Journal of Korean Society of Water and Wastewater
Vol.25, No.4, pp.573-579, August, 2011

상하수도학회지, 논문
25권 4호, pp.573-579, 8월, 2011

역삼투 방식의 해수담수화 플랜트 에너지 회수 기술

Energy Recovery Technologies for Seawater Reverse Osmosis Desalination Systems : A Review

김영민[1] · 이원태[1] · 최준석[1] · 강만곤[2] · 이상호[3*]

Kim, Youngmin[1] · Lee, Wontae[1] · Choi, June-Seok[1] · Kang, Man Gon[2] · Lee, Sangho[3*]

1 한국건설기술연구원 건설환경연구실, 2 효성굿스프링스, 3 국민대학교

(2011년 5월 18일 접수 ; 2011년 7월 18일 1차 ; 2011년 8월 3일 2차수정 ; 2011년 8월 10일 채택)

Abstract

As rapid advances in technologies continue, seawater reverse osmosis (SWRO) desalination systems are now more energy-efficient than conventional thermal processes. Some SWRO desalination plants can achieve the specific energy consumption (SEC) below 2 kWh/m^3. Along with the development of new membranes and high-performance pumps, energy recovery devices (ERD), which recover the hydraulic energy of brine, have been developed to enhance energy efficiency. In this work, we reviewed general aspects of ERD technologies and their market trends. The advantages and disadvantages of various EDR technologies were compared to explore the future directions of ERD development.

Key words : Energy Recovery Device, Centrifugal, Isobaric, Pressure Exchange, Reverse Osmosis

주제어 : 에너지 회수 장치, 원심식, 양변위식, 압력 교환, 역삼투 공정

1. 서 론

전 세계적으로 물 부족에 대한 대응기술로서 지표수, 지하수의 개발과 더불어 해수 및 기수(brackish water)의 담수화를 통해 공업용수와 생활용수를 확보하려는 노력이 계속되고 있다. 해수 담수화는 지난 40년 동안 지속적인 기술개발을 통해 보조 수자원의 공급 역할을 성공적으로 수행해 오고 있다(Gleick, 2006). 전 세계적으로 2016년까지 새로운 담수화 플랜트를 위한 예산으로 170억 달러 이상이 지출될 것으로 예상되고 있으며, 이중 역삼투 방식(RO; Reverse Osmosis)이 130억 달러를 차지할 것으로 기대되고 있다(Global Water Intelligence, 2010). 플랜트 용량 측면에서도 2007년 680만 m^3/day에서 2009년 5,000만 m^3/day규모로 큰 폭의 상승을 보여주고 있다(Lee, 2011).

일반적으로 해수담수화는 해수를 증발시켜 담수를 확보하는 열 증류 방식과 분리막을 활용하여 염분을 제거하는 막 여과 방식으로 구분할 수 있다. 1960년대 이후 중동 지역을 중심으로 열 증류 방식이 주를 이루었으나, 현재 전 세계 담수 플랜트의 61%가 RO 방식을 이용하는 등 막 여과 방식이 시장을 주도하고 있다(**Fig. 1**).

열 증류방식의 에너지 요구량이 7~14 kWh/m^3인 반면, 막 여과 방식은 2~6 kWh/m^3이다(Subramani, 2011). 에너지 소비 측면에서 열 증류방식에 비해 효과적이나 RO 공정에 필요한 유입수의 가압 과정 등에서 에너지 소비로 인

* Corresponding author Tel:+82-2-910-4529, E-mail: sanghlee@kookmin.ac.kr(Lee, S.)

해 운전비용이 여전히 높은 실정이다. SWRO (seawater reverse osmosis desalination) 플랜트에서 에너지 비용이 전체 용수생산 최종 비용의 50%까지 소요되고 있다(Penate, 2011).

