

제지폐수 재활용을 위한 관형 탄소계 세라믹 한외여과장치에서 물 역세척의 막오염 제어 효과

김 미 희 · 박 진 용[†]

한림대학교 생명과학부 환경시스템공학 전공
(2001년 10월 30일 접수, 2001년 12월 3일 채택)

Membrane Fouling Control Effect of Periodic Water-back-flushing in the Tubular Carbon Ceramic Ultrafiltration System for Recycling Paper Wastewater

Mi Hee Kim · Jin Yong Park[†]

Division of Life Science, Hallym University, 1 Okchon, Chunchon, KOREA 200-702
(Received October 30, 2001, Accepted December 3, 2001)

요 약 : 본 연구에서는 4종류의 탄소계 관형 세라믹막으로 제지공장의 방류수를 물로 주기적 역세척하면서 한외여과하였을 때, 물 역세척 주기와 막간압력차 (TMP), 유량의 영향과 최적운전조건을 규명하였다. 역세척 시간(BT)은 3초로 고정하였고, 역세척 주기(FT)는 여과시간을 15~60초로, TMP는 1.00~2.50 kg/cm²로, 유량은 0.25~1.75 L/min로 변화시켜 가면서 각각 그 영향을 살펴보았다. 또한, 최적조건은 무차원 투과선속 (J/J₀) 및 총 여과부피 (V_T), 막오염에 의한 저항 (R_f)의 측면에서 고찰하였다. 그 결과 최적 역세척 주기는 BT/FT=0.20로, 빈번한 역세척은 막오염을 감소시켰다. 한편, V_T 측면에서 최적 TMP는 1.00~1.55 kg/cm²로 TMP 증가는 막오염을 심화시켜 투과선속을 감소시켰으나, 유량 증가는 막오염을 감소시켜 투과선속을 증가시키는 경향을 보였다. 본 연구에서 사용한 탄소계 세라믹 분리막에 의한 오염물질 제거율은 탁도의 경우 88~98%로 높았으나, COD_{cr}의 경우 48~72%, 총용존고형물 (TDS)의 경우 37~76%였다.

Abstract : In this study the discharged wastewater from a paper plant was filtrated by 4 kinds of tubular carbon ceramic ultrafiltration membranes with periodic water-back-flushing. We could investigate effects of water-back-flushing period, transmembrane pressure (TMP) and flow rate, and find optimal operating conditions. The back-flushing time (BT) was fixed at 3 sec, and filtration times (FT) were changed in 15~60 sec, TMP in 1.00~2.50 kg/cm², and the flow rates in 0.25~1.75 L/min. The optimal conditions were discussed in the viewpoints of dimensionless permeate flux (J/J₀), total permeate volume (V_T) and resistance of membrane fouling (R_f). Optimal back-flushing period was BT/FT=0.20, suggesting that the frequent back-flushing should decrease membrane fouling. Optimal TMP in the viewpoint of V_T was 1.00~1.55 kg/cm², suggesting that rising TMP should increase membrane fouling and decrease permeate flux. But, rising flow rate should decrease membrane fouling and increase permeate flux. Then, average rejection rates of pollutants filtrated by carbon ceramic membranes were 88~98 % for turbidity, 48~72% for COD_{cr} and 37~76% for TDS.

Keywords : water-back-flushing, fouling, ceramic membrane, paper wastewater

[†]주저자(e-mail : jypark@hallym.ac.kr)

1. 서 론

막분리 공정의 응용 범위가 증가함에 따라 다양한 분리막의 개발에 대한 많은 연구가 시도되고 있고, 고분자 분리막 및 세라믹 막, 금속막 등이 실용화되고 있다. 분리막은 물질 선택투과성을 이용한 분리기술의 하나로 세계적으로 해수의 담수화, 폐수 재이용을 위한 고도 수처리 방법으로 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 변동등에 따라서 처리수질이 크게 좌우되지 않고 비교적 안정적이며 양호하다. 하지만 분리막에 의한 정수처리공정의 경제성은 운전동력비 및 투과 플럭스와 수명에 크게 좌우되는데, 막의 수명은 운전할 때 발생하는 막오염과 가장 밀접한 관계를 갖는다 [1,2]. 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.

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, 용존불순물이 많지 않으므로 처리 방법은 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[3]. 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[4]. R. Jiratananon 등은 시계꽃열매(passion fruit) 주스를 폴리스ulfone(polysulfone) 중공사막으로 한외여과시 다양한 운전 변수의 영향으로 발생하는 막오염 현상을 관찰하였다.

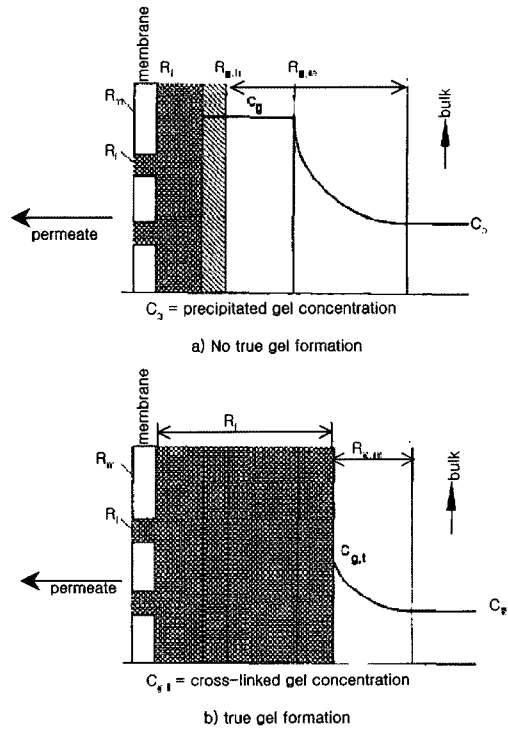


Fig. 1. A conceptual model for resistances [5]

그리고 막오염을 일으키는 저항등을 분석하여 대략적인 개념을 Fig. 1과 같이 표현하였다. 그림에서 R_m 은 막이 가지는 고유의 저항이고, R_{pre} 는 가역적으로 낮은 유량 세척으로 제거 가능하다고 하였다. $R_{d,ir}$ 은 비가역적인 저항과 가역적인 저항의 중간 저항으로 높은 유량으로 세척이 가능한 저항이고, R_f 는 오염물질에 의한 비가역적인 저항으로 제거가 되지 않는 저항을 나타낸다[5]. 본 연구에서는 저항 R_{pre} 및 $R_{d,ir}$, R_f 의 합을 막오염에 의한 저항 R_f 로 보았다.

