

## 대기오염방지

&lt;KEITI 중국사무소 차목승 연구원&gt;

## 선박용 탄소 포집·활용·저장(CCUS) 기술 응용소개

## ▶ 개요

탄소 포집·활용·저장(Carbon Capture, Utilization and Storage, 이하 'CCUS')기술은 이산화탄소를 배출원에서 분리한 뒤 직접 이용하거나 봉인하여, 이산화탄소 배출을 줄이는 것을 의미한다. 또한 'CCUS'는 탄소 포집·저장(CCS)을 바탕으로 탄소 활용(Utilization) 공정을 추가하여 개발된 기술이다. 즉, 이는 이산화탄소 포집·저장 기술을 발전시킨 개념으로 인식할 수 있다.

현재 'CCUS' 기술은 주로 화력발전, 석탄화공, 시멘트 생산 등 산업에서 일부 시범 프로젝트로 진행하고 있지만, 아직 상용화 단계까지 발전하지는 못했다. 특히 선박 산업에서는 아직 탄소 배출 감소를 위한 기술을 적용한 시범 프로젝트가 없기 때문에 최근 연구개발 되고 있는 선박용 'CCUS' 기술은 이제 시작 단계이다.

따라서 본 기술동향은 'CCUS' 기술 원리 및 동 기술이 선박 산업에서 어떻게 적용 가능한지를 살펴보고자 한다.

## ▶ 'CCUS' 기술 원리

## 1) 탄소 포집방식(碳捕捉方式)

'CCUS' 기술의 핵심은 탄소 포집방식이다. 이산화탄소 포집방식은 주로 '연소 전(前) 포집', '풍부한 산소 조건에서 연소(富氧燃烧)<sup>1)</sup> 포집', '연소 후(後) 포집' 3가지로 나뉜다.

## (1) 연소 전 포집(燃烧前捕捉)

주요 원리는 연소 전 화석 원료(化石燃料)에서 이산화탄소를 제거하는 것으로 연료 처리를 위한 재정비 장치가 필요하다.

## (2) 풍부한 산소 조건에서 연소 포집(富氧燃烧)

공기 중에서 연소하는 것이 아니라, 순수 산소 조건에서 화석연료를 연소시키는 것이다. 따라서 공기분리장치(空分装置, Air Separation Unit)<sup>2)</sup>를 이용하여 공기 중의 산소를 분리시켜야 한다.

1) 풍부한 산소조건 연소(富氧燃烧) : 공기 중 산소함량이 20.947% 이상 높은 산소를 함유하고 있는 기체로 연소시키는 효율적인 연소기술이다. / 출처 : 바이두백과 번역(2021.3.22.검색)

2) 공기분리장치(空分装置, Air Separation Unit) : 공기 구성을 분리해 산소, 질소, 아르곤가스 등으로 나눠 생산하는 설비이다. / 출처 : 바이두백과 번역(2021.3.22.검색)

### (3) 연소 후 포집(燃烧后捕捉)

일반적으로 주로 사용되는 방식은 화학적 흡수법(化学吸收法, 화석 연료가 연소 후 발생하는 배기가스에서 이산화탄소를 흡수하는 방식)과 막 분리법(膜分离法, 배기가스를 분리하여 이산화탄소를 정화하는 방식)이 있다. 화학흡수법은 정화 효율은 좋지만 원가가 비싸다. 반면에 막 분리법은 경제성은 우수하지만 이산화탄소 회수량이 낮기 때문에 순도(纯度, purity)<sup>3)</sup>가 높지 않다.

따라서 연소 후 포집은 앞선 두 가지 포집방식(연소 전·풍부한 산소 조건에서 포집) 대비 기술성속도가 높고 엔진을 별도로 개조할 필요가 없어 선박용 탄소 포집기술에 적합하다.

현재 많은 중국 내외의 연구기관에서 연소 후 포집방식을 통해 선박에 적용할 경우 기술성과 경제성을 분석하였다. 그 결과, 포집 매개체와 포집 공정에 따라 탄소 포집율은 60~90%로 나타났다. 또한 동등한 흡수제를 사용할 경우, 엔진 출력이 큰 대형 선박은 중소형 선박 대비 이산화탄소를 포집하기 위한 원가가 현저히 낮은 것으로 평가하였다.

