

도서지역 「해수담수화시설」 농축수 활용 방안 연구*

- 저염분 해수담수화시설을 중심으로 -

The Utilization of Desalination Brine in Island Areas

- A Focus on Low-Salinity Desalination Plants -

정용문** · 오길영*** · 오은하**** · 박현수***** · 김민영***** · 김학림***** · 임형인*****
차윤경***** · 한용원***** · 이덕안***** · 박귀남*****
Jung, Yong-Moon· Oh, Gil-Young· Oh, Eun-Ha· Park, Hyun-Soo· Kim, Min-Young· Kim, Hak-Rim·
Lim, Hyeong-In· Cha, Yoon-Gyeong· Han, Yong-Won· Lee, Duk-An· 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 환경연구관 : (Research officer, 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)

Corresponding Author : Gil-Young Oh, ohgy@korea.kr, (Tel)+82-61-240-5311, (Fax)+82-61-240-5325

ABSTRACT

Desalination plants in South Korea were installed with government aid from the mid-1990s. Furthermore, most of the plants were small scale to produce under 100 m³/day. Generally, brine produced by desalination plants was recognized as being twice as concentrated as seawater. Also, the discharging of brine into the ocean can have adverse impacts on the wider environment and marine ecosystem. However, many of the domestic desalination plants used low-salinity groundwater, so low-salinity brine with salt concentration lower than seawater was produced.

The largest number of desalination plants in Jeollanam-do have been installed and operated in Sinan-gun. The average total dissolved solids of feed water in 13 low-salinity desalination plants was 821 mg/L. The capacity of low-salinity desalination plants was from 6 m³/day to 300 m³/day. The desalination plants on Jara island and Ock island were invested as the oldest low-salinity desalination plant in Shinan-gun. 13 low-salinity desalination plants used 1,588 m³/day of low-salinity groundwater. And 691 m³ of low-salinity brine was released from desalination plant for a day.

This study investigated the characteristic of low-salinity brine in Shinan region and analyzed water quality to compare groundwater quality standard. In addition, growth rates and mineral contents of microgreens(*Brassica oleracea* var. *gongyloides*, *Raphanus sativus* L., *Hordeum vulgare*) were evaluated using low-salinity brine.

The total dissolved solids of low-salinity brine was 1,975 mg/L, which was about 2.2 times higher TDS than feed water. Moreover, the brine meets the needs for the water quality standard as microorganism, organic matters, heavy metals, agricultural pesticides, volatile organic compounds in 「Groundwater Act」 except for chlorine. However, chlorine standard could not be applied according to the exception clause, so brine could be used as domestic water, Agricultural water and etc. The growth rates of *Raphanus sativus* L. growing low-salinity brine were higher than general groundwater. Furthermore, mineral contents of micro-greens could be increased when the higher salinity brine was used. The results show a need for greater support and improved public relations are needed to reuse low-salinity brine in island areas.

Key Words(핵심용어) : low-salinity desalination(저염분 해수담수화), water reuse(용수 재이용), brine(농축수), agricultural water(농업용수), hydroponics(수경재배), 새싹채소(micro-green)

국문 초록

국내 해수담수화시설은 1990년대 중반부터 국가와 지자체의 지원을 받아 도서지역에 설치되었으며, 하루 약 100 m³ 이하의 담수를 생산하는 역삼투 방식의 소규모 시설이다. 일반적으로 해수담수화시설에서 발생하는 농축수는 바닷물보다 염분 농도가 두 배 정도 높은 잔물로 인식되어 있으며, 고염분 농축수의 해양 방류는 바다 환경 및 생태계에 악영향을 주는 것으로 알려져 있다. 그러나 국내에 설치된 일부 해수담수화시설은 염분 농도가 낮은 염지하수를 원수로 사용하고 있어 바닷물 보다 오히려 수질 배 낮은 염분농도의 저염분 농축수가 발생된다.

신안군에는 전라남도에서 가장 많은 해수담수화시설 27개소가 설치되어 운영 중에 있다. 이 중 48 %인 13개소 해수담수화시설 원수의 총용존고형물은 821 mg/L 이하로 바닷물 보다 약 43배 염분 농도가 낮으며, 이로 인해 저염분 농축수가 발생되어 바다로 방류되고 있다.

본 연구에서는 신안지역의 저염분 해수담수화시설 현황과 저염분 농축수 발생량을 조사하였고, 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조 제1항 제5호에 따른 환경오염공정시험기준에 준하여 일반오염물질 4 항목, 특정유해물질 16 항목을 분석하였다. 분석한 수질 결과는 「지하수법」 시행규칙 별표 9의 지하수의 수질기준과 비교해 해수담수화시설에서 버려지고 있는 저염분 농축수의 재이용 가능성을 평가하였다. 더 나아가 저염분 농축수(총용존고형물 1,000 ~ 8,000 mg/L)를 이용해 새싹채소 적콜라비쌈(*Brassica oleracea* var. *gongyolodes*), 적무쌈(*Raphanus sativus* L.), 새싹보리(*Hordeum vulgare*)의 수경재배가 가능한지를 연구하였다.

신안군 저염분 해수담수화시설의 하루 담수 생산량은 7 ~ 300 m³ 이며, 설치가 가장 오래된 섬은 2011년도에 설치된 자라도, 옥도이다. 저염분 해수담수화시설 13개소의 하루 염지하수 취수량은 1,588 m³이며 이 중 43.5 %인 691 m³의 저염분 농축수가 바다로 방류되고 있다. 저염분 농축수의 평균 총용존고형물량은 1,975 mg/L이며 원수 대비 2.2 배 농축되었다. 저염분 농축수의 수질분석 결과 미생물, 유기물, 중금속, 농약, 휘발성 유기물질 등의 오염물질이 「지하수법」의 모든 수질 기준 이내로 미량 검출되거나 검출되지 않았다. 염소이온의 경우 홍도2구는 법적 기준 보다 낮게 나왔으나 가거도, 당사도, 대야도에서는 법적 기준 보다 높게 나왔다. 하지만, 「지하수법」 시행규칙 별표 9 지하수의 수질 기준 비교에 따라 어업용수로 사용할 때, 지하수의 이용 목적상 염소이온의 농도가 인체에 해가 되지 않을 때, 해수침입 등으로 인하여 일시적으로 염소이온 농도가 증가한 경우 염소이온기준을 적용하지 아니할 수 있기 때문에 저염분 농축수를 생활용수, 어업·농업용수 등으로 재이용 할 수 있다. 또한, 총용존고형물 1,000 mg/L, 2,500 mg/L의 저염분 농축수로 재배한 적무쌈(*Raphanus sativus* L.)이 일반 지하수 재배 보다 생장률이 높았다. 하지만 지하수와 저염분 농축수로 보리새싹과 적콜라비쌈을 재배했을 때 생장률은 비슷하게 나타났다. 건조 새싹채소의 무기질 함량을 분석한 결과 저염분 농축수의 총용존고형물 함량이 높아질수록 무기질 함량도 증가했으며, 적무쌈은 소듐 > 마그네슘 > 포타슘 > 칼슘, 적콜라비쌈은 소듐 > 마그네슘 > 칼슘 > 포타슘, 보리새싹은 포타슘 > 소듐 > 마그네슘 > 칼슘 순으로 함량이 증가했다.

