

Cost comparison of pretreatment processes in large SWRO desalination plant

대규모 해수담수화 플랜트에서의 전처리공정 비용 분석

Youngmin Kim¹ · Jin-Ho Kim² · Sangho Lee³ · Chang-Kyu Lee¹ · Kwang Duk Park¹ · June-Seok Choi^{*}

김영민¹ · 김진호² · 이상호³ · 이창규¹ · 박광덕¹ · 최준석^{*}

¹한국건설기술연구원 환경연구실 · ²에코니티 · ³국민대학교

Abstract : A cost analysis method for pretreatment processes of a large scale seawater desalination plant was considered using a cost estimation model, WaTER (Water Treatment Estimation Routine). This model is based on cost functions of U.S. EPA to conduct economic analysis of water treatment facilities. A virtual seawater desalination plant which has pretreatment production capacity of 100,000 m³ per day was chosen as a model plant. Dual media filtration and microfiltration systems were compared as pretreatment process, and the following reverse osmosis process was modeled. As a result, microfiltration showed a price competitiveness in condition of operating with reverse osmosis process by reducing the loads of water treatment and membrane cleaning despite its high annual cost.

Key words : SWRO desalination plant, pretreatment process, cost analysis

주제어 : 해수담수화 플랜트, 전처리 공정, 비용 분석

1. 서론

전 세계 담수시장의 약 60 %를 차지(Global Water Intelligence, 2012)할 정도로 SWRO (seawater reverse osmosis) 기술은 이미 시장 주도형 기술로 성장하였으므로 RO 공정의 성능 유지를 위해서는 효과적인 전처리가 필수적이다. 해수담수화 전처리 기술로는 응집, 침전을 포함한 여재여과, 용존공기부상법(dissolved air floatation; DAF) 및 저압 막여과 방식이 활용되고 있다(Edzwald et al., 2011).

여과 방식은 여재 통과방식에 따라 중력식 또는

압력식으로 구분할 수 있다. 압력식은 중소규모 플랜트에서 주로 활용되며, 40,000 m³/day 이상의 대규모 플랜트에서는 안트라사이트와 모래를 이용한 이중여과 방식(dual media filtration; DMF)의 중력식이 주로 사용된다(Voutchkov, 2010). 일반적으로 여재의 확보가 용이하고 2단으로 구성할 경우 용존 유기물의 처리도 가능한 장점이 있으나, 여과지 등의 건설비용이 높은 단점이 있다.

반면 MF 또는 UF를 이용한 저압 막여과 방식은 막과 모듈, 세정 및 계측 설비 등의 초기 투자비용이 높은 단점이 있으나, 여재여과 방식에 비해 부지 소요면적이 작고 안정된 수질확보가 가능하다(Ahn et al., 2009). 따라서 후단 설비에 대

• Received 22 July 2013, revised 04 October 2013, accepted 07 October 2013.

* Corresponding author: Tel : +82-31-910-0659 Fax : +82-31-910-0291 E-mail : jschoi@kict.re.kr

한 처리 부하를 줄여줄 수 있으므로 SWRO 설비의 유지관리에 용이하다.

전처리 방식은 해수 원수의 수질과 수원 특성에 따라 장단점이 있다. 해당 프로젝트에 적합한 전처리 기술을 선정하기 위해서는 처리 성능 및 생애주기 분석, 모형실험을 통해 적절하게 선정할 필요가 있다(Voutchkov, 2010a).

본 연구는 대규모 SWRO 담수 시스템을 대상으로 경제적 측면에서 보다 적절한 전처리 기술을 선정할 수 있도록 그 방법론을 제시하는데 목적이 있다. 모형실험을 대규모로 수행하는 것은 현실적인 어려움이 있으므로, 비용 분석을 통해 여재여과 또는 분리막 전처리 설비, 후단의 SWRO 설비 활용에 따른 생산비용을 비교하였다.

