

18CTAP
-C116746
-03

분산형 용수공급을 위한 다층박막광흡수발열소재
이용 막증류 정수처리 기술 개발 최종보고서
2019
국토교통과학기술진흥원

보안 과제(), 일반 과제(√) / 공개(), 비공개()발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 제 3차 연도 최종 보고서

R&D / 18CTAP-C116746-03

분산형 용수공급을 위한 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 기술 개발 최종보고서

2019. 12. 10.

주관연구기관 / 한국과학기술연구원
공동연구기관 / 에이티이(주)
위탁연구기관 / 울산과학기술원

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

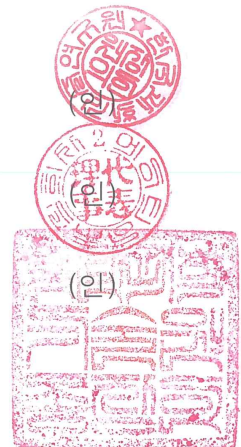
‘분산형 용수공급을 위한 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 기술 개발’(연구개발
기간 : 2016. 06. 28 ~ 2019. 10. 27) 과제의 최종보고서 12부를 제출합니다.

2019. 12. 10.

주관연구기관명 : 한국과학기술연구원 (대표자) 이병권

공동연구기관명 : 에이티이(주) (대표자) 정헌희

위탁연구기관명 : 울산과학기술원 (대표자) 이용훈



주관연구기관책임자: 송경근

공동연구기관책임자: 정헌희

위탁연구기관책임자: 백정민

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C116 746-03	해당 단계 연구 기간	2016.06.28. ~ 2019.10.27	단계구분	1/1
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	분산형 용수공급을 위한 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 개발			
연구책임자	송경근	해당단계 참여연구원 수	총: 13명 내부: 2명 외부: 11명	해당단계 연구비	정부:271,000천원 민간:90,334천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:361,334천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 29명 내부: 5명 외부: 24명	총 연구비	정부:880,000천원 민간:294,184천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:1,174,184천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국과학기술연구원 물자원순환연구센터			참여기업명 :에이티이(주)	
국제공동연구	상대국명: 해당사항 없음			상대국 연구기관명:해당사항 없음	
위탁연구	연구기관명:울산과학기술원			연구책임자:백정민	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제
-------------------------	------

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

본 연구과제를 통하여 국내외 논문 8건을 게재, 특허 국내출원 7건, 국내등록 3건, 국외출원 2건을 달성. 시작품으로 고효율 일체형 라멜라 응집/침전 설비 제작

보고서 면수
134

연구의 목적 및 내용	본 연구는 현재의 단일수원 중앙집중식 용수공급 시스템을 다양한 수원 분산형 용수공급 시스템으로 전환할 수 있는 분산형 용수공급 기술로서 열흡수율이 높은 새로운 광흡수발열소재인 다층박막광흡수발열소재를 적용하여 태양광을 열로 전환하여 막증류(MD)를 위한 열원으로 사용하는 융합형 막증류 정수기술을 개발하는 것으로 프로토타입 막증류 장치의 현장 성능평가를 통하여 적용가능성을 확보하는 것이 연구의 최종목표임. ○ 막증류 공정설계에 필요한 막증류 운전인자 범위 산정, 막파울링 현상 규명 및 파울링 제어, 멤브레인 오염에 따른 웨팅 규명 및 제어를 위한 기초연구 수행 ○ 기초연구 결과를 바탕으로 막증류 모듈설계, 제작 및 다양한 원수 대상 성능시험 ○ 막증류 적용에 적합한 다층박막광흡수발열소재 개발 및 성능평가를 통한 적용성 향상 ○ 개발된 다층박막광흡수발열소재를 적용한 태양광 집열장치 설계, 제작 및 성능평가 ○ 프로토타입 다층박막광흡수발열소재 적용 막증류 장치의 제작 및 현장설치 후 성능평가를 통하여 현장 적용 시 문제점 및 개선방안 도출을 통한 적용가능성 확보				
연구개발성과	○ 다양한 원수에 적용 가능한 고효율 막증류용 모듈 설계를 위한 적정 운전인자 범위 산정 ○ 태양열 집열 성능을 향상시키고 막증류 공정에 적합한 태양에너지 흡수체(금속/유전체 다층박막) 개발 ○ 막증류 정수처리 시스템에 적용 가능한 프로토타입 막증류 스택 개발 ○ 기존 태양열 흡수체를 대체할 수 있는 막증류용 고성능 태양에너지 집열기 개발 ○ 유입 유량 및 농도 부하량 변화 등에 능동적 대처가 가능하며 높은 제거효율과 안정적인 처리수질을 얻을 수 있는 전처리 기술개발 ○ 금속/유전체 다층박막 태양열 흡수체 제작, 흡수체 적용시 나타나는 열 손실 최소화 및 고온 열처리시 나타나는 안정성 문제 검증 ○ 다층박막광흡수발열소재 적용 프로토타입 막증류 장치 현장용 파일럿 개발 및 적용성 검증				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 다층박막광흡수발열소재 적용 막증류 장치 개발을 통하여 다양한 수원 이용 분산형 용수공급 시스템으로 전환을 위한 기술 확보 가능 ○ 소규모 마을상수도용 정수시스템 및 재해 시 비상급수용 정수시스템으로 적용 가능 ○ 정수처리 및 막증류 분야의 기술적 수준을 한 단계 업그레이드 ○ 중동, 동남아 등에 소규모 정수처리 기술로 수출 상용화하여 해외시장 진출도 기대				
국문핵심어 (5개 이내)	막증류	광흡수발열소재	정수처리	태양에너지	분산형용수공급
영문핵심어 (5개 이내)	Membrane distillation	Photothermal conversion material	Water treatment	Solar energy	Distributed water supply

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	5
2. 연구수행내용 및 성과	13
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	111
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	116
붙임. 참고 문헌	129

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구 개발의 목적

- 본 연구는 신재생에너지를 이용할 수 있는 열흡수율이 높은 새로운 광흡수발열소재인 다층 박 광흡수발열소재를 개발하여 태양광을 열로 전환하여 막증류(MD)를 위한 열원으로 사용하는 융합형 막증류 정수기술 개발을 통하여 현재의 단일수원 중앙집중형 용수공급 시스템에서 다양한 수원 분산형 용수공급 시스템으로의 전환이 가능한 프로토타입 막증류 장치 파일럿을 이용한 막증류 정수처리 기술을 개발하는 것이 본 연구의 주요 목적임.

나. 연구개발 범위

(1) 1차년도

① 개발 목표

- 주관연구기관 (한국과학기술연구원):
 - 다양한 원수에 적용 가능한 고효율 막증류용 모듈 설계를 위한 적정 운전인자 범위 산정
 - 태양열 집열 성능을 향상시키고 막증류 공정에 적합한 태양에너지 흡수체(금속/유전체 다층박막) 개발
- 참여기관 (에이티이(주)):
 - 국내외 기술현황을 분석을 통하여 기술경쟁력을 가지는 상용화기술 성능목표 설정

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한국과학기술연구원):
 - 다양한 원수에 적용 가능한 막증류용 모듈 설계를 위한 막증류 공정운전을 통한 부하율, 온도범위 등 운전인자 영향평가 및 적정인자 범위 산정
 - 다양한 원수에 적용 가능한 막증류 모듈 설계를 위한 막증류 공정에서의 막 파울링 현상 규명 및 막 파울링 제어 방안 마련
 - 막증류 공정의 장기운전을 위한 멤브레인 오염도 특성에 따른 wetting 분석을 통한 웨팅 현상 규명 및 제어 방안 마련
 - 태양에너지 흡수체 개발을 위한 기초연구 및 연구사례를 통하여 막증류용 흡수체 목표성능 설정
 - 설정된 흡수체 목표 성능에 적합한 흡수체 시제품 개발을 통한 성능 평가 및 개선
- 참여기업 (에이티이(주)):
 - 국내외 기술현황을 분석을 통하여 기술경쟁력을 가지는 상용화기술 성능목표 설정

(2) 2차년도

① 개발 목표

- 주관연구기관(한국과학기술연구원):
 - 프로토타입 막증류 정수처리 시스템(0.5m³/d 규모)에 적용 가능한 프로토타입 막증

류 스택(플럭스: $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ 에서 5 LMH) 개발

- 프로토타입 막증류 정수처리 시스템($0.5\text{m}^3/\text{d}$ 규모)에 적용 가능한 막증류용 고성능 태양에너지 집열기(흡수파장 영역대: $0.2\text{--}3\mu\text{m}$, 흡수도: 90% 이상, 온도: 집광시 80°C 이상) 개발
- 참여기관 1(에이티이(주)):
 - 유입원수내 부유물질 및 탁도제거용 전처리설비 설계 및 제작
 - 프로토타입 막증류 스택의 설계 도면 작성 및 프로토타입 막증류 스택의 제작 참여
- 참여기관 2(울산과학기술원):
 - 금속/유전체 기반의 고효율 태양에너지 흡수체의 흡수 파장 제어 및 비반사도 향상 기술

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한국과학기술연구원):
 - 1차년도 막증류 적정 운전인자 범위 산정 결과를 바탕으로 프로토타입 막증류 모듈 세부 성능목표 설정 및 프로토타입 막증류 모듈설계
 - 프로토타입 막증류 모듈 제작 및 프로토타입 막증류 모듈 성능 평가
 - 막증류 정수시스템 파일럿 설계에 필요한 막증류용 고성능 태양에너지 집열기 목표 성능 설정
 - 설정된 집열기 목표 성능에 적합한 집열기 시제품 개발을 통한 실험실 및 현장 성능 평가 및 개선
- 참여기관 1(에이티이(주)):
 - 유입원수내 부유물질 및 탁도제거용 전처리설비 설계 및 제작
 - 프로토타입 막증류 스택의 설계 도면 작성 및 프로토타입 막증류 스택의 제작 참여
- 참여기관 2(울산과학기술원):
 - 1차년도에 제작된 태양열 흡수체의 광흡수 결과를 바탕으로 광대역에서 높은 광흡수를 갖는 다층 박막 흡수체 제작
 - 표면 형상 제어를 통한 비반사도 향상 연구

(3) 3차년도

① 개발 목표

- 주관연구기관(한국과학기술연구원):
 - 프로토타입 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 시스템($1\text{m}^3/\text{d}$ 규모, 플럭스: $\Delta T 50^{\circ}\text{C}$ 이하에서 5LMH)의 파일럿 플랜트의 실제 현장 운전을 적용하여 성능 및 적용가능성 평가, 개선을 통한 실용화 가능성을 검증
- 참여기관 1(에이티이(주)):
 - 프로토타입 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 운전을 통한 경제성 분석 및 사업화 기반 구축
- 참여기관 2(울산과학기술원):
 - 제작된 태양열 흡수체의 열 손실 최소화 연구 및 열적 안정성 향상 연구

② 개발 내용 및 범위

○ 주관연구기관(한국과학기술연구원):

- 파일럿 플랜트의 실제 현장 운전을 수행하여 성능평가 및 적용성 평가를 통한 문제점 및 개선방안 도출

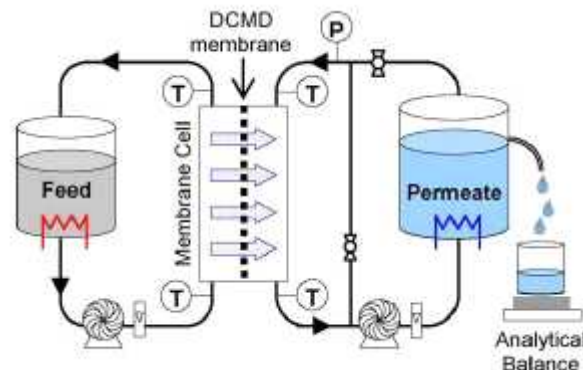
○ 참여기관 1(에이티이(주)):

- 프로토타입 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 운전을 통한 경제성 분석 및 사업화 기반 구축

다. 연구개발 대상의 국내외 현황

(1) 국내 현황

- 일반적인 막분리 기술이 막 양쪽의 압력 차이를 이용하여 물과 오염물질을 분리하는 것이라면, 막증류(MD: Membrane Distillation)는 막 양쪽의 온도차에 의한 기체 분압 차이에 의해 기화된 물이 막을 통과하는 원리를 이용한 공정으로 염도가 높은 염수(saline water)와 해수의 탈염화 기술로 새로이 등장하고 있으며, 막증류는 분리공정 및 정화 공정에서 큰 기대치를 갖고 있음.



< 그림 1.1. 일반적인 막증류 공정 모식도 >

- 막증류(membrane distillation, MD)는 물이 수증기의 형태로 막의 공극을 지나가기 때문에 역삼투(R/O) 공정에서 얻는 정도의 수질을 얻을 수 있어 최근 차세대 해수담수화 공정으로 주목받고 있음.
- 막증류 공정은 기존 열을 이용하는 분리 공정 (MSF (multi-stage flash), MED (multi effect distillation))에 비해 해수나 폐수 등의 수용액을 비점까지 가열할 필요가 없어 운전온도가 낮아짐에 따라 에너지 비용을 절감할 수 있으며, 더욱이 공경이 훨씬 큰 정밀여과(Microfiltration) 막을 이용하므로, 역삼투막(RO) 공정에서와 같이 매우 높은 운전 압력도 필요하지 않고, 기존의 막이용 수처리 공정에서 문제가 되는 파울링 발생 문제도 상대적으로 심각하지 않는 등 많은 이점으로 해수담수화, 정수처리, 초순수 제조 등에서 최근 연구사례가 점차 증가함.

- 막증류 공정을 통한 해수담수화에 있어 국내의 경우 국토부 연구단 사업인 “MD/PRO 복합탈염공정 해수담수화 플랜트 기술개발 연구” 를 2013년 해수담수화를 목적으로 시작하여 현재 초기단계 연구가 진행중.
- 막증류기술의 실용화를 위해서는 막과 공정개발이 가장 중요하며, 특히, 저렴한 열원을 확보하는 것이 필수적이다. 이를 위해 태양열, 지열 또는 발전소 등의 산업 폐열을 대체 열에너지로 이용하기 위한 시도가 진행되고 있음.
- 국내에서도 한국에너지기술연구원, 국민대 등에서 태양열을 이용한 담수화연구가 있었으나, 이는 상용 태양열 집열기를 사용한 것으로서 막증류에 적합한 태양열 집열기에 대한 연구는 진행된바 없음.
- 기존의 상용화된 태양열 집열기는 흡열판 코팅 기술을 볼 때 현재 국내 제작되는 집열기 대부분이 수입 흡열판을 이용하여 제작되고 있으며 국내 업체 중 코팅 업체가 있지만 그 성능면에서 경쟁력은 없는 실정임.
- 흡열판 코팅 기술에 있어서 한국전기연구원에서는 저방사 투명 top 코팅 소재 및 차열 소재 연구를 진행 중이며, 집열판의 흡수율은 98% 이상, 방사율 7%(300℃) 이하를 달성하였지만, 이도 연구단계의 결과이며, 상용된 국내 기술은 성능면에서 떨어지는 것으로 판단됨.
- 기존의 태양열을 이용한 난방. 온수용 집열판 흡수장치는 빛을 열로 가장 많이 변환하고 열매체 전달이 잘 되는 금속판(알루미늄, 구리, 강철)으로 이루어져 있으며, 그 중 검은색 크롬의 경우 85 %의 흡수율을 갖음.

(2) 국외 현황

- 막증류 공정을 통한 해수담수화가 전 세계적으로 증가되고 있어 다국적 물기업인 GE, Veolia, Siemens 등의 EPC 업체뿐만 아니라, Memstill, Memsys, Scarab, Solar Spring, AquaStill, Hyflux 등 해외 모듈업체에서 막증류 기술 상용화를 위해 많은 노력을 기울이고 있으나, 아직까지 기술적용을 위한 초기 단계로서 파일럿 플랜트 수준의 연구가 진행 중으로 소규모의 막증류용 막/모듈만 개발된 상태이며, 대용량 플랜트 기술로서 실용화된 경우는 매우 적은 실정임.



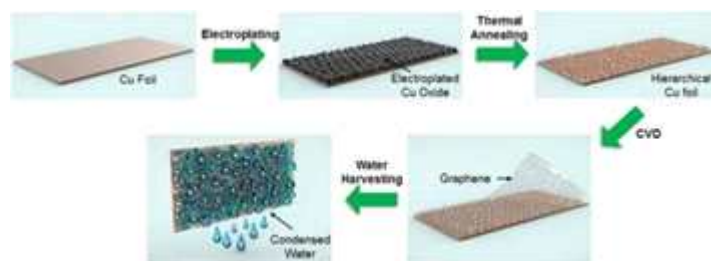
< 그림 1.2. 외국 제조사의 MD용 모듈 예 >

- 신재생에너지를 활용하여 해수담수화를 수행하고자 하는 노력은 해외에서 활발하게 연구 중에 있다. ACWA Power사는 200MW 규모의 태양열 플랜트 건설을 추진했으며 비용은 1kWh 당 0.06달러 수준이며, 이는 태양 에너지가 담수화 플랜트의 에너지원으로써 활용된 예임.
- AWT(Advanced Water Technology)사와 아벤고아(Abengoa)사는 사우디아라비아에 태양열 에너지를 이용한 세계 최초의 최대 규모 담수화 플랜트를 건설하는 사업에 공동 참여하여 6만m³/일의 용량을 생산하였다. 이 프로젝트는 태양전지(solar PV)를 이용한 플랜트로 담수화 공정에 필요한 에너지를 공급해 결과적으로 운전비용을 줄이는 효과를 얻음.
- 막증류는 극고온에서 운전되는 공정이 아니기 때문에 담수화나 수처리에 사용하는 경우 기존에는 소규모 시스템으로 저에너지 시스템 구성을 위한 태양열 시스템과 결합이 추진 중에 있다. EU의 프라운호퍼 에너지 시스템 연구소는 6m²의 태양열 집열기를 이용한 120~150L/일 용량의 해수담수화 장치를 개발하였으며, 싱가포르 국립수자원공사(PUB)는 막증류 기술을 이용한 담수화 패키지 시스템(MEMSTILL)을 개발했고, 네바다주립대학교(University of Nevada)는 태양열 온수지 시스템을 이용한 담수화 장치 실험에 성공한 바 있음.



< 그림 1.3. 미국 네바다주 리노에 설치된 지열을 이용한 MD 공정 파일럿 설비 >

- 집열기용 흡수체의 경우, 독일의 알라노드는 구리산화물, 알루미늄질화산소, 크롬 등 진공증착 코팅으로 높은 흡수율을 가지는 흡수체를 제작하였으며, 이는 고온과 염수에서 산화와 부식을 방지 목적으로 열전도도가 높은 부식에 강한 그래핀을 화학기상증착방법으로 구리(Cu)에 코팅한 기술로 고온(200℃)환경과 소금물 속에서도 5시간 동안 산화와 부식이 일어나지 않고 표면 소수성을 유지하는 기술을 보유하고 있음.



< 그림 1.4. 흡수체 제작 과정 >

- 포르투갈의 IMAT-Materials Institute에서는 Cr-CrO cermet 선택 흡수막은 DC 스퍼터링으로 제작하여, 막의 구조나 두께를 다르게 하여 흡수율에 대한 최적화 구조를 연구하였으며 이는 흡수율 95%를 갖는다. 이는 시드니대에서 연구된 Zr-ZrO cermet 선택 흡수막 보다 열적안정성이 안정하여 흡수막의 광퇴화가 천천히 일어남.
- 인도의 CSIR에서는 HfMoN/HfON/Al₂O₃ 흡수체를 스퍼터링으로 제작하였으며, 이는 높은 온도에서 오랜 시간동안 안정한 흡수체를 만드는 목적으로 600 °C에서 100시간 이상 안정하게 흡수율이 높은 상태를 유지할 수 있는 기술을 보유하고 있음.
- 도쿄대는 텅스텐 기판을 리소그래피 공정으로 honeycomb-array 패턴을 만든 후 알루미늄과 백금을 ALD로 증착하여 흡수율 92 %를 가지는 선택적 흡수막을 제작하였으며, 이는 700 °C에서 10시간 어닐링에도 안정한 기술을 개발하였음.

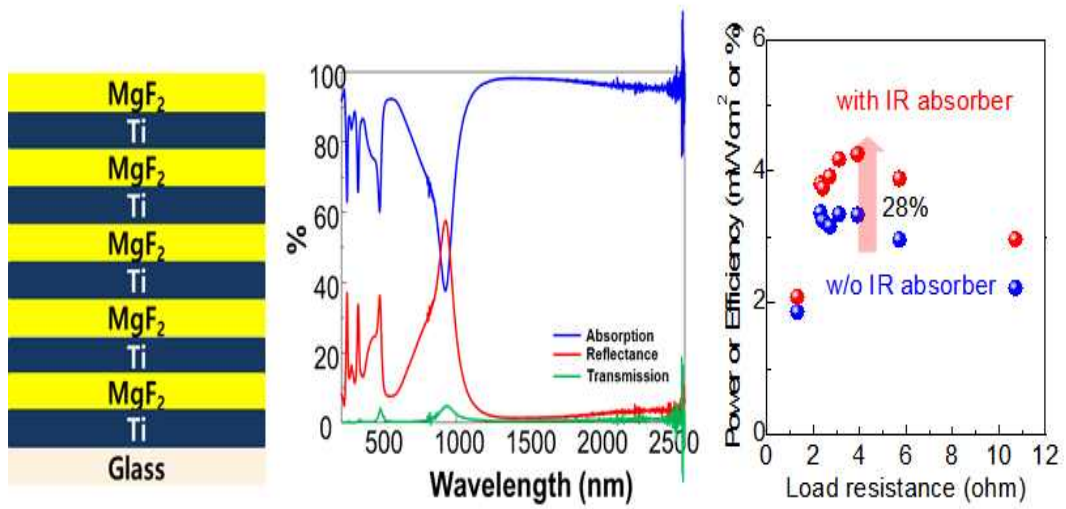
(3) 기술개발 성숙도

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☒	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☐	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☒	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

라. 연구개발의 중요성

- 급격한 산업화와 인구 증가로 인해 가용 수자원은 지속적으로 감소하고 있으며 세계적인 기후변화는 심각한 가뭄에 따른 물부족에 대한 우려를 가중시키고 있다. 최근 국내에서도 가뭄에 따른 지역적인 물부족 문제를 야기하여 금강물을 보령댐으로 공급하는 도수로 를 긴급히 설치하는 등 물부족 문제는 사회적인 이슈가 되고 있음.
- 이러한 지역적 가용수자원의 부족은 현재의 단일수원을 이용하는 중앙집중식 용수공급 시스템의 문제점 중 하나이다. 따라서 다양한 수원을 이용하여 소규모로 용수공급을 할 수 있는 분산형 용수공급 시스템으로의 전환이 필요한 시점임.
- 분산형 용수공급 시스템은 지표수, 지하수, 심지어 하수처리수 등 다양한 수질의 원수를 이용할 수 있어 처리수질에 대한 신뢰성이 매우 중요하며 다양한 원수를 이용하여도 일정 수준 이상의 처리수질을 유지하는 것이 매우 중요하다. 이러한 점에서 막증류는 분산형 용수공급 기술로 매우 적합한 기술임.
- 막증류는 기술 자체가 온도차에 따른 증기의 분압차(partial pressure difference)를 활용하기 때문에 온도차 유지를 위한 열원 등 에너지 집약도가 높으므로 추가적인 열원의 확보가 실용화를 위한 경제성을 좌우하게 된다. 따라서, 무한한 친환경 에너지인 태양에너지를 이용한 막증류 공정을 개발하는 것은 물부족 문제의 해결 및 재생에너지 사용에 의한 온실가스 감축효과 등의 많은 이점을 얻을 수 있음.
- 본 연구팀에서는 고성능의 태양열 흡수체 개발을 위한 흡열판 코팅 기술을 보유하고 있으며, 이는 기존 흡수체로 많이 쓰는 구리(Cu) 대신 메탈(metal)/유전체(dielectric mul

ti layer)의 멀티층을 사용하여 부식 등에 강하고 열용량이 큰 장점을 가지는 태양열 흡수체 개발을 통하여 막증류에 최적화된 태양열 집열기의 개발이 가능함.



<그림 1.5. 본 연구팀 보유 다층박막광흡수발열소재 개요 및 광흡수 특성>

- 따라서 이러한 고성능의 태양열 흡수체 소재기술을 접목하여 태양열을 열원으로 사용하는 막증류 기술을 실용화한다면 상당한 경쟁력을 갖출 것으로 판단됨.

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구 수행 내용

연구명	소제목	연구 목적	결과
(1) 다양한 원수 적용을 위한 막증류 기초연구	(가) 실험실 규모 막증류 시스템을 이용한 운전 특성 평가	막 재질, 온도차, pH, flow rate 등의 운전인자 변화에 따른 플럭스, 오염물질 제거율 등 막증류 운전 특성 평가	PTFE 증류막 선정. 다양한 수원의 운전결과 비슷한 플럭스 유지경향을 보임. 24시간 운전 시 플럭스 저감 확인. 먹는물 수질기준 만족.
	(나) 막증류 장기운전을 위한 막 오염 (파울링, fouling) 특성평가	막증류 시스템 이용, 원수를 장기간 운전하여 막증류에서 발생할 수 있는 막오염 사전 평가	유기물질과 Ca^{2+} 을 포함한 침전물에 막오염 발생 확인.
(2) 막오염 저감을 위한 고효율 전처리 방법 연구	(가) 전처리를 통한 파울링 제어	pH 조절, 응집/침전 등 전처리에 따른 막증류 공정의 영향 비교, 전처리를 통한 파울링 제어	중성 pH에서 플럭스 저하 확인, pH 4에서 플럭스 유지, pH 10에서 플럭스는 유지되나 값이 낮음 PACl 응집/침전을 통하여 플럭스 유지됨을 확인, 막 파울링 저감을 위한 유입 원수 전처리 방법(GF/C여과) 확인.

연구명	소제목	연구 목적	결과
(3) 막중류 모듈 개발	(가) 프로토타입 막중류 모듈 설계 및 제작	막중류 적정 운전인자 범위 산정결과를 바탕으로 프로토타입 막중류 모듈 설계 및 제작	프로토타입 막중류 모듈 설계 및 제작
	(나) 프로토타입 막중류 모듈 성능 평가	프로토타입 막중류 모듈의 성능 평가	플렉스는 DCMD가 유리하고 온도차 유지에서는 AGMD가 유리함을 확인, 파일럿 플랜트 막중류 모듈 설계를 위한 기초자료 도출
	(다) 파일럿 플랜트 막중류 모듈 개발 (scale-up에 따른 모듈 설계의 변경)	개선된 파일럿 플랜트 막중류 모듈 설계 및 제작	프로토타입에 비해 유효면적(0.14 m^2)이 5배 증가된 파일럿 플랜트 막중류 모듈 제작
	(라) 막중류 정수처리 모듈 제작 및 설계 변경	파일럿 플랜트 막중류 모듈 운전을 통한 최적 막중류 스택 개발	spacer 디자인 변경, 분리막 손상가능성 방지, 모듈 누수 방지 등 막 모듈 변경으로 최적의 막중류 스택 개발

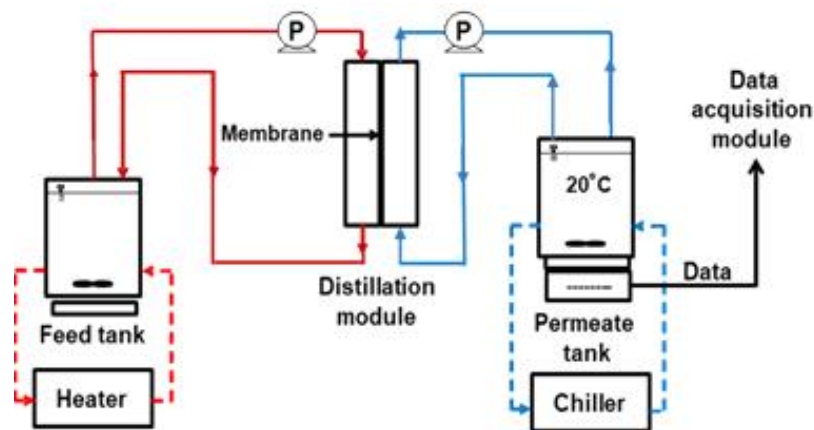
연구명	소제목	연구 목적	결과
(4) 태양열 집열기 개발	(가) 태양열 흡수체 소재의 최적 설계	태양에너지 흡수체 설계	막증류를 위한 태양에너지 흡수체 설계
	(나) 태양흡수체 소재의 개발 및 성능 평가	다층박막구조 광 흡수체 특성평가, 다층박막구조 기반의 광흡수체 시뮬레이션 등을 통한 최적 구조 도출	금속인 Ti와 유전체인 MgF_2 를 교차증착 시 효율 상승 확인 다층박막구조 최적 다층박막구조 도출
	(다) 태양열 흡수체 소재 열적 내구성	흡수체의 열적 안정성 및 내구성 평가	열적 안정성 및 내구성이 우수함
	(라) 태양열 흡수체 소재 최적화 방안마련	태양열 흡수체 소재 최적화를 위한 비반사도 향상 연구, 실리콘 기반 3D 광 흡수체 제작	0.4-1.6 μm 에서 95 % 이상의 높은 흡수도를 얻었음 실리콘 기판에 NaCl을 열증착하여 마이크로 스케일의 NaCl 입자를 제조 30분 이내에 62 $^{\circ}C$ 까지 온도가 상승
	(마) 태양열 집열기 개발	다층박막 흡수체를 적용하여 수온을 증가시킬 수 있는 솔라 집열기 개발	개발된 집열기는 종래의 태양열 집열기보다 현저하게 높은 집열 효율 달성
	(마) 태양열 집열기의 막증류 성능 평가	솔라 시뮬레이터를 이용한 막증류 시스템 성능평가(태양열 흡수체 효율 평가) 및 자연광을 이용한 막증류 시스템 성능평가	흡수체를 사용한 경우 플럭스의 증대를 보임. 흡수면적 증대를 위한 scale-up 필요.

연구명	소제목	연구 목적	결과
(5) 파일럿 플랜트 설치 및 운전	(가) 태양열 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 설치	태양열 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 설계 및 제작	테스테 베드 내에 태양열 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 설치
	(나) 고효율 라멜라 응집/침전 설비 개발	유입원수 내 부유물질 및 탁도 제거용 전처리 설비 설계 및 제작, 고형물 및 탁도 제거효율 분석	경사형 침전판이 설치된 일체형 고효율 라멜라 침전설비 제작, 70 % 이상의 고형물 및 탁도제거 효율 달성
	(다) 태양열 막증류 설비 및 운전 결과	파일럿 플랜트 운전을 수행하며 다양하게 일어나는 현장 조건의 변화에 따른 영향을 파악 다양한 막증류 스택구별 운전을 통한 최적 운전 방안 마련	최적 막증류 스택 구성
	(라) 태양열 막증류 설비 개선 및 운전 결과	증류 시스템 효율 극대화 선정된 프로토타입 막증류 시스템 효율적 운전 방안 도출	모듈의 막 증착을 통한 막증류 시스템 처리수 생산량 향상 향후 시스템 운전 최적화하여, 높고 안정적인 온도차 생성, 유지 및 열원공급을 통해 연구개발 목표를 달성

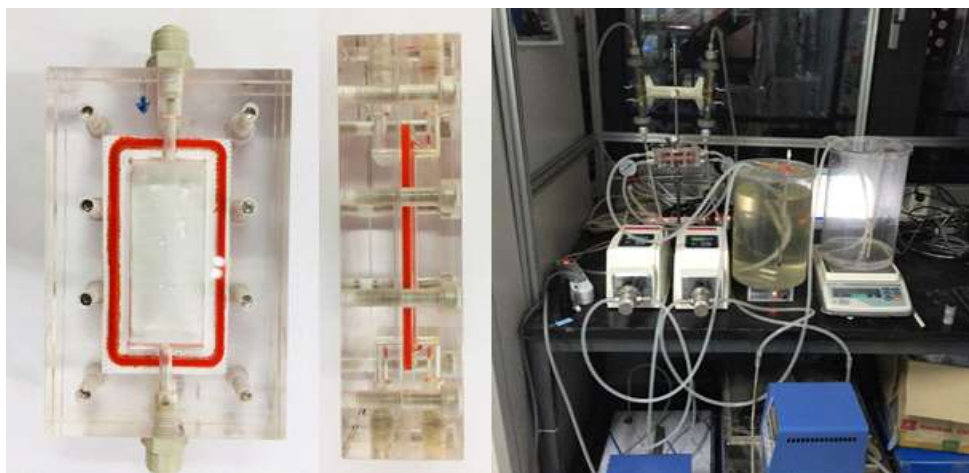
(1) 다양한 원수 적용을 위한 막증류 기초연구

(가) 실험실규모 막증류 시스템을 이용한 운전 특성 평가

- 막증류 기초실험을 위하여 그림 2.1 및 2.2와 같이 실험실 규모 막증류 시스템을 구성함. 대상 원수를 feed tank에서 가온하여 막증류 모듈로 공급이 되고, permeate tank는 증류수로 냉각하여 막증류 모듈로 공급됨. 온도는 heater와 chiller를 이용하여 온도차 30~50 °C를 유지함.



<그림 2.1. 실험실 규모 막증류 시스템 schematic diagram>



<그림 2.2. 막증류 공정 운전범위 산정을 위한 실험장치>

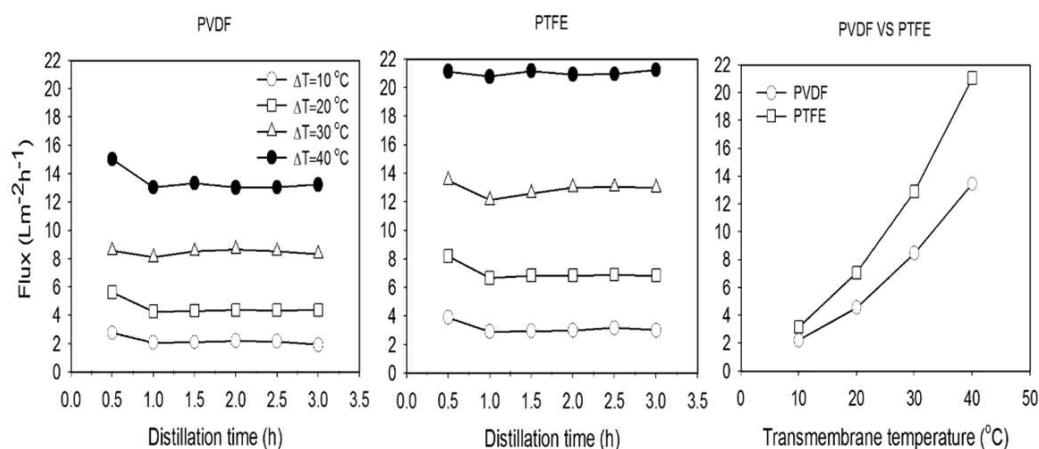
- 막증류 기초실험에 사용된 막증류용 분리막은 PVDF 및 PTFE 재질의 막을 사용하였으며 특성은 표 2.1과 같음.

<표 2.1. 사용 막증류용 분리막의 특성>

Parameter	PTFE	PVDF
Supplier	Millipore	Millipore
Material	Polytetrafluoroethylene	Polyvinylidene fluoride
Type	Flat sheet	Flat sheet
Nominal pore size (μm)	0.2	0.22
Porosity (%)	70	75
Thickness (μm)	175	125
Effective permeate area (cm^2)	32	32
Contact angle ($^\circ$)	142 ± 10	94 ± 2
Surface energy ($\times 10^{-3} \text{Nm}^{-1}$) ^b	9–20	30
Thermal conductivity ($\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$) ^c	~ 0.25	~ 0.17
LEP(Liquid Entry Pressure)	280 kPa	204 kPa
Support layer	PE(Polyethylene)	non

○ 오염물질 제거능 판단을 위하여 증류수에 희석된 만큼 연산하여 보정함. pH와 전기전도도(conductivity)는 Hach의 HQ40d meter에 pH 전극(PHC101)와 conductivity 전극(CDC401)를 이용하여 측정하였고, 탁도(turbidity)는 2100N(Hach, USA) 탁도계를 이용하여 측정함. 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)는 Shimadzu사의 TOC-L CPH를 사용하여 분석함. UV254는 Backman Coulter DU[®]730을 이용하여 254 nm파장에서 흡광도를 측정함. 부유성 고형물(Suspended Solids, SS_ES 04303.1b 부유물질), 총대장균군(ES 04701.3c 총대장균군-평판집락법), 분원성대장균군(ES 04702.1d 분원성대장균군-막여과법)은 공정시험방법(환경부 수질오염공정시험기준)에 의하여 분석함.

○ 막 재질에 따른 막증류 성능을 비교한 결과, 그림 2.3에 보듯이 재질별 온도차에 따른 플럭스의 경우 10 $^\circ\text{C}$ 에서는 막 재질별 플럭스의 차이가 1 LMH 정도로 낮은 편이지만, 온도차가 늘어나 40 $^\circ\text{C}$ 에서는 막 재질별로 9 LMH 차이가 나는 것으로 나타남. 따라서 PTFE 막을 막증류용 모듈에 적용하기로 함.

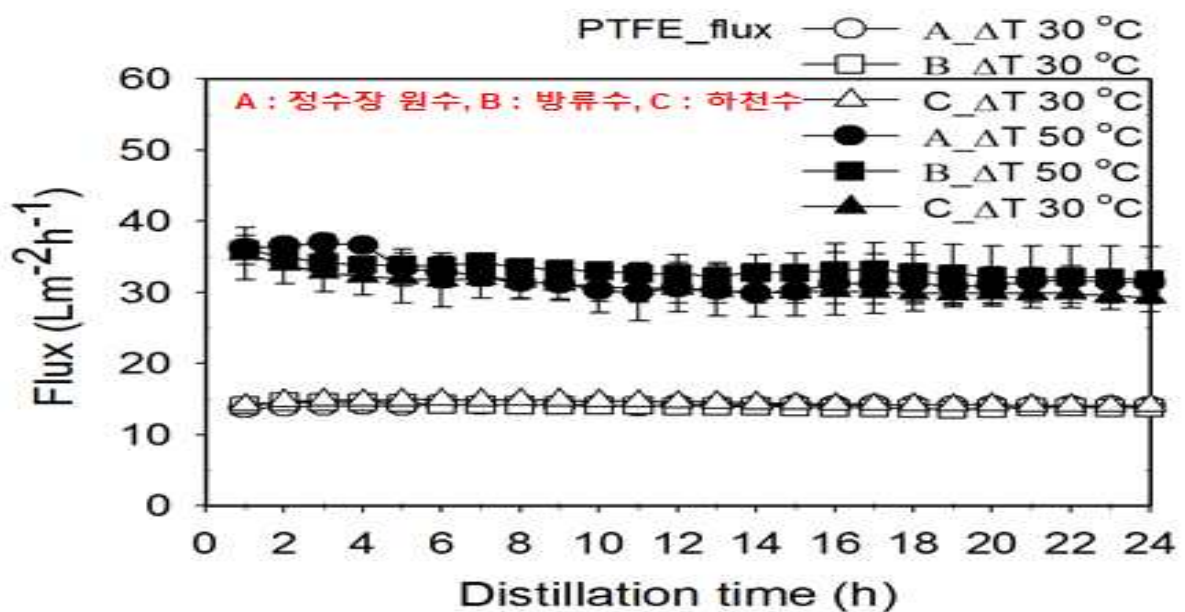


<그림 2.3. 막 재질별 온도차에 따른 플럭스 비교>

- 정수장 원수, 하수처리수(방류수), 하천수 등 다양한 원수(그림 2.4 참조)를 이용하여 온도차별로 PTFE 증류막에서 플럭스의 차이를 비교함. 정수장 원수, 하수처리수(방류수), 하천수 모두 안정적인 플럭스를 보이며 온도차 50 ℃에서 높은 플럭스를 보임. 온도차 50 ℃ 조건에서는 초기 플럭스에 비하여 24시간 후의 플럭스가 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 증류막의 오염으로 인한 것으로 보이며 이를 저감할 수 있는 방법이 필요함.



<그림 2.4. 다양한 수원 취수 장소>



<그림 2.5. 다양한 원수별 온도차에 따른 플럭스 비교>

○ 다양한 원수로서 매곡 정수장 원수, 의정부 하수처리장 방류수, 중랑천에서 취한 하천수를 대상으로 온도차 30 ℃, 50 ℃에서 막증류를 시행한 결과 전반적으로 온도차가 큰 경우에 우수한 수질을 나타냄. 이온성 물질의 경우 막증류를 통하여 대부분 배제되어 전기전도도는 95 % 이상 낮아짐. 부유성 입자물질인 SS는 완벽히 배제되며 탁도는 먹는물 수질기준 보다 낮은 수치를 보임. 총 유기탄소 또한 59~85 %에 가까운 제거율을 보임. 이온성 물질은 암모니아성 질소를 제외하고 모두 효과적으로 배제되었음.

<표 2.2. 다양한 수원별 온도차에 따른 수질변화>

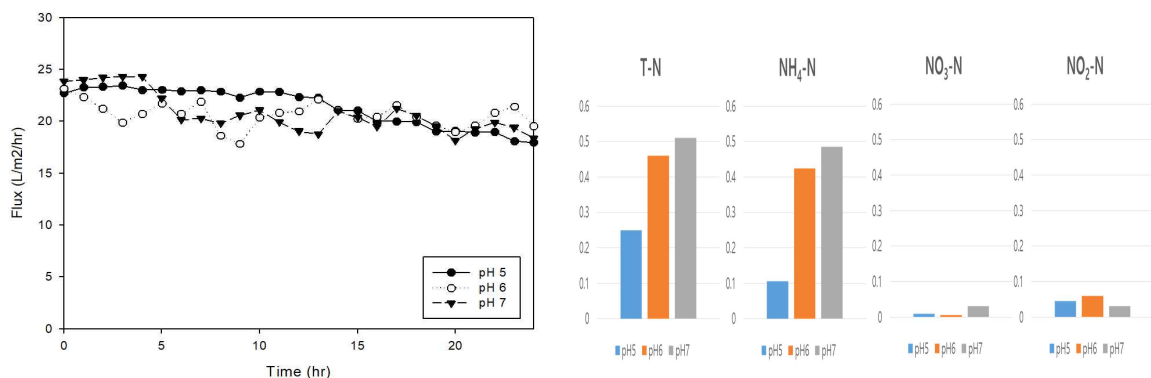
항목	매곡			의정부			중랑천			먹는물 수질기준
	Influent	Δ T 30℃	Δ T 50℃	Influent	Δ T 30℃	Δ T 50℃	Influent	Δ T 30℃	Δ T 50℃	
Conductivity (μ S/cm)	285	16.10	5.20	518	6.03	2.59	506	8.18	9.29	-
SS (mg/L)	13.2	-	-	2.40	-	-	3.20	-	-	-
Turbidity (NTU)	6.21	0.51	0.15	0.88	0.31	0.18	1.19	0.25	0.22	0.50
TOC (mg/L)	1.73	0.71	0.52	2.29	0.86	0.50	2.32	0.36	0.39	-
T-N (mg/L)	2.04	0.58	0.26	9.14	0.88	0.67	8.63	0.89	0.80	-
NO ₃ -N (mg/L)	1.19	0.02	0.01	6.73	0.02	N.D.	6.00	0.01	0.00	10
NH ₄ -N (mg/L)	0.01	0.60	0.21	0.02	0.21	0.21	0.28	0.58	0.51	0.50
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	26.36	0.93	0.36	28.38	N.D.	N.D.	27.63	0.04	0.05	200
Cl ⁻ (mg/L)	18.82	1.36	0.41	75.05	0.23	0.14	66.48	0.17	0.09	250

○ 매곡 정수장 원수, 의정부 하수처리장 방류수, 중랑천 하천수의 다양한 원수를 대상으로 막증류 후 처리수의 수질분석 결과 이온성 물질의 경우 수도수 및 병물에 비하여 수질이 우수하였으며 모든 항목에서 먹는물 수질기준을 만족하는 수질을 확인함으로써 향후 다양한 수질을 갖는 원수를 대상으로 막증류를 통하여 먹는물 생산의 가능성을 확인함.

<표 2.3. 다양한 수원별 처리수 수질(온도차 30 ℃의 경우) 및 수도수, 병물, 먹는물수질 기준과의 비교 >

Items	WTP Influent	River Water	STP Effluent	Tap Water	Portable Water	Drinking Water Standards
pH	6.71	6.49	6.45	7.20	7.75	5.8~8.5
Conductivity (μ S/cm)	2.63	2.86	6.03	193.8	125.9	-
Turbidity(NTU)	0.14	0.16	0.18	0.15	0.10	0.5
SCOD	5.129	5.08	2.69	1.94	0.807	-
DOC	1.898	0.88	0.86	0.87	0.574	5
UV254	0.004	0.008	0.001	0.007	0.006	-
T-N	N.D.	0.89	0.88	0.1	3.36	-
NH ₄ -N	0.03	0.298	0.21	N.D.	N.D.	0.5
NO ₂ -N	N.D.	0.03	0.04	0.025	0.224	-
NO ₃ -N	N.D.	0.01	0.02	1.71	2.2	10
T-P	<0.06	<0.06	<0.06	0.01	0.02	-
PO ₄ -P	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Total E. Coli	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Fecal Coliform	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
SO ₄ ²⁻	0.02	0.04	N.D.	15.5	9.86	200
Cl ⁻	0.308	0.23	0.23	19.2	1.98	250
Ca ²⁺	-	-	<1.0	19.7	17.9	-
Mg ²⁺	-	-	<0.1	3.84	2.01	-
Na ⁺	-	-	<1.0	7.93	7.74	200
Fe ²⁺	-	-	<0.05	<0.05	<0.05	0.3
Mn ²⁺	-	-	<0.01	<0.01	<0.01	0.05
K ⁺	-	-	<0.1	2.11	1.66	12

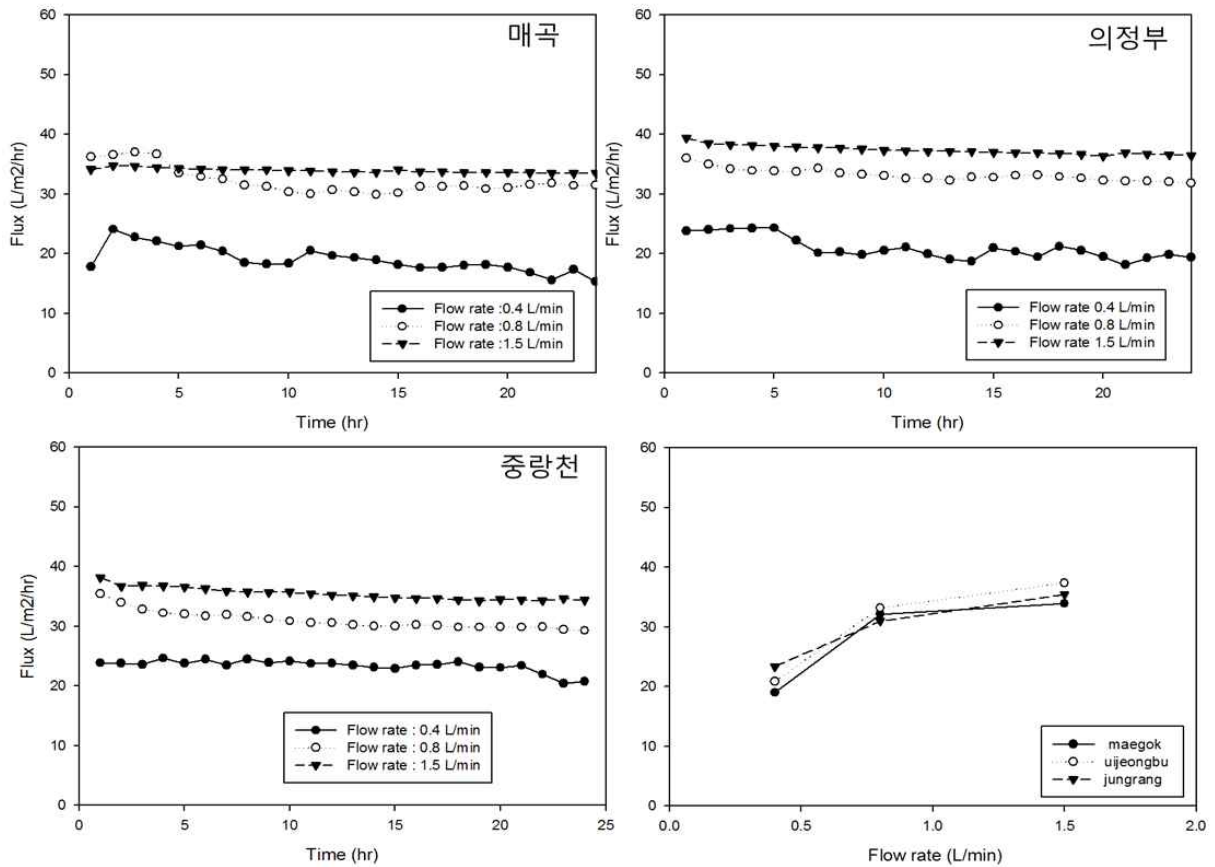
○ pH 5, 6, 7에서 막증류를 시행한 결과 pH에 관계없이 비슷한 플럭스를 보임. 다만 암모니아성 질소의 경우 pH에 영향을 받아 낮은 pH에서 암모니아성 질소의 농도가 낮게 검출됨. 향후 장기운전을 위하여 처리수의 암모니아 농도를 낮추는 방안이 필요할 것으로 보임.



