

## 다채널 세라믹 정밀여과막으로 호소수 처리시 질소 역세척 시간 및 막간 압력차의 영향

박 보 림·박 진 용<sup>†</sup>

한림대학교 환경생명공학과  
(2007년 5월 10일 접수, 2007년 6월 10일 채택)

### Effect of N<sub>2</sub>-back-flushing Time and TMP in Lake Water Treatment Using Multichannel Ceramic Microfiltration Membranes

Bo Reum Park and Jin Yong Park<sup>†</sup>

Department of Environmental Sciences & Biotechnology, Hallym University, Chuncheon, Kangwon 200-702, Korea  
(Received May 10, 2007, Accepted June 10, 2007)

**요 약:** 본 연구에서는 2종류의 다채널 알루미나 세라믹 정밀여과막으로 호소수를 처리할 경우, 질소 역세척 시간(BT) 및 막간압력차(TMP) 영향과 최적운전조건을 규명하였다. 정상여과시간(FT)은 8분, 유량 2.0 L/min, 역세척 압력 2.0 bar로 고정하였고, BT는 10~60초, TMP는 0.6~2.0 bar로 변화시켰다. 또한, 최적운전조건은 막오염에 의한 저항( $R_f$ ), 무차원한 투과선속( $J/J_0$ ), 투과선속( $J$ ), 총여과부피( $V_T$ )의 측면에서 고찰하였다. 그 결과, 0.4  $\mu\text{m}$ 의 평균기공 크기를 갖고 있는 HC04 분리막의 최적 역세척 조건은 BT = 10초, 1.0  $\mu\text{m}$ 의 평균기공인 HC10 분리막에서는 20초임을 알 수 있었다. 한편, TMP가 증가할수록 구동력의 증가로 보다 많은  $V_T$ 를 얻을 수 있었다. 오염물질 제거율은 탁도(Turbidity) 95.4% 이상, 화학적 산소 요구량(COD<sub>Mn</sub>) 12.7~20.1%, 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N) 0.0~6.4%, 총질소(T-N) 1.9~4.6%, 총인(T-P) 34.9~88.4%의 제거율을 보였다.

**Abstract:** In this study, we treated lake water by 2 kinds of multichannel ceramic microfiltration membranes. We could investigate effects of N<sub>2</sub>-back-flushing time (BT) and transmembrane pressure (TMP), and find optimal operating conditions. The BT were changed in 10~60 sec, TMP in 0.6~2.0 bar at fixed filtration time (FT) 8 min, flow rate 2.0 L/min and back-flushing pressure 2.0 bar. Also, the optimal conditions were discussed in the viewpoints of resistance of membrane fouling ( $R_f$ ), dimensionless permeate flux ( $J/J_0$ ), permeate flux ( $J$ ) and total permeate volume ( $V_T$ ). As result, optimal back-flushing conditions for HC04 (0.4  $\mu\text{m}$  pore size) and HC10 membrane (1.0  $\mu\text{m}$ ) were BT = 10 sec and BT = 20 sec, respectively. Then, higher TMP should increase the driving force, and could produce more  $V_T$ . Average rejection rates of pollutants were higher than 95.4% for turbidity, 12.7~20.1% for COD<sub>Mn</sub>, 0.0~6.4% for NH<sub>3</sub>-N, 1.9~4.6% for T-N and 34.9~88.4% for T-P.

**Keywords:** ceramic membrane, back-flushing, microfiltration, lake water, TMP

#### 1. 서 론

산업발전으로 인하여 날로 심각해지는 환경오염을 방지하고, 삶의 질을 높이고자 하는 요구와 더불어 환경 친화적인 기술이 크게 중요해지고 있다[1]. 환경 친화적인 기술 중에서, 수처리 분야의 분리막 공정은 다른 수처리 공정보다 에너지 소비가 낮고, 단순한 시설

과 공정, 자동화로 인한 낮은 노동력 등, 최근 주목받고 있는 기술이다. 또한 분리막 기술은 현재 나노 기술과 접목하여 에너지, 의료, 약품, 식품, 상하수 처리, 반도체, 화학 공업 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 그러나 분리막 공정의 폭넓은 산업적 응용에도 불구하고 아직까지 막오염 현상은 플럭스(Fulx)를 감소시켜 효율적인 분리막 활용에 큰 장애가 되고 있다. 막오염을 일으키는 주요 원인으로서는 막의 종류, 공급액의 성질, 운전조

<sup>†</sup>주저자(e-mail : jypark@hallym.ac.kr)

건 등을 들 수 있으며 이에 따른 투과유속의 감소원인으로 막의 압밀화 및 입자의 침전, 흡착, 석출, 폐쇄와 같은 기공막힘(pore blocking)[2]과 케이크(cake)층[3,4], 겔(gel)층[5]과 같은 부착층으로 인한 오염, 농도분극[6] 현상 등이 있다. 따라서 막오염을 제어하기 위하여 초음파 및 물 역세척, 역진동과 같은 기술들이 전 세계적으로 다양한 원수를 대상으로 연구되어 왔다[7-10]. 한편, 막분리 공정의 응용성은 분리막의 특성에 의하여 좌우될 수 있는데 현재 주로 사용되고 있는 유기질 막은 열적, 기계적, 화학 및 생물학적 안정성이 낮고 세척에 의한 재생성이 용이하지 않기 때문에 차후 이들을 대체하여 모든 조업조건 하에서 효율적으로 장기간 사용될 수 있는 세라믹 멤브레인의 개발이 요구되고 있는 실정이다[11]. 일반적으로 세라믹 분리막은 유기질 막에 비해 기계적 강도와 화학적 안정성이 우수하여 장시간 사용 가능하기 때문에, 비용 절감에 큰 효과가 있어 수처리 분야 적용에 꾸준히 연구되고 있다[12-14].

