

탄소중립률 평가모형 연구
공간 단위 탄소중립 기술적용 시나리오 모형 연구
: 에너지전환 기술 중심으로

A study on the carbon neutral scenario model
for technology application in units of space
: Focusing on energy conversion technology

2022. 12.

제 출 문

국가녹색기술연구소 소장 귀하

본 보고서를 “공간 단위 탄소중립 기술적용 시나리오 모형 연구: 에너지전환 기술 중심으로”의
보고서로 제출합니다.

2022. 12. 31.

주관연구기관명 : 국가녹색기술연구소

부 서 명 : 기술총괄부

연구책임자 : 이 민 아

연구 원 : 박 신 영

: 최 유 영

: 최 지 혁

위탁연구기관/연구책임: (주) 에이케이에이/장병욱

요 약 문

제 1 장 서 론

□ 연구의 배경 및 목표

- 탄소중립 달성을 위해 온실가스 배출·흡수량을 측정·관리할 공간 범위 설정 필요
 - 탄소중립 목표 달성을 위하여 국가뿐만 아니라 지역, 도시 등의 중요성이 증대되고 있으며, 현재 136개 국가, 116개 지역, 239개 도시에서 탄소중립 선언
 - 공간은 인구·산업·자연환경 등 여건에 따라 온실가스 배출 특성의 차이를 나타내므로 탄소중립 목표를 효과적으로 달성하기 위해서는 공간 특성에 적합한 경로 설계 필요
 - 특히, 행정구역 단위의 공간경계로서 지방자치단체는 온실가스 관리의 주체로 중요한 역할 담당
- 공간단위 탄소중립 분석 도구의 부재
 - 다양한 공간 단위에서 복합적인 기후기술도입에 따른 탄소중립 기여도를 평가하거나, 기술의 발전을 고려하여 기술경로를 도출하는 등의 정보를 제공하는 프로그램 부재
 - 국가 단위 에너지 모형은 지역·도시 단위의 에너지 시스템 운영 측면에서 한계가 존재하며, 프로젝트 단위 모형은 경제성평가 중심으로 기술 및 시스템 단위에서 전과정평가 분석이 불충분
 - 해외 소프트웨어의 경우, 우리나라의 기상 현황, 에너지공급·수요현황 등을 반영하지 못하고, IPCC 가이드라인에서 제공하는 TIER1 배출계수를 사용하기 때문에 국내 실정반영이 미흡
- 본 연구는 공간단위 탄소중립 기술적용 시나리오 모형개발을 통하여 국가 탄소중립 실현을 위한 공간별 기술 적용성 평가 및 단계별 기술도입 전략수립 체계 구축을 목표로 함
 - 탄소중립 기술시나리오 모형(Carbon-neutral Assessment based on Technology Application Scenario, 이하 CATAS)은 수요자의 사용 목적을 고려하여 ‘CATAS-BASIC’ 과 ‘CATAS-PRO’ 로 구분하여 개발
 - ‘CATAS-BASIC’ 은 일반 국민 또는 지자체 온실가스 감축정책 관련 담당자들이 탄소중립 정책 수립 및 이행점점을 용이하게 할 수 있도록 개발될 예정

- ‘CATAS-PRO’ 는 탄소중립 R&D 기획·점검·성과평가의 목적으로 개발되어 탄소중립 기술전문가들이 활용할 수 있는 수준으로 고도화할 예정

□ 연구내용 및 추진체계

○ 탄소중립률 평가 방법론 개발 및 CATAS-BASIC 알파버전 구축

- 당해연도에는 온실가스 직접배출원에 대하여 17개 광역지자체를 대상으로 9개 에너지 전환기술(①태양광, ②풍력, ③바이오에너지, ④수력, ⑤해양에너지(조력, 파력, 조류), ⑥수소연료전지, ⑦태양열, ⑧지열, ⑨수열) 및 ⑩산림흡수원에 대해 탄소중립률 평가 방법론 구축
- CATAS-BASIC 알파버전은 ①공간선정, ②공간정보, ③기술선정, ④온실가스 배출량, ⑤경제성 분석, ⑥리포트로 구성되어 있으며, 화면 흐름에 따라 데이터를 입력하고 결과를 도출할 수 있도록 개발

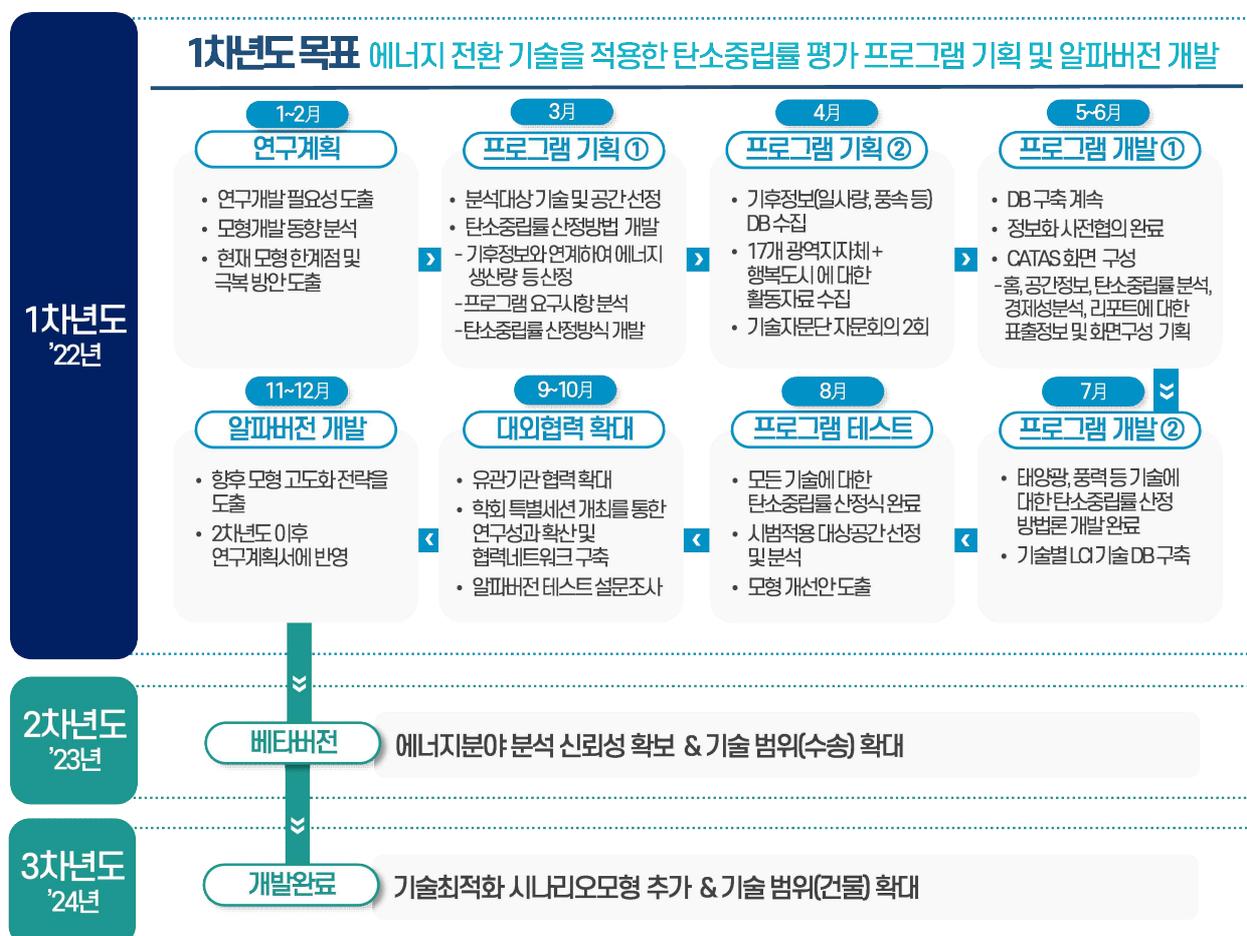
[그림] CATAS-BASIC 알파버전 화면구성



○ 연구 추진 프로세스 및 추진체계

- 1차년도에는 기초자료 수집, 기술별 탄소중립률 모듈개발, 화면기획, 모형 시범 적용 연구수행을 통해 알파버전을 개발하였으며, 향후에는 에너지분야 분석 신뢰성 확보, 시나리오 분석 및 적용공간·기술범위 확대 예정
- 모형개발-검증-활용까지 프로그램 활용도 제고를 위한 ‘CATAS 기술자문단’을 구성하여 지자체 및 국내 산학연 전문가들과 네트워크를 구축하고 지속적인 논의 진행

[그림] CATAS-BASIC 1차년도 추진 프로세스



제 2 장 대내외 현황

□ 국내외 탄소중립 전략수립 현황

- 전국 지자체는 P4G 서울 녹색미래 정상회의에서 실시한 2050 탄소중립 지방 정부 실천연대 선언식을 계기로 탄소중립 이행계획 수립 착수
 - (서울) 국내 최초 도시로 2050년 탄소중립 목표를 담은 7대 온실가스 감축 전략을 수립하였으며, C40 도시기후리더십그룹에 추진계획 제출
 - (부산) ‘글로벌 기후 리더십 도시 탄소중립도시 부산’을 비전으로 삼고, 2030년까지 온실가스를 2018년 대비 47% 감축, 2050년 탄소중립을 실현하기 위한 3대 분야, 10+1대 추진전략 마련
 - (충남) ‘충청남도 2045 탄소중립·녹색성장 기본계획’ 초안으로 2018년 온실가스 배출량 대비 2035년까지 50% 감축하고 2045년 탄소중립을 실현하기 위한 4대 전략 제시
 - (제주) ‘2050 탄소중립기후변화 대응계획’을 제시하였으며, 4대 목표, 7대 부문별 전략 수립하여 글로벌 리더 탄소중립 도시 추진
- 지자체 온실가스 배출량은 국가 온실가스 인벤토리 작성체계에 따라 산정
 - 국가 온실가스 인벤토리는 「저탄소·녹색성장 기본법」 제45조의 규정에 따라 작성되었으며, 국가 온실가스 통계관리 위원회 승인 이후 매년 온실가스 배출량 산정 및 공표
 - 지역 온실가스 배출량 산정은 지역별 활동자료(연료 사용량, 전력사용량, 제품 생산량, 산림면적 등)에 기반하여 「국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침」을 준용하여 산정

□ 국외 지역단위 탄소중립 전략수립 현황

- 기후행동 정상회의(UN Climate Action Summit 2019)을 기점으로 각국 참여유도
 - UN은 기후행동 정상회의와 기후목표 상향연맹 발족을 통해 각국 정부가 파리 협정 목표 달성과 기후변화 대응에 적극 참여하도록 유도
 - 글로벌 지역 단위 탄소중립 선언 도시는 총 241개이고 대도시 기후리더십 그룹 C40의 회원국 수는 현재 기준 총 96개이며 서울은 2006년 가입 이후 회원자격 유지
- 국외 지역단위 온실가스 배출량 인벤토리는 국제표준을 따라 구축
 - 글로벌 공간단위 온실가스 인벤토리는 일관성과 투명성을 위해 국제표준인 GHG 프로토콜에 따라 측정 및 보고
 - 프로토콜의 세 가지 인증방법은 검토(Review by the GHG Protocol), 인증(Built on GHG Protocol), 공동개발(Joint development by the GHG Protocol)로 구성

- 해외 주요국은 온실가스 배출량 지도를 통해 공간별 탄소배출량 현황을 제공
 - (미국) 환경보호청의 온실가스 보고 프로그램을 통해 지역별 주요 배출원 온실가스 배출정보를 공간화하여 제공하며, 웹 기반 시스템인 Facility Level Information on Green House Gases Tool(FLIGHT)를 통해 대규모 배출시설의 온실가스 배출정보를 가시화하여 제공
 - (영국) 기업 에너지산업 전략부에서 지역 단위의 온실가스 배출량 추정 통계 자료를 지도화하여 국경 내에서 발생하는 배출량(Territorial emissions)을 에너지 공급자·사용자 등의 기준으로 제공

□ 국내외 탄소중립 관련 프로그램

- 해외 주요국은 공간 단위 온실가스 배출량을 분석을 위한 프로그램 개발 및 활용 중
 - (영국) 에너지 수요 솔루션 연구센터(Centre for Research into Energy Demand Solutions)가 제작한 위치기반 탄소 계산기(Place-Based Carbon Calculator, PBCC)는 공간단위(LSOA, lower super output area; 지역의 평균 인구가 약 1,500명인 소규모 통계 영역)별 탄소배출량을 산정하여 웹 맵핑(Web mapping) 형태로 제공
 - (일본) 일본 정부는 도시구조와 교통정책실시 등에 따른 탄소저감 효과를 포괄적으로 진단·평가할 수 있는 공간 분석 도구인 CO₂ Reduction Effect Simulation Tool(CREST)를 개발 및 사용
 - (미국) Cool Climate Network가 개발한 Household Calculator와 Business Calculator는 일반 가정과 기업이 구매하는 모든 운송, 에너지, 식품, 상품 및 서비스의 온실가스 배출량을 산출하는 탄소발자국 계산 도구
- 에너지 시스템 분석 프로그램을 통해 공간의 탄소중립 기술적용 실현가능성 및 환경성 분석
 - (한국) 한국에너지공단의 에너지 절감 지식포털 EG-TIPS(Energy GHG Technology Information Platform Service)에서 제공하는 탄소중립 시뮬레이터는 부문별 2050 감축경로를 거시적으로 제공하여 경로별 에너지 수요 및 온실가스 배출량 정보제공
 - (캐나다) 캐나다 천연자원부 (Natural Resources Canada)가 개발한 RETScreen은 재생에너지, 에너지 효율 및 열병합 발전 프로젝트의 기술 및 재정적 실행 가능성 분석을 목적으로 하며, 기술적 범위는 기존 에너지원과 연료전지, 가스터빈, 지열, 수력, 태양광, 태양열, 풍력, 해양에너지 등을 포함
 - (미국) 미국 재생에너지 국립연구소 (National Renewable Energy Laboratory, NREL)에서 개발한 HOMER는 그리드 설계 최적화를 주목적으로 하며 시뮬레

이선, 최적화, 민감도 분석과 경제성 분석을 제공하고 기술적 범위는 태양광, 풍력, 수력, 바이오매스, 수소, 에너지 저장, 천연가스 등 포함

- (독일) 독일 연방 경제 기술부(German Federal Ministry for Economy and Technology)의 District Energy Concept Adviser(DECA)와 독일 서부의 노르트라인 베스트발렌(North Rhine-Westphalia) 주 정부의 에너지 지도(Energy Atlas NRW)는 해당 지역의 에너지공급 및 전환 관련 정보제공과 전략 수립 지원이 주목적

제 3 장 모형 범위 및 방법론

□ 모형 개발범위

○ (온실가스 배출원 범위) 1차년도(당해연도)는 직접배출량을 대상으로 분석 수행

- UN에 제출하는 국가 온실가스 배출량 보고서는 직접배출량만을 대상으로 하며, 온실가스종합정보센터(GIR)에서 제공하는 지역 온실가스 배출통계 또한 직접 배출량만을 고려
- 1차년도인 금년은 직접배출량을 중심으로 분석하고, 2차년도에 간접배출량을 포함하여 분석 예정

○ (공간적 범위) 직접·간접배출의 경계를 공간적 범위로 설정

- 탄소중립 전략수립이 필요한 물리적·지역적 공간을 “공간”으로 정의하며, 온실가스 배출원에 대한 구역/경계가 구분되는 공간을 본 연구의 공간적 범위로 설정
- 탄소중립률 분석의 기초자료가 되는 온실가스 배출통계는 현재 광역지자체 단위에서 제공되므로, 당해연도에는 17개 광역지자체를 대상으로 분석 수행

○ (기술적 범위) 에너지 전환 분야 9개 기술과 산림흡수원을 기술적 범위로 설정

- 전환, 산업, 건물, 수송 등 10개 분야 중 온실가스 배출량이 가장 큰 전환부문과 산림 흡수원을 당해연도 분석대상으로 설정
- 「기후기술분류체계」, 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법」, 「탄소중립 중점기술(안)」 검토를 통해 ①태양광, ②풍력, ③바이오에너지, ④수력, ⑤해양에너지(조류, 조력, 파력), ⑥수소연료전지, ⑦태양열, ⑧지열, ⑨수열 및 ⑩산림 흡수원을 기술적 범위에 포함

<표> CATAS-BASIC 1차년도 연구범위

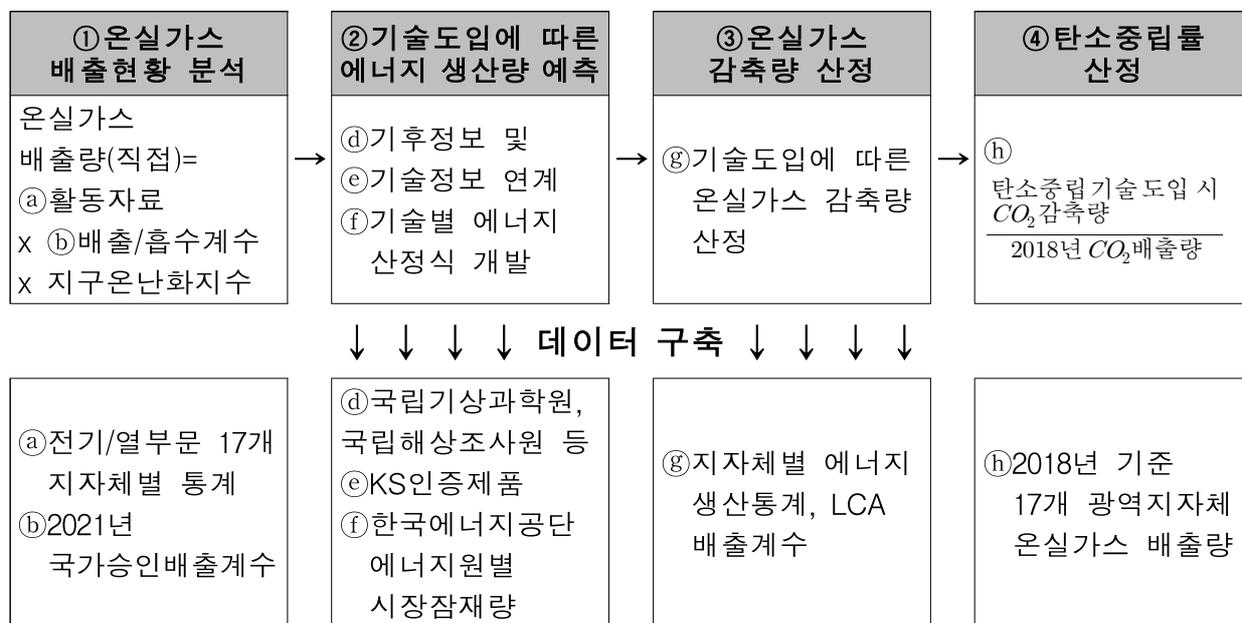
온실가스 배출원 범위	공간적 범위	기술적 범위
직접배출원	직접배출과 간접배출의 경계 *17개 지자체 데이터를 활용한 검증	10개 에너지전환 기술

□ 탄소중립률 평가 방법론 개발 및 시나리오 연구

○ 다음과 같이 4단계로 탄소중립률 평가 방법론 구축

- (①온실가스 배출현황 분석) GIR과 협력을 통해 지자체별 활동자료를 구축하고, 지자체별·에너지원별 2018년 온실가스 배출현황 분석하여 현 지자체 탄소중립률 진단
- (②기술도입에 따른 에너지생산량 예측) 지자체별·월별 기상정보를 수집·가공하고, KS 인증제품 기술정보 데이터베이스 구축하여 기후정보와 기술정보 연계를 통한 기술별 에너지 산정 방법론 구축
- (③온실가스 감축량 산정) 기술도입에 따른 기존 화석연료 대체효과와 전과정 평가(LCA) 기반의 온실가스 배출량 분석을 통해 기술도입에 따른 온실가스 감축량 산정
- (④탄소중립률 산정) 2018년 온실가스 배출량 대비 기술도입에 따른 감축량 비율로 탄소중립률 도출

<표> 탄소중립률 산정 프로세스별 데이터 구축 현황



○ 탄소중립 시나리오 평가 연구사례 고찰 및 향후 연구 방향 설정

- 탄소중립 달성을 위하여 다양한 시나리오 구성·평가를 수행한 국내·외 선행연구와 신재생에너지 도입 가능지역 분석 연구사례 고찰
- 시나리오 분석을 위해 활용 가능한 신재생에너지 자원 관련 공간정보(에너지 기술연구원, 기상청, 환경부 등) 검토
- 향후 시나리오 분석을 통해 신재생에너지를 활용한 전력생산량 극대화, 비용 및 온실가스 배출량 최소화 등을 반영하여 최적 기술경로 제안 계획

□ 모형의 웹 기반 프로그램 개발

- 웹 기반 탄소중립률 평가 프로그램 개발을 위한 상세 프로세스 구축
 - 개발 방법론은 요구사항, 분석/설계, 구현, 시험, 이행, 비즈니스 모델링을 포함한 6개의 핵심 프로세스로 구성
 - 구축된 시스템과 시스템 간 지속적 기능 및 데이터 교환을 위한 품질보장, 의사전달 기능 향상 및 유지보수 용이성 확보를 위한 표준화 요소 고려
- 프로그램의 시스템 구성은 데이터베이스, 웹서버, 사용자 인터페이스로 구성
 - 프로그램에서 공간단위별 탄소중립률을 나타내기 위해 배출량정보 수집 및 이를 기반으로 한 탄소중립률 계산결과로 DB를 구축, 지자체별 지역 정보와 함께 GIS 기반으로 표출
 - 공간단위별 12개의 기후기술에 대한 기술사양, 기술세부사항 및 기상인자 데이터 베이스 구축을 기반으로 에너지 발전량 산정 시뮬레이션 모듈개발
- 보안 및 데이터 요구사항
 - 시스템 구축 및 개발 관련 정보의 보안 요구사항 준수를 위해 관리적 보안, 기술적 보안, 물리적 보안 관리체계 구축
 - 데이터 거버넌스 및 표준을 적용해 향후 확장성을 고려한 DB를 설계하고 데이터 리엔지니어링(데이터 표준화와 구조화)을 통해 내부 데이터 재정리

제 4 장 모형 시범적용

□ 서울특별시 모형 시범 적용 결과

○ 서울시 탄소중립 정책목표 분석

- 서울시(2021)는 「2050 온실가스 감축 추진계획」으로 ①그린 빌딩, ②그린 모빌리티, ③그린 숲, ④그린 에너지, ⑤그린 사이클에 해당하는 5대 부문의 74개 세부과제 발표
- 에너지 전환분야에서는 태양광·연료전지 설비 보급확대, 소수력·수열 등 신재생에너지 발굴·이용, 서울시 에너지정보센터 구축 계획수립

<표> 서울시 「2050 온실가스 감축추진계획」 에너지 부문별 주요 계획

부문	주요 계획
① 태양광 보급확대	· '22년까지 500MW, '50년까지 5GW 태양광 설비 보급 확대
② 연료전지 보급확대	· '22년까지 3000MW, '50년까지 1GW 연료전지 설비 보급 확대
③ 소수력, 수열 등 신재생에너지 발굴·이용	· 잠실수중보 소수력 발전시설 2.5MW 설치 · 한강홍수통제소 350kW, 강남삼성병원 40MW, 영동대로 복합환승센터 14MW 등 신규 수열 시설 설치를 통한 냉·난방 공급 확대
④ 서울시 에너지정보센터 구축	· '21년 마곡지역 에너지데이터 통합 관리 및 에너지효율화 플랫폼 구축 · '22년~ 서울 전역으로 플랫폼 단계별 확대를 통한 에너지 정보센터 구축

※출처: 「2050 온실가스 감축 추진계획(2021.5.4.)

○ CATAS 알파버전 적용을 통한 서울시 탄소중립 정책목표의 탄소중립률 기여도 진단

- 해당 계획 중 신규 발전설비 설치·확대 계획을 해당연도에 개발한 CATAS 알파버전에 반영하여 온실가스 감축량 및 탄소중립률 기여도 평가 수행
- 태양광의 경우 현재 시장 잠재량 고려 시 목표치('22년까지 500MW, '50년까지 5GW) 보급 반영이 불가능하며, 최대 43.38GWh 전력량 생산 가능
- 수소연료전지의 경우 보급목표('22년까지 3000MW, '50년까지 1GW) 달성 시, '22년에 약 2,417GWh(서울시 전력소비량의 약 5.06%), '50년에는 8,760GWh의 전력(전력소비량의 약 18.32%) 생산 예측
- 수열 시설 공급확대 계획(한강홍수통제소 350kW, 강남삼성병원 40MW, 영동대로 복합환승센터 14MW 등 신규 수열 시설 설치) 달성 시 연간 577,150,068MJ의 냉난방 에너지(서울시 열에너지 가정·상업부문 열에너지 소비량(332,000toe)의 약 4.15%) 생산 예측
- 소수력 목표(잠실수중보 소수력 발전시설 2.5MW 설치)의 경우, 지자체별 강수량과 낙차, 유역면적을 이용하여 이론적 발전량을 산정하는 본 시뮬레이터에 직접 반영하여 평가하기 어려운 측면이 존재하여, 향후 고도화시 개선이 요구

- 태양광·수소연료전지·수열을 적용한 결과, 서울시의 전환부문 배출량인 1.49백만 tCO₂eq 중 기술도입으로 0.43백만 tCO₂eq 감축하여 전환부문 탄소중립률은 28.94%로 분석
- 경제성 분석 결과, 태양광의 LCOE는 142원/kWh(수명 30년 가정), 수소연료전지는 431원/kWh(수명 10년 가정)로 산정

[그림] 서울시 탄소중립 계획 목표 CATAS 시범적용 결과



□ CATAS 알파버전 테스트 설문조사

○ 산학연 전문가 대상 CATAS 알파버전 테스트를 통한 프로그램 개발 상태 진단 및 향후 과제 도출

- CATAS 알파버전에 대한 프로그램 만족도, 유용성, 편리성 및 기술별 에너지 생산량 산정식의 적정성 등의 설문 항목에 대해 총 45명의 전문가가 응답
- 프로그램에 대한 전반적으로 높은 만족도와 탄소중립에 유용한 프로그램이라는 긍정적인 평가 확인
- 추가 의견들을 수렴 결과, 일반인용으로 활용되기 위해서는 프로그램이 보다 단순화될 필요성이 있으며, 지자체의 탄소중립 계획수립을 지원하기 위해서는 실사용자의 의견 수렴을 통해 화면 및 기술선정 방식 등에 대한 변화가 필요
- 해당 설문을 통해 확보한 기술별 자문단과의 지속적인 협력을 통해 향후 프로그램 고도화를 추진할 수 있을 것으로 기대

제 5 장 결론 및 향후계획

□ 결론

- 본 연구는 공간단위 탄소중립 기술적용 시나리오 모형(CATAS) 개발을 통하여 국가 탄소중립 실현을 위한 공간별 기술 적용성 평가 및 단계별 기술도입 전략 수립 체계를 구축하기 위해 수행
 - 공간의 온실가스 배출량 현황을 알아보고 다양한 탄소중립 기술을 적용했을 때 실질적인 온실가스 감축량을 분석하기 위한 기능을 포함함
 - 모형의 입력데이터는 활동자료, 배출계수, 기후정보, 기술정보, 비용 등이며, 결과값으로 대체에너지 전력 및 열 생산량 예측에 따른 온실가스 감축량 및 경제성 분석임
 - 수요자의 사용목적에 따라 ‘CATAS-BASIC’ 및 ‘CATAS-PRO’ 로 구분되어 개발될 예정이며, 올해부터 3년간 주요 수요자로서 일반국민과 지자체 온실가스 감축 담당자를 대상으로 하는 ‘CATAS-BASIC’ 을 개발하고자 함
- CATAS-BASIC 알파버전을 활용하여 서울시 온실가스 감축 계획 진단하고, 45명의 산·학·연 전문가를 대상으로 알파버전 테스트에 대한 설문조사를 진행함
- CATAS-BASIC 개발을 통하여 탄소중립 관련 의사결정을 지원하기 위한 도구로 활용되기를 기대함

□ 향후 계획

- (간접배출량 분석) 공간 내에 직접적으로 배출되는 온실가스뿐 만 아니라 전기 및 열 등 간접배출량을 동시에 비교·분석하여 분석정보를 다양화
- (에너지산정식의 고도화) 금년에 기술별로 개발된 산정식 초안을 고도화 및 구체화하여 에너지 생산량 예측 분석 결과에 대한 신뢰도를 제고
- (수송부문 기술 범위 확장) 전기차, 수소차 등 보급에 따른 도로부분 온실가스 감축량 분석과 함께 철도, 항공, 해운 부분의 기술도 포함하여 분석
- (공간단위 기술 최적화 모형 개발) 공간단위 기술 최적화 모형 개발은 비용 최소화, 신재생에너지를 활용한 전력생산량 최대화, 온실가스 배출량 최소화 등을 최적화 조건으로 반영하여 공간별 최적 에너지믹스 경로를 제안
- (프로그램의 유용성 및 편리성 제고) 온실가스배출량현황-에너지생산량-온실가스 배출량-탄소중립률산정에 이르는 모든 분석 과정을 한 화면에서 분석하고, 구체적인 분석결과를 인포그래픽 형식으로 다음 화면에 나타나게 하는 방향으로 화면구성을 수정·보완

S U M M A R Y

Chapter 1 Introduction

□ Research Background and Objectives

- **To achieve carbon neutrality, it is necessary to set a spatial range to measure and manage GHG emissions and absorption**
 - In order to achieve the goal of carbon neutrality, the importance of not only countries but also regions and cities is increasing. Currently, 136 countries, 116 regions, and 239 cities have declared carbon neutrality goals
 - Since spaces show differences in GHG emission characteristics depending on conditions such as population, industry, and natural environment, it is necessary to design a path suitable for spatial characteristics in order to effectively achieve the carbon-neutral goal
 - In particular, as the spatial boundary of administrative district units, local governments play an important role as the main body of GHG management
- **Lack of spatial-level carbon neutrality analysis tools**
 - Absence of a program that provides information such as evaluating the contribution of the introduction of combination of climate technologies to achieving carbon neutrality in various spatial units or deriving a technology path in consideration of technological development
 - The national energy model has limitations in terms of operation of the energy system at the regional and city level, and the project unit model focuses on economic evaluation, and the life cycle analysis at the technology and system level is insufficient
 - In the case of foreign software, it does not reflect S.Korea's weather conditions, energy supply/demand status, etc., and because it uses TIER 1 emission factor provided by the IPCC guidelines, it is insufficient to reflect the domestic reality

- This study aims to establish a system for evaluating technology applicability for each unit of space and establishing a technology introduction strategy for each space for the realization of national carbon neutrality through spatial model development of carbon-neutral technology application scenarios
 - Carbon-neutral Assessment based on Technology Application Scenario (CATAS) is developed by dividing into ‘CATAS-BASIC’ and ‘CATAS-PRO’ considering user purposes
 - ‘CATAS-BASIC’ will be developed so that the general public or those in charge of local government’s GHG reduction policies can establish carbon-neutral policies and assess their implementation
 - ‘CATAS-PRO’ was developed for the purpose of carbon neutrality R&D planning, inspection, and performance evaluation, and will be upgraded to a level that carbon neutrality technical experts can adopt

□ Research Contents and Structure

- Development of carbon neutrality evaluation methodology and establishment of CATAS-BASIC alpha version
 - In the current year, carbon neutrality evaluation methodology was established for 9 energy transition technologies (① solar power, ② wind power, ③ bio energy, ④ hydraulic power, ⑤ marine energy (tidal power, wave power, tidal current), ⑥ hydrogen fuel for batteries, ⑦ solar heat, ⑧ geothermal heat, ⑨ hydrothermal) and ⑩ forest sinks
 - Alpha version of CATAS-BASIC consists of ① spatial selection, ② spatial information, ③ technology selection, ④ GHG emission, ⑤ economic analysis, and ⑥ report
- Research process and structure
 - In the first year, the alpha version was developed through basic data collection, carbon neutrality module development for each technology, screen composition planning, and model trial application research
 - Establishment of a network with local governments and domestic industry-academia-research experts by forming the ‘CATAS Technical Advisory Group’ to improve the program utilization from model development-verification-utilization, and conduct continuous discussions

Chapter 2 Domestic and International Environmental Analysis

□ Domestic and International Carbon Neutrality Strategy Establishment

- **Local governments in S.Korea started establishing carbon-neutral implementation plans upon the declaration ceremony of 2050 Carbon-neutral Local Government Implementation Solidarity held at the P4G Seoul Green Future Summit**
 - (Seoul) As the first case in Korea, Seoul has established 7 GHG reduction strategies with a goal of achieving carbon neutrality by 2050, and submitted an action plan to C40 Urban Climate Leadership Group
 - (Busan) With the vision of ‘Becoming a carbon-neutral, global climate leadership city’, Busan has proposed to reduce GHG emissions by 47% compared to 2018 by 2030, and prepared 10+1 strategies in three areas to achieve carbon neutrality by 2050
 - (Chung-Nam) Presented 4 strategies to reduce GHG emissions by 50% by 2035 compared to 2018 and to achieve carbon neutrality in 2045, in a draft of ‘Chungcheongnam-do 2045 Carbon Neutral Green Growth Basic Plan’
 - (JeJu) Presented the ‘2050 Carbon Neutral Climate Change Response Plan’ and established 4 goals and 7 strategies for each sector with the goal of becoming a leading carbon-neutral city
- **Local governments’ GHG emissions are calculated according to the national GHG inventory preparation guidelines**
 - The national GHG inventory was prepared in accordance with Article 45 of the 「Framework Act on Low Carbon and Green Growth」, and after the approval of the National GHG Statistical Management Committee, annual GHG emissions have been calculated and published
 - Calculation of regional GHG emissions is based on regional activity data (fuel consumption, electricity consumption, production of goods, forest area, etc.) and is calculated by applying the 「National Greenhouse Gas Statistical Calculation, Reporting and Verification Guidelines」

□ International Regional-Unit Carbon Neutrality Strategies

- **UN Climate Action Summit 2019 with the goal of promoting participation from countries around the world**
 - UN encouraged governments to actively participate in achieving the Paris

Agreement goals and responding to climate change through the Climate Action Summit and the establishment of Climate Ambition Alliance: Net Zero 2050

- A total of 241 cities have declared carbon neutrality goal at the global regional level while the number of members of the metropolitan climate leadership group C40 is 96 as of the present, and Seoul has maintained its membership since joining in 2006
- **Overseas regional unit GHG emission inventory is established according to international standards**
 - Global spatial unit GHG inventory is measured and reported according to the international standard GHG protocol for consistency and transparency
 - The three authentication methods of the protocol consist of ‘Review by the GHG Protocol’, ‘Built on GHG Protocol’, and ‘Joint development by the GHG Protocol’
- **Major foreign countries provide the current status of carbon emissions by space in forms of GHG emissions map**
 - (USA) Provides spatial information on GHG emissions from major sources of emission by region through the GHG Reporting Program of the Environmental Protection Agency, with visualization of GHG emission information of large-scale emission facilities through a web-based system, Facility Level Information on Green House Gases Tool (FLIGHT)
 - (UK) The Corporate Energy Industry Strategy Department provides territorial emissions based on energy suppliers and users by mapping the estimated statistical data of regional-level GHG emissions

□ International Carbon Neutrality-Relevant Web Program

- **Major overseas countries are developing and using programs to analyze spatial unit GHG emissions**
 - (UK) The Place-Based Carbon Calculator (PBCC) produced by the Center for Research into Energy Demand Solutions calculates and provides carbon emissions by a small statistical area(LSOA, lower super output area with an average population of about 1,500 people) in the form of web mapping
 - (Japan) The Japanese government developed a spatial analysis tool called CO₂ Reduction Effect Simulation Tool (CREST) that can comprehensively diagnose and evaluate the carbon reduction effect of urban structure and transportation policy implementation

- (USA) The Household and Business Calculator, developed by Cool Climate Network, is a carbon footprint calculation tool that calculates the GHG emissions from transportation, energy, food, goods and services purchased by households and businesses
- **Feasibility and environmental analysis of spaces for carbon-neutral technology application with energy system analysis programs**
 - (S.Korea) The carbon-neutral simulator provided by EG-TIPS (Energy GHG Technology Information Platform Service), the energy saving information portal of the Korea Energy Agency, provides information on sectoral energy demand and GHG emissions projection scenarios for 2050
 - (Canada) Developed by Natural Resources Canada, RETScreen aims to analyze the technical and financial viability of renewable energy, energy efficiency and cogeneration projects, including solar power, solar heat, wind power, marine energy, etc
 - (USA) Developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL), HOMER focuses on grid design optimization and provides simulation, optimization, sensitivity analysis and economic analysis regarding hydrogen, energy storage, natural gas, etc
 - (Germany) The District Energy Concept Adviser (DECA) of the German Federal Ministry for Economy and Technology and the Energy Atlas NRW of the state government of North Rhine-Westphalia in western Germany (NRW) provide information on energy supply and conversion to support energy strategy establishment

Chapter 3 Model Scope and Methodology

□ Scope of Model Development

- (GHG Emission Source Scope) Analysis performed on direct emissions in the first year(current year)
 - The national GHG emission report submitted to the UN covers only direct emissions, and the regional GHG emission statistics provided by the Greenhouse Gas Information Center (GIR) only consider direct emissions
 - Analysis is focused on direct emissions in the first year(current year), and the second year will include indirect emissions

- **(Spatial Scope) Boundary between direct and indirect emissions is set with a spatial range**
 - Physical and regional space that requires establishment of a carbon-neutral strategy is defined as “space” and the space where zones/boundaries for GHG emission sources are separated is set as the spatial scope of the current study
 - Since GHG emission statistics, which are the basic data for carbon neutrality analysis, are currently provided at the regional level, the analysis was performed on 17 regional municipalities in the current year
- **(Technical Scope) 9 technologies in the energy transition sector and forest sinks were set as the technical scope**
 - Among the 10 fields including transition, industry, building, and transportation and etc, the transition sector, with the largest GHG emissions, and forest sink were set as the analysis targets for the current year
 - Through the review of 「Climate Technology Classification System」, 「Act on Promotion of Development, Use, and Dissemination of New Energy and Renewable Energy」 and 「Carbon-neutral Key Technologies (draft)」, ① solar power, ② wind power, ③ bio energy, ④ hydropower, ⑤ marine energy (tidal current, tidal power, wave power), ⑥ hydrogen fuel cell, ⑦ solar heat, ⑧ geothermal, ⑨ hydrothermal and ⑩ forest sinks are included in the technical scope

<Table> Research Scope of CATAS-BASIC(1st yr)

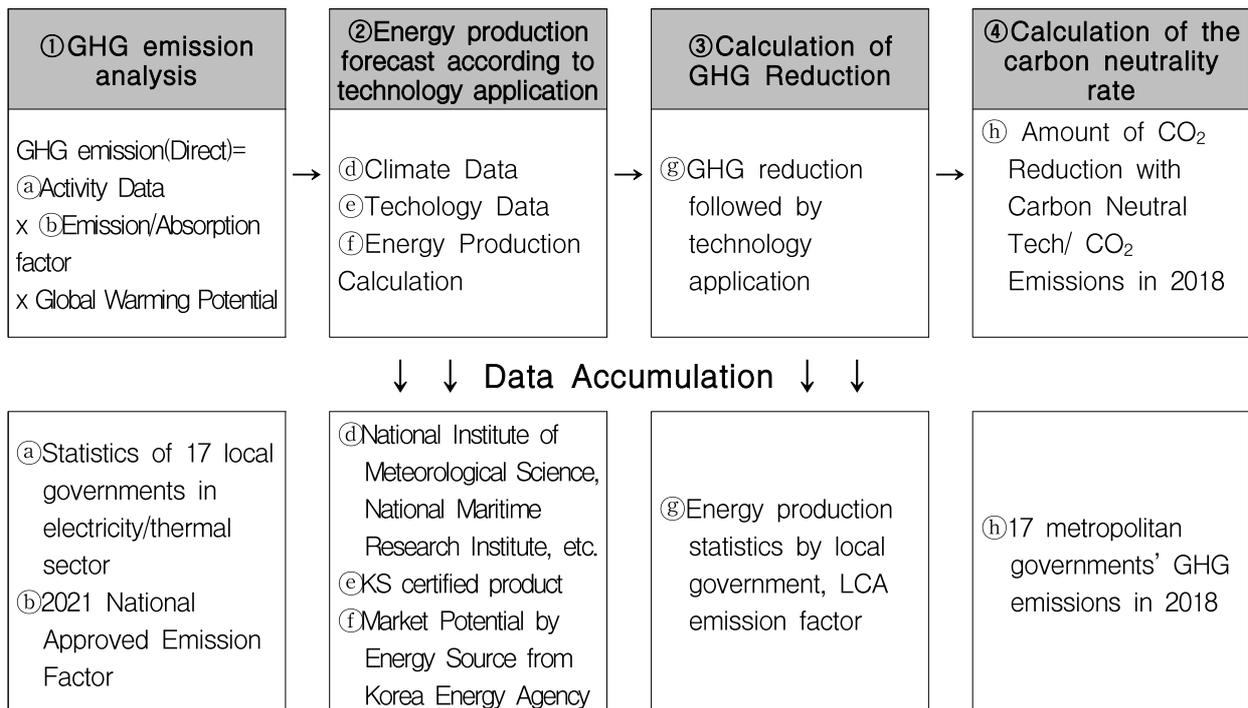
GHG Emission Scope	Spatial Scope	Technical Scope
Direct Emissions	boundary between direct and indirect emissions *Verification using data from 17 local governments	10 Energy Transition Technologies

□ Development of Carbon Neutrality Assessment Methodology and Scenario Study

○ Establishment of carbon neutrality rate evaluation methodology in 4 steps

- (①GHG emission analysis) Establish activity data for each local government through cooperation with GIR, and analyze GHG emissions status in 2018 for local government and energy source to diagnose the current local government's carbon neutrality rate
- (②Energy production forecast according to technology application) Collect and process monthly weather information for each local government, and build a KS certified product technical information database to establish a methodology for calculating energy production through linking climate information and technical information
- (③Calculation of GHG Reduction) Estimation of GHG reduction followed by technology application by analyzing the effect of replacing existing fossil fuels with the technologies and GHG emission analysis based on Life Cycle Assessment (LCA)
- (④Calculation of the carbon neutrality rate) Deriving the carbon neutrality rate by looking at the ratio of reductions from GHG emissions in 2018, due to the technology application

<Table> Data Construction of Carbon Neutrality Estimation Process



- **Review on carbon neutrality scenario evaluation research and future research**
 - A review of domestic and foreign studies that conducted various scenario construction and evaluation to achieve carbon neutrality and analysis of areas where new and renewable energy can be introduced
 - Review of spatial information related to renewable energy resources that can be used for scenario analysis (Energy Technology Research Institute, Meteorological Administration, Ministry of Environment, etc.)
 - Plans to propose an optimal technology path by reflecting the maximization of electricity production using new and renewable energy and minimization of costs and GHG emissions through future scenario analysis

□ **Web-Based Program Development**

- **Construction of a detailed process for developing a web-based carbon neutrality evaluation program**
 - The development methodology consists of six core processes including requirements, analysis/design, implementation, testing, implementation, and business modeling
 - Consideration of standardization factors for quality assurance, communication function improvement and maintenance for continuous function and data exchange between the established and existing systems
- **The system configuration of the program consists of database, web server, and user interface**
 - Representation of the carbon neutrality rate for each spatial unit in the program through collection of emission data, DB construction, calculation of the carbon neutrality rate, and display it based on GIS along with regional information for each local government
 - Development of energy generation calculation simulation module based on technical specifications, technical details, and meteorological factor database for 12 climate technologies per spatial unit
- **Security and Data Requirements**
 - Establishment of administrative security, technical security, and physical security management system to comply with security requirements for system establishment and development related information
 - Design a DB considering future scalability by applying data governance and standards, and rearrange internal data through data reengineering (data standardization and structuring)

Chapter 4 Model Case Study

□ Results of Model Trial Application in Seoul City

○ Analysis of Seoul's Carbon Neutrality Policy Goals

- Seoul Metropolitan Government (2021) announced 74 tasks in the 5 categories of ① Green Building, ② Green Mobility, ③ Green Forest, ④ Green Energy, and ⑤ Green Cycle as a part of '2050 GHG Reduction Plan'
- In the field of energy transition, establishment of plan for expansion of solar and fuel cell facilities, discovery and use of new and renewable energy such as small hydro and hydrothermal, and construction of Seoul Energy Information Center

<Table> Major Policies by Sector in Seoul's 「2050 GHG Reduction Plan」

Sector	Key Policies
① Expansion of solar photovoltaic	· Expand solar power facilities to 500MW by 2022 and 5GW by 2050
② Expansion of fuel cell supply	· Expand the supply of fuel cell facilities to 3000MW by 2022 and 1GW by 2050
③ Discovering and using new and renewable energy	· Installation of small hydroelectric power plant(2.5MW) in Jamsil barrage · Expand the supply of cooling and heating by installing new hydrothermal facilities such as Han River Flood Control Center(350kW), Gangnam Samsung Hospital(40MW), Yeongdong-daero Complex Transfer Center(14MW)
④ Establishment of Seoul Energy Information Center	· Energy data integrated management and energy efficiency platform establishment for Magok region in 2021 · Establishment of energy information center through platform expansion throughout Seoul from 2022

※ Source: 2050 Greenhouse Gas Reduction Promotion Plan (2021.5.4.)

○ Diagnosis of contribution of Seoul's carbon neutrality policy goals to carbon neutrality rate using CATAS alpha version

- Evaluation of contribution to GHG reduction and carbon neutrality rate by reflecting the plan to install and expand new power generation facilities using the Alpha version of CATAS developed in the current year
- In the case of solar power, it is impossible to reflect the supply target (500MW by 2022, 5GW by 2050) considering the current market potential, and it is possible to produce up to 43.38GWh of electricity
- In the case of hydrogen fuel cells, when the supply target (3000MW by 2022,

- 1GW by 2050) is achieved, production forecast results suggest about 2,417GWh (about 5.06% of Seoul's electricity consumption) in 2022, 8,760GWh of electricity in 2050(about 18.32% of entire consumption)
- When the plan to expand the supply of hydrothermal facilities is achieved, 577,150,068MJ of heating/cooling energy per year(Approximately 4.15% of household and commercial thermal energy consumption (332,000toe) in Seoul) production is forecasted
 - In the case of the small hydropower target, it is difficult to directly reflect and evaluate the theoretical power generation amount using the precipitation, fall, and watershed area for each local government and thus improvement is required with further sophistication
 - As a result of applying solar power, hydrogen fuel cell, and hydrothermal heat, out of 1.49 million tCO₂eq of emissions from the transition sector in Seoul, 0.43 million tCO₂eq was reduced with the introduction of technology, and the carbon neutrality rate in the transition sector was analyzed to be 28.94%
 - As a result of economic analysis, the LCOE of solar power is calculated to be 142 won/kWh (assuming a lifespan of 30 years) and 431 won/kWh for a hydrogen fuel cell (assuming a lifespan of 10 years)

[Figure] Result of CATAS Case Study on Seoul's Carbon Neutrality Plan



□ CATAS-Alpha Ver. Test Survey Analysis

- CATAS alpha version test with industry-university-research experts to diagnose the program development status and draw future tasks
 - A total of 45 experts responded to questionnaire items such as program satisfaction, usefulness, convenience, and appropriateness of energy production calculation formula for each technology in CATAS alpha version
 - High level of overall satisfaction with the program and positive evaluation that it is a useful program for carbon neutrality
 - Additional opinions suggest that it is necessary to simplify the program to be used for the general public. In order to support the establishment of carbon neutrality plans of local governments, changes in the user interface and technology selection method are necessary through reflecting opinions of actual users
 - It is expected that the program will be upgraded in the future through continuous cooperation with the technical advisory group obtained through the survey

Chapter 5 Conclusion and future plan

□ Conclusion

- This study was conducted to evaluate the applicability of technology to realize national carbon neutrality and to establish a step-by-step technology introduction strategy through Carbon-neutral Assessment based on Technology Application Scenario(CATAS)
 - It includes the function to investigate the current status of greenhouse gas emissions in space and to analyze the actual greenhouse gas reduction when various carbon-neutral technologies are applied
 - The input data of the model are activity data, emission coefficient, climate information, technical information, and cost, and the results are greenhouse gas reduction and economic analysis based on the prediction of alternative energy power and heat production
 - It will be developed by dividing it into ‘CATAS-BASIC’ and ‘CATAS-PRO’ according to the purpose of use by consumers, and for three years from this year

- ‘CATAS-BASIC’ will be developed for the general public and local government greenhouse gas reduction managers
- The CATAS-BASIC alpha version was used to diagnose the greenhouse gas reduction plan in Seoul, and a survey of 45 industry, academia, and research experts was conducted on the alpha version test
- It is expected to be used as a two-way point to support carbon-neutral decision-making through the development of CATAS-BASIC

□ Future plan

- **(Indirect Emissions Analysis)** Diversify analysis information by comparing and analyzing indirect Emissions such as electricity and heat as well as greenhouse gases directly emitted in the space
- **(Advanced Energy Calculation)** This year, the draft calculation formula developed by each technology is advanced and specified to enhance the reliability of the energy production prediction analysis results
- **(Expansion of technology in the transportation sector)** Analysis of greenhouse gas reduction in the road part due to the supply of electric vehicles, hydrogen cars, etc., as well as technology in the railway, aviation, and shipping sectors
- **(Enhancing the usefulness and convenience of the program)** All analysis processes from the current status of greenhouse gas emissions to the calculation of greenhouse gas emissions to carbon neutrality are analyzed on one screen, and the screen composition is modified and supplemented in a way that specific analysis results are displayed on the next screen in infographic format

약 어

약어	의미	한국어 명칭
AEP	Annual Energy Production	연간발전환산량
API	Average Power Intercepted	평균추출출력
ASOS	Automated Synoptic Observing System	지점 종관기상관측소
BECCS	Bioenergy with carbon capture and storage	바이오에너지 탄소 포집, 저장기술
BEIS	UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy	英 기업 에너지산업 전략부
C40	Cities Climate Leadership Group	도시기후리더쉽 그룹
CAPEX	Capital expenditures	초기투자비
CATAS	Carbon-neutral Assessment based on Technology Application Scenario	탄소중립 기술시나리오 모형
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage	탄소포집, 활용, 저장
CEDA	Comprehensive Environmental Data Archive	상품 및 서비스에 대한 간접 수명 주기 배출계수
COP	Coefficient of performance	성능계수
CREST	CO ₂ Reduction Effect Simulation Tool	日탄소감축영향시물레이션툴
DECA	District Energy Concept Adviser	獨 연방경제기술부
EG-TIPS	Energy GHG Technology Information Platform Service	한국에너지 공단의 에너지절감 지식포털
FLIGHT	Facility Level Information on Green House Gases Tool	美 시설단위 온실가스 배출정보 툴
GHGRP	Greenhouse Gas Reporting Program	온실가스 보고 프로그램
GIR	Greenhouse Gas Inventory and Research Center	온실가스종합정보센터
GWP	Global Warming Potential	지구온난화지수
HCF	Household Carbon Footprints	가정 탄소발자국
IAM	Integrated Assessment Model	통합 평가 모델링
ICLEI	Local Governments for Sustainability	자치단체국제환경협의회
IEA	International Energy Agency	국제 에너지 기구
IGC	Installed Generating Capacity	설비용량
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	정부간 패널

LANUV	Agència protecció del Medi Ambient de Rin del Nord - Westfàlia	獨 국가 자연환경 소비자 보호국
LCA	Life Cycle Assessment	전과정평가
LCI	Life Cycle Inventory Database	전과정목록
LCOE	Levelised Cost of Energy	에너지균등화발전비용
LDAPS	Local Data Assimilation and Prediction System	기상청 현업 국지예보모델
LULUCF	Land Use, Land Use Changes and Forestry	토지이용, 토지이용변화 및 산림
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA	다기준 의사결정법
NDC	Nationally Determined Contributions	국가 온실가스 감축목표
NPV	Net Present Value	순현재가치
NREL	National Renewable Energy Laboratory	미국 재생에너지 국립연구소
NRW	North Rhine-Westphalia	독일 서부의 노르트라인 베스트발젠
OPEX	Operating expenditure	운영유지비
PBCC	Place-Based Carbon Calculator	英 위치기반 탄소 계산기
PD	Power Density	일률밀도
UNDP	United Nations Development Programme	유엔 개발 계획
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change	기후변화협약
US EPA	United States Environmental Protection Agency	미국 환경보호청
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development	세계지속가능발전 기업위원회
WRI	World Resources Institute	세계자원연구소

목 차

요약문	i
제1장 서 론	1
제 1 절 연구의 배경 및 목표	1
1. 연구 배경 및 필요성	1
2. 연구목표	4
제 2 절 연구내용 및 추진체계	6
1. 연구 내용	6
2. 연구 프로세스	9
3. 연구 추진체계	10
제 2 장 대내외 환경분석	13
제 1 절 국내 지역단위 탄소중립 전략수립 현황	13
1. 지자체 탄소중립 선언 동향	13
2. 지자체 탄소중립 정책 및 전략 수립 사례	14
3. 지자체 온실가스 배출량 산정방식	17

제 2 절	국외 지역단위 탄소중립 전략수립 현황	19
1.	지자체 탄소중립 선언 현황	19
2.	국제 지역단위 온실가스 배출량 인벤토리 산정지침	22
3.	국외 온실가스 배출량 공간지도	23
제 3 절	국내외 탄소중립 관련 웹프로그램	27
1.	공간단위 온실가스 배출량 분석 프로그램	27
2.	에너지 분석 프로그램	34
제 4 절	소결	44
제 3 장	모형 범위 및 방법론	47
제 1 절	모형 범위	47
1.	온실가스 배출원 범위	47
2.	공간적 범위	48
3.	기술적 범위	49
제 2 절	모형 방법론 개발	54
1.	탄소중립률 산정	54
2.	시나리오 방법론 연구	100
제 3 절	모형의 웹기반 프로그램 개발	113
1.	개발 프로세스	113
2.	시스템구성	121

3. 보안 및 데이터 요구사항	125
제 4 절 소결	129
제 4 장 모형 시범적용	133
제 1 절 서울시 탄소중립 정책 목표 진단	133
1. 서울시 2050 온실가스 감축 추진계획	133
2. CATAS 알파버전을 통한 서울시 탄소중립 정책목표 진단	136
제 2 절 CATAS 알파버전 테스트 설문조사	147
1. 설문조사 개요	147
2. 설문조사 항목	147
3. 설문조사 결과	148
제 3 절 소결	158
제 5 장 결론 및 향후 계획	161
제 1 절 결론	161
제 2 절 향후 계획	163
참고문헌	164
[별첨1] 도시단위 탄소중립 선언 현황	173
[별첨2] CATAS 알파버전 테스트 설문조사 상세결과	180

표 목 차

<표 1-1> 국내외 탄소중립 웹프로그램 비교분석	3
<표 1-2> CATAS-BASIC 및 CATAS-PRO 차이	4
<표 1-3> CATAS-BASIC 1차년도 연구범위	6
<표 1-4> 탄소중립률 산정 프로세스	7
<표 2-1> 지자체 탄소중립 대응 경과	13
<표 2-2> 지자체 탄소중립 추진전략 현황	16
<표 2-3> 온실가스 배출량 산정방법	18
<표 2-4> UN 기후목표상향연맹의 참가자 수	19
<표 2-5> GHG 프로토콜의 인식(recognition) 방법	22
<표 2-6> PBCC의 공간별 탄소배출량 계산 주요 구성요소	28
<표 2-7> 일본 CREST 분석 프로세스	29
<표 2-8> RETScreen 프로그램의 구성 도식표	37
<표 2-9> HOMER 프로그램의 구성 도식표	39
<표 3-1> 대한민국 2050 탄소중립 시나리오	49
<표 3-2> 기후기술분류체계	50
<표 3-3> 대한민국 2050 탄소중립 시나리오	50
<표 3-4> 탄소중립 중점기술(안) 기술분류체계-에너지부문	51
<표 3-5> 탄소중립 중점기술(안) 기술분류체계 - 전환부문	52
<표 3-6> 에너지전환부문 기술별 정의	53
<표 3-7> 탄소중립률 산정 프로세스별 데이터 구축 현황	54
<표 3-8> 2018년 지자체별 온실가스 배출량 및 부문별 배출량 비율	55
<표 3-9> 2018년 공공전기 및 열 생산 부문 지자체별·성상별 온실가스 배출량 ...	57
<표 3-10> 2019년 배출현황 기준 지자체별·부문별 탄소중립률 현황	59
<표 3-11> 기술별 활용 데이터 및 출처	61
<표 3-12> 기술별 KS인증 품목 및 설비 수	61
<표 3-13> 기술별 에너지 생산량 산정식 요약	62

<표 3-14> 지자체별 · 월별 평균 일사량	64
<표 3-15> 지자체별 태양광 시장잠재량	66
<표 3-16> 지자체별 평균풍속, 평균기압 및 연평균기온	67
<표 3-17> 지자체별 풍력 시장잠재량	70
<표 3-18> 지자체별 유역면적, 연 강수량 및 월별 강수량	71
<표 3-19> 지자체별 수력 시장잠재량	73
<표 3-20> 지자체별 평균조차	75
<표 3-21> 지자체별 조력발전 잠재량	76
<표 3-22> 지자체별 해양의 평균유속 및 면적	77
<표 3-23> 지자체별 조류발전 잠재량	78
<표 3-24> 지자체별 유의파고, 주기, 에너지 주기 10년 빈도 평균값	79
<표 3-25> 지자체별 파력발전 잠재량	81
<표 3-26> 지자체별 바이오가스화 시설 바이오가스 생산량	84
<표 3-27> 지자체별 · 월별 일사량	85
<표 3-28> 지자체별 태양열 시장잠재량	88
<표 3-29> 지자체별 지열 시장잠재량	90
<표 3-30> 지자체별 수열 시장잠재량	92
<표 3-31> 주요 산림수종별 표준탄소 흡수량	93
<표 3-32> 세분류토지피복도 기반 지자체별 조림 가능면적	94
<표 3-33> 연료별 배출계수와 대체 우선순위	95
<표 3-34> 경기도 연료별 온실가스 감축률 계산 (예시)	96
<표 3-35> LCA 기반 기술별 배출계수 평균값	98
<표 3-36> EnergyPlan 모형 활용 시나리오별 에너지 믹스	103
<표 3-37> 국가 신재생에너지 잠재량 평가결과	105
<표 3-38> 풍력발전 적지지역 탐지 기준	106
<표 3-39> 환경성평가 기준	108
<표 4-1> 서울시 「2050 온실가스 감축추진계획」 부문별 주요 정책	134
<표 4-2> 서울시 「2050 온실가스 감축추진계획」 에너지 부문별 주요 계획 ...	135
<표 4-3> 경제성분석을 위한 주요 지표 및 수치	144
<표 4-4> CATAS 알파버전 테스트 설문조사 내용	148

그림 목 차

[그림 1-1] 글로벌 탄소중립 선언 현황	1
[그림 1-2] 공간의 경계에 따른 온실가스 직접/간접배출원	2
[그림 1-3] 탄소중립 기술시나리오 모형(CATAS)-BASIC 연차별 목표	5
[그림 1-4] CATAS-BASIC 알파버전 화면구성	8
[그림 1-5] CATAS-BASIC 1차년도 추진프로세스	9
[그림 1-6] 연구 추진체계	10
[그림 2-1] 국가 온실가스 인벤토리 작성 체계	17
[그림 2-2] 지역 온실가스 배출량 산정 절차	18
[그림 2-3] 글로벌 지역단위 탄소중립 선언 현황	20
[그림 2-4] C40 도시기후리더십 그룹 가입도시	21
[그림 2-5] 미국 Facility Level Information on Green House Gases Tool (FLIGHT) ...	23
[그림 2-6] FLIGHT 프로그램 내 공간 및 시설기반 조건설정 화면	24
[그림 2-7] 영국 CO2 Interactive Map	25
[그림 2-8] UK 최종사용자 기준 온실가스 배출량 정보(kt CO2 2020)	26
[그림 2-9] 영국 Place-Based Carbon Calculator(PBCC)	27
[그림 2-10] 일본 CREST 상세 분석 프로세스	30
[그림 2-11] 미국 우편번호 기반 가정 평균 탄소 발자국 현황	32
[그림 2-12] 미국 지역별 평균 가정 탄소발자국	33
[그림 2-13] EG-TIPS 에너지온실가스 종합정보 플랫폼 메인화면	34
[그림 2-14] EG-TIPS 탄소중립 시뮬레이터 화면	35
[그림 2-15] 캐나다 천연자원부 RETScreen 구동화면	36
[그림 2-16] 미국 재생에너지 국립연구소 HOMER 구동화면	38
[그림 2-17] 독일 연방경제기술부 DECA 구동화면	41
[그림 2-18] 독일 노르트라인 베스트발렌 Energy Atals NRW 구동화면	41
[그림 2-19] 독일 NRW Scenario Calculator 구동화면	42
[그림 2-20] 고도별 풍력에너지 발전량 밀도	43

[그림 3-1] 온실가스 배출원 구분	47
[그림 3-2] 태양광 자원지도 평균 경사면 일사량(5년 평균)	63
[그림 3-3] 수집한 태양광 패널 제품정보(예시)	65
[그림 3-4] 풍력 자원지도 고도 10m 평균 풍속분포	67
[그림 3-5] 수집한 풍력발전기 제품정보(예시)	68
[그림 3-6] 세 가지 제품의 출력곡선	68
[그림 3-7] 국립해양조사원 바다누리 해양정보 서비스 조위관측소 정보	74
[그림 3-8] 우리나라 해양경계	76
[그림 3-9] 심해설계과 격자점 분포	79
[그림 3-10] 수집한 연료전지 제품정보(예시)	82
[그림 3-11] 수집한 바이오가스플랜트 시설정보(예시)	83
[그림 3-12] 수집한 태양열 제품정보(예시)	87
[그림 3-13] 수집한 지열 제품정보(예시)	89
[그림 3-14] 본 연구에서 가정한 월별 냉·난방시간	89
[그림 3-15] 수집한 수열 제품정보(예시)	91
[그림 3-16] LCA 기반 온실가스 배출계수 산정 모식도	97
[그림 3-17] 2018년 대비 2019년 탄소중립률 분포 현황지도	99
[그림 3-18] 한국형 통항평가 모형 시나리오별 이산화탄소 배출량 평가결과 ..	100
[그림 3-19] 딥러닝 기반 제주 신재생에너지 시나리오 분석 연구 모식도	101
[그림 3-20] NASA MERRA-2 활용 발전량 및 CO2 배출량	102
[그림 3-21] 시나리오별·시기별 전력생산량 예측값	103
[그림 3-22] 최적 적응경로 탐색 모식도	104
[그림 3-23] 육상풍력 고려 대상 지도	107
[그림 3-24] 천리안 영상 범선면 직달일사량(좌), 풍력밀도(우) 및 법적 환경규제지역 ...	110
[그림 3-25] 태양광기상자원지도(좌), 풍력기상자원지도(우)	110
[그림 3-26] 태양광기상자원지도(좌), 풍력기상자원지도(우) 및 회피검토지역(회색)과 신중검토지역(핑크색)	111
[그림 3-27] CATAS 시나리오 분석 개념도	112
[그림 3-28] 프로그램 개발 프로세스	113
[그림 3-29] 프로그램 개발 방법론 및 적용 방안	114
[그림 3-30] 개발 프로세스 상세 절차 구성도	115
[그림 3-31] 시스템 표준화 내용 및 방법	116
[그림 3-32] 시스템 효율성 및 안정성을 위한 기술적용	117

[그림 3-33] REST와 SOAP 간의 기술 특성 비교 118

[그림 3-34] JSON과 XML의 구조 비교 119

[그림 3-35] Angular의 특징점 및 브라우저 지원 범위 120

[그림 3-36] 시스템 구성도 및 기능 구성도 121

[그림 3-37] 콘텐츠 대상자료 및 GIS 기반 정보 표출을 위한 요소 122

[그림 3-38] 기후기술 별 예상 에너지 산정량 산정 단계 123

[그림 3-39] 시스템 입출력 데이터 정리 및 DB화 124

[그림 3-40] 시스템 보안 요구사항 개요 125

[그림 3-41] 시스템 기술적 보안 요구사항 개요 126

[그림 3-42] 데이터 거버넌스 기본모델 및 표준화 구성요소 127

[그림 3-43] 데이터 표준화 세부내용 및 구축 방법론 128

[그림 4-1] 서울시 연도별 온실가스 감축 시나리오 133

[그림 4-2] 서울시 공간선정 136

[그림 4-3] 서울시 공간의 일반정보 137

[그림 4-4] 서울시 태양광 기술적용 138

[그림 4-5] 서울시 연료전지 기술적용 화면 139

[그림 4-6] 서울시 수열 기술적용 화면 140

[그림 4-7] 서울시 소수력 기술적용 화면 141

[그림 4-8] 서울시 기술분석 화면 142

[그림 4-9] 서울시 온실가스 배출량 분석 143

[그림 4-10] 서울시 경제성 분석화면 145

[그림 4-11] 서울시 리포트 146

[그림 4-12] 산학연별 응답자수 148

[그림 4-13] 기술별 응답자수 149

[그림 4-14] 공통질문 응답결과 151

[그림 4-15] 공간선정 화면 응답결과 152

[그림 4-16] 공간정보 화면 응답결과 153

[그림 4-17] 기술 화면 응답결과 153

[그림 4-18] 배출량 화면 응답결과 154

[그림 4-19] 경제성 화면 응답결과 154

[그림 4-20] 리포트 화면 응답결과 155

[그림 4-21] 기술별 질문 응답결과 : 에너지 생산량 산식의 적절성 157

C O N T E N T S

Summary	i
Chapter 1 Introduction	1
Section 1 Research Background and Objectives	1
1. Research Background and Significance	1
2. Research Objectives	4
Section 2 Research Contents and Structure	6
1. Research Contents	6
2. Research Process	9
3. Research Structure	10
Chapter 2 Domestic and International Environmental Analysis	13
Section 1 Domestic Regional-Unit Carbon Neutrality Strategies	13
1. Local Government's Carbon Neutrality Declaration	13
2. Local Government's Carbon Neutrality Policy and Strategies	14
3. Local Government's GHG Emission Calculation Method	17

Section 2 International Regional-Unit Carbon Neutrality Strategies	19
1. Local Government’s Carbon Neutrality Declaration	19
2. Foreign Regional GHG Emissions Inventory Calculation Guidelines	22
3. International GHG Emission Spatial Map	23
Section 3 International Carbon Neutrality-Relevant Web Program	27
1. Spatial GHG Emission Analysis Program	27
2. Energy System Analysis Program	34
Section 4 Conclusion	44
Chapter 3 Model Scope and Methodology	47
Section 1 Model Scope	47
1. GHG Emission Scope	47
2. Spatial Scope	48
3. Technical Scope	49
Section 2 Model Methodology Development	54
1. Calculation of Carbon Neutrality Rate	54
2. Scenario Analysis Methodology	100
Section 3 Web-Based Program Development	113
1. Development Process	113
2. System Structure	121

3. Security and Data Requirements	125
Section 4 Conclusion	129
Chapter 4 Model Case Study	133
Section 1 Diagnosing Seoul’s Carbon Neutrality Policy Goals	133
1. Seoul’s 2050 GHG Reduction Plans’	133
2. Diagnosing Seoul’s Carbon Neutrality Policy With CATAS-Alpha Ver.	136
Section 2 CATAS-Alpha Ver. Test Survey Analysis	147
1. Survey Overview	147
2. Survey Items	147
3. Survey Results	148
Section 3 Conclusion	158
Chapter 5 Conclusion and Future Plans	161
Section 1 Conclusion	161
Section 2 Limitations and Future Plans	163
References	164
[Appendix 1] City-Level Carbon Neutrality Declaration	173
[Appendix 2] CATAS-Alpha Ver. Test Detailed Survey Results	180

List of Tables

<Table 1-1> Comparative Analysis of Domestic and International Carbon Neutrality Web Programs	3
<Table 1-2> Difference Between CATAS-BASIC and CATAS-PRO	4
<Table 1-3> First Year Research Scope of CATAS-BASIC	6
<Table 1-4> Carbon Neutrality Calculation Process	7
<Table 2-1> Progress of Local Government's Carbon Neutrality Response	13
<Table 2-2> Status of Local Government's Carbon Neutral Promotion Strategy	16
<Table 2-3> GHGs Calculation Method	18
<Table 2-4> Number of Participants of Climate Ambition Alliance: Net Zero 2050	19
<Table 2-5> GHG Protocol Recognition Method	22
<Table 2-6> Major Components of PBCC Calculation of Carbon Emissions by Space	28
<Table 2-7> Japanese CREST Analysis Process	29
<Table 2-8> Schematic Diagram of RETScreen Program	37
<Table 2-9> Schematic Diagram of HOMER Program	39
<Table 3-1> S.Korea's 2050 Carbon Neutrality Scenario	49
<Table 3-2> Climate Technology Classification System	50
<Table 3-3> S.Korea's 2050 Carbon Neutral Scenario	50
<Table 3-4> Technology Classification System for Carbon-Neutral Technologies (Energy Sector)	51
<Table 3-5> Technology Classification System for Carbon-Neutral Technologies (Transition Sector)	52
<Table 3-6> Definition by Technology in Energy Conversion Sector	53
<Table 3-7> Data Construction of Carbon Neutrality Estimation Process	54
<Table 3-8> GHGs by Local Government and Emission Ratio by Sector(2018) ..	55
<Table 3-9> GHGs by Local,Provincial Government(Public Electricity,Heat Production Sector,2018)	57
<Table 3-10> Status of Carbon Neutrality by Local Government and Sector Based on 2019 Emission	59

<Table 3-11> Technological Data and Sources	61
<Table 3-12> Number of KS-Certified Items and Facilities	61
<Table 3-13> Summary of Energy Production Equation	62
<Table 3-14> Average Monthly Insolation	64
<Table 3-15> Solar Market Potential	66
<Table 3-16> Average Wind Speed, Average Atmospheric Pressure, and Average Annual Temperature	67
<Table 3-17> Wind Power Market Potential	70
<Table 3-18> Watershed Area, Annual and Monthly Precipitation	71
<Table 3-19> Hydropower Market Potential	73
<Table 3-20> Average Tidal Difference	75
<Table 3-21> Tidal Power Generation Potential	76
<Table 3-22> Average Flow Velocity and Area of the Ocean	77
<Table 3-23> Potential Tidal Power Generation by Local Government	78
<Table 3-24> Significant Wave Height, Cycle, and Energy Cycle(10-yr Average) ...	79
<Table 3-25> Wave Power Potential	81
<Table 3-26> Biogas Production of Biogas Plants	84
<Table 3-27> Monthly Solar Insolation	85
<Table 3-28> Solar Market Potential	88
<Table 3-29> Geothermal Market Potential	90
<Table 3-30> Hydrothermal Market Potential	92
<Table 3-31> Standard Carbon Absorption by Major Forest Tree Species	93
<Table 3-32> Potential Reforestation area based on Subcategory Land Cover Map	94
<Table 3-33> Emission Factors by Fuel and Substitution Priority	95
<Table 3-34> Example of Calculation of GHG Reduction Rate by Fuel in Gyeonggi-do	96
<Table 3-35> LCA-Based Average Emission Factor Value by Technology	98
<Table 3-36> Energy Mix by EnergyPlan Model Based Scenario	103
<Table 3-37> National Renewable Energy Potential Evaluation Results	105
<Table 3-38> Wind Power Generation Site Detection Criteria	106
<Table 3-39> Environmental Evaluation Criteria	108
<Table 4-1> Major Policies by Sector in Seoul's 「2050 GHG Reduction Plan」 ...	134
<Table 4-2> Major Plans by Energy Sector in Seoul's 「2050 GHG Reduction Plan」 ·	135
<Table 4-3> Key Indicators and Numerical Values for Economic Analysis	144
<Table 4-4> Contents of CATAS Alpha Version Test Survey	148

List of Figures

[Figure 1-1] Status of Global Carbon Neutrality Declaration	1
[Figure 1-2] Direct/Indirect GHGs Sources by Space Boundaries	2
[Figure 1-3] Annual Plans for Development of Carbon Neutrality Technology Scenario Model (CATAS)-BASIC	5
[Figure 1-4] CATAS-BASIC Alpha Version Module Structure	8
[Figure 1-5] CATAS-BASIC 1st Year Process	9
[Figure 1-6] Research Promotion Structure	10
[Figure 2-1] National GHG Inventory Compilation System	17
[Figure 2-2] Local GHGs Calculation Procedure	18
[Figure 2-3] Carbon Neutrality Declaration at Global Regional Unit	20
[Figure 2-4] C40 City Climate Leadership Group	21
[Figure 2-5] US Facility Level Information on Green House Gases Tool (FLIGHT)	23
[Figure 2-6] Space and Facility-Based Condition Setting in FLIGHT program	24
[Figure 2-7] UK CO ₂ Interactive Map	25
[Figure 2-8] UK End User-Based GHGs Information (kt CO ₂ 2020)	26
[Figure 2-9] UK Place-Based Carbon Calculator (PBCC)	27
[Figure 2-10] Detailed Analysis Process on Japan's CREST	30
[Figure 2-11] Average Carbon Footprint Status of U.S. Postal Code-Based Households ·	32
[Figure 2-12] Average U.S. Household Carbon Footprint by Region	33
[Figure 2-13] EG-TIPS Energy GHG Comprehensive Information Platform(Main Screen) ··	34
[Figure 2-14] EG-TIPS Carbon Neutral Simulator	35
[Figure 2-15] Canadian Ministry of Natural Resources' RETScreen	36
[Figure 2-16] US Renewable Energy National Laboratory's HOMER	38
[Figure 2-17] German Federal Ministry of Economy and Technology's DECA	41
[Figure 2-18] Germany Nord Rhine-Westwalsen Energy's Atals NRW	41
[Figure 2-19] German NRW's Scenario Calculator	42
[Figure 2-20] Wind Energy Generation Density by Altitude	43

[Figure 3-1] Classification of GHGs Sources	47
[Figure 3-2] Average Insolation on Slope of Solar Resource Map (5-yr Average) ..	63
[Figure 3-3] Example of Solar Panel Product Information	65
[Figure 3-4] Average Wind Speed Distribution at 10m Altitude in Wind Resource Map ..	67
[Figure 3-5] Example of Wind Power Generator Product Information	68
[Figure 3-6] Output Curves of Products	68
[Figure 3-7] National Oceanic and Atmospheric Research Institute Nadanuri Marine Information Service Tidal Observatory Information	74
[Figure 3-8] Korea's Maritime Boundary	76
[Figure 3-9] Deep Sea Design Wave Grid Point Distribution	79
[Figure 3-10] Fuel Cell Product Information (Example)	82
[Figure 3-11] Biogas Plant Facility Information (Example)	83
[Figure 3-12] Solar Product Information (Example)	87
[Figure 3-13] Geothermal Product Information (Example)	89
[Figure 3-14] Monthly Cooling and Heating Time Assumed	89
[Figure 3-15] Hydrothermal Product Information (example)	91
[Figure 3-16] LCA-Based GHGs Factor Calculation Schematic Diagram	97
[Figure 3-17] Distribution of Carbon Neutrality Ratio in 2019 compared to 2018 ...	99
[Figure 3-18] Evaluation of CO ₂ Emissions by Scenario Using Integrated Evaluation Model for S.Korea	100
[Figure 3-19] Deep Learning-based Jeju Renewable Energy Scenario Analysis Schematic Diagram	101
[Figure 3-20] NASA MERRA-2 Utilized Power Generation and CO ₂ Emissions	102
[Figure 3-21] Estimated Power Generation by Scenario and Period	103
[Figure 3-22] Schematic Diagram of Optimal Adaptive Path Search	104
[Figure 3-23] Map of Onshore Wind Power Considerations	107
[Figure 3-24] Direct Lunar Insolation (left), Wind Density (right) and Legally regulated area ...	110
[Figure 3-25] Solar Meteorological Resource Map (Left), Wind Meteorological Resource Map (Right)	110
[Figure 3-26] Solar Meteorological Resource map (left), Wind Meteorological Resource Map (right), and Avoidance Review Area (grey) and Prudential Review Area (pink)	111
[Figure 3-27] CATAS Scenario Analysis Conceptual Diagram	112

[Figure 3-28] Program Development Process	113
[Figure 3-29] Program Development Methodology and Application Plan	114
[Figure 3-30] Development Process Detailed Procedure Diagram	115
[Figure 3-31] System Standardization Methods	116
[Figure 3-32] Techniques for System Efficiency and Stability	117
[Figure 3-33] Comparison of Technical Characteristics Between REST and SOAP	118
[Figure 3-34] Structure Comparison of JSON and XML	119
[Figure 3-35] Angular's Features and Browser Support Range	120
[Figure 3-36] System Configuration Diagram and Function Diagram	121
[Figure 3-37] Elements for Content Target Data and GIS-Based Information Display	122
[Figure 3-38] Estimated Energy Estimation Steps for Climate Technologies	123
[Figure 3-39] System I/O Data Arrangement and DB	124
[Figure 3-40] Overview of System Security Requirements	125
[Figure 3-41] Overview of System Technical Security Requirements	126
[Figure 3-42] Data Governance Basic Model and Standardization Components	127
[Figure 3-43] Data Standardization and Construction Methodology	128
[Figure 4-1] Seoul GHG Reduction Scenarios by Year	133
[Figure 4-2] Seoul Space Selection	136
[Figure 4-3] General Information on Seoul	137
[Figure 4-4] Solar Technology Application in Seoul	138
[Figure 4-5] Fuel Cell Technology Application in Seoul	139
[Figure 4-6] Hydrothermal Technology Application in Seoul	140
[Figure 4-7] Small hydropower Technology Application in Seoul	141
[Figure 4-8] Technical Analysis	142
[Figure 4-9] Seoul's GHG Analysis	143
[Figure 4-10] Economic Analysis	145
[Figure 4-11] Summary Report	146
[Figure 4-12] Number of Respondents by Industrial/Academic Categories	148
[Figure 4-13] Number of Respondents by Technology	149
[Figure 4-14] Answers Collected for Common Questions	151
[Figure 4-15] Responses for Space Selection Menu	152
[Figure 4-16] Responses for Spatial Information Menu	153
[Figure 4-17] Responses for Technology Menu	153

[Figure 4-18] Responses for Emissions Menu 154

[Figure 4-19] Responses for Economic Feasibility Menu 154

[Figure 4-20] Responses for Report menu 155

[Figure 4-21] Answers Collected for Technology-Specific Questions: Adequacy of
Equation for Energy Production 157

I

서론

제1절 연구의 배경 및 목표

제2절 연구내용 및 추진체계

제 1 장 서론

제 1 절 연구의 배경 및 목표

1. 연구 배경 및 필요성

1.1. 탄소중립과 공간 구분

파리기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 1.5℃ 특별보고서¹⁾에서 파리협정 목표를 달성하기 위해서는 전지구적으로 2050년까지 탄소중립을 달성해야 함을 제시하였다. 이후로 전세계적으로 탄소중립에 대한 논의가 확산되었으며, 현재 136개 국가가 탄소중립을 선언하였다. 그리고 탄소중립 목표 달성을 위해서 국가뿐만 아니라 지역, 도시 등도 함께 노력해야 달성할 수 있다는 중요성이 점점 커지기 시작하였고, 지역, 도시 단위 등에서도 탄소중립을 선언하였다. 그림 1-1과 같이 현재 지역단위에서는 116개, 도시단위에서는 239개가 탄소중립을 선언한 상태이다.

[그림 1-1] 글로벌 탄소중립 선언 현황

(2022년 10월 기준)



※ 출처: Enovate(2022) 제공, 저자 수정.

탄소중립의 달성은 일정 공간범위 내에서 온실가스 배출량과 흡수량을 제로(Net Zero)로 만들어 대기 중 추가적인 온실가스 증가를 막는 것을 의미한다. 이에 따라 배출량과 흡수량을 측정·관리할 공간 범위의 설정이 요구된다. 공간(Space)의 사전적 정의는 어떤 물질 또는 물체가 존재할 수 있거나 어떤 일이 일어날 수 있는 장소를 뜻한다. 공간의 경계는 내부와 외부, 육지와 해양, 국가와 국가, 도시와 농어촌, 국가와 지자체 등으로 공간의 자연 환경적 특성, 공간의 활용 목적 등에 따라 다양하게 구분될 수 있다. 그리고 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 파리협정(Paris Agreement)에 따른 온실가스 감축 의무와 같은 경우에는 “국가” 라는 공간의 경계에서 온실가스 배출량을 관리하는데 목표를 두고 있다고 할 수 있다.

1) 출처: IPCC(2018), “Special Report on Global Warming of 1.5℃”

그림 1-2와 같이 온실가스 배출원은 공간 경계의 내부에서 온실가스 배출될 때는 직접배출원, 직접적인 온실가스 배출은 없으나 전기, 열 등의 소비로 유발되는 온실가스 배출을 간접배출로 정의한다. UNFCCC 당사국은 IPCC 가이드라인에 따라 온실가스 배출량에 대한 국가별 통계보고서를 제공할 의무를 가지고 있으며, 이에 따라 현재 각 국가들은 온실가스 직접배출원에 대한 통계만을 생산하고, 이에 대한 온실가스 감축목표를 수립하고 있다.

공간은 인구, 산업, 자연환경 등 여건에 따라 온실가스 배출 특성에서 많은 차이를 나타내므로 탄소중립 목표를 효과적으로 달성하기 위해서는 공간 특성에 적합한 경로 설계가 필요하다. 예를 들어 도시 인구는 2030년 60.4%, 2050년 66%²⁾까지 증가할 것으로 예측되므로, 도시 공간에서 배출되는 온실가스를 조속히 제어하는 것이 탄소중립 목표 달성에 핵심이라고 볼 수 있다. 특히, 도시의 에너지소비량이 연간 글로벌 온실가스 배출량에서 차지하는 비중은 70%이며, 도시에서 탄소중립 정책을 수립하면 2050년까지 90%의 온실가스 배출량이 줄어드는 것으로 예측된다³⁾. 우리나라 또한 7대 광역자치체(서울특별시, 부산·대구·인천·광주·대전·울산광역시)에 인구의 43%가 살고 있으며, 공급되는 최종에너지가 국가 전체의 31%를 차지한다. 향후에는 도시의 인구 증가에 따라 지구온난화에 더 많은 영향을 미칠 것으로 판단되므로, 집중적인 온실가스 배출 관리가 필요하다⁴⁾.

행정구역 단위의 공간 경계로서 지방자치단체(이하 지자체)는 온실가스 관리를 위한 대표적인 공간이라고 할 수 있다. 지자체는 국토 영토의 일부를 구역으로 하여 건물·수송·폐기물 등과 관련한 인허가권을 가지고 있다. 따라서 기존 중앙 정부 위주의 탄소중립 정책 추진방식보다는 지자체 스스로 탄소중립 감축 목표를 설정하고, 이행계획을 수립하는 것이 효과적일 수 있다. 2022년 7월부터 시행된 「탄소중립·녹색성장 기본법(이하 탄소중립기본법)」에서는 탄소중립 목표 달성을 위한 지자체 역할을 강조하고 있으며, 향후 지자체 단위에서의 탄소중립을 위한 관련 계획 수립, 온실가스 통계 현황 공표 등에 대한 의무를 부여하고 있다.

[그림 1-2] 공간의 경계에 따른 온실가스 직접/간접배출원



2) 출처: UN-Habitat(2020), "World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization"

3) 출처: IEA(2021), IEA(2021), *Empowering "Smart Cities" toward net zero emissions*, 2022.05.23. 접속, <https://www.iea.org/news/empowering-smart-cities-toward-net-zero-emissions>

4) 출처: BBC(2021), *How cities are going carbon neutral*, 2022.05.23. 접속, <https://www.bbc.com/future/article/20211115-how-cities-are-going-carbon-neutral>

1.2. 공간단위 탄소중립 분석 도구의 부재

현재로서 탄소중립 사회로의 전환을 촉진할 수 있는 공간 단위 탄소중립 분석 도구 부재하다. 유사 목적으로 개발된 도구들을 고찰한 결과, 다양한 공간단위에서 여러 기후기술도입에 따른 탄소중립 기여도를 평가하거나, 기술의 발전을 고려하여 경로를 도출하는 등의 정보를 제공하는 프로그램은 부재했다.

