

세라믹 멤브레인을 이용한 고도 정수공정

조재원, 이상엽
광주과학기술원 환경공학과 NoM 연구실

1. 서 론

한때 인기있었던 드라마 허준에서 허준의 스승인 유 의태의원은 단순히 마셔보는 것 만으로 어떤 물이 어떤 탕약을 다릴 때 적합한지를 알아내는 장면이 나온다. 유 의태가 현재 수돗물을 마셔보았다면 과연 탕약을 제조 하는 물로 인정하였을까. 미국의 여러 주를 차로 여행하 다보면 여러 지역의 수돗물을 맛볼 수 있는 기회가 있는 데(이 때 아예 생수(bottled water)를 사먹는 여행자도 많지만), 굳이 포도주 감별가는 아니더라도 각 지역의 수돗물 맛이 다름을 금방 알 수 있다. 물론, 물맛이 좋다고 유해한 물질이 적어 건강에 좋다고는 할 수 없다. 수돗물을 전공하고 있다는 생각에 가는 곳마다 수돗물을 그대로 마시던 나는 미국의 한 주에서는 비소(발암물질)의 농도가 엄청나게 높다는 것을 시간이 지난 후에 알았 던 경험도 있다. 우리나라의 경우에도 지역에 따라 원수로 사용하는 수계의 수질에 따라 수돗물의 수질은 천차만별이다. 음식점이나 찻집을 가면 나름대로 장만한 정수기 혹은 생수를 자랑스럽게 내놓은 집은 있어도 수돗물을 그냥 마시라고 내놓은 집은 아마 찾기 힘들 것이다. 그렇다고 해서 그 물맛에 만족하는 소비자는 얼마나 될 지에 대해서는 의문이 간다. 더구나, 그 물이 수돗물보다 마시기에 안전한지는 더더군다나 의심이 간다. 그렇다면, 물맛 좋고 안전한 그야 말로 꿈의 수돗물은 언 제쯤 가능한가. 그리고, 과연 가능할까라는 의문을 가지 게 될 것이다. 필자의 생각을 말하자면, 그것은 가능하다. 그것도 앞으로 10년 안에.

오래 전 옛날에는 사람들은 자연 속에 존재하는 물을 그냥 마셨다. 사람들이 모여 살기 시작하고 산업화가 되면서 발생한 하수 혹은 폐수 때문에 수인성 전염병이 생기고, 이를 막기 위해 염소소독이 생겨났던 것이다. 이 염소는 물맛을 과거의 추억으로 돌려버렸다. 하지만, 염소소독이 없었다면 지금까지 사람들은 불안에 떨며 수돗물을 마시고 있을 것이다. 염소를 차치하고라도, 하루가 멀다하고 생겨나는 새로운 화학물질들이 과연 수돗물 속에 뭐가 있는지도 모를 정도의 복잡한 상황으로 만들고 있는 현실이다. 수돗물 선진국은 물론이고 우리 나라에서 규정하고 있는 음용수기준은 인간에게 위해를 가할 수 있는 물질에 대하여 어느 정도의 확률을 인정한 상태에서 정해진 수치이다. 즉, 건강한 성인이 매일 마셨을 경우에 암에 걸릴 확률이 1만분의 1이라는 것이 한 예이다. 하지만, 현대와 같이 대기오염과 수질오염 등의 위해성이 가중되는 상황에서 수돗물마저 “만분의 일” 확률을 첨가시킨다면, 건강한 성인이라 할지라도 발암확률은 천분의 일, 아니 백분의 일이 될지 모를 일인 것이다. 만약, 수돗물을 매일 마셔 암이 발생할 수 있는 확률을 줄이고, 아니 아예 그 확률을 없애고, 나아가 오히려 건강에 도움을 줄 수 있는 수돗물이 있다면, 그야말로 꿈의 수돗물일 것이다.