I. 서론

국내 대부분의 도서지역은 한정된 수자원으로 인해 갈수기에는 물 사용에 어려움을 겪고 있으며, 최근에는 물 부족 해결 방법 중 하나로 해수담수화 기술이 주목받고 있다. 해수담수화란 해수 중에 존재하는 염분, 이온성분, 유기물 등을 제거해 일상생활에 사용할 수 있는 담수를 만드는 수처리 기술을 의미한다. 해수담수화의 장점은 무한한 해수를 이용하기 때문에 수자원 확보에 어려움이 적으며 시간과 공간 등에 영향을 받지 않아 안정적으로 담수를 확보할 수 있다(이상호, 2018). 해수 중 염분을 제거하는 방법에 따라 증발법, 막여과법, 흡착법 등으로 구분할 수 있으며, 국내 대부분의 소규모 해수담수화시설에서는 경제성이 높은 막여과법을 사용하고 있다.(손진식 등, 2009) 해수담수화시설은 1990년대 중반부터 국가와 지자체의 지원을 받아 설치되기 시작했고 현재는 도서지역을 중심으로 하루 물 생산량이 1,000 m³ 이하인 해수담수화시설 109개소가 설치되어 있으며 그중 81 %는 하루 물 생산량이 100 m³ 이하인 소규모 시설이다(이현경, 2021).

해수담수화에 이용하는 원수는 일반적으로 해수를 사용한다고 알려져 있지만 전남지역의 대부분 해수담수화시설에서는 염지하수를 원수로 사용하고 있다. 「먹는물관리법」에 따르면 염지하수란 물속에 녹아있는 염분 등 총용존고형물의 함량이 2,000 mg/L 이상인 암반대수층 안의 지하수를 의미한다. 해수담수화시설에서 해수보다 염지하수를 원수로 이용하는 이유는 지하수와 혼합되어 염분 농도가 낮고, 해양에서 발생하는 오염원을 암반층이 차단해 주기 때문에 막여과 시설의 효율적인 운영과 물 생산에 필요한 전기에너지를 낮추어 주는 등 많은 장점을 가지고 있기 때문이다. 하지만, 갈수기에는 염지하수에 흙과 모래가 섞이고 염분의 농도가 평년보다 높아지는 등 단점도 존재한다.

일반적으로 해수담수화시설에서 발생하는 고염분 농축수는 염분 함량이 바닷물보다 두 배 정도 높으며, 해양으로 방류시 주위 환경과 생태계에 악영향을 주는 것으로 알려져 있다(박선영 등, 2018). 하지만, 염지하수를 원수로 사용하는 해수담수화시설에서는 바닷물보다 염분이 낮은 저염분 농축수가 발생한다. 한국수자원공사에서 운영 중인 해수담수화시설의 경우 원수의 총용존고형물은 1,000 ~ 10,000 mg/L으로, 이 중 저염분 2,000 mg/L 이하의 시설은 42개소 중 13개소로 전체 시설의 31 %를 차지한다(박남식 등, 2011). 국내 저염분 농축수가 발생하는 해수담수화 시설이 많이 설치되어 있음에도 불구하고 이에 대한 연구는 매우 드물다. 또한, 국내 해수담수화 시설의 관리 주체가 시·군, 한국수자원공사 등으로 나누어져 있어, 해수담수화시설 관리에 필요한 수질, 수량 등 기본적인 데이터 기록 역시 매우 부족하다(최인수 등, 2015).

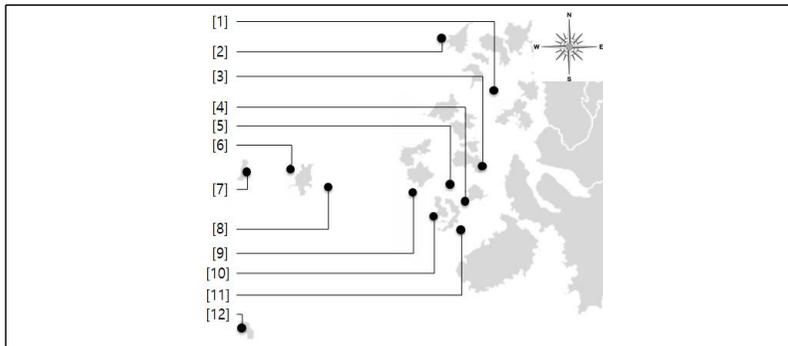
본 연구에서는 신안지역 해수담수화시설 중 저염분 염지하수를 원수로 사용하는 해수담수화 시설 현황을 조사했으며, 저염분 농축수의 수량 및 수질 분석을 통해 도서지역에서 저염분 농축

수를 재이용할 수 있는지 평가하였다. 특히, 저염분 농축수를 농업용으로 활용 가능한지 알아보기 위하여 저염분 농축수와 지하수로 각각 새싹채소를 수경재배한 후 생장률과 무기질 함량을 비교 분석하였다.

II. 연구지역 현황

전라남도에는 전국 유인섬 464개 중 가장 많은 271개가 위치해 있다(한국섬진홍원, 2023). 신안군은 전라남도 해수담수화시설 중에서도 가장 많은 27개소가 설치 및 운영 중이다. 총용존고형물(TDS, Total dissolved solids)은 물에 녹아 있는 염소, 소듐, 마그네슘, 황산염, 칼슘, 포타슘 등의 농도를 나타낸다. 총용존고형물과 염분은 동일하게 전기전도도에 의한 방법으로 측정되기 때문에 해수담수화시설의 수질을 조사할 때 지표로 염분을 대신해 총용존고형물을 사용하고 있다. 원수인 염지하수의 총용존고형물 함량에 따른 신안지역 해수담수화시설은 고염분(20,000 mg/L 이상)이 1개소, 중염분(2,000 ~ 20,000 mg/L)이 13개소, 저염분(2,000 mg/L 이하) 13개소로 구분되어진다(정용문 등, 2022).

