J. Korean Soc. Environ. Eng., 38(5), 255~268, 2016
Original Paper
http://dx.doi.org/10.4491/KSEE.2016.38.5.255
ISSN 1225-5025, e-ISSN 2383-7810

국내 및 해외의 해수담수화 기술 비교분석

Comparative Analysis of Seawater Desalination Technology in Korea and Overseas

황문현 · 김인수†
Moon-Hyun Hwang · In S. Kim†

광주과학기술원 글로벌담수화연구센터
Global Desalination Research Center, Gwangju Institute of Science and Technology

(Received February 29, 2016; Revised April 6, 2016; Accepted April 11, 2016)

Abstract : Climate change has increased the need to secure a new water resource in addition to the traditional water resources such as surface water and ground water. The seawater desalination market is growing sharply in accordance with this situation in Korea, "seawater engineering & architecture of high efficiency reverse osmosis (SEAHERO)" program was launched in 2007 to keep pace with world market trend. SEAHERO program was completed in 2014, contributed to turn the domestic technology in evaporative desalination technology to RO desalination technology. Currently, it is investigated that the average specific energy consumption of the whole RO plant is around 3.5 kWh/m^3. The Busan Gi-jang plant has shown 3.7~4.0 kWh/m^3, including operational electricity for plant and maintenance building. Although not world top level, domestic RO technology is considered to be able to compete in desalination market. Separately, many researchers in the world are developing new technologies for energy savings. Various processes, forward osmosis (FO), membrane distillation (MD) process are expected to compete with RO in the future market. In Korea, FO-RO hybrid process, MD and pressure retarded osmosis (PRO) process are under development through the research program in Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). The desalination technology level is expected to decrease to 2.5 kWh/m^3.
Key Words : *Seawater Desalination, Enegy Efficiency, SeaHERO Program, FO-RO Hybrid, Membrane Distillation*

요약 : 기후변화는 현재 사용되고 있는 지표수 및 지하수 등의 담수자원 외에도 새로운 수자원을 확보해야할 필요성을 증가시켰다. 해수담수화 시장은 이러한 변화에 따라서 매년 급증하고 있는 상황이며, 이에 발맞추어 2007년 해수담수화 플랜트 사업단이 국내에서 출범하였다. 2014년에 종료된 해수담수화플랜트 사업단은 증발식 해수담수화 기술에 치우친 국내 기술을 역삼투방식 해수담수화 기술로 선회할 수 있도록 이끌었다. 현재 세계 최고의 역삼투방식 해수담수화 기술 에너지 효율성은 약 3.5 kWh/m^3 전후로 조사된다. 기장 플랜트의 수준은 3.8~4.0 kWh/m^3 수준으로 비록 세계 최고 수준에는 미치지 못하나, 선두권이라 하기에는 부족함이 없는 것으로 사료된다. 한편, 세계 역삼투방식 해수담수화 기술은 평준화 수준에 이른 것으로 사료되며, 에너지 저감을 위해 새로운 기술을 개발하고자 경쟁중이다. 미래 해수담수 시장에서 경쟁할 것으로 예상되는 기술로 정삼투공정, 막증발법 등이 있으며, 이를 위해 국내에서도 정역삼투 융합공정 개발, 막증발법 및 압력지연삼투등의 기술개발을 진행중에 있다. 이를 통하여 국내 기술수준을 2.5 kWh/m^3까지 낮출 것으로 기대된다.
주제어 : 해수담수화, 에너지 효율성, 해수담수화플랜트 사업단, 정역삼투 융합공정, 막증발 공정

1. 서 론

세계 해수담수화 시장에서의 지배적인 기술은 2000년 이전까지 다단플래쉬 공정(Multi-Stage Flush, MSF)으로 대변되는 증발식이 지배적인 기술이었다. 이것은 타지역에 비해 에너지 비용이 저렴한 중동지역을 중심으로 해수담수화 기술이 발전하였으며, 장기간 운영 등을 통해 안정성이 입증된 기술이기 때문이었다. 그러나 비록 쉐일가스 개발 등의 요인으로 인하여 하락하기는 하였으나, 2011년 배럴당 126.65$를 고점을 나타내었던 시점까지 에너지 비용의 증가는 해수담수화 시장에서의 기술 트랜드를 증발식 기술에서 에너지 비용이 저렴한 역삼투 기술로 변화시키기에 충분하였다. Desalination Market 2016에 따르면, 현재 발주되거나 혹은 예상되는 해수담수화 플랜트의 90%가 역삼투공정이다.[1)] 이러한 이유는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 증발식에 비해 뛰어난 역삼투공정의 가격 경쟁력 때문이다.[2)] Wittholz는 해수담수화 플랜트 10,000~500,000 m^3/d까지 생산수 단가와 시공비용을 비교한 결과 Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) 공정이 증발식에 비해 시공비용 8.4~60%, 생산수 단가가 23~38%까지 저렴한 것으로 보고하였다.[3)] 따라서, 해수담수 시장은 점차 역삼투 기술로 변화되었으며, 에너지 면에서 효율화되었다.

현재 역삼투 해수담수화 기술은 완숙기에 들어서 있는 것으로 사료된다. Fig. 2는 이러한 경향을 나타내는 것으로 호주에서 생산되는 역삼투방식 해수담수화 공정 생산수 단가를 제외하면 2010년까지 건설된 플랜트의 생산수 단가는 0.5-0.7 $/$m^3$ 수준에서 평준화되어 있다는 것을 보여준다.[4)] 또한 역삼투 공정의 생산수 단가는 기술적인 능력 외에도

† Corresponding author E-mail: iskim@gist.ac.kr Tel: 062-715-3381 Fax: 062-715-2434

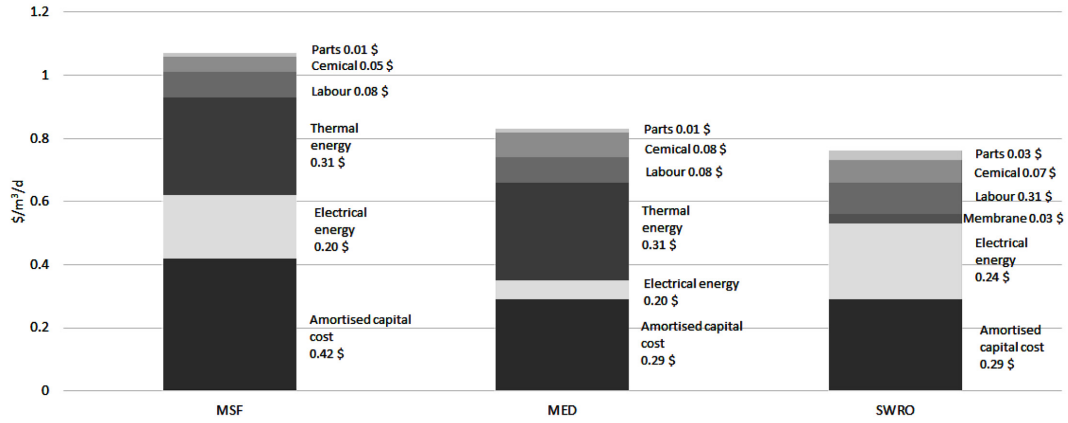

Fig. 1. Comparison of the water production cost in desalination processes.[2)]

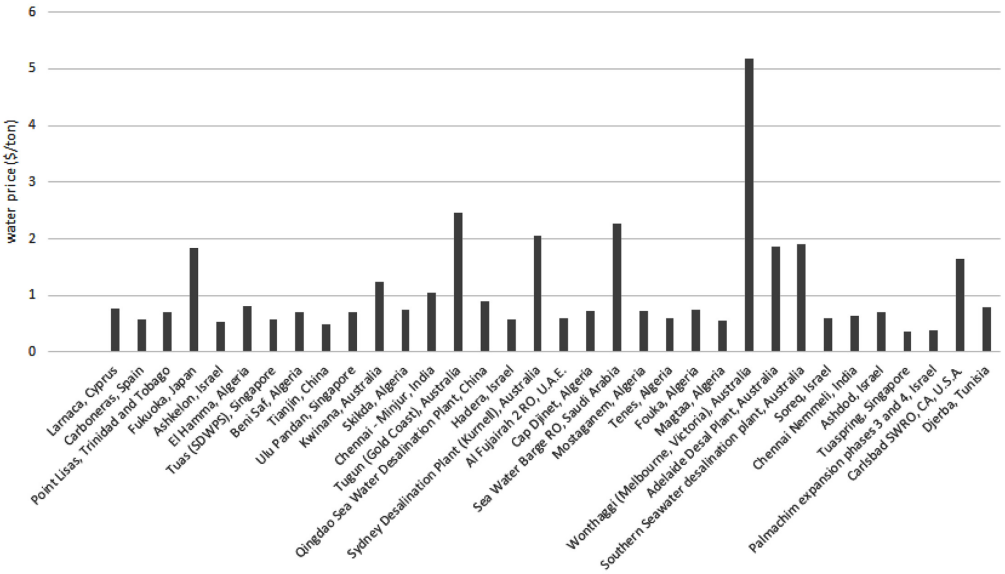

Fig. 2. Water price of SWRO plants in the world.[4)]

수온, 염도, 해수 오염정도 등 플랜트 건설의 환경과 입지 조건에 의해 결정되기 때문에 역삼투공정 기술에 대한 개발만으로는 생산수단가 저감에는 한계가 있을 수 있다는 것을 의미한다.

따라서, 해수담수 선진국 내에서는 생산수 단가 저감을 위한 차세대 해수담수화 기술에 대해서 연구가 활발하게 진행되고 있다. 전 세계에서 가장 주목받고 있는 해수담수화 기술은 정삼투 기술(Forward Osmosis, FO)과 막증발 기술(Membrane Distillation, MD)이 대표적이다. Fig. 3은 두 기술에 대한 세계의 연구논문 증가 경향을 보여주는 것으로 막증발법에 대한 연구논문은 1980년대에 시작되어 2000년 이후 급격한 증가를 보이고 있으며, 정삼투 관련 연구논문은 이보다 늦은 2000년 중반 이후 급격한 증가를 보이고 있다.

