

소규모 역삼투 담수화 시설에서 에너지 회수장치의 필요성에 대한 연구

전종민 · 광경섭 · 김누리 · 정재학 · 손동민* · 김수한†

부경대학교 토목공학과
48513 부산광역시 남구 용소로 45
*(주)크로시스
49434 부산광역시 사하구 신산로 72-1
(2017년 6월 16일 접수, 2017년 7월 19일 수정본 접수, 2017년 7월 24일 채택)

Study on the Necessity of Energy Recovery Device in Small Scale Reverse Osmosis Desalination Plant

Jongmin Jeon, Kyungsup Kwak, Noori Kim, Jaehak Jung, Dong-Min Son* and Suhan Kim†

Department of civil engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea

*Krosys Incorporated, 72-1, Sinsan-ro, Saha-gu, Busan, 49434, Korea

(Received 16 June 2017; Received in revised form 19 July 2017; accepted 24 July 2017)

요 약

에너지 회수장치는 역삼투 공정에서 에너지 소모량을 줄이기 위해 사용된다. 그러나 해수담수화 시장에서 소규모 에너지 회수장치(< 100 m³/d)를 찾기는 쉽지 않다. 우리나라에서 음용수 생산을 위한 역삼투 해수담수화 시설은 대부분 도서지역이나 선박에서 소규모로 운영되고 있다. 즉, 국내에는 소규모 에너지 회수장치 수요가 잠재하고 있다. 본 연구에서는 고압펌프의 현실적인 효율과 국내 전력비 단가 등을 고려하여, 소규모 역삼투 공정의 에너지 소모량을 에너지 회수장치의 적용 여부 및 설치 장소(예: 육상, 도서, 선박)에 따라 비교 분석하였다. 분석 결과, 에너지 회수장치 적용 시 전력비는 1,914.1원/m³까지 절감될 수 있고 소규모 시설과 선박에서는 절감효과가 증가되는 것을 확인하였다. 소규모 역삼투 담수화 시설이 대부분을 차지하는 국내 현실과 규모가 작아질수록 에너지 회수장치에 대한 전력비 절감효과가 커지는 본 연구의 결과를 고려한다면, 소규모 에너지 회수장치의 개발 필요성이 크다고 할 수 있다.

Abstract – Energy recovery device (ERD) is used to save energy consumption in seawater reverse osmosis processes. However, small-scale ERDs (<100 m³/d) are hardly observed in seawater desalination market. In South Korea, most of seawater desalination plants for drinking water production are small-scaled and have been operated in island areas or on ships. Thus, the effect of ERDs for these small-scale SWRO processes should not be neglected. In this work, the small-scale SWRO processes are designed and analyzed in terms of energy consumption with/without ERD. The realistic efficiencies of high pressure pumps are considered for the energy analyses. The unit cost of electricity depending on the application place (e.g., inland and island areas, on ships) is investigated to calculate the energy cost for unit water production in various SWRO applications classified by plant capacity, application place, and the installation of ERD. As a result, the energy cost can be saved up to 1,640.4 KRW/m³ when ERD is applied, and the saving effect increases at smaller plants on ships. In conclusion, the development of small-scale ERDs are necessary because small-scale SWRO processes are dominant in Korean seawater desalination market, and the electricity saving effect becomes higher at smaller-scaled system.

Key words: Seawater reverse osmosis (SWRO), Energy recovery device (ERD), Small-scale, Energy cost

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: suhankim@pknu.ac.kr

‡이 논문은 부경대학교 이재근 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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. 서 론

물은 인간이 살아가는데 가장 중요한 것 중 하나로 인식되고 있다. 세계보건기구(WHO)에서 “깨끗한 물은 사람의 건강을 증진시킨다.”라고 물의 중요성을 강조한 바 있고, 질병의 10%는 물의 관리 체계를 개선함으로써 감소시킬 수 있다고 한다[1]. 그러나, 인구 증가, 기후 변화 등으로 인해 물 부족 현상이 점점 심해질 것으로 예측되고 있다[2]. 국내에서도 도서지역 등에서는 실제 수자원 부족 현상을 체감하고 있고, 해수담수화 기술 중 하나인 역삼투법(Reverse osmosis, RO)을 도입하여 물을 공급받고 있다[3-5]. 역삼투법은 해수에 고압을 가하여 물을 역삼투막에 투과시켜 담수를 생산하는 방법이다. 이때, 고압 펌프에서 소비하는 에너지는 1,000 m³/d 이상 규모의 역삼투 담수화 시설에서 약 3~5 kWh/m³로 전체 운전비용의 50~70%를 차지한다[6-8].

