

원수의 물리·화학적 특성에 따른 막 분리 공정의 전처리 공정 적용성 평가

정철우·손희종^{†*}·배상대^{**}

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

(2005년 10월 10일 접수, 2006년 6월 14일 채택)

Effect of Pretreatment Process on Hybrid Membrane Filtration Performance

Chul-Woo Jung · Hee-Jong Son^{†*} · Sang-Dae Bae^{**}

Ulsan Regional Innovation Agency, Ulsan Industry Promotion Techno Park

*Water Quality Research Institute, Waterworks Headquarter, Busan · **Department of Environmental Engineering, Silla University

ABSTRACT : The objectives of this research are to evaluate the effect of membrane materials, particulate matter and membrane pore size on permeate flux. It was shown that the removal efficiency of high MW organic matter more than 10 kDa was lower than that of low MW organic matter for MIEX[®] process. For the change of permeate flux by the pretreatment process, MIEX[®] + UF process showed high removal efficiency of organic matter as compared with coagulation + UF processes, but high reduction rate of permeate flux was presented through the reduction of removal efficiency of high MW organic matter. The pretreatment of the raw water significantly reduced the fouling of the hydrophilic membrane, but did not decrease the flux reduction of the hydrophobic membrane. Flux decline on MF process increased due to the pore clogging, while the permeate flux decline of UF process decreased due to the formation of cake layer. It was shown that particle matter was not effect on MIEX + membrane process. But, for coagulation+membrane process, particle matter was important factor on permeate flux.

Key Words : Coagulation, MIEX[®], Low Pressure Membrane, Particle, Permeate Flux

요약 : MIEX[®]와 응집에 의한 분자량 크기별 제거특성에서는 10 kDa 미만의 유기물질에 대해서는 MIEX[®] 처리가 우수한 제거능을 나타내었으나, 10 kDa 이상의 유기물질은 응집 공정에서 높은 제거능을 가지는 것으로 나타났다. 막의 공극 크기에 대한 투과 flux 실험결과 UF 공정에 비하여 MF 공정에서의 투과 flux 감소율이 낮게 나타나고 있으며, MF 공정에 적용된 전처리 공정중 MIEX[®] + MF 공정의 경우 응집 + MF 공정에 비하여 투과 flux 감소율이 낮게 나타나고 있다.

MIEX[®] + UF 공정의 경우 입자상 물질의 존재 유무에 상관없이 flux 감소율은 거의 유사하게 나타났으나, 응집 + UF 공정의 경우에는 용존성 유기물질만이 존재하는 시수에 비하여 입자상 물질이 존재하는 경우 투과 flux 감소율은 작게 나타났다.

응집 공정의 적용 후 다양한 입도분포 변화가 발생하였으며, pH 7에서 MIEX[®] 입자의 제타전위 측정결과 MIEX[®] 입자의 전하는 평균 -2.3 mV로 나타나 전기화학적으로 입자상 물질의 흡착이 가능하며 MIEX[®]가 침전됨에 따라 입자상 물질이 sweep되어 입도분포 변화를 보였다.

주제어 : 응집, MIEX[®], 저압 멤브레인, 입자, 투과 플럭스

1. 서 론

막분리 공정은 수처리 공정에서 재래식 공정을 대체하여 입자상물질에서 용존성 염류까지 다양한 오염물질을 제거할 수 있는 공정으로 현재 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁾ 또한 막분리 공정은 물리적으로 오염물질을 분리할 수 있으며 화학제의 첨가를 최소화할 수 있다. 기존에 널리 사용되었던 막은 높은 압력이 요구되며 공업용수내의 염을 제거하기 위하여 역삼투막(Reverse Osmosis)을 중심으로 연구되어 폭넓은 분야로 개발되어 사용되어 왔으며 현재 정수처리에서 사용

되는 막 분리 공정은 역삼투막(Reverse Osmosis)을 비롯하여 NF(Nanofiltration), UF(Ultrafiltration), MF(Microfiltration) 그리고 전위차를 이용한 ED(Electrodialysis) 등을 들 수 있다.^{2,3)} 현재는 낮은 압력을 이용하여 비용을 줄이는 방법으로 NF와 그 이하의 압력에서도 사용가능한 UF와 MF의 사용방법에 대한 연구가 이루어지고 있다. 하지만 공극이 큰 UF의 경우, UF 단독사용으로는 효과적인 용존성 유기물 제거가 어려우며, 용존성 유기물 제거를 위해서는 적절한 전처리 공정을 결합하여야 한다. 또한 UF 공정의 사용시 입자상 물질에 의한 막 오염 현상이 발생함으로 입자상 물질에 대한 영향도 고려되어야 한다. 이에 따라 막 분리 공정의 전처리 공정으로 다양한 처리공정이 적용되고 있으며 이중 수종의 용존 유기물질들의 제거에 매우 효과적이며, 쉽게 재생이 가능한 이온교환 수지가 많이 부각되고 있다. 이온교환