이러한 막오염 분석과 함께 막오염을 해결하고자 하는 연구 중 한 방법으로 Taylor 와류를 이용한 동역학적 여과[6,7]와 회전판형 모듈을 이용한 막오염 방지 기술에 대한 연구가 이루어지고 있다. 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 한외여과시 역세척을 해줌으로 투과수 높게 유지함을 관찰하였다[8]. R. H. Davis 등은 단백질 세포 혼합물 (BSA, yeast)의 정밀여과시 역세척을 해줌으로써 오염물층으로 발생하는 저항을 줄

일 수 있다고 하였다[9]. M. Heran 등은 교차흐름 정밀여과시 높은 역세척 주기는 투과선속을 증가시킨다고 하였다[10]. 또한 S. Elmaleh 등은 직경이 서로 다른 관형 알루미늄 막을 사용하여 역세척 빈도의 효과를 보기 위해 3가지 부유물질을 여과하여 높은 역세척 빈도가 부유물질 제거에 효과적이라는 것을 밝혔다[11]. Y. Soffer 등은 막여과시 부유고형물과 유기물등을 응집시켜 전처리 해줌으로써 투과선속을 높게 얻을 수 있다고 하였다[12]. N. Laitinen 등은 100 nm의 α -알루미나 세라믹막을 제조하여 폐수여과시 역세척을 해줌으로써 여과시 오염층 형성을 줄일 수 있다는 것을 관찰하였다[13].

본 연구에서는 탄소계 세라믹막 4종류를 사용하여 제지공장의 방류수를 재사용하기 위해 주기적으로 물 역세척하면서 한외여과하였을 때 운전조건에 따른 막 오염 진행을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 역세척 주기 (BT/FT)와 막간압력차(TMP), 유입유량을 변화시키면서 실험하였다. 그 결과로부터 막오염을 최소화할 수 있는 최적의 운전조건을 찾고자 하였다. 원수 및 처리수의 수질을 평가하기 위하여 총용존 고형물, 화학적 산소요구량, 탁도를 조사하였다.

2. 이 론

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)을 이용하여 단위면적당 단위시간당 막표면을 투과하는 투과수의 부피로 표현하였다.

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

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/cm²), P_o 는 유출압력(kg/cm²)

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[14].

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

여기서, J 는 투과선속이고, ΔP 는 막간압력차, R_m 은 막자체에 의한 저항, R_b 는 경계층에 의한 저항, R_f 는 막오염에 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 $t=0$ ($R_f=0$)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 세라믹 한외여과막은 Tech-Sep 회사 제품으로 분획분자량 (MWCO)이 150,000 daltons인 모델명 M8 탄소막 및 분획분자량이 300,000 daltons인 M9 탄소막, Koch사 제품의 기공 0.1 μm

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 μm	0.1 μm
Outer diameter (mm)	10	10	8	8
Inner diameter (mm)	6	6	6	6
Length (mm)	250	250	250	250
Surfac area (cm^2)	47.1	47.1	47.1	47.1

Table 2. The quality of wastewater used in this study.

Items	Carbon M8		Carbon M9		Carbon C005		Carbon C010	
	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average
Turbidity (NTU)	8.00~8.60	8.32	3.00~5.00	4.00	4.14~14.4	9.3	7.30~7.84	7.6
COD (mg/L)	4.9~8.6	7.3	40~60	50	92~205	149	142~165	153
TDS (mg/L)	213~224	219	380~415	397	4706~5703	5291	4511~4701	4606

인 탄소막 C010과 기공 0.05 μm 인 탄소막 C005막을 사용하였다. 이러한 4종의 관형세라믹에 대한 특성을 Table 1에 제시하였다.

3.2. 대상 시료수

본 연구에서는 우유 또는 쥬스 종이 용기를 재생하여 화장지를 생산하는 제지공장의 방류수를 사용하였다. 사용한 방류수의 수질분석 결과를 Table 2에 제시하였다. 원수의 수질은 채수 시기에 따라 약간의 수질 차이를 보이고 있다.

3.3. 실험 장치

본 연구에 사용한 한외여과 실험장치를 Fig. 2에 나타내었다. 공급탱크는 스테인레스 재질로 25 L 용량이며, 냉각수가 순환하는 동관 코일을 설치하여 온도를 일정하게 유지하였다. 제지폐수는 원심 펌프(SA55JXJFB-4917, Emerson, U.S.A.)에 의해 유량계(NP-127, TOKYO KEISO, Japan)로 이송되어 일정한 유량으로 세라믹막 모듈 내로 공급된다. 막 모듈 입구와 출구에 각각 압력계를 설치하여 막 모듈내 압력차를 측정하였다.

역세척 시간조절을 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

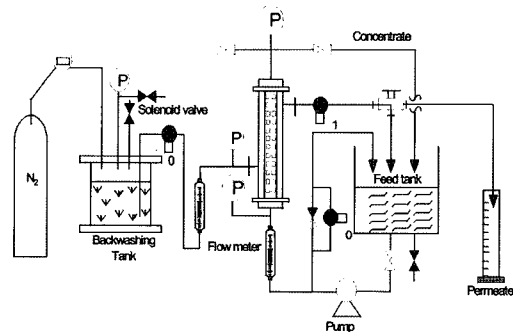


Fig. 2. Apparatus of ultrafiltration with periodic water-backflushing.

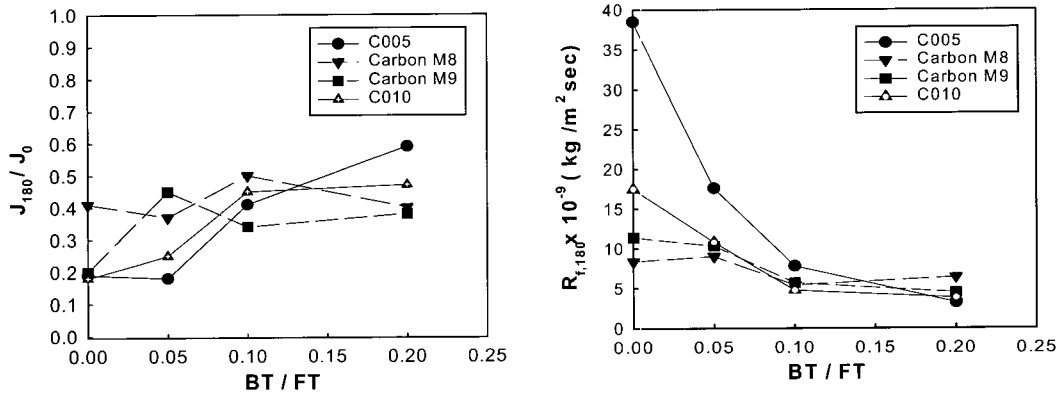
개의 솔레노이드 밸브들은 모두 하나의 시간제어계(Omron, Japan)에 연결되어 밸브의 개폐가 동시에 일어난다. 역세척시 공급수는 막 모듈 내로 공급되지 않고 우회관을 통해 배출되게 된다.

