

분류된 천연유기물질을 이용한 막 오염 특성 평가

이병구 · 손희종^{†*} · 노계순* · 황영도* · 정철우** · 강임석

부경대학교 환경공학과 · *부산광역시 상수도사업본부 수질연구소 · **울산산업진흥TP 전략산업기획단

(2005년 11월 11일 접수, 2005년 12월 20일 채택)

Effect of Fractionated Organic Matter on Membrane Fouling

Byung-Gu Lee · Hee-Jong Son^{†*} · Jae-Soon Roh* · Young-Do Hwang* · Chul-Woo Jung** · Lim-Seok Kang

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

*Water Quality Research Institute, Waterworks Headquarter, Busan

**Ulsan Regional Innovation Agency, Ulsan Industry Promotion Techno Park

ABSTRACT : As a results of this research, the Nakdong River consisted of 43% of hydrophobic fraction, 39% of hydrophilic fraction, and 18% of transphilic fraction. The hydrophobic fraction in this raw water was mostly fulvic acid. Fulvic acid comprised of 62% and the rest was humic acid(38%). There was more carboxylic acid functional group(64%) than phenolic group(36%). HPI-N and HPI-C comprised of 17% and 22% in the hydrophilic portion, respectively. The results of the membrane fouling test using UF membrane according to NOM fractions. HPI-N caused more fouling than HPI-C. Humic acid caused more fouling than fulvic acid probably due to higher adsorption capacity. Since humic acid has higher adsorption capacity than fulvic acid, it would be more adsorbed onto the membrane pores. The carboxylic acid functional group caused more fouling than the phenolic group.

Key Words : Membrane Fouling, NOM, Hydrophobic, Transphilic, Hydrophilic, UF

요약 : 낙동강 원수의 경우 소수성 물질이 43%, 친수성 물질이 39%, 반친수성 물질이 18%를 차지하고 있는 것으로 나타났으며, 소수성 물질을 세분화하여 조사한 결과 fulvic acid는 62%, humic acid는 38%로 나타났으며, 또한, 카르복실기는 64%, 페놀기는 36%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 친수성 물질을 세분화하여 조사한 결과 HPI-N이 44%, HPI-C가 56%를 차지하고 있었다. 친수성 유기물질 중 HPI-C에 비하여 HPI-N이 막 오염을 더욱 많이 유발하였으며, 소수성 유기물질에서는 HA가 FA에 비하여 막 오염을 더 많이 유발하였으며, 작용기에 따른 막 오염 현상을 살펴보면 카르복실기의 경우 페놀기에 비하여 투과 flux 감소가 크게 나타나고 있다. 공극의 크기가 커질수록 공극 속으로 전달되는 고분자 유기물이 많이 발생하며 이러한 고분자 유기물이 공극을 막아버리는 현상에 의하여 투과 flux 감소가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 공극의 크기가 상대적으로 큰 막의 경우 투과되는 양이 공극이 작은 막 보다 상대적으로 많기 때문에 운전초기에 많은 양의 유기물이 막으로 전달되어 막의 표면과 공극에 흡착되어 막의 공극의 크기가 커짐에 따라 투과 flux 감소가 크게 나타났다.

주제어 : 막 오염, 천연유기물질, 소수성, 반친수성, 친수성, 한외여과

1. 서 론

상수원수중에 함유된 천연유기물질(natural organic matter: NOM)은 주로 humic substance로서 모든 토양과 수 환경내 존재하며 식물이나 동물 사체의 분해로부터 유래하는 매우 복잡한 구조를 가진 유기 화합물이다.¹⁾ 또한 Humic Substances는 다양한 분자량 분포 범위를 가지며, DOC의 50% 정도를 차지하고 있다. Humic substance의 안정도는 산성작용기의 전하밀도에 의하여 좌우되며 수중에서 크게 안정화되어 존재하므로 수처리 공정에서 제거하기가 어렵고, 또한 소독제로 사용되는 염소와의 반응을 통하여 소독부산물 형성을

유발하게 된다.²⁾

막분리 공정은 NOM의 효율적인 제거와 점차 강화되는 수돗물 수질기준에 대처하기 위하여 현재 기존 정수공정의 보완 또는 대체방안으로 많은 연구가 진행중이다.³⁾ 그러나, 막분리 공정을 운전할 경우 NOM의 영향으로 인하여 막 표면 및 공극내에서 막 오염 현상이 발생하게 되며 막 오염 현상이 발생함에 따라 막분리 공정의 효율적인 운전이 어렵게 된다. 이에 따라 막분리 공정적용에 앞서 유기물에 의한 막 오염 현상을 세부적으로 파악하여 각 유기물 특성상 막 오염 유발 메카니즘을 이해하여 원수에 함유된 유기물의 물리·화학적 특성을 고려한 효율적인 운전조건이 제시될 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 상수 원수에 함유된 유기물의 세부적인 분류를 통하여 유기물 특성에 따른 막 오염 현상을 규명하고자 하였으며, 막의 공극크기에 따라 발생하는 막 오염

