

이온 몰 전도도가 나노여과막에 의한 폐수 중의 중금속 분리특성에 미치는 영향

Effect of Ionic Molar Conductivity on Separation Characteristics of Heavy Metals by Nanofiltration Membranes in Waste Water

오정익¹Jeong-Ik Oh¹

(Received September 24, 2012 / Revised January 10, 2013 / Accepted January 16, 2013)

요 약

나노여과막은 일반적으로 하전막이며, 용질의 하전성, 막과의 상호작용에 의해서 특징 있는 분리특성을 보인다. 본 연구에서는 나노여과막에 의한 폐수 중의 중금속류의 제거에 미치는 하전특성을 조사했다. 크롬(Cr), 철(Fe), 구리(Cu), 아연(Zn), 비소(As), 주석(Sn), 납(Pb)을 각각 0.1mg/L 첨가한 모의폐수를 제조하여 나노여과막(a)과 나노여과막(b)을 이용하여 운전압력 0.24MPa, 온도 25°C에서 여과실험을 수행하였다. 그 결과, 나노여과막(a)과 나노여과막(b)에 의한 염소 이온의 제거율은 12.8%, 3.5%였고, 황산이온의 제거율은 78%, 9.3%였고 TOC의 제거율은 70.4%, 26.2%이었다. 한편, 중금속의 제거율은 나노여과막(a)의 경우 크롬(Cr) 92.5%, 철(Fe) 90.9%, 구리(Cu) 93.1%, 아연(Zn) 92.6%, 비소(As) 74.6%, 주석(Sn) 97.3%, 납(Pb) 93.4%이었고, 나노여과막(b)의 경우는 크롬(Cr) 69.9%, 철(Fe) 84.6%, 구리(Cu) 87.0%, 아연(Zn) 73.3%, 비소(As) 15.2%, 주석(Sn) 80.1%, 납(Pb) 87.7%이었다. 여기서, 나노여과(a), 나노여과(b)의 경우 공통적으로 크롬, 철, 동, 아연, 주석, 납에 비하여 비소의 제거율은 상대적으로 낮았다. 상기 실험결과에서 폐수 중에 다량 함유되는 염소이온 및 황산이온에 대한 중금속류의 분리계수와 이온성분의 수중에서의 활동정도를 나타내는 인자인 이온 몰 전도도로 해석할 수 있었다. 그 결과, 몰 전도도 비가 큰 중금속 이온일수록, 나노여과막에 의한 중금속 이온의 제거율이 높아지는 경향을 알 수 있었다.

주제어 : 나노여과, 중금속, 분리계수, 몰 전도도, 제거율

ABSTRACT

Generally, the characteristic of nanofiltration membranes were categorized into charged membrane, sieve effect, interaction between membranes and target solutes. This study aims to investigate the effect item of heavy metal separation with view of charge nanofiltration membranes. The experiments of nanofiltration were conducted by nanofiltration set-up with operational pressure of 0.24 MPa at 25°C by using synthetic wastewater containing 0.1mg/L of Cr, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Pb. 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 molar conductivity 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. These phenomena were observed in the relationship between the molar conductivity and the separation coefficient for heavy metals.

Key words: Nanofiltration, Heavy Metal, Separation Coefficient, Molar Conductivity, Rejection

1. 서 론

근래, 복합막 제조기술이 발전함에 따라 저압으로 운전하면서 높은 투과량을 가지며 나노스케일의 미량유해물질의 제

거가 가능한 나노여과막의 상·하폐수 처리 분야에 적용이 유망하다(Brugger et al., 2008, Agenson et al., 2003, Rautenbach and Linn, 1996). 일반적으로 나노여과막은 제거 대상물질의 하전성, 막과 대상물질과의 상호작용, 막의 나노 세공크기에

1) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(교신저자: ojijp@lh.or.kr)

의한 채효과로 분리특성을 보인다(Nicolaisen, 2003).

나노여과막은 수중에 나노스케일의 미량으로 해리용해되어 이온 성분으로 존재하는 중금속, 가스제, 이온염, 유기 화합물 등 유해 미량물질류의 분리 및 제거에 적용 가능한 기술로 기대할 수 있다(Wang et al., 2009; Rahimpour et al., 2010; Slesarenko, 2003; Kurama et al., 2002). 더욱이, 환경기준 강화와 유해 미량물질류에 대한 관심 증대되는 시기에 수중에 미량으로 존재하나 독성이 강한 물질에 대한 대체 기술로서 나노여과막은 유망하다고 예상된다(Oh and Uruse, 2011; Oh and Yamamoto, 2009; Choi, 2011).