SWRO 공정의 에너지 사용 절감은 시스템의 설계 최적화, 고효율 펌프 개발, 에너지 회수, 고 기능성 막 소재 개발 등 다양한 요소에 영향을 받는다(Subramani, 2011). 막 투과율(permeate flux)과 에너지 회수율의 향상, 막 오염 및 농도 분극의 제어를 통해 1970년 12 kWh/m^{3}에서 2006년 2 kWh/m^{3}이하의 에너지 소비가 가능하게 되었다(Wiseman, 2006). 이론적으로 해수 담수화를 위한 최소 에너지 사용량은 약 1.08 kWh/m^{3}이나(Voutchkov, 2010), 현재 일반적인 대용량 SWRO 플랜트의 생산수량에 대한 에너지 소비량의 비율인 SEC (specific energy consumption)는 2~5 kWh/m^{3}에 그치고 있는 실정이다. 본 논문에서는 SWRO 공정에서 고압의 농축수로부터 에너지를 회수하는 ERDs (Energy Recovery Devices) 기술 및 시장 동향, ERD를 활용한 기존 플랜트 공정의 성능개선(retrofitting) 등을 소개함으로써 국내 SWRO 플랜트의 에너지 효율의 향상 방안을 모색하고자 한다.

2. SWRO ERDs 기술 소개

SWRO 담수화 공정은 원수의 취수, 유입수의 가압을 위해 고압 펌프(High pressure pump), 승압 펌프(Booster pump) 등을 사용한다(**Fig. 2**). 이들 펌프들은 공정에 필요한 총 에너지 비용의 40% 이상(Service, 2006; Souari, 2007), 총 유지관리 비용의 75% 이상을 소모하는 것으로 알려져 있다(Farooque, 2008). 따라서 SWRO 담수화 공정의 경제성 확보를 위해서는 에너지 회수를 통해 에너지 충당에 필요한 비용을 절감하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 에너지 회수는 RO 유닛의 고압 농축수에 포함된 수리학적 에너지(hydraulic energy)를 기계적 에너지(mechanical energy)로 변환한 후 다시 수리학적 에너지로 전환하는 방식과, 직접 농축수의 수리학적 에너지를 회수하는 방식으로 구분할 수 있다. 전자는 터빈에서 발생되는 원심력을 이용하므로 원심식(centrifugal type)으로, 후자는 양변위(positive displacement type) 혹은 등압식(isobaric type)으로 지칭하고 있다(**Fig. 3**).

원심식 ERDs의 경우 펠톤 터빈(Pelton turbine), 터보차저(Turbocharger) 등이 사용되고 있으며, 양변위식은

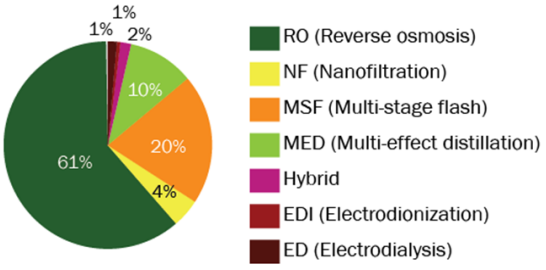


Fig. 1 해수담수화 기술 별 시장 동향 (Global Water Intelligence, 2008)