경제적으로 여유가 있는 미국, 일본, 프랑스 등 수돗물 선진국에서는 조심스럽게, 하지만 확신을 가지고 수돗물을 만드는 정수공정에 멤브레인을 도입하고 있다. 영국의 처칠이 바닷물을 먹는 물로 만들기 위하여 시도했다 실패한 이래로 멤브레인은 너무 비싸다는 이유로

항상 수돗물분야에서 고베를 마셔야 했다. 90년대 초반부터 한해가 다르게 발전하고 있는 멤브레인 분야의 연구로 인하여 멤브레인은 이제 더 이상 비싼 공정이 아니며, 기존 상수처리공정의 완전교체도 그렇게 불가능한 것만은 아닌 듯 싶다. 10여년 전부터 이미 미국의 캘리포니아 베버리힐스에서는 자체 멤브레인 정수장을 차려 놓고 물을 마셔왔다. 그리고, 프랑스에서는 3-4년 전부터 34만톤/일 규모의 나노멤브레인 정수장을 파리근교에 설치하여 파리지민에 최고급의 수돗물을 제공한다고 선전하고 있다. 이제는 돈 많은 부자나라. 부자동네에서 뿐만 아니라, 우리 나라의 모든 지역에서 멤브레인으로 처리한 물을 마실 수 있는 시기도 머지 않았다고 성급하게 짐작한다. 건강에 위대한 물질은 완벽하게 분리하고 필요한 것만을 가진 그야말로 꿈의 수돗물 생산을 위한 미래기술, 멤브레인에 기대를 가져본다. 특히, 세계적으로 매년 사용되는 증가폭이 매우 높은(약 15%이상) 세라믹 멤브레인(이하말로 미래의 멤브레인기술이라는 것을 감안하면 이에 대한 환경공학측면에서의 관심이 어느 때보다 높다고 판단된다.

그렇다면, 안전하고 최고급의 안전한 수돗물을 만들어내기 위해서는 어떠한 물질을 제거해야 하는가. 사실 상수원수로 사용되는 강물, 호수물, 지하수 등에는 다양한 종류의 오염물질들이 포함되어 있어 이를 모두 파악하고 분석해 내는 것은 거의 불가능하다. 하지만, 환경공학적 측면에서 가능한 많은 오염물질들을 분석하고 이를 제거할 수 있는 공정을 도입하는 것이 현재로서는 최선의 길일 것이다. 본 연구에서는 많은 오염물질 중에서도 특히, 발암성이 매우 높은 염소 소독부산물인 할로아세트산(haloacetic acids (HAAs))과 오존 소독부산물인 브로메이트(bromate, BrO_3^-) 최소화를 위한 세라믹 멤브레인 공정의 적용 가능성에 대하여 살펴보았다. 이는 현재, 선진 정수국가인 미국과 유럽의 여러 국가들이 이 두 물질에 대한 음용수기준(미국 EPA Safe Drinking Water Act)을 이미 강화하였으며, 이를 충족시키기 위하여 많은 정수장에서 고도정수공정을 도입하고 있기 때문이다. 우리나라의 경우에도 머지않은 미래에 이에 대한 음용수기준이 제정될 것이므로 이에 대비한 고도정수공정의 연구가 필요하다고 판단된다.

상수원수에는 자연유기물질(natural organic matter (NOM))이라는 자연적으로 발생하여 물 속에 존재하는 유기물질이 있다. 이 물질이 정수공정의 하나인 염소 소독과정에서 염소와 반응하여 강력한 발암물질인 할로아세트산(HAAs)이라는 소독부산물을 생성한다. 현재 미국 EPA에서는 2001년부터 이 물질을 $30\mu g/L$ 로 규제하고 있다. 또한, 상수원수에 미량으로 존재하는 음이온인 브롬이온(Br^-)은 오존과 반응하여 오존소독부산물인 브로메이트(BrO_3^-)를 생성하는데, 이 브로메이트도 매우 강력한 발암물질이고 미국 EPA에 의하여 2001년부터 $5\mu g/L$ 로 규제되고 있다. 즉, 재래식 정수공정을 사용하는 경우에는 염소 소독부산물인 HAAs가, 고도정수공정의 하나인 오존처리공정을 사용하는 경우에는 오존 소독부산물인 브로메이트가 생성되는 것이다. 이런 측면에서 멤브레인 고도정수의 역할은 어느 때보다 높다고 판단되는 것이다. 즉, 염소 소독부산물을 생성할 수 있는 NOM을 염소와의 반응 전에 제거함으로써 HAAs의 생성을 최소화할 수 있으며, 또한 오존산화공정에 의하여 생성되는 브로메이트는 멤브레인을 통하여 후처리할 수 있는 것이다.

