

NF막을 이용한 EDCs, PhACs, PCPs 물질의 제거 특성 평가

Removal Characteristics of Endocrine Disrupting Compounds (EDCs), Pharmaceutically Active Compounds (PhACs) and Personal Care Products (PCPs) by NF Membrane

장혜원^{1,2} · 박찬혁² · 홍승관^{1,*} · 윤여민³ · 정진영² · 정윤철²

Hyuewon Jang^{1,2} · Chanhyuk Park² · Seungkwan Hong^{1,*} · Yeomin Yoon³ · Jin-Young Jung⁴ · Yun-Chul Chung⁴

1 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과

2 한국과학기술연구원 환경기술연구단

3 CH2M HILL KOREA

(2007년 3월 20일 논문 접수; 2007년 6월 12일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Reports of endocrine disrupting compounds (EDCs), pharmaceutically active compounds (PhACs), and personal care products (PCPs) have raised substantial concern in important potable drinking water quality issues. Our study investigates the removal of EDCs, PhACs, and PCPs of 10 compounds having different physico-chemical properties (e.g., molecular weight, and octanol-water partition coefficient (K_{ow})) by nanofiltration (NF) membranes. The rejection of micropollutants by NF membranes ranged from 93.9% to 99.9% depending on solute characteristics. A batch adsorption experiments indicated that adsorption is an important mechanism for transport/removal of relatively hydrophobic compounds, and is related to the octanol-water partition coefficient values. The transport phenomenon associated with adsorption may also depend on solution water chemistry such as pH and ionic strength influencing the pKa value of compounds. In addition, it was visually seen that the retention was somewhat higher for the larger compounds based on their molecular weight. These results suggest that the NF membrane retains many organic compounds due to both hydrophobic adsorption and size exclusion mechanisms.

Key words: Nanofiltration, endocrine disrupting compounds (EDCs), pharmaceutically active compounds (PhACs), personal care products (PCPs), Adsorption

주제어: 나노여과, 환경호르몬, 의약품, 개인관리용품, 흡착

*Corresponding author Tel: +82-2-3290-3322, Fax: +82-2-928-7656, E-mail: skhong21@korea.ac.kr (Hong, S.K.)

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

		Formula	Use	Molecular weight (g/mol)	pK _a *	log K _{ow}
EDC	Estradiol	C ₁₈ H ₂₄ O ₂	Steroid	272.2	10.4	4.01
	Androsterone	C ₁₉ H ₃₀ O ₂	Steroid	290.4	N/A	3.07
	Androstenedione	C ₁₉ H ₂₆ O ₂	Steroid	286.2	N/A	2.76
PhAC	Ibuprofen	C ₁₃ H ₁₈ O ₂	Pain reliever	206.1	4.5	3.97
	Diclofenac	C ₁₄ H ₁₀ Cl ₂ NNaO ₂	Arthritis	318.1	4.2	0.70
	Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂	Stimulant	194.2	6.1	-0.07
PCP	Triclosan	C ₁₂ H ₇ C ₁₃ O ₂	Antibiotic	289.6	8	4.76

*pK_a calculated from SPARC (<http://ibmlc2.chem.uga.edu/aparc>); values given for -OH, -COOH or highest NHx groups. Values in parentheses are from literature [Yoon et al., 2006].

NA = not available

1. 서 론

고품질의 음용수 공급에 대한 요구는 전 세계적으로 끊임없이 증가하고 있으며, 건강 문제에 대한 관심이 증대되면서 환경호르몬 및 의약품계열 물질 등의 신종 유해물질 제거에 대한 연구가 활발히 진행 중이다 (Kimura et al., 2003). 내분비교란물질 (Endocrine disrupting compounds; EDCs), 의약품 계통 물질 (Pharmaceutically active compounds; PhACs), 개인관리용품 (Personal care products, PCPs) 등은 수중에서 미량으로 검출되고 있지만, 인체에 장기간 지속적으로 노출될 경우에 건강상 직접적인 해를 끼치는 독성 유해물질 및 발암성 물질 등과 같은 잠재적 영향을 나타낼 수 있다 (Yoon et al., 2006). 특히, 이들 물질은 기존 정수처리공정이나 AOP (Advanced oxidation process) 등의 고도처리공정으로도 효과적인 제거가 어려워 음용수를 통해 가정에 그대로 공급될 가능성이 매우 높다. 그러므로, 안정적인 음용수 공급을 위해서는 이를 효과적으로 제거할 수 있는 고도 정수처리공정인 막여과 공정의 도입이 필수적이며, 다양한 막여과 공정 중 고효율 및 저에너지를 만족시킬 수 있는 나노여과 (Nanofiltration; NF) 공정에 대한 검토가 필요한 실정이다. 현재 국내 정수장은 막여과 공정이 MF (Microfiltration)/UF (Ultrafiltration) 공정을 중심으로 적극 검토되고 있으며, 맛·냄새 유발물질 및 자연유기물질 (Natural organic matter; NOM) 등의 용존성 물질 제거를 위해 NF 공정 도입이 일부 검토 중이다. 지속적인 환경 규제의 강화와

함께 환경호르몬, 의약품 계열 물질의 제거가 점차 요구되고 있으며, 국내 NF막의 도입이 진행되고 있는 시점에서 본 연구는 절실히 필요하다고 할 수 있다.

