



SWRO-PRO 복합해수담수화 신공정기술의 연구

The study of a novel SWRO-PRO hybrid desalination technology

김지숙·여인호·이원일·박태신·박용균*

Jisook Kim·Inho Yeo·Wonil Lee·Taeshin Park·Yonggyun Park*

GS건설, Global Engineering 본부, 환경공정설계팀
Environment Process Engineering Team, Global Engineering Division, GS E&C

pp. 301-307

pp. 309-315

pp. 317-324

pp. 325-335

pp. 337-348

pp. 349-355

pp. 357-361

ABSTRACT

SWRO-PRO hybrid desalination technology is recently getting more attention especially in large desalination markets such as USA, Middle East, Japan, Singapore, etc. because of its promising potential to recover a considerable amount of osmotic energy from brine (a high-concentration solution of salt, 60,000 - 80,000 mg/L) and also to minimize the impact of the discharged brine into a marine ecosystem. By the research and development of the core technologies of the SWRO-PRO desalination system in a national desalination research project (Global MVP) supported by Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT) and Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA), it is anticipated that around 25% of total energy consumption rate (generally 3 to 4 kWh/m³) of the SWRO desalination can be reduced by recovering the brine's osmotic energy utilizing wastewater treatment effluent as a PRO feed solution and an isobaric pressure exchanger (PX, ERI) as a PRO energy converter. However, there are still several challenges needed to be overcome in order to ultimately commercialize the novel SWRO-PRO process. They include system optimization and integration, development of efficient PRO membrane and module, development of PRO membrane fouling control technology, development of design and operation technology for the system scaling-up, development of diverse business models, and so on. In this paper, the current status and progress of the pilot study of the newly developed SWRO-PRO hybrid desalination technology is discussed.

Key words: Desalination, SWRO, PRO, Brine treatment, Pilot study

주제어: 해수담수화, 해수역삼투, 압력지연삼투압, 농축수 처리, 파일럿 연구

1. 서론

전 세계적으로 인구증가 및 기후변화에 의한 가뭄의 빈도가 잦아짐에 따라서, 물 수요 증가 및 부족에 대응할 수 있는 대체수자원 확보에 대한 필요성이 더욱 더 높아지고 있다. 특히, 지구 수자원 중 97%에 해당하는 해수를 담수화 시키는 방법이 주목 받고 있고, 일반적인 해수담수화 기술로는 증발식, 막여과 방식, 이온교환 방식 등이 있다 (Nijmeijer and Metz, 2010). 이 중에서 대규모 해수담수화 플랜트 공정으로는 증

발식과 막여과 방식이 주류를 이루고 있고, 상대적으로 에너지 소모량이 적고 생산단가가 낮은 막여과 방식의 시장 규모가 지속적으로 커지고 있으며, 현재 전체 해수담수화 시장의 2/3이상을 점유하고 있다 (Brown, 2015). 대표적으로 해수담수화기술인 역삼투 (Reverse Osmosis, RO) 기술은 RO막 및 농축수 압력회수장치(Energy Recovery Device, ERD)의 성능향상으로 에너지 효율이 초기대비 크게 향상 되었지만, 여전히 생산단가의 40% 내외, 플랜트 운영비의 50%이상을 차지하고 있다. 또한 RO 반투막에서 걸러진 염분 등의 총 용존 고형물(Total Dissolved Solid, TDS)로 인하여 고농도의 농축수가 생산되며, 일반적으로 해수담

Received 15 March 2018, revised 25 June 2018, accepted 18 July 2018.

*Corresponding author: Yonggyun Park(E-mail: ygpark01@gsenc.com)

수화 플랜트 해수원수의 약 50~60%의 고염도 농축수 (Brine)가 해양으로 배출되어 해양생태계에 영향을 미친다고 알려져 있다 (Danoun, 2007). 미국 캘리포니아 지역에서는 농축수의 해양방류에 따른 해양생태계의 영향을 최소화하기 위해 농축수 방류에 대한 규제가 강화되고 있고, 전 세계 해수담수화 플랜트의 53.4%가 위치하고 있는 중동에서도 농축수에 대한 환경평가 및 처리방안에 대한 검토가 이루어지고 있다. 특히, Arabian Gulf에 위치한 해수담수화 플랜트에서 배출되는 대량의 농축수와 인접하고 있는 Arabian Sea로부터 해수순환이 잘 이루어지지 않아서 지속적으로 해수의 염농도가 계속해서 높아지고 있다 (Bashithalshaer et al., 2011; Dawoud, 2012). 이러한 해수의 염농도의 증가는 해양생태계 영향뿐만 아니라, 궁극적으로 해수담수화 공정에 더 많은 에너지가 필요하게 됨으로써 해수담수화의 생산단가 상승을 초래할 수 있다. 이에, 최근에는 해수담수화의 에너지 소모량 절감하면서 고염도 농축수를 함께 처리할 수 있는 압력지연삼투 (Pressure Retarded Osmosis, PRO) 기술을 접목한 복합해수담수화 공정기술에 대한 관심이 크게 높아지고 있다.

