

소규모 해수담수화시설 물 생산량 제고 방안*

- 전라남도 해수담수화시설을 중심으로 -

A Study on the Improvement of Water Production in Small-Scale Desalination Plants

정용문** · 오은하*** · 박현수**** · 김민영***** · 송승리***** · 김학림*****

차윤경***** · 한용원***** · 황윤화***** · 김익산***** · 박귀남*****

Jung, Yong-Moon· Oh, Eun-Ha· Park, Hyun-Soo· Kim, Min-Young· Song, Seung-Ri· Kim, Hak-Rim

Cha, Yoon-Gyeong· Han, Yong-Won· Hwang, Yun-hwa· Kim, Ik-San· Park, Gwi-Nim

* 본 연구는 국립환경과학원 “환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반 구축”사업에 따른 국고 보조금이 일부 지원되어 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

** 전라남도보건환경연구원 환경연구사 : (Researcher, Dept. of Environmental Investigation, Jeollanam-do Institute of Health and Environment)

*** 전라남도보건환경연구원 환경연구사 : (Researcher, Dept. of Environmental Investigation, Jeollanam-do Institute of Health and Environment)

**** 전라남도보건환경연구원 환경연구사 : (Researcher, Dept. of Environmental Investigation, Jeollanam-do Institute of Health and Environment)

***** 전라남도보건환경연구원 환경연구사 : (Researcher, Dept. of Environmental Investigation, Jeollanam-do Institute of Health and Environment)

***** 전라남도보건환경연구원 환경연구사 : (Researcher, Dept. of Environmental Investigation, Jeollanam-do Institute of Health and Environment)

***** 전라남도보건환경연구원 환경연구사 : (Researcher, Dept. of Environmental Investigation, Jeollanam-do Institute of Health and Environment)

***** 전라남도보건환경연구원 환경연구사 : (Researcher, Dept. of Environmental Investigation, Jeollanam-do Institute of Health and Environment)

***** 전라남도보건환경연구원 환경연구사 : (Researcher, Dept. of Environmental Investigation, Jeollanam-do Institute of Health and Environment)

***** 전라남도보건환경연구원 환경연구사 : (Researcher, Dept. of Environmental Investigation, Jeollanam-do Institute of Health and Environment)

***** 전라남도보건환경연구원 환경연구관 : (Research officer, Dept. of Environmental Investigation, Jeollanam-do Institute of Health and Environment)

***** 전라남도보건환경연구원 환경연구관 : (Research officer, Dept. of Environmental Investigation, Jeollanam-do Institute of Health and Environment)

***** 전라남도보건환경연구원 환경연구관 : (Research officer, Dept. of Environmental Investigation, Jeollanam-do Institute of Health and Environment)

Corresponding Author : Eun-Ha Oh, coffee5@korea.kr, (Tell)+82-61-240-5311, (Fax)+82-61-240-5325

ABSTRACT

Desalination was a water treatment process that involved converting saline water to fresh water. Desalination generated an estimated 0.03 hundred million m³/day of fresh water in Korea. But, water shortage problems in the island area were not solved regarding the low capacity of desalination plants, the low amount of available salinity groundwater, etc. Furthermore, the low recovery rate of freshwater, lack of expertise of local operators, water leakage and contamination by old pipelines needed to be improved. This study used a reverse osmosis system projection program to compare compared desalination processes to improve water production and decrease electricity consumption.

It was investigated that over 80 % of small-scale desalination plants in Jeollanam-do produced 50 m³/day. The total dissolved solids of feed water were at least 115 mg/L, up to 28,273 mg/L, an average of 5,676 mg/L, and the water temperature of raw water was at least 5.2 °C, up to 28.1 °C, and the average of 17.0 °C. Based on the investigation results, plant capacity and the total dissolved solids of the final freshwater for performance simulation were set at 50 m³/day, 500 mg/L, and the total dissolved solids and temperature of raw water were set at 6,500 mg/L, and 17 °C. The process compared and analyzed changes in the quality and quantity of freshwater by designing the ‘1st RO’ process, the ‘1st RO + ERD’ process with an energy recovery device added, the ‘1st RO + Recirculation’ process, and the ‘2nd RO + Recirculation’ process.

In the ‘1st RO’ process, 200 m³/day of feed water was required to produce 50 m³/day of fresh water, but in the ‘1st RO + Recirculation’ process and the ‘2nd RO + Recirculation’ process, the amount of feed water required could be reduced to 83.3 m³/day and 66.7 m³/day. The ‘1st RO’ process consumed 1.47 kWh/m³. However, in the ‘1st RO + ERD’ process, it is lowered to 0.45 kWh/m³. The recovery rate was increased by 75 % in the ‘2nd RO + Recirculation’ process. Finally, reducing the electric energy consumed in freshwater production in summer was possible.

When replacing old desalination plants or installing new ones, the ‘1st RO + ERD’ process, which can lower electricity consumption, should be considered rather than the ‘1st RO’ process, the ‘1st RO + Recirculation’ process and the ‘2nd RO + Recirculation’ process, which could increase waster production.

Key Words(핵심용어) : small-scale desalination(소규모 해수담수화), water production(물 생산량), electric energy consumption(전기에너지 소모량), reverse osmosis process(역삼투 공정), reverse osmosis system projection program(역삼투 공정 설계 프로그램), water quality(수질)

국문 초록

해수담수화는 무한한 수자원인 해수를 이용해 담수를 생산하는 수처리 방법이다. 국내에서는 역삼투법을 이용한 해수담수화시설이 설치되어 연간 3백만 m³의 담수가 생산되고 있다. 하지만 해수담수화시설의 용량 부족, 원수인 염지하수의 부존량 감소 등으로 인해 섬 지역 물 부족 문제가 완벽하게 해결되지 못하고 있다. 또한, 해수담수화시설의 낮은 회수율, 현지 운영자의 전문성 부족, 시설 수리 및 보수의 어려움, 관로 노후화로 인한 누수 및 오염 등 여러 부분에서 개선이 필요하다. 본 연구에서는 성능모사 프로그램을 이용해 소규모 해수담수화시설의 담수생산량은 높이고 전기소모량은 줄일 수 있는 공정을 비교 분석하였다.

