



검토 한국의 담수화 기술: 기술 동향 및 미래 전망에 대한 종합적인 검토

박종관¹ 그리고 이성윤^{2,3,*}

¹ 51140 창원시 창원대학교 20 창원대학교 토목환경화학공학부; jkpark2019@changwon.ac.kr 경북대학교 방재
환경공학부 토목환경공학과, 상주시 경상대로 2559, 37224, 경북대학교 첨단과학기술융합학과, 경상 2559 -상주
² 시대로 37224, 대한민국

삼

* 연락 : Sungyunlee@knu.ac.kr

추상적인: 담수화 기술의 발전으로 인해 담수화는 증가하는 전 세계 담수 수요를 충족시키기 위한 실용적인 방법으로 간주되었습니다. 이 논문은 한국의 담수화 산업 및 연구 작업의 현황을 살펴봅니다. 담수화 플랜트 설계, 통계, 담수화 연구 로드맵을 분석하였다. 담수화에서 에너지 소비를 줄이기 위해 해수 역삼투압법(SWRO)이 집중적으로 조사되었습니다. 최근에는 정삼투압법, 압력지연삼투압법, 막중류법, 용량성 탈이온화법, 신재생에너지 담수화법, 담수화 전지 등의 대체 담수화 기술도 활발히 연구되고 있다. 관련된 주요 컨소시엄 기반의 담수화 연구 프로젝트 및 파일럿 플랜트는 담수화의 에너지 소비를 낮추고 SWRO 염수의 환경 영향을 완화하는 방법에 대한 통찰력을 제시합니다. 마지막으로 우리나라의 담수화 기술 현황을 바탕으로 향후 개발에 대한 고려사항을 제시한다.



소환: 박제이; Lee, S. 한국의 담수화 기술: A

키워드: 해수담수화; 역삼투; 산업; 연구; 대체 기술; 에너지; 대한민국

기술 동향 및 향후 전망에 대한 종합 검토. *막* 2022년, 12, 204. <https://doi.org/10.3390/>

멤브레인12020204

학술편집자: 박호식

접수: 2022년 1월 9일 수락:

2022년 2월 6일 발행: 2022년 2

월 9일

발행인 메모: MDPI는 게시된 지도 및 기관 제휴의 관찰권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.

1. 소개

연간 기준으로 전 세계 수준의 수요를 충족시키기에 충분한 담수가 있지만, 물 수요 및 가용성의 공간적 및 시간적 변동은 세계 여러 지역에서 물 부족 문제를 초래합니다.¹ 현재 전 세계 인구의 거의 절반인 36억 명 또는 47%가 일년 중 적어도 한 달 동안 물 부족에 직면합니다. 이 숫자는 2050년까지 세계 인구의 57%로 증가할 것으로 예상됩니다.² 인구 증가, 도시화, 산업 및 농업 활동 증가로 인해 꾸준히 증가하는 물 수요에 대응하여 해수 담수화는 부족을 해결하고 수요를 충족시키는 실행 가능한 옵션으로 가장 주목을 받았습니다. 이에 따라 담수화 시장은 1990~2018년 연간 9%에 가까운 성장률을 보이며 급성장하고 있다.³

2000년 이전 해수담수화 시장의 핵심기술이 열담수화였을 때 우리나라 기업들은 해수담수화 시장의 상당 부분을 점유하고 있었다. 그러나 2000년대 담수화 기술은 역삼투압(RO) 기술이 지배적이어서 시장 점유율을 유지하기 위해서는 해수 역삼투압(SWRO) 기술에 대한 정부의 연구개발 지원이 필요했다. 2006년 한국 정부가 연구개발(R&D) 10대 과제(Value Creator 10) 중 하나로 해수담수화 기술을 선정할 이후 국내에서도 담수화 연구에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁴

이 리뷰 기사에서 우리는 한국의 담수화 기술의 혁신과 발전에 초점을 맞추었습니다. 이 리뷰는 담수화 기술의 역사를 공유하는 것을 목표로 합니다.



저작권: © 2022 저자에 의해. 사용권자 MDPI, Basel, Switzerland. 이 기사는 CC BY(Creative Commons Attribution) 라이선스(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)의 이용 약관에 따라 배포되는 오픈 액세스 기사입니다.

한국의 담수화 산업 발전 방향과 연구 목표에 대한 통찰력을 제공합니다. 주요 글로벌 트렌드와 함께 우리나라의 담수화 산업 현황 및 관련 주요 담수화 연구 프로젝트를 소개합니다. 한국의 담수화 기술을 검토하는 것은 산업적 요구를 이해하기 위한 정보와 담수화 연구를 위한 기초를 제공합니다.

2. 한국의 담수자원과 담수화 산업

2.1. 한국의 담수 자원 및 담수화 시설

한국은 비교적 습한 지역에 위치하고 있습니다. 우리나라 수자원의 총량은 1,323억 m³/년(2015)이며, 한국의 연평균 강수량은 1277mm(1978-2007)로 세계 평균의 1.6배입니다. 그러나 높은 인구 밀도로 인해 1인당 연간 강수량은 2629m입니다. ^삼매년 세계 평균의 약 1/6 [5]. 더욱이 한국의 계절적 강수량 분포는 균일하지 않다. 봄의 연간 강수량은 약 15%에 불과하며, 연간 총 강수량의 40-60%는 6월에서 8월까지 여름에 집중됩니다. 남해안 지역을 제외한 겨울철 강수량의 대부분은 강설에 의한 것으로 겨울철 연강수량은 5~10% [6]. 불행히도 이러한 계절별 가용수량의 공간적, 시간적 편차는 날로 심화되는 기후변화의 영향과 극심한 강우의 발생 및 집중으로 인해 더욱 커질 것으로 예상된다. [7].

최근 건기의 일시적인 물 부족 문제로 인해 한국의 안정적인 물 공급을 위한 솔루션으로 해수 담수화에 대한 고려가 촉발되었습니다. 예를 들어, 2015년 대한민국 중서부에 위치한 충청남도는 심각한 물 부족을 겪었습니다. 이를 해결하기 위해 정부는 2021년 10만m² 규모의 ^삼/day SWRO 담수화 플랜트, 인근 산업 클러스터에 수자원 공급 [8].

한국에서는 중형(5000~60,000m^삼/일) 공업용수를 공급하기 위해 1980년대 후반에 RO 담수화 시설이 처음 건설되었다. [8,9]. 테이블 1 한국의 대표적인 RO 담수화 플랜트를 나열합니다. RO 담수화 시설의 대부분은 기수 담수화 플랜트입니다. 공업용수 생산을 위한 최초의 해수 RO 담수화 플랜트는 2014년에 건설되었습니다. ^삼/일) 도시용수를 위한 RO 담수화 시설은 지금까지 섬에만 설치되었습니다. 2014년 기준으로 남한의 섬들에는 109개의 해수 RO 담수화 시설이 있으며, 총 시설 용량은 8333m^삼입니다. ^삼/년 [10]. 섬에 있는 RO 담수화 시설의 97%는 용량이 500m^삼 미만입니다. ^삼/일(테이블 2). 이러한 소규모 담수화 플랜트는 외딴 섬에 위치하기 때문에 전문 운영자의 적절한 운영 및 유지 관리(O&M)가 어렵습니다. 그 결과, O&M 문제로 인해 일부 소규모 담수화 플랜트가 폐쇄되었습니다. [11]. 따라서 효과적인 관리를 위해서는 자동화된 O&M 장치 또는 원격 제어 시스템을 적용해야 합니다.

1 번 테이블.대한민국 대표 RO 담수화 설비.

공장 위치	용량(m ³ /낮)	급수 유형	생산 1년차	목적
서산	16,000	염수	1988년	공업용수
서산	25,000	염수	1990년	공업용수
서산	84,000	염수	1991년	공업용수
당진	4500	염수	1997년	공업용수
당진	182,000	염수	2009년	공업용수
대산	119,000	염수	2012년	공업용수
광양	30,000	바닷물	2014년	공업용수
삼척	2400	바닷물	2017년	발전소
울진	10,000	바닷물	2020년	발전소
대산	100,000	바닷물	2024년(예정)	공업용수

표 2. 한국의 섬에 있는 생활용수에 대한 해수 RO 담수화 시설의 용량.

용량(m ³ /낮)	시설 수	백분율(%)	목적
10-49	60	55.0	도시 물
50-99	29	26.6	도시 물
100-499	17	15.6	도시 물
500-1000	삼	2.8	도시 물

2.2. 국내 담수화 기술 동향 및 담수화 산업 개요

일반적으로 담수화 기술은 증발 및 응축, 막 공정 또는 결정화의 세 가지 주요 범주로 분류할 수 있습니다. 수치1정삼투압법(FO), 막증류법(MD), 용량성 탈이온화법(CDI)과 같은 신기술을 포함한 현재의 담수화 기술을 보여줍니다.12,13]. 증발 기술은 1950년대에 가동되기 시작하여 2000년까지 주요 기술이었다 [14]. 그러나 지난 몇 년 동안 RO 멤브레인 기술의 엄청난 발전과 에너지 비용 증가로 인해 주요 담수화 기술이 열 공정에서 멤브레인 기반 담수화로 전환되었습니다.15]. 현재 RO 해수 담수화의 특정 에너지 소비(SEC), 3.5-4.5 kWh/m³[16], 다단 플래시(MSF; 13.5-25.5 kWh/m)와 같은 열담수화 기술보다 현저히 낮습니다.삼 및 다중 효과 증류(MED, 6.5-11kWh/m³) [13]. 그 결과 RO 담수화 (2001년 신규 해수담수화 용량의 51%)가 2003년 75%로 증가했으며 이후 계속 증가하고 있다.14,17].

한국의 대표적인 담수화 플랜트 공급업체는 두산중공업(한국 창원)입니다. 두산중공업은 2010년부터 2021년까지 계약된 담수화 용량 5위를 차지한 글로벌 해수담수화 플랜트 공급업체입니다.18]. 두산중공업은 주로 MSF와 MED 담수화 사업에 주력했지만 RO 기술 중심의 해수담수화 시장 점유율을 높이기 위해 2007년부터 2012년까지 정부의 RO 기술 R&D 프로그램에 참여했다. 담수화 플랜트, Ras Al Khair 담수화 플랜트, 1,036,000m 용량삼2014년 /일(MSF 727,130m³/일 및 RO 309,360m³/낮) [19]. GS 건설(GS E&C)(한국 서울)도 담수화 사업의 선두 기업 중 하나입니다. GS건설은 2012년 스페인 RO담수화플랜트 공급업체인 Inima OHL을 인수하여 담수화 사업에 본격 진출하였습니다.20]. GS이니마는 세계 50대 물 관련 기업 중 45위를 기록했으며, 2020년 말 오만에서 약 21억 달러 규모의 담수화 프로젝트를 수주했다.21]. Hanwha E&C(한국 서울) 및 Daewoo E&C(한국 서울)와 같은 설계, 조달 및 건설(EPC) 회사는

해수 개발을 위한 국책과제(한국, 2016~2020)에도 참여 담수화 기술 [22].

