

## 원수의 수질화학과 HA의 물리화학적 특성이 막 오염에 미치는 영향

배진열 · 한인섭<sup>†</sup> · 박성호 · 신지원

서울시립대학교 환경공학부

### Effects of Surface Water Chemistry and Physicochemical Characteristics of Humic Acid on Fouling of Membrane

Jin-Youl Bae · Ihnsup Han<sup>†</sup> · Sung-Ho Park · Jee-Won Shin

Department of Environmental Engineering, The University of Seoul  
(Received 5 January 2005, Accepted 2 March 2005)

#### Abstract

In this study, we investigated the removal efficiencies of pollutants and permeate fluxes depending on chemistry of feed water, various molecular weight cut-offs (MWCOs) and materials of membrane, operating pressure. We used seven MWCO membranes of YC0.5, YM1, YM3, YM10, YM30, YM100 and PM30, humic acid solution and surface water as feed water, and examined variation in permeate flux. Results of TOC removal experiment demonstrate that MWCO lower 1,000daltons could remove humic acid effectively. As increasing solution pH and decreasing divalent cations ( $Ca^{2+}$ ) concentration, TOC removal increased. But  $UV_{254}$  removal efficiency increased with higher divalent cation concentration and solution pH. Membrane fouling increased with increasing electrolyte (NaCl), divalent cation concentration and decreasing solution pH. In spite of initial permeate flux of the hydrophobic membrane (PM30) was higher than that of the hydrophilic membrane (YM30), flux decline of PM30 was significant during operation. At higher operating pressure, compactness of the cake layer on the membrane surface increased, resulting in gradual increase in hydraulic resistance.

**keywords** : Membrane fouling, Molecular weight cut-off (MWCO), Humic acid, Permeate flux, Flux decline, Hydraulic resistance

## 1. 서론

최근 상수원으로 사용되고 있는 하천수나 지하수의 오염이 날로 심각해지고 있으며 더욱이 오염물질의 수와 종류도 매우 다양해져 기존의 정수처리 공정으로만 양질의 처리수를 생산하는 데 있어 많은 문제를 나타내고 있다.

상대적으로 간편한 시설과 복잡하지 않은 운전을 통해 우수한 수질의 생산수를 얻을 수 있는 분리막 공정은 점차 강화되는 요구수질기준을 충족할 수 있어 기존의 수처리 기술보다 효율적인 방법으로 인식되고 있다(김, 1995).

80년대 이후 분리막 공정은 미국과 유럽 및 중동지역을 중심으로 발전해 왔으며 일본의 경우 1991년 MAC21 (Membrane Aqua Century 21)계획을 시작으로 급속한 연구·개발이 진행되고 있는 상황이다(김, 2003).

분리막을 이용한 상수처리 공정에 있어서 중요한 문제는 생산수의 수질과 관련된 오염물질의 제거 및 여과/정수 공정의 효율과 관련된 막 오염의 영향이다(Fan et al., 2001). 따라서 배제대상 물질을 목표수준까지 제거하고 막 오염의 진행속도를 늦출 수 있도록 분리막의 종류와 운전방식을

가장 적절하게 선정하는 것이 중요하다(김 등, 2003).

본 연구에서는 분획분자량이 작은 환외여과막(UF)을 이용하여 다양한 수질화학적 특성을 가진 인공원수의 수질화학적 특성에 따른 투과플럭스의 변화를 평가하였으며, 막의 특성 및 운전조건에 따른 투과플럭스 거동을 관찰하였다. 또한 현재 서울시 일부 정수정의 취수원으로 사용되고 있는 G 취수장 지표수의 수질화학적 특성이 분리막의 오염에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1. 재료

#### 2.1.1. 인공원수

0.1 g의 휴믹산(Aldrich Chemical)에 1 N-NaOH 1 mL를 가해 1 L의 증류수에 용해시킨 후 GF/C로 여과한 것을 stock solution으로 하였다. 제조된 100 mg/L의 휴믹산 용액을 10 mg/L가 되도록 증류수에 희석해 사용하였으며 이때 희석된 휴믹산 용액의 총유기탄소(TOC)는 약 3~4 mg/L이었다. 실험수행 시 사용된 원수의 수온은 25.5 ± 0.5°C로 일정하게 유지하였다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

ishan@uos.ac.kr

2.1.2. 지표수

G정수장의 취수원에서 얻어진 한강수를 원수로 사용하였다. 시료의 안정적인 보관을 위해 4°C에서 항온항습으로 보관하였으며 실험 시 25.5 ± 0.5°C로 일정하게 유지되도록 하였다. GF/C로 여과한 후 한외여과법을 이용해 분자량 분포를 확인하고 수정 연속 soxhlet 추출법을 이용해 친수성/소수성 NOM으로 분류했다.

