

RO/NF막 공정을 이용한 BTEX 물질의 제어 특성 평가

장혜원 · 박찬혁* · 홍승관**† · 윤여민*** · 정진영 · 정운철

한국과학기술연구원 유해물질연구센터

*한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터

**고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과

***CH2M HILL KOREA

Removal Mechanisms of BTEX Compounds by RO/NF Membrane Processes

Hyuewon Jang · Chanhyuk Park* · Seungkwan Hong**† · Yeomin Yoon*** · Jin-Young Jung · Yun-Chul Chung

Hazardous Substances Research Center, Korea Institute of Science and Technology

*Water Environment and Remediation Research Center, Korea Institute of Science and Technology

**Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University

***CH2M HILL KOREA

(Received 22 June 2006, Accepted 1 August 2006)

Abstract

A series of bench-scale membrane filtration experiments were performed to systematically investigate the removal mechanisms of reverse osmosis (RO) and nanofiltration (NF) membranes for BTEX (benzene, toluene, ethylene, xylene), trichloroethylene (TCE) and tetrachloroethylene (PCE). The molecular weight of these organic compounds ranged from 78 to 166 dalton. The rejection of organic compounds by RO/NF membranes varied significantly from 59.6 to 99.2% depending on solute and membrane types. Specifically, experimental results demonstrated that the removal efficiency of RO/NF membranes increased as solute molecular characteristics such as W/L (molecular width/length) $\times M_w$ (molecular weight) and octanol-water partition coefficient increased. This observation suggested that the rejection of small organic compounds by RO/NF membranes was determined by the combined effect of physical (molecular size and shape) and chemical (hydrophobicity) properties.

keywords : BTEX, Nanofiltration, Physical properties, Removal efficiency, Reverse Osmosis

1. 서론

최근 국내에서도 각종 산업 활동이 활발해지고, 급성장함에 따라 약 36,000여종의 화학물질이 유통되고 있으며, 매년 200여종의 신규화학물질이 국내 시장에 진입되고 있어 유해화학물질에 의한 환경오염이 심화되고 있다(환경부, 2004). 자연계로 배출되는 오염물질 성분이 복잡하고 다양해지는 경향을 나타내고 있으며, 미생물의 분해속도가 매우 느리거나 난분해성 물질로 인해 일반 생물학적 처리공정의 적용을 어렵게 하여 자연수계 및 수자원에 악영향을 미치고 있다. 또한, 배출수의 허용기준이 강화되고 있으며, 유해화학물질에 대한 환경 기준이 발효되고 있는 시점에서, 효과적인 기술 도입 방안 및 공정 신기술 검토는 미비한 수준이다. 유해화학물질은 독성을 가지고 있어 기존 생물학적 처리방법으로는 완벽한 처리가 어려우며, ppb 수준의 검출에도 유해성이 밝혀져, 안정적 수질 보장을 위한 시스템 개발이 필요한 실정이다.

석유화학공정에서 주로 배출되고 있는 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene) 계통의 물질은 난분해성 유기화합물로서 기존의 수처리 공정으로는 효과적인 처리가 어려워 고도처리 공정을 도입해야 하며(Bellona et al., 2004; Kosutic et al., 2002), 잠재적 발암물질로 분류되어 음용수 처리에 있어서도 제거 대상 유해물질 중의 하나로 인식되고 있다. 한편, 유류의 주요 구성성분으로 BTEX와 같은 방향족 탄화수소인 PCE(tetrachloroethylene)와 TCE(Trichloroethylene)는 지하수 및 토양에서 가장 흔히 검출되는 물질로서 미국 환경청(USEPA)에서는 발암성과 독성 면에서 우선적으로 처리되어야 할 주요 오염물질로 분류하고 있다(Lee et al., 1998). 따라서, 본 연구에 사용한 유해물질의 특성을 Table 1에 정리하였으며, 이러한 물질들은 미량 존재 시에도 건강상의 문제를 야기시키고, 지속적인 노출에 의해 인체에 축적되는 발암물질 계통으로 고도처리는 필수적이라 할 수 있다.

정밀여과(MF: Microfiltration) 및 한외여과(UF: Ultrafiltration) 공정은 병원성 미생물 등의 입자성 물질을 쉽고 안전하게 제어할 수 있어 국내 정수장 도입이 적극 검토되고 있으며,

† To whom correspondence should be addressed.
skhong21@korea.ac.kr

Table 1. Physico-chemical properties of target compounds used in this study

Compound	Formula	Molecular weight (g/mol)	Molecular width (nm)	Molecular length (nm)	log K_{ow}
Benzene	C ₆ H ₆	78.12	0.134	0.605	2.13
Toluene	C ₇ H ₈	92.14	0.202	0.702	2.72
Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	106.17	0.269	0.709	3.15
Xylene	C ₈ H ₁₀	106.17	0.224	0.700	3.12
Trichloroethylene (TCE)	C ₂ HC _{l3}	131.39	0.141	0.593	2.42
Tetrachloroethylene (PCE)	C ₂ C _{l4}	165.83	0.153	0.595	3.40