2. 분석 방법

본 연구는 대규모 SWRO 담수 플랜트에서의 건설비용, 유지관리비용을 산정함으로써 각 처리 방식의 경제성을 분석하였다. 전처리 용량은 RO 세정빈도 등 유지관리 항목 값의 참조를 위해서 선행연구(Henthorne, 2007)의 25 MGD에 상응하는 100,000 m³/일 규모를 대상으로 하였다. DMF 및 가압식 MF 공정 등 전처리 공정, 후속 공정인 RO 공정의 생산 비용을 비교하였다. 분석 모형으로는 USBR (United States Bureau of Reclamation)의 WaTER (Water Treatment Estimation Routine) 모형을 사용하였다. 본 모형은 미국 EPA에서 발간한 수처리 설비 비용곡선(U.S. EPA, 1979)을 기반으로 하며, ENR (Engineering News Record)의 연도별 가격지수(cost index)를 고려하여 개발되었다(Wilbert et al., 1999). Table 1은 비용 환산을 위한 ENR 비용항목 및 가격지수(2013년 7월 기준)를 나타낸다. 비용함수 산정 비용에 가격지수를 곱하여 현재 가치로 환산하였다.

총 건설비용은 직접비(direct capital cost), 간접비(indirect capital cost)의 합으로부터 산

정하였으며, 총 건설비용으로부터 자본회수 비용(capital recovery)을 산정한 후 유지관리 비용과 합산하여 연간 1 m³ 생산비용을 산정하였다. 이자율 5%, 상환기간 30년 기준으로 연간 할부상환(amortization) 조건으로 계산하였다.

Table 1. ENR cost categories and indices

Cost indices category	Cost index	Used for
ENR construction cost index		
Construction cost	3.35	Manufactured & electrical equipment
Wage	3.73	Labor for operating the plant
ENR building cost index		
Building cost	3.07	Housing
Skilled labor	3.67	Excavation and sitework
ENR materials cost index		
Materials	2.35	Piping & valves
Materials	2.35	Maintenance materials
Cement	2.30	Concrete
Steel	3.20	Steel
Other		
Electricity cost	2.33	Power

2.1 DMF

DMF 공정은 중력식 여과 워크시트를 활용하여 모의하였다. 중력식 여과에 따른 비용곡선은 아래 식과 같다(Qasim, 1992). Table 2에 DMF로 100,000 m³/day 처리 시의 모형 입력 변수와 입력치를 정리하였다.

$$CC_{BW} = 36,000 + 1,254.21 \cdot x - 0.1212 \cdot x^2 \quad (1)$$

$$CC_{GF} = 35,483.47 \cdot x^{0.591} \cdot e^{13.62 \times 10^{-4} \cdot x} \quad (2)$$

$$OM_{BW} = 73.3 \cdot x^{0.75} + 2,200 \quad (3)$$

$$OM_{GF} = 359.5 \cdot x^{0.8568} + 8,100 \quad (4)$$

$$Y = 38,319 \cdot x + 21,377 \quad (5)$$

CC_{BW} 는 역세설비 건설비용, CC_{GF} 는 중력식 여과 구조물 건설비, OM_{BW} 는 역세펌프 운전 및 유지관리비, OM_{GF} 는 여과 구조물의 운전 및 유지관리비이다. Y는 여재 충전 비용이며, x는 DMF 여재

층 소요 면적(ft²)이다(Kawamura et al., 2008).

Table 2. Input parameters for estimating DMF annual cost

Parameter	Input value	Note
Media filtration recovery(%)	96	(Henthorne, 2007)
Desired flow rate(m ³ /day)	100,000	
Temperature(°F)	68.0	
Total Suspended Solids(mg/l)	10.0	
Wash cycle(hours)	24	
TSS density(g/L)	35	
Media depth(m)	1	
Maximum media capacity(L-TSS/m ³)	1	
Loading rate(gpm/sqft)	4.0	(Henthorne, 2007)

2.2 가압식 MF

가압식 MF 공정은 모듈 당 1개의 막(막 면적 90 m²)이 설치되는 중공사막(Econity Ltd.) 타입을 대상으로 하였다. 100,000 m³ 처리수 생산에 필요한 모듈 수를 계산하였으며, 모듈 수에 따른 총 건설 및 유지관리 비용을 산정하였다. Table 3은 가압식 MF 비용 산정을 위한 입력값을 나타낸다.