일반적으로, 역삼투법에서 에너지 소모를 저감시키기 위해 에너지 회수장치(Energy recovery device, ERD)를 적용하고 있다. 에너지 회수장치는 역삼투법에서 필연적으로 발생하는 고압의 농축수의 유체 에너지를 고압펌프의 축이나 저압으로 유입되는 원수에 전달하는 방법으로 에너지를 절감한다. 그러나, 현재 상용화된 에너지 회수장치는 농축수 유량이 100 m³/d 이상일 때 적용 가능하다[9,10]. Table 1에서 볼 수 있듯이 100 m³/d 미만의 소규모 역삼투 담수화 시설에 적용 가능한 에너지 회수장치는 찾기 어렵다[11-14].

펌프의 용량이 작을수록 효율이 나빠기 때문에 담수 생산량 대비 에너지 단가가 올라가게 된다. 따라서, 에너지 회수장치를 활용하였을 때의 에너지 절감 비용이 증가할 것으로 기대된다. 또한, 소규모 해수담수화 시설이 주로 설치되는 도서지역이나 선박과 같은 경우에는 각각 전력비가 육상 지역 대비 비싸기 때문에[15,16], 100 m³/d 미만의 소규모 에너지 회수장치가 개발될 경우 경제적 효과가 더욱 증가할 것으로 기대된다[17].

100 m³/d 미만의 소규모 에너지 회수장치 개발은 전혀 불가능한 것일까? 문헌에 따르면, 주로 요트에서 소량의 식수를 간헐적으로 생산하는 데 사용되는 Clark pump라는 제품을 일종의 소규모 에너지 회수장치로 볼 수 있다[18]. Clark pump는 장기간 운전 시 제품 내부에서 누수, 불규칙성 유량/압력 발생 등과 같은 문제점 때문에 연속운전에 적용하기 힘들지만, 이러한 단점을 개선한다면 100 m³/d 미만의 소규모 에너지 회수장치 개발은 꿈이 아닐 것이다.

본 연구에서는 용량에 따른 고압펌프의 효율을 현실적으로 고려한 해수담수화 시설의 전력비를 효율 90%의 에너지 회수장치 도입의 유무에 따라, 그리고, 설치 위치(육상, 도서, 선박)에 따라 산출하여, 소규모 에너지 회수장치 개발 시의 경제적 효과를 정량적으로 분석하고자 한다. 본 논문의 연구 결과는 소규모 에너지 회수장치 개발의 당위성을 제공할 것으로 기대된다.

Table 1. Flow rate range by energy recovery device

Manufacturer	Product	Flow rate range (m ³ /d)
ERI	PX series	109~1,635
Flowserve (Calder™)	DWEER	3,840~8,400
Danfoss	iSave series	168~1,008
OSMOREC	OSMOREC ERD	3,600~10,320

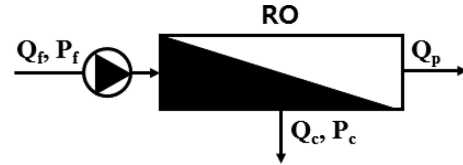


Fig. 1. Schematic diagram of reverse osmosis process.