소규모 해수담수화시설 성능모사를 위해 주요 영향인자를 조사한 결과 전라남도 지역 해수담수화시설은 대부분 '1st RO'공정이고, 시설 중 80 % 이상이 하루 담수생산량 50 m³ 이상이며, 원수의 총용존고형물량은 최소 115 mg/L, 최대 28,273 mg/L, 평균 5,676 mg/L이었고 원수의 수온은 최소 5.2 °C, 최대 28.1 °C, 평균 17.0 °C로 나타났다. 조사결과를 토대로 섬 지역에 보편적 설치되어 있는 해수담수화 공정 조건인 용량 50 m³/일, 최종 담수의 총용존고형물, 500 mg/L 이하, 원수의 총용존고형물량 6,500 mg/L, 수온 17 °C를 성능모사를 위한 설계조건으로 정했다. 공정으로는 기존 '1st RO'공정, 에너지회수장치 추가한 '1st RO + ERD'공정, 농축수를 원수로 재순환시키는 '1st RO + 재순환'공정과 '2nd RO + 재순환'공정을 설계해 담수의 수질 및 수량 변화를 비교분석 하였다.

기존 '1st RO'공정에서는 담수 50 m³/일을 생산하기 위해서는 원수 200 m³/일이 필요했으나 '1st RO + 재순환'공정과 '2nd RO + 재순환'공정에서는 소요되는 원수량을 83.3 m³/일, 66.7 m³/일로 낮출 수 있다. 공정별 전력소모량을 살펴보면 기존 '1st RO'공정은 1.47 kWh/m³이었으나 '1st RO + ERD'공정에서는 0.45 kWh/m³까지 낮아지므로 전기가 부족한 섬 지역에 필요한 공정이다. '1st RO + 재순환'공정은 농축수 재순환 배관만 설치하면 회수율을 60 % 까지 높일 수 있기 때문에 기존 시설을 이용해 최소예산으로 담수 생산량을 높일 수 있다. '2nd RO + 재순환'공정은 기존 시설에 새로운 역삼투 모듈을 설치해야하기 때문에 비용이 많이 발생하지만, 회수율을 75 %까지 높일 수 있어 염지하수 자원이 부족한 섬 지역에 적합한 공정이다. 마지막으로 원수의 수온이 낮은 겨울철보다 수온이 높은 여름철에 전기에너지 소모량을 낮출 수 있다.

해수담수화시설은 섬 지역 물 부족 문제를 해결할 수 있는 가장 현실적이고 주민들의 물 사용에 대한 체감도가 높은 효율적인 방법이다. 기존에 노후화된 해수담수화시설을 교체하거나 신규로 설치할 때 기존 '1st RO'공정이 아닌 전기소모량을 낮출 수 있는 '1st RO + ERD'공정, 물 생산량을 높일 수 있는 '1st RO + 재순환'공정과 '2nd RO + 재순환'공정이 섬 지역 여건에 맞게 설치될 수 있도록 고려되어야 한다.

I. 서론

해수담수화란 무한한 수자원인 해수를 이용해 담수를 생산하는 수처리 방법 중 하나로 물이 부족한 중동아시아, 북아프리카, 호주 등에서 해수담수화시설을 설치해 지역 주민들에게 담수를 공급하고 있다(손진식, 2013). 해수담수화 공정에는 다단계 플래시 증류법(Multi Stage Flash, MSF), 다중 효과 증류법(Multi Effect Distillation, MED), 증기압축법(Vapor Compression Distillation, VC), 역삼투법(Reverse osmosis, RO) 등이 있으나, 열에너지를 이용해 해수를 증발시켜 담수를 얻는 다단계 플래시 증류법, 다중 효과 증류법 및 증기압축법 보다 분리막을 이용해 담수를 생산하는 역삼투법이 더욱 경제적이기 때문에 근래 널리 이용되고 있다(최창규 등, 2019; 황문현·김인수, 2016). 최근에는 역삼투막 트레인 설계 및 성능검증, 플랜트 운영기술 개발, 신재생에너지를 연계한 공정 개발, 에너지회수장치 적용 등 대규모 해수담수화시설에서 담수 생산량은 높이고 전기에너지 소모량은 낮추는 연구가 활발히 진행 중이다(김택승 등, 2019; 윤승현·우달식, 2019; 홍승관 등, 2019).

국내 해수담수화시설은 1997년 홍도, 추자도 등에 처음 설치되었으며, 현재 해수담수화시설에서 생산되는 물량은 3백만 m³의로 우리나라 연간 수자원 이용량 38,100백만 m³ 중 댐 20,390백만 m³, 하천수 13,320백만 m³, 지하수 2,910백만 m³, 하수재이용 1,110백만 m³, 중수도 360백만 m³, 빗물 8백만 m³에 이어 가장 적은 양이다(국가물관리위원회, 2018). 해수담수화시설에서 담수의 생산원가는 5,587 ~ 33,289 원/m³으로 전국 수도요금 평균단가인 747.8 원/m³보다 높기 때문에 국가, 지방자치단체 등의 지원이 없이는 해수담수화시설의 설치 및 운영 어려운 실정이다(국가통계포털, 2024; 최인수 등, 2015; 한국수자원공사, 2010).