대부분의 EDCs, PhACs 및 PCPs 계열의 물질들은 분자량이 200Da 내외로써 NF/RO막 공정으로 제거하는 것이 효과적이다 (Yoon et al., 2006). NF/RO 막여과 공정은 저분자량을 가지는 살충제 계열 및 휘발성 유기물질 등을 제거하는 데 효과적인 것으로 보고되고 있으며 (Bruggen et al., 1998; Kiso et al., 2001; Agenson et al., 2003), 최근에는 NF 및 UF막을 사용하여 EDCs, PhACs 및 PCPs 물질의 제거 특성을 살펴본 연구가 진행되고 있다 (Yoon et al., 2004; Yoon et al., 2006). 하지만, 이들 물질의 물리화학적 특성을 고려한 제거 특성에 대한 연구는 부족한 실정이며, 대부분 소수성인 이들 물질의 흡착 특성을 고려한 연구도 초기 단계이다. 따라서, 본 연구에 사용한 제거 대상 물질이 가지는 물리화학적 특성을 **Table 1**에 정리하였으며, 구조적 특성에 의한 영향과 함께 고려하기 위해 이들의 구조를 **Fig. 1**에 나타내었다. 본 연구에서는 EDCs, PhACs 및 PCPs 물질의 다양한 물리화학적 특성과 NF막 자체의 특성을 고려한 제거 경향을 파악하고자 하였으며, 제거에 미치는 주요 영향 인자를 찾고자 하였다. 또한, 흡착에 대한 영향과 막 특성인 친/소수성과의 상호작용을 파악하여 제거 특성을 보다 근본적으로 이해하고자 하였다.

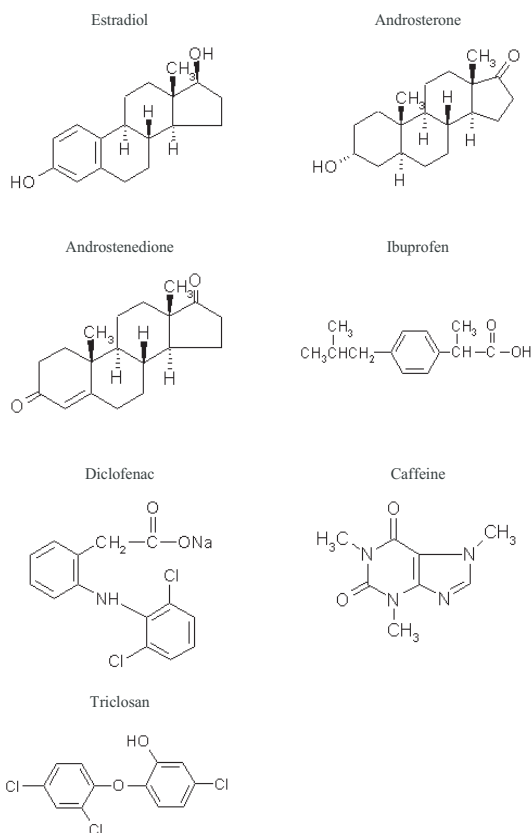


Fig. 1. Structural formulas of target compounds (EDC/PhAC/PCP).

2. 기초 이론 및 실험 방법

2. 1. EDC/PhAC/PCP 물질

본 연구에서 대상물질로 선택한 EDCs, PhACs, 및 PCPs 물질인 triclosan, estradiol, ibuprofen, androsterone, androstenedione, diclofenac, caffeine는 모두 Sigma-Aldrich사 제품으로서, 순도 99% 이상의 물질 사용하였다. Stock solution은 각각의 물질을 메탄올에 1,000ppm의 농도로 만들어 완전히 용해시켜 100ppm으로 희석하여 사용하였다. Bench-scale 여과 실험장치의 원수 유입수로는 3차 증류수 20L에 KH_2PO_4 와 K_2HPO_4 buffer를 1mM 농도로 넣은 후, 1N HCl과 1N NaOH를 사용하여 pH를 중성(6.5~7.0)으로 조절하였다. 또한, 대상물질을 주입하기 전 1시간 이상 운전하여 flux는 25.5LMH(15GFD), 회수율은 15%로 막을 안정화시킨 다음 제조한 stock

solution을 spiking하여 유입수의 최종 농도를 각각 100ppb로 조정하여 막여과 실험을 수행하였다.

