

정수처리 적용을 위한 UF/MF 중공사막의 투과성능과 오염현상

이 주 형 · 김 정 학* · 이 용 택

경희대학교 환경·응용화학부, SK Chemicals*
(2000년 6월 19일 접수, 2000년 7월 25일 채택)

Characteristics of Permeation and Fouling of UF/MF Hollow Fiber Membranes for Drinking Water Treatment

Ju-Hyung Lee, Jeong-Hak Kim*, and Yong-Taek Lee

School of Environment and Applied Chemistry, Kyung Hee University,
Yongin-shi, Gyeonggi-do 449-701, Korea, SK Chemicals*

(Received June 19, 2000, Accepted July 25, 2000)

요 약 : 본 연구는 정수처리 공정에서 예상되는 오염물질에 대한 막의 투과성능과 오염현상을 알아보기 위하여 막의 길이와 운전압력에 따른 압밀화 현상을 검토하였다. 막의 길이와 운전압력이 증가함에 따라 압밀화 현상도 증가하였다. MF막을 오염물질에서 고압(2.0 kg/cm^2)과 저압(0.5 kg/cm^2)으로 운전할 때, 고압 운전이 막힘현상(clogging)을 가속화 시켜 플럭스를 급격히 감소시키므로 저압 운전이 효과적이다. MF막을 Out-In 방식으로 운전하였을 때, 막의 길이와 운전 압력에 관계없이 일정 시간 운전 후 비슷한 플럭스가 나타났다. 미생물 물질에 대한 막오염 현상을 파악하기 위해 중공사막을 강제 오염시킨 후 화학세정을 실시하였다. Biofouling된 막을 화학세정 하였을 때 산화능력이 우수한 H_2O_2 와 NaOCl 이 NaOH 에 비해 살균능력과 탈착능력이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

Abstract : This study, which was carried out to investigate the characteristics of permeation rates and fouling phenomena in drinking-water treating processes with MF membrane, showed that pressure drop was dependent on the length of membrane module and operating pressure: the pressure drop increased with the length of membrane module and operating pressure, operation at a relatively low pressure (0.5 kg/cm^2) is better than that at a relatively (2.0 kg/cm^2), since high operating pressure accelerates the clogging. In case of out-in permeation type, almost same flux was obtained after a certain operating time regardless of membrane length and operating pressure. In order to understand, the microbial fouling, chemical cleaning was carried out to the forced contaminated hollow-fiber membrane with chemicals (H_2O_2 , NaOCl , and NaOH). Chemical cleanings with H_2O_2 and NaOCl , which are oxidizing agents, are better for sterilizing and desorbing the microbes than those with NaOH .

1. 서 론

최근의 환경변화를 보면, 상수원수의 수질이 점점 나빠지는 반면, 복지에 대한 관심이 증대되면서 양질의 먹는 물을 요구하게 되었다. 그러나 상수원으로

사용되는 하천이나 지하수의 오염이 더욱 심각해지고 있으며 오염물의 종류도 다양해져 기존의 정수처리 공정의 능력이 한계를 보이고 있다. 최근에 정수처리 및 폐수처리 공정에서 널리 사용되고 있는 막분리 공정은 운전 시 막의 오염현상(fouling)이 가장 문제가

되며 이를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다 [1-3]. 이러한 막오염은 분리막의 기공(pore) 벽면이나 표면에 염(salt), 거대분자(macromolecule), 콜로이드(colloid) 입자 등의 침적으로 인한 가역, 비가역적 현상 뿐만 아니라 수계에 존재하는 탁도와 미생물에 의한 오염현상을 의미하여 투과성능을 저하시킨다 [4-7]. 탁도의 경우 1975년 NIPDWR(National Primary Drinking Water Regulations)이후 심미적 항목에서 건강항목으로 다시 규정되어 미생물학적 기준의 일부로 분류하는데 이는 탁도를 나타내는 입자들이 병원성 미생물의 부착지를 제공함으로써 그들을 소독제로부터 보호하기도 한다. 또한 탁도의 크기가 *Giardia*와 같은 원생동물 이상으로 큰 미생물의 여과에 의한 제거의 간접적인 지표가 된다[8].