본 논문에서는 사용된 세라믹 멤브레인의 특성을 분석하는 방법, 사용된 NOM 용액 분석방법, 소독부산물 측정방법을 소개하고, 이어 세라믹 멤브레인을 이용하여 NOM 및 브로메이트를 제거한 결과를 소개할 것이다. 이를 통하여, 고도정수공정으로서의 세라믹 멤브레인의 적용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 실험방법 및 장치

2-1. 사용된 세라믹 멤브레인 및 멤브레인특성 분석 방법

본 연구에서는 타이타니아(TiO_2) 재료로 만들어진 tight-ultrafiltration (UF) 세라믹 멤브레인(TAMI, France)이 사용되었다. 막공크기는 molecular weight cutoff (MWCO) 기준으로 1000부터 8000사이의 멤브레인을 이용하였다. 멤브레인의 직경은 1.0 cm이며 길이는 25 cm이고, 여과면적은 95.2 cm^2 이었다. 사용된 여과장치는 랩규모로 제작되었는데, 유입펌프, 세라믹 멤브레인

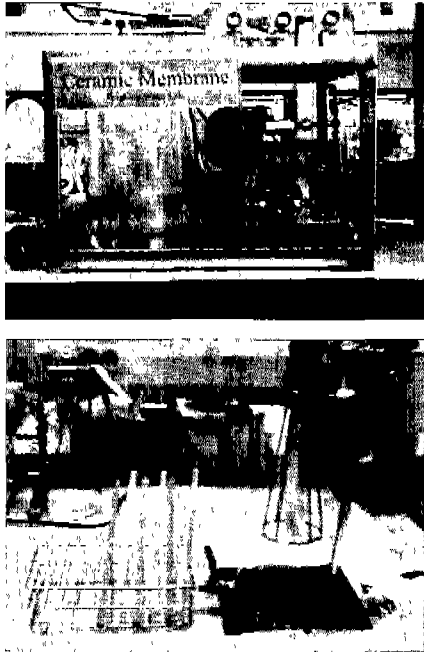


Fig. 1. 램규모의 세라믹 멤브레인 여과장치 및 관형 세라믹 멤브레인 샘플.

호울더, 유량 및 압력조절 밸브, 그리고 유량계 및 압력계로 이루어져 있다. 사용된 멤브레인 및 여과장치의 사진은 Fig. 1과 같다.

멤브레인 표면은 특정한 전하를 띠고 있는 반면, 표면 전하를 직접 측정하는 것은 불가능하므로, 유체가 이동할 수 있는 거리만큼 떨어진 유동 경계면(shear plane)에서의 전위값인 제타전위 값이 대신 측정되고 표면전하값의 간접적인 지표로 사용되고 있다. 본 연구에서는 멤브레인의 제타전위(mV)를 전기영동(electro-phoresis)법에 의하여 측정하였다(ELS-8000((주)오츠카전자)). 전하측정을 위한 표준 모니터입자로는 폴리스틸렌라텍스(입경: 520 nm) 입자가 사용되었다. 모니터입자는 전하

