

원수 블렌딩이 해수담수화 역삼투 공정 성능에 미치는 영향

김 지 혜 · 박 형 진 · 이 경 혁 · 권 병 수 · 권 순 범 · 임 재 림[†]

K-water 연구원 물이용연구소

(2020년 4월 13일 접수, 2020년 6월 8일 수정, 2020년 6월 18일 채택)

Impact Analysis of Water Blending to Reverse Osmosis Desalination Process

Jihye Kim, Hyung Jin Park, Kyung-Hyuk Lee, Bounsu Kwon, Soonbuhm Kwon, and Jae-Lim Lim[†]

Water Works Research Center, K-water Research Institute, 1689 beon-gil 125, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34045
Republic of Korea

(Received April 13, 2020, Revised June 8, 2020, Accepted June 18, 2020)

요 약: 2018년 환경부에서 발표된 수도정비기본계획에 따라 다양한 수자원 활용의 중요성이 증가하고 있으며, 여러 수원을 혼합하여 원수 또는 생산수로 활용하는 워터 블렌딩 방식은 미국, 호주를 비롯한 여러 나라에서 시도되고 있다. 본 연구에서는 공업용수 공급 목적으로 100,000 m³/일 규모 해수담수화 사업이 추진되고 있는 충남 대산 지역을 대상으로, 해수와 호소수, 침전수, 폐수 방류수 등 타 수원을 블렌딩할 때 수종 및 혼합비율에 따른 영향을 분석하였다. 타 수원 혼합비율 10~50% 조건에서 혼합수 염분농도는 약 50%까지 감소하였지만, 탁질 및 유기물 농도는 1.6~2.0배 수준으로 증가하는 것을 확인하였다. 실험실 규모 역삼투 공정 성능평가 결과, 해수의 단독활용 대비 원수 혼합 시 막오염 경향이 증가하였으며 혼합비율 10~50%에서 평균 4.1배의 플럭스 저감률을 나타내었다. 성능모사를 통한 역삼투 공정 성능분석에 따르면 혼합비율 50% 조건에서 역삼투 공정 에너지 사용량이 평균 39% 절감될 수 있을 것으로 기대되나, 운영비용 등 혼합수 활용에 대한 전반적인 영향분석을 위해서는 모형플랜트 규모에서 장기간 성능평가가 필요하다.

Abstract: The utilization of multiple water sources becomes important due to the master plan for development of water supply released by Ministry of Environment, Korea in 2018. In this study, therefore, the analysis of comprehensive effect in blending applicable water sources in Daesan where 100,000 m³/d seawater desalination plant will be constructed for industrial use was performed. The increase in mixing ratio of other water sources with seawater reduced salinity up to 50%, but negatively impacted the turbid and organic matter. Lab-scale reverse osmosis performance test also found that membrane fouling was exacerbated in blended water condition. The simulation results of reverse osmosis indicated 39% energy saving on average is expected at the one-to-one blending ratio, however, long-term performance test at the pilot-scale plant is highly required to evaluate the inclusive impact of mixing seawater and other water sources.

Keywords: water blending, multiple water sources, smart water grid, seawater desalination, reverse osmosis

1. 서 론

인구증가, 산업화 및 기후변화 현상이 심화됨에 따라 지난 세기 물 스트레스는 상당히 증가하였으며[1,2], 2050년에는 전 세계 인구의 절반 이상이 극심한 물 부족 문제를 겪을 것으로 전망된다[3]. 한국의 경우 연평

균 강수량은 1,150 mm로 세계 평균 대비 높은 수준이지만 강수량의 60% 이상이 여름에 집중되어 있는 문제가 있다[4]. 2014~15년에는 극심한 가뭄 발생으로 연간 총 강수량이 1973~2015년 대비 35~50% 수준으로 급감하는 상황이 발생하면서[5] 수자원 확보의 중요성이 지속적으로 대두되고 있다.

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

현재 부족한 수자원을 확보하기 위하여 전 세계적으로 해수담수화 기술이 널리 활용되고 있다. 특히 분리막 기술 발달에 따른 막 비용 절감 및 에너지회수장치 적용으로 역삼투 해수담수화 방식의 물 생산단가가 증발식 대비 최대 38%까지 감소하면서[6], 현재 건설 중이거나 발주 예정인 해수담수플랜트의 90% 이상이 역삼투 기술을 적용하고 있다[7]. 국내에는 수도 관망을 통한 직접 물 공급이 어려운 도서지역을 중심으로 소규모 (10~100 m³/일) 역삼투 해수담수화 시설이 설치·운영되고 있고, 중·대규모로는 국가 R&D 예산으로 기장에 구축된 45,000 m³/일 시설, 민간자본으로 광양에 구축·운영 중인 30,000 m³/일 시설이 있다. 또한, 충남 지역에 계속된 가뭄으로 인해 감소한 대호지 취수물량 및 공장 시설 확충으로 증가한 물 수요로 인해 수자원 확보에 어려움을 겪고 있는 대산 임해산업단지(에틸렌 생산 세계 4위 수준으로 롯데케미칼, 한화토탈, 현대오일뱅크, KCC, LG화학 등이 위치함)의 안정적 산업용수 공급을 위하여, K-water에서 100,000 m³/일 규모 역삼투 방식 해수담수화플랜트 건설 사업을 추진하고 있다.

한편, 2010년대 초반에 호소수, 지하수, 빗물, 해수, 하수처리수 등 다양한 수원을 활용하여 원수나 생산수 혼합(워터 블렌딩)을 통해 사용자를 효율적으로 만족시킬 수 있는 스마트워터그리드 개념이 국내에 소개된 바 있다[8,9]. 이에 앞서 미국 플로리다 주에서는 해수, 지표수, 지하수를 원수로 이용하여 서로 다른 시설에서 생산된 물을 혼합하여 공급한 사례가 있으며[10,11], 호주 시드니에서는 해수담수화 시설의 생산수와 기존 정수 시설의 생산수를 혼합할 때 야기될 수 있는 문제점에 대한 연구를 진행하였다[12]. 생산수를 혼합하는 측면에서 실제 적용 또는 연구한 해외 사례와는 달리, 국내에서는 해수와 담수를 혼합하여 역삼투 공정의 유입수로 공급하는 경우에 대한 성능모사 연구가 진행된 사례가 있다[13].

