

## 세라믹 여과 시스템으로 제지폐수 처리시 회수 효율에 대한 물 역세척 시간의 영향

박진용<sup>†</sup>

한림대학교 자연과학대학 환경시스템공학과  
(2004년 12월 3일 접수, 2004년 12월 17일 채택)

### Effect of Water-Back-Flushing Time on Recovery Efficiency in Ceramic Filtration System for Paper Wastewater Treatment

Jin Yong Park<sup>†</sup>

Department of Environmental System Eng., Hallym University, Chunchon 200-702, Korea  
(Received December 3, 2004, Accepted December 17, 2004)

**요약:** 본 연구에서는 4종류의 관형 세라믹 정밀 및 한외여과막(탄소 재질)으로 제지공장의 방류수를 물로 주기적 역세척하면서 여과하였을 때, 최적 역세척 시간을 규명하였다. 각 분리막에 대상으로 물 역세척 시간의 영향을 살펴 본 결과, 분리막의 기공이 클수록 길게 역세척 하는 것이 가장 많은 총여과부피, 즉 처리수의 회수 효율이 높기 때문에 가장 효과적이라 할 수 있다. 한편, 180분 동안 여과하면서 초기투과선속에 대한 투과선속의 변화를 살펴본 결과, 정상운전시간이 길수록 막오염이 많이 진행된 상태이므로 역세척 시간을 길게 해주어야만 막오염을 억제하여 높은 투과선속을 유지할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한, 막오염의 저항 변화 추이를 관찰하여 최적 물역세척 시간을 규명해 보아도, 투과선속의 변화로부터 얻은 최적 역세척 시간과 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

**Abstract:** In this study the discharged wastewater from paper manufacturing plant was filtrated by 4 kinds of tubular ceramic microfiltration and ultrafiltration membranes (carbon material) with periodic water-back-flushing, and we tried to find the optimum back-flushing time (BT). As results of water-BT effect for each ceramic membrane, the longer BT was more effective for a membrane having the larger pore size. And we could acquire the most volume of total permeate and the highest recovery efficiency of purified water. Then, the results of permeate flux vs. initial permeate flux during 180 min's operation showed that the longer BT was more effective for longer filtration time (FT) to obtain the higher permeate flux because membrane fouling proceeded deeply at long FT condition. And the optimum BT that founded from the trends of membrane fouling resistances almost accorded with the optimum BT from the trends of permeate flux, too.

**Keywords:** water-back-flushing, ceramic membrane, recovery efficiency, paper wastewater

#### 1. 서론

최근 막분리 공정의 응용 범위가 증가함에 따라 다양한 분리막의 개발에 대한 많은 연구가 시도되고 있고, 다양한 용도의 고분자 분리막 및 세라믹 막, 금속막 등이 개발되어 실용화 되고 있다. 분리막은 물질 선택투과성을 이용한 분리기술의 하나로 세계적으로 해수의 담수화, 폐수 재이용을 위한 고도 수처리 방법

으로 널리 사용되고 있다. 막을 사용한 정수처리공정은 단순한 시설과 조작으로 응집·침전·여과에 의한 종래의 정수처리 공정보다 우수한 처리수질을 얻을 수 있다. 또한 분리막 공정을 적용할 경우에 그 설비가 간소하여 설치면적에 대한 장애가 적고 물리적인 처리 방법이므로 폐수의 성질 상태의 변동에 따라서 처리수질이 크게 좌우되지 않고 비교적 안정적이며 양호하다. 하지만 분리막에 의한 정수처리공정의 경제성은 운전 동력비 및 투과 플럭스와 수명에 크게 좌우되는 데, 막의 수명은 운전할 때 발생하는 막오염과 가장

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

밀접한 관계를 갖는다. 투과선속을 감소시키는 주요 원인인 막오염은 막표면에 오염물질이 누적되는 것으로 정의되며 막오염의 주요 원인 물질로는 잉여 용존성 유·무기물질, 콜로이드성 또는 입자성 물질, 미생물 등이 있다[1].

본 연구에서 사용한 폐수는 제지폐수로, 일반적으로 제지공장의 폐수는 pH가 약산성이거나 중성이며 물에 쉽게 녹지 않는 유기질 섬유소류와 물과 전혀 반응성이 없는 무기질의 미소한 현탁성 부유물질을 많이 함유하고 있는 것이 특징이다. 따라서, 단시간에 처리하면 BOD가 매우 낮고 유독성 화학약품이 거의 없을 뿐만 아니라, 용존 불순물이 많지 않으므로 처리방법은 단순해진다. 또한, 다른 산업폐수와 특이한 차이는 현탁성 부유물만을 신속히 분리 제거하면 처리수의 상층액을 제지공업용수로 재순환 사용할 수 있다는 것이다. 다만 소량의 수용성 유기물이 있으며 이들이 농축되어서, 점도 증가와 미생물 번식문제가 대두되므로 이에 대해 배려할 필요가 있다. 본 연구에 사용한 제지폐수 또한 현탁성 부유물질과 콜로이드 농도가 높아 막오염이 쉽게 발생하였다.

오늘날 이러한 분리공정의 가장 큰 장애가 되는 막오염을 분석하고 해결하고자 많은 연구가 이루어지고 있다. 우선 R. S. Faibish 등은 제올라이트 세라믹 막으로 오일 에멀전 여과시 가역적인 오염과 비가역적인 오염이 일어나며 비가역적 오염으로 20% 정도의 투과수 감소를 나타내었다고 하였다[2]. R. Jiratananon 등은 시계꽃열매(passion fruit) 주스를 폴리설펜(poly-sulfone) 중공사막으로 한외여과 시 다양한 운전변수의 영향으로 발생하는 막오염 현상을 관찰하였다. 그리고 막오염을 일으키는 저항 등을 분석하였다[3].