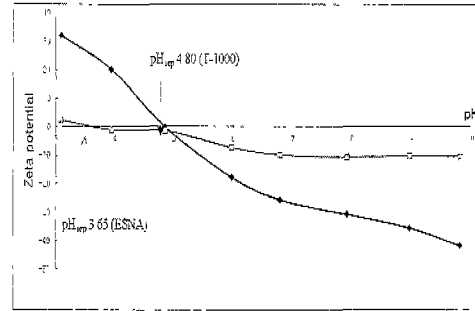


Fig. 2. 세라믹 멤브레인(T-1000)과 고분자 나노멤브레인(ESNA)의 제타포텐셜 값 비교. T-1000은 MWCO=1000인 세라믹 멤브레인이며, ESNA는 MWCO=250인 고분자 멤브레인임.

를 띠지 않게 하기 위하여 중성을 띠는 물질로 코팅되어 10 mM NaCl용액에 분산시킴으로써 멤브레인 측정용 석영셀과 반응하지 않고 단지 멤브레인 표면과 반응함으로써 멤브레인 고유의 전위를 구할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 pH 3에서 pH 10범위에서 측정된 멤브레인의 제타전위값을 나타낸 것인데, 등전위값(iso-electric-point)이 pH 4.8에서 존재함을 알 수 있다. 그림에서 비교된 ESNA멤브레인은 고분자 나노멤브레인(Hydranautics, MWCO=250, polyamide)으로써 등전위값은 유사하게 나타나고 있으나, 표면전하의 절대값은 세라믹멤브레인에 비하여 낮게 나타남을 알 수 있다. 즉, 멤브레인을 통하여 제거하고자 하는 용질이 전하(특히, 음전하)를 띠고 있는 경우에는, 전하반발력을 효과적으로 이용하기 위해서 표면전하를 높게 띠고 있는 T-1000과 같은 멤브레인을 이용하는 것이 보다 유리할 것으로 예상된다.

멤브레인 다른 특성들은 Table 1에 요약되어 있다. 막공크기는 대개 멤브레인 제작사로부터 일반적으로 MWCO값으로 제공되고 있으나, 본 연구팀에서는 자체 개발한 FR-PEG방법을 이용하여 막공크기분포(결과

Table 1. 연구에 사용된 멤브레인의 특성요약

Code	Material	Manufacture	Contact angle	MWCO ^a (dalton)	MWCO ^b (dalton)	Clean Water Permeance (L / day · m ² · kpa)
ESNA	Polyamide TFC	Hydranautics	60.3°	200	250	3.70
CeRAM 25 (T-1000)	TiO ₂	TAMII	-	1000	1100	5.80

^a Molecular weight cut-off value provided by the manufacturers

^b MWCO determined by the FR-PEG (fractional rejection of polyethylene glycol) method⁴⁾



나타내지 않았음)까지 측정하였다⁴⁾.

2.2 사용된 여과 원수 및 용질

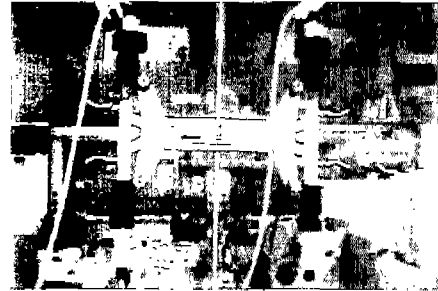
실험용액으로는 NOM이 포함되어있는 주암호 원수(JL-SW)를 사용하였다. 주암호 원수는 실제 전남 및 광주지역의 식수원으로 사용되고 있기 때문에 고도정수 가능성을 평가하기 위하여 선택되었다. 멤브레인 처리 전후의 샘플에 대하여 염소처리를 함으로써 소독부산물 HAAs가 생성될 수 있는 가능성을 검토하였다. 즉, 세라믹 멤브레인 처리공정에 의하여 얼마만큼의 HAAs 생성 가능성이 줄어들 수 있는가를 평가할 수 있는 것이다. 브로메이트 제거 실험을 위해서는 초순수에 브로메이트 100 ppb를 주입한 시료(Ambient)와 이에 pH를 4로 낮춘 시료(pH 4), 그리고 Ca^{2+} (10mM)를 주입하여 멤브레인 표면의 ion binding을 증가시킨 시료(Ca^{2+})를 각각 멤브레인에 통과시켜 브로메이트 제거율을 조사하였다. 또한, 주암호 원수(JL-SW)를 0.45 μ m 여과를 한 후에, 브로메이트를 100ppb 주입하여 멤브레인에 통과시켰다. 모든 시료(4L)는 동일한 수리학적 운영조건($f/k = 2.0$)에서 멤브레인 여과를 실시하였고, 평형상태(flux decline 이 없는 시점)에서 시료채취(200ml)가 이루어 졌다(여기에서 f는 처리수 플럭스를, k는 mass transfer coefficient를 나타낸다). 이들 시료는 이온 크로마토그래피(IC)에 의하여 브로메이트농도를 측정하기 전까지 4°C에서 냉장보관 하였다. 본 연구에 사용된 주암호 원수에 대한 특성은 Table 2와 같다.

