ISSN(Print): 1225-7672 / ISSN(Online): 2287-822X
DOI http://dx.doi.org/10.11001/jksww.2016.30.4.401

SWRO-PRO 복합해수담수화 기술의 현재와 미래

The present and future of SWRO-PRO hybrid desalination technology development

정경미·여인호·이원일·오영기·박태신·박용균*
Kyungmi Chung·In-Ho Yeo·Wonil Lee·Young Khee Oh·Tae Shin Park·Yong-gyun Park*

GS 건설, Global Engineering 본부, 환경공정설계팀
Environment Process Engineering Team, Global Engineering Division, GS Engineering and Construction

ABSTRACT

Desalination is getting more attention as an alternative to solve a global water shortage problem in the future. Especially, a desalination technology is being expected as a new growth engine of Korea's overseas plant business besides one of the solutions of domestic water shortage problem. In the past, a thermal evaporation technology was a predominant method in desalination market, but more than 75% of the current market is hold by a membrane-based reverse osmosis technology because of its lower energy consumption rate for desalination. In the future, it is expected to have more energy efficient desalination process. Accordingly, various processes are being developed to further enhance the desalination energy efficiency. One of the promising technologies is a desalination process combined with Pressure Retarded Osmosis (PRO) process. The PRO technology is able to generate energy by using osmotic pressure of seawater or desalination brine. And the other benefits are that it has no emission of CO_2 and the limited impact of external environmental factors. However, it is not commercialized yet because a high-performance PRO membrane and module, and a PRO system optimization technology is not sufficiently developed. In this paper, the recent research direction and progress of the SWRO-PRO hybrid desalination was discussed regarding a PRO membrane and module, an energy recovery system, pre-treatment and system optimization technologies, and so on.

Key words: Desalination, SWRO-PRO, PRO, CO_2

주제어: 해수담수화, SWRO-PRO, 압력지연삼투압, CO_2

1. 서 론

지구 온난화, 환경오염, 산업화, 인구증가 등의 요인으로 수자원 고갈이 전 세계적으로 심화되고 있다. 인구증가와 산업화로 인해 전 세계의 물 사용량이 급증하였으나, 지역과 기후에 따라 수자원의 편중된 분포로 세계 인구의 약 40% 이상이 식수난을 겪고 있다. 2025년경 세계 인구의 1/3이 절대적 물 부족 지역에 거주하고, 2/3가 물 기근을 겪을 것으로 전망 된다 (Brown, 2015). 특히 2020년에는 북아프리카, 중동, 인도, 동남아시아, 북중국 지역 등에 물이 부족하거나 물 부족으로 갈등이 발생할 것으로 전망되고 있다. 따라서 전 세계는 물 부족 문제를 해결하기 위한 대체 수자원 개발에 다양한 노력을 기울이고 있으며, 그 중에서도 해수담수화 기술이 크게 주목을 받고 있다 (Nijmeijier and Metz, 2010). 해수담수화 시장은 1965년 이후 연평균 15% 정도로 급속한 성장세를 보이고 있으며, 시장규모는 2018년 약 15조까지 커질 것으로 예상되고 있다(Lu et al., 2015) (Fig. 1).

대표적인 해수담수화 기술로는 증발법(MSF)과 역삼

Received 6 June 2016, revised 14 July 2016, accepted 15 July 2016
*Corresponding author: Yong-gyun Park (E-mail: ygpark01@gsconst.co.kr)

투(SWRO)법이 있는데 증발식은 해수를 가열하여 증발시킨 후 증발된 수증기를 응축시켜 담수를 얻는 방식이고, 역삼투법은 물은 투과하지만 물속에 녹아있는 염분 등은 투과하지 않는 반투막을 이용하여 해수를 담수화하는 방법이다. 역삼투 방식의 해수담수화 기술은 기존 증발식에 비해 에너지 소비량이 훨씬 적기 때문에 해수담수화 시장의 70% 이상을 점유하고 있다 (Brown, 2015). 하지만, 역삼투 방식의 해수담수화 공정 역시 운전비용 중 에너지 비용이 차지하는 비중은 40% 이상으로 아직까지도 에너지가 많은 비중을 차지한다 (Fig. 2A). 이에 고효율 고압펌프, 에너지 회수장치 설치를 통해 에너지 효율을 향상시키고 물 생산에 사용되는 에너지를 기술적 한계인 3-4 kWh/m^3까지 낮췄다 (Fig. 2B).

이러한 이유로 최근 에너지 소비 절감을 위해 제 3세대 하이브리드 기술이 떠오르고 있는데 대표적인 하이브리드 기술로는 정삼투(Forward Osmosis, FO)-역삼투(Reverse Osmosis, RO), 역삼투(Reverse Osmosis, RO)-압력지연삼투(Pressure Retarded Osmosis, PRO), 역삼투(Reverse Osmosis, RO)-막증류(Membrane Distillation, MD) 등이 있다 (Fig. 3). 그러나 아직까지 이러한 차세대 해수담수화 기술의 기술수준은 여전히 미흡한 실정으로 에너지를 적게 소모하고 환경 친화적인 미래 핵심기술을 확보하는 것이 시급한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 차세대 해수담수화 기술 중 최근 미국, 유럽, 일본, 싱가포르를 비롯한 여러 국가에서 연구실 및 파일럿 규모의 연구가 활발히 수행되고 있고 제막 기술의 지속적인 발전에 따른 막 단가 절감 등에 힘입어 가까운 미래에 에너지를 생산공급 할 수 있을 것으로 기대되는 압력지연삼투 기술의 발전 현황을 알아보고, 이 기술의 상용화시기를 앞당기기 위해 필요한 연구 개발 방향에 대해 논의해보고자 한다.

