

LNG 냉열 활용 심냉 CO₂ 포집 공정 개발

2023 KEPIC-Week
이산화탄소 포집·활용 기술

한국전력공사 전력연구원 이동욱



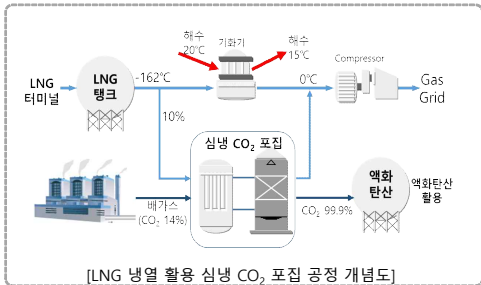
기술 개요

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

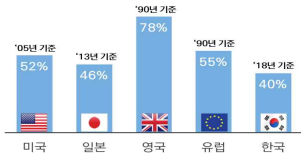
연구개발 배경

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

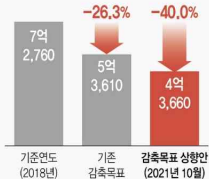
- CCUS 감축 목표 1,120만톤(기존 1030만톤)
- 국내 저장소 확보(~'24), 해외 저장소 추진

● 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

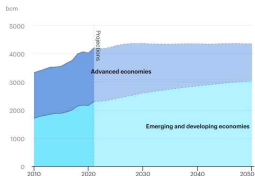
국내 천연가스(LNG) 수요 전망

● 청정에너지 수요증대에 따른 LNG 수요 증가

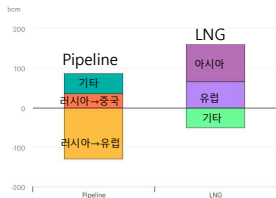
- 10차 전력수급기본계획, 석탄 → LNG(28기)
- 블루수소, 연료전지 등 천연가스 수요 증가
⇒ LNG 수요 : 5,340만TOE('20년) → 7,080만TOE('30년)

	'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	기간중 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(F23H)			10월 중순 약 15일간	120
	에어리워드(F43H)			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	
덕일	#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
SK머티리얼스리뉴텍	SK머티리얼(Ds)	울산	400	3-6월 공정별 보수	300
	SK머티리얼(Ds)	250	300		
	소 계	650	300		
신비로엠티 신비오계케미칼	에어리워드(F33H)	여수	180	5/09 - 5/30 (21일간)	150
	현대오일뱅크(H)	대산	(600)	10월중 신규 가동 예정	건설중
	소 계	180(780)	150		
코리아에어텍	대한유화(E.O)	울산	140	-	100
	보령화학공업	보령	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)			23년 하반기 가동예상	유실중
	소 계			300(600)	300
SGC머티리얼	지체 발전 투입	군산	(300)	23년 가동 예상	건설중
태웅씨비유	OCL SE 발전 포집	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 불량' 우회도



- [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)

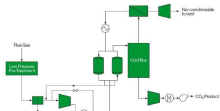
SES社



[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



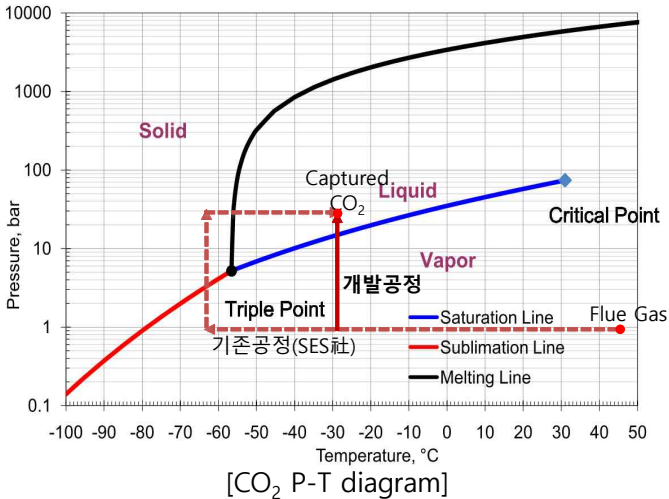
[순산소 연소 배가스 CO₂ 심냉 액화공정]