2018년 7월 환경부에서 발표한 수도정비기본계획 수립지침에 따르면 수자원 이용 우선순위는 빗물, 하·폐수 처리수 재이용, 대체 취수원 개발 순서로 제시되었다[14]. 지속가능하고 효율적인 수자원 확보를 위해서는 수도정비기본계획 지침 및 국내외 워터 블렌딩 사례를 참고하여 지역 여건에 맞는 다양한 수자원 활용 방안을 모색할 필요가 있다. 예를 들어, 해수에 염분농도가 낮은 타 수원을 혼합하여 원수로 활용하는 경우 역삼투 공정 운전압력이 감소하여 에너지 절감 효과를 얻을 수

있으나[13], 유입 원수의 유기물 함량 증가로 막 세정 빈도가 증가하여 운영비용이 증가할 가능성이 있기 때문에 실제 상업 시설에 적용하기 위해서는 종합적인 검토가 선행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 대산 임해산업단지를 대상으로 해수 및 기타 수원(호소수, 하·폐수 처리수 등)의 혼합수에 대한 혼합 비율별 수질분석, 실험실 규모 성능평가 및 프로세스 프로그램 기반 성능모사를 통하여, 해수담수화 시설에서 해수 및 인근 수원 연계 활용에 대한 영향을 고찰하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 대산 지역 활용가능 수원 종류

대산 인근지역에서 해수와 혼합 활용이 가능할 것으로 기대되는 수원 조사 결과를 바탕으로, 대호지 호소수, 아산정수장 침전수, 대산산업용수시설 폐수방류수를 검토대상으로 선정하였다. 충남 서부 지역의 적은 강우량 및 잦은 가뭄으로 인해 빗물 활용은 어려우며, 주변 지하수는 물량이 충분하지 않아 검토대상에서 제외되었다.

대호지 호는 대산산업단지에서 약 8 km 거리에 위치한 농업용 저수지로, 산업단지 내 입주한 일부 기업에서는 대호지 물을 원수로 하여 자체 용수공급을 위한 역삼투 담수화시설을 운영하고 있다. 아산정수장 침전수는 현재 대산 산업단지에 약 119,000 m³/일(전체 산업단지의 산업용수 사용량의 50% 수준)의 용수를 공급하고 있는 K-water 대산 산업용수시설의 원수로 사용되고 있으며, 정밀여과 및 역삼투 공정을 거쳐 산업용수가 생산되는 과정에서 발생하는 다량의 농축폐수는 적절한 처리 후 하천에 방류된다. 서산 하수처리장은 K-water에서 구축 예정인 100,000 m³/일 해수담수플랜트 부지에서 약 40 km 이격되어 있어 본 연구에서는 대산 산업용수시설의 폐수방류수를 검토대상에 포함하였다.

2.2. 대산 지역 인근 수원 연간 수질변화 분석

대산 지역에서 활용 가능한 수원의 연간 수질변화 분석을 위하여 다음과 같은 방법으로 수질 데이터를 확보하였다. 해수는 K-water 연구원에서 2016~2017년 먹어섬 인근에서 직접 채수하여 분석한 데이터이며, 아산정수장 침전수는 대산 산업용수센터의 운영데이터(2016~2018년), 폐수방류수는 국립환경과학원의 수질원격감시

Table 1. Characteristics of Reverse Osmosis Membrane

Contents	Permeate flow rate	Stabilized salt rejection	Minimum salt rejection	Boron rejection
LG SW R	9,000 gpd	99.85%	99.7%	93%

Test condition: NaCl 32,000 ppm (Boron 5 ppm), Pressure 800 psi, Temperature 25°C, pH 8, Recovery 8%

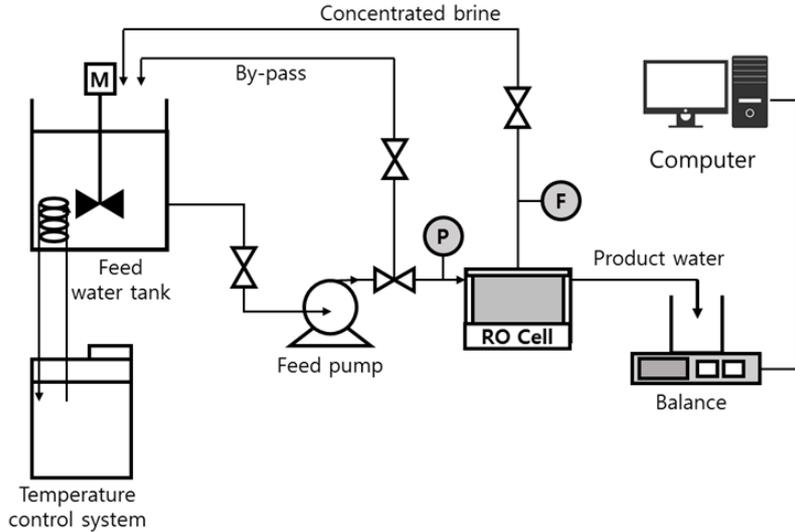


Fig. 1. Lab-scale reverse osmosis system.

체계(tele-monitoring system, TMS) 데이터(2016~2018년), 대호지 호소수는 환경부 물환경 정보시스템에서 제공하는 데이터(2016~2018년)를 각각 활용하였다.