본 연구는 정수처리 공정에서 예상되는 막의 오염현상을 파악하기 위하여 막의 길이와 운전압력에 따른 압밀화 현상과 비대칭 구조를 가진 막의 투과방식에 따른 오염 정도, 입자 오염물질에서 막의 길이와 운전압력에 따른 오염현상을 알아보았다. 또한 biofouling과 이에 대한 대책으로 화학세정을 실시하여 회복정도를 검토하였다.

2. 실험

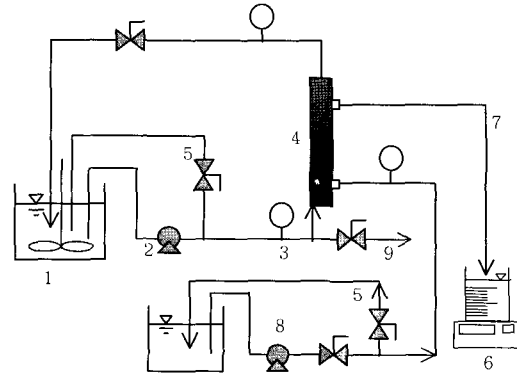
2.1. 실험장치

본 실험에 사용된 실험 장치 구성은 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 내부여과 방식의 전형적인 ultrafiltration(UF) 공정이며 cross-flow 방식으로 실험에 사용되었다. Fig. 1(b)는 외부여과 방식의 막을 운전하기 위한 장치로써 전여과 방식으로 사용되었다. 본 실험에서 외부여과 방식의 MF막은 이 장치를 사용하여 실험하였다. 원수의 성상이 균일함을 유지하기 위하여 교반봉을 원수조(feed tank)에 부착하여 교반하였으며, 막 모듈 유입 유량 조절을 위해 bypass line을 이용하였다. 압력조절은 (a)에서 bypass와 outlet 부분의 밸브를 이용하여 일정한 압력으로 조절하였고, (b)에서는 bypass 부분의 밸브만으로 압력을 조절하였다. 역세척 실험에서는 여과수가 적어 순수를 제조하여 역세척에 사용하였다.

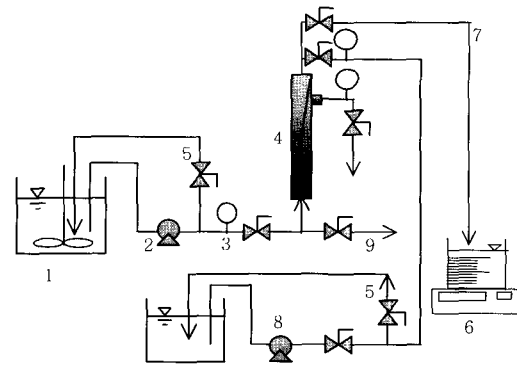
2.2. 실험방법

2.2.1. 시료제조

오염현상 실험을 위해 입자 오염물질과 미생물 오염물질을 제조하였다. 입자 물질은 수계에 존재하는



(a) Cross-flow Membrane Process



(b) Dead-end Membrane Process

1. Feed water 2. Feed pump 3. Pressure gauge
4. Membrane module 5. Bypass line 6. Balance
7. Permeate 8. Back-washing pump 9. Drain line

Fig. 1. Schematic flow diagram of experimental units.

점토(clay)를 물에 용해하여 교반시킨 후 4시간 정도 침전시키고 상등액을 채취하여 탁도 10FTU로 조절하여 시료로 이용하였다. 시료에 존재하는 입자는 입자분석기(Particle size analyzer, Marvern Co., Master Sizer/E)를 사용하여 측정하였고 입자 분포도는 Fig. 2에 나타내었다. 미생물 물질은 포도당 균을 10^6 CFU/mL로 시료를 조제하여 기공의 크기가 $0.1 \mu\text{m}$ 인 MF막으로 실험하였다.

