

## 저압나노여과에 의한 각종 중금속의 제거 특성

# Rejection Characteristics of Various Heavy Metals by Low-pressure Nanofiltration

오정익\* · 김한승 · 김충환

Oh, Jeong-Ik\* · Kim, Han-Seung · Kim, Chung-Hwan

한국수자원공사 수자원연구원 국제상하수도연구소

(2004년 6월 12일 접수: 2004년 7월 30일 최종수정논문 채택)

### Abstract

Rejection characteristics of heavy metals by nanofiltration membranes were investigated. Nanofiltration membranes rejected heavy metals much better than chloride, sulfate and TOC, of which concentration in synthetic wastewater was higher than that of heavy metals. To consider rejection characteristics of various metals by nanofiltration membranes, separation coefficient, which is the ratio of the metal permeation rate to the chloride ion or TOC permeation rate, was introduced. In spite of different materials and different nominal salt rejection of nanofiltration membrane used, the separation coefficients of metals were nearly the same. In particular, the separation coefficient of arsenic against chloride ion and TOC was larger than any other separation coefficient of heavy metals. These phenomena were observed in the relationship between the molar conductivity and the separation coefficient for heavy metals.

**Key words:** Nanofiltration, heavy metal, Arsenic, separation coefficient, molar conductance

**주제어:** 나노여과, 중금속, 비소, 분리 계수, 몰 전도도

## 1. 서론

역삼투법은 해수담수화를 비롯하여 다양한 수처리에 적용되는 사례가 두드러지게 나타나고 있다 (Slesarenko, 2003; Lee 등, 2001; Kurama 등, 2002; Vandanjon 등, 2002; Linde 등, 1995; Rautenbach 등, 1996). 근래, 복합막 제조기술이 발전함에 따라 저압

으로 운전하면서 높은 투과량을 가지는 역삼투막이 개발되었고, 이들은 나노여과막이라고 불려지면서, 상수 처리 분야에 적용이 유망하다 (Magara, 1996; Nicolaisen, 2003).

나노여과막은 일반적으로 하전막이며, 용질의 하전성, 막과의 상호작용에 의해서 특징 있는 분리특성을 보인다. 그러므로, 나노여과막은 수중에 전기적으로 해리되어 용해성분으로 존재하는 유해 금속류의

\*Corresponding author Tel: +82-42-860-0386, FAX: +82-42-860-0399, E-mail: ojip@yahoo.co.kr (OH, J.I.)

분리 및 제거에 적용 가능한 기술로서, 기대되어지는 기술 중의 하나이기도 하다(Ratanatamskul 등, 1996). 더욱이, 수도수질기준의 강화 및 환경 중의 미량오염 물질에 대한 높은 관심을 계기로, 수중에 미량으로 존재하나 독성이 강한 물질에 대한 대체 기술로서, 나노여과법에 많은 기대가 예상되고 있다(오정익 등, 2002; Agenson 등, 2003).

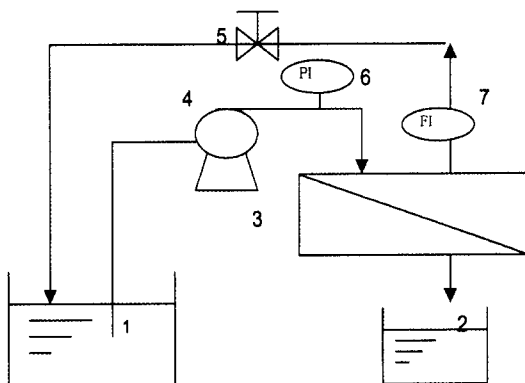
나노여과막의 제거특성은 용액환경에 영향을 받므로, 공존하는 물질의 막을 통과하기 쉬운 정도가 제거대상 물질의 막 투과에 영향을 미치므로 해석이 용이하지 않다. 상수처리에 나노여과막을 이용한 경우에 얻어지는 수질적 검토를 수행함에 있어서, 나노여과막의 일반적 성능 평가법인 공칭 탈염율이 하나의 인자로 간주되어 사용되고 있지만, 본 연구에서 문제시한 중금속의 제거특성간의 관계는 명백하지 않다.