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

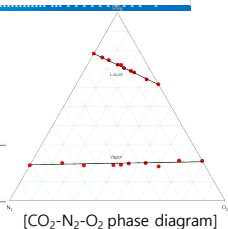
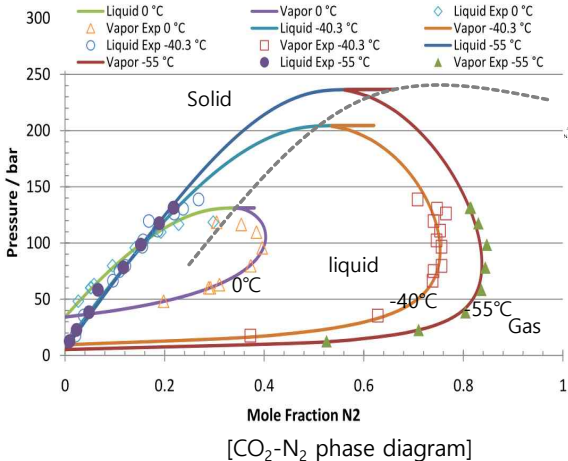
☞ 화력발전 배가스 대상 심냉 CO₂ 포집 기술 개발 사례 없음

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

Thermodynamics



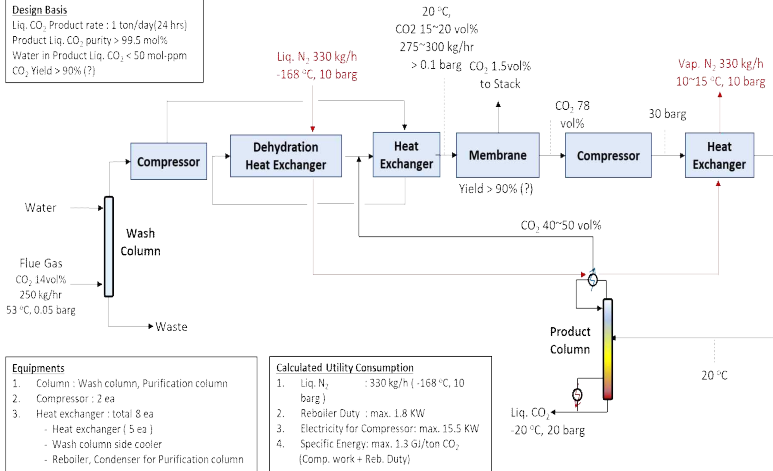
Thermodynamics



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

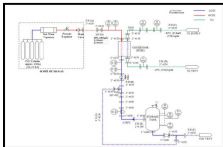
- 공정 전단에 분리막을 설치하여 CO₂ 농도를 1차적으로 높임
- LNG를 직접 사용하지 않고 냉매 순환을 통한 간접냉각법 적용(과냉각으로 인한 플로킹 예방)

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 포집 Compact 열교환기 개발

Compact 열교환기를 활용한 CO2 액화기초실험 수행

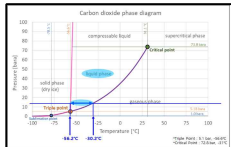
- CO2 Gas를 N2 Cold Gas와 열교환시켜 CO2를 액화하는 방식으로 실험 진행
- CO2는 압력 12~14 barg, 온도 -30 ~ -40°C 구간에서 액화됨을 확인



[CO2 액화기초실험 PFD]



[실험용 Compact 열교환기]



[CO2 P-h 선도 (액화구간)]



[CO2 액화기초실험 Test Facility 구성]

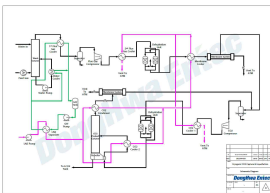


[CO2 액화 사진]

