

## 관형 알루미나 세라믹 한외여과막에 의한 고도정수처리 시스템에서 물 역세척의 영향

박진용<sup>†</sup> · 이송희

한림대학교 환경생명공학과

(2009년 8월 3일 접수, 2009년 9월 1일 수정, 2009년 9월 7일 채택)

### Effect of Water-back-flushing in Advanced Water Treatment System by Tubular Alumina Ceramic Ultrafiltration Membrane

Jin Yong Park<sup>†</sup> and Song Hui Lee

Department of Environmental Sciences & Biotechnology, Hallym University, Chuncheon, Kangwon 200-702, Korea

(Received August 3, 2009, Revised September 1, 2009, Accepted September 7, 2009)

**요약:** 본 연구에서 처리수를 이용한 주기적인 역세척은 춘천시 공지천의 관형 세라믹 한외여과막에 의한 고도정수처리 시스템에서 막오염을 저감하고 투과선속을 향상시키고자 수행되었다. 일정한 역세척 시간(BT) 15초에서 여과시간 즉, 물 역세척 주기(FT) 2분이 가장 높은 무차원 투과선속(초기 투과선속에 대한 투과선속)과 가장 낮은 막오염 저항값을 보였다. 또한, FT 10분으로 고정한 BT 영향의 결과에서 BT 20초가 가장 낮은 막오염 저항과 가장 높은 무차원 투과선속을 나타내어, 가장 많은 총여과부피 107.3 L를 얻을 수 있었다. 결론적으로 공지천의 정수처리에서 FT 10분과 BT 20초가 최적 조건으로 관형 알루미나 정밀여과의 선행 연구결과와 정확히 일치하였다. 한편 관형 세라믹 한외여과 시스템에 의한 오염물질 평균제거율은 탁도 97.0%, 망간법에 의한 COD 32.1%, 암모니아성 질소 28.8%, 총인 54.4%로 나타났다.

**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 by tubular ceramic ultrafiltration membrane for Gongji stream in Chuncheon city. The back-flushing period (FT, filtration time) 2 min with periodic water-back-flushing of 15 sec showed the highest value of dimensionless permeate flux (permeate flux vs. initial permeate flux), and the lowest value of resistance of membrane fouling. Also in the results of BT effect at fixed FT 10 min, BT (back-flushing time) 20 sec showed the lowest value of resistance of membrane fouling and the highest value of dimensionless permeate flux, and we could be obtained the highest total permeate volume of 107.3 L. Consequently FT 10 min and BT 20 sec could be the optimal condition in Gongji stream water treatment, which was the exactly same results of our previous tubular alumina microfiltration. Then the average rejection rates of pollutants by our tubular ceramic UF system were 97.0% for turbidity, 32.1% for chemical oxygen demand by manganese method, 28.8% for ammoniac nitrogen and 54.4% for T-P.

**Keywords:** ultrafiltration, ceramic membrane, water-back-flushing, water treatment

#### 1. 서론

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 이용

한 정수처리 공정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[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 및 상태 변동 등에 따라서 처리수의 수질이 크게 좌우되지 않고 비교적 안정적이며 양호하다[6].

그러나 막분리를 정수처리에 적용할 경우 막의 오염

<sup>†</sup>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 <sub>Mn</sub> (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	
07.09.10	Effect of BT	Range	109~118	4.60~9.10	1.98~4.12	0.042~0.170	3.336~3.932	0.034~0.056
		Average	112	5.78	2.82	0.100	3.637	0.043
08.03.20	Effect of FT	Range	81~91	4.33~8.07	5.08~5.78	0.084~0.643	3.485~4.849	0.072~0.100
		Average	84	6.80	5.49	0.198	4.151	0.082

현상(fouling)이 가장 문제가 되며, 이는 투과선속을 감소시키고 막의 수명을 단축시키는 등의 문제점을 야기한다. 막 오염은 원수의 성상에 따라 차이는 있으나, 일반적으로 지표수를 이용한 정수처리의 경우 막오염은 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, iron, silica, suspended solids와 같은 무기물이나, humic substances, polysaccharides, protein, micro-organisms과 같은 유기물에 의해 일어나고[7-9], 이것은 농도분극[10]이나 막 표면의 gel층 형성[11] 그리고 막 기공 내에 흡착이나 기공 막힘[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 투과선속을 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 제3세대 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 미생물과 세균에 의한 오염 및 분리막 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 크기 때문에 매우 중요하다[20,21].