3.4. 실험운전방법 및 수질분석

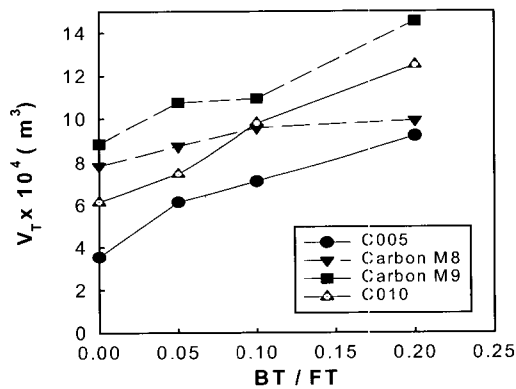
실험은 공급탱크에 5 L의 폐수를 채우고 역세척 시간을 3초로 일정하게 설정하고 이들 각각의 경우에 대해서 정상운전시간을 15, 30, 60초로 변화시켜 운전 시간에 따른 투과선속의 변화를 관찰하고, 역세척을 하지 않았을 때의 결과와 비교하였다. 이때 다른 운전 변수인 TMP는 1.55 kg/cm^2 로, 유량은 0.50 L/min로 각각의 운전시 동일하게 유지하였다. TMP에 대한

Table 3. Average rejection rates of various tubular ceramic membranes used in this study.

	Back-flushing period BT/FT: 0.00~0.20 (BT=3 sec, FT=15~60 sec)				TMP (kg/cm ²) 1.00~2.50				Flow rate (L/min) 0.25~1.75			
Other conditions	TMP=1.55 kg/cm ² , Flow rate= 0.50 L/min				BT/FT= 0.10 (BT=3 sec, FT=30 sec) Flow rate= 0.50 L/min				BT/FT= 0.10 (BT=3 sec, FT=30 sec) TMP= 1.55 kg/cm ²			
Membrane	M8	M9	C005	C010	M8	M9	C005	C010	M8	M9	C005	C010
Turbidity (%)	93	88	98	94	92	94	93	97	91	94	92	96
TDS (%)	76	56	54	35	69	50	37	41	52	53	46	39
CODcr (%)	59	48	70	60	68	54	60	72	56	62	71	67



(a) Effect of the backflushing period on the dimensionless permeate flux (b) Effect of the backflushing period on the resistance of membrane fouling



(c) Effect of the backflushing period on the total filtration volume.

Fig. 3. Optimal filtration conditions of the backflushing period after 3hrs' operation (TMP=1.55 kg/cm², Flow rate=0.50 L/min).

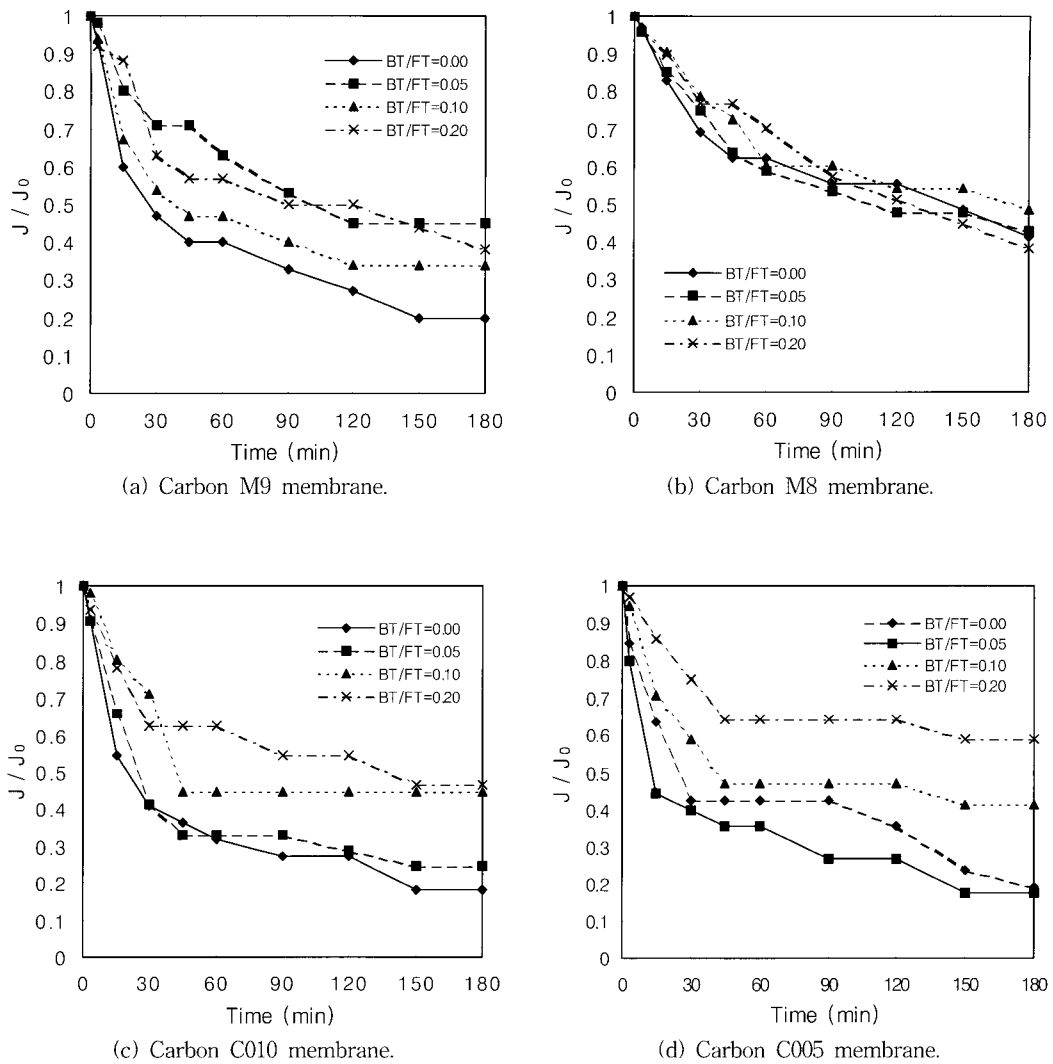


Fig. 4. Effect of the backflushing period on the dimensionless permeate flux for the various tubular ceramic membranes (TMP=1.55 kg/cm², Flow rate=0.50 L/min).

영향을 알아보기 위하여 압력만을 1.00, 1.55, 2.00, 2.50 kg/cm²로 변화시켰고, 역세척시간은 3초 정상운전시간은 30초(BT/FT=0.10), 유입유량은 0.50 L/min으로 일정하게 유지시켜 그 결과를 관찰하였다. 실험에서 역세척 시간을 3초로 일정하게 유지시킨 것은, 3초 정도의 역세척 시간에서 역세척의 영향을 충분히 볼 수 있을 것으로 예상하여 임의로 3초로 정하였다. 유량에 대한 영향은 유량을 0.25, 0.75, 1.25, 1.75 L/min으로 변화시키고, TMP 1.55 kg/cm², 역세척 주기 BT/FT=0.10으로 일정하게 유지시켜, 그에 따른

막오염 진행과정과 투과선속 변화과정을 살펴 보았다. 모든 실험에서 역세척 압력과 역세척 수량은 각각 1.00 kg/cm², 2.50 mL/min으로 일정하게 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 담가 두어, 막 기공내의 오염물질이 용해되어 나오도록 하였다. 새로운 운전 조건에서 가동하기 전에 막을 모듈에 설치한 후, 1차 증류수로 정상 운전하면서 투과량

