

LNG 냉열 활용 심냉 CO₂ 포집 공정 개발

2023 KEPIC-Week
이산화탄소 포집·활용 기술

한국전력공사 전력연구원 이동욱



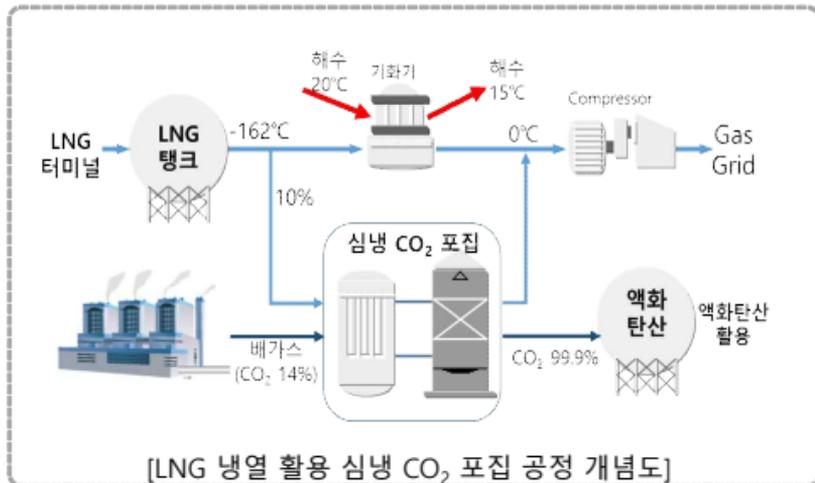
기술 개요

심냉 CO₂ 포집(Cryogenic Carbon Capture)

배가스에 포함된 CO₂를 **LNG 냉열**을 활용하여 **심냉포집**하는 기술

☞ CO₂ 배출저감, 액화탄산 산업계 공급, 폐냉열 활용

*LNG 냉열: -162°C의 LNG가 보유하고 있는 초저온 에너지, LNG를 가스 상태의 상온으로 기화하기 위해 해수 열교환 또는 연소 기화 공정을 통해서 버려지는 냉열



기체	액화온도
CO ₂	-78 °C (드라이아이스)
N ₂	-196 °C
O ₂	-183 °C
H ₂	-253 °C
LNG(CH ₄)	-162 °C

[주요가스 액화온도]

· 기존 포집공정 대비 40% 이상 CO₂ 포집비용 저감

과제 개요

최종 목표

파일럿 급 심냉 CO₂ 포집 공정 실증 및 상용급 공정 설계

연구목표

- [1차년도(6개월)] 1톤CO₂/일 규모 심냉 CO₂ 포집 파일럿 플랜트 기본설계
- [2차년도(8개월)] 1톤CO₂/일 규모 심냉 CO₂ 포집 파일럿 플랜트 상세설계
- [3차년도(20개월)] 파일럿급(1톤/일) 심냉 CO₂ 포집 플랜트 구축 및 운전최적화
상용급(100톤/일) 심냉 CO₂ 포집 플랜트 격상설계

한국전력공사 (총괄)

- 과제 총괄
- 심냉 증류탑 설계 및 공정 개념설계

한국중부발전

- 파일럿 플랜트 설계검토 및 유틸리티 지원
- LNG 터미널 연계안 도출

(주)씨이에스

- 파일럿 상세설계, 운전지원, 경제성 분석, 격상설계

(주)동화엔텍

- 컴팩트 열교환기 설계 및 제작
- 파일럿 플랜트 구축
- 파일럿 플랜트 시운전 및 변수운전

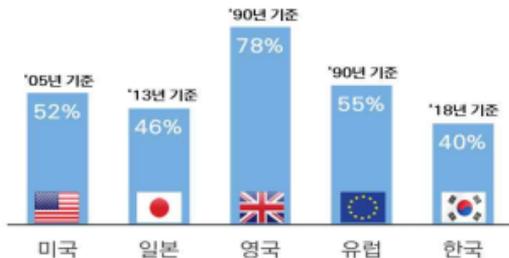
연구개발 배경

온실가스 감축목표

주요국가 온실가스 감축목표(NDC)

● 주요국가 2030 NDC 상향안 수립 동향

- 美 52%(기존 28%), 日 46%(기존 26%)
- 英 78%(기존 68%), EU 55%(기존 40%)
- 한국 40%(기존 26.3%)



국가 온실가스 감축목표 상향안(23.3)

● '30년까지 '18년 대비 $\Delta 40\%$, 2.9억톤 감축

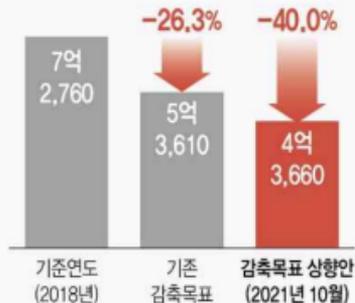
- CCUS 감축 목표 1,120만톤(기존 1030만톤)
- 국내 저장소 확보(~'24), 해외 저장소 추진

● 2050 탄소중립 시나리오

- (A안) 화력발전 전면중단, (B안) LNG 5% 잔존, CCUS 적극 활용
- CCUS 처리량 (A안) 5,510만톤, (B안) 8,460만톤
- [CCS] 6,000만톤 저장, [CCU] 광물탄산화 등 2,500만톤 전환

