

나노여과/역삼투 공정을 이용한 기능성 미네랄의 농축

문수형·이호원*[†]·고경수

제주특별자치도 개발공사, *제주대학교 생명화학공학과
(2009년 12월 7일 접수, 2009년 12월 20일 수정, 2009년 12월 20일 채택)

Concentration of Functional Mineral by NF/RO Processes

Soo-Hyoung Moon, Ho-Won Lee*[†], and Kyoung-Soo Ko

Jeju Special Self-Governing Province Development Co., Jeju-si, Jeju-do 695-811, Korea

*Department of Chemical and Biological Engineering, Jeju National University, Jeju-si, Jeju-do 690-756, Korea

(Received December 7, 2009, Revised December 20, 2009, Accepted December 20, 2009)

요약: 지하수 중의 바나듐 및 실리카의 농축에 적합한 막을 선정하기 위하여 2종류의 나노여과 막모듈(NE2540-90, NF90-2540)과 3종류의 역삼투 막모듈(BW30-2540, RE2540-TE 및 XLE-2540)에 대한 투과선속과 배제율을 측정하였다. 투과선속과 배제율에 대한 실험 결과 본 연구에 사용된 나노여과 막모듈과 역삼투 막모듈 중에서 NE2540-90 막모듈이 바나듐과 실리카의 농축에 가장 적합하였다. NE2540-90 막모듈을 사용하여 막간차압을 8 kg/cm^2 로 하였을 때, 바나듐 및 실리카의 배제율은 각각 98.2% 및 99.0%이었고, 알루미늄, 크롬, 철, 붕소, 스트론튬 및 바륨에 대한 배제율은 각각 92.0%, 83.6%, 96.0%, 45.1%, 98.6% 및 69.5%이었다. 서귀포지역 지하수를 각각 회수율 15%로 6단 처리하였을 때, 바나듐과 실리카 함량은 각각 $148.9 \mu\text{g/L}$ 및 85.8 mg/L 로 농축되었다. 나노여과 공정에 의한 농축수는 고농도의 바나듐과 실리카를 함유하고 있어 기능성음료로의 상품개발이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract: In order to select the most suitable membrane to the concentration of vanadium and silica in groundwater, two different commercial NF membrane modules (NE2540-90 and NF90-2540) and three different commercial RO membrane modules (BW30-2540, RE2540-TE, and XLE-2540) were tested. The membrane characteristics test results showed that NE2540-90 module was the most efficient because of higher permeate flux and similar rejection coefficient. Using NE2540-90 module at the transmembrane pressure of 8 kg/cm^2 , it was found that the rejection coefficients of vanadium, silica, aluminium, chromium, iron, boron, strontium, and barium were 98.2%, 99.0%, 92.0%, 83.6%, 96.0%, 45.1%, 98.6%, and 69.5%, respectively. It was possible that vanadium and silica contents of groundwater were concentrated into $148.9 \mu\text{g/L}$ and 85.8 mg/L respectively by six-stages NF process at the recovery ratio of 15%. The waters produced by NF, which are enriched in vanadium and silica content, are expected to be commercialized the various functional mineral waters.

Keywords: nanofiltration, vanadium, silica, groundwater

1. 서론

제주특별자치도는 지난 2008년 3월에 물산업을 미래의 성장동력산업으로 육성하기 위해 5대 주요사업을 골자로 한 물산업 육성전략을 확정하였다. 이 물산업 육성전략에서는 2017년까지 연간 매출 1조원 달성과 아시아를 대표하는 고부가 물산업 중심지로의 육성을 목

표로 설정하였다. 이와 같은 목표를 달성하기 위하여 물산업 클러스터의 조성, 제주 물의 프리미엄 브랜드화, 제주개발공사의 물사업 고도화, 제주 지역맥주의 개발 및 제주형 워터테마파크의 조성을 5대 주요 사업으로 정하였다. 그 중에서 제주개발공사의 물사업 고도화 과제는 바나듐 및 실리카와 같은 기능성 미네랄을 함유한 음료를 개발하여 물의 부가가치를 높이는 데 초점을 맞추고 있다[1].

제주 지하수는 화산암반수라는 제주 지역만이 갖고

[†]주저자(e-mail : hwlee@jejunu.ac.kr)

있는 특성으로 인해 바나듐 및 실리카 함량이 다른 지역보다 높게 나타나고 있다[2,3].

바나듐은 혈당강하에 효과가 있음은 이미 여러 연구자에 의해 보고된 바 있다[4-9]. 특히 Shibuichi 등[4]의 연구는 바나듐의 혈당강하 효과에 대한 대표적인 연구 사례로서 기능성 미네랄인 바나듐의 임상실험에서 62 µg/L의 바나듐 성분을 함유한 제품을 장기간 복용한 31명의 실험 군에서 혈당강하에 효과를 보인다는 결과를 발표한 바 있다. 이 연구진은 임상실험 이외에 2형 당뇨병 모델 실험쥐에 후지산 주변의 62 µg/L의 바나듐을 함유한 지하수와 이 지하수를 5배 농축한 물(약 300 µg/L)을 3개월간 급수한 결과, 체중의 증가가 억제되고 지방조직의 인슐린 수용체가 증가하는 것이 확인되었으며, 장기간 섭취(여기서 쥐의 3개월 간은 사람으로 환산하면 7~8년에 해당됨)하여도 특정 장기에 축적되는 현상이 발생하지 않아 안정성에도 문제가 없는 것으로 확인되었다. 특히, 이 연구진은 바나듐의 독성에 대한 영향을 조사하기 위하여 시험 종료 후에 폐 및 간장 등 12종류 조직의 바나듐 함량을 측정하고 결과 바나듐수를 투여한 그룹에서 증류수를 투입한 그룹보다 약간 높게 나타났지만 생체 내에 받아들여지는 바나듐은 섭취한 바나듐 량의 0.1%에 불과할 정도였으며, 특정장기에 집중되는 현상을 볼 수 없는 것으로 보고되었다.