† Corresponding author

E-mail: menuturk@hanmail.net

Tel: 055-323-4718

Fax: 055-323-4719

공정(ion exchange process)은 초기 투자비가 낮고, 운전이 간편한 이점이 있어 세계 각국에서 수처리에 이온교환 공정을 많이 채택하고 있는 추세이다.⁴⁻⁷⁾ 자성체 이온교환 수지(magnetic ion exchange resin: MIEX[®])는 기존의 이온교환 수지들과 비교하여 높은 비표면적(specific surface area)을 가지며, 용존 유기물질들과의 빠른 반응속도 및 수중에서 침전속도가 빨라 반응 후에 수층(liquid phase)으로부터 수지를 분리하여 물과 혼탁하여 반응시키는 장점을 가지고 있다.^{6,8)} 하지만 이온교환 수지의 특성상 입자상 물질의 제거는 큰 효과가 없는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 MIEX[®] 적용에 따른 유기물 제거특성을 파악하고자 하였으며 막 분리공정의 전처리 공정으로 MIEX[®] 공정과 응집 공정을 적용하여 전처리 공정에 따른 유기물의 제거특성을 파악하였고, MIEX[®]와 응집 공정 적용에 따른 UF 막의 fouling 특성과 투과 flux 변화를 조사하여 다양한 전처리 공정의 적용에 따른 입자상 물질이 막 오염에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 원수 성상

실험에 사용된 시수는 부산시의 상수원수로 이용되고 있는 낙동강 하류 매리지역 원수(NOM)를 사용하였다. NOM 시료는 DOC 농도를 높이기 위하여 rotary evaporator(R205, Büchi, Germany)를 사용하여 30°C에서 2배 농축하여 GF/C 여지(Whatman, England)로 입자성 물질을 제거한 여과수(filtered NOM)와 제거하지 않은 원수(unfiltered NOM)로 구분하여 실험하였다. 실험에 사용된 시료수의 성상을 Table 1에 나타내었다. 실험은 탁도물질(particle)의 유무에 따른 MIEX[®] + UF 공정에서의 막 오염 특성을 평가하였다.

2.2. 실험방법

유기물질 제거를 위한 응집 및 MIEX[®] 실험은 jar-tester (PB-700, phipps & bird, U.S.A.)에서 2 L jar를 사용하였으며, 응집제(coagulant)나 MIEX[®]의 최적 주입량 결정은 처리수의 DOC를 분석하여 DOC 제거율이 가장 높은 주입량을 최적 주입량으로 결정하였다. 응집제는 부산지역의 정수장에서 많이 사용되고 있는 알루미늄계 응집제인 PSO-M(서정화학, Al₂O₃ 7%)을 사용하였으며, 급속혼화 250 rpm 1분, 완속혼화 30 rpm 5분의 조건으로 정치 조건 없이 수행하였다.

Table 1. Characteristics of sample waters quality

Item		Unfiltered NOM	Filtered NOM
pH	(-)	7.6	7.2
Alkalinity	(mg/L as CaCO ₃)	66	64
DOC	(mg/L)	4.64	4.48
UV ₂₅₄	(cm ⁻¹)	0.1042	0.1036
SUVA	(L/mg-m)	2.25	2.31
Turbidity	(NTU)	11	0.6

MIEX[®] 실험조건은 MIEX[®]를 시료수에 주입하여 100 rpm으로 30분 동안 접촉시킨 후 15분간 정치하였다. 본 실험에 사용된 batch형 UF 멤브레인 장치(Millipore, U.S.A.)는 막힘형 형태(dead-end flow)를 사용하였다. 원수를 응집 및 MIEX[®] 처리하여 5 L 용량의 스테인레스 스틸 저류조에 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 않고 실험을 진행하였다. 사용된 UF 막은 pore size가 100 kDa, 투과면적 45.34 cm²인 친수성 재질인 regenerated cellulose(YM100, Millipore, U.S.A.)와 소수성 재질인 polyethersulfone(PBHK, Millipore, U.S.A.)을 사용하였으며, MF막은 pore size가 0.22 µm이고 친수성 재질인 mixed cellulose ester(GVHP, Millipore, U.S.A.)를 사용하였다. 적용압력은 UF 막은 28 psi, MF막은 14 psi로 고정하였으며 막 투과 flux는 전자저울(PB5001-s, Mettler-toledo, Switzerland)을 이용하여 투과수의 무게를 측정하여 부피로 환산하였다. 시료수에 대한 막 분리 실험은 1 시간 동안 운전하였고, 투과 flux는 1분마다 측정하였다.