현재 국내에서는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 차세대 해수담수화 기술개발 연구사업(연구과제명: MD/PRO 복합탈염공정 실증플랜트 기술개발, 2013-2018)에서 PRO를 이용한 해수담수화 플랜트에 에너지 회수 기술개발을 수행 중이며, 핵심기술은 해수담수화 플랜트에 발생하는 농축수의 염분차에너지(삼투압)를 PRO 기술을 통해 회수하는 SWRO-PRO 복합해수담수화 공정이다. 이는 SWRO 해수담수화 플랜트에서 발생하는 고염도 농축수와 하수처리수를 각각 PRO 시스템의 유도용액(Draw Solution, DS)과 유입수(Feed Solution, FS)로 사용하여, 두 용액의 농도차에 의해 발생하는 삼투에너지를 압력교환장치를 통해 회수하여 SWRO 공정 고압펌프에서 필요한 에너지를 줄이거나, 터빈 형태의 에너지 회수장치 적용을 통해 전력을 생산하는 기술이다. PRO 시스템을 통해 회수된 에너지는 해수담수화 운영비 및 생산단가를 절감할 수 있고, 고농도 농축수 방류로 인한 해양생태계 영향을 최소화 시킬 수 있다. 또한, 농축수 처리 비용(즉, 농축수 배수시설 비용) 및 해수담수화 전력시설 설치비용을 절감할 수 있는 효과를 기대할 수 있다. 최근에 미국, 일본, 싱가포르 등 선진국에서도 PRO

공정을 이용한 에너지 생산에 관한 기초 및 파일럿 연구가 활발히 진행 중이다.

SWRO-PRO 복합해수담수화 기술이 해수담수화 시장에서 경쟁력을 갖기 위해서는 우선적으로 고성능 PRO 전용막 및 모듈 개발이 필요하며, 해수담수화 농축수 외 추가적으로 하수처리수와 같은 저농도 담수를 유입수(Feed Solution, FS)로 사용하기 때문에 PRO 막오염을 최소화 할 수 있는 적절한 전처리 시스템과 물리화학적 세정기술 개발이 필요하다. 또한, 농축수의 삼투에너지를 회수할 수 있는 PRO 에너지 회수장치 개발 및 SWRO-PRO 복합해수담수화 시스템을 최적화 할 수 있는 설계 및 운영 기술개발이 필요하다. 이를 위해, 국책연구과제를 통해 부산시와 경기도 고양시 하수처리장에 소규모 및 대규모 파일럿 플랜트를 설치 및 운전 중에 있으며, 부산시 남부하수처리장에 운영 중인 대규모 파일럿 플랜트를 활용하여 세계 최초로 압력교환장치 형태인 PRO 에너지 회수장치를 적용한 고효율 SWRO-PRO 복합해수담수화 신공정 원천기술 개발을 성공 하였다. 차세대 해수담수화 기술인 SWRO-PRO 신공정기술은 해수담수화 전력소모량을 기존 기술대비 25% 이상 절감할 것으로 기대된다.

2. SWRO-PRO 복합해수담수화 기술

1976년에 Sidney Loeb이 최초로 제안한 PRO 발전 기술은 두 용액 사이의 농도차에 의해 발생하는 삼투에너지를 회수하는 기술로서, Fig. 1과 같이 PRO 시스템은 고농도 유도용액(Draw Solution, DS)과 저농도 유입수(Feed Solution, FS) 사이의 삼투압 차를 발생시키는 PRO 막모듈과 시스템 압력을 일정하게 유지시키는 압력교환장치(Pressure Exchanger), 그리고 압력 에너지를 전기에너지로 변환시키는 터빈(Turbine)으로 구성되어 있다 (Kim et al., 2017).