본 연구에서는 관형보다 월등히 단위면적당 투과량이 많은 2종류의 다채널 알루미늄 세라믹 정밀여과막으로 호소수를 처리할 경우, 분리막에서 발생하는 막오염 현상을 최소화하기 위하여 질소 기체로 주기적 역세척을 수행하였다. 역세척 수행 시, 역세척 시간(BT) 및 막간압력차(TMP)를 변화시켜 얻은 실험결과를 직렬여과 저항식을 사용하여 해석한 후, 무차원 투과유속 및 막오염 저항, 총여과부피 측면에서 최적 운전조건을 조사하였다. 또한 호소수에 대한 처리수의 수질을 평가하기 위하여 탁도(Turbidity), 총용존고형물(TDS), 화학적 산소요구량(COD<sub>Mn</sub>), 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N), 총질소(T-N), 총인(T-P)을 분석하였다.

## 2. 이 론

잘 알려진 직렬 여과저항 모델(Resistance-in-series model)[15]을 사용하여, 실험 결과로부터 압력차를 추진력으로 하는 막분리 공정에서 발생하는 여과저항과 투과속(J)을 계산하였다.

$$J = \frac{\Delta P}{R_m + R_b + R_f} \quad (1)$$

여기서,  $\Delta P$ 는 막간압력차,  $R_m$ 은 막 자체의 고유저항,  $R_b$ 는 경계층에 의한 저항,  $R_f$ 는 막오염에 의한 저항이다.

순수(Pure water)를 대상으로 한 분리막의 경우에는,  $R_b$ 와  $R_f$ 는 존재하지 않으므로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P}{R_m} \quad (2)$$

순수의 투과유속 J값을 식 (2)에 대입하여  $R_m$ 을 구하고 식 (3)을  $R_b + R_f$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$R_b + R_f = \frac{\Delta P}{J} - R_m \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 구한  $R_b + R_f$  값을 시간에 대하여 도식한 후, 여과초기에 시간에 대하여 그 값이 선형적으로 증가하는 구간에서 최적 직선식을 구하였다. 구한 직선식을 연장하여  $t = 0$  ( $R_f = 0$ )에서의 값이  $R_b$ 가 된다. 이렇게 구한  $R_b$ 를  $R_b + R_f$ 에서 빼주면 시간변화에 따른  $R_f$ 를 구할 수 있었다.

한편, 분리막의 특정용질 제거율[16]을 알아보기 위해 식 (4)를 이용하여 구하였다.

$$R = \frac{C_F - C_P}{C_F} \times 100 \quad (4)$$

여기서, R은 제거율(Rejection rate, %),  $C_F$ 는 유입수의 농도(mg/L),  $C_P$ 는 유출수의 농도(mg/L)이다.

## 3. 실험

### 3.1. 다채널 세라믹 정밀여과막의 제원과 형상

본 연구에서 사용한 2종류의 분리막은 국내 D사의 제품으로서 7개의 채널을 갖고 있는 다채널 세라믹 정밀여과막이다. 이러한 분리막의 특성으로는 기계적 강도가 높고, 높은 내화학성 가지고 있으며, 넓은 pH범위를 가지고 있기 때문에 분리막 세척 시 강산 및 강알칼리에 제약을 받지 않아 장시간 사용 가능하다. 본 연구에서 사용한 분리막의 제원과 형상은 Table 1과 Fig. 1에 제시하였다.

### 3.2. 대상 원수

본 연구에서 사용한 원수로는 북한강 수계인 강원도 춘천시의 공지천수를 사용하였으며, 원수의 수질은

**Table 1.** Specification of Multichannel Ceramic Membranes Used in This Study

Membranes	Pore size ( $\mu\text{m}$ )	Material	No. of channels	Outer diameter (mm)	Inner diameter (mm)	Length (mm)	Surface area ( $\text{cm}^2$ )
HC04	0.4	Alumina	7	20	4	245	216
HC10	1.0						

**Table 2.** The Quality of Lake Water Used in This Study

Membranes	Experimental conditions		Turbidity (NTU)	TDS (mg/L)	COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
HC04	BT = 10~60 sec FT = 8 min TMP = 1.8 bar	Range	1.70~2.90	37~51	2.56~4.12	0.052~0.133	1.857~3.387	0.033~0.346
		Average	2.17	47	3.32	0.077	2.958	0.240
	TMP = 0.6~1.8 bar BT = 10 sec FT = 8 min	Range	1.90~4.30	26~49	3.84~4.38	0.043~0.193	1.880~2.687	0.146~0.239
		Average	2.90	32	4.13	0.102	2.265	0.176
HC10	BT = 10~60 sec FT = 8 min TMP = 1.8 bar	Range	1.70~3.00	37~53	3.62~4.30	0.014~0.191	1.955~3.432	0.017~0.426
		Average	2.40	48	4.06	0.068	2.902	0.256
	TMP = 0.6~2.0 bar BT = 20 sec FT = 8 min	Range	2.70~2.90	26~37	2.22~5.20	0.035~0.129	1.676~2.254	0.015~0.186
		Average	2.77	29	3.88	0.086	1.790	0.137

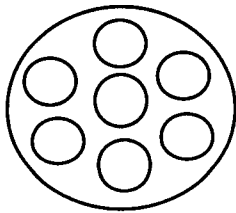
**Fig. 1.** Cross-sectional shape of multichannel ceramic membranes.

Table 2에 제시하였다.