[†] Corresponding author

E-mail: menuturk@hanmail.net

Tel: 055-323-4718

Fax: 055-323-4719

현상을 이해하여 상수원수에 함유된 유기물의 물리·화학적 특성에 적합한 막분리 공정을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 원수특성

실험에 사용된 시수는 부산시의 상수원수로 이용되고 있는 낙동강 하류 매리지역 원수(NOM)를 사용하였다. NOM 시료는 수중의 유기물질 농도를 높이기 위하여 rotary evaporator (R205, Büchi, Germany)를 사용하여 30°C에서 4배 이상 농축하여 사용하였으며, 0.45 µm membrane 여지를 이용하여 입자성 물질을 제거한 후 실험에 사용하였다.

2.2. 유기물 분리

수중의 용존 유기물질 특성별 분리는 XAD-4 수지(Supelite DAX-4, Supelco, U.S.A.)와 XAD-8 수지(Supelite DAX-8, Supelco, U.S.A.)를 이용하여 농축된 원수를 소수성 물질(hydrophobic fraction: HPO-T), 친수성 물질(hydrophilic fraction: HPI-T) 및 반친수성 물질(transphilic fraction: TPI)으로 분류하였다. XAD-8 수지에 흡착된 부분을 0.1 N-NaOH로 탈착시킨 것을 소수성 물질(HPO-T), XAD-8 수지를 통과하여 나온 유출수를 다시 XAD-4 수지가 충전된 컬럼을 통과하여 나온 유출수를 친수성 물질(HPI-T), XAD-4 수지에 흡착된 부분을 0.1 N-NaOH로 탈착시킨 것을 반친수성 물질(TPI)이며, 0.1 N-NaOH로 탈착시킨 것은 양이온 교환수지(Amberlite IRC-50, Rohm & Haas, France)를 이용하여 용액 중의 Na⁺ 이온을 제거한 후 실험에 사용하였다.

HPO-T의 휴믹산(humic acid: HA)과 펄빅산(fulvic acid: FA)으로 분리되는 HPO-T를 pH 1 이하로 조절, 20°C 항온항습기에서 3시간 이상 정치한 후 0.2 µm 멤브레인 필터로 여과하여 통과한 여액을 FA, 여지에 위에 침전물을 형성한 것을 0.1 N-NaOH로 탈착시킨 것을 HA로 분류하였다. 또한, 소수성 물질을 카르복실기(carboxylic groups: Carbo)와 페놀기(phenolic groups: Pheno)로 분리하기 위해 A-21 수지(Amberlyst A-21, Rohm & Haas, France)를 사용하였으며, A-21 수지에 흡착된 부분을 1 N-NaOH로 탈착시켜 양이온 교환수지(Amberlite IRC-50, Rohm & Haas, France)를 이용하여 용액 중의 Na⁺ 이온을 제거한 것을 페놀기, A-21 수지가 충전된 컬럼을 통과하여 나온 유출수를 카르복실기로 분리하였다.⁴⁾

Table 1. Characteristics of raw water

Item	Unit	Concentrated water
Temperature	(°C)	18~20
pH	(-)	7.2
Turbidity	(NTU)	0.5
UV ₂₅₄	(cm ⁻¹)	0.129
DOC	(mg/L)	7.35
Alkalinity	(mg/L as CaCO ₃)	45~50

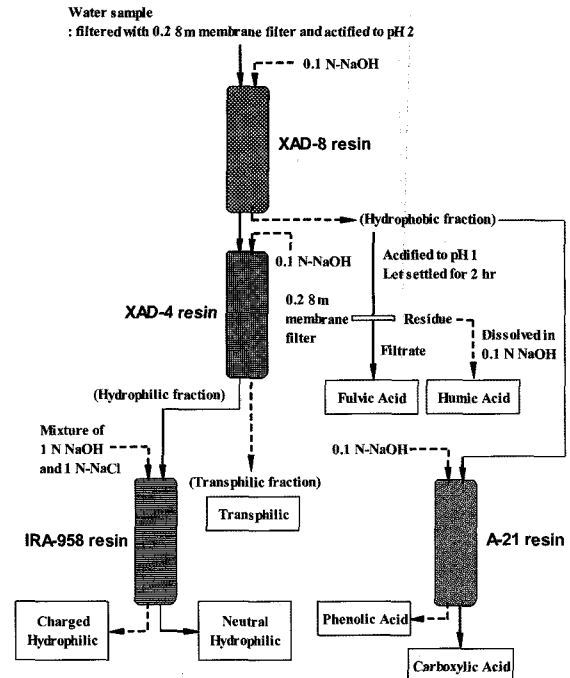


Fig. 1. Analytical procedure for NOM fractionation.

