

최종보고서(일반과제용)										보안등급 일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부				사업명	사업명				국토교통기술촉진연구사업	
전문기관명	국토교통과학기술진흥원				내역사업명						
공고번호	공고-제00호				총괄연구개발 식별번호					-	
					연구개발과제번호					21CTAP-C157250-02	
국가과학기술 표준분류	H0102		40%	EH0104		30%	H1202		30%		
총괄연구개발명	국문	액체건조제를 활용한 막증류기반 에너지절약형 실내 미세먼지 제거 기술 개발									
	영문	Development of an energy efficient indoor fine dust control system using membrane distillation with liquid desiccant cycle									
연구개발과제명	국문										
	영문										
주관연구기관	기관명	부산대학교 산학협력단				사업자등록번호	621-82-06530				
	주소	(우46241) 부산대학교 금정구 부산대학로63번길 2				법인등록번호					
주관연구책임자	성명	정상현				직위	조교수				
	연락처	직장전화	051-510-2895			휴대전화	010-3297-3412				
		전자우편	sh.jeong@pusan.ac.kr			국가연구자번호	1153-9844				
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 8.6개월)									
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31(0년 8.6개월)									
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년 개월)									
	3년차	YYYY. MM. DD - YYYY. MM. DD(년 개월)									
	m년차	YYYY. MM. DD - YYYY. MM. DD(년 개월)									
	n년차	YYYY. MM. DD - YYYY. MM. DD(년 개월)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금 자립재단체 기타()				합계			연구개발비 외 지원금
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	370,000			-	-	-	-	370,000		370,000	-
1년차	160,000			-	-	-	-	160,000		160,000	-
2년차	210,000			-	-	-	-	210,000		210,000	-
3년차				-	-	-	-				-
m년차				-	-	-	-				-
n년차				-	-	-	-				-
공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고					
						역할 기관유형					
공동연구기관	한국산업기술시험원	김환	선임연구원	010-4159-1159	hhwany83@ktl.re.kr	공동 정부출연연					
위탁연구기관											
연구기관 외 기관											
연구개발담당자 실무담당자	성명	이지은			직위	연구교수					
	연락처	직장전화	-			휴대전화	010-3037-7916				
		전자우편	99atkins07@gmail.com			국가연구자번호	1022-4109				

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022년 2월 22일

주관연구책임자 :

정상현



주관연구기관의 장 :

부산대학교 산학협력단 최경민



국토교통과학기술진흥원장 귀하

본 서식은 「국가연구개발혁신법」 시행('21.01.01) 이전에 최종 협약하여 '21.01.01 이후에 최종평가를 시행하는 일반과제용 입니다.

< 요약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구 사업			총괄연구개발 식별번호		-	
내역사업명					연구개발과제번호		21CTAP-C157250-02	
국가과학기술 표준분류		H0102	40%	EH0104	30%	H1202	30%	
총괄연구개발명		액체건조제를 활용한 막증류기반 에너지절약형 실내 미세먼지 제거 기술 개발						
연구개발과제명								
전체 연구개발기간		2020.04.13 - 2021.12.31(1년 8.6개월)						
총 연구개발비		총 370,000 천원 (정부지원연구개발비 : 370,000 천원, 기관부담연구개발비 : 천원, 지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)						
연구개발단계		기초[☒] 응용[☐] 개발[☐] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[☐]			기술성숙도		착수시점 기준(☐) 종료시점 목표(☐)	
연구개발과제 유형		지정공모 [☐] 자유공모 [☒]						
연구개발과제 특성		실용화						
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		액체 건조제 순환공정을 통한 실내 공기질 개선(미세먼지 저감, 습도조절 등) 원천기술 확보					
	전체 내용		미세먼지를 포함한 실내 공기를 액체 건조제(Liquid desiccant, LD)와 접촉시켜, 공기 중에 함유된 수분과 먼지를 액체 건조제로 흡수 및 흡착시키고 먼지가 제거된 청정 공기는 건물 내로 순환시켜 건물 내 실내 공기질을 향상시키는 미세먼지 정화 시스템을 개발하고자 함					
	1년차	목표	미세먼지 제거효율 극대화를 위한 LD 최적 활용 기술 개발					
		내용	- LD의 미세먼지 제거효율 평가 및 최적화 - LD의 미세먼지 제거성능 평가방법 규격화					
	2년차	목표	막증류법(Membrane distillation, MD)을 이용한 희석된 액체건조제의 농축(회수) 및 수분(물) 회수 최적화 기술 개발					
		내용	- 반응성 분리막(Reactive membrane)에 의한 액상에 포집된 미세먼지의 분리 및 제거 기술 개발 - 액체건조제-막증류(LD-MD) 시스템 성능평가 시험설계 및 정량적 평가수행 - 막증류법의 액체건조제 농축 및 수분회수 성능평가방법 규격화					
연구개발성과		○ 막증류법을 이용한 희석된 액체건조제의 농축(회수) 및 수분(물) 회수 최적화 기술 - 막증류를 이용한 최적 액체 건조제 회수 공정 최적화를 위해 온도, 유속(유량), 액체 건조제 종류 및 농도에 따른 막 파울링 관찰 및 플럭스 측정, 다른 막증류법 (직접접촉식이나 진공 막증류) 또는 평판형이나 중공사형 모듈 평가를 통한 최적 막증류 공정 설계 (실험실) ○ 액상에 포집된 미세먼지의 분리 및 제거 기술 - 액체 건조제에 의해 포집된 (초)미세먼지를 제거하기 위한 최적 분리막 선정 및 분리 공정 설계 및 평가 (실험실) ○ 막증류법을 이용한 희석된 액체건조제의 농축(회수) 및 수분(물) 회수 최적화 기술 - 막증류를 이용한 최적 액체 건조제 회수 공정 최적화를 위해 온도, 유속(유량), 액체 건조제 종류 및 농도에 따른 막 파울링 관찰 및 플럭스 측정, 다른 막증류법 (직접접촉식이나 진공 막증류) 또는 평판형이나 중공사형 모듈 평가를 통한 최적 막증류 공정 설계 (챔버 표준시험) ○ 액상에 포집된 미세먼지의 분리 및 제거 기술 - 액체 건조제에 의해 포집된 (초)미세먼지를 제거하기 위한 최적 분리막 선정 및 분리 공정 설계 및 평가 (챔버 표준시험)						

연구개발성과 활용방안 및 기대효과	○ 미세먼지 제거 및 습도 조절을 통한 건물 실내 공기질 개선의 핵심요소기술 및 미래원천기술 확보 (시스템 기술) ○ 후속 연구를 통한 프로토타입 장치를 개발하고 제작하여 시스템의 신뢰성 및 안전성을 평가하고, 시범운행을 통해 실용화 및 사업화를 위한 실제 환경 사용 가능성 및 사용적합성을 증명 ○ 실내공기질 개선 장치: 건물 내 미세먼지를 제거하고 습도를 조절함으로써 쾌적하고 건강한 생활환경을 조성하고 추가적인 냉·난방 효과를 기대 ○ 실내 조경 인테리어: 막증류를 포함한 액체 건조제 순환공정에서 회수된 물을 실내 조경 인테리어 조성 및 유지에 이용하고, 조성된 식생에 의한 산소공급에 따른 추가 실내공기질 개선 효과를 기대 ○ 도시 농업 사업: 액체 건조제 순환공정의 제습 및 물 회수 기술은 도시 내 건물에서의 도시 농업 혹은 스마트팜 (smart farm)에 적용가능하며, 이를 통한 대기-물-식량 연계 인프라 설계 기대 ○ 그린 인프라 구축: 건물 내 폐열 재이용, 스마트 물순환, 대기질 향상 등 미래 스마트 시티 구축의 핵심기술로서 이용이 가능하며, 소규모 건물 단위의 그린인프라 구축이 가능											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	2	4	N	N	N	N		N	N	N	N	N
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
	N	N	N	N	N	N	N	N	N			
국문핵심어 (5개 이내)	액체건조제		미세먼지		공기정화		막증류		반응성분리막			
영문핵심어 (5개 이내)	Liquid Desiccant		Fine Dust		Air Purification		Membrane Distillation		Reactive Membrane			

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

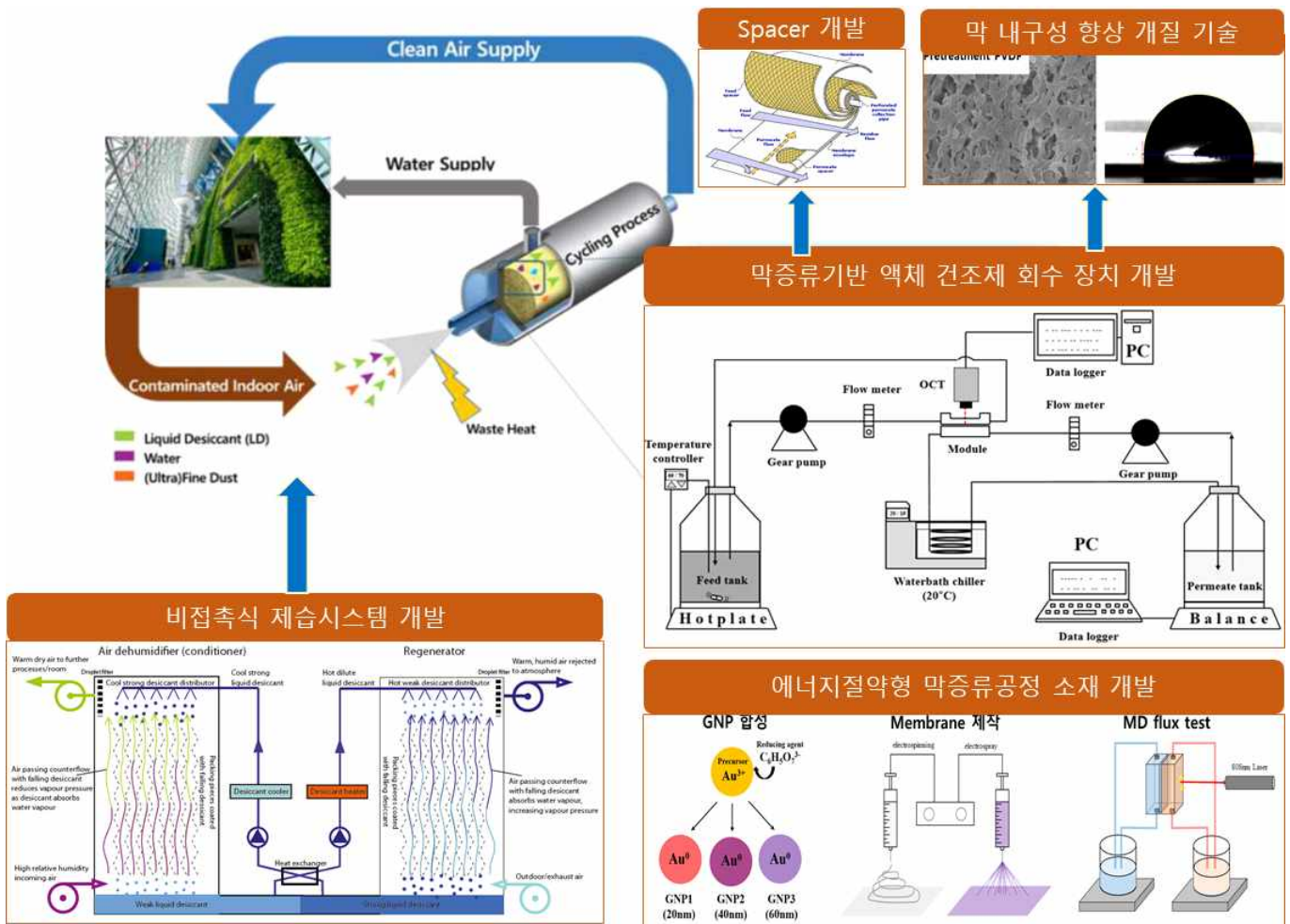
별첨자료(참고문헌 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

○ 액체 건조제 순환공정을 통한 실내 공기질 개선을 위한 원천 기술 확보

- 미세먼지를 포함한 실내 공기를 액체 건조제(Liquid desiccant, LD)와 접촉시켜, 공기 중에 함유된 수분과 먼지를 액체 건조제로 흡수 및 흡착시키고 먼지가 제거된 청정 공기는 건물 내로 순환시켜 건물 내 실내 공기질을 향상시키는 미세먼지 정화 시스템을 개발하고자 함.
- 공기 내 수분을 흡수한 액체 건조제는 희석되는 동시에 흡열반응을 일으키는데, 이 때 발생하는 액체 건조제의 흡수열과 건물 내 폐열을 복합적으로 이용하여 막증류(Membrane distillation, MD)함으로써, 희석된 액체건조제를 에너지 효율적으로 농축하고 재생하고자 함.
- 포집된 미세먼지는 반응성 분리막(Reactive membrane)에 의해 연속적으로 제거됨.
- 추가적으로 회수된 깨끗한 물은 건물 내 습도조절을 위한 가습공기로서 제공하거나, 실내 조경을 위한 용수로 공급됨으로써 쾌적한 실내 환경을 조성하는 기술의 개발을 포함함.



2) 연구개발과제의 년차별 목표

○ 1차년도 연구개발 내용

- 미세먼지 제거 효율 극대화를 위한 LD 최적 활용 기술 개발
- LD의 미세먼지 제거효율 평가 및 최적화
- LD의 미세먼지 제거성능 평가방법 규격화

○ 2차년도 연구개발 내용

- 막증류법 (Membrane distillation, MD)을 이용한 희석된 액체건조제의 농축 (회수) 및 수분 (물) 회수 최적화 기술 개발
- 반응성 분리막 (Reactive membrane)에 의한 액상에 포집된 미세먼지의 분리 및 제거 기술 개발
- 액체 건조제-막증류 (LD-MD) 시스템 성능평가 시험설계 및 정량적 평가 수행
- 막증류법의 액체건조제 농축 및 수분회수 성능평가방법 규격화

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	액체 건조제 이용 공기 정화 및 제습 최적화 기술	액체 건조제 공기 정화능 평가를 통한 최적 액체 건조 공정 개발		미세먼지 제거효율 (실험실) 99% 이상	농도분석 (a-b)/a X 100% (a, b 미세먼지 처리 전후 농도)	20
		액체 건조제의 제습 평가를 통한 습도 조절 능력 검증		실내공기 제습효율 (실험실) 2.3 L/kWh 이상	단위시간 동안 부피증가/에너지 소비율	-
	액체 건조제 이용 공기 정화 및 제습 최적화 기술	액체 건조제 공기 정화능 평가를 통한 최적 액체 건조 공정 개발		미세먼지 제거효율 (표준시험 챔버) 99 % 이상	농도분석 (a-b)/a X 100% (a, b 미세먼지 처리 전후 농도)	20
		액체 건조제의 제습 평가를 통한 습도 조절 능력 검증		실내공기 제습효율 (표준시험 챔버) 2.3 L/kWh 이상	단위시간 동안 부피증가/에너지 소비율	-
	액상에 포집된 미세먼지의 분리 및 제거 기술	액체 건조제에 포집된 미세먼지 제거위한 최적 분리 공정 설계 및 평가		미세먼지 분리효율 99 % 이상	농도분석 (a-b)/a X 100% (a, b 미세먼지 분리 전후 농도)	
2년차 (2021)	막증류법을 이용한 희석된 액체건조제 농축(회수) 및 수분(물) 회수 최적화 기술	막증류를 이용한 최적 액체 건조제 회수 공정 최적화 (실험실, 연속공정/챔버시험)		-액체건조제 회수율 98 % 이상	-농도분석 (a-b)/a X 100% (a, b 액체건조제 처리 전후 농도)	20
				-물회수율 99 % 이상	-물증가량에 대한 막증류에서 회수된 비율	40
		최적 막증류 공정 설계 (실험실, 연속공정/챔버시험)		막증류 수투과율 7 kg/m ² ·h 이상	단위 시간, 막면적 당 물 생산량 측정	-
	액상에 포집된 미세먼지의 분리 및 제거 기술	액체 건조제에 포집된 미세먼지 제거위한 최적 분리 공정 설계 및 평가		미세먼지 분리효율 99 % 이상	농도분석 (a-b)/a X 100% (a, b 미세먼지 분리 전후 농도)	-

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

가. 액체 건조제를 이용한 미세먼지 제거 및 제습 공정 최적화 기술개발

○ 목표: 미세먼지 제거효율 극대화를 위한 액체 건조제 활용기술 개발

○ 1차년도 수행내용

- 입자성 물질인 콜로이드성 실리카를 이용한 막증류 장치에서의 운전 성능 및 막오염 현상 규명
- 액체 건조제 순환공정 최적화: 직접 접촉식 막증류 장치 제작 및 운전성능 평가, 진공식 공기간격 막증류 장치 설계
- 액체 건조제 특성 및 미세먼지 제거 관련 문헌 연구: 무기 및 유기 액체 건조제 이용현황, 효율성 증대를 위한 액체 건조제 혼합 연구 및 장치설계를 위한 정보 획득

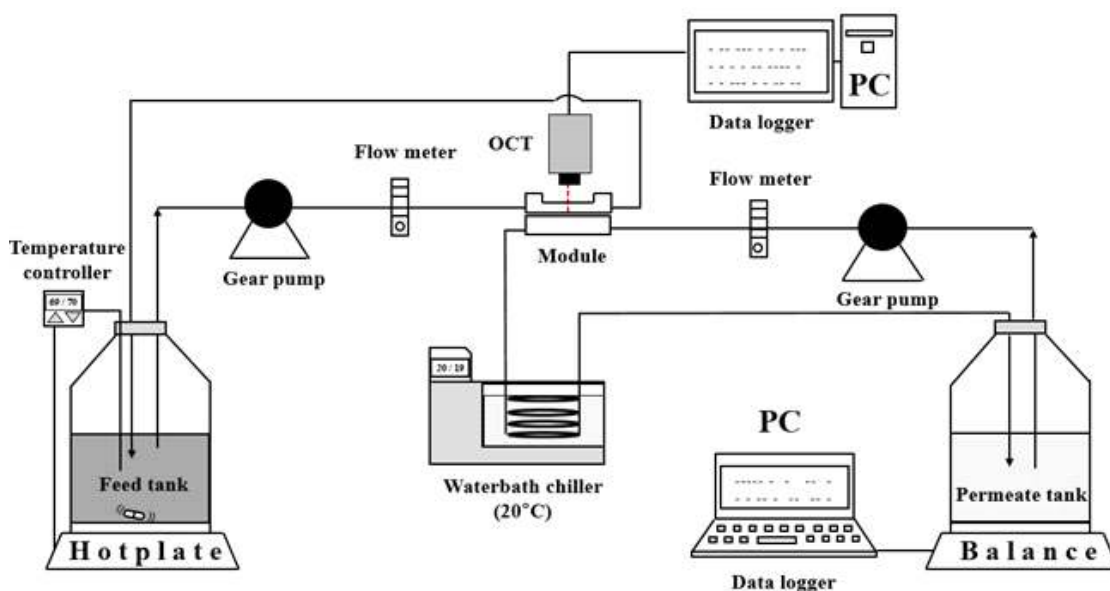
① 액체건조제의 유해성 문헌 연구

- 1차년도에는 무기계 액체건조제의 유해성에 관한 문헌 연구를 시행하였음
- 아래 표에서 보듯이, LiCl가 제습효과가 비슷한 물리화학적 특성(Viscosity, vapor pressure, crystallization)을 가진 CaCl_2 , LiBr, MgCl_2 와 비교했을 때 가장 제습효과가 뛰어난 반면 부식성은 상대적으로 낮은 것으로 조사되었음. 이에 비해 CaCl_2 , LiBr은 부식성이 강하고 제습효과도 비교적 낮은 것으로 조사되었음.
- 이온성 액체건조제 중 하나인 HCOOK의 경우, 부식성이 낮으면 비교적 환경친화적 액체건조제로 인식되고 있으나, 막증류 공정에서 운전한 사례가 아직 없고, 경제성 면에서도 경쟁력이 있어 본 연구에서 채택하여 막증류 공정에 적용하여 운전함.
- 이에 비해 유기성 액체건조제인 TEG의 경우, 점도가 매우 높아 막증류 공정에 적합하지 않고 (매우 낮은 flux 효과), 휘발성이 강한 것으로 조사되었음.

[표2-1] 액체건조제의 특성

	CaCl_2	LiCl	LiBr	LiCl& CaCl_2	MgCl_2	TEG	HCOOK
증기압	LiCl&LiBr보다 상대적으로 높음	가장 낮음	가장 높음	상대적으로 낮음		낮음	70.3wt%가 35wt%의 LiCl과 동일
점도	낮음	낮음	낮음	낮음		높으며 휘발성이 있음	
흡수율	가장 낮음	CaCl_2 보다 높음	LiCl보다 낮음		약함		
비용/USD	저렴함 / 284	매우 비쌈 / 7400	LiCl보다 저렴/3660	LiCl과 비교하여 30% 비용절감	저렴함/155	가격 유동성이 높음	할로겐 염보다 저렴
흡습성능	LiCl보다 낮음	가장 높음	비교적 높음	LiCl의 농도에 비례함	낮음	높음	LiCl과 유사함
재생온도	80 °C 이하	85 °C 이하	80 °C 이하	80 °C 이하		80 °C 이하	농도에 따라 다름 (80 °C 이하)
부식성	부식	약한 부식	부식	부식		부식성이 없음	부식성이 적고 친환경적임
결정화	결정화가 가장 심함	결정화 발생	결정화 발생	Crystallized	가장 심함		
최적 농축농도	35-45%	35-46%	45-60%	95-97%		90-98%	65-70%

② 직접접촉식 막증류장치 제작 및 운전성능평가



[그림2-1] 직접접촉식 막증류 평가장치

[표2-2] 분리막 특성

Material	Polytetrafluoroethylene (PTFE)	
Porosity (%)	75±5	
Mean pore size (μm)	0.2	
Thickness (μm)	179	
Mean contact angle (°)*	140±4.0	
Zeta potential (mV)*	-33 (at pH 7)	
Effective area (m ²)	0.0009	

– 막증류 장치를 이용하여 막오염 실시간 관찰이 가능한 장치의 설계를 제작하여 다른 특성을 가진 소수성 분리막을 이용하여 성능평가를 진행함

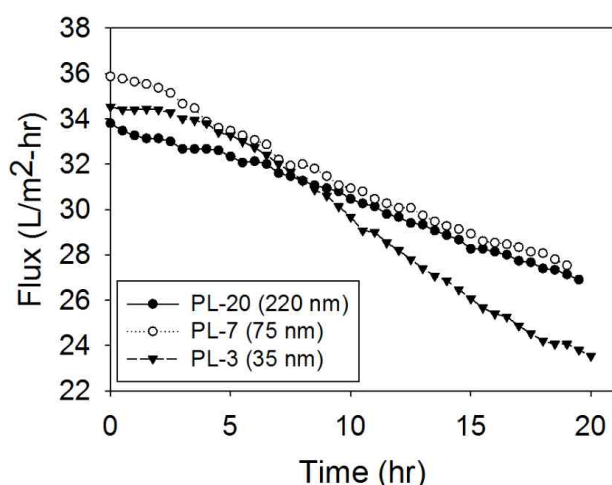
[표2-3] 입자성 물질 특성

Item		Unit	PL-3	PL-7	PL-20
General properties	Appearance	–	Slightly opal	Milky	Milky
	Specific gravity	–	1.12	1.14	1.12
	(20°C)				
	pH	–	7.3	7.3	7.3
Particle size	Primary size (d1)	nm	35	75	220
	Secondary size	nm	70	125	370
	(d2)				
	Aggregate ratio	–	2.0	1.7	1.7
Impurities	(d2/d1)				
	Alkali metals	ppb	300 or less	300 or less	300 or less
	Heavy metals	ppb	100 or less	100 or less	100 or less

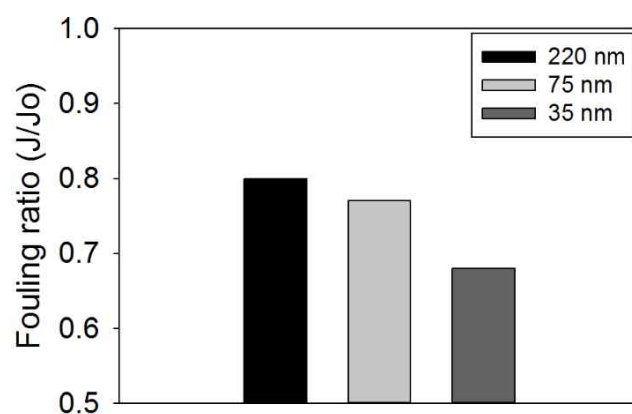
- 콜로이드성 실리카는 막의 기공 크기와 비교하여 비슷하거나 다른 크기의 입자성 물질을 이용하여 미세 먼지와 유사한 입자성 물질이 원수에 포함될 경우 막오염의 현상을 규명하고자 함.

[표2-4] 실험조건

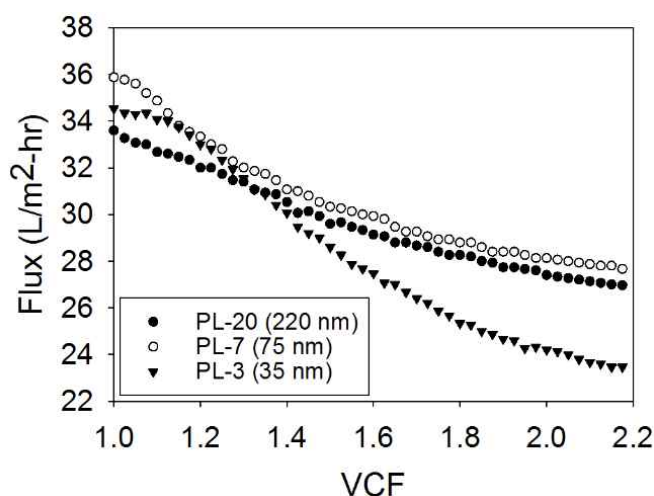
Experiments	No.	Type of silica	Feed temp. (°C)	Flow rate (L/min)	NaCl (g/L)	Note
Effect of size	E1	PL-3	60	0.4	35	
	E2	PL-7				
	E3	PL-20				
Effect of salinity	E4	PL-20	60	0.4	0	Compared to E3
	E5				70	
Effect of flowrate	E6	PL-20	60	0.6	35	Compared to E3
	E7			0.8		
Effect of temp.	E8	PL-20	70	0.4	35	Compared to E3
	E9		50			



(a)



(b)



(c)

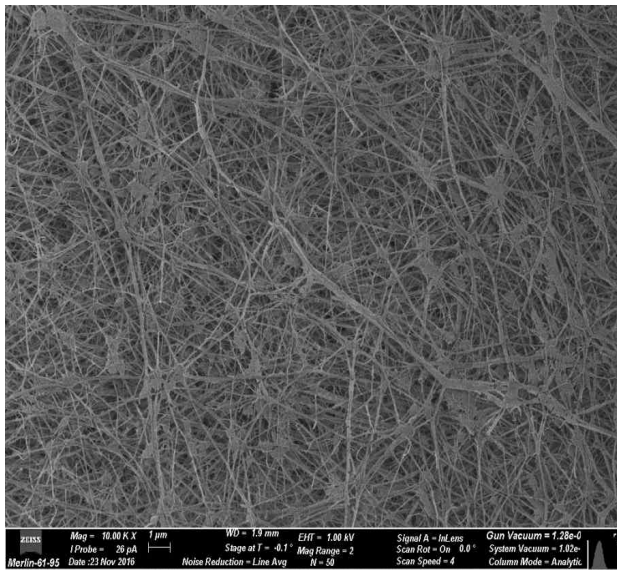
[그림 2-2] 실리카 크기의 영향: (a) 시간에 따른 플럭스의 변화, (b) 파울링 비율, (c) 농도 농축도에 따른 플럭스의 변화

- 실리카의 크기에 대한 플렉스의 감소가 다른 패턴을 보임
- 실리카의 크기에 대한 막오염 비율이 다르게 나타남

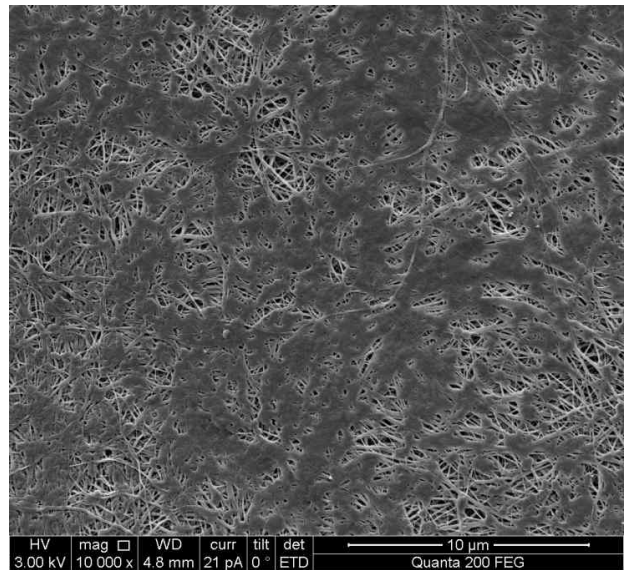
[표2-5] 운전시간에 따른 플렉스 변화 비교

Type of silica	Size (nm)	Flux rate (dJ/dt)	
		0 to 2 h	2 h to Final
PL-20	220	-0.32	-0.35
PL-7	75	-0.29	-0.44
PL-3	35	-0.11	-0.55

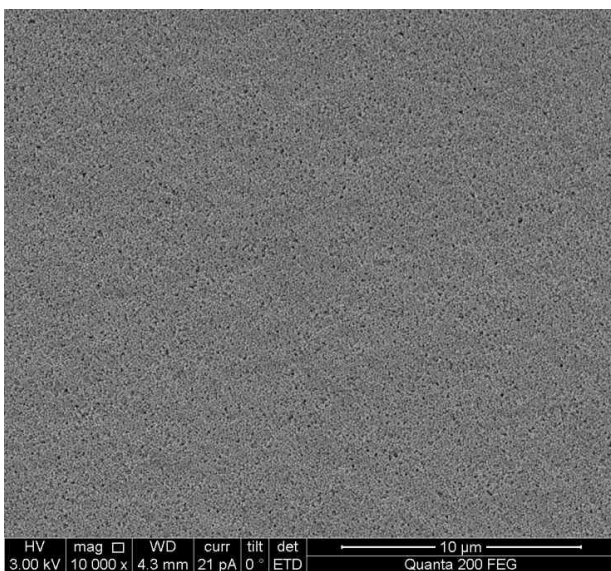
- 실리카의 크기에 따라 초기 플렉스 감소와 후반 (2시간 이후) 플렉스 감소가 다른 것으로 보아 막오염 경향성이 다름



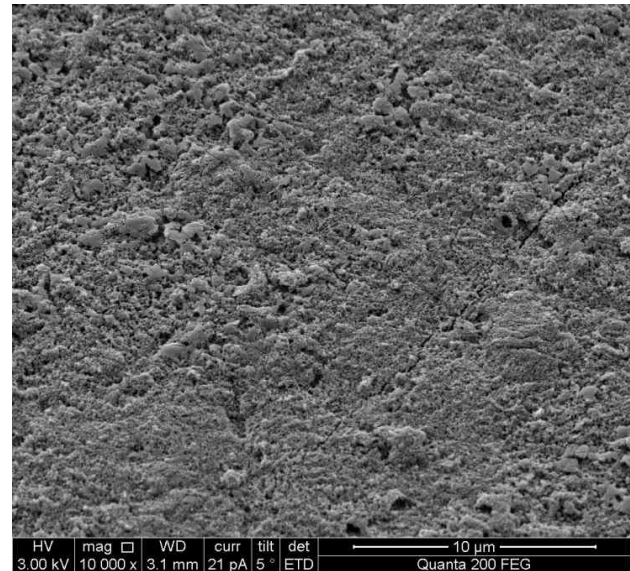
(a)



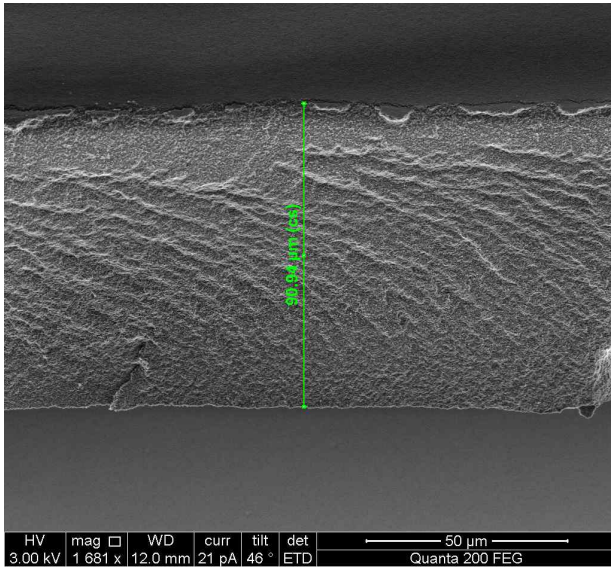
(b)



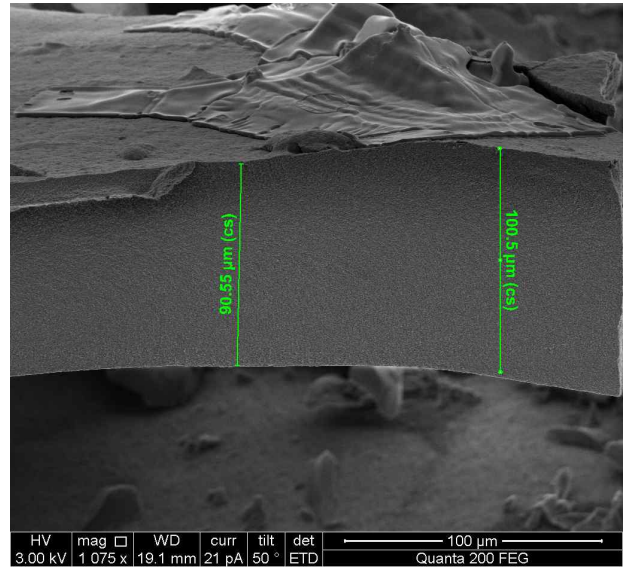
(c)



(d)



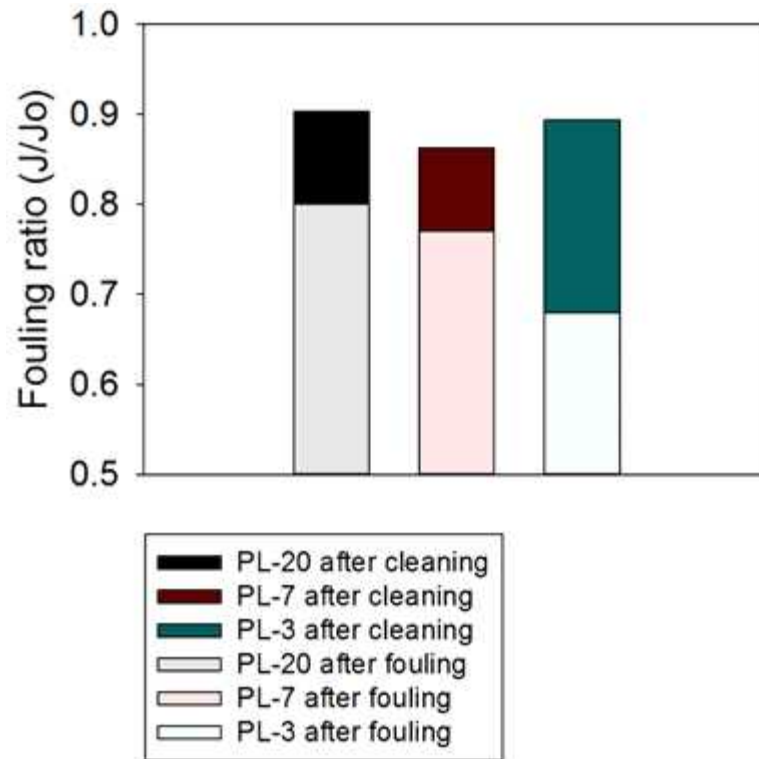
(e)



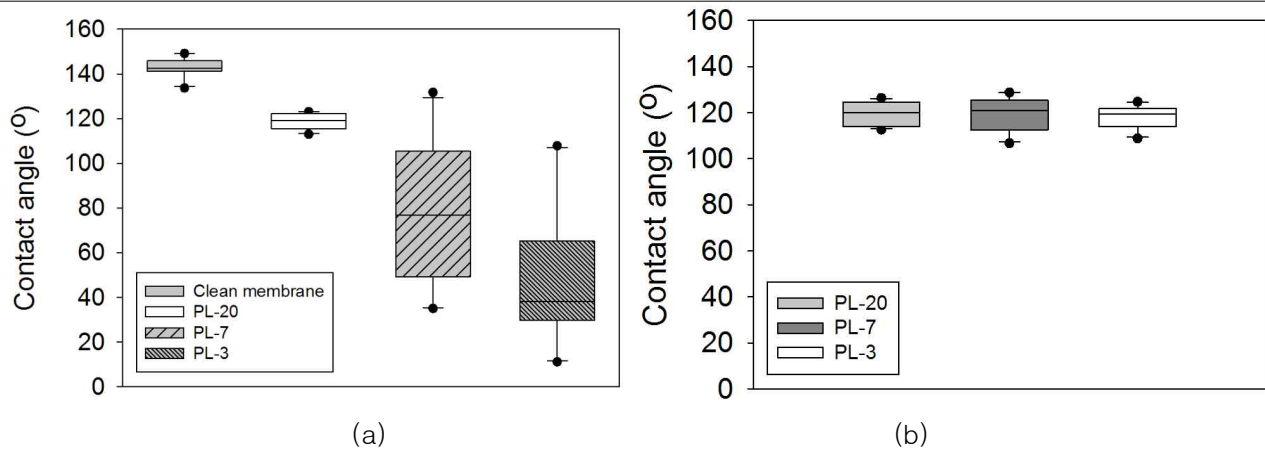
(f)

[그림 2-3] 막오염 전후에 SEM 이미지: (a) 운전 이전의 분리막, (b) - (d) 파울링된 분리막, (e-f) 분리막 층 두께

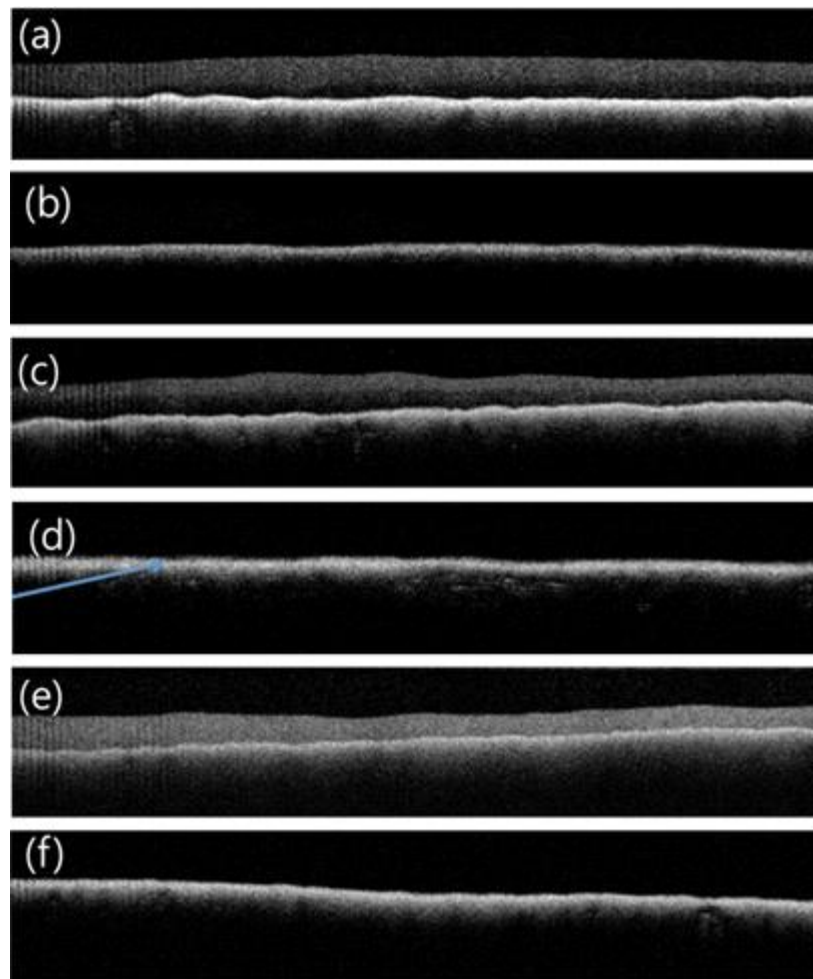
- 입자 크기에 따라 다른 분리막 오염 형태 및 오염층 두께가 달라짐.