국내에 설치된 대규모 해수담수화시설은 부산 기장군 해수담수화시설(45,000 m³/일), 광양 포스코 해수담수화시설(27,000 m³/일)이 있으며, 한국수자원공사에서 서산시 대산임해산업단지 해수담수화시설(100,000 m³/일)을 신규로 설치하고 있다. 하지만 3개 대규모 해수담수화시설을 제외하고는 하루 담수 생산량이 1,000 m³ 이하인 소규모 해수담수화시설이며, 물이 부족한 섬 지역에 주로 설치되어 있다(이현경, 2021).

그러나 현재 해수담수화시설 보급은 섬 지역 주민들의 물 사용에 대한 불편함을 완벽하게 해결하지는 못하고 있다. 일부 섬에서는 물 사용 수요를 부정확하게 파악하여 담수 생산 용량이 낮은 해수담수화시설이 설치되어 있거나, 염지하수 취수량 부족으로 인해 해수담수화시설을 가동하지 못하는 상황이 발생한다. 또한, 해수담수화시설의 낮은 회수율, 현지 해수담수화시설 운영자의 전문성 부족, 시설 수리 및 보수의 어려움, 마을 상수도 관로 노후화에 따른 누수 및 오염 등 개선이 필요한 부분이 많은 실정이다. 또한 해수담수화시설이 설치되어 있지 않아서 지하수, 빗물, 계곡수 등을 사용하는 섬의 경우 매년 반복되는 가뭄으로 인해 장기간 물을 이용하지

못하고 있지만 이를 해결하기 위한 기본적인 물관리 계획조차 미비한 실정이다. 2024년에 발표한 환경부 주요정책에서도 가뭄 극복을 위한 대책으로 여수·광양 산단 해수담수화시설 설치와 지하수 저류댐 건설 등과 관련된 지원만 있을 뿐 섬 주민들이 체감할 수 있는 소규모 해수담수화시설에 대한 지원은 부족하다(환경부, 2024). 최근 수행되고 있는 연구 또한 해수담수화시설의 대형화, 고도화, 신기술 등에 대해 진행되고 있으며, 소규모 해수담수화시설에 대한 조사와 연구는 저조하다(김정빈·홍승관, 2020; 이상현·박경태, 2022; 전종민·김수한, 2022).

해수담수화 성능모사란 해수담수화시설을 설치하기 전에 공정을 설계해 보는 것으로, 역삼투막 제조사에서 자사 제품을 홍보하기 위해 무료로 설계 소프트웨어를 공개하고 있다. 설계 소프트웨어에서는 원수의 수질 입력, 역삼투막 선정 및 모듈 배열 등을 통해 담수의 수질, 수량, 에너지 소모량 등을 계산할 수 있다(김지혜, 2019; 정재학 등, 2019).

기존에 설치된 소규모 해수담수화시설의 공정은 일반적으로 염지하수 취수정, 원수 보관 탱크, 전처리시설, 역삼투 모듈, 정수탱크, 염소소독장치 등으로 구성되어 있다. 「먹는물관리법」에 따르면 염지하수는 총용존고형물의 함량이 2,000 mg/L 이상인 물을 의미하는데, 바닷물보다 염분이 낮아 소규모 해수담수화시설에서 원수로 사용하고 있다(법제처, 2024). 해수담수화시설에서 담수의 수질 및 생산량은 역삼투 모듈의 배치에 따라 달라질 수 있는데, 대부분의 소규모 해수담수화시설은 1단 역삼투모듈만 통과하게 되는 '1st RO'공정으로 설치되어 있다. '1st RO'공정은 원수가 들어가 담수가 생산되고 농축수가 배출되는 기본 구조로 운영 및 관리가 간편한 장점이 있지만, 해수담수화시설로 유입되는 원수량 대비 적은양의 담수를 생산하기 때문에 담수 생산량을 나타내는 회수율 측면에서 낮은 효율을 보인다. 따라서, 염지하수 대수층이 급격히 낮아지는 여름철 갈수기에는 원수 부족으로 해수담수화시설을 가동하지 못하게 되는 경우도 발생한다. 본 연구에서는 해수담수화 성능모사 프로그램을 이용해 소규모 해수담수화시설의 담수 생산량은 높이고 전기 소모량은 줄일 수 있는 공정을 비교 분석하였다.

II. 연구방법

1. 소규모 해수담수화시설 주요 영향인자

전라남도 지역에 설치된 소규모 해수담수화시설은 일반적으로 원수탱크, 전처리시설, 고압펌프, 역삼투막, 정수탱크 등으로 구성된 '1st RO'공정을 보이고 있다<사진 1>. 해수담수화시설 성능모사를 위해서는 목표로 하는 담수의 수질, 회수율을 우선 정해야 하며 다음으로 원수의 수질 및 수량 특성조사, 역삼투막 종류 선정 및 배열 등을 통해 최종적으로 해수담수화시설 공정을 디자인하게 된다. 원수의 염분 농도는 공정 설계의 주요 영향인자인데, 높아질수록 원수의 삼투압을 증가시키기 때문에 담수생산에 필요한 압력을 증가시키게 된다. 원수의 온도는 삼투압과 점도와 관련이 있어 낮아지게 되면 수투과도를 높이게 된다(Mark, 2006). 본 연구에서는 전라남도 지역에서 운영 중인 해수담수화시설에서 확보한 과거 3년 데이터를 분석해 성능모사에 사용하였고 목표로 하는 담수의 수질은 총용존고형물량(total dissolved solids, TDS) 500 mg/L 이하이며 회수율은 취수원 원수를 최대한 많이 담수로 생산하기 위해 한계 회수율까지 설계했다.