HPI-T는 IRA-958 수지(Amberlite IRA-958, Supelco, U.S.A.)를 이용하여 2 가지 물질로 분리하였으며, IRA-958 수지가 충전된 컬럼을 통과하여 나온 유출수를 neutral-hydrophilic (HPI-neutral), 수지에 흡착된 것을 1 M-NaOH와 1 M-NaCl 혼합액으로 탈착시켜 양이온 교환수지(Amberlite IRC-50, Rohm & Haas, France)를 이용하여 용액 중의 Na⁺ 이온을 제거한 것을 charged-hydrophilic(HPI-charged)으로 분리하였다.⁵⁾

2.3. UF Membrane

본 실험에 사용된 막 장치(Millipore, U.S.A.)는 막힘형 형태(dead-end flow)로 Fig. 2에 간략하게 도식하였다. 막 분리 실험은 5 L 용량의 스테인레스 저류조에 시료수를 주입 후, 고순도 질소가스를 이용하여 28 psi의 투과압력으로 300 mL 용량의 UF cell에 주입하여 막 분리를 하였으며, 막 분리 실험시 UF cell에 부착된 교반장치는 사용하지 않았다.

실험에 사용된 막(membrane)은 평판 disc 형태로 지름 76 mm, 공극 크기가 10 kDa(YM10, Millipore, U.S.A.)과 100 kDa (YM100, Millipore, U.S.A.)인 친수성 재질(regenerated cellulose)의 UF 막과 막공 크기가 0.22 µm인 친수성 재질(mixed cellulose ester)의 MF 막(GVHP, Millipore, U.S.A.)을 각각 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 상수원수 유기물의 물리화학적 특성

본 실험에 사용된 NOM 시료수의 유기물 정상분석 결과와 각각의 SUVA 값을 Table 2에 나타내었다. 낙동강 원수의 경우 HPO-T가 43%, HPI-T가 39%, TPI가 18%를 차지하고

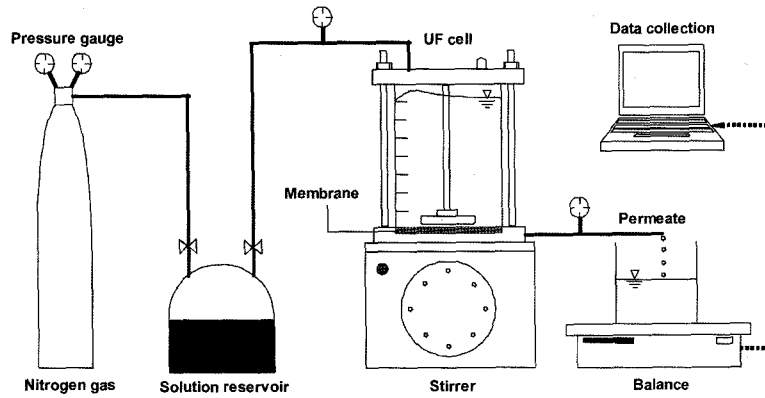


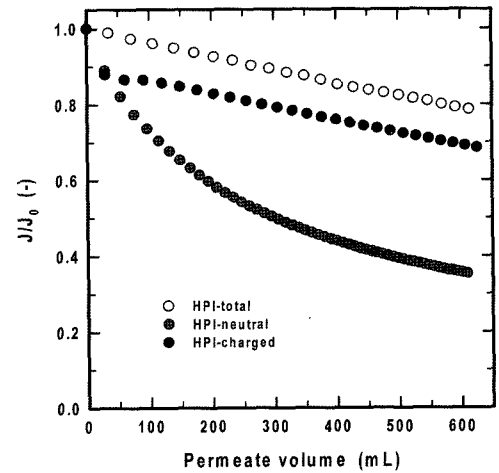
Fig. 2. Schematics of experimental setup for a batch cell (dead-end filtration).

