

碩士學位論文

막분리 공정을 이용한 기능성
미네랄수의 제조에 관한 연구



濟州大學校 大學院

生命化學工學科

文 數 馨

2008年 2月

막분리 공정을 이용한 기능성 미네랄수의 제조에 관한 연구

指導教授 李 皓 遠

文 數 馨

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 2月

文數馨의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 玄 榮 珍 (印)

委 員 李 相 白 (印)

委 員 李 皓 遠 (印)

濟州大學校 大學院

2008年 2月

A Study on the Preparation of Functional
Mineral Water Using Membrane Separation
Processes

Soo-Hyoung Moon

(Supervised by Professor Ho-Won Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of
requirement for the degree of Master of
Engineering

2008. 2.

Department of Chemical & Biological Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	iv
SUMMARY.....	v
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	3
2.1. 막분리 공정.....	3
2.1.1. 역삼투 (reverse osmosis, RO).....	3
2.1.2. 나노여과 (nanofiltration, NF).....	3
2.1.3. 한외여과 (ultrafiltration, UF).....	4
2.1.4. 정밀여과 (microfiltration, MF).....	4
2.2 막 모듈 (membrane module).....	5
2.2.1 평판형 모듈 (plate frame type module).....	6
2.2.2 관상형모듈 (tubular type module).....	6
2.2.3 모노리스형 모듈 (monolith type module)	6
2.2.4 중공사형 모듈 (tubular type module).....	7
2.2.5 나권형 모듈 (spiral wound type module)	7
2.3. 막분리의 메카니즘 (mechanism).....	7
2.3.1. 수소 결합 메카니즘.....	8
2.3.2. 선택 흡착-미세공 메카니즘.....	8
2.3.3. 용해-확산 메카니즘.....	8
2.4. 막오염 (membrane fouling) 및 제어.....	9
2.4.1. 막오염 현상.....	9
2.4.2. 막오염의 제어.....	10
III. 실험장치 및 방법	13

3.1. 실험장치.....	13
3.2. 실험방법.....	15
3.2.1. 원수의 특성조사.....	15
3.2.2. 막선정을 위한 기초실험.....	16
3.2.3. 농축실험.....	17
IV. 결과 및 고찰.....	19
4.1. 원수의 수질특성.....	19
4.2. 순수의 투과선속 (permeate flux).....	21
4.3. 원수의 투과선속 (permeate flux).....	22
4.4. 원수의 용질배제율 (rejection coefficient).....	25
4.4.1. 1가 이온의 배제율.....	25
4.4.2. 2가 이온의 배제율.....	31
4.4.3. 바나듐과 실리카의 배제율.....	36
4.4.4. NE2540-90 막모듈의 배제율.....	41
4.5. 농축실험.....	45
4.5.1. 서귀포지역 지하수의 농축실험.....	45
4.5.2. 어음지역 지하수의 농축실험.....	47
4.5.3. 와흘지역 지하수의 농축실험.....	47
4.5.4. 남원지역 지하수의 농축실험.....	50
V. 결론.....	55
VI. 참고문헌.....	57
VII. 부록.....	61

LIST OF FIGURES

Fig. 1. Schematic diagram of NF/RO process.....	14
Fig. 2. Pure water permeate flux as function of transmembrane pressure.....	21
Fig. 3. Permeate flux as function of transmembrane pressure.....	24
Fig. 4. Rejection coefficient of Na as function of transmembrane pressure.....	27
Fig. 5. Rejection coefficient of K as function of transmembrane pressure.....	29
Fig. 6. Rejection coefficient of Mg as function of transmembrane pressure.....	33
Fig. 7. Rejection coefficient of Ca as function of transmembrane pressure.....	35
Fig. 8. Rejection coefficient of V (vanadium) as function of transmembrane pressure.....	38
Fig. 9. Rejection coefficient of SiO ₂ as function of transmembrane pressure.....	40
Fig. 10. Rejection coefficient of various ingredient as function of transmembrane pressure (NE2540-90).....	44
Fig. 11. Variations of vanadium during the six-stage membrane separation processes.....	52
Fig. 12. Variations of silica during the six-stage membrane separation processes.....	53

LIST OF TABLES

Table 1. Comparison of various membrane modules.....	5
Table 2. Characteristics of membrane.....	13
Table 3. ICP/MS analysis conditions.....	18
Table 4. Quality of groundwater.....	20
Table 5. Variations of seogwipo groundwater ingredient during the six- stage membrane separation process (NE2540-90).....	46
Table 6. Variations of ayum groundwater ingredient during the six-stage membrane separation process (NE2540-90).....	48
Table 7. Variations of wahyul groundwater ingredient during the five- stage membrane separation process (NE2540-90).....	49
Table 8. Variations of namwon groundwater ingredient during the six- stage membrane separation process (NE2540-90).....	51

SUMMARY

Vanadium is considered to possess insulin-mimetic actions not only in animal models of diabetes mellitus but also in the cases of type 1 diabetes and type 2 diabetes. Silica in drinking water may reduce the risk of developing Alzheimer disease.

The purpose of the study is to produce the functional mineral (vanadium and silica) water from Jeju groundwater using nanofiltration (NF), and reverseosmosis (RO) processes, respectively. Groundwater samples were taken from Seogwipo, Ayum, Wahyul, and Namwon groundwater wells with different in vanadium content each other. Their vanadium concentrations were 53.0, 44.5, 31.8, and 10.2 ppb, respectively.

In this study, three different commercial RO membrane modules (BW30-2540, RE2540-TE, and XLE-2540) and two different commercial NF membrane modules (NE2540-90 and NF90-2540) were used for the concentration of vanadium and silica. The membrane characteristics test results showed that NE2540-90 module was the most efficient because of higher permeate flux and similiar rejection coefficient.

Using NE2540-90 module at the transmembrane pressure of 8 kg/cm², 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%. It was possible that vanadium contents of Seogwipo, Ayum, Wahyul, and Namwon groundwater were concentrated into 148.9, 122.9, 89.2, and 50.8 ppb, respectively, by 5 or 6 stages treatment at the recovery ratio of 15~20%. And these concentrated groundwater did not exceed the permissible drinking water standards, because of the purity of Jeju groundwater.

The waters produced by NF or RO, which are enriched in vanadium and silica content, are expected to be commercialized into the various functional mineral waters.



I. 서 론

2006년 제주도는 물산업육성을 위한 6대 중점 추진과제를 발표하였으며, 그 중에서 기능성음료 및 미네랄워터 (mineral water)의 개발은 부가가치와 상품화 가능성이 매우 높은 과제이다.

기능성미네랄 중 바나듐은 제주도내 지하수에 함유된 양이 다른 지역보다 다소 높게 나타나고 있으며, 바나듐 함유 관정에 대한 일제 조사에서 상품화가 가능한 함량을 보이는 일부관정이 있다고 발표되었고, 또한 지하수의 바나듐성분이 당뇨개선효과가 있다고 보고되면서 제주도 지하수를 이용한 기능성음료의 산업화 가능성을 밝힌 바 있다 (임 등, 2006).

일반적으로 수계 중의 바나듐의 함량은 지리학적인 위치에 크게 의존하며 0.2~100 ppb의 함량으로 분포하고 있다고 보고 (National Academy of Science, 1974)되고 있으며, 바닷물에서는 평균적으로 0.2~29 ppb가 분포하고 있다 (Waters 등, 1977).

바나듐의 혈당강하 효과에 대한 연구로서 하루에 125 mg/day의 sodium metavanadate를 인슐린 의존형 환자 (1형 당뇨)와 비의존형 당뇨병환자 (2형 당뇨)를 대상으로 4주간 투여한 결과 1형 및 2형 당뇨 모두 혈당강하 효과를 확인하였다 (Goldfine 등, 1995). 또 다른 연구결과로 천연 바나듐을 함유하는 후지산의 복류수를 연속 60일간 섭취한 결과 혈당치가 안전하게 저하됨을 보고하였다 (Kitta 등, 2003). 이러한 바나듐성분의 인슐린 모방효과는 인슐린 장애로 생기는 진형당뇨병 (diabetes mellitus)의 동물모델 뿐만 아니라 1형 당뇨와 2형 당뇨병환자의 경우에도 효과가 입증되었다 (Sakurai 등, 2003; Ding 등, 2001; Yeh 등, 2003).

또한, 바나듐 이외에 주목할 만한 기능성 미네랄인 실리카 (Silica, SiO_2)도 최근에 많은 관심이 되고 있다. 규소 (Silicon, Si)는 자연수 중에 0.4~40 mg/L의 함량분포를 보이고 있으며 (Farmer 등, 1986), 콜라겐과 뼈의 구성에 매우 중요한 요소로 보고되고 있다 (Calomme 등, 1997; Carlisle 등, 1997; Hott 등, 1993).

최근의 프랑스 카슬라르디 병원의 소피박사 등의 임상연구 결과에 의하면, 수돗물이나 생수 속의 실리카성분이 알츠하이머병을 예방하는 효과가 있다고 보고되면서 음용수 중의 실리카 함량이 크게 관심을 끌고 있다 (Sophie 등, 2005).

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. 특히 일본에서 시판중인 바나듐수의 함량은 65~140 ppb로서 이 것 들과 비교하면, 제주도 지하수의 바나듐 함량은 많이 떨어져 상품 경쟁에서 뒤떨어 질 수밖에 없다.

따라서 제주도 지하수에 미량으로 함유되어 있으면서 기능성미네랄로 주목받고 있는 미네랄 성분을 고농도로 농축하여, 이를 고부가가치 상품으로의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 미네랄 성분을 농축하고, 이를 기능성 음료로 개발하기 위하여 역삼투 (reverseosmosis) 및 나노여과 (nanofiltration) 공정을 도입하였으며, 이에 대한 타당성을 조사하였다. 이를 위하여 역삼투 및 나노여과 공정을 각각 사용하여 원수의 투과선속 (permeate flux)과 바나듐 및 실리카 성분의 배제율 (rejection coefficient) 측정을 통해 최적의 막을 선정하였다. 또한, 선정된 막을 사용하여 바나듐의 함량을 목표농도 (50~150 ppb)까지 높은 농축수를 제조하였다. 제조된 농축수 중의 유해성분에 대한 정밀 분석을 실시하여 유해성 여부를 조사하였으며, 기능성 미네랄 수로의 상품가능성을 제시하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 막분리 공정

압력차를 추진력 (driving force)으로 하는 막분리 공정은 막의 세공 크기 (pore size)에 따라 역삼투, 나노여과, 한외여과 및 정밀여과로 분류된다.

2.1.1. 역삼투 (reverse osmosis, RO)

역삼투 공정은 일반적으로 1 MPa 이상의 조작 압력하에서 10 Å 내외의 세공 크기를 갖는 반투막을 사용하여 수중의 염 등 주로 저분자 물질을 분리하는 방식이다.

해수 담수화에 사용되는 역삼투 공정은 5~8 MPa 정도의 고압에서 운전되고 95~99% 정도의 염제거가 가능하며 다소 높은 운전압력으로 적절한 플럭스를 얻을 수 있다 (Mallevalle 등, 1996).

막의 재질은 지지층 위에 분리효과를 위한 분리층으로 형성된 비대칭형 cellulose acetate나 aromatic polyamide를 위시하여 최근에는 용존 염을 99%까지 제거시킬 수 있는 복합막이 개발되었다. 이 복합막은 지지층 위에 염제거 효과가 큰 고분자 박막을 형성시킨 것으로, 지지막은 기계적 강도가 크고 내화학약품성이 큰 polysulfone이 주로 사용되며, 분리층은 cellulose-tri-acetate, crosslinked polyether 등이 주로 사용된다.

2.1.2. 나노여과 (nanofiltration, NF)

나노여과 공정은 150~1,000 Dalton 사이의 세공크기 (pore size)를 갖는 나노여과막을 사용하는 공정으로서, 주로 유기물제거 및 연수화 목적으로 많이 사용

되고 있으며, 정수장에서도 현재 사용되고 있다 (Ventresque 등, 2000). 현재 수처리 분야에서 나노여과 공정은 연수화 공정에 많이 사용되고 있으며, 1가 이온을 중심으로 하는 전기전도도의 제거에는 큰 효율을 나타내지 못하는 것이 보통이다. 그러나, 2가 이상 음이온의 제거에는 상대적으로 높은 효율을 나타내는데, 특히 황산이온과 같은 2가 음이온의 경우에는 나노여과막에 의하여 거의 70~90%이상의 배제율을 나타낸다 (Ernst 등, 2000).

2.1.3. 한외여과 (ultrafiltration, UF)

한외여과는 나노여과와 유사한 분리조작법으로 압력차를 추진력으로 사용한다. 한외여과에서 사용되는 압력차는 대개 0.1~0.4 MPa 범위인데, 이는 분자량이 큰 입자가 상대적으로 삼투압이 낮고, 따라서 삼투압 이상의 압력을 가하는데 고압을 요하지 않기 때문이다. 역삼투법의 분리조작은 막과 용존 염과의 상관성에 의해 주로 지배되는 반면, 한외여과법은 용질 및 세공의 크기에 의해 거의 지배된다. 즉 한외여과는 미세공 입구에서 입체장애 (steric hindrance)와 세공 내에서 용질과 세공벽 간의 마찰저항에 의해 분리효과가 나타난다.

2.1.4. 정밀여과 (microfiltration, MF)

정밀여과방식은 수중에서 0.1~1 μm 입자 크기의 물질 제거에 주로 사용되며, 탁도 유발물질 및 병원성 미생물과 같은 오염물질을 제거할 수 있다. 정밀여과는 조업 압력이 낮아 경제성이 매우 높고 탁도를 0.1 NTU 이하로 낮출 수 있는 여과방식이다 (Laine 등, 2000).

세공이 막 총면적의 80%정도를 차지하는 것이 적합하며, 정밀여과용 분리막의 소재로는 셀룰로오스 (cellulose) 계통이나 나일론 (nylon), PVC 및 PTEE (poly tetra fluoro ethylene)등 여러 고분자 물질이 적합하다. 정밀여과는 주로 수중의 무기 콜로이드 입자들의 제거를 통하여 많은 수의 미생물 제거가 가능하지만, 한외여과에 비해서는 낮은 제거율을 보인다.

2.2. 막 모듈 (membrane module)

일반적으로 분리막은 튜브형 (tubular type)과 평판형 (flat sheet type)으로 구분되며, 튜브형 분리막을 사용한 막 모듈에는 관형 막 모듈과 중공사형 (hollow fiber type) 막 모듈이 있고, 평판형 분리막을 사용한 막 모듈에는 판틀형 (plate and frame) 막 모듈과 나선형 (spiral wound type) 막 모듈이 사용된다 (한국막학회, 1996).

관형 막 모듈은 초기 투자비가 크게 소요되는 단점은 있으나, 공정제어와 막 오염의 세척이 용이하므로 막오염이 심하게 유발되는 분리대상 계에의 사용에 적합하며, 반면 중공사형 막 모듈은 초기 투자비는 낮으나, 막오염이 심한 분리대상 계에는 사용이 적합하지 않다는 단점이 있다.

Table 1에서 나타낸 것과 같이 일반적으로 분리대상 계에 적합한 막 모듈의 선정은 초기 투자비뿐만 아니라, 분리대상 계의 상태, 도입액의 예비처리 비용 및 막 교체 또는 모듈 교체 비용을 포함한 운전비 등을 고려한 경제성 해석에 기초하여 이루어진다.

Table 1. Comparison of various membrane modules

Item for comparison	Tubular type	Plate and frame type	Spiral wound type	Hollow fiber type
Packing density	Low	—————>		Very high
Investment	High	—————>		Low
Fouling tendency	Low	—————>		Very high
Cleaning	Good	—————>		Poor
Operation	High	—————>		Low
Membrane replacement	Yes/No	Yes	No	No

2.2.1. 평판형 모듈 (plate frame type module)

평판형 모듈은 지지판의 양면에 평막을 붙여 작은 공간을 경계로 일정한 간격으로 층을 이루어 모듈화 한 것이다. 각 모듈들의 간격을 조절하는 것이 가능하여 고농도 현탁 물질을 함유한 원수에도 적용이 가능하다. 또한 분해·조립이 가능하기 때문에 세정이 용이하다. 약간 다른 형태이긴 하지만 평막 중에는 부채처럼 분리막을 접어놓은 형태인 플릿형 (pleat type)도 있는데, 이는 여과면적을 크게 할 수 있기 때문에 막의 충전 밀도가 크다. 고농도의 용액 처리에 적합하며 구조가 간단하여 조립·분해가 용이하며 평막 자체만 교체할 수 있는 장점이 있다.

2.2.2. 관상형 모듈 (tubular type module)

관상형 모듈은 내압용기 안에 파이프 형상의 분리막 element를 여러 개 모아 놓은 것이다. 여기서 분리막 element란 파이프 형태의 다공질 지지판의 안쪽에 분리기능을 갖는 분리막을 고정시키는 개별 파이프형태를 말한다. 분리막의 충전 밀도는 작지만 원액 측 유로단면이 크기 때문에 고농도의 현탁입자를 함유한 액체에 대해서도 적용이 가능하다. 대부분의 경우는 내압식으로 운전된다.

2.2.3. 모노리스형 모듈 (monolith type module)

유기막인 경우에는 각 element를 모아 놓은 관상형 모듈로 구성하지만, 무기막인 경우에는 원통형 내부에 여러 채널을 만들어 놓은 형태로 구성한다. 이러한 모듈형태를 모노리스형 모듈이라 하고 이 경우에는 분리막의 충전 밀도는 작지만 원액 측 유로 단면이 크기 때문에 고농도의 현탁 입자를 함유한 액체에 대해서도 적용이 가능하다.

2.2.4. 중공사형 모듈 (hollow fiber type module)

중공사형 모듈은 투과 세공 (pore)이 있고, 실의 중심에 빈 공간이 있는 섬유성 실을 수천 개에서 수만 개씩 배열시킨 형태이다. 분리막을 통과한 투과수는 중공사형 내부로 들어와 집수관을 통해 외부로 빠져 나간다. 중공사형 모듈은 높은 충전 밀도로 인해 단위 부피당 막 표면적이 가장 넓다는 장점이 있으나 다른 모듈에 비해 고농도의 현탁 물질에 의해 오염되지 쉬운 단점이 있다.

2.2.5. 나선형 모듈 (spiral wound type module)

나선형 모듈은 평막을 말아 놓은 모양으로 막과 막 사이에는 막을 지지해 주는 지지층이 있으며, 이 지지층으로 원수가 투과되어 처리수가 나온다. 막의 충전 밀도는 높지만 막의 간격이 작기 때문에 현탁 입자를 함유한 원수를 직접 흐르게 하기는 어려우므로 부유물질 (SS) 제거 등의 전처리가 필요하다.

나선형 모듈은 사각형 평막을 permeate carrier의 사이에 두고 막의 분리 활성층 표면이 서로 반대가 되게 샌드위치 식으로 쌓는다. 그 다음 이 샌드위치 형태의 평막을 투과수가 나갈 수 있는 구멍이 나 있는 원통형 집수부에 나선형으로 감는다. 이때 막의 표면은 polypropylene 재질의 스페이서를 넣어 보호하는데 이는 분리 활성층의 보호뿐만 아니라 막 표면에서의 와류를 증대시켜 물질전달을 촉진시키고 농도분극을 감소시킨다.