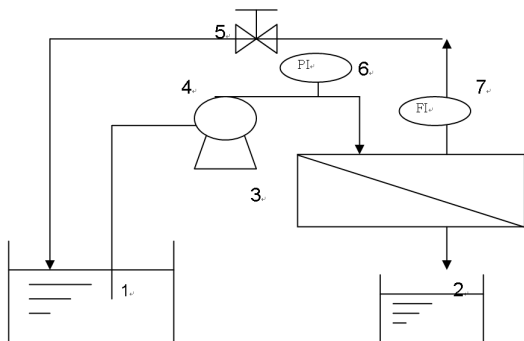
하지만, 나노여과막으로 제거하려는 대상물질이 미량 유해 물질류라고 할 때, 이들은 수중에 이온염 등에 비교하여 상대적으로 미량농도로 존재하므로 그 제거특성에 대한 해석이 어려운 실정이다. 특히, 나노여과막의 하전특성은 이온염 등의 용액환경에 영향을 받으므로, 공존하는 물질의 막을 통과하기 쉬운 정도가 제거대상 물질의 막 투과에 영향을 미치므로 그 상관성 분석은 매우 중요하다. 그러나 나노여과막의 일반적 성능평가는 공칭 탈염율이 하나의 인자로 간주되어 사용되고 있지만, 본 연구에서 문제시한 중금속의 제거 특성간의 관계는 명백하지 않다.

본 연구에서는, 각종 중금속류의 나노여과막에 의한 제거 특성을 실험적으로 조사하고, 용액환경과 막의 하전특성을 비교 평가수법을 제안하는 것을 목적으로 하였다. 이를 통해 중금속류의 나노여과막에 의한 분리 특성의 해석이 용이하게 하고, 막의 선택성을 판단하는 인자로서의 발골 및 활용을 기대하였다.

2. 실험방법

2.1 나노여과 실험

나노여과 실험은 그림 1과 같은 Cross-Flow 실험장치를 이용하여 행하였다. 막 모듈은 유효면적 60cm²의 모듈(Nitto



1. 원수 공급수조 2. 투과 용액 3. 막 모듈, 4. 공급펌프, 5. 압력 조절 밸브, 6. 압력계, 7. 유량계

그림 1. 나노여과 cross-flow 시험장치

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.

나노여과막 제조사에서는 막의 Skin Layer 재질과, 1~3% NaCl 수용액의 1.0MPa 운전압력에서의 공칭 탈염율을 제시하고 있다. 한편, 나노여과막의 하전특성은 처리대상 용액의 이온농도에 따라 상이하게 나타나며 일반적으로 공칭 탈염율이 높을수록 하전특성을 상대적으로 많이 나타내고 있다. 본 연구에서는 나노여과막(a)와 나노여과막(b)를 사용하였다. 나노여과막(a)는 polyvinyl alcohol/polyamide재질로 공칭탈염율 70%이었고, 나노여과막(b)는 polysulfones재질로 공칭탈염율 15%이었다. 실험조건은 운전압력 0.24MPa, 순환유량 1.8 L/min, 운전온도 25°C로 설정하여 격자흐름방식으로 운전하였다. 여기서 투과되는 유량은 나노여과막(a)는 0.18m³/m²/day이고 나노여과막(b)는 1.34m³/m²/day이었다.

2.2 모의폐수

막의 제거특성에는 폐수의 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 한다. 사용한 침출수 원액은 T지역 매립지로부터 채수하였고, 차갈색으로 부유물질은 거의 함유하지 않은 상태였다. 나노여과막 실험에 사용한 공급액은, 매립지 침출수 1%와 순수한 물 99%로 구성된 모의폐수에 크롬(Cr), 철(Fe), 구리(Cu), 아연(Zn), 비소(As), 주석(Sn), 납(Pb)을 각각 0.1±0.05mg/L를 첨가하였다. 이는 중금속류의 제거특성을 용이하게 관찰하기 위해 비교적 높은 농도의 모의폐수를 만들었으며, 그 때의 모의폐수에 함유된 화학성분의 분석치를 표 1에 나타내었다. 한편, 중금속의 종류는 여러 가지가 있으나