2-3. 자연유기물질(NOM)과 소독부산물 분석방법

서론에서 언급한 바와 같이 할로아세틱산(HAAs)이라는 염소 소독부산물은 자연유기물질(NOM)이 염소와 반응하여 생성된다. 그러므로, 멤브레인공정에 의하여 NOM을 얼마나 효과적으로 제거할 수 있나 하는 것이 공정을 평가하는 중요한 척도라고 할 수 있다. NOM은 자연계에 존재하는 유기물질이므로, 그 분자구조 및 화학적 특성 등이 매우 다양하여 이를 정확하게 파악하는 것은 거의 불가능하다. 본 연구에서는 이러한 복잡다양한 NOM의 특성을 분석해 내기 위하여 NOM의 분자크기분포, NOM 분자구조(친수성 vs. 소수성), NOM 전하적 특성을 각각 size exclusion chromatography (SEC) 방법, XAD-8/4레진방법, 정밀적정방법을 사용하여 분석하였다. Fig. 3에 분석 장비를 나타내었다. 또한, 염소 소독부산물인 HAAs는 diazo-methane을 이용하여 측정



(a) NOM 분자크기분포 측정장치



(b) 소수성, 친수성 NOM 분리용 XAD-8/4 레진



(c) NOM 전하밀도 측정을 정밀적정장치

Fig. 3. NOM 특성분석용 장비사진.

Table 2. 실험에 사용된 주암호 원수 수질특성.

Source	DOC (mg/L)	UVA (L/cm)	SUVA (L/mg · m)	Conductivity (μ S/cm)	pH	Br ⁻ (ppb)	NH ₃ (ppm)
JL-SW	3.81	0.088	2.30	286	7.04	20.3	0.03

가능물질로 유도 후 용매추출법에 의하여 추출하여 GC와 ECD탐지기를 이용하여 측정하였다.

3. 연구결과 및 토론

3.1 세라믹 멤브레인에 의한 NOM 제거효율

Fig. 4에는 4가지 종류의 서로 다른 멤브레인을 이용하여 얻은 NOM 제거율을 나타내었다. T-1000(세라믹, MWCO=1000) 멤브레인과 ESNA(고분자, MWCO=250)멤브레인이 거의 비슷한 NOM 제거율을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 막공의 크기가 ESNA 멤브레인보다 커서 단위 압력당 단위 면적당 침수율(permeability)이 약 1.5배가 큰 세라믹 T-1000 멤브레인을 통하여 상대적으로 매우 높은 NOM 제거효율을 얻을 수 있다는 것을 발견할 수 있다. 즉, NOM 제거율이 유사한 경우에는 당연히 단위 압력당 침수율이 높은 멤브레인이 효율적인 멤브레인이 되는 것이다.

