

요 약 문

I. 연구개요

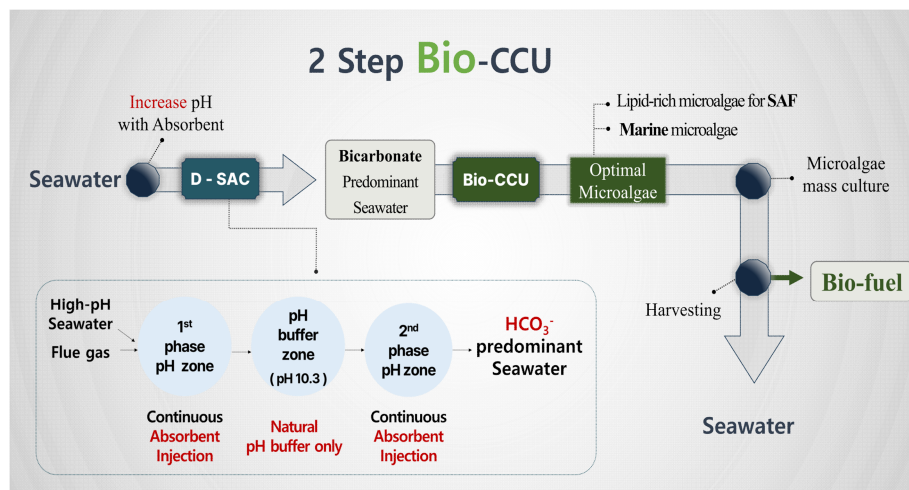
- 전 세계적으로 온실가스 배출이 지속적인 증가추세를 보임에 따라 대기 중 온실가스의 농도가 증가하여 지구온난화를 비롯한 기후위기 발생빈도 증가. 최근 30년간 지구 기온은 1.4 °C 상승하였으며 10년간 기상재해로 인해 발생한 경제적 손실이 10조 이상으로 나타났음. 기후위기 문제가 범지구적으로 심각해짐에 따라 2016년 파리협정을 통해 국제적인 신기후체제가 출범.
- 전 지구적으로 지구 평균 온도 상승을 1.5 °C 이내로 억제하기 위해서는 2050년까지 탄소 순배출량이 0이 되는 탄소중립(Carbon Neutral)을 달성하여야 한다고 제시.
- 경기도는 전국에서 가장 많은 산업단지를 보유하고 있으므로, 서해연안의 산업단지 및 공단, 공장 등에서 발생하는 CO₂ 저감을 위한 특화된 탄소감축기술(NET) 개발이 시급.
- 이에 본 연구에서는 향후 용수부족에 대비하면서 해수(seawater)가 갖는 장점을 살려 산단 배가스 중의 이산화탄소를 효과적으로 해수에 흡수시켜 감축시키는 요소기술을 개발하고자 하였으며, 이렇게 효과적으로 흡수된 무기탄소(중탄산)를 해수성 미세조류 배양액으로 활용하여 Bio-fuel 생산으로 연계시키고, 잔여분의 해수는 바다로 환원시키는 미래지향적 “Pollution-Zero CO₂ 저감 및 자원화 시스템 개발”을 위한 연구를 수행하고 있음.

II. 연구의 필요성 및 목적

- 경기도는 2018년, 최종에너지 소비 기준 전국 온실가스 배출량 1위로서, 국내 탄소중립 목표치 달성을 위해서는 주요 CO₂ 배출원인 경기도의 탄소중립 방향성이 중요하게 작용.
- 이에 경기도는 2030년까지 2018년도에 배출한 온실가스 8,717만톤 대비

40% 감축한 5,230만톤 배출을 달성하는 것을 목표로 설정하고 노력중임.