있는 것으로 나타났다. HPO-T를 세분화한 결과에서 FA와 HA의 구성비는 각각 62%와 38%로 나타났으며 또한, 카르복실기와 페놀기로 분류한 경우 각각 64%와 36%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. HPI-T를 세분화하여 조사한 결과 HPI-N이 44%, HPI-C가 56%를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

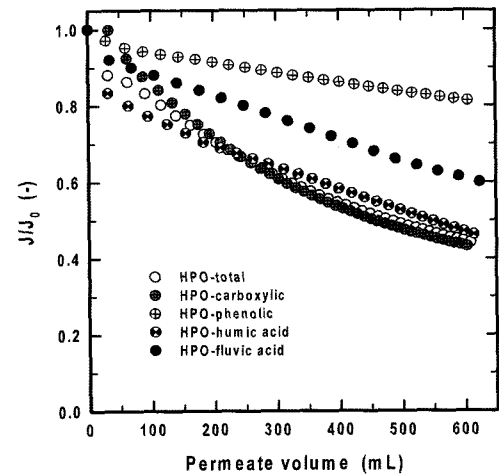
3.2. 유기물특성에 따른 막 오염 현상

UF 막을 이용하여 유기물 정상별 분류특성에 따른 투과 flux 변화를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 HPI-T를 HPI-N과 HPI-C로 세분화하여 투과 flux 변화를 살펴보았다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 HPI-C에 비하여 HPI-N이 막 오염을 더욱 많이 유발하는 것으로 나타나고 있다. HPI-N을 구성하는 물질은 polysaccharide류, aldehydes류, ketone류 등의 화합물들이며, Wiesner 등⁹⁾은 막 오염을 유발하는 물질로 단백질류, aminosugar류, polysaccharide류, polyhydroxyaromatic류 등의 4 종류 유기물질을 제시하였다. Amy와 Cho¹⁰⁾는 UF 공정에서 polysaccharide 물질이 주된 막 오염 유발물질로 작용한다고 보고하였으나, 지표수에는 polysaccharide 물질은 상대적으로 낮은 농도로 분포되어 있다. Mackey의 연구결과¹¹⁾에서도 polysaccharide와 단백질과 같은 고분자 화합물의 경우 막 오염을 더 많이 유발시키며 이들 물질이 혼합되

어 존재할 경우 막 오염은 더욱 증가한다고 보고하였다. Fig. 3(b)는 HPO-T를 카르복실기와 페놀기, HA와 FA로 분류하여 투과 flux 변화를 살펴보았다. Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 HA의 경우 FA에 비하여 막 오염을 더욱 많이 유발하는 것으로 나타나고 있다. 이는 HA의 경우 방향족 성분의 고분자 유기물질로 구성되어 FA에 비하여 더 큰 흡착영역을 가



(a) hydrophilic matter



(b) hydrophobic matter

Table 2. Organic fractions on DOC, UV₂₅₄ and SUVA in raw water

Fraction	DOC (mg/L)	UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	SUVA (m ² /mg/L)
Raw water	7.35	0.129	1.76
Hydrophobic fraction (HPO-T)	3.15	0.150	2.76
Fulvic acid (FA)	1.94	0.042	2.16
Humic acid (HA)	1.21	0.034	2.80
Carboxylic groups (Carbo.)	2.01	0.051	2.54
Phenolic groups (Pheno.)	1.14	0.028	2.45
Hydrophilic fraction (HPI-T)	2.89	0.042	1.45
Neutral-hydrophilic (HPI-N)	1.27	0.011	0.87
Charged-hydrophilic (HPI-C)	1.62	0.021	1.30
Transphilic fraction (TPI)	1.31	0.027	2.06

Fig. 3. Changes of permeate flux as a function of organic fraction matter using MWCO 100 kDa.