2.3. 분석방법

DOC와 UV₂₅₄는 0.2 µm 멤브레인 필터로 여과 후 TOC analyzer(Sievers 820, Sievers, U.S.A.)와 UV-Vis spectrophotometer(UV-2401PC, Shimadzu, Japan)로 분석하였다. 소수성/친수성(hydrophobic/hydrophilic) 유기물질 분류는 XAD-8 수지(Supelco, U.S.A.)를 이용하였으며, 분자량 분포 측정엔 UF 장치(Millipore, U.S.A.)를 사용하였다. 또한, 멤브레인 필터(Millipore, U.S.A.)는 MWCO(Molecular Weight Cutoffs)가 1, 3, 10, 100 kDa인 것을 사용하였다. 입자상 물질의 측정엔 입도분석기(Model 770A, Accusizer, U.S.A.)를 사용하여 입자상 물질의 크기와 개수를 측정하였다. 또한, MIEX[®]의 표면전하는 Electrophoretic Light Scattering(ELS-8000, Otsuka, Japan)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원수의 물리·화학적 특성

시료수 중에 함유된 유기물질의 물리·화학적 특성을 Table 2에 나타내었다. 물리·화학적 특성은 유기물 성상별 특성과 분자량 분포 특성에 대하여 각각 나타내었다. 시료수는 소수성 물질 58.2%, 친수성 물질 41.8%로 나타났다. 분자량 분포 특성결과 1 kDa 이하의 물질이 43.3%, 10 kDa 이상의 물질이 14.8%를 차지하고 있으며 대부분의 유기물질이 10 kDa 미만의 저분자 물질들로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 따라서 낙동강 원수의 분자량 분포 특성에 의하면 MWCO 30 kDa UF막을 단독으로 적용할 경우 UF막의 공극크기보다 적은 저분자량의 유기물은 여과효율이 저조하여 효과적인 유기물 제거를 기대할 수 없다고 판단되었으며, Laine의 연구⁹⁾에서도 적절한 전처리 없이 UF 공정을 단독으로 적용할 경우 효과적으로 유기물 제거를 할 수 없다고 보고하였다.

Table 2. DOC contents of organic fractions and AMWD for used water in this study

AMWD	Filtered NOM
1 kDa >	43.3%
1-3 kDa	21.1%
3-10 kDa	21.8%
10 kDa <	14.8%
Organic fraction	Filtered NOM
Hydrophobic	58.2%
Hydrophilic	41.8%

3.2. MIEX[®]와 응집제 투입량에 따른 용존성 유기물질 성상별 제거특성

응집 및 MIEX[®] 처리에 따른 유기물 성상별 제거특성에 대하여 Fig. 1에 나타내었다. 각 공정의 운전조건은 MIEX[®] 주입량은 12 mL/L, 응집제 주입량은 100 mg/L, MIEX[®] + 응집 공정의 경우 MIEX[®] 12 mL/L, 응집제 주입량 20 mg/L에서 운전하였다. NOM 시료수의 유기물 성상별 제거특성을 나타낸 Fig. 1(a)를 살펴보면 응집 공정에 의한 총 DOC 제거율은 37%로 나타났고, 소수성 물질 제거율이 46%로 친수성 유기물질 25%에 비하여 높은 제거율을 보였다. MIEX[®] 공정의 경우는 총 DOC 제거율이 69%로 나타나 응집 공정에 비해 32% 정도 높은 제거율을 보였고, 친수성 및 소수성 물질의 제거율도 각각 56%, 78%로 조사되어 응집 보다 MIEX[®] 처리가 친수성과 소수성 유기물질의 제거율에 효과적인 것으로 나타났다. MIEX[®] + 응집 공정의 경우 총 DOC 제거율이 76%로 나타났으며, 친수성과 소수성 물질의 제거율도 각각 64%, 85%로 나타났다. Lee 등의 연구⁸⁾에서도 MIEX[®]를 이용한 NOM의 제거시에 응집과 비교하여 transphilic과 hydrophilic acid의 제거효율이 높게 나타났다고 보고하고 있다.

응집과 MIEX[®] 처리에 따른 분자량 분포별 제거특성을 Fig. 1(b)에 나타내었다. Fig. 1(b)는 NOM 시료수의 분자량 분포별 제거특성을 나타낸 것으로 응집처리시에는 1 kDa 미만의 유기물질은 7% 정도의 제거율을 나타내었고, 1~3 kDa, 3~10 kDa 및 10 kDa 이상의 유기물질의 경우 각각 44%, 64% 및 76%의 제거율을 나타내어 저분자에서 고분자 유기물로 갈수록 응집에 의한 제거율은 상승하였다. MIEX[®] 처리에 의해서는 1 kDa 미만의 유기물질이 60%, 1~10 및 10 kDa 이상의 유기물질 제거율은 각각 85%, 47%로 나타나 MIEX[®] 처리에 의해서는 10 kDa 이상의 고분자 유기물질들에 대한 제거율이 저분자 유기물질에 비해 낮은 것으로 나타났다. Lee 등의 연구결과⁸⁾에 따르면 MIEX[®] 처리에 의한 NOM 제거 mechanism은 MIEX[®] 표면의 chloride ion과 negative charge를 띠는 NOM과의 이온교환에 의한 것으로서 저분자 유기물질과 높은 전하밀도를 띠고 있는 NOM 성분이 MIEX[®] 처리에 의하여 더 선택적으로 제거된다고 보고하고 있다. 특히 100 kDa 이상의 고분자 유기물질에 대해서 응집 공정과 MIEX[®] 공정의 제거율은 상당한 차이를 보이는 것

으로 나타났다. 따라서, 분자량 크기별 제거특성에서는 10 kDa 미만의 유기물질에 대해서는 MIEX[®] 처리가 우수한 제거능을 나타내었으나, 10 kDa 이상의 유기물질은 응집 공정에서 높은 제거능을 가지는 것으로 나타났다.