일부 설치되어 시범운전 중이다. 반면, 분자량이 비교적 작거나, 소독부산물 발생을 일으키는 자연유기물질(NOM: Natural Organic Matter) 및 맛·냄새 유발물질 등의 용존성 물질 제거는 RO/NF 공정의 도입을 필요로 한다 (Agenson et al., 2003). 최근에는 RO/NF 공정을 이용하여 환경호르몬 및 의약품 계통 물질을 제어하기 위한 연구가 많이 보고되고 있으나(Kimura et al., 2004; Nghiem et al., 2004; Yoon et al., 2004, 2006), 석유화학물질 계통인 BTEX 물질 제어 연구는 제거율만을 평가한 연구가 선행되었으며(Kiso et al., 2001; Nader et al., 2003), 명확한 제거 메커니즘 및 영향인자에 대한 체계적인 연구가 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 용존성 미량 유해물질인 BTEX 및 PCE, TCE를 RO/NF 공정을 이용하여 효과적으로 제거하고자 하였으며, 대상물질의 특성에 따른 제거 효율을 평가하였다. 한편, 사용한 막 특성을 분석하여 제거 대상물질이 가진 특성과의 상호작용을 파악하여 제거 특성에 영향을 미치는 인자를 찾고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 제거 대상물질

본 연구에서의 제거 대상물질인 BTEX와 PCE, TCE는 Aldrich사 제품으로서, 순도 99%이상의 물질을 메탄올 1 L에 400 mg/L로 용해시켜 stock solution을 제조한 후 해당 농도를 희석하여 사용하였다. Bench-scale 여과실험장치의 원수 유입으로 3차 증류수 20 L에 NaCl 250 mg/L 첨가하여 RO/NF 막의 기본 특성인 용매(물)이동계수(K_w : water specific flux)와 용질이동계수(K_s : solute specific flux)를 측정하였으며, 0.2N HCl과 NaOH를 사용하여 pH를 조절하였다. 대상물질을 주입하기 전, pH를 각각 4, 7, 10으로 맞춘 후, 1시간 이상 운전하여 flux는 25.5 lmb, 회수율은 15%로 막을 안정화시킨 다음 대상물질을 혼합하여 막여과 실험을 수행하였다. 유입수, 여과수 및 농축수의 수질분석을 위해 purge and trap 장치(Teclcyne Tekmar Company, USA)가 장착된 가스크로마토그래피(GC-2010, Shimadzu Corporation, Japan)를 이용하여 분석하였다. Purge and trap은 3차 증류수 5 mL에 10 μ L의 시료를 주입하여 분석하였으며, dimethylpolysiloxane으로 코팅된 Agilent Technology사의 DB-1 컬럼(30.0 m \times 0.32 μ m \times 1.0 μ m)을 사용

하여 FID(Flame Ionization Detector)로 검출하였다. 시료 주입기와 검출기의 온도는 각각 250°C, 300°C에서 운전하였고, 오븐의 온도는 40°C에서 4분, 15°C/min의 속도로 6분, 130°C에서 4분으로 온도프로그램을 설정하였다. Carrier gas는 헬륨 가스를 사용하였다.

2.2. 막 특성 분석

본 실험에 사용된 막은 (주)새한(Saehan Company, South Korea)사의 것으로 TFC(Thin Film Composite) 재질의 가정용(직경 1.8 inch) RO막과 NF막을 사용하였다. RO막은 새한에서 개발한 내오염성(FRM: Fouling Resistance Membrane)막 2종류이며, 1차로 개발하여 표면이 음전하를 띄게 만든 막(RE-1812)과 표면 전하를 중성으로 만든 막(FE-1812)을 사용하였다. NF막(NE-1812)은 공경이 약 200 Da인 1.8 inch 직경의 가정용 막을 사용하였으며, 이들 막의 특성을 Table 2에 정리하였다. 막의 표면 전하는 SPA(Streaming Potential Analysis, BI-EKA, Brookhaven Instruments, USA)를 사용하여 pH의 변화에 따라 측정하였으며, 친/소수성(hydrophobicity) 여부는 Goniometer(Rame-hart)를 이용해 막 표면에 물을 떨어뜨려(sessile drop method) 생기는 접촉각(contact angle)을 측정하여 판단하였다.

