

# 배가스 CO2 포집을 위한 기체분리막 공정

Membrane Gas Separation Processes  
for CO2 Capture from Flue Gas

---



2023. 12. 1

이충섭, 하성용

(주)에어레인

# 발표 순서

---

- 연구의 배경
- **CO2** 포집공정
- **CO2** 포집공정 비교
- 기체분리막 포집공정
- 배가스 기체분리막 공정적용
- 결론

# 연구의 배경

## COP21 (2015 Paris 기후변화 협약)

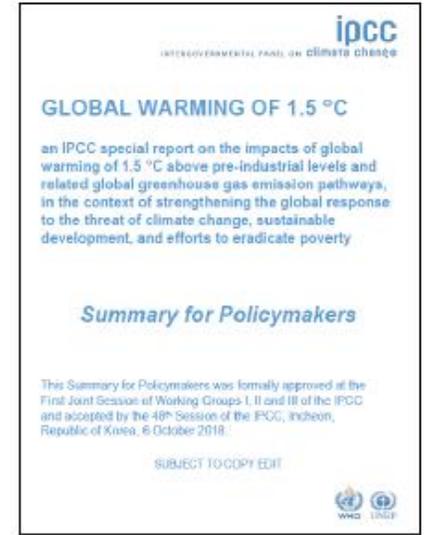
- 지구평균온도 상승폭을 산업화 이전 대비 1.5°C까지 제한
- 2020년부터 개발도상국 기후변화 대처 사업에 최소 1000억달러 지원



## IPCC 1.5°C 보고서 주요내용

- 현재 평균 온도 : 산업화 이전 수준보다 약 1°C 상승
- 온실가스 배출 추세가 지속 되면, 2030~2052년에 **산업화 이전 대비 1.5°C 상승 예상**
- 1.5°C 이내로 제한하기 위해 **2030년까지** 2010년 대비 이산화탄소 배출량을 **최소 45% 감축**해야 하며, **2050년까지 탄소 중립** 달성 필요

➡ 탄소중립 : 온실가스 순 배출량 "0"으로 제한 하는 개념



# 연구의 배경

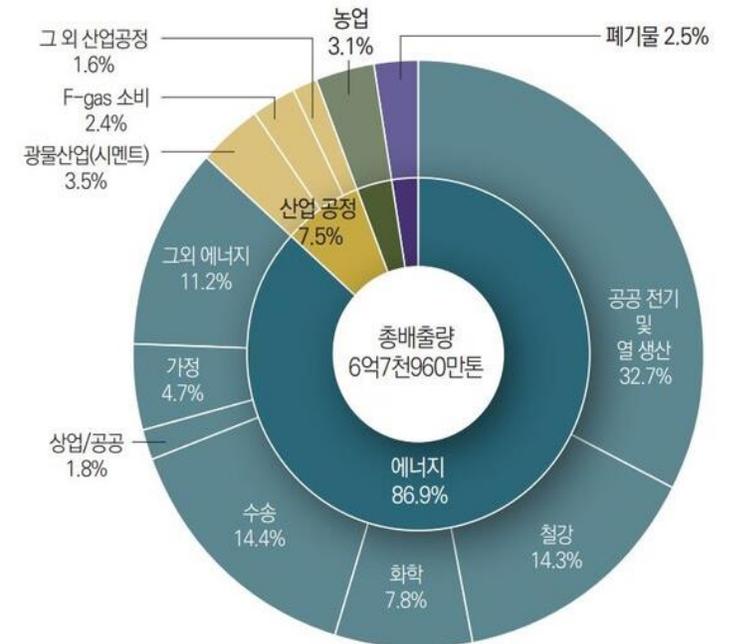
## 탄소중립의 배경

- 2050년 장기 저탄소 발전전략(LED) 수립  
COP21 결정문 : 모든 당사국 발전전략(LED)을 수립하여 2020년까지 UN 제출
- 2100년까지 지구평균 온도 2°C이하 제한을 고려한 각국의 장기 감축 목표 수립 및 추진

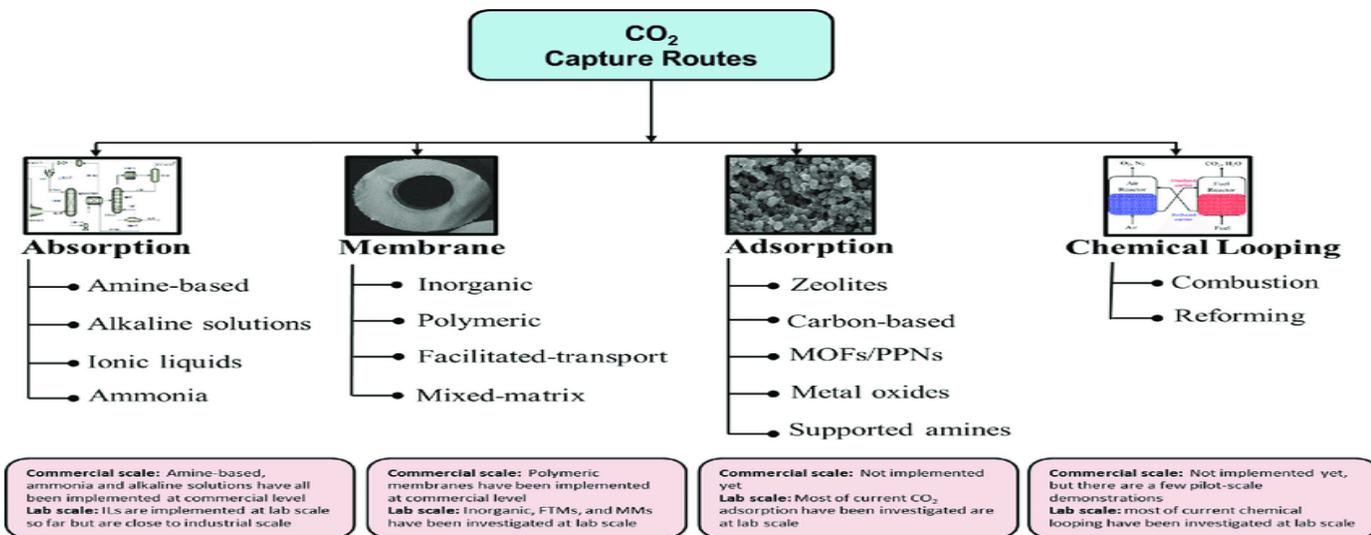
## 국내 발전전략(LED) 보고서

| 기본방향   | 부문별 비전 및 전략  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; 깨끗하게 생산된 전기·수소의 활용 확대</li> <li>&gt; 디지털 기술과 연계한 혁신적인 에너지 효율 향상</li> <li>&gt; 탈탄소 미래 기술 개발 및 상용화 촉진</li> <li>&gt; 순환경제(원료·연료투입↓)로 지속가능한 산업 혁신 촉진</li> <li>&gt; 산림, 갯벌, 습지 등 자연 생태의 탄소 흡수 기능 강화</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; (전력·열 공급) 화석연료 중심 → 재생에너지 + 그린수소 + CCUS</li> <li>&gt; (산업) 미래 신기술, 순환경제로 지속가능한 탄소중립 산업 생태계 구축</li> <li>&gt; (수송) 내연기관 → 친환경 교통수단 + 지능화 + 녹색물류</li> <li>&gt; (건물) 에너지절감(녹색건축) + 에너지생산(태양광·지열) → 에너지 자급자족 실현</li> <li>&gt; (농축수산) 친환경 농수산업 경영 및 저탄소 유통 추진</li> <li>&gt; (탄소흡수원) 자연·생태자원을 활용한 탄소흡수 능력 제고</li> </ul> |
| 이행기반 혁신  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; (정책혁신) 이행평가, 제도기반, 탄소가격, 공공주도</li> <li>&gt; (사회혁신) 인식제고, 거버넌스, 지역역할, 녹색금융</li> <li>&gt; (기술혁신) 융합/통합, 기술평가, 투자강화</li> </ul>  |  |

<2021년 분야별 온실가스 배출 비중>



# CO2 포집기술



|                  | TRL 1   | TRL 2                 | TRL 3   | TRL 4  | TRL 5   | TRL 6  | TRL 7  | TRL 8  |
|------------------|---|-----------------------|---|--|---|--|--|--|
| Major technology | Ionic liquids<br>3D-printed absorber<br>Additive manufacturing for reactor components | Encapsulated solvents | Alkalisated alumina sorbent<br>Catalytic membrane reactor | Biphasic solvents<br>Cryogenic<br>Zeolite membrane<br>Ceramic membrane | Aminosilicone solvent<br>Pd membrane<br>Hybrid/solvent membrane | Fuel cells<br>Chilled ammonia<br>PEEK membrane<br>Carbon-based sorbent<br>Polyimide membrane<br>PEEK hybrid membrane | Solid sorbents: functionalised silica/metal-organic frameworks<br>Mixed salt solvent | Water-lean solvent (mixture of amine/organic solvent)<br>Polymeric membrane: polyether-polyamide<br>a-MDEA<br>Piperazine solvent |
| Major players    | <br><br>  | <br>                  | <br><br>  | <br><br><br>   | <br><br><br><br>  | <br><br><br><br>   | <br><br>   | <br><br><br><br><br><br>   |