<그림 2.6. pH 변화에 따른 플럭스 및 수질분석 비교>

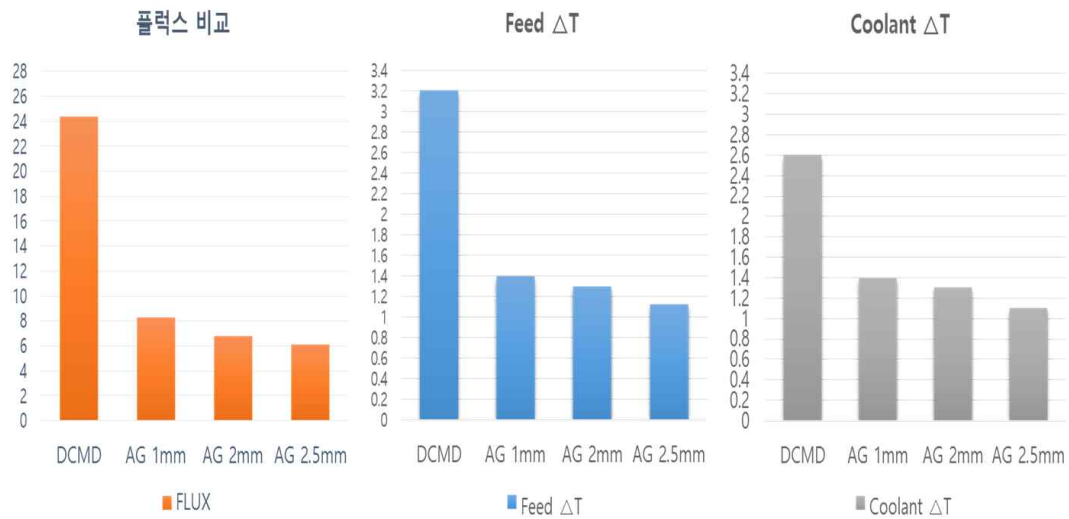
○ 다양한 원수로 매곡 정수장, 의정부 하수처리장, 중랑천에서 취한 시료로 flow rate에 따른 플럭스를 비교함. flow rate가 증가함에 따라 flux도 증가하나 0.8 L/min이상의 flow rate에서는 증가정도가 감소하여, 향후 장기운전에서는 1.0~1.5

L/min가 적합한 flow rate로 판단됨.



<그림 2.7. 다양한 수원별 Flow rate에 따른 플럭스 비교>

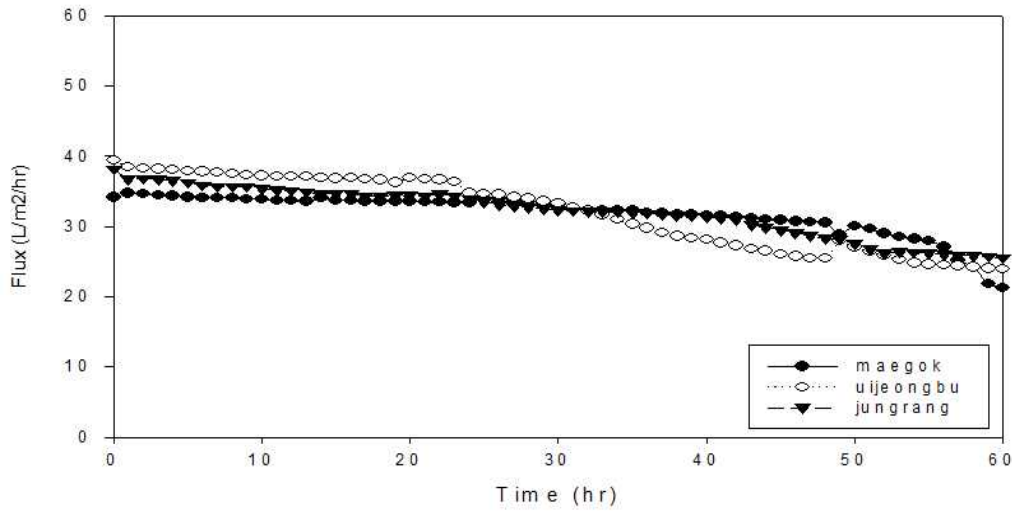
○ 막증류 모듈 구성, 즉 집적접촉식 막증류(DCMD) 및 공기간극식 막증류(AGMD)에서 공기간극의 거리에 따른 플럭스 및 온도 손실량을 비교한 결과 DCMD의 경우, AGMD에 비하여 월등히 높은 플럭스를 보이지만, 그만큼 온도 손실량도 많아서 지속적으로 온도차를 유지하여 운전함에 있어 어려움이 있고 그에 따라 플럭스의 감소가 발생할 것으로 판단이 됨. AGMD의 공기간극 거리가 늘어날 수록 플럭스 및 온도손실도 감소하는 것으로 나타나 향후 효율적인 막증류 모듈 구성의 검토가 필요할 것으로 판단됨.



<그림 2.8. DCMD & AGMD 플럭스 및 온도 손실량 비교>

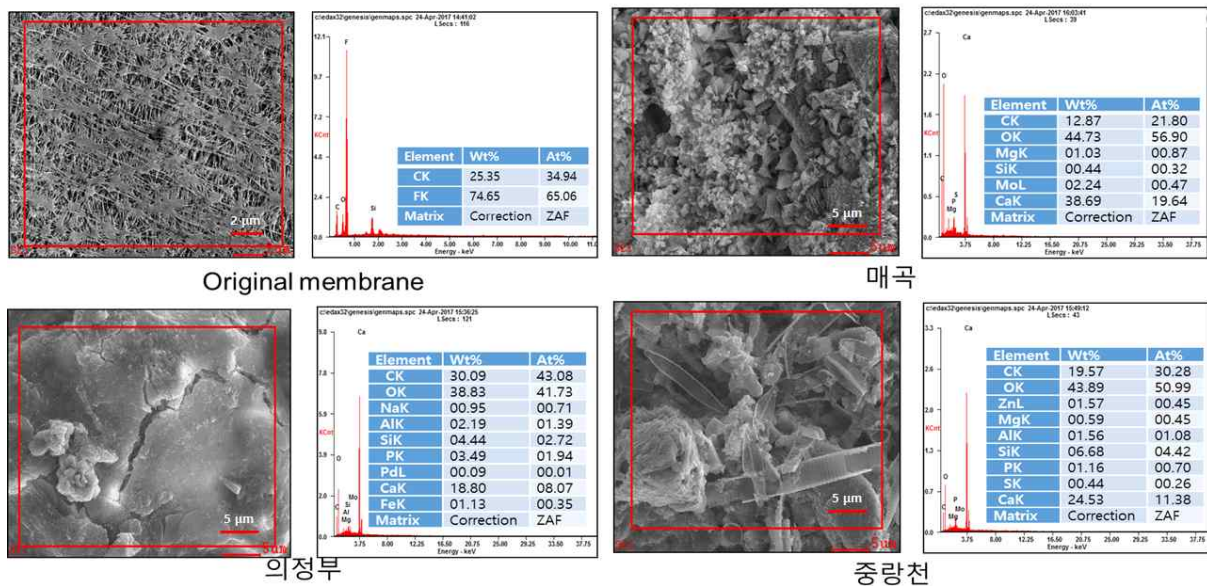
(나) 막증류 장기운전을 위한 막 오염 (파울링, fouling) 특성평가

- 증류막 표면의 무기물질 fouling을 평가하기 위해 증류막 표면을 전자주사현미경 (FE-SEM-EDS, S-4200, Hitachi, Japan)으로 측정함. 유기물질 fouling을 측정하기 위해 F-EEM (Fluorescence Excitation Emission Matrix, Hellma, USA)로 tryptophan protein-like: Peak A (ex / em = 270-280 / 320-350), aromatic protein-like: Peak B (ex / em = 220-240 / 320-350nm), humic-like: Peak C (ex / em 330-350 / 420-480nm), fulvic acid -like: Peak D (ex / em = 250-260 / 380-480nm)의 4가지 성분으로 분석하였다. 또 Biopolymers (> 20 kDa), humic substances ((1-20) kDa), building blocks ((300-500) Da), low molecular weight (LMW) acids (< 350 Da), and LMW neutrals (< 350 Da)의 5가지 유기물을 LC-OCD/UVD (DOC-LABOR, Karlsruhe, Germany)로 유입수와 막증류 유출수를 측정하여 비교하였음.
- 운전시간이 경과함에 따라 모든 원수에서 플럭스의 감소가 관찰되어 향후 전처리 공정 등을 통한 안정적인 플럭스 유지가 가능한 장기운전 방안모색이 필요함.

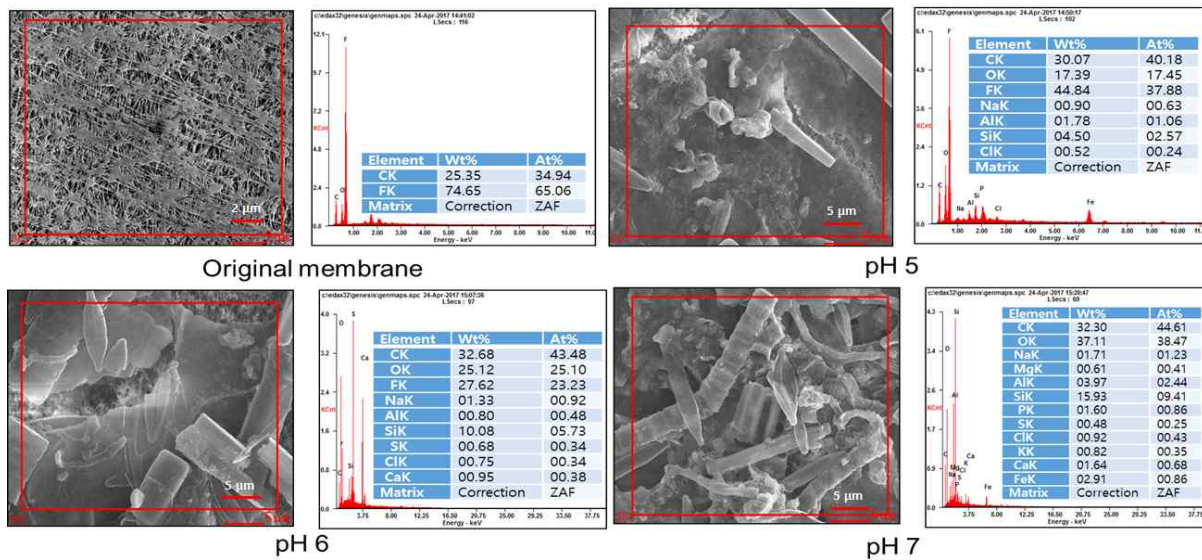


<그림 2.9. 다양한 수원별 장기운전에 따른 플럭스 비교>

○ SEM-EDS 분석 결과 매곡정수장, 의정부 하수처리장, 중랑천 원수를 증류하였을 때 증류막 표면에 Ca^{2+} 가 높은 비율로 검출된 것으로 보아 막 파울링을 일으키는 주요 물질은 Ca로 판단됨, 향후 장기운전을 위해서는 전처리 등 Ca^{2+} 컨트롤을 통한 운전조건 도출이 필요함.



<그림 2.10. 다양한 수원별 장기운전에 따른 표면분석 이미지(측정장비:FE-SEM-EDS, S-4200. Hitachi, Japan)>

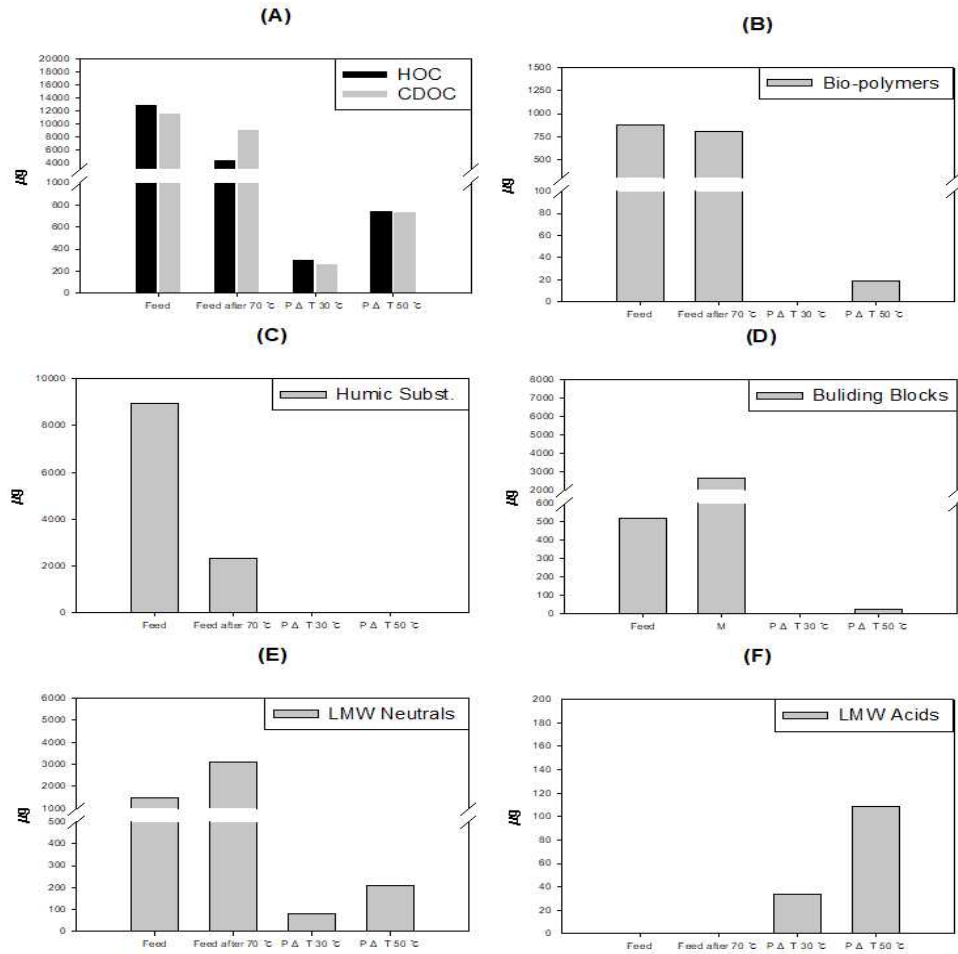


<그림 2.11. 다양한 수원별 pH 변화에 따른 표면분석 이미지(측정장비:FE-SEM-EDS, S-4200. Hitachi, Japan)>

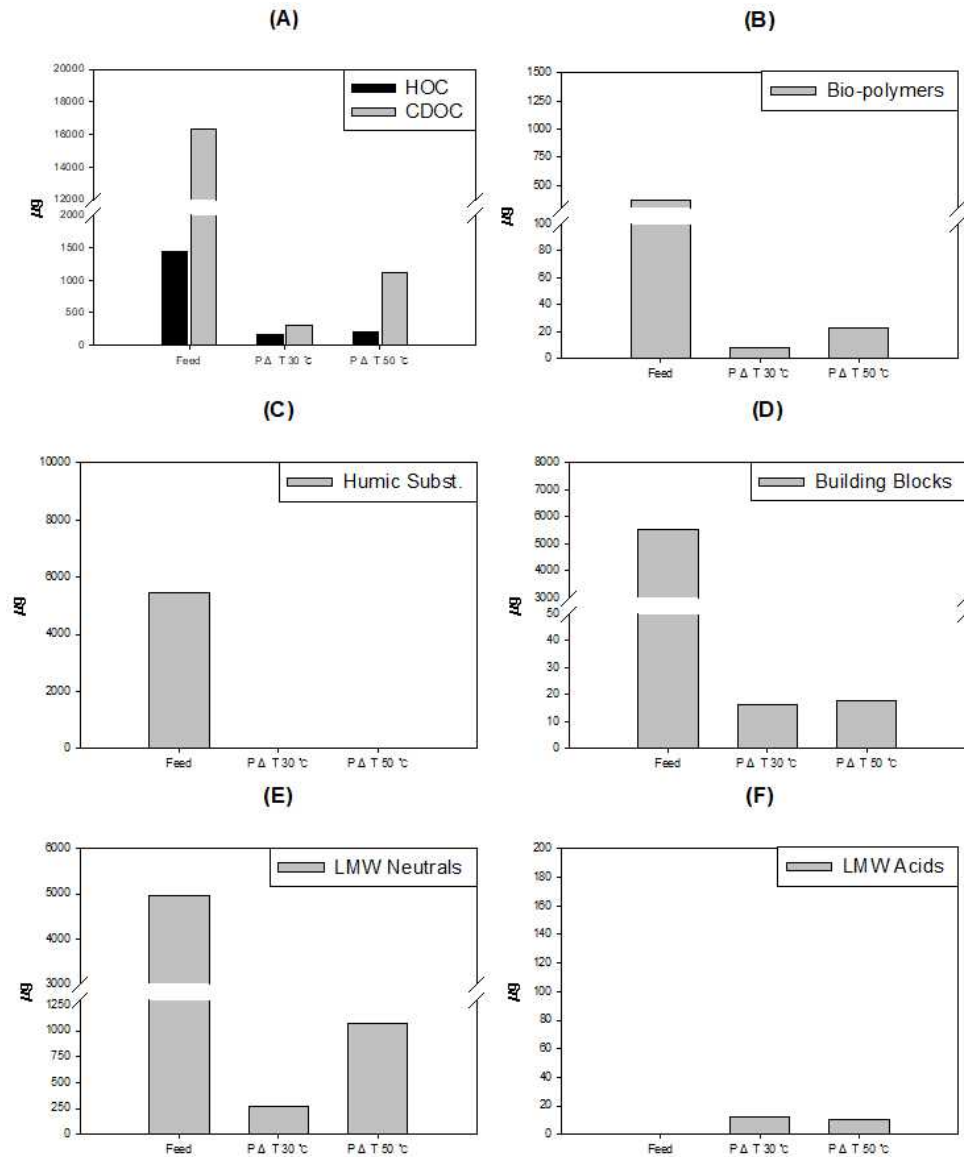
○ 유기성 오염물질의 제거양상을 비교하여 어떤 유기물질들이 증류막을 오염 시키는 지 알아봄. 매곡정수장, 의정부 하수처리장, 중랑천 사료를 이용하여 막증류 전후로 LC-OCD와 F-EEM을 이용하여 분석함.

○ 그림 2.12에서 2.17까지를 보면 대부분의 유기물질들이 막증류를 통하여 90 % 이상 제거되는 양상을 보임. 제거된 유기물질은 feed water에 농축되며 이는 물의 액체에서 기체로 상전이하는 에너지 요구량을 증대시켜 증기발생량을 저하시킨 것이 하나의 원인으로 보임. 또, 그림 2.12에서 2.14까지 (A)의 HOC (소수성유기탄소, hydrophobic)와 CDOC (친수성유기탄소, hydrophilic)의 분석결과를 보면, 농축되는 소수성 유기물질이 그림 2.8의 SEM 분석과 같이 소수성을 띄는 증류막 표면에 침착되어 증기의 흐름을 방해하거나 막표면의 물성을 변화시켜 flux의 저해를 야기한 것으로 보임.

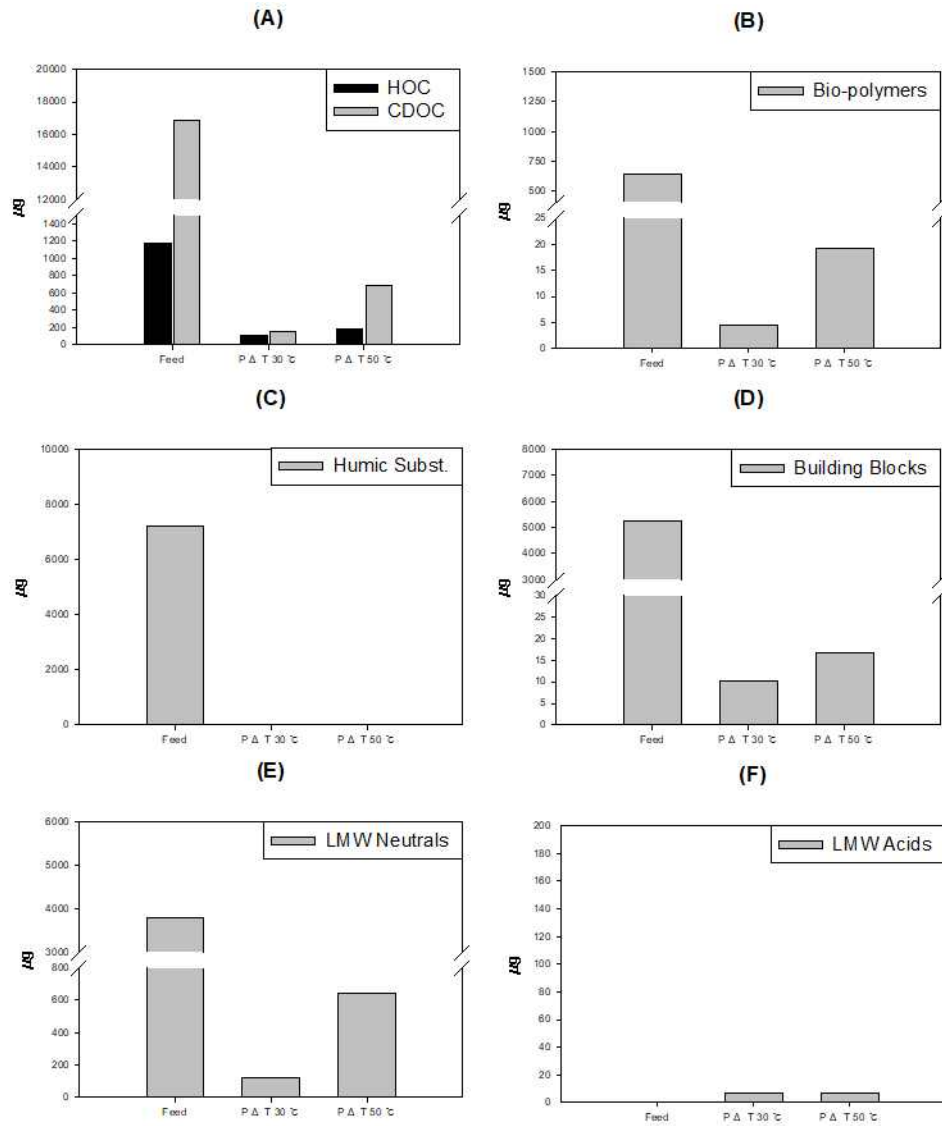
○ 그림 2.15부터 2.17까지 F-EEM 결과를 보면 ΔT 30 °C와 50 °C인 막증류수 (B)와 (C)에서 단백질류가 공통적으로 검출됨. 이는 소수성을 띄는 작용기를 가지는 일부 단백질류가 소수성 증류막 표면에 붙고 증기의 이동이나 운전펌프의 구동 압력에 의하여 소량의 물이 증류막을 직접적으로 통과한 것으로 보임. 그 결과, 막증류를 거친 증류수에 일부 유기물질이 검출된 것으로 판단됨.



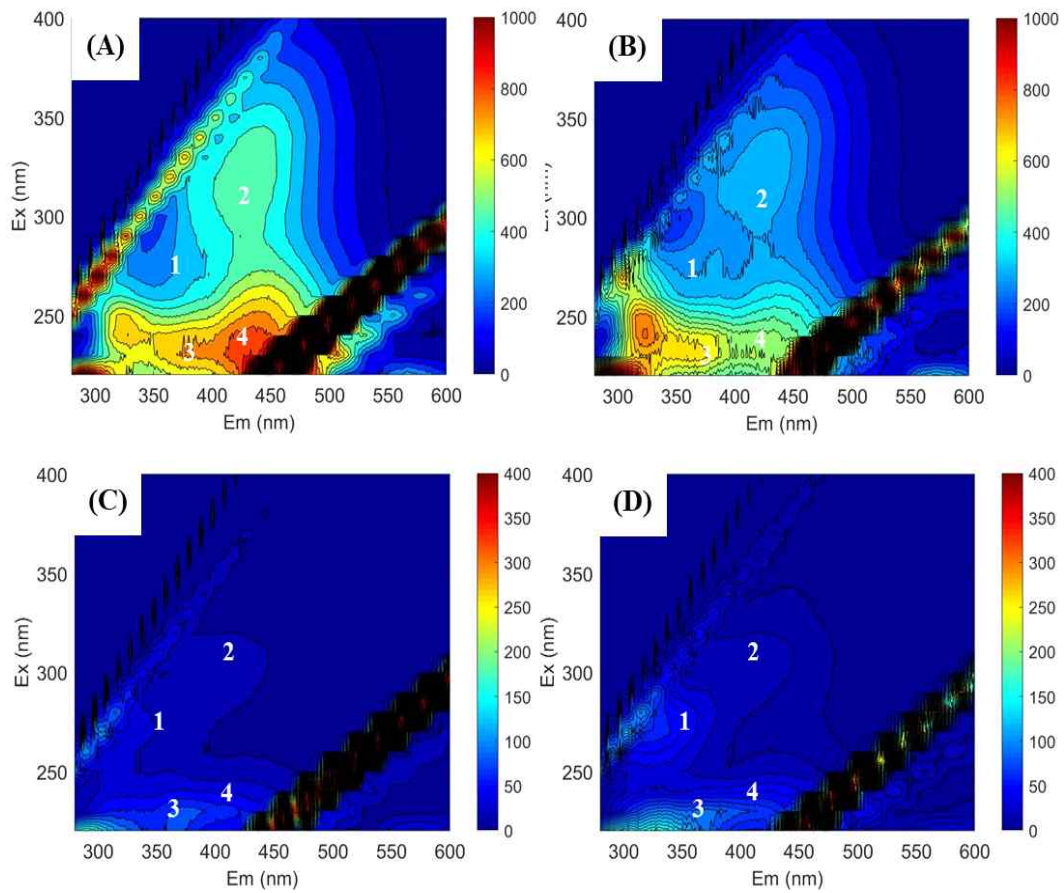
<그림 2.12. 정수장 원수를 사용한 feed와 permeate water의 LC-OCD 분석 결과. (A)DOC, (B)bio-polymers, (C)humic substance (D)building blocks, (E)LMW neutrals, (F)LMW acids>



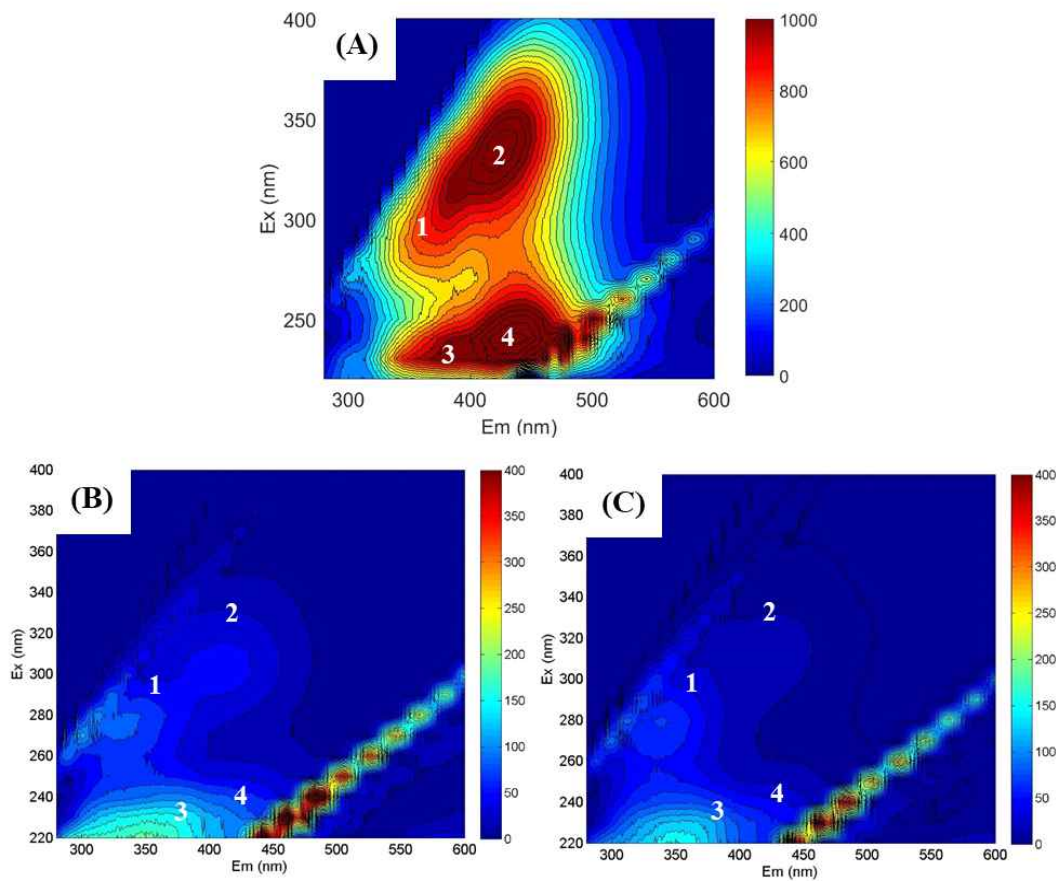
<그림 2.13. 하수처리장 방류수를 사용한 feed와 permeate water의 LC-OCD 분석 결과.
(A)DOC, (B)bio-polymers, (C)humic substance (D)building blocks, (E)LMW neutrals, (F)LMW acids>



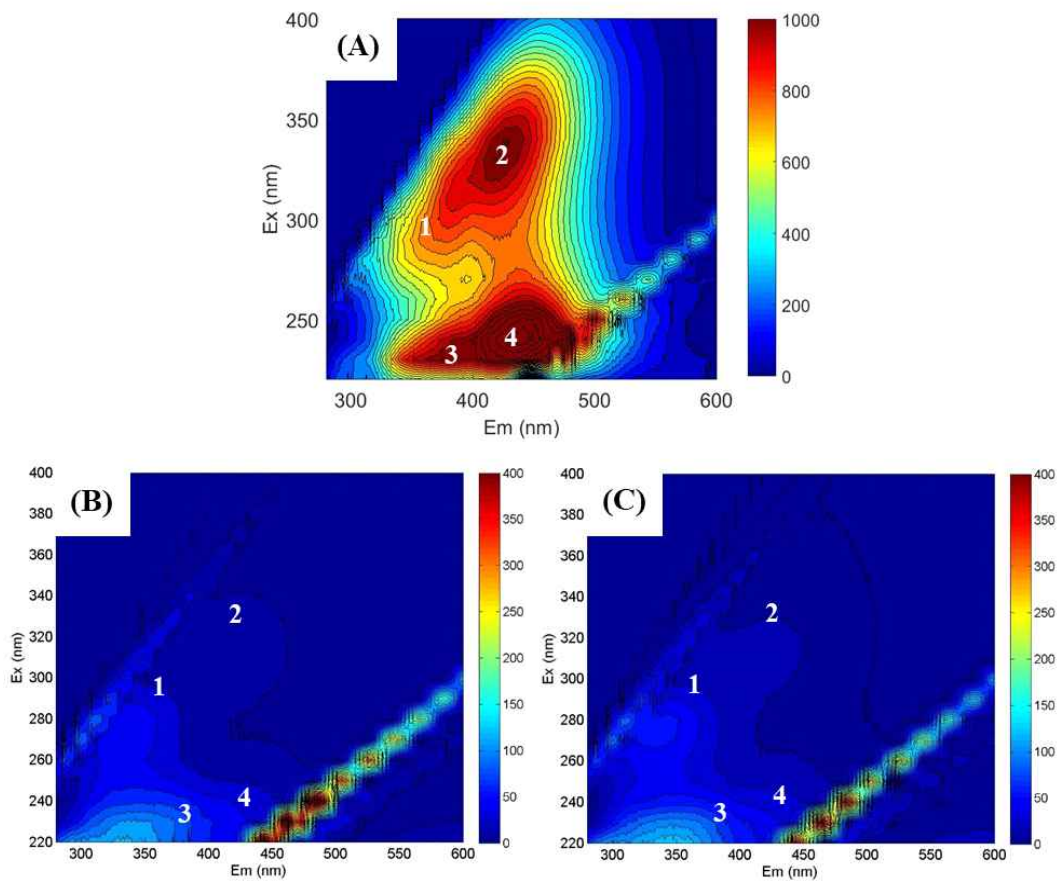
<그림 2.14. 하천수를 사용한 feed와 permeate water의 LC-OCD 분석 결과. (A)DOC, (B)bio-polymers, (C)humic substance (D)building blocks, (E)LMW neutrals, (F)LMW acids>



<그림 2.15. 정수장 원수를 사용한 feed와 permeate water의 F-EEM분석 결과.
 ((A)feed water, (B)feed water after increasing the temperature to 70 °C,
 (C)permeate water at ΔT 30 °C (D)permeate water at ΔT 50 °C. [Peak 1:
 Tryptophan protein-like, Peak 2: Humic acid-like, Peak 3: Aromatic protein-like,
 Peak 4: Fulvic acid-like]>



<그림 2.16. 하수처리장 방류수를 사용한 feed와 permeate water의 LC-OCD 분석 결과.
 (A)feed water, (B)permeate water at ΔT 30 °C (C)permeate water at ΔT 50 °C.
 [Peak 1: Tryptophan protein-like, Peak 2: Humic acid-like, Peak 3: Aromatic protein-like, Peak 4: Fulvic acid-like]>

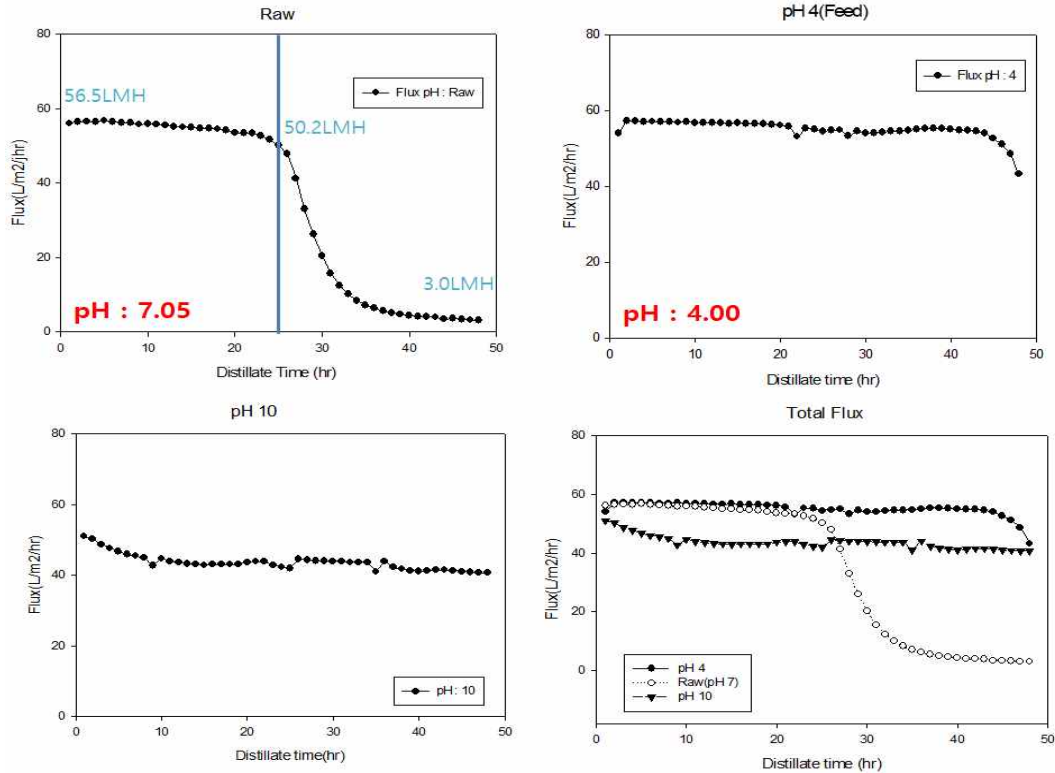


<그림 2.17. 하천수를 사용한 feed와 permeate water의 LC-OCD 분석 결과. (A)feed water, (B)permeate water at ΔT 30 °C (C)permeate water at ΔT 50 °C. [Peak 1: Tryptophan protein-like, Peak 2: Humic acid-like, Peak 3: Aromatic protein-like, Peak 4: Fulvic acid-like]>

(2) 막오염 저감을 위한 고효율 전처리 방법 연구

(가) 전처리를 통한 파울링 제어

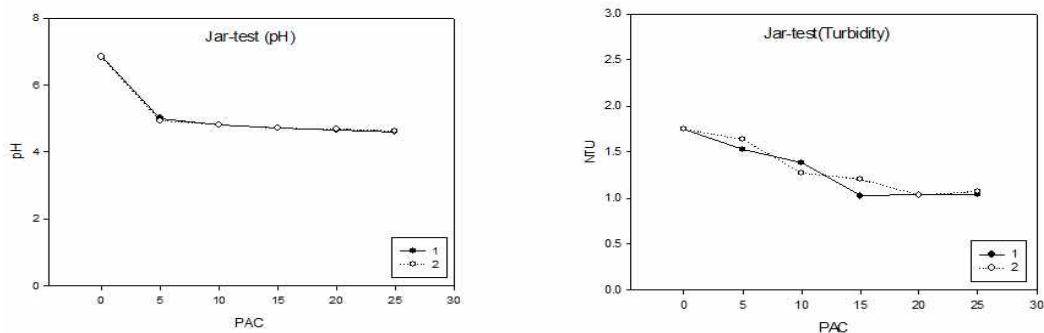
○ pH 변화에 의한 막오염 제어 평가를 위해 pH는 4, 7, 10으로 하여 막증류 플럭스를 관찰함. 응집/침전법은 정수장에서 주로 사용하는 17% PACl ($[Al_2(OH)_nCl_{16-n}]$, KG chemical)을 이용하여 최적 응집제량을 선정하는 실험을 반복 진행하고, 그에 따라 변화하는 플럭스를 측정함. 응집/침전의 영향을 살펴보기 위해 원수와 GF/C 여과, 응집/침전, 응집/침전 후 GF/C여과를 통하여 막증류 공정 에 미치는 영향을 알아봄.



<그림 2.18. pH 4, 7, 10 변화에 따른 플럭스 >

○ pH 4 조건에서는 세 조건 중에서 높은 플럭스를 유지하며 안정적으로 유지하는 경향을 보임. pH가 높으면 플럭스는 유지되는 반면 낮은 플럭스가 발생하는 것을 확인하였으며, 이는 수산화물에 의한 공침으로 인해 야기된 것으로 보임.

○ 응집/침전 전처리법에 의한 막오염 제어 평가함.

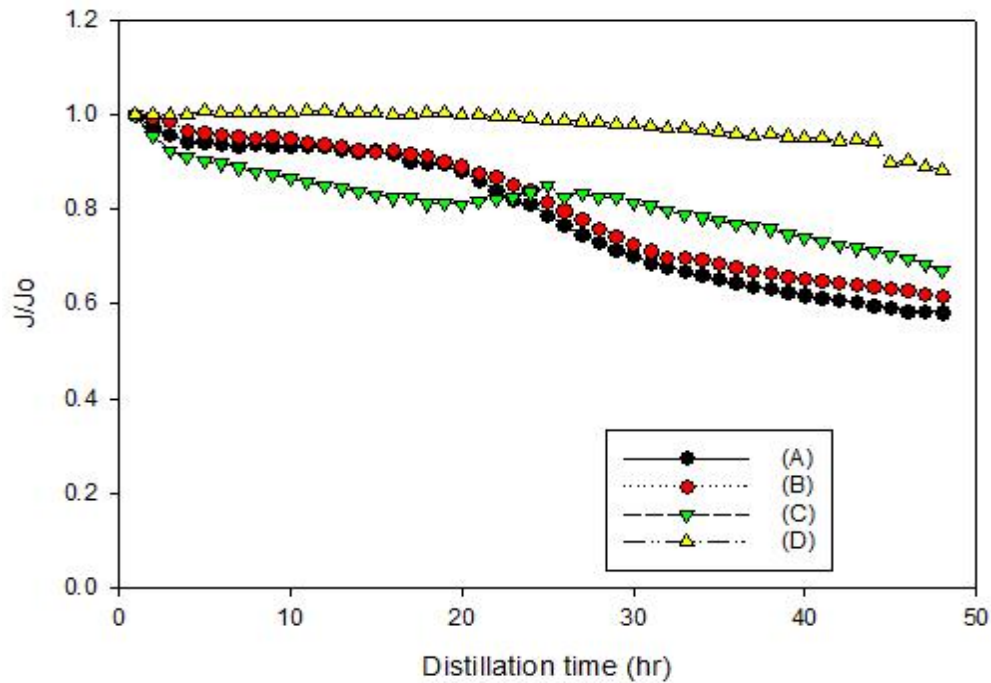


PAC		0ppm	5ppm	10ppm	15ppm	20ppm	25ppm
pH	1	6.85	5.01	4.81	4.72	4.67	4.61
	2	6.85	4.94	4.82	4.71	4.69	4.63
탁도	1	1.75	1.53	1.39	1.02	1.03	1.04
	2	1.75	1.63	1.27	1.21	1.03	1.07

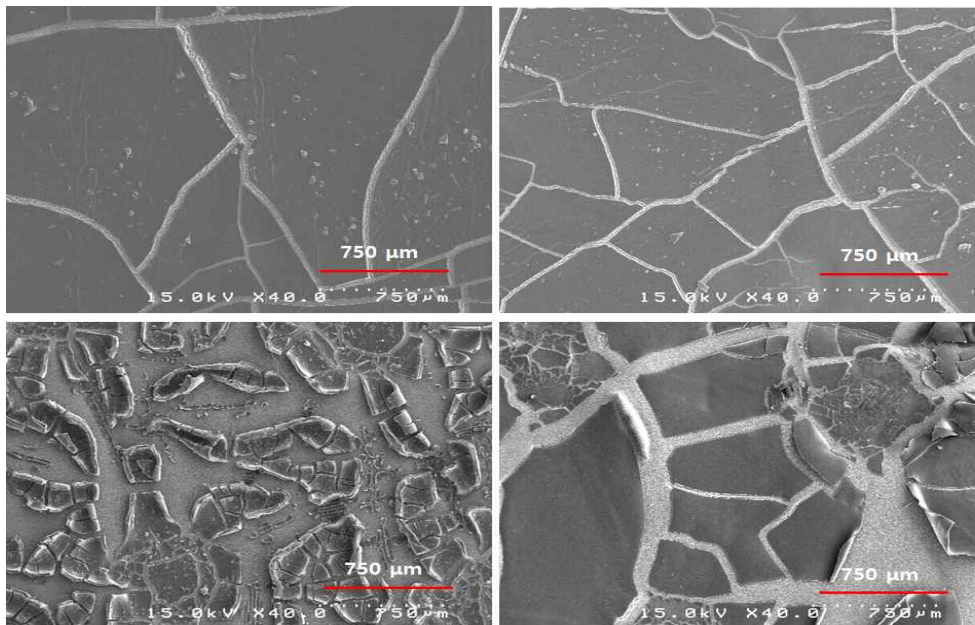
<그림 2.19. 하천수 처리를 위한 Jar-test를 이용한 응집제량 선정(1.2: 반복실험 횟수)>

○ Jar test를 통하여 최적의 PAC의 주입량을 산정(반복 실험을 통하여 최적 응집제 주입조건 산정)하여 하천수를 처리후 막증류를 진행함. 아래 그림과 같이 응집/

침전 후 GF/C로 여과하여 전처리 하였을 때 안정적인 플럭스를 가지는 것을 확인함.

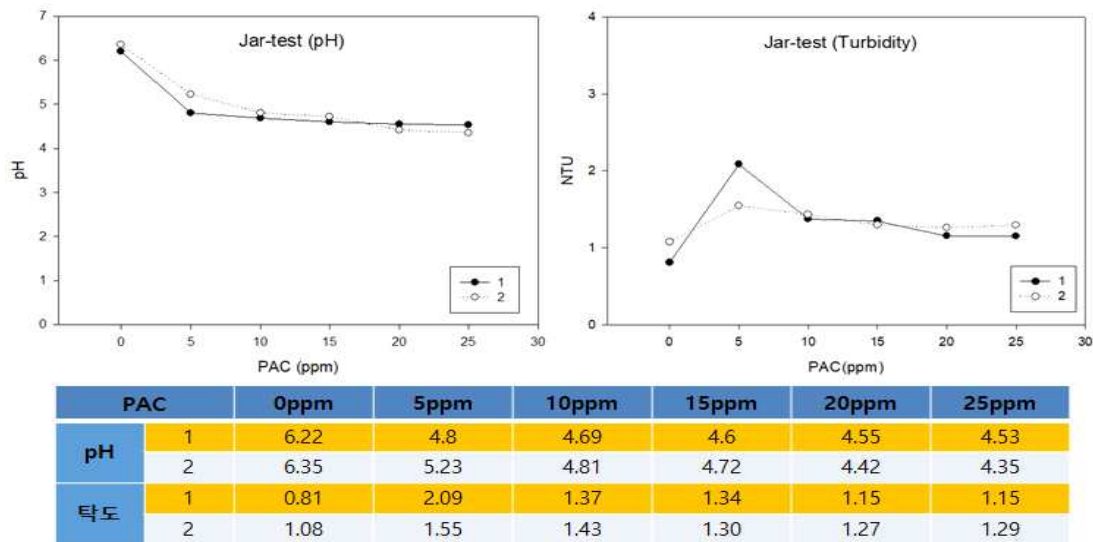


<그림 2.20. 하천수 처리 시 전처리 변화에 따른 플럭스 변화. (A) 원수, (B) GF/C 여과, (C) 응집/침전, (D) 응집/침전 후 GF/C 여과>



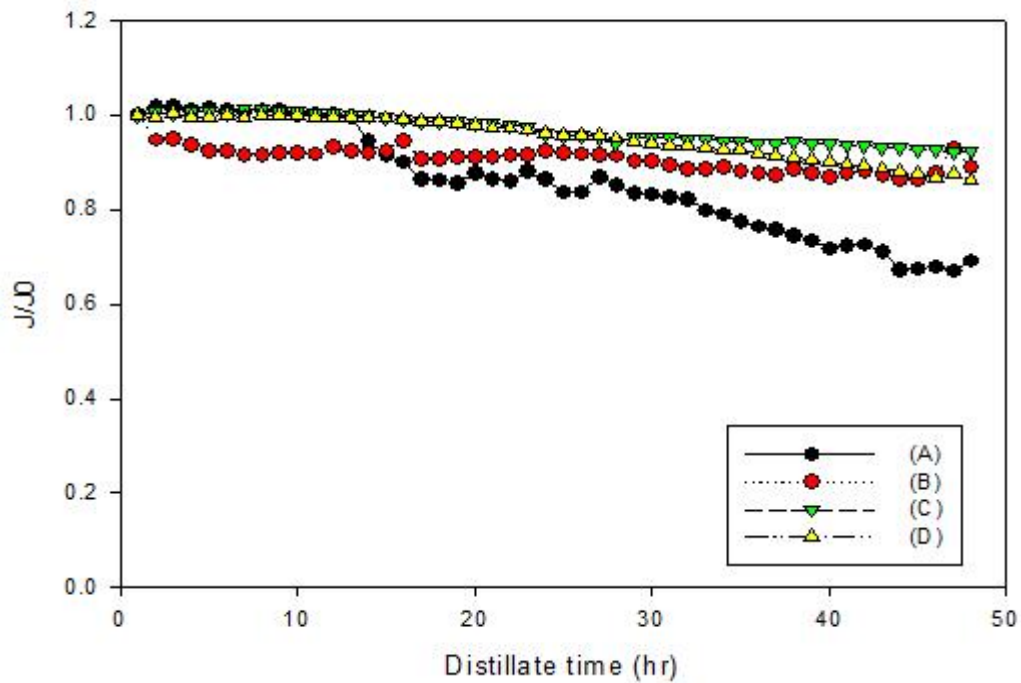
<그림 2.21. 하천수 처리 시 전처리 변화에 따른 멤브레인 표면. (좌상) 원수, (우상) GF/C 여과, (좌하) 응집/침전, (우하) 응집/침전 후 GF/C 여과(측정장비:FE-SEM-EDS, S-4200. Hitachi, Japan)>

- 증류막 표면의 무기물질 분석을 위해 SEM-EDS 분석을 진행하였고, 막증류 전후의 유기물질분석을 위해 LC-OCD와 F-EEM 분석을 진행함.
- 멤브레인 표면의 파울링이 덜 발생한 것을 확인할 수 있었으며, 기존 Ca의 화합물에 대한 파울링이 적게 발생하는 것을 확인함 (표 2.4 참조).
- 하수처리장 방류수 또한 jar test를 통하여 최적 주입량을 산정(반복 실험을 통하여 최적 응집제 주입조건 산정)하고 막증류를 진행함.

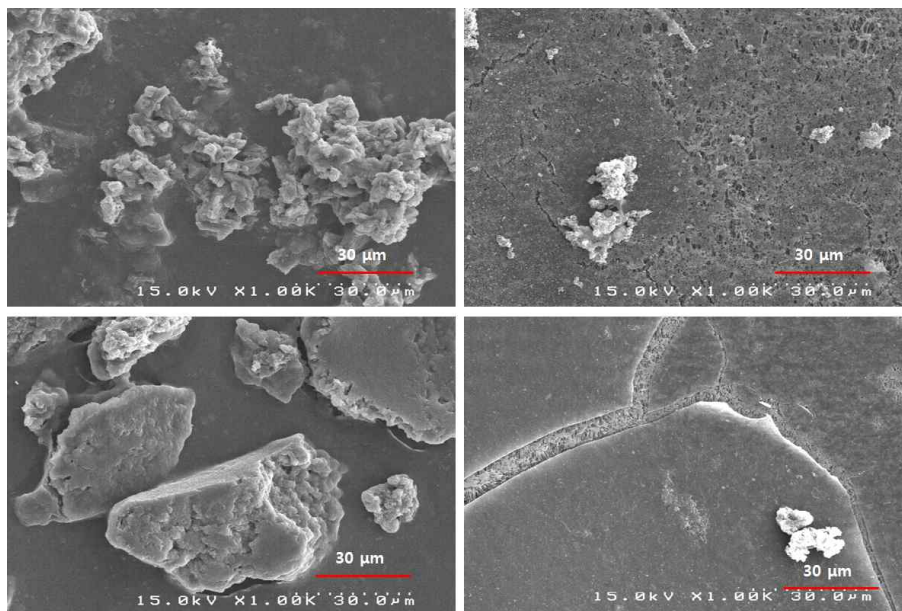


<그림 2.22. 하수처리장 방류수 처리를 위한 Jar-test를 이용한 응집제량 선정(1.2: 반복실험 횟수)>

- 하수처리장 방류수는 하천수와 다르게 비교적 안정적으로 모든 실험에서 안정적인 플럭스를 보이는 경향이 있지만, 멤브레인 표면 분석을 보면 하천수와 동일하게 응집/침전 및 GF/C 여과를 진행하였을 때 파울링이 덜 발생하는 것을 확인함.



