

## 오일 함유 세척수의 한외여과 처리에서의 역세척에 관한 실험연구

김종표·전명석·김재진·정건용\*·전성덕\*\*

한국과학기술연구원 고분자연구부

\*서울산업대학교 화학공학과, \*\*(주)한국하우톤 환경사업부

(1998년 4월 29일 접수, 1998년 6월 16일 채택)

### Experimental Study on the Backflushing for Ultrafiltration Treatment of Alkaline Cleaner Containing Cutting Oils

Jong-Pyo Kim, Myung-Suk Chun, Jae-Jin Kim, Kun-Yong Chung\*,  
and Sung-Duk Jeon\*\*

Polymer Division, KIST, Seoul 130-650, KOREA

\*Dept. of Chem. Eng., Seoul National Polytechnic Univ., Seoul 139-743,

\*\*Korea Houghton Corp., Seoul 150-717

(Received April 29, 1998, June 16, 1997)

**요약** : 폴리아크릴로니트릴 공중합체의 재질인 한외여과 중공사막 (분획분자량:  $5 \times 10^4$  Dalton)을 이용하여 금속표면처리 세척수 (cleaner)로부터 오일입자를 제거하였다. 오일입자를 분리하고자 할 때 막표면에서의 농도분극 (concentration polarization) 현상으로 투과플럭스를 감소시키므로 농도분극을 억제하기 위하여 질소기체로 역세척 (backflushing)을 수행하였다. 정상운전 (normal operation) 및 역세척시간을 각기 달리하여 운전함으로써 얻어진 투과플럭스의 거동을 정량적으로 비교하였다. 실험결과, 실질투과플럭스 (net permeate flux) 증가율의 산출을 기준으로 정상운전시간/역세척시간이 10분/40초인 조건이 역세척을 하지 않은 경우와 비교하여 가장 높은 증가율 (약 23%)을 보였다. 하지만, 실제 운전에서 중요하게 고려되는 시간에 따른 투과플럭스의 안정성은 정상운전시간이 연장되면 크게 떨어짐을 알 수 있었다. 막투과플럭스가 역세척압력에 무관하게 일정한 거동을 보이는 레이놀즈수 이상에서는 역세척압력이 증가할수록 투과플럭스는 n제곱승으로 증가하는 상관관계를 보였고, 원료공급속도가 증가할수록 투과플럭스의 증가정도는 상승하는 경향을 나타냈다.

**Abstract** : The oil separation is effectively performed from the oil containing alkaline cleaner solution by using a backflushed ultrafiltration system, where hollow fibers commercially made by polyacrylonitrile copolymer are bundled. Backflushing to reduce membrane fouling during crossflow ultrafiltration is investigated. Experimental observations allow us to understand the behavior of permeate flux according to the relative operating conditions, and determine the optimum condition of normal operation and backflushing. The maximum improvement of net permeate flux owing to backflushing was found to be about 23 % with the condition of 10 min/40 sec for the cycle of normal/backflushing operations. Note that, however, the maintenance of stable permeate flux is lost as the duration of normal operation is increased. The permeate flux depends on both the backflushing pressure and the feed flow rate. It is obvious that there is a critical velocity of feed flow, in which permeate flux is practically independent of backflushing pressure. Above this critical value, the permeate flux is proportional to an appropriate power of the backflushing pressure,  $\Delta P_{back}^n$ , where exponent n is enhanced with increasing feed velocity.