초기 PRO 연구는 강물과 바닷물이 만나는 지점인 강 하구에서 해수와 담수의 삼투압 차를 활용한 PRO 발전기술 개발에 집중에서 연구가 진행되어졌고, 최근엔 기존 SWRO 해수담수화에 소모되는 에너지를 절감하기 위하여 해수담수화 플랜트에서 배출되는 고염도 농축수(50,000~80,000 mg/L, TDS)와 하수처리장에서 배출되는 방류수(500~1,000 mg/L, TDS)를 PRO 시스템의 DS과 FS으로 각각 활용하여, PRO 막모듈 및

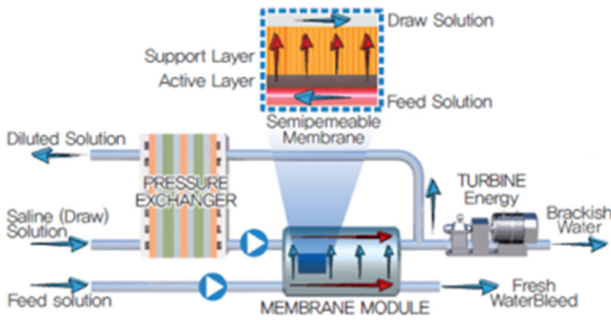


Fig. 1. Conceptual diagram of a PRO power generation system (ref, Kim et al., 2017).

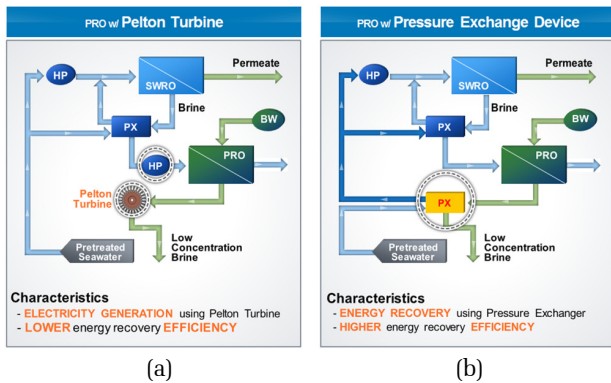


Fig. 2. SWRO-PRO hybrid desalination processes: (a) PRO-Turbine process and (b) PRO-2PX process.

시스템을 통해 두 용액간의 삼투압 에너지를 회수하는 기술개발이 활발히 진행되고 있다 (Chung et al., 2016). 현재 연구개발 중인 SWRO-PRO 복합해수담수화 기술은 터빈을 이용한 전기를 생산하는 공정과 해수담수화 농축수 압력을 직접적으로 회수할 수 있는 압력교환장치(Pressure Exchanger, PX)를 적용한 공정으로 나눌 수 있다 (Fig. 2).

PRO-Turbine 공정에서는 PRO 시스템을 통해 회수된 압력을 터빈과 발전기를 통해 전기를 생산할 수 있는 공정이지만, 전체 에너지 효율이 터빈, 발전기 등 각각 설비의 효율에 크게 영향을 받을 수 있다. 하지만, 압력교환장치를 활용한 PRO-2PX 공정에서는 PRO 시스템을 통해 회수된 대부분의 삼투압이 SWRO 공정 유입수의 압력을 높이는데 사용할 수 있어서, 전체적인 에너지 효율 측면에서는 PRO-turbine 공정에 비해 PRO-2PX 공정이 훨씬 더 높을 것이라 판단된다. 하지만, 차세대 해수담수화 기술로서 개발 중인 SWRO-PRO 복합해수담수화 기술의 상용화를 위해서는 여전히 다음과 같이 이슈사항들에 대한 최

적의 해결 방안들이 마련되어야 할 것이다.

- 1) SWRO-PRO 복합해수담수화 공정의 에너지 손실 최소화
- 2) 고성능 PRO 전용막 및 모듈 개발
- 3) PRO 막오염 제어 기술 개발
- 4) 경제성 분석 및 사업 모델 도출
- 5) 중대규모 플랜트 건설을 위한 Scale-up 기술 확보

3. SWRO-PRO 복합해수담수화 공정의 에너지 효율

PRO 시스템은 고농도의 해수담수화 농축수의 화학적 에너지(Cheical Potential Energy)를 기계적 에너지(Mechanical Energy)로 변환시키는 energy converter이고, 일반적인 농축수에서 회수가 가능한 삼투압 에너지는 1.4-2.0 kWh/m³으로 알려져 있다 (Yip and Elimelech, 2012). PRO 시스템의 구동력은 반투과막에 마주하는 두 개의 수용액 사이의 삼투압력의 차이이다. 수용액의 삼투압은 반트 호프(Van't Hoff) 관계식에 의해 계산될 수 있다.

$$\pi = \theta v.C.R.T. \tag{1}$$

여기서, v 는 용질의 담수화 동안 발생된 이온의 개수이고, θ 는 삼투 계수이며, C 는 모든 용질의 농도(moles/L)이고, R 은 일반 기체 상수(0.0831451 bar/moles.K)이며, T 는 절대 온도(K)이다. 삼투압 차이에 의해 반투과막을 통과하는 투수량은 다음 식(Chung et al., 2016)으로서 주어진다.

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P) \tag{2}$$

여기서, J_w 는 반투과막을 통과하는 투수량(L/m²·h)이고, A 는 반투과막의 순수 투과성능 계수(L/m²·h·bar)이며, $\Delta\pi$ 는 삼투압 차(bar), ΔP 는 시스템 압력차(bar)이다.