온실가스 배출량 감축 목표 상향안

단위: 만톤CO2eq, 2018년 배출량 대비 감축률



연구개발 배경

LNG 수요 증가

글로벌 천연가스 수요 전망

● 천연가스 글로벌 수요 증가

- 글로벌 천연가스 수요는 '30년까지 완만하게 증가
4,213bcm('21년) → 4,372bcm('30년)
- LNG 형태 가스 운송량 급격히 증가
⇒ LNG 폐냉열 활용 가능성 증대

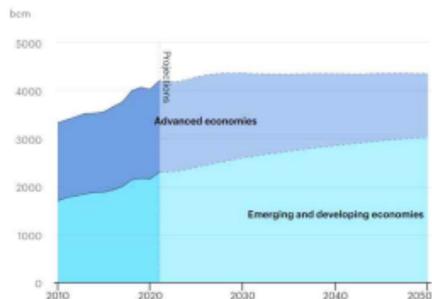
국내 천연가스(LNG) 수요 전망

● 청정에너지 수요증대에 따른 LNG 수요 증가

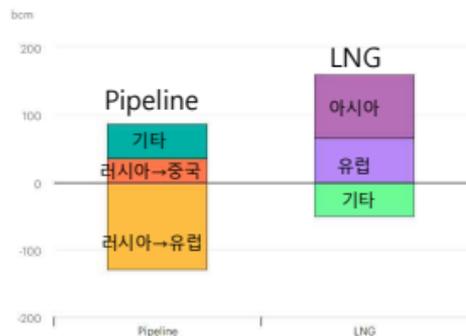
- 10차 전력수급기본계획, 석탄 → LNG(28기)
- 블루수소, 연료전지 등 천연가스 수요 증가
⇒ LNG 수요 : 5,340만TOE('20년) → 7,080만TOE('30년)

	'22년	'36년	비고
원전	24.7GW	31.7GW(+7)	· 원전 계속운전 및 신규원전 반영
석탄	38.1GW	27.1GW(-11)	· '36년까지 노후석탄 28기 폐지(現 58기)
LNG	41.3GW	64.6GW(+23.3)	· 신규 LNG 및 노후석탄 LNG 전환 반영
신재생	29.2GW	108.3GW(+79.1)	· 현실적 보급전망 반영

[10차 전력수급기본계획(산업부, 2023)]



[글로벌 천연가스 수요 전망(IEA, 2022)]



[21년 대비 '30년 천연가스 운송량 변동(IEA, 2022)]

연구개발 배경

● 국내 액화탄산 시장, 2020년 이후 만성적 공급부족

- 국내 수요 연간 100만톤 규모, 식음료 배송 증가, 드라이아이스 수요 폭발적 증가
- 국내 액화탄산 수요 연간 8% 이상 증가, 탄산 원료 공급부족으로 만성적 시장 불안정

2022년 L-CD) 업체별 장비 및 생산현황 (단위 : TPD)

회사명	원료 공급처	소재지	COMP 생산능력	장기보수 일정 및 특이사항	기anton 생산 가능량
태양케미칼	LG화학(E.O)	대산	280	- 추가증설 추진 -	40
	한화토탈(E.O)			-	90
	롯데케미칼(E.G #1)			3/14 - 4/30 (46일간)	80
	롯데케미칼(E.O)	여수	460	5/14 - 6/24 (40일간)	50
	에어리워드(F2/F4)			10월 중순 약 15일간	120
	에어리워드(F4/F4)			11월 초순 약 15일간	-
LG화학(H)	나주	40	5/09 - 5/30 (21일간)	40	
소 계		780		420	
선도화학	현대오일뱅크(H)	대산	860	4/21 - 5/25 (35일간)	270
	현대오일뱅크(H)			3/21 - 4/03 (15일간)	170
	LG화학(E.O)	-	40		
	롯데비피	울산 (150)	신규 진행 예정	미정	
	중국주정	대구	55	-	40
소 계		915(1065)		520	
왕신화학 유신화학	롯데케미칼1(E.O)	여수	240	롯데원단소재 수요	80
	롯데케미칼3(E.O)	-	-	5/14 - 6/24 (40일간)	-
	롯데케미칼(E.G #1)	대산	240	-	100
	롯데케미칼(E.G #2)	-	-	-	110
LG화학(H)	나주	150	5/09 - 5/30 (21일간)	150	
소 계		630		440	
덕양	#2 공정(H)	울산	300	-	240
	DY Chemical	(300)	신규 추진 계획	미정	
	한화토탈(E.O)	대산	140	-	40
	LG화학(E.O)	-	-	-	40
	소 계		440(740)		320
SK머티리얼즈리뉴텍	SK머티리얼즈(Ds)	울산	400	3-6월 공정별 보수	300
	SK머티리얼즈(Ds)	-	250	-	150
	소 계		650		300
신비로업 신비오케이칼	에어리워드(F2/F4)	여수	180	5/09 - 5/30 (21일간)	150
	현대오일뱅크(H)	대산	(600)	10월중 신규 가동 예정	건설중
소 계		180(780)		150	
코리아에어텍	대한토탈(E.O)	울산	140	-	100
	포항석유화학	포항	150	10-11월 수·약 30일간	100
	OCL, 세안주정	군산	20	-	20
	소 계		170		120
동광화학	S-Oil(H)	온산	300	5월말 부분 정비	300
	S-Oil(H)	(300)	23년 하반기 가동예상	유실중	
	소 계		300(600)		300
SGC머티리얼즈	저체 발전 부설	군산	(300)	23년 가동 예상	건설중
태웅씨비유	OCL SE 발전 포설	군산	(100)	23년 가동 예상	건설중
신일탄산	정혜탄산용	전주	50	4, 5월중 약 10일간 예상	50
남경산업가스	LG화학	나주	40	5/09 - 5/30 (21일간)	40
우리탄산	일산산업	황안	40	4, 5월중 10일간 예상	40
대영종합가스	서영주정	군산	20	4, 5월중 10일간 예상	20
신창	MH-에탄올	창원	15	4, 5월중 10일간 예상	15
합 계			4,370(6,120)		2,835



