최종 결과보고서

삼척시 특화 탄소중립모델 개발을 위한 핵심과제 발굴연구

2023. 10. 26

제출자 김 우 재

제 출 문

○ 과 제 명 : 삼척시 특화 탄소중립모델 개발을 위한 핵심과제 발굴 연구

○ 계약기간 : 2023년 07월 27일 ~ 2023년 10월 26일 (총3개월)

○ 계 약 일 : 2023년 07월 27일

○ 착 수 일 : 2023년 07월 27일

○ 완 료 일 : 2023년 10월 26일

본 보고서를 2023 삼척시 탄소중립 연구과제 공모사업의 최종 결과보고서로 제출합니다.

2023년 10월 26일

소 속 : 이화여자대학교

직 위 : 교수

성 명 : 김 우 재 (인/서명)

삼척시탄소중립지원센터장 귀하

요 약 문

Ⅰ. 연구개요

삼척시의 기간 산업분석을 통해 이와 직접 연계할 수 있는 탄소포집기술 및 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술 연구과제를 도출하여, 삼척시의 탄소중립 달성에 기여함

Ⅱ. 연구의 필요성 및 목적

삼척시는 이산화탄소 배출이 많은 한국남부발전, 삼척블루파워 등 석탄화력발전소와 삼표시멘트, 쌍용C&E 등 시멘트회사가 위치한 전통적인 에너지 공업 도시로서, 석탄화력발전과 시멘트에서 발생하는 이산화탄소를 저감할 수 있는 탄소중립기술 도출/개발이 필요함. 삼척시는 액화수소 실증을 위한 규제자유특구이나, 지역에 특화된 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술을 보유하고 있지 않아, 삼척시에 적용가능한 CO_2-free 친환경 무탄소(수소)에너지생산기술이 필요함. 이를 해결하기 위해, 삼척시 산업 맞춤형 탄소중립기술을 도출함

Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

다음의 4가지 삼척시 산업 맞춤형 탄소중립기술을 제시함

- 석탄화력발전소에서 배출되는 이산화탄소를 흡착할 수 있는 포집기술 제안
- 석탄화력발전소에서 배출되는 이산화탄소를 전환할 수 있는 촉매기반 CCU 기술 제안
- 시멘트 회사에서 배출되는 이산화탄소를 저감할 수 있는 콘크리트 탄산화기술 제안

- 삼척시 특화형 친환경 수소생산기술 제안

Ⅳ. 연구결과

○ 차세대 고체소재 기반 포집기술
- 아민기를 포함한 고체 이산화탄소 포집소재 및 이를 이용한 CCS 기술을 조사하고, 삼척시 석탄화력발전소의 배가스 조성에 최적화된 소재 및 공정을 제시함

○ 촉매기반 이산화탄소 전환기술
- 다양한 촉매를 이용한 건식 이산화탄소 개질기술을 조사하고, 이의 기존 LNG 수증기 개질반응을 통한 수소 생산과 비교하여, 최적의 건식 이산화탄소 개질 공정을 제시함

○ 콘크리트 탄환화공정을 이용한 온실가스 저감기술
- 시멘트의 수산화칼슘에 이산화탄소를 주입하여 탄산칼슘으로 변화시키는 콘크리트 탄산화 공정을 이용한 이산화탄소 저감기술에 대해 조사하고 그 결과를 공유함

○ 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술
- 삼척시에 풍부한 재활용가능 바이오매스 조사를 통해, 바이오매스 알칼리 개질반응에 특화된 바이오매스 선정 및 이를 이용한 수소 생산기술을 제시함

Ⅴ. 연구결과의 활용계획

본 과제에서 제시한 기술들은 삼척시 기반에너지시설과 연계하여 활용이 가능하므로, 삼척시의 탄소포집 및 친환경 무탄소(수소)에너지 생산을 통한 탄소중립 목표 달성에 기여할 것임

목 차

- **제1장 연구개요** ---------- 1

- **제2장 연구의 필요성 및 목적** ---------- 2
- 2.1. 연구의 필요성 ---------- 2
- 2.2. 연구의 목적 ---------- 2

- **제3장 연구의 내용 및 범위** ---------- 3
- 3.1. 연구의 목표 ---------- 3
- 3.2. 연구의 범위 ---------- 3

- **제4장 연구결과** ---------- 4
- 4.1. 차세대 고체소재 기반 포집기술 ---------- 4
- 4.2. 촉매기반 이산화탄소 전환기술 ---------- 5
- 4.3. 콘크리트 탄산화공정을 이용한 온실가스 저감기술 --------- 7
- 4.4. 재활용 자원을 이용한 친환경 수소에너지 생산기술 ----- 10

- **제5장 연구결과의 활용계획** ---------- 13
- 5.1. 연구성과 활용방안 ---------- 13
- 5.2. 연구수행 기대 및 파급효과 ---------- 13

- **참고문헌** ---------- 15

그림목차

- 그림 1. 대표적인 다관능 아민 함유 고분자인 폴리에틸렌이민 (PEI)를 이용한 이산화탄소 포집 공정 ---------- 5

- 그림 2. CO_2 수소화반응(왼쪽)과 건식 개질 반응(오른쪽) 비교 ------ 6

- 그림 3. 셀룰로오스 파이버를 담체로 활용한 친환경 촉매의 예 ------ 7

- 그림 4. 배합할 때 이산화탄소를 넣은 콘크리트 압축강도 예시 --- 9

- 그림 5. 725 Ponce (Georgia, USA) 실증 사이트 ---------- 9

제1장. 연구개요

본 연구는 ‘삼척시 특화 탄소중립모델 개발을 위한 핵심과제 발굴 연구’로서 삼척시 관내 화력발전소 및 시멘트산업에서 배출되는 이산화탄소를 제거하는데 적합한 탄소중립관련 기술을 조사하고 이를 바탕으로 삼척시에 특화된 탄소중립 기술들을 제안하였다. 삼척시는 이산화탄소 배출이 많은 한국남부발전, 삼척블루파워 등 석탄화력발전소와 삼표시멘트, 쌍용C&E 등 시멘트회사가 위치한 전통적인 에너지 공업 도시이다. 따라서 석탄화력발전과 시멘트에서 발생하는 이산화탄소를 저감할 수 있는 탄소중립기술 도출/개발이 필요한 실정이다.