이러한 막오염을 해결하고자 하는 연구 중 한 방법으로 Taylor 와류를 이용한 동역학적 여과와 회전판형 모듈을 이용한 막오염 방지 기술에 대한 연구가 이루어지고 있다[4,5]. 그리고 활발히 연구되는 것 중 하나가 역세척을 이용하여 막오염을 줄이는 방법이다. 역세척은 투과선속을 증대시키는 기술 중 하나로 오늘날 많이 사용된다. 역세척은 침전물이 막벽에 완전히 형성되거나 압밀화 되기 전에 제거하여 줄 수 있다. 한편, P. Srijaroonrat 등은 오일 에멀전 한외여과 시 역세척을 해줌으로써 투과수를 높게 유지함을 관찰하였다[6]. V.T. Kuberkar 등은 단백질 세포 혼합물(BSA, yeast)의 정밀여과 시 역세척을 해줌으로써 오염물층으로 발

생하는 저항을 줄일 수 있다고 하였다[7]. M. Heran 등은 교차흐름 정밀여과 시 높은 역세척 주기는 투과선속을 증가시킨다고 하였다[8]. 또한 S. Elmaleh 등은 직경이 서로 다른 관형 알루미늄 막을 사용하여 역세척 빈도의 효과를 보기위해 3가지 부유물질을 여과하여 높은 역세척 빈도가 부유물질 제거에 효과적이라는 것을 밝혔다[9]. Y. Soffer 등은 막여과시 부유고형물과 유기물 등을 응집시켜 전처리 해줌으로써 투과선속을 높게 얻을 수 있다고 하였다[10]. N. Laitinen 등은 100 nm의  $\alpha$ -알루미늄 세라믹막을 제조하여 폐수여과시 역세척을 해줌으로써 여과시 오염층 형성을 줄일 수 있다는 것을 관찰하였다[11]. 한편, 본 연구실에서는 제지폐수를 대상으로 관형 세라믹 한외 및 정밀여과막으로 처리하면서 주기적 물 역세척할 경우와 질소 역세척할 경우 최적 운전조건을 규명하기 위한 연구를 이미 수행한 바 있다[1,12].

이러한 앞선 연구를 바탕으로 이 논문에서는 탄소계 세라믹막 4종류를 사용하여 제지공장의 방류수를 재사용하기 위해 주기적으로 물 역세척하면서 여과하였을 때, 역세척 시간(Back-flushing time, BT)이 막오염에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 그 결과로부터 막오염을 최소화하고 최대의 처리수 회수율을 얻을 수 있는 최적의 역세척 시간을 찾고자 하였다. 한편, 원수 및 처리수의 수질을 평가하기 위하여 총용존 고형물, 화학적 산소요구량, 탁도를 조사하였다.

## 2. 이론

분리막을 이용하여 실험할 때, 공급탱크의 원수와 막을 투과한 투과수의 수질을 분석하였다. 그리고 막에 의한 오염물질의 제거율을 구하기 위해 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$\text{제거율}(\%) = \frac{\text{원수의 수질} - \text{투과수의 수질}}{\text{원수의 수질}} \times 100 \quad (1)$$

또한, 여과시간에 따른 투과선속을 구하기 위해 식 (2)를 이용하여 단위면적당 단위시간당 막표면을 투과하는 투과수의 부피로 표현하였다.

$$J \text{ (mL/m}^2 \cdot \text{sec)} = \frac{\text{투과량(mL)}}{\text{막표면적(m}^2\text{)} \times \text{시간(sec)}} \quad (2)$$

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

Material	Carbon (M8)	Carbon (M9)	Carbon (C005)	Carbon (C010)
MWCO (Daltons)	150,000	300,000	0.05 $\mu\text{m}$	0.1 $\mu\text{m}$
Outer diameter (mm)	10	10	8	8
Inner diameter (mm)	6	6	6	6
Length (mm)	250	250	250	250
Surfac area (cm <sup>2</sup> )	47.1	47.1	47.1	47.1

운전 중 막간에 걸리는 압력을 구하기 위하여 막 유입부와 유출부에 걸리는 압력을 합하여 평균을 계산하였다. 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = \frac{(P_i + P_o)}{2} \quad (3)$$

여기서  $P_i$ 는 유입압력(kg/cm<sup>2</sup>),  $P_o$ 는 유출압력(kg/cm<sup>2</sup>)이다.

위의 식을 이용하여 압력차를 추진력으로 하는 막분리 공정에서 발생하는 여과저항과 투과선속(Permeate flux,  $J$ )은 일반적으로 잘 알려진 직렬여과 저항 모델(Resistance-in-series model)에 의해서 식 (4)과 같이 표현할 수 있다[13].

$$J = \frac{\Delta P}{R_m + R_b + R_f} \quad (4)$$

여기서,  $J$ 는 투과선속이고,  $\Delta P$ 는 막간압력차,  $R_m$ 은 막 자체에 의한 저항,  $R_b$ 는 경계층에 의한 저항,  $R_f$ 는 막 오염에 의한 저항이다. 따라서 막을 통한 물질의 투과에 미치는 전체 저항( $R_{tot}$ )은  $R_m$  및  $R_b$ ,  $R_f$ 의 합으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P}{R_{tot}} \quad (5)$$

순수 투과시  $R_b$ 와  $R_f$ 는 존재하지 않으므로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P}{R_m} \quad (6)$$

순수의 투과선속  $J$ 값을 식 (6)에 대입하여  $R_m$ 을 구하였다. 또한  $R_b+R_f$ 에 대해 식 (1)을 정리하면 식 (7)와 같다.

$$R_b + R_f = \frac{\Delta P}{J} - R_m \quad (7)$$

식 (7)를 이용하여 구한  $R_b+R_f$  값을 시간에 대하여 도시한 후, 여과초기에 시간에 대하여 그 값이 선형적으로 증가하는 구간에서 최적 직선식을 구하였다. 구한 직선식을 연장하여  $t=0$  ( $R_t=0$ )에서의 값이  $R_b$ 가 된다. 이렇게 구한  $R_b$ 를  $R_b+R_f$ 에서 빼주면 시간 변화에 따른  $R_f$ 를 구할 수 있다.