2.1.3. 평막

분획분자량이 각각 500, 1,000, 10,000, 30,000 100,000 Da인 친수성 재질의 YC05, YM1, YM10, YM30, YM100 과 분획분자량이 30,000 Da인 소수성 재질의 PM30 등 모두 여섯 종류의 평막을 대상으로 실험을 진행하였다.

2.2. 실험방법

실험대상 평막은 사용하기 전 초순수에 48시간 이상 침지시켜(초순수를 2시간 마다 교체) 코팅된 글리세린과 막에서 유출될 수 있는 용존성 물질을 제거하였다. 그 후 0.1 N-NaOH에 30분간 침지시킨 후 200 mL 초순수로 세척한 다음 실험에 사용하였다. Bulk층으로부터 막 표면에 용질이 침적되는 것을 막기 위해 stirrer를 이용해 교반하였다. N<sub>2</sub>가스를 이용해 막 투과압력을 0.5~2 bar로 조절하였고 투과수의 무게를 측정해 투과플럭스를 산정했다. 모든 막의 초기 투과플럭스는 초순수로 30분 이상 여과하여 측정하였다. 이후 인공원수와 지표수를 Fig. 1과 같은 평막실험장치(Model 8200 stirred cell, Amicon)에 채우고 3~4시간 여과하면서 투과플럭스 변화를 관찰하였다. 원수의 수질화학적 특성에 따른 투과플럭스 변화를 살펴보기 위해 인공원수의 이온강도와 pH 그리고 칼슘이온 농도에 변화를 주어 투과플럭스 변화를 관찰하였다.

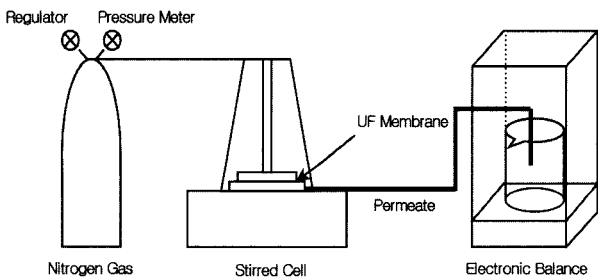


Fig. 1. Schematic diagram of plate membrane filtration experiment.

한 조건에서 실험이 종료되면 초순수를 200 mL 주입하여 수리세정을 실시한 후 0.1 N-NaOH로 화학세정을 실시하였다. 사용하던 막의 초기플럭스가 최초 값의 95% 이상으로 회복되지 않을 경우 새로운 막으로 교체하여 실험을 진행하였다.

한강원수의 휴믹산 용액을 인공원수와 같은 TOC 범위가 되도록 희석한 후 여과실험을 진행해 투과플럭스 변화를 관찰하였다.

인공원수와 지표수는 TOC 농도(TOC-VCPH total organic carbon analyzer, Shimazu), UV<sub>254</sub> (DR4000U Spectrophotometer, HACH), 탁도(2100P Turbidimeter, HACH), SUVA 값, pH·온도(725P pH meter, istek), 이온강도(SCT meter, YSI) 등의 기초수질을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 인공원수와 지표수의 수질측정

실험에서 사용된 인공원수와 지표수의 수질분석 결과는 Table 1과 같다. 결과 값 중에서 인공원수의 이온강도는 투여된 NaCl이 100% 해리된다는 가정하에 계산되었으며 실제 측정결과 1.03 × 10<sup>-2</sup> ~ 0.94 × 10<sup>-2</sup>의 범위를 보이고 있었다. 분자량 크기별로 원수의 휴믹산을 분리하기 위하여 한외여과법을 이용하였다. DOC 농도가 1.676 mg/L인 한강원수의 휴믹산과 인공원수를 0.45 μm 멤브레인 여과지로 여과한 후 여과액을 분획분자량이 100,000 Da, 10,000 Da, 1,000 Da, 0.5 Da인 UF를 이용하여 순차적으로 여과하여 분리한 후 겔보기 분자량(AMW: apparent molecular weight) 0.45 μm~100,000 Da, 100,000~10,000Da, 10,000~1,000 Da, 1,000~500 Da, 500 Da 이하로 분류하였으며 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 한강원수와 인공원수의 분자량 분포를 비교한 결과, 한강원수는 10~1 K daltons의 물질분율이 57.0%로 나타나지만 인공원수는 0.45 μm~10 K daltons의 물질분율이 77.7%로 인공원수가 한강원수에 비해 고분자량 물질이 많음을 알 수 있었다.

