

해수로부터 전기투석 장치를 이용한 고경도 수 제조

지 호[†] · 김광수 · 문덕수 · 김현주 · 이호생
선박해양플랜트연구소

Production of Hard Water From Seawater Using Electrodialysis

Ho Ji[†], Kwang Soo Kim, Deok Soo Moon, Hyeon Ju Kim and Ho Saeng Lee

Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 426-774, Korea

요 약

바닷물 속에는 다양한 종류의 이온들이 존재한다. 바닷물을 음용수로 사용하기 위해서는 특정 성분은 농축하고 또 다른 특정 성분은 제거되어야 한다. 이러한 특성을 갖기 위해서는 바닷물의 수질을 조정하는 것이 필요하다. 특히 2가 양 이온인 칼슘과 마그네슘은 인체에 유용한 물질이므로 이를 농축하는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 나노막을 거친 농축수를 전기투석 장치를 이용하여 칼슘과 마그네슘을 농축하는 고경도수 제조기술을 연구하였다. 나노막을 이용하여 2가 이온 성분을 농축한 처리수를 얻은 후 이를 전기투석 장치에 적용시켜 1가 이온인 염화나트륨성분을 제거하였다. 이와 같이 전기투석 장치를 이용하여 고경도수를 제조할 수 있었다.

Abstract – There are various ions in seawater. In order to use seawater as the drinking water, some elements are to be concentrated and other elements are to be removed. To obtain these characteristics using seawater, it is necessary to adjust seawater quality. Because calcium and magnesium are especially healthful to human bodies, it is required to concentrate these elements. In this study, the technology to obtain the hard water from seawater by electrodialysis was investigated. After concentrated water was produced using nanofiltration membranes, sodium chloride was eliminated from the concentrated water by electro dialysis. The hard water production from seawater was successfully achieved using electro dialysis in this study.

Keywords: Hard water(고경도수), Nano filtration(나노여과), Electro dialysis(전기투석), Concentrated seawater(농축수)

1. 서 론

해수는 무궁무진한 자원으로 육상 자원 고갈로 인한 그 중요성이 증대되고 있다. 특히 육상 담수가 부족한 경우 해수가 육상 담수를 대신할 수 있다. 일부 지역에서는 현재 심각한 담수 부족 현상을 겪고 있다. 육상에서는 빗물 모으기, 하수 재이용과 같은 방법으로 부족한 담수를 확보하려는 연구를 수행 중에 있다. 아직까지는 해수 담수화 비용이 많아 이를 현실적으로 낮추려는 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구 가운데 해수를 이용하여 먹는 물 제조하려는 시도가 행해지고 있다. 주로 증발법이나 막여과법을 사용하여 해수 담수화를 하였으나, 최근에는 막여과법으로 해수를 처리하는 경향이 증가하고 있다. 막여과법은 증발법에 비해 에너지 사용량이 적어 친환경

경제적인 공법으로 인식된다. 하지만 막오염 문제 및 주기적인 막 교체 등 해결해야 할 과제가 많이 있다(Kim and Hoek[2005]).

해수의 장점은 많은 미네랄을 함유하고 있지만, 해수 담수화과정에서 대부분 제거되어 담수화된 물에는 미네랄성분이 거의 없다. 해양심층수 미네랄은 최근 동물 실험 연구에 의하면 비만 예방과 암 예방에 효과가 있는 것으로 알려지고 있다(Kim *et al.*[2013]). 먹는 물에 이러한 미네랄 성분을 함유시키기 위해서는 새로운 공정의 담수화 기술이 필요하다. 특히 미네랄 성분 중 칼슘과 마그네슘의 농도가 높은 고경도수 제조가 필요하다. 고경도수는 최근 동물 임상 실험에서 밝혀진 것과 같이 건강에 좋은 작용을 하는 것으로 알려져 있다(Ha *et al.*[2013]). 현재 고경도수는 역삼투를 사용한 농축수로부터, 증발법을 이용하여 추출물을 분리한 후 재 용해과정을 통해 얻고 있으나, 증발법에는 다량의 에너지가 소모됨으로 이에 대한 대안이 필요하다(Ji *et al.*[2014a]). 따라서 고경도수 제조를 위해 전기투석(ED, electro dialysis)공정을 활용할 필요가 있다. 전기투석 공정

[†]Corresponding author: 79hoji@kriso.re.kr

본 논문은 2014년 춘계 해양환경에너지학회에서 발표된 논문을 근거로 하고 있음을 밝힙니다.

