

세라믹 정밀여과에 의한 고도정수처리 시스템에서 물 역세척 시간 및 주기의 영향

이 혁 찬·조 재 형·박 진 용[†]

한림대학교 환경생명공학과
(2007년 12월 24일 접수, 2008년 3월 5일 채택)

Effect of Water-back-flushing Time and Period in Advanced Water Treatment System by Ceramic Microfiltration

Hyuk Chan Lee, Jae Hyeong Cho, and Jin Yong Park[†]

Department of Environmental Sciences & Biotechnology, Hallym University, Chuncheon, Kangwon 200-702, Korea
(Received December 24, 2007, Accepted March 5, 2008)

요 약: 본 연구에서 처리수를 이용한 주기적인 역세척은 세라믹 정밀여과에 의한 고도정수처리 시스템에서 막오염을 저감하고 투과선속을 향상시키고자 수행되었으며, 물 역세척 주기(FT) 및 시간(BT)의 영향과 최적 운전조건을 규명하고자 하였다. FT의 영향을 알아보기 위해 일정한 BT 3초에서 FT를 30~120초로 변화시켰고, BT 영향 실험에서 일정한 FT 120초에서 BT를 3~12초로 변화시켰다. 그리고 다른 운전변수인 막간압력차는 1.52 bar, 물 역세척 압력 0.98 bar, 유입유량 0.5 L/min, 공급액의 온도 20°C로 일정하게 유지하였다. 그 결과, 일정한 BT 3초에서 본 실험 범위의 최적 FT는 30초로, 이것은 빈번한 역세척이 막오염의 저감에 더 효과적임을 의미한다. 그러나 너무 짧은 BT로 인하여 FT의 영향은 크지 않았다. 한편, 일정한 FT 120초에서 BT가 증가함에 따라 막오염에 의한 저항(R_f)은 감소하고 투과선속(J)과 무차원화한 투과선속(J/J_0)은 증가하는 경향을 나타내어, 최대 BT인 12초에서 가장 많은 총여과부피(V_T)를 얻을 수 있었다.

Abstract: In this study, periodic water-back-flushing using permeate water was performed to minimize membrane fouling and to enhance permeate flux in advanced water treatment system by ceramic microfiltration. We investigated effect of water-back-flushing period (FT) and time (BT), and tried to find the optimal operating conditions. BT was fixed at 3 sec and FT was changed in 30~120 sec to inspect effect of FT. Also, FT was fixed at 120 sec and BT was changed as 3~12 sec at experiment of BT effect. At both two experiments, TMP was fixed at 1.52 bar, water-back-flushing pressure at 0.98 bar, feed flow rate at 0.5 L/min, and feed water temperature at 20°C. As the result, optimal FT was 30 sec at fixed BT 3 sec in our experimental range. It means that the more frequent back-flushing was the more effective to reduce membrane fouling. However, there were not large effects of FT due to a short BT. Then, increasing BT at fixed FT 120 sec could decrease resistance of membrane fouling (R_f) and increase permeate flux (J) and dimensionless permeate flux (J/J_0), and the most total permeate volume (V_T) could be produced at the maximum BT 12 sec.

Keywords: microfiltration, ceramic membrane, water-back-flushing, water treatment

1. 서 론

산업의 발전으로 인하여 상수원수의 오염은 날이 심각해지고 있는 반면 생활수준이 향상됨에 따라 양질의 먹는 물의 요구가 증대되면서 고도정수처리 공정에 대한 관심이 증가하고 있으며, 최근에는 막분리를 이용한 정수처리 공정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있

다[1-5]. 정수처리공정에 막분리를 이용할 경우, 종래의 정수처리 공정보다 우수한 처리수질을 얻을 수 있으며, 그 설비가 간소하여 설치면적에 대한 장애가 적고 물리적인 처리 방법이므로 대상 원수의 성질 상태의 변동 등에 따라서 처리수의 수질이 크게 좌우되지 않고 비교적 안정적이며 양호하다[6].

그러나 막분리를 정수처리에 적용할 경우 막의 오염 현상(fouling)이 가장 문제가 되며, 이는 여과 플럭스를

[†]주저자(e-mail : jypark@hallym.ac.kr)

Table 1. The Quality of Source Water Used in This Study

Sampling Date	Experimental Conditions	TDS (mg/L)	Turbidity (NTU)	COD _{Mn} (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	
06.09.26	Effect of FT	Range	50~69	1.52~6.55	2.21~10.81	0.121~0.503	1.550~3.132	0.016~0.027
		Average	59	4.52	5.53	0.289	2.709	0.020
07.05.03	Effect of BT	Range	88~101	1.87~8.39	2.95~6.27	0.036~0.589	1.944~3.718	0.004~0.051
		Average	91	4.98	4.48	0.342	2.583	0.027

감소시키고 막의 수명을 단축시키는 등의 문제점을 야기한다. 막 오염은 원수의 성상에 따라 차이는 있으나, 일반적으로 지표수를 이용한 정수처리의 경우 막오염은 Ca²⁺, Mg²⁺, iron, silica, suspended solids와 같은 무기물이나, humic substances, polysaccharides, protein, microorganisms과 같은 유기물에 의해 일어나고[7-9], 이것은 농도분극[10]이나 막 표면의 gel층의 형성[11] 그리고 막 기공 내에 흡착이나 기공막힘[12]을 야기한다. 따라서 이러한 막오염을 효과적으로 제어하기 위하여 물이나 질소를 이용한 역세척[13,14], 초음파[15,16], 역진동[17], 광산화[18]와 같은 기술들이 다양하게 연구되어져 왔다. 이중에 역세척을 이용한 방법은 막오염을 줄이고 투과속도를 증대시키는 기술 중 하나로 오늘날 많이 사용되며, 역세척은 침전물이 막벽에 완전히 형성되거나 압밀화 되기 전에 제거하여 줄 수 있다[19].

한편, 세라믹 분리막은 세라믹 특성상 제 3 세대 분리막으로 불리고 있으며 내기계적 및 내화학적, 내열성 등의 한계를 극복한 분리막으로써 내화학적 및 내마모성이 우수하고, 고온 및 고압 하에서도 특성을 유지할 수 있으며, pH 사용 범위가 0~14로 넓고, 고분자 막에 비해 긴 수명을 가지며, 무기질이기 때문에 고분자 막에서 미생물 및 세균에 의한 오염 및 막의 분해 등의 문제점을 방지할 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한, 세라믹 분리막은 막오염 발생을 극소화하기 위하여 역세척, 고압세척, 고온살균, 고농도 화학세정제에 의한 세척 등을 통하여 오염물질을 강력히 제거할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 이러한 세라믹 분리막은 수처리 분야에서 급성장이 예상되며, 산업적으로 파급효과가 매우 크기 때문에 매우 중요하다[20,21].