(Source: Concawe Review, February 2021)

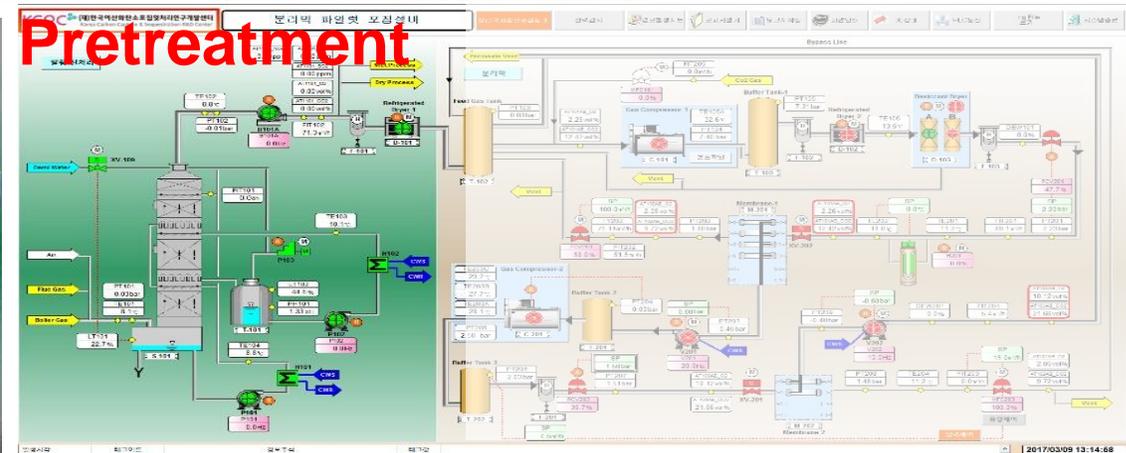
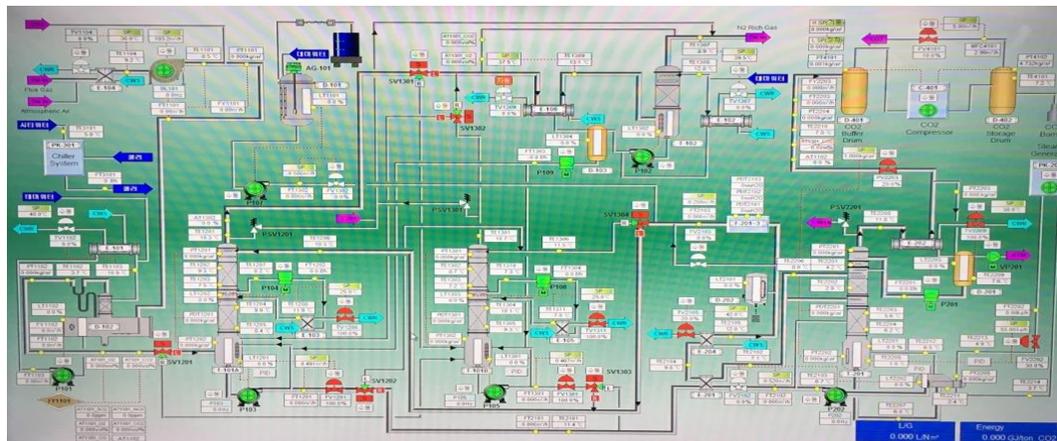
TRL : Technical Readness Level (기술성숙도)

# CO2 포집기술

US DOE, NCCC 20TPD

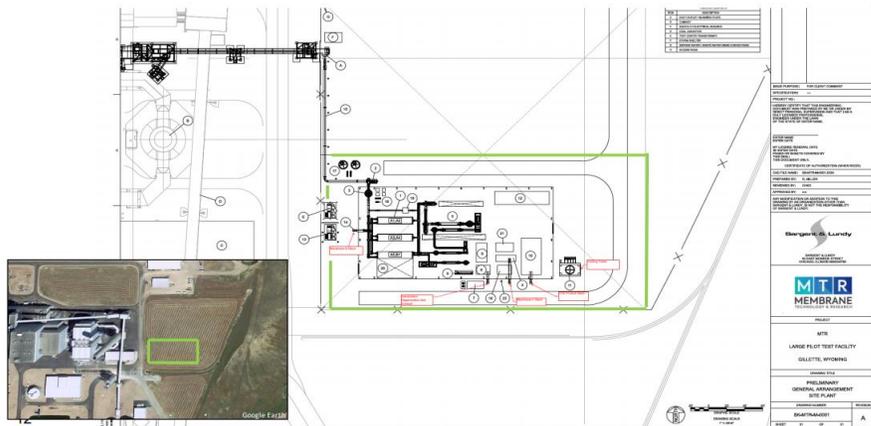


20TPD = 4,000 Nm<sup>3</sup>/h  
 1.25TPD = 250 Nm<sup>3</sup>/h

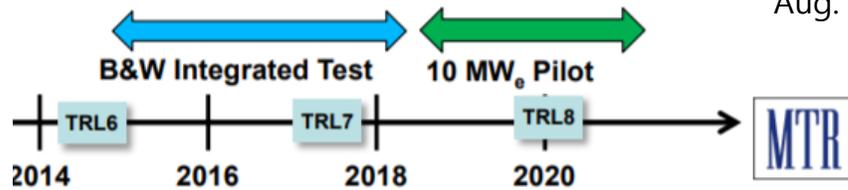


# CO2 포집기술\_해외 분리막기술

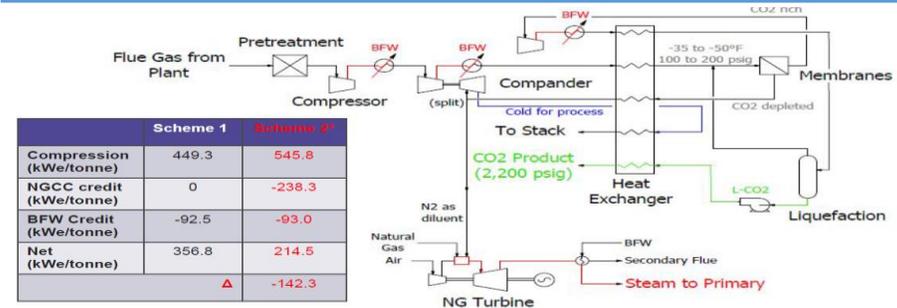
[미국] MTR, Air-sweep 공정  
발전소 통합 파일럿 플랜트 실증 FEED 진행중  
('19-'21년, 10 MW<sub>e</sub>급, 약 28,600 Nm<sup>3</sup>/h)



DE-FE0031587,  
Aug. 2020



[미국] Air-Liquide, 저온 분리막 공정  
NCCC 파일럿 플랜트 실증  
('15-'19년 0.3 MW<sub>e</sub>급, 약 860 Nm<sup>3</sup>/h)