Table 1. Characteristics of feed water

Parameter	Sample	Synthetic water	Surface water
pH		6.9±0.1	8.87
Turbidity (NTU)		-	4.34
TOC (mg/L)		3~4	2.558
UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )		0.242	0.1070
Ion strength (μS/cm)		1.00 × 10 <sup>-2</sup>	1.81 × 10 <sup>-3</sup>
Hardness (mg/L)		-	54.71

3.2. 오염물질 제거효율

YM30 평막을 이용해 선택성(배제율) 실험을 진행하였다. 1 bar의 투과압력, 25.7 ± 0.2°C의 실험조건하에서 초순수를 이용해 측정된 초기순수플럭스는 7.5 ± 0.5 × 10<sup>-5</sup> m/s으로써 막 제조업체인 Millipore에서 제시한 값인 1.17~1.84 × 10<sup>-4</sup> m/s와는 큰 차이를 보였다. 이러한 초기순수플럭스의 차이는 투과압력에 의한 차이인 것으로 판단된다(제조업체의 경우 측정압력이 55 psi, 본 연구에서는 1 bar (14.5 psi)). 최근에 다른 연구에서 제시한 7.4 ± 0.2 × 10<sup>-5</sup> m/s의 초기순수플럭스와는 상대적으로 차이가 적었다(Yuan et al., 2000).

4시간 동안 여과를 진행한 후 UF평막에 의한 휴믹산의 제거를 TOC와 UV<sub>254</sub> 제거율로 관찰하였다. UF 평막에 의

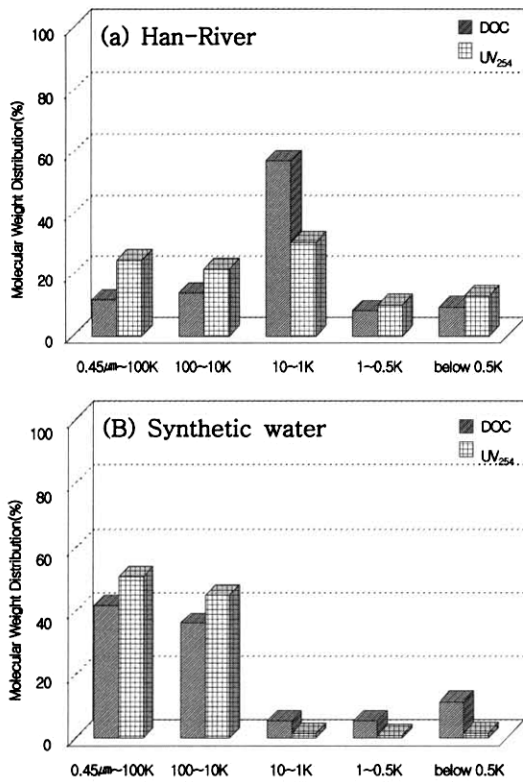


Fig. 2. Molecular weight distribution of humic acid isolated from feed water.

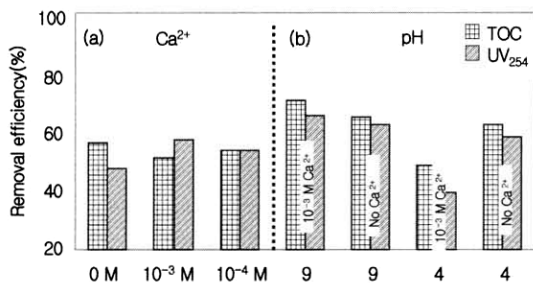


Fig. 3. Rejection properties of the UF membrane in various solution chemistries. Experimental conditions: humic acid concentration = 10 mg/L, ionic strength =  $10^{-2}$  M by NaCl, Temp. = 25.5°C, operating pressure = 1 bar and pH =  $6.95 \pm 0.3$ .

한 TOC 제거율은 48.6~70.1%로 나타났고, UV<sub>254</sub> 제거율은 39.2~65.4%로 나타났으며 원수의 화학적 특성에 의존함을 볼 수 있었다(Fig. 3). 칼슘이온의 영향을 보면 주입량이 증가함에 따라 TOC 제거율이 다소 감소하나 그 차이는 그리 크지 않았다. Hering 등(1992)에 의하면, 칼슘이온은 휴믹산의 산성작용기와 반응해 복합체를 만드는데 이 과정에서 분리된 산성작용기로 인해 휴믹산의 크기가 작아져 막 공극을 보다 쉽게 통과하게 되고 칼슘이온이 통과하기 전과 비교해 TOC 제거율이 감소하는 것으로 판단된다. 하지만 칼슘이온과 산성작용기에 의해 형성된 복합체가 막 위에 케이크 층을 형성하게 되면 축적되는 휴믹산의 질량도 증가하기 때문에 TOC 제거율은 증가하게 된다. 따라서 칼슘이온의 영향은 TOC 제거율보다는 UV<sub>254</sub> 제거율을 확