본 연구에서는 춘천시 공지천수의 고도정수처리를 위한 관형 알루미나 세라믹 한외여과 시스템에서 투과선속을 향상시키고 막오염 현상을 적절히 억제하고자, 처리수를 이용하여 주기적인 역세척을 실시하였다. 또

한 역세척 주기인 정상여과 시간 및 역세척 시간을 변화 시키면서 그에 따른 영향을 살펴보고, 최적 운전조건을 도출하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 세라믹 분리막 및 대상 시료

본 연구에 사용한 세라믹 막은  $\alpha$ -alumina 지지체 위에  $\alpha$ -alumina로 코팅한 관형 한외여과막(NCMT-5231)으로 (주)나노기공소재에서 구입하였으며, 유효막면적은 63.1 cm<sup>2</sup>, 평균기공크기는 0.05  $\mu$ m, 외경은 10 mm, 내경은 8 mm, 길이는 251 mm, 두께 1 mm이다. 또한, 실험에 사용한 원수는 강원도 춘천시에 위치한 북한강 수계 상류지역인 의암호의 한 지류로서 공지천수를 대상 원수로 하였고, 2007년 9월 10일과 2008년 3월 20일에 같은 지점에서 각각 채수하여 4°C에 보관하여 사용하였으며, 본 연구에 사용된 원수의 수질을 Table 1에 정리하였다. Table 1에 나타난 것과 같이 채수시기가 다른 각각의 원수는 서로 비슷한 수질을 나타내는 것을 알 수 있었으나, 다만 2007년 9월 10일에 채수한 원수의 경우 총용존고형물(TDS)이 109~118 mg/L의 범위로 더 높은 값을 보였다.

### 2.2. 실험 장치

Fig. 1에 본 실험에 사용한 처리수를 이용하여 물 역세척이 가능한 한외여과 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. 공급탱크 안의 공급수는 펌프(Procon, Standex Co., U.S.A.)에 의해 공급탱크로부터 막 모듈 안으로 원수가 유입되고, 펌프

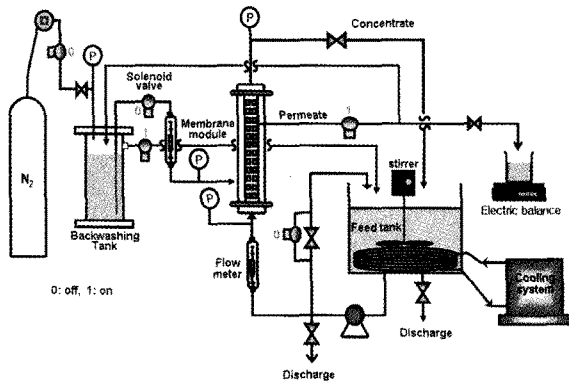


Fig. 1. Apparatus of ceramic ultrafiltration system with water-back-flushing.

우회관을 설치하여 막에서의 유량과 압력을 조절할 수 있도록 하였다. 막 모듈에 유입되는 유량은 유량계(NP-127, Tokyo keiso, Japan)를 통하여 측정하고, 일정한 유량으로 이송되어 세라믹 막 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 채택하였다. 그리고, 분리막 실험장치는 위쪽 지지체를 조정이 가능하게 설치하여 막 모듈의 크기가 다른 경우에도 쉽게 장착하여 실험할 수 있도록 설계되었다. 막을 투과한 처리수는 막 모듈 상단부를 통하여 역세척조로 이동하며, 역세척조에 일정량 이상의 처리수가 모아지면 다시 공급탱크로 순환하는 방식을 채택하여 실험 기간 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 관계없이 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 한외여과 시스템에서 발생하는 막오염을 최소화하기 위하여 처리