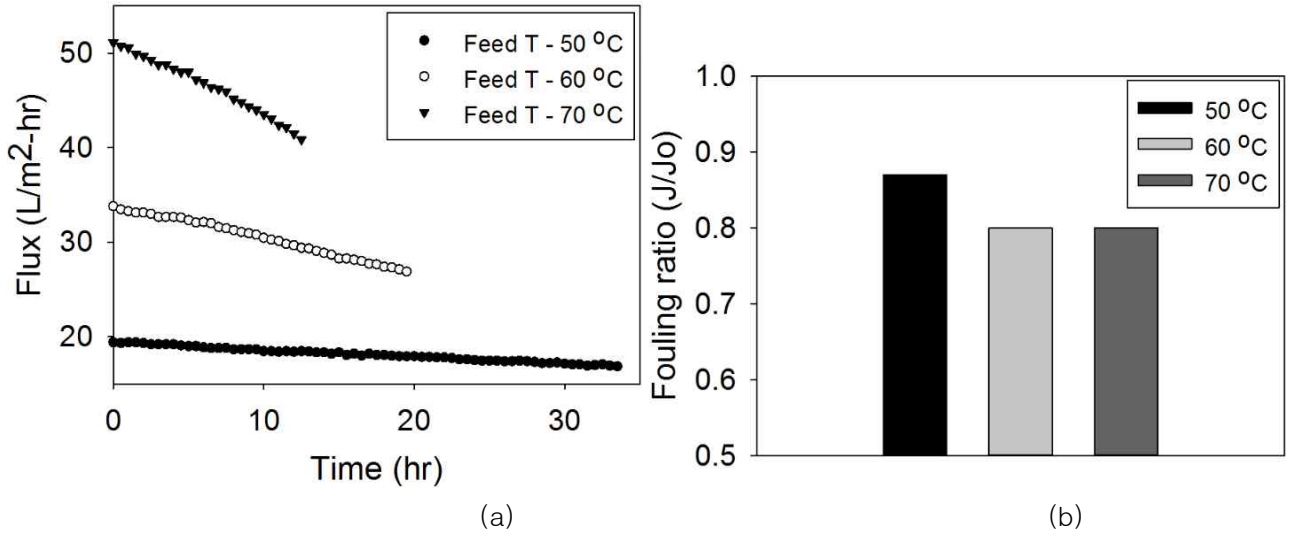
[그림 2-4] 막오염 비율 및 물리적 세척에 대한 플럭스 회복



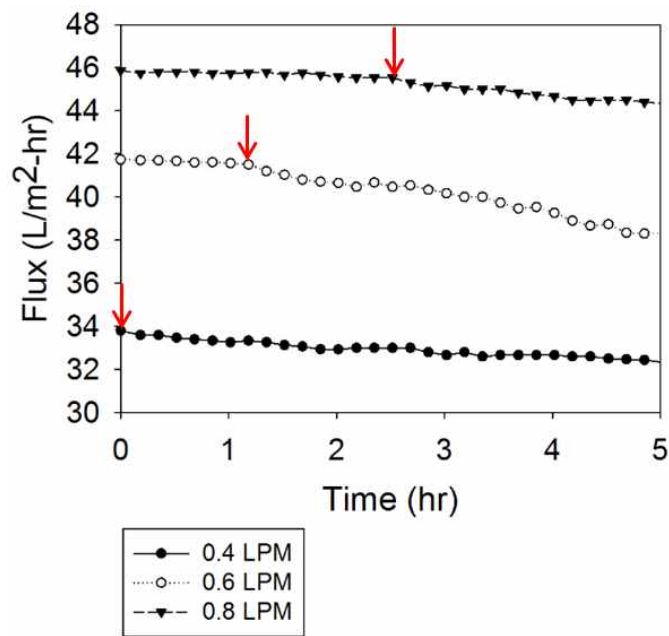
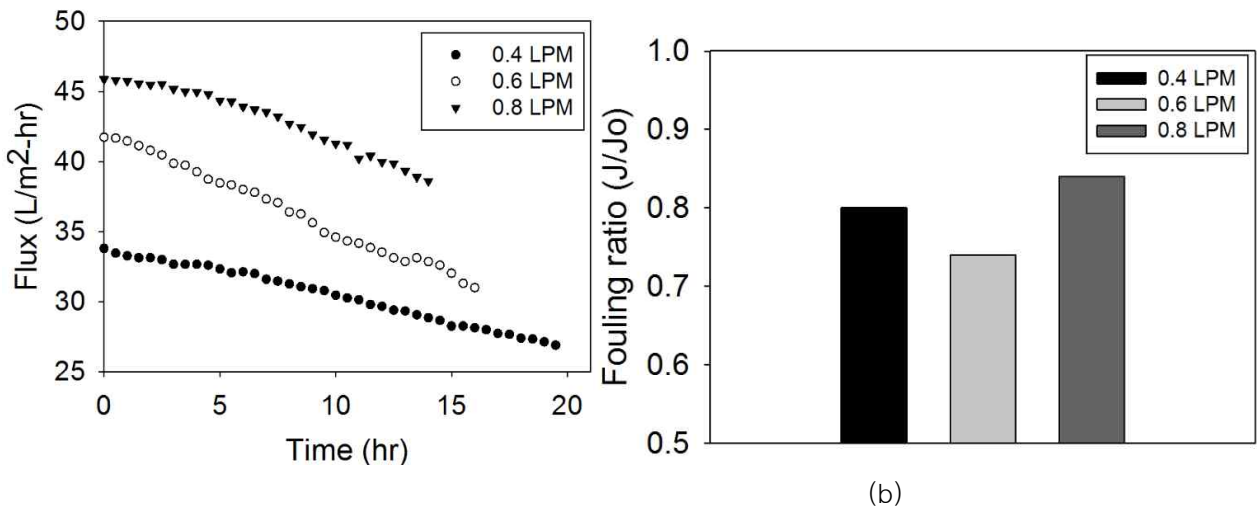
[그림 2-5] 막오염 후 및 물리적 세척 후의 접촉각



[그림 2-6] 막오염 및 물리적 세척 전후의 OCT 이미지

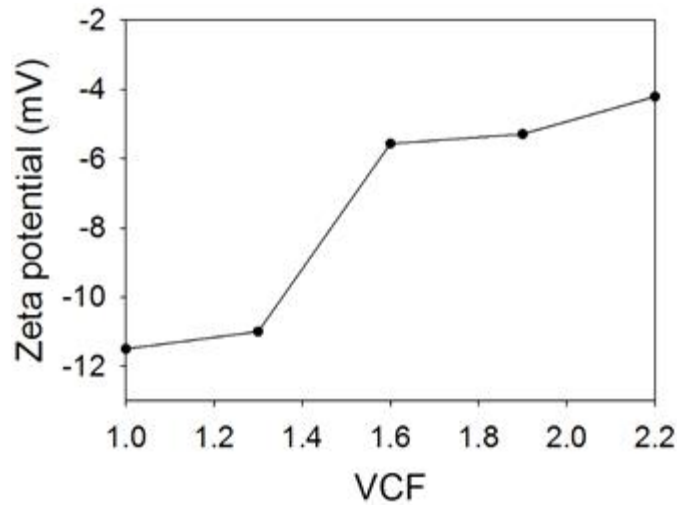


[그림 2-7] 운전 온도에 따른 플럭스의 변화 및 막오염 비율

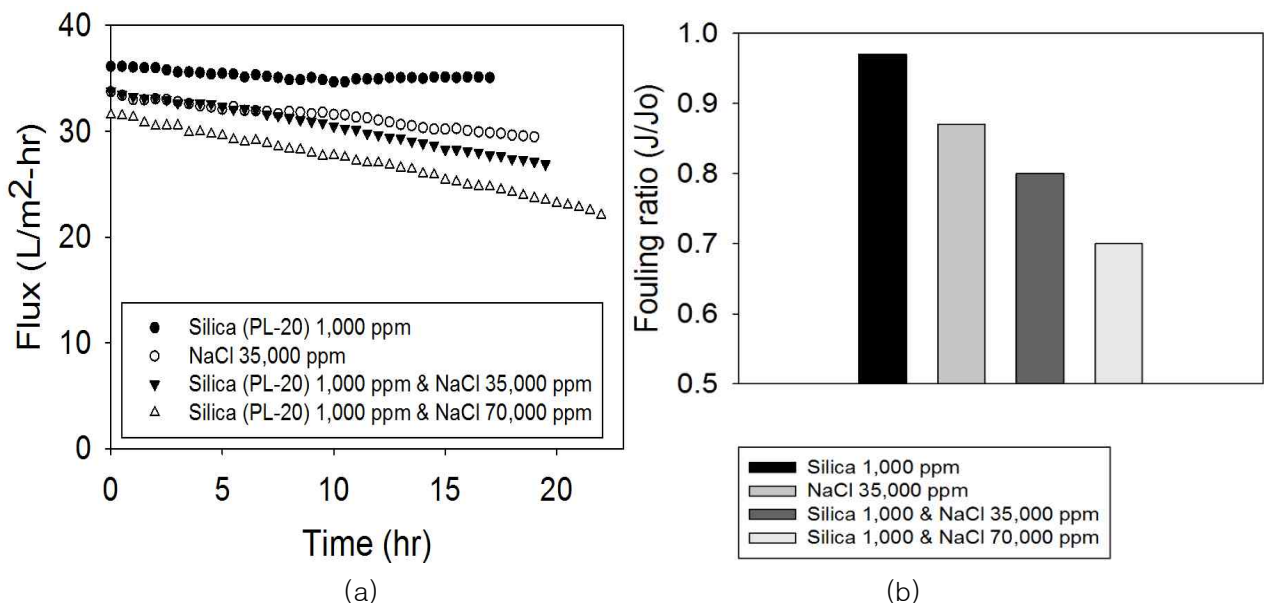


(c)

[그림 2-8] 운전 조건에 따른 (a) 플럭스의 변화, (b) 막오염 비율, (c) 초기 5시간 운전동안 플럭스 변화



[그림 2-9] 막오염에 의해서 변화되는 zeta 전위



[그림 2-10] 염농도의 영향 (a) 플럭스의 변화 및 (b) 막오염 비율

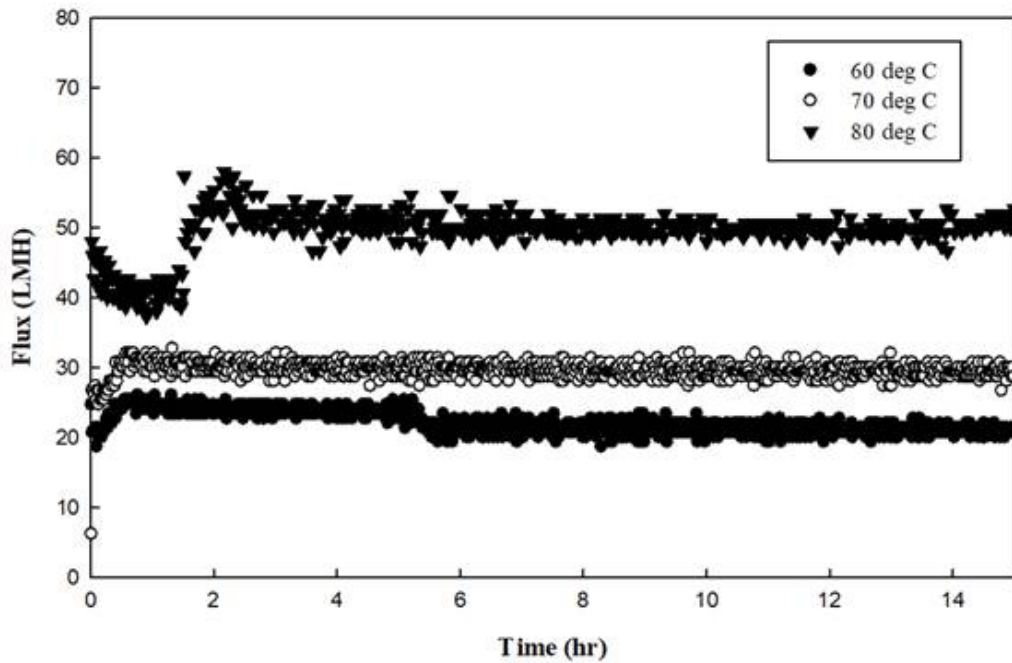
- 입자성 물질에 대한 막증류에서 막오염이 다양한 인자에 영향을 받으면서 관찰되나 물리적 세척을 통한 안정적인 운전이 가능할 것으로 기대됨.

○ 2차년도 수행내용

① 막증류법(Membrane distillation, MD)을 이용한 액체건조제의 농축(회수) 및 수분(물) 회수 최적화 기술 개발

□ 막증류 장치 운전성 평가

- 최적 막증류 공정 설계에 대한 평가로 막증류 수투과율 (permeability, $L/m^2 \cdot hr$ ($kg/m^2 \cdot hr$))를 측정함.
- Deionized water로 14시간 이상 운전하면서 flux (LMH= $L/m^2 \cdot hr$) 평가
- 피드 온도 조건 60 °C, 70°C, 80°C 에서 운전함.
- 14시간동안 60 °C에서 25 LMH, 70 °C에서 30 LMH, 80 °C에서 55 LMH로 안정적인 FLUX 나타냄.
- 이는 최적 막증류 공정설계에 대한 연구 목표치인 7 $kg/m^2 \cdot hr$ (or LMH) 이상으로 성과를 달성함.



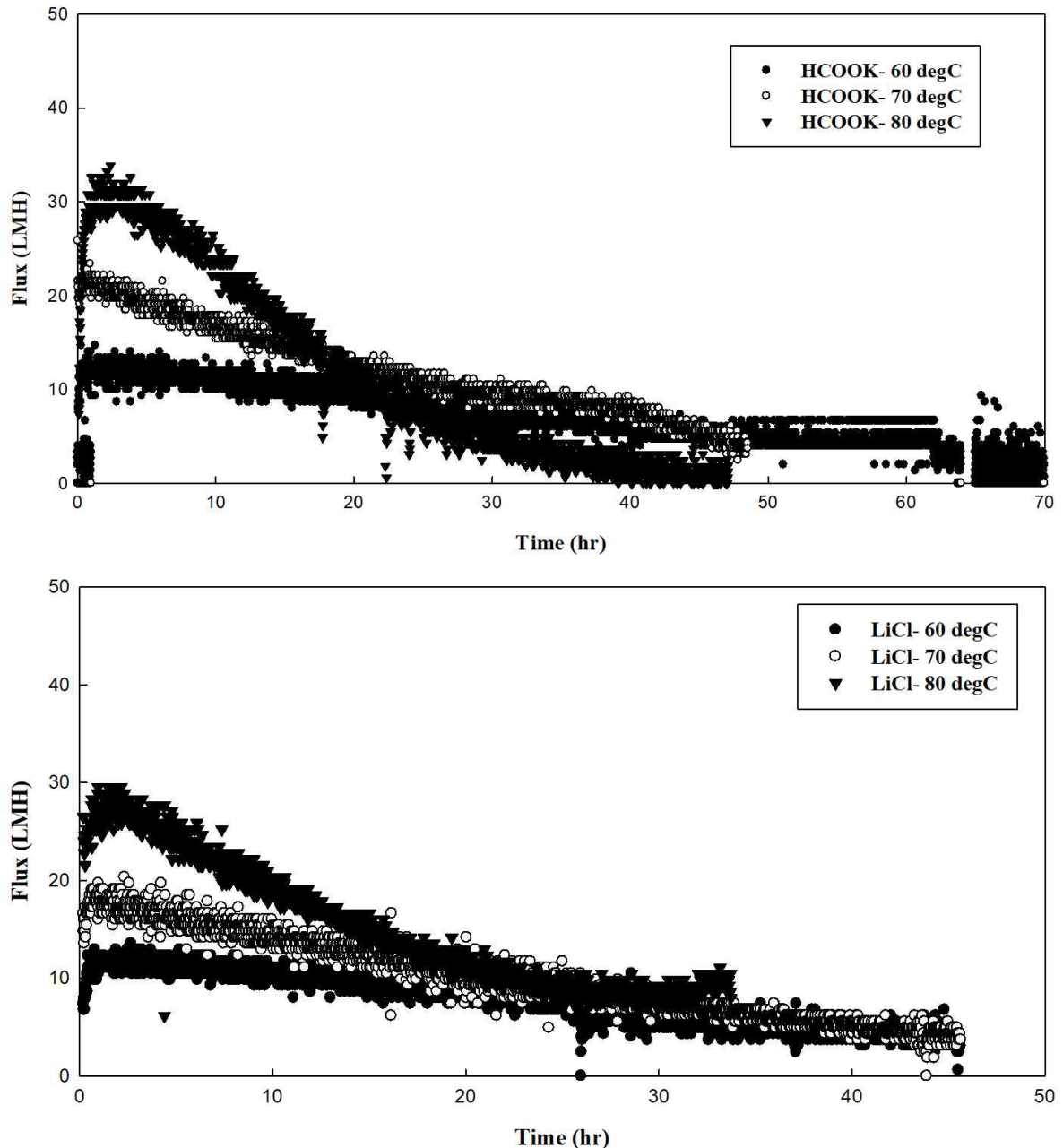
[그림 2-11] PVDF 막의 DI water flux test (60 °C, 70°C, 80°C)

□ 액체건조제 제습시스템 운전

- LiCl 20 %와 HCOOK 35 %를 막증류 시스템에서 운전하면서 제습 효율성 평가함.
- 액체 제습제의 농도가 2배로 농축될 때까지 운전한 후 2배로 농축되는데 걸리는 시간 및 그에 따른 플럭스 변화를 고찰함.
- 각 제습제별 온도에 따른 플럭스는 HCOOK는 평균 5.98 LMH (60°C), 11.91 LMH (70°C), 11.14 LMH (80°C)였고, 20 wt% LiCl는 7.77 LMH(60°C), 9.88 LMH(70°C), 15.16 LMH(80°C)를 나타냄.
- 전반적으로 온도가 높을수록 높은 초기 플럭스를 나타내었으나 장기간 운전시 그에 따른 플럭스 감소율도 크게 나타남.
- 35wt% HCOOK의 경우 70 °C에서 가장 이상적인 플럭스를 나타낸 반면, 20 wt% LiCl는 60, 70 °C에서 전체적으로 낮은 플럭스를 기록함
- 35 wt% HCOOK는 2배 농축되는데 37 시간이 걸린 반면, 20 wt% LiCl는 그보다 오래 걸린 56 시간이 소요됨.



[그림 2-12] 실험실 스케일 순환식 액체건조제-막증류 시스템



[그림 2-13] 액체제습- 막증류시스템 (Liquid desiccant membrane distillation)의 운전성 평가.

□ 막증류법 이용한 최적 액체 건조제 회수 공정 최적화를 평가

- 막증류 시스템 상에서 액체건조제 농축(회수) 및 수분 회수가 제대로 진행되고 있다면, 현재 보고되고 있는 막증류시스템의 제거율 (액체 건조제 회수율)인 98 % 이상을 달성해야함. 따라서 회석된 액체건조제의 농도 (Feed side)와 생산수 (Permeate side)에서 액체건조제 농도를 고찰함.
- HCOOK는 K 이온 농도, LiCl는 Cl 이온 농도를 한국고분자시험연구소 (KOPTRI, 국제공인시험기관) ICP-OES로 분석 의뢰하였음. (아래 공인시험 성적서 포함)
- IC-OES 분석결과는 아래 표 2-5와 같음. 두 액체건조제 모두 99.99 % 이상의 제거율을 나타내어 액체 건조제시스템으로 작동하고 있다고 판단됨.
- 위 결과는 성과 목표인 액체 건조제 회수율 98 % 이상을 만족하여 연구성과 달성함.
- 액체 건조제 회수율과 농축되는 정도 고려할 때 수분(물) 회수율 99 % 이상을 만족하여 연구 성과 달성함.

[표 2-6] 액체 제습제 종류에 따른 막증류 시스템에서 검출되는 이온농도(mg/L)와 제거율 (%)

	Feed side (mg/L)	Permeate side (mg/L)	제거율 (%)
HCOOK 35 %	146,000	5.8	99.9960
LiCl 20 %	30,200	6.4	99.9788

Koptri www.polymer.co.kr Test report No. 21-11327 Page 1 / 3	
TEST REPORT	
1. 시험기관 가) 공. 부산대학교 산학협력단 주 소: 부산광역시 부산진구 부곡로63길 2 부산대학교 제2공학관(개표관) 2203호 2. 의뢰일자: 2021. 12. 15 3. 용도: 연구용 4. 시험대상물품 또는 용도, 시험물: 표 1 참조 5. 시험항상: 투과량 측정 6. 시험항목: 표 2 참조 7. 시험방법: ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry) 8. 시험기간: 2021. 12. 16 ~ 2021. 12. 20 9. 시험결과: 표 2 참조 10. 시험자: 박상은 분석원	
확 인 실무자 영 역 직 상 인 Saibum Park 기술책임자 영 역 직 주 인 Seungmin Kim	2021년 12월 20일 국립공인시험기관 한국고분자시험연구소 (인)
(사)02033 서울특별시 동대문구 진보대로 367, 365 한국고분자시험연구소(인) TEL:1588-1574	

Koptri

www.polymer.co.kr

Test report No. 21-11327

Page 2 / 3

TEST REPORT

표 1. 시험항 및 시험사진

No.	시험자가 제공한 시험항	시험에 사용한 시험항	시험사진
1	HCOOK 35 wt% (B-1)	Koptri- 21-03-19711-1	
2	HCOOK Permeate (B-3)	Koptri- 21-03-19711-2	
3	LiCl 20 wt% (A-1)	Koptri- 21-03-19711-3	
4	LiCl Permeate (A-3)	Koptri- 21-03-19711-4	

(주)K20233 시험용수시 | 한국화학연구원 | 385-100 경기도 수원시 화성구 송죽리 1 | TEL: 031-310-3100

Koptri

www.polymer.co.kr

Test report No. 21-11327

Page 3 / 3

TEST REPORT

표 2. 시험방법 및 시험결과

시험항	시험항목	단위	시험방법	검출한계	시험결과
Koptri-21-03-19711-1	K (Potassium)	%	ICP-OES	-	14.6
Koptri-21-03-19711-2	K (Potassium)	mg/L	ICP-OES	-	5.8
Koptri-21-03-19711-3	Li (Lithium)	%	ICP-OES	-	3.02
Koptri-21-03-19711-4	Li (Lithium)	mg/L	ICP-OES	-	6.4

Note:

a) ICP-OES: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry

b) Koptri-9007-02-02

c) 1 % = 10,000 mg/L, 10,000 ppm

d) ICP분석기: 양주 과학기술 및 진단부. 이항. 한도에 미치지 않는 결과가 나왔습니다.

표

(주)KOPTRI 서울특별시 남동구 반곡로 387, 305 한식교보생명(사)시험연구소 | TEL:1588-8888

Notes

a) ICP-OES: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry

- Kopri-WA-NPT-OL10

b) 1 % = 10,000 mg/L, < 10,000 ppm

c) IC 방법의 경우, 고농도(100 ppm) 이상인 원소에 대해서는 오차가 발생할 수 있습니다

□ Regeneration ability

- 액체 제습제별 regeneration ability (%)는 액체제습제 농도 증가분을 계산한 결과임. 계산 식은 아래와 같음.

$$\Delta X = X_{after} - X_{before} = \frac{X(m_{after} - m_{before})}{m_{after}}$$

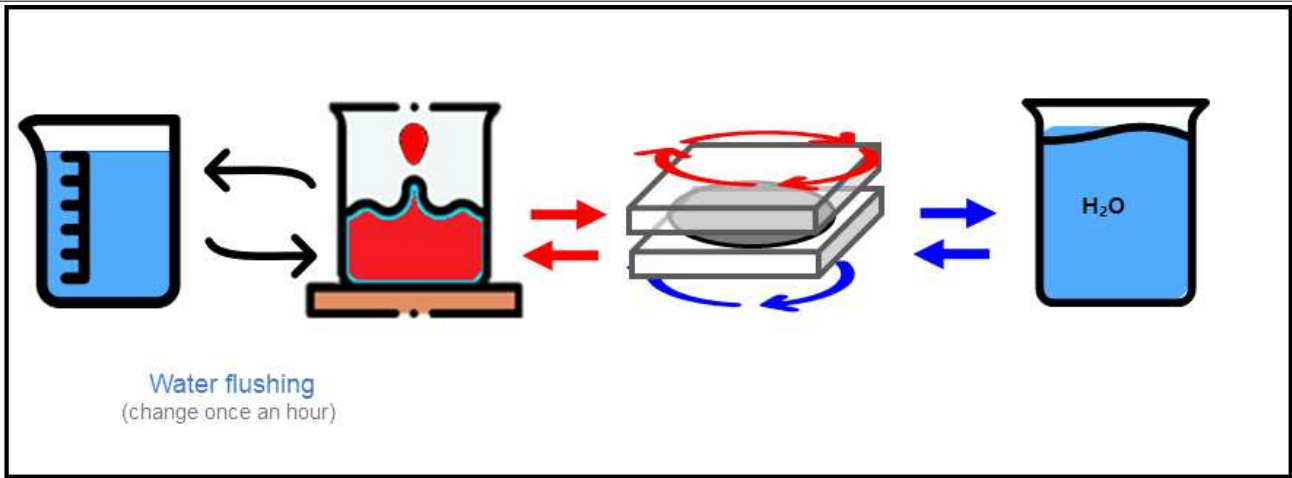
- 표에서와 같이 70 °C에서 HCOOK의 flux가 11.91 LMH로 LiCl (9.88 LMH) 보다 높은 값을 나타내었고, 55.54%의 Regeneration ability를 나타내었음. 반면 LiCl의 경우 10 - 16 %의 상대적으로 매우 낮은 값을 나타냄.

[표 2-7] 액체 제습제별 Regeneration ability (%) 비교.

Operating temperature (°C)	Average flux (LMH)		Regeneration ability (%)	
	HCOOK	LiCl	HCOOK	LiCl
60	5.98	7.77	33.20	10.64
70	11.91	9.88	55.24	16.21
80	11.14	15.16	37.46	19.92

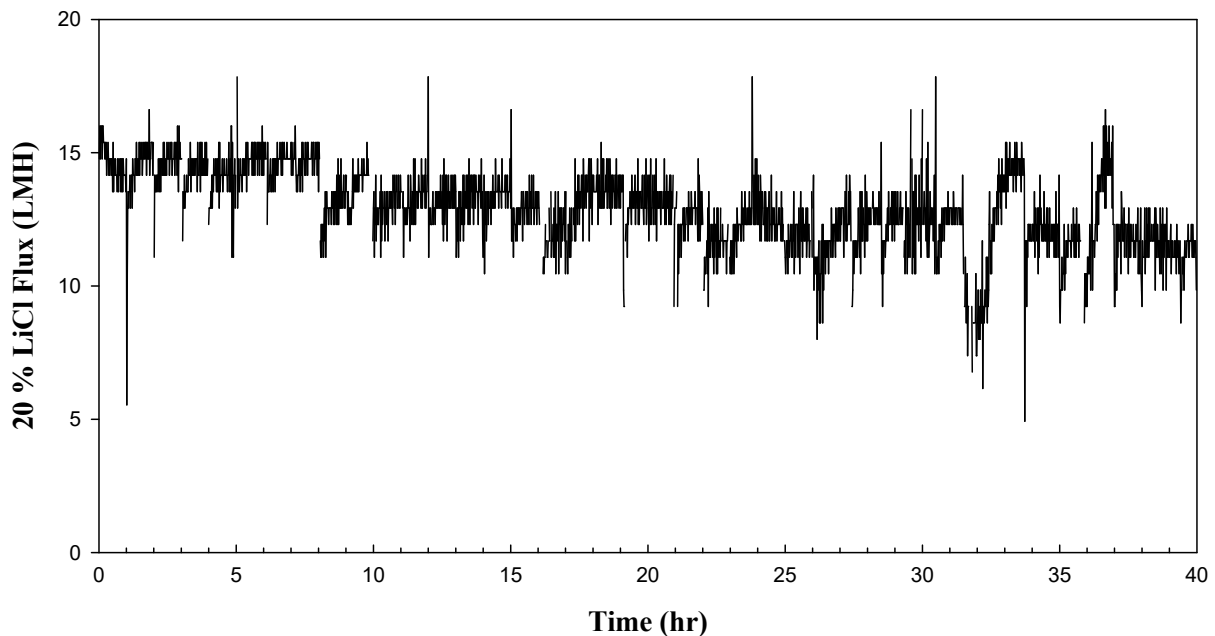
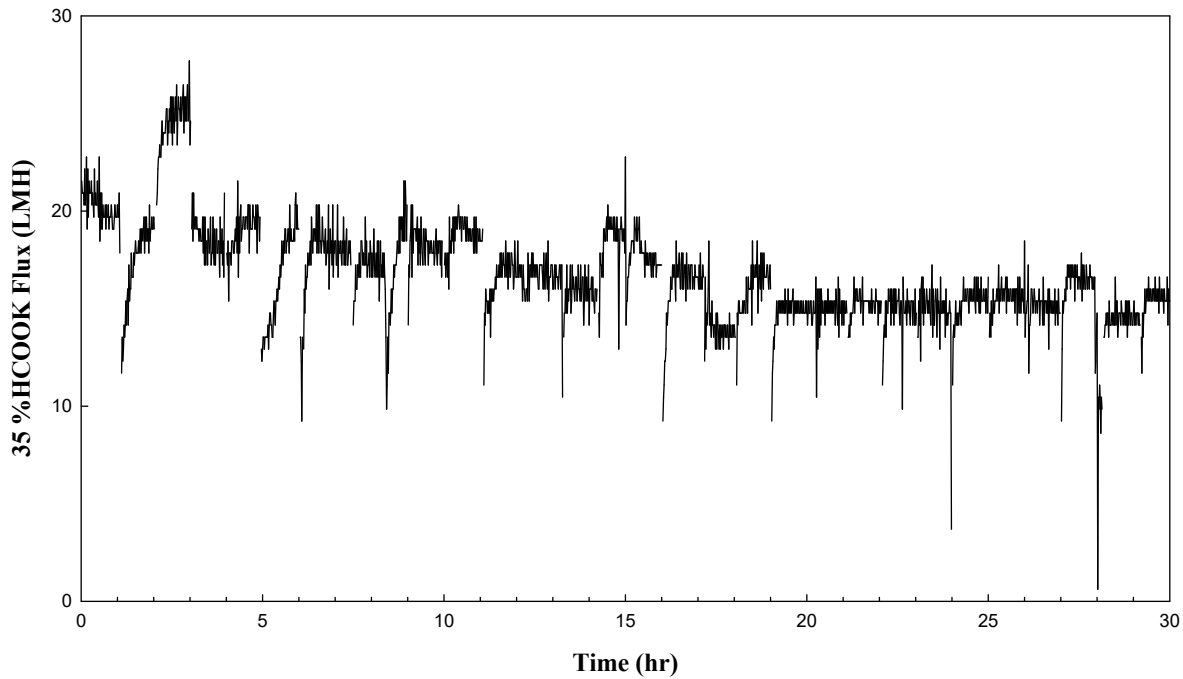
□ 제습시스템 운전 효율 향상을 위한 막 세정 작업 후 플럭스 변화

- 액체 제습-막증류 시스템에서 상대적으로 높은 액체제습제가 막증류 시스템 내 막을 오염시키기 때문에 낮은 플럭스와 운전시간에 따른 플럭스 감소를 야기시킴.
- 따라서, 액체 제습-막증류 시스템의 운전 효율 향상을 위하여 1시간 운전 후 Di Water로 막을 워싱한 후 재가동하는 사이클을 반복하면서 운전 플럭스의 패턴을 관찰함. 세정 과정은 아래 그림과 같이 진행됨.



[그림 2-14] 막 세정 (water flushing) 과정 모식도.

- 아래 그림에서와 같이 35 % HCOOK 제습제를 1시간 운전 한 뒤 막 세정 후 재가동하였을 때 플럭스는 평균 20.32 LMH에서 17.45 LMH로 85 % 회복되었음. 처음 5시간 동안은 85 ~95%의 회복율(flux recovery)를 보임.
- 이후부터 20시간동안 운전시 플럭스는 14.45 ~16.76 LMH를 보여 **71 %** 까지 플럭스 회복율이 감소하는 것을 관찰하였음. 이는 운전하면서 장기간 동안 HCOOK 이온 결정이 막 표면에 쌓여서 irreversible fouling을 일으키기 때문에 막 세정 후에도 플럭스 회복 (80 % 이상)이 잘 나타나지 않는 것으로 사료됨.
- 20 wt% LiCl 제습제의 경우, 35 wt%HCOOK보다 1시간동안 플럭스 감소율이 낮아서 상대적으로 높은 플럭스 회복율을 나타냄. 초기 1시간 플럭스는 14.62 LMH에서 5시간 동안 매 한시간 후 14.34, 14.55, 14.25, 그리고 13.98 LMH로 회복되어 99~ 96 %의 플럭스 회복율을 나타냄.
- 이 후부터 10시간 동안 13.38 LMH로 92 % 로 감소된 회복율을 나타내었고, 20시간 장기간 운전시 11.41 LMH로 78 %로 현저히 감소된 플럭스 회복율을 나타냄.
- 이 후 마지막 40시간까지 11.08 LMH로 **76 %**의 감소된 회복율을 나타냄.
- 20 wt% LiCl 가 상대적으로 높은 플럭스 회복율을 나타내었지만, 당초 운전 플럭스가 35 % HCOOK 보다 70 % 낮고 2배 농축되는데 상대적으로 오랜 시간이 걸리는 것으로 관찰됨.
- 당초 막 세정을 진행하지 않고 운전시, 35 % HCOOK 는 37 시간, 20 % LiCl는 56시간이 2배 농축되는데 걸린 반면, 막 세정 후 2배 농축하는데 까지 걸린 시간은 35 % HCOOK는 30 시간, 20 % LiCl는 40 시간으로 약 20 % (35 % HCOOK), 29 % (20 % LiCl) 의 시간이 단축되는 것을 알 수 있음.



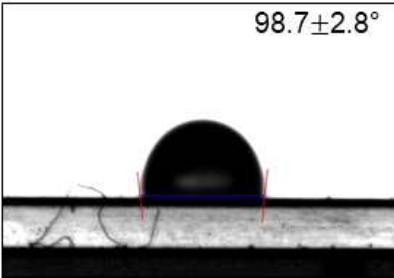
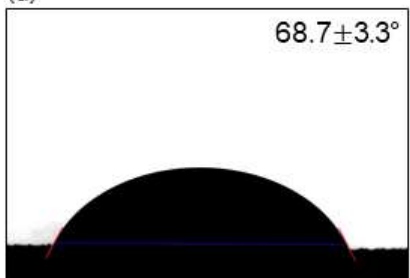
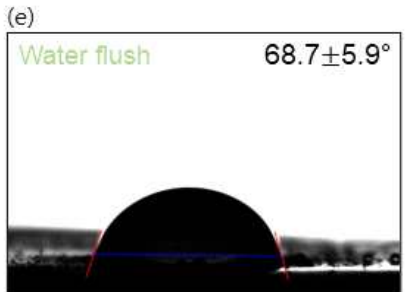
[그림 2-15] 액체제습- 막증류시스템에서 막 세정 후 운전 효율성 향상.

□ 제습시스템 운전 후 막 표면 소수성/친수성 변화 분석

- 위에서 LiCl 20%, HCOOK 35 %로 각각 45 시간, 70 시간 이상 운전한 후 막 표면의 소수성/친수성 변화와 막 세정 후 운전한 뒤 2배 농축 후 막 표면 소수성/친수성 변화를 분석한 결과는 다음과 같음.
- Contact angle로 표면 소수성/친수성을 분석한 결과, 기존의 소수성을 띤 ($98.7 \pm 2.8^\circ$) PVDF 막은 20 wt% LiCl로 운전시 Contact angle이 0° 로 감소하여 막표면이 친수성으로 변하였고, 35 wt% HCOOK의 경우도 58.08° 로 감소하여 막 표면 친수성이 증가하였음.
- 한편 막세정 (water flushing) 후 운전한 막증류 시스템에서 20 wt% LiCl과 35 wt % HCOOK 모두 Contact angle 변화가 세정 전과 달라진 것이 없었음. 기존 20 wt% LiCl과 35 wt % HCOOK에서 각각 0° 와 $68.7 \pm 3.3^\circ$ 인 반면, 세정 후 운전한 경우에도 똑같이 0° 와 $68.7 \pm 5.9^\circ$ 로 관찰되었음.
- 위의 결과, 막 세정은 액체제습제에 의한 막표면의 소수성 감소(친수성 증가) 현상을 극복하기 어렵고, 이는 두 액체 제습제 모두 irreversible fouling을 일으켜 플럭스를 100 % 회복시키지 못하고 결국엔 감소

하는 결과를 초래함.

- 따라서, 액체제습제로 막 증류 시스템 운전결과, 막 표면에 친수성이 증가하였고, 이는 증기압 차 (water vapor pressure difference)에 의해 구동되는 막증류 시스템의 플렉스를 상당히 저하시키는 요인으로써, 향후 후속연구에서 액체 제습-막증류 시스템에서 막의 소수성을 향상시킬 수 있는 막 소재 개발이 시급하다고 할 수 있음.

