsList.do?q_bbsCode=1036&q_clCode=1
- 한국산업단지공단(2021), 산업단지현황지도(2021년 12월 말 기준), 2022.10.11. 접속, <https://www.kicox.or.kr/home/mwrc/policyRsrch/fdrmPblictN/fdrmPblictN04.jsp>

- 한국지질자원연구원(2022), 「서해 군산분지 해양 대심도 탐사 시추 플랫폼 기공식」, 『한국지질자원연구원』, 7.6, 2022.10.13. 접속, https://www.kigam.re.kr/gallery.es?mid=a10703010000&bid=0003&b_list=8&act=view&list_no=3159&nPage=2&vlist_no_npage=0&keyField=&keyWord=&orderby=
- Appunn K.(2021), “Use Existing Infrastructure for Hydrogen to Reduce System Costs, Accelerate Transition – Govt Advisors”, Clean Energy Wire, 6.19, 2022.10.20. 접속, <https://www.cleanenergywire.org/news/use-existing-infrastructure-hydrogen-reduce-system-costs-accelerate-transition-govt-advisors>
- bcc Research(2022), *Carbon Capture, Utilization & Storage Technologies*, 2022.10.25. 접속, <https://www.bccresearch.com/market-research/energy-and-resources/carbon-capture-and-storage-market.html>
- CEQ(2021), Council on Environmental Quality Report to Congress on Carbon Capture, Utilization, and Sequestration, Washington D.C.: White House, 2022.10.12. 접속, <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/06/CEQ-CCUS-Permitting-Report.pdf>.
- CSIS(2020), “China’s Hydrogen Industrial Strategy”, 2022.10.13. 접속, <https://www.csis.org/analysis/china-hydrogen-industrial-strategy>
- CSIS(2021), “Japan’s Hydrogen Industrial Strategy”, 2022.10.13. 접속, <https://www.csis.org/analysis/japan-hydrogen-industrial-strategy>
- DOE(2022), “Biden Administration Launches \$3.5 Billion Program To Capture Carbon Pollution From The Air”, Renewable Carbon News, 5.19, 2022.10.14. 접속, <https://www.energy.gov/articles/biden-administration-launches-35-billion-program-capture-carbon-pollution-air-0>
- DOE/NETL(2015), NATCARB/ATLAS, 2022.10.14. 접속, <https://www.netl.doe.gov/coal/carbonstorage/strategic-program-support/natcarb-atlas>
- Gardiner J.(2021), “The Humber and Teesside Join Forces to Form the East Coast Cluster and Decarbonise Almost Half of UK Industrial Cluster Emissions”, Net Zero Teesside, 6.8, 2022.10.12. 접속, <https://www.netzeroteesside.co.uk/news/the-humber-and-teesside-join-forces-to-form-the-east-coast-cluster-and-decarbonise-almost-half-of-uk-industrial-cluster-emissions/>
- Gov.UK.(2018), *CCUS Cost Challenge Taskforce*, 2022.10.15. 접속, <https://www.gov.uk/government/groups/ccus-cost-challenge-taskforce>
- HyNet North West(2022), *The HyNet North West Hydrogen Pipeline*, 2022.10.19. 접속, <https://www.hynet>

hydrogenpipeline.co.uk

KOSIS 국가통계포털, 국가통계포털 1인당 자동차 등록대수, 2022.10.25. 접속, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1YL20731

KOTRA 해외시장뉴스(2021), 「독일 수소경제 확대에 인프라 관련 한국 기업에 새로운 수출 기회」, 2022.10.15. 접속, https://dream.kotra.or.kr/kotranews/cms/news/actionKotraBoardDetail.do?SITE_NO=3&MENU_ID=180&CONTENTS_NO=1&bbsGbn=243&bbsSn=243&pNttSn=188050

Marsh(2022), Hydrogen in the UK: Challenges of a clean hydrogen strategy, 2022.10.15. 접속, <https://www.marsh.com/uk/industries/energy-and-power/insights/hydrogen-in-uk-challenges-of-clean-hydrogen-strategy.html>

OECD, “OECE Statistics”, OECD.Stat, 2022.10.21. 접속, <https://stats.oecd.org>

Repowering the Black Country(2022), UK Industrial Clusters Decarbonisation, 2022.10.11. 접속, <https://zerocarbonhubs.co.uk/industrial-clusters.html>

Research and Markets(2022), Global Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Market (2022-2027) by Service, Technology, End-Use Industry, Geography, Competitive Analysis, and the Impact of Covid-19 with Ansoff Analysis, 2022.10.25. 접속, <https://www.researchandmarkets.com/reports/5601480/global-carbon-capture-utilization-and-storage>

SNECI(2021), France and the hydrogen deployment plan, 2022.10.15. 접속, <https://www.sneci.com/blog/france-and-the-hydrogen-deployment-plan/>

The Business Research Company(2022), Carbon Capture, Utilization, and Storage Market Grows At Large Rate Over 17%, 2022.10.25. 접속, <https://www.prnewswire.com/news-releases/carbon-capture-utilization-and-storage-market-grows-at-large-rate-over-17-301549791.html>

U.S. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Hydrogen Production, 2022.10.15. 접속, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production>

Yuki(2020), “2019 China Hydrogen Market Review: Investment & Production”, Energy Iceberg, 2.12, 2022.10.21. 접속, <https://energyiceberg.com/china-hydrogen-market-2019/>

별첨



- [별첨 1] CCUS 정책 우선순위 도출을 위한 정책과제별 평가지표 가중치 결과
- [별첨 2] CCUS 정책 우선순위 도출 결과
- [별첨 3] 수소 선도시장 분석(생산부문) 설문조사지
- [별첨 4] 수소 선도시장 분석(저장·운송 부문) 설문조사지
- [별첨 5] 수소 선도시장 분석(활용 부문) 설문조사지
- [별첨 6] CCUS관련 정책 우선순위 마련을 위한 지표선정관련 전문가 설문조사
- [별첨 7] CCUS 산업 클러스터 조성방안 설문조사지
- [별첨 8] 수소 서면자문 명단
- [별첨 9] CCUS 서면자문 명단

[별첨 1] CCUS 정책 우선순위 도출을 위한 정책과제별 평가지표 가중치 결과

응답자A	구분	정부정책 부합성	파급 효과	시급성
	정부정책 부합성	1	3	4
	파급 효과	0.333333333	1	3
	시급성	0.25	0.333333333	1
응답자B	정부정책 부합성	1	7	5
	파급 효과	0.142857143	1	0.2
	시급성	0.2	5	1
	정부정책 부합성	1	1	1
응답자C	정부정책 부합성	1	1	1
	파급 효과	1	1	1
	시급성	1	1	1
	정부정책 부합성	1	4	6
응답자D	정부정책 부합성	1	4	6
	파급 효과	0.25	1	3
	시급성	0.166666667	0.333333333	1
	정부정책 부합성	1	0.5	0.3333333
응답자E	정부정책 부합성	1	0.5	0.3333333
	파급 효과	2	1	0.5
	시급성	3	2	1
	정부정책 부합성	1	3	5
응답자F	정부정책 부합성	1	3	5
	파급 효과	0.333333333	1	4
	시급성	0.2	0.25	1
	정부정책 부합성	1	4	5
응답자G	정부정책 부합성	1	4	5
	파급 효과	0.25	1	3
	시급성	0.2	0.333333333	1
	정부정책 부합성	1	0.333333333	3
응답자H	정부정책 부합성	1	0.333333333	3
	파급 효과	3	1	6
	시급성	0.333333333	0.166666667	1
	정부정책 부합성	1	3	5
응답자I	정부정책 부합성	1	3	5
	파급 효과	0.333333333	1	2
	시급성	0.2	0.5	1
	정부정책 부합성	1	2	4
응답자J	정부정책 부합성	1	2	4
	파급 효과	0.5	1	2
	시급성	0.25	0.5	1

[별첨 2] CCUS 정책 우선순위 도출 결과

응답자	차별화된 R&D 지원제도 수립			시장활성화와 수요처 확대를 위한 제도 마련			CCUS 산업활성화를 위한 산업 클러스터 조성			감축량 산정 방안 마련 및 국제적 협의			국내 CCUS 관련 킷트를 타워 수립			CCUS에 대한 사회적 수용성 제고			CCUS 관련 협력체계 구축 및 교류의 장 마련		
	1-1	1-2	1-3	1-1	1-2	1-3	1-1	1-2	1-3	1-1	1-2	1-3	1-1	1-2	1-3	1-1	1-2	1-3	1-1	1-2	1-3
A	7	7	6	6	5	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	6	5	5	6	6	6
B	7	6	7	7	6	7	5	6	6	5	6	6	6	5	6	6	5	5	5	4	5
C	6	5	6	6	6	7	7	7	4	4	7	4	4	4	4	3	4	5	4	4	4
D	5	5	6	6	6	7	7	6	5	4	6	5	5	4	4	4	4	4	5	5	5
E	5	5	5	5	5	6	6	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4
F	6	4	4	5	6	7	6	4	5	6	6	5	4	4	5	7	5	6	5	4	4
G	4	5	5	5	4	7	7	6	4	5	4	6	5	4	4	4	4	3	4	4	3
H	6	6	5	7	6	7	6	7	6	5	6	6	4	4	4	5	4	4	5	5	4
I	5	6	5	6	5	4	5	4	5	5	7	6	5	5	5	5	5	4	5	6	7
J	6	5	4	6	6	3	3	3	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	5	5	4
점수	57	54	53	59	58	52	61	59	48	49	52	55	48	48	44	48	44	44	48	47	46
가중치	0.542 255	0.285 204	0.171 826	0.542 255	0.285 204	0.171 826	0.542 255	0.285 204	0.171 826	0.542 255	0.285 204	0.171 826	0.542 255	0.285 204	0.171 826	0.542 255	0.285 204	0.171 826	0.542 255	0.285 204	0.171 826
종합 점수	30.90 852	15.40 101	9.106 803	31.99 303	16.54 182	8.934 976	33.07 754	16.82 703	13.97 499	8.934 976	29.82 401	13.68 979	8.247 67	26.02 823	12.54 897	26.02 823	7.560 364	13.40 458	26.02 823	13.40 458	7.904 017
	55.41 633		57.46 983			58.83 954				48.93 819		51.76 146			46.13 756			47.33 682			

[별첨 3] 수소 선도시장 분석(생산부문) 설문조사지

[수소 선도시장 분석] 전문가 자문 요청 - 국내 수소 생산부문의 지향점 도출과 이슈 진단-

녹색기술센터 정책연구부 / 2022.8.18.