표 1. 모의 폐수에 함유된 화학물질별 농도

함유 물질	농도	주입 물질	농도
염소이온(Cl ⁻)	30mg/L	크롬(Cr)	0.1±0.05mg/L
황산이온(SO ₄ ²⁻)	1.5mg/L	철(Fe)	0.1±0.05mg/L
TOC(Total Organic Carbon)	3.5mg/L	구리(Cu)	0.1±0.05mg/L
pH	7~8	아연(Zn)	0.1±0.05mg/L
		비소(As)	0.1±0.05mg/L
		주석(Sn)	0.1±0.05mg/L
		납(Pb)	0.1±0.05mg/L

산업폐수, 상수, 하수 등의 처리에서 미량이면서 독성이 높은 중금속으로 상기 7가지 물질을 선정하여 수행하였다.

2.3 분석방법

2.3.1 ICP/MS에 의한 중금속류의 분석

각종 중금속류는 ICP/MS(유도결합플라즈마질량분석장치, H사)에 의해서 측정했다. 환경 시료 중의 원소분석에 대해서 본 장치를 이용하여 검토한 결과, 크롬(Cr : $m/z=53$)은 동위 원소비가 이상이 있으므로, $^{37}\text{Cl}^{16}\text{O}$ 등의 산화물의 영향을 받을 가능성이 높다고 본다. 비소에 대해서는 비소($\text{As} : m/z=75$)에 대한, 아르곤염소($\text{ArCl} : m/z=40+35$)이 방해하므로, 염소 이온의 영향을 염소이온 농도로부터 보정했다. Cu에 대해서는 ^{63}Cu 에 관해서는 $^{23}\text{Na}^{40}\text{Ar}$ 의 방해가 인정되었기 때문에, ^{65}Cu 로 정량했다. 단, 모의폐수 중의 중금속의 농도는 구경 $0.45\mu\text{m}$ 의 셀룰로사아세이트막의 여액에 대해서 측정했다.

2.3.2 염소 이온, 황산 이온 및 TOC의 분석

염소이온(Cl^-) 및 황산이온(SO_4^{2-})은 이온크로마토그래피(IC-7000, Y사)에 의해 측정하였고, TOC(Total Organic Carbon)는 전유기탄소계(TOC 5000, S사)에 의해서 측정했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제거 특성

각종 중금속, 염소이온, 황산이온, TOC의 모의폐수 중의 함유농도 및 나노여과막에 의한 제거율을 그림 2에 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/L 로 각종 중금속류의 함유농도에 비해서 다량으로

함유되어 있다.

나노여과막(a)와 나노여과막(b)에 의한 염소 이온의 제거율은 12.8%, 3.5%였고, 막의 공칭탈염율 보다 꽤 낮았다. Solution Diffusion model에 의하면 이온 제거율은 flux와 회수율에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 저압력차에 의한 투과량 감소는 낮은 이온 제거율로 귀결된다. 즉, 염소 이온의 낮은 제거율은 나노여과막의 운전압력이 0.24MPa 의 저압이고, 공칭탈염율의 측정압력과 큰 차이 때문이라고 사료된다.

황산이온은 2가 이온이며, 나노여과막에 1가이온인 염소 이온에 비해 제거하기 쉽다고 보며, 나노여과막(a)와 나노여과막(b)에 의한 황산이온의 제거율은 각각 78%, 9.3%였다. TOC는 나노여과막(a)와 나노여과막(b)에 의한 제거율이 각각 70.4%, 26.2%였다. TOC의 주성분은 휴민질의 차 갈색성분으로 사려 되며, 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. 나노여과막(a)의 경우, 크롬, 철, 동, 아연, 주석, 납 등은 제거율이 거의 90%를 초과하고 있음에도 불구하고 비소는 약 75%였다. 나노여과막(b)의 경우, 크롬, 철, 동, 아연, 주석, 납 등은 제거율이 거의 70%를 초과하고 있음에도 불구하고 비소는 약 15%였다.

