

국내 해수담수화 플랜트 생산수 단가 추정 Estimation of Water Production Cost from Seawater Reverse Osmosis (SWRO) Plant in Korea

황문현 · 한도선 · 김인수[†]

Moon-Hyun Hwang · Doseon Han · In S. Kim[†]

광주과학기술원 글로벌담수화연구센터

Global Desalination Research Center, Gwangju Institute of Science and Technology

(Received October 21, 2016; Revised January 4, 2017; Accepted March 2, 2017)

Abstract : This study was conducted to supply information that can be utilized as data for desalination plant construction in the future by estimating unit cost of water production in the potential site of Incheon, Daesan, Yeosu, Busan, Ulsan and Sokcho in Korea. The production costs in Sokcho and Ulsan were similar to those of Busan and Yeosu. Those four sites showed better economic range due to low construction cost for intake facility compared to Incheon and Daesan. Although the salinity measured in the above 6 sites did not show perceptible effect on the production cost, the difference of seasonal seawater temperature needs to be considered due to the change of flux in reverse osmosis (RO) membrane. It turned out that the most critical parameters are the amortization in a year by the analysis of life cycle and the capacity of plant. Incheon and Daesan showed the difference of production cost up to 29% at the condition of amortization in 25 year, and up to 22% depending on plant capacity. However, the production cost in this study did not take into account of other indirect costs, therefore, this should be considered as the minimum cost.

Key Words : Seawater Desalination, Water Price, Construction Cost, O&M Cost, Life Cycle Cost

요약 : 기후변화를 대비하여 국내 수자원 확보를 위한 해수담수화 플랜트의 필요성이 점차 높아지고 있어 향후 해수담수화 플랜트 건설시 경제적 판단의 근간이 될 수 있는 자료의 필요성도 또한 높아졌다. 이에 본 연구에서는 국내 해수담수화 플랜트 설치 가능한 지역, 인천, 대산, 여수, 부산, 울산, 속초시를 대상으로 생산수 단가를 추정하여, 향후 플랜트 건설시 참고 자료로 활용이 가능하도록 제안하고자 하였다. 동해바다를 취수원으로 하는 속초와 울산시 생산수 단가는 부산과 여수시의 단가와 유사하였으나, 서해바다를 취수원으로 하는 인천과 대산에 비해 취수시설 건설비용 저감으로 인하여 비교적 경제적인 생산수 단가 범위를 나타내었다. 염도 조건은 비교적 유사하여 생산수 단가에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 사료되나, 계절별 수온 차에 의한 영향은 역삼투막의 생산수량 차이에 의해 높게 나타날 것으로 사료되었다. 가장 크게 생산수 단가에 영향을 미치는 요소는 생애주기 분석 시 적용되는 감가상각 연수와 플랜트 용량이었으며, 인천과 대산의 경우 감가상각 연수에 따라 최대 29%, 플랜트 용량에 따라 22%까지 차이가 발생하였다. 그러나 본 연구에서 추정된 생산수 단가는 간접비 등을 고려하지 않은 것으로 국내에서 생산할 수 있는 최소한의 단가로 고려되었으며, 실질적인 공사 시에는 제시된 생산수 단가보다 증가될 것으로 사료된다.

주제어 : 해수담수화, 생산수단가, 건축비, 운영비, 생애주기 비용

1. 서론

상수도의 부족을 겪는 나라는 전 세계적으로 약 26개국에 달하며 통계학적으로 40~50%의 인구가 향후 50년간 물 부족 문제에 시달릴 것으로 예측되고 있다.^{1,2)} 이러한 배경에 의해 물 부족 문제를 해결하기 위한 새로운 수자원으로서 해수담수화 플랜트의 중요성이 부각되었으며, 해수담수화 시장은 지속적으로 성장되었다. 세계 해수담수화 시장은 2000년 이후 에너지 효율성으로 인하여 증발식에서 역삼투방식으로 기술변화가 되었다. Desalination Market 2016³⁾에 나타난 바에 따르면, 현 해수담수화 시장에서 향후 90% 이상이 역삼투 공정으로 발주되었거나 혹은 발주될 것으로 예측된다. Chang⁴⁾에 의하면 세계 역삼투 플랜트 시장의 규모는 170억 달러까지 증가하였다. 이러한 양상은 역삼투공정의 경제성에 기인하는 것으로 사료되는데, 증발식에 비하여 역삼투 공정은 생산수 단가 면에서 약 5.4~29.0% 저감할 수

있는 것으로 분석된다.⁵⁾ 또한 Mabrouk 등²⁴⁾은 각 공정별 5,000 m³/d 플랜트에서 역삼투공정이 열역학적으로 생산수 단가면에서 다단플래쉬(Multi Stage Flash, MSF), 다중효용법(Multi Effect Distillation, MED)에 비해 각각 51%, 80% 수준으로 분석한 것 외에도 다양한 논문에서 역삼투방식이 더 효율적이라고 발표되었다.^{6,7)} 이러한 역삼투 공정의 효율성은 고압펌프의 효율 증대, 에너지 회수장치의 개발에 따른 에너지 저감과 역삼투막 성능향상 및 대형화에 따른 단위면적당 플럭스 향상과 이에 따른 에너지 효율성 증대에 기인한바가 크다.⁸⁻¹⁴⁾

일반적으로 역삼투 공정의 생산수 단가는 Fig. 1과 같이 건축비, 에너지비, 역삼투막 교체비, 노동비 등으로 구성되나, 여기에는 이를 구성하고 있는 자본구조와 해당 자본의 interest부분은 포함되지 않았다.⁵⁾ Voutchkov¹⁵⁾는 생산수 단가의 구성비와 관련하여 직접비 30-40%, 간접비 10~20%, 전력비 20-35%, 다른 O&M 비용 15-30%로 다른 비율로

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

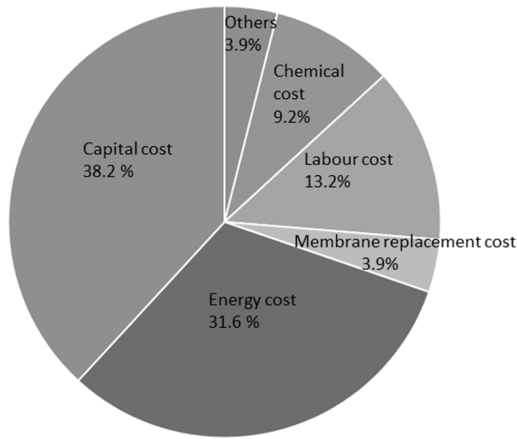


Fig. 1. Composition of the water production cost in desalination processes.¹⁶⁾

구성되는 것으로 기술하였으며, Raucher 등¹⁶⁾은 인건비 4%, 에너지 36%, 막교체비 4%, 화학약품비 12%, 건축비 37%, 기타 7%로 구성되는 것으로 분석하였다. 각각의 경우 분석을 위해 소요된 data의 종류에 따라서 당연히 차이가 발생할 수밖에 없기 때문에 다른 국가의 프로젝트에 대하여 절대적으로 비교하는 것은 불가능하다. 특히 해수담수화 플랜트에 대한 구성비 중에서 절대적인 비중을 차지하는 전력비와 건축비는 플랜트가 건설되는 지역의 경제력에 의존하므로 적용되는 환경조건에 따라서 달라질 수밖에 없다. 따라서 이러한 조건들을 만족시키기 위해 다양한 디자인의 적용과, 운영 방식을 도입하여 최적화된 해수담수화 플랜트를 설계하는 것에 주된 연구가 이루어지고 있다.¹⁷⁻²¹⁾

국내 해수담수화 플랜트는 도서지역을 중심으로 운영되고 있으며, 2014년 기준 총 109개소 총 8,333 m³/d 규모의 플랜트가 운영되는 것으로 조사되나, 이 중에서 총 14개소는 운영이 중지되어 있다.²²⁾ 그중에서 수자원공사에서 총 39개소를 수탁 운영하고 있다. 2009년 기준으로 도서지역의 생산단가는 8,794원/m³이나, 생산수의 판매단가는 784원/m³으로 수탁운영관리에 따른 손실이 매년 20억 원에 달하는 것으로 보고되었다.²³⁾ 이와는 별도로 국내 내륙의 해안지역 해수담수화 플랜트는 45,000 m³/d의 부산 기장 플랜트를 시작으로 광양제철소 내에 건설된 30,000 m³/d 플랜트가 있다. 두 플랜트의 경우 생산수 단가에 대한 정확한 수치는 확인되지 않고 있지만, 1,000원/m³ 내외로 추측된다. 그러한 이유로 기장플랜트의 경우 국가 R&D의 결과물로 건설되었으며, 광양플랜트는 발전소 온배수를 취수하는 것으로 계획함에 따라 취수시설 건설을 생략하였기 때문에 각각 경제적인 면에서 유리한 면이 있기 때문이다. 국내 해수담수화 플랜트는 생산수 단가 면에서 도서지역과 내륙의 해안지역에 설치된 플랜트가 극단적으로 나뉘어져 있어 전반적인 플랜트 규모 및 지역적 환경에 따른 해수담수화 플랜트 생산수 단가 분석에 대한 명확한 기준점 제시가 힘든 상황이다.