Table 3. Input parameters for estimating annual cost of the pressurized MF

Parameter	Input value	Note
Plant availability(%)	94	
Planned operation time per day(%)	100	
MF product flow rate(m ³ /day)	100,000	
Membrane and module cost(USD/m ²)	25	
Flow per module(gpm)	33.02	2 m/d 기준
Number of membranes per module	1	
Backwash flow(gpm)	1	
Backwash intervals(minutes)	38	
Backwash and backflush duration(minutes)	1	
CEB duration(minutes)	2	
CEB times(times/day)	1	
Recovery rate(%)	93	(Henthorne, 2007)

2.3 RO

RO 공정은 단위 모듈(element)의 실제 플럭스를 아래 식들로부터 산정한 후, 회수율에 따라 RO 생산수량과의 비율로 모듈, 베셀 및 스킴(skid)의 수를 산정하였다.

$$A = \frac{J_v}{NDP_0} \quad (6)$$

$$NDP_0 = P_{app} - P_{osm} \quad (7)$$

$$P_{osm} = 0.99 \cdot 2 \cdot R \cdot (273.15 + T) \cdot C_w / 1,000 \quad (8)$$

$$J_v = A(P_{app} - P_{osm}) \quad (9)$$

A는 물질 전달계수 [m³/m²·sec·Pa], J_v는 초기 또는 실제 모듈 처리량 [m³/day], NDP₀는 순 구동 압력(net driving pressure) [kPa], P_{osm}은 원수의 삼투압 [kPa], P_{app}는 구동 압력 [kPa]을 나타낸다. Table 4에 RO 공정 모의를 위한 입력 값을 정리하였다.

Table 4. Input parameters for estimating RO process performance

Parameter	Input value	Note
Feed Total dissolved solids(mg/l)	35,000	
Average molecular weight(g/mol)	35.82	
Feed flow(l/s)	1,157.4	pretreatment process permeate
Recovery(%)	45	
Chloride rejection(%)	99.1	
Osmotic pressure per module(kPa)	3,220	SW30-8040 (FilmTec)
Net driving pressure per module(kPa)	2,280	SW30-8040
Module productivity(m ³ /day)	23	SW30-8040
Area per module(m ²)	27.7	SW30-8040
Operating water temperature(°C)	25	
Number of elements per vessel	7	
Max vessels per skid	60	
membrane life(years)	3	
membrane diameter(cm)	20.32	SW30-8040

DMF 또는 가압식 MF 공정 등의 전처리 공정 특성 상 후단 공정인 RO 시스템에 미치는 영향에 차이가 있다. 문헌을 참고하여 각 연속공정(DMF-RO, MF-RO)의 RO 세정 빈도, RO막 교체 비율, 카트리지 필터 사용 여부 등 유지관리 차이에 따른 연간 비용을 산정하였다(Table 5).

Table 5. Input parameters for estimating preprocess influence of RO process

Parameter	Input value		Note
	DMF-RO	MF-RO	
Labor	20	19	(Henthorne, 2007)
RO Membrane replacement(%)	15	12	
Cleaning frequency(times)	4	2	(Voutchkov, 2010b)
Cartridge filters	○ (381,296USD/yr)	× (0USD/yr)	

3. 결과 및 고찰

3.1 전처리 연간비용 비교

Table 6과 같이 WaTER 모형으로 DMF 및 MF 전처리 비용을 산정하였다. 총 건설비용의 경우 MF가 DMF에 비해 약 15% 증가한 것으로 나타났으며, 유지관리비도 MF 방식이 40% 이상 증가하는 것으로 나타났다. 이는 DMF가 식(3) - (5)의 비용함수로 산정되어 간략화된 영향이 있겠으나, MF 공정이 모듈 설치에 따른 건설비용과 세정약품, 인건비 등의 유지관리비가 높기 때문으로 판단된다.