은 증발법과 같은 열에너지를 이용하지 않고, 막과 전기에 의해 고경도 수를 제조할 수 있다. 전기투석을 이용하여 수처리 연구를 수행한 사례는 다음과 같다. 전기투석 장치를 이용하여 질산성 질소를 제거하려는 시도가 있었다(Lee[2009]). 총 질소 중 고농도의 질산성 암모니아성 질소 제거를 위하여, 전기투석을 사용하여 운전인자 중 유입유량, 희석, 농축액의 농도, 운전전압이 질소이온 제거에 미치는 영향 등을 연구하였다. Kim *et al.*[1994]은 전기투석법을 이용하여 아미노산 수용액 중에 존재하는 전해질인 무기염의 분리정제에 관하여 연구하였으며, 운전결과 NaCl 제거효율은 96.1~96.2%이었고, 아미노산 누설율은 glycine의 경우 2.5%, methionine의 경우 1.7%, alanine의 경우 2.0%로 염 제거율이 매우 뛰어났다. 그리고 전기투석장치는 해수담수화 공정에서도 사용 되어져 왔다. 해수담수화 공정 중 탈염과정을 통해 먹는 물을 생산하고, 걸러진 1가 이온들을 농축하여 소금을 만드는 방법이 있었다. 그러나 고가의 설비비용과 생산량의 한계로 인한 경제성부분에 미흡한 결과를 나타내어, 해수담수화 공정에서는 거의사용을 하지 않고 있었다. 그런데 최근에 Ji *et al.*[2014b]은 Nano Filtration(NF)을 사용하여 경도 20,000 이상의 고경도 농축수를 제조하였다. 그러나 이렇게 만들어진 고경도 농축수에는 나트륨 등의 인체 유해성분을 다량 함유하고 있는 실정므로, 특히나 유해성분인 1가 이온들의 제거방법이 요구 되어졌다. 전기투석장치는 앞의 선행연구 결과처럼 NaCl 제거효율이 탁월한 장점을 가지고 있으며, 단점으로 지적 되었던 생산량의 한계성을 고품질의 고경도 농축수 제조에 사용한다면, 극복 할 수 있을 것으로 예상된다. 이처럼 전기투석 장치를 고경도 농축수에 적용하여 유해성분인 1가 이온을 제거하면, 고품질의 고경도 농축수를 제조 할 수 있을 것으로 사료되어진다.

2. 실험방법

본 실험은 해수로부터 칼슘 및 마그네슘을 추출하여 고경도 수를 제조하는데 목적이 있다. 실험에 사용된 해양심층수는 강원도 고성 앞바다 수심 500 m에서 취수한 것으로 청정하고 미네랄 성분이 풍부하다. 실험에 앞서 전해액으로 NaNO_3 와 Na_2SO_4 를 사용하여 향후 실험에 사용할 전해액을 결정하였다. 실험에 사용된 전기투석 장치는 모델명 Acylizer 02(일본 ASTOM사 제품)이다. 해양심층수 속의 미네랄 농축을 알아보기 위해, 해양심층수를 탈염조와 농축조에 넣고 미네랄 분리, 농축실험을 하였다. 사용된 전압은 37.0 V이고 유량은 $13.3 \mu\text{S}/\text{cm}$ 였다. 실험 중단 전기전도도(low set)는 5, 10, 20, 25, 30, 35에서 실험하여 어느 전기전도도에서 1가 양이온과 2가 양이온이 분리될 수 있는지 실험하였다. Na, K, Mg, Ca 등과 같은 미네랄 성분 분석을 이온크로마토그래피(IC, Ameritech Science)를 이용하여 분석하였다. 실험에 사용된 NF막은 중국 vontron사 제품으로 20 bar, 20 °C에서 운전하였으며 flux는 18 LMH였다(Ji *et al.*[2014b]).

농축조에 사용될 시료에 의한 전기투석 영향을 알아보기 위해 농축조에 해양심층수와 수돗물을 이용하여 실험하였다. 이때에 탈염조에는 NF에 의해 3차 또는 4차까지 농축된 NF농축수를 사용하였

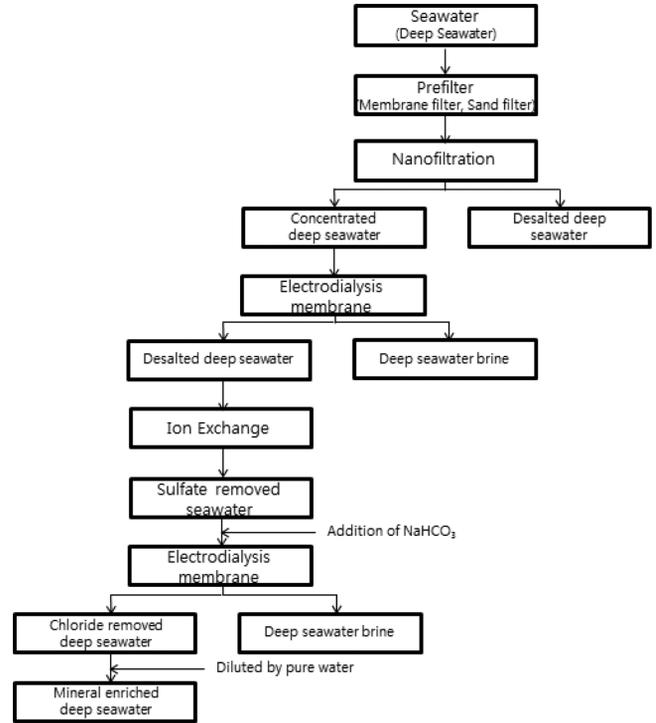


Fig. 1. Diagram of total processes.