3.2 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

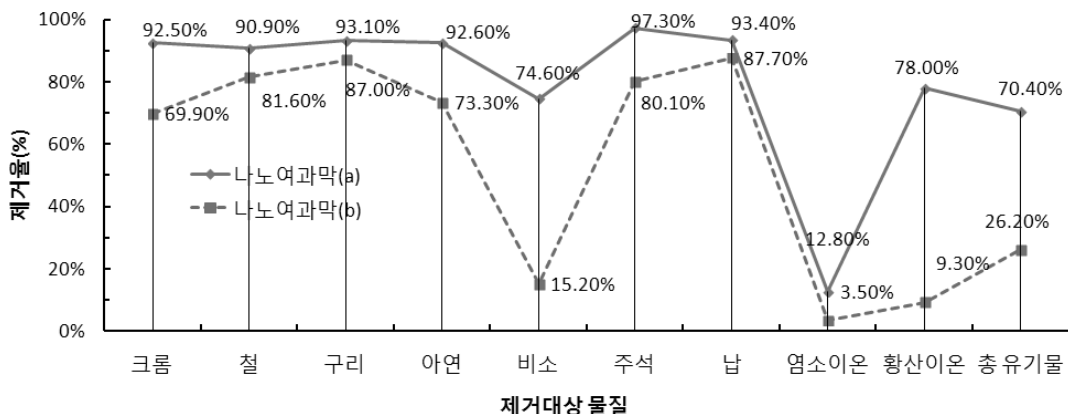


그림 2. 나노여과막에 의한 중금속류, 염소, 황산이온, 총 유기물의 제거율

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 정의하였다.

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

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

α_i 가 크다는 것은, 그 중금속이 염소이온보다 막을 좀 더 통과하기 쉬운 것을 의미하며, 만약, 하전 및 확산의 영향을 무시하여 고려하면, 막에 어떠한 친화성을 염소이온보다 많이 갖고 있다고 볼 수 있다. 또한, β_i 가 크다는 것은, 그 중금속이 황산이온보다 막을 좀 더 통과하기 쉬운 것을 의미하며, 만약, 하전 및 확산의 영향을 무시하여 고려하면, 막에 어떠한 친화성을 염소이온보다 많이 갖고 있다고 볼 수 있다.

그림 3에서 나노여과막(a)에서 염소이온 및 황산이온의 투과율에 관한 중금속의 분리계수를 나타내었다. 나노여과막(a)의 제거대상 중금속류의 염소이온에 대한 분리계수(α_i)를 비교해 보면, 크롬 0.99, 철 0.10, 구리 0.08, 아연 0.08, 비소 0.29, 주석 0.03, 납 0.08이었다. 중금속 종류별 분리계수(α_i)의 크기를 비교하면 비소가 0.29로 가장 높은 값을 나타내었고, 크롬 0.99, 철 0.10, 구리, 아연, 납은 0.08로 동일하였으며, 주석 0.03으로 가장 낮은 값을 나타내었다. 분리계수(α_i)가 1보다 낮으면 염소 이온보다 제거대상 중금속류가 나노여과(a)를 통과하기 어려우며 제거율이 높게 나온다고 볼 수 있다. 나노여과(a)의 제거대상 중금속류의 분리계수는 1.0 보다 낮았으며, 이는 중금속류는 염소 이온보다 막을 통과하기 어려우므로 높은 제거율을 확보할 수 있었다. 한편, 나노여과(a)의 제거대상 중금속류의 황산이온에 대한 분리계수(β_i)를