1. 연구의 배경 및 목적

- (배경) 우리나라는 2050 탄소중립을 달성하기 위하여 수소를 핵심수단으로 내세우고 있으나, 각 수소 가치사슬(생산, 저장·수송, 활용)에 대하여 주요국과 비교한 엄밀한 현주소 진단은 부재
- (목적) 우리나라의 각 수소 가치사슬의 현황을 국제 비교를 통해 진단하고, 현재의 주요 이슈를 극복할 수 있는 수소 활성화 이행방안 마련

2. 전문가 자문 개요

- (자문 내용) 우리나라 수소 생산부문의 주요 요소별 진단 결과를 바탕으로, △ 각 요소별 우리나라의 실현 가능한 지향점 △ 지향점을 추구함에 있어 우리나라의 장애요인 및 주요 이슈, △ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 방안
- (자문 방식) 서면 방식으로 하며 아래 양식[붙임1]에 맞게 작성하여 **8월 31일(수) 까지** 아래 이메일*로 회신
 - * 이메일: gchoi0322@gtck.re.kr (정책연구부 최고봉 연구원)
- (자문비 지급) 센터 내 규정에 따라 30만 원 이내로 책정

붙임1

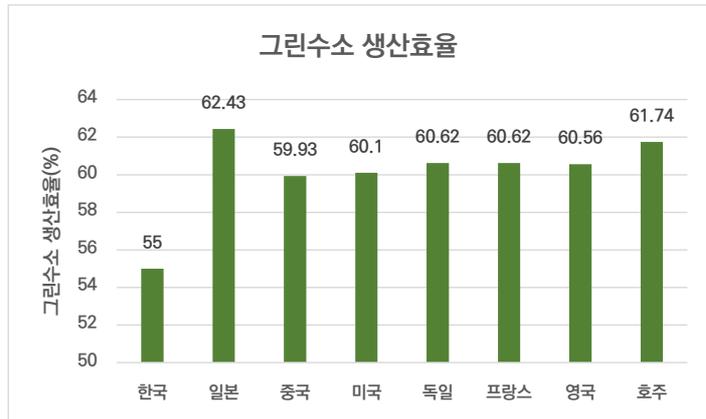
자문 작성양식

기관명		부서명	
성함 및 직책			

자문 주제: 국내 수소 생산부문 관련 지향점 도출과 이슈 진단

[진단 1. 그린수소 생산기술]
현재 우리나라의 그린수소 생산효율은 약 55%로, 주요국의 생산기술에 비해 상대적으로 낮은 것으로 진단됨

[그린수소 생산효율: 전기 1kWh 사용 시 생산할 수 있는 수소의 질량]



1-1. 우리나라 그린수소 생산기술 개선의 지향점

○ 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 **2050년까지 우리나라가 달성해야 하는 실현 가능한 그린수소 생산효율 수치를 55~80% 범위내에서 제시**

※ (참조) 국내 현 수준 55%, 제1차 수소경제 이행 기본계획상 국내 목표 2030년 기준 69%, 2050년 기준 77%, 이론적 한계치 약 83%

※ (예시) 60%

()%

1-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

○ 그린수소 생산기술에 있어서 우리나라의 강점 및 한계점

-

-

- 우리나라의 기술적 성과창출(생산 효율 향상 등)을 저해하는 요인

-
-

1-3. 상기 장애요인 및 주요 이슈를 해결하기 위한 주요 방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

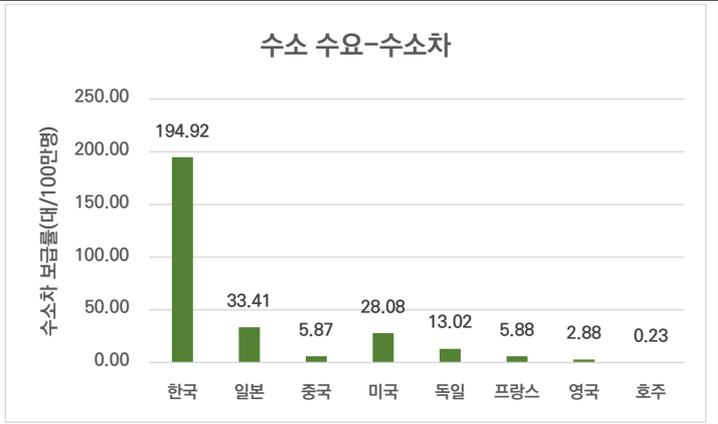
- (그린수소 생산기술에 있어 우리나라의 한계점 해결을 위한 방안)

-

- (우리나라의 기술적 성과 창출의 저해요인에 대한 해결방안)

-

[진단 2. 수소생산 수요]
현재 우리나라의 수소차 보급률은 약 100만명 당 194.92대로, 주요국의 수소 수요에 비해 상대적으로 높은 것으로 진단됨



2-1. 우리나라의 수소 수요 확대의 지향점

- 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 2050년까지 우리나라가 달성해야 하는 실현 가능한 수소차 보급률 수치를 0~80% 범위 내에서 제시
 - ※ (참조) 국내 현 수준 1%, 2050 탄소중립 시나리오상 2050년 국내 수소차 등 무공해차량 보급 목표 17%, 전기차 보급 목표 80%
 - ※ (예시) 60%
 - ()%

- 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 2050년까지 우리나라가 달성해야 하는 연료전지 발전 비중 수치를 0~30% 범위 내에서 제시
 - ※ (참조) 국내 현 수준 0.6%, 2050 탄소중립 시나리오상 2050년 국내 연료전지 발전 비중 목표 1.4%(A안), 10.1%(B안)
 - ※ (예시) 20%
 - ()%

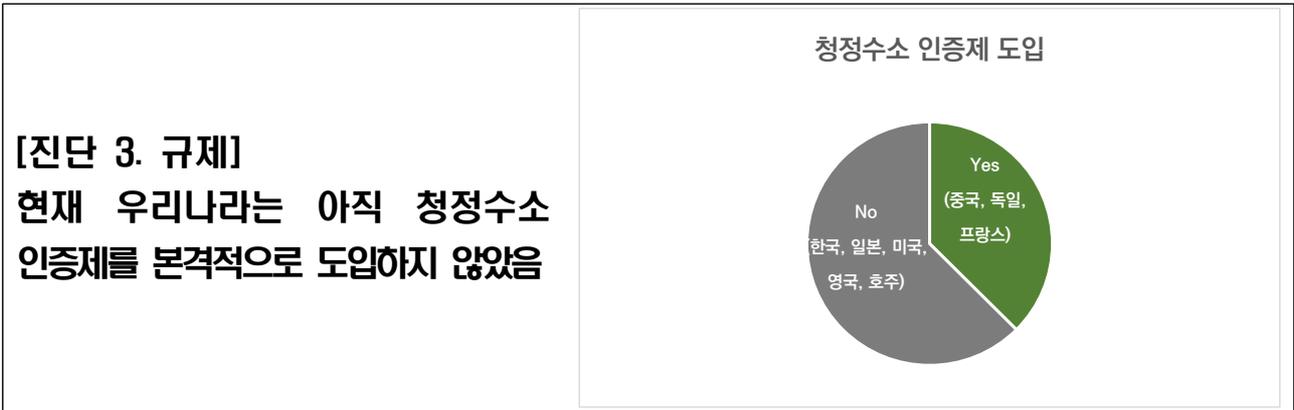
- 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 2050년까지 우리나라가 달성해야 하는 실현 가능한 무탄소 가스발전 비중 수치를 0~40% 범위 내에서 제시
 - ※ (참조) 국내 현 수준 0%, 2050 탄소중립 시나리오상 국내 무탄소 가스발전 비중 목표 21.4%(A안), 13.8%(B안)
 - ※ (예시) 20%
 - ()%

2-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 수소차 보급 확대의 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -
- 연료전지 발전 확대의 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -
- 무탄소 가스발전 확대의 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -
- 탄소 다배출 업종에서 수소 활용의 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -

2-3. 상기 주요 이슈를 개선하기 위한 주요 제도적·기술적 해결방안

- ※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요
- (수소차 보급 확대 측면의 장애요인 극복방안)
 -
- (연료전지 발전 확대 측면의 장애요인 극복방안)
 -
- (무탄소 가스 발전 확대 측면의 장애요인 극복방안)
 -
- (탄소 다배출 업종에서의 수소 활용 측면의 장애요인 극복방안)
 -



3-1. 우리나라의 청정수소 인증제가 추구해야 할 지향점

- 청정수소 인증 대상에 포함될 배출량의 범위(무탄소, 저탄소 등)
 - ※ (참조) EU는 천연가스 추출수소 생산의 이산화탄소 배출량 91gCO_{2eq}/MJH₂를 기준으로 이산화탄소를 60% 이상 감축할 수 있는 수소부터 저탄소 프리미엄 수소라고 인증함
 -
 -
- 인증된 청정수소의 사용이 의무화가 되어야 하는 산업의 범위
 -
 -

3-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 우리나라의 장애요인 및 이슈

- 수소 생산 측면에서의 장애요인 및 이슈
 -
 -
- 수소 활용 측면에서의 장애요인 및 이슈
 -
 -
- 청정수소 인증제 도입 시 제도적으로 고려해야 할 사항
 -
 -

3-3. 상기 주요 이슈를 개선하기 위한 주요 제도적·기술적 해결방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

○ (수소 생산 측면에서의 장애요인 및 이슈 해결을 위한 방안)

-

○ (수소 활용 측면에서의 장애요인 및 이슈 해결을 위한 방안)

-

○ (청정수소 인증제 도입 시 예상되는 주요 이슈 해결을 위한 방안)

-

[진단 4. 그린수소 특허]

현재 우리나라의 그린수소수전해 관련 특허 점유율은 약 8.25%로, 주요국의 특허 점유율에 비해 상대적으로 낮은 것으로 진단됨



4-1. 우리나라의 그린수소 특허 확보의 지향점

- 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 수소기술을 선도하기 위해 **우리나라가 달성해야 하는 실현 가능한 그린수소 특허 점유율 수치를 10~50% 범위 내에서 제시**

※ (예시) 30%

()%

4-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 국내외 특허출원·등록과 관련된 우리나라 여건 또는 정책의 강점 및 한계점

-
-

- 그린수소(수전해) 분야 특허 중 우리나라가 집중적으로 출원·등록하고 있는 분야

-
-

- 그린수소(수전해) 분야 중 더 적극적인 지식재산권을 확보가 필요한 분야

-
-

4-3. 장애요인 및 주요 이슈를 해결하기 위한 주요 제도적·기술적 방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