이에 본 논문에서는 향후 지속되는 기후변화에 따른 대

체 수자원 확보수단으로서 해수담수화 플랜트의 건설이 지속적으로 추진될 것으로 예상됨에 따라 국내 전반적인 해수담수화 플랜트의 생산수 단가에 대한 고찰을 통해서 해수담수화 건설시 참고자료로 활용할 수 있는 가이드라인을 제시하고자 하였다.

2. 본론

2.1. 국내 역삼투 방식 해수담수화 플랜트 생산수 단가 결정의 구성요소

2.1.1. 해수담수화 플랜트 설비의 건설 및 운영에 따른 생산수 단가 구성요소

역삼투방식 해수담수화 플랜트의 생산수 단가는 크게 구분하여 Engineering Procurement Construction (EPC)와 Operation and Maintenance (O&M) 비용에 의해 대부분 결정이 된다. 일반적으로 EPC 가격은 건설비(Capital cost) 중 직접비에 해당되며, O&M 비용은 간접비와 건축설비를 제외한 모든 것을 의미한다. Fig. 1은 Global Water Intelligence (GWI)에 보고된 플랜트의 건축비와 생산수 단가 등을 통계화하여 나타낸 것으로 가장 크게 생산수 단가에 영향을 미치는 요소는 건설비용과 에너지 비용이라 할 수 있다. 그러나 실질적인 이런 비용들은 해수담수화 플랜트 건설지의 환경과 플랜트 규모에 의해 크게 영향을 받는다.^{6,7,15,25-27)}

Fig. 2는 Desaldata를 이용하여 추정한 것으로 플랜트 규모에 따라 capital, O&M 비용과 생산수 가격간의 관계를 보여주고 있다. 본 Desaldata를 활용한 가격 추산방법은 Desaldata가 제공하는 세계 각지의 플랜트 정보에 대한 데이터를 기반으로 플랜트 용량별 플랜트 건설비와 가격 정보에 대한 데이터를 추출하여 평가한 것으로 평가 툴은 Desaldata 홈페이지에서 제공한다. 이러한 평가 툴에 비교를 원하는 data를 추가하면, 그에 따른 추정 통계자료를 추출하는 것이 가능하다.

Fig. 2는 50,000 m³/d 이상의 규모에서 용량당 capital cost

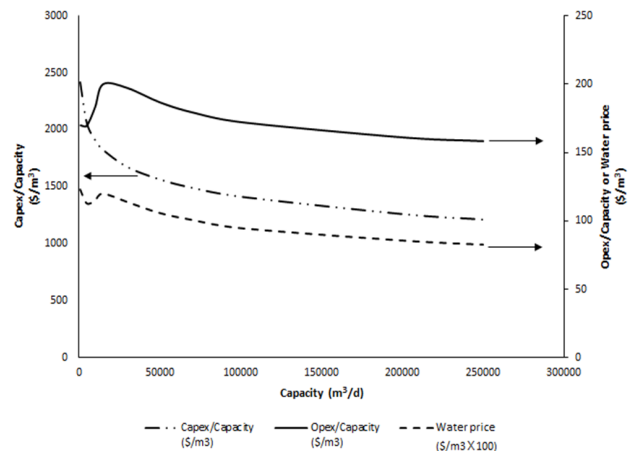


Fig. 2. The relationship of capex and opex on water price²⁸⁾ (Conc. 35,000 mg/L, Temp 15-30°C, 2nd pass 50%, SEC 3.5 kWh/m³, Electricity price, 0.08 \$/kWh, Interest rate 6%).

가 비교적 완만하게 감소하는 것을 보여주고 있지만, 그 이하에서는 규모의 경제성으로 인하여 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 다만 O&M 비용은 다른 경향을 보여주고 있는데, 15,000 m³/d까지 증가세를 보이고 있으며 이후 점차 낮아지는 경향을 보이고 있다. 생산수 단가 결정을 위한 가장 중요한 두 개의 요소의 다른 경향으로 인하여 생산수 단가는 일정규모까지는 증가하다가 플랜트 용량에 반비례하는 모습을 보여주고 있다. 일반적으로 생산수 단가 계산 시 플랜트 용량, 유입수 염도, 부품소재 종류 등이 영향을 미치지만²⁶⁾ Fig 2에서와 같이 플랜트의 용량은 특히 핵심적인 요소이므로 이에 대한 기준을 결정하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 1톤당 건설비의 기울기의 변곡점으로 추정되는 50,000 m³/d를 기준으로 10,000, 30,000, 100,000 m³/d 플랜트 규모의 생산수 단가에 대하여 추정하였다.

Table 1은 Fig. 1의 생산수 단가 결정을 위한 구성 요소를 구분하여 놓은 것으로 플랜트 규모 외에도 해수담수화 플랜트 생산수 단가를 추정하기 위해서 플랜트 건설비용에 따른 감가상각, 전력비, 인건비, 화학약품비 등이 중요하다. 이런 항목들은 국내 정수장 생산수 단가 계산 방식인 식 (1)에서 영업비용에 해당된다.²⁹⁾

Table 1. Composition of capital and O&M cost^{15,30)}

Capital cost	Direct cost	Plant construction cost
	Indirect cost (Project engineering and service)	Design cost, Pilot test cost Others (Environmental permitting, Legal services, Financing, Interest etc)
O&M cost		Power cost Chemical cost Labor cost Membrane and cartridge filter replacement cost Waste disposal cost Environmental monitoring cost Others

$$\text{총괄원가} = \text{자본비용} + \text{영업비용} + \text{영업외비용} + \text{기타영업 수익} + \text{영업외 수익} \quad (1)$$

국내에서 생산수 단가를 계산하기 위해서는 원칙적으로 식 (1)에 따라서 자본비용, 영업외비용, 기타영업 수익 그리고 영업외 수익 등이 추가적으로 고려되어야 하나, 본 연구에서 수행하는 범위와는 다른 것으로 판단되므로 고려하지 않았다. 이외에도 농축수 처리비용, 인허가, 환경생태, 폐수/폐기물 처리비용은 적절한 기준단가를 추정할 수 없으며, 생산수단가에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 사료되므로 본 연구에서는 고려하지 않았다.

2.1.2. 국내 해수담수화 플랜트 건설을 위한 환경요소

해수담수화 플랜트의 생산수 단가를 위한 1차적인 요소는 해당지역의 염도와 수온의 변화라고 할 수 있다. Fig. 3은 2015년 동해, 서해, 남해의 해수담수화가 가능한 도시 2개씩을 선별하여 염도와 수온변화를 조사한 것이다. 염도와 수온 변화는 2015년 1월부터 12월까지의 변화를 조사한 것이다.

Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼 남해지역을 제외하고 겨울과 여름의 수온 차이가 20℃ 이상 발생하는 것으로 조사되었으며, 인천시에서 최대 25.45℃ 차이가 나는 것으로 조사되었다. 남해지역은 16~18℃ 이내로 남해에서는 기온차가 상대적으로 덜하고 북쪽으로 갈수록 기온차가 많이 난다는 것을 알 수 있다. 이것은 중부지역의 해수담수화플랜트 전력비가 남해지역에 비해 높다는 것을 의미한다. Goosen 등에 따르면, 수온 20℃ 차이에 따라서 60%까지의 플릭스 차이가 발생할 수 있고, Wilf and Bartels은 같은 플릭스를 위해서 5℃와 10℃에서 약 3 bar, 5℃와 25℃에서 약 10 bar의 차이가 발생하는 것으로 주장하였다.^{32,33)} 이러한 결과들은 국내에서 해수담수화플랜트 설치 시 중요한 사항 중 하나로 에너지 소모량 최적화를 위해 variable frequency drive (VFD) 설치와 이를 활용한 플랜트 가변 운영을 고려할 것을 의미한다.

염도의 경우 모든 지역에서 상한선이 30 practical salinity unit (PSU) 이상이었으나, 특징적으로 동해안 쪽으로 갈수록 최대 염도가 높아지는 경향이 있으며, 서해안으로 갈수록



Sites	Seawater temp. (°C)	Salinity (PSU)
Incheon	2.18~27.63 (25.45)	17.05~31.62
Daesan	3.4~24.9 (21.5)	25.41~31.96
Yeosu	6.84~27.74 (20.9)	23.87~30.42
Busan	10.1~27.7 (17.6)	31.04~34.36
Ulsan	9.7~25.7 (16)	29.16~33.76
Sokcho	4.4~28.8 (24.4)	28.03~34.43

Fig. 3. The salinity and seawater temperature of several sites³¹⁾ (2015 statistics).

Table 2. The difference of the height of the tide in 6 sites in 2015³⁴⁾

Site	Incheon	Daesan	Yeosu	Busan	Ulsan	Sokcho
The difference between ebb and high tide (cm)	950	826	372.5	146.5	72	53.4

록 낮은 염도의 분포가 나타났다. 따라서 상대적으로 서해안 지역에 건설될 경우 에너지 소요량 면에서 유리할 것으로 보이고 있으나, 각 지역에 따른 염도의 차이가 높지 않기 때문에 국내에서는 해수의 온도가 더 중요한 인자로 판단된다. 각 지역별 더 고려해야 할 환경인자로 취수시설의 경제성과 밀접한 관계가 있는 조위차가 있다. Table 2에서 나타난 것처럼 인천 및 대산의 조위 차는 2015년 기준으로 950 cm, 826 cm로 조사되었으며, 이것은 동해안이나, 남해안에 비해 취수시설 설치를 위해 상대적으로 멀리 설치해야 한다는 것을 의미한다. 인천시를 중심으로 안정적인 10 m 이상 수심 확보를 위해 국립해양조사원에서 공급하는 해도를 통하여 계산하면, 경우에 따라 10 km 내외까지 취수시설 거리를 확보해야 할 수도 있다. 대산은 대산화력발전소를 중심으로 1 km 이내에서 안정적인 수심을 확보할 수 있는 것으로 조사되었다. 다른 도시들은 500 m 이내에서 안정적 수심을 확보할 수 있는 것으로 조사되었으므로 상대적으로 취수시설에 대한 경제성은 남해 및 동해안 지역이 유리할 것으로 사료된다.

2.2. 건설비

Capital cost는 직접비로서 건축비와 함께 설계비용을 합쳐서 구분되기도 하지만, 실제 프로젝트에서는 직접비와 간접비로 구분된다. 간접비는 경우에 따라서 30~50%의 비중을 갖는 경우도 있는 것으로 알려진다.¹⁵⁾ 따라서 실제 플랜트 건설을 고려할 경우 이율, 인허가 비용 등도 함께 고려되어야 하나, 간접비 항목들은 플랜트 건설지의 환경에 따라 크게 좌우되므로 설계를 포함한 순수 플랜트 비용에 대해서만 고려하였다. 아울러 해수담수화 플랜트가 국내에서는 많은 시장이 있는 것이 아니므로 항목 각각에 대하여 직접적으로 계산하는 것이 불가능하였기 때문에 국내 건설된 대형플랜트 2곳과 GWI의 Desaldata 그리고 참고문헌을 통해서 간접적으로 추정하였다.

2.2.1. Desaldata를 활용한 건축비 추정

Table 3은 6개 도시에서의 건축비 추정을 위한 각 도시별 조건을 보여준다. 각 도시별 2016년 기준 부유물질 평균 농도가 동해 3.2 mg/L, 남해 10.6 mg/L, 서해 17.4 mg/L로³⁵⁾ 이를 반영하기 위하여, Table 3에서와 같이 취수시설 조건에 차이를 두었으며, 국내 해상의 염도의 경우 지역적 특성에 따라서 염도가 극히 다르게 분포하며 계절에 따른 변화가 심하여 특정 수치로 대체할 수 없어 가능한 각 도시별 조건에 근접하는 범위로 예측한 데이터를 이용하여 반영하였다. Desaldata를 활용할 때 가장 어려운 점은 온도의 반

Table 3. The variables for calculating the construction cost

Sites	Incheon	Daesan	Yeosu	Busan	Ulsan	Sokcho
Temp. (°C)	15-28					
Feed concentration (mg/L)	30,000	30,000	30,000	35,000	35,000	35,000
Pretreatment	Difficult					
Second pass (%)	50					
Intake	Difficult	Difficult	Typical	Typical	Minimum	Minimum

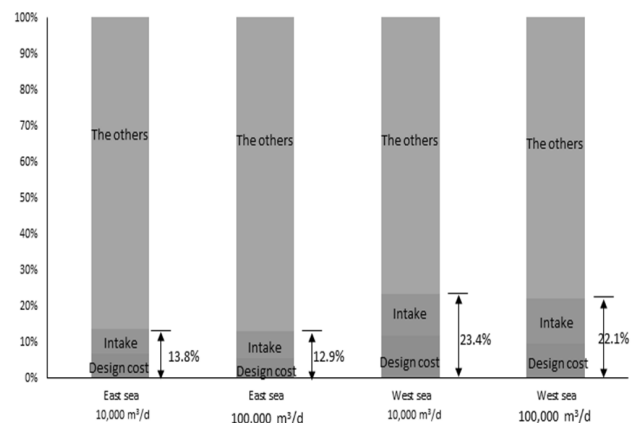
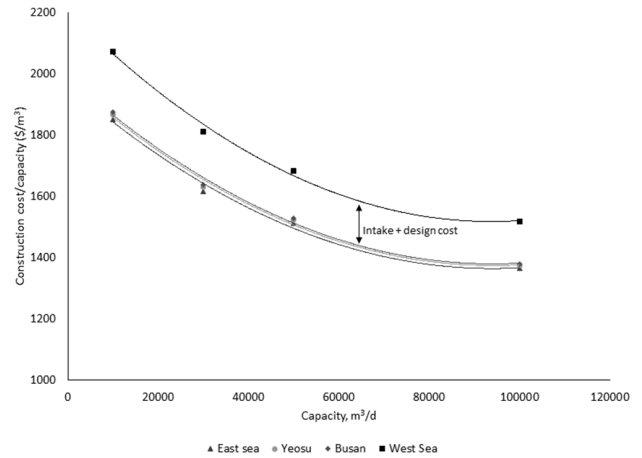


Fig. 4. The comparison of construction cost for 6 sites (East sea : Sokcho, Ulsan, West sea : Incheon, Daesan, Refer to www.desaldata.com).

영으로 현재 시스템 상에서 15°C가 최저점으로 되어 있다. 따라서 국내에서 서해 및 동해의 최저 온도인 2~4°C 반영이 불가능하였기 때문에, 모든 도시에서 15~28°C를 적용하였다. 2nd pass 용량의 경우 각 운영 조건 및 원수조건에 따라서 상이한 것이 일반적이며 본 연구의 경우 일정한 용량을 선정(2nd pass로 분할되는 생산수의 용량 50%)하여 생산수 단가에 미치는 영향을 일정하게 유지하였다.