### 3.3. 실험장치

Fig. 2와 같은 질소역세척이 가능한 분리막 성능 실험장치는 공급탱크가 스테인레스강 316으로 25 L의 용량을 가지며, 항온 순환기(CDRC8, Daihan Co.)와 연결하여 온도를 20°C로 일정하게 유지하였다. 펌프(Procon, Standex Co.)에 의해 공급탱크로부터 분리막 모듈 안으로 원수가 유입되고, 펌프 우회관을 설치하여 분리막에서의 유량과 압력을 조절할 수 있도록 하였다. 분리막에 유입되는 유량은 유량계(RMB-85D, Dwyer)로 측정하고, 입구와 출구부에 각각 6 bar까지 측정할 수 있는 압력계를 설치하여 막 내에서 압력차를 측정하였다. 본 여과장치는 위쪽 지지체를 조정이 가능하게 설치하여,

막모듈의 크기가 다른 경우에도 쉽게 장착하여 실험할 수 있도록 하였다.

역세척 효과에 대한 실험을 위하여 투과액 배출구와 질소 투입구에 각각 솔레노이드 밸브(Solenoid valve : CKD, Japan)를 설치하였고, 막 투과압력에 관계없이 역세척 동안 막의 내부 압력을 일정하게 유지시키기 위하여 막의 우회관을 솔레노이드 밸브를 장착하였다. 이들 세 개의 솔레노이드 밸브는 모두 하나의 시간 제어계(Twin timer : Omron, Japan)에 연결 부착되어 밸브의 개·폐가 동시에 일어난다. 솔레노이드 밸브는 전원이 차단된 경우는 닫힘 상태이므로 투과액 배출구에 부착된 밸브에는 우회관을 설치하여 역세척을 하지 않을 때에는 투과액이 배출될 수 있도록 하였다. Fig. 2와 같이 역세척시 투입되는 질소는 막 모듈의 상단부에 연결되어 있고 투과액 배출구는 막 모듈의 하단부에 설치하여 막투과가 일어나도록 하였다[17].

### 3.4. 실험방법

2종류의 다채널 세라믹 정밀여과막으로 호소수를 처리할 경우, 막오염의 문제를 해결하기 위해 역세척 시간(BT)의 영향에 따른 최적운전 조건을 알아보았다. 25 L의 용량을 가지는 공급탱크에 10 L의 원수를 채우고,

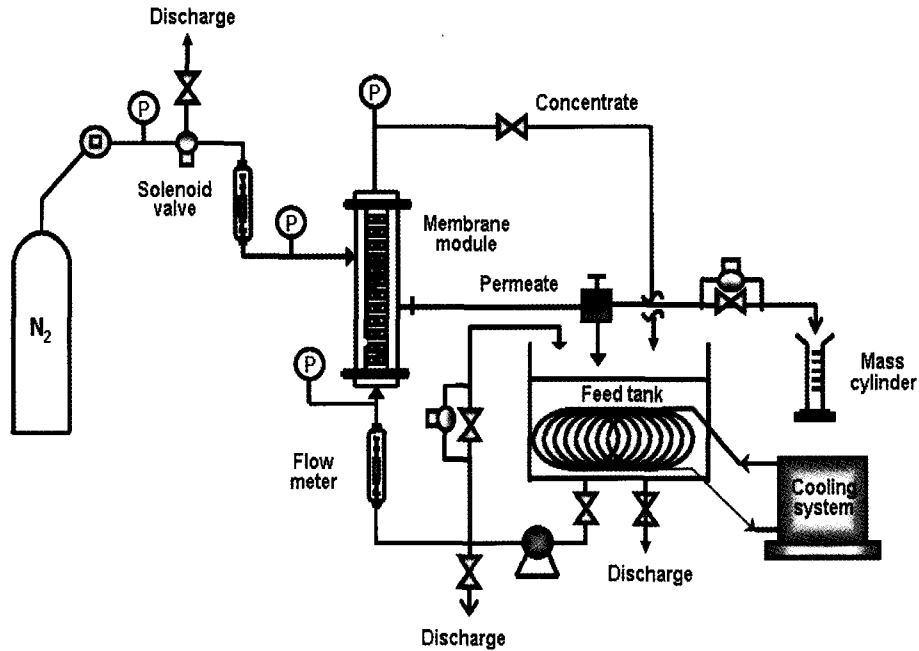


Fig. 2. Microfiltration apparatus with periodic N<sub>2</sub>-back-flushing system.

BT를 역세척 없을 때(NBF), 10초, 20초, 40초, 50초, 60초로 변화시키면서 실험하였다. 이때 총 3시간 운전 시간에 따른 막오염에 대한 저항( $R_f$ ), 무차원화한 투과선속( $J/J_0$ ), 투과선속( $J$ ) 및 총여과부피( $V_T$ )의 변화 거동을 관찰하였다. 운전조건으로는 정상여과시간(FT)을 8분, 막간압력차(TMP) 1.8 bar, 역세척시 질소의 압력 2.0 bar, 유량 2 L/min으로 일정하게 유지하면서 실험하였다. 또한 이러한 실험을 통해 2종류의 분리막에서의 최적 BT 조건을 찾은 후, 호소수에 대한 TMP 영향을 알아보았다. TMP 변화 실험에서는 FT = 8분, 유량 2.0 L/min로 2종류의 분리막 모두 일정하게 유지하면서, HC04 분리막의 TMP 조건은 0.6, 1.0, 1.4, 1.8 bar로 각각 변화시켜 실험하였다. 한편, HC10 분리막에서는 최대 TMP를 다소 증가시켜 TMP 조건을 0.6, 1.0, 1.4, 2.0 bar로 변화시키면서, 전체 운전시간에 따른  $R_f$ ,  $J/J_0$ ,  $J$ ,  $V_T$ 의 변화를 알아보았다. 또한, 호소수에 대한 처리수의 수질을 평가하기 위하여 탁도, 총용존고형물, 화학적 산소요구량, 암모니아성 질소, 총질소, 총인을 수질오염공정시험법[18] 및 Standard Method [19]에 의하여 분석하였다.

