

미활용 탄소자원의 고부가가치를 창출하는  
**차세대 탄소자원화 연구단**

- 기술소개자료집 -







자원의 미래를 연구하다

# Contents.

<b>총괄1</b>	<b>부생가스 분리(<math>\text{CO}</math>, <math>\text{CH}_4</math>)</b>	<b>06</b>
세부1	$\text{CO}$ 및 $\text{CH}_4$ 회수용 분리막 원천소재 및 분리공정 개발	08
세부2	$\text{CO}$ 촉진수송 고체 전해질 분리막 소재 개발	10
세부3	고효율 $\text{N}_2/\text{CH}_4$ 분리를 위한 차세대 분리막 분자체 기능 구현	12
세부4	유무기 복합 다공체 기반 고효율 $\text{CH}_4/\text{N}_2$ 분리용 흡착제 및 흡착분리 공정 개발	14
<b>총괄2</b>	<b>부생가스의 <math>\text{CO}_2</math>로 화학원료 제조</b>	<b>16</b>
세부1	부생가스와 이산화탄소를 이용한 고부가 화학원료 생산용 Syn-gas 제조 기술 개발	18
세부2	고농도 $\text{CO}$ 생산을 위한 $\text{CO}_2$ /부생가스 맞춤형 건식 개질 촉매 개발	20
세부3	$\text{CO}_2$ 가 함유된 합성가스로부터 선형 장쇄 올레핀 제조 촉매 공정 개발	22
세부4	이산화탄소를 탈수소제로 활용한 저급올레핀( $\text{C}_2=$ / $\text{C}_3=$ )화 촉매 개발	24
<b>총괄3</b>	<b>광촉매 &amp; 바이오촉매 융합 <math>\text{CO}_2</math>의 전환 기술</b>	<b>26</b>
세부1	광촉매-바이오촉매 융합 $\text{CO}_2$ 선택적 전환기술 개발	28
세부2	광촉매-바이오촉매가 융합된 $\text{CO}_2$ 전환 포름산( $\text{HCOOH}$ ) 제조용 bio-mimic 고선택성 촉매 개발	30
세부3	$\text{CO}_2$ 전환용 광-바이오촉매시스템 : 전자전달물질 및 NADH 대체물질 개발	32
<b>총괄4</b>	<b><math>\text{CO}_2</math> 전환 산화-환원 융합 기술</b>	<b>34</b>
세부1	$\text{CO}_2$ 의 옥살산염 및 옥살산으로의 전환 기술 및 공정 개발	36
세부2	전기화학시스템을 이용한 이산화탄소 전환 에틸렌 제조 기술 개발	38



<b>총괄5</b>	<b>수소 이용 CO<sub>2</sub> 전환 기술</b>	<b>40</b>
세부1	CO <sub>2</sub> 직접수소화를 통한 액체 탄화수소 연료 제조 촉매 및 공정 개발	42
세부2	중온-저온 2단계 CO <sub>2</sub> 수소화 메탄올합성 촉매반응공정 개발	44
세부3	최적화 기법을 이용한 CO <sub>2</sub> 직접자원화 공정 개발 및 평가	46
세부4	CO <sub>2</sub> 의 직접방향족 화합물 제조를 위한 촉매 및 공정 개발	48
<b>총괄6</b>	<b>바이오알코올 - CO<sub>2</sub> 동시전환 기술</b>	<b>50</b>
세부1	글리세롤 활용 이산화탄소 동시전환 불균일 촉매 개발	52
세부2	바이오 알코올 기반 CO <sub>2</sub> 동시전환 불균일 촉매기술 계산화학기법 개발	54
<b>총괄7</b>	<b>식물자원-CO<sub>2</sub> 전환고분자 제조기술</b>	<b>56</b>
세부1	유기성 폐자원 활용 및 CO <sub>2</sub> 전환 기능성 고분자 소재 개발	58
세부2	고효율, 고선택성 균일 유기금속촉매 기반 유기성폐자원 및 CO <sub>2</sub> 전환 폴리머 플랫폼 제조 개발	60
세부3	유기성 폐자원 활용 류란계 폴리머 플랫폼 제조 촉매공정 개발	62
<b>총괄8</b>	<b>유기성폐자원 원료 액체연료 제조기술</b>	<b>64</b>
세부1	유기성 폐자원 유래 바이오가스의 고품질화 요소기술 개발	66
세부2	유기성 폐자원 유래가스 초청정 전처리 요소기술 개발	68
세부3	바이오가스로부터 액체연료(C <sub>5</sub> -C <sub>20</sub> ) 선택적 제조용 3D 모듈형 촉매 및 공정 개발	70

미활용 탄소자원의 고부가가치를 창출하는  
**차세대 탄소자원화 연구단**

**총괄1**

# 부생가스 분리 (CO, CH<sub>4</sub>)





## 자원의 미래를 연구하다

- 
- 세부1** CO 및 CH<sub>4</sub> 회수용 분리막 원천소재 및 분리공정 개발
  - 세부2** CO 촉진수송 고체 전해질 분리막 소재 개발
  - 세부3** 고효율 N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 분리를 위한 차세대 분리막 분자체 기능 구현
  - 세부4** 유무기 복합 다공체 기반 고효율 CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> 분리용 흡착제 및 흡착분리 공정 개발



한국화학연구원 | 김 정 훈

## CO 및 CH<sub>4</sub> 회수용 분리막 원천소재 및 분리공정 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 국내 철강 화학산업 제련과정에서 CO와 CH<sub>4</sub>이 발생하고 있으며, 증류나 흡수, 흡착 등의 전통적인 분리기술을 활용하였을 때 연간 6000만톤의 CO<sub>2</sub>를 배출하게 됨
- 탄소중립이 세계적인 패러다임으로 대두되고 있는 가운데 국내에서도 철강 및 화학산업 공정에서 발생하는 부생가스 속 일산화탄소(CO)와 메탄(CH<sub>4</sub>)을 분리해 화학산업의 기초원료로 활용할 수 있는 기술 개발로 버려지는 폐가스에서 고부가가치의 산업원료가스를 만들어 내는 것이 필요하며 이과정에서 질소를 분리할 수 있는 새로운 분리소재 및 분리공정 원천기술의 개발이 필요함

#### 주요내용

- N<sub>2</sub>로부터 고순도 CO를 분리하는 촉진수송 분리막 기술개발 - 분자크기가 비슷한 혼합가스 (N<sub>2</sub> : 3.64 vs. CO : 3.6 Å)에서 고순도의 CO를 회수하기 위해 CO와 결합하는 전이금속 Ag+를 적용한 키토산계 촉진수송 분리막 개발
- 분자체 기공구조 조절기술을 이용한 N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 분리용 복합막 및 대면적화기술 개발 - 분자 크기 차이가 미세한 혼합가스 (N<sub>2</sub> : 3.64 vs. CH<sub>4</sub> : 3.80 Å)에서 고순도의 CH<sub>4</sub> 회수를 위하여 기공 구조를 정밀 제어할 수 있는 유무기 혼성기질막 및 제올라이트 분자체 복합막 기술 개발
- 철강부생가스에서 고순도(96~99%) CO 및 CH<sub>4</sub> 회수를 위한 촉진수송막 및 분자체 복합막의 대면적화 및 대면적 분리막을 적용한 고회수율 벤치 규모의 미니파일럿 규모의 막분리공정 및 미니파일럿 개발

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 CO 회수를 위한 키토산 고분자계 촉진수송 복합막 및 대면적화 제조기술 개발	· 고순도의 CO를 회수하기 위해 CO와 결합하는 전이금속 Ag+를 적용한 세계 최고의 CO/N <sub>2</sub> 선택도를 가진 습식 키토산계 촉진수송막 원천기술 (CO/N <sub>2</sub> 선택도 14~25) 개발 및 대면적화 (260cm <sup>2</sup> ) 복합막 개발중 (CO/N <sub>2</sub> 선택도 10~15)
02 N <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> 혼성기질 복합막/제올라이트 복합막 및 면적화 제조기술 개발	· 탄소분자체(CMS)의 기공 구조를 정밀 제어할 수 있는 세계 최고의 N <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> 선택도를 가진 혼성기질막 및 제올라이트계 분자체막의 원천소재 개발 (N <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> 선택도 3~7) 및 얇은 선택층을 갖는 비대칭형의 혼성기질 및 탄소분자체 대면적(260cm <sup>2</sup> ) 복합막 개발중 (N <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> 선택도 6)
03 CO 및 CH <sub>4</sub> 회수를 위한 복합막 대면적화 및 벤치 규모의 분리공정 개발	· 자체개발된 전산모사 프로그램을 통해 LDG의 CO회수 및 COG내의 CH <sub>4</sub> 회수를 위한 규모 1Nm <sup>3</sup> /hr의 통합공정 미니파일럿을 설계 제작하고 CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> 를 1% 이하로 제거하는 폴리설펜/폴리에틸렌옥사이드 분리막을 이용한 전처리 공정 기술개발 · 촉진수송 분리막 및 혼성기질 및 제올라이트 분자체 분리막의 스케일업을 통해 대면적 막모듈이 개발하고 있으며 설치된 벤치플랜트에 설치하여 막분리공정을 개발 예정임

### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 「전이금속이 담지된 산계-고분자착체 분리막 및 그 제조방법」 외 국내외 분리막 제조 특허 6건 출원과 4건을 등록하였음
- 「촉진수송막 및 탄소분자체막, 유기기 혼성 분리막」 등 분리막 분야의 최상위 SCI논문인 J. Membrane Science(상위 5%이내, IF 8) 등에 4편 논문 게재하였음

#### 기술이전

- 기업에서의 일산화탄소( 전처리 이산화탄소 분리기술 포함) 및 메탄(전처리 수소 회수 기술 포함) 분리회수를 위한 분리막 제조 원천기술 및 다단 막분리공정기술의 기술이전을 추진하고 있음

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- CO분리막 기술은 철강산업의 LDG나 BFG 및 화학산업의 메탄리포밍에 의해 제조되는 부생가스로부터 CO를 온실가스의 저감과 함께 경제적인 대체생산 가능
- CH<sub>4</sub>분리막 기술은 천연가스전, 매립지나 세일가스 등의 질소가 오염된 메탄혼합물 등 다양한 부생가스 분리산업에 적용 가능
- CO 및 CH<sub>4</sub> 분리기술을 국내외 저활용 탄소폐자원 관련산업에 적용했을 때 경제적인 시장 대체효과는 철강부생가스로부터 발생되는 CO는 연간 10조원, N<sub>2</sub>가 포함된 CH<sub>4</sub>은 연간 1.2조원 정도로 추산(화학연 자체 연구보고서)

#### 향후계획

- CO 및 CH<sub>4</sub>의 분리회수를 분리막 및 흡착제 원천소재 및 이들을 적용한 철강산업의 LDG 내 CO 및 COG 내 CH<sub>4</sub> 회수를 위한(1 Nm<sup>3</sup>/hr)급 미니파일럿 막분리공정의 연구가 진행중임
- 기술개발이 종료될 경우 참여기업 등에게 기술이전을 추진하고 참여기업들과 함께 막분리 파일럿 실증공정 개발(10 Nm<sup>3</sup>/hr)을 개발하고 상용화플랜트 (10,000Nm<sup>3</sup>/hr) 이상의 사업화를 추진할 계획임



연세대학교 | 김 종 학

## CO 촉진수송 고체 전해질 분리막 소재 개발

## 01 연구배경 및 주요내용

## 연구배경

- 대면적 막 (260 cm<sup>2</sup> 이상)의 경우 RK coater로 용액을 코팅할 때 용액이 적으면 고르게 코팅이 되지 않아, 소면적을 코팅할 때 보다 더 많은 용액을 부어 코팅을 해야만 막에 결함이 생기지 않는 특성이 있기에 막의 선택층 두께가 소면적 막에서보다 더 두껍게 나타나고, 투과도 감소로 이어지기 때문에 가능한 적은 양의 용액으로 균일한 두께의 막을 코팅할 수 있는 능력이 요구됨

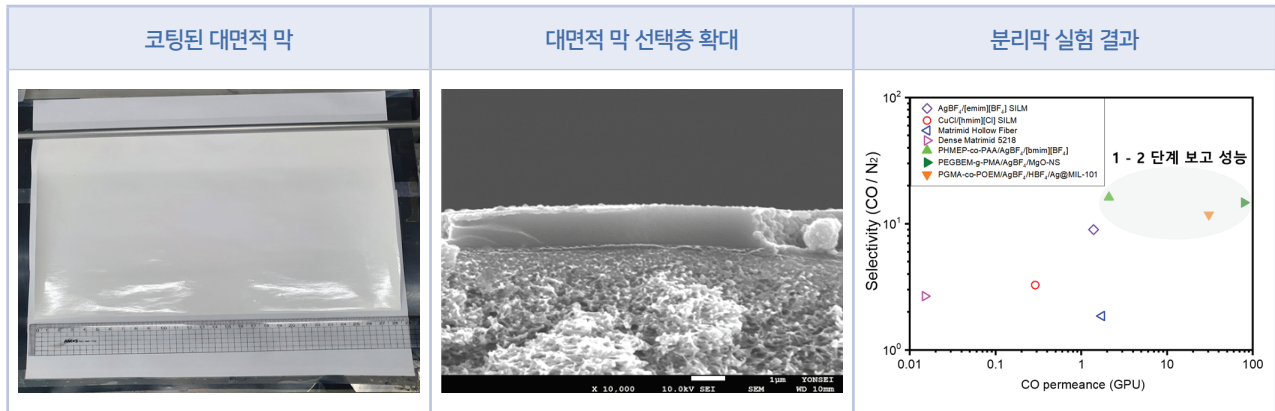
## 주요내용

- 에너지 절약형 분리막 사용을 통한 고순도 CO 획득 및 정제
- CO 촉진수송에 대한 원천기술 확보
- 고분자 분리막 제조 공법 확립을 통한 에너지 생산 단가 획기적 절감

## 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 소재 중 최적의 촉진수송막 소재 선정 및 분리 성능 개선	<ul style="list-style-type: none"> <li>· PHMEP-co-PAA/IL/Ag 복합막 CO/N<sub>2</sub> 선택도 16.2, CO 투과도 2.1 달성</li> <li>· PGMA-co-POEM/Ag@MIL-101/Ag/HBF<sub>4</sub> 복합막 CO/N<sub>2</sub> 선택도 11.8 CO 투과도 30.7 GPU 달성</li> <li>· PEGBEM-PMA/AgBF<sub>4</sub>/MgO-NS 촉진수송 분리막 CO/N<sub>2</sub> 선택도 14.7 CO 투과도 79 GPU 달성</li> </ul>
02 촉진수송 분리막 안정성 확보	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 장기안정성 후속연구 필요</li> </ul>
03 선택층 두께 1μm 이하의 대면적 분리막 제조	<ul style="list-style-type: none"> <li>· PHMEP-co-PAA/IL/Ag 복합막 선택층 두께 800 nm</li> <li>· 투과면적 260cm<sup>2</sup> 의 PHMEP-co-PAA/IL/Ag대면적 복합막 제조</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 일산화탄소 분리용 촉진 수송 분리막에 관한 특허와 기체 분리용 혼합 분리막에 대한 특허 2건 출원
- SCI 논문 1편 게재

#### 기술이전

- 공개 가능한 기술이전의 건: 1건, PHMEP-co-PAA/IL/Ag 복합막, 장기안정성 후속연구가 필요함

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 제철산업 및 석유화학 산업에서 발생하는 부생가스 중 분리 회수된 CO를 다양한 화학연료 및 원료로 사용하여 고부가가치 산업에 적용
- CO-전이금속이온 complex 형성을 통한 CO 촉진수송 과정은 여타 기체에 적용될 여지가 충분하며, 올레핀 기체의 경우 분자 구조상 이중결합의  $\pi$ -bond가 전이금속이온과 상호작용하는 것이 연구로 확인되어 올레핀/파라핀 분리에 활용할 가능성이 충분함
- 저온 조건이 요구되기 때문에 많은 에너지가 필요하며, 분리막 기반의 공정을 도입하여 올레핀을 분리할 수 있다면 상당한 에너지 및 비용을 절감할 수 있을 것이라 예상됨

#### 향후계획

- 연료전지 산업의 경우, 수소를 수소 이온으로 분해하고 이를 산소와 반응시키는 과정에서 백금 촉매를 사용하는데, 일산화탄소와 반응하면 촉매로써의 기능을 상실하는 결과를 가져오기 때문에 미량의 일산화탄소도 치명하므로 본 연구개발이 완료되면 연료전지 산업에 우선적으로 적용하는 것을 목표 할 수 있음
- CO-전이금속이온 complex 형성 및 투과 메커니즘 규명을 통해서 최적화된 CO 촉진수송 운반체 개발 기술을 보유함. 뿐만 아니라 다른 기체 및 소재에 적용 시에도 활용 가능한 밑바탕이 될 것임



서강대학교 | 이 종 석

## 고효율 $\text{N}_2/\text{CH}_4$ 분리를 위한 차세대 분리막 분자체 기능 구현

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 메탄분리회수를 위하여 폴리이미드 및 사다리형태의 폴리실세스퀴옥산 물질의 구조를 설계 및 합성하고, 이들 혼합물에 기반한 전구체 물질을 이용하여 우수한  $\text{N}_2/\text{CH}_4$  분리 성능을 지닌 대면적 탄소분자체 분리막을 개발하고자 함

