



# 미래 그린 해수담수화 기술

## Future green seawater desalination technologies

김정빈·홍승관\*

Jungbin Kim·Seungkwan Hong\*

고려대학교 건축사회환경공학과

Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

### ABSTRACT

The difficulty of securing freshwater sources is increasing with global climate change. On the other hand, seawater is less affected by climate change and regarded as a stable water source. For utilizing seawater as freshwater, seawater desalination technologies should be employed to reduce the concentration of salts. However, current desalination technologies might accelerate climate change and create problems for the ecosystem. The desalination technologies consume higher energy than conventional water treatment technologies, increase carbon footprint with high electricity use, and discharge high salinity of concentrate to the ocean. Thus, it is critical to developing green desalination technologies for sustainable desalination in the era of climate change. The energy consumption of desalination can be lowered by minimizing pump irreversibility, reducing feed salinity, and harvesting osmotic energy. Also, the carbon footprint can be reduced by employing renewable energy sources to the desalination system. Furthermore, the volume of concentrate discharge can be minimized by recovering valuable minerals from high-salinity concentrate. The future green seawater desalination can be achieved by the advancement of desalination technologies, the employment of renewable energy, and the utilization of concentrate.

**Key words:** Climate change, Concentrate utilization, Green desalination technologies, Low carbon, Low energy, Seawater desalination

**주제어:** 기후변화, 농축수 활용, 그린 담수 기술, 저탄소, 저에너지, 해수담수화

Received 3 September 2020, revised 21 October 2020, accepted 30 October 2020.

\*Corresponding author: Seungkwan Hong (E-mail: [skhong21@korea.ac.kr](mailto:skhong21@korea.ac.kr))

• 김정빈 (박사과정) / Jungbin Kim (Ph. D. Student)

서울시 성북구 안암로 145, 02841

145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

• 홍승관 (정교수) / Seungkwan Hong (Professor)

서울시 성북구 안암로 145, 02841

145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

# 1. 서론

이산화탄소 배출 증가에 따른 기후변화로 양질의 담수 확보가 점차 어려워지고 있다. 반면 해수 자원은 변동이 적고 쉽게 구할 수 있으므로, 해수담수화는 미래 담수 자원 확보에 있어 반드시 필요한 기술로 여겨지고 있다. 그러나 해수담수화는 기존 정수처리 시설 대비 에너지소모량이 크므로 모든 지역에서 상용 가능한 기술이 아니다. 또한, 높은 전력사용량으로 인해 탄소를 많이 배출하며, 고농도의 농축수를 배출한다는 문제점도 존재한다. 따라서 미래 그린 해수담수화 기술에 대한 관심이 크게 증가하고 있다.

먼저 저에너지 역삼투(reverse osmosis, RO) 해수담수화 기술이 다방면에서 개발되고 있다. 현재 역삼투 기술은 주로 고프레스 역삼투막 개발, 고회수율 공정 개발, 규모의 경제성, 생물막오염 문제 해결을 중심으로 개발되고 있다 (Weaver, 2020). 그러나 현재 담수화 공정을 통해 줄일 수 있는 에너지소모량은 한계가 있어 수요를 만족시키지 못하고 있다. 또한, 탄소 배출을 줄이기 위해 신재생에너지를 활용하는 다양한 방법이 시도되고 있다. 특히, 저에너지 해수담수화 공정과 신재생에너지를 연계한 공정이 주로 연구되고 있다. 최근에는 중동지역을 중심으로 농축수를 부피를 줄이면서 유가자원을 회수하는 기술도 개발되고 있다. 농축수는 해수담수화 과정에서 발생하는 고염의 용액으로 생태계에 악영향을 미치지만, 이를 활용할 경우 농축수 부피를 줄이면서 부가가치도 창출할 수 있기 때문이다.

이 연구는 저에너지 미래 그린 해수담수화를 위한 기술에 대해 상세히 분석한다. 먼저 저에너지 해수담수화 기술 개발을 위해 역삼투 기술, 유입수 염도 저감 기술, 그리고 삼투에너지 회수 기술에 대해 분석하고 평가한다. 또한, 신재생에너지 연계 해수담수화 적용 사례와 분산형 소규모 패키지 플랜트에 대해 분석한다. 마지막으로 농축수 부피 저감 및 유가자원 회수 기술에 대해 정리하고 분석한다.