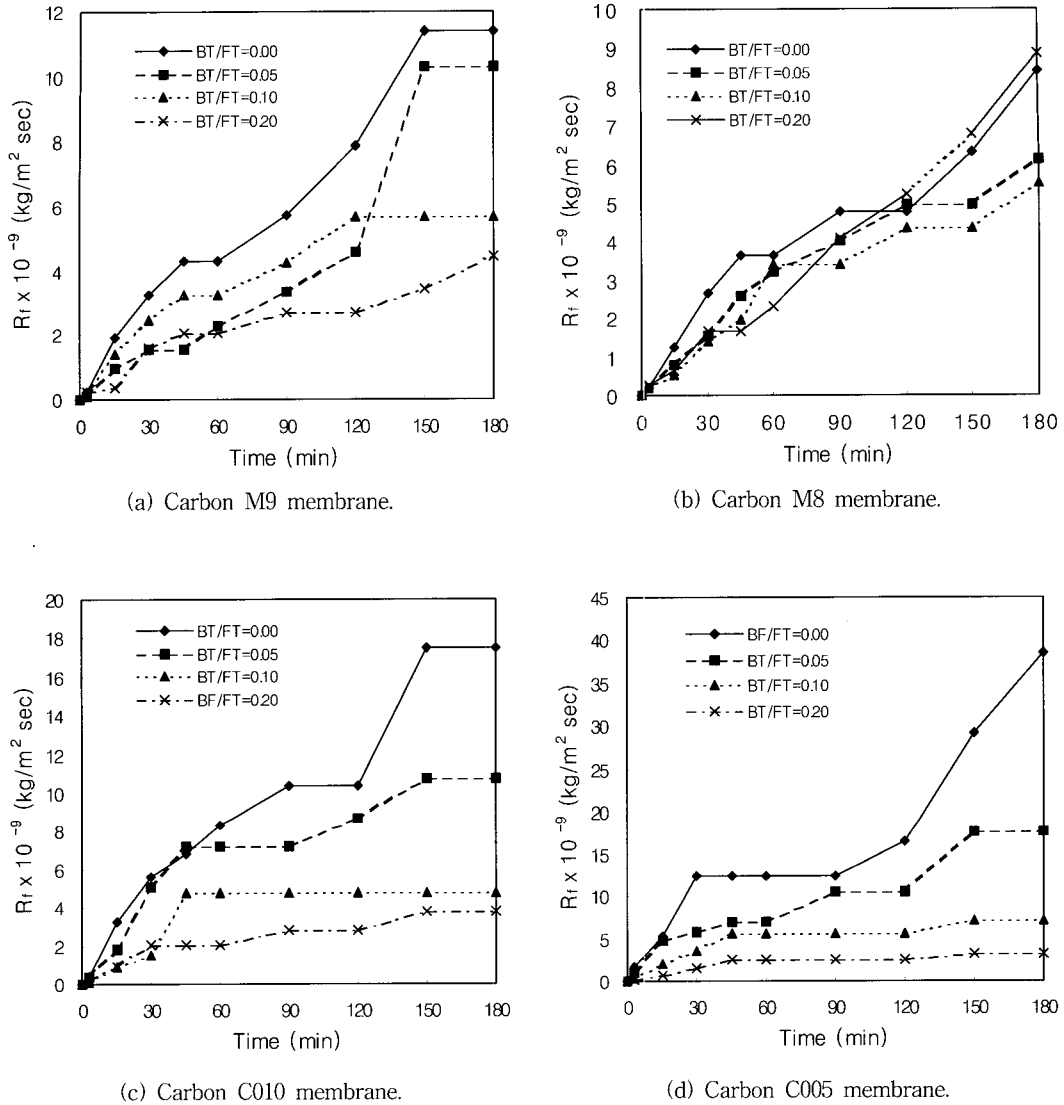


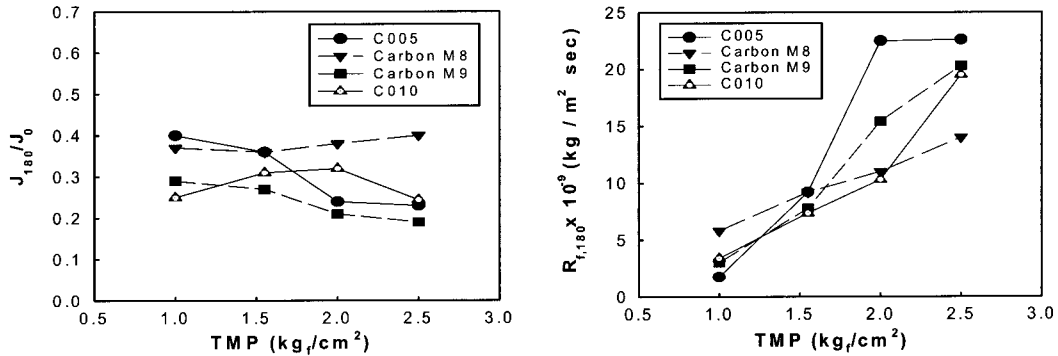
Fig. 5. Effect of the backflushing period on the resistance of membrane fouling for the various tubular ceramic membranes (TMP=1.55 kg/cm², Flow rate=0.50 L/min).

을 측정하여 막 성능의 회복 여부를 확인하였다.

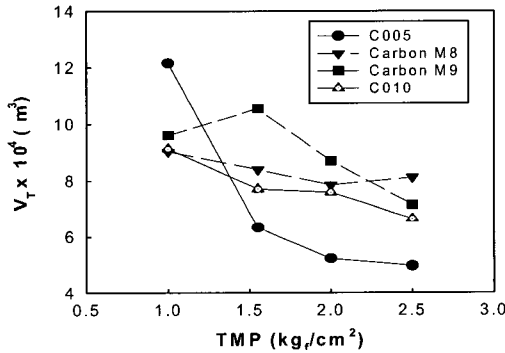
막을 통한 오염물질 제거율의 산출을 위해 공급수 및 투과액의 농도 분석을 하였다. 분석항목과 방법은 총용존 고형물 (TDS)은 Conductivity meter (MODEL 162, ATI ORION, U.S.A.)을 사용하여 직접측정하고 탁도 (Turbidity) 또한 Turbidimeter (DRT-15CE, HF Scientific Inc., U.S.A.)를 사용하여 직접 측정하였다. 화학적 산소요구량 (COD)은 중크롬산법[15]으로 측정였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서 B제지공장의 방류수를 대상으로 4종의 세라믹 탄소계 한외여과막을 사용하여 1차중류수로 주기적 역세척하면서 막오염 현상의 진행과정을 다음과 같이 고찰하였다. 역세척 주기 및 막간압력차, 유량변화에 따라 최적 운전조건을 초기 투과선속으로 무차원화한 최종투과선속 (J_{180}/J_0)과 막오염에 의한 최종저항 (R_{f180}), 경계층에 의한 저항 (R_b), 총여과부피 (V_T)측면



(a) Effect of TMP on the dimensionless permeate flux (b) Effect of TMP on the resistance of membrane fouling



(c) Effect of TMP on the total filtration volume.

Fig. 6. Optimal filtration conditions of TMP after 3 hrs'operation (BT/FT=0.10, Flow rate=0.50 L/min).