각각의 시료는 MTBE(methyl-t-butyl ether)를 이용하여 액체-액체 추출(liquid-liquid extraction) 후, 기화가 잘 되는 상태로 만들어 분석이 용이하도록 하기 위해, EDC 물질은 TMS(trimethylsilylation), PhAC, PCP 물질은 methylation으로 유도체화 반응을 시켜 전처리 과정을 수행하였다. Trimethylsilylation으로 전처리 한 estradiol, androsterone, androstenedione은 GC/MS(Gas chromatography/Mass spectrometry; GC-6890N/MS-5975, Agilent Technologies, USA)를 이용하여 분석하였으며, 컬럼은 HP-5HS(30m×0.25mm×0.25 μm , Agilent Technologies, USA)를 사용하였다. Methylation으로 전처리를 한 triclosan, ibuprofen, diclofenac, caffeine은 GC/TOF/MS(Gas chromatography/Time of flight/Mass spectrometry; GC-6890N, Agilent Technologies, USA/TOF/MS-Pegasus III, Leco, USA)를 이용하여 분석하였으며, 컬럼은 ULTRA2(50m×0.2mm×0.11 μm , Agilent Technologies, USA)을 사용하였다. Carrier gas는 모두 헬륨 가스를 사용하였다.

2. 2. Bench-scale NF 여과 실험장치

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 약 직경 4.6cm, 길이 30.5cm로서 막의 유효면적은 $4.5 \times 10^{-1} \text{ m}^2$ 이다. Bench-scale 막여과 장치의 구성도는 Fig. 2에 나타내었으며, 냉각기(Recirculating Chiller, Watermaster, Dongwha Cooling System)에 연결된 스테인레스 코일이 유입탱크에 담겨진 간접 냉각방식으로 25 $^{\circ}\text{C}$ 를 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. 막여과 실험의 시

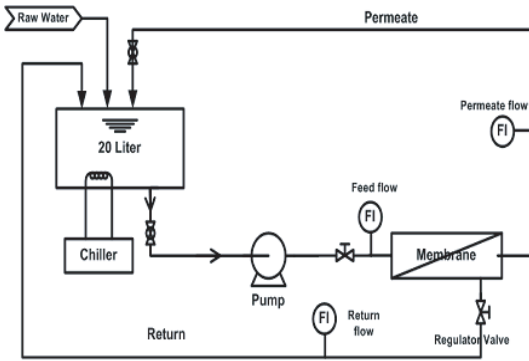


Fig. 2. Schematic diagram of bench-scale cross-flow NF membrane filtration system.

료채취는 유입수, 유출수, 농축수를 일정한 시간 간격으로 72시간 동안 200mL씩 샘플링 하였으며, 각각 시료의 pH와 conductivity를 측정하였다. pH meter로는 Fisher Scientific사의 AR15를 사용하였으며, conductivity meter는 YSI 3200을 사용하였다.

2.3. 막 특성 분석

본 실험에 사용된 막은 (주)새한(Saehan Company, South Korea)사의 것으로 TFC(Thin Film Composite) 재질의 가정용(직경 4.6cm) NF막을 사용하였다. NF막(NE-1812)은 공경이 약 200Da인 4.6cm 직경의 가정용 막을 사용하였다. 제조사에서 제시한 NaCl 제거율은 90%이며, 막의 표면 전하는 SPA(Streaming Potential Analysis, BI-EKA, Brookhaven Instruments, USA)를 사용하여 pH의 변화에 따라 측정하였으며, 친/소수성(hydrophilicity/hydrophobicity) 여부는 Goniometer(Rame-hart)를 이용해 막 표면에 물을 떨어뜨려(sessile drop method) 생기는 접촉각(contact angle)을 측정하여 판단하였다. 막의 표면 전하는 electrophoretic mobility 측정으로 -33.62mV (pH = 6.5)였으며, 접촉각은 23.1° 로 친수성 특성을 지니는 것으로 나타났다.

2.4. 회분식 흡착 실험

대부분의 EDCs, PhACs 및 PCPs 물질들은 소수성을 지니며 막에 흡착되는 경향과 함께 제거율에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Kimura et al., 2003). 본 연구에서는 NF막에 흡착되는 정도를 정확히 파악하기 위해서, 회분식 흡착 실험을 여과 실험과 별도

로 수행하였다. 4.6cm의 원형 모듈로 되어 있는 NF막을 $1\sim 10\text{cm}^2$ 의 평막 상태로 절단한 뒤, 대상물질을 막에 접촉시켜 20℃의 항온교반기(VS-8480SF, Vision Scientific Co., LTD, Korea)에 72시간 동안 반응시켰다. 대상 물질의 농도는 100ppb로 일정하게 주입하고, pH 변화(= 3.5, 6.5, 9.5)에 대한 영향과 전기전도도 변화(= $300\mu\text{S}/\text{cm}$, $600\mu\text{S}/\text{cm}$, $1200\mu\text{S}/\text{cm}$)에 대한 영향을 조사하였다. 또한, 시간이 지남에 따라 감소되는 용질의 농도를 측정 후, 다음과 같은 식을 이용하여 흡착 특성을 평가하였다.