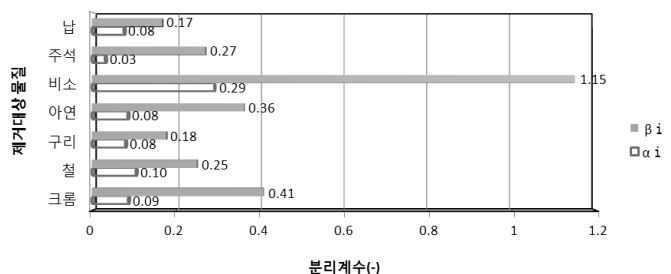


그림 3. 나노여과막(a)의 α_i 및 β_i 의 거동

비교해 보면, 크롬 0.41, 철 0.25, 구리 0.18, 아연 0.36, 비소 1.15, 주석 0.27, 납 0.17이었다. 중금속 종류별 분리계수(β_i)의 크기를 비교하면 비소가 1.15로 가장 높은 값을 나타내었고, 크롬 0.41, 아연 0.36, 주석 0.27, 철 0.25, 구리 0.18, 납 0.17로 나타내었다. 분리계수(β_i)가 1보다 낮으면 황산 이온보다 제거대상 중금속류는 나노여과(a)를 통과하기 어려우며 제거율이 높게 나온다고 볼 수 있다. 나노여과(a)의 제거대상 중금속류의 분리계수는 비소를 제외하고 대부분이 1.0 보다 낮았으며, 이는 중금속류는 황산이온 성분보다 막을 통과하기 어려우므로 높은 제거율을 확보할 수 있었다. 그러므로 실험대상 용액 환경에서 다량의 농도로 함유하는 염소 또는 황산이온 같은 경우에 비해 중금속류는 높은 제거율을 나타내고 있으며, 분리계수(α_i , β_i)를 이용하여 나노여과(a)에 의한 중금속의 제거현상을 해석할 수 있었다.

그림 4에서 나노여과막(b)에서 염소이온 및 황산이온의 투과율에 관한 중금속의 분리계수를 나타내었다. 나노여과(b)의 제거대상 중금속류의 염소이온에 대한 분리계수(α_i)를 비교해 보면, 크롬 0.31, 철 0.19, 구리 0.13, 아연 0.28, 비소 0.88, 주석 0.21, 납 0.13이었다. 중금속 종류별 분리계수(α_i)의 크기를 비교하면 비소가 0.88로 가장 높은 값을 나타내었고, 크롬 0.31, 아연 0.28, 철 0.19, 구리, 납은 0.13로 동일하였고 주석 0.21로 가장 낮은 값을 나타내었다. 분리계수(α_i)가 1보다 낮으면 염소 이온보다 제거대상 중금속류가 나노여과(a)를 통과하기 어려우며 제거율이 높게 나온다고 볼 수 있다. 나노여과막(b)의 제거대상 중금속류의 분리계수(α_i)는 1.0 보다 낮았으며, 이는 중금속류는 염소 이온보다 막을 통과하기 어려우므로 높은 제거율을 확보할 수 있었다. 한편, 나노여과막(b)의 제거대상 중금속류의 황산이온에 대한 분리계수(β_i)를 비교해 보면, 크롬 0.25, 철 0.31, 구리 0.23, 아연 0.25, 비소 0.86, 주석 0.09, 납 0.22이었다. 중금속 종류별 분리계수(β_i)의 크기를 비교하면 비소가 0.86로 가장 높은 값을 나타내었고, 철 0.31, 크롬 0.25, 아연 0.25, 구리 0.23, 납 0.22, 주석 0.09로 나타내었다. 분리계수(β_i)가 1보다 낮으면 황산 이온보다 제거대상 중금속류는 나노여과막(b)를 통과하기 어려우며 제거율이 높게 나온다고 볼 수 있다. 나노여과막(b)의

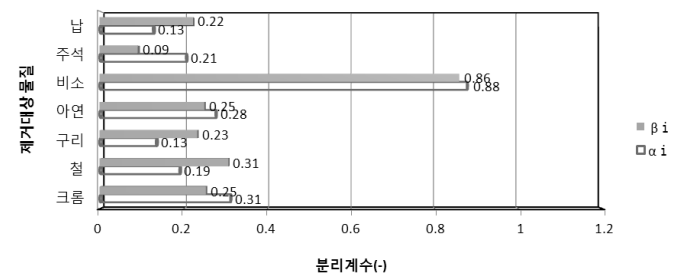


그림 4. 나노여과막(b)의 α_i 및 β_i 의 거동

표 2. 중금속류 및 염소이온에 대한 물 전도도

이온형태	물전도도 [$\lambda \times 10^4 (\text{Sm}^2/\text{mol}, 25^\circ\text{C})$]
$1/2\text{CrO}_4^{2-}$	85
$1/3\text{Fe}^{3+}$	68.4
$1/2\text{Cu}^{2+}$	53.6
$1/2\text{Zn}^{2+}$	54.3
H_2AsO_4^-	34
$1/2\text{Pb}^{2+}$	69.5