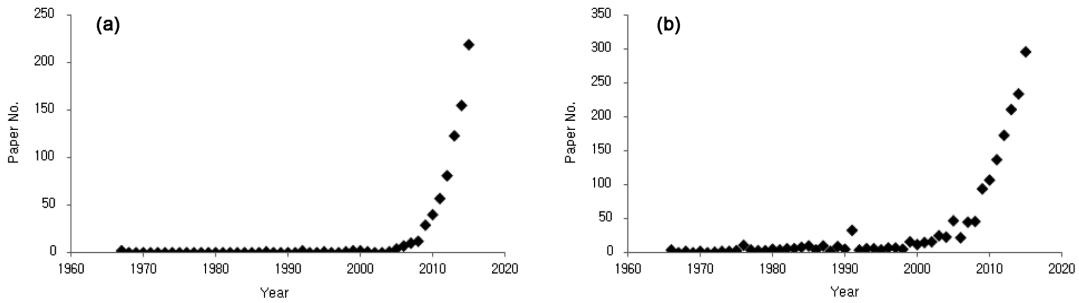

Fig. 3. Trend of research on Forward Osmosis (FO) and Membrane Distillation (MD). (a) FO paper, (b) MD paper, Scope.com (keyword : forward osmosis, membrane distillation))

한국의 경우 2015년 기준으로 정삼투 분야에 103편, 막증발법 분야에 96편으로 분야별 세계 순위에서 각각 5위, 12위권에 존재한다. 또한 정삼투 및 막증발법 분야에서 본격적으로 연구가 시작된 시기는 각각 2011년과 2009년으로 선진국에 비해 많이 늦다고 할 수는 없다. 따라서 한국의 이 분야에 대한 연구 경쟁력은 상대적으로 높다고 할 수 있다. 이에 반하여 국내 역삼투에 대한 연구는 2004년에 시작된 것에 비하여 선진국은 1960년대에 본격적으로 시작되어 현 시장지배적인 해수담수화 기술인 역삼투 기술에 대한 실질적인 주도권을 놓칠 수밖에 없는 상황이었다. 그래도 두산중공업으로 대변되는 국내 해수담수화기술은 2010년 이전까지 증발식에서 세계적인 선두 그룹 중 하나였으며, 이런 시장 선도적 위치를 고수하기 위해 2005년 이후 증발식 시장보다 커진 역삼투막 시장 상황에 맞추어 2007년 국토교통부(당시 건설교통부)는 국책사업의 일환으로 해수담수화플랜트 사업단을 발주하였다. 아울러 현재는 미래시장에 대한 빠른 대응을 위해 차세대 기술개발을 위한 3개의 연구단을 발주하여 연구가 진행 중에 있다. 본 논문에서는 해수담수화 기술에 대한 세계의 기술개발 현황을 조사하고 현재까지 국내에서의 기술개발 현황 조사를 통해 미래 해수담수 시장 변화에 대한 대처 방안을 제시하고자 하였다.

2. 본 론

2.1. 역삼투 공정 해수담수 기술 현황

2.1.1. 재래식 트레인 설계

역삼투 방식 해수담수화 공정의 설계에 대한 단위는 트레인으로 규정된다. Fig. 4에서 보여주는 것처럼, 트레인은 고압펌프와 벳셀로 구성되는 역삼투막 뱅크 그리고 에너지 회수장치로 구성되는 자체적으로 운영이 가능한 최소의 단위이다. 일반적인 역삼투 방식 해수담수화공정은 이런 트레인이 다수 모여서 하나의 플랜트를 완성한다. Fig. 1에서 나타난 바와 같이 역삼투 공정의 경제성은 건설비를 제외하면, 에너지 비용에 의존하며, 역삼투 공정의 에너지는 트레인에서 소모되는 에너지에 크게 의존한다. Voutchkov는 Total Dissolved Solid (TDS) 농도 35,000 ppm, 온도 23℃ 조건하에 대형 역삼투 해수담수화 공정내 트레인에서 약 72%의 에너지가 소모된다고 주장하였다.[5] 일반적으로 역

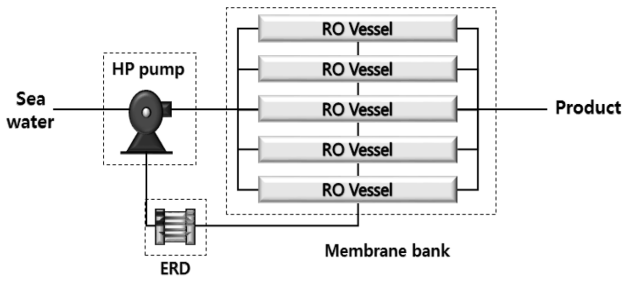

Fig. 4. Train definition.

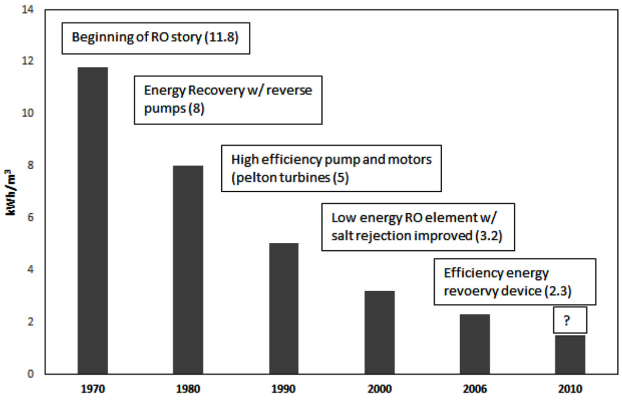

Fig. 5. Energy consumption as device development.[6]

삼투 공정은 트레인을 구성하는 요소 중 역삼투막 성능, 고압펌프효율, 에너지회수장치의 효율에 의해 에너지 효율성이 크게 좌우된다. Fig. 5는 이러한 부품소재의 개발에 따른 역삼투 공정의 에너지 소모율 저감을 보여준다.[6]

고압펌프의 효율성은 일반적으로 대형화 할수록 효율성에서 유리한 것으로 알려진다.[7] 현재 사용되는 고압펌프의 종류에는 왕복 펌프(용적형/피스톤 펌프)와 원심력 펌프가 있으며, 소형에서는 비교적 효율이 높고 일정한 효율을 유지할 수 있는 왕복 펌프를 사용하는 경우도 있다. 이에 반하여 대형 역삼투방식의 해수담수화 플랜트에서는 원심력 펌프를 사용하며, 유량에 따라서 효율성은 약 82-88% 내외를 나타낸다. 이스라엘 Ashkelon 해수담수화 플랜트에는 건설당시 세계에서 가장 큰 펌프가 설치되었으며, 효율은 88.5 %로 세계에서 가장 높은 효율성을 기록하였다.[8] 펌프의 대형화는 독특한 설계기법과 함께 Ashkelon 플랜트의 가격경쟁력 중의 하나로 평가된다.

고압펌프의 대형화는 일부의 플랜트를 제외하고는 트레인 크기 및 플랜트 용량과 직접적으로 관계가 있다. Fig. 6는 desaldata.com을 이용하여 50,000 m^3/d 이상의 대형 플랜트 중 연도별 가장 큰 트레인 용량을 도식한 것으로 2000년을 기점으로 대형화된 트레인이 건설되었음을 알 수 있다. 트레인 용량의 대형화는 전력소모율과 직접적인 관계가 있다. Martinho는[9] 트레인 용량 2,500~10,000 m^3/d에서 에

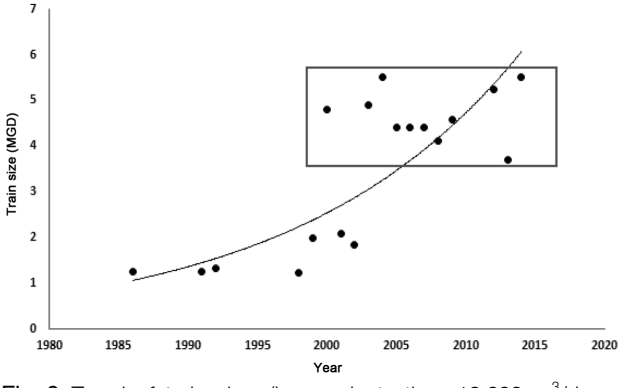

Fig. 6. Trend of train size. (larger plants than 10,000 m^3/d caparcity).[4]

너지 회수장치로 터빈을 사용할 때, 회수율 45%를 기준으로 전력소모율은 트레인 용량에 반비례하였으며, 2,500 m^3/d일 때 3.56~3.37 kWh/m^3, 10,000 m^3/d일 때, 3.17~3.02 kWh/m^3이라고 보고하였다. 다만 Fig. 6의 대형 트레인용량은 25 MGD (Mega Gallon per Day, 약 95,000 m^3/d) 이상 대형플랜트에서 볼 수 있으며, 4-6 MGD(약 15,000~23,000 m^3/d) 범위에 존재한다. 트레인 1개 용량이 23,000 m^3/d가 넘을 경우 역삼투막교체 등의 Operation and Maintenance (O&M) 및 관리적인 측면에서 트레인 운영의 일시중지시 큰 손실율로 인한 불편한 점을 야기할 수도 있다는 점에서 향후 200,000 m^3/d 이상의 대형 플랜트에서나 가능한 트레인 사이즈이다. 2000년 이후 발주된 역삼투방식 해수담수화 플랜트 중 200,000 m^3/d 이상은 총 5개로 이러한 추세로 비추어볼 때 향후에도 이러한 대형 트레인 크기로 건설할 상황은 많지 않을 것으로 사료된다.

또 하나의 중요하게 역삼투공정의 에너지 효율성을 증대시킨 것은 에너지 회수장치의 개발이라 할 수 있다. 에너지 회수장치는 크게 3종류, Pelton Wheel, Turbocharger, Isobaric 타입으로 구분된다. Pelton Wheel과 Turbocharger 타입은 농축수의 압력을 이용해 펌프의 축에 에너지를 전달하여 회수하며, Isobaric 타입은 압력자체를 직접 회수하는 원리를 이용한다. Fig. 7은 각 에너지 회수장치별 개발 시기를 보여주는 것으로 Isobaric 타입은 비교적 최근에 개발되었다는 것을 알 수 있다. Isobaric 타입의 효율성은 일반적으로 95% 내외로 다른 타입에 비하여 비교적 높은 효율을 나타낸다.[10,11] 95%의 에너지 회수장치 효율성은 원심력 타입 고압펌프의 효율성이 극대화된 것과 마찬가지로 에너지회수장치의 경우도 에너지 회수 효율 면에서 극대화된 것으로 간주될 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 향후 에너지회수장치 효율성은 기술개발에 의해 괄목할 만큼 증대될 가능성이 극히 적다고 판단할 수 있다.