Fig. 4는 Table 4에 나타난 6개 도시를 기준으로 Desaldata를 활용하여 계산한 건축비를 비교한 것이다. Desaldata에서 제공하는 건설비 중 취수시설은 Minimum, Typical, Difficult, Onerous로 구분되며, 여기에는 스크린 설치여부, 비

Table 4. The construction cost for A site desalination plant 50,000 m³/d

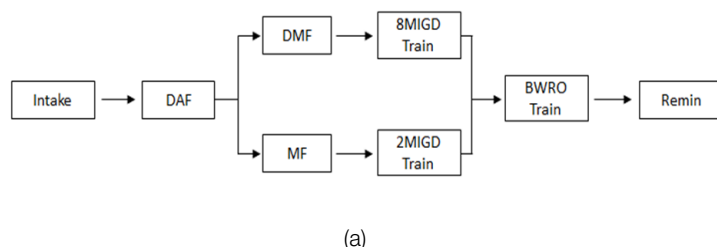
Items	A site (50,000 m ³ /d)	%
Site preparation	2,574,390	3.5
Construction	32,205,750	43.3
Materials & Devices	30,879,350	41.5
Design	1,800,400	2.4
Test run	1,805,600	2.4
The others	5,188,700	7.0
Total	74,454,190	100

취월 여부 등이 중요인자로 포함되는 것으로 사료된다. 따라서 각 지역별 특성차이, 특히 부유물질 농도 자료를 반영하기 위해 동해 지역의 도시는 Minimum, 남해지역의 도시는 Typical, 서해의 경우는 Difficult로 반영하였다.

인천, 대산 지역 내 해수담수화플랜트 건축비는 속초나 울산시에 비하여 154~222 \$/m³까지 높은 것으로 계산되었으며, 대부분 취수시설과 설계비용에 의한 것으로 사료되었다. 여수와 부산은 염도 차이 외에는 같은 조건으로 속초와 울산시의 건축비와 유사하였다. 이러한 결과는 실질적으로 취수시설 조건이 공사비의 상당부분을 좌우한다는 것을 의미한다. 또한 취수시설에 의한 공사비용 증가는 설계비용 증가를 동반하므로 전체적인 비용 상승의 원인이 된다. Fig. 4(b)는 이러한 상황을 보여주고 있으며, 서해의 경우 취수시설과 설계비용이 전체 비용의 약 22.1~23.4%의 비중을 나타낸 것에 비해, 동해의 경우 12.9~13.8%의 비중으로 계산되었다. 따라서 서해에 해수담수화 플랜트를 건설할 경우에는 같은 플랜트 용량에서는 취수시설 건설비용에 의해 건축비 경제성이 좌우되는 것으로 판단된다.

2.2.2. 국내 플랜트 건설비용으로부터 추정

내륙의 해안지역 내 해수담수화 플랜트는 대표적으로 기장 플랜트와 광양 제철소 내 플랜트가 존재한다. 그 중에서 기장플랜트는 45,000 m³/d 규모의 생활용수 공급을 위한 국내 최초의 대형플랜트로 국내 해수담수화플랜트의 기준을 제시한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 기장 플랜트의 기획보고서 자료를 토대로 건축비를 추정하였다. Fig. 5는 기장 플랜트의 공정도와 해수담수화플랜트 사업단 상세기



획보고서를 바탕으로 요약한 전체 시공비용 구성을 보여준다.³⁶⁾ 2007년 당시 플랜트 건설 추정 비용은 취수시설 제외 676억이었으며, 2014년 완공 당시 취수시설 건설을 위해 219억이 소요되어 총비용은 895억이었다. 이 건설비용은 Desaldata를 통해 추정된 약 767억(1550 \$/m³)에 비해 17% 높은 것으로 조사되었으나, 취수시설 비용을 뺀 가격은 649억으로 유사한 비용으로 계산된다. 이것은 기장플랜트의 취수시설이 암반을 뚫어서 만드는 비교적 시공금액이 높은 터널 방식으로 건설되었기 때문이며, 국내 해안 환경에 비추어 볼 때 이러한 방식이 적용되는 경우는 거의 없을 것으로 추정된다. 국내에서는 해안가의 모래사장 등이 부족하므로 오픈 취수시설을 설치할 확률이 높고 오픈 취수시설은 비교적 건설비용이 적게 소요된다. 따라서 일반적으로는 취수시설 시공 비율이 기장플랜트보다는 감소할 것으로 사료된다.

유사하게 A사에서 시행된 50,000 m³/d 해수담수화 플랜트 타당성 검토를 통한 추정금액이 Table 4에 나타나 있다. A시는 서해에 위치한 도시로 공정에서 취수시설에 대한 고려는 포함되지 않았으며, 서해안의 특성상 부유물질과 펄의 대량함유로 인하여 Fig. 6에 나타난 것처럼 해수담수화 시설 적정설치·운영방안(2002)을 참고하여 응집, 침전, 이층여과를 전처리공정으로 적용하는 방안이 고려되었다.³⁷⁾ 따라서 상대적으로 토지비용의 증가가 예상되나, 여기서는 고려하지 않았다. 이러한 이유로는 초기 건설시 토지 비용이 들어가나 향후 생산수 단가 측정 시 자본비용 등에 이러한 항목으로 반영이 가능하며, 감가상각 등이 반영되지 않기 때문이다. Desaldata를 통해 추정된 서해의 50,000 m³/d 비용은 926억이었다. 이 중에서 취수시설 비용을 고려하지 않은 비용은 약 772억 원으로 A시 기획보고서 추정값과 비교적 유사한 비용을 나타낸다. 이러한 내용으로부터 국내 해수담수화 플랜트를 건설하기 위해서 주요 공정에 대한 플

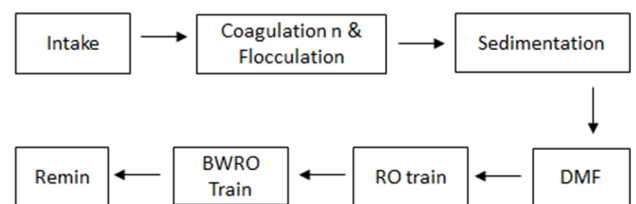


Fig. 6. The flow diagram of A site desalination plant.

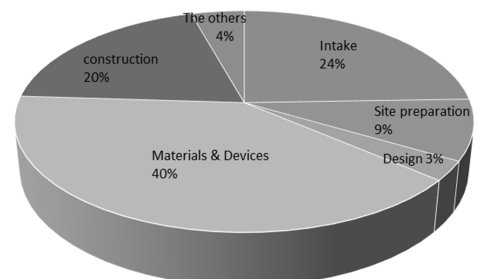


Fig. 5. Construction cost of Gijang desalination plant ((a) Flow diagram, (b) construction cost breakdown).³⁶⁾

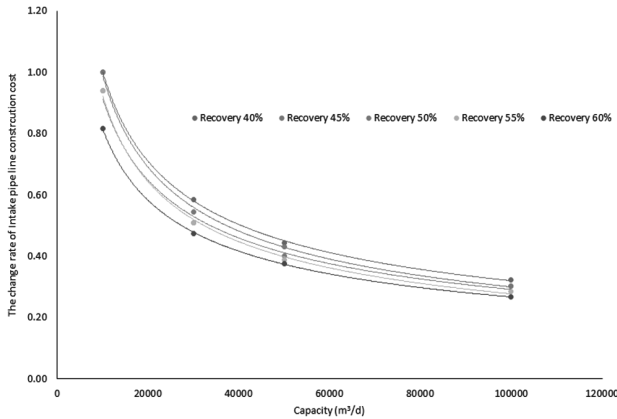


Fig. 7. The change in the intake pipe line construction cost due to the recovery rate of plant (refer GRP pipe cost and GRP connection/laying cost in Korea Price Information, www.kpi.or.kr).