(a) 당사도



(b) 대야도



(c) 만재도



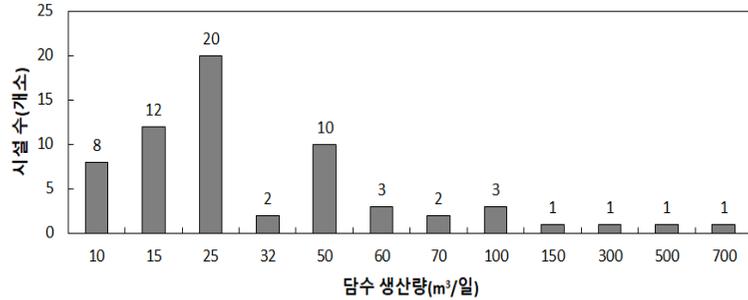
(d) 관사도

자료 : 본 연구조사 내용분석에 의함

<사진 1> 소규모 해수담수화시설 내부 모습

2. 소규모 해수담수화의 수질 및 수량 특성

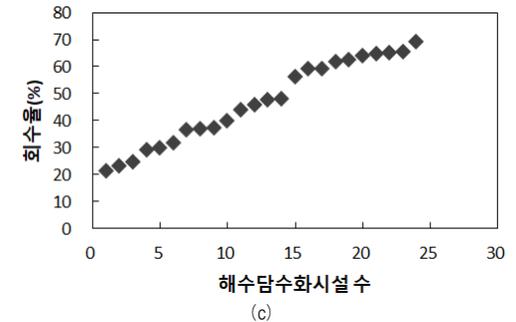
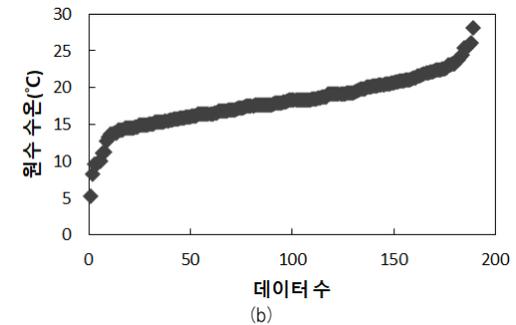
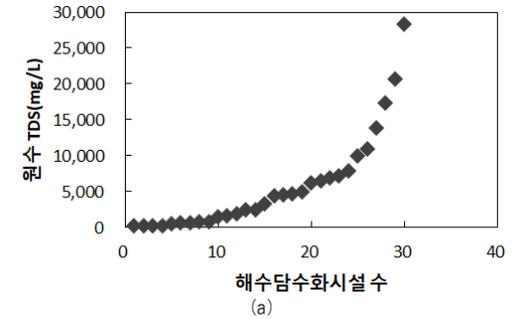
전라남도 지역에 설치된 해수담수화시설의 담수 생산량에 따른 시설 수를 나타내었다<그림 1>. 해수담수화시설의 담수 생산량은 최소 10 m³/일에서 최대 700 m³/일이며, 해수담수화시설 중 80 % 이상의 시설이 담수생산량 50 m³/일 이하의 소규모 시설로 조사되었다.



자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

<그림 1> 담수 생산량에 따른 해수담수화시설 수

해수담수화시설에서 원수의 수질은 공정에서 소모되는 전기에너지, 역삼투막과 전처리필터의 교체 등 담수생산 비용에 직접적인 영향을 미친다. 원수의 염분이 낮고, 유기물과 미생물 등의 오염물질이 적으면 막 오염과 역삼투막에서 차압의 증가를 낮추기 때문에 낮은 압력으로 많은 담수를 생산할 수 있다. 특히, 전라남도 섬 지역의 해수담수화시설에서는 원수로 해수가 아닌 염지하수를 사용하고 있기 때문에 염분을 나타내는 총용존고형물량이 낮은 특성이 있다. 섬 지역 해수담수화시설 원수의 총용존고형물량, 수온과 회수율을 조사한 결과를 나타냈다<그림 2>. 총용존고형물은 최소 115 mg/L, 최대 28,273 mg/L, 평균 5,676 mg/L 였으며, 수온은 최소 5.2 °C, 최대 28.1 °C, 평균 17.0 °C로 나타났다. 회수율은 원수 투입량 대비 담수 생산량을 나타낸 것으로 최소 23.2 %, 최대 69.2 %, 평균 47.6 %로, 취수한 염지하수 중 담수를 생산하는 양보다 농축수로 버리는 양이 더 많았다. 본 연구에서는 전라남도 섬 지역에 설치되어 있는 소규모 해수담수화시설의 원수 수질 조사 결과와 향후 신규로 설치될 소규모 해수담수화시설 대상지역의 수질 조건 등을 감안하여 총용존고형물량 6,500 mg/L, 수온 17 °C를 원수 수질 조건으로 설정하고 성능모사를 실시하였다.



자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

<그림 2> 해수담수화시설에서 조사된 (a)원수 TDS, (b)원수 수온, (c)회수율

3. 소규모 해수담수화시설 성능모사

전라남도 소규모 해수담수화시설에서 가장 많이 사용하고 있는 역삼투막은 Hydranautics(미국)에서 제조하고 있는 CPA3 모델이며, Hydranautics사에서도 IMSDesign라는 성능모사 소프트웨어를 제공하고 있다. 본 연구에서는 IMSDesign 소프트웨어를 이용해 해수담수화공정 성능모사를 수행하였다.