2.3. 대산 지역 인근 수원 혼합 비율별 성능평가

2.3.1. 수원별 채수 및 전처리

해수 및 기타수원 혼합비율에 따른 수질분석 및 성능평가를 위하여 대산항, 현대오일뱅크 내 원수 유입시설, 대산산업용수센터 원수 유입 및 폐수방류 시설에서 각각 해수, 대호지 호소수, 아산 침전수, 폐수방류수를 직접 채수하여 수질분석 및 실험을 진행하였다. 혼합 활용시 추가 전처리 필요 여부를 비교하기 위하여 검토 대상 수원은 모두 전처리(혼화·응집·침전)된 상태로 혼합하여 활용하였다. 아산 침전수 및 폐수방류수는 각 시설에서 전처리를 거친 상태로 채수하였고, 해수와 대호지 호소수는 실험실에서 전처리를 수행하였다. 해수 원수는 응집제(FeCl₃) 주입률 1~5 ppm (as Fe) 조건, 대호지 호소수는 응집제(poly aluminum chloride, PAC) 주입률 10~50 ppm 조건에서 각각 Jar-test를 수행하여 최적 응집제 주입률을 결정하였으며, 급속 교반(200 rpm) 1분, 완속 교반(40 rpm) 20분, 침전 30분 조건을 적용

하였다. 본 연구는 해수를 주요 수원으로 활용하는 것을 전제로 하기 때문에, 해수를 기준으로 타 수원의 혼합 비율을 10~50%로 조절하였다. 후단 전처리 공정의 필요성을 검토하기 위하여 혼합 비율별 혼합수에 대하여 TDS, 탁도, TOC, SDI₁₅ 등의 수질항목을 측정하였다.

2.3.2. 역삼투 공정의 막오염 평가

해수와 타 수원의 혼합수에 대하여 실험실 규모 역삼투 평막 성능평가 장치를 이용하여 혼합수종 및 비율에 따른 막 오염평가를 수행하였다. 실험에 사용한 역삼투 성능평가 설비의 공정도는 Fig. 1과 같다. 역삼투 막은 LG화학에서 제공한 해수담수화 전용막을 사용하였고 (Table 1), 유효 막 면적은 0.0106 m², 온도 15~16°C, 유입 압력 45 bar, 전단속도 7.7 cm/s 및 유입 유량 1,200 mL/분 조건에서 6시간 동안 실험을 진행하였다. 고압 조건에서 운전함에 따른 막의 압밀화 영향을 감소시키기 위하여, 동일 운전조건(압력, 유량)에서 DI water를 이용하여 15시간 동안 막을 안정화 시킨 후 본 실험을 진행하였다.

막오염에 의한 막 성능 변화를 비교하기 위하여 혼합수 종류 및 혼합 비율별 막 성능평가 데이터를 이용하

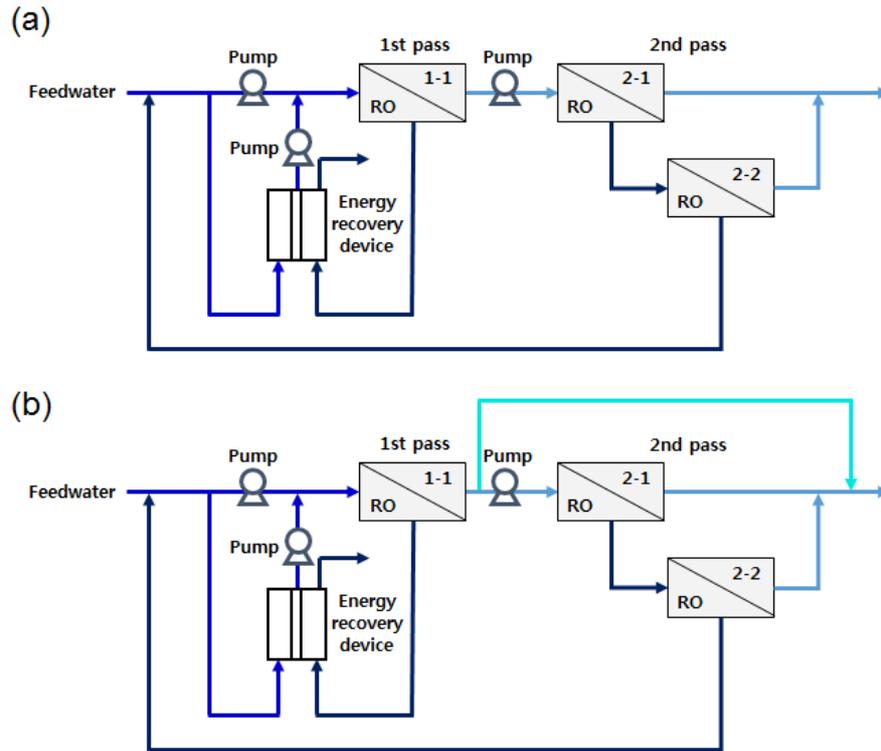


Fig. 2. Schematic diagram of (a) full two pass RO process and (b) partial two pass RO process[16].

여 플럭스 저감속도(Flux decline rate, FDR)를 계산하였다. FDR(ϕ)은 초기 플럭스와 시간에 따라 변화하는 플럭스와의 관계로 나타나며, 본 실험에서는 Choi *et al.*의 계산 방법을 사용하였다[15].

$$\phi = \frac{\left(\frac{J_0}{J(t)}\right)^2 - 1}{2J_0 t} \quad (1)$$

$J(t)$: 시간에 따른 플럭스($L/m^2 \cdot h$),

J_0 : 초기 플럭스($L/m^2 \cdot h$), t : 시간(h)

2.3.3. 역삼투 공정 성능모사

Dupont (미국), Hydranautics (일본), LG화학(한국), Toray (일본) 등 주요 역삼투막 제조사에서는 범용으로 사용 가능한 역삼투 공정 성능모사 소프트웨어를 무료로 제공하고 있다. 본 연구에서는 대산 해수담수화 사업의 타당성 조사 및 기본계획 수립 시 사용된 Hydranautics사 소프트웨어(IMSDesign)를 활용하여 해수 및 타수원 혼합수의 수질변화에 따른 역삼투 공정 성능분석을 수행하였다. 혼합에 따른 염분농도(total dissolved