#### 주요내용

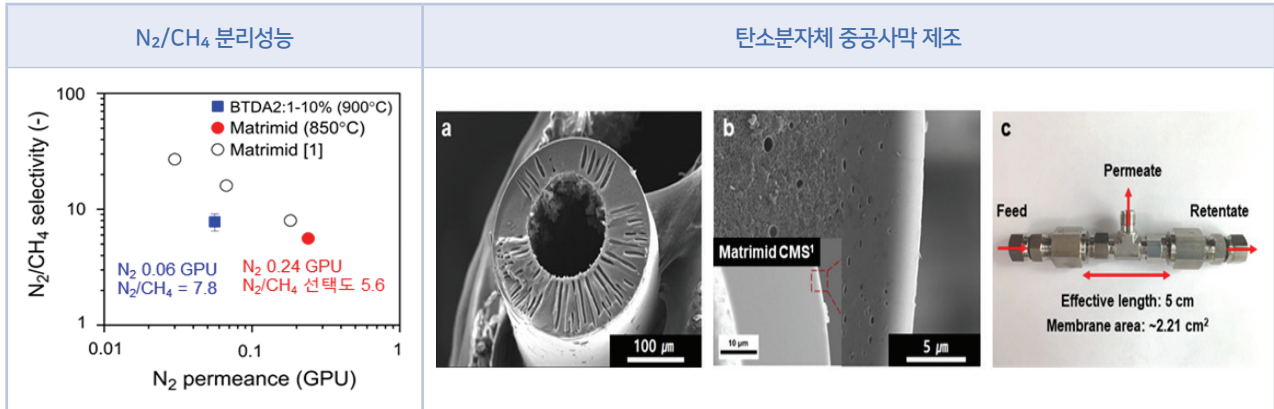
- 신규 폴리이미드/사다리형태의 폴리실세스퀴옥산 전구체 물질을 탄화하여 우수한  $\text{N}_2/\text{CH}_4$  분리성능을 지닌 탄소분자체 분리막 소재를 확보하고 분리메커니즘을 규명함
- 전구체 고분자 용액 조성 및 대면적 전구체 분리막 제조조건에 따른 분리성능을 분석하여 defect-free한 대면적의 전구체 분리막을 개발하고, 이를 열분해하여 탄소분자체 분리막을 제조 후 전구체 고분자의 조성과 탄화조건을 최적화하여 대면적 탄소분자체 분리막 분리성능을 향상시키고자 함
- 대면적 탄소분자체 분리막의 장기안정성을 평가하고, 대면적 막모듈을 제작

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 대면적 탄소분자체 분리막 제조기술 최적화	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 막 면적 <math>260 \text{ cm}^2</math> 이상</li> <li>· <math>\text{N}_2</math> 투과도 20 GPU</li> <li>· <math>\text{N}_2/\text{CH}_4</math> 선택도 <math>&gt; 10</math></li> <li>· <math>\text{CH}_4</math>의 파이프라인 순도를 (96%) 및 회수율 90%이상을 할 수 있는 3단 막분리 공정의 상용화가 가능한 수준으로 스케일-업 분리막 제조</li> </ul>
02 대면적 탄소분자체막의 장기안정성 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 대면적 분리막의 장기안정성 연구 (분리성능 100시간 유지 <math>35^\circ\text{C}</math>)</li> </ul>
03 대면적 탄소분자체 분리막 스케일업 막모듈 제작	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 대면적 분리막 스케일-업 분리막 모듈제조 및 화학연 제공 (막면적 <math>&gt; 260 \text{ cm}^2</math>)</li> </ul>



### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 2020년 탄소분자체 분리막 제조용 고분자 조성물에 대한 특허가 출원되었으며, 하이브리드 고분자 중공사막에 대한 특허가 등록됨
- 국외 SCI 학술지 <Journal of Membrane Science>에 게재되었으며, 한국화학공학회 학술대회 논문 발표하며 구두발표상 우수상 수상함

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 대면적 탄소분자체 분리막을 개발하여 장기안정성 확보 이후, 다양한 기체들의 분리 (CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 등)에도 적용 기대
- 천연가스 내 CH<sub>4</sub>를 저비용 고순도화를 통하여 신재생에너지 생산 기술을 확보하고 국내외 관련시장을 선점할 수 있음

#### 향후계획

- 탄소분자체 분리막은 천연가스에서 N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 분리를 통해 CH<sub>4</sub>를 재활용하는데 활용할 수 있음. 이와 더불어, 국내 기체분리막 제조 기업 상대로 분리막 소재 및 공정기술 기술이전을 추진



연세대학교 | 배운상

## 유무기 복합 다공체 기반 고효율 CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> 분리용 흡착제 및 흡착분리 공정 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 산업부생가스 및 탄소폐자원으로부터 고순도의 CH<sub>4</sub>을 회수하여 고부가 가치 화학원료 및 신재생에너지로 재활용하기 위함

#### 주요내용

- 유무기 복합 다공체 기반 고효율 CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> (or N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>) 분리용 흡착제 및 유무기 복합 다공체 기반 혼성기질 복합막 개발(Mixed Matrix Membrane, MMM)이 성공적으로 이루어져 막분리 공정에 적용된다면, 탄소 폐자원 및 부생가스에서 발생하는 CH<sub>4</sub>을 N<sub>2</sub>와 분리하여 고부가 가치를 창출

### 02 핵심기술 및 달성내용

#### 핵심기술

#### 달성사항

01

MMM 적용을 위한  
메탄/질소 분리용 흡착제  
후보군 선정 및 개발

- 대용량 분자모사 스크리닝을 통한 N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 분리 가능 후보 선정
- 크롬 기반 N<sub>2</sub> 분리용 흡착제의 열역학적 및 속도 분리 성능을 모두 고려한 kinetic selectivity 11 달성
- 분극성이 큰 브롬 작용기를 도입한 지르코늄 기반 CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> 분리용 흡착제 개발 (선택도 5.6)

02

- N<sub>2</sub> 선택적 빈배위금속 자리를 갖는 Cu-paddle wheel 구조의 미세기공 흡착제(ZEGYOB) 합성
- 상대적으로 높은 N<sub>2</sub> diffusivity를 이용한 혼성기질 복합막 적용 가능성 확인

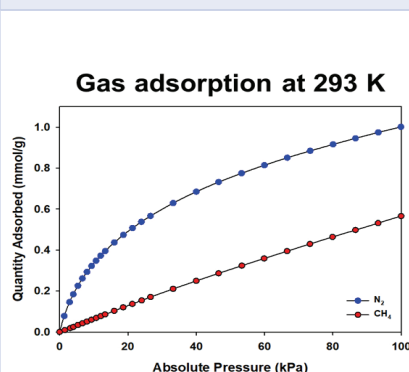
03

MMM 적용을 위한 흡착제의  
scale-up 합성 및 혼성기질  
복합막 제조

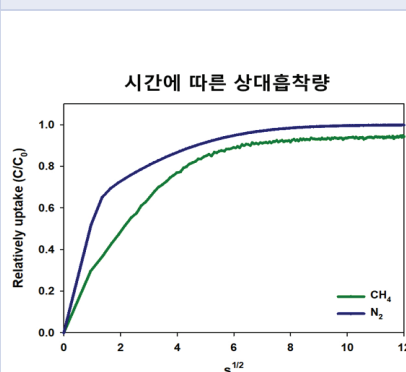
- MMM 적용을 위한 microwave를 이용한 크롬 기반 흡착제의 최적화된 scale-up 합성법 개발
- 개발된 흡착제 기반 N<sub>2</sub> 선택적 고분자(DOCDA-ODA) 및 CH<sub>4</sub> 선택적 고분자(PEBAX)와의 혼합을 통한 혼성기질 복합막 제조

### 03 실험데이터 및 실증사진

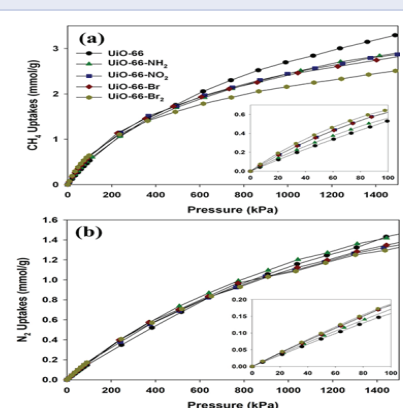
크롬 기반 흡착제의 N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>  
흡착성능 실험 결과서

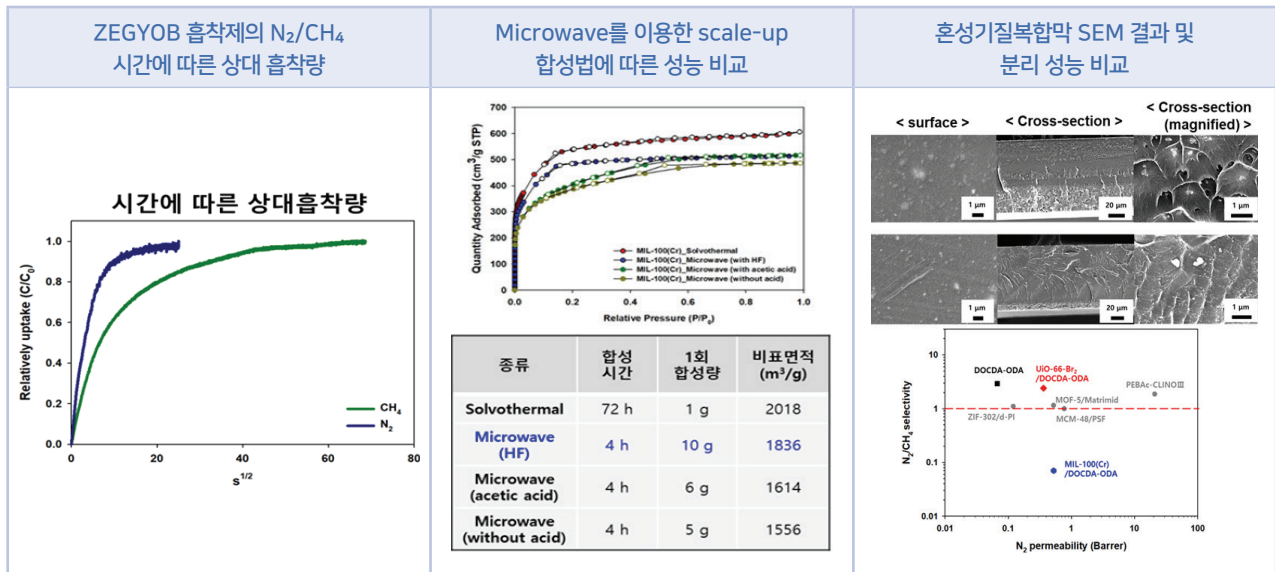


크롬 기반 흡착제의 N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>  
시간에 따른 상대 흡착량



지르코늄 기반 흡착제의 CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>  
흡착성능 실험 결과서





## 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

### 주요성과

- 일산화탄소에 대한 선택적 흡착능을 갖는 일산화탄소 흡착제 등 3건의 국내 특허 등록과 CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> 분리를 위한 금속 유기골격에 대한 특허 1건 출원함
- 해외 우수저널 <Chemical Engineering Journal>에 2건 <Cell Reports Physical Science>에 1건 논문 게재와 국내 학술대회 1회 발표함

### 기술이전

- 1) 기능화된 지르코늄 기반 메탄 선택적 흡착제의 제조 방법
- 2) 혼성기질 복합막 개발을 위한 질소 선택적 흡착성능을 보이는 크롬 기반 흡착제 입자 조절 및 scale-up 합성 방법

## 05 기대효과 및 향후계획

### 기대효과

- 고순도 메탄, 이산화탄소의 동시 생산 및 막분리정제에 성공할 경우, C1가스 리파이너리사업 및 CCP융합연구단사업의 촉매 전환기술과 연계하여 고부가 가치의 화학제품의 생산용 화학원료가스 제공에 큰 기여
- 저비용의 고순도 이산화탄소 회수기술의 확보로 탄소자원화 화학원료가스 제공 및 이산화탄소의 분리 저장(CCS)시장의 이산화탄소 배출권 거래제에 이용

### 향후계획

- CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> 분리 분야는 국내에서 아직 연구가 많이 진행되지 않은 분야이기 때문에 후속 연구를 위한 중요한 기반으로 활용될 것이며, CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> 분리 흡착제 및 혼성기질 복합막에 대한 원천 기술을 확보함으로써 향후 관련 시장을 선도 가능
- 다양한 재료의 변형법 및 공정 시스템의 설계는 추후 CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> 분리가 아닌 다른 기체 분야에서도 적용될 수 있음
- MMM 기반 고효율 분리막 공정을 이용한 다양한 산업의 기체 분리 공정을 통해 저에너지, 친환경적 공정으로 활용 가능

미활용 탄소자원의 고부가가치를 창출하는  
**차세대 탄소자원화 연구단**

## 총괄2

# 부생가스 이용 CO<sub>2</sub> 전환 기술





## 자원의 미래를 연구하다

- 
- 세부1** 부생가스와 이산화탄소를 이용한 고부가 화학원료 생산용 Syn-gas 제조 기술 개발
  - 세부2** 고농도 CO 생산을 위한 CO<sub>2</sub>/부생가스 맞춤형 건식 개질 촉매 개발
  - 세부3** CO<sub>2</sub>가 함유된 합성가스로부터 선형 장쇄 올레핀 제조 촉매 공정 개발
  - 세부4** 이산화탄소를 탈수소제로 활용한 저급올레핀(C2=/C3=)화 촉매 개발



한국에너지기술연구원 | 남 성 찬

## 부생가스와 이산화탄소를 이용한 고부가 화학 원료 생산용 Syn-gas 제조 기술 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 산업에서 발생하는 3-waste(부생가스, 폐열, CO<sub>2</sub>)로 인해 환경문제 및 자원 낭비가 심각하며, 일반적으로 금속산화물을 통한 산화환원 반응을 통해 처리함
- 부반응( $2\text{CO} \leftrightarrow \text{Carbon} + \text{CO}_2$ )에 의한 탄소침적이 발생하여 금속산화물의 표면을 덮어 반응의 효율이 낮아지며, 800℃ 이상의 고온반응으로 금속입자 간 응집 또는 소결현상으로 인하여 장기간 운영에 어려움


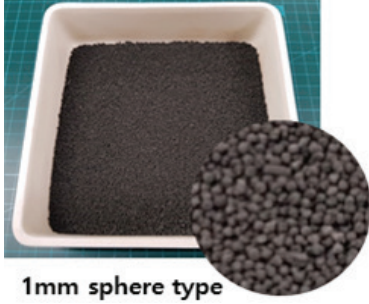
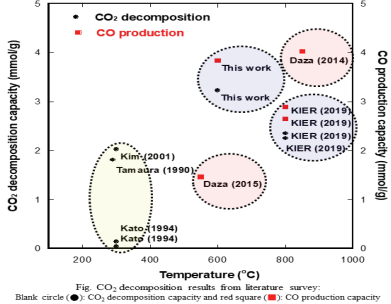
#### 주요내용

- 낮은 온도( $\geq 700^\circ\text{C}$ )에서도 90% 이상의 CO<sub>2</sub> 전환율을 보였으며, 고온 내열성 및 안정성이 우수하여 환원 및 산화 반복 운전에도 전환율, 수율 등의 감소없이 일정한 활성을 확보함
- 철계 촉매 구조의 낮은 비표면적과 다공성 개선을 통하여 반응성이 전보다 우수하게 개발하였으며, 다중 Soft-template 이용 다층 기공 구조를 확보함

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 CO <sub>2</sub> 전환 활성화제 합성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 철산화물(<math>\text{Fe}_x\text{O}_{y-d}</math>) 관련 연구 결과를 이용한 CO<sub>2</sub> 직접 전환 활성화제 합성</li> <li>· 선정된 최적 활성화제와 부생가스를 이용한 CO<sub>2</sub> 직접 전환-폐열 이용 연계 공정의 최적 설계 구현</li> </ul>
02 CO <sub>2</sub> 전환효율 99% 이상	<ul style="list-style-type: none"> <li>· CO<sub>2</sub> 직접 전환-폐열 이용 연계 공정의 최적 설계 구현</li> <li>· 부생가스 이용 이산화탄소 직접 전환효율 90% 이상 달성(분리막 적용)</li> </ul>
03 공정 최적화 및 공정격상 자료도출/최적운전시간 (100h 운전)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 화학원료 생산연계 CO<sub>2</sub> 직접전환(<math>4\text{Nm}^3/\text{hr}</math>) 공정 최적화</li> <li>· Mini-Pilot 규모 공정 설계 패키지 완성-제작-설치</li> </ul>
04 자체 기술 개발에 의한 기술 사업화 달성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 자체 설계에 의한 공정 설계 패키지(PDP) 제작</li> <li>· 기술사업화를 위한 상급원천특허 및 논문 확보(2편 이상)</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진

Mini-Pilot 공정 시스템	1mm 구형 SrFeO <sub>3</sub> pellet	국내외 CO <sub>2</sub> 분해결과 비교
	 1mm sphere type	

### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 특허 고순도 CO<sub>2</sub>와 블루수소 확보 가능한 CO<sub>2</sub> 포집 관련 특허 등록 4건과 함께, 포집된 CO<sub>2</sub>의 고부가가치화 관련 특허 4건 출원과 1건 등록하여 지재권 확보하였으며,
- 논문은 CO<sub>2</sub> 절감 및 고부가 합성가스 생산 기술에 대해 journal of CO<sub>2</sub> utilization(2019), Jurnal of Solid State Chemistry (2020), Catalysts(2020)에 게시되기도 하며, 2020대한민국 환경·에너지대상 학술연구부문에서 수상하였음

#### 기술이전

- 1) 제철산업, 석유화학/정유사와 기술이전 및 후속과제 공동연구 협의 중

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 고순도 CO 확보를 통한 다양한 응용분야로 유기합성, 연료, 환원제, 및 식품 보존의 원료 등에 활용가능하여, 국내 CO 시장규모 84 만톤/년의 규모가 예상됨

\* 출처 : 한국석유화학협회, 머니투데이(10.03.04.), 키움증권:화학/정유(18.03.27.)