3.3. MIEX[®]와 응집 공정의 적용에 따른 UF 공정에서의 막 투과 flux 변화

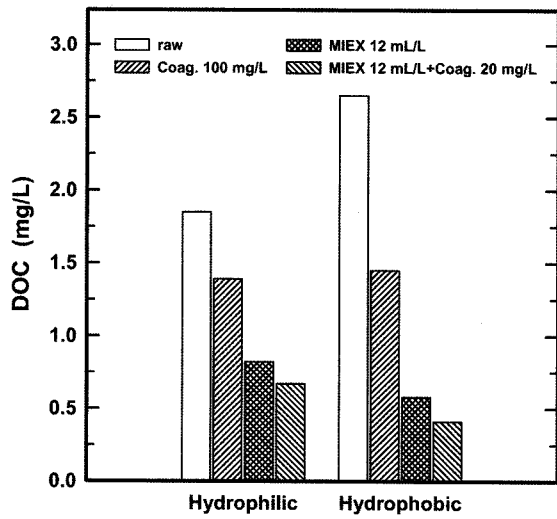
MIEX[®] 공정과 응집 공정을 UF 공정의 전처리 공정으로 적용하여 막의 재질에 따른 투과 flux 변화를 살펴보았다. Fig. 2(a)는 친수성 재질의 막을 사용한 실험결과를 나타내었으며, Fig. 2(b)는 소수성 재질 막을 사용하여 나타난 결과로 UF 단독, 응집 + UF, MIEX[®] + UF, MIEX[®] + 응집 + UF 공정에 대하여 투과 flux 변화를 살펴보았다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 막 재질에 따른 투과 flux 변화는 친수성 막에 비하여 소수성 막에서 전체적으로 투과 flux 감소율이 더 크게 나타나고 있다. 이는 소수성 막의 경우 친수성 막에 비하여 “hydrophobic interaction”에 의하여 투과 flux의 감소가 나타나는 것으로 나타났다. Jonsson과 Jonsson의 연구¹⁰⁾에서도 친수성 막에 비하여 소수성 막에서 유기물 흡착율이 더 높은 것으로 보고하였다. 또한 전처리 공정으로 MIEX[®]와 응집 공정을 각각 적용한 경우는 UF 단독공정에 비하여 투과 flux 감소율이 낮게 나타나고 있다. 이는 MIEX[®] + UF 공정의 경우 MIEX[®] 처리에 의해 유기물 부하 감소로 투과 flux 감소율이 낮게 나타나고 있고, 응집+UF 공정의 경우에는 유기물질들과 미세입자들이 응집에 의해 큰 플록으로 전환됨에 따라 막 표면에 케이크 층을 형성하여 투과 flux의 감소율이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

전처리 공정에 따른 투과 flux 변화를 살펴보면 MIEX[®] + UF 공정의 경우 응집 + UF 공정에 비하여 높은 유기물 제거율에도 불구하고 투과 flux 감소율이 크게 나타나고 있다. 이는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 MIEX[®] 처리 후에는 10 kDa 이상을 제외한 전 분자량 분포대에서 응집처리 한 경우 보다 낮은 유기물질 농도를 나타내어 MIEX[®] + UF 공정의 경우 MIEX[®]에 의하여 제거가 어려운 10 kDa 이상의 유기물질이 막 오염에 기여하였다고 판단되었다.

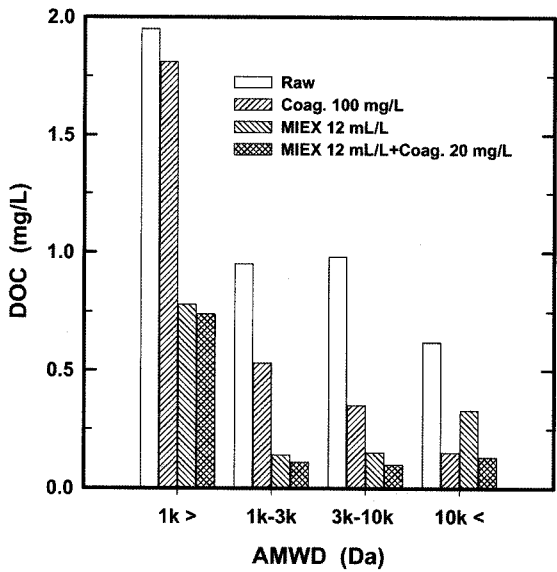
UF 전처리 공정으로 MIEX[®] + 응집 공정을 적용한 경우에는 MIEX[®] + UF 공정과 응집+UF 공정을 적용한 경우에 비하여 투과 flux의 감소율이 더 낮게 나타나고 있다. 이는 Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 MIEX[®]는 응집에 의하여 제거가 어려운 저분자 유기물질을 주로 제거하며, 응집 공정의 경우는 막 오염 유발물질인 고분자 유기물질을 제거하기 때문에 MIEX[®]에 의한 높은 유기물 제거와 응집에 의한 flocc 형성으로 막 표면에서 다공성 케이크 층이 형성되어 투과 flux 감소율이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