2.2.2. 막의 선정 및 모듈 제작

세균, 미립자, pyrogen의 제거가 가능한 UF막과 MF막을 선택하였으며, 막의 재질로는 기계적 강도, 내열성, 가공성, 내화학성 및 높은 수투과량을 가지는

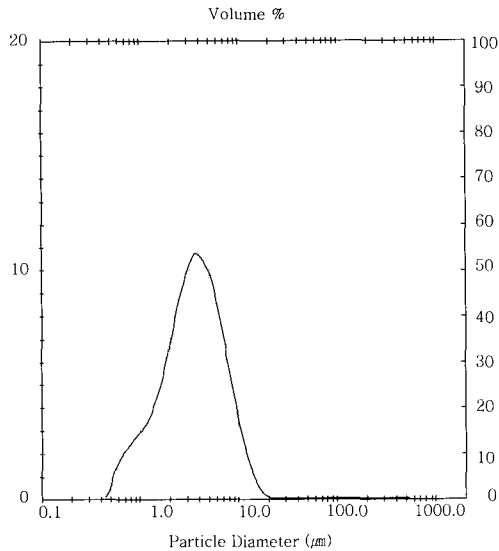


Fig. 2. Particle size distribution of feed water.

polysulfone(PSf)을 선정하였다. 분리막 모듈은 단위 체적당 표면적이 넓고 조업압력이 낮아 경제성이 우수한 중공사막 형태의 모듈을 선정하였다. 막의 유효 길이에 따른 압력손실을 알아보기 위하여 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 m의 길이별로 실험용 모듈을 제작하였다. 사용된 분리막은 국내에서 생산 가능한 (주)SK Chemicals사의 UF막과 MF막으로 분획분자량(MWCO) 30,000과 0.1 μm의 중공사를 공급받아 자체적으로 모듈을 만들어 사용하였다. 분리막의 제원 및 특성은 Table 1과 같다.

2.2.3. 미생물에 의한 막성능 변화 실험

미생물 실험은 다음과 같이 3단계로 나누어 실험하였다. 첫번째로 미생물 오염실험은 수계에 존재하는

미생물 0.3 μm정도 크기의 황색포도당 구균을 10⁶ CFU/mL로 조제하여 5 L 여과시킨 후 오염된 막을 이틀 동안 방치하였다. 이렇게 방치된 막은 화학적 세정을 위하여 0.2M-NaOH, 3%-H₂O₂, 10ppm NaOCl의 3가지 세정약품을 이용하여 오염된 막을 10, 20, 30분간 침적하여 화학적 세정을 하였다. 화학세정된 막을 순수로 5분간 약품을 세정한 다음 다시 순수로 2분간 역세척하였다. 이때 역세척에 의해 오염물이 탈착된 여과수를 채취하여 균수를 측정하였고, 이 시료에서 측정된 미생물 농도로 세정약품의 살균력과 세정시간이 막성능에 미치는 영향을 알아보았다. 역세척한 막을 다시 정상운전조건(Out-In방식, 운전압력 1 kg/cm²)에서 순수로 여과시켜 회복정도를 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

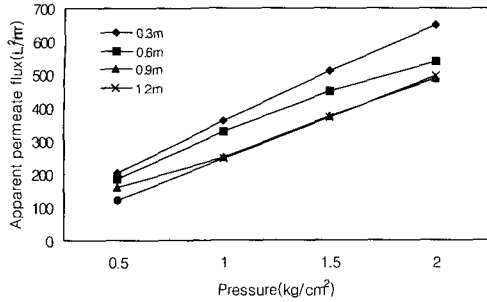
3.1 길이와 투과방식에 따른 플럭스 변화

Fig. 3, 4는 MF와 UF막을 길이에 따라 Out-In방식(dead-end방식)과 In-Out방식(cross-flow방식)으로 운전하여 나타난 결과이다. 순수한 물(pure water)을 이용하여 막의 유효길이를 0.3, 0.6, 0.9, 1.2m 길이에 맞게 모듈을 제작하고, 운전압력은 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kg/cm²으로 변화시키며 압력과 투과방식의 변화에 따른 투과거동을 평가하였다.

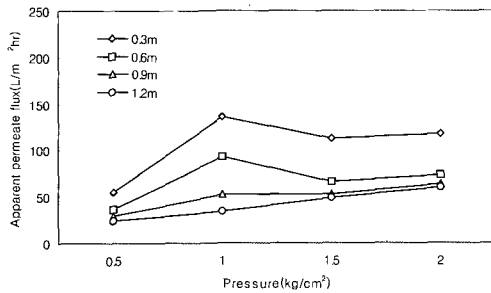
Fig. 3에 UF막의 길이와 압력에 따른 플럭스의 변화를 나타내었다. 그 결과 Out-In(Fig. 3(b))방식의 경우 길이가 길어지게 되면 걸보기 투과량이 감소하고, 중공사막 내부의 압손실은 크게 증가함을 알 수 있는데, 운전압력 1 kg/cm²에서 모듈길이가 0.3 m인 중공사막에 비해 1.2 m의 길이에서 약 3배 정도의 압손실을 받는 것을 예상할 수 있다. In-Out(Fig. 3(a))의 경우는 운전압력이 증가함에 따라 걸보기 투