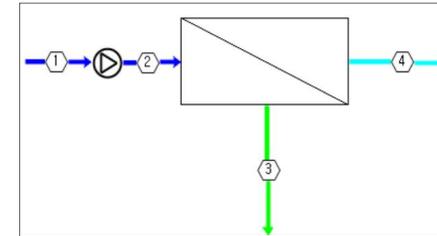
소규모 해수담수화시설 공정의 담수 생산 규모는 섬 지역에 가장 많이 설치되어 있는 50 m³/일 규모로 하였고, 1개 배셀 당 3개의 역삼투막으로 구성해 총 3개 배셀로 트레인을 구성하였다. 역삼투막은 8인치 크기의 역삼투막 CPA3모델을 이용하였다<표 1>.

본 연구의 목적인 소규모 해수담수화 공정의 회수율은 높이고 전기에너지 소모량은 낮추기 위해서 4가지 공정을 설계해 비교하였다<사진 2>. 현재 대부분의 소규모 해수담수화시설에 설치되어 운영 중인 '1st RO'공정은 원수가 해수담수화공정으로 들어가 역삼투막을 통과해 담수가 생산되고, 역삼투막을 통과하지 못한 농축수는 바다로 방류되게 된다. 신규 공정으로는 기존 '1st RO'공정에 에너지회수장치(Energy Recovery Device, ERD)를 결합한 '1st RO + ERD'공정, 농축수를 재순환시켜 담수 생산량을 증대하는 재순환공정 '1st RO + 재순환'공정, 1단에서 저염분 농축수를 2단으로 재유입 시켜 담수를 생산하고 버려지는 2단의 농축수를 재순환시키는 '2nd RO + 재순환'공정으로 성능모사를 수행한 후 공정별로 수질, 수량, 회수율, 전기소모량 등을 비교 분석하였다.

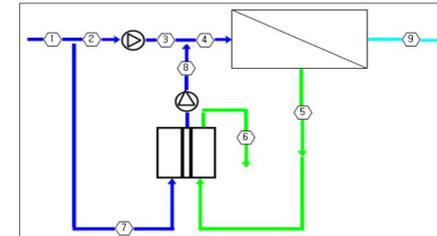
<표 1> 소규모 해수담수화시설 성능모사 조건

구 분	조 건
수질	TDS 6,500 mg/L
수온	17 °C
시설용량	50 m ³ /일
역삼투막 구성	3개 배셀, 9개 역삼투막
역삼투막 모델	CPA3
성능모사 프로그램	IMS Design(HYDRANAUTICS, 미국)

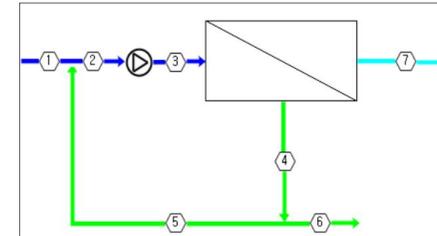
자료 : 본 연구조사 내용분석에 의함



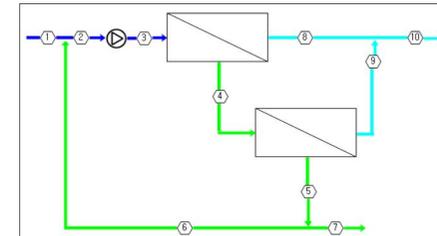
(a) 1st RO(기존)



(b) 1st RO+ERD



(c) 1st RO+재순환



(d) 2nd RO+재순환

자료 : 본 연구조사 내용분석에 의함

<사진 2> 해수담수화 공정도(원수: 파란색, 담수: 하늘색, 농축수: 녹색)

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 공정별 수질 및 수량 변화

성능모사 프로그램에 의해 설계한 4가지 소규모 해수담수화 공정의 수질 및 수량 변화를 나타내었다<표 2>. 기존에 설치되어 있는 '1st RO'공정은 하루 동안 담수 50 m³을 생산하기 위해 원수 200 m³이 필요하다. 하지만 기존 공정에서 버려지는 농축수를 원수로 재순환시키는 '1st RO + 재순환'공정에서는 담수 50 m³을 생산하기 위해 필요한 원수량이 83.3 m³로 낮아지게 되며, '2nd RO + 재순환'공정의 경우에는 해수담수화에 사용되는 원수량을 66.7 m³까지 감소시킬 수 있다. 전라남도 섬 지역 해수담수화시설의 담수 총용존고형물량 관리기준은 500 mg/L로 알려져 있는데, 기존 '1st RO'공정의 경우 담수의 총용존고형물량이 152 mg/L로 가장 낮다. '1st RO + 재순환'공정과 '2nd RO + 재순환'공정의 담수 총용존고형물량은 278 mg/L과 413 mg/L로 담수 수질 관리기준을 만족하면서 담수 생산량도 늘릴 수 있다. 또한, '1st RO + ERD'공정의 담수 총용존고형물량은 155 mg/L로 기존 '1st RO'공정과 유사한 수질 및 수량을 얻을 수 있다.

