

에너지 소모를 고려한 역삼투 해수담수화 플랜트 주요 성능인자 영향 분석

김 지 혜 · 이 경 혁 · 임 재 림[†]

K-water 연구원 맑은물연구소
(2019년 9월 25일 접수, 2019년 10월 7일 수정, 2019년 10월 8일 채택)

Comprehensive Analysis of Major Factors Associated with the Performance of Reverse Osmosis Desalination Plant for Energy-saving

Jihye Kim, Kyung-Hyuk Lee, and Jae-Lim Lim[†]

Water Works Research Center, K-water Research Institute
(Received September 25, 2019, Revised October 7, 2019, Accepted October 8, 2019)

요 약: 기후변화로 인해 가속화되고 있는 충남 지역 가뭄현상에 대응하고 대산 임해산업단지의 증가하는 용수 수요를 만족하기 위해서, K-water에서는 100,000 m³/일 규모 역삼투 해수담수플랜트 건설 사업을 추진하고 있다. 이에 본 연구에서는 해수담수플랜트 운영비용의 70% 이상을 담당하는 역삼투 공정 성능에 영향을 미치는 주요 인자에 대한 성능 분석을 수행하였다. 대산 지역 해수 염분농도 및 수온 변화 조건에서 RO 공정의 전력소모는 2.39 ± 0.13 kWh/m³로 나타났으며, 막여과유속과 회수율이 낮을수록 전력소모가 절감되어 연간 운영비용이 감소하였다. 주요 막 제조사별 고유량 막의 성능 비교 결과, 전량 2단 여과공정(full two pass) 기준 생산수 TDS는 평균 3.84 mg/L로 양호하였고, 전력소모는 2.22 ± 0.13 kWh/m³ 수준으로 확인되었다. 역삼투 공정 구성을 전량 2단 여과방식에서 partial 또는 split partial 방식으로 변경함에 따라 전력소모는 최대 0.29 kWh/m³, 막모듈 설치비용은 최대 15.6% 절감 가능할 것으로 기대된다.

Abstract: A worsened drought in Chungnam province of Korea due to climate change and increasing water demand at Daesan industrial complex have motivated the 100,000 m³/d seawater desalination project. In this study, therefore, the comprehensive analysis of parameters affecting the reverse osmosis (RO) performance was conducted. Under the various conditions of feedwater salinity and temperature in Daesan, energy consumption was calculated as 2.39 ± 0.13 kWh/m³. The decrease in membrane flux and recovery rate positively impacted annual operation cost. The average total dissolved solids (TDS) of the permeate and energy consumption with highly permeable membrane according to the membrane manufacturer were 3.84 mg/L and 2.22 ± 0.13 kWh/m³, respectively. In addition, energy saving up to 0.29 kWh/m³ or cost reduction of membrane module up to 15.6% is expected by changing the RO configuration from full two pass to partial or split partial two pass.

Keywords: reverse osmosis, seawater desalination, energy consumption, performance factor

1. 서 론

전 세계적인 기후변화 현상은 강수량을 비롯한 물 순환 체계 전반에 영향을 미치고 있으며 지표수 및 지하수 등 담수 자원으로서의 접근성을 악화시키고 있다[1]. 이에 따라 대체 수자원 확보를 위해 다단 플래쉬, 다단효용

방식 등의 증발식과 분리막을 이용한 역삼투(reverse osmosis, RO) 방식 해수담수화 기술이 발전하였다. 에너지회수 장치 및 분리막 기술이 발달하면서 증발식 대비 역삼투 해수담수화의 공사비용은 최대 60%, 생산수 단가는 최대 38%까지 감소하였고[2], 지리적 여건에 의한 제한이 적고 신뢰성이 검증된 장점 때문에[3,4], 현

[†]Corresponding author(e-mail: jllim@kwater.or.kr, <http://orcid.org/0000-0002-3319-6754>)

재 발주되거나 발주 예정인 해수담수플랜트의 약 90%가 역삼투 방식을 적용하고 있다[5]. 국내에는 수자원 확보가 어려운 도서지역에 10~100 m³/일 규모 해수담수 시설이 100여개 설치되어 있으며, 중·대 규모로는 국가 R&D 과제를 통해 해수담수화 사업단에서 부산 기장에 구축한 45,000 m³/일 규모 시설과 광양제철소 공업용수 공급을 위해 포스코 건설에서 민간사업으로 구축한 30,000 m³/일 시설이 있다[6].