랜트 건설비용을 Desaldata 등을 참고하여 산정하는 것이 가능하나, 취수시설 중 취수구의 위치와 이에 따른 플랜트 까지 요구되는 파이프라인에 대한 보정이 별도로 고려되어야 한다는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 별도의 보정을 위해 한국물가정보를 이용하여 GRP관을 기준으로 파이프라인 건설 단가 추이를 비교하였다.³⁸⁾ Fig. 7은 이러한 결과를 보여 주고 있으며, SWRO 회수율에 의해 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. 국내의 경우 중·대형 해수담수화플랜트에 비취웰(beach well) 타입의 취수시설 건설이 힘들 것이므로 오픈 타입의 취수시설이라고 가정할 경우, 파이프라인의 거리가 플랜트의 건설비에 중요한 영향을 미칠 것으로 추정된다.

Fig. 7은 10,000 m³/d, 40% 회수율을 기준으로 회수율과 플랜트 크기에 따라서 변하는 취수시설 파이프라인 비용의 변화를 나타낸 것으로 회수율이 높아짐에 따라서 파이프라인 m당 공사비는 낮아지는 경향을 보여준다. 10,000 m³/d 플랜트를 기준으로 할 경우 회수율 60%에서 18% 절감이 가능하다. 또한 100,000 m³/d 플랜트에서는 60% 회수율을 기준으로 m당 비용은 17%까지 절감이 가능한 것으로 분석되었다. 그러나 회수율이 같을 경우 플랜트 규모에 따라서 73%까지 절감이 가능한 것으로 계산되었다. 이것은 실질적으로 회수율보다는 플랜트 크기에 따라서 취수시설 공사비용이 크게 좌우된다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 보정율을 고려하여 Fig. 4의 취수시설 공사비용을 수정할 필요가 있다. 다만 참고할 것은 Fig. 7은 수압이 아닌 내륙 매설시 공사비를 기준으로 산정하였기 때문에 실질 공사는 달라질 수 있다는 점이다.

2.3. 전력비

해수담수화 플랜트는 기본적으로 에너지 소요량이 많은 플랜트이다. 따라서 전력비는 생산수 단가에 있어 공사비 다음으로 많은 비중을 나타내는 항목이며, 각 국가의 전력 단가에 따라서 크게 변화된다. 전 세계 역삼투방식 해수담

Table 5. The electric charge for the range of 10,000 to 100,000 m³/d capacity (unit : Won)

Industrial Electric charge	Charge I	Charge II	Charge III
Average Electric charge except basic charge	94.56	89.55	87.90
Average Electric charge for operation power 4.0 kWh/m ³ (10,000 m ³ /d)	108.84	103.28	101.55
Average Electric charge for operation power 4.0 kWh/m ³ (30,000 m ³ /d)	108.75	103.20	101.47
Average Electric charge for operation power 4.0 kWh/m ³ (50,000 m ³ /d)	108.79	103.23	101.50
Average Electric charge for operation power 4.0 kWh/m ³ (100,000 m ³ /d)	108.76	103.20	101.48
Contract electric power	10,000 m ³ /d (2400 kW), 30,000 m ³ /d (7,200 kW), 50,000 m ³ /d (12,000 kW), 100,000 m ³ /d (24,000 kW)		

수화 플랜트의 대부분은 2000년 이후로 3.0~4.5 kWh/m³ 범위 내에 있는 것으로 조사된다.³⁾ 또한 기장플랜트의 운영 전력은 3.5~4.0 kWh/m³ 범위에 있는 것으로 조사되므로 Table 3의 염도 범위로부터 이 범위를 크게 벗어나지는 않을 것으로 사료된다. 이러한 자료를 참고하여 본 연구에서는 3.5~4.0 kWh/m³에 대해서 전력비를 추정하고자 하였다.³⁹⁾

국내 산업용 전력 생산단가는 기본적으로 고압과 사용용량에 따라서 분류된다. 일반적으로 해수담수화플랜트는 고압이 사용되므로 산업용(을)에 해당하며, 기장플랜트 자료를 고려할 경우, 100,000 m³/d 범위에서 고압 B 전력이 해당되는 것으로 사료된다. 또한 24시간 운영을 기본으로 하기에 선택요금Ⅲ가 절대적으로 유리하다. Table 5는 이러한 사항을 정리한 것으로 12,000 kW 계약전력을 기준으로 각각 설정된 계약단가를 고려한 평균전력단가를 보여준다.

실질적으로 각 용량별 평균 전력비는 유사함을 보여주고 있으며, 가장 유리한 선택요금 3의 경우 약 101.5원/kWh임을 알 수 있다. 이것은 당연한 결과이므로 본 연구에서는 전력비 기준을 101.5원/kWh로 정하였으며, 이를 기준으로 계산하면 전력비는 플랜트 용량 10,000 m³/d를 기준으로 0.1 kWh 당 약 37,047,500원씩 증가하게 되며, 다양한 변수에 의해 에너지 효율성 변화를 고려할 경우 10,000 m³/d 용량의 전력비는 13~14.8억 원/년, 100,000 m³/d 용량의 전력비는 130~148억 원/년 범위에서 결정될 것으로 계산된다.

2.4. 역삼투막 교체비

역삼투막은 생산수 수질을 결정하는 가장 중요한 요소이며, 대표적인 소모성 부품으로 분류된다. 또한 역삼투막 교체비용은 생산수 단가의 약 4%를 나타낼 만큼 비중이 큰 것으로 조사된다.⁵⁾ 소모품으로서의 역삼투막의 기대수명은 전처리와 유입수 수질에 크게 의존하며, Avlonitis 등⁴⁰⁾은 몇몇의 역삼투방식 해수담수화 플랜트를 조사한 결과

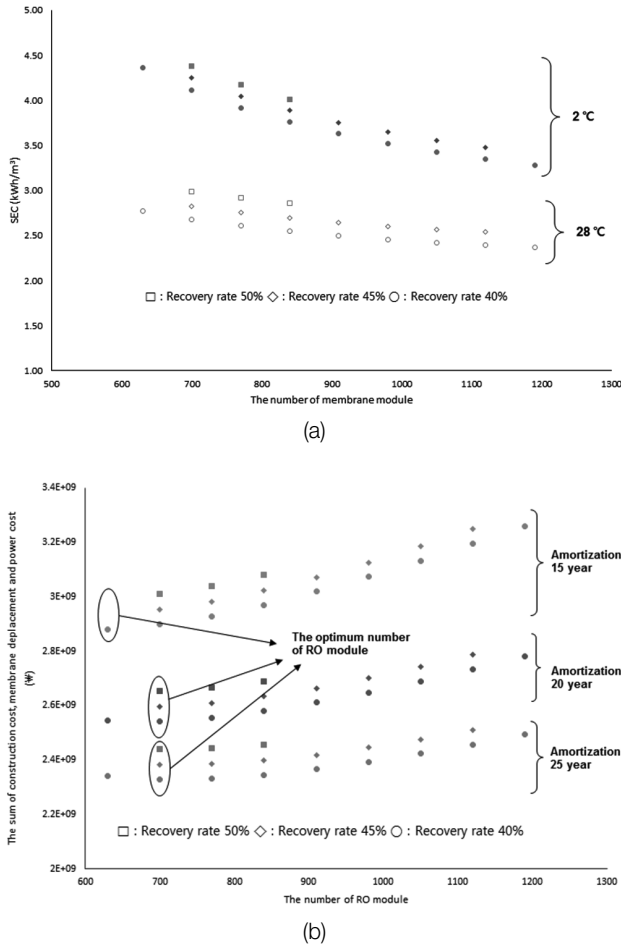


Fig. 8. The number of RO module under various conditions (a: The change in SEC as the number of RO module, b: The total cost as the number of RO module and amortization). (ERD efficiency 95%, plant capacity 10,000 m³/d, SWRO element cost : ₩900,000, BWRO cost : ₩600,000).