연구 지역은 신안군의 저염분 해수담수화시설이 위치한 12개의 섬을 대상으로 하였으며(그림1), 저염분 해수담수화시설의 용량 및 설치 연도는 <표 1>과 같다. 해수담수화시설의 용량은 장재도(7 m³/일)가 가장 작았고 가거도(300 m³/일)가 가장 컸다. 해수담수화시설의 설치연도는 자라도, 옥도가 2011년도로 가장 오래됐고 재원도, 장도, 대야도가 2020년도로 가장 최근에 설치되었다. 정주인구가 많은 가거도에는 2014년도에 300 m³/일 용량의 해수담수화시설이 최초로 설치되었으며, 2019년도에 140 m³/일 용량 시설이 추가로 설치되어 운영 중이다.



자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

(그림 1) 신안지역 저염분 해수담수화시설 위치

<표 1> 신안지역 저염분 해수담수화시설의 설치 지역, 용량, 연도

구분	지역	용량(m ³ /일)	설치연도
1	당사도	60	2015
2	재원도	70	2020
3	자라도	100	2011
4	막금도	10	2015
5	옥도	30	2011
6	장도	50	2020
7	홍도2구	50	2014
8	영산도	50	2013
9	대야도	20	2020
10	장재도	7	2015
11	고사도	10	2015
12	가거도	1호기	2014
		2호기	2019

자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

III. 연구방법

1. 저염분 농축수 수량 및 수질 분석

저염분 해수담수화시설에서 농축수 발생량 및 수질 특성을 분석하기 위하여 2020년 6월부터 2022년 5월까지의 매일 유량, 온도, pH, 총용존고형물 등을 조사하였다. 농축수의 발생 특성은 회수율, 염제거율, 농축계수를 이용해 평가하였다.

회수율은 원수의 유입 유량 중 담수의 생산 유량을 의미하며 식(1)에 나타내었다. 회수율을 높게 운영하면 담수 생산량은 높아지지만 고압펌프의 압력과 전기 소모량을 증가시키며 담수의 수질이 악화된다. 하지만, 회수율이 낮아지면 담수의 생산량은 낮아지고 농축수 발생량이 높아진다.

$$R(\%) = \frac{Q_P}{Q_F} \times 100 \quad (1)$$

- R : 회수율(%)
- Q_P : 담수의 생산유량(m³/h)
- Q_F : 원수의 유입유량(m³/h)

염제거율은 해수담수화시설에서 원수에 있는 염분을 얼마나 효율적으로 제거하는지를 나타내며 식(2)에 의해 계산되어진다. 일반적으로 해수담수화시설은 염제거율이 99 % 이상이며 원수 내 무기물, 유기물 등에 의해 막오염이 발생하면 염제거율이 낮아져 담수의 염분 농도가 높아진다. 염제거율은 해수담수화시설 운영의 주요 인자 중 하나로 염제거율이 낮아지면 막세척 또는

막교체를 수행해야 한다.

$$Salt\ Rejection(\%) = \frac{TDS_F - TDS_p}{TDS_F} \times 100 \quad (2)$$

- Salt Rejection : 염제거율(%)
- TDS_p : 담수의 총용존고형물(mg/L)
- TDS_F : 원수의 총용존고형물(mg/L)

농축계수는 해수담수화시설의 회수율과 관련이 있으며 식(3)에 의해 표현된다. 담수 생산량을 높이기 위해 회수율을 높이면 농축수의 염분 농도가 높아져 농축계수가 높아진다. 일반적으로 원수의 염분이 낮은 해수담수화시설에서는 고압 펌프 압력을 낮추어 회수율을 낮게 운영하기 때문에 많은 양의 저염분 농축수가 발생하게 된다.

$$Concentration\ Factor = \frac{100}{100 - R(\%)} \quad (3)$$

- Concentration Factor : 농축계수
- R : 회수율(%)

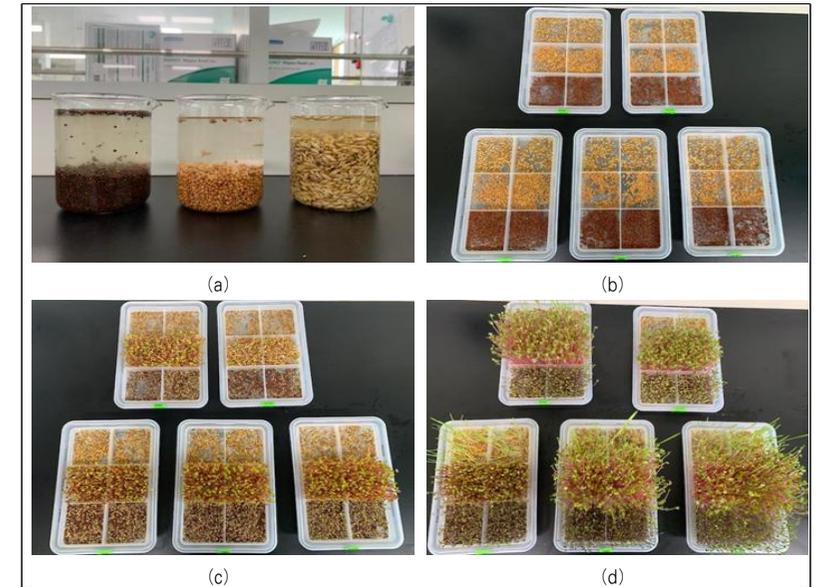
바다로 방류되고 있는 저염분 농축수를 생활용수, 농업·어업용수, 공업용수로 재이용하기 위해서는 「지하수법」 시행규칙 별표 9의 지하수의 수질기준을 만족해야한다. 저염분 해수담수화 시설 중 가거도, 당사도, 대야도, 홍도2구의 농축수를 채취한 후 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조 제1항 제5호에 따른 환경오염공정시험기준에 준하여 일반오염물질 4 항목, 특정유해물질 16 항목을 분석하였다.

2. 염분농도에 따른 새싹채소 수경재배 및 성장률, 무기질 함량 측정

수경재배는 흙을 사용하지 않고 물에 배양액을 첨가해 식물을 재배하는 방법으로 비교적 관리가 쉽고 외부 환경의 영향을 받지 않는다. 또한 토양의 영향을 배제하고 인위적으로 영양분 등을 주입해 그 영향이 어떻게 식물에 미치는지 연구하는 방법으로 널리 사용되고 있다. 새싹채소는 다른 채소류와 비슷하게 풍부한 영양성분을 갖고 있으며, 씨앗의 짝의 튀워 바로 섭취하기 때문에 재배 기간이 1 주일 정도로 짧다. 따라서 수경재배를 이용해 염분농도에 따른 새싹채소의 성장률과 무기질 함량을 비교해 보았다.