다(Ji *et al.*[2014b]). NF농축수를 사용한 이유는, NF에 의해 칼슘과 마그네슘을 농축시킨 후 전기투석에 의해 Na와 같은 1가 양이온을 분리하여 2가 양이온만 분리 정제하기 위해서다. 즉, Ji *et al.*[2014b] 연구에서 만들어진 농축수에 인체에 유해한 Na 등과 같은 1가 이온들을 제거하여, 상품성이 있는 고경도 농축수를 생산할 수 있을 것이라고 예상 할 수 있었다. 전기투석에 의한 고경도수 제조를 위해 NF 농축수를 1차 전기투석 장치를 통과하고, 이온교환 수지를 통과한 후, 2차 전기투석 장치를 통과시켰다. NF에 의해 2가 이온을 농축시키고 이때 같이 농축된 염소이온, 황산이온을 차후 공정에서 제거하는 과정을 거쳤다. 1차 전기투석에서는 나트륨과 염소이온을 제거하였고, 이온교환 장치에서는 황산이온을 제거하였다. 2차 전기투석 전에 중탄산나트륨(NaHCO_3)을 첨가시킨 후, 전기투석 장치에서 염소이온을 제거하여 고경도수를 제조하였다. 또한 전기투석 실험 시 1가 양이온인 나트륨 성분이 부족할 시 염소이온 제거 성능을 평가하기 위해, 중탄산나트륨의 첨가 유무를 비교해 보았다. NF, 전기투석, 이온교환 복합공정의 공정도는 Fig. 1과 같다.

3. 실험결과

전기투석 장치의 전해액을 결정하기 위해 3% Na_2SO_4 와 0.5N NaNO_3 를 비교하였다. 탈염수의 TDS값과 전기전도도를 비교해 보았을 때 두 전해액 모두 우수한 탈염 결과를 나타내었다. 3% Na_2SO_4 의 경우에는 탈염수의 TDS가 378 mg/L, 0.5N NaNO_3 의 경우에는 탈염수의 TDS가 201 mg/L를 나타내었다. 탈염수의 전기전도도는 3% Na_2SO_4 의 경우에는 $631 \mu\text{S}/\text{cm}$, 0.5N NaNO_3 의 경우에는 $336 \mu\text{S}/\text{cm}$ 를

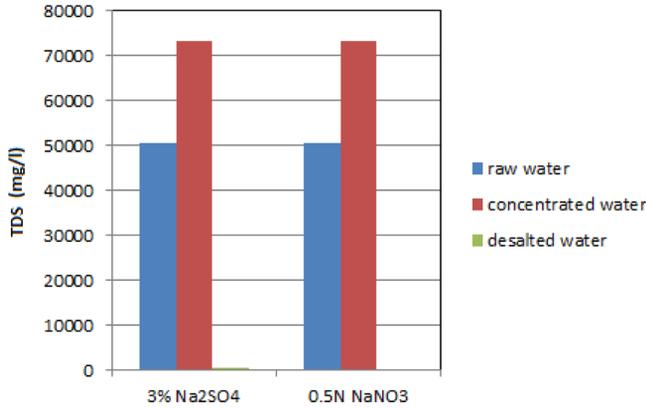


Fig. 2. TDS Measurement for the comparison of 3% Na₂SO₄ and 0.5N NaNO₃ as an electrolyte solution.

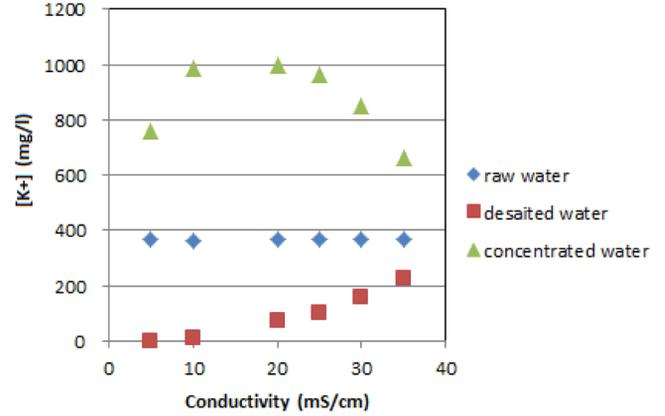


Fig. 5. Potassium concentration in desalted solution depending on the final conductivity.