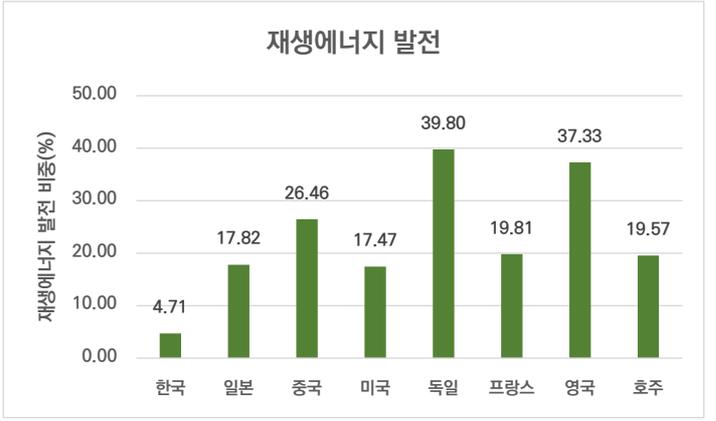
○ (국내외 특허출원 및 등록과 관련된 우리나라 정책의 한계점을 극복하기 위한 방안)

-

○ (적극적인 지식재산권 확보를 위한 방안)

-

[진단 5. 재생에너지 발전]
현재 우리나라의 재생에너지 발전 비중은 약 4.71%로, 주요국의 재생에너지 발전 비율에 비해 상대적으로 낮은 것으로 진단



5-1. 우리나라의 재생에너지 발전 비중 확대의 지향점

- 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 **우리나라가 달성해야 하는 실현 가능한 재생에너지 발전 비중 수치를 10~80% 범위 내에서 제시**
- ※ (참조) 국내 현 수준 4.71%, 2050 탄소중립 시나리오상 2050년 재생에너지 발전 비중 목표 70.8%(A안), 60.9%(B안)
- ※ (예시) 20%
 ()%

5-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 재생에너지 발전 비중을 확대하는 데 있어서 국내 재생에너지 잠재량 외 장애요인
 -
 -
- 재생에너지 전력을 수소생산에 활용하는 데 있어서 한계점 및 장애요인
 -
 -

5-3. 장애요인 및 주요 이슈를 해결하기 위한 주요 제도적·기술적 방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

- (재생에너지 발전 비중 확대에 있어 장애요인에 대한 해결방안)
-
- (재생에너지 전력의 수소생산에의 활용에 있어 장애요인에 대한 해결방안)
-

[별첨 4] 수소 선도시장 분석(저장·수송 부문) 설문조사지

[수소 선도시장 분석] 전문가 자문 요청 - 국내 수소 저장·수송 부문의 지향점 도출과 이슈 진단 -

녹색기술센터 정책연구부 / 2022.8.18.

1. 연구의 배경 및 목적

- (배경) 우리나라는 2050 탄소중립을 달성하기 위하여 수소를 핵심수단으로 내세우고 있으나, 각 수소 가치사슬(생산, 저장·수송, 활용)에 대하여 주요국과 비교한 엄밀한 현주소 진단은 부재
- (목적) 우리나라의 각 수소 가치사슬의 현황을 국제 비교를 통해 진단하고, 현재의 주요 이슈를 극복할 수 있는 수소 활성화 이행방안 마련

2. 전문가 자문 개요

- (자문 내용) 우리나라 수소 저장·수송 부문의 주요 요소별 진단 결과를 바탕으로, △ 각 요소별 우리나라의 실현 가능한 지향점 △ 지향점을 추구함에 있어 우리나라의 장애요인 및 주요 이슈, △ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 방안
- (자문 방식) 서면 방식으로 하며 아래 양식[붙임1]에 맞게 작성하여 8월 31일(수) 까지 아래 이메일*로 회신
 - * 이메일: gchoi0322@gtkc.re.kr (정책연구부 최고봉 연구원)
- (자문비 지급) 센터 내 규정에 따라 30만 원 이내로 책정

붙임1 **자문 작성양식**

기관명		부서명	
성함 및 직책			

자문 주제: 국내 수소 저장·수송부문 관련 지향점 도출과 이슈 진단

[진단 1. 수소 액화플랜트 규모]
현재 우리나라는 운영 중인 수소 액화플랜트가 존재하지 않으며, 주요국에 비해 낮은 경쟁력을 가진 것으로 진단됨

국가	규모 (ton/day)
한국	0
일본	26.7
중국	0.60
미국	252
독일	14.80
프랑스	10.50
영국	0.00
호주	0.25

1-1. 우리나라 수소 액화플랜트 규모의 지향점

○ 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 2050년까지 우리나라가 달성해야 할 실현 가능한 수소 액화플랜트 규모

※ (참조) 「제1차 수소경제 이행 기본계획」에 따르면 우리나라는 수소 액화플랜트를 '30년까지 구축할 예정이며, 평택('30년, 2만톤/년), 통영('26년, 1만톤/년), 인천('23년, 3만톤/년), 울산('23년, 1.3만톤/년), 창원('23년, 1,650톤/년)의 계획을 합산할 경우 약 74,650톤/년(204톤/일) 규모에 해당함 () 톤/일 또는 () 만톤/년

1-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 수소 액화플랜트 확보 관련 기술적 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -

- 수소 액화플랜트 확보 관련 제도적 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -

1-3. 상기 장애요인 및 주요 이슈를 해결하기 위한 주요 제도적·기술적 방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

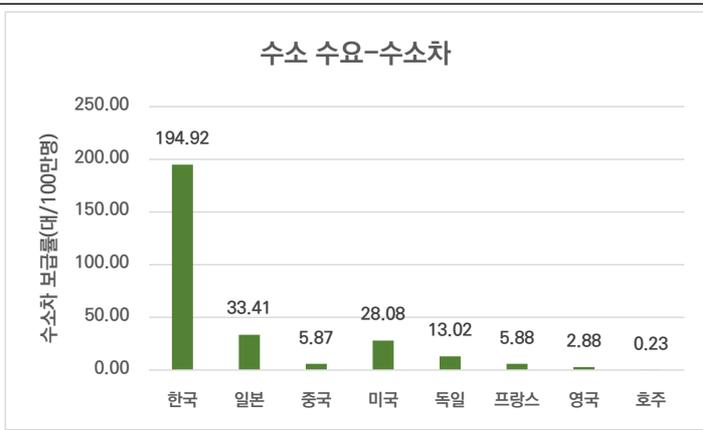
○ (수소 액화플랜트 확보 관련 기술적 장애요인에 대한 해결방안)

-

○ (수소 액화플랜트 확보 관련 제도적 장애요인에 대한 해결방안)

-

[진단 2. 수소저장·수송 수요]
현재 우리나라의 수소차 보급률은 약 100만명 당 194.92대로, 주요국의 수소 수요에 비해 상대적으로 높은 것으로 진단됨



2-1. 우리나라의 수소 수요 확대의 지향점

○ 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 2050년까지 우리나라가 달성해야 하는 실현 가능한 수소차 보급률 수치를 0~80% 범위 내에서 제시

※ (참조) 국내 현 수준 1%, 2050 탄소중립 시나리오상 2050년 국내 수소차 등 무공해차량 보급 목표 17%, 전기차 보급 목표 80%

※ (예시) 60%

()%

○ 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 2050년까지 우리나라가 달성해야 하는 연료전지 발전 비중 수치를 0~30% 범위 내에서 제시

※ (참조) 국내 현 수준 0.6%, 2050 탄소중립 시나리오상 2050년 국내 연료전지 발전 비중 목표 1.4%(A안), 10.1%(B안)

※ (예시) 20%

()%

○ 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 2050년까지 우리나라가 달성해야 하는 실현 가능한 무탄소 가스발전 비중 수치를 0~40% 범위 내에서 제시

※ (참조) 국내 현 수준 0%, 2050 탄소중립 시나리오상 국내 무탄소 가스발전 비중 목표 21.4%(A안), 13.8%(B안)

※ (예시) 20%

()%

2-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 수소차 보급 확대의 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -
- 연료전지 발전 확대의 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -
- 무탄소 가스발전 확대의 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -
- 탄소 다배출 업종에서 수소 활용의 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -

2-3. 상기 주요 이슈를 개선하기 위한 주요 제도적·기술적 해결방안

- ※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요
- (수소차 보급 확대 측면의 장애요인 극복방안)
 -
- (연료전지 발전 확대 측면의 장애요인 극복방안)
 -
- (무탄소 가스 발전 확대 측면의 장애요인 극복방안)
 -
- (탄소 다배출 업종에서의 수소 활용 측면의 장애요인 극복방안)
 -

[진단 3. 수소 저장·수송·활용 특허]
현재 우리나라의 수소 저장·수송·활용 관련 특허 점유율은 약 9.32%로, 주요국의 점유율에 비해 상대적으로 낮은 것으로 진단됨



3-1. 우리나라의 수소 저장·수송·활용 특허 확보의 지향점

- 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 우리나라가 달성하여야 하는 실현 가능한 그린수소 특허 점유율 수치를 10~40% 범위 내에서 제시

※ (예시) 20%
 ()%

3-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 국내외 특허출원·등록과 관련된 우리나라 여건 또는 정책의 강점 및 한계점
 -
 -
- 수소 저장·수송 분야 특허 중 우리나라가 집중적으로 출원·등록하고 있는 분야
 -
 -
- 수소 저장·수송 분야 중 더 적극적인 지식재산권을 확보가 필요한 분야
 -
 -

3-3. 장애요인 및 주요 이슈를 해결하기 위한 주요 제도적·기술적 방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

○ (국내외 특허출원 및 등록 관련 우리나라 정책의 한계점을 극복하기 위한 방안)

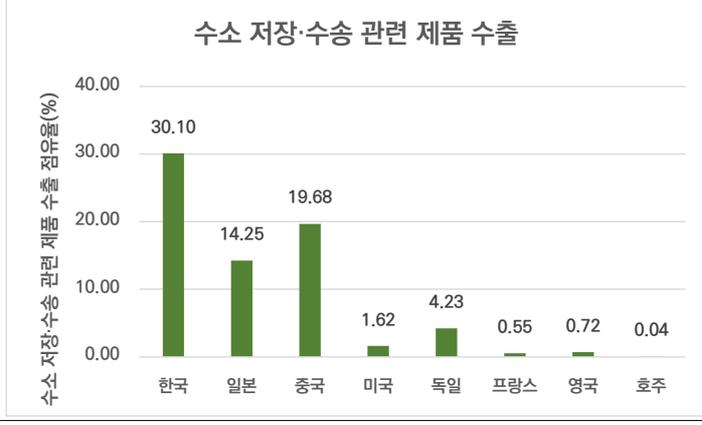
-

○ (적극적인 지식재산권 확보를 위한 방안)