예를 들어, 국가 단위 에너지 모형은 탄소중립 달성을 위한 거시적 단위에서 저탄소기술 기여도 분석이 가능하지만, 지역, 도시 단위 에너지 시스템의 운영(operation)에 대한 모델링이 불충분하여 기술 분석을 위한 정밀 모형으로는 한계를 지니고 있다. 신재생에너지 프로젝트 분석 프로그램 HOMER, RETScreen, EnergyPRO 등은 프로젝트 단위에서 일부 저탄소 기술의 경제성 평가 중심이며, 또한 기술 및 시스템 단위에서 전과정 평가 분석은 불충분하다. 또한 탄소중립 관련 기술은 태양광, 풍력 등의 시간 단위별 발전량 간헐성을 고려한 재생에너지 기반의 통합 에너지 시스템 구성이 중요하며 이에 대한 기술실현 가능성(technical feasibility) 평가가 중요하다. 재생에너지 기반 통합 에너지 시스템은 365일 시시각각 변하는 기상요소에 따라 전력생산, 전력저장, 수소변환, 열 공급 등을 안정적으로 공급해야 하며 이에 대한 평가는 실제 설계 이전에 정책 단위에서도 고려되어야 한다. 하지만, 해외 소프트웨어는 우리나라의 기상현황, 에너지공급·수요현황 등을 반영하지 못하고, IPCC 가이드라인에서 제공하는 TIER 1 배출계수⁵⁾를 사용하기 때문에 국내 실정반영이 미흡하다. 또한 특정 공간에서 기후정보-온실가스 감축목표-적용 가능기술-경제성을 포괄적으로 고려한 최적화된 기술 조합에 대한 정보를 제공하지 못하고 있다.

<표 1-1> 국내외 탄소중립 웹프로그램 비교분석

구분	국내	국외			
프로그램명	EG-TIPS	RETScreen	HOMER	DECA	E-Atlas NRW
개발사	한국에너지공단	캐나다 천연자원부	미국 NREL	독일연방 BEIS	독일 NRW 주정부
주사용자	유관 부문 전문가, 기업 등	개발자, 공학자, 연구원, 설비업체	개발자, 공학자, 연구원, 설비업체	도시 계획자, 개발자 및 지역정책결정자	도시 계획자, 지역 에너지 전환 관련 정책 입안자 등
공간적 범위	국가	건물	시스템(그리드)	건물	주(State)
기술적 범위	상세 개별기술 이 아닌 저탄소 기술 및 연료 전환, 확대 등 정책경로	연료전지, 가스터빈, 지열, 수력, 융복합, 조류, 태양광, 태양열, 파력, 풍력	태양광, 에너지저장, 천연가스발전, 풍력	태양광, 태양열, 지열, 풍력, 천연가스, 석유, 바이오	바이오매스, 풍력, 태양광, 태양열
경제성 분석	X	O	O	X	X
환경성 분석	감축경로 (1~4단계)별 최종에너지 수요 및 탄소 배출량	- 에너지 생산당 배출계수 적용 - 기술 전과정 중 운영단계 탄소배출량 정보만 제공	연간 연료사용량과 배출계수를 사용한 직접배출량	에너지 생산량 당 탄소 배출량	연간 부문별 탄소 배출량

5) 배출량산정등급(TIER)은 활동자료, 배출계수 산화를, 전환을 및 온실가스 배출량 등 복잡성을 나타내는 수준으로서 TIER1는 IPCC 가이드라인에서 제시하는 배출계수, TIER2는 국가배출계수, TIER3는 사업장배출계수를 의미한다.

2. 연구목표

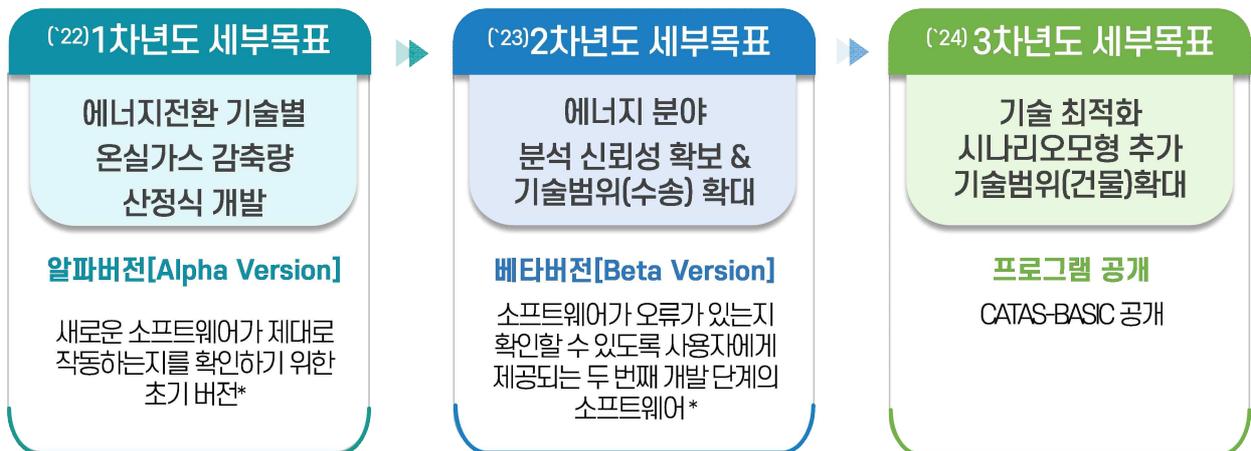
표 1-2는 탄소중립기술시나리오 모형(CATAS)의 개요를 나타내고 있다. 본 연구의 최종 목표는 공간단위 탄소중립 기술적용 시나리오 모형 개발을 통하여 국가 탄소중립 실현을 위한 공간별 기술 적용성 평가 및 단계별 기술도입 전략수립 체계 구축에 있다. 탄소중립 기술시나리오 모형(Carbon-neutral Assessment based on Technology Application Scenario, 이하 CATAS)은 사용목적에 고려하여 ‘CATAS-BASIC’ 과 ‘CATAS-PRO’ 로 구분되어 개발될 예정이다. ‘CATAS-BASIC’ 은 일반국민 또는 지자체 온실가스 감축정책 관련 담당자들이 탄소중립 정책 수립 및 이행점검을 용이하게 할 수 있도록 개발될 예정이며, ‘CATAS-PRO’ 는 탄소중립 R&D 기획·점검·성과평가의 목적으로 개발되어 탄소중립 기술전문가들이 활용할 수 있는 수준으로 고도화할 예정이다.

<표 1-2> CATAS-BASIC 및 CATAS-PRO 차이

	CATAS BASIC	CATAS PRO
	<p style="text-align: center;">Questions</p> <ul style="list-style-type: none"> ? 나 또는 내가 사는 공간이 배출하는 온실가스량 ? 탄소중립 기술은 무엇이 있을까 ? 탄소중립 기술을 적용하면 온실가스 감축은 얼마나 될까 ? 탄소중립 기술을 이용하면 비용은 얼마나 필요할까 	<p style="text-align: center;">Questions</p> <ul style="list-style-type: none"> ? 탄소중립 기술개발 정도에 따른 온실가스 감축량 변화는 ? 내가 개발하고 있는 기술의 향후 발전정도가 어떻게 될까 ? 미래 공간의 인구, 환경, 에너지 수요 등을 예측했을 때 최적화 기술조합은 어떻게 될까 ? 탄소중립 정책목표 달성을 위한 기술 우선순위는
수요자	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 일반국민 ▪ 지자체 탄소중립 정책 수립 및 온실가스 배출량 관리 담당자 등 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 탄소중립 R&D 기획·점검·성과 담당자 ▪ 산학연 기술전문가 등
개발시기	22~24년(3년)	25~28년(4년)
형태	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Webform (웹기반) - 반응형 웹디자인 (PC, 스마트폰, 태블릿 PC 접속 가능) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ WinForm (프로그램 다운로드) - 많은 양의 데이터를 빠른 시간 내 처리하여 분석할 수 있도록 개발
제공 정보	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 온실가스 배출량 ▪ 탄소중립 기술 인벤토리 ▪ 탄소중립 기술 적용 온실가스 감축량 ▪ 탄소중립 기술 비용 분석 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BASIC 제공정보 ▪ 기술별 발전예측에 따른 온실가스 감축량 변화량 분석 ▪ 공간의 인구, 환경, 에너지수요, 기후변화에 따른 최적화 기술조합 ▪ (DATA 연계) R&D 통계, 수준조사 등

우선 개발되는 프로그램은 CATAS-BASIC이며 개발기간은 '22~'24년 3년간이다. 1차년도는 에너지전환 기술 적용한 알파버전을 개발할 계획이다. 2차년도에는 에너지 분야 분석에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 산정식을 고도화하고, 기술범위를 수송부문까지 확대하여 베타버전으로 고도화한다(그림1-3). 마지막으로 3차년도는 기술최적화 시나리오 모형을 추가 및 기술범위(건물 등) 확대하여 프로그램을 공개하는 목표를 세웠다. CATAS 로고는 그림 1-3과 같다.

[그림 1-3] 탄소중립 기술시나리오 모형(CATAS)-BASIC 연차별 목표



* 출처: Cambridge University Press (2023)⁶⁾

6) Cambridge University Press. (2023). Alpha version. In Cambridge dictionary. January, 31, 2023, 접속. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/>

제 2 절 연구내용 및 추진체계

1. 연구 내용

1.1. 연구범위

가. 온실가스 배출원 범위

온실가스 배출원은 배출형태에 따라서 직접배출원과 간접배출원으로 구분할 수 있다. 현재 온실가스 배출통계는 직접배출량을 대상으로 하고 있기 때문에 본 과제에서도 또한 직접배출량을 우선 분석대상으로 고려하였다. 그러나 공간의 온실가스 배출량을 제대로 이해하기 위해서는 간접배출량을 동시에 분석하는 것이 중요하며, 이는 차년도에 포함시켜 직접배출량 분석과 함께 비교·분석해보고자 한다.

나. 공간적 범위

CATAS는 특정 “공간”의 온실가스 배출량을 기반으로 탄소중립 기술을 적용했을 때 온실가스 감축량을 산정하는 프로그램이다. 본 연구의 공간의 정의는 “탄소중립 전략수립이 필요한 물리적·지역적 공간”이다. 다시 말해서 직접 및 간접배출량으로 건물, 마을, 지자체 등 온실가스 배출원에 대한 구역/경계가 구분이 되는 공간이 본 연구의 공간적 범위이다. 현재 GIR에서는 공간적 경계로서 행정구역 단위의 17개 광역지자체에 대한 온실가스 배출통계를 생산하고 있으므로 본 데이터를 활용하여 모형개발 및 검증은 하도록 한다.

다. 기술적 범위

2050 탄소중립 시나리오의 부문은 전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 수소, 탈루, 흡수원, CCUS, DAC까지 10개의 부분으로 구성되어 있으며, 이러한 부문에 온실가스 감축을 위해 적용되는 기술은 다양하다. 금년은 온실가스 배출량이 가장 많은 전환부문을 대상으로 분석하고자 하며, 전환부문에 대한 기술은 기후기술분류체계, 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법, 탄소중립 중점기술(안)을 참고로 하여 선정하였다. 최종적으로 ①태양광, ②풍력, ③바이오에너지, ④수력, ⑤해양에너지(조력, 파력, 조류), ⑥수소연료전지, ⑦태양열, ⑧지열을 포함하기로 하고, 추가로 지열과 같은 히트펌프를 공유할 수 있는 ⑨수열 및 ⑩산림흡수원을 기술적 범위에 포함한다. 히트펌프를 공유할 수 있는 ⑨수열 및 ⑩산림흡수원을 기술적 범위에 포함시키고자 한다.

<표 1-3> CATAS-BASIC 1차년도 연구범위

온실가스 배출원 범위	공간적 범위	기술적 범위
직접배출원	직접배출과 간접배출의 경계 *17개 지자체 데이터를 활용한 검증	10개 에너지전환 기술

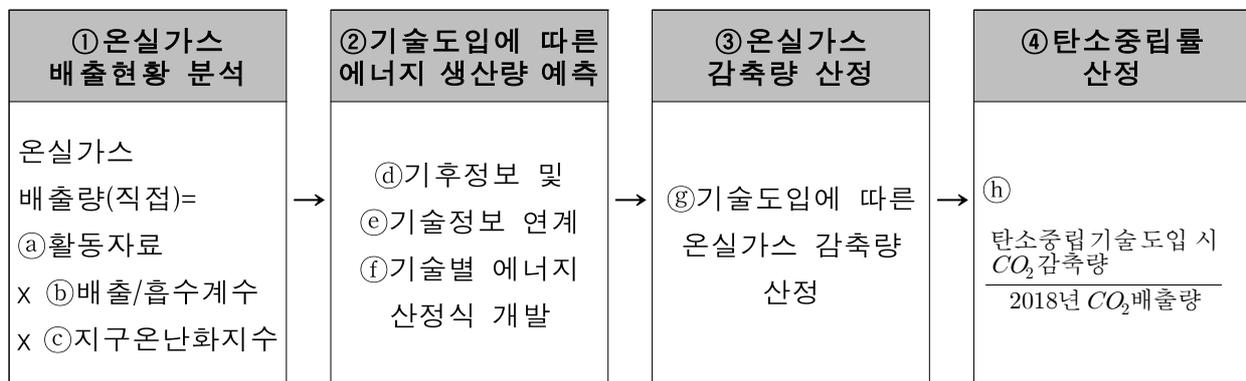
1.2. 탄소중립률 방법론 개발

CATAS에서 우선 탄소중립률 산정 방법론을 개발하였다(표1-3). 우선 ①온실가스 배출현황 분석하고, ②기술도입에 따른 에너지생산량 예측 후 ③온실가스 감축량 산정하고, ④탄소중립률 산정한다. ①온실가스 배출량은 직접배출량만 고려하였으며, ④활동자료는 GIR 협조를 통한 에너지 전환 부문에서 열과 전기가 분리된 비공개자료를 활용하였으며 및 ⑥배출/흡수계수는 2021년 국가 승인 배출계수를 활용하였다. ③지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)는 온실가스별 지구온난화 기여정도를 나타내는 지수이며 GIR로부터 온난화지수를 고려한 이산화탄소환산량(CO₂eq) 단위의 온실가스 배출 통계를 수집하였다.

금년의 기술적 범위는 에너지 전환 부문의 10개 기술로서 기후정보와 기술정보를 활용한 ①산정식을 기술별로 개발하여 ②기술도입에 따른 에너지생산량 예측을 하였다. ④기후정보는 국립기상과학원, 기상청 해양수산부, 국립해양조사원이 제공하는 데이터를 활용하였으며, 기후정보와 연계된 기술은 태양광, 풍력, 수력, 해양에너지, 태양열, 지열, 수열이다. ⑤기술정보는 한국에너지공단의 기술별 KS인증 제품정보를 활용하였다. 수열은 지열과 같이 히트펌프를 사용하기 때문에 같은 기술정보를 활용하였다. 개발 중인 기술로서 해양에너지 및 수력과 같은 경우는 기술정보를 수집하는데 한계가 있어, 기술자문을 통해 이용률 정도만 산정식에 반영하였다.

③온실가스 감축량은 에너지전환 부문 탄소중립 기술도입에 따른 에너지생산량이 연료별 온실가스 배출계수가 높은 온실가스부터 대체한다고 가정하여 산정하였다. 온실가스 배출계수는 2021년 국가승인통계에서 공고한 배출 및 흡수계수를 사용하였다. 단, 연료의 종류가 다양하기 때문에 프로그램에서는 성상별(석탄, 석유, 가스)로 온실가스 감축량을 나타낸다. 마지막으로 탄소중립률은 해당공간이 기술도입 후 얼마나 탄소중립화가 되었는지 보여지는 지표로서 2018년 ⑥CO₂ 배출량 대비 기술도입 후 온실가스 감축량으로 계산된다. 이 때 2018년을 기준으로 삼은 이유는 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contributions, NDC)가 2018년 대비 온실가스 감축량이기 때문에 지자체의 목표와 연계하고자 정하였다.

<표 1-4> 탄소중립률 산정 프로세스



1.3. CATAS 화면구성

CATAS-BASIC 알파버전의 화면구성은 ①공간선정, ②공간정보, ③기술선정, ④온실가스 배출량, ⑤경제성 분석, ⑥리포트로 되어있으며, 화면 흐름에 따라 데이터를 입력하고 결과를 도출할 수 있도록 개발되었다(그림 1-4). ①공간선정은 GIS 기반의 공간별 온실가스 배출량 및 탄소중립률 현황을 제시하며, 사용자는 원하는 분석하고 싶은 대상 공간을 선정하게 된다. ②공간정보는 분석하고 싶은 대상공간의 기후정보, 온실가스 배출량, 에너지정보 등 공간의 일반정보를 제공한다. ③기술선정은 분석공간에 적용하고 싶은 기술을 적용한다. 기후기술별 특징을 현실적으로 반영한 디자인을 애니메이션 기반으로 구축하여 프로그램 사용자가 쉽게 기술을 적용할 수 있도록 노력하였다. 기술별 필요한 기후 및 기술데이터를 추가로 입력하면 에너지 생산량이 산정된다. ④온실가스 배출량은 탄소중립 기술을 적용한 결과 감축되는 온실가스 배출량을 분석하여 보여주며, ⑤경제성 분석은 기술별로 에너지 균등화 발전비용(Levelized cost of energy, LCOE)를 계산할 수 있다. 마지막 ⑥리포트는 최종분석 결과에 대한 인포그래픽화하여 사용자가 PDF 또는 그림파일로 다운받을 수 있도록 서비스를 제공하는 화면이다.

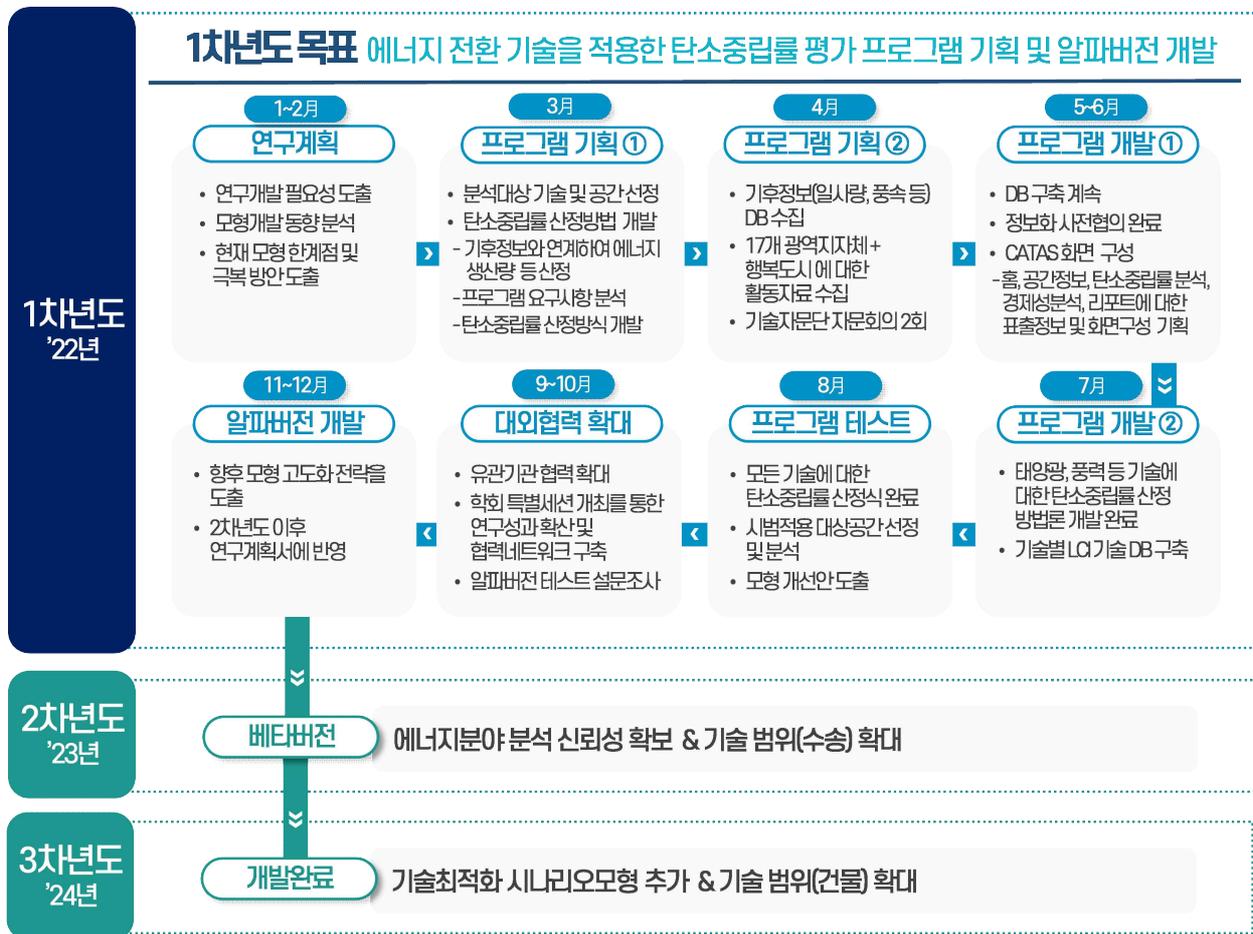
[그림 1-4] CATAS-BASIC 알파버전 화면구성



2. 연구 프로세스

연구내용은 ①프로그램 기획, ②프로그램 개발, ③프로그램 테스트로 구분될 수 있다. ①프로그램 기획에서는 분석대상 기술을 선정하고, 탄소중립률 산정 방법론을 개발한다(그림1-5). 방법론은 기후정보와 연계한 에너지 생산량을 산정하고, 프로그램 기능에 대한 요구사항을 분석하였다. 또한 프로그램 개발을 위한 공간정보(면적, 인구, 에너지공급/수요량), 기후정보(일사량, 풍속, 온도 등), 기술정보 등 데이터와 함께 온실가스종합정보센터를 통하여 17개 광역지자체에 대한 활동자료를 수집하였다. 또한 기술별로 전과정평가(LCA)를 통한 배출계수를 산정하였다. ②프로그램 개발을 위해서는 공간선정, 공간정보, 기술선정, 온실가스 배출량분석, 경제성 분석, 리포트에 대한 화면구성을 기획하고, 엑셀로 개발한 기술별 탄소중립률 산정 모듈을 프로그램화 하였다. ③프로그램 테스트는 CATAS-BASIC 알파버전에 대하여 산·학·연 전문가에게 테스트를 요청하고 현재 상태를 진단하고, 향후 과제를 발굴하였다.

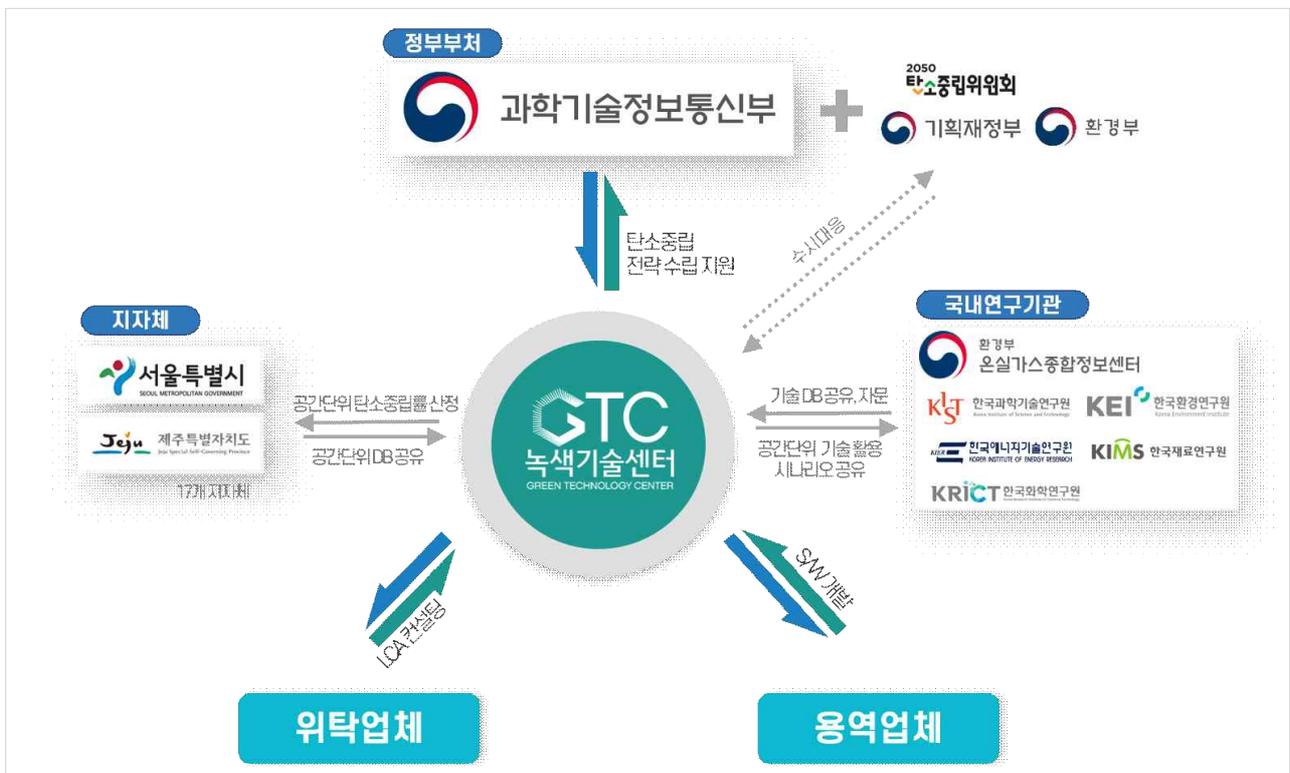
[그림 1-5] CATAS-BASIC 1차년도 추진프로세스



3. 연구 추진체계

본 연구 추진을 위해서 국가녹색기술연구소 본 연구진은 기초자료 수집, 기술별 탄소중립률 모듈개발, 화면기획, 모형에 대한 시범적용 연구를 수행하였다. 본 연구는 ‘CATAS 기술자문단’을 구성하여 지자체 및 국내 산학연 연구기관과의 논의를 활발히 하여 모형개발-검증-활용까지 프로그램 활용도 제고를 위한 네트워크를 구축하였다. LCA 기반 기술별 온실가스 배출계수 산정을 위해서 LCA 전문 컨설팅 기관과 연구를 수행하고, 웹기반의 프로그램 제작을 위하여 용역업체와 진행하였다.

[그림 1-6] 연구 추진체계



II

대내외 환경분석

제1절 국내 지역단위 탄소중립 전략수립 현황

제2절 국외 지역단위 탄소중립 전략수립 현황

제3절 국내외 탄소중립 관련 웹프로그램

제4절 소결

제 2 장 대내외 환경분석

제 1 절 국내 지역단위 탄소중립 전략수립 현황

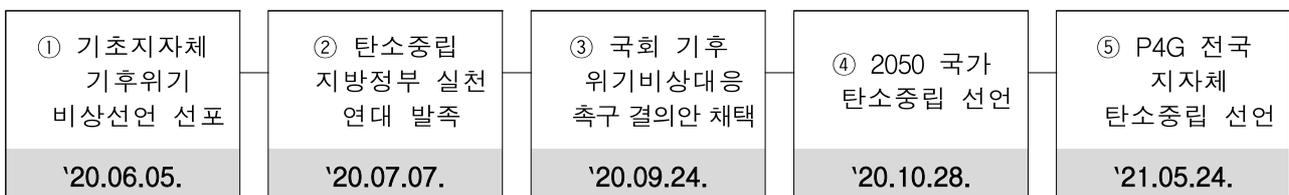
1. 지자체 탄소중립 선언 동향

2020년 6월 6일 전국 226개 기초지방정부는 기후위기를 비상상황으로 선포하고, 기후위기와 재난에 가장 먼저 대응하는 주체로 온실가스 감축목표를 세우고 취약계층을 위한 대응 계획을 수립하고 실행하기로 하였다⁷⁾. 지구 평균온도가 1.5°C 이상 상승하지 않도록 온실가스 감축 목표를 설정하고 적극적으로 실천할 것을 선언하였으며, 전국 지자체의 동시 기후위기 비상선언은 국제적으로 최초이자 최대규모이다.

2020년 7월 7일 환경부는 지방정부의 온실가스 감축사업 및 이행 분위기 확산을 위한 협력적 관계를 구축하고, 지자체 탄소중립 전략 수립 우수사례를 공유하기 위해 탄소중립 지방정부 실천연대를 발족⁸⁾하였다. 탄소중립 지방정부 실천연대의 목표는 ①2050년까지 탄소중립을 실현, ②기후위기로부터 안전하고 행복한 삶을 영위하도록 적극 노력, ③탄소중립 사업 발굴과 지원을 최우선 추진, ④지역의 지속가능한 발전과 탄소중립이 실현될 수 있도록 노력, ⑤국민적 합의와 공감대 확산을 위해 소통·공동 협력, ⑥탄소중립을 위해 선도적인 기후행동 실천 확산을 포함한다. 또한 81개 광역·기초 지자체는 탄소중립을 공동 선언하여 지방정부의 선도적 역할을 강화하였다.

2021년 5월 24일 ‘P4G 서울 녹색미래 정상회의’에서 2050 탄소중립을 달성하기 위하여 17개 광역지자체 및 226개 기초지자체의 243개 모든 지방자치단체가 참여한 탄소중립 지방정부 실천연대 선언식을 실시하였다⁹⁾. 전국의 지자체는 선언식을 계기로 탄소중립 이행계획 수립에 착수하였으며, 정부는 지자체 계획 수립 지원 및 지역 균형 뉴딜을 활용한 재정지원 등의 협력을 약속하였다.

<표 2-1> 지자체 탄소중립 대응 경과



7) 출처: 환경부(2020), *대한민국 기초지방정부 기후위기비상선언 선포식*, 2022.10.30. 접속, <https://www.korea.kr/archive/speechView.do?newsId=132032224>

8) 출처: 환경부(2020), *탄소중립, 지방정부가 앞장선다*, 2022.10.30. 접속, <http://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=286&orgCd=&boardId=1383300&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=>

9) 출처: 환경부(2021). *2021 P4G 서울 녹색미래 정상회의*, 2022.10.30. 접속, <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=286&orgCd=&boardId=1456180&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=>

2. 지자체 탄소중립 정책 및 전략 수립 사례

2.1. 서울시 2050 온실가스 감축전략 ('20.12월)¹⁰⁾

서울시는 2020년 12월 국내 도시 중 첫 번째로 C40도시기후리더쉽그룹(C40)에 2050 탄소중립 달성목표를 담은 「2050 온실가스 감축 추진계획」을 제출한 바 있다¹¹⁾. 이에 앞서 같은 해 7월 서울시는 「그린뉴딜 추진을 통한 2050 온실가스 감축전략」을 발표하여 2050을 목표로 한 온실감축 기본 정책전략을 공표하였다. 서울시의 「2050 온실가스 감축 추진계획」의 추진 배경에는 서울의 평균 기온이 최근 100년 동안 2.3° C 상승하고 폭염, 열대야, 한파 등의 이상기온이 발생하는 일수가 증가하는 등 기후변화로 인한 피해가 가시화되어온 사실과, 기후위기 대응에 있어 각국의 지방정부가 선도적 역할을 해야 한다는 글로벌적 요구의 확산 등이 있다. 해당 감축전략은 그린빌딩(저탄소 제로에너지빌딩 전환 추진), 그린 모빌리티(보행 친화도시를 넘어 그린모빌리티 선도), 그린 숲(녹지 확보를 통한 온실가스 상쇄), 그린 에너지(신재생에너지로 전환 가속화), 그린 사이클(폐기물 원천 감량 및 직매립 제로화)을 포함한 총 5대 분야 및 74개 세부과제로 이루어져 있으며, 서울시는 이를 통해 온실가스를 2030년까지 (2005년 대비) 40% 감축하고, 2050년에는 탄소중립에 도달하겠다는 목표를 세웠다.

2.2. 2050 탄소중립 선도도시 부산 ('22.4)¹²⁾

부산시는 2022년 4월 21일 탄소중립의 선도도시로 자리매김하기 위한 추진전략을 논의하기 위해 「부산광역시 2050 탄소중립녹색성장위원회」의 첫 회의를 개최했다. 해당 위원회는 올해 3월부터 시행된 「탄소중립녹색성장기본법」에 의해 구성되었으며 공동위원장, 시의원, 전문가 및 시민단체를 포함한 총 44명의 위원으로 이뤄졌다. 부산시는 ‘글로벌 기후 리더십 도시 탄소중립도시 부산’을 비전으로 삼아 2019년 대비 2030년까지 온실가스를 47% 줄이고 2050년 탄소중립을 달성한다는 방침을 내세웠으며, 이를 위해 3대 분야의 11대 전략을 마련하였다. 먼저 ‘전략적 저감’ 분야에서 미래에너지 전환, 제로에너지 건물, 스마트 그린항만을 추진할 계획이며, ‘시민 및 기업 참여 이행’ 분야에서 시민실천, 기업실천, 인재양성을 유도하겠다는 방침이다. 이어서 ‘탄소중립분야 신산업 선도’ 분야에서 수소경제권 구축, 미래형 모빌리티 전환, 탄소중립 기술개발을 가속화 하고, 마지막으로 2030 부산세계박람회 유치성공을 통해 세계 기후변화대응을 이끄는 선도 도시로 도약해 나아갈 계획임을 밝혔다.

10) 출처: 서울특별시(2020), *2050온실가스 감축전략*, 2022.11.01. 접속, <https://news.seoul.go.kr/env/environment/climate-energy/2050-ggrs>

11) 출처: 서울특별시(2020), *서울시, 국내 처음으로 '2050 온실가스 감축 추진계획' C40 제출*, 2022.11.01. 접속, <https://news.seoul.go.kr/env/archives/510120>

12) 출처: 부산광역시(2022), 「*부산광역시 2050 탄소중립녹색성장위원회*」 개최, 2022. 11.01. 접속, <https://www.busan.go.kr/nbtnewsBU/1526145?curPage=&srchBeginDt=2022-04-16&srchEndDt=2022-04-23&srchKey=&srchText=>

2.3. 충청남도 2045 탄소중립 녹색성장 기본계획 초안('22.6)¹³⁾

충청남도는 2022년 6월 13일 「충청남도 2045 탄소중립 녹색성장 기본계획」의 초안을 공개한 바 있다. 해당 기본계획은 ‘대한민국 탄소중립을 선도하는 그린 충남’의 비전을 바탕으로 2035년까지 온실가스 배출량을 2018년 대비 50% 감축하고 2045년 탄소중립을 실현하는 것을 목표로 삼았다. 충청남도는 이를 달성하기 위한 4대 전략으로 1)정의로운 전환으로 신재생에너지 확대 2)그린 산업을 선도하는 혁신 생태계 구축, 3)기후탄력성 회복 및 탄소중립 사회 실현,, 4)친환경 투자 확대를 위한 이행기반 선도를 내세웠다¹⁴⁾. 또한 2045 탄소중립 실천계획에서 각 전략의 세부 추진계획을 살펴보면, 청정한 전환(전환 부문)의 경우 충청남도 선도의 석탄화력발전 조기폐쇄, 신재생에너지 중심의 에너지 믹스, 도민 공감 및 상생형 에너지 전환, 지역산업을 기반으로 한 수소에너지 네트워크 구축 등이 있다. 과감한 혁신 전략(산업부문)에는 그린산업의 생태계 조성, 저탄소 및 유망기술 저변의 확대, 충청남도에 적합한 탄소포집·활용·저장(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 비즈니스 모델 및 수소산업 생태계 구축, 그리고 탄소중립형 중소기업의 육성과 지원계획이 포함되었다. 참여형 사회 전략(건물, 수송, 폐기물, 농축수산, 흡수원 부문)은 에너지 복지의 사각지대 없애기, 저탄소·고효율 건물에너지의 관리, 제로 에너지 스마트시티 구축 기반 마련 등을 포함한 추진계획으로 구성되어 있다.

2.4. 2050 탄소중립 위한 제주특별자치도 기후변화 대응 계획(안) ('22.1)¹⁵⁾

제주시는 2022년 1월 정부의 ‘2050 장기저탄소발전전략’과 연계하여 제주특별자치도 기후변화 장기전략을 수립하였으며, 이를 위해 부문별 온실가스 감축 전략을 수립하는 동시에 기후변화 적응을 위한 종합 계획을 수립하였다. 또한 ‘2050 지방 탄소중립 녹색성장 위원회’ 출범을 추진에 있으며 해당 위원회는 탄소중립 사회로의 이행 및 녹색성장 추진을 위해 정책 기본 방향, 탄소중립 계획의 비전과 감축목표를 설정하고 기본 계획 및 연차별 세부 시행계획의 추진 점검 등을 이행하게 된다. 2050년 제주시의 예상 온실가스 총 배출량은 약 1,086만 톤 CO₂eq(2018년 대비 1.87배 증가)로 전망되고 있으며 해당 계획(안)은 ‘글로벌 리더 탄소중립 도시 제주’라는 비전 아래 7개 부문별(신재생에너지, 산업, 수송, 건물, 농축수산, 폐기물, 탄소흡수원) 전략과 32개의 중점과제로 구성되어 있다¹⁶⁾. 각 부문별 전략은 1)청정에너지 보급 확대 및 환경 조성, 2) 저에너지화 및 고효율 산업 생태계 구축, 3) 교통수요 관리 및 무공해차 전환, 4) 건물에너지 효율 향상 및 청정에너지 보급 시스템 구축, 5) 1차 저에너지화 및 지원 체계 구축, 6) 매립 제로화 및 순환 경제 환경 조성, 그리고 7) 도민 체감형 탄소흡수원 조성으로 이루어져 있다.

13) 출처: 충청남도(2022), 「충청남도 2045 탄소중립 녹색성장 기본계획(초안)」

14) 출처: 충청남도(2022), 「2045 탄소중립·녹색성장 기본계획 논의」, 2022.11.01. 접속, http://www.chungnam.go.kr:8100/cnnnet/board.do?mnu_url=/integratedBoardView.do&board_seq=405696&field03=in&cdate=20220530&mnu_cd=CNMMENU02362&searchCnd=0&srtdate=20180101&enddate=20220628&pageNo=16&pageGNo=1&showSplitNo=10&code=600

15) 출처: 제주특별자치도(2022), 「2050 탄소중립을 위한 제주특별자치도 기후변화대응 계획(안)」

16) 출처: 한국행정연구원(2022), 「제주특별자치도의 탄소중립 추진 현황 및 향후 계획」

<표 2-2> 지자체 탄소중립 추진전략 현황

구분	추진전략	주요내용
서울 특별시	서울시 2050 온실가스 감축전략 ('20,12)	·서울시는 사람·자연, 미래가 공존하는 지속가능한 도시를 만들고자 국내 최초 도시로 2050년 탄소중립 목표를 담은 7대 온실가스 감축 전략을 수립하였으며, C40 도시기후리더십그룹에 추진계획 제출
부산 광역시	2050 탄소중립 선도도시 부산 ('22.4)	·부산이 탄소중립 선도도시가 될 수 있도록 '글로벌 기후 리더십 도시 탄소중립도시 부산'을 비전으로 삼고, 오는 2030년까지 온실가스를 2018년 대비 47% 감축, 2050년 탄소중립을 실현하기 위한 3대 분야, 10+1대 추진전략 마련
대구 광역시	대구 2050 탄소중립 비전 및 전략 ('21.12)	·2018년 온실가스 배출량 대비 2030년 45% 감축, 2040년 70% 감축, 2050년 탄소중립을 실현하기 위한 비전과 8대 핵심 전략을 제시
인천 광역시	제3차 인천광역시 기후변화 대응 종합계획 ('21.4)	·인천광역시는 2040년까지 2018년 대비 80.1% 온실가스 감축을 달성하는 목표로 신재생에너지 확충, 적응 체계 구축, 기반구축에 대한 3대 추진전략 수립
대전 광역시	대전광역시 기후변화 대응 기본계획 ('22.3)	·삶이 건강한 산소도시 대전을 만들기 위해 대전광역시 맞춤형 기후변화 대응 계획을 수립하였으며, 4+1전략(건물, 수송, 에너지, 시민협력과 도시숲 부문)으로 2050 탄소중립 실현하고자 함
행복중심 복합도시	행정중심복합도시 2040 탄소중립 추진 전략 ('21.9)	·행복청은 정부목표보다 10년 앞당긴 탄소중립 실현을 위해 기존 정부 정책을 고려한 2040 탄소중립 추진 전략을 제시하였으며, 녹색 청정에너지 조성하고자 5대 추진 전략을 계획
강원도	강원도 2040 탄소중립 추진전략 기본계획 ('21.2)	·'강원도 2040 탄소중립 추진전략 기본계획'을 통해 전국 최초 2040년까지 탄소중립 선언하였으며, 2040년까지 4대전략, 12개 실천과제의 체계적 이행을 통해 34,347천t 이상의 온실가스 감축으로 탄소중립을 조기 달성하고자 계획 수립
충청남도	충청남도 2045 탄소중립 녹색성장 기본계획 초안('22.6)	·2045년 탄소중립 달성을 목표로 '충청남도 2045 탄소중립·녹색성장 기본계획' 초안 작성하였으며, 2018년 온실가스 배출량 대비 2035년까지 50% 감축하고 2045년 탄소중립을 실현하기 위한 4대 전략 제시
전라남도	주력산업 탄소중립 대응 전략('21.5)	·전국 지자체 최초로 정부의 탄소중립 정책을 뒷받침하고 2050 전남도 탄소중립 종합비전을 실현하기 위한 탄소중립 대응 전략을 수립하였으며, 주력산업인 석유화학, 철강, 조선산업을 핵심 분야로 선정
경상남도	경남형 2050 탄소중립 로드맵('21.12)	·2030 국가 온실가스 감축 목표의 상향조정과 연계하고 2030년 경상남도 온실가스 60% 감축목표에 대응하기 위해 '경남형 2050 탄소중립 로드맵'을 발표하였으며, 기존 계획의 추진성과 시사점 및 개선·보완 필요사항을 반영한 7대 추진 전략 기반의 로드맵 제시
제주 특별자치도	2050 탄소중립 위한 제주특별자치도 기후변화 대응 계획(안) ('22.1)	·정부가 제시한 '2050 장기저탄소발전전략'과 연계하고 '2030 온실가스 감축 로드맵'보다 상향된 감축전략으로 2050 탄소중립기후변화 대응계획을 제시하였으며, 4대 목표, 7대 부문별 전략 수립하여 글로벌 리더 탄소중립 도시를 만들고자 함

3. 지자체 온실가스 배출량 산정방식

온실가스 인벤토리는 「저탄소·녹색성장 기본법」 제45조의 규정에 따라 작성되었으며, 국가 온실가스 통계관리 위원회 승인 이후 매년 온실가스 배출량을 산정 및 공표하고 있다. 그림2-1과 같이 국가 온실가스 인벤토리 작성체계는 국가 온실가스 통계 산정 및 공표를 위해 분야·부문별 배출량을 산정·제출하는 관장기관과 관장기관별 통계를 취합·검증·공표하는 총괄기관으로 이루어진 체계로 구성되어 있다. 온실가스종합정보센터(Greenhouse Gas Inventory and Research Center, 이하 GIR)는 국가 온실가스 종합정보관리체계를 구축·관리하는 총괄업무를 담당하며, 탄소 녹색성장 기본법 시행령에 따라 분야별 관장기관은 소관 분야의 활동자료를 수집하고 온실가스 인벤토리를 작성하여 온실가스 종합정보센터에 제출하며, GIR은 분야별 배출통계를 취합하여 검증하게 된다.

[그림 2-1] 국가 온실가스 인벤토리 작성 체계



※ 출처: 온실가스종합정보센터(2021)

GIR은 국가-지역 인벤토리 간 정합성을 확보하기 위하여 「2022 시·도 온실가스 인벤토리 산정지침¹⁷⁾」을 배포하였으며, 지역 온실가스 배출량 산정절차는 그림 2-2와 같다. 17개 광역지자체 온실가스 배출량을 산정하기 위해 지역별 활동자료를 기반하고 있다. 광역지자체별 활동자료가 확보 가능한 경우에는 해당 자료를 우선 적용하며, 동일 출처 내 별도의 지역별 자료가 없는 경우 타 유사 통계자료의 비율을 활용한다. 만약 타출처에도 활동자료가 부재한 경우에는 활동자료에 영향을 미치는 상관인자를 조사하여 추정하게 된다.

17) 출처: 온실가스종합정보센터(2021), 「2022 시·도 온실가스 인벤토리 산정지침」

국내 부문별 온실가스 배출량 산정을 위한 활동자료는 하향식으로서 중앙기관 추계 에너지통계자료와 상향식으로서 지역 실사 보고자료를 종합한 상호 검증을 통해 자료를 수집 및 보완하는 것을 통해 만들어지게 된다. 또한 활동자료의 시계열 완전성을 확보하는 것이 중요하나, 과거 자료의 경우 값이 부재하거나 국가 기준 총계만 제시되어 있는 경우에는 내삽 또는 이동평균(3년) 등을 활용하여 활동자료 확보하게 된다.

[그림 2-2] 지역 온실가스 배출량 산정 절차



※ 출처: 온실가스종합정보센터(2021)

카테고리별 온실가스 배출량 산정방법은 「국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침」을 준용하며, 구체적인 온실가스 배출량 산정방법은 배출원별로 상이하나 기본적인 방법으로는 활동자료와 배출계수, 지구온난화 지수의 곱으로 산정한다. 활동자료는 에너지로 사용되는 연료 사용량, 전력 사용량, 제품 생산량, 산림 면적, 비료 시비량, 폐기물 발생량 등이며, 국가 공식 통계, 관련 협회 자료, 목표관리제·배출권거래제 사업장 통계, 통계청 발표자료 등 다양한 형태로 수집된다(표2-3). 또한 국가 배출량 통계에 활용되는 배출계수 및 매개변수를 준용하여 온실가스 배출량을 산정하며, 지구온난화 지수는 「IPCC 제2차 평가보고서(IPCC, 1995)」에서 제시한 값을 반영한다. 온실가스 배출량 산정 범위는 국가 배출량 통계와 동일한 분야에 간접배출량을 추가한 총 6개 분야(에너지, 산업공정, 농업, 산림흡수원, 폐기물, 간접배출량)에 해당한다. 배출량을 산정하기 위한 기준은 1996 IPCC GL 기반으로 산정하였으나, 일부 부문은 IPCC GPG 2000, IPCC GPG-산림흡수원 2003, 2006 IPCC GL 방법론을 적용하였다.

<표 2-3> 온실가스 배출량 산정방법

온실가스 배출량 (Emission)	활동자료 (Activity Data)	배출계수 (Emission Factor)	지구온난화지수 (GWP)
· 직접/간접 배출량 · CO ₂ 환산 배출량 · 6대 온실가스	· 연료사용량 · 제품생산량 · 산림면적 · 비료 시비량 · 폐기물 매립량 · ...	· 연료별 배출계수 · 발열량/산화율 · 장내발효 배출계수 · Biomass 확장계수 · 메탄보정계수 · ...	· CO ₂ : 1 · CH ₄ : 21 · N ₂ O : 310 · HFCs : 140-11,700 · PFCs : 6,500-9,200 · SF ₆ : 23,900

※ 출처: 온실가스종합정보센터(2021)

제 2 절 국외 지역단위 탄소중립 전략수립 현황

1. 지자체 탄소중립 선언 현황

1.1 UN 기후행동정상회의와 기후목표상향연맹

가. 기후행동 정상회의¹⁸⁾

2019년 9월 안토니오 구테레쉬 UN 사무총장을 필두로 개최된 유엔 기후행동 정상회의((UN Climate Action Summit 2019)는 파리협정의 목표를 달성하고 기후변화 대응을 위한 세계 각국의 의욕 증진과 참여를 향상시키는 것을 주 목적으로 하였다. 본 회의에서는 정부, 시민, 기업이 기후변화 대응을 위해 할 수 있는 구체적인 기후행동 계획이 총 12개의 주제에 대해 발표되었다. 포함된 주제는 1) 글로벌 탄소중립을 위한 계획, 2) 기후금융, 3) 화석에너지 대체할 클린에너지, 4) 기후행동에 있어 자연 잠재력의 활용, 5) 회복탄력성 있는 미래, 6) 군사도서 개발국, 7) 생활속의 기후대응, 8) 에너지 효율성 증진을 통한 온실가스 배출감축, 9) 기후적응, 10) 최빈개도국, 11) 사람 중심의 기후대응 행동 그리고 12) 녹색경제이다¹⁹⁾.

나. 기후목표 상향연맹²⁰⁾

COP25의 의장국인 칠레는 기후행동 정상회의에서 탄소중립을 국가, 기업, 투자자, 도시, 지역 등으로 구성된 기후목표 상향연맹(Climite Ambition Alliance: Net Zero 2050) 발족을 선언하고 2020년에 출범하였다. 해당 동맹에 대한 국가들의 참여는 UNFCCC와 UNDP의 지원 아래 칠레와 영국 정부가 주도한다. 연맹은 출범 이후 각국의 정부가 파리협정에 대한 기여를 강화하는 것과 이를 통해 연맹의 다양한 참가 주체들이 기후 목표를 달성하는 동시에 보다 포용적이고 회복력있는 경제를 만들어 갈 수 있도록하는 것을 주 목표로 삼았다. 기후목표 상향연맹에 더 많은 국가들의 참여를 독려하기 위하여 2020년 6월부터 Race to Zero 캠페인을 시작하였으며, Race to Zero 연맹에 참여하면 자동으로 기후목표상향연맹에도 가입되는 구조이다. 2021년 10월 기준으로 국가 120개, 도시·지역 474개 등 2,289개의 기후변화 주체가 연맹에 참여하였다(표2-4).

<표 2-4> UN 기후목표상향연맹의 참가자 수

(2021년 10월 19일 기준)

구분	국가	도시/지역	교육기관	기업	금융기관	합계
가입수	120	474	549	1,101	45	2,289

※ 출처: Climate Initiatives Platform(2021)

18) 출처: UN Climate Action(2019), *2019 Climate Action Summit*, 2022.11. 01. 접속, <https://www.un.org/en/dimatchange/2019-climate-action-summit>

19) 출처: UN Climate Action(2019), "Report of the Secretary-General on the 2019 Climate Action Summit the Way Forward in 2020"

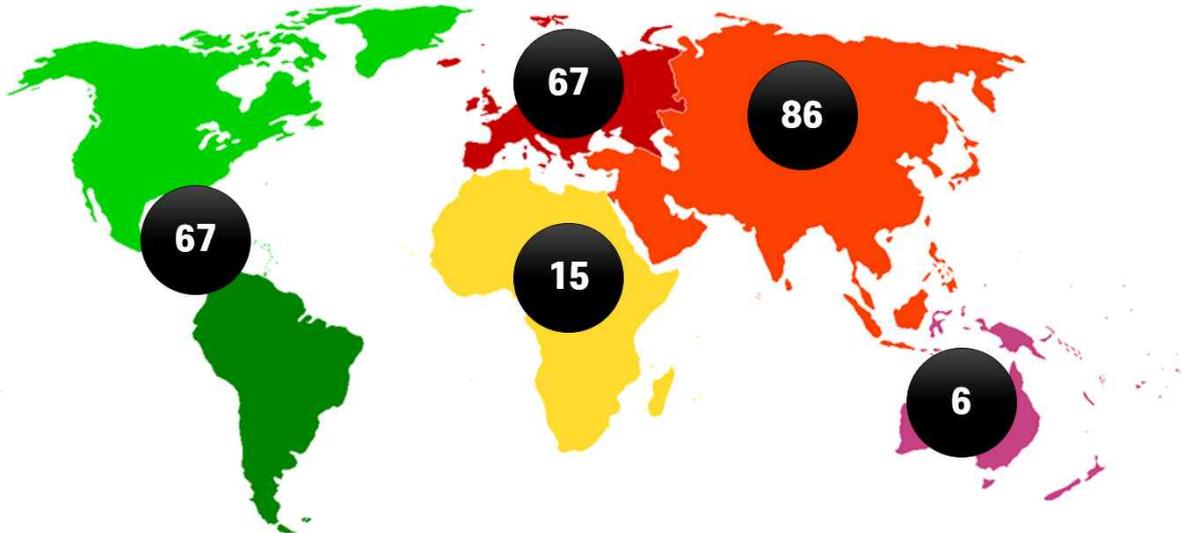
20) 출처: UNEP Climate Initiatives Platform(2021), *Climate Ambition Alliance*, 2022. 05.19. 접속,

https://climateinitiativesplatform.org/index.php/Climate_Ambition_Alliance:_Net_Zero_2050

1.2. 글로벌 지역단위 탄소중립 선언 현황²¹⁾

1,777개 도시 중 탄소중립을 선언한 도시는 241개이다(그림 2-3). 대륙별로 유럽 67개, 아시아 86개, 아메리카 67개, 오세아니아 6개, 아프리카 15개 도시로 나타난다. 이 중 탄소중립 목표를 법제화한 도시로서 독일 베를린, 미국 호놀룰루와 밀워키, 인도네시아 자카르타, 브라질 상파울로, 벨기에 안트베르펜가 있다.

[그림 2-3] 글로벌 지역단위 탄소중립 선언 현황



구분	탄소중립선언 도시
유럽	(67개 도시) 암스테르담, 에센, 베를린, 오슬로, 아테네, 바르셀로나, 버밍엄, 영국, 본머스, 브라이튼과 호브, 브리스톨, 부다페스트, 뒤셀도르프, 에든버러, 글래스고, 그레노블, 함부르크, 헬싱키, 이스탄불, 코펜하겐, 레스터, 영국, 라이프치히, 릴, 프랑스, 리스본, 리버풀, 런던, 맨체스터, 뉴캐슬, 뉴로테르담, 헤이그, 리가, 셰필드, 사우샘프턴, 스톡홀름, 슈투트가르트, 베네치아, 바르샤바, 웨스트요크셔, 즈리히, 안트베르펜, 벨파스트, 보르도
아시아	(86개 도시) 암만, 두바이, 세부, 청두, 첸나이, 뉴델리, 다카, 푸저우, 하노이, 히로시마시, 자카르타, 콜카타, 구마모토시, 마쓰야마, 메이산, 팔렘방, 헤펄, 난징, 칭다오, 텔아비브-야포, 마카오, 샹포로, 서울, 우한, 시온, 안산, 부산, 쿠알라룸푸르, 부산, 마쓰다. 다렌, 고양, 과리오, 광주, 항저우, 홍콩, 인천, 인도레, 잠비, 전주
아메리카	(67개 도시) 오스틴, 벨로 호라이즌테, 보고타, 보스턴, 부에노스아이레스, 쿠리치바, 멘도자, 델러스, 덴버, 데스모인, 디트로이트, 로사리오, 살타, 에드먼턴, 호놀룰루, 휴스턴, 인디애나폴리스, 캔자스시티, 새너제이, 키토, 로스앤젤레스-롱 비치-산타, 마이애미, 뉴올리언스, 몬티, 뉴올리언스. 아네이로, 새크라멘토, 솔트레이크시티, 살바도르, 샌안토니오, 샌프란시스코, 상파울루, 시애틀, 세인트루이스, 토론토, 워싱턴 D.C., 앨버커키, 앨런타운-베들레헴, 과달라하라, 바랑킬라, 셀라야
오세아니아	(6개 도시) 애들레이드, 오클랜드, 멜버른, 시드니, 라고스, 아부자
아프리카	(15개 도시) 아비장, 아크라, 아디스아바바, 킨샤사, 브라자빌, 나이로비, 라바트, 키갈리, 다카르, 다르에스살람, 케이프타운, 더반, 요하네스버그, 에쿠르후레니, 루사카

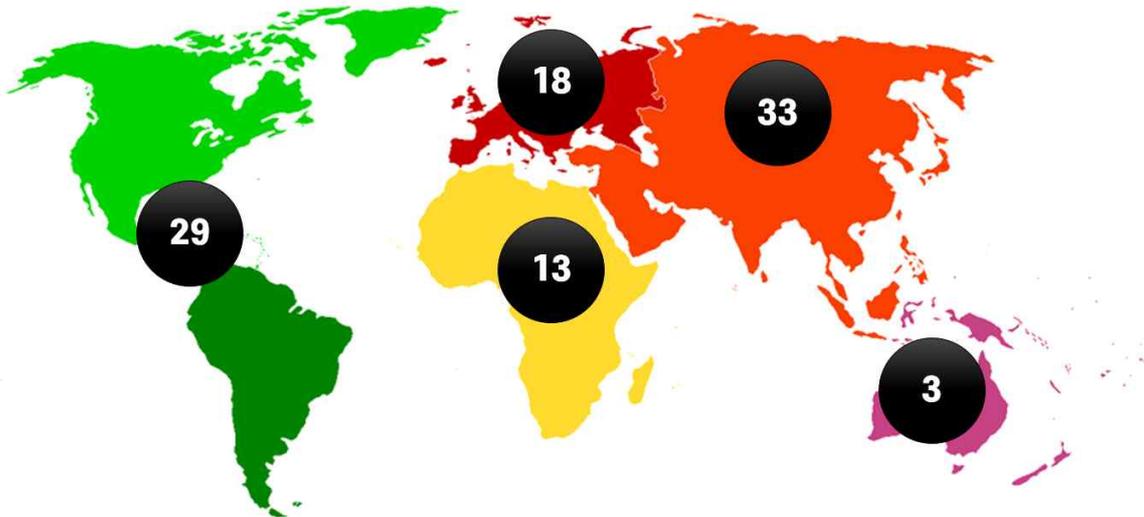
※ 출처: Enovate(2022) 제공, 저자 수정.

21) 출처: Enovate(2022), Net Zero Tracker. 2022.10.30. 접속, <https://zerotracker.net/>

1.3. C40 도시기후리더십 그룹²²⁾

2005년 케네스 리빙스턴 前런던시장의 주최로 세계온실가스 80%이상을 배출하고 있는 18개 대도시가 참여한 “대도시 기후리더십 그룹 (Large Cities Climate Leadership Group)” 의 제1차 총회가 개최되었으며, 이듬해 2006년 회원도시를 40개로 확산하면서 “도시기후리더십 그룹(Cities Climate Leadership Group, 이하 C40)” 로 그룹의 명칭을 개정하였다. C40 도시기후리더십 그룹은 대도시의 온실가스 감축 활동에 대한 구체적인 계획 수립을 의무화하는 역할을 하며 주 미션은 회원도시가 온실가스 배출량을 10년 이내에 절반으로 줄이는 동시에 형평성과 회복력을 개선하여 모든 사람들이 어디에서나 잘 살 수 있는 조건을 만드는 것에 있다. 회원도시가 기후변화 대응에 구체적으로 어떻게 기여했는지에 대하여 정기적으로 운영위원회 (Steering Committee)가 평가하며, C40 기준에 미달할 경우에는 회원도시로서의 자격을 박탈당하게 된다. 2022년 현재를 기준으로 런던, 베를린, 뉴욕, 도쿄, 델리 등 96개의 도시가 C40에 가입되어 있으며(그림 2-4), 한국의 경우에는 서울이 2006년 가입하여 현재까지 회원자격을 유지하고 있다.

[그림 2-4] C40 도시기후리더십 그룹 가입도시



구분	탄소중립 선언 도시
유럽	암스테르담, 베를린, 코펜하겐, 런던, 밀란, 파리 등 (18개 도시)
아시아	베이징, 홍콩, 방콕, 자카르타, 서울, 싱가포르 등 (33개 도시)
아메리카	보스톤, 뉴욕, 토론토, 멕시코 시티, 산티아고 등 (29개 도시)
오세아니아	오클랜드, 시드니, 멜버른 (3개 도시)
아프리카	케이프 타운, 아비장, 다카르, 요하네스버그 등 (13개 도시)

※출처: C40(2022) 제공. 저자 수정.

22) 출처: C40(2022), *About C40*, 2022.05.19. 접속, <https://www.c40.org/about-c40/>

2. 국제 지역단위 온실가스 배출량 인벤토리 산정지침²³⁾

1990년대 후반 세계자원연구소(World Resources Institute, WRI)²⁴⁾와 세계지속가능발전 기업위원회(World Business Council for Sustainable Development, WBCSD)²⁵⁾는 기업의 온실가스 회계처리 및 보고기준에 대한 국제표준의 필요성을 제기하고 2001년 첫 기업표준을 제기하였다. 이를 기점으로 그동안 도시, 감축, 정책 및 이행, 공급망, 제품 등 다양한 분야에서의 GHG 프로토콜이 개발되어 왔으며, 해당 프로토콜은 지역단위 온실가스 배출량을 산정하기 위한 국제표준으로 사용되고 있다. C40 기후리더쉽 그룹과 ICLEI가 개발한 도시에 대한 GHG 프로토콜은 지역 단위에서 총배출량과 최대 배출원 파악을 통해 온실가스 감축목표를 설정하고 성과를 추적 할 수 있도록 표준화된 도구로서 활용되는 동시에 기후행동계획을 지원하기 위하여 도시가 스스로 온실가스 인벤토리를 개발할 수 있도록 지원한다. 국제적으로 공인된 온실가스 회계 및 보고 원칙에 따라 도시 간 온실가스 배출량을 일관되고 투명하게 측정하고 보고하는 것이 가능하다. 또한 도시 인벤토리를 하위 국가 및 국가 수준에서 집계할 수 있도록 하고, 기후 변화에 대처하는데 도시가 수행하는 중요한 역할을 보여주고 비교 가능한 데이터의 벤치마킹 및 집계를 통해 통찰력을 촉진할 수 있다. 국제표준인 GHG 프로토콜에 대한 세가지 인증방법은 검토(Review by the GHG Protocol), 인증(Built on GHG Protocol), 공동개발(Joint development by the GHG Protocol)이다(표 2-5). 한국환경공단은 2009년 ‘지자체 온실가스 배출원 및 배출량 인벤토리 구축사업’을 통해 ‘지자체 온실가스 인벤토리 산정지침’을 개발, 지속적으로 수정·보완하여 2019년 GHG 프로토콜의 인증을 획득한 바 있다.

<표 2-5> GHG 프로토콜의 인식(recognition) 방법

구분		방법	
1	검토 Review by the GHG Protocol	문구 삽입	최소한의 인증요건을 만족하면 아래와 같은 문구 삽입 가능 "This [sector guidance] has been reviewed by the GHG Protocol and is consistent with the [specific title] Standard"
2	인증 Built on GHG Protocol	마크 부여	제3자 검증에 따라 GHG 프로토콜에 부합되면 인증마크 부여 
3	공동 개발 Joint development by the GHG Protocol	마크 부여	개발 시작부터 세계자원연구소(WRI)가 완전히 개입되는 경우 인증마크 부여 

※ 출처: GHG Protocol(2022) 제공, 저자 수정

23) 출처: WRI & WBCSD(2022), *GHG Protocol*, 2022.08.18. 접속, <https://ghgprotocol.org>

24) 세계자원연구소(WRI)는 1982년 미국에서 설립된 글로벌 비영리조직으로서 기후변화대응과 관련된 세계적인 연구기관임.

25) 세계지속가능발전기업위원회(WBCSD)는 1995년에 다국적 기업이 참여하여 설립된 비영리조직이며, 경제·환경·사회의 지속 가능한 발전을 추구하는 것을 목표로 함.

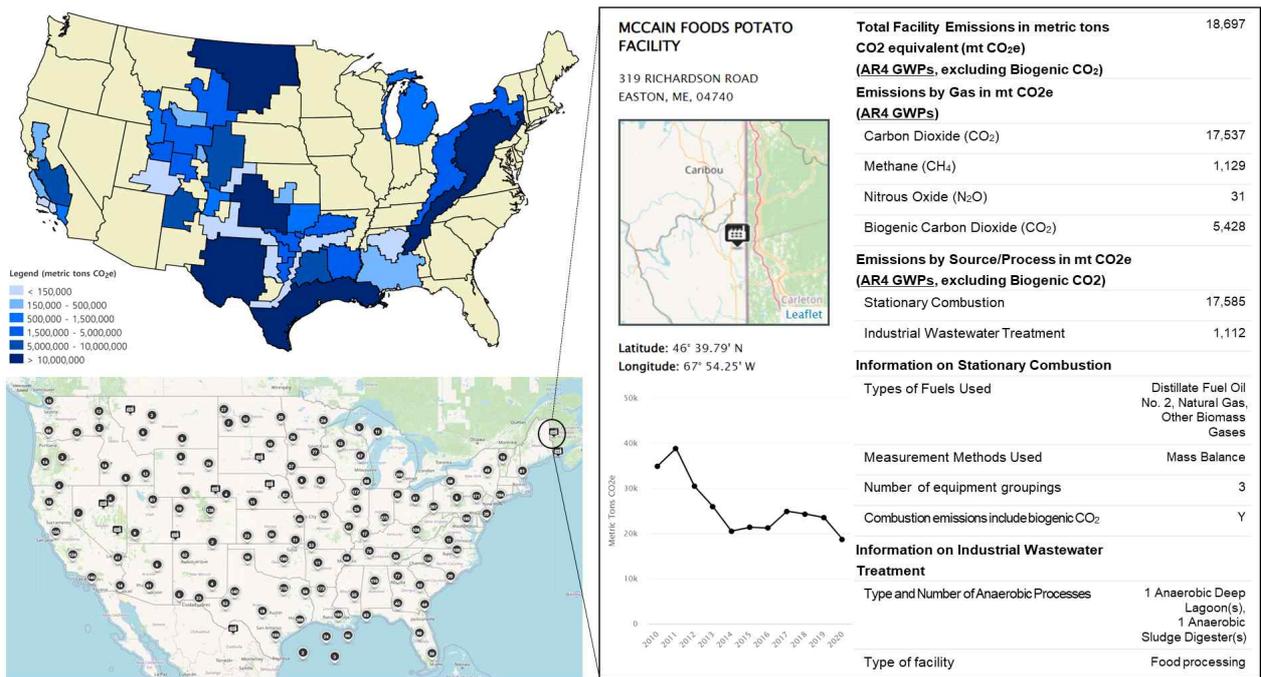
3. 국외 온실가스 배출량 공간지도

3.1 미국

미국 환경보호청(United States Environmental Protection Agency, US EPA)은 온실가스 보고 프로그램(Greenhouse Gas Reporting Program, GHGRP)을 통해 지역별 주요 배출원의 온실가스 배출정보를 공간화하여 제공하고 있다. 미국 통합세출법(Consolidated Appropriation Act)에서는 연간 25,000톤 이상의 CO₂ 배출 환산량(MTCO₂e)을 배출하는 시설 또는 발전시설, 활용과정에서 온실가스를 배출하는 제품의 공급자 등은 매년 미국 환경보호청에 온실가스 배출량을 의무적으로 보고하도록 규정하고 있다.

이에 따라 온실가스 보고 프로그램에서는 2010년부터 매년 온실가스 배출량 데이터를 수집·갱신하고 있으며, 국가·주 및 지역·부문·시설 등 다양한 공간적 범위에서 대규모 배출시설의 온실가스 배출 정보를 웹 기반 시스템인 시설단위 온실가스 배출정보 툴(Facility Level Information on Green House Gases Tool, FLIGHT)²⁶⁾를 통해 지도, 도표, 그래프 등을 사용해 가시화된 형태로 제공한다[그림 2-5]. 이를 통해 온실가스 배출량에 대한 정확도가 높은 최신의 자료를 대중, 정책 결정자 등 이해당사자들에게 제공하여 특정 산업 및 개별 시설의 배출량, 배출량에 영향을 미치는 요인 및 온실가스 감축 조치를 파악할 수 있게 함으로써 감축 촉진을 지원하고 있다.

[그림 2-5] 미국 Facility Level Information on Green House Gases Tool (FLIGHT)

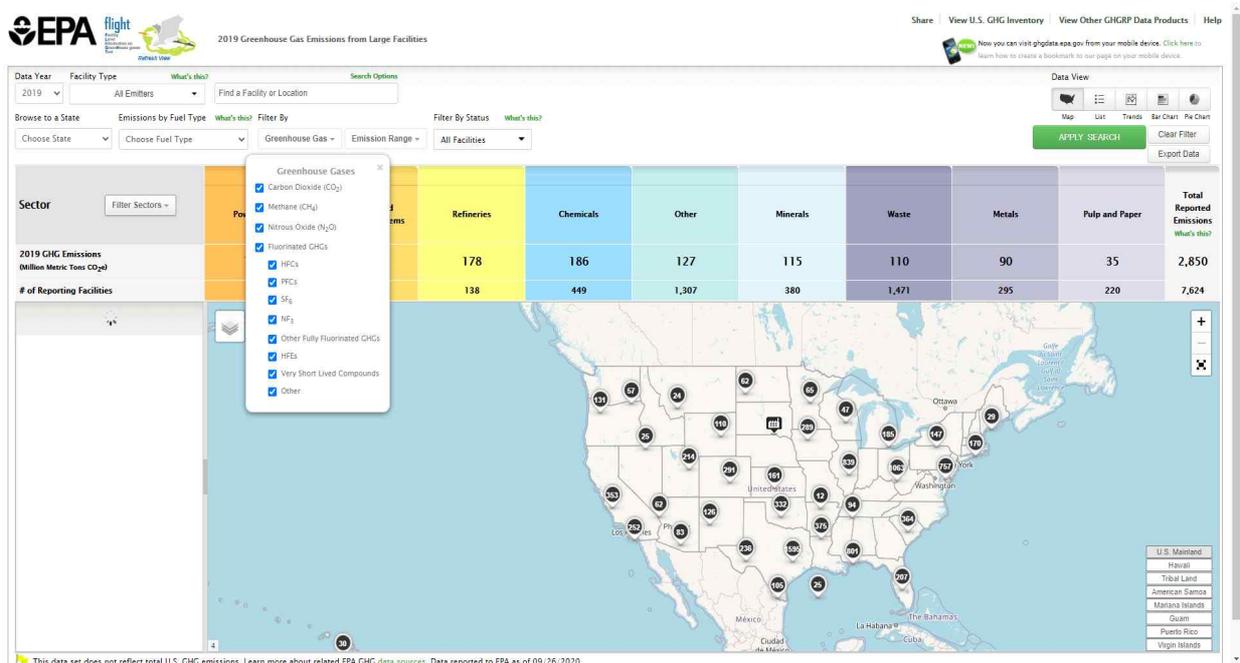


※ 출처: US EPA(2020)

26) 출처: EPA(2021). Facility Level Information on Green House gases Tool, 2022.10.17. 접속, <https://ghgdata.epa.gov/ghgp/>

FLIGHT 프로그램의 사용자는 미국 전역 단위의 시설 데이터 또는 특정 주(State)단위의 시설 데이터를 기반으로 온실가스 배출정보를 지도상에 가시화된 형태로 확인할 수 있다. 그림 2-6과 같이 또한 프로그램의 다양한 서치기능을 활용하여 데이터 연도, 데이터 종류, 시설 이름, 주, 연료 종류, 온실가스 종류 등에 대한 옵션을 특정 장소 또는 시설에 맞추어 설정할 수 있다. CO₂, CH₄, N₂O, 그리고 F-gases 전부를 포함한 온실가스 데이터를 제공하고 있으며, 사용자가 해당 온실가스의 연간 배출량 범위(Emission range)를 설정하여 해당 범위 안에 포함되는 시설을 필터링 할 수 있다.

[그림 2-6] FLIGHT 프로그램 내 공간 및 시설기반 조건설정 화면



※ 출처: US EPA(2021)²⁷⁾

온실가스 배출정보는 시설 부문(Facility sector)별로 나열되며 발전소(Power Plants), 석유 및 천연가스 시스템(Petroleum and Natural Gas Systems), 정제소(Refineries), 화학(Chemicals), 광물(Minerals), 폐기물(Waste), 금속(Metals), 제지산업(Pulp and Paper) 그리고 기타(Others)를 기준으로 정보를 제공하고, 사용자는 한가지 또는 여러 가지 조합의 시설물을 선택할 수 있다.

특정 시설물에 대해 위치(도시·주, 위·경도, 사업분류 코드(NAICS code), 시설물 ID, 다년간의 온실가스 배출 트렌드, 그리고 선택연도에 대한 상세 배출정보(시설의 총 탄소배출량(MtCO₂e), 가스 사용으로 인한 배출량, 가공 소스 또는 공정으로 인한 배출량)를 제공한다. 이와같이 다양한 정보들을 지도, 리스트, 선 도표, 막대그래프, 파이그래프 등의 형태로 시각화해 제공하는 기능을 갖추고 있다. 또한 특정 지역의 평균 가구수입, 인종비율 등의 인구통계학적 데이터를 함께 제공한다.

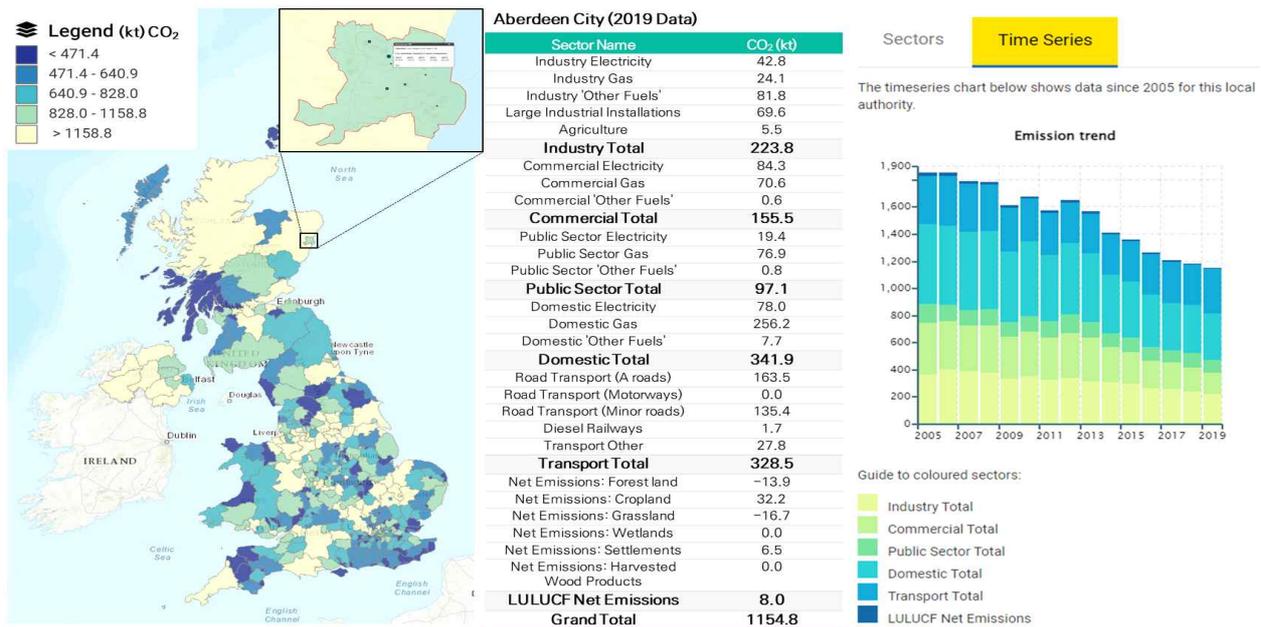
27) 출처: EPA(2021), *FLIGHT Basics*, 2022.11.01. 접속, <https://ccdsupport.com/confluence/display/ghgp/FLIGHT+Basics>

3.2 영국

영국 기업 에너지산업 전략부(UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy, BEIS)²⁸⁾에서는 그림 2-7과 같이 지역 단위의 온실가스 배출량 추정에 대한 통계자료를 지도화된 형태로 구현하고, 온실가스 배출량을 지속적으로 모니터링을 통해 감축 전략 수립에 유용한 정보를 제공하고 있다. 국가 온실가스 인벤토리의 CO₂, CH₄, N₂O 배출량을 기준으로 지자체별 배출 현황과 더불어 시계열 변화 정보 및 지자체 내의 주요 배출원의 상세 정보를 웹 기반으로 제공하고 있다.

‘최종사용자(End User)’를 기준으로 배출량을 산정하는 방식을 적용하여 공간화를 실시하며, 이는 연료의 생산과 처리, 전기 생산 시 발생하는 온실가스 배출량을 전력·제품 등의 최종사용자에게 재할당하는 방식이다. ‘최종사용자’ 기준 배출량 산정 방식은 ‘배출원’ 기준 산정 방식과는 달리, 가스 및 전력 소비통계, 폐기물 발생 자료, 토지이용, 토지이용변화 및 임업(산림흡수원) 지역 자료 등 다양한 활동정보를 수집하여 에너지 사용지역의 배출량을 추정하게 된다. 이와 같은 방식은 에너지를 생산지역이 아닌 사용지역의 배출을 중요하게 고려하는 방식으로, 에너지 공급(전력을 포함하는 에너지의 전환과 공급), 사용(거주지, 산업, 교통 등) 및 기타(농업, 산업 공정, 토지이용변화 및 폐기물 등) 부문으로 구분해서 산정하고 있다. 예를 들어 폐기물로 인한 온실가스 배출량의 경우, 각 지역에서 발생하는 폐기물량을 기반으로 온실가스 배출량을 재할당하며, 에너지 공급자가 전력을 사용하는 경우 전력 공급원에서 발생하는 배출량이 에너지 공급자 배출량으로 이전되고, 이는 다시 최종 에너지 사용자에게로 재분배되는 방식이다.

[그림 2-7] 영국 CO₂ Interactive Map



※ 출처: 영국 BEIS(2020)

28) 출처: UK National Atmospheric Emissions Inventory(2022). CO₂ Interactive Map, 2022.10.17. 접속, <https://naei.beis.gov.uk/laco2app/>

영국의 온실가스 인벤토리는 Ricardo Energy & Environment 주도의 컨소시엄에서 글로벌 표준 가이드에 준해 매년 수집되며 또한 다양한 국가 통계 및 부문별 데이터를 활용한다. 해당 인벤토리 데이터는 매년 UNFCCC에 보고되어 국가 및 국제 배출량 감축 기준을 준수하고 있는지를 평가하는데 사용된다. 배출 데이터 수집에는 일관성 있는 방법론과 배출활동 정보가 사용되며 이는 내부적으로 일관된 인벤토리 및 온실가스 및 대기오염물질 배출량 예측을 가능케 한다.

영국 국경내에서 발생하는 영토내 배출량(Territorial CO₂, CH₄, N₂O emissions)정보를 여러 가지 목적과 활용에 맞게 사용할 수 있도록 배출량 섹터를 에너지 공급자(Energy suppliers), 에너지사용자(Energy users), 그리고 기타(Others, 연료사용과 상관없이 발생하는 CO₂배출)로 구분지어 제공한다. 또한 ‘최종사용자 포맷(End user format)’을 기반으로 연료의 생산 및 처리, 전기 생산으로 인한 배출량은 해당 에너지의 사용과 관련된 총 배출량을 반영하기 위해 에너지의 최종소비자에게 재할당된다. 이러한 형태의 배출량 보고는 주로 발전소에서 일어나는 발전이나 정유소의 연료처리와 관련된 배출량의 크기에 영향을 주게되어, 직접 배출부문에 속하는 ‘원별(by source)’ 배출량 포맷과 다른 수치를 제공하게 된다. 연료 생산 및 처리 이외의 배출원으로부터 발생하는 배출량은 그 발생위치에 따라 최종사용자 또는 배출원별 접근 방식 모두에서 동일한 방식으로 보고된다. 최종사용자 기준의 배출량 보고는 지역 수준에서 에너지 사용으로 인한 배출량을 설명하며 다른 지역으로 수출되어 사용되는 에너지 생각으로 인한 배출량의 경우 해당 지역으로 귀속되지 않는다는 것이 장점이다.

[그림 2-8] UK 최종사용자 기준 온실가스 배출량 정보(kt CO₂ 2020)

Sector	Anthracite & Coal	Coke	SSF & Charcoal	Natural Gas	Oil	Electricity	Non-Fuel	Grand Total
Energy Supply								
Energy Consumption								
Industry: Iron & Steel	166	10,704	-	909	80	328	752	12,939
Industry: Other Combustion	1,896	-	-	20,487	12,814	14,455	256	49,707
Industry: Other Processes	1,428	-	-	2,031	5,732	-	7,347	16,538
Commercial	31	-	-	11,404	170	11,357	724	23,687
Agriculture	-	-	-	207	4,547	814	39,471	45,039
Miscellaneous	-	-	-	-	-	-	17,653	17,653
Rail Transport	38	-	-	2	1,522	902	-	2,464
Domestic	1,500	-	837	58,384	8,685	21,444	293	91,143
Public	59	-	-	7,793	100	2,834	-	10,785
Road Transport	-	-	-	62	103,450	112	57	103,681
Inland Waterways	-	-	-	-	928	-	-	928
Land use Change	-	-	-	-	-	-	4,607	4,607
Water Transport: National Navigation	-	-	-	-	4,783	-	-	4,783
Air Transport	-	-	-	-	603	-	-	603
Military Transport (Air & Water)	-	-	-	-	1,542	-	-	1,542
Exports	-	-	11	-	4,480	906	-	5,397
International aviation and shipping	-	-	-	-	1,771	-	-	1,771
Total	5,118	10,704	848	101,280	151,008	53,151	71,159	393,269

Legend and Notes:

Energy Suppliers
Energy Users
Others (CO ₂ emissions not related to fuel use)

Sectors: Excluded from Local GHG estimates in *italics*

※ 출처: 영국 BEIS(2022)²⁹⁾

29) 출처: 영국 BEIS(2022), "UK Local and Regional Greenhouse Gas Emissions Estimates for 2005-2020"

제 3 절 국내외 탄소중립 관련 웹프로그램

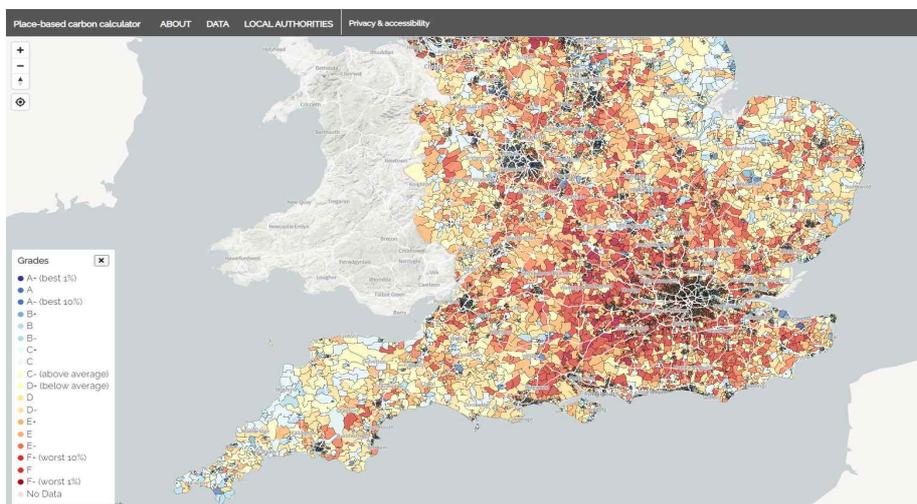
1. 공간단위 온실가스 배출량 분석 프로그램

1.1. 영국 Placed-Based Carbon Calculator(PBCC)³⁰⁾

영국의 위치기반 탄소 계산기 (Place-Based Carbon Calculator, 이하 PBCC)는 UK Research and Innovation의 자금 지원으로 에너지 수요 솔루션 연구센터(Centre for Research into Energy Demand Solutions)가 제작한 웹 기반 도구로, 영국 전역에 걸친 광범위한 데이터와 연구 결과를 활용하여 지역 사회와 정책 입안자들이 탄소발자국이 어디로부터 왔으며, 탄소 배출량을 줄이기 위해 어떤 감축 전략을 구성해야 하는지 등의 의사결정을 내릴 수 있도록 지원하는 것을 목적으로 만들어졌다. PBCC는 영국 남부 모든 지역에 대한 1인당 탄소 배출량을 추정하며 특히 인구가 약 1,500~3,000명인 작은 단위의 통계분석 기준 지역에 대한 정보가 제공된다는 것이 특징이다.

PBCC는 탄소 발자국에 대한 소비 기반의 접근 방식을 취하고 있으며, 특정 제품이나 서비스의 생산자가 아닌 소비자를 기준으로 탄소 배출량이 계산되게 된다. 예를 들어 타 국가에서 만들어진 휴대폰이 영국에서 소비될 경우 실질적인 탄소 배출량은 생산 국가에서 발생하지만 소비지인 영국의 탄소발자국으로 계산된다. 탄소 배출량 계산의 정확도를 최대화하기 위해 개인의 행동과 소비 패턴에 대한 정보를 수집하는데, 지역의 가스 및 전기 소비량과 같은 데이터를 활용하며, 음식 소비량과 같이 정확한 정량적 데이터 수집이 어려운 부문에 있어서는 설문조사 결과와 모델링이 사용된다. 수집된 데이터는 지역의 총 탄소 배출량에 대한 개요를 제공하고, 총 배출량을 해당 지역의 거주 인구수로 나누어 1인당 평균 탄소 발자국을 계산한다.