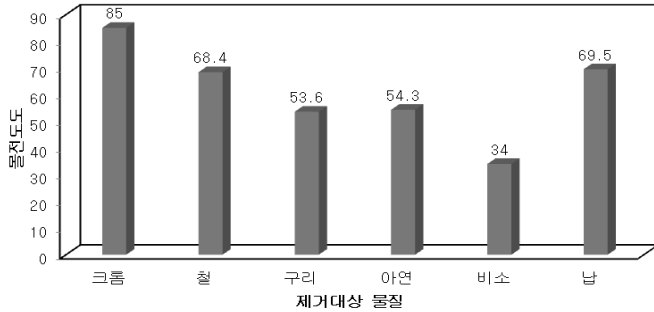


그림 5. 제거대상 중금속 종류별 물전도도 비교
(단위: $\lambda \times 10^4 (\text{Sm}^2/\text{mol}, 25^\circ\text{C})$)

제거대상 중금속류의 분리계수는 비소를 제외하고 대부분이 1.0 보다 낮았으며, 이는 중금속류는 황산이온 성분보다 막을 통과하기 어려우므로 높은 제거율을 확보할 수 있었다. 그러므로 실험대상 용액 환경에서 다량의 농도로 함유하는 염소 또는 황산이온 같은 경우에 비해 중금속류는 높은 제거율을 나타내고 있으며, 분리계수(α_i, β_i)를 이용하여 나노여과막(b)에 의한 중금속의 제거현상을 해석할 수 있었다.

나노여과막(a), 나노여과막(b)의 염소 및 황산이온의 분리계수 α_i 와 β_i 를 비교하면 중금속의 종류별 제거유형이 유사하였다. 실험대상 용액에서 중금속류에 비교하여 상대적으로 높은 농도로 존재하는 염소, 황산이온보다 분리계수가 낮게 나오는 경향을 나타내며, 제거효율이 높게 나온다고 볼 수 있었다. 특히, 중금속의 제거유형도 막의 종류에 따라 절대값은 상이하지만, 상대적으로 분리계수 α_i 와 β_i 는 비소>>크롬>(아연, 철, 구리, 주석, 납)의 순으로 결과를 얻었다. 그러므로 기존의 나노여과막을 선택함에 사용되는 나노여과막의 재질, 공칭탈염율 뿐만 아니라 본 연구에서 제시한 분리계수 α_i 와 β_i 는 중금속류의 나노여과막에 의한 분리 특성의 해석이 용이하게 하고, 막의 선택성을 판단하는 인자로 활용이 가능하다고 볼 수 있었다.

3.3 이온의 물전도도

나노여과막에 의한 중금속 제거 영향인자로 이온의 크기에 의한 상대적인 제거가 아닌 이온특성을 고려한 하전효과를 예측하기 위해 수중의 대표적 중금속류의 존재형태의 이온에 대해서 활동하기 쉬운 정도를 나타내는 인자로서 이온

몰전도도(λ)를 고찰했다. 이온의 몰전도도는 이온 이동도(u), 이온의 하전(z) 및 파라데이상수(F)의 관계로부터 구해졌다. 중금속류 및 염소 이온에 대한 물 전도도는 표 2에 나타내었다(Oh et al., 2004, Ceankoplis, 1992).

여기서, 중금속 이온의 종류별 몰전도도를 비교하여 그림 5에 나타내었다. 그 결과, 크롬 $85 \times 10^4 \text{Sm}^2/\text{mol}$, 철 $68.4 \times 10^4 \text{Sm}^2/\text{mol}$, 구리 $53.6 \times 10^4 \text{Sm}^2/\text{mol}$, 아연 $54.3 \times 10^4 \text{Sm}^2/\text{mol}$, 비소 $34 \times 10^4 \text{Sm}^2/\text{mol}$, 납 $69.5 \times 10^4 \text{Sm}^2/\text{mol}$ 이었으며 몰전도도 값이 크롬이 가장 높았으며 납, 철, 아연, 구리의 순으로 낮아졌고 최종적으로는 비소가 가장 낮았다.

나노여과막(a), 나노여과막(b)의 염소, 황산이온에 대한 중금속류의 분리계수 α_i 와 β_i 는 비소가 가장 높았고 크롬, 아연, 철, 구리, 주석, 납은 상대적으로 낮은 결과를 얻었다. 즉, 크롬, 아연, 철, 구리, 주석, 납의 경우는 물 전도도비가 비소에 비하여 약 1.5배 이상의 물질이었다. 물 전도도 비가 큰 중금속 이온일수록, 그 중금속 이온의 분리계수는 낮아지는 경향을 나타내었다. 그러므로 나노여과막에 의한 중금속 제거 영향인자로 이온의 크기에 의한 상대적인 제거가 아닌 이온 특성을 고려한 하전효과와 같은 경우는 제거 대상 중금속 이온의 물 전도도를 비교하여 제거특성을 예측가능하다고 볼 수 있었다.