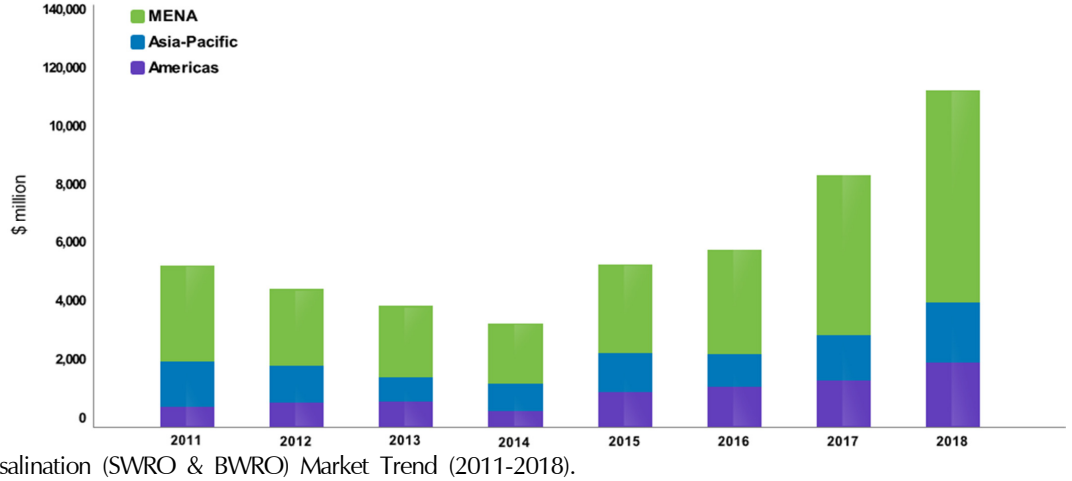
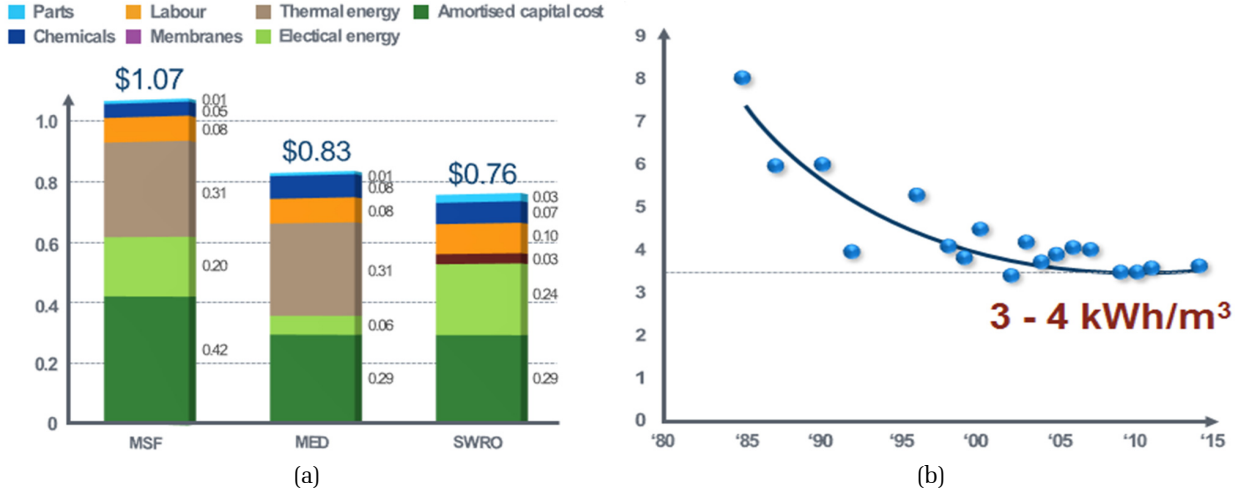


Fig. 1. Desalination (SWRO & BWRO) Market Trend (2011-2018).



(a) (b)

Fig. 2. Cost and energy consumption (a) Water production cost breakdown, (b) Desalination power consumption.

2. 압력지연삼투 (Pressure Retarded Osmosis, PRO) 기술 이란?