2.3. 막분리 메카니즘 (mechanism)

물과 용질의 투과에 대한 막분리 메카니즘은 크게 수소결합 메카니즘, 선택흡착-미세공 메카니즘 및 용해-확산 메카니즘으로 구별할 수 있다 (환경관리연구소, 2005).

2.3.1. 수소결합 메카니즘

이 이론은 물 분자와 막 사이에 수소결합을 이룬다는 이론으로 물분자 주위의 수소가 막을 구성하는 작용기 중에 산소와 결합하여 수소결합을 형성하고, 외부의 압력에 의해 물 분자가 미세한 공극으로 투과한다는 이론이다

분리막은 결정의 영역과 비결정의 영역을 가지고 있으며, cellulose acetate 막에 있어서 카르보닐기의 산소원자는 물 분자의 수소원자와 수소결합을 하여 bound water를 형성한다. 비결정 영역이 크면 미세공에 대하여 bound water가 차지하는 비율이 적으므로 막과 수소결합을 형성하지 않은 이온 또는 분자가 이 부분을 통과하게 되는데 이것을 hole type diffusion이라 한다. 막과 수소결합을 가지는 이온 또는 분자는 bound water 중에서 alignment type diffusion에 의하여 투과한다.

이러한 메카니즘은 역삼투막 초기에 나온 것이나 이후에 판명된 용질투과의 여러 가지 현상이 수소결합 메카니즘을 뒷받침하고 있다.

2.3.2. 선택흡착-미세공 메카니즘

막의 화학적 성질이 수용액 중의 용질의 흡착에 영향을 미치면, 막 부근에서의 용질의 농도는 막에 가까울수록 낮아진다. 그러면 막-용액의 계면에서는 순수의 층이 존재하며 이러한 계면에서 순수층과 막의 미세공에 대해 압력을 가하여 흐르게 하면 수용액으로부터 순수를 얻을 수 있다.

2.3.3. 용해-확산 메카니즘

용매 및 용질의 막 투과는 용매 및 용질이 먼저 막으로 용해되어 접근한 다음 화학 포텐셜 (chemical potential)의 차이에 의하여 막의 한쪽 편에서 다른 쪽으로 확산하여 이동 한다는 원리이다.

용질과 용매 및 cellulose acetate 막의 재질이 불변의 요인이라고 한다면, 용질

이나 용매의 막 내로의 용해도 계수와 확산계수는 주어진 온도에서 각각 한 개의 값만으로 정해진다. 결과적으로 용질이나 용매의 막 투과속도 및 용질의 분리도는 막 재질이 정해지면 각각 1개의 값을 가진다.

이러한 메카니즘은 농축용의 막 투과에 이용되는 것으로 막을 용해 및 확산의 장소로 생각하는 것이다. 이때의 투과에 대한 추진력은 농도차와 압력차이다.

2.4. 막오염 (membrane fouling) 및 제어

2.4.1. 막오염 현상

분리막을 이용한 막분리 시스템을 실용화하는데 있어서 최대의 문제점은 용액 중의 현탁물질 또는 흡착물질 등이 막에 침적되어 미세공을 차단시키거나 유로를 밀폐시켜 버리는 막오염 현상이 일어난다는 점이다.

나노여과 및 역삼투와 같이 압력차를 추진력으로 하는 막분리 공정에서 농도분극 층과 막오염이 형성되었을 때 투과선속 (permeate flux), J_v 는 일반적으로 다음 관계식과 같이 표현된다 (Mulder., 1991).

$$\begin{aligned}
 J_v &= \frac{\Delta P}{\mu R_{tot}} \\
 &= \frac{\Delta P}{\mu (R_m + R_{cp} + R_f)} \\
 &= \frac{\Delta P}{\mu (R_m + R_{cp} + R_p + R_a + R_c + R_s + R_g)}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, ΔP 는 막 양단의 압력차, μ 은 용액의 점도, R_{tot} 는 총 여과저항, R_m 은 막 자체의 순수 저항 (membrane resistance), R_{cp} 는 농도분극 저항, R_p 는 세공 막힘 (pore plugging; 막의 세공 내의 용질의 흡착 또는 침적 등에 의해 세공이 밀폐

되는 현상)에 의한 저항, R_a 는 흡착 층 (원액 중의 흡착성 물질이 세공 또는 막 표면에 흡착되어 형성하는 층)에 의한 저항, R_c 는 cake 층 (원액 중의 현탁물질이 막 표면에 축적되어 형성하는 층)에 의한 저항, R_s 는 scale 층 (농축에 의해 난용해성 물질이 용해도를 초과하여 막 표면에 석출하여 형성하는 층)에 의한 저항, R_g 는 gel 층 (농축에 의해 용해성 고분자 등이 막 표면에 형성하는 비유동성 층)에 의한 저항을 각각 나타낸다.

이러한 막오염을 유발하는 오염원은 Ca^{+2} , Mg^{+2} , CO_3^{-2} , SO_4^{-2} , Fe^{+2} , Silica 등의 무기물, 단백질, 지방, 박테리아, 바이러스, 폐놀, 농약 등의 유기물과 콜로이드성 고형물을 들 수 있으며, 이러한 오염원에 의해 야기되는 fouling 현상은 분리막을 이용한 수처리 공정에 있어서 다음과 같은 문제점을 야기 시키는 것으로 알려져 있다 (Fane 등, 1987).

- 1) 막 표면에 용질에 의한 cake 층, gel 층, scale 층 등이 형성되어 수력학적 저항이 증가된다.
- 2) 막의 미세공을 차단시키게 되므로 막 고유의 용질 배재 성능이 저하된다.
- 3) 장시간에 걸쳐 서서히 진행되므로 안정된 조업조건의 설정을 어렵게 한다.
- 4) 분리대상 물질과 막과의 상호 작용으로 막 재질의 조성을 변화시킬 가능성이 있다.

분리막을 이용한 수처리 공정에 있어서 이와 같은 막오염 현상이 발생할 경우 막 투과량은 순수 투과량의 약 2~10% 정도에 지나지 않게 된다. 따라서 수처리를 위한 막 분리 효율의 향상을 위해서는 막오염 현상에 대한 정량적 해석 및 막오염의 적절한 제어 방법이 요구된다.

2.4.2. 막오염의 제어

분리물질과 막 간의 상호작용, 분리물질의 침적, 흡착, 세공 막힘 등으로 나타나는 막오염은 유발 요인이 다양하고 복잡하여, 처리대상 물질의 특성에 따라 적절한 제어 방법을 선정하여야 한다. 일반적인 막오염 제어 방법은 다음과 같다.

2.4.2.1. 전처리 (pretreatment)

원액이 막 모듈 (membrane module) 내로 들어가기 전에 막오염 물질을 미리 제거하는 방법으로서 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, FeCl_3 및 고분자 응집제 등을 이용한 응집 침전, pH 조정, 열처리, 염소화, 활성탄 등에 의한 흡착, 모래 및 규조토 여과, 정밀여과 또는 한외여과 등이 사용될 수 있으며, 막오염 물질의 종류에 따라 적절한 제어 방법을 선정한다. 한 예로서 단백질의 분리에서는 pH 조정이 매우 중요하다. 즉, 단백질의 등전점 (isoelectric point; 단백질이 전기적으로 중성인 점)에서 막오염이 최소가 되므로 분리막을 이용한 단백질의 분리에서는 공급 원액의 pH를 등전점 부근으로 조절할 필요가 있다.

전처리 공정을 무시하고 상당한 시간과 노력을 막 세척에 소비하는 경우가 있는데, 막오염 제어의 시작은 각 처리공정에 적합한 전처리 방법을 선정하는데 있으며, 전처리 방법이 막오염 제어의 가장 능동적인 방법이라는 것을 간과해서는 안된다.

2.4.2.2. 막의 성질 (membrane property)

막의 물리화학적 성질을 변화시켜 막오염을 제어할 수 있다. 정밀여과 또는 한외여과용 막과 같은 다공성 막 (porous membrane)은 역삼투용 및 투과증발용 막보다 막오염이 보다 심각하게 일어나며, 세공 크기 분포가 좁은 막을 사용할수록 막오염을 보다 더 줄일 수 있다. 또한 일반적으로 수처리 공정에서는 소수성 막 (hydrophobic membrane) 보다는 친수성 막 (hydrophilic membrane)을 사용하는 것이 유리하며, 전하를 띤 콜로이드성 물질의 분리에는 하전막 (charged membrane)의 사용이 막오염 제어에 도움을 줄 수 있다.

2.4.2.3. 막 모듈 및 조업 조건

막오염은 막 표면 위에 형성된 농도분극을 감소시킴으로써 줄일 수 있는데, 공급 원액을 높은 유속으로 모듈 내로 보내주어 물질전달 계수를 크게 하거나 낮은 초기 flux를 갖는 막을 사용하면 농도분극을 감소시킬 수 있다. 또한 모듈의 치수나 형태를 적절히 디자인함으로써 효과를 얻을 수 있는데, 이러한 방법으로는 Murkes 등 (1986)이 제시한 막 층 유로에 의한 난류 흐름 형성법,

Flemmer 등 (1982)이 제시한 난류 촉진물의 유로내 설치법, Kroner 등 (1988)이 제시한 동심 이중 원관의 회전에 의한 Taylor 난류 형성법 등이 제시되어 있으나, 큰 scale의 실제 공정으로의 적용에는 경제성 등으로 인해 어려움이 있다.

2.4.2.4. 세정 (cleaning)

시스템의 운전이 끝난 후나 운전 중에 막 표면 및 세공 내에 형성된 오염물질을 수력학적, 기계적 또는 화학적으로 세정하는 방법이다. 이 방법은 앞에서 언급된 막오염 제어 방법과 병행하여 사용될 수 있는데, 모듈의 형태, 막의 물리·화학적 내구성 및 오염물질의 종류에 따라 적절한 방법을 선정하여야 하며, 적절한 세척 시간 및 빈도수는 공정 최적화로부터 계산될 수 있다.

1) 수력학적 세정 (hydraulic cleaning)

수력학적인 방법에 의해 오염물질을 세정하는 방법으로서 Fane 등 (1987)이 제시한 역류 세정법 (backflushing), Rodger 등 (1984)이 제시한 역방향 압력 맥동법 (negative pressure pulsing), Bauser 등 (1986) 및 Nikolov 등 (1993)이 제시한 맥동류 흐름법 (pulsatile flow) 등이 제시되어 왔다.

역류 세정법은 투과부로부터 용액부로 주기적으로 공기를 불어넣어 막 세공 내 또는 막 표면에 형성된 오염 층을 제거하는 방식이다.

2) 기계적 세정 (mechanical cleaning)

Sponge ball을 이용하여 막 표면 위에 형성된 오염물질을 세척하는 방법이다. 나권형 모듈이나 실관형 모듈에는 적용될 수 없고, 평판형 모듈과 관상형 모듈에만 적용이 가능하다.

3) 화학적 세정 (chemical cleaning)

이 방법은 실제 공정에서 사용되고 있는 방법으로서, 강산 (인산 등), 약산 (구연산 등), 알칼리 (수산화나트륨 등), 세제 (detergents), 착화제 (EDTA) 및 세균처리제 등과 같은 화학약품이 단독으로 또는 배합되어 사용된다. 이 방법에서는 화학약품에 대한 막의 내구성 뿐만 아니라 약품의 농도 및 세정시간이 매우 중요하다.

Ⅲ. 실험장치 및 방법

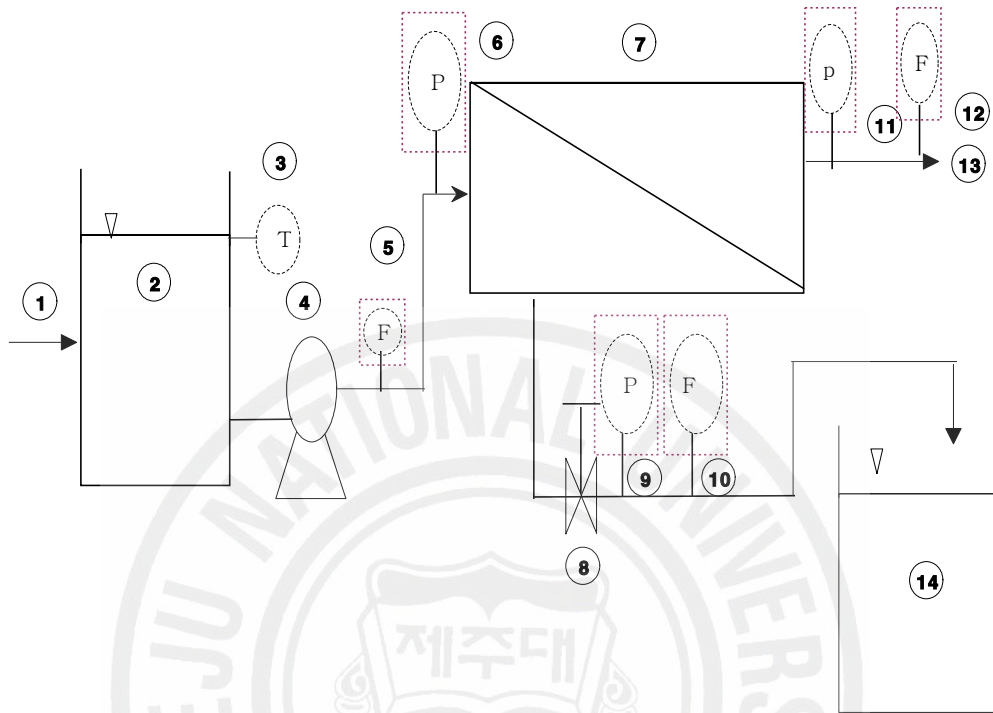
3.1. 실험장치

본 실험을 수행하기 위하여 lab 스케일의 실험 장치를 제작하였으며, 이를 Fig 1에 나타내었다. 원수는 원수탱크로부터 전처리 필터 (0.2 μm)를 거쳐 고압펌프에 의해 막 모듈로 공급된다. 이때, 막 모듈 후 단에 있는 압력조절밸브를 이용하여 압력을 조절하였다. 막 모듈의 양단에는 압력게이지 (pressure gauge)를 설치하여 막에 작용하는 압력을 측정하였으며, 농축 및 투과수량은 유량계 (flow meter)를 설치하여 측정하였다. 수온은 원수공급탱크에 온도조절장치를 설치하여 일정 ($25\pm 1^\circ\text{C}$)하게 유지되도록 하였다.

본 연구에서는 국내 S사 및 외국 D사의 3종류의 역삼투막과 2종류의 나노막을 각각 사용하였으며, 막 모듈은 모두 같은 크기의 나권형 모듈을 사용하여 서로 비교 할 수 있게 하였다. 본 실험에 사용한 각 막의 제원은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. 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



- | | | |
|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 1. Feed water | 2. Raw water tank | 3. Temperature gauge |
| 4. High pressure pump | 5. Flow meter | 6. Pressure gauge |
| 7. Membrane (RO/NF) | 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.

3.2. 실험방법

본 연구에서는 제주도 지하수의 원수 수질에 대한 특성을 선행 조사하였으며, 그 결과를 토대로 국내외 5종류의 막에 대한 원수의 투과특성을 파악하고 기능성미네랄 성분인 바나듐 성분과 실리카 성분 함량을 높여 부가가치가 높은 미네랄수로의 상품을 개발하기 위한 기초실험을 수행하였다.

3.2.1. 원수의 특성조사

원수는 임 등 (2006)의 연구결과에 의해 바나듐 함량이 높은 지역인 서귀포 지역 및 어음지역 관정, 바나듐 함량이 비교적 높으면서 바로 사용이 가능한 와흘 지역 관정, 바나듐 함량은 낮으나 감귤가공 공장과 연계하여 물을 사용할 수 있는 남원지역 관정 등 모두 4개 지역의 관정을 대상으로 하였다.

Embrahim 등 (2001)은 원수의 전처리 특성을 조사하기 위해 SDI (Silt density index)를 측정하여 비교분석하였으며 이 지수는 파울링 지수 (fouling index)라고도 하며 막의 오염이 일어 날 수 있는 가능성을 나타내는 척도로 사용된다.

SDI의 측정은 47 mm 직경의 필터에 30 psig의 압력으로 물을 흘려 측정한다. 처음 500 ml의 물이 흐르는 데 걸리는 시간 (T_0)을 잰 후 15분 (T)이 지난 후 다시 500 ml의 물이 흐르는 데 걸리는 시간 (T_1)을 재 이 두 시간의 비율을 척도로 사용하며 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$SDI = 100 \times \frac{(T_0/T_1)}{T} \quad (2)$$

높은 SDI 수치가 막의 즉각적인 오염이 일어날 수 있다는 절대적인 근거는 아니며 반대로 낮은 SDI 수치라 해도 막의 오염이 심하게 일어 날 수 있다. 그러나 일반적으로 볼 때 SDI 수치가 3이하이면 오염이 심하지 않은 것으로 판단하며, 5이상일 경우 심한 오염이 일어날 수 있다고 볼 수 있다.

3.2.2. 막 선정에 위한 기초실험

본 연구에서는 제주도 지하수의 원수 수질조사를 통해 원수의 수질특성을 파악하였으며, 그 결과를 토대로 대상 원수별로 국내외 5 종류의 분리막에 대한 투과선속과 배제율 측정을 통해 바나듐 및 실리카 성분의 농축수 제조에 적합한 막을 선정하였다.

3.2.2.1. 순수의 투과선속 (permeate flux)

국내 S사의 RE2540-TE 및 NE2540-90, 국외 D사의 BW30-2540, XLE-2540 및 NF90-2540를 선정하여 기초실험을 수행하였다. 5종류의 분리막을 3차 증류수로 안정화 시킨 후 막간차압 (transmembrane pressure, TMP)을 $2 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 에서 $16 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 으로 $2 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 간격으로 증가시키면서 투과수량의 변화를 측정하였으며, 이 때의 공급수의 수온은 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

3.2.2.2. 원수의 투과선속

서귀포 지역, 어음리 지역, 와흘리 지역 및 남원리 지역의 원수를 대상으로 하여 막간차압을 $2 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 에서 $16 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 으로 $2 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 간격으로 증가시키면서 투과수량의 변화를 측정하였다. 이때 공급수량은 $12 \text{ L}/\text{min}$, 공급수의 수온은 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정온도를 유지하여 각 지역 원수의 투과선속 및 순수의 투과선속을 서로 비교할 수 있도록 하였다.

3.2.2.3. 회수율 (recovery ratio)

회수율은 공급수량에 대한 투과수량의 비로 막여과 공정에서 양적인 처리효율을 보여주는 지표로서 식 (3)과 같이 정의된다. 여기서 Q_p 는 투과수량이며, Q_f 는 공급되는 공급수량이다. 본 연구에서도 각 실험마다 공급수량과 투과수량을 측정

하여 식 (3)에 의해 회수율을 계산하였으며, 농축수 제조에서의 최적 회수율은 막의 수명과 효율을 고려하여 15%~20%로 설정하였다.

$$\text{Recovery ratio (\%)} = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100 \quad (3)$$

3.2.2.4. 용질의 배제율 (rejection coefficient)

배제율은 용질에 대한 분리막의 배제 정도를 나타내는 척도로서 식 (4)와 같이 정의된다. 여기서 C_f 는 도입수의 용질농도이고, C_p 는 분리막 투과수 (permeate)의 용질농도이다.