- 2030년 예상 상용화 시기로 온실가스 5.94 만 톤 저감과 함께 CO 4.2만 톤을 생산할 것으로 예상하며 일석이조의 경제적 효과를 기대함

#### 향후계획

- 부생가스 적용을 위한 분리-정제-고부가가치화 시스템 적용을 위한 시도를 하고 있으며, 현재 부생가스 발생공정에 대해서도 분석을 완료하여 제철 및 석유/정유 공정에서의 부생가스에 접목시키고자 함
- 공동연구를 통해 국가탄소중립 달성을 위한 공동 협업을 기대하며, CO<sub>2</sub>의 포집 및 활용을 통한 신사업의 활로가 될 것이라 기대함



연세대학교 | 노현석

## 고농도 CO 생산을 위한 CO<sub>2</sub>/부생가스 맞춤형 건식 개질 촉매 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 수증기 개질 반응은 국내/외 연구팀에 의해 상용화 단계에 진입하였으나 제철 공정에서 발생하는 온실가스(CO<sub>2</sub>)의 직접적인 제어가 어려운 문제가 있음
- 기존 부생가스 건식 개질 반응은 안정한 CO<sub>2</sub>의 활성화를 위한 높은 반응 온도와 강한 흡열 반응으로 인한 부분적 온도 감소로 인해 탄소 침적 및 소결 현상이 발생하여 촉매 안정성이 감소되는 문제가 있음

#### 주요내용

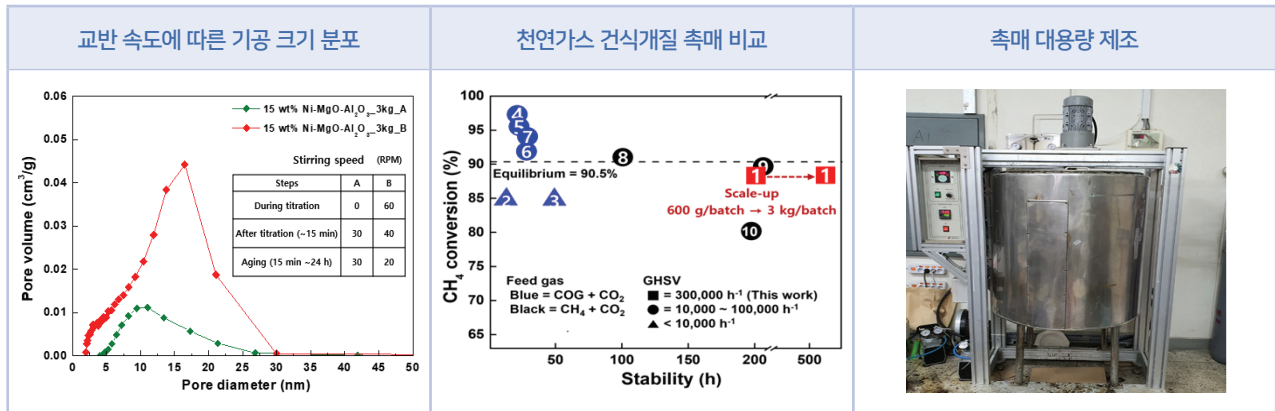
- Ni 기반 촉매로서 귀금속 기반 촉매 대비 우수한 경제성을 갖췄으며, 낮은 온도( $\geq 800^{\circ}\text{C}$ )에서 촉매 자체 탄소침적 저항성 증진시킴
- 평형전환율 대비 90% 이상의 CH<sub>4</sub> 및 CO<sub>2</sub> 전환율과 500시간 이상의 안정성을 확보한 촉매 개발함으로써 실제 공정에서 높은 활용도를 구축함

### 02 핵심기술 및 달성내용

	핵심기술	달성사항
01	부생가스 맞춤형 촉매의 대용량 제조법 최적화	· 제조량: 3 kg/batch (기존 Lab. scale 대비 촉매 제조량 1000배 scale-up)
02	부생가스 맞춤형 촉매의 황 허용농도 수준 파악	· 부생가스 건식 개질 촉매의 황 허용농도 가이드라인 작성
03	부생가스 맞춤형 촉매의 건식 개질 양산 촉매의 mini-pilot급 공정 적용 및 장기 운전 성능 평가	· 평형전환율 대비 CH <sub>4</sub> 및 CO <sub>2</sub> 전환율 > 90% 이상 (공간속도 300,000 h <sup>-1</sup> 에서 500 h 이상)
04	부생가스 맞춤형 건식 개질 양산 촉매 핵심 성능 인자 및 최적 recipe 도출	· 대용량 합성 촉매의 특성 분석 (소성을 마친 촉매 및 반응 적용 촉매)



### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### — 주요성과

- 부생가스 건식 개질 반응용 촉매의 제조 방법에 대한 내용을 기반으로 부생가스의 화학적 활용과 CO<sub>2</sub> 저감 효과에 대해 2020년 9월 특허 출원이 완료됨
- 논문은 Ni 기반 촉매를 활용하여 경제적 이점을 창출하여 International Journal of Hydrogen Energy에 게재 되었음
- 건식 개질 반응용 촉매의 물리화학적 특성에 영향을 주요 인자를 도출하여 촉매 개발의 수월성을 확보하여 Catalysis Today에 게재되었음
- 부생가스 건식 개질 반응용 촉매의 최적 제조 방법 및 조건 도출을 통해 우수한 촉매 성능을 확보하여 촉매 상용화의 기반을 마련하였으며 Journal of CO<sub>2</sub> Utilization에 게재되었음

### 05 기대효과 및 향후계획

#### — 기대효과

- 탄소배출권에 대한 가격이 2021년 2월 12일 기준 t당 39.97 유로로 2020년 2월 이후 증가하고 있는 추세로 이후 환경오염에 대한 관심도가 높아짐에 따라 탄소배출권의 가격이 오를 것으로 예상됨
- 글로벌 합성가스 시장은 2016년 기준 2026년까지 10년 동안 약 148% 증가할 것으로 예측하며 1,000억 달러는 넘을 것으로 예측하고 있음 (출처 : Inkwood Research)

#### — 향후계획

- Mini-pilot 규모 공정을 적용하기 위해 모사가스 반응을 통한 촉매 성능 테스트와 Bench scale 공정이 완료되어 있어 COG 를 단순 정제·소각 하고 있는 기업과 연계하여 상용 규모의 실증 사업 진행을 계획하고 있음
- 실용화 공정을 구축하기 위해 부생가스 맞춤형 촉매 대용량 제조를 위한 연구와 함께 부생가스 맞춤형 mini-pilot급 공정 적용의 안정성 확보를 진행 하고 있어 최적의 recipe를 가지고 기업에서 활용도를 높일 것임



한국화학연구원 | 김 용 태

## CO<sub>2</sub>가 함유된 합성가스로부터 선형 장쇄 올레핀 제조 촉매 공정 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 기존 알파올레핀은 고순도로 정제된 에틸렌을 원료로 하는 까다로운 공정으로 비싼 금속 촉매가 필요할 뿐만 아니라 해외 기업이 원천기술 및 통합 공정 특허를 가지고 있어 알파올레핀은 전량 수입에 의존하였음
- CO<sub>2</sub>은 대표적 온실 가스로 포집, 저장하는 기술을 넘어서 자원으로 활용하기 위한 기술의 중요성이 커지고 있음

#### 주요내용

- 촉매는 저렴한 철광석으로 제조함으로써 촉매 비용도 크게 절감 하였으며, 에틸렌이 아닌 일반 부생가스를 사용하기 때문에 원료가 약 4배 정도 저렴하여 경제적 우위성을 확보함
- CO와 CO<sub>2</sub>의 동시전환 기술을 통해 CO의 최고 반응성을 유지하면서 동시에 CO<sub>2</sub>를 전환하며 생성물 범위 조절이 가능한 촉매 활성을 최적화함

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 CO <sub>2</sub> 가 풍부한 합성가스 사용에 적합한 촉매 화학적 전환 반응기구 모색	· 반응물 조성에 따른 반응성 확인 및 부산물 억제를 위한 반응 메커니즘 규명
02 탄소생성물 분포의 한계를 극복할 수 있는 이중기능 원천촉매 개발	· CO <sub>2</sub> 전환율 ≥ 66%, CO 전환율 ≥ 96%, C <sub>5</sub> -C <sub>20</sub> 선형 장쇄 올레핀 수율 ≥ 31% · 촉매 안정성 ≥ 500 h · 탄화수소 생성물 내 C <sub>8</sub> 선택도 ≥ 8%
03 반응기 내 반응물/생성물 분포에 따른 화학반응 속도를 조절할 수 있는 촉매 반응 시스템 개발	· CO <sub>2</sub> 가 풍부한 합성가스로부터 1kg 올레핀/일 촉매반응기 운전 (운전시간 ≥ 100 h (계획)) · 촉매 재생 조건 및 기술 확보 (계획) · 반응기 및 분리공정이 포함된 공정 패키지 설계 완성 (계획)

### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 특허로 올레핀 제조용 촉매 및 공정에 대한 국내 특허 등록이 3건 되었으며, 논문은 Bulletin of the Korean Chemical Society(2018), RSC advances(2019), ACS Catalysis(2020), Energies (2021)에 촉매개발 및 반응최적화에 대한 내용으로 게재하였음
- 온실가스의 고급 화학물질 제조 공정에 대한 기술로 YTN 기술 소개가 되며, 본 기술의 우수성이 대외적으로 나타남

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 알파올레핀은 세정제나, 화장품, 윤활유, 플라스틱 등을 만드는데 사용되는 정밀화학원료이며, C<sub>6</sub>-C<sub>8</sub>범위의 프리미엄 폴리머의 수급 불균형이 높아지고 있어 더욱 필요한 상황임
- 세계 경제 규모는 `18년 기준 알파올레핀 시장이 90억 달러이며 연평균 성장률 4%로 꾸준히 증가하고 있어 높은 활용도를 나타내며, 탄소저감과 함께 고부가가치 생산의 기대 효과가 예상됨

#### 향후계획

- 핵심 원천 기술의 고도화로 CO, CO<sub>2</sub> 촉매 기반 신규 활성점 개발과 물리·화학적 전달 속도 조절을 통해 CO<sub>2</sub>와 동시전환을 통한 올레핀 수율을 25% 이상을 확보를 목표로 하고 있으며, 기존 부생가스 동시 전환 테스트 베드 구축을 할 계획임



인하대학교 | 조 창 범

## 이산화탄소를 탈수소제로 활용한 저급올레핀 (C<sub>2</sub>=/C<sub>3</sub>=)화 촉매 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 기존 알파올레핀 제조 공정은 부반응( $2\text{CO} \leftrightarrow \text{Carbon} + \text{CO}_2$ )에 의한 탄소침적이 나타나 촉매 표면을 급격한 비활성화가 발생함
- 700℃ 이상의 고온에서 반응 과정이 나타나 금속 입자끼리도 응집 또는 소결 현상이 발생하여 장시간 연속 공정에 활용이 어려움

#### 주요내용

- 크롬산화물 또는 귀금속 기반의 촉매로 생성되는 경질 올레핀은 기존 촉매에 비해 10배 이상의 수율을 확보하였으며, 촉매 안정성은 2배 이상 향상되어 경제적 이점을 확보하였음
- 유기관능기 도입한 제올라이트 기술을 통해 선택적 흡착제를 제조하는데 성공하여 에탄/에틸렌 혼합기체에서의 분리 기술 뿐만 아니라, 메탄에서의 벤젠 및 에틸렌 까지 분리가 가능하여 활용도가 높음

### 02 핵심기술 및 달성내용

	핵심기술	달성사항
01	에틸렌 반응의 촉매 안정성 확보	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 에틸렌 수율 &gt; 40%, 선택도 &gt; 90%</li> <li>· 프로필렌 수율 &gt; 35%, 프로필렌 선택도 &gt; 75%</li> </ul>
02	프로필렌 반응의 촉매 안정성 확보	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 프로필렌 수율 &gt; 35%, 프로필렌 선택도 &gt; 80%</li> <li>· 저급 올레핀의 생산량 (1kg/day)</li> </ul>
03	촉매 재생성 테스트	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 촉매를 5회 이상 재생 후, 마지막 3회 실험에서 얻은 수율 및 선택도의 평균값이 하단의 수치를 달성</li> <li>· 프로필렌 수율 &gt; 35%, 프로필렌 선택도 &gt; 80%</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 각 공정에 대한 특허로 올레핀 제조 촉매, 제올라이트, 에탄/에틸렌 분리 흡착제 개발 기술까지 공정 각각에 대한 특허 출원
- 최근 논문으로 Chem. Soc. Rev.(Royal Society of Chemistry)에서 CO<sub>2</sub> 캡처와 사용에 관한 최신 방법론으로 소개

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 에틸렌, 프로필렌은 고분자의 원재료로서 다양하게 활용되어 수요가 지속적으로 증가하여 매년 5%의 성장률로 시장 규모가 커질 것으로 미국 UOP에서 예상하고 있음
- 본 기술을 통하여 나노촉매 설계로 코크 생성 억제되는 촉매로써 안정성 확보와 경제적 이점을 가질 뿐만 아니라, 에틸렌, 프로필렌 생산도 수요에 따라 변동이 가능한 공정을 개발하였음

#### 향후계획

- CO<sub>2</sub> 활용하는 독창적 기술로 CO<sub>2</sub> 활용 메탄올, 합성가스 제조 등에 본 연구에서 개발한 촉매가 사용될 수 있을 것으로 예상하며, 다른 분야로도 활용도가 매우 높을 것으로 보임
- Bench scale 적용을 위해 lab scale에서 촉매 스크리닝을 완료 하였으며, 제올라이트 분리제도 모듈화하기 위한 기술이 개발되어 있음, 본 촉매를 기반으로 CO<sub>2</sub>를 산화제로 활용하고자하는 다양한 촉매반응에도 적용할 수 있음

미활용 탄소자원의 고부가가치를 창출하는  
**차세대 탄소자원화 연구단**

### 총괄3

# 광촉매 & 바이오촉매 융합 CO<sub>2</sub>의 전환 기술





## 자원의 미래를 연구하다

- 
- 세부1** 광촉매-바이오촉매 융합 CO<sub>2</sub> 선택적 전환기술 개발
  - 세부2** 광촉매-바이오촉매가 융합된 CO<sub>2</sub> 전환 포름산(HCOOH) 제조용 bio-mimic 고선택성 촉매 개발
  - 세부3** CO<sub>2</sub> 전환용 광-바이오촉매시스템 : 전자전달물질 및 NADH 대체물질 개발



한국화학연구원 | 백진욱

## 광촉매-바이오촉매 융합 CO<sub>2</sub> 선택적 전환기술 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 지구가 매년 받는 태양광 에너지는 지구 전체의 연간 사용에너지(현재 15.7 TW, 2100년 27~33TW 추정)의 1만 배로, 본 기술은 태양광 에너지만을 이용하여 온실가스 CO<sub>2</sub>를 선택적으로 유용한 포름산으로 바꾸는 꿈의 기술을 실현하고자 함

#### 주요내용

- 2D COF 필름 광 촉매 매커니즘 규명을 통해 고가의 귀금속이 포함되지 않는 고효율의 태양광 전환 2D COF 필름 광촉매 제조법을 개발하였음
- 광-바이오 융합 촉매는 태양광에너지 외 부가적인 에너지의 투입 없이도 자연광합성의 태양광 전환 효율(평균 2%)을 상회하는 2.75%의 효율을 달성, 포름산 생성물의 선택도 또한 고선택성을 가진 바이오촉매의 도입으로 선택도 100%까지 크게 개선됨

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 태양광 에너지 전환 원천 광촉매 및 요소기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 광 직접 활용 광촉매-바이오촉매 CO<sub>2</sub> 전환 시스템용 고효율 및 초고선택 광촉매 소재 개발</li> <li>· STF &gt;2%, Selectivity &gt;97%, TON &gt; 20,000</li> </ul>
02 광촉매-바이오촉매 CO <sub>2</sub> 광전환 핵심요소들의 고정화 및 고효율화 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 광 직접 활용 광촉매-바이오촉매 CO<sub>2</sub> 전환 시스템용 핵심 요소 소재 고정화 및 반응기술 개발</li> <li>· STF &gt;2.75%, Selectivity ~100%, TON &gt; 25,000</li> </ul>
03 태양광 에너지 전환 핵심 CO <sub>2</sub> 광전환 시스템기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 필름형 광촉매 고정화 기술 개발</li> <li>· 광촉매 고효율화 기술 개발</li> <li>· STF &gt;3%, Selectivity ~100%, TON &gt; 30,000</li> </ul>



### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 태양광 에너지 만을 이용하여 메탄올과 의약품 제조 및 포름산등을 선택적으로 제조 등 세계 인공 광합성 연구를 주도하고 있어 특허 및 논문 활동이 활발하게 이뤄지고 있음
- 특허로 신규 박막형 광촉매 및 전자구조 제어에 의한 광촉매 설계 기술 등 5건이 출원·등록 되었음
- 논문은 인공광합성의 핵심인 2D COF 광촉매를 펄스 레이저를 활용한 광촉매의 전자전달 메커니즘을 세계 최초로 규명하여 2020년에 Nature Communications에 Editor's Choice로 선정되어 게재되는 등 SCI급 논문 10편이 게재되었음

#### 기술이전

- 1) 신규 태양광 에너지 전환용 2D COF 가시광 광촉매 제조 방법 및 이의 필름화 기술
- 2) 가시광 광촉매 밴드구조 제어에 의한 광에너지 전환효율 향상 및 광촉매 설계기술
- 3) 태양광 활용 이산화탄소로부터 포름산을 제조하는 CO<sub>2</sub> 광전환기술

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 광촉매-바이오촉매 융합 시스템은 태양광에너지만을 활용하므로 기존 화석연료 기반 포름산 생산 방법 대비 에너지 비용 절감 및 CO<sub>2</sub> 감축 효과를 가지며, 상용화되어 연 4만 톤의 포름산 생산 시, 16,000 톤의 이산화탄소 순 감축 효과가 기대됨
- 세계 포름산 시장은 약 6.2억불(2019)로 추산되며, 2025년까지 매년 4%의 성장률이 전망되는데 아시아-태평양 지역의 농축산업 및 가축과 섬유가공 분야가 성장함에 따라 시장을 주도할 것으로 보이며, 고순도 포름산은 연료전지 및 수소저장 연료로 신 분야 개척이 가능함 (Ref. Mordor Intelligence)

#### 향후계획

- 광전환효율 3%의 태양광 CO<sub>2</sub> 광-직접전환 시스템을 완료하여 기업과 Bench-scale의 광-바이오 생산 통합 공정을 검증하고 각종 화학산업의 첨가제, 살충제의 원료 및 연료전지 연료로서 유용하게 사용될 포름산 제조의 원천 광촉매 및 광전환 bench 설비를 확보하며 광-바이오 생산 파일럿 플랜트를 설계하고자 함
- 광촉매의 전자전달 원리 규명과 함께 광촉매의 박막화, 대면적화에도 관심을 기울여 핵심 원천기술을 확보함과 동시에 향후 연속생산이 가능한 실용화를 위한 연구성과들을 확보하였으며, 기업 협업을 통해 광바이오 생산통합 bench-scale 공정 검증 및 생산 파일럿 플랜트 설계 등을 진행할 계획임