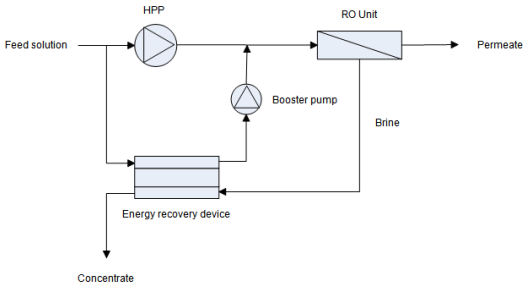
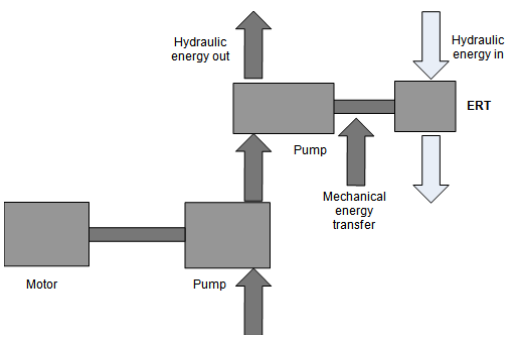
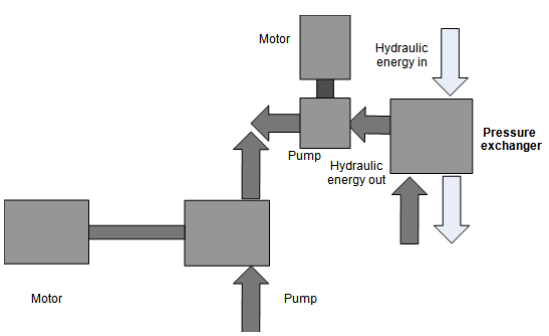


Fig. 2 SWRO 공정 개념도



(a) Centrifugal type



(b) Isobaric type

Fig. 3 ERDs 에너지 전달 개념도(Harris, 1999)

상하수도학회지, 논문
25권 4호, pp.573-579, 8월, 2011

덕트(duct) 내 로터(rotor)의 회전, 챔버(chamber) 내부의 피스톤 운동으로 압력을 직접 전달하는 압력 교환기(pressure exchanger)가 일반적으로 사용되고 있다.

현재까지 운전 중인 대용량 해수담수화 플랜트의 대부분이 양변위식 ERDs를 사용하고 있다(Greenlee, 2009). 이는 원심식의 경우 에너지 전달 과정에서 임펠러(impeller) 회전 등으로 인해 기계적인 에너지 손실이 발생하기 때문이다(Harris, 1999).

원심식은 터보 차저와 같이 적용 용량이 제한적이고 좁은 흐름(narrow flow) 및 압력 운전 조건에 적합하다(Stover, 2004; Oklejas, 2005; Stover, 2007). 터보 차저의 효율은 70-80% 범위이며, 펠톤 터빈 ERD의 효율은 70-90%이다(Penate, 2011). 원심식 ERD를 통해 확보 가능한 SEC는 5.00 kWh/m^3이하로 알려져 있다(Woodcock, 1981).

양변위식 ERD는 농축수와 시스템 유입부 사이에 피스톤 등의 물리적 격벽(barrier)의 유무에 따라 구분한다. 격벽이 있는 타입은 Flowserve사의 DWEER (Dual Work Exchanger Energy Recovery)가 있으며, 없는 타입은 ERI사의 PX (Pressure Exchanger) 등이 있다. 양변위식 ERD는 원심식에 비해 내부적인 기계 손실이 없으므로 95% 이상의 효율을 보이며, 2.50 kWh/m^3이하의 SEC을 제공할 수 있다(MarHarg, 2002; Dundorf, 2007). **Table 1**에 대표적인 원심식 ERD인 펠톤 터빈과 양변위식의 일반적인 특성을 정리하였다.

3. ERDs 효율 평가

3.1 ERD 효율

ERD는 고압의 농축수에서 에너지를 회수하는 장치의 특성 상 모터, 펌프, 밸브 등의 기기 효율, 덕트 및 실린더 등 검사 체적에서의 에너지 전달률에 영향을 받는다.

원심식의 경우 펌프, 터빈 등의 기기 손실로 인해 ERD의 효율은 낮은 반면 유지관리가 용이하고, 양변위식의 경우 원심식에 비해 기기 손실이 적어 효율은 높으나 1~3%의 농축수 혼합(brine mixing)에 따라 에너지 소비의 증가가 우려된다(Cameron, 2008).