Table 1. Specification of membrane modules

	SKUF-30	SKMF-10
Material	Polysulfone	Polysulfone
Pore size	0.1μm	MWCO 30,000
Fibers (pieces)	5	5
Membrane size (mm, ID/OD)	0.7/1.0	0.8/1.4
Length(m)	0.3, 0.6, 0.9, 1.2	0.3, 0.6, 0.9, 1.2
Surface area(m ²)	0.00962 (0.9m, I-O)	0.01131 (0.9m, I-O)
	0.0141 (0.9m, O-I)	0.0191 (0.9m, O-I)



(a) In-Out type



(b) Out-In type

Fig. 3. Flux of UF membrane as function of pressure and permeation type.

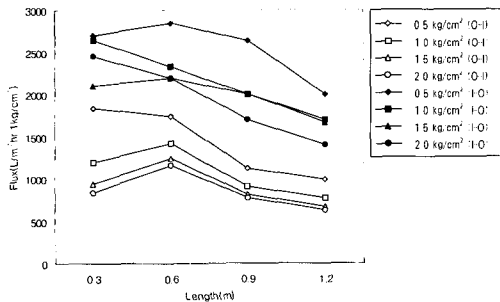
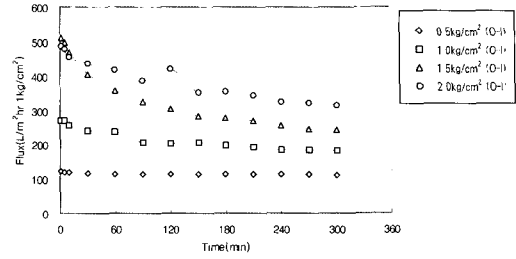


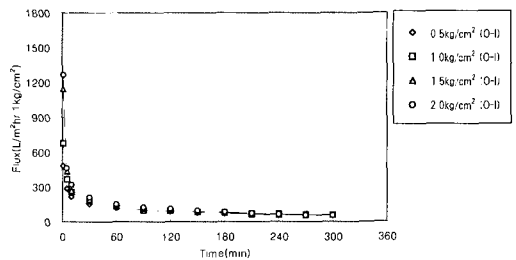
Fig. 4. The Flux of MF membrane with various module length and pressure.

과량이 3~4배 정도 되는 것을 알 수 있는데, Out-In 방식의 경우 여과수가 좁은 관 사이로 흘러가야 하며 다른 부위에서 여과된 물의 수압에 의해서도 압손실의 영향을 받으므로 In-Out 방식에 비해 투과량이 적음을 알 수 있었다. 따라서 double-skin 구조를 가진 UF막에서 Out-In 방식에 비해 In-Out 방식이 효율적이라고 판단된다.

Fig. 4에 MF막의 길이와 압력에 따른 플럭스 변화를 나타내었다. 그 결과 길이와 압력에 따른 투과량



(a) In-Out type (UF)



(b) Out-In type (MF)

Fig. 5. Pressure effect on the flux as function of operating time for UF/MF membrane.

의 저하 비율은 UF막의 결과와 유사한 경향을 보였다. 그러나 실제 투과량은 $500 \sim 1,000 (L/m^2 \cdot hr)$ 1 kg/cm^2 정도로 큰 차이를 나타내었으며, 특히 In-Out 방식 및 Out-In 방식 역시 같은 압력에서 $1,000 (L/m^2 \cdot hr)$ 1 kg/cm^2 이상의 차이를 보이기도 하였다. 이는 MF막의 투수량이 많아 증공사 관으로 흐를 수 있는 여과량을 초과하였다고 생각된다.