$$\log K = \log \frac{Q}{C_b}$$

K = 분배계수(무차원), Q = 단위 막면적당 흡착된 용질의 양($\mu\text{g}/\text{m}^2$), C_b = bulk 상태에서의 용액 농도(mg/L)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상물질의 제거율

본 연구에서 사용한 EDCs, PhACs 및 PCPs 계열의 미량유해물질은 일반적으로 200~300g/mol의 분자량을 지니고 있어, 유기물을 제거할 수 있으면서도 경제적인 NF막을 사용하여 제거 특성을 살펴보았다.

Fig. 3은 물질에 따른 일반적인 제거율을 나타낸 것

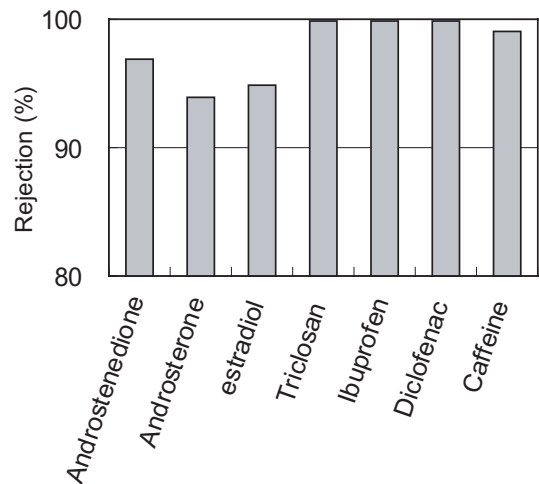


Fig. 3. Removal efficiency of target compounds at pH 6.5 and conductivity $600\mu\text{S}/\text{cm}$.

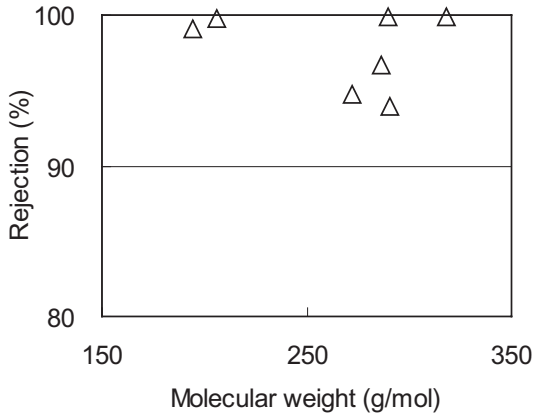


Fig. 4. Removal efficiency as a function of molecular weight of solutes for the NF membrane at pH 6.5 and conductivity 600 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

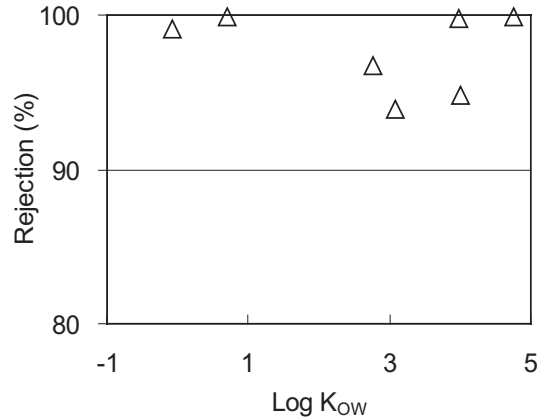


Fig. 5. Removal efficiency as a function of log Kow of solutes for the NF membrane at pH 6.5 and conductivity 600 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

로서, EDC(androstenedione, androsterone, estradiol) 계열의 물질을 제외한 PhACs 및 PCPs 물질의 제거율은 99% 이상으로 NF막의 사용이 적절한 것으로 판단된다. 한편, EDC 계열의 물질들은 분자량이 기타 물질에 비해 크지만, 제거율이 낮게 나타나고 있는 특성을 보였다. 이는 물질들이 높은 pK_a 값을 가지고 있는 특성과 더불어 해리(undissociated)되지 않아 비교적 낮은 제거율을 나타내는 것으로 판단된다. 따라서, 미량유해물질의 제거에 있어서 NF막의 사용은 물질 특성에 의해서 크게 좌우되지만, 수질 화학적 조건(water solution chemistry)에 의해서도 영향을 받는 것으로 파악되어, 이들에 대한 영향을 체계적으로 분석하여 정리하였다.

