

RO 및 NF막에서의 부식질에 의한 Fouling 및 미량오염물질의 제거

NOM fouling and Removal of Micro-pollutants in RO and NF Membrane processes

왕창근^{1,*} · 차준철¹ · 이용현¹ · 김수동² · 류주환²

Wang, Chang-Keun^{1,*} · Cha, Joon-Chul¹ · Lee, Yong-Hyun¹ · Kim, Su-Dong² · Liu, Ju-Whan²

1 충남대학교 환경공학과
2 충남대학교 고분자공학과

(2003년 11월 4일 접수: 2003년 12월 30일 최종수정논문 채택)

Abstract

This study investigated the phenomena of membrane fouling by NOM and the effect of the fouling on removal of micro-pollutants. NOM has a great effect on decline of permeate flux. Permeate flow rate was reduced by 88% in RO and 34.8% in NF for 323hr operation period. Removal rate of UV₂₅₄ is 87.4% in RO and 78.5% in NF and removal rate of DOC is 42.7% in RO and 32.9% in NF for 2mg/l humic acid. Removal efficiency of the micro-pollutants by the RO and NF membranes fouled by humic acid was mostly lower than that by the new membrane. The concentration polarization which affects the flux and the rejection was thought to occur in the active layer of the membrane, as the membrane was getting fouled.

Key words: Membrane, NOM, Fouling, Micro-pollutants

주제어: 분리막, 자연유기물질, 파울링, 미량오염물질

1. 서론

산업의 급속한 발전에 의한 환경오염으로 인하여 상수원 오염 등의 문제점이 대두되고 있고 미량유기 오염물질의 검출 기술이 발달함에 따라 농약 등의 미량유해물질, 발암성 및 독성 의심이 있는 물질이 음용수에도 잔류되어져 있는 것으로 밝혀지고 있다. 또한 지금까지 안전하다고 생각하였던 수돗물에서도 바 이러스가 검출되었다는 발표에 의해 음용수에 대한

국민들의 불안감이 커져가고 있는 실정이다. 따라서 안전한 물의 공급이라는 측면에서 기존의 응집·침전·여과를 기본으로 하는 기존 정수처리 기술로는 제거가 어려운 용존성 유기물 등을 제거하기 위하여 오존처리, 활성탄 처리 등의 고도처리기술이 도입되고 있다. 그러나 이 경우 목표물질에 따라 다른 정수 프로세스를 가지게 되므로 수처리 시설을 복잡하게 하는 경향이 있으므로 비교적 신뢰성 있고, 간편하면서도 목표수질을 만족할 수 있는 정수 프로세스 도입

*Corresponding author Tel.: 042-821-6676, Fax: 042-822-5610, E-mail: ckwang@cnu.ac.kr (Wang, C.K.)

이 고려되고 있으며 그 중의 하나가 막분리 기술이다. 그러나 막분리 공정의 가장 큰 문제점은 막분리가 진행됨에 따라 발생하는 파울링에 의해 플럭스가 감소되어 경제성이 떨어진다는 것이다. 플럭스 감소는 막 오염에 의하여 발생하는데 막의 오염은 탁도를 유발하는 현탁물질과 같은 입자성 물질의 축적, 유기물의 축적, 막 표면에서의 균의 증식, 막 표면이나 내부에서의 철·망간 등의 산화 등에 의해서 일어난다. 따라서 막 오염의 원인 오염물질을 파악할 수 있게 되면 정수처리공정에서 주로 제어해야 할 오염물질과 그 방법을 찾을 수 있어, 막 오염을 최소화하는 방법을 찾을 수 있고 결국 막 공정의 경제성을 향상시킬 수 있는 것이다(김, 1995).