Fig. 5는 4가지 종류의 서로 다른 멤브레인에 대하여, 각각 HAAs 소독부산물물의 생성가능성(haloacetic acids formation potential (HAAFP))을 얼마만큼 줄일 수 있는지를 검토 비교한 결과이다. 예를 들면, 세라믹 T-1000 멤브레인은 6개 HAAs 물질을 생성시킬 수 있는 잠재력을 77.1%를 제거한 반면, GM(고분자, MWCO=8000) 멤브레인은 56.5%를 제거할 수 있음을 알 수 있

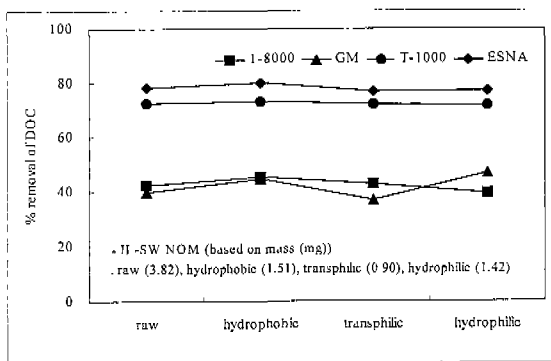


Fig. 4. 세라믹 멤브레인(T-8000, T-1000)과 고분자 멤브레인(GM, ESNA)에 의한 NOM 제거효율의 비교: T-8000 멤브레인은 MWCO가 8000인 세라믹 멤브레인, GM은 MWCO가 역시 8000인 고분자(polyamide) 멤브레인임; hydrophobic, transphilic, hydrophilic은 각각 소수성, 반친수성, 친수성 NOM을 나타냄.

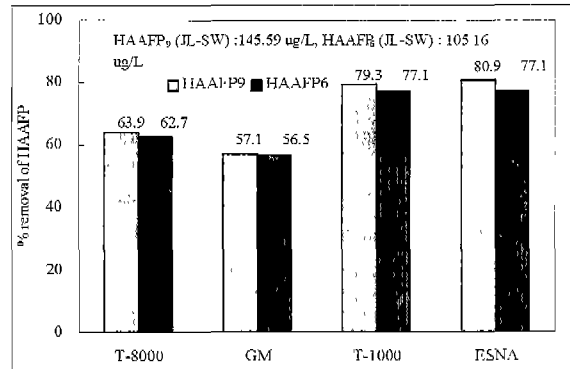


Fig. 5. 세라믹 멤브레인과 고분자 멤브레인에 의한 할로아세트산 생성가능성 제거비교: 여기서, HAAFP는 HAAs formation potential이며 샘플 속에 포함되어 있는 NOM에 의하여 최대 생성될 수 있는 HAAs의 양을 의미함.

다. Fig. 4에서의 용존탄소농도(dissolved organic carbon (DOC))제거율 비교에서의 유사하게, HAAs 생성가능성을 제거하는 측면에서도 T-1000 세라믹 멤브레인은 ESNA 고분자 멤브레인과 비교하여 큰 막공크기에도 불구하고 높은 제거효율을 나타냄으로써 고도정수공정에서의 응용이 가능함을 나타내었다.

3-2. 세라믹 멤브레인에 의한 브로메이트 제거효율

각기 다른 특성을 나타내는 4 가지 시료 - ambient (초순수에 브로메이트 첨가한 용액), Ca²⁺ 첨가샘플, pH 4로 조절한 샘플, and 주암호 원수(JL-SW) -를 폴리머 멤브레인과 세라믹 멤브레인에 통과시킨 후 그 유입수와 처리수에 대하여 브로메이트 농도변화를 포함한 여러 가지 특성변화를 Table 3과 Fig. 6에 나타내었다. Table 3과 Fig. 6에서 알 수 있듯이, 앞의 NOM과 소독부산물 관련 결과와 유사하다는 것을 알 수 있다. 즉, 막공크기가 상대적으로 커 침수율이 높은 세라믹 T-1000 멤브레인이 고분자 ESNA 멤브레인과 거의 유사한 제거율로 브로메이트를 제거할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 칼슘첨가 및 pH 감소에 의한 전하반발력 감소 등에 크게 영향을 받지 않고 브로메이트를 안정적으로 제거할 수 있음을 알 수 있다. 앞의 NOM 및 소독부산물 최소화 분야에서의 가능성과 더불어 브로메이트의 효율적인 제거를 위한 세라믹 멤브레인의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