## Main Accomplishments

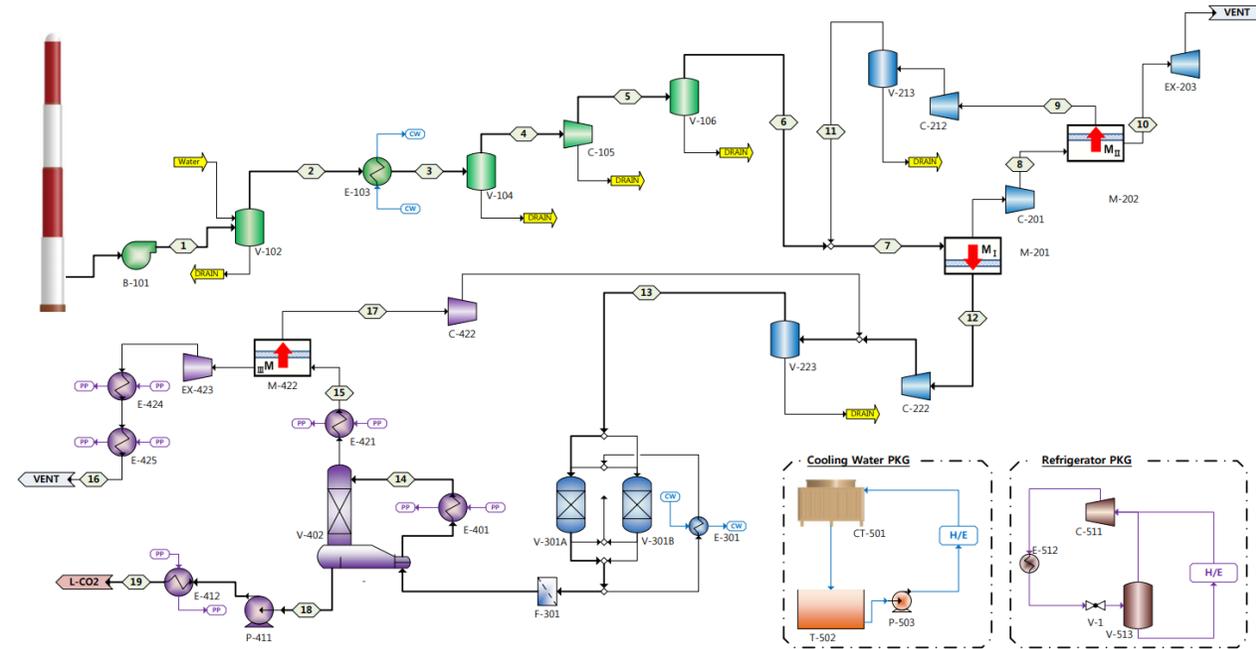


- **Fabricated 4" PI-2 prototype bundles**
  - Developed correct manufacturing techniques
  - Exceeded success criteria
- **Fabricated 6" PI-2 commercial bundles**
  - Exceeded success criteria
- **Development of lower-cost formulation of PI-2 membrane**
  - Low polymer cost on scale-up
  - Potential composite formulation discovered
- **~ 500 hours of NCCC field test**
  - Exceeded success criteria
  - 500-hour long-term stability test
  - Extended parametric testing to investigate industrial CO<sub>2</sub> source applications
- **TEA for full scale 550 MWe plant shows both PI-1 and PI-2 cold membrane with < \$40/tonne capture cost**
- **Bringing the skid back to AL for further CO<sub>2</sub> capture studies**

# CO2 포집기술 비교

| Parameter       | Amine absorption              | Membrane                      |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 배가스 CO2 농도 (%)  | 5이상                           | 10이상                          |
| 포집가스 CO2 농도 (%) | 95이상                          | 70~95                         |
| SOx, NOx 전처리    | 아민흡수제의 변성 제거설비 필요             | 대기 배출기준                       |
| O2 허용기준 (%)     | 5%이하                          | 20%이하                         |
| 이차오염물 및 폐기물     | 큼                             | 매우 적음                         |
| 동일용량 장치크기       | 대                             | 소                             |
| 동일용량 장치투자비      | 큼                             | 적음                            |
| 동일용량 장치운영비      | 적음                            | 중                             |
| 운영난이도           | 어려움                           | 쉬움                            |
| 정상상태 도달시간       | 김                             | 짧음                            |
| 소모품             | 아민                            | -                             |
| 유지보수 및 기타       | 어려움<br>화관법 준수<br>주민 민원 해결     | 쉬움                            |
| 실증 연구 사례        | 미국 NCCC<br>일본 NEDO<br>한국 KCRC | 미국 NCCC<br>일본 NEDO<br>한국 KCRC |

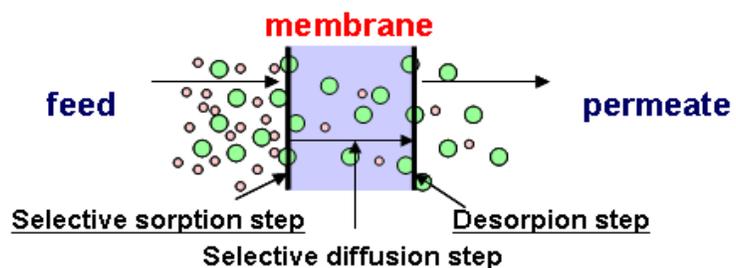
\* Amine absorption : BASF 공정자료



# 기체분리막 원리

## Permeation Mechanism:

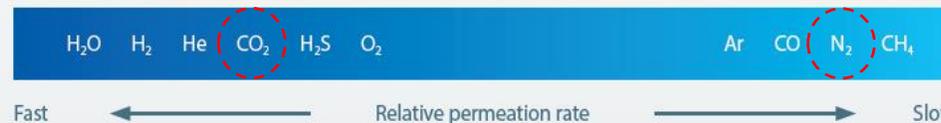
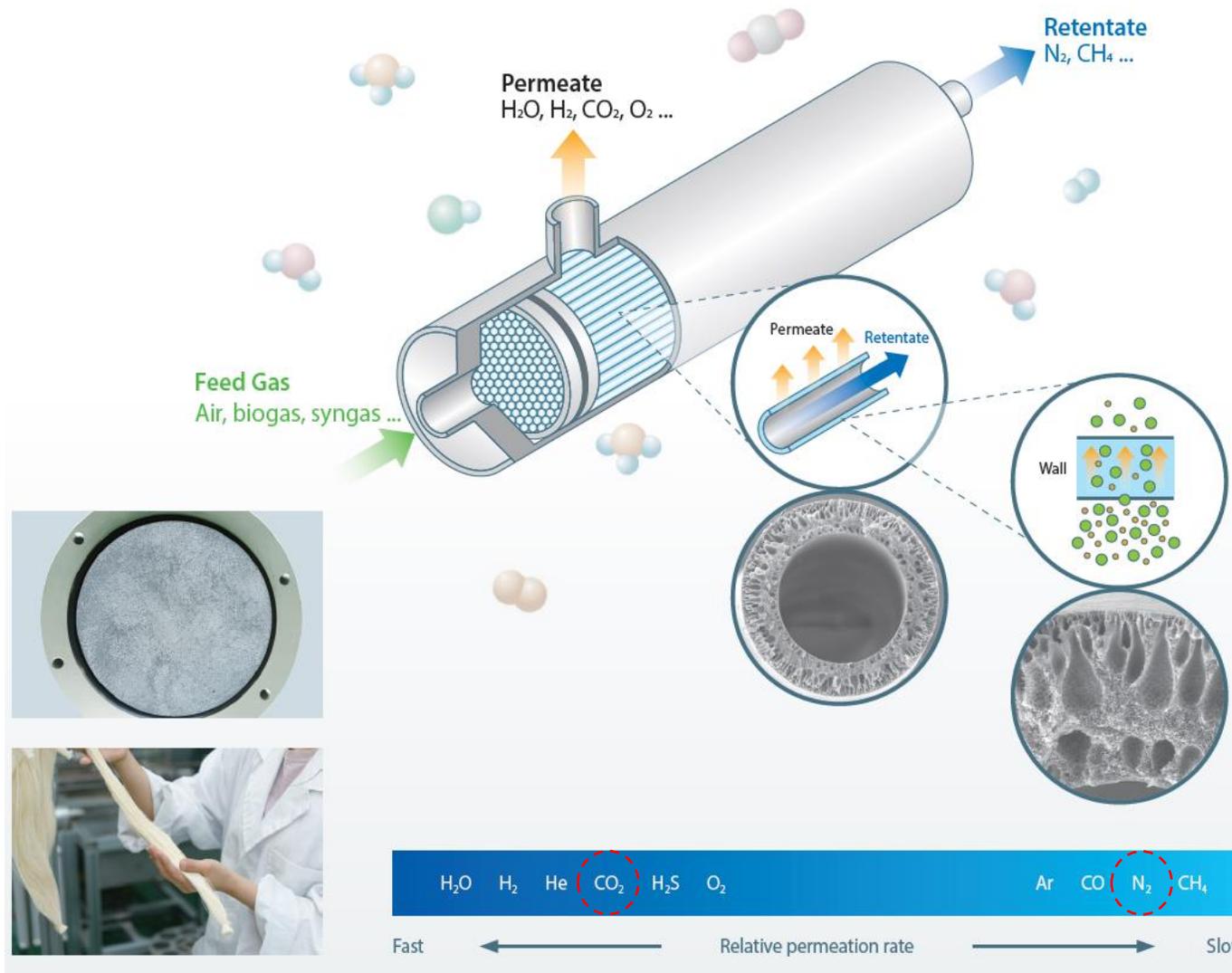
용해 - 확산모델 (solution-diffusion model)



- Permeability of A  $\equiv P_A = D_A S_A$ ,  
 where  $D_A$   $\equiv$  Diffusion coefficient of A  
 $S_A$   $\equiv$  Solubility coefficient of A