수를 이용한 물 역세척을 수행 하였다. 역세척의 수행 주기인 정상여과 시간(FT)과 역세척 시간(BT)을 변화 시키면서, 역세척 주기 및 시간의 영향에 따른 최적운전 조건을 알아보았다. 실험은 공급탱크에 10 L의 원수를 채우고 물 역세척 시간에 의한 영향을 살펴보기 위하여 FT를 10분으로 일정하게 설정하고, BT를 6, 10, 15, 20초로 변화시켰다. 또한, 앞의 역세척 시간의 변화 실험결과를 바탕으로, 역세척 주기 변화에 따른 영향을 살펴보기 위하여 BT를 15초로 일정하게 고정된 다음, FT를 2, 4, 6, 8, 10분으로 변화시키면서 180분 동안의 운전시간에 따른 막오염에 대한 저항( $R_f$ ) 및 무차원화한 투과선속( $J/J_0$ ), 투과선속( $J$ ), 총여과부피( $V_T$ )의 변화를 관찰하고, 역세척을 하지 않았을 때(NBF)의 결과와 비교 분석 하였다. 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 1.77 bar, 유입유량은 1.0 L/min, 온도는 20°C, 물 역세척 압력은 1.98 bar로 일정하게 유지시켰으며, 이것은 본 연구실의 이전의 정밀여과에 대한 연구결과[22]와 비교하기 위하여 위와 같이 FT와 BT 의의 운전조건을 같게 하여 실험을 수행하였고, 또 다른 이전의 연구결과[23]의 운전조건보다 TMP와 역세척 압력을 증가시켰다.

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 투과부피의 ±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 2100 N, HACH, U.S.A.)를 사용하여 직접 측정하였다. 그리고 화학적 산소요구량(COD<sub>Mn</sub>) 및 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N), 총질소(T-N), 총인

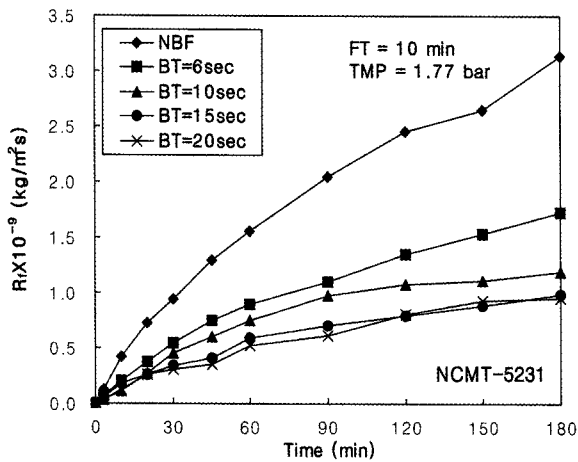


Fig. 2. Effect of back-flushing time (BT) on resistance of membrane fouling.

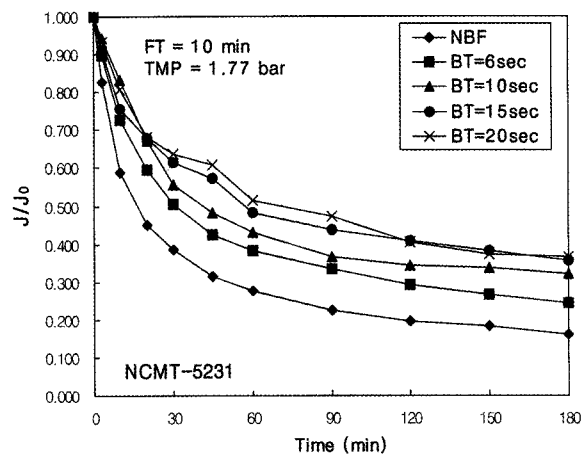


Fig. 4. Effect of back-flushing time (BT) on dimensionless permeate flux.

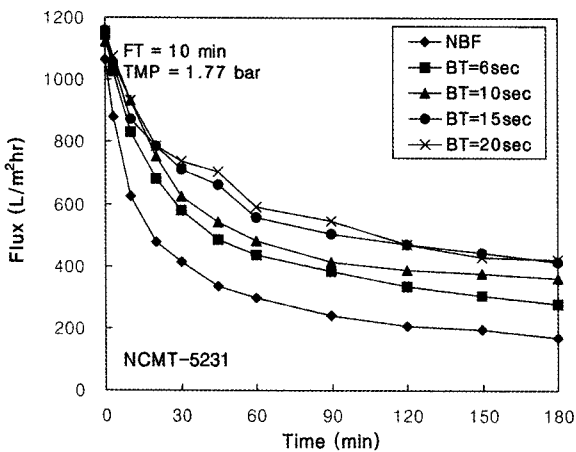


Fig. 3. Effect of back-flushing time (BT) on permeate flux.