또한 바나듐 이외에 실리카도 최근에 기능성 미네랄로서 많은 관심의 대상이 되고 있다. 프랑스 카탈라르디 병원의 소피박사 등의 임상연구결과에 의하면 수돗물이나 생수 속의 실리카 성분이 알츠하이머병을 예방하는 효과가 있다고 보고된 바 있으며[10], 그 외에도 실리카는 항 동맥경화 작용, 콜레스테롤 수치 감소, 뼈형성의 필수요소라는 연구결과가 보고된 바 있다[11-13].

제주지역 지하수 중에 함유된 기능성 미네랄 성분인 바나듐과 실리카에 대한 현재까지의 기초 연구조사에 의하면, 국내의 다른 지역에 비해 다소 높게 나타나고 있지만, 바나듐 및 실리카 성분의 농도가 바로 상품화할 수 있을 정도까지는 못 미치는 것으로 판단된다. 따라서 제주 지하수에 미량으로 함유되어 있으면서 기능성 미네랄로 주목받고 있는 바나듐과 실리카 성분을 고농도로 농축하여, 이를 고부가가치 상품으로 개발하는 것이 필요하다. 문 등은 제주 지하수 중의 바나듐 성분을 농축하기 위하여 역삼투(reverse osmosis) 공정을 도입하여 이에 대한 타당성을 조사한 바 있다[3].

본 연구에서 사용한 대상 원수는 서귀포 지역의 지하수를 원수로 사용하였는데, 이 지역의 지하수는 국내의 지하수 중 바나듐 농도가 가장 높은 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이 지역 지하수 중의 미네랄 성분을 농축하고, 이를 기능성 음료로 개발하기 위하여 나노여과[14,15]와 역삼투 공정을 각각 적용하였으며, 이에 대한 타당성을 비교하였다. 이를 위하여 나노여과 및 역삼투 공정을 각각 사용하여 서귀포 지역 지하수의 투과선속(permeate flux)을 측정하고, 기능성 미네랄(바나듐 및 실리카 등) 성분과 중금속 등의 유해 성분(배제율(rejection coefficient)을 등을 측정하여 최적의 막을 선정하였다. 또한, 선정된 막을 사용하여 상품성이 있다고 판단되는 바나듐 농도인 150 µg/L까지 바나듐 함량을 높인 농축수를 제조하였다. 제조된 농축수 중의 유해성분에 대한 정밀 분석을 실시하여 유해성 여부를 조사하였으며, 바나듐과 실리카가 고농도로 함유된 기능성 미네랄 수로의 상품화 가능성 여부를 제시하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

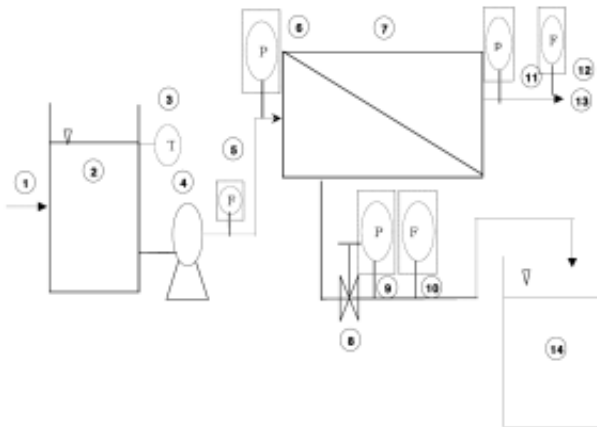
본 연구에서 사용한 실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 원수는 전처리 필터(0.2 µm)를 거쳐 고압 펌프에 의해 막 모듈로 공급된다. 막에 작용하는 압력은 막모듈 양단 압력을 측정하여 그 평균값으로 하였으며, 이때 막모듈 양단 압력의 차이는 거의 없었다. 공급수량은 12 L/min로 하였고, 공급수의 수온은 25±1°C로 일정한도를 유지하여 투과선속을 서로 비교할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 2종류의 나노여과막과 3종류의 역삼투막을 각각 사용하였다. 사용한 막 모듈은 모두 나권형 모듈로서 직경과 길이가 모두 같은 크기의 모듈을 사용하여 서로 비교 할 수 있게 하였다. 본 실험에 사용한 각 막모듈의 제원을 Table 1에 나타내었다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 막 선정을 위한 실험

기능성 미네랄의 농축에 적합한 막을 선정하기 위하여 국내 S사의 RE2540-TE 및 NE2540-90, 국외 D사의 BW30-2540, XLE-2540 및 NF90-2540를 대상으로 기초실험을 수행하였다. 국내의 5종류의 분리막에 의한 투과선속과 여러 종류의 배제율을 측정하고, 이를 서로



- 1. Feed water
- 2. Raw water tank
- 3. Temperature gauge
- 4. High pressure pump
- 5. Flow meter
- 6. Pressure gauge
- 7. Membrane (NF/RO)
- 8. Valve
- 9. Pressure gauge
- 10. Flow meter
- 11. Pressure gauge
- 12. Flow meter
- 13. Permeate
- 14. Mineral water tank

Fig. 1. Schematic diagram of NF/RO process.