본 실험에서 사용한 적콜라비쌈(*Brassica oleracea* var. *gongylodes*), 적무쌈(*Raphanus sativus*

L.), 새싹보리(*Hordeum vulgare*)는 아시아종묘(한국, 서울)에서 씨앗을 구입했다. 신안군 다물도 해수담수화시설에서 채취한 농축수(총용존고형물 19,200 mg/L)를 증류수로 희석하여 총용존고형물 기준 1,000 mg/L, 2,500 mg/L, 4,000 mg/L, 8,000 mg/L 용액을 제조해 재배에 사용하였고 대조군으로는 증류수와 지하수를 이용하였다. 새싹채소 재배는 실험실에서 24 시간 씨앗을 침종시키고 재배기에 씨앗과 용액을 넣고 2일간 암 발아를 진행했다. 7 일간 실온 재배 후 수확한 새싹채소를 이용해 성장률과 무기질 함량을 측정하였다(그림 2>)



자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

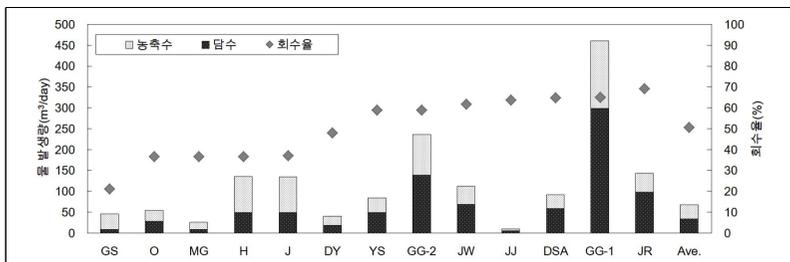
(그림 2) 염분농도 별 새싹채소 재배과정 (a)침종, (b)발아, (c)재배, (d)수확

염분농도에 따른 새싹채소의 성장률 평가는 파종 7 일 후 임의의 새싹채소 개체 20개를 수확해 초장과 근장을 측정했다. 무기질 함량은 재배한 새싹채소를 건조기(JSOF-150, JSR, Korea)에서 70 °C로 36 시간 동안 완전 건조한 후 고운 입자로 분쇄하여 습기가 들어가지 않도록 밀봉해 데시케이터에 보관하였다. 분쇄 시료를 약 0.5 g을 취하여 HNO₃ 5 mL를 가하고 Microwave oven(MARS5, CEM, USA)를 이용해 산분해한 후 증류수를 이용해 50 mL로 정용하였다. 유도결합플라즈마 분광 분석기(Optima 8300, Perkin Elmer Inc., USA)를 이용하여 정량하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 저염분 해수담수화시설에서 농축수 발생특성

저염분 해수담수화시설 13개소의 하루 담수 생산량과 농축수 발생량 조사를 통해 회수율을 구하였다<그림 3>. 일반적으로 바닷물을 이용한 역삼투 방식 해수담수화시설의 1단 역삼투 공정은 약 40 ~ 50 %의 회수율로 운영되며, 염분이 낮은 기수의 경우 50 ~ 60 %까지 회수율을 설계하는 것으로 알려져 있다(김지혜 등, 2019). 13개소의 평균 회수율은 50.7 %이며, 6개 시설의 회수율은 50 %보다 낮았고 5개 시설의 회수율은 60 %보다 높았다. 회수율은 원수의 수질, 전처리시설의 효율 등에 의해 결정되는데 높게 운영되면 막오염이 잦아지고 낮게 운영되면 담수의 생산량이 작아진다. 회수율이 가장 낮은 고사도의 경우 원수 47 m³ 중 21.2 %인 10 m³을 담수로 사용하고 78.8 %인 37 m³은 농축수로 발생해 바다로 버려지고 있다. 회수율이 가장 높은 자라도에서는 원수 144 m³ 중 69.4 %인 100 m³의 담수가 생산되고 30.6 %인 44 m³의 농축수가 발생한다. 저염분 해수담수화시설 13개소에서 취수하는 하루 총 원수량은 1,588 m³이며, 이중 897 m³인 56.5 %는 담수이고 691 m³인 43.5 %는 농축수로 발생하고 있다(그림 3).



주 : * GS-고사도, O-옥도, MG-막금도, H-홍도2구, J-장도, DY-대야도, YS-영산도, GG-2-가거도 2호기, JW-재원도, JJ-장재도, DSA-당사도, GG-1-가거도 1호기, JR-자라도, Ave.: 평균

자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

(그림 3) 해수담수화시설 별 농축수·정수 발생량 및 회수율

농축수의 염분은 원수의 염분량과 염제거율에 의해 결정된다. <표 2>에 따르면 장도, 고사도의 원수의 총용존고형물은 200 mg/L 보다 낮으며, 저염분 농축수의 총용존고형물도 장도 283 mg/L, 고사도 122 mg/L로 낮게 조사되었다. 장도와 고사도에서는 원수인 염지하수의 총용존고형물 함량이 담수 수질을 의미하는 500 mg/L 보다 낮다. 따라서, 총용존고형물량이 500 mg/L 보

다 낮을 때는 해수담수화 공정을 생략하고 생활용수로 바로 사용하면 물 생산 비용을 절감할 수 있다. 하지만, 갈수기 또는 바닷물의 침투가 의심되어 염지하수의 염분이 높아질 때에는 해수담수화시설을 이용하는 것이 바람직하다. 가거도 2호기의 경우 원수의 총용존고형물은 2,949 mg/L 이고 염제거율은 99.1 %로 13개 시설 중에서 가장 높기 때문에 농축수의 총용존고형물량이 7,189 mg/L으로 높게 나타났다. 옥도의 경우 염제거율이 91.9 %로 높지만 원수의 총용존고형물량이 325 mg/L으로 낮기 때문에 농축수의 총용존고형물량이 513 mg/L으로 낮았다. 염제거율이 65.1 %로 상대적으로 낮은 영산도의 경우 농축수의 총용존고형물량이 1,258 mg/L으로 높게 나타났는데, 이는 원수의 총용존고형물량이 높기 때문이다. 저염분 해수담수화시설에서 농축수의 염분은 원수의 염분 함량과 해수담수화시설의 염제거율 모두 영향을 받는다. 하지만 농축수의 염분 함량이 염제거율에 의해 더 많은 영향을 받는 일반 해수담수화 공정과는 달리, 저염분 해수담수화시설에서는 염제거율 보다는 원수의 염분 함량에 의해 농축수 염분 함량이 결정되었다.