(T-P)은 수질오염공정시험법[24] 및 standard method[25]에 의하여 분석을 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 역세척 시간(BT)의 영향

본 연구에서는 정수처리를 위한 관형 알루미늄 세라믹 한외여과 시스템에서 발생하는 막오염을 최소화하기 위하여 처리수를 이용한 물 역세척을 수행 하였다. 먼저 역세척 시간인 BT를 변화시키면서 일정한 역세척 주기인 FT 10분에서의 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  $R_f$ 의 변화를

나타내었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 역세척을 하지 않았을 때(NBF)와 비교하여 불 때 주기적으로 역세척을 수행한 경우에서  $R_f$ 가 뚜렷하게 감소함을 알 수 있었으며, 180분 운전 후 NBF에 비해 BT 6, 10, 15, 20 초에서 각각 44.9, 61.8, 68.5, 69.5%의 막오염 저감 효과를 나타내었다. 하지만, BT를 10초 이상 증가시켰을 때 이에 따른 막오염의 감소 경향이 크게 나타나지는 않았다.

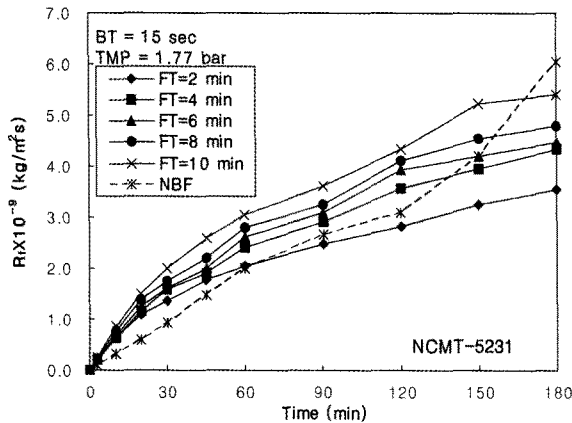
Fig. 3에서는 역세척 시간이 운전시간에 따른 막의 투과선속(Permeate flux, J)의 변화에 미치는 영향을 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 BT 20초일 때 가장 높은 J를 나타내었고, 180분 운전 후의 결과를 NBF와 비교하였을 때 BT 6초에서 15초까지 뚜렷하게 증가 하였으나, 20초의 최종 J값은 15초의 경우에 비하여 2% 증가폭만을 보였다. Fig. 4의 초기 투과선속( $J_0$ )에 대한 시간에 따른 투과선속(J)인 무차원화한 투과선속( $J/J_0$ )에서도 비슷한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 반면에, BT 15초와 20초일 때 60분 운전시간까지  $J$ 나  $J/J_0$ 의 감소 경향이 다른 조건에 비해 완만하게 일어남을 볼 수 있다. 이것은 TMP에 비해 역세척 압력이 크고 역세척 시간을 길게 수행한 결과, 역세척 시간이 길어짐에 따라 충분한 역세척이 이루어져 농도분극 현상과 막오염 물질의 막표면 누적을 감소시켜 막오염이 서서히 진행되고, 이에 따라 초기의 여과부피가 증가하였다.

Table 2에는 역세척 주기의 변화에 따른 총여과부피( $V_f$ )와  $J_0$ , 그리고 180분 운전 후의  $R_{f,180}$ ,  $J_{180}$  및  $J_{180}/J_0$ 을 나타내었다. Table 2에서 보는 바와 같이 TMP에 비해 역세척 압력이 큰 경우, 역세척 시간이 길수록 역세

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

Experimental conditions		$R_{f,180} \times 10^{-9}$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$J_0$ (L/m <sup>2</sup> · hr)	$J_{180}$ (L/m <sup>2</sup> · hr)	$J_{180}/J_0$	$V_T$ (L)
FT (min)	BT (s)					
	NBF*	3.133	1064.8	170.3	0.160	5.76
	6	1.725	1143.5	278.5	0.244	8.30
10	10	1.196	1121.9	360.5	0.321	9.30
	15	0.986	1157.5	413.9	0.358	10.50
	20	<b>0.954</b>	1153.8	<b>422.2</b>	<b>0.366</b>	<b>10.73</b>