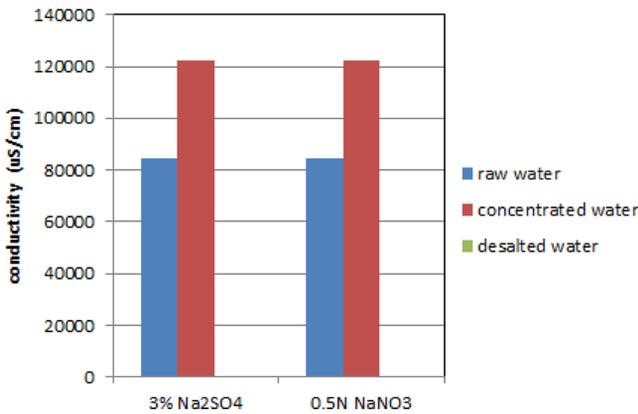


Fig. 3. Conductivity measurement for the comparison of 3% Na₂SO₄ and 0.5N NaNO₃ as an electrolyte solution.

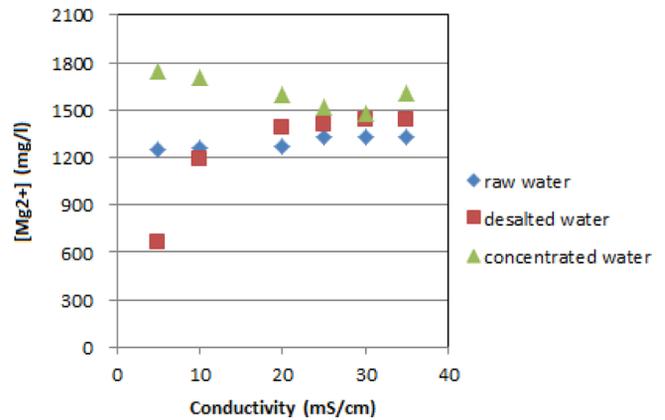


Fig. 6. Magnesium concentration in desalted solution depending on the final conductivity.

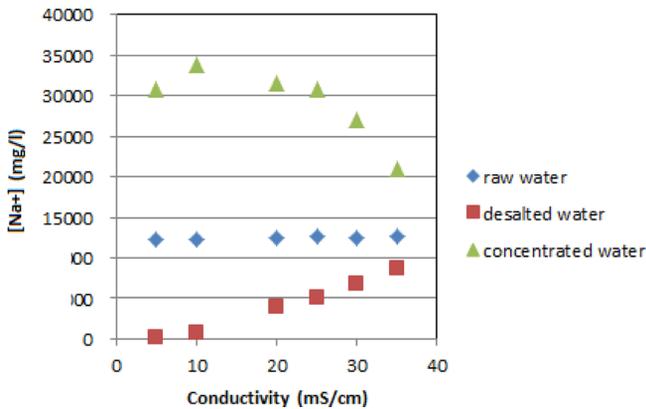


Fig. 4. Sodium concentration in desalted solution depending on the final conductivity.

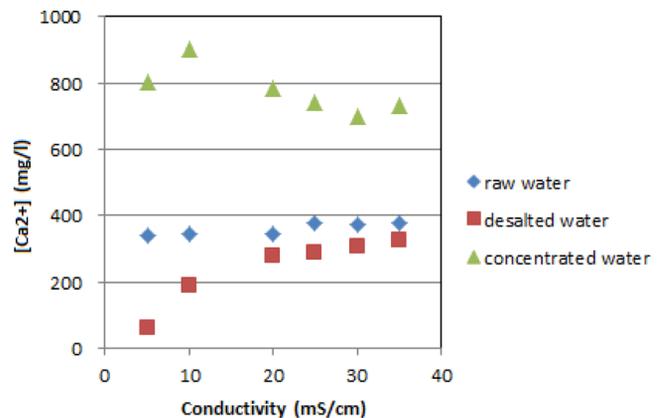


Fig. 7. Calcium concentration in desalted solution depending on the final conductivity.

나타내었다. 0.5N NaNO₃가 약간 우수한 탈염결과를 나타내었으나 그 차이는 매우 적었다.

전기투석으로 탈염실험을 진행할 때, 어느 정도의 전기전도도까지 탈염해야 1가 이온과 2가 이온을 분리할 수 있는지 알아보기 위해, 전기투석 실험을 최종 전기전도도 5, 10, 20, 25, 30, 35 μS/cm까지 하여 탈염수내 각 이온 농도를 분석하였다. 나트륨과 같은 1가 양이

온의 경우 최종 전기전도도가 감소함에 따라 탈염수내 농도가 떨어지고, 농축수의 나트륨 농도는 높아짐을 알 수 있었다. 이는 탈염조 내의 나트륨이 양이온 전기투석막을 통과하여 농축조로 이동함을 의미한다. 나트륨 농도는 농축조에서는 30분동안 전기전도도 20 mS/cm 이상에서는 18,000 ppm에서 30,000 ppm으로 증가하였고, 전기전도도 20 μS/cm이하에서는 30분 동안 30,000 ppm에서 33,000 ppm으로 증

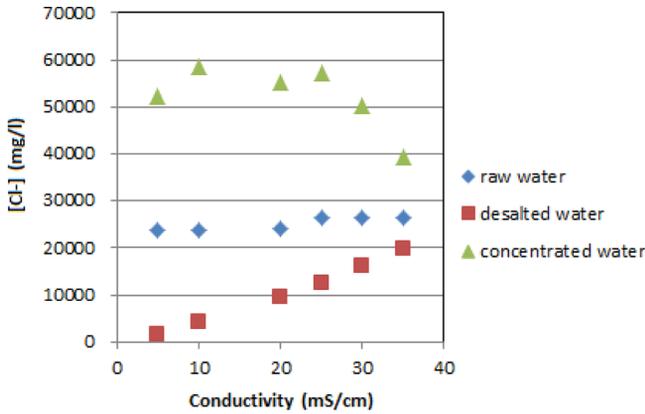


Fig. 8. Chloride concentration in desalted solution depending on the final conductivity.