### 3. 실험방법

#### 3.1. 세라믹 한외여과막의 특성

본 실험에 사용한 관형 세라믹 여과막은 Tech-Sep 회사 제품으로 탄소 재질의 분획분자량(MWCO) 150,000 daltons인 모델명 M8 및 분획분자량 300,000 daltons인 M9 한외여과막과, Koch사 제품으로 역시 탄소 재질의 평균기공 0.1  $\mu\text{m}$ 인 C010, 평균기공 0.05  $\mu\text{m}$ 인 C005 정밀여과막을 사용하였다. 이러한 4종의 관형세라믹에 대한 내경 및 길이, 막 유효면적을 Table 1에 제시하였다.

#### 3.2. 대상 시료수

본 연구에서는 우유 또는 주스 종이 용기를 재생하여 화장지를 생산하는 제지공장의 방류수를 사용하였는데, 각 실험마다 사용한 방류수의 수질분석 결과는 Table 2에 정리하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 방류수의 수질은 채수 시기에 따라 공장 가동을 때문에 다소 차이를 보이고 있다.

#### 3.3. 실험 장치

본 연구에서 사용한 물 역세척이 가능한 여과 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 공급탱크는 스테인레스 재질로 25 L 용량이며, 냉각수가 순환하는 동관 코일을 설치하여 온도를 일정하게 유지하였다. 제지폐수는

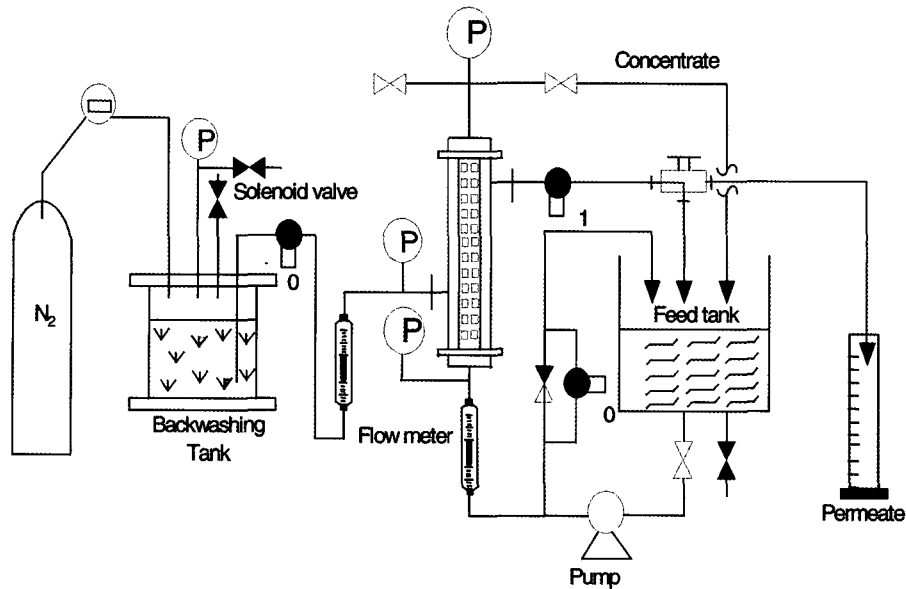


Fig. 1. Apparatus of ceramic membrane filtration with periodic water-back-flushing.

원심 펌프(SA55JXJFB-4917, Emerson, U.S.A.)에 의해 유량계(NP-127, TOKYO KEISO, Japan)로 이송되어 일정한 유량으로 세라믹막 모듈 내로 공급되는 내압 방식을 선택하였다. 그 이유는 사용한 분리막의 활성층이 관형 내부에 존재하기 때문이다. 또한, 막 모듈 입구와 출구에 각각 압력계를 설치하여 막 모듈내 압력차를 측정하였다.

역세척 시간 조절을 위하여 투과액 배출구와 역세척수 모듈내 투입구에 각각 솔레노이드 밸브(CKD, Japan)를 설치하였고, 막 투과압력에 관계없이 역세척 동안 막의 내부 압력을 일정하게 유지시켜주기 위하여 막의 우회관에 솔레노이드 밸브를 장착하였다. 세 개의 솔레노이드 밸브들은 모두 하나의 시간제어기(Omron, Japan)에 연결되어 밸브의 개폐가 동시에 일어난다. 역세척 시 공급수는 막 모듈 내로 공급되지 않고 우회관을 통해 배출되게 된다.

### 3.4. 실험운전방법 및 수질분석

실험은 공급탱크에 5 L의 폐수를 채우고 정상운전 시간(Filtration time, FT)을 30초 또는 60초로 일정하게 설정하고 이들 각각의 경우에 대해서 역세척 시간(BT)을 0, 2, 4, 6, 8초로 변화시켜 운전시간에 따른 투과선속의 변화를 관찰하였다. 이때 다른 운전변수인 TMP는  $1.55 \text{ kg/cm}^2$ 로, 유량은  $0.50 \text{ L/min}$ 로 각각의 운전 시 동일하게 유지하였다.

각각의 실험이 종료된 후 사용한 폐수를 배수한 후, 5 L의 증류수로 20분 동안 주기적 역세척 운전을 하면서 막을 세척하였다. 그 다음, 모듈에서 세라믹 분리막을 탈착하여 20% 질산 수용액에 2~3일간 담가두어, 막 기공내의 오염물질이 용해되어 나오도록 하였다. 새로운 운전 조건에서 가동하기 전에 막을 모듈에 설치한 후, 1차 증류수로 정상 운전하면서 투과량을 측정하여 막 성능의 회복 여부를 확인하였다.