## 2. 저에너지 해수담수화 기술 개발

### 2.1 RO 에너지 저감 기술 개발

해수담수화 기술이 증발법에서 역삼투법으로 전환된

주요 원인은 에너지회수장치 적용으로 인한 에너지소모량 감소 때문이다 (Fig. 1). 에너지회수장치 적용 초기에는 터빈형 에너지회수장치인 Francis turbine(FT) 및 Pelton turbine(PT)가 주로 사용되었으나, 이후 기계적 효율이 높은 등압형 에너지회수장치인 dual work exchanger energy recovery(DWEER) 및 pressure exchanger(PX)가 사용되었다 (Kim et al., 2019). 에너지회수장치는 역삼투 공정의 에너지소모량을 크게 줄였으나 여전히 플랜트 전체 에너지소모량의 약 70%를 차지하고 있다 (Voutchkov, 2018). 따라서 역삼투 해수담수화(seawater reverse osmosis, SWRO)의 에너지소모량을 최소화하기 위해 고효율 에너지회수장치 및 펌프를 사용하고 있다.

PX는 기계적 효율이 가장 높은 에너지회수장치로 2010년 전후 건설된 많은 플랜트에 적용되고 있다 (Kim et al., 2019). 2010년 운전을 시작한 이스라엘 Hadera 플랜트의 경우 4 kWh/m<sup>3</sup>의 에너지소모량을 보이며, 2015년 운전을 시작한 아랍에미리트 Ghalilah 플랜트의 경우 3 kWh/m<sup>3</sup>의 낮은 에너지소모량을 보이고 있다 (Table 1). 그러나 동일한 지역의 플랜트일지라도 유입수 및 생산수 기준, 설계 기준 등이 상이하므로 고효율 에너지회수장치만을 가지고는 에너지소모량을 줄이기 어렵다. 또한, 현재 PX의 효율은 이미 95%

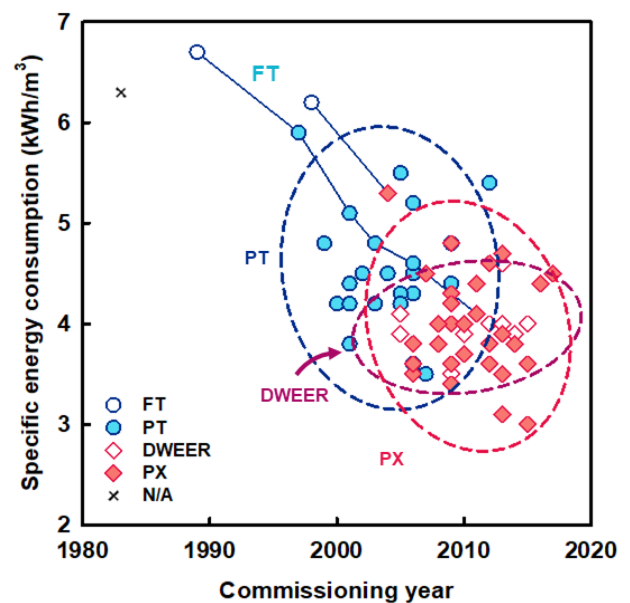


Fig. 1. Reduction of specific energy consumption with development of energy recovery device (Kim et al., 2019). © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

**Table 1.** Specification of SWRO desalination plants equipped with PX in the Middle East (Kim et al., 2019)

Country	Plant	Year	Capacity (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /d)	Overall RO configuration	Energy recovery device	Plant energy consumption (kWh/m <sup>3</sup> )
Israel	Hadera	2010	350	Split partial second pass (SPSP)	PX	4
Saudi Arabia	Shuaibah III	2009	150	Full two pass	PX	4.8
	Sadara	2016	149	Full/Partial two pass	PX	4.4
Qatar	Ras Abu Fontas A3	2017	164	Two pass	PX	4.5
United Arab Emirates	Khorfakkan	2008	23	Single pass	PX	4
	Layyah	2008	23	Single pass	PX	4
	Ghalilah	2015	68	Single pass	PX	3

이상으로 나타나는 만큼 고효율 에너지회수장치 개발로 인한 에너지 감소 효과는 크지 않을 것이다.

또한, 고압펌프의 기계적 효율을 높이기 위해 트레인 규모를 키우고 있다. 일반적으로 플랜트 규모가 커질수록 에너지소모량은 줄어든다고 알려져 있는데, 이는 역삼투 공정 설계 시 최적화 할 수 있는 부분이 많아지기 때문이다. 그러나 고압펌프 효율은 플랜트 규모가 아닌 역삼투 트레인의 규모에 따라 결정되므로, 100,000 m<sup>3</sup>/d 이상의 플랜트에서는 이러한 경향이 뚜렷하게 나타나지는 않는다 (Kim et al., 2019). 한편, 이스라엘의 IDE Technologies사는 고압펌프 효율을 높이기 위해 트레인 규모를 키운 pressure center design을 개발한 바 있으나, 적용 가능한 규모에 제약이 있다.