이에 따라 Fig. 2(c)는 막의 공극 크기에 대한 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 2(a)와 (b)와 동일한 실험조건에서 MF 막을 이용하여 투과 flux 변화를 살펴보았다. 그림에서 나타난 바와 같이 MF 공정 적용결과 UF 공정 적용과 상반된 결과를 보이고 있으며, 응집 + MF 공정의 경우 투과 flux 감

소용이 가장 크게 나타나고 있으며 MIEX[®] + MF 공정의 경우 응집 + MF 공정에 비하여 투과 flux 감소율이 낮게 나타나고 있다. 이러한 현상은 MF 막의 경우 잔류하는 유기물질의 분자량 분포보다 공극의 크기가 크기 때문에 flux 감소에 미치는 영향은 MIEX[®]에 의하여 제거되지 않고 잔존하는 고분자 유기물질들 보다 응집에 의해 형성된 미세 floc들이 MF 막의 표면에서 cake 층을 형성하기 보다는 막의 공극을 막는 clogging 현상을 유발하여 나타난 결과로 판단된다. Jung과 Kang의 연구¹¹⁾에서도 공극이 큰 막의 경우 막표면에서 다공성 케이크 층을 형성하여 투과 flux 감소율이 낮게 나타났으며 반면 공극의 크기가 작은 막의 경우 공극의 막힘현상에 의하여 투과 flux 감소율이 상대적으로 크게 나타난다고 보고하였다.¹¹⁾

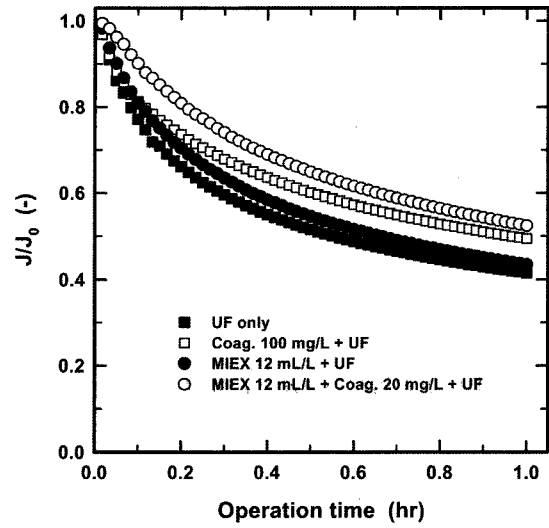


(a) Filtered NOM

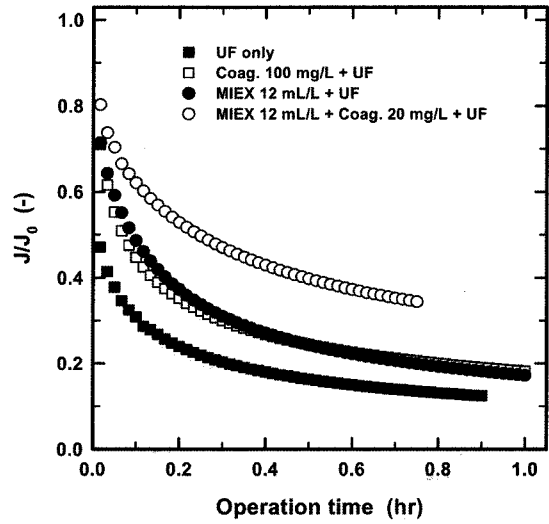


(b) Filtered NOM

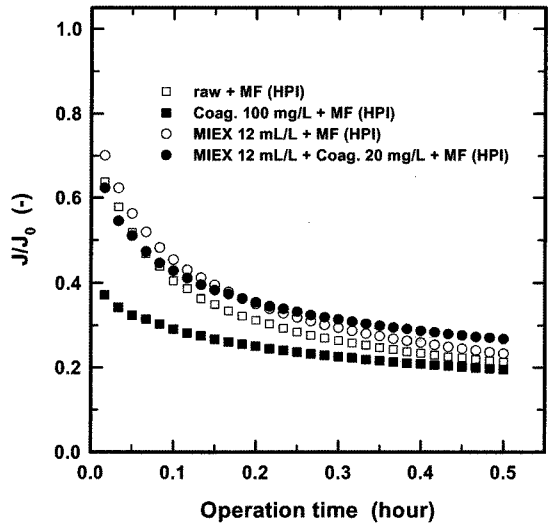
Fig. 1. Comparison of organic fraction and AMWD between raw water and treated water.



(a) Hydrophilic UF membrane



(b) Hydrophobic UF membrane



(c) Hydrophilic MF membrane

Fig. 2. Changes in permeate flux of UF membrane under various pretreatment conditions using NOM(without particle).