본 연구에서는, 각종 중금속류의 나노여과 공정에서의 제거율을 공칭탈염율 등과 비교검토해서, 각종 중금속의 종류별 제거특성을 조사하고, 평가수법을 개발하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 나노여과막 실험

나노여과 실험은 Fig. 1과 같은 Cross-Flow 실험장



1: Feed solution, 2: Permeate solution, 3: Test cell(C10T), 4: Pump, 5: Pressure regulating valve, 6: Pressure gauge, 7: Flow meter

Fig. 1. Schematic diagram of cross flow nanofiltration experimental set-up.

Table 1. Operational conditions of the nanofiltration experiment

Nanofiltration membrane	NTR7250	NTR7410	ES10
Pressure (MPa)		0.24	
Circulating Flow (L/min)		1.80	
Flux (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /day)	0.18	1.34	0.12
Temperature(°C)		25	

치를 이용하여 행하였다. 막 모듈은 유효면적 60cm<sup>2</sup>의 C-10T모듈(Nitto Denko Co. Ltd.)을 이용하였으며, 8시간 운전을 하는 도중에 3회 나누어서 공급액과 여과액을 채취하였다. 제거율은 3회 채취한 공급액과 여과액 시료의 평균치로부터 계산되었다. 한편, 8시간 운전하는 동안의 공급액과 여과액에서의 중금속 및 염소 이온 등의 농도는 일정하게 변화가 거의 없이 안정된 데이터를 확보할 수 있었다. 더욱이, 여과액은 다시 공급액으로 돌려보냄으로써, 공급액의 성분농도가 증가하지 않았다.

실험에 사용한 나노여과막은 NTR7410(재질: Polysulfones, 공칭탈염율:15%, Nitto Denko Co. Ltd.), NTR7250(재질: polyvinyl alcohol/polyamide, 공칭탈염율: 70%, Nitto Denko Co. Ltd.) 및 ES10(재질: aromatic polyamide, 공칭탈염율: 99.6%, Nitto Denko Co. Ltd.) 이었으며, 운전조건은 Table 1과 같다.

### 2.2. 모의폐수

막의 제거특성에는 용액환경을 고려하기 위해서, 평가용액은 실제의 침출수를 희석하여 염소 이온, 황산이온 및 전유기탄소의 농도를 조절한 용액에 각종 중금속산류를 첨가한 모의 폐수를 나노여과막으로 처리하는 방법론을 취하기로 하였다. 매립지 침출수는 환경 시료 중에 상존하는 적절한 농도의 후민 성분을 함유한 모의폐수로 사용되었으며, 실험 대상 중금속 물질들이 막에 직접 흡착되는 영향을 억제하는 역할을 한다고 보고되어져 있다(Oh 등, 1999). 사용한 침출수 원액은 일본 동경灣 매립지로부터 채수하였고, 차갈색으로 부유물질은 거의 함유하지 않은 상태였다. 나노여과막 실험에 사용한 공급액은, 매립지 침출수 1%와 순수한 물 99%로 구성된 모의폐수에 Cr, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Pb을 각각 0.1mg/L를 첨가하였다. 이는 중금속류의 제거특성을 용이하게 관찰하기

**Table 2.** Components of synthetic wastewater used in nanofiltration experiments

Components of synthetic wastewater	Concentration
Cl <sup>-</sup>	30 mg/L
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.5 mg/L
Na <sup>+</sup>	21 mg/L
Mg <sup>2+</sup>	14 mg/L
Ca <sup>2+</sup>	27 mg/L
K <sup>+</sup>	7.5 mg/L
TOC	3.5 mg/L
pH	7~8
<b>Heavy metals</b>	
(Cr, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Pb)	0.1 mg/L

위해 비교적 높은 농도의 모의폐수를 만들었으며, 그때의 모의폐수에 함유된 화학성분의 분석치를 Table 2에 나타내었다.