표 1. 탄소 포집방식

구분	주요 원리
연소 전 포집	· 화석 원료에서 이산화탄소를 제거하는 것으로 연료 처리를 위한 재정비 장치 필요
풍부한 산소 조건에서 연소 포집	· 공기 중에서 연소하는 것이 아니라, 순수 산소조건에서 화석원료를 연소시키는 것임. 따라서 공기분리장치를 통해 산소를 분리시켜야 함
연소 후 포집	· 화학 흡착제와 막 분리법을 이용하여 이산화탄소 정화 · 화학흡수법은 정화 효율이 좋고, 원가가 높음. 반면에 막 분리법은 경제성은 좋지만 회수량이 적어 순도가 낮음 · 연소 전·풍부한 산소 조건에서 연소 포집 방법 대비 기술성속도가 높음

자료 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

### 2) 탄소 활용방식(碳利用方式)

탄소 활용방식은 지질활용(地质利用), 화학활용(化学利用), 생물활용(生物利用) 등으로 분류할 수 있다.

① (지질활용) 이산화탄소는 대부분 고갈된 유전(油田, oil field)<sup>4)</sup>이나 비교적 안전한 지하에서 봉인된 상태로 최종 목적지까지 운송된다. 아울러 봉인 상태로 운송된 이산화탄소는 자원화하거나 재이용할 수 있다. 그렇기 때문에 지질을 활용하여 봉인된 상태로 운송된 이산화탄소의 활용은 기타 활용법 대비 경제성이 우수하기 때문에 현실에서 적용하기 용이하다.

따라서 현재 가장 흔히 볼 수 있는 탄소 활용방식은 이산화탄소 연료기술(二氧化碳驱油技术)<sup>5)</sup>를 이용한 이산화탄소 연료저장기술(CO2驱油封存技术)이라고도 한다. 동 기술을 사용할 경우, 최초 석유 채취량이 기존 방식 대비 15~20% 많기 때문에 효율이 높아 곧 상용화가 앞당겨질 것으로 보인다.

3) 순도(纯度, purity) : 물질이 화학적으로 얼마만큼 순수한가를 나타내는 정도로, 높을수록 물질은 그 물리적 성질이 일정하고, 화학조성도 결정되는데, 이것을 아는 데는 물질의 녹는점이나 끓는점을 측정하는 방법이 사용된다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.22.검색)  
4) 유전(油田, oil field) : 석유를 함유한 하나 또는 몇 개의 지층이 단일 지질구조에 지배되어 존재하는 지역을 뜻한다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.22.검색)  
5) 이산화탄소 연료기술(二氧化碳驱油技术) : 이산화탄소를 기름에 주입하여 유전의 채유율을 높이는 기술이다. / 출처 : 바이두백과 번역(2021.3.22.검색)

② (화학활용) 화학적 합성 성질을 이용하는 방식으로 이산화탄소를 탄소원(碳源, carbon source)<sup>6)</sup>으로 이용한다. 따라서 수소기체를 메탄(甲烷, methane)<sup>7)</sup>, 메탄올(甲醇, methanol)<sup>8)</sup>, 디메틸 에테르(二甲醚, dimethylether)<sup>9)</sup>, 메탄산(formic acid)<sup>10)</sup> 저탄소 상태의 알칸(烷烃, Alkane)<sup>11)</sup> 등 기체나 액체연료와 합성되어 환원시킬 수 있다. 따라서 동 방식은 화석 원료의 의존도를 줄이면서 동시에 이산화탄소 배출량도 감소시킬 수 있는 특징이 있다.

③ (생물활용) 식품, 사료(饲料), 생물비료(生物肥料), 생물연료(生物燃料) 등을 주로 이용한다.

현재 화학·생물활용을 통해 이산화탄소를 제거하기 위한 응용범위는 비교적 적다.