SBS 2022.8

연구개발 배경

핵심



- (정부) 온실가스 감축목표 상향('30년 감축량 26.3% → 40% 상향)
 - '30년 CCUS를 통한 감축목표 1,120만톤 달성을 위한 추가적인 기술방안 확보 필요
- (한전 및 발전사) 배출권 구입 및 정산비용 최소화 방안 확보 필요
 - NDC 상향 및 탄소중립 선언에 따른 발전사 온실가스 배출 감축 압박 강화
 - 저비용 CO₂ 포집기술 확보를 통한 배출권 정산비용 절감 및 ESG 경영 구현

기회



- LNG 활용 확대에 따른 발전사 LNG 직도입 추진
 - LNG 복합발전, 블루수소 생산, 연료전지 등 발전산업 LNG 활용 증대
 - 발전사 LNG 직도입에 따른 LNG 냉열 직접활용 가능

에너지신문

HCOR | 02-263-1000

중부발전 LNG터미널 건설 KDI 예타 통과

금호아시아 | 02-263-2000

정부발전도 직도입 관련 설립 신청해 예타 신청
동서상용발전도 LNG터미널 용역 조율 타진
앞서 과영 및 공복투자 우려, '차기정부 운영' 추진도



- [기존기술]
 - (LNG 기화) 해양 냉해로 인한 민원 발생 우려, LNG 기화 비용 발생
 - (CO₂ 포집) 흡수제 재생에너지 사용(스팀)
- [개발기술] LNG 냉열 활용 심냉 CO₂ 포집·액화 기술 개발
 - LNG 냉열 활용 배가스 중 CO₂ 만 선택적으로 포집·액화 처리(스팀 미사용)

심냉 CO2 포집 기술

심냉 CO2 포집 기술 분류

Cryogenic
Distillation
(Vapor-Liquid)

- 혼합기체의 끓는점 차이를 기반으로 한 전통적인 분리기술
- 천연가스 생산에서 CO2 분리 공정으로 활용
- 과냉각으로 인한 플러깅(드라이아이스 형성) 및 에너지 과다사용

Cryogenic
Heat Exchangers
(Vapor-Solid)

- 고효율 극저온 열교환기 적용 다단 열교환 공정
- -100°C 이하의 극저온 냉각 필요
- 표면의 드라이아이스 형성으로 인해 재생(해동) 공정 별도 필요

Cryogenic
Packed bed
(Vapor-Solid)

- 충전층을 질소 등으로 냉각시키고 냉각된 충전층에서 CO2를 분리하는 공정
- [CO2 포집] - [충전층 재생] - [충전층 냉각] 사이클

Cryogenic
Liquid
(Vapor-Solid)

- 혼합가스를 버블칼럼 등을 통해 극저온 액체와 접촉시켜서 극저온 액체 내에 CO2 입자가 형성되도록 하는 공정
- 별도의 고-액 분리 공정 필요

국내외 기술동향

국내외 기술개발 현황

- [국내] 가스공사, 포집된 CO₂에 대한 심냉 액화기술 개발 추진
 - 대상 : 블루수소 생산 포집 CO₂(순도 99%), 공정설계 및 경제성 평가 진행중(실증계획 없음)
- [국외] 미국 SES社, Airliquid社 등에서 심냉 CO₂ 포집 기술 개발
 - SES社 파일럿 규모(1톤/일) 공정 개발, Airliquid社 기타 혼합가스에 대한 분리기술 개발(화력발전 배가스 대상 아님)

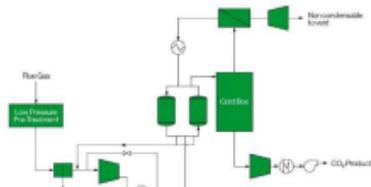
SES社



[1톤/일급 심냉 CO₂ 포집 플랜트]

- 시멘트 공정에서 CO₂ 심냉 포집
 - '19년 1톤CO₂/일 규모 파일럿 실증
- 드라이아이스 형태로 동결 포집 후 액화
 - 고체 분리 공정 및 액화공정 필요