한편, 각각의 실험이 끝난 뒤에는 호소수를 배수한 후, 30분 동안 증류수를 순환시키면서 분리막을 세척하였다. 그 다음 모듈에서 분리막을 탈착하여, 초기투과플

럭스의 95% 이상으로 플럭스가 회복될 때까지 10% 질산수용액으로 화학세정하고 다음 실험을 진행하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 역세척 시간(BT)의 영향

2종류의 다채널 세라믹 정밀여과막으로 호소수를 처리할 경우, 막오염의 문제를 해결하기 위해 BT 변화가  $R_f$ 에 미치는 영향을 Fig. 3에 운전시간에 따라 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 2종류의 분리막 모두 역세척을 수행하지 않았을 때,  $R_f$ 가 급속하게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 운전 초기에 농도분극 현상에 의한  $R_f$ 가 급격히 증가되며, 그 후 농도분극층 형성과 함께 분리막의 표면 또는 그 내부의 세공 벽면에 분리막을 투과하지 못한 물질들이 비가역적으로 침적됨으로써 생기는 현상으로 파악되고 있다[20].

한편, 식 (1)을 사용하여 순수 투과량으로부터 막 자체의 고유저항  $R_m$ 값은 HC04의 분리막  $0.99 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ , HC10 분리막  $0.75 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 각각 구할 수 있었다. 3.4 실험방법에서 언급한 바와 같이, 모든 실험 전에 10% 질산수용액으로 화학세정을 실시하여 세라믹 분리막을 회복시킨 후 순수 투과수량을 측정하여  $R_m$ 값을 확인하였다.

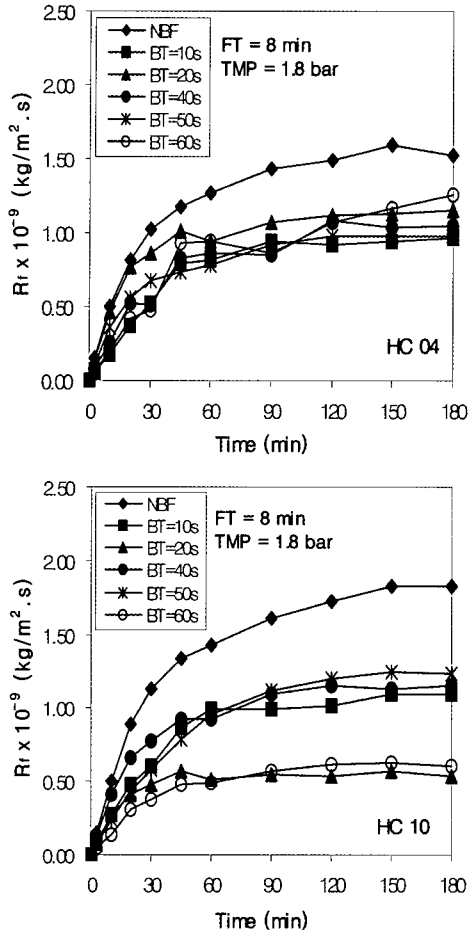


Fig. 3. Effect of back-flushing time on resistance of membrane fouling for HC04 and HC10 membranes at FT = 8 min.

BT = 10~60초로 변화시킨 상태에서 질소 역세척을 수행한 결과, Fig. 3에서 제시한 것과 같이 HC04 분리막의 경우 BT 조건에 따라  $R_f$ 값이 크게 변화하지 않았으나, 질소 역세척을 수행하지 않은 경우 보다  $R_f$ 값이 3시간 운전하는 동안 뚜렷하게 감소하였다. 이러한 결과는 질소 역세척 수행으로 운전초기에 발생하는 농도분극 현상 및 그 후 발생된 가역적, 비가역적 막오염에 의한 저항을 감소시킨 것으로 판단된다. 특히, BT = 10초일 때 가장 낮은  $R_f$ 값을 유지할 수 있었다. 또한 HC10 분리막 경우에는 BT = 60초일 때 초기에는 가장 낮은  $R_f$ 값을 유지하다가, 60분 이후부터 BT = 20초일 때 더 낮은  $R_f$ 값을 보여주고 있다. 이러한 결과는 막오염이 급격하게 증가하는 초기 60분까지 긴 역세척이 효과적이지만, 그 이후에는 BT = 20초 정도의 짧은 질소 역세척으로 충분히 막오염을 억제할 수 있다는 것을 보

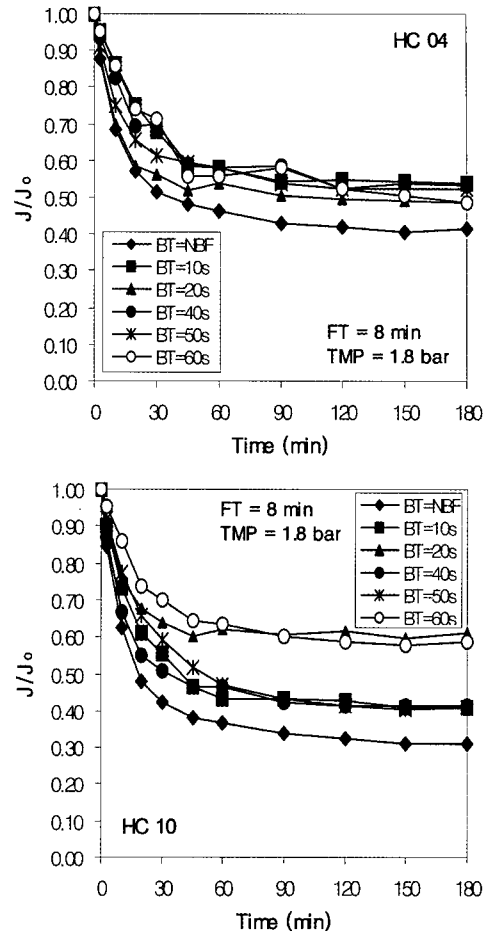


Fig. 4. Effect of back-flushing time on dimensionless permeate flux for HC04 and HC10 membranes at FT = 8 min.