비교함으로써 바나듐 및 실리카 성분의 농축수 제조에 적합한 막을 선정하였다.

2.2.2. 분석방법

분리막 장치에서 적절한 운전조건을 통해 얻은 농축수와 투과수는 0.45 μm filter로 여과시켜 분석하였으며, pH와 전기전도도(electro-conductivity)는 multimeter (Orion #1119001, Germany)를 사용해 측정하였으며, Al, V, U, Fe 등의 중금속을 포함하는 무기물질은 ICP/MS (Varian 820, Australia)를 이용해 분석하였다. 그 외의 먹는 물 수질성분에 대한 분석은 standard method에 준하여 분석하였다.

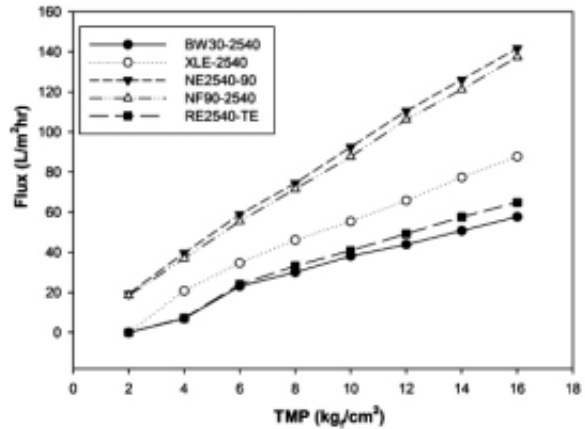


Fig. 2. Permeate flux as function of transmembrane pressure.

3. 결과 및 고찰

3.1. 투과선속(Permeate Flux)

각 모듈에 대하여 막간차압(TMP) 변화에 따른 서귀포 지역 지하수의 투과선속을 측정하고, 그 결과를 각각 Fig. 2에 나타내었다.

투과선속은 문 등[3]의 결과에서와 유사하게 막간차압의 증가에 따라 거의 선형적으로 비례하여 증가하였다. 또한, 5종류의 막 모듈에 대한 순수의 투과선속은 BW30-2540 < RE2540-TE < XLE-2540 < NF90-2540 < NE2540-90 순서로 증가하였으며, 나노여과막의 투과선속은 역삼투막보다 높았다. 가장 높은 투과선속을 나타낸 역삼투 막모듈과 나노여과 막모듈은 각각 XLE-2540과 NE2540-90이었으며, NE2540-90 막모듈이 XLE-2540 막모듈보다 61.5~69.9% 정도 투과선속이 높았다.

막간차압을 10 kg/cm²으로 하였을 때 NE2540-90,

Table 1. Characteristics of Membrane

Item	RO			NF	
	BW30-2540	XLE-2540	RE2540-TE	NE2540-90	NF90-2540
Membrane type	Polyamide thin-film composite	Polyamide thin-film composite	Polyamide thin-film composite	Polyamide thin-film composite	Polyamide thin-film composite
Effective area (m ²)	2.6	2.6	2.5	2.5	2.6
pH range	2~11	2~11	3~10	3~10	2~11
Maximum feed silt density index	5	5	5	5	5
Free chlorine tolerance	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

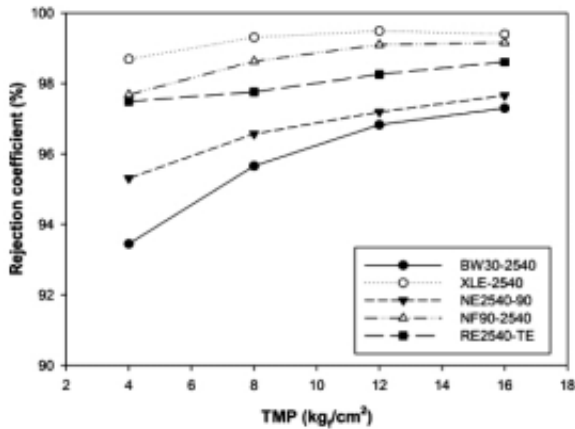


Fig. 3. Rejection coefficient of Na as function of transmembrane pressure (Na = 19 mg/L).

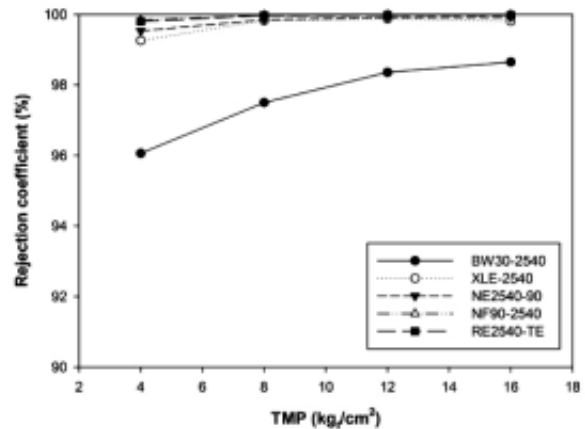


Fig. 5. Rejection coefficient of Mg as function of transmembrane pressure (Mg = 6.39 mg/L).