본 연구를 통해 도출된 삼척시 탄소중립 달성을 위한 특화 기술은 (1) 차세대 고체소재 기반 이산화탄소 포집기술(CCS), (2) 촉매 기반 이산화탄소 전환기술(CCU), (3) 콘크리트 탄산화 공정을 이용한 이산화탄소 저감기술(CCU) 및 (4) 재활용자원을 이용한 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술 등의 4가지가 있으며, 각각 기술 별로 배경, 현재 개발현황, 향후 전망 등도 같이 제시하였다. 이 연구보고서가 삼척시 특화 탄소중립 핵심기술과제들을 발굴 하는데 도움이 되길 기대한다.

제2장. 연구의 필요성 및 목적

2.1. 연구의 필요성

2.1.1. 삼척시 기간산업 맞춤형 탄소배출 저감기술개발 필요

탄소중립은 더 이상 거스를 수 없는 글로벌 질서로 대두되고 있는 상황이나, 우리나라는 탄소중심의 에너지 집약적 산업구조를 가지고 있어 달성이 쉽지 않은 도전적 목표이다. 특히 산업분야는 그간 탄소저감을 위한 효율향상 중심의 기술개발에 집중해 왔으나, 이제는 과거와 전혀 다른 근본적인 새로운 공정 개발이 필요한 상황에 이르렀다.

삼척시는 이산화탄소 배출이 많은 한국남부발전, 삼척블루파워 등 석탄화력발전소와 삼표시멘트, 쌍용C&E 등 시멘트회사가 위치한 전통적인 에너지 공업 도시이다. 현재 기술로는 탄소중립이 요원한 바, 탄소중립을 위해 현재의 기술과 산업공정을 뛰어넘는 획기적인 기술이 필요하며, 따라서 삼척시에도 석탄화력발전과 시멘트에서 발생하는 이산화탄소를 저감할 수 있는 탄소중립기술 도출/개발이 필요한 실정이다.

2.1.2. 삼척시 특화형 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술 도출 필요

삼척시는 최근 ‘청정 수소 드림시티’라는 비전을 제시하고 수소 산업 육성에 역얄을 집중하고 있다. 2020년 삼척시 수소 산업 육성을 위한 제도적 기반을 마련한 이후, 수소생산시설 및 수소버스 충전소 등을 지속적으로 건설해왔으며, 기업체 유치를 통한 수소특화 산업단지 조성, 수소 R&D 특화조성사업 등을 적극 추진 둥에 있다. 또한, 삼척시는 액화수소 실증을 위한 규제자유특구로도 지정되어있다. 또한 암모니아 도입 및 이를 활용하는 무탄소 에너지생산기술을 계획중에 있다. 하지만, 현재 지역에 특화된 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술을 보유하고 있지 않은 실정이므로, 삼척시에 적용가능한 CO_2-free 친환경 무탄소(수소)에너지생산기술에 대한 연구 및 이를 바탕으로 한 기술개발 전략이 필요하다.

2.2. 연구의 목적

2.2.1. 삼척시 기간산업 맞춤형 탄소중립 기술 도출

삼척시의 기간 산업분석을 통해 이와 직접 연계할 수 있는 탄소포집기술 및 친환경 그린

에너지 생산기술 연구과제를 도출함으로써 삼척시의 에너지 패러다임 전환촉진을 통한 탄소중립 달성에 기여하고자 한다.

2.2.2. 삼척시 특화형 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술 도출

삼척시의 자원을 활용한 친환경 무탄소(수소)생산기술을 제안하고, 이를 상용화할 수 있는 연구과제를 도출하여, 삼척시가 무탄소(수소)에너지 생산-저장-활용의 순환경제도시로 발전하는데 기여하고자 한다.

제3장. 연구의 내용 및 범위

3.1. 연구의 목표

3.1.1. 삼척시 기간산업 맞춤형 탄소배출 저감기술 도출

- 석탄화력발전소(한국남부발전, 삼척블루파워)에서 배출되는 이산화탄소를 흡착할 수 있는 차세대 고체소재 기반 포집기술(Carbon Capture and Storage, CCS) 1건 이상 도출
- 석탄화력발전소 배출 이산화탄소를 또다른 온실가스인 메탄과 반응시켜 고부가 수소에너지 등으로 전환할 수 있는 촉매기반 이산화탄소 전환기술(Carbon Capture and Utilization, CCU) 1건 이상 도출
- 시멘트 회사에서 배출되는 이산화탄소를 저감할 수 있는, 콘크리트 탄산화 공정 등, 시멘트 회사용 온실가스 저감 기술 1건 이상 도출

3.1.2. 삼척시 특화형 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술 도출

- 삼척시에 풍부한 재활용 자원(바이오매스, 폐플라스틱 등)을 원료로 사용하여 이산화탄소 배출없이(CO_2-free) 수소로 전환할 수 있는 새로운 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술 1건 이상 도출 및 이의 상용화 가능성(경제성) 타진

3.2. 연구의 범위

3.2.1. 차세대 고체소재 기반 포집기술 도출

- 국내외 아민기를 포함한 고체 이산화탄소 포집소재 및 이를 이용한 CCS 기술을 조사하고, 삼척시 석탄화력발전소의 배가스 조성에 최적화된 소재 및 공정을 제시함

3.2.2. 촉매기반 이산화탄소 전환기술 도출

- 다양한 촉매를 이용한 건식 이산화탄소 개질기술을 조사하고, 이의 기존 LNG 수증기 개질 반응을 통한 수소 생산과 비교하여, 최적의 건식 이산화탄소 개질 공정을 제시함