Table 6. Detailed economic analysis for pretreatment processes

Cost items	Pretreatment process	
	DMF	MF
Direct capital cost(USD/yr)	NE*	4,979,035
Indirect capital cost(USD/yr)	NE	1,992,000
Total construction cost(USD)	6,081,623	6,971,035
Capital recovery(USD/yr)	395,618	453,476
Total O&M cost(USD/yr)	458,656	750,239
Annual cost(USD)	854,274	1,203,715
Annual cost per m ³ (USD/m ³)	0.024	0.035

*NE : Not estimated. DMF의 경우 비용함수로써 총 건설비용만 연산 가능함.

연간 자본회수(capital recovery)와 유지관리 비용을 합산한 연간비용이 증가함으로써 m³ 당 생산비용도 MF (0.035 USD/m³)가 DMF (0.024 USD/m³)에 비해 높게 나타났다.

상기 결과는 전처리 설비의 처리수 기준 100,000 m³/day 생산 시, 모듈 단가 25 USD/m² 시의 연간 소요비용을 나타낸다. 처리 용량 변화에 따른 전처리 소요비용의 편차를 비교하였다(Fig. 1). 1,000,000 m³/day까지 전처리 비용을 비교한 결과, 전용량에 걸쳐 DMF의 연간 비용이 MF에 비해 낮게 산정되었다. MF 방식의 높은 초기 투자비, 유지관리 비용으로 인해 전처리 공정 간의 단독 비교를 통해서는 경제성 확보가 어려운 것으로 판단된다.

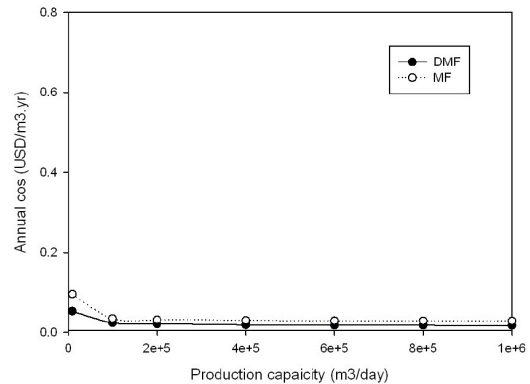


Fig. 1. Annual pretreatment cost of the virtual desalination plant by production capacity

3.2 RO 연간비용 비교

Table 5의 전처리 방식 별 유지관리 특성에 따른 RO 연간비용을 산정하였다. Table 7과 같이 전처리 방식 별 RO 소요비용을 계산한 후, 각 전처리 비용과 합산하여 DMF-RO 및 MF-RO 연속 공정을 각각 비교하였다.

먼저 각 전처리 방식 별 RO 소요비용을 살펴 보면, 총 건설비용엔 차이가 없으나 전처리 방식 별 유지관리 특성 차이로 인해 연간 유지관리 비용이 MF를 통과한 RO 공정이 적게 소요되는 것으로 나타났다. MF 전처리를 통한 RO막 처리부

Table 7. Detailed economic analysis for RO and continuous processes

Cost items	Process			
	RO after DMF	RO after MF	DMF-RO	MF-RO
Direct capital cost(USD/yr)	11,899,980	11,899,980	NE	16,879,015
Indirect capital cost(USD/yr)	3,212,995	3,212,995	NE	5,204,995
Total construction cost(USD/yr)	15,112,974	15,112,974	21,194,597	22,084,009
Capital recovery(USD/yr)	983,121	983,121	1,378,739	1,436,597
Total O&M cost(USD/yr)	3,074,594	2,538,755	3,533,251	3,288,994
Annual cost(USD)	4,057,715	3,521,876	4,911,989	4,715,591
Annual cost per m ³ (USD/m ³)	0.247	0.214	0.271	0.250

하가 줄어든 영향으로 판단된다.

각 전처리 연간비용과의 합산을 통해 연속 공정의 비용을 검토한 결과, 총 건설비용의 경우 MF-RO가 DMF-RO에 비해 약 4%의 비용 상승이 있으나, 유지관리 비용은 약 7% 정도 감소되었다. 연간 자본회수를 고려하면 매년 소요비용은 유지관리 비용에 따라 결정되므로, 연간 소요비용 및 m³ 당 생산비용은 MF-RO 공정이 약 8% 정도 적게 소요되는 것으로 나타났다.