2.3. Bench-scale RO/NF 여과 실험장치

RO/NF 공정에 의한 대상물질의 제거 정도와 물질 특성에 따른 제거 기작을 파악하기 위해 bench-scale 막여과 장치를 이용하여 여과실험을 수행하였다. 십자류 여과(cross-flow) 방식으로 테스트를 수행하였으며, 모듈의 크기는 직경 1.8 inch, 길이 12 inch로서 막의 유효면적은 $4.5 \times 10^{-1} \text{ m}^2$ 이다. Bench-scale 막여과 장치의 구성도는 Fig. 1에 나타내었으며, 냉각기(Recirculating Chiller, Watermaster, Dongwha Cooling System)에 연결된 스테인레스 코일이 유입탱크에 담겨진 간접 냉각방식으로 25°C를 일정하게 유지하며, 유입탱크내의 유입수는 펌프(OTIS · LG Elevator Company)를 통해 막으로 유입된다. Cross-flow 유속과 유입압력은 by-pass 밸브, needle 밸브를 사용하여 조절하였으며, 미세 압력조절은 back pressure regulator를 사용하였다. 유입, 유출, 농축 유량은 Blue White사의 유량계를 이용하여 실시간으로 측정하였으며, 유출 및 농축수는 원수 유입탱크로 반송시키는 batch식 실험을 수행하였다.

Table 2. Summary of membrane characteristics

Membrane	Material	Salt(NaCl) rejection(%) ^a	Zeta potential(mV) ^b	Contact angle(°) ^c
RE-1812(RO)	Polyamide(TFC)	96.0	-44.68 ¹	37.7
			-63.11 ²	
			-67.80 ³	
FE-1812(RO)	Polyamide(TFC)	99.5	18.23 ¹	36.5
			-17.43 ²	
			-27.13 ³	
NE-1812(NF)	Polyamide(TFC)	90.0	15.03 ¹	23.1
			-43.42 ²	
			-73.81 ³	

^a indicated by manufacturer

^b 10mM KCl, Electrophoretic mobility measurement

^c Sessile drop method

¹ pH 4, ² PH 7, ³ pH 10

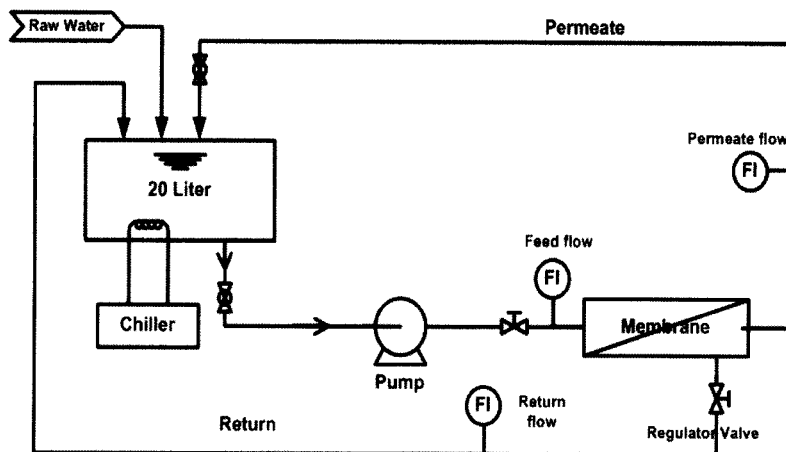


Fig. 1. Schematic diagram of bench-scale cross-flow RO/NF membrane filtration system.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미량유기오염물질의 제거

RO/NF막에 의한 미량유기오염물질의 제거 특성을 파악하기 위해, 기본적 수질 조건인 pH 영향을 평가하였다. 본 연구에서 사용한 미량유기오염물질 별 제거율을 pH 변화에 따라 Fig. 2(a)-(c)에 나타내었다. 우선 RO막과 NF막의 기본 제거 메커니즘에서 알 수 있듯이, RO막에서의 제거율이 전반적으로 우수함을 확인하였다. 이는 이온성 물질이

아닌 유기물질로서 막 공경 차이에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다. 표면 전하가 중성인 RO(FE-1812)막은 음전하를 띤 RO(RE-1812)과 제거율이 거의 비슷하게 나타나 유기오염물질의 제거에 있어서, 전하에 의한 영향이 크지 않음을 확인하였다. 또한, pH에 의한 변화(pH ≈ 4, 7, 10)에서도 제거율에 미치는 영향은 미비하였으나, 중성에서의 제거율이 RO, NF 모두에서 다소 우수한 것으로 나타났다. 한편, 본 실험에 사용한 유기오염물질 중 benzene의 제거율(60-68%)이 기타 물질보다 다소 낮음을 확인하였는데, 이