(표 2) 해수담수화시설 별 원수, 농축수, 정수의 총용존고형물 및 염제거율

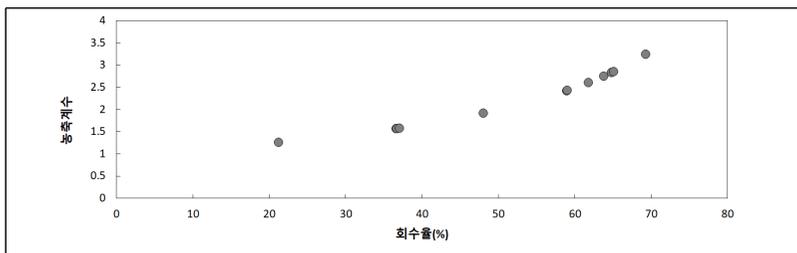
구분	총용존고형물(mg/L)			염제거율 (%)
	원수	농축수	정수	
GG-2	2,949	7,189	27.5	99.1
DSA	1,235	3,505	26.1	97.9
GG-1	1,252	3,584	33.9	97.3
DY	700	1,345	22.2	96.8
O	325	513	26.5	91.9
H	387	612	34.7	91.0
JJ	558	1,539	54.4	90.3
MG	1,397	2,203	304.2	78.2
JR	805	2,618	230.7	71.3
JW	245	640	79.9	67.3
YS	517	1,258	180.2	65.1
J	178	283	155.8	12.5
GS	122	154	113.6	6.6
Ave.	821	1,957	99.2	74.3

주 : * GS-고사도, O-옥도, MG-막금도, H-홍도2구, J-장도, DY-대야도, YS-영산도, GG-2-가거도 2호기, JW-재원도, JJ-장재도, DSA-당사도, GG-1-가거도 1호기, JR-자라도, Ave.: 평균

자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

일반적으로 바닷물을 이용하는 해수담수화시설에서는 농축계수를 높게 운영하면 역삼투막의 오염을 가중시키고 이로 인해 고압펌프의 전기 에너지 소모량이 증가하게 되며, 낮게 운영하면 원수량 대비 물 생산량이 줄어들게 된다. 저염분 해수담수화시설에서 농축계수는 최대 3.25, 최소 1.27, 평균 2.2로 조사되었다(그림 4) 농축계수는 13개 시설 중 6개 시설이 평균보다 낮았

며 7개 시설은 평균보다 높았다. 평균 총용존고형물 821 mg/L 원수를 최대 농축계수인 3.25로 농축되더라도 농축수의 총용존고형물은 2,668 mg/L이며, 농축수의 총용존고형물은 바닷물의 총용존고형물 35,000 mg/L보다 13배 이상 낮다. 대부분의 도서지역은 강우량이 적은 갈수기에는 염지하수 부존량이 급격히 줄어들어 해수담수화시설을 가동하지 못하고 있다. 따라서, 저염분 해수담수화시설에서는 원수의 염분이 낮다는 장점을 활용해 농축계수를 높게 운영한다면 원수량 대비 담수 생산량을 높일 수 있다.



자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

(그림 4) 회수율에 따른 저염분 해수담수화시설의 농축계수

2. 저염분 농축수의 수질특성

<표 3>은 생활용수, 농업·어업용수, 공업용수의 지하수 수질기준과 저염분 농축수의 수질 분석 결과를 나타내었다. 가거도, 당사도, 대야도, 홍도2구의 농축수 수질분석 결과 염소이온을 제외하고 미생물, 유기물, 중금속, 농약, 휘발성 유기물질 등의 오염물질이 법적 기준 이내로 미량 검출되거나 검출되지 않았다. 염소이온은 바닷물에 가장 많이 함유된 성분으로 계절별, 해역 등에 따라 농도가 달라지며 동해안(강릉) 16,025 mg/L, 서해안(서산) 16,696 mg/L, 남해안(고성) 18,151 mg/L로 알려져 있다(이상범 등, 2017). 가거도의 염소이온 농도가 6,846 mg/L로 가장 높으며, 대야도 2,400 mg/L, 당사도 608 mg/L, 홍도2구 123.5 mg/L로 표층 바닷물 대비 0.6 ~ 34.1 % 수준의 농도를 보인다. 특히, 홍도 2구의 농축수는 생활용수, 농업·어업용수, 공업용수로 바로 이용할 수 있을 정도로 염분 농도가 법적 기준 보다 낮다. 또한, 「지하수법」 시행규칙 별표 9 지하수의 수질 기준 비교에 따르면 어업용수로 사용할 때, 지하수의 이용 목적상 염소이온의 농도가 인체에 해가 되지 않을 때, 해수침입 등으로 인하여 일시적으로 염소이온 농도가 증가한 경우 염소이온기준을 적용하지 아니할 수 있기 때문에 가거도, 대야도, 당사도에서도 염소이온 농도만 적절히 고려해 농축수를 바로 실생활에 사용할 수 있다.

(표 3) 해수담수화시설에서 발생하는 농축수 수질 및 지하수의 수질기준

구분	생활용수 기준	농업·어업 용수 기준	공업용수 기준	가거도	당사도	대야도	홍도2구
수소이온농도(pH)	5.8 - 8.5	6.0 - 8.5	5.0 - 9.0	7.6	6.9	7.3	6.7
총대장균군 (균수/100mL)	5,000 이하	-	-	0	0	0	0
질산성질소 (mg/L)	20 이하	20 이하	40 이하	6.7	14.0	5.2	2.1
염소이온 (mg/L)	250 이하	250 이하	500 이하	6,846.0	608.0	2,400.0	123.5
카드뮴 (mg/L)	0.01 이하	0.01 이하	0.02 이하	불검출	불검출	불검출	불검출
비소 (mg/L)	0.05 이하	0.05 이하	0.1 이하	불검출	불검출	불검출	불검출
시안 (mg/L)	0.01 이하	0.01 이하	0.2 이하	불검출	불검출	불검출	불검출
수은 (mg/L)	0.001 이하	0.001 이하	0.001 이하	불검출	불검출	불검출	불검출
다이아지논 (mg/L)	0.02 이하	0.02 이하	0.02 이하	불검출	불검출	불검출	불검출
파라티온 (mg/L)	0.06 이하	0.06 이하	0.06 이하	불검출	불검출	불검출	불검출
페놀 (mg/L)	0.005 이하	0.005 이하	0.01 이하	불검출	불검출	불검출	불검출
납 (mg/L)	0.1 이하	0.1 이하	0.2 이하	불검출	불검출	불검출	불검출
크롬 (mg/L)	0.05 이하	0.05 이하	0.1 이하	불검출	불검출	불검출	불검출
트리클로로에틸렌 (mg/L)	0.03 이하	0.03 이하	0.06 이하	불검출	불검출	불검출	불검출
테트라클로로에틸렌 (mg/L)	0.01 이하	0.01 이하	0.02 이하	불검출	불검출	불검출	불검출
1,1,1-트리클로로에탄 (mg/L)	0.15 이하	0.3 이하	0.5 이하	불검출	불검출	불검출	불검출
벤젠 (mg/L)	0.015 이하	-	-	불검출	불검출	불검출	불검출
톨루엔 (mg/L)	1 이하	-	-	불검출	불검출	불검출	불검출
에틸벤젠 (mg/L)	0.45 이하	-	-	불검출	불검출	불검출	불검출
크실렌 (mg/L)	0.75 이하	-	-	불검출	불검출	불검출	불검출

주 1.: 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 경우에는 염소이온기준을 적용하지 않을 수 있다.