미래 역삼투 공정의 에너지소모량을 줄이기 위해선 에너지효율장치 및 고압펌프의 효율을 높이는 방식 이외의 방식을 적용해야 한다. 최근 펌프의 비가역성으로 인한 에너지소모량이 큰 만큼 이를 줄이기 위해 다단 공정 개발이 이론적으로 활발하게 이루어지고 있다 (Park et al., 2020). 중동지역에 설치된 해수담수화 플랜트의 경우 운영 압력이 높으므로, 펌프의 비가역성을 감소시킬 시 에너지소모량이 크게 줄어들 것으로 판단한다 (Fig. 2). 그러나 해당 기술은 실제 적용 및 운영 측면에서 면밀한 검토가 필요하다 (Kim et al., 2020a; Kim et al., 2020b).

## 2.2 유입수 염도 저감 기술 개발

중동지역은 유입수의 염도 및 온도가 다른 지역에 비해 높은 편이다. 아라비아만의 염도 및 온도는 각각 45,000 mg/L와 26°C이며, 홍해의 경우 염도 및 온도가

각각 41,000 mg/L와 28°C이다 (Voutchkov, 2013). 역삼투 해수담수화 공정에서 유입수 염도가 높을 경우 플랜트 운영 압력 증가로 인해 에너지소모량이 높아진다. 반면, 유입수 온도가 높을 경우 역삼투막의 수투과율이 증가하여 에너지소모량은 낮아진다 (Kim et al., 2019). 그러나 염도 변화가 에너지소모량에 더 큰 영향을 미치므로 염도를 낮추는 편이 에너지소모량을 줄이는데 더 효과적이다.

현재 two-pass 역삼투 해수담수화 플랜트에서는 second-pass RO의 농축수로 first-pass RO의 유입수를 희석하고 있다 (Fig. 2). Second-pass RO 농축수는 first-pass RO 유입수 대비 염도가 낮으므로, 혼합할 경우 first-pass RO 운영에 필요한 압력을 낮춰 에너지소모량을 줄일 수 있기 때문이다. 또한, 농축수 순환을 통해 공정 전체의 회수율도 높일 수 있다. 이와 비슷한 콘셉트로 개발된 split partial single-pass(SSP) RO 공정은 베셀 후단 생산수를 가지고 유입수를 희석하는데 사용한다 (Kim and Hong, 2018). 그러나 이처럼 내부 용액 순환하여 유입수를 희석(혼합)할 경우 오히려 엔트로피가 증가하므로, 저농도의 용액을 직접 처리하여 물을 생산하는 편이 에너지 측면에서 더 효율적일 수 있다.

유입수를 직접적으로 희석하지 않고 유도용액 희석을 통해 해수담수화를 하는 방법에 대해서도 연구가 진행되고 있다. Draw solution assisted reverse osmosis(DSARO)라 불리는 이 공정은 유입수를 통해 유도용액을 희석시키고, 희석된 유도용액을 역삼투 공정의 유입수로 사용하여 물을 생산하는 방식이다 (Park et al., 2017). 유입수와 생산수 사이에 유도용액을 두므로 공정 내 삼투압 차이를 낮출 수 있다는 장