연속 공정의 처리 용량 변화에 따른 총 연간 m³당 생산비용을 비교하였다. Fig. 1으로부터 전처리 단독 비교의 경우 MF 공정의 연간비용이 더 높았으나, MF 공정 후단 RO 공정의 유지관리 비용의 감소로 인해 MF-RO 연속 공정이 DMF-RO 공정에 비해 연간 소요비용이 낮은 것을 볼 수 있다.

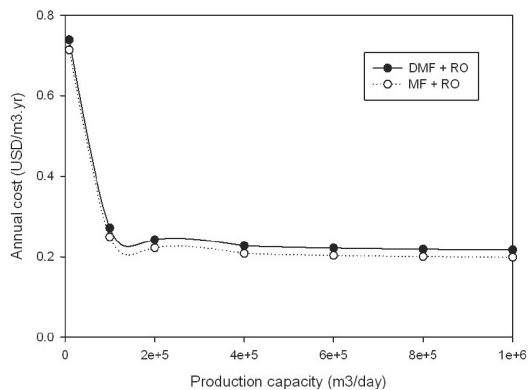


Fig. 2. Annual cost of continuous processes which were consisted of pretreatment and the following RO process by production capacity

다만, 본 결과는 DMF 공정의 소요비용이 비용함수로 인해 단순화된 결과이며, 특히 외국의 과거 시장자료를 2013년 현재가치로 환산한 결과이므로 국내 실정에 맞는 DMF 공정의 비용 산정 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

WaTER 모형을 통해 대규모 해수담수화 전처리 공정 및 RO 공정의 연간 소요비용을 비교하였다.

- 1) 100,000 m³/day 전처리 수 생산, 25 USD/m² MF 모듈단가 기준 하에서 DMF 공정과의 전처리 연간 비용을 산정한 결과 DMF 공정이 MF 공정에 비해 낮게 산정되었다.
- 2) MF 방식의 높은 초기 투자비, 유지관리 비용으로 인해 전처리 공정 간의 단독 비교를 통해서는 DMF 방식에 비해 소요비용이 큰 것을 볼 수 있다.
- 3) 전처리 후 RO 연속 공정을 살펴본 결과, MF 전처리를 통한 후속 공정에 대한 처리부하 경감, 유지관리 비용 감소에 따라 MF-RO 공정이 DMF-RO 공정에 비해 소요비용이 적은 것으로 나타났다.
- 5) 외국 문헌 및 시장자료를 통한 분석 결과이므로 국내 여건을 고려한 비용 분석방법 마련이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국토해양부 플랜트기술고도화사업(과제번호 #07해수담수B03-02), 플랜트연구개발사업(과제번호 13IFIP-B065893-01)과 R&D 정책·인프라사업 기술사업화 지원(과제번호 11TRPI-C057432-01)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Ahn, C.H., Lee, W.I., Yoon, J.Y. (2009) An Overview of the Pretreatment Processes in Seawater Desalination Plants using Reverse Osmosis Membranes, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 23(6), pp. 811-823
- Edzwald, J.K., Haarhoff, J. (2011) Seawater pretreatment for reverse osmosis: Chemistry, contaminants, and coagulation, *Water Research*, 45, pp. 5428-5440.
- Global Water Intelligence (2012) IDA *DESALINATION Yearbook 2011-2012*, <http://www.desaldata.com>.
- Henthorne, L. (2007) Evaluation of Membrane Pretreatment for Seawater Reverse Osmosis *Desalination*, United States Bureau of Reclamation.
- Kawamura, S., McGivney, W.T. (2008) *Cost Estimating Manual for Water Treatment Facilities*, Wiley.
- Qasim, S.R. et al., (1992) Estimating Costs for Treatment Plant Construction, *J. AWWA*, pp. 57-62
- Voutchkov, N. (2010a) Considerations for selection of seawater filtration pretreatment system, *Desalination*, 261, pp. 354-364.
- Voutchkov, N. (2010b) *Seawater Pretreatment*, 1st Ed. p.132, Water Treatment Academy.
- Wilbert, M.C., Pellegrino J., Scott, J., Zhang, Q. (1999) *Water Treatment Estimation Routine WATER) User Manual*, United States Bureau of Reclamation.