

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

국토교통기술촉진연구사업 제3차 연도 최종 보고서

R&D / 19CTAP-C133309-03

정류비 100의 전기투석 용 이온정류막 개발과 이를 활용한 이동식 0.5 KWh/m³의 기수전기투석 담수화 기술 개발 최종보고서

2020. 02. 19.

주관연구기관 / (주) 넥스트이앤엠

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘정류비 100의 전기투석 용 이온정류막 개발과 이를 활용한 이동식 0.5 KWh/m³의 기수전기 투석 담수화 기술 개발’(연구개발 기간 : 2017. 07. 20. ~ 2019. 12. 31.) 과제의 최종보고서 12부를 제출합니다.

2020. 02. 19.

주관연구기관명 : 주식회사 넥스트이앤엠 (대표자) 최기운



주관연구기관책임자: 최기운

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C133309-03	해당 단계 연구 기간	2019-01-01 ~ 2019-12-31	단계구분	3/3
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	정류비 100의 전기투석 용 이온정류막 개발과 이를 활용한 이동식 0.5 KWh/m ³ 의 기수전기투석 담수화 기술 개발			
연구책임자	최기운	해당단계 참여연구원 수	총: 6 명 내부: 6 명 외부: 0 명	해당단계 연구비	정부: 225,000 천원 민간: 75,000 천원 계: 300,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 7 명 내부: 7 명 외부: 0 명	총 연구비	정부: 600,000 천원 민간: 200,000 천원 계: 800,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	주식회사 넥스트이앤엠			참여기업명	주식회사 넥스트이앤엠
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
----------------------	----

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	2	3				1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

보고서 면수

108

요약문

연구의 목적 및 내용	□ 본사의 “고효율/저가의 이온정류막”에 대한 원천기술을 바탕으로 해수담수화 맞춤형 형의 이온정류막을 개발함으로써 획기적으로 에너지 효율 개선 및 원가 절감한 전기투석 방식 담수화 기술을 실현하여 미래 해수담수 시장을 선점하고 미래 물 부족 문제 해결 ○ 전기투석 해수담수 기술 산업화 및 상품성 개선을 위해 향상된 내구성(열적, 화학적, 기계적 특성)을 가지는 사파이어 재질의 저가, 대면적의 이온정류막 개발 ○ 시뮬레이션을 통해 최적의 해수담수화 용 이온정류막을 설계하고 막특성 제어기술을 통해 전기투석에 최적화된 고효율의 이온정류막 개발 ○ 이온정류막특성을 활용한 역전극에서도 scale 제거와 동시에 연속적으로 담수화가 가능한 전기투석 원천기술 개발 □ 전기투석(ED), 막촉전식 탈염(MCDI), 역전기투석발전(RED)과 같은 해양청정에너지 분야는 성능 및 산업생산을 결정하는 핵심소재 인 이온교환막의 낮은 내구성과 효율, 높은 가격으로 인하여 산업화가 저해되고 있으며, 차세대 이온교환막 개발을 요구 □ 전기배양장어의 전기생산세포를 모사한 이온정류막은 기존 이온교환막의 성능을 1,500 배 이상 개선이 가능한 차세대 멤브레인 기술로 관심이 집중되고 있으며, 본사에서는 세계 최초로 고효율과 저가의 이온정류막 개발에 성공, 그 구조와 제조공정에 대한 원천 특허기술 2개를 보유함 □ 이온정류막은 이동거리가 가장 짧은 원뿔형태의 다공으로 이루어져 세계 최고 수준 대비 동일한 선택성을 유지하면서도 400% 향상 된 높은 이온전도도, 막오염의 최소화, 이온정류막특성을 보이며, 기존 고가의 이온교환막 대비 1/100 이하의 낮은 생산 원가를 가져 역삼투 방식과 비교해 낮은 에너지(Low Energy), 대용량(Large Scale), 낮은 파울링(Low Fouling)의 “3L” 해수담수화에 적합한 기술임 □ 본 과제에서는 해양청정에너지원에 최적화 된 고성능, 고내구성 이온정류막을 개발하기 위해 사파이어 재질의 이온정류막 제조공정 기술을 개발하고, 이온정류막을 이용하여 반대극 전원에서 연속적으로 해수담수가 가능한 “3L” 고성능의 담수화 원천 기술을 개발함 ○ Poisson-Nernst-Planck 모델을 보안한 이온정류막 시뮬레이션 ○ 이온정류막의 특성 (막저항, 선택성, 정류특성) 제어 기술 확립 ○ 산업화 면적의 전기투석 최적화 된 이온정류막 제조 원천 기술개발 ○ 고내구성 사파이어 이온정류막 제조 원천기술 확보 ○ “3L” 해수담수화를 위한 전기투석 원천기술 개발
연구개발성과	□ $500 \times 500 \text{ mm}^2$ 면적의 파단강도 1 MPa 이상의 고내구성 양/음이온정류막 원천 특허기술 □ $10 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 전기전도도, 94 % 이온선택성, 100 이상 정류비의 두께 10um 이하의 고성능 양/음이온교환막 (세계 Top) □ 극한 화학적 환경(6mol/L 황산, 7mol/L 인산, 5mol/L 수산화나트륨)에서도 분해되지 않는 높은 화학적 안정성의 이온정류막 소재 (세계 Top) □ 역전극에서도 효율적인 scale 제거와 동시에 연속적인 담수화가 가능한 전기 투석 시스템 원천 특허기술 □ 연간 매출과 생산량 (과제종료 시): 20,000 sheet * \$250 = \$5,000,000

연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	□ 이온정류막은 이온교환막 대비 4배의 이온전도도를 보이므로 이를 활용하면 역삼투 방식보다 낮은 에너지로 해수담수화가 가능하여 기존 해수담수화 시장의 혁신이 될 기술로 기대 □ 이온정류막을 이용한 electrodialysis reversal(EDR)은 이온정류막의 정류특성으로 인하여 역전극에서도 desalination water 방향으로 제거 된 이온이 이동하지 않기 때문에 scale 제거와 동시에 desalination water를 생산이 가능하여 Astom사의 EDR보다 효율적인 담수화가 가능 □ 본 과제로부터 전량 수입에 의존하는 이온교환막을 국산화하고 미래 해양청정에너지 시장을 선점할 기틀을 마련하며, 나아가 세계 물 부족 문제를 해결할 대안을 제시함				
국문핵심어 (5개 이내)	이온정류막	담수화	전기투석	내구성	안티파울링
영문핵심어 (5개 이내)	Ion-diode membrane	Desalination	Electrodialysis	Durability	Anti-fouling

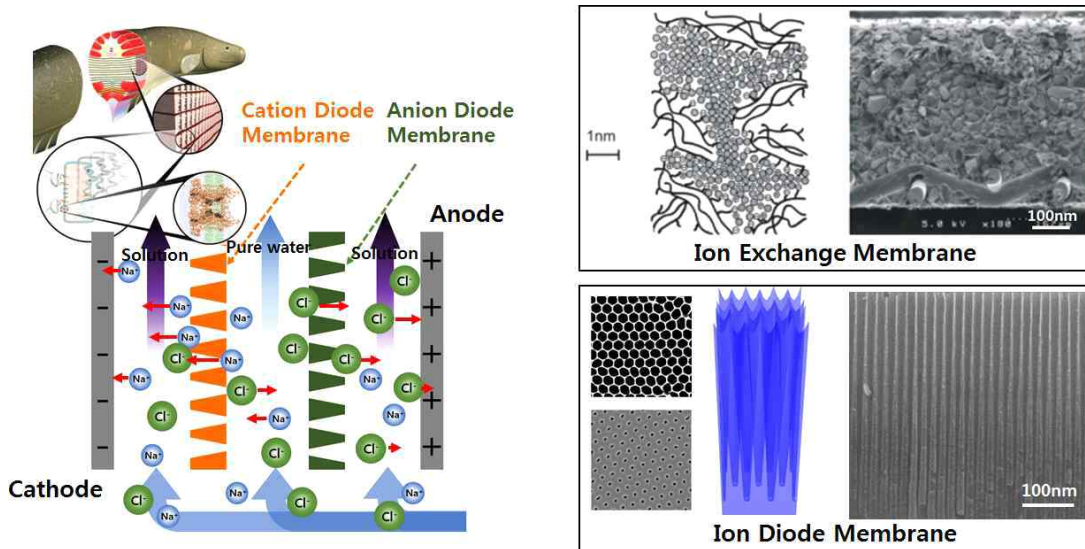
※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

제 1 장. 연구개발과제의 개요	1
제1절. 차세대 이온교환막의 필요성	3
제2절. 이온정류막 연구배경	5
제 2 장. 연구수행내용 및 성과	8
제1절. 연구수행 방법	8
제2절. 연차별 연구 내용 및 성과	10
제 3 장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	64
제1절. 연차별 연구개발 목표 및 달성도	64
제2절. 정량적 연구성과 목표 및 달성도	83
제 4 장. 연구개발성과의 활용 계획 등	90
제1절. 연구개발 성과의 활용방안	90
제2절. 기대효과	92
제3절. 연구개발성과의 사업화 방안	94
붙임. 참고 문헌	106

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

제 1 장. 연구개발과제의 개요

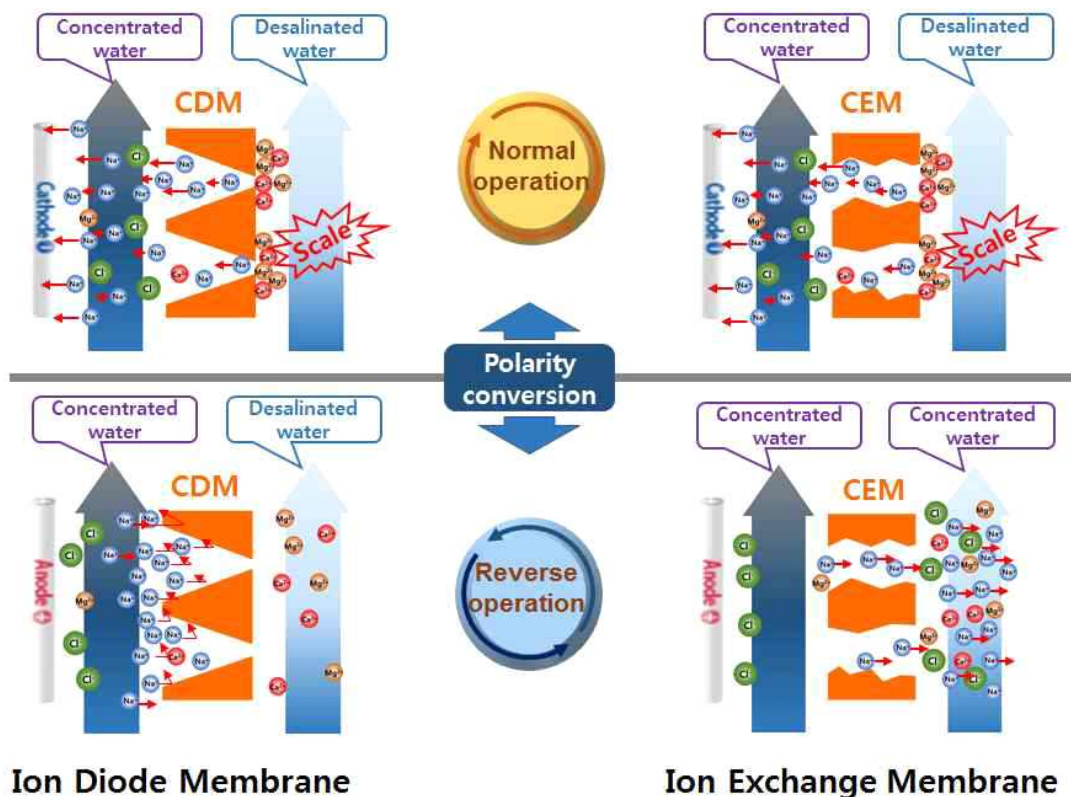


[그림 1] 전기뱀장어 모사 형 전기투석 담수화 기술의 모식도와 이온교환막과 이온 정류막 비교

- 전기투석(ED) 해수담수화, 막촉전식 탈염(MCDI), 역전기투석발전(RED)과 같은 청정에너지 분야는 성능 및 산업생산을 결정하는 핵심소재 인 이온교환막의 낮은 내구성(열적, 기계적)과 효율(선택성,이온전도도), 높은 가격으로 인하여 산업화가 저해되고 있으며, 차세대 이온교환막 개발을 요구
- 전기뱀장어의 전기생산세포를 모사한 이온정류막은 기존 이온교환막의 성능을 1,500 배 이상 개선이 가능한 차세대 멤브레인 기술로 관심이 집중되고 있으며, 본사에서는 세계 최초로 고효율과 저가의 이온정류막 개발에 성공하였고, 그 구조와 제조공정에 대한 원천 특허기술 2개를 보유함
- 이온정류막은 이동거리가 가장 짧은 원뿔형태의 다공으로 이루어져 세계 최고 수준 대비 동일한 선택성을 유지하면서도 400% 향상 된 높은 이온전도도, 막오염의 최소화, 이온정류특성을 보이며, 기존 고가의 이온교환막 대비 1/100 이하의 낮은 생산 원가를 가져 역삼투 방식과 비교해 낮은 에너지(Low Energy),대용량(Large Scale), 낮은 파울링(Low Fouling)의 “3L”해수담수화에 적합한 기술임
- 본 과제에서는 해수담수화에 최적화 된 고성능, 고내구성 이온정류막을 개발하기 위해 사파이어 재질의 이온정류막 제조공정 기술을 개발하고, 이온정류막을 이용하여 반대극 전원에서

도 연속적으로 해수담수가 가능한 “3L” 고성능의 담수화 원천 기술을 개발함

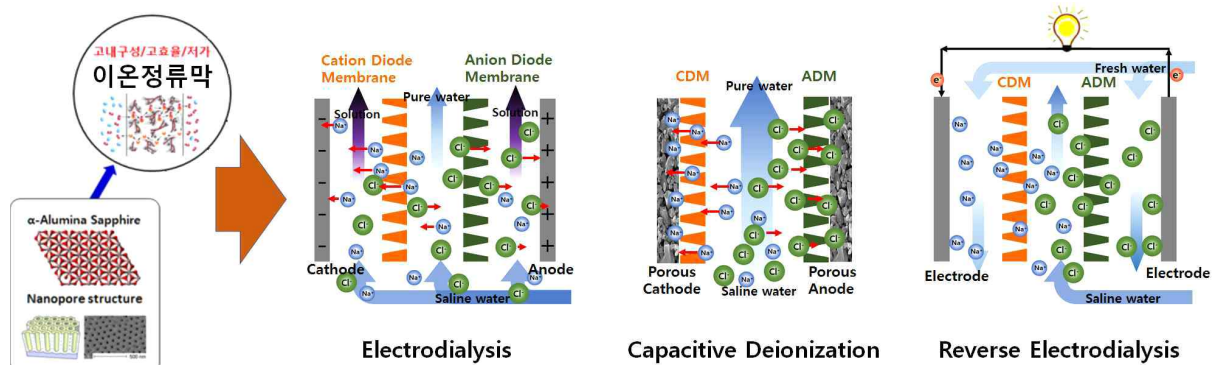
- 개발 된 이온정류막은 이온교환막 대비 4배 (이론적으로는 1,500 배이므로 효율 개선이 가능함) 의 이온전도도를 보이므로 이를 활용하면 월등이 낮은 에너지로 해수담수화가 가능하여 기존 해수담수화 시장의 혁신이 될 기술로 기대함
- [그림 2]의 이온정류막을 이용한 electrodialysis reversal (EDR) 은 이온정류막의 정류특성으로 인하여 역전극에서도 desalination water 방향으로 제거 된 이온이 이동하지 않기 때문에 scale 제거와 동시에 desalination water를 생산이 가능하여 Astom 사의 EDR 보다 효율적인 담수화가 가능함
- 본 과제로부터 전량 수입에 의존하는 이온교환막을 국산화하고 미래 해수담수화 시장을 선점하며, 나아가 세계 물 부족 문제를 해결할 대안을 제시함



[그림 2] 이온정류막과 이온교환막을 적용한 electrodialysis reversal 에서 역전위에서 scale 제거 원리

제1절. 이온정류막의 필요성

1. 고효율·저가·고내구성의 차세대 이온교환막 기술 요구



[그림 3] 해양청정에너지원에서의 이온정류막의 활용

- 선택적으로 이온을 투과시키는 이온교환막은 미래 성장산업으로 각광받고 있는 해수담수화, 역전기투석발전 같은 해양청정에너지 분야에서 제품의 성능과 원가를 결정하는 핵심소재
- 해양청정에너지의 상업적 활용을 위해서는 전기적 저항이 작고, 이온의 선택투과성이 뛰어나며, 열적·화학적 안정성 및 기계적 강도가 우수한 이온교환막이 필수 요소임
- 현재 해수담수화 시스템(EDR, MCDI)에 적용되고 있는 이온교환막은 낮은 효율과 내구성, 높은 가격으로 인해 활용이 제한되어 있으며, 일부 상업화된 제품들에서도 원가를 올리는 주요 원인이 되고 있음
- 전기투석은 역삼투방식의 해수담수화 기술에 비해 건강한 물 생산, 적은 유지 관리비, 간편한 전처리의 장점을 가지고 있지만 이온교환막의 낮은 효율과 내구성, 높은 가격으로 인해 높은 막교체 비용 및 초기투자비, 적은 용량, 고농도(해수)에 비효율적인 문제점을 가짐
- 실제로 이온교환막에 대한 연구는 1980년대 이후 산업화에 활용할 수 있을 정도로 개선이 이루어지지 못한 반면 역삼투막은 지속적으로 발전하여 현재 해수 담수시장은 대부분 역삼투방식을 선택
- 이온교환막은 \$200\sim1,000/m^2\$의 고부가가치 산업으로 제품의 성능개선 및 원가절감을 통해 전기투석의 산업화를 이루었을 경우 향후 높은 시장창출이 기대됨
- 따라서, 기존 기술의 한계를 돌파할 수 있는 고효율·저가·고내구성의 차세대 이온교환막 소재 기술을 확보한다면 역삼투방식보다 효율적으로 해수담수가 가능한 전기투석시스템의 개발이 가능하며 동시에 미래 글로벌 해수담수 시장을 선점할 수 있는 고부가가치 산업을 육성하는 최선의 전략이 될 것임

2. 국가 미래 성장동력의 조기 산업화를 위한 핵심 소재기술

- 국가의 새로운 먹거리를 창출할 수 있는 전략산업으로서 신재생에너지, 녹색기술, 에너지 저장장치 등에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이에 따라 핵심 희소소재인 이온교환막에 대한 국내 수요가 증가하고 있음
- 현재 국내에서 연료전지, 해수담수화 장치 등의 개발에 사용되고 있는 이온교환막은 듀폰(DuPont)사의 나피온(Nafion)이라는 고가의 고분자 이온교환막으로 전량 수입에 의존하고 있는 실정
- 고효율·고내구성의 이온교환막을 국내에서 저가에 생산할 수 있는 원천기술을 확보함으로써, 향후 우리나라가 신재생에너지 강국으로 발전할 수 있는 기반을 마련함과 동시에, 해당 분야 글로벌 시장을 리드해나갈 수 있는 국가 산업경쟁력을 제고할 필요가 있음

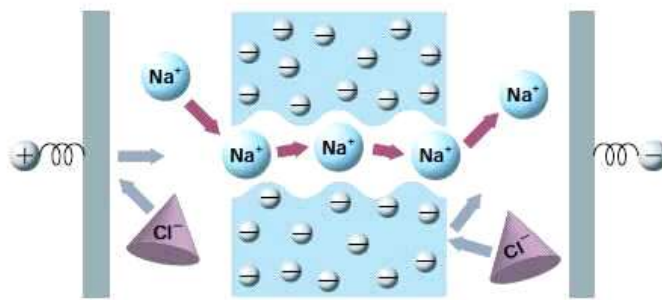
3. 국내 뿌리산업의 성장기반 선진국형 제조업으로의 전환을 촉구

- 본사가 독자적으로 보유한 전기화학적 나노기공형성을 이용한 이온정류막 생산기술을 상용화한다면 내수 및 수출의 증가를 통해 양극산화, 도금과 같이 현재 침체되어 있는 국내 뿌리산업의 활성화를 가져올 수 있음
- 해수담수화, 연료전지 등 이온교환막 관련 최종재 산업이 상호상승적으로 활성화됨으로써 숙련된 전문인력의 고용창출 및 높은 생산유발 효과, 고부가가치, 고임금 등 선진국형 제조업으로의 고도화를 꾀할 수 있는 혁신적 계기를 마련

제2절. 차세대 이온교환막 연구배경

1. 이온교환막이란?

- 이온교환막은 전해질 용액에서 막 내부의 고정이온의 이온결합에 의해 대응이온에 대한 선택적 투과성을 가지는 합성수지막을 말하며, 전기화학적 농축·희석 및 탈염 공정 등에 사용되고 있음 [그림 4]



[그림 4] 이온교환막의 개념도

- 이온교환막은 1890년 Oswald가 이온선택성을 가진 분리막을 처음으로 발견하고, 이후 1930년 Donnan이 전해질 용액에서 이온교환막 내부 고정이온의 이온결합에 의한 대응이온의 선택적 투과현상인 Donnan exclusion 현상을 이해하는 데에서 시작
- 이온교환막의 제조에는 고분자소재와 무기소재가 주로 사용되고 있으며, 막의 작용기에 따라 양이온 전도막과 음이온 전도막으로 구분
- 양이온 전도막은 표면에 $-SO_3^-$, $-COO^-$, $-PO_3^{2-}$, $-PO_3H^-$, $-C_6H_4O^-$ 등 음전하 작용기를 지니기 때문에 음이온을 배제하고 양이온을 선택적으로 투과
- 음이온 전도막은 $-H_3^+$, $-NRH_2^+$, $-NR_2H^+$, $-NR_3^+$, $-PR_3^+$, $-SR_2^+$ 등의 양전하 작용기를 지니고 있어 음이온을 선택적으로 투과
- 이온교환막은 전기적 탈염기술, 산/알칼리의 생산, 산업폐수의 중금속 제거, 해수의 담수화, 반도체 산업의 초순수 제조, 해수에서 식염의 제조, 발효산업의 유기산 및 아미노산 회수 등 다양한 산업분야에서 활용되고 있음

2. 이온교환막의 중요성

2.1. 다방면에 걸친 이온교환막의 수요 증가

- 지난 십수년간 해수담수화, 역전기 투석발전, 연료전지, 레독스 흐름 전지 등 미래 성장동력에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔으나, 핵심 소재부품인 이온교환막의 낮은 효율과 열적·화학적 내구성, 높은 가격이 산업화를 저해
- 이온교환막은 관련 산업의 성능, 원가 등을 결정하는 핵심소재로서 널리 인식되고 있으나, 1980년대 이후 효율, 내구성 및 공정비용 측면에서의 개선이 크게 이루어지지 못했으며 이를 해결할 혁신 기술이 간절히 요구되고 있음

2.2. 국가 핵심 기간산업의 산업화를 위한 핵심 희소소재 기술

- 신재생에너지, 에너지 저장장치, 해수담수화 기술은 경제적 파급효과가 큰 국가 핵심 기간산업으로 이들 기술의 산업화를 위해서는 반드시 고효율의 고온형 이온교환막 원천기술 개발이 필요
- 동 기술들의 연구개발을 위해 국내의 이온교환막 수요가 증가하고 있지만, 아직 이온교환막 관련 원천기술을 확보하지 못하고 전량 수입에 의존하는 실정
- 본 과제에서 고내구성·고효율의 사파이어 이온교환막 소재 개발을 통해 우리나라는 신재생에너지 및 녹색기술 강국으로 발전할 수 있으며, 나아가 관련 분야의 글로벌 시장을 주도할 수 있는 원천기술 확보가 가능

3. 이온교환막 기술의 당면 과제

3.1. 낮은 열적 안정성

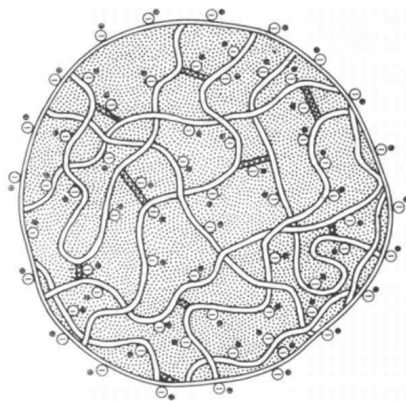
- 높은 온도조건일수록 이온교환막 내부의 이온전도가 향상되어 에너지 효율 관점에서 유리해지는 반면, 일반적인 이온교환막은 고분자 소재를 사용하여 열적 안정성이 매우 나빠지기 때문에 상대적으로 낮은 온도에서만 작동이 가능
- 따라서, 150℃ 이상의 높은 온도에서도 안정적으로 작동 가능한 이온교환막 소재의 개발이 필요

3.2. 낮은 화학적 안정성

- 이온교환막은 전해질 내에서 특정 이온들의 선택적 투과를 가능하게 하지만, 전해질 용액 자체가 화학적 부식을 야기하기 때문에 시간이 지남에 따라 전도막으로서의 성능이 저하되는 현상을 보임
- 따라서, 화학적인 부식에 높은 내구성을 보이면서 선택적 투과막으로서 안정적인 동작을 하는 이온교환막 소재의 개발이 요구됨

3.3. 낮은 효율

- 현재 널리 사용되고 있는 이온교환막은 이온교환수지를 이용한 고분자이온교환막으로, 이들은 구불구불한 10nm 이하의 세공을 가지기 때문에 이온 이동거리가 길고 막의 저항이 매우 높은 단점이 있음 [그림 5]
- 따라서, 관련 기술의 조기 산업화를 위해서는 이온교환막의 효율개선이 시급



[그림 5] 이온교환수지형 고분자 이온교환막의 기본 구조

3.4. 높은 가격

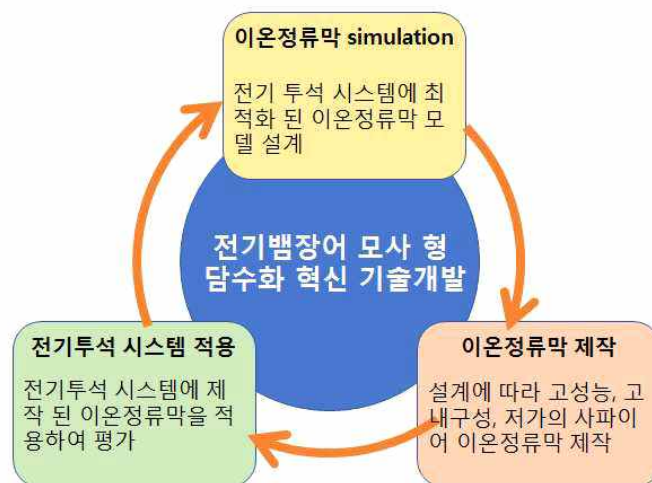
- 1980년대 이후 Tokuyama Corporation, Asahi Chemical, DuPont등에서 경제성이 높은 막들이 개발되어 막의 비용이 절감된 바 있으나, 관련 제품들이 충분한 경제성을 갖추기에는 막의 가격 및 저항이 아직도 현저하게 높은 실정
- 연료전지 자동차가 연구개발 단계에서 소량으로 생산되고 있는 현 시점에서는 분리막(membrane)이 차지하는 가격 비중이 가장 높은 것으로 평가되고 있음
- 또한 분리막의 멤브레인 성능 개선은 연료전지 자동차 동력발생 장치의 효율로 바로 연결되기 때문에 다른 어떤 소재보다도 기술 혁신에 대한 수요가 높음

제 2 장. 연구수행내용 및 성과

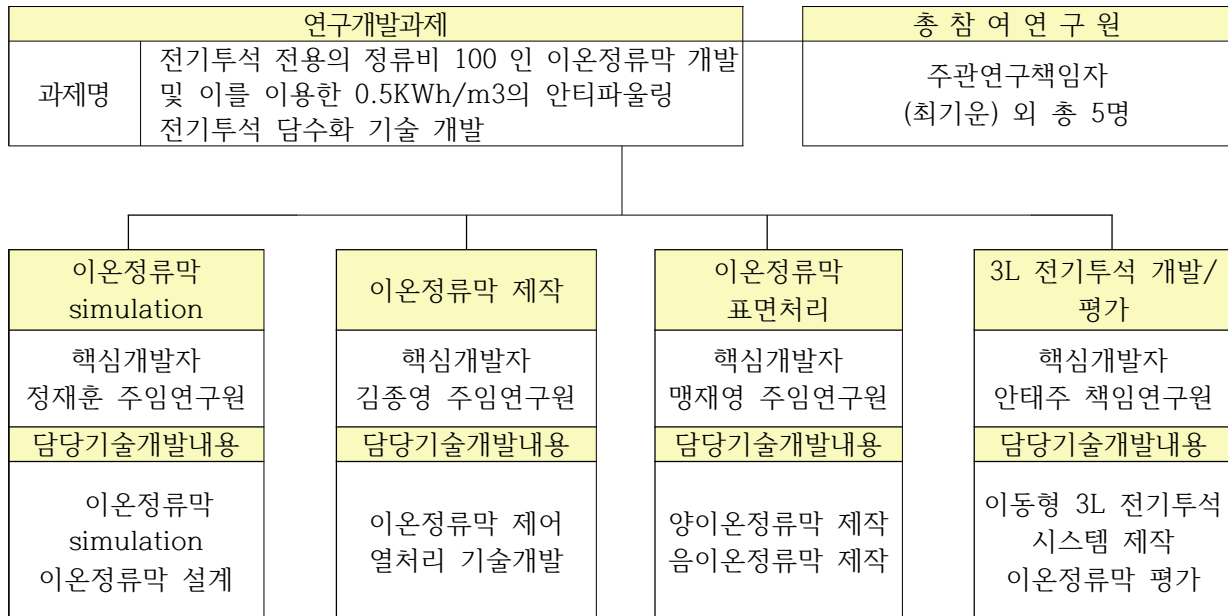
제1절. 연구수행 방법

1. 연구개발 추진전략 · 방법

- Comsol 기반의 이온정류막 simulation 결과를 토대로 이상적인 이온정류막을 설계하고, 설계된 모델에 따라 이온정류막을 제작, 전기투석 시스템에서 막 특성 평가. 특성 평가 결과를 토대로 simulation을 수정하여 다시 계산됨. 이러한 공정을 반복하여 전기투석 시스템에 가장 이상적인 이온정류막 제작과 동시에 고성능 소형, 이동형 전기투석 시스템 개발이 이루어질 것임
- 개발품인 이온정류막의 수요기업은 GE, Veolia, Simens, Astom 과 같은 국외기업이므로 2차년도에 이온정류막 기술 개발 성공 후 3차년동안 자체적인 담수화 시스템 개발과 동시에 K-waters, 포스코, 웰크론한텍, 두산중공업, 삼성엔지니어링, 이우테크 등과 같은 국내 잠재적 수요처에 기술 홍보, 시제품 제공을 통해 적용성에 대한 실험을 동시에 진행하며, TRL 8-9 단계의 후속 연구개발을 통해 전기투석 담수화 플랜트와 관련 된 국내 배타적 원천기술 확보
- 개발품의 신기술, 신제품 인증을 위해서 KOLAS 인증기관의 시험이 요구되며 한국산업기술시험원 신뢰성평가 팀과 현재 이온정류막 특성평가와 관련 된 시험에 대해서 협의 중에 있으며, 전기투석 담수화 기술에 관련 특성평가를 글로벌담수화연구센터와 협의하여 진행할 계획임



2. 연구개발 추진체계



3. 연구개발 추진일정

구분	연구 수행기관	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	소요 연구비 (백만원)	1차년도	2차년도				3차년도					
		핵심 성과	단위 성과	성과지표			3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	
주관	넥스트	1	1-1	-	이온정류막 simulation	10											
주관	넥스트	1	1-1	①,②	500x500 전해 장비 구축 및 전해 제어기술 개발	60											
주관	넥스트	1	1-1	①,②	막특성 제어 조건 확립 및 전해 제어기술 개발	25											
주관	넥스트	1	1-1	①,②	전기장 제어 기술	15											
주관	넥스트	1	1-1	①,②	Detachment 기술 확립	10											
주관	넥스트	1	1-2	①~④	고온 열처리 장비 제작	70											
주관	넥스트	1	1-2	①~④	Alumina 결정화	10											
주관	넥스트	2	2-1		Alumina -OH 도입기술	100											
주관	넥스트	2	2-1	①~③	무기계 양/음이온정류막 처리기술	40											
주관	넥스트	2	2-1	①~③	유기계 양/음이온정류막 처리기술	10											
주관	넥스트	2	2-2	①~③	무기계 양/음이온정류막 처리기술	40											
주관	넥스트	2	2-2	①~③	유기계 양/음이온정류막 처리기술	10											
주관	넥스트	2	2-2	-	이온정류막의 특성 제어	30											
주관	넥스트	2	2-2	-	사피어 이온정류막 제단 기술 확보	65											
주관	넥스트	3	3-2	-	소규모, 이동형 전기투석 담수화 사전 테스트	5											
주관	넥스트	3	3-1	①~③	안티파울링 전기투석 스택 설계 및 제작	50											
주관	넥스트	3	3-1	①~③	담수화용 이온정류막 평가	20											
주관	넥스트	3	3-1	①~③	안티파울링 전기투석 시스템 평가	30											
주관	넥스트	3	3-2	①~⑤	소규모, 이동형 전기투석 담수화 설비 제작	150											
주관	넥스트	3	3-2	①~⑤	소규모, 이동형 전기투석 담수화 설비 실증	50											

제2절. 연차별 연구 내용 및 성과

1. 1차연도 (2017년)

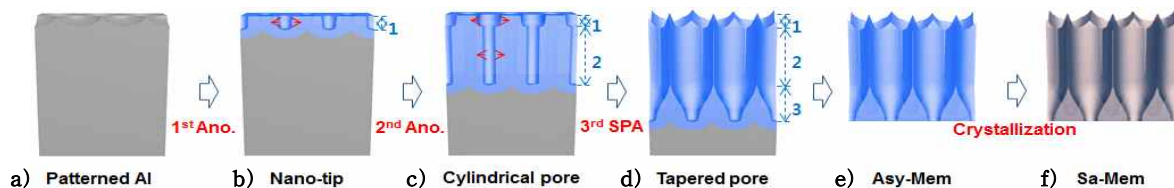
1.1. 1차연도 연구 내용

1.1.1. 대면적, 비대칭 사파이어 멤브레인 제조 공정

□ [그림 6]은 대면적 비대칭 사파이어 멤브레인 제조 공정의 모식도이며, 제조 공정은 크게 아래의 순서로 이루어짐

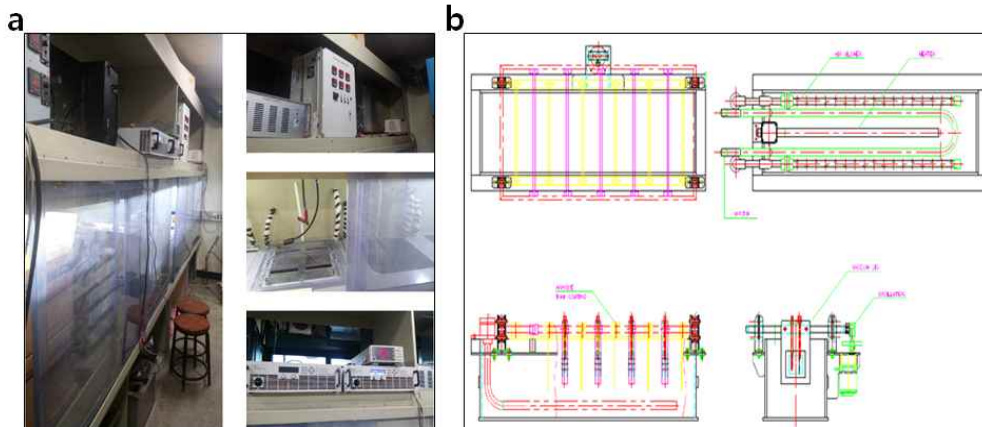
- a) 양극산화를 위한 금속 (Toyo Aluminum K.K., Luxal) 및 전해질을 준비하는 단계
- b,c) 전해질에 의한 식각이 일어나지 않는 조건에서 양극산화를 수행하여 비대칭 사파이어 멤브레인의 지지층이 되는 amorphous 알루미나를 형성하는 단계
- d) 전해질에 의한 식각이 일어나는 조건에서 양극산화를 수행하여 비대칭 사파이어 멤브레인의 비대칭 다공을 형성하는 amorphous 알루미나를 형성하는 단계
- e) 금속을 제거하여 amorphous 알루미나 템플레이트를 얻은 후 템플레이트의 하부를 제거하여 관통된 비대칭 amorphous 알루미나 멤브레인을 얻는 단계
- f) 열처리를 통하여 결정화를 시켜 결정성 알루미나 (사파이어) 멤브레인을 얻는 단계