3.2. 대상물질의 특성에 따른 영향

제거하고자 하는 대상물질의 특성을 파악하는 것은 막여과 공정에서의 제거 특성을 파악하는 데 있어 매우 중요하다. 제거를 기작(size exclusion)과 확산계수(diffusion coefficient)와 연관되어 있는 분자량(molecular weight)과 대상물질의 화학적 특성인 친/소수성 여부를 판단하는 $\log K_{ow}$ (octanol-water partition coefficient)에 의한 제거 특성을 bench-scale NF 막여과 실험을 통해 조사하였다. 우선, 분자량에 의한 제거율 변화를 살펴보면(Fig. 4), 분자량이 증가함에 따라 제거율이 증가하는 비례관계가 뚜렷하게 성립하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 분자량 외의 제

거 대상물질 특성 중 $\log K_{ow}$ 값에 의한 제거 특성을 살펴보았다. 본 연구에서 선정한 대상물질의 $\log K_{ow}$ 값은 -0.07에서 4.76으로 다양한 범위로 존재하고 있으며, 이들의 제거 특성도 Fig. 5에서와 같이 상관관계를 보이지 않았다. $\log K_{ow}$ 값이 증가할수록 대상물질은 소수성을 나타내어 소수성인 막 표면에서 흡착에 의한 일정한 제거 경향을 나타낼 것이라는 예상과는 다른 양상을 보였다. 분자량과 $\log K_{ow}$ 값은 물질의 대표 특성으로 제거 기작에 영향을 미치고는 있으나, 각각의 인자가 미치는 영향보다는 대상 물질 특성들의 복합적인 상호 작용에 의한 제거 특성 변화가 예측 가능하였다. 또한, 제거 대상물질의 특성만이 아닌, 막 특성과의 관계 및 막 표면에서의 흡착 등 다양한 영향에 의해 제거 특성이 변화할 것으로 판단된다.

3.3. 회분식 흡착 실험

미량유해물질 등의 유기물질을 제거함에 있어서 $\log K_{ow}$ 가 높은 물질일수록 막 표면의 흡착량이 많다고 알려져 있어, 막 표면적 변화에 따른 흡착 정도를 회분식 흡착 실험을 통해 조사하였다. 막 면적과 함께 pH 및 전기전도도(conductivity)를 변화하면서 흡착되는 양을 Fig. 6~7에 나타내었다. C_0 는 흡착 전의 농도를 나타내며, C는 일정 시간 후의 농도를 나타내어, C/C_0 가 클수록 막 표면에 흡착되는 양은 적다고 할 수 있다. pH 및 전기전도도에 의한 영향보다는 막 면적이 증가함에 따라 C/C_0 값이 작아져 흡착이 많이 진행됨을 확인할 수 있었다. 한편, $\log K_{ow}$ 값에 의한

- ◆ Androstenedione(pH 3.5) ■ Androsterone(pH 3.5) ▲ Estradiol(pH 3.5)
- ◇ Androstenedione(pH 6.5) □ Androsterone(pH 6.5) △ Estradiol(pH 6.5)
- ◇ Androstenedione(pH 9.5) □ Androsterone(pH 9.5) △ Estradiol(pH 9.5)

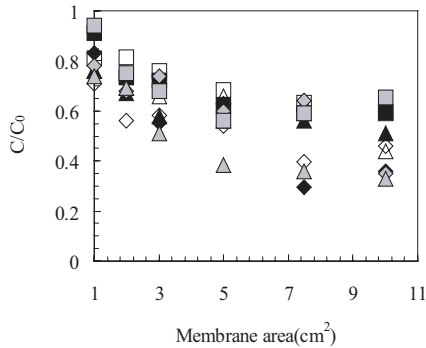


Fig. 6(a). EDC compounds adsorption onto/into the NF membrane at various pH conditions.

- ◆ Triclosan(pH 3.5) ■ Ibuprofen(pH 3.5) ▲ Diclofenac(pH 3.5) ● Caffeine(pH 3.5)
- ◇ Triclosan(pH 6.5) □ Ibuprofen(pH 6.5) △ Diclofenac(pH 6.5) ○ Caffeine(pH 6.5)
- ◇ Triclosan(pH 9.5) □ Ibuprofen(pH 9.5) △ Diclofenac(pH 9.5) ○ Caffeine(pH 9.5)

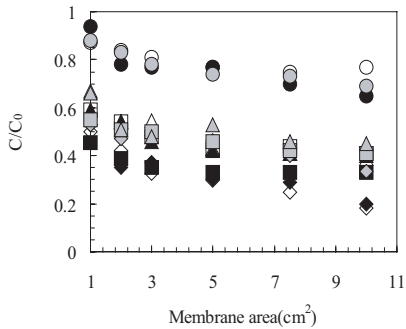


Fig. 6(b). PhAC/PCP compounds adsorption onto/into the NF membrane at various pH conditions.