### 2.3. 분석방법

#### 2.3.1. ICP/MS에 의한 중금속류의 분석

각종 중금속류는 ICP/MS(유도결합플라즈마질량 분석장치, HP4500)에 의해서 측정했다. 환경 시료 중의 원소분석에 대해서 본 장치를 이용하여 검토한 결과, Cr(m/z=53)은 동위원소비가 이상이 있으므로, <sup>37</sup>Cl<sup>16</sup>O 등의 산화물의 영향을 받을 가능성이 높다고 본다. 비소에 대해서는 As(m/z=75)에 대한, ArCl(m/z=40+35)이 방해하므로, 염소이온의 영향을 염소이온 농도로부터 보정했다. Cu에 대해서는 <sup>63</sup>Cu에 관해서는 <sup>23</sup>Na<sup>40</sup>Ar의 방해가 인정되었기 때문에, <sup>65</sup>Cu로 정량했다. 단, 모의폐수 중의 중금속의 농도는 구경 0.45μm의 셀룰로스아세테이트막의 여액에 대해서 측정했다.

#### 2.3.2. 염소 이온, 황산 이온 및 TOC의 분석

염소이온(Cl<sup>-</sup>) 및 황산이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)은 이온크로마토그래피(IC-7000, Yokogawa)에 의해 측정하였고, TOC(Total Organic Carbon)는 전유기탄소계(TOC5000, Shimadzu)에 의해서 측정했다.

**Table 3.** Rejection of heavy metals, chloride, sulfate and total organic compounds by nanofiltration membranes

	Rejection of solutes by NF membranes		
	NTR7250	NTR7410	ES10
Cr	92.5 %	69.9 %	98.1 %
Fe	90.9 %	81.6 %	92.4 %
Cu	93.1 %	87.0 %	94.6 %
Zn	92.6 %	73.3 %	94.9 %
As	74.6 %	15.2 %	87.0 %
Sn	97.3 %	80.1 %	99.0 %
Pb	93.4 %	87.7 %	98.8 %
Cl <sup>-</sup>	12.8 %	3.5 %	95.1 %
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	78.0 %	9.3 %	99.9 %
TOC	70.4 %	26.2 %	91.7 %

## 3. 결과

### 3.1. 나노여과에 의한 중금속의 제거 특성

각종 중금속, 염소이온, 황산이온, TOC의 나노여과막에 의한 제거율을 Table 3에 나타내었다. 여기서, 제거율은 투과액 농도의 원액 용해성 중금속류의 농도에 대한 비로 평가했다. 모의 폐수 중에는 조정된 염소이온, 황산이온 및 TOC성분의 농도는 각각 30mg/L, 1.5mg/L 및 3.5mg/L로 각종 중금속류의 함유농도에 비해서 다량으로 함유되어 있다.

NTR7250과 NTR7410에 의한 염소 이온의 제거율은 12.8%, 3.5%였고, 막의 공칭탈염율 보다 꽤 낮았다. Solution Diffusion model에 의하면 이온 제거율은 막의 투과량과 회수율에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 즉, 염소 이온의 낮은 제거율은 나노여과막의 운전압력이 0.24MPa의 저압이고, 공칭탈염율의 측정압력과 차이가 크며, 낮은 운전압력에 의한 낮은 투과량이 상대적으로 낮은 이온 제거율이 얻어졌다고 사료된다.

황산이온은 2가 이온이며, 나노여과막에 1가이온인 염소이온에 비해 제거하기 쉽다고 보며, NTR7250과 NTR7410에 의한 황산이온의 제거율은 각각 78%, 9.3%였다. TOC는 NTR7250과 NTR7410에 의한 제거율이 각각 70.4%, 26.2%였다. TOC의 주성분은 휴민질의 차갈색성분으로 사려되며, 분자 사이즈가 염소이온 등 보다 꽤 크기 때문에 제거율이 염소이온보다 크게 되었다고 볼 수 있다.

또, 염소이온 및 황산이온의 제거율에 비해 각종

중금속의 제거율은 대부분 높았다. 하지만, 중금속류 중에도 비소의 제거율은 낮았다. NTR7250막의 경우, 크롬, 철, 동, 아연, 주석, 납 등은 제거율이 거의 90%를 넘고 있음에도 불구하고 비소는 약 75%였다.