\*NBF: No back-flushing



**Fig. 5.** Effect of back-flushing period (FT) on resistance of membrane fouling.

척이 충분히 수행되어 막오염의 억제에 유리하였다. 또한, BT 20초일 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 10.73 L를 얻을 수 있었다. 한편 BT 15초와 20초의 경우에는  $R_{f,180}$ 과  $J_{180}$  및  $J_{180}/J_0$ 에서 서로 비슷한 값을 나타내어 BT 15초일 때  $V_T$ 가 10.50 L로 역세척 시간에 따른 영향이 거의 나타나지 않았다. 이러한 결과는 동일한 운전조건에서 수행한 0.1  $\mu\text{m}$  정밀여과 세라믹 분리막의 결과[22]와 일치하는 것이다. 또한, TMP 및 역세척 압력이 낮은 조건에서 운전한 결과[23]에서도 역세척 시간이 가장 긴 BT 12초에서 가장 많은  $V_T$ 값을 얻을 수 있었다.

3.2. 역세척 주기(FT)의 영향

역세척 시간에 따른 막오염의 억제 효과와 투과선속의 변화를 살펴본 결과, Table 2에서 제시한 바와 같이 역세척의 영향이 역세척을 실시하지 않은 NBF에 비해 뚜렷하게 증가하는 경향을 나타냈는데 BT 15초와 20초의 차이가 크지 않았다. 따라서 역세척 시간을 15초로

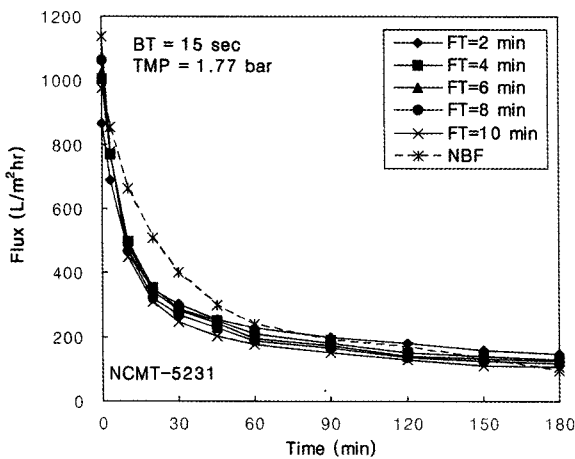
고정한 후 역세척 주기 FT를 2분에서 10분으로 단계적으로 증가시켜 가면서 FT의 증가에 따른 영향을 살펴 보았다. 그 결과, 역세척 시간에 따른 막오염의 저항  $R_f$ 를 나타낸 Fig. 5에서 보는 바와 같이 FT가 짧아질수록 역세척 효과를 나타냄을 알 수 있었고, 180분 운전 후 FT가 10, 8, 6, 4, 2분으로 짧아질수록 NBF에 비해 각각 10.6, 20.6, 25.8, 28.2, 41.4%의  $R_f$  저감 효과를 나타내었다. 특이한 점은 NBF 조건에서 60분 이전에는 가장 낮은  $R_f$ 를 보이다가 그 이후 지속적으로 증가하여 120분 이후에 급격하게 막오염이 진행되었다. 이것은 Table 3에 정리한 바와 같이 NBF 조건의 초기 투과선속  $J_0$ 가 다른 조건보다 상대적으로 낮기 때문인 것으로 추정되는데, 그 원인을 명확히 규명하기 위해 재실험을 진행 중에 있다. 반면에 역세척이 실시되는 경우에는 운전 초기부터 급격히 막오염이 진행되다가 역세척 주기가 짧아질수록 30분 이후부터 막오염이 뚜렷하게 둔화됨을 알 수 있었다.

Table 3에 역세척 주기의 변화에 따른  $V_T$ 와  $J_0$ , 그리고 180분 운전 후의  $R_{f,180}$ ,  $J_{180}$  및  $J_{180}/J_0$ 을 나타내었다. 그 결과를 살펴보면 역세척 주기 FT가 짧아질수록  $R_{f,180}$ 은 감소하고  $J_{180}$  및  $J_{180}/J_0$ ,  $V_T$ 는 증가하였으나, NBF 조건에서 가장 큰  $V_T$ 를 보였다. 이러한 결과는 FT 변화에 따른 투과선속  $J$ 를 나타낸 Fig. 6에서 보는 바와 같이, NBF 조건에서 운전 초기부터 60분까지 가장 높은 투과선속을 나타냈고 그 이후에도 FT 감소에 따른 투과선속의 증가폭이 크지 않았다. 또한, FT가 감소함에 따라 여과시간이 축소되어, NBF 조건 보다 역세척을 수행하였을 때 오히려  $V_T$ 가 감소하는데 영향을 끼친 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 6에서 FT가 감소할수록 점차적으로  $J$ 가 점차 높게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이것은 FT가 짧아질수록 막오염의 저감에 더 효과적임을 나타낸 것이다. 따라서 FT가 2분일 때 가장