고압펌프와 에너지회수장치와는 다르게 트레인 관련 부품소재 중에서 현재까지도 활발하게 연구가 진행되고 있으며, 에너지 소모율면에서 영향력이 높은 분야는 역삼투막 개발분야이다. 역삼투 막에 대한 연구는 두가지 방향으로 진행되는 것으로 요약될 수 있다. 하나는 역삼투 막 모듈의 대형화이며, 다른 하나는 플럭스의 증대이다. 첫 번째로 역삼투막은 16인치 모듈까지 상용화되어 있다. 16인치 모듈의 경제성은 파이프라인, 프레임 등의 저감으로 인한 것과 파울링 저감에 의한 것이라고 보고된 바 있다.[12] 또한 Lisa Henthome 등[13]은 플랜트 용량별로 8, 16, 20인치 역삼투막을 사용하였을 때, 크기가 증가함에 따라 18.5%에서 27%까지 경제적이라고 보고한 바 있다. 이러한 결과들은 역삼투막 모듈이 대형화할수록 건축비면에서 경제적이라는 것을 암시한다. 그러나 너무 큰 역삼투막은 교체시 불편함 등의 O&M의 관리적인 측면에서 고려해야할 사항이 있을 수 있다.

두 번째 방향성인 역삼투막의 플럭스 증가는 WHO에서 공표한 보론 농도기준의 완화와 관련되어 있다. WHO는 2009년부터 보론 농도의 위해성을 평가한 결과 보론 농도의 가이드라인을 0.5 mg/L에서 2.4 mg/L로 2011년 완화한 바 있다.[14] 따라서 보론농도의 조절을 위한 역삼투막 제거율의 중요도가 상대적으로 감소하였다. Hydranautics사는 이와 관련하여 역삼투막의 발전방향을 Fig. 8에서와 같이 고플럭스로 초점을 맞춘바 있다.[15]

대표적인 고플럭스 막으로는 Filmtech 사의 SEAMAXX (8인치, 17,000 GPD, 염제거율 99.47%, 보론제거율 89%), Hydranautics사의 SWC6 MAX (8인치, 13,200 GDP, 염제

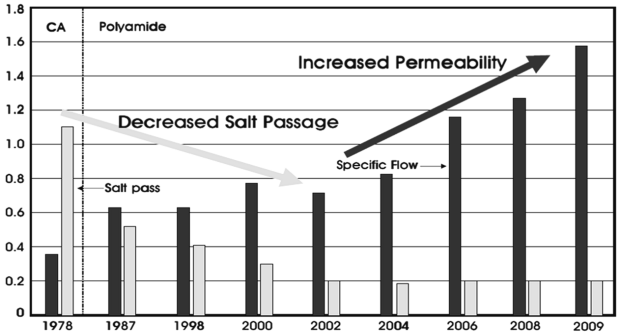

Fig. 8. Research direction for reverse osmosis membrane.[13]

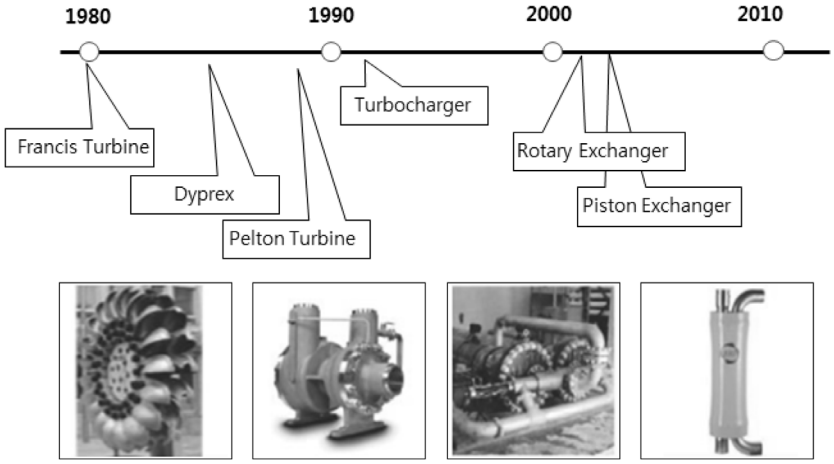

Fig. 7. Development of ERD types.[10]

거율 99.8%, 보론제거율 91%) 등이 있다. 그러나 고플럭스 막의 경우 제거율이 상대적으로 감소할 수 있으므로 최종 생산수의 수질기준이 엄격하게 제한되는 곳에서는 고플럭스 막 적용을 엄격하게 고려해야 할 필요가 있다. 또한 플랜트 운전시 파울링 발생빈도를 고려해야 한다. 그래도 고플럭스 막과 에너지회수장치의 개발로 인하여 최근 역삼투공정의 에너지 소모율은 2.5-4.0 kWh/m^{3}까지 효율적으로 변화되었다.[16]

2.1.2. 역삼투 공정의 새로운 설계

고플럭스 막의 생산은 같은 압력에서 더 많은 생산수를 만들 수 있으므로, 에너지 소모율 및 자본비 면에서 유리하다. Wilf 등[17]은 Atlantic/Pacific, Mediterranean, Gulf 지역의 대표적인 수질에 대하여 고플럭스 막만을 적용하여 시뮬레이션한 결과, 각각 3.0, 3.2, 2.5%의 생산수 단가를 감소시키는 것으로 보고하였다. 그러나, 실제 고플럭스 막은 일반적으로 낮은 염 제거율을 나타내기 때문에 상대적으로 수질면에서 불리하다. 또한 첫 번째 모듈에서의 플럭스가 높아서 파울링 면에서 문제가 있을 수 있다. Winters는 고플럭스 막이 크리티컬 플럭스 이상으로 운전될 경우 파울링 발생빈도가 증가될 수 있다고 보고하였다.[18] 파울링 발생빈도 증가 현상은 일반적인 벳셀 디자인을 고려하면, 7개의 모듈이 적용될 때 1, 2번에 위치한 모듈에서 심화될 것으로 예상된다. 그러나 고플럭스막을 적용할 경우 전체플랜트내 역삼투막 및 벳셀의 개수감소, 전처리 규모의 감소, 에너지 소모량감소 등의 장점이 많기 때문에 (주)Dow Water Solutions에서 고플럭스막 적용을 위한 Internal stage design (ISD) 벳셀디자인을 개발하였다.[19] ISD는 벳셀내에 다양한 플럭스 성능의 역삼투막을 조합하는 것으로 벳셀내부의 앞쪽에는 저플럭스의 막을 적용하고, 후단에는 고플럭스의 막을 적용하는 것을 의미한다. Fig. 9는 일반적인 ISD의 모식도를 보여주는 것으로, 이러한 ISD가 적용된 플랜트는 대표적으로 El Coloso 플랜트와 Madinat Al-Jubajl Yanbu Al-Sinaiyah 플랜트가 있다.

ISD는 여러 연구자에 의해 평가되어 그 효율성이 입증되었다. Garcia Molina 등[20]은 다양한 조건(오스트레일리아, 스페인, 사우디아라비아, 이스라엘)에서 경제성을 평가한 결과 18℃를 기준으로 생산수 단가가 최대 67.09 ¢/m^{3}에서 64.26 ¢/m^{3}으로 감소하였다고 보고하였다. 그러나 파울링 요소가 높을 경우에는 에너지 소모율면만 고려할 경우 유리하지 않았으며, 약품처리비용, 대체비용 등 다른 요소로 인하여 경제적인 것으로 보고하였다. Penate and Garcia-Rodriguez[21]는 Filmtec, Hydranautics, Toray 사의 역삼투막을 ISD로 설계하여 성능평가를 한 결과, 일반적인 설계에 비하여 수질은 좋지 못하였으나, 에너지 면에서는 효율성이 있었으며 각 회사별로 각각 8.3%, 5.4%, 6.4%의 경제성이 있었다고 보고하였다. 이 연구에서는 고플럭스막 만을 적용한 경우가 에너지 면에서 더 유리한 것으로 시뮬레이션 되었으나, 각 역삼투막 회사에서 기준으로 하는 플럭스 회수율 기준을 넘어 파울링 발생빈도가 높을 것으로 예측하였다. Garcia Molina 등[20]과 Penate and Garcia-Rodriguez[21]의 두 연구결과로 부터 고플럭스 막을 적용할 경우 에너지 면에서는 유리하나, 파울링 빈도가 증가할 수 있으며 수질면에서 손해로 인하여 2nd pass에서 에너지 손실 증가 가능성을 유추할 수 있다.

역삼투공정은 Fig. 3의 일반적인 트레인으로 설계하는 방식과 Fig. 10과 같이 펌프와 에너지회수장치를 센터식으로 집중하는 2가지 방식으로 크게 구분된다. 후자의 설계 방식은 이스라엘 IDE사에서 개발한 것으로 이스라엘 플랜트를 중심으로 적용되었으나 최근에는 미국의 Carlsbad 플랜트에도 적용되었다. 센터식의 장점으로는 고압펌프를 대형화 함으로써 에너지 소모율을 효율화할 수 있다는 것을 대표적으로 들 수 있다. Ashkelon 플랜트는 이런 방식을 적용하여 초기 에너지 소모율 3.9 kWh/m^3 이하와 생산수 단가 0.53 $/m^{3}을 달성하였다.[8] Table 1은 센터형 설계를 적용한 플랜트로 미국에 적용된 Carlsbad 플랜트를 제외하면, 생산수 단가 면에서 우수하다는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 센터형 설계는 펌프의 대형화를 기반으로 하기 때문에 대형플랜트에서 더 효율성이 있으며, IDE사의 특허로 인하여 중・소형 플랜트에 대한 적용은 아직까지 보고된바 없다.

Table 1. Desalination plant with pump and ERD central design[22,23]

Plant	Capacity (m^3/d)	Capital cost (Million $)	Energy consumption (kWh/m^3)	Water price ($/m^3)
Ashkelon	330,000	212	3.85	0.68
Hadera	456,000	425	3.5	0.67
Sorek	540,000	400	3.5	0.52
Carlsbad*	200,000	530	3.56 (design)	1.61

*The energy consumption of Carlsbad SWRO plant is energy consumption target in planning.