<그림 2.23. 방류수 처리 시 전처리 변화에 따른 플럭스 변화. (A) 원수, (B) GF/C 여과, (C) 응집/침전, (D) 응집/침전 후 GF/C 여과>



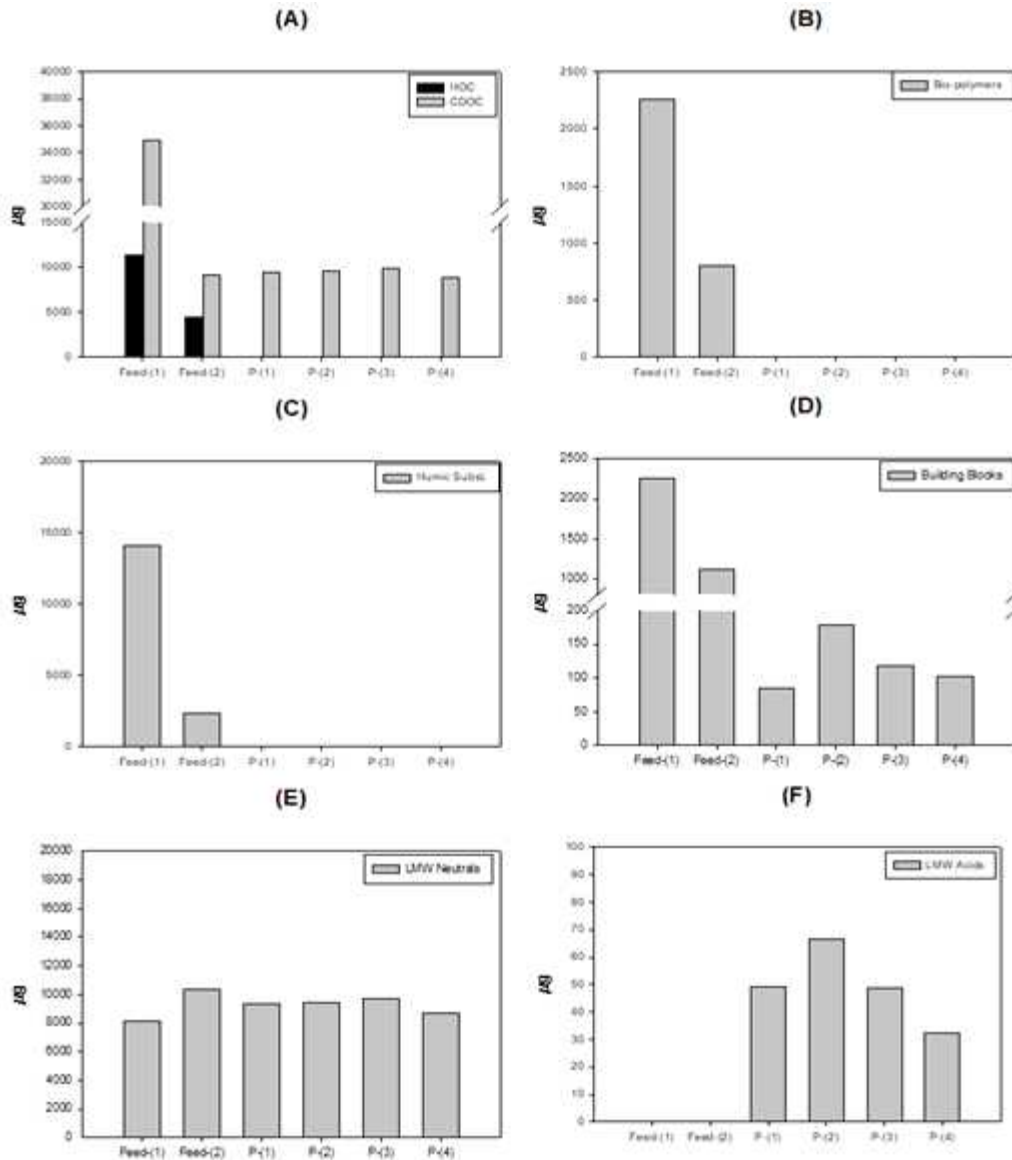
<그림 2.24. 방류수 처리 시 전처리 변화에 따른 멤브레인 표면. (좌상) 원수, (우상) GF/C 여과, (좌하) 응집/침전, (우하) 응집/침전 후 GF/C 여과(측정장비: FE-SEM-EDS, S-4200, Hitachi, Japan)>

<표 2.4. 하수처리장 방류수 전처리에 따른 EDS 분석 결과(Wt %). (A) raw water, (B) GF/C filtration (C) flocculation and sedimentation, (D) GF/C filtration

after the flocculation and sedimentation.>

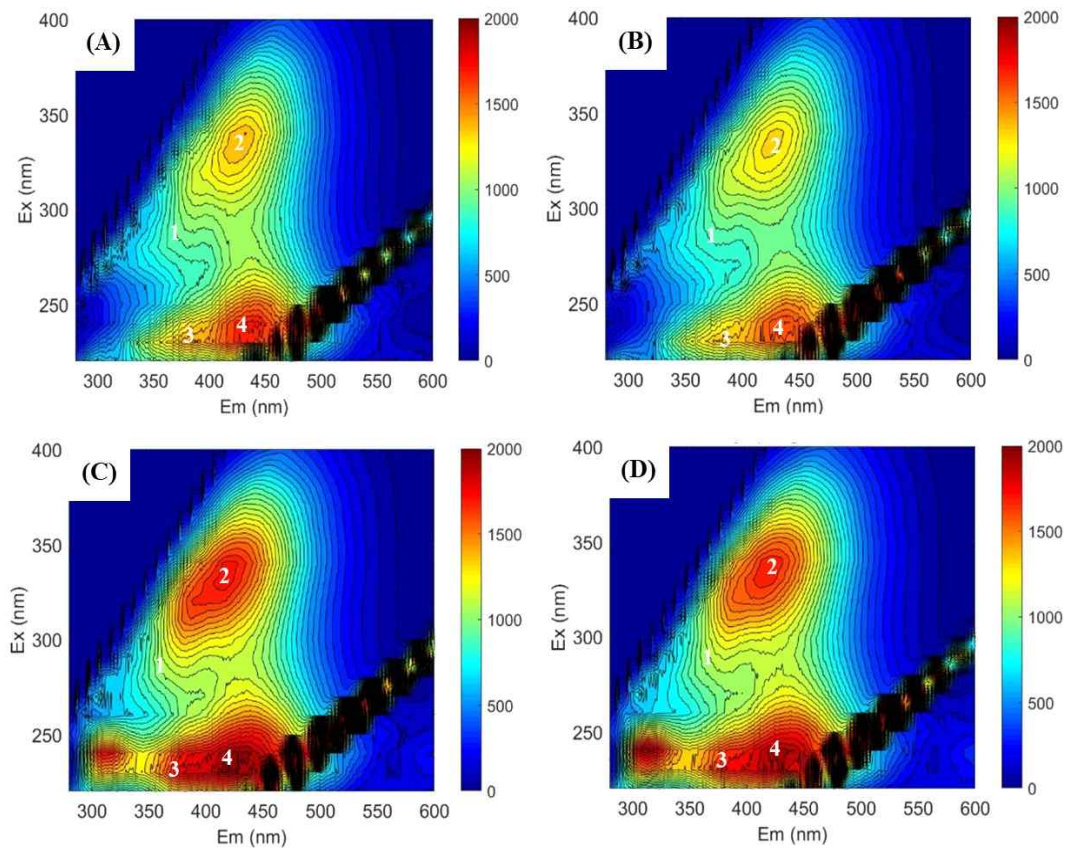
EDS (Wt %)	Pristine	(A)	(B)	(C)	(D)
C	25.35	56.01	64.27	8.54	7.50
O	-	34.47	30.21	47.84	39.57
F	74.65	-	-	-	9.76
Na	-	0.94	-	-	-
Mg	-	0.59	-	-	-
Al	-	0.72	0.69	34.01	33.56
Si	-	1.12	1.64	1.97	1.11
S	-	0.97	1.11	6.08	4.62
Cl	-	2.03	-	1.56	3.88
Ca	-	3.16	2.08	-	-

○ 막 증류 전후의 시료를 LC-OCD와 F-EEM을 이용하여 유기물 성분분석을 진행함. 응집/침전을 통해서 상당량의 유기물이 제거됨을 확인할 수 있었는데, 주로 bio-polymers와 humic substances 등의 고분자 화합물임. 저분자 화합물은 거의 변화가 없었으며 막증류를 통해서도 거의 제거되지 않는 것으로 보임. 일부 저분자 산류가 생성되어 막증류 처리수에서 검출되었는데, 응집제의 주입 및 이로 인하여 낮아진 pH에 고분자 유기물질이 분해되어 생성된 것으로 보임.

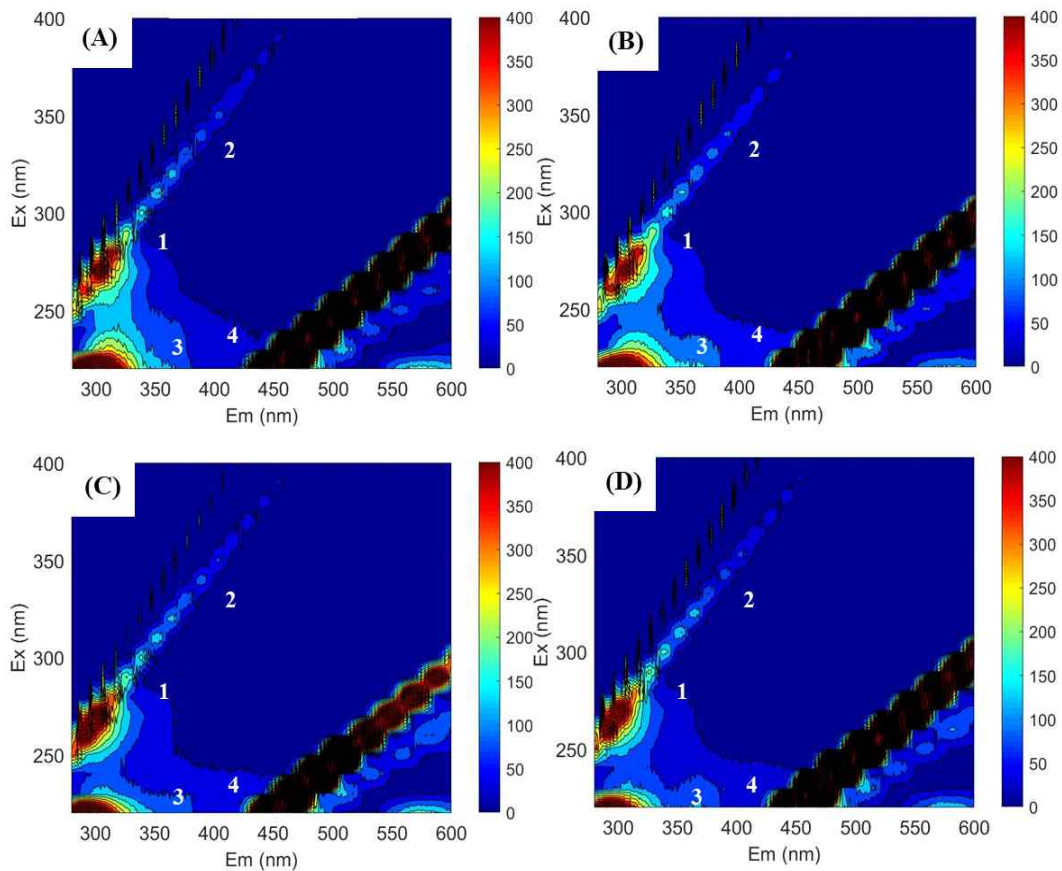


<그림 2.25. 하수처리장 방류수 전처리에 따른 feed 와 permeate water LC-OCD 분석 결과. [Feed-(1):원수, Feed-(2):응집/침전 후 원수, P-(1):증류 후 원수, P-(2):증류 후 GF/C 여과수, P-(3):증류 후 응집/침전수 P-(4):증류 후 응집/침전 및 GF/C 여과수, (A)DOC, (B)bio-polymers, (C)humic substance, (D)building blocks, (E)LMW neutrals, (F)LMW acids]>

○ 아래 그림 2.26의 (C)와(D)에서 보는바와 같이 peak2의 영역에서 신호 강도 (intensity)가 증가함을 보이는데, 이는 LC-OCD의 결과와 마찬가지로 응집제의 주입으로 인하여 일부 고분자성 유기물의 분해로 인하여 신호강도가 증가한 것으로 보이며, 막 증류 후에는 비슷한 결과를 보임.



<그림 2.26. 하수처리장 방류수 전처리에 따른 feed water F-EEM 분석결과. [(A) 원수, (B) GF/C 여과, (C) 응집/침전, (D) 응집/침전 후 GF/C 여과 [Peak 1: Tryptophan protein-like, Peak 2: Humic acid-like, Peak 3: Aromatic protein-like, Peak 4: Fulvic acid-like]>



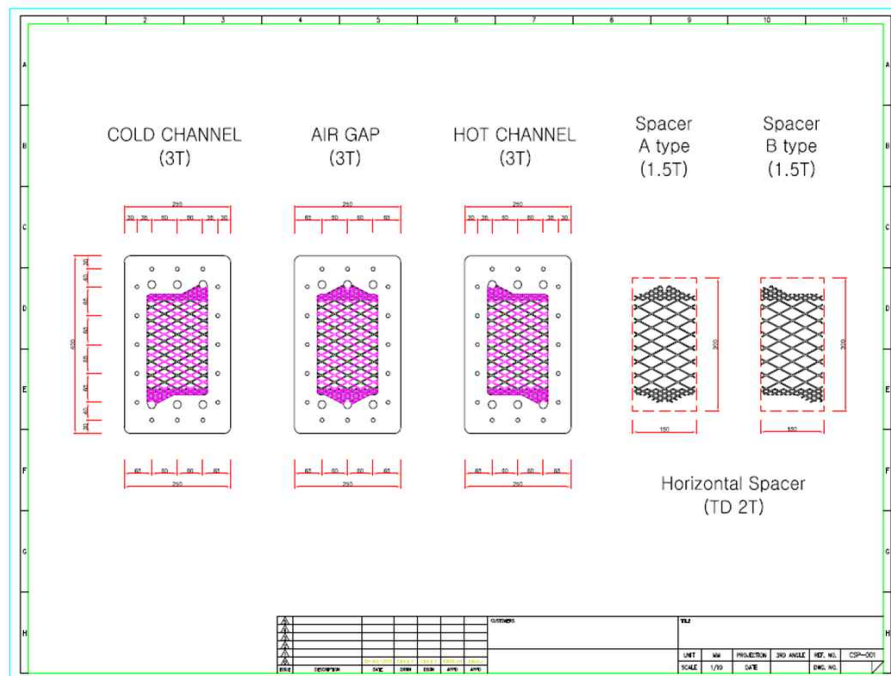
<그림 2.27. 하수처리장 방류수 전처리에 따른 permeate water F-EEM 분석결과.

[(A) 원수, (B) GF/C 여과, (C) 응집/침전, (D) 응집/침전 후 GF/C 여과 [Peak 1: Tryptophan protein-like, Peak 2: Humic acid-like, Peak 3: Aromatic protein-like, Peak 4: Fulvic acid-like]>

(3) 막증류 모듈 개발

(가) 프로토타입 막증류 모듈 설계 및 제작

- 1차년도에 막증류 적정 운전인자 범위를 고려하여 실제 적용에 적합한 프로토타입 막증류 모듈 세부 성능목표를 설정하고, 이를 기반으로 막증류 적합성과 유입구 및 유출구의 형상 및 모듈 내에서의 흐름 특성을 고려하여 프로토타입 막증류 모듈의 세부 설계를 완성함. 기존의 실험실 규모의 막증류 스택에서 scale-up 된 프로토타입의 막증류 스택을 제작함. 유효 막 면적 : 0.028 m^2 (가로 14 cm, 세로 20 cm).



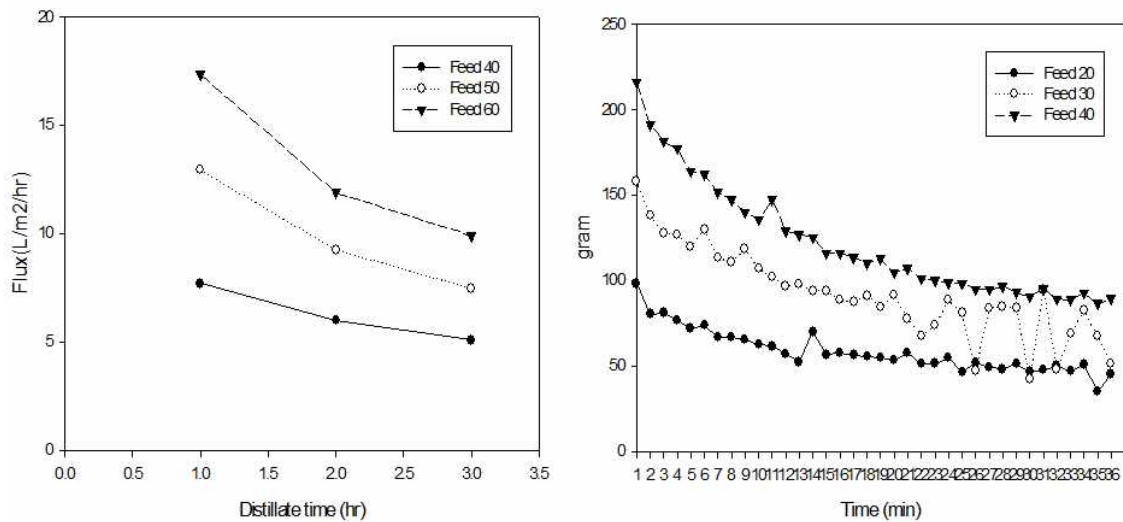
<그림 2.28. 프로토타입 막중류 모듈 설계도>



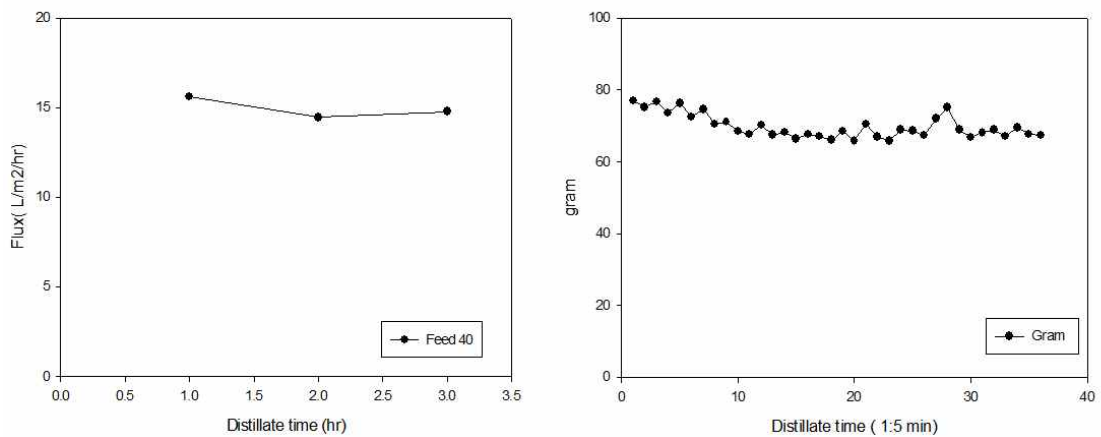
<그림 2.29. 프로토타입 막중류 모듈>

(나) 프로토타입 막중류 모듈 성능 평가

○ 프로토타입 막증류 모듈의 세부 설계를 바탕으로 프로토타입 막증류 모듈 및 스택을 제작하고, 다양한 실제 원수를 대상으로 운전온도, 플럭스, 제거율 등의 성능을 확인함. 운전조건- Module : DCMD, AGMD, Membranes : PTFE (pore size : $0.45\ \mu\text{m}$, PALL, Active area : $0.114\ \text{m}^2$ (0.028×4) m^2 , Feed flow rate : 12.0 L/min, Permeate flow rate : 6.0 L/min, Initial feed volume : 20 L, Distillation time : 3 hr, ΔT : $30\ ^\circ\text{C}$ (feed : 50°C , permeate : $20\ ^\circ\text{C}$)

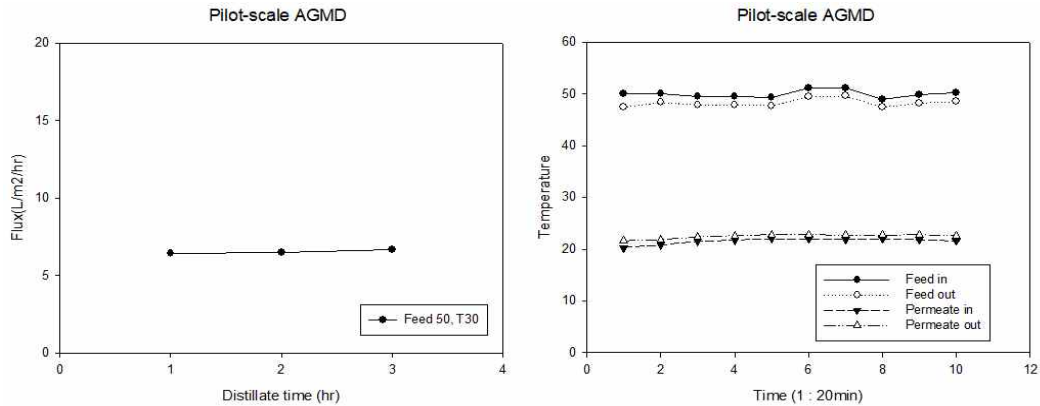


<그림 2.30. 운전 온도에 따른 플럭스 변화>



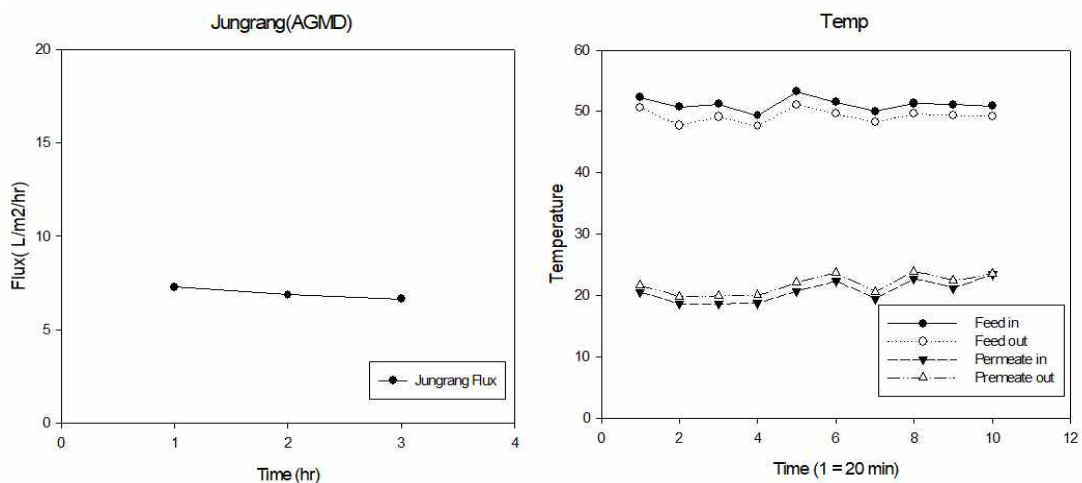
<그림 2.31. $\Delta T\ 30^\circ\text{C}$ DCMD 플럭스>

○ AGMD 모듈 적용 및 성능 확인



<그림 2.32. ΔT 30℃ AGMD 플럭스 및 온도손실량>

- 에어 갭 막 증류 모듈의 경우, 직접 접촉식 막 증류 모듈보다 플럭스가 적지만 매우 적은 온도 손실량과 플럭스를 유지하는 것을 알 수 있음. 그에 따라 프로토타입 에어 갭 막 증류 모듈을 통해 장기운전의 가능 및 성능을 확인함.

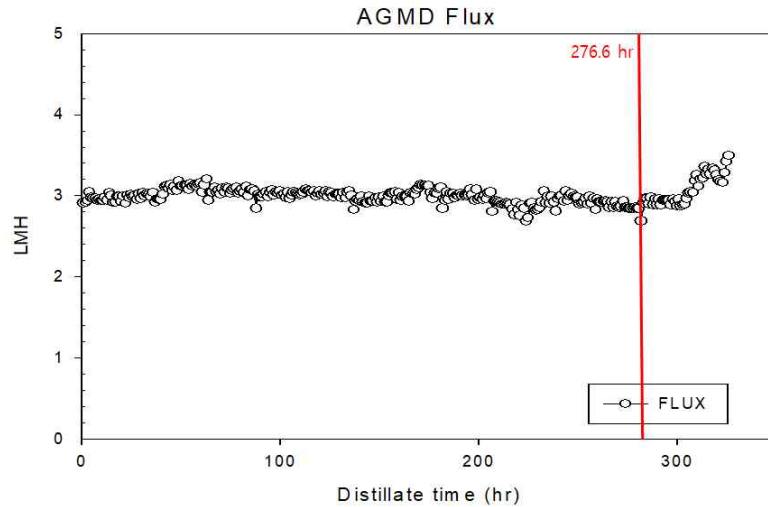


<그림 2.33. ΔT 30℃ 하천수를 이용한 AGMD의 플럭스 및 온도손실량>

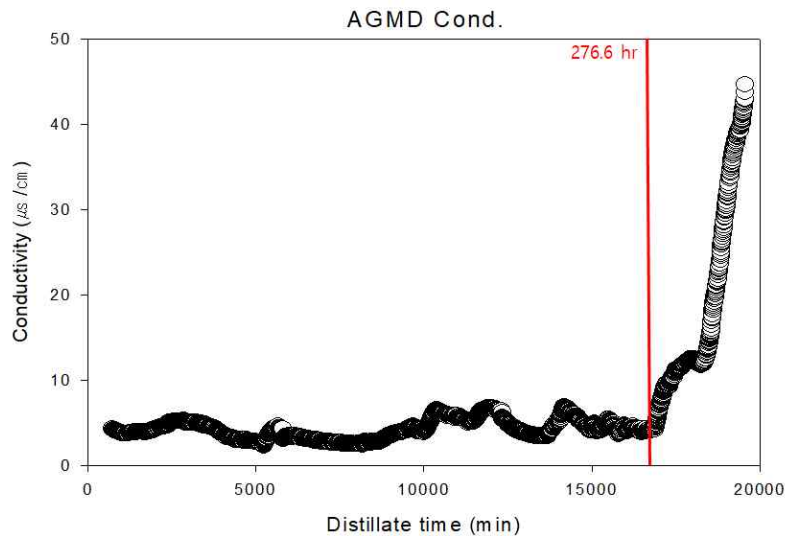
- 실제 원수를 이용하여 프로토타입 막 증류 모듈을 운전하여도 안정적으로 플럭스를 유지하며 적은 온도 손실량이 발생한 것을 확인하였음.

○ 프로토타입 AGMD 모듈의 장기운전 실험

- 하수처리장 2차 침전지 유출수를 이용하여 멤브레인 장기운전 함. 운전조건-
Initial feed volume : 20,000 mL, Distillation time : 288 시간 (12일) ΔT : 30 °C (feed : 50°C, permeate : 20 °C)



<그림 2.34. ΔT 30℃ 하수처리장 2차 침전지 유출수를 이용한 AGMD의 플럭스>



<그림 2.35. ΔT 30℃ 하수처리장 2차 침전지 유출수를 이용한 AGMD의 conductivity>

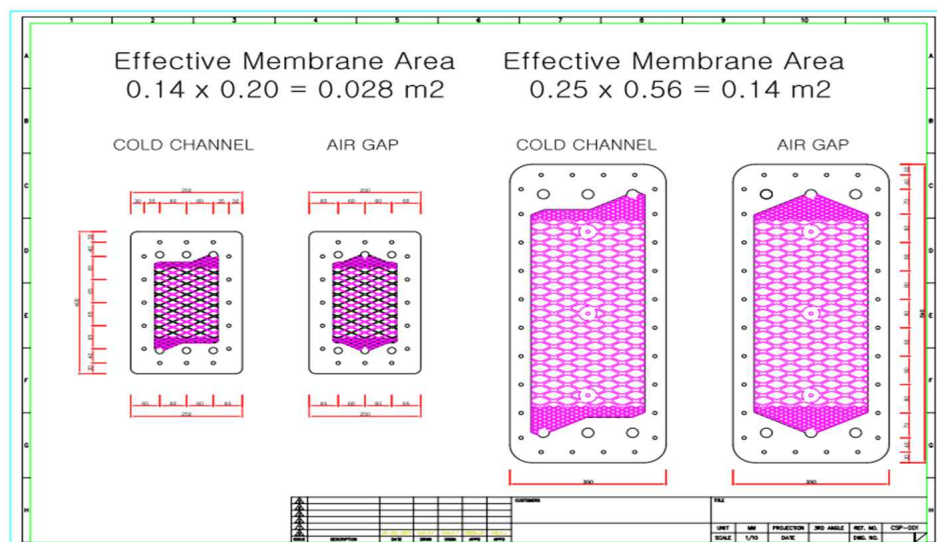
- 전기전도도의 경우, 2~6 $\mu\text{S/cm}$ 정도, 약 276.6시간 (약 11.5일 정도) 이후 4.0 $\mu\text{S/cm}$ 에서 지속적으로 상승함. 그에 따라 운전 약 12.5일 정도 이후부터 막 웨팅이 발생한 것으로 보임. 플럭스의 경우 3 ± 0.15 LMH를 유지하다가 약 305 시간 부터 지속적으로 증가하는 경향을 보임. 운전기간별 막증류 처리수의 수질 분석 결과에서도 약 11일 이후 분석값 들의 변화가 관찰되는 것으로 보아 막 젖음이 발생한 것으로 판단됨. 향후 막증류 운전의 장기운전을 위한 막 젖음 억제 방안이 필요할 것으로 보임.

Items	유입수	MD permeate						11.5일 막 젖음 발생
		2일	4일	6일	8일	9일	10일	
pH	6.81	6.22	6.48	6.81	7.02	7.01	7.02	7.04
Turbidity (NTU)	0.25	0.15	0.16	0.16	0.16	0.17	0.16	0.15
SS	1.0	-	-	-	-	-	-	-
TCOD	13.42	-	-	-	-	-	-	-
SCOD	8.81	4.13	3.07	4.09	3.75	4.05	3.40	8.04
TOC	3.42	-	-	-	-	-	-	-
DOC	3.05	1.63	1.39	1.26	1.18	1.24	1.28	2.02
UV254	0.06	0.004	0.004	0.006	0.006	0.004	0.006	0.006
T-N	12.37	0.39	0.29	0.38	0.33	0.27	0.24	2.83
NH ₄ -N	<0.02	0.07	0.06	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.06
T-P	0.15	<0.06	<0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.8

<그림 2.36. ΔT 30℃ 하수처리장 2차 침전지 유출수를 이용한 AGMD의 운전시간별 수질분석 결과>

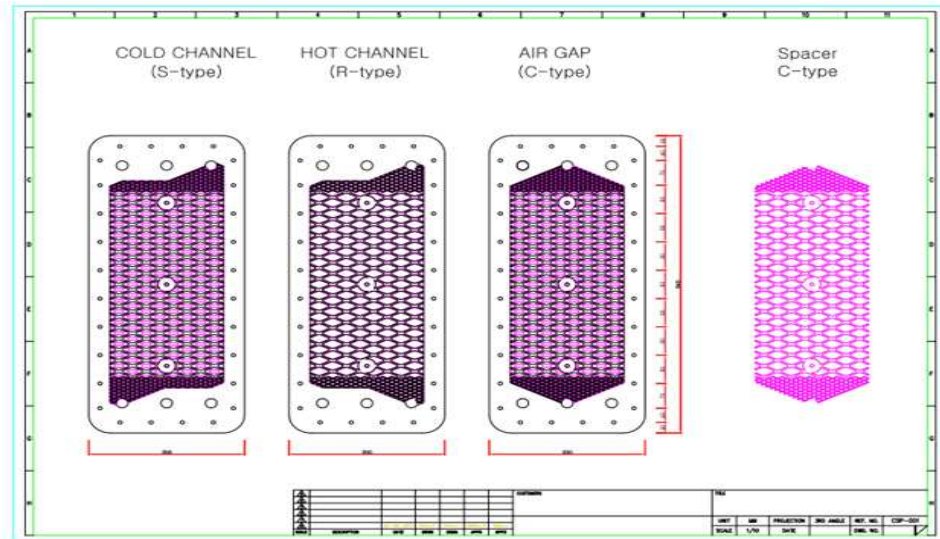
(다) 파일럿 플랜트 막증류 모듈 개발(scale-up에 따른 모듈 설계 변경)

- 개발된 프로토타입 막증류 모듈의 결과를 바탕으로 개선된 파일럿 플랜트 막증류 모듈 설계 및 제작완료.



<그림 2.37. scale-up에 따른 프로토타입 막증류 모듈 설계도>

- 유효 막 면적 : 0.14 m^2 (가로 25 cm, 세로 56 cm) 프로토타입 (0.028 m^2)에 비해 5배 유효면적 증가함.



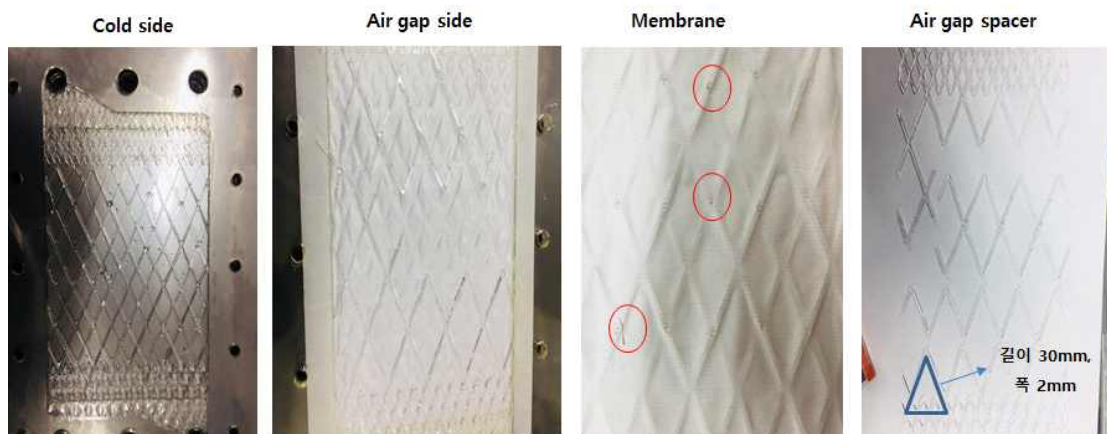
<그림 2.38. 파일럿 플랜트 용 막증류 모듈 설계도>



<그림 2.39. 파일럿 플랜트 용 막증류 모듈 설계도>

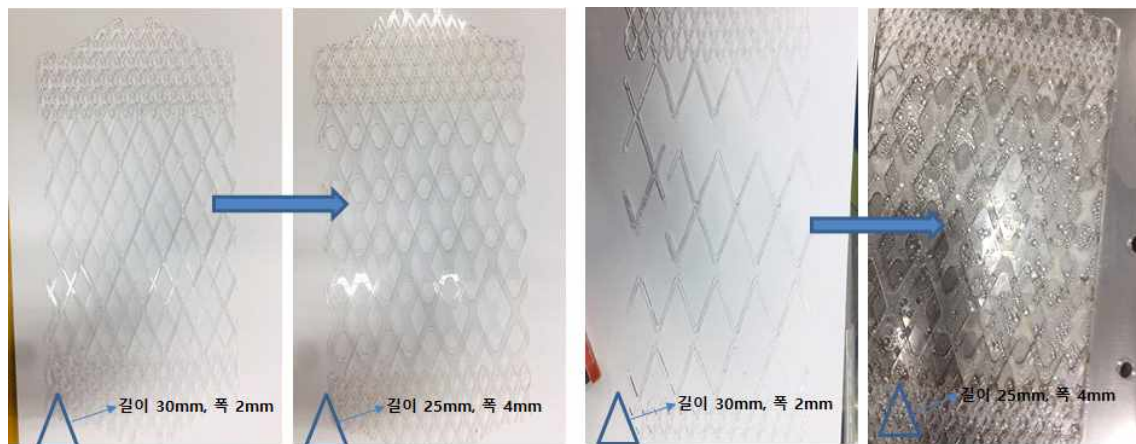
(라) 막증류 정수처리 모듈 제작 및 설계 변경

- 파일럿 플랜트 막증류 스택 개발을 위해 막증류 정수처리 모듈을 제작 및 운전함. 일부 설계 변경을 통해 운전중에 발생하는 문제점 해결함. 막증류 모듈의 운전온도 $\Delta T : 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (feed : $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$, permeate : $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$)에서 3시간 막 증류 이후 Air gap spacer의 깨짐 발생함. 깨진 Spacer로 인하여 멤브레인의 손상을 우려할 가능성이 높아짐. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 Spacer의 디자인 변경함.

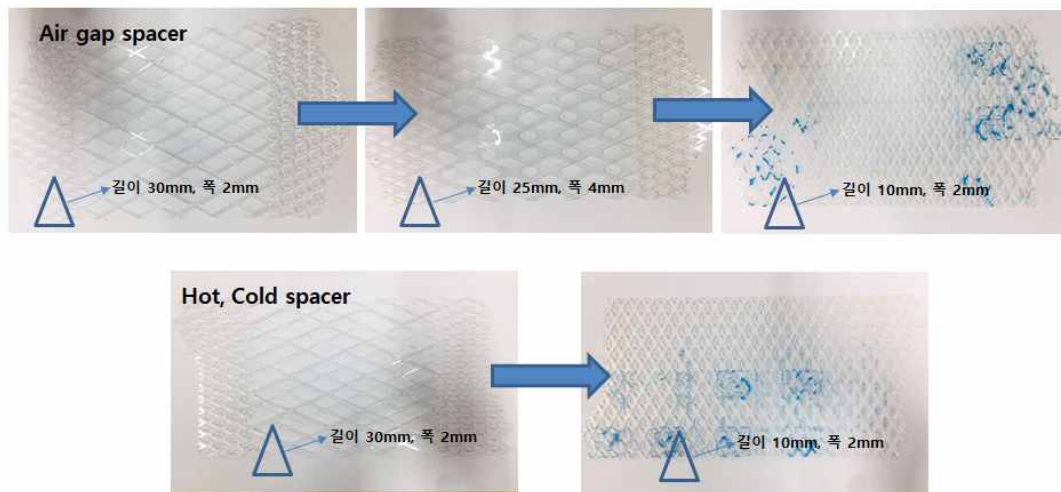


<그림 2.40. 막 증류 운전 이후 모듈 내부>

- 막증류 Spacer의 폭을 2배로 증가하여, 내구성을 증가시킴. 기존에 발생하던 문제점을 완화하여, 멤브레인의 손상의 위험성을 최소화함. 내구성은 증가하였지만, 플럭스가 감소함. (기존: 약 6.5 LMH → 변경 후 : 약 3.1 LMH) 그에 따라 모듈 내부의 디자인 변경 및 추가 실험을 통한 모듈 디자인의 최적화가 필요함.

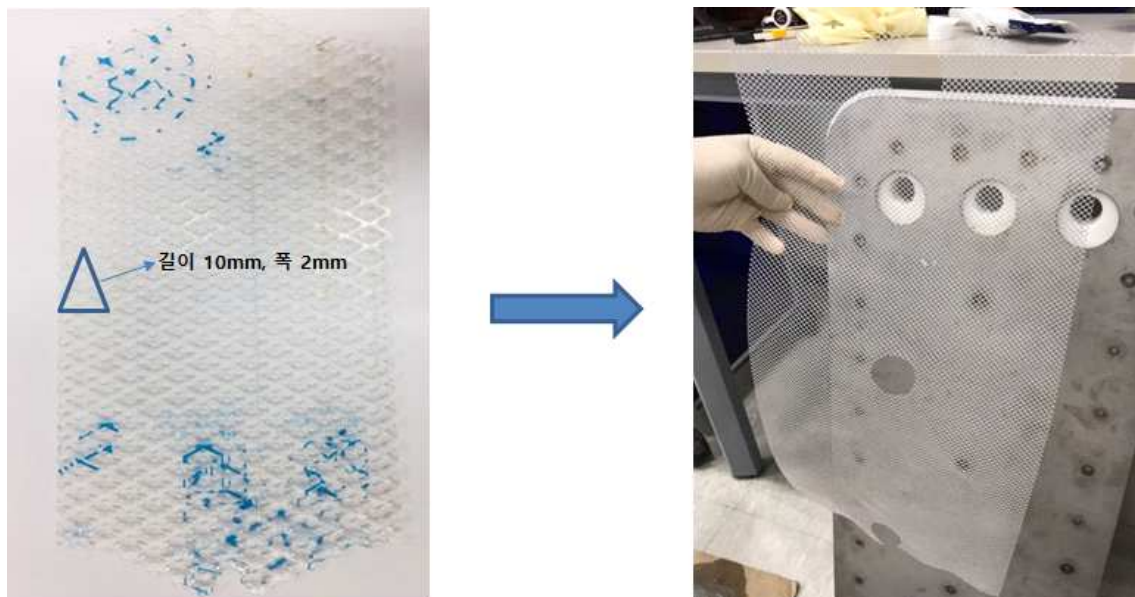


<그림 2.41. 모듈의 air gap spacer 변경>



<그림 2.42.모듈의 air gap spacer 및 hot, cold spacer 변경>

- 모듈의 스테이서 변경(열변형에 의한 스페이서 깨짐현상 방지:(작은 마름모 → 큰 마름모), flux 향상:(큰 마름모 → woven mesh), 분리막 손상가능성방지(woven mesh → nonwoven mesh)), 모듈 누수방지(모듈 중간 구멍 유/무, 막 길이 조절) 등 막모듈 디자인 변경 및 추가 실험을 통하여 최적의 파일럿 플랜트 모듈 제작함.



<그림 2.43.모듈의 spacer 변경>

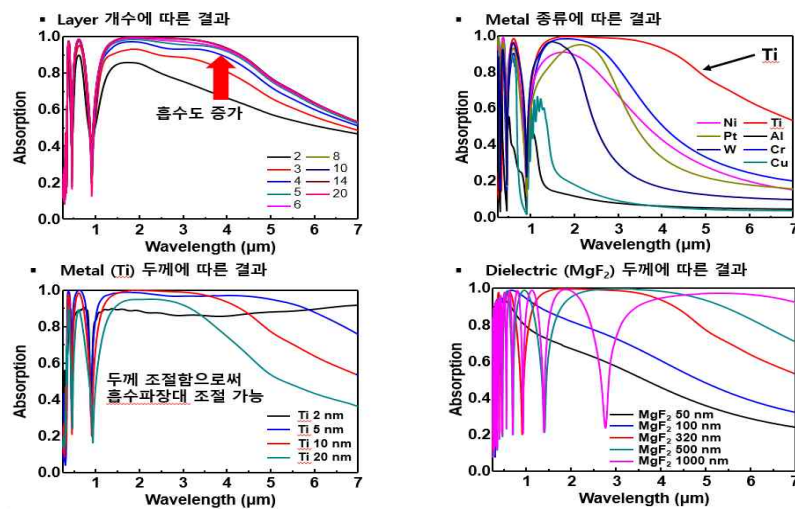
(4) 태양열 집열기 개발

(가) 태양열 흡수체 소재의 최적 설계

- 태양전지를 포함한 다양한 분야에 흡수체가 용이하게 널리 사용되기 위해서는 흡수도가 높아야 할 뿐만 아니라, 박막형으로 간단하게 제조되어야 함. 그러나 흡수체

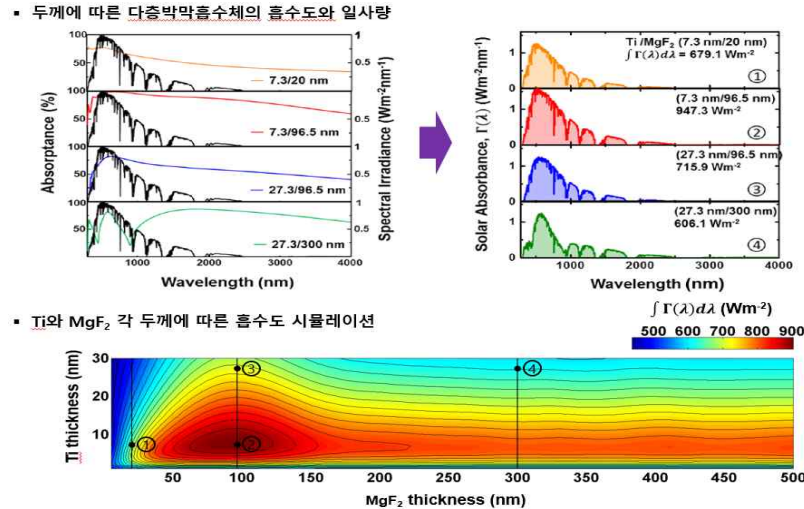
의 종류, 두께, 층의 개수에 따라 다양한 흡수도를 나타내기 때문에 적절한 조건을 잡는데 어려움이 있음.

- 시뮬레이션 결과를 통해 높은 흡수도를 가지는 흡수체의 금속/유전체 소재와 박막 두께를 최적화함. 금속과 유전체를 교차하여 증착하는 것은 빛이 입사하였을 때 금속과 유전체의 굴절률 차이로 인해 반사되는 빛이 반복적인 전반사로 인해 상쇄되어, 흡수율을 높이기 때문임.
- 금속/유전체로 이루어진 다층박막구조 기반의 광흡수체의 광흡수율 극대화를 위해 Finite-difference time-domain (FDTD) 기법을 통해 맥스웰 방정식과 일사량을 기반으로 다양한 다층구조 박막의 흡수율에 대한 시뮬레이션 진행함. 금속과 유전체를 교차하여 증착하는 것은 빛이 입사하였을 때 금속과 유전체의 굴절률 차이로 인해 반사되는 빛이 반복적인 전반사로 인해 상쇄되어, 흡수율을 높이기 때문임. 이와 같이 시뮬레이션을 통해 속/유전체 소재와 박막두께를 최적화함.
- 다층박막수가 증가할수록 흡수도가 커지는 것을 볼 수 있는데, 5층 이후로 이미 90% 이상의 흡수도를 보이고 층을 더 늘려도 큰 변화가 없는 것을 알 수 있는데, 이때 금속 소재는 가장 높은 광흡수율이 예측된 Ti을 사용함. 또한 금속 및 MgF_2 의 두께를 조절함으로써 흡수파장대를 조절할 수 있었는데, 이를 통해 Ti는 5 ~ 10 nm, MgF_2 는 100 nm정도의 최적값을 도출함.



<그림 2.44. 소재 및 두께에 따른 광흡수 시뮬레이션 결과>

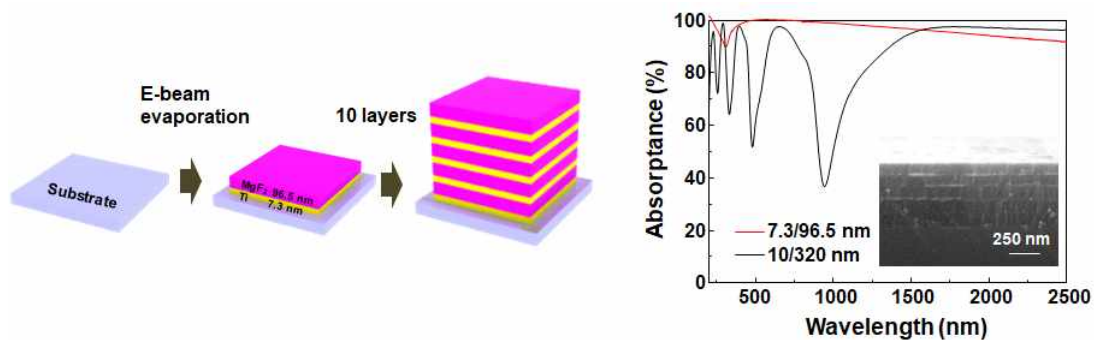
- 파장에 따른 태양빛의 일사량과 계산된 광흡수체의 광흡수도를 고려하여 열생성 정도를 판단한 결과, Ti 두께 7.3 nm, MgF_2 두께 96.5 nm를 다층박막구조로 5 pairs 증착하였을 때, 흡수도가 가장 높고 일사량이 947.3 W/m^2 으로 컸고, 이에 반해 두께가 두꺼울수록 열생성 효율이 낮음을 알 수 있음.



<그림 2.45. 금속/유전체 박막 두께에 따른 흡수도 및 일사량 시뮬레이션>

(나) 태양흡수체 소재의 개발 및 성능 평가

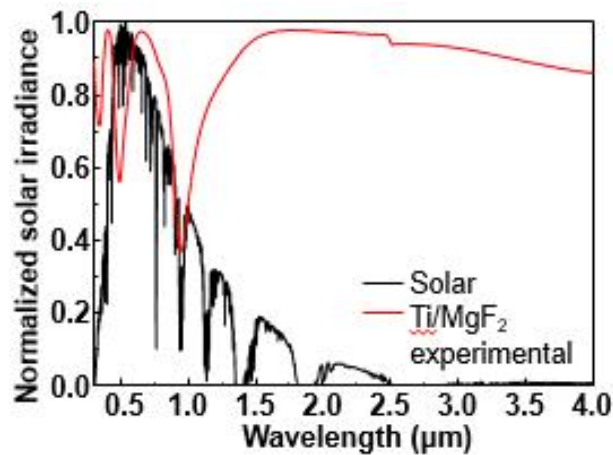
- 다층박막구조의 광흡수체의 소재와 적층구조에 따라 변화하는 광 흡수효율을 파악하여 최적조건의 광 흡수체를 제작하고 솔라 시뮬레이터를 통하여 흡수도를 평가함.
- 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 바탕으로 E-beam evaporation 방법으로 막질을 향상시키고 두께를 최적화함으로써 광흡수체를 제작하였고, UV-Vis-NIR spectrophotometer (Cary 5000, Agilent, USA)를 이용하여 광흡수를 측정결과 0.2-2.5 μm 에서 90 % 이상의 높은 흡수도 특성을 얻었음.