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

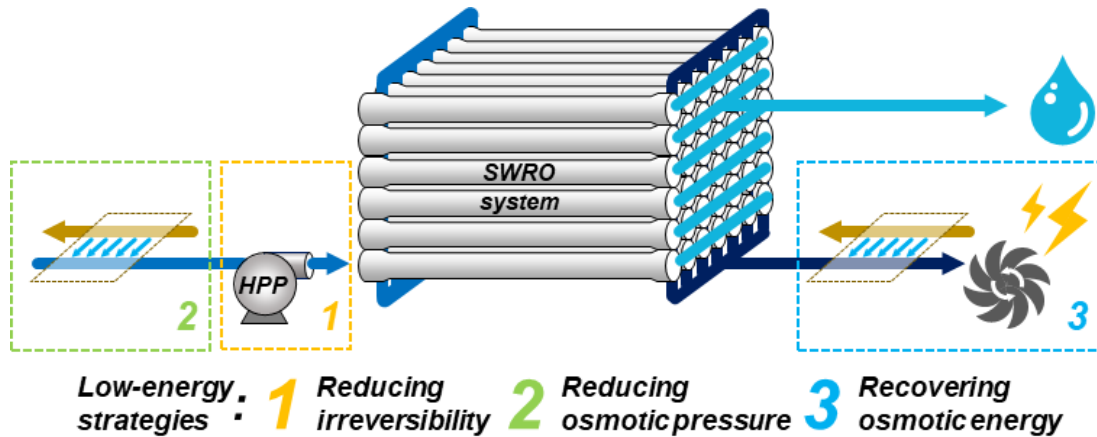


Fig. 2. Strategies for low-energy SWRO desalination plants (modified from Park et al., 2020). © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

점이 있지만, 엔트로피 증가로 인해 전체 공정의 에너지소모량이 증가한다는 단점이 있다.

에너지소모량을 줄이기 위해서는 내부 용액이 아닌 외부 용액을 활용하여 유입수 염도를 저감해야 한다. 특히, 저농도 용액(외부 용액)에서 이끌어낸 물로 해수(유입수)를 희석하는 정삼투-역삼투 융합 해수담수화 기술은 에너지소모량을 효과적으로 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다 (Fig. 2). 그러나 해당 기술을 실현시키기 위해선 대량의 저농도 용액 확보 등 현실적인 한계를 극복해야만 한다 (Park et al., 2020).

### 2.3 삼투 에너지 회수 기술 개발

해수담수화 연구는 주로 생산수 수질 및 수량을 높이기 위한 기술을 중심으로 이루어져 왔다. 생산수 수질을 높이기 위해 two-pass RO를 기반으로 한 공정이 개발되었고, 생산수 수량을 높이기 위해 two-stage RO 위주의 공정이 개발되어 왔다. 그러나 생산수 수질 또는 수량을 높일 경우 에너지소모량이 증가한다는 단점이 존재한다 (Fig. 3). 생산수를 활용한 연구는 다양하게 진행된 반면, 농축수를 활용한 연구는 널리 적용되지 못하였다. 그러나 해수담수화 농축수는 높은 삼투 에너지를 가지므로, 이를 활용하여 에너지를 생산하는 연구가 최근 활발하게 이루어지고 있다.

압력지연삼투(pressure retarded osmosis, PRO)는 삼투 에너지를 회수하는 기술 중 하나이다. 노르웨이의 Statkraft사는 2009년에 압력지연삼투 파일럿 플랜트를

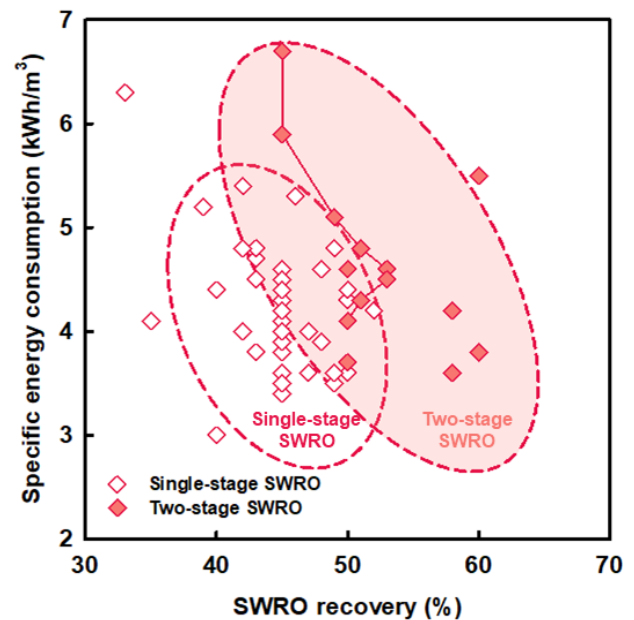


Fig. 3. Energy consumption of SWRO desalination plants depending on the number of stages (Kim et al., 2019). © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

설치 및 운영한 바 있으나, 강물과 해수의 낮은 삼투압 차이로 인해 경제성이 떨어져 2012년에 운영을 중단한 바 있다. 이후 일본의 Megaton Project, 한국의 GMVP 연구단 등에서 파일럿 규모의 압력지연삼투 기술을 적용한 바 있다. 특히, 한국의 GMVP 연구단의 경우 하수와 해수담수화 농축수를 활용한 압력지연삼투를 운영하여 경제성을 확보하였다 (Fig. 2).