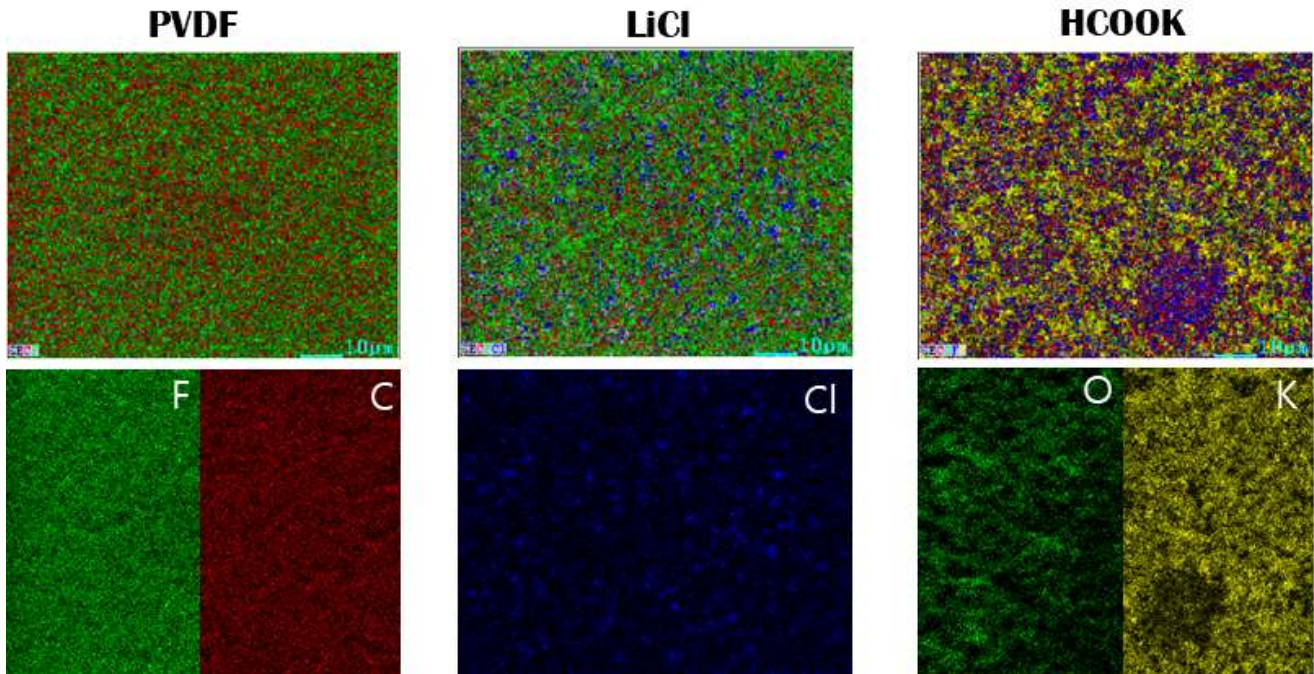
Pristine	20 wt% LiCl	35 wt % HCOOK
(a) 	(b) 	(d) 
	(c) 	(e) 

[그림 2-16] 액체 제습제 막증류 시스템에 사용된 막에 대한 Contact angle 비교.

- 막 표면에 생성된 LiCl 와 HCOOK 결정화에 대한 후속 연구의 필요성이 요구됨.

□ 제습시스템 운전 후 막 표면 및 기공에 Cl, K 분포 특성 분석

- 액체제습-막증류 시스템 운전 중, 액체제습제 성분이 막표면에 어떻게 분포 되었는지를 조사하기 위해서, 운전한 막의 표면에 대하여, Cl과 K 의 분포를 EDS로 분석함.
- 먼저 막 표면에 Cl과 K 분포를 나타낸 그림은 아래와 같음. PVDF 막에서 주요 원소인 F와 C의 원자분포는 각각 녹색과 빨강색으로 표시되며 막 표면에 고르게 관찰되어 나타남.
- 20 wt% LiCl로 운전한 PVDF 막의 경우, 아래 그림에서처럼 Cl (남색) 원소가 막 표면에 고르게 분포되어 있는 것을 관찰하였음.
- 35 wt% HCOOK로 운전한 PVDF 막의 경우, K (노란색) 원소가 고르게 분포되어 있는 것을 관찰하였음.
- 이는 LiCl와 HCOOK 액체제습제가 막표면에 분포하여 foulant로 작용하여 막 플렉스를 감소하였다고 유추할 수 있음. LiCl와 HCOOK 가 crystallization 형성하는 패턴은 향후 후속연구로 진행하고자 함.



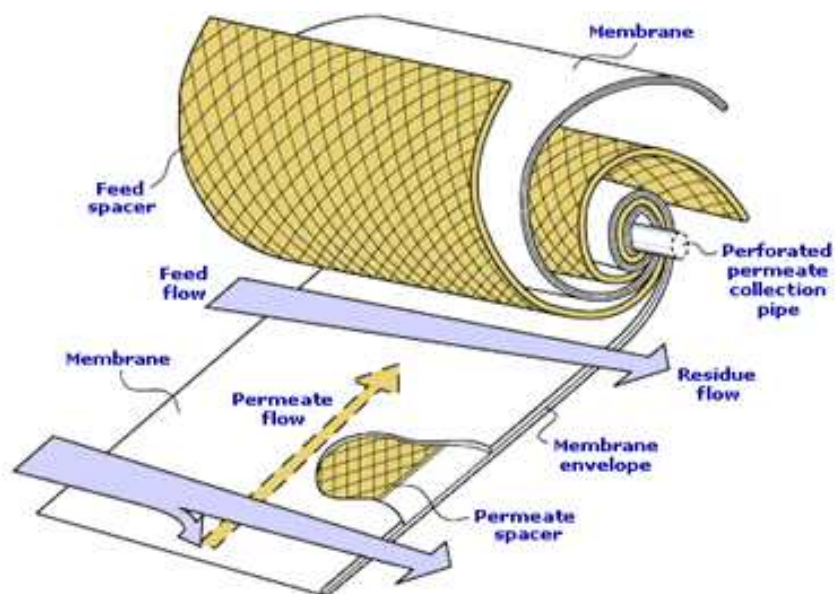
[그림 2-17] 액체제습- 막증류시스템 운전 후 EDS를 이용하여 막표면에서 Cl, K 분포 관찰.

② 막증류 시스템의 효율성을 높이기 위한 스페이서 제작 기술 개발

: 나노 탄소재료를 이용한 membrane spacer 제조

□ 막증류(MD) 공정에서 spacer의 필요성

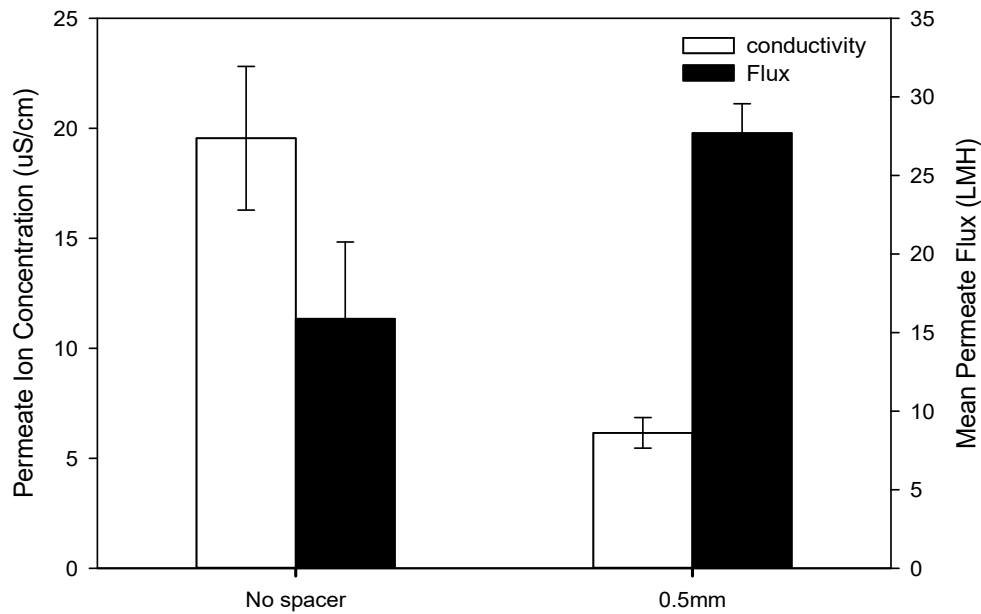
- 분리막에서의 spacer는 용액의 원활한 흐름을 위한 공간 확보와 유체의 난류를 형성시켜 농도 분극화 현상을 감소시킴.
- Spacer는 막 표면에 축적되는 오염물을 용액 내로 혼합해 막 표면의 오염을 줄이고 플럭스를 높이며 분리막의 장기간 운전을 도움.
- 특히 MD 공정에 spacer를 사용할 경우 농도 분극화 현상 및 막 오염을 막아 MD 공정의 단점을 보완할 수 있음



[그림 2-18] 분리막 spacer 모식도

□막증류(MD) 공정에서의 spacer

- MD 공정의 Feed를 35 g/L NaCl로 하고 spacer를 적용해 이온 제거율과 플럭스를 측정하여 막의 효율을 확인함



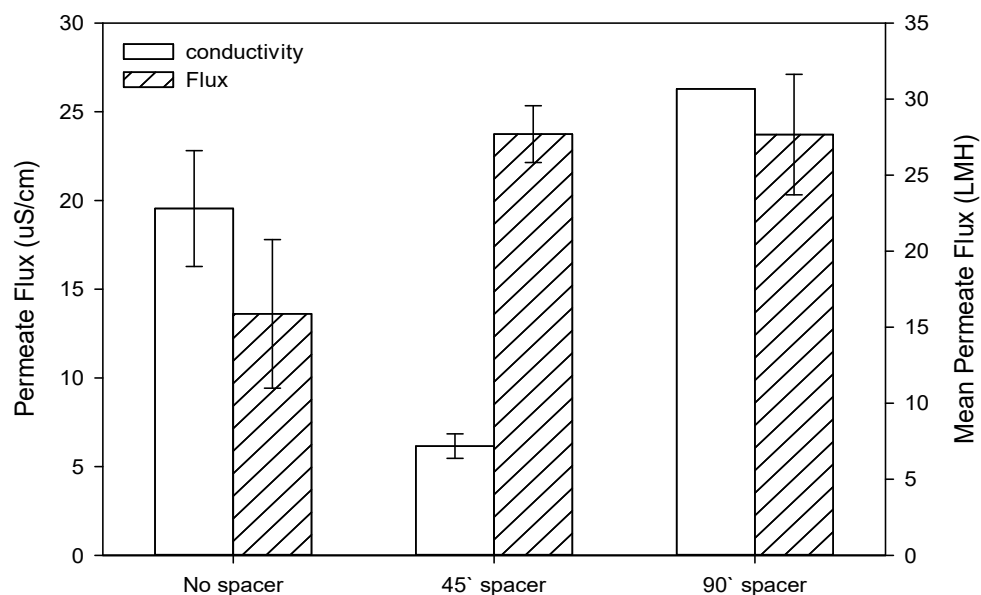
[그림 2-19] spacer 유무에 따른 이온 제거율 및 플럭스

- Spacer를 끼우면 이온 제거율이 좋아지고 플럭스가 향상되어 막의 효율이 높아지는 것을 확인함
- 막증류 공정에 최적화된 spacer 디자인을 찾는 실험을 진행하고자 함

□ 막증류(MD) 공정 spacer 디자인의 최적화

○ MD 공정에서의 spacer 배열 각도에 따른 효율

- MD 공정에서의 spacer 배열 각도에 따른 이온 제거율과 플럭스를 측정하기 위해 MD 공정의 Feed를 35 g/L NaCl로 하여 막의 효율을 확인함
- Spacer 배열 각도는 45°, 90°로 하여 비교함



[그림 2-20] spacer 배열 각도에 따른 이온 제거율 및 플럭스

- Spacer 배열 각도를 90°로 하였을 때 spacer가 없을 때와 비교하여 플럭스가 1.6배 상승하였으며 이온 제거율은 spacer가 없을 때가 1.7배 높았음
- Spacer 배열 각도를 45°로 하였을 때 spacer가 없을 때와 비교하여 플럭스가 1.7배 상승하였으며 이온

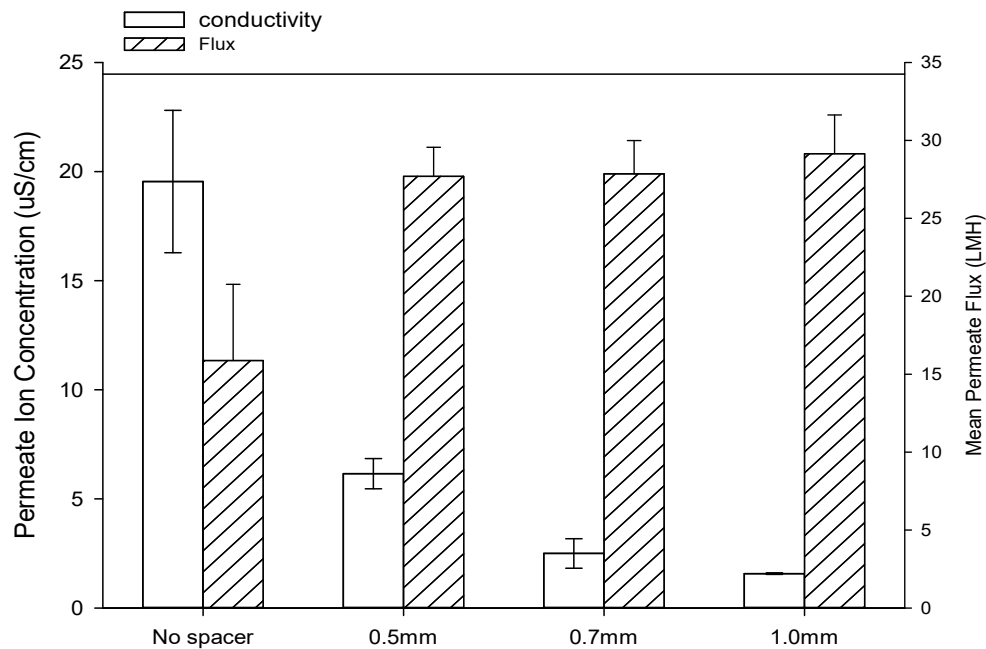
제거율은 13배 상승함

- Spacer의 배열 각도를 45°로 정함

○ MD 공정에서의 spacer 두께에 따른 효율

- MD 공정의 Feed를 35 g/L NaCl로 하고 spacer 두께에 따른 이온 제거율과 플럭스를 측정하여 막의 효율을 확인함

- Spacer 두께는 0.5mm, 0.7mm, 1.0mm 로 하여 비교함



[그림 2-21] spacer 두께에 따른 이온 제거율 및 플럭스

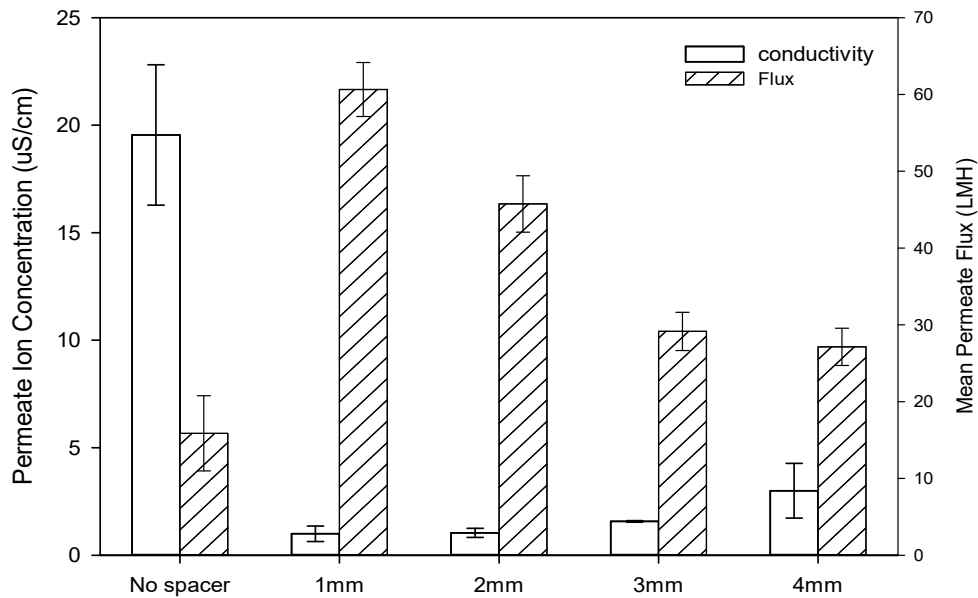
- Spacer 두께를 0.5mm, 0.7mm, 1.0mm로 하였을 때 spacer가 없을 때와 비교하여 이온 제거율이 각각 3.2배, 10.9배, 18.8배 증가함

- Spacer 두께 0.5mm, 0.7mm, 1.0mm는 spacer가 없을 때와 비교해 플럭스가 1.74배, 1.75배, 1.84배 증가하여 두께가 두꺼울수록 플럭스가 높음

○ MD 공정에서의 spacer 간격에 따른 효율

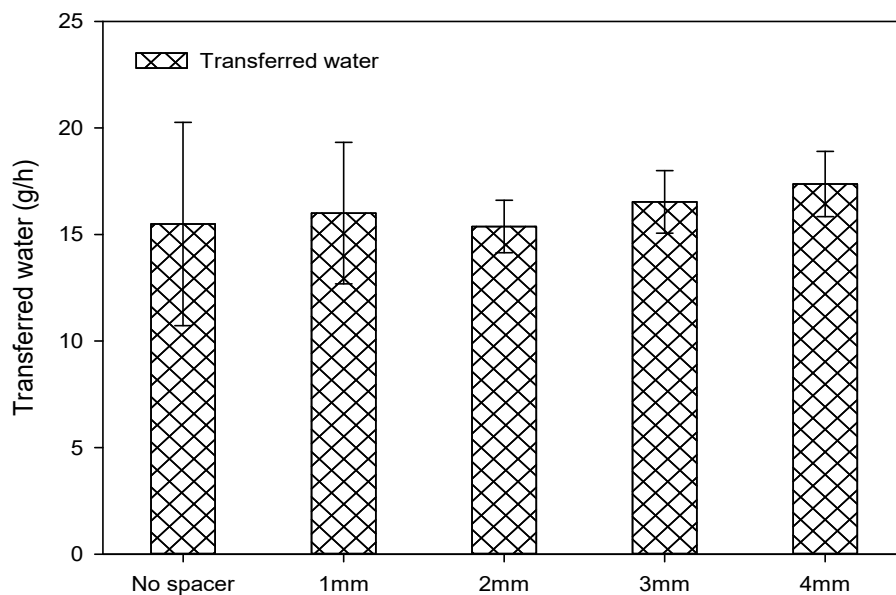
- MD 공정에서의 spacer 간격에 따른 이온 제거율과 플럭스를 측정하기 위해 MD 공정의 Feed를 35 g/L NaCl로 하여 막의 효율을 확인함

- Spacer 간격은 1mm, 2mm, 3mm, 4mm 로 하여 비교함



[그림 2-22] spacer 간격에 따른 이온 제거율 및 플럭스

- Spacer 간격을 1mm, 2mm, 3mm, 4mm로 하였을 때 spacer가 없을 때와 비교하여 이온 제거율이 각각 19.5배, 18.8배, 12.4배, 6.5배 증가함
- Spacer 간격 1mm, 2mm, 3mm, 4mm는 spacer가 없을 때에 비해 각각 3.8배, 2.9배, 1.8배, 1.7배 증가하여 spacer의 간격이 넓을수록 유효 막 면적이 넓어 플럭스가 낮게 측정됨



[그림 2-23] spacer 간격에 따른 생성된 물의 양

- Spacer 간격이 1mm, 2mm, 3mm, 4mm일 때 생성되는 물의 양이 spacer가 없을 때와 비교해 1.03배, 1배, 1.07배, 1.12배 증가하여 spacer의 간격이 넓을수록 생성되는 물의 양이 증가함

○ MD 공정에서의 spacer 디자인 최적화

- MD 공정에서의 Feed가 35 g/L NaCl일 때, spacer 배열 각도는 45°, 두께는 1.0mm 일 때 막의 효율이 가장 높음
- Spacer 간격이 좁을수록 막의 유효 면적이 줄어들어 플럭스가 높지만, 간격이 좁을수록 스케일링이 생겼을 때 막의 구멍을 막아 flux drop이 일찍 일어날 수 있고, 오히려 생성되는 물의 양은 spacer의 간격이 넓

을수록 많기에 생성되는 물의 양이 많은 spacer 간격을 4mm로 하기로 함

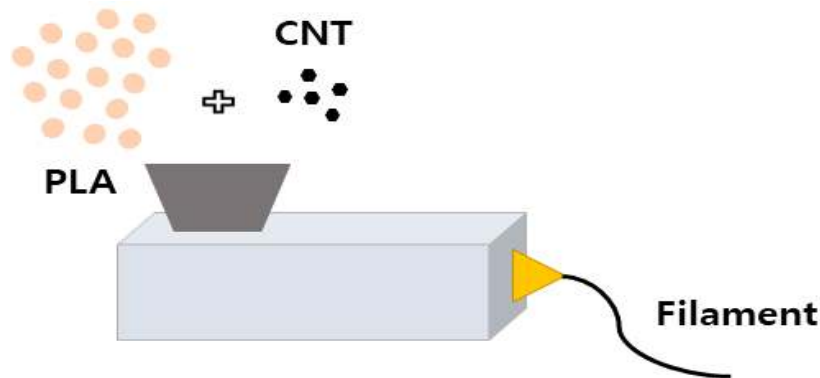
□ 탄소나노튜브(CNT)가 첨가된 spacer 제작

○ 탄소나노튜브(CNT)가 첨가된 필라멘트 제작

- 열전도도 및 전기전도도가 높은 탄소나노튜브(CNT)를 spacer에 사용한다면 spacer의 열 전도도를 높여 MD 공정에서 발생하는 온도 분극화 현상을 감소시켜 막의 효율을 증가시킬 수 있을 것이라 예상

spacer는 글루건과 유사한 방식은 FDM 3D 프린터를 이용하여 제작하였으며 3D 프린터용 필라멘트는 필리 붓을 이용하여 제작함

- PLA 펠렛 15g과 CNT 0.15g을 혼합하여 필라멘트를 제작함



[그림 2-24] 필라멘트 제작 모식도

○ 탄소나노튜브(CNT) spacer 제작

- 3D 프린터로 배열 각도 45°, 두께 1.0mm, 간격 4mm의 spacer를 제작함



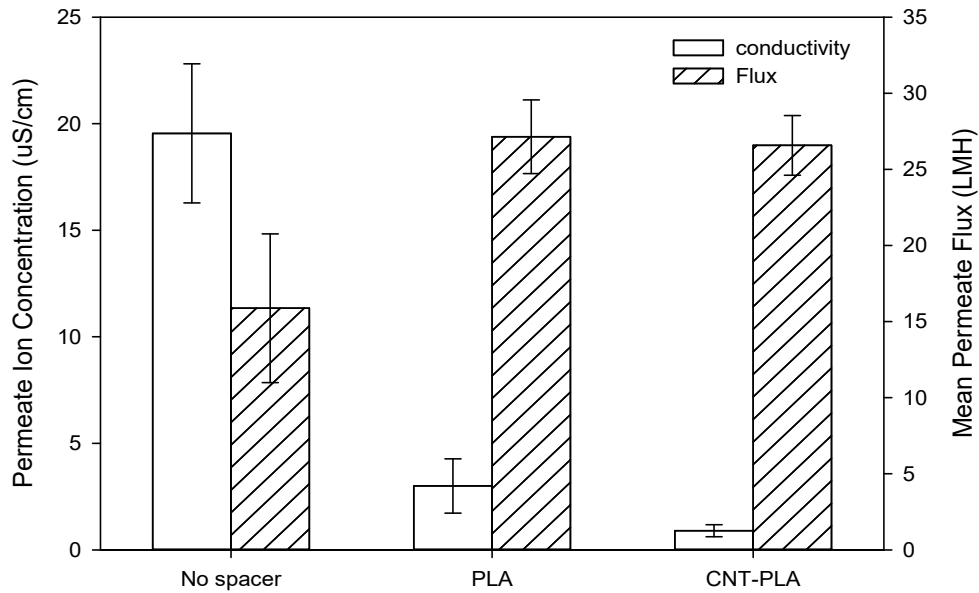
[그림 2-25] 광학현미경으로 관찰한 결과 좌) PLA spacer, 우)CNT-PLA spacer

- PLA 만을 이용해 만든 spacer 가닥은 매끄러운 구조를 가지고 있었지만 CNT를 첨가한 spacer 가닥에는 돌기가 관찰됨

□ MD 공정에서의 탄소나노튜브(CNT)가 첨가된 spacer 효율 시험

○ 탄소나노튜브(CNT) spacer의 이온 제거율과 플렉스

- MD 공정에서의 이온 제거율과 플렉스를 측정하여 spacer에 따른 막의 효율을 확인함

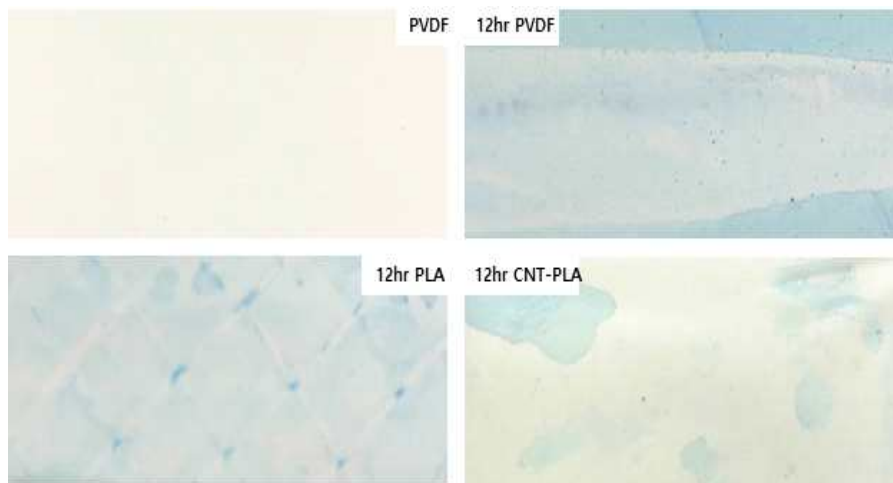


[그림 2-26] spacer에 따른 이온 제거율 및 플럭스

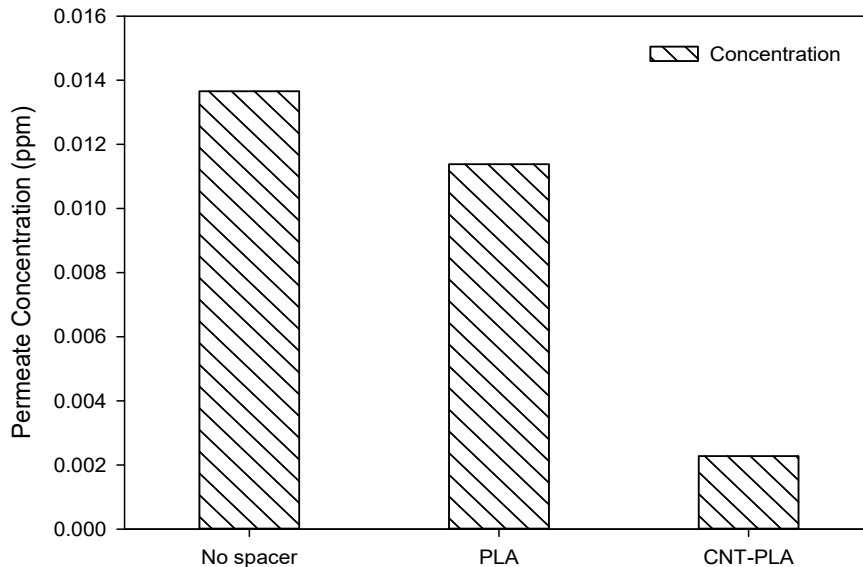
- CNT-PLA spacer는 이온 제거율이 spacer가 없을 때와 비교해 21.7배, PLA spacer와 비교해 3.3배 증가함
- CNT-PLA spacer는 spacer가 없을 때와 비교해 플럭스가 1.67배 증가하였고, PLA spacer와 비교해 0.98배 증가함

○ 탄소나노튜브(CNT) spacer에 의한 막 표면 오염 관찰 및 오염 물질 분석

- MD 공정의 Feed를 100ppm 메틸렌블루로 하여 1시간 운전 후 막 표면에 생긴 막 오염을 관찰함

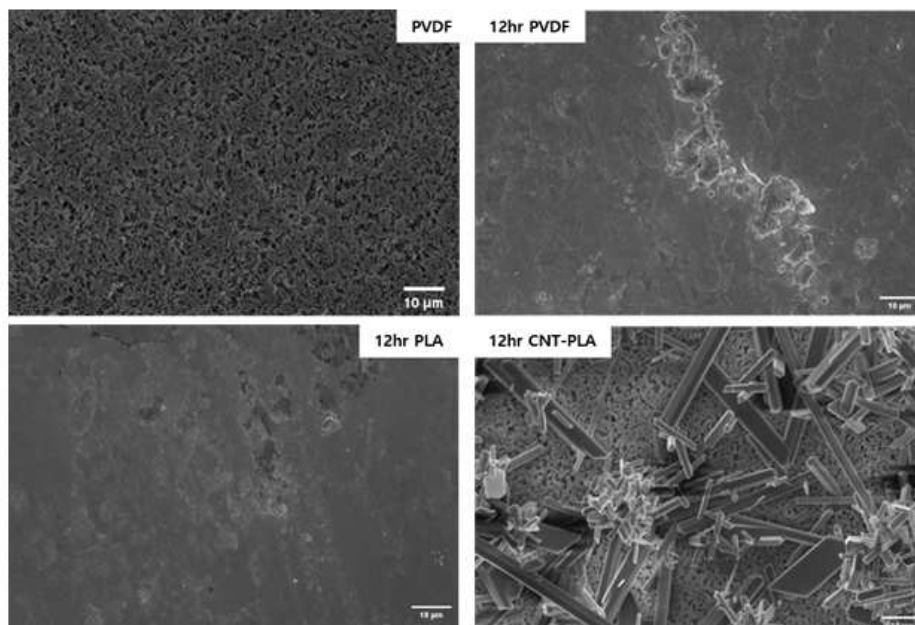


[그림 2-27] spacer에 따른 막 표면 오염



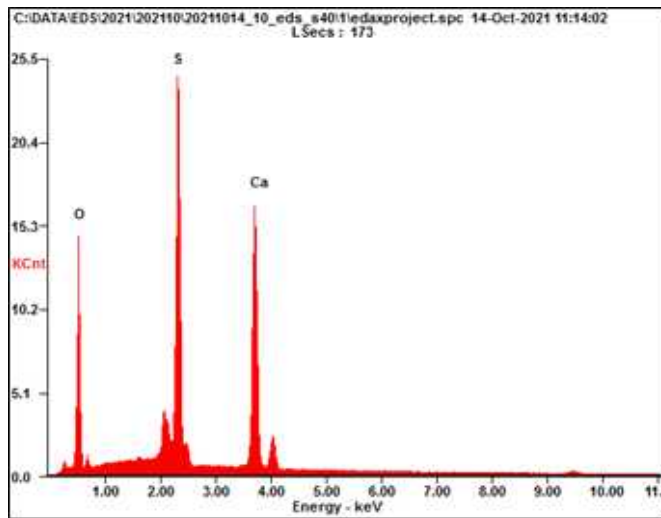
[그림 2-28] spacer에 따른 permeate 농도

- Spacer 없이 운전한 막은 표면에 오염 물질이 불균일하게 쌓임
- PLA spacer를 끼우고 운전한 막은 오염 물질이 spacer와 막이 닿는 부위 주변에 쌓였으며 CNT-PLA spacer를 끼우고 운전한 막에는 오염 물질이 거의 쌓이지 않음
- 1시간 운전 후 Permeate의 메틸렌블루 농도는 spacer가 없는 경우 0.014ppm, PLA spacer를 사용한 경우 0.011ppm, CNT-PLA spacer를 사용한 경우 0.0023ppm으로 CNT-PLA spacer를 사용하면 permeate로 넘어가는 메틸렌블루의 양이 적음
- MD 공정의 Feed를 0.19 g/L CaSO_4 로 하여 12시간 운전 후 SEM을 이용하여 막 표면 오염을 관찰함



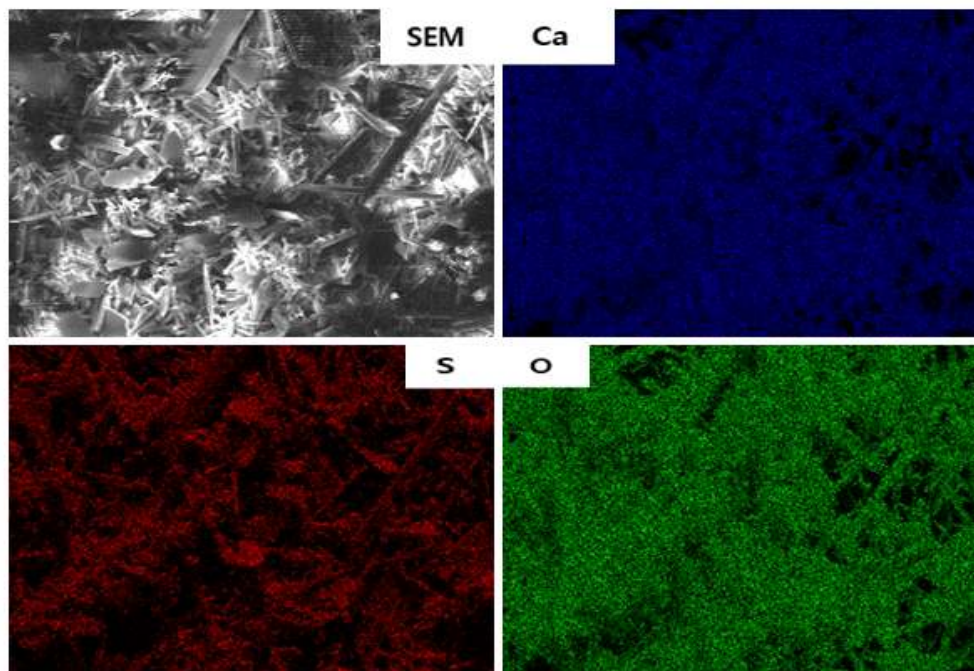
[그림 2-29] SEM으로 관찰한 spacer에 따른 막 표면 오염

- Spacer가 없는 PVDF 막의 운전 전 사진과 비교하여 MD 12시간 운전 후의 막과 PLA spacer를 사용한 막은 표면에 오염 물질이 쌓여 막의 기공을 완전 덮음
- CNT-PLA spacer를 사용한 막의 표면은 오염 물질로 완전히 덮이지 않았으며 표면에 결정이 형성됨
- 생성된 결정을 에너지분산형 분광분석기를 이용하여 분석을 진행하였으며, 분석 결과 표면에 형성된 결정은 CaSO_4 로 확인됨



Element	Wt%	At%
O	38.24	58.38
S	26.18	19.94
Ca	35.58	21.68

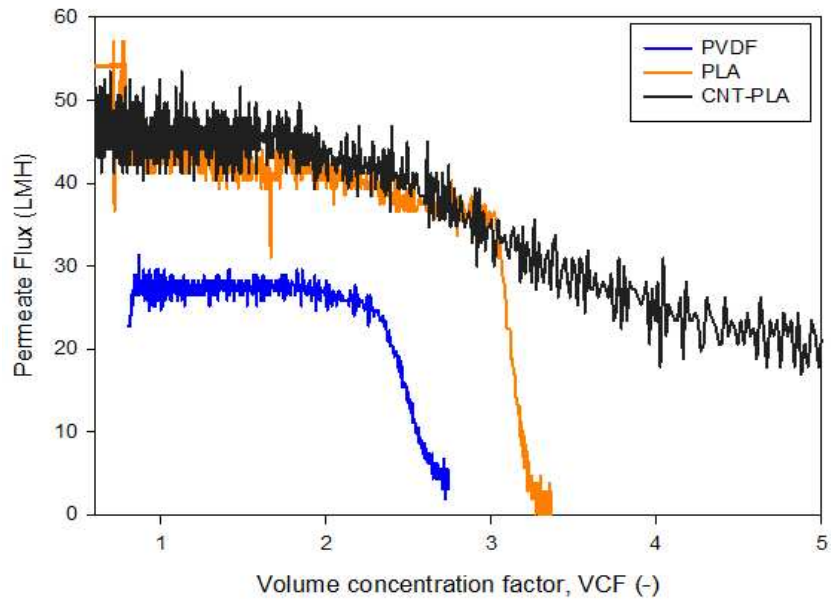
[그림 2-30] 에너지분산형 분광분석기로 분석한 구성 원소



[그림 2-31] 에너지분산형 분광분석기로 관찰한 막 표면

○ 탄소나노튜브(CNT) spacer에 의한 플럭스 감소 현상 분석

- MD 공정의 Feed를 0.19 g/L CaSO₄로 하여 플럭스 감소 현상이 일어날 때까지 운전하여 분석함



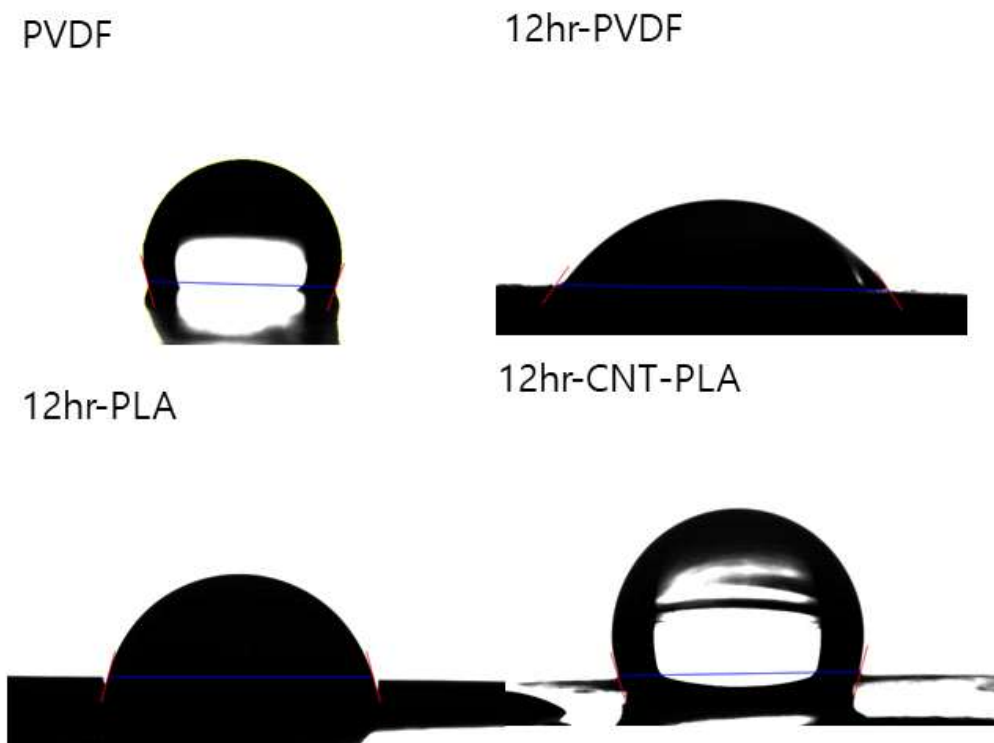
[그림 2-32] spacer에 따른 플럭스 변화

-Spacer를 사용하지 않은 막과 PLA spacer를 사용한 막은 급격한 플럭스 감소를 보였고, PLA 스페이서의 사용으로 플럭스가 증가하였고 플럭스 감소도 지연시킬 수 있는 것을 확인함

-위와 다르게 CNT-PLA 스페이서를 사용할 경우 플럭스가 일정하게 감소하는 경향을 보였으며, VCF가 5에 도달할 경우에도 flux가 여전히 20LMH 이상을 보임

○ 탄소나노튜브(CNT) spacer에 의한 막의 소수성 변화

- MD 공정의 Feed를 0.19 g/L CaSO_4 로 하여 12시간 운전 후 막의 소수성을 관찰함



[그림 2-33] spacer에 따른 막의 소수성

-PVDF 막의 운전 전 막의 접촉각은 110° 이었고, 12시간 운전 후 PVDF 막의 접촉각은 55° 로 소수성을 거의 잃었음

-PLA spacer를 끼운 막은 접촉각이 76° 로 소수성을 완전히 잃지는 않았고, CNT-PLA spacer를 끼운 막은

접촉각이 104°로 소수성을 거의 잃지 않음

spacer에 CNT를 첨가할 경우 spacer를 끼우지 않은 것 보다 플렉스가 증가하며 이온 제거율이 우수함

- Spacer는 막오염으로 인해 막의 기공을 막는 현상을 줄이며, CNT-PLA spacer를 사용할 경우 막의 기공이 오염 물질로 인해 막히지 않고, 명확한 결정을 생성시켜 플렉스 감소 현상을 낮출 수 있어 장기간 운전이 가능함

- CNT가 첨가된 spacer는 막의 소수성을 장기간 지속시키며 이로 인해 막의 수명을 증가시킬 것으로 예상된다

- CNT가 첨가된 spacer의 막오염 저하 메커니즘에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 보임

- 향후, CNT-Spacer가 장착된 액체건조제 막증류 시스템 운전하여 낮은 플렉스와 장시간 운전시 플렉스 급감 현상 회복 예상됨.