상위 세 가지 활용방식 외, 소화시스템(灭火系统)에 이산화탄소를 주입하거나 초임계 이산화탄소 터빈발전기술(超临界CO2涡轮发电技术) 등 선상(船上)에서 직접 이산화탄소를 처리하는 방식도 있다. 하지만 동 기술들은 이산화탄소 처리량이 너무 적기 때문에 현재로서는 선박 산업에서 응용하기 쉽지 않다.

### 3) 탄소 저장방식(碳封存方式)

탄소 저장방식은 운송과 저장 두 단계로 분류된다.

#### (1) 탄소 운송

우선 육상 고정식 배출원(陆上固定式排放源)의 탄소 운송과정은 파이프, 선박, 압력 탱크차량을 통해 탄소를 운송한다.

이때 선박에서 선상에 포집된 이산화탄소를 해안의 최종 처리 장소까지 어떻게 운반하느냐가 주요 쟁점이다. 일반적으로 선상에서 포집한 이산화탄소는 하역시스템(卸载系统)을 통해 항구 등 육지에 있는 처리시설로 운송되어 이산화탄소를 봉인 상태로 저장하거나 처리된다.

#### (2) 탄소 저장

탄소 저장기술은 주로 지질저장(地质封存, Geological Storage), 해양저장(海洋封存, Ocean Storage) 두 가지로 나뉜다.

① (지질저장) 포집한 이산화탄소를 지질구조에 저장하는 것을 의미한다. 이는 대기로부터 장기간 단절시키는 과정으로 현재 지질봉인은 함수층(咸水层), 오일·가스층(油气层), 석탄층(煤层), 셰일가스(页岩气) 네 가지 종류로 이산화탄소를 저장하고 있다.

6) 탄소원(碳源, carbon source) : 미생물의 영양원으로서 유기 화합물로 된 글루코오스, 말토오스, 녹말 따위를 이르는 말이다. / 출처 : 네이버 국어사전 발췌(2021.3.22.검색)

7) 메탄(甲烷, methane) : 가장 간단한 탄화수소 기체이다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.22.검색)

8) 메탄올(甲醇, methanol) :  $CH_3OH$ 의 시성식을 갖는 가장 간단한 알코올이다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.22.검색)

9) 디메틸에테르(二甲醚, dimethylether) : 메탄올을 진한 황산 따위의 산성 촉매로 탈수하여 얻는 에테르. 상온에서는 무색의 기체로 향기가 나며 불에 타기 쉽다. 냉매나 용제로 쓰인다. 화학식은  $(CH_3)_2O$ 이다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.22.검색)

10) 메탄산(formic acid) :  $HCOOH$ . 탄소 수가 하나인 카복실산. 메탄산 또는 개미산이라고도 한다. 개미나 벌 따위의 체내에 들어 있다. 자극성 냄새가 나는 무색의 산성 액체로, 부식성이 큰 유기산이다. 메탄올이나 포말린의 산화로 얻는다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.22.검색)