에서 살펴보았다. 이때 총여과부피는 역세척수를 배제하기 위하여 정상운전시 측정된 투과선속만으로 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 4 종류의 분리막은 M8, M9, C005, C010의 순서로 분획분자량이 증가한다. TDS의 경우는 분획분자량이 작을수록 평균제거율이 증가하였고, COD_{Cr}와 탁도의 경우는 평균제거율이 거의 일정하게 나타났다.

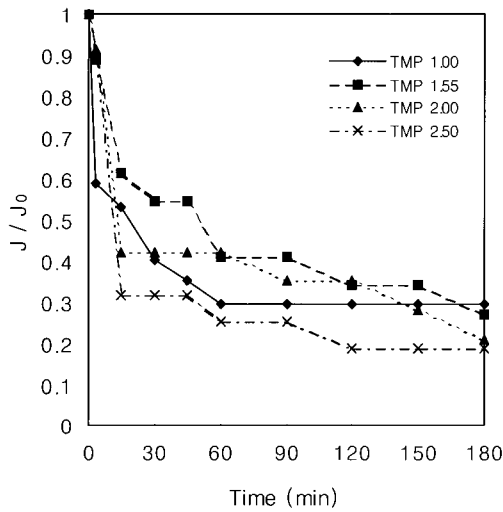
4.1. 역세척 주기의 영향

역세척 주기 변화에서 탄소 M8 세라믹 분리막의 경우 J_{180}/J_0 와 $R_{f,180}$ 측면에서 볼 때 최적 역세척주기 (BT/FT)는 0.10이었고, V_T 측면에서는 0.20이었다. 분획분자량이 큰 탄소 M9의 최적 역세척 주기는 V_T 와 $R_{f,180}$ 측면에서 볼 때 역세척을 가장 빈번히 하여준

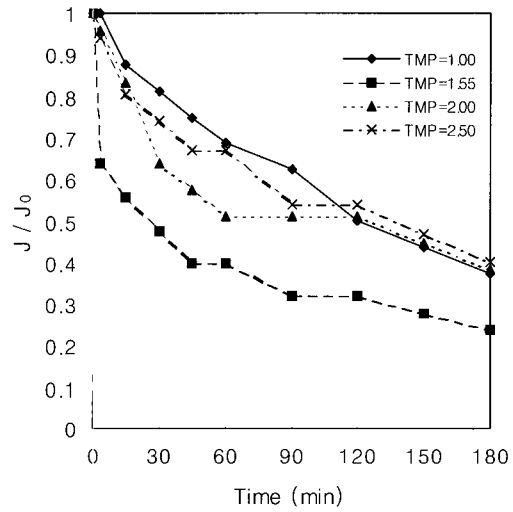
0.20이었으나, J_{180}/J_0 측면에서는 0.05이었다. 실험에 사용한 막 중 분획분자량이 가장 큰 C010의 경우는 J_{180}/J_0 와 $R_{f,180}$ 측면에서 역세척을 가장 자주한 0.20이었다. R_b 측면에서는 3종류의 분리막 모두 역세척을 가장 자주하여 준 0.20이었다. 실험에 사용한 막 중 분획분자량이 작은 C005의 경우는 J_{180}/J_0 와 $R_{f,180}$ 측면에서는 다른 막과 같이 역세척을 가장 자주 하여준 0.20이었으나, R_b 측면에서는 0.05였다. 분획분자량이 큰 막일수록 역세척의 효과가 잘 나타내어지는 것으로 실험에서 보여졌다. 이러한 최적 조건을 알아보기 쉽게 Table 4로 나타내었고, 최적 조건 측면(J_{180}/J_0 , $R_{f,180}$, V_T)의 경향을 각각의 막에 대해 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3(c)에서 보는 것과 같이 각각의 막의 3시간 운전 후 역세척을 자주할수록 총여과부피도 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 4는 각각의 막의 시간에 따른 투과선속 변화를 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 시간에 따라 투과선속이 감소하는 경향을 보이며, 역세척을 자주 할수록 투과선속 감소가 둔화

Table 4. Optimal filtration conditions for the various tubular ceramic membranes.

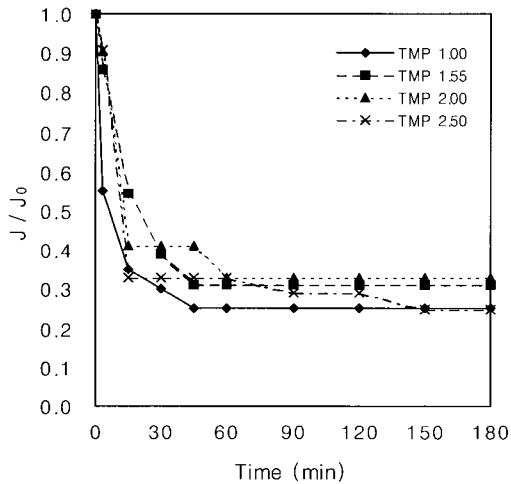
View points	Operation condition				Backflushing period BT/FT:0.00~0.20 (BT=3 sec, FT=15~60 sec)				TMP (kgf/cm ²): 1.00~2.50				Flow rate (L/min): 0.25~1.75 (Re= 490~3590)			
	Other conditions				TMP=1.55 kgf/cm ² , Flow rate= 0.50 L/min				BT/FT= 0.10 (BT=3 sec, FT=30 sec) Flow rate= 0.50 L/min				BT/FT= 0.10 (BT=3 sec, FT=30 sec) TMP= 1.55 kgf/cm ²			
Membrane	M8	M9	C005	C010	M8	M9	C005	C010	M8	M9	C005	C010				
J_{180}/J_0	0.10	0.05	0.20	0.20	2.50	1.00	1.00	2.00	1.25	1.75	1.75	1.75				
$R_{f,180}$	0.10	0.20	0.20	0.20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.75	1.75	1.75				
R_b	0.20	0.20	0.05	0.20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.75	0.25	0.75	1.25				
V_T	0.20	0.20	0.20	0.20	1.00	1.55	1.00	1.00	0.25	1.75	1.75	1.75				



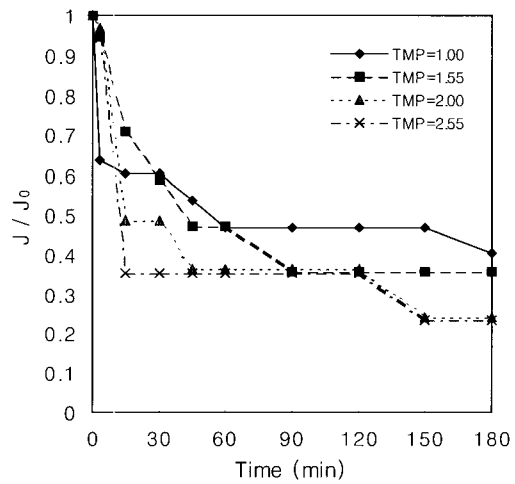
(a) Carbon M9 membrane.



(b) Carbon M8 membrane.



(c) Carbon C010 membrane.