막을 통한 오염물질 제거율의 산출을 위해 공급수 및 투과액의 농도 분석을 하였다. 수질 분석을 위하여 총용존 고형물 (TDS)은 Conductivity meter (MODEL 162, ATI ORION, U.S.A.)를 사용하여 측정하였고, 탁도 (Turbidity)는 Turbidimeter (DRT-15CE, HF Scientific Inc., U.S.A.)로 측정하였다. 한편, 화학적 산소요구량 (COD)은 중크롬산법으로 측정하였다[14].

## 4. 결과 및 고찰

본 연구에서 B제지공장의 방류수를 대상으로 4종의 탄소 재질의 관형 세라믹 정밀 및 한외여과막을 사용하여 1차 증류수로 주기적 역세척하면서 막오염 현상의 진행과정을 다음과 같이 고찰하였다. 역세척 주기 및 막간압력차, 유량변화에 따라 최적 운전조건을 무차원 최종투과선속( $J_{180}/J_0$ )과 막오염에 의한 최종저항( $R_{f,180}$ ), 경계층에 의한 저항( $R_b$ ), 총여과부피( $V_T$ ) 측면

**Table 2.** The Quality of Wastewater Used in This Study

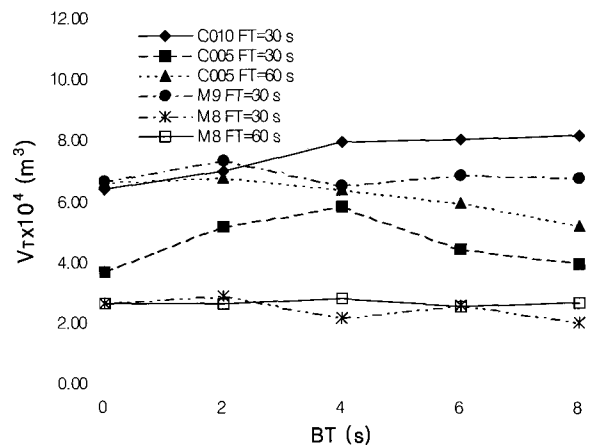
Items	Carbon M8		Carbon M9		Carbon C005 (FT=30 s)		Carbon C005 (FT=60 s)		Carbon C010	
	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average
Turbidity (NTU)	8.70~23.3	12.2	2.90~ 8.00	5.38	22.8~ 28.2	25.2	4.33~ 4.78	4.51	3.85~ 5.19	4.33
COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	94.3~144.3	114.5	73.0~151.7	125.9	72.5~88.5	80.9	92.5~120.5	106.7	101.0~106.0	101.5
TDS (mg/L)	94~ 148	119	147~ 180	172	740~ 806	625	440~490	463	4591~5861	5421

**Table 3.** Rejection Rates of Various Tubular Ceramic Membranes Used in This Study

Items	Carbon M8		Carbon M9		Carbon C005 (FT=30 s)		Carbon C005 (FT=60 s)		Carbon C010	
	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average
Turbidity (%)	86.5~96.3	91.4	93.8~ 97.0	94.9	87.2~ 96.6	90.5	73.6~ 80.9	75.7	83.2~ 95.8	88.7
COD <sub>Cr</sub> (%)	57.8~89.9	75.7	18.4~69.3	56.6	29.4~65.5	52.5	72.9~74.3	73.3	59.1~68.2	61.6
TDS (%)	32.1~78.1	59.2	13.1~55.9	42.3	58.4~84.9	77.4	14.5~64.6	52.6	21.3~61.7	40.6

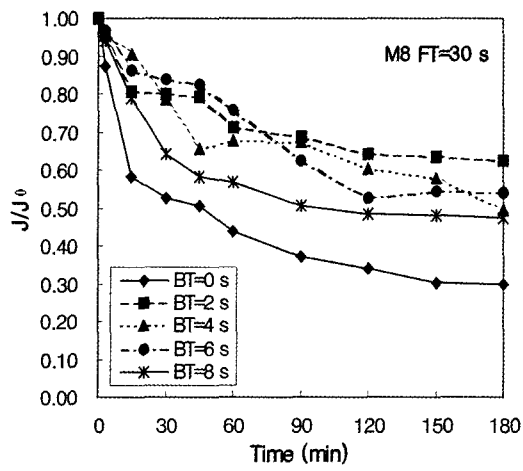
에서 살펴보았다.  $J_{180}/J_0$ 는 최종투과선속( $J_{180}$ )을 초기투과선속( $J_0$ )의 비로 무차원화한 값이다. 이때 총여과부피는 역세척 시간 동안 얻을 수 없기 때문에, 순수한 정상운전시간에 대하여 측정된 투과선속을 사용하여 수치적분법(Numerical integration method)으로 계산하였다. 각 운전 조건에서 공급수와 투과수를 분석하여 얻은 탁도, 총용존고형물, 화학적 산소요구량의 평균 제거율을 Table 3에 나타내었다. 제거율은 막의 분획분자량이 증가함에 따라 작은 변화를 보이고 있다. 실험에 사용한 4종류의 분리막은 M8, M9, C005, C010의 순서로 분획분자량이 증가한다. 탁도의 경우는 사용한 분리막의 분획분자량이 커질수록 평균제거율이 다소 감소하는 경향을 나타냈으나, COD<sub>Cr</sub>와 TDS의 평균제거율은 분획분자량에 상관없이 거의 일정하게 나타났다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 사용한 한외 및 정밀여과막의 기공이 크기 때문에 탁도는 76% 이상 제거되지만 COD<sub>Cr</sub>와 TDS는 상대적으로 일부만 제거되므로, 탁도의 평균제거율은 사용한 분리막의 기공 즉 분획분자량의 영향을 뚜렷하게 받은 것이다.