3.2.3. 콘크리트 탄산화공정을 이용한 온실가스 저감기술 도출

- 시멘트의 수산화칼슘에 이산화탄소를 주입하여 탄산칼슘으로 변화시키는 콘크리트 탄산화 공정을 이용한 이산화탄소 저감기술에 대해 조사하고 그 결과를 공유함

3.2.4. 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술 도출

- 삼척시에 풍부한 재활용가능 자원에 대한 조사를 통해, 바이오매스 알칼리 개질반응에 특화된 재활용 자원 선정 및 이를 이용한 수소 생산기술을 제시함

제4장. 연구결과

4.1. 차세대 고체소재 기반 포집기술

4.1.1. 배경

삼척 수소 충전소는 LNG를 이용한 SMR 공정으로 생산되는 개질 수소 즉 그레이 수소(Grey Hydrogen)이므로 수소 생산 과정 중에서 다량의 고농축/고순도 이산화탄소가 발생한다. 탄소 발자국 (Carbon footprint)없는 진정한 의미의 신재생 에너지로 수소를 사용하기 위해서는 부생적으로 발생하는 이산화탄소 포집 기술 개발이 필연적으로 요구된다. 현재 CCS (CO_2 Capture and Sequestration) 공정으로 가장 널리 사용되는 공정은 냉각된 암모니아 수용액이나 알카놀아민 수용액을 이용하는 흡착 공정, 멤브레인 공정, 극저온 공정, 해상 조류 생물 공정과 다공질 고체 흡착제를 이용하는 공정이며, 이 중에서 monoethanolamine (MEA)나 diethanolalime (DEA)와 같은 알코놀아민을 이용한 흡착 공정이지만, 이러한 화합물에 의한 장비 부식, 재생 공정중에서 아민 손실과 이로 인한 환경 오염으로 인해서 다공질 활성탄, 제올라이트, 실라카와 같은 다공질 소재에 아민기가 화학적으로 결합된 흡착제로 이용하는 흡착 공정이 대안으로 대두되고 있다.

4.1.2. 고체소재 기반 포집기술의 핵심

아민기가 화학적으로 결합된 다공질 흡착제의 CO_2 포집 성능은 표면적, 다공성, 기공의 크기에 의해서 크게 좌우 되지만 가장 결정적인 인자는 단위 표면적당 존재하는 아민기의 숫자나 농도이다. 따라서 흡착제를 이용한 CO_2 포집 성능을 극대화하기 위해서는 다공성 흡착제에 아민기를 효율적으로 고농도로 화학적으로 결합시키는 공정 개발이 필수적이다. (기존 공정으로는 10%미만의 그라프팅 효율이 얻어짐).

4.1.3. 차세대 고체소재 기반 포집기술

동일한 단위 표면적에 아민기 도입을 극대화하기 위해서 분자당 최대 아민기를 가지고 있는 하이퍼브랜치형 물질을 합성하고, 50%이상의 그라프팅 효율로 무기물 지지체에 결합시키는 공정을 사용하여서 대량 생산이 가능한 흡착소재를 개발할 수 있다. 대표적인 이산화탄소 포집용 물질인 다관능 아민 함유 고분자인 폴리에틸렌이민 (PEI)를 다공성 무기물 입자에 결합시켜서 이산화탄소를 포집하는 연구가 매우 활발하게 진행되고 있으나,

PEI는 현재 소수의 다국적 기업이 독점 생산하고 있는 물질이므로 이를 대체할 수 있는 신규 다관능 아민 화합물 제조 및 이를 이용한 이산화탄소 포집 공정 개발이 시급하며 이러한 공정 기술을 삼척 지역의 탄소 중립을 위해 시급하게 확보해야할 기술로 제시하고자 한다.

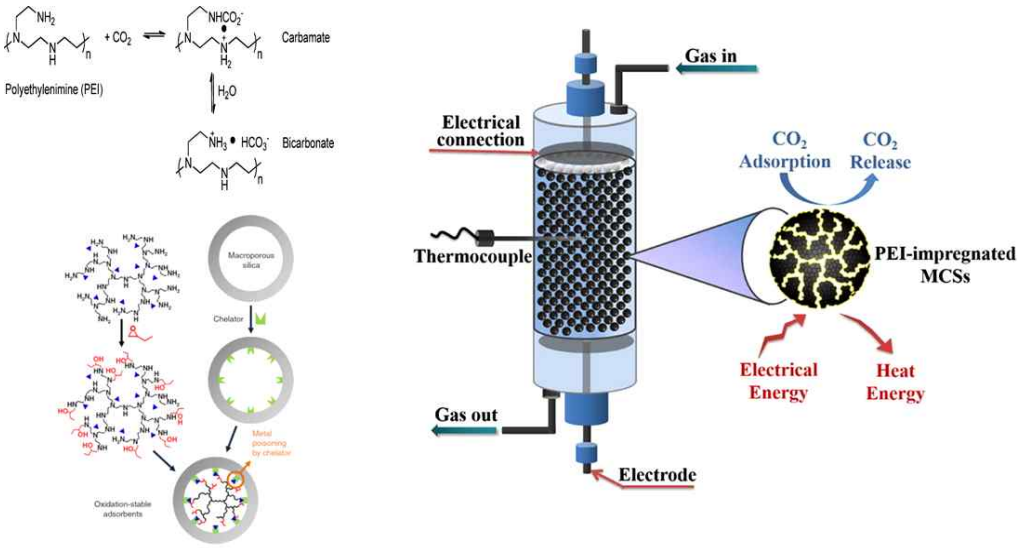


그림 1. 대표적인 다관능 아민 함유 고분자인 폴리에틸렌이민 (PEI)를 이용한 이산화탄소 포집 공정

4.2. 촉매기반 이산화탄소 전환기술

4.2.1. 배경

세계 각국은 탄소중립 목표 선언과 함께 탄소 규제를 더욱 강화하고 있으며, 우리나라도 국제사회의 노력에 발맞춰 2050년 탄소중립을 선언하였다. 또한, 주요 선진국은 온실가스 배출권 거래제 확대, 탄소세 부과, 탄소국경세 등을 통해 저탄소·친환경 경제구조로 전환을 유도 중이며, 특히 EU는 '23년, 미국은 '25년부터 탄소배출이 많은 제품(국가) 수입시 관세 부과 예정이므로, 이를 대처하기 위한 탄소포집 및 전환기술(CCU) 개발의 필요성이 대두되었다. 특히, CCU 기술은 신재생에너지와 연계 및 활용, 친환경 자원순환 측면 등에서 잠재력이 높은 탄소중립 수단으로 주목받고 있다.