□ 50x50 cm²의 순수 알루미늄을 이용하여 위 제작 공정에 따라 대면적 비대칭 사파이어 멤브레인을 제작함



[그림 6] 대면적 비대칭 사파이어 멤브레인 제조 공정의 모식도

1.1.2. 대면적, 비대칭 사파이어 멤브레인 제조 설비

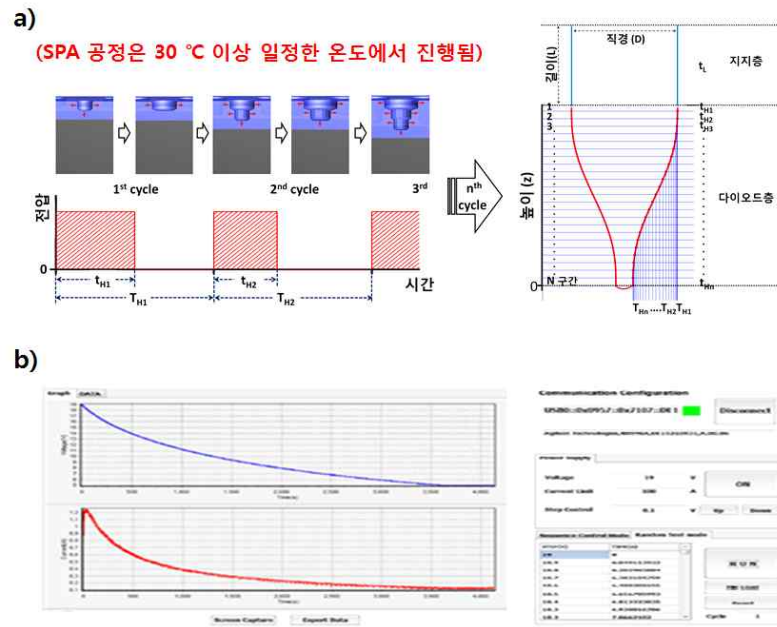


[그림 7] 대면적 비대칭 사파이어 제조 설비, a. 사진(전체모습, TE 칠러 및 컨트롤러, 양극산화/전해연마 수조, 전원공급기 및 조절기), b. 설계도

- 50x50 cm²의 사파이어 멤브레인 제조를 위한 제조 설비를 [그림 7-b]와 같이 설계를 하였지만 대면적 양산 설비 연구를 할 환경산업연구단지 입주가 지연되어 임시로 기존의 20x20cm² 제조 설비를 개조하여 대면적 비대칭 사파이어 멤브레인 제조 조건 확립
- 설비 제작을 외주에 의뢰할 계획하였지만, 비용이 너무 비싸 본사에서 자체 제작으로 계획 변경
- 제조 설비는 크게 칠러, 양극산화/전해연마 수조, 전원공급기 및 전압컨트롤러로 구성됨

1.1.3. 인가전압 제어 장치

- 비대칭 사파이어 멤브레인의 다이오드층인 비대칭 다공영역은 [그림 8-a]와 같이 인가전압의 제어로 실현되므로, 이를 정교하게 제어할 수 있는 컨트롤러와 프로그램이 요구됨
- 본사에서는 keysight 사의 power supply sequence control software를 수정하여 각 스텝에서 전압과 시간을 조절하여 제어할 수 있는 소프트웨어를 제작
- 본 연구에서 비대칭 다공의 프로파일을 입력하면 자동으로 각 스텝의 시간 및 전압 조절하여 비대칭 다공성 멤브레인 제조 가능
- 실시간으로 전압, 전류가 기록되도록 하여 비대칭 사파이어 멤브레인 생산 공정의 모니터링이 가능



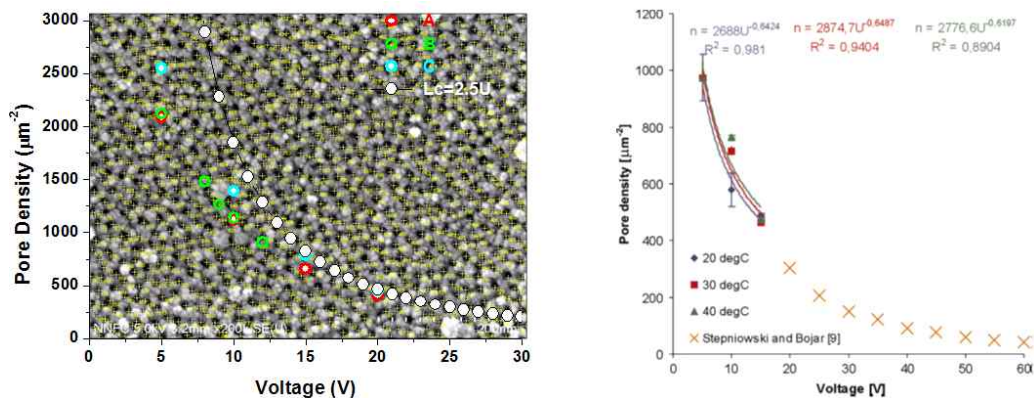
[그림 8] a. 다이오드층 제작과정에서 전압 프로파일과 b. 제어 프로그램

1.1.4. 비대칭 사파이어 멤브레인 제조 조건 확립

- 비대칭 사파이어 멤브레인은 크게 지지층과 다이오드층으로 이루어져 있으며, 지지층의 길이, 직경과 다이오드층의 길이, 직경, 경사의 프로파일 (경사진 기공의 다이오드층을 여러 개의 구간으로 나누어 각각의 구간의 길이와 직경) 은 막 특성에 큰 영향을 줌
- 지지층의 길이는 공정 시간에 비례하므로, 시간에 따라 지지층의 길이가 조절될 수 있음
- 성장속도는 공정 조건에 따라 영향을 받으므로 정확한 성장속도의 계산과 제조조건의 확립이 필요함
- 양극산화 공정의 온도, 전압, 전해액이 동일할 때 시간에 따른 나노기공의 수직 성장 길이와 기공크기 변화를 측정
- 나노기공의 수직방향 성장속도의 평가 결과는 30 °C에서 2시간에서 5시간까지 1시간 단위로 평가 한 결과 성장 속도는 5.21 $\mu\text{m}/\text{hour}$ 임
- 나노기공의 수평방향 확장속도는 30°C에서 1시간 나노기공을 제작한 뒤 전압을 가하지 않은 상태에서 1시간부터 7시간까지 기공크기 변화를 관찰함
- 양극산화로 생성된 기공은 30°C에서 화학적으로 에칭되어 기공이 확장되며, 초기 기공직경은 9nm 정도이며, 5.07 nm/h로 성장함

1.1.5. High Pore Density 멤브레인 제조

- 멤브레인 제조의 전해질인 셀렌산은 산업적 사용이 적어 희소성으로 고가이므로 양산을 위해서는 이를 대체 할 수 있는 저가의 전해질 제조가 요구
- 이온의 전도도를 높이기 위해서는 pore density가 높을수록 유리하므로 기존의 전해질 대비 높은 pore density의 전해질이 요구
- 저가의 시약인 황산에 다른 화합물을 첨가하여 A, B, C 3가지 조성의 전해질 제조
- 다양한 조성의 황산 전해질에서 제작된 멤브레인의 SEM 이미지를 이용하여 [그림 9-좌] 에 서처럼 다양한 인가전압에서 pore density를 측정함
- [그림 9-좌]에서 C 조건일 때 멤브레인의 기공 간격이 조밀해지며 다공 밀도가 증가하므로 C 조건 전해질이 멤브레인 제작에 적합
- 예로 5V, A 조건에서 2028 개/ μm^2 의 다공밀도는 C 조건에서 2549 개/ μm^2 로 25.7%가 증가
- 성공적으로 저가의 멤브레인 제조 시약의 조성을 발견함
- [그림 9-우]는 가장 낮은 pore density로 보고 된 논문의 “pore density vs 인가전압”의 그래프로 본 연구에서 개발된 시약을 이용한 경우, 동일한 인가전압 조건에서 pore density가 260% 이상 향상됨을 확인할 수 있음

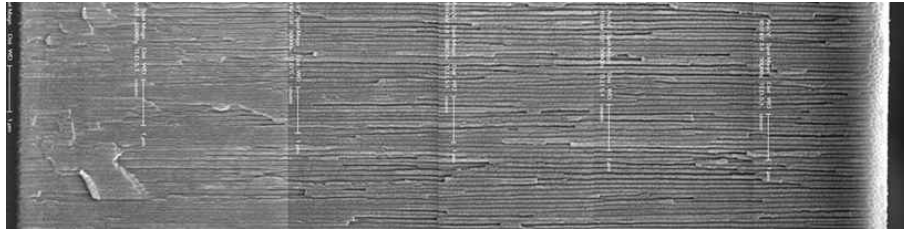


[그림 9] Pore density (number of pores occupying 1 μm^2) versus anodizing voltage. 좌) NextE&M, 우) 기존 보고 된 world best

1.1.6. 비대칭 사파이어 멤브레인 제조

- 비대칭 사파이어 멤브레인은 크게 지지층과 다이오드층으로 이루어져 있으며, 지지층의 길이, 직경과 다이오드층의 길이, 직경, 경사의 프로파일 (경사진 기공의 다이오드층을 여러 개의 구간으로 나누어 각각의 구간의 길이와 직경) 은 막 특성에 큰 영향을 줌

- [그림 10]는 본 연구에서 제작 된 대면적 비대칭 사파이어 멤브레인의 단면 이미지로 오른쪽에서부터 구멍의 직경이 왼쪽으로 갈수록 점차적으로 작아짐을 확인할 수 있음



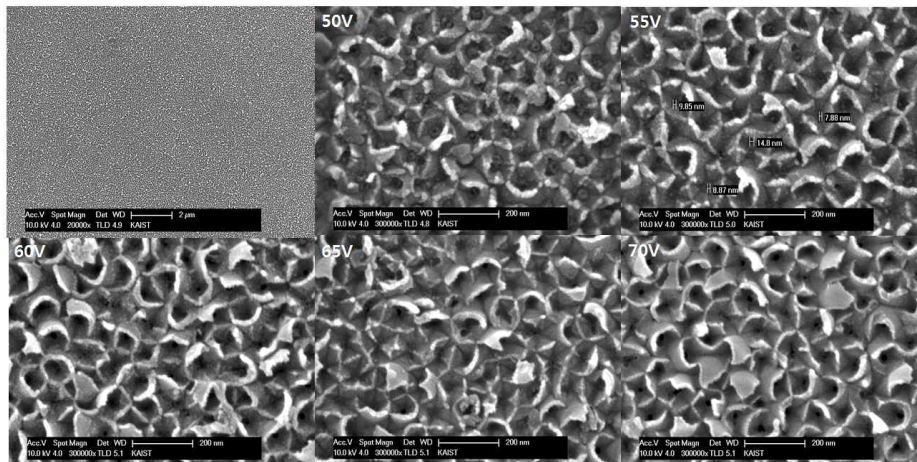
[그림 10] 비대칭 사파이어 멤브레인의 SEM 이미지

1.1.7. 균일한 두께의 대면적 사파이어 멤브레인 제조 기술

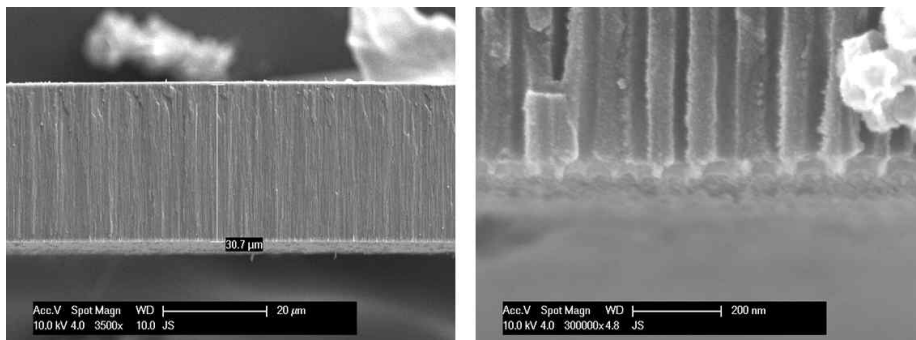
- 대면적에서 동일한 막특성 발현을 위해서는 사파이어 멤브레인의 두께가 모든 면적에서 동일하여야 함
- 동일한 두께의 멤브레인을 제조하기 위해서는 양극산화 공정 중 모든 면적에 동일한 전기장이 걸려야함
- 제작 된 막을 분할하여 모폴로지를 관찰하여 각 구역에 적용된 전기장 값을 개산한 후 이를 보정할 실드를 제작하여 전기장을 보정하면 막 두께를 균일하게 만드는 것이 가능
- 양극산화 공정 중 전극과 접촉하는 알루미늄 판의 일면을 완벽하게 접촉시키면 실드 없이도 균일한 전기장이 걸리므로 손쉽게 해결이 가능
- 알루미늄 판 일면을 양극과 완벽하게 밀착시킨 후 두께 100, 40, 10um로 제작 된 대면적, 비대칭 사파이어 멤브레인의 중앙 1개와 각 모서리 4개에서 샘플을 얻어 SEM으로 확인 한 결과 매우 균일 한 두께로 멤브레인이 제작되었음을 확인함

1.1.8. Voltage Pulse Detachment

- 양극산화 후 나노기공의 밑면은 항상 알루미나 바닥층으로 막혀 있으므로 멤브레인으로 만들기 위해서는 제거가 필요
- 알루미나 바닥층은 건식 식각 (아르곤 스퍼터링) 제거가 가능하나 고비용이며 대면적에서는 활용이 불가하고 습식 식각 공정은 비용이 적으며 대면적이 가능한 장점이 있으나 정교한 제어가 불가하여 막 성능 저하 우려
- 본 연구에서 다양한 전압조건과 용액 조성에서 고전압 박리를 실시하였으며 다공성 멤브레인의 SEM 이미지로 바닥이 잘 열려져 있음을 확인할 수 있음



[그림 11] 다양한 전압 조건에서 박리 된 다공성 멤브레인의 바닥층 SEM 이미지



[그림 12] 박리된 다공성 멤브레인의 SEM 단면 이미지

1.2. 1차연도 연구개발 성과

□ 핵심성과 : 대면적의 비대칭 사파이어 멤브레인 제조 공정 개발

1.2.1. 질적 성과

(가) 면적 : $50 \times 50 \text{cm}^2$

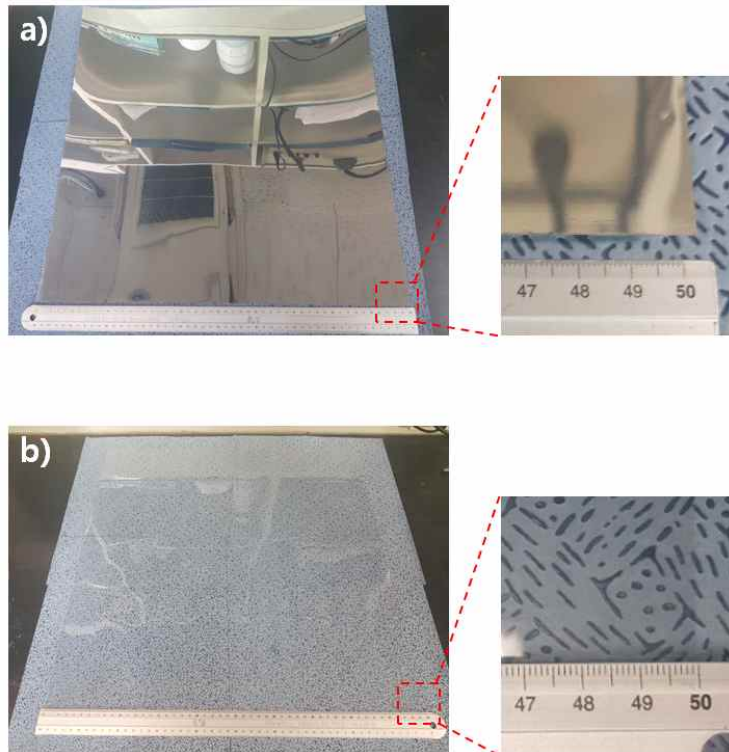
1) 실험 방법

□ $50 \times 50 \text{cm}^2$ 의 고순도 알루미늄 (LUXAL, Toyo Aluminum K.K.) 을 이용하여 비대칭 사파이어 멤브레인을 제작

□ 제작된 비대칭 사파이어 멤브레인은 자를 이용하여 면적이 계산되었으며, 개발 된 시제품과 자를 함께 사진을 찍어[그림 9-b]에 나타냄

2) 개발 성과

- 본 연구에서 면적 $50 \times 50 \text{ cm}^2$ 을 목표로 하였고, [그림 9]에서처럼 $50 \times 50 \text{ cm}^2$ 의 비대칭 사파이어 멤브레인 제조기술이 성공적으로 개발됨



[그림 13] a) $50 \times 50 \text{ cm}^2$ 의 알루미늄과 b) 비대칭 사파이어 멤브레인

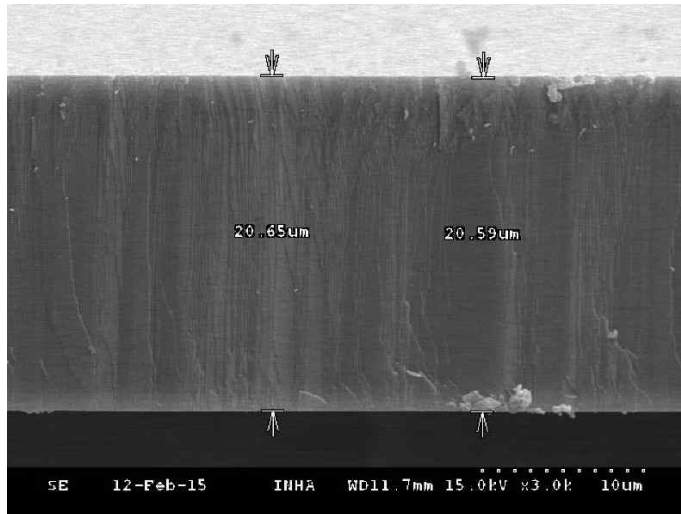
(나) 두께 : $20.6 \mu\text{m}$

1) 시험 방법

- 두께 $20 \mu\text{m}$ 의 비대칭 사파이어 멤브레인을 제작하고 나노종합기술원에서 SEM을 이용하여 두께를 측정함

2) 개발 성과

- 본 연구에서 $10, 40, 100 \mu\text{m}$ 의 비대칭 사파이어 멤브레인을 제조하여 공정조건을 검토하였으며 $20 \mu\text{m}$ 를 목표로 제작한 경우 $20.6 \mu\text{m}$ 로 $0.6 \mu\text{m}$ 오차 내에서 정교하게 제작됨
- 정교한 두께 조절이 가능한 대면적의 $20 \mu\text{m}$ 의 비대칭 사파이어 멤브레인 제조 기술이 개발됨



[그림 14] 사파이어 멤브레인의 단면 이미지

(다) 결정화도 : 100%

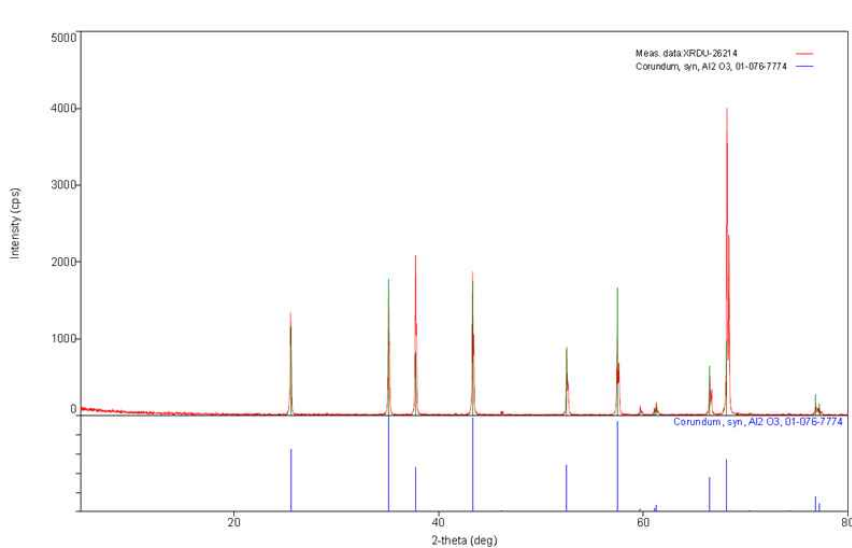
1) 실험 방법

□ XRD를 이용하여 결정성 및 결정화도 분석

2) 개발 성과

□ XRD 결과 100%에 가까운 완벽한 sapphire (α -alumina) 결정이 형성되었음을 확인함

□ XRD를 이용한 결정화도는 비결정영역과 결정영역을 분리해야 측정이 가능하지만, 100%에 가까우면 비결정 피크와 결정 영역의 피크 분리가 불가하므로 정확한 값을 얻을 수는 없음



[그림 15] 사파이어 멤브레인의 XRD

(라) 파단강도 : 25.92MPa

1) 실험 방법

- ☐ 각 시험편의 상단, 중단, 하단 3곳에서 thickness, width를 측정 후 최소값을 사용
- ☐ 시험편 측과 지지 장치의 축이 일치하는지 축 정렬 상태를 확인 후 시험편 상· 하 부분에 덮개 부착
- ☐ 부착강도가 시험편의 인장강도 이상으로 충분한 시간이 경과된 후 가압장치의 하중 측과 시험편의 하중 축 정렬
- ☐ 시험은 일정한 재하속도에서 수행하도록 하며, 1~5분 정도의 시험 시간이 소요되도록 제어하기 위해 0.5mm/min 속도로 수행
- ☐ 시험이 수행되는 동안 기록 가능한 연속 기록 장치를 이용하여 기록
- ☐ 시험 결과인 직접 인장강도는 시험편의 최대 하중을 초기의 단면적으로 나눈 값이다. 이 때 파괴 면이 접착 부분을 포함하는 경우의 시험 결과는 강도 산정 시 제외

2) 개발 성과

- ☐ 5개의 사파이어 멤브레인 시편의 파단강도를 측정한 결과 최고 34.51 MPa, 최소 16.50 MPa, 평균 25.92 MPa이 측정됨 [그림]
- ☐ 파단 강도 1.0 MPa를 목표로 하였으며 사파이어 멤브레인의 파단강도는 일반적인 고분자 이온교환막에 비해 월등히 우수한 기계적 특성이 나타났으며, 본 과제를 통하여 세계 최고의 파단강도를 가지는 이온교환이 가능한 멤브레인이 개발됨

시료명	Run	인장강도 ¹⁾ (MPa)
Koptri- 18-06-07610-1	1	34.51
	2	22.44
	3	28.76
	4	16.50
	5	27.38
	SD	6.80
	CV (%)	26.22
	평균	25.92

[표 1] 사파이어 멤브레인의 강도 실험 결과

(마) 곡률반경 : 1.75mm

1) 실험 방법

- 두께 20 μm , 너비 2cm의 사파이어 멤브레인을 이용하여 버니어 캘리퍼스를 이용하여 곡률 반경 측정
- 버니어 캘리퍼스에서 측정된 수치는 곡률 지름으로 곡률 반경은 측정 된 값의 1/2임

2) 개발 성과

- 사파이어 멤브레인 시편의 곡률반경을 5회 측정하였을 때 평균 약 1.75mm로 본 연구의 목표로 하였던 10mm에 비해 월등히 우수한 유연성이 나타남
- 기존의 무기 재료보다 벌집 구조의 다공을 가지는 사파이어 멤브레인은 굽힘에 의한 응력을 효율적으로 분산이 가능하므로 높은 유연성이 관찰됨

(단위 : mm)

시험품명	결과	
	측정거리	곡률반경 ¹⁾
사파이어멤브레인 1	2.92	1.46
사파이어멤브레인 2	3.17	1.59
사파이어멤브레인 3	2.77	1.39
사파이어멤브레인 4	4.73	2.37
사파이어멤브레인 5	4.00	2.00

¹⁾ 곡률반경 = 측정거리 / 2

[표 2] 사파이어 멤브레인의 곡률반경 실험 결과

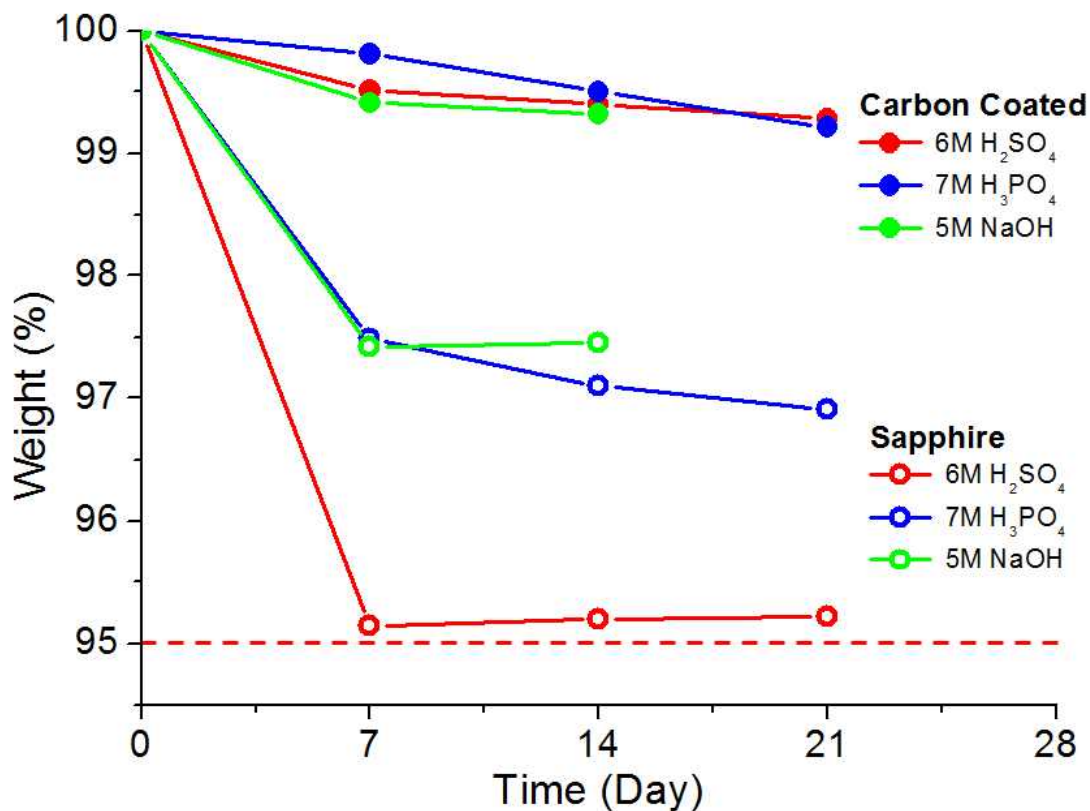
(바) 화학적 내구성 : 99.05%(6M 황산), 99.37%(7M 인산), 96.71%(5M 수산화나트륨)

1) 실험 방법

- 20 °C의 6mol/L 황산, 7mol/L 인산, 5mol/L 수산화나트륨 용액에서 720시간 (30일) 지난 후 전과 후의 무게 비를 계산하고, morphology 변화를 SEM을 이용하여 관찰

2) 개발 성과

- 6 M 황산에서 30일 경과 후 사파이어 멤브레인은 95.2% 무게 유지 (0.95% 변화)
- 7 M 인산에서 30일 경과 후 사파이어 멤브레인은 99.37% 무게 유지 (0.63% 변화)
- 5 M 수산화나트륨에서 30일 경과 후 사파이어 멤브레인은 97.5% 무게 유지 (3.29% 변화)
- 위 조건은 기존의 이온교환막은 파괴되는 극한의 산과 염기 조건으로 개발된 사파이어 멤브레인은 목표 95% 보다 높은 화학적 안정성을 유지하였음



[그림 16] 6M 황산, 7M 인산, 5M 수산화나트륨에서 사파이어 멤브레인의 무게 변화

1.2.2. 양적 성과

(가) 특허 등록 (등록번호 : 10-1896266)

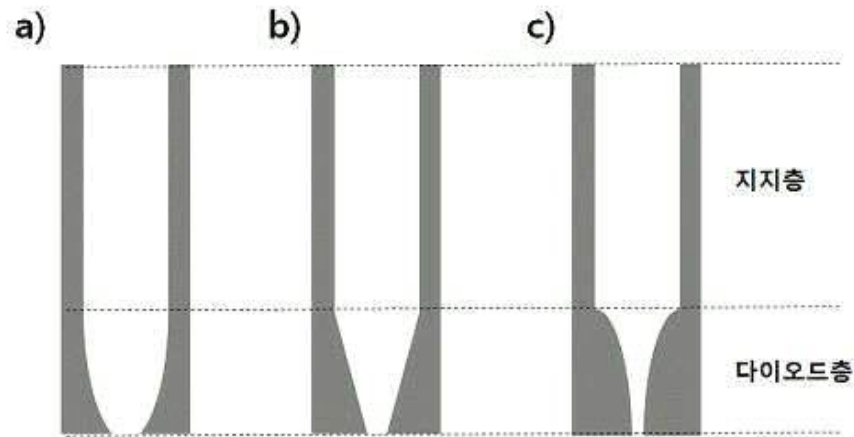
1) 발명의 명칭

□ 경사가 있는 나노기공을 포함하는 이온 다이오드막 및 그 제조 방법

2) 요약

□ 본 발명은 경사가 있는 나노 기공이 집적되어 이온선택성과 이온정류특성을 갖는 다공 구조의 이온 다이오드막과 그 제조방법에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 이온선택성을 갖는 것 뿐만 아니라 막저항이 낮아 표면전하밀도 비대칭에 의한 농도구배를 나노 기공 축을 따라서 유도하여 정류특성을 갖도록 경사가 있는 나노기공이 고밀도로 집적된 이온 다이오드막과, 양극산화 공정조건을 조절하여 이온 다이오드막의 형태를 설계에 따라서 자유롭게 제어함으로써 이온 다이오드막의 정류특성이나 막저항 등의 다양한 특성을 조절할 수 있는 이온 다이

오드막 제조방법에 관한 것이다.



[그림 17] 이온다이어드막 제조방법에 관한 특허 주요 도면

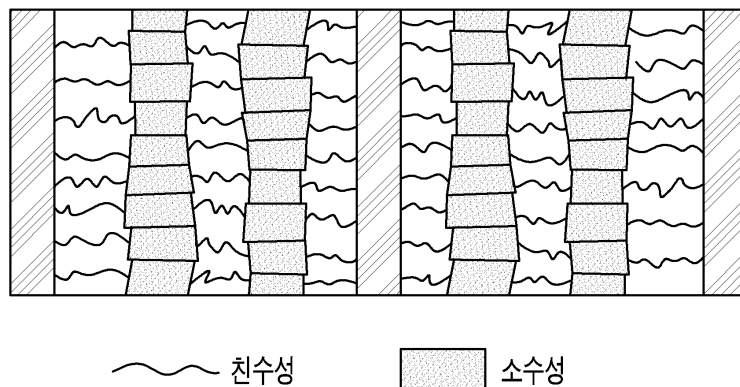
(나) 특허 등록 (등록번호 : 10-2048811)

1) 발명의 명칭

□ 이온선택성 고분자가 충전된 유무기 복합막

2) 요약

□ 기공 직경 10 내지 20nm, 공극율(porosity) 5 내지 20%의 나노 기공을 포함하는 무기물 박막과 상기 나노기공을 포함하는 무기물 박막의 기공 내부에 충전되어 친수성 도메인과 소수성 도메인이 기공 중심축 방향으로 교호로 배향되는 이온 선택성 고분자가 충전된 유무기 복합막에 관한 것이다. 이온선택성 고분자가 완전한 이온 채널을 형성하게 되므로 이온 전도도가 우수하면서, 기계적, 화학적 안정성이 우수하고 제조원가가 저렴한 이온선택성 유무기 복합막의 제조가 가능하다.