본 연구에서는 고도정수처리를 위한 세라믹 정밀여과 시스템에서 여과 플럭스를 향상시키고 막오염 혼상을 적절히 억제하고자, 처리수를 이용하여 주기적인 역세척을 실시하였다. 또한 역세척 주기인 정상여과 시간 및 역세척 시간을 변화시키면서 그에 따른 영향을 살

펴보고, 최적 운전조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 세라믹 분리막 및 대상 시료

본 연구에 사용한 세라믹 막은 α -alumina 지지체 위에 α -alumina로 코팅한 관형 정밀여과막(NCMT-7231)으로 (주)나노기공소재에서 구입하였으며, 유효막면적은 47.5 cm², 평균기공크기는 0.1 μ m, 외경은 8 mm, 내경은 6 mm, 길이는 252 mm, 두께 1 mm이다. 또한, 실험에 사용한 원수는 강원도 춘천시에 위치한 북한강 수계 상류지역인 의암호의 한 지류로서 공지천수를 대상 원수로 하였고, 2006년 9월 26일과 2007년 5월 3일에 같은 지점에서 각각 채수하여 4°C에 보관하여 사용하였으며, 본 연구에 사용된 원수의 수질을 Table 1에 정리하였다. Table 1에 나타낸 것과 같이 채수시기가 다른 각각의 원수는 서로 비슷한 수질을 나타내는 것을 알 수 있었으나, 다만 2007년 5월 3일에 채수한 원수의 경우 총용존고형물(TDS)이 88~101 mg/L의 범위로 더 높은 값을 보였다.

2.2. 실험 장치

Fig. 1에 본 실험에 사용한 처리수를 이용한 물 역세척이 가능한 정밀여과 장치를 나타내었다. 역세척이 가능한 분리막 실험장치는 공급탱크가 스테인레스강 316으로 25 L의 용량을 가지며, 공급탱크 내에는 냉각수가 순환하는 동관코일을 항온순환기(Model 1146, VWR, U.S.A)와 연결하여 온도를 일정하게 유지할 수 있다. 또한 공급탱크에 교반기를 설치하여 공급수가 균질한 상태를 유지할 수 있도록 하였다. 공급탱크안의 공급수는 펌프(Procon, Standex Co., U.S.A.)에 의해 공급탱크로부터 막 모듈 안으로 원수가 유입되고, 펌프 우회관을 설치하여 막에서의 유량과 압력을 조절할 수 있도록 하였다. 막 모듈에 유입되는 유량은 유량계(NP-127,

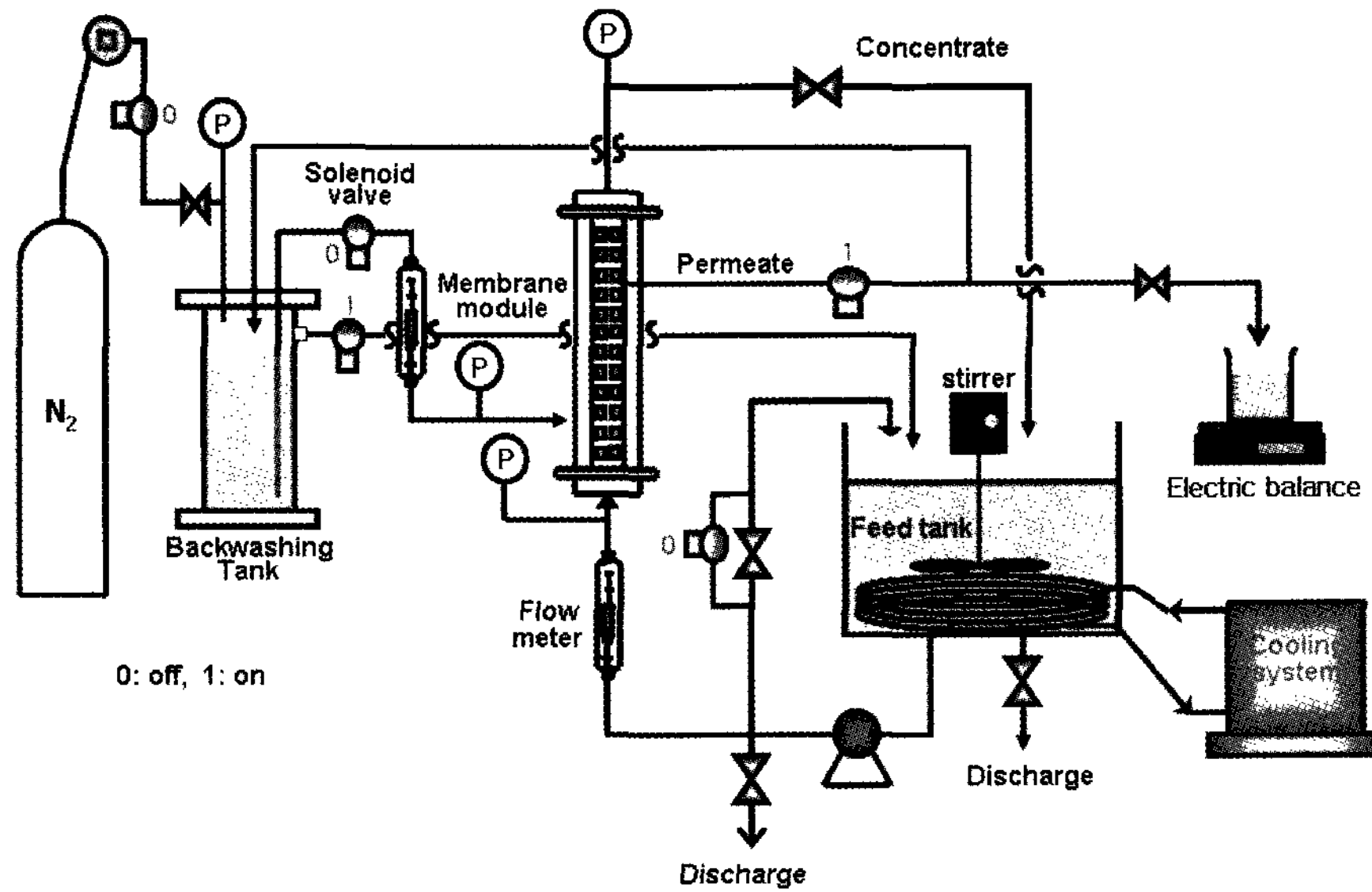


Fig. 1. Apparatus of ceramic microfiltration system with water-back-flushing.

Tokyo Keiso, Japan)를 통하여 측정하고, 일정한 유량으로 이송되어 세라믹막 내로 공급된다. 막 모듈 입구와 출구부에 각각 6.8 bar까지 측정할 수 있는 압력계를 설치하여 막 모듈 내 압력차를 측정한다. 또한, 막표면에서의 농도분극현상을 최소화시키고 막의 오염을 방지하기 위해서 십자흐름(Cross-flow) 여과방식을 채택 하였다. 그리고, 분리막 실험장치는 위쪽 지지체를 조정이 가능하게 설치하여 막 모듈의 크기가 다른 경우에도 쉽게 장착하여 실험할 수 있도록 설계 되었다. 막을 투과한 처리수는 막 모듈 상단부를 통하여 역세척조로 이동하며, 역세척조에 일정량 이상의 처리수가 모아지면 다시 공급탱크로 순환하는 방식을 채택하여 실험기간 동안 원수의 수질을 일정하게 유지하도록 하였다.

역세척 효과에 대한 실험을 위하여 투과액 배출구와 역세척조의 처리수 배출구 그리고 질소 투입구 및 역세척수의 모듈 내 투입구에 각각 솔레노이드 밸브(Solenoid valve : CKD, Japan)를 설치하였고, 막 투과압력에 관계 없이 역세척 동안 막의 내부 압력을 일정하게 유지시키기 위하여 막 모듈의 우회관에 솔레노이드 밸브를 장착하였다. 이들 다섯 개의 솔레노이드 밸브는 모두 하나의 시간 제어계(Twin timer : Omron, Japan)에 연결 부착되어 밸브의 개·폐가 동시에 일어나며, 역세척시 역세척조의 처리수는 질소탱크의 압력에 의해 막모듈의 하단부를 통하여 역세척이 수행된다.