- 경기도는 무한한 Blue-Carbon Sink 인 해수를 이용할 수 있는 근거리에 이산화탄소 배출원인 산업단지가 위치하고 있는 지리적 잇점이, 해수를 흡수액으로 활용한 습식 탄소포집 공정 적용에 있어 매우 유리한 여건조건을 보유.
- CCU 분야 기술 중 배출된 이산화탄소를 액체 흡수제에 포집하는 습식 탄소포집 공정은 높은 TRL-8 기술수준까지 개발되어 있으며, 포집된 이산화탄소를 안정적이고 고부가가치의 부산물로 전환하는 기술과 연계시 높은 성과를 보일 것으로 기대되고 있으나, 해수를 활용한 탄소포집 기술은 아직도 TRL-3 수준으로, 향후 경기도가 직면할 NET의 중요성을 고려할 때, 이 분야에 대한 연구개발과 투자가 절실한 현실.
- 위와 같은 현실적인 이산화탄소 감축 문제와 경기도의 산업 및 지형적 장점을 고려한 가장 경제적이고 바람직한, **해수 수성탄산화 (D-SAC) 요소기술** 개발이 현실적으로 매우 필요.
- 또한, D-SAC 공정에서 해수중에 이산화탄소를 최대한 중탄산 형태로 용존시키고, 이를 배양으로 사용하여 microalgal mass culture를 수행하는 Bio-fuel 생산형 생물전환 기능성에 대하여 가능성을 검토하고자 함.
- 기존 해수 복합탄산화 보다 이산화탄소 흡수량을 증대시키고, 기존 공정이 가진 낮은 탄산염 광물 생산이란 단점을 바이오매스 자원으로의 생물전환 형태로 극복한 2 Step Bio-CCU 의 개요는 다음과 같음.



Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

1. 연구의 주요 내용

- 경기도의 현실적인 이산화탄소 감축 문제와 지형 및 특징을 고려한 경제적이고 효과적인 **해수 수성탄산화 (D-SAC) 요소기술 개발**
- 이산화탄소 흡수량을 증대시키고, 기존 공정이 가진 낮은 탄산염 광물 생산이란 단점을 바이오매스 자원으로의 생물전환 형태로 극복한 **2 Step Bio-CCU 시스템** 요소기술 개발

2. 연구 범위

- 해수를 흡수액으로 CO₂를 포집하는 공정인 D-SAC 요소기술 개발
 - 흡수액 pH 조절에 따른 습식 CO₂ 포집경향 분석을 통한 해수에서의 최적 pH 탐색
 - 담수 대비 해수 흡수액의 CO₂ 포집성능 분석을 통한 탄소포집효율 향상 방안 모색
 - D-SAC 공정의 해수염 거동분석을 통한 탄소포집 효율 영향인자 파악 및 최적화
- D-SAC 요소기술 최적화
 - 주요 영향인자인 Mg²⁺ 침전 및 탄소포집 기준의 최적 pH 운전조건 도출
 - 유입 CO₂ 농도에 따른 CO₂ 포집량 및 효율 분석
 - 기존의 해수 활용 수성탄산화 기술 대비 D-SAC의 수성탄산화 효율의 비교 평가
- Bio-CCU 연계 가능성 검토
 - D-SAC 처리수 조건이 해수성 미세조류의 대량배양에 미칠 영향 분석
 - Bio-CCU 기술의 이산화탄소 생물전환 효율분석 및 최적화 가능성 검토

IV. 연구 결과

□ D-SAC 흡수액의 pH가 CO₂ 포집에 미치는 영향

- 흡수액의 pH에 의한 CO₂ 포집경향을 파악하여, 해수에서의 적절한 흡수액 pH 탐색
- 해수염이 CO₂ 포집에 미치는 영향을 배제하고자 증류수를 기반으로 실험을 진행했을 때, 탄소포집 흡수액의 pH 12 이상에서 유의미한 CO₂ 흡수효율의 상승을 확인하였고, 이때 pH 완충효과 또한 기대되었음.
- 인공해수 흡수액에 흡수제인 NaOH를 지속적으로 주입하여 pH를 유지시킨 경우, pH 12에서 유의미한 수준의 CO₂ 흡수효율 개선을 확인할 수 있었음.
- pH를 유지하는 경우, 유의미한 CO₂ 포집량 상승효과를 얻기 위해서는 최소한 Mg²⁺가 침전되는 범위 이상의 pH를 유지해야 하며, 본 연구에 의하면 pH 12 이상의 값이 D-SAC 공정의 1st phase의 기준 pH로 적절함이 확인됨.

□ 담수 대비 인공해수 흡수액에서의 CO₂ 포집효과 비교

- 인공해수 흡수액과 담수 흡수액의 차이는 해수염에 따른 pH 완충의 유무임.
- 동일량의 흡수제를 두 흡수액에 주입하였을 때, 해수 흡수액의 경우에선 수중에 생성된 Mg(OH)₂가 pH 하강과정에서 재용해되며 OH⁻를 방출되며 pH 완충효과를 나타냄.
- 이러한 완충작용은 지속적인 pH 하강에 따른 이산화탄소 흡수효율 감소를 억제시킬 수 있어, 해수 흡수액의 주요한 이점으로 작용하는 사실이 확인됨.