고려대학교 | 손 호 진

## 광촉매-바이오촉매가 융합된 CO<sub>2</sub> 전환 포름산 (HCOOH) 제조용 bio-mimic 고선택성 촉매 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 1987년 일본 오사카대학 tanaka그룹에서 ACS Organometallics지에 bipyridyl Ru(II) complex의 전기화학적 방법을 통한 이산화탄소-to-CO/HCOOH 전환연구결과가 처음으로 보고된 이래 많은 연구그룹들에 의해서 관련연구가 진행되으나 현재 포름산 생산을 위한 정확한 반응 메커니즘이 밝혀지지 않은 상황임
- 현재까지 전세계적으로 포름산 생성 촉물촉매 중 Ru(II)계 촉매를 대체할 촉매는 전무한 상황으로 메커니즘을 분석을 통한 정확한 반응경로 분석은 관련 연구에서의 포름산 생성 효율과 선택도를 높이는 좋은 피드백역할을 할 것으로 기대됨

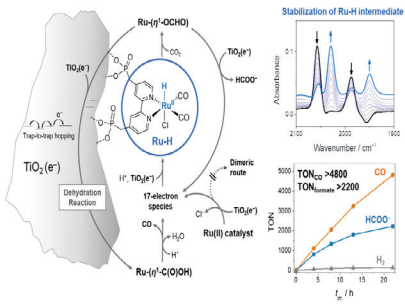
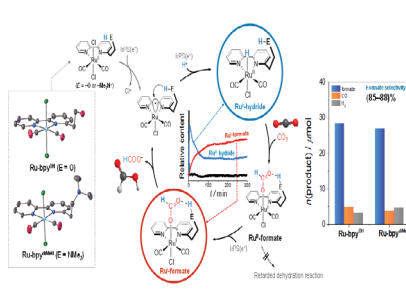
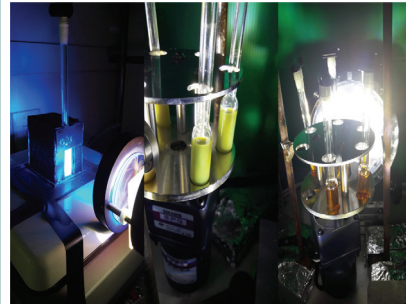
#### 주요내용

- 이산화탄소 환원촉매반응 간 선택도 향상을 위하여 유기금속 촉물 촉매의 리간드의 bulkiness조절 및 담지화를 통하여 신규 고효율, 고선택성 유기금속촉물촉매 개발
- 전환효율과 선택도 향상을 위한 촉매 내 전환 메커니즘 연구를 위하여 동시적외선분석 (in situ FTIR), 전기화학 및 광물리연구를 진행

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 FTIR 동력학 분석을 통한 반응메커니즘 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 전기화학적 Operando FTIR분석을 활용하여 신규개발된 촉물촉매의 환원 potential 별 <math>v(\text{CO})</math>값 비교분석</li> </ul>
02 광물리분석을 통한 촉매 선택도 개선과 효율 최적화	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 광화학적 Operando FTIR분석결과와 비교를 통하여 반응경로 메커니즘 분석 및 선택도 최적화: 포름산생산을 위한 핵심 'M-H 중간체'의 정량분석</li> <li>· 반응경로메커니즘을 기반한 촉매구조 재설계 및 반응 최적화</li> </ul>
03 광물리분석을 통한 촉매 선택도 개선과 효율 최적화	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 사용된 광감응제와 신규촉물촉매 사이의 Stern-Volmer실험을 통한 전자전달속도 메커니즘 분석</li> <li>· 광물리분석을 통해 확보된 전자주입 및 이동속도를 기반한 광감응제와 촉매의 최적조합 도출</li> <li>· 신규 고안정성 고흡광도 광감응제 도입을 통한 기개발된 신규환원촉매의 효율 최적화</li> </ul>
04	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 정량세부목표: 포름산생성선택도 &gt;80%; QY &gt;10%; TONformate &gt;1000; 촉매효율지속시간 &gt;40시간</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진

Ru(II)기반 신규 광촉매의 메커니즘 및 광조사 시간대비 관측된 생성물 결과 그래프	제안된 균일계tethered bipyridine Ru(II) 착물촉매시스템의이산화탄소 환원 반응경로 모식도 및 광반응 결과 그래프	광반응 실험사진
		

### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 이산화탄소 환원용 광촉매에 대한 특허를 US Patent 1건 출원
- ACS Catalysis, ACS Applied Materials & Interfaces, Inorganic Chemistry 및 ACS Applied Energy Materials외 무기화학 촉매분야 전문학술지 10편 논문게재

#### 기술이전

- 1) TiO<sub>2</sub>기반한 비균일계 신규 이산화탄소 환원 촉매 플랫폼 기술

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- CO<sub>2</sub> 전환기술은 지구의 대기환경변화대응 및 새로운 재생에너지원 확보라는 현 시대에 시급하게 요청되는 두 가지 문제를 해결할 수 있는 새로운 기술임
- CO<sub>2</sub>를 메탄올과 같은 화학적 연료로 전환시키는 기술의 확보를 통해 에너지자원화 기술분야에서 신규 사업을 창출

#### 향후계획

- 태양광을 이용한 광촉매연구에서 상업화가 가능한 내구성과 효율을 가진 촉매시스템의 개발 사례가 없으므로 본 연구를 통해 원천 특허 확보 및 기술개발이 이루어진다면 이에 대한 향후 수요는 무궁무진할 것으로 예상되며, 산업 전반에 걸쳐 에너지 기술의 활용 방안을 제시
- 상용화 관점에서 촉매의 비균일계화를 통한 이산화탄소 환원 product의 분리공정 단순화 및 촉매회수의 용이성을 높일 수 있음



이화여자대학교 | 김진홍

## CO<sub>2</sub> 전환용 광-바이오촉매시스템 : 전자전달 물질 및 NADH 대체물질 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 생체 대사과정에서 중요한 역할을 하는 효소를 보조하는 조효소 NADH의 재생 반응연구와 그에 따른 메커니즘 연구는 국제적으로 활발히 진행되는 분야 중 하나로 NADH 가시광 재생 시스템을 개발하기 위해 최적화된 리간드의 디자인과 합성, 그리고 분자금속착화합물의 합성을 진행

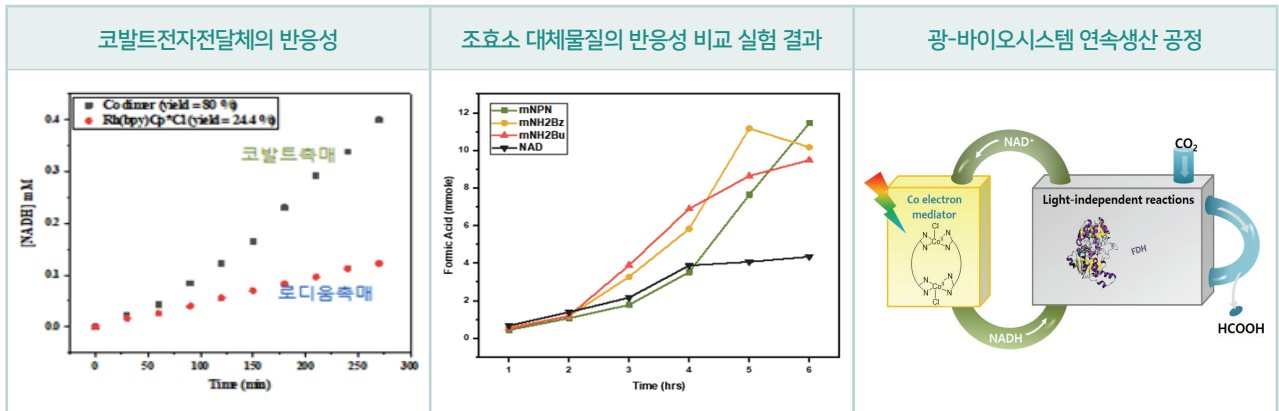
#### 주요내용

- 분자 설계에 의한 저전위 금속촉매의 개발을 통해 이산화탄소를 선택적으로 환원하여 유용한 물질을 높은 전환율로 생산하는 전자 전달 시스템을 확보함으로써 이산화탄소 제거 및 수소 저장체 개발과 관련한 환경 사업에 기여
- 조효소광재생에 의한 이산화탄소의 포름산전환용 광-바이오 시스템용 금속전자전달체 및 NADH 유사체 10종 이상 개발. 기존 금속전자전달체와 천연 NADH 보다 높은 반응성과 저가의 금속전자전달체 개발

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 광활성체/전자전달체/효소간 효율적 에너지 전달 물질 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 광활성체/전자전달체/효소 연계연구를 통한 광효율성을 높이는 신물질 개발</li> <li>· 전자전달체와 효소의 고정화를 통한 에너지 흐름을 원활하게하는 시스템을 개발</li> </ul>
02 에너지전달을 위한 광활성체/전자전달체/효소 연계연구	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 금속전달체/효소/조효소대체물질 사용, 이산화탄소 전환 광재생 : 포름산 생성 선택성&gt;99%</li> </ul>
03 조효소 광재생과 CO <sub>2</sub> 전환효소반응 최적화	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 천연조효소보다 2.0배이상 반응성의 대체물질 개발</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 국외 저널 <Journal of the American Chemical Society>에 2020년 11월 논문(IF > 10)을 게재하며, 국내 학술대회에서 5개 주제로 발표를 하였음
- 이산화탄소 전환용 니켈광촉매와 관련하여 2건의 특허 출원하였음

#### 기술이전

- 1) 조효소 광재생 전이금속촉매제조 및 광반응 공정
- 2) 조효소 대체물질 제조 및 광재생반응 활용 공정
- 3) 금속전자전달체 및 효소 고정화 공정 및 광반응 연속 공정

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 조효소 NADH 대체물질의 개발과 이들의 생화학 반응 적합성 연구는 생화학 메커니즘 연구와 조효소에 의한 전자전달 소재를 개발하여 이산화탄소를 포름산으로 전환하는 효율적인 시스템 개발에 기여할 수 있음
- 신재생에너지에 의해 이산화탄소를 광화학반응에 의해 개미산을 합성하고 이를 다양하게 전기생산, 액체연료로 활용하는 내용을 그 핵심으로 하고 있고 개념적으로 자연순환형의 기술임

#### 향후계획

- 고효율, 고선택의 가시광 직접 활용 CO<sub>2</sub> 전환 기술 완성 시, 상용화 모델로는 “순수 태양광 에너지를 이용한 고선택 CO<sub>2</sub> 전환 포름산 생산용 상용화 플랜트”이며, 현시점에서 본 기술은 상용화되어 시장이 형성되지 않은 신산업 창출 기술
- 미래 참여 대상 사업 분야인 태양광 관련 업체, 석유화학 관련업체, 철강업체, 발전업체 및 태양광 CO<sub>2</sub> 전환신규 벤처업체들과 공동 참여 및 사업방안 창출

미활용 탄소자원의 고부가가치를 창출하는  
**차세대 탄소자원화 연구단**

## 총괄4

# CO<sub>2</sub> 전환 산화-환원 융합 기술





## 자원의 미래를 연구하다

---

**세부1** CO<sub>2</sub>의 옥살산염 및 옥살산으로의 전환 기술 및 공정 개발

**세부2** 전기화학시스템을 이용한 이산화탄소 전환 에틸렌 제조 기술 개발



서강대학교 | 신 운 섭

## CO<sub>2</sub>의 옥살산염 및 옥살산으로의 전환 기술 및 공정 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 옥살산 생성 공정은 Glucose 등 질산으로 산화시켜 제조하여 친환경 공정에서는 거리가 있으나, 제약, 금속(히토류 제련) 등 다양한 산업에서 활용도가 높아 개선이 필요하였음
- CO<sub>2</sub> 전환 기술은 환원 반응의 경제성을 높일 수 있도록 산화, 환원 반응이 융합하여 안정적으로 구동할 수 있는 기술의 필요

#### 주요내용

- 전기화학적 산화/환원을 통한 CO<sub>2</sub>를 옥살산염으로 침전·분리시키는 기술과 분리된 옥살산염을 옥살산으로 전환하는 공정을 연계하여 전기화학적 공정을 통한 옥살산 제조 기술을 실현하였음
- 전기분해조 1에 아연을 효과적으로 회수하며 순도 90% 이상의 ZnC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(옥살산염)으로 전환 공정을 개발하였으며, 화학 반응조에서 효과적으로 H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(옥살산)로 전환 가능한 기술을 개발하여 100% 순도의 옥살산을 수득함

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 전기화학적 CO <sub>2</sub> 환원반응을 활용한 고선택성 옥살산염 생성 반응의 개발 및 생성 전류효율 90% 이상 구현	· 중간체 및 생성물 정량 분석법 확보, 옥살산염 전류효율 90%
02 옥살산염의 옥살산으로의 효과적이며 경제적 전환 기술 개발 : 90% 이상 전환 효율	· 기존 음이온교환막과 양이온교환막을 이용한 3 compartment cell에서의 ZnC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 의 H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 전환 → 전환효율 70% 달성 · 양이온교환막 만을 이용한 ZnC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 의 H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 및 H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 전환 공정 개발 → K <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 혹은 Na <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 로 전환효율 80~90% 확보 · 화학반응조에서 강산을 이용하여 ZnC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 를 H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 로 전환, 전환 효율 90% 이상, 순도 100% 달성
03 3 세부 과제와의 협력으로 1 kg/day 이산화탄소 전환 시스템 개발	· 0.2 kg/day 전환테스트를 기반으로 CO <sub>2</sub> 1 kg/day 전환을 목표로 스택화 기술을 적용한 시스템을 제작하여 신재생에너지와 연계하여 진행 중
04 전기화학적 옥살산염/옥살산 전환 메커니즘 연구 및 전극, 전해질 최적화	· 옥살산의 글리콜산 전기화학적 전환 메커니즘 연구 · in situ ATR-FTIR 시스템에서 전기화학적 3전극 시스템 구축



### 03 실험데이터 및 실증사진

CO <sub>2</sub> 옥살산 전환 반응 공정도	1 kg CO <sub>2</sub> /day 전환 bench-scale 전해조 모습	실제 생성한 순도 100 % 옥살산

### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- CO<sub>2</sub>의 옥살산 전환 전기화학적 공정에 대한 국내 및 국제 특허가 확보
- 확보한 특허의 사업화를 위하여 특허 포트폴리오를 구축하여 특허 강화를 위한 노력 중에 있음

#### 기술이전

- 1) 이산화탄소 기반 옥살산 생산 기술

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 공정의 상용화 시기는 2031년으로 목표하고 있으며, 연간 10,000톤의 옥살산을 생산과 동시에 약 7,000톤의 온실가스 저감의 효과를 예상함
- 옥살산은 제약, 금속, 특히 히토류의 제련과 섬유/피혁/목재의 bleaching agent, rust-remover 등으로 다양하게 활용되는 화학원료이며, 다양한 고분자 합성의 원료물질, initiator로 사용 가능하기에 확장성은 더욱 증가할 것으로 보임
- 글로벌 옥살산 시장은 ADROIT Market Research사에 따르면 17년 기준 약 6억 2,000만 달러의 규모로써 매해 4.6%로 성장할 것으로 전망하여 `25년 약 8억 8,800만 달러 규모를 예상함

#### 향후계획

- 옥살산 전환 공정 개발을 통해 전환 시스템의 설계 및 제작 중에 있으며, 고/액 분리 방안 모색 및 공정 개발과 CO<sub>2</sub> 용해 및 프로세스 개발을 진행하고자 하며, 신재생 에너지 연계를 위해 모사 프로그램을 활용한 공정 연속 공정 평가와 태양광 모듈 직접 연결 검증에 대해 진행 예정임
- 현재 Bench-Scale을 통해 하루 0.5 kg의 CO<sub>2</sub> 전해조를 가동하였음. 이를 바탕으로 1 kg CO<sub>2</sub>/day 전해조 구동 중이며, 신재생 에너지 연계 예정임



한국과학기술연구원 | 오 형 석

## 전기화학시스템을 이용한 이산화탄소 전환 에틸렌 제조 기술 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 기존 에틸렌 생성 공정은 석유나 천연가스에서 정제하여 얻는 과정으로, 고온 고압의 공정을 거치는 생성 과정에서부터 많은 온실가스를 배출하는 문제가 있음
- 탄소중립 시대를 대비할 CCU 기술로서 재생에너지 기반 전기를 이용하여 온실가스인 이산화탄소를 물과 함께 전환하여 플랫폼 화합물인 에틸렌을 제조하기 위한 환원/산화 촉매 개발 및 전기화학 시스템 기술 개발

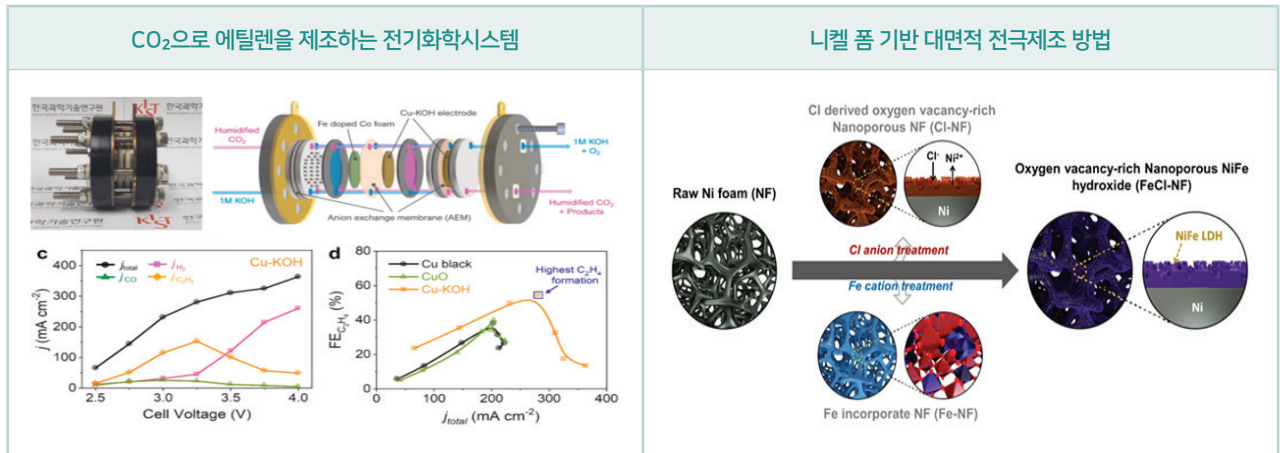
#### 주요내용

- 전기화학적 CO<sub>2</sub> 전환 에틸렌 제조 시스템 구현을 위한 세 가지 요소기술인 ① CO<sub>2</sub> 환원 촉매, ② 물산화 촉매, ③ 전기화학적 전해 시스템 등을 개발함
- CO<sub>2</sub> 전환 장치를 통해 50% 이상의 에틸렌 생성 선택도에 달성하였으며, 153 mA/cm<sup>2</sup> 규모의 에틸렌 생성 전류밀도를 기록하여 기초화학 원료제조 공정뿐만 아니라 CO<sub>2</sub> 저감 사이클에도 기여 가능한 기술 개발
- 구리 기반 나노 촉매로 CO<sub>2</sub>를 에틸렌으로 선택적으로 전환할 수 있도록 하였으며, 비귀금속 기반 물산화 촉매로 CO<sub>2</sub>의 전환에 필요한 전자 및 수소이온을 공급해줄 수 있도록 하였으며, 두 전극을 장치해 구동하는 전기화학 장치 개발 및 대면적화 연구를 수행 중