막 오염물질은 주로 미세 입자와 유기물질이 있는데, 정수처리에서는 수중의 부식질을 포함한 NOM(자연유기물질)이 주된 원인 물질로써, 이들은 응집, 비가역적 흡착, 중금속류와의 complex 형성, 오존 등에 의한 산화 과정에서의 initiator, promoter, inhibitor로써의 역할 등 다양한 단위공정과 반응 기작에 참여하며, 소독부산물인 트리할로메탄 형성에 기여한다. 또한 NOM은 근원에 따라 그 특성이 다양하고 많은 작용기를 함유한 중~고분자 물질의 혼합 특성이 막분리 공정에 영향을 미친다. 이러한 NOM에 의한 파울링은 처리수량 감소, 막 손상 등의 문제 외에 미량오염물질(Micro-pollutants)의 제거 기작에 영향을 미치므로 NOM과 미량오염물질 특성과의 상관관계 연구가 막분리 공정의 효율향상에 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 막분리 공정에서 NOM에 의한 파울링과 미량오염물질 제거와의 관계를 분석함으로써 NOM/미량오염물질 제거 기작을 규명하고자 한다(김, 1995; Cho et al., 1999; Hong and Elimelech, 1997; Snoeyink et al., 1980).

2. 실험장치 및 방법

본 실험은 RO 및 NF막에서 NOM에 의한 파울링 특성과 미량오염물질의 제거 정도를 알아보고자 humic acid 2mg/l 농도로 조제한 원수로 각각의 막에서 323시간 운전하여 막을 파울링 시킨 후 그 특성을 분석하였고, 파울링 된 막과 새 막으로 1차 증류수에 선택된 미량오염물질을 조제한 후 운전하여 그 제거

정도를 알아보았다. 이때 압력은 RO막 최대 4bar, NF막 최대 7bar를 유지하였다.

2.1. RO, NF막 모듈

실험에 사용된 막은 (주)새한의 polyamide로 만들어진 나권형 모듈이며, 막 표면은 (-)전하를 띄고 있고, 유효 막면적 0.446m²(= 4.8ft²), 분획 분자량은 NF막은 200 정도, RO막은 100 정도이다. 25°C, recovery 10~20%, feed TDS 250ppm, 60psig, 60gpd에서 막의 condition test 결과 RO막은 96%, NF막은 93%로 나타났다.

2.2. 실험 원수

본 연구에서는 자연유기물질의 대표적 물질로써 Aldrich 사의 humic acid를 사용하였다. 실험에 사용한 humic acid의 분자량은 2,000~500,000 범위를 가지며, 그 구성 성분은 polysaccharide, protein, simple phenol, chelated metal ions 등이며 crude lignite로 제조한 물질이다. 이 humic acid를 탈염소된 수돗물에 2mg/l로 조제하여 막의 파울링을 위한 원수로 사용하였고 제거율 비교를 위한 실험에서는 1차 증류수를 사용하여 실험을 수행하였다.

Table 1은 각 실험원수의 특성이다.

2.3. 파울링 특성 및 미량오염물질의 분석

막 파울링이 진행되는 것을 알아보기 위해 운전 기간 동안의 처리수량, 처리수의 DOC, UV₂₅₄ 변화를 측정하였다. UV₂₅₄ 흡광도는 일본-JASCO사의 UV-spectrometer를 이용하여 측정하였고, DOC 농도는 미국-KFX사의 DC-180 TOC Analyzer를 사용하여 분석하였다. 또한 새 막과 파울링 된 막표면의 특성을 비교 분석하기 위해 Nicolet Magna-560 FTIR

Table 1. Water quality of source water

Parameter	수도수 + Humic Acid(2mg/l)	1차 증류수
pH	7.4~7.7	6.7~7.1
Alkalinity(mg/l as CaCO ₃)	54~57	18~24
UV ₂₅₄ Abs.(cm ⁻¹)	0.08~0.082	0.035~0.038
Turbidity(NTU)	1.5~2	0~0.2
DOC(mg/l)	1.1~1.21	0.05~0.1
전기전도도(μs/cm)	125~127	25~37

Table 2. Analytical condition of micro-pollutants by GC/MSD

Column	HP-5MS(low-bleed 5% phenyl methyl siloxane) 30m length - 0.2mm ID - 0.25 μm film thickness			
Injection Condition		Column Temp. program(°C)		
Head Pressure 37kpa		Initial Temp : 50°C		
splitless		Initial Time : 1.00 min		
Carrier gas flow rate : 0.8ml/min			Rate(°C/min)	Final Temp(°C)
Injection sample volume : 1 μl		level 1	6	120
Carrier Gas : Helium		level 2	8	210
Linear velocity : 32.4cm/s		level 3	8	280
Detector	MSD Qualitative Analysis : SCAN Mode Quantitative Analysis : SIM Mode			