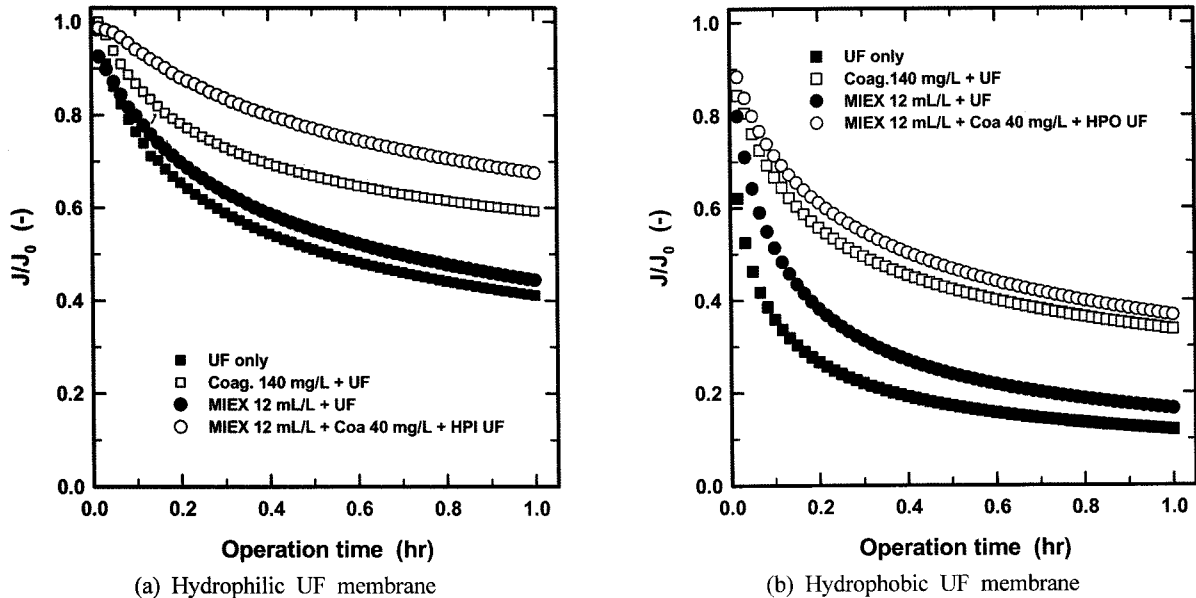


Fig. 3. Changes in permeate flux of UF membrane under various pretreatment conditions using NOM(with particle).

3.5. MIEX[®]와 응집 공정의 적용에 따른 UF 공정에서 입자상물질의 영향

Fig. 3은 입자상 물질의 영향을 살펴보기 위하여 NOM 시료수의 탁도를 11 NTU로 조정하여 Fig. 2와 동일한 실험 조건에서 투과 flux 변화를 살펴보았다. Fig. 2의 실험결과와는 달리 입자상 물질이 존재할 경우 적용된 전처리 공정에 따라 투과 flux의 변화는 크게 나타나고 있다. 특히 MIEX[®] + UF 공정의 경우는 입자상 물질의 존재 유무에 상관없이 거의 유사한 경향을 보이고 있으나 응집 + UF 공정의 경우 용존성 유기물질만이 존재하는 시수에 비하여 입자상 물질이 존재하는 경우 투과 flux 감소율은 작게 나타났다. 이는 응집 공정의 특성상 입자상 물질이 존재하는 경우 입자상 물질이 존재하지 않는 시수에 비하여 보다 큰 floc이 형성되어

막 표면에서 다공성 케이크 층을 형성하여 용존 유기물질로만 구성된 시료수에 비하여 투과 flux 감소율이 더 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 이러한 현상을 규명하기 위하여 MIEX[®]와 응집 공정 적용시 수중의 입자상 물질의 변화특성을 살펴 보았다.

Fig. 4는 입자상 물질이 존재하는 경우 전처리 조건에 따른 수중의 입도분포 변화를 나타내었다. 입자상 물질이 존재하는 경우 응집 공정 후 수중의 입자들이 보다 큰 floc으로 전환되어 15 μm 이하의 입자들은 감소하고, 15~40 μm 사이의 입자들이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 응집 + UF 공정의 경우 원수에 존재하는 미세입자가 큰 floc를 형성함으로써 막 표면에서 다공성 케이크 층을 형성하여 투과 flux 감소가 낮게 나타나고 있다. MIEX[®]를 12 mL/L 처리 후에

