



역삼투막 해수담수화 공정에서 에너지 회수장치의 운영인자 비교분석을 통한 에너지 효율 최적화 연구

Optimization of energy efficiency through comparative analysis of factors affecting the operation with energy recovery devices on SWRO desalination process

김푸름¹·김형수¹·박준영²·김태우³·김민진¹·박기태¹·김지훈^{1*}

Pooreum Kim¹·Hyungsoo Kim¹·Junyoung Park²·Taewoo Kim³·Minjin Kim¹·Kitae Park¹·Jihoon Kim^{1*}

¹성균관대학교 수자원전문대학원, ²성균관대학교 건설환경연구소, ³성균관대학교 건설환경시스템공학과

¹Sungkyunkwan University Graduate School of Water Resources

²Center of Built Environment, SungKyunKwan University

³Architectural and Environmental Systems Engineering, SungKyunKwan University

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

ABSTRACT

Recently, interest in the development of alternative water resources has been increasing rapidly due to environmental pollution and depletion of water resources. In particular, seawater desalination has been attracting the most attention as alternative water resources. As seawater desalination consumes a large amount of energy due to high operating pressure, many researches have been conducted to improve energy efficiency such as energy recovery device (ERD). Consequently, this study aims to compare the energy efficiency of RO process according to ERD of isobaric type which is applied in scientific control pilot plant process of each 100 m³/day scale based on actual RO product water. As a result, it was confirmed that efficiency, mixing rate, and permeate conductivity were different depending on the size of the apparatus even though the same principle of the ERD was applied. It is believed that this is caused by the difference in cross-sectional area of the contacted portion for pressure transfer inside the ERD. Therefore, further study is needed to confirm the optimum conditions what is applicable to the actual process considering the correlation with other factors as well as the factors obtained from the previous experiments.

Key words: Desalination, Energy recovery device, Mixing rate, Reverse osmosis

주제어: 담수화, 에너지 회수장치, 혼합율, 역삼투

1. 서론

최근 환경오염으로 인한 유효 수자원의 고갈과 인구 증가 및 삶의 질 향상 등으로 인한 물사용량이 급증함에 따라 대체 수자원 개발에 대한 관심이 급격히 증가하고 있으며 특히 지구에서 무한하게 사용할 수 있는 해수를 이용한 해수담수화 기술이 대체수자원의

로써 가장 주목받고 있는 추세이다 (Ko et al., 2010).

현재 해수담수화 기술은 기존 증발법에 비해 에너지 소비가 적은 역삼투막 해수담수화(SWRO, sea water reverse osmosis) 공정으로 많이 전환되는 추세이며 (Kim and Oh, 2008) 역삼투막 해수담수화 공정 또한 높은 운전압력으로 인해 많은 에너지를 소모함에 따라(Wang et al., 2010; Avlonitis et al., 2003) 에너지 회수장치(ERD, energy recovery device) 및 저압 역삼투막 개발, ISD(internally staged design) 기술 적용 등과 같

Received 28 November 2017, revised 21 December 2017, accepted 26 December 2017

*Corresponding author: Jihoon Kim (E-mail: jitt23@skku.edu)

은 에너지 효율을 높일 수 있는 연구가 많이 병행되고 있다 (Ham et al., 2012).

특히, 에너지 회수장치의 경우 가장 효과적으로 에너지를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있어 최근 에너지 회수장치에 대한 연구 개발 및 적용사례 실적 등이 높아지고 있으나(Stover, 2007; Song et al., 2015; Song et al., 2014) 여전히 공정 설계 및 운전 조건 등에 따라 에너지 회수장치의 에너지 효율이 많은 차이를 보여주고 있기에 이에 대한 효율 최적화 연구가 지속적으로 이루어져야 될 것으로 판단된다.

에너지 회수장치는 작동원리에 따라 크게 터보차저 방식과 등압교환방식으로 나누어진다. 먼저, 터보차저 방식은 고압 측에서 배출되는 농축수의 수력에너지를 기계에너지로 변환시키는 원리이며, 전체적으로 수력 에너지가 기계에너지로 변환되어지는 과정에서 발생하는 에너지 손실이 너무 커 에너지 효율이 떨어진다. 반면에 등압교환방식은 터보차저방식과 달리 에너지간의 변환이 없는 직접적인 압력교환방식을 적용하여 에너지간의 변환을 통한 효율 저하를 최소화하였으며, 대표적으로 피스톤 타입과 로터리 타입의 에너지 회수장치로 나뉜다.

피스톤 타입의 에너지 회수장치는 고압으로 배출되는 농축수의 에너지를 피스톤을 통해 저압으로 유입되는 해수 원수 측에 전달하는 방식이며 실제 해수담수화 공정에 적용할 시, 운영 방식이 복잡하고 별도의 밸브들 및 특수 제작된 압력용기가 필요하며 전체적인 규격이 커져 설치비 상승의 요인으로 작용된다. 그럼에도 불구하고 동일한 등압교환방식의 로터리 타입 대비 낮은 혼합율(mixing rate)과 높은 에너지 효율 및 안정적인 운영으로 인해 대용량 역삼투막 해수담수화 시설 설계 시 많이 고려되어지고 있다 (Farooque et al., 2004).

로터리 타입의 에너지 회수장치는 장치 내의 로터를 통해 저압, 저농도의 해수원수인 염수와 고압, 고농도의 농축수가 직접적으로 접촉하는 방식이며 고압의 농축수가 유입 시 동압유체 베어링 현상을 통해 유체역학적 에너지를 줄여 로터의 마찰을 최소화하며 이를 통해 로터가 고속 회전함으로써 농축수 측의 고압이 저압의 해수 원수 측으로 전달된다 (Wu et al., 2015).

이와 같은 직접적인 압력 교환 방식을 통해 실제 95% 이상의 높은 에너지 효율을 갖는 것으로 알려져

있으며 장치의 규격 또한 작아서 설치가 용이하기에 현재 많은 곳에서 사용되고 있다. 하지만 농축수 측에서 배출되는 압력의 손실을 보상하기 위해 별도의 부스터펌프가 필요하며 농축수와 해수 원수의 직접적인 접촉으로 인한 혼합 현상이 발생되어 원수 측의 염분 농도가 증가하는 단점이 있다 (Dark and Adatoz, 2014).