인하는 것이 더 효과적이다. UV<sub>254</sub> 제거율의 경우 칼슘이온 주입량이 증가함에 따라 제거율도 증가함을 볼 수 있다. UV<sub>254</sub>는 휴믹산의 이중결합 구조와 반응해 흡광하는데 주로 산성작용기가 이러한 구조로 존재한다. 따라서 칼슘이온 농도가 증가할수록 투과된 휴믹산의 이중결합은 적어지고 이로 인해 투과수의 UV<sub>254</sub> 흡광도가 감소해 제거율은 증가하게 된다.

pH의 영향을 보면 휴믹산은 pH 4보다 pH 9에서 TOC 제거율이 높음을 볼 수 있다. 낮은 pH에서 휴믹산은 분자사슬간의 정전기적 반발력이 감소되기 때문에 더 작은 분자구조를 가지게 된다. 그러므로 이들은 막의 공극을 더 쉽게 통과할 수 있어 낮은 휴믹산 제거율을 보이게 된다(Childress et al., 1996).

### 3.3. 비플렉스 변화

#### 3.3.1. 다양한 수질화학적 특성에 따른 변화

모든 실험은 10 mg/L의 휴믹산 농도,  $25 \pm 0.5$ 의 온도, 1 bar의 운전압력 및  $6.9 \pm 0.1$ 의 pH 조건에서 진행되었다.

##### 3.3.1.1. 이온강도의 영향

막 오염에 있어 이온강도의 영향을 살펴보기 위해 동일 염을 이용해 세 가지 이온강도에서 실험을 진행하였다( $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  및  $10^{-3}$  M NaCl). Fig. 4를 보면 용액의 이온강도가 증가함에 따라 투과플렉스 감소율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 증가된 이온강도에 의해 cake층의 유체역학적 저항이 증가하였기 때문으로 추정된다. 높은 이온강도에서 막 표면과 휴믹산의 전위는 이중층 압축과 전위 차단으로 인해 크게 감소되어 막 표면과 휴믹산 사이의 정전기적 반발력은 감소한다. 따라서 막 표면위의 휴믹산 축적은 크게 증가한다. 게다가, 높은 이온강도에서 감소된 사슬간(interchain)의 정전기적 반발력으로 인해 휴믹산의 모양은 더욱 감겨진 형태로 구형이 더 조밀한 오염층을 형성한다. 이 오염층은 유체의 흐름에 있어 높은 유체역학적 저항을 제공하고 투과플렉스의 빠른 감소를 야기한다(Sbaï et al., 2003).

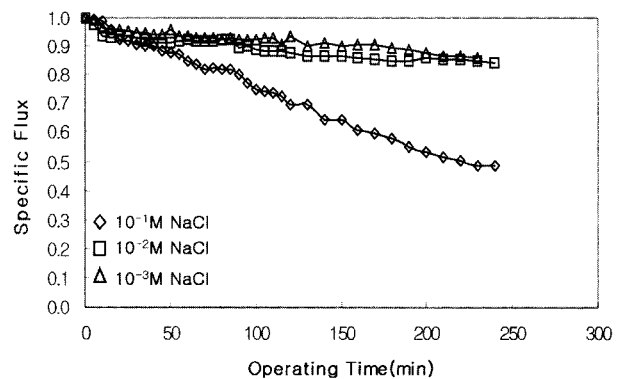


Fig. 4. Effect of ionic strength on the membrane fouling.

##### 3.3.1.2. 칼슘이온의 영향

막 오염에 있어 칼슘이온의 영향을 알아보려고 실험을

진행하였으며 이온강도는  $10^{-2}$  M로 고정되었다. 실험결과 칼슘이온의 농도가 증가함에 따라 투과플럭스는 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 5).

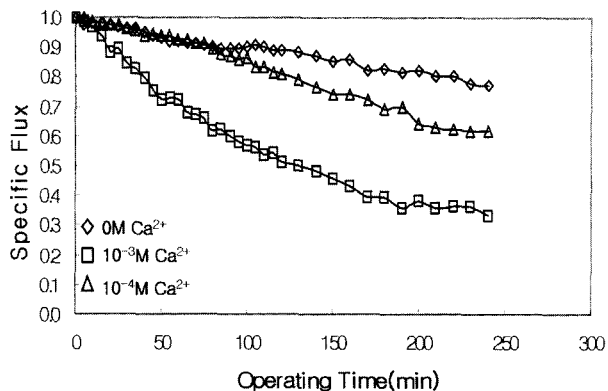


Fig. 5. Effect of calcium concentration on the membrane fouling.