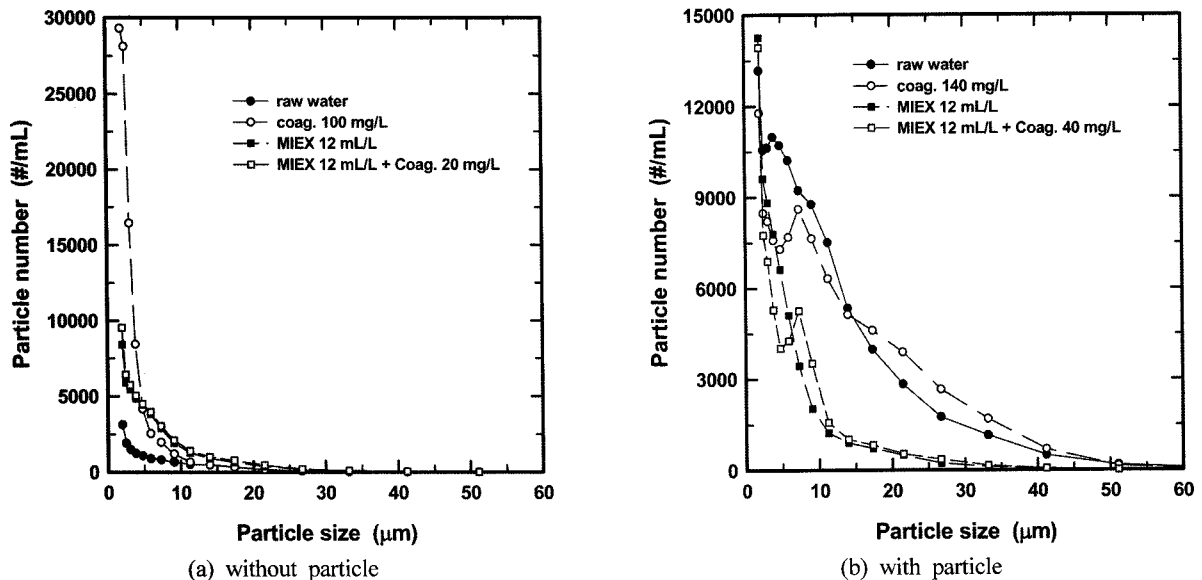


Fig. 4. Distribution of particle number among particle size for various treatment processes.

는 원수에 비하여 3~50 μm 사이의 입자들의 감소가 두드러지게 나타나고 있다. 이는 원수 중에 함유된 입자상 물질이 MIEX[®] 처리 후 침전시키는 동안 MIEX[®]가 침전됨에 따라 입자상 물질이 sweep되어 입도분포 변화를 나타내는 것으로 판단되며, 또한 입자의 전하가 음전하를 띠고 있어 MIEX[®] 수지 표면의 활성점(active site)에서 이온교환 작용에 의해 제거된 것으로 판단된다. 이는 MIEX[®] 입자의 제타전위 측정결과 pH 7의 중성에서 전하는 평균 -2.3 mV로 나타나 전기화학적으로 입자상 물질을 충분히 흡착할 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 MIEX[®]를 12 mL/L 처리 후에는 원수에 비하여 미세입자의 분포가 현저히 줄어들어 투과 flux 감소율도 낮게 나타나고 있다. MIEX[®] 12 mL/L 처리 후 응집제를 40 mg/L 투입하여 응집하였을 경우 MIEX[®]를 단독으로 처리한 경우에 비하여 7 μm 이하의 입자들이 감소하고, 7~20 μm 사이의 입자들이 증가하는 것으로 나타났다. MIEX[®]를 처리 후 응집 공정을 적용함에 따라 응집 공정에 의하여 미세입자와 용존성 유기물질의 응집이 발생하여 입도분포가 변화하였고, 이에 따라 전처리 공정으로 MIEX[®]를 단독으로 적용한 경우 보다 MIEX[®]+응집+UF 공정의 경우가 투과 flux 감소가 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다.

막의 투과 flux에 입자상 물질의 영향을 살펴보기 위하여 앞서 실시한 친수성 재질의 막을 이용한 투과 flux 실험결과를 바탕으로 각 운전조건에 따른 막의 저항을 산정하여 Table 3에 나타내었다. 막의 저항값 산정을 위해서는 식 (1)을 사용하였으며 식 (1)에서 J 는 투과 flux, ΔP 는 적용된 압력, R_T 는 저항의 합이며 $R_T = R_m + R_g + R_c + R_i$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서 R_m 은 막 자체의 고유저항으로 깨끗한 막을 이용하여 순수를 투과하여 구할 수 있으며, R_g 는 막에서 발생하는 저항의 총합으로 시수를 투과한 후 flux를 산정하여 나타낼 수 있다. 여기서 R_g 는 겔층의 형성에 의한 저항값, 케이크 층 형성에 의한 저항값, 비가역적 오염에 의한 저항값을 합한 것으로 표현할 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_T} \quad (1)$$

Table 3에 나타난 바와 같이 UF 단독공정의 경우 입자상 물질이 존재하는 경우 막에서 발생하는 저항값은 크게 나타나고 있으며, MIEX[®]+응집+UF 공정에서는 입자상 물질이 존재할 경우는 입자상 물질이 존재하지 않는 경우에 비해 낮은 저항값을 보이고 있다. 그러나 응집+UF 공정의 경우 입자상 물질의 존재 유무에 따라 저항값의 차이는 거의 유사하게 나타나고 있으나 MIEX[®]+UF 공정의 경우 입자상 물질의 존재 유무에 따라 저항값의 차이가 많이 발생하고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 입자상 물질이 존재할 경우 응집+UF 공정에서는 응집에 의하여 flocc을 형성함에 따라 막의 표면에서 다공성 케이크 층을 형성함으로써 저항값이 다소 낮아짐을 알 수 있으며, MIEX[®]+UF 공정의 경우 UF 단독공정과 마찬가지로 MIEX[®] 공정에서 제거되지 못한 미세입자들에 의하여 저항값이 상대적으로 높게 나타나고 있다.