현재 역삼투막 해수담수화 공정에서 에너지 효율을 높이기 위해서는 에너지 회수장치의 적용은 불가피하다 (Peñate and Rodríguez, 2011; Sun et al., 2009; Wang et al., 2012). 특히, 에너지 효율이 높은 등압교환방식의 에너지 회수장치가 많이 사용되어 지고 있으나, 앞서 언급한 바와 같이 혼합율(mixing rate) 조절과 회수율 변화에 따른 부스터펌프의 Hz 제어, 해수 원수 및 농축수의 유량 밸런스 조절 등과 같은 영향 인자에 따라 역삼투막 공정 생산수의 수질 및 에너지 효율 등에서 많은 차이를 보여준다 (Qi et al., 2012). 이는 곧 생산단가 및 유지관리비용의 증가와도 연결되어 있기에 이를 제어하려는 연구가 지속적으로 진행되고 있다 (Mohamed et al., 2005).

따라서, 본 연구에서는 실제 역삼투막 해수담수화 공정에서 많이 적용되고 있는 등압교환방식의 에너지 회수장치를 활용하여 운영인자 도출 및 이를 통한 에너지 효율 최적화 연구를 하고자 한다. 사전 조사를 통해 국내에서 진행 중인 pilot 규모의 역삼투막 해수담수화 공정에 실제 적용되고 있는 등압교환방식의 에너지 회수장치 2종류를 선정하였으며 생산수 기준 100 m³/일 규모의 역삼투막 해수담수화 pilot plant에 직접 적용하여 운전 압력, 운영효율, 혼합율 및 처리수질 등의 변화를 살펴보고 2종류의 에너지 회수장치 데이터(data)들을 비교 분석함으로써 최적 운전 조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 역삼투막 사양

실험에 사용된 역삼투막은 polyamide 재질의 상용화된 8 inch SWRO 분리막으로써 DOW사에서 제작한 것이며 1개의 베셀(vessel) 내에 7개의 SWRO 엘리먼트(element)를 장착하여 테스트를 진행하였다. 역삼투막 베셀 내에 해수가 유입하게 되면 전단 엘리먼트의



처리수량은 많고 생산수의 염분 농도는 낮으나, 후단 엘리먼트로 갈수록 유입수가 농축되어 투과수량은 줄어들게 된다. 또한 역삼투막의 엘리먼트는 그 구조상 최대 유입유량과 최소 유입유량 범위가 있는데 그 범위를 벗어나게 되면 압력 손실이 많이 발생하고 유량 분포가 고르지 못해 처리효율이 저하된다.

이와 같은 이유로 본 실험에서는 ISD를 적용하여 역삼투막 해수담수화 pilot 테스트를 진행하였다. ISD는 베셀 전단에 염제거율은 높고 투과수량이 적은 엘리먼트를 장착하고 후단에 염제거율은 낮고 투과수량이 많은 엘리먼트를 장착함으로써 압력용기 내의 유량분포를 고르게 유지할 수 있다. 이는 전체 시스템의 회수율을 높일 수 있고 투자비를 감소할 수 있을 뿐만 아니라 운전압력이 낮아 에너지 비용을 절감할 수 있다. 실험에 사용된 역삼투막의 제원은 아래의 Table 1에 나타냈다.

2.2 역삼투막 해수담수화 pilot plant 구성

본 실험에 사용된 역삼투막 해수담수화 pilot plant의 공정 구성은 Fig. 1과 같이, 생산수 기준 100 m³/일 규모의 pilot plant를 2기 구축하였고 기본 1st pass RO 방식으로 제작되었으며, cross flow 방식의 정유량 제어가 가능하도록 운영 프로그램을 설정하였다.

또한, 각 각의 원수조와 처리수조를 비롯한 유입펌프 및 고압펌프, 디지털 압력계, 유량계 등을 구성하여 자동 연속 운전이 가능하도록 하였으며, 에너지 회수장치의 효율 비교를 위한 정확한 데이터 분석을 하고자 HMI(human machine interface) 제어를 통해 각 단위 공정 별 모든 데이터들은 항시 기록되도록 설정하였다. 고압펌프 및 배관, 부속품 등은 고염 원수에 의한 부식을 방지하기 위해 듀플렉스(duplex) 재질로 구성하였으며 에너지 회수장치를 제외한 모든 부품 및 공정들은 동일하게 적용함으로써 에너지 회수장치의 효율 비교 분석 시 발생될 수 있는 오차를 최소화하였다.

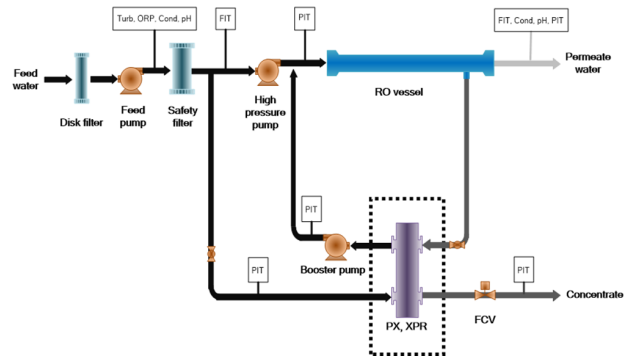


Fig. 1. The ERD in SWRO desalination plant system.

2.3 해수 취수 방식 및 원수성상

해수 취수방법은 크게 surface intake방법과 sub-surface intake방법으로 나눌 수 있으며, 이는 플랜트 설치 부지의 조건과 규모를 고려하여 결정되어지는 것이 일반적이다. 먼저 surface intake 방법은 직접 취수 방식으로써 대용량의 플랜트에서 다수 적용하며, 충분한 수량을 안정적으로 취수할 수 있고, 상대적으로 건설비가 낮다는 장점이 있다. 하지만 이 경우 태풍 등 자연재해로 인해 해조류 등 부유물질 유입이 예상됨에 따라 철저한 계획과 설계가 이뤄져야한다.