각 원수 중에 함유된 여러 성분에 대한 배제율은 막간차압을 4, 8, 12 및 16 kg/cm²로 변화시키면서 측정하였으며, 이때의 공급유량은 12 L/min로 고정하였다.

$$\text{Rejection coefficient (\%)} = \left(1 - \frac{C_p}{C_f} \right) \times 100 \quad (4)$$

3.2.3 농축실험

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 먹는물 수질성분에 대한 분석은 Standard Method를 준하여 분석하였다.

Table 3에는 농축수 및 투과수 중에 함유된 무기물질 분석을 위한 ICP/MS 분석조건을 나타내었으며, Al, Fe, Ca 등은 시료의 간섭물질 (interface matrix)의 방해영향을 최적화시키기 위하여 CRI (collision reaction interface)시스템을 적용하여 분석하였다.

Table 3. ICP/MS analysis conditions

Item	Parameters	Setting range
Gas flow (L/min)	Plasma flow	16.5~18.5
	Auxiliary flow	1.45~1.55
	Sheath gas flow	0.22~0.25
	Nebulizer flow	1.0
RF power (kw)	RF power (kw)	1.4
CRI gases (L/min)	Skimmer (with H ₂)	0.085~0.090
	Scan mode	Peak hopping
	Dwell time (ms)	20
Quadrupole scan	Points per peak	1
	Scan/Replicate	50
	Replicates/Sample	3

IV. 결과 및 고찰

4.1. 원수의 수질특성

Table 4에 선정된 대상 원수의 수질에 대한 분석결과를 나타내었다. 서귀포지역의 바나듐함유 관정, 어음리 지역의 바나듐함유 관정, 와흘 지역의 바나듐함유 관정 및 남원지역의 바나듐함유 관정을 각각 서귀포 (Segwipo), 어음 (Ayum), 와흘 (Wahyul) 및 남원 (Namwon)으로 간략히 나타내었다. 각 지역의 지하수 관정에 대하여 pH 외 20가지 항목을 분석하였으며, 평균 3회 이상 반복하여 측정하여 평균값을 산출하였다.

서귀포, 어음, 와흘 및 남원 지역 관정의 바나듐 농도는 각각 53, 44.5, 31.8 및 10.2 ppb이었으며, 실리카 농도는 각각 36.3, 40.6, 29.9 및 36.5 ppm이었다. 본 대상 원수를 포함한 제주지역 지하수의 특징 중의 하나는 경도성분 (마그네슘, 칼슘 등)이 다른 지역 지하수에 비해 낮은 점이다. 특히, 농축공정에서 중요한 저해 요인인 유해물질의 함량은 검출한계 미만 이거나 극히 적은 함량을 보인다는 것이며, 본 연구 대상 지하수 관정에서도 이를 확인하였다. 따라서 분리막을 적용하기 위한 원수의 수질은 순수처럼 매우 청정한 수질로서 막 오염과 같은 문제 뿐만 아니라 농축 시에도 유해물질에 의한 문제는 거의 없을 것으로 판단된다.

Table 4. Quality of groundwater

Feed water	Unit	Segwipo	Ayum	Wahyul	Namwon
pH	-	8.61±0.2 ¹⁾	7.9±0.15	8.0±0.06	7.7±0.1
Turbidity	NTU	0.1±0.05	0.1±0.05	0.1±0.07	0.1±0.05
Ca	mg/L	8.95±0.4	3.1±0.5	2.1±0.60	3.1±0.4
Mg	mg/L	6.39±0.4	5.1±0.62	1.4±0.16	2.5±0.7
K	mg/L	7.5±0.28	4.9±0.89	6.1±0.65	1.9±0.53
Al	μg/L	10.1±0.2	5.5±0.7	8.0±0.76	1.6±0.9
Mn	μg/L	<0.2	<0.2	0.69±0.16	<0.2
Ni	μg/L	<0.2	<0.2	0.29±0.01	<0.2
Cd	μg/L	ND ²⁾	ND	ND	ND
Se	μg/L	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Ge	μg/L	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Cr	μg/L	1.25±0.06	5.5±0.8	2.13±0.24	1.2±0.2
SiO ₂	mg/L	36.3±0.5	40.6±0.6	29.9±0.35	36.5±0.7
V	μg/L	53.0±3.9	44.5±2.3	31.8±1.24	10.2±1.1
Fe	μg/L	2.07±0.2	0.6±0.56	10.2±8.26	7.8±0.70
Cu	μg/L	1.5±1.52	<0.2	0.2±0.28	<0.2
Zn	μg/L	1.47±1.90	29.2±2.87	1.47±1.9	4.3±1.45
B	μg/L	17.75±1.83	16.2±2.09	17.3±1.87	6.6±1.09

¹⁾ Values are means ± S.D. (n=3)

²⁾ ND: Not detected.

4.2. 순수의 투과선속 (permeate flux)

막간차압 (TMP) 변화에 따른 순수의 투과선속을 측정한 결과를 Fig 2.에 나타내었다. 순수의 투과선속을 측정한 결과 순수의 투과선속은 막간차압의 증가에 따라 선형적으로 비례하여 증가하였으며, 상대적으로 역삼투막 보다는 나노여과막에서의 투과선속이 높았다 (문 등, 2007).

5종류의 막 모듈에 대한 순수의 투과선속은 BW30-2540 < RE2540-TE < XLE-2540 < NF90-2540 < NE2540-90 순서로 증가하였으며, 막간차압 10 kgf/cm²에서의 NE2540-90, NF90-2540, XLE-2540, RE2540-TE 및 BW30-2540의 투과선속은 각각 103.2, 92.31, 60.0, 57.7 및 42.0 L/m² · hr이었다.

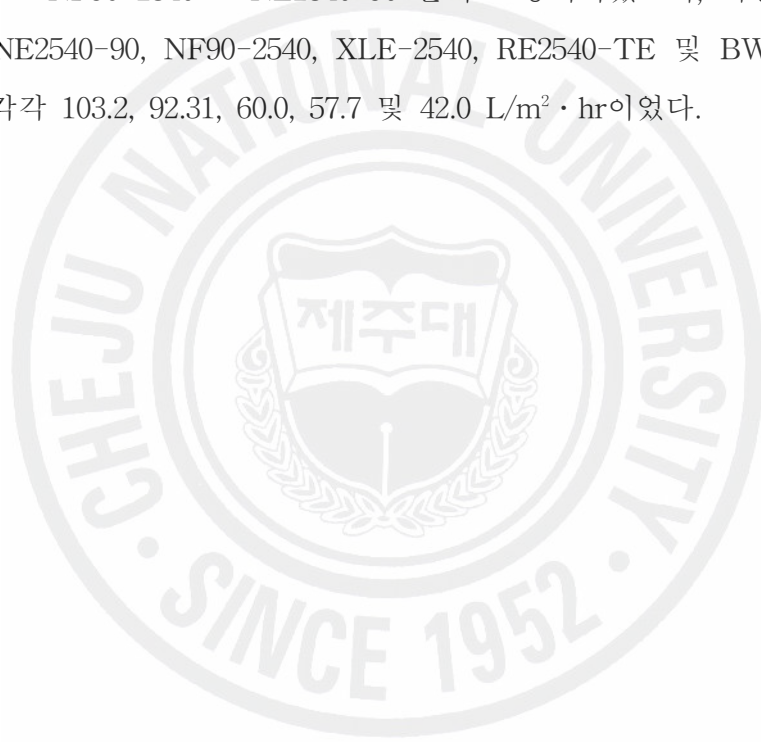


Fig. 2. Purewater permeate flux as function of transmembrane pressure.

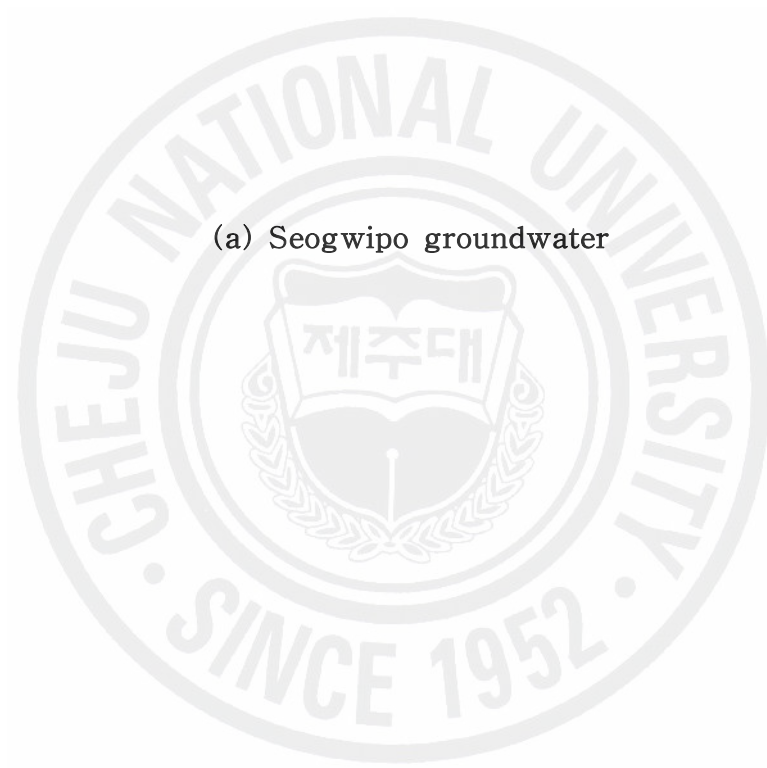
4.3. 원수의 투과선속 (permeate flux)

서귀포, 어음, 와흘 및 남원지역의 각각의 원수를 대상으로 막간차압 (TMP) 변화에 따른 투과선속을 측정하고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 막간차압 변화에 따른 투과선속 변화의 경향은 4 종류 원수 모두 매우 유사할 뿐만 아니라, 순수를 대상으로 한 실험결과와도 거의 일치하였다. 이러한 결과는 본 실험에 사용된 4 종류의 원수가 모두 순수처럼 매우 청정한 수질을 갖고 있기 때문으로 판단된다. 따라서 원수의 수질 분석결과에서도 예측하였듯이 막 오염과 같은 문제뿐만 아니라 원수의 농축 시에도 유해물질에 의한 문제는 거의 없을 것으로 판단된다.

원수의 투과선속은 순수를 대상으로 한 실험에서와 같이 BW30-2540 < RE2540-TE < XLE-2540 < NF90-2540 < NE2540-90의 순서로 증가되었으며, 이러한 결과는 4종류의 원수에서 모두 같았다. 즉, 나노여과막이 역삼투막보다 높은 투과선속을 나타냈으며, 가장 높은 투과선속을 나타낸 역삼투막모듈과 나노막모듈은 각각 XLE-2540과 NE2540-90이었다.

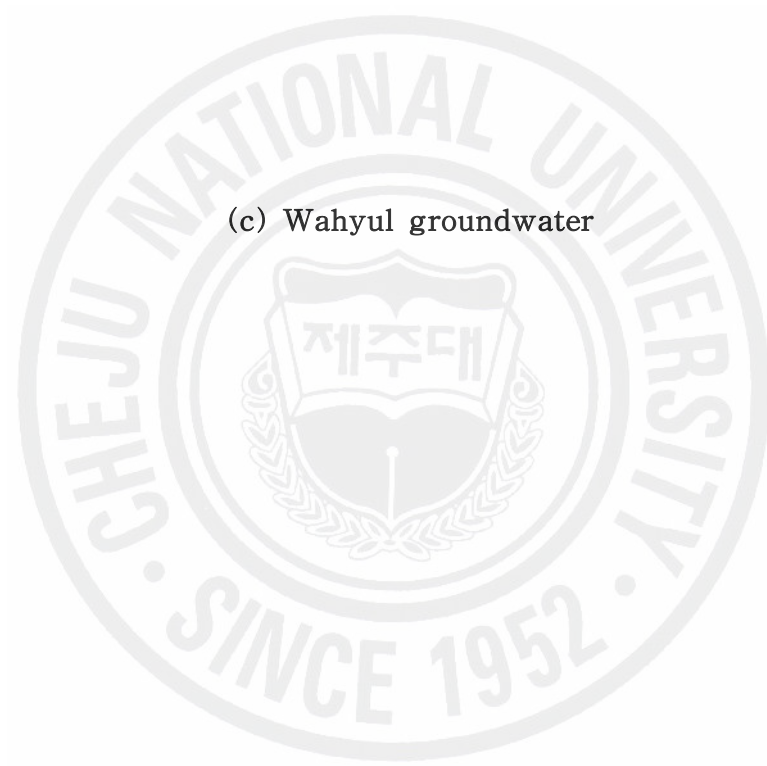
또한 본 실험에 사용된 나노여과막 중 투과선속이 양이 가장 높은 NE2540-90 막모듈과 역삼투막 중에 투과선속의 양이 가장 높은 XLE-2540 막모듈을 비교하여 보면, 서귀포지역 원수의 경우 NE2540-90 막모듈이 XLE-2540 막모듈보다 61.5~69.9% 정도 투과선속이 높았으며, 어음지역 원수, 와흘지역 원수 및 남원지역 원수의 경우의 경우에는 각각 62.1~69.9%, 59.8~65.4% 및 64.5~75.2% 정도 투과선속이 높았다.

서귀포 지역의 지하수를 원수로 하고 막간차압을 10 kg_f/cm²으로 하였을 때 NE2540-90, 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 · hr이었으며, 원수 종류에 따른 투과선속의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 대상으로 선정된 4 종류의 원수의 수질이 매우 청정하고 수질성분이 거의 비슷한 수준이어서 막 종류별 투과특성에서 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다.



(a) Seogwipo groundwater

(b) Ayum groundwater



(c) Wahyul groundwater

(d) Namwon groundwater

Fig. 3. Permeate flux as function of transmembrane pressure.

4.4. 원수의 용질 배제율 (rejection coefficient)

4 종류의 원수를 대상으로 하여 막간차압 변화에 따라 막 종류별로 용질 배제율을 측정하였다. 이 때 공급유량은 12 L/min으로 일정하게 하였으며, 농축수 및 투과수에 대한 성분 분석을 통해 식 (4)를 이용하여 배제율을 계산하였다.

4.4.1. 1가 이온의 배제율

물 중에 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. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 이때, 막간차압은 4, 8, 12 및 16 kg/cm²로 변화시키면서 배제율을 측정하였으며, 수온은 25±1℃로 일정하게 유지하였고 공급유량은 12 L/min으로 일정하게 막모듈에 공급하였다.

Fig. 4와 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 4 종류의 원수와 본 연구에 사용된 모든 막에서 막간차압 증가에 따라 나트륨과 칼륨의 배제율은 증가하였다. 나트륨의 배제율과 칼륨의 배제율의 차이는 크지 않았으나, XLE-2540을 제외한 모든 막 모듈에서 나트륨의 배제율보다 칼륨의 배제율이 상대적으로 높은 경향을 나타내었다.

나트륨의 배제율은 4 종류의 원수에서 공통적으로 XLE-2540 막 모듈이 가장 높은 배제율을 보였으며, BW30-2540이 가장 낮은 배제율을 나타내었다. 칼륨의 배제율은 나트륨의 경우에서와 같이 BW30-2540이 가장 낮은 배제율을 나타내었으나, 그 이외의 모듈에서는 거의 유사한 배제율을 나타내었다.

역삼투막의 경우 나트륨과 칼륨의 배제율은 국내 S사의 RE2540-TE 막 모듈을 사용하였을 때 각각 97.1~98.8%와 97.8~99.1%이었으며, 국외 D사의 XLE-2540 막 모듈을 사용 하였을 때 각각 97.7~99.5%와 96.6~99.4%이었다. 나노여과막의 경우 나트륨과 칼륨의 배제율은 국내 S사의 NE2540-90 막 모듈을 사용 하였을 때 각각 90.5~97.7%와 93.6~98.9%이었으며, 국외 D사의 NF90-2540 막 모듈을 사용하였을 때 각각 97.1~99.2%와 97.9~99.8%이었다.

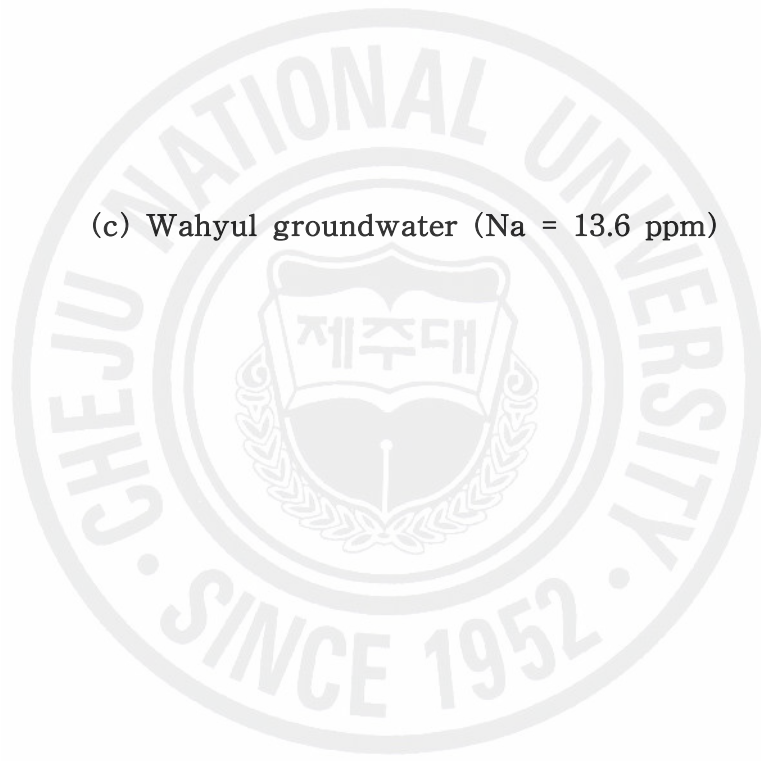
서귀포 지역의 지하수를 원수로 하고 막간차압을 8 kg/cm²으로 하였을 때,

(a) Segwipo groundwater (Na = 19 ppm)



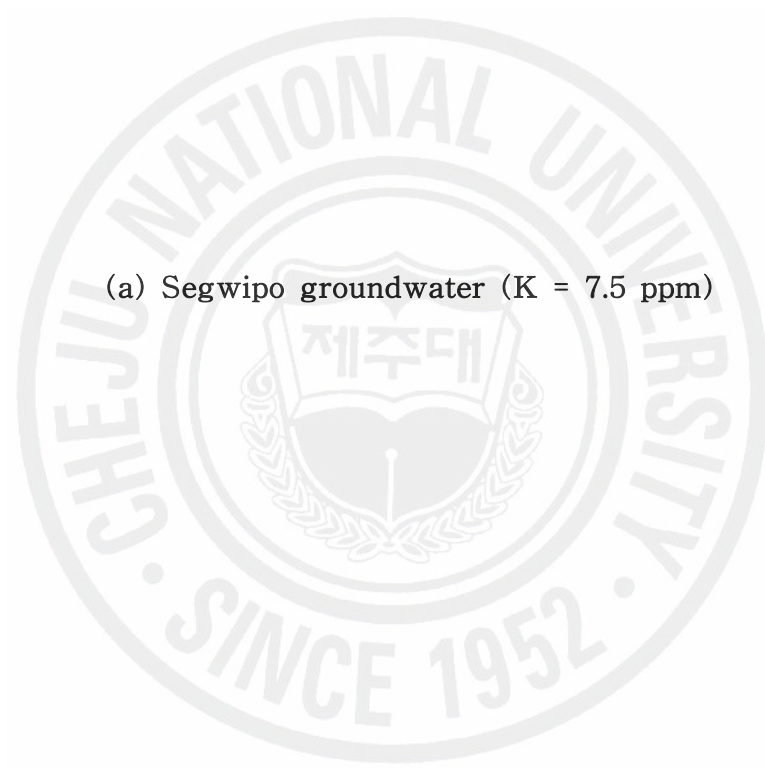
(b) Ayum groundwater (Na = 9.8 ppm)