2.3. 실험운전방법 및 수질분석

본 연구에서는 정수처리를 위한 세라믹 정밀여과 시스템에서 발생하는 막오염을 최소화하기 위하여 처리수를 이용한 물 역세척을 수행 하였다. 역세척의 수행주기인 정상여과 시간(FT)과 역세척 시간(BT)을 변화시키면서, 역세척 주기 및 시간의 영향에 따른 최적운전 조건을 알아보았다. 실험은 공급탱크에 10 L의 원수를 채우고 역세척 주기에 의한 영향을 살펴보기 위하여 BT를 3초로 일정하게 설정하고, FT를 30, 60, 90, 120 초로 변화 시켰다. 이때 BT를 3초로 일정히 유지시킨 것은, 3초 정도의 BT에서 역세척의 영향을 충분히 나타낼 수 있을 것으로 예상하여 임의로 3초로 설정하였다. 또한, 앞의 역세척 주기의 변화 실험결과를 바탕으로, 역세척 시간변화에 따른 영향을 살펴보기 위하여 FT를 120초로 일정하게 고정한 다음, BT를 3, 6, 9, 12 초로 변화시키면서 180분 동안의 운전시간에 따른 막오염에 대한 저항(R_f) 및 무차원적인 투과선속(J/J_0), 투과선속(J), 총여과부피(V_T)의 변화를 관찰하고, 역세척을 하지 않았을 때(NBF)의 결과와 비교 분석하였다. 또한, 막을 통과한 투과수의 부피는 전자저울(Ohaus, U.S.A.)을 사용하여 무게를 측정하여 투과량을 산정하였다. 한편, 모든 실험에서 다른 운전 변수인 막간압력차(TMP)는 1.52 bar, 유입유량은 0.5 L/min, 온도는 20°C, 물 역세척 압력은 0.98 bar로 일정하게 유지시켰으며, 이것은 본 연구실의 이전의 연구결과[22]와 비교

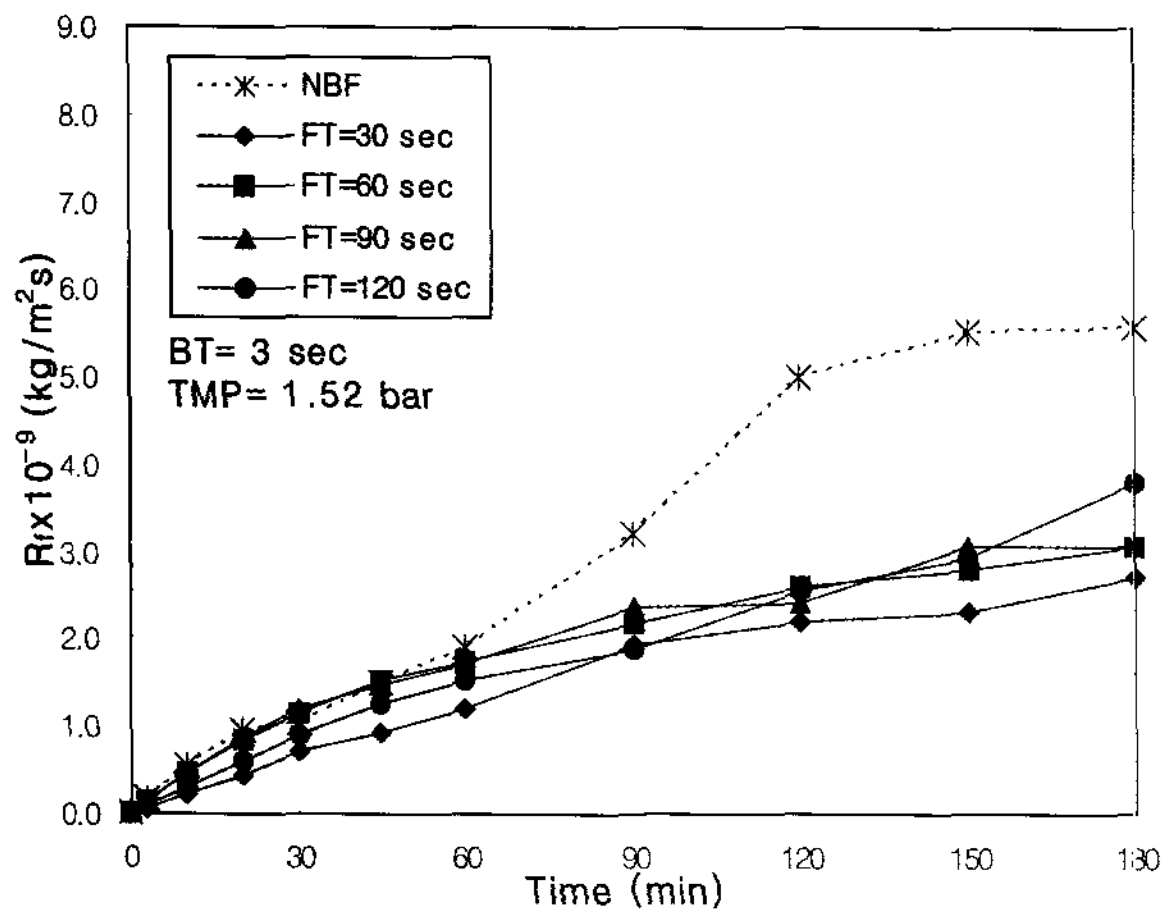


Fig. 2. Effect of back-flushing period (FT) on resistance of membrane fouling.

하기 위하여 위와 같이 다른 운전 변수를 같게 하여 실험을 수행하였다.

각각의 조건에서 실험이 끝난 뒤에는 공급탱크의 원수를 배수한 다음, 5 L의 1차 증류수를 넣고 약 15분 동안 증류수를 순환시킴과 동시에 역세척을 수행하여 분리막과 실험 장치를 세척하였다. 그 다음 막 모듈에서 세라믹 분리막을 탈착하여 15% 질산 수용액에 하루 동안 담가두어 막 기공 내의 오염물질이 용해되어 나오도록 하고, 다시 증류수로 여러 번 헹궈 주었다. 새로운 운전 조건에서 실험하기 전에 막을 모듈에 설치하고, 1차 증류수로 운전하면서 투과량을 측정하여 초기 투과 부피의 $\pm 5\%$ 범위 이내로 회복되었는지 확인한 후 다음 실험을 진행하였다.