### 1. 서 론

오일폐수는 오늘날 여러 산업 현장에서 환경 문제를 유발하는 주요 요인 중의 하나로 부각되고 있다. 금속가공 공정에서는 페인트를 칠하기 전에 표면에 묻어 있는 먼지나 그리스를 제거하기 위해 금속표면 세척수를 사용하며, 금속기계 작업시에는 기계 및 작업대를 냉각하거나 윤활성을 주기 위해 오일 함유 에멀전을 사용한다. 또한 섬유산업에서는 각종 천연섬유에 잔류하는 천연 오일을 포함한 선분비물을 제거하기 위해 계면활성제가 함유된 물을 사용하며, 자동차나 항공산업 및 식품산업 등에서도 다양한 종류의 오일/물 에멀전 폐수가 배출된다. Table 1에 이에 관한 내용을 요약하였다. 이러한 오일폐수는 크게 자유부상 오일 (free-floating oil), 불안정한 오일/물 에멀전 (unstable oil/water emulsion), 안정한 오일/물 에멀전 (stable oil/water emulsion)의 3종류로 나누어진다[1]. 자유부상 오일은 부상시켜 oil skimmer나 API(American Petroleum Institute) 등 기계적인 방법으로 분리하거나 중력에 기초한 다른 물리적 방법으로 비교적 쉽게 분리할 수 있다. 불안정한 오일/물 에멀전은 물리적 혹은 화학적으로 에멀전을 깨뜨린 후에 분리한다. 그러나 배출수의 대부분은 매우 안정한 오일/물 에멀전을 포함하고 있으며 더구나 세척과 탈지에 사용한 폐수의 경우 계면활성제를 함유하고 있으므로 에멀전을 파괴하기가 매우 어렵다[2]. 이들 안정한 오일/물 에멀

전은 일반적으로 화학응집이나 전기영동 등의 공정에 의하여 에멀전을 파괴한 후 처리해 오고 있다. 그러나 이러한 방법은 많은 슬러지를 발생시키며 또한 처리수에 잔류하는 오일과 유기 및 무기 성분을 제거하기 위한 추가적인 처리가 필요하다.

최근에 이러한 오일/물 에멀전 폐수를 분리막을 이용하여 처리하는 방법에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다[3-6]. M. Hlavacek는 정밀여과막을 오일 함유 폐수에 적용하였는데, 여기서 정밀여과막을 여과매체가 아닌 에멀전을 깨뜨려 오일을 응집시키는 응집매체로 이용하였다[4]. 그리고, S.M. Madi와 R.O. Sköld는 각기 다른 형태의 세 종류의 수용성 합성 연마유로부터 정밀여과 및 한외여과로 오염물과 미생물을 제거하여 연마유를 재사용할 수 있음을 보고하였다[5, 6]. 일반적으로 분리막을 사용할 경우 막표면에 용질층이 형성되어 농도분극을 일으키거나 막기공을 막는 막오염 (membrane fouling) 현상이 발생하여 처리수의 투과량 감소를 초래하고 또한 처리수의 수질도 저하시키게 된다[7]. 따라서 막을 이용하여 오일/물 에멀전을 분리하고자 할 때에는 이러한 농도분극이나 막오염을 방지하여 우수한 막성능을 유지할 수 있도록 하여야 한다. 오일/물 폐수처리에서 발생하는 농도분극을 최소화하기 위해 F. Vigo 등은 분리막에 50~100 Hz의 기계적인 진동을 주었으며[8], R. Lopez 등은 에멀전의 크기가 온도에 의해 영향을 받는다는 사실을 이용해 온도에 따른 에멀전의 한외여과 특성을 연구

Table 1. Major Industries Where Ultrafiltration Solves Oily Wastewater Problems.

Industry	Sources of oil wastes
General Metalworking	Water-soluble coolants, cutting and grinding oils, and lubricants used in machining operations  Discharges from parts washer tanks, rinse-waters, and floor washings.
Primary Metal	Rolling and drawing oils used as lubricants and coolants in ferrous and non-ferrous operations
Waste Collection	Emulsified and water-soluble oil wastes collected by waste haulers from other industries.
Food Processing	Natural fats and oils from animal and plant processing, particularly vegetable oily wastes.
Transportation	Oil wastes discharges from tank car cleaning operations.
Textiles	Natural oils from wool scouring, fabric finishing oils.