3.2. 입자성 물질에 의한 플럭스의 변화

Fig. 5은 입자 성분이 오염(fouling) 현상에 미치는 영향을 알아보기 위해 점토(clay)를 이용하여 압력을 변화시키면서 실험하였다. 시료는 자연산 점토를 순수에 일정량을 용해하여 4시간 방치시킨 후 입자물질을 전처리 된 물에 희석하여 탁도(turbidity)를 10FTU로 조제하였다. 실험에 사용한 막모들은 UF막과 MF막의 길이에 따른 플럭스 변화의 결과를 바탕으로 0.9 m를 선택하여 실험하였다. 순수 투과 실험에서의 최적조건은 0.6 m였으나 현재 산업용으로 적용되는 막모들의 길이가 0.9 m이므로 향후 적용성을 위해 0.9 m의 막을 선택하였다. 그 결과 UF막(Fig. 5(a))의 경우 투과량이 크게 감소하지는 않았는데 막 표면의 기공이 작고 매크러워 cross-flow 방식으로 운전할 때 막 표면에서 선속도에 의해 퇴적된 입자를 배제한다고 사료된다.

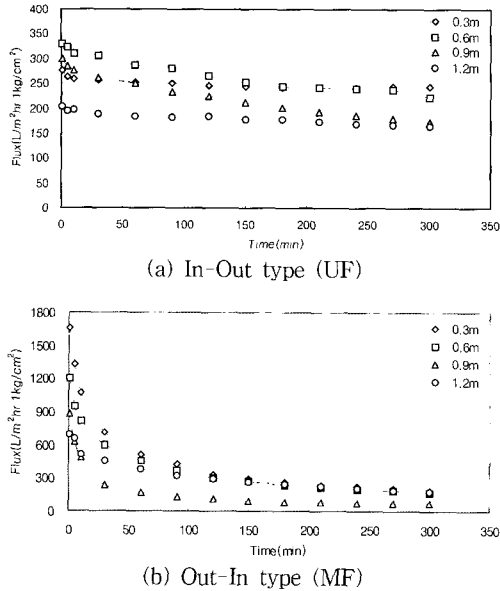


Fig. 6. Effect of the length on the flux for UF/MF membrane.

MF막(Fig. 5(b))의 경우 약 1시간이 지난 후 압력에 관계없이 투과량은 동일한 결과를 나타내었다. 즉, 입자상 물질에 대한 dead-end(Out-In)방식의 증공사막의 운전은 고압보다 저압운전이 유리하다고 보이며 고압으로 운전할 때 막오염의 가속화만 초래할 뿐이며, 압력에 따른 효율을 가지지 못하므로 운전비용 측면에서도 좋지 않다고 판단된다. 또한 Fig. 2의 입자분포에서 MF막의 세공크기(0.1 μm)보다 큰 입자성 물질들이 분포하므로 막힘 현상이 발생함을 알 수 있었다[9,10].

증공사막 모듈의 길이에 따른 입자 성분에 의한 오염 현상에 대한 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다. 막 모듈은 UF/MF를 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 m로 제작하여 운전 압력 1 kg/cm^2 에서 실험하였다. UF막(Fig. 5(a))에서는 입자성 오염물질에 대해 오염정도가 적음을 알 수 있고, 막의 길이가 0.3 m에서 1.2 m로 길어짐에 따라 투과량이 감소하였다. MF막(Fig. 5(b))에서는 막길이의 증가와 관계없이 일정한 시간 후 일정한 플럭스를 가지게 되는데 이는 dead-end(Out-In)방식이기 때문에 막의 외면에 막힘현상(clogging)이 빨리 일어나 막의 길이에 관계없이 비슷한 플럭스를 가지게 되는 것으로 판단된다[11,12].

3.3. MF막에서 투과방식에 따른 투과성능 변화
MF막의 순수투과 실험에서 모듈의 길이가 0.9 m

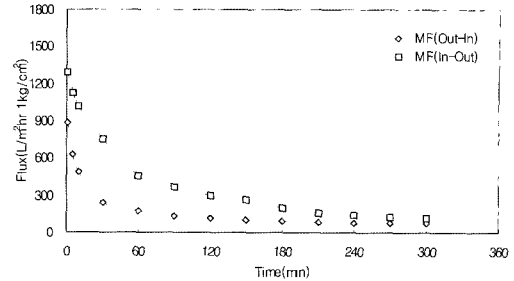


Fig. 7. Effect of permeation type on the flux for MF membrane (In-Out type, Out-In type).