Airliquid社



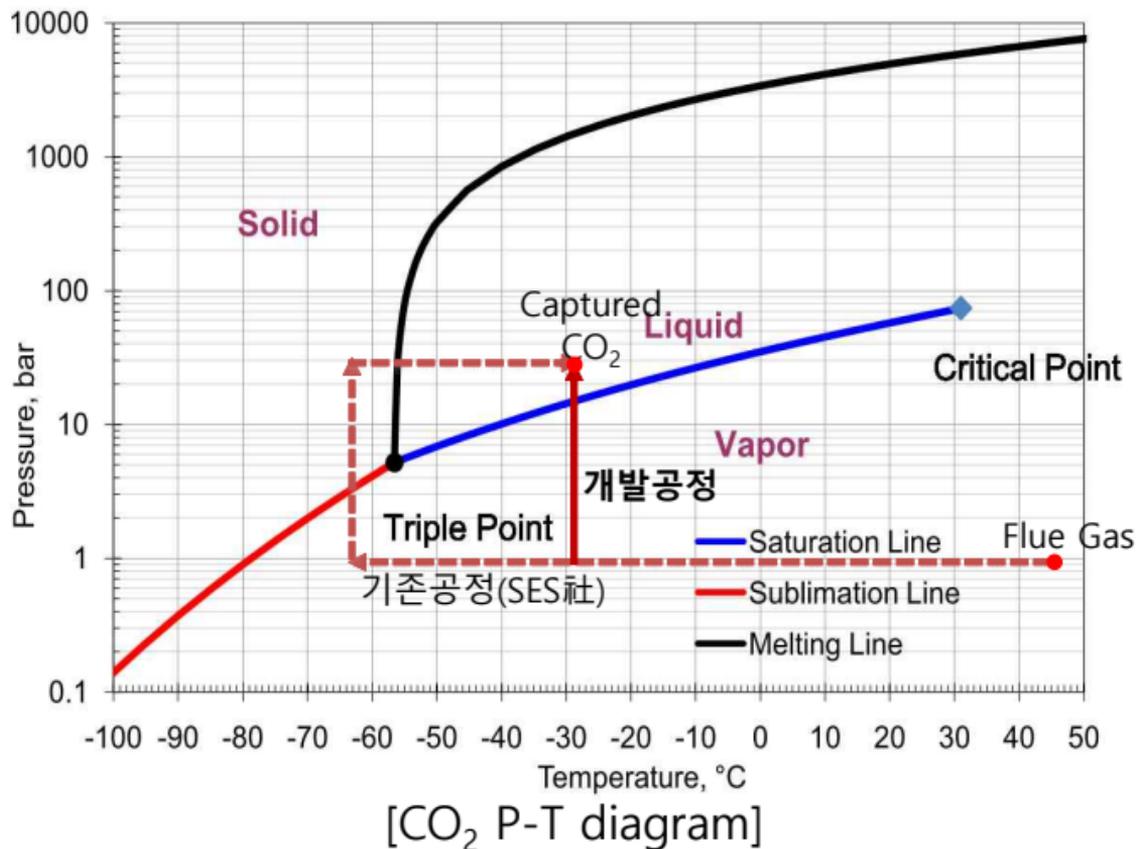
[순산소 연소 배가스 CO₂ 심냉 액화공정]

- 순산소 연소배가스, LNG 생산 공정 등에서 CO₂ 심냉 액화 공정 개발
- 석탄화력 대상 심냉 포집 개발 사례 없음

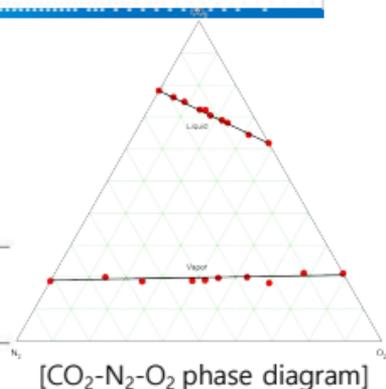
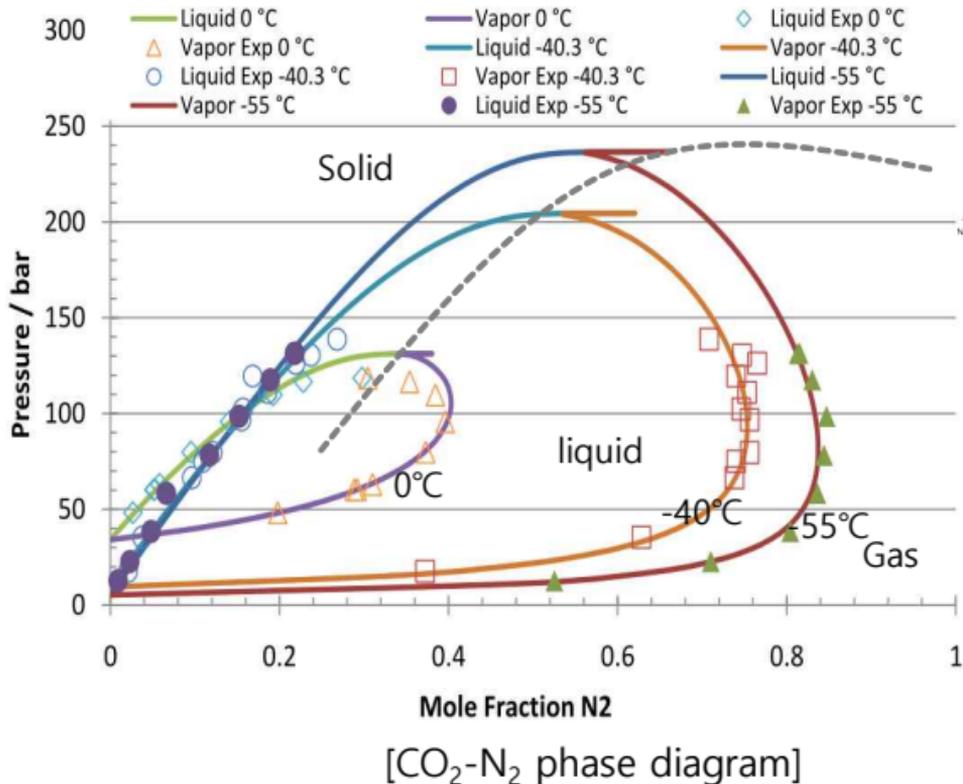
☞ 화력발전 배가스 대상 심냉 CO₂ 포집 기술 개발 사례 없음