역삼투막 수명이 4~5년 주기로 교체된다고 발표한바 있으며, 다수의 논문들도 일반적으로 역삼투막 교체주기를 5년 이라고 발표하거나 이를 기준으로 생산수 단가를 분석하였다.^{41~44)} 이것은 매년 전체 플랜트 역삼투막 개수에 대하여 20~25%를 교체한다는 것을 의미한다. 따라서 역삼투막의 교체비용을 결정하기 위해서는 각 플랜트 용량에서 소요되는 역삼투막 개수를 계산해야 하며, 이것은 일반적으로 역삼투막 제조사에서 배포한 프로그램을 활용하여 예측한다. 본 연구에서는 Dow Chemical사에서 배포한 ROSA 9 프로그램을 활용하여 각 플랜트 용량별 필요 개수를 예측하였다. Table 2의 각 지역별 최저 온도조건 2°C와 필요 수질기준 중에서 28°C 조건에서 보론 1 mg/L를 기준으로 각 회수율 조건 별로 필요한 역삼투막 개수를 계산한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 사용된 모듈은 일반적으로 사용되는 SW30HRLE-400i (7500 GPD, 99.8% @ 32,000 mg/L NaCl)와 BW30-400 (10,500 GPD, 99.5% @ 2,000 mg/L NaCl)가 적용되었으며, 시뮬레이션 결과에서 회수율 55% 이상은 SWRO의 성능 초과로 설계에서 배제하였다.

Fig. 8(a)에서 볼 수 있는 것처럼 회수율이 높을수록 설계범위가 감소하는 경향으로 인하여 회수율 50%조건에서 SWRO 모듈 수는 700~840개, 45%에서 최대 1120개, 40%에서 1190개까지 요구되는 것으로 나타났으며, 모듈개수가 증가할수록 SEC는 감소되었다. 이러한 결과는 에너지 비용에 의한 영향이 순수 막교체 비용보다 훨씬 더 크다는 것을 의미하며, 국내 환경조건에서 2°C까지 감안해야 하는 저온 조건에 의한 플렉스 감소에 따른 에너지 소량 증가에 기인한다. 따라서 단순히 운영비 측면에서는 회수율을 낮추고 막면적을 증가시켜 SEC를 감소시키는 것이 유리하나, 이는 필연적으로 초기 투자비의 증가가 동반되므로 적절한 수준을 고려해야만 한다. 그러므로 모듈 개수를 분석하고자 할 경우에는 SEC 그리고 공사비를 함께 고려하는 것이 타당하다.

역삼투 방식 해수담수화 플랜트에서 건축비 중에서 트레인공사가 차지하는 비중은 30~60%로 다양한 문헌에서 분석한 바 있다.^{15,45~47)} 30%로 분석한 대부분은 직접비 외에 간접비를 포함한 전체 금액에 대하여 분석한 결과이므로 본 연구에서는 간접비를 생략하고 트레인 공사비용을 전체 시공비의 50%로 가정하여 계산하였으며, 속초와 울산시 조건에서 계산된 10,000 m³/d 공사비 21,291 백만원을 기준으로 계산하였다. Fig. 8(b)는 막 교체비, SEC 그리고 RO 트레인 총 공사비용을 합산한 총 비용과 역삼투막 개수와의 관계를 보여주는 것으로 총 공사비용에 대한 감가상각 연수에 따라서 최적의 역삼투막 개수가 변화하고 있는 것을 보여 준다. 이 결과는 감가상각 연수가 작을수록 역삼투막 개수 증가에 따른 공사비 증가가 역삼투막 개수 증가에 따른 SEC 감소량에 비해 크다는 것을 의미하며, desalination market 2010을 포함한 다양한 문헌들과 같은 결과를 나타낸다. 반대로 감가상각 연수가 늘어날수록 에너지 비중이 커진다. 따라서 감가상각 연수가 30년으로 늘어나면 최적의 역삼투막 개수가 770개로 증가한다(본 연구에서는 보여주지 않았음). 따라서 에너지 비용만을 고려할 경우 최적의 역삼투막의 개수가 증가하지만, 공사비에 의해 적절한 범위의 역삼투막 개수가 있음을 나타낸다.

2.5. 인건비

국내 해수담수화플랜트와 관련한 적정 인력수준에 대해서는 제도화된 바가 없으며, 이에 대한 규정도 찾기 어렵기 때문에 환경부 정수장 운영 및 관리실태 평가 규정을 참고하여 Table 6에 정리하였다. 그중에서 30,000 m³/d에 대한 적정인력은 보건법에 의해 계산된 것이다. 다만 현 정수장의 경우는 생산수량과 유입수량간의 차이가 작기 때문에 문제가 없을 것으로 사료되나, 해수담수화 플랜트의 경우는 회수율이 40~60%이므로 유입수량이 생산수량에 비해 2배가량이다. 따라서 어느 수량을 기준으로 하는지에 대한 명확한 기준 제시가 요구되나, 본 과제에서는 생산수량을 기준으로 계산하여 Table 6에 있는 인력을 그대로 적용하였다. 생산단가 산정을 위해서는 적절한 수준의 임금이 중요하게 작용하므로 평균

Table 6. The standard on the number of staff for water purification plant⁴⁹⁾

Capacity (m ³ /d)	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	50,000	100,000
The number of staff	5	7	8	10	13	15	20
Labor cost (1,000 ₩)	338,690	474,166	541,904	677,380	880,594	1,016,070	1,354,760
Chemical cost (1,000 ₩)			293,825 ^{a)}	587,650 ^{a)}	881,475 ^{a)}	1,469,125 ^{a)}	2,938,250 ^{a)}
			276,000 ^{b)}		782,000 ^{b)}	1,380,000 ^{b)}	2,760,000 ^{b)}

a) calculating by Desalination Market 2010 and Voutchkov^{5,40)}

b) Calculating by Desalting Handbook for Planners⁵¹⁾

임금단가에 대한 기준을 산정하기 위하여 한국 건설업 노임 단가를 기준으로 분석하였다. 2016년 9월 1일 기준으로 플랜트 전공에 대한 노임은 185,583원으로 조사되었으며, 이를 연봉개념으로 계산할 경우 67,738천원이 된다. 이를 기준으로 계산한 각 용량별 인건비가 Table 6에 나타나 있다.

2.6. 화학약품 사용비

해수담수화 플랜트에 기본적으로 사용되는 화학약품은 응집제(FeCl₃), 소독제(NaOCl), SBS, 스케일방지제, 황산 그리고 막 세정에 요구되는 화학약품들 등이다. 이에 대한 사용량은 플랜트 건설지 수질 환경에 따라서 영향을 받기 때문에 모든 플랜트 설비마다 달라질 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 참고문헌을 통하여 화학약품 사용비를 추정하고자 하였다. Voutchkov¹⁵⁾와 Wilf 등³⁰⁾은 각각 자신의 저술에서 SWRO의 O&M 비용에서 화학약품의 비율을 3~9% (0.025~0.075 \$/m³)의 비율을 가지고 있는 것으로 기술하였다. 또한 Desalination market 2010⁵⁾에 따르면 화학약품의 비율이 생산수 단가(0.76 \$/m³)의 약 9% (0.07 \$/m³), 미국의 해수담수화 가격을 조사한 white paper⁴⁵⁾와 AMTA에서는 약 6%로 제시하였다.⁴⁹⁾ 이러한 참고문헌 중에서 공통적으로 제시된 0.07 \$/m³을 참고하여 계산할 경우 Table 6에 제시된 바와 같다. 이러한 금액은 Desalting handbook for planners를 통해서 계산한 금액과 유사한 범위를 나타낸다.⁵⁰⁾ 본 연구에서는 2개의 계산값 중에서 비교적 최근에 제시된 통계적 data인 Desalination market 2010을 통하여 계산된 것을 적용하였다. 그러나 Desalination market 2010 등에서 나타난 인건비와 화학약품의 비율과는 다르게, Table 6에서는 30,000 m³/d 이상에서는 화학약품비가 더 높게 나타나고 있는데 이는 국내 정수장의 인력 배치 가이드에 따라

20,000 m³/d까지는 필요인력수가 플랜트 용량에 비례하지 만 그 이상의 대형 플랜트에서는 필요 인력수가 비례하지 않기 때문이다. 따라서 국내 플랜트의 경우 대형화할수록 인건비 비중이 상대적으로 줄어든다.