-

[진단 4. 수소 저장·수송관련 수출]
현재 우리나라의 수소 저장·수송관련
제품의 수출 점유율은 약 30.1%로
주요국의 점유율에 비해 상대적으로
높은 것으로 진단됨

[수소 저장·수송관련 제품: 탱커, 트레일러, 압축액화가스용 절강용기, 절강 파이프라인, 탱커선박]



4-1. 우리나라의 수소 저장·수송관련 제품의 수출 지향점

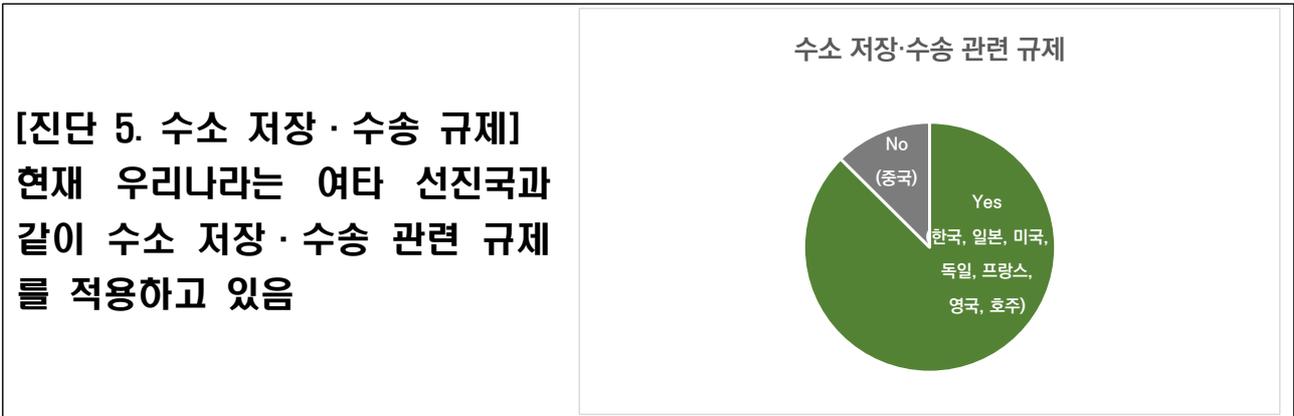
- 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 우리나라가 달성해야 하는 실현 가능한 수소 저장·수송관련 제품 수출 점유율 수치를 10~50% 범위 내에서 제시
 ※ (예시) 20%
 ()%

4-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 수소 저장·수송 관련 제품 개발에 있어 우리나라의 강점 및 한계점
 -
 -
- 수소 저장·수송 관련 제품의 해외판로 확보 및 수출시장 점유율을 확대하는 데 있어 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -

4-3. 장애요인 및 주요 이슈를 해결하기 위한 주요 제도적·기술적 방안

- ※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요
- (수소 저장·수송 관련 제품 개발에 있어 우리나라의 한계점에 대한 극복방안)
 -
- (해외판로 확보 및 수출시장 점유 확대에 있어 장애요인에 대한 해결방안)
 -



5-1. 우리나라의 수소 저장·수송 관련 규제가 추구해야 할 지향점

- 현 수소 저장·수송 관련 규제의 장점 및 단점
 -
 -
- 현 수소 저장·수송 관련 규제의 적합성
 -
 -

5-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 수소 생산 측면에서의 장애요인 및 이슈
 -
 -
- 수소 활용 측면에서의 장애요인 및 이슈
 -
 -
- 수소 저장·수송 설비에 대한 주민 수용성 측면에서의 이슈
 -
 -
- 수소 저장·수송 관련 규제 개선안 마련 시 제도적으로 고려해야 할 사항
 -
 -

5-3. 장애요인 및 주요 이슈를 해결하기 위한 주요 제도적·기술적 방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

○ (수소 생산 측면에서의 장애요인 및 이슈 해결을 위한 방안)

-

○ (수소 활용 측면에서의 장애요인 및 이슈 해결을 위한 방안)

-

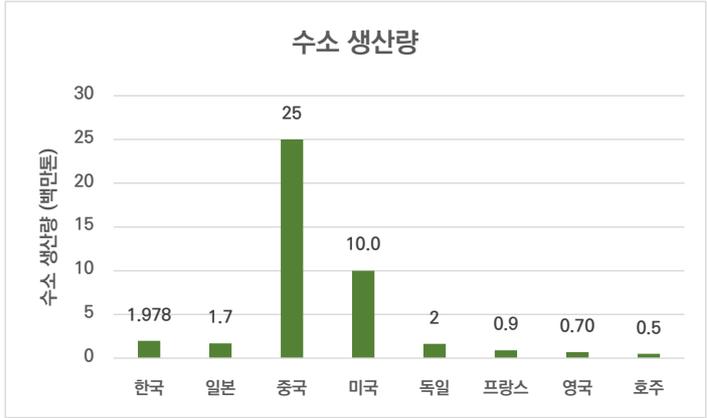
○ (주민 수용성 관련 이슈 해결을 위한 방안)

-

○ (수소 저장·수송 관련 규제 개선안 마련 시 예상되는 주요 이슈 해결을 위한 방안)

-

[진단 6. 수소의 국내 생산]
현재 우리나라의 수소 생산량은 약 198만 톤으로, 미국·중국에 비해서 낮으나 일본·독일과 유사한 수준임



6-1. 우리나라 수소 생산량의 지향점

- 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 자원안보 측면에서 원활한 수소 공급을 위해 **2050년까지 우리나라가 달성해야 하는 수소 공급량 대비 국내 생산량의 비중** 수치를 15~60% 범위 내에서 제시
 - ※ (참조) 2050 탄소중립 시나리오상 2050년 수소 공급량 중 국내 생산량의 비중 20.1%(A안), 17.9%(B안)
 - ※ (예시) 50%
() %
- 에너지 및 자원 도입선의 다변화, 현지 생산 잠재량, 청정수소 확보 가능성 여부, 도입가격 등을 종합적으로 고려했을 때 주요 수소 수입처의 우선순위
 호주: ()위, 중동: ()위, 러시아: ()위, 북아프리카: ()위

6-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 국내 수소 생산 측면에서의 장애요인 및 이슈
 -
 -
- 해외 수소 수입처 확보 측면에서의 장애요인 및 이슈
 -
 -

6-3. 장애요인 및 주요 이슈를 해결하기 위한 주요 제도적·기술적 방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

○ (국내 수소 생산 측면에서의 장애요인에 대한 해결방안)

-

○ (해외 수소 수입처 확보 측면에서의 장애요인에 대한 해결방안)

-

[별첨 5] 수소 선도시장 분석(활용 부문) 설문조사지

[수소 선도시장 분석] 전문가 자문 요청 - 국내 수소 활용 부문의 지향점 도출과 이슈 진단 -

정책연구부 / 2022.8.1.

1. 연구의 배경 및 목적

- (배경) 우리나라는 2050 탄소중립을 달성하기 위하여 수소를 핵심수단으로 내세우고 있으나, 각 수소 가치사슬(생산, 저장·수송, 활용)에 대하여 주요국과 비교한 엄밀한 현주소 진단은 부재
- (목적) 우리나라의 각 수소 가치사슬의 현황을 국제 비교를 통해 진단하고, 현재의 주요 이슈를 극복할 수 있는 수소 활성화 이행방안 마련

2. 전문가 자문 개요

- (자문 내용) 우리나라 수소 활용 부문의 주요 요소별 진단 결과를 바탕으로, △ 각 요소별 주요 이슈, 우리나라의 강점 및 한계점, △ 주요 이슈와 한계점을 극복하고 강점을 극대화하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 해결 방안과 △ 우리나라 수소 활용 부문의 지향점
- (자문 방식) 서면 방식으로 하며 아래 양식[붙임1]에 맞게 작성하여 8월 31일(수) 까지 아래 이메일*로 회신
 - * 이메일: gchoi0322@gtck.re.kr (정책연구부 최고봉 연구원)
- (자문비 지급) 센터 내 규정에 따라 30만 원 이내로 책정

붙임1 **자문 작성양식**

기관명		부서명	
성함 및 직책			

자문 주제: 국내 수소 활용 부문의 지향점 도출과 이슈 진단

[진단 1. 연료전지 발전 단가]
현재 우리나라의 연료전지 발전 단가는 1kWh당 약 240원으로, 주요국에 비해 낮은 경쟁력을 가진 것으로 진단됨

국가	발전단가 (원/kWh)
한국	240
일본	204.14
중국	383.32
미국	205.32
독일	232.00
프랑스	232.00
영국	232.00

1-1. 우리나라의 연료전지 발전단가 및 비율의 지향점

- 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 2050년까지 우리나라가 달성해야 할 실현 가능한 연료전지 발전단가 수치를 100~230원/kWh 범위 내에서 제시
 - ※ (참조) 국내 현 수준 240원/kWh, 수소 기술개발 로드맵상 2030년 목표 141원/kWh, 2040년 목표 131원/kWh
 - ※ (예시) 140원/kWh
 - ()원/kWh

1-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 연료전지 발전단가 저감 관련 기술·정책적 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -
- 연료전지 발전 기술에 있어서 우리나라의 강점 및 한계점
 -
 -

1-3. 장애요인 및 주요 이슈를 개선하기 위한 주요 제도적·기술적 해결방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

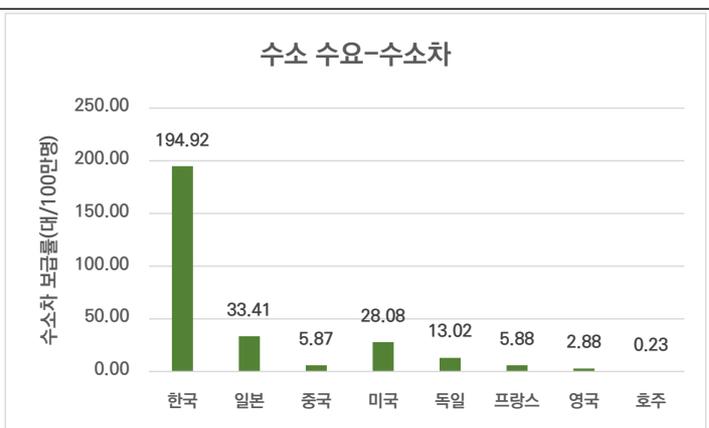
○ (연료전지 발전단가 저감에 있어 장애요인에 대한 해결방안)