그리고 막을 통한 오염물질 제거율을 알아보기 위해 공급수와 막을 통과한 처리수를 일정량 취하여 수질 분석을 실시하였다. 분석항목과 방법은 총용존고형물(TDS)은 Conductivity meter (Model 162, ATI ORION, U.S.A.)을 사용하여 직접 측정하였고, 탁도(Turbidity) 또한 Turbidimeter (Model 2100N, HACH, U.S.A.)를 사용하여 직접 측정하였다. 그리고 화학적 산소요구량(COD_{Mn}) 및 암모니아성 질소(NH₃-N), 총 질소(T-N), 총 인(T-P)은 수질오염공정시험법[23] 및 Standard Method [24]에 의하여 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 역세척 주기(FT)의 영향

본 연구에서는 정수처리를 위한 세라믹 정밀여과 시

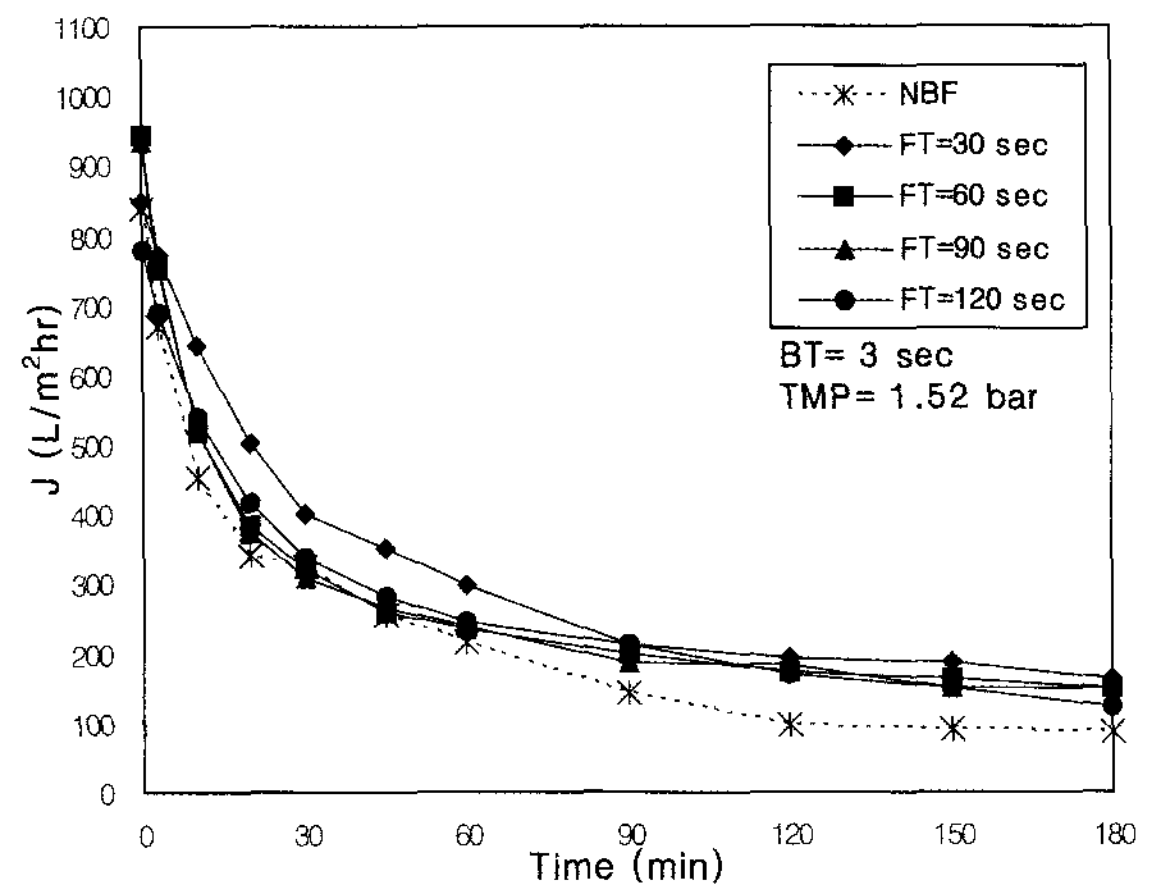


Fig. 3. Effect of back-flushing period (FT) on permeate flux.

스템에서 발생하는 막오염을 최소화하기 위하여 처리수를 이용한 물 역세척을 수행하였다. 먼저 역세척 수행 주기인 FT를 변화시키면서 일정한 BT에서의 막오염 억제 효과와 투과선속의 변화를 살펴보았다. 그리고 막분리 공정에서 발생하는 여과저항과 투과선속은 김미희 등[5]의 이론적 방법과 동일하게 직렬여과 저항식을 이용하여 계산하였다. Fig. 2에서는 운전시간에 따른 각각의 조건에서 R_f의 변화를 나타내었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 NBF와 비교하여 불 때 주기적으로 역세척을 수행한 경우에서 R_f가 감소함을 알 수 있었으며, 180분 운전 후 NBF에 비해 FT 30, 60, 90, 120초에서 각각 51.0, 45.2, 45.0, 31.8%의 막오염 저감 효과를 나타내었다. 하지만, FT에 따른 막오염의 감소 경향이 크게 나타나지는 않았다. 그 이유는 일반적으로 역세척 압력을 운전압력인 TMP보다 높게 하여 역세척을 수행하는 반면, 본 연구에서는 역세척 압력이 0.98 bar로 TMP인 1.52 bar보다 낮은 압력으로 역세척을 수행하였기 때문이며, 또한 BT가 3초로 비교적 짧았기 때문에 충분한 역세척이 이루어지지 않았던 것으로 사료된다. 여기서 BT를 3초로 설정한 이유는 앞의 2.3절에서 언급하였다.

Fig. 3에서는 운전시간에 따른 막의 투과선속(Permeate flux, J)의 변화를 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 FT = 30초일 때 가장 높은 J를 나타내었지만, 180분 운전 후의 결과를 NBF와 비교하였을 때 소폭만이 증가하였을 뿐이며 다른 조건들과도 큰 차이가 없었다. 이것 역시 앞에서 언급한 이유에 기인한 것으로 판단되며, Fig. 4의 초기 투과선속(J₀)에 대한 시간에 따른

Table 2. Filtration Factors in the Experiments for Effect of Back-flushing Period

Experimental conditions		$R_{f,180} \times 10^{-9}$ ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	J_0 ($\text{L/m}^2 \cdot \text{hr}$)	J_{180} ($\text{L/m}^2 \cdot \text{hr}$)	J_{180}/J_0	V_T (L)
FT (s)	BT (s)					
NBF		5.578	839.6	87.8	0.105	2.82
120	3	3.803	778.6	121.4	0.156	3.48
90		3.068	933.9	149.7	0.160	3.39
60		3.059	944.6	150.3	0.159	3.38
30		2.732	848.4	161.9	0.191	3.80

투과선속(J)인 무차원화한 투과선속(J/J_0)에서도 비슷한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 반면에, FT = 30초일 때 60분 운전시간까지는 J나 J/J_0 의 감소 경향이 다른 조건에 비해 완만하게 일어남을 볼 수 있다. 이것은 TMP에 비해 역세척 압력이 작고 역세척 시간도 짧지만 잦은 역세척의 수행 결과 초기의 막오염을 둔화 시킨 것으로 사료되며, 이는 초기의 여과부피를 증가시켰다. 그러나 60분 운전 이후에는 막표면에 오염물질이 쌓여 압밀화 되어 역세척 효과가 감소한 것으로 판단된다.