③ 막증류 시스템의 에너지 효율성을 높이기 위한 plasmonic membrane 소재 개발

○ GNP 제조

1) GNP제조

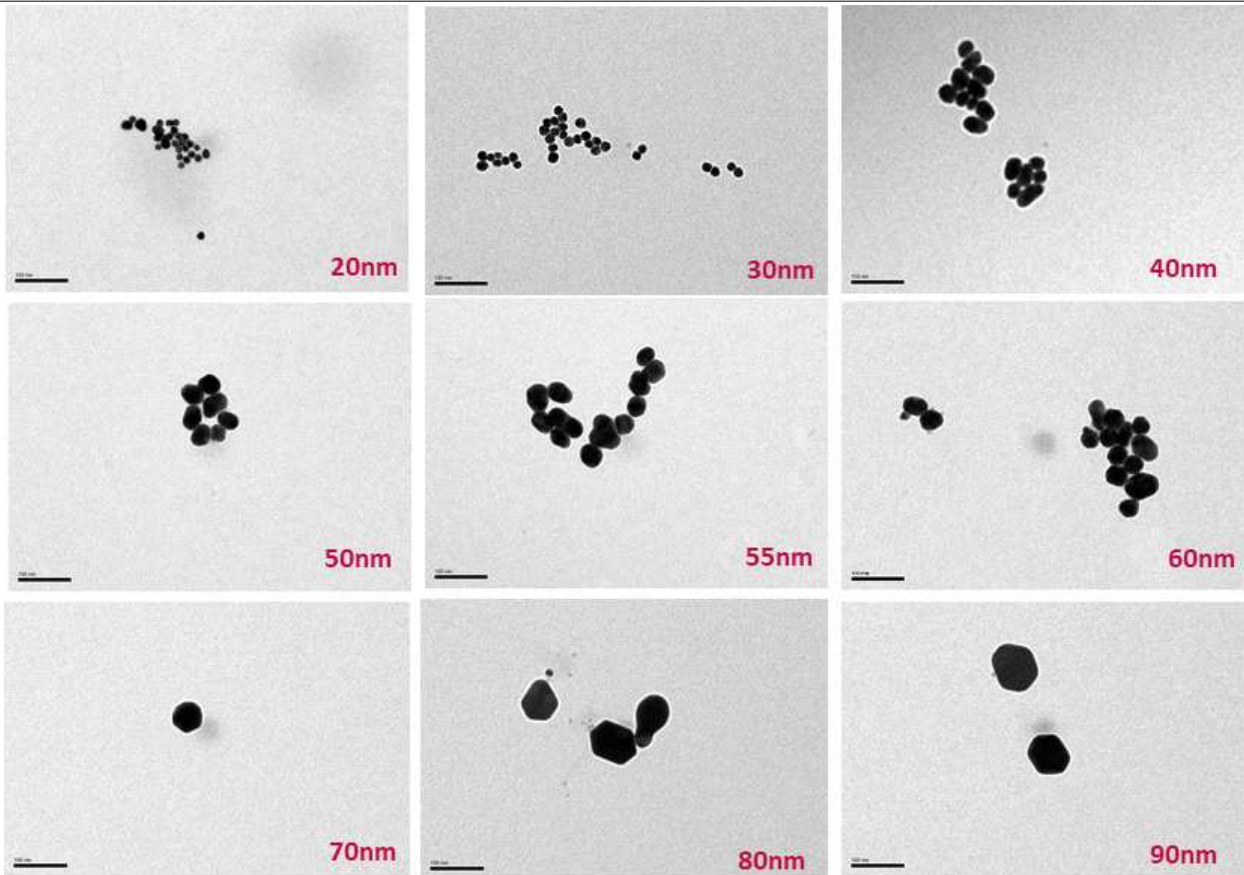
- 특정 파장대의 빛을 비추었을 때 열을 발생시키는 플라즈모닉 효과(plasmonic effect)를 가짐.
- 가시광선 영역대의 빛도 흡수 및 산란시킬 수 있어 최근 다양한 분야에 적용되고 있음.

2) 다른 크기의 GNP 제조 (크기별 생성 조건 최적화)

- 시트르산 환원법을 통해 제조
- TSC/HAuCl₄ ratio, salt concentration, reaction time, mixing rate 조절
- 크기 명확해지면 centrifuge 통해서 GNP 보관; 100배 희석 시 optical density 기록

[표2-8] GNP 크기별 생성을 위한 제조용액 최적화

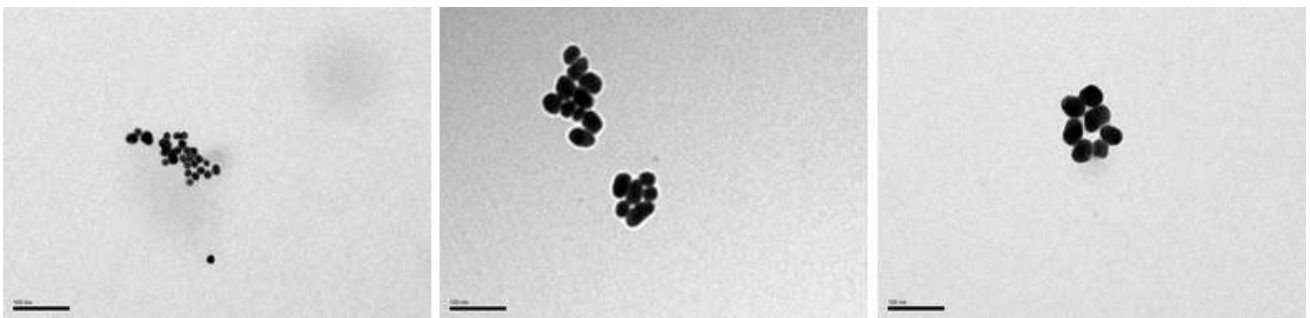
	HAuCl ₄	TSC	Salt	Time	rpm	Wavelength
20nm	0.5mM	1.5mM	0mM	7min	400rpm	519nm
30nm	1mM	3mM	0mM	7min	400rpm	527nm
40nm	1mM	1.5mM	0mM	7min	400rpm	530nm
50nm	1mM	1.5mM	10mM	7min	400rpm	535nm
55nm	1mM	1.5mM	10mM	7min	100rpm	534nm
60nm	1mM	1.5mM	15mM	10min	400rpm	
70nm	1mM	1.5mM	10mM	7min	200rpm	
80nm	1mM	1.5mM	10mM	15min	400rpm	
90nm	1mM	1.5mM	10mM	15min	200rpm	



[그림2-34] 20 nm~90 nm 크기로 생성된 GNP 별 TEM image.

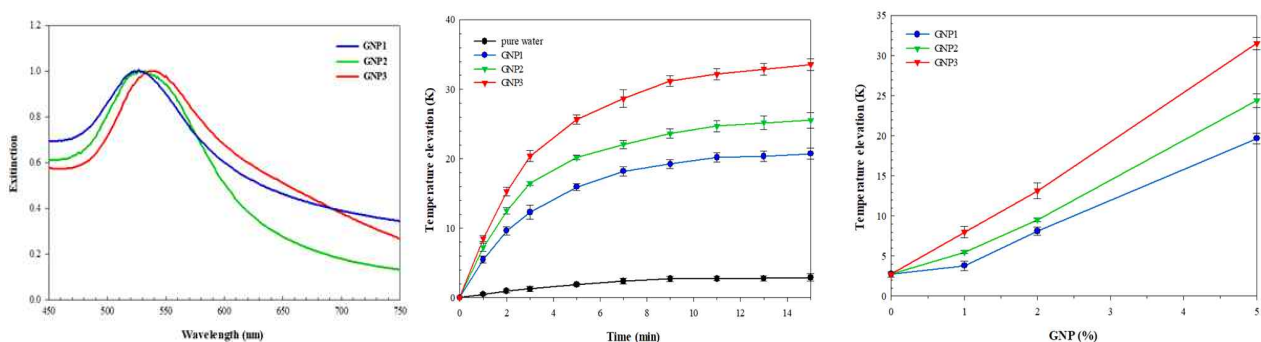
○ GNP bulk test

– GNP1(20nm), GNP2(40nm), GNP3(60nm) 선정



[그림2-35] 20, 40, 60 nm 크기의 TEM image.

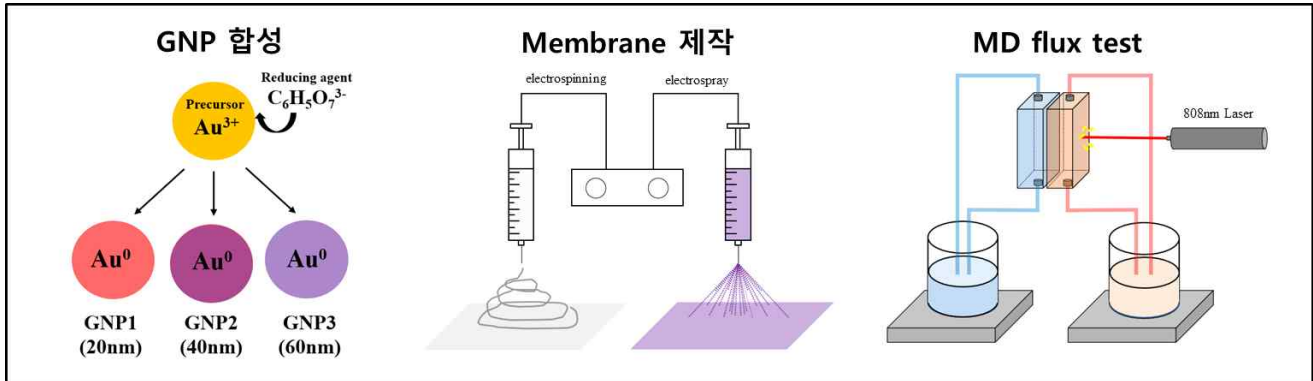
– 808nm Lazer 및 IR camera를 통해 GNP의 크기, 농도에 따른 plasmonic effect 확인



[그림2-36] a) GNP 사이즈별 Extinction spectra b) 시간에 따른 GNP 크기별 수온도 변화 (15분). c) GNP 크기에 따른 GNP 농도별 수온도 변화.

○ Plasmonic membrane 제조

- GNP를 size별로 합성
- 전기 방사(electrospinning) 및 전기 분무(electrospray)를 이용하여 PVDF막 제작
- Lab-scale DCMD를 이용하여 막 성능 확인 (플럭스 및 막 오염)



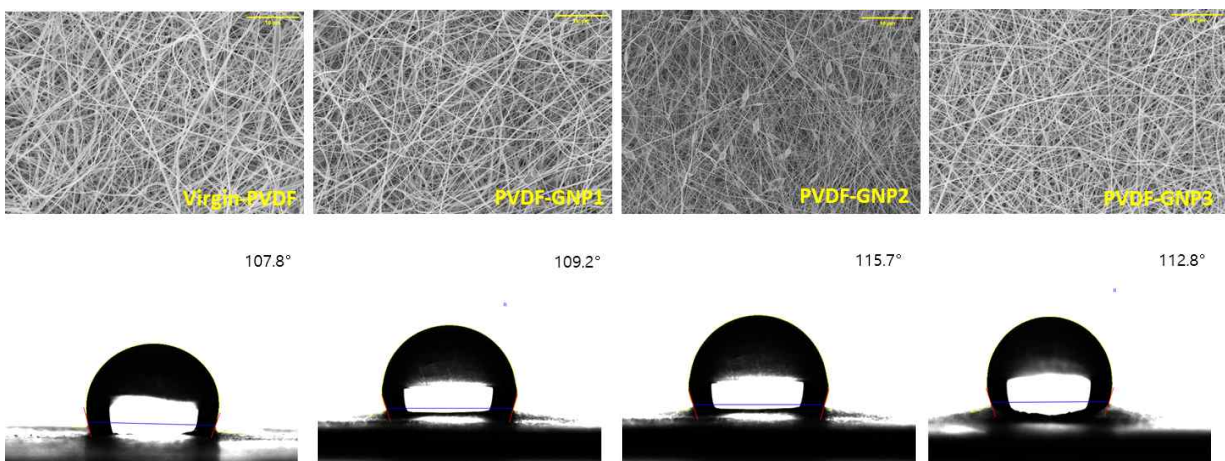
[그림2-37] Plasmonic 제조 방법.

○ PVDF + GNP membrane

- 전기방사법을 이용한 PVDF 막에 합성한 GNP를 넣어서 plasmonic membrane으로 개질함
- SEM image, contact angle 측정 : 막 만들어지는지, 소수성이 유지되는지 확인
- 808nm laser, IR camera로 plasmonic effect(온도 변화) 확인
- fouling test : methylene blue (100 mg L^{-1}) 확인

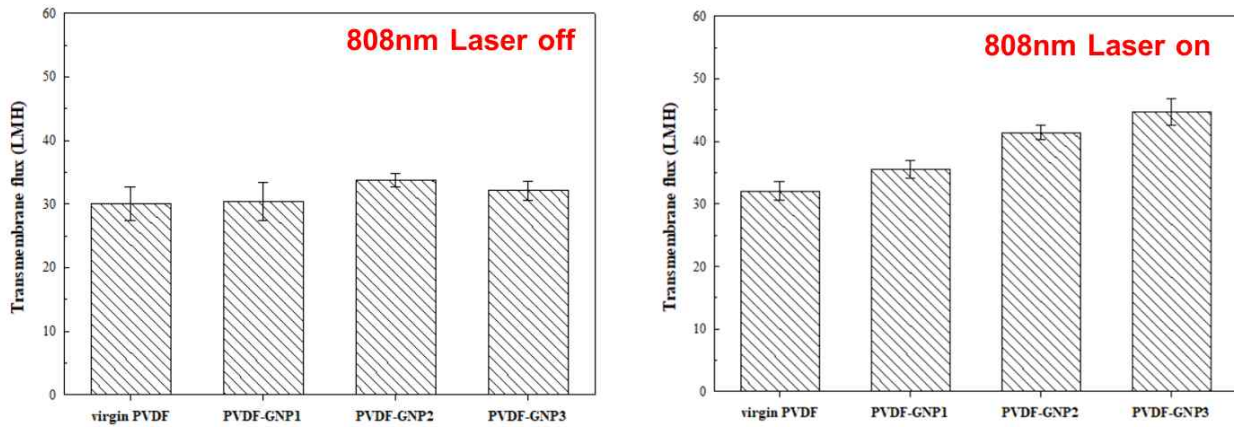
1) electrospinning

- PVDF 20w% 막 제조 (8ml).
전기방사(flow rate=0.8mL/h, voltage=13kV, niddle size=0.5mm(21G))를 이용하여 막 제조.
- PVDF 20w%, GNP 5w% 농도 조건에서 막 제조 (2ml).
전기방사(flow rate=0.8mL/h, voltage=15kV, niddle size=0.5mm(21G))를 이용하여 막 제조.
- SEM 및 contact angle을 통해 생성된 막의 표면과 소수성 확인



[그림2-38] a) SEM image, b) Contact angle: 1) PVDF 막 2) PVDF-GNP1 막 3) PVDF-GNP2 막 4) PVDF-GNP3 막.

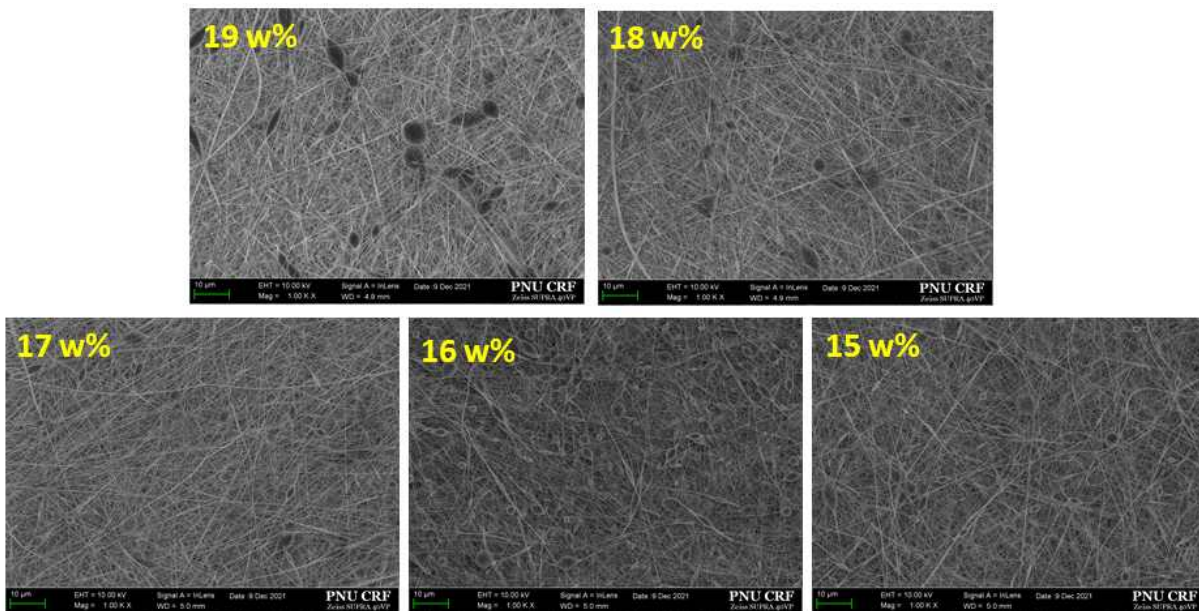
- Lab-scale DCMD를 이용하여 1시간 동안의 평균 플럭스를 통해 플라즈모닉 막 종류 공정 평가.
- 빛 에너지(808nm Lazer) 조사 시 GNP의 플라즈모닉 현상에 의해 막 표면 온도 증가
- 20,40,60nm GNP 첨가 시 5.1LMH(17%), 7.7LMH(23%), 12.6LMH(39%) 플럭스 증가



[그림2-39] Transmembrane flux of water vapor at different GNP size (Feed typology : 60°C pure water)

2) Electrospinning 및 electrospray 조건 최적화

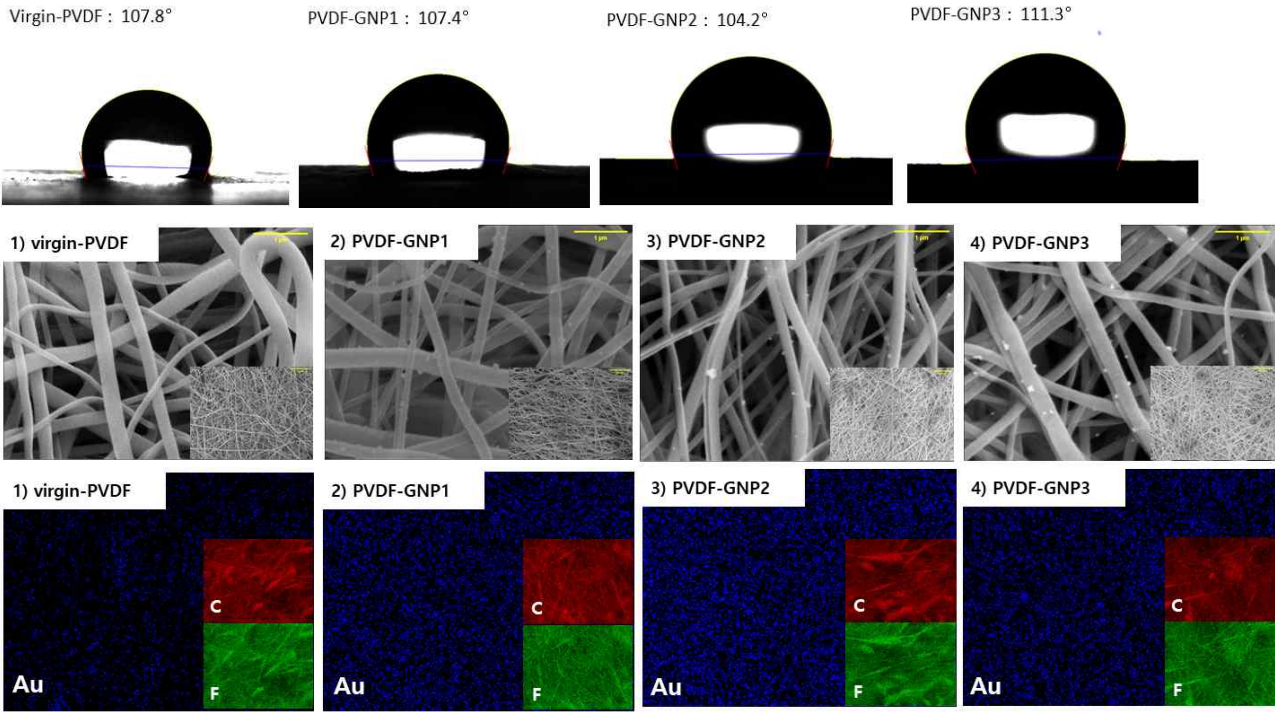
- Electrospinning : PVDF 농도를 조절해가면서 GNP-PVDF membrane 생성을 위한 조건 최적화 ; PVDF 17w%
- Electrospinning : Flow rate 및 전압을 조절해가면서 GNP-PVDF membrane 생성을 위한 조건 최적화



[그림2-40] 15 ~20 wt% PVDF 막에서 관찰된 GNP의 SEM image.

2) Electrospray

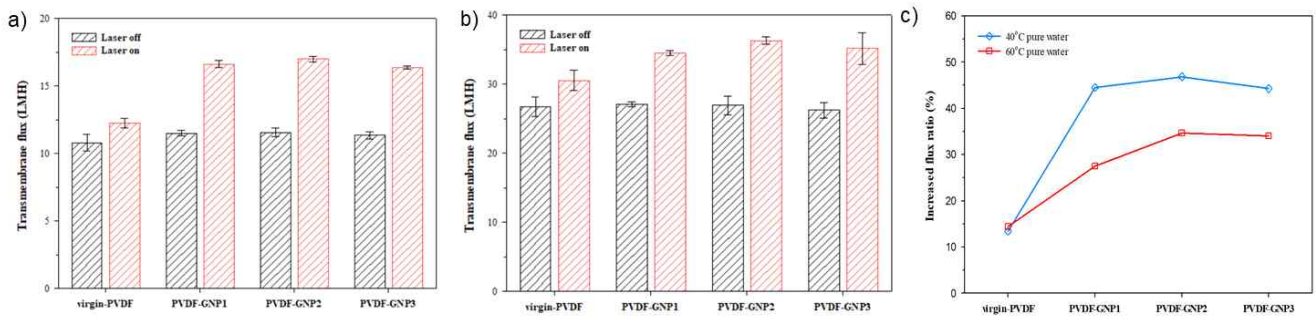
- PVDF 막에 electrospray 기법을 활용하여 GNP를 deposition 함.
- PVDF 20w% 막 제조 (8ml).
전기방사(flow rate=0.8mL/h, voltage=13kV, niddle size=0.5mm(21G))를 이용하여 막 제조.
- PVDF 5w%, GNP 5w% 농도 조건에서 막 제조 (2ml).
전기방사(flow rate=1.0mL/h, voltage=20kV, niddle size=0.25mm(25G))를 이용하여 막 제조.
- SEM 및 contact angle을 통해 생성된 막의 표면과 소수성 확인
- SEM-EDS를 통해 GNP분포 확인



[그림2-41] SEM image (X 2,000 and X 20,000) of membrane surface b) gold (Au), carbon (C) and fluorine (F) distribution of membrane surface c) contact angle image of membrane 1) virgin PVDF membrane 2) PVDF-GNP1 membrane 3) PVDF-GNP2 membrane 4) PVDF-GNP3 membrane.

3) Plasmonic 막 증류 공정 평가

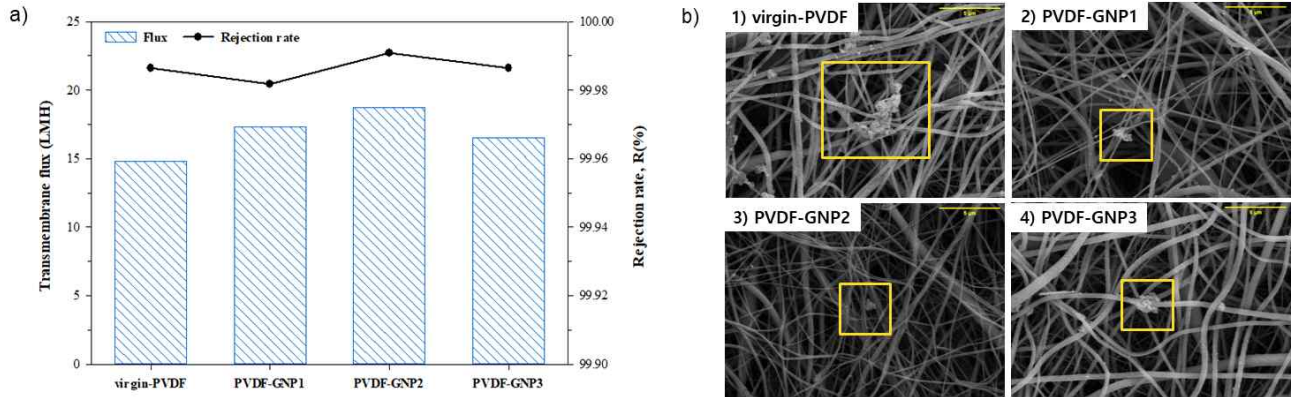
- lac-scale DCMD를 이용하여 1시간 동안의 평균 플럭스를 통해 플라즈모닉 막 증류 공정 평가.
- 빛 에너지(808nm Lazer) 조사 시 GNP의 플라즈모닉 현상에 의해 막 표면 온도 증가
- 20,40,60nm GNP 첨가 시 5.1LMH (44%), 5.4LMH (46%), 5.0LMH (44%) 플럭스 증가 (40°C)
- 20,40,60nm GNP 첨가 시 7.5LMH (44%), 9.4LMH (46%), 8.9LMH (44%) 플럭스 증가 (60°C)



[그림2-42] Transmembrane flux of water vapor at different GNP size (Feed typology : a) 40°C pure and b) 60°C pure water) c) transmembrane flux increasing ratio of water at different temperature.

4) Plasmonic 막 증류 공정에서 막 오염 평가

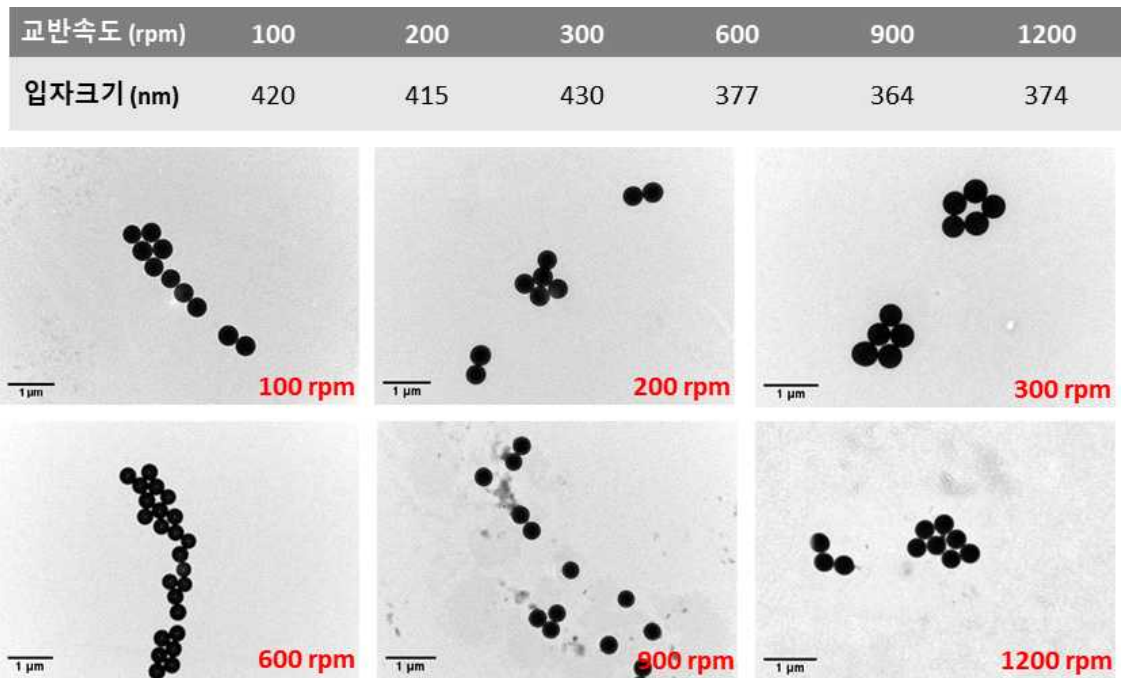
- MB(methylene blue, 664nm)에 의한 막 오염 관찰
- GNP의 광분해 효과에 의한 foulant 감소; SEM-EDS 및 추가 실험 필요



[그림2-43] a) PVDF-GNP 막의 플럭스 및 MB 제거율 평가, b) 막 증류 운전 후 막 표면 관찰 SEM image (5k).

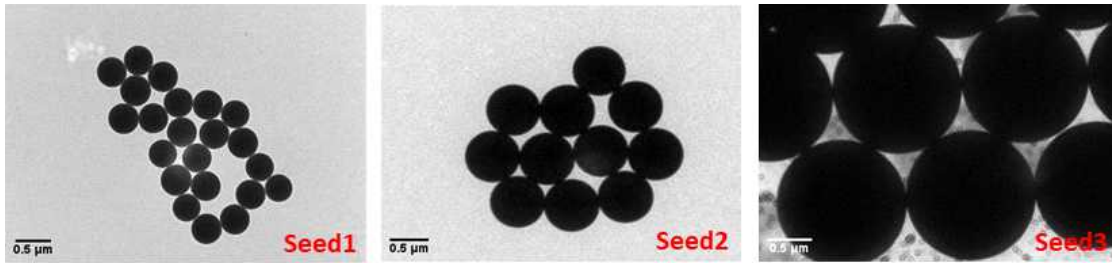
5) Plasmonic 막 증류 공정에서 막 오염 평가를 위한 Silica particle 제조

- 오염물 크기에 따른 막오염 패턴 연구를 위한 model compound 제조 기술 개발
- 균일한 크기의 입자를 제조하는 방법으로, TEOS(Tetra ethyl ortho silicate)를 알코올 용액에서 물과 반응 시켜서 생성되는 분자가 서로 결합하는 졸-겔 공정을 사용해 제조
- 교반 속도, 교반 시간, reaction stage, solvent 조절하여 원하는 Silica 입자 크기 조절
- 2.5 μ m를 목표로 입자 크기를 키우는 과정.



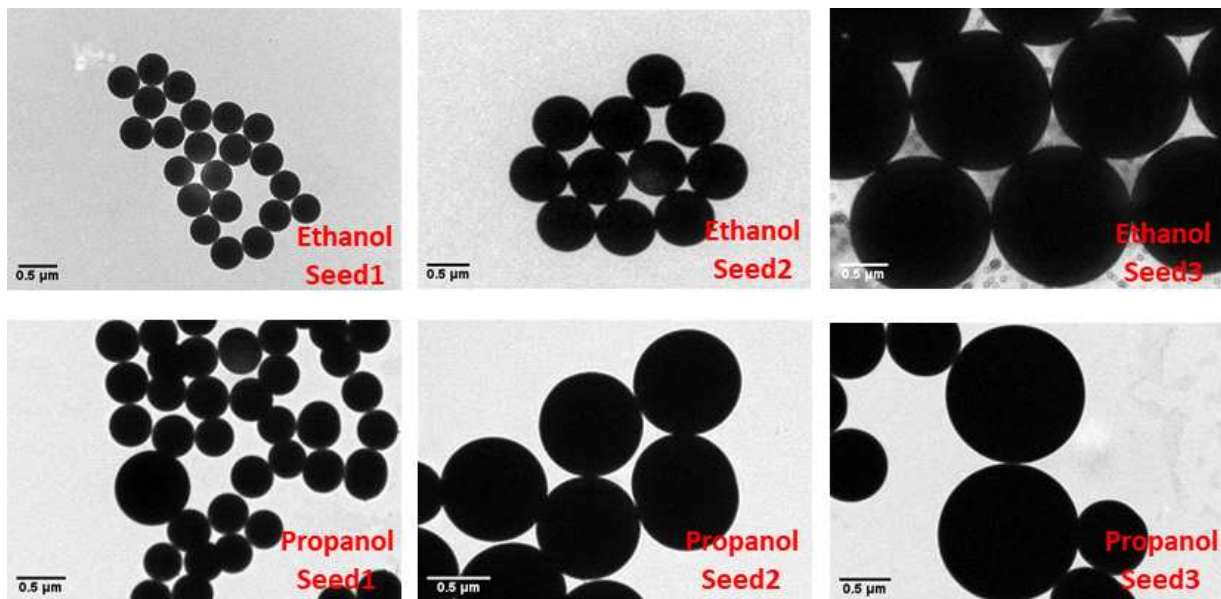
[그림2-44] 합성한 silica의 크기와 TEM image

	seed1	seed2	seed3
입자크기 (nm)	430	698	1398



[그림2-45] 반응 단계에 따른 silica 크기 비교

		seed1	seed2	seed3
입자크기 (nm)	Ethanol	430	698	1398
	Propanol	430, 740	842	1363



[그림2-46] Ethanol과 Propanol을 용매로 합성한 Silica 입자 크기 비교

④ 액체건조제 막증류 시스템에서 막 내구성 향상을 위한 막 소재 개발

○ Silicate로 소수성 PVDF 막 표면 개질

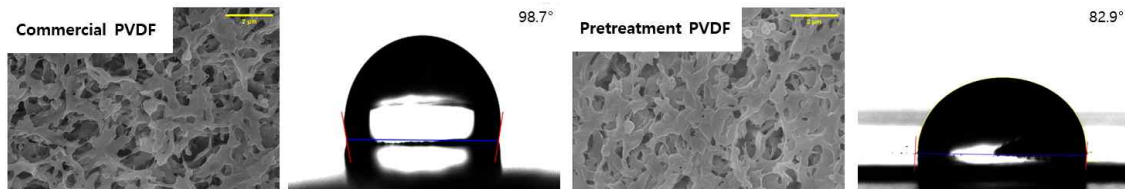
- 커플링제와 PVDF 막의 반응성을 향상 시키기 위해 PVDF 막을 전처리 하였다. 7%(w/w) NaOH 용액에 PVDF 막을 16시간 교반함
- EtOH, H₂O, NH₃, 커플링제를 사용하여, 1시간 동안 40°C, 300rpm으로 교반하여 개질 용액을 제조하였다. 전처리된 PVDF 막은 딥 코팅(Dip Coating) 방법으로 개질함.
- 커플링제의 농도는 고정시키고 EtOH, H₂O, NH₃의 농도를 조절하여 250 ± 20 nm (membrane 1), 150 ± 16.5 nm (membrane 2), 50 ± 5 nm (membrane 3), 크기 분포가 다양한 (membrane 4) 실리카를 합성함. Silicate 제조용액 조절에 따라 도포된 silicate 크기는 아래 표와 같음.

[표2-9] Silicate 제조방법에 따른 크기 분류

막 이름	Silicate 크기
Membrane 1	250 ± 20 nm
Membrane 2	150 ± 16.5 nm
Membrane 3	50 ± 5 nm
Membrane 4	다양한 크기 분포

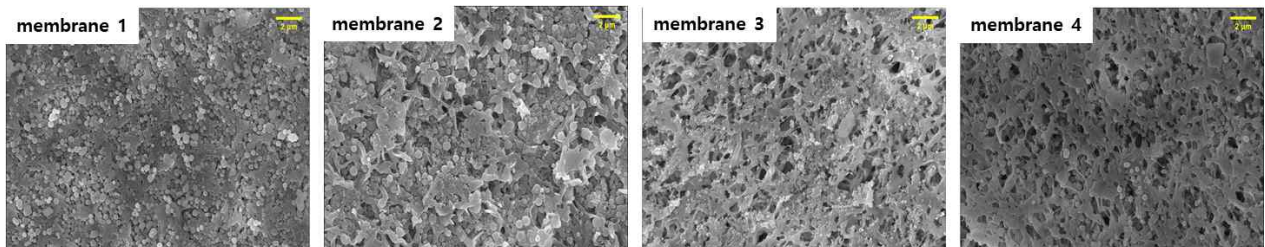
○상용 PVDF membrane 표면과 silicate로 전처리된 PVDF membrane 표면 특성 변화

- 개질한 PVDF 막, 전처리한 PVDF 막, PVDF 상용막의 표면을 scanning electron microscope (SEM)을 통해 관찰하고, contact angle 측정을 통해 소수성 차이를 비교함.
- 상용 PVDF 막과 전처리된 PVDF 막의 표면의 SEM 이미지는 큰 차이를 나타내지 않음.
- 그러나 contact angle 값에는 차이를 보였는데, NaOH 용액에 PVDF 막을 전처리 하면서 PVDF 막의 mechanical integrity가 파괴되었기 때문으로 보임.