칼슘이온에 의해 제거된 산성작용기에 의해 휴믹산의 전위는 감소한다. 이에 따라 막 표면과의 정전기적 반발력도 감소하게 되어 결과적으로 막 표면에 축적되는 휴믹산의 질량이 증가하게 된다. 뿐만 아니라 칼슘이온과 마그네슘이온 같은 2가 양이온에 의해 형성된 복합체는 휴믹산 사이에 가교작용을 해 등글게 감긴 형태의 체인을 형성하게 하고 이것이 막 표면에 축적되게 된다(Meier-Haack et al., 2003). 결과적으로 칼슘이온의 존재는 휴믹산과 막 표면과의 정전기적 반발력의 감소와 감긴 형태의 조밀한 복합체를 형성하게 만들고 이로 인해 투과플럭스는 크게 감소하게 된다.

### 3.3.1.3. pH의 영향

휴믹산 오염에 있어 pH의 영향을 칼슘이온이 존재하는 조건과 존재하지 않는 조건에서 조사하였다. pH 4 및 pH 9에서의 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다. 칼슘이온의 존재와 상관없이 pH 4에서 투과플럭스 감소가 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 낮은 pH에서 막과 휴믹물질의 전위감소로 인한 것으로 추정된다. 앞서 언급한 바와 같이 막의 표면전위는 pH가 감소하면 등전점까지는 감소되고

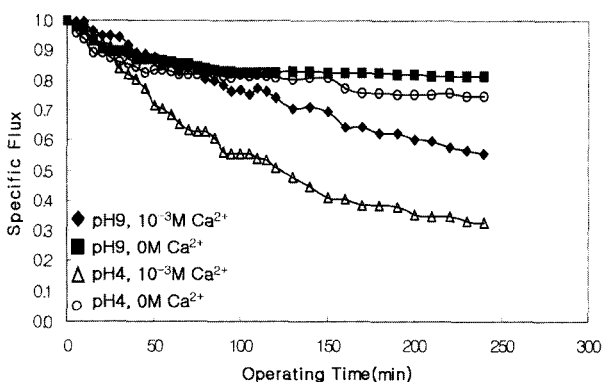


Fig. 6. Effect of pH on the membrane fouling.

등전점을 지난 이후 양전하를 띄게 된다. 대부분 막의 경우 낮은 pH 범위에 등전점이 존재한다. 게다가 휴믹산의 작용기 중 카르복실 작용기는 감소된 pH에서 양자화되고 이로 인해 휴믹물질의 전위는 감소된다. 그러므로 낮은 pH에서 막 표면과 휴믹산 사이, 용액의 휴믹산과 축적된 휴믹산 사이의 정전기적 반발력이 감소되어 막 표면에 축적되는 휴믹산의 양은 증가한다. 이와 비슷한 실험결과는 여러 연구논문에서 많이 보고되고 있다(Sbai et al., 2003).

### 3.3.2. 막 재질에 따른 변화

동일한 분획분자량(30,000 Da)을 갖는 다른 재질의 막을 이용해 실험을 진행하였다. 소수성 막(PM30)의 초기순수플럭스는  $662.52 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 친수성 막(YM30)의 초기순수플럭스  $275.1 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 보다 약 2.5배 정도 컸으나 운전시간이 지속됨에 따라 소수성 막의 투과플럭스는 급격한 감소를 보이고 있다(Fig. 7). 소수성 막의 경우 hydroxyl기와의 친화도가 떨어져 초순수만을 투과했을 경우에는 막 공극의 팽창이 발생해 초기순수플럭스가 증가하게 되나 용액에 포함되어 있는 소수성 오염물질인 휴믹산과의 친화도는 높아 운전 시간이 길어질수록 막 오염이 많이 발생해 투과플럭스 저하가 꾸준히 증가하는 것으로 판단된다.