-

○ (연료전지 발전 기술에 있어 우리나라의 한계점을 극복하기 위한 방안)

-

[진단 2. 수소 활용 수요]
현재 우리나라의 수소차 보급률은 약 100만명 당 194.92대로, 주요국의 수소 수요에 비해 상대적으로 높은 것으로 진단됨



2-1. 우리나라의 수소 수요 확대의 지향점

○ 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 2050년까지 우리나라가 달성해야 하는 실현 가능한 수소차 보급률 수치를 0~80% 범위 내에서 제시

※ (참조) 국내 현 수준 1%, 2050 탄소중립 시나리오상 2050년 국내 수소차 등 무공해차량 보급 목표 17%, 전기차 보급 목표 80%

※ (예시) 60%

()%

○ 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 2050년까지 우리나라가 달성해야 하는 연료전지 발전 비중 수치를 0~30% 범위 내에서 제시

※ (참조) 국내 현 수준 0.6%, 2050 탄소중립 시나리오상 2050년 국내 연료전지 발전 비중 목표 1.4%(A안), 10.1%(B안)

※ (예시) 20%

()%

○ 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 2050년까지 우리나라가 달성해야 하는 실현 가능한 무탄소 가스발전 비중 수치를 0~40% 범위 내에서 제시

※ (참조) 국내 현 수준 0%, 2050 탄소중립 시나리오상 국내 무탄소 가스발전 비중 목표 21.4%(A안), 13.8%(B안)

※ (예시) 20%

()%

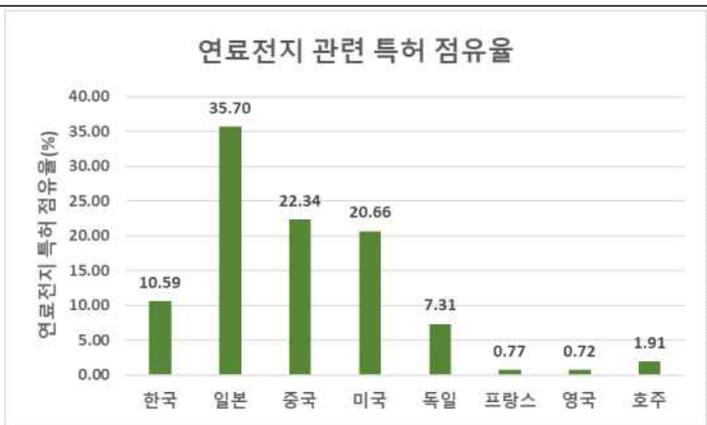
2-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 수소차 보급 확대의 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -
- 연료전지 발전 확대의 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -
- 무탄소 가스발전 확대의 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -
- 탄소 다배출 업종에서 수소 활용의 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -

2-3. 장애요인 및 주요 이슈를 개선하기 위한 주요 제도적·기술적 해결방안

- ※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요
- (수소차 보급 확대 측면의 장애요인 극복방안)
 -
- (연료전지 발전 확대 측면의 장애요인 극복방안)
 -
- (무탄소 가스 발전 확대 측면의 장애요인 극복방안)
 -
- (탄소 다배출 업종에서의 수소 활용 측면의 장애요인 극복방안)
 -

[진단 3. 연료전지 관련 특허]
현재 우리나라의 연료전지 관련 특허 점유율은 약 10.59%로, 주요국의 특허 점유율에 비해 상대적으로 낮은 것으로 진단됨



3-1. 우리나라의 연료전지 특허 확보의 지향점

- 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 우리나라가 달성하여야 하는 실현 가능한 연료전지 특허 점유율 수치를 15~40% 범위 내에서 제시

※ (예시) 20%

()%

3-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 국내외 특허출원·등록과 관련된 우리나라 여건 또는 정책의 강점 및 한계점
 -
 -
- 연료전지 분야 특허 중 우리나라가 집중적으로 출원·등록하고 있는 분야
 -
 -
- 연료전지 분야 중 더 적극적인 지식재산권을 확보가 필요한 분야
 -
 -

3-3. 장애요인 및 주요 이슈를 개선하기 위한 주요 제도적·기술적 해결방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

○ (국내외 특허출원 및 등록과 관련된 우리나라 정책의 한계점을 극복하기 위한 방안)

-

○ (적극적인 지식재산권 확보를 위한 방안)

-

<p>[진단 4. 규제]</p>	<p>전기·수소차 의무구매 규제 도입</p>
<p>현재 우리나라는 여타 선진국과 달리 전기·수소차 의무구매 규제를 적용하고 있음</p>	<p>A pie chart titled '전기·수소차 의무구매 규제 도입' (Introduction of Mandatory Purchase Regulation for Electric and Hydrogen Vehicles). The chart is divided into two segments: a small green segment labeled 'Yes (한국)' (Yes, Korea) and a large grey segment labeled 'No (중국, 일본, 미국, 독일, 프랑스, 영국, 호주)' (No, China, Japan, USA, Germany, France, UK, Australia).</p>

4-1. 우리나라의 전기·수소차 의무구매 규제가 추구해야 할 지향점

- 우리나라의 전기·수소차 의무구매 규제의 장점 및 단점
 -
 -
- 전기·수소차 의무구매 규제의 적합성
 -
 -
- 고려 가능한 여타 규제 및 제도 (주요국의 사례 벤치마킹 등)
 -
 -

4-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 수소 생산 측면에서의 장애요인 및 이슈
 -
 -
- 수소 저장·수송 측면에서의 장애요인 및 이슈
 -
 -
- 전기·수소차 의무구매 규제 개선안 마련 시 제도적으로 고려해야 할 사항
 -
 -

4-3. 장애요인 및 주요 이슈를 개선하기 위한 주요 제도적·기술적 해결방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

○ (수소 생산 측면에서의 장애요인 및 이슈 해결을 위한 방안)

-

○ (수소 활용 측면에서의 장애요인 및 이슈 해결을 위한 방안)

-

○ (전기·수소차 의무구매 규제 개선안 마련 시 예상되는 주요 이슈 해결을 위한 방안)

-

[진단 5. 연료전지 수출 점유율]
현재 우리나라의 연료전지 수출 점유율은 약 2.14%로, 주요국의 수출 점유율에 비해 상대적으로 낮은 것으로 진단됨



5-1. 우리나라의 연료전지 수출 점유율 확대의 지향점

- 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 우리나라가 달성하여야 하는 실현 가능한 연료전지 수출 점유율 수치를 5~40% 범위 내에서 제시

※ (예시) 20%
 ()%

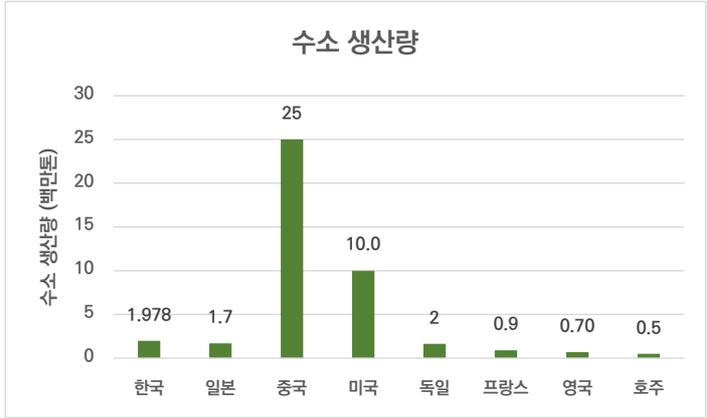
5-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 연료전지 관련 제품 개발에 있어 우리나라의 강점 및 한계점
 -
 -
- 연료전지 관련 제품의 해외판로 확보 및 수출시장 점유율을 확대하는 데 있어 장애요인 및 주요 이슈
 -
 -

5-3. 장애요인 및 주요 이슈를 개선하기 위한 주요 제도적·기술적 해결방안

- ※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요
- (연료전지 관련 제품 개발에 있어 우리나라의 한계점에 대한 극복방안)
 -
- (해외판로 확보 및 수출시장 점유 확대에 있어 장애요인에 대한 해결방안)
 -

[진단 6. 수소의 국내 생산]
현재 우리나라의 수소 생산량은 약 198만 톤으로, 미국·중국에 비해서 낮으나 일본·독일과 유사한 수준임



6-1. 우리나라의 수소 생산량의 지향점

- 우리나라 정부 계획 및 현재 국내외 사례 및 수준을 참조하여 자원안보 측면에서 원활한 수소 공급을 위해 2050년까지 우리나라가 달성해야 하는 수소 공급량 대비 국내 생산량의 비중 수치를 25~60% 범위 내에서 제시
 - ※ (참조) 2050 탄소중립 시나리오상 2050년 수소 공급량 중 국내 생산량의 비중 20.1%(A안), 17.9%(B안)
 - ※ (예시) 50%
 - () %
- 에너지 및 자원 도입선의 다변화, 현지 생산 잠재량, 청정수소 확보 가능성 여부, 도입가격 등을 종합적으로 고려했을 때 주요 수입처의 우선순위
 - 호주: ()위, 중동: ()위, 러시아: ()위, 북아프리카: ()위

6-2. 상기 지향점을 추구함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 국내 수소 생산 측면에서의 장애요인 및 이슈
 -
 -
- 해외 수소 수입처 확보 측면에서의 장애요인 및 이슈
 -
 -

6-3. 장애요인 및 주요 이슈를 개선하기 위한 주요 제도적·기술적 해결방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

○ (국내 수소 생산 측면에서의 장애요인에 대한 해결방안)

-

○ (해외 수소 수입처 확보 측면에서의 장애요인에 대한 해결방안)

-

[별첨 6] CCUS관련 정책 우선순위 마련을 위한 지표선정관련 전문가 설문조사

CCUS관련 정책 우선순위 마련을 위한 지표선정관련 전문가 설문 조사

귀하의 무궁한 발전을 기원합니다.

녹색기술센터는 과학기술정보통신부 산하의 정부출연연구기관으로서, 녹색·기후기술 관련 국내외 정책 및 글로벌 기술협력을 지원하는 연구를 수행 중입니다.

본 기관은 지난 2021년 「탈탄소 사회 전환을 위한 정책 아젠다 발굴 및 산업 육성 전략 연구」를 통해 탄소중립을 위한 산업부문의 핵심요소인 CCUS 산업 혁신 생태계를 종합적으로 파악하고, 8대 국내 CCUS 산업 혁신 생태계 조성방안을 마련하였습니다.