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

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 (min)	BT (s)					
NBF*		6.046	975.7	94.8	0.097	<b>4.99</b>
10	15	5.403	1137.8	106.5	0.094	3.68
8		4.801	1064.2	117.7	0.111	3.87
6		4.484	1023.7	124.4	0.122	3.99
4		4.342	1003.6	127.6	0.127	4.06
2		<b>3.541</b>	866.1	<b>148.6</b>	<b>0.172</b>	4.03

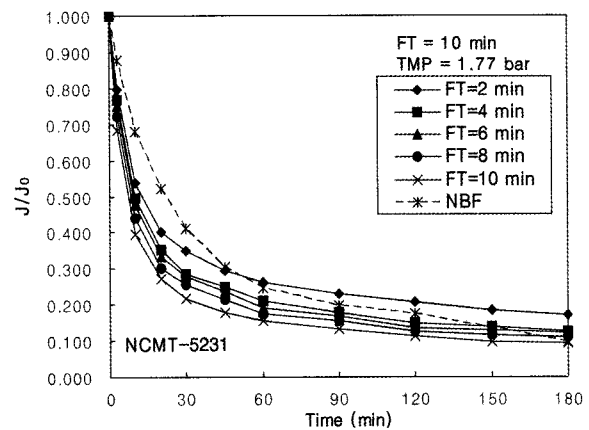
\*NBF: No back-flushing



**Fig. 6.** Effect of back-flushing period (FT) on permeate flux.

높은 J를 보였으며, 180분 운전 후 NBF의  $94.8 \text{ L}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 에 비해 1.57배 높은  $148.6 \text{ L}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 를 얻을 수 있었다.

한편, 원수의 채수시기가 두 조건 변화 실험에서 서로 다른 이유로 Table 1에서 제시한 바와 같이 FT 변화 실험에서 사용한 호소수의 COD와 T-P가 높기 때문에, Table 2와 Table 3에서 보는 바와 같이 BT 변화에서 NBF의  $R_{f,180}$  값이  $3.133 \times 10^{-9} \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 인 것에 비해 FT 변화에서 NBF의  $R_{f,180}$  값이  $6.046 \times 10^{-9} \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 로 훨씬 더 큰 막오염을 나타내고 있다. 하지만 BT 변화 실험에서 FT 10분, BT 20초에서  $R_{f,180}$  값이  $0.954 \times 10^{-9} \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 로 FT 변화 실험에서  $R_{f,180}$ 이 가장 낮은 FT 2분, BT 15초의  $R_{f,180}$  값  $3.541 \times 10^{-9} \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 보다 더 낮았다. 이러한 결과로부터 일정한 FT 10분에서 BT 20초일 때, 역세척 시간이 길어짐에 따라 충분한 역세척이 이루어져 농도분극현상 및 막오염물질이 막표면에 쌓이는 것을 감소시켜 막오염이 서서히 진행된 것으로 보인다. 또한, Fig. 7의 운전시간에 따른  $J/J_0$ 의 변화에서도 비슷한 결과를 나타내어 FT가 감소할수록  $J/J_0$



**Fig. 7.** Effect of back-flushing period (FT) on dimensionless permeate flux.

의 감소가 더욱 둔화되는 경향을 보인다. 그러나 NBF 조건에서 운전 초기부터 45분까지 가장 높은  $J/J_0$  값을 나타내다가, 역세척이 수행되는 조건에 비하여 60분 이후 급격하게 감소함을 알 수 있다.