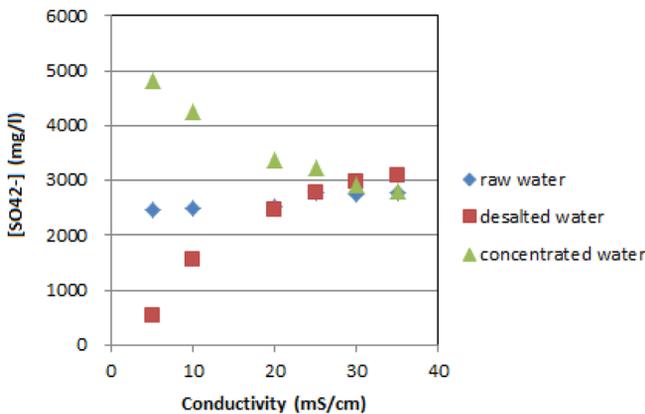


Fig. 9. Sulfate concentration in desalted solution depending on the final conductivity.

가하였다. 이와 같이 전기전도도 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서는 농축조에 나트륨이 농축되는 속도가 감소하였다. 이는 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서는 탈염조내의 나트륨이 상당부분 제거되어 잔존양이 많이 감소했음을 의미한다. 칼륨도 나트륨과 비슷한 경향을 나타내었다.

마그네슘의 경우 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지는 탈염조에서 마그네슘 농도가 변화하지 않다가 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서 줄어드는 경향을 나타내었다. 농축조에서는 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지는 변화하지 않다가 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서 높아지는 경향을 나타내었다. 이는 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지는 1가 양이온이 전기투석에 진행됨에 따라 탈염조에서 농축조로 이동하다가 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서는 1가 양이온이 탈염조에서 충분히 존재하지 않아 2가 양이온인 마그네슘이 탈염조에서 전기투석막을 통과하여 농축조로 이동함을 알 수 있다. 칼슘의 경우도 마그네슘과 비슷한 경향을 나타내었다.

염소이온 농도의 경우, 탈염조에서 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지는 빠르게 떨어졌으며, 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서는 천천히 떨어졌다. 농축조에서는 염소이온 농도는 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지 빠르게 높아졌으며, 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서는 천천히 높아졌다. 이는 전기전도도 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지는 1가 음이온인 염소이온이 탈염조에서 충분히 존재하여, 전기투석 시 탈염조에서 농축조로의 이동이 원활하였으나, 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서는 탈염조에 염

소이온 농도가 충분하지 않아 탈염조에서 농축조로 이동속도가 감소했음을 알 수 있다.

2가 음이온인 황산이온 농도의 경우 탈염조에서 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지는 변화하지 않다가 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서는 서서히 떨어졌다. 농축조에서는 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지는 변화하지 않다가 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서는 천천히 높아졌다. 이는 음이온 전기투석막이 1가 음이온의 막이므로 1가 음이온을 먼저 통과시키고, 1가 음이온의 농도가 충분하지 않은 경우 2가 음이온을 통과시키기 때문이다.

고경도의 물을 생산하기 위해 나노막을 사용하여 경도성분을 농축시킨 후 전기투석을 통해 1가 이온을 제거하는 방법을 생각할 수 있다. 전기투석만으로 경도성분을 농축시키는 데는 한계가 있으므로, 나노막을 통해 이온 성분을 농축한 후 이중 2가 이온을 전기투석을 사용하여 분리 농축할 수 있다. 경도물질 농축을 위해 역삼투막 대신 나노막을 사용하였다(Ji *et al.*[2014b]). 나노막은 2가 이온 성분에 대해서는 50-60%의 농축효율을 얻을 수 있기 때문이다. Fig. 10을 보면, NF 3차, 4차 농축수의 나트륨농도가 약 21,000-24,000 mg/L 정도였다. 이는 해양심층수 원수의 나트륨 농도보다 높은 값으로 해양심층수가 NF에 의해 농축되었음을 의미한다. 하지만 이러한 나트륨 성분은 고경도수를 제조하는데 유해한 성분으로 제거되어야 한다. 나트륨 제거는 전기투석 장치의 성능에 좌우되며, 전기투석 장치의