서해 지역에 위치한 대산 임해산업단지는 세계 4위 에틸렌 생산을 담당하고 있으며, 현대오일뱅크, 한화토탈, 롯데케미칼, LG화학 KCC 등 대산 5사 외에도 여러 기업들이 입주해있다. 현재 대산 임해산업단지에서 필요한 용수는 아산공업정수장 침전수를 원수로 이용하는 기수담수화 시설(K-water 대산 산업용수센터)에서 약 119,000 m³/일을 공급하고 있으며, 부족분은 인근 대호지에서 공급받아 각 기업에서 보유하고 있는 역삼투 시설을 통해 자체 생산하여 활용하고 있다. 하지만 기후변화로 인해 충남 지역의 가뭄현상이 지속되면서 농업용 저수지인 대호지에서 취수 가능한 물량이 크게 감소하여 용수 확보에 어려움을 겪고 있다. 또한, 산업단지 내 일부 기업의 경우 생산시설 확충이 진행 중이거나 예정하고 있는 것으로 나타나 향후 용수 수요가 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 K-water에서는 대산 임해산업단지에 필요한 용수 공급을 위하여 국내 최대 규모인 100,000 m³/일 역삼투 해수담수플랜트를 구축 및 운영하고자 한다.

역삼투 해수담수플랜트는 취수, 전처리, 역삼투, 후처리, 방류 등의 공정으로 구성되며, 그 중 역삼투 설비는 전체 건설비용의 40~60%, 운영비용의 70~80%를 차지하기 때문에 비용을 절감하기 위해서는 역삼투 공정의 설계 및 운영 최적화가 반드시 필요하다[7]. 이에 Kim은 전 세계 70개 이상의 대규모 해수담수플랜트 운영자료 조사를 통해 유입수 염분농도, 목표 수질, 장치(펌프, 에너지회수장치 등) 효율 등이 역삼투 공정 전력소모에 미치는 영향에 대하여 분석한 바 있다[8]. 해수담수화는 원수 수질 및 사업 특성에 따라 공정 성능 및 비용에 차이가 큰 편이므로, 실제 대상 지역의 현황을 고려한 성능검토가 반드시 필요하다.

따라서 본 연구에서는 해수담수화플랜트 성능에 영향을 미치는 주요 요소인 염분농도, 수온, 막여과유속, 회수율 변화에 대한 RO 공정의 투과수질 및 에너지 사용량에 대한 분석을 통하여, 대산 임해지역에 건설될

100,000 m³/일 규모 해수담수플랜트의 운영비용을 절감할 수 있는 설계 및 운영 방향을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 해수담수플랜트 주요 영향인자

해양환경공단 연안해역환경측정망 자료를 활용하여 대산 지역 1997~2018년 해수 수질데이터 분석 결과, 염분농도(total dissolved solids, TDS)는 평균 31,200 mg/L, 수온은 평균 13°C로 확인되었다. 또한, 대산 인근지역 해수 샘플링(2016~2017년, 총 26회) 및 대산 임해산업단지 내 구축한 해수담수 모형플랜트 운영(2018년)을 통해 자체적으로 확보한 데이터 분석 결과, 대산 지역 해수의 연간 염분농도는 28,000~34,000 mg/L, 수온은 5~30°C 범위로 연안해역환경측정망 자료와 유사한 수준으로 나타났다. 이에 본 연구는 유입 원수 수질조건인 평균 TDS 31,200 mg/L 및 수온 13°C에서 성능 분석을 수행하였다.

2.1.1. 염분농도

농도 차에 의한 확산을 주요 메커니즘으로 하는 역삼투 공정에서 유입수 염분농도는 성능에 직접적인 영향을 미친다. 반트호프 법칙(식 1)에 따라 동일 온도 조건에서 유입수 염분농도가 증가하면 유입수 삼투압이 증가하기 때문에, 동일유량을 생산하기 위한 소요압력이 증가하게 되고 운영비용이 상승하게 된다.

$$\pi = i \times C \times R \times T \quad (1)$$

π : 삼투압(bar), i : 삼투계수(-), C : 몰농도(mol/L),

R : 기체상수(atm · L/mol · K), T : 절대온도(K)

2.1.2. 수온

유입 원수 온도가 증가하면 물의 점도가 감소하게 되며 낮아진 물의 점도는 역삼투막의 수투과도(water permeability)를 증가시킨다[9]. 역삼투 공정의 여과유량(유속)은 다음 식 (2)에 의하여 표현되며, 막 저항이 감소하면 동일 여과유량을 생산하기 위해 필요한 압력이 감소하여 운영비용이 감소하게 된다.

$$J = \frac{(\Delta P - \Delta \pi)}{\mu R_m} = A(\Delta P - \Delta \pi) \quad (2)$$

Table 1. Comparison of Feedwater TDS and Recovery Rate of Worldwide Desalination Plants

Desalination plant (Country)	Feedwater TDS (mg/L)	Recovery rate (%)
Tuaspring (Singapore)	31,600	45
Tuas 3 (Singapore)	32,000~35,000	50
Calrsbad (USA)	34,500	< 50
Ghalirah (UAE)	42,000	40
Al Ghubrah (Oman)	45,000	38
Mirfa (UAE)	48,700	43

J : 여과유속(L/m² · h), μ : 점도(Pa · s),
 R_m : 막 저항(1/m), A : 수투과도(L/m² · h · bar),
 P : 소요압력(bar), π : 삼투압(bar)