[그림 2-9] 영국 Place-Based Carbon Calculator(PBCC)



※ 출처: CREDS(2022)

30) 출처: CREDS(2022), *Place-Based Carbon Calculator*, 2022.10.26. 접속, <https://www.carbon.place>

해당 프로그램은 상향식(Bottom-up) 데이터에 초점을 맞추어 개발되었다. 공간단위 탄소배출량 계산을 위해 건물 및 운송 부문, 가스 및 전기 사용으로 인한 배출량의 경우 기존의 데이터들이 사용되었으며, 그에 비해 비교적 그 크기가 작고 데이터 수집이 어려운 배출원(예: 섭취되는 음식의 종류와 양 등)에 대해서는 설문 데이터를 기반으로 한 소득 등의 지표가 그 전체 소비와 탄소배출량을 예측하기 위해 사용되었다(표 2-6 참조).

수집된 데이터를 기반으로 영국의 각 소규모 지역(LSOA, lower super output area; 지역의 평균 인구가 약 1,500명인 소규모 통계 영역)에 대한 1인당 평균 탄소배출량이 계산되었다. LSOA가 사용된 이유는 첫째, 지역의 크기가 작아 자세히 들여다 볼 수 있는 흥미로운 세부 정보가 많이 존재하기 때문이고 또한 LSOA통계는 정부와 학계에서 널리 사용되기 때문에 유용한 비교와 설명을 뒷받침할 수 있는 데이터를 많이 접할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문이다. 소규모의 통계 영역에서의 탄소발자국 분석 결과에 따르면, 배출량이 가장 높은 지역은 가장 낮은 지역에 비해 1인당 평균 배출량이 8배 이상 큰 것으로 나타났다.

<표 2-6> PBCC의 공간별 탄소배출량 계산 주요 구성요소

소비카테고리	탄소발자국 비중(%)	공간적 단위	시간적 단위
전기, 가스 및 기타 연료	25.3	LSOA	연간 가스 및 전기 사용량
개인 교통수단	16.7	LSOA	2011년 자료를 연간 데이터로 모델링 추정
공공 교통수단	13.1	LSOA내 육상 운송에 사용되는 공간, 항공 운송 거리	2011년 자료를 연간 데이터로 모델링 추정
음식 소비	12.7	설문 데이터 기반 모델링 추정	2017년
기타 (외식업, 서비스업, 우편배송 등)	32.2	설문 데이터 기반 모델링 추정	2017년

※출처: Morgan, M., et al. (2021)³¹⁾ 제공, 저자 수정

PBCC는 기존의 GIS 소프트웨어 사용에 익숙하지 않은 비전문가 사용자에게 공간 데이터를 보다 쉽게 제공하기 위해 최근 널리 사용되고 있는 웹 맵핑 (Web mapping) 기술을 활용하였다. 본 기법은 공간 데이터 시각화에 필요한 서버 공간이 적고 사용자가 결과를 빠르게 다운로드 받을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 한 공간에 대해 다양한 속성을 나타내는 것이 가능하고, 많은 수의 공간(예: 32,844개의 LSOA)을 한 지도위에 시각화할 수 있다.

31) 출처: Morgan, M., Anable, J., Lucas, K(2021), "A Place-Based Carbon Calculator for England", *29th Annual GIS Research UK Conference (GISRUUK)*

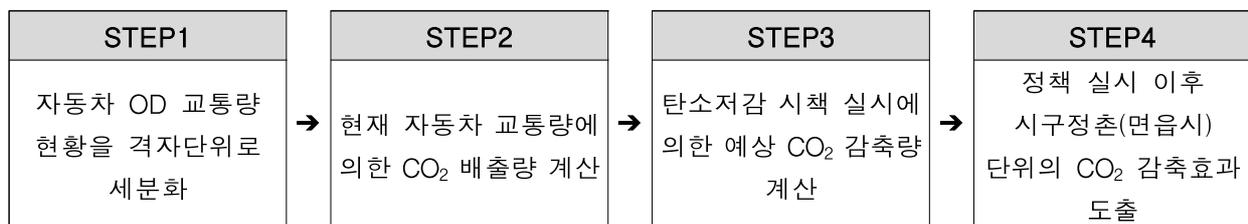
1.2. 일본 CO₂ Reduction Effect Simulation Tool(CREST)³²⁾

일본 정부는 2020년 3월 30일 온실가스 감축목표(NDC)로서 일본 내 배출량 감축·흡수량을 확대하여 2013년 대비 2030년까지 온실가스 배출량을 26% 수준으로 감축하는 것을 목표로 한다고 발표한 바 있다. 그 이듬해 2021년 4월 22일 온실가스 감축목표(NDC)를 46% 감축하는 것으로 상향한 새로운 NDC를 UN에 제출하였다. 또한 「지구온난화대책의 추진에 관한 법률」에 파리기후 변화협정 및 2050년 탄소중립 선언 등에 준하는 기본개념과 관련 조항들이 신설되었다. 해당 법에 따라 기업의 탄소 배출량 정보를 디지털화 및 오픈 데이터화 하는 등 지구온난화대책 마련과 탄소중립 경영 촉진을 위한 전략을 추진해오고 있다.³³⁾

현재 일본은 도시구조와 교통정책 실시 등에 따른 탄소저감 효과를 포괄적으로 진단 및 평가할 수 있는 공간 분석틀인 CO₂ Reduction Effect Simulation Tool(이하 CREST)를 개발해 활용하고 있다. CREST는 「저탄소 도시조성 계획 작성 매뉴얼」에 기재된 도로교통 통계 조사데이터를 이용한 산정방법을 활용하여 도시구조·교통 분야의 저탄소화 정책으로 인한 CO₂ 배출량 감축 효과를 전국의 시구정촌(면읍시) 단위로 추정하는 도구이다. CREST는 기존 자료를 기반으로 각종 정책으로 인한 CO₂ 배출량 감축 효과를 간편하게 계산하는 것을 목적으로 만들어졌으며, 따라서 공간 내의 상세한 정보(예: 시책에 의한 교통량 변화)는 반영하지 않는다.

본 분석도구는 도로교통 통계 OD 조사데이터를³⁴⁾ 이용한 산정기법을 사용한다. 먼저 지역간 차종별 자동차 교통량 현황을 격자 단위로 세분화하여 이산화탄소 배출량 현황을 계산한다. 이를 위해 도로 교통 통계 구역 간 교통량을 집계, 500m 격자 단위로 세분화하여 존(zone)간 교통량을 인구 비율로 나누어 구역 간의 교통량을 계산하게 된다. 다음으로 세분화된 각 구역간의 현 교통량에 의한 CO₂ 배출량이 계산되며, 공간의 탄소저감 정책 실시에 의한 예상 감축량을 계산한다. 이때 도시의 실정에 따른 인구집약화 시책, 지역별 교통 시책, 전역의 교통시책 (예: 친환경차 보급률) 등을 포함한 정책이 고려된다. 마지막으로 각 시책에 의해 산출된 탄소 저감량의 합산을 통해 정책 실시 이후 시구정촌(면읍시) 단위의 교통에 의한 CO₂ 감축효과가 도출되게 된다

<표 2-7> 일본 CREST 분석 프로세스



※ (출처) 일본 국토교통성 도시국 도시계획과

32) 출처: 일본 국토교통성(2014), “二酸化炭素削減効果シミュレーション・ツール利用マニュアル(CO₂-Reduction Effect Simulation Tool Users' Guide)”

33) 출처: 일본환경성(2022), 지구 온난화 대책의 추진에 관한 법률, 2022.10.24. 접속, <https://www.env.go.jp/press/109218.html>

34) 도로 교통 통계 OD 조사데이터는 자동차를 가지고 있는 대상 중에서 무작위로 선정된 대상에게 협조를 받아 설문조사 등을 실시하여 지역간(존간)의 차종별 자동차 교통량을 집계한 것이며, 여기서 OD는 Origin(출발지)과 Destination(목적지)의 약자임.

Step3 : 저탄소 시책의 실시에 따른 CO₂삭감량 계산

◇ 도시 실정에 따라 시책을 선택

◇ 인구의 집약화 시책
인구집약화에 의한 CO₂ 배출량 삭감효과 계산



어느 지역에, 어느 정도, 인구를 집약화시킬지 설정

집약화 실시 후 메시지간 CO₂ 배출량
= 집약지역 메시지간 CO₂배출량
× 격자셀 인구 증가율(집약전후)
+ 기타 메시지간 CO₂배출량
× 격자셀 인구감소율(집약전후)
※ 집약화는 도시 내 인구이동을 상정하고 있으며, 증가분은 다른 지역의 인구를 평균적으로 감소시켜 조정. (시책 전후 도시인구는 일정.)

◇ 지역별 교통시책
공공교통 편리성향상, 도심진입규제에 의한 CO₂ 배출량 삭감효과 계산



어떤 교통 시책을 어느 지역에서 실시할 것인지 설정

시책 실시 후 메시지간 CO₂배출량
= 영향범위 격자셀간 CO₂배출량
× (1 - 시책에 의한 CO₂삭감률(%))
+ 기타 격자셀간 CO₂배출량
※ 각 시책 영향범위, 삭감률은 「PersonTrip 예측모델에 의한 분석 결과」를 디폴트값으로 준비. 독자적으로 설정할 수도 있다.

◇ 전지역의 교통시책
모빌리티매니지먼트, 환경대응차 보급에 따른 CO₂ 배출량 삭감효과 계산



어떤 교통 시책을 어느 정도 실시할 것인지 설정

시책 실시 후 전지역 CO₂배출량
= 전지역 CO₂배출량
× (1 - 시책에 의한 CO₂삭감률(%))
※ 환경대응차의 삭감효과는 「자동차연비일람」이나 「제조사 제원표」에서 설정

○ Step2와 툴의 관계

본 툴에서는 시책의 CO₂ 삭감효과 계산 프로그램을 구현하고 있으며, 시책의 종류, 실시위치를 지도상에서 지정함으로써 계산이 가능합니다.

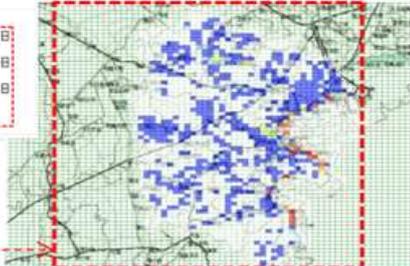
Step4: 시책 실시 후의 시정촌 단위의 CO₂삭감 효과를 계산

◇ 시정촌 단위의 표시
시정촌 전체의 자동차교통에 의한 현재의 CO₂배출량과 삭감효과

계산결과

시책실시전배출량	7998 2005	t-CO ₂ /B
시책실시후배출량	7795 5986	t-CO ₂ /B
삭감량	12 6019	t-CO ₂ /B
삭감률	0.1614	%

◇ CO₂삭감효과의 가시화
CO₂삭감효과를 메시단위로 지도상에 표시



○ Step3와 툴의 관계

본 툴에서는 시책 실시 전의 CO₂ 배출량, 시책에 의한 CO₂ 삭감량이나 삭감율의 분포를 지도상에 메시 단위로 표시하는 동시에 각종 GIS 소프트웨어에 도입하는 것도 가능합니다.

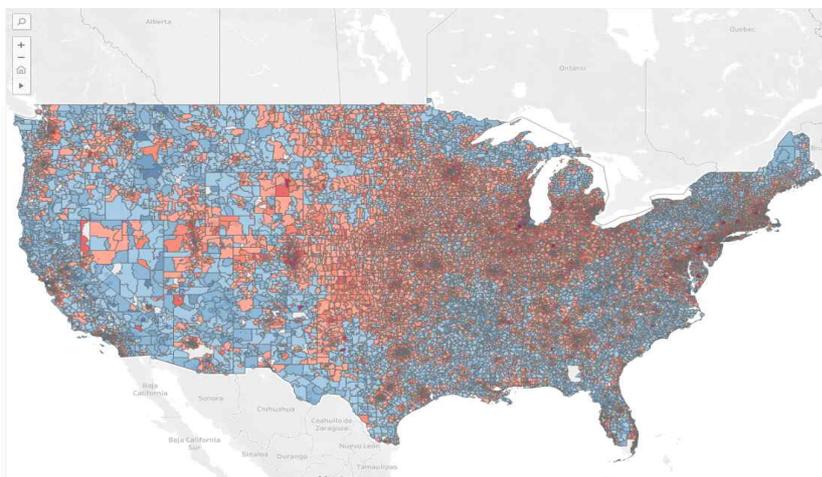
1.3. 미국 Household-Business Calculator 35)

미국 University of California, Berkeley를 주체로 한 학계, 정부, 산업계, NGO 간의 파트너십 네트워크인 Cool Climate Network에서는 청정에너지 경제로의 전환을 가속화하기 위한 다양한 의사 결정 도구를 제공하고 있다. 해당 네트워크는 탄소발자국 벤치마킹 연구를 개발하여 이를 다양한 사용자가 맞춤형 기후 솔루션을 설계하는데 활용할 수 있는 것을 목적으로 하며 개인, 기업, 조직 또는 커뮤니티가 온실가스 배출 감축을 달성할 수 있는 기회를 식별할 수 있도록 지원한다.

Cool Climate Network가 개발한 Household Calculator와 Business Calculator는 일반 가정과 기업이 구매하는 모든 운송, 에너지, 식품, 상품 및 서비스의 온실가스 배출량을 산출하는 탄소발자국 계산 도구이다. 해당 도구들은 포괄적인 ‘소비 기반 온실가스 회계 (consumption-based greenhouse gas accounting)’ 방법을 통해 가정, 기업 및 지역사회의 전체 탄소 발자국을 추정하고 이를 유사한 결과값을 가진 사용자와 비교한다. 해당 도구는 미국 전역과 국제적으로 정부, 기업 및 비정부기구들에 의해 채택되었다.

또한 우편번호별로 미국 가정집의 평균 탄소 배출량을 지도로 확인할 수 있는 ‘Average U.S. Household Carbon Footprint by Zip Code’ 를 제공하고 있다. 해당 탄소 지도는 미국 내 어느 지방 자치 단체가 가정별 온실가스 배출에 가장 많이 기여하며, 지역의 인구 밀도와 교외화(suburbanization)가 온실가스 배출에 미치는 영향이 무엇인지 등을 알아내기 위한 연구의 일환으로 개발되었으며, 전국의 가구 조사를 위해 사용되는 미국 우편번호, 도시, 카운티 및 대도시 지역의 평균 가구 탄소발자국을 도출하는데 사용된 에너지, 교통, 식품, 상품 및 서비스 수요의 계량경제학 모델을 기반으로 만들어졌다.

[그림 2-11] 미국 우편번호 기반 가정 평균 탄소 발자국 현황
(’22년 8월 기준)



※ 출처: CoolClimate Network(2022)

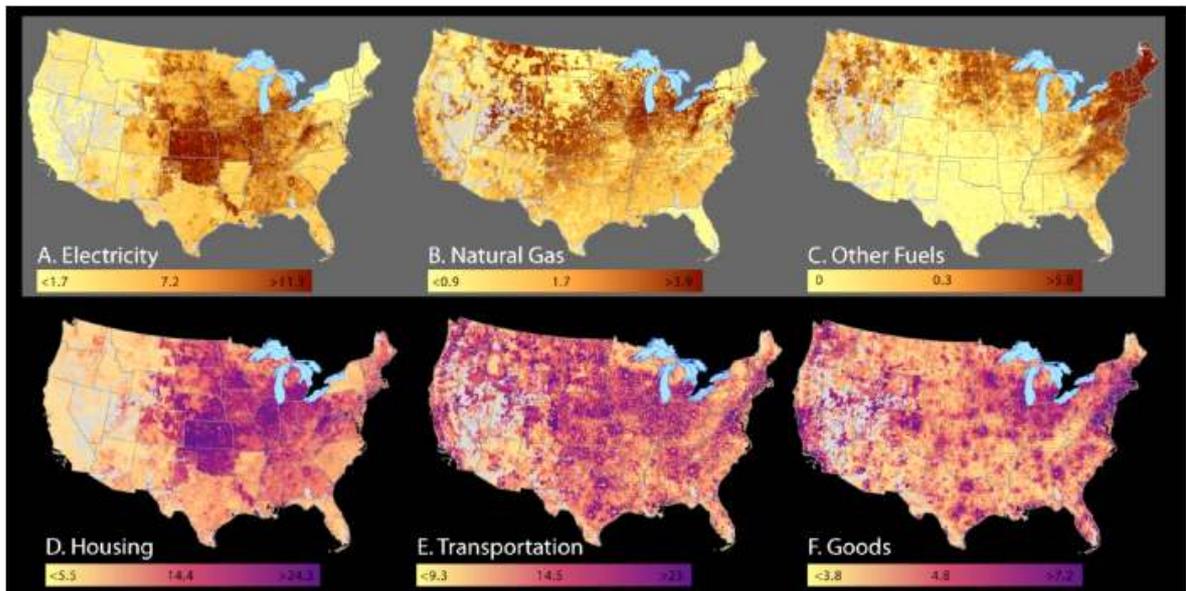
35) 출처: Cool Climate Network(2022), *Cool Climate Maps*, 2022.10.26. 접속, <https://coolclimate.berkeley.edu/index>

미국 가정 탄소발자국(HCF, Household Carbon Footprints) 계산기는 정밀한 지리적 해상도에서 가계 별 자동차, 대중 교통, 항공 여행, 가정 내 에너지 사용, 식품, 물, 제품 및 서비스 구매와 사용 등을 통해 1년간 배출하는 총 탄소량을 추정하기 위한 계량경제학적 모델을 기반으로 한다. 해당 모델은 미국 전역의 우편 번호, 도시, 카운티 및 주를 기준으로 가구 탄소배출의 크기와 구성요소를 특성화 할 수 있으며, 각 위치 당 고해상도의 탄소 프로필을 도출하는 동시에 지역의 인구 밀도와 도시화가 전주기 온실가스 배출에 주는 영향 등을 분석할 수 있다. 개인 또는 집단의 총 탄소발자국은 소비하는 양(C, 단위 예: 달러)과 각 단위 소비당 배출량(E)을 곱한 것의 총합으로 계산되며, 산식은 아래와 같다.

$$HCF = \sum C_i E_i$$

가구의 소비량(C)은 미국 전역의 가구 조사 데이터를 사용해 계산되는데, 주거용 에너지 소비 조사의 에너지 가격, 난방 연료 유형, 난방 및 냉방 정도, 가정 구조(방 개수, 주택 건설 연도 등), 인구통계정보(소득, 세대구성원, 인종 등), 농촌 또는 도시 지역 비율 등이 사용되었다. 교통에 대한 소비량 측정에는 전국 가계 여행 조사의 소유 차량수, 연료 가격, 평균 출근 시간, 평균 통근자 비율, 인구 밀도 등의 정보가 활용되었다. 소비량에 곱해지는 온실가스 배출계수(E)의 경우, 상품 및 서비스에 대한 간접 수명 주기 배출계수는 CEDA(Comprehensive Environmental Data Archive)³⁶⁾ 데이터를 활용한 투입-산출(input-output) 수명주기평가를 통해 지출 1달러당 평균 배출량을 계산한 것을 사용하였다. 그림 2-12는 위 수식에 따라 계산된 가정의 소비 부문별(에너지 사용, 교통, 제품 소비 등) 탄소발자국의 지역별 패턴을 시각화한 것을 보여준다.

[그림 2-12] 미국 지역별 평균 가정 탄소발자국



※ 출처: Jones & Kammen(2022)³⁷⁾

36) CEDA란 LCA, 탄소, 에너지, 물, 폐기물 등의 공급체인에서의 영향력 평가를 위해 디자인된 전과정목록(LQ) 데이터베이스로 약 3800여 개의 산업군을 포함

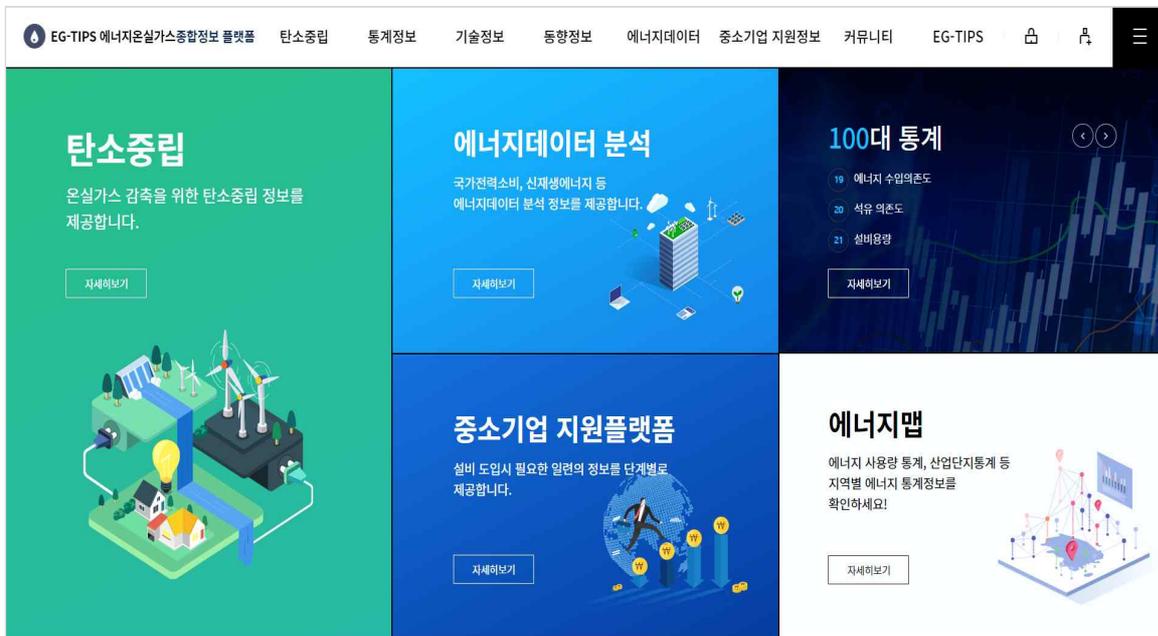
37) 출처: Jones, C., and Kammen, D. M.(2014), "Spatial Distribution of US Household Carbon Footprints Reveals Suburbanization Undermines Greenhouse Gas Benefits of Urban Population Density", *Environmental science & technology*, 48(2), p895-902

2. 에너지 분석 프로그램

2.1 한국에너지공단 EG-TIPS 탄소중립 시뮬레이터³⁸⁾

한국에너지 공단의 에너지절감 지식포털 EG-TIPS(Energy GHG Technology Information Platform Service)³⁹⁾는 기업의 온실가스 감축 및 에너지절감 사업을 추진하기 위해 필요한 국내·외 기술정보를 통합적으로 제공하려는 목적으로 만들어진 양방향 기술정보 서비스이다. 해당 플랫폼은 사업 데이터베이스 연계, 설비 및 업종별 에너지 절감기법을 포함한 통합기술 정보를 제공하며, 에너지 절감량 산출의 기준과 계산을 실행할 수 있는 전산툴을 제공하고 있다. EG-TIPS는 또한 우수 에너지절감 기술과 고효율 인증제품들을 검색하고 구매할 수 있는 기능과 더불어 사용자 간 커뮤니케이션을 위한 커뮤니티 기능을 제공한다.

[그림 2-13] EG-TIPS 에너지온실가스 종합정보 플랫폼 메인화면



※ 출처: 한국에너지공단(2022)

한국에너지 공단의 EG-TIPS 탄소중립 시뮬레이터는 영국 정부의 Mackay carbon calculator를 벤치마킹하여 개발되었으며 발전 (전원 믹스 변화, 송배전 손실 감소), 산업 (철강산업 감축, 석유화학산업 감축, 시멘트산업 감축, 정유산업 감축, 기타산업 감축), 가정, 상업, 수송, 공공 부문의 2050 감축경로를 단계별로 제공한다. 해당 프로그램에서 사용자는 감축 부문별 시나리오 단계를 설정할 수 있고, 이에 따른 2050년까지의 최종 에너지 수요와 온실가스 배출량을 볼 수 있다.

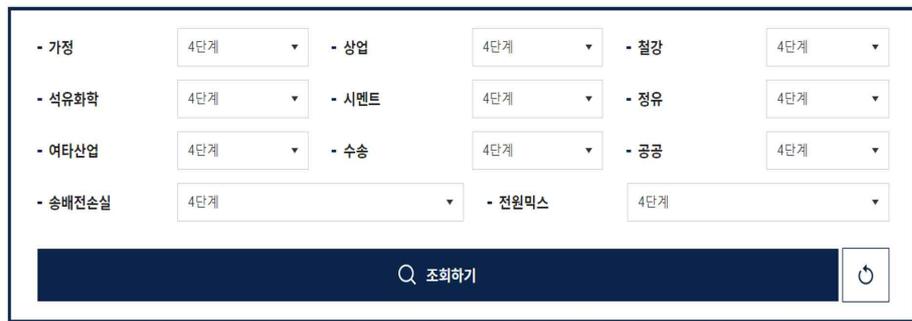
38) 출처: 한국에너지공단(2022), EG-TIPS, 2022.07.15. 접속, https://tips.energy.or.kr/carbon/carbon_cal.do.

39) 출처: 한국에너지공단(2015), 「정부 3.0 맞춤형 EG-TIPS, 참여기업 경영진 간담회 개최」

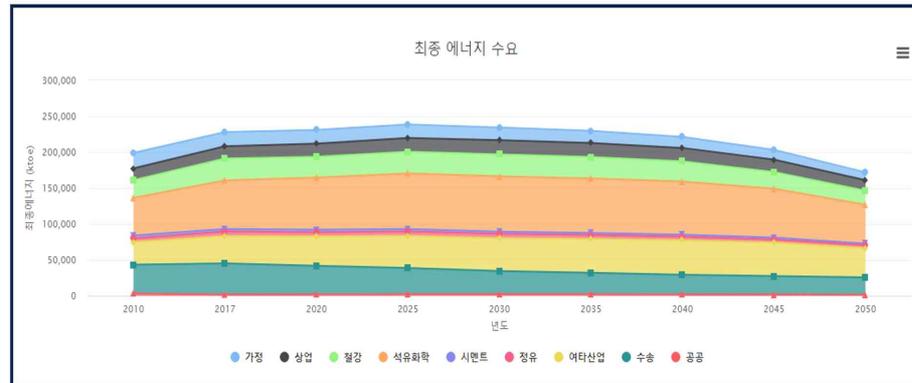
부문별 감축경로는 총 4단계로 구분되며, 현 수준이 유지되는 단계(BAU)부터 점차적으로 신재생 전력원 및 열원의 사용이 확대되는 등의 시나리오로 구성되어 있다. 예시로 발전 부문의 ‘전원 믹스 변화’의 단계별 시나리오를 살펴보면, 1단계는 현재 수준의 감축정책 유지로 2050년까지 전력의 18%를 신재생으로 생산하는 것이고, 2단계는 신재생 기반 전력을 50%까지 확대하는 경로로 설정되어 있다. 3단계와 4단계는 각각 신재생으로 전력의 68%와 72.5%를 생산하는 것과 더불어 수소와 암모니아 등을 포함한 무탄소 발전의 비중을 늘리는 시나리오로 설정되어 있다.

[그림 2-14] EG-TIPS 탄소중립 시뮬레이터 화면

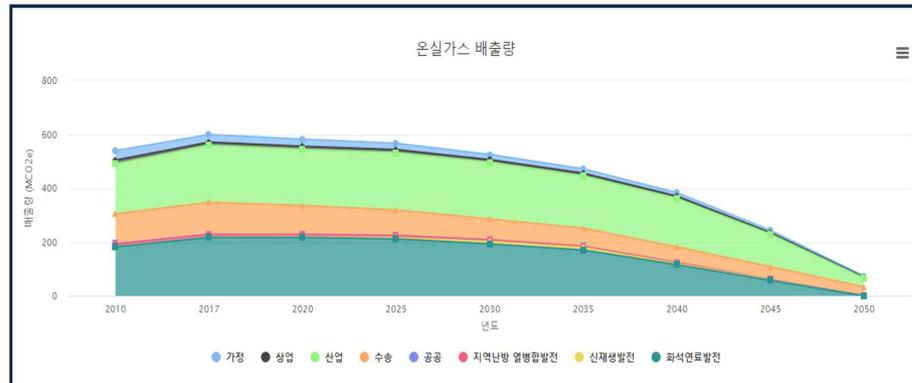
탄소중립 시뮬레이터



최종 에너지 수요



배출량



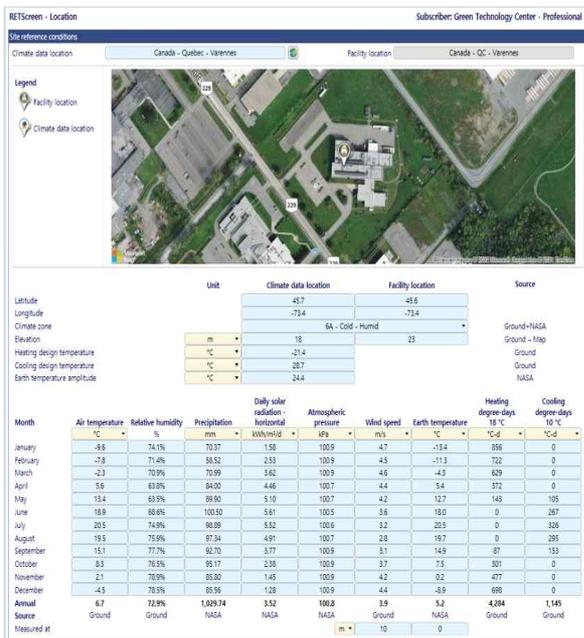
※ 출처: 한국에너지공단(2022)

2.2 캐나다 천연자원부 RET Screen⁴⁰⁾

1997년 캐나다 천연자원부 (Natural Resources Canada)가 프로그램 형태로 개발했으며 재생에너지, 에너지 효율 및 열병합 발전 프로젝트의 기술 및 재정적 실행 가능성 분석을 목적으로 하며, 기술적 범위는 기존 에너지원과 연료전지, 가스터빈, 지열, 수력, 태양광, 태양열, 풍력, 해양에너지 등을 다룬다.

주 대상 사용자는 개발자, 공학자, 연구원, 설비업체 등으로 에너지 분석, 비용 분석, 배출 분석, 재무 분석 및 민감도, 위험 분석을 통해 연간, 월간 및 시간별 출력, 용량 계수, NPV, 투자 회수, 수익 수치 등의 정보를 제공한다. 개별 주택에서 대규모 산업 시설을 아우르는 다양한 규모의 공간에 대해 에너지 효율, 난방 및 냉방(바이오매스, 열펌프, 태양열 공기/수열 난방), 전력(태양광, 풍력, 수력, 지열 등 재생에너지 포함), 가스/증기 터빈을 포함한 에너지 프로젝트의 분석을 지원한다. 또한 기본적으로 제공되는 산업 벤치마크와 비교를 통해 에너지 시스템의 실현 가능성 분석을 수행한다.

[그림 2-15] 캐나다 천연자원부 RETScreen 구동화면



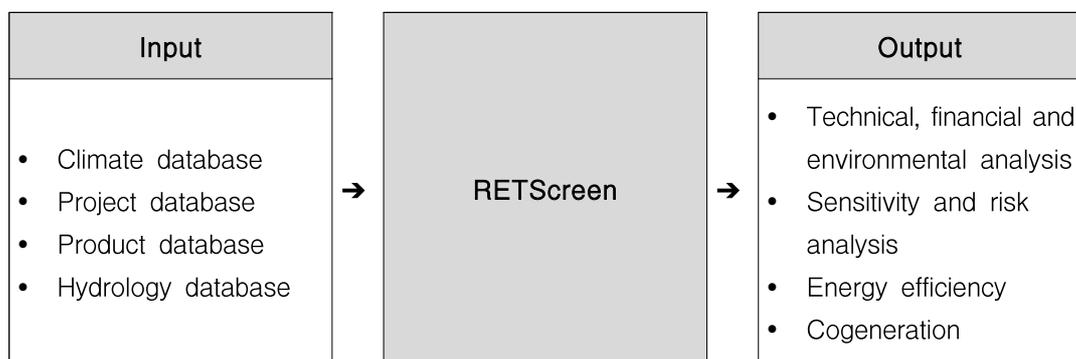
* 출처: 캐나다 천연자원부(2022)

40) 출처: Government of Canada(2022), *RETScreen*, 2022.07.15. 접속, <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>

NASA에서 제공하는 기후정보, 기술별 제품정보, 비용 정보 등 데이터를 제공하여 사용자가 대상 프로젝트에 대한 제한적 정보를 가지고 있어도 분석을 시행할 수 있도록 지원한다. 분석대상 공간을 선택하면 연계된 기후 데이터가 자동으로 로딩되고, 사용자가 프로젝트의 기술 및 비용 정보를 입력할 수 있는데, 이때 프로젝트에 대해 가지고 있는 정보에 따라 직접 입력 혹은 프로그램이 제공하는 디폴트 수치의 사용이 가능하다. 글로벌 기후 데이터베이스는 위치별 월평균 태양복사조도(solar irradiation), 에너지 자원지도(예: 풍력지도), 수문학 데이터(hydrology data) 등을 제공하며, 기술 데이터의 경우 태양광 패널 상세 제품정보 및 풍력 파워커브를 포함한 다양한 정보를 제공한다. 입력된 정보를 바탕으로 기술적, 경제적 및 위험 분석이 수행되며, 현재 가동되고 있는 시스템 대비 새롭게 만들려고 하는 에너지 시스템을 비교하여 프로젝트의 실현 가능성을 가늠할 수 있다. 또한 배출정보의 경우, 단위 에너지 당 배출계수를 사용하여 CO₂, CH₄, N₂O에 대한 배출량을 계산하여 제공한다.

RETScreen의 에너지 시스템 실현 가능성 상세 분석 절차를 살펴보면, 먼저 사용자가 원하는 장소를 선택하면 해당 지역의 기후 데이터가 자동으로 로드되고 다음으로 분석하고자 하는 프로젝트의 기술 및 재정 정보를 사용자가 직접 입력한다. 이때 입력하는 정보의 양에 따라 세가지 레벨의 분석 디테일로 세분화되어 있으며, 대상 프로젝트에 대한 정보가 부족할 경우 프로그램이 기본으로 제공하는 기후정보 데이터베이스, 에너지 구성요소 설명서, 비용 정보 등을 활용하여 분석을 진행할 수 있다. 정보입력이 완료되면 해당 프로젝트에 대한 재정, 기술, 위험분석 등을 수행할 수 있으며, 실존하는 현재의 시스템과 사용자가 계획하고 있는 시설의 에너지 시스템을 비교 분석하는 것도 가능하다. 또한 사용자가 선택한 에너지 기술들의 위치별 평균 에너지 비용과 효율을 계산하여 비용절감 효과를 추정해주며, 에너지 수요관리에 대한 분석도 제공된다.

<표 2-8> RETScreen 프로그램의 구성 도식표



※ 출처: Sinha & Chandel(2014)⁴¹⁾의 자료를 재구성

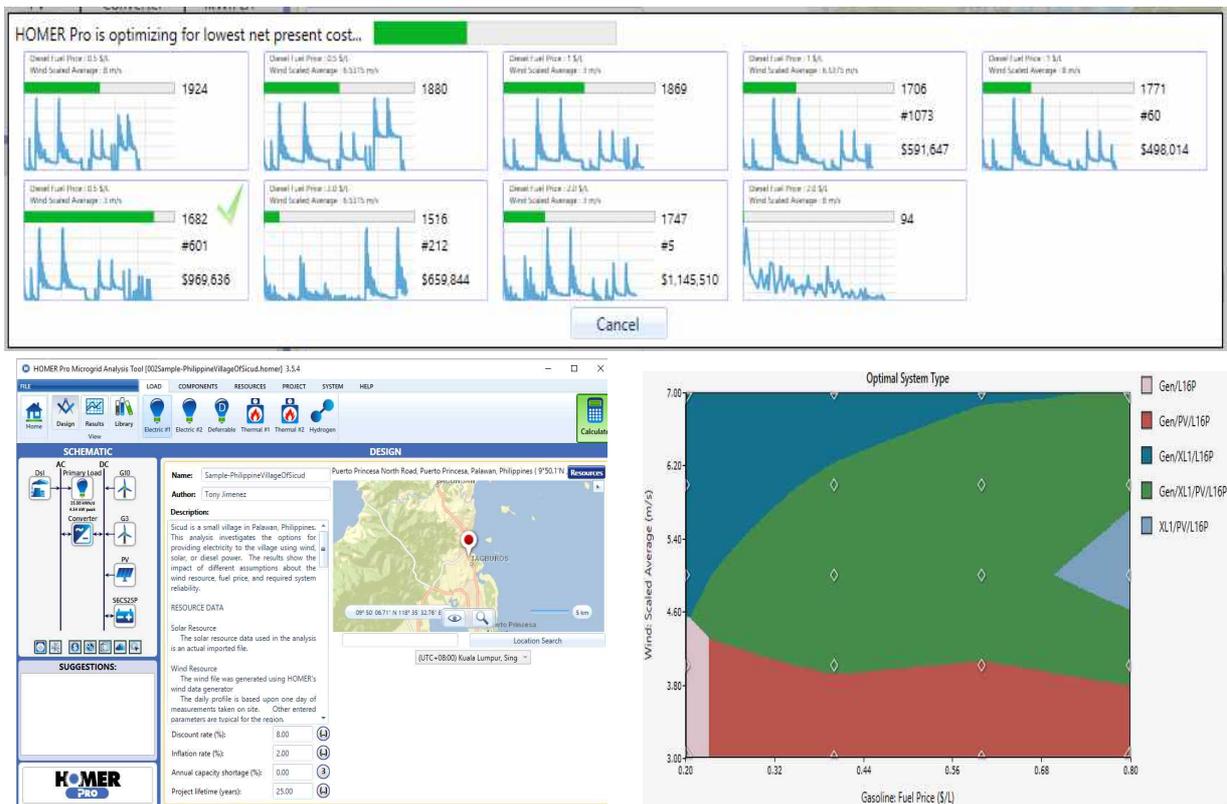
41) 출처: Sinha, S., and Chandel, S. S.(2014). "Review of Software Tools for Hybrid Renewable Energy Systems", *Renewable and sustainable energy reviews*, 32, p192~205

2.3 미국 재생에너지 국립연구소 HOMER⁴²⁾

미국 재생에너지 국립연구소 (National Renewable Energy Laboratory, NREL)에서 개발하여 HOMER Energy사에 의해 향상 및 배포되는 프로그램으로, 마을이나 섬의 전력 시스템에서 캠퍼스 및 군사 기지의 그리드 연결에 이르기까지 모든 부문에서 마이크로 그리드 설계 최적화를 지원한다. 시뮬레이션, 최적화, 민감도 분석과 경제성 분석을 제공하고 태양광, 풍력, 수력, 바이오매스, 수소, 에너지 저장, 천연가스 발전에 범위를 둔다. 주 사용 대상자인 개발자, 공학자, 연구원, 그리고 설비 업체에게 비용 요약, 현금흐름, 전력량, 온실가스 배출량 정보를 제공한다.

그리드의 여러 구성 요소와 설계 결과 및 비용 경쟁력을 비교하여 프로젝트의 위험을 최소화하는 동시에 에너지 손실을 줄일 수 있는 최적화 조합을 제시한다. 또한 시스템 시뮬레이션을 통해 마이크로 그리드 및 다른 종류의 분산 발전 시스템 설계에 있어 사용자가 고려하는 기술 및 장비들의 모든 조합에 대한 실행 가능성을 분석하여 최적화 알고리즘을 적용해 최소 비용이 드는 설계 프로세스를 식별하여 제공한다.

[그림 2-16] 미국 재생에너지 국립연구소 HOMER 구동화면

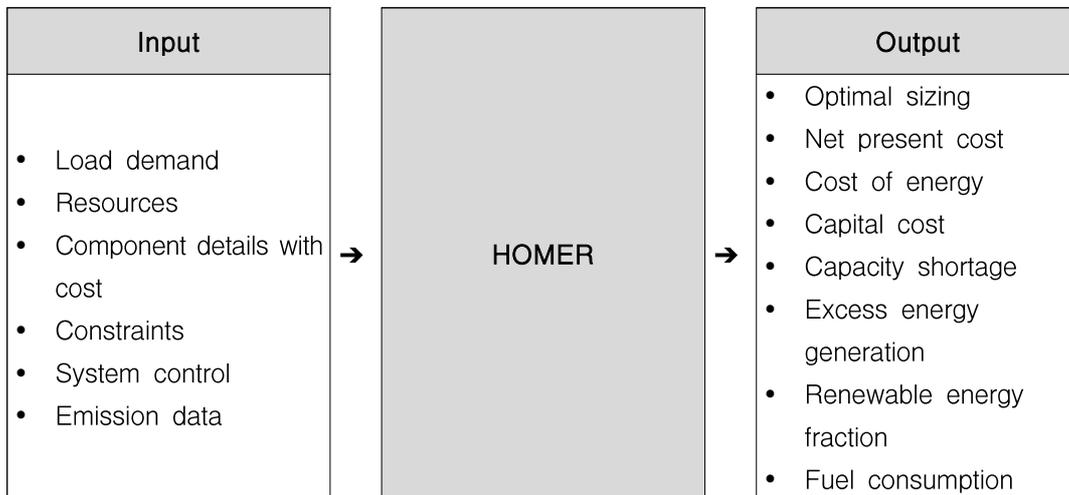


※ 출처: HOMER Energy(<https://www.homerenergy.com/>)

42) 출처: National Renewable Energy Laboratory(2022), *HOMER Energy*, 2022.08.18. 접속, <https://www.homerenergy.com/>.

분석에 사용되는 주 입력변수는 에너지 로드 특성에 대한 기술·경제적 정보, 재생에너지와 비재생에너지의 시스템 구성요소와 리소스에 대한 사양 등이 있다. 입력된 정보를 기반으로 에너지 생산과 소비에 대한 밸런스를 1분에서 1시간 단위로 계산하여 제공하며, 최소 운영비용을 기준으로 가장 효율적인 에너지 시스템 구성의 최적화 계산을 수행하는데 이때 고려되는 요인에는 자본비, 금리, 프로젝트 수명 등이 있다. 시스템의 최소 운영 비용을 계산하는데 있어 자본 비용, 이자율, 프로젝트 수명 등을 고려하여 계산된 순현재가치를 기준으로 실행 가능성이 높은 시스템 구성을 도출해 내는 반면 균등화 발전비용 (LCOE)을 기준으로 한 시스템 최적화는 제공하지 않는다. 그리드 시스템의 환경 영향 평가 측면으로는 연료 연소 기반 기술들의 온실가스 직접 배출량을 제공한다.

<표 2-9> HOMER 프로그램의 구성 도식표



※ 출처: Sinha & Chandel(2014)⁴³⁾의 자료를 저자 재구성

HOMER는 주로 특정 장소(건물, 마을 등)에 어떤 에너지 발전 시스템을 사용하는 것이 가장 경제적인지 최적화 알고리즘을 통해 분석하는데 사용된다. 예를 들어 하루에 31.6kW의 전기를 사용하는 의료시설에 들어갈 에너지 시스템의 사이즈와 전주기비용(lifecycle cost)를 HOMER를 사용해 분석한 결과, 가장 경제적인 시스템 구성은 6kW PV 모듈, 배터리 80개, 그리고 3kW 인버터의 조합인 것으로 밝혀졌으며 또한 PV를 사용해 발전한 전기는 해당 시설의 기존 디젤발전전기에 비해 4배 더 비싸다는 결과와, PV발전이 온실가스 감축효과를 가져올 수 있는 것으로 추정되었다. 이렇게 HOMER는 하이브리드 에너지 시스템의 경제성과 경제적 실현 가능성에 초점을 맞춘 분석을 제공하며, 온실가스를 포함한 오염물질의 배출량도 제공하지만 이는 분석의 주 목적은 아니다.

43) 출처: Sinha, S., and Chandel, S. S.(2014). "Review of Software Tools for Hybrid Renewable Energy Systems", *Renewable and sustainable energy reviews*, 32, p192~205

2.4 독일 연방경제기술부 District Energy Concept Adviser (DECA)⁴⁴⁾

독일 연방 경제 기술부(German Federal Ministry for Economy and Technology)에서 출범한 에너지 효율 도시(EnEff:Stadt, Energy efficient cities) 이니셔티브의 일환으로 프라운호퍼 건축물리 연구소 (Fraunhofer Institute for Building Physics)가 국제 에너지 기구(International Energy Agency, IEA)와 협력하여 개발한 프로그램으로, 건물을 단위로 이루어진 도시 및 지구 (District)를 공간적 범위로 한다.

건물 지구(Building district)의 고효율 에너지 공급 계획을 지원하는 소프트웨어로, 지역 에너지 공급의 초기 계획 단계에서 도시 계획자, 주택 회사, 개발자 및 지역 정치 의사 결정자를 대상으로 새로운 지역과 기존 지역의 에너지 공급 시스템 개조 및 재설계에 대한 전략적 지침을 제공한다. 예를 들어 기존 건물의 중앙 에너지 공급 시스템의 효율 평가를 통해 에너지 절감 가능성 전략 수립을 지원할 수 있다.

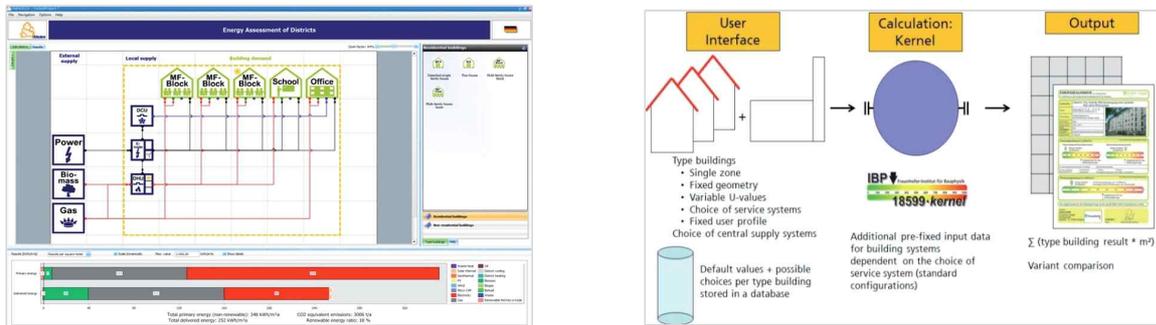
프로그램 내의 ‘성능 평가 도구’는 에너지 절감 또는 친환경 구역의 에너지 효율성 케이스 스터디를 제공하여, 대상 지역의 에너지 사용을 독일 내 다른 유사한 지역의 평균과 비교할 수 있는 기능을 제공한다. 또한 지역의 에너지 수요와 공급 양 측면을 모두 고려한 다양한 형태의 ‘에너지 콘셉트’ 평가를 통해 지역의 에너지 성과를 계산할 수 있다. 예를 들어 대상 공간의 에너지 공급 계획이 중앙 집중식(예: 지역 난방 네트워크용) 또는 분산형(예: 보일러 또는 열펌프), 혹은 혼합 방식인 경우의 에너지 소비량과 탄소배출량을 계산하여 비교할 수 있다.

DECA는 다양한 형태의 건물 유형을 비슷한 특성을 기준으로 그룹화하여 사용자가 고를 수 있게 하는데, 예를 들어 같은 기간에 지어진 모든 다가구 주택은 하나의 유형으로 분류되어 분석시 동일한 에너지 공급원과 개조 상태가 적용되게 된다. 건물의 유형은 크게 주거용과 비주거용으로 분류되는데, 주거용 건물의 경우 단독 주택, 연립 주택, 블록 형태의 다가구 주택 또는 타워 형태의 다가구 주택으로 그룹화되며, 비주거용 건물의 경우 일반 사무실 건물, 학교, 보육원, 호텔, 스포츠 센터, 식품 소매점, 생산·제조 건물, 그리고 대학 건물로 분류된다. 건물 유형 분류의 기준이 되는 다른 요인들은 건물의 연식, 건물 외피의 단열 수준, 기존의 난방, 온수 공급, 환기, 냉방, 조명용 에너지 공급량 등이 고려된다.

또한 해당 프로그램에서는 에너지 공급(난방 및 냉방)과 관련하여 중앙 집중식 및 분산 솔루션을 다양한 유형의 보일러, 열펌프, 마이크로 CHP, 분할 장치 등을 고려해 모델링 할 수 있다. 분석 대상 지역의 난방 및 냉방 네트워크 정보와 함께 석유, 가스, 외부 지역의 열과 냉기, 전기, 바이오매스, 바이오가스, 바이오연료, 태양열, 풍력, 폐기물, 폐열, 지열에너지 등을 고려한 분석을 진행할 수 있다. 또한 1차 에너지 또는 CO₂ 배출정보를 함께 고려하여 해당 에너지 공급 네트워크의 환경성을 평가한다.

44) 출처: German Federal Ministry for Economy and Technology(2022), *District Energy Concept Adviser*, 2022.07.15. 접속, <https://www.district-eca.de/>

[그림 2-17] 독일 연방경제기술부 DECA 구동화면



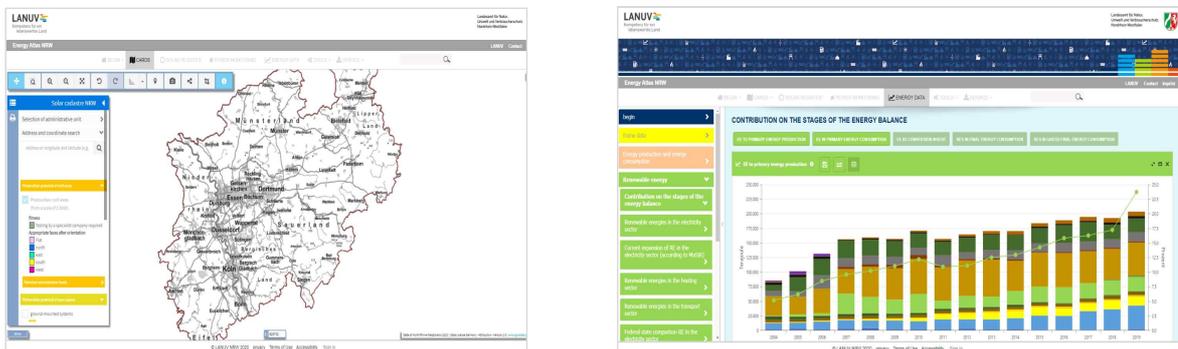
※ 출처: 독일 연방경제기술부(2022)

2.5 독일 노르트라인 베스트발젠 Energy Atlas NRW 45)

독일 서부의 노르트라인 베스트발젠(North Rhine-Westphalia) 주정부에서 개발한 에너지 지도로 해당 지역의 에너지 전환 관련 정보 제공을 주 목적으로 하며, 해당 지역의 기후, 에너지 상황 정보를 제공하는 테마 지도 (Thematic maps), 전기 시장 모니터링, 에너지 전환 관련 데이터 등을 제공한다. 에너지 테마 지도의 경우 태양 지도(Solar cadastre), 전기 인벤토리 지도(Electricity Inventory map), 열공급 지도(heat register), 풍력 잠재량지도(Wind planning map), 바이오매스 잠재량지도(biomass planning map)등으로 구성되어 있다.

‘태양 지도 (NRW Solar cadastre)’에서는 사용자가 해당 지역의 건물 지붕 위에 태양광 및 태양열 시스템 설치 계획을 세울 수 있도록 위치적 그리고 기후적 설치 가능성 정보를 지도상에 제공한다. 전력발전 인벤토리 지도 (Inventory card electricity)의 경우, NRW주 내의 풍력, 태양광, 바이오매스, 가스, 폐기물 소각, 수력, 석탄 및 기타 발전소들의 위치, 총 설비용량 그리고 총 전력 생산량 등의 종합적 정보를 제공한다. 에너지 데이터 섹션에서 국내 에너지 생산 및 수입량, 에너지 소비, 신재생에너지 생산 비중, 전기 및 열 사용량, 수송 관련 에너지 소비 그리고 온실가스 배출 정보를 제공한다.

[그림 2-18] 독일 노르트라인 베스트발젠 Energy Atals NRW 구동화면

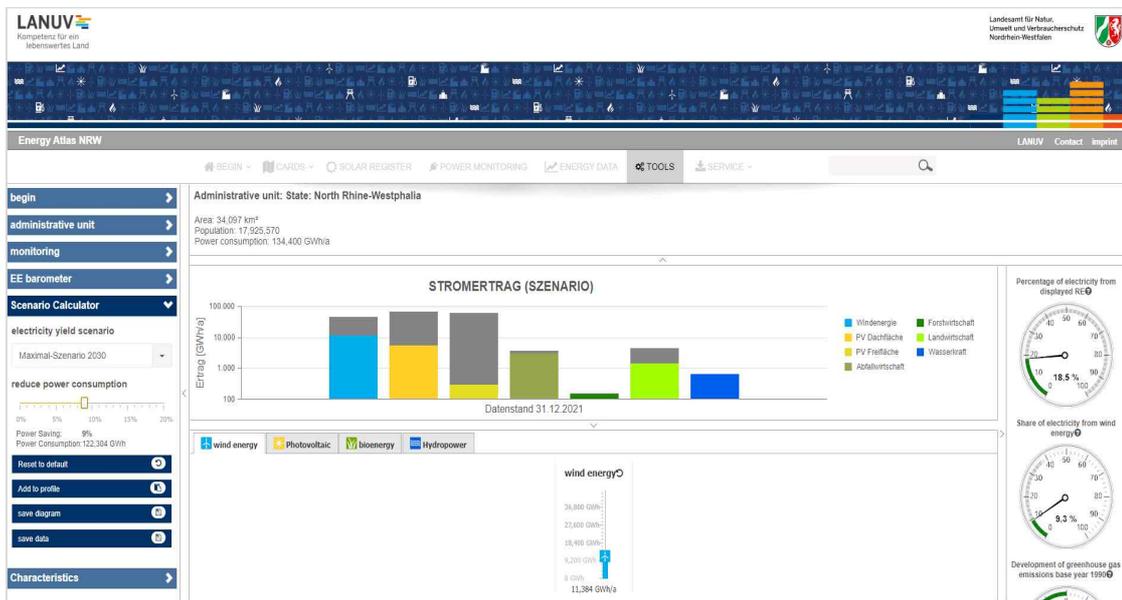


※ 출처: 독일 노르트라인베스트발젠(2022)

45) 출처: North Rhine–Westphalia(2022), *Energy atlas NRW*, 2022.07.15. 접속, <https://www.energieatlas.nrw.de/site>

온실가스 정보의 경우 부문별 (에너지, 산업, 수송, 농업, 폐기물, 기타) 탄소 배출량 수치만을 제공하고 있다. ‘시나리오 계산기 (Scenario calculator)’를 통해 사용자가 2030년 기준 목표 전력소비 감축량과 해당 지역의 풍력, 태양광, 바이오에너지 및 수력 예상 발전량을 설정하면, 재생에너지를 사용한 전기발전량 비중 및 온실가스 배출량 분석 정보를 제공한다. 배출량 정보의 경우, 사용자가 설정한 재생에너지 사용 비중에 따른 탄소 감축량과 1990년 대비 온실가스 감축량을 제공한다.

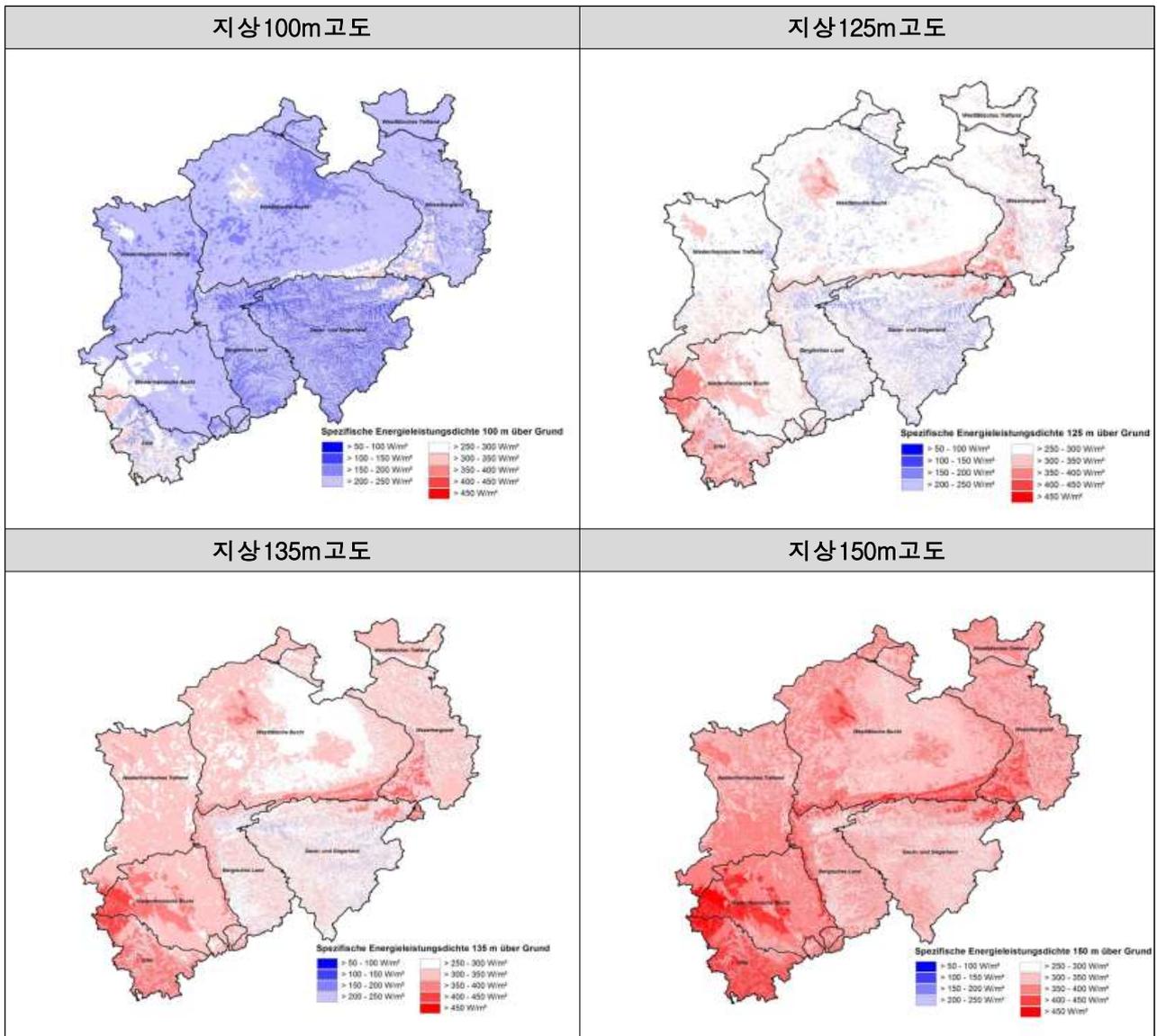
[그림 2-19] 독일 NRW Scenario Calculator 구동화면



※ 출처: 독일 노르트라인베스트발렌(2022)

프로그램의 재생에너지 지표(Renewable Energy Barometer) 섹션은 관련 정책 의사결정자들에게 지역 내 재생에너지 확정 가능성과 기회에 대한 개요를 제공하는 것을 목적으로 한다. 독일 노르트라인 베스트발렌 지역에 대해 2012년부터 연구된 재생에너지 잠재량 연구 결과들을 기반으로 하며 특정 지역의 전력 소비 수준, 재생에너지 현황 및 잠재력 정보를 제공한다. 독일의 국가 자연환경 소비자 보호국(LANUV)은 2011년부터 노르트라인 베스트발렌 지역의 재생 가능하고 기후 효율적인 에너지 잠재력을 조사해왔으며, 지역 레벨에서 다양한 형태의 에너지에 대한 인벤토리를 바탕으로 환경적으로 호환 가능성이 있는 에너지 잠재량을 분석하여 제공하며, 분석 결과의 수용도를 높이기 위해 과학자 및 해당 분야의 전문가들로 이루어진 프로젝트 그룹(Project-accompanying working group, PAG)을 결성하여 분석 절차와 결과를 검증한다. 풍력에너지 잠재량 연구의 일환으로 NRW 연방주의 풍력에너지 법령 및 기타규정에 따라 풍력발전에 필요한 지역계획을 포함한 기본 데이터를 수집하고 지상 100m, 125m, 135m, 150m 높이에서의 풍력데이터를 계산 및 검증하여 GIS 기반 지역 분석에 포함시켰다. 또한 삼림지대의 면적을 다르게 설정한 여러 가지 시나리오에 대해 풍력에너지 발전잠재량을 계산하여 제공한다.

[그림 2-20] 고도별 풍력에너지 발전량 밀도



※ 출처: 독일 노르트라인베스트발젠(2022)

제 4 절 소결

본 장에서는 국내외 지역단위 탄소중립 전략수립 현황 및 탄소중립 관련 웹프로그램을 조사분석하였다. 국내의 경우에는 17개 광역지자체 및 226개 기초지자체 모두 2050 국가 탄소중립 선언을 하고, 목적 달성을 위한 추진계획들을 수립하는 중이다. 지자체 온실가스 배출량 산정방식은 GIR에서 산정지침을 만들고 통계를 생산하고 있다.

국외의 경우에는 UNFCCC의 기후목표상향연맹, C40 도시기후리더쉽 그룹 등을 통하여 국가뿐만 아니라 도시·지역 단위에서 탄소중립을 선언하고 있다. 국외 지역단위 온실가스 배출량 통계의 경우에는 우리나라와 같이 국가 차원에서 통계를 생산하여 제공하는 국가는 미국과 영국이 있으며, 이 두 국가는 통계 생산뿐만 아니라 온실가스 배출량 정보를 웹기반으로 미국과 영국과 국가 차원에서 지역단위 온실가스 배출량 정보를 공간화된 웹기반 지도로 제공하고 있다. 국가 차원이 아닌 도시·지역차원에서는 GHG 프로토콜에 따라 스스로 온실가스 인벤토리 산정하고 측정할 수 있으며, 인증 획득을 통해 통계 신뢰성을 제고할 수 있다.

국내외는 다양한 탄소중립과 관련된 웹프로그램이 있으며, 크게 공간단위 온실가스 배출량 분석 프로그램과 신재생에너지에 대한 에너지생산량을 산정해주는 프로그램으로 나눌 수 있다. 공간단위 온실가스 배출량 분석은 가스 및 전기소비량, 도로교통 통계 등 기존의 데이터를 활용하여 온실가스 배출량을 분석하여 공간지도에 나타내는 방법을 사용한다. 우리나라의 경우에는 탄소중립기본법 시행령 제39조에 따라 “환경부와 국토부는 지역·공간단위의 온실가스 배출량·흡수량 등의 정보를 반영한 공간정보 및 지도를 작성하여 관리할 수 있다.” 라고 명시되어 있어, 조만간 우리나라도 이러한 온실가스 배출량 공간지도를 작성할 계획을 가지고 있다.

에너지 분석 프로그램의 경우에는 어느 특정 지점/건물(점단위)의 일사량, 풍속과 같은 기상정보를 연계하여 태양광 풍력과 같은 재생에너지의 전력생산량 예측 및 전력생산에 대한 경제성 분석을 수행한다. 그러나 이러한 프로그램은 공간의 범위가 건물단위이며, 온실가스 배출량 분석을 주된 목적이 아니기 때문에 지역·도시와 같은 공간의 범위에서 온실가스 감축량을 설명하는데 한계가 있다.

Ⅲ

모형 범위 및 방법론

제1절 모형 범위

제2절 모형 방법론 개발

제3절 모형의 웹기반 프로그램 개발

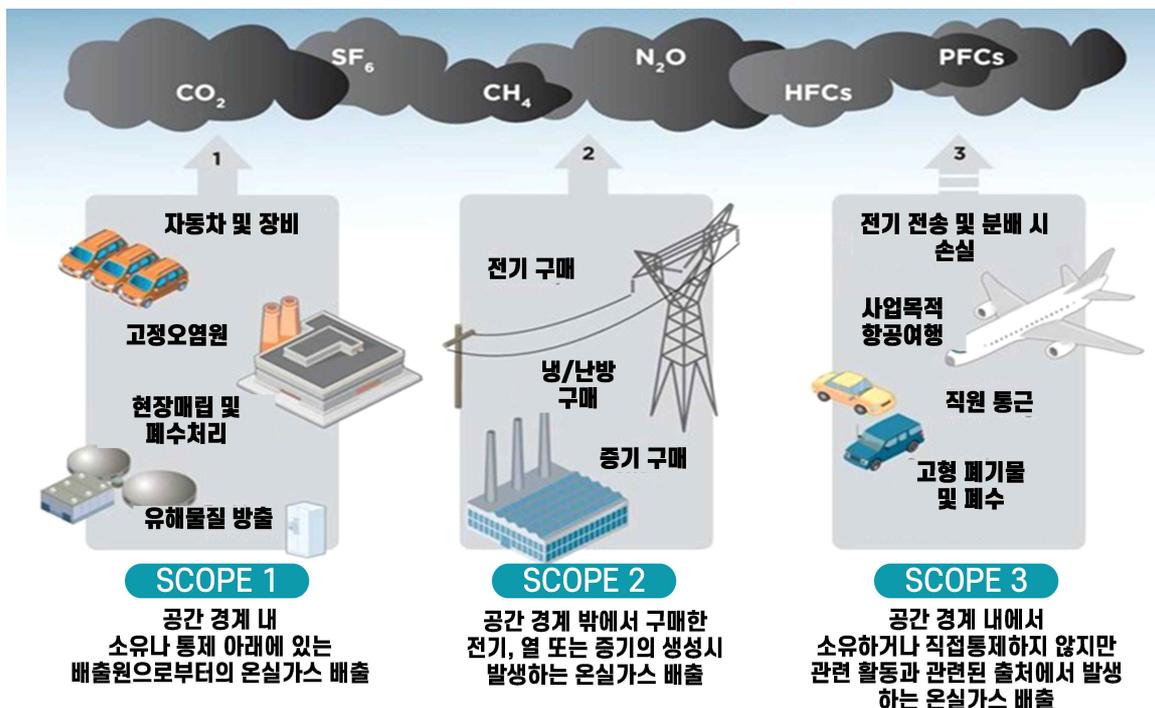
제 3 장 모형 범위 및 방법론

제 1 절 모형 범위

1. 온실가스 배출원 범위

온실가스 배출원은 배출형태에 따라서 직접배출원과 간접배출원으로 구분할 수 있다. 직접배출원은 해당 공간(경계) 내에서 직접적으로 온실가스 배출하는 것을 뜻하며, 간접배출원은 해당 공간(경계) 외에서 운반된 전기, 열 등을 사용하여 배출하는 것을 의미한다. 국제 및 국가 탄소 회계 표준(International and national carbon accounting standards)⁴⁶⁾에 그림 3-1과 같이 직접배출은 SCOPE1, 간접배출은 SCOPE 2와 SCOPE 3로 나뉘어 질 수 있다. 여기서 SCOPE 3는 밸류체인 전반에서 배출되는 온실가스를 정의하며 구매한 제품의 재료 추출 및 생산, 구매한 제품의 연료의 운송, 폐기물의 운송 및 처리 등이 포함된다⁴⁷⁾.

[그림 3-1] 온실가스 배출원 구분



※ 출처: US EPA(2022)⁴⁸⁾제공, 저자가 수정.

46) 출처: Work for Climate(2021), *What's the difference? Scope 1, 2 and 3 corporate emissions*, 2022.10.30. 접속, https://www.workforclimate.org/post/whats-the-difference-scope-1-2-and-3-corporate-emissions?gclid=Cj0KCQjwvfiaBhC7ARIsAGvcPe65I1PWbV52OA2jQ3uZIEUw-MYQWxnHJMlgIp6MCEXP-IXYUp9NUAaAI5nEALw_wcB

47) 글로벌 기업들은 ESG 전략 중 일환으로 협력업체에게까지 온실가스 감축에 대한 의무를 부여하고 있어, 향후 전생애주기평가(LCA) 기법을 도입한 제품 전주기 온실가스 배출량평가를 측정이 점점 활발해질 전망이다

UN에 제출하는 국가 온실가스 배출량 보고서는 직접배출량만을 대상으로 하며, GIR에서 제공하는 지역 온실가스 배출통계 또한 직접 배출량만을 고려하고 있다. 그러나 직접배출량 뿐만 아니라 간접배출량에 대한 분석을 함께 포함되어야 효율적인 감축전략 수립이 가능하다. 예로 2018년 서울특별시의 전기발전량은 641GWh이며 전력소비량은 전력발전량의 74배가 넘는 47,810GWh이다. 반면에 화석발전단지가 집중되어 있는 충청남도의 경우에 전기발전량이 129,632GWh이나 전력소비량은 서울특별시와 비슷한 52,013GWh로 나타난다.

따라서 온실가스 배출원 범위는 1차년도인 금년은 직접배출량을 고려하여 분석하고, 2차년도에 간접배출량을 포함하여 대상공간의 직접배출량과 간접배출량의 차이를 비교분석하기로 한다.

2. 공간적 범위

본 연구의 공간의 정의는 “탄소중립 전략수립이 필요한 물리적·지역적 공간”이다. 직접 및 간접배출량으로 건물, 마을, 지자체 등 온실가스 배출원에 대한 구역/경계가 구분되는 공간이 본 연구의 공간적 범위이다. 이러한 공간은 법률 및 통계에 따라 여러 가지로 구분될 수 있는데 예를 들어 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」의 제6조에 따라 우리나라는 토지의 이용실태 및 특성, 장래의 토지이용 방향, 지역 간 균형발전 등을 고려하여 도시지역, 관리지역, 농림지역, 자연환경보전지역 4개의 용도지역으로 구분한다.

또한 국토교통부의 「지적통계연보」는 우리나라 국토면적을 행정구역별, 소유자별, 지목별로 나누어 토지이용현황에 대한 현황통계를 제공하여 국토개발, 보전계획 수립 등에 활용되고 있다. 행정구역은 시·도 및 시·군·구로 구분되며, 소유자는 민유지, 국유지, 도유지, 군유지, 법인, 비법인, 기타로 구분하며, 지목별은 토지의 주된 용도에 따라 토지의 종류를 과수원, 임야, 학교, 도로 등 28개로 구분한다.

탄소중립 정책의 실질적 이행주체로서 탄소중립 기본법 상에서 행정구역 단위의 광역 및 기초지방자치단체에게 탄소중립 기본계획 수립, 녹색성장위원회 구성 및 운영, 온실가스 종합정보관리체계구축, 탄소중립지원센터의 설립 등 탄소중립 역할을 부여하고 있다. 또한 GIR의 지자체 온실가스 배출통계 또한 지방자치단체단위로 생산하고 있다.

CATAS는 특정 공간의 온실가스 배출량을 기반으로 탄소중립 기술을 적용했을 때 온실가스 감축량을 산정하는 프로그램이다. GIR이 공간적 경계로서 행정구역 단위의 17개 광역지자체에 대한 온실가스 배출통계를 생산하고 있으므로, 모형을 개발한 후 검증을 위하여 GIR에서 제공하는 에너지 전환 부문의 활동정보 포함 온실가스 배출량 데이터를 활용하여 프로그램 분석결과를 검증하도록 하고자 한다.

48) 출처: US EPA(2022), *Greenhouse Gases at EPA*, 2022.10.30. 접속, <https://www.epa.gov/greeningepa/greenhouse-gases-epa>

3. 기술적 범위

2050 탄소중립 시나리오⁴⁹⁾는 표 3-1과 같이 크게 온실가스 “배출”과 “흡수 및 제거”로 구분된다. 부문은 탄소중립 목표 설정을 위한 단위이며, “배출”에 대한 부문은 전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 수소, 탈루이며, “흡수 및 제거”에 대한 부문은 흡수원, 이산화탄소 포집 및 활용저장(CCUS), 직접공기포집(DAC)로 분류된다. 이 중 온실가스 배출량이 가장 큰 전환 부문에 대한 기술을 범위로 고려하고자 한다. 전환 부문에 대한 기술종류를 알아보기 위하여 「기후기술분류체계」, 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법」, 「탄소중립 중점기술안」에서 다루고 있는 전환 기술을 살펴보고자 한다.

<표 3-1> 대한민국 2050 탄소중립 시나리오

(단위: 백만톤CO₂eq)

구분	배출									흡수및제거		
	전환	산업	건물	수송	농축수산	폐기물	수소	탈루	흡수원	CCUS	DAC	
2018년	686.3											
	269.6	260.5	52.1	98.1	24.7	17.1	-	5.6	-41.3	-	-	
2050년	A안	0	0	51.1	6.2	2.8	15.4	4.4	0	0.5	-25.3	-55.1
	B안	0	20.7	51.1	6.2	9.2	15.4	4.4	9	1.3	-25.3	-84.6

※ 출처: 관계부처합동(2021)

3.1. 기후기술분류체계

2017년 미래창조과학부(現과학기술정보통신부)는 “개도국·국내기업에 기후기술 매칭정보 제공으로 신기후체제 대비 기후기술 해외 진출 활성화를 지원”하기 위하여 「기후기술분류체계」를 수립하였다⁵⁰⁾(표3-2). 분류체계는 3대 대분류, 14개 중분류, 45개 소분류로 구성된다. 3대 대분류 중 ‘감축’이 온실가스 저감 및 고정기술에 대한 분류체계이며, 7개 중분류(비재생에너지, 재생에너지, 신에너지, 에너지저장, 송배전 전력, 에너지수요, 온실가스 고정)으로 분류된다.

49) 출처: 관계부처합동(2021), 「2050 탄소중립 시나리오안」

50) 출처: 과학기술정보통신부·녹색기술센터(2022), 「2021 기후기술 국가연구개발사업 조사·분석보고서」

<표 3-2> 기후기술분류체계

대분류	중분류	소분류	대분류	중분류	소분류
감축	(1)비재생에너지	1. 원자력 발전	적용	(8) 농업·축산	23. 유전자원·유전개량
		2. 핵융합 발전			24. 작물 재배·생산
		3. 청정화력 발전·효율화			25. 가축 질병 관리
	(2) 재생에너지	4. 수력			26. 가공·저장·유통
		5. 태양광			27. 수계·수생태계
		6. 태양열			28. 수자원 확보 및 공급
		7. 지열			29. 수처리
		8. 풍력		30. 수재해 관리	
		9. 해양에너지		31. 기후 예측 및 모델링	
		10. 바이오에너지		32. 기후 정보·경보 시스템	
		11. 폐기물		33. 해양생태계	
	(3) 신에너지	12. 수소제조		34. 수산자원	
		13. 연료전지		35. 연안재해 관리	
	(4) 에너지 저장	14. 전력저장		36. 감염 질병 관리	
15. 수소저장		37. 식품 안전 예방			
(5) 송배전·전력IT	16. 송배전시스템	38. 산림 생산 증진			
	17. 전기지능화 기기	39. 산림 피해 저감			
	18. 수송효율화	40. 생태 모니터링·복원			
(6) 에너지 수요	19. 산업효율화	41. 신재생에너지 하이브리드			
	20. 건축효율화	42. 저전력 소모 장비			
(7) 온실가스 고정	21. CCUS	43. 에너지하베스팅			
	22. Non-CO ₂ 저감	44. 인공광합성			
			감축/적용 융복합	(14) 다분야 중첩	45. 분류체계에 다루기 어려운 기후변화 관련 기타 기술

※ 출처: 미래창조과학부(現과학기술정보통신부)(2017)

3.2. 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법

「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」의 제정목적은 “신에너지 및 재생에너지의 기술개발 이용·보급 촉진과 신에너지 및 재생에너지 산업의 활성화를 통하여 에너지원을 다양화하고, 에너지 안정적인 공급, 에너지구조의 환경친화적 전환 및 온실가스 배출의 감소를 추진함으로써 환경의 보전, 국가경제의 건전하고 지속적인 발전 및 국민복지의 증진에 이바지함을 목적”으로 한다. 여기서 “신에너지”는 기존의 화석연료를 변환시켜 이용하거나 수소·산소 등의 화학반응을 통하여 전기 또는 열을 이용하는 에너지로서 수소, 연료전지, 석탄을 액화·가스화한 에너지 및 중질산사유를 가스화한 에너지가 있다. “재생에너지”는 “햇빛·물·지열·강수·생물유기체 등을 포함하는 재생 가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 에너지”로서 태양에너지, 풍력, 수력, 해양에너지, 지열에너지, 바이오에너지, 폐기물에너지가 있다.

<표 3-3> 대한민국 2050 탄소중립 시나리오

(단위: 백만톤CO₂eq)

구분	배출
신에너지	수소, 연료전지, 액화·가스화한 에너지 및 중질산사유를 가스화한 에너지, 이 밖에 석유·석탄·원자력 천연가스가 아닌 에너지로서 대통령령으로 정하는 에너지
재생에너지	태양에너지, 풍력, 수력, 해양에너지, 지열에너지, 바이오에너지, 폐기물에너지, 이 밖에 석유·석탄·원자력 천연가스가 아닌 에너지로서 대통령령으로 정하는 에너지

※ 출처: 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법

3.3. 탄소중립 중점기술(안)(‘21.8월)

‘21년 8월 탄소중립기술특별회는 「탄소중립 기술로드맵」을 수립하기 위한 대상기술로 「탄소중립 중점기술(안)」을 보고하였다. 부문은 에너지, 산업, 수송, 건물도시·ICT, 환경, CCUS로 나누어져 있다. 아래 표 3-4와 같이 에너지 부문에 대한 대분류는 전력생산(신재생에너지, 원자력, 핵융합, 청정화력발전, 수소·암모니아, 전력망), 바이오연료생산, 수소 생산·저장·이송, 에너지전환(열 생산·변환 시스템, 에너지통합연계시스템)으로 구분된다.

<표 3-4> 탄소중립 중점기술(안) 기술분류체계-에너지부문

대분류	중분류	소분류	대분류	중분류	소분류				
전력 생산	신 재 생 에 너 지	태양광	전력 생산	핵 융 합	태양광 시스템	핵융합	토카막, 비토카막,		
		태양열		청정 화력 발전	솔라타워, 파라볼릭 트로프, 선형 프레넬 반사판	청정화력발전	석탄, 복합, 신발전, 고효율 가스터빈		
		풍력		수소· 암모 니아	수소· 암모 니아 발전	육상, 해상, 공중	발전용 가스터빈, 분산전원용 가스터빈, 수소엔진 수소연소 보일러, 발전용 석탄/암모니아 혼소/전소발전		
		수력						전력저장	전력저장
		지열		전 력 망	계통연계 시스템	열수형 지열발전, EGS 지열발전	계통연계시스템, 수송용 충전인프라		
		연료전지						송전	초고압 송전, 유연 고압전력망, 초전도 고압, 유연 교류송전시스템, 동적전송용량
		해양에너지						배전	지능형배전시스템, 전력 거래
		바이오매스		바이오 연료생산	바이오연료	고형연료, 바이오가스, 바이오중유	바이오가스/바이오메탄, 바이오에탄올, 바이오부탄올, 바이오디젤, 바이오수소		
		원 자 력		대형 상용원전	수소 생산·저장·이송	수소	경수로, 중수로	생산, 저장, 이송	
	SMR		에너지전환	열 생산·변환 시스템					태양열, 바이오열, 지열, 수열, 히트펌프, 열저장, 열교환, 열에너지 네트워크
	제4세대 원자로								

표 3-5와 같이 「기후기술분류체계」, 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」, 「탄소중립 중점기술안」에서 전환분야의 기술을 분석한 결과 ①태양광, ②풍력, ③바이오에너지, ④수력, ⑤해양에너지, ⑥수소연료전지, ⑦태양열, ⑧지열을 포함하기로 하고, 추가로 지열과 같은 히트펌프를 공유할 수 있는 ⑨수열 및 ⑩산림흡수원을 기술적 범위에 포함시키고자 한다. 단 해양에너지의 경우에는 기술적 원리 및 구조가 다양하여 조력발전, 파력발전, 조류발전으로 세분화하여 분석하였다. 기술별 정의는 표3-6과 같다.

<표 3-5> 탄소중립 중점기술(안) 기술분류체계 - 전환부문

기후기술분류체계 (소분류)	신에너지및재생에너지 개발·이용·보급촉진법	탄소중립중점기술(안) (중분류)	본연구 기술적범위
원자력 발전		원자력(대분류)	
핵융합발전		핵융합(대분류)	
청정화력발전·효율화	석탄 액화·가스화 에너지	청정화력발전(대분류)	
수력	수력	수력	포함
태양광	태양에너지	태양광	포함
태양열		태양열	포함
지열	지열	지열	포함
풍력	풍력	풍력	포함
해양에너지	해양에너지	해양에너지	포함
바이오에너지	바이오에너지	바이오매스	포함
폐기물에너지	폐기물에너지		
수소제조		수소·암모니아	
연료전지	수소연료전지	연료전지	포함
			+
			수열
			+
			산림흡수원

<표 3-6> 에너지전환부문 기술별 정의

기술명	정의
태양광	태양광발전시스템을 이용하여 태양 빛 에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 기술*
풍력	바람의 운동에너지를 로터 블레이드에 흡수, 기계적 에너지로 변환하여 전력을 생산하는 발전기술*
바이오	생물유기체로부터 열화학적 또는 생물학적 전환 기술을 적용하여 기체, 액체 또는 고체의 연료를 얻고, 이들 연료를 연소 또는 변환시켜 에너지를 얻는 기술*
수력	댐, 강 또는 하천등에서 물이 가지는 위치에너지나 운동에너지를 활용하여 에너지를 변환하는 제반 기술*
해양 에너지	<ul style="list-style-type: none"> • (조력발전) 조석의 힘을 동력원으로 하여 해수면의 상승하강 운동을 이용하여 전기를 생산하는 발전기술** • (파력발전) 입사하는 파랑에너지를 이용하여 터빈 등의 원동기 구동력으로 발전하는 기술** • (조류발전) 자연적인 조류의 흐름을 이용하여 전기를 생산하는 방식**
수소 연료전지	수소를 포함하는 연료의 화학에너지를 수소 산화 및 산화 환원의 전기화학반응을 통해 전기를 생산하며, 동시에 열과 물을 생산하는 기술*
태양열	태양복사에너지(일사)를 유용한 열 및 전기에너지로 변환, 저장 및 이용에 관련된 제반 기술*
지열	물, 지하수 및 지하의 열 또는 온도차 등을 이용하여 전기 또는 열을 생산, 활용하는 기술*
수열	해수의 표층의 열 및 하천수의 열을 히트펌프를 이용하여 냉·난방에 활용하는 기술**
산림 흡수원	산림을 통해 온실가스 흡수를 증대시키거나 배출을 줄인 탄소량

※ 출처: *과학기술정보통신부 & 녹색기술센터(2022)⁵¹⁾**한국에너지공단(2022)⁵²⁾***법제처(2022)⁵³⁾

51) 출처: 과학기술정보통신부·녹색기술센터(2022), 「2021 기후기술 국가연구개발사업 조사·분석보고서」

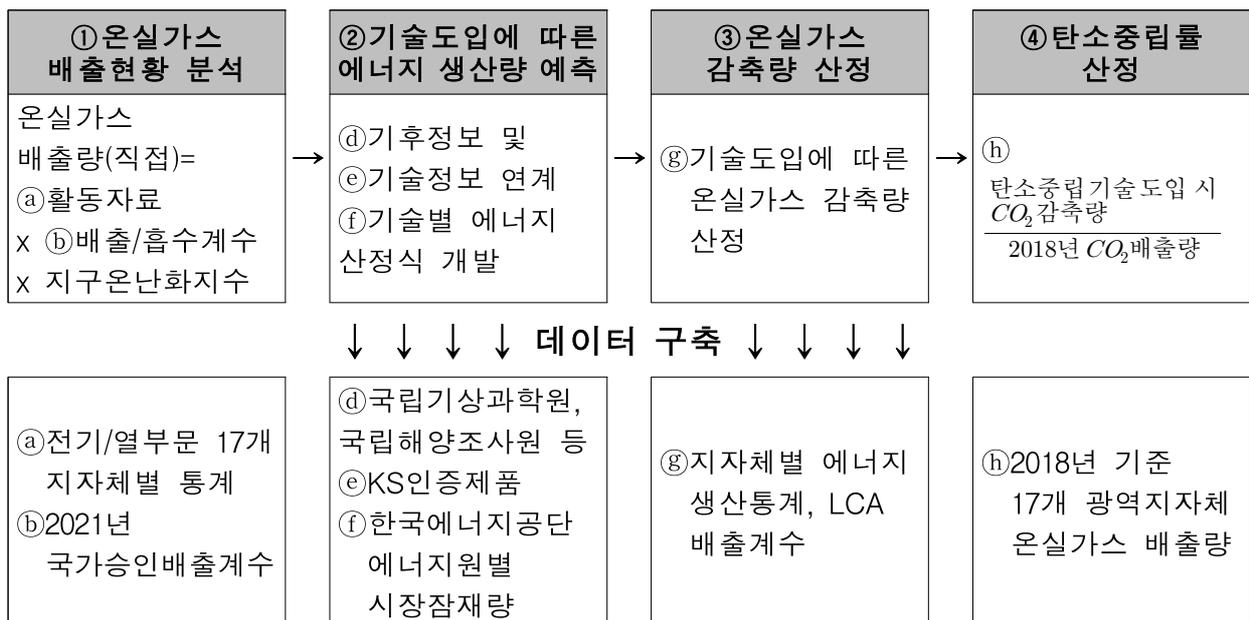
52) 출처: 한국에너지공단(2022), 「신재생에너지원별소개, 2022.10.31. 접속, <https://www.knrec.or.kr/biz/main/main.do>53) 출처: 법제처(2022), 「탄소흡수원유지 및 증진에 관한 법률」, 2022.10.31. 접속, <https://www.law.go.kr/LSW//lsLawLinkLnfo.do?lsJoLnkSeq=900374109&lsId=011554&chrClsCd=010202&print=print>

제 2 절 모형 방법론 개발

1. 탄소중립률 산정

본 연구에서의 탄소중립률 산정 방법론은 다음과 같다(표 3-7). 우선, 당해연도에는 17개의 광역지자체의 에너지 부문을 대상으로 분석을 실시하였으므로, 현재 온실가스 배출현황을 파악하기 위하여 GIR과 연구 협력을 통해 지자체별 활동자료를 수집하였다. 지자체별·에너지원별 2018년 온실가스 배출현황을 분석하고, 확보 가능한 가장 최신 자료인 2019년 배출량을 통해 현재 탄소중립률을 진단하였다(1.1. 대상지역 온실가스 배출현황). 탄소중립 기술도입에 따른 감축 효과 분석을 위하여, 실제 도입 가능한 KS 인증 제품의 기술정보를 수집하여 분석에 필요한 정보를 추출하였다. 또한, 기술별 에너지생산량에 영향을 미치는 기상정보를 구축하여 발전량 산정에 활용 가능한 형태로 가공하였다. 수집된 기술정보와 기상정보를 종합하여 기술별 도입에 따른 연간발전량 산정 방법론을 구축하고, 지자체별 신재생에너지 잠재량 정보를 수집·분석하여 기술의 최대 도입량을 제한하는 한계치를 설정하였다(1.2. 기술도입에 따른 에너지생산량 예측). 구축된 기술별 발전량을 기반으로, 사용자가 선정한 기술도입 시 총 에너지생산량을 도출하고, 기존에 화석연료를 활용하여 생산하였던 에너지 대체를 가정함으로써 온실가스 감축효과를 분석하였다. 또한, 탄소중립 기술의 전과정평가(LCA)를 기반으로 기술도입에 따른 온실가스 배출량도 추가적으로 고려할 수 있는 방법론을 구축하였다(1.3. 온실가스 감축량 산정). 최종적으로 2018년 온실가스 배출량 대비 기술도입에 따른 2050년 온실가스 감축량 비율로 탄소중립률을 도출하였다(1.4. 탄소중립률 산정). 단계별 방법론은 해당 장에서 구체적으로 서술하고자 한다.