결과적으로, BT 및 FT의 변화 실험에서 각각 가장 낮은  $R_{f,180}$ 와 가장 높은  $J_{180}$  및  $J_{180}/J_0$ ,  $V_T$ 를 나타낸 조건은 FT 10분, BT 20초와 FT 2분, BT 15초인데, 역세척 주기에 대한 역세척 시간의 비율(BT/FT)이 각각 0.033과 0.125이다. 동일한 운전조건에서 수행한  $0.1 \mu\text{m}$  정밀여과 세라믹 분리막의 결과[22]인 BT/FT 0.1과는 다른 값을 보이고 있는데, 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 분리막이 기공이  $0.05 \mu\text{m}$ 인 한외여과막이기 때문인 것으로 판단된다. BT 및 FT의 변화 실험에서 가장 우수한 두 조건을 비교하여 볼 때, FT 10분, BT 20초에서 적절한 여과시간이 확보되고 역세척이 충분히 길게 수행되면서 막오염의 억제에 더 효과적임을 알 수 있었으며, 상대적으로 더 높은 J와  $V_T$ 를 얻을 수 있었다. 따라서 본 실험 범위에서 FT 10분, BT 20초가 최

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

Items	Effect of BT		Effect of FT	
	Treated water	Rejection rate	Treated water	Rejection rate
TDS (mg/L)	107	1.0%	79	2.8%
Turbidity (NTU)	0.09	96.6%	0.15	97.4%
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	1.61	22.9%	2.95	41.4%
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	0.068	22.4%	0.105	35.2%
T-N (mg/L)	3.421	3.2%	3.687	8.3%
T-P (mg/L)	0.017	52.1%	0.033	56.7%

적 운전 조건임을 알 수 있었다.

### 3.3. 세라믹 한외여과막의 오염물질 제거율 및 처리수 수질

본 연구에 사용한 세라믹 한외여과막의 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 0.1 µm 정밀여과 세라믹 분리막의 결과[22,23] 92.9~94.7%와 88.0~92.0%보다 다소 증가된 BT 및 FT의 영향 실험에서 각각 96.6%와 97.4%로 높은 평균제거율을 보였으나, 총용존고형물(TDS)은 각각 1.0%와 2.8%로 거의 제거되지 않았으며 정밀여과 결과[22, 23] 0.7~1.4%와 0.7~5.5%보다 다소 증가한 값이다. 그리고 화학적 산소요구량(COD)은 BT 및 FT의 영향 실험에서 각각 22.9%와 41.4%, 암모니아성 질소는 각각 22.4%와 35.2%, 총질소는 각각 3.2%와 8.3%, 총인은 52.1%와 56.7%의 평균제거율을 보였다. 이러한 결과는 한외여과막의 기공크기보다 큰 원수 중의 부유성 유기물이나 미생물, 일부 콜로이드 물질 등이 체거름의 원리로 분리막에 의해 선택적으로 배제된 결과로 사료된다. 한편, FT 및 BT 영향 실험 결과를 비교하여 보면, TDS를 제외한 모든 측정 항목에서 수질이 좋지 않은 원수를 사용한 FT 영향 실험의 제거율이 BT 영향 실험의 값보다 다소 큰 값을 보였다. 이것은 분리막에 의한 정수처리 시 원수의 수질에 따른 처리수질의 변화가 크지 않다는 사실을 입증한 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 고도정수처리를 위한 세라믹 한외여과 시스템에서 막오염을 최소화하고 투과선속 감소를

해결하고자 처리수를 이용한 물 역세척을 수행 하였으며, 역세척 주기(FT) 및 역세척 시간(BT)를 변화 시키면서 그에 따른 최적의 운전조건을 규명하고자 하였다. 최적 운전조건은 투과선속(J)과 막오염에 대한 저항( $R_f$ ), 무차원화한 투과선속( $J/J_0$ ), 총여과부피( $V_T$ ) 측면에서 살펴보았다.

처리수를 이용하여 FT 10분으로 고정한 후 BT의 영향을 살펴 본 결과, NBF에 비해 주기적으로 역세척을 수행 하였을 때  $R_f$ 가 감소하고, J 및  $J/J_0$ 가 증가하는 것을 알 수 있었다. 그 결과, BT가 길어질수록 충분한 역세척이 이루어져 농도분극현상 및 막오염 물질이 막 표면에 쌓이는 것을 감소시켜 뚜렷한 역세척 효과를 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 180분 운전 후 BT가 20초일 때  $R_{f,180}$ 이  $0.954 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 최소였고 J 및  $J/J_0$ 가 가장 높게 유지되어 가장 많은  $V_T$ 인 10.73 L를 얻을 수 있었다.