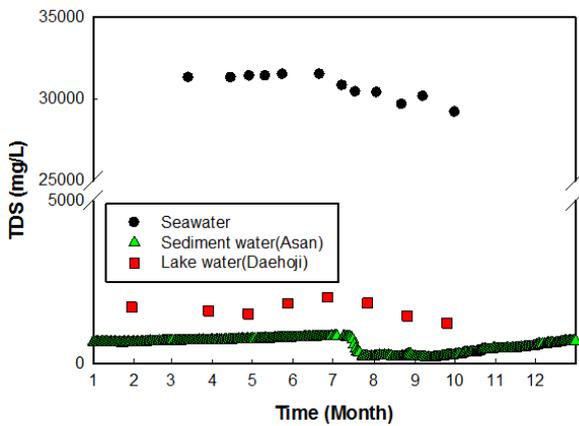
solids, TDS) 변화의 최대 효과를 비교하기 위하여 타수원의 혼합비율이 가장 높은 경우(해수 : 기타수원 = 5 : 5)에 대하여 성능 모사를 진행하였으며, 2.3.1절에서 분석한 전처리된 해수 및 타수원 혼합수 수질데이터를 이용하였다. 단일 트레인 용량 10,000 m^3 /일 기준 에너지회수장치가 적용된 2단 역삼투 공정으로 구성하였으며, 전량 2단 여과(Full 2 pass) 및 부분 2단 여과(Partial 2 pass) 방식을 비교하였다(Fig. 2). 1단 및 2단 역삼투 공정에 적용된 막은 각각 SWC6-MAX과 ESPA2-MAX이며 막오염 및 노후화가 진행되지 않은 초기 운전 조건을 적용하였다. 역삼투 공정 운전조건은 타당성 조사 및 기본계획과 동일한 회수율(1단 52.6%, 2단 90%) 및 막여과유속(1단 13.4 $L/m^2 \cdot h$, 2단 24.2 $L/m^2 \cdot h$)을 적용하였으며, 주요 설비 효율은 각각 고압 펌프 84.1%, 부스터 펌프 83%, 모터 93%, 인버터 97%로 가정하였다[16,17].

3. 결과 및 고찰

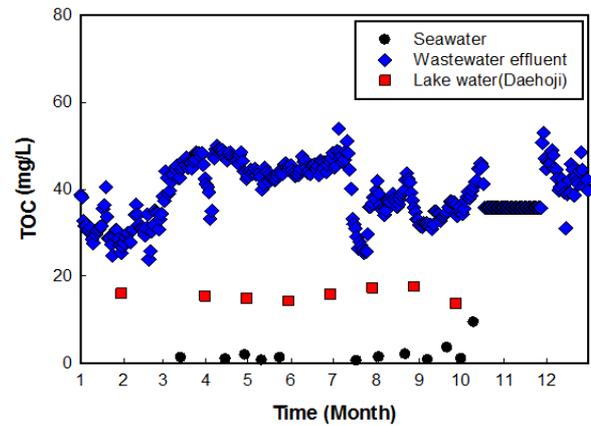
3.1. 대산 지역 인근 수원 연간 수질변화 분석결과 2016~2018년 데이터(해수는 2016~2017년) 기준, 각

Table 2. Comparison of Annual Average Water Quality of Applicable Water Sources Near Daesan

Contents	Seawater	Lake water (Daehoji)	Sediment water (Asan)	Wastewater effluent
TDS (mg/L)	30,943 ± 578	1,639 ± 183	525 ± 50	-
Turbidity (NTU)	9.3 ± 4.3	8.1 ± 2.2 (SS, mg/L)	1.0 ± 0.2	2.5 ± 1.1 (SS, mg/L)
pH (-)	7.6 ± 0.5	7.3 ± 1.6	7.1 ± 0.2	6.8 ± 0.2
COD _{Mn} (mg/L)	1.4 ± 1.1	11.3 ± 1.2	-	26.9 ± 1.1
TOC (mg/L)	2.2 ± 1.7	15.8 ± 1.7	-	38.5 ± 1.6

**Fig. 3.** Comparison of TDS variation in 2017 according to water sources.

수질 항목별 연평균 비교 결과를 Table 2에 요약하였다. 해수 염분농도(TDS)는 타 수원 대비 19~57배 수준이고 유기물(TOC) 함유량은 5.7~14% 정도로 낮은 편이며 pH는 비슷한 수준으로 확인되었다. 수원 종류별 계절에 따른 수질변화 추이를 확인하기 위하여 2017년 데이터를 기준으로 TDS 및 TOC의 연간 변화를 비교한 결과, 해수의 TDS는 평균 30,754 mg/L이며, 연간 TDS 변화가 -5.0~2.5% 수준으로 변화가 크지 않았다. 이에 반해, 아산 침전수 및 대호지 호소수는 평균 TDS가 각각 561 ± 213 , $1,657 \pm 253$ mg/L 수준으로 해수 대비 표준편차가 매우 큰 것으로 관찰되었다(Fig. 3). 한편, 수원에 따른 연간 TOC 변화는 폐수방류수의 변동 폭이 평균 38.5 mg/L 대비 약 38%로 다소 크게 나타났으며, 해수와 대호지 침전수는 계절에 따른 유기물 농도 변화가 크지 않은 것으로 확인되었다(Fig. 4). 해수, 대호지 호소수, 폐수방류수의 유기물 데이터는 각 시설에서 COD_{Mn} 기준으로 측정되고 있으나, 본 논문에서는 혼합수 유기물 농도의 정확한 비교를 위해 TOC를 기준으로 비교하고자 하였다. 이에 각 시설에서 확보한 연간 COD_{Mn} 데이터를 각 시료의 실측 COD_{Mn}/TOC 비율로 환산하

**Fig. 4.** Comparison of TOC variation in 2017 according to water sources.

여 Table 2의 TOC값으로 나타내었다. 한편, 아산정수장 침전수 COD_{Mn} 및 대산산업용수센터 폐수방류수 TDS는 각 시설의 수질관리기준 항목에 해당되지 않아 데이터 확보 및 연간 데이터 분석이 불가능하였으며, 3.2절에서 혼합수 수질 비교를 위해 직접 채수하여 분석을 진행하였다.