<표 3-7> 탄소중립률 산정 프로세스별 데이터 구축 현황



1.1. 대상지역 온실가스 배출현황

탄소중립을 산정을 위하여 GIR의 협조를 통해 기준년도인 2018년의 지자체별 활동자료를 수집하였다. 수집된 활동자료를 탄소중립 시나리오에서 제시하는 부문(전환, 산업공정, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 탈루, LULUCF)에 맞춰 재분류한 지자체별 분야별 온실가스 배출통계는 다음 표 3-8과 같다.

지자체별 온실가스 순배출량이 높은 지역은 충청남도(23%), 전라남도(13%), 경기도(12%), 경상남도(9%), 인천광역시(8%) 순이며, 충청남도와 경상남도, 인천광역시의 경우 석탄화력발전소가 집중되어 있어 에너지산업의 배출량이 높은 것으로 나타났다. 반면 전라남도의 경우, 석유화학, 철강, 조선산업을 주력산업이므로, 제조업 및 건설업에서 배출되는 온실가스의 비중이 높다. 경기도의 경우, 전환과 더불어 수송 부문의 배출량이 높아 상대적으로 높은 순 배출량을 나타냈다. 서울특별시는 전국 배출량의 4% 가량의 온실가스만을 배출하나, 건물 부문의 배출량이 가장 높고, 다음으로 수송 부문의 배출량이 높아 밀집된 인구조로 인한 에너지 사용량이 높은 것을 확인할 수 있다.

<표 3-8> 2018년 지자체별 온실가스 배출량 및 부문별 배출량 비율

(단위: tCO₂eq.)

구분		전국	서울특별시	부산광역시	대구광역시	인천광역시
배출	전환	268,355,620 (39%)	1,492,113 (5%)	3,439,777 (22%)	1,333,991 (15%)	39,201,317 (76%)
	산업공정	260,777,130 (38%)	3,838,100 (13%)	3,103,909 (20%)	1,378,837 (16%)	4,520,408 (9%)
	건물	52,053,330 (8%)	11,292,862 (38%)	2,804,937 (18%)	2,020,484 (23%)	2,601,776 (5%)
	수송	98,102,230 (14%)	8,986,883 (30%)	5,079,722 (33%)	3,728,410 (43%)	5,082,537 (10%)
	농축수산	24,669,760 (4%)	1,017,211 (3%)	296,729 (2%)	77,085 (1%)	180,045 (0%)
	폐기물	17,542,680 (3%)	2,090,597 (7%)	682,433 (4%)	252,975 (3%)	-156,640 (0%)
	탈루	5,544,420 (1%)	983,753 (3%)	249,105 (2%)	174,319 (2%)	319,106 (1%)
흡수 및 제거	LULUCF	-42,086,210 (-6%)	- 94,453 (0%)	-213,469 (-1%)	-313,139 (-4%)	-147,980 (0%)
합계(순배출량)		684,958,960 (100%)	29,607,066 (100%)	15,443,143 (100%)	8,652,963 (100%)	51,600,570 (100%)

구분		광주광역시	대전광역시	울산광역시	세종특별 자치시	경기도
배출	전환	263,710 (5%)	326,641 (6%)	5,733,552 (14%)	1,555,551 (63%)	25,633,784 (30%)
	산업공정	921,861 (16%)	1,157,517 (20%)	30,044,630 (74%)	230,074 (9%)	18,063,021 (21%)
	건물	1,268,858 (22%)	1,505,610 (26%)	1,277,868 (3%)	160,345 (6%)	10,986,711 (13%)
	수송	2,765,298 (49%)	2,427,784 (41%)	2,407,678 (6%)	362,672 (15%)	25,527,603 (30%)
	농축수산	74,626 (1%)	26,647 (0%)	323,309 (1%)	162,882 (7%)	3,073,822 (4%)
	폐기물	279,598 (5%)	593,074 (10%)	633,391 (2%)	239,598 (10%)	2,967,775 (4%)
	탈루	114,785 (2%)	134,557 (2%)	627,095 (2%)	12,765 (1%)	914,563 (1%)
흡수 및 제거	LULUCF	-48,164 (-1%)	-284,546 (-5%)	-420,896 (-1%)	-250,798 (-10%)	-2,515,939 (-3%)
합계(순배출량)		5,640,571 (100%)	5,887,283 (100%)	40,626,628 (100%)	2,473,089 (100%)	84,651,340 (100%)
구분		강원도	충청북도	충청남도	전라북도	전라남도
배출	전환	18,824,561 (47%)	407,124 (2%)	102,544,273 (64%)	1,062,233 (8%)	13,904,751 (16%)
	산업공정	25,065,333 (62%)	16,997,540 (72%)	44,058,643 (28%)	2,386,478 (19%)	64,187,790 (73%)
	건물	2,339,463 (6%)	1,952,722 (8%)	2,309,171 (1%)	2,305,113 (18%)	2,089,005 (2%)
	수송	3,861,407 (10%)	4,723,300 (20%)	6,139,430 (4%)	4,672,319 (37%)	4,912,432 (6%)
	농축수산	1,171,880 (3%)	1,358,511 (6%)	3,617,735 (2%)	3,035,563 (24%)	4,303,585 (5%)
	폐기물	555,123 (1%)	1,227,977 (5%)	1,973,984 (1%)	1,930,290 (15%)	1,194,841 (1%)
	탈루	383,957 (1%)	96,351 (0%)	433,714 (0%)	121,647 (1%)	517,674 (1%)
흡수 및 제거	LULUCF	11,823,981 (-29%)	-3,011,505 (-13%)	-1,780,706 (-1%)	-2,980,797 (-24%)	-3,481,755 (-4%)
합계(순배출량)		40,377,743 (100%)	23,752,021 (100%)	159,296,245 (100%)	12,532,846 (100%)	87,628,323 (100%)

구분		경상북도	경상남도	제주도
배출	전환	5,017,417 (9%)	46,546,336 (78%)	1,068,490 (26%)
	산업공정	41,236,192 (78%)	3,392,625 (6%)	194,179 (5%)
	건물	3,400,556 (6%)	3,036,284 (5%)	701,565 (17%)
	수송	7,550,041 (14%)	7,769,617 (13%)	2,105,093 (51%)
	농축수산	3,402,455 (6%)	2,105,711 (4%)	441,963 (11%)
	폐기물	1,528,737 (3%)	1,386,458 (2%)	162,467 (4%)
	탈루	239,345 (0%)	216,395 (0%)	5,291 (0%)
흡수 및 제거	LULUCF	-9,376,332 (-8%)	-4,784,290 (-8%)	-557,464 (-14%)
합계(순배출량)		52,998,411 (100%)	59,669,137 (100%)	4,121,584 (100%)

※ 출처: 온실가스종합정보센터 제공, 저자 수정

활동자료는 에너지산업, 제조업 및 건설업, 수송, 기타(상업/공공, 가정, 농업/임업/어업), 미분류로 구분되어 있으며, 에너지 산업의 경우, ‘공공 전기 및 열 생산’, ‘석유정제’, ‘고체연료 제조 및 기타 에너지 산업’ 부문을 포함하고 있다. 해당연도는 에너지 전환 부문만을 다루므로, 에너지 산업의 ‘공공 전기 및 열 생산’ 배출 현황자료를 추출하여 본 연구에 활용하였다. ‘공공전기 및 열 생산’ 부문에서 지자체별 바이오매스를 제외한 성상별 배출현황은 다음 표 3-9과 같다.

표 3-5에서 제시한 바와 마찬가지로 석탄화력발전소가 분포하는 충청남도, 경상남도, 인천광역시, 강원도, 전라남도에서 석탄을 원료로 하는 공공전기 생산 부문에서 배출량이 높게 나타났다. 성상별로는 전국적으로는 석탄이 76%, 가스가 22%, 석유가 2% 순으로, 석탄화력발전소의 주원료이자 온실가스 배출계수가 가장 높은 석탄이 가장 높은 비율을 차지했다. 그 외 지역에서는 전기 생산과 열 생산을 분류해서 살펴보면, 인구 밀도가 높아 난방 소비가 많은 서울특별시와 경기도, 인천광역시에서 가스 사용으로 열 생산 시 배출되는 온실가스가 전체 열 생산으로 배출되는 온실가스의 각각 16%, 51%, 7%를 차지하여 대부분이 수도권에서 배출되는 것을 확인할 수 있다.

<표 3-9> 2018년 공공전기 및 열 생산 부문 지자체별·성상별 온실가스 배출량

(단위: tCO₂eq.)

분야/성상	서울특별시	부산광역시	대구광역시	인천광역시
공공 전기 및 열 생산 (총합)	1,480,961	3,433,547	1,329,410	39,188,647
석탄	-	-	-	33,225,430.43
석유	25,531.91	8,490.12	199,910.75	80,463.43
가스	1,455,429.06	3,425,057.20	1,129,499.08	5,882,753.32
공공 전기 생산	291,462	3,282,680	905,282	38,643,380
석탄	-	-	-	33,225,430.43
석유	25,531.91	8,490.12	270.96	80,463.43
가스	265,930.48	3,274,189.85	905,011.34	5,337,485.85
열생산	1,189,499	150,867	424,128	545,267
석탄	-	-	-	-
석유	-	-	199,639.79	-
가스	1,189,498.58	150,867.36	224,487.74	545,267.47
분야/성상	광주광역시	대전광역시	울산광역시	세종특별자치시
공공 전기 및 열 생산 (총합)	263,120	323,023	5,701,190	1,552,830
석탄	-	-	-	-
석유	6.32	121,330.41	1,429,429.85	-
가스	263,113.97	201,692.45	4,271,760.56	1,552,829.92
공공 전기 생산	166,450	131,007	5,654,885	1,419,231
석탄	-	-	-	-
석유	6.32	121,233.89	1,429,429.85	-
가스	166,443.30	9,773.44	4,225,455.46	1,419,231.35
열생산	96,671	192,016	46,305	133,599
석탄	-	-	-	-
석유	-	96.52	-	-
가스	96,670.67	191,919.01	46,305.10	133,598.57
분야/성상	경기도	강원도	충청북도	충청남도
공공 전기 및 열 생산 (총합)	25,594,019	18,774,839	382,555	102,508,956
석탄	-	17,196,564.40	-	98,916,675.18
석유	1,078,662.11	41,240.57	249,597.31	158,283.65
가스	24,515,356.64	1,537,033.80	132,957.50	3,433,997.52
공공 전기 생산	21,737,665	18,769,687	798	102,301,830

석탄	-	17,196,564.40	-	98,916,675.18	
석유	982,119.27	41,240.57	756.51	155,464.31	
가스	20,755,546.07	1,531,882.09	41.79	3,229,690.05	
열생산	3,856,353	5,152	381,757	207,127	
석탄	-	-	-	-	
석유	96,542.84	-	248,840.80	2,819.34	
가스	3,759,810.58	5,151.72	132,915.72	204,307.48	
분야/성상	전라북도	전라남도	경상북도	경상남도	제주도
공공 전기 및 열 생산 (총합)	1,003,514	13,878,877	5,008,272	46,524,453	1,052,094
석탄	-	8,127,003.81	-	46,161,115.08	-
석유	10,039.53	55,971.47	59,571.18	53,906.18	1,052,094.08
가스	993,474.02	5,695,901.28	4,948,700.37	309,431.91	-
공공 전기 생산	997,153	13,845,637	4,954,886	46,225,272	1,052,094
석탄	-	8,127,003.81	-	46,161,115.08	-
석유	10,039.53	55,971.47	59,483.51	53,906.18	1,052,094.08
가스	987,113.80	5,662,661.89	4,895,402.08	10,250.68	-
열생산	6,360	33,239	53,386	299,181	-
석탄	-	-	-	-	-
석유	-	-	87.67	-	-
가스	6,360.22	33,239.39	53,298.29	299,181.23	-

※ 출처: 온실가스종합정보센터 제공, 저자 수정

온실가스 배출통계 중 가장 최신 자료인 2019년 자료를 활용하여 탄소중립률을 계산한 결과는 다음 표 3-10과 같다. 전국은 전 부문 고려 시, 약 3% 수준의 탄소중립률로, 전환, 건물 부문에서 7%가량 온실가스 배출이 감소했으나, 건물과 수송, 농축산 부문은 오히려 배출량이 증가한 것을 확인할 수 있다. 지자체별로는 세종특별자치시가 21%, 전라북도가 13%로 가장 높은 탄소중립률을 나타냈고, 그 외 나머지 지자체는 대부분 10% 미만의 탄소중립률로 나타났다. 인천광역시, 광주광역시, 충청북도는 각각 -4%, -2%, -5%로 2018년 대비 2019년 온실가스 배출량이 오히려 증가한 것을 확인할 수 있다. 이러한 현황은 2050 탄소중립 달성을 위하여 앞으로 더욱 가속화된 노력이 수반되어야 하며, 이를 뒷받침할 수 있는 의사결정 지원 도구의 중요성을 시사한다.

<표 3-10> 2019년 배출현황 기준 지자체별·부문별 탄소중립률 현황

탄소중립률	구분	전국	서울	부산	대구	인천	광주	대전
배출	전환	7%	-10%	27%	-1%	-5%	3%	24%
	산업공정	2%	27%	3%	26%	7%	-12%	23%
	건물	7%	6%	5%	3%	9%	6%	7%
	수송	-3%	2%	-2%	-2%	-5%	-2%	2%
	농축수산	-1%	-12%	16%	4%	4%	3%	3%
	폐기물	4%	0%	1%	-1%	146%	0%	-36%
	탈루	4%	7%	3%	5%	0%	3%	5%
흡수 및 제거	LULUCF	6%	3%	1%	3%	10%	-4%	45%
전체		3%	6%	7%	4%	-4%	-2%	3%
탄소중립률	구분	울산	세종	경기	강원	충북	충남	전북
배출	전환	23%	28%	-1%	14%	4%	7%	6%
	산업공정	4%	25%	15%	-2%	-6%	-2%	13%
	건물	9%	2%	6%	7%	8%	5%	12%
	수송	-3%	-18%	-4%	-4%	-3%	-2%	-1%
	농축수산	-9%	0%	1%	-2%	0%	1%	-2%
	폐기물	4%	54%	-5%	2%	1%	6%	57%
	탈루	3%	2%	4%	6%	0%	1%	2%
흡수 및 제거	LULUCF	-1%	20%	-4%	4%	4%	5%	1%
전체		6%	21%	3%	4%	-5%	4%	13%
탄소중립률	구분	전남	경북	경남	제주			
배출	전환	-2%	84%	11%	2%			
	산업공정	1%	1%	3%	35%			
	건물	13%	9%	5%	4%			
	수송	-7%	-4%	-3%	-2%			
	농축수산	-4%	-1%	0%	7%			
	폐기물	4%	-8%	-4%	-23%			
	탈루	7%	7%	7%	-7%			
흡수 및 제거	LULUCF	12%	10%	9%	2%			
전체		0%	6%	8%	2%			

1.2. 기술도입에 따른 에너지 생산량 예측

기술별 에너지 생산량 예측을 위해서는 기술별 에너지원이 되는 기상조건을 추출하고, 해당 지역에 도입할 제품정보, 대수, 운영 기간 등 기술정보가 입력되어야 한다. 이에 따라, 크게 3단계로 기술별 에너지 생산량을 예측하였다. 1) 기술별 에너지 자원량을 산정할 수 있는 기상정보를 수집하여, 지자체별 평균값을 도출하고, 2) 기술별 실제 도입 가능한 제품으로 KS인증 제품에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 3) 기상조건과 기술정보에 따른 기술별 발전량 산정식을 구축하여, 연간 발전량을 산정하였다.

1) 기술별 에너지원으로서 수집한 주요 기상 데이터와 데이터 출처를 요약하면 다음 표 3-11과 같다.

<표 3-11> 기술별 활용 데이터 및 출처

기술	데이터명	출처
태양광	평균 경사면 도달일사량	국립기상과학원 태양광 자원지도
풍력	평균풍속(고도 10m, 80m)	국립기상과학원 풍력자원지도
수력	종관기상관측 월별 강수량	기상청
조력	조위 관측소 분조 빈조차	국립해양조사원
조류	해양지열별 평균유속	논문(조철희 등, 2016)
파력	평균 유의파고, 평균주기	해양수산부 심해설계파추신자료
태양열	평균 경사면도달 일사량	국립기상과학원 태양광 자원지도
지열	종관기상관측 지중온도	종관기상관측 지중온도

2) 기술별 KS 인증 제품에 대해 수집한 정보를 요약하면 다음과 같다(표 3-12)⁵⁴. 기술별 수집 항목은 기술별 발전량 산정 방법론에서 구체적으로 서술하였다.

<표 3-12> 기술별 KS인증 품목 및 설비 수

분야	태양열	태양광	풍력	지열	연료전지	바이오	축전지	합계
품목	2	7	2	3	1	1	1	17
모델수	35	2,287	12	158	28	10	-	2,530

※ 출처: 한국에너지공단(2022)

54) 출처: 한국에너지공단(2022), *신재생에너지설비 KS인증*. 2022.10.30. 접속, https://www.knrec.or.kr/biz/introduce/new_cer_t/intro_energyks.do?gubun=A

3) 제품 도입에 따른 에너지 생산량은 기술별로 산정 방법론을 구축하고, 해당 분야 전문가들의 자문을 통해 수정·보완하였다. 표 3-13은 기술별 산정식을 요약적으로 제시한 것으로, 구체적인 에너지 생산량 산정 방법론은 기술별로 상세히 서술하였다.

<표 3-13> 기술별 에너지 생산량 산정식 요약

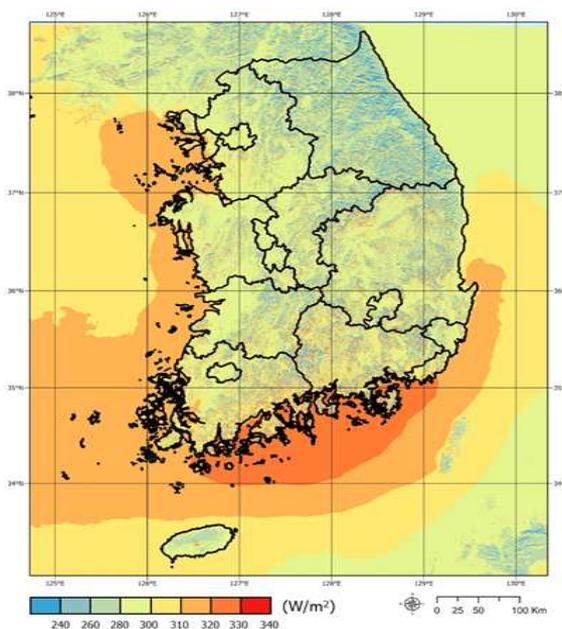
기술명	산정식
태양광	<ul style="list-style-type: none"> 태양광에너지 발전량(연) : 일사량 × 태양광 모듈면적 × 모듈 효율 × 365일
풍력	<ul style="list-style-type: none"> 풍력에너지 발전량(연) : ∑ 풍속 빈도분포 (Weibull 분포) × 터빈 출력곡선
바이오	<ul style="list-style-type: none"> 바이오가스 플랜트 발전량(연): 정격출력 × 설치대수 × 월별 일수 × 24시간 바이오가스 플랜트 연료소비량: 시간당 연료소비량 정격출력 × 설치대수 × 월별 일수 × 24시간 × 1년: 360일 (정비시간 3일 제외)
수력	<ul style="list-style-type: none"> 수력에너지 발전량(연) : 유체밀도 × 중력가속도 × 유량 × 유효낙차 × 시스템 효율 × 가동률 × 8,760시간
해양 에너지	<ul style="list-style-type: none"> 조류 에너지 발전량(연): $1/2 \times \text{해수밀도} \times \text{조류유속}^3 \times \pi/60 \times \text{시설 점유면적} \times \text{설비 효율} \times 8,760\text{시간}$
	<ul style="list-style-type: none"> 조력 에너지 발전량(연): $1/2 \times \text{유체밀도} \times \text{중력가속도} \times \text{조지면적} \times \text{최대조차}^2 \times \text{터빈 효율} \times 8,760\text{시간}$
	<ul style="list-style-type: none"> 파력 에너지 발전량(연): $\text{유체밀도} \times \text{중력가속도}^2 \div 64\pi \times \text{에너지주기}^2 \times \text{유의파고} \times 1000 \div (7 \times 7 \times \text{설비길이}) \times \text{설비점유면적} \times \text{발전장치 개수} \times \text{이용률} \times 8,760\text{시간}$
수소 연료 전지	<ul style="list-style-type: none"> 수소연료전지에너지 발전량(연): 시스템출력 × 이용률 × 설치대수 × 8,760시간
태양열	<ul style="list-style-type: none"> 태양열에너지 발전량(연): 일사량 × 태양열 투과면적 × 설치대수 × 월별일수 × 0.004186(MJ/Kcal)
지열/수열	<ul style="list-style-type: none"> 열에너지 발전량(연): 정격용량(kW) × (1-1/COP(성능계수)) × 3.6MJ/kWh × 월별냉난방 에너지생산시간(h)
산림 흡수원	<ul style="list-style-type: none"> CO₂ 흡수량(연) : 수종별 나무 식재량 × 수종별 1그루당 CO₂ 흡수량

가. 태양광

태양광 발전은 태양광 모듈을 이용하여 태양광을 직접 전기에너지로 변환시키는 발전 방식이다. 태양광 모듈은 태양광 발전에서 빛을 전기로 변환하는 핵심기능을 수행하는 반도체 소자인 태양전지의 기본 단위인 셀을 여러 장 직렬로 연결하여 패널형태로 제작한 것이다. 태양전지는 소재에 따라 실리콘, 화합물 박막, 유기반도체 등으로 구분되며, 흡수층의 형태에 따라 결정계와 박막계로 구분할 수 있다⁵⁵⁾. 결정질 실리콘계는 결정 상태에 따라 단결정과 다결정 실리콘이 있으며, 공정 방식의 차이로 단결정과 다결정이 구분되는데, 단결정 태양전지가 훨씬 정교하고 복잡한 공정 과정을 필요로 한다. 이에 따라 고성능이나 상대적으로 비용이 많이 들고, 다결정의 경우 성능이 단결정에 비해 떨어지나 더 낮은 가격으로 제조가 가능한 제품이다. 박막 태양전지의 경우, 주로 CdTe 박막과 CIGS 박막이 있다.

태양광 발전량은 태양광 자원량과 설치되는 태양광 패널 사양에 따라 다르게 산정된다. 본 연구에서는 지자체별 활용 가능한 태양광 자원량을 파악하기 위하여 기상청 기상자료개방포털⁵⁶⁾에서 제공하는 고해상도 태양광 기상자원지도의 평균 경사면 일사량 자료를 활용하였다. 국립기상과학원에서 제공하는 기상자원지도는 기상청 현업 국지예보모델인 LDAPS에 우리나라의 복잡한 지형특성을 고려할 수 있는 규모상세화 기법을 통해 제공하는 자료로, 100m의 높은 해상도로 태양광·풍력 자원 현황 정보를 제공한다⁵⁷⁾. 2016년 7월 1일 ~ 2021년 6월 30일 과거 5년 간의 시간별, 월별, 계절별, 전 기간 평균자료를 제공하고 있다.

[그림 3-2] 태양광 자원지도 평균 경사면 일사량(5년 평균)



※ 출처: 국립기상과학원 자료 저자 가공

55) 출처: 산업통상자원부·한국에너지공단 신·재생에너지센터(2020), 「신·재생에너지 백서」

56) 출처: 기상청(2022), 기상자료개방포털, 2022.10.27. 접속, <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>

57) 출처: 국립기상과학원 미래기반연구부(2021), 「고해상도 태양광 기상자원지도 설명자료」

본 연구에서는 국립기상과학원을 통해 격자형태로 제공받은 일사량 자료를 바탕으로 지자체별·월별 일사량 평균값을 생성하여 태양광 도입에 따른 발전량 산정에 활용하였다(표 3-14).

<표 3-14> 지자체별·월별 평균 일사량

(단위: kWh/m²/day)

월	강원도	경기도	경상 남도	경상 북도	광주 광역시	대구 광역시	대전 광역시	부산 광역시	
1월	1.5	1.6	1.8	1.7	1.7	1.8	1.6	1.9	
2월	2.4	2.4	2.6	2.5	2.5	2.6	2.5	2.7	
3월	2.7	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	
4월	3.3	3.5	3.5	3.5	3.6	3.5	3.5	3.6	
5월	3.5	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	
6월	3.6	3.8	3.6	3.7	3.7	3.7	3.8	3.7	
7월	2.7	2.9	2.8	2.8	2.9	2.8	2.8	2.9	
8월	2.6	2.8	3.0	2.8	3.0	3.0	2.9	3.1	
9월	2.4	2.6	2.4	2.3	2.6	2.3	2.5	2.3	
10월	2.0	2.2	2.2	2.1	2.2	2.1	2.1	2.2	
11월	1.6	1.7	2.0	1.8	1.9	1.9	1.8	2.0	
12월	1.4	1.4	1.6	1.6	1.5	1.6	1.4	1.7	
월	서울 특별시	세종 특별 자치시	울산 광역시	인천 광역시	전라 남도	전라 북도	제주도	충청 남도	충청 북도
1월	1.6	1.6	1.8	1.6	1.7	1.6	1.5	1.6	1.6
2월	2.5	2.5	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.5	2.4
3월	2.9	2.9	2.9	3.0	3.0	2.9	2.9	3.0	2.8
4월	3.6	3.6	3.5	3.7	3.6	3.5	3.5	3.6	3.4
5월	3.6	3.6	3.6	3.7	3.6	3.6	3.6	3.7	3.6
6월	3.9	3.8	3.6	4.0	3.7	3.6	3.4	3.8	3.8
7월	3.0	2.8	2.8	3.2	3.0	2.8	2.9	2.9	2.8
8월	2.9	2.9	2.9	3.1	3.2	3.0	3.0	2.9	2.8
9월	2.7	2.5	2.2	2.8	2.6	2.5	2.3	2.6	2.5
10월	2.2	2.1	2.1	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1
11월	1.7	1.7	2.0	1.7	2.0	1.8	1.9	1.7	1.7
12월	1.4	1.4	1.7	1.4	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4

본 연구에서 수집한 KS인증 태양광 패널의 경우, 단결정(1,654개), 다결정(82개), 박막/CIGS(1개) 제품을 포함하고 있다. 해당 제품들의 태양광 패널의 셀 사양, 모듈크기, 정격효율 및 정격출력 등 기술 세부사항 정보를 구축하였다.

[그림 3-3] 수집한 태양광 패널 제품정보(예시)

제품정보			
품목	결정질실리콘태양광발전모듈	기업소재지	서울중구청계천로86
세부품목	고내구성친환경모듈	제조사	한화솔루션 주식회사 음성 제2사업장
기업명	한화솔루션주식회사	제조공장소재국가	한국
모델명	QFEAKDUXL-G11.6KR1580		

기술세부사항					
구분	내용	단위	구분	내용	단위
셀사양	단결정	-	단락전류(A)	13.5	A
모듈크기	2420x1147x35	Mm	최대출력동작전류(A)	12.9	A
모듈면적	2.81	m ²	셀제조사	가이안카오스타프테크놀로지(중국)	-
무게	31.0	kg	셀개수	156.0	개
정격효율	20.9	%	셀모듈크기	182x182	mm ³
정격출력	580.0	W	셀출력	7.5	W
최대시스템전압	1500.0	V	설치대수	10,000	대
개방전압	53.7	V	운영기간	30	years
최대출력동작전압	45.1	V	설치년도	2022	year

출처: 한국에너지공단

태양광 발전량 산정식은 다음과 같다. 이 산정식을 통해 도출된 1~12월 월별 태양광 발전량의 총합으로 연간 발전량을 산정하였다.

$$\text{태양광 발전량}(kWh/\text{Month}) = \text{설치면적}(\text{모듈면적}, m^2) \times \text{정격효율}(\%) \times \text{일사량}(kWh/m^2/\text{day}) \times \text{월별일수}$$

태양광 발전은 넓은 부지에 설치하는 대규모 발전, 지붕·건물 부착형 태양광, 주차장형 태양광, 건물 일체형 태양광, 영농형 태양광, 수상형 태양광, 이동형 태양광 등 다양한 형태로 활용·개발되고 있다. 이러한 기술 형태에 따라 도입 가능지역을 추출하여 잠재량을 산정할 필요성이 있으나, 당해연도에는 시범적으로 신재생에너지 백서에서 제시한 지자체별 시장 잠재량 값을 지자체별 도입 가능한 한계값으로 이용하였다(표 3-15).

<표 3-15> 지자체별 태양광 시장잠재량

지역	발전량(GWh/년)
서울특별시	44
대전광역시	871
부산광역시	1,211
세종특별자치시	2,575
울산광역시	2,995
대구광역시	3,086
인천광역시	4,099
광주광역시	4,798
제주도	24,235
경기도	36,205
강원도	36,101
전라남도	40,474
충청북도	48,048
경상남도	49,166
전라북도	50,584
충청남도	80,904
경상북도	109,111

※ 출처: 한국에너지공단(2020)

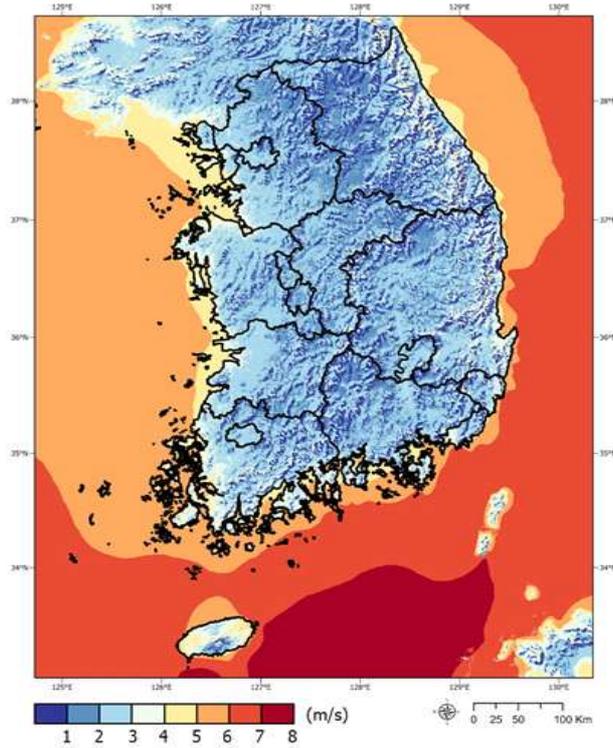
나. 풍력

풍력발전은 바람의 운동에너지를 로터의 블레이드에서 회전을 통해 흡수하고, 기계적 에너지로 변환하여 전력을 생산하는 발전기술이다. 이에 따라 풍속이 강할수록, 로터의 회전면적이 넓을수록 높은 전력을 얻을 수 있다.

풍력발전기가 도입될 지역의 풍속의 경우, 기상청 기상자료 개방포털에서 제공하는 고해상도 풍력 기상자원지도를 활용하였다⁵⁸⁾. 국립기상과학원에서는 고해상도(100m) 풍력 기상자원지도로 고도 10m와 80m에서 5종의 풍력 정보(평균 풍속, 평균 일 최고풍속, 가용풍속 비율, 주풍향, 주풍향 비율)를 제공한다. 본 연구에서는 풍력발전기 높이와 근접한 80m 고도의 평균풍속 자료를 활용하였다. 풍력발전기는 시동풍속(Cut-in speed) 이상에서 전력생산을 시작하기 때문에 수집한 KS 제품들의 시동풍속을 고려하여 평균풍속이 3m/s 이상인 지역들을 추출하고, 추출된 지역의 평균 풍속을 지자체별 평균값으로 적용하였다(표 3-16).

58) 출처: 국립기상과학원 미래기반연구부(2021), 「고해상도 풍력 기상자원지도 설명자료」

[그림 3-4] 풍력 자원지도 고도 10m 평균 풍속분포



※ 출처: 국립기상과학원 자료 저자 가공

<표 3-16> 지자체별 평균풍속, 평균기압 및 연평균기온

광역지자체	평균 풍속(m/s)	평균기압(kPa)	연평균기온(°C)
제주도	5.25	101.2	15.34
경상남도	3.69	100.8	12.97
경상북도	3.99	100.2	11.66
전라남도	4.36	100.9	13.05
전라북도	3.63	100.2	11.78
충청남도	3.89	101.2	11.83
충청북도	3.43	100.0	10.91
강원도	3.98	98.8	10.07
경기도	3.62	100.6	10.73
세종특별자치시	3.35	100.8	12.39
울산광역시	4.40	101.3	13.36
대전광역시	3.33	100.7	12.07
광주광역시	3.60	101.1	12.94
인천광역시	4.50	101.1	10.77
대구광역시	3.63	101.3	12.67
부산광역시	4.52	101.3	14.22
서울특별시	3.67	99.6	10.45

풍력발전기의 경우, KS 인증을 받은 21개의 제품에 대해 증속기 유/무, 시동풍속, 정격풍속, 정격출력, 로터직경, 로터 회전면적 등의 제품정보를 수집하였다(그림 3-5).

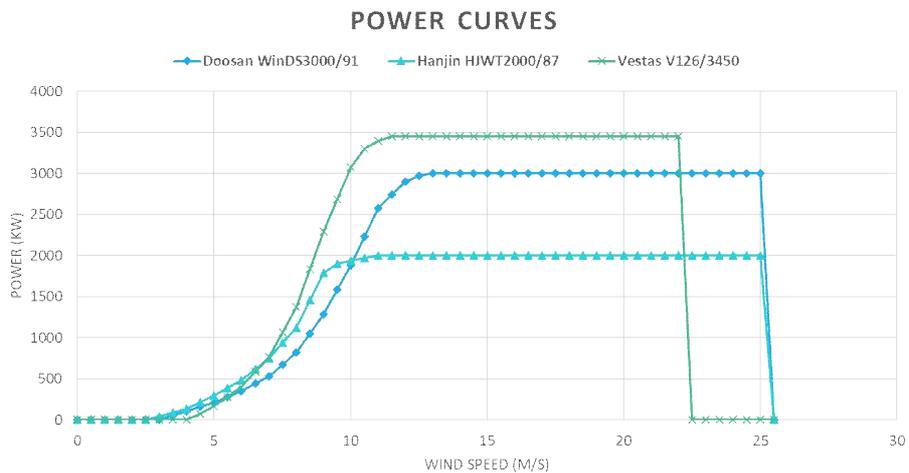
[그림 3-5] 수집한 풍력발전기 제품정보(예시)

제품정보					
품목	중대형				
기업명	지멘스가메사		제조국	덴마크	
모델명	SWT-3.0-108-DD				
기술세부사항					
구분	내용	단위	구분	내용	단위
증속기(유/무)	무	-	로터회전면적	9144	m ²
육/해상	육상용	-	기어박스종류	Gearless. Direct drive	-
시동풍속	3	m/s	허브높이	80	m
중단풍속	25	m/s	설치대수	20	대
정격풍속	12	m/s	운영기간	30	years
정격출력	2000	kW	설치년도	2022	year
로터직경	108	m			

출처: 한국에너지공단

풍력터빈의 출력곡선은 풍력발전기의 풍속에 따른 출력 변화를 나타낸 것으로, 발전기 별로 성능이 다르며, 제조사에서 제공한다. 본 연구에서는 KS 인증 제품 중 출력곡선이 확보 가능한 제품들 적용하였다. 그림3-6은 일부 제품의 출력곡선을 나타낸다.

[그림 3-6] 세 가지 제품의 출력곡선



※ 출처: The Wind Power⁵⁹⁾ 자료 저자 가공

59) 출처: The Wind Power(2022), *Manufacturers and turbines databases*, 2022.10.31. 접속, <https://www.thewindpower.net>

풍력 발전량은 풍력터빈의 출력곡선과 풍속에 따라 산정된다⁶⁰. 산정식에서 빈(N)은 풍속을 0.5m/s 간격으로 구분한 것을 의미하며, F(V)는 풍속 확률분포를, P는 풍속에 따른 출력값을 나타낸다.

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right)$$

N_h : 8760(1년 총 시간)

N : 빈(bin)의 개수

V_i : 빈 i 에서의 평균 풍속

P_i : 빈 i 에서의 평균 출력

$F(V)$: 풍속에 대한 와이블(또는 레일리) 누적 확률분포

풍속 측정기에서 측정되는 풍속을 발전기의 허브높이(hub height)에서의 풍속으로 변환하기 위하여 고도 80m 풍속을 허브높이 풍속으로 외삽하여 적용하였다. 이때 적용되는 윈드시어(α)의 경우, 표면의 거칠기 정보를 반영하는 계수로 본 연구에서는 안정화된 상태에서 널리 적용되는 1/7을 적용하였다.

$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha$$

\bar{V} : 허브높이 H 에서의 평균풍속

\bar{V}_0 : 풍속측정기 H_0 에서의 평균풍속 (80m)

α : 윈드시어(wind shear exponent) 1

풍속은 시간에 따라 계속적으로 변화하므로 풍속빈도 곡선을 연속함수로 모델링 한 확률밀도함수를 사용하여 발전량 산정에 활용한다. 흔히 Weibull 확률밀도함수와 Rayleigh 확률밀도함수를 사용하는데 본 연구에서는 지역별 기상 측정자료가 아닌 국립기상과학원에서 제공하는 풍력 자원지도를 통해 도출된 지자체별 평균풍속 정보를 활용하였으므로, 아래 식과 같이 레일리 누적분포함수를 적용하였다.

$$F(V) = 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}} \right)^2 \right]$$

60) 출처: RETScreen International Clean Energy Decision Support Centre (Canada). (2001), "Clean Energy Project Analysis: RETScreen® Engineering & Cases Textbook"

이렇게 도출된 풍력에너지 생산량은 지역별 평균기압과 온도를 기반으로 보정하여 총 에너지 생산량(Gross energy production)으로 도출하였다. 또한, 에너지 공급 시 발생할 수 있는 여러 손실을 고려하여, 단일 터빈 설치 시에는 10% 손실을, 복수터빈 설치 시에는 후류손실(wake loss)을 고려하여 15% 손실률을 적용하여, 최종 발전량을 산정하였다.

$$E_G = E_U c_H c_T$$

$$c_H = \frac{P}{P_0}, c_T = \frac{T_0}{T}$$

- E_U : 보정 전 에너지 생산량
- P : 그 지역의 연평균 기압
- P_0 : 표준기압 101.3kPa
- T : 그 지역의 연 평균 절대온도
- T_0 : 평균절대온도 288.1K

풍력의 경우에도 신재생에너지 백서에서 도출한 지자체별 시장 잠재량 값을 지자체별 최대 도입 가능 한계값으로 적용하였다(표 3-17).

<표 3-17> 지자체별 풍력 시장잠재량

지역	발전량(GWh/년)
서울특별시	-
대전광역시	8
부산광역시	52
세종특별자치시	79
울산광역시	293
대구광역시	19
인천광역시	504
광주광역시	63
제주도	5,687
경기도	1,167
강원도	3,227
전라남도	8,197
충청북도	2,178
경상남도	3,831
전라북도	2,183
충청남도	7,422
경상북도	17,364

※ 출처: 한국에너지공단(2020)

다. 수력

수력 발전은 댐, 강, 하천 등에서 물이 가진 위치에너지를 수차를 이용하여 터빈의 기계적 회전에너지로 변환하고, 이를 발전기를 통해 전기에너지로 변환하는 방식의 기술이다. 이에 따라, 수력을 이용한 발전량은 낙차와 유량에 의해 결정된다. 낙차는 상부수면에서 하부수면까지 이용 가능한 수직거리를 의미하며, 물이 흘러 내려오는 동안 발생하는 손실낙차를 제외하고 이용 가능한 에너지 수두를 유효낙차라고 한다. 유효낙차가 크고, 유량이 많을수록 많은 전력량을 생산할 수 있으며, 유량의 경우, 유역면적과 월별 강수량에 따라 결정된다.

당해연도의 시뮬레이터에서는 유역면적은 수력 발전을 도입하고자 하는 사용자가 입력하도록 하고, 유량의 경우, 지자체별·월별 강수량을 통해 산정할 수 있도록 수식을 구성하였다⁶¹⁾.

$$Q_m(\text{월}) = \frac{\text{유역면적} \times \text{월별 강수량} \times \text{유출계수}}{\text{월별 일수} \times 24 \times 60 \times 60} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

지자체별 강수량은 기상청 기상자료 개방포털에서 제공하는 103개 지점 종관기상관측소(ASOS)의 과거 30년간의 월별 자료를 수집하고, 티센가중치법을 적용하여 지자체별 평균값을 다음 표 3-18와 같이 도출하였다.

<표 3-18> 지자체별 유역면적, 연 강수량 및 월별 강수량

(단위: mm)

광역지자체	강원도	경기도	경상남도	경상북도	광주광역시	대구광역시
유역면적 (km ²)	16829.68	10195.27	10540.55	19034.03	501.13	883.49
연 강수량	1287.5	1336.8	1414.5	1118.1	1318.7	1028.1
1월	26.8	20.9	25.7	23.4	34.1	19.4
2월	32.3	25.8	39.9	30.4	41.0	26.5
3월	50.4	44.3	71.8	52.7	64.4	46.1
4월	77.3	77.4	114.6	82.3	92.8	73.5
5월	88.7	96.9	111.5	83.3	93.9	75.0
6월	122.6	128.9	165.0	126.6	162.5	131.1
7월	301.4	367.9	297.4	233.2	268.7	221.8
8월	287.7	306.0	272.1	220.8	262.0	197.1
9월	158.5	144.3	171.4	143.9	155.7	139.7
10월	64.4	51.9	74.9	60.2	57.8	46.1
11월	53.2	50.2	46.2	39.9	51.6	32.8
12월	24.1	22.3	24.0	21.3	34.4	19.0

61) 출처: 정성은 외(2018), 「관측 유량 자료를 이용한 소수력 잠재량 평가에 대한 사례연구」, 『한국태양에너지학회 논문집』, 38(4), p.43~54

광역지자체	대전 광역시	부산 광역시	서울 특별시	세종 특별자치시	울산 광역시	인천광역시
유역면적 (km ²)	539.66	770.07	605.23	464.91	1062.09	1065.23
연 강수량	1344.7	1459.9	1370.4	1269.8	1220.9	1172.3
1월	28.3	28.3	25.8	31.3	32.2	18.4
2월	37.6	48.5	24.3	33.2	41.2	21.0
3월	55.5	87.2	50.3	60.0	71.2	37.4
4월	87.1	128.6	74.1	49.7	103.6	71.6
5월	93.5	123.2	95.3	79.6	97.0	92.2
6월	160.4	164.9	147.6	131.0	105.4	113.0
7월	307.2	301.5	371.1	291.5	222.0	304.9
8월	289.0	217.0	290.9	297.9	209.3	263.5
9월	152.2	189.7	159.2	163.5	184.0	133.6
10월	56.2	87.0	53.5	48.0	78.0	47.5
11월	48.2	53.2	53.6	66.5	48.8	46.5
12월	29.5	30.9	24.6	17.6	28.3	22.6
광역지자체	전라남도	전라북도	제주도	충청남도	충청북도	
유역면적 (km ²)	12348.09	8069.84	1850.21	8246.17	7406.95	
연 강수량	1387.8	1309.2	1632.2	1235.5	1245.6	
1월	29.5	31.0	60.8	25.9	23.4	
2월	41.2	38.4	70.1	32.9	29.9	
3월	76.5	57.0	100.9	50.2	50.3	
4월	110.0	88.1	131.6	77.8	81.6	
5월	116.1	89.1	146.4	90.1	89.9	
6월	167.2	146.6	211.2	126.3	143.6	
7월	261.7	293.9	235.8	275.4	296.8	
8월	266.2	278.6	258.7	264.6	267.2	
9월	158.3	138.5	201.0	143.4	140.0	
10월	74.5	60.4	83.9	59.2	52.7	
11월	53.9	52.7	78.1	59.4	44.6	
12월	32.6	35.1	53.7	30.3	25.6	

※출처: 기상청 기상자료 개방포털 ASOS 자료 저자가공

수력 발전은 수력 발전에 유량과 낙차, 시스템 효율 및 가동률에 따라 발전량을 산정할 수 있다⁶²⁾.

$$\text{수력에너지발전량(연)} = \text{유체밀도} \times \text{중력가속도} \times \text{유량} \times \text{유효낙차} \times \text{시스템효율} \times \text{가동률} \times 8,760\text{시간}$$

62) 출처: 유인상·김하용·정성민(2017), 「우리나라의 표준유역별 연간 소수력발전가능량 산정」, 『J. Korean Soc. Hazard Mitig.』, 17(6), p473~481

유효낙차는 사용자가 직접 입력 가능하나, 참고문헌⁶³⁾에 따르면 2~20m는 저낙차, 20~150m는 중낙차, 150m 이상은 고낙차로 분류할 수 있다. 발전기의 가동률, 수차효율, 발전기 효율의 경우, 참고문헌 조사를 바탕으로 평균값을 도출하여 기본값으로 적용하는 것으로 시뮬레이터를 구성하였다. 이에 따라, 가동률을 42.89%를, 수차효율은 82.5%, 발전기 효율은 87.8%를 적용하였다. 최대 발전가능량은 다른 기술들과 마찬가지로 신재생에너지 백서에서 도출한 지자체별 시장 잠재량으로 적용하였다(표 3-19).

<표 3-19> 지자체별 수력 시장잠재량

지역	발전량(GWh/년)
서울특별시	-
대전광역시	1
부산광역시	-
세종특별자치시	7
울산광역시	1
대구광역시	245
인천광역시	-
광주광역시	-
제주도	-
경기도	2,168
강원도	952
전라남도	120
충청북도	620
경상남도	2,687
전라북도	366
충청남도	775
경상북도	925

※ 출처: 한국에너지공단(2020)

63) 출처: 김성철 외(2019), 「소수력 발전 활성화를 위한 분류 기준」, 『Water for future』, 52(1), p62~73

라. 조력

조력발전은 조석현상으로 인한 해수면의 상승·하강 운동을 에너지원으로 하여 전기를 생산하는 기술이다. 주로 조차가 큰 연안에 댐과 수문을 설치하고 댐 내·외부의 수위차를 통해 터빈을 회전시켜 발전하는 방식이다. 조력에너지(E_p)는 조지의 면적(A)과 조석간만의 차(h)의 차에 의해 발전량이 결정되는데, 조지 면적은 도입을 결정하는 사용자가 입력하도록 시뮬레이터를 구성하였다⁶⁴).

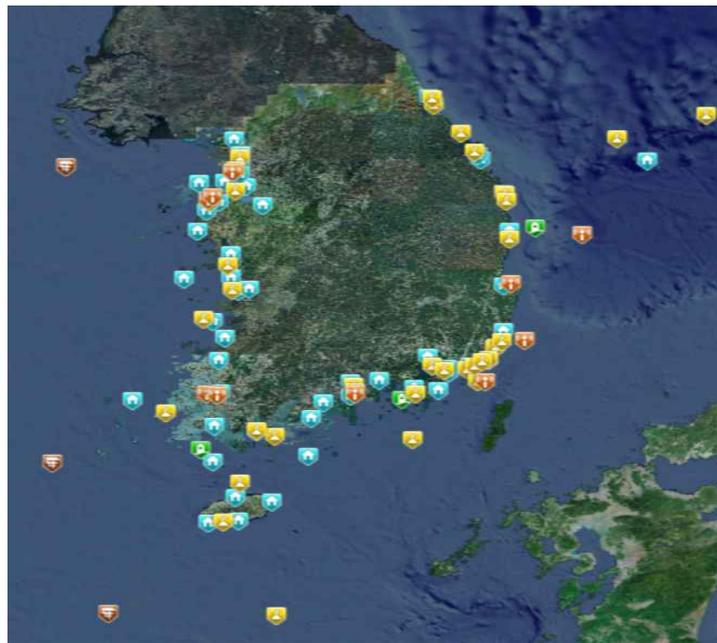
$$E_p = \frac{1}{2} \rho g A (h^2) \text{ [J]}$$

A : 조지의 면적

h : 조석간만의 차

조석간만의 차 정보는 국립해양조사원에서 제공하는 조위관측소의 기본수준점 자료 중 주태음반일주조(M2)⁶⁵ 반조차(H) 자료⁶⁶를 활용하여, 반조차의 두 배로 평균조차를 산정하였다. 총 48개소의 정보를 수집하였으며, 광역지자체별 평균 조차는 다음과 같다(표 3-17).

[그림 3-7] 국립해양조사원 바다누리 해양정보 서비스 조위관측소 정보



※ 출처: 국립해양조사원(2022)

64) 출처: 황수진·조철희(2019), 「국내 해양에너지 이론적 잠재량 산정 연구」, 『한국수소및신에너지학회논문집』, 30(5), p465~472
 65) 조석현상에 영향을 미치는 여러 천체의 영향 중 가장 큰 영향을 미치는 분조(분리된 개개의 조석성분)로, 달의 영향을 의미하며, 이로 인해 발생한 (반)조차 자료를 이용하였다.
 66) 출처: 국립해양조사원(2022), 바다누리 해양정보서비스, 2022.10.31. 접속, <http://www.khoa.go.kr/oceangrid/khoa/intro.do>

<표 3-20> 지자체별 평균조차

광역지자체	평균조차(m)
강원도	0.134
경상북도	0.0813
울산광역시	0.326
부산광역시	0.967
경상남도	1.312
전라남도	2.479
전라북도	3.985
충청남도	4.537
경기도	5.485
인천광역시	5.319
제주도	1.488
인천경기	5.402

※출처: 국립해양조사원 바다누리 해양정보 서비스 조위관측소 정보 저자 가공

조력의 연간발전환산량(Annual Energy Production, AEP)은 일률밀도(Power Density, PD)와 설비용량(Installed Generating Capacity, IGC)을 계산하여 산정하였다. IGC의 경우, 전문가 자문을 바탕으로 터빈효율(약 90%)을 적용하였고, AEP 산정 시 설비 이용율은 약 20~30%를 적용할 수 있도록 구성하였다.

$$PD = \frac{E_p}{T_{semi}A} \text{ [MW/km}^2\text{]}$$

T_{semi} : 반일조 주기 (44700s)

$$IGC = \frac{PD \times A \times \text{터빈효율}}{10^3} \text{ [GW]}$$

$$AEP = \frac{IGC \times \text{설비이용율} \times 365 \times 24}{10^3} \text{ [TWh/y]}$$

신재생에너지 백서에서는 현재 해양에너지의 시장잠재량은 없는 것으로 산정하였다. 이론적 잠재량이나 기술적 잠재량의 경우, 지자체별로 구분해서 제공하지 않기 때문에 본 연구에서는 황수진·조철희(2019) 논문에서 산정한 조력발전 잠재량 값을 지자체별 한계값으로 적용하였다⁶⁷⁾.

<표 3-21> 지자체별 조력발전 잠재량

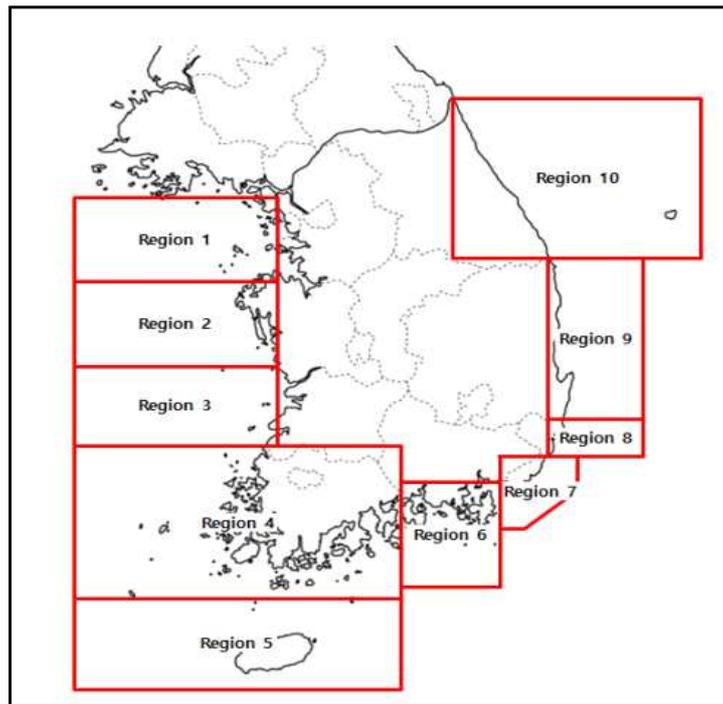
지역	발전량(TWh/년)
인천경기	58
충청남도	16
전라북도	10
전라남도	25
경상남도	3
부산광역시	0

※ 출처: 황수진·조철희(2019)

마. 조류

조류발전은 조석현상과 지형 요인으로 발생하는 조류의 운동에너지를 이용하여 발전하는 기술이다. 기본 원리는 풍력발전과 유사하며, 조석현상에 의한 흐름을 이용하기 때문에 기상이나 계절의 영향 없이 전력을 생산할 수 있는 장점이 있다. 조류발전은 터빈의 형태에 따라 수평축, 수직축, 진동식 터빈으로 구분되며, 터빈을 지지하는 형식에 따라 부유식, 파일식, 중력식 등으로 구분할 수 있다. 발전량은 지역별 유속에 의해 결정되는데, 자료 확보의 한계로 인해 당해연도 시뮬레이터에는 지자체별 해양경계와 조류의 유속정보는 조철희 외(2016)의 논문의 자료를 활용하였다⁶⁸⁾.

[그림 3-8] 우리나라 해양경계



※ 출처: 조철희 등(2016)

67) 출처: 황수진·조철희(2019), 「국내 해양에너지 이론적 잠재량 산정 연구」, 『한국수소및신에너지학회논문집』, 30(5), p465~472

68) 출처: 조철희 외(2016), 「API 를 적용한 국내 조류에너지 잠재량 추정」, 『한국태양에너지학회 논문집』, 36(1), p75~81

<표 3-22> 지자체별 해양의 평균유속 및 면적

지역	Region	평균 유속 (m/s)	면적(km ²)
인천광역시	1	0.64	15,248
충청남도	2	0.57	17,754
전라북도	3	0.39	11,093
전라남도	4	0.52	31,784
제주도	5	0.47	34,507
경상남도	6	0.37	4,791
부산광역시	7	0.40	3,280
전체	All areas	0.57	118,457

※ 출처: 황수진·조철희(2019)

조류 연간발전환산량을 계산하기 위하여 우선 조류의 유속정보를 활용하여 일률밀도를 도출하였다⁶⁹⁾.

$$PD = \frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

V : 조류의 유속

유속을 기반으로 다음 수식을 이용하여 평균추출출력(Average Power Intercepted, API)을 도출하였다. 조류발전 시 도입하는 기술 정보의 경우, 전문가 자문을 바탕으로 터빈직경(D) 16m, 이에 따른 점유면적은 3,840m² ($15D \times 10D$)으로 적용하였다. 현재 상용화된 조류발전기는 수평축 터빈뿐이므로, 수평축 터빈의 효율(42~43%)과 설비 이용율(30~40%)을 적용하였다.

$$API = \frac{1}{2} \rho V^3 \times \frac{\pi}{60} \text{ [MW/km}^2\text{]}$$

$$API = PD \times \frac{A_{swept}}{A_{occupied}} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$A_{occupied} = 1.5D \times 10D \text{ [m}^2\text{]}$$

D : 터빈의 직경

69) 출처: 황수진·조철희(2019), 「국내 해양에너지 이론적 잠재량 산정 연구」, 『한국수소및신에너지학회논문집』, 30(5), p465~472

설비용량(Installed Generating Capacity, IGC)은 API와 점유면적, 효율을 적용하였으며, 설비 이용율을 고려하여 연간발전산량(AEP)을 도출하였다.

$$IGC = \frac{API \times A \times \text{효율}}{10^3} \text{ [GW]}$$

$$AEP = \frac{IGC \times 365 \times 24 \times \text{설비이용율}}{10^3} \text{ [TWh/y]}$$

신재생에너지 백서에서는 조류 에너지의 시장잠재량은 없는 것으로 산정하였다. 이론적 잠재량이나 기술적 잠재량의 경우도 지자체별로 구분해서 제공하지 않기 때문에 본 연구에서는 조철희 외(2016) 논문에서 산정한 조력발전 잠재량 값을 지자체별 한계값으로 적용하였다(표 3-23).

<표 3-23> 지자체별 조류발전 잠재량

지역	발전량(TWh/년)
인천광역시	939
충청남도	761
전라북도	147
전라남도	1,041
제주도	839
경상남도	58
부산광역시	49

※ 출처: 조철희 등(2016)

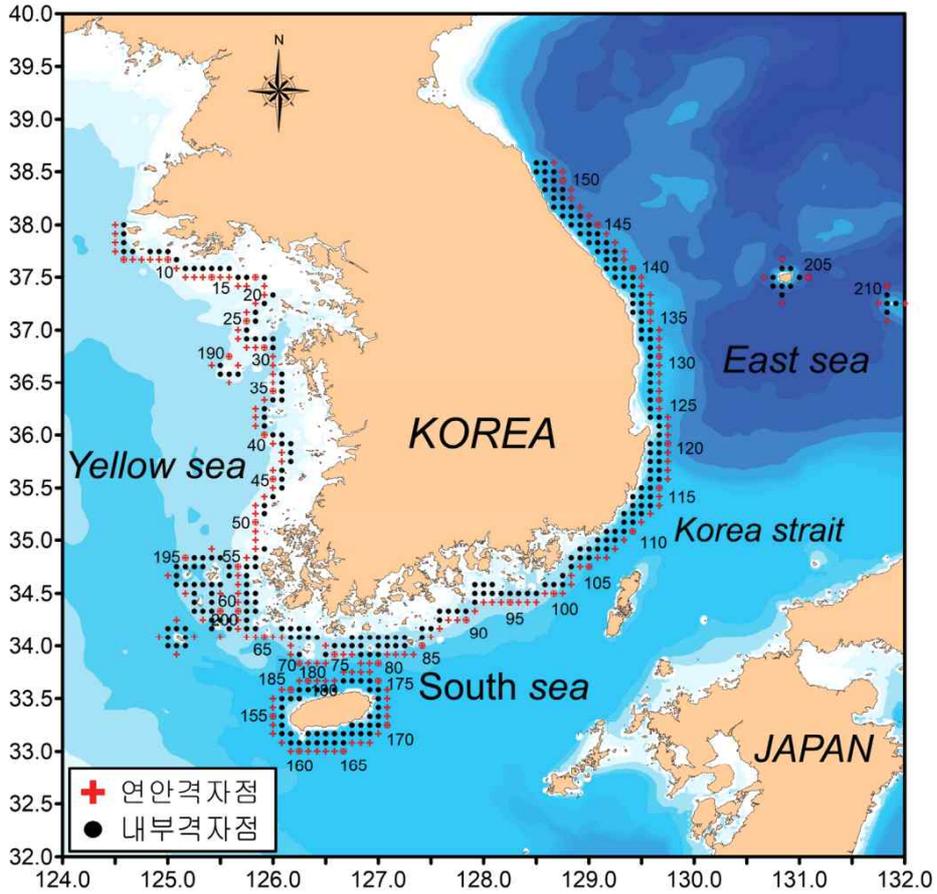
바. 파력

파력발전은 파랑의 에너지를 동력으로 전력을 생산하는 기술로, 국내에서는 상용화를 위한 기술 개발과 실증 연구가 지속적으로 추진되고 있다. 파력발전에는 가동물체형, 진동수주형, 월파형 세 가지 유형이 존재하는데, 본 연구에서는 선박해양플랜트 연구소에서 개발한 부유식 진자형 파력발전장치를 도입하는 것으로 가정하였다.

파력 에너지의 산정을 위해서는 유의파고와 에너지 주기정보가 요구된다. 이러한 정보는 국립해양수산부에서 제공하는 전국파랑관측자료 제공 시스템에서 확보가 가능했지만, 관측지점에서 제공하는 파랑정보의 경우, 육지와 인접한 지점에서 측정되기 때문에 파에너지가 굉장히 낮게 산정되는 한계가 존재했다. 이에 따라 본 연구에서는 심해설계파 산출보고서⁷⁰⁾에서 제공하는 격자별 유의파고와 평균주기를 활용하였다. 격자점 정보를 지자체별 평균값으로 도출한 결과는 다음과 같다(표 3-24).

70) 출처: 해양수산부(2019), 「전국 심해설계파 산출보고서」

[그림 3-9] 심해설계파 격자점 분포



※ 출처: 해양수산부(2019)

<표 3-24> 지자체별 유의파고, 주기, 에너지 주기 10년 빈도 평균값

행정구역	유의파고 평균값(m)	평균주기(s)	에너지주기 평균값(s)
인천광역시	3.60	8.29	9.95
강원도	3.95	9.09	10.91
충청남도	3.72	8.31	9.97
경상북도	4.31	9.38	11.26
경상남도	4.38	9.26	11.11
울산광역시	4.45	9.32	11.19
부산광역시	4.32	9.38	11.25
전라북도	3.72	8.31	9.97
전라남도	4.73	9.76	11.72
제주도	5.23	10.57	12.68

※ 출처: 해양수산부(2019)

파에너지플럭스(P)는 다음 식과 같이 에너지 주기와 유의파고를 통해 산정하였다^{71),72)}

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2 \quad [\text{kW/m}]$$

T_e : 에너지주기

H_s : 유의파고

ρ : 해수밀도

g : 중력가속도

평균추출출력(API)과 설비용량(IGC)은 다음의 식을 이용하여 산정하였고, 전문가 자문을 통해 발전장치 길이에 따른 점유면적을 산정하였다. 발전장치의 길이(L)는 25m를, 설비이용율은 25%를 적용하였다.

$$A_{occupied} = 7L \times 7L \quad [\text{m}^2]$$

$$AII = P \times \frac{1000}{7 \times 7 \times L} \quad [\text{MW/km}^2]$$

$$IGC = \frac{AII \times A}{10^3} \quad [\text{GW}]$$

$$AEP = \frac{IGC \times 365 \times 24}{10^3} \times \text{설비이용율} \quad [\text{TWh/y}]$$

조류·조력 발전과 마찬가지로 신재생에너지 백서에서는 파력발전의 시장잠재량은 없는 것으로 산정하였다. 이론적 잠재량이나 기술적 잠재량의 경우, 지자체별로 구분해서 제공하지 않기 때문에 본 연구에서는 황수진과 조철희(2019) 논문에서 산정한 파력발전 잠재량 값을 지자체별 한계값으로 적용하였다(표 3-25).

71) 출처: 황수진·조철희(2019), 「국내 해양에너지 이론적 잠재량 산정 연구」, 『한국수소및신에너지학회논문집』, 30(5), p465~472

72) 출처: Cornett, A. M.(2008), "A Global Wave Energy Resource Assessment", *Eighteenth international offshore and polar engineering conference*

<표 3-25> 지자체별 파력발전 잠재량

지역	발전량(TWh/년)
인천광역시	110.5
충청남도	82.2
전라북도	38.9
전라남도	390.7
경상북도	190.7
경상남도	60.6
강원도	38.3
부산광역시	20.5
울산광역시	11.9
제주도	183.5

※ 출처: 황수진·조철희(2019)

사. 수소연료전지

연료전지는 수소와 산소의 화학반응을 이용하여 전기를 생산하는 발전기술이다. 연료전지의 연료로 사용되는 수소는 다른 물질로부터 추출하는 과정을 거쳐야 하는 데 여러 가지 연료에서 수소를 추출하는 것을 ‘개질’ 이라고 한다. 연료로는 천연가스, LPG, 등유를 이용하여 수소를 추출하여 공기 중 산소와 반응을 일으켜 전력을 생산한다⁷³⁾.

연료전지의 경우, 기후조건에 영향을 받지 않으므로, 대상 지역별 차이 없이 도입하는 기술정보에 따른 발전량의 차이만 반영할 수 있도록 시뮬레이터가 구성되었다. 연료전지 제품사양으로는 제조사, 제조공장 소재 국가, 사용 연료, 시스템 출력, 발전효율, 배열회수효율, 발전이용률, 종합효율 등의 정보를 수집하였다.

73) 출처: 심중표·이창래·이흥기(2012), 「신재생에너지원인 수소연료전지의 원리와 응용」, 『전기의세계』, 61(11), p15~22

[그림 3-10] 수집한 연료전지 제품정보(예시)

제품정보				
품목	연료전지	<input checked="" type="checkbox"/>	기업소재지	경기수원시권선구고색동 1073
세부품목	연료전지시스템	<input checked="" type="checkbox"/>	제조사	에스퓨얼셀 연료전지 제조공장
기업명	에스퓨얼셀(주)	<input checked="" type="checkbox"/>	제조공장소재국가	한국
모델명	NG6K-19BF	<input checked="" type="checkbox"/>		

기술세부사항		
구분	내용	단위
사용연료	천연가스	
시스템출력	6	kW
종합효율	98.6	%LHV
발전효율	35.7	%LHV
배열회수효율	62.9	%LHV
발전이용률	92	%
설치대수	10,000	대
운영기간	30	years
설치년도	2022	year

출처: 한국에너지공단

연료전지는 전해질 종류에 따라 구분되는데, 본 연구에서 수집한 KS 제품은 연료전지가 크게 고체 산화물 연료전지(SOFC)와 고분자 연료전지(PEMFC)로 구분되었다. 사용 연료는 천연가스, 도시가스, 액화석유가스로 구분할 수 있으며, 발전 방식은 계통연계형, 밀폐식- 강제급배기식, 3상4선식이 존재한다. 이러한 제품 도입에 따른 발전량의 경우, 다음과 같이 산정하였다.

$$\text{연간 연료전지 발전량} = \text{시스템출력} \times \text{발전이용률} \times \text{설치대수} \times 365\text{일} \times 24\text{시간}$$

아. 바이오에너지

바이오에너지는 동·식물 또는 유기성 폐기물 및 해양 바이오매스 등을 원료로 하여 열화학적, 생물학적 전환기술을 적용하여 전기·열·바이오연료를 생산하는 대체 에너지원 기술이다(국가기후기술정보시스템⁷⁴). 바이오에너지는 기후의 영향을 받지 않는 에너지원이므로, 지자체별 차등 없이 기술에 따른 차이만 반영되도록 시뮬레이터를 구성하였다. 바이오에너지 활용 기술로는 바이오가스 플랜트 기술 정보를 반영하였다. 바이오가스 플랜트는 축산분뇨, 음식물쓰레기, 하·폐수 슬러지 등의 유기성 폐기물을 메탄발효로 처리하고, 바이오가스를 발생시켜 사용하는 시설이다⁷⁵. 대부분의 바이오가스 플랜트 시설에서는 열병합 발전기를 사용하여 열과 전기를 생산한다. 당해연도 본 연구에서는 바이오가스 플랜트에서 생산되는 전기만을 이용 가능한 양으로 고려하였다.

바이오가스 플랜트에 대해서는 총 19개의 시설에 대해 엔진, 연료 소비량, 정격출력, 열출력, 종합효율(전기효율, 열효율), 저위발전량 등의 정보를 수집하였다.

[그림 3-11] 수집한 바이오가스플랜트 시설정보(예시)

제품정보			
품목	열병합발전기	<input checked="" type="checkbox"/>	기업소재지 서울특별시 영등포구 문래로20길 메가벤처타워4층
세부품목	DOOSAN 엔진	<input checked="" type="checkbox"/>	제조사 -
기업명	Bokuk	<input checked="" type="checkbox"/>	제조공장소재국가 -
모델명	BGC-130(50Hz)	<input checked="" type="checkbox"/>	

기술세부사항		
구분	내용	단위
엔진	GE08TIC	-
연료소비	28.6	Nm ³ /hr
정격출력	108.0	kw
열출력	144,500	kcal/hr
종합효율	88.4	%
전기효율	34.6	%
열효율	53.8	%
발전기효율	94.0	%
저위발전량	9,393	Kcal/Nm ³
설치대수	100	대
운영기간	50	Years
설치년도	2022	year

출처: 한국에너지공단

74) 출처: 국가기후기술정보시스템(2022), *기후기술 분류체계*, 2022.10.28. 접속, <https://www.ctis.re.kr/ko/techClass>

75) 출처: 허남효(2007), 「유기성폐기물의 바이오가스화 기술 및 보급 현황」, 『한국신재생에너지학회 학술대회논문집』, p763~766

수집한 열병합발전기 사양의 연료 소비량과 정격출력을 통해 기술도입에 따른 바이오가스 소비량과 발전량을 산정하였다. 전문가 자문에 따라 1년 중 5일은 정비시간으로 가정하여, 1년 중 360일간 가동되는 것으로 계산하였다.

$$\text{연간 바이오가스 소비량}(Nm^3) = \text{연료 소비량} \times \text{설치대수} \times \text{월 일수} \times 24\text{시간}$$

$$\text{연간 발전량}(kWh) = \text{정격출력} \times \text{설치대수} \times \text{월 일수} \times 24\text{시간}$$

지자체별 열병합발전의 최대 도입 가능량은 지자체별 지역 발생 유기성 폐기물량을 기초자료로 활용하는 것이 적합한 것으로 판단된다. 하지만 당해연도에는 자료 확보의 한계로 환경부의 지자체별 바이오가스 생산 합계 통계자료⁷⁶⁾를 이용하여 한계값으로 설정하였다(표 3-26).

<표 3-26> 지자체별 바이오가스화 시설 바이오가스 생산량

지역	바이오가스 총생산량(nm ³ /년)
서울특별시	56,880,000
대전광역시	23,473,000
부산광역시	18,293,000
세종특별자치시	925,000
울산광역시	24,327,000
대구광역시	23,984,000
인천광역시	27,670,000
광주광역시	15,207,000
제주도	3,378,000
경기도	75,351,000
강원도	13,011,000
전라남도	2,833,000
충청북도	13,901,000
경상남도	21,643,000
전라북도	25,907,000
충청남도	16,954,000
경상북도	11,267,000

※ 출처: 환경부(2021)

76) 출처: 환경부(2021), 2021년 유기성폐자원 바이오가스시설 현황, 2022.10.27. 접속, www.me.go.kr

자. 태양열

태양열 기술은 태양복사에너지를 흡수하여 열에너지로 이용하는 방법과 복사광선을 집광하여 발전하는 방법이 있다. 대부분의 경우, 열에너지로 변환하여 사용되므로 본 연구에서는 발전량은 고려하지 않고, 열에너지 생산량만을 고려하였다. 흡수한 태양복사에너지를 열에너지로 변환하는 경우, 집열부, 축열부, 이용부로 구성된 태양열 시스템을 통해 건물의 냉난방, 급탕, 산업공정열 등에 활용한다.

지자체별 활용 가능한 태양복사에너지는 일사량에 따라 달라지므로, 태양광과 마찬가지로 국립기상과학원에서 제공하는 태양광 자원지도를 활용하였다⁷⁷⁾. 태양광 자원지도를 통해 지자체별 일사량(kWh/m²/day)을 열에너지 단위(kcal/m²/day)로 환산한 값은 다음 표 3-27과 같다.

<표 3-27> 지자체별·월별 일사량

(단위: kcal/m²/day)

월	강원도	경기도	경상남도	경상북도	광주광역시
1월	1332.802717	1370.219457	1556.962612	1467.860904	1445.873522
2월	2036.835265	2087.455273	2229.659743	2189.21347	2109.323786
3월	2328.264004	2457.885336	2518.076066	2480.271612	2530.853151
4월	2846.338887	3009.997992	2985.143165	2981.532151	3065.253707
5월	2976.40883	3100.724413	3078.888198	3092.766438	3113.800602
6월	3075.515462	3271.158305	3072.140697	3179.321523	3145.522558
7월	2341.43211	2489.912637	2383.554571	2379.940985	2488.775277
8월	2219.683613	2447.953094	2556.93944	2449.420514	2600.983933
9월	2041.772365	2247.887002	2029.006599	1977.845774	2222.223826
10월	1702.698911	1855.997421	1885.835496	1771.604239	1905.453758
11월	1384.09967	1446.624204	1682.346907	1555.00774	1636.279771
12월	1166.518986	1191.156406	1412.318873	1338.529378	1293.763411
지점	대구광역시	대전광역시	부산광역시	서울특별시	세종특별자치시
1월	1510.806432	1398.539427	1609.321971	1381.972177	1394.320693
2월	2205.14603	2126.502711	2284.899037	2119.926631	2144.970425
3월	2528.184263	2501.848768	2520.175164	2498.15082	2528.545008
4월	3007.434413	3038.868429	3057.931478	3062.430552	3072.792387
5월	3113.429711	3127.508724	3120.343516	3135.880627	3139.776093

77) 출처: 기상청(2022), 기상자료개방포털, 2022.10.27. 접속, <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>

6월	3165.866918	3246.401615	3157.499436	3327.732601	3304.866265
7월	2405.671548	2405.626237	2526.71352	2577.170422	2414.623558
8월	2539.899521	2517.544193	2652.605634	2506.466063	2491.995474
9월	2008.566987	2170.425508	1983.911994	2290.391196	2182.619029
10월	1814.105817	1810.959403	1893.259316	1899.107508	1822.836684
11월	1627.608584	1515.542786	1726.973937	1474.461857	1504.362873
12월	1372.232859	1244.801686	1482.807493	1212.648113	1236.802339
지점	울산광역시	인천광역시	전라남도	전라북도	제주도
1월	1570.45303	1387.047131	1488.842973	1409.997646	1327.110372
2월	2245.699693	2144.117139	2156.346241	2105.986519	2078.939061
3월	2465.889972	2584.294343	2548.281254	2512.64174	2473.977342
4월	2986.096202	3166.153239	3067.342094	3035.985403	2998.382992
5월	3061.004989	3213.643434	3118.598695	3114.071466	3055.411693
6월	3088.401886	3404.746349	3177.170238	3139.063523	2897.455878
7월	2393.756751	2751.586764	2558.446574	2437.060287	2515.080866
8월	2523.181582	2687.992959	2719.702481	2540.096601	2612.939886
9월	1875.914501	2405.664455	2212.062524	2185.255274	2002.308431
10월	1822.160883	1962.95217	1944.151092	1852.723678	1866.183418
11월	1686.387137	1490.078543	1679.501262	1568.499566	1620.101262
12월	1463.357414	1218.317127	1334.005958	1259.515213	1224.366956
지점	충청남도		충청북도		
1월	1375.910422		1375.270502		
2월	2139.748553		2100.458634		
3월	2563.150166		2447.689239		
4월	3116.213536		2956.191378		
5월	3154.264739		3099.627291		
6월	3267.651433		3249.360414		
7월	2471.372693		2376.256136		
8월	2519.902396		2424.057696		
9월	2243.451679		2118.86277		
10월	1869.271445		1787.331961		
11월	1499.875894		1462.381282		
12월	1215.167907		1220.523153		

※ 출처: 기상청(2022) 자료를 저자가 수정

태양열 집열기에 대해서는 총 30개의 제품에 대해 집열기 크기와 투과면적, 집열관 개수 및 재질, 집열 효율, 열 손실율, 집열량, 투과체, 투과율 등의 정보를 수집하였다.

[그림 3-12] 수집한 태양열 제품정보(예시)

제품정보			
품목	태양열집열기	기업소재지	경남김해시주촌면소망길88
세부품목	평판형	제조사	SCLIMPEKS ENERJ SAN. VE TIC. A.S
기업명	주식회사신광이앤에스	제조공장소재국가	터키
모델명	WUNDER-ALS20-KR		
기술세부사항			
구분	내용	단위	
집열기 크기	1,041 x 1,988 x 90	mm	
총면적	2.07	m ²	
투과면적	1.89	m ²	
집열관개수(주관)	2	EA	
집열관개수(지관)	10	EA	
집열관재질	동관	-	
집열효율(전면적)	97	%	
열손실율(전면적)	5±1		
집열량(전면적)	9.63	MJ(m/day)	
집열량(투과면적)		MJ(m/day)	
투과체	저철분 강화유리	-	
투과율	91	%	
흡수판재질	알루미늄	-	
출력(투과면적)	628.7	W/m ²	
설치대수	350	대	
운영기간	30	years	
설치년도	2022	year	

출처: 한국에너지공단

태양열 기술도입에 따른 열에너지 생산량은 투과면적과 집열기 효율, 일사량을 통해 산정하였다. 월별 에너지 생산량의 총합으로 연간 태양에너지 생산량을 도출하였다.

$$\text{태양열에너지 (MJ/month)} = \text{투과면적} \times \text{집열기 효율} \times \text{일사량} \times \text{월별일수} \times 0.004186 (\text{MJ/Kcal})$$

지자체별 최대 생산 가능량은 다른 기술들과 마찬가지로 신재생에너지 백서에서 제시하는 지자체별 시장 잠재량을 활용하였다.

<표 3-28> 지자체별 태양열 시장잠재량

지역	열에너지 생산량(MJ/년)
서울특별시	42,372,000,000
대전광역시	12,798,000,000
부산광역시	28,220,400,000
세종특별자치시	3,992,400,000
울산광역시	14,248,800,000
대구광역시	22,820,400,000
인천광역시	21,448,800,000
광주광역시	14,104,800,000
제주도	10,879,200,000
경기도	127,411,200,000
강원도	30,193,200,000
전라남도	58,338,000,000
충청북도	35,092,800,000
경상남도	69,948,000,000
전라북도	50,695,200,000
충청남도	54,583,200,000
경상북도	74,808,000,000

※ 출처: 한국에너지공단(2020)

차. 지열

지열 에너지 기술은 지구 내부에서 보유하고 있는 열에너지를 냉난방 시스템의 에너지원으로 사용하는 기술이다. 열에너지를 추출하는 깊이에 따라 천부지열과 심부지열로 구분되는데, 지하로 내려갈수록 온도가 높아지는 특성이 있다. 심부지열은 통상 지하 500m 이상 깊이, 천부지열은 지하 300m 깊이 이내에서 지하와 대기 간 온도 차를 활용하여 에너지를 생산한다(신재생에너지 백서, 2020). 하지만 지자체별 300m 이상 깊이에서의 지중온도에 대한 정보를 획득하기 어려운 한계로 본 연구에서는 기술정보를 중심으로 에너지 생산량을 산정하였다.

지열 에너지에 대한 기술 정보는 총 143개 제품에 대해 사용하는 펌프, 냉매, 압축기 정보, 열교환기 정보, 정미능력, 유효전력, 성능계수(Coefficient of performance, COP) 등에 대한 정보를 수집하였다.

[그림 3-13] 수집한 지열 제품정보(예시)

제품정보					
품목	물-물 열펌프 유닛(530kW) 이하	기업소재지	충북 음성군 삼성면 상곡로 55-72		
기업명	대성히트에너지(주)	제조사	대성히트에너지(주)		
모델명	DHGW 150N-C4-02	제조공장소재국가	한국		
기술세부사항					
구분	내용	단위	구분	내용	단위
용량	525000	W	열교환기(제조사)	DANFOSS	-
냉매	R-410A	-	정미능력 (냉방, 지중루프)	564646	W
크기	1670x1964x2072	mm ³	정미능력 (난방, 지중루프)	550202	W
무게	2650	kg	유효전력 (냉방, 지중루프)	107945	W
압축기(형식)	Scroll	-	유효전력 (난방, 지중루프)	139815	W
압축기(수량)	6	대	EER, COP (냉방, 지중루프)	5.23	W/W
압축기(용량)	120000	W	EER, COP (난방, 지중루프)	3.94	W/W
압축기(제조사)	COPELAND	-	설치대수	350	대
열교환기(형식)	Plate	-	운영기간	25	years
열교환기(수량)	2	대	설치년도	2022	year
열교환기(용량)	195,000 / 12,000	W			

출처: 한국에너지공단

지열 에너지 생산량은 다음과 같은 산정식을 통해 계산하였다⁷⁸⁾. 냉·난방에너지 생산시간은 난방의 경우, 겨울철 11월~3월 5개월, 냉방의 경우 여름철 5월~9월 5개월간 1일 12시간씩 가동하는 것으로 가정하여 월간 에너지 생산량을 도출하였다.

$$\text{월간수열 냉난방에너지 (MJ)} = \text{정격용량} \times (1 - 1/\text{COP}) \times 3.6\text{MJ/kWh} \times \text{월별 냉난방에너지 생산시간}$$

[그림 3-14] 본 연구에서 가정한 월별 냉·난방시간

연간 냉난방 시간		
월	구분	시간(h)
1월	난방	372
2월	난방	336
3월	난방	372
4월	냉방	0
5월	냉방	372
6월	냉방	360
7월	냉방	372
8월	냉방	372
9월	냉방	360
10월	난방	0
11월	난방	360
12월	난방	372
Total		3,648

78) 출처: 백길남 외(2015), 「건물 용도별 지열히트펌프 설비 부하율을 적용한 지열에너지 이용량 비교」, 『한국자원공학회지』, 25(4)

신재생에너지 백서에서는 지열에너지에 대한 잠재량을 지자체별로 산정하고 있지 않으므로, 본 연구에서는 지자체별 발전가능량 한계값으로 에너지경제연구원에서 발간한 참고문헌⁷⁹⁾에서 산정한 지자체별 지열 시장 잠재량 자료를 활용하였다.