4종의 세라믹 분리막을 사용하여 정상운전시간 FT를 30초와 60초로 고정한 후, 역세척 시간 BT 변화에 따른 총여과부피를 도시한 것이 Fig. 2이다. 그 결과를 살펴보면, 분획분자량이 상대적으로 작은 M8과 M9, C005 한외여과막을 사용한 경우 BT를 2초 또는 4초로 짧게 해 줄 경우 동일하게 180분 동안 다소 높은 총여과부피를 얻을 수 있었다. 특히 C005를 사용하여 FT 30초로 운전할 경우 BT를 4초로 하는 것이 비교적

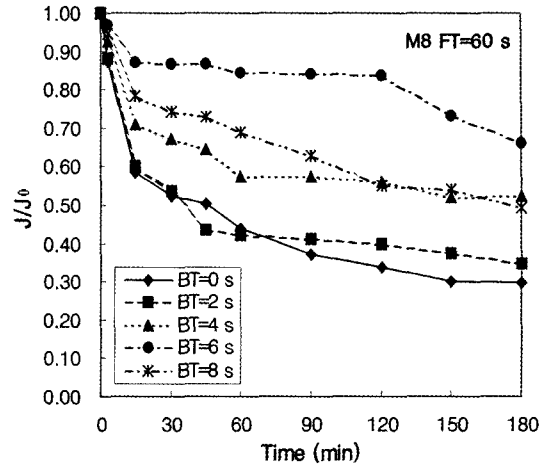


**Fig. 2.** Optimal back-flushing time after 3 hrs' operation (TMP=1.55 kg/cm<sup>2</sup>, flow rate=0.50 L/min).

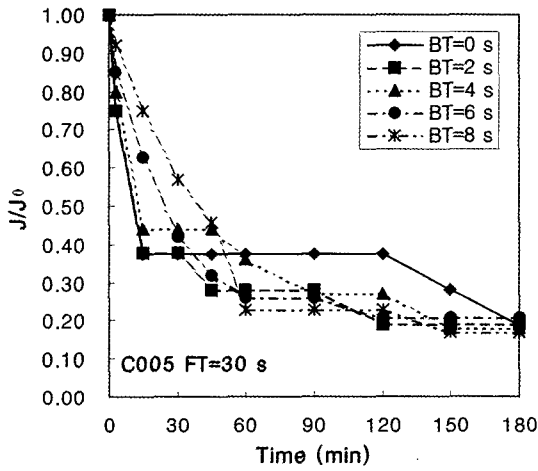
뚜렷하게 많은 총여과부피, 즉 처리수를 얻을 수 있었다. 반면에 본 연구에서 사용한 분리막 중 유일하게 정밀여과막인 C010의 경우 BT를 8초로 길게 역세척을 해주어야만 상대적으로 많은 총여과부피를 얻을 수 있었다. 한편, 본 연구에서는 각 분리막으로 동일한 FT 조건 실험에 동일한 폐수를 사용하였기 때문에, 역세척 효과에 대한 폐수 수질의 영향을 최소화할 수 있었다. 또한, 다른 분리막에 비하여 C010의 기공이 가장 크기 때문에 동일한 시간에 가장 많은 처리수를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 사용하는 분리막의 분획분자량, 즉 기공이 작을수록 역세척 시간을 짧게 해 주는 것이 유리하다는 것을 의미한다. 본 연구실의 앞선 연구[1]에서는 역세척 주기의 영향을 살펴보았는데, 본