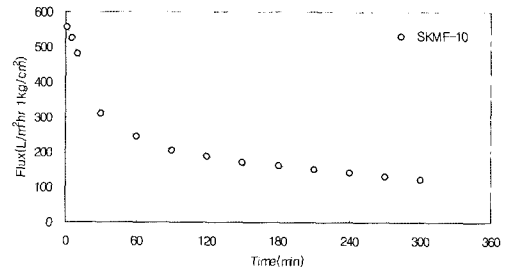


Fig. 8. Effect of microbe materials on the flux for MF membrane.

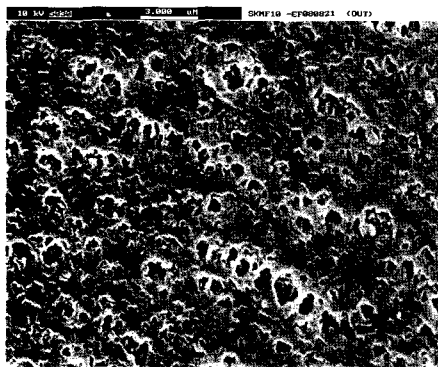
(1 kg/cm^2)일 때, In-Out방식이 Out-In방식에 비해 2배 정도의 높은 플럭스를 가지는 것을 알 수 있었다. Fig. 7은 점토 오염물이 과량으로 함유된 시료를 MF막에 투과시킬 때 오염정도가 어떻게 변하는지 알아보려고 하였다. 그 결과 MF막은 주기적인 세정이 없으면 In-Out, Out-In방식 모두 flux가 저하됨을 알 수 있었다. MF막의 구조는 비대칭 막으로서 내부의 세공크기는 크고 안정적이지 못하기 때문에 crossflow 방식으로 운전하였을 경우 막의 내부흐름의 선속도에 의하여 막 표면에 쌓인 입자 물질들이 탈착됨을 알 수 있다[13].

3.4. 미생물에 의한 Biofouling

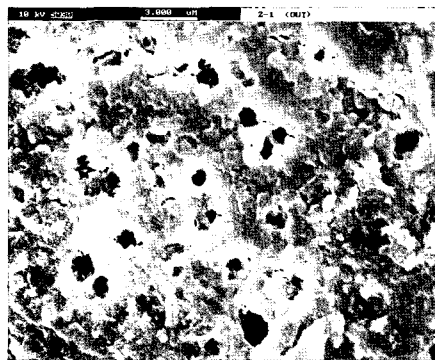
황색포도당구균 미생물 농도를 $10^6\text{CFU}/\text{mL}$ 로 조제한 다음 MF막에 투과하여 시간에 따른 플럭스 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 미생물 함량이 높아지면 막 표면의 biofouling으로 플럭스가 감소하는 것으로 추측할 수 있었으며[14] Fig. 9에 SEM으로 확인하였다. 사진은 조제된 시료를 5L 투과시킨 막을 이틀 동안 방치한 후 MF막 표면을 찍은 것으로서 MF막 표면에 미생물이 침적되어 있는 것을 확인할 수 있었다[15-17].

Table 2. 살균능력 및 부착 미생물의 세정효과 세정제

CIP 시간(min)	0.2M-NaOH			3% H ₂ O ₂			10ppm NaOCl		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30
여과수의 세포수(CFU/mL)	0	0	7	0	12	0	0	4	0
린스 후의 세포수(CFU/mL)	130 0	560	490	430	540	130 0	370	400	300



(a) before biofouling



(b) after biofouling

Fig. 9. SEM micrographs of MF membrane surfaces.

3.5. 살균능력 및 부착 미생물의 세정효과

Table 2는 여과수의 미생물 수를 측정하여 MF막의 세균 능력을 알아보았고, 세정약품과 CIP(clean in place) 시간에 따른 살균력과 부착 미생물의 세정효과를 알아보았다. 여과수의 미생물은 적은 수이지만 약간의 미생물이 검출되었는데, 오염원에 노출된 곳에서 실험을 행하여 이에 따른 실험적 오차로 볼 수 있다. 실험에 사용된 황색포도당 구균의 크기는 0.3 μm 으로 MF막의 pore size의 제거범위(0.1 μm)에 있으므로 충분한 세균이 가능하다고 가정할 수 있다.