2. 실험재료 및 방법

2-1. 역삼투 공정 설계

역삼투 공정에서는 유량 Q_f 압력 P_f 인 원수가 역삼투막에 여과되어 유량 Q_p 인 투과수를 생산하고 유량 Q_c , 압력 P_c 인 농축수가 방류된다(Fig. 1 참조). 이때 회수율은 Q_p/Q_f 로 나타낸다. 역삼투 공정 시뮬레이션을 위한 프로그램으로 Reverse Osmosis System Analysis (ROSA, Dow chemical, USA)를 사용하였다. ROSA 프로그램 입력 값으로는 막 종류와 개수, 생산수량, 회수율, 원수유량, 원수 구성 성분 등이 있고 원수는 해수를 사용하였다. 해수 구성 성분 데이터는 Dow chemical사에서 제공하는 표준 해수 구성 성분을 사용하였다[19]. 생산수량은 선박과 도서지역에서 사용하는 소규모 역삼투 시설 중 최소, 최대 유량을 고려하여 2.5, 10, 25, 50, 100 m³/d 다섯 가지 경우를 채택하였다. 온도는 국내 해수 연안 평균 온도를 최소, 최대를 고려하여 5 °C와 30 °C를 채택하였다. 설계에 사용되는 해수담수화용 역삼투 막으로는 Dow chemical사의 4인치 막 SW30HRLE-4040을 채택하였다. SW30HRLE-4040에서 HRLE는 High Rejection Low Energy를 뜻하며 비슷한 막 면적을 가진 다른 막인 SW30-4040보다 에너지 소모량이 낮고 높은 제거율을 보여주는 막이다. 회수율은 25, 50, 100 m³/d 유량의 경우 Dow chemical사에서 제공하는 회수율 범위 35~50%를 고려하여 40%로 채택하였으나, 2.5, 10 m³/d는 ROSA 시뮬레이션 시 막 내부에 필요한 최소 유량을 만족하기 위해 원수유량을 높여 회수율을 10%로 채택하였다.

2-2. 에너지 산정

역삼투 공정에서 에너지는 펌프를 지나는 유량과 압력으로 구한다. 에너지 회수장치를 고려하지 않은 역삼투 에너지 소모량(E_{RO}) 계산에는 식 (1)을 사용하였다.

$$E_{RO}(\text{kWh/m}^3) = \frac{Q_f P_f}{36\eta Q_p} \quad (1)$$

여기서 Q_p 는 역삼투 공정 생산수, η 는 펌프와 모터 효율의 곱, Q_f 와 P_f 는 각각 원수의 유량과 압력을 나타낸다. 에너지 회수장치를 고려한 역삼투 에너지 계산에는 식 (2)를 사용하였다[3].

$$E_{RO}(\text{kWh/m}^3) = \frac{Q_f P_f - \eta_{ERD} Q_c P_c}{36\eta Q_p} \quad (2)$$

η_{ERD} 는 에너지 회수장치의 효율로 90%의 가정 값을 사용하였고, Q_c 와 P_c 는 각각 농축수의 유량과 압력을 나타낸다[3]. 펌프와 모터 효율은 ERI Power Model™ (Energy Recovery Inc. 2011) 프로그램에서 유량에 따른 효율을 구해서 사용하였다. ERI Power Model™은 펌프와 모터의 효율을 산정하는 프로그램으로 원수펌프를 통과하는 유량을 입력하면 그에 따른 펌프와 모터의 효율을 나타낸다[20].

2-3. 전력비 산정

육상지역과 도서지역 그리고 선박에서의 생산수량 $1 \text{ m}^3/\text{d}$ 당 단가를 계산하기 위해 전력비를 조사하고 산정하였다. 육상지역 산업용 전력비는 한국전력공사에서 판매단가를 107.41 원/kWh 로 제공하고 있으며 도서지역 평균 전력비는 한국전력공사에서 126.03 원/kWh 로 제공하고 있다[14,15]. 선박에서는 경유(디젤)를 연료로 하는 발전기를 사용한다. 발전기 사양서를 참고하면 발전 시 연료소모량은 $150\sim 175 \text{ g/HP}\cdot\text{hr}$ 이다. 디젤 밀도는 평균 밀도인 850 g/L 을 사용하였다[21]. $1 \text{ kW}=1.33 \text{ HP}$ 이므로 이는 $0.13\sim 0.15 \text{ L/kWh}$ 범위로 환산되고, 본 연구에서는 평균값인 0.14 L/kWh 를 디젤 발전 시의 연료 소모량으로 채택하였다. 이에 한국석유공사에서 제공하는 리터당 경유 값 1254 원 (2017년 6월 14일 기준)을 곱해주면 디젤 발전 시 전력비 단가는 175.6 원/kWh 로 산정된다[22].