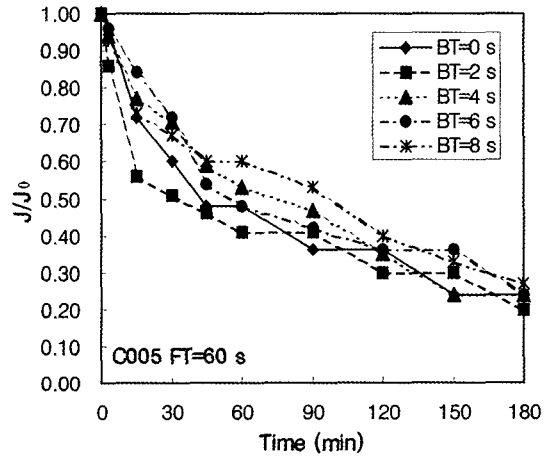
(a) M8 membrane at FT=30 s



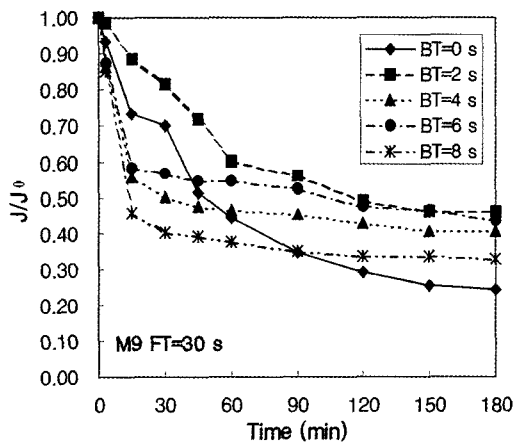
(b) M8 membranes at FT=60 s



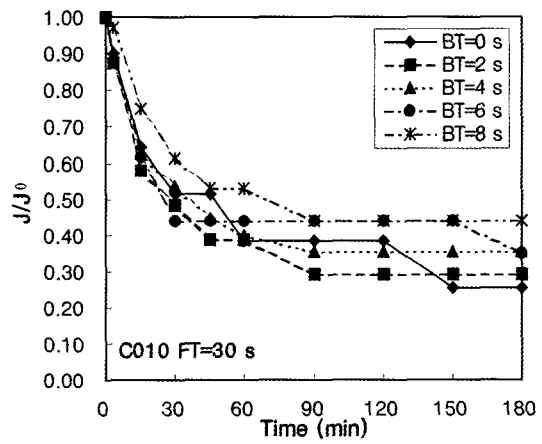
(c) C005 membrane at FT=30 s



(d) C005 membranes at FT=60 s

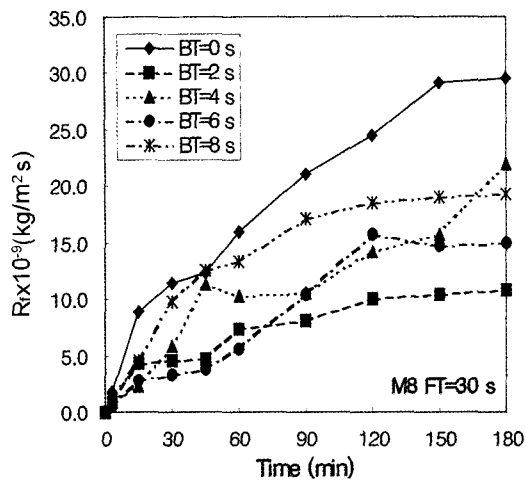


(e) M9 membrane at FT=30 s

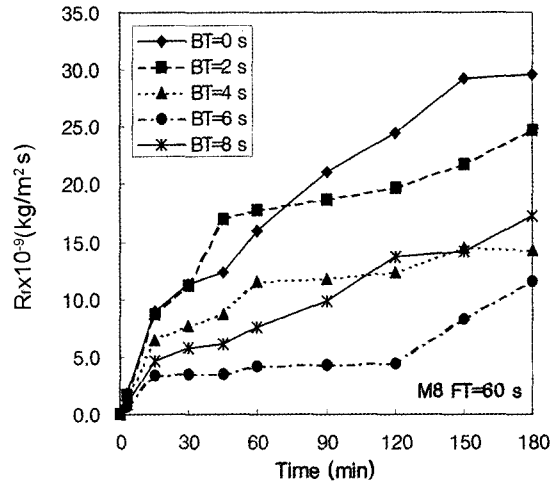


(f) C010 membranes at FT=30 s

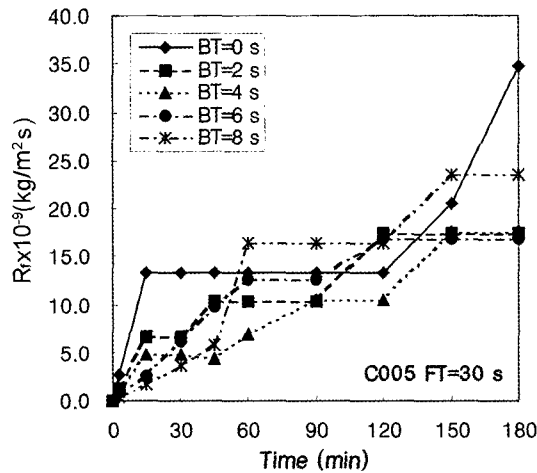
**Fig. 3.** Effect of the back-flushing time on the dimensionless permeate flux for the various tubular ceramic membranes (TMP=1.55 kg/cm<sup>2</sup>, Flow rate=0.50 L/min).



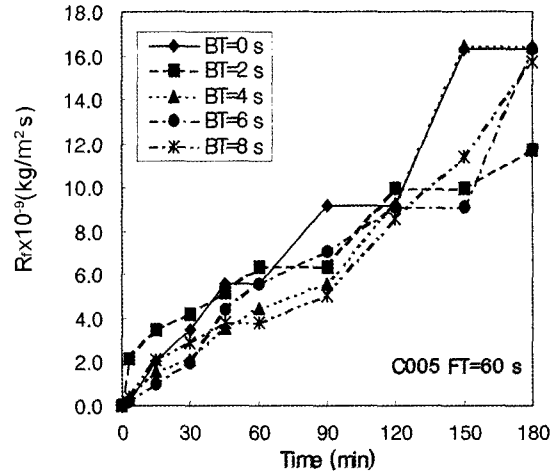
(a) M8 membrane at FT=30 s



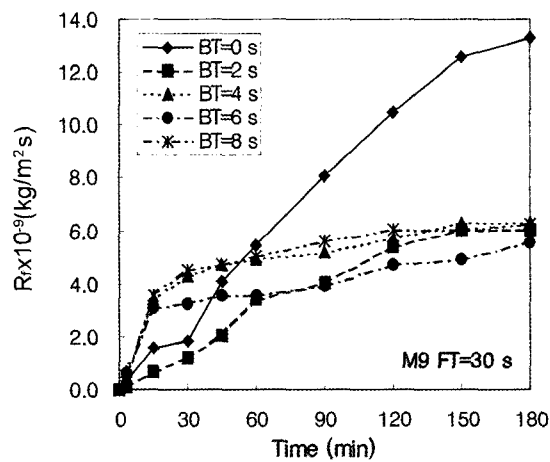
(b) M8 membranes at FT=60 s



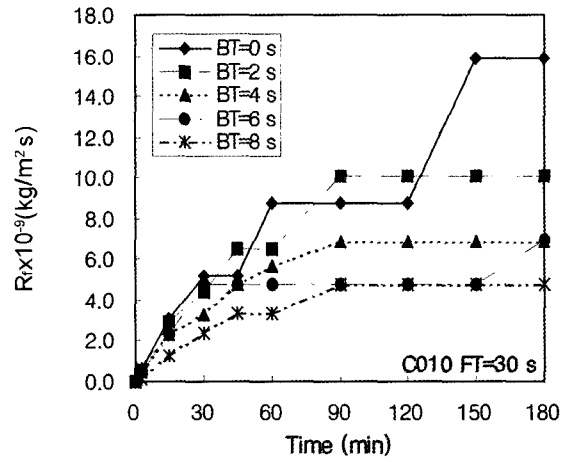
(c) C005 membrane at FT=30 s



(d) C005 membranes at FT=60 s



(e) M9 membrane at FT=30 s



(f) C010 membranes at FT=30 s

**Fig. 4.** Effect of the back-flushing time on the resistance of membrane fouling for the various tubular ceramic membranes (TMP=1.55 kg/cm<sup>2</sup>, Flow rate=0.50 L/min).