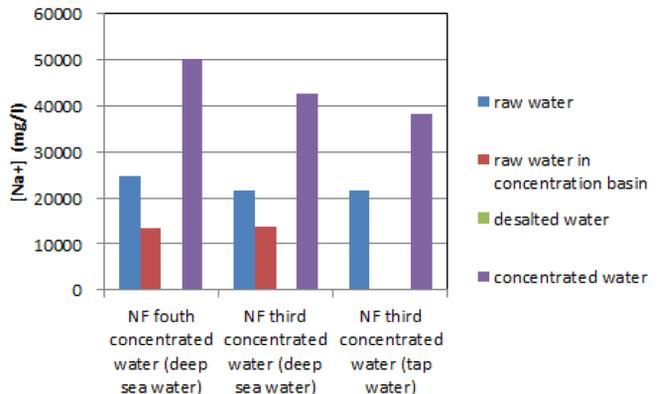


Fig. 10. Sodium concentration after the electro dialysis of third or fourth NF concentrated solution.

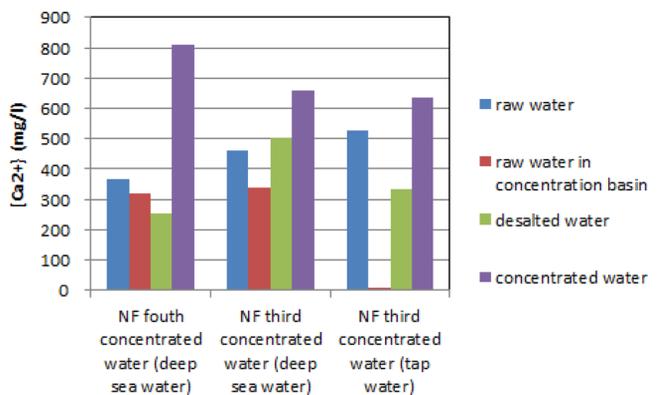


Fig. 11. Calcium concentration after the electro dialysis of third or fourth NF concentrated solution.

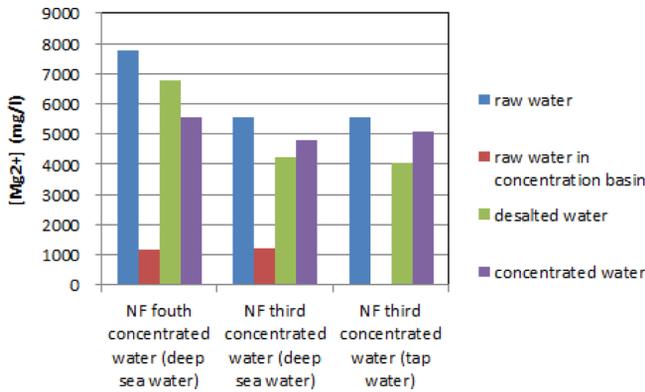


Fig. 12. Magnesium concentration after the electrolysis of third or fourth NF concentrated solution.

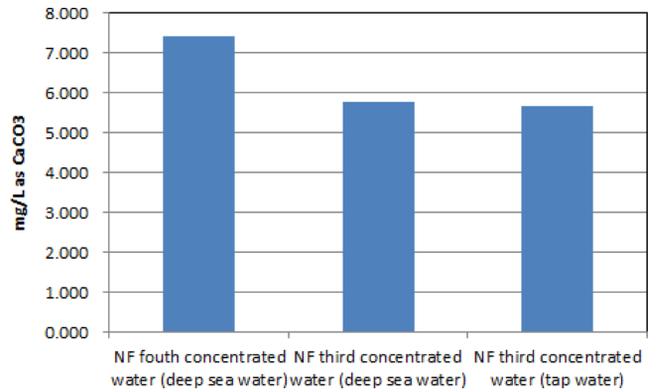


Fig. 15. Hardness after electro dialysis of third or fourth NF concentrated solution.

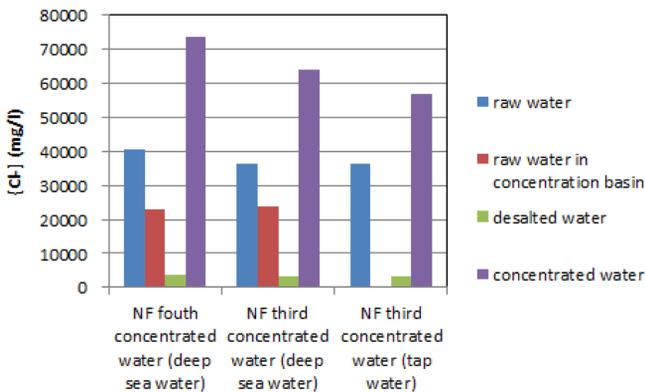


Fig. 13. Chloride concentration after the electrolysis of third or fourth NF concentrated solution.