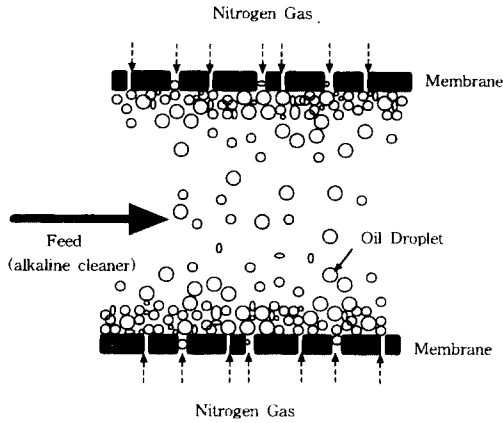


Fig. 1. Schematic illustration of nitrogen backflushing.

하였다[9].

본 연구에서는, 오일 함유 폐수로부터 한외여과로 예멀전 오일을 분리할 경우 오일입자에 의한 농도분극과 막오염으로 인한 투과플럭스 감소를 억제하기 위하여 질소기체로 역세척을 수행하였다. 역세척은 일정 시간동안 정상운전을 행한 후에 투과플럭스의 감소나 투과수질의 저하가 기준값 이하로 될 때 정상운전을 중단하고 막의 외부에 순수 등의 유체나 공기, 질소 등을 가한다. 즉, 역투과운전으로 막표면에 형성된 케이크나 젤층, 그리고 기공을 막고 있는 입자들을 제거하는 것이다[10-12]. Fig. 1은 중공사막에서 질소 역세척 과정을 보여주고 있다.

또한, 주어진 운전조건에 대한 투과플럭스 변화의 실험적 결과에서 정량적으로 규명된 실질투과플럭스(net permeate flux)의 증가율과 그에 따른 안정적 거동으로부터 판단되는 최적 역세척주기에 대해 중점적으로 다루었다. 역세척압력(backflushing pressure)에 따른 투과플럭스의 실험결과로부터는, 임의의 원료공급속도에서 역세척압력과 투과플럭스간에 상관관계가 있음을 밝혔다. 역세척 과정에서 역세척압력은 다양한 특성과 구조를 갖는 막표면과 오일입자간의 표면장력(surface tension) 크기와 상호 비교되어 결국 막기공을 통한 투과플럭스를 결정하게 된다.

## 2. 한외여과 실험

### 2.1. 막모듈 및 함유세척수

상업용 중공사막모듈인 Romicon<sup>®</sup>, HF1-45-CM50을 KOCH Membrane Systems Inc. (Wilmington, MA)로부터 구입하여 실험하였다. 막의 재질은 polyarc-

rylonitrile (PAN) 공중합체로서 비대칭성 막기공 구조를 갖고 있으며 분획분자량은 50,000 Dalton이다. 막모듈의 사양을 Table 2에 제시하였다.

수용성 절삭유(cutting oil' Hocut SSK)는 반합성(semi-synthetic)으로서 이를 상업적으로 제조하고 있는 (주)한국하우톤에서 공급받아 실험하였다. 이 절삭유는 금속가공 및 절삭시 일반적으로 3-5 wt%로 물에 희석하여 사용된다. 불투명의 유백색을 띄며 주요 성분은 광유, 유성제, 방청제 및 극압제로 3 wt% 희석시 비중이 0.95 (15/4 °C)이고 pH 9.0이다. 이러한 절삭유는 금속가공시 금속표면에 잔류하게 되는데 잔류된 절삭유는 세척수를 약 5 atm의 압력으로 분사시켜 제거한다. 이 경우, 세척수내에 오일성분이 증가하게 되어 세척능이 저하되므로 결국 폐기 처분한다. 본 연구에서의 알칼리 세척수(alkaline cleaner)는 (주)한

Table 2. Specifications of Romicon<sup>®</sup>, HF1-45-CM50 Membrane Module used in this Study

중공사막		모듈		
내경(cm)	유효막면적(cm <sup>2</sup> )	직경(cm)	길이(cm)	막충전율(%)
0.114	930	2.54	45.7	11.67