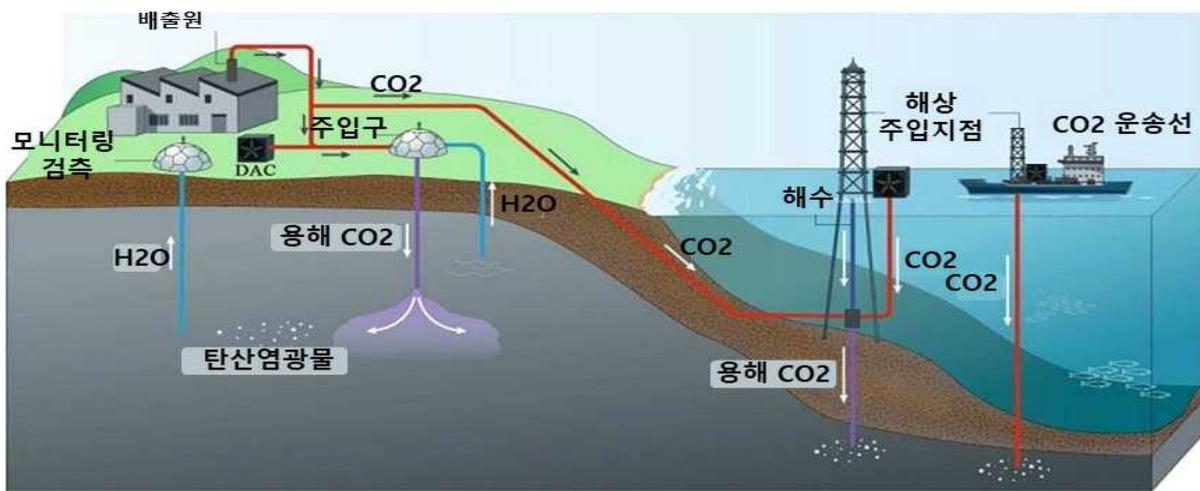
11) 알칸(烷烃, Alkane) : 사슬모양 탄화수소로서, 일반식  $C_nH_{2n+2}$ 로 나타낼 수 있는 화합물의 총칭이다. 가장 간단한 알칸은 탄소 하나로 이뤄진 메테인이다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.23.검색)

하지만 지질저장 방식은 현재 기술성숙도, 운영비용 등으로 인해 대부분 오일·가스층에서 저장되고 있다. 따라서 향후 선박 산업에서 이산화탄소 저장방식은 지정된 장소에서 해저(海底)와 연결된 배관을 통해 봉인된 상태로 운송하여 저장할 것으로 보인다.

- ② (해양저장) 이산화탄소를 배나 배관을 통해 심해 해저까지 운반해 봉쇄하여 저장하는 것을 의미한다. 하지만 이러한 방법은 이산화탄소 함량이 너무 높으면 심해의 생물과 해수를 산성화 시키는 등 환경에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 또한 해저에 봉인되어 있던 이산화탄소가 대기 중으로 누출될 수 있다.

따라서 이산화탄소를 심해 해저에 저장하기 위해서는 아직 세부적인 연구개발이 필요하다.

그림 1. 탄소 저장 방식(지질저장·해양저장)



자료 : 바이두 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

### ▶ 선박용 ‘CCUS’ 기술

현재 전 세계에서 선박용 ‘CCUS’ 기술은 지속적으로 연구개발 중이다. 특히 선박 산업에서 ‘CCUS’ 기술을 적용하기 위해서는 설계단계부터 선상에 소형의 이산화탄소 포집설비를 설치해야 한다.

이 과정에서 ‘화학흡수법’이나 ‘막 분리법’을 이용하여 이산화탄소를 회수할 수 있다. 회수된 이산화탄소는 압축·액화시켜 저장해야 한다. 동 방법으로 압축·액화된 이산화탄소는 유전에서 주유하여 석유 채굴을 향상시키고, 합성연료(合成燃料, synthetic fuel)<sup>12)</sup>의 원료로 사용이 가능하다. 또한 비교적 기술수준이 높은 해상기술 중 하나인 드라이아이스(dry ice) 형태로 해저의 침적물에 넣어 봉인할 수 있다.

이러한 과정에서 탄소 포집과 선상의 탄소 저장은 선박용 ‘CCUS’ 기술의 핵심이다. 또한 선박에서 대용량으로 탄소 봉인이 불가능하기 때문에 외부로 연결된 장치나 시스템 또한 고려해야 한다.

반면에 탄소 활용은 앞에서 설명한 방식과 거의 동일하다.

12) 합성연료(合成燃料, synthetic fuel) : 석유 및 천연 가스의 대체 연료로서 석탄, 오일셀, 오일샌드, 바이오매스, 합성가스 등에서 생산되는 연료의 총칭이다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.23.검색)

### 1) 이산화탄소 포집(CO<sub>2</sub>捕捉)

선상에 탄소 포집장치를 설치하거나 크기를 줄이는 것이 선박용 탄소 포집 기술의 주요 핵심이다. 현재 발전소에서 사용하는 탄소 포집설비는 규모와 면적이 크기 때문에 이를 선상에 설치하기 위해서는 그 규모와 면적을 줄여야 한다. 또한 탄소가 포집되는 과정에서 에너지 소모량이 많기 때문에 이에 따른 경제성도 고려해야 한다.