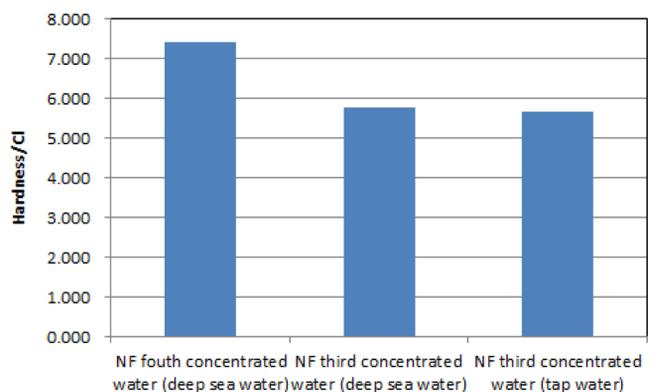


Fig. 16. Hardness/Cl ratio after the electro dialysis of third or fourth NF concentrated solution.

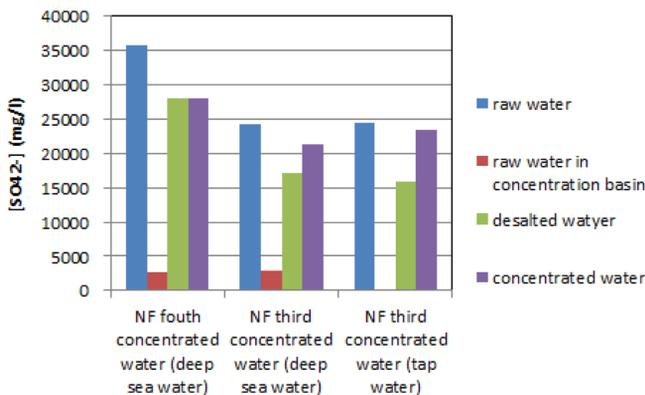


Fig. 14. Sulfate concentration after the electro dialysis of third or fourth NF concentrated solution.

이온교환막에 의해 1가 양이온인 나트륨이 분리된다.

칼슘과 마그네슘은 원수와 비슷한 농도로 탈염수에 존재하거나 조금 적은 농도로 존재하였다. 이는 NF에 의해 농축된 경도성분이 탈염수에 그대로 잔존하는 것으로 사료된다. 염소이온의 경우, 전기투석 장치에 의해 대부분 농축수쪽으로 이동하였다. 황산이온의 경우는 대부분 탈염수 쪽에 그대로 남아 있었다.

NF 3차, 4차 농축수를 전기투석 한 후 경도 성분을 살펴보았다. NF 3차 농축수의 경우 전기투석 후 경도가 17,000~18,000 mg/L as

CaCO₃ 정도로, 해수의 경도보다 많이 농축된 것을 알 수 있다. 경도와 염소이온 비를 살펴보면 NF 3차 농축일 경우 5.6에서 5.8정도를 나타내었다. 경도 대 염소이온비가 높다는 것은 염 성분은 낮고 경도 성분이 높다는 것을 의미한다. 고경도수 제조를 위해서는 경도성분이 높고 염성분이 낮은 물을 제조하여야 한다.

해수 중에는 19,500 mg/L 정도의 염소이온이 존재한다. 이러한 고농도의 염소이온은 해수를 상업적으로 이용하는데 제약 조건이 된다. 따라서 해수를 이용하여 고경도수를 만들려면, 염소이온의 농도를 낮추어야 한다. 본 연구에서 개발된 연속공정에서의 염소이온을 비롯한 타 이온 농도는 Table 1에 나타내었다. 먼저 NF에 의해 칼슘과 마그네슘을 농축 시 염소이온도 농축된다. 이 때 NF 조건은 20 bar, 18 LMH, 8시간동안 해양 심층수를 농축한다. NF에 의해 염소이온이 농축되면서 19,500 mg/L에서 22,282 mg/L로 증가하였다. 나노막에 의해 염소이온은 완전히 배제되는 것이 아니라 일부는 배제되고 일부는 통과한다(Ji et al.[2014b]). 이렇게 농축된 염소이온은, 후속 공정인 전기투석 과정에서 상당부분 제거 된다. NF를 통과한 농축수를 경도 농축조에 넣고, 수돗물을 염분 농축조에 넣어, NF 농축수 중 염소이온 성분을 염분 농축조로 이동시킨다. 이 때 염소이온 농도는 22,282 mg/L에서 4,862 mg/L 정도로 떨어진다. 그리고 나트륨이온 농도도 14,582 mg/L에서 32 mg/L로, 황산이온 농도는

Table 1. Ion concentrations from each process (unit : mg/L)

Ion	Deep sea water	NF Concentration	ED (first)	Ion exchange (NaHCO ₃)	ED (second)
Na ⁺	10,770	14,582	32	9,510	2,645
Ca ²⁺	412	685	494	434	123
Mg ²⁺	1,290	3,902	3,816	4,257	4,261
Cl ⁻	19,500	22,282	4,862	12,910	3,839
SO ₄ ²⁻	2,649	23,293	12,357	3,936	3,147

23,293 mg/L에서 12,357 mg/L로 떨어졌다.