(d) Carbon C005 membrane.

Fig. 7. Effect of TMP on the dimensionless permeate flux for the various tubular ceramic membranes (BT/FT=0.10, Flow rate=0.50 L/min).

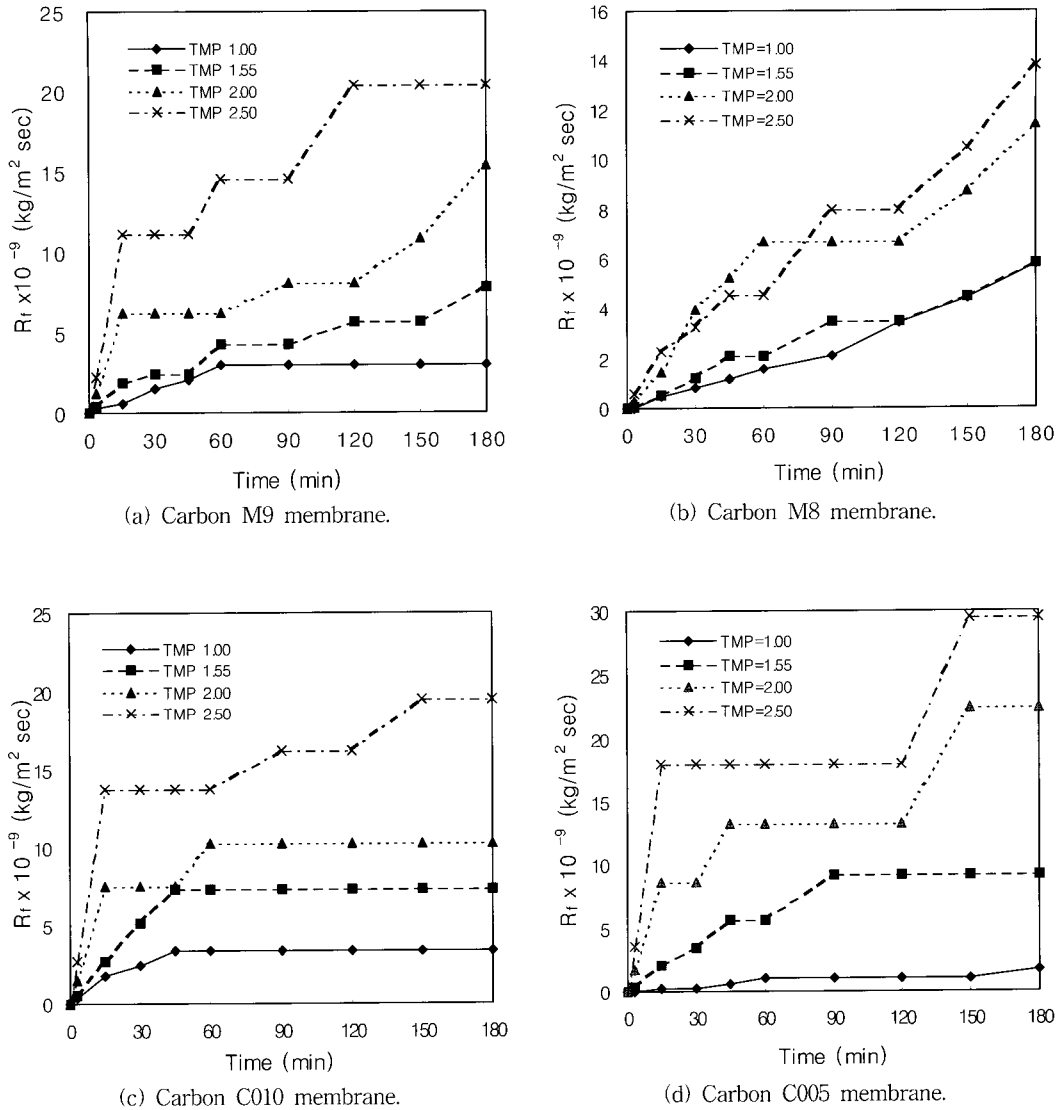


Fig. 8. Effect of TMP on the resistance of membrane fouling for the various tubular ceramic membranes (BT/FT=0.10, Flow rate=0.50 L/min).

되는 경향을 보인다. Fig. 5는 4종류의 탄소계막의 시간에 따른 오염물질에 의한 저항 변화를 나타낸 것이다. 대부분의 막이 역세척을 자주하여 줄수록 오염물질에 의한 저항 증가가 감소하는 경향을 보인다. 이와 같은 현상을 나타내는 원인은 역세척을 자주하여 줄수록 막표면에 오염물질이 쌓여 압밀화 되기전에 오염물질을 탈착시키고, 오염물질이 표면에 쌓일 기회를 감소시켜 막오염이 둔화되는 것으로 보여진다.

4.2. 막간압력차의 영향

최적의 TMP는 4종의 탄소계 세라믹 분리막 모두 $R_{f,180}$ 과 R_b 의 측면에서 가장 낮은 TMP인 1.00 kg/cm^2 이었다. V_T 측면에서는 M9의 경우 $\text{TMP}=1.55 \text{ kg/cm}^2$ 였고, 다른 M8과 C010, C005의 경우 가장 낮은 $\text{TMP}=1.00 \text{ kg/cm}^2$ 이었다. Table 4에 분리막의 최적 조건을 나타내었고, 최적화 경향을 보다 쉽게 알아보기 위하여 Fig. 6에 도시하였다. 대부분의 최적조건은 낮은 압력에서 형성됨을 보이고 있다. Fig. 6(c)는 각

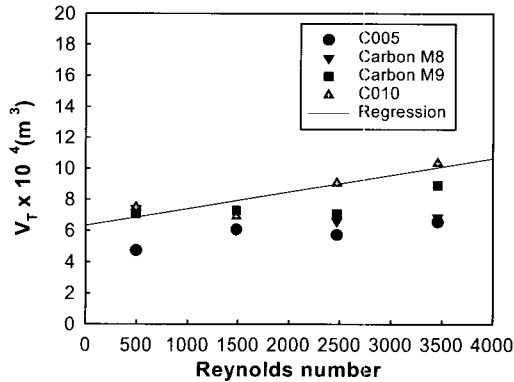
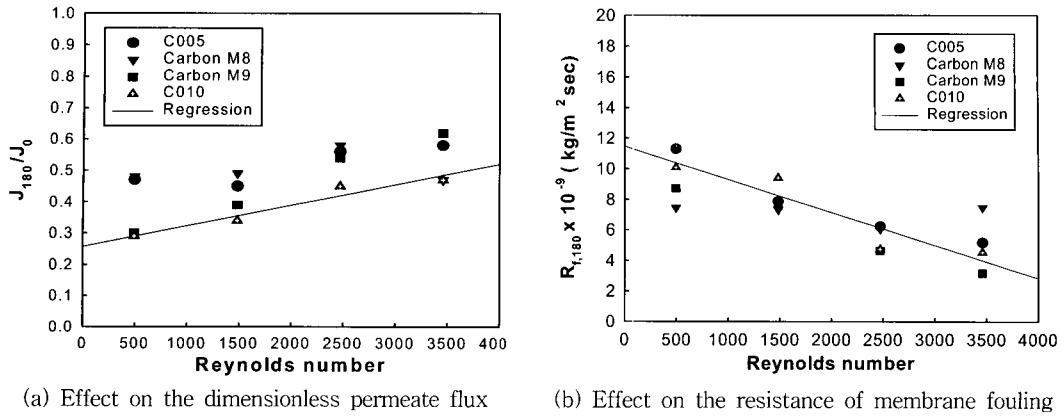


Fig. 9. Optimal filtration conditions of the Reynolds number after 3 hrs' operation (BT/FT=0.10, TMP=1.55 kg/cm²).