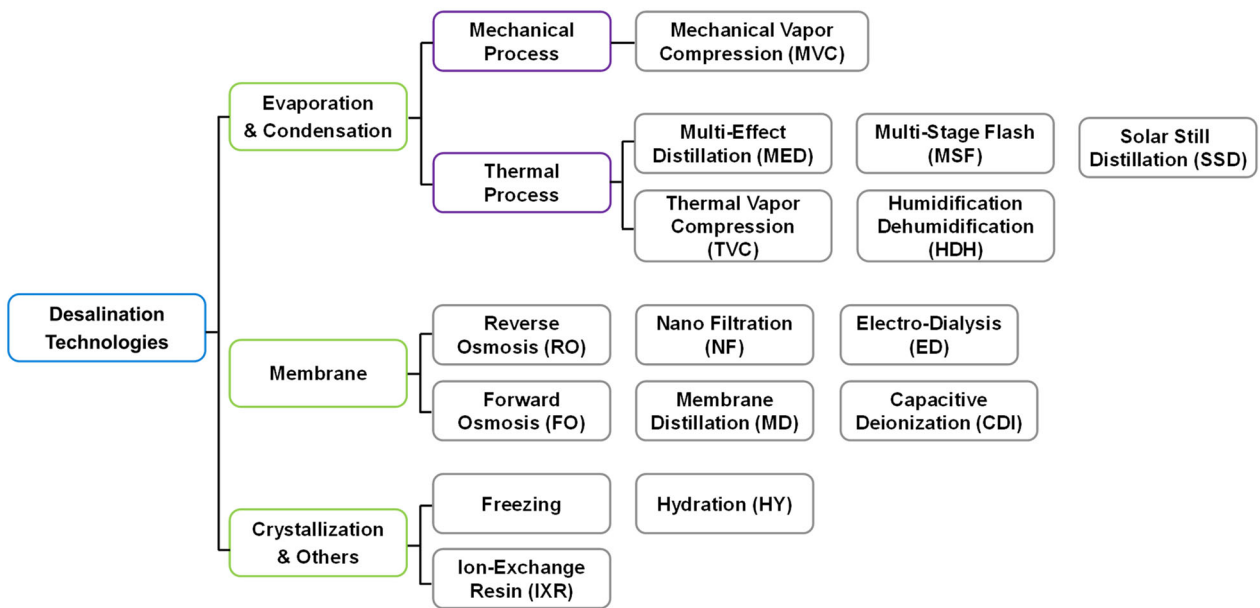


그림 1. 담수화 기술의 범주.

국내 물 부족 문제가 심각하지 않은 만큼 국내 기업들이 글로벌 담수화 시장에 주목하고 있다. 2020년 전 세계 담수화 장비 시장 규모는 131억 2,000만 달러로 2020년부터 2028년까지 연평균 7.1%의 성장률로 성장할 것으로 예상됩니다.[23].

3. 국내 담수화 연구 현황

3.1. 한국의 담수화 연구 로드맵

연구 간행물 데이터는 2000년부터 2020년까지 담수화라는 검색어를 사용하여 Scopus 데이터베이스에서 수집되었습니다.[24]. 2020년까지 글로벌 출판물은 26,617건으로 그 중 1,447건이 한국에서 발행되어 5.4%를 차지합니다. 최근 서지 연구에 따르면 한국의 담수화 관련 출판물 수는 중국, 미국, 인도에 이어 세계 4위[25]. 수치 2000년부터 2020년까지 국내 담수화 관련 연간 간행물의 추이를 보여 준다. 2009년 연간 간행물은 20편에서 80편 이상으로 급격히 증가했고, 2013년에는 최대 163편에 달했다. 이후 간행물 수는 변동이 있었지만 그러나 한국의 출판 비율은 2013년부터 8.4%에서 2020년에는 4.5%로 감소하는 추세를 보였다.

한국의 담수화 출판물 상위 20개 키워드는 표에 나열되어 있습니다.삼. 상위 10개 키워드는 다음과 같습니다. 막, 바닷물, 역삼투압, 물 여과, 물 처리, 오염, 삼투, 폐수 처리, 전극, 그리고 에너지 효율. 상위 10개 키워드의 대부분은 최근 RO 위주의 시장을 반영하여 RO 기술과 관련된 것으로 해석된다. 그리고 전국인 9위 키워드는 용량성 탈이온화 기술과 관련이 있는 것으로 판단된다. 11위부터 20위까지의 키워드는 다음과 같습니다. 용량성 탈이온화, 막 종류, 그리고 정삼투, 대체 담수화 기술인 저에너지 담수화를 향한 한국의 담수화 연구 동향을 보여줍니다.

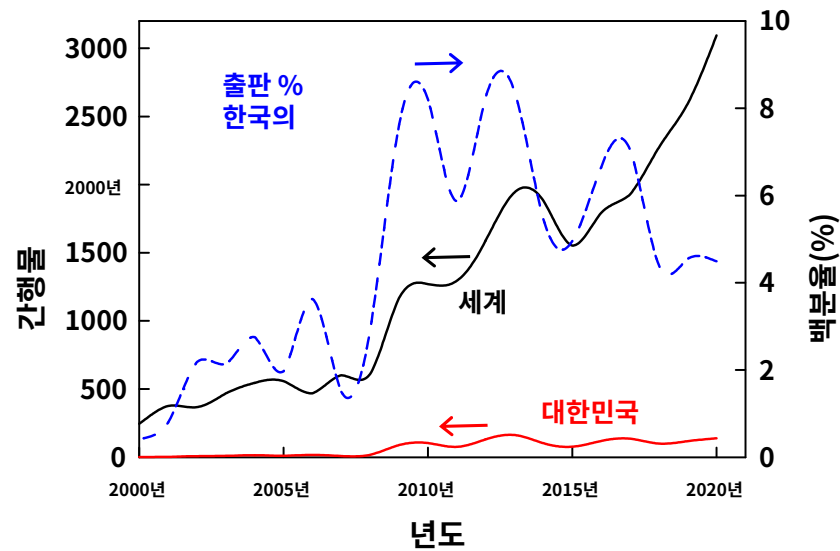


그림 2. 전 세계 및 한국의 담수화 관련 과학 출판물 동향.

표 3. 한국의 담수화 연구를 위한 상위 20개 키워드.

계급	키워드	숫자
1	멤브레인, 멤브레인, 멤브레인 기술	569
2	바닷물, 바닷물 담수화, 바닷물	522
삼	역삼투압, 해수역삼투압, RO 멤브레인, 역삼투압 담수화	377
4	물 여과, 여과	377
5	수처리, 정수, 정화	275
6	파울링, 멤브레인 파울링, 파울링 제어	226
7	삼투	182
8	폐수처리, 폐수, 폐수매립, 폐수관리	162
9	전극, 전기화학 전극	159
10	에너지 효율, 에너지 소비량, 특정 에너지 소비량 e 탈이온화, 막 용량성	152
11	정전용량 탈이온화	150
12	증류	148
13	물, 급수	143
14	염화나트륨	119
15	정삼투	115
16	막 e 증류, 직접 접촉 막 증류	115
17	에너지 활용	105
18	집중	94
19	편극, 집중 편극	93
20	생물 오염, 생물막	89

주요한 한국의 담수화 R&D 프로젝트는 내셔널을 사용하여 분석 한국과학기술정보원(NTIS) 데이터베이스 [22]. '담수화'라는 키워드로 데이터베이스를 검색한 후 연구비 1억원/년(≈2021년까지 85,000 USD/년) 이상. 데이터베이스에 따르면 2002년 이후 695개의 담수화 연구 프로젝트가 수행되었습니다. 그림 3 한국의 주요 컨소시엄 기반 담수화 연구 프로젝트를 보여줍니다. 이러한 컨소시엄 기반 연구 프로젝트에는 국내 우수 대학, 국가 연구 기관 및 주요 기업이 참여했습니다. 그림과 같이 주요 담수화 연구 프로젝트는 FO, MD, 압력 지연 삼투압(PRO), CDI 및 담수화 배터리를 포함한 기존의 RO 기반 담수화와 대체 담수화의 두 가지 범주로 나눌 수 있습니다. 해수담수화 연구는 2006년 한국 정부의 지원을 받아 해수담수화플랜트센터(CSDP)가 설립된 이후 붐을 일으키고 있다. 개발을 위해 CSDP에 의해 시작되었습니다.

SWRO 플랜트 기술 중 2009년부터 2014년 사이에 새로운 대체 염수 기술을 기반으로 한 담수화-연구 프로젝트가 시작되었습니다. 이러한 대체 담수화 연구 프로젝트는 파일럿 규모의 테스트를 토종의 통해 기술적 타당성을 보여주었지만 아직 실제 대규모(>60,000m²)로 발전되지 않았습니다.삼/ , 그들 일) 담수화 플랜트. 2016년부터 실용화 가능성이 높은 RO 담수화 기술을 기반으로 한 연구과제 새로운 가 진행되고 있다. 각 담수화 기술의 세부 현황 알 사용 오지은

강조 표시됨에프 올로우.