여준 것이다.

Fig. 4는 분리막에 대하여 BT 변화가 무차원화된 투과선속( $J/J_0$ )에 미치는 영향을 운전시간에 따라 나타낸 것이다. 그 결과, 2종류의 분리막 모두 역세척을 수행하지 않았을 때보다 역세척 수행 시  $J/J_0$ 가 높게 유지되는 것을 볼 수 있었다. HC04 분리막의 경우  $J/J_0$ 값의 변화가 BT에 따라 뚜렷한 차이를 보이고 있지 않지만, BT = 60초일 때 초기 30분 동안  $J/J_0$ 가 상대적으로 가장 높게 유지되다가 그 이후 BT = 10초일 때  $J/J_0$ 가 더 큰 값을 보여주고 있다. HC10 분리막의 경우에는 HC04보다 뚜렷하게 BT의 영향을 확인할 수 있었다. 즉, BT = 60초일 때 초기 60분 동안 가장 높은  $J/J_0$ 값을 유지하다가, 그 이후에는 BT = 20초일 때  $J/J_0$ 가 다소 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는, BT를 길게 해 주는 것이 운전초기에 농도분극 현상으로 인한

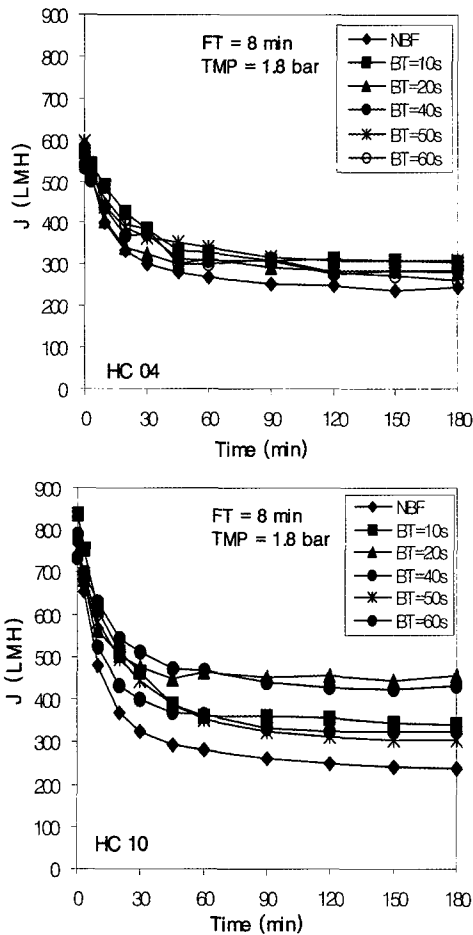


Fig. 5. Effect of back-flushing time on permeate flux for HC04 and HC10 membranes at FT = 8 min.

급격한 투과선속의 감소를 최소화한 것으로 볼 수 있다. 그 후 BT = 10~20초의 짧은 역세척으로도 막표면에 오염물질이 쌓여 압밀화되기 전에 오염물질을 탈착 시킴으로써, 오염물질이 표면에 쌓일 기회를 감소시켜

막오염이 상대적으로 덜 일어나 투과선속이 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 분리막에 대하여 BT 변화가 투과선속(Permeate flux, J)에 미치는 영향을 운전시간에 따라 나타낸 것이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, BT를 변화하였을 경우 HC04 분리막에서는 BT = 10초, HC10 분리막은 BT = 20초일 때 가장 높은 J값을 유지하였다.  $V_T$  및 막오염에 의한 최종저항값( $R_{f,180}$ )을 정리한 Table 3에서 보는 바와 같이, 가장 높은 J값을 유지하는 BT 조건에서 2종류의 분리막 모두 최소  $R_{f,180}$ 을 보였으며, 최대  $V_T$ 를 나타내어 가장 많은 처리수를 얻을 수 있었다. 이 결과로 볼 때, HC04 분리막의 최적 역세척 조건은 10초이고, HC10 분리막에서는 20초임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 사용한 호소수가 낮은 탁도를 가지고 있기 때문에, 본 실험조건 중 짧은 BT에 해당되는 10초와 20초만으로 충분한 역세척 효과를 보인 것으로 판단된다.

#### 4.2. 막간압력차(TMP) 영향

분리막의 최적 BT조건에서 호소수에 대한 TMP 영향을 살펴보기 위하여,  $V_T$ ,  $R_{f,180}$ ,  $J_0$  측면에서 분석하였다. Table 4에서 보는 바와 같이, 2종류의 분리막 모두 TMP가 증가할수록  $V_T$ ,  $R_{f,180}$ ,  $J_0$  모두 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 TMP이 높을수록 표면에 쌓인 오염물질이 높은 압력에 의해 압밀화되면서 농도분극 현상이 심화되어  $R_f$ 가 빠르게 진행되지만, 구동력의 증가로 인해  $J_0$  및  $V_T$ 값 역시 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 TMP 변화가  $R_f$ 에 미치는 영향을 운전시간에 따라 나타낸 것이다. 2종류의 분리막 모두 TMP가 증가할수록 막오염에 의한 저항값이 증가됨을 볼 수 있