각 막의 운전 후 얻은 총여과부피를 나타낸 것이다. 대체로 TMP가 낮은 1.00~1.55 kg/cm² 사이에서 가장 많은 여과부피를 얻는 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 각각의 막의 시간에 따른 투과선속 변화를 나타내었다. TMP가 낮을수록 투과선속이 높게 유지되는 경향을 보이고 있다. TMP가 클수록 시간에 따른 투과선속이 급격히 감소하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 8은 시간에 따른 오염물질에 의한 저항을 나타낸 것이다. 오염물질에 의한 저항 역시 TMP가 낮을수록 저항이 감소됨이 관찰되었다. 이와 같은 현상은 압력이 높을수록 표면에 쌓인 오염물질들이 높은 압력에 의해 압밀화되면서 농도분극 현상이 심화되어 막오염이 급격히 발생한 것으로 볼 수 있다. 따라서 낮은 압력에서 운전하면 막오염이 덜 발생함을 알 수 있었다.

4.3. 유입유량의 영향

최적유량 조건은, C005의 경우 J_{180}/J_0 와 $R_{f,180}$ 측면에서 높은 유량인 1.75 L/min이었으나, M8 분리막의 경우는 다소 낮은 1.25 L/min이었고, M9와 C010의 경우는 C005와 마찬가지로 높은 유량인 1.75 L/min이었다. 이와 같은 결과는 높은 유량인 경우 막표면에 난류가 발생하여 막 표면에 오염물질을 탈착하여 막오염을 억제하는 것을 볼 수 있다. Table 4에 최적 조건을 표시하였고, Fig. 9에 Reynolds 수가 J_{180}/J_0 및 $R_{f,180}$, V_T 에 미치는 영향을 나타내었다. Fig. 9(c)는 최적조건인 V_T 를 나타낸 것으로, Reynolds수 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 10는 4개의 탄소막의 시간에 따른 투과선속의 변화를 나타낸 것으로 대체로 유량이 높을수록 투과선속이 높게 유지되는 현상이 나타났다. 그리고 Fig. 11는 유량으로부터 계산한 Reynolds

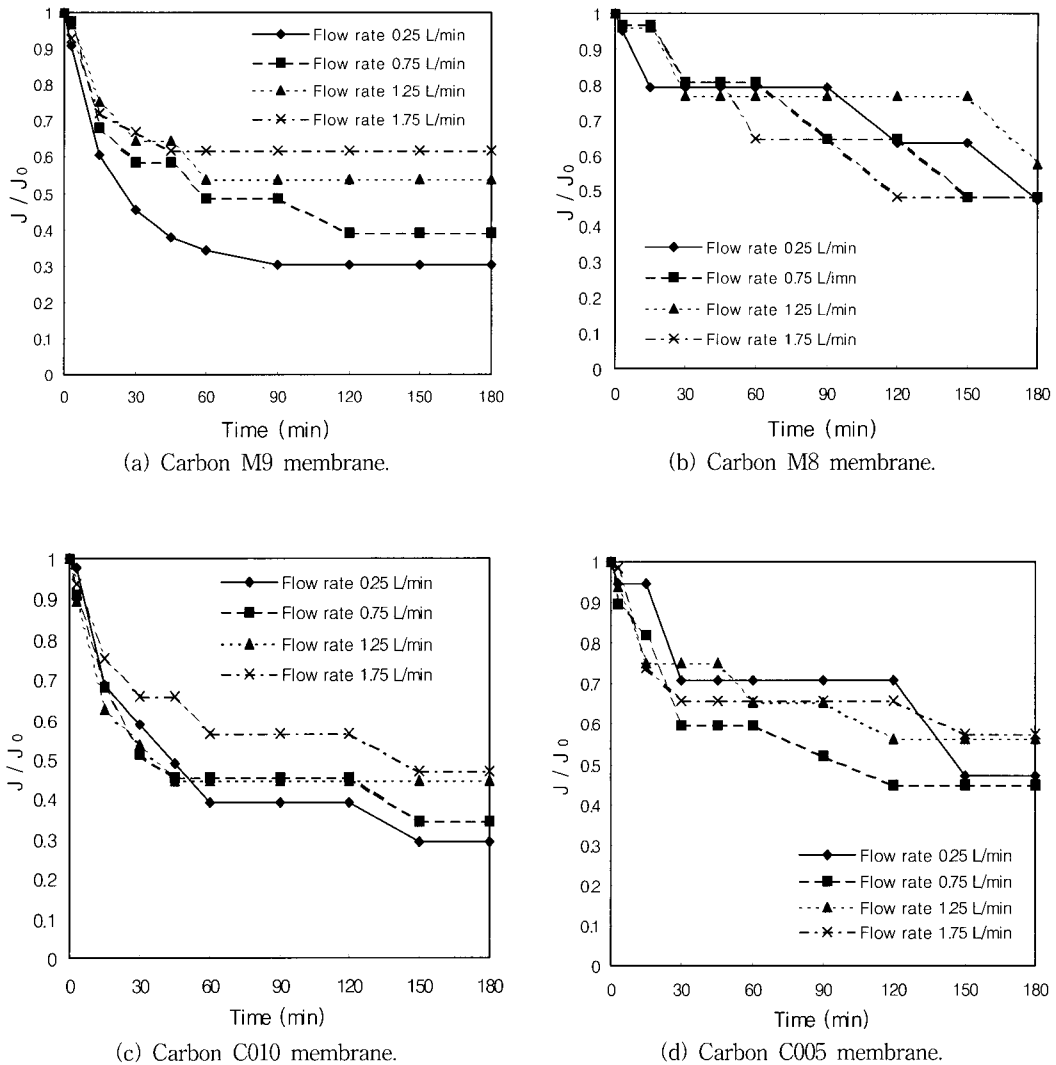


Fig. 10. Effect of flow rate on the dimensionless permeate flux for the various tubular ceramic membranes (BT/FT=0.10, TMP=1.55 kg/cm²).