아래 식은 ERD에서 손실되는 유량 및 압력 손실을 계산한다. ERI사의 PX의 경우 유입 농축수의 약 1%가 베어링 윤활(bearing lubrication) 중 손실되며, 압력은 PX 내부의

Table 1 ERDs 종류 별 특성 비교 (Penate, 2011)

구분	Pelton turbine	Isobaric ERDs
트레인 용량	5,000 m^3/d이하	5,000 m^3/d이상
회수율	45 - 50%	37 - 45%
HPP 전력 수요	유입수의 100%	유입수의 34 - 45%
승압 펌프 수	n/a	ERD 당 1기
토목 공사	○	×
유입수 염도 증가	×	○
농축수 관 추가 설치	○	
에너지 회수 시 저압차	n/a	○
에너지 회수 시 고압차	n/a	○
누수	n/a	○
평균 효율	90% 이하	90 - 97%
SEC	3 - 4 kWh/m^3	2-4 kWh/m^3
에너지 절감 비율(설치 후)	35-42%	55-60%

n/a : not applicable, ○ : Yes, × : No

유동 마찰(flow friction)로 인해 손실이 발생된다(Cameron, 2008).

$$ERD\ Efficiency = \frac{\sum(Pressure \times Flow)_{out}}{\sum(Pressure \times Flow)_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

3.2 SEC

해수 담수화에 있어 에너지 소비는 유입 원수의 농도, 담수 방법, 원수의 물리화학적 특성, 에너지 회수 장치의 유무 및 종류, 운전 조건, 담수 플랜트의 위치, 플랜트 용량 등에 기인한다(Avlonitis, 2003). 에너지 비용이 총 용수생산 비용의 약 50%를 차지하므로 SWRO 플랜트의 운영 효율을 향상시키고 막의 내구성(lifetime)을 향상시키기 위한 산업 수요가 계속되고 있다.

ERD 자체의 기계적 효율뿐 아니라 에너지 회수 효율을 높이는 것은 매우 중요한 문제이므로 관련 분야 연구와 기술 혁신의 초점은 SEC의 감소에 집중되고 있다(Penate, 2011). RO/NF 담수화에 있어서 SEC는 목표 염 농도를 만족하는 처리수(permeate) 1 m^3을 생산하는 데 필요한 에너지로 정의된다(Zhu, 2009).

$$SEC = \frac{W_{pump}}{\eta_p \cdot Q_p} \quad (2)$$

여기서 η_p: 펌프 효율, Q_p: 처리 수량(m^3/s), W_{pump}: 펌프 일률(W)

$$W_{pump} = \triangle P \times Q_f \quad (3)$$

여기서 $\triangle P$: 유입 원수에 가해진 압력($=P_f - P_o$, Pa) : Q_f : 유입수량(m^3/s), P_f : 막 모듈 입구 압력(Pa), P_o : 유입 원수 압력(대기압, Pa)

Table 2 대표적인 양변위식 제조사 및 제품

제조사	대표 제품
ERI	PX
Flowserve	Dweer™
the Canary Islands	RO kinetic
KSB	SalTec DT
Danfoss	iSave

RO 공정 설계인자인 회수율($Y_f = \frac{Q_p}{Q_f}$)에 대하여 표현하면 아래와 같다.

$$SEC = \frac{\triangle P}{\eta_p \cdot Y_f} \quad (4)$$

4. 관련 시장 동향

전 세계 SWRO 플랜트의 40%가 15 MGD 이상으로 대용량화(Global Water Intelligence, 2010)되면서 에너지 회수를 위해 양변위식 ERDs가 시장을 주도해왔다. 현재까지 시장에서 경쟁하고 있는 압력 교환방식의 제조사는 ERI, Flowserve 등이 있으며(**Table 2**), 이들 제조사의 제품들은 신규 중규모 플랜트에서 피스톤 타입의 고압펌프와 연계하여 1.80 ~ 2.20 kWh/m^3의 SEC를 거둔바 있다(Dundorf, 2007; Penate, 2010).

특히 ERI의 경우 전 세계적으로 70% 이상의 신규 플랜트 시장 점유율과 7,000기 이상의 ERDs가 설치 혹은 계약되어 연간 900 MW의 에너지를 절감하는 것으로 발표하고 있다(Energy Recovery INC., 2011).