Table 3. Cake resistance at different pre-treatment conditions of hydrophilic UF membranes

Hydrophilic membrane	R_m		$R_f(R_g+R_c+R_i)$	
	with particle	w/o particle	with particle	w/o particle
UF only	6.2×10^{11}	6.5×10^{11}	6.5×10^{11}	1.8×10^{11}
Coag.+UF	6.2×10^{11}	6.5×10^{11}	2.2×10^{11}	1.36×10^{11}
MIEX [®] +UF	6.2×10^{11}	6.5×10^{11}	5.3×10^{11}	1.74×10^{11}
MIEX [®] +Coag.+UF	6.2×10^{11}	6.5×10^{11}	0.8×10^{11}	1.28×10^{11}

4. 결론

- 1) 원수의 물리·화학적 특성 분석결과 사용된 원수의 경우 소수성 물질 58.2%, 친수성 물질 41.8%로 나타났다. 분자량 분포 특성결과 1 kDa 이하의 물질이 43.3%, 10 kDa 이상의 물질이 14.8%를 차지하고 있으며 대부분의 유기물질이 10 kDa 미만의 저분자 물질로 구성되어 있다.
- 2) 분자량 크기별 제거특성에서는 10 kDa 미만의 유기물질에 대해서는 MIEX[®] 처리가 우수한 제거능을 나타내었으나, 10 kDa 이상의 유기물질은 응집 공정에서 높은 제거능을 가지는 것으로 나타났다.
- 3) 막 재질에 따른 투과 flux 실험결과 소수성 막의 경우 막 오염 유발물질이 막 표면과 빠르게 반응하여 친수성 막에 비하여 투과 flux 감소율이 더 크게 나타났다.
- 4) 막의 공극 크기에 대한 투과 flux 실험결과 UF 공정에 비하여 MF 공정에서의 투과 flux 감소율이 낮게 나타나고 있으며 MF공정에 적용된 전처리 공정 중 MIEX[®]+MF 공정의 경우 응집+MF 공정에 비하여 투과 flux 감소율이 낮게 나타나고 있다.
- 5) MIEX[®]+UF 공정의 경우 입자상 물질의 존재 유무에 상관없이 거의 유사한 경향을 보이고 있으나 응집+UF 공정의 경우 용존성 유기물질만이 존재하는 시수에 비하여 입자상 물질이 존재하는 경우 투과 flux 감소율은 작게 나타났다.
- 6) 응집 공정의 적용후 다양한 입도분포 변화가 발생하였으며, pH 7에서 MIEX[®] 입자의 제타전위 측정결과 MIEX[®] 입자의 전하는 평균 -2.3 mV로 나타나 전기화학적으로 입자상 물질의 흡착이 가능하며 MIEX[®]가 침전됨에 따라 입자상 물질이 sweep되어 입도분포 변화를 보였다.

참고문헌

1. Wiesner, M. R. and Chellam, S., "The promise of membrane technology an expanded understanding of membrane technology is fostering new environmental applications," *Environ. Sci. Technol.*, **33**(17), 360~366(1999).
2. Buros, O. K., "Desalting practices in the United States," *J. AWWA*, **81**(11), 38~42(1989).
3. Marsh, A. R. and Eriksson, P. K., "Projecting RO desalination system performance with filmtec spiral-wound

- eliments," *Proceedings of seminar on membrane processes, orlando, Fla.*(1988).
4. Ødegaard, H., Eikebrokk, B., and Storhaug, R., "Processes for the removal of humic substances from water-an overview based on Norwegian experiences," *Water Sci. Technol.*, **40**(9), 37~46(1999).
 5. Cadee, K., O'Leary, B., Smith, P., Slunjski, M., and Bourke, M., "World's first magnetic ion exchange(MIEX[®]) water treatment plant to be installed in western Australia," *Proceedings of American Water Works Association Conference*, 11~15 June, Denver(2000).
 6. Drikas, M., Morran, J. Y., Pelekani, C., Hepplewhite, C., and Bursill, D. B., "Removal of natural organic matter-a fresh approach," *Water Science and Technology: Water Supply*, **2**(1), 71~79(2002).
 7. Singer, P. C. and Bilyk, L., "Enhanced coagulation using a magnetic ion exchange resin," *Water Res.*, **36**(16), 4009~4022(2002).
 8. Lee, N. H., Sinha, S., Amy, G., and Bourke, M., "Removal of polar natural organic matter(NOM) with a magnetically impregnated ion exchange(MIEX[®]) media," *American Water Works Association Annual Conference*, Anaheim, California, June 16~19(2003).
 9. Laine, J. M., Hagstrom, J. P., Clark, M. M., and Mallevialle, J., "Effects of ultrafiltration membrane composition," *J. AWWA.*, **81**(11), 60~67(1989).
 10. Jonsson. A. S. and Jonsson. B., "The influence of nonionic and ionic surfactants on hydrophobic and hydrophilic ultrafiltration membranes," *J. membrane Sci.*, **56**, 49~76(1991).
 11. Jung, C. W. and Kang, L. S., "Application of combined coagulation-UF membrane process for water treatment," *Korean Jour. Chem. Eng.*, **20**(5), 855~861(2003).