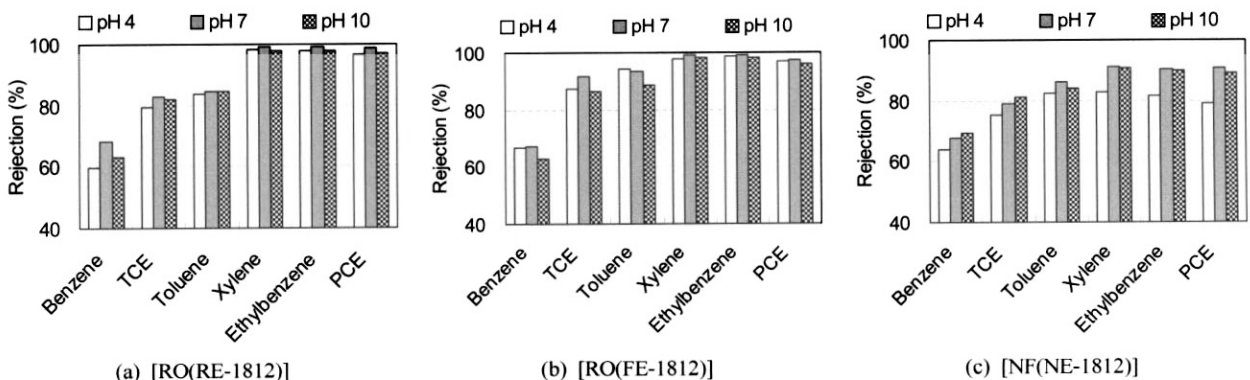


Fig. 2. Removal efficiency of target compounds at various pH.

는 분자량이 작은 영향에 의한 것으로 사료된다. 따라서, 각 오염물질에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위해 여러 가지 대상물질 특성을 고려하여 제거 영향에 대한 실험을 수행하였다.

3.2. 대상물질 특성에 의한 영향

막여과 공정에서는 막의 특성과 함께 대상물질의 특성을 파악하는 것이 제거 특성을 파악하는 데 있어 중요하다. 따라서, bench-scale RO/NF 여과 실험을 통해 대상물질 특성인 분자량(molecular weight), 분자폭(molecular width), 분자길이(molecular length)가 제거율에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 3(a)-(c)는 BTEX 물질과 TCE, PCE 물질을 분자량으로 나타내어 제거율을 비교한 그림이다. 분자량의 증가에 따라 RO/NF 모두에서 제거율이 증가하는 경향이 나타나고 있으나, 분자량이 131.39 g/mol인 TCE는 분자량에 비례하는 결과를 보이지 않았다. 미량유기오염물질의 분자량은 RO막의 공극보다는 비교적 크나, NF막의 공극보다는 작아 RO막에서의 제거율이 다소 높게 나타나지만, 대상물질의 분자량 증가에 따라 선형적으로 비례하지는 않았다.

분자량과 함께 분자폭과 분자길이는 막 공경과 상호 연관성을 지니고 있어 제거율에 영향을 미치는 인자이다. 대상물질의 분자폭은 GaussView software의 측정값을 사용하였으며, 이를 기존 문헌(Kimura et al., 2004)에서의 자료와 비교하였다. 한편, 대상물질의 분자폭에 대한 제거율 변화를 Fig. 4(a)-(b)에 나타내었다. RO막인 경우, 분자폭이

0.15 nm 이상에서는 매우 높은 제거율을 보였으나, toluene 물질은 분자폭에 비례한 제거율을 나타내지 않았다. NF막에서는 분자폭 증가에 의해 제거율이 비례하여 증가하였지만, 0.15 nm 이상에서는 분자폭이 증가해도 일정한 제거율을 보였다.

한편, 대상물질의 분자길이에 의한 제거율 영향은 다소 차이를 나타냈다. 분자길이가 0.6 nm 내외로 비슷한 물질(Benzene, TCE, PCE) 중에서도 제거율이 약 60-98% 범위로 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있으며, 0.7 nm 내외로 비슷한 물질(Toluene, Ethylbenzene, Xylene)에서도 제거율 차이가 다소 있음을 확인하였다(Fig. 5(a)-(b)). 따라서, 제거 대상물질의 분자길이는 분자량 및 분자폭에 비해 RO/NF막의 제거율에 영향을 미치는 인자라고 할 수 없다. 또한, 이들 물질이 RO/NF막을 통과하는 데 있어서, 한 가지 특성에 의해 제거율이 크게 좌우되지 않는다고 판단된다.

3.3. W/L 비에 의한 제거 특성

보다 정확한 제거 특성을 파악하기 위해 제거 대상물질을 3차원 분자구조로 나타내었다(Table 3). GaussView software를 사용하였으며, ball-and-stick model은 화학적 구조식에 의해 표현한 반면, space-filling model은 원자 크기와 위치의 결합특성을 고려한 사실적 분자구조를 나타낸다. 이를 통해 분자폭과 분자길이의 비(Width/Length: W/L)를 계산하였으며, 이들에 따른 제거 특성을 분석하였다. W/L 비는 대상물질 분자량에 의한 제거 특성보다 실질적인 제