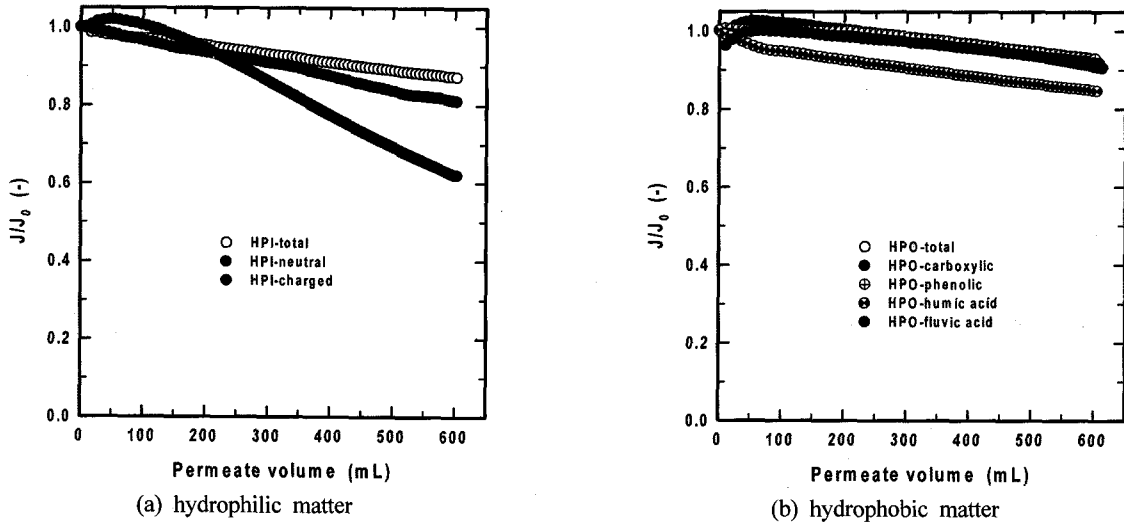


Fig. 4. Changes of permeate flux as a function of organic fraction matter using MWCO 10 kDa.

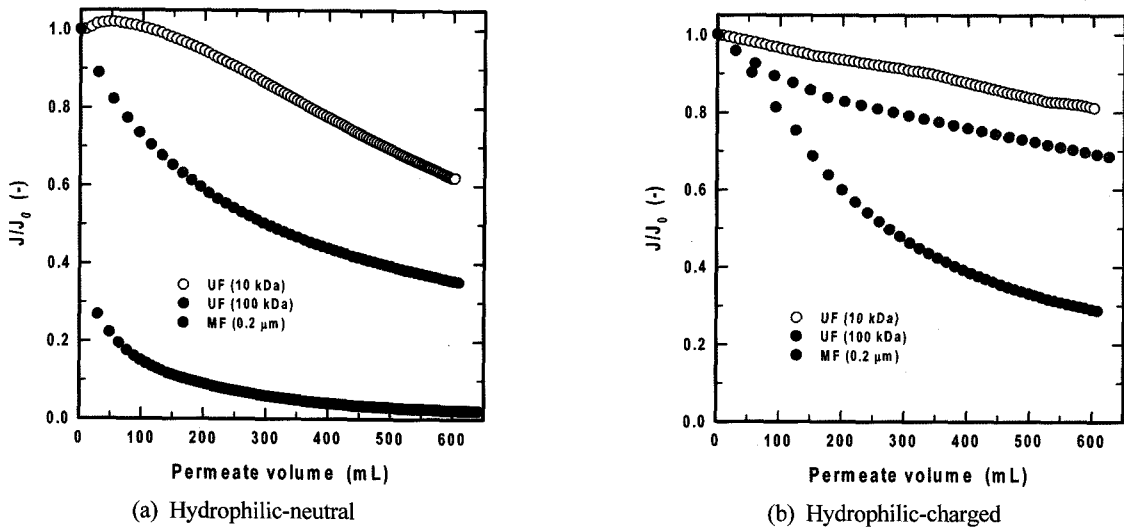


Fig. 5. Changes of permeate flux as a function of membrane pore size for hydrophilic matter.

지게 되어 많은 양의 유기물질이 막 표면 및 공극에 흡착되기 때문이다. Juker와 Clark의 연구결과¹²⁾에서도 HA의 경우 FA에 비하여 막 오염을 더 많이 유발하는 물질로 나타났다. 또한 작용기에 따른 막 오염 현상을 살펴보면 카르복실기의 경우 폐놀기에 비하여 투과 flux 감소가 크게 나타나고 있다. Lin 등¹³⁾의 이온강도와 작용기 특성에 따른 막 오염 현상에 대한 연구결과에서도 폐놀기 보다 카르복실기에 의해 투과 flux의 감소가 크게 나타나며, 카르복실기의 함량이 높을수록 막 오염이 많이 발생하여 투과 flux 감소율이 크게 나타나고 있음을 보고하였다.

Fig. 3과 동일한 실험조건에서 막의 공극크기를 10 kDa를 적용한 경우의 유기물 성상별 특성에 따른 투과 flux 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)에 나타난 친수성 계열 유기물질의 경우 전반적으로 100 kDa의 실험결과와 유사한 경향을 보이고 있으며, Fig. 4(b)에 나타난 소수성 유기물질의 경우는 HA가 가장 높은 투과 flux 감소를 보이고 있다. 그러나 유기물 성상별 특성에 따라 투과 flux의 변화는 거의 나

타나고 있지 않다. 100 kDa 막의 경우 유기물의 종류에 따라 투과 flux의 변화가 크게 나타나는 반면 10 kDa 막의 경우 유기물 종류에 대한 영향은 작게 받는 것으로 나타났다.