Global Water Intelligence에 따르면 전 세계 담수시장의 49%를 점유(Matthews, 2009)하고 있는 중동 지역의 경우 Turbo booster 공급사인 FEDCO와 PEI의 시장 점유율과 성장세가 두드러지는 것을 볼 수 있다(**Fig. 4**). FEDCO는 사우디아라비아의 Jeddah Phase 3지역 249,000 m^3/d규모의 계약이 성사 단계에 있다(Global Water Intelligence, 2011).

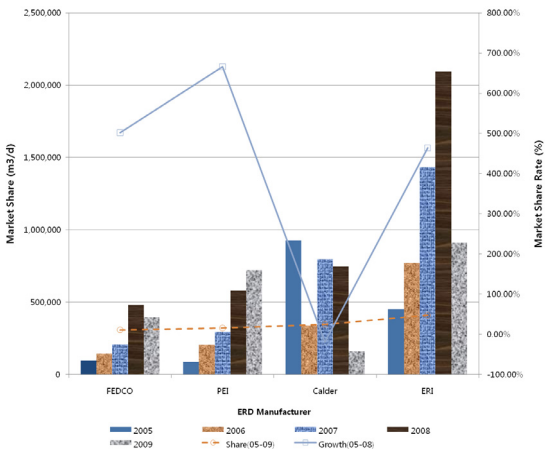


Fig. 4 중동지역 ERD 시장 점유율(m^3/d) (Global Water Intelligence, 2011)

상하수도학회지, 논문
25권 4호, pp.573-579, 8월, 2011

이상과 같이 ERD 시장은 아직까지 양변위식이 주도하고 있으나, 해수담수화 플랜트의 대형화 추세에 따라 향후 시장 내 ERD 제조사의 계약 실적에 따라 가변적일 것으로 판단된다.

5. 기존 플랜트 공정 성능개선

SWRO 플랜트의 설치 밀도가 높은 카나리 제도(Canary archipelago, 22.73 km^2/plant)의 경우 공공 플랜트 시설들의 대부분이 양변위식 도입 전에 설치되어 점진적으로 에너지 회수 시스템을 최적화, 개선하고 있다(Penate 2011). 펠톤 터빈을 활용한 원심식 ERD (ERTs)는 낮은 회수율 조건에서는 유량, 압력, 회전속도 및 장치 효율 등 다양한 영향으로 인해서 적정 운전조건을 찾기 위해 보다 많은 양의 유입수를 양수하게 된다. 에너지 소비를 줄이기 위한 해법으로써 현재 ERTs로 설치하는 플랜트의 경우 회수율 45% 이상이 되도록 설계되는 실정이다(Penate, 2011). 총 생산수량 145.8 m^3/h의 Sharm el-Sheikh RO 플랜트에 대하여 ERD 설치 방식에 따른 생산수량 당 총비용(specific total cost)을 비교하였다. 압력 교환 방식의 설치로 29.2%의 단위 생산비용이 증가하였으나, 총비용은 미설치 시 0.898 \$/m^3, 펠톤 터빈식 0.683 \$/m^3, 압력 교환식 0.572 \$/m^3로 감소되었다(Nafey, 2010).

이상과 같이 대용량 플랜트를 중심으로 기존의 터빈 방식 ERD를 양변위식으로 대체하여 플랜트의 에너지 회수 효율을 개선(retrofitting)하고 있다. Table 3은 10,000 m^3/d 규모의 ERT 방식 플랜트를 양변위식으로 변경할 경우의 기대 효과를 열동역학적 분석을 통해 제시하였다(Penate 2011).