<표 3-29> 지자체별 지열 시장잠재량

지역	열에너지 생산량(GWh/년)	열에너지 생산량(MJ/년)
서울특별시	2,027	7,297,200,000
대전광역시	533	1,918,800,000
부산광역시	1,209	4,352,400,000
세종특별자치시	167	601,200,000
울산광역시	614	2,210,400,000
대구광역시	953	3,430,800,000
인천광역시	964	3,470,400,000
광주광역시	570	2,052,000,000
제주도	394	1,418,400,000
경기도	5,803	20,890,800,000
강원도	1,353	4,870,800,000
전라남도	2,448	8,812,800,000
충청북도	1,510	5,436,000,000
경상남도	2,968	10,684,800,000
전라북도	2,088	7,516,800,000
충청남도	2,390	8,604,000,000
경상북도	3,189	11,480,400,000

※ 출처: 에너지경제연구원(2021)

79) 출처: 조일현·박정순(2021), 「재생열에너지 보급장벽 분석 및 보급 정책 설계방안」. 『에너지경제연구원 기본연구보고서』, p.50

타. 수열

수열 에너지는 물이 에너지를 축적하는 능력(비열)을 활용하여 냉·난방에 활용하는 것이다. 수열 에너지의 이용은 여름철에는 대기보다 수온이 낮으므로, 물이 가진 냉기를 히트펌프를 통해 난방에 활용하고, 겨울철에는 수온이 대기 온도보다 높으므로, 난방에 활용하는 방식으로 이루어진다. 해수, 하천수, 호소수, 댐 등을 수열원으로 활용할 수 있으나 현재는 주로 해양표층수와 하천수를 열에너지 추출 대상으로 한다.

수열 에너지는 수열원과 대기의 온도 차 혹은 표층수와 심층수 간 수온 차이를 기반으로 생성되므로 지역별·시기별 대기 온도와 수온 정보를 활용하여야 정확한 에너지 생산량을 산정할 수 있다. 하지만 당해연도에는 수온과 해당 수역에서의 기상정보 취득의 한계로 인해 기술 정보를 중심으로 에너지 생산량을 산정하였다.

수열 에너지 설비의 경우, 지열 에너지와 마찬가지로 총 143개 제품에 대해 사용하는 펌프, 냉매, 압축기 정보, 열교환기 정보, 정미능력, 유효전력, 성능계수(Coefficient of performance, COP) 등에 대한 정보를 수집하였다.

[그림 3-15] 수집한 수열 제품정보(예시)

제품정보			
품목	물-물열펌프유닛(530kW이하) ▼	기업소재지	충북음성군삼성면상곡로55-72
기업명	대성히트에너지(스주) ▼	제조사	대성히트에너지(스주)
모델명	DHGW 150N-C4-02 ▼	제조공장소재국가	한국
기술세부사항			
구분	내용	단위	
용량	525000	W	
냉매	R-410A	-	
크기	1670x1964x2072	mm ³	
무게	2650	kg	
압축기(형식)	Scroll	-	
압축기(수량)	6	대	
압축기(용량)	120000	W	
압축기(제조사)	COPELAND	-	
열교환기(형식)	Plate	-	
열교환기(수량)	2	대	
열교환기(용량)	195,000 / 12,000	W	
열교환기(제조사)	DANFOSS	-	
정미능력(냉방_지중루프)	564646	W	
정미능력(난방_지중루프)	550202	W	
유효전력(냉방_지중루프)	107945	W	
유효전력(난방_지중루프)	139815	W	
EER,COP(냉방_지중루프)	5.23	W/W	
EER,COP(난방_지중루프)	3.94	W/W	
설치대수	350	대	
운영기간	25	years	
설치년도	2022	year	

출처: 한국에너지공단

수열 에너지 생산량도 지열 에너지와 동일한 산정식을 통해 계산하였다. 냉·난방에너지 생산시간도 지열에서와 동일하게 난방의 경우, 겨울철 11월~3월 5개월, 냉방의 경우 여름철 5월~9월 5개월간 1일 12시간씩 가동하는 것으로 가정하여 월간 에너지 생산량을 도출하였다.

$$\text{월간수열 냉난방에너지 (MJ)} = \text{정격용량} \times (1 - 1/\text{COP}) \times 3.6\text{MJ/kWh} \times \text{월별냉난방에너지 생산시간}$$

수열 에너지의 경우, 신재생에너지 백서에서 잠재량을 산정하지 않고 있으므로, 지자체별 한계값으로 한국수자원공사의 문헌⁸⁰⁾을 참고자료로 활용하였다. 해당 문헌에서 제공하는 지자체별 발전가능량 한계값은 다음과 같다.

<표 3-30> 지자체별 수열 시장잠재량

지역	열에너지 생산량(MJ/년)
서울특별시	454,145,040
대전광역시	1,738,440
부산광역시	1,954,440
세종특별자치시	2,365,920
울산광역시	25,503,480
대구광역시	0
인천광역시	0
광주광역시	0
제주도	0
경기도	3,763,800
강원도	0
전라남도	62,258,760
충청북도	0
경상남도	19,476,360
전라북도	552,600
충청남도	657,360
경상북도	0

※ 출처: 한국수자원공사(2020)

80) 출처: 한국수자원공사(2020), 「수열에너지 잠재량 분석 및 적지조사」

파. 산림흡수원

탄소중립 수단으로 산림흡수원은 중요한 역할을 수행하고 있으며, 나무의 나이가 어릴수록 탄소흡수량은 높아진다. 그러나 우리나라의 산림은 1970~80년 사이 집중적으로 조림되어 노령화가 빠르게 진행되고 있다. 따라서 산림흡수원의 탄소흡수량을 높이기 위해서는 노령화된 나무는 바이오매스 등 에너지원으로 활용하고, 그 자리에 탄소흡수량이 우수한 나무를 심어 젊은 산림으로 개편하는 것이 중요한 숙제 중 하나다.

토지이용, 토지이용변화 및 산림(Land Use, Land Use Changes and Forestry, LULUCF)은 토지피복을 기반으로 온실가스 배출량을 산정하며, 산림은 온실가스 저장고, 흡수원으로서 중요한 역할을 담당하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 신규 산림 조성(수목 식재)에 따른 온실가스 흡수량을 산정하는 것을 포함하였다. 온실가스 흡수량 산정은 국립산림과학원에서 제공하는 주요 산림수종별 표준탄소 흡수량 정보⁸¹⁾를 이용하였다.

<표 3-31> 주요 산림수종별 표준탄소 흡수량

수종	강원지방 소나무	중부지방 소나무	잣나무	낙엽송	리기다 소나무	편백	상수리 나무	신갈나무	
입령 (년)	10	7.5	3.5	5.4	9.1	4.5	5.2	11.2	8.6
	15	9.6	5.2	10.6	9.4	10.5	8	13.1	11.9
	20	10.1	6.9	11.8	10.5	13.9	8.8	15.9	15
	25	10	15.8	11.6	10	13.8	8.8	14.9	11.8
	30	9.6	12.4	10.8	9.5	12.4	8.2	14	9.3
	35	9	9	9.9	8.9	10.5	7.4	13.1	9.1
	40	8.2	6.4	9.1	8.5	8.7	6.6	12.3	8.4
	45	7.5	4.6	8.3	8.1	7.1	5.8	11.6	7.9
	50	6.7	3.3	7.6	7.9	5.8	5.2	10.9	7.5
	55	6	2.4	7	7.6	4.8	4.6	10.4	7.1
	60	5.4	1.8	6.5	7.5	4.1	4.1	9.8	6.8
	65	4.7	1.4	6.1	7.3	3.5	3.7	9.3	6.5
70	4.2	1.1	5.7	7.2	3.1	3.4	8.9	6.3	

※ 출처: 국립산림과학원(2019)

81) 출처: 이선정·임종수·강진택(2019), 「주요 산림수종의 표준 탄소흡수량 (ver.1.2)」, 『국립산림과학원, NIFoS 산림정책이슈』, 129, p. 13

식재하고자 하는 수종과 임령, 식재면적에 따라 연간 이산화탄소 흡수량을 산정식은 다음과 같다.

$$\text{연간흡수량}(tCO_{2eq.}) = \text{수종별나무식재면적}(ha) \times \text{수종별 } CO_2\text{흡수량}(tCO_2/ha/\text{년})$$

지자체별 탄소흡수원 최대 도입가능 면적의 경우 환경부에서 제공하는 최신 세분류 토지피복도를 활용하였다⁸²⁾. 세분류토지피복 분류상 논으로 분류된 지역 중 ‘경지정리가 안된 논’, 밭 중 ‘경지정리가 안된 밭’, 인공나지 중 ‘채광지역’ 과 ‘기타나지’, ‘자연초지’ 로 분류된 지역을 신규 조림이 가능한 지역으로 분류하여 최대 조림 가능 면적을 산출하였다. 향후 보다 정확한 조림을 통한 탄소 흡수량의 산정을 위해서는 실제 조림 가능한 지역을 추출하고, 지자체별로 산림 조성 계획 및 도입 가능한 수종 정보과 수종 성장에 영향을 미칠 수 있는 기후정보 등을 포함할 필요성이 있다.

<표 3-32> 세분류토지피복도 기반 지자체별 조림 가능면적

지자체	조림가능 면적 (m ²)
제주도	449,880,000
경상남도	1,081,230,000
경상북도	2,205,630,000
전라남도	1,412,650,000
전라북도	1,214,950,000
충청남도	1,412,340,000
충청북도	889,180,000
강원도	1,204,200,000
경기도	1,667,000,000
세종특별자치시	87,290,000
울산광역시	165,950,000
대전광역시	52,450,000
광주광역시	57,590,000
인천광역시	180,720,000
대구광역시	72,190,000
부산광역시	92,250,000
서울특별시	30,170,000

※ 출처: 환경부 세분류 토지피복도(2021) 자료 기반 저자 가공

82) 출처:환경부(2021), 환경공간정보서비스 세분류 토지피복도, 2022.10.27. 접속, <https://egis.me.go.kr/map/map.do>

1.3. 온실가스 감축량 산정

가. 기존 석탄 화석연료 대체효과 분석

기술도입에 따른 온실가스 감축량 산정의 경우, 신재생에너지 기술도입으로 전기와 열을 생산하는 양만큼 기존 화석연료를 기반으로 생성되던 발전량과 열에너지를 대체하는 것을 가정하여 온실가스 감축 효과를 산정하였다. 대체되는 화석연료는 국가승인 배출계수를 활용⁸³⁾하여, 연료별 배출계수가 높은 순으로 우선 대체되는 것으로 가정하였다.

<표 3-33> 연료별 배출계수와 대체 우선순위

성상	연료	연료별 2021년 국가승인배출계수(cT/TJ)	배출계수 기반 대체 우선순위
석탄	국내무연탄	29.705	1
	원료용 수입무연탄	28.99	2
	연료용 수입무연탄	27.32	3
	연료용 유연탄	26.105	4
	원료용 유연탄	25.349	5
석유	부생연료유2호	21.877	6
	B-C유	21.249	7
	B-B유	20.9	8
	B-A유	20.44	9
	부생연료유1호	20.165	10
	경유	20.09	11
	실내 등유	19.926	12
	휘발유	19.731	13
	부탄	18.094	14
가스	프로판	17.63	15
	천연가스(LNG)	15.281	16
	도시가스(LNG)	15.236	17

선정된 기후기술별 발전량, 발열량 합에 해당하는 양만큼 지자체별 2018년 온실가스 배출현황 통계를 기반으로 화석연료의 에너지 생산량을 대체하는 것으로 감축량을 계산하였다. 예를 들어, 경기도 지역에 태양광, 풍력 등 신재생에너지 기술도입으로 61,947GWh의 발전량을 생산할 수 있다면, 기존에 석유(B-C유)로 생산하던 전력을 100% 신재생에너지로 우선 대체하고, 다음으로 온실가스 배출계수가 높은 부생연료유 1호로 생산하던 전력을 100% 대체하고, 다음으로 배출계수가 높은 경유(89%)를 일부 대체할 수 있다. 이렇게 연료별 전력생산량 대체 비율을 연료별 온실가스 배출량에 동일하게 적용하여 기술도입에 따른 온실가스 감축량을 산정하였다.

83) 출처: 환경부(2022), 「2021년 승인 온실가스 배출 흡수 계수」

<표 3-34> 경기도 연료별 온실가스 감축률 계산 (예시)

배출계수 기준순위	성상별	연료별	배출계수 (CO ₂ eq./TJ)	연료별 전력발전량 (GWh)	감축률(%)
1순위	석유	B-C유	21.249	1,636.635	100%
2순위	석유	부생연료유1호	20.165	7.739654	100%
3순위	석유	경유	20.09	6.736709	89%
4순위	석유	실내 등유	19.926	2.22573	0%
5순위	석유	부탄	18.094	0.664888	0%
6순위	석유	프로판	17.63	60.68992	0%
7순위	가스	천연가스 (LNG)	15.281	59360.6	0%
8순위	가스	도시가스 (LNG)	15.236	872.3315	0%
9순위	-		-	-	-
10순위	-		-	-	-
합계				61,947.62	-

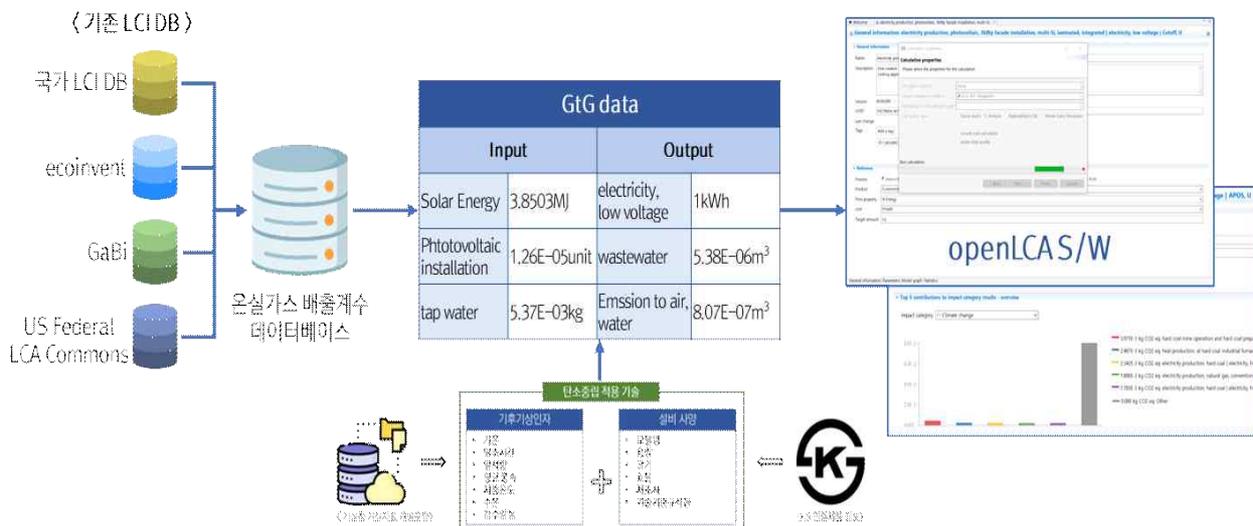
나. LCA 기반 기술도입에 따른 온실가스 배출량 분석

신·재생에너지란 수소·산소 등의 화학반응을 통하거나 햇빛·물·지열·강수·생물유기체 등 재생 가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 에너지이다. 깨끗하고 고갈되지 않는 에너지원을 이용하지만, 이러한 에너지를 수집하여 전기와 열을 만들어내는 과정에서는 온실가스를 배출시킨다. 그러므로 진정한 의미의 친환경을 달성하기 위해서는 신재생에너지 생산과 수송, 발전 시설, 운용 및 유지, 철거에 이르는 전 과정에 대한 온실가스 배출량을 평가하고, 이를 저감시키는 노력도 함께 수반되어야 한다. 이와 같은 맥락에서 2020년부터 운영되고 있는 태양광 탄소인증제는 태양광 모듈의 제조 전 과정에서 배출되는 온실가스 총량을 계량화하여, 단위출력(1kW)당 탄소 배출량을 기준으로 등급을 구분하고, 등급별 차등화된 특전을 적용하고 있다.

이에 따라, 본 연구에서도 기술별 단위출력(1kW), 단위발열량(1MJ)당 탄소 배출량을 산정하여 기술 도입에 따른 온실가스 배출량 분석에 적용하고자 하였다. 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 기반으로 기술별 온실가스 배출계수를 도출하여, LCA를 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때 온실가스 감축량을 각각 제시하였다.

본 연구에서는 LCA를 기반으로 한 기술별 배출 계수는 기 구축된 해외의 전과정목록(Life Cycle Inventory Database, LCI) 데이터베이스를 활용하여 지자체별·기술별 온실가스 배출계수를 도출하는 방법론을 적용하였다. 기후기술에 대한 전과정목록 데이터베이스를 제공하는 Ecoinvent의 데이터베이스를 확보하여 Gate to Gate(GtG) 분석을 수행하고, 본 연구에서 수집한 기술 정보와 기후기술 도입에 따른 발전량/발열량 산정 방법론을 반영하여 GtG를 수정하였다. 본 연구에 적합하게 수정된 데이터베이스를 LCA S/W(open LCA)를 적용하여 LCA simulation을 수행함으로써 온실가스 배출계수를 산정하였다.

[그림 3-16] LCA 기반 온실가스 배출계수 산정 모식도



기술별·지자체별 LCA 기반 배출계수를 산정하였으나, 당해연도에는 기술별로 대푯값을 생성해서 시뮬레이터에 적용하였다(표 3-35). 태양광의 경우, 단결정·다결정·박막 세 가지 세부기술에 대한 배출계수 평균값을 적용하였고, 풍력의 경우 정격출력의 용량에 따라 세 가지로 구분하여 배출계수를 산정하였다. 바이오가스는 19개 설비별 계수를 하나의 평균값으로 생성하였고, 연료전지의 경우 사용 전해질과 연료에 따라 구분하여 배출계수를 도출하였다. 지열과 수열의 경우에는 펌프와 배출계수에 크게 영향을 미치는 냉매의 종류에 따라 구분하여 산출하였다.

<표 3-35> LCA 기반 기술별 배출계수 평균값

부문	기술명	세부기술	배출계수 평균값(tCO ₂ eq./kWh)
태양광	태양광 단결정		0.00011875
	태양광 다결정		0.00013625
	태양광 박막		0.00009417
풍력	정격출력 <1MW		0.00001873
	정격출력 1-3MW		0.00004569
	정격출력 >3MW		0.00016222
바이오가스	바이오가스		0.00001384
연료전지	SOFC		0.00052884
	PEMFC	가스(천연가스, 도시가스)	0.00073880
		액화가스	0.00051626
부문	기술명	세부기술	배출계수 평균값((tCO ₂ eq./MJ)
		냉매	
지열	물-물 지열 열펌프	R-134A	0.00682243
		R-22	0.00891567
		R-452B	0.00475727
		R-410A	0.00819659
	물-공기 지열 열펌프	R-410A	0.01099864
수열	물-물 수열 열펌프	R-134A	0.00599764
		R-22	0.00835573
		R-452B	0.00430515
		R-410A	0.00779714
	물-공기 수열 열펌프	R-410A	0.01051026

1.4. 탄소중립률 산정

본 연구과제에서는 탄소중립률을 2018년 온실가스 배출량 대비 기술도입에 따른 온실가스 감축량 비율로 정의하였다. 기술도입에 따른 온실가스 감축량의 산정은 앞서 제시한 기술도입에 따라 화석연료를 대체함으로써 저감할 수 있는 온실가스 배출량과 기술별 LCA를 기반으로 평가된 기술 적용에 따른 온실가스 배출량을 고려하여 계산되었다.

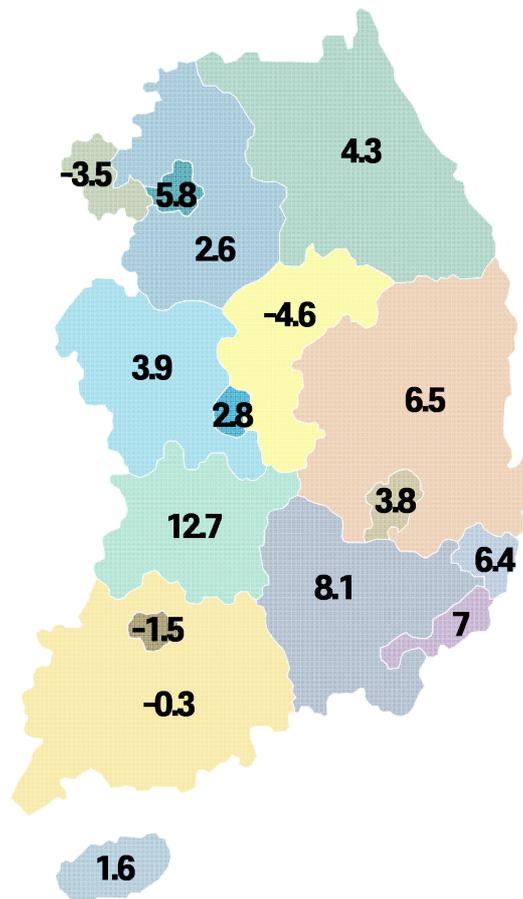
$$\text{탄소중립률(\%)} = \frac{\text{탄소중립기술도입시온실가스감축량}^*}{\text{2018년온실가스배출량}} \times 100$$

탄소중립기술도입시온실가스감축량* = 화석연료대체효과를 통한 감축량 - LCA과정에서의 배출량

앞서 1.1에서 서술한 지자체별 2018년 배출량 대비 2019년 온실가스 감축량으로 산정한 탄소중립률 현황 분포는 다음 그림 3-17과 같다.

[그림 3-17] 2018년 대비 2019년 탄소중립률 분포 현황지도

(단위: %)



2. 시나리오 방법론 연구

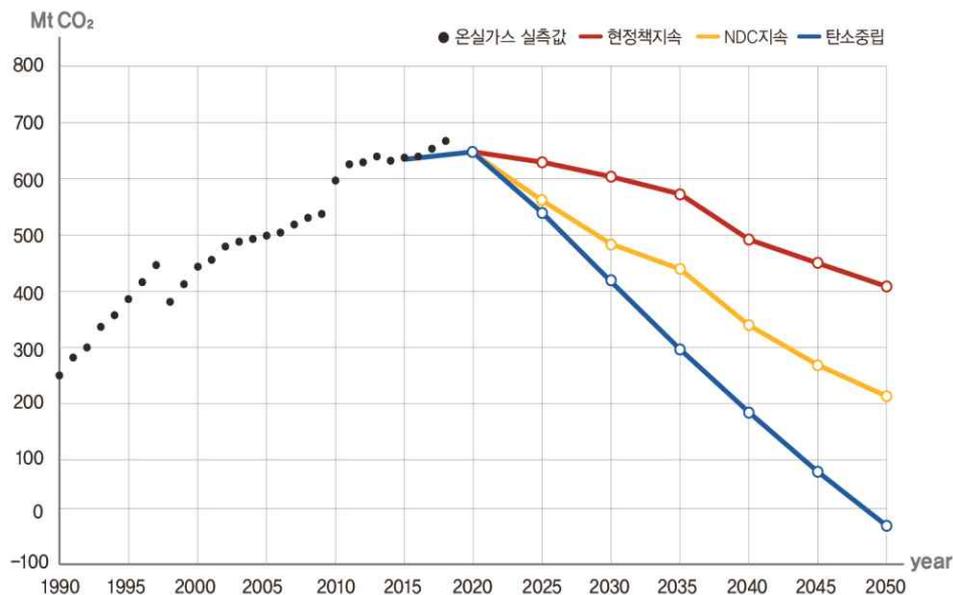
본 연구에서 다루는 시나리오 방법론 연구는 다양한 기술 조합에 따라 공간 단위별 탄소중립률을 평가하고, 지자체의 예산 범위, 탄소중립 관련 정책·기술 목표 및 현황 등 다양한 제약조건 내에서 탄소중립을 달성하기 위한 최적 기술경로(technology pathway)를 제공하는 것을 목표로 한다. 당해연도에는 이와 유사한 목표로 시나리오 분석을 수행한 다양한 선행 연구사례와 도구 등을 검토하여, 향후 CATAS에 도입 가능한 방법론을 모색하였다.

2.1 연구사례 검토

가. 시나리오 평가 및 최적 에너지믹스 도출 연구사례

한국형 통합평가모형 분석 보고서(2021)⁸⁴⁾에서는 한국형 통합평가 모형(GCAM-KAIST1.0)을 활용하여 우리나라의 탄소중립 시나리오를 평가하였다. 한국형 통합평가모형은 IAM(Integrated Assessment Model) 모형 중 GCAM(Global Change Assessment Model)에 국내 현황을 반영한 모형으로 개발되었다. 해당 연구에서는 네 가지 정책 시나리오(현정책지속, NDC 지속, 탄소중립, 탄소중립_NoCAC)를 설정하고, 시나리오별 감축경로를 도출하여 경로별 경제적 부담과 에너지 전환 분석을 실시하고, 이를 기반으로 NDC 목표의 타당성을 평가하였다.

[그림 3-18] 한국형 통합평가 모형 시나리오별 이산화탄소 배출량 평가결과



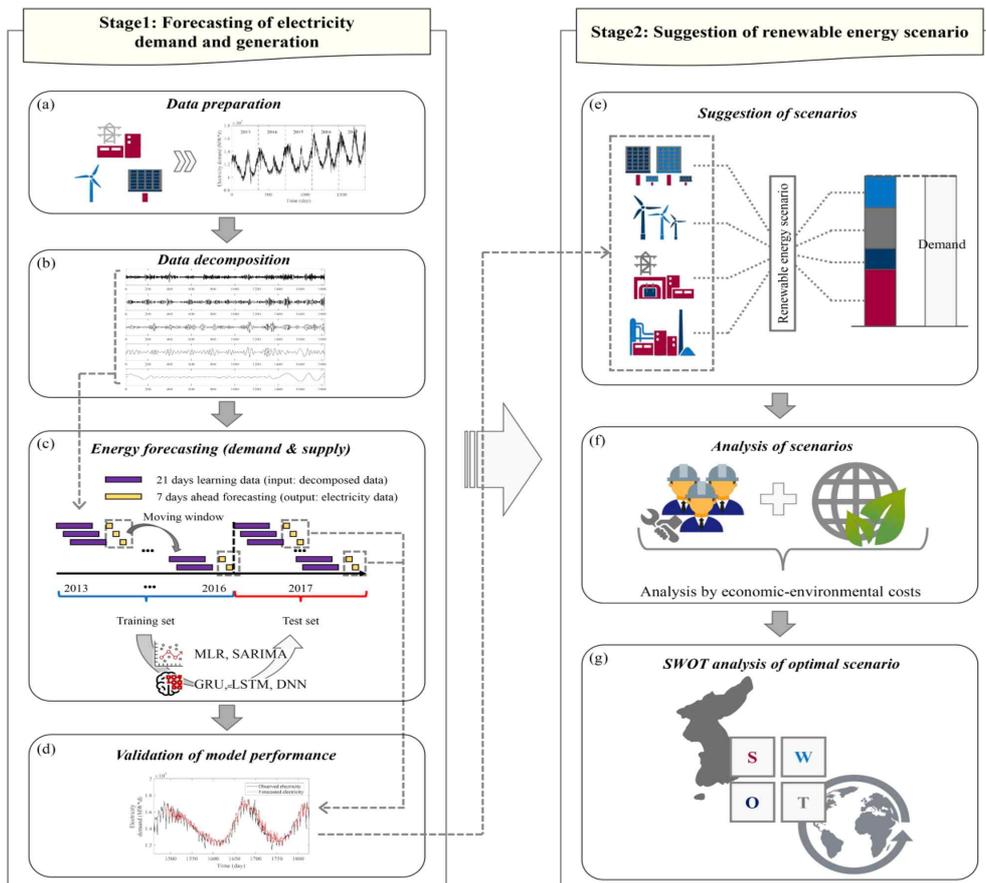
※ 출처: 기후솔루션(2021)

84) 출처: 엄지용 외(2021), 「2050 탄소중립 전환 시나리오 : 한국형 통합평가모형 분석」

해당 보고서 작성 당시 NDC 목표는 상향안을 발표하기 이전인 2017년 배출량 대비 24.4% 감축목표를 반영하였고, 평가결과 NDC 목표 달성 시나리오가 2050 탄소중립 달성하지 못하는 결과가 도출되었다. 이에 따라 재생에너지 대폭 확대와 바이오에너지 탄소포집·저장기술(BECCS)와 토지이용, 토지이용 변경 및 임업(LULUCF), 공기 중 탄소포집 기술(DAC)의 적용과 확대를 고려할 필요성 등 더욱 적극적인 정책 수단의 도입을 권고하였다.

Nam et al.(2020)⁸⁵⁾의 연구에서는 제주도를 대상으로 딥러닝을 기반으로 전력 수요와 공급량을 예측하여 신재생에너지 시나리오를 제안하고, 시나리오별 SWOT 평가를 수행하였다. 현재 제주도의 에너지 계획을 기반으로 base 시나리오를 구성하고, 이 외에 안정적인 전력공급을 위한 다양한 기술이 추가되는 시나리오를 구성하여 사회환경적 비용을 기반으로 각 시나리오가 평가하였다. 연구결과, 최적 시나리오로 통합 가스화 복합사이클, 육상 및 해상풍력발전단지, 태양광 발전소 및 연료전지를 활용하는 것으로 도출되었다.

[그림 3-19] 딥러닝 기반 제주 신재생에너지 시나리오 분석 연구 모식도

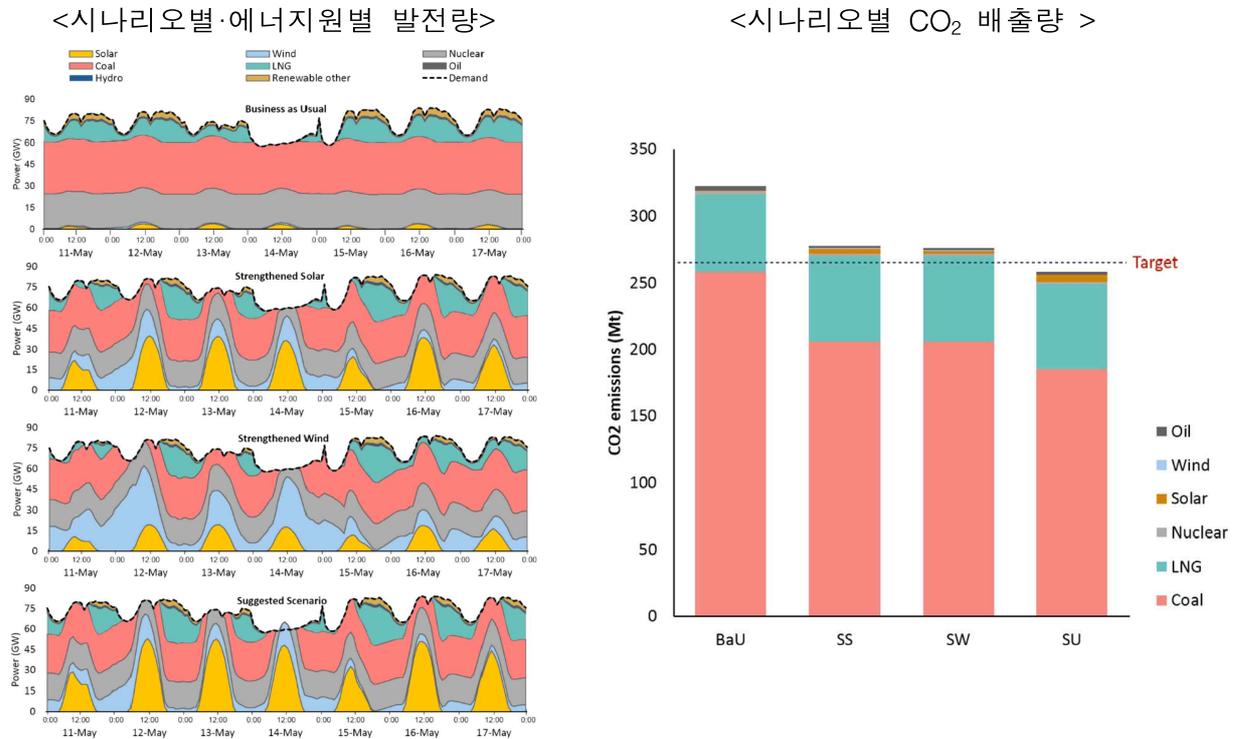


※ 출처: Nam et al.(2020)

85) 출처: Nam, K., Hwangbo, S., Yoo, C.(2020), "A Deep Learning-Based Forecasting Model for Renewable Energy Scenarios to Guide Sustainable Energy Policy: A Case Study of Korea", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 122, p1~18

Park et al.(2019)⁸⁶⁾의 연구에서는 NASA의 MERRA-2 재분석 데이터베이스를 이용하여 우리나라의 시간당 태양광과 풍력의 전력생산량을 모의하고, 이를 바탕으로 정부의 정책을 평가하였다. 재생에너지의 시간적 변동성 분석을 통해 네 가지 재생에너지 시나리오를 구상하여 각 시나리오의 실현 가능성과 에너지 발전량 및 환경적 영향과 비용 분석을 수행하였다. 현 정부의 시나리오는 2030 NDC 목표를 달성하지 못하며, 추가적인 석탄화력발전소의 감축이 필요함을 시사하였다. 또한, 해당 연구에서는 재생에너지의 계절적 변동성을 분석함으로써, 계절별로 다른 에너지 믹스 구성을 제안하였다.

[그림 3-20] NASA MERRA-2 활용 발전량 및 CO₂ 배출량



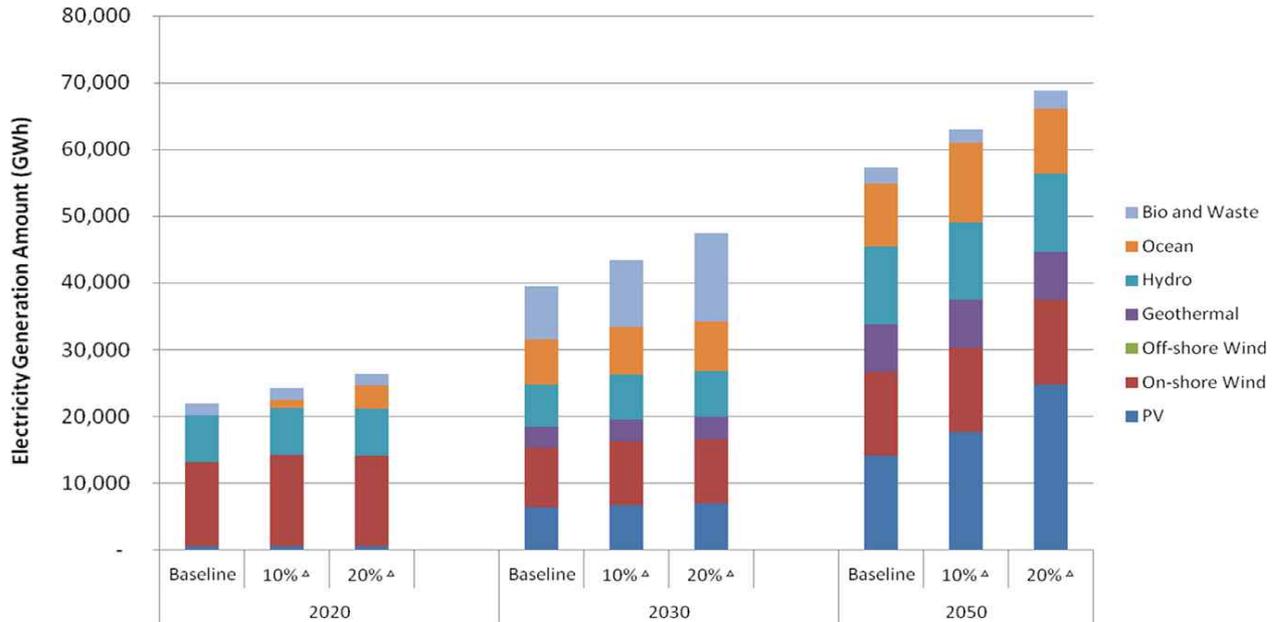
※출처: Park et al.(2019)

Park et al.(2016)⁸⁷⁾은 에너지 시스템 모형들을 검토하고, 상향식 모델인 TIMES 모형을 이용하여 재생에너지 기술의 최적 포트폴리오를 도출하는 연구를 수행하였다. 연구결과 태양광 패널 비용 감소가 가장 잠재성이 높았고, 가장 높은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 기술도입에 따른 비용 감소가 성공적으로 이루어진다면 재생에너지 도입이 온실가스 배출 감소를 줄이는 데 중요한 역할을 담당할 것임을 시사하였다.

86) 출처: Park, M., Barrett, M., Cassarino, T. G.(2019), "Assessment of Future Renewable Energy Scenarios in South Korea Based on Costs, Emissions and Weather-Driven Hourly Simulation", *Renewable Energy*, 143, p1388~1396

87) 출처: Park, S. Y. et al.(2016), "An Analysis of the Optimum Renewable Energy Portfolio Using the Bottom-Up Model: Focusing on the Electricity Generation Sector in South Korea", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, p319~329

[그림 3-21] 시나리오별·시기별 전력생산량 예측값



※출처: Park et al.(2016)

Vidal-Amaro et al.(2015)⁸⁸⁾의 연구는 도시 단위에서 신재생에너지의 최적 조합을 도출한 연구사례이다. 본 연구에서는 시간당 에너지 생산량을 기반으로 에너지 수요를 충족시킬 수 있는 최적의 에너지 믹스를 결정하는 방법론을 제안하였다. 신재생에너지 생산량이 차지하는 비율, 백업 전력량, 잉여전력을 최적화 기준으로 적용하였다. EnergyPLAN 모형을 적용하였으며, 원자력 발전, 지열, 가스터빈, 수력, 풍력, 태양광의 다양한 조합을 통해서 세 가지 시나리오를 생산하였다. 시나리오별 전력공급 가능 비중, 화석연료 기반의 최소 보완용량, 잉여전력을 평가하여 멕시코의 화석연료 기반 전력생산량 감축 계획을 바탕으로 최적의 조합을 제시하였다.

<표 3-36> EnergyPlan 모형 활용 시나리오별 에너지 믹스

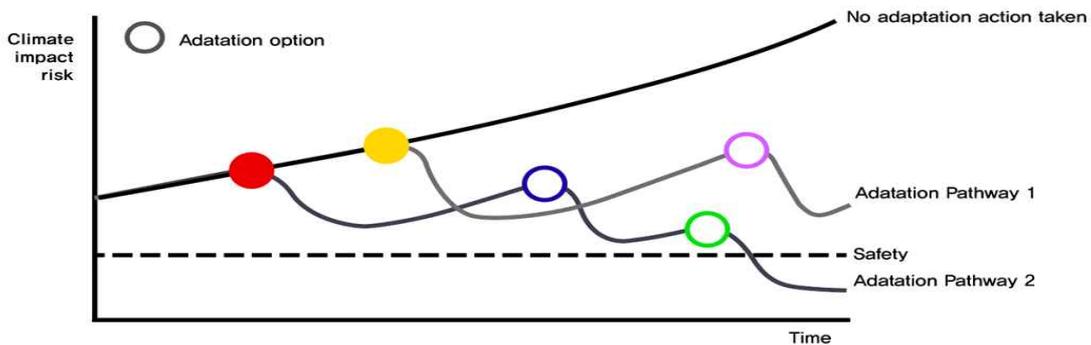
Scenario	Bio (MW)	Wind (MW)	PV (MW)	NG-CC (MW)	Subtotal (MW)	Remaining power (MW)	Total (MW)
HighRES-LowBio	3000	1000	27,000	35,800	66,800	30,493	97,293
		5000	22,000	35,000	65,000		95,493
		10,000	16,000	35,213	64,213		94,706
		15,000	10,000	36,185	64,185		94,678
		20,000	1000	43,000	67,000		97,493
HighRES-MidBio	6500	1000	20,000	32,324	59,824	30,493	90,317
		5000	15,000	31,935	58,435		88,928
		10,000	7000	35,300	58,800		89,293
		15,000	1000	39,628	62,128		92,621
		20,000	1000	39,408	66,908		97,401
HighRES-HighBio	11,000	1000	1000	36,623	49,623	30,493	80,116

※출처: Vidal-Amaro et al.(2015)

88) 출처: Vidal-Amaro, J. J., Østergaard, P. A., Sheinbaum-Pardo, C.(2015) "Optimal Energy Mix for Transitioning from Fossil Fuels to Renewable Energy Sources-The Case of the Mexican Electricity System", *Applied Energy*, 150, p80~96

온실가스 감축 평가 외에도 적응 분야에서도 시나리오 모형을 적용한 최적 적응계획 수립 연구를 실시한 바 있다. 한정희 외(2019)⁸⁹⁾의 연구에서는 기후변화 적응 계획 수립 지원을 위하여 적응계획들을 평가하여 우선순위를 도출하는 방법론을 고찰하고, 시사점을 제시하였다. 적응경로의 경우, 설정된 목표 달성을 위하여 세부사업들의 다양한 조합으로 여러 경로를 제시하여, 적응목표 달성도를 평가한다. 이를 통해 장기계획에서의 의사결정 시점과 기술도입에 따른 효과를 파악하고 시나리오 간 비교를 통해 적응경로의 장단점을 의사 결정자에게 제공할 수 있다.

[그림 3-22] 최적 적응경로 탐색 모식도



※ 출처: 한정희 등(2016)

환경부 R&D 과제로 수행된 「기후변화 적응정책 선정을 위한 통합평가 의사결정지원도구 개발 및 실증화·고도화」 과제⁹⁰⁾에서는 Tier 1, 2 수준에서 다기준 의사결정법(Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA)를 적용하여 적응대책·기술의 평가항목과 지표, 가중치를 도출하였다. Tier 3 수준에서는 적응정책·기술이 영향을 미치는 다양한 측면(경제성, 환경성, 안정성, 사회경제역량 등)을 평가하고, 일련의 시기별로 적절한 적응대책과 기술 조합을 제공하였는데, Tier 3 수준에서는 파레토 최적 솔루션(Pareto optimal solutions) 기법을 통해 기술도입에 따른 영향 저감효과, 효과 편익, 투자비용, 운영비용을 고려하여 최적 경로를 찾는 시나리오를 개발하였다. 저감효과는 기후변화 영향의 저감정도로, 효과편익은 투입된 비용 대비 효과 편익을 순현재가치(Net Present Value, NPV)로 환산해서 적응경로를 평가하였다. 최적화를 통해 저감효과는 극대화되고, 비용이 적은 계획안이 우선 선정되고, 선정된 계획안이 변형을 거쳐 발전되는 형태로 최적의 계획안이 도출된다.

본 연구는 온실가스 감축 평가를 대상으로 수행하므로, 기후변화 적응 분야보다 평가 대상이 되는 대책·기술이 적고, 평가지표 역시 온실가스 배출량으로 명확한 측면이 있어 해당 연구과제에서는 Tier 3 수준의 평가 방법론의 응용이 가능할 것으로 판단된다. 최적 경로의 도출방법론도 활용 가능할 것으로 판단되어 보다 심도 있는 검토를 진행할 필요가

89) 출처: 한정희 외(2019), 「적응경로 기반 지자체 기후변화 적응계획 강화를 위한 의사결정 지원 전략」, 『한국기후변화학회지』, 10(2), p89~102

90) 서울대학교 주관으로 3년간 수행된 연구과제로 국가 및 지자체 수준에서 기후변화 적응정책 지원을 위한 의사결정지원 시스템을 개발하였다. Tier 1,2 수준에서 적응대책·기술 평가기술을 개발하고, 적응대책 기술의 다양한 정량적 평가 및 비용-편익 분석과 최적 적응경로 도출 모형을 제시하였다.

있다.

나. 신재생에너지 도입 가능지역 분석 연구사례

신재생에너지 확대를 통한 탄소중립 실현을 위해서는 기후·환경조건을 고려하였을 때 확보 가능한 자원량과 지자체별 신재생에너지 실 도입 가능지역의 검토가 필수적이다. 본 장에서는 이와 관련한 선행연구들을 고찰하고, 향후 CATAS 시나리오 분석에 반영 방안을 모색하고자 한다.

우리나라의 신재생에너지 자원 잠재량은 한국에너지공단에서 발간한 신·재생에너지 백서(2020)에서 평가된 바 있다. 백서에서는 신재생에너지 자원 잠재량을 이론적 잠재량, 기술적 잠재량, 시장 잠재량으로 구분하여 제시하고 있다. 이론적 잠재량이란 일사량, 풍력밀도 등 자연자원만을 고려하였을 때 이론적으로 활용 가능한 에너지의 양을 의미하며, 기술적 잠재량은 이론적 잠재량 중 지리적·기술적 제약 요인을 고려하였을 때의 에너지 양을, 시장 잠재량은 지원, 규제 등 정책적 요인과 균등화발전원가(LCOE) 등의 경제적 요인까지를 고려하였을 때의 에너지 자원량을 의미한다. 이러한 구분을 바탕으로 백서에서는 태양(태양광·태양열), 풍력(육상·해상), 수력, 지열(천부·심부), 해양(조류·조력·파력·해수 온도차), 바이오, 폐기물에 대하여 잠재량을 평가하였다. 해당 평가 결과는 국가 차원의 신재생에너지 확대 보급 계획의 기반자료를 제공한다. 하지만 지자체 차원에서 기술 도입에 따른 에너지 생산량 및 온실가스 배출량 평가를 수행하기 위해서는 보다 구체적인 정보가 제공될 필요성이 있다.

<표 3-37> 국가 신재생에너지 잠재량 평가결과

구분	세부	설비용량 (GW)			연간발전환산량 (TWh/년, *TWhth/년)			최종에너지 (10 ³ toe/년)			1차에너지 (10 ³ toe/년)		
		이론적	기술적	시장	이론적	기술적	시장	이론적	기술적	시장	이론적	기술적	시장
태양	광	102,455	973	369	137,347	1,314	495	11,811,842	113,004	42,570	28,980,217	277,254	104,445
	열*	102,455	1,917	141	137,347	2,589	187	11,811,842	222,654	16,082	28,980,217	546,279	39,457
풍력	육상	499	352	24	968	781	52	83,248	67,166	4,472	204,248	164,791	10,972
	해상	462	387	41	1,298	1,176	119	111,628	101,136	10,234	273,878	248,136	25,109
수력	-	28	12	3	246	41	9	21,156	3,526	774	51,906	8,651	1,899
지열	천부*	22,236	1,256	334	55,796	932	29	4,798,456	80,152	2,494	11,772,956	196,652	6,119
	심부	350	3	-	3,066	19	-	263,676	1,634	-	646,926	4,009	-
해양	조류	296	72	-	2,595	633	-	223,170	54,438	-	547,545	133,563	-
	조력	13	11	-	111	46	-	9,546	3,956	-	23,421	9,706	-
	파력	129	18	-	1,128	40	-	97,008	3,440	-	238,008	8,440	-
	해수 온도차	발전	64	1	-	557	4	-	47,902	344	-	117,527	844
냉난방*		15	9	-	85	51	-	7,310	4,386	-	17,935	10,761	-
바이오	-	12	10	0	89	72	3	7,654	6,192	258	18,779	15,192	633
폐기물	-	6	4	4	45	32	32	3,870	2,752	2,752	9,495	6,752	6,752
합계		229,020	5,025	916	340,678	7,730	926	29,298,308	664,780	79,636	71,883,058	1,631,030	195,386

※ 출처: 한국에너지공단(2020)

또한, 신재생에너지의 적지 분석 연구도 다수 수행된 바 있다. 특히 풍력·태양광 발전 시설의 입지분석 및 환경적·지리적 요인을 고려한 적지분석 연구가 수행되었다. 풍력의 경우, 풍력자원지도와 경사도, 산사태 위험도, 시가화건조지역, 도로, 국토환경성평가지도 등을 고려하여 배제지역과 적지를 구분하여 공간적으로 제시하는 연구들이 다수 수행되었다. 고정우·이병걸(2016)⁹¹⁾의 연구에서는 운송 및 건설조건을 고려하여 육상풍력단지 설치 시 현업에서 활용할 수 있는 형태의 적지분석 요인과 프로세스에 대해 제시하였다. 앞서 언급한 요인들에 풍력장비이동 및 설치를 위한 수송, 교통시스템, 행정절차, 사회적 환경여건 등을 목록화하여 우선 고려 사항들을 제시하였다.

<표 3-38> 풍력발전 적지지역 탐지 기준

Condition	Sub Condition	Detail Condition	Satisfaction Check	Order of Priority
Wind Resource	Wind Resource Portal	Wind speed more than 5.5 m/sec (elevation 50 m)	Necessary	1
	Terrain Type	Simple/Complex*	Optional	3
	Access Road	Less than 8% of slop	Optional	3
Transportation & Installation	Installation Condition	Check the special construction company	Optional	3
	Connection of electrical grid	Less than 5 to 10 km	Optional	3
Analysis of exclusion condition	Ecological zones	Below class 2	Necessary	2
	Baekdudaegan Mountain Range	Not Including	Necessary	2
	Area of Preservation	Not Including	Necessary	2
	Landslide class	Below class 2	Optional	2
Administrative	Noise & Approval	Separation Distance of Private House	Optional	2
	Military Communication Area		Necessary	5
	Administrative District	Minimize of cities and countries	Optional	5
Social Environment	Land Registration Map	Less than 20% of Private Land	Optional	4
	Civil Complaint	Separation Distance (500 m ~ 1 km)	Optional	2

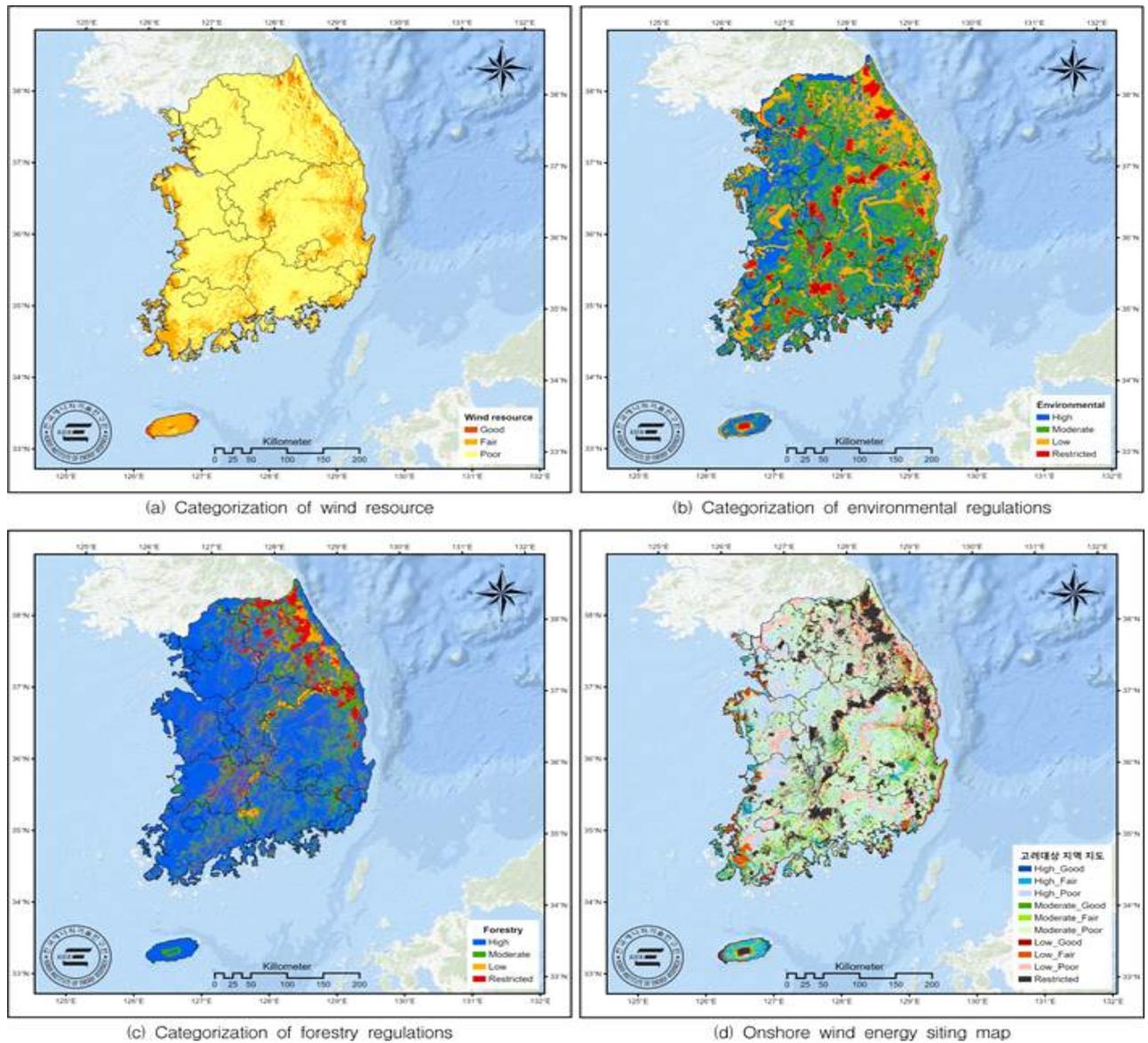
* 경사도 약 17° 이상

※ 출처: 고정우·이병걸(2016)

91) 출처: 고정우·이병걸(2016), 「육상풍력 적지분석 프로세스에 대한 연구」, 『한국환경과학회지』, 25(3), p457~464

황수진 등(2021)⁹²⁾은 육상풍력 입지지도 개발과 고도화 연구로, 풍력자원, 생태·환경적 입지 및 산림입지를 기준으로 등급을 구분하여 육상풍력 적합 지역을 제시하였다. 한국에너지기술연구원에서 제작한 자원지도를 바탕으로, 생태·환경 입지 요건 24종과 산림규제 기반 21종의 입지 요건을 적용하여 고려대상의 적합성 등급을 구분하였다. 해당 연구는 풍력자원을 일정 기준에 따라 입지 적합지역을 등급화하여 제시함으로써, 사용자 편의성을 고려한 형태로 제공된다면 육상 풍력사업 추진 시 활용도가 높을 것으로 판단된다.

[그림 3-23] 육상풍력 고려 대상 지도



※ 출처: 황수진 등.(2019)

92) 출처: 황수진 외(2021), 「육상풍력 입지지도 II: 고려대상 지역 지도화 및 민감도 분석」, 『한국풍공학회지』, 25(2), p55~60

지역 단위에서 보다 실용적인 정보를 제공하기 위해서는 실제 설치가 가능한 지역적 요건에 대해 살펴볼 필요가 있다. 환경부에서는 신재생에너지 시설이 능선 등 산림 생태계를 훼손할 수 있는 지역에 입지하여 환경적 피해가 발생함에 따라 환경적 피해를 예방·최소화하기 위하여 에너지 개발사업에 대한 환경성평가 지침을 마련하고 있다⁹³⁾. 환경영향평가 시 제시하고 있는 입지 조건에 대한 지침은 자연환경과 생활환경, 지형 및 지질 조건 등 환경 전 부문에 걸쳐 제한 조건을 제시하고 있으므로, 신재생에너지 발전시설 입지 분석에 유용한 기초 정보로 활용할 수 있다.

육상풍력 개발사업에 대한 환경성평가 지침에 따르면, 풍력발전시설, 진입로, 송·배전시설 및 기타 부대시설 개발 시 해당 사업지구 및 주변 지역의 동·식물상 분포와 서식환경 및 주요 서식지에 대한 면밀한 조사를 선행되어야 하며, 보호지역의 경우 500m ~ 1km의 이격거리를 두어야한다. 이와 같이 환경부 환경성 평가지침에는 기술별 입지와 관련하여 회피해야할 지역과 입지에 대해 신중한 검토가 필요한 지역 기준을 다음과 같이 제시하고 있다(표 3-39). 향후, 기술별 도입 가능성 평가 시에는 이러한 환경성 기준을 고려한 검토가 필요하다.

<표 3-39> 환경성평가 기준

○: 해당, ◎: 신중검토, ◆: 선정시 검토

구분	검토 지역	풍력		태양광	
		육상	해상	육상	수상
입지 회피 지역	백두대간 및 정맥 보호지역(핵심-완충구역)	○		○	
	주요 산줄기(기맥, 지맥 등) 능선축 중심으로부터 (도명상에서 수평거리) 기맥은 좌우 100m 이내, 지맥은 좌우 각각 50m 이내 지역			○	
	생태경관보전지역	◎		○	
	야생생물보호구역	○		○	
	습지보호지역	○	○	○	
	상수원보호구역	○		○	◆
	유네스코 세계 자연유산구역 (세계유산법 제10조 제2항 제 1호)		○	○	
	환경보전관련 용도 등으로 지정된 법정보호지역			○	
	해양보호구역		○		
	자연공원		○		
	천연보호구역		○		
	국내·외 법정보호종의 집단번식지		○		
	멸종위기야생생물 및 천연기념물 등 법정보호종의 서식지 및 산란처	◎		○	
	주요 철새도래지 등 법정보호종의 서식환경 유지를 위하여 보존이 필요한 지역	◎		○	◆
	수질보전 특별대책지역				◆
	수변구역				◆
	생태·자연도 1등급(식생보전 I-II등급, 도시생태현황지도가 있는 경우 비오톱 I-II등급) 지역	◎		○	
	생태·자연도 2등급이면서 식생보전등급 III등급 이상인 지역			○	
산사태 및 토사유출 방지를 위하여 경사도 15° 이상이면서 식생 보전등급 IV등급 이상인 지역 (경사도 산정방법은 「산지관리법 준용」)	◎		○		

93) 출처: 환경부(2022), 「법령·정책」 환경정책, 2022.10.30. 접속, <http://www.me.go.kr/>

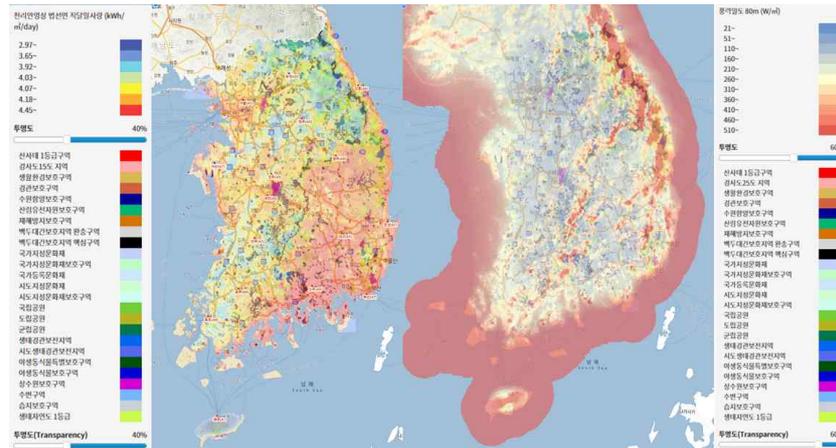
	과도한 지형 훼손을 방지하기 위하여 지형변화지수 1.5 이상 발생이 예상되는 지역			○	
	문화재보호구역			○	
	경관보전이 필요한 지역			○	
	생태계변화관찰 지역			○	
	겨울철 조류 동시센서스 조사지역 등 생태계조사가 지속적으로 실시되는 지역		◎ (조류분야)	○	
	산사태위험 1, 2등급지 (사업지구가 산지인 경우에만 해당)			○	
입지 신중 검토 지역	생태·자연도 2등급지 (식생보전Ⅳ등급)이면서 경사도 15° 이하 지역			○	
	동물 이동로가 되는 주요 능선 및 계곡, 산림-수계 연결지역 등 생태적 보전가치가 높은 지역 (동물 이동경로 훼손 및 절·성토로 인한 지역 생태축 단절 등이 우려되는 지역)	○	○ - (조류, 해양 동·식물상 이동경로)	○	
	식생보전Ⅲ-Ⅳ등급의 양호한 산림으로 둘러싸여 있거나 산림 내부로 침투하는 산림 지역 (예시: 산림 내부로의 100m 이상 진입로 개설이 필요한 지역)			○	
	산림으로 둘러싸여 있거나 산림 경계와 연결한 경작지의 경우 경사도 20° 이상인 지역			○	
	입지회피 보호지역의 반경 1km 이내 인접지역으로서 환경적으로 민감한 지역			○	
	전체 또는 일부지역이 개발이 가능한 지역 중에서 인근에 서식하는 법정보호 야생생물에게 주요한 서식환경을 제공하는 지역	○		○	
	법정보호종은 아니나 무리를 지어 번식·휴식하는 동물(조류, 양서·파충류 등)의 서식지, 지역의 전통문화나 전통지식에 따라 보호가 필요하다고 여겨지는 동·식물 서식지(예시: 반딧불이·가재 서식지 등)	○	○ - (조류, 해양 동·식물상 이동경로)	○	
	입지 회피지역에 해당되지 않는 생태축의 능선부 좌우 일정 이격거리 (10m~50m 범위, 사업지역 여건에 따라 협의기관이 판단) 이내의 지역	○		○	
	노두 등 특이지형·지질, 폭포, 용소, 산간습지, 석호, 사구, 해빈 등이 분포하고 있어 자연경관 및 역사·문화·향토적 측면에서 보전가치가 있는 지역	○		○	○
	수질보전대책의 시행에도 불구하고 주요 하천, 저수지 및 산간 계류 등 토사유출로 인한 수질 및 육수생태계에 영향이 우려되는 지역			○	
	수려한 경관, 특색 있는 자연경관지역, 경관 관련 보전용도지역	○	○ (해양경관 분야)	○	○
	랜드마크(대표·상징경관), 역사문화자원 등 경관자원에 대한 영향이 예상되는 지역	○	○ (해양경관 분야)	○	
	자연·문화적 경관이 중요한 조망점에서 경관 시뮬레이션 등을 통해 자연경관 영향을 검토한 결과 차폐가 되지 않을 것으로 우려되는 지역	○		○	
	특정도서		○		
	절대보전무인도서		○		
	환경보전해역		○		
	특별관리해역		○		
	수산자원보호구역		○		
	보호수면		○		
	수산자원관리수면		○		
법정보호종의 주요 이동경로	○	○			
수산자원 증대를 목적으로 조성된 인공어초 및 바다숲 지역		○			

※ 출처: 환경부(2022)

다. 시나리오 분석을 위해 활용 가능한 공간정보 검토

신재생에너지 자원과 관련하여 여러 기관에서 다양한 공간정보를 제공하고 있다. 한국에너지기술연구원 신재생에너지 센터에서는 태양, 풍력, 수력, 해양, 바이오매스, 폐기물, 지열, 수소에 대해 웹 기반 자원지도를 제공하고 있다. 일사량, 풍속, 유량 등 기상자원 정보와 25개의 법적 환경규제지역을 중첩하여 확인할 수 있다⁹⁴⁾.

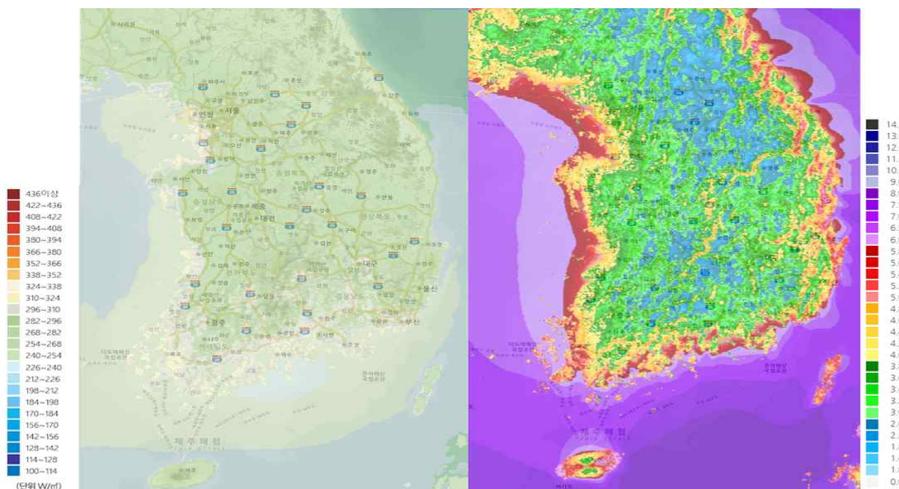
[그림 3-24] 천리안 영상 법선면 직달일사량(좌), 풍력밀도(우) 및 법적 환경규제지역



※ 출처: 한국에너지기술연구원(2022)

기상청 기상자료개방포털⁹⁵⁾ 및 고해상도 기상·기후정보 홈페이지⁹⁶⁾에서는 태양광자원지도와 풍력자원지도를 제공하고 있다. 고해상도 기상·기후정보 홈페이지에서는 실시간 기상자원 단기예측정보와 100m 해상도의 기상자원지도 및 미래기상자원지도를 제공하고 있다.

[그림 3-25] 태양광기상자원지도(좌), 풍력기상자원지도(우)



※ 출처: 기상청(2022)

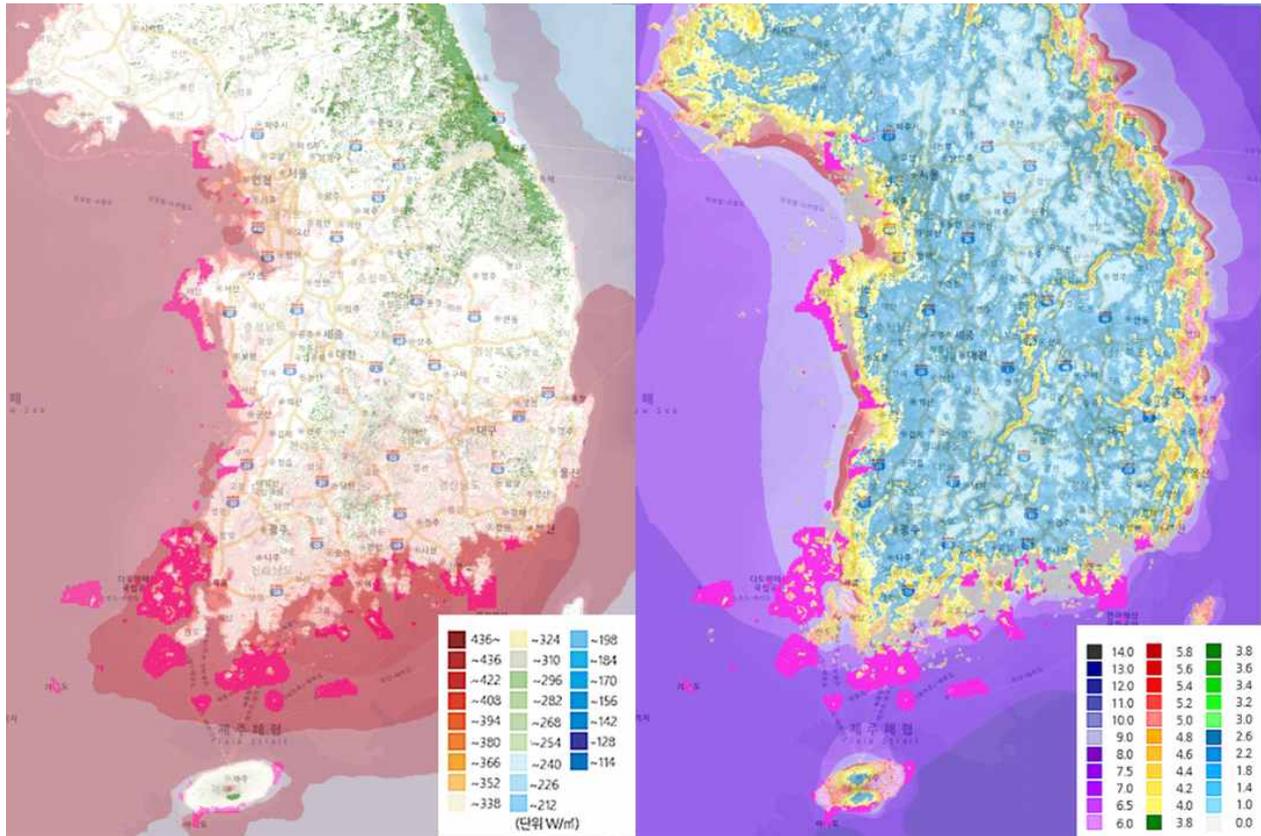
94) 출처: 한국에너지기술연구원(2022), 「신재생에너지자원지도」

95) 출처: 기상청(2022), 「기상자료개방포털」

96) 출처: 기상청(2022), 「고해상도 기상·기후정보」

환경부에서 제공하는 환경공간정보서비스에서는 기상청 기상자원지도와 생태자연도, 철새서식지를 중첩해서 제공하고 있으며, 해상풍력에 대해서는 ‘회피검토지역’ 과 ‘산중검토지역’ 을 명시해서 제공하고 있다⁹⁷⁾.

[그림 3-26] 태양광기상자원지도(좌), 풍력기상자원지도(우) 및 회피검토지역(회색)과 산중검토지역(핑크색)



※ 출처: 환경부(2022)

위와 같이 여러 곳에서 다른 방식으로 생성한 자원지도를 제공하고 있으며, 제공형태 및 제공정보도 다양하다. CATAS에서 기술도입 가능지역을 추출하고, 에너지 생산량 및 온실가스 감축량을 산정하기 위해서는 위와 같은 기관들과의 보다 긴밀한 협력과 정보 공유가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 고해상도 기상자원지도에 여러 법적 규제지역 및 환경 영향 회피를 위해 설치 불가지역뿐 아니라 설치 권고지역 등 지자체 차원에서 적극적인 계획수립에 활용할 수 있는 형태의 정보가 유용할 것으로 사료된다.

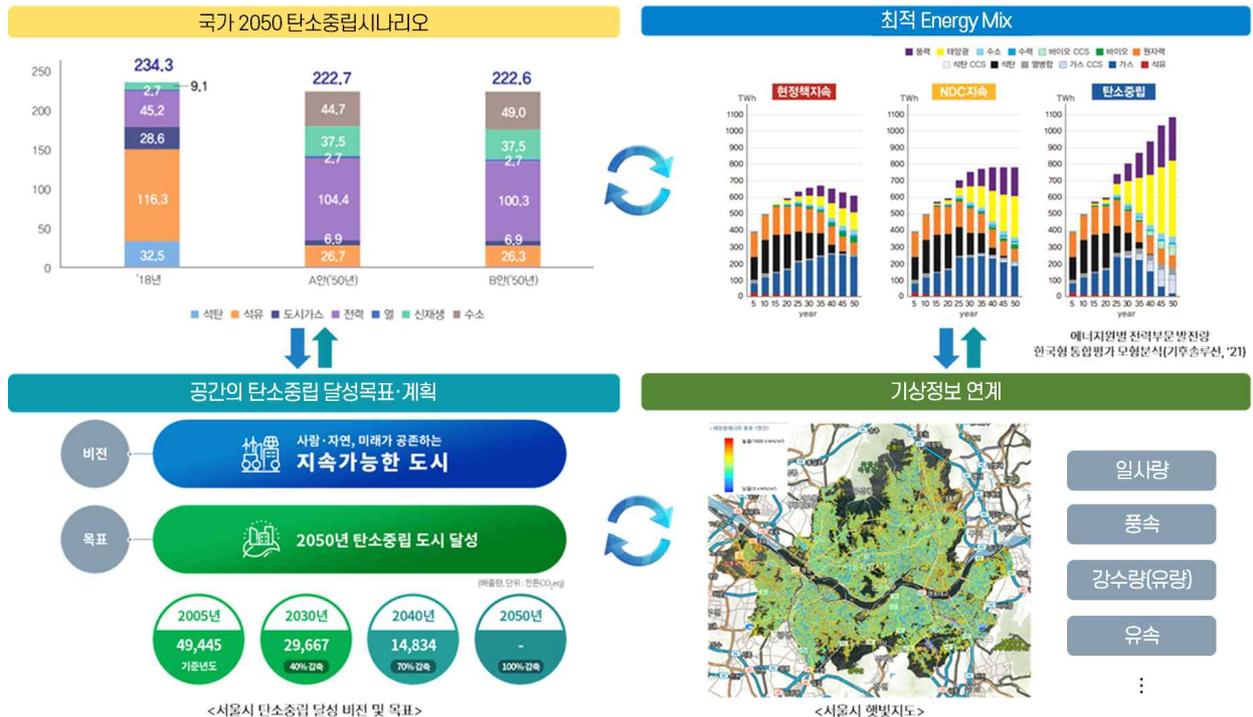
97) 출처: 환경부(2022), 환경공간정보서비스, 2022.10.30. 접속, <https://egis.me.go.kr>

2.2 향후 시나리오 도입방안

탄소중립은 다양한 층위에서 계획이 수립되고, 계획 간 연계와 유기적 평가, 지속적 수정·보완이 수반되어야 달성 가능한 장기 목표이다. CATAS는 궁극적으로 국가 탄소중립 실현을 위한 공간별 기술 적용성 평가 및 단계별 기술도입 전략수립 도구로서 기술적 관점에서 최적 시나리오 제시를 목표로 한다.

국가 차원의 장기 전력수급 계획의 경우, 전력 수요를 전망하고 이를 충당할 수 있는 발전설비 보급 계획을 수립하며, 신재생에너지 확대계획을 반영하여 연도별·에너지원별 보급 목표치를 제시하고 있다. 하지만 지자체 등 하위 공간단위에서는 탄소중립 경로에 대한 구체적인 계획수립은 미흡한 상황으로, 해당 공간의 탄소중립을 달성하기 위한 최적 에너지믹스 계획이 수립될 필요성이 있다. 또한, 지속적으로 발전하는 탄소중립 기술을 반영하여 실현 가능성을 진단함으로써 보다 현실적인 탄소중립 달성 계획수립을 지원할 수 있다. 이에 따라, 향후 연구에서는 비용 최소화, 신재생에너지를 활용한 전력생산량 최대화, 온실가스 배출량 최소화 등을 최적화 조건으로 반영하여 공간별 최적 에너지믹스 경로를 제안하는 연구를 수행하고자 한다. 또한, 이와 더불어 기상 현황 등과의 연계를 통해 기술별 최대 생산가능량을 평가하고, 신기술도입에 따른 비용 및 탄소중립률 달성의 기여 효과를 분석하여 제시함으로써, 현황을 진단하고 향후 방향성을 제시하고자 한다.

[그림 3-27] CATAS 시나리오 분석 개념도



제 3 절 모형의 웹기반 프로그램 개발

1. 개발 프로세스

웹 기반 탄소중립률 평가 프로그램은 클라우드를 기반으로 구축되며, 탄소중립률 산정 모형과 경제성 분석 모형을 기반으로 공간별 기술적용 효과 및 탄소중립률을 사용자가 손쉽게 계산할 수 있도록 구성되었다. 프로그램의 목표시스템 구성도는 그림 3-28과 같다. 공간의 지역정보, 기후정보, 온실가스 배출량, 기술정보 등은 통합 데이터베이스로 구축되며, 웹기반의 사용자 편의성을 고려한 직관적 인터페이스를 통해 구현되었다.

[그림 3-28] 프로그램 개발 프로세스



1.1 개발 방법론

프로그램의 효율성 및 안정성을 고려한 개발공정은 계획단계, 아키텍처 단계, 점진적 개발단계, 인도단계로 구성되어 있으며, 프로그램 내 단위 모듈의 성격에 따라 최적화된 개발방법론이 적용되었다. 컴포넌트 개발공정은 분석, 설계, 구현, 검증 순으로 진행되며, 상세 프로세스 작업 흐름은 요구사항, 분석/설계, 구현, 시험, 이행, 비즈니스 모델링 순으로 이어진다(그림 3-29).

[그림 3-29] 프로그램 개발 방법론 및 적용 방안

개발 방법론



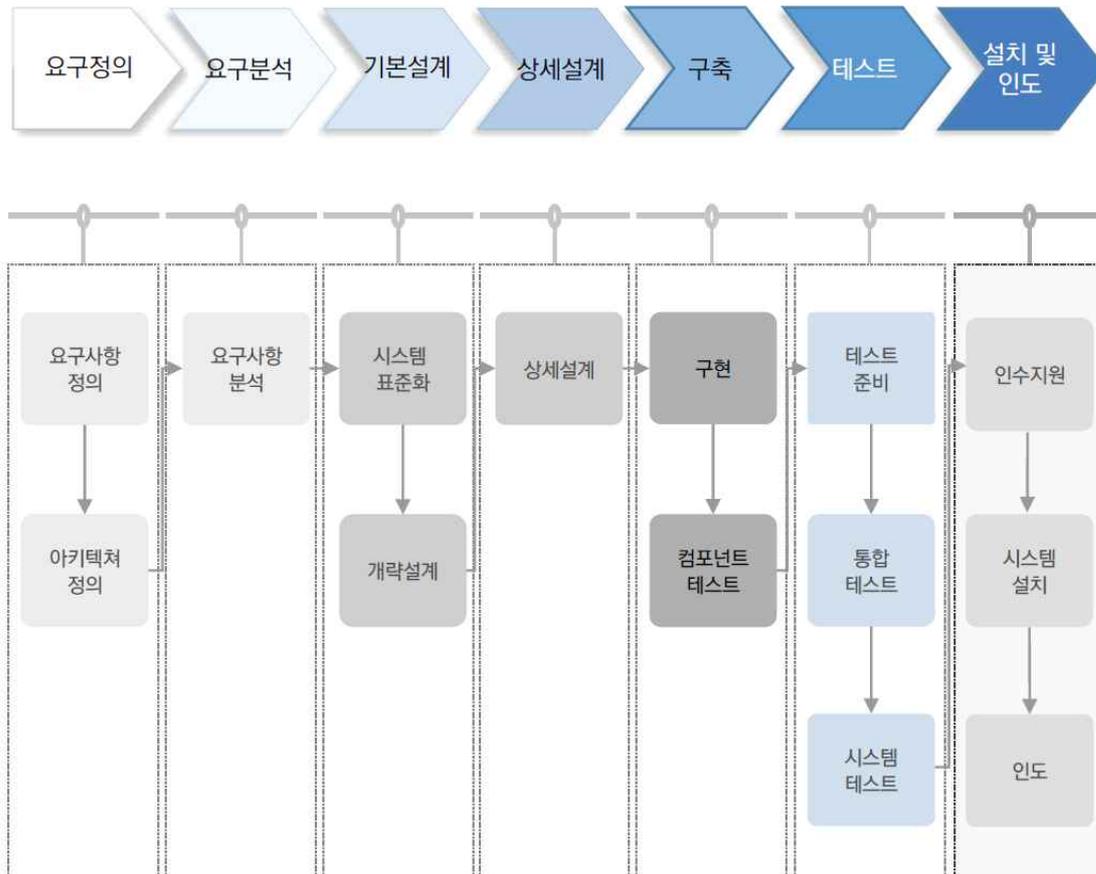
적용방안



1.2 상세 개발 프로세스

요구정의 단계에서는 개발 업무의 범위가 정의되고 상위수준의 요구사항이 정의된 후, 이를 만족하는 초기 시스템의 아키텍처 정의가 이루어진다. 요구분석 단계에서는 현행 업무 및 시스템 분석을 통한 요구사항의 파악과 함께 프로세스 및 엔티티 모형의 구성 및 정의가 만들어지며, 입출력 정보의 정의, 프로세스 및 엔티티와의 상호연관성 분석을 통한 분산 정보가 작성된다. 기본설계 단계에서는 요구사항의 구현 방법 결정되고 시스템의 사용자 인터페이스 설계 및 프로토타입이 정의되며, 개발하는 시스템의 목적에 따라 테이블이나 프로그램을 처리 노드에 할당된다. 상세설계 단계에서는 개발시스템의 설계 및 논리적 데이터 구조를 물리적 구조로 변환되고 단위테스트 요구사항 작성 및 통합테스트 요구사항이 갱신되며, 신규 애플리케이션을 업무에 적용하기 위한 이행계획서를 작성한다. 구축단계에서는 설계 명세를 바탕으로 프로그램 원시코드를 구현하고, 단위테스트를 통한 원시코드 검증하며 사용자 및 운영자 설명서 등이 작성된다. 테스트 단계에서는 사용사례 다이어그램 단위의 독립적인 시험을 수행하며 전체시스템 검증을 수행한다. 마지막 설치 및 인도단계에서는 시스템 요구기능 및 성능이 정확히 반영되었는지 검증하게 된다.

[그림 3-30] 개발 프로세스 상세 절차 구성도

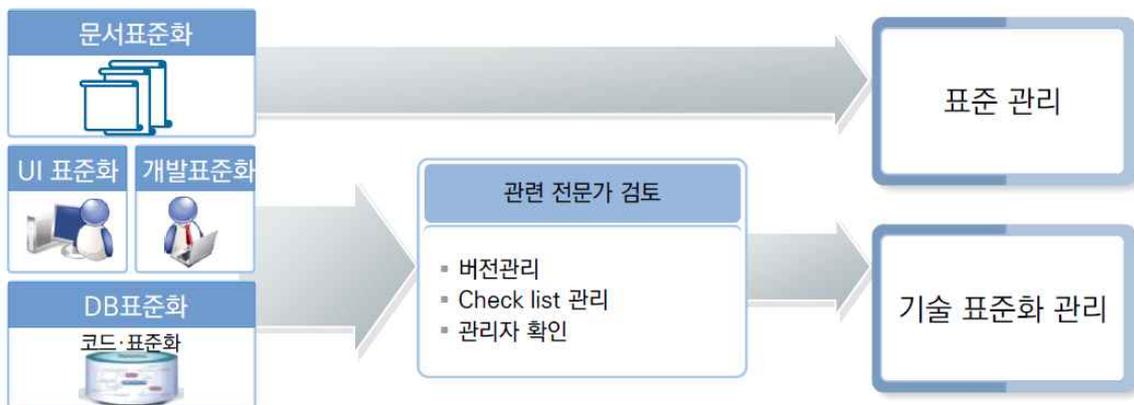


1.3 표준화 적용

구축된 시스템과 센터 내부 타 시스템 간 지속적으로 발생하게 될 기능 및 데이터 교환을 위한 품질보장, 의사전달 기능 향상 및 유지보수가 용이성 확보를 위해 표준화 요소가 고려되어야 한다. 시스템의 표준화 내용은 크게 문서 표준화, UI 표준화, 공통 Business Logic 개발 표준화, 그리고 DB객체 명명표준화로 이루어져 있으며, 각각의 상세 내용은 그림 3-31과 같다. UI, 비즈니스로직, DB표준화는 모두 기술 표준화 관리로 구분된다.

[그림 3-31] 시스템 표준화 내용 및 방법

구분	표준화 내용	
문서 표준화	프로젝트를 수행하는 과정에서 작성되는 주요 산출물에 대한 구성형태를 제시함	
	<ul style="list-style-type: none"> • 문서작성환경 • 문서식별번호 • 문서명명규칙 • 문서버전관리 	<ul style="list-style-type: none"> • 문서의 종속관계 • 파일보관 • 문서의 구성 • 문서의 서식
UI 표준화	<ul style="list-style-type: none"> • 정확성 - 관련분야 필수 정보 제공을 위한 UI제공 • 통일성 - 유사한 패턴의 화면 제공 	<ul style="list-style-type: none"> • 효율성 - 사용자 경험(UX)을 고려한 화면구성 • 가독성 - 직관적인 표현의 화면구성
	프로그램 및 공통 Business Logic에 상호 연관성이 밀접하지 않도록 설계하여 유지보수가 용이하도록 함	
공통 Business Logic 개발표준화	<ul style="list-style-type: none"> • 환경구성 • 용어사용 • 파일명명규칙 	<ul style="list-style-type: none"> • 공통모듈의 정의 • 단위모듈의 정의 • 프로그램 코딩 표준의 정의 • 버전관리 및 운영적용 절차 정의
	각 업무 분야에서 공통적으로 사용되는 용어를 도출하여 DB객체에 대한 표준화된 표기법을 적용하여 유지보수의 능률을 향상시키도록 함	
DB 객체 명명표준화 (코드·표준화)	<ul style="list-style-type: none"> • 환경구성 • 용어사용 • 테이블설계규칙 • 인덱스 규칙 	<ul style="list-style-type: none"> • 필드(속성) 규칙 • 프로그램 규칙 • 공통코드 정의 • 버전관리 및 운영적용 절차 정의



1.4 적용기술

시스템의 성능 및 효율성 확보를 위한 기술 표준에 최적화된 적용 기술의 구성을 통해 기술 아키텍처를 구성한다. 적용기술에는 크게 REST방식, JSON방식, 그리고 Angular 기술이 있다. REST방식을 적용하여 연계성능을 최적화 하고, JSON방식을 통해 Web GIS 표출 및 자료전송을 최적화 하며, Angular를 활용해 페이지 반응속도를 향상시킬 수 있다. 이와 같은 기술을 적용하여 시스템의 데이터 교환을 URL리소스 접근 방식으로 개선하여 소스를 경량화시키는 것을 통해 최적화 할 수 있으며, 지도서비스 구현 시 엔진으로부터 사용자에게 자료를 전송하는 속도를 향상, 또한 Edge, Chrome을 비롯한 다양한 브라우저에 대한 프로그램의 반응속도를 보장할 수 있다.