또한 역세척 시간의 영향 실험 조건에서 BT 15초와 20초의 변화에 따른 막오염의 영향이 크지 않기에, BT를 15초로 고정하고 FT를 2분에서 10분으로 단계적으로 변화시키면서 FT의 증가에 따른 영향을 살펴 보았다. 그 결과, FT가 짧아질수록 역세척 효과가 뚜렷이 나타났고, NBF에 비해 180분 운전 후  $R_f$  저감 효과를 나타내었다. 또한, FT가 짧아질수록  $R_{f,180}$ 은 감소하고  $J_{180}$  및  $J_{180}/J_0$ ,  $V_T$ 는 증가하였으나, NBF 조건에서 가장 큰  $V_T$ 을 보였다. 이러한 결과는 NBF에서 운전 초기부터 60분까지 가장 높은 투과선속을 나타냈고 그 이후에도 FT 감소에 따른 투과선속의 증가폭이 크지 않기 때문에, FT 감소함에 따라 여과시간의 축소로  $V_T$ 가 감소한 것으로 판단된다.

BT 및 FT의 변화 실험에서 가장 우수한 두 조건을 비교하여 볼 때, FT 10분 BT 20초에서 적절한 여과시간이 확보되고 역세척이 충분히 길게 수행되면서 막오

염의 억제에 더 효과적으로, 더 높은 J와  $V_T$ 를 얻을 수 있었다. 따라서 본 실험 범위에서 FT 10분 BT 20초가 최적 운전 조건임을 알 수 있었다.

한편, 세라믹 한외여과막의 오염물질의 제거율은 탁도의 경우 0.1  $\mu\text{m}$  정밀여과 세라믹 분리막의 결과[22, 23]보다 다소 증가된 97.0%로 높은 평균제거율을 보였으나, 총용존고형물은 1.9%로 거의 제거되지 않았으며 정밀여과 결과[22,23] 보다 다소 증가한 값이다. 그리고 화학적 산소요구량은 32.1%, 암모니아성 질소는 28.8%, 총질소는 5.8%, 총인은 54.4%의 평균제거율을 보였다.

### 참 고 문 헌

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. Y. T. Lee and J. K. Oh, "A study on the optimization of process and operation condition for membrane system in tap water treatment", *Membrane Journal*, **9(4)**, 193 (1999).
6. M. H. Kim and J. Y. Park, "Membrane fouling control effect of periodic water-back-flushing in the tubular carbon ceramic ultrafiltration system for recycling paper wastewater", *Membrane Journal*, **11(4)**, 190 (2001).
7. Y. T. Lee and J. K. Oh, "Membrane fouling effect with organic-inorganic materials using the membrane separation in drinking water treatment process", *Membrane Journal*, **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. Elmeh, "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. Majumdara, 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  $\text{N}_2$ -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. Y. J. Yuk and K. H. Youm, "Enhancement of ultrafiltration performance using ultrasound", *Membrane Journal*, **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, "Inter-relationship of photooxidation and microfiltration



- in drinking water treatment”, *J. Membr. Sci.*, **281**, 541 (2006).
19. J. Y. Park, “Effect of water-back-flushing time on recovery efficiency in ceramic filtration system for paper wastewater treatment”, *Membrane Journal*, **14(4)**, 329 (2004).
  20. E. O. Kim, “Application of Ceramic Membrane”, *Membrane Journal*, **3(1)**, 12 (1993).
  21. S. K. Kang, K. H. Kim, H. S. Lee, and D. S. Bae, “R&D Trend and Information Analysis of Ceramic Membrane for Water Treatment”, *Korean Industrial Chemistry News*, **7(3)**, 83 (2004).
  22. J. Y. Park and A Reum Lee, “Effect of periodic water-back-flushing time and period in water treatment by tubular alumina ceramic microfiltration”, *Korean Membr. J.*, **10(1)**, 33 (2008).
  23. H. C. Lee, J. H. Cho, and J. Y. Park, “Effect of water-back-flushing time and period in advanced water treatment system by ceramic microfiltration”, *Membrane Journal*, **18(1)**, 26 (2008).
  24. Editorial Department of Dongwa Technology, “Standard Method of Water Pollution”, pp.133-204, Dongwa Technology Publishing Co., Gyeonggi, Korea (2002).
  25. 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).