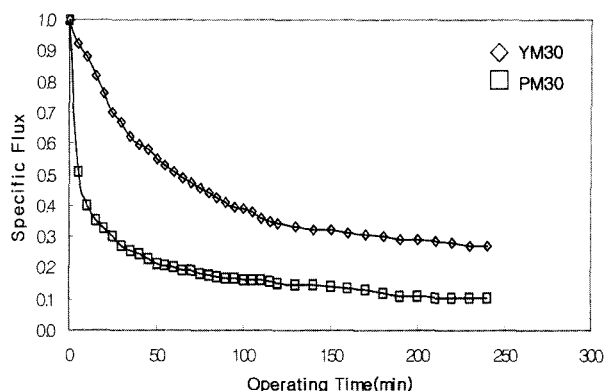
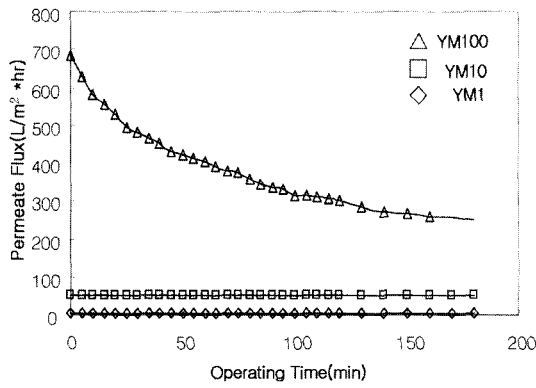


Fig. 7. Effect of membrane material on NOM fouling. Experimental condition: humic acid concentration =  $10 \text{ mg/L}$ , ionic strength =  $10^{-1} \text{ M}$ , Temp. =  $25.5^\circ\text{C}$ , operating pressure = 1bar and pH = 4.06.

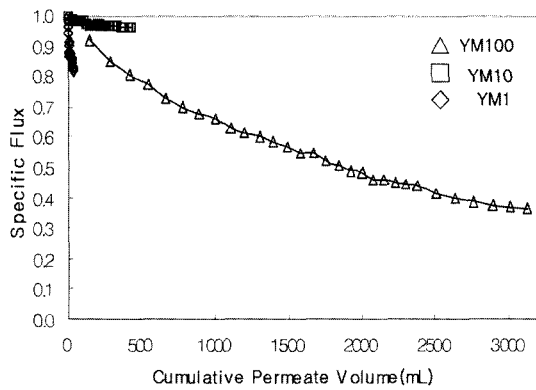
용액의 소수성 지표를 나타내는 방법에는 여러 가지가 있는데 그 중 한 가지가 접촉각(contact angle)을 측정하는 것이다. 접촉각이란 액체를 고체표면위에 떨어뜨렸을 때 고체표면과 액체가 이루는 각을 말하며 완전한 친수성을 보이는 경우  $0^\circ$ , 완전한 소수성을 보이는 경우  $180^\circ$ 가 된다. Jucker 등(1994)에 의하면 PM30의 경우 접촉각이  $42.5^\circ$ , YM30의 경우  $7.0^\circ$ 를 보이고 있다.

### 3.3.3. 막의 분획분자량에 따른 변화

동일 재질의 분획분자량이 다른 막을 이용해 실험을 진행하였다. 실험은 앞절과 동일한 조건에서 수행하였다. 평균 투과플럭스를 계산한 결과 YM100은  $383.21 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 가장 높고 YM10에서  $50.67 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ , YM1에서  $4.91$



(a)



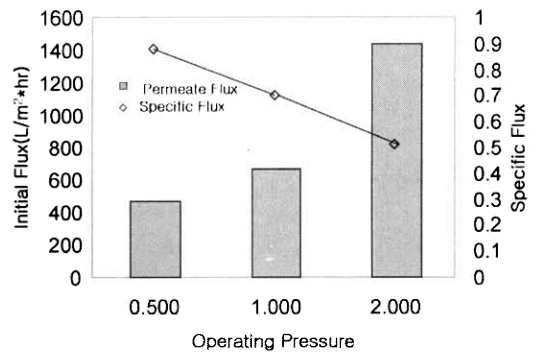
(b)

**Fig. 8.** Effect of membrane MWCO on NOM fouling: (a) permeate flux vs. operating time and (b) specific flux vs. cumulative permeate volume.