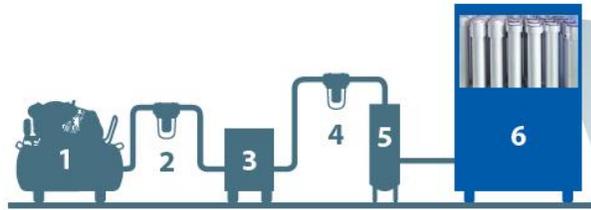
- Selectivity  $\equiv \alpha = \frac{P_A}{P_B} = \left( \frac{D_A}{D_B} \right) \left( \frac{S_A}{S_B} \right)$   
 Mobility selectivity      Solubility selectivity

| Molecule         | Molecular Weight | Kinetic Diameter (Å) |
|------------------|------------------|----------------------|
| CO <sub>2</sub>  | 44               | 3.3                  |
| O <sub>2</sub>   | 32               | 3.46                 |
| N <sub>2</sub>   | 28               | 3.64                 |
| H <sub>2</sub> O | 18               | 2.65                 |
| CH <sub>4</sub>  | 16               | 3.8                  |
| H <sub>2</sub>   | 2                | 2.89                 |



# 기체분리막 공정의 장점

## Membrane Separation Process



1. Compressor
2. Liquid Separator
3. Dryer
4. Coalescing Filter
5. Activated Carbon Bed/Filter
6. Membrane Module



**824,320 Sm<sup>3</sup>/hr EOR Plant  
(Natco사)**

- ✓ Simple and Reliable Design
- ✓ Economic Solution
- ✓ Environmental Benefits
- ✓ Flexible Application
- ✓ Improved Safety
- ✓ Small Footprint



**Natural Gas CO<sub>2</sub> Separation**

# CO2 포집 기체분리막공정 적용

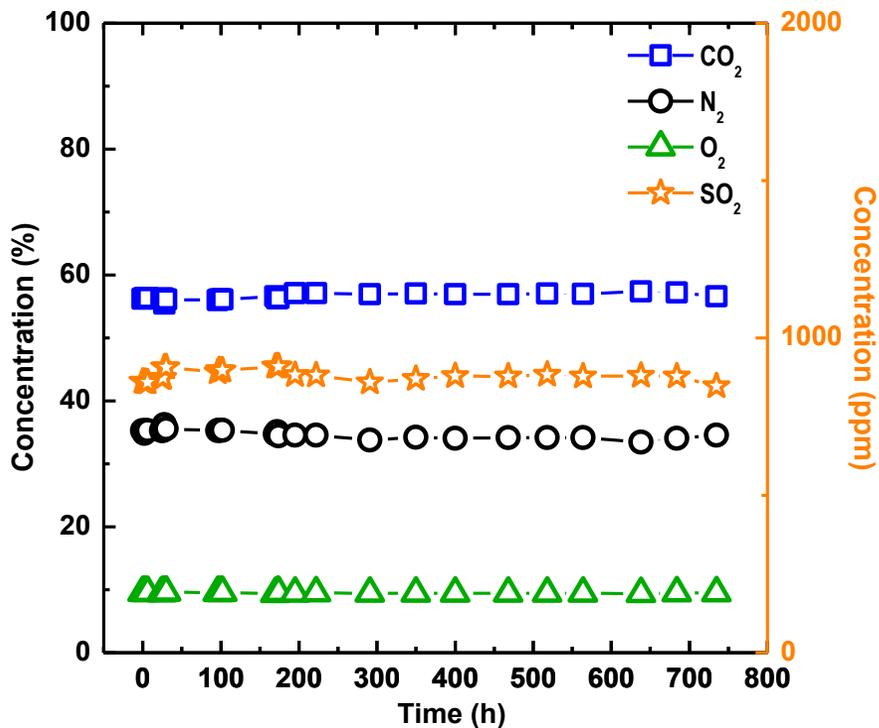
## ✓ Flue gases test result from various CO<sub>2</sub> emission sites

| Item    |                          | Coal flue gas                      | LNG flue gas                 | Kiln flue gas           | Chemical flue gas     | H2 reformer flue gas |
|---------|--------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Site    |                          | Korea Institute of Energy Research | Korea District Heating Corp. | Halla Cement            | L chemical            | P 사                  |
| Process |                          | 2stage                             | 3stage                       | 3stage                  | 3stage                | 2stage               |
| Feed    | Flowrate                 | 110m <sup>3</sup> /hr              | 400m <sup>3</sup> /hr        | 2,000m <sup>3</sup> /hr | 300m <sup>3</sup> /hr | 10m <sup>3</sup> /hr |
|         | CO <sub>2</sub> conc.    | 13.6~15%                           | 4.5~8%                       | 15~22.6%                | 12~14%                | 16.7~18.5%           |
|         | O <sub>2</sub> conc.     | 0.7~3.4%                           | 5.5~12.8%                    | 9.9~14.3%               | 4~5%                  | 2.0~4.8%             |
|         | NOx                      | -                                  | -                            | 45~54ppm                | ~ 50ppm               | -                    |
|         | Dust                     | 15~22mg/m <sup>3</sup>             | ~2mg/m <sup>3</sup>          | serious                 | < 1mg/m <sup>3</sup>  | ~2mg/m <sup>3</sup>  |
| Product | CO <sub>2</sub> conc.    | 83.9~84.2%                         | 65~84.9%                     | 85.4~90.4%              | 90~95%                | > 90%                |
|         | CO <sub>2</sub> Recovery | 84~86.5%                           | 69~82%                       | 71~92%                  | 80%                   | 90%                  |

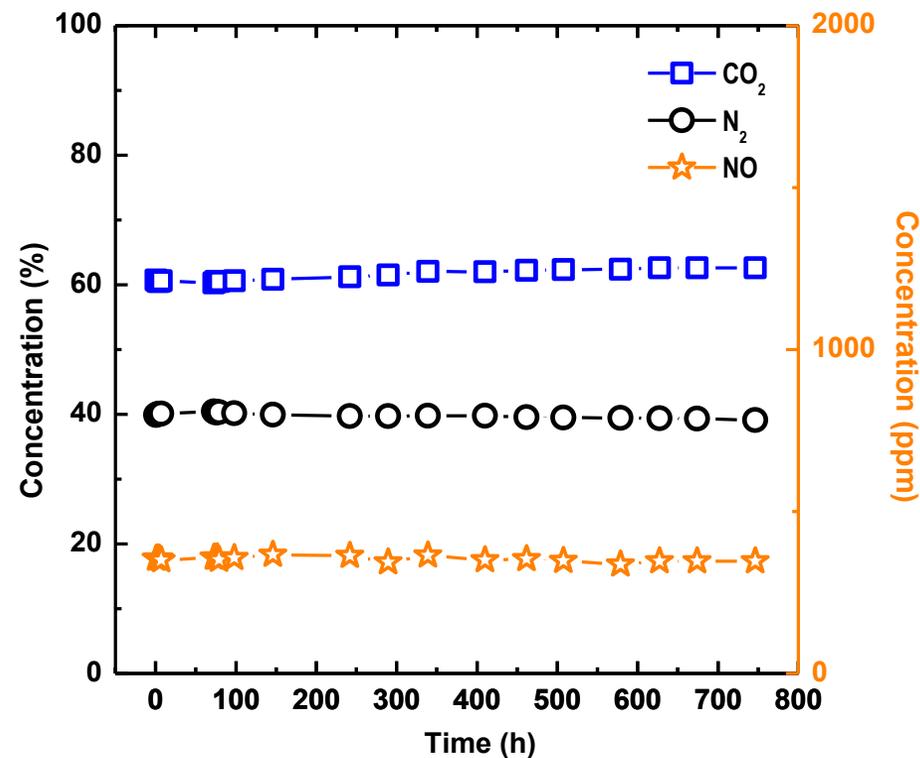
# 기체분리막을 이용한 CO2 포집기술 적용 (SOx, NOx 내구성)

## ✓ SOx, NOx 내구성 평가

- Gas composition CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> = 14.0%/6.04%/990(ppm)/balance
- Pressure: 2.0/0.2 bar,a
- Temperature 30 °C