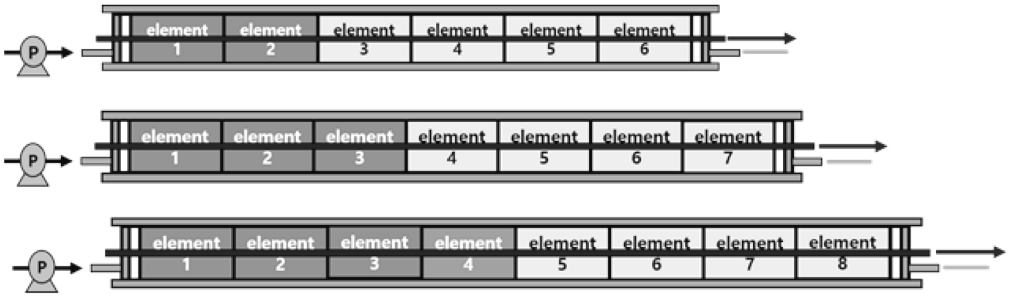

Fig. 9. Concept of Internal Staged Design.[19]

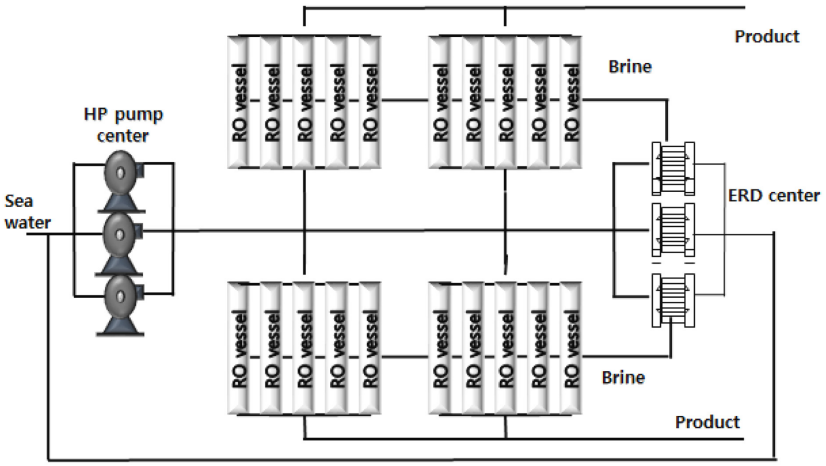

Fig. 10. New Concept of RO Train (Pump and ERD Central design).[49]

2.1.3. 새로운 신공정

전 세계에서 역삼투공정을 대체할 수 있는 공정으로 가장 주목받고 있는 공정은 정삼투 기술과 막증발 기술이다. Fig. 11은 정삼투의 원리를 보여주는 것으로 정삼투 기술은 이론적으로 외부의 에너지를 최소화한 상태에서 고농도의 유도용액을 주입함으로써 삼투압 차이에 의해 염분을 제거하는 기술이다. 영국의 Modern Water사는 오만지역내에 2011년 100 m^3/d 정삼투공정을 4.9 kWh/m^3의 에너지 소모율로 운영함으로써 비교 대상으로 운영한 역삼투공정의 에너지 소모율 8.5 kWh/m^3에 비해 효율적이었다고 주장하였다. 하지만 이 결과는 에너지 회수장치를 고려하지 않은 것으로 직접적인 비교는 힘들 것으로 사료되나, 정삼투 공정의 가능성은 보여준 것으로 분석된다.[24]

정삼투 기술은 분리막 및 모듈개발과 유도용액 개발 등 크게 2가지의 연구방향으로 구분된다. 초기 정삼투막 제조는 미국의 HTI사에서 주도하였으나, 현재는 미국의 Porifera 사에서 평막으로 상업화에 성공한 상황이다. 또한 Toray Chemical Korea에서는 와권형(spiral wound) 형태로 제조하여 상업화를 목전에 두고 있다. 특히 Porifera 정삼투막의 성능은 유도용액 농도 1 mole NaCl 기준으로 30 LMH 전후의 플럭스를 나타내고 있으며, 이는 일반적인 역삼투막의 성능과 유사한 정도를 나타내는 것이다.[25] 따라서 초기 정삼투막의 문제점이었던 낮은 플럭스는 지속적으로 개선되고 있는 상황이나, 아직까지 경제적인 유도용액 회수공정이 개발되지 못한 이유로 독립적 단일 정삼투 공정은 에너지 효율성 면에서 경제적이라고 하기에는 부족하다. Seminat 등[26]은 유도용액의 분리공정을 제외한 경우 실제 정삼투 분리에는 0.3 kWh/m^3의 에너지가 소요되었으나, 유도용액 분리공정에 11 kWh/m^3의 에너지가 소요되는 결과를 도출함으로써 정삼투 공정의 비경제적인 면을 보고하였다. 이러한 결과는 정삼투 공정의 상업화에 가장 큰 장애물이 유도용액의 회수공정임을 보여준다. 2015년 Shaffer 등[27]은 정삼투 공정에 대한 열역학적 분석을 통해서 유도용액의 종류와 무관하게 담수화에 소요되는 최소한의 에너지를 저감할 수 없으며, 정삼투-역삼투 담수시스템도 표준 역삼투 공정에 비해 에너지를 낮추는 것이 힘들다고 주장하였다. 그래도 유도용액의 회수공정없이 정삼투공정의 희석효과만을 이용할 경우 에너지 저감 가능성이 있음과 정삼투 공정의 파

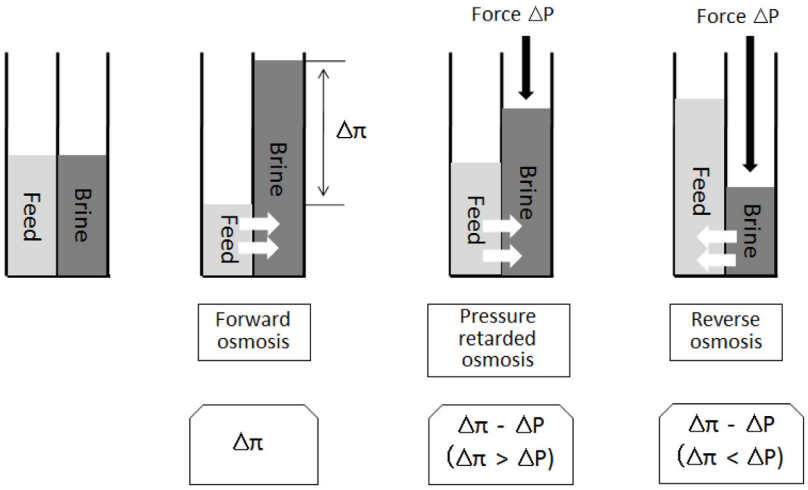

Fig. 11. The principal of FO technology (Δπ : osmotic pressure, ΔP : pressure).[50]

울링 저감이 이러한 에너지 효율성에서의 단점을 보완할 수 있는 잠재력이 있다고 주장하였다. 이와 유사하게 Bamaga 등[28]은 실험실 규모에서 정삼투 공정의 전처리 공정으로 활용에 대한 가능성을 입증한바 있다. 따라서 이러한 연구결과들로부터 정삼투 공정은 해수담수화에 있어 역삼투 공정 전단에서 전처리 기능을 할 경우 경제성을 갖출 수 있는 가능성을 가지고 있음을 알 수 있다. 다만, 역삼투 공정의 전단에서 정삼투 공정의 희석효과를 위해 하수 등을 적용할 경우 유도용액 회수공정을 없앨 수는 있지만, 음용수 사용에 제한적일 수 있으므로 공업용수 등 사용처에 한계가 있을 수 있다.

막 증발법은 증발식 해수담수화 공정과 막공정을 융합시킨 공정이라 할 수 있다. Fig. 12는 막증발법의 원리와 이를 위해 개발된 공정을 보여준다.

막증발법은 1960년대에 Bodell[29]에 의해 연구가 시작된 것으로 알려진다. 증발식 해수담수화에서 발생하는 스케일 발생과 많은 부지요구량의 단점을 극복하기 위해 고안된 것으로 일반적으로 소수성으로 알려진 Polytetrafluoroethylene (PTFE), Polypropylene (PP), Polyvinylidene Fluoride (PVDF) 등으로 만들어진 Ultrafiltration (UF)막을 적용함으로써 해수의 막에 대한 접촉을 최대한 억제하여 스케일 발생을 억제하며, 막간 온도차에 의해 발생되는 증기만 통과하여 차가운 외벽에 접촉함으로써 담수가 되는 원리를 이용한다. 따라서 막소재의 선택은 막증발법의 성능에 중요한 영향을 미친다. 이런 일반적인 재료 및 막의 기본적인 특성이 막증발법의 플럭스에 미치는 영향은 Fujii 등[30,31]에 의해 보고된바 있다.

막증발법은 증발법에 비하여 낮은 온도와 적은 면적이 소요된다는 장점이 있는 반면에 여전히 높은 열에너지, 낮은 회수율 및 암모니아 같은 휘발성 물질의 제거가 힘들다는 단점이 존재한다. 따라서, 막증발법의 상업화를 위해 가장 중요한 요소는 개발된 막의 플럭스 증대와 에너지 소모율 저감이다. 현재 막증발법에 사용되는 막의 플럭스는 단일 8인치 역삼투 모듈이 17,000 GPD(약 65 LMH)까지 개발된 것에 비견될 만큼 실험실 조건하에 유입수 온도 79.8 ℃에서 98.6 LMH의 막이 개발되었지만,[34] 이 막이 실제 상업화 된다고 가정하더라도 열에너지 소요량으로 인하여 경제적인 면에서 부족할 것으로 사료된다. 이러한 특성은 El-Bourawi 등[32]이 주장한 유입수의 온도와 플럭스의 지수적인 관계로 인하여, 유입수 온도가 일정 이상이 되지 않을 경우 플럭스를 높이는 것에 한계가 있기 때문이다. 따라서 낮은 유입수 온도에서 막증발법 막의 플럭스 증대는 경제성을 높일 수 있는 직접적인 요소이며, 이를 위해 PTFE, PP, PVDF소재를 중심으로 다양한 막들이 개발되어 연구되었다.[33]

막증발법의 에너지 소모율을 저감하기 위해서 신재생에너지를 활용하는 방안은 꾸준히 연구가 지속되어 왔으며, 향후 가장 상업화에 근접한 형태가 될 것으로 사료된다. 현재 막증발법에 가장 꾸준하게 적용되고 있는 신재생에너지 형태는 막증발법의 원리에 따라 태양열과 폐열을 이용하는 방안으로 조사된다. Schwantes 등[35]은 태양열과 폐열을 사용하여 막증발법 현장플랜트를 3개의 국가, 나미비아, 이탈리아, 스페인에서 운영한 결과를 보고하였으며, Koschikowski 등[36]은 0.2-20 m^3/d 규모의 막증발법 시설을 만들기 위해 소규모 시스템을 태양열을 활용하여 운영한 결과를 보고하였