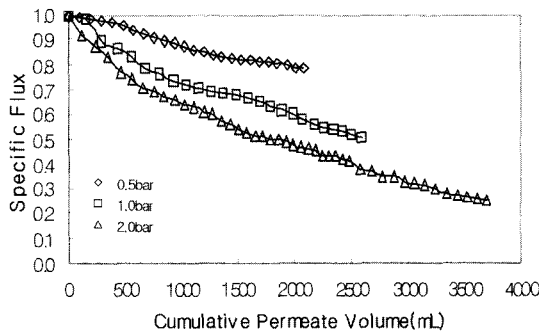
L/m<sup>2</sup> · hr로 분획분자량이 작아질수록 감소하였다(Fig. 8(a)). 그러나 누적투과량에 대한 투과플럭스 감소율의 경우 YM10에서 가장 작고 YM100이 중간이며 YM1에서 가장 크게 나타났다(Fig. 8(b)). YM10의 경우 초기순수플럭스가 YM100에 비해 1/13배 수준으로 매우 작았다. 막의 공극이 YM100에 비해 작기 때문에 휴믹산에 의한 내부공극 막힘이 YM100보다 적으므로 플럭스 감소폭이 작은 것으로 판단된다. 실제 비플럭스를 계산한 결과 YM10의 경우 3시간 운전 후 초기순수플럭스 대비 96%를 보였으나 YM100의 경우 37% 정도를 보였다. 분획분자량이 1,000인 YM1의 경우 분획분자량이 작기 때문에 배제되는 휴믹산의 양이 많으므로 다른 막과 비교해 동일한 누적투과수량 당 막 위에 축적되는 휴믹산의 양이 많아 두꺼운 케이크층이 형성된다. 각각의 막의 TOC 제거율을 살펴보면 YM1은 81.4%, YM10은 48.0% 그리고 YM100은 32.4%로 YM1의 TOC 제거율이 다른 두 막에 비해 특히 높음을 볼 수 있다. 또한 동일한 누적투과수량에 도달하기 위한 투과시간도 다른 막에 비해 길기 때문에 생성된 케이크층의 압밀화도 더 많이 이루어졌으며 초기순수플럭스가 5.64 L/m<sup>2</sup> · hr로 매우 작기 때문에 작은 플럭스 감소도 비플럭스 변화에는 민감하게 작용했을 것으로 판단된다.

3.3.4. 운전압력에 따른 변화

YM100 막에서 압력에 따른 초기순수플럭스는 0.5 bar에



(a)



(b)

**Fig. 9.** Effect of operating pressure on NOM fouling: (a) initial and specific flux and (b) specific flux decline at each operating pressure.

서 417.30 L/m<sup>2</sup> · hr, 1.0 bar에서 663.78 L/m<sup>2</sup> · hr 그리고 2.0 bar에서 1433.70 L/m<sup>2</sup> · hr로 운전압력이 증가할수록 증가하였다. 그러나 평균 비플럭스를 살펴보면 0.5 bar에서 0.88, 1.0 bar에서 0.7, 2.0 bar에서 0.51로 압력이 증가할수록 감소하였다(Fig. 9(a)). 누적투과량에 대한 투과플럭스 감소, 즉 운전시간에 따른 투과플럭스 감소율은 적용압력이 클수록 크게 증가하였다(Fig. 9(b)). 동일한 막을 사용했기 때문에 모든 막의 휴믹산 제거율은 동일하므로 누적투과량이 같은 시점에서 막 표면에 생성된 케이크의 양은 동일할 것이고 투과플럭스 감소율도 동일해야 한다. 그런데 실험결과 적용압력에 비해 투과플럭스 감소율은 증가했다. 이러한 현상은 두 가지 측면 때문인 것으로 판단된다. 우선 적용압력이 증가하면 막 위에 축적된 케이크층에 가해지는 압력 또한 증가하며 따라서 이로 인한 케이크층의 조밀성이 증가했기 때문으로 판단된다. 또한 앞에서 언급했듯이 막 세정의 정도에 따라 초기순수플럭스에 차이가 발생했는데 이 차이가 동일 누적투과량 시점에서 막 표면에 생성된 케이크 양의 불일치를 가져올 수도 있다.

다양한 운전압력에서 분획분자량에 따른 투과플럭스 변화특성을 보면 분획분자량이 작은 YM10의 경우 1 bar에서 2 bar로 운전압력을 상승시키면 초기순수플럭스가 52.08 L/m<sup>2</sup> · hr에서 102.08로 약 2배 정도 증가하였고 투과플럭스도 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 분획분자량이 상대적으로 큰 YM30의 경우 1 bar에서 2 bar로 운전압력을 상승시키면 초기순수플럭스는 273.6 L/m<sup>2</sup> · hr에

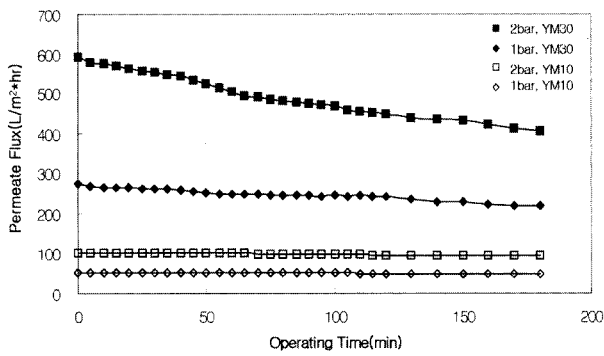


Fig. 10. Effect of operating pressure and membrane MWCO on NOM fouling. Experimental conditions: humic acid concentration = 10 mg/L, ionic strength =  $10^{-2}$  M, temperature = 25.3°C and pH = 6.88.