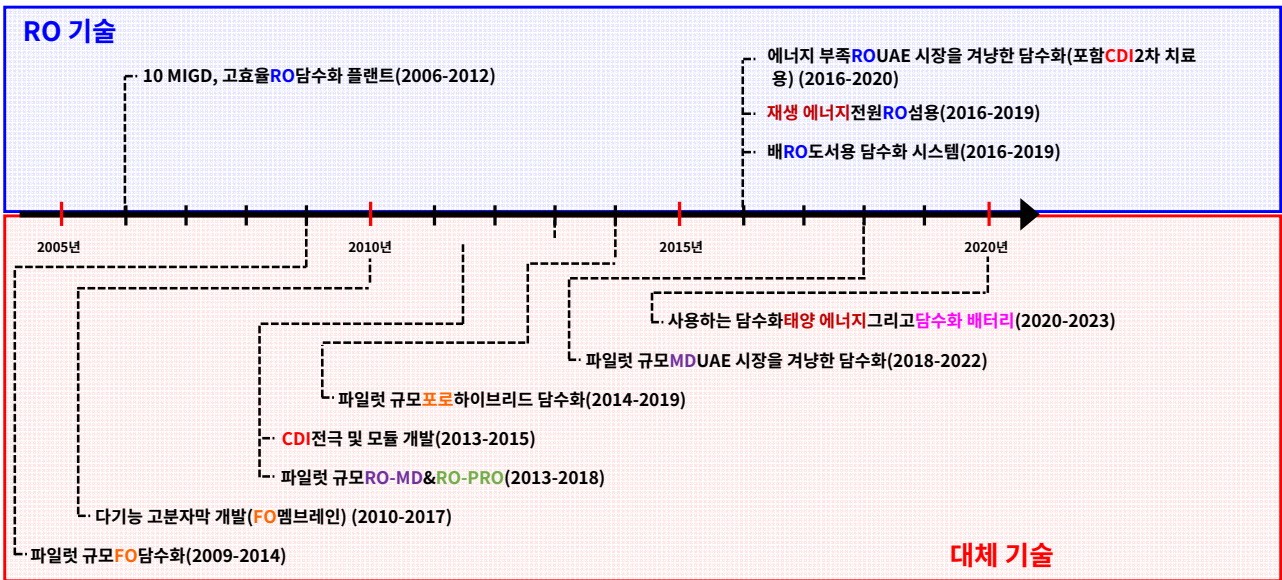


그림 3. 한국의 주요 담수화 연구의 이정표.

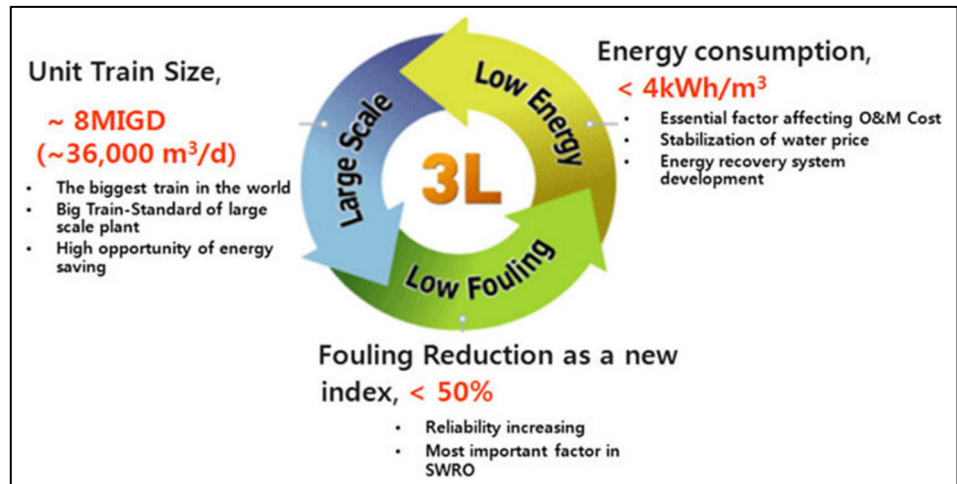
3.2. 역삼투압

1990년대 에너지 회수 장치(ERD)의 개발로 SWRO의 SEC는 20kWh/m³에서 감소삼~ 2-5kWh/m³[26,27], 열 담수화 기술에 비해 에너지 효율적인 시스템입니다. 또한 SWRO 멤브레인 및 플랜트 기술의 지속적인 혁신과 개선으로 RO 플랜트의 수와 용량이 꾸준히 증가했습니다. 2000년 이후로 생산 능력이 100,000m 이상인 거의 모든 신규 담수화 플랜트삼/day 전 세계 SWRO 담수화 플랜트 [17]. SWRO의 현재 담수 생산량은 6,550만 m³입니다.삼/일, 담수화 생산량의 69%를 차지 [27].

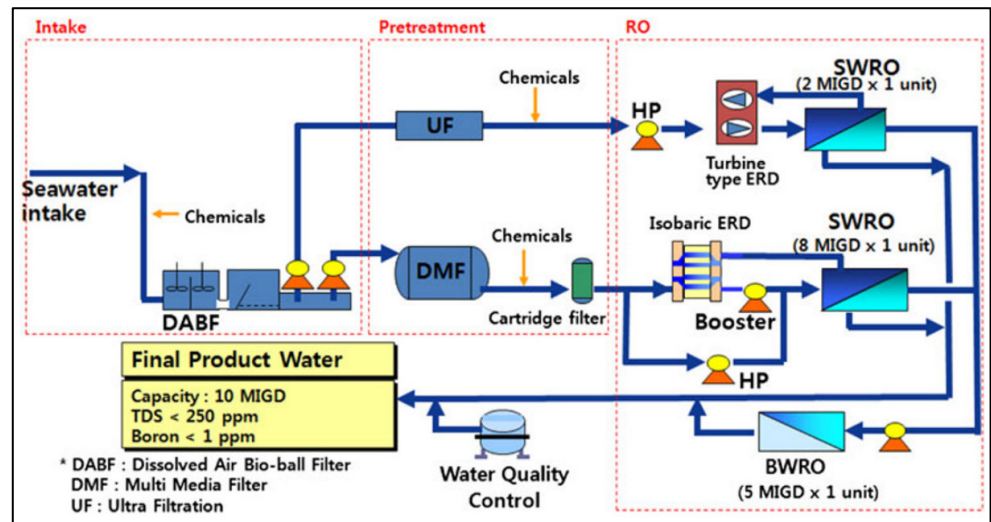
SWRO 공정의 세 가지 주요 구성 요소는 RO 멤브레인, 고압 펌프 및 ERD 시스템입니다. 멤브레인 제조 회사는 한국에서 RO 멤브레인 개발을 주도했습니다. 한국 기업인 웅진케미칼은 1990년대 초반에 폴리아미드(PA) RO 멤브레인을 개발했습니다. 2003년 웅진케미칼은 RO 멤브레인 소자 생산능력에서 미국의 Dow Chemical, 일본의 Hydranautics에 이어 세계 3위를 기록했다. 그러나 웅진케미칼은 2014년 일본 도레이첨단소재에 인수됐다. 현재 RO 멤브레인을 제조하는 국내 기업은 LG화학(한국 서울)이 유일하다. LG화학은 2014년 미국 스타트업인 NanoH2O(Torrance, USA)를 인수하며 RO 멤브레인 분야에 진출했다. 현재 도레이(일본 도쿄), 듀폰(미국 월링턴)(구 다우),[17].

RO 기술은 2000년 이후 담수화 시장의 주요 기술로 자리 잡았지만 정부의 R&D 지원으로 국내에서 RO 기술 개발이 본격적으로 시작된 것은 2007년부터다. 최초의 컨소시엄 담수화 연구 프로젝트인 SEAHERO R&D 프로그램은 세계 최고 수준의 SWRO 기술을 달성하기 위해 5년 동안 1억 6500만 달러의 자금으로 2007년에 시작되었습니다. Kim et al. 이 연구 프로젝트의 기술 개념을 자세히 소개했습니다 [28]. 연구는 세 가지 기술

전략 및 4대 핵심 개발 기술. 세 가지 기술 전략은 저에너지, 저오염 및 대형 열차 크기입니다(그림 4가). 4대 핵심 개발 기술은 (I) 미래 SWRO 기술, (II) 핵심 부품 국산화, (III) 대규모 SWRO 플랜트 설계 및 건설 기술, (IV) 혁신적인 O&M 기술 [4].



(가)



(나)

무화과) SEAHERO(고효율 삼투압) 연구 및 개발 프로그램의 해수 공학 및 아키텍처의 세 가지 주요 전략 및 (시
 신부)의 흐름도
 바다하이로 테스트베드 [28].

한국 기업 두산중공업, 효성, 웅진화학이 SEAHERO R&D 프로그램에 참여했다. 그들은 SWRO 공정의 주요 부품의 국산화를 달성하기 위해 각각 고압 펌프 및 SWRO 멤브레인의 설계 및 엔지니어링 기술 개발을 담당했습니다. 이 작업의 가장 주목할만한 성과는 하루에 8백만 제곱 갤런(MIGD)이었습니다(≈36,000m³/일) 이중 매체 여과 전처리가 있는 단일 SWRO 트레인. 멤브레인 전처리를 사용하는 또 다른 2개의 MIGD SWRO 트레인에서 총 물 생산 용량은 10 MIGD(≈45,000m³/일) (그림 4나). 또한 SWRO 플랜트의 초기 투자비와 운영비를 줄이기 위해 16인치 SWRO 나선권형 소자를 개발했다. SWRO 테스트베드의 SEC는 3.7kWh/m로 추정되었습니다.삼급수에서

10-15의 온도이다. 이후 본 프로젝트에서 개발한 고압펌프는 수출에 적합한 성능을 [29].

3.3. 정삼투

RO 기술이 담수화의 SEC를 크게 줄였지만 해수 담수화는 여전히 에너지 집약적인 프로세스입니다. 따라서 에너지 사용을 더욱 줄이기 위해 고급 담수화 기술이 연구되었습니다. 대체 기술 중 하나는 FO 멤브레인 기술입니다. RO 멤브레인 공정은 물 수송을 위해 해수의 삼투압보다 높은 수압(일반적으로 60~70bar)이 필요합니다. 그러나 FO 기술은 삼투압을 물 수송의 원동력으로 사용합니다. 따라서 FO 공정은 물 플럭스에 대해 훨씬 더 낮은 에너지를 필요로 합니다. 2005년 암모니아-이산화탄소를 유도물질로 사용하는 FO 공정을 도입한 이후, FO는 학술 연구와 산업 발전에서 큰 주목을 받았습니다.[30-32]. 2000년대 초반 대부분의 연구는 Hydration Technologies Inc.의 셀룰로오스 트리아세이트(CTA) 멤브레인에 집중되었습니다. 그러나 상업용 CTA 멤브레인은 중탄산 암모늄 유도 용액에 노출될 때 분해, 상대적으로 낮은 투수성 및 염분과 같은 불충분한 성능을 보였습니다. 거절 [33]. 그 후, 내부 농도 분극을 최소화하기 위해 다공성 지지층이 있는 특수 맞춤형 PA 박막 복합막(TFC) 멤브레인에 대한 연구는 2008년 미국의 Oasys Water로부터 상업용 TFC FO 멤브레인의 도입으로 이어졌습니다.[32,34].