R : 회수율(%), Q_p : 생산유량(m³/h),
 Q_F : 유입유량(m³/h)

2.1.3. 막여과유속

막여과유속은 단위면적당 여과유량으로 정의되며, 설계 관점에서 다음 식 (3)과 같이 나타낸다. 여과유속이 증가하면 생산물량이 증가되나, 여과유속을 과도하게 설계하면 막오염을 심화시키고 운전압력을 증가시켜 운영비용 증가를 야기한다.

$$J = Q_p \times \frac{1,000}{(N_v \times N_m \times A_e)} \tag{3}$$

J : 여과유속(L/m² · h), Q_p : 생산유량(m³/h),
 N_v : 총 베셀개수, N_m : 베셀당 막모듈개수,
 A_e : 유효 막면적(m²)

일반적인 해수담수화 공정에서 1단 역삼투 공정의 적정 여과유속은 13.5~18 L/m² · h, 2단 역삼투 공정의 적정 여과유속은 35~45 (2단 1차, 2-1) 및 25~35 L/m² · h (2단 2차, 2-2) 수준으로 운영된다[10].

2.1.4. 회수율(Recovery)

역삼투 공정의 회수율은 유입유량 대비 생산유량을 의미하며 다음 식 (4)와 같이 표현된다. 회수율을 증가시킬 경우 소요압력이 상승하여 역삼투 공정의 전력소모는 증가하지만, 역삼투 공정 유입유량을 감소시키므로 전단공정(취수, 전처리 등)의 규모 및 운영비용이 감소되는 장점이 있다.

$$R = \frac{Q_p}{Q_F} \times 100 \tag{4}$$

해수담수플랜트 회수율은 대상 지역의 수질 및 사업 특성을 고려하여 결정되며, 대상 지역과 염분농도가 유사한 지역의 해수담수플랜트 방문조사 결과, 1단 역삼투 공정 회수율은 약 40~50% 수준으로 운영되고 있음을 확인하였다(Table 1).

2.2. 역삼투 해수담수플랜트 성능모사

역삼투막의 주요 제조사인 Dupont (미국), Hydranautics (일본), LG화학(한국), Toray (일본) 등에서는 역삼투 공정의 성능모사가 가능한 프로젝트용 소프트웨어를 무료로 제공하고 있다. 본 연구에서는 K-water 대신 해수담수화 사업 타당성 조사 및 기본계획과의 연계성을 위해 Hydranautics社의 IMSDesign을 이용하여 주요 성능인자에 대한 비교분석을 수행하였다[11].

본 성능모사를 위한 기본 조건으로 역삼투 공정은 생산수 기준 100,000 m³/일 규모로 10 + 1개 트레인(10,000 m³/일/트레인)으로 구성하였으며, 에너지회수장치가 설치된 전량 2단 여과방식으로 회수율은 52.6 (1단) 및 90% (2단), 막여과유속은 13.4 (1단) 및 24.2 L/m² · h (2단)로 가정하였다. 각 절에서 별도의 설명이 없는 한, 주요 설비효율은 1 및 2단 펌프 효율 84.1%, 부스터 펌프 효율 83%, 모터 효율 93%, 인버터 효율 97%를 적용하였다. 1 및 2단 역삼투 막모형은 각각 SWC6-MAX 및 ESPA2-MAX이며 막 노후가 진행되지 않은 초기 운전 상태를 기준으로 하였다.

2.3. 역삼투 해수담수화 공정 운전방식

역삼투 해수담수화 공정은 1단 역삼투 처리수 분기 유·무 및 위치에 따라 전량 2단 여과(full two pass,

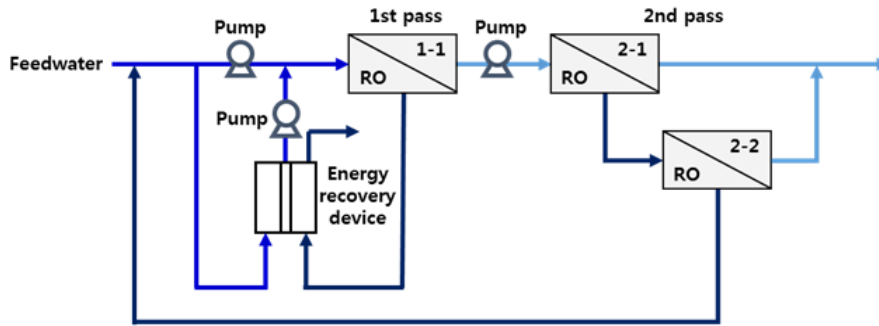


Fig. 1. Schematic diagram of the full two pass RO process.