(c) Wahyul groundwater (Na = 13.6 ppm)



(d) Namwon groundwater (Na = 8.0 ppm)

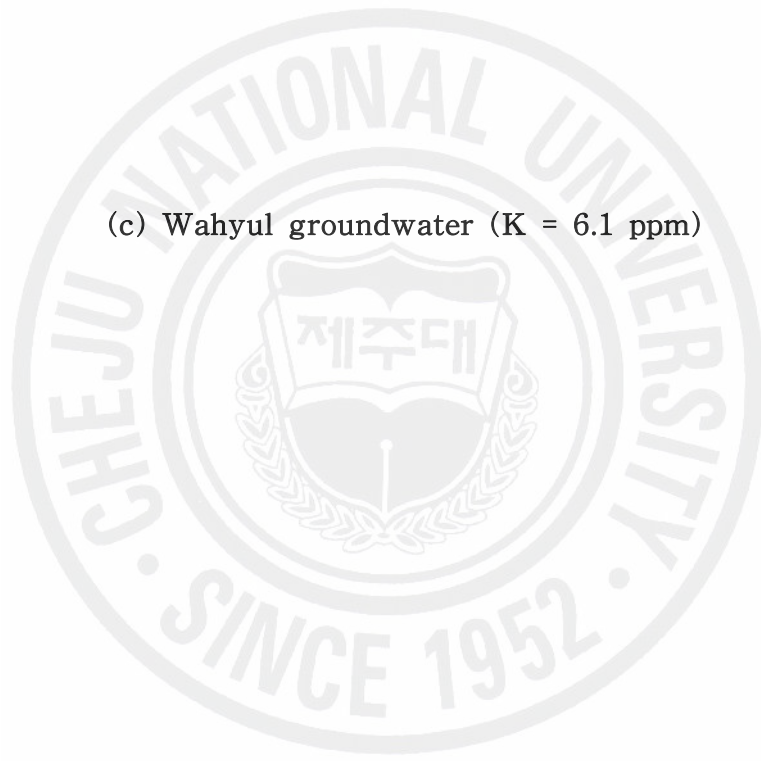
Fig. 4. Rejection coefficient of Na as function of transmembrane pressure.



(a) Segwipo groundwater (K = 7.5 ppm)

(b) Ayum groundwater (K = 4.9 ppm)

(c) Wahyul groundwater (K = 6.1 ppm)



(d) Namwon groundwater (K = 1.9 ppm)

Fig. 5. Rejection coefficient of K as function of transmembrane pressure.

XLE-2540, BW30-2540, NF90-2540, RE2540-TE 및 NE2540-90 막 모듈에서 나트륨에 대한 배제율은 99.3%, 95.7%, 98.6%, 97.8% 및 96.6%이였으며, 칼륨에 대한 배제율은 99.0%, 96.3%, 99.3%, 98.5% 및 97.3%이었다.



4.4.2. 2가 이온의 배제율

원수의 선행 수질분석을 통해 조사된 바와 같이 제주지역 지하수 중에 함유되어 있는 대표적인 2가 이온은 마그네슘 (Mg)과 칼슘 (Ca)이며, 이 들은 물의 경도 (hardness)를 나타내는 주성분이다.

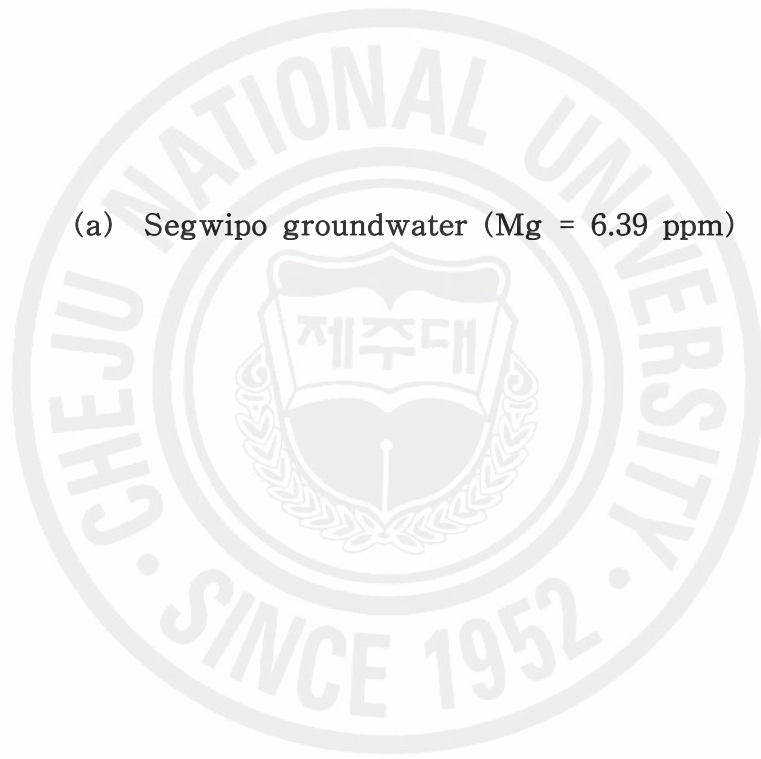
Fig. 6과 Fig. 7에 각 대상원수별로 막간차압 (TMP) 변화에 따른 마그네슘 및 칼슘 이온의 배제율 측정 결과를 각각 나타내었다. 1가 이온의 경우에서와 같이 모든 원수와 모든 모듈에 대하여 막간차압 증가에 따라 마그네슘 및 칼슘 이온의 배제율은 증가하였다.

또한 BW30-2540을 제외하고는 역삼투막과 나노여과막 간의 마그네슘 및 칼슘 이온에 대한 배제율 차이는 거의 없었으며, BW30-2540을 제외한 모든 막에서 원수의 종류에 관계없이 98%이상의 배제율을 나타내었다.

서귀포 지역의 지하수를 원수로 하고 막간차압을 $8 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 으로 하였을 때 XLE-2540, BW30-2540, NF90-2540, RE2540-TE 및 NE2540-90 막 모듈에서 마그네슘에 대한 배제율은 99.8%, 97.5%, 99.9%, 99.9% 및 99.9%이었으며, 칼슘에 대한 배제율은 99.8%, 97.7%, 99.8%, 99.8% 및 99.9%이었다.

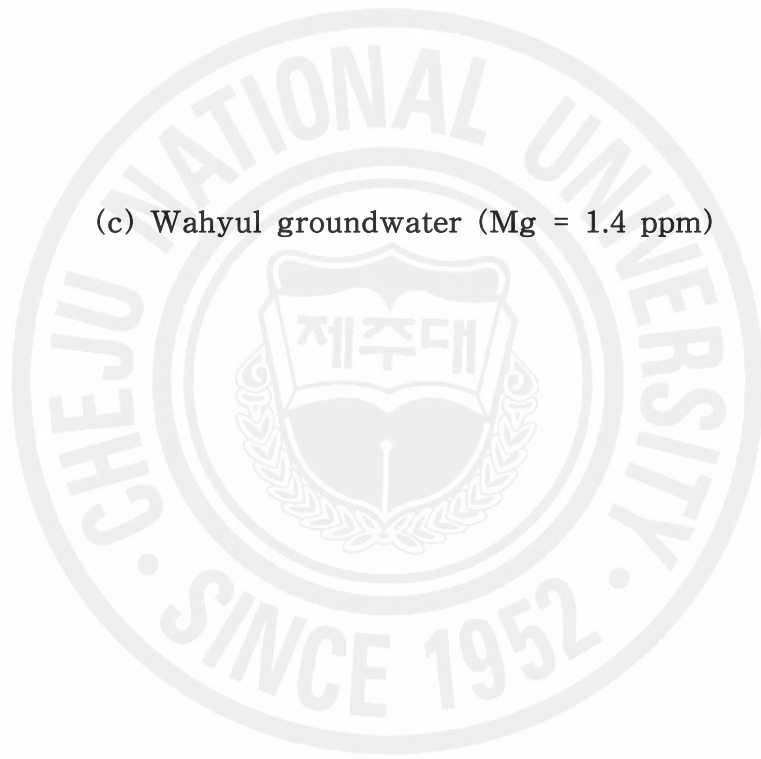
1가 이온 (나트륨과 칼륨)과 2가 이온 (마그네슘과 칼슘)의 배제율에 대한 역삼투막과 나노여과막의 배제율 결과를 종합하여 보면, 칼륨, 마그네슘 및 칼슘에 대한 역삼투막과 나노여과막 간의 배제율 차이는 없었으나, 나트륨 이온에 대한 나노여과막의 배제율은 역삼투막에 비해 낮은 경향을 나타내었다. 특히, 나트륨의 경우는 본 실험에서 제조하고자 하는 기능성 미네랄수인 농축수에 가능한 한 낮은 함량을 유지하는 것이 유리하므로, 나노여과막에 의해 목적하는 기능성 미네랄 성분인 바나듐과 실리카 성분의 농축이 가능하다면 투과선속의 양이 높은 나노여과막을 사용해 농축수를 제조하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

(a) Segwipo groundwater (Mg = 6.39 ppm)



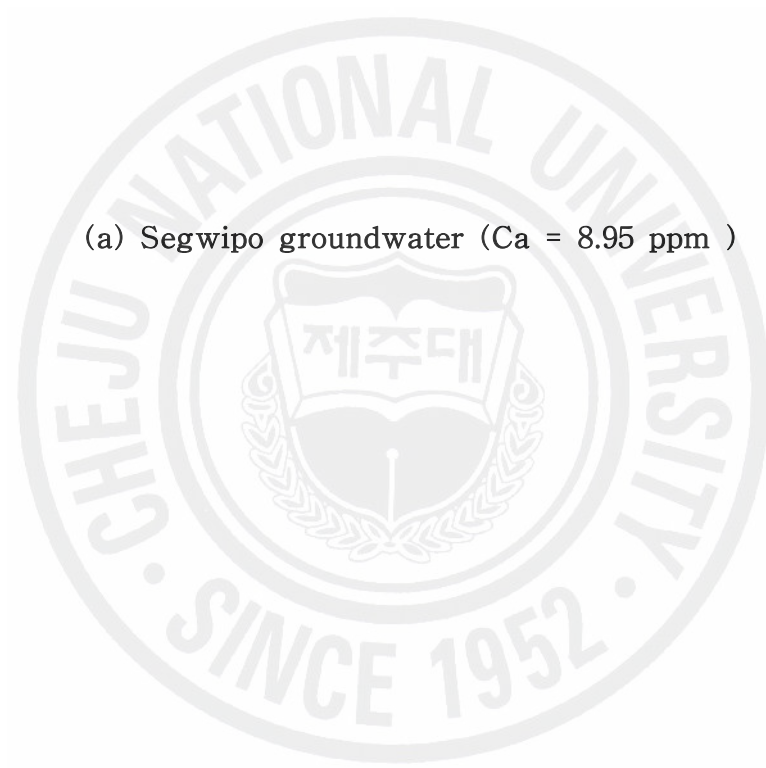
(b) Ayum groundwater (Mg = 5.1 ppm)

(c) Wahyul groundwater (Mg = 1.4 ppm)



(d) Namwon groundwater (Mg = 2.5 ppm)

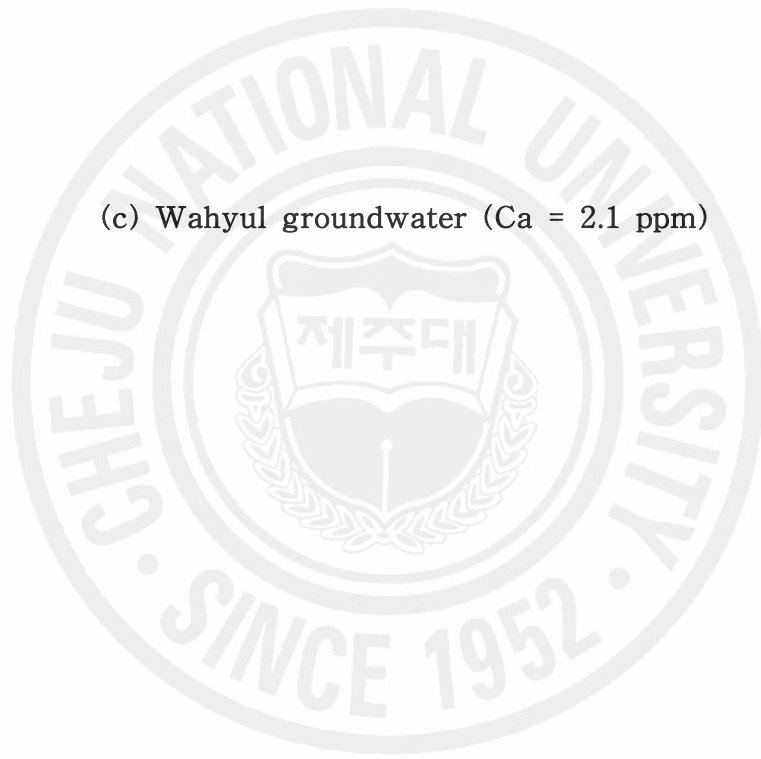
Fig. 6. Rejection coefficient of Mg as function of transmembrane pressure.



(a) Segwipo groundwater (Ca = 8.95 ppm)

(b) Ayum groundwater (Ca = 3.1 ppm)

(c) Wahyul groundwater (Ca = 2.1 ppm)



(d) Namwon groundwater (Ca = 3.1 ppm)

Fig. 7. Rejection coefficient of Ca as function of transmembrane pressure.

4.4.3. 바나듐 및 실리카의 배제율

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

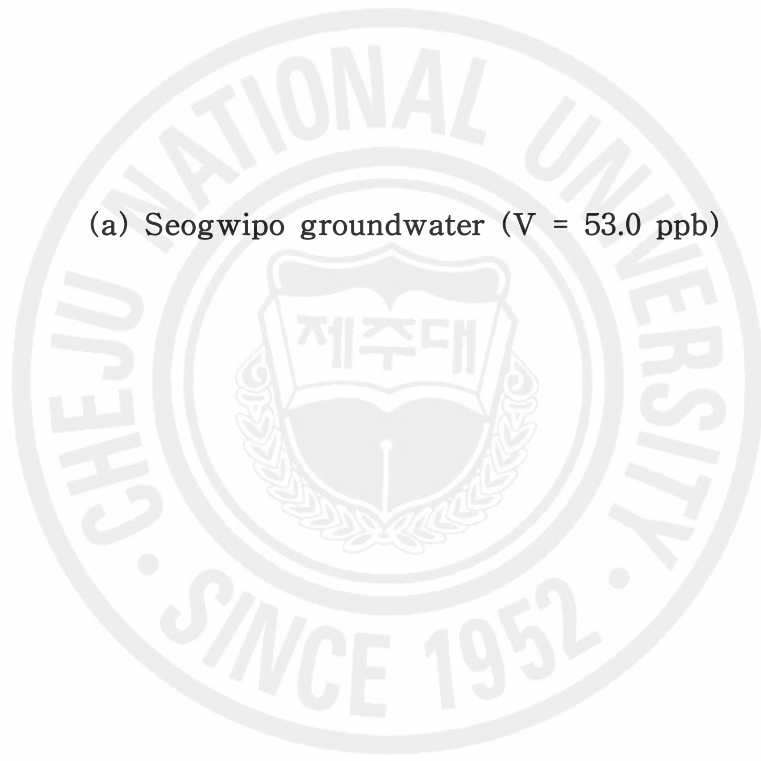
바나듐과 실리카에 대한 원수종류별 배제율 측정 결과를 Fig 8 및 Fig 9에 각각 나타내었다. 1가 이온과 2가 이온에서와 같이 모든 원수와 모든 모듈에 대하여 막간차압 증가에 따라 바나듐 및 실리카의 배제율은 증가하였으나, 모든 대상 원수에서 막 종류에 따른 배제율의 차이는 없었다.

4 종류의 원수와 본 연구에 사용된 모든 막에서 바나듐의 배제율은 95%이상이었으며, 실리카의 배제율은 98%이상이었다. 따라서 역삼투막 또는 나노여과막을 사용하여 바나듐과 실리카를 충분히 농축 가능함을 알 수 있었다.

서귀포 지역의 지하수를 원수로 하고 막간차압을 8 kg/cm^2 으로 하였을 때 XLE-2540, BW30-2540, NF90-2540, RE2540-TE 및 NE2540-90 막 모듈에서 바나듐에 대한 배제율은 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.

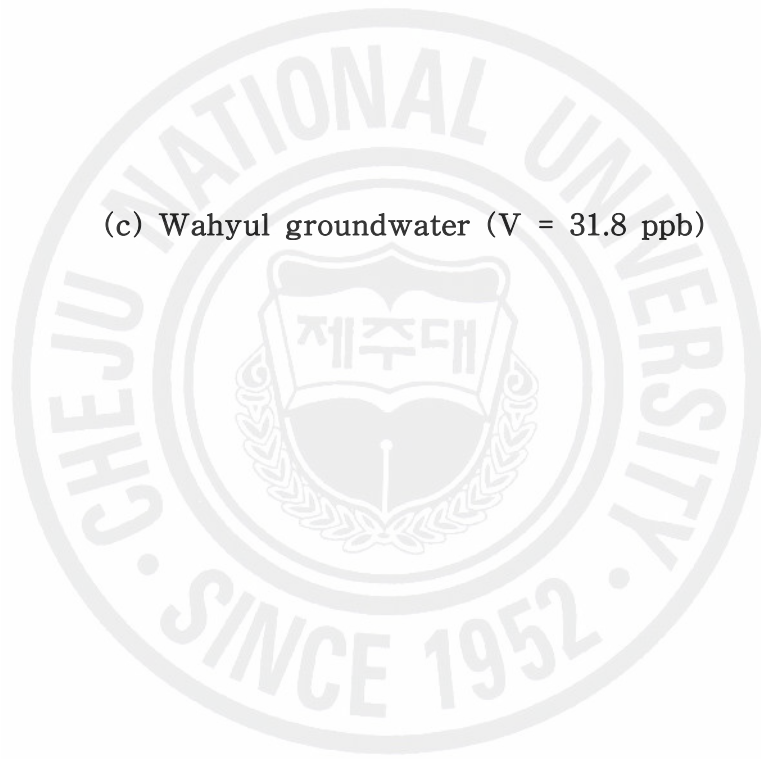
바나듐과 실리카의 농축에 적합한 막은 가능한 투과선속이 크면서 바나듐, 실리카 및 유용성분 (K, Ca, Mg 등)에 대한 배제율은 높고, 비 유용성분 (Na 등)과 유해성분 (B, Al, Sr, Ba 등)에 대한 배제율은 낮은 막이다. 본 연구에 사용된 역삼투막과 나노막의 투과선속과 배제율에 대한 실험 결과 배제율은 큰 차이가 없어 투과선속의 양을 고려하여 나노여과막을 선정 하였으며, 나노여과막 중에서 투과선속이 가장 높은 국내 S사의 NE2540-90 막 모듈을 선정하여 농축 실험을 진행하였다.