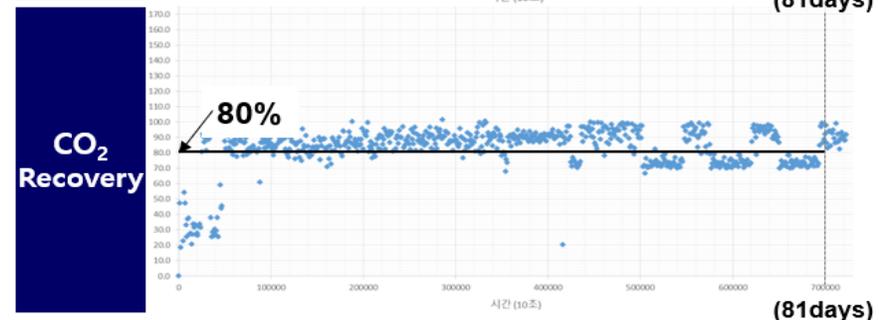
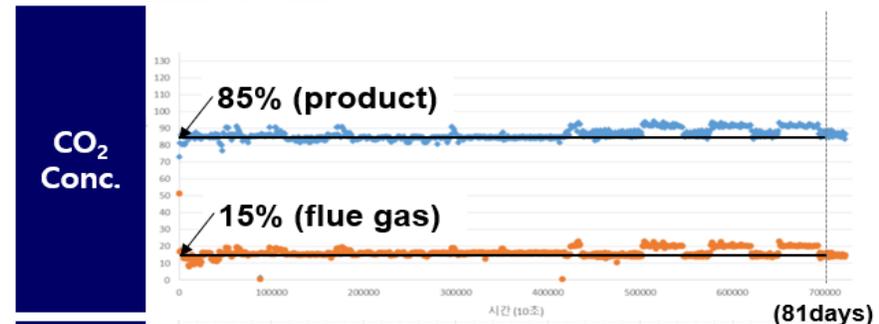
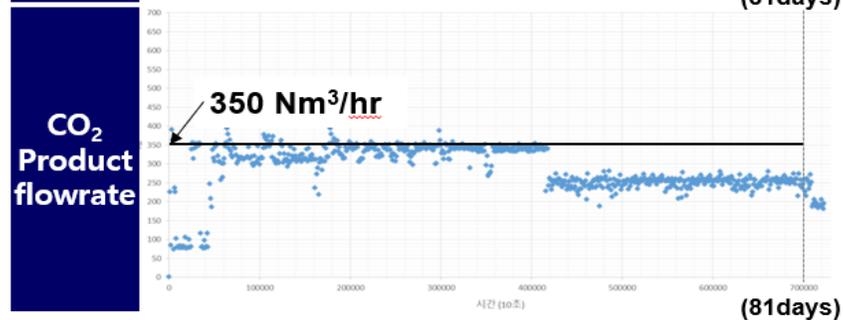
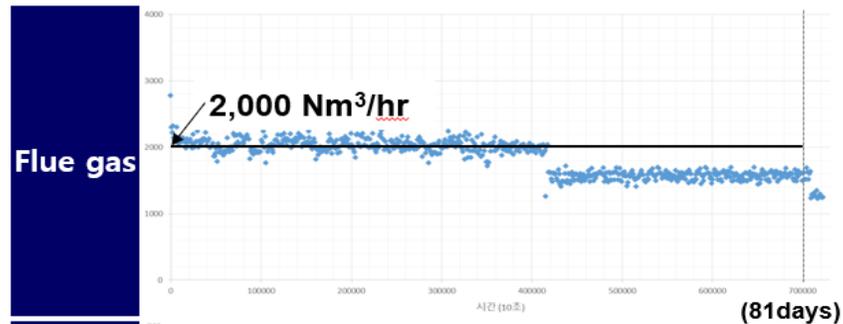


- Gas composition: CO<sub>2</sub>/NO/N<sub>2</sub> = 13.4%/990(ppm)/balance
- Pressure: 2.0/0.2 bar,a
- Temperature 30 °C