서 590.08 L/m<sup>2</sup>·hr로 약 2.2배 증가했으나 투과플럭스 감소가 급격히 이루어지는 것으로 나타났다(Fig. 10). 이는 원수의 휴믹산 입자가 YM10의 공극보다 크기 때문에 막 표면에 축적된 케이크층의 공극 또한 막의 공극보다 크게 되고 이로 인해 케이크층의 투과저항이 막 자체 저항에 비해 상당히 작기 때문에 투과율에 있어 별다른 영향을 미치지 못했기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결론

한강원수는 분자량 10~1 kDa의 물질분율이 57% 정도를 차지하기 때문에 휴믹산의 안전한 제거를 위해서는 1 kDa 이하의 막을 사용해야만 한다. 용액의 칼슘이온 농도와 pH는 오염물질 제거에 영향을 미치는데 칼슘이온의 경우 낮은 농도에서 상대적으로 높은 TOC 제거율을 보이며 UV<sub>254</sub>의 경우 높은 농도에서 높은 UV<sub>254</sub> 제거율을 타나내고 있다. pH의 경우 높은 범위에서 TOC와 UV<sub>254</sub> 제거율이 모두 높음을 볼 수 있었다.

용액의 수질화학적 특성에 따른 투과플럭스의 변화를 관찰한 결과 큰 이온강도, 높은 칼슘이온 농도, 낮은 pH 범위에서 투과플럭스 감소율이 큰 것으로 나타났다.

또한 소수성 막의 경우 hydroxyl기와의 친화도가 떨어져 초순수로 측정된 초기순수플럭스는 컸으나 용액에 포함되어 있는 소수성 오염물질인 휴믹산과의 친화도는 높아 운전 시간이 길어질수록 막 오염이 많이 발생해 투과플럭스 저하가 꾸준히 증가하는 것으로 판단된다.

막의 분획분자량이 작을수록 평균 투과플럭스는 감소하나

누적투과량에 대한 투과플럭스 감소율의 경우 휴믹산에 의한 내부 공극막힘과 공극크기에 따른 배제율의 차이로 인해 YM10이 가장 작고 YM1이 가장 큰 것으로 나타났다.

운전시간에 따른 투과플럭스 감소율은 운전압력이 클수록 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 적용압력이 증가하면 막 위에 축적된 케이크층에 가해지는 압력 또한 증가하면 이로 인해 케이크층의 조밀성 증가했기 때문인 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

김규진, 분리막을 이용한 정수 및 폐수처리, *대한환경공학회지*, **17**(5), pp. 313-420 (1995).

김지훈, 최혁, 김형수, 염익태, 한기봉, Pilot 규모의 정수처리용 정밀여과 시스템에서 PACs 응집제가 투과 플럭스에 미치는 영향, *한국물환경학회지*, **19**(2), pp. 225-231 (2003).

김형수, *요코하마 20 만m<sup>3</sup>/일 막여과 정수처리 효율평가*, 서울특별시 수도기술연구소, pp. 37-67 (2003).

Childress, A. E. and Elimelech, M., Effect of Solution Chemistry on the Surface Charge of Polymeric Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes, *J. Mem. Sci.*, **119**(2), pp. 253-268 (1996).

Fan, L., Harris, J. L., Roddick, F. A. and Booker, N. A., Influence of the Characteristics of Natural Organic Matter on the Fouling of Microfiltration Membranes, *Wat. Res.*, **35**(18), pp. 4455-4463 (2001).

Hering, J. G. and Morel, F. M. M., *Principle and Application of Aquatic Chemistry*, Wiley, New York (1992).

Jucker, C. and Clark, M. M., Adsorption of Aquatic Humic Acid Substances on Hydrophobic Ultrafiltration Membranes, *J. Mem. Sci.*, **97**(1-2), pp. 37-52 (1994).

Meier-Haack, J., Booker, N. A. and Carroll, T., A Permeability-Controlled Microfiltration Membrane for Reduced Fouling in Drinking Water Treatment, *Wat. Res.*, **37**(3), pp. 585-588 (2003).

Sbaï, M., Fievet, P., Szymczyk, A., Aoubiza, B., Vidonne, A. and Foissy, A., Streaming Potential, Electroviscous Effect, Pore Conductivity and Membrane Potential for the Determination of the Surface Potential of a Ceramic Ultrafiltration Membrane, *J. Mem. Sci.*, **215**(1-2), pp. 1-9 (2003).

Yuan, W. and Zydney, A. L., Humic Acid Fouling during Ultrafiltration, *Environ. Sci. Technol.*, **34**(23), pp. 5043-5050 (2000).