Table 3. 여러 가지 조건을 지닌 브로메이트 용액에 대한 멤브레인의 제거 효율 비교

Membrane type	properties	ESNA		CeRAM 25 (T-1000)	
		feed	permeate	feed	permeate
(1) Ambient	pH	5.39	5.55	5.85	5.65
	conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	104.1	26.2	98.9	22.8
	bromate conc. (ppb)	107.3	31.8	103.7	20.6
	% removal	70.4		80.1	
(2) Ca^{2+}	pH	5.54	6.08	5.39	5.82
	conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1328	534	1285	31.2
	bromate conc. (ppb)	97.6	20.5	102.5	18.9
	% removal	79.0		81.6	
(3) pH 4	pH	4.00	4.12	4.00	4.56
	conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	227	129.8	238	118.2
	bromate conc. (ppb)	108.4	36.9	98.5	20.1
	% removal	66.0		79.6	
(4) JL-SW	pH	7.26	6.59	7.42	7.08
	conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	174	31.7	169	29.5
	bromate conc. (ppb)	93.8	22.8	94.9	18.5
	% removal	75.7		80.5	

Fig. 7에서는 동일한 화학적 조건하에서 멤브레인 운영인자를 변화시켜 브로메이트 제거효율에 미치는 영향을 살펴보았다. 멤브레인 운영인자로는 f/k 비를 사용하였는데, f 는 단위 압력당, 단위 면적당 멤브레인의 플럭스를 의미하며, k 는 mass transfer coefficient를 의미한다. k 는 멤브레인으로 떨어지려는 용질의 확산계수를 의미하므로, f/k 비를 증가시키는 방향으로 멤브레인 운영인자를 조절할 경우에는 상대적으로 용질(여기서는 브로메이트)의 제거율은 감소할 것이며, 반대로 f/k 비를 감소시키면 브로메이트의 제거율은 증가한다는 가설을 세울

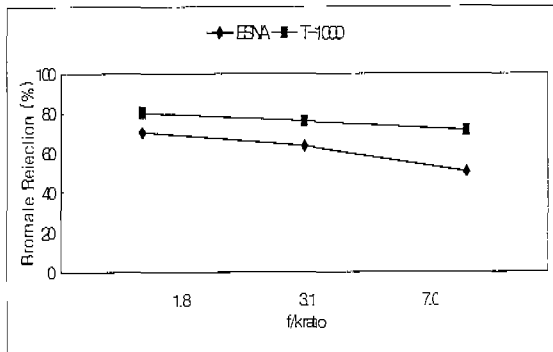


Fig. 6. 세라믹 멤브레인과 고분자멤브레인에 의한 브로메이트 제거경향 비교

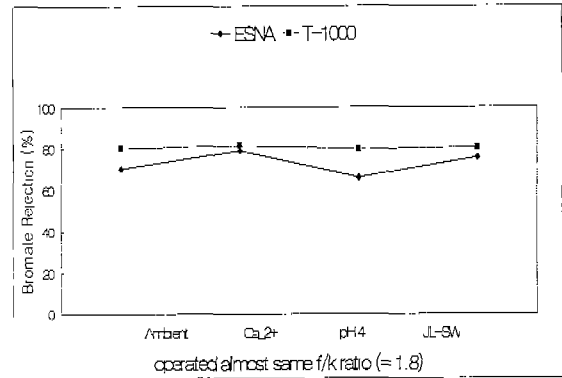


Fig. 7. 멤브레인 운영조건(특히, 평행유속(cross-flow velocity))에 따른 브로메이트 제거경향 변화. f/k 비가 크질 수록 제거효율은 떨어지므로 목표 제거율에 따른 최적의 운영조건 결정이 가능하다.