### 02 핵심기술 및 달성내용

	핵심기술	달성사항
01	고효율, 고내구성 CO <sub>2</sub> -to-에틸렌 전환 촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 가스 확산층 적용 (GDL) 전극 에틸렌 전환 선택도 54.5% 달성</li> <li>· 최대 에틸렌 생산 부분 전류밀도 153 mA/cm<sup>2</sup> 로 목표 초과 달성</li> </ul>
02	고효율 CO <sub>2</sub> 전환 에틸렌 생산 전기화학 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 대면적화를 위해 전극 면적 10 cm<sup>2</sup> 셀을 3개 스택한 30 cm<sup>2</sup> 규모의 에틸렌 생산 전기화학 반응기에서 에틸렌 50% 선택도, 총 전류밀도 6A (200 mA/cm<sup>2</sup>) 달성함</li> <li>· 100 cm<sup>2</sup> 규모의 대면적 전해 시스템 개발 수행 중</li> </ul>
03	고효율, 고내구성 물산화 촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 비귀금속 기반 FeCl 처리한 Ni foam 전극 촉매 적용하여 과전압 321mV (400 mV 이하)에서 100 mA/cm<sup>2</sup> 달성</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 전기화학적 CO<sub>2</sub>의 에틸렌 생산에 대한 촉매 물질 및 제조 방법에 대한 국내 특허 4건과 미국 특허 1건 출원
- 전기화학적 CO<sub>2</sub> 생산 촉매 개발을 위한 전기화학 반응 중 실시간 촉매 분석 및 반응기에 대한 국내 특허 2건, 통합 공정 및 디바이스에 대한 국내 특허 1건 출원을 통해 패키지를 위한 포트폴리오를 구축하였음

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 본 기술은 CO<sub>2</sub>를 원료로 고부가가치 화합물 에틸렌을 생성하므로 온실가스 배출 저감에 기여하고 에틸렌 생산을 통한 수익 창출이 가능할 것으로 기대
- 본 기술은 화석 연료에 기초한 현재의 고압 / 고온 가공 생산 시스템을 부분적으로 또는 완전히 대체함으로써 다가올 탈석유시대에 대비하는 새로운 에틸렌 제조 공정으로 활용 가능할 것으로 기대함
- 본 기술은 소재부터 시스템 기술까지 기술의 패키지화가 가능하므로 온실가스 감축 의무가 있는 기업들의 수요가 높을 것으로 기대하며 이를 통한 기술이전 성과를 기대함

#### 향후계획

- CO<sub>2</sub> 전환 시스템의 에틸렌 생산 규모의 확장을 위하여 구리 기반 촉매의 고효율화, CO<sub>2</sub> 전환 시스템의 규모 확장 연구와 물산화 촉매의 비귀금속 중성 조건 구동 합성 기술 확보를 진행 중이며, Bench scale 플랜트 설계를 통해 에틸렌 5 kg/day 생산 가능한 시스템을 기획하고 있음

미활용 탄소자원의 고부가가치를 창출하는  
**차세대 탄소자원화 연구단**

**총괄5**

# 수소 이용 CO<sub>2</sub> 전환 기술





## 자원의 미래를 연구하다

- 
- 세부1 CO<sub>2</sub> 직접수소화를 통한 액체 탄화수소 연료 제조 촉매 및 공정 개발
  - 세부2 중온-저온 2단계 CO<sub>2</sub> 수소화 메탄올합성 촉매반응공정 개발
  - 세부3 최적화 기법을 이용한 CO<sub>2</sub> 직접자원화 공정 개발 및 평가
  - 세부4 CO<sub>2</sub>의 직접방향족 화합물 제조를 위한 촉매 및 공정 개발



한국화학연구원 | 전 기 원

## CO<sub>2</sub> 직접수소화를 통한 액체 탄화수소 연료 제조 촉매 및 공정 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 재생에너지 보급이 지속적으로 증가함에 따라 변동성이 큰 재생에너지를 화학원료 형태로 저장하는 대용량 Power-to-X 기술이 필요
- 기존 CO<sub>2</sub> 화학전환 방식은 효율이 낮은 2단계 간접전환방식으로 효율이 증대된 직접전환 촉매 및 공정 기술개발 연구를 진행함



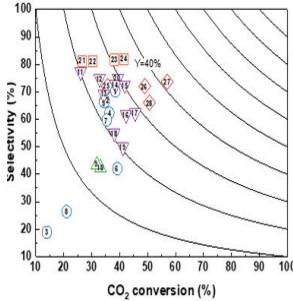



#### 주요내용

- CO<sub>2</sub> 직접전환 공정 개발을 통해 기존 간접전환 기술 대비 에너지 효율 10% 이상, CO<sub>2</sub> 감축율 7% 이상 향상된 기술을 확보하였음
- 제조가 용이하고 저렴한 Fe 계열 촉매를 개발하여 약 40%의 나프타 생산 수율을 달성함
- 개발한 촉매를 대량생산하기 위한 성형법을 최적화함
- 촉매 1000시간 시험 - 안정성 확인
- 5 kg/day 합성 나프타 생산 규모의 mini-pilot plant 시운전 성공. Dynamic operation 1000시간 운전 기술 확보중

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 촉매 성분 최적화를 통한 CO <sub>2</sub> 전환율 및 나프타 선택도 향상	<ul style="list-style-type: none"> <li>· CoFe 단원자 합금 촉매: CO<sub>2</sub> 전환율 55%, C<sub>3</sub>+ 수율 39%</li> <li>· FeCuKAl 촉매를 사용한 2단 반응 : CO<sub>2</sub> 전환율 58%, C<sub>3</sub>+ 수율 42% (TOS=150 h)</li> </ul>
02 액체탄화수소의 생산 및 에너지효율 향상	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 에너지효율 67% 이상</li> <li>· CO<sub>2</sub> 처리량 : 1.78 톤<sub>CO<sub>2</sub></sub>/톤<sub>액체연료</sub> 이상</li> </ul>
03 Mini-Pilot plant 운전	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 수전해 시스템을 연계한 5kg/day 나프타 생산 시설 실증</li> </ul>
04 재생에너지 이용 Power-to-Liquid 통합공정 개념 설계	<ul style="list-style-type: none"> <li>· PtL 통합공정 케이스별 모사 및 탄소저감·에너지 효율 최적화</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진

5 kg/day 나프타 생산 시설	생산된 액체 탄화수소	촉매 성능 및 성형 촉매
		 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>촉매 압출</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>촉매 성형</p> </div> </div> <div style="text-align: center;">  <p>확대 이미지</p> </div>

### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 특허출원으로 '촉매 물질 및 탄화수소 제조 방법', '반응기 및 장치', '반응 기술 및 반응 공정', '통합공정 및 시스템' 분야별 진행되고 있어 이후 공정 기술에 대한 패키지를 구축하고 있음
- 최근 국외 저널 최고 권위지인 'ACS Catalysis' 2월호에 게재되며 원천 기술에서부터 공정 패키지까지 확보하고 있음

#### 기술이전

- 1) 이산화탄소 직접수소화 공정 및 그 시스템
- 2) 이산화탄소로부터 나프타 생산을 위한 고효율 촉매 및 그 제조 방법

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 나프타는 석유화학 기초원료이나 원유(석유) 정제과정에서 얻어지며 휘발유의 원료로 사용되어 국내 석유화학 산업에서의 소비량이 매우 큰 비중을 차지함
- 2030년 8~10 만톤/년 규모 상용화 가능. 2040년 이후 연간 그린 나프타 250만 톤 생산에 의한 CO<sub>2</sub>의 450만 톤 저감
- 세계 나프타 사용 규모는 IMARC Group 사에 따르면 2020년에 사용량이 3억 1,310만 톤으로 전 세계적으로 많이 사용하고 있으며, 세계 나프타 시장 규모 또한 Expert Market Research 사에 따르면 3.0%의 연평균 성장률로 2026년에는 1,818억 원에 이를 것으로 예상됨

#### 향후계획

- 실증형 파일럿 플랜트 운영을 통해 재생에너지 연계 CO<sub>2</sub> 직접 전환 탄화수소 화합물 실증 사업을 구축하고자 하고 있으며, 8.4 만톤/년 규모의 상용공정 기반 기술 확보를 위한 노력을 하고 있음
- Mini-Pilot plant 제작 및 설비를 통해 P2L 통합 공정 케이스별 연구와 함께 5 kg/day 이상의 설비 운영 공정 패키지 구축을 진행 중에 있음
- 최적화된 실증공정을 바탕으로 수전해에 의한 수소 생산(그린수소) 시스템 연계와 함께 고효율 액상 나프타·연료 및 합성 도시가스 동시 생산 공정을 구축하고자 함



한국과학기술연구원 | 김 홍 곤

## 중온-저온 2단계 CO<sub>2</sub> 수소화 메탄올합성 촉매반응공정 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 메탄올은 연료 및 다양한 유기화합물 제조에 사용되는 기초화합물이지만 수입에 의존하고 있으며, 메탄·납사·석탄·CO<sub>2</sub> 등을 높은 온도에서 합성가스로 전환시킨 후 수소와 반응시켜 제조하는 기존 방식을 해결하고자 CO<sub>2</sub>를 직접 수소와 반응시키는 낮은 온도에서의 CO<sub>2</sub>-to-메탄올 전환기술을 실현함

#### 주요내용

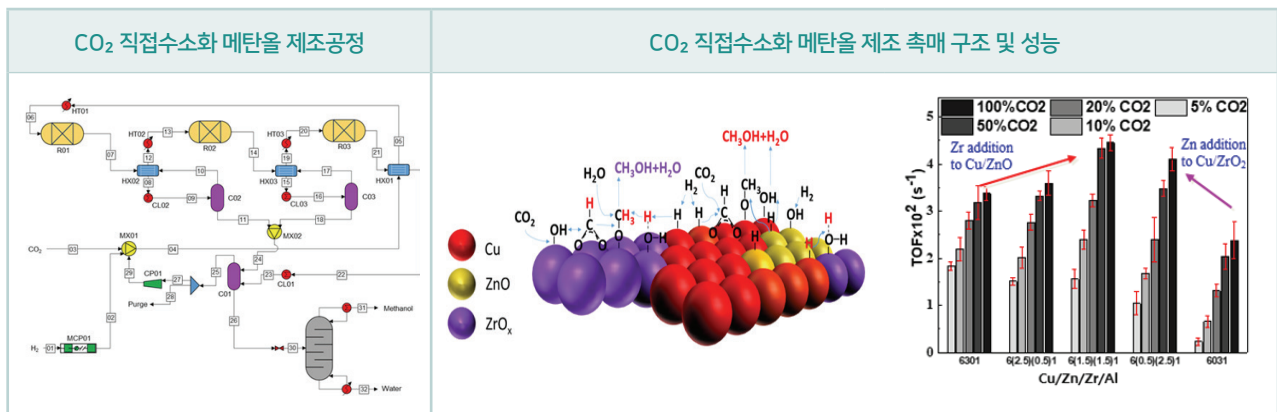
- 다단반응 적용과 단계별 반응기에 적합한 CO<sub>2</sub> 직접수소화용 촉매를 개발하여, 메탄올 제조수율과 촉매 내구성을 향상시키는 반응기술 확보
- 다단반응 적용 공정 최적화를 통해 반응 후 생성물을 제거하면서 열에너지를 효율적으로 활용하여 메탄올 제조수율을 높이고 촉매 비활성화를 완화하는 반응기술을 개발하여, 기존공정 대비 최대 27% 비용절감이 가능한 재생에너지 활용 메탄올 제조공정을 고안함
- 구리계 촉매에 산화질코니움을 함유시켜 CO<sub>2</sub> 직접 수소화 메탄올 합성에 적합하게 하였으며, 촉매의 메커니즘과 최적 조성을 조사하여 상용 메탄올 제조 촉매보다 활성이 높고 온도 충격 안정성이 향상된 개량 촉매 제조기술을 확보함

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 기상 메탄올 합성 촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· CO<sub>2</sub> 수소화 메탄올 합성에 적합한 촉매(Cu/Zn/Zr/Al계) 개발</li> <li>· 촉매활성: 메탄올 수율 &gt;15%, 생산성 &gt;550g/kgcat·h 달성</li> <li>· 촉매활성 감소속도: 초기활성 대비 &lt;6%/100h</li> </ul>
02 Bench-scale 단위장치 설치 및 운전조건 최적화	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Bench-scale (2.4 kg/day 메탄올 규모) 반응시스템 설치</li> <li>· 미반응 기체 분리와 재공급을 포함한 순환식 반응공정의 운전조건 최적화</li> <li>· 2단 반응기의 per pass MeOH 수율 &gt;20% 확보</li> <li>· 연속적 운전, 단속적 운전에서 공정 및 촉매 안정성 조사</li> </ul>
03 소형 pilot plant 기본설계	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 공정 개념설계 (CO<sub>2</sub> 처리량 &gt;0.81 MT/MT MeOH, 에너지효율 &gt;79%)</li> <li>· 소형 pilot plant (100 MT/년 MeOH) 기본설계 수행 중</li> </ul>



### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 국내 특허로 '다단반응을 이용한 개선된 메탄올 제조방법 및 장치' 기술에 대한 특허 1건 등록
- 국외 저널 'ACS Catalysis(2019)', 'Applied Catalysis B: Environmental (2019)', 'Int. J. Energy Res.(2020)'에 CO<sub>2</sub> 전환 메탄올 제조용 구리계 촉매의 비활성화 현상, 산화질코니움 도입으로 CO<sub>2</sub> 직접수소화반응에 적합하게 개량한 촉매 개발, 다단반응 적용 공정 최적화에 대한 논문을 게재

#### 기술이전

(기술이전 가능 내용)

- 1) 내구성을 향상시킨 메탄올 합성 촉매 (개선된 CZZA계 촉매 준비 중)
- 2) 다단반응을 이용한 메탄올 제조 장치

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 메탄올은 자체로 청정연료로 사용되거나 여러 유기화합물 제조의 원료로 사용되고, 지방족 올레핀이나 파라핀 등 다른 탄화수소로도 전환되어 가솔린 혼합제 등 연료로 사용되거나 고분자 합성용 화학제품 제조의 원료로 사용됨
- CO<sub>2</sub> 자원화를 통한 메탄올 제조공정 개발로 2030년에 30만톤/년 규모의 메탄올 생산을 통해 수입 대체효과와 42만톤/년 규모의 온실가스 감축효과를 함께 기대함
- Fortune Business Insights사에 따르면 메탄올 세계 시장은 2019년 285억 달러 규모이고 약 4.6%의 연평균성장률로 커질 것으로 전망하여 2027년 404.8억 달러의 시장 규모를 예상함

#### 향후계획

- Bench-Scale 촉매반응공정 운전결과와 실증형 Pilot Plant 기본설계를 바탕으로 기업과 협업하여 Pilot Plant 건설 및 실증 공정 최적화 연구를 수행하여 공정 Scale-up 기술을 확립할 예정임
- 최적화된 실증공정을 바탕으로 메탄올 5만톤/년 생산 규모의 상용공장 기본설계를 수행하여 상용화 기반을 구축할 계획임



성균관대학교 | 김 지 용

## 최적화 기법을 이용한 CO<sub>2</sub> 직접자원화 공정 개발 및 평가

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 탄소 자원화 전략 실증화를 위하여 상용급 이산화탄소 기반 다양한 에너지 생산 기술을 기술적, 경제적 타당성 분석이 매우 시급한 현안 중 하나임. 이에 포집된 이산화탄소는 물론 다양한 탄소자원 (예, 매립지 가스, 부생 가스 등)을 이용하여 72 여가지의 에너지 전환 기술을 개발 및 평가를 수행하였음
- 특히 탄소 자원화의 큰 장애요소 중 하나인 고비용 수소 공급 전략에 따른 최적 기술을 규명할 필요가 있고, 실제 탄소 자원화를 위한 다양한 의사결정 문제 (예, 기술 선정, 크기 선정, 위치 선정 및 투자 전략 등)을 최적화 기법을 이용하여 국내 실정에 적합한 실효적인 해견안을 도출 함