[그림 18] 이온선택성 고분자가 충전된 유무기 복합막에 관한 특허 주요 도면

2. 2차연도 (2018년)

2.1. 2차연도 연구내용

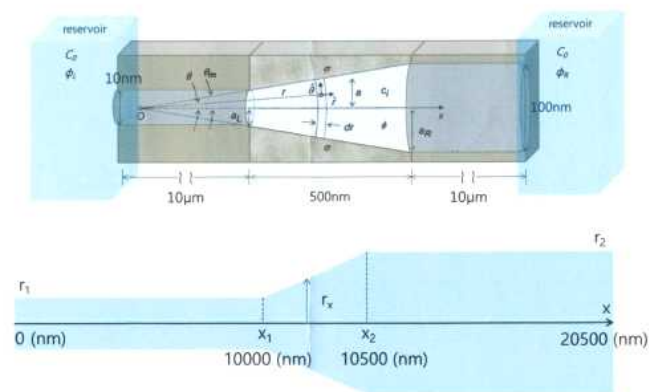
2.1.1. 전기투석 담수화에 최적화 된 이온정류막 디자인

- Comsol 기반의 이온정류막 simulation 툴 개발
- Poisson-Nernst-Planck 모델을 보안한 시뮬레이션 모델 제시 및 결과 확인
- 시뮬레이션 모델 결과를 바탕으로 전기투석 담수화에 최적화 된 이온정류막 모델 설계

(가) model 1 : Surface modified asymmetric ion channel sapphire membrane

1) 내용

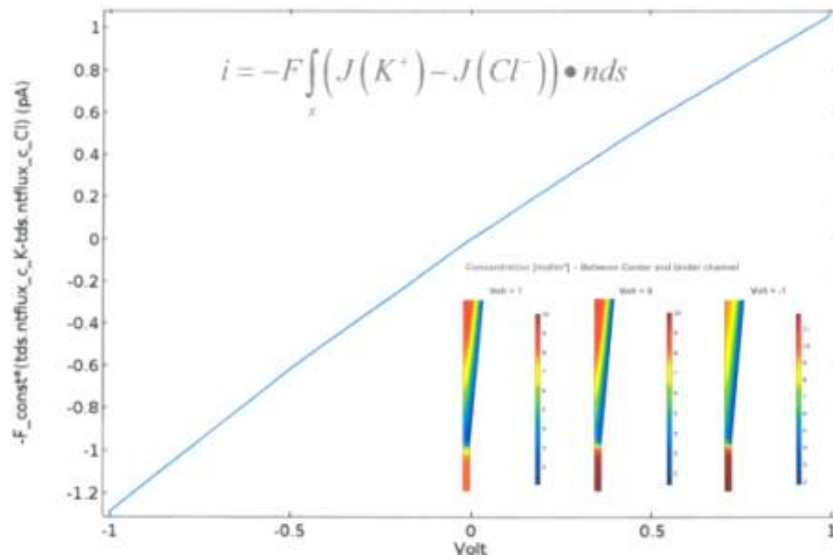
- 서로 다른 기공크기의 이온채널이 연속적으로 연결된 비대칭성 사파이어 멤브레인
- 표면처리를 통해 양/음 작용기를 도입하면 작은 기공크기의 이온채널을 통해 이온선택성이 부여됨
- 이온채널의 구조적 비대칭성을 통해 멤브레인이 정류특성을 갖도록 함



[그림 19] 표면처리된 비대칭 이온채널을 갖는 사파이어 멤브레인의 모식도(model 1)

2) 결과

- 전압-전류 곡선 시뮬레이션결과를 바탕으로 약 1.2배의 정류특성을 가질 수 있음을 확인
- 기공 크기가 변하는 지점 주변에서 전압에 따른 이온농도분포에 변화가 정류특성의 원인임을 알 수 있음

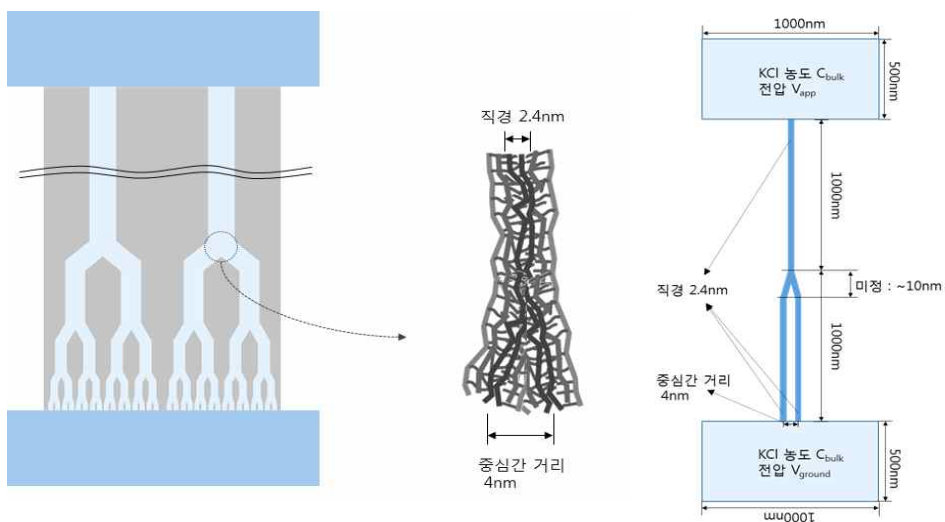


[그림 20] 전압-전류 곡선 및 농도분포 변화 시뮬레이션 결과 (model 1)

(나) model 2 : Pore-filling Nafion branched ion channel sapphire membrane

1) 내용

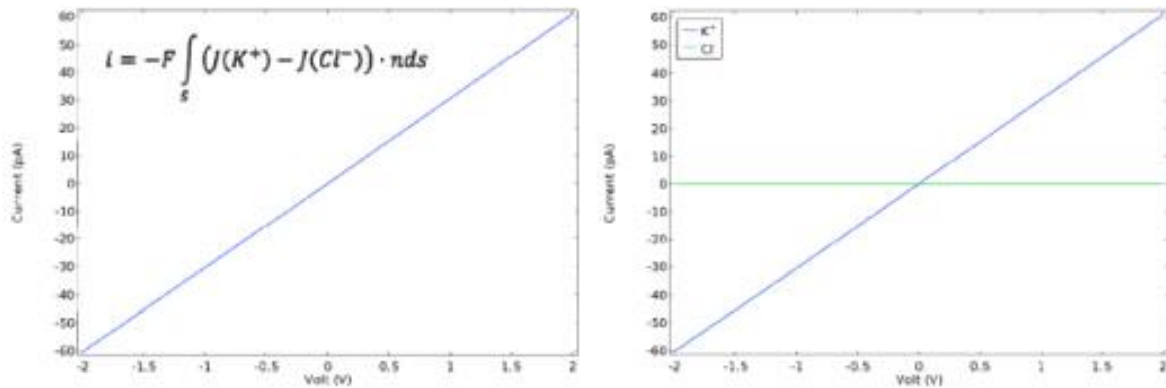
- 사파이어 기공에 나피온이 채워진 세공충진 멤브레인
- 막의 두께 방향에 따라 나피온 분율이 변함
- 나피온 분율이 증가하는 지점에서 채널의 분기가 일어날 것으로 예상 [그림 21]



[그림 21] 세공충진 나피온의 분기된 이온채널을 갖는 사파이어 멤브레인의 모식도 (model 2)

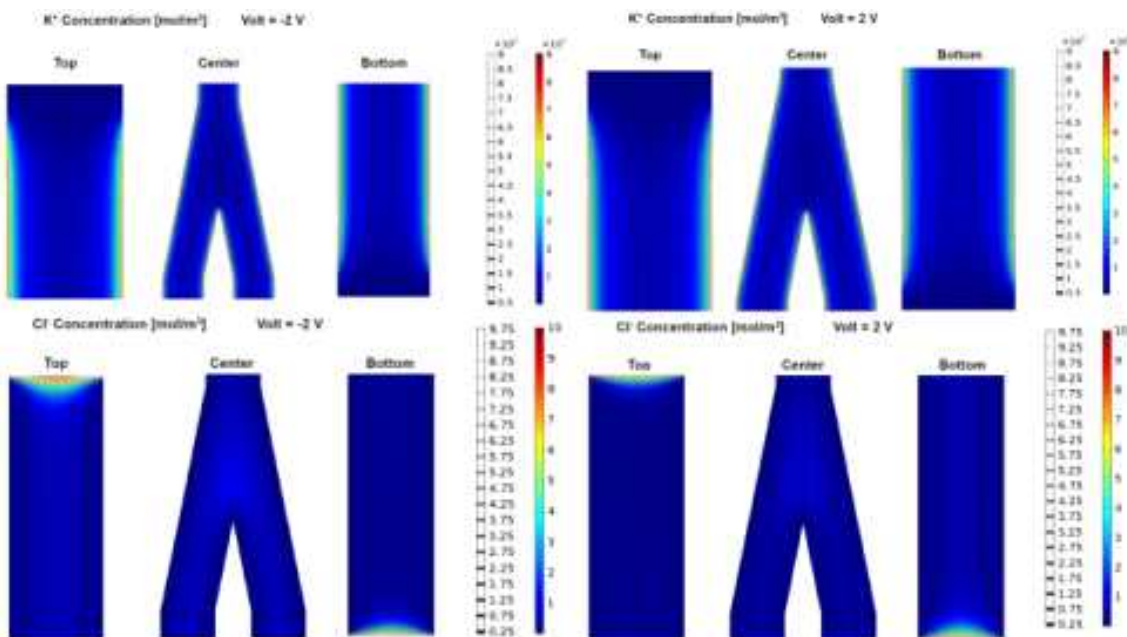
2) 결과

- 기공 내부 세공충진된 나피온의 높은 선택성으로 인해 이온 전류에서 K⁺ 이온의 기여도가 대부분을 차지
- 전류-전압 곡선을 통해 정류특성이 나타나지 않음을 확인



[그림 22] 전압-전류 곡선 시뮬레이션 결과, 전체 이온 전류(좌), 각 이온 종류(K⁺, Cl⁻)에 따른 이온 전류(우) (model 2)

- 이온농도분포를 확인한 결과 구조적인 비대칭성에도 불구하고 기공전체에서 이온농도분포 변화가 없는 것이 정류특성이 나타나지 않는 이유임을 알 수 있음

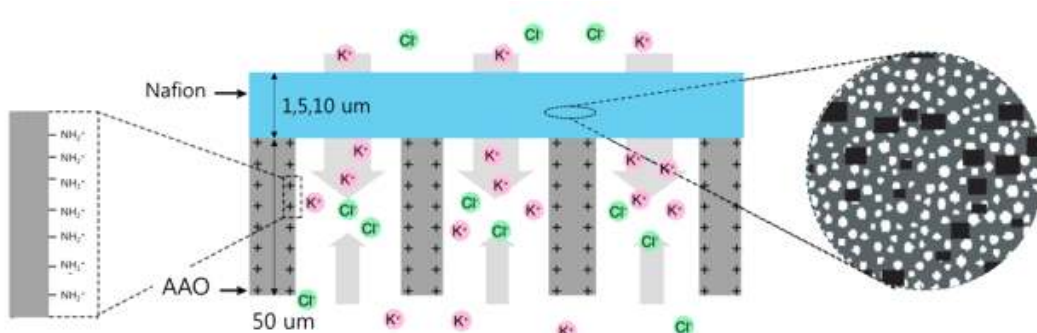


[그림 23] 전압에 따른 각 K⁺, Cl⁻ 이온의 농도분포 변화 (model 2)

(다) model 3 : Nafion-sapphire heterogenous membrane

1) 내용

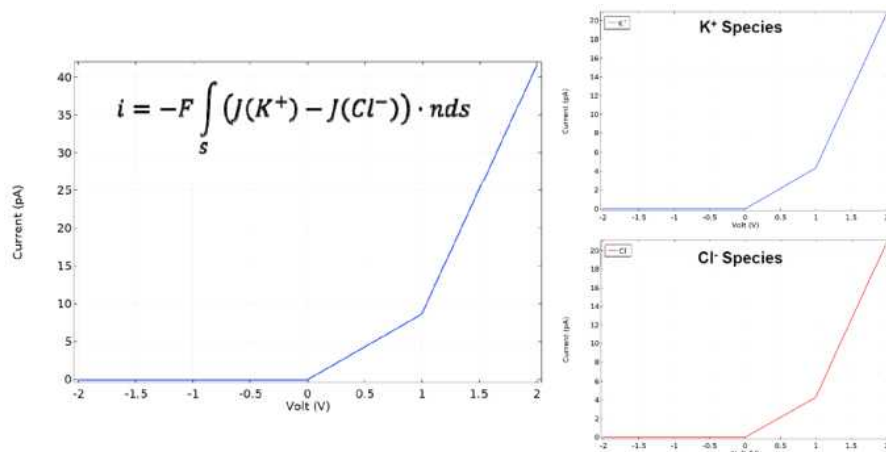
- 다공성 사파이어막 위에 높은 전하밀도를 갖는 나피온 층이 있는 비균질 형태의 멤브레인
- 비균질 멤브레인은 내부 전하밀도의 비대칭성 때문에 높은 정류특성을 갖는데 유리함 [그림 24]



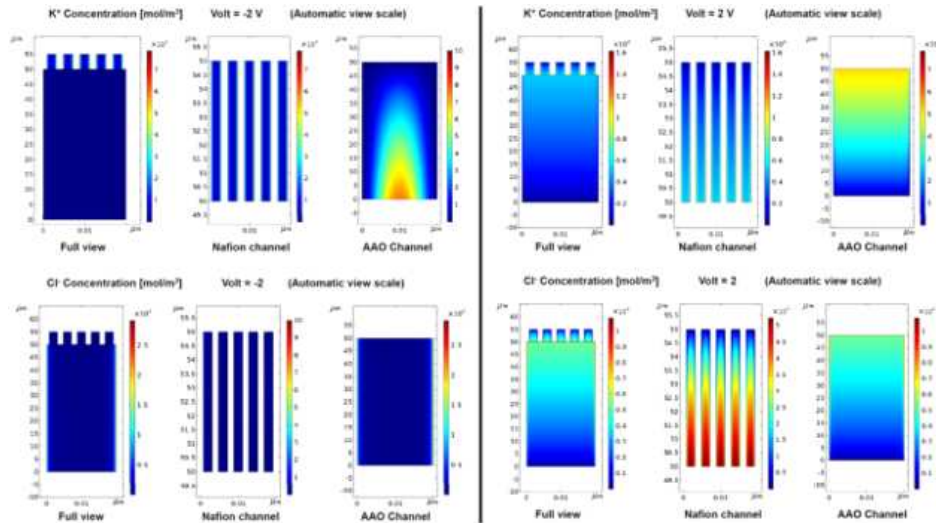
[그림 24] 나피온-사파이어 비균질 멤브레인의 모식도 (model 3)

2) 결과

- 전압-전류 곡선 결과 model 3 은 이론적으로 매우 높은 정류특성 가질 수 있음을 확인함
- 매우 높은 정류특성의 이유를 전압에 따른 각 이온의 농도분포를 통해 유추할 수 있음
- -1V에서는 K+와 Cl- 이온 모두 농도가 감소하고, +1V에서는 K+와 Cl- 이온 모두 농도가 증가하여 전류에 기여함



[그림 25] 전압-전류 곡선 시뮬레이션 결과, 전체 이온 전류(좌), 각 이온 종류(K+, Cl-)에 따른 이온 전류(우) (model 3)

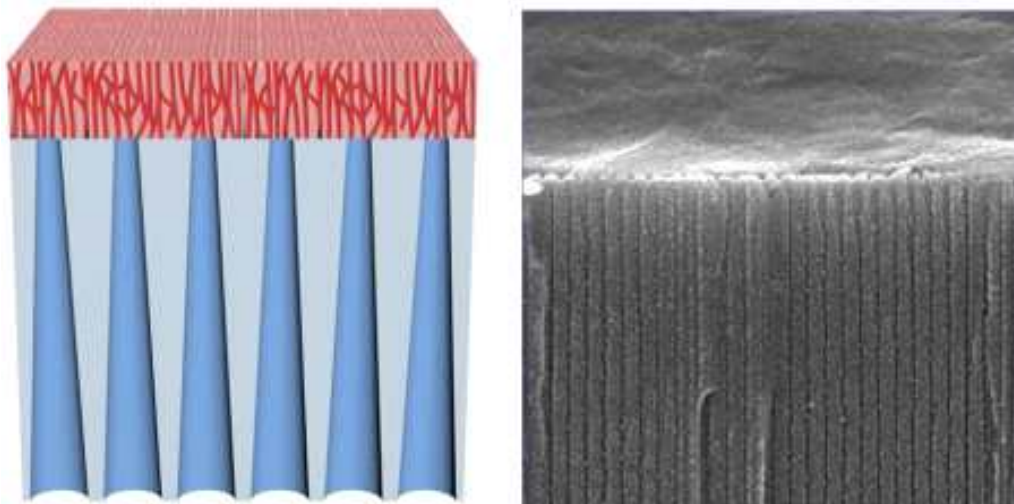


[그림 26] 전압에 따른 각 K⁺, Cl⁻ 이온의 농도분포 변화 (model 3)

2.1.2. 양/음이온정류막 제품 개발 및 평가 결과

(가) 양/음이온정류막 제품 개발 결과

- 시뮬레이션 결과를 통해 디자인한 모델 중 model 3의 heterogenous 구조에서 높은 정류 특성을 확인
- 이를 바탕으로 양/음 이오노머와 사파이어를 결합하여 비균질 형태의 멤브레인을 개발

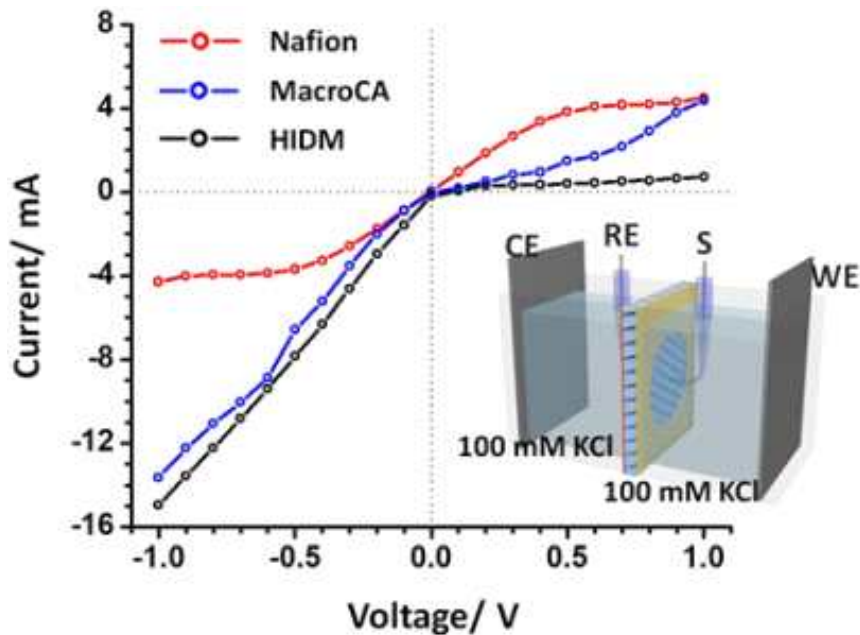


[그림 27] 개발된 이오노머-사파이어 비균질 이온정류막 모식도(좌), SEM 이미지(우)

(나) 양/음이온정류막 제품 평가 결과

1) 정류특성 및 이온전도도

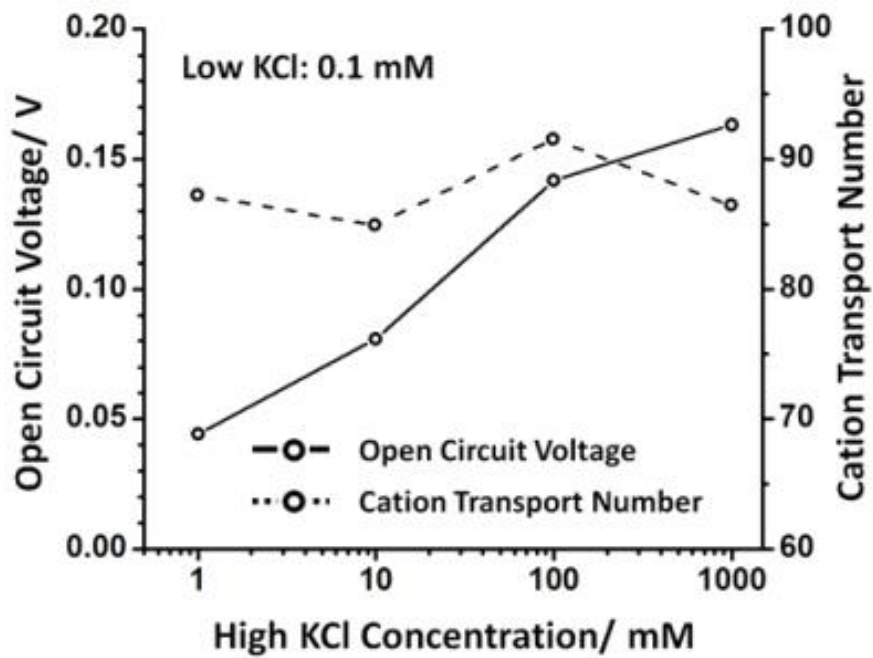
- 정류특성 평가 결과 이오노머를 사용하여 비대칭 사파이어 멤브레인(MacroCA)의 정류특성을 향상시킴
- 동일한 이오노머로 제작된 Nafion 필름과 비교시 4배 가까이 향상된 전도도를 보임을 확인함



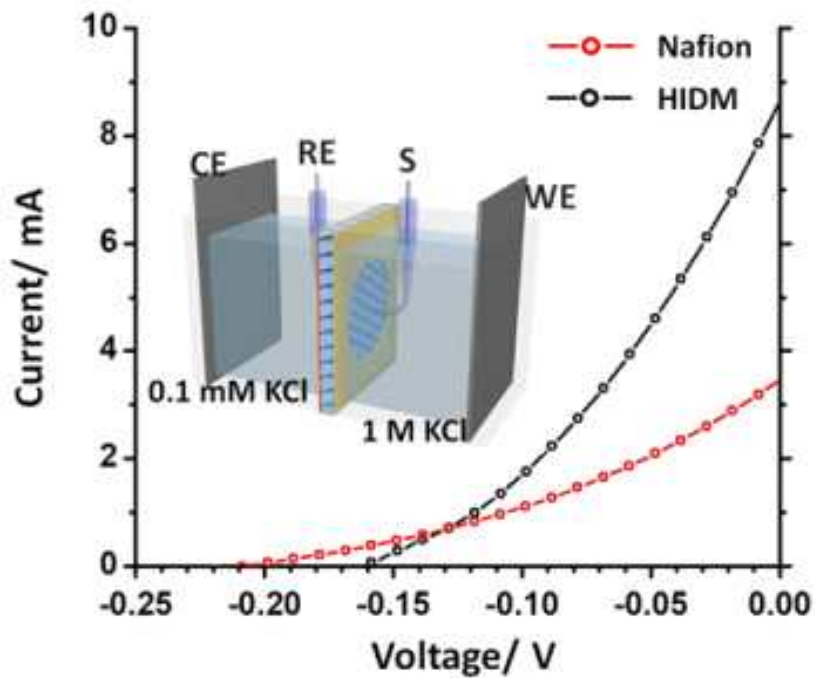
[그림 28] 개발된 이오노머-사파이어 비균질 이온정류막 정류특성 결과

2) 이온선택성 및 전력특성

- KCl 0.1mM의 낮은 농도 조건에서도 90%이상의 이온선택성 효율을 보임
- KCl 0.1mM과 1M의 조건에서 Nafion과 에너지 변환 전력을 비교하였을 때 더 높은 전력값을 나타냄
- 이는 이온정류막의 높은 전도도와 정류특성 및 충분한 이온선택성으로 인한 것으로 판단됨



[그림 29] 개발된 이오노머-사파이어 비균질 이온정류막 이온선택성 결과



[그림 30] 개발된 이오노머-사파이어 비균질 이온정류막 전력특성 평가 결과

2.1.3. 나노유체역학 연구

- 나노전기유체역학은 세포막 근처의 이온 수송뿐만 아니라 역사적으로 해수담수화와 관련된 수처리 분야에서 오랫동안 연구됨
- 전기투석법은 나노 구멍이 있는 얇은 막에 직류 전기장을 인가하고 이온을 선택적으로 통과하게 하여 담수를 생산하는 방식으로 나노전기유체역학의 대표적인 연구 분야
- 90년대 초반에 시작된 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)연구와 2000년대 가속화 된 NEMS(Nano-Electro-Mechanical System) 연구는 예전에는 관찰하지 못했던 나노막 주변 유동과 실제 이온 교환 기작 연구를 가능하게 함.
- 이로 인해 나노막 근처의 나노전기유체역학이 핵심 역할을 수행하며 이온 수송의 새로운 기작들이 속속 발견되거나 증명

2.1.4. 이온선택성 연구

(가) 개요

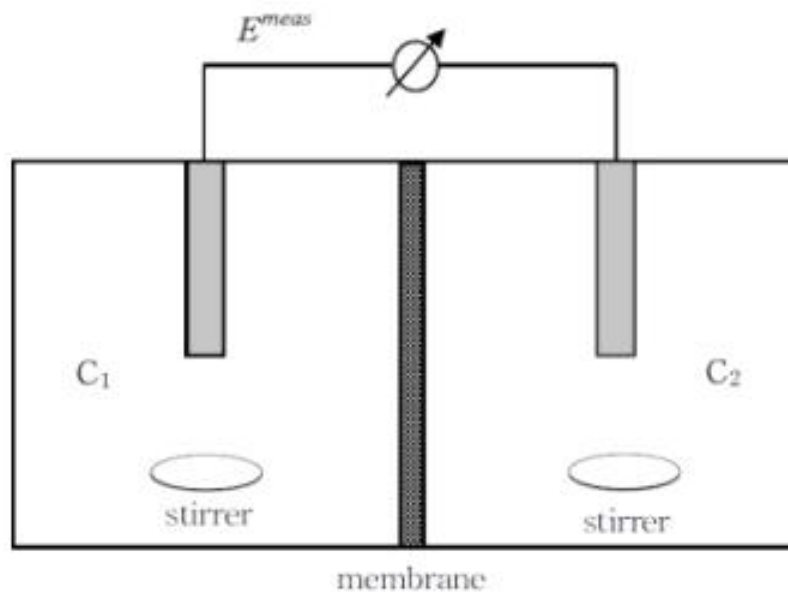
- 1890년 Oswald가 이온선택성을 가진 분리막인 이온교환막을 처음으로 발견
- 1930년 Donnan이 전해질 용액에서 이온교환막 내부 고정이온의 이온결합에 의한 대응이온의 선택적 투과 현상인 Donnan exclusion 현상을 이해하는 데에서 연구가 시작
- 이온교환막은 나노스케일의 기공과 그 기공 벽면에 강한 양 혹은 음전하를 띤 고정이온(fixed ion)을 가짐.작은 크기의 기공과 강한 고정전하에 의해 전하의 극과 동일한 동전하이온(co-ion)은 반발되고, 대이온(counter-ion)만이 교환막을 통과할 수 있음
- 통과 가능한 이온의 종류에 따라 양이온교환막(CEM : Cation Exchange Membrane)과 음이온교환막(AEM : Anion Exchange Membrane)으로 분류

(나) 수행방법

- 이온교환막의 선택성이란 막이 얼마나 효과적으로 coion들을 배제시키고 counterion만을 통과시킬 수 있는지를 나타내는 지표로 이온교환막의 성능을 나타내는 중요한 인자
- 이온교환막의 선택성은 이온교환막의 이동수로 표현

- 이온교환막의 이동수를 측정하는 일반적인 방법은 membrane potential로부터 이동수를 구하는 것
- [그림 32]와 같이 측정하고자 하는 이온교환막을 전기화학 셀에 끼우고 양쪽에 서로 다른 농도의 전해질을 채운 후 이온교환막 사이의 전위차(E_{meas})를 측정
- 비가역적 열역학(irreversible thermodynamics)으로부터 전위차와 이온교환막의 이동수와는 다음과 같은 관계식이 성립되고 식으로부터 막의 이동수를 계산

$$E_{meas} = -(2t_m^{app} - 1) \frac{RT}{F} \ln \frac{a_1}{a_2}$$



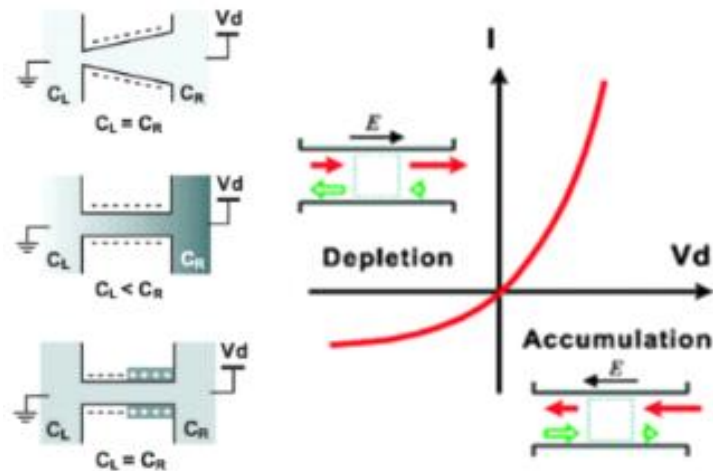
[그림 32] membrane potential 측정용 전기화학 셀의 구성

2.1.5. 이온정류현상 연구

(가) 개요

- 이온정류현상이란 전자 회로에서 다이오드(diode)의 기능과 유사하게 전압의 극성에 따라 특정한 방향으로의 이온 전류를 흐르게 하고, 다른 방향으로의 이온 전류의 흐름을 억제할 수 있는 현상

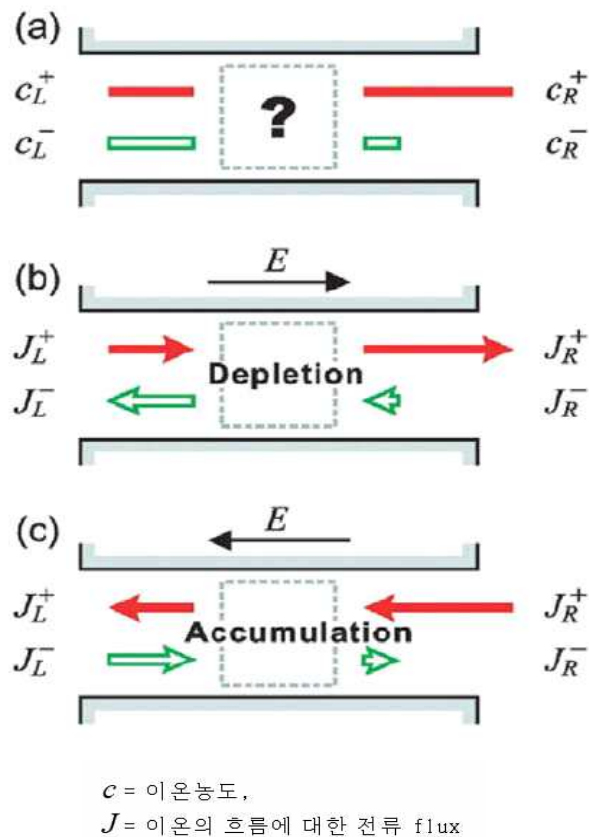
- 이 현상을 이용하면 매우 간단한 방법으로 이온의 흐름을 제어할 수 있어 다양한 나노유체역학 연구 및 멤브레인 개발에 적용되고 있음
- 채널구조, 표면 전하 분포 그리고 버퍼용액(buffer solution) 농도의 비대칭성에 의해서 유발됨



[그림 33] 나노유체역학 다이오드의 개략도

(나) 원리

- 다른 바이어스 극성에 대해서 채널내부의 이온 과다(accumulation)와 이온결핍(depletion)에 의해서 발생
- [그림 34] (a)와 같이 채널 양쪽의 양이온과 음이온의 비가 서로 다른 경우 (왼쪽에는 양이온과 음이온의 농도가 동일하고, 오른쪽에는 양이온의 농도가 음이온의 농도보다 높음)
- 채널의 오른쪽 방향으로 전기장을 가했을 때, [그림 34] (b)의 화살표와 같이 양이온은 오른쪽으로, 음이온은 왼쪽으로 움직이며, 채널에서 빠져나가는 양이온의 양이 채널로 들어오는 양이온의 양보다 많음. 음이온 역시 채널에서 빠져나가는 양이 채널로 들어오는 양보다 많음
- 이로 인해 채널 내에서 이온 농도가 초기 상태보다 낮아지는 **이온 결핍(ion depletion)** 현상이 발생
- [그림 34] (c)와 같이 왼쪽 방향으로 전기장을 가해주게 되면, 그림 3(b)와는 반대 현상이 발생되고, 채널 내에서는 **이온 과다(ion accumulation)** 현상이 발생



[그림 34] 나노채널의 양/음이온 농도분포 및 이온 결핍/과다 현상

2.1.6. 이온채널 내 이온이동 수치해석적 연구

(가) 개요

- 생물체의 나노채널에서 일어나는 생리적인 현상의 이해를 위한 연구와 인위적으로 나노미터 크기의 채널(나노채널)을 제작하고 이를 통과하는 이온, 유체, 작은 분자들의 이동에 관한 연구가 최근 20여 년 동안 활발하게 수행되고 있음
- 최근에는 나노공정기술의 진보 덕분에 더욱 정교하고 보다 쉽게 나노채널을 구현함으로써 나노채널에서 일어나는 유동의 특성과 물질 전달현상에 대한 보다 깊은 이해와 다양한 응용이 바이오센서, 에너지 변환, 해수 담수화 등의 여러 분야에서 활발히 이루어지고 있음
- 이와 같은 실험적 연구와 더불어 채널 내부의 물질 전달을 정성적인 분석에서 정량적으로 분석하기 위한 수치해석 연구의 중요성이 크게 대두됨

(나) 수행방법

- ☐ 전기투석 담수화에 최적화된 이온정류막을 설계하기 위해 여러 모델에 대한 정량적 분석을 수치해석방법으로 시뮬레이션함
- ☐ 소프트웨어 COMSOL multiphysics를 이용
- ☐ 각 모델에 대하여 인가전압, KCl농도 조건에 따른 이온분포와 전류를 계산

(다) 사용 module

- ☐ Transport of Diluted Species (Nernst-Planck equation),
- ☐ Electrostatics (Poisson equation)

(라) 사용 식

- ☐ Nernst-Planck equation : 나노채널 내 물질 이동은 용액의 대류 유동, 물질의 농도 차이, 그리고 외부 전기 포텐셜 차이가 원동력(driving force)으로 작용. 이 세 가지 원동력을 고려하여 이온 및 물질들의 농도 분포 구성을 결정

$$J_i = -D_i \nabla c_i - \frac{z_i F}{RT} D_i c_i \nabla \Phi$$

- ☐ Poisson equation : 전기적 포텐셜에 의한 용액 내의 이온 농도와의 관계를 나타냄

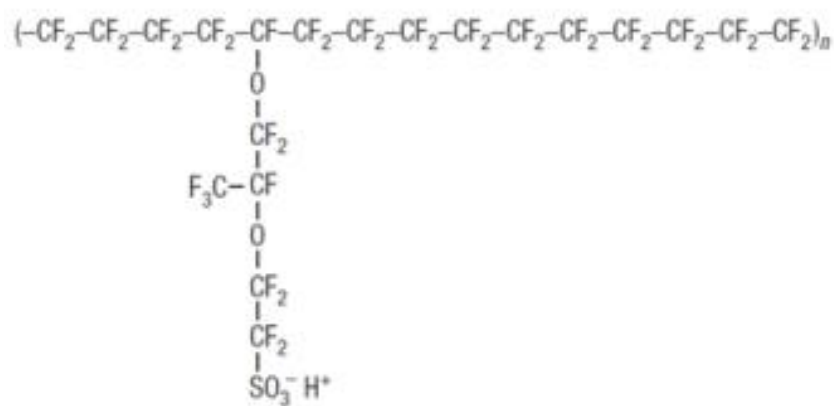
$$\nabla^2 \Phi = -\frac{F}{\epsilon_0 \epsilon_r} \sum_i z_i c_i$$

2.1.7. 이오노머 구조 및 이온정류막 제조 공정

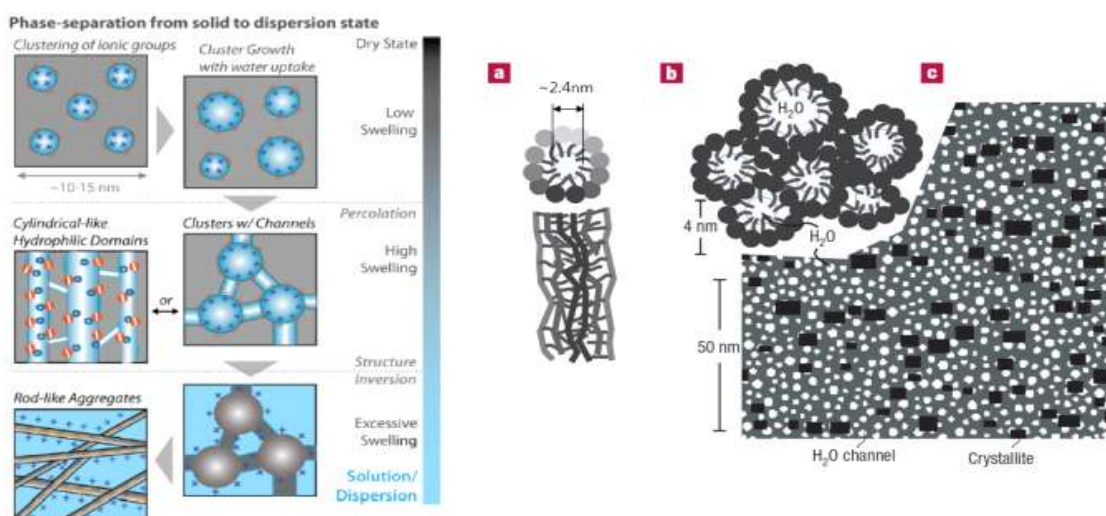
(가) 개요

- ☐ 이오노머란 이온성이 없는 반복 단위와 소량의 이온을 함유하는 반복단위로 구성된 공중합체를 뜻하며 이온교환막을 제작하는 주요 재료
- ☐ 대표적인 이온교환막인 나피온(미국 Dupont社)의 경우 PFSA(perfluorosulfonic acid) 이오노머로 제작

- PFSA(perfluorosulfonic acid) 이오노머의 분자구조는 hydrophobic 테프론 backbone에 hydrophilic한 side group이 에테르 결합으로 연결된 구조
- 이러한 구조는 대기 중 적절한 습도가 주어졌을 때 쉽게 미세 상분리가 일어나 ionic 클러스터를 형성하며 이온채널로 연결됨 [그림 36]
- 나피온의 이온채널구조 연구결과 직경 2.4nm cylindrical한 역micell의 channel이 약 4nm간격으로 분산되어 있음이 알려져 있음 [그림 36]
- 기존 이온교환막의 문제점을 개선하고 성능을 높이기 위해 다양한 구조체 및 물질에 이오노머를 활용한 복합막을 개발하려는 노력이 세계적으로 활발하게 진행중임
- channel 내부에는 SO₃⁻ 작용기가 존재하여 수소이온 또는 양이온만을 선택적으로 투과함