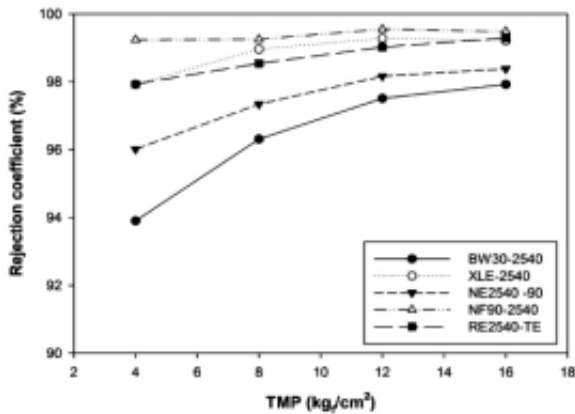


Fig. 4. Rejection coefficient of K as function of transmembrane pressure (K = 7.5 mg/L).

NF90-2540, XLE-2540, RE2540-TE 및 BW30-2540 막 모듈의 투과선속은 각각 92.4, 87.69, 55.39, 40.8 및 38.08 L/m² · hr이었다.

3.2. 배제율(Rejection Coefficient)

3.2.1. 1가 이온의 배제율

물에 함유되어 있는 대표적인 1가 이온은 Na (나트륨)과 K (칼륨)이다. 각각의 원수를 대상으로 막간차압 (TMP) 변화에 따른 나트륨 및 칼륨의 배제율을 측정하여 이를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 바와 같이 본 연구에 사용된 모든 막에서 막간차압 증가에 따라 나트륨과 칼륨의 배제율은 증가하였다. 나트륨의 배제율과 칼륨의 배제율의 차이는 크지 않았으나, XLE-2540을 제외한 모든 막모듈에서 나트륨의 배제율보다 칼륨의 배제율이 상

대적으로 높은 경향을 나타내었다.

나트륨의 배제율은 XLE-2540 막 모듈이 가장 높은 배제율을 보였으며, BW30-2540이 가장 낮은 배제율을 나타내었다. 칼륨의 배제율은 나트륨의 경우에서와 같이 BW30-2540이 가장 낮은 배제율을 나타내었다.

막간차압을 8 kgf/cm²으로 하였을 때, XLE-2540, BW30-2540, NF90-2540, RE2540-TE 및 NE2540-90 막 모듈에서 나트륨에 대한 배제율은 각각 99.3%, 95.7%, 98.6%, 97.8% 및 96.6%이었으며, 칼륨에 대한 배제율은 각각 99.0%, 96.3%, 99.3%, 98.5% 및 97.3%이었다.

3.2.2. 2가 이온의 배제율

지하수 중에 함유되어 있는 대표적인 2가 이온은 마그네슘(Mg)과 칼슘(Ca)이며, 이들은 물의 경도(hardness)를 나타내는 주성분이다.

Fig. 5와 Fig. 6에 각 대상원수별로 막간차압(TMP) 변화에 따른 마그네슘 및 칼슘 이온의 배제율 측정 결과를 각각 나타내었다. 1가 이온의 경우에서와 같이 모든 원수와 모든 모듈에 대하여 막간차압 증가에 따라 마그네슘 및 칼슘 이온의 배제율은 증가하였다.

또한 BW30-2540을 제외하고는 역삼투막과 나노여과막 간의 마그네슘 및 칼슘 이온에 대한 배제율 차이는 거의 없었으며, BW30-2540을 제외한 모든 막에서 원수의 종류에 관계없이 99% 이상의 배제율을 나타내었다.

막간차압을 8 kg/cm²으로 하였을 때 XLE-2540, BW30-2540, NF90-2540, RE2540-TE 및 NE2540-90 막 모듈에서 마그네슘에 대한 배제율은 각각 99.8%, 97.5%, 99.9%, 99.9% 및 99.9%이었으며, 칼슘에 대한 배제율

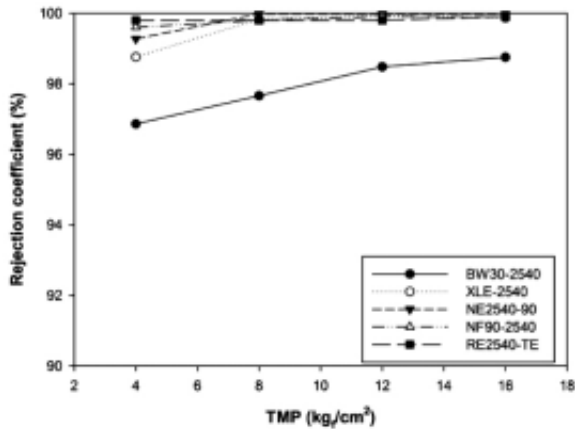


Fig. 6. Rejection coefficient of Ca as function of transmembrane pressure (Ca = 8.95 mg/L).