흡착량 변화를 Fig. 8에서 조사하였으며, 단위 막 면 적당 평균 흡착률로 표기하여 나타내었다. Androsterone과 estradiol을 제외한 물질들은 $\log K_{ow}$ 값의 증가에 따라 흡착률이 증가함을 확인하였다. 회분 식 흡착 실험에서도 pH 및 전기전도도에 의한 영향을 조사하였으며, Figs. 9-10는 pH 및 전기전도도가 변화함에 따라 흡착에 의한 물질이 저감되는 정도를 나타내었다. pH가 증가하면 pK_a 값이 적은 물질들은 해리됨에 따라 흡착에 의한 물질저감이 증가할 것이라고 가정하였으며, 전기전도도가 증가함에 따라 막 표면의 음전하값이 작아져 흡착에 의한 물질저감이 증가할 것으로 예상하였다. 그러나 흡착 특성에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 하지만, 물질별로는 약간의 차이를 보였으며, 이는 대상물질의 pK_a 값 차

- ◆ Androstenedione(300 μ S/cm) ■ Androsterone(300 μ S/cm) ▲ Estradiol(300 μ S/cm)
- ◇ Androstenedione(600 μ S/cm) □ Androsterone(600 μ S/cm) △ Estradiol(600 μ S/cm)
- ◇ Androstenedione(1200 μ S/cm) □ Androsterone(1200 μ S/cm) △ Estradiol(1200 μ S/cm)

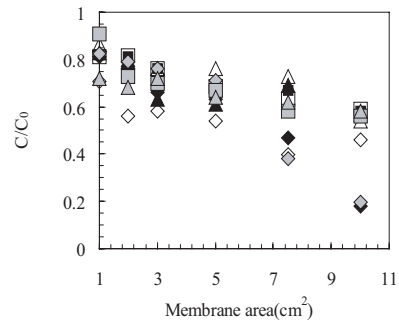


Fig. 7(a). EDC compounds adsorption onto/into the NF membrane at various conductivities.

- ◆ Triclosan(300 μ S/cm) ■ Ibuprofen(300 μ S/cm) ▲ Diclofenac(300 μ S/cm)
- Caffeine(300 μ S/cm) ◇ Triclosan(600 μ S/cm) □ Ibuprofen(600 μ S/cm)
- △ Diclofenac(600 μ S/cm) ○ Caffeine(600 μ S/cm) ◇ Triclosan(1200 μ S/cm)
- Ibuprofen(1200 μ S/cm) △ Diclofenac(1200 μ S/cm) ○ Caffeine(1200 μ S/cm)

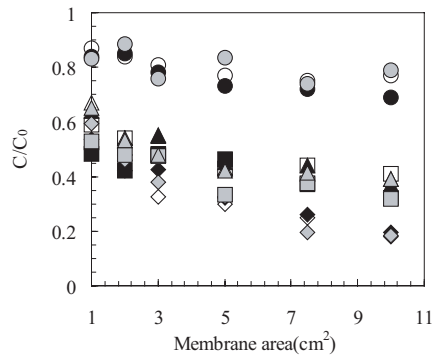


Fig. 7(b). PhAC/PCP compounds adsorption onto/into the NF membrane at various conductivities.

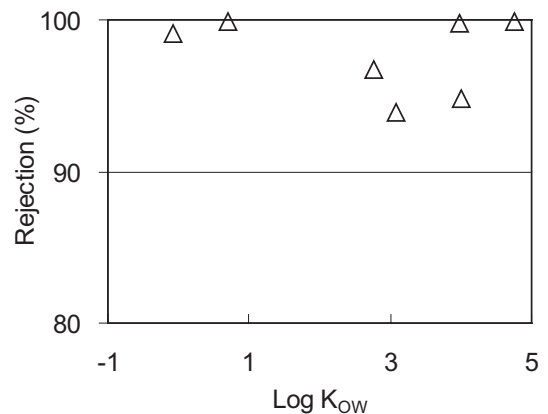


Fig. 8. Average adsorption efficiency (%) per unit membrane area as a function of $\log K_{ow}$ of target compounds.

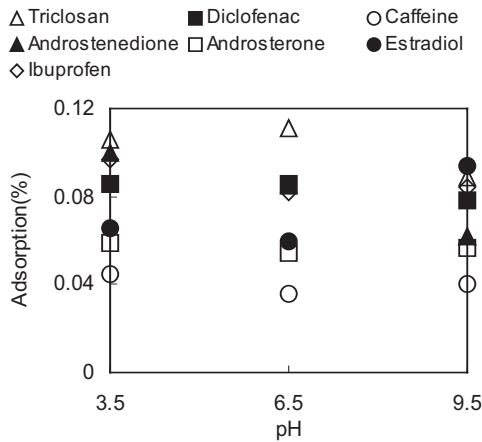


Fig. 9. Average adsorption ability (%) of compounds per unit membrane surface area at various pH conditions.