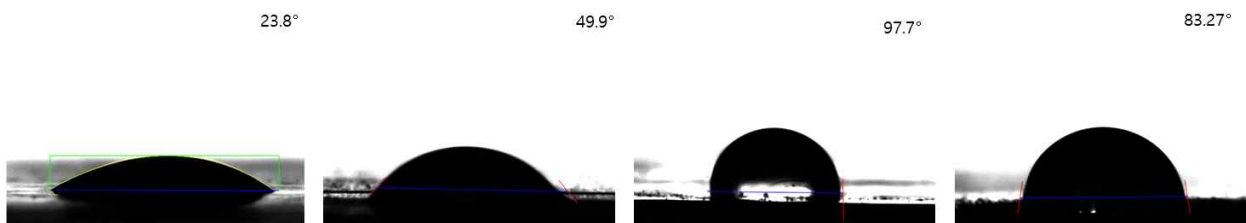
[그림2-47] 상용 PVDF 막과 Silicate로 개질한 PVDF 막의 SEM image 와 contact angle.

- Silicate 크기에 따른 개질된 막표면 비교 관찰한 결과 입자 크기가 클수록 dense하게 도포되고 표면 막공을 감소시키는 것으로 보임.



[그림2-48] Silicate 크기에 따른 막 표면 SEM image.

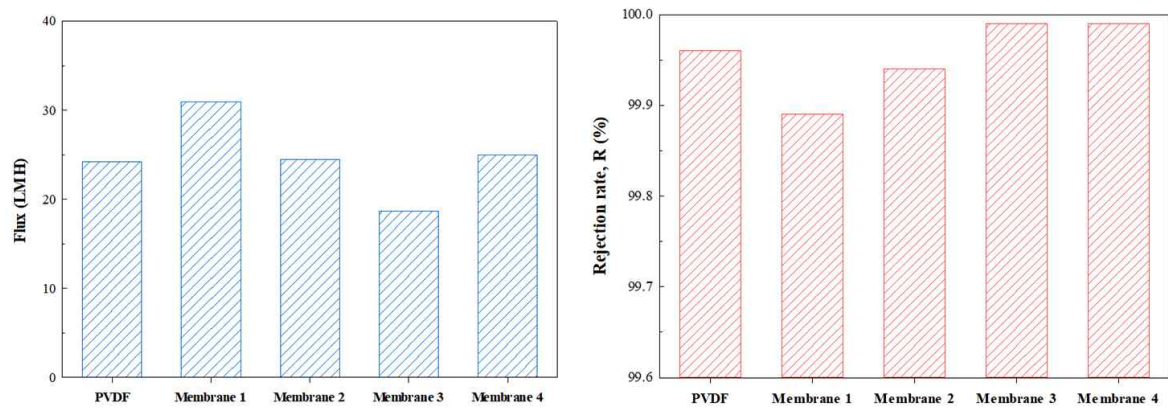
- 실리카의 입자 크기가 크고 막 표면에 dense 하게 도포될 수록 소수성이 감소하는 것을 확인함.
(membrane 1: 23.8 ° → membrane 4: 83.27 °)



[그림2-49] contact angle image of membrane 1, membrane 2, membrane 3, membrane 4

○ Silicate로 개질된 막 종류 공정 성능(Flux) 평가

- 입자 크기가 50 ± 5 nm (membrane 3) 인 실리카로 막을 개질 할 경우 막 섬유에 실리카가 부착이 되고 표면 거칠기가 증가해서 소수성이 증가되었다고 생각된다. 플럭스 값은 낮아졌지만 제거율이 증가하였고 소수성도 높았기 때문에 막 성능이 향상되었다고 생각된다.



[그림2-50] flux of water vapor at different Silica size (Feed typology : 60°C NaCl 3.5 %(w/w))

나. 액체건조제 활용 미세먼지 제거시스템 성능평가 (공동연구기관: 한국산업기술시험원)

○ 목표 : 액체건조제 활용 미세먼지 제거효율 평가 및 최적화

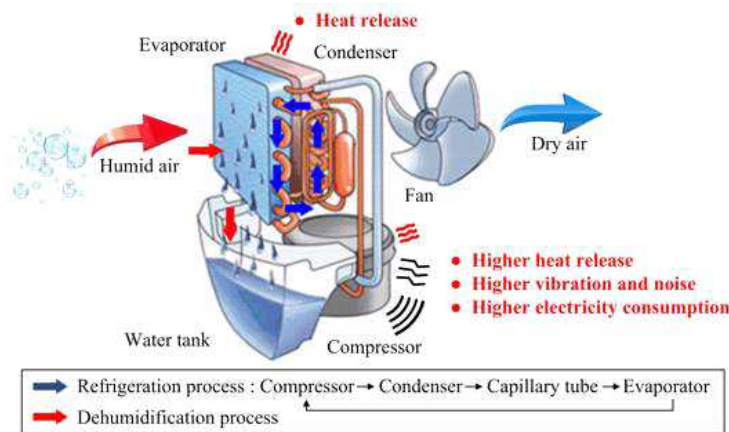
○ 달성

- 액체건조제 기반 제습기의 오염물질 제거 평가시스템 설계 및 제작 완료
- 오염물질 제거실험 예정

○ 주요내용

✓ 액체건조제 기반 제습과정 분석 및 검토

- 기존 압축식 냉각제습은 공기 중의 수분을 응축하기 위해 적정온도 이하로 냉각함에 따라 냉동기 가동에 많은 전기가 소요됨.
- 이와 함께 생활수준과 삶의 질 향상에 따라 실내 공기질(indoor air quality, IAQ)에 대한 관심이 높아지고 있음. 기존 압축식 제습방법은 응축 냉각기 표면 결로 발생에 따라 미생물 및 진균의 증식 문제를 야기시키며 결과적으로 공기질 오염을 유발하여 건강을 위협하는 요소로 작용할 수 있다는 문제가 제기되고 있음.
- 상대적으로 액체식 제습시스템의 경우 용액상태의 액체건조제를 이용하여 공기중의 수분을 제어함에 따라 냉각코일 표면에서 발생할 수 있는 미생물 및 진균 오염문제를 미연에 방지할 수 있는 장점을 가지고 있음.



[그림2-51] 압축식 제습시스템

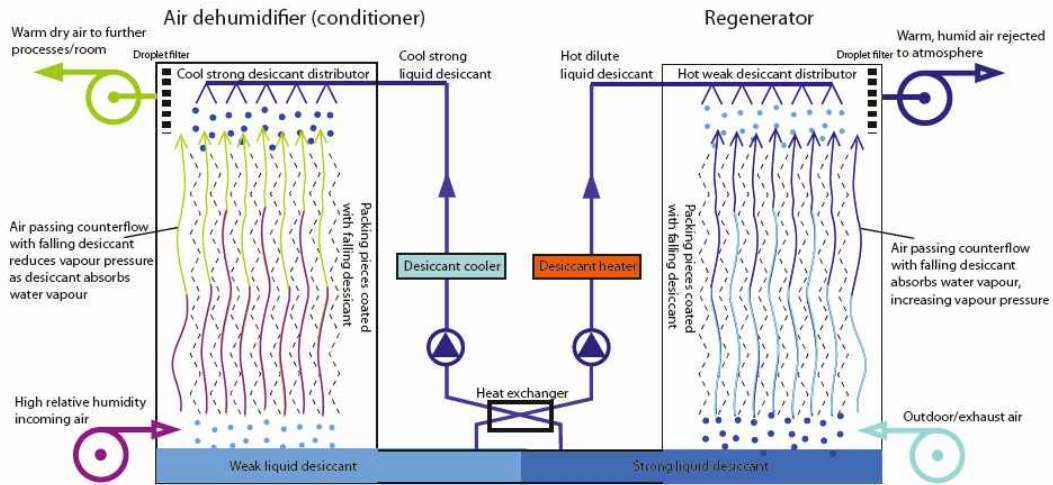
[표2-10] 압축식 제습시스템의 특징

특징	단점
• 일반적으로 사용됨. • 높은 제습력 • 낮은 소비전력	• 18°C 이하에서 제습력이 급격히 저하 • 압축기로 인한 큰 부피와 무게 • 증발기 표면 잔류 수분에 의한 곰팡이 및 세균번식으로 실내공기질 오염 가능성

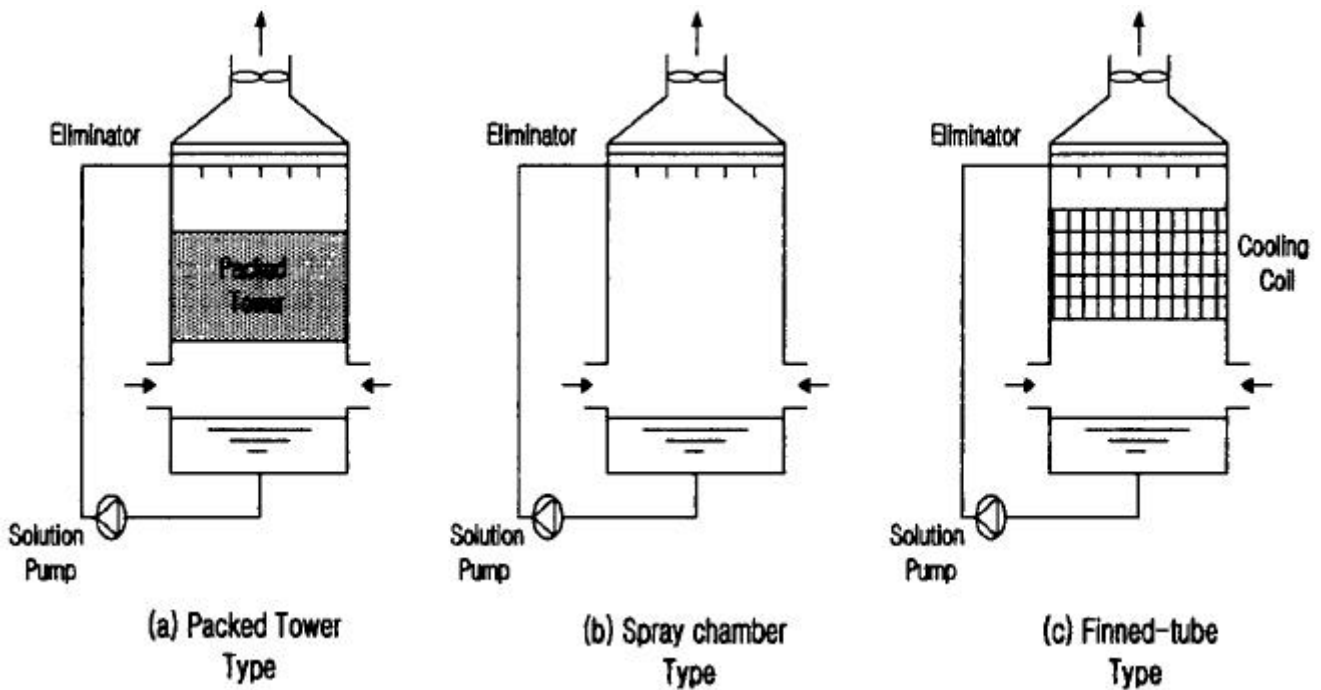
- 액체식 제습공정에는 흡수성이 있는 액체건조제와 습공기가 직접적으로 접촉하여 습공기 내 수분을 제거하는 직접접촉식과 소수성 고분자막을 이용한 분리막식이 있음. 직접접촉식 제습공정의 성능은 액체건조제의 종류, 습공기와 액체건조제의 접촉 방식, 작동 조건 등에 의해 크게 달라지며, 특히 액체건조제의 종류가 제습성능에 가장 큰 영향을 미침. 일반적으로 사용되는 액체건조제에는 염화리튬(LiCl)과 염화칼슘(CaCl₂) 수용액이 있음.

[표2-11] 액체식 제습시스템의 특징

특징	단점
4계절 사용가능 액체건조제와 습공기의 직접접촉으로 열 및 물질 전달에 효과적	액체건조제의 종류가 성능에 절대적 영향 액체건조제의 유해성 검증 필요



[그림2-52] 액체식 제습시스템



[그림2-53] 액체식 제습공정 종류

- 액체건조제는 주로 염화리튬과 염화칼슘이 사용되고 있으며 그 외에 적용가능한 액체건조제의 종류와 특성을 조사분석한 결과는 아래의 표와 같음.

[표2-12] 액체건조제별 특성

물질	실온에서 경제적으로 얻어지는 습도(R.H)	독성	부식성	안정성	특징
CaCl	20-25	무	무	안정	LiCl과 거의 유사
Glycerin	30-40	무	무	고온에서 산화분해	진공 증발에 의해 재생. 농도50-60%에서 많은 수분을 흡수 응축 및 용해열 제거를 위한 냉각장치 필요
LiCl	10-20	무	유	안정	부식성과 독성이 심해 적용이 어려움
Phosphoric acid	5-20	유	유	안정	용액의 고온가열과 부식성으로 적용이 어려움
Sodium hydroxide	10-20	유	유	안정	흡습효율은 높으나 독성 및 부식성 높음
Sulfuric acid	5-20	유	유	안정	흡습제 손실없이 .재생가능한 장점이 있음
Triethulene glycol	5-10	무	무	안정	

Health and flammability hazards of the desiccants [50-52].

Sl. No.	Desiccant	Health hazard	Flammability hazard
1.	LiCl	● Harmful if swallowed ● Causes skin irritation ● Causes serious eye irritation ● May cause respiratory irritation	No
2.	LiBr	● Harmful if swallowed ● Causes skin irritation ● May cause an allergic skin reaction ● Causes serious eye irritation ● May cause respiratory irritation ● Suspected of causing cancer ● Causes serious eye irritation	No
3.	CaCl ₂	● Causes serious eye irritation	No

Comparison of different dehumidification techniques with respect to IAQ [97].

Sl. No.	Parameter	Liquid desiccant dehumidification	Solid desiccant dehumidification	Condensing dehumidification
1.	VOCs	Removal	Removal	No effect
2.	Bacteria	Kill or deactivation	No effect	Breeding
3.	PMs	Capture	Release	No effect
4.	Carryover	Yes	No	No

[그림2-54] 액체건조제별 유해성

- ✓ 직접접촉식 액체건조제 기반 제습공정의 대기오염물질 제거 성능평가시스템 설계 및 실험검토
 - 액체건조제를 활용한 직접접촉식 미세먼지포함 대기오염물질 제거실험이 가능한 시스템을 설계 및 제작
 - Air pressure를 통해 clean air를 공급하고 atomizer에서 생성되는 KCl, NaCl, PSL 등의 입자와 함께 반응 챔버 내로 공급됨.
 - 이후 일정습도를 유지하기 위한 dryer를 거치고 액체제습제와 접촉함.
 - 액체제습제의 경우 수압펌프를 통해 노즐로 공급되고 노즐을 통해 에어로졸 형태로 일정한 액적크기로 분사됨.
 - 접촉면적을 늘리고 효율적인 제거를 위해 충전재를 사용하게 되며 충전재는 glass ball, 활성탄, 모래 등 다양하게 적용이 가능함.

2020년 7월 30일

* 장치 구성 목록 List *

① 입자 발생 장치

- Clean air supply
- Atomizer
- Diffusion Dwyer

② Liquid desiccant 분사 장치

- 분사 노즐 (jet nozzle)
- Liquid 공급 펌프
- Clean air supply

③ 충전재

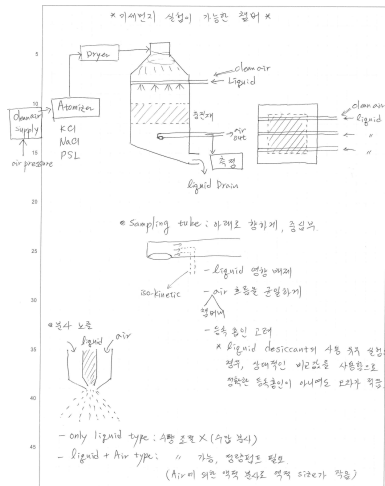
- 크기: 약 2mm 주변으로 아크릴도 발포
- 충전재 지지대 (컵머 내 설치)

④ 미세먼의 챔버

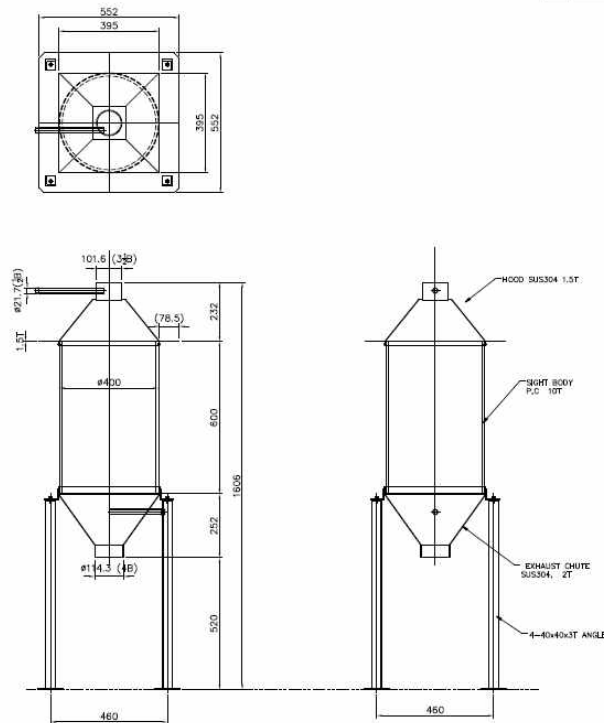
- 크기: 500 x 500 x 500 mm (T: ? mm), 상·하부 제외
- 내부 온도 어느정도(?) 균일하도록 설계/제작
- 챔버내 유행공의 길이 및 분포, 유온 정도가 가능하도록 분리 가능한 구조

⑤ 기타

- Air 배기 및 Sampling tube
- 연결 튜브 및 장력 받침
- Liquid 배관 등.



제작 수량 : 1대

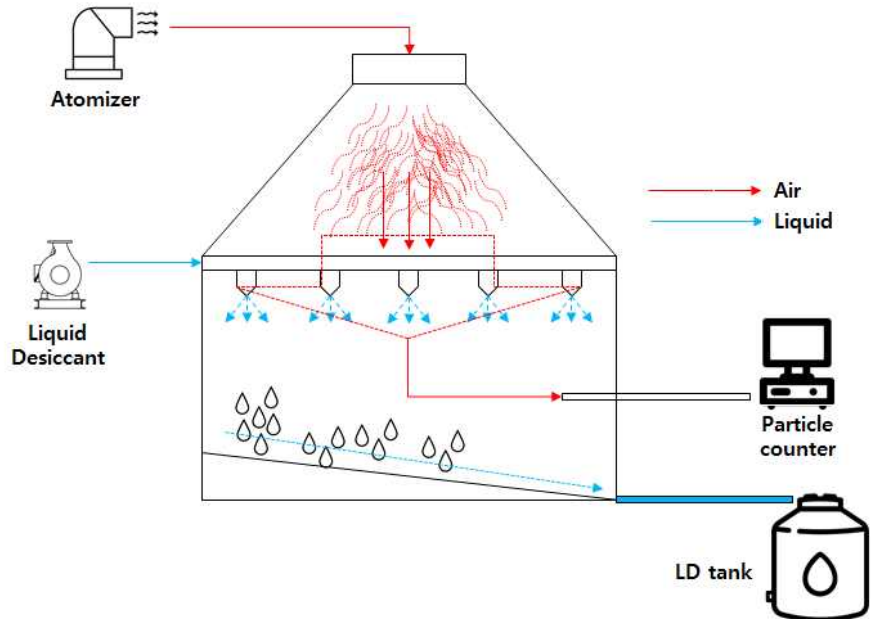


NOTE

1. 지시값은 오차기 C=0.5
2. 결단면의 차상물 (다수)를 제거한 후
3. 특등, scratch 및 사용에 무해한 요소, 보물권

NO.	Part Name	DWG NO.	SUS304, PC	1 SET	DIMENSION	REMARK
APPD BY	UNIT	ITEM	NAME OF PROJECT	KTL PARTICLE CHECK CHAMBER		

[그림2-55] 액체건조제 제습공정 대기오염물질 제거 평가시스템 설계도면



[그림2-56] 액체건조제 제습공정 대기오염물질 제거 평가시스템 개요도

- NaCl 혹은 KCl 사용
- 현재 보유하고 있는 HCTM atomizer 사용하는 것이 합리적
- LD 분사노즐은 형태가 매우 다양하나 다분사 노즐이 적합할 것으로 판단함. 50*50 cm 챔버로 가정했을 시 6개 노즐로 설계
- LD의 경우 부식성이 있으므로 내부식성이 있는 아크릴 재질
- batch 형태로 실험가능
- PSL의 농도포화상태를 유지한 상태에서 LD를 분사하고 저감효과를 보는 방법으로 실험
- 측정방법은 별도의 흡입라인을 만들고 흡입하여 particla counter로 측정하는 것이 정확도를 높일 것으로 판단

✓ 직접접촉식 액체건조제 기반 대기오염물질 제거 실험계획 수립

- 실험계획수립을 위한 기존자료 및 문헌연구 수행
- 크게 제습공정과 재생공정으로 나누어 대분류 중분류별로 대표 논문 및 연구방향을 수립하였음.
- 제습공정 부분의 공기질 개선 분야는 액체건조제 및 분리막 등의 소재를 중심으로 일부 수행연구 결과가 있었으며 충전재, 분사조건 등에 대한 연구는 상대적으로 미비한 상황임.
- 재생공정은 재생공정 시 공기질의 오염물질 제어에 대한 내용이 상대적으로 미비한 상황이었으며 기타 분리막 등 공정 시스템 적용을 중심으로 연구가 이루어지고 있음.

[표2-13] 연구동향

분류1	분류2	분류3	대표 논문
Dehumidifier (제습공정) 공기질 개선	Material application	액체건조제	◦ Studies of VOCs removed from packed-bed absorber by experimental design methodology and analysis of variance, Chem. Eng. J. 157 (2010) 1e17. ◦ Discussions of mass transfer behaviors between VOCs and TEG solutions by surface tension and equilibrium process, Sep. Sci. Technol. 50 (2015) 1294e1301.
		분리막	◦ Numerical modeling and performance analysis of a membrane-based air dehumidifier using ionic liquid desiccant, Applied Thermal Engineering, 5 July 2020, Volume 175, Article 115395 ◦ Performance of counter flow membrane-based annular pipe liquid desiccant air conditioner, Applied Thermal Engineering, 5 November 2020, Volume 180, Article 115884
		충진재(packed bed)	◦ none

		분사조건(nozzle)	◦ none
	Pollutant removal	Particles	◦ Laboratory study of the impact of evaporative coolers on indoor PM concentrations, Atmos. Environ. 37 (2003) 1075e1086. ◦ Correlations between short-term indoor and outdoor PM concentrations at residences with evaporative coolers, Atmos. Environ. 37 (2003) 2691e2703. ◦ Experimental study on the filtration efficiency of structured packing air handling processors, Procedia Eng. 121 (2015) 2037e2043.
		VOCs	◦ Impact of the Humidity Pump on Indoor Environment, GRI Report No. GRI-90/0193, Gas Research Institute, Chicago, 1990. ◦ A Summary of Pollutant Removal Capacities of Solid and Liquid Desiccants from Indoor Air, GRI Report No. GRI-92/0157.1, Gas Research Institute, Chicago, 1992. ◦ Studies of VOCs removed from packed-bed absorber by experimental design methodology and analysis of variance, Chem. Eng. J. 157 (2010) 1e17.
		Bacteria & Virus	◦ Liquid desiccant materials and dehumidifiers-A review, Renew. Sustain. Energy Rev. 56 (2016) 179e195
	Carryover(오염)	Carryover(오염)	◦ Development of new wire mesh packings for improving the performance of zero carryover spray tower, Energy 36 (2011) 1362e1374. ◦ Lithium and lithium compounds, Ullmann's Encycl. Industrial Chem. (2014) 1e38. ◦ Theoretical study on volatile organic compound removal and energy performance of a novel heat pump assisted solid desiccant cooling system, Build. Environ. 85 (2015) 233e242.
Regenerator (재생공정)	Pollutant removal	Pollutant control	◦ none
	Material application	분리막	◦ Membrane distillation regeneration of liquid desiccant solution for air-conditioning: Insights into polarisation effects and mass transfer, Environmental Technology & Innovation, August 2020, Volume 19, Article 100941
		기타	◦ Modeling and performance investigation on the counter-flow ultrasonic atomization liquid desiccant regenerator, Applied Thermal Engineering, 25 January 2020, Volume 165, Article 114573 ◦ Experimental study on liquid desiccant regeneration by photovoltaic electrodialysis, Energy Procedia, February 2019, Volume 158, Pages 959-964

[표2-14] 대기오염물질 제거실험 계획

구분	내용	
사용 장비	미세먼지 테스트 챔버	미세먼지 발생장치
	압력계	유량계
	온습도계	데이터 기록장치
	미세먼지 측정기	가압펌프
실험 목적	액체건조제 종류별 미세먼지 제거효율 평가	
공통사항	• 목표 액적크기를 설정하고 해당 노즐을 장착(공기청정기협회 표준인 실내공기청정기 시험방법에 따라 다분산 KCl(혹은 NaCl)입자를 사용하므로 중간입자의 크기가 약 0.3~0.6 μm 입경 크기를 대상으로 함) • 미세먼지 발생장치를 통해 목표 발생미세먼지 크기 형태로 챔버에 분사 • 테스트는 각각 10분씩 진행 후 측정된 계측 값을 데이터로거를 통해 확보 • 영상기록 매체는 실험챔버의 정면으로 관측하여 기록	
실험 진행	• 액체건조제를 선정하여 일정농도의 용액으로 조제하고 농도별로 액체건조제를 준비 • 압력계 및 온습도계의 장착된 부분을 다시 한번 확인 • atomizer를 통해 챔버 내 미세먼지 농도를 일정농도까지 포화시킴 • 특정 농도의 액체건조제를 챔버 내로 분사 • 분사 유량 및 압력에 따른 제거실험 수행 • 미세먼지 측정기를 통해 미세먼지 저감 추이 및 데이터를 기록 • 액적분사 조건 및 액체건조제 별 실험 수행	
실험 기록	① 가속도계 및 압력계의 데이터를 확보하여 1분간의 기록을 명시 ① 영상기록매체를 통해 물의 출렁임 정도의 속도 및 장비별 차이를 비교하며 기록	

✓ 액체건조제 기반 분리막 제습시스템 연구동향

- 최근 공조 시스템은 적절한 온도를 유지하는 것뿐만 아니라 습도를 유지하는 것이 중요하게 인식되고 있으며 이와 더불어 미세먼지 등으로 인해 실내 공기질까지 관리할 수 있는 공조 시스템에 대한 니즈가 더욱 강해지고 있음.
- 기존 공조방식은 여름철 공기를 냉각하면서 시스템 내부에 응축수가 발생해 열교환기와 시스템 내부에 곰팡이, 세균이 번식하며 악취가 발생하는 문제점이 있음. 또한 재실자가 쾌적함을 위해서는 온도와 습도가 매우 중요한데, 기존 시스템의 경우 습도(잠열)를 제거하기 위해 공기를 과냉각한 후 재가열하는 에너지 비효율이 발생함. 특히 온도(현열)와 습도를 분리해 처리할 수 없어 실내부하에 따른 최적제어가 힘들다는 것 또한 단점임.
- 이러한 문제를 해결하기 위한 많은 연구 개발이 진행되고 있는 가운데 흡습기능이 있는 용액을 이용해 잠열과 현열을 제거하는 액체식 제습시스템이 주목을 받고 있음. 액체식 제습시스템은 현재까지 반도체, 제약, 식품공장 등에 주로 적용되고 있으며 이 시스템은 잠열과 현열을 상황에 맞게 제거할 수 있다는 점으로, 기존시스템과 달리 공기를 과냉각할 필요가 없어 에너지 절감이 가능하다는 것이 장점임.
- 그 중 기존 기술들의 한계점인 낮은 성능, 작동유체의 유해성, 높은 에너지 소비와 유지 및 보수비용 등을 보완하기 위해 액체건조제와 소수성 고분자막(hydrophobic polymer membrane)을 이용한 제습공정에 대한 많은 연구들이 수행되고 있음. 이 공정은 소수성 고분자막을 기준으로 양 채널에 각각

습공기와 액체건조제가 공급되고, 이때 막 양단을 통해 습공기와 액체건조제의 수증기 분압차가 발생됨. 이로 인해, 습공기 내 수증기는 막의 기공을 통해 액체건조제로 흡수되며 막에 의해 액체건조제와 습공기 채널은 분리되어 액체건조제는 공조공간으로 유입되지 않음. 또한 현재 가장 많이 사용되고 있는 증기압축식 냉동사이클 기반 제습시스템에 비해 구조가 단순하고 에너지 소비가 작음.

✓ 액체건조제 기반 분리막 제습시스템 문헌동향(1)

a) 논문명: Comparative study on the liquid desiccant dehumidification performance of lithium chloride and potassium formate

b) 개요 및 목적

- 액상 건조제(염화리튬과 포름산칼륨)의 제습 성능 비교 연구
- 내부 냉각식 제습기에서 KCOOH용액의 제습특성 조사
- 적절한 농도범위를 선택하기 위해, 다양한 농도에 따른 KCOOH용액의 증기압 측정 (정적방법)
- KCOOH의 제습성능을 확인하기 위한 LiCl용액과의 제습성능 비교실험 : 공기유량, 온도 및 공기습도 차이에 따른 성능비교

c) 결과

- 증기압 측정 결과 : 70.3% KCOOH 용액은 35% LiCl 용액 거의 동일한 증기압을 가짐. KCOOH 용액의 가격은 LiCl의 가격의 20%에 불과하므로, 경제적으로 매우 효율적임.
- 동일한 조건에서 KCOOH 용액의 절대 수분 제거율은 35% LiCl 용액보다 약간 높음. 그럼에도 불구하고 두 액체 건조제의 물질전달 계수는 거의 비슷함.

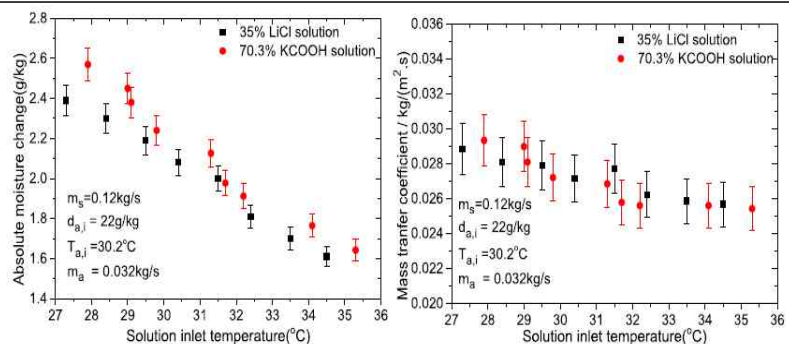
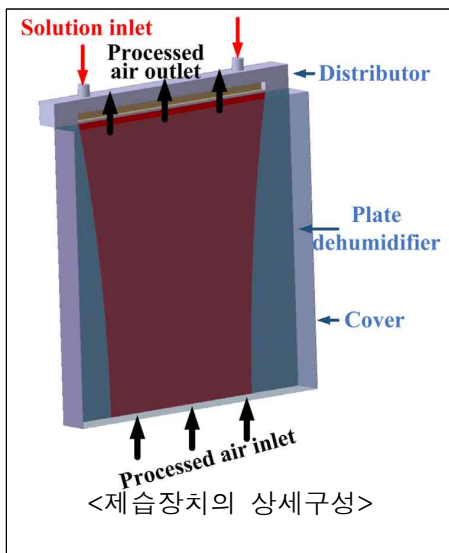


Fig. 8. Effect of solution temperature on dehumidification performance.

<용액 온도가 제습 성능에 미치는 영향>

✓ 액체건조제 기반 분리막 제습시스템 문헌동향(2)

a) 논문명 : Experimental study on dehumidification performance enhancement by TiO₂ superhydrophilic coating for liquid desiccant plate dehumidifiers

b) 개요 및 목적

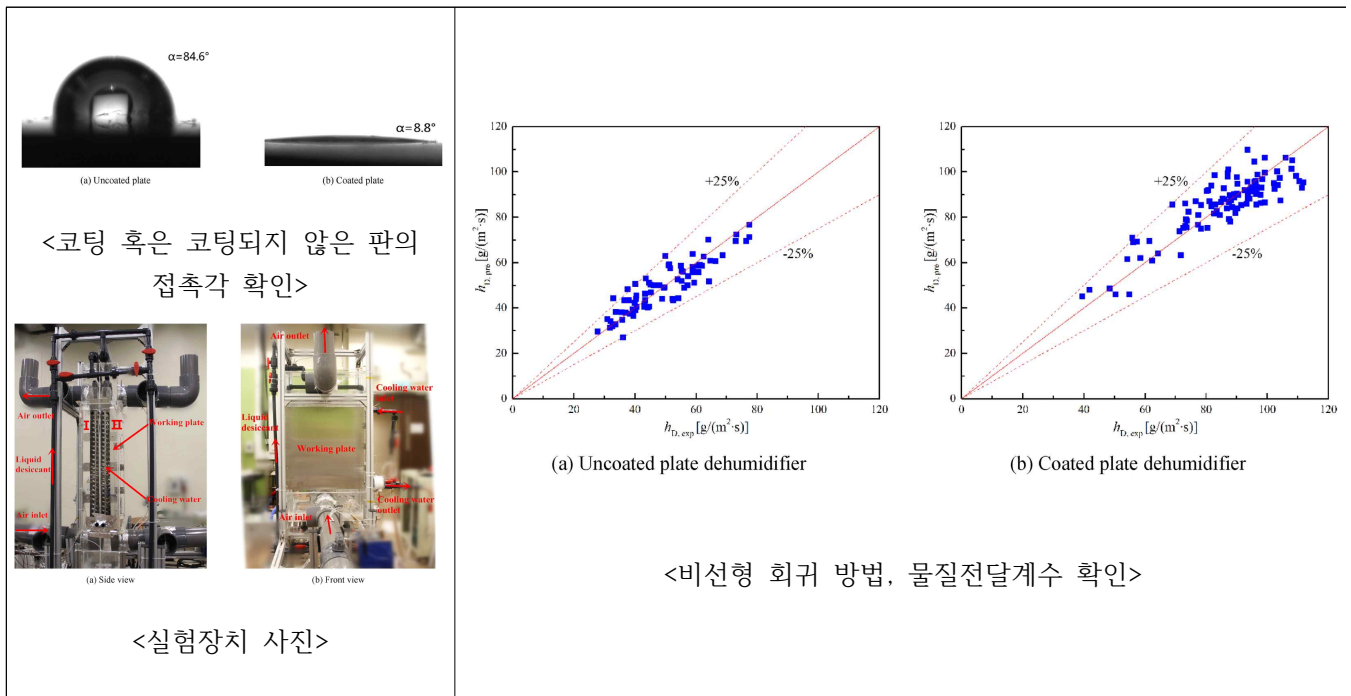
- TiO₂를 이용한 판형제습기 코팅 : 표면의 습윤성 향상
- 접촉각 비교: 코팅에 따라 표면 젖음성이 효과적으로 개선됨을 보여줌.
- 두 개의 단일 채널 내부 냉각 액체 건조제 제습기의 제작 : TiO₂를 이용한 판형제습기 코팅이 제습 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 제작
- 여러 분석에 기초하여 물질 전달계수의 새로운 상관관계 발견

c) 결과

-이중층으로 TiO₂ 초친수성 코팅 개발 : 접촉각이 84.6에서 8.8로 크게 감소 되었으며, 이는 표면 습윤성이 효과적으로 향상됨을 나타냄.

-이중층으로 TiO₂ 초친수성 코팅함에 따라, 습기 제거율 (ξ_w) 및 제습효율 (ξ_Π)이 1.60 과 1.63으로 향상 : 이러한 성능향상은 습윤영역의 증가와 필름 두께의 감소에 영향을 줌.

-실험적으로 제습 성능에 영향을 미치는 요소 분석 : 비선형 회귀 방법을 통하여 코팅 혹은 코팅되지 않은 판의 물질 전달 계수 확인.



✓ 액체건조제 기반 분리막 제습시스템 문헌동향(3)

a) 논문명 :Membrane-based liquid desiccant air dehumidification: A comprehensive review on materials, components, systems and performances

b) 개요 및 목적

- 멤브레인 기반 액체 건조 공기 제습(MLDAD)은 증기압 차이에 의해 구동되는 분리 프로세스.

- 기존의 액체 건조제 공기 제습과 달리 MLDAD는 반투막을 사용하여 처리 공기와 건조제 액체를 분리하여 내부의 수증기만 공기 쪽은 막을 통해 전달되고 용액에 의해 흡수.

- 이 과정에서 기류에서 증기가 제거되고, 공기 중의 용액 방울의 carryover도 제거.

- 액체 건조제 및 멤브레인의 특성, MLDAD 모듈 및 시스템의 설계, 제습 및 재생 모듈의 성능 평가 및 비교, 시스템 수준 에너지 분석을 다룸.

c) 결과

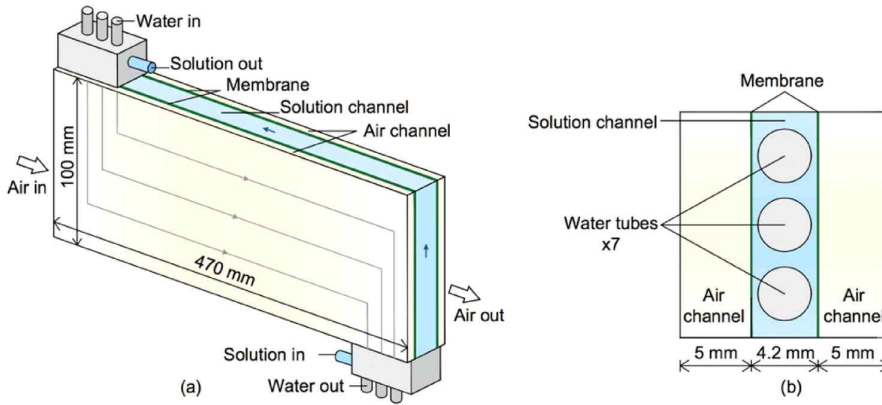
- MLDAD 용도에 맞는 맞춤형 멤브레인 개발 : 광범위한 온도와 압력에서 수증기 이동에 대한 높은 투과성을 가지며 내구성이 있어야함.