<표 2> 공정에 따른 수질 및 수량

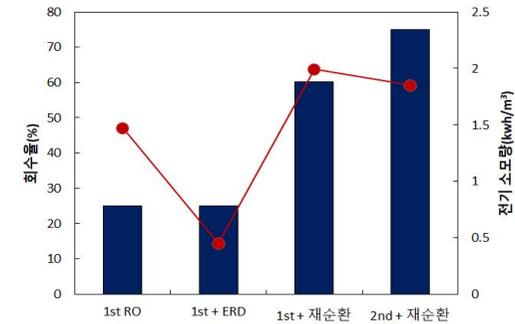
구분	총용존고형물(mg/L)			농축계수 (%)	유량(m ³ /일)	
	원수	정수	농축수		원수	정수
1 st RO (기준)	6,500	152	8,616	133	200	50
1 st RO + ERD	6,500	155	8,748	135	200	50
1 st RO + 재순환	6,500	278	15,845	250	83.3	50
2 nd RO + 재순환	6,500	413	24,707	380	66.7	50

자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

2. 공정별 전력소모량 변화

4가지 공정별 회수율 및 전기소모량 변화를 조사하였다<그림3>. 기존 '1st RO'공정의 회수율은 25 %이며 담수생산에 소모되는 전기량은 1.47 kWh/m³이다. 에너지회수장치(Energy recovery devices, ERD)는 배출되는 농축수의 고압을 이용해 원수의 압력을 높여 줌으로써 고압

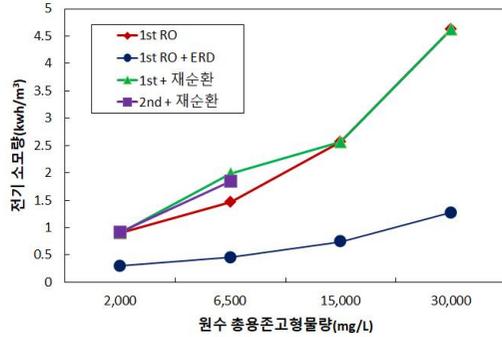
펌프 전기에너지 소모량을 낮추어주는 장치이다. 대규모 해수담수화시설에서 담수 생산비용을 낮추기 위해 설치되는 필수 장치이지만 소규모 해수담수화시설에서는 장치의 가격이 높아 설치되어 있지 않다. '1st RO + ERD'공정의 회수율은 25 %로 기존'1st RO'공정과 같다. 하지만, '1st RO + ERD'공정의 전기 소모량은 0.45 kWh/m³로 기존'1st RO'공정에서 소모되는 전기량의 31 %로 동일한 양의 담수를 생산할 수 있어 전기가 부족한 섬 지역에 필요한 공정이다. '1st RO + 재순환'공정과 '2nd RO + 재순환'공정은 기존'1st RO'공정과 비교했을 때 담수 생산에 필요한 전기 소모량이 35 %, 26 % 증가하지만, 회수율이 140 %, 200 % 높아져 염지해수 자원이 부족한 섬 지역에 적합한 공정이다.



자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

<그림 3> 공정별 회수율 및 전기소모량

원수 총용존고형물량 변화로 인한 4가지 공정의 전기소모량 변화를 나타내었다<그림4>. 기존 '1st RO'공정은 원수의 총용존고형물량이 2,000 mg/L일 때 전기 소모량이 0.9 kWh/m³이고, 총용존고형물량이 바닷물과 비슷한 수준인 30,000 mg/L으로 높아졌을 때 4.62 kWh/m³까지 전기 소모량이 높아졌다. '1st RO + 재순환'공정은 기존 '1st RO'공정과 같이 원수의 총용존고형물량이 높아질수록 비슷한 경향의 전기소모량을 보였다. '1st RO + ERD'공정은 원수의 총용존고형물량이 2,000 mg/L일때 전기소모량이 0.3 kWh/m³이며, 원수의 총용존고형물량이 30,000 mg/L일 때 전기소모량은 1.27 kWh/m³로 기존'1st RO'공정보다 동일 량의 담수를 생산하는데 소모되는 전기량을 73 % 낮아졌다. '2nd RO + 재순환'공정의 경우 농축계수가 높아짐에 따라 원수의 총용존고형물량이 6,500 mg/L보다 높은 농도에서는 공정설계가 불가능했다.



자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한
〈그림 4〉 공정별 회수율 및 전기소모량

3. 농축수 재순환이 수량, 수질 및 전기소모량에 미치는 영향

'1st RO + 재순환' 공정에서 담수 50 m³/일을 생산하기 위해서는 회수율이 20 %일 때 250 m³/일의 원수가 필요하지만, 회수율을 60 %까지 높인다면 원수 사용량을 83.3 m³/일까지 낮출 수 있다. 담수의 총용존고형물량과 전기소모량은 회수율이 20 %일 때는 152.1 mg/L, 2.59 kWh/m³이며 회수율이 60 %에서는 277.8 mg/L, 1.97 kWh/m³로 담수의 수질기준을 만족하면서 생산량을 높일 수 있다<표 3>. 회수율은 해수담수화시설을 운영하는 운영자가 공정조작을 통해 높이고 낮출 수 있기 때문에 재순환공정이 섬 지역에 도입된다면 수자원이 부족한 갈수기에는 회수율을 높여 물 생산량을 높이고 물 사용량이 낮은 시기에는 회수율을 낮춰 해수담수화시설은 안정적으로 운영할 수 있을 것이다.

〈표 3〉 회수율에 따른 '1st RO + 재순환' 공정의 수질, 수량 및 전력소모량 변화

구 분	회수율(%)				
	20	30	40	50	60
원수 유량 (m ³ /일)	250	166.7	125	100	83.3
담수 총용존고형물량 (mg/L)	152.1	169	192.6	226.5	277.8
전기소모량 (kWh/m ³)	2.59	2.08	1.9	1.87	1.97

자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

'2nd RO + 재순환' 공정은 기존 공정에서 방류되는 저염분 농축수를 한번 더 역삼투공정으로 보내 정수를 만든 후 발생하는 저염분 농축수를 원수로 재순환시키는 공정이다. 4가지 공정 중에서 최소한의 원수로 가장 많은 양의 담수를 생산할 수 있어 대규모 해수담수화시설에서는 주로 사용되고 있는 공정이며, 회수율이 높아짐에 따라 원수 사용량은 낮아지지만 담수의 총용존고형물량과 전기소모량은 높아지게 된다<표 4>.