Spectrometer를 이용하여 FTIR 스펙트럼을 얻었고, Hitachi사의 전자현미경 모델 S5500-N을 사용하여 SEM 사진을 찍었다. 실험에 사용된 미량오염물질은 환경 호르몬의 EPA 분류 중 확정된(known) 영역에서 아트라진과 린데인을, 가능성 있는(probable) 영역에서 파라치온, 카드뮴, 납을 선택하였고, 상수 원수 중 존재 가능성이 높은 미량오염물질로 페놀과 LAS를 선택하였다. 선택된 각 오염물질의 농도는 아트라진, 린데인 0.005mg/l, 파라치온 0.1mg/l, 카드뮴 0.02mg/l, 납 0.1mg/l, 페놀 0.01mg/l, LAS 1.0mg/l로 각각 먹는물 수질기준 또는 미국 WHO 권장기준의 2배 정도의 농도로 조제하여 실험을 수행하였다.

아트라진, 린데인, 파라치온의 분석은 Standard Method 「6630 B. Liquid-Liquid Extraction Gas Chromatograph Method 1」에 준하여 전처리 한 후 HP 5890 GC/HP 5972 MS로 분석하였고, ICP/MSD (ELAN 6000)를 이용하여 카드뮴과 납을 분석하였다.

Table 2는 GC/MS의 분석조건을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. NOM 파울링의 특성

Fig. 1은 humic acid 2mg/l로 운전한 RO, NF막의 처리수량 변화를 나타낸 것이다. RO막과 NF막 모두 처리수량의 변화가 거의 없는 시점, 즉 파울링이 한계에 이른 시점(323시간)까지 운전시켰다. RO, NF막 모두 비슷한 경향으로 초기 120시간 이내에 처리

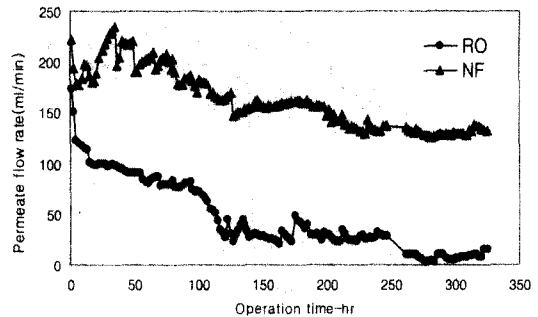


Fig. 1. Variation of permeate flow rate for 2mg/l humic acid.

수량의 급격한 감소가 일어났으며 그 이후에는 처리수량의 감소가 완만하게 나타났다. 따라서 막의 파울링은 운전 초기에 대부분 발생함을 알 수 있었다. RO막에서의 처리수량 감소율은 88% (190ml/min 20ml/min), NF막에서는 34.8% (230ml/min 150ml/min)를 보였고, RO막의 평균 처리유량은 47.34ml/min, NF막은 162.8ml/min로 나타났다.

Fig. 2는 UV₂₅₄ Abs.의 변화를 나타냈다. UV₂₅₄ Abs.는 난분해성 유기물의 동향을 파악할 수 있는 간접지표이다. 323시간 운전 후 UV₂₅₄ Abs.의 RO막 평균 제거율은 87.4%, NF막은 78.5%로 나타났다.

Fig. 3은 DOC변화를 나타냈다. RO막의 DOC 제거율은 평균 42.7%, NF막 제거율은 32.9%를 나타냈다. DOC의 RO, NF막 제거율 차이가 9.8%로 UV₂₅₄의 제거율 차이와 비슷했다.