3.2. 대산 지역 인근 수원 혼합 비율별 성능평가 결과

3.2.1. 혼합수 종류 및 비율별 수질비교

해수 및 대호지 호소수의 전전처리 조건 선정을 위한 Jar-test 결과, 해수는 응집제(FeCl_3) 4 ppm, 대호지 호소수는 응집제(PAC) 40 ppm 조건에서 탁도 제거율이 각각 78 및 82%로 가장 높게 나타나 이후 전전처리 시에는 위의 응집제 투입량을 적용하였다. 2.3.1절에서 명시한 바와 같이 아산침전수와 폐수방류수는 전전처리가 완료된 상태로 채수하였기 때문에 추가 처리 없이 실험 비율에 따라 혼합하여 사용하였다.

대산 해수와 타 수원의 혼합비율 10~50% (타 수원 혼합량 기준) 조건에서 TDS, SDI₁₅, 탁도, TOC 등 다양한 수질항목을 분석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 해

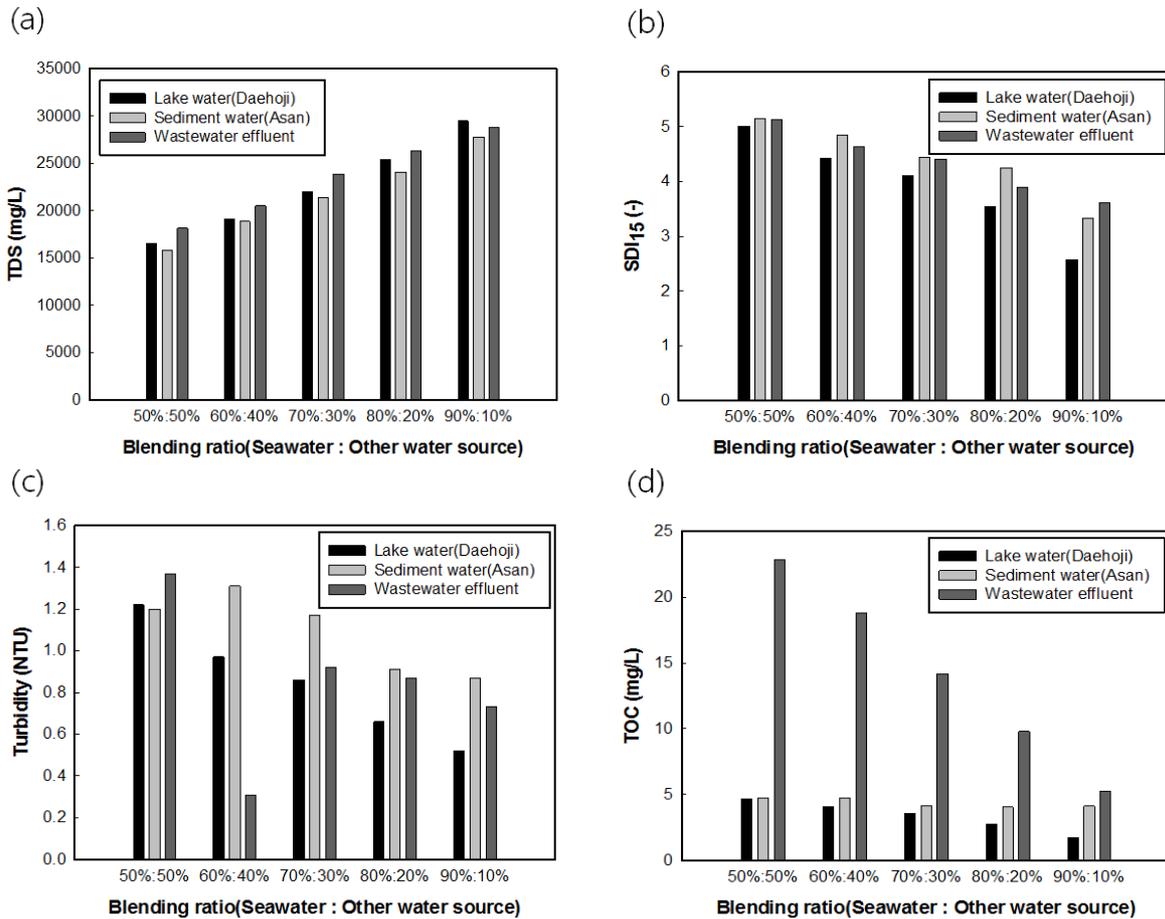


Fig. 5. Comparison of water quality according to the blending ratio. (a) TDS, (b) SDI₁₅, (c) Turbidity, (d) TOC.