본 조사는 2021년에 수행된 국내 CCUS 산업 혁신 생태계 조성방안을 2022년 주요 사업인 「국가 온실가스 감축 목표달성을 위한 이행방안 및 제도적 기반마련 연구: 수소 및 CCUS를 중심으로」와 연계하여 既 도출된 8대 생태계 조성방안 중 최우선 정책 과제를 선정하는 데 그 목적이 있습니다.

상기 8대 생태계 조성방안 중 ‘CCUS 산업촉진을 위한 법안 마련’은 현재 범부처 차원에서 법안이 이미 수립 중에 있으므로, 본안은 제외하고, 본 조사에서는 7대 생태계 조성 방안을 설문조사의 범위로 설정하였습니다. 본 조사는 ① 정책 우선순위 선정을 위해 각 평가기준 항목들의 중요도를 측정하기 위한 AHP 설문과 ② 7대 생태계 조성방안을 평가기준 항목별로 평가하는 설문으로 구성되어 있습니다. AHP(계층분석법) 설문은 두 평가기준 항목 간 중요도에 대한 상대적 비교를 위한 것으로, 특정 항목이 타 항목에 비해 얼마나 더 중요한지를 7점 척도를 이용하여 평가하게 되며, 후보 프로그램에 대한 설문은 총 7대 생태계 조성방안을 대상으로 하여 평가기준 항목별 7점 척도를 기준으로 평가합니다. 먼저 각 설문에 대한 응답 방법을 숙지하신 후 설문에 응해주시기 바랍니다.

본 조사를 통해 수집된 모든 자료 및 응답내용은 통계법 제38조에 의해 철저히 보호되며, 본 연구 이외의 타 목적으로 사용되지 않음을 알려드립니다.

설문은 20분 내외의 시간이 소요될 예정이며, 설문에 참여하신 모든 분들께는 소정의 자문비가 제공될 예정입니다. 설문에 응답하신 후, 응답 내용이 작성된 한글 파일 또는 설문지 스캔 파일을 하단의 E-mail로 보내주시기 바랍니다. 감사합니다.

[설문조사 기간 및 문의처]

- 조사기간: 2022.6.6.(월)~2022.6.10.(금)
 - 주관기관: 녹색기술센터
 - 문의처: 녹색기술센터 정책연구부 김소은 연구원(soekim@gtck.re.kr/02-6261-0881)
한민지 연구원(a2pmin@gtck.re.kr/02-3393-3925)
- ※ 설문 회신처: 김소은 연구원(soekim@gtck.re.kr)

□ **응답자 정보**

성명	
소속 및 직급	
연락처	
이메일 주소	

(목 차)

1. 평가기준 항목별 중요도 평가	3
□ 설문 응답 방법	3
□ 평가항목 간 중요도 비교	4
2. 정책과제에 대한 평가	5
□ 설문 응답 방법	5
□ 7대 정책과제 평가표	6

1. 평가기준 항목별 중요도 평가

□ 설문 응답 방법

- 설문표 좌·우측의 <기준항목>과 <비교대상항목>을 상호 비교하여 상대적인 중요도에 따라 적절하다고 판단되는 곳에 “V”로 표시 하십시오.

<응답 예시>

- 예제 ①은 기준항목인 “기능”보다 비교대상항목인 “성능”이 약간 중요하다라는 의미입니다.
- 예제 ②는 기준항목인 “기능”이 비교대상항목인 “디자인”보다 아주 중요하다라는 의미입니다.
- 예제 ③은 기준항목인 “성능”과 비교대상항목인 디자인의 중요도가 같다는 의미입니다.

기준 항목	중요도															비교대상 항목			
	절대 중요 (9)	(8)	아주 중요 (7)	(6)	중요 (5)	(4)	약간 중요 (3)	(2)	동등 (1)	(2)	약간 중요 (3)	(4)	중요 (5)	(6)	아주 중요 (7)		(8)	절대 중요 (9)	
기능												V	← ①					성능	
기능			V	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	디자인
성능									V	←	←	←	←	←	←	←	←	←	디자인

- 모든 줄을 빠짐없이 표시하셨는지 확인하여 주십시오.
- 중요도 판단 시 선택의 일관성을 염두에 두시기 바랍니다.
(일관성 예시) A는 B보다 중요하다.
B는 C보다 중요하다.
C는 A보다 중요하다. (X)
A는 C보다 중요하다. (O)

□ 평가항목 간 중요도 비교

○ CCUS 관련 정책 우선순위 선정 시 고려해야 할 평가항목들은 아래와 같습니다.

평가항목	설명
정부정책 부합성	정부정책과의 연계성, 국고지원의 당위성 및 효율성, 기후변화 완화·지연효과, 에너지 절감효과, 온실가스 저감효과
파급 효과	경제사회산업에 미치는 영향, 국가경쟁력 제고, 지역경제 활성화, 부가가치 및 취업 유발효과, 정책의 효과성
시급성	내용 추진의 시의 적절성, 신속한 대응 필요성

○ 위의 3개 평가 항목 중에서 어떤 항목이 얼마나 중요하다고 생각하십니까?

기준 항목	중요도												비교대상 항목	
	아주 중요 (7)	(6)	중요 (5)	(4)	약간 중요 (3)	(2)	동등 (1)	(2)	약간 중요 (3)	(4)	중요 (5)	(6)		아주 중요 (7)
정부정책 부합성														파급 효과
정부정책 부합성														시급성
파급 효과														시급성

2. 정책과제에 대한 평가

□ 설문 응답 방법

- 7개 정책과제별로 3개 평가 항목에 대한 적합성을 ① 매우 낮다 ~ ⑦ 매우 높기로 평가하여 주십시오. 평가 시 **평가표에 함께 제시된 정책과제 별 추진전략을 참고**하여 주십시오.

<응답 예시>

- ABCDE 프로그램은 정부정책 부합성은 조금 낮고, 시급성은 보통이라는 의미입니다.

정책과제	ABCDE						
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
정부정책 부합성	①	② ✓	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다
시급성	①	②	③	④ ✓	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다

- 2021년에 진행된 「CCUS 산업 혁신 생태계 조성방안」 연구를 기반으로 한 CCUS 정책과제 목록은 아래의 표와 같습니다.

구분	설명
정책과제 1	차별화된 R&D 지원제도 수립
정책과제 2	시장 활성화와 수요처 확대를 위한 제도마련
정책과제 3	CCUS 산업활성화를 위한 산업클러스터 조성
정책과제 4	감축량 산정 방안 마련 및 국제적 합의
정책과제 5	국내 CCUS 관련 컨트롤 타워 수립
정책과제 6	CCUS에 대한 사회 수용성 제고
정책과제 7	CCUS 관련 협력체계 구축 및 교류의 장 마련

□ 7대 정책과제 평가표

(정책과제 1)	차별화된 R&D 지원제도 수립						
추진전략	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 실증형 R&D 지원체계 구축(ex. 데스트베드 구축) 등 산업계의 수요가 반영된 지원제도 마련이 필요함 ▪ CCUS 기술개발에 대한 투자를 유도하고 R&D를 통해 저감한 CO₂ 배출권으로 인정하는 산정방식 등의 마련 필요 ▪ CCUS 공정 및 장비 등의 국산화를 위한 기술개발 지원, CCUS 기술을 보유한 기업간의 매칭 프로그램 등 요구됨 						
1) 정부정책 부합성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다
2) 파급 효과	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다
3) 시급성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다

(정책과제 2)	시장 활성화와 수요처 확대를 위한 제도마련						
추진전략	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CCUS 시장활성화를 위한 보조금지급을 통한 사업안정성 제고, 초기 시장 창출시 경쟁력 확보 가능하도록 공공구매, 사용화 의무제, 친환경제품 지정 등 제도적 지원마련 필요 ▪ CCUS 제품에 대한 보조금 지급을 통해 안정화하고 탄소배출권 거래제도(ETS)와 연계하여 CO₂ 배출권 시장거래 지원 고려 						
1) 정부정책 부합성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다
2) 파급 효과	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다
3) 시급성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다

(정책과제 3)	CCUS 산업활성화를 위한 산업클러스터 조성						
추진전략	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CCUS 기술공정 및 산업특성상 다양한 타 산업과의 유기적 연계성을 가지는 점을 고려하여 산업클러스터 집약적으로 조성 ▪ CCUS 산업클러스터 조성을 통해 Value Chain 경쟁력이 제고될 것으로 기대 						
1) 정부정책 부합성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통이다	조금 높다	높다	매우 높다
2) 파급 효과	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통이다	조금 높다	높다	매우 높다
3) 시급성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통이다	조금 높다	높다	매우 높다

(정책과제 4)	감축량 산정 방안 마련 및 국제적 합의						
추진전략	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 현재 CCUS 기술 및 제품에 대해 국내외 공식적으로 감축량을 인정받을 수 있는 표준화된 산정 방식이나 측정방법이 부재한 상황이므로 정부의 온실가스 감축량 상정 및 표준화에 대한 국제적 합의 노력이 필요함 						
1) 정부정책 부합성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다
2) 파급 효과	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다
3) 시급성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다

(정책과제 5)	국내 CCUS 관련 컨트롤 타워 수립						
추진전략	<ul style="list-style-type: none"> 산재되어 있는 CCUS 관련 기술개발 및 정책지원이 통합되어 추진될 수 있도록 CCUS 기술개발 및 사업 전반에 걸친 범부처 차원의 컨트롤타워 수립 마련이 필요함 						
1) 정부정책 부합성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다
2) 파급 효과	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다
3) 시급성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다

(정책과제 6)	CCUS에 대한 사회 수용성 제고						
추진전략	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 이산화탄소 저장소 안정성에 대한 국민 수용성 확보 및 CCUS 기술에 대한 인식개선을 통해 국민적 이해를 높여야 함 ▪ CCUS 기술에 대한 홍보 강화(유튜브, 블로그 등 SNS 매체 활용, 공익방송, CCUS 국민간담회 등) 						
1) 정부정책 부합성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다
2) 파급 효과	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다
3) 시급성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통 이다	조금 높다	높다	매우 높다

(정책과제 7)	CCUS 관련 협력체계 구축 및 교류의 장 마련						
추진전략	<ul style="list-style-type: none"> 산학연을 비롯해 해외 선진기술을 보유한 기업 및 기관과의 기술 및 공동연구 활성화 등을 통해 국내외 협력체계를 구축하여 기술 및 정보교류 촉진이 필요 						
1) 정부정책 부합성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통이다	조금 높다	높다	매우 높다
2) 파급 효과	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통이다	조금 높다	높다	매우 높다
3) 시급성	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	매우 낮다	조금 낮다	낮다	보통이다	조금 높다	높다	매우 높다

“설문에 응해주셔서 감사합니다.”