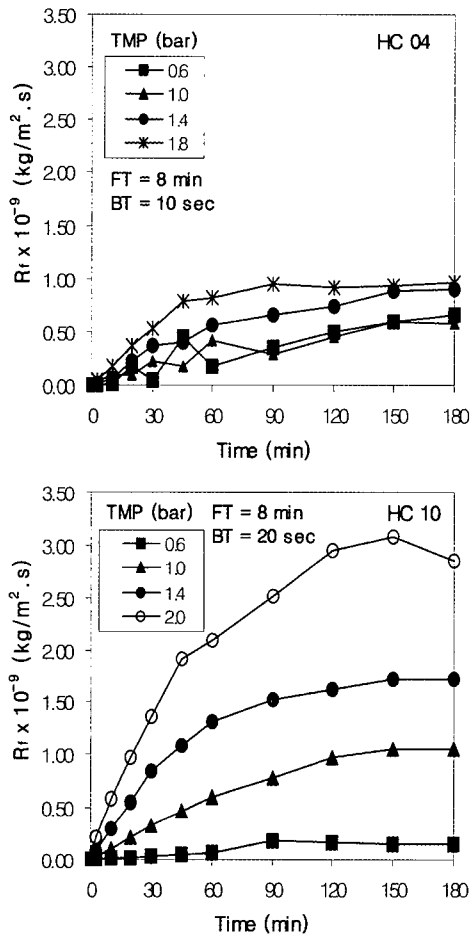
Table 3. Filtration Factors in the Experiments for Effect of BT

BT (sec)		NBF <sup>a</sup>	10	20	40	50	60
$V_T \times 10^4$ ( $m^3$ )	HC04	180.18	<b>217.40</b>	193.65	190.69	199.80	186.73
	HC10	191.44	253.93	<b>293.31</b>	220.31	215.94	275.69
$R_{f,180} \times 10^{-9}$ ( $kg/m^2s$ )	HC04	1.53	<b>0.96</b>	1.16	1.04	0.97	1.25
	HC10	1.83	1.10	<b>0.54</b>	1.15	1.23	0.61
$J_0 \times 10^5$ ( $m/s$ )	HC04	16.29	15.81	16.13	14.79	16.49	15.01
	HC10	21.44	23.24	20.71	21.86	20.95	20.35
$J_{180} \times 10^5$ ( $m/s$ )	HC04	6.76	8.48	7.84	7.90	<b>8.62</b>	7.27
	HC10	6.66	9.48	<b>12.69</b>	9.03	8.51	11.96

a ; No back-flushing.

**Table 4.** Filtration Factors in the Experiments for Effect of TMP

TMP (bar)		0.6	1.0	1.4	1.8	2.0
$V_T \times 10^4$ ( $m^3$ )	HC04	79.30	160.31	185.95	<b>212.97</b>	-
	HC10	130.83	154.88	155.05	-	<b>156.55</b>
$R_{f,180} \times 10^{-9}$ ( $kg/m^2s$ )	HC04	0.67	0.57	0.90	<b>0.96</b>	-
	HC10	0.15	1.05	1.71	-	<b>2.86</b>
$J_0 \times 10^5$ ( $m/s$ )	HC04	4.47	9.52	12.55	<b>15.81</b>	-
	HC10	6.53	12.36	16.73	-	<b>22.36</b>
$J_{180} \times 10^5$ ( $m/s$ )	HC04	2.97	6.11	6.87	<b>8.48</b>	-
	HC10	<b>5.60</b>	5.32	5.42	-	5.25



**Fig. 6.** Effect of TMP on resistance of membrane fouling for HC04 and HC10 membranes at FT = 8 min.

었다. 이것은 분리막 공정의 운전변수 중 하나인 TMP를 증가시킬수록 공급수 내의 오염물질이 막 표면으로 빠르게 확산되어, 막표면에서 부착되거나 흡착되고 세공막힘 현상으로 막이 압밀화되어 막오염에 의한 저항

값이 증가된 것으로 판단된다. 또한 HC04보다 기공이 큰 HC10 분리막에서의  $R_f$ 은 상대적으로 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이와 같은 결과로 볼 때, 본 실험조건에서 분리막의 기공이 큰 HC10의 경우 상대적으로 기공이 작은 HC04보다 압력의 증가가 막오염에 크게 영향을 끼치는 것으로 알 수 있었다.

Fig. 7은 TMP 변화가  $J/J_0$ 에 미치는 영향을 운전시간에 따라 나타낸 것이다. 2종류의 분리막 모두 TMP가 낮을수록  $J/J_0$ 이 높게 유지되는 반면에, 높은 TMP일수록 시간에 따른  $J/J_0$ 이 급격히 감소하는 경향을 볼 수 있었다. 따라서 TMP가 증가할수록 막오염이 급격하게 발생하여, 초기투과선속에 대한 상대적인 투과선속  $J/J_0$ 가 뚜렷하게 감소한 것을 알 수 있었다.

Fig. 8은 TMP 변화가  $J$ 에 미치는 영향을 운전시간에 따라 나타낸 것이다. 그 결과, 높은 TMP일수록 막오염이 급격히 증가하지만, HC04 분리막에서는 높은 TMP일수록  $J$ 값도 증가하는 것을 알 수 있었다. 이것은 식 (1)에서 보는 바와 같이, TMP가 증가하면 구동력의 증가로  $J$ 값 역시 증가하는 것을 알 수 있었다. 반면에, HC10 분리막의 경우 초기에는 TMP가 높을수록 큰  $J$ 값을 보였으나, 급격한 막오염으로 인하여 운전시간 30분 후에는 TMP에 상관없이 비슷한  $J$ 값을 나타내었다. 또한 Table 4에서 보는 바와 같이, TMP 0.6 bar일 경우를 제외하고 TMP에 상관없이 거의 일정한  $V_T$ 값을 나타내었다.