# 기체분리막을 이용한 CO2 포집기술 적용 (KILN flue gas)

✓ 2,000Nm<sup>3</sup>/hr Pilot scale system

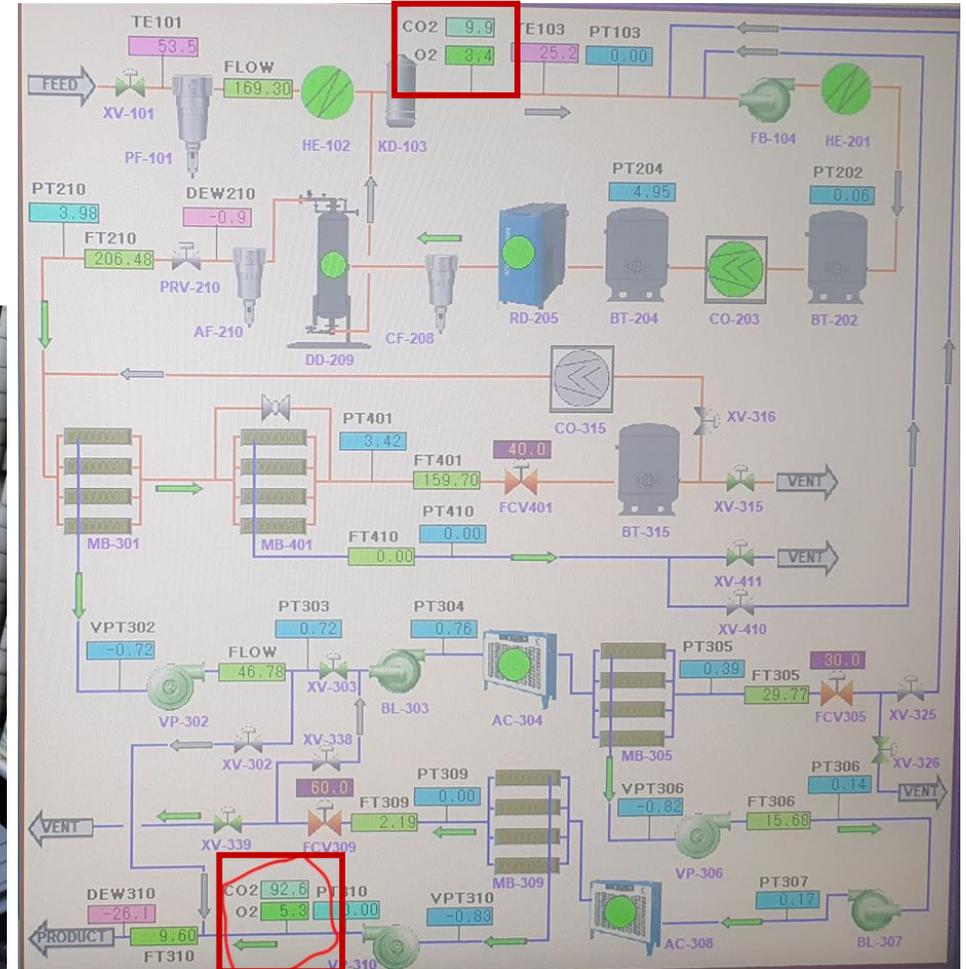


# 기체분리막을 이용한 CO2 포집기술 적용 (Chemical flue gas)

✓ 300Nm<sup>3</sup>/hr Pilot scale system



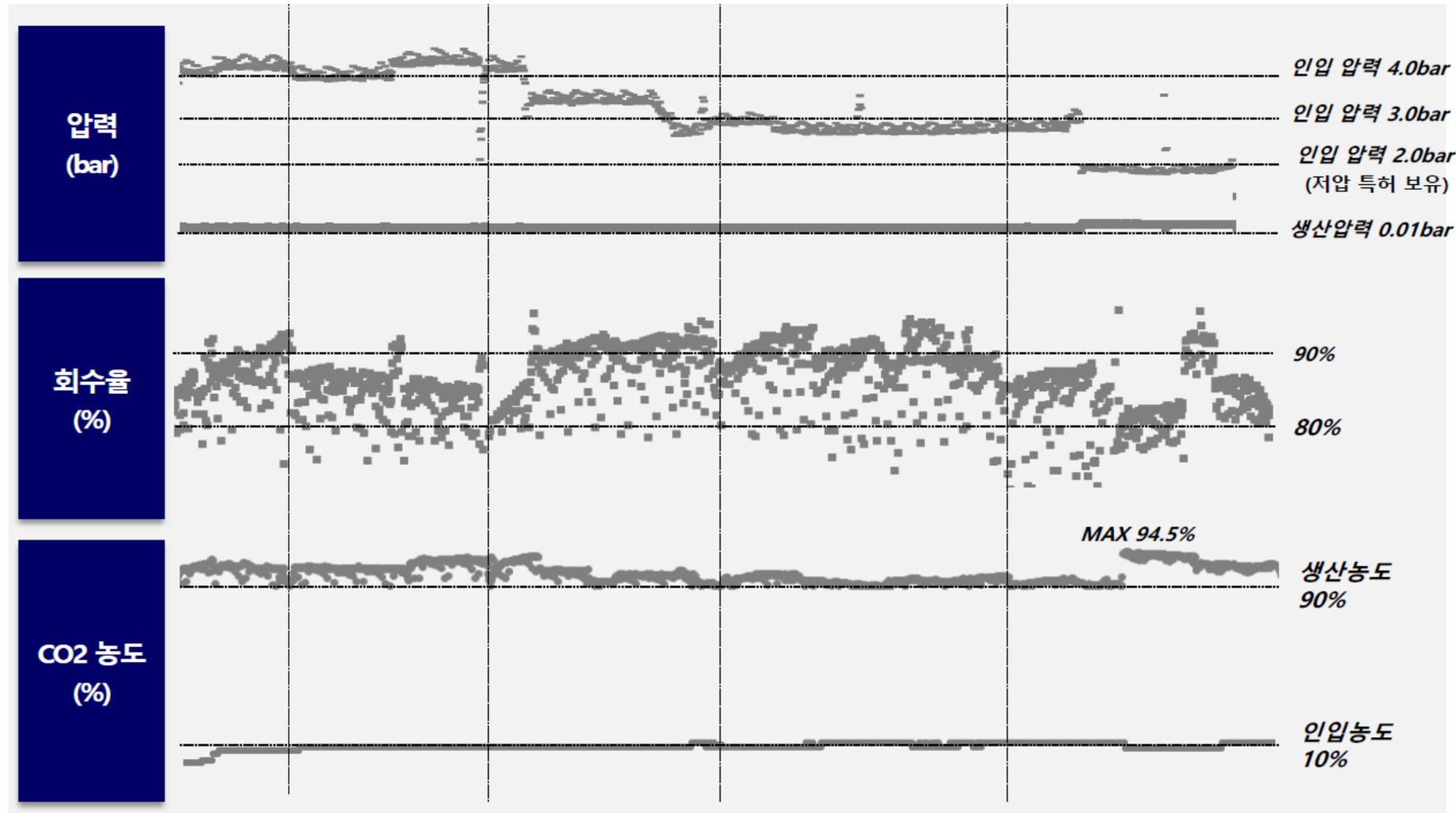
CO2 : 9.9%



CO2 : 92.6%

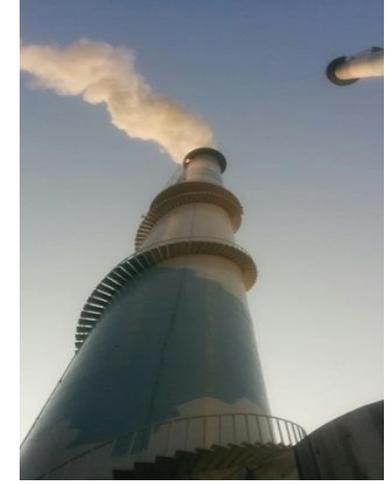
# 기체분리막을 이용한 CO2 포집기술 적용 (Chemical flue gas)

✓ 300Nm<sup>3</sup>/hr Pilot scale system (여수 NCC flue gas, 2021.04~)

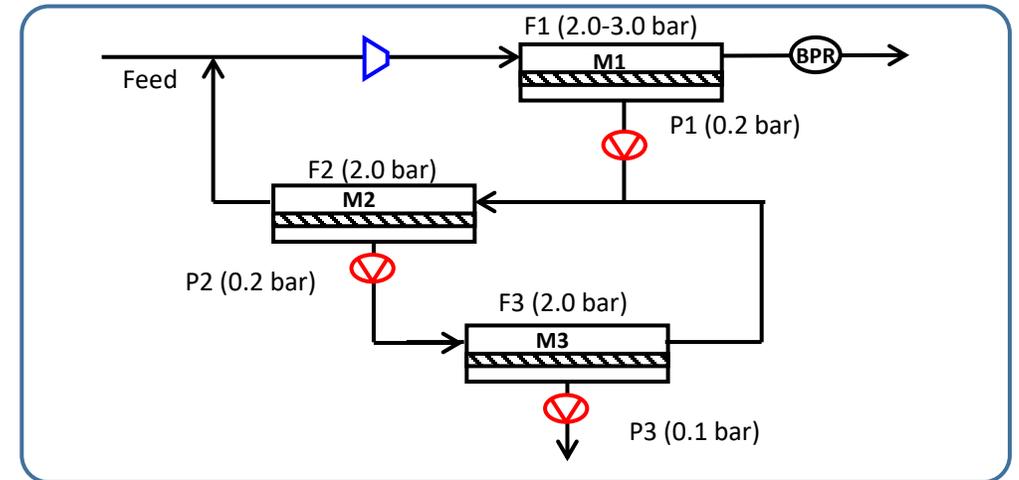


# 기체분리막을 이용한 CO2 포집기술 적용 (LNG 보일러)

✓ 30Nm<sup>3</sup>/hr bench scale system



Movable membrane equipment

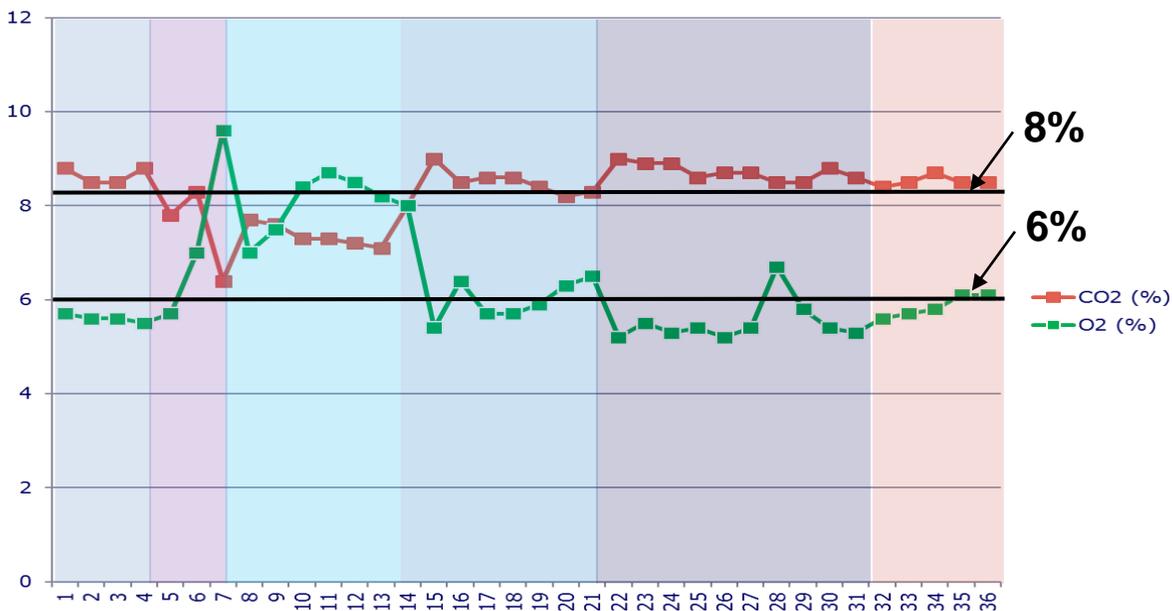


3 stage membrane cascade

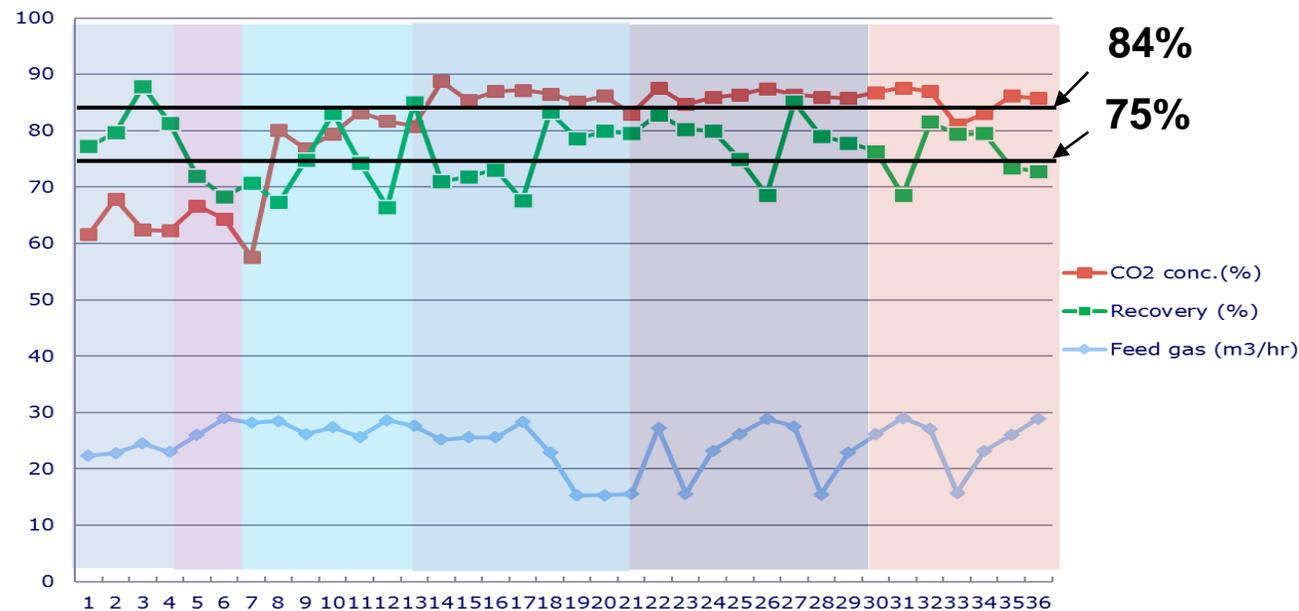
# 기체분리막을 이용한 CO2 포집기술 적용 (LNG 보일러)