다음 sub-surface 방법은 간접 취수 방식으로 surface 방식에 비해 양질의 원수를 얻을 수 있고, 원수의 염분 농도가 조금 낮아 운전 압력을 다소 줄일 수 있으며 전처리시설의 부하를 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나, 취수 시설에 따른 건설비가 매우 높고 취수량의 제한, 지역적 한계 등 많은 제약조건을 가지고 있다 (Voutchkov, 2005).

본 역삼투막 해수담수화 pilot plant에서는 광양제철소 내 발전소에서 바닷물을 취수해 냉각수로 활용한 뒤 다시 바다로 배출하는 온배수를 원수로 사용하였다. 온배수의 경우 냉각수 사용 시설의 운영 방식(냉각수 사용 유무 및 전염소 처리 공정 작동 유무 등) 및 해수의 수질(해조류), 염도 그리고 온도 등의 변화에

Table 1. Characteristics of the membrane used in this experiment

Maker	Model	Effective membrane area (m ²)	Permeate flow rate (m ³ /day)	Stabilized salt rejection (%)	Maximum applied pressure (Mpa)	Surface charge	Membrane material
DOW	SW30HRLE-440i	41	30.2	99.8	8.27	Negative	polyamide
DOW	SW30ULE-440i	41	45.4	99.7	8.27	Negative	polyamide

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

Table 2. Qualities of seawater

Parameters	Values
pH	8.0~8.1
TOC (mg/L)	1.5~2.0
TDS (mg/L)	32,000~33,000
Turbidity (NTU)	4~10
Operating temperature (°C)	26~28

민감하게 반응하는 등의 많은 제약이 발생될 수 있다. 특히, 본 연구를 위해 원수로 사용한 온배수의 경우 surface intake방식을 통해 취수를 하고 있으며 발전소의 운영 유무에 따라서 온도가 크게 변하는 경향을 보인다. 하지만 본 실험 기간 동안의 온도변화는 없었기에 실험결과에는 영향을 미치지 않았다. 실험에 사용된 해수원수의 수질 성상은 Table 2에 나타냈다.

2.4 에너지 회수장치

본 실험에 사용된 등압교환방식의 에너지 회수장치는 앞서 언급한 바와 같이 로터리 타입의 에너지 회수장치이며 장치내의 로터(rotor)를 통해 고압의 농축수를 바로 배출하는 것이 아니라 저압의 유입 원수와 직접적으로 접촉하여 농축수 측에서 배출되는 높은 압력을 그대로 유입 원수에 전달한다. 이와 같은 방식을 통해 유입 원수의 압력을 상승해 주고 동시에 감압된 농축수는 밖으로 배출되는 원리이며 보다 자세한 작동 방식 원리는 Fig. 2 (Guirguis, 2011)에 나타내었다.

실험은 사전 조사를 통해 I사와 E사의 에너지 회수장치 2종류를 선정하여 역삼투막 해수담수화 pilot plant에 적용하였으며, 실험 특성상 발생할 수 있는 오차를 줄이고 보다 정확한 비교데이터를 확보하기 위해 동일한 부스터펌프를 사용하였다. 에너지 회수장치의 사양을 살펴보면 작동 유량 범위, 허용 혼합율 및

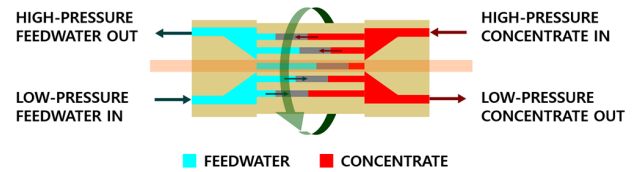


Fig. 2. ERD operation cycle.

에너지 효율 등의 주요 인자들은 거의 비슷한 값을 가지는 반면 최대 허용 압력 및 에너지 회수장치의 크기에서 차이가 있음을 확인할 수 있다. 실험에 사용된 에너지 회수장치의 제원은 Table 3에 나타내었다.

2.5 실험 방법

본 실험은 UF 전처리수를 원수(SDI₁₅ < 3이하 만족)로 사용하였으며, 에너지 회수장치에 따른 각 각의 운영인자를 도출하기 위하여 역삼투막 해수담수화 pilot plant에 두 가지 종류의 에너지 회수장치를 직접 연결하여 실험을 진행하였다. 보다 정확한 운영인자 도출 및 운영 데이터 비교 분석을 위해 에너지 회수장치를 제외한 모든 운영 조건들을 동일하게 설정하였으며, 사전 pilot plant의 시운전을 통해 에너지 회수장치의 적용 유량 범위 및 역삼투막 베셀 내의 최대 허용 압력, 제막사에서 제시하는 운전 매뉴얼 등을 고려하여 역삼투막 해수담수화 pilot plant의 운영 조건들을 산출하였다.

또한, 역삼투막 해수담수화 pilot plant 운영은 cross flow 방식의 정유량 제어를 통해 공정 회수율을 50%로 고정하여 운전하였으며, 에너지 회수장치의 주요 영향 인자인 부스터펌프 제어속도(Hz)를 변화시켜 운영효율, 혼합율, 처리수질 등의 변화를 측정한다. 비교 분석함으로써 최적 운전 조건을 도출하고자 하였다. 다음은 본 실험에서 설정한 역삼투막 해수담수화 pilot plant의 운영 조건을 Table 4에 나타내었다.