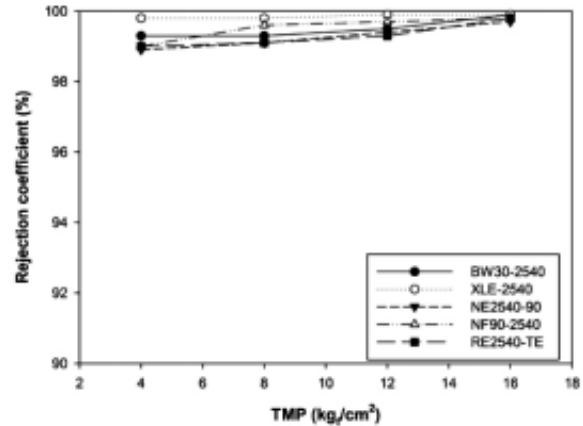


Fig. 8. Rejection coefficient of SiO₂ as function of transmembrane pressure (SiO₂ = 36.3 mg/L).

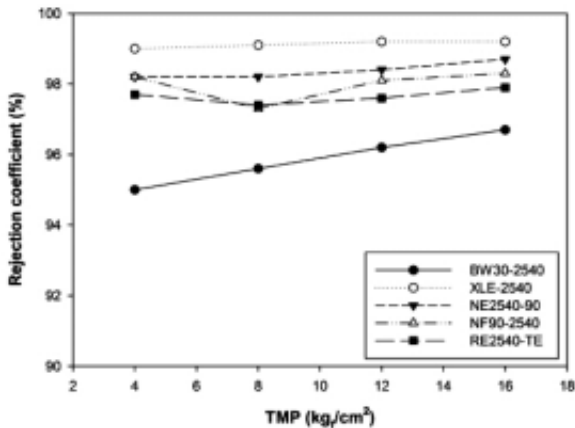


Fig. 7. Rejection coefficient of V as function of transmembrane pressure (V = 53.0 µg/L).

은 각각 99.8%, 97.7%, 99.8%, 99.8% 및 99.9%이었다.

3.2.3. 바나듐 및 실리카의 배제율

바나듐 및 실리카 성분은 최근에 그 효능에 대한 여러 결과가 발표되면서 관심을 받고 있는 기능성 미네랄이다. 본 연구에서는 지하수에 미량으로 함유된 바나듐 및 실리카 성분을 목표농도까지 농축하고, 이 농축수를 기능성 미네랄수로 활용하고자 하였다. 따라서 나노여과막과 역삼투막의 바나듐 및 실리카에 대한 배제율 측정은 매우 중요하다.

바나듐과 실리카에 대한 원수종류별 배제율 측정 결과를 Fig. 7 및 Fig. 8에 각각 나타내었다. 1가 이온과 2가 이온에서와 같이 모든 모듈에 대하여 막간차압 증가에 따라 바나듐 및 실리카의 배제율은 증가하였다. 바나듐의 경우 BW30-2540을 제외하고는 막 종류에 따라

배제율의 차이는 거의 없었으며, 실리카의 경우에는 모든 막간의 배제율 차이는 거의 없었다.

본 연구에 사용된 모든 막에서 바나듐의 배제율은 95% 이상이었으며, 실리카의 배제율은 98% 이상이었다. 따라서 역삼투막 뿐만 아니라 나노여과막을 사용하여도 바나듐과 실리카를 충분히 농축 가능함을 알 수 있었다.

막간차압을 8 kg/cm²으로 하였을 때 XLE-2540, BW30-2540, NF90-2540, RE2540-TE 및 NE2540-90 막 모듈에서 바나듐에 대한 배제율은 각각 99.1%, 95.6%, 97.3%, 97.4% 및 98.2%이었으며, 실리카에 대한 배제율은 99.8%, 99.3%, 99.6%, 99.1% 및 99.1%이었다.

바나듐과 실리카의 농축에 적합한 막은 가능한 투과선속이 크면서 바나듐, 실리카 및 유용성분(K, Ca, Mg 등)에 대한 배제율은 높고, 비 유용성분(Na 등)과 유해성분(B, Al, Sr, Ba 등)에 대한 배제율은 낮은 막이다. 본 연구에 사용된 역삼투막과 나노여과막의 투과선속과 배제율에 대한 실험 결과 배제율은 큰 차이가 없었으나, 투과선속이 상대적으로 큰 나노여과막을 선정하였으며, 나노여과막 중에서 투과선속이 가장 높은 국내 S사의 NE2540-90 막 모듈이 가장 적합하여 이 모듈을 사용하여 농축실험을 진행하였다.

3.2.4. NE2540-90 막모듈의 배제율

바나듐 및 실리카 농축에 있어 가장 적합한 막으로 선정된 국내 S사의 NE2540-90 막모듈을 사용하여 주요 성분에 대한 배제율을 측정하고 이를 Fig. 9에 나타내었다.