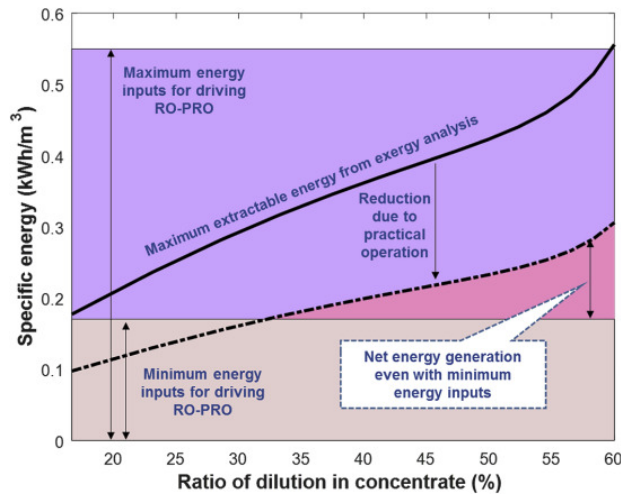


Fig. 4. Feasibility of RO-PRO hybrid process (Park et al., 2020). © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

역전기투석(reverse electrodialysis, RED)을 통해서도 삼투에너지를 회수할 수 있다. 역전기투석은 전기투석의 원리를 반대로 적용한 기술로, 저염 용액과 고염 용액을 이온교환막으로 분리하여 염도차를 통해 발전하는 방식이다. 네덜란드의 RED stack사는 Fujifilm 및 Wetsus와 함께 역전기투석 연구 및 실증화를 진행하였고, 그 결과 실제 원수를 사용하는 세계 최초의 50 kW급 역전기투석 파일럿을 운영하고 있다.

압력지연삼투 및 역전기투석 기술 모두 삼투에너지를 회수할 수 있다는 장점이 있지만, 실증화 측면에서 좀 더 기술적인 진보가 필요하다. 압력지연삼투는 역전기투석에 비해 발전량이 많지만 현실적인 제약이 존재하므로 충분한 타당성 검증이 필요하다 (Fig. 4). 특히, 다량의 저염의 용액 확보 및 고성능 분리막 개발 등 현실적인 조건을 극복할 수 있는 기술 개발이 필요하다 (Park et al., 2020).

### 3. 신재생에너지와 연계한 저탄소 해수담수화 기술 개발

#### 3.1 신재생에너지 연계 해수담수화 적용

신재생에너지는 활용 가능성이 큰 것으로 조사되고 있으나 기존 에너지원들에 비해 경제성이 떨어져 널리 적용되지 못하고 있다 (Schenkeveld, 2012). 그러나 탈석유시대를 맞이하여 많은 중동지역 국가들이 신재

생에너지 개발에 박차를 가하고 있으며, 신재생에너지를 연계한 해수담수화 플랜트를 통해 물-에너지 생산을 동시에 이뤄내려고 한다 (Fig. 5).

사우디아라비아의 경우 신재생에너지와 해수담수화 플랜트를 적극적으로 연계하고 있다. Advanced Water Technology(AWT)사와 Abengoa사는 태양광에너지를 이용한 Al Khafji 플랜트(60,000 m<sup>3</sup>/d)를 지은 바 있다. 해당 플랜트는 에너지저장시스템을 갖추고 있어 낮에는 태양에너지를 통해 에너지를 직접 사용하고 밤에는 낮에 저장한 에너지를 이용하여 플랜트를 운영한다. 사우디아라비아는 최근 네움(Neom) 신도시에 4 MW급 태양 에너지 발전 시스템을 사용하는 125,000 m<sup>3</sup>/d의 역삼투 해수담수화 플랜트를 건설할 계획을 수립하기도 하였다.

아랍에미리트는 2013년 국영기업 Masdar사를 통해 신재생에너지를 이용한 해수담수화 파일럿 프로그램을 발족하였다 (Table 2). 참여 기업들은 아부다비에서 약 90 km 떨어진 Ghantoot 지역에서 해수담수화 파일럿 플랜트를 운전하였고, 에너지소모량을 3.6 kWh/m<sup>3</sup> 미만으로 낮추었다. 이러한 추세를 볼 때 아랍에미리트에서도 신재생에너지를 연계한 해수담수화 적용 사례가 앞으로 더욱 증가할 것으로 판단한다 (The World Bank, 2012).