고제거율 나노여과막인 ES10의 경우에는, 중금속류 뿐만 아니라 음이온 및 TOC성분 모두가 90%이상의 높은 제거율을 보인다. 하지만, 비소는 다른 중금속류에 비해서 제거율이 낮았다. 즉, ES10에 의한 크롬, 철, 동, 아연, 주석, 납 등은 제거율이 거의 92%를 넘고 있는 데 비해 비소는 87%였다.

#### 4. 고찰

##### 4.1. 각 금속의 염소이온에 대한 분리계수

나노여과막에 의한 주요 제거대상물질로 본 연구에서 선택한 중금속류의 환경 시료에서의 함유 농도는, 환경수의 주요 성분인 나트륨, 칼슘, 염소이온, 황산이온 등과 비교하면 극히 미량으로 존재한다. 그러므로, 모의폐수의 주요 이온성분의 제거특성이 중금속류의 제거특성에는 영향을 미친다고 할 수 있지만, 중금속류의 존재가 막의 성능 자체에 영향을 미치는 정도는 매우 적다고 볼 수 있다. 즉, 염소이온의 제거특성을 실험적으로 알면, 거기에서부터 중금속의 제거특성을 알 수 있는 가능성이 있다.

모의폐수 중에는 염소이온, 황산이온이 고농도로 존재하며, 이들의 분리성능은 이온성 물질의 제거특성을 대표한다고 볼 수 있다. 여기서, 분리계수를 이용하여 각각의 막에 의한 중금속류의 제거를 대표적 물질의 제거율과 비교해, 막의 선택성을 제시할 수 있었다. 각각의 막에 있어서 모의폐수 중에 함유되어 있는 중금속류, 염소이온 및 황산이온성분의 투과율로부터 분리계수를 다음과 같이 정의 하였다.

$$\alpha_i = \frac{\text{금속 } i \text{의 투과율}}{\text{염소이온의 투과율}} = \frac{[\text{금속 } i \text{의 여과액 중의 염소이온의 투과율}]}{[\text{염소이온의 여과액 중의 농도/금속 } i \text{의 원수용액중의 농도}]}$$

$$\beta_i = \frac{\text{금속 } i \text{의 투과율}}{\text{황산이온의 투과율}} = \frac{[\text{금속 } i \text{의 여과액 중의 황산이온의 투과율}]}{[\text{황산이온의 여과액 중의 농도/금속 } i \text{의 원수용액중의 농도}]}$$

$$\frac{\text{농도/금속 } i \text{의 원수용액중의 농도}}{\text{중의 농도/황산이온의 원수용액중의 농도}}$$

본 연구에서는 재질이 다른 3 종류의 나노여과막을 사용했다. NTR7410의 재질은 Polysulfones이며, NTR7250은 재질이 Polyvinyl Alcohol/Polyamide이다. 또, 고제거율 막인 ES10은 재질이 Aromatic Polyamide이다. 각기 나노여과막에 있어서 염소이온 및 황산이온의 제거율에 관한 중금속류의 분리계수를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

NTR7250, NTR7410은 중금속류의 분리계수가 1 이하이며, 중금속류는 염소 이온 혹은 황산이온 성분보다 막을 통과하기 어려운 것을 알 수 있었다. 반면, ES10은 하전 밀도가 크고, 이온성분에 대한 제거율은 높은 막이지만, 중금속류에 대해서는 제거율은 NTR7250 및 NTR7410에 비해 그다지 향상되지 않았기 때문에, 중금속의 염소이온에 대한 분리계수는

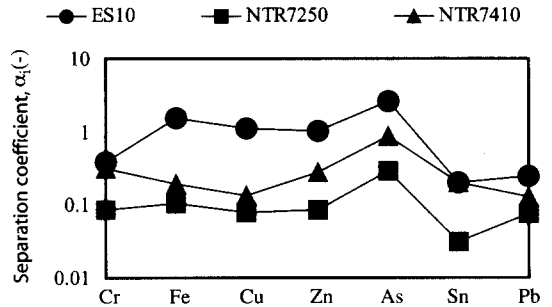


Fig. 2. Comparison of separation coefficients of heavy metals for chloride ion in the case of ES10, NTR7250 and NTR7410.