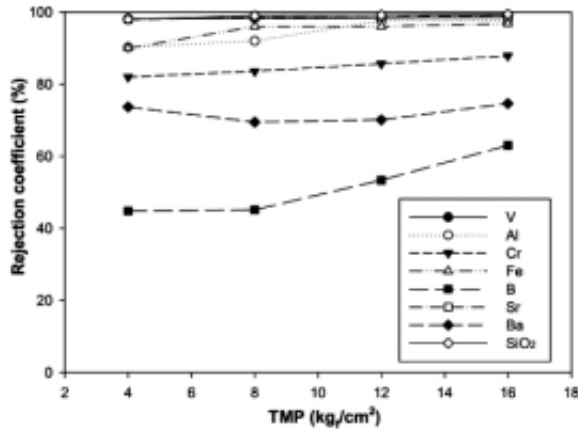


Fig. 9. Rejection coefficient of various ingredient as function of transmembrane pressure.

용질의 종류에 관계없이 각 용질의 배제율은 막간차압의 증가에 따라 증가하였으며, 바나듐과 실리카의 배제율은 각각 97% 이상 및 98% 이상이었다. 바륨(Ba)의 배제율은 69.5~74.6%로서 다른 용질에 비해 낮은 배제율을 나타내고 있다. 특히 붕소(B)의 배제율은 44.8~63.0%로서 가장 낮은 배제율을 나타내었다. Redondo 등[16]과 Georghiou 등[17]의 연구 결과에 의하면 붕소의 배제율은 수소이온농도(pH)의 변화에 따라 매우 민감하게 변화한다고 하였다. 이들의 연구 결과에 의하면 pH가 7 및 8일 때 붕소원자의 99.3% 및 93.2%가 붕산(boric acid, $B(OH)_3$) 형태로 각각 존재하나, pH가 9.5일 때 붕산의 50% 이상이 붕산염(borate) 이온($B(OH)_4^-$) 형태로 전환되며, pH가 11 이상에서는 거의 100%가 붕산염 이온 형태로 존재한다고 하였다. 본 연구에서 사용한 원수의 pH는 8.62이었다. 따라서 본 연구결과에서 붕소의 배제율이 다른 원수에 비해 크게 감소한 이유는 원수 중에 존재하는 붕소의 대부분이 붕산분자의 형태로 존재하며, 이 붕산분자의 수소가 막을 구성하는 활성기(active group) 중의 산소와 수소결합을 형성하게 되고, 외부의 압력에 의해 세공(pore) 내로 투과되어 배제율이 감소한 것으로 판단된다[16,17].

막간차압을 8 kg/cm^2 로 하였을 때, 알루미늄, 크롬, 철, 붕소, 스트론튬 및 바륨에 대한 배제율은 각각 92.0%, 83.6%, 96.0%, 45.1%, 98.6% 및 69.5%이었다.

본 실험에서는 농축수를 활용하여 기능성 미네랄수를 제조하는 공정이므로 유해물질인 붕소(B)의 배제율이 낮은 결과는 나노여과막 공정을 적용할 때 큰 장점 중의 하나로 판단된다.

따라서 대상원수로 선정된 지하수에서 유용성분인 바나듐과 실리카 성분을 나노여과 막모듈(NE2540-90)을 이용하여 충분히 농축할 수 있을 것으로 판단되었다.

3.3. 농축실험

기능성 미네랄수의 제조에 있어 가장 적합한 막으로 선정된 국내 S사의 NE2540-90 막 모듈을 사용하여 농축실험을 수행하였다.

서귀포지역 원수의 경우 바나듐성분의 함량은 $53.0 \mu\text{g/L}$ 로서 현재까지 조사된 관정 중 가장 높은 지역이다. 바나듐 농도 목표치를 $150 \mu\text{g/L}$ 로 설정하였고, 이를 위하여 6단으로 농축하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 이때의 회수율은 15%, 막간차압은 4.4 kg/cm^2 로 하였고, 이때 수온은 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지되도록 하였다.

6단 농축에 따른 바나듐의 농도는 각 단에서 64.3, 83.0, 105.2, 114.3, 128.9 및 $148.9 \mu\text{g/L}$ 로 각각 증가되어 목표치로 설정한 $150 \mu\text{g/L}$ 의 바나듐수를 제조할 수 있었다. 또한 각 단의 농축처리에 따른 실리카 농도는 39.6, 45.1, 52.6, 60.3, 76.6 및 85.8 mg/L 로 증가되어 기능성이 증진되었다.

분리막을 이용한 기능성 미네랄수의 제조에 있어서 고려해야 할 가장 중요한 인자는 바나듐 및 실리카와 같은 기능성 미네랄의 농축 여부와 함께 유해물질의 농축 정도와 이의 유해성 여부이다. 그러나 Table 2에 나타난 바와 같이 본 연구에서 사용한 지하수는 바나듐 및 실리카 등의 기능성 미네랄의 함량은 다소 높으나, 유해성 물질이 거의 검출되지 않는 최적의 원수 조건을 갖고 있다. 따라서 Table 2에 나타난 바와 같이 회수율을 15%로 하여 6단 처리하여도 유해물질은 검출한계 미만이거나 국내외 먹는 샘물의 수질과 비교해도 손색이 없을 정도로 청정성을 유지하고 있음을 알 수 있었다.

한 예로 알루미늄의 경우 6단 농축수에서 $29.4 \mu\text{g/L}$ 로 분석되었다. 그러나 알루미늄의 음용수 수질기준은 $200 \mu\text{g/L}$ 이하로서 이와 비교하면 농축수의 알루미늄 함량은 수질기준의 15%에도 못 미치는 안전한 수준임을 알 수 있었다.