전 세계적으로 CCU 기술은 대부분 응용연구 수준으로 본격적인 상용화를 위해서는 대규모 R&D 투자가 필요한 상황이다. CCU 분야는 CCS에 비해 기술적 난이도가 높고, CCU 제품은 석유화학 제품대비 생산단가가 높아 기업 참여유인이 부족하다. 영국, 미국 등은 최근 CCU 투자를 확대 중이나, 우리나라는 구체적 기술확보 전략 및 관련 R&D 투자도 미비한 상황이다.

4.2.2. CO_2 화학전환 기술

CO_2의 화학전환 기술은 크게 CO_2 methanation (CO_2와 수소를 반응시켜 메탄을 생성하는 반응, CO_2 수소화반응이라고도 함)과 CO_2 dry reforming (건식 메탄 개질 반응이라고 하며, CO_2와 또다른 온실가스인 메탄을 반응시켜 합성가스를 만드는 반응) 으로 나눌 수 있다.

$$CH_4+CO_2 \rightarrow 2CO+2H_2 \ [CO_2 \text{ dry reforming}]$$

$$CO_2+4H2 \rightarrow CH_4+2H_2O \ [CO_2 \text{ methanation}]$$

메탄(LNG)를 주 에너지원으로 사용하고, 신재생에너지를 활용한 수소생산이 비교적 원활한 유럽에서는 CO_2를 수소화 반응시켜 메탄을 생성하는 CO_2 methanation 기술 개발에 큰 관심을 갖고 있으며, 메탄이 shale 가스로부터 풍부하게 생산되는 미국은 CO_2 dry reforming 기술 개발에 큰 관심을 갖고 있다. 우리나라는 수소생산이 여의치 않고, LNG 공급 인프라는 잘 갖추어져 있으므로, 미국과 비슷한 CO_2 dry reforming 기술에 집중하여야 하는 상황이다.

건식 메탄 개질 방법은 온실가스인 메탄과 이산화탄소를 동시에 감축할 수 있으면서도 화학산업의 기반이 되는 합성가스를 생산하는 기술이다. 하지만 반응이 진행될수록 촉매의 표면에 탄소가 쌓여 반응성을 낮추는 코킹(coking) 현상과 나노입자가 서로 뭉치게 되는 소결(sintering) 현상 때문에 실제 산업에서 적용에 큰 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 코킹현상과 소결현상을 억제할 수 있는 건식개질 반응용 촉매 기술에 대해 조사하고, 석탄화력발전의 배가스 중 이산화탄소와 LNG와의 반응에 최적화된 공정을 찾아 제시하고자 한다.

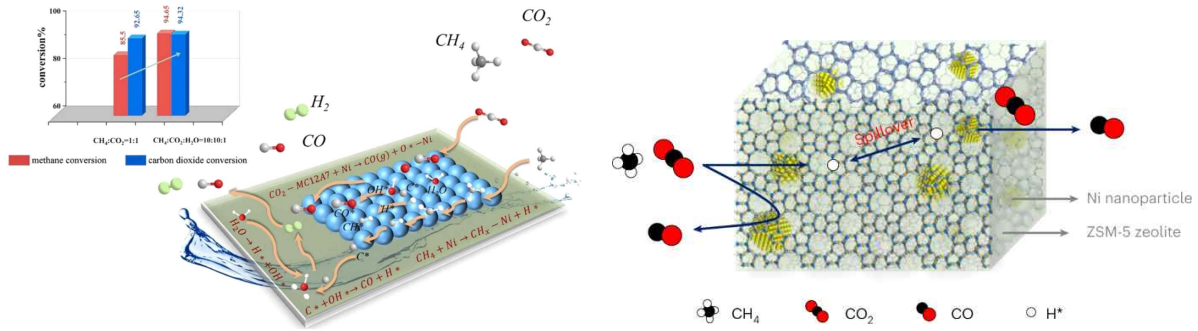


그림 2. CO_2 수소화반응(왼쪽)과 건식 개질 반응(오른쪽) 비교 [1, 2]

4.2.3. 메탄 건식 개질 촉매 공정

최근 온실가스인 메탄을 원료로 사용해 에틸렌의 수율을 극대화 할 수 있는 새로운 '질소 도핑' 기술이 적용된 촉매 공정이 보고된 바 있다. 이는, 대표적 온실가스인 메탄과 이산화탄소를 반응시켜 합성가스(H_2, CO)를 생산하는 건식개질(Dry reforming) 공정용 촉매가 개발됨으로써 가능해 졌다. 합성가스는 암모니아, 알코올, 플라스틱 등 다양한 화

학원료의 필수적인 핵심 물질이다. 하지만 석유화학 산업에서 합성가스를 생산하는 기존 기술들은 모두 온실가스를 대량으로 배출하는 문제점이 있다. 따라서 기존 기술 대비 온실가스를 획기적으로 줄일 수 있는 '온실가스 감축형 합성가스 제조기술'이 필요하다.