지금까지 한국에서는 3개의 컨소시엄 기반 FO 연구 프로젝트가 수행되었습니다.삼. 2009년과 2010년에 시작된 1차 및 2차 프로젝트는 FO 멤브레인 개발에 중점을 두었습니다. 그 결과 1차 연구과제에 참여한 웅진케미칼은 자사의 PA TFC RO 멤브레인 기술을 양산에 적용해 상용화 수준의 나선상소자 개발에 성공했다. 개발된 FO 멤브레인은 FO 담수화 파일럿 테스트에 적용 [35,36]. FO 파일럿 테스트는 개발된 FO 멤브레인에 대해 더 나은 물 플럭스 성능을 보여주었지만, 연구 프로젝트는 2가 유도용질을 사용하는 FO-RO 하이브리드 담수화 공정과 같은 FO 공정의 적용과 관련된 문제에 직면했습니다.

FO 막을 통해 침투하는 물은 유도 용액을 희석합니다. 따라서 최종 제품으로 담수를 얻기 위해서는 유도용질 분리를 위한 추가적인 공정이 필요하다. 분리 공정의 높은 에너지 소비 때문에 FO를 사용한 담수화에 필요한 이론적인 열역학 에너지는 FO가 없는 것보다 항상 더 높습니다.[32]. 대안적으로, 삼투 희석 개념을 사용하는 FO 하이브리드 담수화 공정은 저에너지 공정일 수 있습니다.[37-39]. 삼투 희석은 유도 용액 분리 공정 없이 FO의 물 투과에 대한 두 용액 간의 삼투압 차이를 사용하여 FO 공정의 생성물로 희석된 유도 용액을 생성하는 것을 의미합니다.

2014년에 시작된 세 번째 FO 연구 프로젝트는 세계 최초의 파일럿 규모 플랜트를 사용하여 삼투압 희석 FO-RO 하이브리드 공정을 조사했습니다. 수치5FO-RO 하이브리드 파일럿 플랜트의 개략도를 보여줍니다. 도시된 바와 같이, 폐수 처리의 방류수는 공급 용액으로 사용되며 해수는 유도 용액으로 사용됩니다. 투과된 폐수는 해수를 희석시켜 해수의 삼투압을 감소시킵니다. RO의 적용 수압은 해수의 삼투압에 의존하기 때문에 FO 공정의 삼투 희석은 후속 SWRO 공정에서 에너지 소비를 줄일 수 있습니다. [14,38]. 연구의 목표는 담수화의 SEC를 2.5kWh/m³로 줄이는 것이었습니다.삼, 그리고 타당성은 1000m³ 용량의 FO-RO 하이브리드 파일럿 플랜트에서 테스트되었습니다.삼/낮 [40]. 파일럿 플랜트는 Porifera의 플레이트 및 프레임 유형 FO 멤브레인 모듈을 채택했습니다. 모델링 추정치에 따르면 FO-RO 하이브리드 담수화 플랜트의 SEC는 2.16kWh/m³삼, SWRO 공정의 SEC(2.87kWh/m³)보다 24.7% 낮습니다.삼[41].

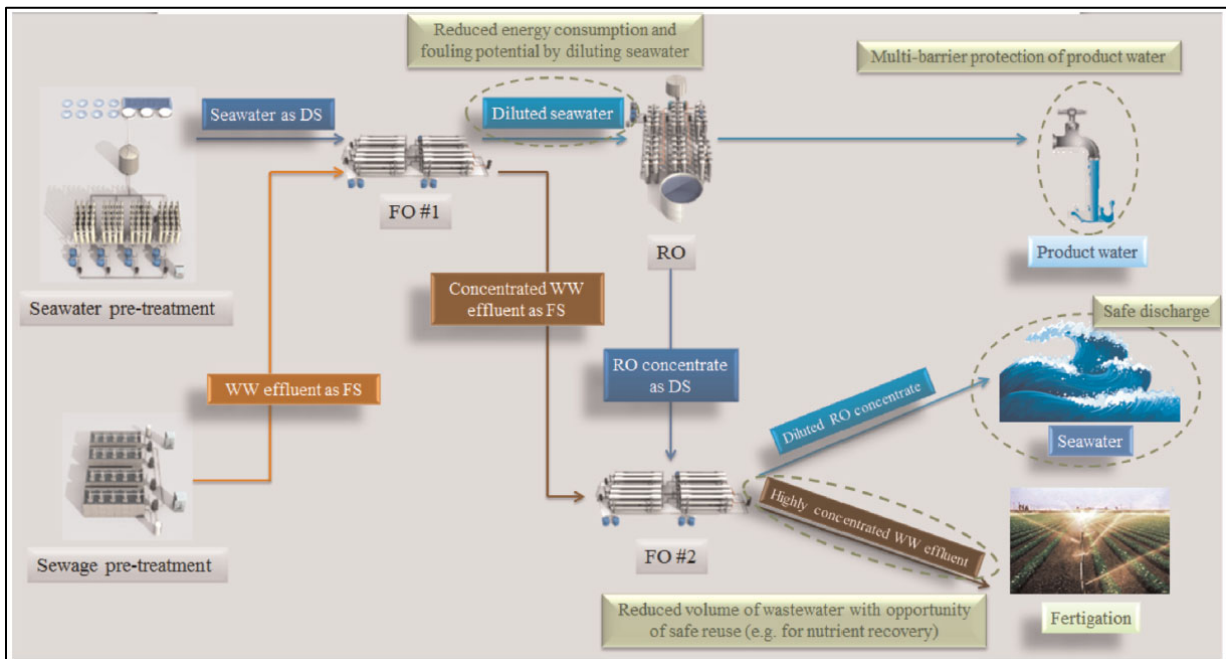


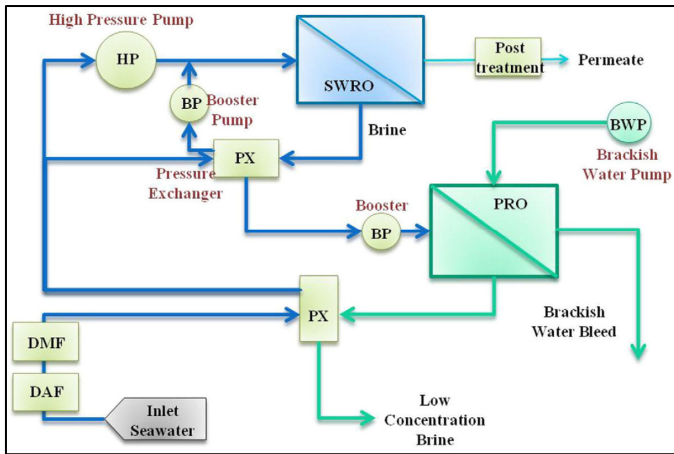
그림 5.삼투 희석 정삼투-역삼투(FO-RO) 담수화 하이브리드 파일럿 플랜트의 개략도 [37].

3.4. 압력 지연 삼투

주로 막 분리에 의한 수처리를 목적으로 하는 RO 또는 FO 공정과 달리 PRO 공정의 목적은 염도 구배에서 에너지를 얻는 것입니다. PRO는 FO와 유사하게 삼투압수송을 이용하지만 농도가 높은 용액에는 삼투압차 이하의 수압을 가한다. 수압에 의해 유속은 감소하지만 터빈을 통해 수압을 방출할 때 에너지 발생 [42]. PRO의 이론적 타당성은 1950년대와 1960년대에 조사되었지만 PRO의 개발은 시스템의 복잡성과 적절한 멤브레인의 부족으로 인해 제한되었습니다. [42,43]. 세계 최초의 프로토타입 PRO 발전소는 2009년 노르웨이 회사인 Statkraft가 건설한 [42]. PRO 멤브레인 성능이 충분하지 않아 실제 발전은 여전히 경제적으로 어렵습니다. Statkraft 분석에 따르면 멤브레인의 최소 전력 밀도 성능은 5W/m 이상이어야 합니다. [44,45] 상업적으로 실행 가능한 PRO 프로세스 [44,45]. 일본의 Mega-ton Water System 프로젝트는 발전 대신에 2010년 유압 Pelton 터빈을 이용하여 유압을 생산하는 PRO 공정을 조사 [46]. 이 프로젝트에서 PRO 파일럿 플랜트는 460m를 사용했습니다. [47] 삼/일 유도 용액으로서의 SWRO 염수 및 420 m삼/공급 용액으로 처리된 폐수의 일 [47]. 토요보사에서 개발한 중공사 PRO 멤브레인을 적용했으며, 자체 보고한 최소 출력 밀도가 12W/m 이상 [46], 약 30bar의 적용된 유압에서 [46].

담수화의 기술적인 문제는 염수로 인한 상대적으로 높은 경제적 비용과 환경적 문제입니다. [14]. 이러한 문제를 해결하기 위해 한국 정부 지원 프로젝트인 Global Membrane distillation, Valuable source recovery, PRO(MVP) 프로그램은 2013년과 2018년 사이에 에너지 회수 및 SWRO 염수 처리를 위한 RO-PRO 및 RO-MD 하이브리드 공정의 타당성을 평가했습니다. 240m의 물 생산 능력을 갖춘 RO-PRO 하이브리드 담수화 파일럿 플랜트삼/day는 장기 운용능력 검증을 위해 2년 이상 구축·운영했다. [47]. 개발된 파일럿 플랜트는 SWRO 염수 및 재생폐수를 PRO 공정에 사용하였으며, 전기로 변환하지 않고 유압을 사용하기 위해 2개의 등압 압력 교환기를 채택하였다(그림 2). [6] [46]. 나선권 PRO 멤브레인은 도레이첨단소재가 개발했고, GS건설은 PRO 개발을 담당했다.

공학 기술. PRO 공정은 SWRO 염수를 희석하여 해양 환경에 대한 부정적인 영향을 완화하고 염분 구배의 수압은 SWRO 공정의 SEC를 동시에 감소시킵니다. 파일럿 플랜트 테스트에 따르면 SEC는 19% 감소했고 SWRO 브라인은 PRO 공정을 적용하여 원래 농도의 63%로 희석되었습니다.[47]. SWRO-PRO 기술을 개선하기 위해서는 회수율이 높은 PRO 요소의 개발과 PRO 멤브레인의 세척 기술 최적화가 필요합니다.[45,47,48].



(가)



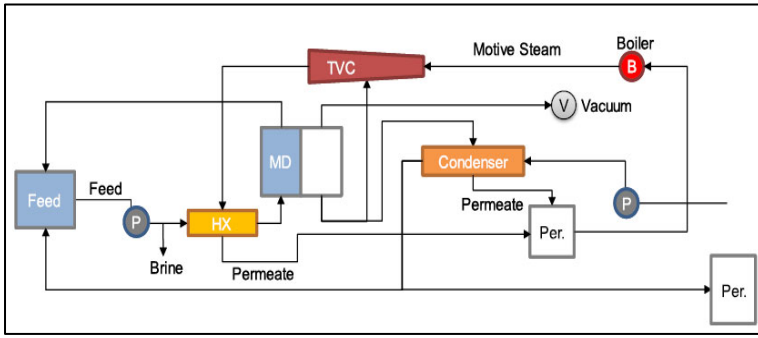
(나)

그림 6. (가) 삼투 희석 해수 역삼투압-자연삼투압(SWRO-PRO) 담수화 하이브리드 파일럿 플랜트의 개략도, (나) SWRO 물 생산 능력이 240만인 역삼투압(RO)-PRO 하이브리드 담수화 파일럿샷/날 [46,48].