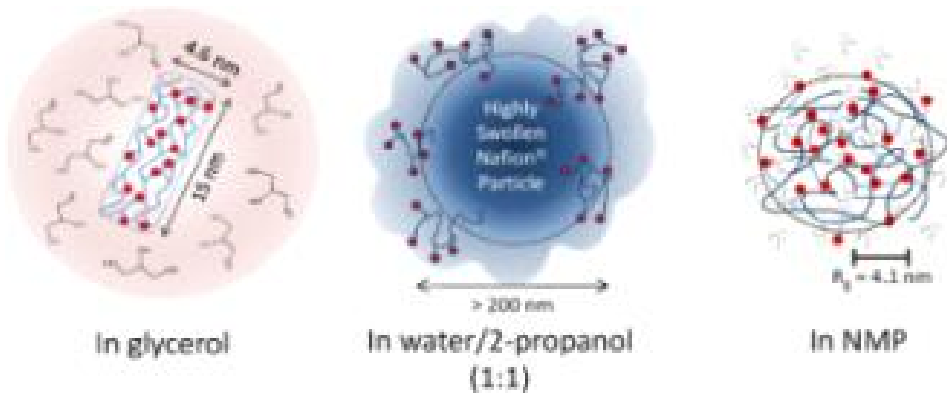
[그림 35] PFSA(perfluorosulfonic acid) 이오노머의 분자구조



[그림 36] 습도에 따른 상분리 변화와 ionic 클러스터 형성 및 이온채널 구조 모식도

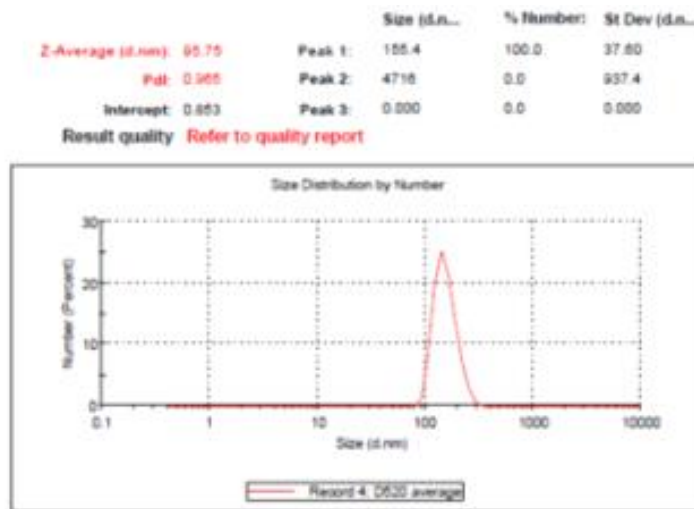
(나) 수행방법

- 사파이어 멤브레인 표면에 높은 전하밀도를 도입할 수 있는 이오노머를 이용하여 높은 선택성을 갖도록 함
- hydrophobic한 부분과 hydrophilic한 부분을 갖는 이오노머는 용매내에서 일정크기의 micell구조를 형성하여 크기배제(size exclusion) 효과에 의해 그 보다 작은 크기에 기공에는 비침투(non infiltration) 함



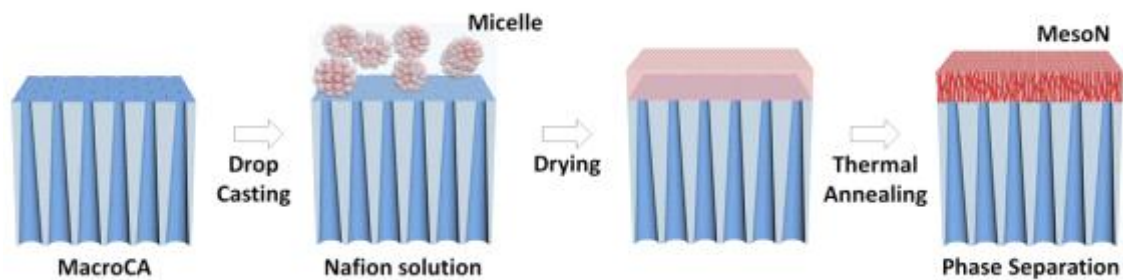
[그림 37] 용매에 따른 이오노머(나피온)의 모폴로지 거동

- 입자크기 분석결과 100nm 이상임을 확인함 [그림 38]



[그림 38] 이오노머(D520)의 입자크기 분석 결과

- 이는 사파이어 멤브레인 표면에서 얇은 두께의 이온선택층을 형성하여 높은 이온전도도가 유지됨
- 또한 비균질 형태의 멤브레인으로서 채널구조, 전하밀도의 비대칭성으로 인해 높은 정류특성을 부여함



[그림 39] 이오노모-사파이어 비균질 이온정류막 제조 공정

- 양이온정류막 용 이오노머는 (Nafion, D520), 음이온정류막 용 이오노머는 (Fumion, FAA-3) 사용

Nafion® PFSA Polymer Dispersions by Composition						
Property	D520	D521	D1020	D1021	D2020	D2021
Polymer Content, wt%	5.0 min. 5.4 max.	5.0 min. 5.4 max.	10.0 min. 12.0 max.	10.0 min. 12.0 max.	20.0 min. 22.0 max.	20.0 min. 22.0 max.
Water Content, wt%	45 ± 3	45 ± 3	87-90	87-90	34 ± 2	34 ± 2
VOC Content, wt%	50 ± 3	50 ± 3	<1	<1	46 ± 2	46 ± 2
1-Propanol	48 ± 3	48 ± 3	—	—	44 ± 2	44 ± 2
Ethanol	<4	<4	—	—	<2	<2
Mixed Ethers and Other VOCs	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Specific Gravity	0.92-0.94	0.92-0.94	1.05-1.07	1.05-1.07	1.01-1.03	1.01-1.03
Available Acid Capacity, meq/g, H ⁺ polymer basis	>1.00	>0.92	>1.00	>0.92	>1.00	>0.92
Total Acid Capacity, meq/g, H ⁺ polymer basis	1.03-1.12	0.95-1.03	1.03-1.12	0.95-1.03	1.03-1.12	0.95-1.03
Viscosity, cP, at 25 °C (77 °F) and 40 sec ⁻¹ Shear Rate*	10-40	10-40	2-10	2-10	50-500	50-500

*1 cP = 1 MPas

[표 3] 양이온정류막 용 이오노머(D520)의 물질정보

fumion [®] solution		FAA-3
ionomer type		anion exchange ionomer
polymer type		polyaromatic polymer
appearance / colour		brown, transparent solution
solvent		<i>N</i> -methyl-2-pyrrolidone (NMP)
concentration ¹⁾	wt%	8 - 12
solution viscosity at 25 °C	mPa s	< 20
functional group		quaternary ammonium group
counter ion		bromide (Br ⁻)
boiling point of NMP	°C	203
additive (defoamer, wetting, anti-cratering)	%	optional

1) determined by drying at T = 80 °C for 24 hrs.

[표 4] 음이온정류막 용 이오노머(FAA-3)의 물질정보

2.2. 2차년도 연구 개발 성과

- 핵심성과 : 전기투석 해수담수화용의 이온정류막 개발

2.2.1. 질적 성과

(가) 이온선택성 : 양이온정류막 95.8% / 음이온정류막 93.7%

1) 실험방법

- 측정 cell 중앙에 시험품을 고정시킨다.
- 측정 cell 양 끝단에 제작한 Ag/AgCl 판 전극을 고정시킨다.
- 제작한 Ag/AgCl Luggin capillary 전극의 끝부분을 시험품의 표면과 0.5 cm 이내의 거리에 위치시킨다.
- Potentiostat 측정용 계측기의 전극을 측정 cell 에 고정되어 있는 Ag/AgCl 판 전극 및 Ag/AgCl Luggin capillary 전극에 연결한다.
- 제조한 NaCl 0.5mol/L (NaCl 1mol/L 용액 250 mL와 DI워터 250 mL를 혼합한 용액)을 측정 cell 의 좌측, 제조한 NaCl 0.01mol (NaCl 1mol/L 용액 5 mL와 DI워터 495 mL를 혼합한 용액)용액을 측정 cell의 우측에 투입하여 고정되어 있는 시험품과 Ag/AgCl 판 전극 및 Ag/AgCl Luggin capillary 전극이 용액에 잠기도록 한다.

- Potentiostat 측정 계측기와 소프트웨어 Smart Manager(SM)로 100초 동안 Voc(전압)를 측정하여, 100초 종료 시 측정된 전압(Voc)을 확인하고 아래의 수식으로 이동수를 계산한다.

2) 판정기준

- 소프트웨어에서 측정한 전압(Voc)으로 이동수를 계산하여 기록한다.

양이온이동수

$$V_{oc} = (1 - 2t_+) \frac{RT}{F} \ln \frac{C_H}{C_L}$$

V_{oc} : OCV
 t_+ : 양이온 이동수
 C_H : 0.5 [mol/L]
 C_L : 0.01 [mol/L]
 R : 기체상수 (8.31[J/K/mol])
 T : 293.15 [K]
 F : 96485.33 [C/mol]

음이온이동수

$$V_{oc} = (2t_- - 1) \frac{RT}{F} \ln \frac{C_H}{C_L}$$

V_{oc} : OCV
 t_- : 음이온 이동수
 C_H : 0.5 [mol/L]
 C_L : 0.01 [mol/L]
 R : 기체상수 (8.31[J/K/mol])
 T : 293.15 [K]
 F : 96485.33 [C/mol]

시험품	시험결과	
	전압(Voc)	이동수
양이온정류막 #1	-92.163 mV	0.958
양이온정류막 #2	-91.858 mV	0.957
양이온정류막 #3	-92.163 mV	0.958
양이온정류막 평균		0.958
음이온정류막 #1	87.891 mV	0.937
음이온정류막 #2	88.196 mV	0.939
음이온정류막 #3	87.585 mV	0.936
음이온정류막 평균		0.937

[표 5] 양이온정류막, 음이온정류막의 이온선택성 평가 결과

3) 개발성과

- 개발된 양이온정류막은 양이온을 평균 95.8% 선택적으로 투과하는 이온선택성을 가지며 이는 일반적인 상용이온교환막 성능조건에 부합함
- 개발된 음이온정류막은 음이온을 평균 93.7% 선택적으로 투과하는 이온선택성을 가지며 이는 일반적인 상용이온교환막 성능조건에 부합함

(나) 이온전도도 : 양이온정류막 1.975 Ω·cm² / 음이온정류막 2.288 Ω·cm²

1) 실험방법

- 측정 cell 중앙에 시험품을 고정시킨다.

- ☐ 측정 cell 양 끝단에 제작한 Ag/AgCl 판 전극을 고정시킨다.
- ☐ 제작한 Ag/AgCl Luggin capillary 전극의 끝부분을 시험품의 표면과 0.5 cm 이내의 거리에 위치시킨다.
- ☐ Potentiostat 측정용 계측기의 전극을 측정 cell 에 고정되어 있는 Ag/AgCl 판 전극 및 Ag/AgCl Luggin capillary 전극에 연결한다.
- ☐ 제조한 NaCl 0.5 mol/L 용액을 측정 cell 에 고정되어 있는 시험품과 Ag/AgCl 판 전극 및 Ag/AgCl Luggin capillary 전극이 잠기도록 투입한다.
- ☐ Potentiostat 측정 계측기와 소프트웨어 Smart Manager(SM) 로 전압 +100mV에서 전류를 측정하여, 시험품의 저항을 확인한다.
- ☐ 측정 cell 에 고정되어 있는 시험품을 제거하고, NaCl 0.5 mol/L 용액의 저항을 측정한다.

시험품	시험결과			
	측정저항	용액저항	막저항	면적비저항
양이온정류막 #1	13.194 Ω	6.275 Ω	6.937 Ω	1.873 Ω·cm ²
양이온정류막 #2	13.239 Ω		6.964 Ω	1.880 Ω·cm ²
양이온정류막 #3	14.322 Ω		8.047 Ω	2.173 Ω·cm ²
양이온정류막 평균				1.975 Ω·cm ²
음이온정류막 #1	14.484 Ω	6.275 Ω	8.209 Ω	2.216 Ω·cm ²
음이온정류막 #2	14.390 Ω		8.115 Ω	2.191 Ω·cm ²
음이온정류막 #3	15.371 Ω		9.096 Ω	2.456 Ω·cm ²
음이온정류막 평균				2.288 Ω·cm ²

[표 6] 양이온정류막, 음이온정류막의 이온전도도 평가 결과

2) 판정기준

- ☐ NaCl 0.5 mol/L 용액을 포함한 시험품의 저항값과, 시험품을 제거한 NaCl 0.5 mol/L 용액만 측정한 저항값을 기록한다.
- ☐ NaCl 0.5 mol/L 용액을 포함한 시험품 저항값과, 시험품을 제거한 용액 저항값의 차를 계산하여 막저항값을 산출하여 기록한다.
- ☐ 산출된 막저항값과 시험품의 유효면적[cm²]을 곱하여 면적비저항을 산출하여 기록한다.

※ 시험품 유효면적 : 0.27 cm²

3) 개발성과

- ☐ 양이온정류막은 평균 면적비저항이 $1.975 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 일반 상용이온교환막 저항 ($16.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$) 대비 낮은 저항(높은 이온전도도)를 나타냄
- ☐ 음이온정류막은 평균 면적비저항이 $2.288 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 일반 상용이온교환막 ($16.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$) 대비 낮은 저항(높은 이온전도도)를 나타냄

(다) 정류특성 : 양이온정류막 478.9743 / 음이온정류막 282.9072

1) 실험방법

- ☐ 측정 cell 중앙에 시험품을 고정시킨다.
- ☐ 측정 cell 양 끝단에 제작한 Ag/AgCl 판 전극을 고정시킨다.
- ☐ 제작한 Ag/AgCl Luggin capillary 전극의 끝부분을 시험품의 표면과 0.5 cm 이내의 거리에 위치시킨다.
- ☐ Potentiostat 측정용 계측기의 전극을 측정 cell 에 고정되어 있는 Ag/AgCl 판 전극 및 Ag/AgCl Luggin capillary 전극에 연결한다.
- ☐ 제조한 NaCl 0.01mol/L 용액을 측정 cell 에 고정되어 있는 시험품과 Ag/AgCl 판 전극 및 Ag/AgCl Luggin capillary 전극이 잠기도록 투입한다.
- ☐ Potentiostat 측정 계측기와 소프트웨어 Smart Manager(SM)로 전압 및 전류를 측정하여, +1 V 를 인가할 때 측정되는 전류와 -1 V 를 인가할 때 측정되는 전류를 확인하여 기록한다.

2) 판정기준

- ☐ +1 V 를 인가할 때 측정되는 전류와 -1 V 를 인가할 때 측정되는 전류를 확인하여 계산한다.
 - ※ 양이온 정류비 : +1 V 의 측정 전류 / -1 V 의 측정전류
 - ※ 음이온 정류비 : -1 V 의 측정 전류 / +1 V 의 측정전류

3) 개발성과

- ☐ 양이온정류막은 +1V일 때가 -1V일 때보다 평균 478.9743배의 더 빠른 이온전류가 측정되므로 양이온을 한 쪽 방향으로만 흐르게 할 수 있는 정류특성을 가지는 것을 확인함
- ☐ 음이온정류막은 -1V일 때가 +1V일 때보다 평균 282.9072배의 정류비로 더 빠른 이온전류가 측정되므로 음이온을 한 쪽 방향으로만 흐르게 할 수 있는 정류특성을 가지는 것을 확인함

시험품	시험결과		
	+1V 인가 시 측정전류	-1V 인가 시 측정전류	정류비 (절대값)
양이온정류막 #1	155.050 μ A	-1.072 μ A	144.6362
양이온정류막 #2	92.814 μ A	-0.129 μ A	719.4884
양이온정류막 #3	43.189 μ A	-0.0754 μ A	572.7984
양이온정류막 평균			478.9743
음이온정류막 #1	0.096 μ A	-10.272 μ A	107.2289
음이온정류막 #2	0.060 μ A	-20.743 μ A	344.0993
음이온정류막 #3	0.056 μ A	-43.741 μ A	782.2347
음이온정류막 #4	0.318 μ A	-21.155 μ A	66.6089
음이온정류막 #5	0.209 μ A	-32.126 μ A	114.3640
음이온정류막 평균			282.9072

[표 7] 양이온정류막, 음이온정류막 정류비 평가 결과

2.2.2. 양적 성과

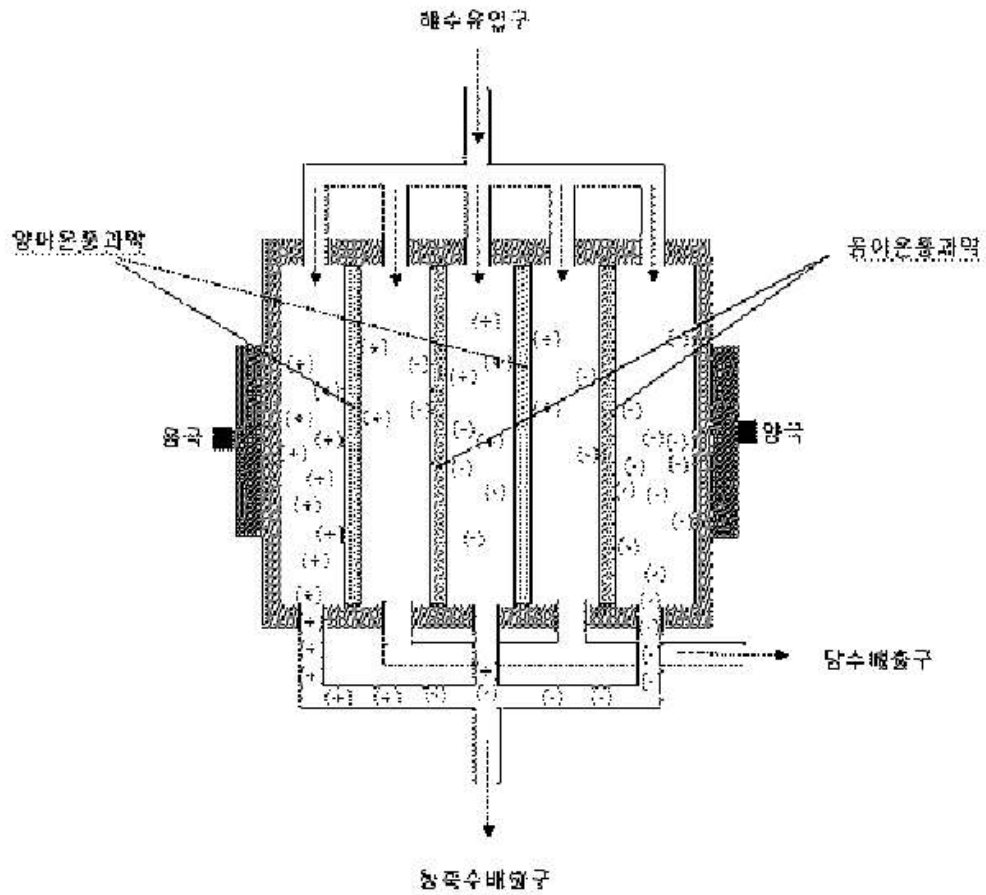
(가) 특허 출원 (출원번호 : 10-2018-0138367)

1) 발명의 명칭

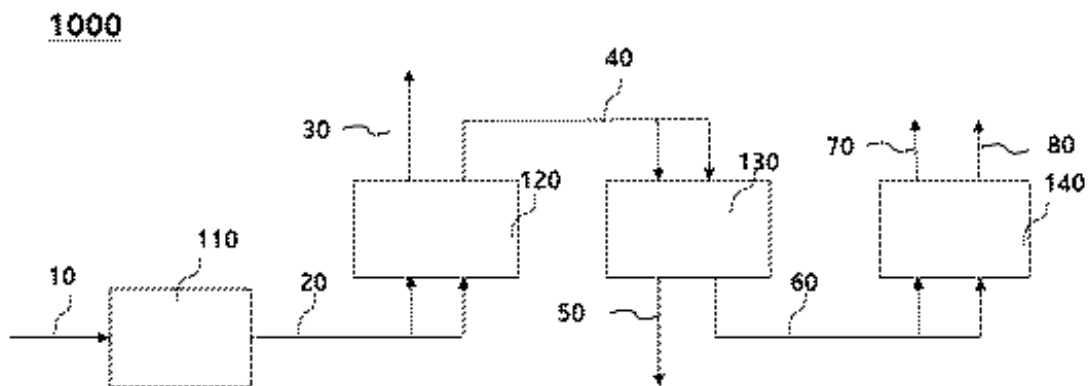
□ 다단 전기 투석법에 의한 해수 담수화 시스템 및 그에 따른 해수 담수화 방법

2) 요약

□ 해수가 유입되는 해수 유입부와 유입된 해수를 전처리하는 전처리 유닛; 상기 전처리된 해수를 공급받아 전기투석 방식으로 탈염을 수행하여 제1농축수와 1차 탈염수를 생성하는 1차 탈염유닛; 상기 1차 탈염수를 공급받아 전기투석 방식의 탈염을 수행하여 제1담수와 2차 탈염수를 생성하는 2차 탈염유닛; 상기 2차 탈염수를 공급받아 전기투석 방식으로 탈염을 수행하여 제2담수와 제2농축수를 생성하는 3차 탈염유닛으로 구성되는 다단 전기투석법을 이용한 해수 담수화 시스템에 관한 것이다. 전기투석법에 의한 다단 처리 유닛을 구성함으로써 처리 효율을 향상시키면서 안정적인 해수담수화 시스템을 제공한다.



[그림 40] 전기투석식 해수 담수화를 위한 탈염 유닛의 기본 구성을 나타내는 도면



[그림 41] 다단 전기투석법에 의한 해수 담수화 시스템의 공정도

(나) 시제품

1) 양이온정류막



[그림 42] 이동형 전기투석 장치용 양이온정류막 시제품 사진

2) 음이온정류막



[그림 43] 이동형 전기투석 장치용 음이온정류막 시제품 사진

3. 3차연도

3.1. 3차연도 연구내용

3.1.1. 이온 정류막 제조장치 재설계

- 개발 된 이온정류막 제조 장치를 이용하여 이온정류막을 대면적으로 제작 한 결과 작은 면적에서 제작 한 것에 비해서 다소 낮은 특성이 관찰
- 대면적 이온정류막의 균일도 저해 현상으로 대면적 샘플의 open circuit voltage는 작은 면적 샘플에 비해 <5% 정도 낮음.
- 결과적으로 <1% 정도 낮은 선택성을 보이며 전기투석 담수화에 적용하면 운전 전력을 높이는 결과를 초래
- 이는 표면 처리 코팅 공정, 양극산화 공정, bottom etching 공정 중에서 발생한 이온정류막 전체의 균일도 저하 문제에 의한 것으로 여겨짐
- 문제가 되는 장치를 다시 설계하고 제작하여 더욱 최적화된 이온정류막 제조 필요
- 양극산화 공정 및 에칭 공정 장비 (온도 제어 장치 및 와류식 교반시스템, 전기장 차폐 장치)의 교체 및 개조



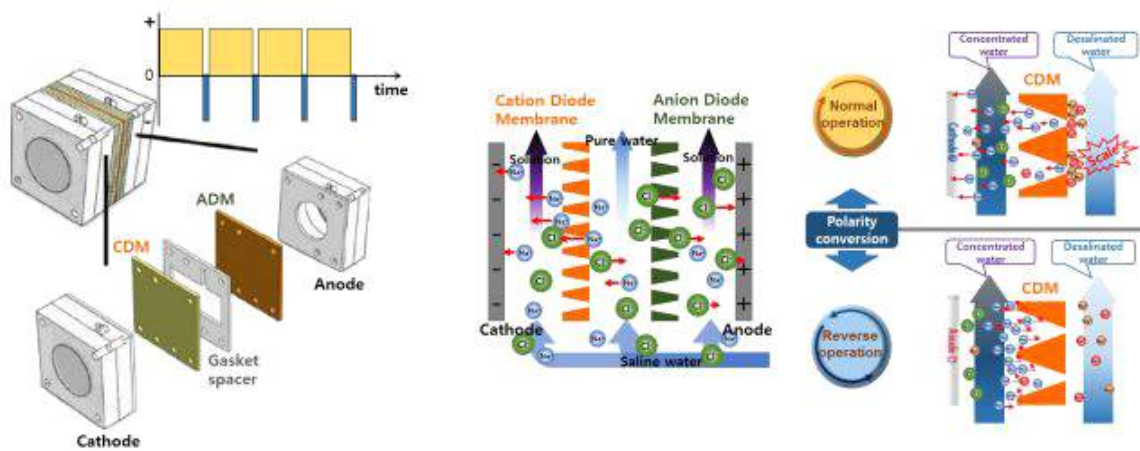
[그림 44] 재설계한 이온정류막 제조장치 사진

3.1.2. 전기투석에 따른 이온정류막 평가 및 최적화

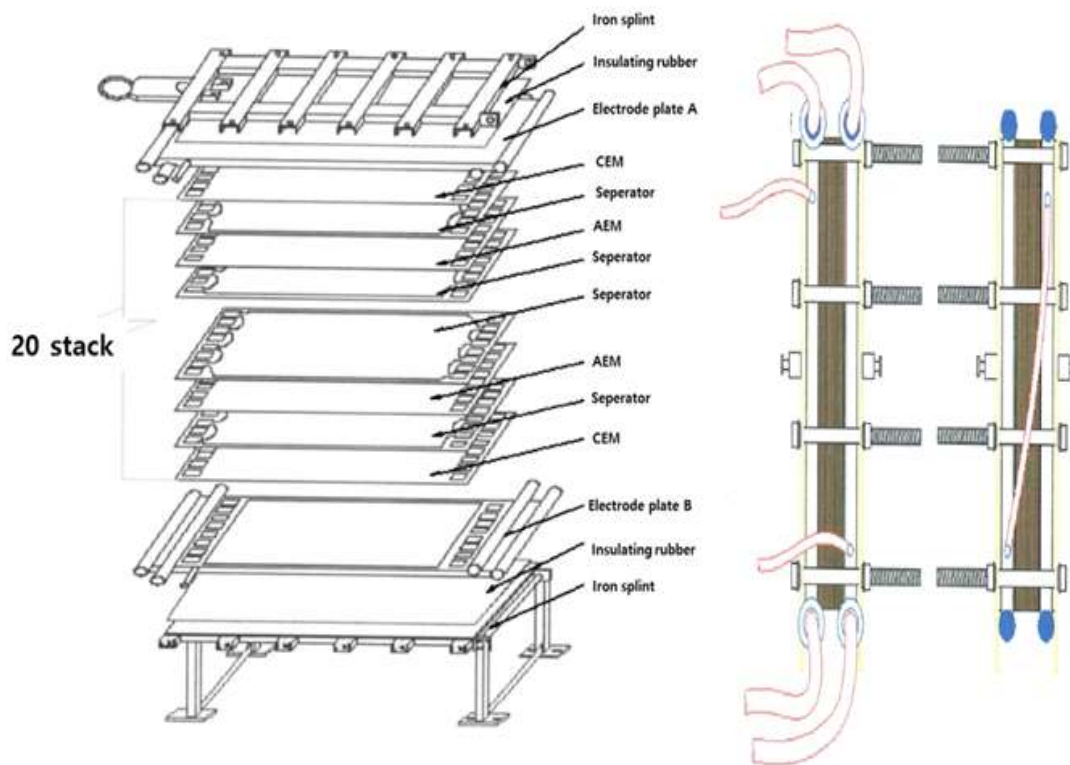
- 전기투석에 있어서 운전 중 장애를 발생시킬 수 있는 요소 중에는 용액 내 Ca^{2+} 와 SO_4^{2-} 이온의 농도가 고농도로 존재할 경우 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , CaSO_4 등과 같은 침전물이 막 표면에서 스케일을 형성하여 막기능을 저하시킬 수 있으며, scale 제거를 위해 역전극 운전 방식을 사용하며 polarity 변환의 주기를 조절하여 효율적인 담수화와 scale 제거가 동시에 일어나 저에너지의 해수 담수기술을 개발하도록 관찰과 실험 진행
- 전기투석의 담수화를 위한 연구는 초기에는 1 stage의 membrane stack을 이용하여 전기투석장치에 사용된 양이온정류막과 음이온정류막의 특성을 파악하고 장치운전의 최적화를 통한 안정화에 그 목표를 둔 실험을 진행
- 시뮬레이션을 통한 ED 스택 디자인 및 운전 조건 계산
- 추후 지속적으로 stages를 늘려가면서 membrane stack를 구성하여 여러 농도의 해수로부터의 다단 연속식의 탈염실험을 진행, 해수의 효율적 탈염을 위한 해수 농도에 따른 각 단계서의 전류밀도를 구하고 탈염 효율 관찰하며 진행

3.1.3. 안티 파울링 전기투석 스택 제작

- ED공정의 이온정류막은 전해질 용액에서 막 내부의 고정이온 (fixed ions) 의 작용에 의해 대응이온 (counter-ions) 의 선택투과성을 나타냄
- 탈염전기투석 공정은 염이 희석조로 유입되면 전위구배 아래에서 양이온은 양이온정류막을 통과해 음극쪽으로 이동하며, 음이온은 음이온정류막을 통과해 양극쪽으로 이동해 희석조 양 옆의 농축조로 이동하게 돼 탈염공정을 수행
- 양이온정류막과 음이온정류막 사이에는 유로를 형성시키기 위해 스페이서가 있는 개스킷을 배열하게 되고 액실을 구성
- Membrane size $200 \times 400 \text{ mm}^2$ 의 양이온정류막과 음이온정류막 20 cell pairs로 구성된 담수화 용 전기투석스택개발
- Effective membrane area: 1 m^2
- 일 처리용량: $1 \text{ m}^3/\text{day}$



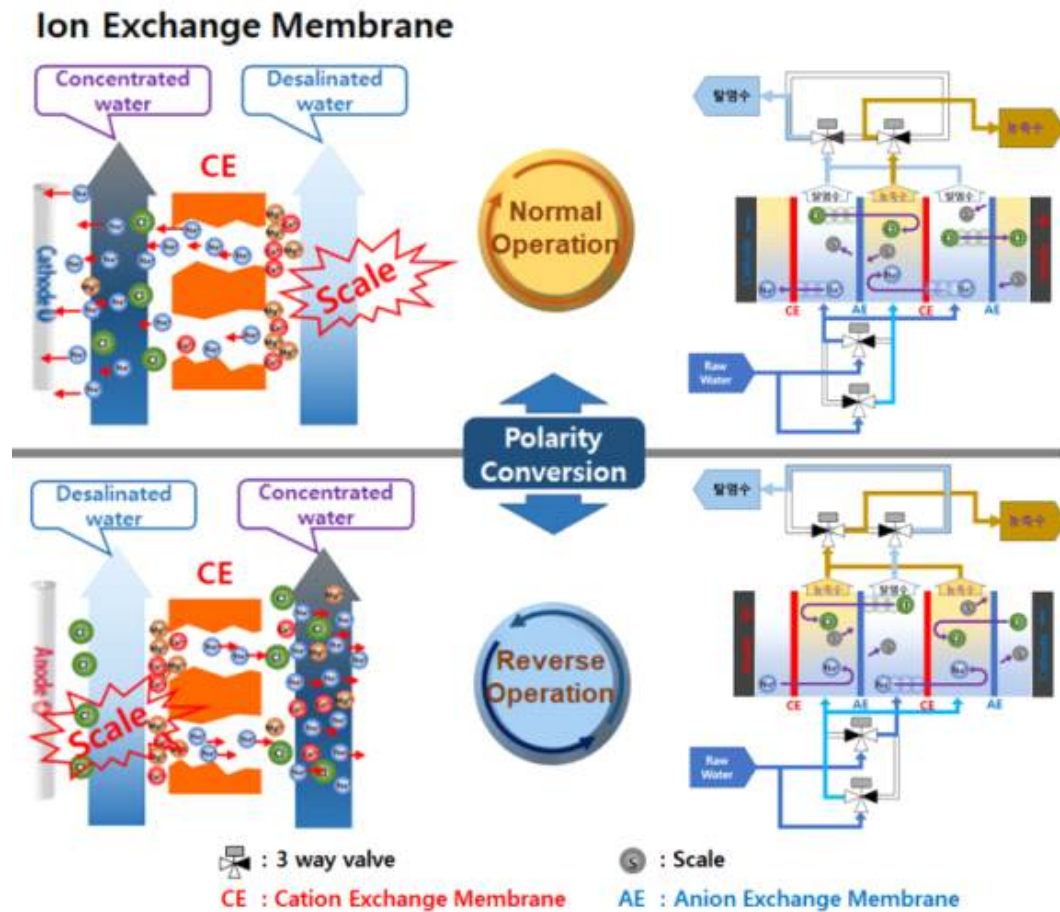
[그림 45] 이온정류막을 이용한 전기투석 stack의 모식도와 개념도



[그림 46] 전기투석 stack의 실제 제작 설계 도면

3.1.4. 소규모, 이동형 안티파울링 전기투석 설비 설계 및 개발

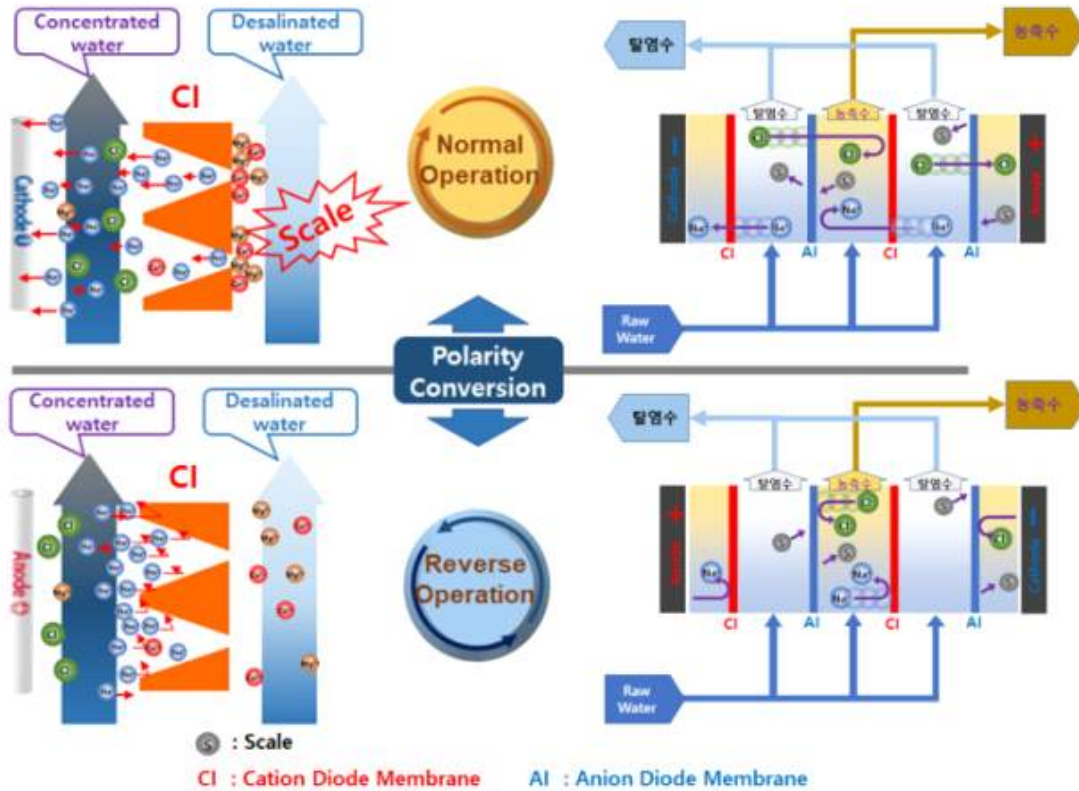
- 염수의 탈염을 위한 EDR설비의 구성은 크게 수류공정, membrane stack, 전원 공급장치로 구성
- 수류공정은 처리수, 농축수+양극처리수, 음극처리수의 3개의 기본 흐름에 의해 이루어지며, 각 흐름의 순환은 3개의 펌프에 의해 이루어짐. 각각의 펌프는 membrane stack에 구성되어 있는 수로를 통해 염분을 함유한 원수를 공급하게 되며, 전기투석장치로 유입되는 염수의 유량은 by-pass관을 사용해 조절
- 전기투석장치의 membrane stack은 filter-press type의 조립구조로 두 전극 사이에 단일의 양이온정류막과 spacer, 음이온정류막을 서로 교차시켜 모아놓은 블록장치
- 양이온교환막과 음이온교환막 사이에 위치하는 spacer가 하나의 cell을 형성하게 되고, 이 cell의 구성에 따라서 탈염실과 농축실이 교차적으로 형성되고, 각각의 cell은 밀폐되어있어 spacer에 의해 한 방향의 나선형 미로같은 통로를 이루며 원수흐름을 난류로 만들어 줌
- 전원공급설비는 극변환이 가능 한 직류전원 공급기를 사용하며 본사가 현재 보유한 장비는 200V, 100A의 제품으로 충분한 용량을 가짐
- EDR (Electrodialysis Reversal) 은 막의 오염을 줄이기 위해 전류의 방향을 주기적으로 바꾸는 양극전도 (polarity reversal) 을 이용한 공정으로 개발은 전기투석 발전에 중요한 계기가 됨
- EDR 공정은 Ionics Inc.에 의해서 개발되었으며, 이는 유로와 전기투석의 전위구배를 바꿈으로써 전기투석공정에 있어서 장애요인으로 작용했던 오염속도를 감소
- 기존 이온교환막을 이용한 EDR 공정은 역전압 걸어주면 기존 농축수 라인에는 탈염수가 흐르고, 탈염수 라인에는 농축수가 흐르기 때문에 3-way 밸브를 입구와 출구에 설치하여 흐름 방향을 바꾸어야하며 긴 배관을 요구하여 설비 비용의 증가와 소형화에 어려움이 있음 [그림 47]
- Polarity conversion 구간에서 기존 농축수로 분리해 놓은 있는 이온이 탈염수 쪽으로 흐르기 때문에 불필요한 에너지가 추가적으로 소모됨 [그림 47]