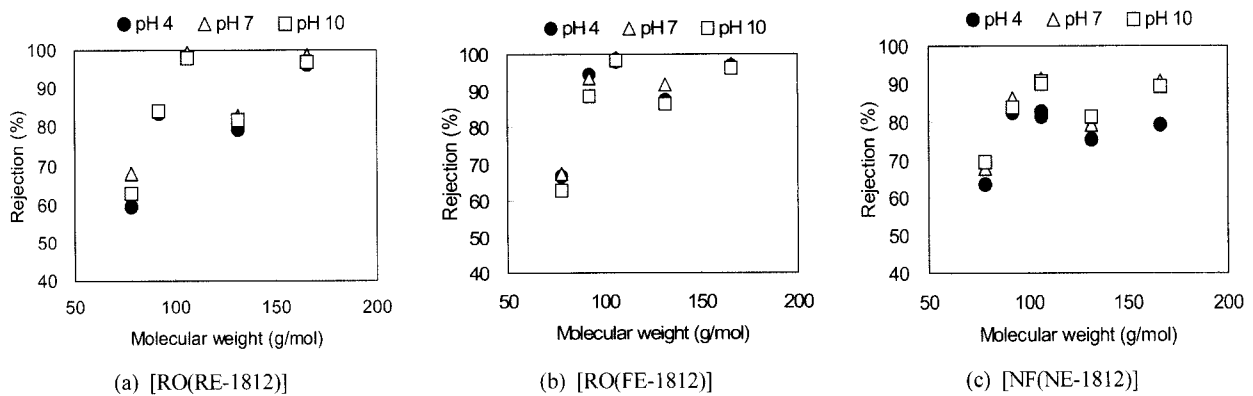


Fig. 3. Removal efficiency as a function of molecular weight of solutes for membranes at various pH.

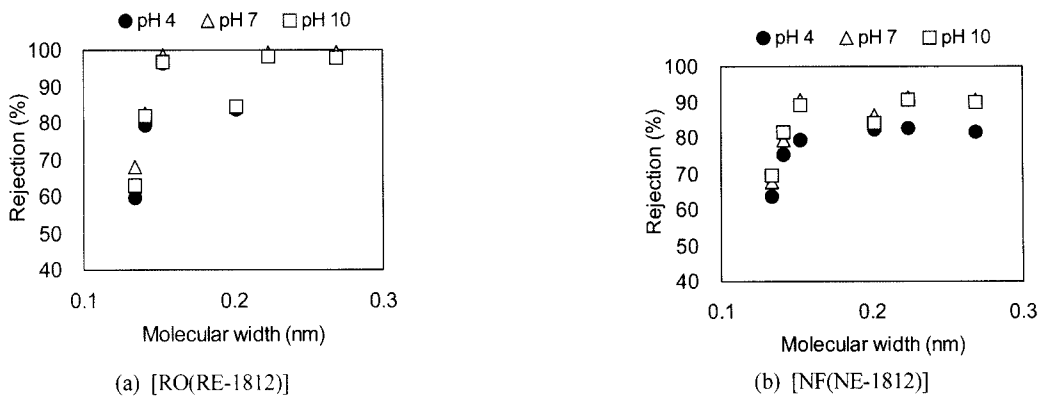


Fig. 4. Removal efficiency as a function of width of solutes for membranes at various pH.

Table 3. Three dimensional molecular structures of the organic compounds

Compound	Ball-and-stick	Space-filling
Benzene		
Toluene		
Ethylbenzene		
Xylene		
Trichloroethylene (TCE)		
Tetrachloroethylene (PCE)		

거 특성을 알 수 있는 인자로 사용되고 있다. 본 실험에서의 결과(Fig. 6(a)-(c)), W/L비의 증가에 비례하여 toluene 물질을 제외한 다른 대상물질은 제거율이 증가하였다. 분자량에 의한 영향에서는 TCE가 분자량에 비례한 제거율을 보이지 않았으나, W/L에 의한 영향은 toluene이 기타 대상물질과 다른 특성을 나타내었다. 따라서, 대상 물질에 따라 제거율에 영향을 미치는 인자가 각각 다르며, 분자량, 분자폭, 분자길이 모두 제거율과 비례적인 관계를 갖고 있지 않음을 확인하였다.

3.4. W/L×M_w에 따른 제거특성

대상물질의 특성이 복합적으로 작용하여 제거 기작에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 따라서, 각각의 대상물질 특성 중 실질적인 제거 특성을 알 수 있는 인자로 많이 사용되고 있는 W/L비와 W/L비에 포함되지 않은 대상물질 특성인 분자량(Molecular Weight: M_w)을 곱한 값으로 제거 특성을 조사하였다. Fig. 7(a)-(c)는 W/L×M_w값에 의한 제거율 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이, W/L비에 따른 제거 특성과 유사한 경향을 보였으며, 일정한 상관관계는 확인할 수 없었다. 하지만, 그림상의 경향으로는 toluene물질만이 제거율과 비례하지 않은 W/L비와 유사하지만, 분석 결과값은 분자량에 의한 영향과 유사하게 TCE 물질이 제거율과 비례하지 않았다. 다만, TCE를 제외한 대상 물질에서 W/L×M_w값 증가에 따라 증가하는 경향을 보이다가, 30이상에서는 비교적 일정한 제거율을 나타냈으나, 복합적인 물질 특성을 고려한 W/L×M_w값도 RO/