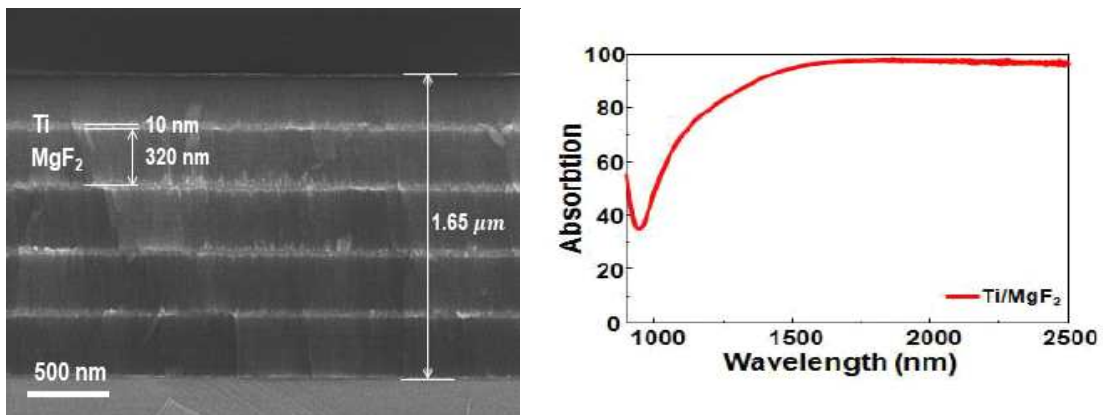
<그림 2.46. (a) 광흡수체 제작 과정 모식도 및 (b) 흡수도 측정 결과>

- E-beam evaporator를 이용하여 금속인 Ti와 유전체인 MgF₂를 각각 10 nm, 320 nm 두께로 증착하고, 이를 교대로 5회 증착하는 제조 방법 개발. 이 때 Ti의 증착파워와 증착속도는 각각 50 mA와 1 nm/s 이며, MgF₂의 증착파워와 증착속도는 각각 2 mA와 2.5 nm/s 일 때 가장 부착력이 좋음.

- 이 다층박막 흡수체는 금속층과 유전체층을 복층으로 형성함을 통해, FTIR을 이용하여 글라스 기판에 올린 흡수체의 흡수도를 측정하였을 때, 태양열의 흡수율을 약 90 % 이상 향상시킴을 확인.

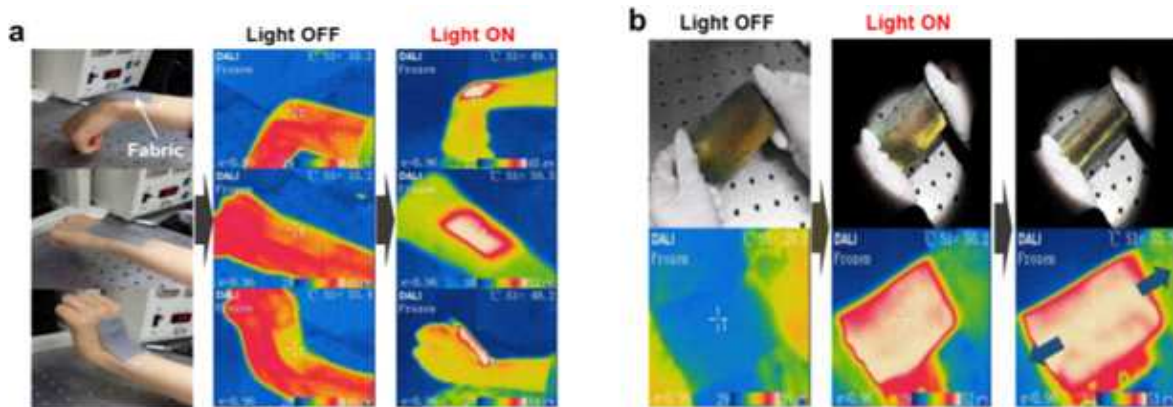


<그림 2.47. 솔라 스펙트럼과 다층박막 흡수체의 흡수도>



<그림 2.48. 다층박막 흡수체의 SEM 이미지와 흡수도 특성 그래프>

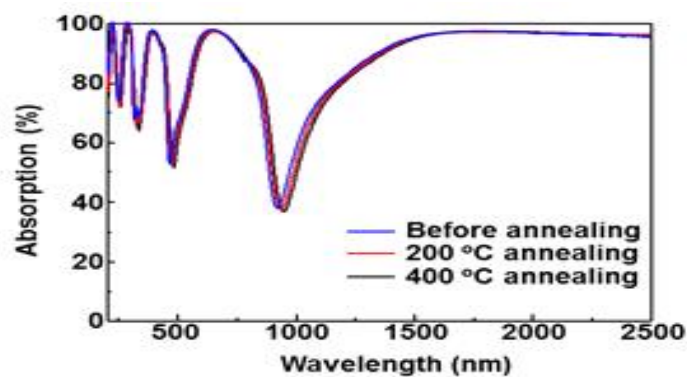
- 기존의 흡수체는 복잡한 리소공정을 포함하거나 빛의 입사각도에 영향을 받으며, 특히 플렉시블 패브릭의 경우에는 제작 가능 사이즈에 제한이 있거나, 변형을 가했을 때도 영향을 받음. 높은 흡수도를 가지는 다층박막구조 흡수체를 패브릭에 적용하여 웨어러블 솔라히터 개발. 벤딩 테스트 이후에도 1 sun에서 약 60 ℃까지 온도 상승. 흡수체를 적용하였을 때, 열전발전기의 출력에 약 60 %의 개선함을 확인함.



<그림 2.49. 흡수체를 적용한 패브릭 샘플의 벤딩 실험>

(다) 태양열 흡수체 소재 열적 내구성

- 다층박막구조(Ti 7.3 nm, MgF₂ 96.5 nm, 5 pairs)의 태양열 흡수체의 열처리 온도 및 시간 조건을 통하여 열적 안정성을 평가하였음. Glass 기판에 증착된 다층 박막구조의 광흡수체를 RTA에서 200 °C, 400 °C에서 각각 5시간씩 열처리 후, UV-Vis spectroscopy 장비로 흡수도를 측정된 결과, 흡수도의 변화가 크게 없고, 열적 안정성 및 내구성이 우수함을 보여줌.

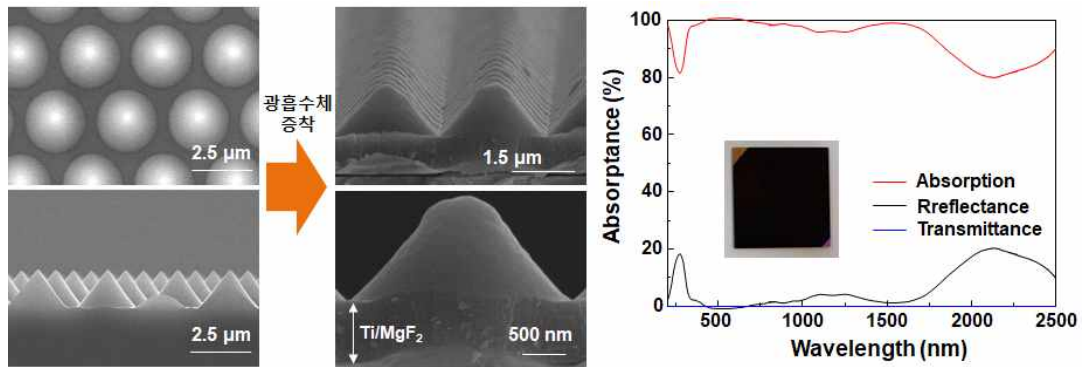


<그림 2.50. 열처리 온도에 따른 다층박막구조의 광흡수체 흡수도 측정 결과>

(라) 태양열 흡수체 소재 최적화 방안마련

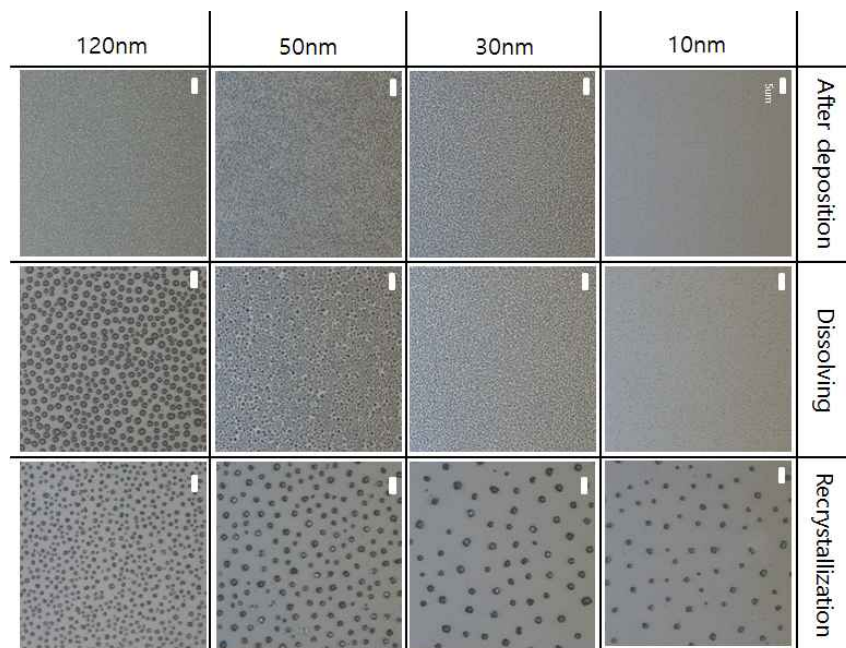
- 추가적인 광흡수도 증가를 위해 표면에 거친 형상을 제작함. 포토리소그래피 공정으로 제작된 피라미드 모양의 Ni stamp에 PDMS, HSQ resin을 부은 후 글라스 기판을 위에 올린 후 열처리를 통하여 비반사도 향상을 위한 피라미드 모양의 glass를 제작함. 전계방출형 주사전자현미경(cold field emission scanning electron microscope (FE-SEM, S-4800, Hitachi))으로 피라미드 형상을 측정한 결과 피라미드 간 거리는 2 μ m, 높이는 1.5 μ m로 측정됨.

- 제작된 피라미드 구조 기판위에 Ti/MgF_2 7.3/96.5 nm가 5 pairs 증착하여, UV-Vis spectroscopy 측정 결과, 0.4–1.6 μm 에서 95% 이상의 높은 흡수도를 얻었음. 다만, 장파장영역에서 비반사도 특성이 나빠 반사도 특성으로 인해 광흡수가 낮아지는 것을 확인하였고, 이는 피라미드 패턴 내 간격, 사이즈를 조절 연구를 통해 해결이 가능 할 것으로 판단됨.



<그림 2.51. 피라미드 구조의 광흡수체 SEM 이미지 및 UV-Vis spectroscopy 측정 결과>

- 실리콘 기판에 NaCl을 열증착법으로 증착하여 이를 재결정화하는 방법을 통하여 마이크로 스케일의 NaCl 입자를 제조하였음.

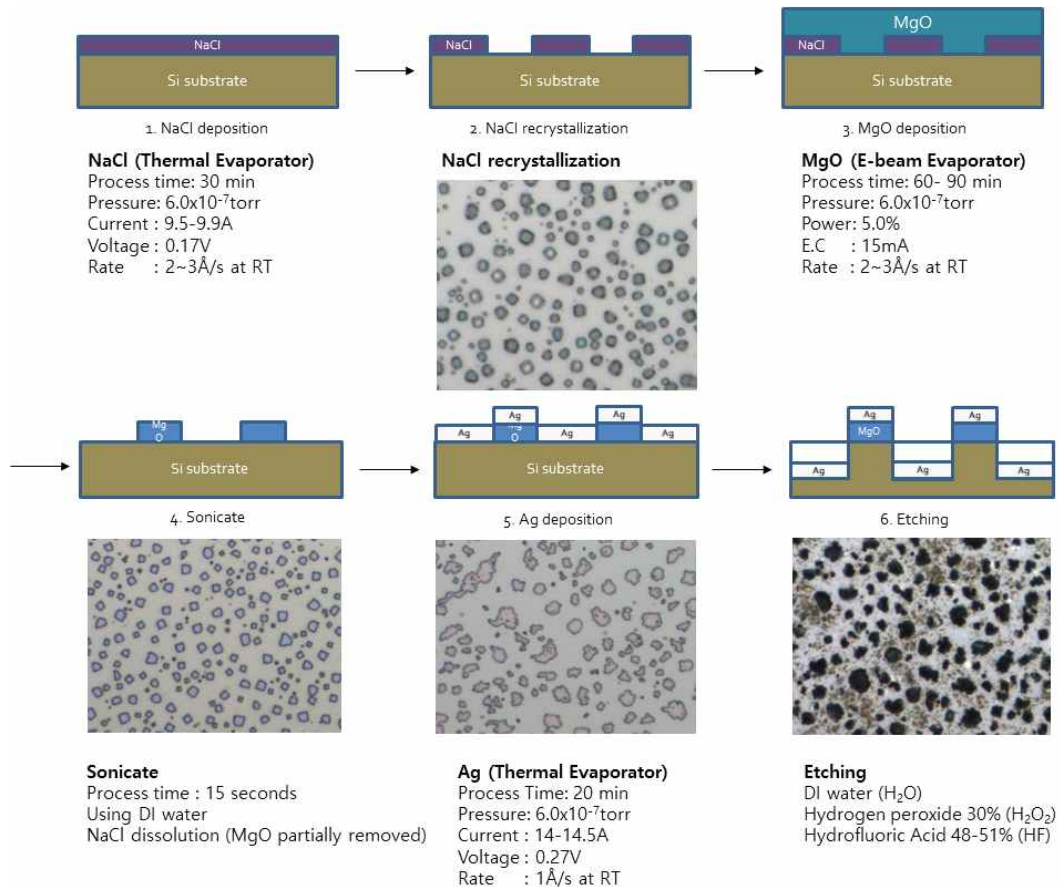


<그림 2.52. NaCl 막 두께에 따른 입자 형상>

- 여기에 MgO를 E-beam evaporator로 초당 0.2 ~ 0.3 nm의 속도로 수백 nm

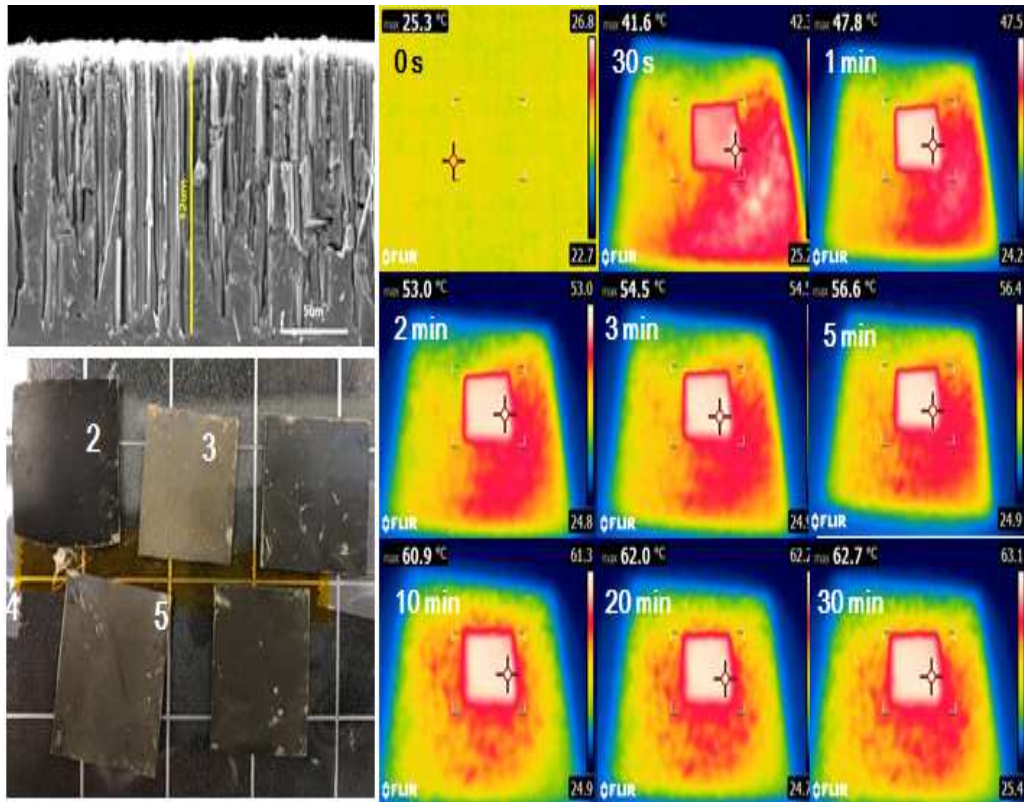
정도 증착하고, 이를 DI water (Ultra-sonication 15 초)에 넣어 NaCl 입자를 제거함.

○ 열증착법(Thermal evaporator)으로 Ag을 초당 0.1 nm로 20분 증착을 통해 금속 마스크를 제작하였으며, 자세한 공정 방법은 아래의 그림과 같음.



<그림 2.53. NaCl을 통한 광흡수체 제작 방법>

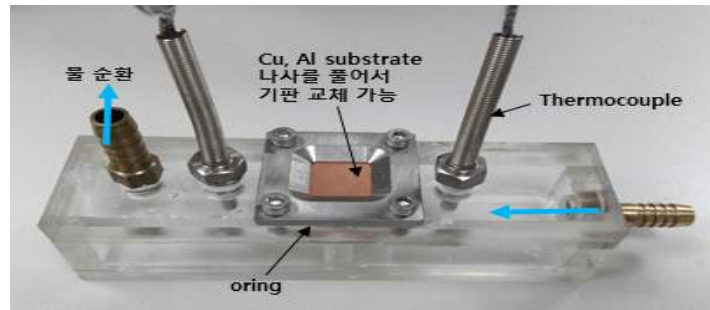
○ 에칭 솔루션으로 HF : H_2O_2 를 120 : 80 ml로 희석하여 에칭한 결과 Si 나노홀 형태의 3차원 구조가 생성되었으며, 이를 1-sun 기준으로 온도를 측정한 결과 30 분 이내에 62.7°C 까지 온도가 상승하는 것을 확인함.



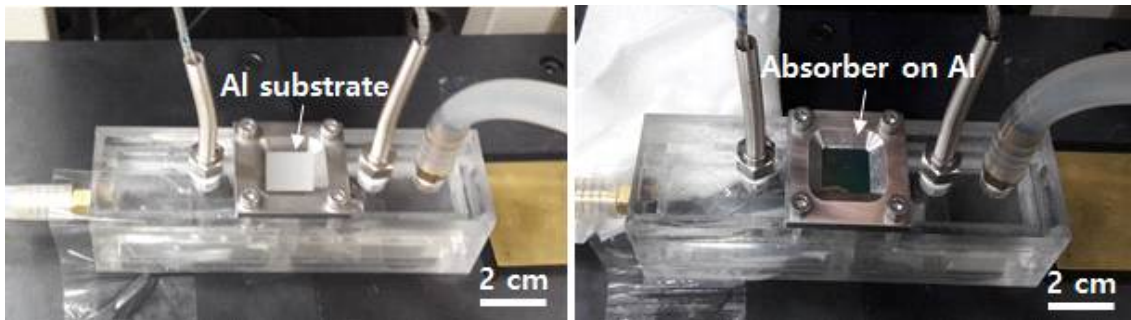
<그림 2.54. 실리콘 나노홀(왼, 위쪽), 제작된 광흡수체 모습(왼, 아래), 1-sun 기준으로 시간에 따른 온도변화>

(마) 태양열 집열기 개발

- 다층박막 흡수체를 적용하여 수온을 증가시킬 수 있는 솔라 집열기를 디자인함. 펌프를 이용하여 탱크에 저장된 물을 순환시켜 흡수체 기판에 흡수된 태양열을 이용하여 물을 가열시킴. 흡수체가 없는 가열부의 온도는 태양광을 조사하기 전 28.5 °C 였으나, 태양광을 조사하고 25분 후 42.0 °C 가 되어 약 13.5 °C 상승함. 반면 흡수체가 배치된 집열기는 태양광을 조사하기 전 가열부의 온도는 27.4 °C 였으나, 태양광을 조사하고 25분 후 91.5 °C 가 되어 약 64.1 °C 상승하여, 흡수체의 집열 효율이 매우 높음을 알 수 있음. 적외선 흡수율이 높은 복층 구조의 흡수체를 태양열 집열기에 적용함으로써, 종래의 태양열 집열기보다 현저하게 높은 집열 효율을 달성할 수 있음.
- 흡수체를 이용한 솔라 집열기는 뛰어난 흡수율을 가지는 Ti/MgF_2 (7.3 nm/96.5 nm) 5 pair 흡수체를 발열 기판에 적용하여 기존의 태양열 집열기보다 향상된 태양열 집열 효과를 가짐.

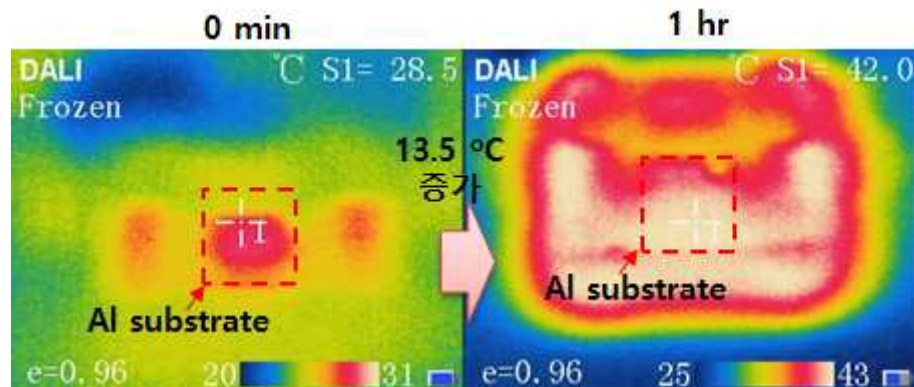


<그림 2.55. 솔라 집열기>

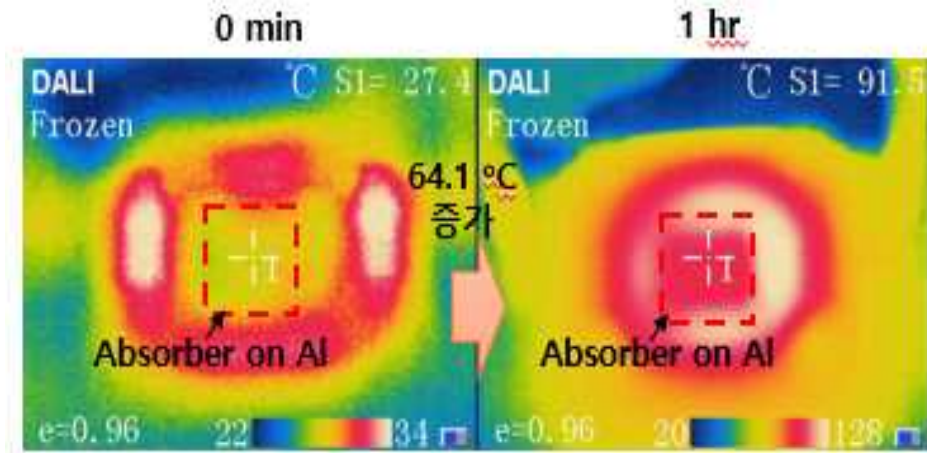


<그림 2.56. Al substrate, Absorber / Al substrate 솔라 집열기>

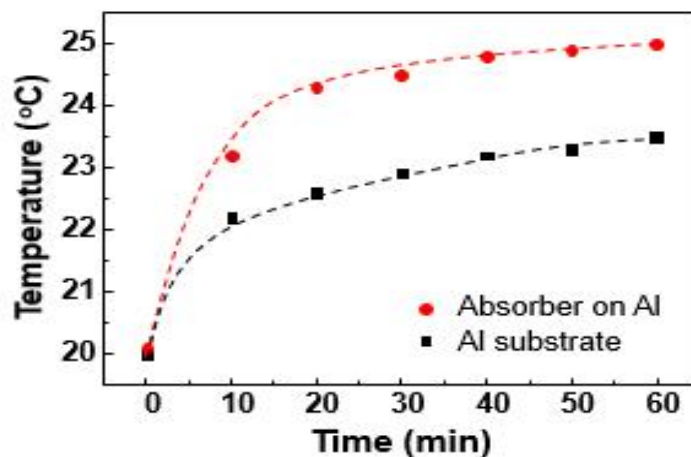
- 40 sun 집광하여 흡수체가 증착된 알루미늄 기판의 온도 측정을 1시간 동안 테스트한 결과, 적외선 온도계를 이용하여 기판의 온도를 측정하였을 때, 흡수체를 증착한 기판의 표면 온도는 약 91 °C까지 증가함을 확인함.



<그림 2.57. Al substrate 집열기 집광시간에 따른 적외선 카메라로 측정한 솔라 흡수체 표면 온도와 열화상 이미지>



<그림 2.58. Absorber / Al substrate 집열기 집광시간에 따른 적외선 카메라로 측정한
솔라 흡수체 표면 온도와 열화상 이미지>



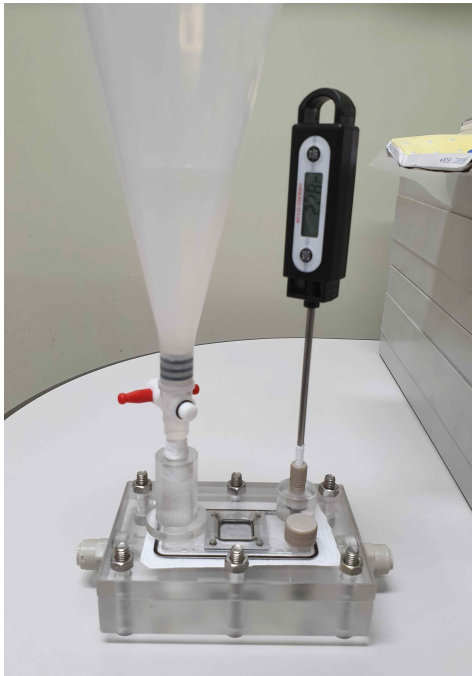
<그림 2.59. 흡수체 유무에 따른 물의 온도 변화>

○ 1시간 동안 알루미늄 기판의 흡수체의 유무에 따른 온도 변화를 관찰하기 위해,
집광 시 다층박막흡수체 유무에 따른 물의 온도 변화 측정 결과 흡수체가 존재할
때 약 2 °C 정도 더 증가함.

○ 막중류 일체형 솔라 집열기 디자인 개선

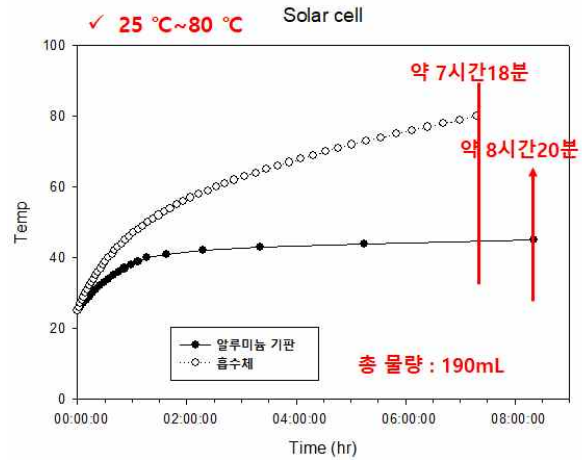
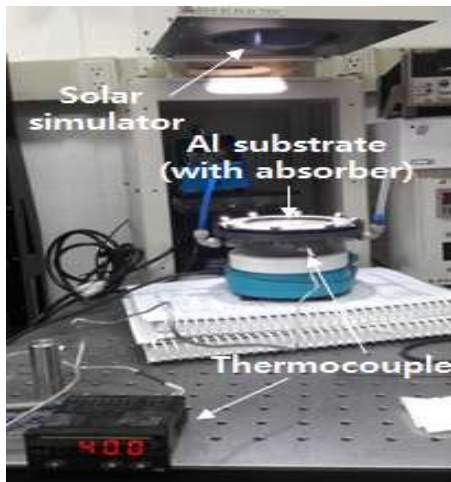
- 기존의 솔라집열기는 공기방울 생성으로 인해 흡수체와 물이 닿지 않는 부분이
생겨 열전도의 효율이 떨어짐.
- 공기구멍을 내어 흡수체와 물이 닿는 면적을 넓히고 빈 공간을 최소화 하여 열
전도에 방해되는 공기방울 생성 가능성을 줄이기 위한 디자인 도입함.

- 투입되는 물의 양을 조절할 수 있는 분액 깔때기를 이용하여 정화하는 물의 양, 온도, 농도의 측정을 용이하게 하기 위한 디자인 도입함.
- 분액 깔때기를 통해 흘려보낸 오수가 태양광을 흡수한 흡수체에 의하여 가열되면, 흡수체의 온도와 가열된 수온을 측정, 막증류(MD) 실험 전후의 오수의 양과 농도를 측정하여 정화된 것을 확인함.



<그림 2.60. 개선된 솔라 집열기>

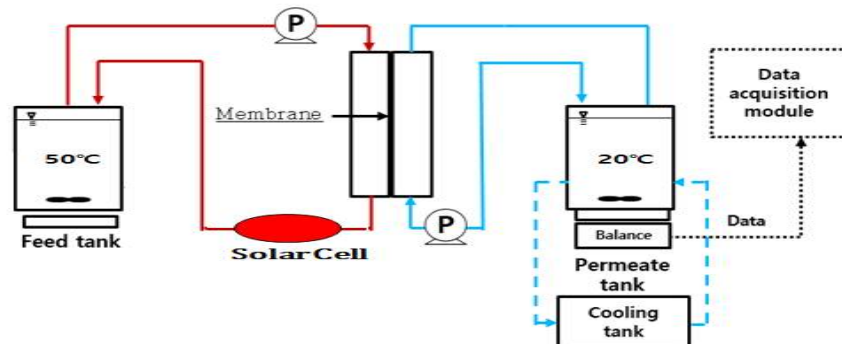
- 솔라 집열기에 의한 물의 가온성능 평가를 위하여 90 % 이상의 흡수도를 가지는 Ti/MgF_2 10/320 nm 10 layers를 증착한 흡수체를 적용하여 1 sun 솔라 시뮬레이터 하에서 수온 상승을 측정함.
- 솔라 집열기는 소규모 원통형 수조에 직경 10cm의 원판형으로 제작된 흡수체를 상부에 부착하는 형태로 제작하였으며, 수조 상부에 플랜지 형태로 흡수체를 부착하도록 제작되었으며, 흡수체의 유효집열면적은 63.6 cm^2 이며 수조의 유효용량은 190 mL로 수조에 증류수를 채우고 1 sun 조건의 솔라 시뮬레이터 하에서 물의 온도를 측정하여 집열기의 가온성능을 평가함.
- 솔라 집열기에 의한 물의 가온성능 평가는 AI 기판과 흡수체가 증착된 기판의 물 온도 변화를 비교측정하였으며, 측정 결과 흡수체가 없는 AI 기판의 경우는 약 8시간 20분 동안 45°C 까지 증가하였으나, 흡수체가 존재할 때는 약 7시간 18분 안에 80°C 까지 증가하여 흡수체가의 가온속도와 최대온도 모두에서 가온성능이 월등함을 확인함.



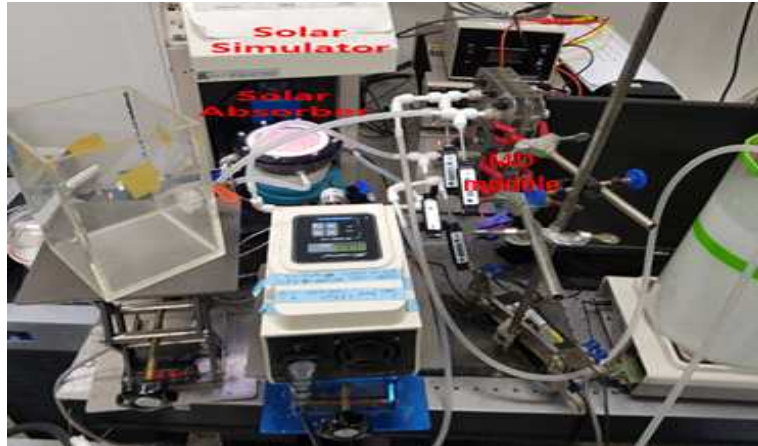
<그림 2.61. 제작된 솔라 집열기, 흡수체 유무에 따른 물의 온도 변화 측정 그래프>

(바) 태양열 집열기의 막증류 성능 평가

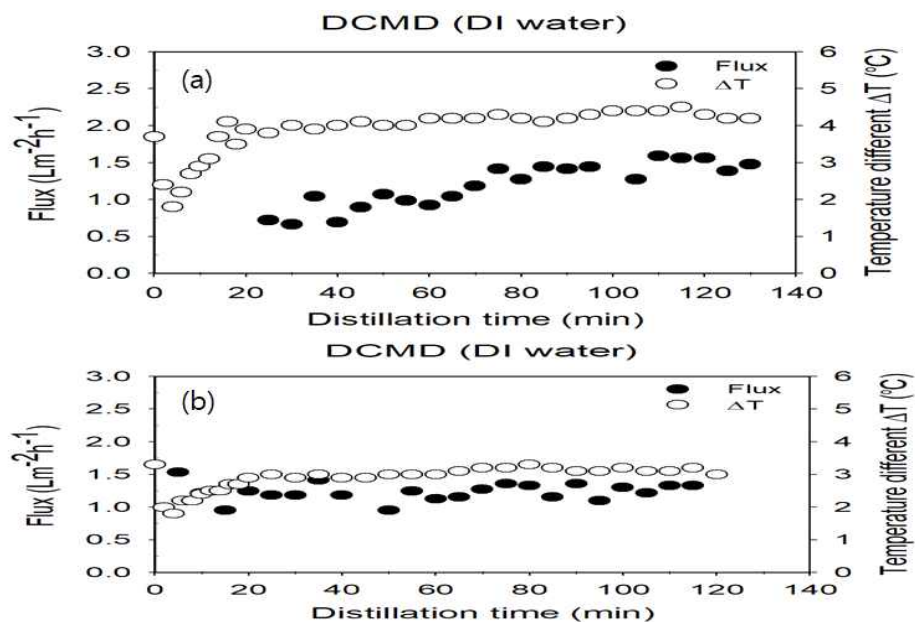
- 솔라 시뮬레이터 하에서 막증류 성능평가를 위하여 실험실 규모의 솔라 흡수체와 막증류 모듈을 결합한 막증류 시스템을 이용하여 다층박막광흡수 소재 유무에 따른 솔라 시뮬레이터 (1 sun)에서의 PTFE 막(유효면적:0.00415 m²)을 이용한 DCMD에서 130분 동안 운전하며 온도차에 따른 flux를 모니터링 하였음.



<그림 2.62. 솔라 흡수체와 막증류 모듈을 결합한 막증류 시스템 schematic diagram>

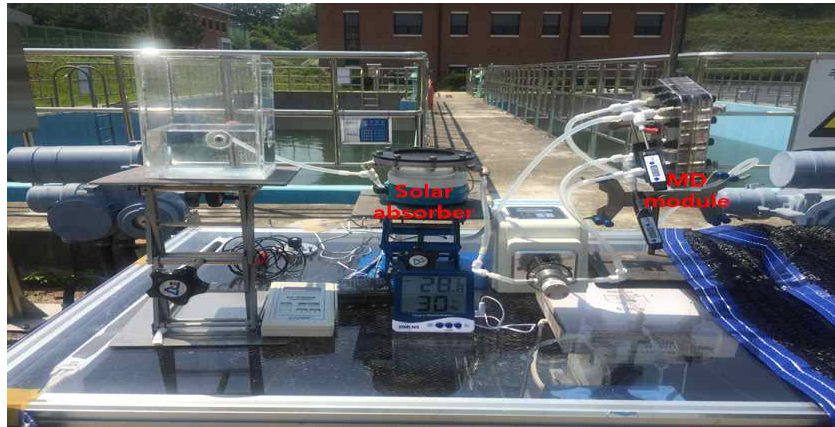


<그림 2.63. 실험실 규모 솔라 흡수체와 막증류 모듈을 결합한 막증류 시스템>



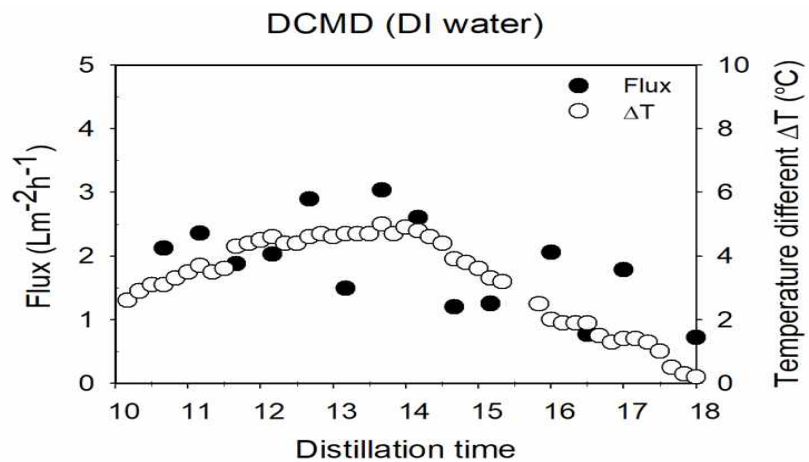
<그림 2.64. 운전시간에 따른 솔라 흡수체와 막증류 모듈을 결합한 막증류 시스템에서의 flux (a) 개발된 다층박막광소재 흡수체, (b) 일반 흡수체>

- 솔라 시뮬레이터 하에서 수행된 실험 결과, 개발된 흡수체를 적용한 경우 물온도는 최대 28.5 $^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하고 온도차 최대 4.5 $^{\circ}\text{C}$ 를 유지하여, 평균 flux는 1.42 LMH이며 최대 flux는 1.59 LMH까지 상승하였음, 반면 일반 흡수체의 경우는 물 온도 최대 27 $^{\circ}\text{C}$ 및 온도차 최대 3.3 $^{\circ}\text{C}$ 를 유지하여, 평균 flux: 1.25 LMH (최대 1.36 LMH)를 보여 다층박막광소재를 이용한 솔라 흡수체의 막증류 성능이 우수함을 확인함.
- 자연광 하에서 막증류 성능 평가를 위하여 실험실 규모의 동일한 막증류 시스템을 이용하여 야외(수지정수장 내)에서 자연광을 이용하여 240분 동안 운전하여 온도차에 따른 flux를 모니터링 하였음.

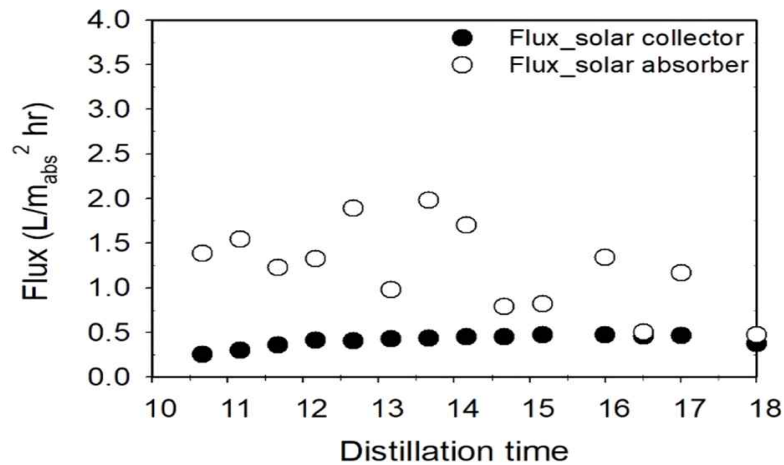


<그림 2.65. 자연광을 이용한 솔라 흡수체와 막증류 모듈을 결합한 막증류 시스템 운전>

○ 자연광 하에서 막증류 성능평가 운전결과 평균 flux는 1.87 LMH(최고: 3 LMH)를 보이며 평균 온도차는 3.2℃(최고: 5℃)를 보임. 막 증류 시간이 AM 10:00 – PM 06:00 으로(8시간 기준) 집열기 면적당 생산량은 개발집열기: 9.0 L/m²·day, 기존집열기: 4.2 L/m²·day 보여 개발된 집열기가 기존집열기에 비해 2배 이상 집열기 면적당 생산량을 보임.



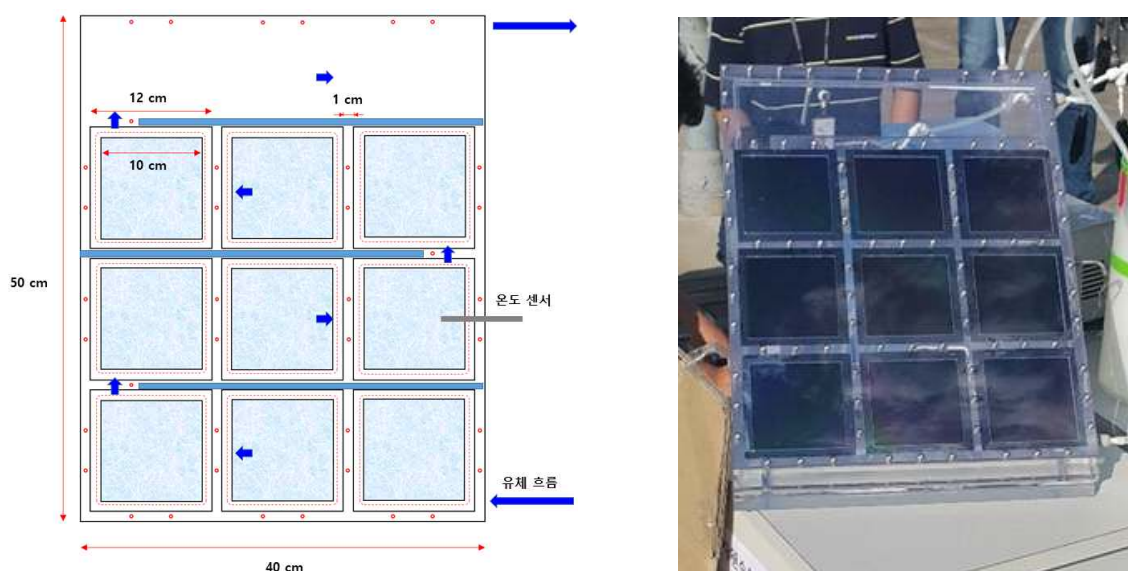
<그림 2.66. 운전시간에 따른 솔라 흡수체와 막증류 모듈을 결합한 막증류 시스템 결과>



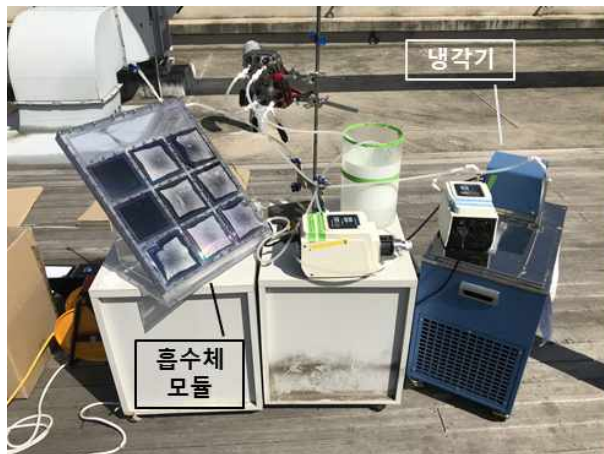
<그림 2.67. 기존 집열기 flux 비교 결과>

○ 태양열 집열기 scale-up

- 흡수체 모듈 : 12×12 cm 크기의 Al 기판위에 Ti/MgF₂를 5층 증착시켜 9장의 흡수체를 제작하였다. 제작된 흡수체를 아래 그림 2.68와 같이 흡수체 모듈을 제작하여 유효 흡수체 면적 10×10 cm, 총 900 cm²의 흡수체를 설치하였다. 1.4 L의 수조부피를 가지고 있으며 Ti/MgF₂가 증착되지 않은 Al기판 뒷면을 직접적으로 접촉하여 가온함.
- 막증류 모듈 : 유효막면적 0.0083 m²의 막증류 모듈을 설치하였고 기어펌프를 이용하여 hot/cold채널 각각 400 mL/min의 유속으로 흡수체 모듈의 가온수와 냉각수를 공급함.

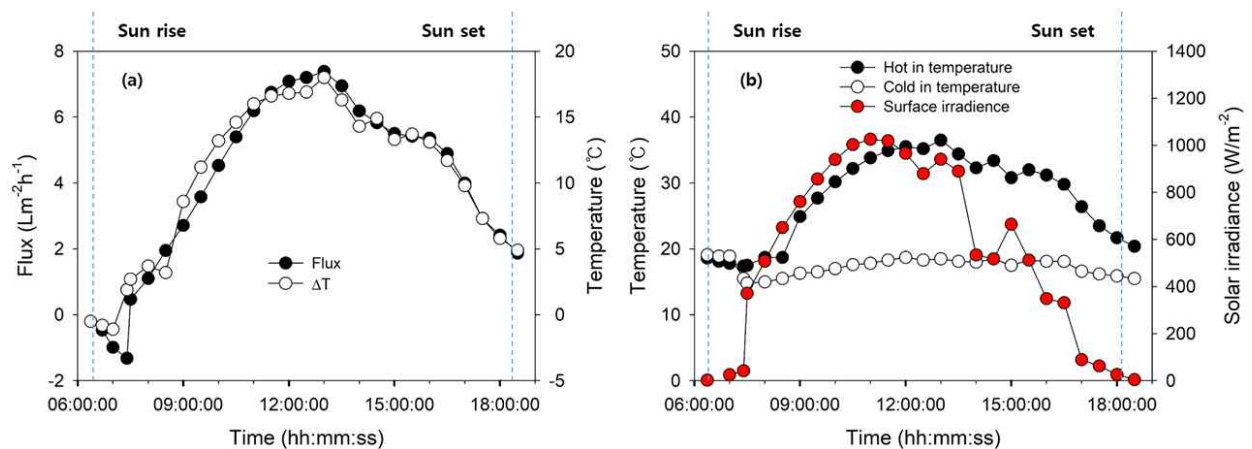


<그림 2.68. 태양열 집열기 모듈 모식도 및 집열기 모듈 사진>



<그림 2.69. 태양열 집열기가 결합된 소규모 막증류 시스템>

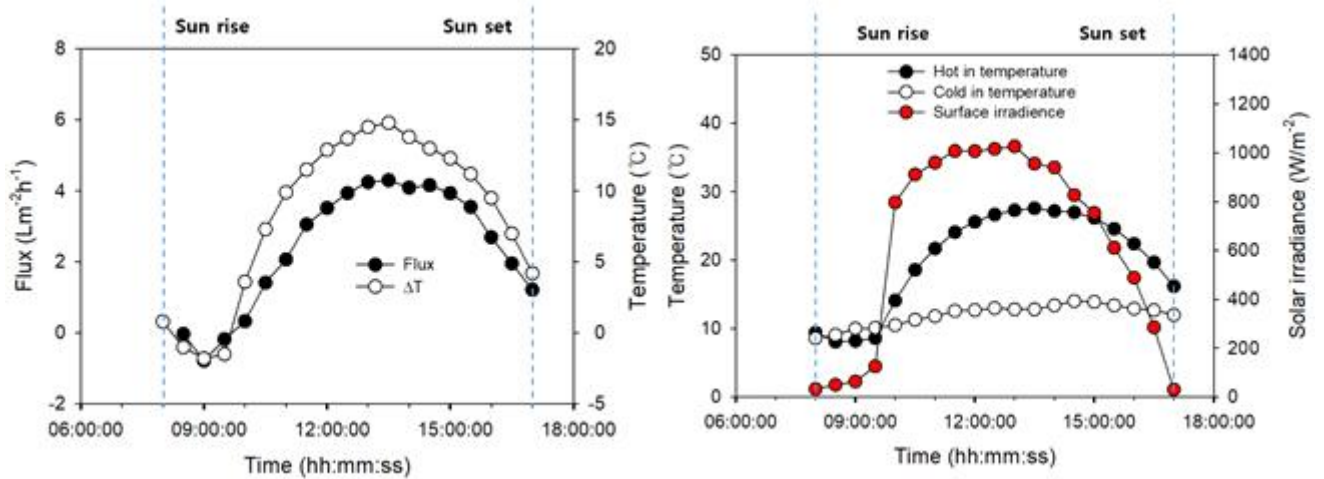
- 한국과학기술연구원 연구동 옥상에서 9월, 맑은 날(일출 06:20 ~ 일몰 18:20) 실험 진행함. 정남방향으로 흡수체 모듈의 방위각을 두어 한낮의 태양에너지를 최대한 이용할 수 있도록함.



<그림 2.70. 9월 맑은날, 막증류 시스템 운전 결과 (a) 온도차에 의한 플럭스 변화, (b) 흡수체 모듈 표면에 공급된 태양복사에너지에 따른 수온 변화>

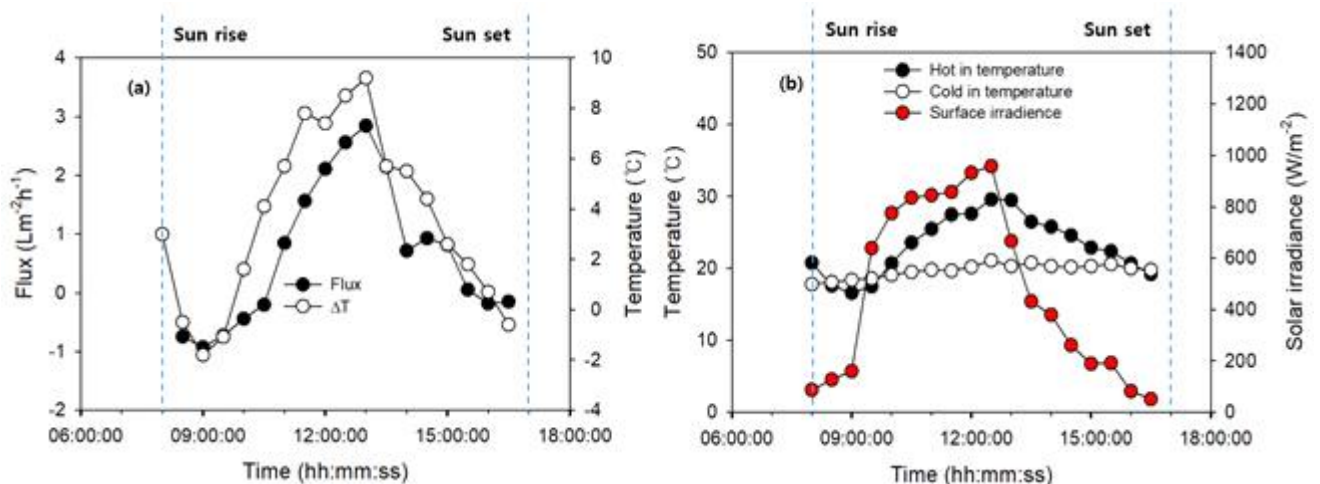
- 그림 2.38 (a)에 나타난 바와 같이 막증류를 통해서 얻어진 플럭스는 막증류 모듈에 공급되는 물의 온도 차이 (ΔT)와 높은 상관관계가 있음. 일출시에는 복사에너지가 불충분하여 오히려 플럭스가 낮아 졌지만 직사광선이 도달하면서 온도차이가 발생하여 플럭스가 상승함. 13시 30분 무렵 최대 플럭스인 7.3 LMH를 달성하였으나 이후 태양이 서쪽으로 진로가 바뀌고 14시 무렵 구름이 몰려와 그림 2.38 (b)와 같이 흡수체 모듈 표면에 도달하는 복사에너지양이 급격하게 줄어들게 되어 플럭스가 감소하는 양상을 보임. 태양열 집열기 단위면적당 일평균 처리수 생산량 : $4.78 \text{ L/m}^2 \text{ day}$, 온도차(avg.) : 12.4°C (최대 18.0°C)를 보임. 온도차를 최대로

장기간 유지하기 위해서 오전 오후 시간대에 복사에너지를 충분히 활용할 수 있도록 모듈에 도달하는 복사에너지의 입사각을 균등히 할 수 있는 방안 필요.