2.7. 생산수 단가의 결정

해수담수화 플랜트의 생산수 단가는 직접비와 간접비 그리고 O&M 비용으로 구성된다. 그러나 국내에서 정수시설은 지자체 등의 도시계획에 따라서 진행하기 때문에 법적 허가 절차, 토지비용 등은 생산수 단가에 포함되지 않는다. 그러므로 Table 1에서 생산수단가 결정요소는 순수 건설비, 설계비 그리고 O&M 비용으로 결정된다. O&M 비용에서 슬러지 처리비용, 모니터링 비용 등은 상황에 따라서 차이가 많이 발생하므로 본 연구에서는 고려하지 않았다.

2.7.1. 건설비 범위

2.2절에서 조사된 각 도시별 해수담수화 플랜트 건설비의 범위를 Table 7에 나타내었다. 메인 설비의 공사비는 각 용량별 비교적 유사하게 나타내고 있으나, 취수시설과 농축수 배관으로 인하여 큰 폭으로 변화되었다. 특히 취수시설과 농축수 배관은 플랜트의 회수율에 따라서 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 인천과 대산의 경우 1 km 이상 배관을 설치해야하기 때문에 용량에 따른 건설비 중 배관공사비용의 비중이 다른 도시에 비하여 높게 계산되었다.

2.7.2. 생산수 단가의 범위

생산수 단가를 계산하기 위해서는 감가상각을 계산해야 한다. 국내에서는 다양한 방식이 있으나, 국토부에서 2008년 12월에 공표된 생애주기 비용 분석 및 평가요령을 많이 사

Table 7. The construction cost

(unit : 10⁶ ₩)

Capacity (m ³ /d)	Incheon	Daesan	Yeosu	Busan	Ulsan	Sokcho	
10,000	23,841	23,841	21,460	21,545	21,291	21,291	
30,000	62,481	62,481	56,241	56,464	55,798	55,798	
50,000	96,788	96,788	87,607	87,949	86,970	86,970	
100,000	174,626	174,626	158,061	158,679	156,912	156,912	
The range of construction cost for intake and brine pipe line	10,000	383~542	383~542	184~271	184~271	184~271	184~271
	30,000	704~980	704~980	352~490	352~490	352~490	352~490
	50,000	923~1185	923~1185	462~593	462~593	462~593	462~593
	100,000	1283~1684	1283~1684	641~804	641~804	641~804	641~804

Table 8. The cost range of 4 core parameter for water price (unit : 10⁶ ₩)

Items	10,000 (m ³ /d)			30,000 (m ³ /d)			50,000 (m ³ /d)			100,000 (m ³ /d)			
	15 year	20 year	25 year	15 year	20 year	25 year	15 year	20 year	25 year	15 year	20 year	25 year	
Total water production (10 ⁴ m ³)	5475	7300	9125	16425	21900	27375	27375	36500	45625	54750	73000	91250	
Chemicals	3300	3996	4556	9887	11976	13652	16486	19969	22763	32973	39937	45526	
Labor	6083	7368	8399	9887	11976	13652	11402	13811	15743	15207	18419	20996	
RO module	1952	2364	2695	5857	7094	8087	9761	11823	13477	19523	23646	26955	
Power	4,0 kWh/m ³	16632	20145	22964	49897	60436	68893	83161	100726	114821	166311	201439	229627
	3,5 kWh/m ³	14522	17590	20051	43657	52878	60277	72758	88125	100457	145526	176264	200930

Table 9. The range of water price (unit : ₩/ m³)

Items	10,000 (m ³ /d)			30,000 (m ³ /d)			50,000 (m ³ /d)			100,000 (m ³ /d)			
	15 year	20 year	25 year	15 year	20 year	25 year	15 year	20 year	25 year	15 year	20 year	25 year	
Incheon/ Daesan	Min.	915	833	714	890	734	630	837	692	595	780	647	557
	Max.	956	870	748	930	770	663	877	727	627	819	682	589
Yeosu	Min.	868	790	680	841	697	601	795	660	569	742	618	534
	Max.	908	826	713	880	733	633	833	695	601	780	653	566
Busan	Min.	869	791	681	842	699	602	796	661	570	743	619	535
	Max.	909	827	714	881	734	634	835	696	602	782	654	567
Ulsan/ Sokcho	Min.	865	787	677	838	695	599	792	658	567	739	616	533
	Max.	905	823	711	877	730	631	830	693	599	778	651	564

용한다.⁵¹⁾ 본 연구에서도 이 기법을 활용하여 생산수 단가를 계산하였다. 생애주기 분석은 초기투자비와 유지관리비 등의 시설물 사용 연수기간 내에 발생하는 비용 일부 혹은 전부를 산출하는 것을 의미한다. 따라서 각 비용별 전체 사용 연수의 선정과 이를 통한 총 비용을 생산된 총 생산수량으로 나눌 경우 생산수 단가가 결정될 수 있다. 이 분석을 위해서 가장 중요한 것은 실질적인 할인을 산출인데 이것에 대한 분석은 본 연구의 범위를 넘는 것으로 사료되며, 따라서 2006년 한국수자원공사에서 발표된 할인을 수치 4.5%를 참고하여 계산하였다.

또 하나의 중요 인자는 수명연수가 있으며, 이는 법인세법 시행규칙 중 별표 6에 수도사업은 20년(최소 15년~최대 25년)으로 규정하고 있으므로 이를 적용하여 각각의 인자에 대한 생애주기에 따른 계산결과를 Table 8에 나타내었다. 전력비는 3.5~4.0 kWh/m³ 범위에 있을 것으로 예측되었으므로 이를 고려하여 계산되었으며, 생애주기비용에서 설비교체주기에 따른 비용은 Fig. 5의 비율을 고려하여 계산하였다. Table 9는 이런 사항들을 고려하여 계산된 생산수 단가의 범위를 계산한 것으로 서해의 도시는 557~956 원/m³, 남해의 도시는 534~909원/m³ 그리고 동해의 도시는 533~905원/m³ 범위에 있는 것으로 계산되었다. 이러한 차이를 나타내는 가장 큰 이유는 생애주기에 따른 감가상각과 플랜트 용량에 의한 것으로 서해의 경우 72%까지 가격 차이가 발생하였다. 그러나 여기에서 계산된 생산수 가격에는 슬러지 처분비용, 카트리지 필터, 모래여과, MF/UF 교체비용 등을 포함하는 기타비용이 생략되어 있으므로 이러한 비용까지 포함할 경우 전체 생산수 가격은 Fig. 5에서 볼

수 있는 것처럼 증가할 여지를 가지고 있다. 따라서 Table 9에 나타난 생산수 단가는 가장 최소한의 생산수 단가로서 이해해야 한다. 특히 서해의 경우 실질적으로 1 km 이내의 취/배수관을 설치할 수 있는 지점이 많지 않을 것이므로 이 경우 당연히 많은 단가상승이 예측된다.

3. 결론

국내 수자원의 다변화를 위하여 해수담수화 플랜트는 지속적으로 발주될 것으로 예상되는바 가장 가능성이 높은 지역 6곳을 선정하여 생산수 단가의 범위를 추정하고자 하였다. 속초와 울산시 생산수 단가 범위는 조건에 따라 533~905원/m³, 부산과 여수시는 534~909원/m³로 큰 차이가 발생하지 않았으나, 인천과 대산시는 557~956원/m³으로 비교적 높은 단가를 나타내었다. 지역에 따른 단가의 차이는 서해 조수간만의 차에 의한 취수시설 건설비용에 의해 발생하였으며, 같은 지역에서 생산수 단가 차이는 플랜트 용량과 감가상각 연수가 지배적인 요소로 조사되었다. 그러므로 국내에서 해수담수화 플랜트를 건설하고자 할 경우는 동해바다를 취수원으로 하는 것이 유리하며, 서해에서는 취수시설 건설비용에 의해 경제성이 좌우될 수 있는 것으로 사료된다. 또한 수온차가 남해에 비하여 인천, 대산 그리고 속초시의 경우 높기 때문에 이 지역에서 운전 최적화를 위해서는 VFD 설치를 고려하는 것이 유리할 것으로 예상된다. 그러나 본 연구에서 계산된 생산수 단가는 간접비를 추가하지 않았으며, 슬러지 처분비용을 포함한 기타 O&M이