메탄과 수증기의 반응에 의한 습식개질(Steam reforming)의 경우 상용화가 완료됐으나 건식개질은 온실가스 감축 효과 및 단순한 공정 등의 장점에도 불구하고 촉매 표면에 심각한 탄소침적(coking)으로 인한 비활성화 문제로 인해 현재까지 상용화되지 못했다. 이를 해결하기 위해 원자단위 촉매설계 및 조성 최적화를 통해 장시간 운전에도 성능 저하가 없는 anti-coking 촉매를 개발이 반드시 필요하며, 이를 통해 삼척시의 화력발전소 및 시멘트 산업 등 이산화탄소 발생원에 직접 촉매 공정을 설치, 상용화하기 위한 연구가 연계된다면 삼척시 탄소중립에 큰 역할을 할 것으로 기대한다.

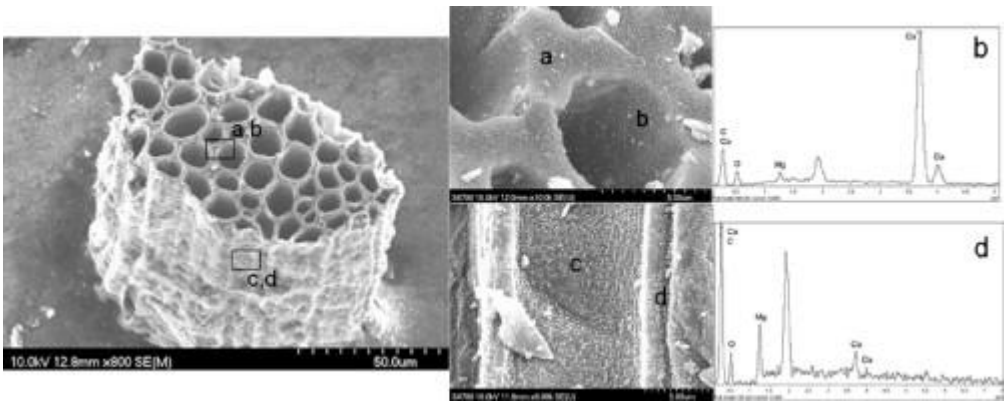


그림 3. 셀룰로오스 파이버를 담체로 활용한 친환경 촉매의 예 [3]

최근 니켈-몰리브데넘 합금 나노입자를 단결정의 마그네슘 산화물 지지체에 담지하면 800도로 온도를 높이는 과정에서 단결정 지지체의 꼭짓점을 막아 안정되는 현상이 보고된 바 있다. 이러한 연구를 통해 소결에도 안정한 촉매개발이 가능할 것으로 보인다.

4.3. 콘크리트 탄산화공정을 이용한 온실가스 저감기술

4.3.1. 배경

세계적으로 연간 40억 톤이 생산되는 콘크리트의 주성분인 시멘트를 생산할 때 발생하는 이산화탄소가 전 세계 이산화탄소 배출량의 7%을 차지하기 때문에 시멘트 업계는 지구온난화의 주범으로 인식되고 있다.

공기 중 이산화탄소와 포틀랜드 시멘트의 수화 생성물인 수산화칼슘이 오랜 시간에 걸쳐 탄산칼슘으로 변환하는 현상은 <콘크리트 탄산화>라는 표현으로 널리 알려진 사실이다. 이를 근거로 포틀랜드 시멘트 콘크리트를 친환경이라고 주장하는 시도도 있었으나,

이산화탄소 저감효과를 정량화하는 것이 어려워 이를 기술화 하는 것이 어려웠다.

그러나, 최근 Cabon Cure라는 캐나다 회사는 산업 현장에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 액상으로 만들고 레미콘 제조 시 주입하여 고정화하는 기술을 개발하였다. 이를 통해 콘크리트의 실질적인 이산화탄소 발생량을 저감하는 친환경 기술을 개발하였다.

Carbon curing은 콘크리트 배합에 측정 가능한 이산화탄소 투입을 통해 탄산칼슘을 생성하는 기술로, 자연적으로 일어나는 콘크리트 탄산화와 비교하여 짧은 시간에 발생하고 소유주가 명확하기에, 이를 이산화탄소 저감과 연계하여 경제적 이익을 취할 수 있는 새로운 기회를 시멘트 관련 산업에 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

다만, 이산화탄소 저장에 필요한 에너지를 고려할 때 Carbon curing이 이산화탄소 저감에 기여하는 효과는 심도 있는 분석이 필요하며, 포틀랜드 시멘트 외 기타 바인더 (플라이에쉬, 슬래그 등)을 혼용할 경우의 콘크리트 성능도 장기적으로 고찰하여 기술의 완성도를 제고하는 노력은 반드시 이루어져야 할 것이다.

4.3.2. 콘크리트 탄산화공정

시멘트의 수화반응은 시멘트가 물과 반응하는 것을 말하며 이는 다량의 열을 방출한다. 수화반응으로 시멘트가 경화하면서 수산화칼슘이 생성되며 이 때 반응식은 다음과 같다.

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (1-1)$$

$$2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (1-2)$$

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O \quad (1-3)$$

$$4CaO \cdot Al_2O_3Fe_2O_3 + CaSO_4 \cdot 2H_2O + Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO(Al_2O_3, Fe_2O_3) \cdot 3CaSO_4 \quad (1-4)$$

콘크리트는 표면으로부터 공기중의 이산화탄소를 흡수하여 콘크리트 중의 수산화칼슘이 오랜 시간에 걸쳐 탄산칼슘으로 변화하는 과정을 탄산화라고 한다.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (1-5)$$

$$Ca^{2+}_{(aq)} + HCO^{-}_{3\ (aq)} + OH^{-}_{(aq)} \rightarrow CaCO_{3(s)} + H_2O \quad (1-6)$$

4.3.3. Carbon Cure 공정

Carbon Cure는 콘크리트를 생산할 때 이산화탄소 배출량을 줄이는 것이 아니라 콘크리트를 양생할 때 이산화탄소를 활용하는 것을 의미하며 포집된 이산화탄소를 콘크리트에 주입하여 화학적으로 탄산칼슘으로 전환되게 한다.