(a) Seogwipo groundwater ($V = 53.0$ ppb)



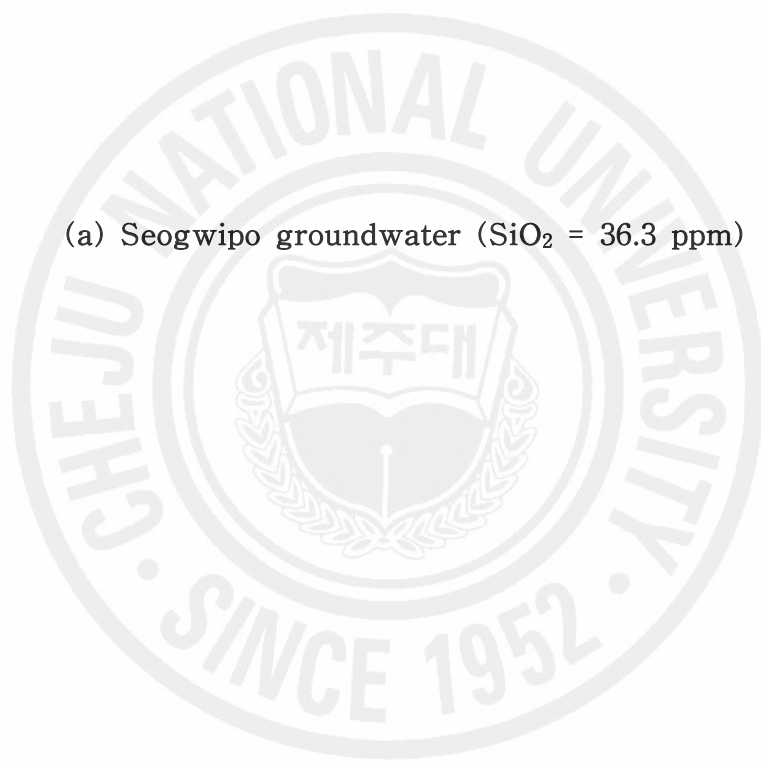
(b) Ayum groundwater ($V = 44.5$ ppb)

(c) Wahyul groundwater (V = 31.8 ppb)



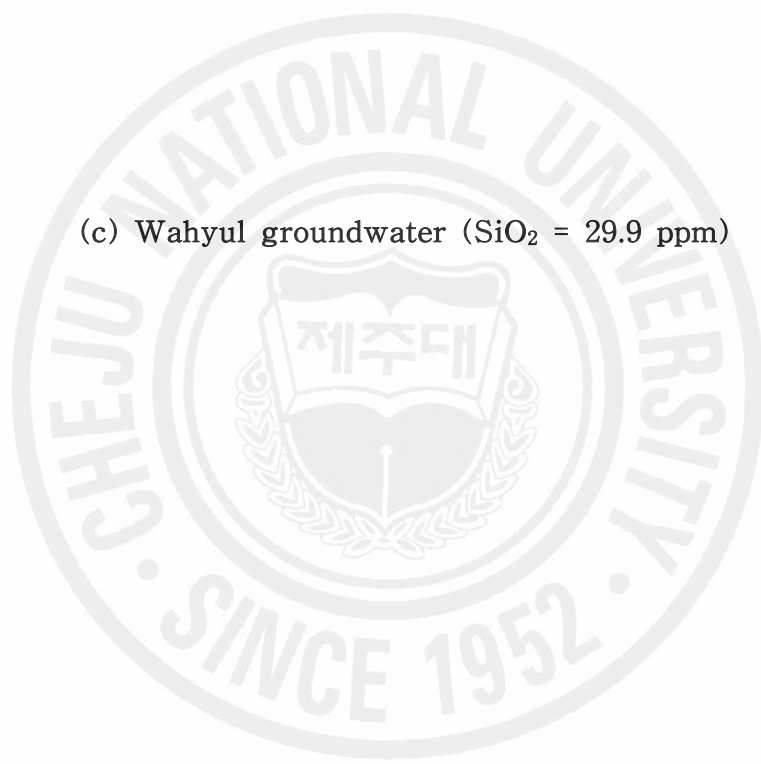
(d) Namwon groundwater (V = 10.2 ppb)

Fig. 8. Rejection coefficient of V (vanadium) as function of transmembrane pressure.



(a) Seogwipo groundwater (SiO₂ = 36.3 ppm)

(b) Ayum groundwater (SiO₂ = 40.6 ppm)



(d) Namwon groundwater ($\text{SiO}_2 = 36.5 \text{ ppm}$)

Fig. 9. Rejection coefficient of SiO_2 as function of transmembrane pressure.

4.4.4. NE2540-90 막모듈의 배제율

바나듐 및 실리카 농축에 있어 가장 적합한 막으로 선정된 국내 S사의 NE2540-90 막 모듈을 사용하여 주요 성분에 대한 배제율을 측정하고 이를 Fig. 10에 나타내었다.

대상 원수의 종류나 막모듈의 종류에 관계 없이 각 용질의 배제율은 막간차압의 증가에 따라 증가 하였으며, 바나듐과 실리카의 배제율은 각각 97%이상 및 98%이상이었다. 바륨 (Ba)의 배제율은 서귀포지역 원수에서는 69.5~74.6%, 어음지역 원수에서는 69.5~74.7%, 와홀지역 원수에서는 63.7~68.5%이었고, 남원지역 원수에서는 60.2~66.5%로서, 다른 용질에 비해 낮은 배제율을 나타내고 있다.

특히 붕소 (B)의 경우 서귀포지역 원수에서는 44.8~63.0%, 어음지역 원수에서는 40.0~63.4%, 와홀지역 원수에서는 50.59~60.5%이었고, 남원지역원수에서는 55.1~74.6%로서 가장 낮은 배제율을 나타내었다. Redondo 등 (2003)과 Georghiou 등 (2007)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 4종류 원수의 pH는 Table 4에 나타낸 바와 같이 거의 8이었다. 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.

서귀포 지역 지하수를 원수로 한 경우 막간차압을 8 kgf/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 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 낮게 측정되는 것은 나노막 공정을 이용 시 큰 장점으로 판단된다.

따라서 대상원수로 선정된 제주지역 지하수에서는 원수 종류에 크게 상관없이 유용성분인 바나듐과 실리카 성분을 나노막 공정을 이용하여 충분히 농축할 수 있을 것으로 판단되었다.

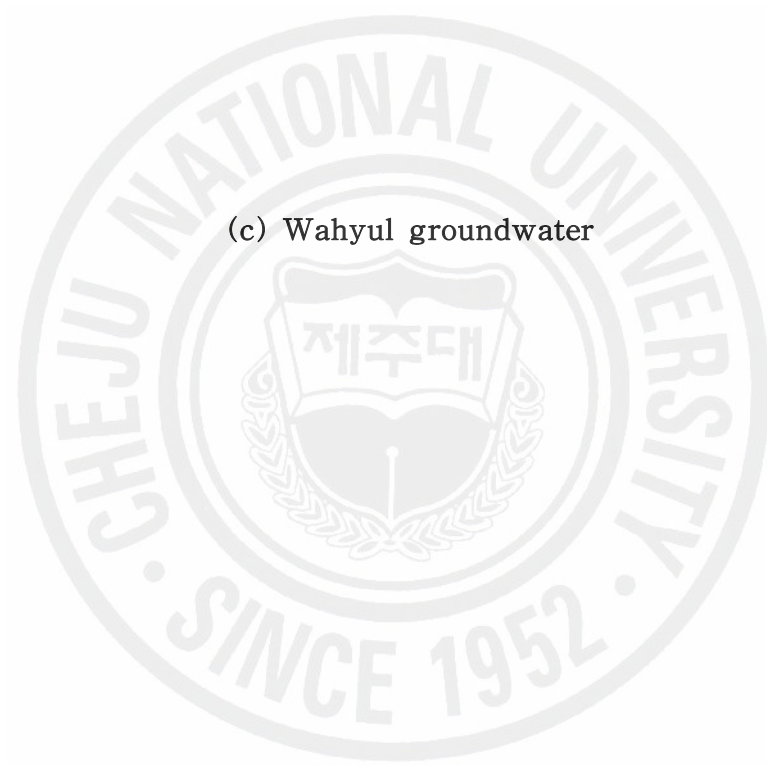
배제율 측정결과를 바탕으로 최적 막으로 선정된 NE2540-90 막을 이용하여 4 종류의 대상원수별 바나듐 및 실리카성분의 목표농도를 설정하였으며, 이에 따른 농축실험을 수행하였다.





(a) Seogwipo groundwater

(b) Ayum groundwater



(c) Wahyul groundwater

(d) Namwon groundwater

Fig. 10. Rejection coefficient of various ingredient as function of transmembrane pressure (NE2540-90).

4.5. 농축실험

기능성 미네랄수의 제조에 있어 가장 적합한 막으로 선정된 국내 S사의 NE2540-90 막 모듈을 사용하여 4 종류의 대상원수별로 바나듐에 대한 목표농도를 설정하고, 이에 따른 농축실험을 수행 하였다.

4.5.1. 서귀포지역 지하수의 농축실험

서귀포지역 원수의 경우 바나듐성분의 함량은 53.0 ppb로서 현재까지 조사된 관정 중 가장 높은 지역이다. 서귀포지역 지하수를 원수로 사용한 경우 바나듐 농도 목표치를 150 ppb로 설정하였고, 이를 위하여 6단으로 농축하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 이때의 회수율은 15%, 막간차압 (TMP)은 4.4 kg/cm²로 하였고, 수온은 25±1℃로 일정하게 유지되도록 하였다.

6단 농축에 따른 바나듐의 농도는 각 단에서 83.0, 104.7, 105.2, 114.3, 128.9 및 148.9 ppb로 각각 증가되어 목표치로 설정한 150 ppb의 바나듐수를 제조할 수 있었다. 또한 각 단의 농축처리에 따른 실리카 농도는 39.6, 45.1, 52.6, 60.3, 76.6 및 85.8 ppm로 증가되어 기능성이 증진되었다.

분리막을 이용한 기능성 미네랄수의 제조에 있어서 고려해야할 가장 중요한 인자는 바나듐 및 실리카와 같은 기능성 미네랄의 농축 여부와 함께 유해물질의 농축 정도와 이의 유해성 여부이다. 그러나 Table 4에 나타낸 바와 같이 서귀포 지역의 지하수를 포함한 제주지역의 대부분의 지하수는 바나듐 및 실리카 등의 기능성 미네랄의 함량은 다소 높으나, 유해성 물질이 거의 검출되지 않는 최적의 원수 조건을 갖고 있다 (문 등, 2007). 따라서 Table 5에 나타낸 바와 같이 회수율을 15%로 하여 6단 처리 (농축률= 2.65배) 하여도 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 ppb로 분석되었다. 그러나 알루미늄의 음용수 수질기준은 200 ppb이하로서 이와 비교하면 농축수의 알루미늄

Table 5. Variations of Seogwipo ground water ingredient during the six-stage membrane separation process (NE2540-90)

Items	pH	Na ppm	Mg ppm	K ppm	SiO ₂ ²⁾ ppm	V ppb	Ca ppm	Zn ppb	Al ppb	Se ppb	Fe ppb	Sr ppb	B ppb	Cr ppb	Mn ppb	Cu ppb	Cd ppb	Ba ppb
water quality standard	5.8~8.5	-	-	-	-	-	-	1,000	200	10	300	-	300	500	-	1,000	5	-
raw water	8.6	26.3±5.98 ¹⁾	6.0±0.5	7.5±0.28	32.1±1.6	53.0±1.3	7.8±0.3	1.5±0.58	10.0 ±1.3	<0.2	2.07±0.2	34.9±1.23	17.8±1.83	1.3±0.46	<0.5	1.0±0.12	<0.5	2.4±0.30
1st concentrate	8.5	29.4±3.28	8.0±0.05	9.3±0.03	39.6±1.1	83±1.9	7.8±0.24	2.9±0.22	16.6±0.78	<0.2	2.1±0.19	37.34±1.3	18.88±0.93	2.0±0.7	<0.5	1.4±0.32	<0.5	2.56±0.34
2nd concentrate	8.6	30.2±4.98	10.1±0.13	11.7±0.05	45.1±0.7	104.7±4.34	12.5±0.04	3.3±0.52	19.7±0.7	<0.2	3.36±0.9	40.28±1.66	19.35±2.75	2.2±0.8	0.7±0.12	3.0±0.11	<0.5	2.95±0.35
3rd concentrate	8.6	39.1±5.64	10.4±0.15	11.8±0.12	52.6±0.9	105.2±4.26	12.7±0.14	4.1±1.5	22.4±0.6	<0.2	4.71±1.00	49.34±0.51	14.95±1.19	2.5±0.9	0.9±0.02	3.4±0.09	<0.5	3.24±0.24
4th concentrate	8.5	46.5±6.98	10.9±0.15	12.7±0.14	60.3±1.2	114.3±6.32	14.0±0.16	4.2±0.9	23.3±0.2	<0.2	5.44±2.67	56.48±0.74	14.48±0.81	2.4±0.6	0.9±0.08	4.0±0.23	<0.5	3.78±0.43
5th concentrate	8.5	49.6±4.10	11.9±0.2	13.9±0.2	76.6±0.70	128.9±2.87	15.5±0.2	5.4±0.3	26.1±0.9	<0.2	5.49±2.16	60.41±1.32	17.62±0.46	2.4±0.66	0.9±0.04	4.8±0.16	<0.5	4.02±0.30
6th concentrate	8.5	52.5±7.43	13.0±0.15	15.4±0.17	85.8±0.87	145.9±4.37	17.2±0.15	5.6±0.53	29.4±1.7	<0.2	7.7±4.57	66.41±1.47	19.31±0.75	3.3±0.6	1.1±0.1	6.0±0.28	<0.5	4.37±0.23
1st permeate	8.7	0.39±0.23	0.1±0.004	0.5±0.0	<0.05	2.0±0.3	0.1±0.00	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	19.64±1.09	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
2nd permeate	8.6	0.48±0.34	0.13±0.008	0.7±0.002	<0.05	1.6±0.18	0.1±0.002	<0.2	2.0±0.24	<0.2	<0.2	<0.2	19.36±0.48	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
3rd permeate	8.3	0.50±0.38	0.19±0.002	0.9±0.012	<0.05	2.6±0.4	0.2±0.01	<0.2	1.8±0.06	<0.2	<0.2	<0.2	19.3±0.781	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
4th permeate	8.5	0.54±0.19	0.19±0.004	1.0±0.01	<0.05	2.4±1.3	0.2±0.007	<0.2	1.8±1.28	<0.2	<0.2	<0.2	17.62±0.46	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
5th permeate	8.3	0.60±0.41	0.26±0.003	1.2±0.007	<0.05	2.8±0.4	0.3±0.008	<0.5	0.9±0.27	<0.2	<0.2	<0.2	17.80±0.88	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
6th permeate	8.3	0.67±0.34	0.31±0.006	1.4±0.006	<0.05	4.6±1.23	0.3±0.008	0.8±0.28	1.2±0.20	<0.2	<0.2	<0.2	19.64±0.56	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2

¹⁾ Values are means ± S.D. (n=3)

²⁾ SiO₂= Si×2.1393.

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 ppb 및 86 ppm인 기능성 미네랄수를 제조할 수 있었다.

4.5.2. 어음지역 지하수의 농축실험

어음지역 지하수의 경우 바나듐성분 함량은 서귀포지역보다 다소 낮은 44.5 ppb로서 바나듐 농도 목표치를 120 ppb로 설정하였다. 이를 위하여 NE2540-90 막 모듈을 사용하여 6단으로 농축하였으며, 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 이때의 운전조건은 서귀포지역 지하수를 원수로 사용한 경우에서와 같이 회수율은 15%로 하였고, 수온은 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지되도록 하였으며, 막간차압(TMP)은 $4.4\sim 4.5\text{ kgf/cm}^2$ 로 하였다.

6단 농축에 따른 바나듐의 농도는 각 단의 농축처리에 따라 52.5, 62.86, 77.6, 87.1, 105.2 및 122.9 ppb로 증가되어 목표치로 설정한 120 ppb를 초과하는 바나듐수를 제조할 수 있었다. 또한 이때 각 단의 농축처리에 따라 실리카의 농도는 46.3, 54.7, 62.0, 73.9, 86.7 및 101.2 ppm로 증가되어 기능성이 증진된 미네랄수를 얻을 수 있었다.

결론적으로 NE2540-90 막 모듈을 사용하여 회수율 15%로 6단 농축하였을 때, 제조된 농축수는 음용수 수질기준을 모두 충분히 만족하면서, 바나듐 및 실리카의 농도를 각각 120 ppb 및 100 ppm으로 농축시킨 기능성 미네랄수를 제조할 수 있었다.