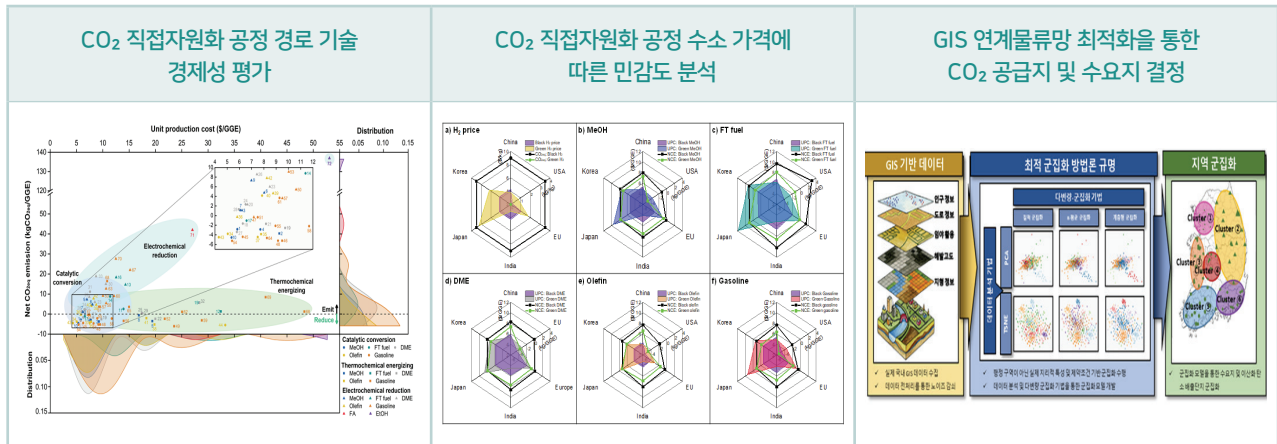
#### 주요내용

- 촉매 반응, 전기화학적 전환 등 72 종의 CO<sub>2</sub> 자원화 기술에 관한 공정 설계 및 기술경제성 평가 수행
- 화석연료 기반 수소, 신재생에너지 기반 수소 및 화석연료 기반 전기, 신재생에너지 기반 전기 등 원료 및 유틸리티 사용에 있어 4가지 시나리오를 구성하여 CO<sub>2</sub> 직접자원화에 적합한 유틸리티 사용 시나리오 규명
- 연계 물류망 최적화 기법 개발 및 실제 GIS 기반 데이터 수집을 통하여 국내 탄소 자원화 전략에 필요한 다양한 의사결정 문제 해결안 도출

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 시간확장망 기법 기반 CO <sub>2</sub> 직접자원화 공정 최적 생산 계획 모델 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>시간확장망 기법 기반 최적화 모델 개발</li> <li>기술상부구조 기반 57개의 공정 모델 개발</li> <li>최적화 모델을 통한 최적 경로 규명</li> </ul>
02 가격, 수요, 원료수급 등 다양한 외부 변수 변화 기반 경제성 민감도분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>유틸리티 수급 방법에 따른 민감도 분석 수행</li> <li>수소 가격 및 수급 방법에 따른 민감도 분석 수행</li> </ul>
03 연계물류망 기반 네트워크 최적화 모델	<ul style="list-style-type: none"> <li>국내 실제 데이터 및 지리적 환경에 적합한 최적의 탄소 및 생산 에너지 공급망 구축 및 투자 전략 수립</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- Energy & Environmental Science, Fuel, Energy, Energy Conversion and Management 와 같은 국외 학술지 논문에 게재함
- 매립가스를 통한 메탄올 생산에 대한 기술과 이산화탄소의 직접수소화 관련 기술에 대한 특허 2건 출원 중에 있음

#### 기술이전

다음의 주요 기술 이전 가능

- 1) 상용급 이산화탄소 자원화 공정 72 종 설계집 및 평가 결과
- 2) 국내 탄소자원화 가치 사슬 구축을 위한 설계 및 운영 전략

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 국가 차원에서의 투자사업에서, 장애기술 및 한계기술 (예, 촉매의 전환율, 반응기 구조, 분리 기술 등)에 대하여 규명할 수 있는 정보를 제공하고, 이를 바탕으로 국가 자원화 사업의 타당성을 제고할 수 있으며, 효율적인 자본운영에 기여
- 에너지 빈국인 한국에 CO<sub>2</sub> 자원화에 대한 깊고 넓은 통찰을 제공하여 국가차원에서 대규모 투자 및 인프라 구성에 대한 필요성을 제시하여 관련 산업의 확대 및 선진화에 기여

#### 향후계획

- 사업장의 위치들을 고려하기 위해 국내 CO<sub>2</sub> 직접자원화 전략 용 지리적정보시스템을 개발할 계획
- 상용화 플랜트 및 운전되고 있는 상용 공정에 대한 운전 데이터 및 경제성 데이터들을 Reference로 하여 차년도에 상용화 플랜트 프로젝트 모사를 진행할 계획



성균관대학교 | 김 재 훈

## CO<sub>2</sub>의 직접방향족 화합물 제조를 위한 촉매 및 공정 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 화석연료 사용에 따라 CO<sub>2</sub> 배출 문제가 나타나 기후변화가 발생하는 상황이나 화석연료의 대체 방안이 없기에 CO<sub>2</sub> 직접수소화를 시켜 감소시키고, 산업에서 활용도가 높은 화학연료를 생산하기에 이룸

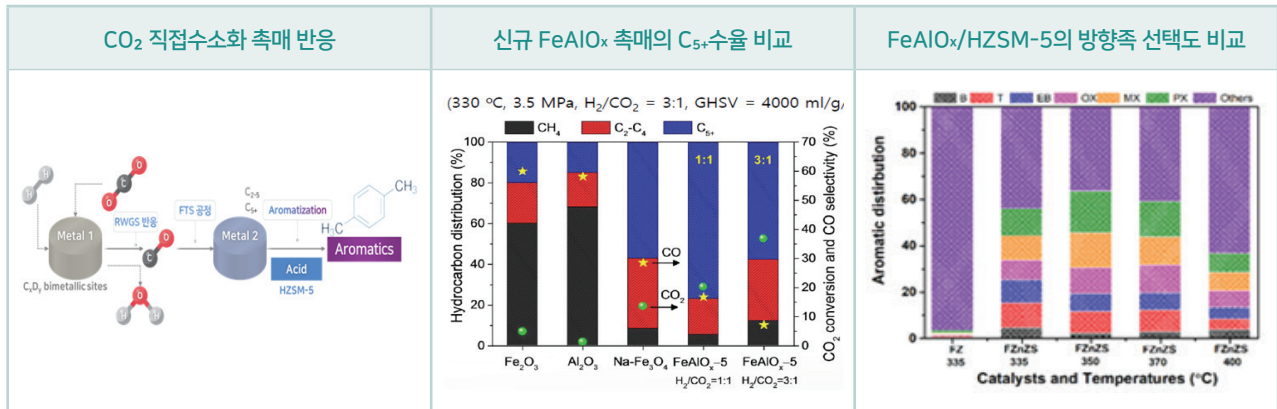
#### 주요내용

- 철계 촉매와 제올라이트의 복합촉매 제조 통해 45%의 높은 CO<sub>2</sub> 전환율과 함께 38.7%의 높은 방향족 선택도를 나타내며, 방향족 화합물 중 BTEX의 선택도가 59%로 높은 수치를 달성하여 고부가방향족 화합물 제조를 할 수 있음
- 촉매의 물리화학적 성질 조절을 통해 방향족 화합물 수율을 향상시킬수 있었으며, BTEX의 공간수율 4mmol/g·h 및 파라자일렌 공간수율 1.0 mmol/g·h를 확보하였음
- 알파올레핀 합성 메커니즘의 원리 규명, 방향족 화합물 합성 원리 규명과 함께 제올라이트 기공의 산점 분포 조절, 외부산점 억제, 철계 촉매와 제올라이트 복합화 방법 등을 연구하여 다양한 연료 및 화학소재를 선택적으로 생산 가능함

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 HZSM-5 성질 제어를 통한 촉매활성 개선	· Zn-doping을 이용한 HZSM-5의 Lewis acidity 향상으로 dehydrogenation activity 향상
02 HZSM-5 성질 제어에 따른 방향족 탄소 전환 메커니즘 변화 탐색	· Zn-doped HZSM-5의 외부 표면에 SiO <sub>2</sub> 코팅을 수행하여 HZSM-5 외부에서 과도한 alkylation을 억제하여 BTEX 선택도 향상
03 촉매를 이용하여 공정변수를 조절하면서 CO <sub>2</sub> 로부터 BTEX 선택도 향상	<ul style="list-style-type: none"> <li>· CO<sub>2</sub> 전환율 45%</li> <li>· 방향족 화합물 선택도 38.7%</li> <li>· BTEX 선택도 22.8%</li> <li>· PX 선택도 5.9%</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 특허출원으로 'CO<sub>2</sub>로부터 방향족 화합물을 효과적으로 제조할 수 있는 철계 촉매 설계'에 대한 연구를 통해 특허를 출원한 상태
- 2020년 국제 저명 학술지 'ACS Catalysis' 8월호에 게재되며 촉매 반응의 메커니즘 원리 규명부터 철계촉매와 제올라이트 복합화 방법 등 기술을 확보하여 국내외 특허 출원 중에 있음

#### 기술이전

- 1) 고수율 장쇄 알파 올레핀 합성을 위한 철계 촉매
- 2) 철계/제올라이트 복합 촉매를 이용한 방향족 화합물 합성

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 방향족 화학제품 BTX는 전체 석유화학제품 중 생산량 1위로 일회용품 및 다양한 플라스틱, 건축자재 및 가전제품 내외장재, 섬유까지 활용도가 매우 다양하며 국내에서의 소비도 증가 추세임
- 세계 BTX 시장 규모에 대해 Market Watch 사에 따르면 2018년에 1,626.6억 달러의 시장 규모로 매해 5.9% 연평균 성장률로 성장하여 2027년에는 2,747.8억 달러의 큰 시장을 형성할 것으로 전망하고 있음

#### 향후계획

- 촉매 및 공정 메커니즘 증명을 통해 Bench-Scale 및 Mini-pilot 실증을 위한 연구 진행 중에 있으며, 촉매 성형 기술을 통해 고도화를 구상하고 있음
- 실증사업을 위한 최종생성물의 전환율을 방향족의 경우 60%까지 올림과 동시에 BTX, PX의 효율도 같이 향상 시킬 예정임
- CO<sub>2</sub>의 직접수소화 촉매 개발을 위해 장주쇄 알파 올레핀 합성 촉매용 다른 성분 후보군의 철계촉매 효과 테스트를 통해 장기운전성이 확보된 새로운 촉매 개발 예정임

미활용 탄소자원의 고부가가치를 창출하는  
**차세대 탄소자원화 연구단**

## 총괄6

# 바이오알코올 - CO<sub>2</sub> 동시전환 기술





## 자원의 미래를 연구하다

---

**세부1** 글리세롤 활용 이산화탄소 동시전환 불균일 촉매 개발

**세부2** 바이오 알코올 기반 CO<sub>2</sub> 동시전환 불균일 촉매기술 계산화학기법 개발



한국화학연구원 | 황 영 규

## 글리세롤 활용 이산화탄소 동시전환 불균일 촉매 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 바이오디젤 생산의 증가에 따라 글리세롤이 부산물로 만들어지는데, 글리세롤의 수소를 활용하여 생분해성 플라스틱 원료인 젖산을 생산하는 연구가 진행되고 있으며, 연구를 통해 CO<sub>2</sub>과 함께 동시전환하는 공정 기술을 개발함



#### 주요내용

- 동시전환의 수소화 반응은 기존 촉매 분야에서 활용이 수소가스를 활용한 연구로 운반이 위험하고 사용이 어려움이 있었으나, 액상 수소원을 활용한 연구로 보다 안정성과 편리성을 갖추
- ‘탈수소화 반응’과 ‘수소화반응’을 동시 이끌어내는 촉매는 금속유기골격체에 루테튬(Ru)원자가 있는 분자체의 탄화공정을 통해 나노촉매 (Ru/NCT)를 제조하여 공정을 진행을 이끌어 낼 수 있었음
- 촉매 활성이 10~20배 높은 활성과 생산량이 2배 정도 높은 수치로 전환빈도(TOF; TurnOver Frequency)의 경우 젖산이 548, 포름산 164으로 매우 높게 나타나, 단위 부피 시간당 젖산 600g/L·day, 포름산 60g/L·day에 달성함

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 이산화탄소와 바이오알코올 동시전환 불균일 촉매기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 바이오기반 알코올 활용 이산화탄소 동시전환 포름산 유도체 제조 원천 촉매 개발</li> <li>· 촉매 고정화를 통한 촉매 이용, 재사용 가능 불균일계촉매 개발</li> <li>· 이산화탄소와 글리세롤의 동시전환을 통한 젖산유도체 제조기술 개발</li> </ul>
02 글리세롤-탄산 동시전환 공정화 요소 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 젖산/포름산 시간당 촉매활성 (TOF) 548, 164 달성</li> <li>· 단위부피시간당 생산량 (STY) 젖산유도체 &gt;600, 포름산 유도체&gt;60g/L·day 달성</li> <li>· 추가염기 사용없는 조건에서 젖산유도체 수율 80%</li> <li>· 포름산 유도체 수율 60% 달성</li> </ul>
03 촉매 성형기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 동시전환용 재사용 가능한 고효율 Ru 나노입자 담지 카본 촉매 개발</li> <li>· 귀금속 기반 촉매 및 염기사용 조건에서 포르메이트 수율 60%, 젖산유도체 수율 80% (연속식 반응)</li> </ul>
04 벤치규모 생성물 및 부산물 분리공정 통합 연계 요소기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 반응물 및 생성물 분리 기술 1건 개발</li> <li>· 젖산 및 포름산 에스테르화 제품 회수율 90% 이상 확보</li> <li>· 무기탄산염 회수공정 개발</li> </ul>



### 03 실험데이터 및 실증사진

CO <sub>2</sub> 와 글리세롤 동시전환촉매 기술	반회분식 고압반응기	통합반응공정의 개략도
 <p>Glycerol CO<sub>2</sub></p> <p>MMHNT</p> <p>젖산 포름산</p> <p>✓ 높은 촉매 활성 ✓ 높은 공시공간 수율 ✓ 촉매 재사용 가능</p>		 <p>수소생산</p> <p>C-A 공정</p> <p>CO<sub>2</sub> 정제</p> <p>반응기</p> <p>분리</p> <p>정제</p> <p>젖산</p> <p>포름산</p>

### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 특허출원으로 탈수소화 반응과 수소화 반응에 필요한 촉매복합체 관련 특허를 포함하여 현재 6건의 특허가 출원 및 등록 진행 중에 있음
- 국제 저명 학술지 'ACS Catalysis' `20년 3월호에 바이오매스 상온 수소화반응 기술에 대해 소개 되었으며, 물질화학(Chemistry of Materials) `20년 12월 호에도 표지논문으로 발표되어 여러 분야로 우수성에 대해 두각을 나타내고 있음

#### 기술이전

- 1) 바이오디젤 부산물 기반의 젖산 및 유도체 생산기술
- 2) 바이오수소 기반 이산화탄소 전환 기술
- 3) 젖산 및 포름산 동시생산 통합공정 기술

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 젖산(Lactate)은 미생물억제제, 항균제, 보존료, 필링제, 피부재생 등 다양한 역할에 사용되어 활용도가 매우 높은 화학소재이며, 포름산(Formate)도 방부제, 섬유산업, 염색 및 정제 등 활용되어 생성물 모두 여러 산업군에 활용되는 성분임
- 세계 젖산 시장 규모는 Markets and Markets 사에 따르면 2020년 이후 약 12.8%의 성장률로 빠르게 성장할 것으로 `25년 약 20억 달러의 규모를 예상하며, 세계 포름산 시장 규모는 Data Intelco 사에 따르면 2018년 이후 약 1.3%의 성장률 꾸준한 소비가 있을 것으로 전망함

#### 향후계획

- 실증 사업으로 300 kg/day 규모의 파일럿 공정 실증을 `22년도에 진행 예정이며, 촉매 최적화 모델링 기술을 최적 생산 계획 수립 및 생산성 향상을 위한 연구 진행 중
- 사업화를 위해 `30년까지 이산화탄소 5,000ton/year 전환용 공정을 확보할 예정이며, Pilot 구축 구체화 및 협의중에 있어 글리세롤 이외의 저활용 유기설폐기물과의 동시전환 공정에도 연구 진행 중



울산대학교 | 정 재 훈

## 바이오 알코올 기반 CO<sub>2</sub> 동시전환 불균일 촉매기술 계산화학기법 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 이산화탄소-바이오알코올 동시전환용 균일 및 불균일 촉매 개발을 지원하기 위해서 계산화학적 방법을 활용하여 촉매 후보물질 스크리닝 및 촉매반응 메커니즘 해석을 수행하고, 이를 통해 도출한 촉매 디자인의 핵심인자를 활용하여 촉매 개선 방안을 탐색하고자 함

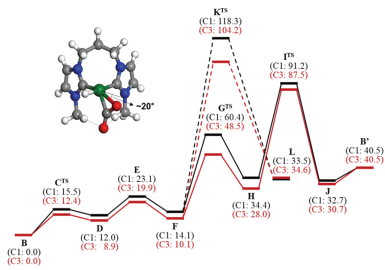
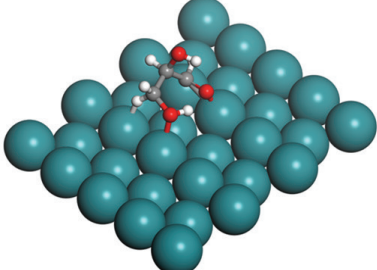
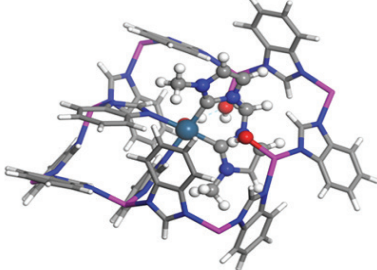
#### 주요내용

- 밀도범함수이론에 기반한 계산화학적 접근법을 활용하여 효율적인 이산화탄소-바이오알코올 동시전환용 균일 및 불균일 촉매소재 설계기술 개발
- 가능성이 높은 후보물질 탐색 프로세스 정립 및 실험연구그룹과의 공동연구를 통해 고부가가치 원천촉매 개발에 최적화된 시스템 구축