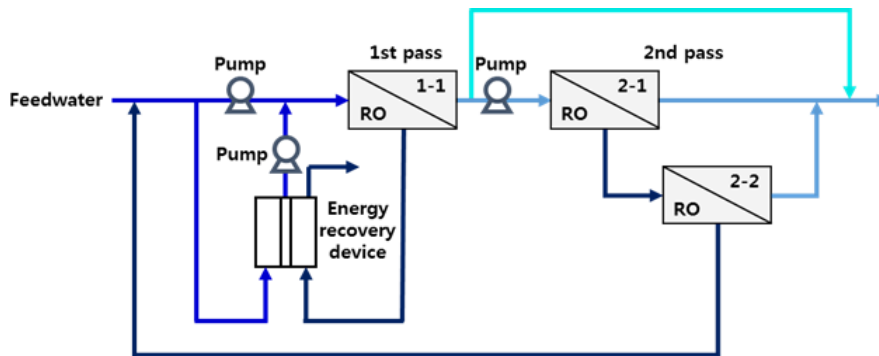


Fig. 2. Schematic diagram of the partial two pass RO process.

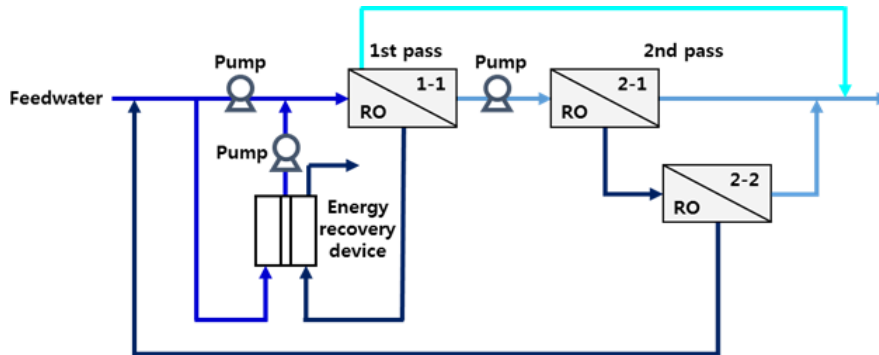


Fig. 3. Schematic diagram of the split partial two pass RO process.

Fig. 1), partial two pass (Fig. 2), split partial two pass (Fig. 3)로 구분된다. 전량 2단 여과 방식은 유입 해수 TDS가 높거나 생산수의 요구수질 기준이 높은 경우(낮은 TDS) 적용되며, 1단 역삼투 공정 처리수를 전량 2단 역삼투 공정에서 재처리한다. Partial two pass는 1단 역삼투 처리수를 분기시켜 일부만 2단 역삼투 공정에서 처리 후 혼합하여 공급하며, split partial two pass는 1단 역삼투 공정의 전단모듈에서 생산되는 낮은 TDS의 생산수와 2단 역삼투 처리수를 혼합하는 방식이다. 두 방식 모두 1단 역삼투 처리수를 분기하는 방법이나 그 위

치가 각각 베셀 끝과 베셀 내 전단모듈(보통 2~3번 모듈)이라는 차이가 있다. 해수담수플랜트는 수온에 의한 막의 투과성능 변화를 고려하여 겨울철보다 처리수질이 악화되는 여름철을 기준으로 설계된다. 생산수 요구수질기준에 여유가 있는 경우, 계절에 따른 생산수질 차이를 고려하여 partial 또는 split partial을 적용하여 설계할 수 있으며 이를 통해 전량 2단 여과 대비 2단 역삼투 공정의 규모 및 전력 소모 측면에서 비용 절감이 가능하다.

Table 2. Comparison of RO Performance according to Feedwater TDS

Feedwater TDS (mg/L)	28,000	31,200	34,000
Feedwater osmotic pressure (bar)	19.5	21.7	23.6
Operating pressure (bar)	43.7	48.2	51.9
Energy consumption (kWh/m ³)	2.22	2.40	2.55

3. 결과 및 고찰

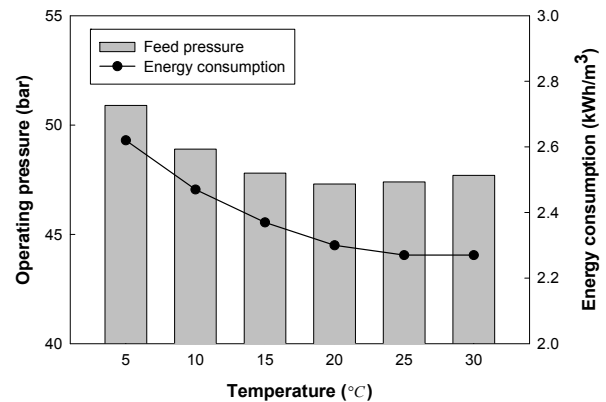
3.1. 염분농도의 영향

유입 해수의 염분농도는 반트호프 법칙(식 1)에 의하여 유입수 삼투압과 직접적인 상관관계가 있으며, 역삼투 공정 소요압력 및 전력소모에 큰 영향을 미친다. 대산 지역 유입 원수 염분농도(TDS) 28,000~34,000 mg/L 범위에서 유입수의 삼투압은 약 19.5~23.6 bar이며, 생산물량 10,000 m³/일(10,000 m³/일/트레인)을 만족하기 위해서 43.7~51.9 bar의 압력이 소요된다(Table 2). 따라서 평균 염분농도 31,200 mg/L일 때 전력소모 2.40 kWh/m³ 기준, 대산 지역 유입 해수 염분농도 변화에 따른 전력소모는 약 ± 7%의 차이를 나타내는 것으로 확인되었다. 성능모사에 적용된 회수율, 막여과유속 및 주요 설비 효율은 2.2절에 명시된 것과 같다.