[그림 3-32] 시스템 효율성 및 안정성을 위한 기술적용



가. REST(Representational State Transfer) 방식

REST는 경량화된 소스코드가 특징인 기술방식으로 시스템의 설계와 구축에 있어 유연성을 보장하는 데이터 교환 적용 기술이다. 또다른 온라인 데이터 전송 방식인 SOAP(Simple Object Access Protocol)와 비교하였을 때, REST는 URL방식으로 리소스에 접근 하며, 서비스 정보요청 코드가 짧고 개방형 시스템에 적절하다. 해당 방식은 데이터 포맷으로 JSON을 사용한다.

[그림 3-33] REST와 SOAP 간의 기술 특성 비교

구분	REST	SOAP
요청방식	• HTTP	• 전송 중립 방식 (FTP, SMTP, MQ)
리소스 접근 방식	• URL	• XML
웹 전송방식 사용 목적	• 리소스 조작	• 메시지 교환
보안	• 인증키 방식	• 추가 인프라
구현시간	• 리소스 중심	• 인터페이스와 메시지를 중심
서비스 방법	• 개방형 시스템에 적절	• 폐쇄 시스템에 적절

지도서비스 상의 REST와 SOAP 간의 서비스 정보 요청 소스 비교

SOAP 방식 소스

```

MapService_MapServer mapservice = new MapService_MapServer();
mapservice.Uri = "http://www.wamis.go.kr:7749/arcgis/rest/services/WAMIS_WK/MapServer/";
MapServerInfo mapinfo = mapservice.GetServerInfo(mapservice.GetDefaultMapName());
MapDescription mapdesc = mapinfo.DefaultMapDescription;
ImageType imgtype = new ImageType();
imgtype.ImageFormat = esriImageFormat.esriImagePNG;
imgtype.ImageReturnUrl = esriImageReturnUrl.esriImageReturnURL;
ImageDisplay imgdisp = new ImageDisplay();
imgdisp.ImageHeight = 1024;
imgdisp.ImageWidth = 693;
imgdisp.ImageDPI = 96;
ImageDescription imgdesc =
imgdesc.ImageDisplay = imgdisp;
imgdesc.ImageType = imgtype;
MapService_MapServer.Env
env.XMin = -121726.648896;
env.XMax = -46114.7255278;
env.YMin = 691074.9767067;
env.YMax = 503955.1246118;
mapdesc.MapArea.Extent = e
MapImage mapimg = mapse
                    
```

REST 방식 소스

```

http://www.wamis.go.kr:7749/arcgis/rest/services/WAMIS_WK/MapServer/export?dpi=96&transparent=true&format=png8&bbox=-121726.64889645407%2C-46114.72552789235%2C691074.9767067972%2C503955.12461180804&size=1024%2C693&f=image
                    
```

REST의 장점

- REST 방식이 SOAP 방식에 비해 개발이 용이하여 초보자도 개발 가능 (URL 방식)
- REST 방식이 SOAP 방식에 비해 경량화된 소스 코드
- 별도의 솔루션 없이 인증 키 방식으로 보안 관리 적용 가능

나. JSON(JavaScript Object Notation) 방식

데이터베이스의 결과 전송을 위한 방식으로 JSON과 XML 방식이 사용되며, 이중 JSON은 경량의 데이터 교환을 위한 방식으로, 시스템 간 데이터 연계 및 교환에 있어 안정성을 확보할 수 있다. JSON의 대표적 장점으로서는 같은 양의 정보를 전달할 때 더 적은 용량으로 데이터를 전송할 수 있다는 것과, 전송된 데이터를 직렬화 또는 데이터 전송을 위한 역직렬화 할 때 XML보다 빠른 속도로 처리할 수 있다는 것이다.

[그림 3-34] JSON과 XML의 구조 비교

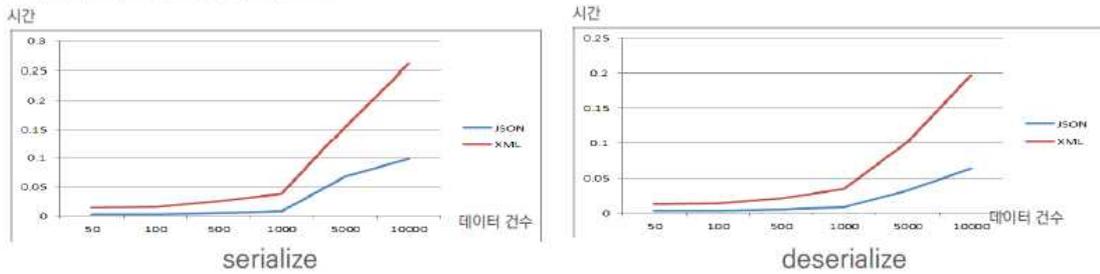
<pre> 1 <employees> 2 <employee> 3 <name>John Crichton</name> 4 <gender>male</gender> 5 </employee> 6 <employee> 7 <name>Aeryn Sun</name> 8 <gender>female</gender> 9 </employee> 10 </employees> </pre> <p style="text-align: center;">XML 방식</p>	<pre> 1 { 2 "employees": [3 { 4 "name": "John Crichton", 5 "gender": "male" 6 }, 7 { 8 "name": "Aeryn Sun", 9 "gender": "female" 10 } 11] 12 } </pre> <p style="text-align: center;">JSON 방식</p>
--	--

JSON의 장점

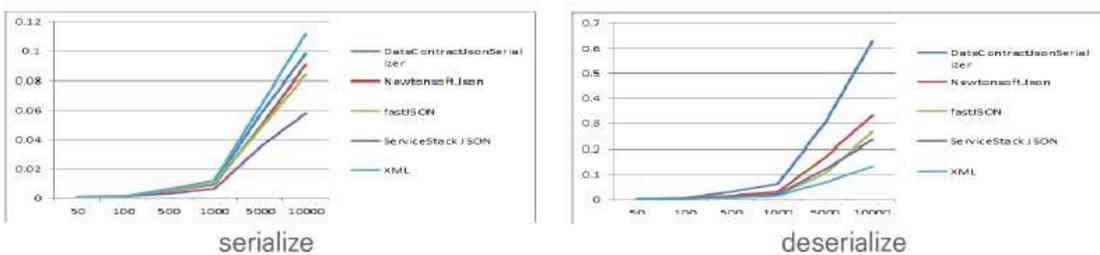
- 같은 정보를 전달함에 있어서 JSON이 XML보다 더 적은 용량으로 데이터를 전송하게 됨
- 전송된 데이터를 Serialize(직렬화)하거나 데이터 전송을 위한 Deserialize(역직렬화)에 있어서 XML보다 빠른 속도로 데이터가 처리됨

JSON과 XML의 Serialize(직렬화) 및 Deserialize(역직렬화) 속도 비교

Java에서의 시스템 시간값 비교



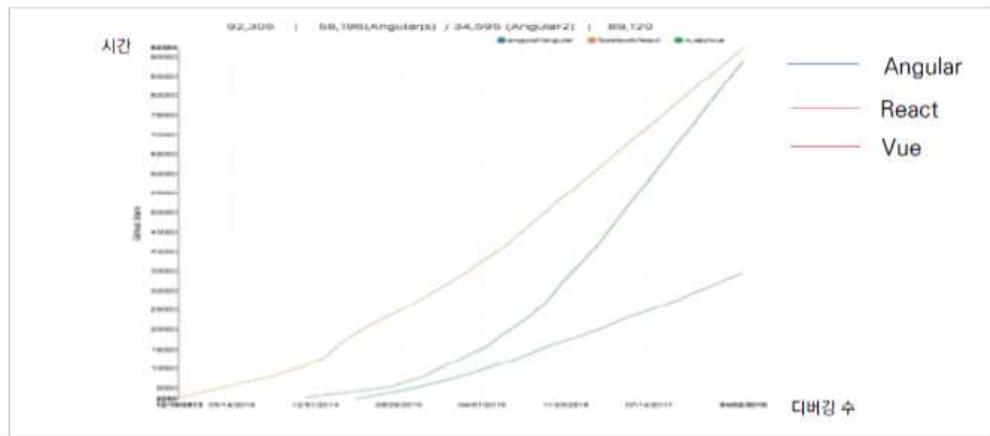
C#에서의 시스템 시간값 비교



다. Angular 방식

Angular 는 SPA(Single Page Application) 개발을 위한 구글의 오픈소스 자바스크립트 프레임워크로, 가장 빠른 웹 플랫폼 컴포넌트 중심의 개발로써 대규모 프로젝트에 적합하다. 또한 의존성이 낮고 안정성이 높으며 정형화된 사용법으로 향후 유지보수에 이롭다는 장점이 있다. Angular는 웹 애플리케이션은 물론 모바일 웹, 네이티브 모바일과 더불어 데스크탑 애플리케이션까지 프론트엔드 개발에 필요한 대부분의 기능을 사용할 수 있다. 또한 정적 타입을 제공하는 TypeScript를 주력 언어로 채택하여 대규모 애플리케이션 개발에 보다 적합한 환경을 제공한다.

[그림 3-35] Angular의 특징점 및 브라우저 지원 범위



디버깅에 따른 속도

브라우저 지원 범위

Chrome	Firefox	Edge	E	Safari	iOS	Android	EMobile
latest	latest	14	11	10	10	Nougat(7.0) Marshmallow(6.0)	11
		13	10	9	9	Lollipop(5.0, 5.1)	
			9	8	8	KitKat(4.4)	
				7	7	Jelly Bean(4.1, 4.2, 4.3)	

2. 시스템구성

2.1 시스템 구성 개요

프로그램의 시스템 구성도 및 기능 구성도는 아래의 그림 3-36에서 보여지는 것과 같다.

[그림 3-36] 시스템 구성도 및 기능 구성도



2.2 공간 정보 및 탄소중립률 콘텐츠 구축

프로그램에서 공간단위별 탄소중립률을 나타내기 위해 배출량정보 수집 및 이를 기반으로 한 탄소중립률 계산결과로 DB를 구축, 지자체별 지역 정보와 함께 GIS 기반으로 표출하였다. 따라서 사용자는 지도상에서 원하는 공간을 선택하고, 해당되는 일반 정보(기후정보, 에너지 정보 및 온실가스 배출량)와 탄소중립률 현황을 인포그래픽, 표, 그래프 등을 통해 쉽게 확인할 수 있다.

[그림 3-37] 콘텐츠 대상자료 및 GIS 기반 정보 표출을 위한 요소



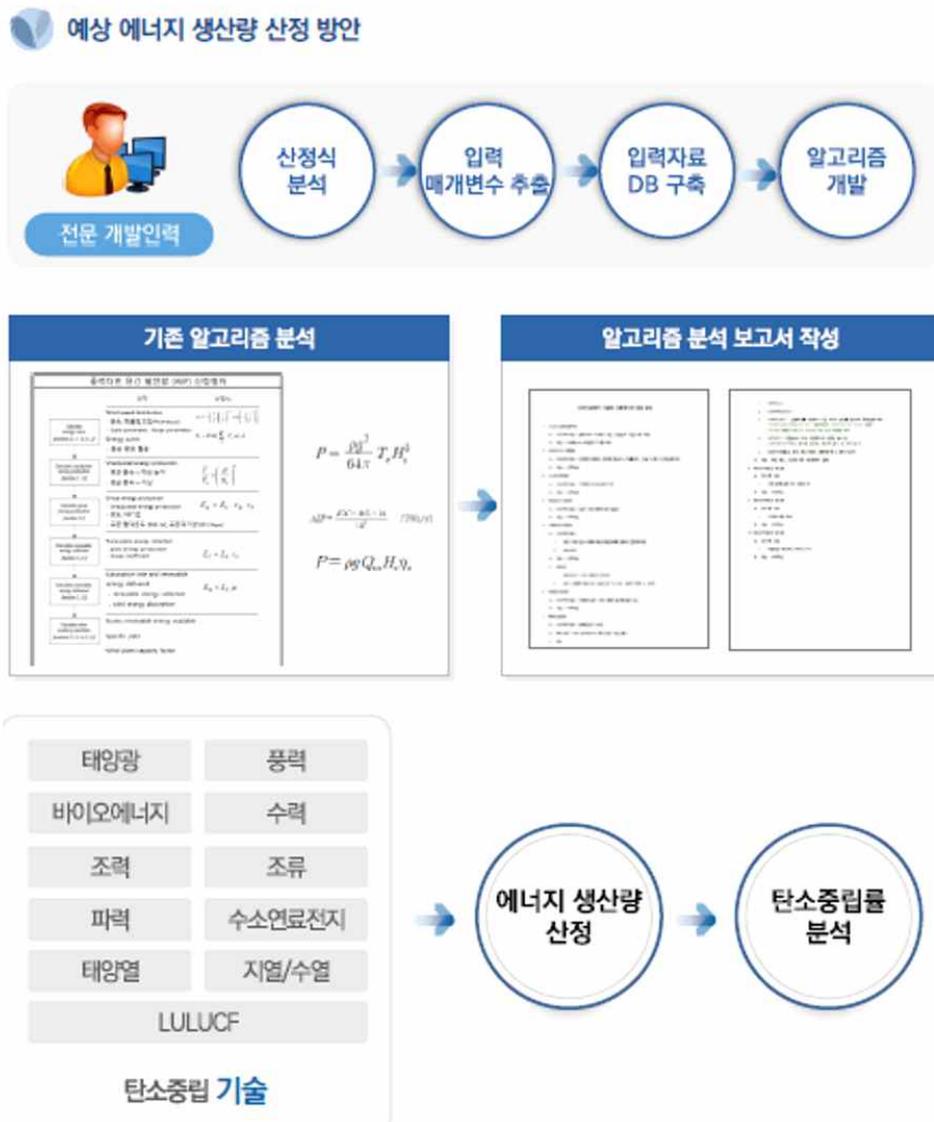
✓ GIS 기반으로 공간단위별 배출량 및 탄소중립률 정보 표출



2.3 공간단위 기후기술 콘텐츠 구축 및 에너지생산량 산정

공간단위 별 총 12개의 기후기술(태양광, 풍력, 바이오에너지, 수력, 조력, 조류, 파력, 수소연료전지, 태양열, 지열, 수열, LULUCF)에 대한 기술사양(제품정보(예: 품목, 세부품목, 기업명, 기업소재지, 제조사, 모델명 등) 및 기술별 세부사항(예: 사양, 정격효율, 크기, 무게, 설치대수, 운영기간, 설치년도 등)) 및 기상인자 데이터베이스 구축을 기반으로 에너지 발전량 산정 시뮬레이션 모듈을 개발하였다. 개별 기술에 대한 예상 에너지는 산정식을 분석하여 입력 매개변수를 추출한 뒤, 입력자료 통합 데이터베이스를 구축한 뒤, 알고리즘 개발을 통해 이루어지게 된다. 알고리즘을 통해 산정된 기술별 에너지생산량 예측값은 사용자가 설정한 목표연도의 탄소중립률 분석에 사용되며, 이를 통해 공간에 적용된 기후기술의 온실가스 감축효과를 산정하게 된다.

[그림 3-38] 기후기술 별 예상 에너지 산정량 산정 단계

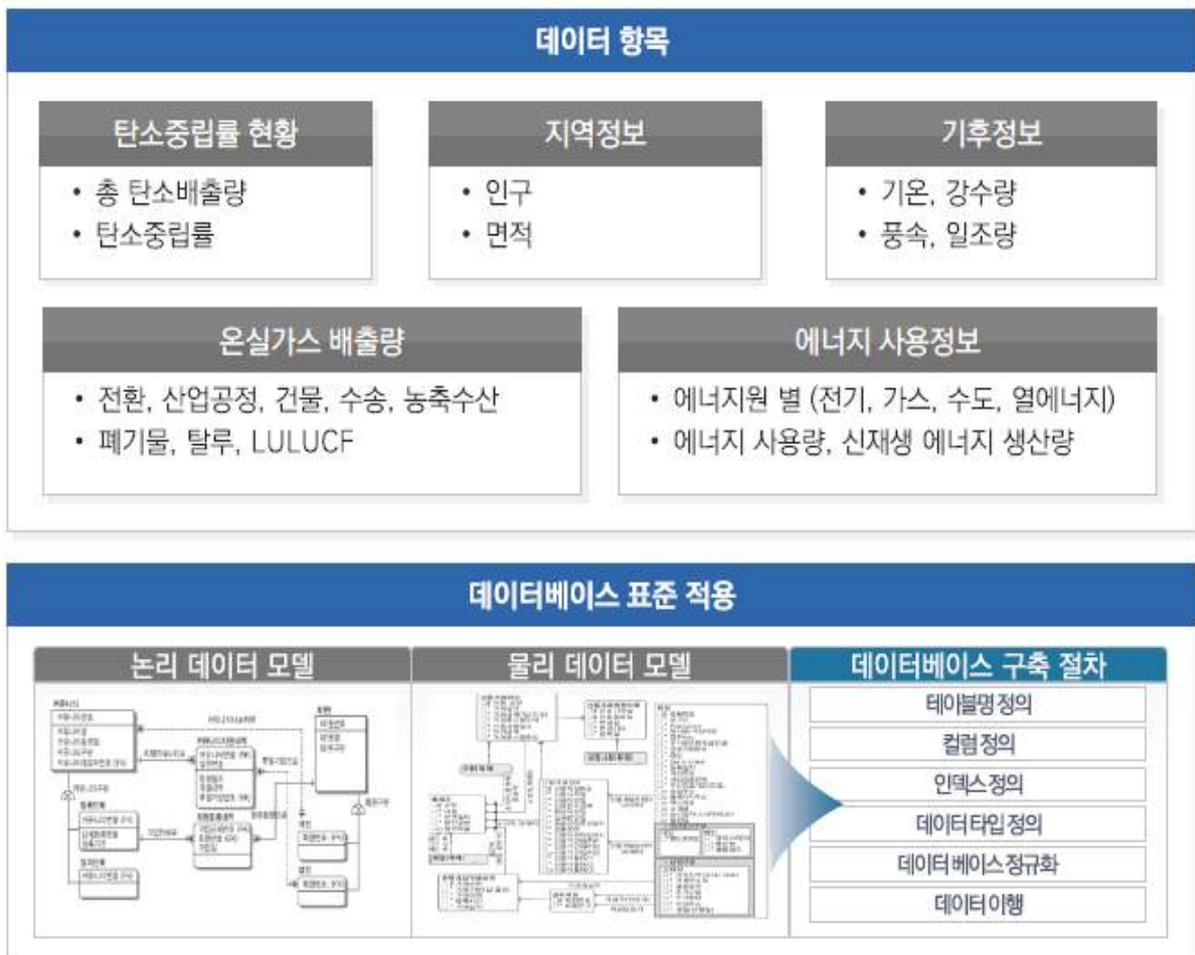


2.4 시스템 입출력 데이터베이스 구축

공간정보, 기후정보, 기술정보를 포함한 시스템 입출력 인자들을 정리하여 데이터베이스 표준 정책을 준수한 데이터베이스 구축을 진행한다. 세부 데이터 항목은 공간의 탄소중립률 현황(구성 데이터 항목: 연도별 총 탄소배출량), 부문별 온실가스 배출량(구성 데이터 항목: 전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 탈루, LULUCF), 공간정보(구성 데이터 항목: 인구, 면적, 위치), 기후정보(구성 데이터 항목: 기온, 강수량, 풍속, 일조량), 그리고 에너지 사용정보(구성 데이터 항목: 에너지 원별 사용량(전기, 가스, 수도, 열에너지), 신재생 에너지 생산량)이 있다. 해당 데이터 항목들은 논리 데이터 모델과 물리 데이터 모델 표준 적용을 통해 테이블 명, 컬럼, 인덱스, 데이터 타입을 정의하고 DB 정규화 및 데이터 이행의 절차를 밟아 통합 데이터베이스를 구축하게 된다.

[그림 3-39] 시스템 입출력 데이터 정리 및 DB화

시스템 입출력 데이터 정리 및 데이터베이스화

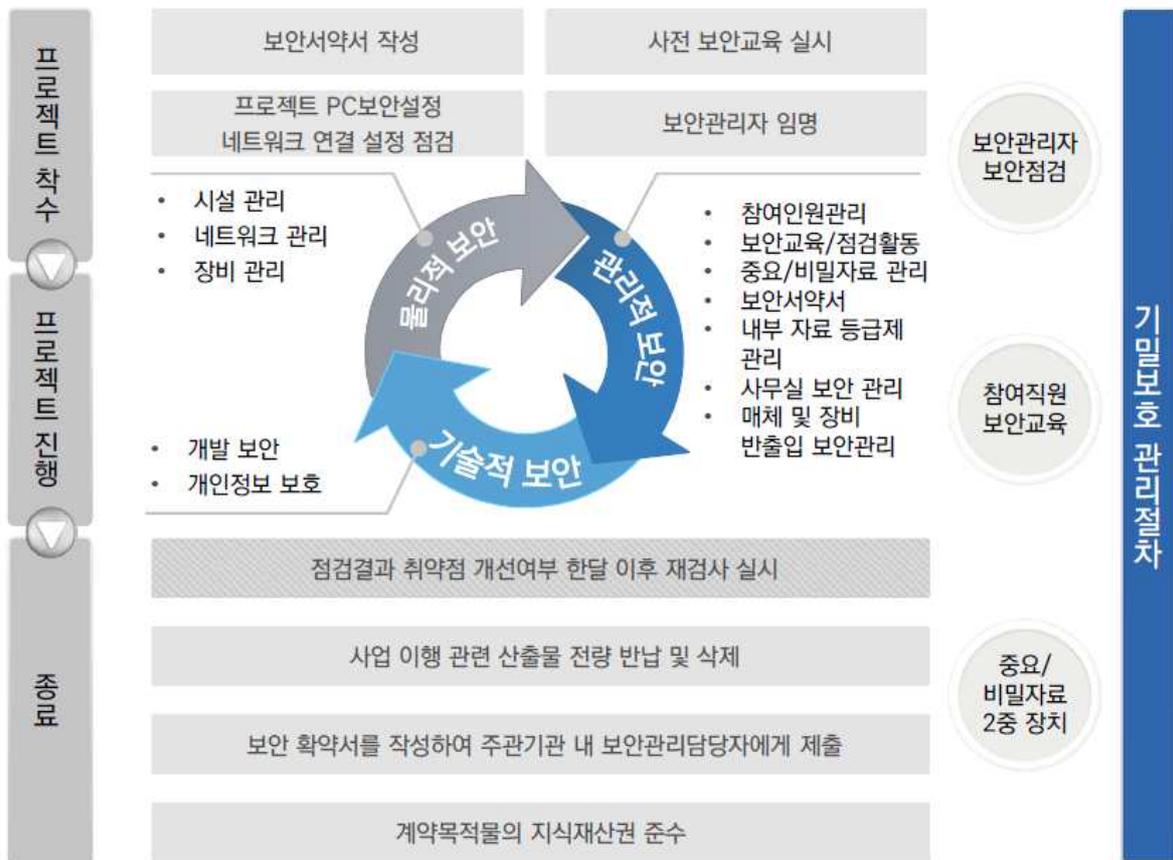


3. 보안 및 데이터 요구사항

3.1 보안 요구사항

본 시스템 구축 및 개발과 관련된 모든 정보는 관련 법규 및 지침을 준수하며 보안 관리 체계를 수립하고 따른다. 시스템 보안 요구사항은 관리적 보안, 기술적 보안, 물리적 보안으로 이루어져 있으며, 개요는 그림 3-40과 같다.

[그림 3-40] 시스템 보안 요구사항 개요



보안 법규 및 지침 준수

- 개인정보보호 처리지침에 따라 행정자치부 개인정보 암호화 조치 가이드(2014.12.) 준수
- 「행정기관 및 공공기관 정보시스템 구축·운영 지침」에 따른 소프트웨어 개발보안 준수
- 공사 「용역계약특수조건」에 명시된 제5조의 1(보안관리)에 따라 “외주 용역사업 보안 특약사항” 내용 준수
- 기타 행안부 SW개발보안가이드라인 등 관련 지침 준수

관리적 보안은 사업 참여인원, 내부 자료 및 산출물에 대한 지속적인 보안사고 방지활동을 포함한다. 참여인원에 대한 보안 관리방안은 참여 인원에 대한 보안서약서 획득 및 인원 투입 관리의 통제 등이 있다. 데이터베이스 보안 관리방안에는 전산망도 및 IP 현황 등 내부 자료는 복사 및 외부반출 금지, 사업 수행 시 제공받는 자료에 대해 자료관리대장 관리, 비공개 자료의 경우 출력, 보관 및 열람 시 이력대장에 관리, DB 관리자를 따로 지정하여 DB 관리, DB 사용자를 등록하고 사용자별 적절한 역할과 권한 부여, DB 사용자의 임의 접근을 차단, 필요한 경우 업무와 관련된 DB 로만 접근 허가, DB 사용자는 정당한 사유 없이 시스템 계정으로 접근 금지 등이 있다. 이외에도 시스템 개발이 진행되는 동안 생산되는 모든 산출물은 외부와 차단된 네트워크망 내의 지정 하드웨어에 보관된다. 물리적 보안에는 사업관련 장비 및 내외부망 접근과 시설에 대한 보안사고 방지 활동이 포함된다. 네트워크 관리방안에는, 개발 서버에서의 작업을 원칙으로 하며 실 운영시스템 운용상황 점검 필요 시 승인 후 사용하는 방안 등이 있다. 시설 및 사업관련 장비에 대한 보안관리도 장비반입 반출관리와 사무환경 관리 등으로 진행된다. 기술적 보안은 시스템을 구성하는 PC, 서버, 네트워크, 데이터베이스 및 각종 하드웨어와 소프트웨어에 대한 기술적 요소들을 보안상의 위협으로부터 보호하는 방안들로 이루어진다(그림 3-41 참조).

[그림 3-41] 시스템 기술적 보안 요구사항 개요

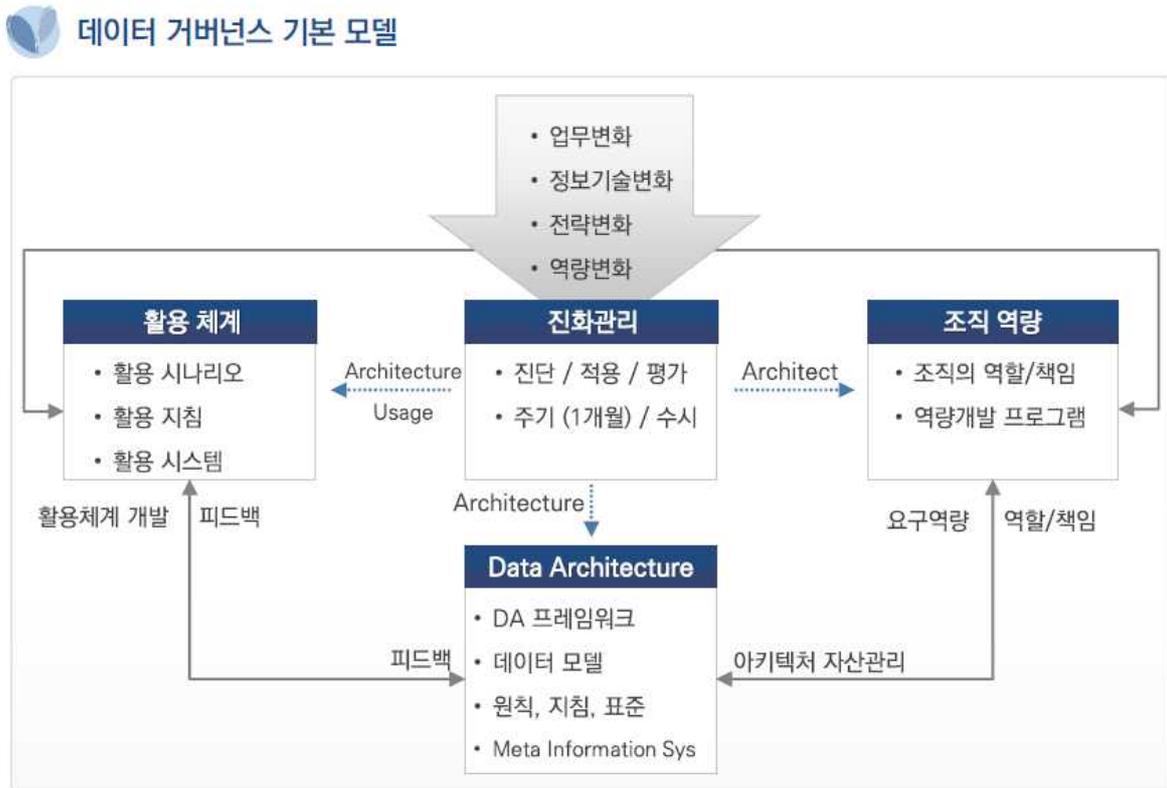


3.2. 데이터 요구사항

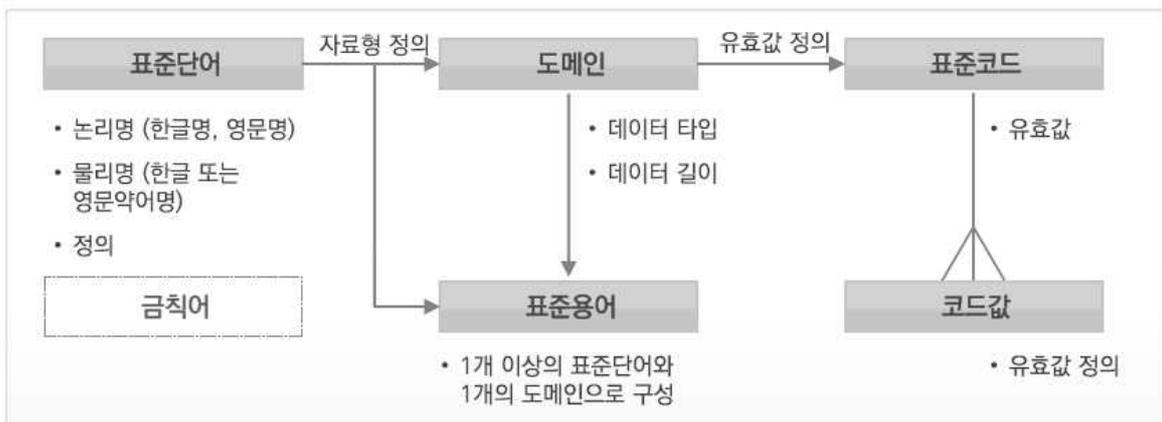
가. 데이터베이스 표준화 적용

데이터 거버넌스 및 표준을 적용하여 향후 확장성을 고려한 데이터베이스를 설계하고, 시스템 사용에 필요한 코드를 설계 및 정의하여 불필요한 코드 남용을 방지한다 (그림 3-42).

[그림 3-42] 데이터 거버넌스 기본모델 및 표준화 구성요소



데이터 표준화 구성 요소

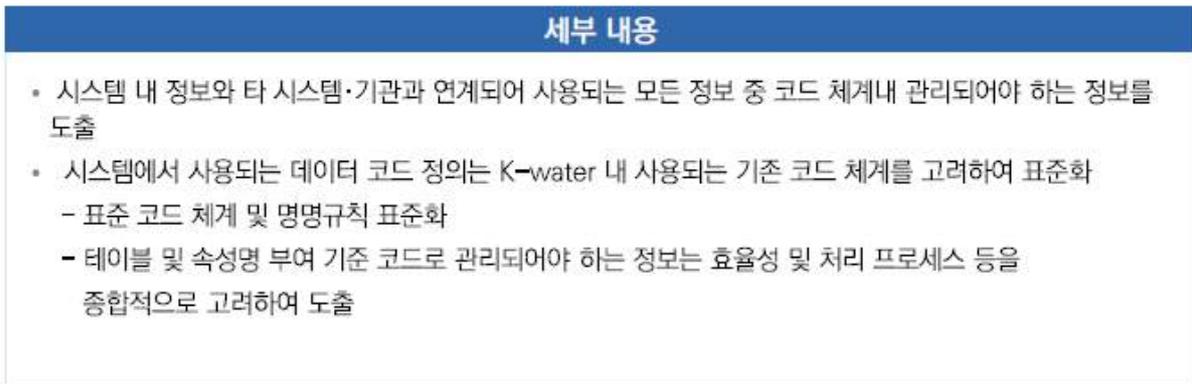


나. 데이터 표준화

데이터 리엔지니어링(데이터 표준화와 구조화)을 통해 내부 데이터를 재정리한다. 데이터 표준화 세부내용 및 구축방법론은 아래 그림 3-43과 같다.

[그림 3-43] 데이터 표준화 세부내용 및 구축 방법론

데이터 표준화



데이터 표준 구축 방법론



제 4 절 소결

공간의 온실가스 배출량을 분석할 때 직접배출원과 간접배출원을 모두 고려하여야 공간적 특성을 이해할 수 있으므로 1차년도에는 직접배출원을 분석하고, 차년도부터는 간접배출원을 포함할 예정이다. 본 연구에서는 공간의 정의를 탄소중립 전략 수립이 필요한 물리적·지역적 공간으로 내리며, 본 프로그램에서 사용하는 온실가스 배출통계는 GIR에서 제공하는 통계를 활용하는데, 본 통계가 행정구역단위의 17개 광역지자체로 구분되어 있어 우선 자자체 공간을 대상으로 모형을 개발하고 검증하고자 한다. 기술적범위는 2050 탄소중립 시나리오 상 가장 온실가스 배출량이 높은 에너지 전환부문의 기술(①태양광, ②풍력, ③바이오에너지, ④수력, ⑤해양에너지(조력, 파력, 조류), ⑥수소연료전지, ⑦태양열, ⑧지열, ⑨수열)과 ⑩산림흡수원을 포함시킨다.

탄소중립률 산정은 ①온실가스 배출현황 분석, ②기술도입에 따른 에너지 생산량 예측, ③온실가스 감축량 산정, ④탄소중립률 산정 순으로 분석한다. 현재 GIR에서는 통계에 활용한 활동자료를 공개하고 있지 않고 있기 때문에 지속적인 협력을 통해 DATA 수집이 필요하고, 향후 시·군·구 단위의 배출통계가 공유된다면 모형에 대한 검증이 더 확실해질 수 있을 것이다. 온실가스 에너지 생산량에서 온실가스 감축량에 이르는 산정식은 차년도에 더욱 고도화되어 신뢰성 있는 분석 결과를 제공할 수 있도록 해야할 것이다. 2050년은 장기적 목표로서 기술발전에 대한 예측분석이 산정식에 포함되어야 하며, 추가적으로 기술-정책-공간 최적화 모형 개발을 통해 수요자들에게 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

IV

모형 시범적용

- 제1절 서울시 탄소중립 정책 목표 진단
- 제2절 CATAS 알파버전 테스트 설문조사
- 제3절 소결

제 4 장 모형 시범적용

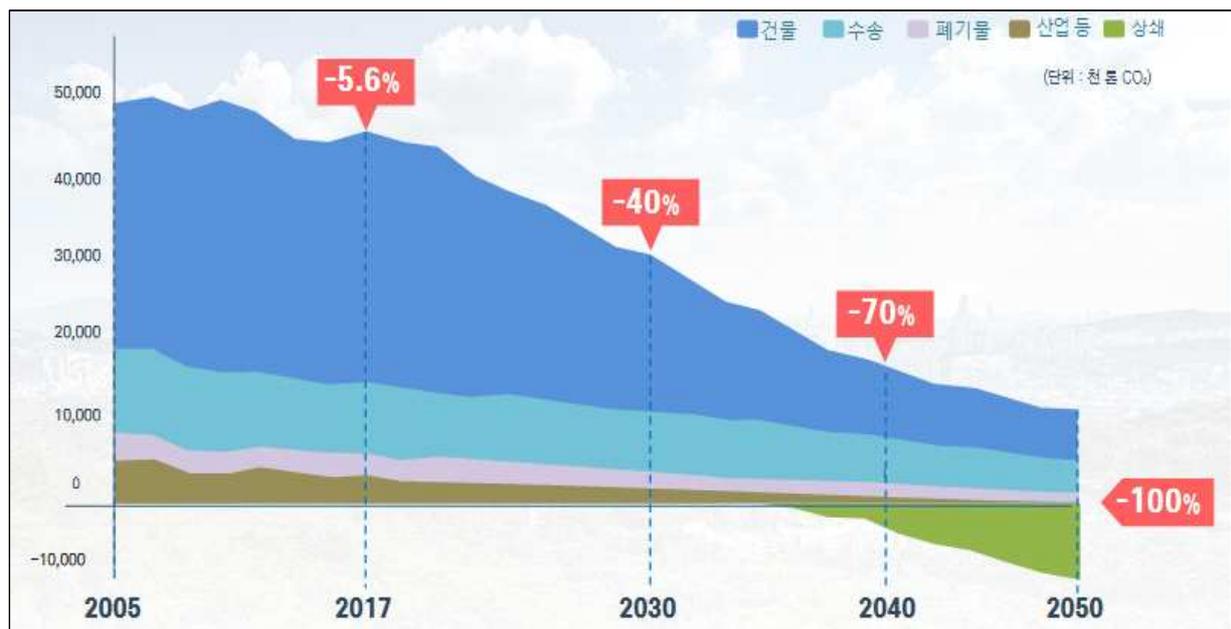
제 1 절 서울시 탄소중립 정책 목표 진단

1. 서울시 2050 온실가스 감축 추진계획

1.1. 계획 주요내용

서울시는 국내 도시 최초로 2050년 탄소중립 계획을 수립하고, C40도시기후리더십그룹(C40)에 「2050 Seoul Climate Action Plan」을 제출한 바 있다⁹⁸⁾(서울시, 2020). 서울시가 발표한 「2050 온실가스 감축 추진계획」에서는 ①그린 빌딩, ②그린 모빌리티, ③그린 숲, ④그린 에너지, ⑤그린 사이클에 해당하는 5대 부문의 74개 세부과제를 담고 있다(2021). 이를 통해 서울시는 2030년까지 2005년 대비 온실가스 배출량의 40%를 감축하고, 2050년 탄소중립 달성 목표를 수립하였다(그림 4-1).

[그림 4-1] 서울시 연도별 온실가스 감축 시나리오



출처: 서울시 2050 온실가스 감축계획 추진 계획(2021)

98) 출처: 서울시 기후환경본부 환경정책과(2020), 「서울시, 국내 처음으로 「2050 온실가스 감축 추진계획」 C40 제출」

추진부문별 세부계획으로는 ① 건물부문에서는 노후 공공건물의 그린리모델링 사업과 신축 민간건물의 제로에너지 빌딩 의무화, 건물 온실가스 총량제 도입 등의 계획을 포함하고 있으며, ② 수송부문에서는 관용차·버스·택시 등 공공부문의 전기·수소차 의무도입과 전기차 충전기 설치 확대, 내연기관차 금지, 보행자와 대중교통 중심의 도로정비 등의 계획을 수립하고 있다. 또한, ③ 상채부문에서는 「미세먼지 차단 숲」, 「바람길 숲」, 「한강 숲」 등 주변 현황에 부합하는 도시 숲 조성 및 도로와 같은 도시기반시설 상부를 공원화하여 온실가스 감축 효과 증진 계획을 수립하였다. ④ 에너지 부문에서는 태양광과 연료전지를 중심으로 신재생에너지 보급 확대를 시행하고, 바이오·폐기물·소수력·상수열 등 에너지원의 다양화를 주요 정책으로 담고 있다. 마지막으로 ⑤ 자원순환부문에서는 공공폐기물처리 시설의 반입량 관리 강화 및 재활용·재활용 활성화를 통해 처리해야 하는 폐기물량을 줄이고, 광역자원 회수시설 신규건설 등을 추진하고 있다(표 4-1).

<표 4-1> 서울시 「2050 온실가스 감축추진계획」 부문별 주요 정책

부문	주요 정책
건물	<ul style="list-style-type: none"> · 353개소의 노후 공공건물에 대한 대규모 공공 그린리모델링 사업(~'22.) · 사업자 부담 완화를 통해 신축 민간건물 제로에너지빌딩 의무화 조기 시행('23.~) · 건물별 특성을 고려한 건물 온실가스 총량제 단계적 도입('22.~)
수송	<ul style="list-style-type: none"> · 관용차·버스·택시 등 공공부문 전기·수소차 의무도입 선도적 시행 · '22년까지 전기차 충전기 설치 확대(급속·완속 각 1천기), 수소충전소 15개소 설치 · 내연기관차 등록·운행 금지 제도 마련, 보행자·대중교통 중심 도로정비 및 수요감축
상채	<ul style="list-style-type: none"> · 생활밀착형 '도시 숲' 조성 등 3천만 그루 나무 심기(~'22.) · 신규 공원 지속 조성 및 도시기반시설 상부 공원화로 도심·생활권 공원녹지 확충
에너지	<ul style="list-style-type: none"> · 공공시설에서 선도하여 2050년까지 태양광 5GW 보급 · 연료전지 경제성 확보를 통해 2050년까지 1GW 보급 · 바이오·폐기물·소수력·상수열 등 다양한 에너지원 이용 확대
자원순환	<ul style="list-style-type: none"> · '26년 생활폐기물 직매립 제로화를 위한 반입량 감축과 처리시설 확충 · 리엔업사이클플라자, 업사이클 테마파크 조성으로 자원순환 생활문화 확산

※ 출처: 서울시 기후환경본부 환경정책과 보도자료(2020.12.30.)

1.2. 에너지 전환분야 주요 내용

본 연구에서는 해당연도에 에너지 전환부문만을 다루고 있으므로, 서울시의 에너지 전환분야의 내용을 중점적으로 검토하고, 개발된 CATAS 모형 적용을 통해 해당 계획 추진에 따른 온실가스 감축량 및 탄소중립률 달성 평가를 수행하였다.

서울시 「2050 온실가스 감축 추진계획」의 에너지 부문에서는 ① 태양광 보급확대, ② 연료전지 보급확대, ③ 소수력, 수열 등 신재생에너지 발굴·이용, ④ 서울시 에너지정보센터 구축 계획으로 구분하여 계획을 수립하고 있다. 계획별 주요 계획으로는, ① 태양광 보급확대를 위해 서울시와 국토교통부, 한국철도공사가 협력하여 ‘22년까지 코레일 역사와 차량기지 및 주차장에 25MW 설치, 한전 변전소 등에 500MW 설치를 목표로 하며, 이외에도 보조금 지원과 태양광 설치 의무화제도, 컬러유리와 같은 태양광 신기술⁹⁹⁾ 지원, K서울햇빛발전¹⁰⁰⁾ 등 태양광 발전사업 추진 등의 계획을 수립하고 있다. 이를 통해 최종적으로 ‘22년까지 500MW, ‘50년까지 5GW의 태양광 설비 보급을 목표로 하고 있다. ② 연료전지 보급확대 계획의 경우, 천왕차량기지, 중랑물재생센터 및 서울도시가스 부지 등 도시기반시설 유휴부지에 연료전지 발전소 도입을 추진하고, 신축 건물 전력용량의 5% 이상을 연료전지로 설치하는 것을 의무화하는 등의 확대계획을 포함한다. ③ 그 외 다양한 신재생에너지원의 발굴을 위하여 잠실수중보 소수력 발전시설(2.5MW) 설치를 추진하고, 광역 상수도 등 하천 수열을 이용한 냉난방 공급을 확대계획을 가지고 있다. 또한, ④ ‘21년 마곡지역 에너지데이터 통합 관리 및 에너지 효율화 플랫폼을 구축하고 서울 전역으로 단계별 확대를 계획하고 있다(표 4-2). 해당 계획 중 신규 발전설비 설치·확대 계획을 반영하여 온실가스 감축량 및 탄소중립률 기여도 평가를 수행하였다.

<표 4-2> 서울시 「2050 온실가스 감축추진계획」 에너지 부문별 주요 계획

부문	주요 계획
① 태양광 보급확대	· ‘22년까지 500MW, ‘50년까지 5GW 태양광 설비 보급 확대
② 연료전지 보급확대	· ‘22년까지 3000MW, ‘50년까지 1GW 연료전지 설비 보급 확대
③ 소수력, 수열 등 신재생에너지 발굴·이용	· 잠실수중보 소수력 발전시설 2.5MW 설치 · 한강홍수통제소 350kW, 강남삼성병원 40MW, 영동대로 복합환승센터 14MW 등 신규 수열 시설 설치를 통한 냉·난방 공급 확대
④ 서울시 에너지정보센터 구축	· ‘21년 마곡지역 에너지데이터 통합 관리 및 에너지효율화 플랫폼 구축 · ‘22년~ 서울 전역으로 플랫폼 단계별 확대를 통한 에너지 정보센터 구축

※ 출처: 「2050 온실가스 감축 추진계획(2021.5.4.)

99) 서울시는 2021년 서울에너지공사에 ‘태양광 신기술 실증 단지’를 조성했다. 다양한 형태의 건물 일체형 태양광발전시스템(Building Integrated Photovoltaic, BIPV), 도로, 보도블록형 태양광시스템, 울타리펜스형 태양광모듈 등의 실증기술을 적용했다.

100) 서울에너지공사가 태양광 발전소 건설 사업을 추진하기 위하여 특수목적법인인 케이(K) 서울햇빛발전사업을 설립하였으며, 서울에너지공사 열병합발전소 상부, 서울교통공사 차량기지, K2코리아(주) 물류창고 등 태양광 발전사업 발굴을 추진하고 있다.

2. CATAS 알파버전을 통한 서울시 탄소중립 정책목표 진단

2.1 공간선정

CATAS 알파버전의 첫 번째 단계는 분석대상이 되는 공간(지자체)을 선정하는 것이다. 다음 그림 4-2와 같이 서울시를 선정하게 되면 2019년 서울특별시의 탄소중립률 현황을 확인할 수 있다. 앞서 3장에서 서술한 것처럼 서울특별시의 2019년 온실가스 배출량은 27.89백만톤 tCO₂e이고, 2018년 대비 2019년 탄소중립률은 5.81%를 나타내고 있다.

[그림 4-2] 서울시 공간선정



2.2. 공간정보

공간선정 후, 공간정보 분석단계로 넘어가면 서울특별시의 탄소중립과 관련한 다양한 일반정보를 확인할 수 있다. 서울시는 약 9백만 명의 인구가 거주하고 있으며, 서울시 전체의 면적은 605.23Km²에 해당한다. 이는 전국 인구의 약 19%가 전 국토의 0.6% 면적에 거주하는 것을 의미하며, 이러한 과도한 인구 밀집으로 인해 건물부문 10.59백만tCO₂e, 수송부문 8.78백만tCO₂e로 건물·수송부문에서 높은 온실가스 배출량을 나타내고 있다.

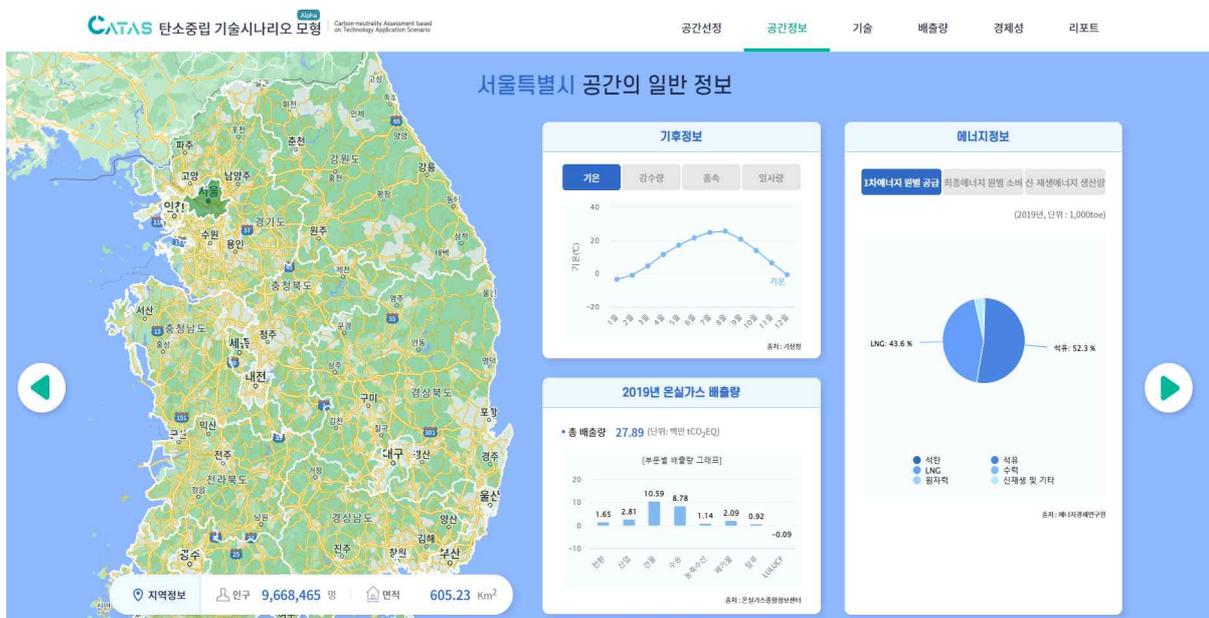
서울시의 월별 기온의 경우, 1월에 최저 기온인 -3.5℃를, 8월에 최고 기온인 25.3℃를 나타내며 강수량의 경우, 12월에 최저 강수량인 24mm를, 7월에 최고 강수량인 371mm 가량을 나타내고 있다. 신재생에너지 자원으로서 기후정보를 살펴보면, 풍력 자원인 풍속의 경우, 3월에 3.5m/s로 가장 높고, 점차 감소하다가 9월에 2.4m/s로 최저 풍속을 보이고 겨울철에 다시 서서히 증가하는 형태를 나타낸다. 일사량의 경우, 12월 최저

일사량인 1.4kWh/m²/day에서 점차 증가하여 6월에 3.5kWh/m²/day로 최고치를 기록한다.

에너지 정보의 경우, 에너지원별·지자체별 1차 에너지 공급통계와 최종에너지원별 소비데이터를 제시하고 있다. 1차 에너지란 변환이나 가공 과정 없이 자연으로부터 얻을 수 있는 에너지를 의미하며, 최종에너지 소비량이란 1차 에너지 공급량에서 전력·석유제품·열 생산을 위해 사용된 전환에너지와 공급되면서 손실된 에너지를 제외한 에너지량을 의미한다¹⁰¹⁾. 서울특별시의 1차 에너지 공급량은 석유가 52.3%를 차지하고, LNG가 43.6%를 차지하고 있다. 최종에너지 원별 소비량의 경우 석유는 34.3%, 가스가 30%, 전력이 29.6%를 차지한다. 1인당 최종에너지 소비량은 1.39 toe/인, 1인당 전력소비량은 4768.7kwh/인을 나타내며 전력자립도는 11.19%에 해당한다.

지자체별 신재생에너지 생산량의 경우, 열에너지는 태양열, 수열, 지열 생산량을, 전력의 경우 태양광, 풍력, 수력, 해양, 연료전지, IGCC로 생산된 전력량 및 바이오가스, 매립지가스, 바이오디젤, 성형탄, 목재펠릿으로 생산한 바이오에너지와 폐기물 발생량을 표기하고 있다. 서울시의 경우, 지열을 통해 16,450toe, 태양열을 통해 630toe를 공급하고 있으며, 전력부문의 경우 연료전지를 통해 341,376MWh, 태양광을 통해 227,866MWh를 충당하고 있다. 이 외에 수력으로 1,112MWh, 풍력으로 200MWh가량을 생산하고 있다(그림 4-3).

[그림 4-3] 서울시 공간의 일반정보



101) 출처: 한국에너지공단(2020), 「에너지첫걸음」

2.3. 기술 적용

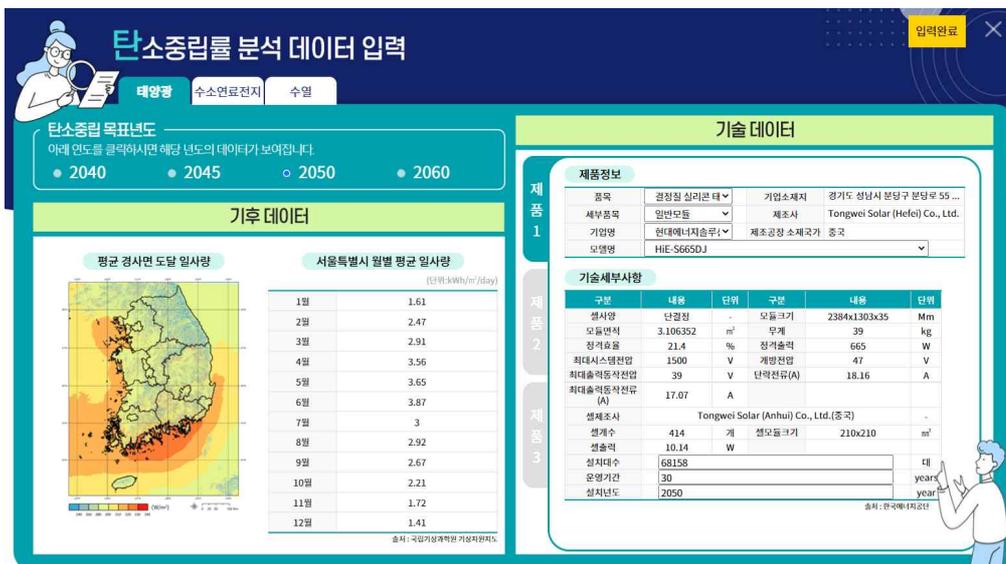
가. 태양광 적용

(목표) '22년까지 500MW, '50년까지 5GW 태양광 설비 보급 확대

서울시에서 제시하고 있는 신재생에너지 보급목표를 CATAS에 입력하여 분석을 실시하였다. 서울시에서 계획하고 있는 태양광 보급목표는 '22년까지 500MW, '50년까지 5GW이다. 이를 달성하기 위하여 현재 수집한 KS 제품 중 가장 높은 정격출력을 나타내는 현대에너지솔루션 사의 HiE-S665DJ 모델 설치를 가정하였다(그림 4-4). 해당 모델은 모듈면적은 3.1m², 정격효율은 21.4%로 정격출력 665W를 보유한 제품이다. 해당 제품으로 서울시에서 계획한 목표 보급량을 달성하기 위해서는 '22년까지 약 751,880대, '50년까지는 약 7,518,797대 설치가 필요하다. 목표 대수 설치 시, 모듈은 각각 2km²(3.1m²×751,880), 23km²(3.1m²×7,518,797) 가량의 면적을 차지하게 되며, 태양광 모듈 설치 각도와 고도, 이격거리 등을 고려하면 더 넓은 면적이 필요할 것으로 사료된다.

'22년 보급목표 달성 시 약 485.37GWh, '50년 보급목표 달성 시 4,853GWh의 전력이 생산되며, 이는 서울시 전력소비량(47,810GWh¹⁰²)의 약 1.02%, 10.15%를 차지하는 양이다. 하지만, 신재생에너지 백서(2020)에서 제시한 서울시의 태양광 시장 잠재량이 44GWh임을 고려하면 현재 기술 수준에서 현실적으로 해당 목표량 보급이 달성 가능한 목표인지 추가적인 검토가 필요하다. 본 시뮬레이터에서는 시장 잠재량을 최대 도입 가능한 한계치로 설정하였기 때문에 해당 제품은 최대 68,158대까지만 설치(입력)가 가능하며, 이는 목표치에 약 10%에 불과하다. 향후 시뮬레이터에서는 실제 도입 가능량을 고려한 한계치 설정 등의 고도화도 필요할 것으로 판단된다. 해당연도의 시범 적용에서는 시장잠재량을 최대 도입 가능량으로 설정하여 탄소중립률 분석을 실시하였다.

[그림 4-4] 서울시 태양광 기술적용



102) 출처: 산업통상자원부-에너지경제연구원(2019), 「지역에너지통계연보」

나. 수소연료전지 적용

(목표) '22년까지 3000MW, '50년까지 1GW 연료전지 설비 보급 확대

수소연료전지의 경우, '22년까지 300MW, '50년까지 1GW 보급 확대 목표를 가지고 있다. 이를 달성하기 위하여 현재 KS 제품 중 가장 높은 정격출력(10kW)을 나타내는 (주)두산퓨얼셀파워사의 DS-SO-10-21A 모델의 설치를 가정하면 22년까지 약 30,000대, '50년까지는 약 100,000대의 설치가 필요하다. '22년에 발전이용률 약 92%¹⁰³⁾로 30,000대 설치 시, 전력생산량은 약 2,417GWh로 서울시 전력사용량의 약 5.06%의 전력에 해당하는 양이다. '50년에는 이용률 개선을 가정하여 100% 발전이용률로 100,000대를 설치한다면 8,760GWh의 전력(전력소비량의 약 18.32%)을 생산할 수 있다.

[그림 4-5] 서울시 연료전지 기술적용 화면

탄소중립 분석 데이터 입력

입력완료

탄소중립 목표년도

아래 연도를 클릭하시면 해당 년도의 데이터가 보여집니다.

● 2040
● 2045
○ 2050
● 2060

기후 데이터

출처: DoosanFuelCell

기술 데이터

제품정보

종목	연료전지 시스템	기업소재지	경기 화성시 향남읍 제약단지로 75
세부종목	고체산화물연료	제조사	(주) 두산퓨얼셀 파워
기업명	(주)두산퓨얼셀	제조공장 소재국가	한국
모델명	DS-SO-10-21A		

기술세부사항

구분	내용	단위
사용연료	천연가스	-
시스템출력	10	kW
총합효율	98.2	%
발전효율	54.3	%
배열회수효율	43.90	%
발전이용률	<input style="width: 80%;" type="text" value="100"/>	%
설치대수	<input style="width: 80%;" type="text" value="100000"/>	개
운영기간	<input style="width: 80%;" type="text" value="30"/>	years
설치년도	<input style="width: 80%;" type="text" value="2022"/>	year

출처: 한국에너지공단

103) 출처: 한국남동발전(2020), 2020년 국내 5개 기업 평균 이용률, 2022.11.03. 접속, <https://www.koenergy.kr/kosep/fr/main.do>

- 139 -

다. 하천수열

(목표) 한강홍수통제소 350kW, 강남삼성병원 40MW, 영동대로 복합환승센터 14MW 등 신규 수열 시설 설치를 통한 냉·난방 공급 확대

하천 수열을 이용한 냉·난방 공급 확대계획으로는 총 54.35MW(한강홍수통제소 350kW, 강남삼성병원 40MW, 영동대로 복합환승센터 14MW)의 신규설치가 구체적으로 명시되어 있다. 다른 기술과 마찬가지로, 냉·난방의 정미능력이 가장 높은 제품(브이피케이 주식회사의 EQ-150GH9B) 도입을 가정하면, 해당 제품의 정미능력이 냉방의 경우, 664,9777W, 난방의 경우 639,899W이므로 목표치 달성을 위해서는 약 84대의 설치가 요구된다. 84대 설치 시, 연간 577,150,068MJ의 냉난방 에너지를 생산할 수 있다. 이는 서울시 열에너지 가정·상업부문 열에너지 소비량(332,000toe¹⁰⁴)의 약 4.15%를 차지하는 양이다.

[그림 4-6] 서울시 수열 기술적용 화면

탄소중립 분석 데이터 입력

태양광 수소연료전지 **수열**

탄소중립 목표년도
아래 연도를 클릭하시면 해당 년도의 데이터가 보여집니다.

● 2040 ● 2045 ○ 2050 ● 2060

기후 데이터

5.0m 평균 지중온도 (단위:℃) 수온 (단위:℃)

월	11.22	1월	4.63
2월	10.33	2월	5.07
3월	9.47	3월	10.16
4월	8.83	4월	14.82
5월	8.66	5월	19.93
6월	9	6월	23.5
7월	9.92	7월	25.06
8월	11.08	8월	26.79
9월	11.98	9월	23.21
10월	12.39	10월	18.42
11월	12.41	11월	13.45
12월	11.99	12월	6.82

출처: 기상청

기술 데이터

제품정보			
종목	물-물 열교환 유닛	기업소재지	충북 음성군 삼성면 상곡로 55-72
기업명	대성히트에너지	제조사	대성히트에너지주
모델명	DHGW 150N-C	제조공장 소재국가	한국

기술세부사항					
구분	내용	단위	구분	내용	단위
용량	525000	W	열교환기 (제조사)	DANFOSS	-
냉매	R-410A	-	정미능력 (냉방 지하수)	612861	W
크기	1670x1964x2072	mm	정미능력 (난방 지하수)	623130	W
무게	2650	kg	유요전력 (냉방 지하수)	93447	W
압축기 (형식)	Scroll	-	유요전력 (난방 지하수)	143394	W
압축기 (수량)	6	대	EER, COP (냉방 지하수)	6.56	W/W
압축기 (용량)	120000	W	EER, COP (난방 지하수)	4.35	W/W
압축기 (제조사)	COPELAND	-	설치대수	84	대
열교환기 (형식)	Plate	-	운영기간	30	years
열교환기 (수량)	2	대	설치년도	2022	year
열교환기 (용량)	195,000 / 12,000				W

출처: 한국에너지공단

104) 출처: 산업통상자원부·에너지경제연구원(2019), 「지역에너지통계연보」

라. 소수력

(목표) 잠실수중보 소수력 발전시설 2.5MW 설치

수력 발전의 경우, 서울시 온실가스 감축 계획상에서는 발전시설의 발전용량을 기준 목표로 제시하고 있다¹⁰⁵⁾. 본 시뮬레이터에서는 지자체별 강수량과 설치하는 댐의 면적을 기반으로 확보할 수 있는 이론적 발전량을 산정할 수 있도록 구성하여, 발전시설 용량을 직접 시뮬레이터에 반영하기 어려운 한계가 존재한다. 또한, 신재생에너지 백서(2020)에서 수력 에너지에 대한 서울시의 시장잠재량은 없는 것으로 평가하였기 때문에 해당 목표를 본 시뮬레이터에 적용하여 발전량과 온실가스 감축량을 산정하기 어렵다.

본 시뮬레이터의 목적은 지자체별로 기후조건을 고려하여 신재생에너지 시설을 도입하였을 때 생산할 수 있는 발전량과 온실가스 감축량 및 탄소중립률을 제시함으로써 지자체의 탄소중립 계획의 수립과 이행을 지원하는 것이다. 현재 알파버전으로 개발된 CATAS의 수력 시뮬레이터의 경우, 지자체 전체의 평균 강수량을 이용하였고, 낙차와 유역면적을 사용자 입력을 통해 계산될 수 있도록 구성하여, 구체적인 지역에 발전시설을 도입하였을 때 발전량 예측에는 부족한 측면이 존재한다. 즉, 서울시의 잠실수중보와 같이 기계화된 설비 설치의 경우 해당 지점에서의 정확한 유량과 구체적인 도입 설비 재원을 바탕으로 발전량을 산정할 수 있으므로 본 프로그램의 개발 취지와는 맞지 않는 부분이 존재하는 것이다. 하지만, 향후에는 이러한 시설 도입에 따른 발전량도 탄소중립률 산정에 반영할 수 있도록 시뮬레이터가 고도화될 필요성이 있다.

[그림 4-7] 서울시 소수력 기술적용 화면



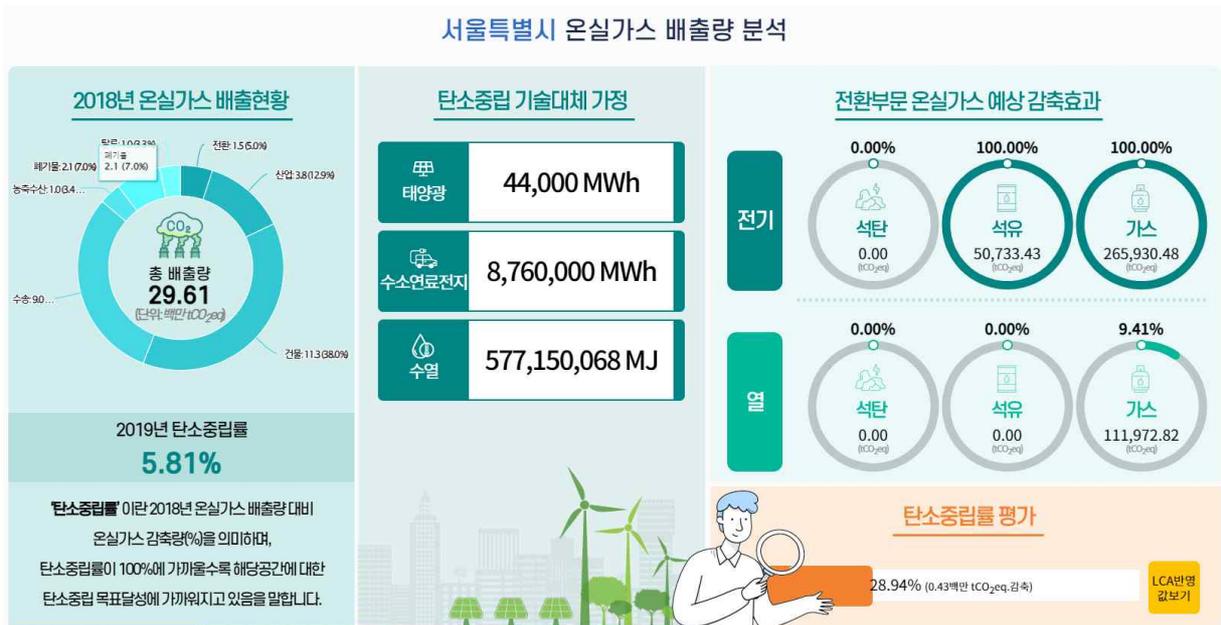
105) 서울시에서는 '20년 타당성 조사를 통해 잠실수중보에 2.5MW 소수력 개발을 통해 연간 14GWh 전력을 생산하고, 66,000톤의 온실가스 감축 계획을 발표했다(서울시 기후환경본부 녹색에너지과 보도자료, 2021.9.24.).

2.4. 온실가스 배출량 분석

서울시에서 계획하고 있는 ‘22년 신재생에너지 확대보급 목표치를 기준으로 최대 기술 도입량을 적용하였을 때 온실가스 배출량은 다음 그림 4-9와 같다. 태양광 설비 도입에 따라 43.38GWh, 수소연료전지 도입에 따라 2,628GWh의 전력을 생산할 수 있으며, 이를 통해 기존 화석연료(석유와 가스)로 생산되던 전력량을 100% 신재생에너지로 대체함으로써, 해당 전력생산으로 발생하던 온실가스 배출량을 감축하는 것으로 분석결과를 도출하였다. 열 생산의 경우, 수열 시설 설치를 통해 577.15TJ의 열에너지를 생산하여 기존에 가스로 생산되던 열에너지의 9.41%를 대체할 수 있는 것으로 분석되었다.

계획상 목표기술 도입을 통해 전환부문의 탄소중립률을 28.94%로 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다. 서울시의 경우 ‘공공 전기 및 열 생산’에 따른 온실가스 배출량이 전기 생산보다 열 생산으로 인한 배출량이 높기 때문에, 전기 생산 시 배출되는 온실가스를 전량 대체하더라도 탄소 중립률이 30% 미만의 결과가 도출되었다. 이는 본 시뮬레이터에서 적용한 화석연료 대체를 통한 온실가스 감축량 산정방법의 한계를 일부 포함하는 결과로도 볼 수 있다. 현재는 수소연료전지의 경우, 설치에 따라 100% 전력생산만을 가정했기 때문에 열 생산량은 고려되지 않았고, 태양광·수소연료전지를 통해 생산되는 에너지 전부가 기존의 전기 생산량만을 대체하는 것으로 온실가스 감축량을 산정했기 때문이다. 하지만 서울시의 탄소중립률을 높이기 위해서는 열 생산에 따른 온실가스 배출량 저감이 중요할 것으로 판단된다.

[그림 4-9] 서울시 온실가스 배출량 분석



2.5. 경제성분석

경제성분석을 하기 위해서는 에너지균등화발전비용(Levelised Cost of Energy)을 사용하였다. LCOE는 발전기 전체수명기간에 걸친 평균 발전원가를 의미하며, 다시 말하면 발전량(kWh)당 실제로 발생한 발전비용이다¹⁰⁶⁾. 산식은 아래와 같다.

$$LCOE = \frac{\text{초기투자비} + \sum_{t=1}^{\text{발전기수명기간}} \frac{(\text{운영유지비}_t + \text{연료비}_t)}{(1 + \text{할인율}_t)^t}}{\sum_{t=1}^{\text{발전기수명기간}} \frac{\text{발전량}_t}{(1 + \text{할인율}_t)^t}}$$

초기투자비(Capital expenditures, 이하 CAPEX)는 처음 기술도입시 지출되는 초기투자비용을 의미하며, 운영유지비(Operating expenditure, 이하 OPEX)는 및 연료비는 기술의 수명기간동안 지출되는 비용을 의미한다. 따라서 LCOE를 계산하기 위해서는 주요지표에 대한 수치 입력이 필요하다. 할인율의 경우에는 4.5%¹⁰⁷⁾를 활용하였다. 태양광의 기술수명은 30년¹⁰⁸⁾, 수소연료전지 10년¹⁰⁹⁾, 수열 25년¹¹⁰⁾을 기본정보로 제공하였다. 발전량은 앞서 기술화면에서 예측된 발전량이 연동된다. 이철용·이민규(2019)¹¹¹⁾에 따르면 태양광의 100kW의 개당 CAPEX는 161,083,270원, OPEX는 3,736,510원이므로, 우리가 본 시범적용에서 도입되는 태양광의 용량은 665W이므로 개당 CAPEX는 1,071,204원, OPEX는 24,848원으로 추정하였다. 수소연료전지의 경우 CAPEX는 22,000,000원/kW¹¹²⁾이며, OPEX는 1,000,000원/kW로 추정하였다. 본 시범적용에 도입되는 수소연료전지의 용량은 10kW이므로, 개당 CAPEX는 220,000,000원, OPEX는 10,000,000원으로 산정하였다. 결과는 태양광은 142원/kWh, 수소연료전지는 431원/kWh로 산정되었다.

<표 4-3> 경제성분석을 위한 주요 지표 및 수치

	할인율(%)	기술수명(년)	발전량(kWh)	용량(개)	CAPEX(원/개)	OPEX(원/개)
태양광	4.5	30	43,382,790	665W	1,071,204	24,848
수소 연료전지	4.5	10	8,760,000,000	10kW	220,000,000	10,000,000

106) 출처: 이근대·김기환(2020), 「재생에너지 공급확대를 위한 중장기 발전단가(LCOE) 전망 시스템 구축 및 운영(1/5)」, 『에너지경제연구원 기본연구보고서 20-21』

107) 사회적 할인율은 공공투자 사업의 경제성 타당성을 분석함에 있어서 미래의 비용 및 편익을 현재가치로 환산하기 위해 적용하는 할인율이다. 「에비타당성 수행 총괄지침」 제50조에 따르면 현재 사회적 할인율은 4.5%이다. 신재생에너지와 같은 경우에는 온실가스 감축효과와 대비 석탄화력발전, 원자력보다 경제성이 높지 않아 공적 투자 영역이 큰 기술분야로 본 경제성 분석을 위해서 사회적 할인율을 활용하였다.

108) 윤경훈(2021), 태양광모듈의 사용수명예측, 2022년 11월 2일 접속, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/07/Report-IEA%E2%80%9393PVPS-T13-16_2021_Service_Life_Estimation_for_PV_Modules_Korean-Version_211102.pdf

109) 대학신재생에너지기자단(2021), 연료전지는 친환경적일까?, 2022년 11월 2일 접속, <https://renewableenergyfollowers.org/3532>

110) 신영기(2011), 「지열원 열펌프 시스템소개」, 『건설기술 쌍용-신재생에너지 기술동향』

111) 이철용·이민규(2019), 사업용(100kW) 태양광 발전설비 원가구조 분석: 한국, 독일, 중국 사례를 중심으로, New & Renewable Energy 2019. 6 Vol.15, No.2

112) 냉난방공조신재생녹색건축전문저널 칸(2021), [인터뷰] 안한근 LH 도시기반처장, 2022년 11월 2일 접속, <http://www.khamn.kr/news/article.html?no=14826>

[그림 4-10] 서울시 경제성 분석화면



2.6. 리포트

위와 같이 분석된 결과로 생성된 리포트는 다음 그림 4-11과 같다. 리포트에서는 서울시의 일반적인 현황으로 인구, 면적, 위치에 대해 간략히 기술하고 공간정보에서 제공되었던 기후정보와 2020년 신재생에너지 생산량 및 2019년 CO₂ 배출량 정보를 가시화된 형태로 확인할 수 있다. 2050년 탄소중립에 대한 기술시나리오 결과에는 전환부문뿐 아니라 산업공정, 건물, 수송, 농축산 등 전 부문 배출량 대비 온실가스 감축량을 의미하는 전체 탄소중립률과 전환부문의 온실가스 배출량 대비 감축량을 의미하는 전환부문 탄소중립률이 구분하여 나타난다. 서울시에 기술도입 시, 전 부문 배출량의 1.43% 감축이 가능한 것으로 나타났고, 전환부문의 경우 28.92%까지 감축 가능한 것으로 분석되었다. 서울시에서는 2018년 대비 2019년에 전환부문을 제외한 나머지 부문에서 온실가스 감축이 이루어져 5.81%의 탄소중립률을 나타내었는데, 현재 2050년 탄소중립률은 다른 부문에서의 감축은 고려하지 않고, 전환부문의 기술도입에 따라 추가적으로 감축되는 양을 기반으로 산정된다. 이로 인해 2019년과 2050년의 탄소중립률 수치의 직접 비교는 어려운 측면이 존재하며, 서울시의 지속적인 감축 노력에 기술도입에 따른 온실가스 감축량이 더해진다면 더 높은 탄소중립률을 나타낼 것으로 판단된다. 기술별 전과정평가(LCA)에서 배출되는 온실가스를 고려하면 역 0.2~0.4% 가량의 탄소중립률 감소가 확인되었다. 리포트에는 도입한 기술별 에너지생산량과 경제성 분석결과가 요약적으로 함께 제시하였다.

[그림 4-11] 서울시 리포트



제 2 절 CATAS 알파버전 테스트 설문조사

1. 설문조사 개요

- (목적) 산학연 전문가 대상 CATAS 알파버전 테스트를 통한 프로그램 개발 상태 진단 및 향후 과제 도출
- (기간) 2022년 10월 24일(월)~28일(금) 5일간
- (방법) CATAS 알파버전 링크 공유 후 웹기반 설문조사 수행
 - ① 설문조사는 공통질문, 화면별질문, 기술별(전문분야) 질문으로 구성되어 있음
 - ② 설문조사 시간은 약 30~1시간정도 소요

2. 설문조사 항목

본 연구를 통해 개발된 CATAS의 알파버전에 대한 전문가 의견을 청취하기 위하여 표 4-4와 같이 항목을 구성하여 설문조사를 실시하였다. 공통질문으로는 크게 6가지 질문으로, Q1. CATAS에 대한 전체적인 만족도와 의견, Q2. 프로그램 디자인과 화면구성에 대한 의견, Q3. 제공하는 정보의 유용성에 대한 의견, Q4. 프로그램 사용의 편리성과 의견, Q5. 메뉴 구성의 적절성, Q6. 프로그램이 국민 인식 개선 기여도, Q7. 지자체 정책 입안자들의 정책 수립 기여도, Q8. 프로그램 사용의향 여부 등에 대한 의견으로 구성하였다. 화면별 질문으로는 CATAS 웹 화면의 구성 단계인 「공간선정→공간정보→기술화면→배출량→경제성→리포트」 순으로 화면별 구성의 적절성에 대해 설문하였다.

공간선정 페이지에 대해서는 Q1. 공간선정 화면구성의 적절성에 대한 의견, Q2. ‘탄소중립률’ 지표 사용의 적절성과 Q3. ‘탄소중립률’ 산정식 구성의 적절성 및 Q4. 기타의견에 대해 질의했다. 공간정보 페이지에 대해서는 Q1. 공간정보 제공 화면 구성의 적절성에 대한 의견, Q2. 제시하고 있는 공간정보의 적정성, Q3. 기타 의견에 대해 질의했다. 기술화면에서는 Q1. 기술 화면 구성의 적절성에 대한 의견, Q2. 기술도입에 따라 등장하는 애니메이션에 대한 의견, Q3. 기타의견에 대해 질의했다. 배출량 화면에서는 Q1. 배출량 화면 구성의 적절성에 대한 의견, Q2. 해당 지역의 배출현황에 대해 제시되는 정보의 적정성, Q3. 기술도입에 따라 예상되는 감축량을 성상별로 제시하는 것의 적절성, Q4. 기존의 석탄 연료 대체를 가정하여 산정한 감축량에 대한 자문 가능 여부, Q5. LCA를 반영한 탄소중립률 평가에 대한 의견과 Q6. 기타의견에 대해 질의했다. 경제성 화면에서는 Q1. 경제성 화면 구성의 적절성에 대한 의견, Q2. 현재 경제성 분석지표로 사용한 LCOE의 적절성 및 Q3. 추가 자문 가능 여부, Q4. 기타의견으로 항목을 구성하였다. 리포트 화면에서는 Q1. 리포트에서 제시하는 화면 구성의 적절성과, Q2. 해당 지역 정보의 적절성 및 Q3. 기타의견에 대해 질의하였다. 기술별 질문에서는 기술별 전문가들에게 본 시뮬레이터를 구성한 산정식을 제시하고, 적절성과 향후 고도화를 위한 자문 가능 여부를 질의하였다.

<표 4-4> CATAS 알파버전 테스트 설문조사 내용

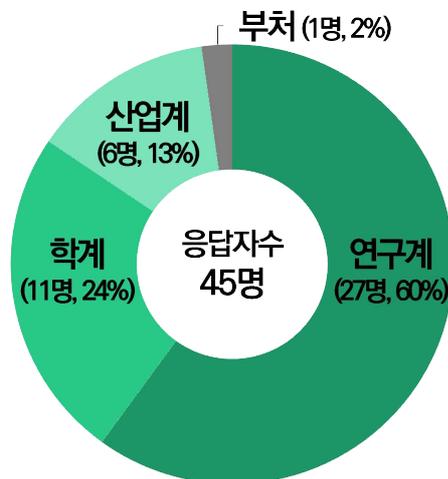
구분	설문조사 내용
공통질문	전체적인 만족도, 화면구성 및 디자인 만족도, 정보의 유용성, 유용한 정보의 선택, 프로그램 편리성, 분석흐름의 적절성, 국민의 탄소중립 인식개선 향상, 지자체의 탄소중립에 도움여부
화면별질문	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (공간선정) 화면구성의 적절성, 탄소중립률 지표의 적절성, 탄소중립률 산정식의 적절성 ▪ (공간정보) 화면구성의 적절성, 지역정보의 적절성 ▪ (기술화면) 화면구성의 적절성, 기술별 애니메이션의 적절성 ▪ (배출량) 화면구성의 적절성, 지역정보의 적절성, 온실가스 감축량-성상별 표현의 적절성, LCA 감축평가 제시의 적절성 ▪ (경제성) 화면구성의 적절성, 경제성지표-LCOE의 적절성 ▪ (리포트) 화면구성의 적절성, 분석정보의 적절성
기술별 질문	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 기술별 에너지 생산량 산정식에 대한 공통질문

3. 설문조사 결과

3.1. 응답자 기본정보

해당 설문 결과, 총 45명의 전문가가 응답하였으며, 이 중 60%(27명)는 정부출연연구소 등 연구계 종사자, 24%(11명)은 유관 학과 교수 등 학계 종사자, 13%(6명)은 산업계, 그 외 2%(1명)는 관련 부처 전문가가 설문조사에 응답하였다(그림 4-12). 이번 설문은 알파버전에 대한 1차 자문으로, 화면구성 및 기술별 산정식의 적절성을 중심으로 설문을 구성하였기 때문에 주로 연구계와 학계의 분야별 전문가들의 의견을 청취하였다. 프로그램이 보다 고도화되면 지자체 및 부처 R&D 기획부서 등 실제 프로그램 활용 주체의 참여를 확대하여 추가 설문을 실시할 계획이다.

[그림 4-12] 산학연별 응답자수



응답자는 탄소중립 정책 부문의 전문가 17명, 태양광 11명, 풍력 8명, 바이오에너지 7명, 조력과 온실가스 모델링 부문에 각 5명의 전문가가 참여하였다. 이 외에 파력, 연료전지, 태양열, 수열 부문에 각각 4명, LULUCF와 조류 부문에 각 3명, 수력과 지열 부문에 2명이 분포하고 있다. 그 외 7명이 응용 기상 등 기타 분야에 해당하는 것으로 응답하였다(그림 4-13). 중복응답으로 전문분야를 기재하도록 구성한 결과, 정책 부문과 태양광, 풍력, 바이오에너지 부문에서 상대적으로 많은 전문가가 참여했으며, 수력, 지열, 조류 및 LULUCF 부문의 경우 해당 분야 전문가들이 3명 이하로 참여하여 향후 해당 분야에서 보다 많은 전문가의 섭외와 의견 청취가 필요할 것으로 판단된다.

[그림 4-13] 기술별 응답자수



3.2. 공통질문

공통질문에 대한 응답 결과는 다음 그림 4-14와 같다. 공통질문 Q1. CATAS에 대한 전반적인 만족도에 대한 질문에는 응답자의 73%가 ‘만족’으로 응답했으며, 9%가 ‘매우 만족’으로 응답하였다. 해당 평가에 대한 ‘매우 만족’·‘만족’ 의견으로는 사용자 친화적인 GUI 환경, 접근성, 시각적 측면에 대한 긍정적인 평가가 많았다. 13%의 ‘보통’ 의견으로는 실제 탄소 중립에 대한 사전지식이 없는 일반인이나, 지자체 정책 입안자가 사용하기 어려운 측면에 대한 지적이 있었다. ‘불만족’으로 응답한 의견에는 시스템 오류에 대한 지적과 탄소 중립시나리오 분석은 BASIC이 아닌 전문가용이 타당하다는 의견이 있었다.

공통질문 Q2. 프로그램 디자인과 구성 만족도에 대한 질문에서는 ‘매우 만족’이 31%, ‘만족’이 64%, ‘보통’이 4%로 95%가 해당 측면에서 높은 만족도를 나타내었다. 공통질문 Q3. 정보의 유익성에 대한 응답으로는 ‘매우 만족’이 29%, ‘만족’이 58%, ‘보통’이 13%로 응답했으며, 온실가스 감축량에 대한 정보가 가장 유용한 정보라고 응답했다. 이와 더불어 공간정보 및 에너지생산량이 유익하다고 답했으며, 경제성 분석의 경우 상대적으로 유용한 정보라고 답한 수가 적었다. 공통질문 Q4. 프로그램의 편리성에 대한 질문에는 대부분이 편리하다고 응답했으나, ‘그렇지 않다’라고 응답한 의견에는 탄소 중립 기술 적용의 어려움과 사용자가 입력해야 하는 정보에 대한 안내 부족으로 적절한 수치를 기입하기 어렵다는 의견이 있었다.