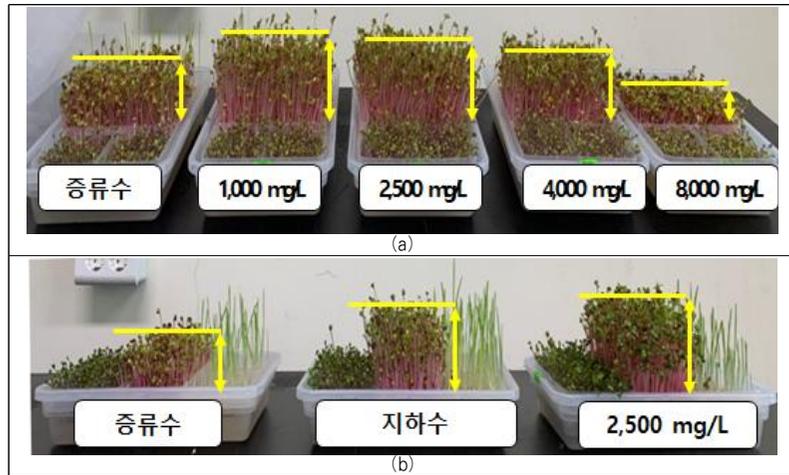
- 가. 어업용수
- 나. 지하수의 이용 목적상 염소이온의 농도가 인체에 해가 되지 않는 경우
- 다. 해수 침입 등으로 인하여 일시적으로 염소이온 농도가 증가한 경우

주 2.: 농·어업용수 및 공업용수가 생활용수의 목적으로도 이용되는 경우에는 생활용수의 수질기준을 적용한다.

자료 : 「지하수법」 시행규칙 별표 9(시행 2022. 5. 30.)

3. 새싹채소 재배

본 연구에서 조사한 저염분 농축수의 총용존고형물(154 ~ 7,189 mg/L, 평균 1,957 mg/L)을 참고하여 새싹채소 재배 용수의 총용존고형물을 1,000 mg/L ~ 8,000 mg/L까지 나누어 새싹채소를 수경재배 했으며 대조군으로는 증류수와 지하수를 이용하였다<그림 5>.

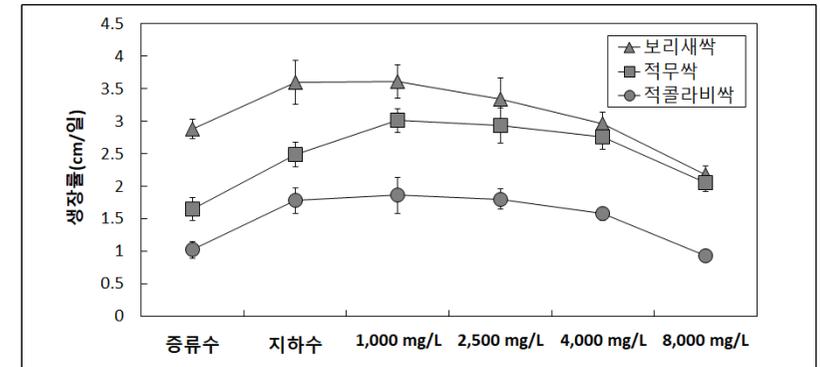


자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

<그림 5> 농축수의 염분농도 별 새싹채소 재배

<그림 6>에는 염분 농도에 따른 새싹채소의 성장률을 분석한 결과를 나타냈다. 총용존고형물량 1,000 mg/L에서 새싹채소의 성장률이 적무싹 3.0 ± 0.2 cm/일, 적콜라비싹 1.9 ± 0.3 cm/일, 보리새싹 3.6 ± 0.3 cm/일로 나타났으며 증류수는 적무싹 1.6 ± 0.2 cm/일, 적콜라비싹 1.0 ± 0.1 cm/일, 보리새싹 2.9 ± 0.1 cm/일 이고 지하수는 적무싹 2.5 ± 0.2 cm/일, 적콜라비싹 1.8 ± 0.2 cm/일, 보리새싹 3.6 ± 0.3 cm/일로 나타났다. 무기질을 함유하지 않은 증류수로 재배한 새싹채소는 성장률이 가장 낮게 나타났으며, 보리새싹과 적콜라비싹은 지하수보다 높은 염분 농도의 농축수로 재배했을 때 성장률은 비슷하거나 감소하였다. 하지만, 적무싹의 경우 총용존고형물 1,000 mg/L와 2,500 mg/L에서 지하수보다 성장률이 높았으나 그 이상의 염분 농도에서는 성장률이 낮아졌다. 바닷물에 의한 작물 재배는 다양한 무기성분 함유로 인해 작물의 생육 촉진, 품질향상, 병해충 및 잡초방제 효과가 있다고 국내뿐만 아니라 국외에서도 알려져 있으며, 들깨는 10 ~ 15배, 오이는 20 ~ 70배의 바닷물 희석농도에서 생육이 촉진되었으며 양파, 마늘, 고구

마, 감귤 등은 염분에 의한 저항성이 강하다고 보고되었다(이상범 등, 2011) 따라서, 식물의 종류에 따라 염분에 대한 저항성이 다르기 때문에 식물에 피해가 발생하지 않도록 염분 농도를 고려해야 하며, 지속적으로 염분이 있는 물이 토양에 흡수되면 뿌리의 양분흡수와 토양 내 수분의 이동이 저해되는 등 농경지 환경이 훼손될 수 있기 때문에 수경재배를 통해 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.