고체 상태(드라이아이스)를 거치지 않는 **포집·액화 동시공정 개발을 통한 기술 차별화**

Thermodynamics



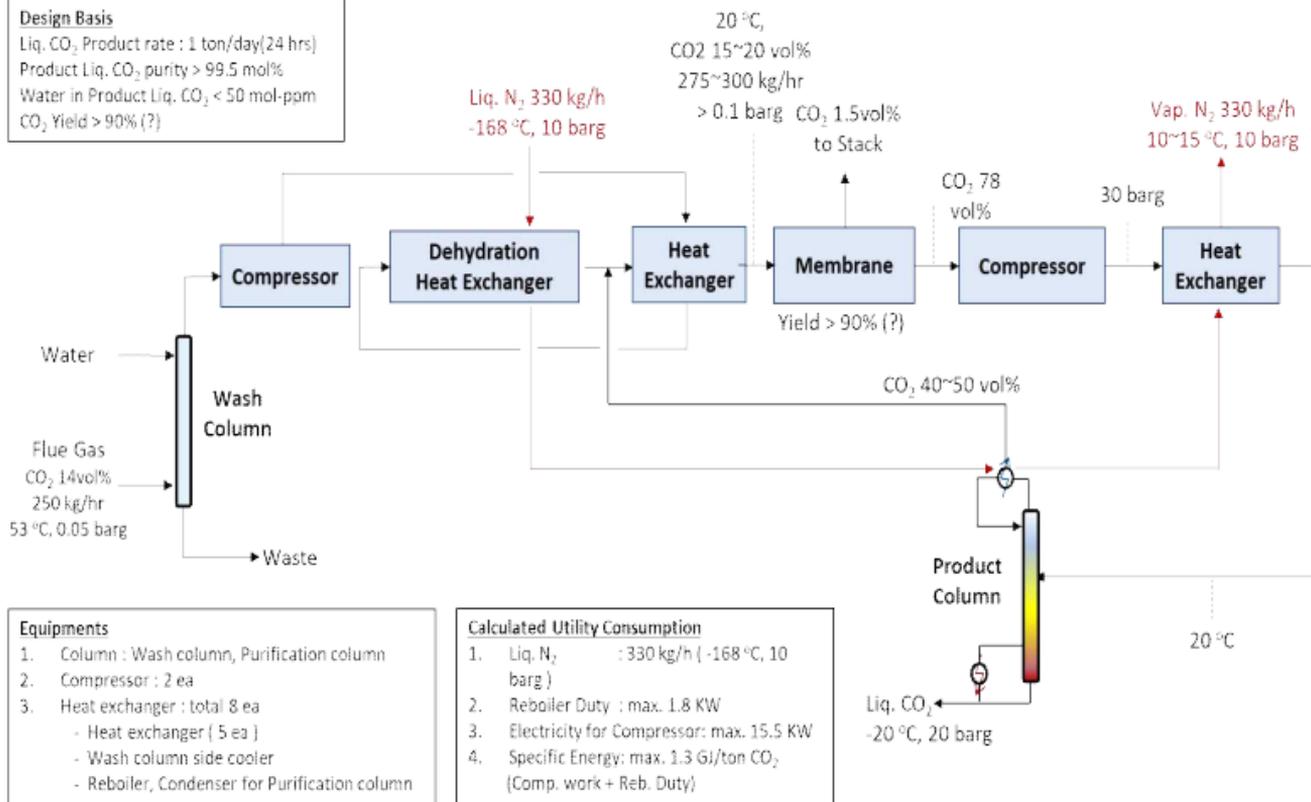
Thermodynamics



파일럿 플랜트 개념설계

Design Basis

Liq. CO₂ Product rate : 1 ton/day(24 hrs)
 Product Liq. CO₂ purity > 99.5 mol%
 Water in Product Liq. CO₂ < 50 mol-ppm
 CO₂ Yield > 90% (?)



Equipments

1. Column : Wash column, Purification column
2. Compressor : 2 ea
3. Heat exchanger : total 8 ea
 - Heat exchanger [5 ea]
 - Wash column side cooler
 - Reboiler, Condenser for Purification column

Calculated Utility Consumption

1. Liq. N₂ : 330 kg/h (-168 °C, 10 barg)
2. Reboiler Duty : max. 1.8 KW
3. Electricity for Compressor: max. 15.5 KW
4. Specific Energy: max. 1.3 GJ/ton CO₂ (Comp. work + Reb. Duty)

기술 차별성

기존 심냉 CO₂ 포집 기술과의 차별성

드라이아이스 형태를 거치지 않고 바로 액화탄산으로 분리

- 공정 전단에 분리막을 설치하여 CO₂ 농도를 1차적으로 높임
- LNG를 직접 사용하지 않고 냉매 순환을 통한 간접냉각법 적용(과냉각으로 인한 플로킹 예방)