<그림 2.71. 11월 맑은날, 막증류 시스템 운전 결과 (a) 온도차에의한 플럭스 변화, (b) 흡수체 모듈 표면에 공급된 태양복사에너지에 따른 수온 변화>

○ 태양열 집열기가 결합된 소규모 막증류 시스템을 11월, 춥고, 맑은 날(일출 -08:00 ~ 일몰-17:00) 실험진행함. 태양열 집열기 단위면적당 일평균 처리수 생산량 : $2.01 \text{ L/m}^2 \text{ day}$, 온도차(avg.) : $8.19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (최대 $14.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 최대 flux : 4.3 LMH 를 보임. 계절에 따른 짧은 일조시간 및 기온변화로 인해 9월(맑은날)에 비해 낮은 flux, 처리수 생산량을 보임.



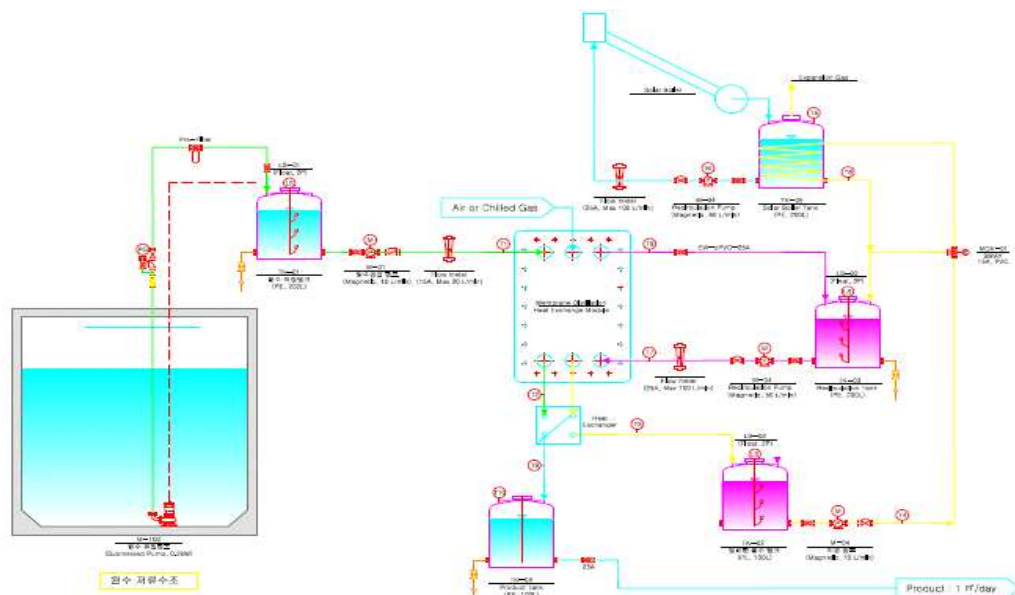
<그림 2.72. 11월 흐린날, 막증류 시스템 운전 결과 (a) 온도차에의한 플럭스 변화, (b) 흡수체 모듈 표면에 공급된 태양복사에너지에 따른 수온 변화>

○ 태양열 집열기가 결합된 소규모 막증류 시스템을 11월, 춥고, 흐린 날(일출

-08:00 ~ 일몰-16:30) 실험진행함. 태양열 집열기 단위면적당 일평균 처리수 생산량 : $0.51 \text{ L/m}^2 \text{ day}$, 온도차(avg.) : 3.59°C (최대 9.2°C), 최대 flux : 2.9 LMH 를 보임. 날씨 따른 짧은 일조시간 및 구름으로 인한 태양복사에너지 차단으로 인해 맑은날에 비해 낮은 flux, 처리수 생산량을 보임. 향후 태양열 집열기가 결합된 파일럿 규모의 막증류 시스템 개발을 위한 계절별, 날씨 변동에 따른 운전조건 도출 필요함.

(5) 파일럿 플랜트 설치 및 운전

(가) 태양열 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 설치



<그림 2.73. 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 P&ID>

- 개발된 집열기, 전처리 설비 및 프로토타입 막증류 스택이 결합된 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 설계 완료함. 실제 현장에 파일럿 플랜트 설치를 위한 설치도면 제작함.



<그림 2.74. 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 설치 도면>

- 파일럿 플랜트 설치를 위한 막증류 정수처리 시스템이 적용가능한 경기도 용인시 수지정수장(K-water 동남권지사)을 테스트 베드로 선정하고, 테스트베드 내에 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트를 설치하고, 안내판(연구과제의 개요, 연구현황 등) 설치함(그림 2.77 참조).



<그림 2.75. 파일럿 플랜트 전처리(좌) 및 막증류(우) 장치>



<그림 2.76. 테스트베드 내 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 설치>



**분산형 용수공급을 위한 다중막광증수발열소재
이용 막증류 정수처리 기술 개발**

연구과제 개요

- 사업명 : 국토교통기술혁신연구사업
- 과제명 : 분산형 용수공급을 위한 다중막광증수발열 소재이용 막증류 정수처리 기술 개발
- 주관연구기관 (책임자) : 한국과학기술연구원 (송 경 근)
- 공동연구기관 (책임자) : 에이티이(이 정 현 회)
- 위탁연구기관 (책임자) : 울산과학기술원 (백 정 민)
- 중 연구기간 : 2016.06.28 ~ 2019.10.27 (40개월)
- 연구 개발비:

정부출연연구	기업부담금	정부 외 출연금	합계
880,000	294,184	-	1,174,184

연구의 최종 목표

- 다중수원 분산형 용수공급 기술로서 열 효율이 높은 다중막광증수발열 소재를 적용하여 태양광을 열로 전환하여 막증류(MD)를 위한 열원으로 사용하는 융합형 막증류 정수기술을 개발하는 것으로 프로토타입 막증류 장치의 현장 성능평가를 통하여 적용가능성 확보

막증류 스택

용액스: ΔT=50℃에서 5LMH
Aquaver 상용 스택과 동일

태양에너지 집열기

증수파장 영역대: 0.2~3μm
흡수율: 90% 이상
온도: 집광 시 80℃ 이상

태양열 막증류 파일럿

목표 정수생산량: 1 m³/day
프로토타입의 일수 생산량: 0.12~0.15 m³/day 수준

핵심 연구 내용

- 본 기술은 분산형 용수공급 기술로서 열효율이 높은 새로운 광증수발열소재인 다중막광증수발열소재를 적용하여 태양광을 열로 전환하여 막증류(MD)를 위한 열원으로 사용하는 융합형 막증류 정수기술임
- 적용분야 : 소규모 마을 상수도용 정수 시스템 및 재해 시 비상급수용 정수시스템으로 적용 가능, 중동 및 동남아 등에 소규모 정수처리 기술로 수출 상용화하여 해외시장 진출기대
- 기술의 차별성 : 고성능 태양에너지 집열기(증수파장 영역대: 0.2~3μm, 흡수율: 90% 이상, 온도: 집광 시 80℃ 이상)기술과 막증류 스택 (ΔT=50℃에서 5LMH 미상)이 결합된 막증류 정수처리 기술

연구성과 현황

- 논문 : Pyramidal Metal-dielectric hybrid structure geometry with an asymmetric TiO₂ layer for broadband light absorption and photo catalytic applications 외 2건
- 특허 : 태양열 증수제를 이용한 막증류 장치 외 6건 (국내출원 7건, 국외출원 2건, 국내등록 2건)

연구책임자 정보

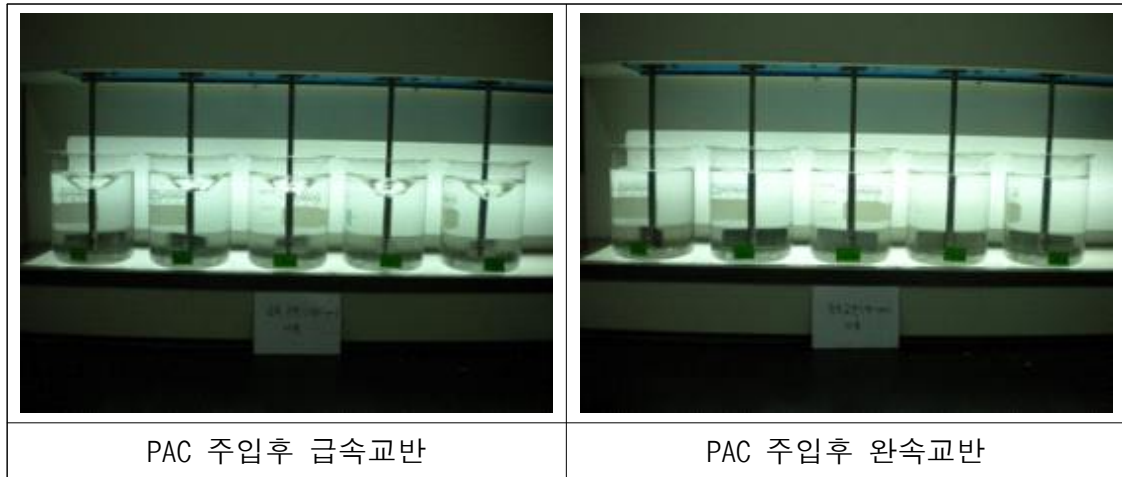
- 성명 : 송 경 근
- 전 화 : 02-958-5842
- 이메일 : kgsong@kist.re.kr
- 소 속 : 한국과학기술연구원(KIST)

<그림 2.77.태양열 막증류 정수처리 시스템 안내판 설치>

(나) 고효율 라멜라 응집/침전 설비 개발

○ 현장 시료를 대상으로 응집제의 적정 투입율 및 부유물질 제거효율에 대한 시험을 위해 PAC을 사용하여 Jar test를 수행함.

－ 시료를 대상으로 적정 투입율 및 부유물질 제거효율에 대한 시험을 위해 응집제를 사용하여 Jar test를 수행하였으며, 그 테스트 조건은 다음과 같음. 120 rpm의 속도로 30초간 급속 교반시킨 다음, 50 rpm 속도로 5분간 완속 혼화를 시행하였으며 20분 정치 후, 상등수를 채취하여 비교 분석하였음. 이때, 투입되어진 응집제의 농도는 각각 5, 10, 15, 20 ppm으로 함.

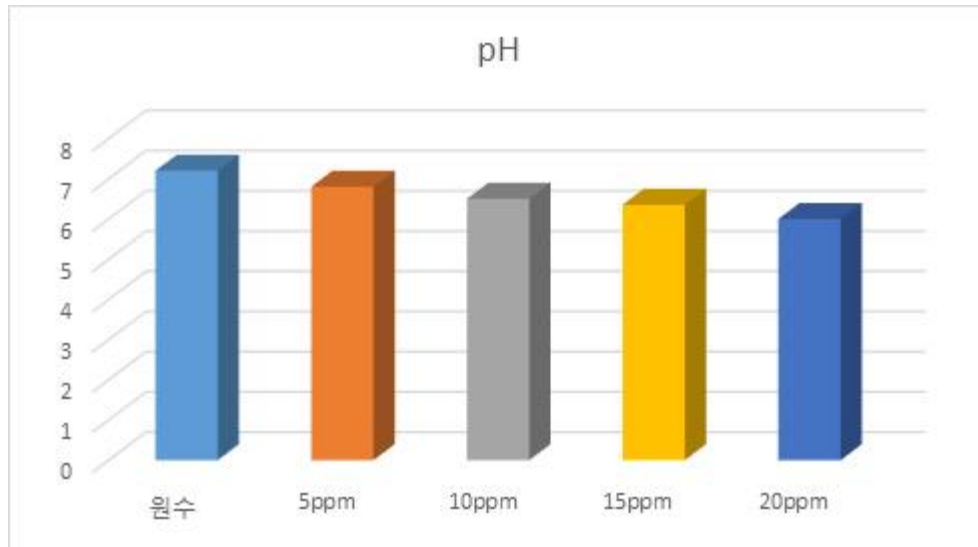


<그림 2.78. 응집제 주입율에 따른 Jar Test의 침강 모습>

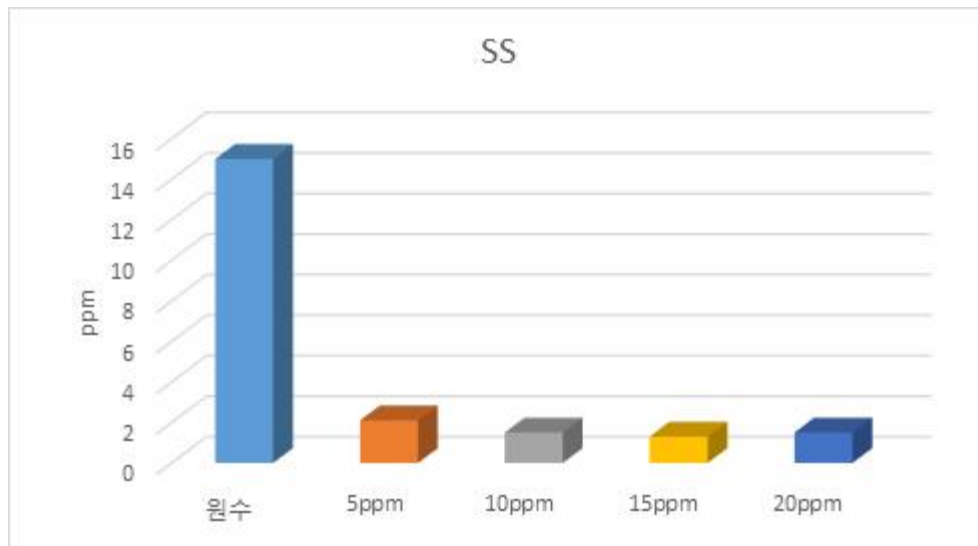
<표 2.5. 시료(원수)와 Jar test 후 상등수의 수질 분석>

구 분		pH	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)	비고
시료(원수)		7.2	15	6	
응집제 주입	5 ppm	6.8	2.1	1.8	
	10 ppm	6.5	1.5	2	
	15 ppm	6.35	1.3	2.1	
	20 ppm	6	1.5	2.5	

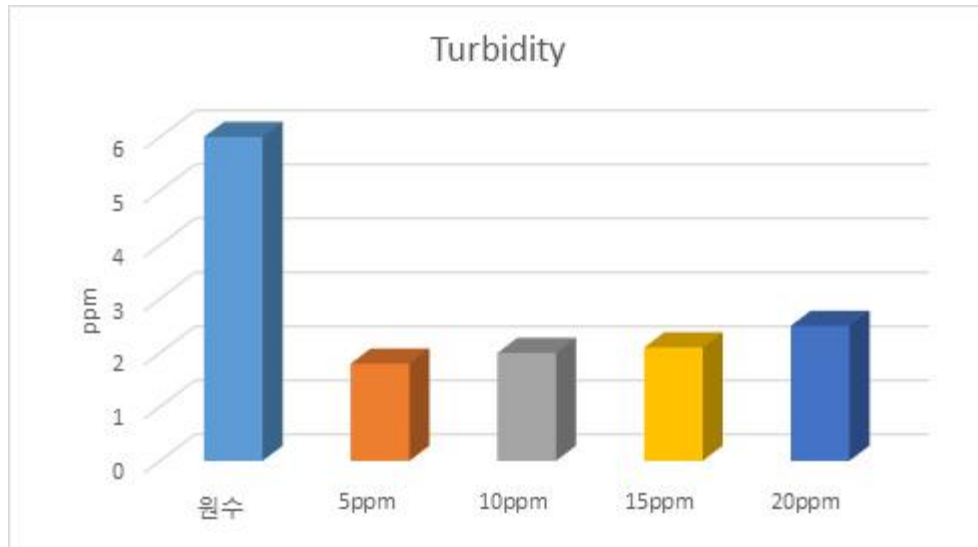
- 표 2.5에서 볼 수 있듯이 응집제의 주입율에 따라 pH는 7.2에서 6.0까지 약간의 저하를 보였으나, 오염물질과의 플러를 형성하는데 영향이 미비함을 확인함.
- 유기물 함량을 나타내는 지표로써 SS를 분석하였는데, 응집제 주입율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으나 일정 농도 이상으로 주입될 때 처리효율이 낮아짐을 확인함.
- 즉 초기 15 ppm의 유입수는 15 ppm 응집제가 투입될 때 약 70 %이상 제거효율을 가졌으나, 그 이상의 약품이 주입될 때 60 %로 낮아짐. 이는 잔류된 응집제 성분의 영향으로 사료되며, 실제 파일럿 운전 시에 다양한 유입수질 조건에서 운영함으로써 체계적인 적정 주입율을 추산할 필요가 있음.



<그림 2.79. 최적 응집제 주입을 선정을 위한 수질 분석(pH)>



<그림 2.80. 최적 응집제 주입을 선정을 위한 수질 분석(SS)>



<그림 2.81. 최적 응집제 주입을 선정을 위한 수질 분석(Turbidity)>

○ 수면적 부하량에 따른 설계조건 결정

	고효율 전처리(라멜라 응집침전) 설비	JOB No.	
		DATA	2019. 09
	설 계 조 건	REVISION	0
		SHEET	

1. 처리용량 및 수질조건

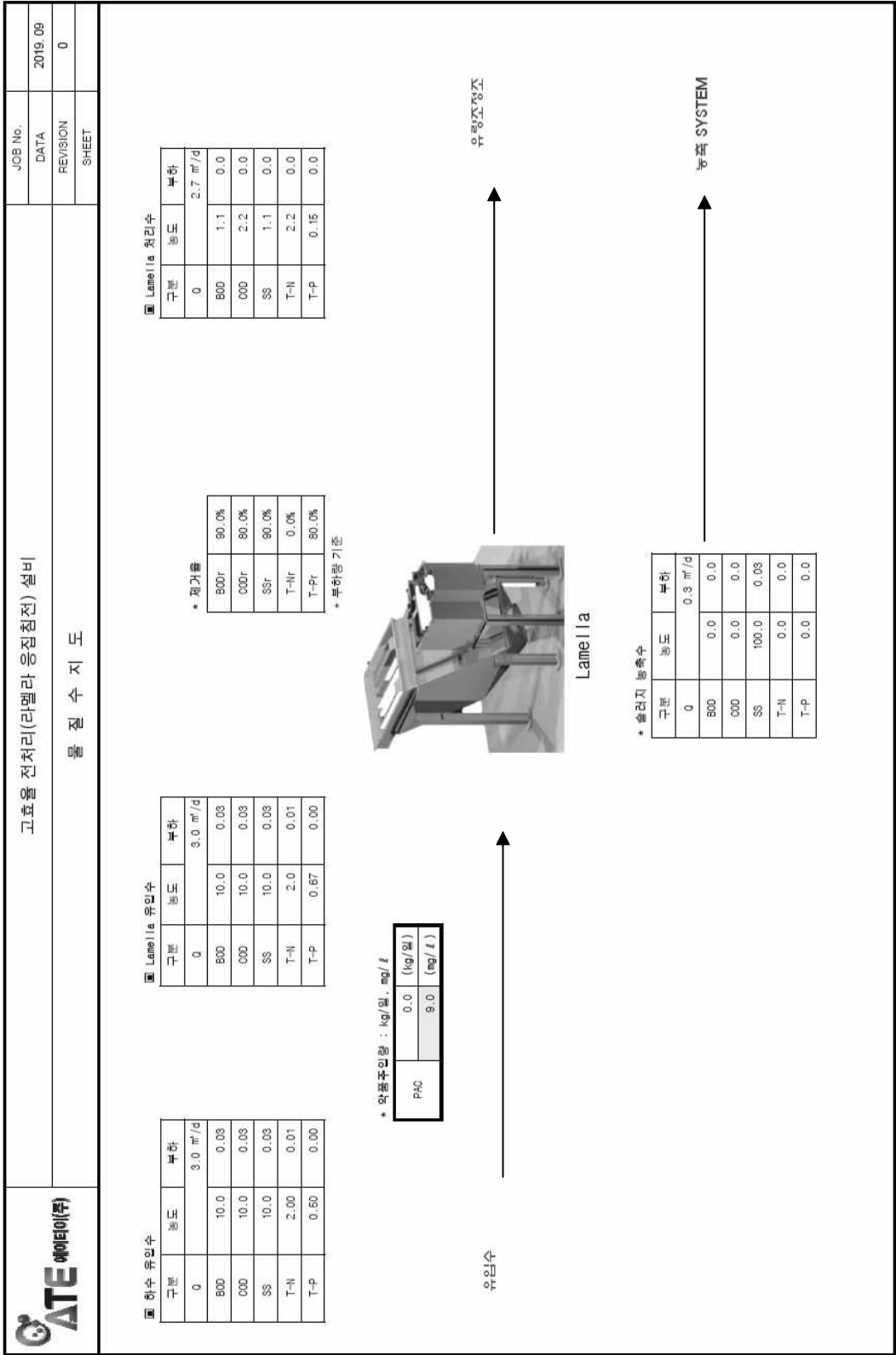
1.1 재이용 수량 : 3 m³/day

1.2 수질조건 및 목표수질 : Lamella Gravity Settler

(단위 : mg/l, MPN/100ml)

구분	pH	BOD	COD _{Mn}	SS	T-N	T-P	E-Coli
유입수질	6~8	10.0	10.0	10.0	2.00	0.50	-
보충수질	6~8	1.0	2.0	1.0	2.00	0.10	-
제거율	-	90.0%	80.0%	90.0%	0.0%	80.0%	-
목표수질	6~8	1.0	2.0	1.0	2.00	0.10	-

* 농도기준



 에어리이(주)	고효율 전처리(라멜라 응집침전) 설비		JOB No.	
			DATA	2019. 09
	용 량 계 산 서		REVISION	0
			SHEET	
1. Lamella				
가. 설계조건				
1) 설계유량(Qs)	- 적용수량(Qs)	=	3.0m ³ /d	= 0.2m ³ /hr
		=	0.004m ³ /min	
2) 필요 수면적 부하(As)	=	0.30 ~ 1.00	m ³ /m ² .hr	(0.40 m ³ /m ² .hr 적용)
4) 수면적	= Qs ÷ As	=	0.6m ²	
5) 적용 수면적	=	0.6m ²		
6) 대당 적용 수면적	=	0.6m ²		(LGS 02 , 1sets 적용)
8) 경사각		65.0°		
9) 지내유속(상향류식)	=	0.5	m/min 이하	
10) 유출웨어 월류부하	=	350.0	mm/m/day 이하	
나. Lamella 설계				
1) 경사판 제원				
- 경사판 수량	=	5.0	ea	
- 경사판 폭	=	0.26	m	
- 경사판 길이	=	0.76	m	
- 경사판 각도	=	65.0	deg	
- 경사판 두께	=	0.003	m	
- 경사판 간격	=	0.06	m	
- 경사판 투영면적	=	0.5	m ²	
- 표면적부하율	=	0.37	m/hr	
2) 경사판 pack 제원				
- 경사판 pack 폭	=	0.26	m	
- 경사판 pack 길이	=	0.76	m	
- 경사판 pack 너비	=	0.60	m	
- 경사판 pack 체적	=	0.077	m ³	
4) 침전지내 상승속도(=침전지유량/수평투영면적)				
- 침전지 설계 유량	=	0.004	m ³ /min	
- 경사판 설치면적	=	0.13	m ²	
- 지내 상승속도	=	0.03	m/min	

용 량 계 산 서

5) 침전지 체류시간(=침전지 체적/유입유량)

- 침전지 부피(유입수로+Pack+농도)	=	0.14	m ³
- 침전지 설계 유량	=	0.004	m ³ /min
- 침전지 체류시간	=	34.66	min

6) 유입구경 및 유입조 계산

- 유입구경내 유속	:	0.11	m/s 이하
- 유입조내 유속	:	0.05	m/s 이하
- 유입구경	=	0.05 m * 0.06 m	
	=	0.03	m/s 이하
- 유입조내 유속	=	0.20 m * 0.60 m	
	=	0.08	m/s 이하

다. 침전슬러지 발생량

1) 설계유량	=	03.0 m ³ /day	
2) 슬러지 발생 부하량(kg/day)	=	00.0 kg/day	= 0.00 kg/hr
3) 침전슬러지 농도	=	1.0% = 10,000 ppm	
4) 슬러지 회수율(%)	=	100.0%	
5) 슬러지 발생량	=	0.0030 m ³ /day	

라. 침전농축조 제원

1) 슬러지 발생량	=	0.30 m ³ /day	= 0.01 m ³ /hr
2) 침전농축조 높이(직경)	=	0.80 m	
3) 침전농축조 체적	=	0.17 m ³	(837.6 분 HRT)

마. Flash Mixer Tank

1) Tank 제원		
- 크기	=	0.008 m ³ (0.6mW x 0.6mL * 0.8mHe)
- 체류시간	=	2 min
2) Flashmixer		
- 형 식	:	Propeller
- 수 량	:	1 대

 ATE 에이티에이(주)	고효율 전처리(라멜라 응집침전) 설비		JOB No.	
	용 량 계 산 서		DATA	2019. 09
			REVISION	0
			SHEET	
- 사 양 바, Flocculation Tank 1) Tank 제원 - 크기 - 체류시간 2) Floccular - 형 식 - 수 량 - 사 양		: 0.40 kW x 120 RPM = 0.04 m ³ (1.2mW x 1.2mL + 0.8mHe) = 10 min : Propeller : 1 대 : 0.40 kW x 30 RPM		

ATE 에이티에이(주)	고효율 전처리(라멜라 응집침전) 설비	JOB No.	
		DATA	2019. 09
	약 품 사 용 량	REVISION	0
		SHEET	

1. 설계 조건

1) 유입조건

2) 목표수질

2. 약품 사용량 계산

(1) PAC 주입설비

1) 설계조건

○ 유입수량(Q)

○ 사용용액

2) 주입량 산정

a. 설계하수량

b. 인제거량 계산

c. 약품량산정

① Al 투입농도

유량	BOD	SS	T-P
3 m ³ /day	10.0 ppm	10.0 ppm	0.6 ppm
0.1 m ³ /hr	0 kg/day	0 kg/day	0 kg/day

유량	BOD	SS	T-P
3 m ³ /day	1.11 ppm	1.11 ppm	0.16 ppm
0.1 m ³ /hr	0 kg/day	0 kg/day	0 kg/day

03m³/일

PAC(17%,액상), 비중 : 1.36

Q = 3 m³/day 목표수질 0.16 mg/L

유입수질 0.6 mg/L

= 0.36 mg/L x 3 m³/day = 0 kg/day

$C_{Al} = C_{sp} \times m \times Al \times f / P = 0.36 \times 2.5 \times 27 \times 1 / 3 = 0.78 \text{ mg/L}$

C_{Al} : Al 주입농도(mg/L)

m : 첨가 mole비 = 2.5

P : 인의 원자량 = 31

Al : 알루미늄의 원자량 = 27

f : enhanced Coagulation coefficient = 1 (여유율)

② pac 주입량 계산
(Al_2O_3 무게비)

$$R_{pac} = C_{Al} \times \frac{O \times 3 + Al \times 2}{Al \times 2} \times \frac{1}{C_{pac}} \times \frac{1}{\rho_{pac}}$$

$$= 0.78 \times \frac{16 \times 3 + 27 \times 2}{27 \times 2} \times \frac{1}{0.17} \times \frac{1}{1.36}$$

$$= 6.40 \text{ ml/m}^3 \text{ (} 8.7 \text{ mg/L) (} 9.0 \text{ mg/L 적용)}$$

Q_{pac} : pac 주입량(l/일)

C_{pac} : pac(%)= 17.0

ρ_{pac} : pac 비중(g/cm3)= 1.36

R_{pac} : 응집제 주입률(ml/m³)

O : 산소의 원자량 = 16

Al : 알루미늄의 원자량 = 27

$$\therefore Q_{pac} = R_{pac} \times Q_{in} \times 10^{-3}$$

$$= 6.4 \times 3 \times 10^{-3}$$

$$= 0.0 \text{ l/일} = 0.0 \text{ l/min}$$

$$= 9.0 \times 3 \times 10^{-3} = 0.027 \text{ kg/일 (응집제 약품량)}$$

○ 주입율

09 mg/l

○ 주입설비용량

설계주입율의 0.6~1.2배

2) PAC 소요량(Fs1)

○ PAC

$$Fs1 = 0.027 \text{ kg/day} = 0.000021 \text{ m}^3/\text{day}$$

○ PAC 저장탱크

$$Vr = Fs1 \times 30 \text{ 일분}$$

$$= 0.0 \text{ m}^3 \rightarrow 1 \text{ m}^3 \text{ 적용}$$

3) PAC feed pump

○ 소요 용량

$$Q1 = Fs1 \times (0.6 \sim 1.2) \div 24(\text{가동시간})$$

$$= 0.0004 \sim 0.0011 \text{ l/hr (적용 0.1 l/hr)}$$

$$= 0.017 \text{ l/min} \times 30.0 \text{ mH} \times 0.2 \text{ kw}$$

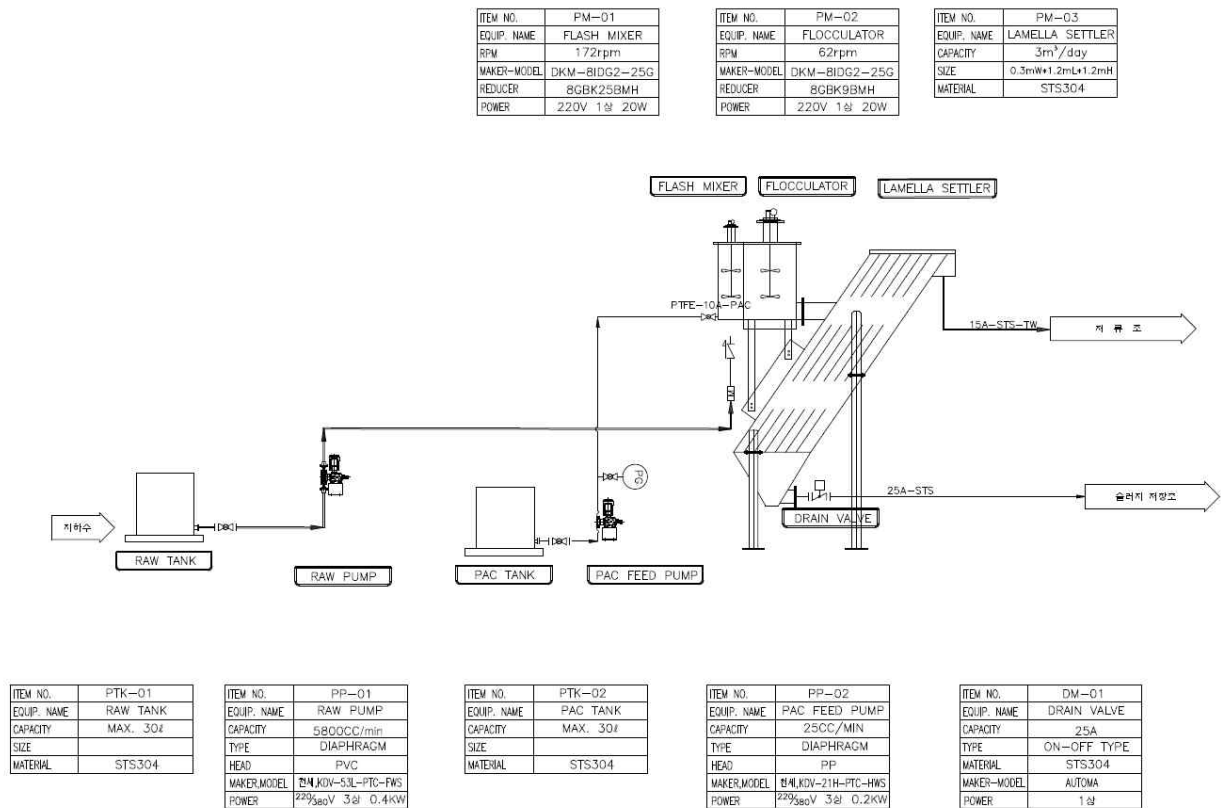
○ 수 량

○ 형 식

∴ Diaphragm , 2 대 (1 대 예비)

 ATE에이티에이(주)	고효율 전처리(라멜라 응집침전) 설비	JOB No.	
	약 품 사 용 량	DATA	2019. 09
		REVISION	0
		SHEET	
3. 화학적슬러지 발생량			
1) 인제거에 의한 슬러지량			
① 화학적 슬러지 (AlPO ₄)		(화학적으로 제거해야할 P농도/P원자량) X AlPO ₄ 분자량 = 0.4 / 31 x 122 = 1.42 mg/L (AlPO ₄ 발생량) 1.42 mg/L x 3 m ³ /일 x 10 ⁻³ = 0.0 kg/일	
② 화학적슬러지 (Al(OH) ₃)		(Al주입농도/Al원자량 - 화학적으로 제거할 P농도/P원자량) x Al(OH) ₃ 분자량 = (0.78 / 27 - 0.4 / 31) x 78 = 1.36 mg/L (Al(OH) ₃ 발생량) 1.36 mg/L x 3 m ³ /일 x 10 ⁻³ = 0.0 kg/일	
③ 총 화학적 슬러지 발생량		= 0 + 0 = 0.0 kg/일	
2) SS제거에 의한 슬러지량			
① 유입부하(kg/일)		유입농도(mg/l) × 유입유량(m ³ /일) = 10.0 × 3.0 ÷ 1,000 = 0.0	
② 유출부하(kg/일)		유출농도(mg/l) × 처리수 유량(m ³ /일) = 1.1 × 3.0 ÷ 1,000 = 0.0	
③ 제거 SS량(kg/일)		0.030 kg/일	
3) 총 슬러지 발생량		총 화학적 슬러지 발생량 + SS제거에 의한 슬러지 발생량 = 0.0 + 0.0 = 0.03	
4) 탈수 케익 발생량		- 고형물회수율 : 90.0% - 탈수케익 함수율 : 80.0% - 케익 발생량 = 슬러지발생량(kg/일) × 회수율(%) ÷ 케익 함수율(%) = 0.0 × 90% ÷ 0.2 = 0.0 ton/일	

- 고흡물 침전효율 극대화를 위한 100 % 경사판 활용 및 운전최적화를 위한 단위 공정 조합 설계함.



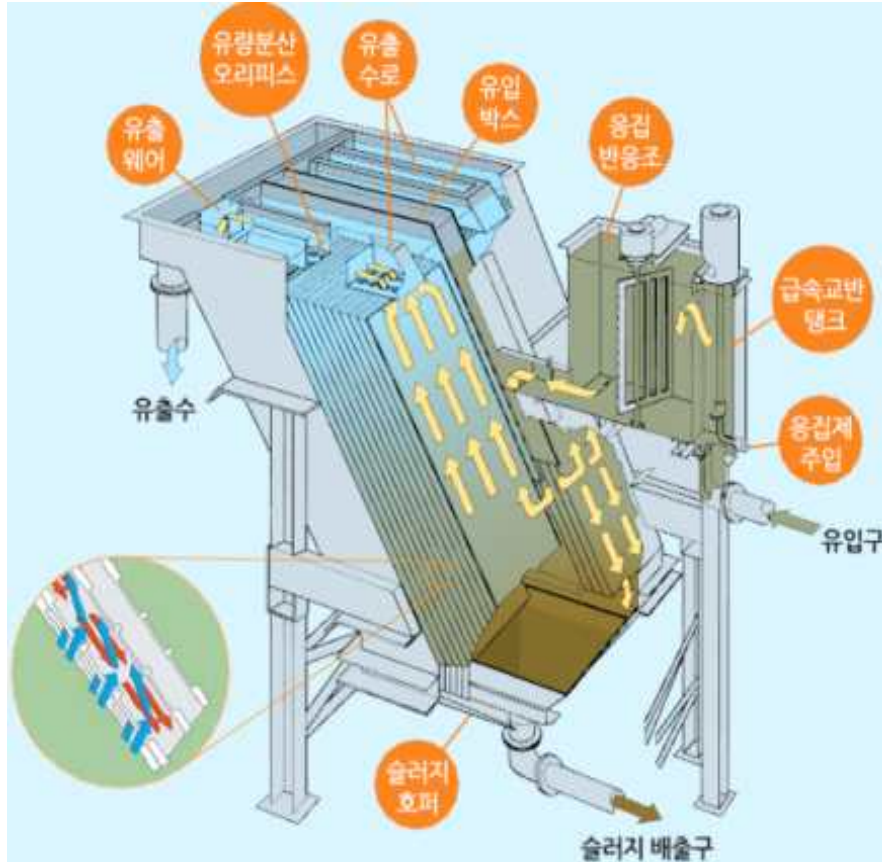
<그림 2.82. 고효율 전처리 설비 P&ID>

- 세부 설계에 따른 고효율 전처리 설비의 시스템 제작

- 고흡물 침전효율 극대화 100 % 경사판 활용 장치 개발함. 본 제안기술은 상향류형으로 반응조안에서 역류흐름을 가진 응집형성된 floc 물질은 역류를 따라 위쪽으로 경사판을 통과하고 모듈 위 방향으로 흘러서 웨어를 통과한 다음 이후 공정으로 이송됨. 반면 경사판에 의해 침전된 고흡물질은 아래 방향 역류를 형성하여 중력에 의해 이동하고 반응조 하부로 쌓이게 됨.
- 이는 기존 처리장의 침전시설을 개선하고 성능향상을 위한 장치에 대한 기술로써, 침전효율을 증대시키기 위하여 체류시간 보다 침전면적에 의해 더 큰 영향을 받는 원리를 응용한 고효율 일체형 라멜라 침전설비임. 즉 초기에 유입되어지는 고농도 유입수는 급속반응조에서 응집제와 혼합된 다음 응집반응조에서 침전성이 우수한 거대 플러크로 형성되어짐. 형성된 플러크들은 유입박스(Feed box)로 연결된 유입관에 의해 라멜라 침전지로 유입되고 유입수는 각 경사판 모듈의 측면에 형성된 슬롯방향의 아래 방향으로 흐르게 됨.

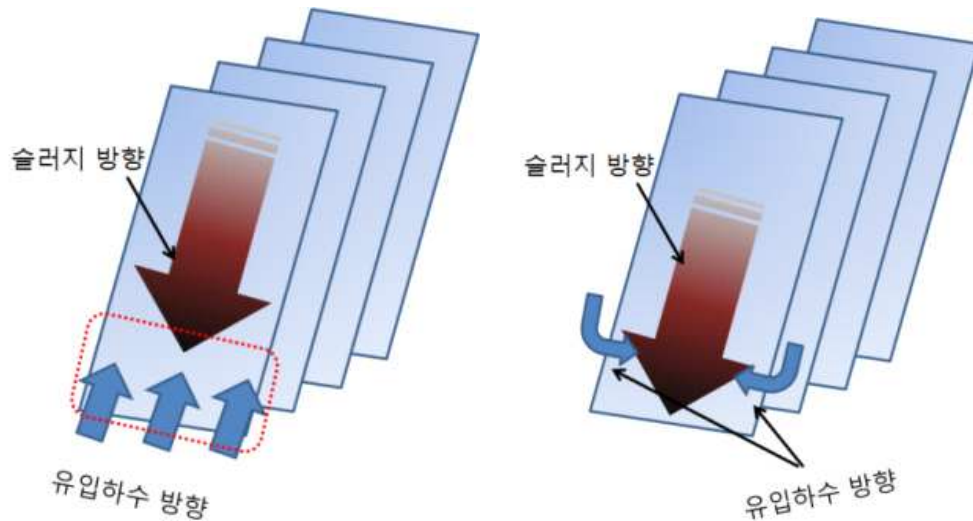
- 유입수는 경사판의 폭과 교차되어 분산되고 층류 상태(Laminar flow)로 상향류로 흐르게 되며, 55도로 기울어져 있는 경사판에 의해 고형물이 침전되고 깨끗한 상등수는 오리피스의 웨어를 통해 후속 공정인 MD 공정으로 이송됨.
- 유출웨어는 각 경사판의 바로 위에 설치되어 각 경사판에서 균등하게 분배되도록 하며 고형물은 경사면을 따라 하부, 즉 슬러지 호퍼안으로 모이게 됨. 이러한 컴팩트 한 구조는 기존 처리시설 보다 설치부지를 1/2이하로 줄일 수 있을 뿐 아니라 처리효율 증대 및 유지관리가 용이하게 할 수 있는 일체형 고효율 라멜라 침전설비가 됨.
- 기술 제작사양은 아래 표와 같음.

구 분	시설제원
급속혼화조	- 재질 : STS304 - 체류시간 : 2min 이상 - 교반기 : 0.4kW*172rpm*1대
완속응결조	- 재질 : STS304 - 체류시간 : 10분 이상 - 교반기 : 0.4kW*62rpm*1대
Lamella Tank	- 재질 : STS304 * 6t - 경사판 설치각도 : 55° - 유입수로와 경사판모듈의 분리구조
슬러지 호퍼	- 재질 : STS304 * 6t - 호퍼 용량 : 0.17m³이상 - 호퍼면 경사각 : 60° 이상 - 슬러지 자동 배출 구조
경사판	- 재질 : FRP - 제원 : 750mmH*500mmW*3t*5장 - 간격 : 500mm 이상
원수펌프	- 재질 : Standard - 용량 : 5,800mL/min - 전력 : 220/380V, 0.4kW, 60Hz
약품펌프	- 재질 : PP&PTFE - 용량 : 25mL/min, Max. 15bar - 전력 : 220/380V, 0.2kW, 60Hz
면적식 유량계	- 재질 : STS304 - 사이즈 : 15A FLANGE
전동밸브	- 재질 : STS304 - 사이즈 : 25A FLANGE - 전력 : AC220V
제어판넬	- 재질 : STS304 - 사이즈 : 600mm x 1,450mm x 350D



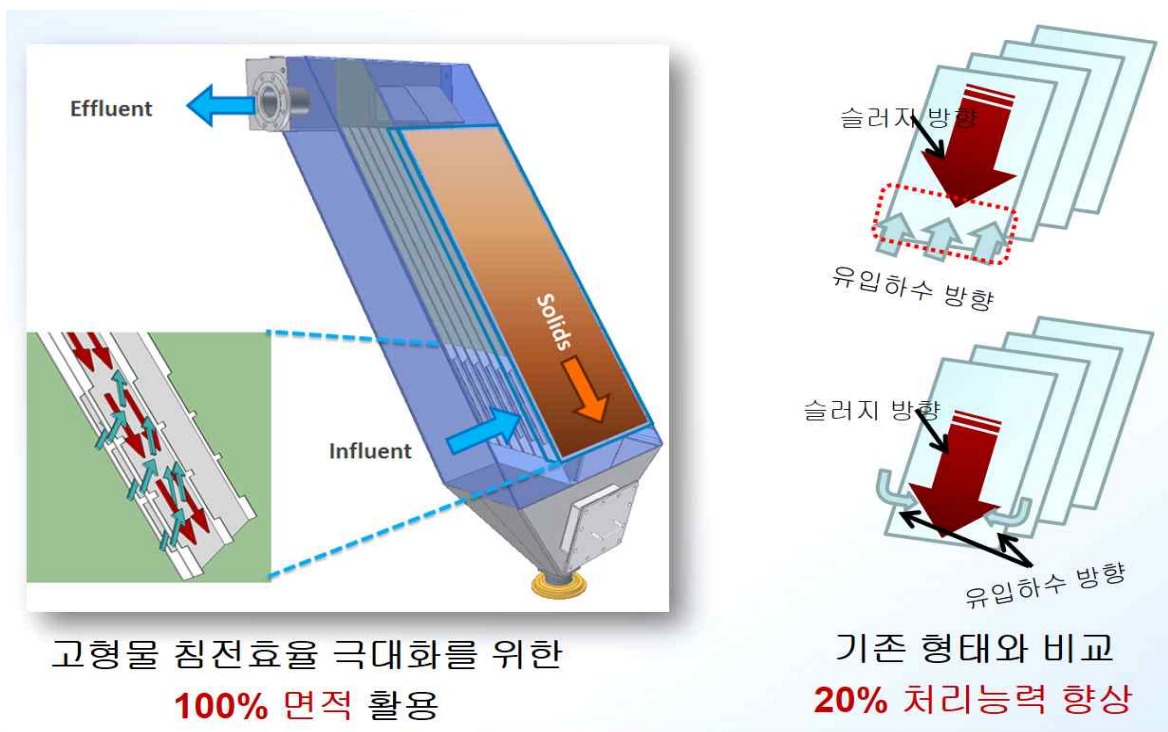
<그림 2.83. 일체형 라멜라 침전지의 모식도>

- 기존 경사판 침전장치의 경우 경사판의 하부로 유입수가 유입되어 경사판을 따라 상류로 흐르게 되는데, 이와 반대방향으로 슬러지는 경사판 하부로 흘러내려 오게 됨. 그러나 이때 유입수와 슬러지의 상반된 흐름으로 인해 혼합현상 발생되거나 침전성을 불량하게 하는 원인임. 그러나 본 제안기술에서는 경사판 측면으로 유입수를 공급하는 구조로 성능을 개선코자 하였으며 유입 슬롯의 위치변경으로 인해 이러한 혼합공정이 없도록 하여 전체 경사판 면적이 침전지 역할을 할 수 있도록 고안함.
- 기존 경사판 침전설비 대비 20% 처리능력 향상기술 개발함. 기존 경사판 침전장치는 경사판의 하부로 유입되어지는 하수는 중력에 의해 하부로 이동되어지는 슬러지와 충돌하게 되며 혼합지역(즉 mixing zone)이 형성됨. 이는 결국 경사판 면적의 20 %를 차지하게 되어 처리용량 저하를 가져옴(하단 그림의 점선부분). 그러나 본 기술개발은 측면의 슬롯을 통해 공급하게 유도함으로써 혼합지역을 최소화시킬 수 있게 하였음. 이는 기존 경사판 침전지와 비교하였을 때 20%의 처리능력 향상의 결과를 얻게 할 것임.



<그림 2.84. 유입하수 방향에 따른 기존 경사판 침전지(좌)와 제안 기술(우)의 혼합지역의 비교>

- 적정 경사판 간격을 통한 층류형성 유도로 처리성능 향상함. 경사판 모듈의 하단 부분의 측면 슬롯의 최적화를 통해 유입유속을 컨트롤하며, 그에 따른 최적의 경사판 간격을 설정함으로써 층류형성을 유도하고자 함. 상향 흐름의 층류 유도함. 적정 경사판 간격을 통한 최적 부유물질 제거효율 향상함.

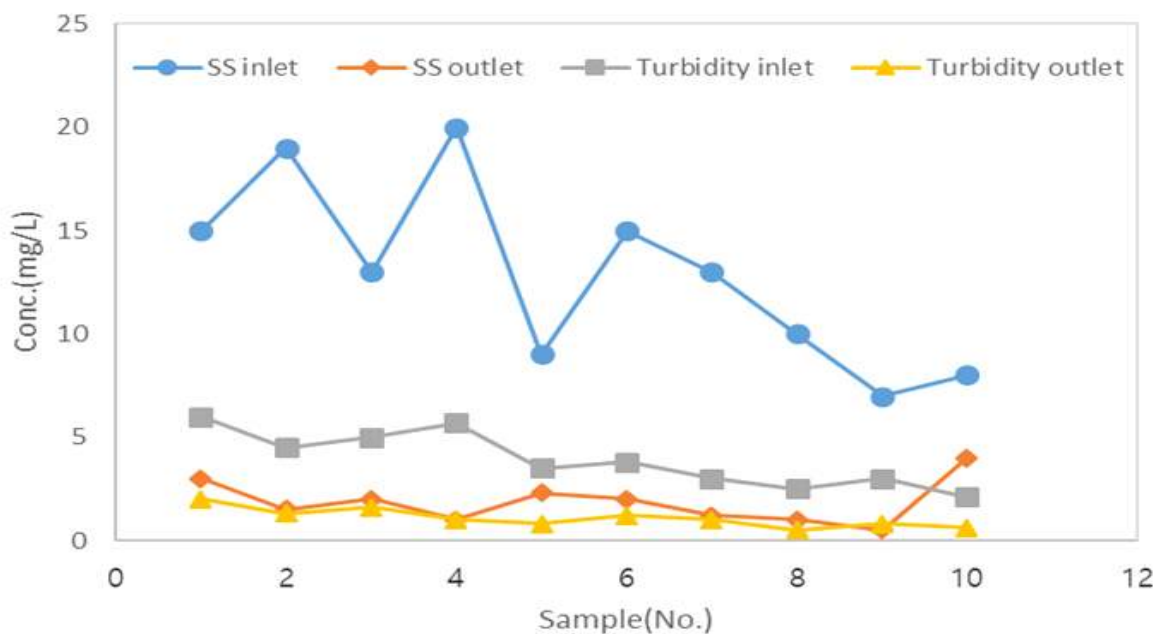


<그림 2.85. 고효율 전처리 설비 특징점>



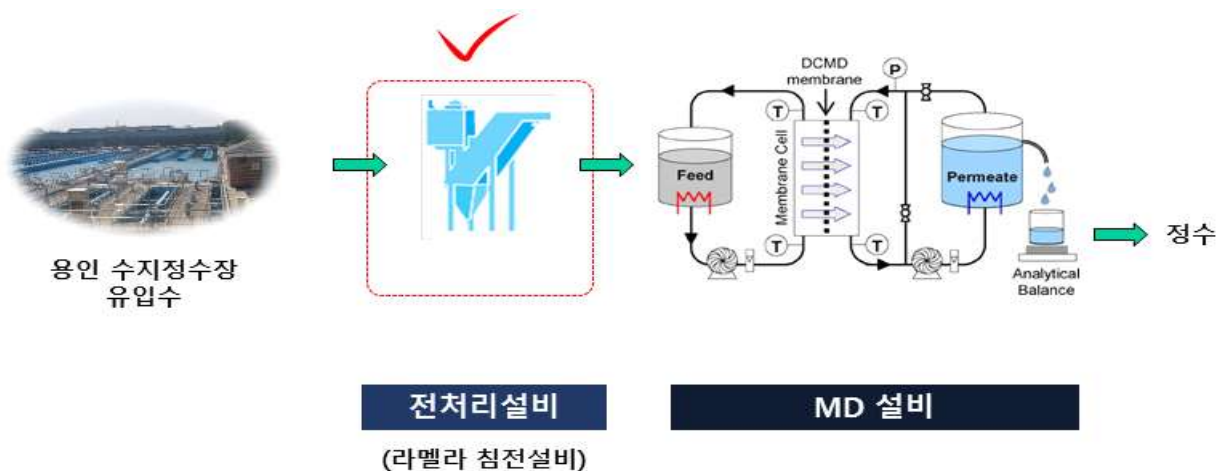
<그림 2.86. 고효율 전처리 설비 제작완료>

○ 유입 원수의 SS 및 탁도 농도 변화에도 안정적으로 70 % 이상의 처리효율을 보임. 유입수 내 포함되어 있는 수질오염의 원인이 되는 입자상 물질의 제거효율을 알아보기 위해 SS를 분석하였고 유입수 내 포함되어 있는 부유물질 등에 의하여 원수의 혼탁한 정도를 알아보기 위해 현장에서 휴대용 탁도계(TURBIDITY meter, HACH 2100Q)를 이용한 탁도를 분석함. 전처리 설비 유입수의 SS는 평균 13 ppm, 탁도는 평균 4 NTU를 나타내었으며, 유입 원수의 농도 변화에도 처리수의 SS 및 탁도 제거효율은 평균적으로 70 % 이상의 처리효율을 보임.