3.3. 막의 공극크기에 따른 막 오염 현상

막의 공극 크기에 따른 막 오염 현상을 세부적으로 파악하기 위하여 MWCO 10 kDa, 100 kDa의 UF 막과 0.2 μm MF 막을 이용하여 유기물 종류에 따른 투과 flux 변화를 살펴보았다. Fig. 5는 HPI-N과 HPI-C를 이용하여 막의 공극크기에 따른 투과 flux 변화를 살펴본 것으로 Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 HPI-N의 경우 0.22 μm의 MF 막이 98%의 flux 감소를 보이고 있으며 100 kDa UF 막과 10 kDa UF 막이 각각 65%, 38%의 flux 감소율을 보이는 것으로 나타나 막의 공극 크기가 커질수록 투과 flux 감소가 크게 나타나고 있다. Fig. 5(b)에 나타난 HPI-C의 경우는 0.22 μm MF 막이 71%의 flux 감소를 보이고 있으며, 100 kDa UF 막, 10 kDa UF 막 순으로 각각 31%와 19%의 투과 flux 감소율을 보이고

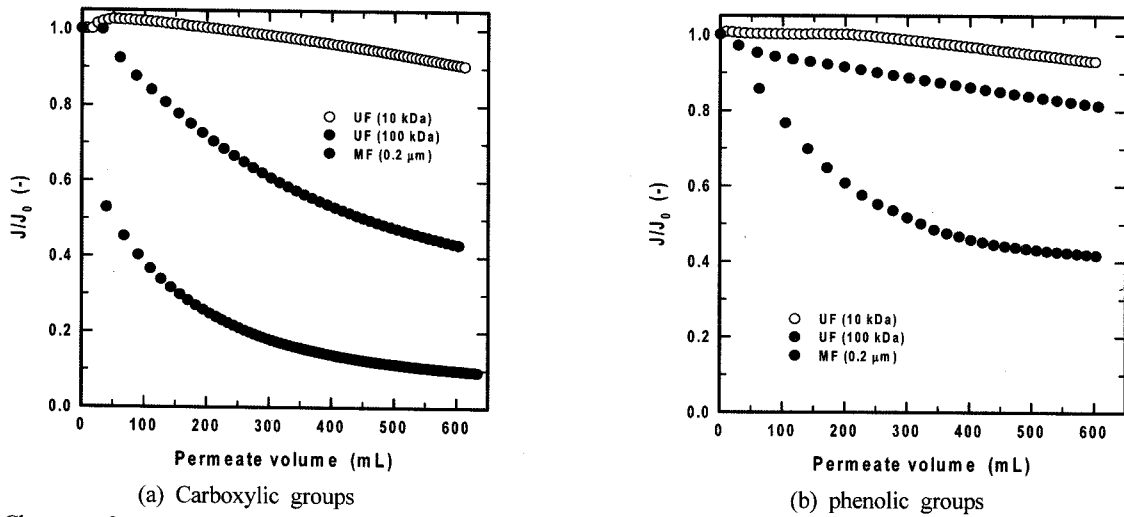


Fig. 6. Changes of permeate flux as a function of membrane pore size for functional group.

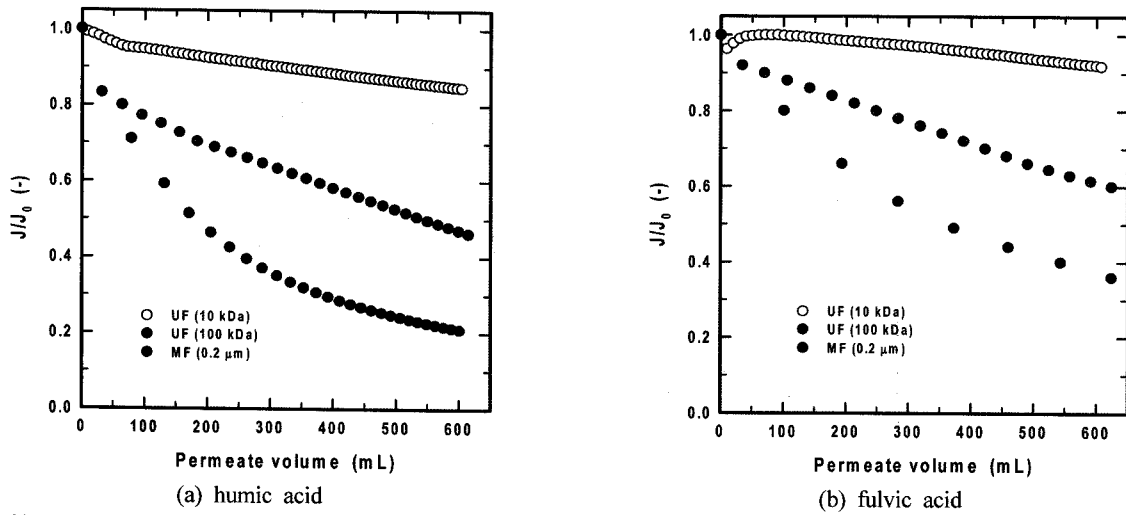


Fig. 7. Changes of permeate flux as a function of membrane pore size for hydrophobic matter.