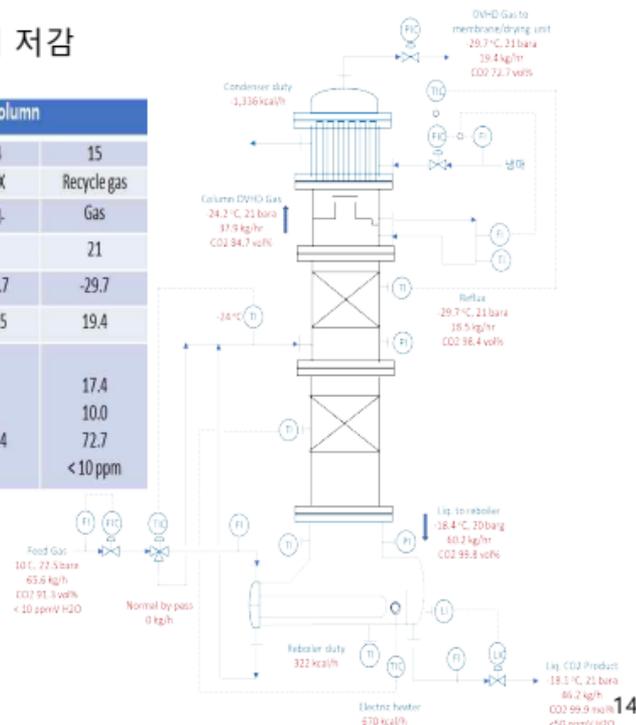
구분	SES社(미국)	개발기술
공정 구성	드라이아이스 생산 기체-고체 분리공정	분리막 적용 심냉증류탑 적용
특징	드라이아이스 생산 후 액화	액화탄산 직접 생산
냉각온도	< -75°C	~ -30°C
냉열 활용량 (추산)	7ton_LNG/ton_CO2	5.4ton_LNG/ton_CO2
공정 구성도		

심냉 증류탑 개발

심냉 증류탑 기본설계 완료

- H&M balance 도출
- 주요사양 : 순도 > 99.9% LCO2 1ton/d 생산
- Feed gas를 리보일러 열원으로 사용, 에너지 저감

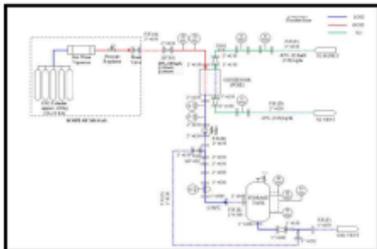
ID	Liquid CO2 Product Column						
	10	11	12V	12L	13	14	15
Description	To reboiler	From reboiler	From chiller	From chiller	Top gas	RFX	Recycle gas
Phase	Gas	Gas	Gas	Liq.	Gas	Liq.	Gas
Pressure, barA	22.5				21		21
Temp. C	10	-10	-24	-24	-24.2	-29.7	-29.7
Flowrate, kg/h	65.6				37.9	18.5	19.4
Composition, mol%							
N2	5.5						17.4
O2	3.2						10.0
CO2	91.3				84.7	98.4	72.7
H2O	< 10 ppm						< 10 ppm



심냉 포집 Compact 열교환기 개발

Compact 열교환기를 활용한 CO2 액화기초실험 수행

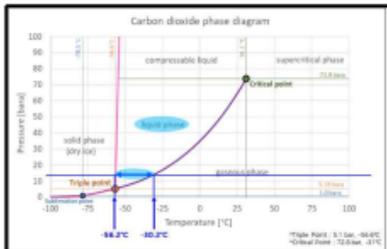
- CO2 Gas를 N2 Cold Gas와 열교환시켜 CO2를 액화하는 방식으로 실험 진행
- CO2는 압력 12~14 barg, 온도 -30 ~ -40°C 구간에서 액화됨을 확인



[CO2 액화기초실험 PFD]



[실험용 Compact 열교환기]



[CO2 P-h 선도 (액화구간)]



[CO2 액화기초실험 Test Facility 구성]

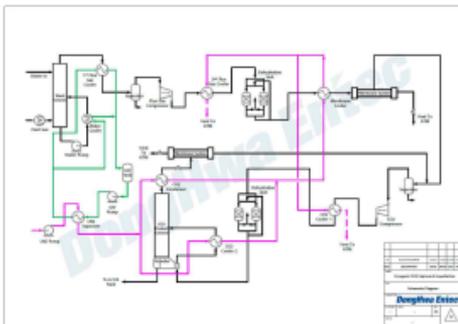


[CO2 액화 사진]

심냉 포집 Compact 열교환기 개발

파일럿급(1ton/일) 심냉 CO2 포집 플랜트 구성 열교환기 사양 도출

- 개념설계(안) 활용, 심냉 CO2 포집 플랜트 구성 열교환기 사양 도출
- 공정의 목적에 맞게 각 열교환기의 작동 조건 파악 및 타입 선정
- 동화엔텍 제작 열교환기 사양 확정



[심냉 CO2 포집 및 액화시스템 개념설계도]