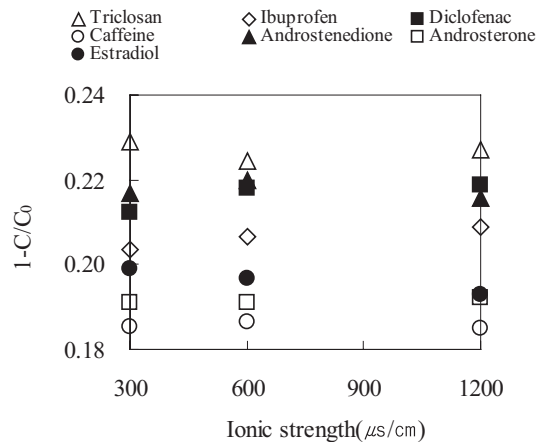


Fig. 10. Relative removal efficiency of compounds at various ionic strength conditions.

이에 의해 pH의 영향을 각기 다르게 받으므로 제거율이 다르게 측정되는 것으로 판단된다.

3. 4. 흡착과 제거율과의 관계

미량유해물질의 흡착 정도가 NF막 공정에서의 제거율과 갖는 관계를 파악하기 위해 흡착량과 제거율의 비율로 나타내어 평가하였다(Fig. 11). 흡착이 막여과 공정의 주요 제거 기작은 아니지만, 본 실험에서 사용된 소수성 물질과 소수성 막의 경우 흡착량이 증가하면 제거율이 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, $\log K_{ow}$ 값이 비교적 큰 물질에서 이러한 경향은 더욱 분명하였다. 따라서, 미량유해물질의 경우, 분자량에 따른 체거름 기작 및 확산 기작과 함께 $\log K_{ow}$ 값과 관련된 친/소수성 및 흡착 등에 의한 제거 기작이 동시에 일어나 특정 인자에 의한 제거 특성으로 판단되지 않는다. 한편, 단일 인자에 의한 제거 특성보다 복잡한 기작에 의한 제거가 일어나지만, 대상물질의 $\log K_{ow}$ 값 증가에 의한 흡착이 제거 특성에 미치는 부분이 상당히 크다고 판단된다. 특히, 대상물질의 흡착정도는 6~22% 정도로 제거율에 미치는 영향이 크며, 미량유해물질의 제거 특성을 나타내는 새로운 모델을 개발하는 데 중요한 인자로 고려해야 할 것으로 사료된다.

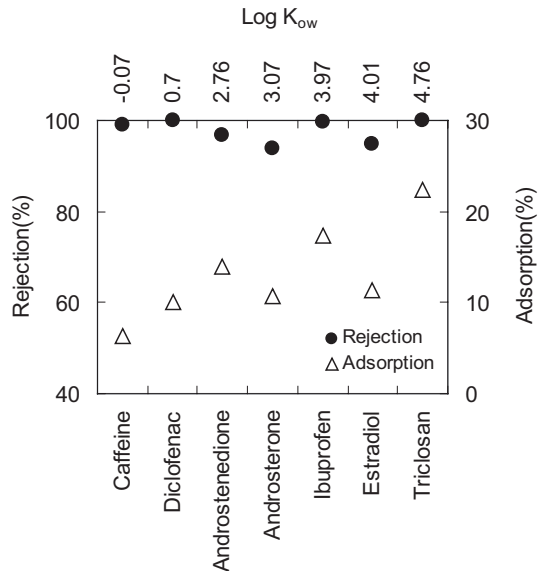


Fig. 11. Average adsorption and removal efficiency of target compounds having different $\log K_{ow}$ values.

4. 결 론

본 연구에서의 실험 결과, EDCs, PhACs 및 PCPs 계열의 미량유해물질은 NF막에서 90%이상의 높은 제거율을 나타냈다. 대상물질의 특성에 따라 제거 특성이 달라질 것으로 예측하여 분자량과 $\log K_{ow}$ 를 고려하여 제거 특성을 평가하였다. 한편, 대상물질 각