Table 2에는 역세척 주기의 변화에 따른 총여과부피(V_T)와 J_0 , 그리고 180분 운전 후의 $R_{f,180}$, J_{180} 및 J_{180}/J_0 을 나타내었다. Table 2에서 보는 바와 같이 낮은 역세척 압력과 짧은 역세척 시간(3초)이긴 하지만 역세척 주기가 짧을수록 역세척이 빈번하여 막오염의 억제가 조금이나마 유리하였으며, FT = 30초일 때 180 min 운전 후에 가장 낮은 $R_{f,180}$ 와 가장 높은 J_{180} 및 J_{180}/J_0 을 나타내어 가장 많은 V_T 인 3.80 L를 얻을 수 있었다. 한편 FT 60초와 90초의 경우에는 $R_{f,180}$ 과 J_{180} 및 J_{180}/J_0 에서 서로 비슷한 값을 나타내어 V_T 가 각각 3.38 L, 3.39 L로 역세척 주기에 따른 영향이 거의 나타나지 않았다.

3.2. 역세척 시간(BT)의 영향

역세척 주기에 따른 막오염의 억제 효과와 투과선속의 변화를 살펴본 결과, 역세척의 영향이 NBF에 비해 어느 정도는 나타났지만 FT에 따른 효과는 적었다. 이러한 결과는 TMP에 비해 낮은 역세척 압력에 의한 영향도 있을 수 있지만, 주된 이유가 짧은 역세척 시간 때문이라 사료된다. 따라서 역세척 주기의 영향 실험에서 FT가 가장 긴 120초를 대상으로, BT를 3초에서 12초로 단계적으로 변화시키면서 BT의 증가에 따른 영향을 살펴보았다. 그 결과, Fig. 5에서 보는 바와 같이 BT

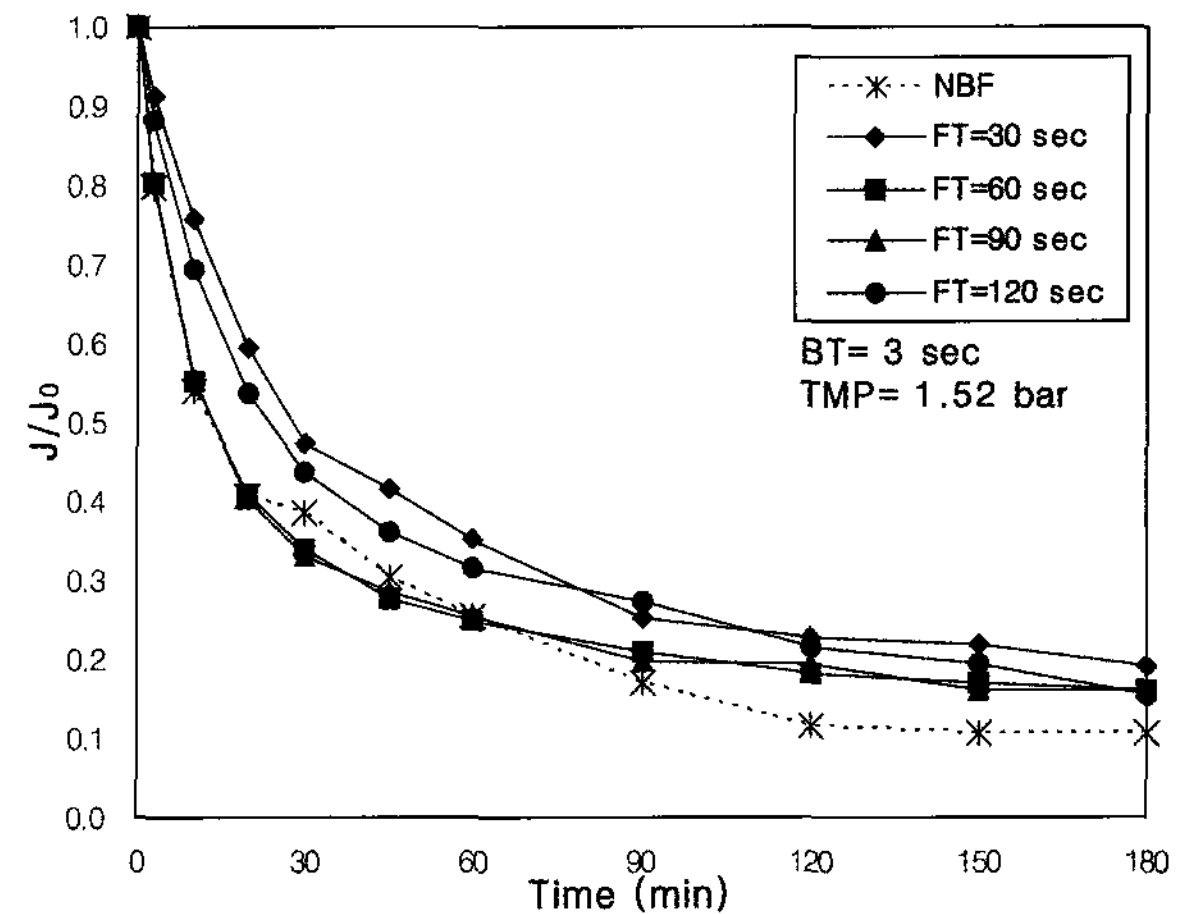


Fig. 4. Effect of back-flushing period (FT) on dimensionless permeate flux.

가 길어질수록 확인한 역세척 효과를 나타냄을 알 수 있었고, 180분 운전 후 BT가 3, 6, 9, 12초로 길어질수록 NBF에 비해 각각 22.6, 51.7, 64.1, 74.7%의 R_f 의 저감 효과를 나타내었다. 여기서 BT가 3초에서 6초로 길어진 조건에서 R_f 의 저감 효과가 29.1% 증가하였는데, 이것은 BT가 3초인 경우에 비해 6초인 경우에서 역세척의 충분한 시간이 주어진 결과로 보여지며 BT가 증가할수록 그 효과가 커짐을 알 수 있었다. Table 3에 역세척 시간의 변화에 따른 V_T 와 J_0 , 그리고 180분 운전 후의 $R_{f,180}$, J_{180} 및 J_{180}/J_0 을 나타내었다. 또한 원수의 채수시기가 두 조건 변화 실험에서 서로 다른 이유로, Table 2와 Table 3에서 보는 바와 같이 FT 변화에서 NBF의 $R_{f,180}$ 값이 $5.578 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 인 것에 비해 BT변화에서 NBF의 $R_{f,180}$ 값이 $8.141 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 훨씬 더 큰 막오염을 나타내고 있다. 하지만 FT = 120초, BT = 12초에서 $R_{f,180}$ 값이 $2.063 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 FT 변화에서 $R_{f,180}$ 이 가장 낮은 FT = 30초, BT = 3초의 $R_{f,180}$ 값 $2.732 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 보다 더 낮았다. 따라서 이러한 결과는 일정한 FT = 120초에서 BT = 12초

Table 3. Filtration Factors in the Experiments for Effect of Back-flushing Time

Experimental conditions		$R_{f,180} \times 10^{-9}$ ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	J_0 ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	J_{180} ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	J_{180}/J_0	V_T (L)
FT (s)	BT (s)					
120	NBF	8.141	931.1	62.7	0.067	2.04
	3	6.302	1017.6	78.0	0.079	2.60
	6	3.936	683.1	115.5	0.169	2.92
	9	2.920	934.3	156.0	0.167	3.53
	12	2.063	859.9	202.6	0.236	4.07