**Table 4.** Resistances of Membrane, Boundary Layer, and Fouling in This Study

Membrane	FT (s)	BT (s)	$R_m \times 10^{-9}$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$R_b \times 10^{-9}$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$R_{f,180} \times 10^{-9}$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$V_T \times 10^4$ (m <sup>3</sup> )
M8	30	0	9.33	<b>3.20</b>	29.5	2.61
		2	9.17	8.82	<b>10.8</b>	<b>2.86</b>
		4	9.71	11.8	21.9	2.13
		6	9.87	7.57	14.9	2.55
		8	9.36	8.08	19.3	1.97
	60	0	9.33	<b>3.20</b>	29.5	2.61
		2	8.87	4.20	24.6	2.58
		4	9.48	6.26	14.3	<b>2.77</b>
		6	11.2	11.6	<b>11.6</b>	2.53
		8	9.17	7.54	17.3	2.63
M9	30	0	2.47	1.85	13.3	6.62
		2	2.69	2.53	6.04	<b>7.33</b>
		4	2.79	<b>1.54</b>	6.27	6.49
		6	2.79	<b>1.54</b>	<b>5.56</b>	6.84
		8	2.92	1.20	6.23	6.76
C005	30	0	2.86	5.17	34.8	3.65
		2	2.86	1.16	<b>17.4</b>	5.13
		4	2.86	<b>0.948</b>	17.6	<b>5.80</b>
		6	2.86	1.67	16.9	4.41
		8	2.86	2.06	23.6	3.95
	60	0	2.86	2.27	16.3	6.58
		2	2.86	<b>1.49</b>	<b>11.7</b>	<b>6.75</b>
		4	2.86	2.19	16.4	6.38
		6	2.86	2.29	16.3	5.92
		8	2.86	2.84	15.7	5.19
C010	60	0	1.13	4.38	15.9	6.36
		2	1.13	3.04	10.1	6.97
		4	1.13	2.70	6.88	7.93
		6	1.13	2.66	6.93	8.01
		8	1.13	<b>2.64</b>	<b>4.80</b>	<b>8.15</b>

연구에서 사용한 4종의 세라믹 분리막 모두 물 역세척을 빈번하게 할수록 많은 총여과부피를 얻을 수 있었다. 두 연구 결과를 종합하여 보면, 세라믹 분리막의 물 역세척은 빈번한 것이 유리하지만, 분리막의 기공이 클수록 장시간 역세척 하는 것이 처리수의 회수 효율이 높아 효과적이라 할 수 있다.

Fig. 3에는 4종의 분리막을 사용하여 다른 역세척 시간에서 운전할 경우 초기 투과선속으로 무차원화한 투과선속( $J/J_0$ )이 어떻게 변화하는지 비교하여 나타내었다. 분획분자량 150,000인 M8의 경우 FT 30초 조건에서는 BT 2초일 때  $J/J_0$ 가 가장 서서히 감소하여 180분 운전 후 가장 높은 값을 유지하였으나, FT 60초 조건에서는 역세척 시간을 다소 늘린 BT 6초에서 가장 높은 값을 보였다. 또한, 평균기공 0.05  $\mu\text{m}$ 인 C005의 경우 M8의 경우처럼 뚜렷한 차이를 보이고 있지는 않지만 역시 FT 30초에서는 BT 6초가 FT 60초에서는 BT 8초가 가장 높은  $J/J_0$ 값을 보여 주고 있다. 이러한

결과는 정상운전시간이 길수록 막오염이 많이 진행된 상태이므로, 역세척 시간을 길게 해주어야만 막오염을 억제하여 높은 투과선속을 유지할 수 있다는 것을 보여 주는 것이다. 분획분자량 300,000인 M9의 경우에는 FT 30초에서 BT 2초일 때 가장 높은  $J/J_0$ 값을 나타냈으나, 평균기공 0.1  $\mu\text{m}$ 인 C010의 경우에는 BT 8초로 가장 길게 역세척 해주었을 때 가장 큰 값을 유지할 수 있었다. C010의 결과는 총여과부피 측면에서 살펴본 결과와 정확히 일치하게 BT 8초가 가장 유리한 것으로 나타난 것이다.

막오염저항( $R_f$ )가 물 역세척 시간에 따라 어떻게 영향을 받는지 정리한 것이 Fig. 4이다. M8 한외여과막의 경우는 Fig. 3의 결과를 뒷받침 해주듯이 FT 30초 조건에서는 BT 2초일 때  $R_f$ 가 가장 서서히 증가하여 180분 운전 후 가장 낮은 값을 유지하였으나, FT 60초 조건에서는 역세척 시간을 다소 늘린 BT 6초에서 가장 낮은 값을 보였다. 물론 물 역세척을 전혀 시행하



지 않은 BT 0초에서 가장 높은  $R_f$ 값을 나타내었다. 한편, C005 한외여과막의 경우 FT 30초 조건에서는 BT 6초일 때 가장 낮은  $R_f$ 값을 보여주어 Fig. 3의 최적조건과 동일하였으나, FT 60초 조건에서는 BT 2초로 오히려 짧게 역세척 해주는 것이 가장 낮은  $R_f$ 값을 나타내어 막오염 저항을 가장 잘 억제할 수 있는 것으로 나타났다. M9의 경우에도 역시 Fig. 3의 최적조건과 다르게 BT 6초가 막오염저항 억제에 가장 유리한 것으로 보인다. 하지만, C010의 경우는 Fig. 3의 최적조건과 동일한 BT 8초로 가장 길게 역세척해 주는 것이 유리하다는 것을 보여주고 있다.