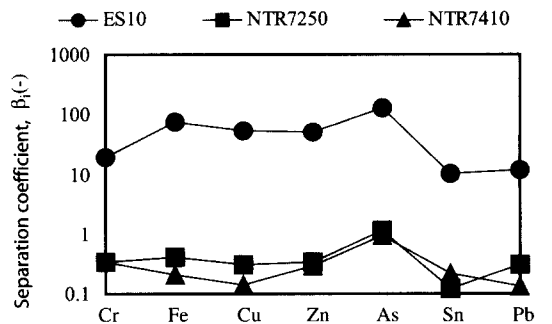


Fig. 3. Comparison of separation coefficients of heavy metals for sulfate ion in the case of ES10, NTR7250 and NTR7410.

높아졌다.

ES10, NTR7250 및 NTR7410에 있어서 비소의 분리계수는 다른 금속류의 분리계수에 비해서 컸다. 이는 본 연구에 이용한 나노여과막의 재질, 공칭탈염율이 다름에도 불구하고 비소는 각각의 막을 통과하기 쉽다는 것을 나타내고 있다.

4.2 이온의 물전도도와 분리계수

수중의 대표적 중금속류의 존재형태의 이온에 대해서 활동하기 쉬운 정도를 나타내는 인자로서 이온 물전도도( $\lambda$ )를 고찰했다. 이온의 물전도도는 이온 이동도( $u$ ), 이온의 하전( $|z|$ ) 및 파라데이상수( $F$ )의 관계로부터 구해졌다. 중금속류 및 염소 이온에 대한 물 전도도는 Table 4에 나타내었다.

염소 이온의 물 전도도를  $\lambda_0$ 로 해서, 염소이온의 물 전도도에 대한 각각의 중금속류의 상대적인 물 전도도 비 ( $\lambda_i/\lambda_0$ )와 막에 의한 제거특성을 나타내는 분리계수 ( $\alpha_i$ )와의 관계를 ES10, NTR7250 및 NTR7410에 있어서 Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내

Table 4. Molar conductances of various metal ions at infinite dilution in water (Hanoi, 1978)

Type of ions	Molar conductance $\lambda_i \cdot 10^4$ (Sm <sup>2</sup> /mol, 25°C)
1/2 CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	85
1/3 Fe <sup>3+</sup>	68.4
1/2 Cu <sup>2+</sup>	53.6
1/2 Zn <sup>2+</sup>	54.3
H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	34
1/2 Pb <sup>2+</sup>	69.5
Cl <sup>-</sup>	76.3

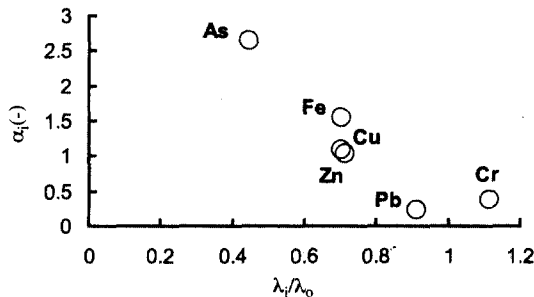


Fig. 4. Separation coefficient  $\alpha_i$  and molar conductance rate  $\lambda_i/\lambda_0$  of heavy metal ions to chloride ion on the rejection of heavy metals by nanofiltration membrane ES10.

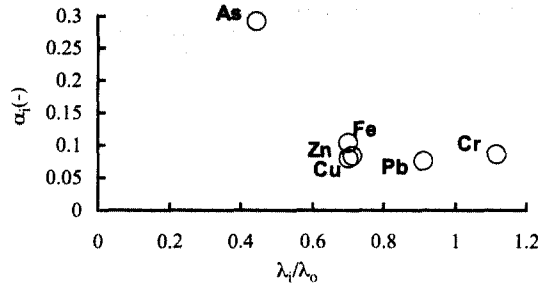


Fig. 5. Separation coefficient  $\alpha_i$  and molar conductance rate  $\lambda_i/\lambda_0$  of heavy metal ions to chloride ion on the rejection of heavy metals by nanofiltration membrane NTR7250.