4.5.3. 와흘지역 지하수의 농축실험

와흘지역 지하수의 경우 바나듐성분 함량은 서귀포지역이나 어음지역보다 낮은 평균 30 ppb로서 바나듐 농도 목표치를 90 ppb로 설정하였다. 이를 위하여 회수율을 20%로 하여 5단 처리(농축률= 3.05배)하였으며, 그 결과를 Table 7에 나타내었다. 이때의 막간차압(TMP)은 6 kgf/cm^2 로 하였고, 수온은 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 일정

Table 6. Variations of Ayum groundwater ingredient during the six-stage membrane separation process (NE2540–90)

Items	pH	Na ppm	Mg ppm	K ppm	SiO ₂ ²⁾ ppm	V ppb	Ca ppm	Zn ppb	Al ppb	Se ppb	Fe ppb	Sr ppb	B ppb	Cr ppb	Mn ppb	Cu ppb	Cd ppb	Ba ppb
water quality standard	5.8 ~ 8.5	-	-	-	-	-	-	1,000	200	10	300	-	300	50	-	1,000	5	-
Raw water	8.0	9.8±5.10 ¹⁾	5.1±0.62	4.9±0.89	40.6±0.6	44.5±2.3	3.1±0.5	29.2±5.23	4.9±0.56	<0.2	0.6±0.56	28.9±1.49	16.2±2.09	5.5±0.8	<0.2	ND	ND	1.46±0.34
1st concentrat	7.9	10.05±4.28	4.52 ±0.6	5.16±0.26	46.3±1.54	52.53±4.79	3.75±0.79	61.65±9.97	5.10±0.98	0.65±0.48	0.64±0.35	34.74±1.19	16.20±2.09	6.58±0.32	0.97±0.14	ND	ND	1.57±0.21
2nd concentrat	8.0	12.08±4.44	5.49±0.38	6.19±0.05	54.7±3.24	62.86±2.76	4.54±0.72	67.30±10.89	5.62±0.96	0.73±0.57	0.65±0.78	41.28±1.36	16.29±1.01	8.09±0.16	5.99±0.71	ND	ND	2.05±0.25
3rd concentrat	7.9	14.70±4.12	6.8±59.76	7.31±0.20	62±1.09	77.62±1.53	5.59±0.50	69.15±11.10	6.04±0.64	0.07±0.39	1.27±0.66	48.53±0.48	16.80±0.28	9.70±1.18	1.46±0.30	ND	ND	2.54±0.14
4th concentrat	7.9	17.91±3.88	8.37±0.57	8.19±0.31	73.9±0.79	87.10±2.54	6.56±0.45	78.30±11.31	6.80±0.70	1.17±1.09	1.60±0.99	56.48±0.84	17.51±0.70	11.23±1.51	2.63±0.13	ND	ND	2.78±0.03
5th concentrat	7.8	22.88±1.51	9.13±0.14	9.33±0.49	86.7±0.67	105.52±3.51	7.99±0.14	89.95±13.65	7.45±0.63	0.70±0.38	2.05±0.64	63.48±3.02	19.29±2.42	12.55±0.64	6.91±0.31	ND	ND	3.07±0.10
6th concentrat	7.9	27.19±2.73	11.1±0.17	11.41±0.72	101.2±1.00	122.90±4.11	9.33±0.66	96.80±12.45	7.97±0.47	1.03±0.69	2.48±0.25	76.81±4.47	21.98±4.27	14.77±0.61	3.57±0.31	ND	ND	3.47±0.25
1st permeate	8.0	0.42±0.14	0.06±0.5	0.15±0.61	<0.05	0.43±0.05	0.06±0.3	12.54±11.96	<0.2	0.33±0.46	<0.2	0.32±0.15	8.38±0.37	0.11±0.28	<0.2	ND	ND	<0.2
2nd permeate	8.1	0.46±0.15	0.061±0.07	0.16±0.01	<0.05	0.43±0.09	0.04±0.5	13.39±16.36	<0.2	0.78±1.07	<0.2	0.16±0.13	9.11±0.16	0.09±0.25	<0.2	ND	ND	<0.2
3rd permeate	8.0	0.54±0.16	0.08±0.07	0.20±0.6	<0.05	0.56±0.19	0.08±0.3	7.09±6.05	<0.2	1.76±2.48	<0.2	0.35±0.04	10.40±0.56	0.14±0.30	<0.2	ND	ND	<0.2
4th permeate	7.9	0.66±0.22	0.09±0.95	0.25±0.2	<0.05	0.52±0.04	0.07±0.6	4.12±3.95	<0.2	1.07±1.51	<0.2	0.28±0.11	10.53±0.65	0.15±0.29	<0.2	ND	ND	<0.2
5th permeate	8.1	0.84±0.8	0.06±0.047	0.25±0.6	<0.05	0.62±0.03	0.05±0.3	1.25±0.03	<0.2	0.78±1.09	<0.2	0.28±0.12	12.64±0.67	0.08±0.18	<0.2	ND	ND	<0.2
6th permeate	7.8	0.77±0.3	0.07±0.04	0.25±0.6	<0.05	0.65±0.35	0.04±0.2	3.75±2.62	<0.2	<0.2	<0.2	0.33±0.02	9.68±0.45	0.18±0.18	<0.2	ND	ND	<0.2

¹⁾ Values are means ± S.D. (n=3)

²⁾ SiO₂= Si×2.1393.

Table 7. Variations of Wahyul groundwater ingredient during the five-stage membrane separation process (NE2540-90)

Item	pH	Na ppm	Mg ppm	K ppm	SiO ₂ ²⁾ ppm	V ppb	Ca ppm	Zn ppb	Al ppb	Se ppb	Fe ppb	Sr ppb	B ppb	Cr ppb	Mn ppb	Cu ppb	Cd ppb	Ba ppb
water quality standard	5.8~8.5	-	-	-	-	-	-	1,000	200	10	300	-	300	50	-	1,000	5	
raw water	8.0	13.6±3.21 ¹⁾	1.4±0.16	6.1±0.65	29.0±0.35	31.57±1.24	2.1±0.60	1.47±1.90	8.0±0.76	0.74±0.19	10.20±8.26	26.3±2.26	17.25±1.87	2.13±0.24	0.69±0.16	0.20±0.28	ND	1.16±0.10
1st concentrat	8.1	15.9±2.88	1.69±0.1	7.1±0.29	37.76±0.76	35.56±2.21	2.4±0.52	3.88±2.12	8.4±0.96	0.88±0.25	38.55±23.26	35.57±2.14	15.72±1.45	3.71±0.43	2.65±1.18	0.38±0.29	ND	1.37±0.20
2nd concentrat	8.1	20.1±4.02	2.1±0.18	9.2±0.57	46.4±1.76	45.02±2.25	3.2±0.79	7.25±4.71	9.1±0.85	0.87±0.17	37.23±15.55	47.52±1.74	18.63±0.21	3.77±0.48	1.83±0.64	0.23±0.24	ND	1.55±0.20
3rd concentrat	8.2	22.9±3.21	2.6±0.20	10.3±0.02	57.4±2.34	53.45±0.84	4.1±1.22	7.75±4.57	11.7±1.57	0.89±0.20	43.58±28.18	55.96±1.73	19.17±0.48	4.59±1.00	3.01±1.59	0.54±0.29	ND	1.76±0.18
4th concentrat	8.1	25.9±5.74	3.2±0.31	13.5±0.89	69.9±2.12	69.72±1.60	5.2±1.54	14.93±10.2	14.1±2.64	0.93±0.33	52.10±23.14	70.01±0.79	21.44±0.41	5.55±0.73	4.41±0.59	1.01±0.01	ND	1.98±0.10
5th concentrat	8.1	29.0±9.27	3.2±0.78	11.6±5.67	86.3±0.98	89.15±1.40	4.3±0.97	10.46±5.85	13.5±4.16	0.91±0.09	48.79±42.12	81.56±1.36	22.61±0.39	5.39±2.39	5.11±1.47	1.52±0.17	ND	2.17±0.15
1st permeate	8.0	2.17 ±2.52	0.1±0.21	0.9±1.08	<0.05	2.59±3.79	0.35±0.46	2.23±2.08	0.43±0.85	0.64±0.31	2.97±1.03	0.47±0.27	7.04±0.31	0.34±0.17	0.24±0.28	ND	ND	2.40±0.20
2nd permeate	8.2	0.3 ±0.35	0.02±0.01	0.8±0.11	<0.05	0.62±0.19	0.62±0.88	1.21±1.57	0.09±0.18	0.54±0.20	1.80±1.47	0.24±0.31	9.18±0.36	0.20±0.18	0.19±0.25	ND	ND	<0.2
3rd permeate	8.1	0.29±0.28	0.07±0.01	0.1±0.09	<0.05	0.63±0.17	0.03±0.04	2.09±1.69	0.08±0.17	0.57±0.17	1.62±1.20	0.23±0.26	9.98±0.71	0.23±0.20	0.19±0.22	ND	ND	<0.2
4th permeate	8.1	0.31±0.37	0.07±0.01	0.11±0.12	<0.05	0.66±0.18	0.02±0.03	2.02±1.74	0.10±0.20	0.55±0.18	1.56±1.12	0.23±0.30	11.02±1.05	<0.2	0.19±0.22	ND	ND	<0.2
5th permeate	8.0	0.33 ±0.47	2.04±0.01	0.12±0.16	<0.05	0.70±0.24	0.04±0.06	0.89±1.03	0.05±0.11	0.58±0.17	1.54±1.10	0.24±0.30	12.98±0.80	0.25±0.22	0.20±0.19	ND	ND	<0.2

¹⁾ Values are means ± S.D. (n=3)

²⁾ SiO₂= Si×2.1393.

하게 유지되도록 하였다.

5단 농축에 따른 바나듐의 농도는 각 단의 농축처리에 따라 35.6, 45.0, 53.5, 69.7 및 89.2 ppb로 증가되어 목표치로 설정한 90 ppb에 거의 근접한 바나듐수를 제조할 수 있었다. 또한 이때 각 단의 농축처리에 따라 실리카의 농도는 37.8, 46.4, 57.4, 69.9 및 86.3 ppm으로 증가되었다.

결론적으로 NE2540-90 막 모듈을 사용하여 회수율 20%로 5단 농축하였을 때, 제조된 농축수는 음용수 수질기준을 모두 충분히 만족하면서, 바나듐 및 실리카의 농도를 각각 89.2 ppb 및 86.3 ppm으로 농축시킨 기능성 미네랄수를 제조할 수 있었다.

4.5.4. 남원지역 지하수의 농축실험

어음지역 지하수의 경우는 본 연구에서 선정한 원수 중 바나듐 함량이 가장 낮은 지역의 원수로서 바나듐성분 함량은 10.2 ppb로서 바나듐 농도 목표치를 50 ppb로 설정하였다. 이를 위하여 NE2540-90 막 모듈을 사용하여 6단으로 농축하였으며, 그 결과를 Table 8에 나타내었다. 이때의 운전조건은 서귀포지역 및 어음지역 지하수를 원수로 사용한 경우와 같이 회수율은 15%로 하였고, 수온은 $25\pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지되도록 하였으며, 막간차압은 4.4 kg/cm^2 로 하였다.

6단 농축에 따른 바나듐의 농도는 각 단의 농축처리에 따라 15.5, 21.0, 29.9, 34.8, 41.3 및 50.8 ppb로 증가되어 목표치로 설정한 50 ppb에 거의 근접한 바나듐수를 제조할 수 있었다. 또한 이때 각 단의 농축처리에 따라 실리카의 농도는 36.4, 40.8, 49.7, 58.0, 67.5 및 80.3 ppm으로 증가되었다.

결론적으로 남원지역 원수에서도 NE2540-90 막 모듈을 사용하여 회수율 15%로 6단 농축하였을 때, 제조된 농축수는 음용수 수질기준을 모두 충분히 만족하면서, 바나듐 및 실리카의 농도를 각각 50.8 ppb 및 80.3 ppm으로 농축시킨 기능성 미네랄수를 제조할 수 있었다.

Fig. 11 및 Fig. 12에는 각 원수를 5단 또는 6단 농축하였을 때, 단계별 바나듐 및 실리카의 농도변화를 나타내었다. 서귀포지역, 어음 지역 및 남원지역의 원수를 각각 회수율 15%로 6단 처리하고, 와흘 지역의 원수를 20%로 5단 처리하였

Table 8. Variations of Namwonggroundwater ingredient during the six-stage membrane separation process (NE2540-90)

Item	pH	Na ppm	Mg ppm	K ppm	SiO ₂ ²⁾ ppm	V ppb	Ca ppm	Zn ppb	Al ppb	Se ppb	Fe ppb	Sr ppb	B ppb	Cr ppb	Mn ppb	Cu ppb	Cd ppb	Ba ppb
water quality standard	5.8~8.5	-	-	-	-	-	-	1,000	200	10	300	-	200	50	-	1,000	5	-
Raw water	7.7	8.0±2.21 ¹⁾	2.5±0.7	1.9±0.53	30.37±0.7	10.2±1.1	3.1±0.4	4.3±1.45	1.6±0.9	<0.2	7.8±0.70	24.8±2.34	6.6±1.09	1.2±0.2	<0.2	<0.2	ND	0.8±0.23
1st concentrat	7.8	6.64±0.3	2.43±0.10	3.19±0.11	36.4±2.54	15.5±0.69	2.23±0.06	7.9±0.32	2.23±0.13	<0.2	21.3±6.62	37.4±0.02	9.7±0.17	1.3±0.18	3.2±0.08	<0.2	ND	1.1±0.10
2nd concentrat	7.6	7.29±0.27	2.92±0.11	3.25±0.12	40.8±0.89	21.0±0.50	2.59±0.07	11.7±0.83	3.80±0.97	<0.2	27.3±7.75	43.0±2.50	10.3±0.47	1.6±0.06	3.7±0.10	<0.2	ND	1.4±0.09
3rd concentrat	7.6	8.97±±0.33	3.30±0.10	4.13±0.09	49.7±1.02	29.9±0.79	3.01±0.11	15.2±0.61	4.38±2.12	<0.2	40.1±4.21	48.7±3.5	10.7±0.70	4.1±1.93	5.1±0.18	<0.2	ND	1.6±0.19
4th concentrat	7.7	10.21±0.45	3.81±0.15	4.65±0.21	58.0±0.91	34.8±1.29	3.45±0.13	17.9±0.68	5.02±0.09	0.5±0.09	36.1±1.99	56.5±0.39	11.4±0.72	2.6±0.14	6.1±0.22	<0.2	ND	1.7±0.16
5th concentrat	7.5	11.42±0.40	4.28±0.11	5.28±0.17	67.5±1.67	41.3±1.58	3.88±0.12	19.4±0.71	6.72±1.6	0.6±0.03	47.7±0.8	64.6±0.75	12.3±0.23	3.1±1.05	7.0±0.07	<0.2	ND	2.1±0.14
6th concentrat	7.6	12.85±0.39	4.80±0.18	5.86±0.20	80.3±1.06	50.8±1.53	4.35±0.13	20.6±0.32	8.14±2.18	0.7±0.03	60.5±4.49	74.7±1.26	13.2±0.24	3.6±0.68	8.5±0.23	<0.2	ND	2.3±0.31
1st permeate	7.8	0.36±0.12	<0.02	0.13±0.06	<0.05	0.8±0.04	<0.02	4.9±0.15	<0.2	<0.2	0.4±0.28	0.7±0.01	7.4±0.16	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
2nd permeate	7.8	0.19±0.03	<0.02	0.047±0.04	<0.05	0.6±0.02	<0.02	3.9±0.07	<0.2	<0.2	0.5±0.03	0.5±0.01	4.6±0.20	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
3rd permeate	7.7	0.50±0.21	<0.02	0.195±0.10	<0.05	0.7±0.02	<0.02	3.1±0.05	<0.2	<0.2	0.6±0.10	0.6±0.02	6.8±0.67	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
4th permeate	7.8	0.38±0.02	<0.02	0.138±0.09	<0.05	0.7±0.02	<0.02	2.6±0.06	<0.2	<0.2	0.5±0.07	0.6±0.01	6.5±0.07	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
5th permeate	7.5	0.49±0.22	<0.02	0.184±0.06	<0.05	0.7±0.03	<0.02	2.8±0.10	<0.2	<0.2	0.7±0.08	0.7±0.007	7.4±0.67	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2
6th permeate	7.6	0.51±0.98	<0.02	0.180±0.10	<0.05	0.5±0.05	<0.02	3.1±0.26	<0.2	<0.2	0.7±0.13	0.6±0.99	6.8±0.96	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2

¹⁾ Values are means ± S.D. (n=3)

²⁾ SiO₂= Si×2.1393.



Fig. 11. Variations of vanadium during the six-stage membrane separation processes.



Fig. 12. Variations of silica during the six-stage membrane separation processes.

을 때, 서귀포지역, 어음 지역, 와흘 지역 및 남원 지역 최종 농축수의 바나듐농도는 각각 148.9, 122.9, 89.2 및 50.8 ppb이었고, 실리카 농도는 각각 85.8, 101.2, 86.3 및 80.3 ppm이었다.



V. 결론

본 연구의 목적은 제주도 지하수에 미량으로 함유되어 있으면서 기능성미네랄로 주목받고 있는 바나듐과 실리카를 역삼투 및 나노여과 공정을 이용하여 고농도로 농축하고 이를 부가가치가 큰 기능성 음료로 개발하는데 있다. 이를 위하여 서귀포 지역, 어음 지역, 와흘 지역 및 남원지역의 지하수를 대상으로 XLE-2540, BW30-2540 및 RE2540-TE의 역삼투 막모듈과 NF90-2540 및 NE2540-90의 나노여과 막모듈을 사용하여 분리막 특성 및 농축실험을 실시하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 서귀포, 어음, 와흘 및 남원 지역 관정의 바나듐 농도는 각각 53, 44.5, 31.8 및 10.2 ppb이었으며, 실리카의 농도는 각각 36.3, 40.6, 29.9 및 36.5 ppm이었다.
2. 원수의 투과선속은 BW30-2540 < RE2540-TE < XLE-2540 < NF90-2540 < NE2540-90의 순서로 증가하였으며, 이러한 결과는 4 종류의 원수에서 모두 같았다.
3. 대상 원수의 종류나 막모듈의 종류에 관계 없이 각 용질의 배제율은 막간차압의 증가에 따라 증가 하였다.
4. 투과선속과 배제율에 대한 실험 결과 본 연구에 사용된 역삼투 막모듈과 나노여과 막모듈 중에서 NE2540-90 막모듈이 바나듐과 실리카의 농축에 가장 적합 하였다.
5. 서귀포 지역 지하수를 원수로 하여 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 92.0%, 83.6%, 96.0%, 45.1%, 98.6% 및 69.5%이었다.
6. 서귀포지역, 어음 지역 및 남원지역의 원수를 각각 회수율 15%로 6단 처리하고, 와흘 지역의 원수를 20%로 5단 처리하였을 때, 본 연구에서 설정한 목적치대로 서귀포지역, 어음 지역, 와흘 지역 및 남원 지역 지하수의 바나듐함량을 각각 148.9, 122.9, 89.2 및 50.8 ppb로 농축 가능하였고, 이때 실리카 농도는 각각 85.8, 101.2, 86.3 및 80.3 ppm로 농축되었다.
7. 제조된 농축수의 유해물질 분석 결과 대부분 검출한계 미만 수준이거나 국내

외 먹는 샘물의 수질과 비교해도 손색이 없을 정도로 청정성을 유지하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과가 가능한 이유는 바나듐과 실리카 함량은 다소 높으면서 수질이 매우 청정한 제주지역 지하수의 특징 때문이다

8. 제조된 기능성 미네랄수는 혼합 음료 또는 기능성음료 등 부가가치가 큰 상품으로 개발이 가능할 것으로 판단된다.



VI. 참 고 문 헌

- 문수형, 이호원, 고경수, 2007. 역삼투공정을 이용한 기능성 미네랄 수의 제조, 한국막학회, 2007 춘계학술대회 논문집, pp. 88~89.
- 문수형, 이호원, 고경수, 2007. 나노공정을 이용한 기능성 미네랄 수의 제조, 대한상하수도학회·물환경학회, 2007 공동 추계학술대회 논문집, pp. 848~852.
- 임윤규, 2006. 기능성미네랄 워터 발굴과 상품화연구, 제주지역환경기술개발센터.
- 한국막학회편, 1996. 막분리 기초, 자유아카데미, pp. 6~43.
- 한국막학회편, 1996. 막분리 기초, 자유아카데미, pp. 60~161.
- 환경관리연구소, 2005. 막기술의 응용과 실제. pp. 54~60.
- Bauser, H., Chemiel, H., Stroh, N., Walitza, E., 1986. Control of concentration polarization and fouling of membranes in medical, food and biotechnical applications. *Journal of Membrane Science*, 27, pp. 195~202.
- Calomme, M., Vanden Berghe, D. A., 1997. 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, pp. 153~165.
- Carlisle, E. M., 1986. "Silicon as an essential trace element in animal nutrition," Silicon biochemistry, Evered D., O'Connor M.(eds.), John Wiley & Sons Ltd, Chichester, United Kingdom, pp. 123~139.
- Ding, W., Hasegawa, T., Hosaka, H., Peng, D., 2001. 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), pp. 159~174.
- Ernt, M., Sacshse, A., Steinberg, C. E. W., Jekel, M., 2000. Characterization of the DOC in nanofiltration permeates of a tertiary effluent. *Wat. Res.* 34(11), pp. 2879~2886.
- Fane, A. G., Fell, C. J. D., 1987. A review of fouling and fouling control in ultrafiltration, *Desalination*, 62, pp. 117~136.