PRO는 두 개의 수용액의 염도 차이에 대한 혼합의 깁스 자유 에너지(Gibbs free energy of mixing)를 이용하여 에너지를 발생하거나 회수하기 위해 사용된다. A와 B 두 용액을 혼합하여 M이라는 혼합물이 생성될 때 농도 및 온도에 따라 회수 가능한 삼투압 에너지는 아래 관계식에 의해 계산될 수 있다 (Yip and Elimelech, 2012).

$$-(\Delta G_{mix})/(vRT) \approx \frac{C_M}{C_M} \Phi \ln(\gamma_{s,M} C_M) - C_A \ln(\gamma_{s,A} C_A) - [(1-\Phi)/\Phi] C_B \ln(\gamma_{s,B} C_B) \quad (3)$$

여기서, Φ 는 시스템 전체부피(물)에서 용액의 부피(물) 비율이고, C 는 용액 내 염의 몰농도, γ_s 는 용액내의 활동계수이다.

해수담수화의 주공정인 RO시스템에서 소모되는 전력소모량은 일반적으로 2~3 kWh/m³로 알려져 있고, 전체 플랜트 에너지 소모량(3~4 kWh/m³)의 약 70%를 차지하고 있다. 이를 고려 시, PRO 시스템을 통해서 회수가 가능한 삼투압 에너지는 이론적으로 플랜트에서 소모되는 총 에너지의 약 50%에 이를 것으로 알려져 있다 (Chung et al., 2016). 하지만, SWRO-PRO 복합해수담수화 공정에서는 일반 SWRO 해수담수화 설비와 연계되는 PRO 시스템의 운전을 위해 추가적인 에너지가 필요하고, PRO 시스템의 에너지 회수장치의 형태에 따라 삼투에너지 회수의 효율이 크게 달라질 수 있다. PRO-turbine 공정에서는 PRO 시스템의 압력을 최적 수준까지 승압 할 수 있는 고압펌프와 PRO 시스템을 통해 회수된 삼투에너지를 기계적 에너지와 전력 에너지로 변화하는 과정에서 효율이 저하될 수 있다. 이에 반해, PRO-2PX 공정에서는 isobaric 형태의 pressure exchanger의 적용을 통해 PRO 시스템에서 회수된 삼투에너지 손실을 최소화 시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 이외에도 PRO 시스템 유입수(FS)의 이송 및 전처리 과정에서 추가적인 에너지가 필요하지만, 해수담수화 플랜트를 하수처리 또는 물재이용 플랜트와 함께 건설함으로써, 에너지 비용뿐만 아니라 시설 구축 및 운전비용의 절감 효과를 가질 수 있다.

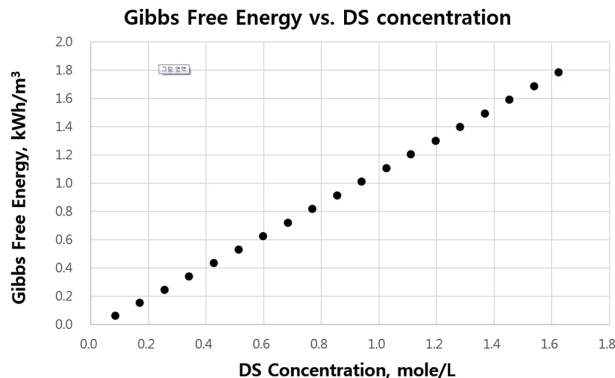


Fig. 3. Gibbs free energy estimation results (T = 303K, $\Phi = 0.333$).