✓ 30Nm<sup>3</sup>/hr bench scale system

□ The variation of feed gas composition

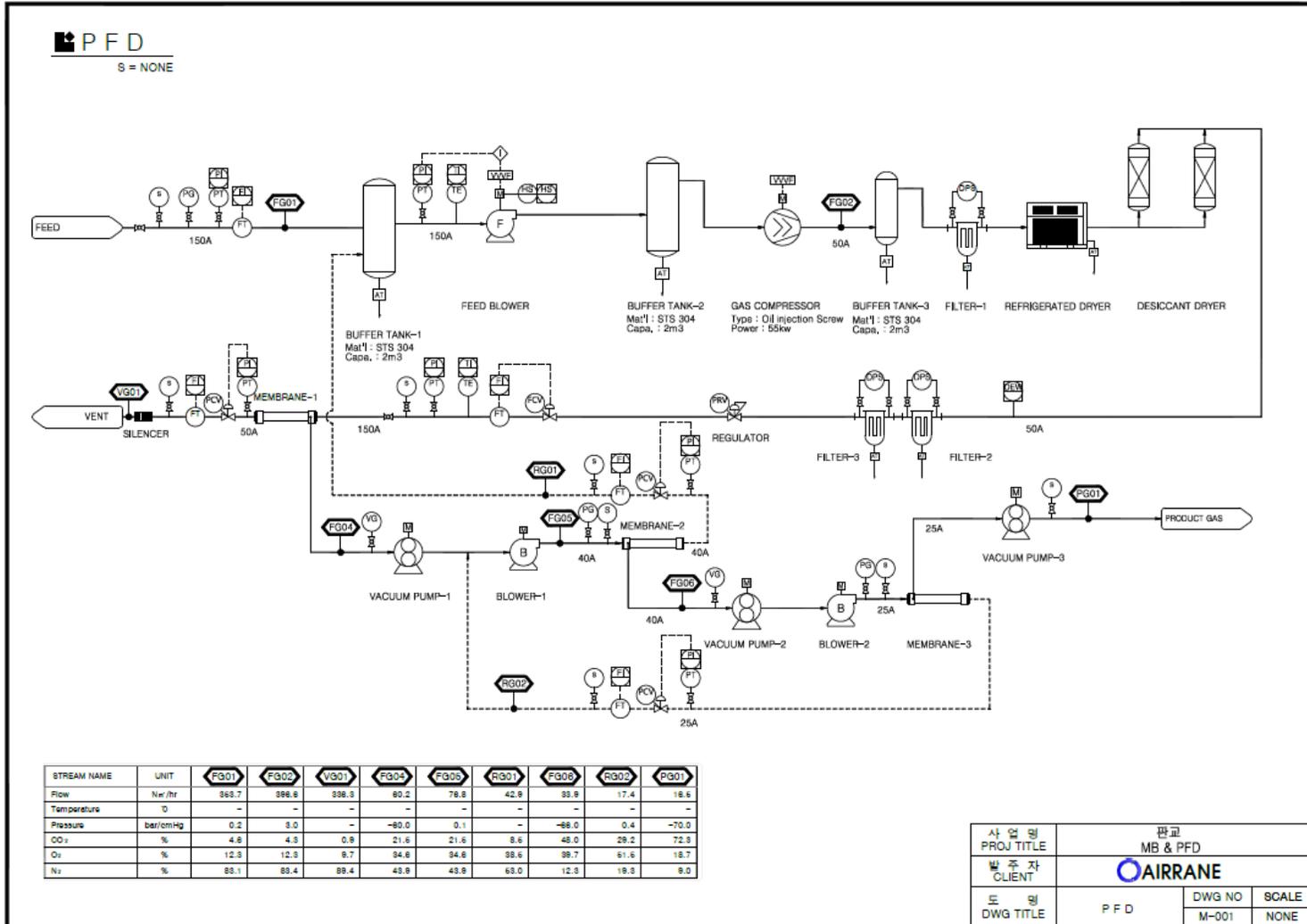


□ The CO2 purity and recovery of 3-stage process



# 기체분리막을 이용한 CO2 포집기술 적용 (LNG 발전)

## ✓ 400Nm<sup>3</sup>/hr Pilot scale system



| 가스 조성   | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|---------|-----------------|----------------|----------------|
| Feed    | ~ 4.5 %         | ~ 12.5 %       | ~83 %          |
| Product | 65~75%          | 18~20 %        | 5~7.8 %        |



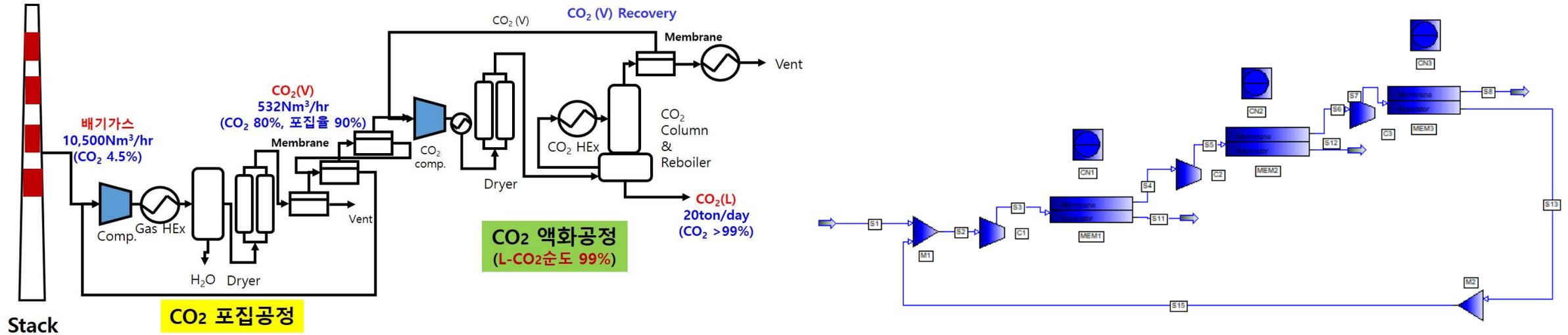
### • 현장가스 분석결과(2020.04.22)

| 가스              | 농도        |
|-----------------|-----------|
| CO <sub>2</sub> | 4.7mol.%  |
| O <sub>2</sub>  | 12.8mol.% |
| N <sub>2</sub>  | 82.4mol.% |