- Farmer, V. C., 1986. "Sources and speciation of aluminium and silicon in natural waters," Silicon biochemistry, Evered D., O'Connor, M.(eds.), John Wiley & Sons Ltd., Chichester, United Kingdom, pp. 4~23.
- Flemmer, R. L. C., Buckley, C. A., Groves, G. R., 1982. An analysis of the performance of a spiral-wound ultrafiltration membrane, with a turbulence-promoting net, *Desalination*, 41, pp. 25~32.
- Georghiou, G., Pashalidis, I., 2007, Boron in groundwaters of Nicosia(Cyprus) and its treatment by reverse osmosis, *Desalination*, 215, pp. 104~110.
- Goldfine, A. B., Simonson, D. C., Folli, F., Patti, M. E., Kahn, C. R., 1995. In vivo and in vitro studies of vanadate in human and rodent diabetes mellitus. *Mol Cell Biochem*, 153, pp. 217~231.
- Hott, M., De Pollak, C., Modrowski, D., Marie, P. J., 1993. Short-term effects of organic silicon on trabecular bone in mature ovariectomized rats. *Calcif Tissue Int*, 53, pp. 174~179.
- Kitta, T., Yamada, S., Ishihara, K., Watanabe, N., Ishiyama, H., Watanabe, Y., 2003. Effect of natural vanadium contained Mt. Fuji underground water on human hyperglycemia, *Pharmacometrics*, 64(5/8), pp. 77~84.
- Kroner, K. H., Nissinen, V., 1988. Dynamic filtration of microbial suspensions using an axially rotating filter, *Journal of Membrane Science*, 36, pp. 85~100.
- Laine, J.M., Vial, D., Houllart, P., 2000. Status after 10 years of operation overview of UF technology. *Desalination*, 131, pp. 17~25.
- Mallevalle, J., Odendaal, P. E., Wiesner, M. R., 1996. Water treatment Membrane process. McGraw-Hill, New-York.
- Mulder, M., 1991. Basic principles of membrane technology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London.
- Murkes, J., 1986. Low-shear and high shear cross-flow filtration, *Filtration & Separation*, 23(6), pp 364~365.
- National Academy of Science, 1974. vanadium, Committee on biologic effect of atmospheric pollutants, Washington, DC.

- Nikolov, N. D., Mavrov, V., Nikolova J. D., 1993. Ultrafiltration in a tubular membrane under simultaneous action of pulsating pressures in permeate and feed solution *Journal of Membrane Science.*, 83, pp. 167~172.
- Parados P., Arribas J. I., Hernandez, A., 1993. Flux limiting factors in cross-flow ultrafiltration of invertase through an asymmetric inorganic membrane, *Sep. Sci, Technol.*, 28(10), pp. 1899~1911.
- Redondo, J., Busch, M., De Witte, J., 2003. Boron removal from seawater using FILMTEC™ high rejection membranes, *Desalination*, 156, pp. 229~238.
- Rodgers, V. G. J., Sparks, R. E., 1991. Reduction of membrane fouling in the ultrafiltration of binary protein mixtures, *AIChE Journal*, 37, pp 1517~1528.
- Sakurai, H., Yasui, H., Adachi, Y., 2003. The therapeutic potential of insulin-mimetic vanadium complexes. *Expert Opin Investigating Drugs*, 12(7), pp. 1189~1203.
- Sophie G. G., Sandrine, A., Fatemeh, N., Viviane L. G., Hélène, G., Bruno, V., 2005. Cognitive impairment and composition of drinking water in women: findings of the EPIDOS Study1, 2, 3. *American Journal of Clinical Nutrition*, 81(4), pp. 897~902.
- Sourirajan, S., Matsuura, T., Taketani, Y., 1983. Predictability of RO/NF performance from surface force parameters and data on average pore size and pore size distribution on membrane surface. *Desalination*, 46, pp 455~466.
- Ventresque, C., Gisclon, V., Bablon, G., Chagneau, G., 2000. An outstanding feat of modern technology: the mery-sur-oise nanofiltration treatment plant (340,000m³/d), *Desalination*, 131, pp. 1~16.
- Waters, M. D., Goyer, R. A., Mehlman, M. A., 1977. Toxicology of vanadium. In: *Advances in modern toxicology. Toxicology of trace elements.* 2, pp. 147~189.

Yeh G. Y., Eisenberg D. M., Kaptchuk T. J., Phillips, R. S., 2003. Systematic review of herbs and dietary supplements for glycemic control in diabetes. *Diabetes Care*, 26(4), pp. 1277~1294.



Ⅶ. 부 록

부록 A. 대상원수에 따른 막 종류별 농축실험결과 자료.

부록 B. 각국의 먹는물 수질기준.



부록 A. 대상원수에 따른 막 종류별 농축실험결과 자료.

Table A-1. Variations of Seogwipo groundwater ingredient during the six-stage membrane separation process
(Membrane module: RE2540-TE, Recovery ratio: 15%, TMP: 9 kg_t/cm², Temp.: 25±1℃.)

Items	Be ppb	B ppb	Mg ppm	Al ppb	V ppb	Cr ppb	Mn ppb	Fe ppb	Co ppb	Cu ppb	Zn ppb	Se ppb	Cd ppb	Ce ppb	Pb ppb	U ppb
Raw water	0.34	25.4	6.72	10.06	53.20	1.32	ND	0.04	ND	0.28	5.05	<0.2	ND	ND	<0.2	0.79
1st concentrate	ND	20.2	10.02	20.19	77.57	2.22	ND	<0.5	ND	4.97	1.61	<0.2	ND	ND	<0.2	0.53
2nd concentrate	ND	20.1	11.43	18.25	94.36	3.83	ND	<0.5	ND	ND	3.26	1.22	ND	ND	<0.2	0.65
3rd concentrate	ND	19.2	13.44	24.35	108.81	3.02	ND	<0.5	ND	3.18	4.09	1.20	ND	ND	<0.2	0.80
4th concentrate	ND	21.1	14.53	26.98	122.04	3.11	ND	8.66	ND	3.56	4.39	1.53	ND	ND	<0.2	0.89
5th concentrate	ND	20.5	17.12	33.50	137.67	3.92	ND	0.87	ND	ND	4.99	1.29	ND	ND	<0.2	1.05
6th concentrate	ND	21.5	19.18	37.88	165.09	2.47	ND	0.78	ND	0.15	6.16	1.43	ND	ND	<0.2	1.19
1st permeate	ND	17.3	0.001	1.19	0.79	0.54	ND	ND	ND	ND	<0.2	<0.2	ND	ND	ND	ND
2nd permeate	ND	16.7	0.001	ND	0.95	0.51	ND	ND	ND	ND	<0.2	<0.2	ND	ND	ND	ND
3rd permeate	ND	18.0	0.002	<0.2	<0.2	<0.5	ND	ND	ND	ND	<0.2	<0.2	ND	ND	ND	ND
4th permeate	ND	18.9	0.003	<0.2	<0.2	0.81	ND	ND	ND	ND	<0.2	<0.2	ND	ND	ND	ND
5th permeate	ND	20.2	0.005	<0.2	0.99	1.14	ND	ND	ND	ND	<0.2	<0.2	ND	ND	ND	ND
6th permeate	ND	18.6	0.062	4.59	1.71	0.10	ND	<0.2	ND	ND	<0.2	<0.2	ND	ND	ND	ND

Table A-2. Variations of Seogwipo groundwater ingredient during the six-stage membrane separation process
 (Membrane module: BW30-2540, Recovery ratio: 15%, TMP: 9 kg_f/cm², Temp.: 25±1°C.)

Items	Be ppb	B ppb	Mg ppm	Al ppb	V ppb	Cr ppb	Mn ppb	Fe ppb	Co ppb	Cu ppb	Zn ppb	Se ppb	Cd ppb	Ce ppb	Pb ppb	U ppb
Raw water	0.34	25.4	6.72	10.06	53.20	1.32	ND	0.04	ND	0.28	5.05	<0.2	ND	ND	<0.2	0.79
1st concentrate	0.51	23.89	12.26	14.55	78.84	2.59	43.88	7.58	<0.2	<0.2	9.32	<0.2	ND	ND	ND	0.65
2nd concentrate	0.51	29.00	14.88	19.69	106.99	2.80	38.02	6.45	<0.2	<0.2	11.00	<0.2	ND	ND	ND	0.83
3rd concentrate	0.51	27.05	14.97	20.33	93.20	3.23	38.13	5.58	<0.2	<0.2	9.67	<0.2	ND	ND	ND	1.03
4th concentrate	0.68	30.31	17.10	20.68	111.12	2.60	49.38	8.34	<0.2	1.36	8.63	<0.2	ND	ND	ND	1.14
5th concentrate	0.51	29.15	18.48	24.11	124.48	2.50	47.29	6.93	<0.2	2.57	9.51	<0.2	ND	ND	ND	1.33
6th concentrate	0.69	32.11	21.83	27.57	149.44	4.68	65.80	69.59	<0.2	2.65	13.04	<0.2	ND	ND	ND	1.35
1st permeate	<0.2	6.68	0.008	1.22	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	ND	ND	ND	ND
2nd permeate	<0.2	8.05	0.003	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	ND	ND	ND	ND
3rd permeate	<0.2	8.63	0.007	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	ND	ND	ND	ND
4th permeate	<0.2	7.91	0.005	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	ND	ND	ND	ND
5th permeate	<0.2	11.75	0.004	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	ND	ND	ND	ND
6th permeate	<0.2	10.89	0.001	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	ND	ND	ND	ND

Table A-3. Variations of Ayum groundwater ingredient during the four-stage membrane separation process

(Membrane module: BW30-2540, Recovery ratio: 20%, TMP: 14 kg_f/cm², Temp.: 25±1°C.)

Items	Be ppb	B ppb	V ppb	Cr ppb	Mn ppb	Co ppb	Ni ppb	Ga ppb	As ppb	Se ppb	Sr ppb	Ag ppb	Cd ppb	Ba ppb	Pb ppb	U ppb
Raw water	<0.2	17.68	46.58	6.32	4.1	0.14	0.40	1.29	2.62	0.26	31.36	<0.2	ND	1.42	ND	1.17
1st concentrate	<0.2	19.90	57.90	7.60	8.27	0.17	1.08	1.21	2.89	<0.2	40.12	<0.2	ND	2.22	ND	0.96
2nd concentrate	<0.2	23.39	75.94	9.80	5.58	0.17	1.11	1.24	3.91	<0.2	51.31	<0.2	ND	2.64	ND	0.94
3rd concentrate	<0.2	27.91	99.05	13.37	9.04	0.20	1.47	1.22	4.91	0.49	66.91	<0.2	ND	3.53	ND	0.95
4th concentrate	<0.2	31.73	133.15	16.89	13.54	0.23	1.97	1.23	6.57	1.05	88.80	<0.2	ND	4.41	ND	0.98
1st permeate	<0.2	8.12	1.23	0.34	<0.2	0.10	0.11	1.04	0.22	1.05	0.77	<0.2	ND	<0.2	ND	<0.2
2nd permeate	<0.2	9.00	1.39	0.34	<0.2	<0.2	<0.2	1.03	0.26	<0.2	0.82	<0.2	ND	<0.2	ND	<0.2
3rd permeate	<0.2	10.00	0.98	0.30	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.30	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	ND	<0.2
4th permeate	<0.2	10.07	1.65	0.38	<0.2	<0.2	<0.2	1.02	0.20	0.27	0.99	<0.2	ND	<0.2	ND	<0.2

Table A-4. Variations of Wahyul groundwater ingredient during the four-stage membrane separation process
 (Membrane module: NF90-2540, Recovery ratio: 20%, TMP: 6 kgf/cm², Temp.: 25±1°C.)

Items	Be ppb	B ppb	Mg ppm	Al ppb	K ppm	V ppb	Cr ppb	Mn ppb	Fe ppb	Co ppb	Cu ppb	Zn ppb	Se ppb	Sr ppb	Cd ppb	Ba ppb	Pb ppb
Raw water	0.5	14.6	1.62	6.8	6.54	31.3	1.4	0.6	<0.2	<0.2	ND	<0.2	0.5	32.5	ND	1.1	0.1
1st concentrate	0.3	15.0	2.05	6.3	7.87	37.1	1.7	2.1	5.1	<0.2	ND	0.2	0.6	39.4	ND	1.0	0.1
2nd concentrate	0.3	17.3	2.53	9.4	9.79	46.7	2.6	2.0	6.1	<0.2	ND	1.9	0.5	50.1	ND	1.1	0.1
3rd concentrate	0.3	18.7	3.24	10.7	12.50	60.0	3.2	2.9	4.5	<0.2	ND	5.7	0.7	61.2	ND	1.4	0.1
4th concentrate	0.3	20.0	3.90	12.7	14.94	71.6	4.1	3.6	8.3	<0.2	ND	6.1	0.6	74.1	ND	1.9	0.1
5th concentrate	0.3	21.7	4.82	16.5	18.39	88.9	5.1	4.7	8.6	<0.2	ND	12.2	0.6	90.6	ND	2.4	0.2
1st permeate	<0.2	5.8	0.015	<0.2	0.04	0.6	<0.2	0.5	<0.2	<0.2	ND	3.4	<0.2	0.7	ND	<0.2	<0.2
2nd permeate	<0.2	6.3	0.001	<0.2	0.044	0.5	<0.2	0.4	<0.2	<0.2	ND	0.9	<0.2	0.3	ND	<0.2	<0.2
3rd permeate	<0.2	7.4	0.003	<0.2	0.080	0.5	<0.2	0.4	<0.2	<0.2	ND	0.2	<0.2	0.3	ND	<0.2	<0.2
4th permeate	<0.2	8.9	0.001	<0.2	0.068	0.5	<0.2	0.4	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	0.3	ND	<0.2	<0.2
5th permeate	<0.2	9.7	0.003	<0.2	0.104	0.6	<0.2	0.4	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	0.3	ND	<0.2	<0.2

Table A-5. Variations of Wahyul groundwater ingredient during the four-stage membrane separation process
 (Membrane module: XLE-2540, Recovery ratio: 15%, TMP: 9 kg_f/cm², Temp.: 25±1°C.)

Items	Be ppb	B ppb	Mg ppm	Al ppb	K ppm	V ppb	Cr ppb	Fe ppb	Co ppb	Ni ppb	Cu ppb	Zn ppb	Se ppb	Cd ppb	Ba ppb	Pb ppb
1st concentrate	0.67	19.45	7.93	7.13	9.61	66.28	1.74	1.12	0.68	2.21	ND	2.54	<0.2	ND	3.30	ND
2nd concentrate	0.82	20.48	9.26	10.94	11.24	75.08	1.77	3.82	0.68	3.10	ND	3.54	<0.2	ND	3.80	ND
3rd concentrate	0.67	21.78	10.76	13.98	13.21	87.93	2.07	6.95	0.71	2.79	ND	3.07	<0.2	ND	4.69	ND
4th concentrate	0.67	21.66	12.38	15.34	15.09	98.23	2.27	4.54	0.72	2.39	ND	3.16	<0.2	ND	5.04	ND
5th concentrate	0.73	22.08	13.12	16.61	15.91	101.68	2.10	14.85	0.69	2.66	ND	3.50	<0.2	ND	5.83	ND
6th concentrate	0.67	24.03	14.85	21.07	18.29	123.84	2.82	6.10	0.69	3.29	ND	4.26	<0.2	ND	6.51	ND
7th concentrate	0.67	26.79	15.80	21.86	20.28	120.32	2.86	14.27	0.71	3.06	ND	4.26	<0.2	ND	6.74	ND
1st permeate	<0.2	7.50	0.004	<0.2	0.058	0.96	0.29	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	ND	<0.2	ND
2nd permeate	<0.2	8.93	0.003	<0.2	0.088	0.81	0.28	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	ND	<0.2	ND
3rd permeate	<0.2	9.51	0.001	<0.2	0.101	0.81	0.30	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	ND	<0.2	ND
4th permeate	<0.2	11.29	0.004	<0.2	0.132	0.85	0.28	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	ND	<0.2	ND
5th permeate	<0.2	11.42	0.005	<0.2	0.141	0.78	0.30	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	ND	<0.2	ND
6th permeate	<0.2	11.94	0.032	<0.2	0.203	0.92	0.28	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	ND	<0.2	ND
7th permeate	<0.2	12.81	0.028	<0.2	0.622	1.00	0.28	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	ND	<0.2	ND

Table A-6. Variations of Ayum groundwater ingredient during the four-stage membrane separation process
 (Membrane module: NF90-2540, Recovery ratio: 15%, TMP: 9 kg_f/cm², Temp.: 25±1 °C.)

items	Be	B	Mg	Al	K	V	Cr	Mn	Co	Cu	Zn	Se	Sr	Ni	As	Cd	Ba	Pb	U
	ppb	ppb	ppm	ppb	ppm	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
1st concentrate	<0.2	14.72	4.96	4.41	5.34	55.92	6.81	1.08	<0.2	ND	1.91	<0.2	35.59	0.26	2.83	ND	1.71	ND	0.26
2nd concentrate	<0.2	15.57	5.76	4.94	6.22	64.81	7.98	6.49	<0.2	ND	8.01	<0.2	42.24	0.59	3.14	ND	1.87	ND	0.29
3rd concentrate	<0.2	16.60	6.80	5.59	7.17	76.54	8.87	1.67	<0.2	ND	14.49	<0.2	48.87	0.79	3.38	ND	2.44	ND	0.36
4th concentrate	<0.2	17.01	7.97	6.31	8.41	88.89	10.16	2.72	<0.2	ND	12.39	<0.2	57.07	1.00	3.82	ND	2.76	ND	0.39
5th concentrate	<0.2	17.57	9.23	7.01	9.67	103.03	12.10	7.13	<0.2	ND	13.22	<0.2	65.62	1.21	4.53	ND	3.14	ND	0.36
6th concentrate	<0.2	18.96	11.22	7.63	11.9	125.81	14.34	3.79	<0.2	ND	17.80	<0.2	79.96	1.56	5.65	ND	3.65	ND	0.37
1st permeate	<0.2	8.64	0.024	<0.2	0.153	0.47	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	0.22	<0.2	0.29	ND	<0.2	ND	<0.2
2nd permeate	<0.2	9.22	0.008	<0.2	0.717	0.37	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.24	ND	<0.2	ND	<0.2
3rd permeate	<0.2	10.80	0.030	<0.2	0.201	0.43	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	0.38	<0.2	0.28	ND	<0.2	ND	<0.2
4th permeate	<0.2	10.99	0.024	<0.2	0.261	0.54	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	0.20	<0.2	0.26	ND	<0.2	ND	<0.2
5th permeate	<0.2	12.17	0.031	<0.2	0.287	0.64	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	0.20	<0.2	0.28	ND	<0.2	ND	<0.2
6th permeate		0.852	0.037	<0.2	0.214	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	ND	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.24	ND	<0.2	ND	<0.2