수화단계(Calcium Silicate Phase)에서 규산칼슘($CaO \cdot SiO_2$), 물, 이산화탄소가 반응하여 탄산칼슘과 수화반응생성물(Calcium Silicate Hydrate Gel)이 생성된다. 뿐만 아니라 시멘

트 페이스트 안에 있는 수산화칼슘과 이산화탄소가 반응하여 탄산칼슘이 생성된다.

$$3CaO \cdot SiO_2 + (3-x)CO_2 + yH_2O \rightarrow xCaO \cdot SiO_3 \cdot yH_2O + (3-x)CaCO_3 \quad (3-1)$$

$$2CaO \cdot SiO_2 + (2-x)CO_2 + yH_2O \rightarrow xCaO \cdot SiO_3 \cdot yH_2O + (2-x)CaCO_3 \quad (3-2)$$

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (3-3)$$

$$Ca^{2+}_{(aq)} + HCO^-_{3\,(aq)} + OH^-_{(aq)} \rightarrow CaCO_{3(s)} + H_2O \quad (3-4)$$

4.3.4. Carbon Curing의 이산화 탄소 저감 효과 예

30MPa 표준 배합에 시멘트 대략 450kg, 물 175 kg, 골재 1800 kg 가 들어가는데 [4], 이 때 시멘트 수화반응으로 생성되는 수산화칼슘(시멘트양의 25%)이 Carbon Cure를 통해 탄산칼슘으로 전환되면 이론적으로 최대 67 kg의 이산화탄소를 저감할 수 있는 것으로 실증되었다.

배합할 때 이산화탄소를 액화시키거나 물에 녹여 주입하는 경우 공기 함량이나 슬럼프에 영향이 없었으나, 압축 강도의 경우 이산화탄소를 넣지 않은 콘크리트와 비교했을 때, 양생한 지 하루가 지나면 14%, 3일이 지나면 16%, 7일이 지나면 13%, 그리고 28일 후 10% 증가하는 것으로 조사되었다.

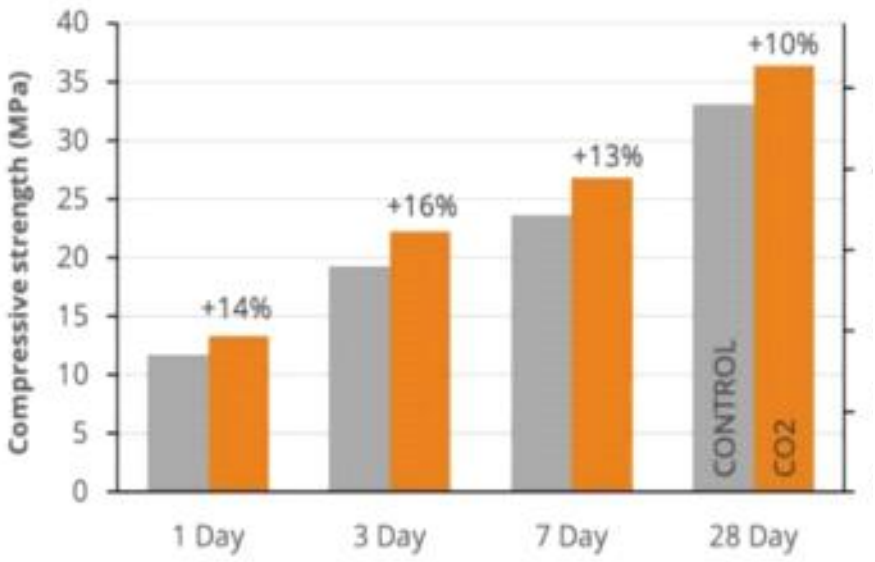


그림 4. 배합할 때 이산화탄소를 넣은 콘크리트 압축강도 예시

4.3.5. 실제 적용된 사례

725 Ponce (Georgia, USA) : 2019년에 완공된 가장 큰 건물로, 이 건물은 48,000 cubic yards의 CarbonCure Concrete가 들어갔으며 이는 364 헥타르의 숲이 일년동안 빨아들인 양인 680 톤의 이산화탄소를 제거하였다.



그림 5. 725 Ponce (Georgia, USA) 실증 사이트

4.4. 재활용 자원을 이용한 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술

4.4.1. 배경

수소 에너지는 기술적 난이도는 높지만 지역적 편중이 없는 보편적 에너지원으로 장기간・대용량 저장(energy-carrier)이 가능하며, 발생되는 부산물도 물(H_2O)밖에 없어 환경친화적(CO_2 free)이다. 특히, 수소는 국가경제, 사회전반, 국민생활 등에 근본적 변화를 초래할 것으로 예상되며, 경제성장과 친환경 에너지의 원천이 될 것으로 전망된다. 전 세계적으로 2030년까지 총 2.8천억 달러의 투자로 수소차 1~1.5천만대, 수소트럭 50만대, 산업연료와 원료, 빌딩 난방・전력, 발전・저장 분야 등에서 다양하게 활용되며 2050년까지 2조 5천억달러 규모의 비즈니스와 3천만개 이상의 신규 일자리를 창출할 전망이다. 따라서 새로운 성장동력으로 “미래경제의 핵심 + 친환경 에너지 혁명”의 중심인 수소에너지 개발이 필요한 실정이다.