탄소를 포집하는 과정은 보통 냉각이나 가열을 위한 별도의 장치를 설치해야 한다.

만약 배기가스에 있는 열에너지를 증기가열장치(蒸汽加熱裝置)의 열공급 에너지로 사용하거나 저온 연료를 이용하여 이산화탄소를 액체·고체 상태로 냉각시킬 수 있다면, 이는 기존의 냉각 장치를 대체하고 선박용 탄소 포집기술의 에너지 소비 문제를 해결할 수 있다. 또한 경제성을 향상시킬 수 있고 탄소 포집장치의 크기도 줄일 수 있다.

많은 연구 결과에 따르면, 현재 'CCUS' 기술이 가장 광범위하게 적용되고 있는 산업은 발전소이다. 하지만 'CCUS' 기술 중 탄소 포집설비로 인해 발전소의 전체 에너지 효율이 감소하는 단점이 있다. 따라서 선상에 탄소 포집을 위한 설비를 설치할 경우, 시스템의 에너지 효율을 최적화하면서 기존 선박의 동력·폐열회수시스템에 미치는 영향을 최소화해야 한다.

### 2) 이산화탄소 저장(CO<sub>2</sub>儲存)

포집된 이산화탄소를 어떻게 저장하는지에 대한 문제도 중요한 관심사이다.

만약 압축 기체형태로 이산화탄소를 저장하면 압축기와 압축 기체탱크가 선박에서 많은 부피를 차지하게 된다. 반면에 액체형태의 경우, 냉각·액화 공정과정에서 많은 에너지 소모가 불가피하다.

또한 저장 형태에 따른 설비의 면적이나 에너지 소모 관련 문제 외에도 저온에서 이산화탄소가 누출될 경우, 선체 구조와 인명피해를 줄 수 있어 이에 대한 안전성도 고려해야 한다.

현재 중국의 해운업에는 이산화탄소 수송선에 관련 규범·지침이 부족한 상황이고, 선박용 대형 이산화탄소 압축기나 액화설비에 대한 규정도 미흡한 상황이다. 따라서 기존의 액화·압축 기체에 대한 규범을 바탕으로 더욱 강화된 선박용 이산화탄소 저장설비를 개발하여 안전성 문제를 해결해야 할 것으로 보인다.

### 3) 이산화탄소 봉인(CO<sub>2</sub>封存)

이산화탄소는 보통 액체와 고농도 압축 상태로 봉인된다.

일반적으로 선박에 따라 이산화탄소를 저장하는 압력과 온도 차이가 크게 나타날 수 있고, 또한 봉인 장소에 따라 이산화탄소 주입 상태도 지질과 해양에 따라 달라진다. 따라서 이산화탄소 주입구의 요구에 따라 선상에서 이산화탄소를 하역시스템으로 운송할 때 누설되지 않도록 하는 기술적 어려움이 존재한다.

우선 선박에서 이산화탄소를 운송하는 방식은 두 가지로, 첫 번째, 선박에서 이산화탄소를 운송한 후, 반영구 처리장치에서 이산화탄소를 처리하는 방식과 두 번째, 선상에서 선 처리한 후 외부의 배관을 통해 다시 남은 이산화탄소를 운송하는 방식으로 분류된다.

첫 번째 방식을 적용할 경우, 이산화탄소를 저온의 액체이거나 저온 압축 기체 상태이기 때문에 선상을 초기 설계할 때 비교적 제한이 많다. 반면에 두 번째 방식의 경우, 선상에서 이산화탄소 처리장치를 설치한 위치가 중요하다.

이와 같이 발생하는 문제 외에도 선박 산업에 ‘CCUS’ 기술을 적용하기 위해서는 탄소 포집시스템에서 발생하는 폐기물, 흡수용제의 배출문제, 이산화탄소 운송 주파수, 이산화탄소 저장탱크의 체적과 균형문제, 이산화탄소 누출·부식 등 많은 문제 또한 고려해야 한다.