Fig. 4에 나타낸 UV₂₅₄/DOC 비는 원수에 포함되어 있는 유기물의 친수성 정도를 간접적으로 나타낼 수

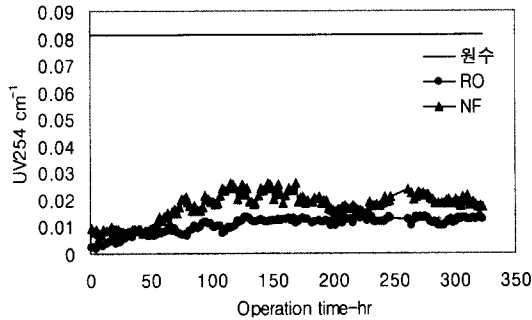


Fig. 2. Removal of UV₂₅₄ Abs. for 2mg/l humic acid.

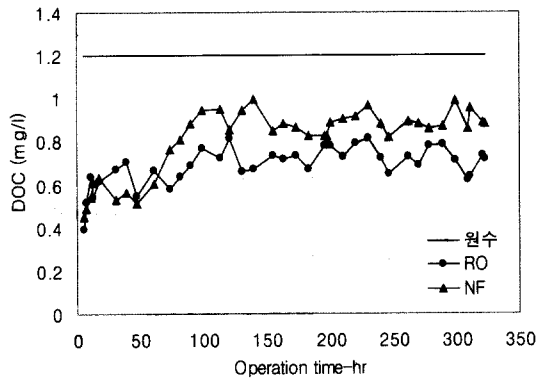


Fig. 3. Removal of DOC for 2mg/l humic acid.

있다. UV₂₅₄/DOC값이 클수록 상대적으로 소수성이 큰 것으로 보는데, 이 경우의 UV₂₅₄/DOC는 6.8로 소수성이 비교적 크게 나타났다. 따라서 실험에 사용된 막의 표면이 polyamide 코팅처리가 되어 있어 소수성을 띄므로 Fig. 2와 Fig. 3에서와 같이 상대적으로 소수성분의 지표인 UV₂₅₄의 배제율이 DOC에 비해 높게 나타난 것으로 판단할 수 있다(강, 1999; Hong et al., 1997).

측정된 DOC 농도를 기초로 막 모듈 내에 축적되는 탄소의 양을 물질수지로 구해보았다(Table 3). 원수, 처리수 및 농축수의 DOC 농도를 기초로 탄소에 대한 물질수지를 구해본 결과 RO막에서는 축적량이 690.2mgC로 35.5%의 막 모듈내 축적률을 보였고 NF막은 축적량이 1632.9mgC로 33.1%의 축적률을 보였다. 이는 원수에 포함되어 있는 humic acid의 상당부분이 막모듈 내에 축적되었고, 이것이 Fig. 1~4에서 나타난 바와 같은 처리수량의 감소, UV₂₅₄ Abs. 및

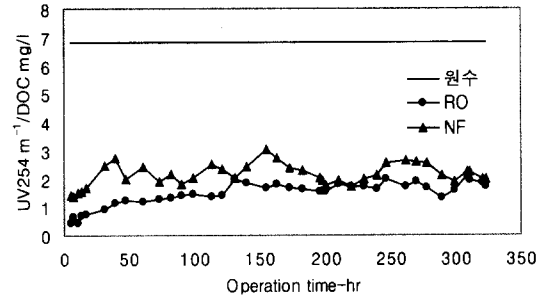


Fig. 4. Removal of UV₂₅₄/DOC for 2mg/l humic acid.

Table 3. Mass balance(carbon)

	RO 막	NF 막
총 유입 수량(l)	1618.9	4113.4
평균 원수 농도(mg C/L)	1.2	1.2
평균 처리수 수량(ml/min)	47.4	162.9
평균 처리수 농도(mg C/L)	0.7	0.8
막모듈내 축적량(mg C)	690.2	1632.9
유입 Mass 당 막모듈내 축적률(%)	35.5%	33.1%

DOC 제거율의 감소를 야기 시켰음을 나타내고 있는 것이다.