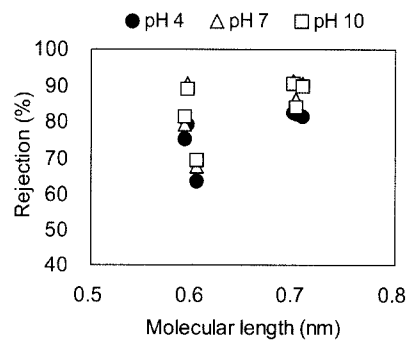
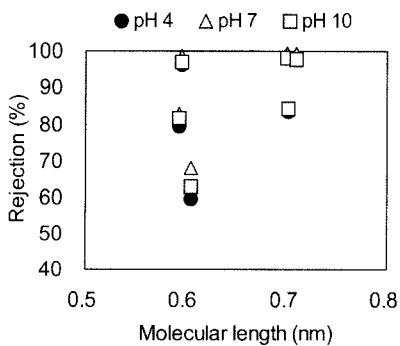


Fig. 5. Removal efficiency as a function of length of solutes for membranes at various pH.

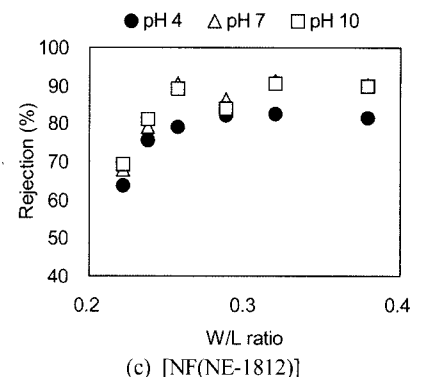
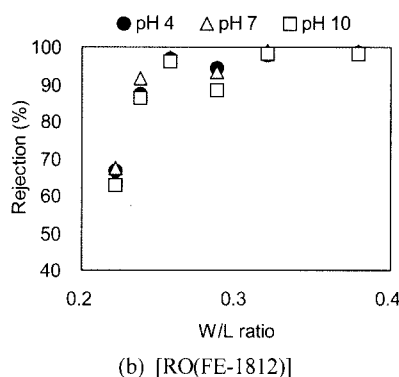
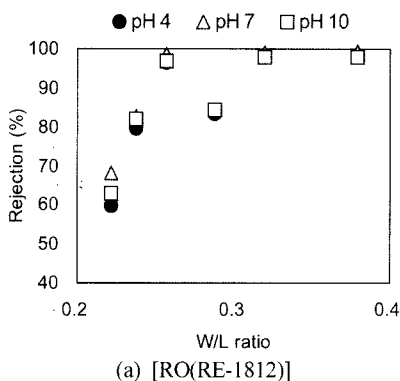


Fig. 6. Removal efficiency as a function of W/L ratio of solutes for membranes at various pH.

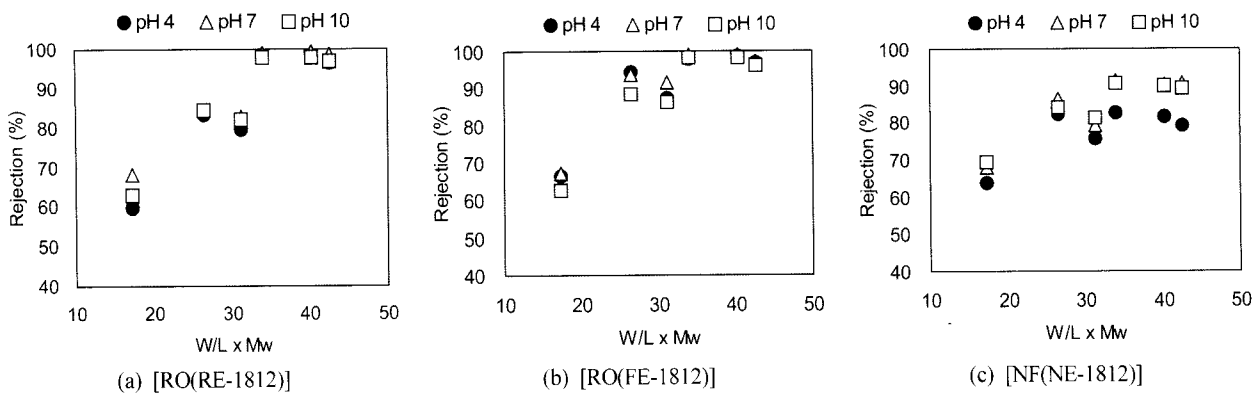


Fig. 7. Removal efficiency as a function of W/L×M_w of solutes for membranes at various pH.

NF막에서의 제거 기작을 대표하는 인자라고 할 수 없었다. 따라서, 본 실험의 대상 물질만으로는 특정 인자에 의한 일정한 제거 특성을 확인할 수 없었으나, 각각의 대상물질 특성보다는 W/L 및 W/L×M_w값이 제거율과 보다 상관관계가 있음을 확인하였다.