#### 4.3. 다채널 세라믹 정밀여과막의 오염물질 제거

2종의 다채널 세라믹 정밀여과막으로 호소수를 처리할 경우, BT 영향 및 TMP 영향 실험 시 처리수의 수질과 각 항목별 평균제거율을 Table 5에 정리하였다.

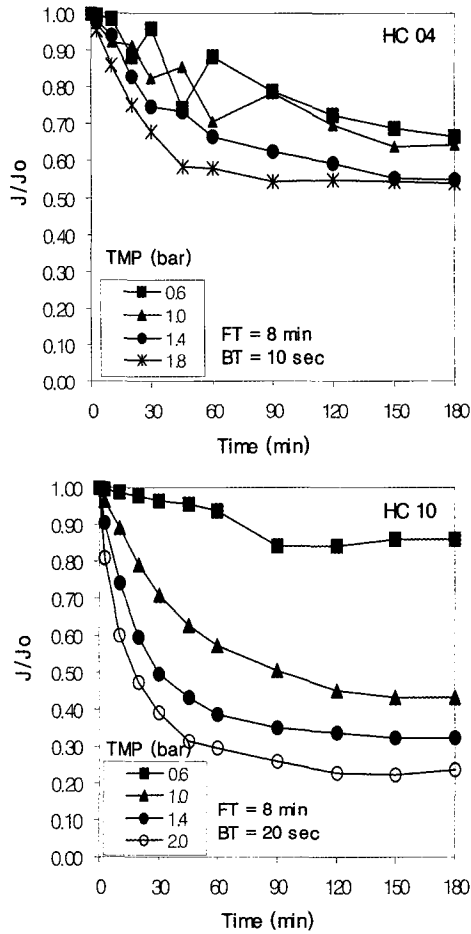


Fig. 7. Effect of TMP on dimensionless permeate flux for HC04 and HC10 membranes at FT = 8 min.

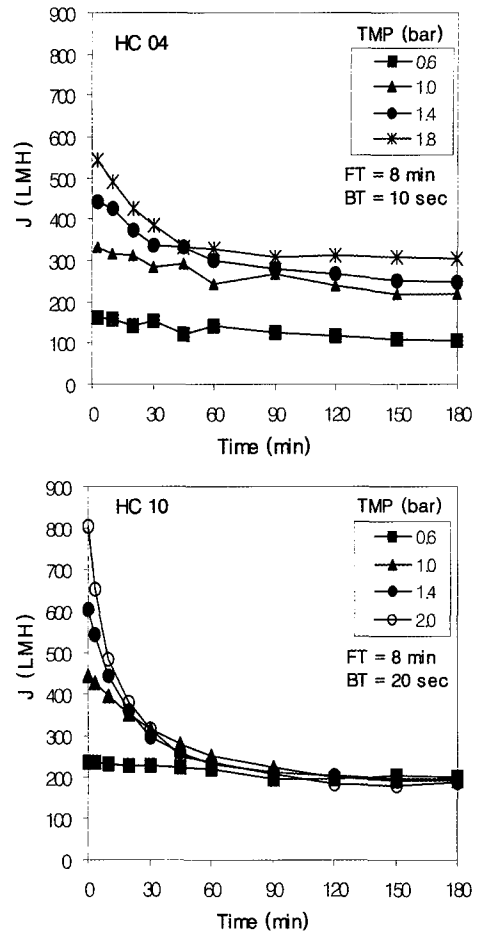


Fig. 8. Effect of TMP on permeate flux for HC04 and HC10 membranes at FT = 8 min.

Table 5. Treated Water Quality Average Rejection Rates of Pollutants Multichannel Ceramic Membranes Used in the Study

Membranes	Experimental conditions	Turbidity		COD <sub>Mn</sub>		NH <sub>3</sub> -N		T-N		T-P	
		Treated water (NTU)	Rejection rate (%)	Treated water (mg/L)	Rejection rate (%)	Treated water (mg/L)	Rejection rate (%)	Treated water (mg/L)	Rejection rate (%)	Treated water (mg/L)	Rejection rate (%)
HC04	BT = 10~60 sec FT = 8 min TMP = 1.8 bar	0.06	95.9	3.64	12.7	0.10	6.4	2.91	1.9	0.07	34.9
	TMP = 0.6~1.8 bar BT = 10 sec FT = 8 min	0.08	96.8	3.30	15.9	0.11	0.4	2.16	4.6	0.09	41.6
HC10	BT = 10~60 sec FT = 8 min TMP = 1.8 bar	0.06	95.9	3.27	12.7	0.08	6.4	3.06	1.9	0.10	34.9
	TMP = 0.6~2.0 bar BT = 20 sec FT = 8 min	0.09	95.4	1.94	20.1	0.10	0.0	2.20	3.1	0.002	88.4



Table 5에서 보는 바와 같이, 탁도는 95.4% 이상 제거가 가능하였으나, 총용존고형물은 전혀 제거가 되지 않았고, 화학적 산소요구량은 12.7~20.1%, 암모니아성 질소는 0.0~6.4%, 총질소 1.9~4.6%, 총인은 34.9~88.4%의 제거율을 보였다.

## 5. 결 론

막분리 공정의 경제성을 결정하는 막오염 문제를 해결하기 위해, 효과적으로 질소 역세척을 수행하면서 기공 크기가 다른 2종류의 다채널 세라믹 정밀여과막으로 호소수를 처리하였다. 질소 역세척을 수행시 질소 역세척 시간(BT)을 변화시키면서 최적 운전조건을 정하였으며, 2종류의 분리막에서 최적 BT조건을 찾은 후, 분리막 공정의 운전변수 중 하나인 막간압력차(TMP) 영향을 알아보았다.