6. 결 론

RO 기술의 발전과 함께 SWRO 담수화 플랜트 기술도 점차 저에너지 고효율화되고 있다. SEC 기준으로 2 kWh/m^3 이하의 에너지 소비가 가능한 단계에 이르렀다. 그러나 현재까지 확보 가능한 최고 수준이므로 아직까지 공정에 필요한 유입수의 가압 등 에너지 소비로 인한 운전비용이 여전히 높다. 국내 광역상수도의 생활용수와 일반적인 RO 방식(시설용량 100㎥/d)의 담수 생산단가를 비교할 때 광역상수도보다 4~5배, 공업용수(시설용량 1만㎥/d 기준)는 약 2배 정도 비싸 현재로서는 경제성이 낮은 실정이다(해수담수화플랜트사업단, 2007).

Table 3 ERT 방식과 양변위식 간 비교(Penate, 2011)

구분	펠톤 터빈	고압펌프+ 양변위식 ERD	승압펌프+고압펌프+양변위식 ERD	Higher RO 트레인+ 양변위식 ERD	양변위식 ERD (승압펌프 대용)
총용량(m^3/h)	2*5,000	10,000	10,000	2*7,200	2*5,000+2*2,693
vessels/elements 수	104/728	104/728	104/728	150/1,050	104/728~62/434
총 유입수량(m^3/h)	926	926	926	1,334	1,436
필요 고압펌프 수	2	1	1	2	2
필요 승압펌프 수	0	1	2	1	0
토목공사 필요 여부	n/a	↔	↔	↑	↑↑
추가면적 소요	n/a	↔	↑	↑↑	↑↑
수리학적 특성 변화	n/a	↑↑	↑	↑	↑↑
고전압 전기 개조	n/a	↔	↔	↔	↑
저전압 전기 개조	n/a	↑	↑↑	↑	↑
농축수 관로 추가 설치	n/a	no	no	no	yes
에너지 요구량(kW)	1,363.6	1,014.2	1,029.2	1,424.08	1,933.2
SEC (kWh/m^3)	3.27	2.43	2.47	2.39	3.02
용량 증가	n/a	0%	0%	44.2%	53.8%
에너지 절감 범위	n/a	25.6%	24.5%	0%	0%

n/a : not applicable
↔ nothing ↑ not too much ↑↑ relevant

따라서 SWRO 플랜트의 에너지 소비를 줄이고 경제적인 시설 운영을 위해서는 에너지 회수 기술을 반드시 고려할 필요가 있다. ERD를 설치할 경우에는 기기 자체의 효율뿐만 아니라 운전 기간 및 목표 회수율, ERD 설치에 따른 추가 공사 및 비용, 유지관리 등을 고려하여 SWRO 플랜트의 전체적인 효율을 평가해야 한다.

선진국의 경우 SWRO 플랜트 기술의 대형화 추세에 부응하여 ERI사의 Titan 1200, Flowserve 사의 DWEER model 1550, ROVA 300 등 대용량 ERD가 최근 개발 중이다. 국내에도 SWRO 플랜트에 대한 국산 소재 기술이 활발히 개발 중이므로, 국내 실정에 맞는 에너지 회수 기술이 조속히 보급되기를 기대해 본다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 플랜트기술고도화사업의 연구비 지원(과제번호 #07해수담수B03-02)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

Zhu, A., Christofides, P.D. and Cohen, Y. (2009) Minimization of energy consumption for a two-pass membrane desalination: Effect of energy recovery, membrane rejection and retentate recycling, *Journal of Membrane Science*, **339**, pp.126-137.

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. (2008) Parametric analyses of energy consumption and losses in SWCC SWRO plants utilizing energy recovery devices, *Desalination*, **219**, pp.137-159.

Subramani, A., Badruzzaman, M., Oppenheimer, J. and Jacangelo, J.G. (2011) Energy minimization strategies and renewable energy utilization for desalination : review, *Water Research*, **45**, pp.1907-1920.

Nafey, A.S., Sharaf, M.A. and Rodr guez, L. G. (2010) Thermo-economic analysis of a combined solar organic Rankine cycle-reverse osmosis desalination process with different energy recovery configurations, *Desalination*, **261**, pp.138-147.