한편, 본 연구의 실험결과로부터 구한 막 자체의 저항( $R_m$ ) 및  $R_b$ ,  $R_f$ 가  $V_T$ 에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Table 4에 정리하였다. 각 조건에서 막분리의 유리한 조건인 최소 저항값과 최대  $V_T$ 를 Table 4에 굵은 글씨로 표시하였다. 각 실험 개시 전에 세라믹 막의 충분한 산세정과 역세척을 통하여 순수에 대한 초기투과선속을 일정하게 유지하였기 때문에,  $R_m$ 은 각 세라믹마다 고유한 값을 거의 일정하게 나타났다.  $R_b$ 는 역세척 시간 BT에 따라 변화하였는데, C005와 C010 정밀여과막의 경우 최소  $R_b$ 일 때 최대  $V_T$ 값을 보여주었다. 반면에 M8과 M9 한외여과막의 경우에는  $R_b$ 가  $V_T$ 에 직접적으로 영향을 미치지 않고,  $R_f$ 가  $V_T$ 에 더 결정적인 영향을 미치는 것으로 보인다.

## 5. 결론

본 연구에서는 분리막 운전 중 막오염으로 인한 급격한 투과선속 감소를 해결하고자, 4종의 관형 세라믹 여과막에 대한 최적 물 역세척 시간을 규명하고자 하였다. 최적의 역세척 시간은 오염물질에 의한 저항( $R_f$ ), 경계층에 의한 저항( $R_b$ ), 총여과부피( $V_T$ ), 그리고 시간에 따른 투과선속을 초기투과선속으로 무차원화한  $J/J_0$  측면에서 살펴보았다. 본 연구에서 사용한 탄소계막의 총평균 제거율은 TDS의 경우 41%이었으나, 탁도의 경우는 76%가 넘는 높은 제거율을 보였고,  $COD_{Cr}$ 의 경우는 53% 이상이었다. 그러나, 이러한 오염물질의 제거율은 운전조건에 따라 거의 변화하지 않고 비슷한 제거율을 보였다.

4종의 분리막에 대상으로 물 역세척 시간의 영향을 살펴 본 결과, 분리막의 기공이 클수록 장시간 역세척

하는 것이 가장 많은 총여과부피, 즉 처리수의 회수 효율이 높기 때문에 가장 효과적이라 할 수 있다. 180분 동안 여과하면서 초기투과선속에 대한 투과선속의 변화를 살펴본 결과, 정상운전시간이 길수록 막오염이 많이 진행된 상태이므로 역세척 시간을 길게 해주어야만 막오염을 억제하여 높은 투과선속을 유지할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한, 막오염의 저항 변화 추이를 관찰하여 얻은 최적 물역세척 시간과, 무차원 투과선속의 변화로부터 얻은 최적 역세척 시간도 역시 총여과부피 측면에서 구한 최적 역세척 시간과 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

## 감 사

이 논문은 2003년도 한림대학교 교비연구비(HRF-2003-39)에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김미희, 박진용, "제지폐수 재활용을 위한 관형 탄소계 세라믹 한외여과장치에서 물 역세척의 막오염 제어 효과", *멤브레인*, **11**(4), 190~203 (2001).
2. R. S. Faibish and Y. Cohen, "Fouling and rejection behavior of ceramic and polymer-modified ceramic membranes for ultrafiltration of oil-in-water emulsions and microemulsions", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **191**, 27~40 (2001).
3. R. Jiratananon and A. Chanachai, "A study of fouling in the ultrafiltration of passion fruit juice", *J. Membrane Sci.*, **111**, 39~48 (1996).
4. J. Y. Park, C. K. Choi, and J. J. Kim, "A study on dynamic separation of silica slurry using a rotating membrane filter: 1. experiments and filtrate fluxes", *J. Membrane Sci.*, **97**, 263~273 (1994).
5. C. K. Choi, J. Y. Park, W. C. Park, and J. J. Kim, "A study on dynamic separation of silica slurry using a rotating membrane filter: 2. modeling of cake formation", *J. Membrane Sci.*, **157**, 177~187 (1999).
6. P. Srijaroonrat, E. Julien, Y. Aurelle, "Unstable

- secondary oil/water emulsion treatment using ultrafiltration: fouling control by backflushing”, *J. Membrane Sci.*, **159**, 11~20 (1999).
7. V. T. Kuberkar and R. H. Davis, “Microfiltration of protein-cell mixtures with crossflushing or backflushing”, *J. Membrane Sci.*, **183**, 1~14 (2001).
  8. M. Heran and S. Elmaleh, “Cross-flow microfiltration with high frequency reverse flow”, *Water Sci. & Tech.*, **41**(10-11), 337~343 (2000).
  9. M. Heran and S. Elmaleh, “Microfiltration through an inorganic tubular membrane with high frequency retrofiltration”, *J. Membrane Sci.*, **188**, 181~188 (2001).
  10. Y. Soffer, R. B. Aim, and A. Adin, “Membrane for water reuse: effect of pre-coagulation on fouling and selectivity”, *Water Sci. & Tech.*, **42**(1-2), 367~372 (2000).
  11. N. Laitinen, D. Michand, C. Piquet, N. Teillera, A. Luonsi, E. Levanen, and M. Nystrom, “Effect of filtration conditions and backflusing on ceramic membrane ultrafiltration of board industry wastewaters”, *Separation & Purification Tech.*, **24**, 319~328 (2001).
  12. 황현정, 박진용, “탄소계 세라믹 한외 및 정밀 여과막으로 제지폐수 처리시 주기적 질소 역세척의 효과”, *멤브레인*, **12**(1), 11~23 (2002).
  13. M. Cheryan, “Ultrafiltration Handbook”, Technomic Pub. Co., Pennsylvania (1984).
  14. 옥치상, 백병천, 박송웅, 김동식, “수질측정 및 수처리실험”, 지구문화사 (1996).