각의 분자량과 $\log K_{ow}$ 값 변화에 따른 제거율과의 상관관계는 크지 않았으며, 다양한 pH 및 전기전도도의 조건이 제거율에 미치는 영향도 적은 것으로 판단된다. 하지만, $\log K_{ow}$ 값은 막 표면의 흡착과 상당히 밀접한 관계를 지니고 있어, 막 면적에 따른 흡착량 실험을 통해 흡착 정도에 대해 조사하였다. 그 결과, 막 면적이 증가할수록 흡착량이 증가하는 경향을 나타내었으며, 대상 물질별로 흡착 정도는 상이하게 나타났다. 이는 대상 물질 특성 중 pK_a 값에 의한 영향과 $\log K_{ow}$ 값이 큰 소수성 물질이 소수성을 띄는 NF 막에서 흡착량이 증가됨에 의한 것으로 사료된다. 한편, 흡착이 실제 NF막 공정에서의 제거율에 미치는 영향을 파악하기 위해 흡착과 제거율의 관계를 확인하였으며, 대상물질에 따라 흡착량이 6~22% 범위로 나타났으며, 흡착정도가 증가할수록 제거율이 증가하는 경향을 확인하였다. 따라서, 미량유해물질의 제거 특성 중 흡착이 제거율에 미치는 영향을 간과할 수 없으며, 막여과 공정의 주요 제거 기작은 아니지만, 고려해야 할 중요한 인자임을 확인하였다. 본 연구를 통하여, 대상 물질 특성과 막 특성 및 흡착 정도를 고려한 EDCs, PhACs, 및 PCPs 계열의 미량유해물질 제거 특성을 파악할 수 있었으나, 보다 많은 대상물질의 특성을 고려하여 제거율과 일정한 상관관계를 확보하고, 더 나아가 다양한 수질화학적 조건 및 흡착의 영향을 고려하여 이들 물질의 제거 예측 모델 및 방법의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원 기관고유과제 (생물학적 유해물질 제어기술 개발)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 본 연구는 기초기술연구회 협동연구과제(과제명: 환경 유해물질 제어를 위한 기능성 나노 구조체 기술 개발)로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Agenson, K. O., Oh, J., Urase, T. (2003) Retention of a wide variety of organic pollutants by different nanofiltration/reverse osmosis membranes: controlling parameters of process, *Journal of Membrane Science*, **225**(1-2), pp. 91-103.
2. Bruggen, B. V., Schaep, J., Maes, W., Wilms, D., Vandecasteele, C. (1998) Nanofiltration as a treatment method for the removal of pesticides from ground water, *Desalination*, **117**(1-3), pp. 139-147.
3. Kimura, K., Amy, G., Drewes, J.E., Heverer, T., Kim, A., Watanabe, Y. (2003) Rejection of organic micropollutants (disinfection by-products, endocrine disrupting compounds, and pharmaceutically active compounds) by NF/RO Membranes, *Journal of Membrane Science*, **227**(1-2), pp. 113-121.
4. Kimura, K., Toshima, S., Amy, G., Watanabe, Y. (2004) Rejection of neutral endocrine disrupting compounds (EDCs) and pharmaceutical active compounds (PhACs) by RO membranes, *Journal of Membrane Science*, **245**(1-2), pp. 71-78.
5. Kiso, Y., Sugiura, Y., Kitao, T., Nishimura, K. (2001) Effect of hydrophobicity and molecular size on rejection of aromatic pesticides with nanofiltration membranes, *Journal of Membrane Science*, **192**(1-2), pp. 1-10.
6. Kolpin, D.W., Furlong, E.T., Meyer, M.T., Thurman, E.M., Zaugg, S.D., Barber, L.B., Buxton, H.T. (2002) Pharmaceuticals, hormones, and other organic waster contaminants in U.S. streams, 1999-2000: a national reconnaissance, *Environmental Science and Technology*, **36**(6), pp. 1202-1211.
7. Nghiem, L.D., Schafer, A.I. (2002) Adsorption and transport of trace contaminant estrone in NF/RO membranes, *Environmental Engineering Science*, **19**(6), pp. 441-451.
8. Nghiem, L.D., Schafer, A.I., Elimelech, M. (2004) Removal of natural hormones by nanofiltration membranes: measurement, modeling, and mechanisms, *Environmental Science and Technology*, **38**(add issue number), pp. 1888-1896.
9. Nghiem, L.D., Manis, A., Soldenhoff, K., Schafer, A.I. (2004) Estrogenic hormone removal from wastewater using NF/RO membranes, *Journal of Membrane Science*, **242**(add issue number), pp. 37-45.
10. Synder, S.A., Keith, T.L., Vervrugge, D.A., Synder, E.A., Gross, T.S., Kannan, K., Giesy, J.P. (1999) Analytical methods for detection of selected estrogenic compounds in aqueous mixtures, *Environmental Science and Technology*, **33**(add issue number), pp. 2814-2820.
11. Vanderford, B.J., Pearson, R.A., Rexing, D.J., Synder, S.A. (2003) Analysis of endocrine disruptors, pharmaceuticals, and personal care products in water using liquid chromatography/tandem mass spectrometry, *Anal. Chem.*, **75**(add issue number), pp. 6265-6274.
12. Yoon, Y., Westerhoff, P., Snyder, S.A., Wert, E.C. (2006)

- Nanofiltration and ultrafiltration of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals and personal care products, *Journal of Membrane Science*, **270**(1-2), pp. 88-100.
13. Yoon, Y., Westerhoff, P., Yoon, J., Snyder, S.A. (2004) Removal of 17 β -estradiol and fluoranthene by nanofiltration and ultrafiltration, *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, **130**(12), pp. 1460-1467.