3.2. 수온의 영향

대산 지역 해수 평균 염분농도 31,200 mg/L 기준, 수온이 5°C에서 30°C로 증가할 때 반트호프 법칙(식 1)에 의하여 유입 원수 삼투압은 약 2 bar (21 → 23 bar) 증가한다. 하지만 수온이 증가하면 물의 점도가 낮아지기 때문에 수온이 5°C에서 30°C로 증가할 때 유입 원수의 점도는 약 24% 감소($1.52 \times 10^{-3} \rightarrow 7.98 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$)하며, 운전압력은 약 3.2 bar 감소한다(Fig. 4). 이에 따라 대산 지역 평균 수온(13°C)의 전력소모 2.4 kWh/m³ 대비 95~109% 변화하는 것으로 확인되었다. 성능모사에 고려된 회수율, 막여과유속 및 주요 설비 효율은 2.2절에 명시된 것과 같다.

수온이 증가할 때 해수 삼투압 대비 점도 변화량이 크기 때문에 전반적으로 운전압력이 감소하는 경향이 나타난다. 유입수 온도 20°C 이상에서 운전압력이 다소 증가하는 현상이 나타난 것은 온도가 높을 때 막의 압밀화(compaction)가 성능 저하에 미치는 영향이 증가하기 때문인 것으로 사료된다[12].

**Fig. 4.** Operating pressure and energy consumption according to feedwater temperature.

3.3. 막여과유속의 영향

역삼투 공정에서 막여과유속이 증가하면 소요압력이 증가하여 에너지 소모가 증가하고 막오염이 심화될 수 있지만, 생산수 TDS가 감소하고 총 설치 막모듈 개수가 감소하는 장점이 있다. 역삼투 공정 전력소모의 80% 이상을 차지하는 1단 역삼투 공정에 대하여 막여과유속이 13~18 L/m²·h (이하 LMH)로 변할 때 성능을 비교한 결과는 Table 3과 같다. 회수율, 주요 설비효율 및 2단 막여과유속은 2.2절의 기본 조건에서 제시된 것과 동일하게 적용하였다. 성능모사 결과, 최종 생산수질은 K-water 대산산업용수센터에서 현재 대산임해 산업단지에 공급하고 있는 산업용수의 수질기준(TDS 65 mg/L 이하)을 충분히 만족하는 것으로 확인되었다. 즉, 1단 역삼투 공정의 막여과유속이 13에서 18 LMH로 증가함에 따라 RO 공정의 전력소모가 0.16 kWh/m³ 증가하고 연간 전력비는 약 584 백만원/년 증가하지만, 막교체비는 약 322 백만원/년 감소할 것으로 예상된다. 전력비와 막교체비를 모두 고려한 역삼투 공정 연간 운영비용은 막여과유속이 증가할수록 증가하는 경향을 보이며, 주어진 조건에서 운영비용을 최소화할 수 있는 1단 역삼투 막여과유속은 13~14 LMH 범위일 것으로 판단된다(Fig. 5). 본 연구에서는 역삼투막 교체주기 5.7년(연

Table 3. Comparison of RO Performance at Various Membrane Flux of 1st pass RO

Membrane flux (LMH)	13	13.4	14	15	16	17	18
Product water TDS (mg/L)	4.00	3.85	3.72	3.44	3.22	3.02	2.87
RO energy consumption (kWh/m ³)	2.39	2.40	2.42	2.45	2.48	2.52	2.55
# of membrane module for replacement (ea/yr)	2,485	2,431	2,377	2,269	2,174	2,093	2,026
RO energy cost (Million ₩/yr)	8,724	8,760	8,833	8,943	9,052	9,198	9,308
Membrane replacement cost (Million ₩/yr)	1,740	1,702	1,664	1,588	1,522	1,465	1,418
RO operation cost (Million ₩/yr)	10,463	10,462	10,497	10,531	10,574	10,663	10,726

Table 4. Comparison of RO Performance at Various Recovery Rate of 1st pass RO

Recovery rate (%)	40	42	44	46	48	50	52.6
Product water TDS (mg/L)	3.25	3.32	3.40	3.48	3.58	3.70	3.85
Feedwater flowrate (m ³ /d/train)	27,780	26,457	25,255	24,157	23,150	22,224	21,126
Total plant energy consumption (kWh/m ³)	3.31	3.32	3.34	3.36	3.38	3.42	3.47
Total plant energy cost (Million ₩/yr)	12,082	12,118	12,191	12,264	12,337	12,483	12,666