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 이산화탄소-바이오알코올 동시전환메커니즘이론적 규명 및 동시전환 촉매소재 설계기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 촉매 후보물질 스크리닝 계산 및 개발된 촉매의 메커니즘 이론적 규명</li> <li>· 리간드 조절을 통한 유기금속 균일 촉매 설계기술 개발</li> <li>· 전이금속 활용 표면개질을 통한 불균일 촉매 설계기술 개발</li> </ul>
02 다양한 촉매 설계 핵심인자 탐색	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 촉매시스템의 염기성 평가, 바이오알코올의 종류에 따른 수소탈거 에너지, 이산화탄소 등 반응물 흡착 에너지, 전이상태 에너지 및 구조 분석, 생성물 분리에너지 등</li> </ul>
03 구조-물성 상관관계 확립 및 촉매효율 향상을 위한 최적화	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 촉매활성 및 선택성에 대한 구조-물성 상관관계를 확립하고, 이를 이용하여 촉매효율 극대화시킬 수 있는 설계 기술 개발</li> <li>· 촉매활성을 개선하기 위한 전이금속원소의 치환효과에 따른 반응 메커니즘 및 반응성 해석</li> </ul>
04 금속-유기물 골격 화합물과 균일촉매의 하이브리드 촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 금속-유기물 골격 화합물 내 균일촉매의 담지구조 해석</li> <li>· 이론적인 XANES 스펙트럼 전산모사</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진

이산화탄소-바이오알코올 동시전환 메커니즘 이론적 규명	바이오알코올 탈수소화 반응에 생성물 흡착 구조	MOF 화합물 구조 내부 Ir(III) 촉매의 담지구조 전산모사
		

### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 이산화탄소-바이오알코올 동시전환용 균일 및 불균일 촉매의 반응 메커니즘의 계산화학적 연구를 통해 촉매구조와 활성에 대한 상관관계 해석
- 불균일 촉매 표면의 동시전환 반응성을 향상시킬 수 있는 도핑원소 제시
- 실험적으로 밝히기 어려운 유기물-금속 골격 화합물 내 균일 촉매구조의 담지구조에 대한 이론적 해석

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 실험-이론계산 공동연구를 통한 촉매 개발 플랫폼은 이후 다양한 촉매개발에 있어서도 이상적인 접근법이 될 수 있음

#### 향후계획

- 촉매개발을 지원하기 위해서 계산화학적 방법을 활용하여 촉매후보물질 스크리닝과 촉매반응 메커니즘 해석을 진행, 촉매 개발 플랫폼은 이후 다양한 촉매개발에 있어서도 이상적인 접근법이 될 수 있음

미활용 탄소자원의 고부가가치를 창출하는  
**차세대 탄소자원화 연구단**

**총괄7**

# 식물자원-CO<sub>2</sub> 전환고분자 제조기술





## 자원의 미래를 연구하다

---

**세부1** 유기성 폐자원 활용 및 CO<sub>2</sub> 전환 기능성 고분자 소재 개발

**세부2** 고효율, 고선택성 균일 유기금속촉매 기반 유기성폐자원 및 CO<sub>2</sub> 전환 폴리머 플랫폼 제조 개발

**세부3** 유기성 폐자원 활용 퓨란계 폴리머 플랫폼 제조 촉매공정 개발



성균관대학교 | 손성욱

## 유기성 폐자원 활용 및 CO<sub>2</sub> 전환 기능성 고분자 소재 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 플라스틱 활용의 증가에 따라 기존의 석유기반 플라스틱 제조공정이 아닌 식물자원과 온실가스 주범인 CO<sub>2</sub>를 활용한 플라스틱 제조로 지속가능한 과학기술을 개발하고자 함

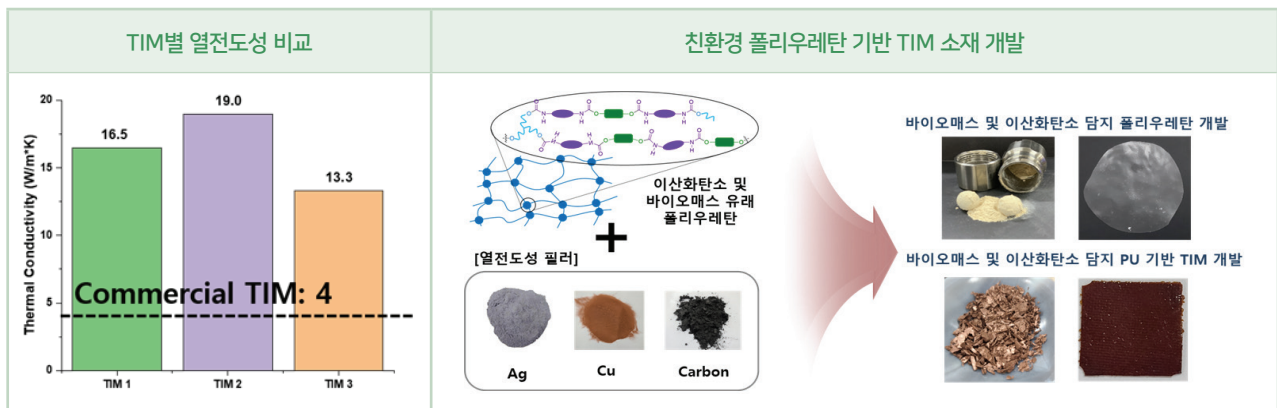
#### 주요내용

- 은, 구리, 탄소 등의 전도성 기능성 필러 물질을 함유하는 복합소재를 개발하여 배터리, 전자기기의 열에 의한 고장을 방지하는 고부가가치 방열 필름소재를 제조함
- 폴리우레탄 TIM 소재 개발에 Spark Plasma Sintering 기법을 적용하여 공정온도 감소로 에너지 절감과 함께 제조 시간을 줄일 수 있음
- 친환경 기능성 폴리우레탄 합성을 통해 상용화 가능한 방열소재(TIM)를 개발하였으며, 열전도도 13.3~19.0 W/m·K 달성하여 열 분산의 효과가 우수함

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 식물자원 및 이산화탄소 유래 폴리우레탄 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 식물 자원 유래 폴리우레탄 소재 11종 개발</li> <li>· 식물 자원 및 이산화탄소 동시 활용 폴리우레탄 소재 6종 개발</li> </ul>
02 폴리우레탄 기반 열분산 박막소재 (TIM) 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 폴리우레탄 기반 열분산 복합 소재 2종 합성</li> <li>· 열분산 고분자 복합 소재 박막 제조 기술 2종 개발</li> </ul>
03 열분산 박막소재 열전도도	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 폴리우레탄기반 열분산 박막소재 열전도도 13.3 ~ 19.0 W/m.K달성</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 폴리우레탄 소재 및 합성법에 대해 2건 특허 출원
- 국제 학술지 'Chemical Communications' 2020년 겔표지 논문 선정
- 2021년 'ACS Sustainable Chemistry & Engineering' 게재포함 SCI급 논문 12편을 발간하였음

#### 기술이전

- 1) 식물유래 폴리머 플랫폼 활용 폴리우레탄 소재 및 제조법
- 2) 식물 및 이산화탄소 전환 폴리머 플랫폼 활용 폴리우레탄 소재 및 제조법
- 3) 은/구리/탄소 필러내포 그린탄소 폴리우레탄 복합체 및 방열 박막 소재 및 제조법

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 폴리우레탄은 열경화성 수지와 유사한 구조로 질기고 화학약품에 잘 견디는 특성을 가지고 있어 전기절연체, 구조재, 기포단열재, 기포쿠션, 탄성섬유 등 다양한 활용도를 가지고 있으며 신축성 또한 우수하여 고무의 대체물질로도 사용됨
- 세계 폴리우레탄 시장 규모는 Grand View Research사에 따르면 2020년 이후 약 3.8%의 성장률을 예상하여 `28년 약 952억 달러의 규모를 예상하며, 기존 CO<sub>2</sub> 기반의 폴리우레탄 소재의 그린탄소 함량은 5.5%에 불과하지만, 본 기술을 통해 약 3배 이상인 15~20% 수준으로 함유하여 온실가스 절감을 기대 할 수 있음

#### 향후계획

- 실증 사업으로 파일럿 공정 실증을 `22년부터 `25년도까지 진행 예정이며, 촉매 최적화 모델링 기술을 최적 생산 계획 수립 및 생산성 향상을 위해 연구 중임
- 기술 실증사업을 목표로 폴리우레탄 및 TIM 박막 데모제품 생산 계획 수립 및 최적화를 통해 사업화준비에 대비하고 있음



경희대학교 | 강은주

## 고효율, 고선택성 균일 유기금속촉매 기반 유기성 폐자원 및 CO<sub>2</sub> 전환 폴리머 플랫폼 제조 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- CO<sub>2</sub>와 에폭사이드의 고리형 카보네이트 제조 공정은 Zn, Co, Al, Nd 등의 중심 금속을 사용해왔는데, 이 중 고온에서 진행되는 CO<sub>2</sub> 전환 반응은 CO<sub>2</sub> 저감효과가 상쇄되어 저온과 저압에서의 전환 시스템 개발이 필요함
- CO<sub>2</sub>와 바이오매스 유래 화학종이 동시에 포함된 폴리머 플랫폼 개발은 전세계적인 탄소중립 흐름에 부합하는 폴리머 개발 연구임

#### 주요내용

- 다기능 이중 리간드 철 착물 촉매는 수소결합주개와 전자쌍주개 작용기를 내포하여, 0.050 mol% 철 착물을 이용해 60°C에서 고리형 카보네이트를 제조함
- 철 촉매를 이용한 반응은 수율 99%로 부산물과 불순물이 거의 없는 반응이며, 저온 및 저압 조건에서 반응이 진행되어 열적 안정도가 낮은 바이오 유래 화합물을 포함한 제조 공정에서도 효과적으로 적용 가능함
- 기존의 CO<sub>2</sub>-바이오매스 유래 폴리우레탄 소재의 그린탄소 함량은 18 wt%에 불과하였으나, 본 기술을 통해 개발한 폴리머 플랫폼은 51 wt%로 온실가스 저감에 매우 효과적임

### 02 핵심기술 및 달성내용

	핵심기술	달성사항
01	CO <sub>2</sub> 및 퓨란 디올을 함유한 고리형 카보네이트 합성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 바이오매스 유래 퓨란 디올을 포함한 말단 에폭사이드 물질 합성, 수율 82%</li> <li>· 다기능 철계 촉매 시스템을 이용하여 CO<sub>2</sub> 전환 고리형 카보네이트 합성, 수율 94%</li> </ul>
02	카보네이트 개환반응을 통한 카바메이트 디올 합성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 카보네이트 개환반응을 통한 카바메이트 디올 폴리머 플랫폼 4종 합성, 플랫폼 2종 전환율 90% 달성</li> </ul>
03	자기조립법을 이용한 다기능 철-리간드 촉매계 합성법 최적화	<ul style="list-style-type: none"> <li>· CO<sub>2</sub> 활성화를 위한 이미다졸, 에폭사이드 활성화를 위한 알코올 작용기를 내포한 이미노피리딘 리간드-철 균일 촉매의 자기조립 합성법 최적화 확립</li> </ul>
04	실리카 지지체에 리간드를 고정하여 비균일 철 촉매계 합성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 고정지지체에 부착된 철 촉매 시스템으로 60°C, TON 3600 성과 달성</li> </ul>



### 03 실험데이터 및 실증사진

다기능성 리간드-철 촉매 구조	CO <sub>2</sub> 및 그린 탄소를 함유한 고리형 카보네이트	카바메이트 폴리올 플랫폼
		

### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 철 착물 촉매, 이의 제조방법 및 상기 촉매를 이용한 환형 카보네이트 제조방법에 관련된 특허 3건 등록, 관련 연구논문 3편
- 그린 폴리머 플랫폼 제조 관련 연구에 대한 연구논문 1편을 발간하였으며 지적재산권 확보 추진 중

#### 기술이전

- 1) 철 착물 촉매 및 상기 촉매를 이용한 환형 카보네이트 제조방법
- 2) 이중 리간드 철 착물 촉매, 이의 제조방법 및 상기 촉매를 이용한 환형 카보네이트 제조방법
- 3) 이산화탄소와 바이오매스유래 화합물을 동시에 포함한 카바메이트 폴리올 및 이의 제조방법

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 고리형 카보네이트는 폴리카보네이트(polycarbonate, PC)의 원료로, PC는 내열성, 내충격성 및 투명성이 좋기에 상품 플라스틱과 엔지니어링 플라스틱, 유리 대용 플라스틱으로 사용되며 광저장매체 소재의 원료까지 사용될 수 있는 고기능성 플라스틱임
- 세계 폴리카보네이트 시장 규모는 Grand View Research 사에 따르면 2016년 이후 약 6.9%의 성장률을 예상하여 `24년 약 431억 달러의 규모를 예상하며, 고기능성 폴리우레탄과 친환경 제품에 대한 수요가 많아지고 있어 가격 및 시장 규모가 빠르게 성장하고 있음

#### 향후계획

- 실증 사업으로 Scale-up 기술 구현 가능성 검토 전에 재사용 가능성을 극대화하기 위해 촉매 지지체의 성능 최적화 진행 후 구현을 위한 협업 예상
- 철 촉매와 다기능성 리간드에 대한 연구를 진행 중에 있으며, 새로운 다기능성 리간드를 이용한 가능성을 검토하고 있으며, 현재 개발한 리간드의 효율을 높이하고자 함



한양대학교 | 서영웅

## 유기성 폐자원 활용 퓨란계 폴리머 플랫폼 제조 촉매공정 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 식물계 폐자원으로부터 얻어지는 퓨란 다이올은 카보네이트 폴리머의 원재료로 활용되는데, 기존의 폴리카보네이트 제조공정에서 인체에 유해한 물질이 나오거나, 석유 물질을 통한 제조 공정을 통하게 되어 환경오염을 유발시키고 있음

#### 주요내용

- 다공성 구리 촉매를 개발하여 기존 촉매에 비해 낮은 가격으로 제조 가능하며, 안정성이 높은 촉매를 개발하였는데, 이를 통해 유기성 폐자원 원료로부터 퓨란 다이올을 제조함
- 고상 합성법을 통해 촉매 대량 생산을 할 수 있게 되었으며, 성형 촉매를 제조하는 기술까지 확보함
- 퓨란 다이올 제조공정은 온도 100℃ 이하의 공정에서 진행되며, 수율 100%과 장시간 활성이 유지되는 결과를 확보하여 원료에 존재하는 다양한 불순물에 대한 영향까지 파악하여 원료 변화에 대응할 수 있는 촉매 시스템 구축함

### 02 핵심기술 및 달성내용

	핵심기술	달성사항
01	유기성폐자원 유래 물질로부터 HMF 합성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 사탕수수대로부터 생산되는 chloromethylfurfural(CMF)를 유기성폐자원 유래 물질로 선정</li> <li>· CMF 내 불순물 정제기술 확보</li> <li>· CMF를 열수(hot water)와 반응시켜 HMF 생성 확인</li> </ul>
02	CMF 전환 용액으로부터 HMF 추출	<ul style="list-style-type: none"> <li>· CMF 전환 후 생성물로부터 HMF 추출용매 확보</li> <li>· 수소화 반응에 미치는 불순물 영향을 최소화하는 염기 세정단계 필요 확인</li> </ul>
03	유기성폐자원 유래 물질로부터 HMF 용액 확보	<ul style="list-style-type: none"> <li>· HMF 농도 10.7 wt%</li> <li>· HMF 순도 90%</li> </ul>
04	수소화 반응 촉매 수명	<ul style="list-style-type: none"> <li>· HMF 용액의 수소화반응을 위한 반응변수 최적화</li> <li>· 상용 Mortar Grinder 이용 촉매 대량 합성 성공</li> <li>· HMF 수소화반응의 촉매 수명 75시간 이상</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진

유기성폐자원의 퓨란다이올 제조 공정	다공성 구리촉매 고상합성법	다공성 구리 촉매 기반 퓨란 다이올 실험 사진
		

### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 2020년 PCT 특허로 2건, 미국 특허로 1건 출원하였으며, 학술지 <Applied Catalysis A: General> 및 <Journal of Industrial Engineering and Chemistry>에 각각 2020년에 발간하며 작년부터 활발한 지재권 확보를 하고 있음

#### 기술이전

- 1) 고상 합성법을 이용한 다공성 구리 촉매 합성기술
- 2) CMF로부터 퓨란 다이올을 생산하는데 필요한 요소기술 및 HMF 수소화 반응에 대한 촉매 반응기술

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 퓨란계 단당체(HMF)는 BHMF뿐만 아니라 공정을 통해 다른 구조로도 생산이 가능하여 다양한 용도로도 활용 가능하며, 퓨란 다이올 (BHMF)은 바이오 플라스틱 시장이 형성될 미래에 중요한 단량체로 활용될 것으로 예상됨
- 세계 폴리카보네이트 시장 규모는 Grand View Research 사에 따르면 2016년 이후 약 6.9%의 성장률을 예상하여 `24년 약 431억 달러의 규모를 예상하며, 고성능성 폴리우레탄과 친환경 제품에 대한 수요가 많아지고 있어 가격 및 시장 규모가 빠르게 성장하고 있음

#### 향후계획

- 퓨란 다이올 생산 10 kg/day 생산 규모를 목표로 생산- 분리 기술을 최적화하고 있으며, 향후 기업체와 협의하여 실제 공정에서 실증하고자 함
- 퓨란 다이올 제조 공정에 실증과 함께 성형 촉매 프로토타입 제작 및 평가를 통해 사업화모델을 개발하여 수요기업에서 활용도를 높이고자 함

미활용 탄소자원의 고부가가치를 창출하는  
**차세대 탄소자원화 연구단**

## 총괄8

# 유기성폐자원 원료 액체연료 제조기술





## 자원의 미래를 연구하다

- 
- 세부1** 유기성 폐자원 유래 바이오가스의 고품질화 요소기술 개발
  - 세부2** 유기성 폐자원 유래가스 초청정 전처리 요소기술 개발
  - 세부3** 바이오가스로부터 액체연료( $C_5-C_{20}$ ) 선택적 제조용 3D 모듈형 촉매 및 공정 개발



한국과학기술원 | 강 석 태

## 유기성 폐자원 유래 바이오가스의 고품질화 요소기술 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 바이오가스화 기술은 유기성 폐기물을 메탄과 같은 바이오가스로 전환함으로써 자연계에서의 탄소순환을 활용하는 탄소중립 기술로, 신재생 에너지의 단점을 보완할 수 있는 기저에너지이나, 산소가 없는 조건에서 30일 이상의 긴 운전시간과 불순물 제거 과정의 높은 비용이 문제가 됨