Table 2. Operational results in various solar energy MD system

Heat source	Feed (ppm)	Production rate (m^3/d)	Reference
Solar heat	Underground water (28,000)	208	35)
Waste hest of diesel engine	Sea water (35,000)	3.69	
Solar heat	Sea water (35,000)	1.4	
Solar heat	Sea water	0.13	36)
Solar heat	NaCl 1 g/L	6.5 LMH	37)
	35 g/L	5.6 LMH	
Photovoltaic and Solar heat	55,000 μS/cm	0.083-0.46 LMH	38)
Solar heat	Underground water	0.11-0.28 (~32.19 LMH)	39)
Solar heat (Solar pond)	0 M	5.8 LMH	40)
	0.6 M	4.2 LMH	
	2.0 M	3.3 LMH	
	4.0 M	2.9 LMH	

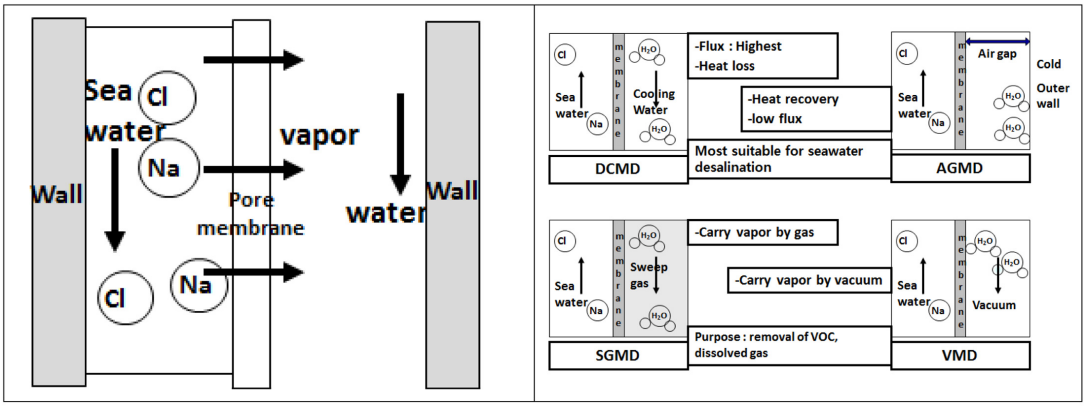

Fig. 12. Principal and Process of Membrane distillation.

다. 일반적으로 폐열은 지속적으로 사용 가능한 것에 비해 태양에너지는 일사량이 존재할 때만 운영이 가능하다는 단점이 있다. 따라서 전체 생산량은 낮을 수밖에 없다.[35] 이외에도 다양한 연구자들에 의해 조사된 태양에너지 활용 막증발법 운영사례를 Table 2에 정리하였다.

신재생에너지를 이용한 막증발법 생산수의 단가는 Kullab and Martin[41]에 의하면 24,000 m^3/year 생산시 8.9 $/$m^3$으로 계산되었으며, Barnet and Jwaied[42]는 태양열을 이용하지 않을 경우 15-18 $/$m^3$ 범위로 추정하였다. 경제성에 대한 핵심인자로서 막의 수명과 플랜트 수명이 경제성에 크게 좌우한다고 보고하였다. 또한 Hogan 등[43]은 시뮬레이션 프로그램을 이용한 결과를 토대로 경제성 분석을 한 결과, 열회수와 Collector의 관계가 반비례적 추세에 의해 일정하게 경제성이 좋아지나, 그 이상 열회수가 감소하면 다시 경제성이 안 좋아진다는 결론을 도출하였다. 이러한 추세는 플랜트 구성요소인 열교환기의 가격이 가장 비싸기 때문이며, 따라서 최적의 경제성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 적절한 heat recovery 설계 여부라고 결론지었다. 현재 막증발법는 열에너지에 대한 필요성으로 인하여 역삼투법에 비해 경제적으로 뒤떨어지는 것으로 알려지나, 싱가폴에서 진행된 MEMSTILL 공정 운영결과를 토대로 분석한 결과는 폐열을 이용할 경우 경제성 확보가 가능한 것으로 발표되었다.[44]

2.2. 국내 역삼투방식 기술 개발현황

2.2.1. 해수담수화 플랜트 사업단(SeaHERO, Seawater Engineering Architecture High Efficiency Reverse Osmosis)

1990년대 후반까지 전세계의 대형 해수담수화플랜트는 증발식 공정을 중심으로 건설되었다. Fig. 13은 각 해수담수화 기술별 시장 점유율을 보여주는 것으로 1990년 후반 이후로 역삼투방식이 크게 증가하고 있음을 보여준다.

한국은 시장점유율 면에서 2000년 초반 증발식 분야 세계 선두권의 지위를 유지하고 있었으나, 역삼투 시장 변화에 대한 대응이 늦어 역삼투 공정 수주량은 세계 10위권 내 진입에 실패하였다.[4] 이에 2006년 국토교통부(당시 건설교통부)는 미래 먹거리 창출을 위한 value creator (VC) 10개의 사업내에 역삼투방식 해수담수화 기술 개발을 선정한 후 정부예산 926억을 투입하여 광주과학기술원을 중심으로 해수담수화플랜트 사업단(이하 사업단)을 출범하였다. Fig. 14에 나타난 것처럼 사업단은 총 3개의 기술적 목표, Low Energy, Low Fouling, Large Train Size (3 L)을 keyword로 세계 수준의 역삼투 기술을 개발하는 선진국 추격형 R&D로 추진되었으며, 총 4개의 핵심기술 분야, 즉 미래형 기술, 핵심부품의 국산화, 역삼투공정 설계 및 시공기술, 역삼투공정 O&M 기술로 구분하여 연구를 진행하였다.

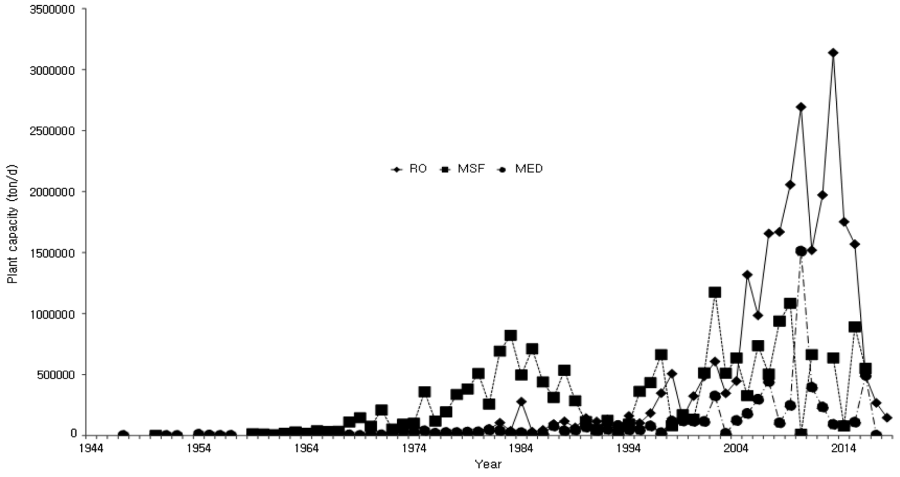

Fig. 13. Capacity of plant based on desalination technology.[4]

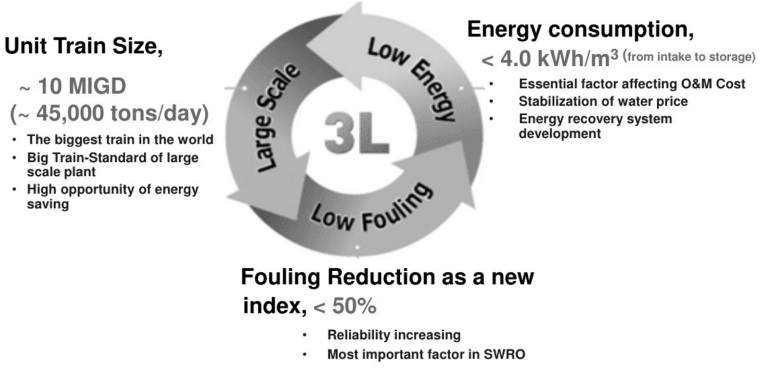

Fig. 14. The R&D target for seawater desalination plant technology.

Table 3. Main output of SeaHERO program

Technology	Output	Performance	World best	Remarks
Low fouling	MMAS	-	World's first	SDI alternative index
	MF	PVDF, 0.1 μm, 80 LMH	110 LMH	-
Low energy	Reverse osmosis membrane	16 inch, 9,000 GPD	17,000 GPD	Merged with foreign company
	High pressure pump	8.3 MIGD, efficiency 85%	12.5 MIGD (Efficiency 88.5%)	-
	Vessel design	Split Partial	-	-
	Energy recovery device (ERD)	Efficiency 95% (Prototype)	Efficiency 98%	different type
Large scale	Train size	8 MIGD	-	World best

사업단내 기술개발의 초점은 8 MIGD급 단일 트레인 설계 및 시공기술 개발을 통한 경제성 확보에 있었으며, 이를 위해 주요 핵심부품인 고압펌프, 역삼투막, 에너지회수장치 등의 국산화와 효율화를 목적으로 하였다. Kim 등[45]은 이에 대한 기술개발 컨셉을 자세하게 소개하였다. Table 3은 3 L이라는 기술개발의 방향성에 따라서 현재 개발된 사업단의 핵심결과물의 성능에 대한 것이다. 비록 현재 시점에서는 선진국과의 기술격차가 있지만 당시로서는 세계최고 수준의 성능을 나타내었다.