수 있다. Fig. 7의 결과에서 알 수 있듯이, 이러한 가설에 부합되게 f/k 비를 증가시키면 세라믹 혹은 고분자 멤브레인 공히 브로메이트 제거율은 감소하였다

4. 결론 및 제언

본 연구를 통하여 고도정수공정의 주 제거 대상물질인 소독부산물 전구물질을 최소화하기 위한 방안으로서 세라믹 멤브레인을 이용한 정수처리공정의 가능성을 검토하였다. 염소 소독부산물로는 할로아세틱산(HAAs)을, 오존 소독부산물로는 브로메이트를 선택하여 이를 최소화할 수 있는 여러 가지 방안을 실험하였다. 본 연구에서는 MWCO가 1000인 세라믹 멤브레인(T-1000)과 막공크기가 훨씬 작은 고분자 멤브레인(ESNA, MWCO=250)이 비교연구를 위하여 같이 조사되었다. 세라믹 T-1000 멤브레인은 고분자 ESNA 멤브레인에 비하여 상대적으로 큰 막공(pore size)을 가졌음에도 불구하고, 자연유기물질(NOM) 및 HAAs 생성가능성 제거에 있어 탁월한 효율을 나타냄으로써, 단위 압력당 침수율(permeability)이 높다는 점을 감안하면 고도정수공정의 경제적인 적용가능성이 높음을 보여 주었다. 또한, 오존산화의 부산물인 브로메이트 제거에 있어서도 나노 고분자 멤브레인에 버금가는 높은 제거효율을 또한 나타내었다. 이러한 결과를 미루어 음전하를 상대적으로 높게 띄고 있는 세라믹 멤브레인의 고도정수분야에의



적용가능성을 확인할 수 있었다. 그리고, 동일한 멤브레인일지라도 수리학적 운영조건에 따라 상이한 용질 제거율을 나타낼 수 있다는 것도 발견할 수 있었다.

참고 문헌

1. Jaeweon Cho, G.L. Amy and J. Pellegrino, Membrane filtration of natural organic matter: factors and mechanisms affecting rejection and flux decline with charged ultrafiltration (UF) membrane, *Journal of Membrane Science*. 164, 89-110(2000).
2. L.H. Grossman, A. Idin, B.L. Relis and M. Rebhun,

Formation of Cyanogen Bromide and Other Volatile DBPs in the Disinfection of Bromide-Rich Lake Water, *Environ. Sci. Technol.* **33** 932-937 (1999).

3. Paul Westerhoff, Ozone Oxidation of Bromide and Natural Organic Matter, Thesis for the Doctor of Philosophy degree of University of Colorado at Boulder (1995).
4. Sangyoun Lee, Jaeweon Cho et al., Determination of membrane pore size distribution using fractional rejection of PEG (FR-PEG), accepted for the publication in the *Journal of Membrane Science* (2001).



조재원

- 1983-1987년 연세대학교 토목공학과 공학사
- 1995-1995년 Univ. of Colorado, Boulder 환경공학과 공학석사
- 1996-1998년 Univ. of Colorado, Boulder 환경공학과 공학박사
- 1996-1998년 미국 표준청(National Institute of Science and Technology, Boulder, US) Guest Researcher
- 1998-1998년 미국 수로국(Bureau of Reclamation, Denver, US) Guest researcher
- 1999-1999년 Univ. of Colorado, Boulder Post-doc
- 1999-현재 광주과학기술원 환경공학과 조교수
- 2000-현재 국립환경연구원 정수기술위원회 위원



이상엽

- 1999년 고려대학교 환경공학과 학사
- 2001년 광주과학기술원 환경공학과 석사
- 2001년 현재 광주과학기술원 환경공학과 박사과정