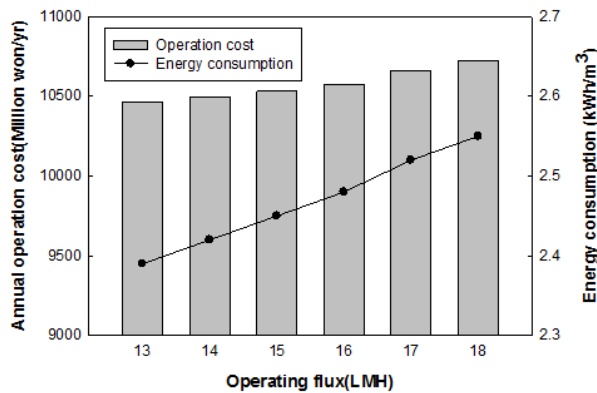


Fig. 5. Operating pressure and energy consumption according to feedwater temperature.

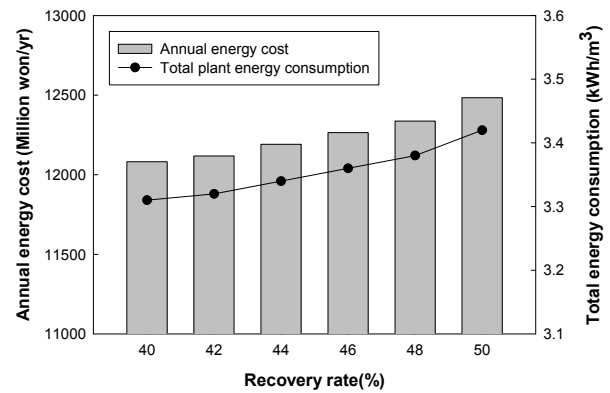


Fig. 6. Annual energy cost and energy consumption of desalination plant according to recovery rate.

간교체율 17.54%), 막모듈 단가 70만원/개, 전력단가는 100원/kWh를 적용하였고, 연간 운영비용 분석 시 실제 역삼투 시설 운영비용의 60% 이상을 차지하는 전력비와 막 교체비만을 고려하였다.

3.4. 회수율의 영향

역삼투 공정에서 회수율이 감소하면 소요압력이 감소하여 전력비용이 감소하지만, 동일 생산물량을 만족하기 위한 유입유량이 증가하여 전단공정(취수~전처리)의 전력소모 및 규모가 증가하게 된다. 현재 가동 중인 국내의 주요 해수담수플랜트의 2단 역삼투 공정 회수율은 평균 90%로 운영되고 있기 때문에 본 연구에서는 1

단 역삼투 공정의 회수율 변화에 따른 성능 변화만을 분석하였으며, 연간 전력비용 비교를 위해 역삼투 공정을 제외한 취수, 전처리 공정 및 기타 공조 설비의 전력소모 합은 수두 차 등을 고려하여 1.07 kWh/m³라고 가정하였다.

Table 4는 1단 역삼투 공정 회수율 40~52.6% 변화시의 성능비교 결과를 나타내며, 모든 조건에서 생산수 TDS는 대산 산업단지 요구수질을 만족하는 것으로 확인되었다. 회수율이 40%에서 50%로 증가함에 따라 해수담수플랜트 전력소모는 0.11 kWh/m³, 연간 전력비는 약 401백만원/년 증가하므로 전력비용 절감을 위해서는 낮은 회수율이 유리할 것으로 사료된다(Fig. 6). 하지만

Table 5. Projection Software and Membrane Models based on Membrane Manufacturer

Membrane manufacturer	Company D	Company H	Company L	Company T
Projection software	WAVE	IMSDesign	Q+	TorayDS2
Membrane model	SEAMAXX (1st) ECO PRO 440i (2nd)	SWC6-MAX (1st) ESPA2-MAX (2nd)	SW440ES (1st) BW440ES (2nd)	TSW-440LE (1st) TM720D-440 (2nd)

Table 6. Comparison of RO Performance based on Membrane Manufacturer (model)

Membrane manufacturer	Company A	Company B	Company C	Company D
Product water TDS (mg/L)	2.75	3.85	4.63	4.13
RO Energy consumption (kWh/m ³)	2.19	2.40	2.18	2.11
# of membrane module for replacement (ea/yr)	2,445	2,431	2,431	2,445
RO operation cost (Million ₩/yr)	9,705	10,462	9,659	9,413

주어진 조건에서 회수율 증가에 따라 단위 트레인당 유입물량은 최대 6,654 m³/일까지 감소되어 전단공정의 공사비용을 절감할 수 있을 것으로 예상되므로, 최적 회수율 도출을 위해서는 전단 공정의 공사비용에 대한 상세한 검토가 추가로 필요하다.