회수율이 80 %일 때 담수 50 m³/일을 생산하기 위해서 필요한 원수량이 62.5 m³/일로 가장 작지만, 담수의 총용존고형물량이 510.4 mg/L로 수질기준 500 mg/L를 초과하게 된다. 따라서 회수율을 75 %로 운영하면 필요 원수량이 66.7 m³/일, 담수의 총용존고형물량이 412.6 mg/L로 최소한의 원수로 수질기준을 만족하는 담수를 생산할 수 있다.

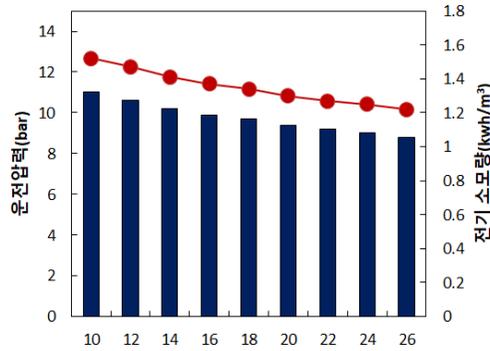
〈표 4〉 회수율에 따른 '2nd RO + 재순환' 공정의 수질, 수량 및 전력소모량 변화

구 분	회수율(%)						
	50	55	60	65	70	75	80
원수 유량 (m ³ /일)	100	90.9	83.3	76.9	71.4	66.7	62.5
담수 총용존고형물량 (mg/L)	219.3	240.5	297.3	302.3	348.8	412.6	510.4
전기소모량 (kWh/m ³)	1.49	1.49	1.53	1.58	1.69	1.85	2.12

자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

4. 원수 온도에 따른 전기소모량 변화

지하에 부존하고 있는 염지하수는 연중 수온이 일정하지만, 해수담수화공정에 유입되기 전 원수저장탱크에 보관되기 때문에 탱크 내 염지하수의 수온이 여름철에는 높아지고 겨울철에는 낮아지게 된다. 물의 특성을 살펴보면 수온이 높아지게 되면 삼투압은 증가하지만 점도가 낮아진다. 전남지역 해수담수화시설로 유입되는 원수의 온도는 10 ~ 26 °C로 조사되었으며, 10 °C일 때 운전압력과 전기소모량은 11 bar, 1.52 kWh/m³이지만 26 °C에서는 8.8 bar, 1.22 kWh/m³으로 감소하게 된다<그림 5>. 수온이 높은 여름철에는 낮은 점도로 인해 해수담수화공정의 운전압력이 낮아지고 소모되는 전기량도 줄어들게 된다.



자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

(그림 5) 원수 온도에 따른 운전압력 및 전기 소모량

V. 결 론

물 부족을 겪고 있는 섬 지역 주민들은 소규모 해수담수화시설 보급으로 인해 물 사용에 대한 어려움이 다소 해결되었으며 만족도 또한 높아지고 있다. 그러나 여름철 갈수기 염지하수의 급격한 수위 저하와 급증하는 관광객 유입에 의한 물 수요 증가로 해수담수화시설 운영에 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 원수 유입량 대비 많은 양의 담수를 생산할 수 있는 공정 개선이 필요하지만, 최근에 신규로 설치되는 해수담수화시설도 과거와 유사한 공정 설치되고 있다. 본 연구는 소규모 해수담수화시설의 담수 생산량을 높이기 위하여, 섬 지역 원수의 수질 및 수량 특성 조사를 바탕으로 해수담수화 공정 성능모사를 수행하였고, 공정별 정수의 수질 및 수량, 회수율, 전기소모량 등을 비교분석 하였다.

소규모 해수담수화시설에서 하루 동안 담수 50 m³을 생산하기 위해서 필요한 원수량은 기존 '1st RO'공정은 200 m³이며, '1st RO + 재순환'공정은 83.3 m³, '2nd RO + 재순환'공정은 66.7 m³으로 낮아지게 된다. 이때 생산되는 담수의 수질은 기존'1st RO'공정 152 mg/L, '1st RO + 재순환'공정 278 mg/L, '2nd RO + 재순환'공정 413 mg/L로 수질 관리기준을 만족한다.

역삼투 공정 구성방식이 기존'1st RO'공정일 때 회수율과 담수 생산에 필요한 전기 소모량은 25%, 1.47 kWh/m³이다. '1st RO + 재순환'공정과 '2nd RO + 재순환'공정에서는 전기 소모량이 1.99 kWh/m³과 1.85 kWh/m³도 높아지고 회수율도 60.1 %, 75 %로 증가하게 된다. 에너지

회수장치를 추가한 '1st RO + ERD'공정에서는 기존'1st RO'공정과 동일량의 담수를 생산할 때 전기 소모량을 0.45 kWh/m³까지 낮출 수 있어 전기가 부족한 섬 지역에 적합한 공정이다.

'1st RO + 재순환'공정은 현재 설치되어 있는 소규모 해수담수화시설의 증설 없이 가장 경제적으로 물 생산량을 높일 수 있는 공정이다. 역삼투 모듈을 거쳐 바다로 방류되는 농축수를 원수 탱크로 재순환시키는 배관만 설치하면 되기 때문에 염지하수 염분이 낮은 섬 지역에 꼭 필요한 공정이다. 이때, '1st RO + 재순환'공정의 최대 회수율은 60 %이며 생산되는 담수의 총용존고형물량이 277.8 mg/L이다.