3.5. Log K_{ow}에 따른 제거특성

대상물질의 친/소수성 특성을 나타내는 옥탄올/물 분배계수(octanol-water partition coefficient : K_{ow})를 미량유기오염물질의 제거 기작 해석에 이용하고자 하였다. Fig. 8(a)-(c)는 log K_{ow}의 값에 의한 제거율 변화를 나타낸 그림이다. log K_{ow}값에 의한 제거율 변화는 앞서 검토한 분자 특성들과는 다르게 일정한 상관관계를 확인할 수 있었으며, RO/NF막 제거에 있어 대표적인 영향 인자라고 할 수 있다고 판단된다. 본 실험에서 검토한 대상물질은 log K_{ow}값이 2.0 이상으로써 비교적 소수성을 띄고 있어 대상물질이 흡착에 의해 제거가 발생할 것으로 추정되며 이는, 앞서 파악한 분자량, 분자폭, 분자길이, W/L비 등과 함께 복합적인 제거 기작을 가질 것으로 예측된다. 기존의 연구에서는 NF/UF 막을 사용하여 서로 다른 log K_{ow}를 가진 세 개의 대상물질이 어떻게 막에 흡착되는 지에 대하여 알아보았다 (Yoon et al., 2004). 이 연구에서는 이들 대상물질들이 막의 표면과 공극에 흡착됨으로써 제거 기작이 일어나는 것을 규명하였으며, 흡착의 정도는 log K_{ow}의 값이 증가함에 따라 증가하였다. 한편 본 연구에서는, NF막에서의 log

K_{ow}값 변화와 함께 pH에 의한 제거율 차이가 나타났다. 본 연구에서 분석한 BTEX 및 TCE, PCE물질은 log K_{ow}값에 의해 RO/NF막을 통한 제거에 가장 크게 좌우되는 것으로 판단된다. 한편, 소수성을 지닌 RO막을 대상으로 표면전하 차이에 따라 분석한 결과, 음전하를 띤 RO막(RE-1812)보다 중성의 전하를 띤 RO막(FE-1812)에서 pH에 관계없이 제거 효과가 높은 것으로 나타났다. 이와 같이, 사용되는 다양한 막 특성(표면 전하, 친/소수성)과의 관계를 고려해서 RO/NF막의 제거 기작을 규명해야 하며, 실질적으로 원수 내의 미량유기오염물질을 효과적으로 제거하기 위해 보다 다양한 유기물질을 대상으로 한 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서의 실험 결과, RO/NF 공정에서 BTEX 및 TCE, PCE 등 미량유기오염물질의 제거는 다양한 인자에 의해 영향을 받음을 확인하였다. 막 특성에 따라 제거 대상물질의 제거율이 차이를 나타냄을 알 수 있었으며, 표면전하가 중성인 RO막(FE-1812)에서 일반적으로 큰 제거율을 나타냈다. 제거 대상물질 특성에 따른 영향에서는 분자량, 분자폭, 분자길이 등 각각의 특성에 대해 조사하였다. TCE를 제외하고는 분자량 증가에 따라 RO/NF막 모두에서 제거율이 증가하였으며, 막의 공경과의 상호 연관으로 인해 RO막에서의 제거율이 NF막에서의 제거율보다 5-10%가량 크게 나타난 것으로 판단된다. 분자폭에 의한 영향으로는

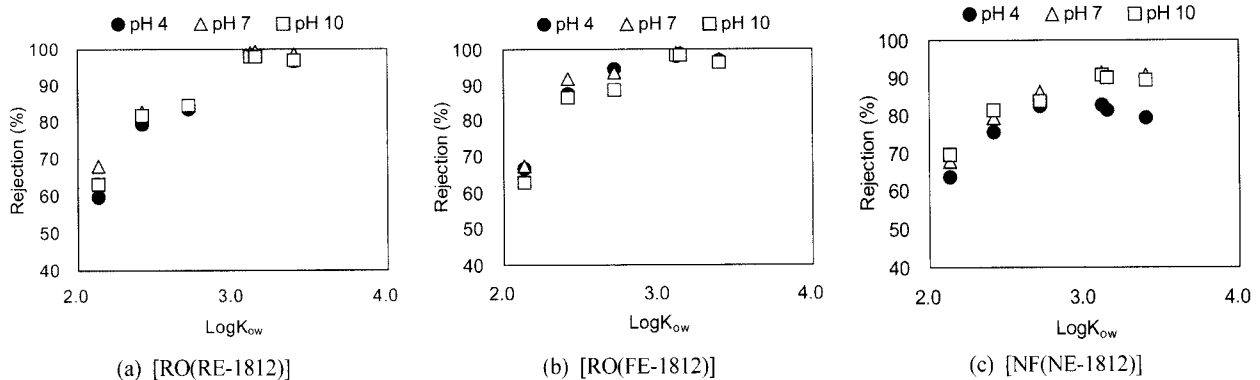


Fig. 8. Removal efficiency as a function of Log K_{ow} of solutes for membranes at various pH.