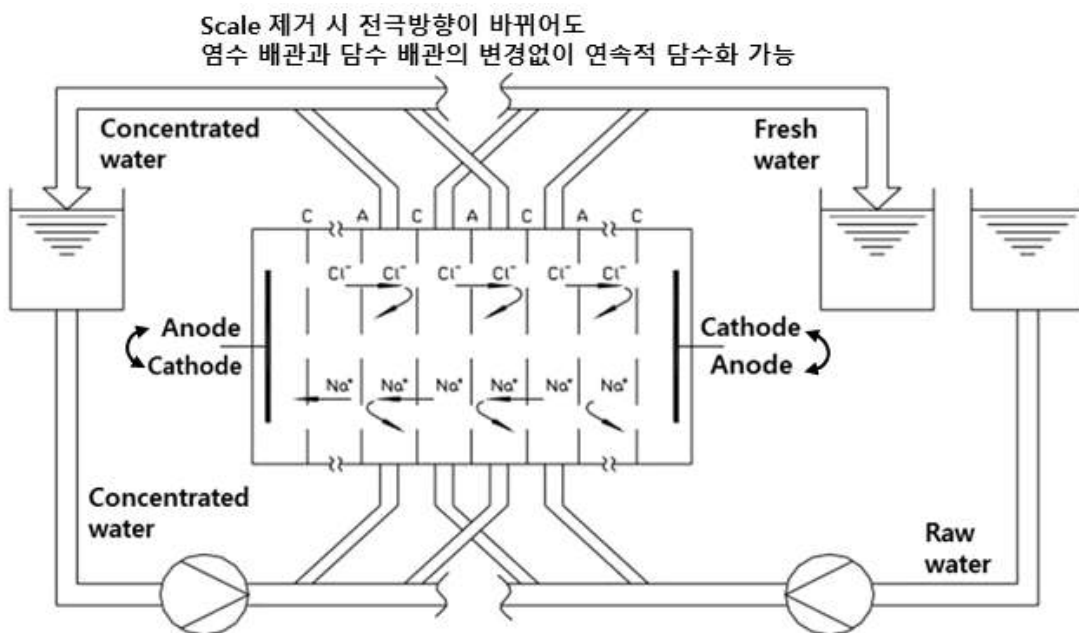
[그림 47] 일반 이온교환막을 이용한 EDR 공정에서의 문제점

- 이온정류막을 사용하면 역전압에서 기존 농축수 라인의 이온은 이온다이크로막에 의해서 탈염수 방향으로 이동할 수 없으며 멤브레인 표면에 오염 된 scale만을 효과적으로 제거할 수 있음 [그림 48]
- 농축수 라인과 탈염수 라인은 스케일 제거 중에도 바뀌지 않기 때문에 기존 EDR 공정처럼 흐름 방향을 바꿀 추가적인 배관 및 설비, 에너지가 불필요하여 효율적인 담수화가 가능하고 소형화에 유리함 [그림 48]

Ion Diode Membrane



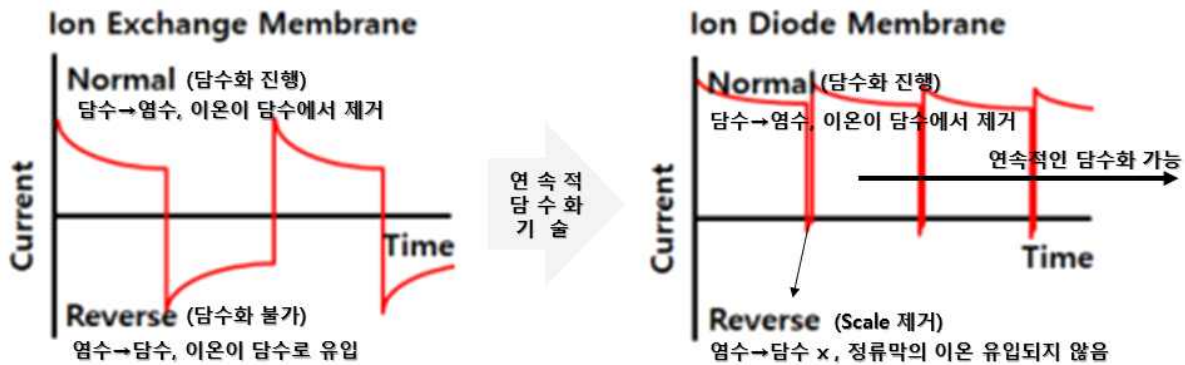
[그림 48] 이온정류막을 이용한 EDR공정에서 역전위 시 scale 문제 및 배관 문제 해결



[그림 49] 연속적 담수화가 가능한 전기투석 장치의 실제 배관 설계 도면

3.1.5. 연속적인 전기투석 설비 운전기술 개발

- [그림 50]는 기존 EDR 시스템과 이온정류막을 활용한 EDR 시스템의 운전 중 전류-시간 그래프 비교
- ED 공정에서 탈염 중에 스케일 형성으로 인하여 시간이 경과하면 전류량은 감소하며 역전압을 걸어 표면 스케일 제거
- 이온정류막을 활용하면 농축수의 오염 이온이 탈염수로 이동할 수 없기 때문에 짧은 시간 스케일만 제거하고 정상 전압으로 가동함. 이때 스케일만 제거되기 때문에 이온전류량은 극소량이며 에너지 소비가 최소화됨
- 이온교환막의 경우 농축수의 이온이 탈염수 방향으로 이동하기 때문에 스케일 제거 외의 추가적인 에너지 소모됨



[그림 50] 이온정류현상으로 연속적 담수화가 가능한 전기투석시스템의 운전 중 전류-시간 그래프 결과

3.2. 3차연도 연구개발 성과

- 핵심성과 : 소규모, 이동형, 안티파울링 전기투석 해수담수화 기술 개발

3.2.1. 질적 성과

(가) TDS(total dissolved solids) 변화율 1.4 % 이하 (안티파울링 성능 확인)

1) 실험방법

- TDS(total dissolved solids)란 총용존고형물질 이라는 뜻, 용액내 용해된 고형물의 총 농도는 용액내에서 전하를 운반할 수 있는 정도를 의미하는 전기전도도값에 비례관계를 가지므로

전기전도도 값을 측정하여 conversion factor의 설정에 따라 TDS 값을 계산

- 담수화장치에 의해 생산된 담수는 TDS가 낮은 값을 유지하여야 함, 그러나 파울링이 발생하면 담수화 장치의 성능저하로 생산된 담수의 TDS가 증가하는 현상이 발생, 따라서 TDS의 변화율(증가율)을 통해 파울링 효과를 확인할 수 있음
- TDS 변화율은 전기투석 담수화 장치의 운전 1일차 생산한 담수(ED-1D)와 14일 후에 생산한 담수(ED-14D) 각각 원수(ED-0) 기준 잔류 TDS 비율을 계산하고 ED-14D의 잔류 TDS 비율과 ED-1D의 잔류 TDS 비율의 차를 통해 변화율 계산

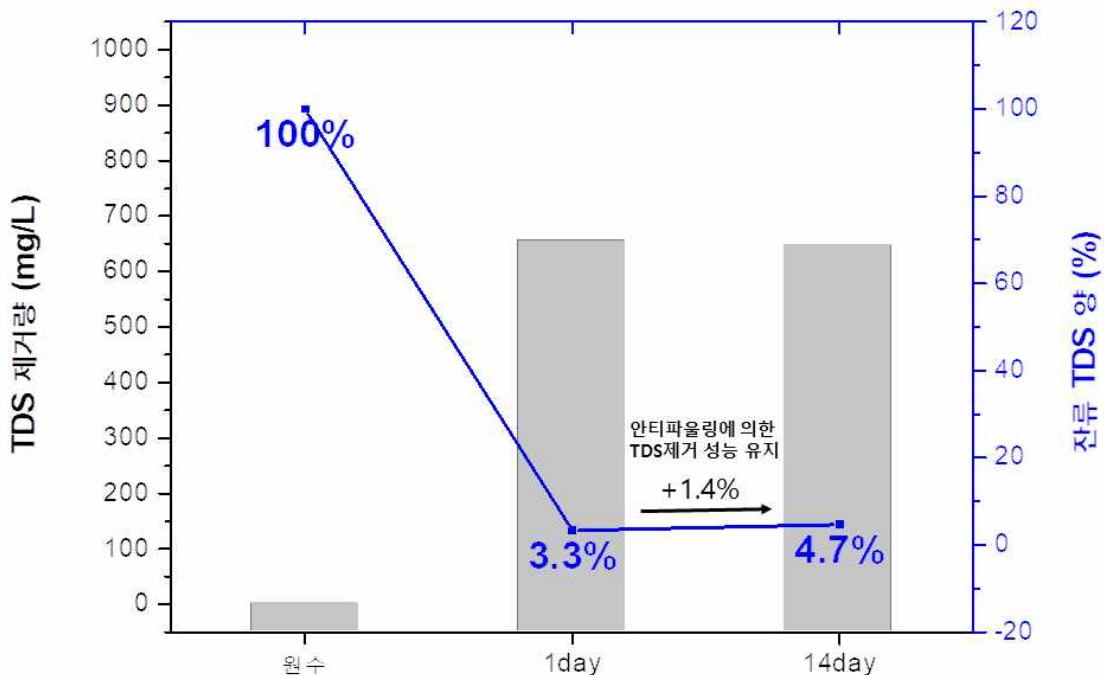
2) 판정기준

- TDS 변화율은 아래의 식을 통해 산출

$$\left\{ \left(\frac{ED-1D의\ TDS}{ED-0의\ TDS} \right) \times 100 \right\} - \left\{ \left(\frac{ED-14D의\ TDS}{ED-0의\ TDS} \right) \times 100 \right\}$$

ED-0의 TDS (mg/L)	ED-1D		ED-14D		TDS 변화율
	TDS (mg/L)	잔류 TDS (%)	TDS (mg/L)	잔류 TDS (%)	
678	22.3	3.3	31.9	4.7	1.4

[표 11] 이동형 전기투석 장치의 1일차 담수와 14일차 담수의 TDS 변화율 결과



[그림 53] 안티파울링에 의한 TDS제거 성능 유지(낮은 TDS 변화율)

3) 개발성과

- ED-1D의 잔류 TDS 비율은 3.3 % 이고, ED-14D의 잔류 TDS 비율은 4.7 % 이므로 약 1.4 % 증가함
- 기존 전기투석 담수화 기술은 담수화 과정에서 용액 내 Ca^{2+} 와 SO_4^{2-} 이온의 농도가 고농도로 존재할 경우 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , CaSO_4 등과 같은 침전물이 막 표면에서 스케일을 형성하여 TDS가 증가하지만 개발된 전기투석 담수화 장치는 14일 간 TDS 변화율이 1.4 % 밖에 되지 않으므로 우수한 안티파울링 성능을 확인함

(나) 에너지효율 0.38 KWh/m^3

1) 실험방법

- 1000mg/L 원수를 0.05%의 담수로 만드는데 사용한 단위 부피당 전력량
- 실험에 사용한 실험 1000mg/L 원수(ED-0)와 1시간 동안 생산한 담수(ED-1H)의 성분을 분석하여 0.05%의 담수가 생산되는지 확인
- 1시간 동안 전기투석 장치로 담수를 생산하면서 전압 및 누적전류를 측정하고 전력량 계산



[그림 54] 소비전력 측정 장면

2) 판정기준

- 1시간 동안 전기투석 장치의 사용 전력량(KWh)을 1시간 동안 생산한 담수생산량으로 나누어 단위 부피(1m^3)당 전력량으로 에너지효율(KWh/m^3)을 계산

1시간 소비전력 (Wh)	1시간 생산 담수 부피 (m ³)	에너지 효율 (KWh/m ³)
16.875	0.044	0.38

[표 12] 이동형 전기투석 장치의 소비전력 결과

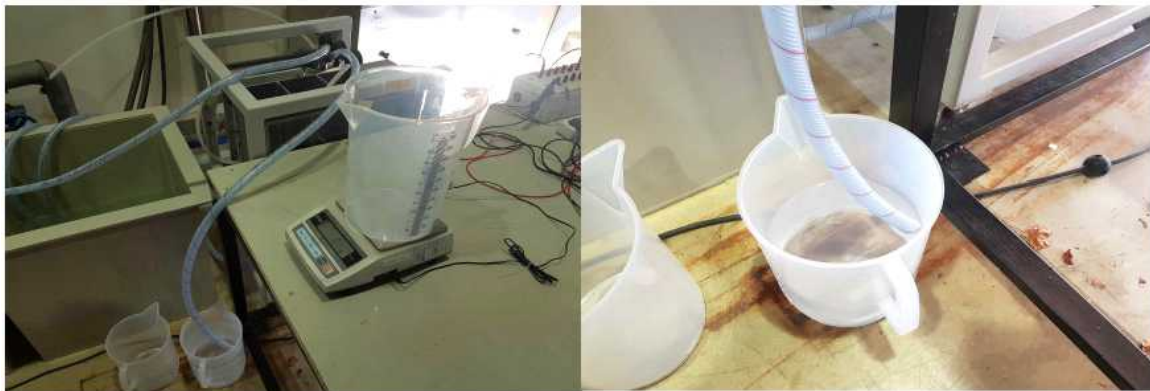
3) 개발성과

- 원수(ED-0)의 증발잔류물은 1120 mg/L 이며 1시간 동안 담수(ED-1H)의 증발잔류물은 92 mg/L 이므로 약 0.01% 임을 확인함
- 1시간 동안 담수생산무게는 44.25 kg 이며 부피로 환산하면 약 0.044 m³ 이고, 이때 소비된 전력은 16.875 Wh 이므로 약 0.38 KWh/m³ 임
- 전기투석 담수화에 필요한 전력 중 막의 저항에 의한 손실이며 개발된 전기투석 장치는 낮은 저항을 갖는 이온정류막을 이용하여 낮은 에너지효율 달성이 가능함

(다) 염분제거율 0.98

1) 실험방법

- 전기투석 담수화 전 원수(ED-0)와 전기투석 후 1일차 담수(ED-1D)의 염분을 증발잔류물 값으로 구함
- 증발잔류량 : 시료를 일정한 온도에서 증발 건조시켰을 때 잔류물의 양을 의미하며 이는 시료 중에 용해되어 있거나 현탁되어 있는 물질의 총 합을 의미
 - (1) 시료군마다 1개의 방법바탕시료(Method blank)를 측정, 방법바탕시료는 정제수를 사용하여 아래의 실험절차와 동일하게 전처리·측정하며 그 값이 영에 가까워야 함
 - (2) 증발접시를 103~105℃에서 1시간 건조하고 데시케이터에서 식힌 후 사용하기 직전에 무게를 측정
 - (3) 시료 100~500mL(건조중량이 10~200mg이 되도록 시료를 취함)를 증발접시에 넣고 103~105℃의 증기건조대 또는 오븐에서 완전 건조
 - (4) 시료가 끓어 튀어나갈 염려가 있을 때에는 끓는 온도 이하(보통 98℃)로 온도를 유지하도록 하여도 되나 103~105℃의 온도에서 적어도 1시간은 증발건조 시켜야함
 - (5) 건조한 시료는 데시케이터에서 식힌 후 무게를 달아 증발접시의 무게차를 구함



[그림 55] 염분제거율 평가를 위한 시료 취수 모습

ED-0의 증발잔류물 (mg/L)	ED-1D의 증발잔류물 (mg/L)	염분제거율 (%)
1120	24	97.86

[표 13] 염분제거율 평가 결과

2) 판정기준

□ 염분제거율은 아래의 수식을 통해 계산

$$\frac{(ED-0 \text{의 증발잔류물}) - (ED-1D \text{의 증발잔류물})}{ED-0 \text{의 증발잔류물}}$$

3) 개발성과

- ED-0의 증발잔류물은 1120 mg/L 이며, ED-1D의 증발잔류물은 24 mg/L 이므로 위 수식에 의해 97.86 % 의 염분이 제거되었음을 확인할 수 있음
- 높은 염분제거율을 나타내는 이유는 개발된 전기투석 장치에 사용한 양이온정류막과 음이온정류막이 각각 높은 양이온선택성 및 음이온선택성을 갖고 있기 때문임

(라) 담수생산량 1062 L/day

1) 실험방법

- 1일 담수생산량을 구하기 위해 1시간 동안 전기투석 장치를 통해 나오는 담수의 양을 측정하여 24시간으로 환산함

- 한국산업기술시험원에 방문시험을 의뢰하였으며, 해당 조건에서 정확한 담수생산량의 부피를 측정할 수 있는 유량계 또는 대용량의 부피측정기구가 없으므로 교정받은 전자저울을 이용하여 무게를 측정하고 시험성적서를 제출
- 저울의 측정 무게 한계 때문에 5kg 이하 마다 측정하여 무게 합산



[그림 56] 담수 용액 무게 측정 장면

2) 판정기준

- 물의 밀도는 1 kg/L 이므로, 염분 등 불순물이 적은 생산된 담수의 밀도도 물과 동일한 것으로 간주하고 측정한 무게를 통해 1시간 담수생산량(L/h)을 계산하고 24를 곱하여 1일 담수생산량(L/day)으로 환산

$$\begin{aligned} \text{시간당 담수생산측정무게(kg/h)} \div \text{밀도(kg/L)} &= \text{시간당담수생산량(L/h)} \\ \text{시간당담수생산량(L/h)} \times 24(\text{h/day}) &= \text{1일 담수생산량(L/day)} \end{aligned}$$

1시간 생산된 담수 무게 측정 결과 (g)					
1	4863.1	2	3715.9	3	3765.5
4	3905.9	5	3747.4	6	3905.4
7	3937.9	8	3961.9	9	3898.2
10	4161.7	11	4388.0	합계 (kg)	44.25

[표 14] 담수생산량 무게 측정 결과

3) 개발성과

- ☐ 시간당 담수생산측정무게는 44.25 kg 이며, 부피로 환산한 시간당 담수생산량은 44.25 L/h 이고, 24시간을 곱하여 구한 1일 담수생산량은 1062 L/day 임
- ☐ 차량에 장착 가능한 소규모의 전기투석 장치를 제작하여 1일 담수생산량이 약 1000 L/day의 규모로 제작되었으므로 담수가 필요한 지역에 직접 이동하여 담수공급이 가능함

(마) 담수 수질 먹는물 수질 기준치 만족

- ☐ 증발잔류량 24 mg/L (기준치 : < 500 mg/L)
- ☐ 과망간산칼륨소비량 2.2 mg/L (기준치 : < 10 mg/L)
- ☐ 수소이온농도 6.7 pH (기준치 : 5.8~8.5 pH)
- ☐ 염소이온농도 13.7 mg/L (기준치 : < 250 mg/L)
- ☐ 황산이온농도 4 mg/L (기준치 : < 200 mg/L)

1) 측정 방법 및 객관성

- ☐ 전기투석 담수장치에서 1일 차 생산한 담수를 1L이상 채취하여 증발잔류량, 과망간산칼륨소비량, 수소이온농도, 염소이온농도, 황산이온농도의 각 항목에 따라 아래의 방법으로 수질 분석함
- ☐ **증발잔류량** : 시료를 일정한 온도에서 증발 건조시켰을 때 잔류물의 양을 의미하며 이는 시료 중에 용해되어 있거나 현탁되어 있는 물질의 총 합을 의미
 - (1) 시료군마다 1개의 방법바탕시료(Method blank)를 측정, 방법바탕시료는 정제수를 사용하여 아래의 실험절차와 동일하게 전처리·측정하며 그 값이 영에 가까워야 함
 - (2) 증발접시를 103~105°C에서 1시간 건조하고 데시케이터에서 식힌 후 사용하기 직전에 무게를 측정
 - (3) 시료 100~500mL(건조중량이 10~200mg이 되도록 시료를 취함)를 증발접시에 넣고 103~105°C의 증기건조대 또는 오븐에서 완전 건조
 - (4) 시료가 끓어 튀어나갈 염려가 있을 때에는 끓는 온도 이하(보통 98°C)로 온도를 유지하도록 하여도 되나 103~105°C의 온도에서 적어도 1시간은 증발건조 시켜야함
 - (5) 건조한 시료는 데시케이터에서 식힌 후 무게를 달아 증발접시의 무게차를 구한
- ☐ **과망간산칼륨소비량** : 과망간산칼륨소비량은 먹는물 중의 산화성물질에 의하여 소비되는 과망간산칼륨의 양을 말하며 유기물질, 제철철염, 아질산염, 황화물 등이 과망간산칼륨을 소비
 - (1) 시료군마다 1개의 방법바탕시료(method blank)를 측정, 방법바탕시료는 정제수를 사용

하여 아래의 실험절차와 동일하게 전처리.측정함

(2) 수개의 끓임쪽을 넣은 삼각플라스크에 시료 100 mL를 넣음

(3) 황산(1 + 2) 5 mL와 과망간산칼륨용액(0.002 M) 10 mL를 넣어 5분간 끓임

(4) 옥살산나트륨용액(0.005 M) 10 mL를 넣어 탈색을 확인한 다음 곧 과망간산칼륨용액(0.002 M)으로 옅은 홍색이 없어지지 않고 남을 때까지 적정

(5) 소비된 과망간산칼륨용액(0.002 M)의 부피를 구함

- **수소이온농도** : pH는 보통 유리전극과 비교전극으로 된 pH 측정기를 사용하여 측정하는데 양전극간에 생성되는 기전력의 차를 이용하여 다음과 같은 식으로 정의

$$pH_x = pH_s \pm F (E_x - E_s) / 2.303 RT$$

pH_x : 시료의 pH 측정값 / pH_s : 표준용액의 pH(-log [H⁺]) / E_x : 시료에서의 유리전극과 비교전극간의 전위차(mV) / E_s : 표준용액에서의 유리전극과 비교전극간의 전위차(mV) / F : 패러데이(Faraday) 정수(9.649 × 10⁴ C/mol) / R : 기체정수(8.314 J/K · mol) / T : 절대 온도(K)

(1) 유리전극은 사용하기 수 시간 전에 정제수에 담가 두어야 하고, pH 측정기는 전원을 켜 다음 5분 이상 경과한 후에 사용

(2) 유리전극을 정제수로 잘 씻고 남아있는 물을 여과지 등으로 조심하여 닦아낸 다음 시료에 담가 측정값을 읽음, 이때 온도를 함께 측정, 측정값이 0.1 이하 의 pH 차이를 보일 때까지 반복 측정

(3) 시료는 유리전극이 충분히 잠기고 자석 교반기가 투명하게 보일 수 있을 정도로 사용

- **염소이온농도** : 염소이온은 천연적으로 광석 등에서 생성되기도 하나 염분이나 염산 등이 오염되어 발생, 이온크로마토그래프를 이용하여 분석

(1) 시료를 0.2 μm 막 여과지를 통과시켜 고체미립자를 제거

(2) 음이온 교환 컬럼을 통과시켜 각 음이온들을 분리

(3) 전기전도도 검출기로 측정

- **황산이온농도** : 황산이온은 천연적광석 등에서 생성되기도 하나 오염물질인 유기황 화합물이 산화되거나 황산이 오염되어 생성, 이온크로마토그래프를 이용하여 분석

(1) 시료를 0.2 μm 막 여과지를 통과시켜 고체미립자를 제거

(2) 음이온 교환 컬럼을 통과시켜 각 음이온들을 분리

(3) 전기전도도 검출기로 측정

1일 차 생산한 담수의 수질 분석 결과	
증발잔류물	24mg/L
과망간산칼륨 소비량	2.2mg/L
수소이온농도	6.7 pH
염소이온	13.7mg/L
황산이온	4mg/L

[표 15] 1일 차 생산한 담수의 수질 분석 결과

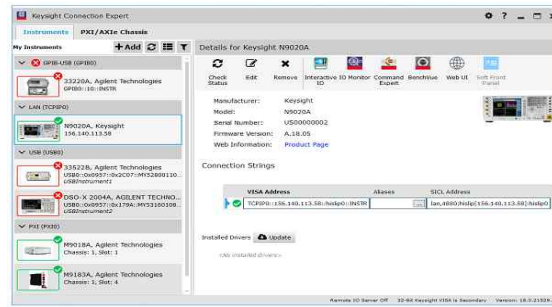
2) 개발 성과

- ☐ 증발잔류량, 과망간산칼륨소비량, 수소이온농도, 염소이온농도, 황산이온농도 항목의 수질분석 결과모든 항목에서 먹는물 수질 기준치를 만족함

3.2.2. 양적 성과

(가) 소프트웨어 (저작권 등록번호 : 제 C-2019-033813 호)

- ☐ 저작물의 명칭 : powerSupplier-master
- ☐ 내용 : 대면적 비대칭 사파이어 제조 공정 시 제조 공정 전압 조건에 따라 전압을 인가하는 파워서플라이에 원하는 멤브레인 구조의 제조 공정 조건을 전송하는 공정제어용 소프트웨어, 제조 공정 조건을 엑셀에 입력하면 본 소프트웨어를 통해 파워서플라이를 구동하는 프로그램에 자동으로 공정조건을 입력하여 다양한 조건에서 대면적 비대칭 사파이어 제조가 가능하도록 돕는다.

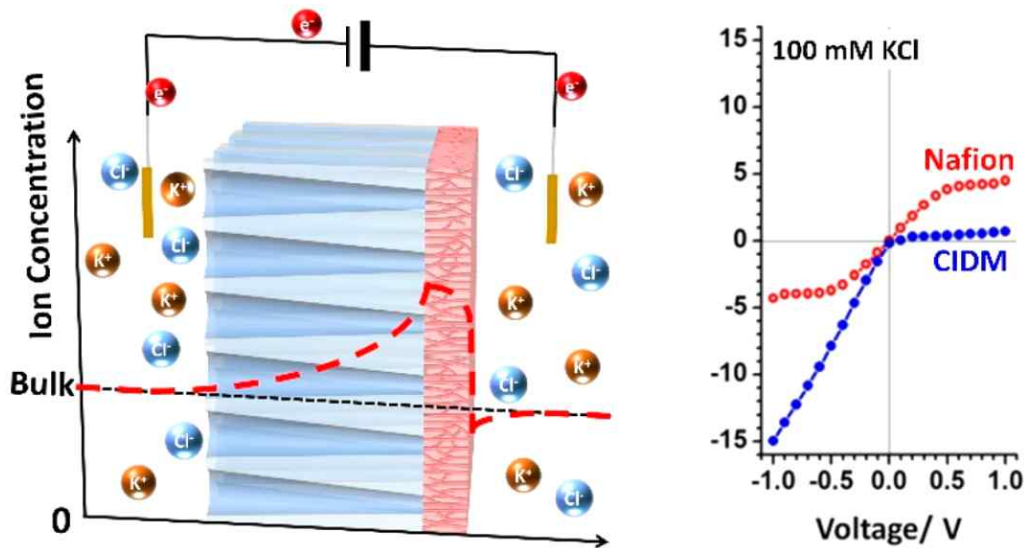


#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	전압 Data	전류 Data	공정전압 V	공정시간 (sec)	상대속도 계수	실제 속도 (mm/min)	길이 (mm)	과재량 (mm)	조기 직경 (mm)	최소외경직 (mm)	최대외경직 (mm)	Area/Volume (single pore S)	Area/Volume (단위부피 S)	Porosity (%)	pore 개수 (/cm ²)	Distance from bottom (mm)	Q%
2	60	46.19	60.00	18,219.96	14.43	181.12	55,000.00	150.00	49.61	51.00	53.92	1.00	1.00	11.72	5.13E+09	60,000.00	7%
3	79	39.61	59.00	30.86	14.05	176.43	90.74	147.50	48.98	50.22	50.23	1.07	1.11	10.52	5.31E+09	5,000.00	7%
4	78	35.75	58.00	32.03	13.54	170.00	90.74	145.00	48.15	49.39	49.39	1.09	1.17	10.52	5.49E+09	4,909.26	7%
5	77	33.03	57.00	33.55	12.99	162.29	90.74	142.50	47.32	48.55	48.56	1.11	1.23	10.53	5.69E+09	4,818.52	7%
6	76	31.00	56.00	35.33	12.27	154.11	90.74	140.00	46.49	47.72	47.72	1.13	1.30	10.54	5.89E+09	4,727.78	7%
7	75	29.17	55.00	36.83	11.77	147.84	90.74	137.50	45.66	46.88	46.89	1.15	1.37	10.55	6.11E+09	4,637.04	7%
8	74	27.85	54.00	38.61	11.28	141.00	90.74	135.00	44.83	46.04	46.05	1.17	1.45	10.55	6.34E+09	4,546.30	7%
9	73	26.26	53.00	40.39	10.74	134.81	90.74	132.50	44.00	45.21	45.21	1.19	1.53	10.56	6.56E+09	4,455.56	7%
10	72	24.93	52.00	42.44	10.22	128.29	90.74	130.00	43.17	44.37	44.38	1.22	1.62	10.57	6.83E+09	4,364.81	7%
11	71	23.54	51.00	44.53	9.74	122.26	90.74	127.50	42.34	43.53	43.54	1.24	1.71	10.58	7.10E+09	4,274.07	7%
12	70	22.52	50.00	46.27	8.96	112.80	90.74	125.00	41.51	42.70	42.70	1.26	1.82	10.58	7.39E+09	4,183.33	7%
13	69	21.56	49.00	48.95	8.86	111.21	90.74	122.50	40.68	41.86	41.87	1.29	1.93	10.59	7.69E+09	4,092.59	7%
14	68	20.61	48.00	51.15	8.48	106.45	90.74	120.00	39.85	41.02	41.03	1.31	2.05	10.60	8.02E+09	4,001.85	7%
15	67	19.69	47.00	44.80	8.66	121.54	90.74	117.50	39.02	40.18	40.19	1.34	2.19	10.61	8.36E+09	3,911.11	7%
16	66	18.84	46.00	48.27	8.98	112.80	90.74	115.00	38.19	39.35	39.35	1.37	2.33	10.62	8.73E+09	3,820.37	7%
17	65	18.11	45.00	50.96	8.51	106.84	90.74	112.50	37.36	38.51	38.52	1.40	2.49	10.63	9.12E+09	3,729.63	7%
18	64	17.47	44.00	54.31	7.99	100.25	90.74	110.00	36.53	37.67	37.68	1.43	2.66	10.64	9.54E+09	3,638.89	7%
19	63	16.70	43.00	56.13	7.73	96.99	90.74	107.50	35.70	36.83	36.84	1.46	2.85	10.65	9.99E+09	3,548.15	7%
20	62	15.96	42.00	60.17	7.21	90.48	90.74	105.00	34.87	35.99	36.00	1.50	3.06	10.66	1.05E+10	3,457.41	7%
21	61	15.28	41.00	62.53	6.93	87.06	90.74	102.50	34.04	35.15	35.16	1.53	3.28	10.67	1.10E+10	3,366.67	7%
22	60	14.43	40.00	64.05	6.77	85.00	90.74	100.00	33.21	34.31	34.32	1.57	3.54	10.68	1.15E+10	3,275.93	7%
23	59	14.05	39.00	67.52	6.42	80.63	90.74	97.50	32.38	33.47	33.48	1.61	3.81	10.69	1.21E+10	3,185.19	7%
24	58	13.54	38.00	70.23	6.17	77.52	90.74	95.00	31.55	32.63	32.64	1.65	4.12	10.70	1.28E+10	3,094.44	7%
25	57	12.43	37.00	74.48	5.60	78.10	90.74	92.50	30.72	31.79	31.80	1.70	4.46	10.72	1.36E+10	3,003.70	7%

[그림 57] 대면적 비대칭 사파이어 제조 공정 제어 소프트웨어 작동모습

(나) 논문 (ACS Nano 2019, 13(9), 10761-10767)

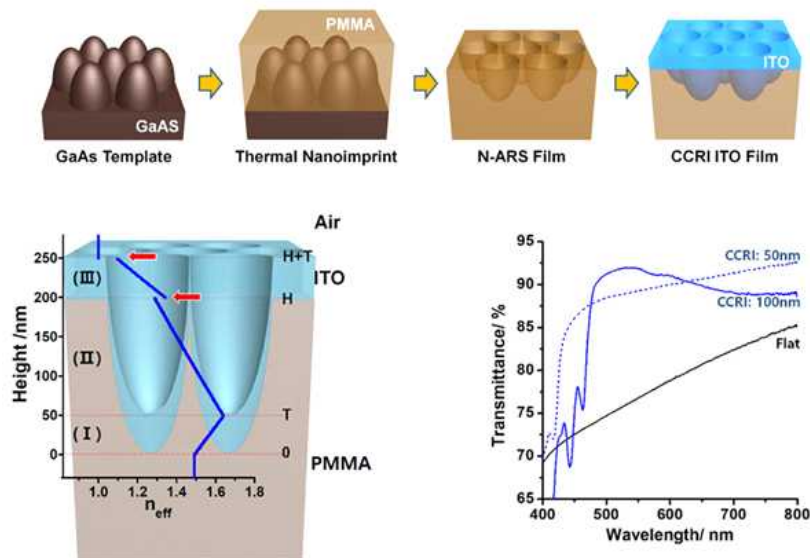
□ 논문 제목 : Multi-Asymmetric Ion-Diode Membranes with Superior Selectivity and Zero Concentration Polarization Effect



[그림 58] 논문 대표 결과 이미지

(다) 논문 (Micromachines 2020, 11, 206)

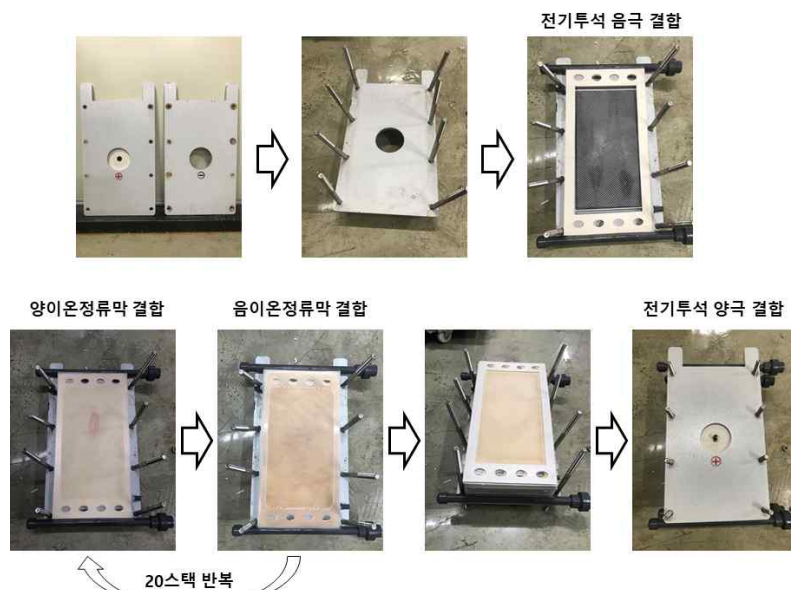
□ 논문 제목 : Antireflective Transparent Conductive Oxide Film Based on a Tapered Porous Nanostructure