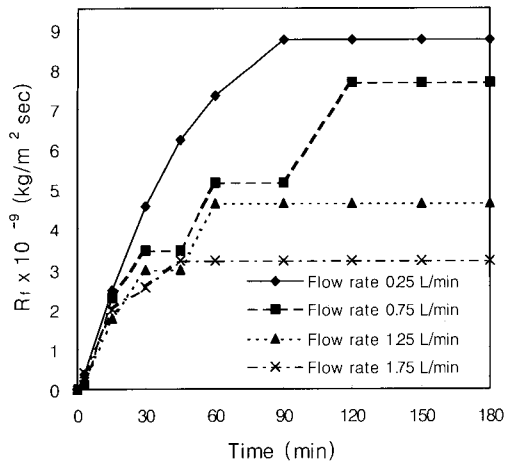
수의 변화에 따른 오염물질에 의한 저항 값을 나타낸 것으로 Reynolds수가 증가할수록 오염물질에 의한 저항이 감소하는 경향을 나타내고 있다.

5. 결론

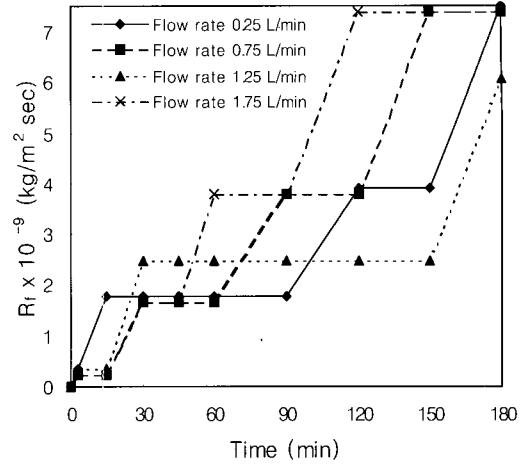
본 연구에서는 분리막 운전 중 막오염으로 인한 급격한 투과선속 감소를 해결하고자, 물에 의한 주기적 역세척을 시행하고, 운전변수에 따른 최적의 운전조건을 규명하고자 하였다. 최적의 운전 조건은 오염물질에 의한

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 49%이었으나, 탁도의 경우는 90%가 넘는 높은 제거율을 보였고, COD_{cr}의 경우는 62%이었다. 그러나, 이러한 오염물질의 제거율은 운전변수에 따라 거의 변화하지 않고 비슷한 제거율을 보였다.

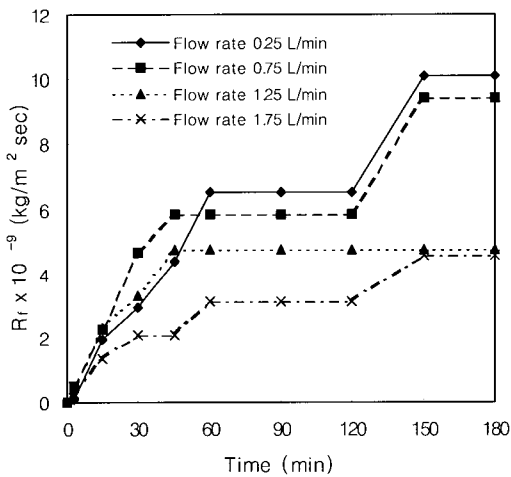
역세척 주기변화 영향은 역세척을 가장 자주 하여 준 BT/FT=0.20에서 총여과부피를 가장 크게 얻을



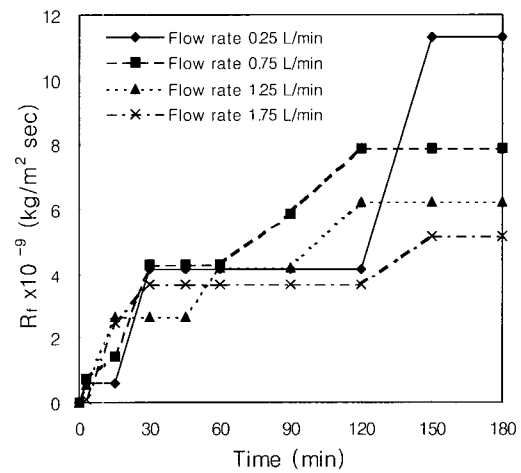
(a) Carbon M9 membrane.



(b) Carbon M8 membrane.



(c) Carbon C010 membrane.



(d) Carbon C005 membrane.

Fig. 11. Effect of flow rate on the resistance of membrane fouling for the various tubular ceramic membranes (BT/FT=0.10, TMP=1.55 kg_f/cm²).

수 있었고, 오염물질에 의한 저항과 무차원화 투과선속 측면에서도 자주 역세척했을 때 최적 운전조건이었다. 이것은 역세척을 자주하여 줄수록 막표면에 오염물질이 쌓일 수 있는 기회를 감소시켜, 막오염을 둔화시키는 것으로 판단되어진다. 막간압력차의 영향 실험에서는 TMP가 낮을수록 오염물질에 의한 저항이 감소하는 경향을 나타내었다. 총여과부피 측면에서도 TMP가 낮을수록 높은 여과부피를 얻을 수 있었다. TMP가 증가하면 막표면에 오염물질들이 압밀화되어 농도분극이 심화되는 것으로 보여진다. 한편, 유량변

화의 영향은 유량이 증가할수록 투과선속이 높게 유지되는 경향을 보였고, 오염물질에 의한 저항도 감소하는 경향을 보였다. 유량이 커지면 막표면에 난류 발생으로 전단응력을 증가시켜 오염물질들을 탈착시키는 것으로 판단된다.

감 사

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비(KRF-99-선도연구자과제-E00393)에 의하여 지원되

었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. 권은미, 유명진, *대한환경공학회지*, **22**(7), 1183~1191 (2000).
2. 송근호, 이광래, 이찬기, *대한환경공학회지*, **22**(7), 1273~1284 (2000).
3. 임재명, 신항식, 정재춘, 이남훈, 민병현, 이상호, "산업폐수처리공학", 신광문화사 (1996).
4. R. S. Faibish and Y. Cohen, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **191**, 27~40 (2001).
5. R. Jiraratananon and A. Chanachai, *Journal of Membrane Science*, **111**, 39~48 (1996).
6. J. Y. Park, C.K. Choi, and J. J. Kim, *Journal of Membrane Science*, **97**, 263~273 (1994).
7. C. K. Choi, J. Y. Park, W. C. Park, and J. J. Kim, *Journal of Membrane Science*, **157**, 177~187 (1999).
8. P. Srijaroonrat, E. Julien, Y. Aurelle, *Journal of Membrane Science*, **159**, 11~20 (1999).
9. R. H. Davis and V. T. Kuberkar, *Journal of Membrane Science*, **183**, 1~14 (2001).
10. M. Heran and S. Elmaleh, *Water Science and Technology*, **41**(10-11), 337~343 (2000).
11. M. Heran and S. Elmaleh, *Journal of Membrane Science*, **188**, 181~188 (2001).
12. A. Adin, R. Ben and Y. Soffer, *Water Science and Technology*, **42**(1-2), 367~372 (2000).
13. N. Laitinen, D. Michand, C. Piquet, N. Teillera, A. Luonsi, E. Levanen and M. Nystrom, *Separation and Purification Technology*, **24**, 319~328 (2001).
14. M. Cheryan, "Ultrafiltration Handbook", Technomic Pub. Co., Pennsylvania (1984).
15. 옥치상, 백병천, 박송웅, 김동식, "수질측정 및 수처리실험", 지구문화사 (1996).