<그림 2.87. 원수 대비 SS 및 탁도 제거효율>

- 용인 수지정수장을 테스트 베드로 선정하여 파일럿 플랜트(전처리 설비)를 현장에 설치하여 다양하게 일어나는 현장 조건 변화를 파악함.
- 혼화지 효율 향상 방안을 위해 짧은 순간에 높은 교반강도로 혼합하여 원수와 응집제의 충분한 혼합이 이루어지도록 설계함.
 - 원수특성에 따른 혼합방식별 충분한 실험 후 최적 혼화 조건 설정, 기계식 교반기 사용 시 수리적 조건 및 운전 용이성을 충분히 검토 후 선정, 기존 정수장에서의 문제점을 파악하여 설계 개선 및 균일하고 빠르게 분산 혼합시키는 장치를 외국의 사례로부터 분석하여 최적 설계 수행함,
 - 혼화지 구조 및 설비를 효율적으로 설계 하고(유입구 및 유출구 대각선 방향 설치 등, 방해벽 설치하여 단회로 방지, 임펠러는 원수흐름방향에 직각으로 설계), 응집제 주입위치에 따른 처리효율 분석 및 설계 반영함.
 - 응집지 효율 향상 방안을 위해 후속공정에 따라 침전성 또는 여과성 플러를 생성하는가에 따라 목표로 하는 플러의 성상을 다르게 함. 혼화지와 응집지간 처리가 미치는 영향 검토, 필요 없는 과대한 G값 발생방지(플러 파괴 방지) 및 외국 기술에 대한 정보의 수집 및 평가 적용함.
 - 라멜라 침전설비 효율 향상 방안을 위해 단락류 형성 방지 고려 설계, 균등분배를 위한 슬롯 디자인 및 설계함.



<그림 2.88. 전처리 설비 설치 Flow Sheet>

<표 2.6. 국내 정수처리용 응집제의 규격 및 기준>

구 분 항 목		단위	PAC	황산알루미늄		PASS	PACS	황산 제1철	황산 제2철
				고체	액체				
성 상		—	액체	고체	액체	액체	액체	고체	액체
확인시험		—	적합	적합	적합	적합	적합	적합	적합
함량	산화알루미늄	%	10~18	16 ↑	8 ↑	8 ↑	16~18	—	—
	3가 철	%	—	—	—	—	—	18 ↑	9.6~16.2
	이산화규소	%	—	—	—	—	0.2~0.4	—	—
순도 시험	납	mg/L	10	20	10	5	10	50	80
	카드뮴	mg/L	2	4	2	1	2	10	20
	비소	mg/L	5	20	10	5	5	50	80
	수은	mg/L	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	2	3
	크롬	mg/L	10	20	10	10	10	50	80
	망간	mg/L	25	50	25	—	25	—	—
	세레늄	mg/L	—	—	—	—	—	10	20
	철(2가)	%	0.01	1.0	0.3	—	0.01	(3)	(2.5)
	NH ₃ -N	mg/L	0.01	0.03	0.01	—	—	—	—
	황산이온	mg/L	3.5	—	—	—	—	—	—
	불용물	mg/L	—	0.3	—	—	—	6.5	—
	유리산	mg/L	—	—	—	—	—	4.5	1
기타	pH	—	3.5~5.0	3.0 ↑	3.0 ↑	2.0 ↑	3~5	—	—
	비중	—	1.19 ↑	—	—	1.25 ↑	1.3 ↑	—	—
	염기도	%	35~60	—	—	—	—	—	—

* PAC : Poly Aluminium Chloride

PASS : Poly Aluminium Silicate Sulfate

PACS : Poly Aluminium Hydroxide Chloride Silicate



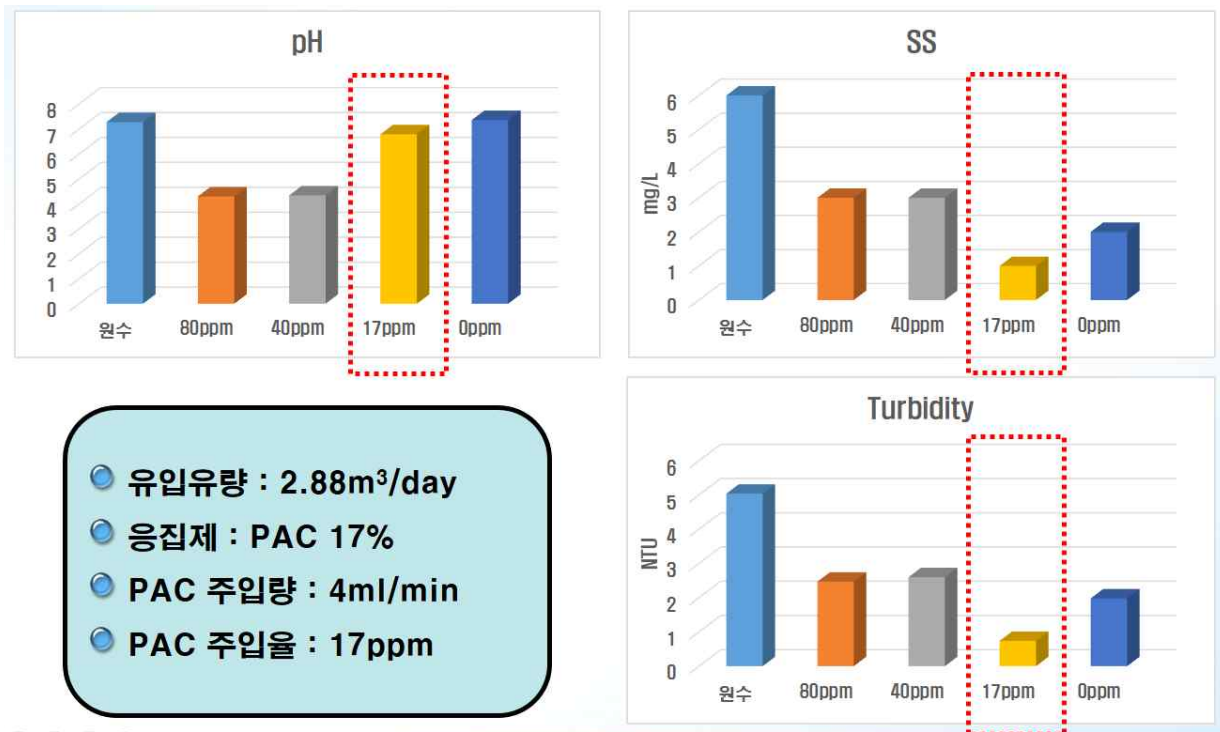
<그림 2.89. 전처리 설비 설치 Flow Sheet>

○ 전처리 운전조건 도출 및 유지관리 매뉴얼 작성

- 유입 원수의 부하에 따른 응집제 주입율을 선정하여 약품소모량을 최소로 하여 운전 조건을 도출하였음.
- 응집은 알루미늄의 수화중 또는 수화물이 콜로이드 물질과 반응하면서 나타나는 현상으로 콜로이드 물질과 수화물 사이의 반응으로 이루어짐. 일반적으로 알루미늄의 용해도가 가장 낮은 지점은 pH 6.0부근이며, pH 8.0이상에서는 알루미늄 수화중이 대부분 $Al(OH)_4^-$ 이고, pH 6.0 이하에서는 Al^{3+} 나 $Al(OH)^{3+}$ 와 같이 양의 수화중이 대부분임.
- 즉 Alum을 주입했을 경우 pH 5~8사이의 pH에서는 주입된 응집제 대부분이 solid($Al(OH)_3$) 상태로 응결물을 형성하며, pH 8이상에서는 $Al(OH)_3$ 와 같은 수화물과 음이온 수화중인 $Al(OH)_4^-$ 가 혼재되는 상태가 됨. 반면에 pH 5이하에서는 $Al(OH)_3$ 와 양이온 수화중이 혼재하는 상태가 됨.
- 채취한 시료의 pH와 Jar test를 실시한 후의 pH를 분석한 결과, 모든 시료는 중성의 pH를 나타내었으며, 적정 응집제를 투여한 후에도 거의 유사한 수치를 나타냄. 또한 응집 반응 후의 응결물의 형태도 양호한 것으로 나타남을 확인함.
- 콜로이드 물질을 불안정화시키는 공정인 전처리 공정은 입자 제거를 위한 여과 공정의 효율을 결정하는 가장 중요한 인자임. 따라서 응집은 직접여과에 있어서 전처리 상태를 예측할 수 있는 좋은 인자가 되며, pH나 응집제 주입율의 조정은 직접여과에서의 여과효율이 높아지게 할 수도 있음. 일반적으로 등전점을 이루는

pH 7 근처에서 가장 높은 탁도 제거율을 나타내는 것으로 나타남.

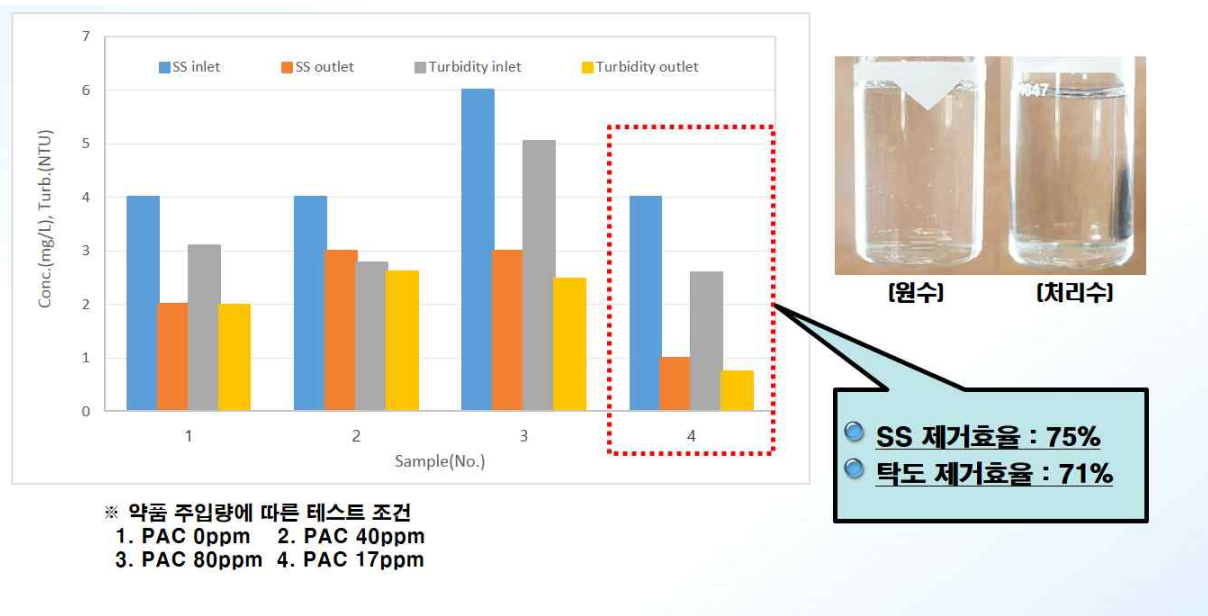
- 응집여과는 지를 생략한 공정이므로 응집제 주입율이 높게 되면 역세척 빈도가 잦아지므로 효율적이지 못함. 따라서 응집제 주입율을 낮추고 탁도 제거율을 높이기 위해서는 응집제와 결합한 콜로이드가 등전점을 이루는 지점 정도에서 전처리를 해 주어야함.
- 음의 전하로 대전되어 있어 안정한 부유상태를 유지하고 있는 콜로이드 등 오염물질을 양의 전하로 대전되어 있는 응집제와 접촉시켜주는 공정인 혼화공정과 혼화 후 생성된 미세 플록을 침전 가능한 정도의 입경, 밀도 및 강도를 갖는 플록으로 성장시켜 주는 공정인 플록형성 공정은 지표수 중의 오염물질을 제거하기 위한 중요한 공정임.
- 지표수를 상수원으로 할 경우에 널리 이용되는 혼화, 응집, 침전, 급속여과 그리고 소독으로 이루어진 일반정수 처리공정은 탁도물질과 미생물을 제거하는 것이 주목적임. 그러나 상수원수의 수질 악화 및 사고로 인한 기존 탁도 물질 외에도 용존 유기물로 인해 정수처리에 많은 어려움이 있음.
- 특히 천연유기물(Natural Organic Matters, NOMs)은 정수공정에서 제거되지 못하면 미생물을 제거하기 위한 소독공정인 염소처리 시 소독부산물인 THMs 등을 발생시키므로 정수처리에서 유기물의 제거가 매우 중요한 현안으로 대두되고 있음. 따라서 정수처리 공정 중 혼화응집공정은 응집제를 원수 중에 분산시켜 원수 중의 불순물과 접촉 및 반응하여 원수 중의 불순물이 후속 침전, 여과공정에서 제거 가능하도록 하는 매우 중요한 공정임.
- 정수처리용 응집제는 크게 대별하여 알루미늄계 응집제와 철염계 응집제로 구분되며, 많은 현장에서 알루미늄계 응집제를 사용하고 있음. 따라서 본 연구에서는 응집제로 PAC(Poly Aluminum Chloride) 무기응집제를 사용하였음.
- 응집제 주입율에 따라 파일렛(전처리 시스템)을 운전하여 상등수의 부유물질(SS)과 탁도를 측정하여, 잔류되어진 과량의 응집제가 오히려 부유물질 증가를 유발할 수 있음을 확인함. 이와 같은 테스트를 통해 최적 응집제 투입율은 17 ppm으로 선정할 수 있었으나, 다양한 지역별 수질변화를 충분히 검토한 반영이 필요할 것으로 사료됨.
- 이후에 채수한 다른 시료를 대상으로 실시한 혼화 및 응집 반응 후 수질분석 자료는 다양한 조건을 반영해야 함을 알 수 있음. 특히 현지의 잦은 스콜과 같은 집중호우 시에 유입될 수 있는 고탁도의 지표수가 형성될 경우 더욱 다양한 응집제 주입량 변수가 발생할 수 있을 것으로 파악되었으며, 이를 고려한 침전효율을 증대시키기 위해 폴리머 주입설비 및 플록 증대를 위한 교반을 설계 시 반영해야 할 것으로 조사됨.



<그림 2.90. 최적응집제 주입율 선정 테스트>

○ 현장 연속운전 결과 및 경제성 분석

- 고효율 라멜라 전처리 설비 성능시험을 진행함. 현장 연속운전을 통해 일처리유량 2 m³/day이상, SS 제거효율 75 %, 탁도 제거 효율 71 % 이상의 처리효율을 달성하였음.
- 고효율 라멜라 전처리 설비의 최적화 운전 시 유입수 및 처리수의 분석은 외부 국가공인 먹는물 수질검사기관((주)혜성환경_국가공인 먹는물 수질검사기관 36호)을 통해 신뢰성을 확보하였으며, 유입수와 처리수의 분석결과는 아래 그림 2.69과 같이 나타났으며, 부유물질과 탁도는 각각 75, 71 %의 제거효율을 얻음. 상대적으로 유입수 성상으로 인한 약품주입량을 최저 용량으로 설정하여 주입하였으며, 유입원수의 성상에 따라 차이는 있었지만, 대체적으로 먹는물 수질기준인 1 NTU와 근접한 처리수를 얻음.



<그림 2.91. 원수 대비 부유물질 제거효율>

시험성적서
TEST REPORT

시험일자: 2019.11.08
시험장소: (주)대성환경
시험대상: (주)대성환경
시험목적: (주)대성환경

시험결과: (주)대성환경

시험결과: (주)대성환경

시험결과: (주)대성환경

시험결과: (주)대성환경

시험결과: (주)대성환경

시험결과: (주)대성환경

시험결과: (주)대성환경

시험결과: (주)대성환경

<그림 2.92. 고효율 라멜라 전처리 설비의 최적화 운전 시 유입수 및 처리수 시험성적서(공인시험기관)>

< 표 2.7. 공인시험기관 처리수질 평균 시험결과(시료채수일자 '1910.21~23)>

항목	먹는물수질기준		시험결과		비고 (제거효율)
	농도	단위	원수	처리수	
1. 일반세균	100 이하	CFU/mL	2175	18	
2. 총대장균군	불검출	-/100mL	검출	검출	
3. 대장균	불검출	-/100mL	검출	검출	
4. 납(Pb)	0.01 이하	mg/L	불검출	불검출	
5. 불소(F ⁻)	1.5 이하	mg/L	불검출	불검출	
6. 비소(As)	0.01 이하	mg/L	불검출	불검출	
7. 셀레늄(Se)	0.01 이하	mg/L	불검출	불검출	
8. 수은(Hg)	0.001 이하	mg/L	불검출	불검출	
9. 시안(CN ⁻)	0.01 이하	mg/L	불검출	불검출	
10. 크롬(Cr)	0.05 이하	mg/L	불검출	불검출	
11. 암모니아성질소(NH ₃ -N)	0.5 이하	mg/L	불검출	불검출	
12. 질산성질소(NO ₃ -N)	10 이하	mg/L	0.8	1.4	
13. 카드뮴(Cd)	0.005 이하	mg/L	불검출	불검출	
14. 보론	1.0 이하	mg/L	불검출	불검출	
15. 페놀	0.005 이하	mg/L	불검출	불검출	
16. 다이아지논	0.02 이하	mg/L	불검출	불검출	
17. 파라티온	0.06 이하	mg/L	불검출	불검출	
18. 페니트로티온	0.04 이하	mg/L	불검출	불검출	
19. 카바릴	0.07 이하	mg/L	불검출	불검출	
20. 1,1,1-트리클로로에탄	0.1 이하	mg/L	불검출	불검출	
21. 테트라클로로에틸렌(PCE)	0.01 이하	mg/L	불검출	불검출	
22. 트리클로로에틸렌(TCE)	0.03 이하	mg/L	불검출	불검출	
23. 디클로로메탄	0.02 이하	mg/L	불검출	불검출	
24. 벤젠	0.01 이하	mg/L	불검출	불검출	
25. 톨루엔	0.7 이하	mg/L	불검출	불검출	
26. 에틸벤젠	0.3 이하	mg/L	불검출	불검출	
27. 크실렌	0.5 이하	mg/L	불검출	불검출	
28. 1,1-디클로로에틸렌	0.03 이하	mg/L	불검출	불검출	
29. 사염화탄소	0.002 이하	mg/L	불검출	불검출	
30. 1,2-디브로모-3-클로로프로판	0.003 이하	mg/L	불검출	불검출	
31. 1,4-다이옥산	0.05 이하	mg/L	불검출	불검출	
32. 경도	1000 이하	mg/L	70	66	
33. 과망간산칼륨소비량	10 이하	mg/L	7.7	3.0	
34. 냄새	무 취	-	없음	없음	
35. 맛	무 미	-	없음	없음	
36. 구리	1 이하	mg/L	0.02	0.02	
37. 색도	5 이하	도	2.0	1.0	
38. 세제(ABS)	0.5 이하	mg/L	불검출	불검출	
39. 수소이온농도(pH)	5.8~8.5	-	6.9	6.5	
40. 아연(Zn)	3 이하	mg/L	0.2	0.5	
41. 염소이온(Cl ⁻)	250 이하	mg/L	11.8	24.7	
42. 철(Fe)	0.3 이하	mg/L	0.1	0.1	
43. 망간(Mn)	0.3 이하	mg/L	0.04	0.01	
44. 탁도	1.0 이하	NTU	2.59	0.74	71.4%
45. 황산이온(SO ₄ ²⁻)	200 이하	mg/L	11	11	
46. 알루미늄(Al)	0.2 이하	mg/L	0.06	0.03	

- 각 원수조건에서 최적화된 전처리 운전조건들을 도출하고 적용성을 검증하며, 이를 토대로 고효율 라멜라 전처리 설비에 대한 운전 및 유지관리 매뉴얼을 작성하였음.



<그림 2.93. 유지관리 매뉴얼>

- 후속 상용화 계획 마련을 위해 수질에 따른 혼화/응집지 운영방법을 시스템화하여 소규모 마을수도시설 적용 관련 특허 획득, 특허를 바탕으로 타 정수프로젝트에 라멜라 침전설비 반영될 수 있도록 마케팅에 활용할 계획임.

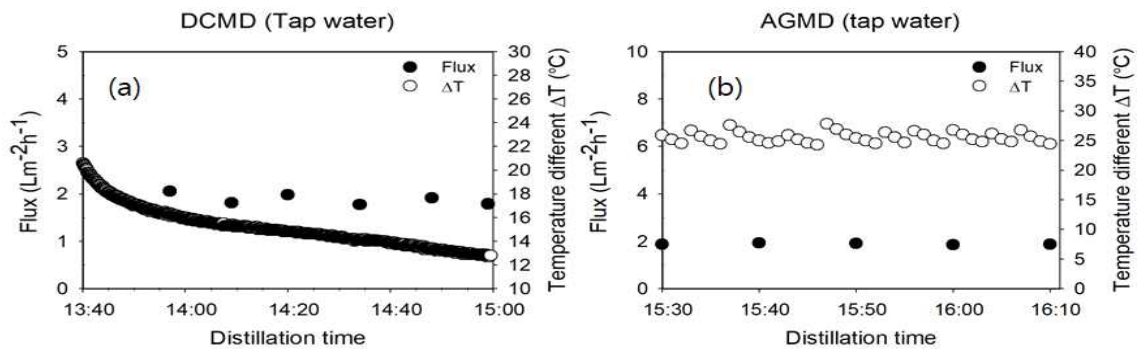
- 부족한 수자원 확보를 위한 전처리 기술 확보, 증가되는 발생량의 처리기술 확보 (빗물처리 등), 최소부지활용으로 공사비 및 유지관리절감기술 확립, 기존의 하/폐수처리 시스템과 연계가 가능하고 소요 부지 및 비용을 저감 시킬 수 있도록 일체형으로 장착하여 양산제품 생산 기술 확보 및 기존 고가의 단일 목적형 외산 하수처리 장치를 대체할 저비용 고효율 국산 처리 시스템 양산 기술을 확보함.
- 사업의 장기적 비전으로 하/폐수처리장의 운영에 부담이 되는 약품비, 전력소모량, 부지면적 등의 고질적 문제점들에 해결책을 제시할 수 있는 선도적 기업으로 발전하여 시장의 선점과 환경문제의 해결자로서의 역할에 충실할 수 있을 것으로 기대하고 있음. 국내 지방자치단체(마을 하수도), 하·폐수 처리장을 운영하고 있는 기업체에 고효율 라멜라 전처리 시스템 납품을 위한 상품화 완료 예정임.

(다) 태양열 막증류 설비 및 운전 결과

- 테스트베드 내 설치된 파일럿 플랜트 막증류(막 유효면적 : 1.078 m²) 정수처리 시스템을 이용하여 유입수(수돗물, 정수장 유입수), 막증류 모듈 구성(DCMD/AGMD), 막증류 시스템 가동 시간(수시간, 일출부터 일몰시까지), 모듈의 hot, cold 순환유량(7.57, 10, 20, 25, 38, 40, 49, 53 LPM)등 운전조건을 변화시켜 막증류 시스템의 성능을 평가함.

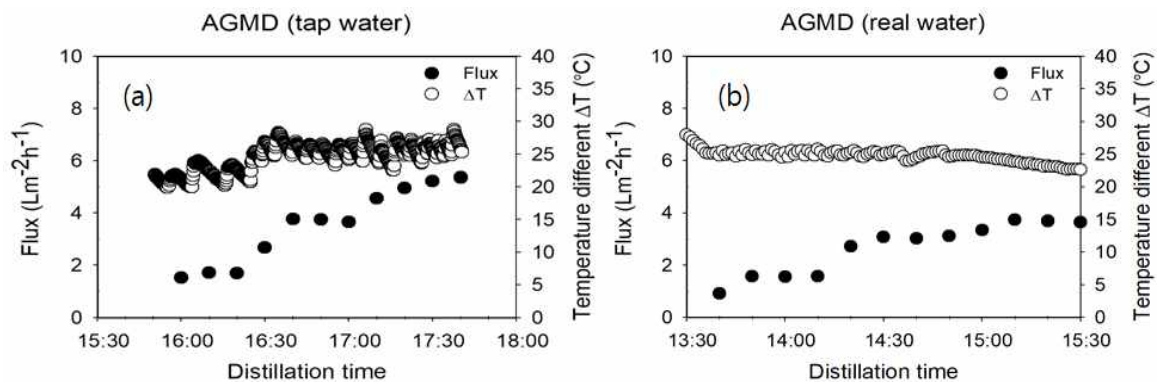


<그림 2.94. 태양열 막증류 설비>



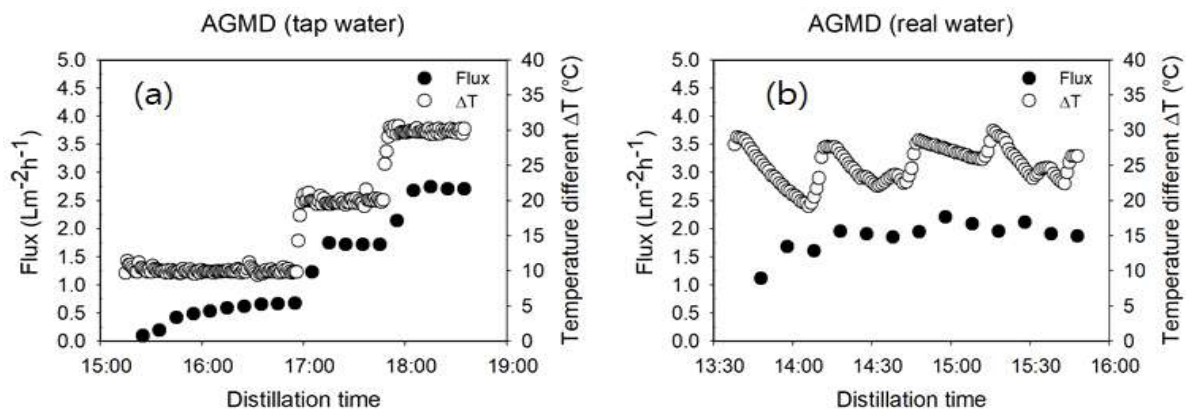
<그림 2.95. Tap water를 이용한 운전 결과 (a)DCMD, (b)AGMD>

○ 막증류 모듈 구성(DCMD/AGMD)별 단기운전에 따른 운전결과, tap water를 이용한 DCMD 단기운전(80 min) 결과 평균 flux는 2.2 LMH, 평균 온도차는 15.1 $^{\circ}\text{C}$ 를 보였다. AGMD 단기운전(110 min) 결과 평균 flux는 1.84 LMH, 평균 온도차는 25.3 $^{\circ}\text{C}$ 를 보였다. Tap water를 이용한 단기운전 결과 DCMD의 막 모듈 구성이 Flux 측면에서 더욱 효율적으로 보임.



<그림 2.96. AGMD 단기운전 결과 (a)tap water, (b)real water>

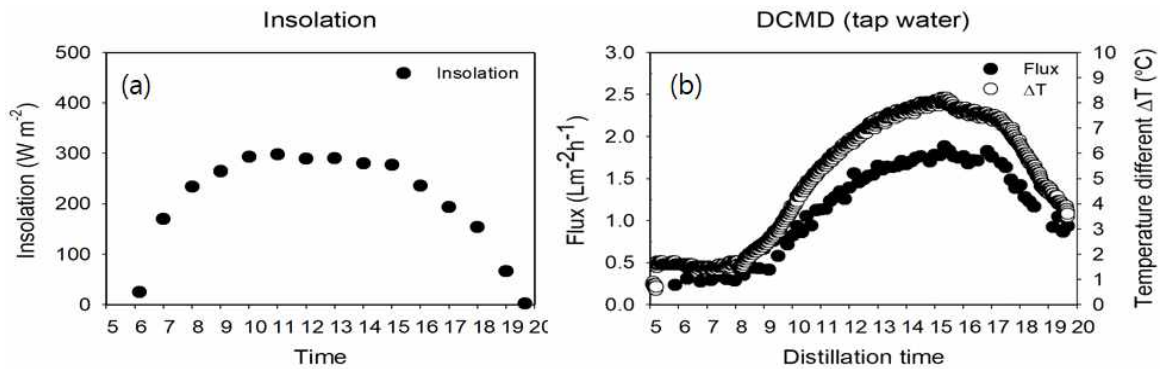
○ 막증류 시스템의 막 모듈 구성이 AGMD일 때 tap water를 이용하여 단기운전 (60 min)동안(a) 모듈의 hot, cold 순환유량을 10, 20, 25 LPM으로 증가하는 동안 flux는 1.64, 3.72, 5.18 LMH로 증가하였으며, 평균 온도차는 25.3 °C를 보임. 막증류 시스템의 막 모듈 구성이 AGMD일 때 real water를 이용하여 단기운전 (120 min)동안(b) 모듈의 hot, cold 순환유량을 7.57, 20, 25 LPM으로 증가하는 동안 flux는 1.57, 3.07, 3.69 LMH로 증가하였으며, 평균 온도차는 24.8°C를 보임. AGMD일 때 모듈의 hot, cold 순환유량이 증가할수록 flux또한 증가하는 경향을 보였으며, real water를 이용한 경우 tap water를 이용할 때 보다 낮은 flux를 보임. hot, cold 순환유량 향상을 통해 막증류 시스템의 flux 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단됨.



<그림 2.97. 모듈의 hot, cold 순환유량이 7.57 LPM 일 때 AGMD 운전 결과 (a)tap water, (b)real water>

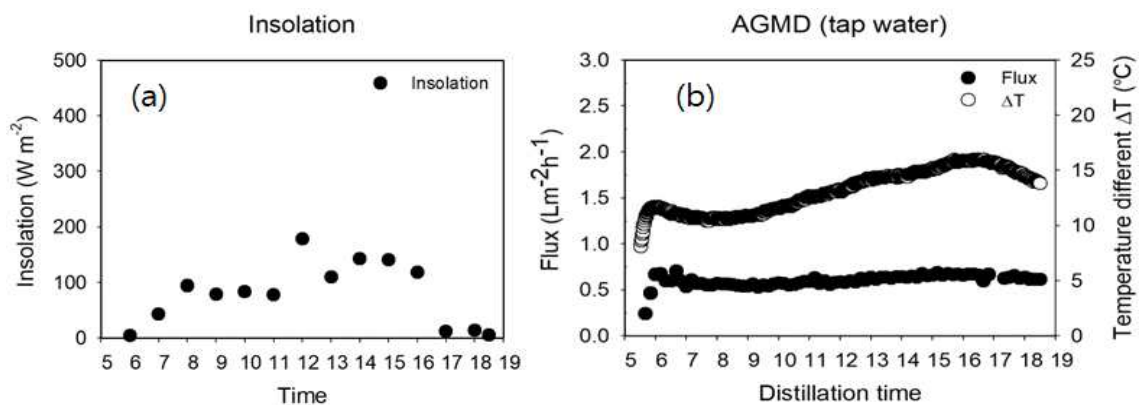
○ AGMD일 때 tap water를 이용하여 모듈의 hot, cold 순환유량이 7.57 LPM으로 단기운전(200 min)동안(a) 모듈의 hot, cold 온도차가 10, 20, 30 °C으로 증가하는 동안 flux는 0.66, 1.73, 2.71 LMH로 증가함. Real water를 이용하여 모듈의 hot, cold 순환유량이 7.57 LPM으로 단기운전(130 min)동안(b) 모듈의 평균 hot, cold 온도차가 25 °C일 때 평균 flux는 1.98 LMH 보임. AGMD일 때 모듈의 낮은 hot, cold 순환유량은 낮은 flux를 보이며, 이는 모듈의 hot, cold 순환유량이 동일한 조건에서의 DCMD의 flux보다 낮은 값을 보임. 막증류 시스템의 flux 측면에서는 DCMD가 AGMD에 비해 유리할 것으로 판단됨.

○ 막증류 모듈 구성(DCMD/AGMD) 별 장기운전에 따른 운전결과



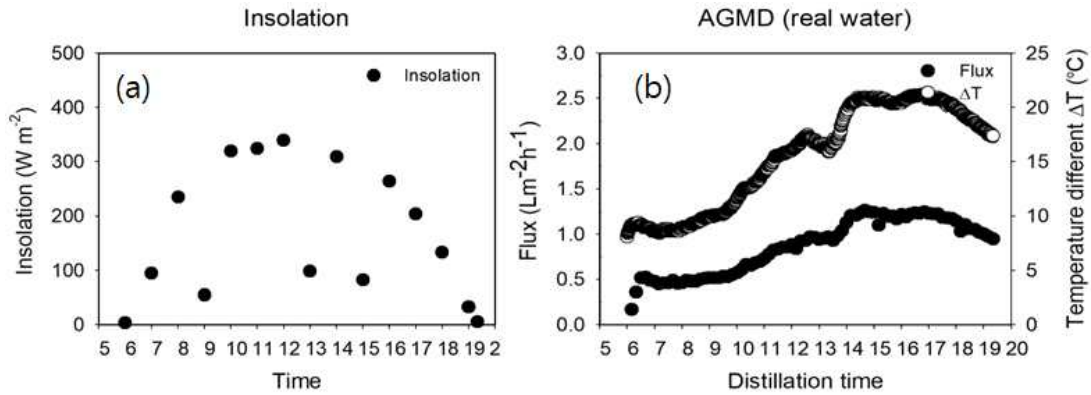
<그림 2.98. 태양열을 열원으로 tap water 처리 시 DCMD 장기운전 결과 (a)insolation, (b)flux and temperature different>

○ DCMD일 때 태양열을 열원으로 tap water 처리 시 모듈의 hot, cold 순환유량 12 LPM으로 장기운전(일출에서 일몰시 까지:880 min, 날씨: 맑음)한 결과, 모듈의 hot, cold 온도차는 운전시간에 따라 증가하다 일사량(a)이 감소함에 따라 감소하는 경향을 보임. 또한 운전 flux도 비슷한 경향을 보이며 평균 flux는 1.1 LMH (최대 1.8 LMH)를 보임(b). 하루의 일사량의 증감은 태양열을 열원으로 하는 막증류 정수처리 시스템의 운전 flux에 영향을 미치며, 향후 막증류 정수처리 시스템의 운전 flux 향상 및 처리수 생산량 확보를 위한 안정적인 열원확보가 필요 할 것으로 보임.



<그림 2.99. 태양열을 열원으로 tap water 처리 시 AGMD 장기운전 결과 (a)insolation, (b)flux and temperature different>

○ 막증류 모듈이 AGMD일 때 태양열을 열원으로 tap water 처리 시 모듈의 hot, cold 순환유량 7.57 LPM으로 장기운전(일출에서 일몰시 까지:780 min, 날씨: 흐림)한 결과 모듈의 평균 hot, cold 온도차는 13°C를 보임. 또한 낮은 일사량(a)으로 인해 낮은 운전 flux(평균 0.61 LMH)를 보임.



<그림 2.100. 태양열을 열원으로 real water 처리 시 AGMD 장기운전 결과
(a)insolation, (b)flux and temperature different>

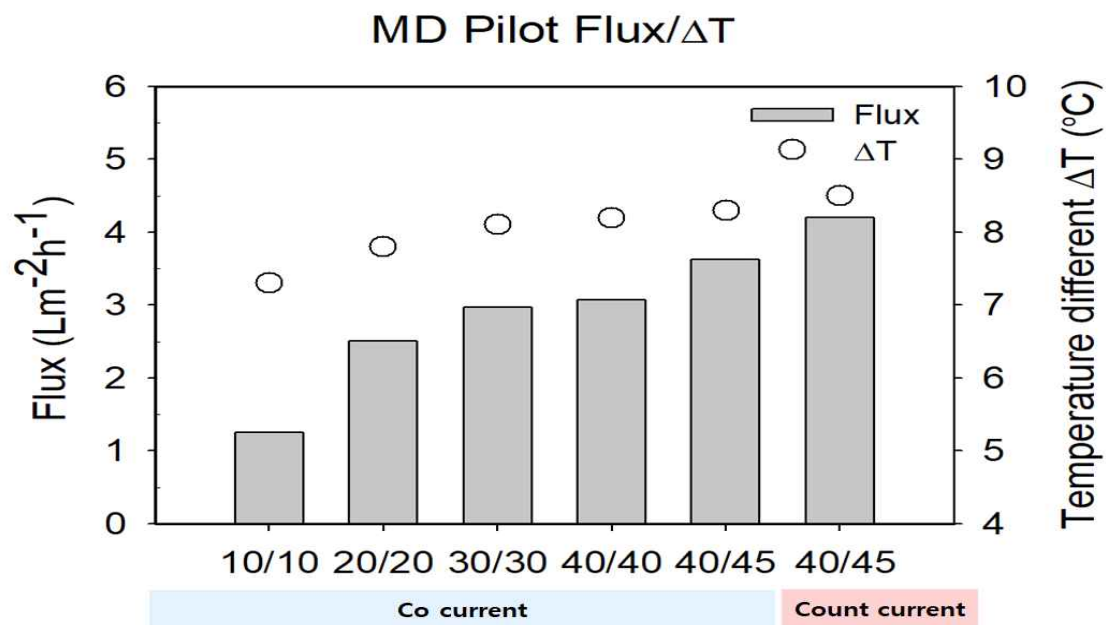
- 막증류 모듈이 AGMD일 때 태양열을 열원으로 real water 처리 시 모듈의 hot, cold 순환유량 7.57 LPM으로 장기운전(일출에서 일몰시 까지:880 min, 날씨:구름 조금)한 결과 모듈의 평균 hot, cold 온도차는 16.5℃를 보임. 평균 운전 flux는 0.87 LMH(최대 1.24LMH)를 보임. 태양열을 열원으로한 막증류 정수처리 시스템은 하루 일사량이 모듈의 온도차 및 운전 flux에 많은 영향을 미치며, 안정적인 열원 확보가 된다면 AGMD에 비해 운전 flux가 높은 DCMD 운전을 통해 보다 높은 운전 flux를 확보할 수 있을 것으로 보임. 향후 안정적이 열원 확보 및 DCMD 운전을 통해 운전 flux 향상이 기대됨.
- 상기 결과들에서 보듯이 태양열을 열원으로 막증류를 수행하는 경우 태양이 떠있는 일출에서 일몰까지 일사시간 동안만 운전이 가능하며, 계절적으로도 일사시간의 증감으로 인하여 운전가능시간의 변동과 일사시간 중에도 날씨, 구름량, 대기오염 등 다양한 요인에 따라 생산량의 변동이 발생하고 있어 안정적인 운전이 방해를 받음. 따라서 일조량, 일사시간, 야간 등에도 안정적인 운전을 위한 개선방안 마련이 필요함.

(라) 태양열 막증류 설비 개선 운전 결과

- 막증류 정수처리 시스템의 처리수 생산량 증대를 위해 막증류 모듈의 막을 증착(막 유효면적 증가 : 1.078 → 6.16 m²)하였으며, 날씨변화(흐림, 비)에 따른(일사량 감소)막모듈 온도차 감소 및 일몰 시, 야간 등 막모듈의 온도차 상승과 안정적인 막증류 시스템 운전을 위해 보조적으로 heat-pump를 설치함. 설치된 파일럿 플랜트의 성능을 평가하고 막증류 시스템의 효율적 운전 방안을 도출함.



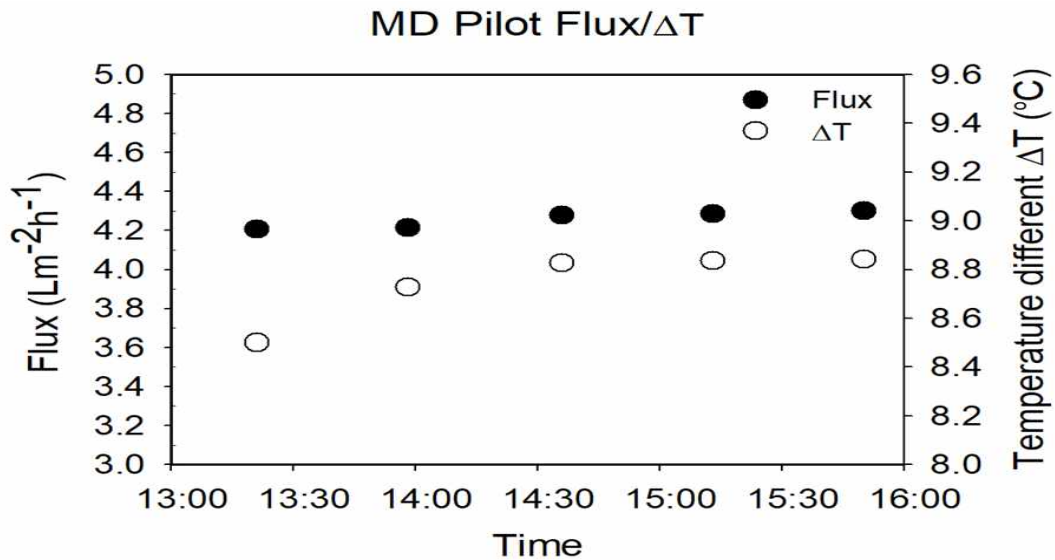
<그림 2.101. 태양열 막증류 설비 개선>



<그림 2.102. 모듈 순환 유량에 따른 운전 결과>

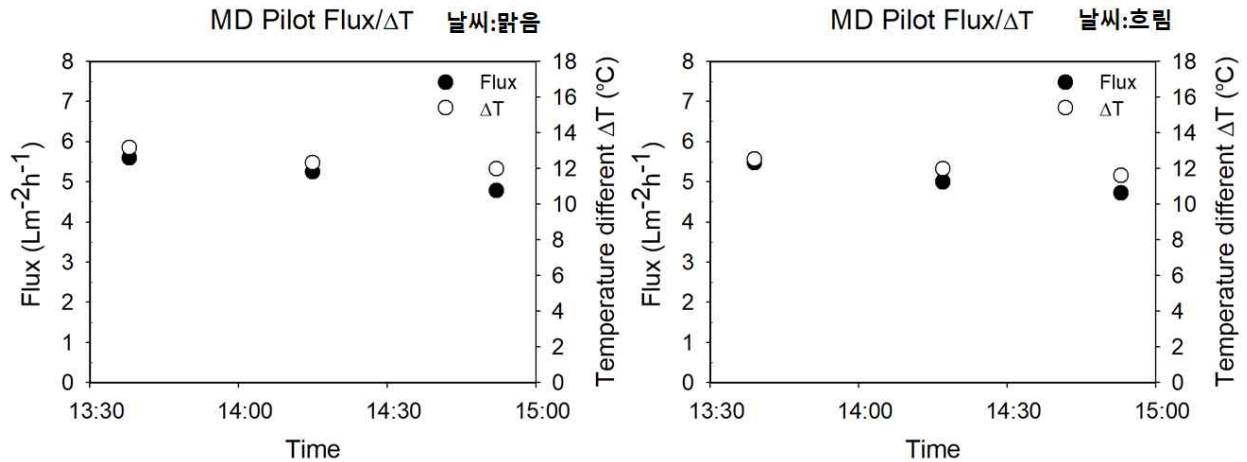
○ 막증류 시스템의 막 모듈을 DCMD, co-current 방식(hot, cold가 같은 방향으로

주입)으로 운전한 결과, 모듈의 feed/permeate 순환유량이 10/10, 20/20, 30/30, 40/40, 40/45 LPM 일때 flux는 각각 1.3, 2.5, 3.0, 3.1, 3.6 LMH 를 보임. feed/permeate 순환유량이 증가 할수록 flux는 증가하는 경향을 보임. 또한 count-current 방식(hot, cold가 교차되는 방향으로 주입)으로 운전한 결과 feed/permeate 순환유량이 40/45 LPM 일때 flux는 4.2 LMH 를 보였다. 추후 운전 flux 및 처리수 생산량 증대를 위해 DCMD, count-current 운전 방식이 적절할 것으로 판단됨.



<그림 2.103. DCMD, count-current 운전 결과>

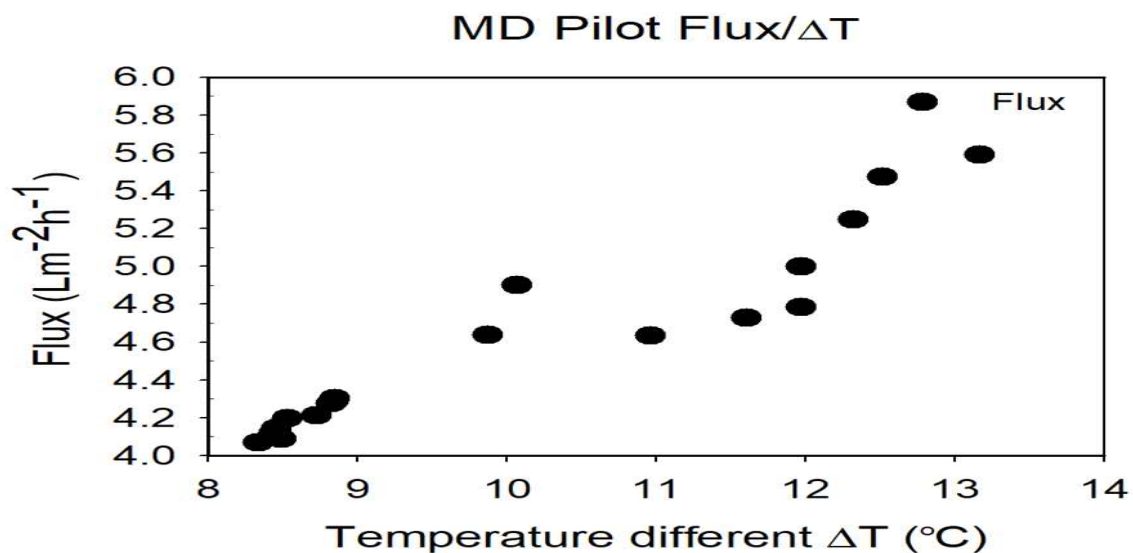
○ 막증류 정수처리 시스템 (DCMD, count-current)의 생산수량 증가를 위해 막증류 시스템의 feed/permeate 순환유량 증대(feed : 37.8 LPM, permeate : 42.9 LPM), 모듈과 연결된 열교환기의 순환펌프 유량 증대(기존 28 LPM → 42 LPM) 및 열교환기 설비(열교환기 2개 장착)를 추가하여 실험하였음. 개선된 막증류 시스템을 운전한 결과 운전시간이 장시간 지속될수록 모듈의 온도차($8.5^{\circ}\text{C} \rightarrow 8.8^{\circ}\text{C}$)가 상승하다 일정한 온도차(8.8°C)를 보이며, 모듈의 flux ($4.2 \text{ LMH} \rightarrow 4.3 \text{ LMH}$)도 서서히 상승하며 일정한 flux를 보여, 운전시간 경과에 따른 온도차 비슷한 경향을 보임. 향후 장기운전을 통해 모듈의 안정화가 되면 flux 향상이 기대됨.



<그림 2.104. 파일럿 플랜트 현장 날씨 조건에 따른 운전 결과>

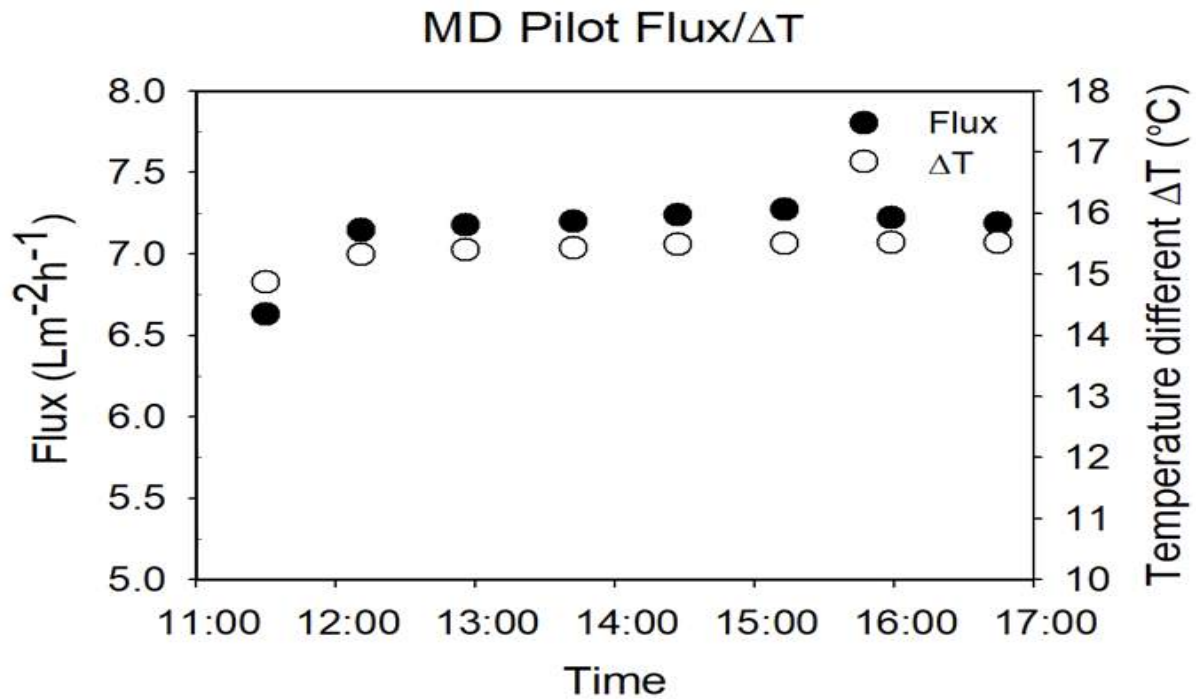
○ 운전조건 변경(hot, cold 온도, feed/permeate 순환유량 조절 등) 및 장기간 운전을 통해 안정화된 막증류 정수처리 시스템 (DCMD, count-current, feed 순환유량 : 37.8 LPM, permeate 순환유량 : 40 LPM)을 이용하여 유입수(정수장 유입수를 $1\mu\text{m}$ Filtration)를 날씨 변화(흐림, 맑음)에 따른 실험 진행함.