압력지연삼투는 바닷물의 삼투에너지를 전기로 전환할 수 있는 기술이다. PRO 전용 분리막의 양쪽에 농도가 다른 용액 (예를 들면, 해수와 담수)을 흐르게 하면 두 용액의 염도 차이로 인해 삼투현상이 발생하여 저농도 용액이 고농도 용액으로 투과되며, 이때 증가한 유량이 터빈을 회전시켜 에너지를 생산하는 기술이다 (Loeb, 1976). 즉, 두 용액 간의 농도차에 의해 발생된 삼투압이 수압의 형태로 바뀌어 이 수압이 터빈을 회전시켜 에너지를 얻는 것이다. PRO 기술의 구현을 위해서는 염도가 다른 두 가지 용액이 필요한데, 통상 해수와 담수, RO 농축수와 하수처리수와 같은 용액들이 사용된다. 압력지연삼투 기술의 성능은 솔루션-디퓨전 모델 (Solution-Diffusion model) (Lonsdale et al., 1965, Kim et al., 2014)에서 유도된 투과수량 식 (1)과 단위면적당 전력밀도 식 (2)로 표현할 수 있다 (Fig. 4).

$$Jw = A(\Delta\pi - \Delta P) \quad (1)$$

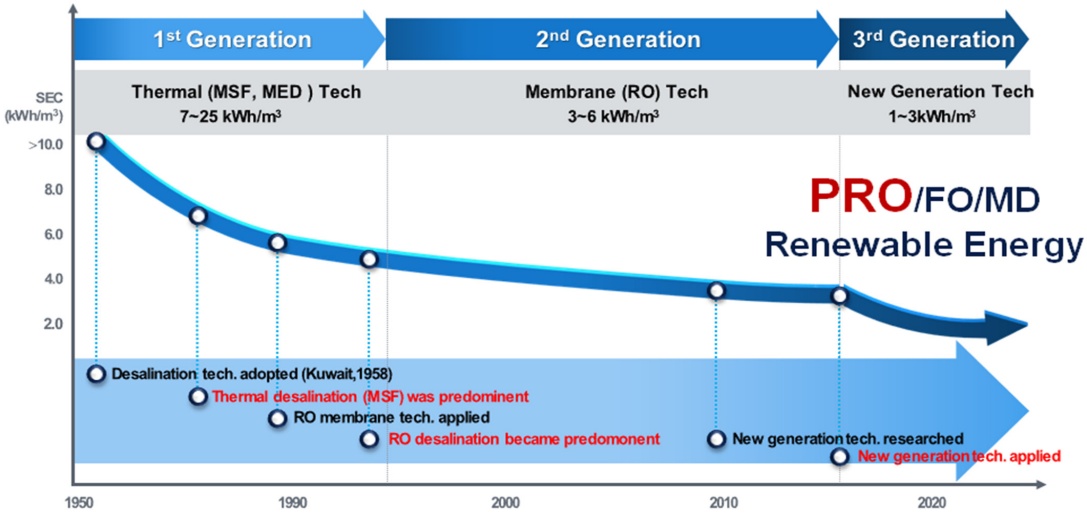


Fig. 3. Technology trend (What will be a next generation desalination technology?).

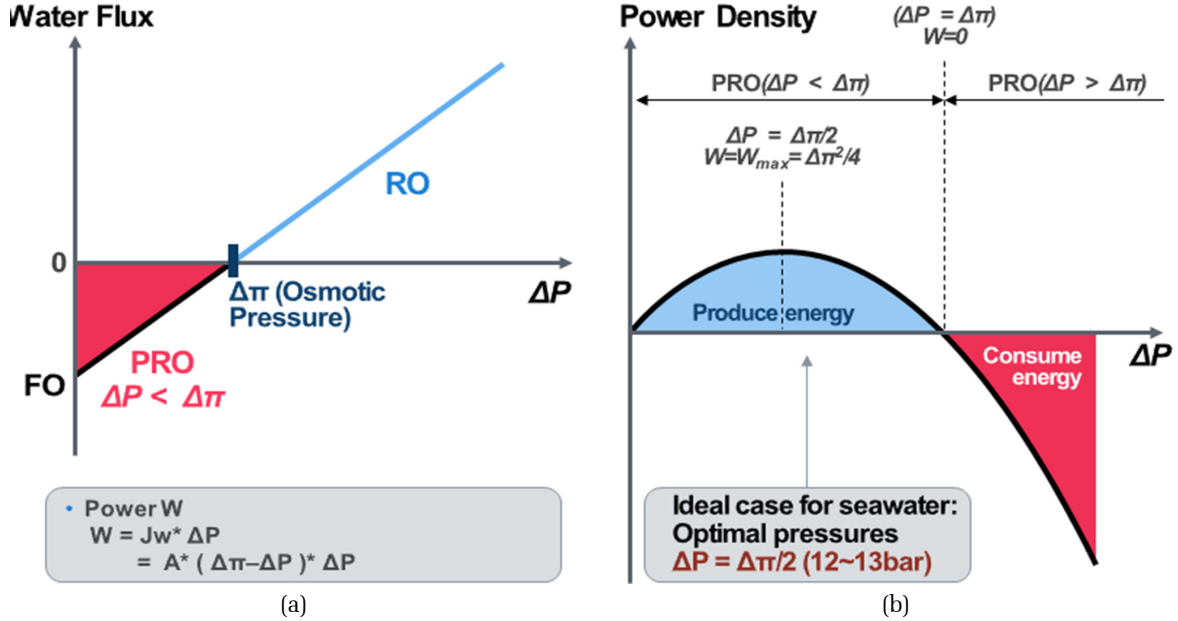


Fig. 4. Principle of PRO technology (a) water flux and $\triangle P$, (b) Energy and $\triangle P$ (Source: Yip et al., 2011)

$$W = Jw\triangle P = A(\triangle\pi - \triangle P)\triangle P \quad (2)$$

이때 $\triangle\pi$는 삼투압 차 (bar), $\triangle P$는 가해지는 압력 (bar), W는 전력밀도 (W/m^2)를 의미한다.