3.5. 역삼투 막 제조사(모델) 영향

역삼투막 제조사(D사, H사, L사, T사 등)에서는 사용자 수요에 맞추어 고유량막, 고염제거율막 등 성능을 특화한 여러 종류의 막을 보유하고 있다. 고유량막을 사용하면 운전압력을 감소시켜 전력비용이 절감되지만 염제거율은 상대적으로 낮고, 고염제거율막은 생산수질이 향상되나 동일물량을 생산하기 위한 운전압력이 비교적 높은 편이다. 따라서 생산수 요구수질 기준을 만족하는 상황이라면 고유량막을 선택하는 것이 비용절감 측면에서 유리하다. 본 연구에서는 각 막 제조사에서 제공하는 프로젝트 소프트웨어를 활용하여 고유량막 적용 시 역삼투 성능을 분석하였으며 제조사별 적용한 막 모델은 Table 5와 같다.

Table 6은 역삼투막 제조사별 고유량막을 적용하여 생산수질 및 운영비용 등 성능을 비교한 결과이며, 민감성을 고려하여 각 제조사는 이니셜과 무관하게 A~D로 표기하였다. 평균 수질조건에서 생산수 TDS는 3.84 ± 0.80 mg/L로 현재 대산 산업단지 산업용수 공급수질 대비 매우 양호한 수준으로 나타났으며, 제조사에 따라 보유한 고유량막 모델의 사양 차이 때문에 동일 막여과 유속(1단 13.4 L/m²·h, 2단 24.2 L/m²·h)을 만족하기 위해 필요한 총 막모듈 개수가 달라져 연간 막 교체수

량에서 최대 14개 차이가 발생한다. 역삼투 공정 전력 소모는 2.22 ± 0.13 kWh/m³로 C 제조사 역삼투막 사용 시 가장 낮은 값을 나타낸다. 주어진 성능모사 조건에서 막 교체비와 전력비를 고려한 역삼투 공정 연간 운영비용은 9,413~10,462백만 원으로 예상되며, 그 차이는 역삼투막의 사양 차이뿐만 아니라 각 소프트웨어별 막 압밀화 영향 고려 여부에서 기인한 것으로 사료된다. 한편, 막오염 영향을 반영할 수 없는 프로젝트 소프트웨어의 한계점 때문에 각 제조사 별 막오염 속도차이로 인한 막 세정비용의 차이는 본 연구에서 고려되지 않았다.

3.6. 역삼투 공정 구성방식 비교

역삼투 해수담수화 공정 구성방식에 따라 전량 2단 여과, partial two pass, split partial two pass의 성능을 비교한 결과는 Table 7과 같다. Partial 및 split partial 방식 적용 시 유입 해수 수질기준(TDS 31,160 mg/L, 수온 13°C)에서 생산수 TDS 40 mg/L를 만족하도록 설계하였으며, 막모듈 개수를 전량 2단 여과 방식과 동일하게 설정하여 막여과 유속이 변경되는 경우와 막여과 유속을 동일하게 유지하기 위해 막모듈 개수를 변경하는 경우 두 가지에 대하여 각각 비교하였다. Partial 방식과 split partial 방식에서 1단 역삼투 생산유량 중 2단 역삼투 바이패스 비율은 각각 평균 14 및 36%로 나타났으며, 본 성능모사 시 적용한 각 단의 회수율과 주요 설비 효율은 2.2절에 명시한 바와 같다.

막모듈 개수를 기존과 동일하게 유지한 상태에서 partial 또는 split partial 방식을 적용할 경우 2단 역삼투

Table 7. Comparison of RO Performance based on Process Configuration

Contents	Full 2 pass		Partial two pass				Split partial two pass			
			Change in membrane flux		Change in # of membrane modules		Change in membrane flux		Change in # of membrane modules	
	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
Membrane flux (L/m ² · h)	13.4	24.3	13.3	20.5	13.4	24.3	12.9	15.2	13.4	24.3
RO permeate flowrate (m ³ /d/train)	11,111	10,000	10,940	8,460	10,938	8,442	10,700	6,300	10,670	6,030
# of total membrane module (ea/train)	840	420	840	420	833	357	840	420	812	252
RO energy consumption (kWh/m ³)	2.40		2.26		2.31		2.11		2.20	

공정의 유입유량 감소로 인해 막여과유속이 감소한다. 이에 따라 동일 생산물량을 만족하기 위한 소요압력이 감소하기 때문에 전력소모가 절감된다. 기존 전량 2단 여과 대비, partial 적용 시 약 0.14 kWh/m³, split partial 적용을 통해 약 0.29 kWh/m³까지 전력소모를 절감할 수 있으며, 낮은 막여과유속으로 운전되기 때문에 막 세정주기가 연장될 것으로 기대된다. Partial 또는 split partial 방식을 적용하되 막여과 유속을 기존과 동일하게 유지하는 경우에는 막 개수가 감소하여 공사비용 절감이 가능하다. 기존 전량 2단 여과 대비, 설치 막모듈 개수는 partial 적용 시 약 5.6%, split partial 적용 시 약 15.6% 감소할 것으로 예상되며, 약 0.09-0.20 Wh/m³ 수준의 전력소모 절감효과도 다소 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유입 원수 수질조건(염분농도, 온도), 운전조건(막여과유속, 회수율, 구성방식) 및 제조사별 막 모델 특성에 따른 해수담수플랜트 역삼투 공정의 성능을 평가하였다.