결론적으로 NE2540-90 막 모듈을 사용하여 회수율 15%로 6단 농축하였을 때, 제조된 농축수는 음용수 수질기준을 모두 충분히 만족하면서, 바나듐 및 실리카의 농도가 각각 $149 \mu\text{g/L}$ 및 86 mg/L 인 기능성 미네랄수를 제조할 수 있었다.

Table 2. Variations of Groundwater Ingredient During the Six-stages NF Process

Items	pH	Na mg/L	Mg mg/L	K mg/L	SiO ₂ ²⁾ mg/L	V μg/L	Ca mg/L	Zn μg/L	Al μg/L	Se μg/L	Fe μg/L	Sr μg/L	B μg/L	Cr μg/L	Mn μg/L	Cu μg/L	Cd μg/L	Ba μg/L
water quality standard	5.8~8.5	-	-	-	-	-	-	1,000	200	10	300	-	300	500	-	1,000	5	-
raw water	8.6	26.3±5.9 ¹⁾	6.0±0.5	7.5±0.3	32.1±1.6	53.0±1.3	7.8±0.3	1.5±0.6	10.0±1.3	<0.2	2.07±0.2	34.9±1.2	17.8±1.8	1.3±0.5	<0.5	1.0±0.1	<0.5	2.4±0.3
1st concentrate	8.5	29.4±3.3	8.0±0.1	9.3±0.1	39.6±1.1	64.3±1.9	7.8±0.2	2.9±0.2	16.6±0.8	<0.2	2.1±0.2	37.34±1.3	18.88±0.9	2.0±0.7	<0.5	1.4±0.3	<0.5	2.56±0.3
2nd concentrate	8.6	30.2±4.9	10.1±0.1	11.7±0.1	45.1±0.7	83.0±4.4	12.5±0.1	3.3±0.2	19.7±0.7	<0.2	3.36±0.9	40.28±1.7	19.35±2.8	2.2±0.8	0.7±0.1	3.0±0.1	<0.5	2.95±0.4
3rd concentrate	8.6	39.1±5.6	10.4±0.2	11.8±0.1	52.6±0.9	105.2±4.3	12.7±0.1	4.1±1.5	22.4±0.6	<0.2	4.71±1.0	49.34±0.5	14.95±1.2	2.5±0.9	0.9±0.0	3.4±0.1	<0.5	3.24±0.2
4th concentrate	8.5	46.5±6.9	10.9±0.2	12.7±0.1	60.3±1.2	114.3±6.3	14.0±0.2	4.2±0.9	23.3±0.2	<0.2	5.44±2.7	56.48±0.7	14.48±0.8	2.4±0.6	0.9±0.1	4.0±0.2	<0.5	3.78±0.4
5th concentrate	8.5	49.6±4.1	11.9±0.2	13.9±0.2	76.6±0.7	128.9±2.9	15.5±0.2	5.4±0.3	26.1±0.9	<0.2	5.49±2.2	60.41±1.3	17.62±0.5	2.4±0.7	0.9±0.1	4.8±0.2	<0.5	4.02±0.3
6th concentrate	8.5	52.5±7.4	13.0±0.2	15.4±0.2	85.8±0.9	148.9±4.4	17.2±0.2	5.6±0.3	29.4±1.7	<0.2	7.7±4.6	66.41±1.5	19.31±0.8	3.3±0.6	1.1±0.1	6.0±0.3	<0.5	4.37±0.2
1st permeate	8.7	0.39±0.2	0.1±0.01	0.5±0.01	<0.05	2.0±0.3	0.1±0.01	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	19.64±1.1	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
2nd permeate	8.6	0.48±0.3	0.13±0.01	0.7±0.01	<0.05	1.6±0.2	0.1±0.01	<0.2	2.0±0.2	<0.2	<0.2	<0.2	19.36±0.5	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
3rd permeate	8.3	0.50±0.4	0.19±0.01	0.9±0.01	<0.05	2.6±0.4	0.2±0.01	<0.2	1.8±0.1	<0.2	<0.2	<0.2	19.3±0.8	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
4th permeate	8.5	0.54±0.2	0.19±0.01	1.0±0.01	<0.05	2.4±1.3	0.2±0.01	<0.2	1.8±1.3	<0.2	<0.2	<0.2	17.62±0.5	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
5th permeate	8.3	0.60±0.4	0.26±0.01	1.2±0.01	<0.05	2.8±0.4	0.3±0.01	<0.2	0.9±0.3	<0.2	<0.2	<0.2	17.80±0.7	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
6th permeate	8.3	0.67±0.3	0.31±0.01	1.4±0.01	<0.05	4.6±1.2	0.3±0.01	<0.2	1.2±0.2	<0.2	<0.2	<0.2	19.64±0.6	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2

¹⁾ Values are means ± S.D. (n=3)

²⁾ SiO₂ = Si × 2.1393.

4. 결 론

본 연구는 지하수 중의 미네랄 성분(바나듐 및 실리카)을 농축하고, 이를 기능성 음료로 개발하기 위한 연구의 일환으로서 나노여과와 역삼투 공정을 각각 적용하여 기능성 미네랄 농축에 적합한 최적의 막을 선정하고, 이에 대한 타당성을 비교 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 원수의 투과선속은 BW30-2540 < RE2540-TE < XLE-2540 < NF90-2540 < NE2540-90의 순서로 증가하였다.