압력지연삼투 공정에서는 물이 투과되면서 막의 내·외부에 용질이 농축되는 농도분극현상과 고농도 유도용액에서 저농도 유입용액 방향으로의 염 확산에 의해 발생되는 역염투과량에 인해 투과수량이 감소하여 공정 성능이 저하되기도 한다. 결국, 안정적인 PRO 공정의 에너지 생산을 위해서는 전처리 공정, 전용막 및 모듈 개발, 공정 최적화 기술 개발이 반드시 필요하다.

3. 압력지연삼투 (Pressure Retarded Osmosis, PRO) 기술개발 현황

PRO에 대한 이론적 접근은 1950~60년대에 처음 시도되었으며, 1970년대에 Sidney Loeb에 의해 PRO라는 이름으로 처음 소개되었다. 21세기 들어 본래 역삼투 방식 담수화 공정을 위해 고안된 압력회수장치(Energy Recovery Device)를 PRO 공정에 도입함으로써 소비 에너지를 저감할 수 있는 가능성이 높아졌으며(Loeb, 2002), 이로 인해 PRO 공정 개발 및 연구가 활발하게 진행되고 있다. 지금까지 압력지연삼투 공정 연구는 단독 공정과 조합 공정 두 가지 형태로 진행되었는데 최초의 프로토타입 PRO 플랜트는 2009년 11월 노르웨이의 Statkraft사에 의해 단독 공정 형태로 건설되었다. 총 막 면적 2,000 m^2 Hydranautics사의 나권형(Spiral-Wound) 막 모듈을 적용하였으며 유입용액으로 fresh water, 유도용액으로 해수를 이용하여 평균 전력밀도 약 3 W/m^2, 전력 생산량은 약 6 kW를 보였다 (Neumann et al., 2012). 이 결과는 PRO 시스템에 의한 전기 생산이 실제로 구현 가능하다는 것을 증명하였다. 또한, PRO fouling을 막기 위한 화학세정 방법을 개발하며 2020년까지 25 MW 상업화 플랜트 완공을 목표로 PRO에 대한 국제적인 관심 유도 및 기술적 발전을 선도해왔으나, 2013년 진행 예정이던 2MW 파일럿 플랜트 건설을 앞두고 2012년 말 갑작스럽게 관련 사업의 중단을 발표하였다 (Statkraft home page, http://www.statkraft.com/media/press-releases/). 최근에는 해수담수화 공정과 연계한 형태의 조합 공정 연구가 우리나라를 비롯해 일본, 미국 등에서 활발하게 진행되고 있다. 특히 역삼투 공정에서 발생되는 농축수를 압력지연삼투 공정에 재이용하는 역삼투-압력지연삼투 조합 공정(SWRO-PRO hybrid process)에 대한 연구가 큰 관심을 받고 있다. SWRO-PRO hybrid process는 역삼투 공정 부산물인 농축수의 해양방류로 인해 야기되는 환경 문제를 저감할 수 있고 (Kurihara et al., 2015), 고농도의 농축수를 압력지연삼투의 유도용액으로 이용함에 따라 삼투압차가 증가하여 최종적으로 전체 공정 효율을 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다. 일본에서는 2010년부터 2013년까지 4년 동안 Toray사를 중심으로 "메가톤 물 시스템(Mega-ton Water System)" 개발 연구가 시작되어 프로토타입 SWRO-PRO hybrid 플랜트가 건설 및 운영되었다. 메가톤 연구는 역삼투, 압력지연삼투, 하수처리 시스템의 연계를 목적으로 하였다. 후쿠오카에 위치한 prototype SWRO-PRO hybrid plant는 10인치 중공사막 모듈 8개를 장착하여 유입용액으로 한외여과(UF) 및 저압 역삼투(Low Pressure Reverse Osmosis)를 거친 420 m^3/d의 하수 처리수, 유도용액으로 SWRO 농축수 460 m^3/d를 이용하며 최대 전력밀도 13.5 W/m^2를 얻었다고 발표하였다(Kurihara et al., 2016). 미국의 SWRO-PRO hybrid process 연구는 남가주대학교 (University of Southern California) Amy E. Childress 연구팀이 주도적으로 수행하고 있으며, 최근 파일럿 시스템 운전 결과를 발표하였다 (Achilli et al., 2014). 해수-담수를 적용하여 Dow의 막 면적 2.8 m^2인 3개의 나권형 RO 막모듈과 Oasys Water에서 개발된 막 면적 4.18 m^2의 4040 나권형 TFC PRO 막모듈이 파일럿 시스템에 설치되었다. SWRO-PRO hybrid 공정 평균 전력밀도는 1.1-2.3 W/m^2인 것으로 보고하였다 (Achilli et al., 2014).