빠진 비교적 중요한 요소에 대해서만 계산한 것으로 최소한의 단가이다. 만약 이러한 요소를 추가할 경우 조건에 따라서 1,000원/m³이 넘을 수 있을 것으로 사료되며, 생산수 공급을 위한 배관비용까지 포함할 경우 더 높은 생산수 가격을 나타낼 수 있다. 그러므로 본 연구에서 제시된 생산수 단가는 최소한의 생산수 단가임을 고려해야 하나, 100,000 m³/d 이상의 규모에서는 송수관로 비용을 제외한 모든 조건을 포함해도 1,000원/m³ 내외로 생산수 단가를 조정할 수 있을 것으로 예상된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(과제번호17IFIP-B089914-04)에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

- Jamaly, S., Darwish, N. N., Ahmed, I. and Hasan, S. W., "A short review on reverse osmosis pretreatment technologies," *Desalination*, **354**, 30~38(2014).
- Qureshi, B. A., Zubair, S. M., Sheikh, A. K., Bhujle, A. and Dubowsky, S., "Design and performance evaluation of reverse osmosis desalination systems: An emphasis on fouling modeling," *Appl. Thermal Eng.*, **60**, 208~217(2013).
- Desalination Markets 2016, Global Water Intelligence(2015).
- Chang, J.-S., "Understanding the role of ecological indicator use in assessing the effects of desalination plants," *Desalination*, **365**, 416~433(2015).
- Desalination Markets 2010, Global Water Intelligence(2010).
- Karagiannis, I. C. and Soldatos, P. G., "Water Desalination Cost : Literature Review and Assessment," *Desalination*, **223**, 448~456(2008).
- Glueckstern, P., "History of Desalination Cost Estimations," (2004) <http://132.68.226.240/english/pdf/IDS/71.pdf>.
- Campos, C., "The Economics of Desalination for Various Uses," www.rac.es/ficheros/doc/00731.pdf.
- 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).
- 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.
- Jonhson, J. and Busch, M., "Engineering Aspects of Reverse Osmosis Module Desalting," www.lenntech.com.
- Shrivastava, A., Rosenberg, S. and Peery, M., "Energy efficiency breakdown of reverse osmosis and its implications on future innovation roadmap for desalination," *Desalination*, **368**, 181~192(2015).
- Subramani, S. and Panda, R. C., "Statistical regression and modelling analysis for reverse osmosis desalination process," *Desalination*, **351**, 120~127(2014).
- Du, Y., Xie, L., Liu, Y., Zhang, S. and Xu, Y., "Optimization of reverse osmosis networks with split partial second pass design," *Desalination*, **365**, 365~380(2015).
- Voutchkov, N., *Desalination Engineering Planning and Design*, McGraw Hill, New York(2013).
- Raucher, R. S., Clements, J., Xu, P., Oxenford, J., Ruetten, J., Choto, Z. and Reiss, R., *Guidelines for Implementing Seawater and Brackish Water Desalination Facilities*, Water Research Foundation and Arsenic Water Technology Partnership(2010).
- Malaeb, L. and Ayoub, G. M., "Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review," *Desalination*, **267**, 1~8(2011).
- Jiang, A., Biegler, L. T., Wang, J., Cheng, W., Ding, Q. and Jiangzhou, S., "Optimal operations for large-scale seawater reverse osmosis networks," *J. Membr. Sci.*, **476**, 508~524 (2015).
- Alnouri, S. Y. and Linke, P., "Optimal seawater reverse osmosis network design considering product water boron specifications," *Desalination*, **345**, 112~127(2014).
- JianWang, J., Biegler, L. T., Cheng, W., Xing, C. and Jiang, Z., "Operational cost optimization of a full-scale SWRO system under multi-parameter variable conditions," *Desalination*, **355**, 124~140(2015).
- Choi, J.-S. and Kim, J.-T., "Modeling of full-scale reverse osmosis desalination system: Influence of operational parameters," *J. Ind. Eng. Chem.*, **21**, 261~268(2015).
- Status of O&M of Seawater Desalination Plant, Ministry of Environment Korea(2014).
- Seawater Desalination Project, K-water(2010).
- Mabrouk, A. A., Nafey, A. S. and Fath, H. E. S., "Thermo-economic Analysis of Some Existing Desalination Processes," *Desalination*, **205**, 354~373(2007).
- Dore, M. H. I., "Forecasting the Economic Costs of Desalination Technology," *Desalination*, **172**, 207~214(2005).
- Voutchkov, N., "World Class Desalination Energy & the Environment," www.adelaide.edu.au(2011).
- Lin, S. and Elimelech, M., "Staged reverse osmosis operation: Configurations, energy efficiency, and application potential," *Desalination*, **366**, 9~14(2015).
- www.desaldata.com.
- Established Rule on the Calculation for Local Waterworks Charge, Ministry of Government Administration and Home Affairs(2013).
- Wilf, M., Awerbuch, L., Bartels, C., Mickley, M., Pearce, G. and Voutchkov, N., *The Guidebook to Membrane Desalination Technology*, Balaban Desalination Publications, Italy(2007).
- Report of Real-time Korea Oceanographic Observations, National Oceanographic Research Institute(2015).
- Goosen, M. F. A., Sablani, S. S., Al-Maskari, S. S., Al-Belushi, R. H. and Wilf, M., "Effect of Feed Temperature on Permeate Flux and Mass Transfer Coefficient in Spiral-Wound Reverse Osmosis Systems," *Desalination*, **144**, 367~372(2002).

33. Wilf, M. and Bartels, C., "Optimization of Seawater RO systems design," *Desalination*, **173**, 1~12(2005).
34. Annual Reports by Korea Ocean Monitoring Network 2015, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, www.khoa.go.kr.
35. The Annual Report on Statics of Oceans and Fisheries 2015, Ministry of Oceans and Fisheries, www.mof.go.kr.
36. The Detail Research Planning Report for Center for Seawater Desalination Plant, Center for Seawater Desalination Plant in Gwangju Institute Science and Technology(2007).
37. The Study on the Optimization Guide for the Construction and Operation of Seawater Desalination Plant, Ministry of Environment, K-Water(2002).
38. Korea Price Index, www.kpi.or.kr.
39. Hwang, M. H. and Kim, I. S., "Comparative Analysis of Seawater Desalination Technology in Korea and Overseas," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(5), 255~268(2016).
40. Avlonitis, A. A., Kouroumbas, K. and Vlachakis, N., "Energy Consumption and Membrane Replacement Cost for Seawater RO desalination Plants," *Desalination*, **157**, 151~158(2003).
41. Poullikkas, A., "Optimization Algorithm for Reverse Osmosis Desalination Economics," *Desalination*, **133**, 75~81(2001).
42. Lu, Y. Y., Hu, Y. D., Xu, D. M. and Wu. L. Y., "Optimum Design of Reverse Osmosis Seawater Desalination System Considering Membrane Cleaning and Replacing," *J. Membr. Sci.*, **282**, 7~13(2006).
43. Glueckstern, P., "History of Desalination Cost Estimations," Proceeding of the International Conference on Desalination Costing, 1~17(2004).
44. Prihasto, N, Liu, Q. F. and Kim, S. H., "Pre-treatment Strategies for Seawater Desalination by Reverse Osmosis System," *Desalination*, **249**, 308~316(2009).
45. "Seawater Desalination Costs," White Paper, WATER REUSE Association, Desalination committee, <http://waterreuse.org>. (2012).
46. Wang, Y. "Optimization of Integrated Seawater Desalination & Salt Production," Environmental Engineering Project, www.researchgate.net(2014).
47. Voutchkov, N., "How Much Does Seawater Desalination Cost?," Texas Nonvative Water 2010, <http://slideplayer.com> (2010).
48. The Amendment for the Assessment Rule on the Status of Operation and Management of Purification Plant, Ministry of Environment, Korea(2008).
49. "Membrane Desalination Costs," American Membraen Technology Association, www.amtaorg.com(2007).
50. Desalting Handbook for Planners, Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No, 72(2003).
51. The Method on Assessment and Analysis for Life Cycle Cost, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (2008).