주기적인 질소 역세척을 수행하면서 역세척 주기의 영향을 살펴 본 결과, HC04 분리막의 경우 BT = 10초일 때 최종 막오염에 의한 저항값( $R_{f,180}$ )이  $0.96 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 최소였고, 총여과부피( $V_T$ )는  $217.40 \text{ m}^3$ 로 가장 높았다. HC10 분리막의 경우에는 BT = 20초일 때  $R_{f,180}$ 이  $0.54 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 최소였고,  $V_T$ 는  $293.31 \text{ m}^3$ 로 가장 높았으므로 본 실험 범위 내에서 최적 질소 역세척 주기로 볼 수 있었다.

TMP 영향을 살펴 본 결과, 2종류의 분리막 모두 TMP가 증가할수록  $V_T$  및  $R_{f,180}$ ,  $J_0$ 가 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 TMP이 높을수록 표면에 쌓인 오염물질이 높은 압력에 의해 압밀화되면서 농도분극 현상이 심화되어  $R_f$ 가 빠르게 진행되지만, 구동력의 증가로 인해  $J_0$  및  $V_T$ 값 역시 증가하는 것으로 판단된다.

세라믹 분리막의 투과수와 호소수의 수질을 조사하여 각 항목별 제거율을 보면, 탁도는 95.4% 이상 제거가 가능하였으나 총용존고형물은 전혀 제거가 되지 않았다. 화학적 산소요구량은 12.7~20.1%, 암모니아성 질소는 0.0~6.4%, 총질소 1.9~4.6%, 총인은 34.9~88.4%의 제거율을 보였다.

## 감 사

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-511-D00217/2R060101-057-S0001000).

## 참 고 문 헌

1. 강상규, 김경호, 이호신, 배동식, “수처리용 세라믹 분리막의 기술개발 현황과 정보분석”, *공업화학 전망*, **7(3)**, 83 (2004).
2. P. Rai, C. Rai, G. C. Majumdar, S. DasGupta, and S. De, “Resistance in series model for ultrafiltration of mosambi (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) juice in a stirred continuous mode”, *J. Membrane Sci.*, **283**, 116 (2006).
3. J. Altmann and S. Ripperger, “Particle deposition and layer formation at the crossflow microfiltration”, *J. Membrane Sci.*, **124**, 119 (1997).
4. H. K. Vyas, A. J. Mawson, R. J. Bennett, and A. D. Marshall, “A new method for for estimating cake height and porosity during filtration of particulate suspensions”, *J. Membrane Sci.*, **176**, 113 (2000).
5. S. K. Karode, “Unsteady state flux response: a method to determine the nature of the solute and gel layer in membrane filtration”, *J. Membrane Sci.*, **188**, 9 (2001).
6. M. Heran and S. Elmaleh, “Microfiltration through an inorganic tubular membrane with high frequency retrofiltration”, *J. Membrane Sci.*, **188**, 181 (2001).
7. J. Cakl, I. Bauer, P. Dolecek, and P. Mikulasek, “Effect of backflushing conditions on permeate flux in membrane crossflow microfiltration of oil emulsion”, *Desalination*, **127**, 189 (2000).
8. F. Meacle, A. Aunins, R. Thornton, and A. Lee, “Optimization of the membrane purification of a polysaccharide-protein conjugate vaccine using backpulsing”, *J. Membrane Sci.*, **161**, 171 (1999).
9. D. Chen, L. K. Weavers, and H. W. Walker, “Ultrasonic control of ceramic membrane fouling: Effect of particle characteristics”, *Water research*, **40**, 840 (2006).
10. K. Katsoufidou, S. G. Yiantsios, and A. J. Karabelas, “A study of ultrafiltration membrane fouling by humic acids and flux recovery by backwashing: Experiments and modeling”, *J. Membrane Sci.*,

- 266, 40 (2005).
11. 현상훈, “세라믹 멤브레인의 현황과 제법”, *멤브레인*, **3(1)**, 1 (1993).
  12. Q. Gan, J. A. Howell, R. W. Field, R. England, M. R. Bird, and M. T. McKechnie, “Synergetic cleaning procedure for a ceramic membrane fouled by beer microfiltration”, *J. Membrane Sci.*, **155**, 277 (1999).
  13. N. Laitinen, D. Michaud, C. Piquet, N. Teilleria, A. Luonsi, E. Levanen, and M. Nystrom, “Effect of filtration conditions and backflushing on ceramic membrane ultrafiltration of board industry wastewaters”, *Sep. Purifi. Techno.*, **24**, 319 (2001).
  14. J. Y. Park, S. J. Choi, and B. R. Park, “Effect of N<sub>2</sub>-back-flushing in multichannels ceramic microfiltration system for paper wastewater treatment”, *Desalination*, **202**, 207 (2007).
  15. M. Cheryan, “Ultrafiltration Handbook”, pp. 89-93, Technomic Pub. Co., Pennsylvania (1984).
  16. A. K. Zander and N. K. Curry, “Membrane and solution effects on solute rejection and productivity”, *Water research*, **35(18)**, 4426 (2001).
  17. 황현정, 박진용, “탄소계 세라믹 한외 및 정밀 여과막으로 제지폐수 처리시 주기적 질소 역세척의 효과”, *멤브레인*, **12(1)**, 8 (2002).
  18. 동화기술편집부, “수질오염공정시험법”, pp. 133-204, 동화기술 (2002).
  19. A. D. Eaton, L. S. Clesceri, and A. E. Greenberg, “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, 9th Ed., pp. 2-8, APHA, NW Washington, DC (1995).
  20. 김미희, 박진용, “제지폐수 재활용을 위한 관형 탄소계 세라믹 한외여과장치에서 물 역세척의 막오염 제어 효과”, *멤브레인*, **11(4)**, 190 (2001).