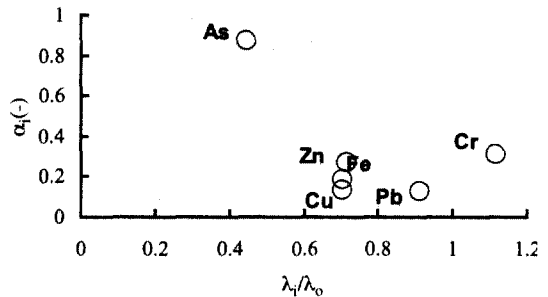


Fig. 6. Separation coefficient  $\alpha_i$  and molar conductance rate  $\lambda_i/\lambda_0$  of heavy metal ions to chloride ion on the rejection of heavy metals by nanofiltration membrane NTR7410.

었다. 물 전도도 비가 큰 중금속 이온일수록, 그 중금속이온의 분리계수가 작게 되는 경향을 얻었다.

한편, 비소는 서로 다른 화학적성질을 나타내는 여러 종류의 유기 무기 비소화합물이 알려져 있다. 일반적으로, 중성부근의 산화적 조건에 있어서, 5가로 안정적으로 존재하나, 환원적 조건이나 생물작용의 조건에서는 쉽게 환원, 알킬화되어, 반응성, 독성이 높은 3가의 비소화합물이 되기 쉽다. Table 5는 각각의 비소 이온의 해리계수를 나타낸다. As(III)은  $pK_{a1}=9.1$ 이며, pH 중성조건에서는 하전을 띄지 않는다. As(V)는  $pK_{a1}=2.19$ 이며, pH중성부근에서는 1 혹은 2가의 음이온으로 존재한다. DMAA에 대해서도 pH중성조건에서 음이온이지만, 산성이 매우 강해질수록, proton화 되어 양이온이 되기 쉽다고 알려져 있다(Ghosh 등, 2004).

As(III)은 이온이지 않은 존재형태를 나타내는 pH 범위에서는 나노여과막에 의한 제거율이 낮았지만,

Table 5. Chemical characteristics of arsenic compounds

Arscopic compounds	Ionization step	Equilibrium constant, pKa	Molecular weight
H <sub>3</sub> AsO <sub>3</sub>	1	9.1	Arsenite[As(III)]: 126
	2	12.1	
	3	13.4	
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	1	2.19	Arsenate[As(V)]: 142
	2	6.94	
	3	11.50	
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> AsO <sub>2</sub> H	1	6.2	DMAA: 138

이온으로 존재하는 높은 pH범위에 갈수록 나노여과막에 의한 제거율은 높았다. 한편, pH3~pH10에 있어서, As(V)는 이온의 형태로 존재하므로, 나노여과에 의한 제거율은 항상 As(III)보다 높았다. 하지만, DMAA의 경우, 하전을 띄지 않는 pH 범위에 있어도 높은 제거율을 나타내는 것으로부터, 크기에 의한 체 효과 등의 하전 이외의 원인에 의해서 DMAA의 제거율이 높아졌다(Oh 등, 2004). 본 나노여과실험에서 모의폐수에 함유된 비소의 경우, 대부분이 As(V)의 형태를 주입하였으므로 As(V)이지만, 나노여과에서 비소의 제거율이 낮아지는 이유중에는, As(V)이외의 제거율이 낮은 화학종의 비소인 AsBe, MMAA, As(III) 및 DMAA 등이 함유되어 있기 때문이라는 사례도 보고 되고 있다(Urase 등, 1998).

## 5. 결론

나노여과막에 의한 중금속류의 제거특성을 조사했다. 나노여과막의 운전압력은 0.24MPa로 일반적인 나노여과막의 운전압력인 1.0MPa에 비해서 극히 낮은 운전압력으로 실험을 수행하였으며, 추후 실제 나노여과 공정에서의 중금속 제거에 대한 운전방향의 설정에도 기초자료가 될 수 있었다. 실험상의 저압운전에서, 오염원인 중금속류에 비해 염소 이온, 황산 이온 및 TOC성분으로 나타내어지는 유기물은 다량 함유되어 있으며 하천수, 지하수 및 산업폐수 등의 주요 구성물질로 간주되어지지만, 이들의 나노여과에 의한 제거율보다 중금속류의 제거율이 높았다. 더욱이, 중금속류의 제거특성을 염소이온 혹은 황산이온에 대한 분리계수를 제안하여 고찰하였다. 나노여과막의 재질, 공칭 탈염율에 상관없이 각종 중금속류의