공통질문 Q5. 프로그램 메뉴 분석의 흐름에 대한 질문에는 대부분이 그렇다고 응답했으나, ‘공간정보’ 메뉴에 실질적으로 공간정보를 제시하고 있지 않으므로, 메뉴명을 변경하고나 세밀한 공간 특성을 담아야 한다는 의견이 존재했다. 공통질문 Q6. CATAS가 국민 탄소중립 인식 개선에 도움이 되는지에 대한 질문에는 ‘매우 그러함’이 38%, ‘그러함’이 44%, ‘보통’이 7%, ‘그렇지 않음’이 11%로 응답하여 다른 문항에 비해 ‘그렇지 않음’의 비중이 높았다. 해당 의견으로는 일반인이 적용하기에 기술분석 부분이 어려운 측면이 있어, 일반인용으로는 보다 더 간단한 형태의 프로그램이 필요하다는 지적이 있었다. Q7. 정책 입안자들의 탄소중립 정책 수립에 도움이 되는지에 대한 질문에는 ‘매우 그러함’이 49%, ‘그러함’이 40%, ‘보통’이 9%, ‘그렇지 않음’이 2%를 차지했다. ‘도움이 되지 않는다’라는 응답에서는 정책 입안자들이 실제 설치량을 직접 입력하도록 할 경우, 해당 지자체의 입지 여건 및 기술 수준에 따라 설치 가능량을 파악하기 어려워 실제 정책 입안에 도움이 되지 못할 거라는 의견이 있었다. Q8. 정식공개시 사용의향에 대해서는 높은 비율로 사용 의사가 있음을 밝혔고, 사용하지 않을 것으로 응답한 응답자의 경우, 경제성 정보와 기술 세부내용을 알지 못하면 기입하기 어려운 점을 지적했으므로 이러한 부분을 반영하여 시스템을 개발 보완·개발 시, 사용자에게 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[그림 4-14] 공통질문 응답결과

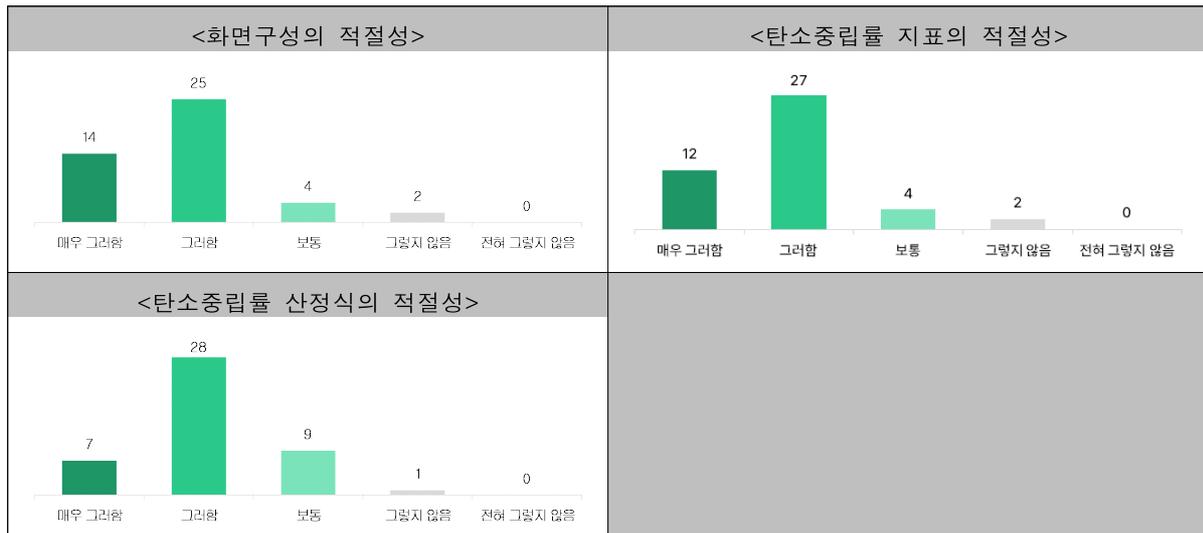


3.3. 화면별 질문

화면별 질문에 대한 응답결과는 다음 그림 4-15과 같다. 화면별 질문 중 Q1. 「공간선정」 화면구성의 적절성에 대해서는 응답자의 31%가 ‘매우 그러함’으로, 56%가 ‘그러함’으로, 9%가 ‘보통’으로, 4%가 ‘그렇지 않음’으로 응답했다. 해당 질문에 대한 의견으로는 공간 선정 시, 선택한 지자체가 유지되도록 화면이 설정될 필요성이 있으며 기초지자체에 대한 설정도 포함되어야 한다는 의견이 있었다.

Q2. ‘탄소중립률’ 지표 사용의 적절성에 대한 문항의 경우, 응답자의 27%가 ‘매우 만족’, 60%가 ‘만족’, 9%가 ‘보통’, 4%가 ‘그렇지 않음’으로 응답했다. 대부분이 직관적으로 탄소중립 정도를 표현한 지표에 대해 긍정적인 평가였으나, 한 가지 지표만 사용하기 보다는 과거 변화 추세를 함께 보여주는 것이 유용할 것이라는 의견과 ‘탄소중립률’ 대신 ‘탄소배출 감축률’ 또는 ‘온실가스 저감률’이 더 적합할 것 같다는 의견이 있었다. Q3. ‘탄소중립률’ 산정식의 적절성에 대한 응답의 경우, ‘매우 그러함’이 16%, ‘그러함’이 62%, ‘보통’이 20%, ‘그렇지 않음’이 2%를 차지했다. ‘그렇지 않음’으로 응답한 이유로는 지자체별 탄소중립 정책 수립에 따라 기준 시기가 다르므로, 기준년도에 대한 선택이 필요함을 언급했다. 이 외에 공간선정 전에 시뮬레이션 사용법에 대한 설명이 선행되면 좋을 것 같다는 의견이 다수 제기되었고, 첫 지도 화면의 이동과 해상도에 대한 개선 요구, 탄소중립률 산정식이나 결과의 표현 방식 및 해석 등에 대한 다양한 별도의 의견이 제시되었다.

[그림 4-15] 공간선정 화면 응답결과



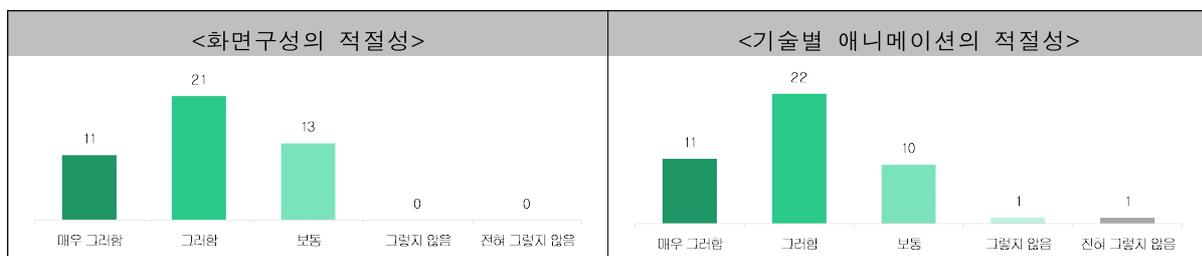
「공간정보」 화면구성 및 해당 정보의 적절성에 대해서는 응답자 전원이 ‘보통’ 이상의 만족도를 나타냈다(그림 4-16). 추가적인 의견으로는 표현 정보의 소수점 자리 수정, 보다 세분화 된 지역 정보제공 및 기상자료의 기준연도 제시 등이 있었다.

[그림 4-16] 공간정보 화면 응답결과



Q1. 「기술정보」 화면 구성의 적절성 부문에서는 응답자 전원이 ‘보통’ 이상의 만족도를 나타냈으나, Q2. 기술별 애니메이션의 적절성에 대해서는 24%가 ‘매우 만족’, 49%가 ‘만족’, ‘보통’이 22%로 96%가 ‘보통’ 이상의 만족도를 나타냈고, 4%는 ‘그럭지 않음’과 ‘전혀 그럭지 않음’으로 응답했다. ‘그럭지 않다’는 응답의 경우, 사용자 입력값에 반응하는 요소가 없는 점과 애니메이션보다는 선택된 지역에 기술이 적용되는 형태가 적합할 것이라는 의견이 제시되었다. 기타 의견으로는 일반인들이 기술 정보를 선택하여 입력하는 방식이 다소 복잡하다는 의견과 기술별 설명, 제품 사진 등이 함께 제시되는 것이 좋을 것 같다는 의견이 있었다. 또한, 지자체 차원에서는 전환보다 건물, 수송, 폐기물에 주도적 역할이 중요할 수 있으므로 시스템 활용성 측면에서 고려가 필요하다는 의견 등 다양한 개선사항들이 제시되었다.

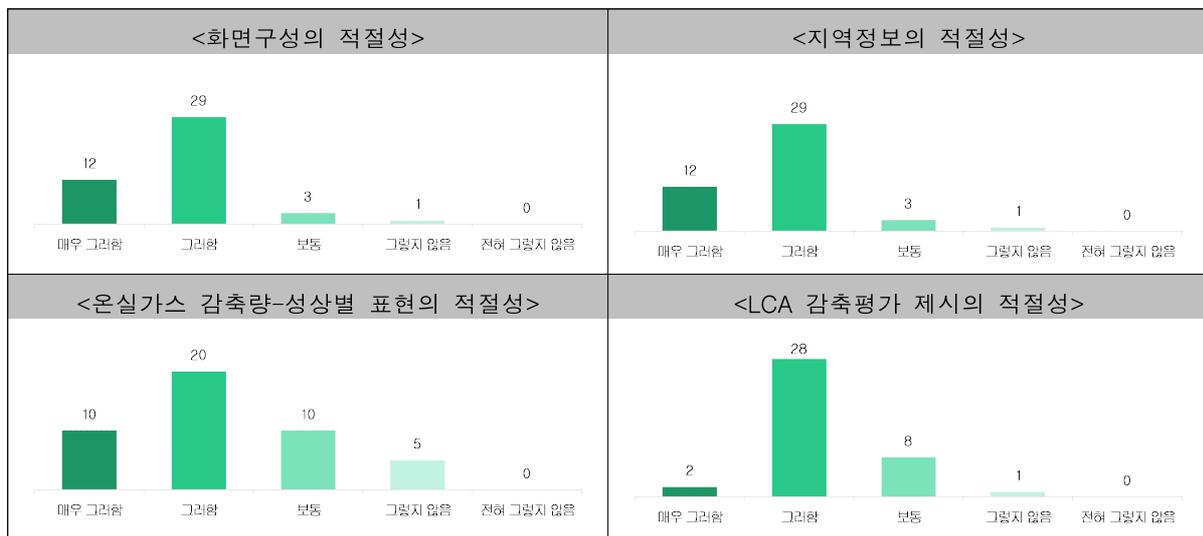
[그림 4-17] 기술 화면 응답결과



Q1. 「배출량」 화면 구성의 적절성에 대해서는 98%의 응답자가 ‘보통’ 이상의 만족도를 나타냈으며, Q2. 해당 지역 정보의 적절성에 대해서는 응답자 전원이 ‘보통’ 이상으로 응답했다. 하지만, Q3. 온실가스 예상 감축량을 성장별로 제시하는 것의 적절성 부문에서는 22%가 ‘매우 만족’, 44%가 ‘만족’, 22%가 ‘보통’, 11%가

‘불만족’으로 응답하여 상대적으로 ‘불만족’의 응답 비율이 높았다. 이에 대한 의견으로는 신재생에너지를 통해 생산되는 전력으로 기존의 1차 에너지를 대체하는 근거와 의미를 이해하기 어렵다는 의견 등이 제시되었다. Q4. LCA를 통한 온실가스 배출량 산정 질문에 대해서는 98%가 ‘보통’ 이상의 의견을 나타냈고, 1명의 응답자만이 LCA에 대한 소개나 근거가 부족하여 이해가 어렵다는 의견을 나타냈다. 그 외 별도 의견으로는 직접배출과 간접배출에 대한 고려, 탄소배출권 거래제에 대한 고려 및 LCA 개선방안 등이 제시되었다.

[그림 4-18] 배출량 화면 응답결과



Q1. 「경제성」 화면 구성의 적절성에 대해서는 9%의 응답자가 ‘매우 만족’, 51%의 응답자가 ‘만족’, 31%의 응답자가 ‘보통’, 9%의 응답자가 ‘불만족’으로 응답했다. 불만족으로 응답한 사용자 및 기타 의견의 경우, 전문 지식 없는 일반인들에게 참고자료 없이 직접 작성하는 것이 어렵다는 의견이 대부분이었다. Q2. 경제성 분석지표로 사용한 LCOE의 적절성에 대한 의견에는 98%가 적절하다고 답했으나, 추후 보다 다양한 지표를 추가할 필요성이 있음을 언급하였다.

[그림 4-19] 경제성 화면 응답결과



Q1. 「리포트」 화면 구성의 적절성에 대해서는 31%의 응답자가 ‘매우 만족’, 58%의 응답자가 ‘만족’, 9%의 응답자가 ‘보통’, 2%의 응답자가 ‘불만족’ 으로 응답하였다.
 Q2. 「리포트」 구성 정보의 적절성에 대해서는 18%의 응답자가 ‘매우 만족’, 67%의 응답자가 ‘만족’, 16%의 응답자가 ‘보통’ 으로 응답하였다. 기타 의견에서는 분석결과에 대한 추가 해설과 도출된 수치를 비교할 수 있는 참고 자료의 제공, 지자체별 적정 기술 추천, 시나리오 정보의 제공 등 보다 다양한 정보제공에 대한 수요가 있음을 확인하였다.

[그림 4-20] 리포트 화면 응답결과



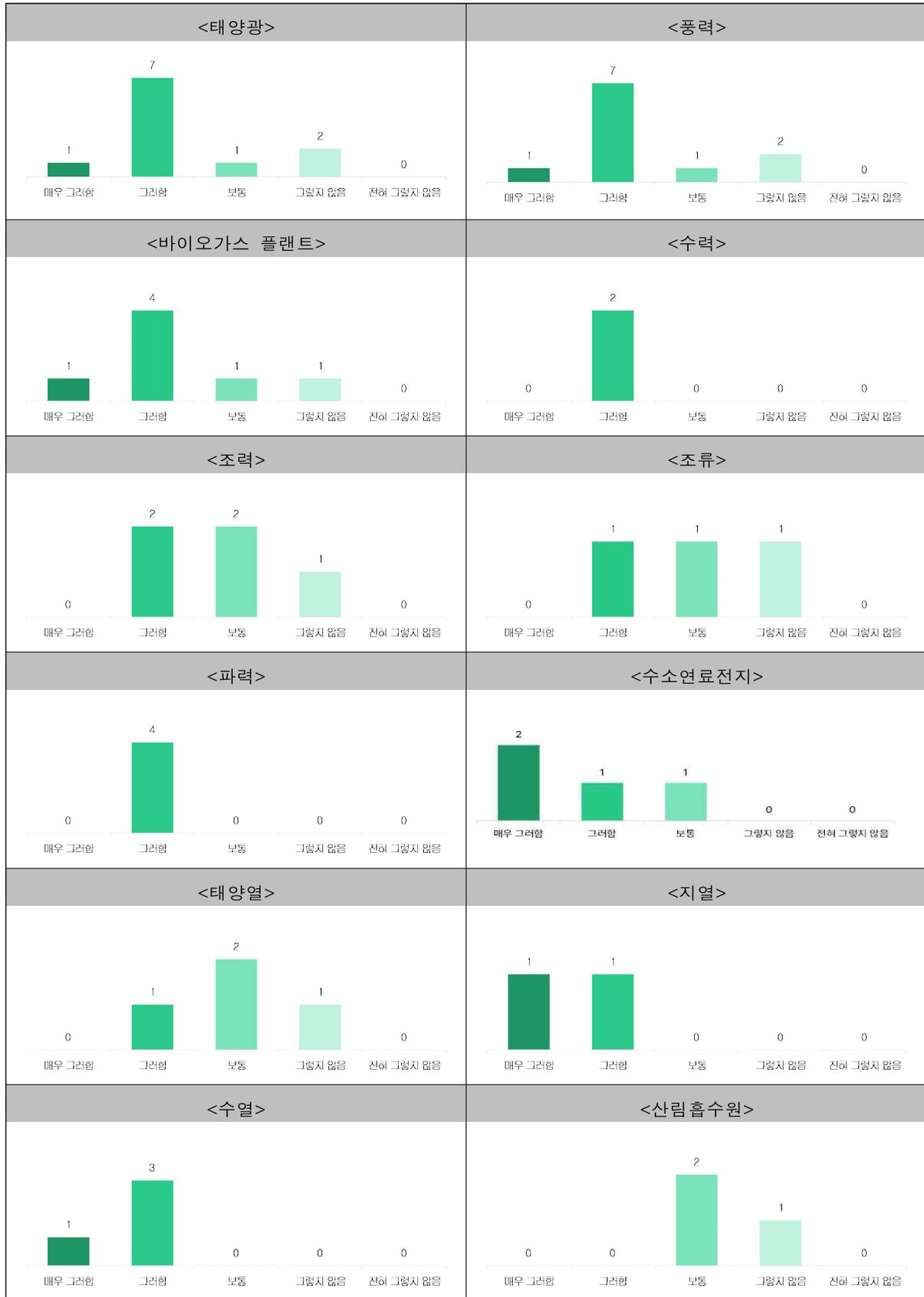
기타 개선사항으로는 일반인이 사용하기 어려운 측면이 있으므로, 사용 설명서를 함께 제시하거나 활용사례 등을 추가하면 좋겠다는 다수의 의견이 제시되었다. 또한, 해당 프로그램을 사용하는 사용자를 명확히 할 필요성과 지자체 정책결정자를 주요 수요처로서 고려한다면 이에 맞도록 메뉴 및 분석 범위 등을 개선해야 한다는 의견이 있었다.

3.4. 기술별질문

기술별 산정식의 적절성에 대한 응답에서 ①태양광의 경우, 시간에 따른 효율 변화, 방향과 경사 등 태양광 모듈 설치식 및 부조일수 등을 반영할 필요성이 제기되었고, ②풍력의 경우 각기 다른 터빈 높이에서 풍속에 대한 모수화 부분이 개선 가능하다는 자문의견이 있었다. ③바이오가스 플랜트에 대해서는 하루의 운영시간에 대한 고려, 지역 및 시기별로 다르게 생산되는 바이오가스 양에 따라 플랜트의 운전 성능을 구분할 필요성 및 바이오가스의 원료의 반입량을 고려할 필요성 등의 의견이 제시되었다. ④수력발전의 경우, 현재 산정식에서 활용한 유역면적 외에 실제 설치되는 수중보의 낙차를 통한 발전이 가능하고, 지자체에서 평균적인 강우량을 바탕으로 산정되는 발전량 보다는 수력발전이 도입되는 특정 하천에 발전시설 도입 시 계산이 유용할 것이라는 의견이 있었다. ⑤조력 에너지 산정과 관련해서는 본 연구의 산정식에서 활용한 최대조차가 아닌 정격출력을 기준으로 설비이용률에 따라 연간 발전량을 계산하는 것이 더욱 타당할 것이라는 의견이 제기되었다. ⑥조류 발전의 경우, 풍력발전과 동일하게 유속의 확률분포와 조류 발전 시스템의 출력곡선을 이용하여 연간발전량을 계산하거나 정격출력과 설비 이용율을 이용하는 것이 더욱 타당하다는 의견이 있었다. ⑦파력 에너지의 경우, 산정방법이 타당하며, 별도의 개선사항은 제시되지 않았다. ⑨연료전지와 관련해서는 사용 연료와 기술별로 면밀한 검토를 통해 배출량 산정이 필요하다는 의견이 제시되었다. ⑩수열·⑪지열 에너지의 경우에도 산정방법이 타당하다고 평가받았다. ⑫태양열의 경우에는 용도별 가동 일수와 및 집열기 설치 기울기 및 흡수효율을 추가적으로 고려할 필요성이 있다는 의견이 있었다. ⑬산림흡수원에 대해서는 지자체 계획 수립용으로 활용하기 위하여 지역별 특화된 계수 적용이 필요하며, 환경별·기후별·지역별 고도화의 필요성을 언급하였다.

이와 관련하여 향후 산정식 고도화 자문 가능 여부도 추가적으로 질의했다. 이를 통해 기술별 최소 2명에서 최대 10명까지 자문 의향을 밝혀 향후 기술자문단으로서 기술별 산정식 고도화에 도움을 받을 수 있을 것으로 기대된다.

[그림 4-21] 기술별 질문 응답결과 : 에너지 생산량 산식의 적절성



제 3 절 소결

일차적으로 개발된 CATAS에 서울시의 「2050 온실가스 감축추진계획」상 제시된 신재생에너지 보급목표를 적용하여 분석을 실시하였다. 서울시 계획상에는 태양광·연료전지·수열·소수력 부문에서 목표치를 제시하고 있었으나, 당해연도에 개발한 CATAS에서는 소수력 부문의 발전용량에 따른 온실가스 감축량 평가를 수행하기 어려운 한계가 존재했다. 이에 따라 소수력을 제외한 나머지 부문들에 대한 평가를 실시하였고, 태양광 기술의 경우, 서울시에서 설정한 목표치가 현재 시장 잠재량을 초과하여 제시되어 있어 현재의 한계치를 기반으로 한 평가를 수행했다. 분석결과 기술도입에 따라 서울시는 전체 탄소중립률의 경우 1.43%, 전환부문의 탄소중립률의 경우 28.92%를 달성할 수 있는 것으로 분석되었다. 서울시 시범적용을 통해 지자체의 탄소중립계획 수립을 지원·평가하기 위해서는 실제 설치 가능량을 기반으로 한 평가와 계획수립 주체와의 긴밀한 협업을 통해 프로그램 입력 및 결과 제시 방안을 마련할 필요성을 확인하였다.

또한, CATAS 알파버전 설문조사를 통해 당해연도에 개발된 프로그램을 진단하고 향후 과제를 도출하였다. 탄소중립과 관련된 정책 및 기술 관련 산·학·연 전문가 45명을 대상으로 설문을 실시한 결과, 프로그램에 대한 전반적으로 높은 만족도와 탄소중립에 유용한 프로그램이라는 긍정적인 평가를 확인하였다. 또한, 화면 구성, 기술별 산정식 고도화 및 프로그램의 활용 측면에서 다양한 의견들을 수렴하였다. 그 결과, BASIC으로 활용되기 위해서는 프로그램이 보다 단순화될 필요성이 있으며, 지자체의 탄소중립 계획수립을 지원하기 위해서는 실사용자의 의견 수렴을 통해 화면 및 기술선정 방식 등에 대한 변화가 필요하다고 사료된다. 해당 설문을 통해 확보한 기술별 자문단과의 지속적인 협력을 통해 향후 프로그램 고도화를 추진할 수 있을 것으로 기대된다.

V

결론 및 향후 계획

제1절 결론

제2절 향후 계획

제 5 장 결론 및 향후 계획

제 1 절 결론

본 연구는 공간단위 탄소중립 기술적용 시나리오 모형(CATAS) 개발을 통하여 국가 탄소중립 실현을 위한 공간별 기술 적용성 평가 및 단계별 기술도입 전략수립 체계를 구축하기 위해 수행되었다. 사용자의 사용목적을 고려하여 ‘CATAS-BASIC’ 과 ‘CATAS-PRO’ 로 구분되어 개발될 예정이며, ‘CATAS-BASIC’ 은 일반국민 또는 지자체 온실가스 감축정책 담당자들이 탄소중립 정책 수립 및 이행점검을 용이하게 할 수 있도록 개발될 예정이다. 금년은 ‘CATAS-BASIC’ 개발에 대한 1차년도 목표로서 목표는 에너지전환 기술을 적용한 탄소중립 평가프로그램 기획 및 알파버전을 개발하는 것이다.

모형의 개발범위는 온실가스 배출원 범위) 1차년도(당해연도)는 직접배출량을 대상으로 분석 수행하였다. UN에 제출하는 국가 온실가스 배출량 보고서는 직접배출량만을 대상으로 하며, 온실가스종합정보센터(GIR)에서 제공하는 지역 온실가스 배출통계 또한 직접배출량만을 고려하고 있다. 따라서 1차년도인 금년은 직접배출량을 중심으로 분석하고, 2차년도에 간접배출량을 포함하여 분석 예정이다. 그리고 공간적 범위는 직접·간접배출의 경계를 공간적 범위로 설정하였다. 본 연구에서는 탄소중립 전략수립이 필요한 물리적·지역적 공간을 “공간”으로 정의하며, 온실가스 배출원에 대한 구역/경계가 구분되는 공간을 본 연구의 공간적 범위로 설정하였다 현재 탄소중립률 분석의 기초자료가 되는 온실가스 배출통계는 현재 광역지자체 단위에서 제공되므로, 당해연도에는 17개 광역지자체를 대상으로 분석 수행하였다. 기술적 범위는 2050 탄소중립 시나리오 전환, 산업, 건물, 수송 등 10개 부문 중 온실가스 배출량이 가장 큰 전환부문과 산림 흡수원을 당해연도 분석대상으로 설정하였다. 그리고 「기후기술분류체계」, 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법」, 「탄소중립 중점기술(안)」 검토를 통해 ①태양광, ②풍력, ③바이오에너지, ④수력, ⑤해양에너지(조류, 조력, 파력), ⑥수소연료전지, ⑦태양열, ⑧지열, ⑨수열 및 ⑩산림 흡수원을 기술적 범위에 포함하였다.

탄소중립률 평가 방법론은 ①온실가스 배출현황 분석, ②기술도입에 따른 에너지생산량 예측, ③온실가스 감축량 산정, ④탄소중립률 산정까지 4단계로 이루어져있다. 우선 ①온실가스 배출현황 분석은 GIR과 협력을 통해 지자체별 활동자료를 구축을 통해 지자체별·에너지원별 2018년 온실가스 배출현황 분석하여 현 지자체 탄소중립률 진단하였다. ②기술도입에 따른 에너지생산량 예측은 지자체별·월별 기상정보를 수집·가공하고, KS 인증제품 기술정보 데이터베이스 구축하여 기후정보와 기술정보 연계를 통한 기술별 에너지 산정 방법론 구축하였다. ③온실가스 감축량 산정) 기술도입에 따른 기존 화석연료 대체효과와 전과정평가(LCA) 기반의 온실가스 배출량 분석을 통해

기술도입에 따른 온실가스 감축량 산정하였다. ④탄소중립률 산정은 2018년 온실가스 배출량 대비 기술도입에 따른 감축량 비율로 탄소중립률 도출하였다.

CATAS-BASIC에 대한 1차 모형 방법론을 구축 한 후 웹 기반 프로그램 개발을 하였다. 우선 요구사항, 분석/설계, 구현, 시험, 이행, 비즈니스 모델링을 포함한 6개의 핵심 프로세스로 구성되는 웹 기반 탄소중립률 평가 프로그램 개발을 위한 상세 프로세스 구축하였다. 구축된 시스템과 시스템 간 지속적 기능 및 데이터 교환을 위한 품질보장, 의사전달 기능 향상 및 유지보수 용이성 확보를 위한 표준화 요소 고려하였다. 프로그램의 시스템 구성은 데이터베이스, 웹서버, 사용자 인터페이스로 구성하였다. 프로그램에서 공간단위별 탄소중립률을 나타내기 위해 배출량정보 수집 및 이를 기반으로 한 탄소중립률 계산결과로 DB를 구축, 지자체별 지역 정보와 함께 GIS 기반으로 표출하였다. 공간단위별 10개의 기후기술에 대한 기술사양, 기술세부사항 및 기상인자 데이터베이스 구축을 기반으로 에너지 발전량 산정 시뮬레이션 모듈개발하였다. 시스템 구축 및 개발 관련 정보의 보안 요구사항 준수를 위해 관리적 보안, 기술적 보안, 물리적 보안 관리체계 구축하고, 데이터 거버넌스 및 표준을 적용해 향후 확장성을 고려한 DB를 설계하고 데이터 리엔지니어링(데이터 표준화와 구조화)을 통해 내부 데이터 재정리하였다.

웹기반 CATAS-BASIC이 개발 된후 서울시의 「2050 온실가스 감축추진계획」상 제시된 신재생에너지 보급목표를 적용하여 분석을 실시하였다. 서울시 계획상에 태양광·연료전지·수열·소수력 부문에서 목표치를 제시하고 있다. 태양광의 경우 현재 시장 잠재량 고려 시 목표치('22년까지 500MW, '50년까지 5GW) 보급 반영이 불가능하며, 최대 43.38GWh 전력량 생산 가능하다. 수소연료전지의 경우 보급목표('22년까지 3000MW, '50년까지 1GW) 달성 시, '22년에 약 2,417GWh(서울시 전력소비량의 약 5.06%), '50년에는 8,760GWh의 전력(전력소비량의 약 18.32%) 생산 예측되었다. 수열 시설 공급확대 계획(한강홍수통제소 350kW, 강남삼성병원 40MW, 영동대로 복합환승센터 14MW 등 신규 수열 시설 설치) 달성 시 연간 577,150,068MJ의 냉난방 에너지(서울시 열에너지 가정·상업부문 열에너지 소비량(332,000toe)의 약 4.15%) 생산 예측되었다. 소수력 목표(잠실수중보 소수력 발전시설 2.5MW 설치)의 경우, 지자체별 강수량과 낙차, 유역면적을 이용하여 이론적 발전량을 산정하는 본 시뮬레이터에 직접 반영하여 평가하기 어려운 측면이 존재하여, 향후 고도화시 개선이 요구되었다. 태양광·수소연료전지·수열을 적용한 결과, 서울시의 전환부문 배출량인 1.49백만 tCO₂eq 중 기술도입으로 0.43백만 tCO₂eq 감축하여 전환부문 탄소중립률은 28.94%로 분석되었다. 경제성 분석 결과, 태양광의 LCOE는 142원/kWh(수명 30년 가정), 수소연료전지는 431원/kWh(수명 10년 가정)로 산정되었다.

마지막으로 산학연 전문가 대상 CATAS 알파버전 테스트를 통한 프로그램 개발 상태 진단 및 향후 과제 도출하였다. CATAS 알파버전에 대한 프로그램 만족도, 유용성, 편리성 및 기술별 에너지생산량 산정식의 적정성 등의 설문 항목에 대해 총 45명의 전문가가 응답하였다. 프로그램에 대한 전반적으로 높은 만족도와 탄소중립에 유용한 프로그램이라는

긍정적인 평가 확인하고, 추가 의견들을 수렴 결과, 일반인용으로 활용되기 위해서는 프로그램이 보다 단순화될 필요성이 있으며, 지자체의 탄소중립 계획수립을 지원하기 위해서는 실사용자의 의견 수렴을 통해 화면 및 기술선정 방식 등에 대한 변화 필요성이 제기되었다. 해당 설문을 통해 확보한 기술별 자문단과의 지속적인 협력을 통해 향후 프로그램 고도화를 추진할 수 있을 것으로 기대된다.

제 2 절 향후 계획

2차년도 연구에서는 ①간접배출량 분석, ②에너지산정식의 고도화, ③수송부문 기술 범위 확장, ④공간단위 기술 최적화 모형 개발, ⑤프로그램의 유용성 및 편리성 제고를 주요 방향으로 고려하여 모형을 개선할 계획이다. 우선 ①간접배출량 분석은 우선 공간의 온실가스 배출량을 제대로 이해하기 위해서는 공간 내에 직접배출되는 온실가스뿐 만 아니라 전기 및 열 등 간접배출량을 동시에 비교·분석하는 것이 중요하기 때문이다.

②에너지 산정식의 고도화의 목적은 금년에 기술별로 개발된 산정식 초안을 고도화 및 구체화하여 에너지 생산량 예측 분석 결과에 대한 신뢰도를 제고함에 있다. 예를 들면 기후정보의 경우에는 일사량, 풍속 등 자료를 고해상도 데이터를 활용하여 산정할 수 있도록 하고, 기술정보와 같은 경우에는 현재와 같이 기술별 제품정보가 아닌 에너지 용량 단위(MW, GW 등)를 활용하여 분석할 수 있도록 할 예정이다.

2050 탄소중립 시나리오 상 전환, 산업 부문 다음으로 수송부문의 온실가스 배출량이 가장 많다. CATAS-BASIC의 주요 수요자는 일반국민과 지자체 온실가스 감축 관련 담당자이므로 산업부문보다 ③수송부문에 대한 기술범위 확장을 우선적으로 고려하였다. 전기차, 수소차 등 보급에 따른 도로부분 온실가스 감축량 분석과 함께 철도, 항공, 해운 부문의 기술도 포함하여 분석할 수 있도록 계획 중이다.

④공간단위 기술 최적화 모형 개발은 비용 최소화, 신재생에너지를 활용한 전력생산량 최대화, 온실가스 배출량 최소화 등을 최적화 조건으로 반영하여 공간별 최적 에너지믹스 경로를 제안하는 연구를 수행하고자 한다. 또한, 이와 더불어 기상 현황 등과의 연계를 통해 기술별 최대 생산가능량을 평가하고, 신기술도입에 따른 비용 및 탄소중립률 달성의 기여 효과를 분석하여 제시함으로써, 현황을 진단하고 향후 방향성을 제시하고자 한다.

⑤프로그램의 유용성, 편리성의 경우에는 알파버전의 설문조사 결과를 수렴하여 현재 5개로 구분된 화면을 2~3개 정도로 줄일 예정이다. 온실가스배출량현황-에너지생산량-온실가스배출량-탄소중립률산정에 이르는 모든 분석 과정을 한 화면에 포함하여 분석하고, 구체적인 분석결과를 인포그래픽 형식으로 다음 화면에 나타나게 하는 방향으로 화면구성을 수정·보완할 예정이다. 그리고 사용자들이 처음시작부터 프로그램을 잘 사용할 수 있도록 가이드라인을 제공하고자 한다.

참 고 문 헌

[국내 문헌]

- 1) 고정우·이병걸(2016), 「육상풍력 적지분석 프로세스에 대한 연구」, 『한국환경과학회지』, 25(3), p457~464
- 2) 과학기술정보통신부·녹색기술센터(2022), 「2021 기후기술 국가연구개발사업 조사·분석보고서」
- 3) 관계부처합동(2021), 「2050 탄소중립 시나리오안」
- 4) 국립기상과학원 미래기반연구부(2021), 「고해상도 태양광 기상자원지도 설명자료」
- 5) 기상청(2022), 「고해상도 기상·기후정보」
- 6) 기상청(2022), 「기상자료개방포털」
- 7) 김성철 외(2019), 「소수력 발전 활성화를 위한 분류 기준」, 『Water for future』, 52(1), p62~73
- 8) 백길남 외(2015), 「건물 용도별 지열히트펌프 설비 부하율을 적용한 지열에너지 이용량 비교」, 『한국자원공학회지』, 25(4)
- 9) 산업통상자원부·에너지경제연구원(2019), 「지역에너지통계연보」
- 10) 산업통상자원부·한국에너지공단 신·재생에너지센터(2020), 「신·재생에너지 백서」
- 11) 서울시 기후환경본부 환경정책과(2020), 「서울시, 국내 처음으로 「온실가스 감축 추진계획」 C40 제출」
- 12) 신영기(2011), 「지열원 열펌프 시스템소개」, 『건설기술 쌍용-신재생에너지 기술동향』
- 13) 심중표·이창래·이흥기(2012), 「신재생에너지원인 수소연료전지의 원리와 응용」, 『전기 의세계』, 61(11), p15~22
- 14) 엄지용 외(2021), 「2050 탄소중립 전환 시나리오 : 한국형 통합평가모형 분석」
- 15) 온실가스종합정보센터(2021), 「2022 시·도 온실가스 인벤토리 산정지침」
- 16) 유인상·김하용·정상만(2017), 「우리나라의 표준유역별 연간 소수력발전가능량 산정」, 『J. Korean Soc. Hazard Mitig』, 17(6), p473~481
- 17) 이근대·김기환(2020), 「재생에너지 공급확대를 위한 중장기 발전단가(LCOE) 전망 시스템 구축 및 운영(1/5)」, 『에너지경제연구원 기본연구보고서』, p20~21

- 18) 이선정 · 임종수 · 강진택(2019), 「주요 산림수종의 표준 탄소흡수량 (ver.1.2)」, 『국립산림과학원, NIFoS 산림정책이슈』, 129, p. 13
- 19) 이철용 · 이민규(2019), 「사업용(100kW) 태양광 발전설비 원가구조 분석: 한국, 독일, 중국 사례를 중심으로」, 『New & Renewable Energy』, 15(2)
- 20) 정성은 외(2018), 「관측 유량 자료를 이용한 소수력 잠재량 평가에 대한 사례연구」, 『한국태양에너지학회 논문집』, 38(4), p.43~54
- 21) 제주특별자치도(2022), 「2050 탄소중립을 위한 제주특별자치도 기후변화대응 계획(안)」
- 22) 조일현 · 박정순(2021), 「재생에너지 보급장벽 분석 및 보급 정책 설계방안」, 『에너지경제연구원 기본연구보고서』, p.50
- 23) 조철희 외(2016), 「API 를 적용한 국내 조류에너지 잠재량 추정」, 『한국태양에너지학회 논문집』, 36(1), p75~81
- 24) 충청남도(2022), 「충청남도 2045 탄소중립 녹색성장 기본계획(초안)」
- 25) 한국수자원공사(2020), 「수열에너지 잠재량 분석 및 적지조사」
- 26) 한국에너지공단(2015), 「정부 3.0 맞춤형 EG-TIPS, 참여기업 경영진 간담회 개최」
- 27) 한국에너지공단(2020), 「에너지첫걸음」
- 28) 한국에너지기술연구원(2022), 「신재생에너지자원지도」
- 29) 한국행정연구원(2022), 「제주특별자치도의 탄소중립 추진 현황 및 향후 계획」
- 30) 해양수산부(2019), 「전국 심해설계파 산출보고서」
- 31) 허남효(2007), 「유기성폐기물의 바이오가스화 기술 및 보급 현황」, 『한국신재생에너지학회 학술대회논문집』, p763~766
- 32) 현정희 외(2019), 「적응경로 기반 지자체 기후변화 적응계획 강화를 위한 의사결정 지원 전략」, 『한국기후변화학회지』, 10(2), p89~102
- 33) 환경부 온실가스종합정보센터(2021), 「2021년 지역별 온실가스 인벤토리(1990-2019)」
- 34) 환경부(2022), 「2021년 승인 온실가스 배출·흡수 계수」
- 35) 황수진 외(2021), 「육상풍력 입지지도 II: 고려대상 지역 지도화 및 민감도 분석」, 『한국풍공학회지』, 25(2), p55~60
- 36) 황수진 · 조철희(2019), 「국내 해양에너지 이론적 잠재량 산정 연구」, 『한국수소및신에너지학회논문집』, 30(5), p465~472

[국외 문헌]

- 1) Cornett, A. M.(2008), “A Global Wave Energy Resource Assessment” , *Eighteenth international offshore and polar engineering conference*
- 2) IPCC(2018), “Special Report on Global Warming of 1.5°C ”
- 3) Jones, C., and Kammen, D. M.(2014), “Spatial Distribution of US Household Carbon Footprints Reveals Suburbanization Undermines Greenhouse Gas Benefits of Urban Population Density “, *Environmental science & technology*, 48(2), p895~902
- 4) Morgan, M., Anable, J., Lucas, K(2021), “A Place-Based Carbon Calculator for England” , *29th Annual GIS Research UK Conference*
- 5) Nam, K., Hwangbo, S., Yoo, C.(2020), “A Deep Learning-Based Forecasting Model for Renewable Energy Scenarios to Guide Sustainable Energy Policy: A Case Study of Korea” , *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 122, p1~18
- 6) Park, M., Barrett, M., Cassarino, T. G.(2019), “Assessment of Future Renewable Energy Scenarios in South Korea Based on Costs, Emissions and Weather-Driven Hourly Simulation” , *Renewable Energy*, 143, p1388~1396
- 7) Park, S. Y. et al.(2016), “An Analysis of the Optimum Renewable Energy Portfolio Using the Bottom-Up Model: Focusing on the Electricity Generation Sector in South Korea” , *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, p319~329
- 8) RETScreen International Clean Energy Decision Support Centre (Canada). (2001), “Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases Textbook”
- 9) Sinha, S., and Chandel, S. S.(2014). “Review of Software Tools for Hybrid Renewable Energy Systems” , *Renewable and sustainable energy reviews*, 32, p192~205
- 10) UN Climate Action(2019), “Report of the Secretary-General on the 2019 Climate Action Summit the Way Forward in 2020”
- 11) UN-Habitat(2020), “World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization”
- 12) Vidal-Amaro, J. J., Østergaard, P. A., Sheinbaum-Pardo, C.(2015) “Optimal Energy Mix for Transitioning from Fossil Fuels to Renewable Energy Sources-The Case of the Mexican Electricity System” , *Applied Energy*, 150, p80~96
- 13) 영국 BEIS(2022), “UK Local and Regional Greenhouse Gas Emissions Estimates for 2005-2020”
- 14) 일본 국토교통성(2014), “二酸化炭素削減効果シミュレーション・ツール利用マニュアル(CO2-Reduction Effect Simulation Tool Users’ Guide)”

[웹사이트]

- 1) BBC(2021), How cities are going carbon neutral, 2022.05.23. 접속, <https://www.bbc.com/future/article/20211115-how-cities-are-going-carbon-neutral>
- 2) C40(2022), About C40, 2022.05.19. 접속, <https://www.c40.org/about-c40/>
- 3) Cambridge University Press. (2023). Alpha version. In Cambridge dictionary. January, 31, 2023, 접속. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/>
- 4) Cool Climate Network(2022), Cool Climate Maps, 2022.10.26. 접속, <https://coolclimate.berkeley.edu/index>
- 5) CREDS(2022), Place-Based Carbon Calculator, 2022.10.26. 접속, <https://www.carbon.place>
- 6) Enovate(2022), Net Zero Tracker. 2022.10.30. 접속, <https://zerotracker.net/>
- 7) EPA(2021), FLIGHT Basics, 2022.11.01. 접속, <https://ccdsupport.com/confluence/display/ghgp/FLIGHT+Basics>
- 8) EPA(2021). Facility Level Information on Green House gases Tool, 2022.10.17. 접속, <https://ghgdata.epa.gov/ghgp/>
- 9) German Federal Ministry for Economy and Technology(2022), District Energy Concept Adviser, 2022.07.15. 접속, <https://www.district-eca.de/>
- 10) Government of Canada(2022), RETScreen, 2022.07.15. 접속, <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>
- 11) IEA(2021), Empowering ” Smart Cities “ toward net zero emissions, 2022.05.23. 접속, <https://www.iea.org/news/empowering-smart-cities-toward-net-zero-emissions>
- 12) National Renewable Energy Laboratory(2022), HOMER Energy, 2022.08.18. 접속, <https://www.homerenergy.com/>.
- 13) North Rhine-Westphalia(2022), Energy atlas NRW, 2022.07.15. 접속, <https://www.energieatlas.nrw.de/site>
- 14) The Wind Power(2022), Manufacturers and turbines databases, 2022.10.31. 접속, <https://www.thewindpower.net>
- 15) UK National Atmospheric Emissions Inventory(2022). CO2 Interactive Map, 2022.10.17. 접속, <https://naei.beis.gov.uk/laco2app/>
- 16) UN Climate Action(2019), 2019 Climate Action Summit, 2022.11. 01. 접속, <https://www.un.org/en/climatechange/2019-climate-action-summit>
- 17) UNEP Climate Initiatives Platform(2022), Climate Ambition Alliance, 2022. 05.19. 접속, https://climateinitiativesplatform.org/index.php/Climate_Ambition_Alliance:_Net_Zero_2050

- 18) US EPA(2022), Greenhouse Gases at EPA, 2022.10.30. 접속, <https://www.epa.gov/greeningepa/greenhouse-gases-epa>
- 19) Work for Climate(2021), What' s the difference? Scope 1, 2 and 3 corporate emissions, 2022.10.30. 접속, https://www.workforclimate.org/post/whats-the-difference-scope-1-2-and-3-corporate-emissions?gclid=Cj0KCCQjwwfiaBhC7ARIsAGvcPe65I1PWbV52OA2jQ3uZIEUw-MYQW XnHJMlgIp6MCExpP-IXYUp9NUAaAl5nEALw_wcB
- 20) WRI & WBCSD(2022), GHG Protocol, 2022.08.18. 접속, <https://ghgprotocol.org>
- 21) 국가기후기술정보시스템(2022), 기후기술 분류체계, 2022.10.28. 접속, <https://www.ctis.re.kr/ko/techClass>
- 22) 국립해양조사원(2022), 바다누리 해양정보서비스, 2022.10.31. 접속, <http://www.khoa.go.kr/oceangrid/khoa/intro.do>
- 23) 기상청(2022), 기상자료개방포털, 2022.10.27. 접속, <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>
- 24) 냉난방공조신재생녹색건축전문저널 칸(2021), [인터뷰] 안한근 LH 도시기반처장, 2022.11.02. 접속, <http://www.kharn.kr/news/article.html?no=14826>
- 25) 대학생신재생에너지기자단(2021), 연료전지는 친환경적일까?, 2022년 11월 2일 접속, <https://renewableenergyfollowers.org/3532>
- 26) 법제처(2022), 「탄소흡수원유지 및 증진에 관한 법률」, 2022.10.31. 접속, <https://www.law.go.kr/LSW//lsLawLinkInfo.do?lsJoLnkSeq=900374109&lsId=011554&chrClsCd=010202&print=print>
- 27) 부산광역시(2022), 「부산광역시 2050 탄소중립녹색성장위원회」 개최, 2022. 11.01. 접속, <https://www.busan.go.kr/nbtnewsBU/1526145?curPage=&srchBeginDt=2022-04-16&srchEndDt=2022-04-23&srchKey=&srchText=>
- 28) 서울특별시(2020), 2050온실가스 감축전략, 2022.11.01. 접속, <https://news.seoul.go.kr/env/environment/climate-energy/2050-ggrs>
- 29) 서울특별시(2020), 서울시, 국내 처음으로 '2050 온실가스 감축 추진계획' C40 제출, 2022.11.01. 접속, <https://news.seoul.go.kr/env/archives/510120>
- 30) 윤경훈(2021), 태양광모듈의 사용수명예측, 2022.11.02. 접속, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/07/Report-IEA%E2%80%93PVPS-T13-16_2021_Service_Life_Estimation_for_PV_Modules_Korean-Version_211102.pdf
- 31) 일본환경성(2022), 지구 온난화 대책의 추진에 관한 법률, 2022.10.24. 접속, <https://www.env.go.jp/press/109218.html>

- 32) 충청남도(2022), 2045 탄소중립·녹색성장 기본계획 논의, 2022.11.01. 접속, http://www.chungnam.go.kr:8100/cnnet/board.do?mnu_url=/integratedBoardView.do&board_seq=405696&field03=in&cdate=20220530&mnu_cd=CNMENU02362&searchCnd=0&srtdate=20180101&enddate=20220628&pageNo=16&pageGNo=1&showSplitNo=10&code=600
- 33) 한국남동발전(2020), 2020년 국내 5개 기업 평균 이용률, 2022.11.03. 접속, <https://www.koenergy.kr/kosep/fr/main.do>
- 34) 한국에너지공단(2022), EG-TIPS, 2022.07.15. 접속, https://tips.energy.or.kr/carbon/carbon_cal.do.
- 35) 한국에너지공단(2022), 신재생에너지설비 KS인증. 2022.10.30. 접속, https://www.knrec.or.kr/biz/introduce/new_cert/intro_energyks.do?gubun=A
- 36) 한국에너지공단(2022), 신재생에너지원별 소개, 2022.10.31. 접속, <https://www.knrec.or.kr/biz/main/main.do>
- 37) 환경부(2020), 대한민국 기초지방정부 기후위기비상선언 선포식, 2022.10.30. 접속, <https://www.korea.kr/archive/speechView.do?newsId=132032224>
- 38) 환경부(2020), 탄소중립, 지방정부가 앞장선다, 2022.10.30. 접속, <http://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=286&orgCd=&boardId=1383300&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=>
- 39) 환경부(2021), 2021년 유기성폐자원 바이오가스시설 현황, 2022.10.27. 접속, www.me.go.kr
- 40) 환경부(2021), 환경공간정보서비스 세분류 토지피복도, 2022.10.27. 접속, <https://egis.me.go.kr/map/map.do>
- 41) 환경부(2021). 2021 P4G 서울 녹색미래 정상회의, 2022.10.30. 접속, <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=286&orgCd=&boardId=1456180&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=>
- 42) 환경부(2022), 「법령·정책」 환경정책, 2022.10.30. 접속, <http://www.me.go.kr/>
- 43) 환경부(2022), 환경공간정보서비스, 2022.10.30. 접속, <https://egis.me.go.kr>

별첨

별첨1. 도시단위 탄소중립 선언 현황

별첨2. CATAS 알파버전 테스트
설문조사 상세결과

별첨1

도시단위 탄소중립 선언 현황

2022년 10월 기준

	대륙	국가명	도시명	목표년도	달성도 (법/정책/선언/논의 중 등)
1	유럽	네덜란드	암스테르담	2050	정책수립
2	유럽	독일	에센	2050	논의 중
3	유럽	독일	베를린	2045	법제화
4	유럽	노르웨이	오슬로	2030	정책수립
5	북아메리카	미국	오스틴	2040	정책수립
6	아프리카	코트디부아르	아비장	2050	논의 중
7	아프리카	가나	아크라	2050	논의 중
8	아프리카	에티오피아	아디스아바바	2050	정책수립
9	오세아니아	호주	애들레이드	2025	정책수립
10	아시아	요르단	임만 주	2050	정책수립
11	유럽	그리스	아테네	2050	선언
12	오세아니아	뉴질랜드	오克兰드	2050	정책수립
13	유럽	스페인	바르셀로나	2050	정책수립
14	남아메리카	브라질	벨루오리존치	2050	선언
15	유럽	영국	버밍엄	2030	정책수립
16	남아메리카	콜롬비아	보고타	2050	정책수립
17	북아메리카	미국	보스턴	2050	정책수립
18	유럽	영국	본머스	2050	선언
19	유럽	영국	브라이턴앤드호브	2030	정책수립
20	유럽	영국	브리스톨	2030	정책수립
21	유럽	헝가리	부다페스트	2050	논의 중
22	남아메리카	아르헨티나	부에노스아이레스	2050	정책수립
23	아시아	아랍에미리트	두바이	2050	선언
24	아시아	필리핀	세부	2030	선언
25	아시아	중국	칭두	2050	정책수립
26	아시아	인도	첸나이	2050	정책수립
27	남아메리카	브라질	쿠리티바	2050	정책수립
28	남아메리카	아르헨티나	멘도사	2050	논의 중
29	북아메리카	미국	달라스	2050	정책수립
30	아시아	인도	뉴델리	2050	정책수립
31	북아메리카	미국	덴버	2040	정책수립
32	북아메리카	미국	디모인	2050	선언
33	북아메리카	미국	디트로이트	2050	정책수립
34	남아메리카	아르헨티나	로사리오	2050	논의 중

35	남아메리카	아르헨티나	살타	2050	논의 중
36	유럽	독일	뒤셀도르프	2035	선언
37	아시아	방글라데시	다카	2050	논의 중
38	유럽	영국	에든버러	2030	정책수립
39	북아메리카	캐나다	에드먼턴	2050	정책수립
40	아시아	중국	푸저우	2060	정책수립
41	유럽	영국	글래스고	2030	정책수립
42	유럽	프랑스	그르노블	2050	논의 중
43	아프리카	콩고	킨샤사	2050	선언
44	아시아	베트남	하노이	2050	정책수립
45	유럽	독일	함부르크	2050	정책수립
46	유럽	폴란드	헬싱키	2035	정책수립
47	아시아	일본	히로사키	2050	선언
48	북아메리카	미국	호놀룰루	2045	법제화
49	북아메리카	미국	휴스턴	2050	정책수립
50	북아메리카	미국	인디애나폴리스	2050	정책수립
51	유럽	터키	이스탄불	2053	선언
52	아시아	인도네시아	자카르타	2050	법제화
53	아프리카	콩고	브라자빌	2050	선언
54	북아메리카	미국	캔자스시티	2050	정책수립
55	유럽	덴마크	코펜하겐	2025	정책수립
56	아시아	인도	캘커타	2050	정책수립
57	남아메리카	콜롬비아	메데인	2050	논의 중
58	아시아	일본	구마모토시	2050	선언
59	남아메리카	코스타리카	산호세	2050	논의 중
60	유럽	영국	레스터	2030	정책수립
61	유럽	독일	라이프치히	2050	정책수립
62	유럽	프랑스	릴	2050	정책수립
63	남아메리카	에콰도르	키토	2050	정책수립
64	유럽	보르투갈	리스본	2050	논의 중
65	유럽	영국	리버풀	2030	정책수립
66	유럽	영국	런던	2040	정책수립
67	북아메리카	미국	샌타애나	2050	정책수립
68	유럽	스페인	마드리드	2050	정책수립
69	유럽	영국	맨체스터	2038	정책수립
70	아시아	일본	미쓰마시	2050	정책수립
71	남아메리카	에콰도르	과야킬	2050	선언
72	아시아	중국	메이산	2050	정책수립
73	오세아니아	호주	멜버른	2050	정책수립

74	아시아	인도네시아	팔렘방	2050	선언
75	북아메리카	미국	마이애미	2050	선언
76	유럽	이탈리아	말라노	2050	정책수립
77	북아메리카	미국	밀워키	2050	법제화
78	북아메리카	캐나다	몬트리올	2050	정책수립
79	아시아	이스라엘	하이파	2050	선언
80	아시아	중국	난징	2060	정책수립
81	유럽	프랑스	낭트	2050	논의 중
82	북아메리카	미국	뉴올리언스	2040	정책수립
83	북아메리카	미국	뉴욕	2050	정책수립
84	유럽	영국	뉴캐슬	2030	정책수립
85	유럽	영국	노팅엄	2028	정책수립
86	유럽	프랑스	파리	2050	정책수립
87	북아메리카	미국	파닉스	2050	정책수립
88	유럽	체코	프라하	2050	정책수립
89	북아메리카	미국	프린스턴	2050	정책수립
90	아시아	중국	칭다오	2060	정책수립
91	아시아	이스라엘	텔아비브	2050	논의 중
92	남아메리카	브라질	레시페	2050	정책수립
93	북아메리카	미국	리치먼드	2050	정책수립
94	남아메리카	브라질	리우데자네이루	2050	정책수립
95	유럽	이탈리아	로마	2050	정책수립
96	아프리카	케냐	나이로비	2050	선언
97	유럽	네덜란드	로테르담	2050	논의 중
98	유럽	네덜란드	덴하그	2030	논의 중
99	북아메리카	미국	새크라멘토	2045	정책수립
100	북아메리카	미국	솔트레이크시티	2040	논의 중
101	유럽	리투아니아	리가	2050	선언
102	남아메리카	브라질	살바도르	2049	논의 중
103	북아메리카	미국	샌안토니오	2050	정책수립
104	북아메리카	미국	샌프란시스코	2040	정책수립
105	아시아	마카오	마카오	2050	논의 중
106	남아메리카	브라질	상파울로	2050	법제화
107	아시아	일본	삿포로	2050	정책수립
108	북아메리카	미국	시애틀	2050	정책수립
109	아시아	한국	서울	2050	정책수립
110	유럽	영국	셰필드	2030	정책수립
111	유럽	영국	시우샘프턴	2030	정책수립
112	북아메리카	미국	세인트루이스	2050	정책수립

113	유럽	스웨덴	스톡홀름	2040	정책수립
114	유럽	독일	슈투트가르트	2050	정책수립
115	오세아니아	호주	시드니	2035	정책수립
116	북아메리카	캐나다	토론토	2040	정책수립
117	유럽	이탈리아	베니스	2050	선언
118	유럽	폴란드	바르샤바	2050	선언
119	북아메리카	미국	워싱턴 DC	2050	정책수립
120	유럽	영국	웨스트요크셔	2038	정책수립
121	아시아	중국	우한	2060	정책수립
122	아시아	중국	셴안	2040	논의 중
123	유럽	스위스	취리히	2040	선언
124	아프리카	모로코	라바트	2050	선언
125	북아메리카	미국	앨버카키	2050	선언
126	북아메리카	미국	앨런타운	2040	논의 중
127	아시아	한국	인산	2050	선언
128	북아메리카	멕시코	고달라하라	2050	정책수립
129	유럽	벨기에	인트베르펜	2050	법제화
130	아시아	한국	안양	2050	선언
131	아시아	인도	아우랑가바드	2040	선언
132	아시아	인도	벵갈루루	2050	선언
133	남아메리카	콜롬비아	바랑키야	2050	선언
134	아시아	중국	베이징	2050	논의 중
135	유럽	영국	벨파스트	-	논의 중
136	유럽	프랑스	보르도	2050	선언
137	아시아	말레이시아	쿠알라룸푸르	2050	정책수립
138	유럽	벨기에	브뤼셀	2050	논의 중
139	아시아	한국	부천	2050	선언
140	아시아	한국	부산	2050	선언
141	북아메리카	멕시코	셀리아	2040	논의 중
142	아시아	한국	창원	2050	선언
143	북아메리카	미국	노스 찰스턴	2050	정책수립
144	북아메리카	미국	살럿	2050	선언
145	아시아	한국	천안	2050	선언
146	아시아	한국	청주	2050	선언
147	북아메리카	멕시코	멕시코시티	2050	정책수립
148	북아메리카	미국	콜럼버스	2050	정책수립
149	남아메리카	아르헨티나	코르도바	2050	논의 중
150	아시아	한국	대구	2050	선언
151	아시아	한국	대전	2050	선언

152	아시아	중국	다롄	2050	선언
153	오세아니아	통가	라고스	2050	선언
154	유럽	독일	도르트문트	2050	선언
155	오세아니아	통가	아부자	2050	정책수립
156	유럽	이탈리아	플로렌스	2040	선언
157	남아메리카	브라질	포르탈레자	2050	정책수립
158	유럽	스위스	제네바	2050	논의 중
159	아시아	한국	고양	2050	선언
160	남아메리카	페루	리마	2050	논의 중
161	아시아	인도	팔리오르	2050	선언
162	아시아	한국	광주	2050	선언
163	아시아	중국	항저우	2060	정책수립
164	유럽	폴란드	크라쿠프	2050	선언
165	아시아	홍콩	홍콩	2050	정책수립
166	아시아	한국	인천	2050	선언
167	아시아	인도	인도르	2050	선언
168	유럽	터키	이즈미르	2050	선언
169	아시아	인도네시아	잠비	2050	선언
170	아시아	한국	전주	2050	선언
171	아프리카	르완다	키갈리	2050	선언
172	유럽	러시아	카잔	2050	선언
173	아프리카	세네갈	다카르	2050	정책수립
174	아시아	일본	오사카	2050	정책수립
175	아시아	태국	논타부리	2030	논의 중
176	아시아	인도	고치	2050	선언
177	유럽	독일	퀸른	2050	선언
178	유럽	터키	안탈리아	2050	선언
179	북아메리카	미국	리스베아거스	2050	정책수립
180	유럽	벨기에	리에주	2050	논의 중
181	북아메리카	캐나다	런던 온타리오주	2050	정책수립
182	유럽	터키	메르신	2050	선언
183	아프리카	탄자니아	다르에스살람	2050	정책수립
184	유럽	스페인	말라가	2050	정책수립
185	아시아	인도	말레곤	2050	선언
186	유럽	프랑스	엑상프로방스	2050	선언
187	유럽	우간다	캄팔라	2050	논의 중
188	아시아	인도	뭄바이	2050	선언
189	유럽	독일	뮌헨	2035	선언
190	아시아	인도	나구푸르	2040	선언

191	아시아	인도	난테드	2050	
192	아시아	인도	나시크	2040	선언
193	북아메리카	미국	뉴헤이븐	2050	정책수립
194	아시아	일본	나이타시	2050	선언
195	아시아	베트남	호치민	2050	선언
196	유럽	독일	뉘른베르크	2050	선언
197	아시아	일본	오카야시	2050	정책수립
198	아프리카	남아프리카 공화국	케이프타운	2050	정책수립
199	북아메리카	미국	필라델피아	2050	정책수립
200	아시아	인도	폰디체리	-	논의 중
201	아시아	인도	푸네	2040	선언
202	북아메리카	캐나다	퀘벡	2050	선언
203	아프리카	남아프리카 공화국	대반	2050	정책수립
204	아프리카	남아프리카 공화국	요하네스버그	2050	정책수립
205	북아메리카	미국	리버사이드	2045	정책수립
206	북아메리카	멕시코	살티요	2050	선언
207	북아메리카	미국	샌디에고	2040	선언
208	아시아	인도	상글리	-	
209	남아메리카	아르헨티나	산타페	2050	논의 중
210	남아메리카	칠레	산티아고	2050	논의 중
211	아시아	한국	성남	2050	선언
212	아시아	중국	선전	2060	논의 중
213	아시아	인도	솔라포	2050	선언
214	아시아	인도	수랏	2050	선언
215	아시아	한국	수원	2050	선언
216	아시아	대만	타이난	2050	선언
217	아시아	대만	타이중	2050	선언
218	아프리카	남아프리카 공화국	에쿠르홀레니	2050	선언
219	아프리카	잠비아	루사카	2050	선언
220	북아메리카	미국	투스온	2030	논의 중
221	아시아	한국	울산	2050	선언
222	아시아	일본	우쓰노미야시	2050	선언
223	유럽	스페인	발렌시아	2050	선언
224	북아메리카	캐나다	밴쿠버	2050	정책수립
225	유럽	오스트리아	빈	2050	선언
226	유럽	폴란드	브로츠와프	2050	선언

227	아시아	한국	용인	2050	선언
228	아시아	중국	전장	2060	정책수립
229	아시아	일본	기요사마	2050	정책수립
230	아시아	일본	사이타마	2050	정책수립
231	아시아	일본	지바	2050	선언
232	아시아	일본	요코하마	2050	선언
233	아시아	일본	가와사키	2050	정책수립
234	아시아	일본	사카이하라	2050	정책수립
235	아시아	일본	교토	2050	정책수립
236	아시아	일본	사카이	2050	정책수립
237	아시아	일본	고베	2050	선언
238	아시아	일본	시즈오카	2050	선언
239	아시아	일본	하마마쓰	2050	선언
240	아시아	일본	기타큐슈	2050	선언
241	아시아	일본	후쿠오카	2040	선언

※ 출처: Enovate(2022)

별첨2 CATAS 알파버전 테스트 설문조사 상세결과

1 설문조사 항목

- (목적) 산학연 전문가 대상 CATAS 알파버전 테스트를 통한 프로그램 개발 상태 진단 및 향후 과제 도출
- (기간) 2022년 10월 24일(월)~28일(금) 5일간
- (방법) CATAS 알파버전 링크 공유 후 웹기반 설문조사 수행
 - ① 설문조사는 공통질문, 화면별질문, 기술별(전문분야) 질문으로 구성되어 있음
 - ② 설문조사 시간은 약 30~1시간정도 소요

[그림] CATAS 알파버전 테스트 설문조사 화면

<p><첫 화면></p>  <p>The first screen shows the CATAS logo and the title '탄소중립 기술시나리오 모형 알파버전 테스트'. It features a central image of a computer monitor displaying the test interface, with a cartoon character on the right.</p>	<p><CATAS 테스트 방법 안내></p>  <p>This screen provides instructions for the test. It includes a list of steps: 1. Access the CATAS alpha version homepage, 2. Participate in the survey (deadline: Oct 28th), and 3. Contact information. A button at the bottom says 'CATAS 홈페이지로 이동'.</p>
<p><설문조사 화면-①></p>  <p>The survey screen asks: 'Q3. CATAS-일반인용 프로그램에서 제공하는 정보가 유용/유익하다고 생각하시나요?' with five radio button options: '매우 그렇함', '그렇함', '보통', '그렇지 않음', and '전혀 그렇지 않음'.</p>	<p><설문조사 화면-②></p>  <p>This screen asks: 'Q1. 「공간선정」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요?' with two radio button options: '매우 그렇함' and '그렇함'. A small thumbnail of the interface is shown above the question.</p>

[표] CATAS 알파버전 테스트 설문조사 항목

구분	설문조사 내용	
응답자 기본 정보	Q1. 귀하의 소속기관명을 적어주세요.	
	Q2. 귀하의 성함을 적어주세요. Q3 귀하의 전문분야를 선택해주세요.(복수응답 가능). <input type="checkbox"/> 태양광 <input type="checkbox"/> 풍력 <input type="checkbox"/> 바이오 E <input type="checkbox"/> 수력 <input type="checkbox"/> 조력 <input type="checkbox"/> 조류 <input type="checkbox"/> 파력 <input type="checkbox"/> 연료전지 <input type="checkbox"/> 태양열 <input type="checkbox"/> 지열 <input type="checkbox"/> 수열 <input type="checkbox"/> 산림흡수원 <input type="checkbox"/> 온실가스 배출량 모델링 분석 <input type="checkbox"/> 탄소중립 정책 <input type="checkbox"/> 기타(직접입력)	
공통 질문	Q1. CATAS BASIC 프로그램에 대한 전체적인 만족도를 선택해주세요. <input type="checkbox"/> 매우만족 <input type="checkbox"/> 만족 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 불만족 <input type="checkbox"/> 매우 불만족	
	Q1-1 전체적인 만족도에 대한 의견을 간단히 작성해주세요.	
	Q2. CATAS-BASIC 프로그램의 디자인 및 구성에 대한 만족도를 선택해주세요.. <input type="checkbox"/> 매우만족 <input type="checkbox"/> 만족 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 불만족 <input type="checkbox"/> 매우 불만족	
	불만족/매우 불만족일 경우 Q2-1 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.	
	Q3. CATAS-BASIC 프로그램에서 제공하는 정보가 유용/유익하다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 그러함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음	
	매우그러함/그러함/보통일 경우	
	Q3-1 어떤 정보가 특히 유용/유익하다고 생각하시나요? (중복 3개까지 선택가능) <input type="checkbox"/> 공간정보 <input type="checkbox"/> 에너지 생산량 <input type="checkbox"/> 온실가스 감축량 <input type="checkbox"/> 경제성 분석 <input type="checkbox"/> 기타	
	그렇지 않음/전혀 그렇지 않음일 경우 Q3-2 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.	
Q4. CATAS BASIC 프로그램이 사용하기 편리하게 개발되었다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 그러함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음		
그렇지 않음/전혀 그렇지 않음일 경우 Q4-1 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.		
Q5. CATAS-BASIC 프로그램의 메뉴는 분석의 흐름에 따라 「공간선정→공간정보 → 기술 → 배출량 → 경제성 → 리포트」 개발 하였습니다. 메뉴구성이 적절하다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 그러함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음		
Q6. 본 CATAS-BASIC 프로그램이 국민들의 탄소중립 인식 개선에 도움이 된다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 그러함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음		
Q7. 본 CATAS-BASIC 프로그램이 지자체 정책입안자들의 탄소중립 정책 수립에 도움이 된다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 그러함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음		
Q8. 향후 CATAS-BASIC 프로그램이 정식적으로 공개된다면 사용할 의향이 있으신가요? <input type="checkbox"/> 매우 그러함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음		
화면별 질문	공간선정	Q1. 「공간선정」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 그러함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음
		Q2. CATAS프로그램은 '탄소중립률'이란 지표를 통해 지역별 탄소중립정도를 직관적으로 나타내고자 하였습니다. 이러한 방법이 적절하다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 그러함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음

구분	설문조사 내용
	Q3. '탄소중립률' 선정식은 아래와 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 해당지역의 (현재 또는) 탄소중립 기술도입 시 CO ₂ 감축 량÷ 2018년 CO ₂ 배출량 x 100 <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음
	Q4. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.
공간정보	Q1. 「공간정보」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음 Q2. 「공간정보」 에서 해당지역에 대한 적절한 정보가 제공된다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음
	Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.
기술 분석	Q1. 「기술」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음 Q2. 「기술」 의 기술별 애니메이션이 적절하게 개발되었다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음
	Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.
배출량 분석	Q1. 「배출량」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음 Q2. 「배출량」 에서 해당지역에 대한 적절한 정보가 제공된다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음 Q3. 온실가스 예상감축량을 성상별(석탄, 석유, 가스)로 나타내고 있는데도 적절하다고 보시나요? <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음 Q4. 온실가스 감축량 산정은 배출계수가 높은 연료 순 으로 신재생에너지 발전량이 대체한다고 가정하여 온실가스 감축량을 산정하였습니다. 현재는 직접배출량만 고려하였으며, 향후 간접배출량에 대한 부분도 포함할 예정입니다. 이러한 부분에 있어서 별도의 자문요청을 드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함 Q5. 탄소중립률 평가에서 LCA(전과정평가)를 통한 온실가스 감축량을 제시하고 있는데도, 적절하게 제시되고 있다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음
	Q6. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.
경제성 분석	Q1. 「경제성」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음 Q2. 현재는 경제성분석 지표로 LCOE를 사용하고 있는데도, 적절하다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음 Q3. 경제성분석과 관련하여 별도의 자문요청을 드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함 Q4. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	설문조사 내용	
리포트	Q1. 「리포트」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 그렇함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음	
	Q2. 「리포트」 에서 해당지역에 대한 적절한 정보가 제공된다고 생각하시나요? <input type="checkbox"/> 매우 그렇함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음	
	Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.	
태양광	Q1. 태양광의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 태양광에너지 발전량(연): 일사량 × 태양광 모듈면적 × 모듈 효율 × 365일 <input type="checkbox"/> 매우 그렇함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음	
	Q2. 내년 과제에서 태양광 에너지 산정 방법을 고도화 하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 태양광 에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함	
	Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.	
풍력	Q1. 풍력의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 풍력에너지 발전량(연): ∑ 풍속 빈도분포 (Weibull 분포) × 터빈 출력곡선 <input type="checkbox"/> 매우 그렇함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음	
	Q2. 내년 과제에서 풍력 에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 풍력 에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함	
	Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.	
기술별 질문	Q1. 바이오에너지의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 바이오가스 플랜트 발전량(연): 정격출력 × 설치대수 × 월별 일수 × 24시간 × 1년: 360일 (정비시간 3일 제외) <input type="checkbox"/> 매우 그렇함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음	
	Q2. 내년 과제에서 바이오에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 바이오 에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함	
	Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.	
수력	Q1. 수력의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 수력에너지 발전량(연) : 유체밀도 × 중력가속도 × 유량 × 유효낙차 × 시스템 효율 × 가동률 × 8,760시간 <input type="checkbox"/> 매우 그렇함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음	
	Q2. 내년 과제에서 수력에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 수력에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함	
	Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.	

구분	설문조사 내용
조력	Q1. 조력의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 조력 에너지 발전량(연): $1/2 \times \text{유체밀도} \times \text{중력가속도} \times \text{조지면적} \times \text{최대조차}^2 \times \text{터빈효율} \times 8,760\text{시간}$ <input type="checkbox"/> 매우 고효율 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음
	Q2. 내년 과제에서 조력에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 조력에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함
	Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.
조류	Q1. 조류의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 조류 에너지 발전량(연): $1/2 \times \text{해수밀도} \times \text{조류유속}^3 \times \pi/60 \times \text{시설 점유면적} \times \text{설비효율} \times 8,760\text{시간}$ <input type="checkbox"/> 매우 고효율 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음
	Q2. 내년 과제에서 조류에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 조류에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함
	Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.
파력	Q1. 파력의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 파력 에너지 발전량(연): $\text{유체밀도} \times \text{중력가속도}^2 \div 64\pi \times \text{에너지주기}^2 \times \text{유의파고} \times 1000 \div (7 \times 7 \times \text{설비길이}) \times \text{설비점유면적} \times \text{발전장치 개수} \times \text{이용율} \times 8,760\text{시간}$ <input type="checkbox"/> 매우 고효율 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음
	Q2. 내년 과제에서 파력에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 파력에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함
	Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.
연료전지	Q1. 수열의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 열에너지 발전량(연): $\text{정격용량(kW)} \times (1-1/\text{COP(성능계 수)}) \times 3.6\text{MJ/kWh} \times \text{월별냉난방에너지생산시간(h)}$ <input type="checkbox"/> 매우 고효율 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음
	Q2. 내년 과제에서 수소연료전지에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 수소연료전지에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함
	Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.
태양열	Q1. 태양열의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 태양열에너지 발전량(연): $\text{일사량} \times \text{태양열 투과면적} \times \text{설치대수} \times \text{월별일수} \times 0.004186(\text{MJ/Kcal})$ <input type="checkbox"/> 매우 고효율 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음

구분	설문조사 내용
	<p>Q2. 내년 과제에서 태양열 에너지 산정 방법을 고도화 하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 태양열 에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함</p> <p>Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.</p>
지열	<p>Q1. 지열의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 열에너지 발전량(연): $\text{정격용량(kW)} \times (1-1/\text{COP(성능계 수)}) \times 3.6\text{MJ/kWh} \times \text{월별냉난방에너지생산시간(h)}$ <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음</p> <p>Q2. 내년 과제에서 지열 에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 지열 에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함</p> <p>Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.</p>
수열	<p>Q1. 수열의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 열에너지 발전량(연): $\text{정격용량(kW)} \times (1-1/\text{COP(성능계 수)}) \times 3.6\text{MJ/kWh} \times \text{월별냉난방에너지생산시간(h)}$ <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음</p> <p>Q2. 내년 과제에서 수열 에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 수열 에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함</p> <p>Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.</p>
산림 흡수원	<p>Q1. LULUCF 관련 탄소 흡수량 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? $\text{CO}_2\text{흡수량(연)}: \text{수종별 나무 식재량} \times \text{수종별 1그루당 CO}_2\text{흡수량}$ <input type="checkbox"/> 매우 고풍함 <input type="checkbox"/> 그러함 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 그렇지 않음 <input type="checkbox"/> 전혀 그렇지 않음</p> <p>Q2. 내년 과제에서 산소흡수원 관련 탄소 흡수량 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 산소흡수원 관련 탄소 흡수량 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청 드려도 될까요? <input type="checkbox"/> 가능함 <input type="checkbox"/> 불가능함</p> <p>Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.</p>
마무리	<p>CATAS-BASIC 프로그램과 관련하여 개선사항 등 기타 의견을 자유롭게 서술해주세요.</p>

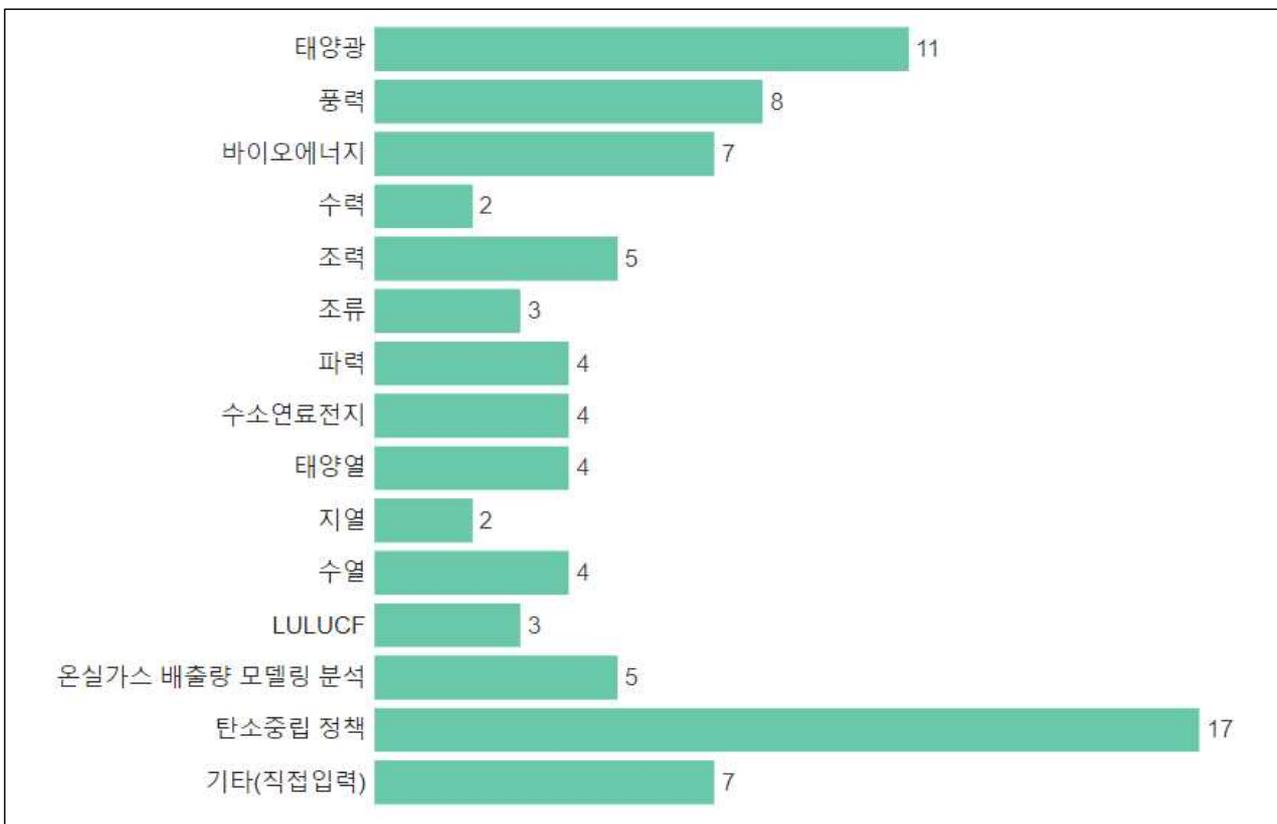
2 설문조사 결과

□ 응답자 기본정보

Q1. 귀하의 소속기관명을 적어주세요.

Q2. 귀하의 성함을 적어주세요.

Q3 귀하의 전문분야를 선택해주세요.(복수응답 가능).



□ 공통질문

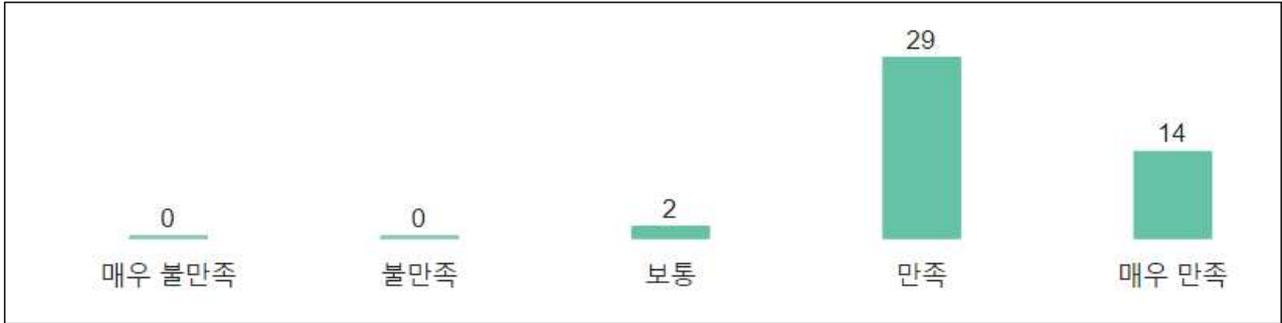
Q1. CATAS BASIC 프로그램에 대한 전체적인 만족도를 선택해주세요.



Q1-1 전체적인 만족도에 대한 의견을 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	탄소중립 기술시나리오 분석은 전문가용으로 만드는 것이 타당함
2	지자체에서 기술정책으로 사용하기에 적합해 보임
3	향후 예측하기 어렵고 복잡한 탄소중립에 관한 기술시나리오를 잘 분석한 프로그램으로 만족함
4	시스템 체계는 잘 구축되었지만 사용 설명법에 대해 user가 쉽게 이해할 수 있도록 보완 되면 좋겠음.
5	공간선정에서 리포트로 이어지는 메뉴구성과 지자체별 정보를 전달(공간선정, 공간정보메뉴)하는 부분은 좋으나, 기술, 배출량, 경제성 메뉴의 내용은 많은 개선이 필요함
6	초기 화면들은 쉽게 이해할 수 있고 그래픽이 편리함. 후반부에는 쉽게 이해하기 어려움
7	전체적인 홈페이지는 만족스러우나, BASIC이라고 하기에는 내용이 전문적임.
8	탄소중립 실현을 위한 시뮬레이션을 해보고, 그 결과를 한눈에 볼 수 있다는 점이 만족스러움
9	프로그램의 구성과 user interface 및 그래픽이 전달하고자 하는 정보가 잘 이해되도록 설계된것 같음
10	시스템 자료 입력시 다소 불안정한 부분이 있는것 같습니다.
11	UI/UX가 직관적으로 잘 구성됨
12	시각화와 편의성 측면에서 우수함. 다만, Target 수요자에게 대한 고려가 필요할 것으로 예상됨. (지도 지명 표기에서 동해와 독도 표기도 수정되어야 함)
13	시각적으로 이해하기 쉽게 구성한 점은 좋음. 다만 태양광, 풍력 제품 선택시 일반인이 접근하기 다소 어려워보임. 간단한 예시 사진 등을 함께하여 실생활에서 자주 볼수 있는 제품이 해당 제품이라는 것을 보여줄 필요가 있음
14	우선, GUI가 매우 훌륭하며 다양한 분야의 여러 적용 옵션을 반영할 수 있는 것이 장점이라고 생각합니다.
15	화면과 시스템 구성이 직관적, 사용자 접근성과 이용 편의성이 높음
16	다양한 상황을 고려하여 시나리오가 만족스럽게 구성되었음.
17	지자체별 온실가스 감축전략 수립을 위해서는 CATAS역할이 무엇보다 중요할 것으로 기대됩니다. 짧은 시간 많은 고민을 통해 기술적·시스템적으로 완성도 높은 모형을 개발하신 것 같습니다. 사용자 입장에서 만족도가 높으나, 마이너 한 부분이 수정되었으면 하여 따로 메일 보냈습니다. 앞으로 CATAS 모형의 발전가능성이 매우 높을 것으로 기대하 며, 응원하겠습니다. 감사합니다.
18	그래픽 전반의 디자인이나 구성은 만족스러움
19	탄소중립 시나리오 분석을 목적으로 분야별 통합 플랫폼을 제공한다는 것에 의미가 있으며, 빠른 시간내에 결과리포 트를 받아 볼수있어서 만족합니다.
20	각 지역별 이산화탄소 배출량을 기준으로 기술 적용에 따른 감축예상량을 예측한다는 점에서 매우 좋아보임.

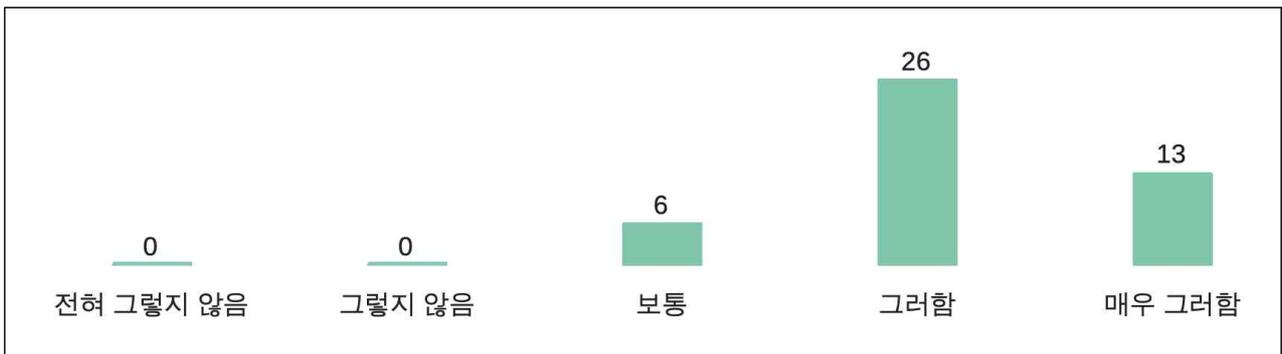
Q2. CATAS-BASIC 프로그램의 디자인 및 구성에 대한 만족도를 선택해주세요..



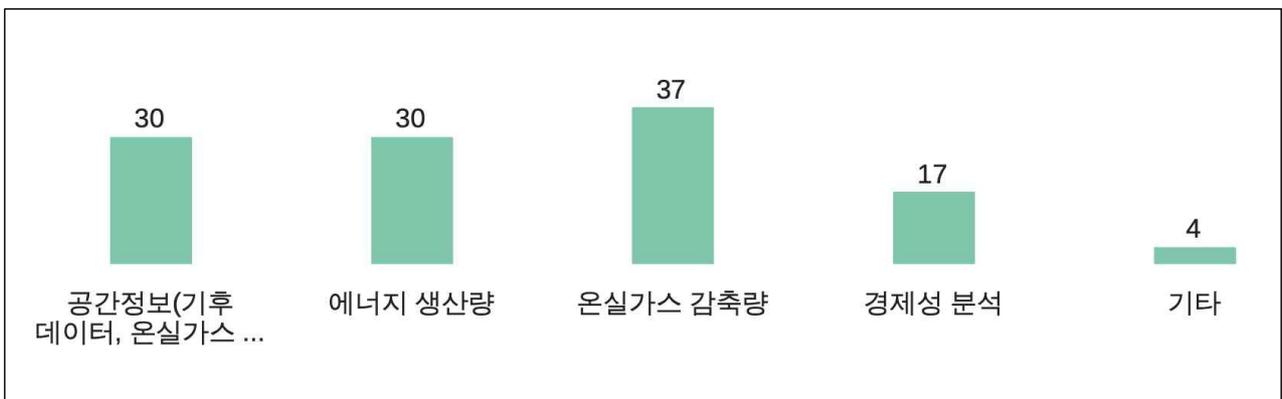
불만족/매우 불만족일 경우 Q2-1 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

Q3. CATAS-BASIC 프로그램에서 제공하는 정보가 유용/유익하다고 생각하시나요?



Q3-1 어떤 정보가 특히 유용/유익하다고 생각하시나요? (중복 3 개까지 선택가능)



Q3-2 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

Q4. CATAS-BASIC 프로그램이 사용하기 편리하게 개발되었다고 생각하시나요?