자료 : 본 연구조사 내용분석에 의한

<그림 6> 염분농도 별 새싹채소 재배

무기질은 식물체의 생육정도를 판단하는 방법 중의 하나이며, 체내에서는 만들어지지 않아 채소 등 음식으로 섭취해야하는 필수 영양소 중 하나이다. 칼슘은 뼈를 구성하고 마그네슘은 탄수화물 대사와 혈압 및 체온 조절, 포타슘은 근육과 신경 기능 조절, 소듐은 체액의 밸런스 조절 및 신경기능, 근육수축 등을 유지하는 중요한 무기질 성분들이다. 증류수, 지하수, 농축수의 염분농도별 새싹채소의 무기질 함량은 <표 4>과 같다. 건조 새싹채소 kg 당 총 무기질 함량은 적무싹, 적콜라비싹은 총용존고형물 함량이 높아질수록 많았지만, 보리새싹의 경우 총용존고형물 2,500 mg/L에서 총무기질 함량이 가장 높았고 총용존고형물 함량이 높아질수록 낮아졌다. 총용존고형물 2,500 mg/L에서 재배한 새싹채소의 다량무기질인 칼슘, 포타슘, 소듐, 마그네슘의 함량 분석결과 적무싹은 소듐(50,016 mg/kg) > 포타슘(26,039 mg/kg) > 마그네슘(21,986 mg/kg) > 칼슘(16,532 mg/kg), 적콜라비싹은 소듐(31,475 mg/kg) > 칼슘(27,502 mg/kg) > 포타슘(26,619 mg/kg) > 마그네슘(23,878 mg/kg), 보리새싹은 포타슘(32,306 mg/kg) > 소듐(20,768 mg/kg) > 마그네슘(10,029 mg/kg) > 칼슘(4,641 mg/kg) 순으로 많은 함량을 보였다. 저염분 농축수로 재배했을 때 지하수 재배보다 함량이 가장 많이 증가한 무기질은 소듐이며, 적무싹은 소듐 > 마그네슘 > 포

타슘 > 칼슘, 적콜라비삭은 소듐 > 마그네슘 > 칼슘 > 포타슘, 보리새싹은 포타슘 > 소듐 > 마그네슘 > 칼슘 순으로 함량이 증가했다. 최종명 등(2012)에 따르면 딸기 재배에서 무기질 중 구리, 몰리브데넘 시비농도를 증가시켰을 때 식물 내 무기질의 함량이 시비농도가 높아짐에 따라 직선적으로 증가하였으며, 딸기의 성장률과 황화현상 등을 고려해 최대 성장량보다 10 % 적은 생장을 보일 때를 무기질 시비농도의 최대 한계점으로 간주하였다. 따라서, 저염분 농축수의 염분 농도가 높아질수록 새싹채소의 무기질 함량이 높아지지만, 염분이 높아짐에 따라 새싹채소의 생장률이 무기질의 과잉공급으로 인해 저하 되므로 바닷물 염분농도의 2.9 % 정도인 총용존고형물 1,000 mg/L의 저염분 농축수를 이용해 새싹채소를 재배하는 것이 가장 적합하다고 판단된다.

(표 4) 증류수, 지하수, 농축수 염분 농도별로 재배한 새싹채소의 건조 중량 당 무기질 함량

(단위 : mg/kg, D.W.)

구분	구리 (Cu)	철 (Fe)	포타슘 (K)	마그네슘 (Mg)	망가니즈 (Mn)	소듐 (Na)	아연 (Zn)	칼슘 (Ca)	Sum.	
적 무 삭	증류수	18 ± 1.3	343 ± 10.3	17,682 ± 1,235	12,741 ± 656	86 ± 7.5	215 ± 65.8	219 ± 17.3	10,772 ± 997	42,075 ± 735
	지하수	22 ± 1.4	356 ± 3.2	19,656 ± 1,035	12,822 ± 729	91 ± 3.4	3,365 ± 251	261 ± 18.5	14,498 ± 711	51,071 ± 1,181
	1,000 mg/L	25 ± 7.6	294 ± 13.9	20,210 ± 1,453	20,839 ± 1,329	143 ± 8.3	38,841 ± 1,209	181 ± 14	16,077 ± 963	96,609 ± 2,799
	2,500 mg/L	15 ± 1.1	252 ± 16.3	26,039 ± 636	21,986 ± 1,060	182 ± 19.2	50,016 ± 2,847	236 ± 35.6	16,532 ± 702	115,259 ± 4,078
	4,000 mg/L	16 ± 0.6	266 ± 25	34,584 ± 2,771	23,942 ± 1,910	188 ± 7.1	58,544 ± 1,511	222 ± 27.3	16,557 ± 839	134,318 ± 6,441
	8,000 mg/L	15 ± 0.4	234 ± 27.9	56,670 ± 3,090	26,670 ± 966	229 ± 32.8	64,190 ± 3,500	223 ± 29.7	17,862 ± 812	166,093 ± 7,816
적 콜라 비 삭	증류수	12 ± 1.0	342 ± 20.5	21,127 ± 1,296	14,497 ± 321	178 ± 4.4	490 ± 95.4	169 ± 13.6	20,503 ± 817	57,318 ± 1,512
	지하수	14 ± 1.3	388 ± 29.2	24,003 ± 1,445	15,121 ± 1,475	198 ± 13.1	1,279 ± 29	225 ± 10.7	22,579 ± 809	63,806 ± 2,968
	1,000 mg/L	13 ± 2.5	376 ± 20.5	20,366 ± 2,519	17,841 ± 1,047	195 ± 7.4	11,962 ± 536	173 ± 10.2	23,371 ± 1,000	74,297 ± 3,406
	2,500 mg/L	13 ± 2.3	379 ± 10.1	26,619 ± 5,618	23,878 ± 1,907	251 ± 19.5	31,475 ± 6,142	188 ± 4.1	27,502 ± 2,141	110,305 ± 1,335
	4,000 mg/L	12 ± 2.7	452 ± 37.3	48,378 ± 2,788	24,550 ± 4,088	274 ± 8.4	44,943 ± 2,988	188 ± 5.0	28,320 ± 902	147,117 ± 71,59
	8,000 mg/L	12 ± 1.3	419 ± 85.2	32,080 ± 5,867	31,508 ± 823	276 ± 15.1	60,678 ± 3,463	186 ± 5.9	28,304 ± 2,545	153,461 ± 4,955

구분	구리 (Cu)	철 (Fe)	포타슘 (K)	마그네슘 (Mg)	망가니즈 (Mn)	소듐 (Na)	아연 (Zn)	칼슘 (Ca)	Sum.	
보 리 새 싹	증류수	17 ± 0.8	238 ± 7.8	14,973 ± 1,339	5,633 ± 167	97 ± 4.1	518 ± 37.4	173 ± 12.7	2,428 ± 151	24,077 ± 1,447
	지하수	17 ± 1.9	228 ± 12.4	17,866 ± 3,748	8,730 ± 205	109 ± 1.5	15,576 ± 691	155 ± 11.8	3,770 ± 249	46,452 ± 4,564
	1,000 mg/L	19 ± 1.5	246 ± 299	26,846 ± 1,016	8,221 ± 651	117 ± 5.6	9,392 ± 424	179 ± 2.4	3,589 ± 228	48,611 ± 1,992
	2,500 mg/L	21 ± 1.7	243 ± 15.7	32,306 ± 4,291	10,029 ± 2,884	131 ± 29.5	20,768 ± 1,426	200 ± 2.0	4,641 ± 550	68,340 ± 4,216
	4,000 mg/L	20 ± 2.7	233 ± 9.6	27,411 ± 1,391	11,276 ± 1,088	146 ± 7.0	21,972 ± 1,176	190 ± 21.6	5,293 ± 146	66,541 ± 1,787
	8,000 mg/L	18 ± 1.6	224 ± 7.5	19,969 ± 606	12,044 ± 329	136 ± 4.5	22,433 ± 85.1	156 ± 11.9	5,462 ± 486	60,441 ± 1,277