□ 해수 기반 탄소포집 과정에서의 해수염 거동 관련 검토

- D-SAC 공정은 해수 내의 해수염이 탄소포집의 영향인자로 작용하는데, 가장 직접적인 영향을 끼치는 주요 해수염은 Ca²⁺, Mg²⁺임.
- 실제 평균적인 해수조건에서는 Ca²⁺가 Ca(OH)₂ 형태의 수화물을 형성할 수준의 농도에 미치지 않아, 실질적인 영향을 끼치는 인자는 Mg²⁺라고 할 수 있음.
- Ca²⁺는 CO₂ 흡수반응 초기에 CaCO₃ 형태로 전량 침전되는 경향을 보였으며, Mg²⁺의 경우는 pH를 13까지 상승시키는 과정에서 Mg(OH)₂로 전량 침전되었다

가, CO₂ 흡수반응 진행에 따라 pH가 감소함에 따라 재용해되어, 반응 종료시
점에는 초기 농도를 회복하는 모습을 보였음.

- 본 연구에서 확인된 바와 같이, D-SAC에서도 기존 수성탄산화 공정과 같이,
Ca²⁺의 침전분리가 진행되는데, 이러한 Ca²⁺가 제거된 인공해수 배양액이 향후
해수성 미세조류의 대량배양에 미치는 영향에 대해서는 파악할 필요성이 있음.

V. 연구결과의 활용실적 및 계획

□ 학술회의 발표 (5편)

■ 학술회의 명칭 및 연도 : 한국폐기물자원순환학회 춘계학술대회 (여수, 대한민국), 2024년 5월
논문제목 : Mg²⁺에 의한 pH 완충작용이 해수 수성탄산화의 CO₂ 흡수효율에 미치는 영향
학술지 명칭 : Proceeding of the Spring Conference of the Korea society of Waste Management

■ 학술회의 명칭 및 연도 : 한국폐기물자원순환학회 춘계학술대회 (여수, 대한민국), 2024년 5월
논문제목 : 탄산화에 있어 해수의 pH 완충능이 CO₂ 흡수에 미치는 영향
학술지 명칭 : Proceeding of the Spring Conference of the Korea society of Waste Management

■ 학술회의 명칭 및 연도 : 한국폐기물자원순환학회 춘계학술대회 (여수, 대한민국), 2024년 5월
논문제목 : CO₂ 수성 광물탄산화 적정 용매로서 해수의 활용가능성
학술지 명칭 : Proceeding of the Spring Conference of the Korea society of Waste Management

■ 학술회의 명칭 및 연도 : 한국폐기물자원순환학회 춘계학술대회 (제주, 대한민국), 2024년 11월
논문제목 : 수중 CO₃²⁻ 농도로 인한 pH 완충시간의 변화가 해수기반 탄소포집의 CO₂ 흡수성능에
미치는 영향

학술지 명칭 : Proceeding of the Autumn Conference of the Korea society of Waste Management

■ 학술회의 명칭 및 연도 : 한국폐기물자원순환학회 춘계학술대회 (제주, 대한민국), 2024년 11월
논문제목 : 중탄산염 농도에 따른 *Dunaliella salina*의 성장량 비교
학술지 명칭 : Proceeding of the Autumn Conference of the Korea society of Waste Management

□ 논문투고 예정 (1편)

○ 국내 KCI 전문학술지 게재

- 한국폐기물자원순환학회 (대한민국), 2025년 투고예정

논문제목 : 해수기반 탄소포집 (Seawater Based Carbon Capture) 공정의 pH 조건 최적화

학술지 명칭 : Journal of Korea society of Waste Management

□ 특허출원 예정 (1건)

- 2 step Bio-CCU 시스템에 의한 효율적인 해수 이용 생물전환 CCU 기술 등

□ 참여기업의 사업화 비전

- 환경분야 공법사인 참여기업은 2 step Bio-CCU 시스템에 대한 이해와 잠재적 가치에 대해 깊은 관심이 있어, **결과물에 대하여 사업화 의지가 매우 강함.**