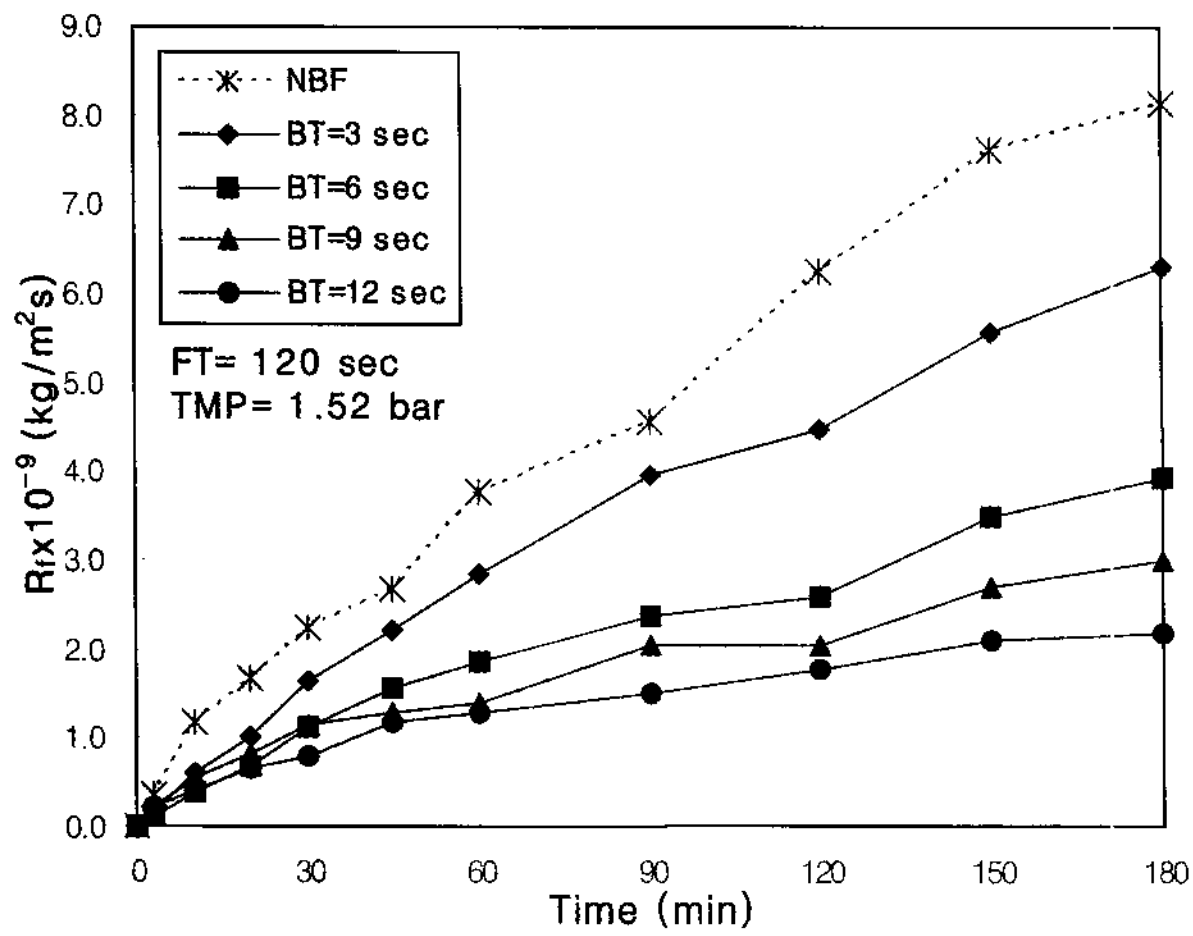


Fig. 5. Effect of back-flushing time (BT) on resistance of membrane fouling.

일 때, 역세척 시간이 길어짐에 따라 충분한 역세척이 이루어져 농도분극현상 및 막오염물질이 막표면에 쌓이는 것을 감소시켜 막오염이 서서히 진행된 것으로 보인다.

Fig. 6에서는 BT의 증가에 따른 운전시간에 대한 J의 변화를 나타내며, BT가 증가할수록 점차적으로 J가 높게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이것은 BT가 길어질수록 막오염의 저감에 더 효과적임을 나타낸다. 따라서 BT가 12초일 때 가장 높은 J를 보였으며, 180분 운전 후 NBF의 $62.65 \text{ L}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 에 비해 약 3.2배 높은 $202.61 \text{ L}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 를 얻을 수 있었다. 또한, Fig. 7의 운전시간에 따른 J/J_0 의 변화에서도 비슷한 결과가 나타나며 BT가 증가할수록 J/J_0 의 감소가 더욱 둔화되는 경향을 보인다. 따라서 Table 3에서 나타내었듯이 FT를 120초로 일정하게 유지하면서 BT를 변화시킨 결과, BT = 12초에서 가장 낮은 $R_{f,180}$ 와 가장 높은 J_{180} 및 J_{180}/J_0 을 나타내어 가장 많은 V_T 값 4.07 L를 얻을 수 있었다.

결과적으로, FT의 변화 조건과 BT의 변화 조건에서 각각 가장 낮은 $R_{f,180}$ 와 가장 높은 J_{180} 및 J_{180}/J_0 , V_T 를