4. PRO 막모듈 개발 및 성능평가

SWRO-PRO 복합해수담수화 시스템에서 가장 중요한 소재는 PRO 시스템 막모듈과 에너지 회수장치라고 할 수 있다. 해수담수화나 발전시설에 상용화된 에너지 회수장치(Pelton turbine, Turbocharger, Isobaric pressure exchanger 등)에 비해 PRO 막모듈은 아직까지 상용화 된 제품이 존재하지 않는다. 본 연구과제를 시작했던 2013년에 Toray Chemical Korea에서 국내에서 처음으로 개발한 나권형(Spiral-wound) 형태의 1세대 8인치 PRO 막모듈(CSM-PRO-1)의 성능은 2.1 LMH 투과유속과 8.5% 회수율로 상용화하기에는 성능이 매우 낮았다. PRO 막 모듈의 성능이 낮을 경우, PRO 시스템에서 요구되는 적정한 회수율을 달성하기 위해 RO 시스템에 비해 상대적으로 많은 개수의 막 모듈과 부대설비가 필요하여 결과적으로 플랜트 건설비용의 큰 영향을 미친다 (Park et al, 2017). PRO 막의 특성상 active layer가 다공성 support layer 위에 구성되어있기 때문에 active layer의 외부표면과 support layer의 내부에서 농도분극(CP)이 발생하고, 이 현상으로 삼투압이 감소되어 수투과량이 낮아지고, 전력밀도 생산이 저하되는 부정적인 영향을 미친다. 이에 따라서 내·외부 농도 분극을 줄이면서 막의 성능을 높이기 위해서는 물의 이동량인 수투과도(A) 값이 커야 하고 높은 삼투현상을 구현하기 위해서는 염투과도(B) 값이 작아야 하며 염이 원활하게 확산 될 수 있는 구조적 특성들의 최적화 가 필요하다. 또한 막구조인자(membrane structure parameter)인 S값이 크면 통과한 염이 확산하지 못하여 이상적인 삼투압보다 낮은 삼투압을 이용하기 때문에 A의 최대화 및 B, S의 최소화가 되어야 한다 (Han et al., 2016). Toray Chemical Korea는 support layer로 polysulfone을 사용하여 다공성 support layer를 만들고 polyamide 재질의 active layer를 만들어 유입수와 유도용액의 이동할 수 있는 두 개의 채널을 가진 PRO전용막을 4세대(CSM-PRO-1, CSM-PRO-2, CSM-PRO-3, CSM-PRO-4)까지 개발하였다. 현재 파일럿 플랜트에서 연구되고 있는 4세대 PRO 전용막(CSM-PRO-4)은 구조적 특성 개선을 통해 막모듈의 성능이 크게 향상되었고, 16.4 LMH 투과유속과 49.3% 회수율을 나타내고 있다 (Fig. 4). 세대별 PRO 전용막의 특성인자들(A, B, S)에 대한 정보를 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서 개발한 나권형



Table 1. PRO membrane properties and structure parameters

PRO Membrane Version	CSM-PRO-1	CSM-PRO-2	CSM-PRO-3	CSM-PRO-4
Type	TFC	TFC	TFC	TFC
Thickness (μm)	165	145	125	113
A ($\text{L}/\text{m}^2/\text{hr}/\text{bar}$)	1.80	1.55	2.85	1.97
B ($\text{L}/\text{m}^2/\text{hr}$)	0.714	0.187	0.466	0.619
S (mm)	2.530	2.098	0.926	0.713

(spiral-wound type) 모듈과 다른 형태인 중공사(hollow fiber type) PRO 막모듈이 단위면적당 투과유속이 낮고, 상용화 크기의 모듈화나 대량생산에 어려움을 가지고 있다. 하지만, 모듈의 높은 packing density와 상대적으로 균일한 유로를 제공할 수 있어 전체 막면적 활용 측면에서 장점을 가지고 있다. 이에, 향후에 두 개의 다른 형태의 PRO 전용막 및 모듈에 대한 지속적인 연구가 필요한 상황이다.

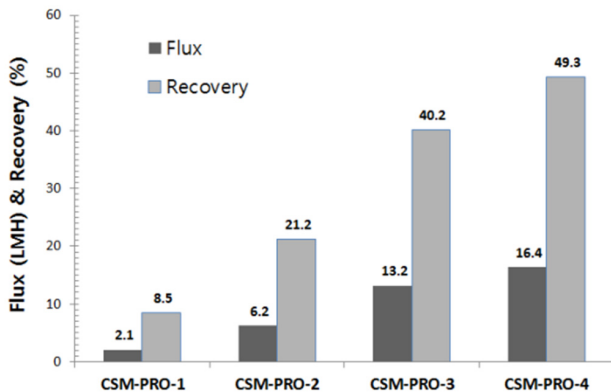


Fig. 4. Performance test results of the 8-inch PRO membrane modules (CSM-PRO-1, CSM-PRO-2, CSM-PRO-3, CSM-PRO-4).

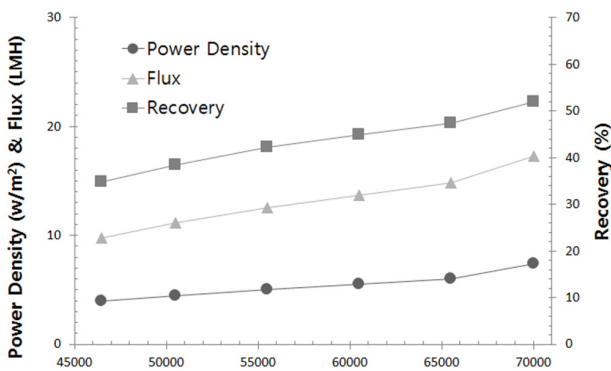


Fig. 5. Effect of DS salt concentration on PRO membrane module performance (w/ CSM-PRO-3).