- 액체건조제를 위한 새로운 재료를 개발해야함 : 저렴하고 독성이 없으며 결정화되지 않으며 저온

열원으로 재생이 가능해야함.

- MLDAD 시스템에 사용되는 HMX의 설계의 최적화 : 중공사막을 이용한 HMX 모듈은 평판형 HMX 모듈보다 충전 밀도가 높고 성능이 우수하지만, 액체의 불균일한 분포로 인한 성능 저하를 방지하기 위해 구조의 개선이 필요함.

- MLDAD 시스템의 크기와 비용을 줄이는 동시에 성능을 향상하려면 공기와 액체 건조제 사이의 흐름 패턴과 내부 냉각을 최적화해야 함.



<MLDAD모듈의 구조>

✓ 액체건조제 기반 분리막 제습시스템 문헌동향(4)

a) 논문명 :Review of the impact of liquid desiccant dehumidification on indoor air quality

b) 개요 및 목적

- IAQ에 대한 건조제 제습 및 이와 관련하여 최근의 성과 및 아래와 같은 진행 상황을 검토
- 액체 건조제 용액의 휘발성 유기 화합물 제거 능력
- 액체 건조제 용액의 박테리아와 바이러스에 제거, 여과, 사멸 또는 비활성화 효과
- 미립자에 대한 액체 건조제 제습 시스템의 포집 기능
- 액체 건조제의 carryover

c) 결과

- 액체 건조제 제습 시스템은 실내 공기에서 일부 VOC를 흡수하고 IAQ를 향상
: 포름알데히드 30%, 탄소 56% 이산화물, 거의 100%의 톨루엔 및 1,1,1-트리클로로에탄 95% 제거.
: LiCl 용액의 경우-포름알데히드 53 % 제거
- 90% TEG 솔루션 : 공기 중 미생물의 92% 이상을 사멸
: LiCl 용액-탄저병에 열화학적 시너지 효과 발견.
- 공기 중 PM을 특정 수준으로 필터링 할 수 있음.
: LiBr 솔루션이 있는 공기 처리 프로세서는 20%~30% 필터링.

Table 2 Indoor pollutants removal capability of 95% TEG solution [21]							
Pollutants	Relative humidity %		Liquid temperature °C	Efficiency of removal by 95% TEG solution, %			
	inlet air	inlet air		Formaldehyde (20 ppb)	Carbon dioxide (1000 ppb)	Toluene (3 ppb)	1,1,1-Trichloroethane (24 ppb)
Formaldehyde	195	263	17.0	30			
	684	246	18.7	27			
Carbon dioxide	211	267	17.6		56		
	642	240	20.1		48		
Toluene	200	275	17.6			-100	
	790	272	18.5			-100	
1,1,1-Trichloroethane	195	263	18.2				-100
	787	244	19.3				-100
Formaldehyde + Carbon dioxide	172	311	20.0	23	51		
	680	246	18.7	20	48		
Formaldehyde + Toluene	241	246	15.8	29		-100	
	650	244	15.6	26		-100	
Formaldehyde + 1,1,1-Trichloroethane	213	267	20.7	26			-100
	787	261	20.6	25			-100
Formaldehyde + Carbon dioxide + Toluene + 1,1,1-Trichloroethane	235	251	16.2	26	54	-100	-100
	780	250	16.1	24	50	-100	-100

* Efficiency of removal = $\frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}}$

Chau et al. [24] developed a multi-component model to simulate the desorption characteristics of water and toluene vapors in various concentrations of TEG solution flowing through a packed-bed dehumidifier (shown in Fig. 4) and examined the influence of various operational variables, such as liquid-to-air flow rate ratio, TEG solution inlet temperatures, TEG solution concentrations,

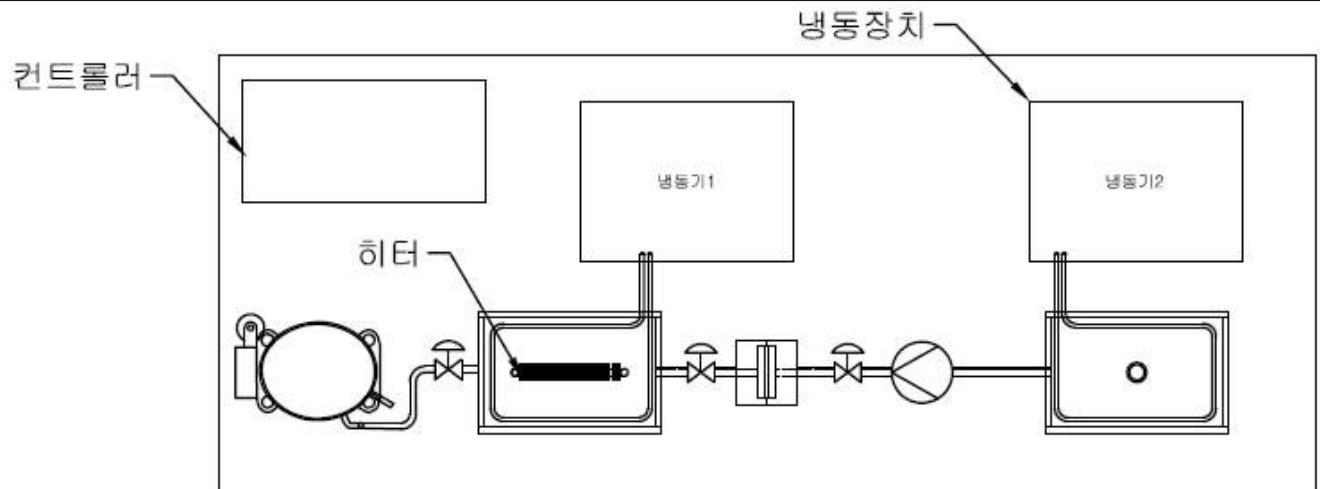
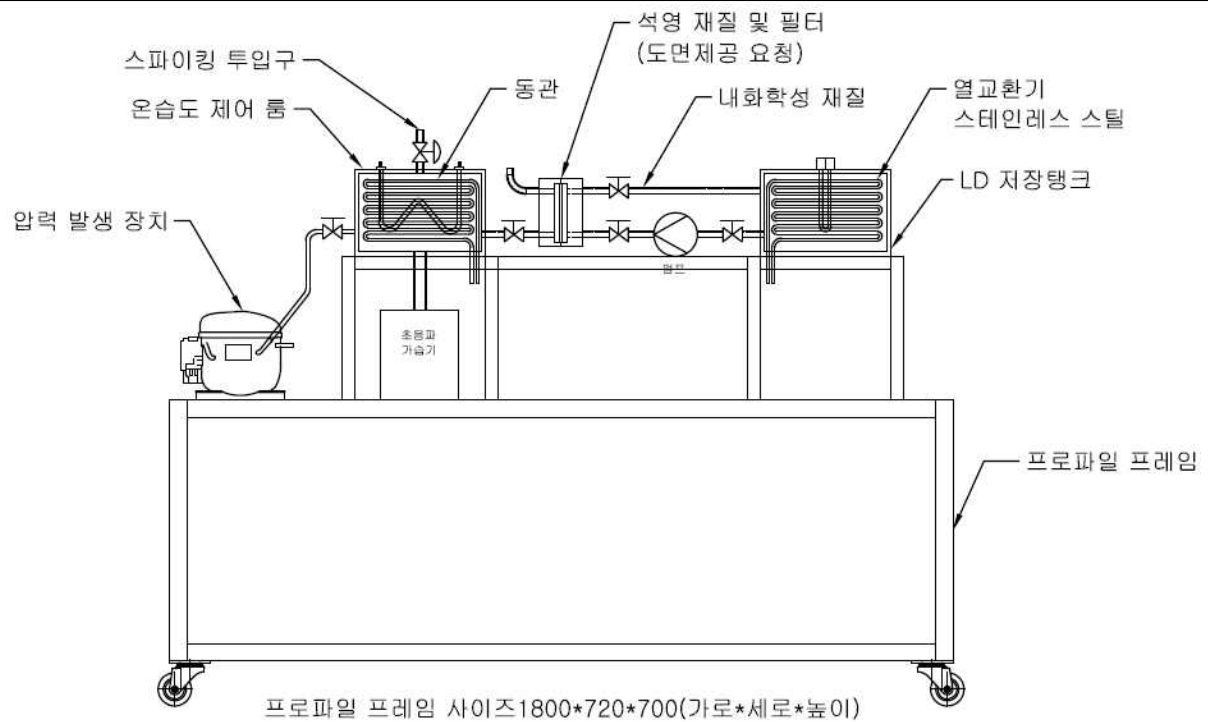
<VOC 제거효율>

<박테리아 제거효율>

<미세먼지제거효율>

✓ 간접접촉식 분리막 제습시스템 설계 및 제작(프로토타입)

- 최초 설계버전으로 기본적인 컨셉은 간접접촉식 분리막 제습시스템으로 액체건조제(liquid desiccant)기반으로 구동력을 증가시키는 구조임.
- 초기버전은 제습 탱크용량과 순환 compressor를 가습용량보다 과도하게 크게 설계하여 분리막이 손상되거나 가습용량이 분사가 되지 않는 등의 문제점이 빈번하게 일어남.
- 실험장치는 컨트롤러부와 온습도 제어 통합룸, 압력발생장치, 초음파 가습기, 멤브레인 홀더, 액체건조제 보관탱크, 열교환기, 저울 등으로 구성되어 있음.
- 초음파 가습기로부터 수증기가 공급되는 가습부는 실내 공기중의 미세먼지 유발물질과 함께 제습이 되는 실험을 모사해야하므로 가스상 미세먼지 유발물질을 주입할 수 있는 스파이킹 투입구도 함께 설치함.
- 기체부에서 발생하는 수증기는 증기압력을 구동력으로 하여 분리막을 통과하고 액체건조제 순환라인에서 응축되어 저울의 중량이 증가함.
- 따라서 분리막을 기반으로 한 분리막식 제습시스템의 제습능력과 포함되어있는 가스상 대기오염물질의 거동을 연구하였음.



[그림2-57] 프로토 타입의 분리막 제습시스템

- 실험에 사용한 분리막은 millipore사의 소수성 평막으로 PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene)재질과 PVDF(Polyvinylidene fluoride)재질의 분리막 2종류를 사용하였음.
- 분리막을 사용한 간접접촉식 제습공정에서는 다공성막을 사용하는 것이 일반적으로 알려져 있음.
- 세부적인 분리막의 물리적 성질과 SEM 이미지 사진은 아래의 그림과 같음.

Scanning electron micrograph (SEM) of a PTFE membrane. The image displays a highly porous, fibrous structure with a dense network of fine, interconnected fibers forming a mesh-like pattern. The fibers appear to be randomly oriented, creating a complex, three-dimensional network. The background is dark, highlighting the intricate, light-colored fiber structure.

Physicochemical Information	
Pore Size	0.22 μm
Air Flow Rate	5 L/min $\times$ cm^2
Bubble Point at 23 $^{\circ}\text{C}$	≥ 1.0 bar, air with methanol
Gravimetric Extractables	0.5%
Porosity %	85%
Water Flow Rate	24 mL/min $\times$ cm^2
Dimensions	
Filter Surface	Plain
Thickness	150 μm
Filter Diameter (ϕ)	142 mm
Materials Information	
Chemistry	Hydrophobic Polytetrafluoroethylene (PTFE)

(a) 사용 PTFE 분리막의 SEM 사진 및 물리적 성질

Scanning electron micrograph (SEM) of a PVDF membrane. The image displays a highly porous, interconnected network of fibers, forming a complex, sponge-like structure with numerous irregular pores of varying sizes. The fibers appear as a light gray, web-like pattern against a darker background.

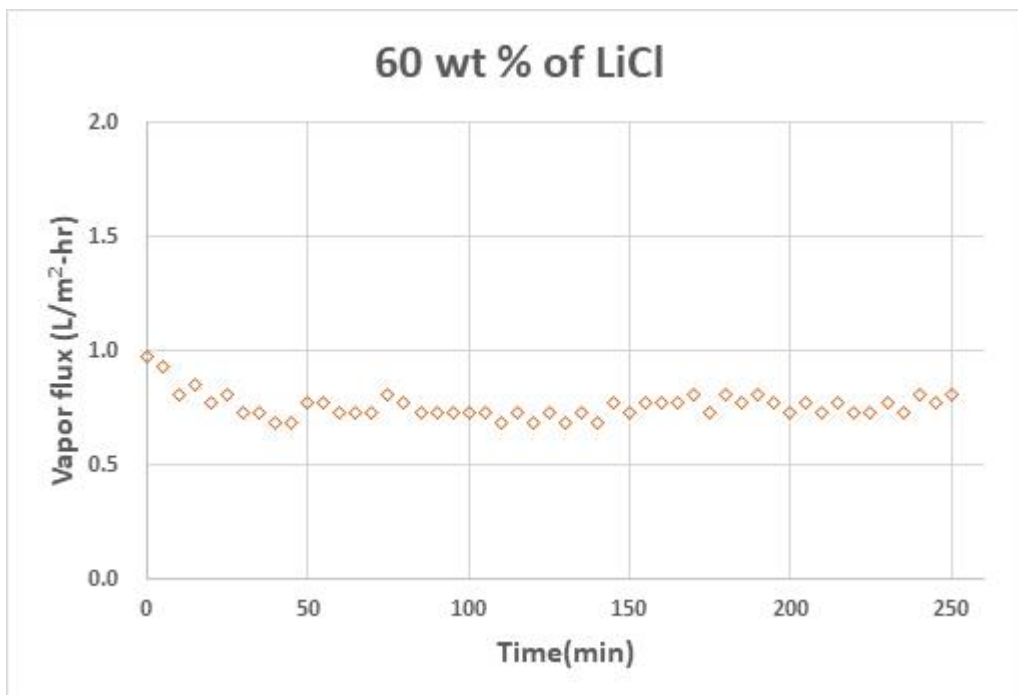
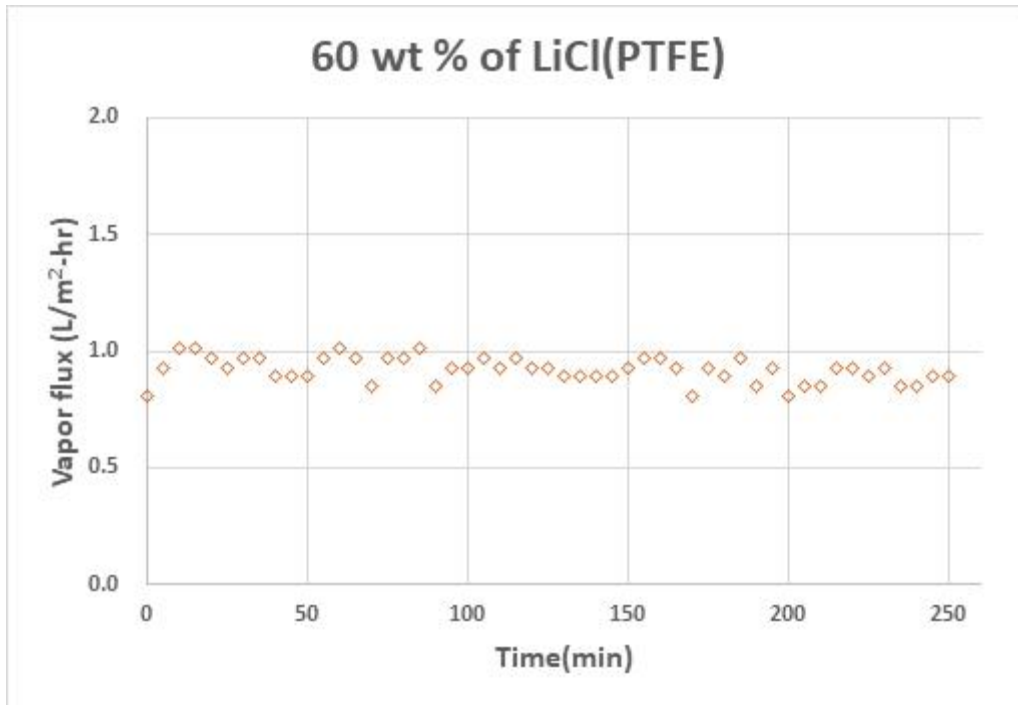
Physicochemical Information	
Refractive Index	1.42
Pore Size	0.22 μm
Air Flow Rate	16 L/min $\times$ cm^2
Bubble Point at 23 $^{\circ}\text{C}$	≥ 1.24 bar, air with methanol
Gravimetric Extractables	0.5%
Porosity %	75%
Water Flow Rate	▪ >1 mL/min $\times$ cm^2
Dimensions	
Filter Surface	Plain
Thickness	125 μm
Filter Diameter (ϕ)	142 mm
Materials Information	
Chemistry	▪ Hydrophobic Polyvinylidene Fluoride (PVDF)

(b) 사용 PVDF 분리막의 SEM 사진 및 물리적 성질

[그림2-57] 사용된 분리막 SEM 사진 및 물리적 성질

✓ 간접접촉식 분리막 제습시스템의 제습실험 결과(프로토타입)

- 설계 제작한 분리막식 제습시스템의 기초실험을 위해 액체건조제로 많이 사용되는 LiCl을 사용하였으며 중량 % 농도로 60 % 농도의 용액을 사용하였음.
- 실험은 기존에 설계했던 방식인 폐회로 실험으로 진행하였으나 실험장치 내부의 압력 상승과 분리막 손상 현상이 발생하여 배출순환구조로 우선 기초실험을 진행하였음.
- 기본적으로 PTFE 분리막의 vapor flux가 더 높은 결과를 나타냈으며, 두가지 타입의 분리막 모두 250분 동안 vapor flux의 감소 현상은 없었음.



[그림 2-58] 프로토타입 분리막식 제습시스템의 제습기초실험 결과(PTFE, PVDF)

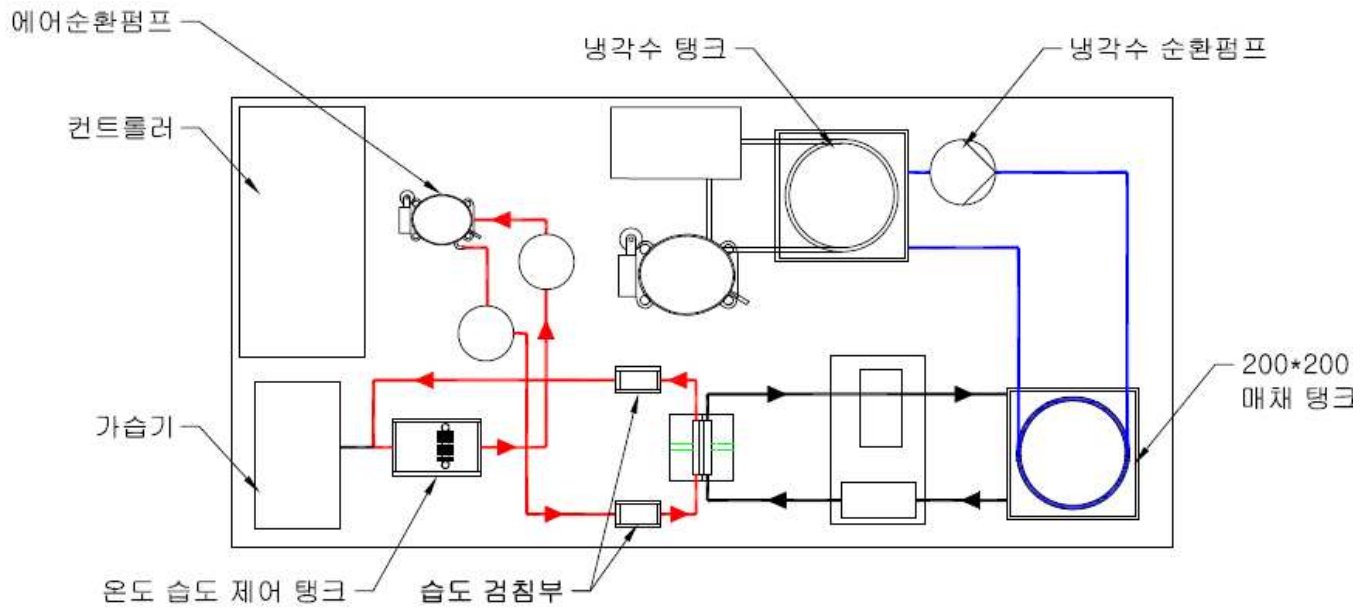
- 프로토타입의 실험장치의 컴프레서는 고용량으로 해당 설비의 용량보다 높은 유속과 압력을 발생시켜 아래의 사진과 같이 분리막에 손상을 주게 되었음.
- 따라서 프로토타입의 실험장치에서 컴프레서와 반응조 용량, 기타 배관 용량 등을 재 설계하여 더 작은

용량으로 scale을 낮춰 제작하였음.



✓ 간접접촉식 분리막 제습시스템 설계 및 제작(small scale)

- 두번째 설계버전으로 프로토 타입과 마찬가지로 기본적인 컨셉은 간접접촉식 분리막 제습시스템이며 액체건조제(liquid desiccant)기반으로 구동력을 증가시키는 구조임.
- 초기버전에서 발생하였던 제습 탱크용량과 순환 compressor를 가습용량보다 과도하게 크게 설계하여 분리막이 손상되거나 가습용량이 분사가 되지 않는 등의 문제점을 보완하기 위해 설계용량을 낮춰 재 설계 및 제작을 진행하였음.
- 실험장치의 구성은 컨트롤러부와 온습도 제어 통합룸, 압력발생장치, 초음파 가습기, 멤브레인 홀더, 액체건조제 보관탱크, 열교환기, 저울 등의 구성으로 프로토타입과 유사하나, 통합룸, 보관탱크, 순환라인, 멤브레인 홀더 등 전체적인 스케일을 작게하여 구성함.
- 액체건조제의 일정온도를 유지하기 위한 항온수조식 열교환기를 사용하였음.
- 초음파 가습기로부터 수증기가 공급되는 가습부는 실내 공기중의 미세먼지 유발물질과 함께 제습이 되는 실험을 모사해야하므로 가스상 미세먼지 유발물질을 주입할 수 있는 스파이킹 투입구도 함께 설치함.



[그림 2-59] Labi scale 분리막 제습시스템

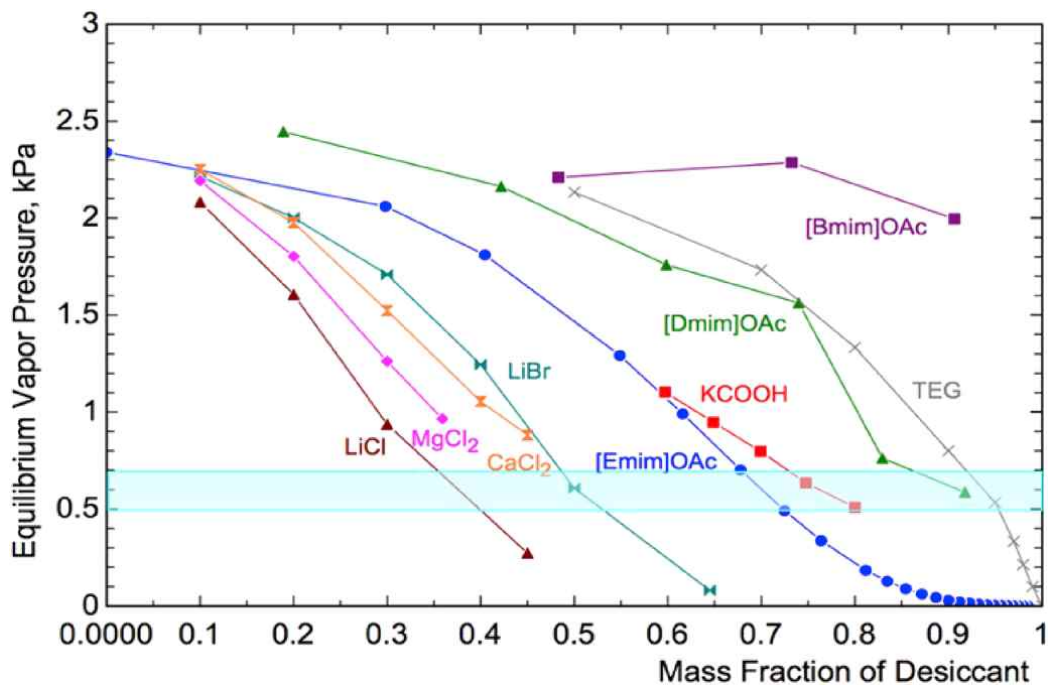
- ✓ 간접접촉식 분리막 제습시스템 제습실험 결과(Lab scale)
 - 보완 설계 및 제작한 lab scale의 제습 기초실험을 수행하였음.
 - 액체건조제는 LiCl 용액을 사용하였으며 실험조건은 다음과 같음.

[표2-15] 액체건조제 실험 조건

항목	조건	비고
실험시간	1~3시간	조건별 상이
습도조건	80 ± 5 %	상대습도 기준 세팅값 : 80 %
순환유속 (수증기)	1 LPM	
순환유속 (액체건조제)	2 LPM	
온도	30 ± 2 °C	세팅값 : 30 °C
액체건조제 농도	35/40/45 wt %	

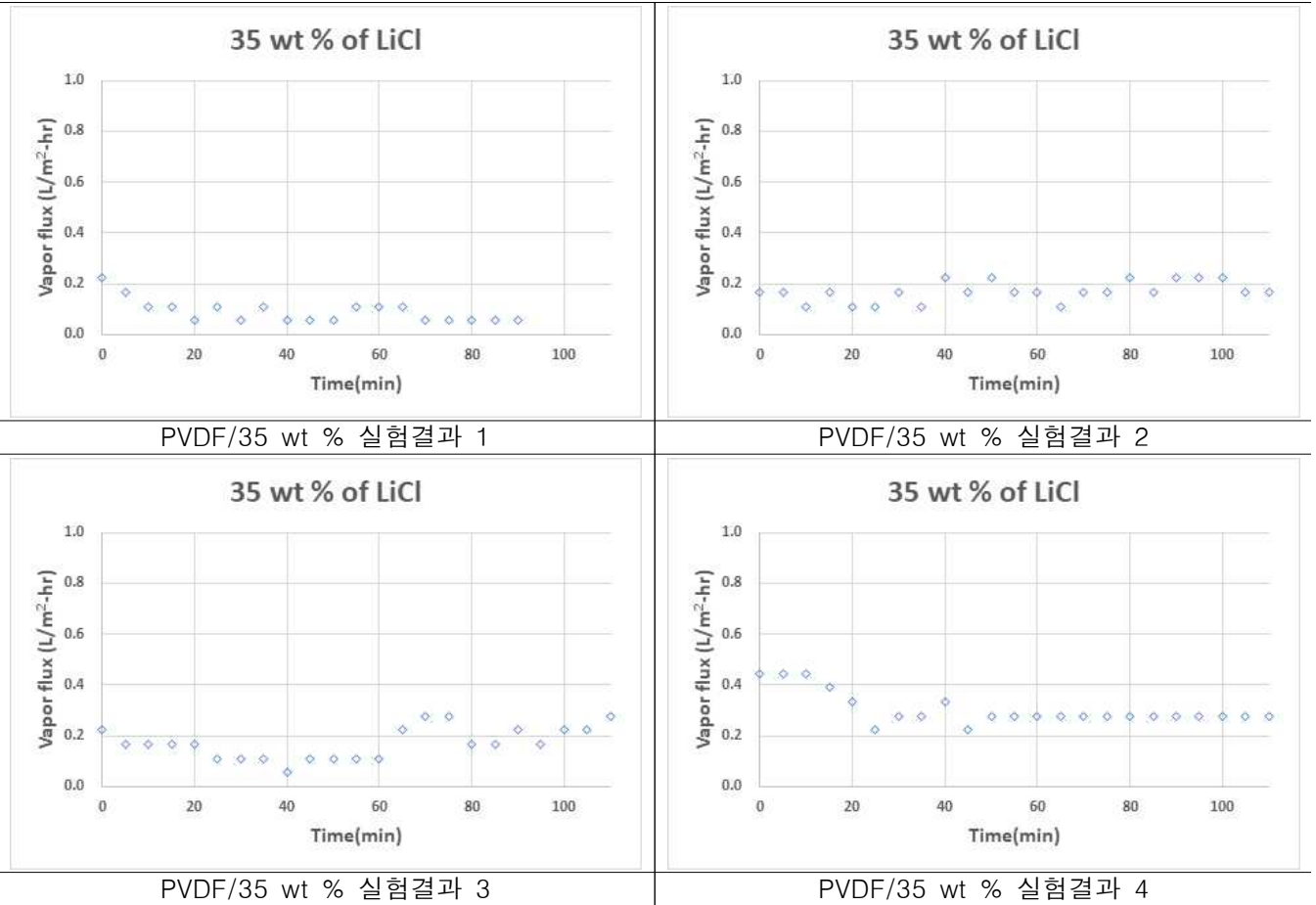
a) PVDF 분리막 실험 결과

- 가장 먼저, 액체건조제의 농도에 따른 수증기의 vapor flux 경향을 보기 위해 액체건조제 농도를 변화시키며 실험을 진행하였음.
- PVDF 재료의 분리막을 활용하여 LiCl 35, 40, 45 w % 3조건 다른 농도의 용액을 액체건조제로 사용하였으며 세부 실험 조건의 위의 표와 같음.
- LiCl을 포함한 액체건조제 용액의 수증기압은 아래의 그림과 같으며, 용액의 수증기압은 농도가 높을수록 작아지므로 액체건조제의 농도와 vapor flux는 비례적으로 상승함.



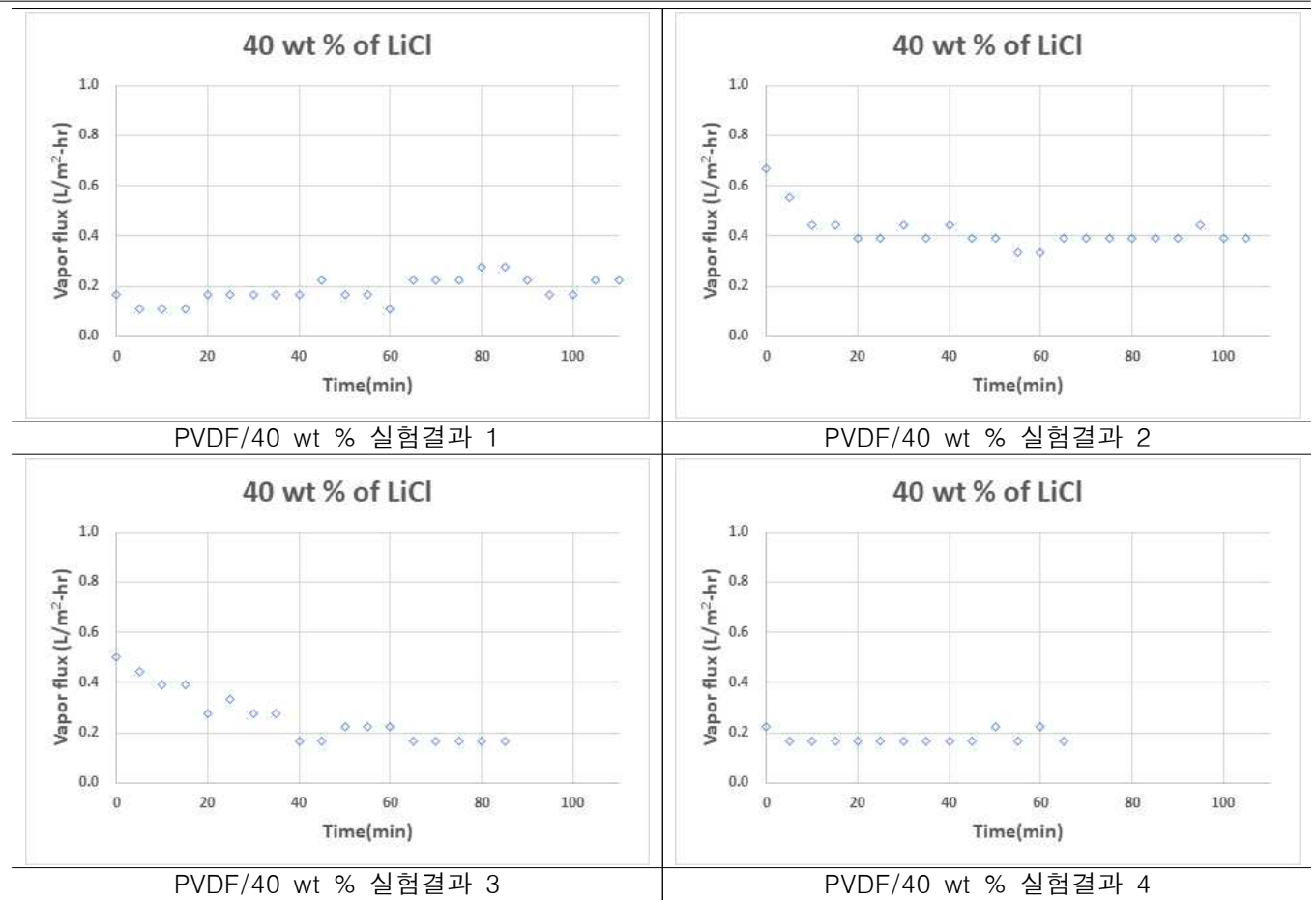
[그림2-60] 액체건조제 용액의 수증기압

- 실험은 총 4회 반복실험을 진행하여 재현성을 확보하였음.
- Vapor flux는 0.08 ~ 0.18 LMH(L/m²-hr)의 경향을 보였으며 시간에 따른 flux 변동은 크게 관찰되지 않았음. 실험별로 flux 차이가 발생하였는데, 이는 분리막 특성 및 해당 실험진행 시 환경조건에 따라 미미한 차이였으며, 대체적으로 0.2 LMH 이하의 flux를 나타내었음.



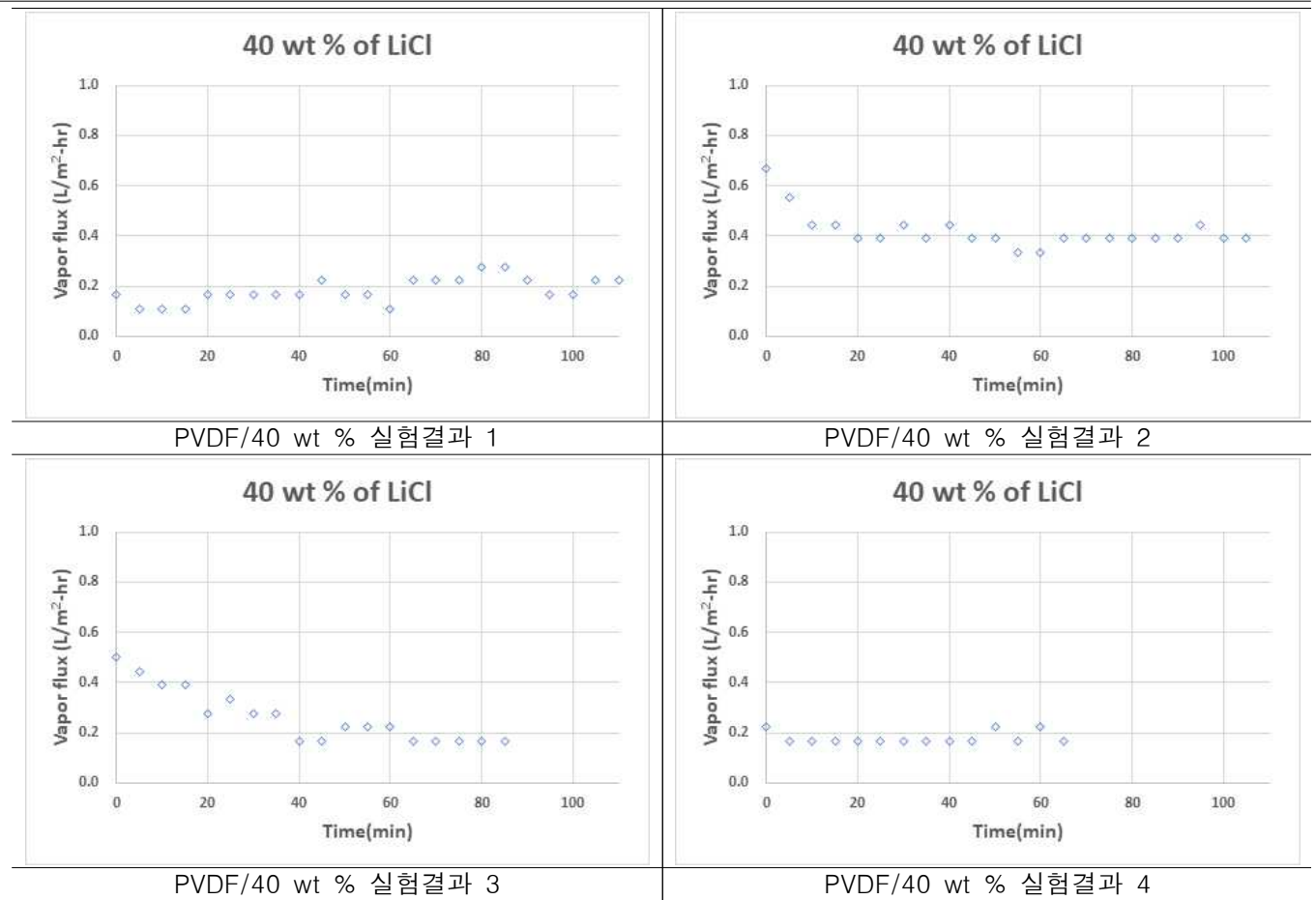
[그림2-61] PVDF/35 wt % 실험결과 1~4

- 40 wt % 농도의 LiCl 액체건조제를 사용하여 실험은 총 4회 반복실험을 진행하였음.
- 35 wt % 에 비해 증가된 vapor flux 경향을 관찰할 수 있었으며 비교적 flux의 변동성이 큰 것을 확인하였음. vapor flux는 0.18 ~ 0.39 LMH 범위로 나타났으며 35 wt % 액체건조제에 비해 약 2배 정도 높은 vapor flux 결과를 나타내었음.