Table 3. Characteristics of the ERD used in this experiment

Parameters	Isobarix XPR	ERI PX
PX model	XPR-309SS	PX-30S
PX unit flow (m ³ /day)	4.48~6.72	4.5~6.3
PX efficiency (%)	95.9	94.3
PX power saving (KW)	9.9	9.1
Volumetric mixing (%)	4	4
Maximum inlet pressure (bar)	68	80
Dimensions (cm)	26.67×11.43×11.43	76.2×76.2×27.94

**Table 4.** Typical operating conditions of SWRO

Parameters	Value
RO capacity water (m ³ /day)	100
Recovery rate (%)	50
Flux (LMH)	15.8
RO feed pressure (bar)	50~55
RO feed TDS (mg/L)	32,000~33,000
RO product TDS (mg/L)	150~200

2.6 혼합물(mixing rate) 분석

혼합물은 등압교환방식의 에너지 회수장치 운전특성상 발생하는 혼합현상을 수치화 한 것이며, 운전 중인 에너지 회수장치의 효율 최적 상태를 확인하기 위해 가장 널리 사용되는 방법 중 하나이다 (Stover, 2007; Cameron, 2008).

앞서 언급한 바와 같이 실험에 사용된 등압교환방식의 에너지 회수장치는 저압의 염수와 고압의 농축수가 직접적으로 접촉하는 방식이기 때문에 맞는 순간 혼합현상이 발생된다. 혼합율이 중요한 이유는 혼합현상이 발생함으로써 역삼투막 공정에 유입되는 염수의 TDS가 올라가게 되고, 이는 운전압력 상승의 요인이 되며 전체적인 운전비용 증가로 이어지기 때문에 혼합율의 제어는 매우 중요하다. 혼합율은 에너지 회수장치에 유입되는 TDS와 유출되는 TDS를 각각 측정함으로써 확인할 수 있으며 기본적으로 아래의 식 (1)을 이용하여 간단하게 계산할 수 있다 (Guirguis, 2011).

$$\text{Mixing Rate } \% = \frac{HP_{out} - LP_{in}}{HP_{in} - LP_{in}}(TDS, mg/L) \times 100 \quad (1)$$

여기서, HP_{out} = High pressure concentrate out

Table 5. Operating condition of XPR energy recovery device

Experimental conditions							
Hz	HP	DP	Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$) error range : $\pm 0.5\%$	LP in TDS (mg/L)	HP in TDS (mg/L)	HP out TDS (mg/L)	Mixing rate (%)
37	49.5	2.07	395	28,000	56,000	29,400	5.0
38	48.5	2.15	386	28,000	54,800	28,800	3.0
39	49.2	2.21	355	28,100	56,000	29,100	3.6
41	48.9	2.33	385	28,200	52,000	30,400	9.2

Conductivity error range : $\pm 0.5\%$

LP_{in} = Low pressure feedwater in

HP_{in} = High pressure concentrate in

3. 결과 및 고찰

3.1 Pilot plant 실험

3.1.1 XPR 에너지 회수장치

본 실험은 XPR 에너지 회수장치를 이용하여 부스터 펌프 제어속도를 조절함에 따라 운영 효율성에 영향을 줄 수 있는 HP(high pressure), DP(differential pressure), 혼합율 및 처리수 수질과 같은 운영 인자들의 변화를 살펴보고자 하였다. 부스터펌프의 제어속도는 에너지 회수장치의 운영제어 인자 중 혼합율이 10%를 넘지 않는 범위 내에서 네 가지 조건(37, 38, 39, 41 Hz)을 선정하여 실험을 진행하였다. 그 결과는 다음 Table 5 및 Fig. 3과 같다.

Fig. 3은 XPR의 부스터펌프 제어속도(Hz)변화에 따른 여러 인자들의 변화를 나타낸 그래프이다. 우선 부스터펌프 제어속도에 따른 HP의 변화를 살펴보면 38 Hz 일 때 가장 낮은 값을 나타내었으나 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 38 Hz 일 때 혼합율이 낮아짐에 따라 유입원수의 농도가 낮아져 HP값이 가장 낮게 나타나는 것으로 생각된다. 이에 부스터펌프 제어속도에 따른 혼합율의 변화를 확인하였다. 그 결과 부스터펌프 제어속도가 37 Hz 시 5.0%의 값을 보였고 38 Hz 와 39 Hz 시 4% 미만(3.0%, 3.6%)으로 감소하다가 41 Hz 시 9.2%로 급격히 증가하는 경향을 보였다. 앞서 말한 38 Hz에서의 혼합율이 가장 낮은 값을 나타내는 것이 아니라 39 Hz에서 가장 낮은 값을 나타내는 것을 볼 수 있는데 이와 같은 결과는 에너지 회수장치 내의 유입량과 유출량의 밸런스를 맞추기