가) Wash Column Water Cooler		나) 1st Flue Gas Cooler		다) 2nd Flue Gas Cooler		라) 1st Membrane Cooler	
Type	Side A	Type	Shell	Type	Side A	Type	Side A
Fluid	Shell / Tube	Fluid	Flue Gas	Fluid	Flue Gas	Fluid	Flue Gas
Mass Flow	877.6 t/d	Mass Flow	240 t/d	Mass Flow	297 t/d	Mass Flow	29 t/shift
Temperature (In / Out)	35.4 °C / 3	Temperature (In / Out)	45.1 °C / 3	Temperature (In / Out)	31.7 °C / 3	Temperature (In / Out)	0 °C / -20
Pressure (In / Out)	2.0 barg / 1	Pressure (In / Out)	3.04 barg / 1	Pressure (In / Out)	3.17 barg / 1	Pressure (In / Out)	1.457 barg / 1
Std Connection (In / Out)	35A / 35A	Std Connection (In / Out)	40A / 40A	Std Connection (In / Out)	40A / 40A	Std Connection (In / Out)	40A / 40A

마) 2nd Membrane Cooler		바) CO2 Cooler 1		사) CO2 Column Reboiler	
Type	PCHE	Type	Side A	Type	Shell & Tube (Circlet)
Fluid	Flue Gas	Fluid	CO2	Fluid	Tube / Shell
Mass Flow	71.1 t/d	Mass Flow	45.3 t/d	Mass Flow	45.3 t/d
Temperature (In / Out)	76.7 °C / -20 °C	Temperature (In / Out)	32 °C / -30 °C	Temperature (In / Out)	32 °C / -30 °C
Pressure (In / Out)	0.02 barg / 0.01 barg	Pressure (In / Out)	30.9 barg / 30.7 barg	Pressure (In / Out)	30.9 barg / 30.7 barg
Std Connection (In / Out)	35A / 35A	Std Connection (In / Out)	35A / 35A	Std Connection (In / Out)	35A / 35A

가) CO2 Cooler 2		나) CO2 Heater	
Type	Side A	Type	PCHE
Fluid	CO2	Fluid	Direct Water
Mass Flow	49.4 t/d	Mass Flow	44.75 t/d
Temperature (In / Out)	30 °C / 30 °C	Temperature (In / Out)	-45.23 °C / -20 °C
Pressure (In / Out)	30.9 barg	Pressure (In / Out)	30.9 °C / 30 °C
Std Connection (In / Out)	35A / 1	Std Connection (In / Out)	3 barg / 1.5 barg

다) CO2 Column Condenser	
Type	PCHE (or PRPB)
Fluid	CO2
Mass Flow	47.75 t/d
Temperature (In / Out)	-26.7 °C / -27.7 °C
Pressure (In / Out)	30.4 barg / 30.3 barg
Std Connection (In / Out)	35A / 35A

[열교환기 11종 사양]

공정모사 : 최적 열역학모델 선정

왜, WHY?

- 수행 이유 -

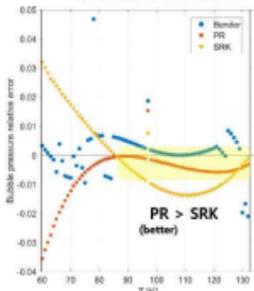
- 공정모사: 실제 공정현상을 연산가능한 수식모델로 표현한 것.
 - 모든 물성 계산이 선정된 열역학적 모델을 기반으로 계산됨.
 - 특히, 본 과제와 같이 운전조건이 일반적이지 않은 경우, 더욱 중요함.

어떻게, HOW?

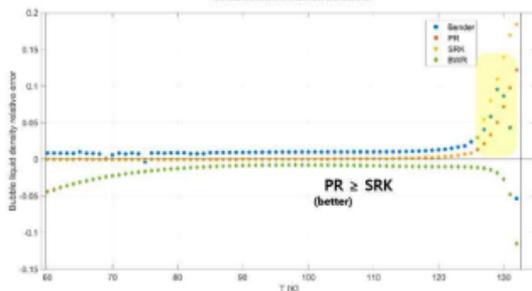
- 수행 과정 -

- 본 공정에서 가장 열역학적 모델이 중요하게 적용되는 기기는 **증류탑**.
 - 관여 유체는 질소, 산소, CO₂로, 위 물질들의 물성 중 증류탑 설계에 관여하는 물성들이 실제값에 가장 가깝게 적용될 수 있는 열역학적 모델을 선정해야 함.
 - Bubble point pressure, Bubble point liquid density, Dew point pressure, Dew point vapor density의 실험결과와 열역학적 모델의 계산 결과값을 비교한 논문*을 참고하여 오차가 가장 적은 모델을 선정함.

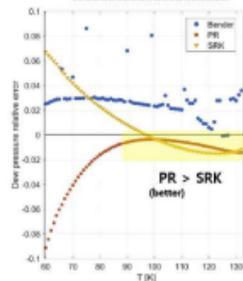
Bubble point pressure



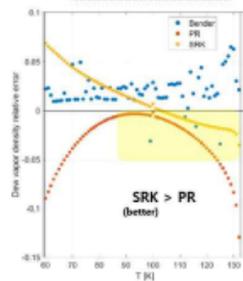
Bubble point liq. density



Dew point pressure



Dew point vap. density



* 발췌 및 인용: Bisotti, Filippo, et al. "Implementing a robust thermodynamic model for reliable bubble/dew problem solution in cryogenic distillation of air separation units." International Journal of Thermofluids 10 (2021): 100083.

RESULTS

- 수행 결과 -

- **Peng-Robinson(PR) EoS**가 실제 현상을 가장 잘 반영하는 열역학적 모델로 선정됨**.