있어 막 공극 크기가 커질수록 투과 flux 감소율이 크게 나타나고 있다. 이는 공극의 크기가 커질수록 공극 속으로 전달되는 고분자 유기물이 많이 발생하며 이러한 고분자 유기물이 공극을 막아버리는 현상에 의하여 투과 flux 감소가 발생함을 알 수 있다. 또한 공극의 크기가 큰 막의 경우 투과되는 양이 상대적으로 많기 때문에 운전초기에 많은 양의 유기물이 막으로 전달되어 막의 표면과 공극에 흡착되어 막 오염을 유발하는 것으로 판단된다. 이러한 연구결과는 Austin 등의 연구¹⁴⁾에서도 막의 공극 크기에 따라 투과 flux의 변화가 발생하였는데 10 kDa 막에 비하여 100 kDa 막의 경우 flux의 감소가 더 크다고 보고하였으며, Son 등¹⁵⁾의 연구에서도 100 kDa UF 막과 0.22 μm MF 막을 사용하여 다양한 전처리 공정의 적용에 따른 투과 flux의 변화를 조사한 결과, UF 막 보다는 MF 막에서의 flux 감소가 더 크게 나타나는 것으로 보고하였다. 또한, HPI-N의 경우 HPI-C에 비하여 투과 flux 감소를 더 많이 유발함을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 HPI-N은 polysaccharides, aldehydes, ketons 등의 화합물로 구성되어 있으며 이들 물질은 막분리 공정에

서 주요한 막 오염 물질로서 작용하기 때문이다. Fig. 6과 Fig. 7은 Fig. 5와 동일한 실험조건에서 소수성 유기물질 계열인 카르복실기, 페놀기, HA와 FA를 이용하여 막의 공극 크기에 따른 투과 flux 변화를 살펴보았다. 그림에서 나타난 바와 같이 Fig. 5의 친수성 계열의 투과 flux 경향과 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 6(a)의 카르복실기를 사용한 경우 0.22 μm 의 MF 막이 91%의 flux 감소를 보이고 있으며, 100 kDa UF 막, 10 kDa UF 막이 각각 57%, 10%의 flux 감소율을 보여 공극의 크기가 클수록 투과 flux 감소율이 크게 나타나고 있다. 페놀기의 경우 0.22 μm 의 MF 막이 58%의 flux 감소를 보이고 있으며, 100 kDa UF 막, 10 kDa UF 막이 각각 19%, 7%의 flux 감소율을 나타내어 카르복실기와 비교하여 투과 flux의 감소경향은 유사하나 카르복실기에 비하여 투과 flux의 감소는 작게 나타났다. 또한 Fig. 7의 HA와 FA를 사용한 경우 마찬가지로 공극의 크기가 클수록 투과 flux 감소율이 크게 나타나고 있으며 방향족 성분이 강하며 분자량 상대적으로 큰 HA의 경우가 FA 보다 투과 flux 감소율이 더 크게 나타나고 있다.

이상의 실험결과를 종합하여 보면 100 kDa 이상의 공극이 큰 막의 경우 HPI-N을 제외한 소수성 계열의 물질이 막 오염의 주된 물질로 작용하며 10 kDa 정도의 공극이 작은 막의 경우 친수성 계열의 물질이 막 오염의 주된 물질로 작용함을 알 수 있다.

4. 결론

1) 낙동강 원수의 경우 소수성 물질이 43%, 친수성 물질이 39%, 반친수성 물질이 18%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 소수성 물질을 세분화하여 조사한 결과 FA는 62%, HA는 38%로 나타났다. 또한, 소수성 물질 중에서 카르복실기는 64%, 페놀기는 36%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 친수성 물질을 세분화하여 조사한 결과 HPI-N이 44%, HPI-C가 56%를 차지하고 있었다.