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) 2nd Membrane Cooler		다) CO2 Column Reboiler		
Type	Side A	Type	PCHE	Type	Shell & Tube (Gasket)	
Fluit	0.061 / 0.061	Fluit	Side A	Fluit	CO2	Shell
Mass Flow	877.6 kg/h	Fluit	Side B	Mass Flow	45.3 kg/h	CO2
Temperature (In / Out)	35.4 °C / 3	Mass Flow	71.1 kg/h	Temperature (In / Out)	32 °C / -20 °C	-
Pressure (In / Out)	2.0 barg / 1	Temperature (In / Out)	76.7 °C / -20 °C	Pressure (In / Out)	30.9 barg / 30.7 barg	-
End Connection (In / Out)	35A / 35A	Pressure (In / Out)	0.02 barg / 0.01 barg	End Connection (In / Out)	35A / 35A	-
		End Connection (In / Out)	35A / 35A	End Connection (In / Out)	35A / 35A	-
나) 1st Flue Gas Cooler		다) CO2 Cooler 1		라) CO2 Heater		
Type	Shell	Type	Side A	Type	Side A	PCHE
Fluit	Fluit	Fluit	CO2	Fluit	CO2	Shell Water
Mass Flow	340 kg/h	Mass Flow	87.7 kg/h	Mass Flow	37.62 kg/h	44.76 kg/h
Temperature (In / Out)	48.1 °C / 3	Temperature (In / Out)	38 °C / 3	Temperature (In / Out)	-63.23 °C / -20 °C	20.9 °C / 28 °C
Pressure (In / Out)	0.04 barg / 1	Pressure (In / Out)	21.36	Pressure (In / Out)	6.797 barg / 6.697 barg	2 barg / 1.9 barg
End Connection (In / Out)	35A / 35A	End Connection (In / Out)	35A / 1	End Connection (In / Out)	35A / 35A	35A / 35A
다) 2nd Flue Gas Cooler		라) CO2 Cooler 2		마) CO2 Column Condenser		
Type	Side A	Type	Side A	Type	Side A	PCHE (or PRPH)
Fluit	Fluit	Fluit	CO2	Fluit	CO2	Side B
Mass Flow	787 kg/h	Mass Flow	88.9 kg/h	Mass Flow	47.72 kg/h	327.3 kg/h
Temperature (In / Out)	38 °C / 3	Temperature (In / Out)	30 °C / 3	Temperature (In / Out)	-26.7 °C / -27.7 °C	-70 °C / -53.53 °C
Pressure (In / Out)	0.175 barg	Pressure (In / Out)	20.36	Pressure (In / Out)	30.4 barg / 30.3 barg	30.4 barg / 30.3 barg
End Connection (In / Out)	35A / 35A	End Connection (In / Out)	35A / 1	End Connection (In / Out)	35A / 35A	35A / 35A
라) 1st Membrane Cooler		바) LN2 Vaporizer				
Type	Side A	Type	Side A			
Fluit	Fluit	Fluit (In / Out)	LN2 / 1			
Mass Flow	79 kg/h	Mass Flow	498.1			
Temperature (In / Out)	0 °C / -20	Temperature (In / Out)	-184.4			
Pressure (In / Out)	1.457 barg	Pressure (In / Out)	30 barg			
End Connection (In / Out)	35A / 35A	End Connection (In / Out)	30A / 1			

[열교환기 11종 사양]

심냉 포집 Compact 열교환기 개발

CO2 액화용 Compact 열교환기 기본설계

- Compact 열교환기 사양 선정
- Compact 열교환기 설계요구특성 분석 및 설계기술확보
- Compact 열교환기 정의 : (기체) 밀집도가 700 m²/m³ 이상인 열교환기
- CO2 Column Condenser의 경우, 동일 열량의 Shell & Tube 열교환기 대비, 사이즈가 약 1/10 이하로 축소됨

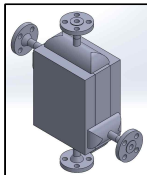
Name : [CO2 Column Condenser]		
Type	PCHE (or PFHE)	
	Side A	Side B
Fluid	CO2	N2
Mass Flow	47.72 kg/h	127.3 kg/h
Temperature (In / Out)	-25.7 °C / -27.7 °C	-70 °C / -53.53 °C
Pressure (In / Out)	20.4 barg / 20.3 barg	20.4 barg / 20.3 barg
End Condition	[CO2 액화용 Compact 열교환기 사양]	