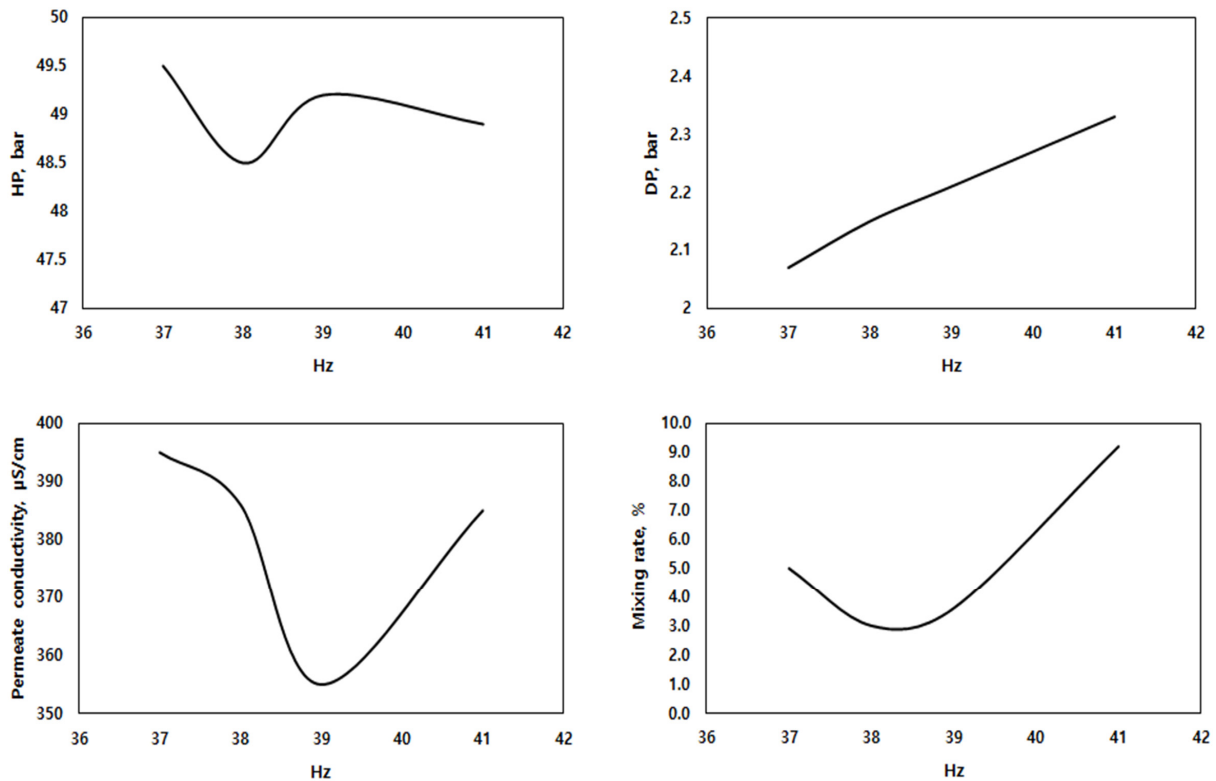


Fig. 3. Results of the parameter(HP, DP, conductivity, mixing rate) with different booster pump Hz.

위해 유입펌프와 유출 측의 유량제어밸브가 항시 작동됨에 따라 발생하는 오차로 판단된다.

또한 38, 39 Hz 모두 제조사에서 보증하는 4% 미만의 혼합율을 보여줌에 따라 오차범위 내에 있음을 확인하였다. 다음 DP그래프를 살펴보면 Hz가 커짐에 따라 점차 증가하는 경향을 볼 수 있다. DP는 유입 측 압력과 유출 측 압력의 차이를 나타내며 Hz가 낮은 값에서는 부스터펌프가 보상하는 압력이 낮아 유입 측의 압력이 낮아져 DP값이 낮게 나타나고 또한 Hz가 증가할수록 로터가 빨리 회전하여 유출 측의 고압 농축수가 설정유량 이상으로 넘어오게 됨으로써 유출 압력이 손실되어 이와 같은 경향이 나타나는 것으로 판단된다.

농축수가 다량으로 원수 측에 넘어올 경우 유입 원수의 염농도가 증가하여 혼합율 및 처리수에 악영향을 미치며 앞서 혼합율 그래프에서도 39 Hz 이후에 증가하는 경향을 확인하였다. 처리수 수질그래프를 보더라도 39 Hz(355 µS/cm)에서 41 Hz(385 µS/cm)로 증가함에 따라 처리수 염농도 또한 증가하는 경향을 확인하였다. 처리수 수질은 혼합율이 가장 낮은 38 Hz에서

좋은 수질을 나타낼 것으로 예상하였으나, 39 Hz에서의 처리수 수질이 가장 좋은 것으로 나타났으며 이는 앞서 설명한 바와 같이 에너지 회수장치 내의 유입량과 유출량의 밸런스를 맞추기 위해 발생하는 기계적 오차로 판단된다.

3.1.2 PX 에너지 회수장치

다음 Table 6과 Fig. 4는 앞서 진행한 3.1.1의 실험과 동일하게 부스터펌프 제어속도에 따른 HP, DP, 혼합율 및 처리수 수질의 변화를 확인하기 위해 PX에너지 회수장치를 적용하여 실험한 결과를 나타내었다. 이 또한, 부스터펌프 제어속도를 선정하기 위해 혼합율이 10%를 넘지 않는 범위 내에서 다섯 가지 조건(28, 29, 30, 32, 34 Hz)을 분류하여 실험을 실시하였다.

Fig. 4는 PX 에너지 회수장치의 부스터펌프 제어속도(Hz)에 따른 여러 영향 인자들의 변화를 나타낸 그래프이며 그 결과를 살펴보면 앞서 진행하였던 XPR과 동일한 등압교환방식의 에너지 회수장치임에도 불구하고 전혀 다른 경향을 보여주었다. 우선 부스터펌프 제어속도에 따른 HP의 변화를 살펴보면 34 Hz 일 때 가



Table 6. Operating condition of PX energy recovery device

Experimental conditions							
Hz	HP	DP	Conductivity (μS/cm)	LP in TDS (mg/L)	HP in TDS (mg/L)	HP out TDS (mg/L)	Mixing rate (%)
28	56.2	0.91	442	29,500	61,800	31,100	5.0
29	55.6	0.94	440	29,900	60,000	31,600	5.6
30	55.4	1.01	432	30,100	65,000	32,100	5.7
32	54.5	1.08	395	30,500	65,000	33,400	8.4
34	53.4	1.14	404	30,300	62,000	33,400	9.8