NaOH 세정시간에 따른 실험을 하였을 때, 세정시간 증가에 따라 미생물 농도가 감소하는 것을 볼 수

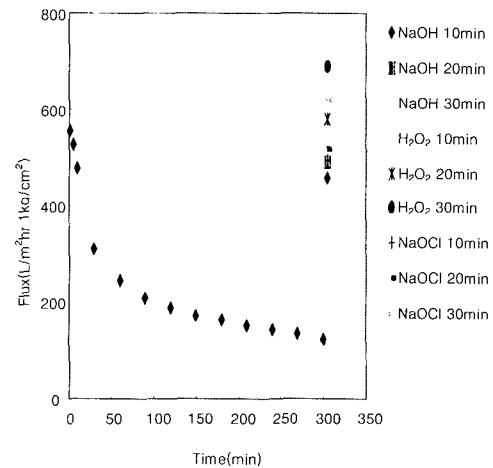


Fig. 10. Attached microbe removal efficiency on chemical agents.

있다. 일정한 시간동안 화학세정된 막을 다시 순수한 물로 린스한 후 2분 동안 역세척에 이용된 물을 채취하여 탈착된 균을 측정하였는데, 이 시료의 배양 후의 균이 30분 동안 화학세정된 시료보다 10분 화학세정한 시료에서 균이 더 많이 나왔다. 30분 화학세정은 살균 능력은 좋으나 부착되어 있는 미생물 탈착에는 큰 도움을 못 주는 것으로 생각된다. 과산화수소의 경우는 NaOH와 반대 경향을 보였는데, 화학세정 시간 증가에 따라 미생물 농도가 증가하였다. 이는 미생물 농도가 화학세정 시간에 따라 증가하는 것은 표면에 부착되었던 균이 완전히 죽지 않은 상태에서 탈착되어 더 많은 수의 미생물이 검출됨을 알 수 있었으며 과산화수소가 살균 능력과 함께 세정 능력에 큰 효과가 있음을 알 수 있다[18]. 차아염소산의 경우 화학세정 시간 증가에 관계없이 비슷한 균수를 보였는데, 이는 저농도에서도 살균력이 좋은 것으로 볼 수 있다[9,19].

화학세정 후 세정약품과 세정시간에 따른 회복정도를 알아보기 위해 순수로 역세정한 후 다시 정상운전 (Out-In, 1 kg/cm^2)하여 수투과 실험결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그 결과 NaOH는 세정시간의 증가에

따라 큰 상승 없이 비슷한 플럭스를 보였는데, NaOH 세정시간이 10분 일때는 $450(\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{hr})$, 30분 일때는 $500(\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{hr})$ 를 나타내었다. 과산화수소의 경우 세정시간 증가에 따라 플럭스가 더 향상되었는데, 세정시간 10분 일때는 $500(\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{hr})$, 30분 일때는 $750(\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{hr})$ 를 나타내었다. 따라서 과산화수소가 미생물의 살균과 함께 미생물 탈착에도 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

4. 결 론

정수처리 공정에서 예상되는 오염물질에 대한 막의 투과성능과 오염현상을 알아보기 위하여 막의 길이와 운전압력에 따른 압밀화 현상을 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 중공사막의 길이 변화에 따른 순수 투과량을 평가해 보았을 때, 0.6 m 이상에서는 압손실에 의해 오히려 투과량이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 막의 내외경에 따라 달라지므로 상용화시 최적화가 필요하다. 또한 본 실험에서 사용한 UF/MF막의 투과성능을 평가하여 본 결과 UF막의 경우는 In-Out방식의 투과가 유리하였으며 Double-skin 구조의 중공사막에 있어서 Out-In방식으로 운전하면 중공사막의 내부 압손실 때문에 통수량이 3~4배정도 적게 나타나는 것을 알 수 있었다. MF막의 경우, 막구조가 외부표면에 작은 기공(pore)이 있고 내부표면에는 큰 기공(pore)이 형성된 비대칭막으로써 In-Out방식으로 운전시 입자성 물질의 오염이 심화되므로 Out-In방식을 사용하는 것이 유리하였다.

2. 입자 오염물질에 대한 오염현상은 세정효과는 UF막의 경우 In-Out방식으로 여과할 때 압력증가에 따라 플럭스는 증가하였고, 저압($0.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$) 운전이 고압($2 \text{ kg}/\text{cm}^2$)에 비해 플럭스가 안정적이었다. 그러나 In-Out방식으로 운전시 길이증가에 따른 압손실에 의하여 플럭스는 감소하는 경향을 보였다. MF막의 경우 저압($0.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$)과 고압($2.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$)의 운전에서 일정 시간 후 플럭스는 비슷하게 나타났다. 이는 MF막은 고압운전에서 입자오염 물질의 막의 막힘현상(clogging)이 가속화되므로 저압운전이 훨씬 효과적인 운전방법이라고 생각된다.