[그림 59] 논문 대표 결과 이미지

(라) 시제품

□ 이동형 안티파울링 전기투석 담수화 장치



[그림 60] 양이온정류막, 음이온정류막을 이용한 이동형 전기투석 장치용 스택의 실제 결합 모습



[그림 61] 전기투석 장치의 각 구성 모습, (좌) 전기투석 스택, (중앙) 전기투석 시스템, (우) 유량계 및 펌프



[그림 62] 차량에 탑재하여 이동형 전기투석 담수화 장치를 완성한 모습

3.2.3. 연구개발 성과의 우수성

(가) 핵심성과 요약 : 소규모, 이동형, 안티파울링 전기투석 해수담수화 기술 개발

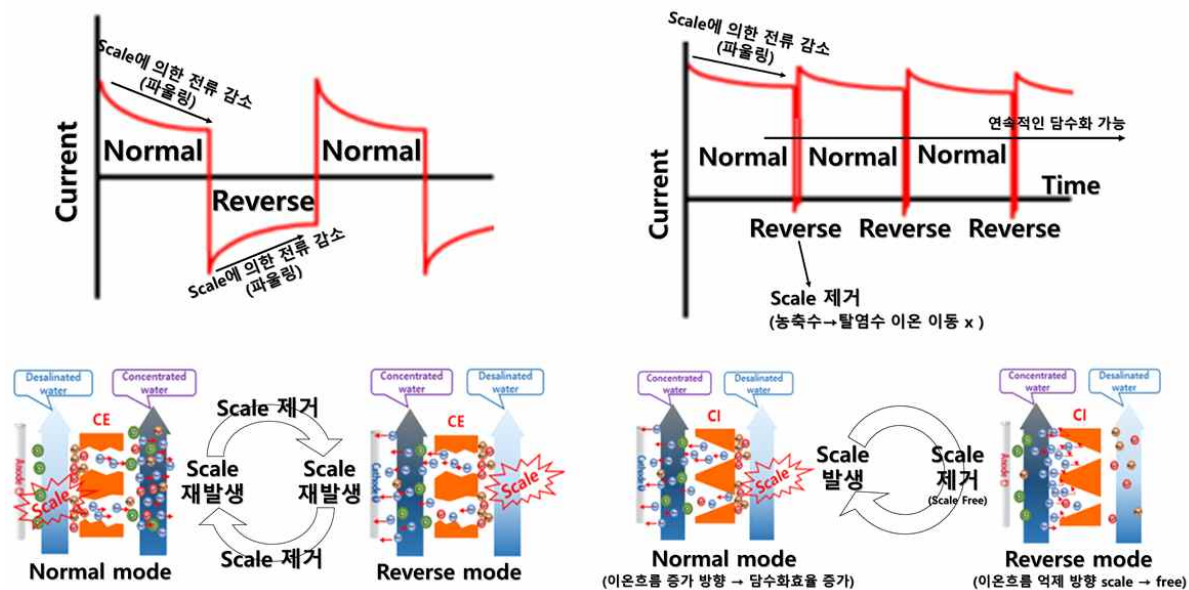
- 이온정류막을 이용한 전기투석은 이온정류막의 정류특성으로 인하여 역전극에서도 desalination water 방향으로 제거 된 이온이 이동하지 않기 때문에 scale 제거와 동시에 desalination water를 생산이 가능하여 소형으로 효율적인 담수화가 가능하며, Astom사의 EDR 기술 보다 적은 설비, 운전 비용으로 담수화가 가능
- 기존 전기투석 담수화 기술은 담수화 과정에서 용액 내 Ca^{2+} 와 SO_4^{2-} 이온의 농도가 고 농도로 존재할 경우 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , CaSO_4 등과 같은 침전물이 막 표면에서 스케일을 형성하여 TDS가 증가하지만 개발된 전기투석 담수화 장치는 14일 간 TDS 변화율이 1.4 % 밖에 되지 않으므로 우수한 안티파울링 성능을 확인함

(나) 경쟁기술 EDR의 파울링 제거

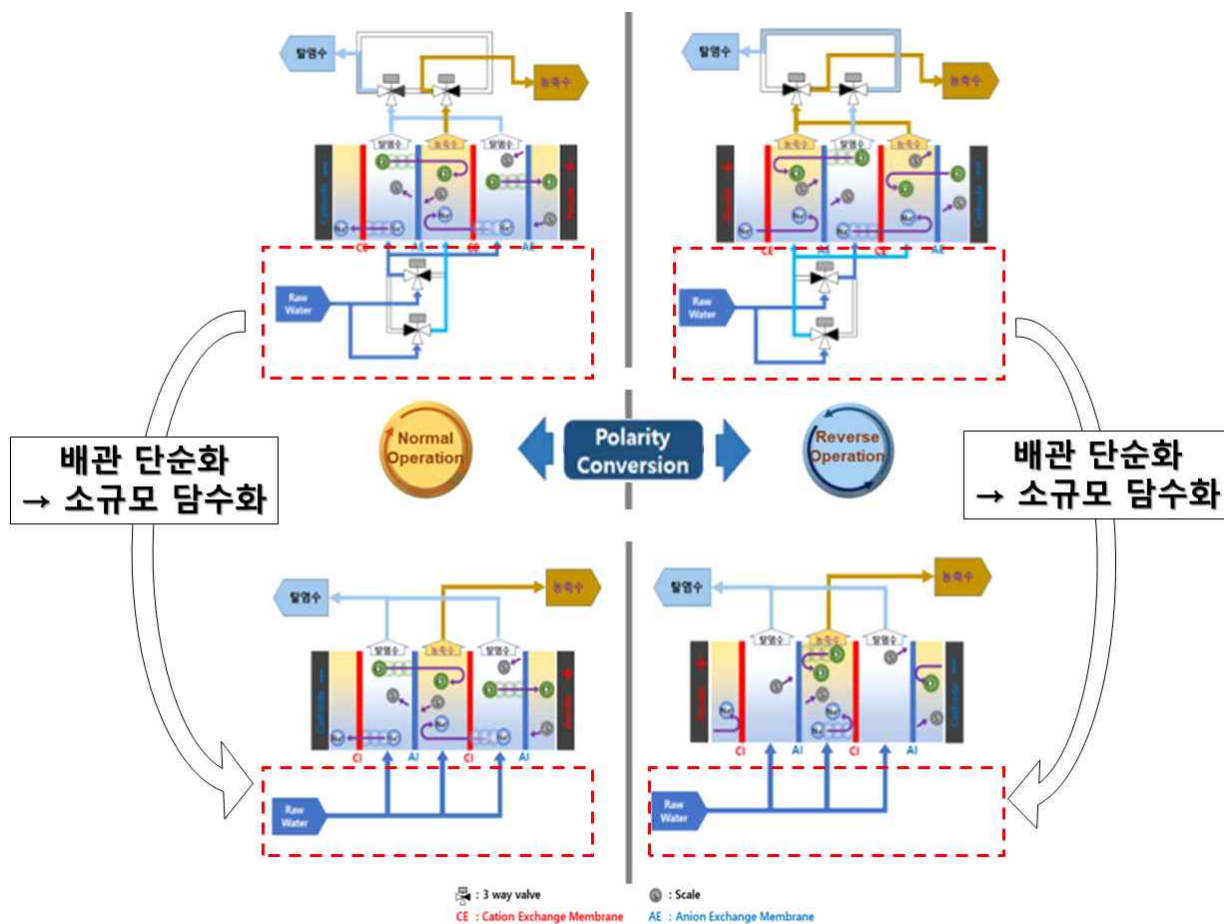
- 전기투석 공정은 담수화비용을 높이는 주된 원인으로 지적되왔던 막의 오염을 효과적으로 줄이기 위해 전기장의 방향을 주기적으로 바꿔주는 Electrodialysis Reversal(EDR)공정이 Ionics에 의해 개발됨
- 하지만 해수담수분야에서 역삼투법에 비해 여전히 높은 에너지비용을 보였고, 현재는 역삼투법에 비해 비용적인 측면에서 우위를 보이는 기수의 담수에 주로 적용
- 전극 역전으로 scale제거 한 후에도 scale에 의한 파울링현상은 반복적으로 발생
- 전극 역전 마다 농축수와 탈염수의 위치 변경으로 담수화 효율 감소 구간 발생
- 수로변경을 위해 복잡한 배관을 사용하므로 관로저항에 따른 효율 감소와 소규모 이동형 담수화 설계 불가

(다) 경쟁기술 대비 우수성

- 이온정류막은 normal 방향에서 이온전류가 더 잘 흐르며 담수화효율 증가하고,reverse 방향에서 이온전류를 억제하며 scale이 생성되지 않아 연속적 담수화 가능
- 전극 역전 마다 농축수와 탈염수의 위치 변경없이 간단한 배관으로 소규모 이동형 담수화 가능



[그림 63] 경쟁기술 EDR의 파울링 제거기술(왼쪽), 안티파울링에 의한 연속적 담수화 비교



[그림 64] 경쟁기술 EDR의 배관 설계(상), 본 기술의 배관 설계(하)의 비교

제 3 장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

제1절. 연차별 연구개발 목표 및 달성도

1. 1차연도

1.1. 1차연도 연구개발 목표

연구개발 목표	대면적의 비대칭 사파이어 멤브레인 제조 공정 개발
정의	전기투석 담수화, 역전기투석발전, 연료전지, 대용량 에너지저장장치의 산업화를 저해하는 이온교환막의 낮은 내구성(열적, 기계적) 과 높은 가격을 해결할 고내구성, 저가의 소재를 이용한 대면적의 비대칭 멤브레인 개발

단위성과	성과점검기준						양적성과 건수
	질적 성과지표	목표 치	달성치	달성도 (%)	검증법	가중 치	
대면적 멤브레인 구조 제어기술 및 설비 개발	면적 (cm ²)	50x50	50x50	100	공인시험기관 시험성적서	7	S/W : 1건
	두께 (μm)	20	20.6	100	공인시험기관 시험성적서	2	
고내구성 사파이어 멤브레인 제조 기술	결정화도 (%)	90	100	100	공인시험기관 시험성적서	2	특허 : 1 건 논문 : 1 건 시제품 : 1 건
	파단강도 (MPa)	>1	25.92	100	공인시험기관 시험성적서	7	
	곡률반경 (mm)	<10	1.75	100	공인시험기관 시험성적서	5	
	화학적 내구성 (%)	>95	99.05 (6M 황산) 99.37 (7M 황산) 96.71 (5M NaOH)	100	공인시험기관 시험성적서	7	
					합계	30	

1.2. 1차연도 목표 달성 여부

1.2.1. 대면적 멤브레인 구조 제어기술 및 설비 개발

(가) 면적 (목표/ 달성치/ 달성도: 50x50cm²/ 50x50cm²/ 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

☐ KOLAS 기관인 한국산업기술시험원의 시험성적서 제출

2) 시험 내용

☐ 50x50cm²의 고순도 알루미늄 (LUXAL, Toyo Aluminum K.K.) 을 이용하여 비대칭 사파이어 멤브레인을 제작

☐ 제작된 비대칭 사파이어 멤브레인은 가로,세로 길이를 측정하여 면적을 확인하였음



사용장비명	제조회사 및 형식	기기번호	차기교정예정일자	교정기관
Description	Manufacturer and Model	Serial Number	The due date of next calibration	Calibration Laboratory
Non-contact coordinate measuring machine	VIEW / 600XP	S600XP 09081310	2018. 06. 10.	KTL

[그림 65] 사파이어 멤브레인의 면적 공인시험 사진

(나) 두께 (목표/ 달성치/ 달성도: 20um/ 20.6um/ 100%)

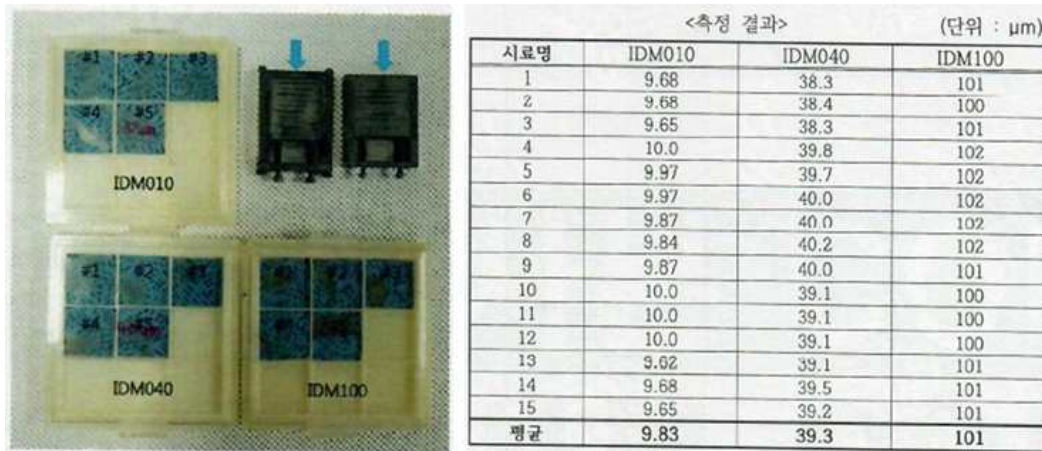
1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

☐ KOLAS 기관인 나노종합기술원의 시험성적서 제출

2) 시험 내용

☐ 시험장비(나노종합기술원)

- 기기명(Description) : 주사전자현미경(SEM)
- 제조회사 및 형식(Manufacturer & Model) : Hitachi, SU8230
- 기기번호(Serial number) : SEM : 1635-04



[그림 66] 사파이어 멤브레인의 두께 공인시험에 사용한 시편 및 시험 결과

1.2.2. 고내구성 사파이어 멤브레인 제조기술

(가) 결정화도 (목표/ 실적/ 달성도: 90%/ 100%/ 100 %)

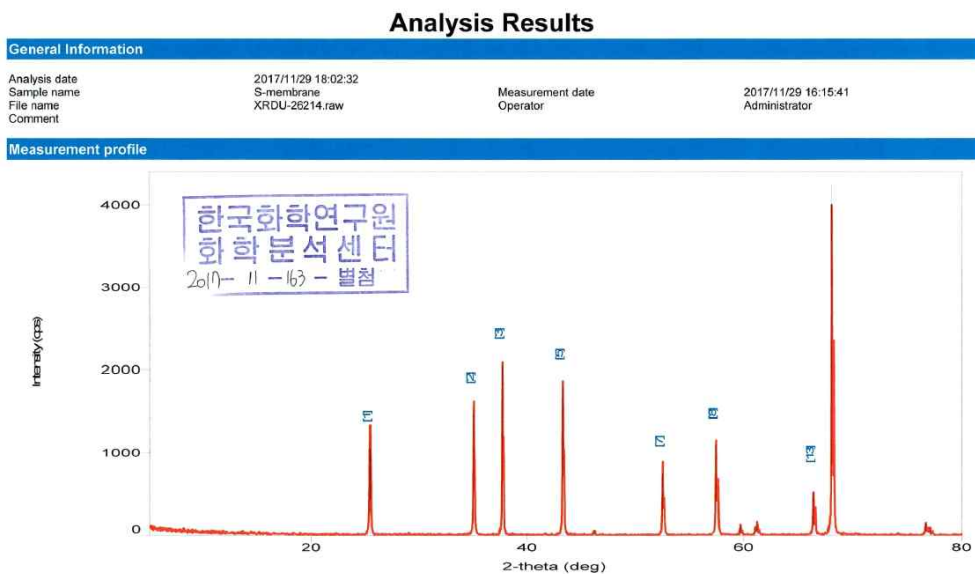
1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

□ KOLAS 기관인 한국화학연구원에 의뢰하여 실험은 진행되었으며 공인성적서를 제출

2) 시험 내용

□ XRD를 이용하여 결정성 및 결정화도 분석

KRICT 한국화학연구원 화학분석센터



[그림 67] 사파이어 멤브레인의 결정화도 공인시험 분석 결과

(나) 파단강도 (목표/ 실적/ 달성도: 1.0MPa/ 25.92MPa/ 100%)

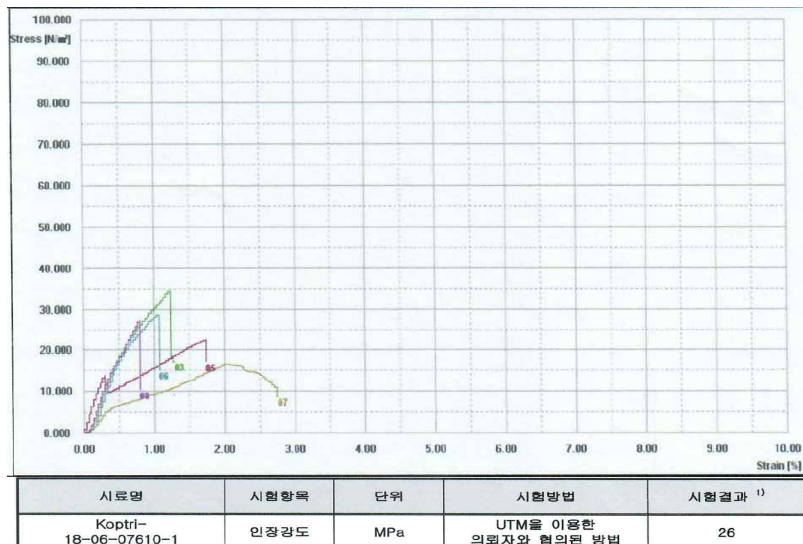
1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

☐ KOLAS 기관 한국고분자시험연구소에서 측정한 시험성적서를 제출

2) 시험 내용

☐ 시험 조건

- 시험기기 : UTM(Universal Testing Machine)
- 시험속도 : 0.5 mm/min
- 그립 간 거리 : 30 mm
- 로드셀 : 200 N
- 시험품 개수 : 5개



[그림 68] 두께 100um의 사파이어 멤브레인의 인장
공인시험 측정 화면

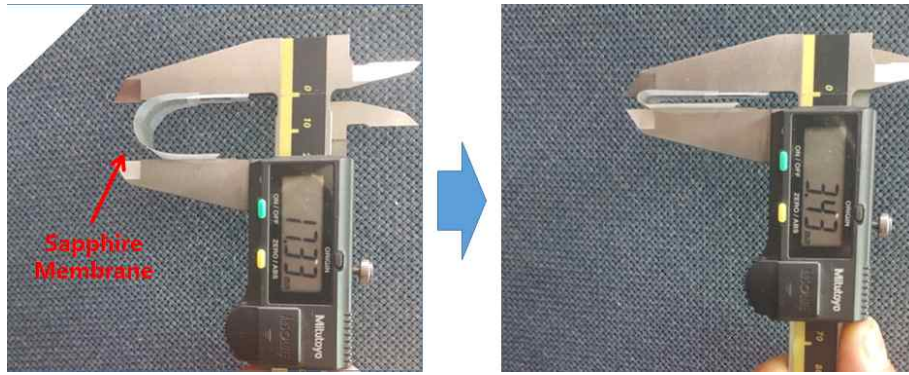
(다) 곡률반경 (목표/ 실적/ 달성도: 10mm/ 1.75mm/ 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

☐ KOLAS 기관인 한국산업기술시험원의 시험성적서를 제출

2) 시험 내용

- ☐ 시험 장비 : 내/외측 캘리퍼(A16027340, Mitutoyo)
- ☐ 시험장비에서 측정된 수치(곡률 지름)의 1/2을 계산하여 곡률 반경을 구함
- ☐ 측정횟수 : 5회



[그림 69] 사파이어 멤브레인의 곡률반경 공인시험 모습. 좌) 시험장비에 장착 된 사파이어 멤브레인과 우) 파괴되기 직전의 사파이어 멤브레인

(라) 화학적 내구성 (목표/ 실적/ 달성도: 95%/ 99.05, 99.37, 96.71%/ 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

□ KOLAS 공인 기관 한국산업기술시험원의 시험성적서를 제출

2) 시험 내용

□ 시험장비

- 전기식 지시저울 (AUW220D, SHIMADZU)
- 건조기 (OF12GW, JEIO Tech)

□ 시험용액

- 6mol/L 황산
- 7mol/L 인산
- 5mol/L 수산화나트륨

□ 초기 무게를 칭량 후 상온에서 각 시험용액으로 30일 용출, 시료를 꺼내 40 °C 건조기에 10 분간 건조 후 무게를 측정, 무게변화율을 계산

시험 용액	결과		
	초기 무게(g)	30일 후 무게(g)	무게 변화율(%)
황산	0.031 7	0.031 4	0.95
인산	0.031 5	0.031 3	0.63
수산화나트륨	0.030 4	0.029 4	3.29

[표 16] 사파이어 멤브레인 화학적 내구성 공인시험 결과

2. 2차연도

2.1. 2차연도 연구개발 목표

연구개발목표	전기투석 해수담수화 용의 이온정류막 개발
목적	낮은 에너지, 대용량, 낮은 파울링의 해수담수화가 가능하도록 원뿔형태의 다공으로 이루어져 세계 최고 수준 대비 동일한 선택성을 유지하면서도 400% 향상 된 높은 이온전도도, 막오염의 최소화, 이온정류특성을 보이며, 기존 고가의 이온교환막 대비 1/100 이하의 낮은 생산 원가를 가지는 이온정류막 국산화 기술 개발

단위성과	성과점검기준						양적성과 건수
	질적 성과지표	목표치	달성치	달성도(%)	검증법	가중치	
양이온정류막 개발	이온선택성 (해수,담수조건) (%)	>94	95.8	100	공인시험기관 시험성적서	5	논문 : 1 건 시제품 : 1 건
	이온전도도 (해수,담수조건) ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	<10	1.975	100	공인시험기관 시험성적서	5	
	정류특성(ratio)	>100	478.9743	100	공인시험기관 시험성적서	10	
음이온정류막 개발	이온선택성 (해수,담수조건) (%)	>94	93.7	99.6	공인시험기관 시험성적서	5	특허 : 1 건 논문 : 1 건 시제품 : 1 건
	이온전도도 (해수,담수조건) ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	<10	2.288	100	공인시험기관 시험성적서	5	
	정류특성(ratio)	>100	282.9072	100	공인시험기관 시험성적서	10	
					합계	40	

2.2. 2차연도 목표 달성여부

2.2.1. 양이온정류막 개발

(가) 이온선택성 (목표/ 실적/ 달성도: >94% / 95.8% / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

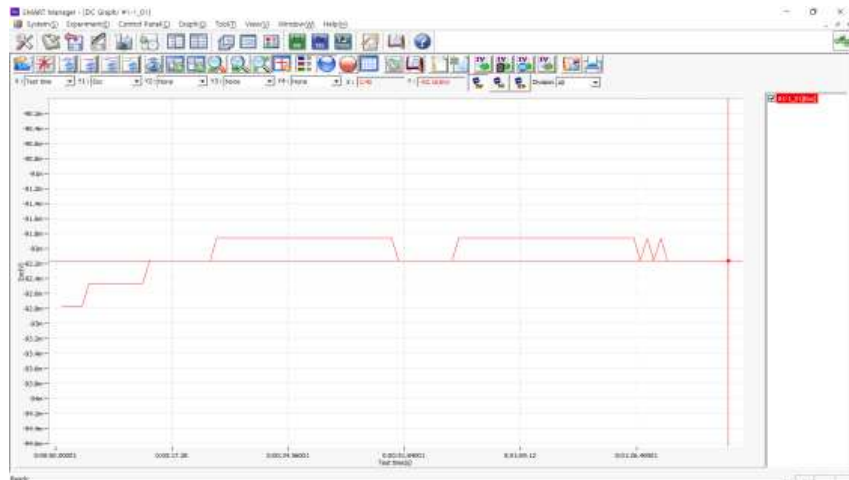
☐ KOLAS 공인 기관 한국산업기술시험원의 시험성적서를 제출

2) 시험 내용

☐ 시험조건

- 시험장비 : 직류전원공급기(PPLE, 원아테크)
- 시험용액 : NaCl 0.01mol/L, 0.5mol/L

☐ 소프트웨어에서 측정한 전압(Voc)으로 이동수를 계산하여 기록



[그림 70] 양이온정류막 공인시험 이온선택성 측정화면

(나) 이온전도도 (목표/ 실적/ 달성도: $<10 \Omega \cdot \text{cm}^2$ / $1.975 \Omega \cdot \text{cm}^2$ / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

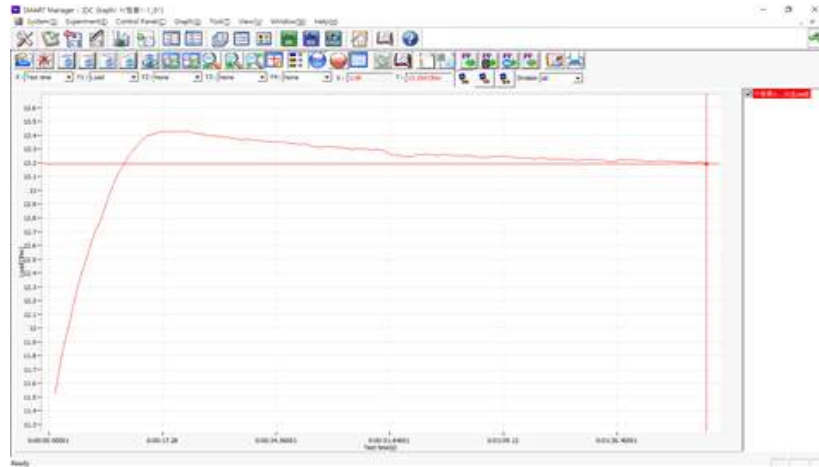
☐ KOLAS 공인 기관 한국산업기술시험원의 시험성적서를 제출

2) 시험 내용

☐ 시험조건

- 시험장비 : 직류전원공급기(PPLE, 원아테크)
- 시험용액 : NaCl 0.5mol/L

☐ 측정저항과 용액저항의 차를 계산하여 막저항을 구한 뒤 시험품의 유효면적(cm^2)



[그림 71] 양이온정류막 공인시험 저항 측정화면

(다) 이온정류특성 (목표/ 실적/ 달성도: >100 / 478.9743 / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

□ KOLAS 공인 기관 한국산업기술시험원의 시험성적서를 제출

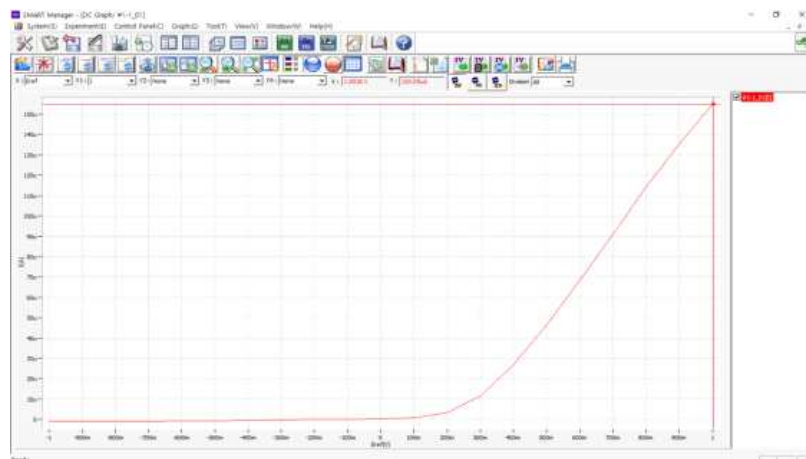
2) 시험 내용

□ 시험조건

- 시험장비 : 직류전원공급기(PPLE, 원아테크)

- 시험용액 : NaCl 0.01mol/L

□ +1 V 를 인가할 때 측정되는 전류와 -1 V 를 인가할 때 측정되는 전류를 확인하여 정류비를 계산



[그림 72] 양이온정류막 공인시험 정류특성 측정화면

2.2.2. 음이온정류막 개발

(가) 이온선택성 (목표/ 실적/ 달성도: >94% / 93.7% / 99.6%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

☐ KOLAS 공인 기관 한국산업기술시험원의 시험성적서를 제출

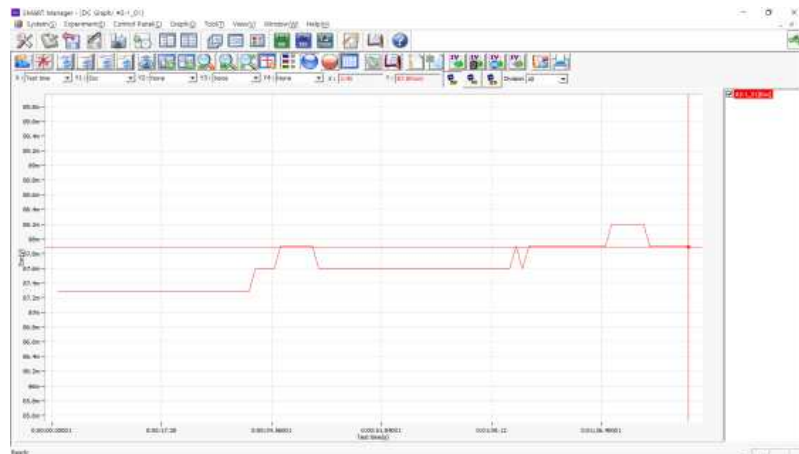
2) 시험 내용

☐ 시험조건

- 시험장비 : 직류전원공급기(PPLE, 원아테크)

- 시험용액 : NaCl 0.01mol/L, 0.5mol/L

☐ 소프트웨어에서 측정한 전압(Voc)으로 이동수를 계산하여 기록



[그림 73] 음이온정류막 공인시험 이온선택성 측정화면

(나) 이온전도도 (목표/ 실적/ 달성도: <10 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ / 2.288 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

☐ KOLAS 공인 기관 한국산업기술시험원의 시험성적서를 제출

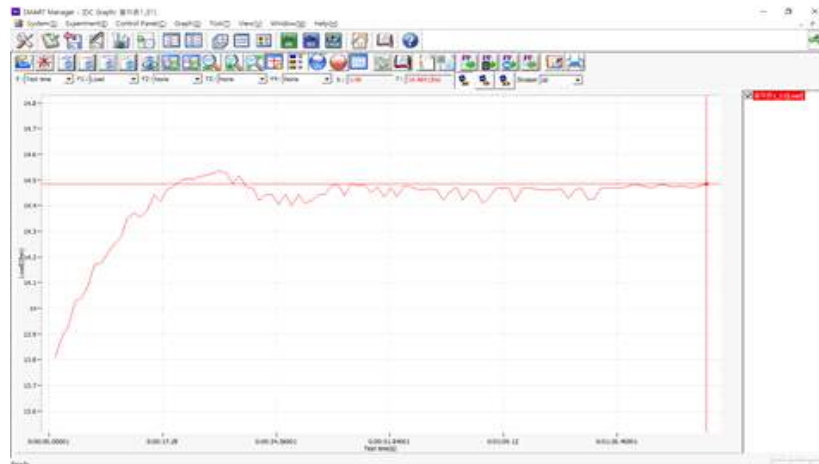
2) 시험 내용

☐ 시험조건

- 시험장비 : 직류전원공급기(PPLE, 원아테크)

- 시험용액 : NaCl 0.5mol/L

☐ 측정저항과 용액저항의 차를 계산하여 막저항을 구한 뒤 시험품의 유효면적(cm^2)를 나누어 이온전도도를 평가



[그림 74] 음이온정류막 공인시험 저항 측정화면

(다) 이온정류특성 (목표/ 실적/ 달성도: >100 / 282.9072 / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

□ KOLAS 공인 기관 한국산업기술시험원의 시험성적서를 제출

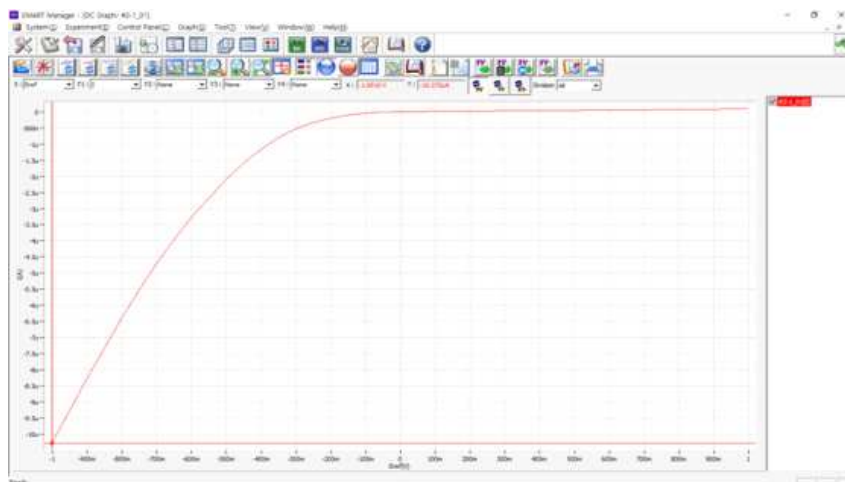
2) 시험 내용

□ 시험조건

- 시험장비 : 직류전원공급기(PPLE, 원아테크)

- 시험용액 : NaCl 0.01mol/L

□ +1 V 를 인가할 때 측정되는 전류와 -1 V 를 인가할 때 측정되는 전류를 확인하여 정류비를 계산



[그림 75] 음이온정류막 공인시험 정류특성 측정화면

3. 3차연도

3.1. 3차연도 연구개발 목표

연구개발 목표	소규모, 이동형, 안티파울링 전기투석 해수담수화 기술 개발
목적	이온정류막을 이용한 전기투석은 이온정류막의 정류특성으로 인하여 역전극에서도 desalination water 방향으로 제거 된 이온이 이동하지 않기 때문에 scale 제거와 동시에 desalination water를 생산이 가능하며 소형으로 효율적인 담수화가 가능하며, Astom 사의 EDR 기술 보다 적은 설비, 운전 비용으로 담수화가 가능

핵심성과 (CTE)	단위성과	성과점검기준						양적 성과 건수
		질적 성과지표	목표치	달성 치	달성 도 (%)	검증법	가 중 치	
소규모, 이동형, 안티파울 링 전기투석 해수담수 화 기술 개발	안티파울링 전기투석 해수담수화 원천기술 개발	TDS 변화율 (%)	< ±2	1.4	100	공인성적서	4	특허 : 1 건 논문: 1 건
		에너지효율 (1000mg/L 조건) (KWh/m ³)	< 0.5	0.38	100	자체시험	4	
		염분제거율 (%)	> 90	98	100	공인성적서	4	
		담수생산량 (L/day)	> 1,000	1062	100	자체시험	4	
	소규모 이동형 전기투석 해수담수화 실증	증발잔류량 (mg/L)	< 500	24	100	공인성적서	4	사제품: 1 건
		과망간산칼륨소비량 (mg/L)	< 10	2.2	100	공인성적서	3	
		수소이온농도 (ph)	5.8~8.5	6.7	100	공인성적서	3	
		염소이온농도 (mg/L)	< 250	13.7	100	공인성적서	2	
		황산이온농도 (mg/L)	< 200	4	100	공인성적서	2	
	계						30	

3.2. 3차연도 목표 달성여부

3.2.1. 안티파울링 전기투석 해수담수화 원천기술 개발

(가) TDS 변화율 (목표/ 실적/ 달성도 : $\pm 2\%$ / 1.4% / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

☐ TDS 측정은 한국고분자시험연구소에 분석 의뢰하여 결과 확인하고 시험성적서를 제출

2) 시험 내용

☐ 전기투석 담수화 장치의 운전 1일차 생산한 담수(ED-1D)와 14일 후에 생산한 담수(ED-14D) 각각 원수(ED-0) 대비 TDS 비율의 변화를 계산