3.5. 막 종류

MD는 소수성 미세다공성 멤브레인을 가로지르는 증기압 차이에 의해 구동되는 멤브레인 기반 열적 담수화 공정입니다. MD는 RO보다 에너지 집약적입니다. 단일 패스 직접 접촉 MD 및 RO에 의한 해수 담수화에 필요한 최소 이론 에너지는 27.6 MJ/m입니다. 삼및 3.8MJ/m삼, 각각 [49]. 그러나 MD 공정은 태양광, 지열에너지, 산업생산에서 발생하는 폐열에너지 등의 저급 열원으로 운영할 수 있어 신형 기술로 주목받고 있다.[50]. 또한, MD는 RO로 담수화할 수 없는 고염도 물을 처리할 수 있습니다.

SWRO 바인 처리를 위한 MD 기술은 Global MVP 프로젝트의 연구 주제 중 하나였습니다. SWRO 염수의 총 용존 고형물(TDS) 농도는 약 70,000mg/L입니다. 결과적으로 염수의 삼투압을 극복하기 위해 필요한 수압은 SWRO 멤브레인 모듈 및 기타 공정 장비의 최대 허용 압력보다 클 수 있습니다.[14,51]. SWRO-MD 연구 주제의 목표는 소금물의 양을 30% 줄이는 것이었습니다.[52]. 기존의 파일럿 규모 MD 플랜트는 평면형 또는 나선형 권선형 모듈을 사용했지만 Global MVP 프로젝트 MD 파일럿 플랜트는 Econity Inc.(한국 용인)의 연구 프로젝트 내에서 개발한 중공사 MD 모듈을 사용했습니다.[52]. 수치 7열 증기 압축이 있는 진공 MD 파일럿 플랜트의 공정 흐름도를 보여줍니다. 초기 단계에서 10m 규모의 MD 파일럿 플랜트삼/day를 구축하고 MD 멤브레인 모듈의 성능과 작동 조건의 영향을 평가 [53]. 또한 MD 공정의 에너지 최적화를 재생 가능한 태양 에너지와 결합하여 수행했습니다.[52]. 나중에 400m 용량의 더 큰 MD 파일럿 플랜트삼/day는 SWRO 염수 처리를 위해 설계되었습니다.[54]. 이러한 개발 성과로 2019년에는 중동 국가의 담수화 시장을 대상으로 하는 차기 MD 연구 프로젝트가 시작되었습니다. MD 파일럿 플랜트는 중동 국가에 건설될 예정이며 O&M 기술 개발과 재생 에너지 사용에 중점을 둘 것입니다.[22].



(ㄱ)

(ㄴ)

그림 7. (ㄱ) 막 증류(MD) 담수화 시스템의 개략도, (ㄴ) 400m³의 물 생산 능력을 갖춘 MD 담수화 파일럿 플랜트삼/낮 [52,54].

3.6. 용량성 탈이온화

최근 새로운 담수화 기술로 CDI(Capacitive Deionization) 기술이 활발히 연구되고 있다. CDI는 종종 다공성 탄소로 만들어진 두 전극에 전위차(보통 <math><1.2V</math>)를 적용하여 물을 탈이온화하는 전기 흡착 기술입니다.[55]. 이온은 외부 DC 에너지원으로 대전된 전극 표면에 일시적으로 흡착되고 흡착된 이온은 전극을 단락시키거나 전압을 감소시켜 용액으로 다시 방출됩니다. 커패시터와 마찬가지로 전극 재생 단계에서 부분적으로 에너지를 회수할 수 있습니다.[56–58]. CDI 공정에서 에너지 소비는 CDI가 전기 흡착에 의해 이온을 탈염하기 때문에 급수의 염 농도에 크게 의존합니다.[59]. 따라서 공급 염도가 3.5g/L 미만이고 생산수 염도가 1g/L일 때 기수 담수화를 위해 CDI가 RO보다 에너지 효율적이라는 것이 제안되었습니다.[60].

시범 규모 CDI 공정은 2016년부터 첨단 에너지 절약(KORAE) 연구 프로젝트와 통합된 한국의 최적화된 RO 담수화를 주제로 조사되었습니다. KORAE 프로젝트의 가장 중요한 목표는 에너지 소비를 줄이는 SWRO 기술을 개발하는 것입니다. SWRO 기술은 에너지 소비 측면에서 개선의 여지가 거의 없는 성숙한 기술입니다. 프로젝트에서 에너지 소비를 줄이기 위한 기술적 접근 방식 중 하나는 2차 통과 RO 공정을 수정하는 것입니다. 두 번째 통과 RO는 원천 해수 염도가 35,000mg/L보다 높거나 TDS 또는 붕소와 같은 항목에 대해 엄격한 최종 수질 기준을 충족해야 할 때 사용됩니다.[61]. 붕소는 자연적으로 해리되지 않은 중성 형태의 붕산(pK)으로 존재하기 때문에 붕소는 제거하기 가장 어려운 해수 성분 중 하나입니다. 8.9 해수의 일반적인 pH(8.1–8.2)에서 [62]. 결과적으로 많은 SWRO 플랜트는 붕소 제거를 위한 2패스 어레이로 설계되었으며 2차 패스 RO에서 소비되는 에너지는 일반적으로 0.5kWh/m입니다.[63–65]. 따라서 CDI 공정이 0.5kWh/m 미만을 사용하여 붕소 또는 TDS를 제거할 수 있다면, 일부 에너지 절약을 달성할 수 있습니다. 수치8 두 번째 패스 RO를 CDI로 대체하는 SWRO-CDI 프로세스의 개념적 프로세스 흐름을 보여줍니다.[55]. 50m 용량의 파일럿 규모 멤브레인 CDI(MCDI) 공정삼 Siontech에서 개발한 /day는 두 번째 통과 RO에 대한 대안 프로세스로 검토되었습니다. CDI 공정은 단일 패스 SWRO 파일럿 시스템(120m삼/낮). MCDI 공정의 에너지 소비량은 0.4kWh/m 미만으로 추정되었습니다.삼SWRO 투과액 농도가 500mg/L 미만인 경우 [22]. 또한, 개발된 MCDI 공정은 붕소와 TDS 뿐만 아니라 브롬화 소독 부산물의 전구체인 브롬화물을 제거하는 데 사용할 수 있습니다.[55]. 브롬화물 제거에 관한 실험실 규모의 테스트에 따르면 에너지 소비량은 0.05kWh/m² 사이로 추정되었습니다.삼및 0.3kWh/m삼, 급수의 TDS에 따라 [55]. CDI의 에너지 소비는 CDI에서 에너지 회수를 달성하고 더 큰 규모의 CDI 프로세스를 사용하여 더욱 최적화될 수 있습니다. KORAE 프로젝트는 SWRO 파일럿 플랜트를 건설할 예정입니다.

1000m³/일 아랍에미리트(UAE). 따라서 CDI 프로세스는 에너지 소비, 제거 효율성 및 O&M 측면에서 추가로 검토될 것입니다.[66].

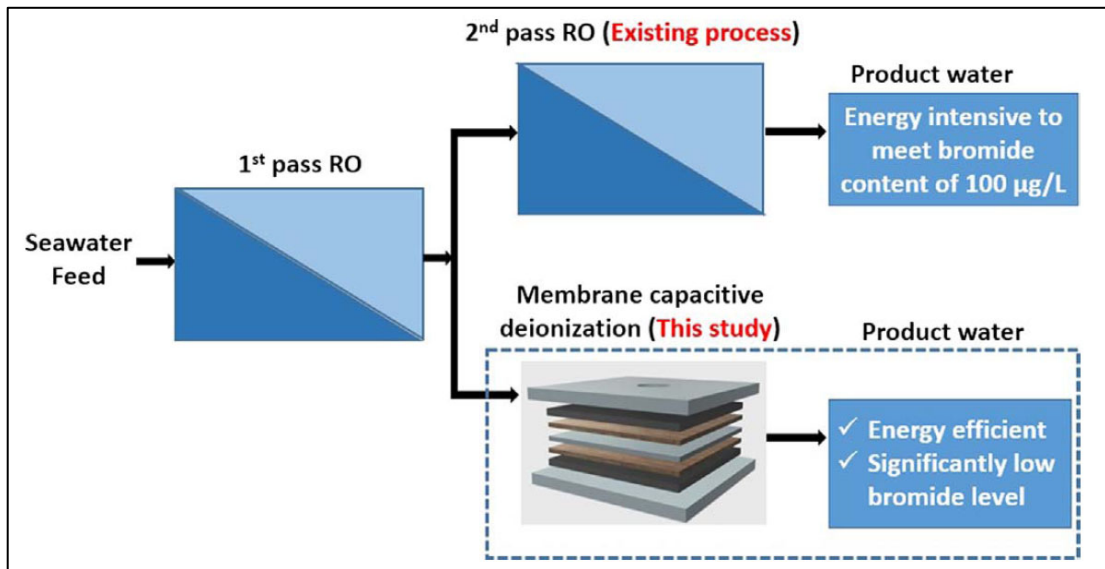


그림 8.2차 통과 RO를 CDI로 대체하는 RO-CDI(Reverse Osmosis-Capacitive Deionization) 공정의 개념도 [55].

3.7. 재생 가능 에너지 담수화

에너지 소비는 물 생산 비용에 영향을 미치는 주요 요인입니다. 해수담수화의 경우 에너지 소비는 총 물 생산 비용의 20~35%를 차지하며, 단위 에너지 비용이 높은 원격 플랜트 위치의 극한 조건에서는 50%를 초과할 수 있습니다.[67]. 이 문제를 완화하기 위해 담수화 에너지 요구 사항을 줄이기 위한 옵션으로 재생 에너지 사용이 제안되었습니다. 또한 에너지 소비를 절약하면 온실 가스 배출을 줄일 수 있습니다. 신재생에너지를 이용한 담수화 개발의 또 다른 동기는 포스트 오일 시대에 대한 중동 국가들의 최근 정책이다.[68]. 석유 후 프로젝트에는 재생 에너지 기반의 담수화가 포함됩니다. 예를 들어 UAE의 재생 에너지 회사인 Masdar는 지속 가능한 물 생산을 위한 첨단 기술을 개발하기 위해 2013년 재생 에너지 담수화 시범 프로그램을 시작했습니다.[69]. 또한 최근 사우디아라비아 알카프지시에 6만m³ 규모의 세계 최대 태양광 담수화 플랜트를 건설했다.삼/day는 석유 이후 시대에 대한 중동의 약속을 보여줍니다.