자료 : 본 연구조사 내용분석에 의함

V. 결 론

도시지역 주민들은 지리적, 환경적 특성으로 인해 물 부족으로 고통을 받고 있으며 근본적으로 물 부족 문제가 해결되지 않아 기본적인 생존권마저 위협을 받고 있다. 다행히 1990년대 중반부터 해수담수화시설이 설치되면서 도시지역 주민들의 물 사용에 대한 갈증이 조금이나마 해결될 수 있었다. 하지만 도시마다 다른 염지하수의 부존 특성을 고려하지 않고 일률적으로 해수담수화시설이 설치되면서 해수담수화 후 발생하는 다량의 저염분 농축수가 해양으로 버려지고 있다.

본 연구에서는 새로운 수자원으로써 저염분 해수담수화시설 현황과 저염분 농축수의 수량 및 수질 특성 등을 조사하였으며 저염분 농축수를 농업용수로 이용했을 때 새싹채소의 성장률과 무기질 함량 변화 등을 분석하였다.

신안군 내 해수담수화시설 27개소 중 원수의 총용존고형물 함량이 2,000 mg/L보다 낮은 저염분 해수담수화시설은 13개소이며, 하루 담수 생산 용량은 7 ~ 300 m³이고 가장 오래된 시설은 2011년도에 설치되었다. 저염분 해수담수화시설 13개소에서는 하루 1,588 m³의 염지하수를 취수해 원수로 사용하고 있는데, 취수량 중 43.5 %에 해당하는 691 m³의 농축수가 발생한다. 하지만 해수담수화시설에서 농축수의 평균 농축계수는 2.2이고, 최대 농축계수 3.25를 적용하더라도 발생하는 저염분 농축수의 총용존고형물량은 2,668 mg/L로, 바닷물과 비교했을 때 13배 이상 염분

농도가 낮다. 또한 「지하수법」에 따른 저염분 농축수의 수질분석 결과 생활용수, 농업·어업 용수, 공업용수 기준 중 염소이온 항목을 제외하고는 미생물, 유기물, 중금속, 농약, 휘발성 유기 물질 등이 불검출이거나 기준 이내로 미량 검출되었다. 따라서 저염분 농축수는 염소이온 농도만 고려된다면, 물이 부족한 도서지역에서 활용 가능한 새로운 수자원이 될 수 있다.

많은 물이 사용되는 농업에 저염분 농축수의 활용 가능성을 수경재배 연구를 통해 평가했을 때 지하수보다 총용존고형물 1,000 ~ 2,500 mg/L의 저염분 농축수에서 새싹채소의 생장률이 높았고 그 이상의 총용존고형물 함량에서는 생장률이 낮아졌다. 하지만 새싹채소의 건조 100 g 당 총무기질 함량은 총용존고형물 함량이 높아질수록 무기질 함량 또한 높아졌다. 염분이 있는 물을 이용한 농사 방법은 작물의 생육 촉진, 품질 향상, 잡초 및 병해충 방제 등 장점이 많지만 고농도 염분으로 인해 토양 염분 축적, 하천수로의 유입에 따른 오염 등 문제가 발생할 수 있다. 따라서 최신 농법인 수경재배 기법을 이용한다면 염분이 토양 및 하천수에 유입되는 것을 차단하고 작물의 품질과 생산효율을 높일 수 있다.

참 고 문 헌

- 김지혜 · 이경혁 · 임재립, 2019, “에너지 소모를 고려한 역삼투 해수담수화 플랜트 주요 성능인자 영향 분석”, 『멤브레인』, 29(6), 한국막학회 : 314-322
- 박남식 · 박준영 · 문유리 · 김자겸, 2011, “소규모해수담수화 시설의 생산비용 절감 방안”, 『한국수자원학회 논문집』, 44(10), 한국수자원학회 : 809-817
- 박선영 · 서진성 · 김태윤, 2018, “해수담수화 시설에서 생성된 농축수의 환경적 영향”, 『환경영향평가』, 27(1), 한국환경영향평가학회 : 17-32
- 손진식 · 양정석 · 박진서, 2009, “국내 해수담수화 플랜트 적용 활성화 방안 연구”, 『상하수도학회지』, 23(2), 대한상하수도학회 : 251-255
- 이상범 · 박광래 · 홍승길 · 이초룡 · 안민실 · 이상민 · 고병구, 2017, 『바닷물의 농업적 활용기술』, 국립농업과학원 : 5-10
- 이상범 · 이민호 · 김명숙 · 최장선 · 조명철 · 심형권 · 박재영 · 조남호 · 심종섭 · 최도영, 2011, 『친환경 농산물 생산을 위한 바닷물의 농업적 활용 매뉴얼』, 국립농업과학원 : 12-23
- 이상호, 2018, “국내 물부족 해소를 위한 해수담수화 추진방안에 대한 제언”, 『대한토목학회지』, 66(10), 대한토목학회 : 22-23
- 이현경, 2021, 『해수담수화』, 한국과학기술기획평가원 : 12-16
- 정용문 · 이정일 · 윤설희 · 정혜민 · 이에영 · 이무현 · 차윤경 · 안길원, 2022, “도서지역 「해수담수화시설」 효율적인 관리 방안”, 『한국도서연구』, 34(1), 한국도서(섬)학회 : 303-319

- 최인수 · 김진위 · 양은경, 2015, 『도서지역 해수담수화시설의 효율적인 운영방안 연구』, 한국지방행정연구원 : 50 - 63
- 최종명 · 남민호 · Chiwon W. Lee, 2012, “국내육성 주요 딸기 품종에서 발생하는 구리(Cu) 과잉 증상 및 영양진단을 위한 식물체 내 한계농도”, 『원예과학기술지』, 30(5), 한국원예학회 : 477-483
- 최종명 · 남민호 · Chiwon W. Lee, 천종필, 2012, “국내육성 주요 딸기 품종에서 발생하는 Mo 과잉 증상 및 영양진단을 위한 식물체 내 한계농도”, 『원예과학기술지』, 30(4), 한국원예학회 : 392-399
- 한국섬진총원, 2023, <https://www.kidi.re.kr/home.do> (2023.2.22. 검색)

(논문접수일 : 2023. 02. 06 / 수정일 : 1차-2023. 02. 20, 2차-2023. 02. 28 / 영문초록감수일 : 2023. 04. 14 / 게재확정일 : 2023. 04. 18)