PRO 막모듈 성능은 DS의 농도에 의해서도 크게 영향을 받는다. DS의 농도가 높으면, PRO시스템을 통해 회수가 가능한 삼투에너지가 많아져서, flux, power density, recovery가 상대적으로 높게 나타난다 (She et al., 2012). Fig. 5은 PRO 3세대 막모듈(CSM-PRO-3)을 가지고 DS 농도에 따른 성능평가 결과를 보여주고 있으며, DS의 농도가 46,500 mg/L 일 때 Flux는 9.75 LMH 이며 70,000 mg/L 에서는 17.3 LMH로 약 77% 향상이 되었다. 또한, recovery와 power density 역시 각각 49%, 86% 향상되었다.

5. PRO 전처리 기술 개발

PRO 시스템의 유입수로는 지표수, 하수처리장 처리수, 재이용수, 물재이용 플랜트 배출수 등 다양한 원수를 적용할 수 있지만, 장기운전에 의한 유기물, 무기물, 그리고 미생물에 의한 막오염이 발생할 수 있다. 이를 저감하는 효과적인 전처리기술 개발이 필수적이며, 대표적으로 저압 역삼투(BWRO), 모래여과 및 한외여과(UF) 기술에 대한 평가가 수행되었다 (Achillie et al., 2009; Abbasi-Garravand et al., 2017). 단순히 수질적인 측면을 고려하면 BWRO 처리수가 가장 적합할 수 있지만, 다른 기술들에 비해 시설비와 에너지 비용을 포함한 운전비용이 커서 상대적으로 경제성이 떨어진다. Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 본 연구 과제에서는 경기도 고양시 하수처리장에 PRO 시스템의 전처리 기술개발을 위해 UF 및 MBR 파일럿 연구를 수행 중에 있다.

UF 공정과 MBR 공정은 기본적으로 막에 의한 suspended solid(SS) 물질의 효율적인 제거성을 가지고 있고, 하수방류수를 PRO 시스템의 유입수로 사용 시, 전처리 기술로서 UF 시스템으로 처리하는 것이 효율적인 것으로 평가되었다. 하지만 UF와 MBR 공정 모두 용존성 유기물의 처리 성능이 낮아서 유입되는

pp. 301-307

pp. 309-315

pp. 317-324

pp. 325-335

pp. 337-348

pp. 349-355

pp. 357-361

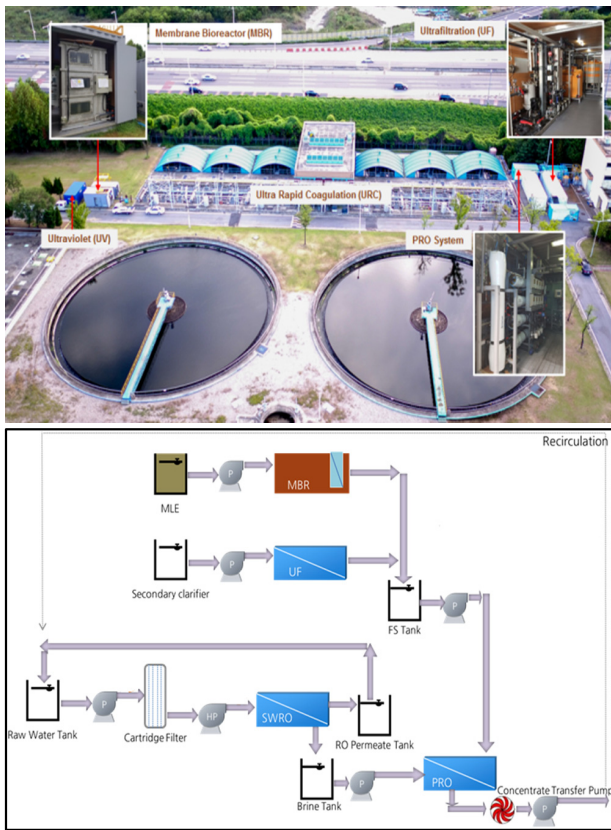


Fig. 6. Pilot plant located in a Goyang wastewater treatment plant (20 m³/d, PRO system capacity) and its process schematic diagram.