재생 가능 에너지로 구동되는 담수화는 성장 잠재력이 높지만 아직 적용 초기 단계입니다. 현재 설치된 재생 에너지로 구동되는 담수화 플랜트는 전 세계 담수화 용량의 1%에 불과합니다.[70,71]. 기술적으로나 경제적으로 이용 가능한 재생 에너지는 국가마다 크게 다릅니다. 재생 에너지로 구동되는 대부분의 담수화는 풍력, 태양열 또는 지열 에너지를 사용하며 가장 지배적인 조합은 태양광(PV) 구동 RO 시스템입니다.[72]. 원격 지역의 소규모 담수화의 경우, 그리드 연결의 높은 비용을 고려할 때 독립형 재생 에너지 동력 담수화 시설이 유리합니다.[73].

한국에서는 에너지 자립 섬 프로젝트와 관련하여 여러 재생 에너지 기반 담수화 시설이 설치되었습니다. 예를 들어, 죽도에 70명의 주민을 위해 태양광 PV 에너지 및 에너지 저장 시스템(ESS)을 갖춘 소규모 RO 담수화 플랜트가 건설되었습니다.[74]. 유사한 에너지 자립 섬 프로젝트로 소작도에 PV-RO 플랜트를 건설하여 200m³ 용량의 114명의 주민에게 에너지와 담수를 공급했습니다.삼/낮. 발전소는 100kW 태양광 발전 시스템, 300kWh ESS, 수질 모니터링 및 원격 제어 시설을 갖추고 있습니다. 재생 에너지를 이용한 해수담수화 기술은 아직 널리 적용되지는 않았지만,

중등 등 주요 담수화 시장의 수요를 충족하고 우리나라와 같은 작은 섬의 물 부족 문제를 해결하기 위해 지속적으로 연구하고 있습니다.

3.8. 담수화 배터리

담수화 배터리(또는 해수 배터리)는 전기화학적 담수화 공정으로 분류됩니다. 담수화 배터리는 전기 탈이온화 및 용량성 탈이온화와 같은 용해된 이온을 흡착하여 염을 제거합니다. 담수화 전지는 고용량 전지 전극 재료로 염 흡착 용량(SAC)이 높기 때문에 보다 적합한 전기화학적 담수화 기술로 여겨져 왔다.⁷⁵. 제한된 SAC로 인해 CDI는 염수 담수화에만 사용되었습니다.

담수화 배터리 작동 과정은 전기화학적 산화환원 반응을 기반으로 합니다. 이 시스템은 충전 과정에서 염분을 제거하는 Na- 및 Clstorage 전극이 있는 전해질로 공급 또는 해수로 구성됩니다. 시스템을 충전할 때 바닷물의 나트륨 이온과 염화물 이온이 각각 Na 저장 전극과 Cl 저장 전극으로 끌려 당겨 담수화됩니다. 그러나 방전 중에는 이온이 방출되어 전극이 재생됩니다. 2012년 담수화 전지가 도입된 후 차세대 담수화 기술로 떠오른 ^[76]. 지난 10년 동안, 혼들의자, 레독스 흐름, 금속-공기 담수화 전지를 포함하여 담수화 용량을 향상시키기 위해 다양한 유형의 담수화 전지가 개발되었습니다.^{77,78}.

한국의 울산과학기술원(UNIST)은 담수화 배터리 기술의 글로벌 리더입니다. UNIST는 고체 전해질 기반 배터리를 개발했습니다. 한국동서발전(KEWP)(한국 울산)과 한국전력(KEPCO)(한국, 나주)은 UNIST와 공동으로 담수화 배터리를 사용한 10kWh 전기 에너지 저장 장치를 개발하기 위한 연구를 진행하고 있습니다. 한국동서발전과 한전은 2016~2019년 UNIST에 약 420만 달러를 투자했다.⁷⁹. 최근에 그들은 충전식 해수 배터리에 의한 해수 담수화의 개념을 도입했습니다.^{80,81}. 이 유형의 담수화 전지는 개방형 양극, 고체 전해질인 나트륨 초전도 분리막 및 폐쇄형 금속-유기 음극으로 구성됩니다. 또한, 충전식 해수전지 담수화 시스템과 RO 담수화 시스템을 비교하였다.

4. 결론 및 전망

이 리뷰는 한국의 담수화 기술의 현황과 동향을 요약합니다. 글로벌 담수화 기술 동향과 마찬가지로 한국의 담수화 기술 발전 방향은 에너지 소비 절감이다. 우리나라에서는 2006년부터 해수담수화 기술에 대한 본격적인 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 결과 우리나라의 담수화 관련 과학 논문 수는 중국, 미국, 인도에 이어 세계 4위를 기록하고 있다. 가장 많이 연구된 연구 주제는 RO 멤브레인 담수화이며, FO, PRO, MD, CDI, 신재생 에너지 기반 담수화, 담수화 배터리 등의 신기술도 활발히 연구되고 있다. 신기술에 대한 타당성 조사가 파일럿 규모로 수행되었다는 점은 주목할 만합니다. 테이블 4 주요 컨소시엄 기반의 담수화 연구 프로젝트와 파일럿 플랜트를 요약합니다. 이 연구는 담수화의 에너지 소비를 낮추고 SWRO 염수의 환경 영향을 완화하는 데 중점을 두었습니다.

표 4. 한국의 대표적인 담수화 연구 프로그램 및 파일럿 플랜트 요약.

연구 프로그램	기간	기술	파일럿 스케일(m삼/낮)	주요 성과 및 특징
씨헤로 프로그램	2007-2012	SWRO	45,000	<ul style="list-style-type: none"> • SWRO 테스트베드 • 16인치 SWRO 요소 • 고압 RO 펌프
개발 다목적 FO 담수화 플랜트	2009-2014	FO	20	<ul style="list-style-type: none"> • 나선형으로 감긴 FO 요소 • FO-RO 하이브리드 파일럿 플랜트
글로벌 MVP 프로그램	2013-2018	찬성 MD	240(프로) 400(MD)	<ul style="list-style-type: none"> • 압력 교환기가 있는 PRO 파일럿 플랜트 • 나선형으로 감긴 PRO 요소 • MD 파일럿 플랜트 • MD 멤브레인
FOHC 프로그램	2014-2019	FO	1000	<ul style="list-style-type: none"> • 삼투 희석 FO-RO 하이브리드 파일럿 플랜트
한국	2016-2020년	RO CDI	120 50	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 플렉스 및 고효율 RO 싱글 패스 SWRO 시스템용 멤브레인 • MCDI 모듈 • SWRO-CDI 파일럿 플랜트 • UAE SWRO 시범공장 (1000m삼/일) (예정)

SWRO 담수화 기술에 대한 연구는 RO 멤브레인 및 고압 펌프와 같은 SWRO 공정의 중요한 구성 요소의 국산화로 이어졌습니다. 그러나 SWRO 공장에서 고효율 ERD, 전처리, 후처리 등 기술의 국산화를 위한 연구 수요는 여전히 많다.

우리나라의 경우 대부분의 도시용수 SWRO 시설은 500m 미만의 소용량 도서지역에 설치되어 있다.삼/낮. 기후변화의 영향을 감안할 때, 앞으로도 도서지방의 소규모 담수화 설비에 대한 수요는 지속적으로 증가할 것입니다. 소규모 SWRO 시설의 추가 적용에 대한 주요 제한 사항은 시스템의 O&M과 경제성입니다. 섬에 있는 소규모 SWRO 시설을 효과적으로 관리하려면 자동화된 O&M 장치 또는 원격 제어 시스템이 필요합니다. 재생 가능한 에너지를 갖춘 SWRO 플랜트는 담수화의 경제적 비용을 줄일 수 있습니다.

풍부한 담수와 저렴한 수돗물로 인해 중대형 SWRO 플랜트는 계절적 물 부족을 경험하는 한국 중서부 지역의 공업용수 생산에만 고려되었습니다. 담수화는 이러한 물 부족 지역의 산업 및 농업에 안정적인 담수를 제공하는 가장 좋은 방법이 될 수 있습니다. 단일 패스 SWRO를 사용하여 수질 요구 사항을 충족할 수 있는 SWRO 멤브레인의 개발은 SWRO 담수화의 총 비용도 절감할 수 있습니다. 수질 및 공정 안정성 측면에서 성능을 입증하는 참조 플랜트의 수가 증가함에 따라 전력 및 도시 부문과 같은 다른 응용 분야에 대한 기회가 개발될 것입니다.

전 세계적으로 담수화 용량의 거의 절반이 중동 및 북아프리카(MENA) 지역에 있습니다.^{82]} 이에 국내 기업들은 국내 시장보다는 해외 시장에 대규모 담수화 플랜트 건설을 추진하고 있다. 대규모 담수화 플랜트 발주를 늘리기 위해서는 MENA 지역에 최적화된 SWRO 엔지니어링 기술과 O&M 기술, 즉 심각한 조류 번성이나 사고로 인한 기름 유출에 대한 전처리 기술 개발이 필요하다. MENA 지역에서 수행된 파일럿 규모의 연구는 현지 요구 사항을 충족하는 최적의 O&M 기술을 개발하기 위한 실용적인 정보를 제공할 수 있습니다.

담수화의 주요 환경 문제는 담수화 과정에서 생성된 염수의 처리입니다. 희석 FO-RO, RO-PRO 및 RO-MD와 같은 신기술을 사용한 Hybrid RO 기술 프로세스는 염수 문제를 해결할 뿐만 아니라 새로운 담수화 시장을 창출할 수 있습니다. 이러한 기술에 대한 파일럿 규모의 연구를 통해 멤브레인 및 엔지니어링 기술 개발에 큰 진전이 있었습니다. 그러나 현재의 기술 현황과 신흥 기술의 작은 시장을 고려할 때 상용화를 위한 성능 향상을 위해서는 정부 정책의 지속적인 지원과 추가적인 연구와 실증이 필요합니다.

저자 기여: 개념화, JP 및 SL; 조사, SL; 쓰기 - 원본 초안 준비, JP; 쓰기 - 검토 및 편집, SL; 시각화, JP; 감독, SL 모든 저자는 원고의 출판된 버전을 읽고 동의했습니다.