요르단의 경우 최근 들어 해수담수화 플랜트 건설에 관심을 갖기 시작하였다. 이는 인구 증가, 난민 유입, 기후변화로 인해 물 부족 현상이 심화되었기 때문이다. 그러나 요르단의 경우 해안과 인접한 지역이 적어 취수 접근성이 떨어지고, 에너지를 저렴하게 공급하기

Table 2. Specification of pilot plants of Masdar program (The World Bank, 2012)

Company	Technology	Capacity (m <sup>3</sup> /d)
Abengoa	Reverse osmosis, membrane distillation	1,080
Suez	Reverse osmosis, ion exchange	100
Sidem/Veolia	Reverse osmosis (using solar energy)	300
Trevi Systems	Forward osmosis	50
Mascara Renewable Water	Reverse osmosis (using solar energy)	30

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

어려워 해수담수화 기술의 타당성이 떨어졌다. 이를 극복하기 위해 태양에너지로 에너지 문제를 해결하면서 동시에 물을 생산하는 Aqaba 플랜트(15,000 m<sup>3</sup>/d)를 건설한 바 있다.

### 3.2 분산형 소규모 패키지 플랜트

물 부족뿐만 아니라 각종 휴양 시설 증가로 인해 소규모 플랜트에 대한 수요 역시 크게 증가하고 있다. 소규모 플랜트의 경우 관망 구축 및 설치비용을 줄일 수 있고, 물을 수송하는 과정 중에 발생할 수 있는 오염을 줄일 수 있다. 또한 각 지역의 규모 및 상황에 맞는 최적화 설계를 통해 플랜트의 성능도 향상시킬 수 있다. 최근 증가하고 있는 소규모 플랜트에 대한 수요를 맞추기 위해 다양한 기업들이 소규모 패키지 플랜트를 개발하고 있다 (Fig. 5).

세계적으로 유명한 수처리 기업인 SUEZ Water Technologies & Solutions에서는 procera 제품을 판매하고 있다. 해당 제품은 패키지 된 역삼투 시설과 더불어, 유입수 수질 및 생산수 요구 조건에 따라 전처리 비롯한 기타 설비를 제공한다. 또한, 원격 관리 및 진단 시스템을 통해 성능을 극대화하여 소규모 플랜트의 단점을 보완하였다. 동일한 패키지 플랜트를 판매하는 것이 아니라 고객의 요구에 맞는 제품을 판매한다는 점에서 경쟁력을 갖춘 것으로 판단한다 (Procera seawater desalination systems).

미국의 Fluence Corporation은 전처리 시설, 역삼투 시설, 에너지회수장치 모두 갖춘 Nirobox라는 컨테이

너 형태의 패키지 플랜트를 생산하고 있다. 해당 패키지는 확장성이 뛰어나 20,000 m<sup>3</sup>/d 규모 해수담수화 시설까지 구축할 수 있다. 또한, 염도 15,000-45,000 mg/L의 유입수를 처리할 수 있고, 용존공기부상법 (dissolved air floatation, DAF)을 전처리로 적용할 수 있어 해수담수화 최대 수요처인 중동지역에서도 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 판단한다 (Elemental Water Source).

네덜란드의 Elemental Water Makers는 태양광 시설과 배터리 그리고 역삼투 시설을 결합한 컨테이너 형태의 패키지 플랜트를 제작한다. 이 패키지 플랜트는 기본적으로 내부식성이 높고, 사용하는 배터리의 경우 유지보수가 크게 필요하지 않은 제품으로 장기간 사용이 가능하다. 또한, 원격제어가 가능하므로 운영 측면에서도 용이하다. 이처럼 소규모 플랜트를 신재생에너지와 결합할 경우 시너지가 클 것으로 판단한다 (Nirobox).

### 4. RO 농축수 활용 및 가치 증대

최근 역삼투를 활용한 해수담수화 농축 기술이 활발하게 개발되고 있다. 특히, 내고압 역삼투막과 다단형 역삼투 공정을 새롭게 개발하였고, 50,000 mg/L 농도의 고염의 유입수를 100,000 mg/L가 넘는 농도로 농축시킬 수 있는 기술을 확보하였다. 이러한 역삼투 기반의 농축 기술은 농축수의 부피를 크게 줄일 뿐 아니라 회수율 또한 높일 수 있다 (Fig. 6).