원수 수질에 따라 PRO 막오염 현상이 다르게 나타날 수 있기 때문에 PRO 시스템의 주기적인 물리세정 및 화학세정을 통하여 막오염을 효율적으로 제어해야 한다. 또한 미생물 및 유기물로 인한 biofouling 제어를 위하여 biocide를 사용하는데, 대부분 상용화된 biocide의 경우 염소그룹을 포함한 산화성 화합물이 주류를 이루고 있어서, PRO 공정 전단에 산화성 물질을 환원시키는 약품주입설비 추가되어야 하는 문제점을 가지고 있다. 이에, 미생물 부착과 생물막으로 발달되는 과정을 차단하며 PRO 막의 성능에 영향을 최소화 할 수 있도록 경제성과 효율성을 고려한 비산화성 biocide의 개발 및 성능평가에 대한 연구를 실험실 및 파일럿 설비를 활용하여 진행 중에 있다. 그 외, SS가 하수 방류수 기준치에 넘어설 경우 간헐적으로 주입하는 응집보조제인 polymer에 의하여 UF 및 PRO 공정의 막오염을 크게 유발할 수 있어서, 응집보조제 사용 및 농도에 크게 주의를 기울여야 한다. 이와 같은 이유로, PRO의 전처리기술로서 UF 공정 대신 MBR

공정을 적용 시 응집보조제로 사용하는 polymer의 영향으로부터 안전하고, UF 시스템 구축을 위한 추가 건설비 및 운영비(에너지 비용 포함)를 절감할 수 있어서 SWRO-PRO 복합해수담수화 플랜트의 경제성이 더 높아질 것으로 기대된다.

6. SWRO-PRO 플랜트 경제성 평가

SWRO-PRO 공정은 SWRO 공정 대비 PRO 시스템 (PRO 전용막, Pressure vessel, 전처리 설비, 에너지 회수장치, 펌프, 배관설비, 계측장비 등)이 추가로 설치되어야 함으로 건설비 측면에서는 추가적인 비용 상승이 예상되지만, PRO 시스템의 에너지 회수를 통해서 장기 운전시 초기 투자비를 일정기간 안에 회수할 수 있을 것으로 예상된다. 플랜트 건설비용은 PRO 전용막의 성능에 따라 크게 영향을 받을 수 있는데, 초기에 개발한 1세대 PRO 전용막의 경우 flux(2.1 LMH)가 낮아서 안정적인 플랜트 운전에 필요한 회수율을 유지하기 위해서는 많은 막모듈과 pressure vessel이 필요하며, 추가적으로 배관설치 비용 상승을 야기한다. 이에, 총 공사비용이 일반적인 해수담수화 플랜트 건설비 대비 약 80%까지 상승될 수 있다고 예상된다 (Park et al., 2018). PRO 전용막의 지속적인 성능 개선을 통해서 현재 평가 중인 4세대 막모듈은 초기 대비 flux는 7.8배까지 상승하였고, 1개 막모듈의 회수율은 5.8배 상승하여서 플랜트 건설비용의 상승이 약 30%까지 낮춰질 것으로 평가된다. 또한, SWRO-PRO 플랜트의 경제성은 농축수 삼투에너지 회수율에 따라 크게 영향을 받으며, PRO 시스템을 통해

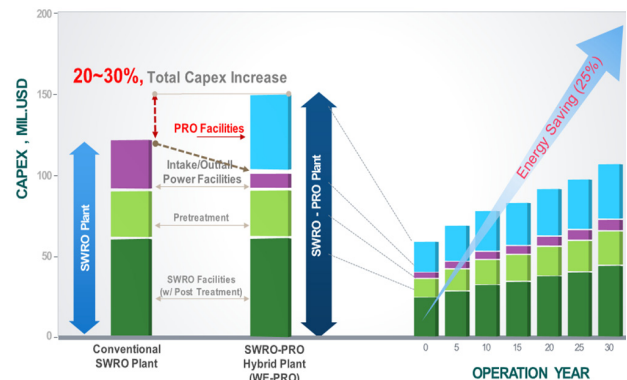


Fig. 7. Conceptual diagram of SWRO-PRO economic analysis results.



해수담수화 에너지 절감(energy saving)이 25% 달성 시, PRO 시스템 시설비용의 투자회수기간은 10년 이하가 될 것으로 예상된다 (Park et al., 2018). 그 외 해양환경에 대한 영향 최소화와 carbon tax 및 전력비의 상승들은 SWRO-PRO 복합해수담수화 플랜트의 경제성을 높일 것으로 판단되지만 아직 PRO 막모듈 성능에 따른 가격이 결정되지 않았고, PRO 전처리시스템 구성에 따라 경제성에 크게 영향을 줄 수 있어서 여러 인자들을 고려한 추가적인 민감도 분석이 필요하다.