3. 결과 및 고찰

3-1. 역삼투 담수화 시설 규모별 에너지

Fig. 2는 ERI Power ModelTM에서 구한 유량에 대한 펌프와 모터 효율이다. 모터의 효율은 유량이 줄어들수록 약 90%에서 거의 변하지 않는 것을 볼 수 있지만 펌프 효율은 유량이 $250 \text{ m}^3/\text{d}$ 에서 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 로 감소할 때 60%에서 32%로 반 정도 줄어드는 것을 볼 수 있다. 앞에서 구한 펌프와 모터 효율을 적용하여 역삼투 담수화 생산수량 별 에너지를 계산하면 Table 2와 같이 나타낼 수 있다. 생산수의 TDS를 500 mg/L 이하로 먹는 물 수질기준을 만족하도록 설계하였으며, 에너지 회수장치의 유무에 따른 에너지를 각각 나타내었다[23].

펌프와 모터 효율이 유량이 줄어들수록 급격하게 감소하기 때문에 생산수량 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 와 $2.5 \text{ m}^3/\text{d}$ 에서 에너지 소모량은 에너지 회수장치 미적용 시 각각 8.2 kWh/m^3 과 105.6 kWh/m^3 으로 약 12.9배 차이가

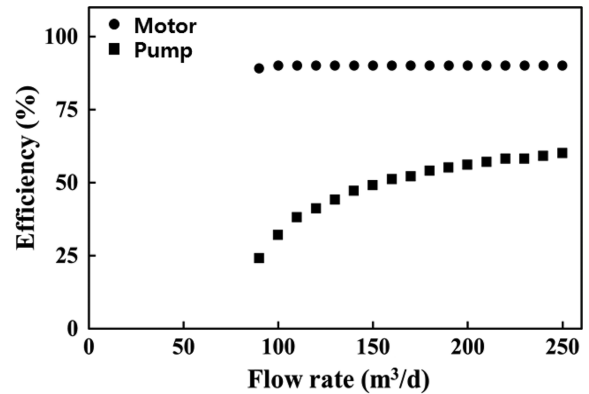


Fig. 2. Motor and pump efficiency according to feed water flow rate.

나며 에너지 회수장치 적용 시 각각 6.0 kWh/m^3 과 94.7 kWh/m^3 으로 약 15.8배 차이가 난다. 온도가 증가할수록 원수의 점성이 감소하므로 원수압력이 줄어들어 에너지 소모량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3은 에너지 회수장치 도입 유무에 따른 역삼투 공정의 단위 에너지 소비량을 나타낸다. 공정 규모가 줄어들수록 에너지 회수장치 도입의 효과가 눈에 띄게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

3-2. 역삼투 담수화 시설 규모별 단위 전력비

Fig. 4는 육상지역, 도서지역, 선박에서 에너지 회수장치의 유무에 따른 단위 전력비를 두 가지 온도 조건에서 나타낸 것이다. 선박에서는 디젤 발전기를 사용하여 생산한 전력비를 적용하여(2-3절 참조) 단위 전력비가 가장 높게 나타나며, 그 다음, 도서지역과 육상지역 순이다. 선박 해수담수화 시설의 경우, 온도 5°C , $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 규모에서 단위 전력비가 $1,439.9 \text{ 원/m}^3$ 인데, 에너지 회수장치가 적용된다

Table 2. RO process energy calculation

		Q_p 100 m³/d		Q_p 50 m³/d		Q_p 25 m³/d		Q_p 10 m³/d		Q_p 2.5 m³/d	
		5 °C	30 °C	5 °C	30 °C	5 °C	30 °C	5 °C	30 °C	5 °C	30 °C
SW30 HRLE-4040	Q_f (m³/d)	250	250	125	125	62.5	62.5	100	100	25	25
	P_f (bar)	64.0	53.8	64.9	54.3	64.8	54.4	53.4	41.5	54.1	42.3
	Q_c (m³/d)	150	150	75	75	37.5	37.5	90	90	22.5	22.5
	P_c (bar)	60.9	51.6	60.0	50.9	59.7	51.0	52.5	40.9	54.0	42.2
	E_{RO} (w/o ERD) (kWh/m³)	8.2	6.9	11.8	9.9	21.1	17.7	52.1	40.5	105.6	82.5
	E_{RO} (with ERD) (kWh/m³)	6.0	5.0	9.5	8.0	18.8	15.8	40.3	31.3	94.7	73.0
	Q_p TDS (mg/L)	62.9	265	62.5	264	62.5	264	49.8	204	51.6	210