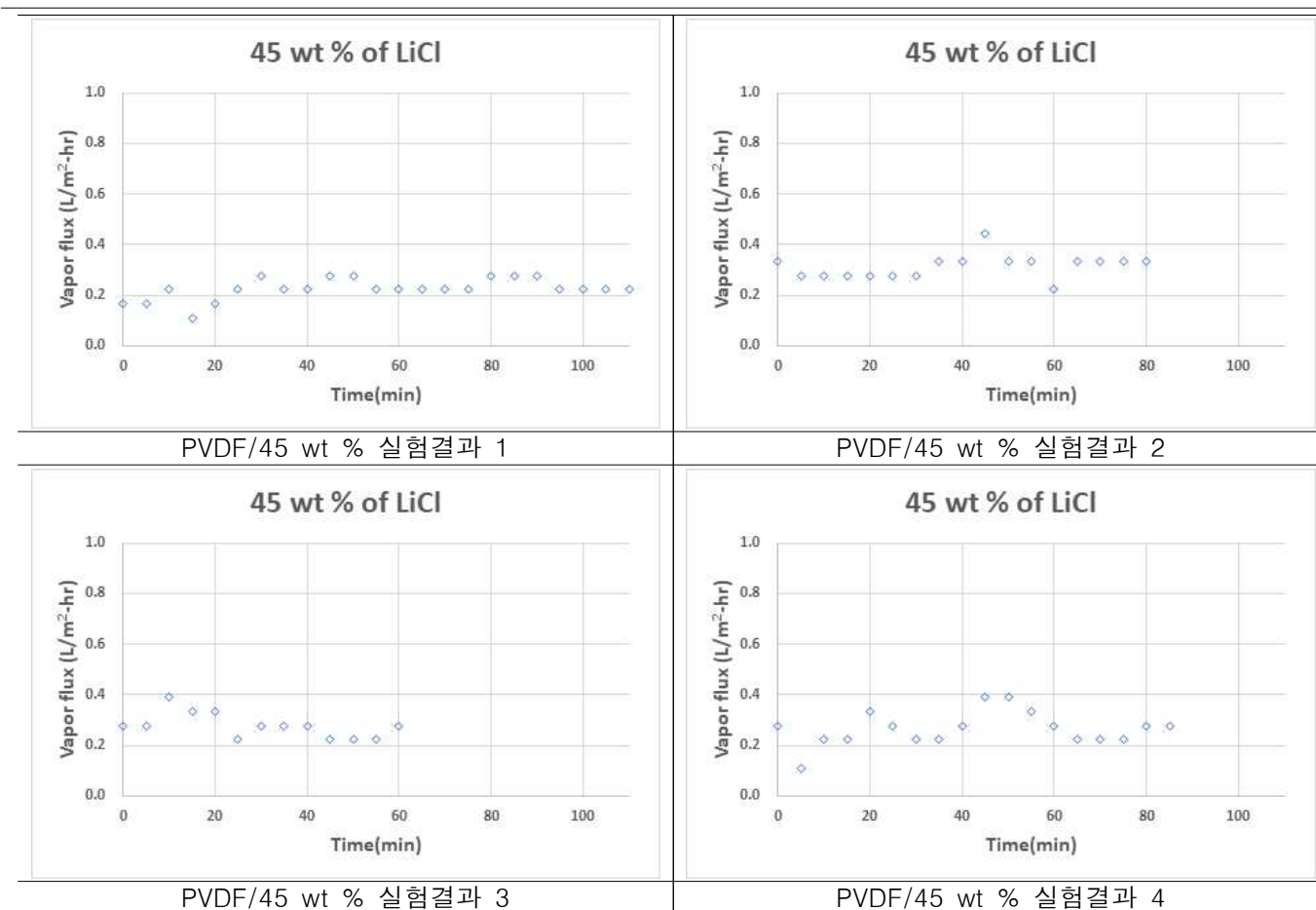
[그림2-62] PVDF/40 wt % 실험결과 1~4

- 40 wt % 농도의 LiCl 액체건조제를 사용하여 실험은 총 4회 반복실험을 진행하였음.
- 35 wt % 에 비해 증가된 vapor flux 경향을 관찰할 수 있었으며 비교적 flux의 변동성이 큰 것을 확인하였음. Vapor flux는 0.18 ~ 0.39 LMH 범위로 나타났으며 35 wt % 액체건조제에 비해 약 2배 정도 높은 vapor flux 결과를 나타내었음.



[그림2-63] PVDF/40 wt % 실험결과 1~4 (반복)

- 45 wt % 농도에 기반한 vapor flux는 35 및 40 wt %에 비해 가장 높은 vapor flux 경향을 보임.
- 본 결과는 45 wt % 농도에서 LiCl 용액이 가장 낮은 수증기압을 형성하므로 85 % 상대습도의 수증기가 가지는 수증기압과의 최대 driving force로 인해 가장 높은 vapor flux 결과를 보인 것으로 사료됨.
- 앞선 35 및 40 wt % 결과와 함께 보았을 때, 분리막 별 vapor flux 편차가 눈에 띄게 확인되었으며 동일한 분리막을 사용했을 때 동일한 경향의 flux 결과를 나타내었음.



[그림2-64] PVDF/45 wt % 실험결과 1~4

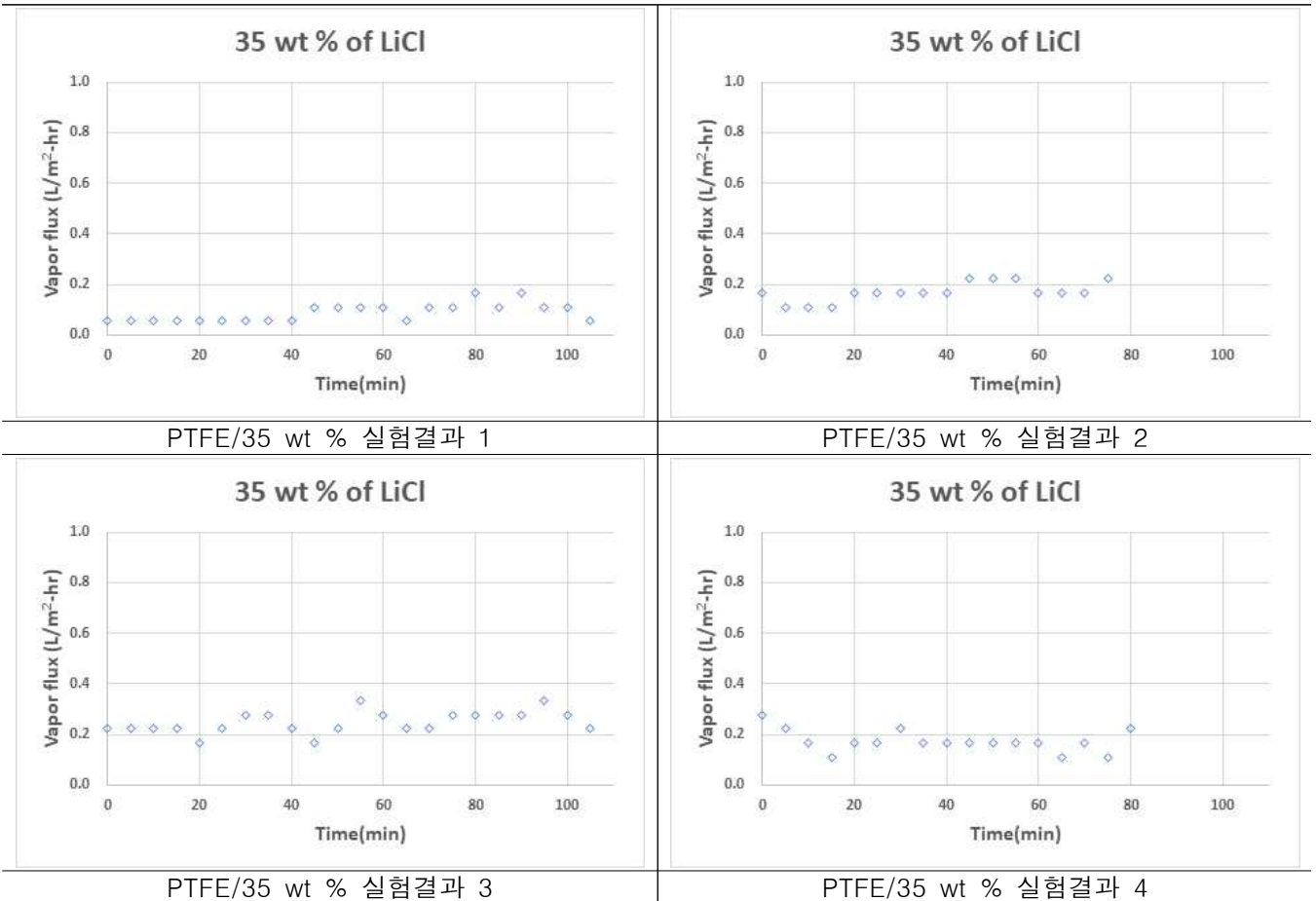
b) PTFE 분리막 실험 결과

- PVDF 재료의 분리막 실험과 함께 PTFE 재료의 멤브레인을 활용하여 액체건조제의 농도에 따른 수증기의 vapor flux 경향 실험을 진행하였음.
- 실험조건은 PVDF 멤브레인 실험과 동일한 조건으로 수행하여 PTFE와 PVDF 실험결과를 비교하였음.

[표2-16] 액체건조제 실험 조건 (PTFE)

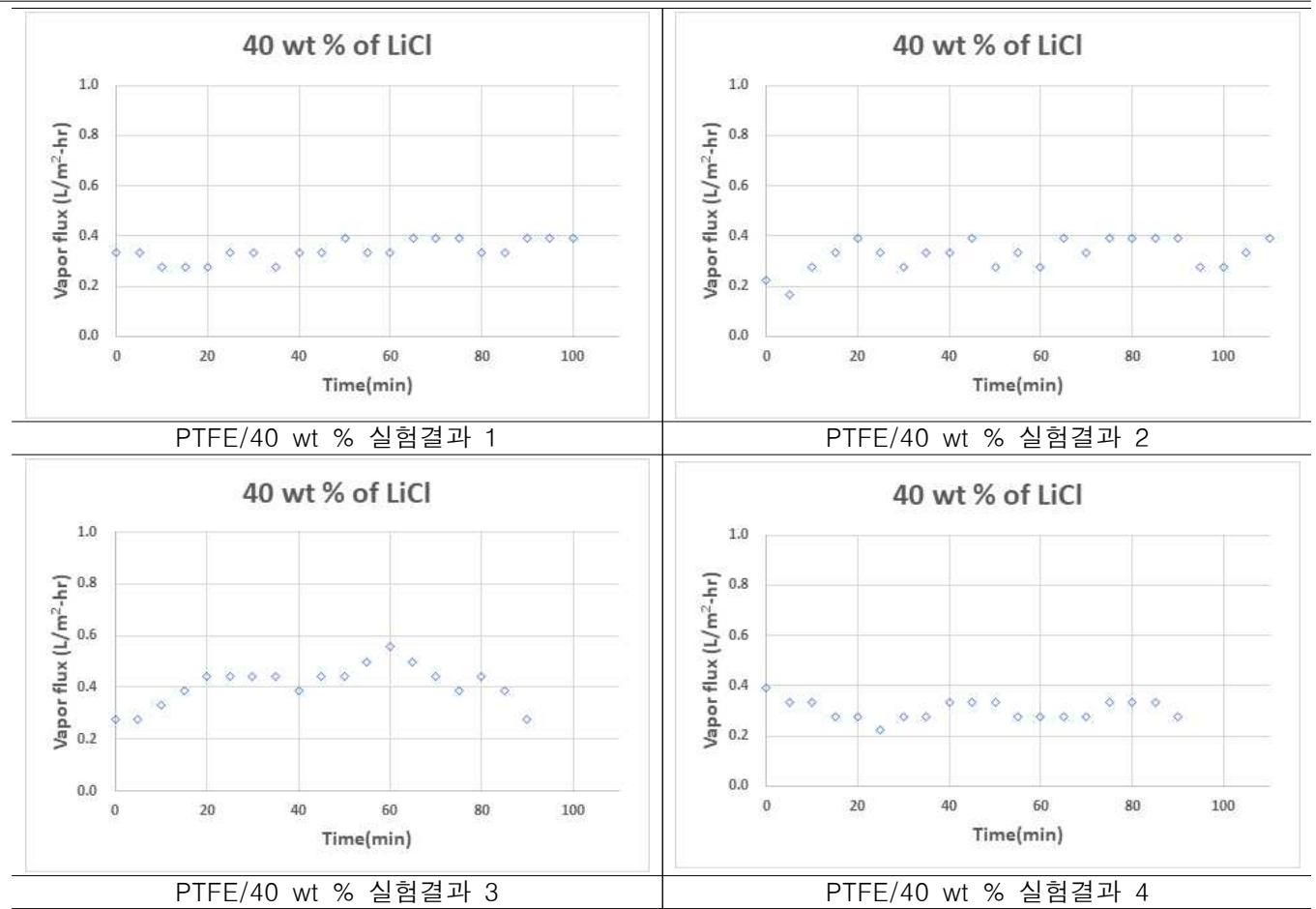
항목	조건	비고
실험시간	1~3시간	조건별 상이
습도조건	80 ± 5 %	상대습도 기준 세팅값 : 80 %
순환유속 (수증기)	1 LPM	
순환유속 (액체건조제)	2 LPM	
온도	30 ± 2 °C	세팅값 : 30 °C
액체건조제 농도	35/40/45 wt %	

- 35 wt % 농도의 LiCl 용액을 액체건조제로 하여 PTFE 멤브레인의 vapor flux 실험 결과는 아래의 그림과 같음.
- vapor flux는 0.11 ~ 0.25 LMH의 flux 결과를 나타내었으며, 분리막별 편차는 존재하였으나 시간에 따른 flux 변화폭은 거의 변화없이 일정한 결과값을 나타냄.
- 동일한 농도의 액체건조제를 사용한 PVDF 멤브레인의 실험결과와 비교하였음.



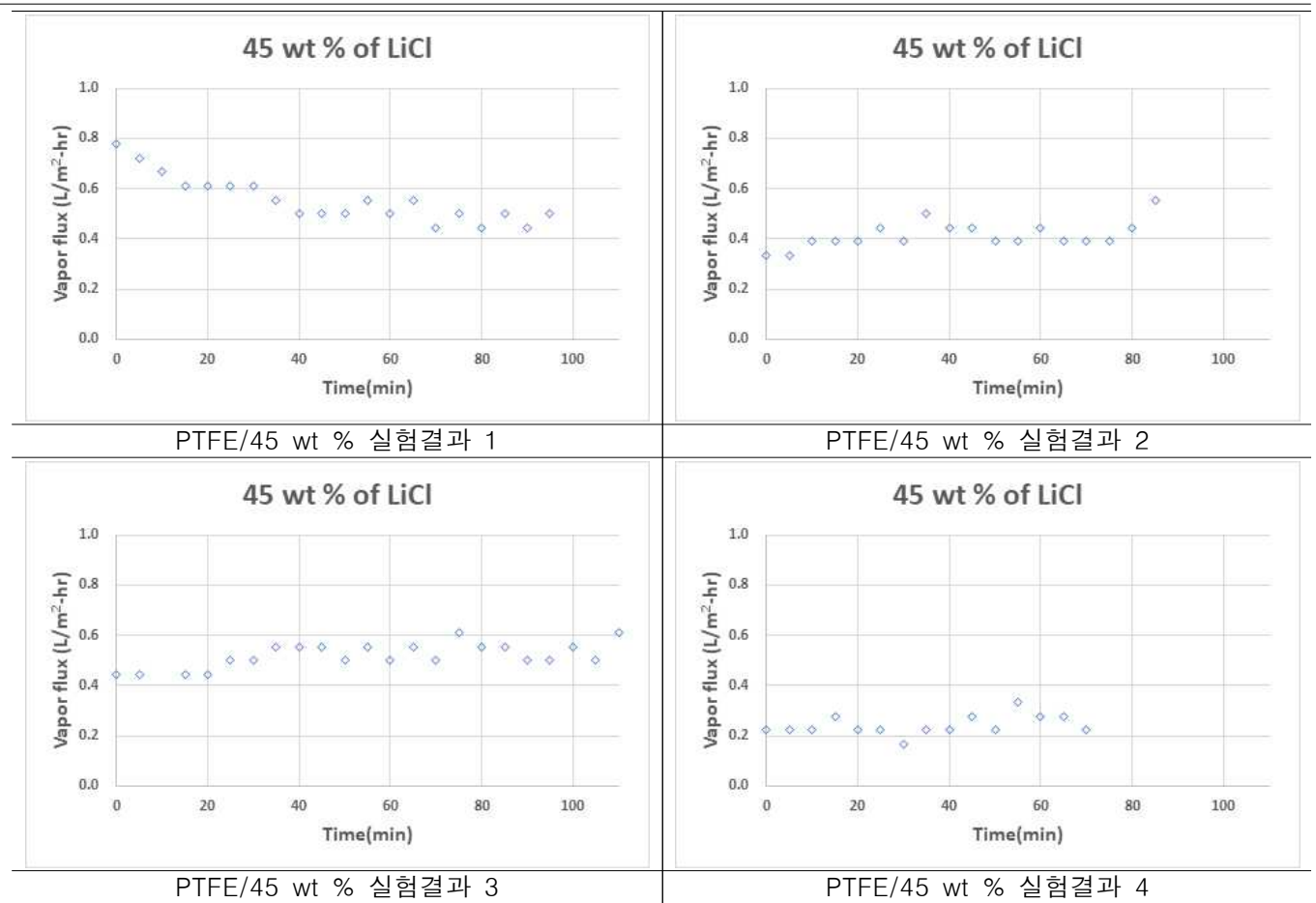
[그림2-65] PTFE/35 wt % 실험결과 1~4

- 40 wt % 농도 실험에서는 0.34 ~ 0.39 LMH의 수증기 플럭스 분포를 보였으며, 실험결과는 아래의 그림과 같음.
- PVDF재질의 분리막에 비해 약 35 % 높은 수증기 플럭스를 나타내었으며, 실험 재현성 결과 또한 더 높은 결과를 도출하였음.
- PVDF실험과 마찬가지로 시간에 따른 vapor flux의 변화폭은 미미하였음.



[그림2-66] PTFE/40 wt % 실험결과 1~4

- 45 wt % 농도의 실험결과로 35, 40 wt % 농도에 비해 높은 수증기 플럭스 결과를 도출하였음.
- 평균 0.5 LMH의 플럭스 결과로, 수치상 pvdf 분리막을 활용한 실험결과에 비해 80 % 이상의 높은 플럭스 결과를 도출하였음.
- 다른 농도의 실험결과에 비해 편차가 높았으며, 이는 pvdf 실험에서도 비슷한 결과를 나타냄. 높은 농도를 사용한 실험결과와의 재현성 확보가 필요할 것으로 판단됨.



[그림2-67] PTFE/45 wt % 실험결과 1~4

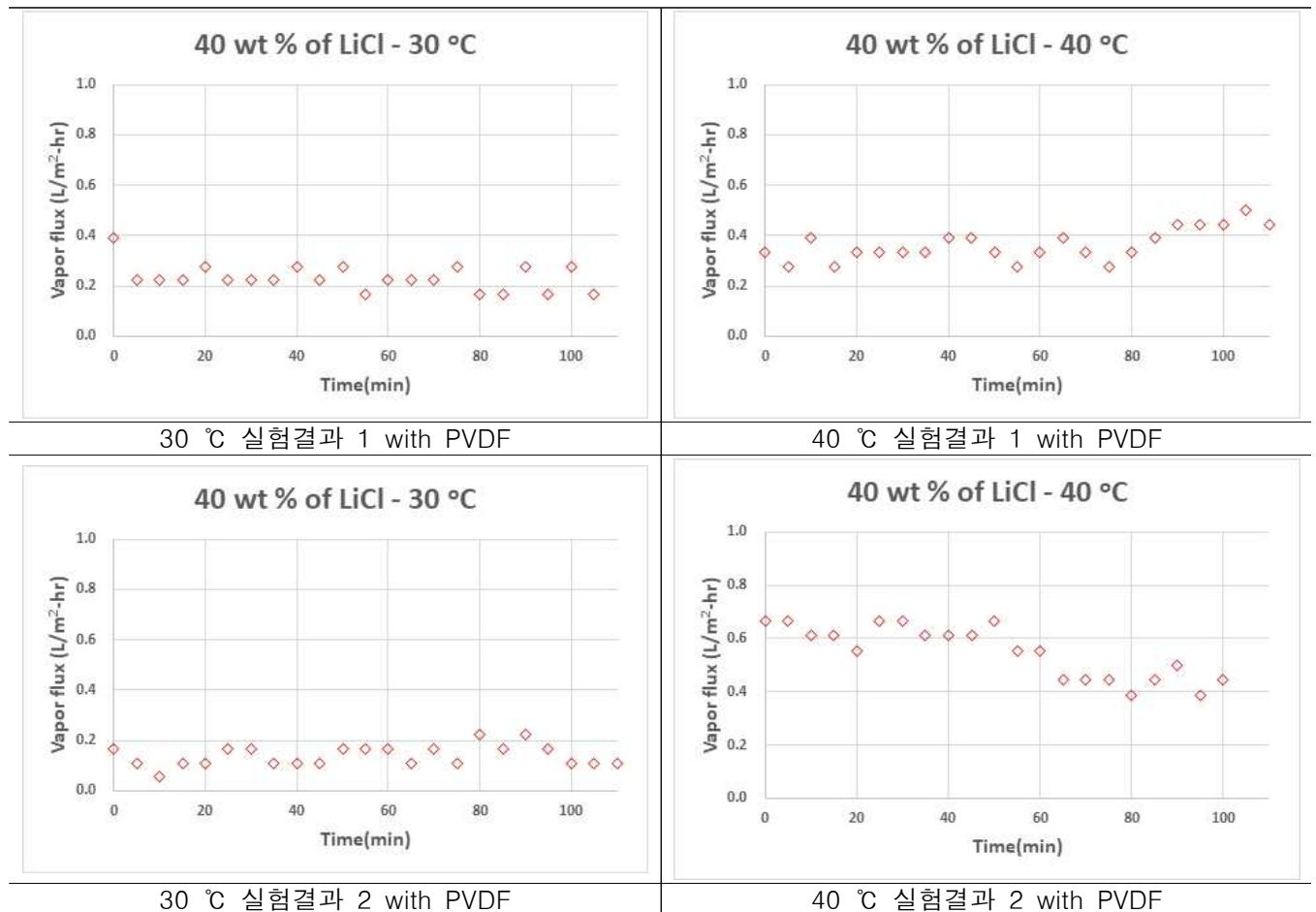
b) 온도변화에 따른 수증기 플럭스 변화 실험

- 수증기는 온도에 따라 수증기압이 변화하므로 온도를 변화시키면 driving force 변동에 따라 플럭스의 결과값이 달라짐.
- 수증기압은 온도가 상승함에 따라 증가하며 이에 따라 액체건조제와의 증기압차가 증가하게 됨.
- 실험조건은 아래와 같음.

[표2-17] 온도변화에 따른 수증기 플럭스 변화 실험

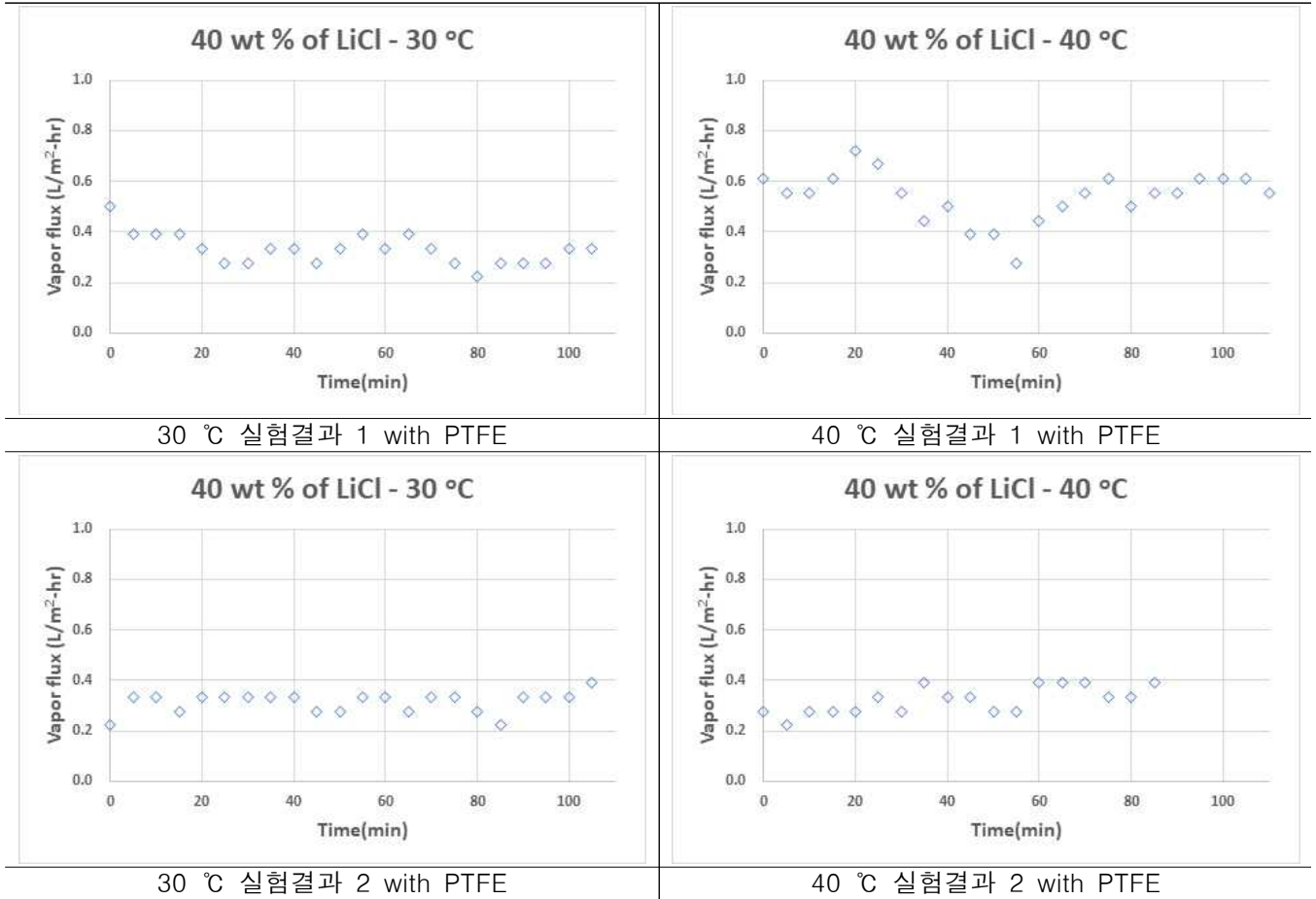
항목	조건	비고
실험시간	1~3시간	조건별 상이
습도조건	80 ± 5 %	상대습도 기준 세팅값 : 80 %
순환유속 (수증기)	1 LPM	
순환유속 (액체건조제)	2 LPM	
분리막	PVDF/PTFE	분리막별 반복실험
온도	30/40 ± 2 °C	세팅값 : 30 °C
액체건조제 농도	40 wt %	

- PVDF 분리막으로 실험한 수증기 flux 결과는 아래의 그림과 같음.
- 1차 실험의 경우 40도에서의 수증기 평균 플럭스는 0.38 LMH로 30도에서의 평균 플럭스보다 약 77 % 가 증가하였음.
- 이는 앞서 서술한 내용처럼, 온도증가에 따른 수증기의 수증기압 상승으로 인한 결과로 사료됨.
- 30도 조건에서의 수증기압은 40도 조건에서의 수증기압 보다 낮으므로 다른 조건이 모두 같을 때 40도 조건의 flux가 더 높은 결과를 나타냄.



[그림2-68] PVDF 온도별 실험결과 1~2

- PTFE 재질의 멤브레인을 사용한 플럭스 실험 결과는 PVDF 재질의 멤브레인을 사용한 플럭스에 비해 전체적으로 높은 플럭스를 나타내었으며, 이는 기존의 온도변화 실험과 유사한 결과임.
- PTFE 멤브레인의 경우 온도에 따른 플럭스 변화가 PVDF에 비해 적었음. 이는 PTFE 재질이 PVDF에 비해 membrane thickness가 높으며 temperature polarization(온도분극)이 낮기 때문이라고 사료됨.
- 30도에서의 수증기 플럭스는 약 0.3 LMH를 나타내었으며 40도로 온도를 상승시키면 0.54 LMH로 수증기 플럭스가 약 64 %의 증가율을 나타냄.



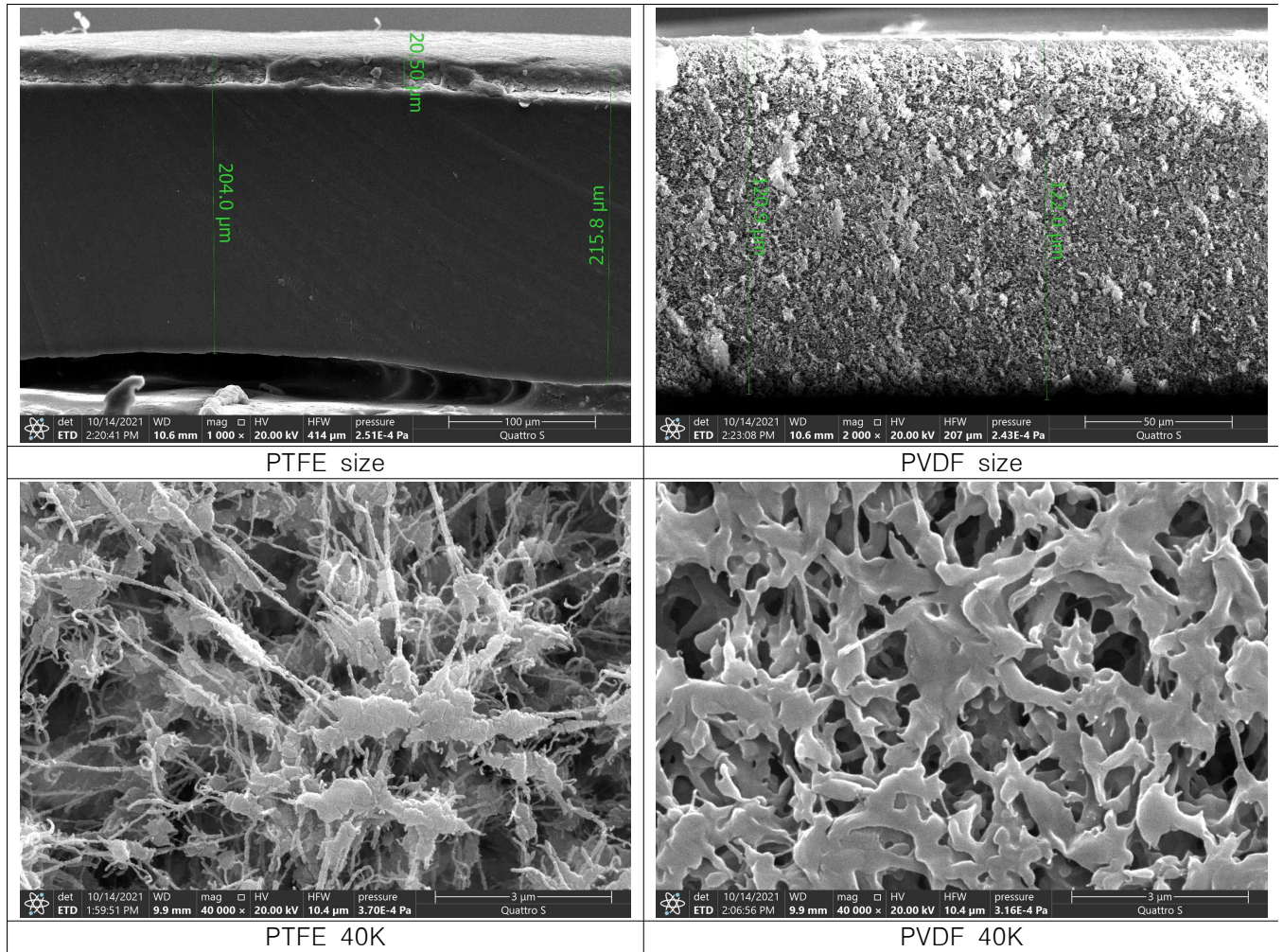
[그림2-69] PTFE 온도별 실험결과 1~2

✓ 분리막의 물리적 특성 분석

- 사용한 분리막의 물리적 특성을 보기 위해 분리막의 특성 분석실험을 진행하였음.
- 물리적 특성 분석은 실험에 사용하는 PVDF와 PTFE 멤브레인을 SEM 표면분석, 수투과도, 접착각 등을 분석하였음.

[표2-18] 분리막 특성

실험항목	대상 분리막	단위	결과	비고
접착각	PTFE	o	129.52(±0.29)	Drop volume : 2ul
기계적 강도		MPA	5.51	Tensile strength
SEM		%	40.8	Elongation
LEP(수투과도)		-	-	하단 그림 참조
접착각	PVDF	bar	4.46	-
기계적 강도		o	128.88(±0.23)	Drop volume : 2ul
SEM		MPA	6.07	Tensile strength
LEP(수투과도)		%	33.4	Elongation
		-	-	하단 그림 참조
		bar	2.70	-



[그림2-70] SEM 이미지 (PVDF, PTFE)

- 또한, 제조사에서 제시한 기공크기를 확인하기 위해 pore size를 측정하였음. 측정결과는 아래와 같음.
- 실제측정한 결과 제조사에서 제시한 0.22 um보다 큰 수치를 나타내었으며, PTFE의 vapor flux가 PVDF보다 높은 결과를 보이는 것이 pore size 크기 차이도 영향을 미친 것으로 판단됨.

시 료 명		PTFE			
시 험 결 과					
시험 항목	시료구분		단위	결과치	비고
	Maximum Pressure(PSI)				
기공측정-GLP	PTFE-1	100	μm	0.316	Mean Flow Pore Diameter(microns)
	PTFE-2	100		0.3249	

Sample	PTFE-1	PTFE-2
Mean Flow Pore Pressure(psi)	20.879	20.307
Mean Flow Pore Diameter(microns)	0.316	0.3249
Bubble Point Pressure(psi)	16.063	15.778
Bubble Point Pore Diameter(microns)	0.411	0.418

시 료 명	PVDF				
시 험 결 과					
시험 항목	시료구분		단위	결과치	비고
	Maximum Pressure(PSI)				
기공측정-GLP	PVDF-1	150	μm	0.2931	Mean Flow Pore Diameter(microns)
	PVDF-2	100		0.2799	

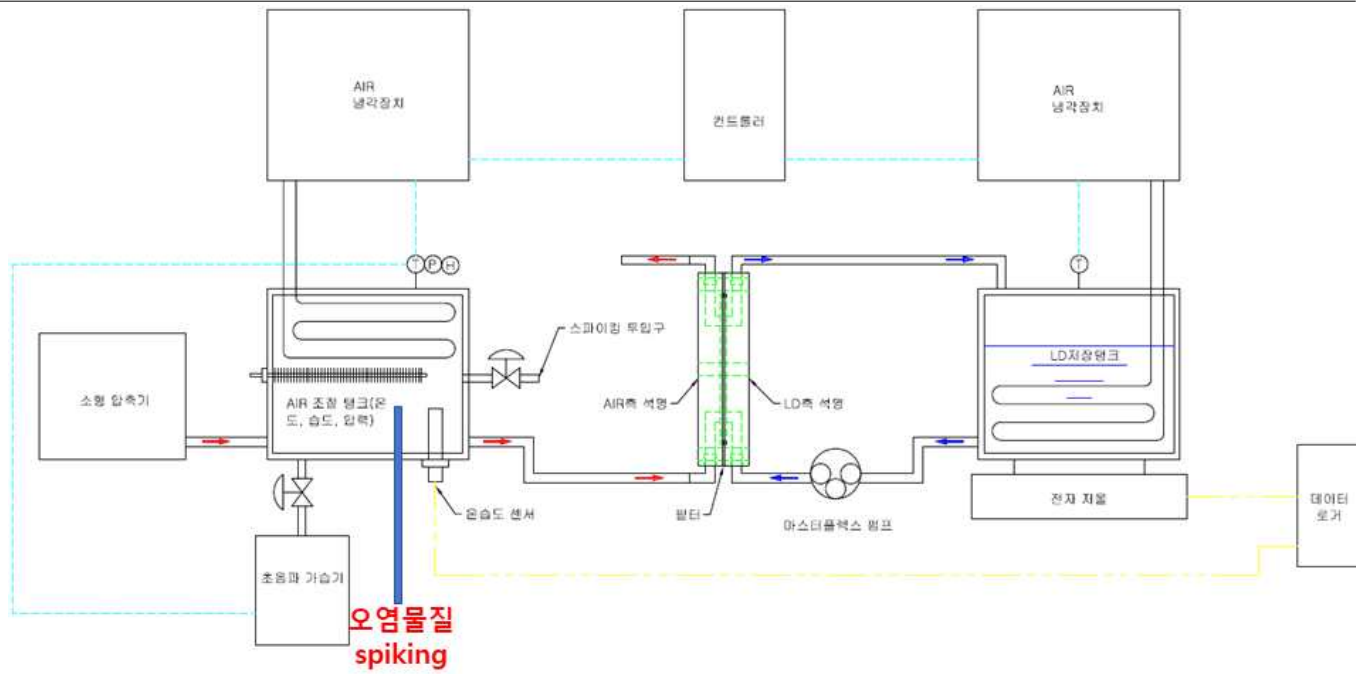
Sample	PVDF-1	PVDF-2
Mean Flow Pore Pressure(psi)	22.512	23.572
Mean Flow Pore Diameter(microns)	0.2931	0.2799
Bubble Point Pressure(psi)	14.38	14.553
Bubble Point Pore Diameter(microns)	0.459	0.453

✓ 미세먼지 유발물질 주입실험

- 본 과제에서는 습도가 높은 실내 환경조건에서 액체건조제를 활용하여 분리막 제습공정을 통해 생산된 깨끗한 물을 액체건조제로부터 회수하고 쾌적하고 청정한 실내 환경조건을 만족할 수 있는 공정을 개발하였음.
- 대기 중에는 톨루엔, 암모니아, 포름알데히드 등 미세먼지 생성에 관여하는 오염물질(전구물질)이 존재하며 최근에는 미세먼지 전구물질을 제어하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있음.

오염물질	주요 배출원	미세먼지를 생성하는 주요 반응과 반응물질 (1차 물질)	미세먼지 성분 (2차 물질)
황산화물 (SO _x)	석탄, 나무 등 황이 포함된 연료 연소	황산화물 + 산화제	황산염
질소산화물 (NO _x)	질소가 포함된 연료 연소, 공기의 질소가 연소과정의 고온에서 분해 (자동차, 가스보일러 등)	질소산화물 + 산화제	질산염
암모니아 (NH ₃)	가축 사육, 비료, 자동차 등	질소산화물 + 휘발성유기화합물 + 산화제	유기탄소
휘발성유기화합물 (VOCs, volatile organic compounds)	용매 사용, 자동차 연료, 인쇄소, 화장품, 방향제, 고기구기 등 다양한 배출원	암모니아(기체) + 산성 먼지(황산염, 질산염 먼지)	황산암모늄, 질산암모늄 (먼지)
미세먼지 생성에 관여하는 오염물질(전구물질)의 중요한 배출원(1차 물질)		대기에서의 반응에 의해 생기는 미세먼지 성분과 주요 반응(2차 물질)	

- 액체건조제 기반 분리막식 제습시스템에서는 간접접촉식 공정으로써 흡수제인 액체건조제 공정과는 원천적으로 분리되어 있음. 그러나 다공성 멤브레인을 사용하기 때문에 vapor flux가 발생하면서 가스상 오염물질이 함께 이동할 우려가 있음. 이에 따라 본 과제에서는 가스상 오염물질을 제습시스템에 주입하여 vapor flux 발생 시 가스상 오염물질의 배제 여부를 함께 확인하였음.
- 수증기 발생부에 미세먼지 전구물질 중 암모니아를 발생시켜 주입하였으며, 주입 후 안정화 시간을 고려하여 일정농도를 유지 하였음.
- 안정화 시간 후 기존의 제습실험과 같이 수증기를 발생시키고 액체건조제를 순환하였으며, 이에 따른 vapor flux를 함께 측정하였음.
- Spiking한 오염물질은 공동연구기관에서 보유하고 있는 FT-IR로 실시간 측정하여 농도를 산출하였으며 vapor flux와 함께 비교분석 하였음.