사업단의 또 다른 특징은 실플랜트 규모의 실증설비를 구축함으로써 당시 R&D로서는 획기적으로 연구개발과 사업화를 직접적으로 연결할 수 있는 테스트베드라는 개념의 도입이었다. 테스트베드는 부산시 기장군 내에 두 개의 계열로 총 45,000 m^3/d 규모의 플랜트가 건설되었으며, Fig. 15에서 보여주는 것처럼 1계열은 MF 공정 중심의 2 MIGD 트레인, 다른 계열은 재래식 전처리 dual media filtration (DMF) 중심의 8 MIGD 트레인으로 구성되었다. 8 MIGD 트레인에 적용된 고압펌프는 효율증가를 위해 펌프의 단수 저감과 양방향의 유입 및 단방향의 유출이라는 새로운 설계 컨셉을 적용하여 최대 효율을 85%까지 증가시켰다. Fig. 16은 8 MIGD급 고압펌프의 효율 증대에 따른 specific energy consumption (SEC) 변화를 나타낸 것으로 85%의 효율에서 약 2.085 kWh/m^3를 나타낸다. 현재 기장 플랜트의 전체 전력효율성은 온도 10-15℃ 기준 최저 3.7 kWh/m^3로 분석되고 있으며, 여름철에는 더 감소될 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 결과는 Table 3에 요약한 연구개발 결과물의 조합으로 인한 것으로 역삼투막의 경우 16인치를 적용함으로써,

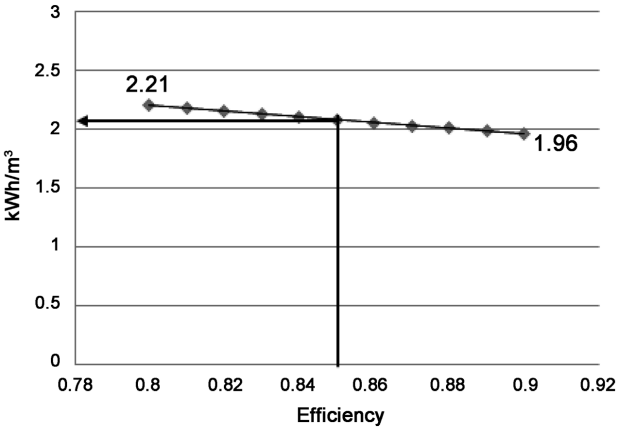

Fig. 16. The Change in the SEC in accordance with the efficiency of HP pump.

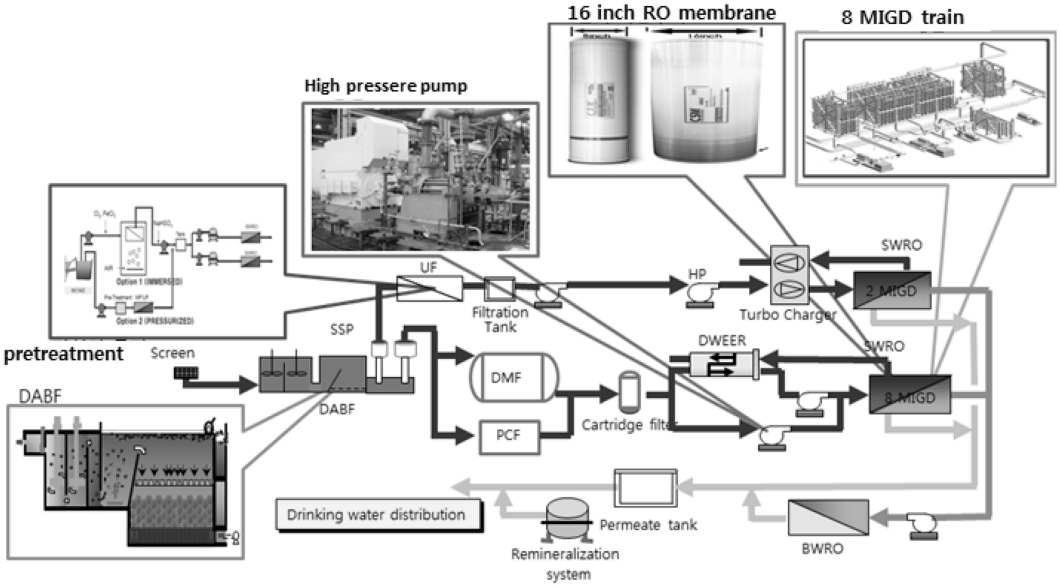

Fig. 15. The process diagram of Busan Gijang plant.

배관 등에서 소모되는 에너지를 절감하였으며, Wilf 등[46]에 의해 주장된 split partial을 적용함으로써 2nd pass로의 유입량 절감 등을 통해 전력소모량을 최소화 하였다.

사업단에서 건설한 test bed의 기술적 가치는 시장점유율에 따라서 1조 9천억에서 6조 9천억까지 평가되었다. 또한 후속 R&D 생산성 면에서 113억~496억, 2125억원의 생산유발효과, 669억원의 부가가치 유발효과, 1059명의 고용유발 효과가 있는 것으로 평가되었다.[47] 현재 국토부에서 진행되고 있는 다양한 해수담수화 관련 연구의 대부분이 사업단과 직접 관계가 있으며, 이는 사업단이 한국의 역삼투방식 해수담수화 플랜트 기술을 세계와 경쟁이 가능한 수준으로 이끌었기 때문이다. 다만 Table 3에 나타난 것처럼 세계적인 수준과는 비교적 차이가 발생하고 있는데, 이것은 2007년 당시 사업단 출범당시와 2014년 종료 시점에서의 세계 수준이 더 높아졌음에도 불구하고, 국내 R&D 특성상 사업단에서 이것을 반영하지 못한 것 때문이다. 따라서 이런 세계적인 격차를 줄이기 위해 다양한 연구단이 출범하였다.

2.2.2. 공정고도화 연구단(SeaHERO2, Seawater High Efficiency Reverse Osmosis O&M Research)

Fig. 17(a)은 세계 해수담수화 기술의 발전상을 보여주는 것으로 해수담수화 플랜트 사업단은 이미 역삼투기술이 시장지배적인 기술이 된 이후에 출범을 하였다. 따라서 비록 개발된 국내 담수화 공정 기술력이 현 시장에서 EPC 경쟁력을 가지고 있지만, O&M (Operaton and Maintenance) 분야의 미비로 인하여 기대만큼 시장 지배력을 갖추지는 못하였다. Fig. 17(b)은 desalination market 2010에 나타난 Engineering Procurement Construction (EPC, Design Build (DB))와 EPC + O&M (BOT (Build Operate Transfer), BOO (Build Own Operate), DBO (Design Build Operate, BOOT (Build Own Operate Transfer))의 비율을 보여주는 것으로 38%와 40%를 각각 나타내고 있다.[2] 이것은 실제 해수담수화 플랜트 수주를 위해서는 반드시 O&M 경험을 필요로 한다는 것을 의미한다.

Desalination market 2016에 따르면, BOT와 BOO 시장에서 세계 20위권 내에는 국내기업으로서 GS Inima(세계 11위) 외에는 없다.[1] 그것도 2010년 이후에는 수주량은 없는 것으로 나타났다. 따라서 향후 해수담수화 플랜트 수주를 위해서는 반드시 O&M에 대한 기술과 경험이 중요하다. SeaHERO2 연구단의 목표는 Fig. 18에 나타난 바와 같이 해수담수화 플랜트 사업단에서 건설한 기장의 실증플랜트의 에너지 소모량을 0.5 kWh/m^3 이상 저감하여, 현 사업단 목표였던 4.0 kWh/m^{3}을 3.5 kWh/m^3 이하로 만드는 것이다. 목표달성을 위해서 총 3개의 과제로 구성되어 있으며, 1 세부과제는 설계의 최적화와 O&M 최적화, 2 세부과제는 농축수 위해성 평가기법, 총괄과제는 고플럭스막 적용 등의 에너지 소모율 최소화를 위한 전략개발을 중심으로 연구개발을 진행하고 있다.

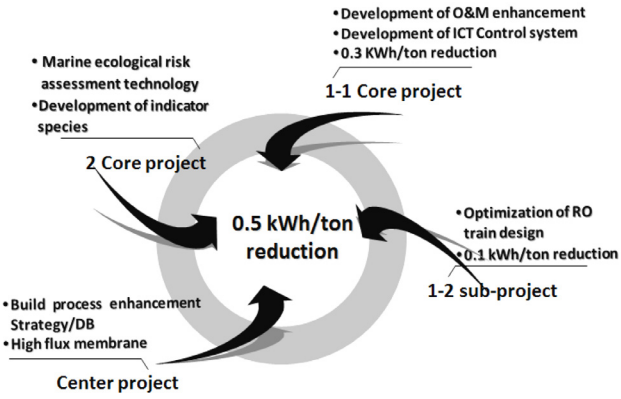

Fig. 18. The R&D target of SeaHERO2 program.

2.2.3. 정 · 역삼투 연구단(FOHC, FO-RO Hybrid Desalination Research Center)

Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼, 정삼투 공정에 대한 연구는 지속적으로 증가하고 있으며, 아직까지 역삼투 공정을 대체하기에는 부족하지만 상업화에 근접한 기술로 평가될 수 있다. 따라서 Fig. 17(a)의 미래 해수담수화 시장에서 역삼투 기술과 경쟁할 수 있는 주요기술 중 하나로 인식되고 있다. 다만 Shaffer 등[27]에서 주장한 것처럼 정삼투 기술의 시장진입 장벽은 유도용액 회수공정이며, 회수공정이 포함될 경우 경제성 확보는 아직까지는 요원한 것으로 사료된다. 따라서 정삼투 공정을 경제적으로 활용하기 위해서는 유도용액 회수공정을 생략하는 것이 중요하며, 정 · 역삼투

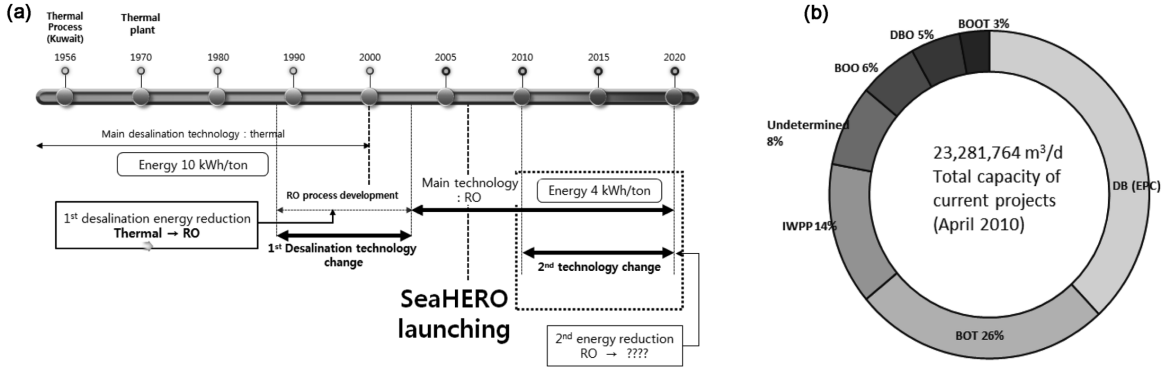

Fig. 17. The situation at the time when SeaHERO program started (a) and the ratio of EPC and EPC + O&M (b).[2]

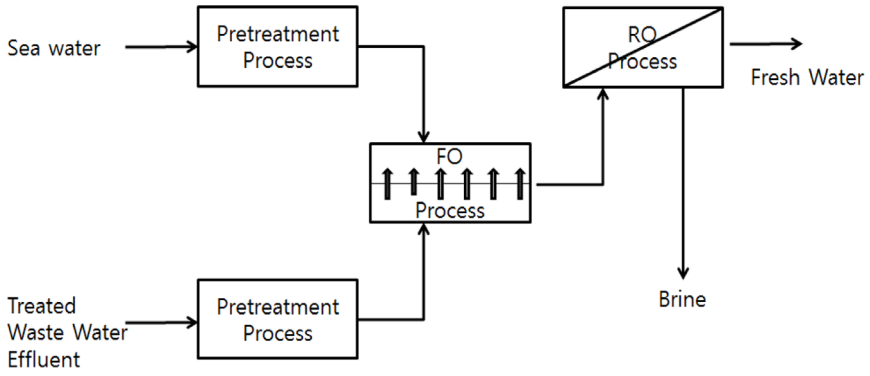

Fig. 19. The schematic diagram of FO-RO system in FOHC program.