○ 파일럿 플랜트 현장의 날씨가 흐린날의 실험 결과는 막증류 시스템의 평균 온도차 : 12.0°C , flux : 5.1 LMH , 하루 처리수 생산량 : $0.7\text{ m}^3/\text{d}$ 이며, 맑은 날씨의 결과는 평균 온도차 : 12.5°C , flux : 5.2 LMH , 하루 처리수 생산량 : $0.8\text{ m}^3/\text{d}$ 를 보임. 태양열을 열원으로 하는 막증류 정수처리 시스템 특성상 날씨가 맑은 날이 모듈의 온도차가 흐린날에 비해 높고, 모듈의 flux 향상을 가져온다. 이는 막증류 시스템의 처리수 생산량 증대의 결과를 보임.



<그림 2.105. 막증류 모듈 온도차에 따른 정수처리 시스템 flux 결과>

○ 막증류 정수처리 파일럿 시스템 (DCMD, count-current)의 실험 결과들을 분석한 결과, 막증류 정수처리 파일럿 시스템의 flux는 온도차가 증가 할수록 증가함을 보임. 온도차와 플럭스 사이에는 선형적인 증가는 아닌 것으로 보이며 2차곡선 형태로 증가하는 것으로 판단됨. 이는 열손실과 관련이 있는 것으로 판단됨.



<그림 2.106. 개선된 막증류 정수처리 시스템 운전 결과>

<표 2.8. 개선된 막증류 정수처리 시스템 운전 조건 및 온도차>

Time / Average	Hot In	Hot Out	Cold In	Cold Out	H.I.-C.O.	H.O.-C.I.	ΔT
11:30	47.590	36.026	20.106	33.770	13.820	15.921	14.870
12:11	50.104	37.872	21.460	35.854	14.250	16.412	15.331
12:56	50.558	38.257	21.750	36.269	14.289	16.507	15.398
13:42	50.658	38.362	21.782	36.378	14.279	16.580	15.430
14:27	50.778	38.475	21.817	36.468	14.310	16.658	15.484
15:13	50.780	38.444	21.798	36.415	14.365	16.646	15.505
15:59	50.682	38.415	21.686	36.357	14.324	16.729	15.527
16:45	50.643	38.326	21.652	36.274	14.368	16.674	15.521

- 현장 날씨, 파일럿 플랜트 현장조건 및 막증류 정수처리 시스템의 처리수 생산량 증대를 위해 막증류 처리시스템의 설비 개선(열원 보강, hot, cold 순환펌프 교체: feed/permeate 순환유량 상향 등)함. 개선된 막증류 정수처리 시스템 (DCMD, count-current, feed/permeate 순환유량 : 52.9/52.9 LPM)을 이용하여 유입수 (정수장 유입수를 1 μ m Filtration)를 처리함. 막증류 시스템의 운전가동 시간이 증가할수록 막증류 모듈의 온도차, flux 는 상승하여, 안정화 이후 높은 평균 온도 차 : 15.5 $^{\circ}$ C, flux : 7.2 LMH, 하루 처리수 생산량 : 1.1 m³/d을 보임.
- 최적화된 막증류 정수처리 시스템 운전결과 처리수의 분석은 외부 국가공인 먹는 물 수질검사기관((주)해성환경_국가공인 먹는물 수질검사기관 36호)의 분석의뢰를 분석결과와 신뢰성을 확보하였으며, 처리수 수질 분석결과 먹는물 수질기준을 만족 함(그림 2.107 공인시험기관 시험성적서 참조). 또한 파일럿 플랜트 운전 시 온도 범위(30~40 $^{\circ}$ C)가 다소 높아 미생물 증식 등 다양한 문제발생 가능성 있어, 향후 처리수의 소독공정을 추가하여 미생물학적 발생 문제를 최소화할 수 있는 방안을 마련하고자함. 국내의 먹는물 수질기준은 WHO, 중동, 동남아시아의 여러국가들의 수질기준(표 2.9 참조)과 비교하여 높은 수준의 기준을 요구하므로, 국내의 먹는물 수질기준은 만족하는 결과를 보인 점을 고려하면, 향후 막증류 정수처리 시스템 기술의 해외진출 시 경쟁력이 있을 것으로 예상임.

시험성적서

TEST REPORT

(주)해성환경 대표이사 : 장공배, 기술책임자 : 조성근

경기도 안양시 동안구 귀인로 79번길 35 (호계동)

TEL : (031)473-3413-5 FAX : (031)472-2996

국가공인 먹는물 수질검사기관 36호

검수번호	LIW1911-0888	검수일자	2019.11.21
시료유형	지하수(물용)	시험항목	일반세균 외 45개 항목
의뢰업체명	한국과학기술연구원	검사목적/시험구분	참고용 / 신규
원수/정수여부	원수	허가/신고번호	-
시료채취방법	지층시료	시료채취자	-
시료채취일시	2019.11.20	시료채취장소(시료명)	처리수 1
시료채취주소	경기도 용인시 수지구 상현동 286		

《 시험 결과 》

분류 항목	수질 기준	시험 결과	분류 항목	수질 기준	시험 결과
일반세균	100 CFU/mL 이하	93	비정	0.01 mg/L 이하	불검출
총대장균군	불검출/100 mL	불검출	루루엔	0.7 mg/L 이하	불검출
분변성 대장균군	불검출/100 mL	불검출	에틸렌진	0.3 mg/L 이하	불검출
납	0.01 mg/L 이하	불검출	크릴린	0.5 mg/L 이하	불검출
몰스	1.5 mg/L 이하	불검출	1,1-디클로로에틸렌	0.03 mg/L 이하	불검출
비스	0.01 mg/L 이하	불검출	사염화탄소	0.002 mg/L 이하	불검출
셀레늄	0.01 mg/L 이하	불검출	1,2-디브로모-3-클로로프로판	0.003 mg/L 이하	불검출
수은	0.001 mg/L 이하	불검출	1,4-다이옥산	0.05 mg/L 이하	불검출
시아	0.01 mg/L 이하	불검출	경도	1,000 mg/L 이하	10
크롬	0.05 mg/L 이하	불검출	과망간산칼륨소비량	10 mg/L 이하	2.0
망고니아성질소	0.5 mg/L 이하	불검출	네트	없음	없음
질산성질소	10 mg/L 이하	0.2	망	없음	없음
카드뮴	0.005 mg/L 이하	불검출	구리(총)	1 mg/L 이하	0.156
보름(붕소)	1.0 mg/L 이하	불검출	색도	5 도 이하	1
피롤	0.005 mg/L 이하	불검출	세정(불이온저면활성제)	0.5 mg/L 이하	불검출
다이아지논	0.02 mg/L 이하	불검출	수소이온농도	5.8 ~ 8.5	5.9
파라티온	0.06 mg/L 이하	불검출	아연	3 mg/L 이하	0.068
페니트로티온	0.04 mg/L 이하	불검출	염소이온	250 mg/L 이하	1.2
카바릴	0.07 mg/L 이하	불검출	철	0.3 mg/L 이하	불검출
1,1,1-트리클로로에탄	0.1 mg/L 이하	불검출	망간	0.3 mg/L 이하	0.008
테트라클로로에틸렌	0.01 mg/L 이하	불검출	탁도	1 NTU 이하	0.23
트리카클로로에틸렌	0.03 mg/L 이하	불검출	황산이온	200 mg/L 이하	불검출
디클로로에탄	0.02 mg/L 이하	불검출	알루미늄	0.2 mg/L 이하	불검출
판정	적합				

* 불검출 : 정량한계 미만임.

2019년 11월 28일



(주)해성환경



1. 이 성적서는 신청자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송 등 용도로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

<그림 2.107. 태양열 막증류 정수처리 시스템 처리수 시험성적서(공인시험기관)>

<표. 2.9. 국가별 먹는물 수질기준>

국가 항목	동아시아		중동			동남아시아		
	한국	WHO	UAE	이라크	시리아	베트남	캄보디아	인도
일반세균	100CFU	-	-	-	-	-	-	-
대장균	불검출	불검출	0	0	0	0	0	불검출
분원성대 장균.	불검출	불검출	0	0	0	0	0	불검출
pH	5.8-8.5	-	7.0-9.2	6.5-8.5	6.5-8.5	6-8.5	6.5-8.5	6.5-8.5
경도	300	-	300	500	500	300	300	600
맛	없음	-	없음	먹을만함	먹을만함	-	먹을만함	-
냄새	없음	-	없음	먹을만함	먹을만함	-	먹을만함	-
색도	5TCU	-	15	10	15	15	5	15
탁도	0.5NTU	-	4	5	5	5	5	5
비소	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05
카드뮴	0.005	0.003	0.003	0.003	0.005		0.003	0.003
크롬	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
불소	1.5	1.5	1.5	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5
수은	0.001	0.006	0.006	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
납	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
NO ₃ -N	10	50	50	50	44	10	50	45
NO ₂ -N	-	3	3	3.0	0.04	1.0	3.0	-
벤젠	0.01	0.01	0.01	-	0.01	0.01	0.01	-
사염화탄 소	0.002	0.004	0.003	-	0.0013	-	-	-
디클로로 메탄	0.02	0.02	0.02	-	-	-	-	-
에틸벤젠	0.3	0.3	-	-	-	-	-	-
페놀	0.005	-	-	-	-	0.01	-	0.002
트리클로 로에틸렌	0.03	-	0.02	-	0.03	-	-	-
테트라클 로로에틸 렌	0.01	0.04	0.04	-	0.01	-	-	-
톨루엔	0.7	0.7	0.7	-	-	-	-	-
크실렌	0.5	0.5	-	-	-	-	-	-
알루미늄	0.2	-	0.2	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2
염소이온	250	-	250	250	250	250	250	1000
구리	1	2	1.0	1.0	1.0	1.0	1	1.5
철	0.3	-	0.2	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3
망간	0.05	-		0.1	0.1	0.5	0.1	0.3
황산이온	200	-	250	250	250		250	400
아연	3	-	5.0	3.0	3.0	3.0	3	15

* 기본 단위: mg/L

* 출처

A global overview of national regulations and standards for drinking-water quality, WHO, 2018 (WHO, 총괄)

환경부 (한국)

The Water Quality Regulations (Fourth Edition) 2014. The Regulation and Supervision Bureau for the water, wastewater and electricity sector in the Emirate of Abu Dhabi. (UAE)

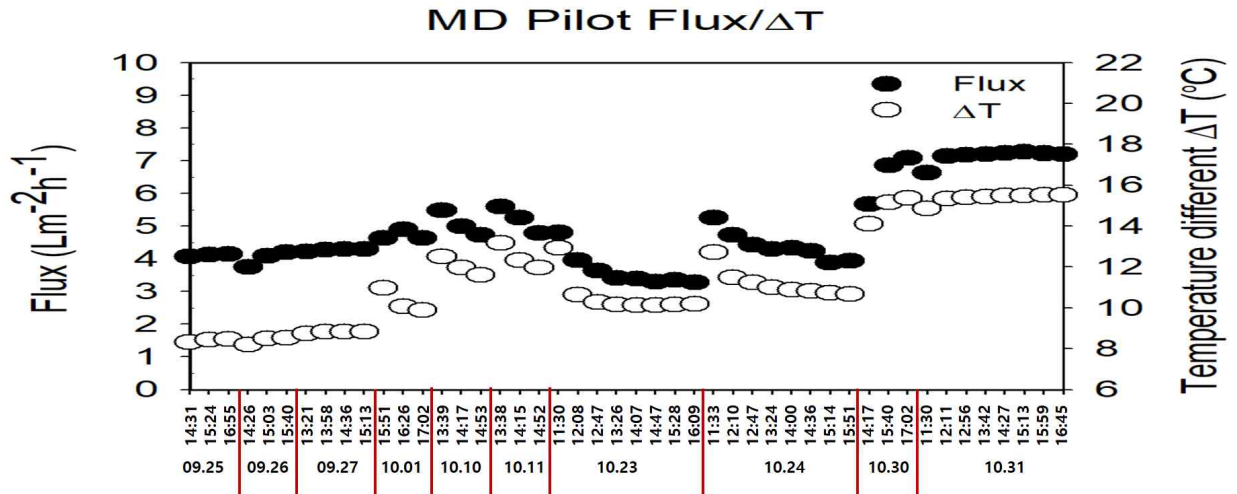
A compendium of drinking water quality standards in the Eastern Mediterranean Region, WHO. 2006 (이라크, 시리아)

Nước cấp sinh hoạt - yêu cầu chất lượng TCVN 5502 : 2003 (Domestic supply water - Quality requirements) (베트남)

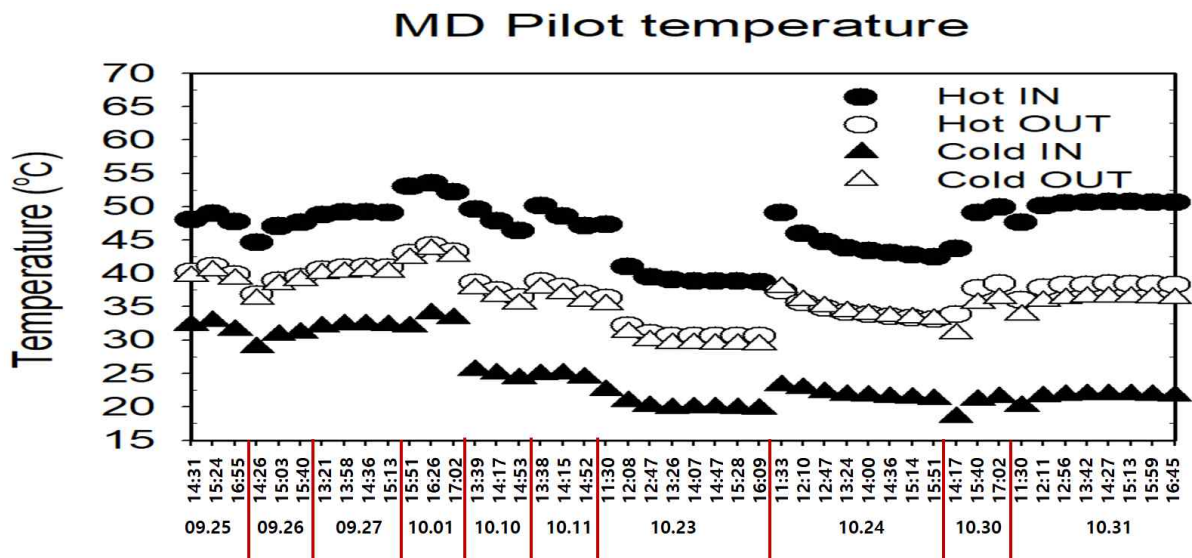
Drinking-water Quality Standards (Ministry of Industry, Mines and Energy) 2004 (캄보디아)

Indian Standard DRINKING WATER - SPECIFICATION (Second Revision) IS 10500 : 2012 (인도)

○ 설비 보강 및 최적화된 막증류 정수처리 시스템은 flux : 7.2 LMH, 하루 처리수 생산량 : 1.1 m³/d, 처리수 수질분석 결과 먹는물 수질기준을 만족하며, 막증류 정수처리 시스템 목표 flux(5 LMH 이상), 처리수 생산량(1 m³/d), 처리수 수질(먹는물 수질기준 만족)을 달성함.



<그림 2.108. 태양열 막증류 정수처리 시스템 운전결과(flux, 온도차)>



<그림 2.109. 태양열 막증류 정수처리 시스템 모듈 운전결과(온도변화)>

<표 2.10. 태양열 막증류 정수처리 시스템 모듈 운전조건 및 운전 결과 정리>

Current	Date	Time	ΔT	Flux	Hot In	Hot Out	Cold In	Cold Out	Hot Flow	Cold Flow
Counter Current	2019.09.25	14:31	8.3	4.1	48.1	40.3	32.2	39.6	37.8	49.2
		15:24	8.4	4.1	48.9	41.1	32.8	40.3	37.8	49.2
		16:55	8.5	4.1	47.8	39.8	31.5	39.2	37.8	49.2
	2019.09.26	14:26	8.2	3.7	44.6	36.9	28.9	36.2	37.8	49.2
		15:03	8.5	4.1	47.1	38.9	30.7	38.3	37.8	49.2
		15:40	8.5	4.2	47.7	39.4	31.1	39.0	37.8	49.2
	2019.09.27	13:21	8.7	4.2	48.7	40.6	32.0	39.9	37.8	49.2
		13:58	8.8	4.3	49.1	40.9	32.2	40.2	37.8	49.2
		14:36	8.8	4.3	49.2	41.0	32.2	40.3	37.8	49.2
		15:13	8.8	4.3	49.1	40.9	32.2	40.1	37.8	49.2
	2019.10.01	15:51	11.0	4.6	53.1	43.0	31.9	42.2	37.8	49.2
		16:26	10.1	4.9	53.5	44.2	33.9	43.6	37.8	49.2
		17:02	9.9	4.6	52.2	43.3	33.2	42.5	37.8	49.2
	2019.10.10	13:39	12.5	5.5	49.6	38.6	25.4	37.7	37.8	40.0
		14:17	12.0	5.0	47.9	37.5	24.9	36.5	37.8	40.0
		14:53	11.6	4.7	46.4	36.5	24.2	35.4	37.8	40.0
	2019.10.11	13:38	13.2	5.6	50.2	38.8	24.9	37.8	37.8	40.0
		14:15	12.3	5.2	48.6	38.0	25.0	37.0	37.8	40.0
		14:52	12.0	4.8	47.2	37.0	24.3	35.8	37.8	40.0
	2019.10.23	11:30	12.9	4.8	47.3	36.3	22.5	35.3	37.8	40.0
		12:08	10.7	3.9	41.0	32.2	20.8	31.1	37.8	40.0
		12:47	10.3	3.6	39.5	31.1	20.1	29.9	37.8	40.0
		13:26	10.2	3.4	39.0	30.7	19.8	29.5	37.8	40.0
		14:07	10.1	3.4	38.8	30.6	19.8	29.5	37.8	40.0
		14:47	10.1	3.3	38.9	30.6	19.8	29.4	37.8	40.0
		15:28	10.2	3.4	38.8	30.6	19.8	29.4	37.8	40.0
		16:09	10.2	3.3	38.7	30.6	19.7	29.2	37.8	40.0
	2019.10.24	11:33	12.7	5.3	49.1	37.4	23.1	37.9	37.8	40.0
		12:10	11.5	4.7	45.9	35.6	22.7	35.9	37.8	40.0
		12:47	11.2	4.4	44.8	34.8	22.1	34.9	37.8	40.0
		13:24	11.0	4.3	43.9	34.1	21.7	34.3	37.8	40.0
		14:00	10.9	4.3	43.4	33.8	21.6	33.9	37.8	40.0
		14:36	10.8	4.2	43.1	33.6	21.4	33.6	37.8	40.0
		15:14	10.7	3.9	42.8	33.4	21.3	33.4	37.8	40.0
		15:51	10.7	3.9	42.4	33.1	21.1	33.1	37.8	40.0
	2019.10.30	14:17	14.1	5.7	43.7	33.8	18.4	31.0	52.9	52.9
		15:40	15.2	6.9	49.0	37.8	21.0	35.5	52.9	52.9
		17:02	15.4	7.1	49.9	38.5	21.4	36.3	52.9	52.9
	2019.10.31	11:30	14.9	6.6	47.6	36.0	20.1	33.8	52.9	52.9
		12:11	15.3	7.1	50.1	37.9	21.5	35.9	52.9	52.9
		12:56	15.4	7.2	50.6	38.3	21.7	36.3	52.9	52.9
		13:42	15.4	7.2	50.7	38.4	21.8	36.4	52.9	52.9
		14:27	15.5	7.2	50.8	38.5	21.8	36.5	52.9	52.9
		15:13	15.5	7.3	50.8	38.4	21.8	36.4	52.9	52.9
		15:59	15.5	7.2	50.7	38.4	21.7	36.4	52.9	52.9
		16:45	15.5	7.2	50.6	38.3	21.7	36.3	52.9	52.9

나. 연구 개발 성과

(1) 국내외 논문게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI여부	게재일	등록번호 ISSN
1	분말 활성탄에 의한 먹는 물 내의 이취미 물질 제거	대한토목학회	채아나	37	한국	대한토목학회	비SCI	2017.04	2287-934X
2	Mechanically Robust, Stretchable Solar Absorbers with Submicron-Thick Multilayer Sheets for Wearable and Energy Applications	ACS Applied Materials & Interfaces	이혜진	9	미국	ACS Publications	SCI	2017.05.10	1944-8252
3	응집슬라지를 이용한 하수슬라지의 탈수성 및 침강성 개선	대한상하수도학회	소수현	32	한국	대한상하수도학회	비SCI	2018.04	2287-822X
4	하수 2차처리 방류수의 총인 고효율 처리를 위한 응집·막분리 혼성처리	대한상하수도학회	최육진	32	한국	대한상하수도학회	비SCI	2018.02	2287-822X
5	Pyramidal Metal-dielectric hybrid-structure geometry with an asymmetric TiO ₂ layer for broadband light absorption and photocatalytic applications	Nano Energy	김학준	53	미국	Elsevier	SCI	2018.09.05	2211-2855
6	Effect of trophic conditions on microalga growth, nutrient removal, algal organic matter, and energy storage products in <i>Scenedesmus (Acutodesmus) obliquus</i> KGE-17 cultivation	Bioprocess and Biosystems Engineering	최육진	42	미국	Springer	SCI	2019.04.15	1225-1234
7	Directional Ostwald Ripening for Producing Aligned Arrays of Nanowires	Nano Letters	이혜진	19	미국	ACS Publications	SCI	2019.06.07	1530-6992
8	Linking process performances and core microbial community structures in anaerobic membrane bioreactor with rotatory disk (ARMBR) system fed with high-strength food waste recycling wastewater	Bioresour. Technology	서현덕	291	미국	Elsevier	SCI	2019.07.27	0960-8524

(2) 지적재산권

번호	지적재산권 등 명칭	국명	출원			등록			기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1	소수성분리막을 이용한 수중 암모니아 제거장치	한국	한국과학기술연구원	2017.05.12	10-2017-0059140				100
2	막증류 처리수의 암모니아 제거장치	한국	한국과학기술연구원	2017.05.16	10-2017-0060409	한국과학기술연구원	2018.09.03	10-1896482	100
3	흡수체를 이용한 태양열 집열기	한국	한국과학기술연구원	2017.06.07	10-2017-0070528	한국과학기술연구원	2019.03.29	10-1965619	100
4	하수슬러지 처리장치 및 방법	한국	한국과학기술연구원	2018.03.22	10-2018-0033221	한국과학기술연구원	2019.11.26	10-2051106	100
5	생물반응조 및 막증류장치를 이용한 수처리장치	한국	한국과학기술연구원	2018.04.02	10-2018-0037972				100
6	태양열 흡수체를 이용한 막증류 장치	한국	한국과학기술연구원	2019.09.02	10-2019-0108373				100
7	태양열 흡수체 및 히트펌프를 이용한 막증류 장치	한국	한국과학기술연구원	2019.09.16	10-2019-0113586				100
8	APPARATUS FOR MEMBRANE DISTILLATION USING SOLAR ABSORBER AND HEAT PUMP	미국	한국과학기술연구원	2019.11.26	16/695185				100
9	APPARATUS FOR MEMBRANE DISTILLATION USING SOLAR ABSORBER	EPC	한국과학기술연구원	2019.11.27	19211713.3				100

(3) 핵심 연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	프로토타입 막증류 스택	막증류 정수처리 시스템에 적용가능한 프로토타입 막증류 스택 개발	장비·장치	한국과학기술연구원	2년차	6단계
2	막증류용 고성능 태양에너지 집열기	기존 태양열 흡수체를 대체할 수 있는 막증류용 고성능 태양에너지 집열기 개발	재료·자재	한국과학기술연구원	2년차	6단계
3	프로토타입 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트	실제 환경에서 운전, 성능 평가를 통한 실용화 가능성이 검증된 1 m ³ /d 규모의 프로토타입 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 시스템의 파일럿 플랜트를 설치 및 운영	시스템	한국과학기술연구원	3년차	6단계
4	고효율 전처리 설비	유입 유량 및 농도 부하량 변화 등에 능동적 대처가 가능하며 높은 제거효율과 안정적인 처리수질을 얻을 수 있는 기술개발 및 운전인자를 확보	시스템	에이티이(주)	2년차	6단계
5	다층박막 흡수체 제작 및 열손실 최소화, 열적 안정성 연구	금속/유전체 다층박막 태양열 흡수체 제작 흡수체 적용시 나타나는 열 손실 최소화 및 고온 열처리시 나타나는 안정성 문제 검증	재료·자재	울산과학기술원	3년차	6단계

(4) 핵심 연구성과별 설명

핵심성과 1	프로토타입 막증류 스택	
정의	막증류 정수처리 시스템에 적용가능한 프로토타입 막증류 스택 제작	
목적	다양한 원수에 적용가능한 프로토타입 막증류 스택을 개발하고 이를 최종적으로 프로토타입 막증류 정수처리 파일럿 시스템에 적용함으로써 사용화 가능한 막증류 정수처리 시스템 제시	
성능목표	Aqavertk사 VMD 상용 스택 플럭스: $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ 에서 5LMH 수준 목표 플럭스: $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ 에서 5LMH	
성과달성 책임자 (소속기관)	송경근(한국과학기술연구원)	
소요기간	' 16.06 ~ ' 18.04 (1년 10개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	개발된 프로토타입의 막증류 스택을 대상으로 $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ 에서 유출 플럭스 측정	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 2건
	논문	SCI(E) : 2건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 2	막증류용 고성능 태양에너지 집열기	
정의	금속/유전체 다층박막을 이용하여 집광시 온도 상승을 유도하는 집열기 제작	
목적	성과물을 활용하여 솔라 집열기 및 정수용 막증류 시스템에 적용	
성능목표	단일 금속판 이용 흡수도 80%수준 금속.유전체 이용 흡수도 90%이상	
성과달성 책임자 (소속기관)	최원준 (한국과학기술연구원)	
소요기간	' 16.06 ~ ' 18.04 (1년 10월, 2년차)	
성과달성 확인방법	흡열체의 단위 성능으로서 UV-IR spectroscope, FTIR 장비로 흡수도를 측정하고 이를 적용한 집열기를 solar simulator 하에서 온도 상승 측정	
성과달성에 다른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 2건
	논문	SCI(E) : 2건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 3	프로토타입 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트	
정의	핵심성과 1과 2에서 개발된 막증류용 스택과 막증류용 고성능 태양에너지 기술이 결합된 프로토타입 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 시스템의 파일럿 플랜트	
목적	개발된 집열기 및 프로토타입 막증류 스택이 결합된 막증류 정수처리 시스템을 현장에 설치, 운전하여 실제 환경에서 성능평가를 통하여 실용화 가능성 검증	
성능목표	프라운호퍼 연구소 담수 생산량: 0.12~0.15 m ³ /day 수준 목표 정수생산량: 1 m ³ /day	
성과달성 책임자 (소속기관)	송경근(한국과학기술연구원)	
소요기간	' 18.04 ~ ' 19.10 (1년 6월, 3년차)	
성과달성 확인방법	개발된 막증류용 고성능 태양에너지 집열기 기술 및 프로토타입 막증류 스택을 결합된 막증류 정수처리 시스템을 현장에 설치, 운전하며 정수생산량 측정	
성과달성에 다른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	SCI(E) : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 4	고효율 전처리 설비	
정의	유입원수중의 부유물질 및 탁도 등 오염물질을 응집 및 침전에 의해 제거하는 설비	
목적	유입 유량 및 농도 부하량 변화 등에 능동적 대처가 가능하며 높은 제거효율과 안정적인 처리수질을 얻을 수 있는 기술개발 및 운전인자를 확보	
성능목표	부유물질 제거율 70% 이상 탁도 제거율 70% 이상	
성과달성 책임자 (소속기관)	정헌회(에이티이(주))	
소요기간	' 17.06 ~ ' 18.04 (10개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	공정시험법에 의한 부유물질 및 탁도 제거효율 분석	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 건
	논문	SCI(E) : 건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타(시작품)	1 건

핵심성과 5	금속/유전체 다층 박막 흡수체 제작 및 열 손실 최소화, 열적 안정성 평가	
정의	금속/유전체 다층박막 설계 및 광흡수 특성 인자 도출, 흡수체의 열 손실 최소화 및 열적 안정성 평가	
목적	성과물을 활용하여 솔라 집열기 및 정수용 막증류 시스템에 적용	
성능목표	단일 금속판 이용 흡수도 80%수준 금속/유전체 이용 흡수도 90%이상 열적 안정성 (열처리 온도 및 시간: 400℃, 5시간 이상)	
성과달성 책임자 (소속기관)	백정민 (울산과학기술원)	
소요기간	' 18.04 ~ ' 19.10 (1년 6월, 3년차)	
성과달성 확인방법	흡열체의 단위 성능으로서 UV-IR spectroscope, FTIR 장비로 흡수도를 측정	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 2건
	논문	SCI(E) : 2건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3-1. 목표

구분	내용
최종 목표	- 열흡수율이 높은 새로운 광흡수발열소재인 다층박막광흡수발열소재를 적용하여 태양광을 열로 전환하여 막증류(MD)를 위한 열원으로 사용하는 융합형 막증류 정수기술을 개발하는 것으로 프로토타입 막증류 장치의 현장 성능평가를 통하여 적용가능성 확보
세부 목표	- 다양한 원수(지표수, 지하수 등)에 적용 가능한 고효율의 막증류용 모듈을 설계하고 이를 통하여 1.0 m³/d 규모의 프로토타입 막증류 정수처리 시스템에 적용 가능한 프로토타입 막증류 스택(플럭스 : ΔT 50 ℃이하에서 5 LMH)을 개발 - 다층박막광흡수발열소재 기술을 이용하여 태양열 집열 성능을 향상시키고 막증류 공정에 적합하도록 고안한 태양에너지 흡수체를 개발하고 이를 이용하여 프로토타입 막증류 정수처리 시스템에 적합한 막증류용 고성능 태양에너지 집열기(흡수 파장 영역대: 0.2-3 μm, 흡수도: 90 % 이상, 온도: 집광 시 80 ℃ 이상)를 개발 - 최종적으로 개발된 막증류용 고성능 태양에너지 집열기 기술 및 프로토타입 막증류 스택을 결합하여, 1 m³/d 규모의 프로토타입 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 시스템의 파일럿 플랜트를 제작하고 실제 환경에서 운전, 성능평가를 통한 실용화 가능성을 검증

3-2. 목표 달성여부

가. 목표달성도

- 본 연구개발과제의 핵심연구성과를 아래 상술하였으며, 성과점검기준표와 성과지표별 목표에서 제시하는 항목의 달성 여부를 기준으로 평가한 결과 100% 목표 달성함.
- 정량성과지표별 목표
 - 논문게재 (목표/실적): 7건/8건
 - 특허출원 (목표/실적): 7건/9건(국외 2건)
 - 특허등록 (목표/실적): 0건/3건
 - 시제품 (목표/실적): 1건/1건

[총괄]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치		
주관	1	프로토타입 막종류 스택	1-1	프로토타입 막종류 스택 개발	①	Flux	>5LMH	>5LMH	flux 측정	flux 확보여부 확인	15	특허: 출원 5건 등록: 3건 논문: 3건 시제품: 1건 SW: 1건
	2	막종류용 고성능 태양에너지 집열기	2-1	금속/유전체 다층박막 흡수체 적용 막종류용 고성능 태양에너지 집열기 개발	①	흡수파장 영역대	UV~M (F)IR 가 변설계 가능여 부	0.2~2.5 μm	흡수도 측정	FTIR이용 흡수 스펙트럼	5	특허: 출원 1건 등록: 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건
					②	흡수도	>90%	>90%	흡수도 측정	FTIR이용 흡수 스펙트럼	5	
					③	집광 집열시 온도	>80℃	>80℃	온도 측정	Solar si mulator 하에서 온도, 샘플 사진	5	
공동	3	고효율 전처리 설비 개발	3-1	리멜라 응집침전 설비 개발	①	고형물 제거율	>70%	>70%	고형물 분석	공정시험 법	15	특허: 출원 1건 등록: 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건
					②	탁도 제거율	>70%	>70%	탁도 분석	공정시험 법	15	
주관/ 공동	4	프로토타입 다층박막광흡 수발열소재 이용 막종류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트	4-1	프로토타입 다층박막광흡수 발열소재 이용 막종류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 개발 및 운전	①	정수생산량	1 m ³ /d	1.1 m ³ /d	정수생산 량 측정	현장조건 에서 1 m ³ /d 의 정수량 확보여부 확인	10	특허: 출원 4건 등록: 3건 논문: 2건 시제품: 1건 SW: 1건
					②	Flux	>5 LMH	7.2 LMH	flux 측정	flux 확보여부 확인	10	
					③	먹는물 수질기준	먹는물 수질기준 만족	먹는물 수질기준 만족	수질분석	국가공인 먹는물 수질검사 기관 시험성적 서 확인	10	
위탁	5	금속/유전체 다층 박막 흡수체 설계	5-1	다층박막 흡수체의 열적 안정성 및 내구성 평가	①	열적안정성	>400 ℃ , 5h	400 ℃ , 5h	온도 측정	열처리 후 흡수체의 흡수도 특성 평가	10	특허: 출원 1건 등록: 2건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건
계											100	특허: 출원 9건 등록: 3건 논문: 8건 시제품: 1건 SW: 1건

[1차 연도]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치	
주관	1	프로토타입 막중류 스택	1-1	막중류용 모듈 설계 및 운전 인자 범위 설정	① 운전인자 범위 설정	운전인자 범위 설정	운전인자 범위 설정 및 모듈 설계 완료	운전인자 범위 설정 여부	운전인자 범위 설정 여부 확인	50	특허: 출원 2건 등록: 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건
	2	막중류용 고성능 태양에너지 집열기	2-1	금속/유전체 다층박막 흡수체 개발	① 흡수파장 영역 대	UV~M (F)IR 가변설계 가능여부	1.5~3 μ m	흡수도 측정	FTIR이용 흡수 스펙트럼	15	특허: 출원 1건 등록: 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건
					② 흡수도	>90 %	>90 %	흡수도 측정	FTIR이용 흡수 스펙트럼	15	
					③ 집광 집열시 온도	>50 $^{\circ}$ C	흡수체 온도 91 $^{\circ}$ C	온도 측정	Solar simulator 하에서 온도, 샘플 사진	20	
계										100	특허: 출원 2건 등록: 1건 논문: 2건 시제품: 1건 SW: 1건

[2차 연도]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치	
주관	1	프로토타입 막중류 스택	1-1	프로토타입 막중류 스택 개발	① Flux	>5 LMH	>5 LMH	Flux 측정	flux 확보여부 확인	35	특허: 출원 2건 등록: 1건 논문: 2건 시제품: 1건 SW: 1건
	2	막중류용 고성능 태양에너지 집열기	2-1	금속/유전체 다층박막 흡수체 적용 막중류용 고성능 태양에너지 집열기 개발	① 흡수파장 영역 대	UV~M (F)IR 가변설계 가능여부	0.2~2.5 μ m	흡수도 측정	FTIR이용 흡수 스펙트럼	5	특허: 출원 1건 등록: 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건
					② 흡수도	>90 %	>90 %	흡수도 측정	FTIR이용 흡수 스펙트럼	5	
					③ 집광 집열시 온도	>80 $^{\circ}$ C	>80 $^{\circ}$ C	온도 측정	Solar simulator 하에서	5	

										온도, 샘플 사진		
공동	3	고효율 전처리 설비	3-1	라멜라 응집 침전 설비 개발	①	고형물 제거율	>70%	> 70%	고형물 분석	공정시험법	15	특허: 출원 건 등록 건 논문: 건 시제품: 1 건 SW: 건
					②	탁도제거율	>70%	> 70%	탁도 분석	공정시험법	15	
위탁	4	금속/유전체 다층 박막 흡수체 설계	4-1	금속/유전체 다층박막 설계 및 광흡수 특성 인자 도출	①	흡수파장 영역 대	UV~M (F)IR 가변설계 가능여부	0.4~1.6 μm	흡수도 측정	FTIR이용 흡수 스펙트럼	10	특허: 출원 건 등록 건 논문: 건 시제품: 건 SW: 건
					②	흡수도	>90 %	>95 %	흡수도 측정	FTIR이용 흡수 스펙트럼	10	
계											100	특허: 출원 3건 등록 건 논문: 2건 시제품: 1건 SW: 건

[3차 연도]

구분		핵심성과 (CTE)	단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치		
주관/공동	1	막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 개발 및 운전	1-1	막증류 정수처리 시스템 파일럿 플랜트 개발 및 운전	①	정수생산량	1 m ³ /d	1.1 m ³ /d	정수생 산량 측정	현장조건 에서 1 m ³ /d 의 정수량 확보여부 확인	30	특허: 출원 4건 등록 3건 논문: 2건 시제품: 1건 S/W: 1건
					②	Flux	>5 LMH	7.2 LMH	flux 측정	flux 확보여부 확인	30	
					③	먹는물 수질기준	먹는물 수질기준 만족	먹는물 수질기준 만족	수질분석	공인시험 기관의 공인성적서를 통한 먹는물수 질기준 만족여부 확인	20	
위탁	2	금속/유전체 다층 박막 흡수체 설계	2-1	다층박막 흡수체의 열적 안정성 및 내구성 평가	①	열적안정성	>400 ℃ , 5h	400 ℃ , 5h	온도측 정	열처리 후 흡수체의 흡수도 특성 평가	20	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 2건 시제품: 1건 S/W: 1건
계											100	특허: 출원 4건 등록 3건 논문: 4건 시제품: 1건 S/W: 1건

나. 관련분야 기여도

○ 기술적 측면

- 지금까지 태양열 막증류 시스템의 성능을 평가하기 위해 일반적으로 합의 된 규범이나 신뢰할 수 있는 표준은 없음. 태양열 흡수체(또는 집열기)는 증류 장치의 주요 구성 요소이며, 이의 효율 개선은 물 생산량에 직접적으로 관계가 있음. 본 시스템의 성능과 다른 MD 파일릿 플랜트와 객관적으로 비교하기 위해 정리된 값이 아래 표 3.1에 제공됨. 낮은 태양 일조 조건에서도, 태양열 흡수기의 막 면적당 최대 증류 플럭스는 다른 시스템보다 대체로 우수한 성능을 보여주었음. 본 과제를 통해 개발된 태양열 흡수기로부터 일정량의 물을 증류하는데 더 적은 에너지가 필요하다는 것으로도 해석할 수 있으며, 이는 태양열 막증류 시스템의 효율이 개선된 것으로 판단할 수 있음.
- 본 연구를 통하여 태양열 막증류 시스템(Solar-MD) 기술이 성공적으로 개발되면 재생에너지인 태양에너지를 이용하는 정수처리기술로서 에너지를 다량 소비하는 기존의 정수처리 시스템을 대체하는 차세대 에너지자립형 정수처리기술로서 다양한 응용이 가능한 미래원천기술을 확보
- 본 연구를 통한 태양열 막증류 시스템(Solar-MD) 원천기술 확보는 국내 고도 수처리 기술 위상의 제고 및 선진기술 수준과의 격차 해소 및 물 관련 세계시장의 글로벌화에의 대비가 가능하며, 개발된 요소기술과 시스템화기술을 바탕으로 해수담수화, 물재이용을 위한 기술로 개량이 가능하므로 전반적인 물산업 분야의 경쟁력 제고에도 큰 이바지 기대

<표 3.1. 태양열 구동 막증류 공정 비교>

Refs.	Gemma Raluy et al., 2012	Wang et al., 2009	Koschikowski et al., 2009	Banat et al., 2007	Schwantes et al., 2013	This study
Location	Gran canaria, Spain	Hangzhou, China	Gran canaria, Spain	Aqaba, Jordan	Amarika, Namibia	Seoul, Korea
MD Configuration	PGMD	VMD	AGMD	PGMD	PGMD	DCMD
Membrane materiel	PTFE	PP	PTFE	PTFE	PTFE	PTFE
Membrane area (m ²)	8.5-10	0.09	120	40	168	0.14
Solar collector area (m ²)	6.96	8	186	72	232	0.09
Solar intensity (kWm ⁻²)	0.5-0.55	0.38	-	0.21-0.25	0.22	0.18
Water production (L/m ² -day)	0.7-17	1.95	7.5	8.92	8.96	9

○ 경제적 · 산업적 측면

- GWI의 예측에 따르면 세계 물시장 규모는 2007년 3,620억 달러에서 2025년까지 8,650억 달러 규모로 성장할 것으로 예측하고 있으며 그중 상수도 분야만도 3,880억 달러로 연평균 4.6%의 성장세가 예상되고 있어 기술의 시장성은 상당히 큰 것

으로 예측

- 특히, 태양열 막증류 시스템(Solar-MD) 기술은 에너지 자립이 가능한 소규모 분산형 용수공급 시스템을 타겟으로 개발되므로 적용대상이 도서지역, 산간지역, 고립지역의 기존 용수공급망이 닿지 않는 지역의 마을상수도 등으로 기존의 정수시스템과는 차별화된 시장을 대상으로 하고 있어 시장전망은 밝을 것으로 예상되며, 특히 중국, 몽골, 동남아, 남미, 중동, 아프리카 등 상수도 보급율이 높지 않은 국가의 부락단위 용수공급 시스템으로서 해외시장 개척도 가능
- 본 기술은 신재생에너지인 태양열을 이용하게 되므로 용수생산에 소비되는 에너지를 절감할 수 있으며, 태양열 집열장치 및 신재생에너지 관련 산업의 발전에도 기여

○ 사회적 측면

- 태양열 막증류 시스템(Solar-MD) 기술은 다양한 수원을 이용할 수 있는 분산형 용수공급 기술로 기후변화에 따른 지역적 수자원 부족 문제를 해결하는 솔루션을 제공함으로써 안정적인 용수공급과 그에 따른 국민의 삶의 질 향상에 기여
- 또한 본 기술은 신재생에너지인 태양열을 이용하게 되므로 용수생산에 소비되는 에너지를 절감할 수 있어 글로벌 기후변화에 대비한 온실가스 저감에도 중요한 역할

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 연구개발성과 활용 계획

○ 도서지역 용수 공급 현황

- 우리나라는 전국 11개 시·도 산하 58개 시군구에 총 3,147개의 도서가 있으며, 이 중 유인도서는 428개(연육도서 제외), 무인도서는 2,719개로 유인도서의 수가 적지만 면적은 전체 도서의 약 95 %를 차지함. 도서의 지역별 분포는 전남지역에 1,944개가 분포하여 전국도서의 61.7 %를 차지하고, 그 면적은 전국 도서면적의 66.5 %임. 또한 도서의 인구규모에 따른 도서 수를 살펴보면 인구가 100명 미만인 도서가 56.31 %로 절반이상의 도서가 소규모화 되었음을 알 수 있음(표 4.1 참조).
- 특별히 우리나라의 도서지역은 특성상 하천의 발달이 미약하고 용수공급원의 개발이 어려우며 자연재해에도 상대적으로 취약하여, 안정적인 식수원의 확보가 어렵기 때문에 물 부족 현상이 심각함. 주로 도서지역에서는 저수지, 관정취수, 해수담수화 시설, 빗물이용시설 등을 용수공급원으로 이용함. 그중 가장 많은 양을 공급하는 용수원은 저수지이며 가장 많은 수의 도서에서 주요 용수공급원으로 의존하고 있는 것은 관정취수로 나타남. 해수담수화시설은 환경부의 도서지역 식수원 개발 사업에서 일부 활용되고 있으며, 가장 오래전부터 이용해 오던 용수공급원은 빗물이용시설임.
- 일반적으로 도서지역의 용수공급 및 관리에서는 수량 부족, 수질관리 미흡, 잠재적인 2차 오염 등이 문제점으로 나타나고 있음. 선행연구의 설문조사 결과를 보면 이 중 수량부족이 가장 시급한 사안으로 나타남(문유리, 2009). 도서지역은 지형적인 특성상 수원확보를 위한 저수지 건설적지가 적고 암반관정 등을 개발하더라도 해수 침투로 인해 염분농도가 높아 생활용수 사용이 어려운 경우가 빈번함. 또한 도서지역의 사업비는 육지보다 30 % 이상 비싸기 때문에 상대적으로 투자가 지연되어 제한급수 등의 어려움을 겪고 있음. 또한 대부분의 도서에서 단일 용수공급원에 의존하는 것도 문제임. 해당 용수공급원의 기능이 상실되면 도서지역의 주민들은 심각한 식수난을 겪을 수밖에 없음을 단적으로 말해주고 있어 용수공급원의 다원화가 시급히 이루어져야 할 것으로 판단됨.

<표 4.1. 인구규모별 유인도서 현황 (2010년 기준)>

인구규모	도서수(개)	구성비(%)
합계	463	100.00
1~25명	113	24.4
25~50명	63	13.6
50~100명	70	15.1
100~500명	133	28.7
500~1,000명	24	5.2
1,000명 이상	60	13.0

자료: 행정안전부(2011), 『대한민국 도서백서』

○ 경제성 평가

- 도서 지역의 담수화시설은 1996년 국토해양부 위탁사업으로 전남 신안군 홍도를 시작으로 점진적으로 건설하여 운영하고 있다. 2010년 현재 국내에는 21개 지자체 77개 도서에 85개의 담수화시설이 설치되어 있으며 시설용량은 7,209 m³/일로써 약 2만 1,000명이 급수혜택을 받고 있음. 하지만 제주도를 제외한 대부분의 도서가 소규모 시설이며 설치연도 또한 오래되어 운영관리가 어려우며 기술력 또한 부족하여 설비의 개량화가 필요함.
- 이중 담수화시설 중에 수자원 공사가 수탁 운영관리 현황은 표 4.2와 같음. 수자원 공사의 비용 분석 결과와 문헌의 비용분석 결과를 비교하기 위하여 선행연구 중에서 세부 항목이 제시된 결과를 가능한 범위 내에서 분석 보고하였음. 자본비용이 포함된 연구는 자본 비용을 제외하고 비용을 분석함 (박남식 외, 2011). 그 결과 담수화 및 정수처리의 비용의 구성비는 크게 차이가 나는 것으로 나타남. 에너지비는 최소 4 %에서 최대 70 %의 범위에, 유지보수비는 17~56 %, 인건비는 6~37 %의 범위로 나타남. 여기서 주목할 내용은 에너지비용의 비중이 크게 변한다는 것이며, 기수를 사용하는 시설을 제외하더라도 에너지비의 비율은 16~70 %로 나타남. 이러한 소규모 정수처리 및 담수화 시설의 생산 비용을 절감하기 위해 새로운 형태의 기술 개발에 대한 요구가 증대되고 있음.
- 본 연구를 통해 개발된 융합형 막증류 정수기술은 열흡수율이 높은 새로운 광흡수 발열소재인 다층박막광흡수발열소재를 적용하여 태양광을 열로 전환하여 막증류(MD)를 위한 효율적 열원으로 사용가능한 것으로, 에너지 비용을 크게 줄일 수 있어 저에너지 및 저비용으로 정수 처리 및 담수 생산이 가능할 것으로 판단됨.

<표 4.2. 담수화시설 수탁운영관리 현황 (한국수자원공사 자료, 2010)>

도명	시군명	시설명	용량(m³/일)	급수원구	가구수	설치연도
총계	9	41	1,735	8,629	2,686	-
수도권	1	1	200	1,250	420	-
	웅진군	대연평도	200	1,250	420	'07
충남	4	22	715	3,814	1,304	-
	보령시	고대도 I	30	300	80	'97
		고대도 II	30			'08
		외연도	50	540	150	'00
		삼시도(밤섬)	30	180	74	'00
		삼시도(윗마을)	50	300	110	'03
		호 도	30	218	68	'01
		장고도	50	285	84	'01
		허육도	10	30	10	'02
		월 도	10	40	16	'02
		육 도	20	40	18	'02
		원산3리(사창,진촌)	50	400	180	'03
		원산1리(선촌,진곶지)	50	305	90	'04
		원산2리(점촌,곶지)	50	296	95	'04
		소 도	10	80	14	'04
		추 도	10	30	15	'04
		원산2리(저두)	50	140	46	'05
		원산3리(초전)	20	128	46	'05
		효자도	50	180	76	'05
	서산시	우 도	15	84	37	'01
		고파도	20	70	29	'99
	당진군	소난지도	50	72	35	'03
	홍성군	죽 도	30	96	31	'98
전북	1	6	290	1,779	465	-
	군산시	관리도	20	125	27	'99
		방축도	30	175	56	'02
		연 도	40	231	55	'03
		어청도	50	439	118	'03
		선유도	100	546	156	'06
	여수시	야미도	50	263	53	'06
		11	510	1,761	485	-
		여자도(대동)	60	360	96	'02
		화태도(화태)	100	408	51	'04
		대두라도(대두)	50	140	31	'04
		화태도(월전)	30	83	34	'04
		대두라도(선창)	20	61	16	'04
		부도	10	14	7	'05
		나발도	30	45	19	'05
		자봉도	30	60	22	'05
		Hits 도	30	110	37	'05
		횡간도	50	130	73	'05
	신안군	홍 도	100	350	99	'97
경남	1	1	20	25	12	-
	거제시	지심도	20	25	12	'97

- 다음은 본 기술을 이용하여 먹는 물 수질 기준 조건을 달성하며 10톤/일 처리 설계 조건으로, 2가지 시스템에 대해서 경제성 평가를 수행했음.