수의 TDS 농도(31,080 mg/L) 대비 대호지 호소수, 아산 침전수, 폐수방류수 혼합 시 각각 최대 53, 51, 58% 수준으로 염분 농도를 저감할 수 있는 것으로 확인되었다[Fig. 5(a)]. 역삼투 해수담수화는 유입수의 삼투압 및 기타 압력손실을 고려한 높은 압력이 요구되는 공정이다. 원수 혼합을 통해 감소한 유입수 염분농도는 공정 운전압력 감소에 기여할 수 있다. 한편, 혼합수의 SDI₁₅는 대체적으로 타 수원 혼합비율 10~20%에서는 4 이하, 20~40%에서는 $4 < \text{SDI}_{15} < 5$, 50% 혼합 시는 5 이상을 나타내었다[Fig. 5(b)]. 역삼투 막 제조사에서 제시하는 역삼투막 성능보증기준(SDI₁₅ < 5)을 고려하면[18,19], 50% 혼합 시에는 반드시 추가적인 전처리가 필요하며, 10~40% 혼합하는 경우에도 역삼투 막의 안정적인 운영을 위해 전처리 적용에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다. 본 연구에서 고려한 혼합 비율 조건에서 혼합수 평균 탁도는 약 0.99 ± 0.25 NTU 수준으로 해수 침전수의 탁도(0.62 NTU) 대비 다소 상승하는

경향을 보였으며[Fig. 5(c)], 역삼투 공정의 막오염을 심화시키는 기준인 0.1 NTU를 초과하는 것으로 확인되었다[20]. 또한, 막오염 주요 영향인자 중 하나인 유기물 농도(TOC 기준)는 해수 침전수(3.60 mg/L) 대비 대호지 호소수, 아산침전수, 폐수 방류수를 50% 혼합 시 각각 4.66, 4.70, 22.87 mg/L까지 증가하는 것으로 나타나[Fig. 5(d)], 막오염 우려 기준인(역삼투 공정 유입수 TOC 2 mg/L 이상)을 초과하였다[20]. 따라서 SDI₁₅, 탁도, TOC 농도를 종합적으로 고려할 때 혼합비율 10~50% 모두 적절한 전처리가 적용되어야 할 것으로 판단된다.

3.2.2. 혼합수 종류 및 비율별 역삼투 평막 성능평가 결과
대산 해수와 인근에서 활용 가능한 수원에 대하여 혼합수 종류 및 혼합비율에 따른 실험실 규모 역삼투 평막 실험결과는 Table 3과 같다. 염분농도가 낮은 타 수원을 혼합함에 따라 해수 단독 사용 대비 역삼투 공정

Table 3. Comparison of RO Membrane Performance according to Water Type and Blending Ratio

Blending ratio	Seawater : Lakewater			Seawater : Sediment water			Seawater : Wastewater effluent		
	J_0 (L/m ² · h)	FDR (m ² /L)	TDS (mg/L)	J_0 (L/m ² · h)	FDR (m ² /L)	TDS (mg/L)	J_0 (L/m ² · h)	FDR (m ² /L)	TDS (mg/L)
90% : 10%	28.75	1.91×10^{-3}	27,960	24.17	2.08×10^{-4}	27,780	28.47	1.16×10^{-3}	28,740
80% : 20%	30.45	6.59×10^{-5}	25,380	29.60	4.49×10^{-5}	24,060	28.41	7.65×10^{-4}	26,340
70% : 30%	32.32	2.01×10^{-4}	21,960	34.02	1.69×10^{-4}	21,360	33.73	7.77×10^{-4}	23,880
60% : 40%	37.47	2.31×10^{-4}	19,140	37.02	4.28×10^{-4}	18,840	36.43	1.23×10^{-3}	20,520
50% : 50%	44.49	2.05×10^{-4}	16,560	43.58	1.28×10^{-4}	15,840	43.41	2.74×10^{-4}	18,120

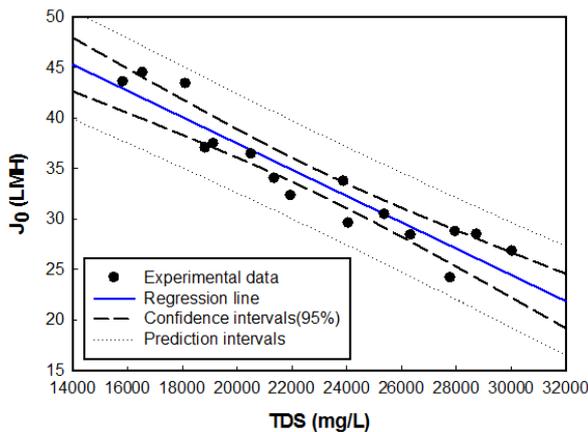


Fig. 6. Relation between influent TDS and initial flux (J_0).

의 유입수 TDS는 최대 47%까지 감소하였으며, 초기 플럭스(J_0)가 약 1.6배 증가하는 경향을 보였다. 실험일정에 따라 혼합수 수질분석(3.2.1절)과 평막 성능평가는 각각 다른 날짜에 채수한 원수를 이용하여 진행하였기 때문에 혼합수 TDS에 다소 차이가 발생하였다. 반트호프 법칙(식 2)에 따르면 동일 온도에서 유입수 염분농도가 감소하면 그에 비례하여 유입수 삼투압이 감소된다[21]. 유입수 삼투압 감소는 운전 압력과 생산 유량에 영향을 미치는데[22], 실제 상업용 역삼투 플랜트는 정 유량(생산수 기준) 방식으로 운전되기 때문에 유입수 염분 농도변화가 운전압력에 영향을 주지만, 본 실험의 경우 정압 조건(유입수 기준)에서 수행되었기 때문에 유입수 염분농도 감소 효과는 생산유량(플럭스)을 통해 확인할 수 있다. Sharnel *et al.*의 연구결과에서 나타난 유입수 TDS와 플럭스의 관계와 유사하게[23], 본 실험에서도 유입수 TDS 변화와 초기 플럭스는 대체적으로 음의 상관관계를 나타내었다(Fig. 6).

$$\pi = i \times C \times R \times T \tag{2}$$

π : 삼투압(bar), i : 삼투계수(-),
 C : 몰농도(mol/L), R : 기체상수(atm · L/mol · K),
 T : 절대온도(K)

한편, 해수와 타 수원 혼합 시의 막오염 영향을 분석하기 위하여 FDR을 비교한 결과, 해수를 단독으로 사용하는 경우 FDR (1.28×10^{-4} m²/L) 대비 수원 혼합 시 FDR 값은 평균 4.06배(0.3~14.9배)로 대체적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 폐수방류수 혼합 시 FDR이 평균 $[(8.43 \pm 3.84) \times 10^{-4}$ m²/L]로 가장 크게 증가하여 막오염에 의한 플럭스 감소가 가장 큰 것으로 확인되었다. 하지만, 일부 혼합수 조건에서 해수 단독 사용 대비 감소된 FDR값이 나타나고 혼합비율에 따른 FDR의 경향성을 확인할 수 없는 것은, 본 실험의 운전시간(6시간) 및 시설 규모가 혼합수의 막오염 영향을 충분히 반영하기 어렵기 때문으로 사료된다. 혼합 비율에 따른 막오염 경향을 정확히 파악하기 위해서는 파일렛 스케일에서의 장기간 성능평가가 반드시 필요하다.