1) 유입 해수의 염분농도가 증가하면 삼투압이 증가되어 소요 에너지가 증가하게 되며, 수온이 감소하면 삼투압은 감소되나 점도가 상승하여 막의 수투과도를 감소시키기 때문에 에너지 소모가 증가하는 경향을 나타내었다. 대산 지역 염분농도 28,000~34,000 mg/L 및 수온 5~30°C 범위에서 전력소모는 약 2.39 ± 0.13 kWh/m³로 확인되었다.

2) 1단 역삼투 공정 막여과유속 13~18 L/m² · h 조건에서 성능평가 결과, 막여과유속이 증가함에 따라 역삼투 공정의 연간 전력비용은 약 584 백만원/년 증가하지만 막 교체비용은 약 322 백만원/년 감소하였으며, 막여

과유속 13~14 L/m² · h 범위에서 운영비용(전력비 및 막 교체비)이 최소화되는 것으로 확인되었다. 또한, 1단 역삼투 공정 회수율을 증가시키는 경우(40 → 50%), 취수, 전처리, 역삼투 공정을 포함한 해수담수플랜트 연간 총 전력비용은 약 401 백만원/년 증가할 것으로 판단된다.

3) 주요 역삼투막 제조사의 고유량 막의 성능을 비교한 결과, 평균 수질조건에서 전량 2단 여과 후 생산수 수질은 3.84 ± 0.8 mg/L으로 현재 대산 지역 산업용수 공급기준을 만족하였으며, 전력소모는 약 2.22 ± 0.13 kWh/m³로 나타났다.

4) 역삼투 공정 구성방식인 전량 2단 여과, partial two pass, split partial two pass 방식에 대하여 성능분석 결과, 막여과유속 변경(막 개수 고정)에 따른 전력소모 절감효과는 기존대비 최대 0.29 kWh/m³, 막 개수 변경(막여과유속 고정)에 따른 필요 막모듈 개수는 최대 15.6% 절감 가능한 것으로 확인되었다.

5) 역삼투 해수담수플랜트 성능에 영향을 미치는 요소들에 대하여 대산 지역 해수 수질을 기준으로 그 성능을 비교 평가함으로써 국내 최대 규모(100,000 m³/일) 해수담수플랜트 건설 및 운영 시 방향을 제시하는 주요 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 국내외 해수담수화 사업 추진 시 활용 가능할 것으로 기대된다.

감 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 플랜트연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(148-5016423).

Reference

1. S. P. Good and K. K. Caylor, "Climatological determinants of woody cover in Africa", *PNAS*, **108**, 4902 (2011).
2. M. K. Wittholz, B. K. O'Neill, C. B. Colby, and D. Lewis, "Estimating the cost of desalination plants using a cost database", *Desalination*, **229**, 10 (2008).
3. R. Tautenbach, T. Linn, and D. M. K. Al-Gobaisi, "Present and future pretreatment concepts-strategies for reliable and low-maintenance reverse osmosis seawater desalination", *Desalination*, **110**(1-2), 97 (1997).
4. J. Kim, M. Park, S. A. Snyder, and J. H. Kim, "Reverse osmosis (RO) and pressure retarded osmosis (PRO) hybrid processes: Model-based scenario study", *Desalination*, **322**, 121 (2013).
5. Global Water Intelligence, "Desalination markets 2016" (2015).
6. M. Hwang and I. S. Kim, "Comparative analysis of seawater desalination technology in Korea and overseas", *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**, 225 (2016).
7. N. Voutchkov, "Desalination cost assessment and management", pp. 156-158, Water Treatment Academy, Bangkok, Thailand (2011).
8. J. Kim, K. Park, D. R. Yang, and S. Hong, "A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants", *Appl. Energy*, **254** (2019).
9. M. Wilf, "The guidebook to membrane desalination technology", pp. 15-16, Balaban Desalination Publications, Hopkinton, MA, USA (2011).
10. N. Voutchkov, "Desalination engineering planning and design", pp. 422-429, McGraw-Hill, New York, USA (2013).
11. K-water, "Feasibility study and basic planning for the seawater desalination project in Daesan coastal industrial complex", 6-190-6-196 (2019).
12. J. Blazheska, "Insight in the thin-film polyamide membrane structure after compaction", Ph.D. Dissertation, Univ. of Rovira I Virgili, Tarragona (2016).