4. 결론

나노여과막에 의한 중금속류의 제거특성을 조사했다. 중금속류 등에 비해 다량 함유되어 있는 염소 이온, 황산이온과 같은 성분은 하천수, 지하수 및 산업폐수 등의 주요 구성물질로 간주되어지지만, 이들의 나노여과에 의한 제거율보다 중금속류의 제거율이 높았다. 또, 중금속류의 제거특성을 염소 이온 혹은 황산이온에 대한 분리계수를 이용하여 평가할 수 있었다. 나노여과막의 재질, 공칭 탈염율에 상관없이 각종 중금속류의 나노여과에 의한 분리거동은 유사하였다. 이에 대하여 분리계수 α_i 와 β_i 가 대부분 1.0 보다 낮은 값을 나타내었고 중금속류는 염소, 황산이온보다 막을 통과하기 어려운 것을 예측할 수 있었다. 그러므로, 나노여과는 염소, 황산이온은 통과시키면서, 중금속류 성분은 회수할 수 있는 공정이 가능함이 시사되며, 기존의 나노여과막의 재질, 공칭 탈염율 이외에 제거대상 중금속류의 분리계수와 물 전도도를 이용하여 막의 선택성 및 하전효과를 예측 가능하였다.

참고문헌

1. Agenson, K. O., J. I. Oh, T. Urase (2003), "Retention of a wide variety of organic pollutants by different nanofiltration/reverse osmosis membranes: controlling parameters of process", *Journal*

- of Membrane Science*, 225: 91~103.
2. Bruggen, B., M. Mänttari, M. Nyström (2008), "Drawbacks of applying nanofiltration and how to avoid them: A review", *Separation and Purification Technology*, 63(2): 251~263.
 3. Ceankoplis, C. J. (1992), *Transport process and unit operation*, University of Minnesota, 2nd edition.
 4. Choi, Y. H., J. H. Kweon (2011), "Investigation of al-hydroxide precipitate fouling on the nanofiltration membrane system with coagulation pretreatment: effect of inorganic compound, organic compound, and their combination", *Environmental Engineering Research*, 16(3): 149~157.
 5. Kurama, H., J. Poetzschke, R. Haseneder (2002), "The application of membrane filtration for the removal of ammonium ions from potable water", *Water Research*, 36: 2905~2909.
 6. Nicolaisen, B. (2003), "Developments in membrane technology for water treatment", *Desalination*, 153: 355~360.
 7. Oh, J. I., K. Yamamoto (2009), "Development of transport parameters affecting on the removal of micro organic compounds such as disinfection by-products and pharmaceutically active compounds by low-pressure nanofiltration", *Environmental Engineering Research*, 14(2): 126~133.
 8. Oh, J. I., S. H. Lee, K. Yamamoto (2004), "Relationship between molar volume and rejection of arsenic species in ground water by low-pressure nanofiltration process", *Journal of Membrane Science*, 234: 167~175.
 9. Oh, J. I., T. Urase (2011), "Evaluation of the effective charge density on low pressure nanofiltration with the separation characteristics of monovalent and divalent solutes in the production of drinking water", *Environmental Engineering Research*, 16(1): 29~34.
 10. Rahimpour, A., M. Jahanshahi, N. Mortazavian, S. S. Madaeni, Y. Mansourpanah (2010), "Preparation and characterization of asymmetric polyethersulfone and thin-film composite polyamide nanofiltration membranes for water softening", *Applied Surface Science*, 256(6): 1657~1663.
 11. Rautenbach, R., T. Linn (1996), "High pressure reverse osmosis and nanofiltration, a "zero discharge" process combination for treatment of wastewater with severe fouling and scaling potential", *Desalination*, 105: 63~70.
 12. Slesarenko, V. V. (2003), "Electrodialysis and reverse osmosis membrane plants at power stations", *Desalination*, 158: 311.
 13. Wang, X. L., W. J. Shang, D. X. Wang, L. Wu, C. H. Tu (2009), "Characterization and applications of nanofiltration membranes: State of the art", *Desalination*, 236(1-3): 316~326.