3.2. 막 표면의 특성 변화

Fig. 5에 새 RO, NF막의 표면을 25,000배를 SEM 사진으로 찍어 나타내었다. SEM 사진에서 어두운 부분은 polysulfone 재질의 지지체이고 밝은 부분이 막 표면을 나타내는데, 이 부분에 어두운 부분과는 다른 성분이 코팅되어 있음을 볼 수 있다. 또한 RO막의 코팅 성분이 NF막에 비해 두꺼운 것을 확인할 수 있다. 표면에 코팅된 성분을 ATR-FTIR 스펙트럼으로 분석할 수 있는데 새막의 표면을 분석한 ATR-FTIR 스펙트럼을 Fig. 6에 나타내었다. RO막과 NF막의 주요 IR 피크는 동일하고 두 막 모두 polyamide로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그러나 NF막은 amide의 주된 피크가 aliphatic polyamide의 C=O(1619cm⁻¹)와 N-H(1585cm⁻¹)이고, 여기에 소량의 phenyl group(1540cm⁻¹)이 존재하고 있는데 반해, RO막은 주된 피크가 aromatic polyamide의 N-H(1609cm⁻¹)이고, 여기에 소량의 aliphatic polyamide의 C=O(1619cm⁻¹)와 N-H(1585cm⁻¹)가 존재함을 확인할 수 있다.

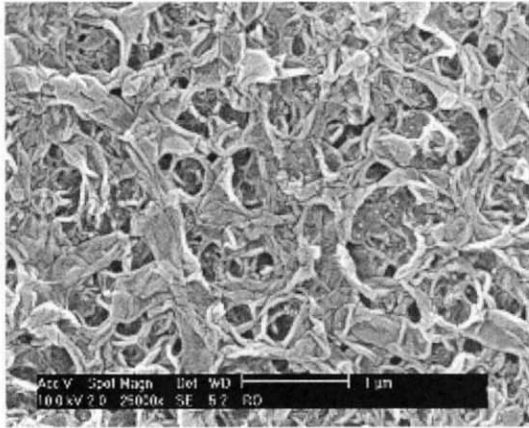


Fig. 5. Surface-SEM photographs of new membranes(25,000X).

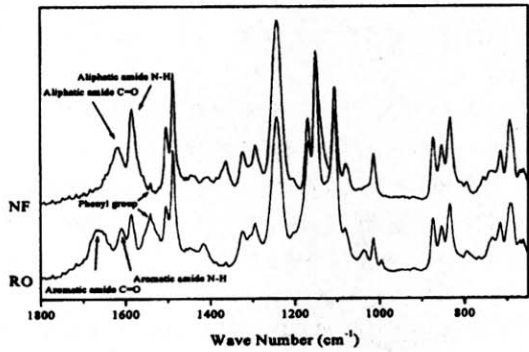
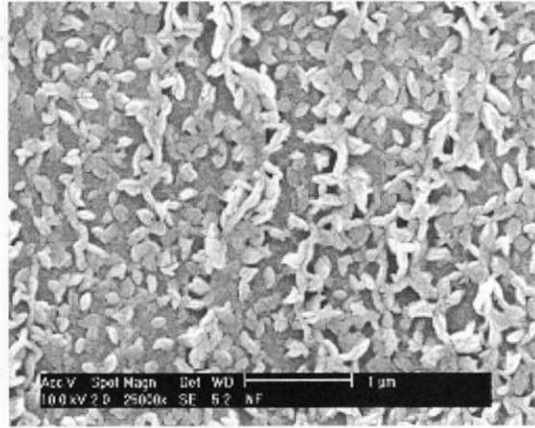
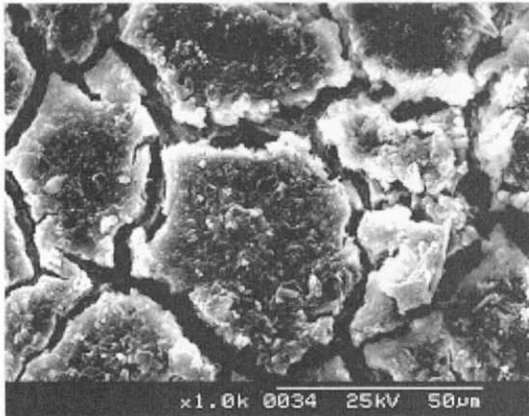