Q4-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	탄소중립 기술을 적용하기가 어려움.
2	사용자가 입력을 해야 하는 경우 예제가 제공된다면 더욱 편리할 것으로 생각됨. 예를 들어 경제성 분석을 위한 값을 입력하는 경우, 비용과 운영 비용에 어떤 값을 넣어야 하는지 정보가 부족함
3	해당 지역의 신재생에너지를 선정하고, 관련 입력자료인 설치 대수, 설비 이용율 등에 대한 안내가 없어 어떤 기준으로 입력치를 설정해야하는지 어려울 것으로 예상함. 어떤 의미인지 알지 못함
4	기술에서 분석데이터 입력하는 것이 어려울 것으로 보임

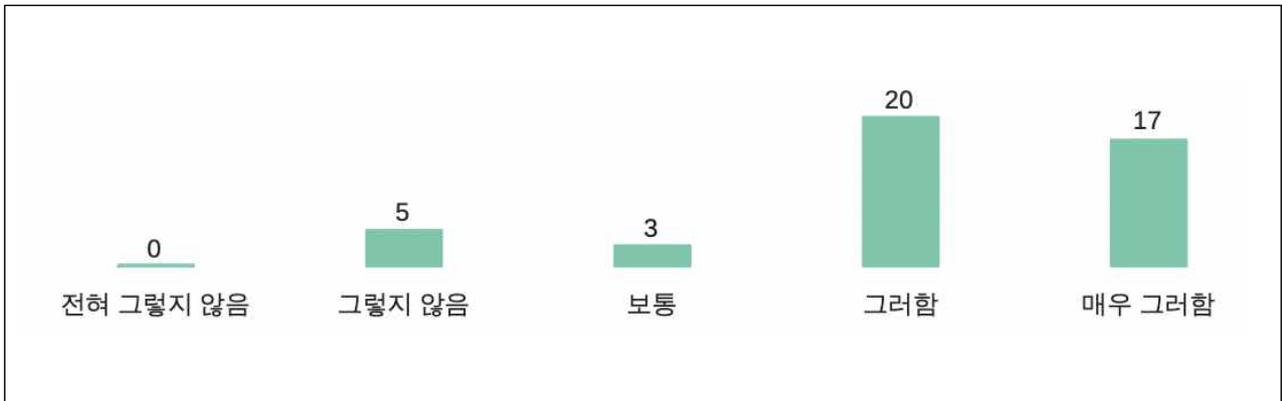
Q5. CATAS-BASIC 프로그램의 메뉴는 분석의 흐름에 따라 「공간선정→공간정보 → 기술 → 배출량 → 경제성 → 리포트」 개발 하였습니다. 메뉴구성이 적절하다고 생각하시나요?



Q5-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	'공간정' 메뉴는 실제 공간정보를 담고 있다고 볼 수 없음. 지역의 탄소-기후 특성을 보여주는 것임. [탄소-기후정보] 등 으로 수정되거나, 선정한 지자체의 세밀한 공간 특성을 보여주는 역할이 필요함

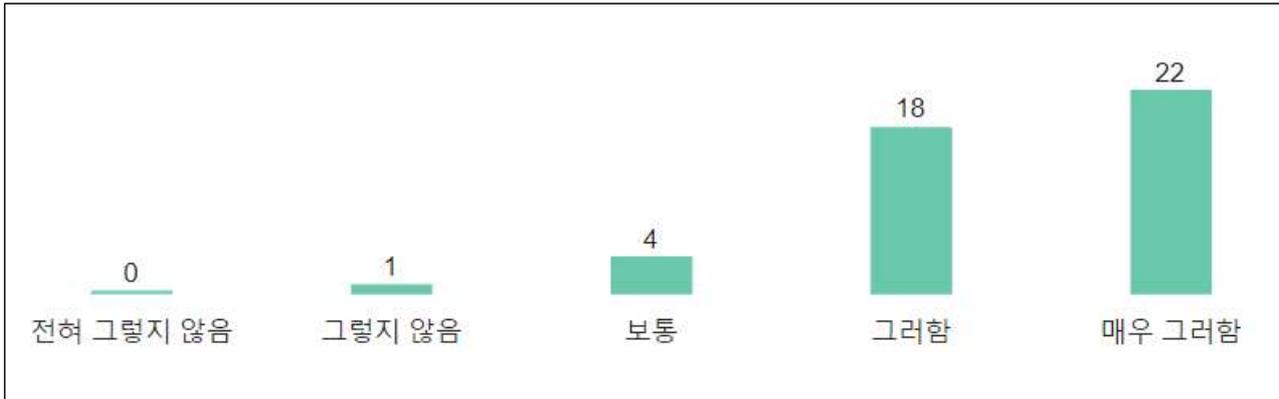
Q6. 본 CATAS-BASIC 프로그램이 국민들의 탄소중립 인식 개선에 도움이 된다고 생각하시나요?



Q6-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	일반인이 프로그램을 사용하기 어렵다고 생각함. 탄소중립 기술을 적용하기가 매우 어려움.
2	일반인이 사용할 근거가 보이지 않음. 일반인(비연구자, 비공무원)에게는 더 Simple한 어플리케이션이 유용할 것임
3	일반 국민들이 사용하기에는 기술분석 파트부터 내용이 어려움
4	탄소중립 정책에 관심이 있거나 공부하는 사람입장에서는 시각화된 데이터가 쓸모 있겠지만, 일반인들 입장에서는 어떻게 기술이 적용될 것이며, 이로 인한 개인의 이득을 우선할 것이기에 인식 개선은 어려워보임
5	기술에 대한 결과값이 자동으로 들어가서 결과값을 매번 업데이트해준다면 도움이 될 것으로 보임

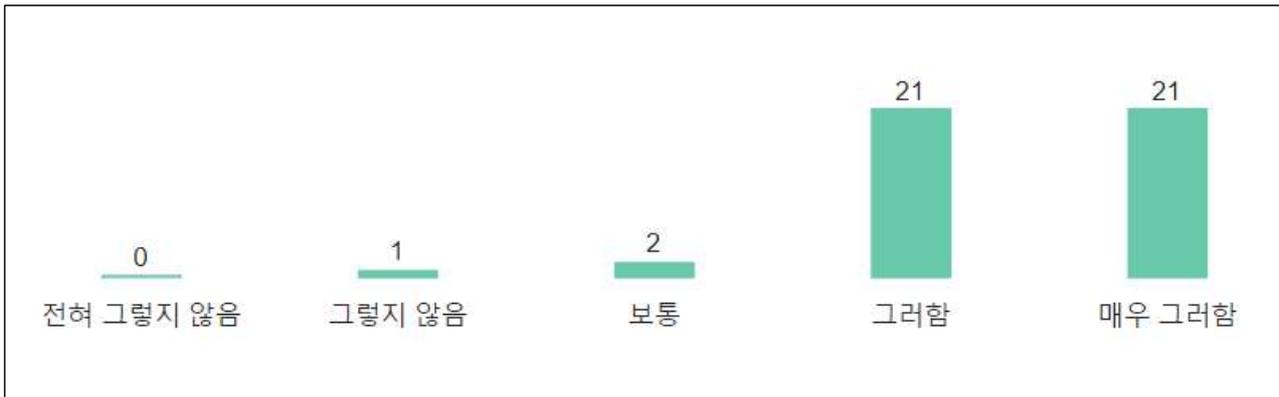
Q7. 본 CATAS-BASIC 프로그램이 지자체 정책입안자들의 탄소중립 정책 수립에 도움이 된다고 생각하시나요?



Q7-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	지자체 정책입안자들이 해당 신재생에너지 설치량을 입력치로 부여할 경우, 해당 지자체의 입지여건 및 기술 수준에 따라 어느 정도 설치 가능할지 파악하지 못한 상황이 되면, 해당 입력값은 무의미하게 되고 결과적으로 현실적인 정책입안에 도움이 되지 못함.(참고자료에 지나지 않음)

Q8. 향후 CATAS-BASIC 프로그램이 정식적으로 공개된다면 사용할 의향이 있으신가요?



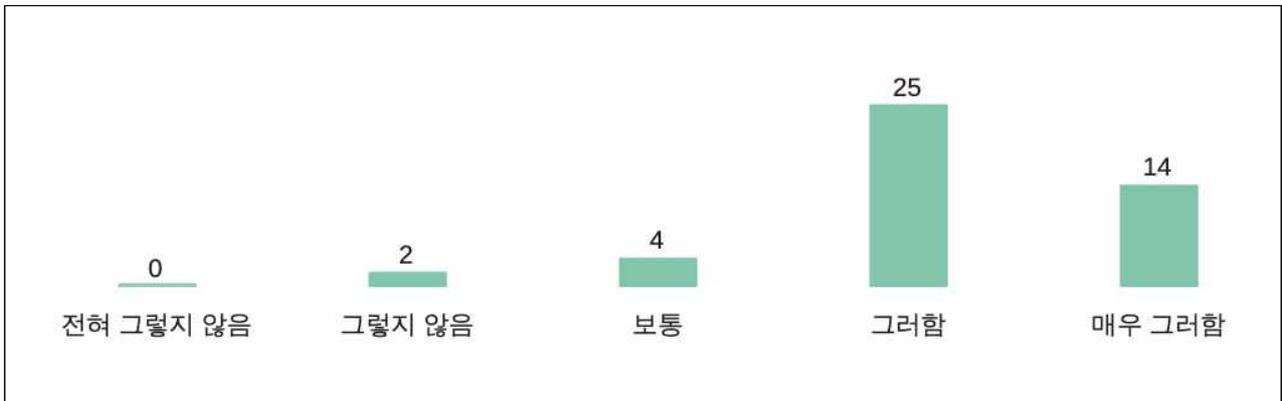
Q7-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	경제성 분석 결과는 b/c분석 결과로 쓰기에는 가정이 부족하고, 기술정보도 세부내용을 알지 못하면 값을 기입할 수 없음

□ 화면별 질문

공간선정

Q1. 「공간선정」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요?



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	지도에서 지역을 선택하면, 우측 상단표에서 해당지역의 탄소중립률 현황이 나오지만 지도에서는 현재 어느 지역이 선택되어 있는지 알 수 없음. 현재 선택되어진 지역이 지도에서도 선택유지되어 보이도록 할 필요가 있음.
2	전국에 대한 설정이 가능하도록, 기초지자체 설정이 가능하도록 되어야 함

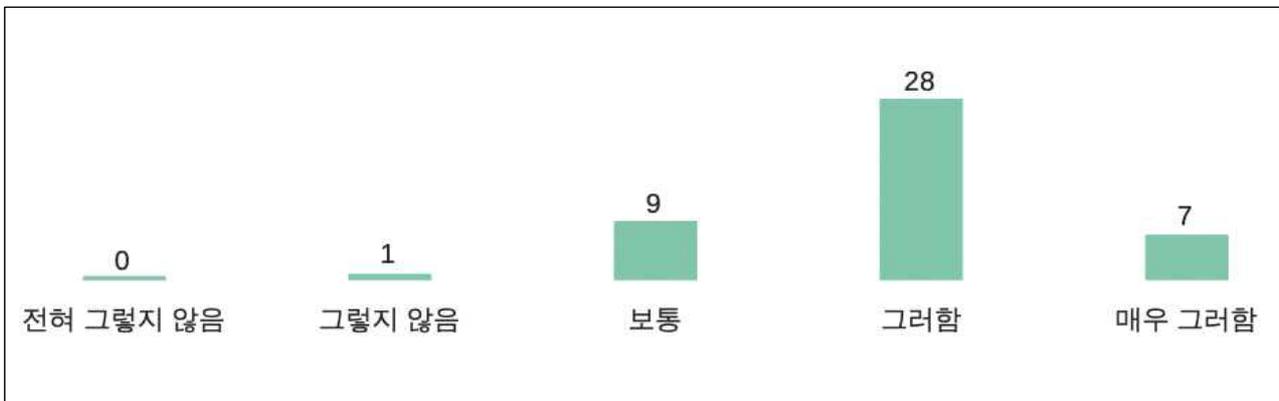
Q2. CATAS프로그램은 '탄소중립률'이란 지표를 통해 지역별 탄소중립정도를 직관적으로 나타내고자 하였습니다. 이러한 방법이 적절하다고 생각하시나요?



Q2-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	한가지 지표만 제공되는것의 위험이 있다고 판단됨. 2018년 배출량외에도 이전연도(예: 1991년)과 함께 비교 하여 배 출량의 추세 또한 보여져야 한다고 생각됨. 물론 과거 공간자료가 없다면, 최근 변화율 같은 정보가 있어야 목표 설정 에 도움이 될것으로 판단됨
2	기존 [탄소중립]의 정의가 순배출 zero를 의미함을 알고있기 때문인지, 정의하신 [탄소중립률]이 순배출 zero에 얼마 만큼 가까워졌는지를 의미하는 것처럼 느껴집니다. 의도하신 사항이 [2018년도 대비 탄소감축률]이라면 간단하게 [탄 소비출 감축률], [온실가스 저감률] 등의 직관적 용어를 쓰심이 나올 것 같다는 의견드립니다.

Q3. '탄소중립률' 선정식은 아래와 같습니다. 적절하다고 생각하시나요? 해당지역의 (현재 또는) 탄소중립 기술도입 시 CO₂ 감축 량÷ 2018년 CO₂ 배출량 x 100



Q3-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

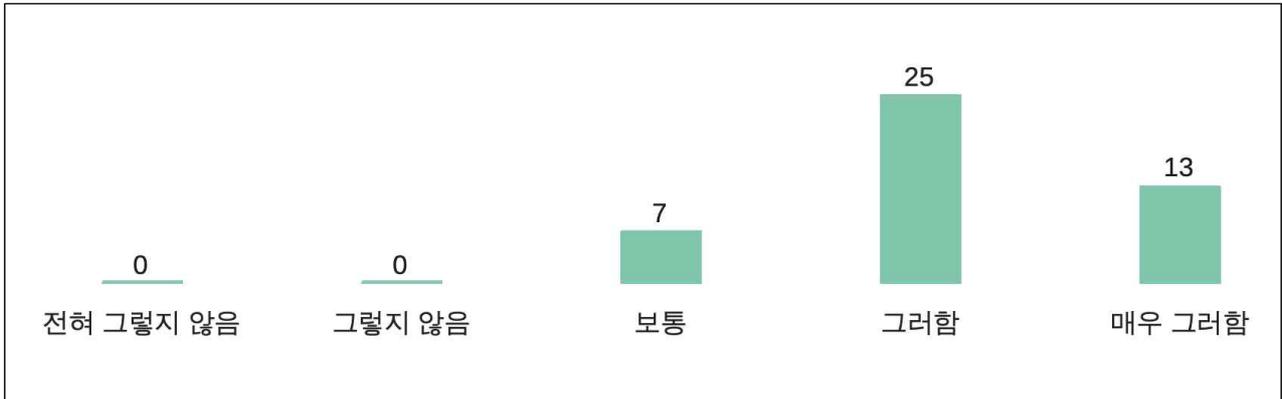
구분	의견 내용
1	국가 탄소중립 기준년도는 2018년이나, 지자체별 기준년도는 각 지자체마다 서로 다름(서울의 경우 2005년). 그리고 탄소중립 정책 수립 시기에 따라 기준 년도가 바뀌는 경우도 많음. 따라서, 기준년도에 대한 선택과 표시가 필요함.

Q4. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	아주 유용한 프로그램이라 판단되며, 실제적으로 새로운 청정에너지 기술 도입시 환경적 요소 개선에 대한 부분과 경제성 효과에 관한 부분을 보여주는 유익한 프로그램이라 판단됨
2	왜 2018년이 기준이 되는지 설명이 있으면 더 좋겠습니다.
3	공간선정을 하기전에 시뮬레이션 가이드라인 등 시나리오 모형, 홈페이지 사용법에 대한 설명이 있었으면 좋겠음
4	자치구별 자료 제공이 가능하면 좋을듯 합니다.
5	탄소중립률에 대한 설명만으로 이해가 어려우며, 실제 예를 추가하여 설명한다면 이해에 도움이 될 것으로 사료
6	일반인이 이해할 수 있는 설명페이지가 추가되면 좋을 것 같음
7	일부지역은 (-) 탄소중립률이 나오는데 이에 대한 부가 설명이 필요할 것으로 보임(2018년보다 해당연도가 더 많은 CO2가 발생했다는 의미인지). 산정식에서 "CO2 감축량 = 2018년도 CO2 배출량 - 해당년도 CO2 배출량" 인것으로 보이는데, 전문가면 이해할 수 있지만 일반인들 위해서는 해당 산정식들에 대한 자세한 설명이 필요할 것으로 보임
8	첫 화면이 좋은데, 지도의 이동이 잘 안됨(줌인, 아웃은 되지만 지도를 화면 가운데 놓기가 어려움)
9	일반인들의 접근 편의성을 고려하여 조금더 간단한 개념의 지표를 도출하는것이 요구됨
10	탄소중립률 계산식에서 '나누기'부분을 '/'로 수정하면 적절할 것 같습니다.
11	탄소중립률 산정시, 기준값을 2018년 이외에 값도 선택할 수 있으면 좋겠습니다(예, 2015~2021). 이를 통해 CAGR 등 다양한 변수로 계산해 볼수 있습니다.
12	현재 우리나라에서 이산화탄소 저감, 탄소 중립을 위해 계획하고 있는 분야는 대부분 저탄소 연료 사용 및 시스템 에너지 효율 개선입니다. 신재생에너지만으로 탄소중립을 이루기에는 그 영향력이 미미해 보일 수 있으므로, 혹시 포션 이 나누어져있다면 그런 점 고려해서 보여주면 신재생에너지 발전 혹은 에너지생산단지를 건설하여 얻을 수 있는 혜택이 더 잘 보이지 않을까 싶습니다.
13	다른 해상도의 화면에도 잘 맞도록 해야 하고, 화살표에 다음 혹은 next로 써 주어야 누르는 것을 알 것 같음
14	메인화면에서 ctrl 로 영역 확대기능 개선 필요 > 마우스 오버시 지도 위치 조정 가능하게, 좌측 메인 화면 확대가 아닌 지도 영역만 확대되게
15	크롬에서 화면을 열었을때 한 화면에 모든 페이지가 뜨지 않음. 밑으로 마우스를 드레그해야 아래 화면이 보임.
16	아직 초기여서 그럴겠지만, 오류가 반복적으로 발생해서 충분히 평가하기가 어려웠다. 경제성 분석에서 일반인들이 각 구성품의 가격을 입력하게 하는 것 보다 대략적인 시장가격이 자동으로 입력되도록 하면 더 좋을 것 같다.
17	탄소중립이란 탄소 배출 "0"을 의미하듯이 "감축량"이란 표현 보다는 "배출량"으로 표현하는 것이 논리적으로 타당하 다고 사료됨. 다만 기술도입에 따른 감축량이 탄소중립률에 기여하는 기여율이라면 현재로도 타당한 것으로 검토됨
18	지도가 이동이 되지 않아서 지역 선정이 불편
19	현재의 탄소배출량이나 탄소중립정도를 전국평균 혹은 타 지역과의 비교를 직관적으로 볼 수 있으면 더욱 효과적일 듯.

공간정보

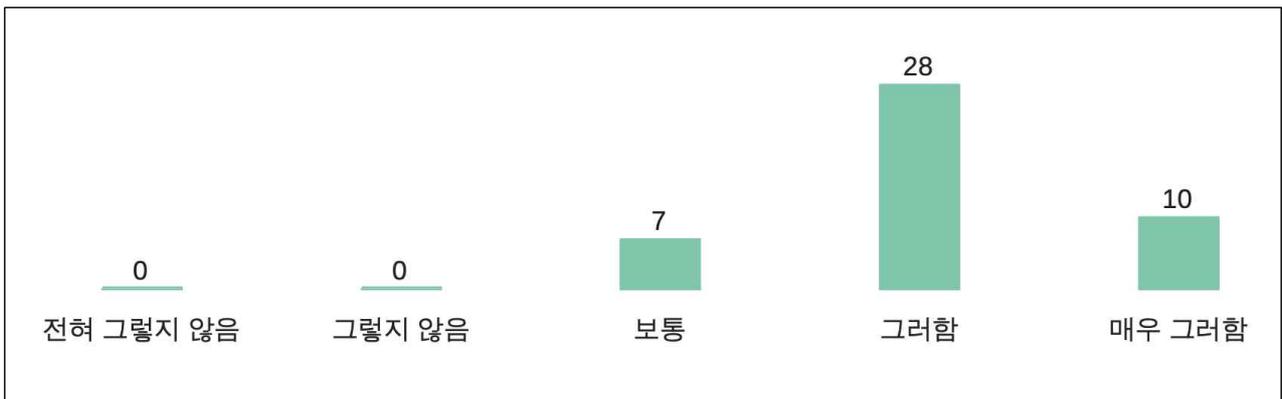
Q1. 「공간정보」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요?



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

Q2. 「공간정보」 에서 해당지역에 대한 적절한 정보 가 제공된다고 생각하시나요?



Q2-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

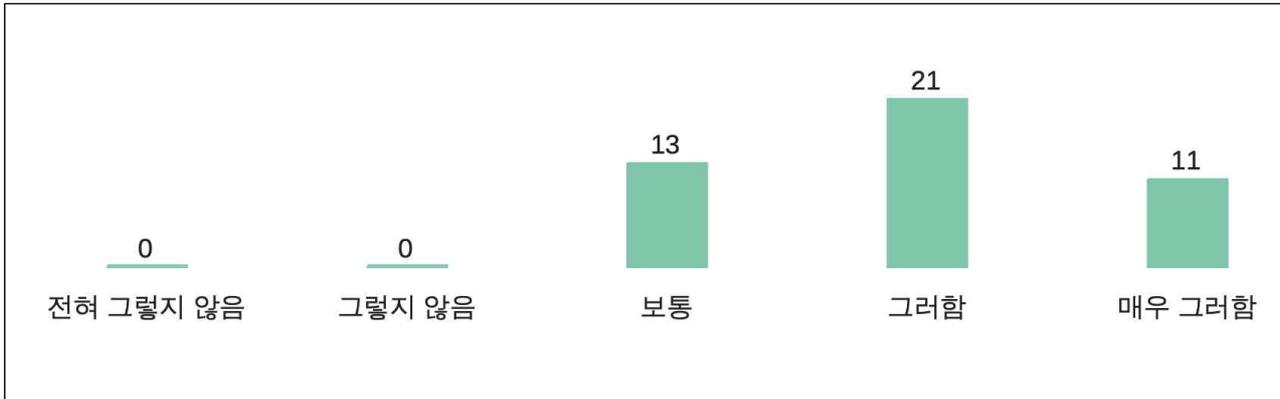
구분	의견 내용
1	응답없음

Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	기후정보에서 그래프 Y축 설명 추가 필요(예, 월간 평균 기온, 월간 누적 강수량), 그래프 값들의 소수점 자리수가 너무 많음
2	그 지역 자체의 배출량 특성이나 감축 목표 등 시민들의 이해를 돕기 쉬운 설명글이 들어가 있으면 더 효과적일 듯
3	기후정보 제공 부분에서 풍속의 경우, 10m 측정 값(AWS)을 그대로 보여주고 있는 것 같은데 풍력발전에서는 80m, 100m 고도에서의 풍속 값을 정보로 제공하여야 함
4	기후정보의 그래프에 표시되는 값의 소수점 자리수를 줄였으면 좋겠음(예, 소수점 첫자리까지 표시).
5	1. 수치는 매년 업데이트가 되어야 할 것 같습니다. 2. 그래프의 색상을 다양하게 하면 직관적으로 눈에 들어올 것 같습니다.
6	재생에너지 자원량은 광역단체보다는 지역단위로 더 세분하는 것이 필요하리라 사료됨. 예를 들어 조력자원의 경우 서해안에 풍부하며 따라서 광역단위로 평균을 제공하는 경우 발전량 등에 왜곡이 발생할 수 있을 것으로 사료됨
7	일반인이 이해하기 쉽게 설명페이지 링크가 추가되면 좋을 듯 함
8	[공간정보] 메뉴에서 '공간정보'가 없음. 현재 보여지는 것은 지역의 통계정보임.
9	마우스를 갖다대면(아니면 다른방식으로) 각 항목 및 용어에 대한 설명이 뜨도록 설정
10	온실가스 배출량 기준연도가 '19년으로 되어 있는데, 배출량 메뉴에는 '18년으로 상이함. 최신 정보를 제공하는 것도 필요하지만, NDC 감축기준 연도인 '18년 정보도 필요하므로 고민 필요. 기후정보도 기준연도 추가 필요,
11	많은 정보량을 제공하는 것 보다는 일반인에게 필요한 정보만 간단하게 전달하는 것도 좋을 듯 함.
12	전반적으로 공간에 필요한 정보들이 잘 구현된 것 같습니다.
13	해당 지역의 기본정보, 배출량, 에너지 정보 등을 보여주고 있는 자료는 유용함. 기타 신재생 에너지와 관련성이 있는 기본 환경자료를 추가 발굴하여 함께 보여주면 더욱 유용할 것임.
14	추후에 보다 세분화된 지역 분류 체계를 적용하면, 타겟 사이트(지역)에 보다 적합한 분석을 수행할 수 있습니다.
15	공간선정 후 공간정보에서 우리나라 전체 지도가 나오는데 여차피 공간을 바꾸려면 선정으로 돌아가서 해야한다면, 아예 다른 부분은 비활성화 상태로 보이게 하는게 집중하기 좋아보입니다. 지역 변경하려고 마우스 활성화된상태에서 클릭하려 하니 안되서 여러번 다시 눌러보았습니다.
16	1. 어떤자료를 이용한 기온,강수량,풍속,일사량 정보인지 (ex. 2000~2020년 기상청 ASOS 몇 지점 대상 일평균자료) 2. 그래프에 마우스 오버시, 자료값 소숫점 둘째자리까지만 표기해도 좋을 듯 3. 그래프에서 기온,풍속,일사량의 선그 래프에는 그래프의 끝에 기상요소 문구가 적힌 반면, 강수량의 바그래프에서는 기상요소 문구가 빠져있음, 이에 통일 시킬 필요가 있어 보임
17	1. 일반사항에 대해 화면 구성은 적절하다고 생각되나, 에너지 정보에서 조금 더 많은 정보가 필요할 것으로 보입니다. 예를 들어, 부문에 대한 내용(산업, 수송, 가정, 상업 등)이 있으면 정책수립에 도움이 될 수 있을 것 같습니다. 2. 신 재생에너지 생산량 탭에서 나타내는 그림과 표는 개인적으로 조금 혼란스럽습니다. 가독성이 조금 보완되어야 할 것 같습니다.
18	기후정보가 평년(30년 평균)값인지, 최근 1년의 값인지 명확하지 않음. 그리고 기후정보의 경우, 평년(30년 평균)대비 최근 기온이 증가하였다. 강수량이 증가하였다 등의 상대적인 정보가 더 중요할 것으로 생각됨. 온실가스 배출량과 에너지 정보의 경우, 기준 년도를 통일하는 게 비교하기 더 좋을 것으로 생각됨. 지자체 온실가스 배출량의 경우, 간접 배출량이 차지하는 비율이 높은 데 (서울의 경우, 50%이상) 본 자료에서는 직접 배출량만 표시되어 지자체에서 활용하기에는 정보가 부족함.
19	초점은 탄소중립이므로 에너지 사용량 등을 표현함에 있어 이를 탄소량으로 환산하여 동시 표현하는 방안이 제안됨

기술정보

Q1. 「기술」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요?



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

Q2. 「기술」의 기술별 애니메이션이 적절하게 개발되었 다고 생각하시나요?



Q2-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

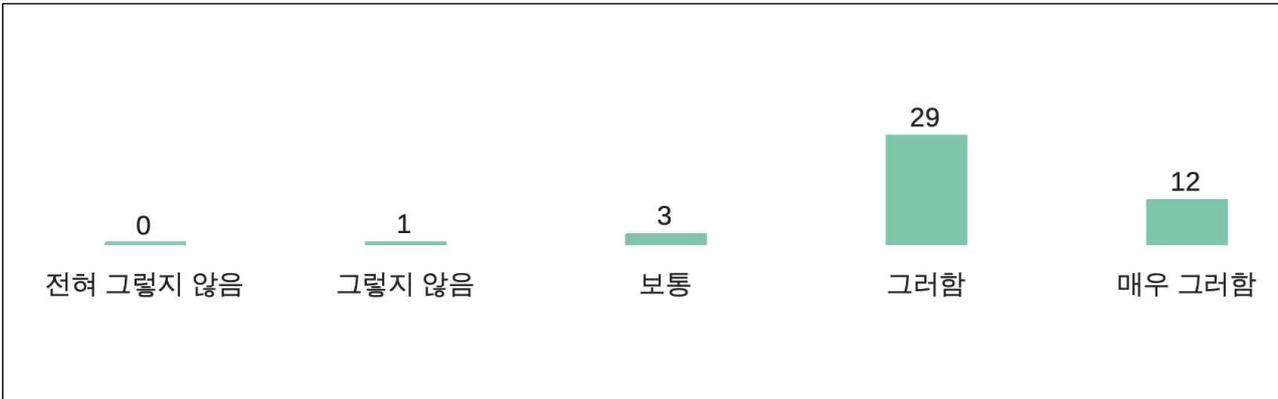
구분	의견 내용
1	탄소중립 기술을 대표하거나, 사용자 입력값에 반응하는 등의 요소가 전혀 없음
2	해당 화면의 상단 애니메이션 보다는 선택된 지역이나오고, 이후 적용되는 탄소중립 기술에 따라 추가(add)되어 표시가 된다면 보다 직관적일듯 합니다.

Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	가시적으로 잘 표현되게 구성되어 있다고 판단됨
2	분석데이터를 입력하면 연간발전량이 계산되어 표출되는 구성인데, 기후데이터 참조 값을 10m 높이 측정값을 적용하여 연간발전량이 잘못 계산되는 것으로 보이고, 터빈 단위 구성보다는 육상/해상 풍력단지로 구분된 단위로 입력을 유도하여 발전량 정보를 제공하는 것이 적절할 것으로 판단됨
3	향후 중요성이 증가하는 negative emission 방식도 포함되어야 (CCS, biochar, DAC)
4	데이터 입력시 탄소중립 목표년도가 2050년 외에는 클릭이 안됨. 그리고, 탄소중립기술결과에 풍력 외에는 반영이 안 되는 것 같음.
5	분석데이터 입력에 대한 내용은 일반인 대상으로는 어려워 보일 수 있음. 일반인을 대상으로는 기술데이터 선택, 기술 하는 내용이 좀 더 쉽게 구성되었으면 좋겠음
6	1. 애니메이션 그림은 분야별 탄소 배출로 위기감을 줄수 있는 내용이 면 좋을 듯 합니다. 2. 오른쪽 탭이 잘 선택이 안 됩니다(여러번 클릭해야 선택됨). 3. 분야별 적용기술들에대한 간략한 설명이 추가 되었으면 좋겠습니다
7	일반인들이 이해할 수 있는 설명페이지 링크가 추가되면 좋을 듯함
8	기술 선택후 애니메이션 변화를 인식하는데 약간의 시간이 필요하였음. 약간의 Highlight가 필요할 것 같습니다
9	기술별 간략한 설명 필요. 태양광, 풍력 제품 설명시 각 제품별 제품명에 간단하게 파악할 수 있는 용량들을 ex(태양 광 HS-SS80W-OT(100W?) (풍력) U113 (23MW) 함께 기입하면 직관적으로나 이해할 수 있을 것으로 보임. 또한 필요시 제품 예시 그림 등.
10	애니메이션이 직관적 이해될 수 있도록 디자인 되었으나, 기존 시설이 없어지는 것은 다시 생각해볼 필요가 있어 보임(예시. 태양광설치를 위해 놀이터를 철거하는 것 등)
11	전환부문 탄소중립률만 산정하는 것인지 궁금함. 전환은 대규모 사업이고 중앙정부 차원의 진행이 더 많이 진행되므로, 오히려 지자체 입장에서 건물, 수송, 폐기물 분야에서 주도적, 적극적 역할이 있을 것으로 판단. 시스템 활용성 측면에서 고려 필요
12	하나의 화면에 모는것을 나타내기 보다는 단계별로 찾아가는 단순한 방식이 더 좋을듯 함
13	화면 구성 및 애니메이션이 매우 잘 개발된 것 같습니다
14	각 분야의 최신 제품들이 지속적으로 업데이트 되면 좋을듯 합니다
15	기술이 적용되는게 잘 보여서 좋아보이긴 했는데, 세부 기술 적용에 들어가야 어떤 설비가 설치되었는지 보였습니다. 세부적인 설명들도 곁들여진다면 처음 사용하는 사람들 입장에서 좋을 것 같습니다
16	1. 물음표 아이콘 등을 사용하여 간단한 사용 매뉴얼을 팝업형식으로 띄워주면 이용하기 편리할것같습니다
17	기술 적용, 분석 데이터 입력탭에서 너무 다양한 기술의 선택지로 인해 다소 복잡하게 느껴집니다. 더군다나 기술 스펙도 상세하게 나와있어 더욱 그런것 같습니다 // 기술별 설치대수의 상한선은 없는지요? // 설치대수를 입력하지마 자 예상 감축효과를 볼 수 있도록 하는 것이 더 편할 것 같다는 생각이 듭니다
18	기술의 경우, 대분류-소분류와 같이 카테고리화 되어 있으면 좋겠음. 예를 들어, 에너지-태양광, 흡수(상세)-산림흡수원 와 같이 분류되어 있으면, 지자체 담당자들이 부문별-기술별 온실가스 감축량을 이해하는데 도움이 될 것 같음. 그리고 애니메이션의 경우, 빈 화면에 해당 기술을 적용했을 때, 관련 애니메이션이 하나씩 생성된다면 어떤 기술이 선택 되었는지 좀더 직관적으로 알기 쉬울 것 같음. 세부 기술의 입력화면이 너무 복잡하고 입력해야하는 정보가 너무 많 음. 특정 업체를 선택할 경우, 공정성 문제가 있을 수도 있어 default값이 필요함(업체의 평균이라든지).
19	일반인 사용시 어려움 예상
20	기술별 특성만 부각한 애니메이션이 더 좋을것으로 생각함

배출량

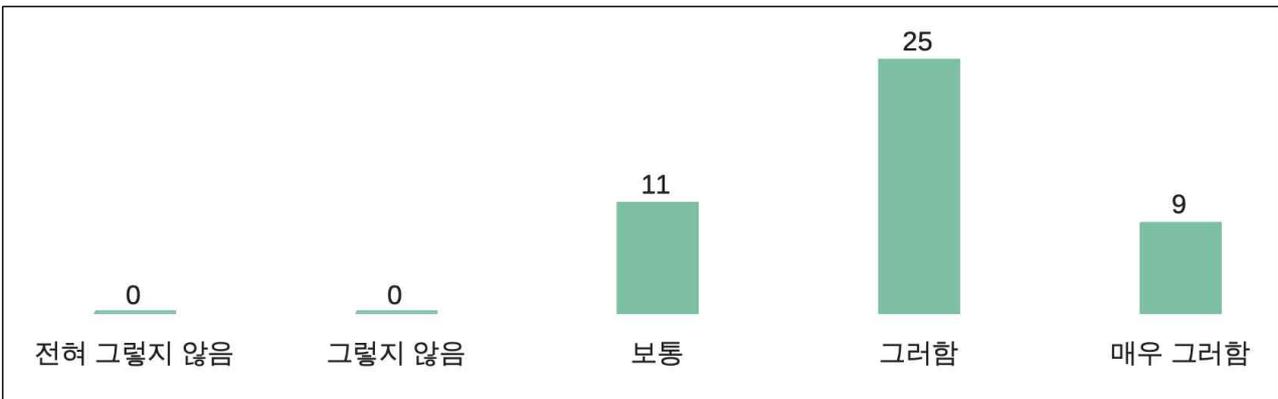
Q1. 「배출량」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요?



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	탄소중립 기술을 적용해서 전기에너지를 절감하면, 전력의 탄소배출계수를 적용해서 탄소배출량 절감량을 산출할 수 있지만, 1차에너지원별로 구분하는 것으로 논리의 무리가 있음

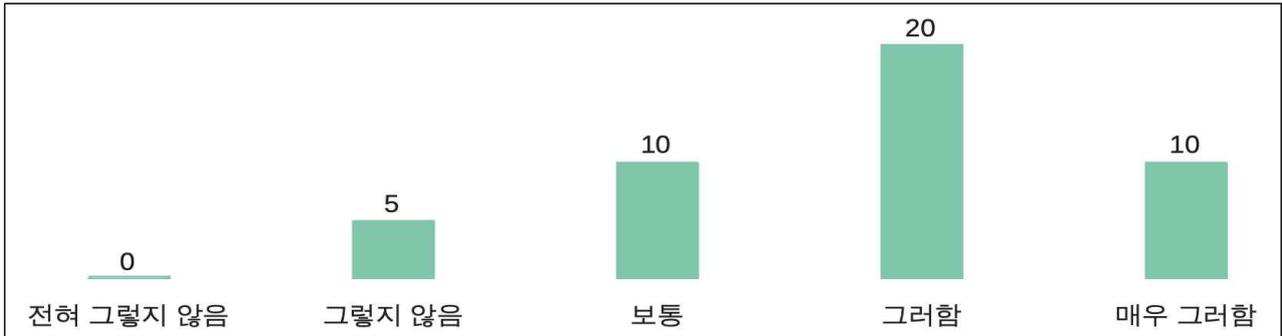
Q2. 「배출량」에서 해당지역에 대한 적절한 정보가 제공된다고 생각하시나요?



Q2-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

Q3. 온실가스 예상감축량을 성상별(석탄, 석유, 가스)로 나타내고 있는데요 적절하다고 보시나요?



Q3-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	탄소중립 기술을 적용해서 전기에너지를 절감하면, 전력의 탄소배출계수를 적용해서 탄소배출량 절감량을 산출할 수 있지만, 1차에너지원별로 구분하는 것으로 논리의 무리가 있음
2	신재생에너지를 설치함으로써 얻게되는 열에너지 대체, 전환부문 대체 효과의 로직이 직관적이지 않은 것 같습니다.
3	지자체와 국가의 온실가스 배출량 산정체계가 다름. 본 시스템에서 말하는 전환 부문은 지자체의 간접 배출량(지자체 배출량 산정 기준으로 score2)과 유사함. 앞의 기술을 활용해서 간접 배출량인 전기에너지와 열에너지를 각각 00% 줄 일 수 있다고 표현하는게 적절할 것으로 보임. 그리고 앞에서 언급한 것처럼 탄소중립률의 기준 년도가 국가와 다름.
4	어떻게 전기, 열로 예상 감축효과가 나오는지에 대한 설명이 필요, LCA는 어떻게 측정되고 계산되는지에 대한 자료 필요
5	태양광, 연료전지의 효과가 가스의 감축효과로 나타나는데 그 근거와 의미를 이해하기 어려움.

Q4. 온실가스 감축량 산정은 배출계수가 높은 연료 순 으로 신재생에너지 발전량이 대체한다고 가정 하여 온실가스 감축량을 산 정하였습니다. 현재는 직접배출량만 고려하였으며, 향후 간접배출량에 대한 부분도 포함할 예정입니다. 이러한 부분에 있어서 별도의 자문요청을 드려도 될까요?



Q5. 탄소중립률 평가에서 LCA(전과정평가)를 통한 온실가스 감축량을 제시하고 있는데
 요, 적절하게 제시되고 있다고 생각하시나요?



Q5-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

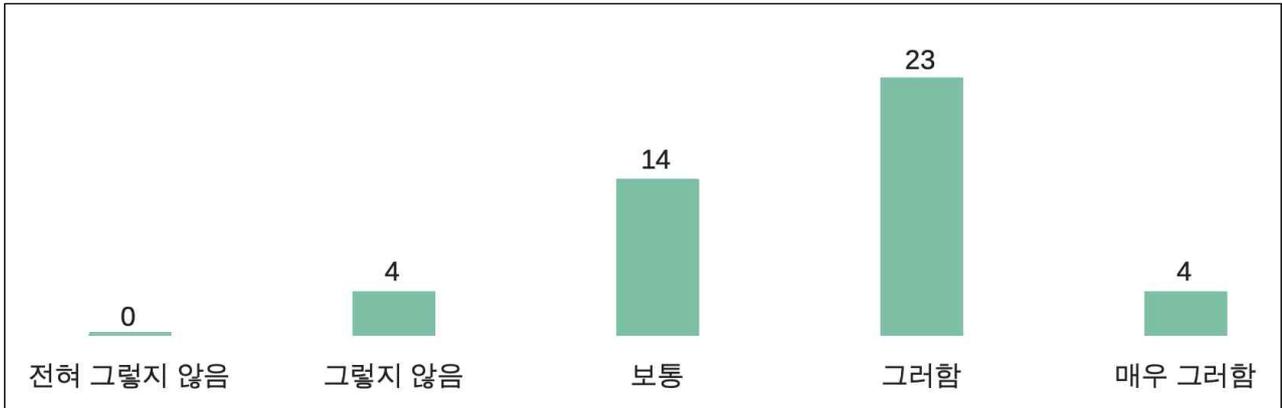
구분	의견 내용
1	LCA에 대한 소개나 근거(가중치 부여 근거나 기준)가 부재하여 일반인이 의미를 판단하기 곤란함

Q6. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	온실가스 배출현황의 글자 크기가 좀 더 컸으면 좋겠음
2	화면 도표의 색상 등 메뉴구성을 보다 다양하게 하면 좋을듯 합니다.
3	성상별 감축효과에 대한 분석결과가 잘 이해되지 않습니다.
4	탄소중립 기술대체 가정에서의 수치, 전환부문 온실가스 예상 감축효과에서 각 원별 %가 나타내는 의미가 무엇인지 설명 필요
5	전문가 모드와 일반인 모드로 분리되었으면 함.
6	올해부터 환경부 한국환경산업기술원에서 실측기반의 한국 LCI DB를 구축중에 있습니다. (태양광, 풍력, 수력, 수소 연료전지 등) 올해 12월 중에 사업이 완료되면 공표할 것으로 보이며 해당 자료를 CATAS와 연계하면 보다 신뢰도 높은 결과를 제공할 것으로 보입니다.
7	대체기술이 어떤 쪽 저감이 가능한지 알 수 있다면 좋을 것 같고, 현재 국내에서 그 지역 내 탄소중립만 신경을 쓰는 지, 아니면 다른지역으로 전기, 가스 등을 분배하는 것도 포함된건지에 따라 배출량기술대체 데이터의 중요도가 달라 질 것 같습니다. 그리고 전환부분만 감축효과를 보고자 한다면, 일부러 온실가스 배출현황을 다 보여줄 필요는 없어 보입니다. 제시된 대체기술로 커버 가능한 선에서만 보여줘도 충분하지 않을까 싶습니다
8	전과정 평가시 고려된 사항에 대한 정보가 추가적으로 있으면 좋을 것 같음. 그리고 서울의 경우, 산림흡수원 중 해외 조 립사업을 통한 온실가스 배출 상쇄(탄소감축사업을 통한 배출권 거래제-탄소 크레딧확보)를 포함하고 있으므로 향후 이 부분에 대한 산정도 포함하면 좋을 것 같음.
9	전과정 평가시 고려된 사항에 대한 정보가 추가적으로 있으면 좋을 것 같음. 그리고 서울의 경우, 산림흡수원 중 해외 조 립사업을 통한 온실가스 배출 상쇄(탄소감축사업을 통한 배출권 거래제-탄소 크레딧확보)를 포함하고 있으므로 향후 이 부분에 대한 산정도 포함하면 좋을 것 같음.
10	국제적으로 탄소중립은 직접 배출을 의미하고, 발전 및 열은 직접 배출과 연계되고 모니터링이 가능 하므로 정책에 반 여되고 있으나, LCA 적용 경우 정확도 및 모니터링의 한계로 동 프로그램의 궁극적인 목적인 지자체에 적용하는 것이 타당한지는 의문임. 다만 기업의 사회적 책임을 고려한 LCA를 고려한 Scope-3의 반영은 필요하다고 생각되며, 제품 별 LCA평가 과정에 대한 귀사의 도출 과정에 관심이 많음
11	전력이나 열을 탄소를 환산할 때의 기준이나 근거를 확인할 수 있는 설명란이 팝업으로 열릴 수 있도록 추가 정보제공 이 필요함.

경제성

Q1. 「경제성」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요?



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	전문 지식이 없는 일반인 사용자들이 입력하기 어려운 정보를 어떠한 참고자료 없이 요구하고 있어 혼란스러움
2	파력의 경우 제품 1, 2 등의 내용을 확인할 수 없어 막연한 느낌의 상황임. 추후 적절한 장치를 선정하여 나타낼 필요 가 있음
3	일반인이 보기에 경제성 분석시 입력 항목에 대한 이해가 낮음.
4	비용이 너무 단순하게 구성되어 있고, 각 내용은 누가 작성할 수 있는지를 고민

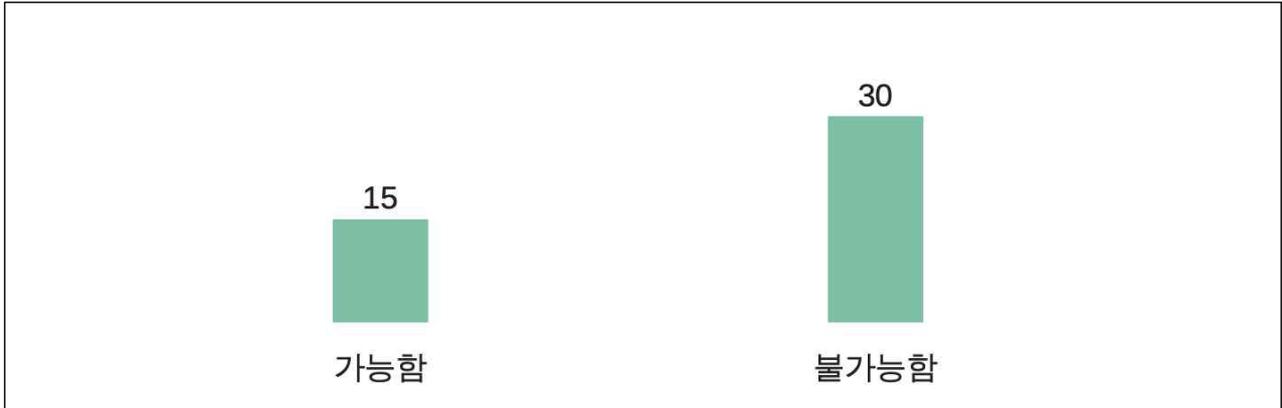
Q2. 현재는 경제성분석 지표로 LCOE를 사용하고 있는데요, 적절하다고 생각하시나요?



Q2-2. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	추후 보다 다양한 지표를 추가하여 다각도의 분석정보를 제공해주었으면 합니다.

Q3. 경제성분석과 관련하여 별도의 자문요청을 드려도 될까요?

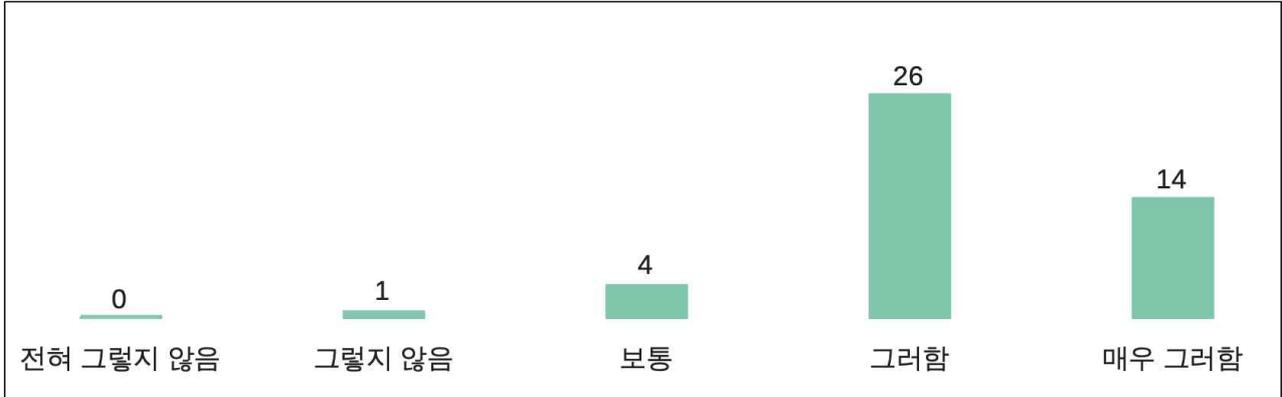


Q4. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	경제성 분석은 에너지경제연구원의 자문이 필요하다고 생각됨
2	작성 예시를 보여주면 도움이 될 것 같음
3	경제성 분석 항목이 사용자가 입력하기에 정보가 너무 부족합니다. 초기비용, 운영비용이 의미하는 뜻과 해당 비용 등은 사용자가 입력하기 어렵습니다.
4	일반 사용자는 초기비용 등을 입력하기 어려워보임
5	초기비용과 운영비용 데이터를 모두 사용자가 직접 넣어야 되는데, 참고할만한 평균 데이터 값 제공도 고려
6	일반인 모드를 선택적으로 분리하고, 일반인 모드는 간단하고 직관적으로 구성하였으면 함.
7	산림흡수원 부분으로 선정되는 화면에서 발전량과 제품으로 구분되는 것이 타당한지, 일반인을 위해서 비용에 대한 reference는 주어져야 할 것으로 보임
8	할인율, 기술수명, 발전량 등에 대한 단위가 표시되면 좋겠음.
9	경제성 분석에서 구성품 가격의 입력이 구성품을 선택했을 때 연동되서 자동으로 입력됐으면 한다.
10	경제성에 대한 전문성이 없어 통상 BC나 IRR 정도만 접해서 별도의견은 없으나 현재 구현된 화면에서 해당 기술의 경제성 유효리를 판단하기는 어려워 보임
11	각 기술별 투자/운영관련 비용항목 기준이 존재하므로 완전한 자유 기재보다는 세부항목에 채워넣기 방식으로 작성 을 편리하게 할 필요가 있음.
12	일부 데이터를 알지 못하더라도 경제성 분석결과를 계산할 수 있도록 기본값(default)을 선택할 수 있도록 데이터(가 격 정보 등) 포함 필요
13	분야별로 산출 방법과 문제들이 달라 추후 작업이 요구됨
14	경제성 분석 항목이 의도하는 바가 다소 불분명함.

리포트

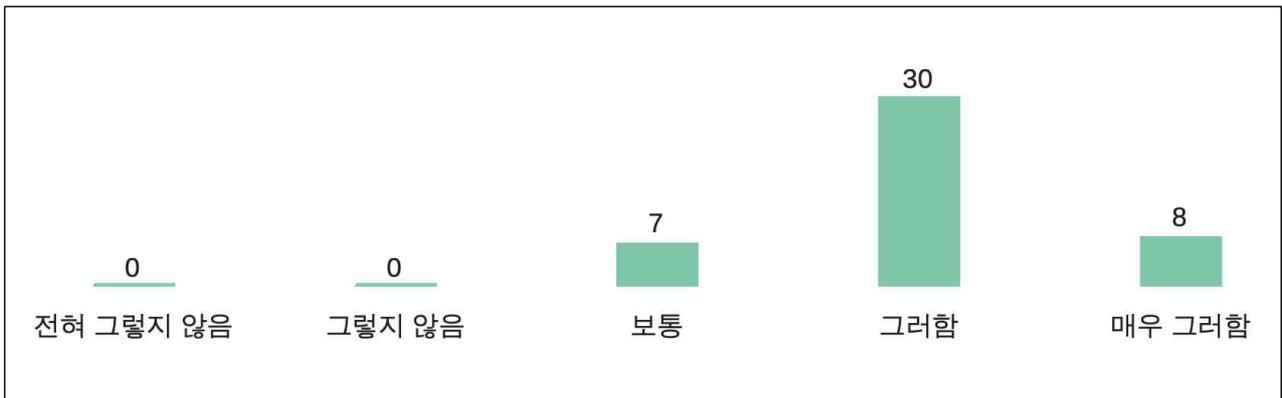
Q1. 「리포트」 화면 구성이 적절하다고 생각하시나요?



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	기후정보는 굳이 필요하지 않다고 보임

Q2. 「리포트」 에서 해당지역에 대한 적절한 정보가 제공된다고 생각하시나요?



Q2-2. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	아주 구체적이고 명료하게 잘 구성되어 있다고 판단됨. 이외에 별도 의견 없음.
2	분석결과를 이해하기 쉽게 간단하게 풀어서 설명해주는 글이 있으면, 분석결과에서 보여주는 수치들을 좀 더 쉽게 해석할 수 있을 것 같음
3	사용자 매뉴얼을 작성하여 시스템과 함께 제공하면 활용도가 높을것 같습니다.
4	강수량 정보 오류 (연 강수량 약 1200mm 혹은, 월평균 강수량으로 기재). '위치'에 쓰인 용어는 어떤 개념이인지. 내륙 지역에서 수온은 하천 온도를 의미하는지.
5	경제성 분석에서 각 에너지원별 발전금액의 수준을 비교할 수 있는 레퍼런스 데이터 제시(현재 전기생산가격 등) 필요
6	최종적으로 비교될때에는 각 신재생 에너지의 단위를 통일하여 총량을 한눈에 비교할 수 있도록 하는 방안을 고려할 수 있음
7	리포트에 기후정보는 불필요, 가운데 신재생에너지 생산량 단위 Toe 외에 MWh 단위로 표시하면, 오른쪽 기술분석 데이터와 직관적 비교 가능할 듯
8	하나의 화면에 너무 많은 정보가 포함되어 집중력이 떨어짐.
9	전반적으로 지자체 현황 및 분석결과를 한눈에 요약해줄 수 있는 유용한 기능인 것 같습니다.
10	최종 결과물을 export(PDF, 각종수치의 .csv)할 수 있는 기능이 있으면 보다 유용할 듯 합니다.
11	지역별로 언급된 대체기술의 적용이 가능한 지역과 그렇지 않은 지역이 있을텐데, 추천하는 기술등에 대한 정보도 제 공하면 좋을 것 같음. 특히 바이오나 산림흡수원은 기후와 관련해서 지역별로 효율이 좋을 수도 있고 나쁠수도 있음.
12	기후정보에 대한 기준년도 필요, 시나리오별로 저장하는 기능도 있으면 좋겠음(시나리오1-현재적용기술, 시나리오2- 기술 추가시, 시나리오3- 다른 기술 추가 등), 탄소중립률도 중요하지만, 온실가스를 얼마만큼 감축했는지 절대량도 필요함. 그리고 각 그림을 저장해서 지자체 보고서에서 활용할 수 있게 하면 좋겠음
13	별도의 의견은 없으나 사용자 중심(지자체 공무원 등)으로 수요를 조사해 보는 것이 필요할 것으로 보임
14	시나리오라고 하면 시간의 흐름에 따라 어떻게 되는지를 보여주어야 하는데, 본 리포트는 2050년 시점만 보여주어서 아쉬움
15	완전히 일반인이 사용하기 보다는 해당 정보가 필요한 전문가가 활용할 가능성이 높기 때문에 정보를 너무 단순화하 기 보다는 각 기술적용에 따른 용량, 발전량, 탄소저감량, 판단기준 등을 종합적으로 제시하는 것이 좋을 것으로 생각 됨. 필요하다면 기술별로 추가 팝업을 제공하는 등 추가 정보가 필요한 사용자를 배려할 필요가 있음.

Q3-1. CATAS-BASIC 프로그램과 관련하여 개선사항 등 기타 의견을 자유롭게 서술해 주세요.

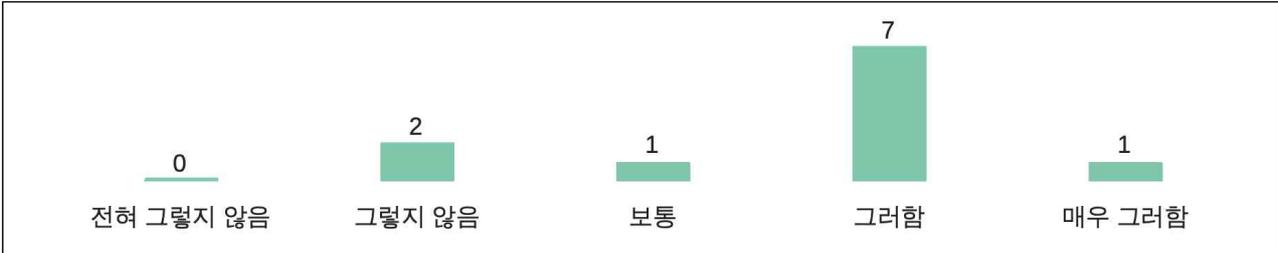
구분	의견 내용
1	탄소중립 기술을 사용자가 입력하게 하는 것 보다는 시나리오 안을 여러가지를 제시하고, 선택하게 하는 것도 좋을 듯 합니다.
2	각 지역별로 기본적인 정보가 추가로 제시되면 수치를 넣고 모형을 돌릴 때 도움이 될 것임. 2023년도에 각 지자체들이 탄소중립 계획을 수립하고 있어서, 모형 공개시점을 당기는 것은 좋지 않을까 생각함. 쉽게 이해할 수 있도록 구성 했는데, 리포트가 좀 더 상세하게 나올 수 없는지
3	별도의 매뉴얼 화면을 통해서, 전체적인 진행방법에 대한 보다 쉬운 설명이 필요할 것으로 판단됨.
4	아주 유용한 프로그램으로 판단되어, 향후 정확성 개선에만 많은 보완이 이루어질 경우 향후 청정에너지 사회 구축에 표준모형이 될 것으로 사료됨
5	전반적으로, 값을 얻기위해 입력해야 할 내용이 전문적인 부분이 많습니다. 참조값을 제공하고 필요시 일부 수정이 가능한 형태로 가이드를 제시하는 것이 좋겠습니다. 그리고, 일반인 공개버전이라면 가장 복잡한 메뉴 구성이 될 것으로 보이는 경제성 메뉴는 빼는 것도 좋을 것 같습니다.
6	탄소중립 실현의 지역별 자료를 매우 편하게 정리한 듯 합니다. 큰 도움이 되리라 생각됨. 경제성 정보는 상황에 따라 편차가 심해서 조심할 필요 있을 듯합니다. 또 정보의 출처에 대한 내용도 포함되면 좋을 듯 합니다.
7	진짜 일반인이 사용하기 쉬운 버전이 있으면 어떨까합니다. 특히 "탄소중립기술 적용" 부분이 너무 전문적이어서, 아 주 개략적으로 탄소중립기술(예: 해당지역의 몇 %이 마련되면 어떨까 합니다.
8	전문가 또는 관련 종사자 가 사용하기에는 적절해 보이나, 일반인들이 쉽게 사용하기에는 어려워 보임. 입력 또는 선택해야 하는 사항들에 대한 설명 또는 가이드가 같이 있었으면 좋겠음
9	본 프로그램 외에도 국내외 온실가스 감축 및 탄소중립과 관련된 자료 또는 도구를 소개하는 탭도 포함되면 유용할것 같음
10	1. 자치구별 자료로 세분화된 프로그램으로 확장하면 좋을듯 합니다. 2. 적용가능한 기술을 제시하면 좋을듯 합니다. 3. 자치구별로 수행중인 온실가스 감축 및 적응 사업들에 대한 목표대비 검증/평가가 이루어질 수 있는 프로그램 구성 이 되면 좋겠습니다.
11	일반인의 경우 용어도 생소하고, 재생에너지에 대한 이해도 많이 낮을 것으로 생각합니다. 따라서 CATAS-BASIC의 경우 가급적 많은 사례를 넣어 이해를 보다 쉽게 할 수 있도록 하면 좋을 것 같습니다.
12	일반인들이 탄소중립과 관련된 정책과 제도에 대한 이해를 할 수 있는 링크를 제공하면 좋을 듯함.
13	정부 및 유관기관에서 개발한 수백가지 프로그램 중 대부분 사용되지 못하고 있는데, 이는 계획단계에서부터 주 사용 자가 고려되지 못하였고, Target층에 특화된 개발이 이루어지지 못했기 때문으로 사료됩니다. 이번 프로그램에서는 명확한 Target층을 설정하여, 프로그램 혹은 기관 Position에 적절한 콘텐츠를 담아내길 기대합니다. (ex. 탄소중립법 기반 지자체 계획수립용으로 특화 -> 개도국 기술이전)
14	탄소중립 시나리오를 그래픽적으로 구현한 것을 일반인/연구자들이 좀더 쉽게 접근할 수 있는 방법으로 좋은 접근임. BASIC이라는 것으로 고려하였을때 관련 용어 및 많은 부분에서 설명이 함께 제시되어야 함. 나중에 프로그램 가이드북 같은 것도 제시 필요.
15	차기 버전에 탄소중립이 가능한 탄소포집 등 기술 추가 검토 필요
16	이미 준비하고 계시겠지만, 용어에 대한 설명(가이드)가 있으면 일반인/비전문가 분들께 도움이 될 것 같습니다.
17	데이터 입력 창에서 사용자가 입력해야 되는 부분을 조금 더 쉽게 인지할 수 있도록 디자인을 수정하면 좋을것 같습니다.
18	일반 국민이 사용하기에는 기술 데이터에 대한 전문성이 필요해서 어려울 듯하며, 일반 국민을 대상으로 한다면, 기술 데이터 부분도 평균치를 입력할 수 있도록 하여, 대략적인 온실가스 감축효과를 확인할 수 있도록 기술데이터 입력화 면을 간소화하는 게 좋을 듯 함. 지자체의 정책결정자가 활용한다고 하면, 앞서 언급한 바와 같이 전환파트에만 치중 되어 실제 활용도가 높지 않을 것으로 우려됨. 명확한 사용자 타겟에 따라 사용자 편의성을 고려 일부 메뉴 개편이 필요한듯 함
19	일반인의 접근 용이성을 개선하기위해 조금더 단순하고 직관적으로 구성이 되었으면 함.
20	완성도 있고 편리하게 모형을 개발해 주셔서, 다양한 사용자 입장에서 활용할 수 있을 것으로 기대합니다. 저 또한 많은 관심을 갖고 CATAS가 더 발전할 수 있도록 노력하겠습니다.

□ 기술별 질문

태양광

Q1. 태양광의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하 다고 생각하시나요?

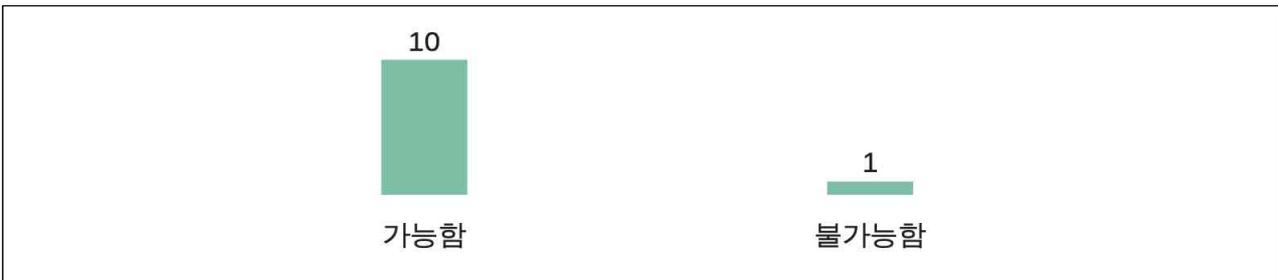
태양광에너지 발전량(연): 일사량 × 태양광 모듈면적 × 모듈 효율 × 365일



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	효율은 시간이 지남에 따라 떨어지는 것을 고려해야 함
2	방향과 경사 등 태양광모듈의 설치방식에 따라 발전량에 큰 차이를 나타내며 건물에 적용할 경우 발전소와 달리 향과 경사가 다양하게 나타나므로 이 정보를 반영하여야 함이러한 반영이 필요함.

Q2. 내년 과제에서 태양광 에너지 산정 방법을 고도화 하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 태양광 에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요?



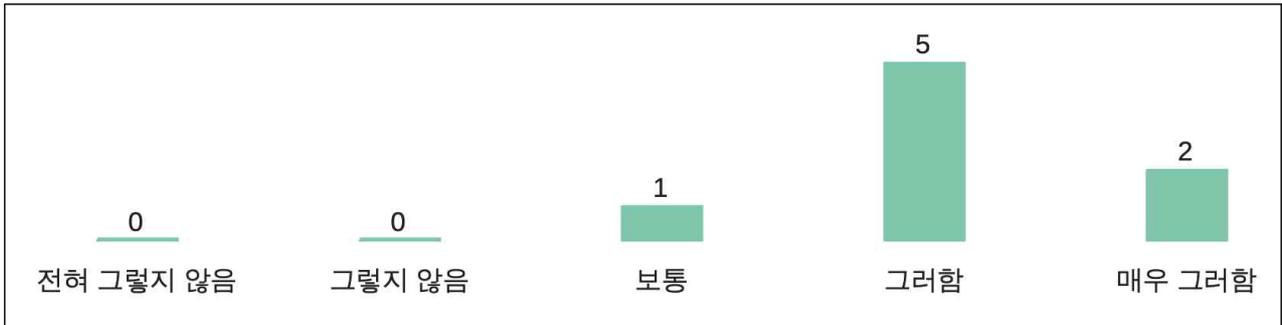
Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	일사량이 수평면 일사량으로 보여집니다. 태양광 패널을 설치할 때 주로 남향으로 기울이는 것으로 알고 있는데(정확한 각도는 모름.), 남쪽으로 기울이는 각도로 계산되는 일사량으로 환산을 하면 더욱 현실에 맞을 것 같습니다.
2	태양광발전량에서 365일이 아닌 부조일수(발전되지않는 흐린날)는 제외해얏한다고 판단됨.
3	태양광에너지 발전량에 온도도 고려해야 되지 않나요?
4	이론적인 산정방식도 중요하지만 태양광은 설치방법(일사 각도 등) 위치도 중요하므로 가장 이상적인 설치방법 및 조 건에 대한 팁도 반영하는 것이 좋을 것 같음

풍력

Q1. 풍력의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요?

풍력에너지 발전량(연): \sum 풍속 빈도분포 (Weibull 분포) × 터빈 출력곡선



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

Q2. 내년 과제에서 풍력에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 풍력 에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요?



Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

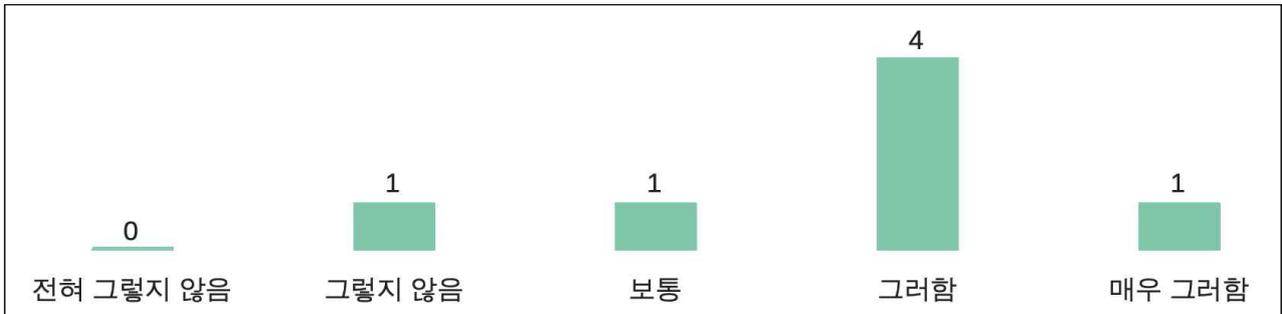
구분	의견 내용
1	각기 다른 터빈 높이에서의 풍속 분포에 대한 모수화를 개선할 수 있을 것 같습니다.

바이오에너지

Q1. 바이오에너지의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요?

바이오가스 플랜트 발전량(연):

정격출력 x 설치대수 x 월별 일수 x 24시간 * 1년: 360일 (정비시간 3일 제외)



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	바이오가스 플랜트의 운영시간 확인이 필요함. (24시간 운영되는지 확인 필요)

Q2. 내년 과제에서 바이오에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 바이오 에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요?



Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

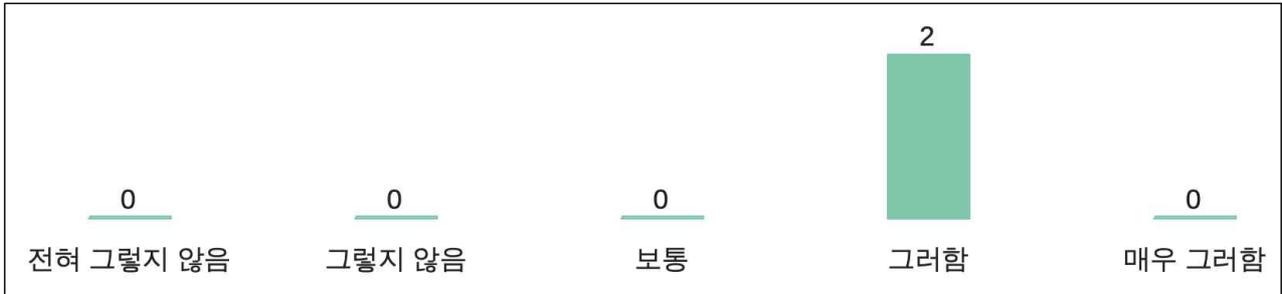
구분	의견 내용
1	플랜트로 산정하는건 합리적이긴한데, 지역/시기별로 생산되는 바이오가스의 양도 다를것이기에 기존 데이터를 바탕으로 최상/보통/최하 수준의 운전결과를 선택할 수 있으면 좋을 것 같음
2	바이오가스는 발전기의 출력(100% 출력 고려는 무리로 판단)도 중요하지만 바이오가스 원료(음식물, 슬러지, 분뇨 등)의 반입이 중요하므로 이에 대한 팁 반영도 필요할 것으로 사료됨

수력

Q1. 수력의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요?

수력에너지 발전량(연) :

$$\text{유체밀도} \times \text{중력가속도} \times \text{유량} \times \text{유효낙차} \times \text{시스템 효율} \times \text{가동률} \times 8,760\text{시간}$$



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

Q2. 내년 과제에서 수력에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 수력에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요?



Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	1. 유연면적은 크게 의미가 없는 듯합니다. 2. 한강의 경우 수중보(잠실, 신곡)의 낙차를 이용한 수력 발전도 가능합니다.
2	현재 지자체 단위에서 대략적인 에너지 산정할 수 있도록 설계되었으나, 공간해상도를 확대하여 특정 하천에 도입 시 계산할 수 있으면 좋을 것 같습니다. 이와 관련하여 도움드릴 수 있도록 노력하겠습니다.

조력

Q1. 조력의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요?

조력 에너지 발전량(연):

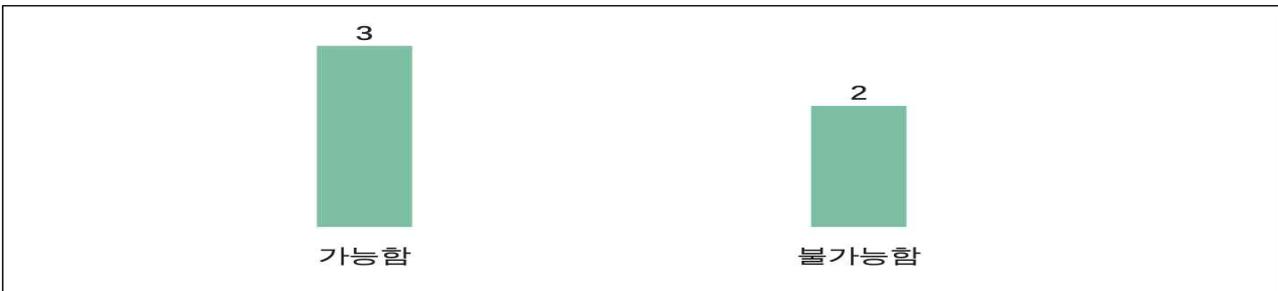
$$1/2 \times \text{유체밀도} \times \text{중력가속도} \times \text{조 지면적} \times \text{최대조차}^2 \times \text{터빈효율} \times 8,760\text{시간}$$



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	위 발전량은 최대조차를 기준으로 한 조력에너지값으로 조력발전은 최대조차가 아닌 발전이 가능한 조차에서 발전을 시작하여 정격발전이 가능한 조차를 유지하면서 발전이 이루어짐. 따라서 최대조차를 기준으로 하는 것은 문제가 있으며, 따라서 정격출력을 기준으로 설비이용률(capacity factor)에 따라 연간발전량을 계산하는 것이 더욱 타당할 것으로 사료됨

Q2. 내년 과제에서 조력에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 조력에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 지문을 요청드려도 될까요?



Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

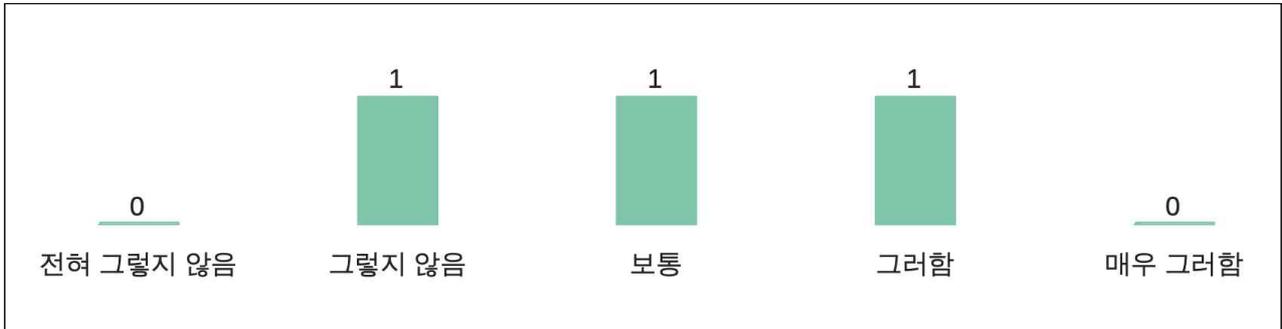
구분	의견 내용
1	응답없음

조류

Q1. 조류의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요?

조류 에너지 발전량(연):

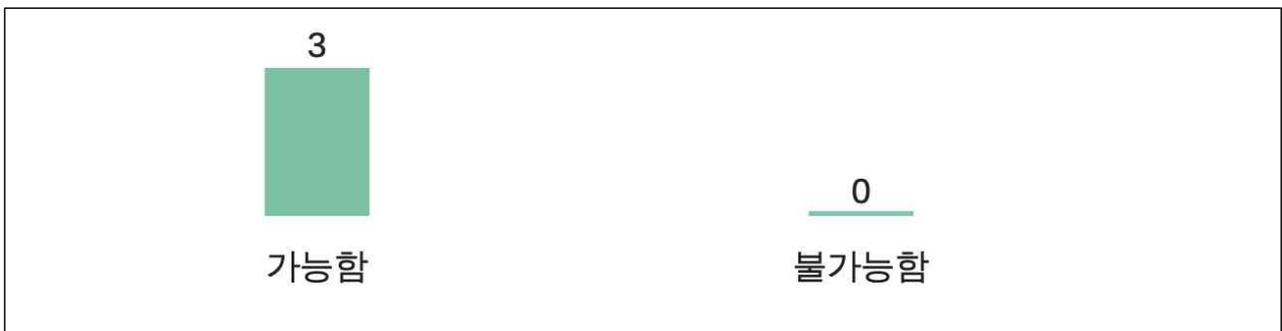
$$1/2 \times \text{해수밀도} \times \text{조류유속}^3 \times \pi/60 \times \text{시설 점유면적} \times \text{설비효율} \times 8,760 \text{시간}$$



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	조류발전의 경우 (1) 풍력발전과 동일하게 유속의 확률분포와 조류발전시스템의 출력곡선을 이용하여 연간발전량을 계산하거나 (2) 정격출력과 설비이용률(capacity factor)을 이용하여 계산하는 것이 타당할 것으로 사료

Q2. 내년 과제에서 조류에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 조류에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요?



Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

파력

Q1. 파력의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요?

파력 에너지 발전량(연):

$$\text{유체밀도} \times \text{중력가속도}^2 \div 64\pi \times \text{에너지주기}^2 \times \text{유의파고} \times 1000 \div (7 \times 7 \times \text{설비길이}) \times \text{설비점유면적} \times \text{발전장치 개수} \times \text{이용율} \times 8,760\text{시간}$$



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

Q2. 내년 과제에서 파력에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 파력에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요?



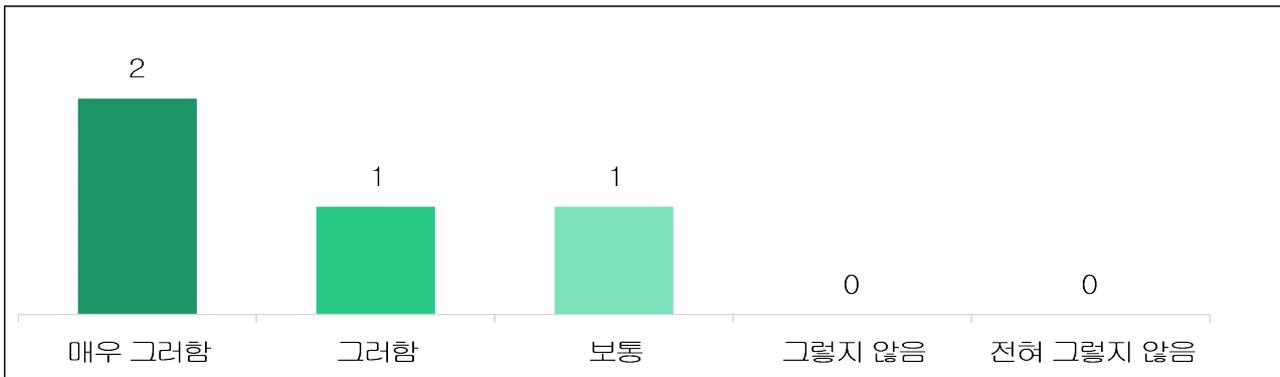
Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

연료전지

Q1. 수소연료전지의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요?

$$\text{수소연료전지에너지 발전량(연)}: \text{시스템출력} \times \text{이용률} \times \text{설치대수} \times 8,760\text{시간}$$



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	시스템출력은 제품에 따라 상이하여 위 식을 그대로 적용할 수는 없음

Q2. 내년 과제에서 수소연료전지에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 수소연료전지에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요?



Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

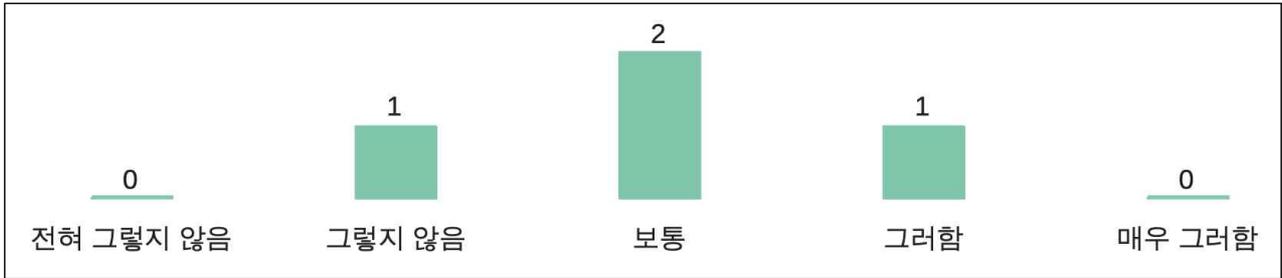
구분	의견 내용
1	많은 신규 에너지 디바이스가 그렇듯, 수소연료전지 역시 배출량이 100% 친환경이 아닐 수도 있으니 해당 부분 업체를 통한 피드백이 필요하며 기술분석시 포함이 필요할 수 있다고 판단됨

태양열

Q1. 태양열의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하 다고 생각하시나요?

태양열에너지 발전량(연):

$$\text{일사량} \times \text{태양열 투과면적} \times \text{설치대수} \times \text{월별일수} \times 0.004186(\text{MJ/Kcal})$$



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	가동일수를 추가해야 함. 가동일수는 산업용, 난방 및 급탕용 등에 따라 달라짐. 건물의 적용되는 태양열 온수시스템 의 가동일수는 대략 4-5개월 정도임

Q2. 내년 과제에서 태양열 에너지 산정 방법을 고도화 하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 태양열 에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요?



Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	태양열에너지 발전량이 아니라 태양열에너지 생산량이 더 적합한 표현입니다. 더불어 연간 생산량이면 월별일수만을 곱하는 것이 부적절한 것 같습니다.
2	태양열에너지 발전량 식에 문제가 있어보임. 일사량이 수평면전일사량을 뜻한다면 위 식은 집열기 설치 기울기와 흡 수효율 관련 정보가 추가 되어야 함.

지열

Q1. 지열의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요?

열에너지 발전량(연):

$$\text{정격용량(kW)} \times (1-1/\text{COP(성능계 수)}) \times 3.6\text{MJ/kWh} \times \text{월별냉난방에너지생산시간(h)}$$



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

Q2. 내년 과제에서 지열 에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 지열 에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요?



Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	응답없음

수열

Q1. 수열의 에너지 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요?

열에너지 발전량(연):

정격용량(kW) x (1-1/COP(성능계 수)) x 3.6MJ/kWh x 월별냉난방에너지생산시간(h)



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	의견없음

Q2. 내년 과제에서 수열에너지 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 수열에너지 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청드려도 될까요?



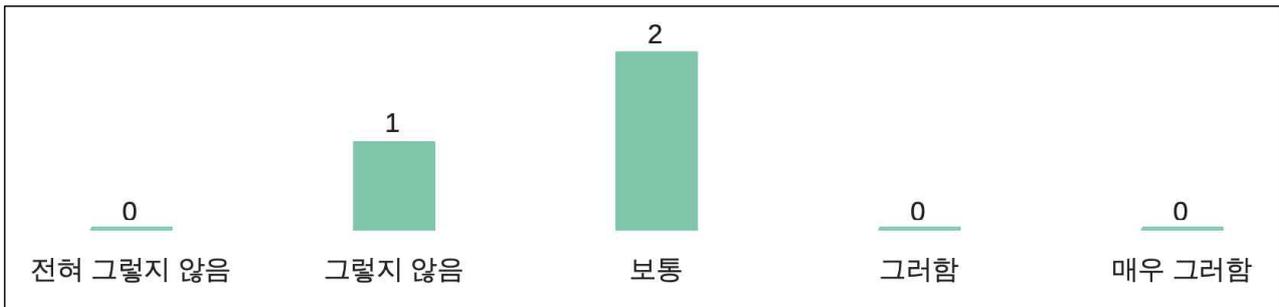
Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	의견없음

산림흡수원

Q1. 산림흡수원 관련 탄소 흡수량 산정식은 다음과 같습니다. 적절하다고 생각하시나요?

$$\text{CO}_2\text{흡수량(연)}: \text{수종별 나무 식재량} \times \text{수종별 1그루당 CO}_2\text{흡수량}$$



Q1-1. 응답에 대한 이유를 간단히 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	ha 단위로 표기되는데 수종별 1그루당이 맞는 것인지, 아마 분수를 비롯하여 다양한 정보가 사전 고려되었을 것으로 판단하지만, 정확한 설명들은 부수적으로 확인할 수 있으면 좋겠음

Q2. 내년 과제에서 산림흡수원 관련 탄소 흡수량 산정 방법을 고도화하여 데이터 분석 결과에 대한 신뢰도를 제고하고자 합니다. 산림흡수원 관련 탄소 흡수량 산정 방법 고도화에 대한 별도의 자문을 요청 드려도 될까요?



Q3. 별도의 의견이 있을 시 자유롭게 작성해주세요.

구분	의견 내용
1	BASIC 프로그램에서는 위 수준으로 하되, 지자체 계획수립용 프로그램의 경우 지역에 특화된 계수들이 적용될 필요가 있음
2	현재 임목수가 아닌 면적 단위로 식재 세부사항을 입력하게 되어 있습니다. 알파버전 수준에서 기본 정보를 잘 갖추고 있다고 생각합니다. 앞으로 환경별/기후별/지역별 고도화 등을 반영할 수 있을 것 같습니다.
3	대상지 조립 가능 면적이 어떻게 선정되었는지에 대한 사전 설명이 있어야 할 것으로 보임, 식재 가능 면적을 초과하는 경우 안내가 뜨는데, 사전에 식재 가능 면적도 기술데이터 입력 시 작관적으로 보여야 할 것 같음

공간 단위 탄소중립 기술적용 시나리오 모형 연구:
에너지전환 기술 중심으로

인 쇄 | 2022년 12월

발 행 | 2022년 12월

발행인 | 이상협

발행처 | 국가녹색기술연구소

인쇄처 | 주식회사 동진문화사

※ 동 보고서의 내용에 문의 사항이 있는 경우 아래로 연락주시기 바랍니다.

국가녹색기술연구소(NIGT) 기술총괄부

- 주소 서울특별시 중구 퇴계로 173
남산스퀘어 17층(우 04554)
- 전화 02-3393-3986
- 이메일 minalee@nigt.re.kr