국내에서는 지난 2013년부터 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 지원 아래 차세대 해수담수화 기술을 개발하는 GMVP 연구단이 출범되어 과제를 수행하고 있는데 GMVP 연구단의 SWRO-PRO hybrid 공정은 GS건설 주도로 개발되고 있다. PRO 기술을 접목하여 RO 농축수와 하수처리수로부터 발생되는 염도차 에너지를 에너지 회수장치를 통해 RO 공정 그대로 회수할 수 있는 기술로 기존 역삼투 해수담수화 공정기술 대비 10% 이상의 운영단가 절감과 해수담수화 플랜트로부터 발생되는 고농도 농축수를 희석

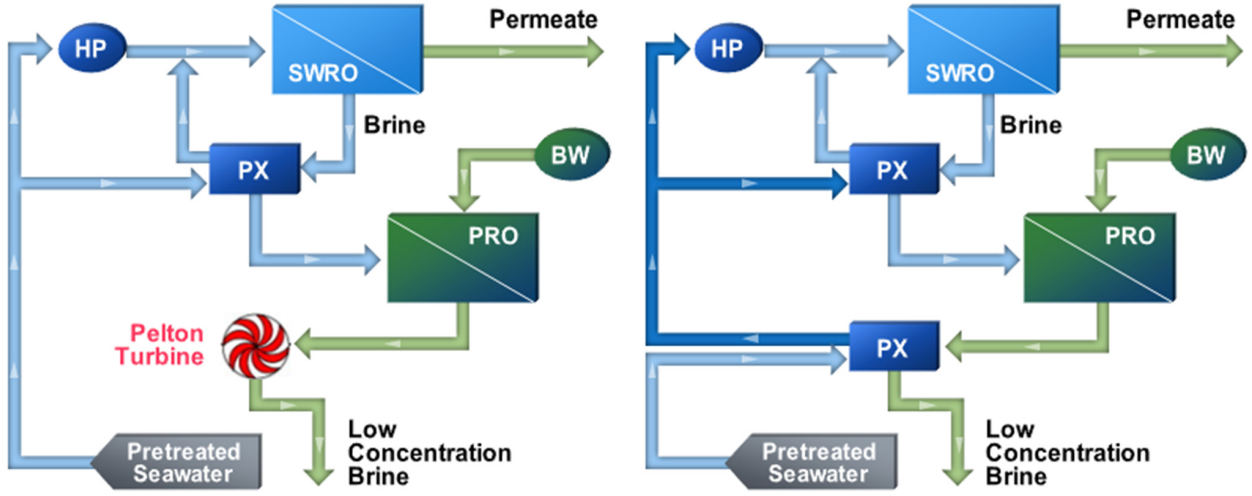


Fig. 5. GMVP SWRO-PRO hybrid desalination system (a) PRO-turbine process, (b) PRO-2PX process.

방류함으로써 해양생태계 파괴 방지 및 농축수 처리 비용 절감 등의 효과를 기대하며 연구에 박차를 가하고 있다 (Fig. 5).

4. 압력지연삼투 (Pressure retarded osmosis, PRO) 공정의 핵심 기술

4.1 PRO 전용막 및 모듈

PRO 공정이 상업적으로 이용 가능할 정도의 경제성을 얻기 위해서는 무엇보다 PRO 전용막 및 모듈의 성능개선이 필요하다. 지금까지 알려진 가장 큰 문제는 PRO 전용막의 모듈화시, 물의 투과가 진행됨에 따라 막 표면에 용질이 농축되어 발생하는 농도분극 현상이다. 농도분극은 발생하는 위치에 따라서 외부농도분극(ECP)과 내부농도분극(ICP)으로 구분된다. 외부농도분극(EPC)은 저농도 용액의 물이 막을 통과하여 고농도 용액 방향으로 투과되면서 유도용액(draw solution)을 희석시키는 현상이 활성층(Active layer)에서 발생하여 삼투압 차이가 감소하며, 이에 따라 구동력이 낮아져 투과량이 감소한다. 내부농도분극(ICP)은 물이 막을 통해 투과될 때, 유입용액의 염들이 선택적 투과성을 가진 활성층에 막혀 지지층(Support layer) 내부에 쌓이면서 활성층과 지지층 경계면의 염분 농도가 증가하는 현상이다 (McCutcheon and Elimelech, 2006; Yip et al., 2011). 농도분극에 의한 수투과량 감소는 곧 생산 전력의 감소로 이어지므로, 최근 이에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있는데 SWRO-PRO hybrid 공정에서 모델링 연구가 수행되기도 하였다 (Kim et al., 2013, Kim et al., 2014). 최근에는, PRO 공정에서의 회수율을 중요한 인자로 고려해야 한다는 목소리가 높아지고 있고 이를 증명하기 위한 다양한 연구들이 파일럿을 통해 수행되고 있다.

4.2 PRO 전처리 기술

PRO 공정의 전처리 기술 선정도 SWRO-PRO hybrid 기술 개발에 중요한 인자이다. 정삼투와 비교하여 PRO는 파울링 현상에 덜 민감함에도 불구하고, 유입수의 전처리 과정은 여전히 중요한 인자이다. Statkraft 사에 따르면, 특히 저농도 용액(하수 처리수 등)을 전처리하는 과정에서 소모되는 에너지량이 예상보다 높은 편이라고 하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 단위 공정 및 전체 공정에 대한 최적화가 필수적이나 아직 실험실 규모의 연구(Achillie et al., 2009; Choi et al., 2014)가 진행 중이며 파일럿 규모는 일본 메가톤 연구에서 수행되었으며 한외여과(UF) 및 저압 역삼투(Low Pressure Reverse Osmosis)를 적용한 연구가 수행되었고 이들 역시 전처리 과정의 에너지 사용량이 예상보다 높아 저에너지 전처리 기술 개발의 필요성을 강조하였다 (Saito et al., 2012).