자금: 본 연구는 한국연구재단(NRF)을 통해 기초과학연구 프로그램(No. 2020R1I1A3069197)과 BK21 FOUR(No. 5199990214511)의 지원을 받았습니다.

기관 검토 위원회 성명서: 해당되지 않습니다.

사전 동의 진술: 해당되지 않습니다.

이해 상충: 저자는 이해 상충을 선언하지 않습니다.

참고문헌

1. 메코넨, MM; Hoekstra, AY 지속 가능성: 심각한 물 부족에 직면한 40억 인구. *과학. 고급* **2016년**, 2, 1-7. [교차 참조]
2. Boretti, A.; Rosa, L. 세계 물 개발 보고서의 예측 재평가. *Npj 깨끗한 물* **2019년**, 2, 15. [교차 참조]
3. 지올코브스카, JR; Reyes, R. 미국의 담수화에 대한 사회 경제적 성장의 영향. *J. 환경. 관리* **2016년**, 167, 15-22. [교차 참조]
4. 황미희; Kim, IS 국내외 해수담수화 기술 비교분석. *J. 한국어 Soc. 환경. 영어* **2016년**, 38, 255-268. [교차 참조]
5. 남에스; Chun, K.-W.; 이주; 강, WS; 장, S.-J. 산림 상류에서 홍수 시즌 동안 관측된 강우 사건에 대한 수문곡선 분리 및 흐름 특성 분석. *Korean J. Ecol. 환경* **2021년**, 54, 49-60. [교차 참조]
6. 김종경; 남, SS; 오, S.-N.; Nam, J.-C.; Chang, K.-H. 한반도의 겨울 지형 구름 씨뿌리기 실험에 대한 타당성 조사. *아시아-팩. J. 애트모스. 과학* **2005년**, 41, 997-1014.
7. 정영; Shin, J.-Y.; 안희; 허, J.-H. 한국의 극한강우 경향의 시공간적 구조. *물* **2017년**, 9, 809. [교차 참조]
8. 대산, 국내 최초의 대용량 담수화 플랜트. 사용 가능한 온라인: <https://inima.com/en/comunicacion/detalle/daesan-primera-planta-desaladora-de-gran-capacidad-en-corea-del-sur> (2021년 12월 11일에 액세스함).
9. 한국의 담수화 설비. 사용 가능한 온라인: <http://www.roplant.or.kr/contents.asp?Depth1=7&Depth2=5> (2021년 12월 1일에 액세스함).
10. 해수담수화시설 현황. 사용 가능한 온라인: http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%ED%95%B4%EC%88%98&menuId=10264&orgCd&seq=6565 (2021년 11월 30일에 액세스함).
11. 최재성; 이에스; 김재민; Choi, S. 한국의 소규모 담수화 플랜트: 기술적 과제. *담수화* **2009년**, 247, 222-232. [교차 참조]
12. Curto, D.; Franzitta, V.; Guercio, A. 담수화 기술에 대한 검토. *적용 과학* **2021년**, 11, 670. [교차 참조]
13. Alkaisi, A.; 모사드, R.; Sharifian-Barforoush, A. 재생 에너지와 통합된 담수화 시스템에 대한 검토. *에너지 프로시디아* **2017년**, 110, 268-274. [교차 참조]
14. 그린리, LF; 라울러, DF; 프리먼, BD; 마로트, B.; Moulin, P. 역삼투압 담수화: 수원, 기술 및 오늘날의 과제. *물 해상도* **2009년**, 43, 2317-2348. [교차 참조]
15. Najid, N.; Fellaou, S.; Kouzbour, S.; Gourich, B.; 루이즈 가르크나, A. 붕소 제거를 고려한 해수 역삼투압 담수화의 에너지 및 환경 문제: 엑서지 분석의 종합 검토 및 사례 연구. *공정 안전. 환경. 보호* **2021년**, 156, 373-390. [교차 참조]
16. 김재이; 박케이; 양 박사; Hong, S. 해수 역삼투압 담수화 플랜트의 에너지 소비에 대한 종합 검토. *적용 에너지* **2019년**, 254, 113652. [교차 참조]
17. Takabatake, H.; 다니구치, M.; Kurihara, M. 해수 RO 멤브레인 담수화 플랜트의 안정화 및 고성능을 위한 첨단 기술. *막* **2021년**, 11, 138. [교차 참조] [펩메드]
18. Abengoa 물 담수화. 사용 가능한 온라인: https://www.abengoa.com/export/sites/abengoa_corp/resources/pdf/noticias_y_publicaciones/Presentacion-Desalacion-Agua_en.pdf (2021년 11월 25일에 액세스함).

19. 고, 추신; 강혜하; 이스마일, AF; Hilal, N. 열 구동 담수화 공정의 하이브리드화: 최적단 및 기회. *담수화* **2021년**, 506, 115002. [교차 참조]
20. GS건설, 스페인 수처리업체 인수 계약 체결 사용 가능한 온라인: <https://pulsenews.co.kr/view.php?연도=2012&no=312360> (2022년 1월 6일에 액세스함).
21. GS 이니마 환경, 오만에서 21억 달러 규모의 담수화 프로젝트 수주. 사용 가능한 온라인: [https://스마트워터매거진.com/news/smart-water-magazine/gs-inima-environment-wins-desalination-project-worth-21 billion-oman](https://스마트워터매거진.com/news/smart-water-magazine/gs-inima-environment-wins-desalination-project-worth-21-billion-oman) (2022년 1월 6일에 액세스함).
22. 국가과학기술정보원(NTIS). 사용 가능한 온라인: <https://www.ntis.go.kr/> (2021년 11월 11일에 액세스함).
23. 기술별 담수화 장비 시장 규모, 점유율 및 동향 분석 보고서(역삼투압(RO), 단단계 플래시(MSF) 종류), 소스별, 애플리케이션별, 지역별 및 부문별 예측, 2020-2028년. 사용 가능한 온라인: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/water-desalination-equipment-market> (2021년 12월 12일에 액세스함).
24. Zapata-Sierra, A.; Cascajares, M.; 알케이드, A.; Manzano-Agugliaro, F. 담수화에 대한 세계적인 연구 동향. *담수화* **2021년**, 519, 115305. [교차 참조]
25. Liang, K.; 마, 큐.; 루, H.; 팡, H.; 양피.; Fan, J. swro 담수화 플랜트의 등압 erd 기술의 연구 및 적용 진행. *데살린. 물 치료* **2020년**, 202, 14-26. [교차 참조]
26. 우와이씨; 김에스; 손홍콩; 티징, LD 소개: *멤브레인 담수화의 현재, 과거 및 미래*, Elsevier: 2018년 네덜란드 암스테르담; pp. xxv-xlvi.
27. 김성수; 오, 학사; 황미희; 홍에스; 김, JH; 이에스; Kim, IS 미래의 담수화 기술을 향한 야심찬 발걸음: SEAHERO R&D 프로그램(2007-2012). *적용 물 과학* **2011년**, 1, 11-17.
28. 해수담수화 플랜트용 고압펌프 국내 최초 수출 사용 가능한 온라인: <http://www.ikld.kr/news/articleView.html?idxno=10687> (2021년 12월 15일에 액세스함).
29. 캐스, 타이; 차일드리스, AE; Elimelech, M. 정삼투: 원리, 응용 및 최근 개발. *J. 멤버. 과학* **2006년**, 281, 70-87. [교차 참조]
30. Zhao, S.; Zou, L.; 탕, CY; Mulcahy, D. 정삼투압의 최근 발전: 기회와 도전. *J. 멤버. 과학* **2012년**, 396, 1-21. [교차 참조]
31. 세퍼, DL; 베르베르, JR; Jaramillo, H.; Lin, S.; Elimelech, M. 정삼투: 우리는 지금 어디에 있습니까? *담수화* **2015년**, 356, 271-284. [교차 참조]
32. Yip, NY; 티라페리, A.; 필립, 워싱턴; 슈프만, JD; Elimelech, M. 고성능 박막 복합 정삼투막. *환경. 과학. 기술* **2010년**, 44, 3812-3818. [교차 참조] [펩메드]
33. 리, 엘.; 시, W.; Yu, S. 정삼투막 기술에 대한 연구는 여전히 물 회수 및 폐수 처리에 대한 개선이 필요합니다. *물* **2020년**, 12, 107. [교차 참조]
34. Lee, S. Spiral-wound와 Plate-and-Frame 정삼투막 모듈의 성능 비교. *목* **2020년**, 10, 318. [교차 참조]
35. 김제이; 블란딘, G.; Phuntsho, S.; Verliedfe, A.; Le-Clech, P.; Shon, H. 8인치 나선형 정삼투 모듈의 작동 가능성에 대한 실제 고려 사항: 유체 역학, 오염 거동 및 청소 전략. *담수화* **2017년**, 404, 249-258. [교차 참조]
36. Chekli, L.; Phuntsho, S.; 김제; 김제이; 최재용; 최재성; 김성수; 김, JH; 홍에스; 손제이; et al. 하이브리드 정삼투 시스템에 대한 포괄적인 검토: 성능, 응용 프로그램 및 미래 전망. *J. 멤버. 과학* **2016년**, 497, 430-449. [교차 참조]
37. 후버, LA; 필립, 워싱턴; 티라페리, A.; 예, 뉴욕; Elimelech, M. Forward with osmosis: 더 큰 지속 가능성을 위한 새로운 응용 프로그램. *환경. 과학. 기술* **2011년**, 45, 9824-9830. [교차 참조]
38. 헨콕, NT; 블랙, ND; Cath, TY 하이브리드 삼투압 희석 담수화와 확립된 해수 담수화 및 폐수 재생 공정의 비교 수명 주기 평가. *물 해상도* **2012년**, 46, 1145-1154. [교차 참조]
39. 세계 최초의 정삼투-역삼투 하이브리드 해수담수화 기술 개발. 사용 가능한 온라인: <http://www.energydaily.co.kr/news/articleView.html?idxno=103627> (2021년 12월 18일에 액세스함).
40. 전제이 *해수담수화용 정삼투압 및 역삼투압 하이브리드 시스템의 에너지 사용량 및 탄소배출량 평가*, 부경대학교: 부산, 한국, 2021.
41. Klaysom, C.; 캐스, 타이; Depuydt, T.; Vankelecom, IFJ 정방향 및 압력 지연 삼투: 에너지 및 물 공급의 글로벌 문제에 대한 잠재적 솔루션. *화학 사회 신부님* **2013년**, 42, 6959-6989. [교차 참조]
42. Yip, NY; 티라페리, A.; 필립, 워싱턴; 슈프만, JD; 후버, LA; 김홍희; Elimelech, M. 염도 구배에서 지속 가능한 발전을 위한 박막 복합 압력 지연 삼투막. *환경. 과학. 기술* **2011년**, 45, 4360-4369. [교차 참조]
43. Achilli, A.; 차일드리스, AE 압력 지연 삼투: Sidney Loeb의 비전에서 첫 번째 프로토타입 설치까지—리뷰. *담수화* **2010년**, 261, 205-211. [교차 참조]
44. 한지.; Zhang, S.; 리, X.; 정, T.-S. 삼투 발전을 위한 압력 지연 삼투(PRO) 막의 발전. *음식물. 폴리머. 과학* **2015년**, 51, 1-27. [교차 참조]
45. Sarp, S.; 리, 지.; Saththasivam, J. 압력 지연 삼투압(PRO): 과거 경험, 현재 개발 및 미래 전망. *담수화* **2016년**, 389, 2-14. [교차 참조]