3. 투과 방식에서는 Out-In방식이 In-Out방식보다 초기 플럭스는 크지만 시간이 경과함에 따라 비슷한 투과량이 되었다. 실험에 사용된 MF막이 비대칭막의 구조적 특성에 따라 입자 물질은 Out-In방식을 사용하면서 주기적인 역세정하는 것이 유리하다고 볼 수

있다. 길이에 따라서는 Out-In방식의 경우 입자물질의 막힘현상이 가속화되므로 길이에 따른 성능 차이는 크지 않았다.

4. 미생물 오염물질에 관한 오염현상과 세정효과는 균이 포함된 조제 시료의 막투과시 biofouling 원인으로 플럭스가 저하되었다. 미생물 오염에 의한 세정약품은 우수한 산화성을 가진 과산화수소(H_2O_2)와 차아염소산(NaOCl)이 수산화나트륨(NaOH)보다 미생물의 살균과 탈착에 효과적인 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. M. F. Speth, R. S. Summers, and A. M. Gusses, *Environ. Sci. Technol.*, **32**, 3612-3617 (1998).
2. M. Hashino, Y. Mori, Y. Fujii, N. Motoyama, N. Kadokawa, H. Hoshikawa, W. Nishijima and M. Okada, "Pilot plant evaluation of ozone-microfiltration system for drinking water treatment", Membrane Tech. in Environ. Management, Tokyo (1999).
3. Nakatsuka, S. and Ase, T., Proceedings of the AWWA Membrane Technology Conference, U.S., Nevada, 621~639 (1995).
4. E. Mattiasson and B. Sivik, *Desalination*, **35**, 59-103 (1980).
5. Y. Kaiya, Y. Itoh, K. Fujita, S. Takizawa, *Desalination*, **106**, 71-77 (1996).
6. D., F. A. Braghetta, A. Utne, and J., N., "Nanofiltration Fouling by natural organic matter and role of particles in flux enhancement" Proceedings of the 1993 AWWA membrane technology conference, Baltimore, MD (1993).
7. C. Serra, Laurence D.-B., M. J. Clifton, P. Moulin, J.-C. Rouch, P. Aptel, *J. of Membrane Sci.*, **161**, 95-113 (1999).
8. 정현미, "미생물의 수처리와 수질관리 동향 및 개선방향", *J. of Korea Works Association*, **25**(1), 36-54 (1992).
9. Y. Kaiya, Y. Itoh, S. Takizawa, K. Fujita, T. Tagawa, "Fouling analysis in membrane process for drinking water production", Membrane Tech. in Environ. Management, Tokyo (1999).

10. S. Vigneswaran, S. Boonthanon, H. Prasanthi, *Desalination*, **106**, 31-38 (1996).
11. Laine, J.-M., Clark, M.M., and Mallevalle, J. M., *J. Am. Water Works Assoc.*, **82**(12), 82-87 (1990).
12. L. Wang, L. Song, *J. of Membrane Sci.*, **160**, 41-50 (1999).
13. Cheryan M., "Ultrafiltration Handbook" published by Technomic Publishing Co. (1986).
14. G.L. Leslie, R.P. Schneider, A.G. Fane, K.C. Marshall and C.J.D. Fell, *Colloids and Surfaces A*, **73** 165 (1993).
15. H.-C. Flemming and G. Schaule, *Desalination*, **70**, 95-119 (1988).
16. H.F. Ridgway, M.G. Rigby, D.G. Argo, *Appl. Environ. Microbiol.*, **47**(1), 61-67 (1984).
17. H.F. Ridgway, M.G. Rigby, D.G. Argo, *J. Am. Water Works Assoc.*, **77**, 97 (1985).
18. A. Rahman, J. Y. Huang, Y. Iwakami and K. Fujita, Membrane Tech. in Environ. Management 1999, Tokyo.
19. S. Babel and S. Takizawa, Membrane Tech. In Environ. Management, Tokyo (1999).