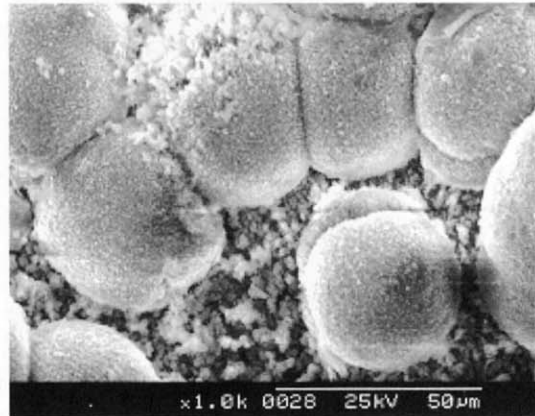
Fig. 6. ATR-FTIR spectrum of new membranes.

Fig. 7은 humic acid 2mg/l로 323시간 운전하여 얻은 파울링 된 RO막을 원수 유입부 쪽과 유출부 쪽으로 나누어 SEM 사진을 찍은 것이다. 유입부(a)는 비교적 큰 분자량을 갖는 humic acid가 크게 뭉쳐져 있음을 볼 수 있고, 유출부(b)는 40-50 μ m 크기의 박테리아가 보이며, 주위에 작은 humic acid가 흩어져 있음을 확인할 수 있다. 발견된 셀룰로오스 분해 박테리아는 보통 분자량이 작고 지방족인 기질을 선호하며 공기 중의 질소를 고정시키기 위해서 Fig. 8에서 확인할 수 있는 872cm⁻¹의 질산염 등을 이용한다고 알려져 있다(Syliva et al., 1998).

Fig. 8은 파울링 된 RO막의 유입부(a)와 유출부(b)



모듈내 막의 유입부(a)



모듈내 막의 유출부(b)

Fig. 7. Surface-SEM photographs of fouled RO membrane.

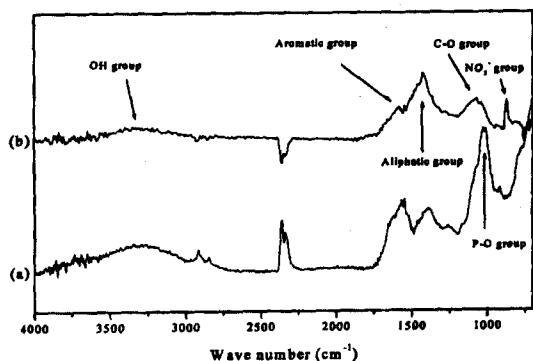


Fig. 8. ATR-FTIR spectrum of fouled RO membrane.

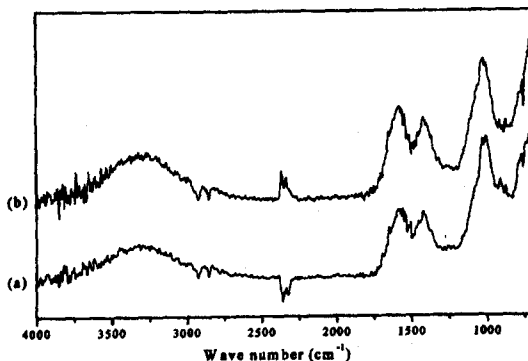


Fig. 9. ATR-FTIR spectrum of fouled NF membrane.

를 ATR-FTIR 스펙트럼으로 나타낸 것이다. Fig. 6에서의 새 막의 스펙트럼과 비교해 보면 축적된 humic acid에 의해 막 표면 특성이 뚜렷이 달라졌음을 확인할 수 있다. 3400cm⁻¹ 근처는 humic acid의 OH group을 나타내는데 (a), (b) 모두에서 나타났고 humic acid의 aromatic group(1530cm⁻¹)과 aliphatic group(1400cm⁻¹)이 높게 나타났음을 볼 수 있다. 그리고 (a)에서는 1018cm⁻¹의 P-O group을 확인할 수 있었고 (b)에서는 871cm⁻¹의 질산염을 확인할 수 있었다. Fig. 9의 NF막에서도 역시 humic acid에 의해 막 표면의 특성이 RO막에서와 비슷하게 달라졌음을 확인할 수 있다.