부록 B. 각국의 먹는물 수질기준

표 B-1. 각국의 먹는물 수질기준 항목수

물질명	한국	WHO	미국		일본			영국	호주	캐나다	독일	프랑스	
			1차	2차	법정 항목	감시	쾌적						
미생물	2	2	5	0	2	0	0	6	2	1	4	8	
무기물질	11	16	17	2	9	4	0	17	18	11	17	16	
유 기 물 질	계	17	79	58	-	19	23	1	7	160	56	6	7
	휘발성물질	10	18	20	0	10	4	0	3	18	12	4	1
	농약	5	33	30	0	4	13	0	1	119	39	0	2
	소독부산물	2	19	1	0	5	5	1	1	15	3	0	1
	기타	0	9	6	0	0	1	0	2	8	2	2	3
심미적물질	17	12	1	13	16	0	12	28	17	16	23	25	
방사능물질	0	2	3	0	0	0	0	0	7	6	0	2	
계	47	111(121)	83	15	46	27	13	58	204	90	50	58	

표 B-2. 먹는물 중 유해한 무기물질의 수질기준

물질명	단위	한국	WHO	미국		일본			영국	호주	캐나다	독일	프랑스
				1차	2차	법정 항목	감시	쾌적					
Arsenic	μg/L	50	10	50		10			50	7	50	10	50
Cadmium	μg/L	10	3	5		10			5	2	5	5	5
Chromium	μg/L	50 ⁽⁺⁶⁾	50	100		50 ⁽⁺⁶⁾			50	50	50	50	50
Lead	μg/L	50	10	15		50			50	10	10	40	50
Mercury	μg/L	1	1	2		0.5			1	1	1	1	1
Selenium	μg/L	10	10	50		10			10	10	10	10	10
Antimony	μg/L		5	6			2		10	3		10	10
Barium	μg/L		700	2000					1000	700	1000 ^{P)}	1000	
Beryllium	μg/L			4									10
Boron	μg/L	300	300				200		2000	3000	5000 ^{P)}	1000	
Molybdenum	μg/L		70				70			50			
Nickel	μg/L		20	140			10		50	20		50	50
Silver	μg/L				100				10	100		10	10
Thallium	μg/L			2									
Ammonia (NH ₄ ⁺)	mg/L	0.5	1.5						0.5	(0.5)		0.5	0.5
Nitrite(as NO ₂)	mg/L		3 ^{P)}	1					0.1	3		0.1	0.1
Total NO ₃ / NO ₂	mg/L			10		10							
Nitrate (as NO ₃)	mg/L	10	(50)	10					(50)	(50)	(45)	50	50
Kjeldahl nitrogen	mg/L								1			1	1
Cyanide	mg/L	0	0.07	0.2		0.01			0.05	0.08	0.2	0.05	0.05
Fluoride	mg/L	1.5	1.5	4	2	0.8			1.5	1.5	1.5	1.5	07~15
Iodide	mg/L									0.1			
Asbestos	MF/L			7									
계		11	16	17	2	9	4	0	17	18	11	17	16

^{P)} Provisional guideline value , MF : Million fiber

표 B-3. 먹는물 중 휘발성 화학물질의 수질기준

물 질 명	단위	한국	WHO	미국		일본			영국	호주	캐나다	독일	프랑스
				1차	2차	법정 항목	감시	쾌적					
Organic chloro compound ¹⁾												10	
(Chlorinated Alkanes)													
Carbon tetrachloride	µg/L	2	2	5		2				3	5	3	
Dichloromethane	µg/L	20	20	5		20				4	50		
1,2-Dichloroethane	µg/L		30	5		4				3	5 ^{p)}		
1,1,1-Trichloroethane	µg/L	100	2000 ^{p)}	200		300						25	
1,1,2-Trichloroethane	µg/L			5		6							
(Chlorinated Ethenes)													
Vinyl chloride	µg/L		5	2						0.3			
1,1-Dichloroethene	µg/L	30	30	7		20				30			
1,2-Dichloroethene(cis)	µg/L		50	70		40				60	5		
1,2-Dichloroethene(trans)	µg/L			100			40						
Trichloroethene	µg/L	30	70 ^{p)}	5		30			30	30	50		
Tetrachloroethene	µg/L	10	40	5		10			10	50			50
Tetrachloromethene	µg/L								3			3	
(Aromatic Hydrocarbons)													
Benzene	µg/L	10	10	5		10				1	5		
Toluene	µg/L	700	70 (21-170)	1000			600			800 (25)	(24)		
Xylenes	µg/L	500	50 (27-80)	1000			400			600 (20)	(300)		
Ethylbenzene	µg/L	300	30 (2-30)	70						300 (3)	(2.4)		
Styrene (Chlorinated benzenes)	µg/L		20 (4-300)	100						30 (4)			
Monochlorobenzene	µg/L		30 (10-12)	10						300 (100)	80 (30)		
1,2 - Dichlorobenzene	µg/L		100 (1-10)	600						1500 (1)	200 (3)		
1,3 - Dichlorobenzene	µg/L									(20)			
1,4 - Dichlorobenzene	µg/L		30 (0.3-30)	75			300			40 (0.3)	5 (1)		
Trichlorobenzenes(Total)	µg/L		20 (5-30)	70 (1.24)						30 (5)			
계		10	18	20	0	10	4	0	3	18	12	4	1

¹⁾ 1,1,1- Trichloroethane, Trichloroethene, Tetrachloroethene, Dichloromethane의 합계

^{p)} Provisional guideline value

표 B-4. 먹는물 중 소독부산물의 수질기준

물질명	단위	한국	WHO	미국		일본			영국	호주	캐나다	독일	프랑스
				1차	2차	법정 항목	감시	폐적					
Trihalomethane	μg/L	100		100		100			100	250	350		
Chloroform	μg/L	80	200			60							
Bromodichloromethane	μg/L		60			30							
Dibromochloromethane	μg/L		100			100							
Bromoform	μg/L		100			90							
Chloral hydrate (Trichloroacetaldehyde)	μg/L		10 ^{P)}				30			20			
Dibromoacetonitrile	μg/L		100 ^{P)}										
Dichloroacetonitrile	μg/L		90 ^{P)}				80						
Trichloroacetonitrile	μg/L		1 ^{P)}										
Chloroacetic acid	μg/L									150			
Dichloroacetic acid	μg/L		50 ^{P)}				40			100			
Trichloroacetic acid	μg/L		100 ^{P)}				300			100			
Formaldehyde	μg/L		900				80			500			
Cyanogen chloide (as CN)	μg/L		70							80			
2 - Chlorophenol	μg/L		(01~10)							300(0.1)			
2,4 - Dichlorophenol	μg/L		(03~40)							200(0.3)	900(0.3)		
2,4,6 - Trichlorophenol	μg/L		200(2~300)							20(2)	5(2)		10
Monochloramine	mg/L		3							3(0.5)			
Chlorite	μg/L		200 ^{P)}							0.3			
Bromate	μg/L		25 ^{P)}							20			
Chlorine	mg/L		5(0.6~1.0)					1		5(0.6)			
Chlorine dioxide	mg/L									1(0.4)			
계		2	19	1	0	5	5	1	1	15	3	0	1

^{P)} Provisional guideline value

⁰⁾ Aesthetic guideline value

표 B-5. 먹는물 중 심미적인 영향물질의 수질기준

물질명	단위	한국	WHO	미국		일본			영국	호주	캐나다	독일	프랑스
				1차	2차	법정 항목	감시	쾌적					
Color	도	5	15 TCU		15	5			20	15 HU	15 TCU	0.5m ⁻¹	15 mg/L
Turbidity	NTU	0.5	5			2도		1도	4 (FORM AZN)	5	1(5)	1.5도 (FORM AZN)	2 (Jaksn)
Odor (12℃, 25)	희석도	무취			3	무취		(3 ton)	(-, 3)	무취	무취	(2, 3)	(2, 3)
Taste (12℃, 25)	희석도	무미				무미			(-, 3)	무미	무미		(2, 3)
pH		5.8~ 8.5			6.5~ 8.5	5.8~ 8.6		7.5	5.5~ 9.5	6.5~ 8.5	6.5~ 8.5	6.5~ 9.5	6.5~ 9.0
Temperature	℃								25		15	25	25
Dissolved Oxygen										>85%			
Corrosivity	-				비부 식성			-1~0					
Conductivity (20, 25)	μS/cm								1500			2000	
Alkalinity (France)	mg/L								30 이상				2.5도
Total dissolved solids	mg/L	500	1000		500	500		30~200	1500	500	500		1500
Total Hardness (France)	mg/L	300				300		10~100 이상	60 이상	200			(15이상)
Calcium	mg/L								250			400	-
Magnesium	mg/L								50			50	50
Aluminium	mg/L	0.2	0.2		0.05~ 0.2			0.2	0.2	0.2		0.2	0.2
Copper	mg/L	1	2 ^{P)} (1)	1.3	1	1			3	2(1)	1	3	1
Iron	mg/L	0.3	0.3		0.3	0.3			0.2	0.3	0.3	0.2	0.2
Manganese	mg/L	0.3	0.5 ^{P)} (0.1)		0.05	0.05		0.01	0.05	0.5 (0.1)	0.05	0.05	0.05
Zinc	mg/L	1	3		5	1			5	3	5	5	5
Sodium	mg/L		200			200			150	300 (180)	200	150	150
계		17	12	1	13	16	0	12	28	17	16	23	25

HU: Hazen Unit

^{P)} Provisional guideline value

(¹⁾ Aesthetic guideline value

(계속)

물질명	단위	한국	WHO	미국		일본			영국	호주	캐나다	독일	프랑스
				1차	2차	법정 항목	감시	패적					
Potassium	mg/L								12		12	12	12
Chloride	mg/L	250	250		250	200			400	250	250	250	200
Sulfate	mg/L	200	250		250				250	500(250)	500	240	250
Hydrogen sulfide	mg/L		0.05							0.05	0.05		0
Carbon dioxide	mg/L							20					
Phosphorus(P ₂ O ₅)	mg/L								2.2 (As P)			6.7 (As PQ)	5
Permanganate value	mg/L	10				10		3	5			5	5
Phenols	μg/L	5	-			5			0.5			0.5	0.5
Foaming agent	mg/L	0.5			0.5	0.2			0.2			0.2	0.2
Total organic carbon	mg/L								Normal				
Dissolved hydrocabons (minernal oils)	mg/L								0.01			0.01	0.01
Substance extractable in chloroform	mg/L								1			1	
2-methylisoborneol	μg/L								0.02				
Geosmin	μg/L								0.02				
Permanganate value	mg/L	10				10		3	5			5	5
Phenols	μg/L	5	-			5			0.5			0.5	0.5
Foaming agent	mg/L	0.5			0.5	0.2			0.2			0.2	0.2
Total organic carbon	mg/L								Normal				
Dissolved hydrocabons (minernal oils)	mg/L								0.01			0.01	0.01

(계속)

물질명	단위	한국	WHO	미국		일본			영국	호주	캐나다	독일	프랑스
				1차	2차	법정 항목	감시	쾌적					
Substance extractable in chloroform	mg/L								1			1	
2-methylisoborneol	μg/L							0.02					
Geosmin	μg/L							0.02					

표 B-6. 먹는물중 방사성물질의 수질기준

물 질 명	단위	한국	WHO	미국		일본			영국	호주	캐나다	독일	프랑스
				1차	2차	법정 항목	감시	쾌적					
계		0	2	3	0	0	0	0	7	6	0	2	
Gross alpha activity	bq/L		0.1	15 (pCi/L)					0.1			3 (pCi/L)	
Gross beta activity	mrem/년		1bq/L	4					0.5bq/L			30	
R 226 + R 228	pCi/L			5									
R-226	bq/L								0.5	1			
R 228	bq/L								0.5				
Cesium-137	bq/L										50		
Iodine-131	bq/L										10		
Strontium-90	bq/L										10		
tritium	bq/L										40,000		
Uranium	μg/L			20 ¹⁾					20	100			
Radon	bq/L								100				
Unspecified and β emitter	mSv								0.1				

1) Proposed guideline value

표 B-7. 각국의 먹는물 중 무기물질의 분석법

구분	측정항목	한 국	일 본	미 국
중금속	납 카드뮴	· Flame-AAS	· Flameless-AAS · ICP	· Flame-AAS · Flameless-AAS · ICP · Dithizon법
	동 망간 아연	· Flame-AAS	· Flameless-AAS · ICP	· Flame-AAS · Flameless-AAS · ICP · Bathocuprone법(Cu) · Dithizon법(Zn) · Zincon법(Zn) · Persulfate법(Mn)
	세레늄	· 수소화발생-AAS	· 수소화발생-AAS · Flameless-AAS	· 수소화발생-AAS
	수은	· 환원기화-AAS	· 환원기화-AAS	· 환원기화-AAS
	비소	· 흡광광도법 (DDTC은법)	· 수소화발생-AAS · Flameless-AAS	· Flameless-AAS · 수소화발생-AAS · ICP · DDTC은법
	6가크롬	· 흡광광도법 (디페닐카바지드법)	· Flameless-AAS · ICP	· 디페닐카바지드법
	철	· 흡광광도법 (페난트로린법)	· Flameless-AAS · ICP · 흡광광도법	· Flame-AAS · Flameless-AAS · ICP · 페난트로린법
무기음이온	염소이온	· 침전적정법	· 침전적정법 · IC	· 침전적정법 · Mercuric nitrate법 · Potentiometric법 · Auto-ferricyanide법 · IC
	황산이온	· IE-킬레이트적정법	-	· IC · Gravimetric법(회화) · Gravimetric법(건조) · Auto-Methylen blue법 · Turbidimetric법
	질산성질소	· 흡광광도법 (살리실산나트륨법)	· IC · 흡광광도법	· UV-흡광광도법 · IC · Nitrate electrode법 · Cadmium reduction법 · Auto-Cadmium reduction법 · Titanous Chloride Reduction법(P) · Auto-hydrazine Reduction법
	불소	· 흡광광도법 (란탄,알리자린법)	· IC · 흡광광도법	· Ion selective electrode법 · SPADAS법 · Complexone법 · IC법
	시안	· 흡광광도법 (피리딘피라졸론법)	· 흡광광도법	· Colorimetric법 · Ion selective electrode법
무기양이온	경도	· 킬레이트적정법	· 킬레이트적정법	· EDTA-titrimetric법 · Calculation법
	암모니아성 질소	· 흡광광도법 (인도페놀법)	-	· Phenate법 · Nesslerization법 · Ion selective electrode법 · Auto-Phenate법

* PCV법; Automated Pyrocatechol Violet Method
ECR법; Eriochrome Cyanine R Method

표 B-8. 각국의 먹는물 중 유기물질 분석법

구분	측정항목	한국	일본	미국
휘발성 유기물질	벤젠	· PT-GC법(FID,ECD) · PT-GC법(PID,ELCD) · PT-GC-MS법	· PT-GC-MS법 · HS-GC-MS법 · PT-GC법	· PT-GC-MS법
	디클로로메탄			
	톨루엔			
	에틸벤젠			
	크실렌			
	1,1-디클로로에틸렌			
	사염화탄소	· PT-GC-MS법 · PT-GC법		
	총트리할로메탄	· Ext-GC법(ECD) · Ext-GC-MS법	· PT-GC-MS법 · HS-GC-MS법 · PT-GC법	· Ext-GC법(ECD) · PT-GC-MS법 · PT-GC법
	테트라클로로에틸렌			
	1,1,1-트리클로로에탄			
트리클로로에틸렌				
유기인계 농약	다이아지논	· Ext-GC법(FTD)	· SP-GC-MS법 · SP-GC법(FPD, FTD)	-
	파라티온			
	말라티온			
	페니트로티온			
카바메이트제 농약	카바릴	· GC법(ECD)	-	-
기타	페놀	· 흡광광도법 (4-아미노안티피린법)	· 흡광광도법	· 흡광광도법
	세제	· 흡광광도법 (메틸렌블루법)	· 흡광광도법	· 흡광광도법

표 B-9. 각국의 먹는물 중 심미적인 영향물질의 분석법

측정항목	한국	일본	미국
냄새	· 관능법	· 관능법	· Threshold Odor 법
맛	· 관능법	· 관능법	· Flavor Profile 법
탁도	· 비탁법	· 비색법 · 투과광측정법 · 적분식광전광도계	· Nephelometric 법
색도	· 비색법	· 비색법 · 투과광측정법	· Visual Comparison 법 · Spectrometric 법 · Tristimulus Filter법 · AMDI Tristimulus Filter법(P)
수소이온농도	· 유리전극법	· 유리전극법 · 비색법	· Electrometric 법
증발잔류물	· 중량법	· 중량법	· Total solid dried at 103~105°C
과망간산칼륨 소비량	· 산화환원적정법	· 산화환원적정법	-
잔류염소	· OT법 · DPD법	· OT법 · DPD법 · 전류법	· DPD Colorimetric법 · DPD Ferrous Titrimetric 법 · Syringaldazine(FACTS)법 · Iodometric electrode 법

감사의 글

대학을 졸업하고 계속 직장생활을 하다가 뒤늦게 시작한 대학원 생활을 되돌아 보면....

새로운 시작에 대한 설렘과 두려움, 앞으로 이루어 나가야 할 연구에 대한 열정 등으로 가득했던 지난 2년간을 되돌아보면 저에게는 학문적 깊이와 함께 인간적 성숙을 이룰 수 있는 소중한 시간이었던 것 같습니다.

먼저, 이 작은 결실이 완성되기 까지 밤 늦도록 고민과 열정으로 지도하여 주신 이호원 지도교수님께 머리 숙여 깊이 감사드립니다. 교수님의 학문에 대한 열정과 인품에 대해 많은 것을 보고 배웠으며 교수님의 진심 어린 말씀 하나 하나 새겨가며 최선을 다해 살아가겠습니다.

또한, 부족한 논문이 완성되기 까지 많은 조언과 심사를 맡아주신 현영진 교수님, 이상백 교수님, 목영선 교수님, 김민찬 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

직장생활을 하며 뒤늦게나마 대학원을 다닐 수 있도록 배려하여 주시고 항상 독려하여 주시는 제주특별자치도개발공사 고계추 사장님에게도 진심으로 감사드립니다.

그리고 직장생활을 하는 지난 6년간 부족한 저에게 항상 큰 힘이 되어주시고 적극적으로 후원하여 주시는 고경수 연구소장님이 없었다면 이 결실은 이룰 수 없었을 지 모릅니다. 소장님의 뜻을 가슴 속 깊이 새기며 살아가겠습니다.

본 결실을 맺을 수 있도록 격려와 물심양면으로 도와 주신 강경구 연구개발팀장님과 김용덕 팀장님, 그리고 원준, 정현, 정환, 승신, 주영이를 비롯한 연구소의 모든 식구들에게도 감사의 뜻을 전합니다. 마지막으로 항상 따뜻한 마음으로 도와주신 환경화학공학연구실의 김승건 선생님과 함께해 준 연구실 식구들에게도 감사의 뜻을 전합니다.

끝으로 아낌없는 사랑과 헌신적인 뒷바라지를 해준 사랑하는 아내 성금이와 사랑하는 나의 아들 종혁, 진혁과 함께 완성의 기쁨을 같이하며 앞으로 더 열심히 살아갈 것을 다짐합니다.