3.2.3. 성능모사를 통한 수원 혼합 영향분석 결과

해수와 타 수원 혼합비율 50% : 50% 조건에서 역삼투 구성방식(전량 2단 여과, 부분 2단 여과) 및 혼합수 종류에 따른 수온별(4.5, 13, 25°C) 에너지 소모를 분석하였다(Fig. 7). 부분 2단 여과 방식은 막 개수를 전량 2단 여과방식과 동일하게 유지하고 운전 플럭스가 변동되는 방식(Partial ①로 표기)과 막 개수를 변화시켜 운전 플럭스를 전량 2단 여과방식과 동일하게 설정하는 방식(Partial ②로 표기) 2가지 경우에 대하여 검토하였으며, 부분 여과 방식 적용 시에는 최종 생산수질 기준을 TDS 65 mg/L에 맞추어 2단 역삼투 공정 유입량을

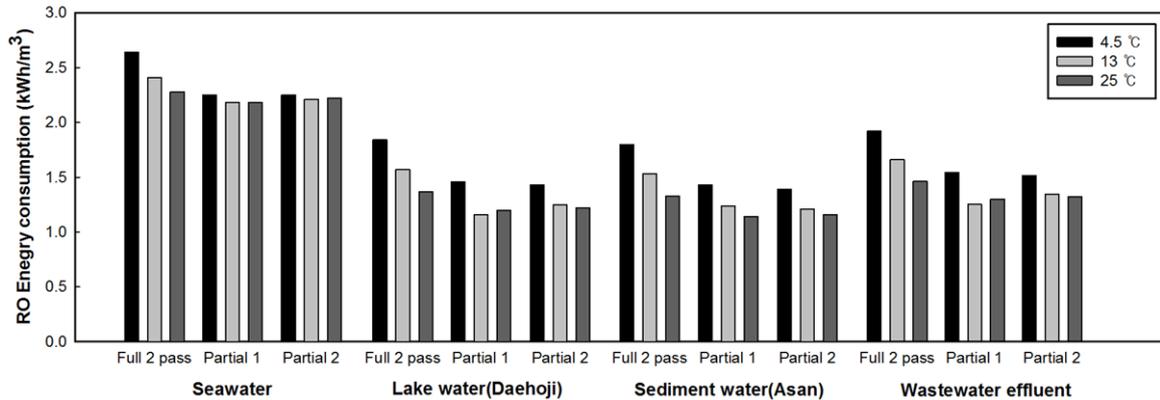


Fig. 7. Comparison of RO energy consumption based on process configuration and blended water type.

조절하였다.

해수를 원수로 단독 사용하는 경우 대비 수원 혼합에 따른 역삼투 공정의 소요 에너지 절감률은 아산 침전수 $40.9 \pm 5.5\%$, 대호지 호소수 $39.6 \pm 5.8\%$, 폐수방류수 $35.7 \pm 5.3\%$ 의 순서로 나타나, 아산 침전수와 대호지 호소수의 전력소모 절감효과는 비슷한 수준으로 확인되었다. 한편, 수온별 에너지 소모 계산 결과 4.5, 13, 25°C에서 각각 평균 절감률 33, 40, 43%로 온도가 증가함에 따라 에너지 절감률이 다소 증가하는 경향을 보였으며, 이는 수온이 증가함에 따라 투과유량이 증가하여 동일 유량을 생산하는데 소모되는 압력이 감소하기 때문이다[23]. 역삼투 공정구성 방식의 경우 부분 2단 여과 방식 적용 시 절감률 31~48% 수준으로 전량 2단 여과(27~42%) 대비 더 효율적인 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 해수담수화 사업을 통한 공업용수 공급이 추진되고 있는 대산 산업단지를 대상으로, 해수와 인근 지역 가용 수원인 대호지 호소수, 아산 침전수, 대산 산업용수센터 폐수방류수의 연계 활용에 대한 영향을 수질 및 에너지 소모 측면에서 분석하였다.

1) 대산 해수와 인근 수원을 혼합 활용하면, 해수를 단독으로 사용하는 경우 대비 평균적으로 탁도 및 SDI_{15} 는 약 1.6배, TOC는 약 2.0배 증가하며, 혼합비율 10~50% 범위 모두 추가적인 전처리 공정이 필요할 것으로 확인되었다.

2) 해수 대비 염분농도가 낮은 수원을 혼합하여 역삼투 공정의 유입수로 활용함에 따라 TDS는 최대 47% 감

소하였고, 이에 따른 삼투압 감소 효과로 역삼투 평막 성능평가 시 초기 플럭스는 최대 1.6배 증가하는 것으로 나타났다.

3) 해수와 인근 수원 혼합 활용 시 역삼투 공정의 막오염 영향 검토를 위하여 FDR을 분석한 결과, 해수를 단독 활용하는 경우 대비 타 수원 혼합 시 FDR 값이 증가하는 경향을 보였으며, 특히 폐수방류수 혼합 시 최대 6.6배까지 증가하였다. 혼합 비율별 FDR의 차이는 미미한 수준이었으며, 이는 본 실험이 랩규모 평막장치 및 단기간(6시간)이라는 제한 조건에서 진행되었기 때문으로 사료된다.