ED-0의 TDS (mg/L)	ED-1D		ED-14D		TDS 변화율
	TDS (mg/L)	잔류 TDS (%)	TDS (mg/L)	잔류 TDS (%)	
678	22.3	3.3	31.9	4.7	1.4

[표 17] 이동형 전기투석장치의 TDS 공인시험 결과를 통한 TDS변화율 계산

(나) 에너지효율 (목표/ 실적/ 달성도 : 0.5 (KWh/m³) / 0.38 (KWh/m³) / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

☐ 한국산업기술시험원에서 방문시험 진행하여 시험 성적서 제출 (19-067609-01-1)

2) 시험 내용

☐ 시험장비 : 전력분석기(PPA2530, N4L)

☐ DC 20V에 도달한 시점부터 1시간 동안 정수동작에 소비된 전력을 측정

☐ 실험에 사용한 실험 1000mg/L 원수(ED-0)와 1시간 동안 생산한 담수(ED-1H)는 한국고분자 시험연구소를 통해 분석 의뢰하여 성적서 제출

1시간 소비전력 (Wh)	1시간 생산 담수 부피 (m ³)	에너지 효율 (KWh/m ³)
16.875	0.044	0.38

시험항목	시험기준	시험결과
소비전력	1. 시험조건 - 시험품의 출력 전압이 DC 20 V 에 도달한 시점부터 1시간 동안 정수동작에 소비된 전기투석 스택의 전력을 측정함. 2. 판정기준 - 1시간 동안 측정된 소비전력은 20 Wh 이하이어야 함.	16.875 Wh

[표 18] 이동형 전기투석장치의 소비전력 공인시험 결과 및 에너지 효율 계산

(다) 염분제거율 (목표/ 실적/ 달성도 : > 0.9 / 0.98 / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

☐ 한국고분자시험연구소에 분석 의뢰하여 시험성적서 제출

2) 시험 내용

☐ 전기투석 담수화 전 원수(ED-0)의 증발잔류물에서 전기투석 후 1일차 담수(ED-1D)의 증발잔류물의 차이를 통해 제거율을 구함

ED-0의 증발잔류물 (mg/L)	ED-1D의 증발잔류물 (mg/L)	염분제거율 (%)
1120	24	97.86

[표 19] 이동형 전기투석장치의 증발잔류물 공인시험 결과에 따른 염분제거율 계산

(라) 담수생산량 (목표/ 실적/ 달성도 : 1000 (L/day) / 1062 (L/day) / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

□ 한국산업기술시험원에서 방문시험 진행하여 시험 성적서 제출 (19-067609-01-1)

2) 시험 내용

□ 시험장비 : 전기식 지시 저울(MWⅡ-6000N, CAS)

□ 1일 담수생산량을 구하기 위해 1시간 동안 전기투석 장치를 통해 나오는 담수의 양을 측정하여 24시간으로 환산함

1시간 생산된 담수 무게 측정 결과 (g)					
1	4863.1	2	3715.9	3	3765.5
4	3905.9	5	3747.4	6	3905.4
7	3937.9	8	3961.9	9	3898.2
10	4161.7	11	4388.0	합계 (kg)	44.25

시험항목	시험기준	시험결과
담수량 생산	1. 시험조건 - 시험품의 출력 전압이 DC 20 V 에 도달한 시점부터 1시간 동안 정수하여 토출하는 담수 용액의 무게를 측정함. 2. 판정기준 - 1시간 동안 생산한 담수 용액의 총 무게는 40 kg 이상이어야 함.	44.25 kg

[표 20] 이동형 전기투석 장치의 1시간 담수 생산 무게 공인시험 결과

3) 실험기준

□ 실험 원수 : 사용한 실험 원수는 환경산업연구단지에서 제공하는 염지하수를 사용 신청하여 확보하고 증발잔류물 1120 ppm 로 희석하여 사용함

■ 단지 내 실험원수 공급

단지 내 실험원수(상수 원수, 하수, 해수) 공급을 통한 물 분야 연구 지원

구분	공급원	공급경로	가용시설	저장용량	공급가능량* (m ³ /일)
상수 원수	단지 내 유수지, 빗물, 배후습지 유입 후 저류지 취수	저류지 → 저류지취수시설 → 상수분야원수공급조정조 → PT·TB	PT, TB	저류지수 4,000m ³ 내외	50 내외
하수 (오수)	종합환경연구단지 및 환경산업연구단지 오수	단지 내 종합환경연구단지 오수 → 하수원수저장조 → 하수분야원수 공급조정조 → PT·TB	PT, TB	하수저장조 1,000m ³	50 내외
해수 (염지하수)	심정 3개소	심정 3개소 → 해수저장조(공급조정조) → PT·TB	PT	해수저장조 109m ³	50 내외

[표 21] 환경산업연구단지 내 실험원수 공급 지원 현황

PT동 내부 배관도		
E동 물재이용 (해수)		① 해수저장조 취수 ② 해수처리수조 유입(처리수) ③ 해수농축수조 유입(농축수) ④ 폐수처리장 유입(미처리수, 청소수)

[표 22] 환경산업연구단지 내 원수(염지하수) 공급 라인

(2014.12.18. 분석결과)

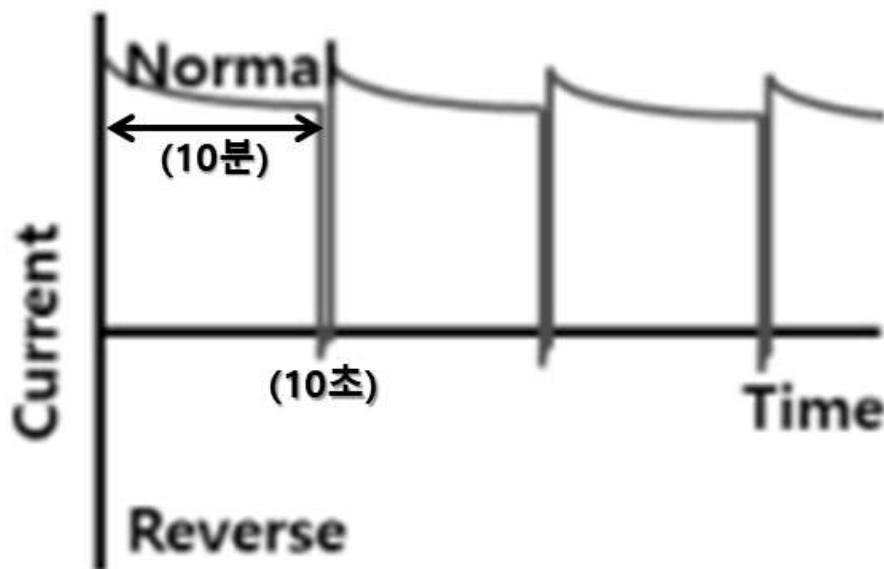
구분	온도 (°C)	염분 (PPT)	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	KCO ₃ ⁻ (mg/L)
심정1	17.7	24.7	19,352	8,337	3,072	1,325	1,389	46	208
심정2	14.5	6.4	4,533	2,379	1,083	296	343	12	159
심정3	14.4	6.2	4,527	2,492	481	244	262	12	191

[표 23] 환경산업연구단지 염지하수의 수질 분석 결과

시험항목	시험방법	허용기준	시험결과
증발잔류물	①	mg/L	1 120
과망간산칼륨 소비량	①	mg/L	4.4
수소이온농도	①	-	6.8
염소이온	①	mg/L	443.0
황산이온	①	mg/L	46
TDS	①	mg/L	678

[표 24] 염지하수에서 희석하여 얻은 실험 원수(ED-0)의 수질분석 결과

□ 운전 조건 : 전압 ±20V, Normal mode 10분, Reverse mode 10초 조건에서 운전



[그림 76] 담수생산량 실험 시 운전 조건

- 담수 평가 기준 : 생산된 담수의 수질 평가 결과(ED-1H)에서 증발잔류물이 92 ppm임을 확인함

시험항목	시험방법	허용기준	시험결과
증발잔류물	①	mg/L	92
과망간산칼륨 소비량	①	mg/L	2.2
수소이온농도	①	-	7.1
염소이온	①	mg/L	86.4
황산이온	①	mg/L	6
TDS	①	mg/L	161

[표 25] 담수생산량 측정 시험 중 생산된 담수(ED-1H)의 수질 평가 결과

3.2.2. 소규모 이동형 전기투석 해수담수화 실증

(가) 증발잔류량 (목표/ 실적/ 달성도 : <500 (mg/L) / 24 (mg/L) / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

- 한국고분자시험연구소에 분석 의뢰하여 결과 확인하고 시험성적서를 제출

2) 시험 내용

- 수질공정시험기준(ES 05307.1c) : 이 시험기준은 먹는물의 총 증발잔류물을 측정하는 방법으로 시료를 103 °C ~ 105 °C에서 건조하고 데시케이터에서 식힌 후 무게를 달아 증발접시의 무게차로부터 증발잔류물의 양(mg/L)을 구한다.
- 전기투석 담수화 장치의 운전 1일차 생산한 담수(ED-1D)의 수질분석 결과

ED-1D(1일 차 생산한 담수)의 수질 분석 결과	
증발잔류물	24 mg/L

[표 26] 이동형 전기투석 장치에서 생산한 담수의 증발잔류물 공인시험 결과

(나) 과망간산칼륨소비량 (목표/ 실적/ 달성도 : <10 (mg/L) / 2.2 (mg/L) / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

- 한국고분자시험연구소에 분석 의뢰하여 결과 확인하고 시험성적서를 제출

2) 시험 내용

- 수질공정시험기준(ES 05302.1c) : 이 시험기준은 먹는물 및 샘플의 과망간산칼륨 소비량을 측정하는 방법으로, 시료를 산성으로 조절한 후 일정한 부피의 과망간산칼륨용액을 넣고 끓인 다음 일정한 부피의 옥살산나트륨용액을 가하여 반응하지 않고 남아있는 옥살산나트륨을 과망간산칼륨 용액으로 적정하여 측정한다.
- 전기투석 담수화 장치의 운전 1일차 생산한 담수(ED-1D)의 수질분석 결과

ED-1D(1일 차 생산한 담수)의 수질 분석 결과	
과망간산칼륨 소비량	2.2 mg/L

[표 27] 이동형 전기투석 장치에서 생산한 담수의 과망간산칼륨 소비량 공인시험 결과

(다) 수소이온농도 (목표/ 실적/ 달성도 : 5.8~8.5 pH / 6.7 pH / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

- 한국고분자시험연구소에 분석 의뢰하여 결과 확인하고 시험성적서를 제출

2) 시험 내용

- 수질공정시험기준(ES 05306.1b) : 이 시험기준은 먹는물, 샘플 및 염지하수의 pH를 측정하는 방법으로 유리전극과 기준 전극으로 구성된 pH 측정기를 사용하여 측정한다.
- 전기투석 담수화 장치의 운전 1일차 생산한 담수(ED-1D)의 수질분석 결과

ED-1D(1일 차 생산한 담수)의 수질 분석 결과	
수소이온농도	6.7 pH

[표 28] 이동형 전기투석 장치에서 생산한 담수의 수소이온농도 공인시험 결과

(라) 염소이온농도 (목표/ 실적/ 달성도 : <250 (mg/L) / 13.7 (mg/L) / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

- 한국고분자시험연구소에 분석 의뢰하여 결과 확인하고 시험성적서를 제출

2) 시험 내용

- 수질공정시험기준(ES 05355.2b) : 이 시험기준은 먹는물 및 샘물 중에 염소이온을 측정하는 방법으로, 존재하는 염소이온이질산은과 정량적으로 반응하고 과잉의 질산은이 크롬산과 반응하여 크롬산은의 침전으로 나타나는 점을 적정의 종말점으로 하여 염소이온의 농도를 측정하는 방법이다.
- 전기투석 담수화 장치의 운전 1일차 생산한 담수(ED-1D)의 수질분석 결과

ED-1D(1일 차 생산한 담수)의 수질 분석 결과	
염소이온	13.7 mg/L

[표 29] 이동형 전기투석 장치에서 생산한 담수의
염소이온농도 공인시험 결과

(마) 황산이온농도 (목표/ 실적/ 달성도 : <200 (mg/L) / 4 (mg/L) / 100%)

1) 평가방법 : 공인시험기관 시험성적서

- 한국고분자시험연구소에 분석 의뢰하여 결과 확인하고 시험성적서를 제출

2) 시험 내용

- 수질공정시험기준(ES 04366.1b) : 이 시험기준은 먹는물 및 샘물 중에 황산이온을 측정하는 방법으로, 존재하는 황산이온이 염화바륨과 반응하여 침전한 황산바륨을 EDTA로 적정하여 황산이온의 농도를 측정하는 방법이다.
- 전기투석 담수화 장치의 운전 1일차 생산한 담수(ED-1D)의 수질분석 결과

ED-1D(1일 차 생산한 담수)의 수질 분석 결과	
황산이온	4 mg/L

[표 30] 이동형 전기투석 장치에서 생산한 담수의
염소이온농도 공인시험 결과

제2절. 정량적 연구성과 목표 및 달성도

1. 전체연도 정량적 연구성과 요약

구분		목 표	성 과	달성 도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	2	2	50	○ ACS Nano 2019, 13(9), 10761-10767 - 논문 제목 : Multi-Asymmetric Ion-Diode Membranes with Superior Selectivity and Zero Concentration Polarization Effect - 게재일 : 2019.09.24. ○ Micromachines 2020, 11, 206 - 논문제목 : Antireflective Transparent Conductive Oxide Film Based on a Tapered Porous Nanostructure - 게재일 : 2020.02.17
국내 논문 게재		2	0	0	○ 1건 투고 ○ 1건 게재 예정
특허 출원	국내	1	1	100	○ 특허 출원번호 : 10-2018-0138367 - 발명의 명칭 : 다단 전기 투석법에 의한 해수 담수화 시스템 및 그에 따른 해수 담수화 방법 - 출원일 : 2018.11.12,
특허 등록	국내	2	2	100	○ 특허 등록번호 : 10-1896266 - 발명의 명칭 : 경사가 있는 나노기공을 포함하는 이온다이크막 및 그 제조 방법 - 등록일 : 2018.09.03. ○ 특허 등록번호 : 10-2048811 - 발명의 명칭 : 이온선택성 고분자가 충전된 유무기 복합막 - 등록일 : 2019.11.20.
등록·기탁 대상 성과물	소프트 웨어	1	1	100	○ 저작권 등록번호 : 제 C-2019-033813 호 - 저작물의 제호(명칭) : powerSupplier-master - 창작연월일 : 2019.11.12. - 등록연월일 : 2019.11.18.
기타	시제품	4	4	100	○ 사파이어 멤브레인 ○ 양이온정류막 ○ 음이온정류막 ○ 소규모 이동형 전기투석 담수화 장치
	성과 홍보	0	1	-	○ 기간산업신문 신년특집 (11면)
	일자리 창출	1	3	300	○ 본 과제 시작 후 신규 3명 채용

2. 정량적 연구성과 자료

2.1. 국외 논문

□ ACS Nano 2019, 13(9), 10761-10767



ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant (18CTAP-C133309-02) from the Infrastructure and Transportation Technology Promotion Research Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, Republic of Korea.

□ Micromachines-652477(접수번호)



Funding: This research was funded by MINISTRY of LAND, INFRASTRUCTURE and TRANSPORT of KOREAN GOVERNMENT, grant number 17CTAP-C133309-01.

2.2. 국내 논문

□ membrane journal (투고)

생체모방형 비대칭 나노채널을 갖는 산화알루미늄 멤브레인 제조 및 채널구조와 표면전하에 따른 이온 정류 현상 평가

정재훈^{***} · 김종영^{**} · 최기운^{**} · 이준호^{**} · 강일석^{***} · 조철희[†]

^{*}충남대학교 에너지과학기술대학원 에너지과학기술학과, ^{**}(주) 넥스트이앤엠,
^{***}나노융합기술원

Fabrication of biomimetic aluminum Oxide Membrane and Evaluation of Ionic Current Rectification dependent on asymmetry and surface charge density

Jaecheon Jung^{***}, Jongyoung Kim^{*}, Kiwoon Choi^{**}, Joonho Lee^{**}, Il-suk Kang^{***}, Churl-Hee Cho[†]

^{*}Graduate School of Energy Science and Technology(GEST), Chungnam National University, 99
Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Republic of Korea

^{**}NextE&M Research Institute, Environmental Research Center, 410, Jeongseojin-ro, Seo-gu,
Incheon 22689, Republic of Korea.

^{***}National Nanofab Center, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 291,
Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34141, Republic of Korea

□ membrane journal (투고예정)

- 황산 전해질 농도에 따른 양극산화막 기공 크기 및 기공밀도에 관한 연구 (김종영 연구원)

2.3. 특허출원

□ 특허 출원번호 : 2018-0138367

출원 번호 통지서

출원 일자 2018.11.12
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호 10-2018-0138367 (접수번호 1-1-2018-1122034-28)
출원인명칭 주식회사 넥스트이앤엠(1-2015-035919-7)
발명자성명 최기운 이준호 김종영 정재훈 맹재영 박상후
발명의명칭 다단 전기 투석법에 의한 해수 담수화 시스템 및 그에 따른 해수 담수화 방법

【이 발명을 지원한 국가연구개발사업】

【과제고유번호】 1615009823
【부처명】 국토교통부
【연구관리 전문기관】 국토교통과학기술진흥원
【연구사업명】 국토교통기술혁신연구
【연구과제명】 전기투석 전용의 정류비 100인 이온정류막 개발 및 이를 이용한 0.5 KWh/m3의 안티파울링 전기투석 담수화 기술 개발
【기여율】 1/1
【주관기관】 (주)넥스트이앤엠
【연구기간】 2018.01.01 ~ 2018.12.31

2.4. 특허등록

□ 특허 등록번호 : 10-1896266

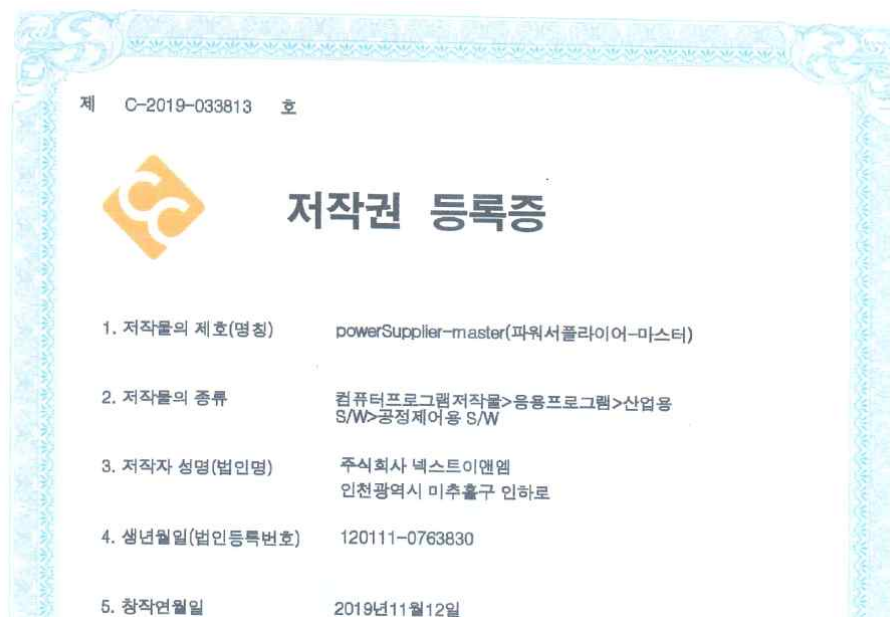


□ 특허 등록번호 : 10-2048811



2.5. 소프트웨어

□ 저작권 등록번호 : 제 C-2019-033813 호



2.6. 시제품

□ 시제품 관련 시험 성적서

- 사파이어 멤브레인 (면적, 두께, 내구성 등)

시험 성적서 (TEST REPORT)



한국산업기술시험원
Korea Testing Laboratory

성적서 번호 : 18-071751-01-1
Report No.

페이지 (1) / (총 2)
Page of Pages



ktl
Korea Testing Laboratory

1. 의뢰자 (Client)
 기관명 (Name) : (주)넥스트이엔엘
 주소 (Address) : 인천광역시 남구 인하로 100, 607호 (유원동, 인하대학교 인하드림센터 1관)
 의뢰일자 (Date of Receipt) : 2018. 11. 13.

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) : 과제 제출용

3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)
 제품명 (Description) : 사파이어멤브레인
 제작회사 (Manufacturer) : 의뢰자가 제시한 시험품
 모델명 (Model Name) : ***
 제조번호 (Serial Number) : ***
 기타 (Remark) : ***

www.polymer.co.kr
Test report no.: 18-3599
페이지 1 / 4

TEST REPORT

1. 의뢰기관 :
 기관명: ㈜넥스트이엔엘 (공중영 남)
 주소: 인천 서구 경서길로 410 PT-E04

2. 의뢰일자 : 2018. 06. 21.

3. 용도 : 국가과제제출용

4. 시험대상품목 또는 물질, 시료명 : 표 1 참조

5. 시료형상 : Film

6. 시험항목 : 인장강도

- 양이온정류막 (이온전도도, 이온선택성, 이온정류특성)

시험 성적서 (TEST REPORT)



한국산업기술시험원
Korea Testing Laboratory

성적서 번호 : 18-073162-01-1
Report No.

페이지 (1) / (총 16)
Page of Pages



ktl
Korea Testing Laboratory

1. 의뢰자 (Client)
 기관명 (Name) : (주)넥스트이엔엘
 주소 (Address) : 인천광역시 남구 인하로 100, 607호 (유원동, 인하대학교 인하드림센터 1관)
 의뢰일자 (Date of Receipt) : 2018. 11. 20.

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) : ***

3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)
 제품명 (Description) : 양이온정류막
 제작회사 (Manufacturer) : (주)넥스트이엔엘
 모델명 (Model Name) : ***
 제조번호 (Serial Number) : ***
 기타 (Remark) : ***

- 음이온정류막 (이온전도도, 이온선택성, 이온정류특성)

시험 성적서 (TEST REPORT)



한국산업기술시험원
Korea Testing Laboratory

성적서 번호 : 18-070594-01-1
Report No.

페이지 (1) / (총 22)
Page of Pages



ktl
Korea Testing Laboratory

1. 의뢰자 (Client)
 기관명 (Name) : (주)넥스트이엔엘
 주소 (Address) : 인천광역시 남구 인하로 100, 607호 (유원동, 인하대학교 인하드림센터 1관)
 의뢰일자 (Date of Receipt) : 2018. 11. 08.

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) : ***

3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)
 제품명 (Description) : 음이온정류막
 제작회사 (Manufacturer) : (주)넥스트이엔엘
 모델명 (Model Name) : ***
 제조번호 (Serial Number) : ***
 기타 (Remark) : ***

- 소규모 이동형 전기투석 담수화 장치

시험 성적서 (TEST REPORT)

 한국산업기술시험원 Korea Testing Laboratory	성적서 번호 : 19-067609-01-1 Report No. 페이지 (1) / (총 12) Page of Pages	 Korea Testing Laboratory
1. 의뢰자 (Client) 기관명 (Name) : 주식회사 넥스트이엔엠 주소 (Address) : 인천광역시 남구 인하로 100, 607호(유현동, 인하대학교 인하드림센터 1관) 의뢰일자 (Date of Receipt) : 2019. 10. 16.		
2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) : ***		
3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample) 제품명 (Description) : 소규모 이동형 전기투석 시스템 제작회사 (Manufacturer) : 주식회사 넥스트이엔엠 모델명 (Model Name) : 시스템 제어 장치, 전기투석 스택 제조번호 (Serial Number) : *** 기타 (Remark) : ***		

- 수질 분석 결과

상 호 : (기관명) ㈜넥스트이엔엠 (주소) -	페이지(1/4)
의뢰인 : 한국고분자시험연구소	채취방법 : 택배시료
시료종류 : -	접수번호 : DW19102201C
시료명 : ED-0	접수일자 : 2019/10/22
시험용도 : 참고용	시험일자 : 2019/10/22 - 2019/11/01

시험항목	시험방법	허용기준	시험결과
중발잔류물	①	mg/L	1 120
과망간산칼륨 소비량	①	mg/L	4.4
수소이온농도	①	-	6.8
염소이온	①	mg/L	443.0
황산이온	①	mg/L	46
TDS	①	mg/L	678

문.

상 호 : (기관명) ㈜넥스트이엔엠 (주소) -	페이지(2/4)
의뢰인 : 한국고분자시험연구소	채취방법 : 택배시료
시료종류 : -	접수번호 : DW19102201C
시료명 : ED-1H	접수일자 : 2019/10/22
시험용도 : 참고용	시험일자 : 2019/10/22 - 2019/11/01

시험항목	시험방법	허용기준	시험결과
중발잔류물	①	mg/L	92
과망간산칼륨 소비량	①	mg/L	2.2
수소이온농도	①	-	7.1
염소이온	①	mg/L	86.4
황산이온	①	mg/L	6
TDS	①	mg/L	161

문.

상 호 : (기관명) ㈜넥스트이앤엠
(주소) -

페이지 (3/4)

의뢰인 : 한국고분자시험연구소

채취방법 : 택배시료

시료종류 : -

접수번호 : DW19102201C

시 료 명 : ED-1D

접수일자 : 2019/10/22

시험용도 : 참고용

시험일자 : 2019/10/22~ 2019/11/01

시험항목	시험방법	허용기준	시험결과
중발잔류물	①	mg/L	24
과망간산칼륨 소비량	①	mg/L	2.2
수소이온농도	①	-	6.7
염소이온	①	mg/L	13.7
황산이온	①	mg/L	4
TDS	①	mg/L	22.3

끝.

상 호 : (기관명) ㈜넥스트이앤엠
(주소) -

페이지 (4/4)

의뢰인 : 한국고분자시험연구소

채취방법 : 택배시료

시료종류 : -

접수번호 : DW19102201C

시 료 명 : ED-14D

접수일자 : 2019/10/22

시험용도 : 참고용

시험일자 : 2019/10/22~ 2019/11/01

시험항목	시험방법	허용기준	시험결과
중발잔류물	①	mg/L	28
과망간산칼륨 소비량	①	mg/L	2.5
수소이온농도	①	-	6.9
염소이온	①	mg/L	13.0
황산이온	①	mg/L	4
TDS	①	mg/L	31.9

끝.

제 4 장. 연구개발성과의 활용 계획 등

제1절. 연구개발 성과의 활용방안

1. 이온정류막 관련 신성장 동력 분야

1.1. 해수 담수화 분야

- 주로 증류법으로 행해지던 해수담수화 분야에서 이온정류막을 기반한 플랜트 및 제품으로 시장이 이동하고 있지만 아직 연구단계에 머물고 있음
- 전기적 이온교환법 원리와 연관된 주요 연구 그룹들에게 이온정류막의 고 효율성을 강조하고 막기술을 제공하는 동시에 자체 연구기반을 다져 나가도록함
- 현재 급격하게 성장하고 있는 RO 관련 기술의 단점 중 하나는 고순도 물 생산이 어렵다는 것이므로 고순도 물 생산이 가능한 전기적 이온교환방식을 연계한 공정을 개발, 이온정류막의 활용도를 높임

1.2. 해수 염분차 발전 분야

- 역전기투석을 이용한 해수 염분차 발전은 새로운 에너지원으로써 자연에서 무한한 잠재적 에너지를 회수할 수 있으며 청정에너지원이지만 아직 많이 알려지지 않은 기술
- 국내 주요 역전기투석 연구기관인 에너지기술연구원과 함께 더욱 염분차발전에 대한 홍보를 넓히고 더욱 많은 연구가 집중 될 수 있도록 할 계획
- 막의 효율적 스택기술을 보유한 국내외 여러 연구그룹 또는 기업과 연계한 연구 및 기술개발 과제 등을 고안하여 지속적인 발전을 이루어나갈 계획

1.3. 연료전지 분야

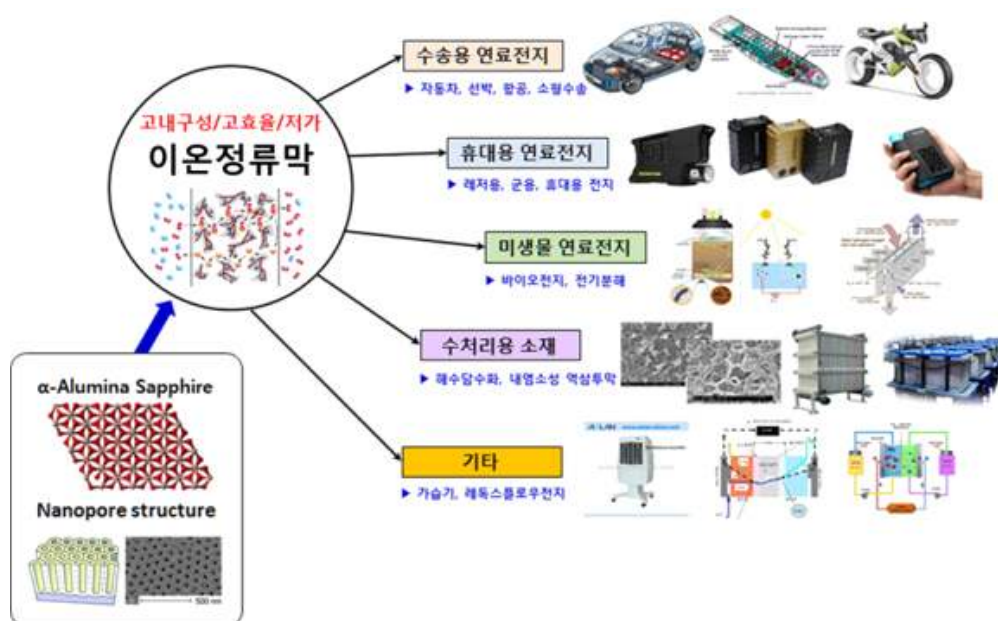
- 연료전지 분야는 이미 국내 기술 및 시장규모가 상당히 성장한 상태이며 이온정류막이 적용될 PEMFC, DMFC는 수송용과 휴대용으로까지 시장규모를 상당히 넓혀나갈 것으로 예상됨
- 빠르게 성장하는 시장에 발맞춰 PEMFC, DMFC의 제조기술과 대량생산이 가능한 업체를 중심으로 주요 공급업체가 될 수 있는 방안을 모색
- 새로 증가될 시장 초기에 높은 점유율을 확보하고 늘어나는 수요에 맞게 규모를 확장

1.4. 레독스 흐름 전지

- 레독스 흐름 전지 분야는 곧 상용화가 시작되는 성장가능성이 매우 큰 분야이며, 리튬이온전지 중심이었던 이차전지분야에 큰 변화를 가져올 기술임
- 레독스 흐름 전지의 주요 활용처는 대용량에너지 시스템으로 불안정한 신재생에너지원과 연계한 에너지저장장치 및 도시전력공급 안정화에 이용될 예정
- 현재 바나듐 레독스 흐름 전지에 적합한 이온막을 개발하려는 노력이 증가하므로, 이에 특화된 이온정류막을 신속히 개발하여 활용할 수 있도록 하는 것이 매우 중요
- 바나듐 이외에도 다양한 전해질 물질에 맞는 이온정류막 개발을 한 발 먼저 진행하여 본 기술의 활용방안을 높일 예정

2. 전기 투석 관련 정수 시스템 분야

- 환경산업 : 연수화, 질산성 질소 제거, 도금폐수 중 유가 금속 회수, 중금속 제거, 원자력 발전소의 방사성 물질 제거, 정유폐액의 탈염, 정수처리, 중수도 공정 및 고도정수처리 공정 등
- 식품산업 : 아미노산/ 유기산의 분리 정제 공정, 유가공품 제조의 탈염, 식염 제조, 유장의 탈염, 당 정제에서 탈색 등
- 전자/자동차/철강/의약산업 : 초순수 제조, 금속이나 산 회수, 의약품 분리정제 등



[그림 77] 연구개발 성과(고내구성/고효율/저가 사파이어 이온정류막 기술)의 활용 분야

제2절. 기대효과

1. 기술적 측면

- 이온정류막의 열적·화학적 안정성 증가에 의해 응용분야인 신재생에너지 및 해수담수화에서 원가절감이 이루어질 것이며 이와 관련된 세계 시장을 선점, 에너지 강국으로 발돋움 할 계기를 마련할 것임
- 이온정류막 생산에 적용한 본사의 새로운 나노구조 제어기술은 저가의 나노구조 제어기술을 기반으로 이온정류막과 관련된 기술분야 이외에 다른 나노기술의 전반에 걸쳐 높은 활용성을 가져와 추가적인 나노기술들의 상용화에 기여할 것임
- 이온정류막 개발은 기존에 진행된 바 없는 독창적인 연구주제로 이와 관련된 특허 및 연구결과가 보고된 바 없으며, 이온교환막 및 이와 관련된 다양한 응용에서 많은 원천기술 확보가 가능
- 이온정류막은 산업전반에 걸쳐 파급효과가 매우 크지만, 현재 나노기술로는 실현 가능성이 매우 희박함. 하지만 새로운 나노구조 제어기술을 개발, 실험적으로 실현 가능성을 검증하였고, 세계 이온교환막, 신재생에너지 및 해수담수화 시장을 선점할 원천기술이 본 연구로부터 시작될 것임
- 이온정류막은 차세대 이온교환막으로 성능 및 가격에 획기적인 개선이 이루어질 것이며 이온교환막의 국산화를 가능하게 할 것

2. 경제적·산업적 측면

- 본사의 이온정류막은 미래의 국가 성장 동력이 될 수 있는 친환경 자동차 및 연료전지를 비롯한 에너지 산업과 수처리 산업에 활용되는 필수 핵심소재임
- 이온정류막 같은 핵심소재 개발을 통해 현재 전량 수입에 의존하고 있는 이온교환막의 국산화를 가능하게 할 뿐만 아니라, 내구성 및 성능, 가격에도 획기적인 개선이 이루어질 것임
- 역전기투석 발전은 세계적으로 강물의 유량이 1.1 Mm³/s 정도임을 감안할 때, 2.6TW (세계 전기사용량의 약 2/3) 의 잠재력을 가지고 있으며, 미국 및 일부 유럽국가에서 유사 연구가 진행되었으며, 상업화를 위해서는 이온교환막의 높은 전기적 특성 (2W/m²) 과 저생산단가가 요구된다고 결론 이온정류막은 200W/m²의 전기적 특성과 낮은 단가가 예상되며, 역전기 투석 발전 시장의 선점에 기여할 것임

- 이동형 전기투석 시스템은 점점 증가하고 있는 세계 물산업 및 담수화 산업 분야에서 저 에너지, 고효율, 고 이동성의 장점이 있는 전기투석을 이용한 시장 확보가 가능할 것으로 판단됨
- 용수확보에 어려움을 겪는 지역에 원할한 용수공급으로 용수확보가 필수적인 산업 분야에 기여

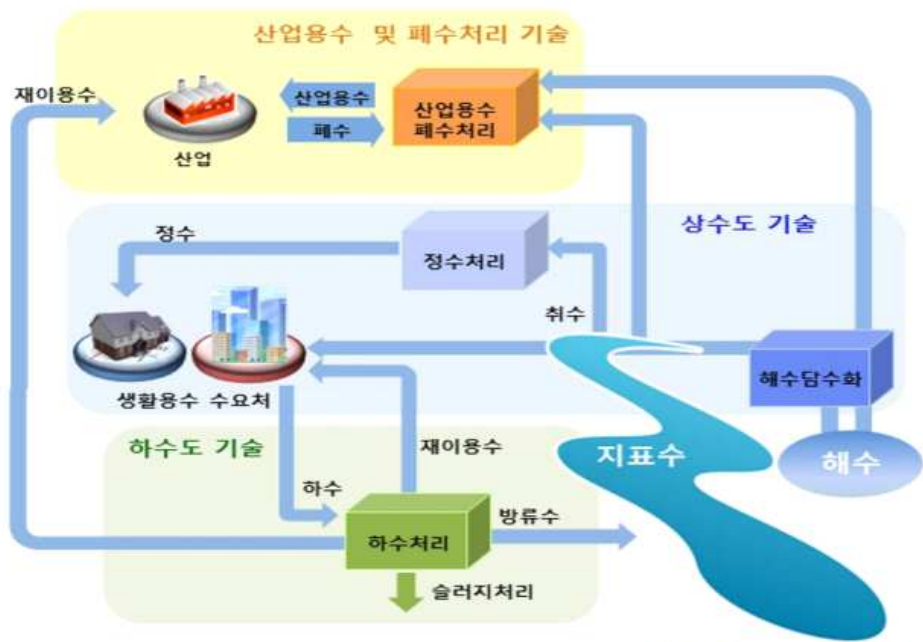
3. 사회적 측면

- 유엔의 기후변화 협약에 따른 국가별 온실가스감축 목표를 달성하기 위해서는 대량의 신재생 에너지 개발은 필수적임. 이를 해결하여 국내의 에너지 문제를 해결함은 물론 전 세계에서 환경에 부담을 주지 않으며 신재생에너지를 대량으로 생산할 수 있는 기술을 개발하는 것은 인류의 에너지 문제를 해결하는 시발점
- 전 세계적으로 물 부족은 매우 심각하며, OECD 경제협력개발기구는 우리나라가 OECD 회원국 가운데 물 부족으로 인해 가장 고통을 겪게 될 것으로 예상되므로 이온정류막은 해수담수화 비용을 절감 저가의 물 생산을 가능하게하고 세계적인 물 부족 해결에 크게 기여할 것임
- 이온정류막은 자체적으로도 큰 시장을 가지고 있으며, 응용분야인 신재생에너지와 해수담수화 또한 큰 시장이 예상되므로 많은 일자리 창출이 가능

제3절. 연구개발성과의 사업화 방안

1. 연구 개발 성과의 사업화 분야 정의

□ 연구 개발 성과의 전기투석 기술은 지하에 있는 해수 및 기수를 원수로 이용하여 담수화하는 기술이므로물관리 기술의 한 분야로서 물 산업 분야에 속함



출처: KISTEP 물관리 기술(2019)

	상수	하수	산업용수 및 폐수
원수	지표수(하천수/저수지), 지하수(우물물/복류수)	액체성 또는 고체성 폐기물이 혼입되어 그대로 사용할 수 없는 물	
		빗물, 지하수	공장폐수 등 산업폐수
사용처	가정용수, 소화용수, 공공용수	재이용수, 산업용수	산업용수
기술	정수처리, 해수담수화, 상수관망 기술 등	하수관거, 처리 및 재이용, 슬러지 처리 기술 등	

*출처: KISTEP 물관리 기술(2019), 환경부 용어사전, NICE평가정보 재가공

[표 32] 물산업 분야 물관리 기술의 구성

□ 기존 해수담수화 기술 중 전기투석법은 일반적으로 원수의 염분 농도가 높으면 에너지 소비량이 많은 단점이 있었지만 이온정류막이라는 소재를 이용하여 높은 에너지효율을 갖는 본사의 이동형 소규모 전기투석 담수화 장치는 이를 극복함

구분	특징
역삼투법	압력에너지와 용질(이온성 물질)은 거의 투과시키지 않는 역삼투막(RO)을 활용한 방법으로, 해수에 가압하여 담수만을 분리해내는 공법. 증발법에 비해 에너지 소비량이 적음.
증발법	해수를 증발시켜서 염분과 수증기를 분리하고, 수증기를 응결시켜 담수를 얻는 방법으로 대용량에 실적이 많고 생산수의 순도가 높은 장점이 있으나 에너지 소비가 크다는 단점이 있음.
전기투석법	전극에 직류전압을 걸면 양이온은 음이온 교환막을 통과하고, 음이온은 양이온 교환막에서 통과하여 순수한 담수만 남게되는 원리를 이용한 방법으로, 원수의 염분 농도가 높으면 에너지 소비량이 많아 비경제적임.
냉동법	고체-액체간의 상변화를 이용한 것으로 염수가 얼 때 어름결정에는 염분이 배제되는 원리에 기초를 둔 방법임.