▶ 선박용 ‘CCUS’ 기술 핵심 요소

- ① (설치위치) 최근 들어 선박용 ‘CCUS’ 기술의 타당성 검토와 해결방안에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구 결과에 따르면, 선박 산업에 ‘CCUS’ 기술을 적용하기 위해서는 준중형 크기의 설비를 설치가 가능한 것으로 나타났다. 하지만 안전성이나 에너지 소비 등의 다른 요인을 고려한다면 크기를 더욱 줄여야 하는 것으로 보인다.
- ② (안전성 보장) 선박에 탄소를 저장하는 기술은 주로 <국제 선적 운송 액화·기체선박구조 및 설비 규칙(国际散装运输液化气体船舶构造与设备规则)>(이하 ‘IGC 규칙’)에 따르며, 일부 LPG 운반선의 기술적 요구나 탄소 저장탱크에 관한 표준은 별도로 관련 규정을 참고하여 설계해야 한다. 하지만 선박용 탄소 포집기술에 대한 안전성 문제는 아직 보완이 필요한 것으로 보인다.
- ③ (에너지 소비) 탄소 포집·저장시스템에서 사용되는 에너지 소비가 전체 운영원가에 직접적인 영향을 미친다.

현재 선박용 ‘CCUS’ 기술의 성숙도도 이산화탄소 포집량에 제한이 있기 때문에 선박에서 이산화탄소를 포집하는 원가는 탄소거래시장보다 훨씬 높게 나타난다. 따라서 선박용 ‘CCUS’ 기술을 적용을 위해서는 지속적인 연구개발이 필요한 상태이다.

표 2. 선박용 ‘CCUS’ 기술 핵심 요소

구분	주요 원리
설치위치	· 현재까지 많은 연구 결과, 준중형 크기의 설비가 설치 가능함. 하지만 장기적인 안전성이나 에너지 소비 등 고려할 경우, 크기는 더욱 줄여야 할 것으로 보임
안전성 보장	· 선박에 탄소 저장·운송기술은 관련 규범에 따라 설계해야함 · 아직은 선박용 탄소 포집기술에 대한 안전성 문제는 보완이 필요함
에너지 소비	· 탄소 포집·저장시스템에서 사용하는 에너지 소모량이 전체의 운영원가에 직접적인 영향을 미침

자료 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

▶ 시사점

최근 선박용 ‘CCUC’ 기술 일부는 이미 개발이 되었지만 아직 시범화단계이다. 또한 이에 따른 많은 문제점이 존재하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 지속적인 연구개발이 필요한 상황이다. 하지만 현재까지의 기술적·경제적 측면에서 볼 때, 대형 선박이 중소형 선박에 비해 탄소 포집이나 저장기술을 적용하기 용이한 것으로 보이고 있다. 따라서 지금까지 존재하고 있는 문제를 해결할 수 있는 기술적 혁신을 통해 대형 선박뿐 아니라 중소형 선박에서도 응용 범위가 확대되도록 해야 할 것으로 보인다.

출처 : 북극성대기망(2021.3.4.발표), <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20210304/1139647.shtml>, 2021.3.23.접속

※ 기술용어 번역·해석이 일부 상이할 수 있으니 반드시 중문본을 확인하시기 바랍니다.



## 중국환경산업 주간기술동향

발행

2021년 3월 23일 KEITI 중국사무소

기획총괄

▶ 박재현 소장(korea@keiti.re.kr)

주저자

▷ 차목승 연구원(cms0522@keiti.re.kr)

공동저자

▷ 윤영근 연구원(ygyin0919@keiti.re.kr)

▷ 김종균 연구원(jaykim@keiti.re.kr)

▷ 임승택 연구원(stlim@keiti.re.kr)

▷ 성소묘 연구원(miao2013@keiti.re.kr)

국민과 함께  
미래를 여는  
글로벌 환경전문기관

중국환경산업 주간기술동향은 매주 화요일 발행됩니다.

문의 : +86-10-8591-0997~8