4.3 PRO 에너지 회수장치

해수에 고압을 가하는 펌프에 소요되는 전기 에너

지는 전체 운전비용의 30-50%를 차지한다. 역삼투 담수화 시스템의 효율에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나는, 삼투막을 투과하지 못하고 배출되는 농축수(brine)의 고압에너지를 회수하는 에너지회수장치(Energy Recovery Device, ERD)의 효율이다. 회수된 에너지는 다시 해수를 가압하는데 사용할 수 있으므로, 에너지 소비가 적은 담수화 시스템의 개발을 위하여 고압 에너지의 손실을 최소화하여 시스템의 전체의 효율을 높일 수 있는 에너지 회수장치의 개발이 중요하다. 따라서 에너지 회수장치 최적 설계 기술은 해수담수화 과정에서 에너지 효율을 극대화하는 것으로 전력사용량을 기존 역삼투 해수담수화(SWRO) 방식보다 약 50% 정도 절감할 수 있다. 현재 해수담수화 플랜트 건설용 저에너지/고효율 대용량 에너지 회수장치의 세계 최고 수준은 97%이며, 국내에서 개발된 장치를 pilot 규모에서 제작하여 시험한 결과 96% 수준의 효율에 도달하였다고 보고되고 있다 (Ham et al., 2012). 그러나 PRO 전용 에너지 회수장치 개발에 대한 연구는 아직 기초단계로 모델링 연구를 진행하였으며 (Senthil and Senthilurugan, 2016), GMVP연구단에서는 펠턴 터빈의 효율 향상 (Cho et al., 2015) 및 상용화된 ERI사의 PX (Pressure Exchanger)의 적용 및 효율 비교를 위한 연구를 진행하고 있다.

4.4 PRO 막오염

분리막이 적용된 수처리 및 해수담수화 시스템에서 발생되는 막오염은 수투과량을 저감시키고 소모 에너지를 증가시키는 등 전체 공정의 성능 저하를 야기시킬 수 있다. 막오염은 그 원인 물질에 따라 유·무기물 막오염, 미생물 막오염, 콜로이드성 막오염으로 분류되며, 주로 오염물질이 공극 내부에 흡착되어 발생하는 공극협소화 (pore narrowing), 오염물질에 의해 공극이 막히는 기공 폐쇄 (pore plugging), 오염 물질이 막 표면에 쌓이는 겔 형성 (gel formation)의 메커니즘을 통해 발생된다 (Bar-zeev et al., 2015; Straub et al., 2016).

PRO 공정에서도 다른 막 기반의 수처리 및 해수담수화 공정과 같이 막오염 현상에 의한 성능 저하가 발생되지만, 막오염의 특성은 다른 막 기반의 공정과는 다르게 나타난다. 예를 들면, RO나 FO 처럼 활성층(active layer) 위에 오염 물질들의 축적보다는 지지층(support layer)의 외부와 내부 양쪽에서 막오염이 발생될 수 있다 (Bar-Zeev et al., 2015). 이는 PRO 공정에서 막의 지지층(support layer)에 오염물질을 주로 포함하고 있는 유입용액(feed solution)이 위치하고 있어 물이 투과될 때 오염물질이 지지층 표면과 함께 지지층 내부까지 침투하기 때문이다. 최근 Elimelech 연구팀에서는 폐수에 *Pseudomonas aeruginosa* 및 *Pseudomonas atlantica*를 주입하여 PRO에서의 bio-fouling에 대한 연구를 진행하였는데 지지층(support layer)에 비가역적 바이오 파울링(irreversible bio-fouling)이 발생하면 수투과율을 50% 정도까지 감소될 수 있다고 보고하였다 (Bar-zeev et al., 2015). Bio-fouling 제거를 위해 삼투역세정를 적용한 결과 삼투역세정은 유기물에 의한 파울링에는 효과가 있지만 bio-fouling에는 수투과량이 13% 증가로 효과가 크지 않음을 보고하였다 (Bar-zeev et al., 2015; Straub et al., 2016). PRO 공정의 막오염 연구는 현재 초기 단계로 미국과 싱가폴에서 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있다 (Straub et al., 2016). 싱가폴 국립대학의 T.S. Chung 연구팀은 중공사 PRO 막에서 gypsum($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), sodium alginate 같은 무기물 및 유기물에 의한 막오염 현상에 대해 연구하였으며 (Chen et al., 2015), 난양기술대의 C.Y. Tang 연구팀은 상용화된 CTA FO막에서 gypsum에 의한 스케일링 현상을 연구하였다 (Zhang et al.,, 2014).