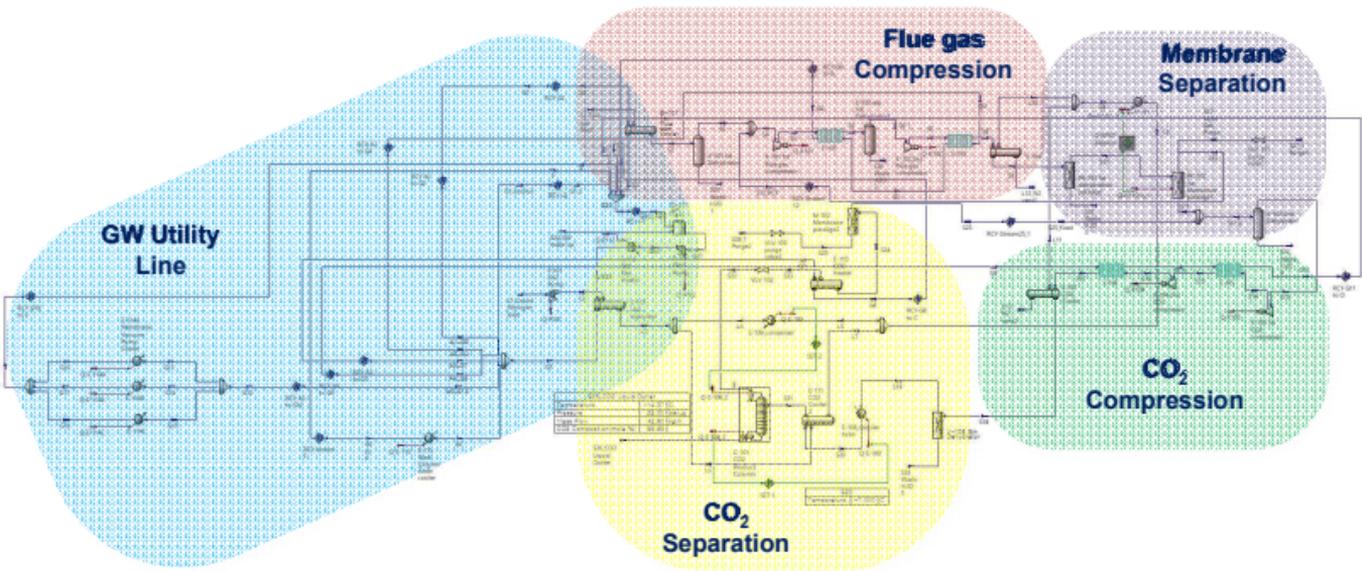
** 비교 후보군: Peng-Robinson(PR) / Soave-Redlich-Kwong(SRK) / Benedict-Webb-Rubin (BWR) / Bender. 총 4가지 모델

통합공정모사 모델링 수행

Process Simulation

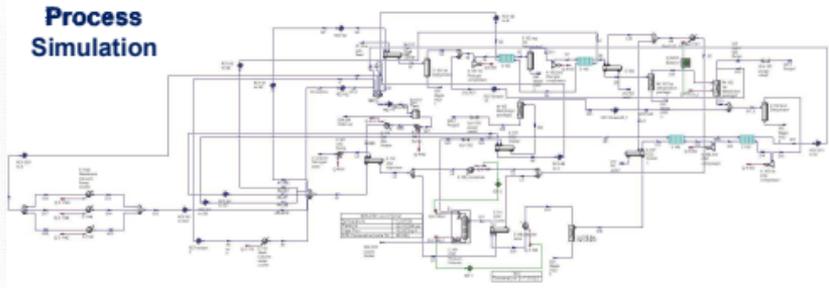
□ 전체 공정 Section에 대한 통합공정모사 수행.

- ① Flue gas compression section
- ② Membrane separation section
- ③ CO₂ compression section
- ④ CO₂ separation section
- ⑤ GW Utility line section
- Process simulation tool: Aspen HYSYS® V11 사용



통합공정 기본설계(안)

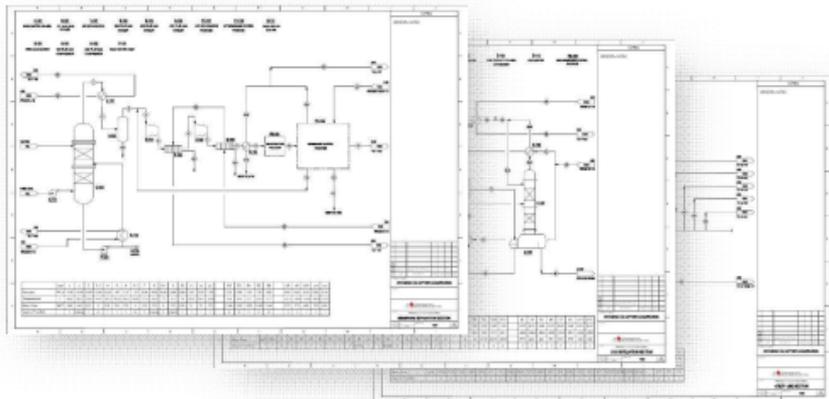
Process Simulation



기본설계(안) 도출

- Base case에 대한 PFD, HMB 도출.
 - Target Capacity & Purity 충족 (1.027 CO₂tpd / 99.9 vol%)

PFD & HMB



향후 최적화 방향

- Optimization:
 1. Energy consumption 최소화 및
 2. CO₂ production rate 최대화
 - Compressor의 stage 및 ratio shift
 - CO₂ Distillation column design 변경 case study를 통한 CO₂ 생산량 증대



감사합니다