46. Lee, S.; 박, T.-S.; 박영지; Lee, W.-I.; 김성희. 해수 역삼투압(SWRO)의 규모 확대 - 압력 지연 삼투압(PRO) 하이브리드 시스템: 240m의 사례 연구 삼/day 파일럿 플랜트. *담수화* **2020년**, *491*, 114429. [교차 참조]

47. Lee, S.; 김용희; 박성준; 이성경; 최 H.-C. 나선형으로 감긴 압력 지연 삼투막 모듈의 성능에 대한 실험 및 모델링. *데살린. 물 치료* **2016년**, *57*, 10101-10110. [교차 참조]

48. Lee, S.; 최제이; 박영지; 손, H.; 안창호; 김성희. 역삼투압 염수의 유익한 사용을 위한 하이브리드 담수화 공정: 현재 상태 및 미래 전망. *담수화* **2019년**, *454*, 104-111. [교차 참조]

49. 김제이; 여, 나.; Lee, W.; 박, 티.; 박용영. 새로운 SWRO-PRO 하이브리드 담수화 기술 연구. *J. 한국어 Soc. 물 폐수* **2018년**, *32*, 317-324. [교차 참조]

50. Tong, T.; Elimelech, M. 폐수 관리를 위한 제로 액체 배출의 세계적인 부상: 동인, 기술 및 미래 방향. *환경. 과학. 기술* **2016년**, *50*, 6846-6855. [교차 참조] [펍메드]

51. Drioli, E.; 알리, A.; Macedonio, F. 막 종류: 최근 개발 및 전망. *담수화* **2015년**, *356*, 56-84. [교차 참조]

52. 세퍼, DL; 아리아스 차베스, LH; Ben-Sasson, M.; Romero-Vargas Castrill영형n, S.; 예, 뉴욕; Elimelech, M. 고염도 세일 가스 생산 물의 담수화 및 재사용: 동인, 기술 및 미래 방향. *환경. 과학. 기술* **2013년**, *47*, 9569-9583. [교차 참조]

53. 태신, P.; 인호, Y.; Choi, J. 막중류법(MD)과 압력지연삼투압법(PRO)을 이용한 차세대 하이브리드 해수담수화 기술 도입. *물의 미래* **2018년**, *51*, 59-65.

54. 신영; 최제이; 박예림; 최영; Lee, S. 파일럿 규모의 진공 막 중류(VMD) 성능에 대한 작동 조건의 영향. *데살린. 물 치료* **2017년**, *97*, 1-7. [교차 참조]

55. Dorji, P.; 최제이; 김디; Phuntsho, S.; 흥에스; Shon, HK 브롬화물 제거를 위한 해수 역삼투 담수화 플랜트의 2차 통과에 대한 대안으로서 막 용량성 탈이온화. *담수화* **2018년**, *433*, 113-119. [교차 참조]

56. 강제이; 김태.; 신에이치; Lee, J.; 하, J.-I.; Yun, J. 막 용량성 탈이온화를 위한 직접 에너지 회수 시스템. *담수화* **2016년**, *398*, 144-150. [교차 참조]

57. Tan, C.; 그, C.; Fletcher, J.; Waite, TD 기수의 파일럿 규모 멤브레인 CDI 처리에서 에너지 회수. *물 해상도* **2020년**, *168*, 115146. [교차 참조] [펍메드]

58. 오모세비, A.; 리, 지.; Holubowitch, N.; 가오, X.; Landon, J.; Cramer, A.; Liu, K. 역 작동 특성을 갖는 용량성 탈이온화 시스템의 에너지 회수. *환경. 과학. 물 해상도. 기술* **2020년**, *6*, 321-330. [교차 참조]

59. Kim, N.; Lee, J.; 김성수; 흥에스파; 이씨.; 윤제이; Kim, C. 다체널 막 용량성 탈이온화에 대한 간략한 검토: 원리, 현황 및 미래 전망. *적용 과학* **2020년**, *10*, 683. [교차 참조]

60. 진, 엠.; Deshmukh, A.; Epszstein, R.; 파텔, SK; 오보세니, OM; 워커, WS; Elimelech, M. 용량성 탈이온화 및 역삼투에 의한 담수화의 에너지 소비 비교. *담수화* **2019년**, *455*, 100-114. [교차 참조]

61. Rybar, S.; 보다, R.; Bartels, C. SWRO 플랜트를 위한 부분적 2차 통과 설계를 분할합니다. *데살린. 물 치료* **2010년**, *13*, 186-194. [교차 참조]

62. Segal, H.; 변혁, 엘.; 니르, 오.; Lahav, O. 높은 pH 작동을 통한 해수 역삼투압 담수화의 강화 및 에너지 최소화: 온도 의존성 및 2차 통과 영향. *화학 공학 프로세스* **2018년**, *131*, 84-91. [교차 참조]

63. McGovern, RK; Lienhard, VJH 역삼투 담수화를 에너지적으로 능가하는 정삼투의 잠재력에 대해. *J. 멤브. 과학* **2014년**, *469*, 245-250. [교차 참조]

64. Glueckstern, P.; Priel, M. 이전 및 새 SWRO 시스템에서 붕소 제거 최적화. *담수화* **2003년**, *156*, 219-228. [교차 참조]

65. Stein, S.; 시반, 오.; Yechieli, Y.; Kasher, R.; Nir, O. 붕소 제거 요건의 관점에서 해수보다 해안 염수 지하수의 담수화에 대한 이점. *환경. 과학. 물 해상도. 기술* **2021년**, *7*, 2241-2254. [교차 참조]

66. 흥에스; 황미희; 임스케; 추, KH; 김, 앤.; 박케이; Kim, J. 중동에 최적화된 저에너지 해수담수화 기술 개발. *J. 한국어 Soc. 문명 영어* **2019년**, *62*, 26-37.

67. Voutchkov, N. *담수화 엔지니어링: 계획 및 설계*; McGraw Hill Professional: 2012년 미국 뉴욕주 뉴욕.

68. Sarant, L. 중동: 석유 의존의 종식. *자연* **2016년**, *537*, S6-S7. [교차 참조] [펍메드]

69. Masdar의 재생 에너지 담수화 파일럿 프로그램은 태양 에너지 기반 담수화가 상업적으로 실행 가능하다는 것을 발견했습니다. 사용 가능한 온라인: <https://news.masdar.ae/en/news/2019/02/19/10/00/masdars-renewable-energy-desalination-pilotprogramme-finds-solar-energy-powered-desalination> (2021년 11월 12일에 액세스함).

70. Ghaffour, N.; Mujtaba, IM 재생 에너지를 사용한 담수화. *담수화* **2018년**, *435*, 1-2. [교차 참조]

71. Ahmadi, E.; McLellan, B.; Mohammadi-Ivatloo, B.; Tezuka, T. 잠재적인 담수원으로서 담수화의 지속 가능성에서 재생 에너지 자원의 역할: 업데이트된 검토. *지속 가능성* **2020년**, *12*, 5233. [교차 참조]

72. Bundschuh, J.; Kaczmarczyk, M.; Gaffour, N.; Tomaszewska, B. 물 담수화에 사용되는 최신 재생 에너지원: 현재 및 미래 전망. *담수화* **2021년**, *508*, 115035. [교차 참조]

73. El-Hady, B.; Kashout, A.; Hassan, A.; Hassan, G.; El-Banna Fath, H.; El-Wahab Kassem, A.; Elshimy, H.; 란잔베파; 샤히드, MH 하이브리드 재생 가능 에너지/오지에 대한 하이브리드 담수화 잠재력: 이집트에서 연구된 일부 사례. *RSC 어드밴스* **2021년**, *11*, 13201-13219. [교차 참조]

74. 양에스; 정시; 양동욱; 김, MK; 오성주 죽도 자동에너지자립도 사례연구. 2018년 7월 3일 한국 황성 전력전자학회의 회보에서; 171~173쪽.

75. 박에스; Ligaray, M.; 김, Y.; 전케이; 손, M.; 조경호 해수전지 담수화에 대한 음극액 염도의 영향 조사. *담수화* 2021년, 506, 115018. [교차 참조]
76. 아메드, FE; Khalil, A.; Hilal, N. 새로운 담수화 기술: 현재 상태, 과제 및 미래 동향. *담수화* 2021년, 517, 115183. [교차 참조]
77. Xu, D.; 왕 W.; Zhu, M.; Li, C. 담수화 전지의 최근 발전: 초기 검토. *ACS 적용 메이터. 인터페이스* 2020년, 12, 57671-57685. [교차 참조]
78. Wang, J.; 다이, J.; 장, Z.; 추, B.; Chen, F. 유동 전극 전기화학적 담수화 시스템의 최근 진행 상황 및 전망. *담수화* 2021년, 504, 114964. [교차 참조]
79. 한국동서발전(KEWP)과 한국전력(KEPCO), UNIST 해수전지 개발에 50억원 투자. 사용 가능한 온라인: <https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2017013109260876853> (2021년 12월 12일에 액세스함).
80. 손, M.; 박에스; 김, 엔.; 엔젤레스, AT; 김, Y.; 조경호 해수 이차 전지를 이용한 에너지 저장 및 해수 동시 담수화: 타당성 및 향후 방향. *고급 과학*. 2021년, 8, 2101289. [교차 참조] [펍메드]
81. 황에스엠; 박지성; 김, Y.; 고, W.; 한제이; 김, Y.; Kim, Y. 충전식 해수 전지 - 개념에서 응용까지. *고급 메이터*. 2019년, 31, 1804936. [교차 참조]
82. Jones, E.; 카디르, 엠.; 반 블리에트, MTH; Smakhtin, V.; 강에스엠 담수화 및 염수 생산 현황: 글로벌 전망. *과학. 토탈 환경*. 2019년, 657, 1343-1356. [교차 참조]