5. 압력지연삼투 (Pressure retarded osmosis, PRO) 기술의 미래

5.1 PRO 막 및 모듈 성능 개선

PRO 막 모듈의 성능을 개선하여 전력밀도를 높이기 위해서는 높은 수투과도와 낮은 염투과도, 낮은 막구조 등 파라미터 값을 갖는 막의 개발이 필수적이다. 최근 진행된 PRO막 개선 연구에 따르면 막구조 파라미터 값을 개선시켰을 때 전력밀도 변화에서 큰 효과를 볼 수 있다고 발표하였는데 (Straub et al., 2015; Geise et al., 2014), 막구조 파라미터 값을 줄이기 위해 지지층의 두께를 감소시키고 다공성을 증가시켜 PRO 막의 유체 흐름에 대한 유동 저항을 최소화 시켜 유도용액과 유입용액 사이의 삼투 현상을 원활하게 하였다 (Jeon et al., 2015). 하지만 높은 성능을 보이는

실험실 규모의 평막의 성능은 모듈화 과정에서 유류 흐름에 따른 농도분극 현상, dead space 증가 등의 이유로 높은 성능을 유지하기가 어렵다. 따라서 PRO 막모듈 설계는 공정의 특성을 최대한 살려 농도분극 및 지지층 두께를 최소화하는 방향으로 설계가 이루어질 수 있도록 하여야 한다.

5.2 PRO 막오염 저감 및 저에너지 전처리 선정

유도용액으로 주로 사용되는 해수 농축수, 유입용액으로 주로 사용되는 하수 처리수 또는 강물에는 다량의 유기 및 무기 오염물질이 포함되어 있어서 막오염에 의한 PRO 막의 성능 저하가 발생하기 쉽다. 따라서 오랜 기간 운전 시에는 막오염을 저감시킬 수 있는 기술을 고려하여야 한다. 특히 미생물이 일으키는 미생물 막오염을 제어하고 사전에 방지하는 효과적인 전처리 공정을 개발하여 향후 PRO 실증 플랜트에서 공정효율을 저하시킬 수 있는 bio-fouling 현상을 최소화할 수 있는 기술을 개발하여야 한다. PRO의 전체 공정성능 향상을 위해서 유도용액 및 유입용액별 특성을 고려함과 동시에 비용을 최소화할 수 있는 전처리 공정의 선정이 매우 중요하다. 그러나 지금까지 PRO 공정에서의 막 오염 메커니즘 및 세척 방법에 대한 연구는 초기단계로 막오염에 의한 성능 저하를 예측하고 이를 제어하기 위한 연구도 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

5.3 PRO 공정 최적화

SWRO-PRO 조합공정에서 PRO 공정의 최적화를 위해서는 고성능 전용 막모듈 개발, 적절한 전처리 기술의 선정도 중요하지만 공정 운전 파라미터의 최적화가 무엇보다 중요하다. 특히, 공정 내에 유도용액과 유입용액의 두 가지 흐름이 존재하기 때문에 적합한 흐름방향(flow direction: co-current, counter-current)과 유량(flow rate)이 매우 중요하다. 또한 module configuration 및 한 베셀당 들어갈 수 있는 최적 멤브레인 개수 등도 매우 중요한 운전 파라미터이다. 따라서 SWRO-PRO 조합공정의 공정 효율을 향상시켜 물/에너지 생산 공정이 결합된 저에너지형, 친환경적인 차세대 해수담수화 기술을 개발하여 향후 해수담수화 플랜트 시장에서 사업 및 기술경쟁력을 높일 수 있는 공정기술이 개발되어야 한다. 따라서 타 공정과의 연계성을 고려한 최적 운전 파라미터 선정을 위해 파일럿 플랜트를 장기적으로 운전하며 기술 실용화를 위한 노력을 계속해야 할 것이다.

6. 결 론

전 세계적으로 심화되고 있는 지구 온난화와 화석연료 고갈 문제에 대비하기 위하여 여러 신재생에너지원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 많이 적용되고 있는 태양광, 태양열, 풍력, 바이오매스 등은 날씨의 의존도가 높거나 CO_2 등 이차오염을 발생시켜 지속적인 에너지 생산이 어려워 날씨 및 계절적 영향을 덜 받을 수 있는 지속가능한 기술에 대한 니즈가 매우 높다. 염도차에 의해 발생하는 에너지를 추출하는 PRO는 아직 연구 단계이지만, 청정에너지를 생산한다는 점에서 높은 관심을 받고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이, 이 공정이 경제성을 얻기 위해서는 PRO 전용 막/모듈 개발, PRO 막오염을 저감할 수 있는 저에너지의 전처리 기술 개발, PRO 공정 최적화 등 한계점을 해결하는 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다. SWRO-PRO 등 조합공정 기술 연계를 통하여 가까운 미래에 PRO의 한계점을 해결하고, 차세대 에너지원으로 자리 잡을 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원(과제번호 15IFIP-B065893-03)에 의해 수행되었습니다.

References

Achilli, A., Cath, T. Y. and Childress, A. E. (2009) Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoritical investigation, J. Membr. Sci., 343, 42-52.

Achilli, A., Prante, J. L., Hancock, N. T., Maxwell, E. B. and Childress, A. E. (2014) Experimental results from RO-PRO: A next generation system for low-energy desalination, Environ. Sci. Technol., 48, 6437-6443.

Bar-zeev, E., Perreault, F., Straub, A. P. and Elimelech, M. (2015) Impaired performance of pressure-retarded osmosis due to irreversible biodouling, Environ. Sci. Technol., 49,

13050-13058.