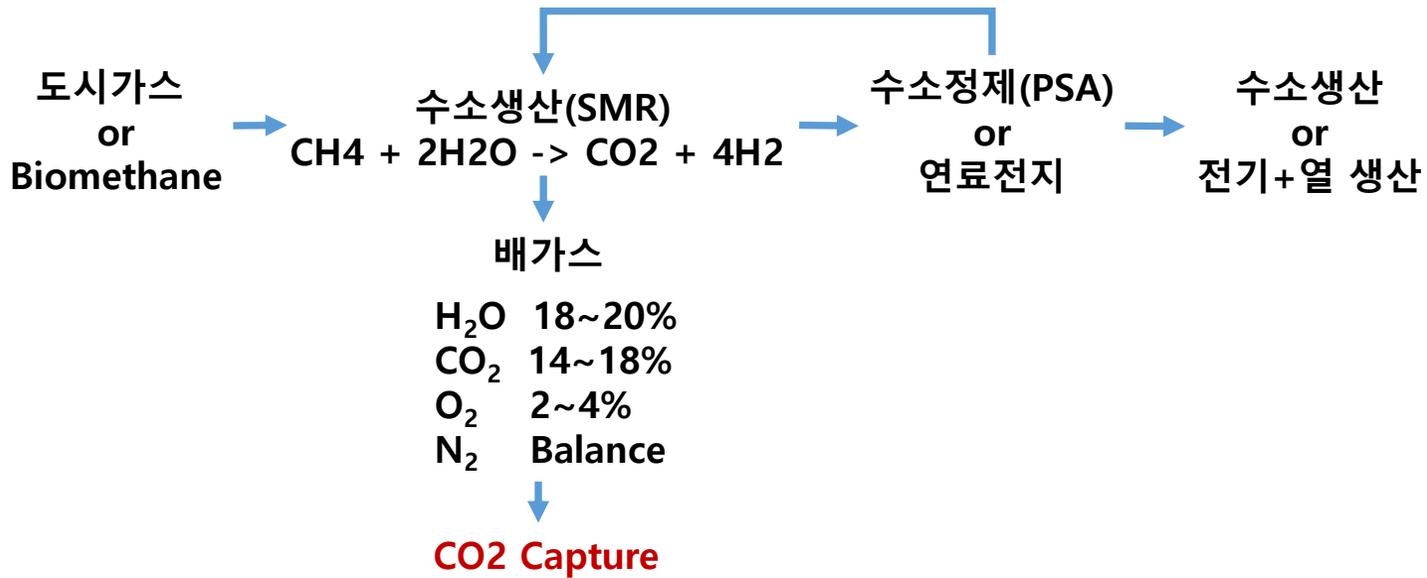
# 기체분리막을 이용한 CO2 포집기술 적용 (LNG 발전)

✓ 10,500Nm<sup>3</sup>/hr Pilot system (20TPD)

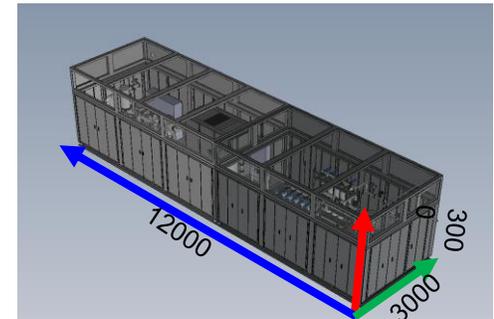
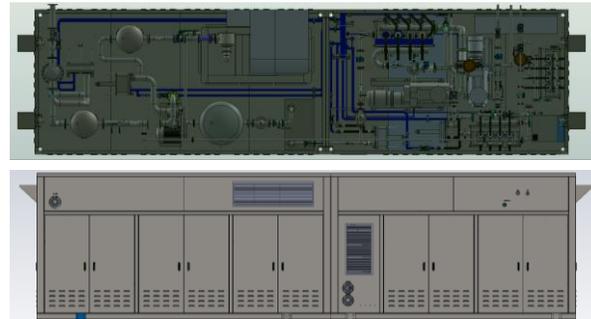


| Stream#            | UNIT   | FEED         | RETENTATE | PRODUCT      | CO <sub>2</sub> RECOVERY |
|--------------------|--------|--------------|-----------|--------------|--------------------------|
| Pressure           | barg   | 3.00         | 2.00      | 0.01         | <b>90.01%</b>            |
| Temp.              | °C     | 25           | 25        | 25           |                          |
| Flowrate           | Nm3/hr | 10,500       | 9,968     | 532          |                          |
| <b>Composition</b> |        |              |           |              |                          |
| CO <sub>2</sub>    | vol.%  | <b>4.50</b>  | 0.46      | <b>80.05</b> | <b>1,375kwh</b>          |
| O <sub>2</sub>     | vol.%  | <b>13.10</b> | 12.83     | <b>18.27</b> |                          |
| N <sub>2</sub>     | vol.%  | <b>82.40</b> | 86.71     | <b>1.68</b>  |                          |

# 기체분리막을 이용한 CO2 포집기술 적용 (수소생산 및 연료전지)



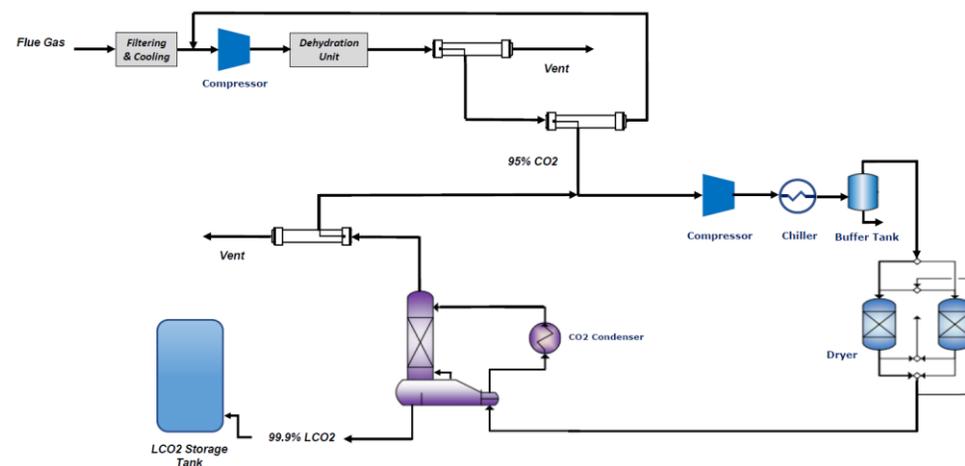
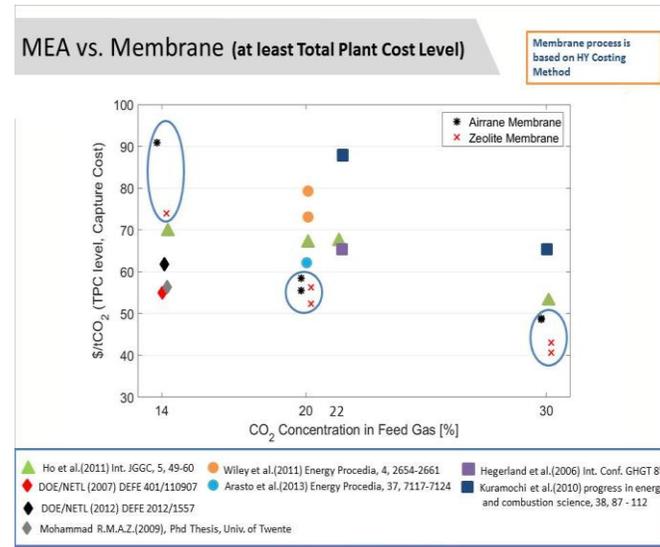
| # | 협력기관           | 현황   |
|---|----------------|--|
| 1 | P사 (H2)        | 10Nm3/h bench test 완료<br>1,000Nm3/h Pilot 예정 ('24.03)  |
| 2 | H사 (H2)        | 100Nm3/h Pilot 실증 ('24.03)                             |
| 3 | K사 (FC)        | 500Nm3/h Pilot 실증 예정 ('24.01)                          |
| 4 | S사 (FC)        | 100Nm3/h Pilot 실증 예정 ('24.01)                          |
| 5 | L사 (H2)        | 40TPD 상업시설 설치 ('24.09)                                 |
| 6 | 에기연<br>공동연구사업  | 250Nm3/h Pilot 실증 ('23.12, 환경부과제)                      |
| 7 | 충북TP<br>컨소시엄사업 | 탄소포집형 수소생산기지 구축사업 (산업부)<br>24TPD 상업시설 설치 및 운영 ('25.12) |



# 결론

## ✓ 배가스 CO2 포집 기체분리막 공정

| Parameter       | Membrane 공정 특징 및 개선사항   |
|-----------------|---|
| 배가스 CO2 농도 (%)  | 10%이상 (CO2농도증가에 따라 경제성 향상)  |
| SOx, NOx 전처리 수준 | 대기 배출기준   |
| O2 허용기준 (%)     | 20%이하   |
| 이차오염물 및 폐기물     | 매우 적음   |
| 장치크기            | 작음  |
| 장치투자비           | 작음  |
| 운영난이도           | 쉬움  |
| 유지보수 및 기타       | 쉬움  |
| 분리막 공정 개선사항     | 분리막 성능(투과도, 선택도) 향상<br>분리막+액화 Hybrid공정<br>압축기 및 진공펌프 전력비 감소를 위한 공정 설계 |



**Membrane**  
**Just Got**  
**Better**  
**For World**

**Airrane Co., Ltd.**

151-5, Gwahaksaneop 4-ro, Heungdeok-gu,  
Cheongju-si 28211, Korea

[www.airrane.com](http://www.airrane.com)

Facsimile : (82)-43-715-6582

Telephone : (82)-43-715-6580

E-mail: [chslee26@airrane.com](mailto:chslee26@airrane.com)