7. 실증파일럿 플랜트 구축 및 평가

해수담수화 원천기술의 검증은 위해서는 파일럿 연구는 필수적으로 수행이 되어야 하기 때문에 경기도 고양시 하수처리장에 위치해 있는 파일럿 플랜트를 통해서 다양한 PRO 막모듈 및 시스템 구성에 대한 평가와 전처리 시스템 개발에 집중해서 연구가 진행되고 있다. 또한, 두 개의 다른 SWRO-PRO 복합해수담수화 공정들(PRO-turbine 공정 vs. PRO-2PX 공정)에 대한 성능 평가를 위해서 부산시 기장군에 240 m³/d 규모의 실증파일럿 플랜트를 2015년 9월에 구축해서 약 20개월 이상 장기운전을 수행하였다. 최근에 실 하수처리수를 대상으로 한 성능평가 파일럿 연구를 위해서 보완된 실증파일럿 플랜트를 2017년 8월에 부산시 남부하수처리장에 이전 설치해서 운전 중에 있다 (Fig. 8).



Fig. 8. SWRO-PRO demonstration plant located in a Busan wastewater treatment plant (240 m³/d, PRO system capacity).

현재까지의 실증파일럿 플랜트 운전결과에 의하면, 기존 SWRO 공정 대비 SWRO-PRO(w/ 2PX) 해수담수화 공정이 18 ~ 28%의 에너지 소모량을 줄일 수 있고, 에너지 효율은 해수 및 하수처리수의 염농도 및 온도에 의해서 많은 영향을 받는 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 바탕으로 장기운전에 의한 PRO 시스템의 막오염 현상 분석 및 저감 기술 개발과 scale-up을 위한 설계 및 운영기술을 개발 중에 있다.

8. 결 론

SWRO-PRO 공정은 해수담수화에서 배출하는 고염도 농축수에서 재생에너지를 생산하면서, 동시에 해양생태계를 보호하는 저에너지 친환경 해수담수화 기술로서 많은 잠재력을 가지고 있다. 최근에 lab-scale 연구 등 기초연구 수준을 넘어서 국내를 비롯한 해수담수화 선도국가들(일본, 싱가포르, 이스라엘 등)에서 상용화를 위한 대규모 파일럿 연구개발이 경쟁적으로 진행 중에 있다. 향후 SWRO-PRO 복합해수담수화 기술의 상용화를 위해서는 PRO 전용막 및 모듈의 성능 개선과 전처리 및 막오염 제어기술 개발 그리고 중대규모 플랜트 건설을 위한 scale-up 기술개발이 필요하다. 현재까지 PRO 기술에 대한 국내 기술력이 세계에서 가장 앞서가고 있지만, 향후 개발기술들의 조기 상용화를 통한 기술선도와 신시장 진출을 위해서는 후속과제를 통한 실증화 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원(과제번호 17IFIP-B065893-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- Achilli, A., Cath, T.Y., Childress, A.E. (2009). Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation, *J. Membr. Sci.*, 343(1), 42-52.
- Abbasi-Garravand, E., Mulligan, C.N., Laflamme, C.B., Clairet, G. (2017). Identification of the type of foulants and investigation of the membrane cleaning methods for PRO

pp. 301-307

pp. 309-315

pp. 317-324

pp. 325-335

pp. 337-348

pp. 349-355

pp. 357-361

- processes in osmotic power application, *Desalination*, 421, 135-148.
- Bashitialshaaer, R., Flyborg, L., Persson, K.M. (2011). Environmental assessment of brine discharge and wastewater in the Arabian Gulf, *Desalin. Water Treat.*, 25(1-3), 276-285.
- Brown, H. (2015). Global Water Intelligence. In: *Global Water Market 2015*, 53-72.
- Chung, K., Yeo, I., Lee, W., Oh, Y., Park, T., Park, Y. (2016). The present and future of SWRO-PRO hybrid desalination technology development, *J. Kor. Soc. Water Wastewater*, 30(4), 401-408.
- Danoun, R. (2007). Desalination Plants: Potential impacts of brine discharge on marine life.
- Han M., Jeon E., Lee J. (2016). The effect of backing layer for pro membranes and modules, *J. Kor. Soc. Water Wastewater*, 30(5), 553-559.
- Kim, S., Yoon, J., Choi, J., Park, T. (2017). First-scalers to transform brine from seawater, renewable energy, and valuable resources, *KSCE. Civ. Engin.*, 65(10), 26-31.
- Park, Y., Chung, K., Yeo, I., Lee, W., Park T. (2018). Development of a SWRO-PRO hybrid desalination system: pilot plant investigations, *Water Sci. Technol.*, 18(2), 473-481.
- She, Q., Jin, X., Tang, C.Y. (2012). Osmotic power production from salinity gradient resource by pressure retarded osmosis: effects of operating conditions and reverse solute diffusion, *J. Membr. Sci.*, 401, 262-273.
- Yip, N.Y., Elimelech, M. (2012). Thermodynamic and energy efficiency analysis of power generation from natural salinity gradients by pressure retarded osmosis, *Environ. Sci. Technol.*, 46, 5230-5239.