3.3. 미량오염물질 제거에의 영향

NOM에 의한 막의 파울링이 미량오염물질의 제거에 미치는 영향을 알아보기 위해 1차 증류수에 선택된 미량오염물질을 각각 spiking한 후 humic acid에 의해 파울링 된 막과 새막에서 각각 운전을 수행하여 그 제거율을 비교해 보았다(Table 4). 먼저 새 막으로 운전했을 경우 RO막에서 아트라진 97.2%, 린데인 100%, 파라치온 100%의 제거율을 보였고, NF막에서는 아트라진 95.8%, 린데인 98%, 파라치온 100%의 제거율을 보여 모두 95% 이상의 양호한 제거율을 보였다. 그러나 humic acid에 의해 파울링 된 막에서는 RO막의 경우 아트라진 62%, 린데인 87%, 파라치온 90.3%의 제거율을 보여, 각각의 제거율이 35.2%, 13%, 5.5% 감소하였음을 볼 수 있었고, 특히 아트라진의 제거율 감소가 상대적으로 크게 나타났음을 알 수 있었다. 또, 파울링 된 NF막에서는 아트라

진 52%, 린데인 87.6%, 파라치온 82%의 제거율을 보여, 새막에 비해 각각 43.8%, 10.4%, 18%의 제거율 감소가 일어났으며 NF막에서도 RO막과 비슷하게 아트라진의 제거율 감소가 43.8%로 가장 크게 나타났다.

납은 RO, NF막 모두에서 새막에 비해 파울링 된 막이 근소하지만 약간 제거율이 낮음을 볼 수 있었으며, 새 RO막으로 처리하였을 때 95.3%의 제거율을 보였고 파울링 된 막에서는 92.5%로 모두 90% 이상의 좋은 제거율을 나타냈으며 NF막에서도 역시 90% 이상의 제거효율을 보였다.

그러나 카드뮴의 경우는 납과는 다르게 새 RO막에서 제거율이 85.9%이었고 파울링 된 막에서 98.9%로 오히려 파울링 된 막으로 처리하였을 경우 제거율이 10% 이상 높다는 결과가 나왔다. 이처럼 파울링 된 막에서의 카드뮴의 제거율이 더 높은 이유는 카드뮴이 파울링 된 막의 cake 층과 complex 등을 형성하여 그 제거율이 상승하는 것으로 예상되며, 막에서의 오염물질 제거는 막의 파울링 뿐만 아니라 막의 표면 전하나 표면 거칠기 등 다른 인자의 영향도 함께 받으므로 이러한 특성들을 고려한 추가 연구가 필요하다고 하겠다.

폐놀, LAS의 제거 실험에서는 새 막으로 실험을 수행했을 경우 폐놀은 RO막에서 66%, NF막에서 48%의 제거율을 보였고, LAS는 RO, NF막에서 모두 100% 제거율을 보였다. 그러나 파울링 된 막을 사용한 경우에 폐놀은 RO막에서 28%, NF막에서 13%의 제거율을 보여, 새 막에 비해 제거율이 RO막은 66%에서 28%로 38% 감소하였고, NF막은 48%에서 13

Table 4. Effect of membrane fouling on micro-pollutants removal

		Atrazine (mg/l)	Lindane (mg/l)	Parathion (mg/l)
원 수		0.005	0.005	0.1
RO 막	새 막 처리수	0.00014(97.2%)	ND(100%)	ND(100%)
	fouling된 막 처리수	0.0019(62%)	0.00065(87%)	0.0097(90.3%)
NF 막	새 막 처리수	0.00021(95.8%)	0.0001(98%)	ND(100%)
	fouling된 막 처리수	0.0024(52%)	0.00062(87.6%)	0.018(82%)
		Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	
원 수		0.02	0.1	
RO 막	새 막 처리수	0.00284(85.8%)	0.0047(95.3%)	
	fouling된 막 처리수	0.00022(98.9%)	0.0047(92.5%)	
NF 막	새 막 처리수	0.00243(87.9%)	0.0041(95.9%)	
	fouling된 막 처리수	0.0008(96%)	0.0089(91.1%)	
		Phenol (mg/l)	LAS (mg/l)	
원 수		0.01	1.0	
RO 막	새 막 처리수	0.0034(66%)	ND(100%)	
	fouling된 막 처리수	0.0072(28%)	0.00039(99.9%)	
NF 막	새 막 처리수	0.0052(48%)	ND(100%)	
	fouling된 막 처리수	0.0087(13%)	0.00361(99.6%)	