가) 고압, 저온의 작동환경에서 기밀 유지를 고려한 설계 반영

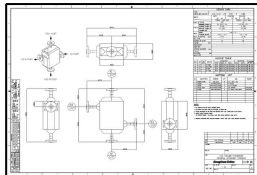
나) 작동유체 (CO2/N2)를 고려하여 Compact 열교환기 재질 선정

- CO2 액화용 열교환기는 CO2 Product Column의 상단에 설치되며, 이 때의 운전 압력은 최대 21 barg
- 작동 시 누설이 발생하지 않도록 Plate의 두께, 적층방식, 유로단면 및 형상, 재질 등을 적절히 선정하여 설계에 반영

[Data Sheet]



[열교환기 3D 모델링]



[CO2 액화용 Compact 열교환기 GA]

공정모사 : 최적 열역학모델 선정

왜, WHY?

- 수행 이유 -

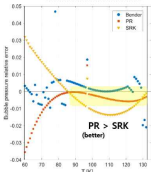
- 공정모사: 실제 공정현상을 연산가능한 수식모델로 표현한 것.
 - 모든 물성 계산이 **선정한 열역학적 모델을 기반으로 계산됨.**
 - 특히, 본 과제와 같이 운전조건이 일반적이지 않은 경우, 더욱 중요함.

어떻게, HOW?

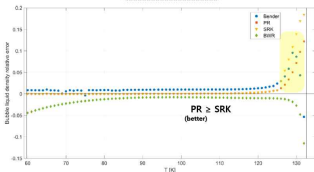
- 수행 과정 -

- 본 공정에서 가장 열역학적 모델이 중요하게 적용되는 기기는 **증류탑.**
 - 관여 유체는 **질소, 산소, CO₂**로, 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.**

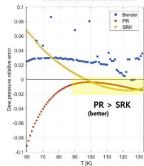
Bubble point pressure



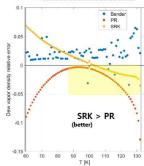
Bubble point liq. density



Dew point pressure



Dew point vap. density



* 발췌 및 인용: Bisotti, Filippo, et al. "Implementing 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**.

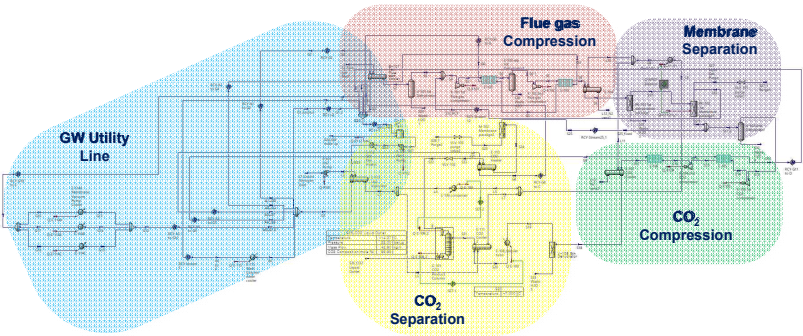
** 비교 후보군: Peng-Robinson(PR) / Soave-Redlich-Kwong(SRK) / Benedict-Webb-Rubin (BWR) / Bender. 총 4가지 모델

통합공정모사 모델링 수행

Process Simulation

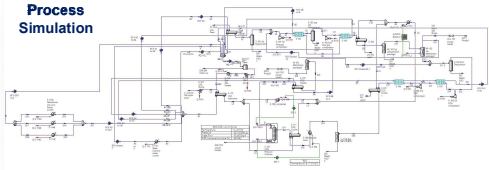
□ 전체 공정 Section에 대한 통합공정모사 수행.

- 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)

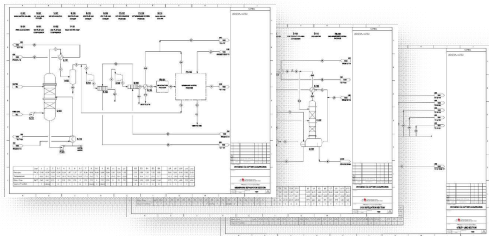
Process Simulation



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