연구단(이하 FOHC 연구단)은 이점을 중점 포인트로 기획이 되었다. Fig. 19는 FOHC 연구단의 개념도를 보여주는 것으로 정삼투 공정을 활용하여 해수를 희석함으로써 후속 역삼투 공정의 에너지를 저감하는 것을 골자로 하고 있다.

FOHC 연구단의 최종 목표는 현재 4.0 kWh/m^3의 에너지 소모율을 해수의 희석효과를 바탕으로 2.5 kWh/m^3까지 낮추는 것이다. 이를 위해서 총 3개의 세부기술 즉, 정·역삼투 융합공정의 설계/시공기술, O&M 메카니즘 규명 및 인자도출, 전처리 및 소독기술을 연구하도록 구성되어 있다. 이러한 기술들은 모두 1,000 m^3/d 플랜트를 통하여 구현될 예정이다. 특히 FOHC 연구단에서 중점을 두고 연구하는 부분은 토레이 케미칼 코리아에서 제작한 8 inch 모듈을 적용하여 FO 전처리 파일럿 플랜트의 트레인 설계인자 및 O&M 인자 도출로 아직까지 전세계에 실규모 모듈의 실제 설계 및 운영인자가 개발된 적은 없다. 또한 FO 모듈의 플럭스 증대를 위해 압력을 가하는 가압형 FO-RO 융합공정도 함께 중점 연구되고 있다.

2.2.4. MD/PRO 연구단(G-MVP, Global-Membrane Distillation, Valuable Resource Recovery, Pressure Retarded Osmosis program)

막증발법은 정삼투 공정처럼 미래의 해수담수화 기술로 관심을 받고 있는 기술 중 하나이며, 오히려 정삼투 공정연구보다 10년 정도 앞서 연구가 진행되었다. 막증발법은 증발법의 원리를 일부 이용하기 때문에 실제 열에너지원이 필요하다는 점에서 외부에서 값싼 열원이 공급되지 못할 경우 아직까지 역삼투 공정에 비해 에너지가 많이 소요될 수밖에 없다. 현재 가장 상업화에 근접하게 테스트한 결과인 MEMSTILL 공정에서도 폐열이 적용될 경우에 경제성확보가 가능한 것으로 보고하였다.[44] 따라서 막증발법을 담수화 공정으로 사용할 시, 시장 진입장벽이 에너지 비용 감소에 있다. MD-PRO 복합탈염공정기술 개발 연구단(이하 G-MVP 연구단)은 막증발 기술을 역삼투 공정에서 필수적으로 발생되는 농축수를 저감함과 동시에 에너지 및 자원을 회수하는 보조 공정으로 적용하는 것에 포인트를 투고 있다. Fig. 20은 G-MVP 연구단의 연구목표와 공정 개념도를 나타낸 것으로 중요한 연구목표는 농축수 30% 저감과 압력지연삼투(Pressure Retarded Osmosis, PRO) 기술을 이용한 에너지 생산 5 W/m^2에 있다.

PRO 공정에 의한 에너지 회수는 일본의 Megaton 프로젝트에서 보고된 7%의 RO공정 농축수를 활용한 13 W/m^2가 최고 수준이다.[48] G-MVP 연구단은 비록 목표한 전력밀도(power density)는 megaton 프로젝트에 비해 낮지만 실용 전력밀도를 더 높이기 위해 역삼투공정에서 발생되는 농축수를 막증발법을 활용하여 더욱 농축하여 삼투압 차이를 더욱 크게 하고자 하고 있다. 따라서 실제 연구목표보다 더 큰 전력밀도 생산이 기대되며, 향후 400 m^3/d 규모의 MD 플랜트와의 조합을 통해 구현될 예정에 있다.

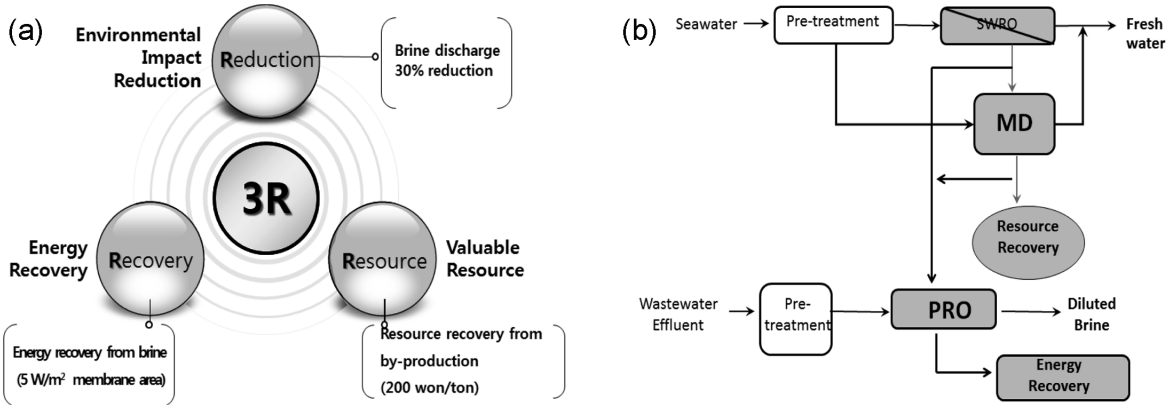

Fig. 20. The R&D target of G-MVP program (a) and the schematic diagram of MD-PRO system (b).

Table 4. Desalination research programs since SeaHERO program in Korea

Research program	Target	Core project
SeaHERO2 program	- SEC 0.5 kWh/m^3 reduction - Verification with Gijang plant	(Center project) The development of strategy & database for process enhancement of reverse osmosis desalination plant
		(Core project 1) Development of technology for smart operation and O&M system for SWRO plant based on ICT
		(Core project 2) Marine ecological risk assessment study of seawater desalination by-products
FOHC program	- SEC 2.5 kWh/m^3 - 1,000 m^3/d pilot plant - Development of O&M design parameter	(Center project) Performance Evaluation and Systematization of Forward Osmosis-Reverse Osmosis Hybrid Plant
		(Core project 1) The Study on Hybrid FO-RO Advanced Technology
		(Core project 2) Development of Forward Osmosis-Reverse Osmosis Hybrid Process
		(Core project 3) Development of the Low Cost Pre-treatment Technologies for FO-RO Hybrid Desalination System
G-MVP program	- Brine reduction 30% - Energy recovery from brine : > 5 W/m^2 - Recycling by products (200 won/m^3)	(Center project) Development of business model for MD/PRO hybrid desalination technology
		(Core project 1) Develoment of technology for MD based hybrid desalination and concentration reduction
		(Core project 2) Develoment of technology for PRO based hybid desalination and energy recovery
		(Core project 3) Develoment of technology for by-product recovergy from desalination plant

4. 결 론

전세계 담수화 기술 발전의 핵심은 에너지 사용 저감에 있다. 현 담수시장의 핵심기술인 역삼투 기술은 역삼투막의 고플럭스화, ISD 설계 및 트레인 설계 등을 중심으로 에너지 소모량을 저감하는 방향으로 초점을 맞추어 발전되고 있으며, 정삼투 기술은 효율적인 유도용액 회수기술 개발과 정삼투막의 플럭스 개선, 막증발 법은 신재생에너지와의 결합을 통한 에너지 저감, 플럭스 증대, 자원회수를 통한 경제성 확보 등에 초점을 맞추어 연구가 진행되고 있다. 이에 발맞추어 국내 담수화 관련연구는 해수담수화플랜트 사업단이 종료된 이후로 크게 3개의 연구단이 발족되어 진행중이다. Table 4는 3개의 연구단에 대해 요약한 것으로 각각 현재 가장 초점이 맞추어지고 있는 담수기술을 연구하고 있으며, 직접적이든 간접적이든 현재 역삼투기술의 에너지 소모율보다 한단계 더 낮은 에너지 소모율 구현에 초점이 맞추어져 있다.