Conductivity error range : ± 0.5 %

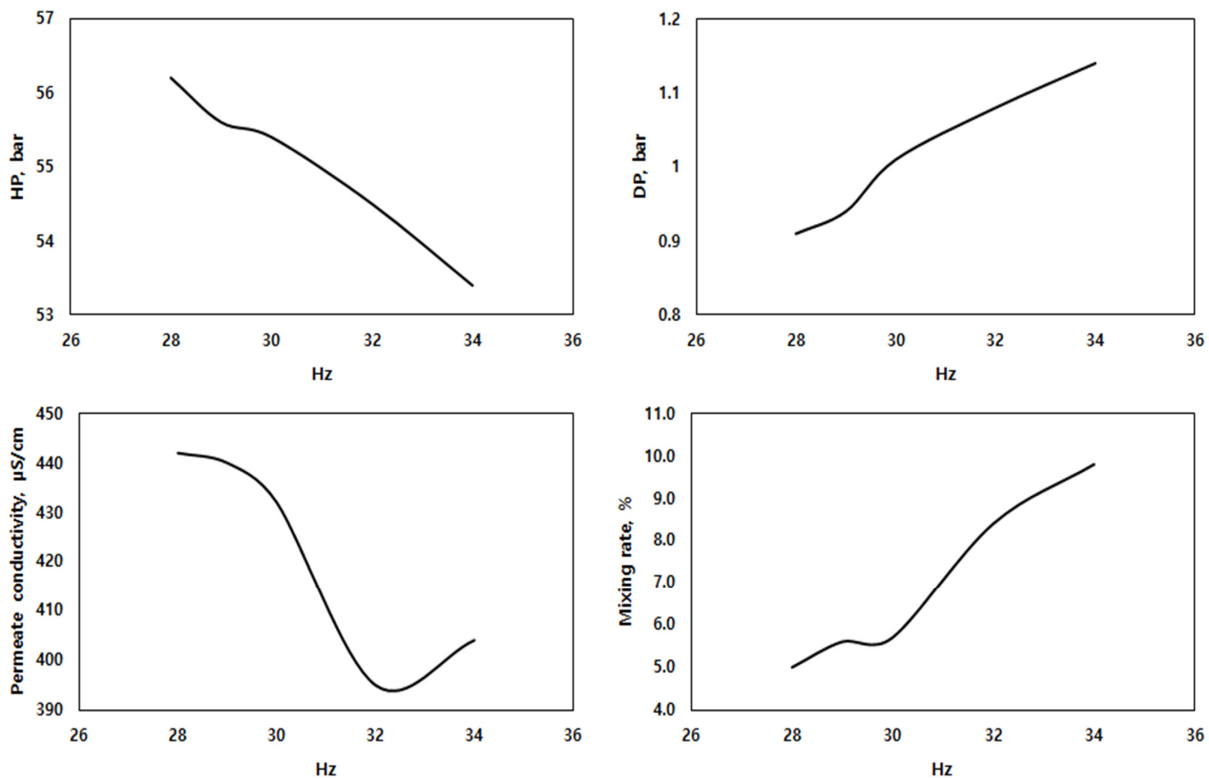


Fig. 4. Results of the parameter(HP, DP, conductivity, mixing rate) with different booster pump Hz.

장 낮은 HP값을 나타내며 Hz가 증가할수록 HP가 낮아지는 경향을 나타낸다. 이전의 XPR의 경우 혼합물이 낮아짐에 따라 원수 측 염농도가 낮아져 HP가 낮게 나타나는 것으로 판단하였으나 PX의 혼합물 그래프를 살펴보면 28~30 Hz 구간에서 가장 낮은 값을 보여 연관성을 확인하기에 어려움이 있었다. 또한, 혼합물이 가장 낮게 나타나는 28 Hz와 30 Hz 에서의 처리수 수질 역시 높게 나타남에 따라 기존 XPR 실험에서 해석했던 것처럼 혼합물이 낮아 원수 측 염농도가 낮아지고 처리수의 수질이 좋아지는 것과 같은 인과 관계

를 설명할 수 없었다.

반면에 DP는 앞선 3.1.1 실험과 같은 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다. Fig. 4의 처리수 수질 그래프를 보게 되면 28 Hz 시 442 μS/cm, 29 Hz 시 440 μS/cm, 30 Hz 시 432 μS/cm, 32 Hz 시 395 μS/cm, 34 Hz 시 404 μS/cm로 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 혼합물 그래프를 보게 되면 부스터펌프 제어속도가 28 Hz 시 5.0%, 29 Hz 시 5.6%, 30 Hz 시 5.7%, 32 Hz 시 8.4%, 34 Hz 시 9.8%로 Hz가 증가함에 따라 혼합물 또한 증가하는 것을 볼 수 있다.

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

Cameron 등은 에너지 회수장치 운전 시 로터의 속도나 Hz가 증가할수록 혼합율이 증가한다고 하였으며(I.B. Cameron, R.B. Clemente, 2008), E사의 PX 에너지 회수장치의 매뉴얼에 따르면 혼합율이 증가할수록 처리수의 수질은 나빠지고, 최적의 유입과 유출의 밸런스가 맞을 때 처리수 수질이 제일 좋게 나온다고 보고하였다. 하지만 실험결과는 혼합율이 가장 낮은 28 Hz에서 최적의 처리수 수질이 나온 것이 아니라 32 Hz의 높은 혼합율일 때 최적의 처리수 수질을 나타낸다. 이는 단순 부스터 펌프 제어속도만이 아닌 유입 측과 유출 측의 밸런스 문제 등 다른 인자의 영향이 있다고 판단된다. 이처럼 각기 다른 경향을 보이는 PX 에너지 회수장치의 최적 운전 조건을 확인하기 위해 각각의 영향 인자를 한 그래프에 정리하여 그 결과를 살펴보기로 한다.

3.1.3 에너지 회수장치 종류별 실험결과 비교분석

Fig. 5와 Fig. 6은 각각의 에너지 회수장치(XPR, PX) 부스터펌프 제어속도 변화에 따른 처리수 수질과 혼합율의 상관성을 파악하기 위해 그래프로 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 5의 XPR 그래프는 부스터펌프 제어속도 변화에 따른 두 가지 인자인 혼합율과 처리수 수질의 변화를 나타낸 것이다. 처리수 수질은 39 Hz일 때 제일 낮은 값을 나타냈으며, 혼합율은 38 Hz전과 39 Hz후에 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6의 PX 그래프는 마찬가지로 부스터펌프 제어속도 변화에 따른 결과 그래프이다. 처리수 수질은 28, 29, 30 Hz일 때 약간 감소하나 거의 비슷한 양상을 나타내고 30 Hz이후 급격히 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 혼합율은 28, 29, 30 Hz일 때 소폭상승하나 거의 비슷한 수준이고, 30 Hz이후에 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. 혼합율 같은 경우 XPR은 급격하게 변하는 양상을 보이고 PX는 초반에 안정적인 그래프 곡선을 보이는데, 이는 두 장치의 로터 단면적 차이 때문에 나타난 결과로 판단된다. 로터 단면적이 큰 경우 상대적으로 부스터펌프 제어속도의 허용범위가 넓어 안정적인 유량과 압력을 토출할 수 있는 반면, 로터 단면적이 작은 경우 회전속도가 급격히 변화하여 XPR 그래프와 같은 결과를 보인 것으로 판단된다.