1차 전기투석 된 탈염수를 황산이온 제거를 위해 이온교환 수지에 통과시켰다. 실험에 사용된 이온교환수지는 polystyrene 계통의 강염기성 음이온 교환수지(CI형)이고 지름 60 cm, 높이 2 m의 칼럼에 채운 후 상향류식으로 2개의 병렬식 칼럼으로 운전하였다. 1.6 ton의 물을 4시간동안 2개 칼럼에 통과시켰다. 이온교환수지 의 염소이온과 해수 중의 황산이온이 치환되어, 해수 중의 황산이온 농도는 12,357 mg/L에서 3,936 mg/L로 낮아졌고 염소 이온 농도는 4,862 mg/L에서 12,910 mg/L로 높아졌다. 이때 다시 높아진 염소이온 농도를 낮추기 위해 이온교환 처리수를 다시 전기투석장치로 가동하였다. 이 경우 이온교환 처리수 내에는 나트륨이온 성분이 부족하기 때문에, 전기투석 장치에서 염소이온을 제거할 수 없다. 왜냐하면 1가 음이온인 염소이온을 제거하기 위해서는 1가 양이온도 동시에 제거해야하기 때문이다. 따라서 1가 양이온 성분인 나트륨 이온을 보충해 주기 위해 이온교환 처리수 내에 중탄산나트륨(sodium bicarbonate, NaHCO₃)을 나트륨 이온 농도 약 10,000 mg/L 정도가 되도록 첨가하였다. 이러한 방법으로 1차 전기투석 실험을 한 결과, 다시 높아진 염소이온 12,910 mg/L의 농도에서 3,839 mg/L로 효과적으로 제거할 수 있었다. 이렇게 연계 공정을 통해 염소이온과 황산이온 등의 유해 성분을 효과적으로 제거 할 수 있었다.

4. 결 론

해양심층수 전기투석 시 최종 전기전도도를 20 µS/cm까지 운전하였을 때, 1가 이온과 2가 이온의 분리가 잘 이루어 졌다. 이를 활용하여 해수 중의 경도성분을 NF와 전기투석 장치를 이용하여 농축할 수 있었다. 전기투석 시 농축조 원수를 해양심층수를 사용하나 수돗물을 사용하나 별 차이를 발견할 수 없었으며, NF 3차 농축수의 경우 전기투석 후 경도가 17,000~18,000 mg/L정도로 해수의 경도보다 많이 농축된 것을 알 수 있다. 경도와 염소이온 비를 살펴보면 NF 3차 농축일 경우 5.6 에서 5.8 정도를 나타내었다. 이는 전기투석 장치를 통과 한 후 2가 이온 인 경도 성분이 농축되었다는 것을 의미한다.

전기투석 장치를 통해 효율적으로 고경도 성분의 물을 만들 수 있었다. NF, 전기투석 및 이온교환 복합공정을 통해 염소이온과 황산

이온 등의 유해성분은 제거하고, 칼슘과 마그네슘 등의 경도 성분은 농축한 고경도 수를 제조할 수 있었다.

후 기

본 연구는 해양수산부가 지원하는 ‘해양심층수 산업지원 기술 개발’ 및 ‘해양심층수의 에너지 이용 기술 개발’ 과제 성과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Ha, B.G., Shin, E.J., Park, J.E. and Shon, Y.H., 2013, “Anti-diabetic effect of balanced deep-sea water and its mode of action in high-fat diet induced diabetic mice”, *Mar. Drugs*, Vol. 11, No. 11, 4193-4212.
- [2] Ji, H., Yun, S.Y., Lee, S.W., Moon, D.S., Lee, H.S. and Kim, H.J., 2014a, “Conditions of desalination with reduced pressure evaporation device”, *J. KOSMEE*, Vol. 17, No. 1, 8-12.
- [3] Ji, H., Moon, D.S., Choi, M.Y., Kim, K.S., Lee, H.S. and Kim, H.J., 2014b, “Production of high hardness concentrated seawater using NF membrane”, *J. KOSMEE*, Vol. 17, No. 4, 333-337.
- [4] Kim, S.G., Han, J.W., Kim, H.S., Chun, K.Y. and Cho, Y.G., 1994, “A study on separation of electrolytes from amino acid using electrodialysis”, *Membrane*, Vol. 4, No. 3, 163-170.
- [5] Kim, S.H. and Hoek, E.M.V., 2005, “Modeling concentration polarization in reverse osmosis processes”, *Desalination*, Vol. 186, No. 1, 111-128.
- [6] Kim, S.Y., Chun, S.Y., Lee, D.H., Lee, K.S. and Nam, K.S., 2013, “Mineral-enriched deep-sea water inhibits the metastatic potential of human breast cancer cell lines”, *International journal of Oncology*, Vol. 43, No. 19, 1691-1700.
- [7] Lee, K.H., 2009, Removal of nitrate-nitrogen and ammonia-nitrogen by electrodialysis, Dongeui University, Master Thesis.

Received 18 August 2014

1st Revised 6 October 2014, 2nd Revised 13 February 2015

Accepted 13 February 2015