%로 35% 감소하였다. 이와 같이 폐놀의 제거율이 다소 떨어지는 이유는 폐놀의 분자량(C₆H₅OH-94)이 실험에 사용된 RO막과 NF막의 분획분자량(RO: 100, NF: 200 정도)보다 작기 때문에 폐놀 분자가 제거되지 않고 막을 빠져나가기 때문인 것으로 판단된다. 또한 RO, NF막의 주된 제거 기작이 막 표면과 물분자 또는 오염물질간의 상호작용(수소결합, 인력에 의한 흡착 또는 막 표면으로의 용해 등)에 의해 처리수가 막 내로 확산되어 오염물질과 배제되는 것임을 감안할 때 폐놀의 수산기를 갖고 있어 새 막에서도 막 표면과 수소결합이 잘 이루어지는 것도 부수적인 원인으로 작용할 것으로 사료된다(이 등, 2000; 한국막학회, 1996; Baker, 2000).

4. 결론

본 실험은 RO 및 NF막에서의 NOM에 의한 파울링과 이 파울링이 미량오염물질의 제거 기작에 미치는 영향을 알아보는 것으로 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) Humic acid 2mg/l 하에서 323시간 운전 후 RO막 88%, NF막 34.8%의 플럭스 감소를 보였고 운전초기(120시간 이내)에 플럭스의 감소가 급격하게 이루어지는 것으로 나타났다.

2) 파울링 전후의 막 표면을 ATR-FTIR 스펙트럼과 SEM 사진으로 관찰해본 결과 막 표면에 쌓인 humic acid에 의해 기존의 막 표면이 전혀 다른 특성을 갖게 되었음을 알 수 있었고 또, 이것이 처리수량의 감소, UV₂₅₄, DOC, 미량오염물질의 제거율에 영향을 끼친 주요 원인이라는 것을 확인할 수 있었다.

3) Humic acid로 파울링 된 막에서 아트라진, 린데인, 파라치온, 폐놀은 정도의 차이는 있었으나 새 막에 비해 제거율이 대체적으로 감소하였고, 특히 아트라진의 경우 제거율 감소가 RO막에서는 35.2%, NF막에서는 43.8%로 상대적으로 큰 값을 보였다.

위와 같이 humic acid는 막의 플럭스 감소 및 미량오염물질의 제거에 많은 영향을 미치는 것을 확인하였다. 따라서 효과적인 전처리를 통해 원수 중의

NOM을 제어한다면 막을 이용한 수처리의 경제성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2000-000-00347-0) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 강미아 (1999) Nanofiltration을 이용한 정수과정의 유기물 처리성 평가에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **21**(10), pp. 1907-1913.
- 김규진 (1995) 분리막을 이용한 정수 및 폐수처리, *대한환경공학회지*, **17**(5), pp. 413-420.
- 이성우, 김충환, 박동희 (2000) 정밀여과 및 나노여과 공정을 이용한 지표수의 상수처리, *상하수도학회지*, **14**(3),

- pp. 224-230.
- 한국막학회(1996), 막분리 기초, 자유아카데미, 서울.
- Baker, R. W. (2000) Membrane Technology and Application, McGraw-Hill, New York.
- Cho, Jaeweon, Gery, Amy and John Pellegrino (1999) Membrane Filtration of Natural Organic Matter : Initial Comparison of Rejection and Flux Decline Characteristics with Ultrafiltration and Nanofiltration Membranes, *Water Resources*, **33**(11), pp. 2517-2526.
- Hong, Seungkwan and Menachem Elimelech (1997) Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes, *Journal of Membrane Science*, **132**(2), pp.159-181.
- Snoeyink, V. L. and Jenkins David(1980), Water Chemistry, John wiley & Sons.
- Syliva, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. U. and Zuberer, D. A. (1998) Principle and application of soil microbiology, 3rd edition, Prantice hall.