*출처: 한국수자원공사 수도기술처의 해수담수화 사업(2010), NICE평가정보 재가공

[표 33] 담수화 사업 분야의 기술 종류

2. 이동형 담수화 기술의 현장 적용성

- 가뭄 우려 및 취약 지역을 파악하여 가뭄 발생 시 이동형 전기투석 장치를 이용하여 신속한 용수공급 가능
- 도서지역 : 지리적인 특성으로 인해 과거부터 물 부족을 많이 겪어 왔고 해수침입 등 외부요인에 의한 지하수 환경변화가 빈번
- 도서지역 용수공급원으로는 지표수, 지하수, 염지하수(해수담수화), 빗물등이있으나수량부족, 수질관리미흡, 2차오염, 유지관리비부담 등 문제점이 발생

구 분	장 점	단 점
저수지	• 안정적 공급 • 생태계 영향 적음 • 유지비 저렴	• 건설 적지 부족 • 공사비 고가 • 부영양화
지하수관정	• 수질 양호 • 공사비 저렴 및 근거리 개발 가능 • 강우 불규칙 영향 적음	• 대용량 개발 곤란(총적층 빈약) • 해수침투 위험성 • 오염 취약 및 회복 곤란
해수담수화시설	• 안정적 공급 • 시설면적 적음 • 공사비 저렴	• 유지관리비 고가 • 전문적 관리 필요 • 에너지 사용량 많음
빗물이용시설	• 수질 양호 • 운송처리시설 불필요(경제적) • 친환경적	• 공급량 부족 • 수질관리 필요
광역상수도(관로)	• 안정적 공급 • 환경 영향 적음	• 육지와와의 거리 짧아야 함 • 관련계획 의존도 높음

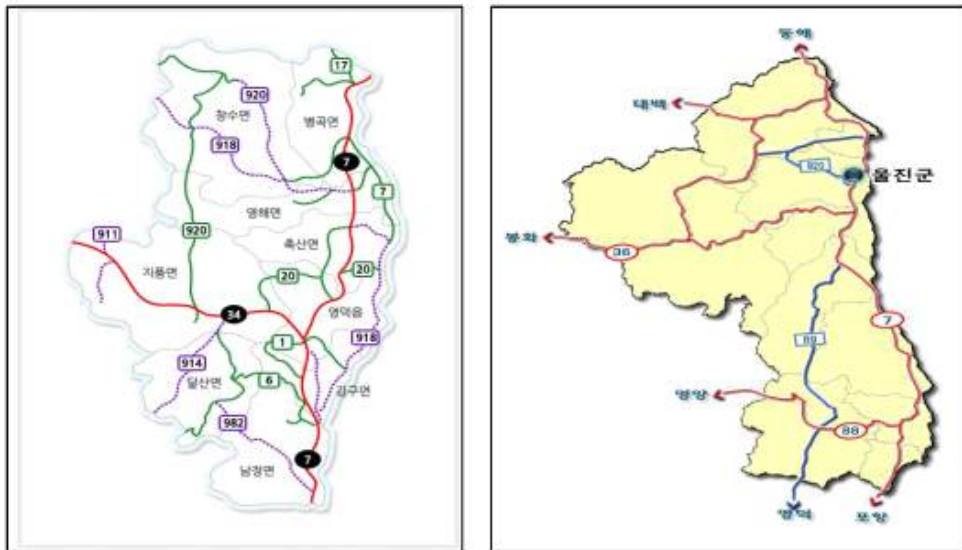
[표 34] 도서지역 용수공급원에 따른 장단점 비교

- 이동형 전기투석장치의 가장 우선적인 활용방안으로 해수침투된 지하수관정의 정확도를 통한 용수공급을 고려해볼 수 있음, 이미 확보된 지하수 관정을 이용하면 원수 확보에 유리하여 이동형 전기투석장치를 효과적으로 이용 가능
- 직접 해수 및 기수를 취수하여 담수화하는 방법이 이용가능한 지역은 인구, 지하수 함양량이 많은 곳일 필요가 있음

선정요소	용수확보 모델				
	저수지	지하수관정	해수담수화시설	빗물이용시설	광역상수도(관로)
인구	많다	—	많다	적다	많다
면적	넓다	넓다	—	좁다	—
지하수 함양량	—	많다	많다	적다	—
지리적 거리	—	—	—	멀다	가깝다

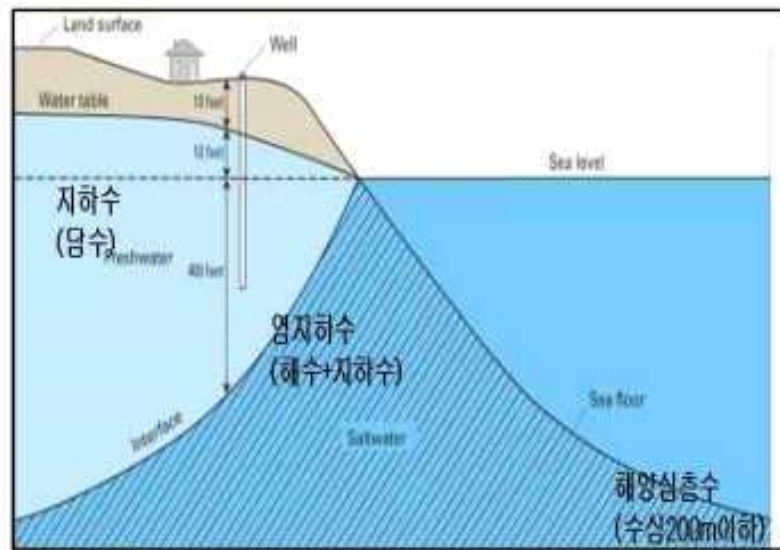
[표 35] 도서지역의 용수공급원별 선정평가 기준

- 동해안 지역 : 염지하수가 풍부한 지역이 많고 해안가에 인접한 도로가 많아 해수 및 기수를 취수하기가 용이함



[그림 78] 동해안 지역 교통망 현황

- 염지하수는 일반지하수와 달리 해양심층수보다 비교적 높은 미네랄 함량을 보이며, 수온은 17~19℃로 저온 안정성과 계절변동 및 특성변화가 적은 물리적 장점이 있음



[그림 79] 동해안 염지하수의 활용 방안

위치	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
경북해양바이오산업연구원 내 1호공	8,757.7	1,001.1	103.4	1,1687.7	1,825.4	16,888.2	112.9
경북 영덕군 영해면 대진리 219-2	1,363.6	509.8	25.9	1,427.5	612.2	4,115.9	143.4
경북 울진군 기성면 망양리 3	8,302.7	182.5	348.8	619.2	1,749.9	1,482.4	161.0
Sea	6,893.7	1,346.6	583.6	430.7	2,103.3	14,541.3	140.3

자료 : 염지하수자원 부존특성조사 보고서, 2013년, 경북해양바이오산업연구원

[표 36] 동해안 염지하수공 수질분석

3. 사업화 목표시장에서의 사업 경쟁력

3.1. 국외 시장 분석

3.1.1. 세계 물산업 시장 규모 및 전망

□ 시장조사기관 GWI(Global Water Intelligence)에 따르면 세계 물시장은 2015년 6천895억 달러에서 2017년 7천252억 달러로 성장했으며, 2019년에는 7천894억 달러, 오는 2022년에는 연평균 4.2%씩 성장해 8천904억 달러 규모로 커질 전망

(단위: 억\$)

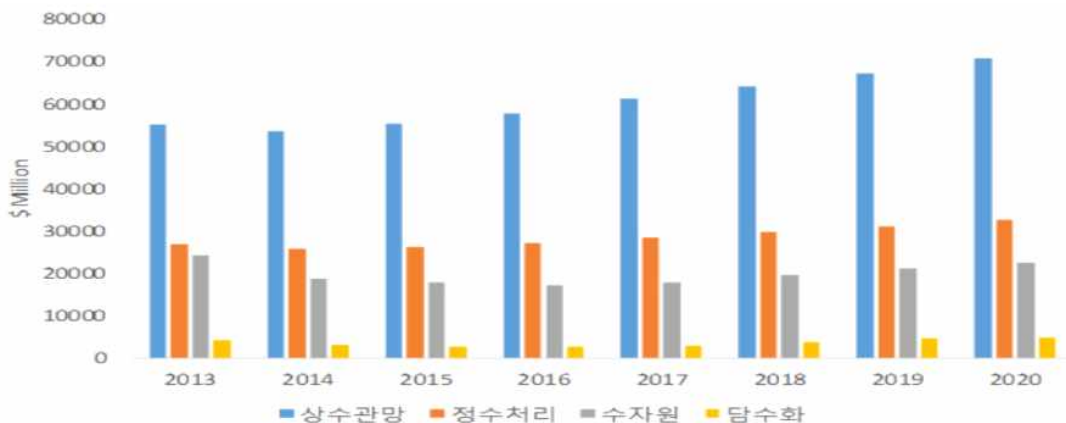
구 분	2017	2018	2019	2020	2021	2030
합 계	7,252	7,555	7,840	8,184	8,520	12,032
상수도	2,908	3,018	3,121	3,237	3,349	4,588
수자원개발	195	214	229	246	262	405
해수/기수담수화	44	49	53	54	60	217
하수도	2,750	2,878	2,975	3,114	3,234	4,582
산업용수	1,354	1,397	1,461	1,533	1,615	2,241



[그림 80] 세계 물시장 전망

3.1.2. 세계 담수화 시장 규모 및 전망

□ 시장조사기관인 GWI(Global Water Intelligence)에 따르면, 세계 해수담수화 시장은 내년부터 2024년까지 연간 70~100억 달러에 달할 것으로 추산



[그림 81] 글로벌 자본적 지출시장 전망(2013~2030)

3.1.3. 세계 물산업 동향

(가) 시장동향

- 세계 인구증가와 도시화 및 산업화에 따른 물수요 증가와 공급부족으로 세계 물시장 지속적 성장 예상 (UN, OECD환경전망 등)
- 물 재이용, 해수담수화 등을 이용한 안정적인 용수 공급 시장과, 엄격해지는 환경 규제에 따른 수처리 시장 수요 예상

(나) 기술동향

- 지속가능한 솔루션에 대한 필요성이 대두되는 것이 에너지 효율적이고 에너지 중립적인 처리 시스템 개발에 대한 투자를 유도
- 전통적인 물공급기술, 하폐수 위생처리기술에 인공지능(AI), 사물 인터넷(IoT), 로봇 등 4차산업 신기술과의 융합된 기술시장 기대
- 산업 부문에서는 분산형/이동형 처리 시스템에 관한 IoT 통신 모듈/솔루션, 클라우드 컴퓨팅, AI, 빅데이터 솔루션 제공사들과의 협업
- 분산형 처리 시스템을 위한 Water-as-a-Service와 같은 최신 서비스 모델 구축
- 개선된 효율성과 용이한 가용성이라는 강점을 지닌 멤브레인 기반 처리 시스템이 AI와 통합 되면 실사용자의 운영비용(OPEX)은 현저히 낮아지는 반면, 완전한 운영 자동화와 처리 시스템의 유지가 가능할 것으로 기대

(다) 지역별 동향

- 선진국에서는 노후 인프라의 교체·개량, 환경기준 강화, 재이용 및 자원회수, 에너지 효율성 향상 등으로 물시장 지속 확대 전망
- APAC 지역이 빠른 산업화와 경제 성장, 그리고 도시화로 물과 폐수 처리 솔루션 분야에서 가장 빠르게 성장하는 시장으로 부상
- 북미 시장 산업부문은 석유 및 가스 추출 산업이 주도, 동유럽·동남아·남미 등 개도국에서는 신규 인프라, 아프리카의 경우 ODA(공적개발원조) 연계 투자, 중동은 해수담수화·재이용 등에 대한 수요 지속 확대 전망, 향후 15년('16~'30)간 물 분야(13.6조\$)에 주요 인프라와 함께 큰 투자가 예상(OECD, '17)
- 중동 지역은 지자체 및 산업용의 에너지 효율성이 높은 담수화 처리 시스템에 투자

3.2. 국내 시장 분석

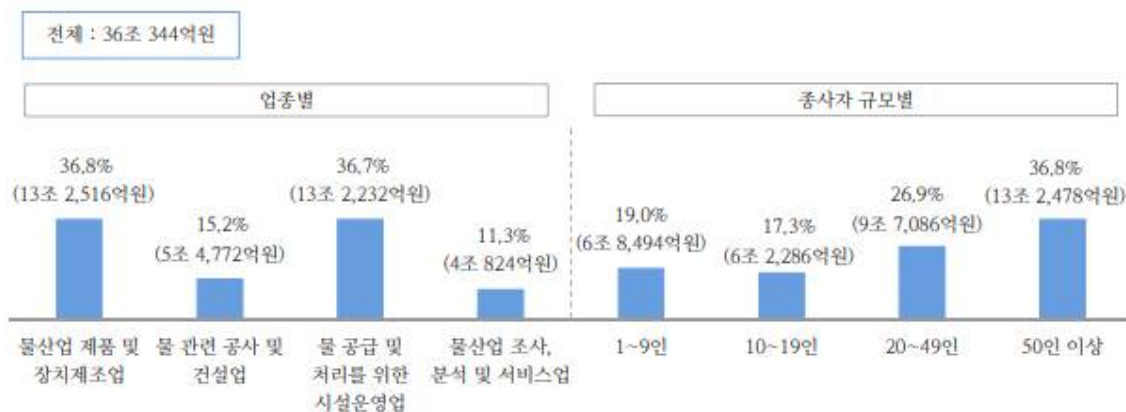
3.2.1. 국내 물산업 시장 규모 및 전망

- 국내 물시장은 세계 12위 규모이지만, 향후 성장 정체 우려, 국내 물기술, 선진국 70~80% 수준
- 향후 세계 시장 성장률(4.2%) 대비 낮은 성장(2.6%)이 전망되고, 상하수도 등 인프라 완비로 향후 내수 시장 성장정체 우려('17년 상하수도 보급률 - 상수도: 99.1%, 하수도: 93.6%)
- 물기업 해외수출 참여율은 4.5%에 불과, 물산업 수출액이 매출액에서 차지하는 비율은 4.7%(1.7조원)로 내수시장 의존도가 높음(중소기업 평균 매출액 대비 수출액 비중 9.5%)

< 국가별 물시장(투자) 규모(GWI 2018) >

구 분	1위	2위	3위	4위	5위	6위	7위	8위	9위	10위	11위	12위
국 가	미국	중국	일본	프랑스	독일	브라질	러시아	인도	영국	호주	이태리	한국
규모(억\$)	1,519	1,057	882	256	244	226	219	201	197	157	130.2	129.9
1인당 규모(\$/인)	462	74	694	394	298	107	152	15	294	628	221	250

[표 37] 국가별 물시장(투자) 규모(GWI 2018)

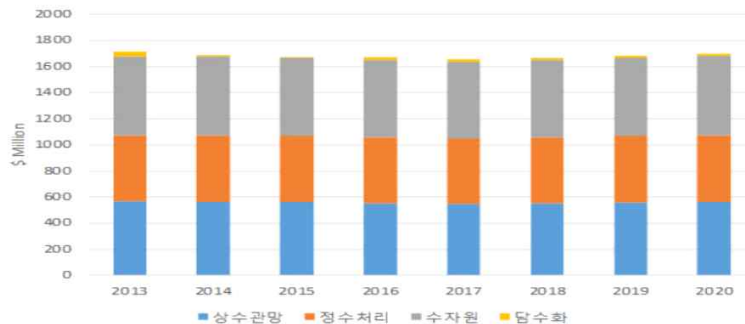


[그림 82] 물산업 분야 매출액 (2018 물산업통계조사)

3.2.2. 국내 담수화 시장 규모 및 전망

- 담수화 시장이 포함된 국내 상수 영역 자본적 지출 전망을 보면 담수화가 차지하는 비중이 세계 전망에 비해 낮은 것을 알 수 있음

- 이는 국내의 경우 높은 시설 비 및 유지비를 필요로 하는 대용량 플랜트 위주로 담수화 시장이 형성되어 있기 때문으로 판단됨
- 소규모 이동형 담수화 기술은 기존 기술과의 차별성으로 상수 영역에서 차지하는 시장 비중을 늘릴 수 있을 것으로 기대됨



[그림 83] 국내 상수 영역 자본적 지출시장
전망(2013~2020)

3.3. 사업 경쟁력

(가) 해수담수화 경쟁 현황

- 물부족 문제 해결 및 기후변화로 인한 수자원 확보 측면에서 1990년대 이후부터 기술개발이 본격화 되었으며, 증발법, 역삼투(RO: Reverse Osmosis), 정삼투(FO: Forward Osmosis) 등 기술이 다변화됨
- 가장 역사가 오래된 해수담수화 기술인 증발법은 해수를 증기로 변화시켜서 담수화하는 방식으로 현재에도 널리 사용됨
- 1990년 이후부터 역삼투 공정이 개발되기 시작하였으며, 2000년 대는 에너지를 대폭 저감할 수 있는 에너지회수장치 기술의 개발로 역삼투 공정이 시장을 주도함
- 가장 역사가 오래된 해수담수화 기술인 증발법은 해수를 증기로 변화시켜서 담수화하는 방식으로 현재에도 널리 사용됨
- 1990년 이후부터 역삼투 공정이 개발되기 시작하였으며, 2000년 대는 에너지를 대폭 저감할 수 있는 에너지회수장치 기술의 개발로 역삼투 공정이 시장을 주도함
- 2010년 이후에는 역삼투막 기술의 고도화 및 대체하기 위한 차세대 기술(정삼투, PRO, 전기투석 등) 개발 활발

(나) 차세대 이온교환막의 차별성과 경쟁력

1) 차별성

- 이온교환막과 달리 수직으로 정렬된 나노기공으로 막 저항이 낮으며, 비대칭구조에 의한 이온 정류특성으로 전기적 특성이 1000 배 이상 향상됨.
- 알루미늄을 양극산화해서 제작되는 알루미늄으로 이루어진 높은 열적 안정성과 높은 기공밀도를 갖는 고효율 막으로 저비용 생산이 가능한 최초의 산업적 차세대 이온교환막 기술
- 본 기업은 차세대 이온교환막 제조의 원천기술을 보유하고 있음

2) 경쟁력

- 이온 정류기능의 기공생산방식을 이용하여 고 기공밀도의 막 생산기술은 본 기업이 유일함
- 본 기술은 나노기공을 정밀하게 조절 가능한 기술로서 해수담수화에 최적화된 나노구조를 사전 설계하여 제작할 수 있음
- 이미 전기화학적 금속 표면처리로서 활성화된 기술인 양극산화를 이용할 수 있어서 저가의 대량 생산설비 마련에 유리
- 기존 이온교환막은 가격이 높기 때문에 저렴한 차세대 이온정류막은 가격 경쟁력에서 우위

외부환경 내부환경	Strength	Weakness
	S1. 독창적 제품생산 기술 S2. 저렴한 생산방식 S3. 열적·화학적 안정성 S4. 구조제어의 용이함	W1. 세라믹 소재 특성상 고분자에 비해 깨지기 쉽다는 인식 W2. 이온정류막에 대한 경험과 노하우 부족 W3. 새로운 기술에 대한 홍보부족
Opportunity	SO 전략	WO 전략
O1. 해수담수화 등의 제품 시장은 꾸준히 성장하는 추세 O2. 에너지와 물부족 문제에 따른 이온정류막에 대한 세계관심 집중	- R&D를 통한 독보적 상용 기술 확보 및 시장선점 - 기존 제품 대비 차별화된 기술로 고내구성, 고효율, 저가의 이온정류막 생산	- 전방기업-후방기업의 연계 및 상호협력 기반 구축 - 국내외 핵심고객 확충 - 산학연 협력을 통한 공정안정화
Threat	ST 전략	WT 전략
T1. 고분자 이온정류막을 이용한 선두 그룹의 시장독점 T2. 세계 다양한 그룹과의 기술경쟁	- 미래시장/산업을 분석하고 그에 따른 중장기적 투자 및 기술개발 전략수립 - 사업초기 사업성 검토를 위한 기술 가치평가	- 제품의 양산화를 위한 산학연협력 - 특허전략 수립 - 전방기업-후방기업의 연계 및 상호협력 기반 구축

[표 38] 기술 경쟁력 분석

4. 연구개발성과 기술의 사업화 방안

4.1. 기술성숙도 분석

구분			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

[표 39] 기술성숙도 단계 표시

- ☐ 전기투석 과정 중에 발생하는 Scale을 제거하기 위해 전위방향을 바꿨을 때 담수의 재오염을 방지할 수 있는 정류특성을 가지는 50x50 cm²의 양/음 이온정류막을 개발함, 개발된 양/음 이온정류막은 각각 1.975 Ω·cm², 2.288 Ω·cm²의 낮은 저항을 가지는 것을 확인함
- ☐ 유효면적 1 m²의 이온정류막 12 pairs로 일 처리용량이 1 m³/day인 전기투석스택을 제작, 이를 적용한 안티파울링 전기투석 시스템 평가 결과 (1)염분제거율 90 %, (2)에너지효율 0.5 kWh/m³, (3)연속적인 scale 제거를 통해 14일 동안 TDS 변화율 ±2 % 이내의 성능을 확인함
- ☐ 안티파울링 전기투석 시스템을 바탕으로 소규모 이동형 전기투석 장치의 담수화 능력을 실증하기 위해 기수로부터 생산된 담수의 수질평가 결과 증발잔류량 24 mg/L, 과망간산칼륨소비량 2.2 mg/L, 수소이온농도 6.7 pH, 염소이온농도 13.7 mg/L, 황산이온농도 4 mg/L임을 확인하여 각 해당 항목의 먹는물 수질기준을 만족하는 것을 확인함
- ☐ 연구개발성과 기술은 이론적 연구와 기술적 개념 정립 후 실험실 및 유사환경에서 성능 평가를 완료하였고 차량에 소규모 전기투석 시스템을 탑재하여 이동형 전기투석 장치 시제품을 제작하므로써 TRL 8 단계에 도달한 것으로 확인됨
- ☐ TRL 8 단계로부터 현장적용 및 사업화 단계인 TRL 9 단계에 도달하기 위해 연구개발성과의 사업화 분야를 정의하고 현장 적용 가능성을 조사하여 사업화 모형 및 전략 설계함

4.2. 사업화 방안

4.2.1. 사업화 모형

(가) 사업화 모형 수립(BM) 배경

- ☐ 저에너지·고효율 해수담수화 기술은 미래 용수 확보를 위한 핵심 기술
- ☐ 도시화와 산업화에 따라 생활 및 공업용수의 사용이 급증하는 추세
- ☐ 내륙이나 해안의 지하수 개발은 지반침하를 야기하므로 저렴하고 풍부한 수자원의 확보는 미래 국가의 생존과 경쟁력을 좌우할 핵심 요소
- ☐ 막을 적용하고 있는 해수담수화 기술이 기존의 에너지 사용량을 대폭 줄이고 효율성을 제고시키는 방향으로 기술개발이 진전되고 있음
- ☐ 전기투석법 (EDR): 과 같이 전기투석법은 전기투석의 원리를 이용하한 해수담수기술로 이온교환막이 사용되며 유지비용이 적고 나노기술이 발전함에 따라 잠재력이 매우 큰 기술

(나) 구체적 사업화 모형

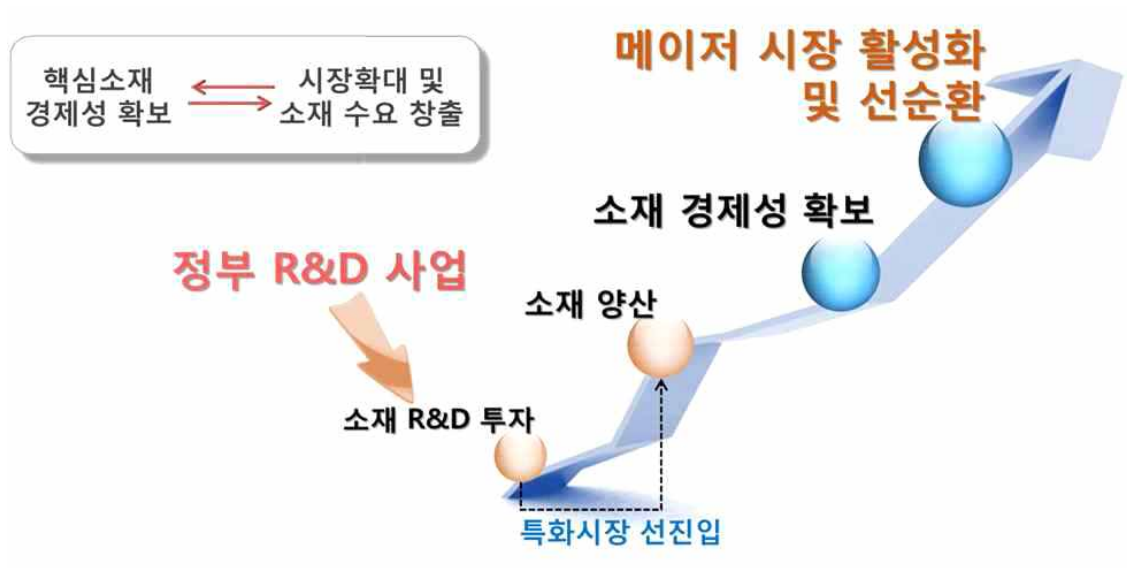
- ☐ 상용화 형태 : 이온정류막, 전기투석 시스템(pilot 또는 소규모)
- ☐ 수요처 :
 - 이온정류막 : 전기투석 관련 연구기관 및 대학, 전기투석 시스템 제조하는 기업, 그 밖의 이온교환막을 수단으로 하는 다양한 수요처 존재
 - 전기투석 시스템 : 물 부족 문제를 겪는 섬 지역 주민, 공장, 농가 또는 전기투석 공정을 이용한 폐수처리공정이나 식품공정이 요구되는 업체
- ☐ 예상 단가 : 이온정류막 : 5 ~ 15 \$/m² /전기투석 시스템 : 5000 ~ 10000 \$

4.2.2. 사업화 전략

- ☐ 경쟁력 있는 핵심소재의 개발을 위해서는 그 만큼 장기적인 전략과 인내심 있는 투자를 요구
- ☐ 특히 값비싼 소재, 부족한 인프라, 더딘 시장 확장에 따른 수요 부족 등을 이유로 악순환에 빠지기 쉽기 때문에 새로운 시장을 목표로 한 소재의 장기 개발은 결코 쉬운 작업은 아님
- ☐ 해수담수화 소재의 경우 반드시 규모의 경제를 통한 선순환 고리에 이르러야만 경제성 있는 제품을 완성차 업체 공급할 수 있다는 점에서 반드시 해결해야하는 문제
- ☐ 또한, 시장의 확실성이 담보되지 않은 상황에서의 장기투자는 리스크가 크기 때문에 핵심소

재인 이온정류막 개발의 관점에서 이러한 리스크의 완화를 위해서는 다음과 같은 전략이 필요함

- 열려있는 특화 시장에 적용을 확대하여 소재의 양산화를 앞당기면 투자 리스크를 분산할 수 있고 소재 양산에 따른 해수담수화 시장 촉진을 가져 올 수 있음
- 초기 시장 활성화를 위해서는 인프라 구축 등 정부의 투자도 함께 진행되어야 함



[그림 84] 사업화 전략

붙임. 참고문헌

- [1] Z. Zhang, L. Wen and L. Jaing, “Bioinspired smart asymmetric nanochannel membranes”, *Chem. Soc. Rev.*, **47**(2), 322–356 (2018)
- [2] E. Gouaux and R. MacKinnon, “Principles of selective ion transport in channels and pumps”, *Science.*, **310**(5753), 1461–1465 (2005).
- [3] L. J. Cheng and L. J. Guo, “Nanofluidic diodes”, *Chem. Soc. Rev.*, **39**(3), 923–938 (2010).
- [4] Z. S. Siwy, “Ion-current rectification in nanopores and nanotubes with broken symmetry”, *Adv. Funct. Mater.*, **16**(6), 735–746 (2006).
- [5] W. Guo, L. Cao, J. Xia, F. Q. Nie, W. Ma, J. Xue, Y. Song, D. Zhu, Y. Wang and L. Jiang “Energy harvesting with single-ion-selective nanopores: a concentration-gradient-driven nanofluidic power source”, *Adv. Funct. Mater.*, **20**(8), 1339–1344 (2010).
- [6] M. A. Alibakhshi, B. Liu, Z. Xu and C. Duan, “Geometrical control of ionic current rectification in a configurable nanofluidic diode”, *Biomicrofluidics.*, **10**(5), 054102 (2016).
- [7] D. He, E. Madrid, B. D. B. Aaronson, L. Fan, J. Dougty, K. Mathwig, A. M. Bond, Neil. B. McKeon and F. Marken, “A cationic diode based on asymmetric nafion film deposition”, *ACS. Appl. Mater. Interfaces.*, **9**(12), 11272–11278 (2017).
- [8] E. Choi, C. Wang, G. T. Chang and J. Park, “High current ionic diode using homogeneously charged asymmetric nanochannel network membrane”, *Nano. Lett.*, **16**(4), 2189–2197 (2016).
- [9] J. Cervera. A. Alcaraz, B. Schiedt, R. Neumann and P. Ramirez, “Asymmetric selectivity of synthetic conical nanopores probed by reversal potential measurements”, *J. Phys. Chem. C.*, **111**(33), 12265–12273 (2007).
- [10] J. Jung, J. Kim, H. S. Lee, I. S. Kang and K Choi, “Multi-asymmetric ion-diode membranes with superior selectivity and zero concentration polarization effect”, *ACS. Nano.*,

13(9), 10761–10767 (2019).

- [11] K. Cjoi, Y. Yoon, J. Jung, C. W. Ahn, G. J. Lee, Y. M. Song, M. J. Ko, H. S. Lee, B. Kim and I. S. Kang, “Super-antireflective structure films with precisely controlled refractive index profile”, *Adv. Opt. Mater.*, **5(3)**, 1600616 (2017).
- [12] K. Nielsch, J. Choi, K. Schwim, R. B. Wehrspohn and U. Gosele, “Self-ordering regimes of porous alumina: The 10 porosity rule”, *Nano. Lett.*, **2(7)**, 677–680 (2002).
- [13] W. Lee and S. J. Park, “Porous anodic aluminum oxide: anodization and templated synthesis of functional nanostructures”, *Chem. Rev.*, **114(15)**, 7487–7556 (2014).
- [14] D. I. Petukhov and A. A. Eliseev, “Gas permeation through nanoporous membranes in the transitional flow region”, *Nanotechnology.*, **27(8)**, 085707 (2016).
- [15] X. Jiang, N. Mishra, J. N. Turner and M. G. Spencer, “Freestanding alumina membrane by double-layer anodization”, *IEEE. T. Nanotechnol.*, **226(3)**, 328–333 (2007).
- [16] B. Zhang, J. G. Hong, S. Xie, S. Xia and Y. Chen, “An integrative modeling and experimental study on the ionic resistance of ion-exchange membranes”, *J. Membrane. Sci.*, **524**, 362–369 (2017).
- [17] J. Wang, M. Zhang, J. Zhai and L. Jiang, “Theoretical simulation of the ion current rectification (ICR) in nano-pores based on the Poisson - Nernst - Planck (PNP) model”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **16(1)**, 23–32 (2014).
- [18] L. J. Cheng and L. J. Guo, “Ionic current rectification, breakdown, and switching in heterogeneous oxide nanofluidic devices”, *ACS. Nano.*, **3(3)**, 575–584 (2009).
- [19] A. Gruger, A. Régis, T. Schmatko and P. Colomban, “Nanostructure of Nafion® membranes at different states of hydration: An IR and Raman study”, *Vib. Spectrosc.*, **26(2)**, 215–225 (2001).
- [20] Z. Siwy, E. Heins, C. C. Harrell, P. Kohli and C. R. Martin, “Conical-nanotube ion-current rectifiers: the role of surface charge”, *J. Am. Chem. Soc.*, **126(35)**, 10850–10851 (2004).

- [21] UNESDOC(2019), The United Nations World Water Development Report 2019, United Nations Education, Scientific and Cultural Organization.
- [22] GWI(2017), Global Water Market 2017, Global Water Intelligence.
- [23] 조기숙(2019), 정수 및 하·폐수 기술 동향, KISTEP.
- [24] 조은채(2011), 주요 국가의 물산업 정책 동향, Journal of Water Policy & Economy.

주 의

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