처리수 수질은 XPR 그래프에서 예상했듯이 혼합율이 낮을 때 유입되는 원수의 염도가 크게 상승하지 않아 처리수 수질이 낮게 나오는 것으로 판단하였으나, PX 그래프를 보게 되면 혼합율이 높은 32 Hz, 34 Hz

에서 더 낮은 처리수 수질을 보인다. 이는 단순 혼합율 만이 처리수 수질에 영향을 미치는 것이 아니라 로터의 회전속도 및 유입유량과 유출유량의 밸런스 등 다른 인자의 영향 또한 고려해야 한다고 사료된다.

이를 통해 부스터펌프 제어속도에 따른 처리수 수질, 혼합율의 상관성은 에너지 회수장치별로 다르다는 것을 확인할 수 있었으며, 다른 인자의 영향을 고려한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

Fig. 7은 두 가지 에너지 회수장치(XPR, PX)의 비교를 위한 그래프로써, 먼저 혼합율을 비교했을 때, 혼합율은 XPR이 3%값을 나타내며 PX는 5%의 값을 나타낸다. 단순 수치상으로는 XPR이 더 작은 값을 나타내며 더 효율이 좋은 것으로 볼 수 있다.

하지만 이는 수치적으로 단순 비교를 한 것이고 실제 운영에 있어서는 상대적으로 부스터펌프의 제어속도의 허용범위가 넓은 PX가 좋을 수 있다. 그 이유는 혼합율이 Hz에 의해 급격히 변하게 되면 정상적인

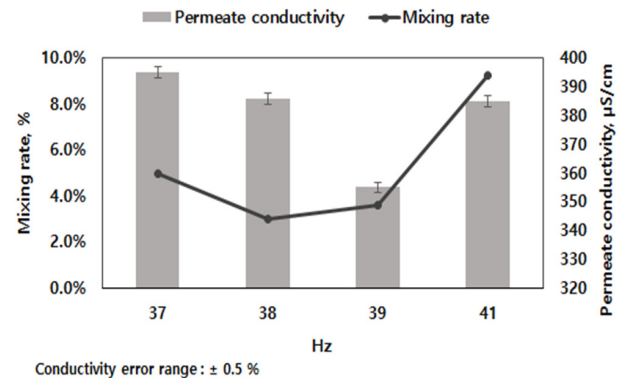


Fig. 5. Variation of mixing rate and permeate conductivity with different booster pump Hz (XPR).

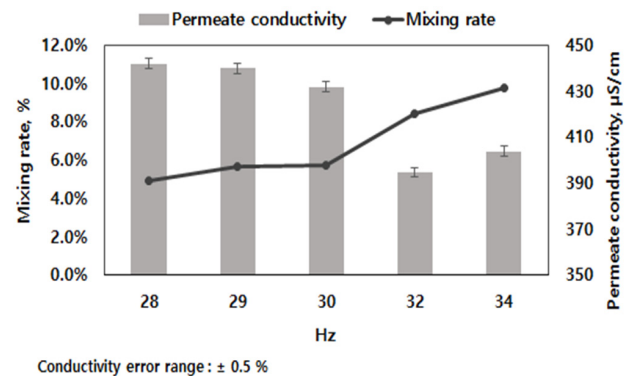
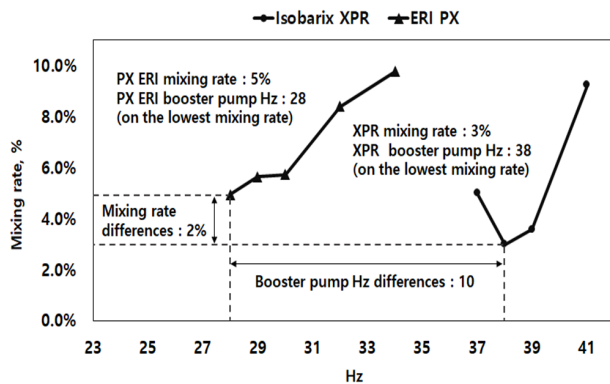


Fig. 6. Variation of mixing rate and permeate conductivity with different booster pump Hz (PX).

**Table 7.** Comparison of parameters with Isobarix XPR and ERI PX

Parameter	Isobarix XPR	ERI PX	Comparison
Booster pump (Hz)	41	34	XPR < PX
Mixing rate (%)	3	5	XPR > PX
Permeate conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	355	395	XPR > PX
Dimensions (cm)	$26.67 \times 11.43 \times 11.43$	$76.2 \times 76.2 \times 27.94$	
Booster pump	Adapt the same model		

Conductivity error range : $\pm 0.5\%$ **Fig. 7.** Comparison of mixing rate and booster pump Hz with different ERD model.

공정운영에 있어서 안정성이 떨어지기 때문이다. 부스터 펌프 제어속도를 비교 하면 수치적으로 XPR의 부스터 펌프 제어속도는 38 Hz이며 PX의 부스터 펌프 제어속도는 28 Hz로 PX의 효율이 좋은 것을 알 수 있다. 하지만, Hz가 낮아도 처리수 수질이 좋지 않으면 후처리 공정의 건설비가 증가하기에 최초 설계 시 목적에 맞는 에너지 회수장치를 선택하는 것이 중요하다고 판단된다.

Table 7은 단기 실험조건에서 최적효율의 혼합율과 처리수 수질을 나타낼 때 크기가 다른 두 가지 에너지 회수장치(XPR, PX)를 비교한 표이다. XPR의 혼합율은 약 3%이며 처리수 수질은 $355 \mu\text{S}/\text{cm}$ 로 두 인자 모두 PX보다 좋은 효율을 보였다. 하지만 부스터 펌프 제어속도는 약 41 Hz로 PX의 34 Hz보다 약 1.2배 정도 높은 수치를 나타낸다. PX 그래프처럼 혼합율이 상승하게 되면 처리수의 수질은 악화되어 후처리 공정 건설비가 증가한다.