4) 대산 해수와 인근 수원을 각각 50% 혼합한 조건에서 역삼투 구성방식 및 혼합수 종류에 따라 에너지 소모를 분석한 결과, 혼합수 활용에 따른 에너지 절감효과는 평균 39% 수준으로 확인되었다.

5) 원수 혼합에 따라 역삼투 공정 유입수 염분농도가 감소하여 소요 에너지가 절감되지만, 막오염이 증가하여 운영비용이 증가될 가능성이 있다. 워터 블렌딩 기술을 해수담수화 상업 시설에 적용하기 위해서는 스케일업 시스템에서의 장기간 성능평가를 통해 이러한 트레이드 오프(trade-off) 지점을 찾는 연구가 선행되어야 한다.

6) 대산 지역을 대상으로 해수와 다양한 타 수원(호소수, 폐수방류수 등)을 혼합하여 해수담수플랜트 원수로 사용하는 경우에 대한 영향을 비교 분석함으로써, 국내 최대 규모 대산 해수담수화 사업(100,000 m³/일) 뿐만 아니라 향후 지역 특성에 맞는 다양한 수자원 활용 방안을 모색하는 데에 기초 자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

본 결과물은 K-water의 자체수행 과제인 “해수담수 시설의 다중수원 연계 활용방안 연구” 및 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 플랜트연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(1485016423).

Reference

1. P. Doll, “Impact of climate change and variability on irrigation requirements: A global perspective”, *Clim. Change*, **54**, 269 (2002).
2. J. Alcamo, P. Doll, T. Hernichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rosch, and S. Siebert, “Global estimates of water withdrawals and availability under current and future ‘business-as-usual’ conditions”, *Hydrol. Sci. J.*, **48**, 339 (2003).
3. J. Schewe, J. Heinke, D. Gerten, I. Haddeland, N. W. Arnell, D. B. Clark, R. Dankers, S. Eisner, B. M. Fekete, F. J. Colón-González, S. N. Gosling, H. Kim, X. Liu, Y. Masaki, F. T. Portmann, Y. Satoh, T. Stacke, Q. Tang, Y. Wada, D. Wisser, T. Albrecht, K. Frieler, F. Piontek, L. Warszawski, and P. Kabat, “Multimodel assessment of water scarcity under climate change”, *PNAS*, **111**, 3245 (2014).
4. K. S. Jeong, D. K. Kim, and G. J. Joo, “Delayed influence of dam storage and discharge on the determination of seasonal proliferations of *Microcystis aeruginosa* and *Stephanodiscus hantzschii* in a regulated river system of the lower Nakdong River (South Korea)”, *Water Research*, **41**, 1269 (2007).
5. S. Lee and S. U. Kim, “Quantification of hydrological responses due to climate change and human activities over various time scales in South Korea”, *Water*, **9**(1), 34 (2017).
6. 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).
7. Global Water Intelligence, “Desalination Markets 2016” (2015).
8. N. S. Park, S. S. Kim, S. H. Chae, and S. Kim, “The effect of fluctuation in flow rate on the performance of conventional and membrane water treatment for a smart water grid”, *Desalin. Water Treat.*, **47**, 17 (2012).
9. S. Kim, F. L. Lim, J. Y. Park, and J. O. Kim, “Effect of flux fluctuation on the fouling in membrane water treatment system for smart water grid”, *Desalin. Water Treat.*, **52**, 1028 (2014).
10. W. A. Lovins III, S. J. Duranceau, R. M. Powell, and J. Richard Voorhees, “Experiences with blending multiple source waters in a common water distribution system”, *Florida Water Resources Journal*, March, 31 (2005).
11. W. Xiao, “Effect of source water blending on copper release in pipe distribution system: Thermodynamic and empirical models”, Ph.D. Dissertation, University of Central Florida Orlando, Florida (2004).
12. H. K. Shon and A. Chanan, “Water management in sydney: Challenges, progress and the future”, Smart Water Grid International Conference, Incheon, Korea, 177 (2014).
13. H. Lee, H. Park, D. S. Woo, and S. Kim, “Design for seawater reverse osmosis plant using water blending in smart water grid”, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **29**(1), 89 (2015).
14. Ministry of Environment, “Guidelines for establishing a basic plan for water supply maintenance” (2018).
15. J. S. Choi, T. M. Hwang, S. Lee, and S. Hong, “A systematic approach to determine the fouling index for a RO/NF membrane process”, *Desalination*, **238**, 117 (2009).
16. K-water, “Feasibility study and basic planning for the seawater desalination project in Daesan coastal industrial complex” (2019).
17. J. Kim, K. H. Lee, and J. L. Lim, “Comprehensive analysis of major factors associated with the performance of reverse osmosis desalination plant for energy-saving”, *Membr. J.*, **29**(6), 314 (2019).
18. Standard SWRO Membrane Specification, https://www.toraywater.com/products/ro/ro_003.html.
19. LG Chem Seawater Reverse Osmosis Membranes

- Specification, <https://www.appliedmembranes.com/lg-chem-seawater-ro-membranes-swro.html>.
20. N. Voutchkov, *Desalination Engineering: Planning and Design*, McGraw Hill, 41, (2013).
 21. S. M. Rao, "Reverse osmosis", *Resonance*, **12**, 37 (2007).
 22. K. Loganathan, P. C. Ayala, and M. G. E. Din, "Pilot-scale study on the reverse osmosis treatment of oil sands tailings pond water: Impact of pretreatment on process performance", *Desalination*, **360**, 52 (2015).
 23. M. M. Shamel and O. T. Chung, "Drinking water from desalination of seawater: Optimization of reverse osmosis system operating parameters", *J. Eng. Sci. Technol.*, **1**(2), 203 (2006).