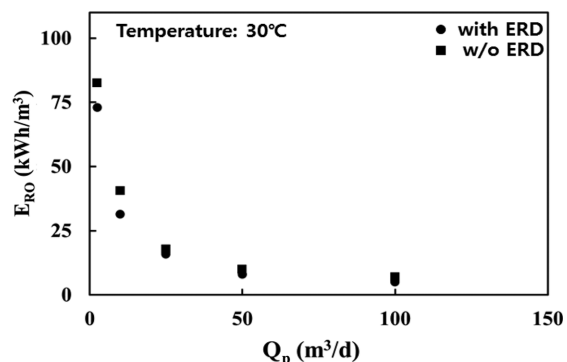
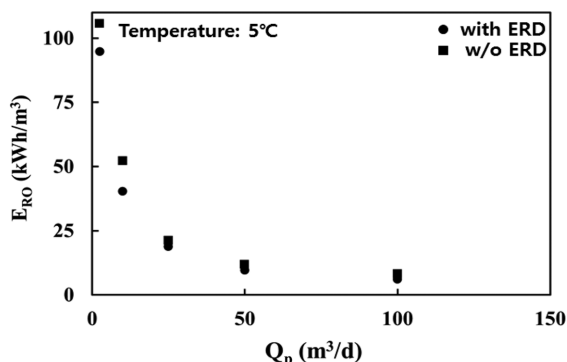


Fig. 3. RO energy according to ERD application.