Penate, B., Fuente, J.A. and Barreto, M. (2010) Operation of the RO kinetic energy recovery system based on the Singapore Project, *Desalination*, **252**, pp.179-185.

Penate, B. and Rodriguez, L.G. (2011) Energy optimization of existing SWRO (seawater reverse osmosis) plants with ERT (energy recovery turbines): Technical and thermoeconomic assesment, *Energy*, **36**, pp.613-626.

Harris, C. (1999) Energy recovery for membrane desalination, *Desalination*, **125**, pp.173-180.

Woodcock, D.J. and White, I.M. (1981) The application of Pelton type impulse turbines for energy recovery on seawater reverse osmosis system, *Desalination*, **39**, pp.447-458.

Energy Recover INC (2011) Industry Leadership, http://www.energyrecovery.com _/index.cfm/0/0/20-Desalination-Industry-Leadership.html.

Global Water Intelligence (2008), *Desalination Market.*

Global Water Intelligence (2010), *Desalination Market.*

Global Water Intelligence (2010), *IDA Desalination Yearbook*

Global Water Intelligence (2009) *Calder suffers the vagaries of the ERD market,* Market Leading Analysis of the International Water Industry, http://www.globalwaterintel.com/archive/10/9/general/calder-suffers-vagaries-erd-market.html.

Cameron, I.B. and Clemente, R.B. (2008), SWRO with ERI's PX Pressure Exchanger device - a global survey, *Desalination*, **221**, pp.136-142.

MacHarg, J.P. (2002) Retro-fitting existing SWRO systems with a new energy recovery device, *Desalination*, **153**, pp. 253-264.

Lee, K.P. , Arnot, T.C. and Mattia, D. (2011) A review of reverse osmosis membrane materials for desalination-Development to date and future potential, *Journal of Membrane Science*, **370**, pp.1-22.

Greenlee, L.F., Lawler, D.F., Freeman, B.D., Marrot, B. and Moulin, P. (2009) Reverse osmosis desalination:water sources, technology, and today's challenges, *Water Research*, **43**, pp.2317-2348.

Souari, L. and Hassairi, M. (2007) Seawater desalination by reverse osmosis: the true needs for energy, *Desalination*, **206**, pp.465-473.

Oklejas, M., Stidham, K. and Weidmann, M. (2005) Improve energy recovery in gas processing plant using an HPT, *Hydrocarbon Process*, pp.43-46.

Voutchkov, N. (2010) *Membrane Seawater Desalination - Overview and Recent Trends*, International

상하수도학회지, 논문
25권 4호, pp.573-579, 8월, 2011

Desalination Association Conference, Huntington Beach, California.

Gleick, P.H. (2006) *The World's Water 2006-2007*, The Biennial Report on Freshwater Resources, Island Press.

Stover, R.L. (2004) Development of a fourth generation energy recovery device. A 'CTO's notebook', *Desalination*, **165**, pp. 313-321.

Stover, R.L. (2007) Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices, *Desalination*, **203**, pp.168-175.

Service, R.F. (2006), Desalination freshens up, *Science*, **313**, pp.1088-1090.

Wiseman, R. (2006) *The International Desalination and Water Reuse Quarterly*, Faversham House Group Ltd.

Avlonitis, S.A., Kouroumbas, K. and Vlachakis, N. (2003) Energy consumption and membrane replacement cost for seawater RO desalination plants, *Desalination*, **157**, pp.151-158.

Matthews, S. (2009) *Desalination in Middle East set to grow*, http://www.arabianoilandgas.com/article-5236-desalination_in_middle_east_set_to_grow/.

Dundorf, S., MacHarg, J. and Seacord, T.F. (2007) *Optimizing lower energy seawater desalination, The affordable desalination collaboration*, IDA World congress, Gran Canaria, Spain.

해수담수화플랜트사업단 (2007), 해수담수화플랜트 사업단 상세기획 보고서.