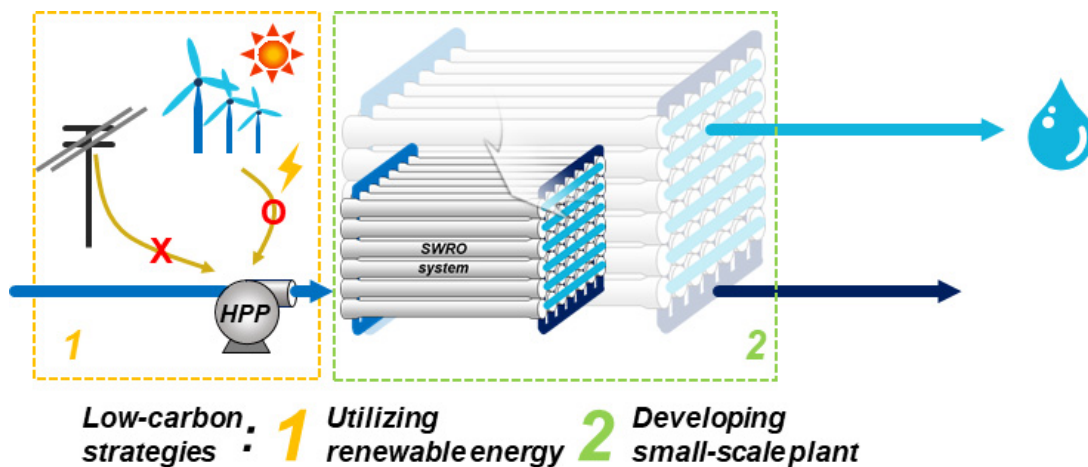


Fig. 5. Strategies for low-carbon SWRO desalination plants.

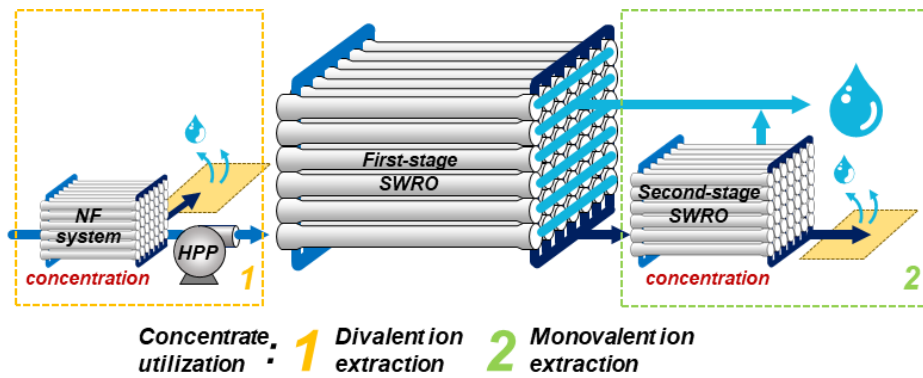


Fig. 6. Strategies for utilizing concentrate from SWRO desalination plants.

이스라엘의 Desalitech는 Closed Circuit Desalination(CCD)라는 일종의 회분공정을 보유하고 있다. 이 공정은 해수담수화의 농축수를 유입수로 지속적으로 유입시켜 회수율을 최대한 높이는 방식으로, 기존에는 파일럿 운영을 통해 해수를 80,000 mg/L 농도로 농축시킨 바 있다. 최근에는 상용 역삼투막이 아닌 내고압 역삼투막을 CCD 공정에 적용하였고, 해수를 100,000 mg/L까지 농축하는 기술에 대해 연구하고 있다 (Pankratz, 2019; The advantages of CCD).

호주 Osmoflo사는 농축 기술을 초기에 도입한 회사로 Osmoflo Brine Squeezer(OBS)라는 농축 기술을 보유하고 있다. OBS 기술은 6-8 kWh/m<sup>3</sup>의 에너지소모량으로 유입수를 150,000 mg/L 농도까지 농축할 수 있으며 회수율도 크게 높일 수 있다. OBS는 기존 역삼투 공정에 쉽게 탈부착 가능하며 큰 규모로 설치가 가능하다. 또한, 파울링 특히 스케일링에 저항하는 고유의 역삼투막을 적용하기 때문에 고농축 조건에서도 안정적인 운영이 가능하다 (Osmoflo Brine Squeezer technology).

터키 Hyrec사는 고회수율 및 고농축의 성능을 갖는 Osmotically Assisted Reverse Osmosis(OARO)를 개발하였다. OARO 기술은 막을 가운데 두고 양쪽에 같은 염도를 가진 물을 유입한 후 한쪽에 고압을 걸어 농축하는 기술이다. 해당 공정은 기존 역삼투막을 사용하면서도 해수를 250,000 mg/L 농도로 농축할 수 있다는 장점이 있다. 이에 사우디아라비아의 Saline Water Conversion Corporation(SWCC)는 OARO 기술을 적용한 플랜트(Fig. 6)를 운영하고 있다 (Unlocking high-salinity desalination).