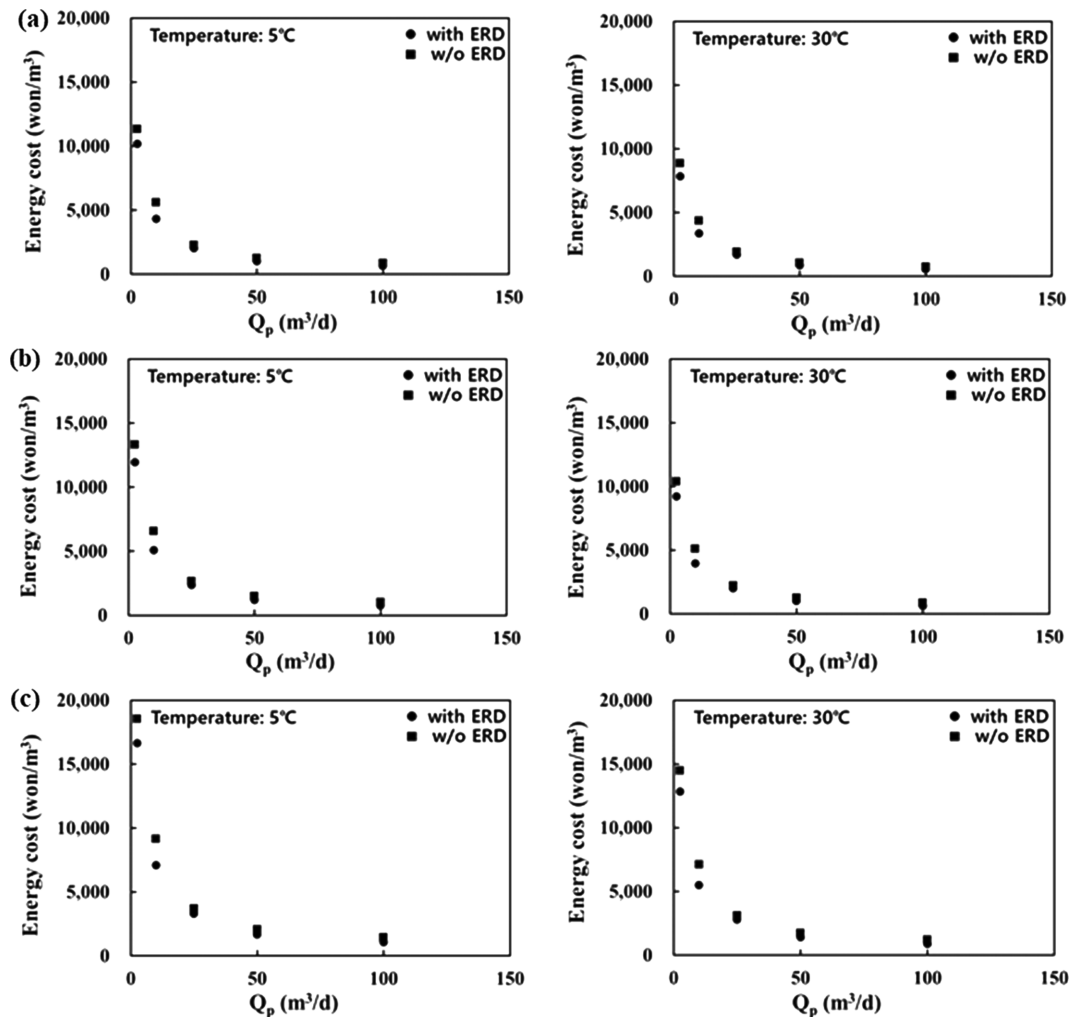


Fig. 4. Permeate water price by location: (a) Inland area (b) Island area (c) On ship.

면 1,053.6원/m³으로 절감되므로 절감액은 386.3원/m³이다. 한편, 2.5 m³/d 규모의 선박 해수담수화 시설에서는 단위 전력비가 18,543.4원/m³이고, 에너지 회수장치 적용 시 16,629.3원/m³으로 절감액이 1,914.1원/m³으로 100 m³/d 규모 대비 약 5배의 절감 효과를 볼 수 있다. 즉, 시설 규모가 작아질수록 에너지 회수장치 도입으로 인한 비용 절감 효과가 커진다는 것을 알 수 있다.

하지만, 2.5, 10 m³/d 규모의 경우 ROSA 시뮬레이션 특성상 막 내부 필요 최소유량을 만족시키기 위해 회수율을 10%로 마일드한 조건에서 추정된 값이므로 실제 적용 시 절감액이 감소할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 소규모 역삼투 해수담수화 시설에 적용 가능한 에너지 회수 장치가 존재하지 않음에 대한 의문으로부터 출발되었다. 세계 시장을 기준으로 생각했을 때 중대규모 해수담수화 시장의 규모가 훨씬 큰 것이 그 원인인 것으로 추정되기는 하지만, 국내의 경우 도서지역, 선박 등을 중심으로 해수담수화 시장이 주로 형성되어 있으므로, 소규모 에너지 회수장치의 개발의 필요성에 대해 고려해 볼 필요가 있다. 본 연구 수행 결과, 2.5 m³/d 규모의 선박 해수담수화 시설에서의 전력비 절감액은 최대 1,914.1원/m³으로 추정되었고, 이는

100 m³/d 규모 대비 약 5배의 효과이다. 그 원인은 펌프 용량이 작을수록 효율이 낮기 때문에 에너지 비용이 높아지게 되고, 따라서 에너지 회수 장치의 도입 효과가 더 크게 산정되기 때문인 것으로 분석된다. 또한, 육상 지역과 비교했을 때, 도서 지역과 선박에서는 전력비가 더 높기 때문에 소규모 에너지 회수장치의 도입 효과가 더욱 큰 것으로 나타났다. 도서 지역, 선박 등을 중심으로 소규모 해수담수화 시장이 형성되어 있는 국내 특성을 고려하고, 최대 1,000원/m³을 넘어서는 에너지 회수장치 도입 시의 전력비 절감 효과를 고려한다면, 100 m³/d 규모 이하의 에너지 회수장치 개발의 필요성이 더욱 높아질 것이라고 볼 수 있다.