국내에서 진행되는 해수담수화 분야의 국토부 대형 R&D 프로그램은 대부분 해수담수화 플랜트 사업단에서 추진된 전략을 벤치마킹하여 구성되어 있다. 따라서 3개 연구단도 연구 개발 이후 대형 파일럿 혹은 실규모 플랜트를 활용하여 개발된 기술을 검증하는 단계가 포함된다. 이러한 전략적 추진방향은 국내 및 해외를 대상으로 사업화까지 진행하고자 하는 국토부 R&D 연구방향과 일치되는 것으로 이를 위해 정부가 적극적으로 개입하는 것은 한국 고유의 R&D 특징으로 분류된다. 또한 해수담수화 플랜트 사업단이 성공할 수 있었던 요소 중 하나였으며, 향후 3개 연구단이 성공을 할 수 있는 원동력이 될 것으로 사료된다. 그러나, 현 3개연구단 중 FOHC 연구단과 G-MVP연구단은 선도형 연구이므로 선진기술 벤치마킹이 힘들며, 관련 기술 시장이 없거나 소규모로 적극적인 기업투자를 기대하기 어려운 상황 하에 있기 때문에 사업단과 같은 성공을 기대하기는 어려울 수도 있다. 이를 극복하기 위해서는 개발된 기술이 적용될 수 있는 시장을 확보하는 것이 중요하므로 현 수자원 관리와 개발된 기술 연계를 위한 정부 시책 추진을 통해 해수담수화 시장 확보를 위한 적극적인 정부 및 지자체의 의지 표명이 중요하며, 국내보다는 해외시장 개척을 위한 민/관/학 간의 네트워크 추진과 공동과 해외 선진 연구기관과의 적극적인 국제공동연구 추진 등의 전략수립이 적극적으로 검토되어야 한다. 이러한 점들이 선결이 된다면 국내 해수담수화 분야의 R&D 프로그램은 기존의 선진국 추격형에서 선도형 R&D로 탈바꿈될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(과제번호15IFIP-B089908-02)에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

1. Desalination Markets 2016, Global Water Intelligence(2015).
2. Desalination Markets 2010, Global Water Intelligence(2010).
3. Wittholz, M. K., O'Neill, B. K., Colby, C. B. and Lewis, D., "Estimating the Cost of Desalination Plants Using a Cost Database," *Desalination*, **229**, 10~20(2008).
4. www.desaldata.com
5. Voutchkov, N., "World Class Desalination Energy & the Environment," www.adelaide.edu.au(2011).
6. Campos, C., "The Economics of Desalination for Various Uses," www.rac.es/ficheros/doc/00731.pdf.
7. Liberman, B. and Liberman, I., "Starting Procedure of High-Pressure Pump with De-Rated Moter for Large-Scale SWRO Trains," *Desalination*, **132**, 293~298(2000).

8. Sauvet-Goichon, B., "Ashkelon Desalination Plant-A Successful Challenge," *Desalination*, **203**, 75~81(2007).
9. Martinho, A., "The High Pressure Pump Train on Reverse Osmosis Plants. Experience and Current Trends," *Desalination*, **138**, 219~222(2001).
10. Guirguis, M. J., Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis on Efficiency and Economical Analysis of Isobaric versus Centrifugal Devices, Thesis of Master in University of South Florida(2011).
11. Farooque, A. M., Jamaluddin, A. T. M., Al-Rewell, A. R., Jalaluddin, P. A. M., Marwani, S. M., Al-Mobayed, S. S. A. and Qasim, A. H., Comparative Study of Various Energy Recovery Devices Used in SWRO Process, Issued as Technical Report No. TR.3807/EVP02005(2004).
12. Yun, T. I., Gabelich, C. J., Cox, M. R., Mofidi, A., A. and Lesan, R., "Reducing Costs for Large-scale Desalting Plants Using Large-diameter, Reverse Osmosis Membranes," *Desalination*, **189**, 141~154(2006).
13. Lisa Henthorne, P. E., Bartels, C., Bergman, R., Hallan, M., Kanppe, P., Losier, J., Metcalfe, P., Peery, M. and Shelby, I., "Large Diameter RO Technology," www.grahamtek.com
14. Guidelines for Drinking-Water Quality, WHO Forth Edition (2011).
15. Bartels, C. R., Franks, R. and Bates, W., "Design Advantages for SWRO using Advanced Membrane Technology," *IDA J. Desalination and Water Reuse*, **2**(24), 21~25(2010).
16. Fritzmann, C., Lowenberg, J., Wintgens, T. and Melin, T., "Stateof-the-art of reverse osmosis desalination," *Desalination*, **216**, 1~76(2007).
17. Wilf, M., Tedesco, S., Arnold, H. and Hudkins, J., "Effectvie Desing of Seawater RO Systems with New Generation of High Permeability Membrane Elements," IDA World congress, San Diego, USA(2015).
18. Winter, H., "Twenty Years Exprience in Seawater Reverse Osmosis and How Chemicals in Pretreatment Affect Fouling of Membrane," *Desalination*, **110**, 93~96(1997).
19. World Intellectual Property Organization, Apparatus for Treating Soultions of High Osmotic Strength, Patent Application Number PCT/US2005/006224(2005).
20. Garcia Molina, V., Busch, M. and Sehn, P., "Cost Savings by Novel Seawater Reverse Osmosis Elements and Design Concepts," *Desal. and Water Treatment*, **7**, 160~177(2009).
21. Penate, B. and Garcia-Rodriguez, L., "Reverse Osmosis Hybrid Membrane Inter Stage Design : A Comparative Performance Assessment," *Desalination*, **281**, 354~363(2011).
22. Spiritos, E. and Lipchin, C. Water Policy in Israel: Chapter 7 Desalination in Israel, Springer, pp. 101~123(2013).
23. Carlsbad Seawater Desalination Project, Energy Minimization and Greenhouse Gas Reduction Plan, Http://carlsbaddesal.com/ (2008).
24. Thompson, N. A. and Nicoll, P. G., "Forward Osmosis Desalination: A Commercial Reality," IDA World Congress, Perth Australia(2011).
25. Roh, I., Li, C., Kaur, S., Revanur, R., Klare, J., Benton, C., Desormeaux, E. and Bakajin, O., "Development of High Performance FO Membrane and Element for High Revery at Minimal Energy Cost," The 8th International Desalination Workshop, pp. 10~12(2015).
26. Seminat, R., Sapoznik, J. and Hasson, D., "Energy Aspects in Osmosis Processes," *Desalination and Water Treatment*, **15**, 228~235(2012).
27. Shaffer, D. L., Werber, J. R., Jaramillo, H., Lin, S. and Elimelech, M., "Forward Osmosis: Where Are We Now?," *Desalination*, **356**, 271~284(2015).
28. Bamaga, O. A., Yokochi, A. and Beaudry, E. G., "Application of Forward Osmosis in Pretreatment of Seawater for Small Reverse Osmosis Desalination Units," *Desalination and Water Treatment.*, **5,** 183~191(2009).
29. Bodell, B. R., Silicone Rubber Vapor Diffusion in Saline Water Distillation, US Patent 285,032(1963).
30. Fujii, Y., Kigoshi, S., Iwatani, H. and Aoyama, M., "Selectivity and characteristics of direct contact membrane distillation type experiment. : I. Permeability and selectivity through dried hydrophobic fine porous membranes," *J. Membr. Sci.*, **72,** 53~72(1992).
31. Fujii, Y., Kigoshi, S., Iwatani, H., Aoyama, M. and Fusaoka, Y., "Selectivity and characteristics of direct contact membrane distillation type experiment : II. Membrane treatment and selectivity increase," *J. Membr. Sci.*, **72,** 73~89(1992).
32. El-Bourawi, M. S., Ding, Z., Ma, M. and Khayet, M., "A framework for better understanding membrane distillation separation process," *J. Membr. Sci.*, **285**, 4~29(2006).
33. Wang, P. and Chung, T. S., "Recent Advances in Membrane Distillation Processes: Membrnae Development, Configuration Design and Application Exploring," *J. Membr. Sci.*, **474**, 39~56(2015).
34. Wang, P., Teoh, M. M. and Chung, T. S., "Morphological Architecture of Dual-Layer Hollow Fiber for Membrane Distillation with Higher Desalination Performance," *Water Res.*, **45**, 5489~5500(2011).
35. Schwantes, R., Cipollina, A., Gross, F., Koschikowski, J., Pfeifle, D., Rolletschek, M. and Subiela, V., "Membrane Distillation: Solar and Waste Heat Driven Demonstation Plants for Desalination," *Desalination*, **323**, 93~106(2013).
36. Koschikowski, J., Wieghaus, M. and Rommel, M., "Solar Thermal-Driven Desalination Plants Based on Membrane Distillation," *Desalination*, **156**, 295~304(2003).
37. Guillen-Burrieza, E., Blanco, J., Zaragoza, G., Alarcon, D. C., Palenzuela, P., Ibarra, M. and Gernjak, W., "Experimental Analysis of an Air Gap Membrane Distillation Solar Desalination Pilot System," *J. Membr. Sci*., **379**, 386~396(2011).
38. Barnat, F., Jwaied, N., Rommel, M., Koschikowski, J. and Wieghaus, M., "Performance Evaluation of the "Large SMADES" Autonomous Desalination Solar-Driven Membrane Distillation Plant in Aqaba, Jordan," *Desalination*, **217**, 17~28(2007).
39. Wang, X., Zhang, L., Yang, H. and Chen, H, "Feasibility research of potable water production via solar-heated hollow fiber membrane distillation system," *Desalination*, **247,** 403~411(2009).

40. Walton, J. Lu, H., Turner, C., Solis, S. and Hein, H., Solar and Waste Heat Desalination by Membrane Distillation, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Final Report 98-FC-81-0048 Desalintion Research and Development Program(2000).
41. Kullab, A., Liu, C. and Martin, A., Solar desalination using membrane distallation - technical evaluation case study, International Solar Energy Society Conference, Orlando, FL, August(2005).
42. Banat, F. and Jwaied, N., "Economic evaluation of desalination by small-scale autonomous solar-powered membrane distillation units," *Desalination*, **220,** 566~573(2008).
43. Hogan, P. A., Sudjito, Fane, A. G. and Morrison, G. L., "Desalination by Solar Heated Membrane Distillation," *Desalination*, **81**, 81~90(1991).
44. Jansen, A. and Bikel, M., "Water Treatment, How Do Membrane Position Today?," Developing Future Water Technologies-Membranes, Dipoli, Espoo, Finland(2011).
45. Kim, S. H., Oh, B. S., Hwang, M. H., Hong, S. K., Kim, J. H., Lee, S. H. and Kim, I. S., "An Ambitious Step to the Future Desalination Technology:SEAHERO R&D Program (2007-2012)," *Appl. Water Sci*., **1**, 11~17(2011).
46. Wilf, M. and Bartels, C., "Optimization of Seawater RO Systems Design," Desalination, **173**, 1~12(2005).
47. The Valuation of Output in SEAHERO program, Technovation Partners(2013).
48. Wan, C. F. and Chung, T. S., "Energy Recovery by Pressure Retarded Osmosis (PRO) in SWRO-PRO integrated Process," Applied Energy, **162**, 687~698(2016).
49. Voutchkov, N., Desalination Engineering Planning and Design, McGraw-Hill, pp. 359~443(2013).
50. She, Q., Wang, R., Fand, A. G. and Tang, C. Y., "Membrane Fouling in Osmotically Driven Membrane Processes: A Review," *J. Membr. Sci.*, **499**, 201~233(2016).