[별첨 7] CCUS 산업 클러스터 조성방안 설문조사지

전문가 자문 요청 - CCUS 산업 클러스터 조성방안을 위한 설문조사 -

녹색기술센터 정책연구부 / 2022.9.7.

1. 연구의 배경 및 목적

- (배경) 우리나라는 2050 탄소중립을 달성하기 위한 주요수단으로 이산화탄소 포집·활용·수송·저장(CCUS)기술에 주목하고 있으며, ‘2050탄소중립시나리오’, ‘장기저탄소발전전략’, ‘탄소중립기본법’ 등에 이를 명시하고 있으나 기술의 불확실성으로 인하여 기술개발 촉진 및 산업육성을 위한 구체적인 방안을 모색할 필요가 있음.
- (목적) 2021년에 본 기관에서 수행된 국내 CCUS 산업 혁신 생태계 조성방안 중 최우선 정책과제로 선정된 CCUS 산업클러스터 조성방안을 2022년 주요 사업인 「국가 온실가스 감축 목표달성을 위한 이행방안 및 제도적 기반마련 연구: 수소 및 CCUS를 중심으로」 와 연계하여 구체적인 정책방안 마련

2. 전문가 자문 개요

- (자문 내용) 우리나라 CCUS 산업클러스터 조성 및 활성화를 위한 진단 결과를 바탕으로, △ 고려요인 및 방안, △ 예측되는 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 방안
- (자문 방식) 서면 방식으로 하며 아래 양식[붙임1]에 맞게 작성하여 9월 30일(금) 까지 아래 이메일*로 회신
 - * 이메일: a2pmin@gtck.re.kr (정책연구부 한민지)
- (문의처) 문의사항은 하기의 연락처**로 문의
 - **문의처: 02) 3393-3998, jyeo@gtck.re.kr (정책연구부 여준호)
- (자문비 지급) 센터 내 규정에 따라 25만 원 이내로 책정

3. 설문지 구성

- (구성) 설문지는 ① 공통 부문 및 ② 세부 조성방안 부문의 총 2개 부문으로 구성
- (작성 방법) 공통 부문 및 아래 표의 세부 조성방안 부문 중 표기된 부문 작성 후 이메일로 회신

<설문지 구성>

진단	설문사항
Chapter 1. 공통 부문	
적격성 기준에 대한 의견	<ul style="list-style-type: none"> • CCUS 산업 클러스터의 적격성 기준에 대한 의견 수렴 • 상업적 운영개시 시점에 대한 근거 • CCUS 산업 클러스터의 상업적 운영을 위한 선결과제
고려되는 제품 범위	<ul style="list-style-type: none"> • CCU 제품/기술의 범위에 대한 의견 수렴 • CCU 제품/기술의 범위에 대한 이유
기타 의견	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 CCUS 산업 클러스터 조성 및 발전을 위해 시급히 해소 하거나 정비해야 할 이슈 • 국내 CCUS 산업 클러스터 조성 및 발전을 위한 정책과제나 개선방안
Chapter 2. 세부 조성방안 부문	
탄소 다배출 산업과의 연계	<ul style="list-style-type: none"> • 예측되는 장애요인 및 고려해야 할 주요 이슈 • 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안
유망저장소와의 장거리 연계	<ul style="list-style-type: none"> • 예측되는 장애요인 및 고려해야 할 주요 이슈 • 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안
클러스터 입주 기업 지원 방안	<ul style="list-style-type: none"> • 예측되는 장애요인 및 고려해야 할 주요 이슈 • 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안
주민수용성 확보 방안	<ul style="list-style-type: none"> • 예측되는 장애요인 및 고려해야 할 주요 이슈 • 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안
배출권거래제와의 연계	<ul style="list-style-type: none"> • 예측되는 장애요인 및 고려해야 할 주요 이슈 • 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안

붙임1

자문 작성양식

기관명		부서명	
성함 및 직책			

자문 주제: CCUS 산업 클러스터 관련 이슈 진단 및 조성방안 도출

*CCUS 산업 클러스터: 이산화탄소 포집·활용·저장 기술 및 산업 기술을 영위하는 기업의 집적 단지로서, 관련 전문인력 양성, 창업 사업화 촉진, 제품 홍보 및 시장 진출 지원 등을 위한 진흥 시설의 총체.

Chapter 1. 공통 부문

[진단 1. 적격성 기준에 대한 의견]

국내 탄소중립 시나리오에 따라 저장소 집중 활용기간 시작점은 2040년으로 제시되어 있음.

※ 영국의 경우 CCUS 산업 클러스터 선정의 적격성 기준 중 하나로 2030년까지 상업적 운영이 시작 가능할 것을 요 구함.

1-1. CCUS 산업 클러스터의 적격성 기준에 대한 의견 수렴

○ 국내 탄소중립 시나리오에 따른 저장소 집중 활용기간(2040년~)을 고려했을 때, CCUS 산업 클러스터의 상업적 운영이 개시되어야 하는 시기를 2023~2050년 범위 내에서 제시 해 주십시오

※ (예시) 2033년

()년

1-2. 상업적 운영개시 시점에 대한 근거

○ 위에서 제시하신 시작점에 대한 근거 또는 이유를 적어주시기 바랍니다.

1-3. CCUS 산업 클러스터의 상업적 운영을 위한 선결과제

○ 상기 답변한 시기에 CCUS 산업 클러스터의 상업적 운영을 개시하기 위하여 다음과 같은 해결과제가 논의되고 있습니다. 아래 해결과제 중, 가장 중요한 내용이 무엇인지 2개 선택 후 선정 사유를 작성해 주십시오

- ① 탄소 다배출 산업과 이산화탄소 저장소 및 활용처와의 물리적 연계 구축
- ② 지리적 거리가 먼 탄소다배업종의 위치와 이산화탄소 저장소와의 물리적 연계(이산화탄소 수송 등) 방안 마련
- ③ 클러스터 입주 기업 지원방안 마련
- ④ CCUS 산업 클러스터 인근 주민수용성 제고방안 마련
- ⑤ CCUS 산업 클러스터 참여기업과 배출권거래제와의 연계방안 마련

- (선정 해결과제)

- (선정 사유)

[진단 2. 고려되는 제품범위]

CCU의 경우 생산되는 제품의 수명주기에 따라 탄소가 다시 대기 중으로 배출될 수 있음.

※ 영국의 경우 CCUS 클러스터라는 개념적 범위 내에 탄소포집 및 활용을 포함시키고 있으나, 탄소중립 목표 달성을 위하여 “영구적으로 탄소감축이 가능한 탄소활용”에 한하여 인정하고 있음

* 단, 탄소활용에 대한 비즈니스 모델 개발의 어려움으로 인해 현재 CCUS 클러스터 개발 및 상업적 운영에 탄소 활용 업종을 포함시키고 있지는 않음.

2-1. CCU 제품/기술의 범위에 대한 의견 수렴

○ 우리나라의 탄소중립 목표, 저장소 여건, 기술 수준, 국제적 경쟁력 등을 고려하였을 때, CCUS 산업 클러스터 내에 포함시켜야 할 CCU 제품·기술의 범위는 어디까지라고 생각하십니까? (객관식)

- ① 영구적 감축이 가능한 제품까지만 허용 (탄소광물화, 건축자재 활용 등)
- ② CO₂의 연료화 등 즉시 탄소가 배출되는 제품을 제외하고 허용
- ③ 전 CCU 기술 및 제품에 대하여 허용
- ④ 기타 ()

2-2. CCU 제품·기술의 범위에 대한 이유

○ 제품 및 기술의 범위로 상기와 같은 답변을 하신 이유에 대해 적어주시기 바랍니다.

[진단 3. 기타 조성 방안]

**3-1. 국내 CCUS 산업 클러스터 조성 및 발전을 위해 시급히 해소하거나
정비해야 할 이슈가 있으면 작성해 주십시오**

**3-2. 국내 CCUS 산업 클러스터 조성 및 발전을 위한 정책과제나 개선방안에
대해 자유롭게 작성해주십시오.**

Chapter 2. 세부 조성방안 부문

[진단 4. 탄소 다배출 산업과의 연계]

현재 우리나라는 탄소 다배출 산업이 국내 특정 지역에 밀집되어 있어 대량의 이산화탄소 배출처를 형성하고 있음

4-1. 탄소 다배출 산업과의 연계에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 탄소 다배출 산업과의 연계에 있어 예측되는 장애요인 및 주요 이슈
 - ① (파이프라인을 통한 저장소/활용처로의 수송 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
-
 - ② (운반선을 통한 저장소/활용처로의 수송 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
-
 - ③ (CO₂ 수송 트럭을 통한 저장소/활용처로의 수송 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
-
 - ④ (탄소 다배출 업종에서의 포집 후 자체 활용 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
-