캐나다 Saltworks사는 운영 압력의 한계를 기존 80 bar가 아닌 120 bar로 높은 역삼투막 Xtremem

RO(XRO)을 개발하였다. 기존 역삼투막을 이용할 경우 해수를 80,000 mg/L 농도로 농축할 수 있지만, XRO를 사용할 경우 130,000 mg/L 농도까지 농축할 수 있다. 그러나 현재 초고압 운전에 적합한 에너지회수장치가 존재하지 않으므로, 농축수를 순환시키는 공정에 대한 연구를 추가적으로 진행하고 있다 (XtremeRO/NF—Brine concentrator & water maker).

## 5. 결론 및 제언

지속적인 담수 생산을 위해선 기후변화 시대에 걸맞은 그린 해수담수화 기술이 반드시 필요하다. 특히, 담수화 기술 고도화, 신재생에너지와의 연계성 구축, 농축수 활용을 통한 유자자원 회수 등의 전략이 필요할 것으로 판단한다. 해수담수화 시장이 전 세계적으로 크게 성장하는 만큼 앞으로 그린 해수담수화 기술 적용 역시 확대될 것으로 기대한다.

## 사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 플랜트연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (국가과제고유번호 1485016424).

## References

Elemental Water Source. <https://www.elementalwatermakers.com/solutions/plugin-play-solar-desalination/> (October 21, 2020).

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

- Kim, J. and Hong, S. (2018). A novel single-pass reverse osmosis configuration for high-purity water production and low energy consumption in seawater desalination, *Desalination*, 429, 142-154.
- Kim, J., Park, K., and Hong, S. (2020a). Application of two-stage reverse osmosis system for desalination of high-salinity and high-temperature seawater with improved stability and performance, *Desalination*, 492, 114645.
- Kim, J., Park, K., and Hong, S. (2020b). Optimization of two-stage seawater reverse osmosis membrane processes with practical design aspects for improving energy efficiency, *J. Membr. Sci.*, 601, 117889.
- Kim, J., Park, K., Yang, D.R., and Hong, S. (2019). A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants, *Appl. Energy*, 254, 113652.
- Nirobox. <https://www.fluencecorp.com/nirobox/> (October 21, 2020).
- Osmoflo Brine Squeezer technology. <https://www.osmoflo.com/globalassets/ourcapabilities/osmoflo-brine-squeezer---obs-8-19.pdf> (October 21, 2020).
- Pankratz, T. (2019). RO systems make their case for brine concentration applications, *Global Water Intelligence*, June, 44-47.
- Park, K., Kim, D.Y., and Yang, D.R. (2017). Cost-based feasibility study and sensitivity analysis of a new draw solution assisted reverse osmosis (DSARO) process for seawater desalination, *Desalination*, 422, 182-193.
- Park, K., Kim, J., Yang, D.R., and Hong, S. (2020). Towards a low-energy seawater reverse osmosis desalination plant: A review and theoretical analysis for future directions, *J. Membr. Sci.*, 595, 117607.
- Procera seawater desalination systems. <https://www.suezwatertechnologies.com/products/reverse-osmosis/sea-water-packaged-desalination> (October 21, 2020).
- Schenkeveld, M., Morris, R., Budding, B., Helmer, J., and Innanen, S. (2012). *Seawater and Brackish Water Desalination in the Middle East, North Africa and Central Asia—A Review of Key issues and Experience in Six Countries (Algeria, Tunisia, Jordan, Uzbekistan, Malta, Cyprus)*, World Bank, Washington D.C.
- The advantages of CCD. <https://www.desalitech.com/advantages-of-ccd/> (October 21, 2020).
- Unlocking high-salinity desalination. <http://www.hyrec.co/solutions/> (October 21, 2020).
- Voutchkov, N. (2013). *Seawater Desalination—Costs and Technology Trends*. Encyclopedia of Membrane Science and Technology.
- Voutchkov, N. (2018). Energy use for membrane seawater desalination – current status and trends, *Desalination*, 431, 2-14.
- Weaver, R. (2020). “Desalination market update”, *GWI DesalData Market Assessment Webinar*, 13 August, 2020, Online.
- XtremeRO/NF—Brine concentrator & water maker. <https://www.saltworkstech.com/technology/xtremero-nf-reverse-osmosis-system/> (October 21, 2020).