표 1. 탄소 및 수소 에너지원 비교

구 분	탄소 에너지	수소 에너지
에너지 패러다임	탄소자원(석유, 석탄, 가스 등) 중심	탈 탄소화 수소 중심
	수입 의존(99%)	국내 생산으로 에너지 자립 기여
에너지 공급	대규모 투자가 필요한 중앙집중형 에너지 수급	소규모 투자로 가능한 분산형 에너지 수급
	입지적 제약이 크고 주민 수용성이 낮음	입지적 제약이 적고 주민 수용성이 높음
경쟁 양상	자원개발 및 에너지 확보 경쟁	기술경쟁력 확보 및 규모의 경제 경쟁
환경성	온실가스, 대기오염물질 배출 (CO_2, NOx, SOx 등)	온실가스 배출이 적어 친환경적 (부산물 = 물(H_2O))

4.4.2. 지속가능한 수소생산 원천기술 확보의 필요성

화석연료(메탄) 개질을 통한 수소생산이 현재 가장 경제적인 주 수소생산 방법이다. 하지만 생산과정의 CO_2 배출량은 가솔린차량의 약 70%로서 환경오염을 유발한다는 한계가 있다. 수전해기술은 고순도의 수소가 생산되며 환경오염이 없으나, 고가의 전력비용으로 단가가 가장 높은 비효율적인 방법이다. 따라서 "수소 경제 활성화 로드맵"에 따르면 2050년도 수소 공급은 석유화학 공정 등의 부산물인 부생수소를 활용하거나, 해외 수소를 주로 활용할 계획이나 이는 지속가능한 수소공급방안이라고 하기에 무리가 있으므로 (특히 해외생산 수소 활용은 에너지자립화라는 정부정책과 맞지 않는다) 지속가능한 수소생산 원천기술 개발이 절실히 필요하다.

기존 수소원 및 수소생산기술보다 친환경적이면서도 경제적인 새로운 재생에너지원과 이로부터 수소를 효율적으로 뽑아낼 수 있는 기술 개발이 여전히 중요한 문제이며, 수소경제의 현실화를 위해 반드시 해결되어야 할 부분이다. 화석연료(석유, 석탄, 천연가스 등)를 대체할 신재생에너지로는 태양열/태양광, 풍력, 조력, 지열, 바이오에너지 등이 있으며, 이 가운데 바이오에너지는 탄소량을 감소시키는데 가장 유리한 재생에너지원이다. 바이오매스는 광합성을 통해 CO_2를 흡수할 수 있으며, 직접 수소생산이 가능하기 때문에, 친환경 재생에너지원으로 무한한 가능성이 있다. 또한, 탄소배출절감에 부합하는 에너지원인 바이오매스는 광합성을 통하여 에너지자원을 생산하기 때문에 이산화탄소는 1:1.8 이상의 비율로 흡수하고, 산소, 수소 물질 등 유용한 물질을 생산하므로 지구온난화 방지 및 재생에너지 생산의 이중효과를 나타낼 수 있다.

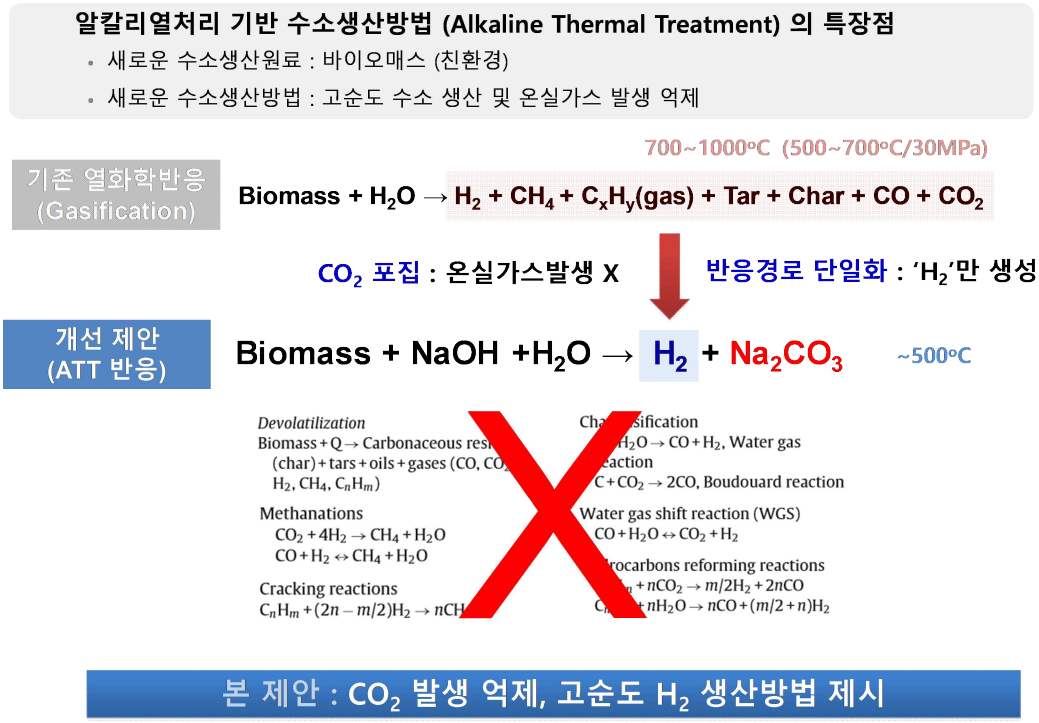
공정적은 측면에서 보면, 바이오매스로부터 수소를 생산하는 공정은 열화학적인 방법과 생물학적 방법이 있으며, 기존 열화학적인 방법은 수소생산속도는 높으나 연료전지촉매(Pt)를 피독시키는 CO와 온실가스(CO_2) 등 부산 가스 발생의 단점이 있고, 생물학적인 방법은 친환경적이고 에너지 효율이 높으나, 수소생산속도가 낮고, 큰 규모의 시설을 필요로 한다는 단점이 있다. 따라서, 기존 수소 생산공정과 다른 친환경이며 경제적인 새로운 수소생산 공정기술 개발이 필요하다.

4.4.3. 알칼리열처리 (Alkaline thermal treatment) 공정 기반 친환경 수소 생산 기술

최근 이화여대-컬럼비아대학교 공동 연구팀은 친환경 공정을 통해 미래 청정에너지원인 수소를 세계 최고 수준으로 생산하는 기술을 개발했다. 연구팀은 수소를 온실가스 배출 없이도 기존보다 훨씬 많이 생산할 수 있는 친환경 기술을 개발하는 데 성공했다 [5].