Brown, H. (2015) Global Water Intelligence. In: Global Water Market 2015, 53-72.

Chen, S. C., Wan, C. F. and Chung, T. S. (2015) Enhanced fouling by inoganic and organic foulants on pressure retarded osmosis (PRO) hollow fiber membranes under high pressures, J. Membr. Sci., 479, 190-203.

Cho, I. C., Park, J. H., Shin, Y. H., Kim, K. H., Jeong, J. T. and Kim, D. I. (2015) Performance characteristics and efficiencies of micro-hydro pelton turbine with nozzle diameter variation, J. Kor. Soc. Flu. Mach., 18, 60-65.

Choi, Y. J., Kim, S. H., Jeong, S. H. and Hwang, T. M. (2014) Application of ultrasound to mitigate calcium sulfate scaling and colloidal fouling, Desalination, 336, 153-159.

Geise, G. M., Paul, D. R. and Freeman, B. D. (2014) Fundamental water and ssalt transport properties of polymeric materials, Prog. Polym. Sci., 39, 1-42.

Ham, Y. B., Kim, Y., Noh, J. H., Shin, S. S. and Park, J. H. (2012) Design of loss-reduction mechanisms for energy recovery devices in reverse-osmosis desalination system, J. Kor. Soc. Sys. Eng., 16, 5-9.

Jeon, E. J., Sim, Y. J., Lee, J. H. (2015) Development of thin-film composite PRO membranes with high power density, Desal. Wat. Treat., 57, 1-8.

Kim, J., Jeong, K., Park, M. J., Shon, H. K. and Kim, J. H. (2015) Recent advances in osmotic energy generation via pressure retarded osmosis (PRO): A review, Energies, 8, 11821-11845.

Kim, J. H., Park, M. K., Snyder, S. A. and Kim, J. H. (2013) Reverse osmosis and pressure retarded osmosis hybrid processes: Model-based scenario study, Desalination, 322, 121-130.

Kim, J., Kim, S. H. and Kim, J.H. (2014) Pressure retarded osmosis process: Current status and future, J. Kor. Soc. Environ. Eng., 36, 791-802.

Kurihara, M., Sakai, H. and Tanioka, A. (2015) "Role of PRO in the mega-ton water project", International conference on emerging water desalination technologies in municipal and industrial applications, August 29th .

Kurihara, M., Sakai, H., Tanioka, A. and Tomioka H. (2016) Role of pressure retarded osmosis (PRO) in the mega-ton water project, Desal. Wat. Treat., doi:10.1080/19443994.2016.1168582.

Loeb, S. (1976) Production of energy from concentrated brines by pressure tratrded osmosis: Preliminary technical and economic correlations, J. Membr. Sci., 1, 49-63.

Loeb, S. (2002) Large-scale power production by pressure retarded osmosis, using river water and sea water passing through spiral modules, Desalination, 143, 115-122.

Lonsdale, H. K., Merten, U. and Riley, R. L. (1965) Transport properties of cellulose acetate osmotic membranes, J. Appl. Polym, Sci., 9, 1341-1362.

Lu, S., Paling, M., Pollard, M., Quintavalle, M., Quigley, T. M., Studer, N. and Wittenberg, A. (2015) Global Risks 2015, 14-44.

McCutcheon, J.R. and Elimelech, M. (2006) Influence of concentrative and dilutive internal concentration polarization on flux behavior in forward osmosis, J. Membr. Sci., 284, 237-247.

Neumann, F. (2012) "Report of the meeting on salinity gradient power generation", Proceedings of the Integrated Network for Energy from Slinity Gradient Power, IMI, Singapore.

Nijimeijier, K. and Metz, S. (2010) Chapter 5 Sustainability Science and Engineering, Elsevier, philadelphia, 95-139.

Saito, K., Irie, M., Zaitsu, S., Sakai, H., Hayashi, H., and Tanioka, A. (2012) A power generation with salinity gradient by pressure retarded osmosis using concentrated brine from SWRO system and treated sewage as pure water. Desal. Water Treat., 4, 114-121.

Senthil, S. and Senthilmurugan, S. (2016) Reverse osmosis-pressure retarded osmosis hybrid system: Modeling, simulation and optimization, Desalination, 389, 78-97.

Statkraft homepage. http://www.statkraft.com/media/press-releases/ (April 11, 2016).

Straub, A. P., Deshmukh, A. and Elimelech, M. (2016) Pressure retarded osmosis for power generation from salinity gradients: Is it viable?, Ener. Environ. Sci., 9, 31-48.

Straub, A. P., Osuji, C. O., Cath, T. Y. and Elimelech, M. (2015) Selectivity and mass transfer limitations in pressure retarded osmosis at high concentrations and increased operating pressures, Environ. Sci. Technol., 49, 12551-12559.

Yip, N. Y and Elimelech, M. (2011) Performance limiting effects in power generation from salinity gradients by pressure retarded osmosis, Environ. Sci. Technol., 45, 10273-10282.

Zhang, M., Hou, D., She, Q. and Tang, C.Y. (2014) Gypsum scaling in pressure retarded osmosis: Experiments, mechanisms and implications, Water Res., 48, 387-395.