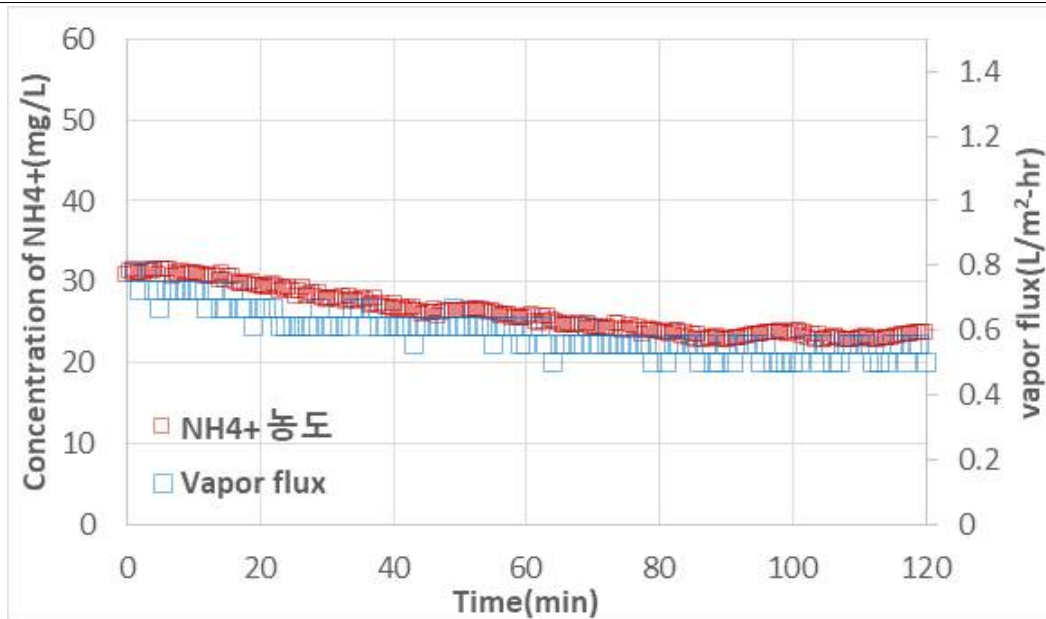


- 미세먼지 제거실험은 한국오존자외선협회 규격인 KOUVA AS 02 : 2019, 공기정화장치에 의거하여 입자 정화 성능실험을 진행함. 해당 규격에서 제시하는 표준시험방법을 따라 염화칼륨(KCl) 용액을 활용하여 분사장치(atomizer)를 통해 공동연구기관 내 보유하고 있는 표준시험챔버에 분리막식 제습시스템을 위치시킨 후 실험을 진행함.
- 반응조 탱크 내에 분사장치 head를 위치시키고 미세먼지 발생용액을 분사장치를 통해 분사한 후 광산란 적산법이 적용된 particle counter로 미세먼지 입자 개수를 측정함. 측정은 연속측정방식으로 진행하였으며, 측정된 공기는 다시 탱크 내로 재순환하였음.

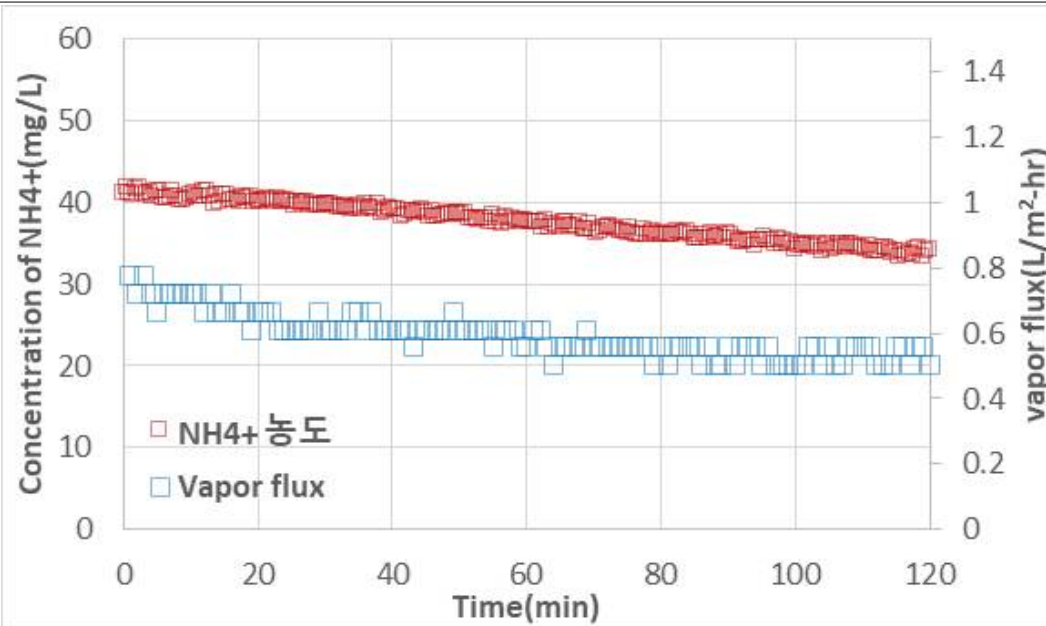
항목	조건	비고
분사입자	- 크기 : 0.3 μm - 사용물질 : 염화포타슘(KCl)	0.3 μm로 초미세먼지 크기의 입자에 해당
습도조건	80 $\pm$ 5 %	상대습도 기준
순환유속 (수증기/액체건조제)	1 LPM / 2 LPM	세팅값 : 80 %
분리막	PTFE	
액체건조제 농도	40 wt %	

항목	결과	비고
초기 측정값	56,464 개/L	15분 평균값
운전 후 측정값	486 개/L	15분 평균값
제거율	99%	

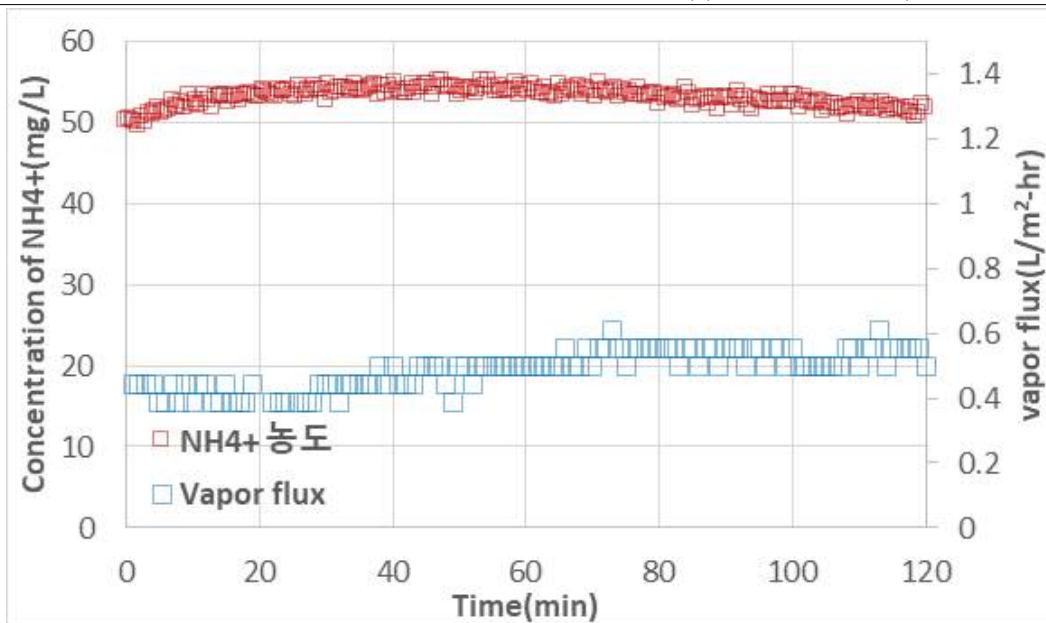
- 미세먼지(입자)제거성능 평가 규격과 같이 실험입자 크기는 0.3 μm 로 하였으며, 입자 분사와 함께 액체건조제 제습시스템을 가동하면서 입자 제거성능을 확인하였음.
- 실험결과 0.3 μm 크기의 입자는 초기 측정값 대비 99% 제거되었으며, 이를 통해 액체건조제 기반 분리막식 제습시스템의 미세먼지 제거성능을 확인할 수 있었음.



[그림2-71] 미세먼지 유발물질(NH_4^+) 농도변화(30ppm) 및 vapor flux



[그림2-72] 미세먼지 유발물질(NH_4^+) 농도변화(40ppm) 농도 및 vapor flux



[그림2-73] 미세먼지 유발물질(NH_4^+) 농도변화(50ppm) 및 vapor flux

- 암모니아의 주입농도는 30, 40, 50 ppm으로 설정하여 주입하였으며 FT-IR로 실시간 측정을 하였음. 모든 농도에서 vapor flux에 따른 암모니아의 농도는 크게 변화가 없는 것으로 나타났으며, 특히 고농도인 50 ppm에서는 거의 변동이 없었음.
- 30, 40 ppm 농도의 경우 미미하게 감소하는 현상을 볼 수 있었는데, 수증기 분사에 따라 일부가 물에 녹아 농도가 변동하는 것으로 사료됨.
- 암모니아의 농도를 모니터링 하는것과 동시에 vapor flux도 함께 측정하였음.
- 액체건조제의 농도는 45 w % 였으며 발생 수증기의 상대습도는 80 %로 유지하였음. 그 외에 다른 실험조건은 아래의 표와 같음.
- Vapor flux가 발생함에 따라 암모니아 등 유해물질이 액체건조제로 유입되는지 여부를 확인하기 위해 실험 후 액체건조제 내 성분 분석을 통해 유입여부를 확인하였음.

항목	조건	비고
실험시간	1~2시간	조건별 상이
습도조건	80 ± 5 %	상대습도 기준 세팅값 : 80 %
순환유속 (수증기)	1 LPM	
순환유속 (액체건조제)	2 LPM	
분리막	PTFE	단일막 실험
온도	30 ± 2 °C	세팅값 : 30 °C
액체건조제 농도	45 wt %	
미세먼지 유발물질 농도	30, 40, 50 mg/L	

- 성분분석은 국가공인 먹는물 수질 검사기관에 의뢰하였음.
- 30, 50 mg/L 농도의 미세먼지 유발물질 주입실험에서는 액체건조제에서 미세먼지 유발물질이 불검출되었으며, 40 mg/L 농도의 주입실험에서는 0.01 mg/L의 암모니아가 검출되었음.
- 이를 통해, 액체건조제 기반 분리막식 제습시스템에서는 수증기 회수 시 미세먼지 유발물질(전구물질)이 99 % 이상 배제되며, 이와 동시에 안정적인 물 생산이 가능하다는 결론을 도출 하였음.



[그림2-74] 미세먼지 유발물질 제어실험 전경

수질검사성적서



검사책임자: 소재호 Tel 1544-7712 Fax 031-689-3235

국가공인 먹는물 수질 검사기관 제38 호 수질측정 대행업 제92호

접수번호 : WF202112-00130
시행일자 : 2021-12-23
발 신 : 워터스생활환경연구소
입 회 자 : /

제 목 : 수질검사성적서 교부
수 신 : 서울특별시 구로구 디지털로26길 87 (구로동,
한국산업기술시험원) 환경사업개발센터
한국산업기술시험원 귀하

1. 시료내용

08389

시 료 명	암모니아	관 련 법 령		채 수 일 자	2021-12-16
상 호 명	한국산업기술시험원	검 사 목 적	자체 관리	접 수 일 자	2021-12-17
시 설 명		신 고 번 호		원 수 / 정 수	
채 수 장 소	암모니아1				

2. 수질검사 결과

가. 검사결과 종합

판정	
수질기준 초과항목	

나. 항목별 검사결과

검사항목	단 위	결 과
암모니아	mg/L	불검출

본 성적서는 시험의뢰 목적 이외의 광고, 상업적인 용도나 법적인 해결의 용도로 사용할수 없습니다.

워터스생활환경연구소



국가공인 먹는물 수질검사기관 제38호 수질측정 대행업 제92호 안전성 검사기관 제54호 폐기물 분석 전문기관 제72호
15847 경기도 군포시 공단로140번길 46, 1213호 (당정동,군포엠테크노센터) T. 1544-7712 F. 031) 689-3235

수질검사성적서



검사책임자: 소재호 Tel 1544-7712 Fax 031-689-3235

국가공인 먹는물 수질 검사기관 제38 호 수질측정 대행업 제92호

접수번호 : WF202112-00131
시행일자 : 2021-12-23
발 신 : 워터스생활환경연구소
입 회 자 : /

제 목 : 수질검사성적서 교부
수 신 : 서울특별시 구로구 디지털로26길 87 (구로동,
한국산업기술시험원) 환경사업개발센터
한국산업기술시험원 귀하

08389

1. 시료내용

시 료 명	암모니아	관 련 법 령		채 수 일 자	2021-12-16
상 호 명	한국산업기술시험원	검 사 목 적	자체 관리	접 수 일 자	2021-12-17
시 설 명		신 고 번 호		원 수 / 정 수	
채 수 장 소	암모니아2				

2. 수질검사 결과

가. 검사결과 종합

판정	
수질기준 초과항목	

나. 항목별 검사결과

검사항목	단 위	결 과
암모니아	mg/L	0.01

본 성적서는 시험의뢰 목적 이외의 광고, 상업적인 용도나 법적인 해결의 용도로 사용할수 없습니다.

워터스생활환경연구소



국가공인 먹는물 수질검사기관 제38호 수질측정 대행업 제92호 안전성 검사기관 제54호 폐기물 분석 전문기관 제72호
15847 경기도 군포시 공단로140번길 46, 1213호 (당정동, 군포엠테크노센터) T. 1544-7712 F. 031) 689-3235

수질검사성적서



검사책임자: 소재호 Tel 1544-7712 Fax 031-689-3235

국가공인 먹는물 수질 검사기관 제38 호 수질측정 대행업 제92호

접수번호 : WF202112-00132
시행일자 : 2021-12-23
발 신 : 워터스생활환경연구소
입 회 자 : /

제 목 : 수질검사성적서 교부
수 신 : 서울특별시 구로구 디지털로26길 87 (구로동,
한국산업기술시험원) 환경사업개발센터
한국산업기술시험원 귀하

1. 시료내용

08389

시 료 명	암모니아	관 련 법 령		채 수 일 자	2021-12-16
상 호 명	한국산업기술시험원	검 사 목 적	자체 관리	접 수 일 자	2021-12-17
시 설 명		신 고 번 호		원수 / 정수	
채 수 장 소	암모니아3				

2. 수질검사 결과

가. 검사결과 종합

판정	
수질기준 초과항목	

나. 항목별 검사결과

검사항목	단 위	결 과
암모니아	mg/L	불검출

본 성적서는 시험의뢰 목적 이외의 광고, 상업적인 용도나 법적인 해결의 용도로 사용할수 없습니다.

워터스생활환경연구소



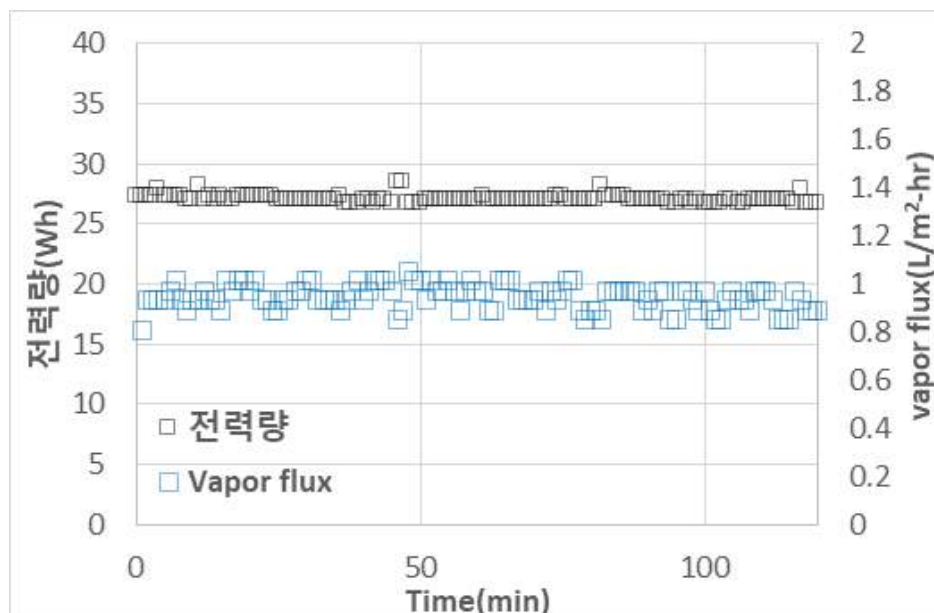
국가공인 먹는물 수질검사기관 제38호 수질측정 대행업 제92호 안전성 검사기관 제54호 폐기물 분석 전문기관 제72호
15847 경기도 군포시 공단로140번길 46, 1213호 (당정동,군포엠테크노센터) T. 1544-7712 F. 031) 689-3235

✓ 소모전력량 실험

- 다습한 환경조건에서 전력 당 생산 가능한 깨끗한 물의 양을 구하기 위해 액체건조제를 활용한 분리막식 제습시스템의 전력량을 측정하였음.

항목	조건	비고
실험시간	1~2시간	
습도조건	80 ± 5 %	상대습도 기준 세팅값 : 80 %
순환유속 (수증기)	1 LPM	
순환유속 (액체건조제)	2 LPM	
분리막	PTFE	단일막 실험
온도	30 ± 2 °C	세팅값 : 30 °C
액체건조제 농도	55 wt %	

- 본 시스템에서 사용되는 전력은 크게 가습, 펌프, 저울, 열교환기 등으로 나누어볼 수 있으며, 이러한 단위 장치 당 발생하는 전력량을 vapor flux 발생과 동시에 직접 모니터링 하였음. 모니터링 결과는 아래의 그림과 같음.
- 약 2시간 동안 vapor flux가 발생하는 동시에 모니터링을 한 결과, **전력량은 평균 약 27 Wh가 발생하였음. vapor flux는 평균 약 0.95 LMH가 발생하였으며, 이는 막면적을 0.3 m²로 확장함에 따라 1kWh당 2.3 L의 물 생산이 가능한 수치로 본 과제목표 수치를 달성하였음.** 현재 상용화 분리막모듈은 모두 1 m²를 상회하므로 본 시스템을 적용 시 충분히 가능한 수치로 판단되나, 추가적인 모듈 연구를 통해서 해결할 수 있을 것으로 사료됨. 또한, 액체건조제 재생 시스템과 연결하여 연속적으로 운전하기 위해서는 막면적 및 유속을 고려한 최적화된 설계인자를 찾는 추가적인 연구가 필요함.



[그림2-75] Vapor flux와 전력량

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

- 막증류법을 이용한 희석된 액체건조제의 농축(회수) 및 수분(물) 회수 최적화 기술
 - 막증류를 이용한 최적 액체 건조제 회수 공정 최적화를 위해 온도, 유속(유량), 액체 건조제 종류 및 농도에 따른 막 파울링 관찰 및 플럭스 측정, 다른 막증류법 (직접접촉식이나 진공 막증류) 또는 평판형이나 중공사형 모듈 평가를 통한 최적 막증류 공정 설계 (실험실)
- 액상에 포집된 미세먼지의 분리 및 제거 기술
 - 액체 건조제에 의해 포집된 (초)미세먼지를 제거하기 위한 최적 분리막 선정 및 분리 공정 설계 및 평가 (실험실)
 - 간접식 제습 및 미세먼지 전구물질 제거 시스템으로 낮은 에너지 소모량 달성
- 막증류법을 이용한 희석된 액체건조제의 농축(회수) 및 수분(물) 회수 최적화 기술
 - 막증류를 이용한 최적 액체 건조제 회수 공정 최적화를 위해 온도, 유속(유량), 액체 건조제 종류 및 농도에 따른 막 파울링 관찰 및 플럭스 측정, 다른 막증류법 (직접접촉식이나 진공 막증류) 또는 평판형이나 중공사형 모듈 평가를 통한 최적 막증류 공정 설계 (챔버 표준시험)
 - 기존 증발법에 의한 액체건조제 재생방법과 비교하여 낮은 온도 (50-70 ℃)에서 재생함으로써 에너지 비용 절감을 통한 운영비용 개선 기대
- 액상에 포집된 미세먼지의 분리 및 제거 기술
 - 액체 건조제에 의해 포집된 (초)미세먼지를 제거하기 위한 최적 분리막 선정 및 분리 공정 설계 및 평가 (챔버 표준시험)

(2) 정량적 연구개발성과

-
- SCI급 논문
 - 2편 게재 및 3건 심사 및 투고 예정
 - 특허출원 4건
-

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Investigation of fouling mechanisms in membrane distillation using in-situ optical coherence tomography with generation of fouled membrane	Journal of Membrane Science	JiaXin Guo, *공동저자: Sanghyun Jeong (주관 책임자), Alicia Kyoungjin An	641	Netherlands	Elsevier	SCIE	2022.1.1	0376-7388	50
2	Colloidal silica fouling mechanism in direct-contact membrane distillation	Desalination	Yongsun Jang, *교신저자: Sanghyun Jeong (주관 책임자)	527	Netherlands	Elsevier	SCIE	2022.4.1	0011-9164	100
3	Membrane Distillation Bioreactor (MDBR) for Wastewater Treatment, Water Reuse, and Resource Recovery: A Review	Journal of Water Process Engineering	Jehad A. Kharraz, *공동저자: Sanghyun Jeong (주관 책임자), Alicia Kyoungjin An	심사중 (Under review)	United Kingdom	Elsevier	SCIE	-	2214-7144	50
4	Membrane distillation for efficient recycling of liquid dessicant	Desalination	Jieun Lee, *교신저자: Sanghyun Jeong (과제 책임자)	3월 중 투고 예정	Netherlands	Elsevier	SCIE	-	0011-9164	100
5	Considerations on the performance evaluation of an air purifier using an airborne virus (Phi-X174) in a large chamber	Process safety and environmental protection	*1저자: Hwan Kim (공동 책임자), *공동저자: Sanghyun Jeong (주관 책임자), Hyoungil Kim	심사중 (Under review)	United Kingdom	Elsevier	SCIE	-	0597-5820	50

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	BEEM 2020	Indoor fine dust control using membrane distillation with liquid desiccant cycle	하성욱	2020.09.06.~ 2020.09.09	인천, 송도	대한민국
2	BEEM 2020	Advanced wastewater reclamation method with ferrate for water reuse in direct contact with human	오유민	2020.09.06.~ 2020.09.09	인천, 송도	대한민국
3	2021 한국막학회 춘계 학술발표회	액체 건조제를 활용한 막증류기반 실내 습도 제어 및 미세먼지 제거 기술 개발을 위한 액체건조제의 최적화	하성욱	2021.04.29.~ 2021.04.30. (2021.04.29.)	서울, 연세대학교	대한민국
4	2021 대한환경공학회 국내 학술대회	전기방사장치를 이용한 탄소나노튜브/고분자 오일흡착제 제조	변시영	2021.11.03.~ 2021.11.05. (2021.11.05.)	제주, 신화월드	대한민국
5	2021 대한환경공학회 국내 학술대회	금 나노입자를 이용한 플라스모닉 막 증류 공정	오유민	2021.11.03.~ 2021.11.05	제주, 신화월드	대한민국
6	2021 대한환경공학회 국내 학술대회	막증류공법을 활용한 액체건조제 재생 최적화를 위한 LiCl/HCOOK 비교	하성욱	2021.11.03.~ 2021.11.05	제주, 신화월드	대한민국
7	Membrane Desalination 2021 (MEMDES 2021)	Regeneration of liquid desiccants in membrane distillation system for air conditioning	하성욱	2021.11.14.~ 2021.11.17	상하이, Shanghai Tech Univ.	중국
8	Membrane Desalination 2021 (MEMDES 2021)	Fabrication of carbon nanotubes (CNTs) embedded Polystyrene (PS) / Polyacrylonitrile (PAN) oil sorbent using electrospinning	변시영	2021.11.14.~ 2021.11.17. (2021.11.17.)	상하이, Shanghai Tech Univ.	중국
9	2021 한국막학회 추계 학술발표회	금나노입자의 플라스모닉을 이용한 막 증류 공정 성능 평가	오유민	2021.11.18.~ 2021.11.19. (2021.11.18.)	대전, 대전라마다호텔	대한민국
10	2021 한국막학회 추계 학술발표회	막증류공법을 활용한 액체건조제 재생 공정 최적화를 위한 LiCl/HCOOK 비교	하성욱	2021.11.18.~ 2021.11.19. (2021.11.18.)	대전, 대전라마다호텔	대한민국
11	2021 한국막학회 추계 학술발표회	실란 커플링제를 이용한 PVDF 분리막의 표면 소수성화	차혁	2021.11.18.~ 2021.11.19. (2021.11.18.)	대전, 대전라마다호텔	대한민국
12	대한상하수도학회·한국 물환경학회 2021년 공동학술발표회	전기방사기술을 이용한 재사용이 가능한 PS/PAN 오일흡착제 제조 및 탈착 평가	변시영	2021.11.24.~ 2021.11.25. (2021.11.24.)	여수, 베네치아호텔	대한민국
13	캠퍼스아시아 사업단 23회 국제학술대회	Evaluation of regeneration performance of liquid desiccants using membrane distillation	하성욱	2021.12.02.~20 21.12.03.	부산, 부산대학교	대한민국
14	2021 대한환경공학회 국내 학술대회	액체건조제를 활용한 제습시스템의 공기조화능력 평가 연구	김환	2021.11.03.~ 2021.11.05	제주, 신화월드	대한민국

□ 기술 요약 정보

번호	연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용 여부	허용방식

□ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	액체건조제를 이용한 저에너지 담수화 시스템 및 이를 이용한 담수화 방법	대한민국	부산대학교 산학협력단	21.02.16	10-2021-0020233	-	-	-	100	활용
2	특허	광촉매와 UV를 통한 공기질 개선 구조의 충전탑식 액체식 제습 시스템	대한민국	김환 외	20.10.14.	10-2020-0132755	-	-	-	100	활용
3	특허	광촉매와 UV를 통한 공기질 개선 구조의 분리막식 액체식 제습 시스템	대한민국	김환 외	20.10.14.	10-2020-0132769	-	-	-	100	활용
4	특허	가시광을 통한 공기질 개선 구조의 분리막식 제습 시스템	대한민국	김환 외	21.10.21.	10-2021-014087	-	-	-	100	활용

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타

☐ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율

☐ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호

☐ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		

☐ 표준화

○ 국내표준

번호	인증구분	인증여부	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류	제안/인증일자

○ 국제표준

번호	표준화단계 구분	표준명	표준기구명	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

☐ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

☐ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)

□ 사업화 투자실적

번호	연도	투자 자금 성격*	추가 연구개발 투자(천원)	설비 투자(천원)	기타 투자(천원)	합계(천원)

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내(천원)	국외(달러)		

□ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
합계						

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
		국외			
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획					
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)		현재	3년 후	5년 후
	수 출				

☐ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			yyyy년	yyyy년	
합계					

☐ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

☐ 비용 절감(누적)

번호	사업화명	발생 연도	산정방법	비용 절감액(천원)
합계				

☐ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수, 명)	기타
해당 연도							
기대 목표							

☐ 산업 지원(기술지도)

번호	내용	기간	참석 대상	장소	인원(명)

☐ 기술 무역

(단위 : 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	총 계약액	기 징수액	해당 연도	징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

☐ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

☐ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

☐ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

☐ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)

☐ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타

☐ 산업 기술 인력 양성

번호	연도	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

☐ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	연도	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비(천원)

☐ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

☐ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

☐ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

번호	구축 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

[그 밖의 성과](해당 시 작성)

○ 학술발표 14건

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

○

-

○

-

<참고 1> 연구개발성과 실적 증빙자료 예시

성과유형	첨부자료 예시
연구논문	논문 사본(저자, 초록, 사사표기를 확인할 수 있는 부분 포함, 연구개발과제별 중복 첨부 불가)
지식재산권	지식재산권 등록증(또는 출원서) 사본(발명인, 발명의 명칭, 연구개발과제 출처 포함)
제품개발(시제품)	제품개발사진 등 시제품 개발 관련 증빙자료
기술이전	기술이전 계약서, 기술실시 계약서, 기술료 입금 내역서 등
사업화 (상품출시, 공정개발)	사업화된 제품사진, 매출액 증빙서류(세금계산서, 납품계약서 등 매출 확인가능 내부 회계자료) 등

<참고 2> 「국가연구개발혁신법」 시행령 제33조 제4항 및 별표 4에 따른 연구개발성과의 등록·기탁 대상과 범위

구분	대상	등록 및 기탁 범위
등록	논문	국내외 학술단체에서 발간하는 학술(대회)지에 수록된 학술 논문(전자원문 포함)
	특허	국내외에 출원 또는 등록된 특허정보
	보고서원문	연구개발 연차보고서, 단계보고서 및 최종보고서의 원문
	연구시설 · 장비	국가연구개발사업을 통하여 취득한 3천만 원 이상(부가가치세, 부대비용 포함) 연구시설·장비 또는 공동 활용이 가능한 모든 연구시설·장비
	기술요약정보	연차보고, 단계보고 및 최종보고가 완료된 연구개발성과의 기술을 요약한 정보
	생명자원 중 생명정보	서열·발현정보 등 유전체정보, 서열·구조·상호작용 등 단백질체정보, 유전자(DNA)칩·단백질칩 등 발현체 정보 및 그 밖의 생명정보
	소프트웨어	창작된 소프트웨어 및 등록에 필요한 관련 정보
기탁	표준	「국가표준기본법」 제3조에 따른 국가표준, 국제표준으로 채택된 공식 표준정보(소관 기술위원회를 포함한 공식 국제표준화기구(ISO, IEC, ITU)가 공인한 단체 또는 사실표준화기구에서 채택한 표준정보를 포함)
	생명자원 중 생물자원	세균, 곰팡이, 바이러스 등 미생물자원, 인간 또는 동물의 세포·수정란 등 동물자원, 식물세포·종자 등 식물자원, DNA, RNA, 플라스미드 등 유전체자원 및 그 밖의 생물자원
	화합물	합성 또는 천연물에서 추출한 유기화합물 및 관련 정보
	신품종	생물자원 중 국내외에 출원 또는 등록된 농업용 신품종 및 관련 정보

2) 목표 달성 수준

연구개발목표	달성내용	달성도(%)
○ 액체 건조제 이용 공기 정화 및 제습 최적화 기술 (부산대)	○ 액체 건조제 공기 정화능 평가를 통한 최적 액체 건조 공정 개발 - 미세먼지 제거효율 (실험실)	100
	○ 액체 건조제의 제습 평가를 통한 습도 조절 능력 검증 - 실내공기 제습효율 (실험실)	80
○ 막증류법을 이용한 회석된 액체건 조제 농축(회수) 및 수분(물) 회수 최적화 기술 (부산대)	○ 막증류를 이용한 최적 액체 건조제 회수 공정 최적화 - 액체건조제 회수율 (실험실) - 물 회수율 (실험실)	100
	○ 최적 막증류 공정설계 - 막증류 수투과율	100
○액상에 포집된 미세먼지의 분리 및 제거 기술 (부산대)	○ 액체 건조제에 포집된 미세먼지 제거위한 최적 분리 공정 설 계 및 평가 - 미세먼지 분리효율	100
○ 액체 건조제 이용 공기 정화 및 제습 최적화 기술 (공동)	○ 액체건조제 공기 정화능 평가를 통한 최적 액체 건조 공정 개 발 - 미세먼지 제거효율 (표준시험 챔버)	80
	○ 액체건조제의 제습 평가를 통한 습도 조절 능력 검증 - 실내 공기 제습 효율 (표준시험 챔버)	80
○ 막증류법을 이용한 회석된 액체건 조제농축 (회수) 및 수분 (물) 회 수 최적화 기술 (공동)	○ 막증류를 이용한 최적 액체건조제 회수 공정 최적화 - 액체건조제 회수율 (연속공정, 챔버시험) - 물 회수율 (연속공정, 챔버시험)	80
	○ 최적 막증류 공정 설계 - 막증류 수투과율 (연속공정, 챔버시험)	80
○ 액상에 포집된 미세먼지의 분리 및 제거 기술 (공동)	○ 액체 건조제에 포집된 미세먼지 제거 위한 최적 분리 공정 설계 및 평가 - 미세먼지 분리 효율	100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

○과학적 연구성과: SCI 논문 출판 3건 미충족

- 당초 계획했던 SCI 논문 출판 3건을 미충족 하였음.
 - 2022. 1월 게재 예정인 SCI 논문 2편 (Journal of Membrane Science, Desalination: 상위 5% 이내)
 - 2편 현재 논문 심사중이며, 추가적으로 1편이 제출 준비중 임.
 - JCR 상위 저널에 출판을 하려다보니 예정된 시간보다 더 소요됨.
-

2) 자체 보완활동

○ 논문 투고 후 심사 중 2건

- 논문 투고 후 심사 중 (Under review)인 논문 2건

○ 논문 작성 중이며 22년 3월 이내 투고 예정

- 최종보고서를 위한 연구내용 정리와 병행하여 SCI 논문을 작성 중이며, 이는 Desalination에 22년 3월 투고 예정임
-

3) 연구개발 과정의 성실성

○ 기한 내 연구 목표 성과 달성과 SCI 논문 작성

- High impact journal에 논문을 출판하기 위하여 본 과제의 연구 기간인 1년 9개월 이내에 논문을 투고
 - 출판 게재 완료하기가 어렵지만, 22년 3월 이내에 충분히 투고하여 연구 종료 후 6개월 이내에 논문 게재가 가능하다고 판단됨.
 - 이 외에도 이미 투고 하여 심사 중인 논문이 2건 있기 때문에 더 빠른 시일 내에 초과 달성도 충분히 가능함.
-

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○기술적 측면

- 본 연구개발은 분리막기반 액체식 제습시스템 시제품 및 기술 확보
- 세계 기술수준 대비 실내공기질 제어 및 모니터링이 가능한 성능평가 기술 확보

○ 경제적 산업적 측면

- 개발 시스템을 통한 에너지 사용량 절감, 실내환경 유해인자 차단 등
- 일부 외산장비의 수입대체 효과
- 기존 공조방식의 사각지대인 세균, 곰팡이 등의 유해물질과 미세먼지 유발물질 혼합 방지
- 관련 개발기술 제품의 상용화에 따른 다양한 산업분야로 확대

○ 사회적 측면

- 대 국민적 관심사인 미세먼지 유발물질로부터 자유로운 공조시스템 구성
 - 인체 위해성 저감에 따른 국민 보건 향상
 - 깨끗한 국토 및 건물 도시경관 조성
-

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 연구개발성과 관리

- 본 과제를 통하여 기존 제습공조설비의 단점으로 지적되는 세균, 곰팡이 등의 유해물질과 미세먼지 유발물질 등 실내공기질을 악화시키는 문제를 해결할 수 있는 분리막기반 액체식 제습시스템을 개발하고 성능을 평가할 수 있는 기술을 개발함.
- 분리막 기반 액체식 제습시스템 시제품을 활용하여 수요기업을 발굴하고 기존 출원 특허 및 해외 PCT 대상국 진입 (미국 및 일본)도 성공적으로 등록될 수 있도록 추진함으로써 해외시장 진출을 위해 필수적인 지적재산권 확보 추진.
- 관련 기업체 및 연구자 등 전문가 대상 기술세미나를 개최하여 본 연구개발 내용에 대한 이해도를 높여 새로운 수요창출과 시장형성을 도모.
- 시제품을 학생 및 기업체 전문가를 대상으로 한 시청각 교육 및 시운전 교육에 활용.
- 차세대 공조시스템의 열병합발전 시스템과의 일체화를 위한 시제품 제작 진행.

○ 활용계획

- 분리막기반 액체식 제습시스템의 각 구성 요소별 최적 스케일업 설계인자를 도출하여 생산 기술 확보를 통해 초기 투자비용을 기존 공조시스템과 유사한 수준으로 제작 및 구축할 수 있는 기초자료로 활용할 계획임.
- 학술대회 및 컨퍼런스 활동을 통해 후속연구 계획을 수립하고 지속적인 네트워크를 강화하여 연계과제 및 사업 추진을 통해 본 연구결과를 핵심기술로 활용할 계획임.
- 빌딩 건물 공기질 개선 장치
:빌딩 건물 내 미세먼지를 제거하고 습도 조절을 통한 쾌적하고 건강한 생활환경을 조성하고 추가적인 냉난방의 효과도 얻을 수 있음. 또한 겨울철이나 봄철에 외부의 미세먼지 상황이 악화되었을 때 내부의 공기질 개선은 물론, 외부에서 유입되는 공기를 차단하고 정화하여 실내에 공급함으로써, 적절한 습도 및 미세먼지 프리 공기 공급 가능
- 실내 조경 인테리어
:공기질 개선을 통해 막증류를 포함한 액체 건조제 순환에서 회수된 물자원을 실내 조경 인테리어 조성 및 유지에 이용가능하고, 조성된 식생에 의해 부가적인 산소 공급이나 공기질 개선을 기대
- 도시 농업에 이용
:액체 건조제 순환 공정의 제습 및 물 회수 기술은 도시 내의 건물에서의 도시 농업 또는 스마트팜 (smart farm)에 이용 가능. 이를 통해 대기-물-식량 연계 인프라 설계가 가능
- 그린 인프라 구축
:에너지 절약(빌딩에서 발생하는 폐열을 회수)과 스마트한 물순환, 대기질 향상이 필요한 미래 스마트 시티의 핵심기술로써 이용이 가능하여 빌딩단위의 그린 인프라 구축 가능
- 사업화/실증화 지원
:본 기반연구를 통해서 획득된 원천기술(간접식 제습/미세먼지 제거시스템, 막증류기반 액체건조제 재생시스템, 내오염성/내화학성/반응성 분리막 기술)을 이용하여 제품화하기 위해서는, 간접식 제습/미세먼지 제거시스템에 사용하는 분리막의 플렉스와 막증류기반 액체건조제 재생시스템의 플렉스를 고려하여 연속 운전이 가능하도록 분리막 면적 및 유속을 최적화하는 실증화 연구가 필요함.

< 별첨 >

별첨 자료

1. 참고문헌

2. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료

3. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘액체건조제를 활용한 막증류기반 에너지절약형 실내 미세먼지 제거 기술 개발’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.