0.15 nm 이상에서 95%이상의 제거율을 보이거나, 0.2 nm인 toluene은 분자폭에 의한 영향이 다소 적어 제거율이 작음을 확인하였다. 반면, 분자길이에 의한 제거율 영향은 분자 길이가 비슷한 물질 중에서도 제거율 차이가 다소 큰 것을 확인하였다. W/L비에 의한 영향으로는 toluene 물질을 제외하고 W/L비 증가에 따라 제거율이 증가하는 경향을 나타냈다. 한편, 이들 모두의 영향을 복합적으로 나타내는 $W/L \times M_w$ 값의 영향에서는 TCE 물질을 제외하고 어느 정도 상관관계가 있음을 확인하였다. 대상물질의 친/소수성 특성을 나타내는 K_{ow} 를 바탕으로 제거율 변화를 분석한 결과, 분자량, 분자폭, 분자길이, W/L비 및 $W/L \times M_w$ 등과 다르게 일정한 경향을 나타냈다. 따라서, 본 연구에서 분석한 BTEX 및 TCE, PCE물질은 $\log K_{ow}$ 값에 의해 RO/NF막을 통한 제거에 가장 크게 좌우되는 것으로 판단되지만, 대상물질에 따라 제거 기작에 영향을 미치는 인자가 각각 달라, 본 연구의 실험결과를 전체 유기오염물질로 확대해석하기는 어렵다. 하지만, 대상물질의 특성별 파악을 통해 분자량의 영향으로 인한 확산 기작과 분자 구조인 분자폭 및 분자길이에 의한 체거름 기작 모두 RO/NF막의 제거율에 영향을 미침을 확인하였다. 또한, 대상물질이 막을 통과하면서 표면에 흡착하는 영향을 무시할 수 없었다. 그러므로, 보다 많은 대상 물질 선정을 통해 각 미량유기오염물질 특성에 따라 RO/NF막의 제거에 미치는 영향을 파악하고, 더 나아가 이러한 특성을 기반으로 통계학적 분석을 통해 RO/NF막에서의 대상 유해물질 거동현상 및 제거율 예측 방법의 개발이 절실히 필요하다.

사 사

본 연구는 한국과학기술연구원 기관고유과제(생물학적 유해물질 제어기술 개발)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

환경부, *환경백서 2004*, pp. 589-600 (2004).

- Agenson, K. O., Oh, J. and Urase, T., Retention of a Wide Variety of Organic Pollutants by Different Nanofiltration/Reverse Osmosis Membranes: Controlling Parameters of Process, *Journal of Membrane Science*, **225**, pp. 91-103 (2003).
- Bellona, C., Drewers, J. E., Xu, P. and Amy, G., Factors Affecting the Rejection of Organic Solutes during NF/RO Treatment - A Literature Review, *Water Research*, **38**, pp. 2795-2809 (2004).
- Kimura, K., Toshima, S., Amy, G. and Watanabe, Y., Rejection of Neutral Endocrine Disrupting Compounds (EDCs) and Pharmaceutical Active Compounds (PhACs) by RO Membranes, *Journal of Membrane Science*, **245**, pp. 71-78 (2004).
- Kiso, Y., Kon, T., Kitao, T. and Nishimura, K., Rejection Properties of Alkyl Phthalates with Nanofiltration Membranes, *Journal of Membrane Science*, **182**(1-2), pp. 205-214 (2001).
- Kosutic, K. and Kunst, B., Removal of Organics from Aqueous Solutions by Commercial RO and NF Membranes of Characterized Porosities, *Desalination*, **142**(1), pp. 47-56 (2002).
- Lee, S. W., Lee, J. M. and Jahng, D. J., Degradation of BTEX and Trichloroethylene by *Pseudomonas Putida* F1 and *Burkholderia Cepacia* G4, *Korean J. Biotechnol. bioeng.*, **13**(5), pp. 561-568 (1998).
- Nader, M. and Al-Bastaki, Treatment of Synthetic Industrial Wastewater with UV/TiO₂ and RO using Benzene as a Model Hydrocarbon, *Desalination*, **156**(1-3), pp. 193-197 (2003).
- Nghiem, L. D., Schafer, A. I. and Elimelech, M., Removal of Natural Hormones by Nanofiltration Membranes: Measurement, Modeling, and Mechanisms, *Environmental Science and Technology*, **38**, pp. 1888-1896 (2004).
- Yoon, Y., Westerhoff, P., Snyder, S. A. and Wert, E. C., Nanofiltration and Ultrafiltration of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals and Personal Care Products, *Journal of Membrane Science*, **270**(1-2), pp. 88-100 (2006).
- Yoon, Y., Westerhoff, P., Yoon, J. and Snyder, S. A., Removal of 17 β -Estradiol and Fluoranthene by Nanofiltration and Ultrafiltration, *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, **130**(12), pp. 1460-1467 (2004).