2) 투과선속과 배제율에 대한 실험 결과 본 연구에 사용된 역삼투 막모듈과 나노여과 막모듈 중에서 NE2540-90 막모듈이 바나듐과 실리카의 농축에 가장 적합하였다.

3) NE2540-90 막모듈을 사용하여 막간차압을 8 kg/cm²로 하였을 때, 바나듐 및 실리카의 배제율은 각각 98.2% 및 99.0%이었고, 알루미늄, 크롬, 철, 붕소, 스트론튬 및 바륨에 대한 배제율은 각각 92.0%, 83.6%,

96.0%, 45.1%, 98.6% 및 69.5%이었다.

4) NE2540-90 막모듈을 사용하여 지하수를 15%의 회수율로 6단 처리하였을 때, 바나듐과 실리카 함량을 각각 148.9 μg/L 및 85.8 mg/L로 농축할 수 있었다.

5) 나노여과 공정에 의한 농축수는 지하수가 갖고 있는 청정성을 계속 유지하고 있을 뿐만 아니라, 고농도의 바나듐과 실리카를 함유하고 있어 기능성음료 등 부가가치가 큰 상품으로 개발이 가능할 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 제주지역 환경기술개발센터 연구개발사업의 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

1. T. H. Kim, JEJUILBO, 3, 2008. 3. 21.
2. Y. G. Lim, "A Study on Investigation and Merchandising of Functional Mineral Water", pp. 6-25,

- Jeju Reginal Environmental Technology Development Center (2006).
3. S. H. Moon, H. W. Lee, and K. S. Ko, "Concentration of Vanadium in Jeju Groundwater Using Reverse Osmosis Processes", *Membrane Journal*, **18(3)**, 241 (2008).
 4. L. Shibuichi, M. Yasue, K. Kato, and Y. Watanabe, "Consideration on the effects of natural water containing vanadium on diabetic mellitus", *Biomed Res Trace Elements*, **17(1)**, 11 (2006).
 5. G. Y. Yeh, D. M. Eisenberg, T. J. Kaptchuk, and R. S. Phillips, "Systematic review of herbs and dietary supplements for glycemic control in diabetes," *Diabetes Care*, **26(4)**, 1277 (2003).
 6. A. B. Goldfine, D. C. Simonson, F. Folli, M. E. Patti, and C. R. Kahn, "In vivo and in vitro studies of vanadate in human and rodent diabetes mellitus", *Mol. Cell Biochem.*, **153**, 217 (1995)
 7. T. Kitta, S. Yamada, K. Ishihara, N. Watanabe, H. Ishiyama, and Y. Watanabe, "Effect of natural vanadium contained Mt. Fuji underground water on human hyperglycemia," *Pharmacometrics*, **64(5)**, 77 (2003).
 8. H. Sakurai, H. Yasui, and Y. Adachi, "The therapeutic potential of insulin-mimetic vanadium complexes", *Expert Opin Investigating Drugs*, **12(7)**, 1189 (2003).
 9. W. Ding, T. Hasegawa, H. Hosaka, and D. Peng, "Effect of long-term treatment with vanadate in drinking water on KK mice with genetic non-insulin-dependent diabetes mellitus," *Biol. Trace. Elem. Res.*, **80(2)**, 159 (2001).
 10. G. G. Sophie, A. Sandrine, N. Fatemeh, L. G. Viviane, G. Hélène, and V. Bruno, "Cognitive impairment and composition of drinking water in women: findings of the EPIDOS Study," *American Journal of Clinical Nutrition*, **81(4)**, 897 (2005).
 11. M. Calomme, and D. A. Vanden Berghe, "Supplementation of calves with stabilized orthosilicic acid. Effect on the Si, Ca, Mg, and P concentrations in serum and the collagen concentration in skin and cartilage," *Biol. Trace. Elem. Res.*, **56**, 153 (1997).
 12. E. M. Carlisle, "Silicon as an essential trace element in animal nutrition," *Silicon biochemistry*, Eds. D. Evered and M. O'Connor, pp. 123, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, United Kingdom (1986).
 13. M. Hott, C. De Pollak, D. Modrowski, and P. J. Marie, "Short-term effects of organic silicon on trabecular bone in mature ovariectomized rats," *Calcif. Tissue Int.*, **53**, 174 (1993).
 14. J. E. Hwang, J. Jegal, J. Mo, and J. Kim, "Nanofiltration of Dyeing Wastewater Using Polyamide RO-Membrane", *Membrane Journal*, **7(1)**, 58 (2005).
 15. S. W. Hong, "Effects of Substrates on Nanofiltration Characteristics of Polyelectrolyte Membranes", *Membrane Journal*, **18(2)**, 185 (2008).
 16. J. Redondo, M. Busch, and J. D. Witte, "Boron removal from seawater using FILMTEC™ high rejection membranes", *Desalination*, **156**, 229 (2003).
 17. G. Georghiou and L. Pashalidis, "Boron in groundwaters of Nicosia (Cyprus) and its treatment by reverse osmosis", *Desalination*, **215**, 104 (2007).