담수 생산량을 최대로 높이기 위해서는 '2nd RO + 재순환'공정이 적합하다. 기존'1st RO'공정과 연계해 새로운 역삼투 모듈을 설치한다면 최대 회수율을 75 %까지 높일 수 있으며 정수의 총용존고형물량도 412.6 mg/L로 수질기준을 만족하게 된다. 따라서, '2nd RO + 재순환'공정은 해수담수화시설을 가동하기 위한 염지하수 부존량이 부족한 섬 지역에 적합한 공정이다.

원수 탱크에 보관된 후 해수담수화시설로 들어가는 원수의 수온은 계절에 따라 10 ~ 26 °C로 변한다. 원수의 수온이 10 °C인 낮은 겨울철에는 담수 생산에 소모되는 운전압력과 전기가 11 bar, 1.52 kWh/m³로 높아지고, 수온이 26 °C로 높은 여름철에는 8.8 bar, 1.22 kWh/m³로 낮아지는 특성을 보인다.

아직까지 계곡수, 빗물을 사용하는 소규모 섬과 저수지, 지하수 등을 사용하는 큰 규모의 섬 등에서 잦은 가뭄으로 인해 해수담수화시설 설치 요구가 갈수록 높아지고 있으며, 물 부족 해결을 위한 많은 연구가 필요한 실정이다. 신규 해수담수화시설 설치를 위해서는 대상 지역의 물 사용 수요와 주요 영향인자 등을 정확히 조사해야한다. 획일적인 '1st RO'공정만을 섬 지역에 설치하지 않고, 수자원이 부족한 섬 지역에는 담수 생산량을 높일 수 있는 공정을 설치하고 전기가 부족한 섬에는 전기 소모량을 낮출 수 있는 공정이 설치될 수 있도록 고려되어야 한다. 향후 개선된 공정이 현장에 설치되면 효율적인 공정 운영을 위한 후속연구와 발생하게 되는 농축수의 환경적 영향 등에 대한 조사가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 국가물관리위원회, 2023, <https://www.water.go.kr/front/main/main.do> (검색일: 2024년 1월 30일)
2. 국가통계포털, 2024, 수도요금 현황, <https://kosis.kr/> (검색일: 2024년 2월 26일)
3. 김지혜 · 이경혁 · 임재림, 2019, "에너지 소모를 고려한 역삼투 해수담수화 플랜트 주요 성능인자 영향 분석", 『멤브레인』, 29(6), 한국막학회 : 314-322
4. 김정빈 · 홍승관, 2020, "미래 그린 해수담수화 기술", 『상하수도학회지』, 34(6), 대한상하수도학회 : 403-410

5. 김택승 · 임병주 · 아요다 · 박창대, 2019, “태양에너지 시스템과 해수담수화 공정의 최적 조합 모델 선정을 위한 설계 플랫폼 개발”, 『한국태양에너지학회 학술대회논문집』, 10, 한국태양에너지학회 : 75
6. 국가물관리위원회, 2023, <https://www.water.go.kr/front/main/main.do> (검색일: 2024년 1월 30일)
7. 박경태 · 이상현, 2022, “LNG 냉열 기반 해수담수화 공정의 설계 및 분석”, 『Korean Chemical Engineering Research』, 60(3), 한국화학공학회 : 371-376
8. 법제처, 2024, ‘먹는물관리법’ : <http://www.law.go.kr/>. (검색일: 2024년 1월 30일)
9. 손진식, 2013, 『차세대 해수담수화 플랜트 산업 및 기술동향 브리프』, 국토해양지식정보센터 : 8-10
10. 윤승현 · 우달식, 2019, “원수 특성 변화 및 공정운영 조건에 따른 해수담수화 에너지 소비량 분석”, 『상하수도학회지』, 대한상하수도학회, 33(4), 286-288
11. 이현경, 2021, 『해수담수화』, 한국과학기술기획평가원 : 12-16
12. 전종민 · 김수환, 2022, “하수재이용 및 해수담수화를 위한 정삼투-역삼투 융합공정의 탄소배출량 분석”, 『대한토목학회논문집』, 42(3), 대한토목학회 : 351-357
13. 정재학 · 김누리 · 전종민 · 김수환, 2019, “역삼투 공정 설계 프로그램의 신뢰성 평가”, 『대한환경공학회지』, 41(1), 대한환경공학회 : 42-47
14. 최인수 · 김진위 · 양은경, 2015, 『도서지역 해수담수화시설의 효율적인 운영방안 연구』, 한국지방행정연구원 : 50-63
15. 최장규 · 김창민 · 임주환 · 김동호 · 김인수, 2019, “국내 역삼투 방식 해수담수화 플랜트 시설 용량별 에너지 사용량 기반 경제성 분석”, 『대한환경공학회지』, 41(7), 대한환경공학회 : 389-398
16. 한국수자원공사, 2010, 『해수담수화 사업』 : 8-10
17. 홍승관 · 황문현 · 임상규 · 주경훈 · 김나영 · 박기호 · 김정빈, 2019, “중동 시장 진출을 위한 현지맞춤형 저에너지 해수담수화 기술 개발”, 『대한토목학회지』, 67(2), 대한토목학회 : 26-37
18. 환경부, 2024, 『2024년 주요업무 추진계획』 : 1-6
19. 황문현 · 김인수, 2016, “국내 및 해외의 해수담수화 기술 비교분석”, 『대한환경공학회지』, 38(5), 대한환경공학회 : 255-268
20. Mark W., 2006, *The Guidebook to Membrane Desalination Technology*; Balaban Desalination Publications : 5-20

(논문접수일 : 2024. 02. 19 / 수정일 : 1차-2024. 02. 23, 2차-2024. 02. 28 / 영문초록접수일 : 2024. 03. 23 / 게재확정일 : 2024. 03. 25)