- 10톤 처리시 설계 (태양열 집열기로 3.3 톤 + 히트펌프로 6.6 톤)

시스템	구성	규격	수량	가격(단위: 천원)
1. 전처리 설비	PP Filter	1 μ m, D60*H150	10 ea	4,000
2. 저장조	농축조 저장조	5 m ³ (설치포함)	3 ea	7,500
3. 히트펌프	DHGW 10N-C4-01	10rt	5 ea	44,000
	수열순환펌프	375L/min	5 ea	1,155
	부하냉온펌프	160L/min	5 ea	627
4. 태양열 집열기	흡수체	6m ² (36ea)	60 set	60,000
	온수순환펌프	55L/min	1 ea	125
5. 막증류 모듈	모듈	350*800	10 set	50,000
	멤브레인	PTFE 045 (0.56*0.25)	81 ft (132 sheets)	28.5 (2,539.35)
	온수순환펌프1	70L/min	3 ea	825
	온수순환펌프2	55L/min	3 ea	375
	기어펌프	1L/min	3 set	4,170
	처리수 저장조	100L	20 ea	2,000
6. 열교환기	판형 열교환기	150,000kcal/hr	2 ea	990
	수중펌프	-	2 ea	300
7. 자동화 설비	분전함 제작/설치	380V/50A	1 set	2,420
	레벨센서	-	3 ea	600
	노트북	ASUS	3 ea	1,500
	온도센서	GR200	3 set	5,649.45
	유량센서	-	3 ea	600

▶ 초기 투자비 (태양열 집열기 3.3 톤 + 히트펌프 6.6 톤 = 하루 총 10톤 생산시)

투자항목	투자 소요예상비 (단위: 천원)
전처리 설비	4,000
저장조	7,500
히트 펌프	45,782
태양열 집열기	9 L/6m ² · 8hr (파일럿 플랜트) -> 3,333 L 60,125
막증류 모듈	57,398
열 교환기	1,290
자동화 설비	10,769
합계	186,864

▶ 유지비

(1) 분리막

소모품	규격	단가	교체주기	연간비용(천원)
PP Filter	1 μ m	약 40,000원	분기별 1회	160
PTFE 막	045LD0A (0.56*0.25)	약 850,000원	3년 1회 (10 set)	2,833
소계				2,993

(2) 전기

태양열 집열기+히트펌프

세부항목		단가	연간비용(천원)
DHGW10N-C4-01	15.57 kW 0.354 kWh/L	50원/kW	6,460.5
수열순환펌프			
부하냉온펌프			
집열기 순환펌프	330 W	50원/kW	65.7
온수순환펌프1	330 W	50원/kW	2,400
온수순환펌프2	150 W	50원/kW	197.1
기어펌프	50 W	50원/kW	65.7
수중펌프	500 W	50원/kW	657
소계			9,846

▶ 감가상각비

구분	기준	연간비용(천원)
감가상각	15년 계산	약 11,884
년간 유지비	분리막 + 전기사용료	약 12,457
소계		약 24,341

- 10톤 처리시 설계 (태양열 집열기로 하루 일조량 있는 8시간만 가동)

시스템	구성	규격	수량	가격(단위: 천원)
1. 전처리 설비	PP Filter	1 μ m, D60*H150	10 ea	400
2. 저장조	농축조 저장조	5 m ³ (설치포함)	3 ea	7,500
3. 태양열 집열기	흡수체	6m ² (36ea)	185 set	185,000
	온수순환펌프	55L/min	3 ea	375
4. 막증류 모듈	모듈	350*800	30 set	150,000
	멤브레인	PTFE 045 (0.5 6*0.25)	81 ft (1,320 sheets)	28.5 (25,393.5)
	온수순환펌프1	70L/min	3 ea	825
	온수순환펌프2	55L/min	3 ea	375
	기어펌프	1L/min	3 set	4,170
	처리수 저장조	100L	20 ea	2,000
5. 열교환기	판형 열교환기	150,000kcal/hr	2 ea	900
	수중펌프	-	2 ea	300
6. 자동화 설비	분전함 제작/ 설치	380V/50A	1 set	2,420
	레벨센서	-	3 ea	600
	노트북	ASUS	3 ea	1,500
	온도센서	GR200	3 set	5,649.45
	유량센서	-	3 ea	600

▶ 초기 투자비 (태양열 집열기로 일조량 있는 8시간 가동, 하루 총 10톤 생산시)

투자항목	투자 소요예상비 (단위: 천원)
전처리 설비	4,000
저장조	7,500
태양열 집열기	1.5L/m ² · 8hr (파일럿 플랜트) → 10,000 L 185,375 (일조시간에만 가동시)
막증류 모듈	157,398
열 교환기	1,290
자동화 설비	10,769
합계	366,332

▶ 유지비

(1) 분리막

소모품	규격	단가	교체주기	연간비용(천원)
PP Filter	1 μ m	약 40,000	분기별 1회	160
PTFE 막	045LD0A (0.56*0.25)	약 850,000	하루 8시간 가동시, 3년 0.33회 (30 set)	2,833
소계				2,993

(2) 전기

태양열 집열기(100%)

세부항목		단가	연간비용(천원)
집열기 순환펌프	150 W	50원/kW	65.7
온수순환펌프1	330 W	50원/kW	2,400
온수순환펌프2	150 W	50원/kW	197.1
기어펌프	50 W	50원/kW	65.7
수중펌프	500 W	50원/kW	657
소계			3,385

▶ 감가상각비

구분	기준	연간비용(천원)
감가상각	15년 계산	약 24,422
년간 유지비	분리막 + 전기사용료	약 6,378
소계		약 30,800

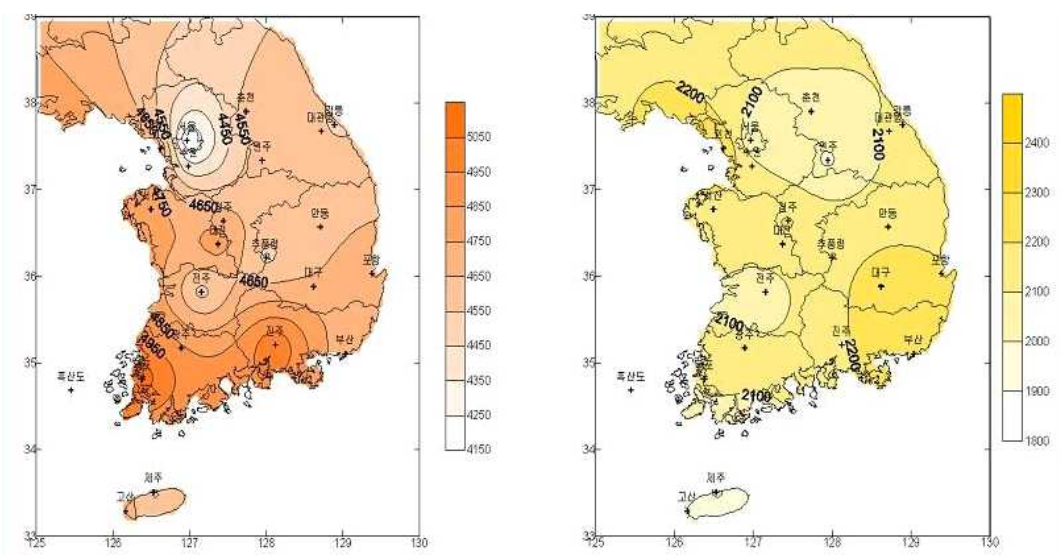
- 지금까지 담수화 공정의 도입단가는 상당히 높아 경제성 문제가 있는 것으로 알려져 왔음. 최근 활발히 개발되고 있는 막의 처리효율, 막 가격 및 조작압력 감소로 인한 공정의 경제성 확보를 위해 노력하고 있음. 먹는 물 수질기준을 달성하는 1일 처리량 10톤 처리 목적으로는 본 기술의 경제성 평가 결과, 하루 8시간(일조시간) 동안 태양열 집열기만 이용하여 10톤을 생산해 내었을 때는 약 3억6천6백만원의 초기 설치비가 계산됨. 하루 중 실제 가동할 수 있는 시간이 적기 때문에 태양열 흡수체와 모듈이 3배로 더 필요하여 높은 초기투자비가 추산됨. 다음은 효율적 상태의 태양열 집열기(하루 중 8시간)와 히트펌프(16시간)가 함께 운전되는 막중류 시스템의 초기투자비는 약 1억8천6백만원으로 추산됨. 이는 이미 경제성이 확보되어 있는 RO 설비(10톤 초기 투자비-1억5천7백)와 비교하여도 물생산 경제성은 충분히 있다고 판단됨. 또한 유지비용 측면에서도 약 2배 차이로 태양열 집열기를 활용한 시스템이 연간 약 6백만원 이상 절감 가능할 것으로 예상됨. 더불어 앞으로 있을 물값 상승과 물부담금을 감안할 때, 소규모 정수처리를 위한 융합형 막중류 시스템 기술 도입이 효율적으로 확산될 수 있을 것으로 판단됨.

○ 적합한 지역 검토 및 활용계획

- 국내의 경우 도서지방에 설치되어 있는 하루 생산량 1천 m³ 이하의 소규모 정수 처리 시설이 대부분으로 시장규모는 크지 않은 수준임. 우리나라는 물이 절대적으로 부족한 지역이 적고, 담수생산 비용이 일반 정수처리비용에 비해 몇 배 높기 때문에 시장규모가 급속히 확대되기는 어려운 실정임. 다만, 물 공급에 어려움을 겪고 있는 일부지역과 도서지역의 용수공급 방법으로 본 프로토타입의 막중류 시스템을 우선 고려 적용 할 수 있을 것으로 보임. 도서지역 등 원활한 용수공급이 어려운 지역은

운전 유지관리를 할 수 있는 전문적인 인원 상주가 어려운 여건으로 자동화 운전이 가능한 용수공급 시스템이 필요한 실정임. 이에 본 프로토타입의 막증류 시스템의 자동화 운전에 대한 검토와 함께 유지관리 용이성에 대한 고려가 필요함. 또한 전략적 진출 대상 지역의 환경 및 수질 사전 검토가 필요함. 지역적으로 상이한 수질 특성을 미리 인지하여 처리 지역에 따라 질산염, 중금속, 유기물 등에 대한 오염 상태가 심각한 지역에 따라서는 Target 물질에 대한 최적 공정 도출하고 적용 가능성을 확보해야 할 것으로 보임.

- 태양광 집열기가 결합된 본 기술을 적용 시, 풍부한 일사량은 효율 높은 운전을 위한 필수 조건이라 할 수 있음. 태양열을 이용함에 있어 일사량과 일조시간은 생산량과 밀접한 관계가 있음. 특히 우리나라는 지역, 그리고 입지 조건에 따라 일사량, 일조시간은 달라지므로 사전 검토가 필요함(그림 4.1 참조). 20년 평균 일사량은 목포가 5110.39 MJ/m² 로 가장 높으며 서울이 4143.82 MJ/m²로 가장 낮으나 그 편차는 국토가 아주 넓지 않아 큰 편은 아님(표 4.3 참조). 일조시간은 인천 주변 대구 부산 진주 주변에서 높게 나타나며 제주 및 고산 지역에서는 오히려 낮게 나타남. 하지만 음영, 안개, 미세먼지 황사 등의 지역적 특색 지형적인 요건에 따른 일조시간이 집열기 효율과 연결되므로 지리적으로 전략적 검토가 필요함.
- 중동이나 동남아시아 지역은 수처리에 대한 수요가 집중되어 있어서 실제 적용을 통해 기술 검증 시 파급효과가 클 것으로 기대됨. 이들 지역은 연평균 일조시간이 서울의 약 1.5배가 넘어 본 시스템을 적용하기에 최적화된 자연환경이라 할 수 있음(그림 4.2 참조). 또한 지하수를 주요 수원으로 활용하여 지하수 중 중금속 발현이 잦은 동남아 지역과 오랜 기간 하천의 오염 심화로 원수의 수질이 악화된 선진국 지역에도 본 기술을 적용하기에 적합할 것으로 판단됨.

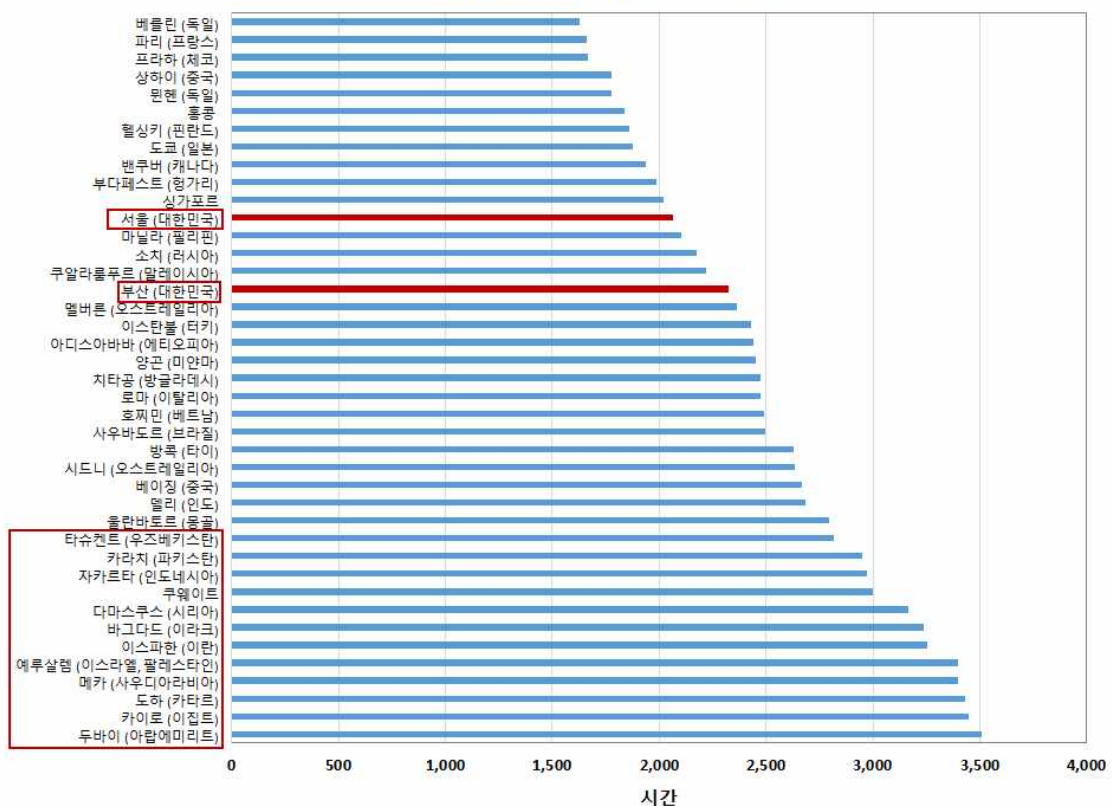


<그림 4.1. 20년(1988-2007) 평균 일사량(좌) 일조시간(우) 분포도>

<표 4.3. 지점별 20년 평균 일사량(좌)-(단위: MJ/m²)과 평균 일조시간(우)-(단위: 시간)(출처: 태양에너지 최적 활용을 위한 기상자원 분석 보고서)>

지점번호	지점명	20년 평균	지점번호	지점명	20년 평균
100	대관령	4574.38	100	대관령	2118.2
101	춘천	4597.63	101	춘천	2088.8
105	강릉	4531.30	105	강릉	2101.3
108	서울	4143.82	108	서울	2008.1
112	인천	4734.79	112	인천	2305.6
114	원주	4608.10	114	원주	1980.1
119	수원	4378.53	119	수원	2131.6
129	서산	4612.90	129	서산	2165.4
131	청주	4709.26	131	청주	2212.1
133	대전	4820.29	133	대전	2176.4
135	추풍령	4522.84	135	추풍령	2165.9
136	안동	4603.48	136	안동	2179.6
138	포항	4737.28	138	포항	2206.1
143	대구	4672.64	143	대구	2245.5
146	전주	4505.19	146	전주	2038.7
156	광주	4864.33	156	광주	2123.6
159	부산	4668.98	159	부산	2291.7
165	목포	5110.39	165	목포	2138.8
169	흑산도	4980.13	169	흑산도	1938.0
184	제주	4535.53	184	제주	1884.9
185	고산	4702.22	185	고산	2007.6
192	진주	5047.09	192	진주	2186.0
평균		4675.51	평균		2122.5

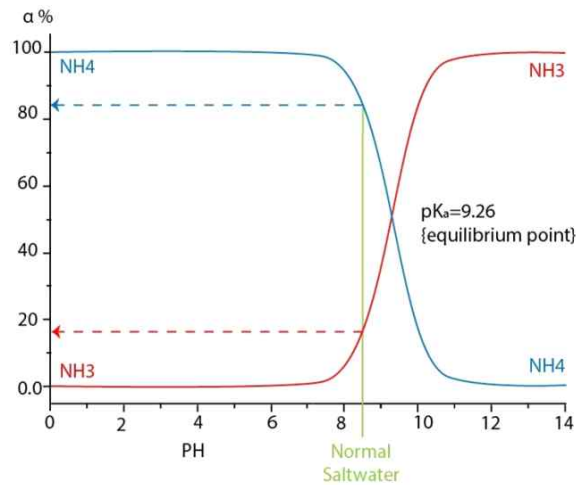
세계 주요 도시들의 연간 일조시간



<그림 4.2. 세계 각국 주요 도시들의 연간 일조시간 (출처: <https://namu.live/b/city/199079?p=1>)>

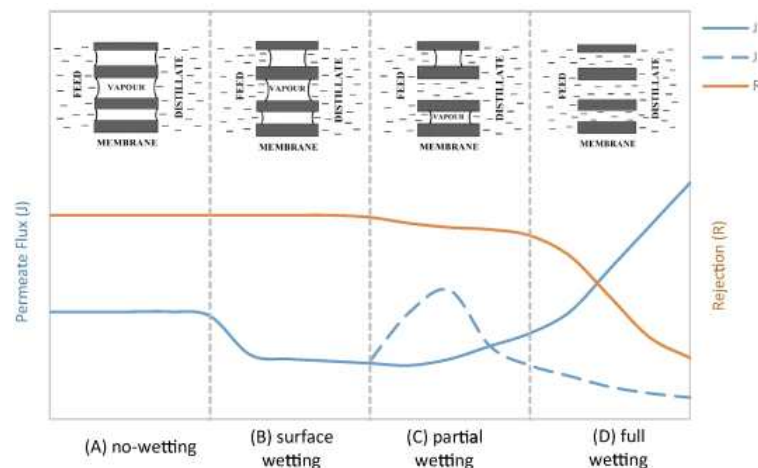
나. 후속연구의 필요성

- 현재 개발기술의 기술성숙도(TRL; Technology Readiness Level)는 시작품 단계(TRL 6)에 해당하는 실용화 초기단계의 기술로서 유사환경에서 기술 적용가능성만이 검증된 단계로 상업적으로 기술을 적용하기 위해서는 상용화 모델을 개발하고 이를 실제 현장에서 검증하는 테스트베드 형태의 시범사업 등을 진행할 필요가 있으며 이를 위하여는 추가 후속연구를 통한 상용화 기술로 개발 완성되어야 함.
- 현재 개발된 프로토타입 막증류 시스템을 기반으로 상용화형 모델로 스케일 업하며 부속 시스템과의 패키지화 기술을 개발하고 운전의 안정성 확보에 집중할 필요가 있음.
- 이러한 상용화형 패키지 모델을 기반으로 타겟현장에서 테스트베드 형태의 시범사업 등을 진행하여 기술을 검증하고 이를 통하여 기술 인·검증을 획득하고 사업화를 진행할 계획임.
- 현재 개발된 프로토타입 막증류 시스템은 유연한 적용성과 다양한 상용화된 평막(flat sheet)의 적용을 고려하여 평막형의 모듈을 기반으로 DCMD, AGMD 등의 모듈 형태로 개발되었음. 평막형 모듈은 중공사형(hollow fiber)이나 나권형(spiral wound) 모듈에 비하여 유효 막면적이 작은 단점이 존재하여 대규모 시설로 적용하는 경우에는 선행연구에서 개발된 중공사막 등 여러 형태의 막 적용에 대한 검토가 필요하며, 막증류 모듈구성에 있어서도 열손실 최소화 및 생산량 증대를 위해 VMD(vacuum membrane distillation), SGMD(sweeping gas membrane distillation) 등 다양한 막증류 방식 적용을 위한 최적의 막증류 시스템 구축에 대한 연구를 추진할 필요 있음.
- 막증류는 증류를 기반으로 하는 수처리공정의 하나로 기본적으로 휘발성물질에 대한 취약성을 갖고 있는 기술임. 따라서 정수 측면에서 본다면 암모니아를 비롯한 휘발성 오염물질의 제어에 한계를 보일 수 있으며 이의 적절한 관리는 필수적이라 할 수 있음.
- 특히 암모니아 존재할 시, pH 상승으로 유리 암모니아로 상이 전환되어 (그림 4.3) membrane을 통해 대기 중으로 휘발되는 문제점이 발생할 수 있음. 본 연구에서도 다루었듯이 암모니아의 경우 응집 전처리 과정에서 pH 조절을 통해 암모니아의 농도를 제어할 수 있는 효과를 얻을 수 있었으며, 그 외 휘발성오염물질에 대해서는 활성탄 흡착 등의 후처리 방안도 필요함. 나아가 향후 후속 연구를 통해 이를 역이용하여 높은 질소비의 처리수를 대상으로 diffusion 막을 개발하여 분해된 암모늄 이온은 암모니아 가스 형태로 적극적으로 회수하는 기술을 개발할 것임. 유입수의 특성에 따른 적절한 전처리 및 후처리 기술의 적용을 검토하여 암모니아를 비롯한 휘발성 오염물질의 제어기술의 추가 연구가 필요함.



<그림 4.3. pH에 따른 암모니아와 암모늄 이온의 상 변화>

- 본 태양열 막증류 시스템의 현장운전은 제한된 연구기간으로 충분한 운전자료의 확보가 다소 미흡한 면이 있음. 따라서 후속 추가연구를 통하여 적용원수(해수, 담수 등)에 따른 오염물질의 종류를 고려한 전처리 및 후처리 방안과 장기운전에 따른 막오염(fouling)과 막젖음(wetting)에 대한 제어기술을 마련하고, 이에 따른 장기운전을 통하여 장기적인 관점에서의 경제성 확보 및 유지관리 비용 등의 추가적인 평가를 수할 필요가 있음.
- 장기 운전에 따른 막 젖음은 소수성 고분자막 기공에 액체가 차는 현상으로, 막 표면에서 증기와 액체간의 표면장력이 저하됨에 따라 막 기공에 물이 유입되기 때문에 발생됨. 이때 액체가 막을 투과할 수 있는 임계압력(LEP)은 막의 표면 에너지, 유입 또는 투과수의 표면장력 그리고 막 기공의 크기와 형상에 크게 영향을 받음. 막 젖음 현상은 막 젖음의 정도에 따라 크게 4 가지로 분류됨(그림 4.4).



<그림 4.4. Wetting degrees: (A) non-wetted; (B) surface-wetted; (C) partially-wetted; and (D) completely-wetted. (source: Mohammad et al., 2018)>

○ 특히나 막증류는 정수를 생산하는 과정에서 원수와 접촉하는 분리막에 오염물질이 달라붙게 되면 분리막의 틈이 막혀 정수 생산속도가 감소할 수 있음. 아울러 수증기만 통과해야 하는 소수성 분리막을 원수가 직접 통과해, 생산된 정수의 수질이 나빠진다는 문제도 있음. 기존에 막 오염과 막 젖음이 서로 깊게 연관되어 있다는 연구 결과들이 존재하지만 정확한 메커니즘은 확인하기 어려움. 이를 위해서 막 젖음 현상을 사전에 감지할 수 있는 모니터링 기술과 새로운 개념의 막 젖음 인자를 도출하여 본 공정의 운전 최적화를 수행함. 이러한 막 젖음 현상을 방지하기 위해서는 원수 내의 유기물 및 무기이온의 용해도를 이용하여 최적의 온도와 농축비로 운전할 수 있는 운영기술을 개발함.

○ 중동국가 등 국외에 비하여 국내의 낮은 유효 일사시간 (년평균 3.5h)으로 인한 태양열 막증류 시스템의 비효율적 운영을 방지를 위해 본 연구에서 보조열원으로서 heat pump를 적용하였으나, 추가적인 전원공급 등 실제 적용을 위해서는 다양한 고려가 필요할 것으로 보여짐. 본 기술의 경우 운전온도가 40-50℃ 정도로 국외사례의 80℃에 비하여 다소 낮은 온도에서 운전되어 다소 보수적인 플렉스에서 운전되었으나 이를 태양열 집열면적을 늘리거나 집광을 통하여 집열량을 증가시켜 운전온도를 80℃ 이상으로 증가시켜 고평렉스로 운전하면 적은 일사시간으로도 증가된 생산량을 얻을 수 있을 것으로 보여짐. 따라서 추후연구를 통하여 이러한 제한된 일사시간에서의 집열량 증가를 통한 고평렉스 운전 등의 대처방안의 확인과 함께 부족한 태양일사시간과 날씨 변동에 따른 안정적인 열원확보 방안의 고려 및 태양일사시간이 충분한 국외 대상지역에 대한 환경 및 여건분석을 통하여 대상지역별 진출 전략을 마련하고 그에 적합한 시스템으로 기술보완에 대한 추가연구를 계획 할 필요가 있음.

○ 후속연구 추진 시 타겟지역의 지역별 주거특성, 물공급 정도 및 각종 수원(잡배수 등)을 고려하며, 지역별 전기공급 능력을 고려하여 열원보조 장치로 디젤 엔진 등을 검토하여 진행할 계획임.

○ 막증류 후속 연구과제 제안

연구개발 과제명	다층박막광흡수발열소재의 흡수-집열 공정을 이용한 막증류 일체형 상용화 정수시스템 개발
1. 연구개발 목표	◦ 막증류용 고효율 태양에너지 흡수-집열기 개발 ◦ 고효율/저오염의 MD 모듈 및 장치를 이용한 시스템 최적화 ◦ 막증류 일체형 모듈의 기술 한계 극복 ◦ 막모듈/공정/설계/운영기술을 포함하는 “막증류 상용화기술 개발”
2. 주요 연구 내용	◦ 막증류용 고효율 태양에너지 흡수-집열기 개발 - 금속/유전체 다층박막이 적용된 흡수체의 집광시 온도 상승을 유

	도하는 집광기 기술 개발 - 금속/유전체 다층박막 설계 및 광흡수 특성 인자 도출, 흡수체의 열 손실 최소화 및 열적 안정성 평가 - 성과물을 활용하여 태양열 집열기 및 정수용 막증류 시스템에 적용 ◦ 고프럭스/저오염의 MD 모듈 및 장치를 이용한 시스템 최적화 - 기존 MD 모듈 대비 15% 생산효율 향상 - 효율 향상 및 열손실 최소화를 위한 MD 모듈 설계 - 적용분야별 (분산형 용수공급용 정수처리, 하수처리수 재이용수 처리, 해수담수화 Brine 처리, Power Plant 적용 등) 최적화된 MD 모듈 설계 및 제작기술 확보 ◦ 막증류 일체형 모듈의 기술 한계 극복 - 장기운전에 따른 막오염(fouling)과 막젖음(wetting)에 대한 제어 기술을 마련 - 암모니아를 비롯한 휘발성 오염물질 제어하는 동시에 diffusion layer를 이용한 회수 가능한 기술 개발 - 고분자형태의 유기오염물질 고농도 함유 하수에 대한 고효율 증류기술 개발 - 원수의 유기물 및 무기이온 구성비에 따른 작동 메카니즘 규명 ◦ 막모듈/공정/설계/운영기술을 포함하는 “막증류 상용화기술 개발” - 다층박막광흡수발열소재의 흡수-집열 공정 결합한 일체형 막증류 정수시스템 개발 및 테스트베드 운영 - 전체 공정을 자동으로 감시제어가 가능한 공정운영제어 알고리즘 개발 - 중동이나 동남아시아 현지 인증 획득 - 현지 여건을 고려한 MD 파일럿 플랜트 유지관리 최적화 기술 개발 - 경제성평가(설치/운영, 에너지/물값 등) - 설계가이드라인/유지관리매뉴얼 작성
3. 연구개발의 필요성 및 기술동향	◦ 개발된 흡수체의 열 손실 최소화 하고 열적 안정성 높이기 위해 집열기와 결합한 형태로 적용 필요 ◦ 지속적인 기술개발로 높은 수준의 기술적 성과를 달성하였으나 기존 기술로는 에너지 효율을 높이기 어려우며, 새로운 접근 방식의 에너지 저감 기술 필요

	◦ 막증류 기술의 국산화를 통한 막모듈의 제조 및 설계/운영의 일체화 기술개발로 경제성을 제고 ◦ 에너지 절감, 배출수량 저감을 위한 막증류 기반의 정수시스템 구축을 통해 녹색 성장구현 ◦ 기존 태양열 막증류 시스템의 현장운전은 제한된 연구기간으로 충분한 운전자료의 확보가 다소 미흡한 면이 있음. ◦ 후속 추가연구를 통하여 적용원수(해수, 담수 등)에 따른 오염물질의 종류를 고려한 전처리 및 후처리 방안과 장기운전에 따른 막오염(fouling)과 막젖음(wetting)에 대한 제어기술을 마련. ◦ 장기적인 관점에서의 경제성 확보 및 유지관리 비용 등의 추가적인 평가를 수행할 필요가 있음. ◦ 막증류는 증류를 기반으로 하는 수처리공정의 하나로 기본적으로 휘발성물질에 대한 취약성을 갖고 있는 기술임. ◦ 암모니아의 경우 응집 전처리 과정에서 pH 조절을 통해 암모니아의 농도를 제어 할 수 있는 효과를 얻을 수 있었으며, 그 외 휘발성오염물질에 대해서는 활성탄 흡착 등의 후처리 방안도 필요함. ◦ 향후 후속연구를 추진하여 유입수의 특성에 따른 적절한 전처리 및 후처리 기술의 적용을 검토하여 암모니아를 비롯한 휘발성 오염물질의 제어기술의 추가고려가 필요함. ◦ 개발된 집열기 및 프로토타입 막증류 스택이 결합된 막증류 정수처리 시스템을 현장에 설치, 운전하여 실제 환경에서 성능평가를 통하여 실용화 가능성 검증 필요 ◦ 기존 연구에서 막증발 공정에 대한 설계 기술 및 파일럿 연구를 진행하였으나, 해외 현장에 설치하여 개발 기술에 대한 검증이 필요하고, 이러한 단계를 거쳐서 국내 막증류 기술에 대한 해외진출 기반 마련 필요. ◦ 특히 중동지역이나 동남아시아 지역은 물부족에 따른 해수담수화 등 수요가 집중되어 있어서 중동지역에서 국내 개발기술에 대한 검증시 파급효과가 클 것으로 기대. ◦ 분산형 용수공급 시스템 운영을 위한 최적의 용수 및 에너지 통합운영관리 시스템 구축하고 클라우드 컴퓨팅 기반의 통합운영시스템을 설계하여 자원을 효율적으로 운영하고 에너지 관리시스템을 설계 제작하여 현장적용을 통하여 우수성 검증할 필요.
4. 연구개발 추진 방법 및 추진체계	◦ 연구개발 추진전략은 총 2단계로 구성되었으며, 1단계 핵심기술 개발 및 실증 플랜트 설계 (2년), 2단계 핵심기술 고도화 및 테스트베드 구축 및 운영 (2년). ◦ 국내·외에서 축적된 참여 기업의 설계 시공 기술, 연구진의 연구역량과 인프라 등을 최대한 활용하여 상용화 기술을 개발하고 시장개척

	기반 마련. ◦ 기존의 타 연구의 연구성과와 실증연구시설 및 기존 구축 시설 등을 활용하여 연구비 투자 대비 성과 극대화. ◦ 실증시설 운영과 유지관리를 통해 개발기술의 검증뿐 아니라, 향후 사업화로 연계시킬 수 있는 기반 마련. ◦ 해외 물시장에 직접 활용 가능한 설계-구축-운영 기술 개발을 목표로 정부·지자체·연구기관·학계·산업계의 공조체제를 유지하며 연구개발 추진이 필요. ◦ 본 과제를 통해 개발된 성과물들은 해외 물 산업 시장진출을 위해 성과를 즉각적으로 실용화할 수 있도록 관계 정부 부처 및 공공 기관과의 긴밀한 협조 체계 구축 필요.
5. 최종성과물	◦ 연구 과제 성과물은 연구 결과 보고서를 비롯하여 논문, 특허, SW, 시제품 제작 등과 같이 다양한 분야의 성과물 만들 것으로 기대. - 연구 결과 보고서 - SCI 논문 게재 12건 - 특허출원 및 등록 8건 (국제 특허 3건 포함) - 시제품 제작 2건 - SW 1건
6. 활용 및 기대효과	◦ 국토교통부 연구 지원 과제으로써 막중류 플랜트 산업의 독창적이고 대표적인 기술력 확보를 통해 홍보 효과 및 관련 기술 보유기업, 대학, 연구기관 등에 연구 지원으로 산업 경쟁력 제고 ◦ 태양열을 효과적으로 이용한 막중류 기술을 확보하여 환경 및 에너지 문제를 극복하는 토탈 솔루션 패키지 기술 제공 ◦ 융복합 기술을 활용하여 수자원 산업 기반 육성과 국내·외 연구진, 전문기업 육성에 기여 ◦ 해외 실증연구와 국제 협력을 통해 해외시장 진출 및 해외 관련 기관과의 협의를 통하여 실제로 국외 정수시설 또는 해수담수화시설에 Retrofit을 위한 활용 기술로써 설계 반영을 통한 사업화 연계 가능 ◦ 신재생에너지를 이용한 막중류 플랜트 구축 기술 확보를 위한 혁신 기술 개발 및 시스템 구축·운영을 통해 세계 막중류 플랜트 선도 국가 입지 확립 ◦ 태양열 구동 중류 기술 패러다임 변화(친환경, 융복합 & 스마트운영)에 선제적으로 대응할 수 있는 기술 확보 및 인프라 구축 가능 ◦ 기후변화(가뭄)에 따른 국가 물안보 및 물복지 취약성 극복을 위한 태양열 막중류 플랜트 구축 기반 마련과 친환경 정수 기술개발을 통한 전세계적 물부족 극복 방안 마련 ◦ 막중류 플랜트의 경제성 제고를 통한 국내 막중류 사업 확대 기반 마

	련과 Value Chain 별 국내 중소·중견 막증류 전문기업 육성 및 고용 창출을 통한 글로벌 플랜트 산업경쟁력 강화
7. 연구개발 기간 및 소요예산	◦ 총 연구개발기간 : 2020 ~ 2024 (4년) - 1차년도 연구개발기간 : 2020. ~ 2021. (12개월) ◦ 총 정부출연금 : 12,000 백만원 기준 ※ 정부출연금은 향후 선정평가 결과 또는 정부예산사정 등에 따라 조정될 수 있음 ※ 기업참여시 기업부담금은 연차별로 “국토교통부소관 연구개발사업 운영 규정”의 기준을 따르되, 추가 부담 가능 ※ 연구단과제는 세부과제별로 기업부담금 비율 준수 ※ 연구비에 대한 구체적 산정내역을 제시해야 하며, 예산산정 근거가 불명확하거나 타당성이 부족할 경우 축소 조정 가능

다. 사업화 계획

- 본 개발기술은 현재 실용화 초기 단계로 실제 사업화를 위해서는 상용화 모델을 개발하고 이를 실제 현장에서 검증하는 테스트베드 형태의 시범사업 등을 진행하는 추가 후속연구가 필요함. 그러나 현 단계에서 본 개발 기술의 사업화를 위해서는 대규모 상용화 시스템 기술로서 추가후속연구를 추진하며, 동시에 현재의 개발 기술을 요소기술 형태로 나누어 사업화하는 투트랙의 사업화 전략이 필요할 것으로 판단됨.
- 대규모 상용화 시스템 기술로서 사업화 추진은 추가후속연구를 통한 시범사업과 함께 인증 획득을 통한 진입장벽을 제거하며 전략적으로 사업화추진 대상 지역과 국가를 구체화하여 대상지역의 지역별 주거특성, 물공급 정도, 각종 수원특성 및 규제기준 등을 고려하여 장기적인 사업화 전략을 마련하며, 단기적으로는 요소기술형태의 사업화를 계획하여 국내를 중심으로 추진할 계획임.

○ 생산 계획

구분		(2021년) 개발 종료 후 1년	(2023년) 개발 종료 후 3년	(2025년) 개발 종료 후 5년
국 내	시장점유율(%)	1 이하	1 이상	5 이상
	판매량(단위: 건)	1	3	6
	판매 단가(원)	20백만원/m ³	20백만원/m ³	20백만원/m ³
	국내 매출액(백만원)	300	1,000	2,000
해 외	시장점유율(%)	1 이하	1 이하	1 이상
	판매량(단위: 건)	-	-	1
	판매 단가(달러)	20백만원/m ³	20백만원/m ³	20백만원/m ³
	해외 매출액(백만달러)	-	-	1.0
당사 생산 능력 ¹⁾		3대	5대	10대

○ 투자 계획

항목		(2021년) 개발 종료 후 1년	(2023년) 개발 종료 후 3년	(2025년) 개발 종료 후 5년
매출원가		200	800	1500
판매관리비		20	80	150
자본적 지출	토지	—	—	25
	건물/구축물	—	—	25
	기계 장치 등	30	40	50
자본적 지출 합계		30	40	100

○ 사업화 전략

구분	구체적인 내용
형태/규모	○ 상용화 형태 : 다층박막광흡수발열소재를 이용한 정수처리 시스템 ○ 수요처 : 소규모 정수처리 시스템 및 개발도상국 정수처리시설 등 ○ 예상 단가 : 지표수 또는 지하수 기준으로 20백만원/m³ ○ 개발 투입인력 및 기간 : - 개발 투입인력 : 제조 4명, 설계 4명 - 개발 기간 : 24개월간
상용화 능력 및 자원 보유	○ 환경기자재 생산 납품 기업 ○ 본사 연구소에서 개발 및 상용화 설계 ○ OEM 생산 체계 구축 및 품질관리 시스템 구축
상용화 계획 및 일정	○ 현장 적용 : 2020년 ○ 단가 절감 및 상품화 작업 완료 : 2020년 ○ 판매 개시 : 2021년

○ 사업화 모형 제시

가. 사업화 모형 수립(BM) 배경

- 단순히 수익 모델을 고민하는 차원을 넘어 개발 기술이 환경에 어떤 가치를 부여할 것인가를 고민하는 문제 즉, 무엇을 만들고, 어떻게 팔 것인지의 방법론적인 문제를 고민하기 이전에, 변화하는 시장에서 반겨줄 새로운 ‘가치’를 발굴하는 것이 중요함. 따라서, 어떤 제품이나 서비스를 어떻게 소비자에게 제공하고, 어떻게 마케팅하며, 어떻게 돈을 벌 것인가 하는 계획 또는 사업 아이디어로서 고객의 니즈, 새로운 수요를 잘 발견해 이를 반영하고자 하였음.

나. 사업화 모형의 목표 및 핵심 경쟁 요인

(1) 사업화 모형의 목표

- 급격한 산업화와 인구 증가로 인해 가용 수자원은 지속적으로 감소하고 있으며, 세계적인 기후변화는 심각한 가뭄에 따른 물부족에 대한 우려를 가중시키고 있음. 최근 국내에서도 가뭄

에 따른 지역적인 물부족 문제를 야기하여 금강물을 보령댐으로 공급하는 도수로를 긴급히 설치하는 등 물부족 문제는 사회적인 이슈가 되고 있음.

- 이러한 지역적 가용수자원의 부족은 현재의 단일수원을 이용하는 중앙집중식 용수공급 시스템의 문제점 중 하나임. 따라서 다양한 수원을 이용하여 소규모로 용수공급을 할 수 있는 분산형 용수공급 시스템을 활용하여 소규모 지역별 맞춤형 사업화를 추진함.

(2) 핵심 경쟁 요인

- 중소규모용 용수공급에 적합한 막증류 정수처리기술 접목 능력
- 기존 단일수원을 이용하는 중앙집중식 용수공급 시스템 한계점 극복기술 접목
- 소규모 지역별 경제적이고 효율적인 처리방안 적용 노하우

다. 목표 시장 구조

(1) 경쟁 기업 현황

- 막증류 공정을 통한 해수담수화가 전 세계적으로 증가되고 있어 다국적 물기업인 GE, Veolia, Siemens 등의 EPC 업체뿐만 아니라, Memstill, Memsys, Scarab, Solar Spring, Aqua Still, Hyflux 등 해외 모듈업체에서 막증류 기술 상용화를 위해 노력하고 있음.

(2) 시장 진입 장벽

- 막증류 공정을 통한 해수담수화가 전 세계적으로 증가되고 있어 다국적 물기업 뿐만 아니라 해외 모듈업체에서 막증류 기술 상용화를 위해 많은 노력을 기울이고 있으나, 아직까지 기술 적용을 위한 초기 단계로써 파일럿 플랜트 수준의 연구가 진행 중으로 소규모의 막증류용 막/모듈만 개발된 상태이며, 대용량 플랜트 기술로써 실용화된 경우는 매우 적은 실정임.

라. 수익 확보 전략

(1) 주요 고객군

고객군		주요 산업		제품 정의
수처리업	유지 고객		정수처리장, 막증류 공정 활용 산업, 해수담수화 산업	막증류 스택 막증류 정수처리시설
	고객 확장		정화처리시설, 하·폐수처리시설, 산업폐수 등	
소재부품 산업	유지 고객		환경산업, 수처리산업	고성능 태양에너지 집열기 다중박막광흡수발열소 재
	잠재 고객		MD, 흡수체, 태양에너지 집열기 소재산업	

(2) 사업화 모형(BM)을 통한 수익 창출 방안

공급방안	제품/기술	판 매	고 객
- 고객 니즈에 부합한 정수처리기술 서비스 - 유입성상별 대처 방안 기술 및 노하우 - 내·외부 파트너 확보 • 공동연구 • 판매 파트너	- 제품 : 1) 막중류 스택 2) 고성능 태양에너지 집열기 3) 막중류 정수처리 - 핵심가치 • 고품질 확보 • 낮은 유지관리비 • 다양한 경험과 시공능력	- 설계/시공 참여 - 직접 판매 - 진단측정 서비스 - 향후 유지보수	- 지자체, 개인 (발주처) - 정수처리장 & 재이용사업자 - 용역사 및 건설사(시공사)
수익모델		채 널	
- 제품 판매 및 설치 - 유지보수 - 진단 측정 및 분석 서비스		- 내부영업력 가동 - 외부대리점 활용	

참고문헌

1. Lee et al., Stretchable Solar Absorbers with Submicron-Thick Multilayer Sheets for Wearable and Energy Applications (ACS Appl. Mater. Interfaces 2017, 9, 21, 18061–18068)
2. Lee et al., Directional Ostwald Ripening for Producing Aligned Arrays of Nanowires (Nano Letter, 2019, 19, 7, 4306–4313)
3. 등록특허공보 제10-1684383호(2016.12.08) 박막형 적외선 흡수체 제조방법 {METHOD FOR THIN FILM INFRARED ABSORBER MATERIAL}
4. A global overview of national regulations and standards for drinking-water quality, WHO, 2018
5. The Water Quality Regulations (Fourth Edition) 2014. The Regulation and Supervision Bureau for the water, wastewater and electricity sector in the Emirate of Abu Dhabi.
6. A compendium of drinking water quality standards in the Eastern Mediterranean Region, WHO. 2006
7. Nước cấp sinh hoạt – yêu cầu chất lượng TCVN 5502 : 2003 (Domestic supply water – Quality requirements)
8. Drinking-water Quality Standards (Ministry of Industry, Mines and Energy) 2004
9. Indian Standard DRINKING WATER — SPECIFICATION (Second Revision) IS 10500 : 2012
10. MEMBRANE DISTILLATION PRINCIPLES AND APPLICATIONS, ,2011, Elsevir B.V.
11. Gemma Raluy et al., Operational experience of a solar membrane distillation demonstration plant in Pozo Izquierdo-Gran Canaria Island (Spain) (Desalination, 2012, 290, 1–13)
12. Wang et al., Feasibility research of potable water production via solar-heated hollow fiber membrane distillation system (Desalination, 2009, 247, 403–411)
13. Koschikowski et al., Experimental investigations on solar driven

- stand-alone membrane distillation systems for remote areas (Desalination, 2009, 248, 125-131)
14. Banat et al., Performance evaluation of the “large SMADES” autonomous desalination solar-driven membrane distillation plant in Aqaba, Jordan (Desalination, 2007, 217, 17-28)
 15. Schwantes et al., Membrane distillation: Solar and waste heat driven demonstration plants for desalination (Desalination, 2013, 323, 93-106)
 16. Mohammad et al., Wetting phenomena in membrane distillation: Mechanisms, reversal, and prevention (Water Res., 2018, 139, 329-352)
 17. 문유리, “도서지역 용수공급체계에 관한 고찰” . 한국환경정책·평가연구원, 2009
 18. 박남식, 박준영, 문유리, 김자겸 “소규모 해수담수화 시설의 생산비용 절감 방안” 한국수자원학회, Vol. 44 No. 10 (p.809-817)
 19. 최광연, “태양에너지 최적 활용을 위한 기상자원 분석 보고서” . 기상청, 2008

붙임.

1. 성과달성 현황보고

< 성과달성 현황보고_KIST(2019.10.07) >

☐ 과제개요

과제명	주관연구기관	연구책임자
분산형 용수공급을 위한 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 기술 개발	한국과학기술연구원	송경근

☐ 성과달성을 위한 개선사항

- 원수 저장조로부터 MD 모듈로 유입되는 유입수 순환위치 변경으로 인한 유입수(hot in) 온도 상승
 - 기존 유입수(hot in) 온도 : 47 °C → 53 °C
 - Flux 상승 : 4.2 LMH → 5.1 LMH
 - ΔT 상승 : 8.5 °C → 10.3 °C
 - 정수생산량 상승 : 0.6 m³/d → 0.7 m³/d

☐ 성과달성 현황

성과지표	목표치	기존 달성치	현재 달성치
정수생산량	1 m ³ /d	0.6 m ³ /d	0.7 m ³ /d
Flux	> 5 LMH	4.2 LMH	5.1 LMH
먹는물 수질기준	먹는물 수질기준 만족	먹는물 수질기준 만족	먹는물 수질기준 만족

☐ 성과달성을 위한 향후계획

- 향후 정수생산량 달성을 위한 다양한 시도 계획
(ΔT 증대를 위한 냉각기능 보강, 열원 보강 등..)

< 성과달성 현황보고_KIST(2019.10.14) >

□ 과제개요

과제명	주관연구기관	연구책임자
분산형 용수공급을 위한 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 기술 개발	한국과학기술연구원	송경근

□ 성과달성을 위한 개선사항

- 원수 저장조로부터 MD 모듈로 유입되는 유입수 순환위치 변경 및 ΔT 증대를 위한 냉각기능 보강
 - Flux 상승 : 5.1 LMH $\rightarrow$ 5.59 LMH
 - ΔT 상승 : 10.3 $^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow$ 13.2 $^{\circ}\text{C}$
 - 정수생산량 상승 : 0.7 m^3/d $\rightarrow$ 0.83 m^3/d

□ 성과달성 현황

성과지표	목표치	기준 달성치	현재 달성치
정수생산량	1 m^3/d	0.7 m^3/d	0.83 m^3/d
Flux	> 5 LMH	5.1 LMH	5.59 LMH
먹는물 수질기준	먹는물 수질기준 만족	먹는물 수질기준 만족	먹는물 수질기준 만족

□ 성과달성을 위한 향후계획

- 향후 정수생산량 달성을 위한 다양한 시도 계획
(ΔT 증대를 위한 냉각기능 보강, 열원 보강 등..)

< 성과달성 현황보고_KIST(2019.10.21) >

□ 과제개요

과제명	주관연구기관	연구책임자
분산형 용수공급을 위한 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 기술 개발	한국과학기술연구원	송경근

□ 성과달성을 위한 개선사항

- 원수 저장조로부터 MD 모듈로 유입되는 유입수 순환위치 변경, ΔT 증대를 위한 냉각기능 보강 및 열원 보강 진행중
- Flux 상승 : 5.1 LMH $\rightarrow$ 5.59 LMH
- ΔT 상승 : 10.3 $^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow$ 13.2 $^{\circ}\text{C}$
- 정수생산량 상승 : 0.7 m^3/d $\rightarrow$ 0.83 m^3/d

□ 성과달성 현황

성과지표	목표치	기준 달성치	현재 달성치
정수생산량	1 m^3/d	0.7 m^3/d	0.83 m^3/d
Flux	> 5 LMH	5.1 LMH	5.59 LMH
먹는물 수질기준	먹는물 수질기준 만족	먹는물 수질기준 만족	먹는물 수질기준 만족

□ 성과달성을 위한 향후계획

- 향후 정수생산량 달성을 위한 다양한 시도 중
(ΔT 증대를 위한 냉각기능 보강, 열원 보강 등..)

< 성과달성 현황보고_KIST(2019.11.04) >

□ 과제개요

과제명	주관연구기관	연구책임자
분산형 용수공급을 위한 다층박막광흡수발열소재 이용 막증류 정수처리 기술 개발	한국과학기술연구원	송경근

□ 성과달성을 위한 개선사항

- 원수 저장조로부터 MD 모듈로 유입되는 유입수 순환위치 변경, ΔT 증대를 위한 냉각기능 보강 및 열원 보강
 - Flux 상승 : 5.59 LMH $\rightarrow$ 7.20 LMH
 - ΔT 상승 : 13.2 $^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow$ 15.4 $^{\circ}\text{C}$
 - 정수생산량 상승 : 0.83 m^3/d $\rightarrow$ 1.06 m^3/d

□ 성과달성 현황

성과지표	목표치	기존 달성치	현재 달성치
정수생산량	1 m^3/d	0.83 m^3/d	1.06 m^3/d
Flux	> 5 LMH	5.59 LMH	7.20 LMH
먹는물 수질기준	먹는물 수질기준 만족	먹는물 수질기준 만족	먹는물 수질기준 만족

□ 성과달성을 위한 향후계획

- 정수생산량 달성함
- 장기운전을 통한 플랜트 성능평가 및 개선방안 도출

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.