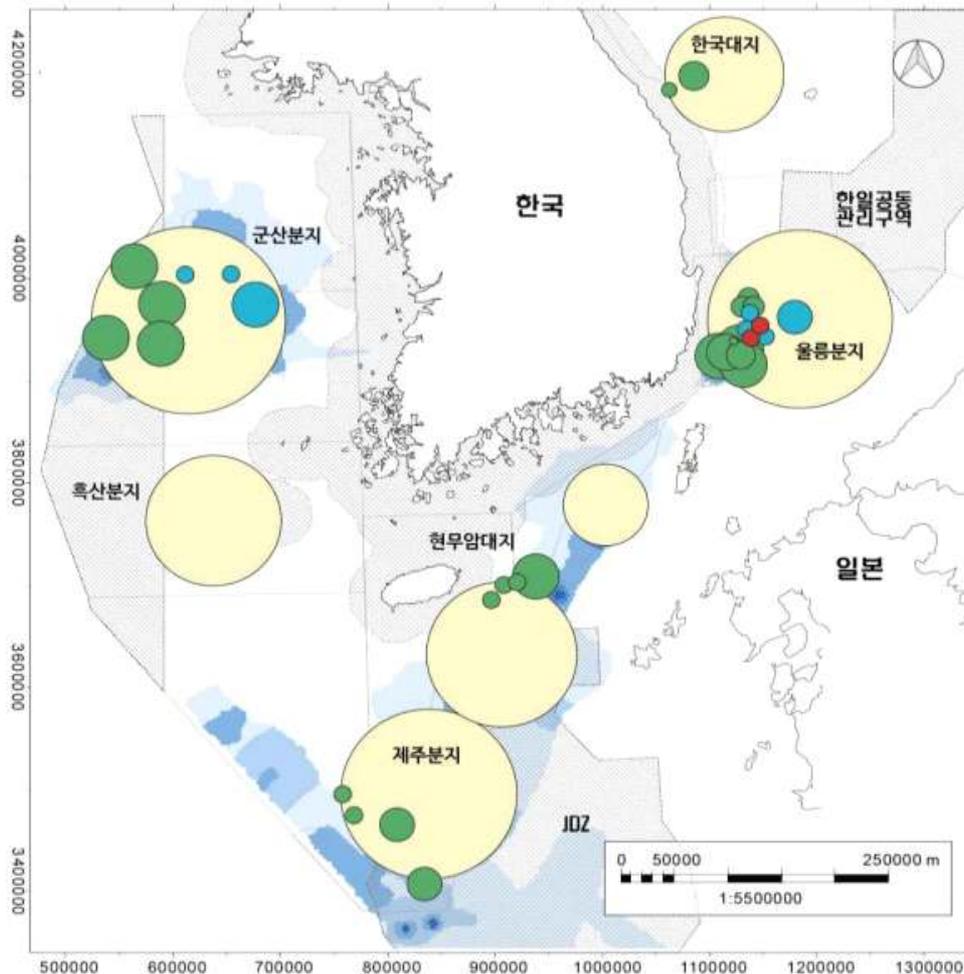
4-2. 상기 장애요인 및 주요 이슈를 해결하기 위한 주요 제도적·기술적 방안

- ※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요
- (탄소 다배출 산업과의 연계에 있어 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
 - ① (파이프라인을 통한 저장소/활용처로의 수송 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
-
 - ② (운반선을 통한 저장소/활용처로의 수송 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
-
 - ③ (CO₂ 수송 트럭을 통한 저장소/활용처로의 수송 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
-
 - ④ (탄소 다배출 업종에서의 포집 후 자체 활용 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
-

[진단 5. 유망저장소와의 장거리 연계]

현재 국내에서 울릉분지, 군산분지가 주요 저장소 입지로 고려되고 있으나 우리나라 일부 주요 탄소 다배출 지역(충북, 강원 등 시멘트 생산지, 경기 남부 산업단지, 여수 광양 산업단지 등)과의 지리적 거리 등 장애요인이 존재함.

[참고] 국내 유망 저장소 분포



해역	1단계 (퇴적분지)	2단계* (잠재지층)	3단계 (유망구조)	4단계 (사업부지)
범례	○	●	●	●

자료: 산업통상자원부·해양수산부, 합동 연구단, 국내 이산화탄소 포집 및 저장(CCS) 유망 저장소 7.3억 톤으로 평가, 보도자료, 2021.11.3.

5-1. 유망저장소와의 장거리 연계에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 유망 저장소와의 장거리 연계 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈
 - ① (장거리 파이프라인 건설 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -
 - ② (운반선 활용 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -
 - ③ (CO₂ 수송 트럭 활용 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -
 - ④ (비연계 및 자체 활용 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -

5-2. 상기 주요 이슈를 개선하기 위한 주요 제도적·기술적 해결방안

- ※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요
- (유망 저장소와의 장거리 연계 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
 - ① (장거리 파이프라인 건설 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
 -
 - ② (운반선 활용 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
 -
 - ③ (CO₂ 수송 트럭 활용 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
 -
 - ④ (비연계 및 자체 활용 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
 -

[진단 6. 클러스터 입주 기업 지원]

CCUS 산업 활성화를 위해서는 클러스터 내 기업의 참여를 독려하기 위한 방안 마련이 필요함.

6-1. 클러스터 입주 기업을 지원함에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- CCUS 산업 클러스터 입주 기업 지원 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈
 - ① (부지 임대료 부담금 감면 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -
 - ② (각종 세제 혜택 제공 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -
 - ③ (국가재정사업에 대한 우선권 제공 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -
 - ④ (투자 촉진을 위한 정부 보조금 지원 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -
 - ⑤ (규제 특례 적용 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -

6-2. 장애요인 및 주요 이슈를 해결하기 위한 주요 제도적·기술적 방안

- ※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요
- (CCUS 산업 클러스터 입주 기업 지원 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
 - ① (부지 임대료 부담금 감면 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
 -
 - ② (각종 세제 혜택 제공 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
 -
 - ③ (국가재정사업에 대한 우선권 제공 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
 -
 - ④ (투자 촉진을 위한 정부 보조금 지원 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
 -
 - ⑤ (규제 특례 적용 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)
 -

[진단 7. 주민수용성 확보]

CCUS 산업활성화를 위한 입지선정에 있어 주민 수용성이 매우 중요함에도 이는 매우 낮은 수준으로 파악됨.

7-1. 주민수용성 확보방안 이행에 있어 장애요인 및 주요 이슈

○ 국내 CCUS 산업 클러스터에 대한 주민수용성 확보 과정에서 예측되는 장애요인 및 주요 이슈

① (안전성 확보를 위한 추가 투자 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)

-

② (CCUS 기술 및 산업에 대한 적절한 정보 제공 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)

-

③ (일자리 창출 도모 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)

-

④ (산업 클러스터 이익 공유 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)

-

7-2. 장애요인 및 주요 이슈를 해결하기 위한 주요 제도적·기술적 방안

※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요

○ (국내 CCUS 산업 클러스터에 대한 주민수용성 확보 과정에서 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)

① (안전성 확보를 위한 추가 투자 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)

-

② (CCUS 기술 및 산업에 대한 적절한 정보 제공 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)

-

③ (일자리 창출 도모 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)

-

④ (산업 클러스터 이익 공유 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈에 대한 해결방안)

-

[진단 8. 배출권거래제와의 연계]

기업/산업유인 측면에서 주요한 사안 중 하나로 배출권거래제와의 연계가 언급되고 있음.

8-1. 배출권거래제와의 연계에 있어 장애요인 및 주요 이슈

- 배출권거래제와의 연계방안 이행 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈
 - ① (CO₂ 활용방안에 대한 경제적 모델 마련 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -
 - ② (이산화탄소 감축량 산정 방법론 마련 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -
 - ③ (감축량 인증 제도 확립 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -
 - ④ (배출권가격 인상 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -
 - ⑤ (국제 배출권 거래시장 마련 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈)
 -

8-2. 장애요인 및 주요 이슈를 해결하기 위한 주요 제도적·기술적 방안

- ※ 장애요인과 주요 이슈를 해결하기 위한 제도적(법, 정책 등)·기술적(기술, 인프라 등) 관점에서 각 1가지 이상의 방안 제시 필요
- (배출권거래제와의 연계방안 이행 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈 해결을 위한 방안)
 - ① (CO₂ 활용방안에 대한 경제적 모델 마련 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈 해결을 위한 방안)
 -
 - ② (이산화탄소 감축량 산정 방법론 마련 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈 해결을 위한 방안)
 -
 - ③ (감축량 인증 제도 확립 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈 해결을 위한 방안)
 -
 - ④ (배출권가격 인상 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈 해결을 위한 방안)
 -
 - ⑤ (국제 배출권 거래시장 마련 시 예측되는 장애요인 및 주요 이슈 해결을 위한 방안)
 -

[별첨 8] 수소 서면자문 명단

소속	이름	직위
한국기계연구원	강도원	선임연구원
창원산업진흥원	강부민	팀장
한국가스안전공사	강승규	책임연구원
한국전기연구원	고락길	책임연구원
한국자동차연구원	구영모	본부장
한국에너지공과대학교	김창희	교수
한국과학기술연구원	남석우	책임연구원
(사)한국선급	노길태	책임연구원
한국화학연구원	박지훈	책임연구원
한국에너지기술평가원	박진남	PD
한국가스공사	양희승	부장
한국과학기술연구원	오인환	책임연구원
일진하이솔루스	유계형	상무
고등기술연구원	윤용승	부원장
한국에너지기술연구원	윤형철	책임연구원
성균관대학교	이구	본부장
부산대학교	이제명	교수
한국과학기술연구원	이종호	책임연구원
전북대학교	이중희	교수
효진오토테크	장봉재	사장
국토교통과학기술진흥원	정시교	수석연구원
한국과학기술원	조은애	교수
한국기계연구원	최병일	본부장
한국재료연구원	최승목	책임연구원
한국전기연구원	하동우	센터장

[별첨 9] CCUS 서면자문 명단

소속	이름	직위
고등기술연구원	강석환	수석연구원
한국품질재단	강영경	과장
한국남부발전(주)	권달정	실장
고려대학교	김경남	교수
한국환경공단	김규수	차장
한국동서발전	김남현	부장
신안산대학교	김동련	교수
한국에너지기술평가원	김미화	실장
한국남동발전	김범일	부장
티비즈온	김영곤	부사장
한국시멘트협회	김의철	센터장
한국에너지기술연구원	류호정	책임연구원
현대중공업파워시스템	박성범	이사
숙명여자대학교	백준현	교수
한국화학연구원	안진주	선임연구원
포항산업과학연구원	안치규	수석연구원
한국가스공사	우경택	선임연구원
울산테크노파크	우항수	단장
한국해양수산개발원	윤성순	연구위원
한국에너지기술연구원	윤여일	책임연구원
(주)선진환경	이강우	대표이사
서경대학교	이순자	교수
효진오토테크	장봉재	사장
한국서부발전	정태성	차장
(주)바이오프렌즈	조원준	대표이사
지에스동해전력	최규범	대리
SK 머티리얼즈	한만재	팀장
파나시아	한승하	차장
포스코경영연구원	허재용	수석연구원

온실가스 감축 목표 달성을 위한 수소경제 및
CCUS 산업 클러스터 활성화 방안 연구

인 쇄 | 2022년 12월

발 행 | 2022년 12월

발행인 | 이상협

발행처 | 국가녹색기술연구소

인쇄처 | (주)디자인여백플러스

※ 동 보고서의 내용에 문의 사항이 있는 경우 아래로 연락주시기 바랍니다.

국가녹색기술연구소(NIGT) 정책연구부

· 주소 서울특별시 중구 퇴계로 173

남산스퀘어 17층(우 04554)

· 전화 02-3393-3928

· 이메일 park5085@nigt.re.kr

주 의

1. 이 보고서는 국가녹색기술연구소에서 발간한 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 국가녹색기술연구소에서 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.