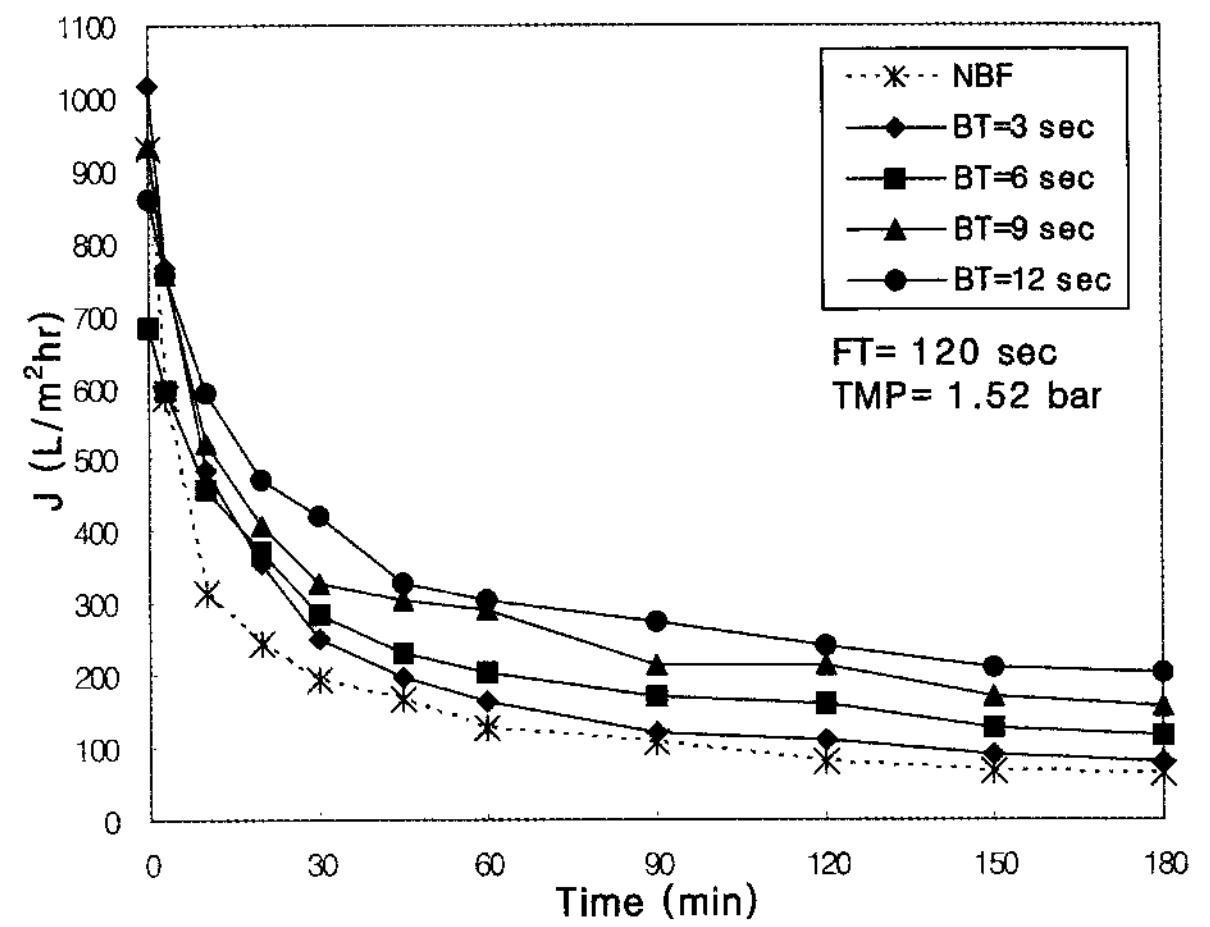


Fig. 6. Effect of back-flushing time (BT) on permeate flux.

나타낸 FT = 30초, BT = 3초와 FT = 120초, BT = 12초 조건은 정상여과 시간에 대한 역세척 시간의 비율 (BT/FT)이 0.1로 동일한 것을 알 수 있다. 이 두 조건을 비교하여 볼 때, 역세척 시간이 더 긴 FT = 120초, BT = 12초에서 충분한 역세척 시간이 확보되어 막오염의 억제에 더 효과적임을 알 수 있었으며, 더 높은 J와 V_T 를 얻을 수 있었다. 따라서 본 실험 범위에서 FT = 120초, BT = 12초가 최적 운전 조건임을 알 수 있었다.

3.3. 세라믹 정밀여과막의 오염물질 제거율 및 처리수 수질

본 연구에 사용한 세라믹 정밀여과막의 오염물질의 제거율과 처리수의 수질을 알아보기 위해 공급수와 막을 통과한 처리수를 일정량 취하여 수질 분석을 실시하였으며, Table 4에 항목별 처리수의 수질과 평균 제거율을 정리하였다. Table 4에서 보는 바와 같이, 탁도는 88.0~92.0%로 높은 제거율을 보였으나 총 용존고형물은 0.7~5.5%로 거의 제거되지 않았다. 그리고 화학적 산소요구량은 42.7~43.0%, 암모니아성 질소는 30.3~

Table 4. Average Treated Water Quality and Rejection Rate of Ceramic MF System

Items	Effect of FT		Effect of BT	
	Treated water	Rejection rate	Treated water	Rejection rate
TDS (mg/L)	55	5.5%	91	0.7%
Turbidity (NTU)	0.50	88.0%	0.43	92.0%
COD _{Mn} (mg/L)	2.77	42.7%	2.29	43.0%
NH ₃ -N (mg/L)	0.137	59.1%	0.262	30.3%
T-N (mg/L)	2.286	15.2%	2.105	17.3%
T-P (mg/L)	0.008	57.7%	0.013	61.0%

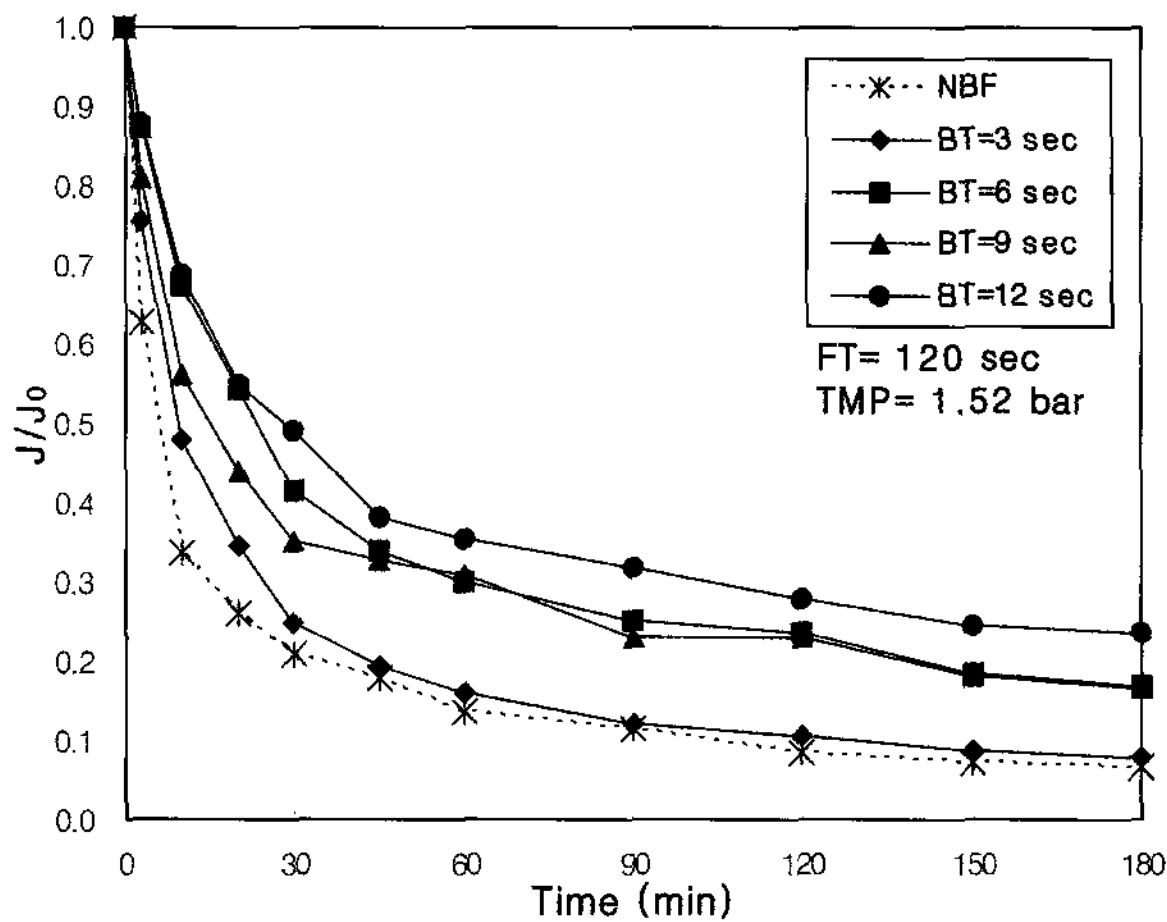


Fig. 7. Effect of back-flushing time (BT) on dimensionless permeate flux.

59.1%, 총 질소는 15.2~17.3%, 총 인은 57.7~61.0%의 제거율을 보였다. 이러한 결과는 정밀여과막의 기공 크기보다 큰 원수 중의 부유성 유기물이나 미생물, 일부 콜로이드물질 등이 체거름의 원리로 분리막에 의해 선택적으로 배제된 결과로 사료된다. 한편, FT 및 BT 영향 실험 결과를 비교하여 보면, 암모니아성 질소를 제외한 나머지 3개 항목에서는 비슷한 제거율을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고도정수처리를 위한 세라믹 정밀여과 시스템에서 막오염을 최소화하고 투과선속 감소를 해결하고자 처리수를 이용한 물 역세척을 수행하였으며, 역세척 주기인 정상여과 시간 및 역세척 시간을 변화시키면서 그에 따른 최적의 운전조건을 규명하고자 하였다. 최적 운전조건은 투과선속(J)과 막오염에 대한

저항(R_f), 무차원적인 투과선속(J/J₀), 총여과부피(V_T) 측면에서 살펴보았다.