2) 분류된 유기물질을 이용한 막 오염 평가결과, 친수성 유기물질 중 HPI-C에 비하여 HPI-N이 막 오염을 더욱 많이 유발하였으며, 소수성 유기물질에서는 HA가 FA에 비하여 막 오염을 더 많이 유발하였으며, 작용기에 따른 막 오염 현상을 살펴보면 카르복실기의 경우 페놀기에 비하여 투과 flux 감소가 더 크게 나타났다.

3) 공극의 크기에 따른 투과 flux 실험결과 공극의 크기가 커질수록 공극 속으로 전달되는 고분자 유기물이 많이 발생하며, 이러한 고분자 유기물이 공극을 막아버리는 현상에 의하여 공극의 크기가 클수록 투과 flux 감소가 많이 발생하는 것으로 나타났다.

4) 실험에 사용된 MF와 100 kDa UF 막의 경우 HPI-N, 카르복실기, HA, FA, HPI-C, 페놀기 순으로 막 오염을 많이 유발하는 것으로 나타났으며 10 kDa UF 막의 경우는 HPI-N, HPI-C, HA, 카르복실기, FA, 페놀기 순으로 막 오염을 많이 유발하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- MacCarthy, P. and Suffet, I. H., "Introduction: Aquatic humic substances and their influence on the fate and treatment of pollutants," *Aquatic Humic Substances: Influence on Fate and Treatment of Pollutants*, I. H. Suffet and P. MacCarthy, (Eds.) Washington, D. C., American Chemical Society(1989).
- Krasner, S., Mcguire, M. J., Jacangelo, J. G., Patania, N. L., Reagan K. M. and Aieta E. M., "The occurrence of disinfection by-products in drinking water in a nationwide survey," *Proceedings, AWWA Annual Conference*, Los Angeles, Calif. Denver, Colo., AWWA(1989).
- Wiesner, M. R. and Chellam, S., "The promise of membrane technology an expanded understanding of membrane technology is fostering new environmental applications," *Envi. Sci. Technol.*, **33**(17), 360~366(1999).
- Thurman, E. M., *Organic Geochemical of Natural Waters*, Kluwer Academic, Boston, MA, U.S.A., pp. 497~498 (1985).
- Bolto, B., Dixon, D., Eldridge, R., King, S., and Toifl, M., "The use of cationic polymers as primary coagulants in water treatment," *Chemical Water and Wastewater Treatment V*, Hahn, H. H., Hoffman, E. and Odegaard, H.(Eds.), Springer, Berlin, pp. 171~185(1998).
- Leenheer, J. A., Noyes, T. I., and Stuber, H. A., "Determination of polar organic solutes in oil-shale retort water," *Envi. Sci. Technol.*, **16**(10), 714~723(1982).
- Leenheer, J. A. and Noyes, T. I., *A Filtration and Column-Adsorption System for Onsite Concentration and Fractionation of Organic Substances from Large Volume of Water*, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2230, U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C. (1984).
- Reckhow, D. A., Bose, P., Bezbarua, B., Hesse, E. M., and Mcknight, A. P., *Transformations of Natural Organic Material during Preozonation*, EPA Report, U.S. Environmental Protection Agency, Drinking Water Research Division, Cincinnati, Ohio(1992).
- Wiesner, M. R., Clark, M. M., Jacangelo, J. G., Lykins, B. W., and Marinas, B. J., "Committee report: membrane processes in potable water treatment," *J. AWWA*, **84**(1), 59~67(1992).
- Amy, G. and Cho, J., "Interactions between natural organic matter(NOM) and membranes: rejection and fouling," *Removal of Humic Substances from Water*, Ø degaard H. (Ed), IWA Publishing, pp. 141~148(1999).
- Mackey, E. D., *Fouling of Ultrafiltration and Nanofiltration Membranes by Dissolved Organic Matter*, Ph. D Dissertation, Rice University(1999).
- Jucker, C. and Clark, M. M., "Adsorption of aquatic humic substances on hydrophobic ultrafiltration membranes," *J. Membrane Sci.*, **97**, 37~52(1994).
- Lin, C. F., Liu, S. H., and Hao, O. J., "Effect of functional group of humic substances on UF performance," *Water Res.*, **35**(10), 2395~2402(2001).
- Aoustin, E., Schafer, A. I., Fane, A. G., and Waite, T. D., "Ultrafiltration of natural organic matter," *Sep. and Puri. Tech.*, **22**(23) 63~78(2001).
- Son, H. J., Hwang, Y. D., Roh, J. S., Ji, K. W., Sin, P. S., Jung, C. W., and Kang, L. S., "Application of MIEX[®] pre-treatment for ultrafiltration membrane process for NOM removal and fouling reduction," *Proceedings of 3rd IWA Leading Edge Technology Conference*, Sapporo, Japan(2005).