나노여과에 의한 분리거동은 유사하였으며, 특히 비소의 염소이온 및 TOC에 대한 분리계수가 다른 중금속류의 분리계수에 비해 크며, 비소가 막을 통과하기 쉬운 것을 알 수 있었다. 그러므로, 나노여과를 이용하여 염소이온 등은 통과시키면서, 중금속류 성분은 회수할 수 있는 공정이 가능함이 시사되었다.

## 참고문헌

- 오정익, Uruse, T., Yamamoto, K. (2002) 나노여과막에서의 음이온 오염물질의 이동현상. *대한환경공학회 2002년 계학술연구발표회논문집 1*, pp. 115-116.
- Agenson, K.O., Oh, J.I., Uruse, T. (2003) Retention of a wide variety of organic pollutants by different nanofiltration/reverse osmosis membranes: controlling parameters of process. *Journal of Membrane Science*, **225**, pp. 91-103.
- Ghosh, A. K., Bhattacharyya, P., Pal, R. (2004) Effect of arsenic contamination on microbial biomass and its activities in arsenic contaminated soils of Gangetic West Bengal, India. *Environment International*, **30**, pp. 491-499 (in Japanese).
- Hanai, T. (1978) 막과 이온, 물질이동의 이론과 계산. (주) 화학同人, pp. 35-36 (in Japanese).
- Kurama, H., Poetzschke, J., Haseneder, R. (2002) The application of membrane filtration for the removal of ammonium ions from potable water. *Water Research*, **36**, pp. 2905-2909.
- Lee, S.H., Lueptow R. M. (2001) Reverse osmosis filtration for space mission wastewater: membrane properties and operating conditions. *Journal of Membrane Science*, **182**, pp. 77-90.
- Linde, K., Jonsson, A. S. (1995) Nanofiltration of salt solution and landfill leachate. *Desalination*, **103**, pp. 223-232.
- Magara, Y. (1996) Sound of step to membrane aqua century. *Nitto Technical Report*, **34**, pp. 11-14 (in Japanese).
- Nicolaisen, B. (2003) Developments in membrane technology for

- water treatment. *Desalination*, **153**, pp. 355-360.
- Oh, J.I., Urase, T., Yamamoto, K. (1999) Effect of Membrane Material and Solution Environment On rejection of Arsenic in different Species in Nanofiltration. *Proc. Of annual conference on Japan society of water environment*, **33**, pp. 346.
- Oh, J.I., Lee, S.H., Yamamoto, K. (2004) Relationship between molar volume and rejection of arsenic species in groundwater by low-pressure nanofiltration process. *Journal of Membrane Science*, **234**, pp. 167-175.
- Rautenbach, R., Linn, T. (1996) High pressure reverse osmosis and nanofiltration, a "zero discharge" process combination for treatment of wastewater with severe fouling and scaling potential. *Desalination*, **105**, pp. 63-70.
- Ratanatamskul, C., Yamamoto, K., Urase, T., Ohgaki, S. (1996) Effect of operating conditions on rejection of anionic pollutants in the water environment by nanofiltration especially in very low pressure range. *Water Science and Technology*, **34**, 149-156.
- Slesarenko, V. V. (2003) Electrodialysis and reverse osmosis membrane plants at power stations. *Desalination*, **158**, pp. 311.
- Vandanjon, L., Cros, S., Jaouen, P., Quemeneur, F., Bourseau, P. (2002) Recovery by nanofiltration and reverse osmosis of marine flavours from seafood cooking waters. *Desalination*, **144**, pp. 379-385.
- Urase, T., Yamamoto, K., 오정익 (1998) Element analysis of landfill leachate by using ICP/MS. *Proc. of the 32th annual conference on Japan society of water environment*, **32**, pp. 126.