처리수를 이용하여 주기적인 3초의 역세척을 수행하면서 역세척 주기 FT의 영향을 살펴 본 결과, NBF에 비해 주기적으로 역세척을 수행하였을 때 R_f가 감소하고, J 및 J/J₀가 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 FT에 따른 영향이 크게 나타나지는 않았는데, 그 이유는 너무 짧은 역세척 시간으로 인하여 역세척이 충분히 이루어지지 않았던 것으로 판단된다. 하지만 짧은 역세척 시간임에도 불구하고 역세척 주기가 짧을수록 막오염의 억제가 조금이나마 유리하였다. 따라서 180 min 운전 후에 R_{f,180}이 2.732 × 10⁻⁹ kg/m² · s으로 최소였고 J 및 J/J₀가 가장 높게 유지되어 가장 많은 V_T인 3.80 L를 얻을 수 있었다.

또한 역세척 주기의 영향 실험 조건 중 가장 긴 역세척 주기 120초를 대상으로, BT를 3초에서 12초로 단계적으로 변화시키면서 역세척 시간 BT의 증가에 따른 영향을 살펴보았다. 그 결과, BT가 길어질수록 충분한 역세척이 이루어져 농도분극현상 및 막오염 물질이 막 표면에 쌓이는 것을 감소시켜 확연한 역세척 효과를 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 180분 운전 후 BT가 12초일 때 R_{f,180}이 2.063 × 10⁻⁹ kg/m² · s로 최소였고 J 및 J/J₀가 가장 높게 유지되어 가장 많은 V_T인 4.07 L를 얻을 수 있었다. 또한 정상여과 시간에 대한 역세척 시간의 비율(BT/FT)이 0.1로 동일한 FT = 30초, BT = 3초와 FT = 120초, BT = 12초 조건의 결과를 V_T와 R_{f,180}, J₁₈₀, J₁₈₀/J₀의 측면에서 비교하여 볼 때, 본 실험 범위에서 FT = 120초, BT = 12초가 최적 운전조건임을 알 수 있었다.

한편, 세라믹 정밀여과막의 오염물질의 제거율은 탁도의 경우 88.0~92.0%로 높은 제거율을 보였으나, 총 용존고형물은 0.7~5.5%로 거의 제거되지 않았다. 그리고 화학적 산소요구량은 42.7~43.0%, 암모니아성 질소 30.3~59.1%, 총 질소 15.2~17.3%, 총 인 57.7~61.0%의 제거율을 보였다.

감 사

본 연구는 중소기업청이 지원하는 산학연컨소시엄사업(2007)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. T. Leiknes, H. Ødegaard, and H. Myklebust, "Removal of natural organic matter (NOM) in drinking water treatment by coagulation-microfiltration using metal membranes", *J. Membr. Sci.*, **242**, 47 (2004).
2. J. I. Oha and S. H. Lee, "Influence of streaming potential on flux decline of microfiltration with in-line rapid pre-coagulation process for drinking water production", *J. Membr. Sci.*, **254**, 39 (2005).
3. L. Fiksdal and T. O. Leiknes, "The effect of coagulation with MF/UF membrane filtration for removal of virus in drinking water", *J. Membr. Sci.*, **279**, 364 (2006).
4. A. R. Costa and M. N. Pinho, "Performance and cost estimation of nanofiltration for surface water treatment in drinking water production", *Desalination*, **196**, 55 (2006).
5. 이용택, 오중교, "분리막을 이용한 정수처리 System 에서 처리공정 및 운전조건의 최적화에 관한 연구", *멤브레인*, **9(4)**, 193 (1999).
6. 김미희, 박진용, "제지폐수 재활용을 위한 관형 탄소계 세라믹 한외여과장치에서 물 역세척의 막오염 제어 효과", *멤브레인*, **11(4)**, 190 (2001).
7. 이용택, 오중교, "분리막을 이용한 정수처리공정에서 유, 무기물질이 막오염에 끼치는 영향", *멤브레인*, **13(4)**, 219 (2003).
8. W. Yuan, A. Kocic, and A. L. Zydney, "Analysis of humic acid fouling during microfiltration using a pore blockage-cake filtration model", *J. Membr. Sci.*, **198**, 51 (2002).
9. D. B. Mosqueda-Jimenez and P. M. Huck, "Characterization of membrane foulants in drinking water treatment", *Desalination*, **198**, 173 (2006).
10. M. Heran and S. Elmaleh, "Microfiltration through an inorganic tubular membrane with high frequency retrofiltration", *J. Membr. Sci.*, **188**, 181 (2001).
11. S. K. Karode, "Unsteady state flux response: a method to determine the nature of the solute and gel layer in membrane filtration" *J. Membr. Sci.*, **188**, 9 (2001).
12. P. Rai, C. Rai, G. C. Majumdera, S. D. Gupta, and S. De, "Resistance in series model for ultrafiltration of mosambi (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) juice in a stirred continuous mode" *J. Membr. Sci.*, **283**, 116 (2006).
13. 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. Membr. Sci.*, **266**, 40 (2005).
14. J. Y. Park, S. J. Choi, and B. R. Park, "Effect of N₂-back-flushing in multichannels ceramic microfiltration system for paper wastewater treatment", *Desalination*, **202**, 207 (2007).
15. D. Chen, L. K. Weavers, and H. W. Walker, "Ultrasonic control of ceramic membrane fouling: Effect of particle characteristics", *Water research*, **40**, 840 (2006).
16. 육영재, 염경호, "초음파를 이용한 한외여과의 성능 향상", *멤브레인*, **13(4)**, 283 (2003).
17. W. F. Jones, R. L. Valentine, and V. G. J. Rodgers, "Removal of suspended clay from water using transmembrane pressure pulsed microfiltration", *J. Membr. Sci.*, **157**, 199 (1999).
18. F. Malek, J. L. Harris, and F. A. Roddick, "Interrelationship of photooxidation and microfiltration in drinking water treatment", *J. Membr. Sci.*, **281**, 541 (2006).
19. 박진용, "세라믹 여과 시스템으로 제지폐수 처리시 회수 효율에 대한 물 역세척 시간의 영향", *멤브레인*, **14(4)**, 329 (2004).
20. 김은옥, "세라믹 분리막의 응용", *멤브레인*, **3(1)**, 12 (1993).
21. 강상규, 김경호, 이호신, 배동식, "수처리용 세라믹 분리막의 기술개발 현황과 정보분석", *공업화학 전망*, **7(3)**, 83 (2004).
22. J. Y. Park, G. Y. Kyung, S. H. Han, H. W. Kim, and H. C. Lee, "Lake Water Treatment using Ceramic Ultrafiltration Membrane System with Periodic Water-backflushing", *Korean Membrane J.*, **8(1)**, 50 (2006).

23. 동화기술편집부, “수질오염공정시험법”, pp. 133-204, 동화기술 (2002).

24. 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).