알칼리 열화학반응 (Alkaline Thermal Treatment) 은 바이오매스를 알칼리염, 물과 반응시켜 수소를 생산하고 CO_2는 Carbonate 형태로 포집하는 반응 메커니즘 (Biomass +

NaOH +H_2O → H_2 + Na_2CO_3)을 이용하며, 기존 열화학반응과 비교하여 고순도 수소를 생산하면서도 CO_2 를 전혀 배출하지 않는 친환경 고효율 수소생산공정이다.



연구팀은 기존 육상 바이오매스(벼, 옥수수 등)보다 이산화탄소 흡수율이 21배나 높은 해상 바이오매스(해조류 등)를 재생에너지원으로 사용하고, 알칼리열화학촉매공정을 활용하여 수소를 생산하는 방식을 개발했다. 이는 바이오매스가 지닌 수소원소 85% 이상을 고순도 수소기체 형태로 추출하여 1g 바이오매스 당 1.5L 이상의 그린수소를 생산할 수 있는 혁신적인 생산기술이다. 수소 생산량 또한 현존 바이오매스로부터 생산할 수 있는 최대치보다 170% 이상 많아짐으로써 세계 최고 수준의 수소 생산이 가능해졌다.

특히 연구팀의 생산기술은 수소 이외에 온실가스인 이산화탄소 배출이 거의 없어 친환경적이면서도, 연료전지 촉매를 피독시키는 일산화탄소를 전혀 생산하지 않아 특별한 후처리 공정 없이도 연료전지 자동차에 직접 활용할 수 있는 장점이 있다. 기존 수소 생산 공정과 비교하여 공정비도 28% 이상 저렴하게 생산 가능하므로, 차세대 그린수소 생산 방법으로 기대된다.

제5장. 연구결과의 활용계획

5.1. 연구성과 활용방안

본 과제를 통해 도출될 기술들은 삼척시의 기반 에너지시설과 연계하여 활용이 가능하므로, 삼척시의 탄소포집 및 친환경 무탄소(수소)에너지 생산을 통한 탄소중립 목표 달성에 기여할 것으로 기대한다

CCS 기술은 석탄화력발전소의 배가스 중 이산화탄소를 포집할 수 있는 기술로 바로 연계될 수 있을 것으로 예상한되며, 또한 기존 LNG와 연계하여 석탄화력발전소의 이산화탄소 전환에 활용될 수 있을 것으로 예상한다.

콘크리트 이산화탄소 포집 기술은 기존 시멘트 회사의 공정에 연계하여 이산화탄소 포집에 활용될 수 있을 것으로 예상한다.

바이오매스 친환경 수소 생산 기술은 on-site 에서 쉽게 수소생산이 가능한 기술이므로, 수소운송 비용절감, 안전성 확보 등을 통해 수소에너지 실용화에 적극 활용될 수 있고, 특히 외국에서 아직 실증이 진행되지 않은 기술이므로 기술 개발을 통한 기술 선점 시, 그 파급효과가 클 것으로 기대한다.

5.2. 연구수행 기대 및 파급효과

5.2.1 삼척시 기간산업 맞춤형 탄소포집 및 무탄소(수소)에너지 생산 기술 도출

삼척시의 기간 산업분석을 통해 이와 직접 연계할 수 있는 탄소포집기술 및 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술을 제안함으로써, 삼척시의 에너지 전환촉진을 통한 탄소중립 달성을 위한 연구개발과제를 도출하는데 기여할 것으로 기대한다.

5.2.2. 삼척시 특화형 탄소포집 기술 및 친환경 무탄소(수소)에너지생산 기술 도출

삼척시의 자원을 활용한 탄소포집 및 친환경 무탄소(수소)에너지 생산기술을 제안하고, 이를 상용화할 수 있는 연구과제를 도출하는데 기여함으로써, 삼척시가 무탄소(수소)에너지 생산-저장-활용의 순환경제도시로 발전하는데 기여할 것이다.

본 과제를 통해 도출될 기술들은 실제 연구개발 성공 시, 반응물 생산(소재 및 화학산업),

공정개발 (화학공학 및 기계산업), 실용화 (석탄화력발전소 및 시멘트 회사 등) 등 연구 분야별로 해당 분야 기업들과 협력이 가능한 내용으로 구성되어 있어, 기술개발 성공 시 경제 산업적 파급력이 클 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Huang et. al., “Formation of H_2O in the CH_4-CO_2 dry reforming process and its activation to this reaction over Ni-Fe/MC12A7 catalysts”, Applied Catalysis B: Environmental, Volume 334, 122822 (2023).

2. Zhu et. al., “Enhanced CO_2 utilization in dry reforming of methane achieved through nickel-mediated hydrogen spillover in zeolite crystals”, Nature Catalysis 5, 1030-1037 (2022).

3. Kim et. al., “Synthesis of a catalytic support from natural cellulose fibers, and its performance in a CO_2 reforming of CH_4”, Applied Catalysis B: Environmental Volumes 113-114, 116-125 (2012).

4. Sandeep et. al., “Reduction of greenhouse gas emission by carbon trapping concrete using carboncure technology”, Applied Journal of Environmental Engineering Science, 2021. 7(3), 306-317 (2021)

5. Kim et. al., “Alkaline thermal treatment of seaweed for high-purity hydrogen production with carbon capture and storage potential”, Nature Communications, 11(1), 378 (2020).

〔주　　의〕

1. 이 보고서는 삼척시탄소중립지원센터에서 시행한 ‘2023 삼척시 탄소중립 연구과제 공모사업’으로 수행된 최종보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 삼척시탄소중립지원센터에서 시행한 ‘2023 삼척시 탄소중립 연구과제 공모사업’의 연구결과임을 밝혀야 합니다.