반면에 XPR 그래프처럼 부스터 펌프 제어속도가 상승하게 되면 역삼투막 공정의 운영비가 상승하기 때문에 어떤 에너지 회수장치가 더 효율적인지는 장기적인 pilot 운영데이터를 통해 다른 인자와의 추가적인 상관성 연구와 경제성 평가가 필요하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 상용화 되어진 등압교환방식의 에너지 회수장치 효율을 비교하기 위해 생산수 기준 $100 \text{ m}^3/\text{일}$ 규모의 역삼투막 해수담수화 공정에 직접 적용하였고 부스터펌프 제어속도(Hz)에 따른 운전 압력, 혼합율 및 처리수질 등의 변화를 분석하여 최적 운전 조건을 도출하고자 하였다. 도출된 결론은 다음과 같다.

생산수 기준 $100 \text{ m}^3/\text{일}$ 규모의 동일한 pilot plant 와 동일한 원리의 에너지 회수장치(ERD)를 적용하였음에도 에너지 회수장치 크기와 부스터펌프 제어속도(Hz)에 따라 운영효율, 혼합율 및 처리수 수질(conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$)이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 에너지 회수장치 내부에서 농축수 측 압력 전달을 위해 접촉되는 부분인 LP 측과 HP 측의 단면적 차이에 의해 발생되며 이로 인해 전달되는 압력과 혼합율의 변화가 생겨 나타나는 현상으로 사료된다.

또한, 에너지 회수장치내의 유입 측과 유출 측의 밸런스가 맞지 않아 운영 효율성에 영향을 주는 인자들이 변화하는 것이라 판단된다. 역삼투막 해수담수화 공정 설계 시, 에너지 회수장치의 최적화를 위해서는 앞서 진행한 실험을 토대로 얻어진 영향인자들 뿐 아니라, 다른 인자와의 상관관계도 고려하여 최적 조건을 확인할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 지원 국토교통기술사업화 연구비(과제번호 17IFIP-C088924-04)에 의해 수행되었습니다.

References

Avlonitis, S.A., Kouroumbas, K., and Vlachakis, N. (2003).

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

- Energy consumption and membrane replacement cost for seawater RO desalination plants, *Desalination.*, 157, 151-158.
- Cameron, I.B., Clemente, R.B. (2008). SWRO with ERI's PX Pressure Exchanger device-a global survey, *Desalination.*, 221, 136-142.
- Dark, A., Adatoz, M. (2014). Energy recovery consideration in brackish water desalination, *Desalination.*, 339, 34-39.
- Farooque, A.M., Jamaluddin, A.T.M., and Al-Reweli, A.R. Saline Water Desalination Research Institute. (2004). Comparative study of various energy devices used in swro process, Issued as Technical Report No. TR.3807/EVP 02005.
- Guirguis, M.J. (2011). Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis on Efficiency and Economical Analysis of Isobaric versus Centrifugal Devices, Master's Thesis, University of South Florida, Florida, USA.
- 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 systems, *J. Korean Soc. Power Syst. Eng.*, 16, 5-9.
- Kim, I.S., Oh, B.S. (2008). Technologies of Seawater Desalination and Wastewater Reuse for Solving Water Shortage, *Environ. Eng. Res.*, 30, 1197-1202.
- Ko, E.O., Moon, J.D., and Park, J.M. (2010). Status-of-arts of Desalination Technology, *Membrane J.*, 20, 185-196.
- Mohamed, E.S., Papadakis, G., Mathioulakis, E., and Belessiotis, V. (2005). The effect of hydraulic energy recovery in a small sea water reverse osmosis desalination system; experimental and economical evaluation, *Desalination.*, 184, 241-246.
- Peñate, B., García-Rodríguez, L. (2011). Energy optimisation of existing SWRO (seawater reverse osmosis) plants with ERT(energy recovery turbines): Technical and thermoeconomic assessment, *Energy.*, 36, 613-626.
- Qi, B., Wang, Y., Xu, S., Wang, Z., and Wang, S. (2012). Operating Energy Consumption Analysis of RO Desalting System: Effect of Membrane Process and Energy Recovery Device (ERD) Performance Variables, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51, 14135-14144.
- Song, D., Wang, Y., Lu, N., Liu, H., Xu, E., and Xu, S. (2015). Development and stand tests of reciprocating-switcher energy recovery device for SWRO desalination system, *Desalin. Water Treat.*, 54, 1519-1525.
- Song, D., Wang, Y., Xu, S., Wang, Z., Liu, H., and Wang, S. (2014). Control logic and strategy for emergency condition of piston type energy recovery device, *Desalination.*, 348, 1-7.
- Stover, R.L. (2007). Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices, *Desalination.*, 203, 168-175.
- Sun, J., Wang, Y., Xu, S., Wang, S., and Wang, Y. (2009). Performance prediction of hydraulic energy recovery (HER) device with novel mechanics for small-scale SWRO desalination system, *Desalination.*, 249, 667-671.
- Voutchkov, N. (2005). SWRO desalination process: on the beach-seawater intakes, *Filtsep.*, 42, 24-27.
- Wang, X., Wang, Y., Wang, J., Xu, S., Wang, Y., and Wang, S. (2010). Comparative study on stand-alone and parallel operating schemes of energy recovery device for SWRO system, *Desalination.*, 254, 170-174.
- Wang, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Qi, B., Xu, S. and Wang, S. (2012). Pilot tests of fluid-switcher energy recovery device for seawater reverse osmosis desalination system, *Desalin. Water Treat.*, 48, 310-314.
- Wu, L., Wang, Y., Xu, E., Wu, J., and Xu, S. (2015). Employing groove-textured surface to improve operational performance of rotary energy recovery device in membrane desalination system, *Desalination.*, 369, 91-96.