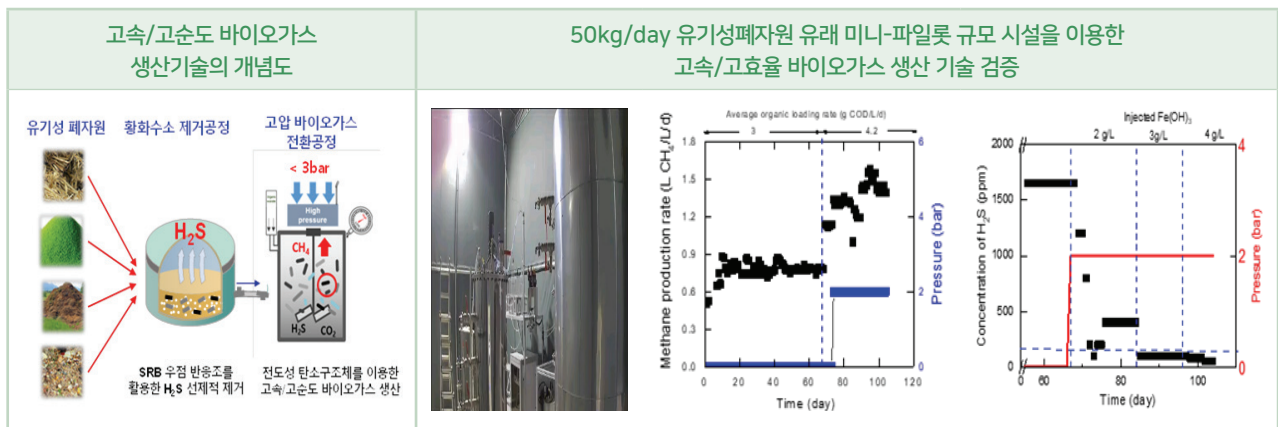
#### 주요내용

- 탄소나노튜브로 성형된 전도성 구조체를 바이오가스 전환 반응조에 투입시켜 전도성 구조체 표면에 미생물이 부착 후 증식해서 분해과정에서 발생한 전자형태의 에너지가 전도성 구조체를 통해 효과적으로 전달하게 되었으며, 이를통해 바이오가스 발생속도가 32% 증가하여 반응조 1 L/day 당 1.27L의 메탄이 생산 가능함
- 바이오가스 배출 공정은 기존에 대기압에서 배출하였으나, 이를 배출압 조절을 통해 반응조의 압력(최대 3bar)을 향상시켜 용해도가 큰 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>S의 바이오가스 내 분율이 감소하게 되어 메탄 분율을 60-80% 조절 및 황화수소 농도 100 ppmv 이하로 유지시킬 수 있음

### 02 핵심기술 및 달성내용

	핵심기술	달성사항
01	미니-파일럿 시설 설계	· 50 kg/day 유기성폐자원 처리 규모 미니-파일럿 시스템 제작
02	미니-파일럿 규모 운전인자 확보	· 실험실 규모 운전을 통한 전도성 구조체 주입 여부에 따른 메탄 생성 속도 34% 향상 확인 · 50kg/day 유기성폐자원 처리 규모 미니파일럿 운전을 통한 바이오가스 생산 속도 30% 향상 검증
03	최적운전인자 도출	· 바이오가스 내 H <sub>2</sub> S 농도 100 ppm 이하 · 50kg/day 유기성폐자원 처리 규모 미니파일럿에서의 바이오가스 내 황화수소 농도 100 ppmv 이하 검증

### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 활발한 지재권 확보로 전도성 구조체 및 자가압력을 활용하여 유기성 폐기물을 고속/고순도의 바이오가스로 전환하는 연구결과에 대해 특허 6건을 출원 및 등록 하였으며 SCI급 논문 13편을 발간하는 등 우수한 성과를 얻고 있음

#### 기술이전

- 1) 기업 참여((주)성지환경건설, (주)이앤캐슬루션)를 통해 파트너십을 구축하였고, 현재 현장 수요 맞춤형 기술로서 고압 및 전도성구조체를 활용한 고효율 바이오가스 생산 기술을 개발 하고 있음
- 2) 혐기성 소화 기술 업체(예 : 대우건설, 부강테크, 대호산업, TSK, 태영)를 자문위원회로 참여시켜 원료의 source 공급방안을 포함한 사업화 방안을 공동 모색중임

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 본 기술을 활용한 바이오가스 생산 시설은 CO<sub>2</sub>에서 유래된 유기물에서 신재생에너지인 바이오가스를 생산할 수 있어, 연간 500 만톤의 음식물쓰레기를 처리하였을 때 약 160 만톤의 CO<sub>2</sub> 절감 효과를 기대됨
- 국내 유기성폐자원 바이오가스화시설은 2020년 기준 작년 대비 9개 증가된 110개소의 67,450t/day의 시설용량의 규모로 `15년 19,310t/day 대비 약 51%가 상승하였으며, 매해 시설 규모 및 처리 용량이 증가 되고 있음
- 한국환경산업기술원에서 조사한 바에 따르면 세계 바이오 에너지는 세계 수요 최종에너지 중 5.1%를 공급하였으며, 이는 최종 소비되는 재생에너지의 절반을 차지하는 비중으로 재생에너지로서의 두각을 나타내고 있음

#### 향후계획

- Mini-pilot을 통해 분리공정의 경제성 향상시키는 기술을 검증 중에 있으며, 실증사업을 통해 10t/day 음폐수 처리 규모의 pilot 시스템 실증을 하고자 함
- 고속/고순도의 바이오가스 생산기술 실증하는 연구를 지속적으로 수행하며 개발한 탄소구조체를 전기화학적 CO<sub>2</sub> 전환 등에 응용하는 후속연구까지 진행하고 있음



한국에너지기술연구원 | 백 일 현

## 유기성 폐자원 유래가스 초청정 전처리 요소기술 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 기존 바이오가스 정제는 처리장치가 크며, 대량의 폐기물 발생, 처리 한계 등의 문제점이 있으며, 이로 인해 정제과정에서 장치비용과 운전비용이 높고 환경 유해물질이 발생하는 문제가 있음

#### 주요내용

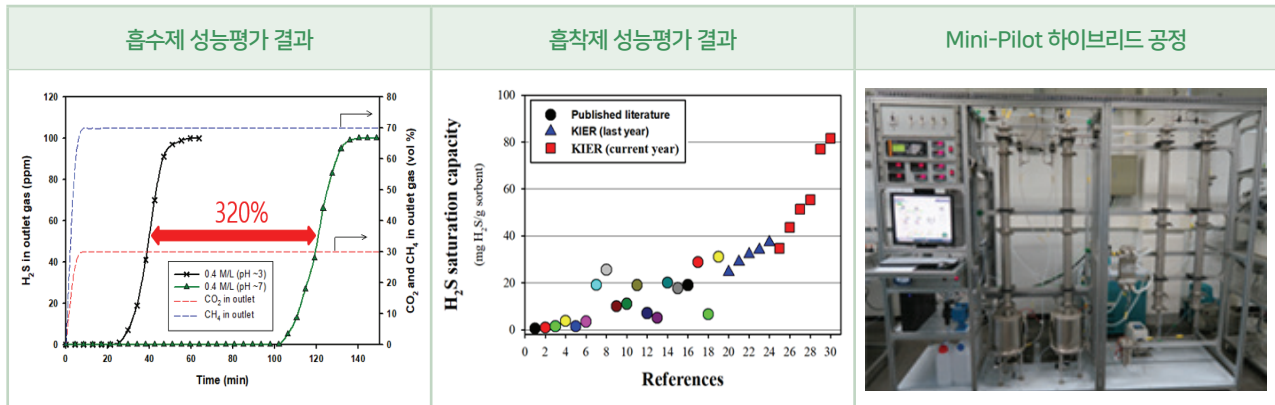
- 황화수소 흡수 및 재생 가능한 유기용매를 황화수소만을 선택적으로 제거 가능한 환경친화적인 처리 기술이며, 장치비와 운전비를 줄일 수 있어 경제적인 공정임
- 고도의 황화수소 처리 가능한 Metal Oxide 기반의 흡착제를 개발로 저온·저압에서 고속 흡착이 가능하여, 바이오가스의 초청정 정제 ( $\leq 10$  ppb)를 할 수 있음
- 분리소재를 이용한 처리공정은 흡수와 흡착의 초청정 2단 정제공정으로 최적화 및 단순화시켜 기존 대비 경제성이 확보된 장치로 개발하였음

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 유기성 폐자원 유래가스 황화수소 분리 기능성 유기용매 기반 흡수제 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 기존보다 신규 흡수제는 흡수능 320% 증가</li> <li>· 바이오가스 중 황화수소 제거율 99.9% 달성</li> </ul>
02 고도 황화수소 처리용 Metal Oxide 기반 흡착제 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 기존보다 신규 흡착제는 흡착능 178% 증가</li> <li>· 황화수소 흡착능: 81.5mg/gr-sorbent</li> </ul>
03 유기성 폐자원 유래가스 불순물 초청정 정제 미니-파이럿 공정	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 바이오가스 초청정 정제(<math>H_2S</math> 등) 공정기술 개발</li> <li>· 2단 흡수/흡착 하이브리드 미니-파이럿 공정 기술개발               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 흡수공정 황화수소 제거: <math>\leq 1</math>ppm</li> <li>- 흡착공정 황화수소 제거: <math>\leq 10</math>ppb</li> </ul> </li> <li>· 실증 미니-파이럿 공정 장기 운전 및 최적화</li> <li>· 장치 격상 공정설계패키지(PFD, P&amp;ID, Data sheet) 제작</li> </ul>



### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 국내, PCT 및 미국에 13건의 특허를 출원 및 등록함으로써 초청정 바이오가스 생산을 위한 소재 및 공정기술의 지재권을 확보
- <Chemical Engineering Journal>를 포함한 국외 6편의 학술지에 논문을 게재하여 학술적 가치를 인정

#### 기술이전

- 1) 바이오가스 불순물(황화수소 등) 제거 기능성 유기용매 기반 흡수제 기술
- 2) 바이오가스 불순물(황화수소 등) 제거 Metal Oxide 기반 흡착제 기술
- 3) 바이오가스 초청정 정제 하이브리드 공정 기술

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 국내에서 바이오가스의 도시가스 및 수송용 생산공정이 증가추세이나, 공정의 잦은 고장과 생산된 바이오가스를 효과적으로 정제하여 이용하는 것이 미흡한 실정으로 본 기술의 초청정기술을 접목하여 정제 기술 및 안정성을 확보할 수 있음
- 바이오가스를 사용한 수송용가스생산은 화석연료 사용을 절감하는 효과와 함께 기존 항공유 생산공정 대비 NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 배출이 90%이상 저감되어 대기오염이 방지되며, 약 100 만t/year의 CO<sub>2</sub> 감량을 통한 탄소중립 실현화 가능함
- 환경부 통계에 따르면 국내 유기성 폐자원 바이오가스 생산·이용량은 2008년 이후 증가 추세에 있으며, 20년 기준 발전(13.8%), 외부공급(27.6%), 자체이용(31.4%), 및 미활용 (16.8%) 되고 있으나, 초청정 정제기술이 확보된다면 탄소중립을 위한 다양한 분야로의 활용(청정연료, 수소 등)이 확대될 전망이다

#### 향후계획

- 향후 정부지원 실증사업으로 바이오가스 정제 기술을 접목시켜 유기성폐자원(음식물쓰레기 등) 100 t/day의 기술검증을 목표로 하고 있으며, 본 사업에서 장치 설계, 제작, 실증 등에 대해 관련 업체의 참여를 통해 추진하고자 함
- 현장 Mini-Pilot 실증으로 공정 효율을 개선과 운전 기술의 확보를 통한 공정설계패키지 제작을 수행하고 있으며, 이를 통해 향후 실증 사업을 수행하여 실용화를 목표로 함



한국화학연구원 | 박근재

## 바이오가스로부터 액체연료( $C_5$ - $C_{20}$ ) 선택적 제조용 3D 모듈형 촉매 및 공정 개발

### 01 연구배경 및 주요내용

#### 연구배경

- 바이오가스 유래 합성가스로부터 탄화수소 혼합물 제조를 위해 피셔-트롭쉬 합성(FTS; Fischer-Tropsch synthesis) 공정에서 중소규모 가스자원에 활용 가능한 구조체 FTS 성형촉매에 대한 실용연구가 필요함
- 기존 촉매 성형방법 (사출, 펠릿, 모노리스 등)을 대신하여 쉽게 원하는 구조를 성형할 수 있는 신규 촉매성형법이 필요하고 공정에 적합한 특정구조 구현을 통해 촉매반응성을 향상시키는 새로운 기술이 필요함

#### 주요내용

- 바이오가스로부터 합성가스 제조 공정 개발: 플라즈마 리포밍 기술을 이용하여 바이오가스로부터 빠른 start-up이 가능하고 후속 FTS 공정에 적합한 합성가스비 조절이 가능 공정기술 개발
- 3D프린팅 기술 이용 FTS용 구조체 촉매 및 공정 개발: 액체연료 선택적 제조를 위한 모듈형 구조체 촉매를 3D 프린팅 기술을 적용하여 제작하고, 그에 맞는 모듈형 반응시스템을 개발함 (3L/day 액체연료 생산 벤치규모 공정 개발)
- 액체연료 선택적 제조 원천 촉매기술 확보: 이중기능성 촉매 개발 (FTS 촉매+ 산촉매)을 통해 합성가스로부터  $C_5$ - $C_{20}$ 의 탄화수소를 선택적으로 제조하는 원천촉매 기술을 확보함

### 02 핵심기술 및 달성내용

핵심기술	달성사항
01 액체연료 제조용 벤치반응시스템 구축 및 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 3L/day 액체연료 생산규모 벤치반응기 설계 및 제작/테스트 완료</li> <li>· 바이오가스 원료 합성가스로 부터 액체연료 제조를 위한 벤치반응시스템 구축 완료</li> </ul>
02 액체연료 선택적 제조용 모듈형 촉매 최적화	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 액체연료 선택적제조 모듈형 촉매 확보</li> <li>· 고선택도 액체연료를 얻기 위한 촉매 기공구조 및 산점에 따른 성능 확보</li> </ul>
03 액체연료 제조용 촉매 안정성 확보 및 촉매재생방법 확보	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 변동성 합성가스 유량에서 <math>\Delta CO</math> 전환율 &lt; 5% 달성</li> <li>· 비활성 촉매의 재생방법 확보 : 초기 촉매활성 회복 확인</li> </ul>
04 바이오가스유래합성가스원료기반 Non-ASF 분포 액체연료 선택적 제조용 Fischer-Tropsch (FT) 원천 촉매 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 액체연료 해당 선택도 &gt; 75% 이상 달성 (동시에 <math>CH_4</math> 선택도 &lt; 12% 달성)</li> <li>· 바이오가스 조성 및 부하 변동에 따른 내구성 및 안정성을 갖는 바이오 가스 맞춤형 FT 공정 개발 (<math>\pm 30\%</math> 부하 변화 기준, <math>\Delta CO</math> 전환율 &lt; 10%, <math>\Delta C_5</math>-<math>C_{20}</math> 탄화수소 선택도 &lt; 10%)</li> <li>· 촉매비활성화 원인 규명 및 장기 안정성 확보 (<math>\Delta CO</math> 전환율 &lt; 5%, 100h TOS기준)</li> </ul>

### 03 실험데이터 및 실증사진



### 04 주요성과 및 이전대상 기술범위

#### 주요성과

- 바이오가스 활용을 위한 촉매·공정 실증 및 상용화 요소기술로 원천 촉매에 대한 SCI급 논문 3편을 게재하였을 뿐만 아니라 촉매 및 공정 원천 특허로 국·내외 9편을 확보한 상태임

#### 기술이전

- 1) 바이오가스로부터 액체연료 제조를 위한 통합공정 기술 (지자체 폐기물 처리장 발생 바이오가스 정제, 전환, 분리를 통한 액체연료 직접 생산 공정기술, '20. 10 기술이전)
- 2) 세라믹 3D 프린팅 기술을 이용한 촉매구조체 제조 기술 (미세구조 형상제어 가능 구조체 촉매 기술)
- 3) 중소규모 가스자원에 적합한 모듈형 반응시스템 (열전달이 용이한 채널형 마이크로 반응시스템)

### 05 기대효과 및 향후계획

#### 기대효과

- 연구팀이 개발한 바이오가스 이용한 액체연료 제조 시스템은 탄소중립 원료인 바이오가스를 활용함으로써 CO<sub>2</sub> 감축효과를 가져오며, 바이오가스 20,000m<sup>3</sup>/day 기준 하루 68배럴의 액체연료를 생산하며 기존 석유정제 액체연료 생산공정대비 온실가스 16.9% 저감 효과임을 확인함
- 경제성 분석 결과 액체연료 선택도를 최대한 높여 바이오가스 내 메탄 1m<sup>3</sup> 당 0.3 kg의 액체 연료 생산, 리터당 생산단가 546원으로 기술 경제성을 확보함
- Grand View Research 사에 따르면 세계 촉매 시장 규모는 2019년 3,390만 달러의 규모로 연평균 성장률 약 4.4%로 꾸준히 성장하여 2027년 약 4,784만 달러의 규모를 예상하며 촉매는 생산성 향상을 위해 다양한 요구에 따라 발전하고 있어 새로 개발된 구조체 촉매 제조 기술은 환경 및 에너지 절약 등의 분야에서 중요한 요소로 보다 더 많은 관심을 가질 것으로 보임

#### 향후계획

- 실증경험으로 플라즈마 리포밍 기술은 실제 매립지가스를 원료로 10,000 L/ hr의 합성가스를 만드는 기술을 실증하였으며, 본 사업을 통해 바이오가스 활용기술로 합성가스 전환-액체연료 선택적 생산기술 개발 통합공정 구축을 완료할 계획임
- 최적 공정 시뮬레이션으로 바이오가스 공급 유량, 조성 변화 등 공정 옵션 최적화와 전주기 통합 공정 설계 및 구축, 운전 반응기 제작을 하고자 함





**자원의 미래를  
연구하다**



**NGUP** 차세대 탄소자원화 연구단  
NEXT GENERATION CARBON UPCYCLING PROJECT

34114 대전광역시 유성구 가정로 141 차세대탄소자원화연구단

**T** 042-610-8890,8556 **F** 042-860-7388

[ncup.krict.re.kr](http://ncup.krict.re.kr)