감 사

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원(과제번호 17IFIP-B088091-04)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Prüss-Üstün, A. B., Robert; Gore, Fiona; Bartram, Jamie, Safer water, better health. World Health Organization, 2008.
2. Chekli, L., Phuntsho, S., Kim, J. E., Kim, J., Choi, J. Y., Choi, J.-S.,

- Kim, S., Kim, J. H., Hong, S., Sohn, J. and Shon, H. K., "A Comprehensive Review of Hybrid Forward Osmosis Systems: Performance, Applications and Future Prospects," *J. Membr. Sci.*, **497**, 430-449(2016).
3. Jeon, J., Park, B., Yoon, Y. and Kim, S., "An Optimal Design Approach of Forward Osmosis and Reverse Osmosis Hybrid Process for Seawater Desalination," *Desalin. Water Treat.*, **57**, 26612-26620(2016).
4. Park, S. W., Park, Y. S. and Chang, H. N., "Performance Change of Reverse Osmosis Membrane by Fabricating into Spiral-Wound Module," *Korean Chem. Eng. Res.*, **28**(1), 124-129(1990).
5. Kim, Y., Lee, J. H., Lee, K. H., K, Y.-C., Oh, D. W. and Lee, J., "Performance Evaluation of Absorbent Solution for Draw Solute Recovery in Forward Osmosis Desalination Process," *Korean Chem. Eng. Res.*, **51**(2), 240-244(2013).
6. Lee, H., Ryu, H., Lim, J.-H., Kim, J.-O., Lee, J. D. and Kim, S., "An Optimal Design Approach of Gas Hydrate and Reverse Osmosis Hybrid System for Seawater Desalination," *Desalin. Water Treat.*, **57**, 9009-9017(2016).
7. Park, B., Lee, J., Kim, M., Won, Y. S., Lim, J. H. and Kim, S., "Enhanced Boron Removal Using Polyol Compounds in Seawater Reverse Osmosis Processes," *Desalin. Water Treat.*, **57**, 7910-7917(2016).
8. Kim, S., Cho, D., Lee, M. S., Oh, B. S., Kim, J. H. and Kim, I. S., "SEAHERO R & D Program and Key Strategies for the Scale-up of a Seawater Reverse Osmosis (SWRO) System," *Desalination*, **238**, 1-9(2009).
9. Zhu, A., Christofides, P. D. and Cohen, Y., "Minimization of Energy Consumption for a Two-pass Membrane Desalination: Effect of Energy Recovery, Membrane Rejection and Retentate Recycling," *Journal of Membrane Science* **339**, 126-137(2009).
10. Farooque, A. M., Jamaluddin, A. T. M., Al-Reweli, A. R., Jalaluddin, P. A. M., Al-Marwani, S. M., Al-Mobayed, A. A. and Qasim, A. H., "Parametric Analyses of Energy Consumption and Losses in SWCC SWRO Plants Utilizing Energy Recovery Devices," *Desalination*, **219**, 137-159(2008).
11. http://www.energyrecovery.com/wp-content/uploads/2014/12/0916_ER_desalProducts_brochure_interactive_v3.pdf.
12. <http://high-pressurepumps.danfoss.com/products/energy-recovery-devices>
13. <https://www.flowserve.com>.
14. <http://osmorec.com/product/technology>.
15. <http://cyber.kepco.co.kr/ckeeco>.
16. <https://home.kepco.co.kr/kepco>.
17. Subramani, A., Badruzzaman, M., Oppenheimer, J. and Jacangelo, J. G., "Energy Minimization Strategies and Renewable Energy Utilization for Desalination : Review," *Water Research*, **45**, 1907-1920(2011).
18. Bermudez-Contreras, A. and Thomson, M., "Modified Operation of a Small Scale Energy Recovery Device for Seawater Reverse Osmosis," *Desalin. Water Treat* **13**, 195-202(2010).
19. Dow Liquid Separations, Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, The Dow Chemical Company Form No. 609-00071-0705, 2005.
20. Kim, D. I., Kim, J., Shon, H. K. and Hong, S., "Pressure Retarded Osmosis (PRO) for Integrating Seawater Desalination and Wastewater Reclamation: Energy Consumption and Fouling," *J. Membr. Sci.*, **483**, 24-41(2015).
21. Xiong, W., Li, X., Xiang, J. and Wu, Q., "High-density Fermentation of Microalga *Chlorella Protothecoides* in Bioreactor for Microbio-diesel Production," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **78**, 29-36(2008).
22. http://www.demkor.co.kr/02/02_win1.php.
23. <http://www.law.go.kr>.