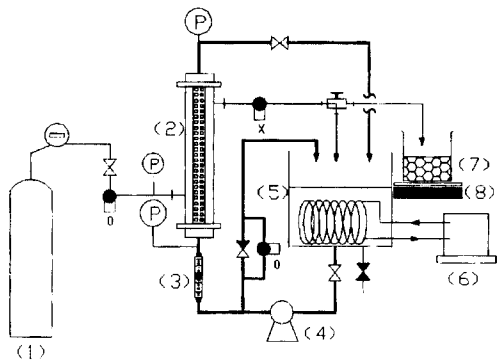
국하우톤에서 공급받은 Cerfa Kleen 5380D를 5 $\mu$ m prefilter와 역삼투막 장치(Elgastat Prima 1, Elga, u.k.)로 제조한 초순수에 3 wt%로 희석하여 준비하였다. 여기에 수용성 절삭유인 Hocut SSK 0.1%를 투입하여 실험용액으로 사용하였다.

### 2.2. 실험장치

질소에 의한 역세척 한외여과의 실험장치를 Fig. 2에 나타내었다. 공급탱크는 스테인레스강 316으로 25 l의 용량을 가지며 항온순환기(RC-6, LAUDA, German)와 연결하여 온도를 일정하게 유지하였다. 원심펌프(Procon, Standex Co.)에 의해 공급탱크로부터 막모듈로의 원료용액이 이동되었고 펌프 우회관을 설치하여 막에서의 압력과 유량을 조절할 수 있도록 하였다. 막모듈에 유입되는 유량은 유량계(VFC-151, Dwyer)로 측정하였고, 입구와 출구부에 각각 6 atm까지 측정할 수 있는 압력계를 설치하여 막모듈 내에서의 압력차를 측정하였다. 본 역세척 한외여과 장치는 위쪽 지지체를 조정이 가능하게 설치하여 막모듈의 크기가 다른 경우에도 쉽게 장착하여 실험할 수 있도록 하였다.

역세척 효과에 대한 실험을 위하여 투과액 배출구

와 질소 투입구에 각각 솔레노이드 밸브(solenoid valve; CKD, Japan)를 설치하였고, 막 투과압력에 관계없이 역세척 동안 막의 내부압력을 일정하게 유지시켜 주기 위하여 막모듈 우회관에 솔레노이드 밸브를 장착하였다. 이들 세 개의 솔레노이드 밸브는 모두 하나의 시간제어계(Twin timer; Omron, Japan)에 연결부착되어 밸브의 개폐가 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 질소기체는 막의 하단부에 연결되어 있고 투과액 배출구는 막의 상단부에 설치하여 막투과는 중공사막의 외부가 투과액으로 젖어있는 상태에서 일어나도록 하였다.



- X : Solenoid Valve Close, O : Solenoid Valve Open or Reverse
- (1) Nitrogen Tank
  - (2) Membrane Module
  - (3) Flowmeter
  - (4) Pump
  - (5) Feed Tank
  - (6) Constant Temperature Circulator
  - (7) Permeate Collector
  - (8) Electric Balance

Fig. 2. Experimental setup of ultrafiltration system with backflushing operation.

### 2.3. 실험방법

실험에 사용된 중공사막의 투과플럭스를 구하기 위하여 일정온도 ( $26 \pm 1^\circ\text{C}$ )에서 막투과압력을 변화시켜 가면서 순수에 대한 투과실험을 하였다. 세척수에 대한 막저항을 알아보기 위하여 3 및 4 wt%로 희석한 Cerfa Kleen 5380D 용액에 대해 실험하였다. 투과플럭스와 아울러 배제물의 산출을 위한 원료용액, 투과액, 그리고 농축액에서의 오일입자의 농도분석은 탁도계 (HACH, 2100N Turbidimeter)를 사용하였다. 정상운전시간을 5.0, 7.5, 10.0 및 20.3분으로 설정하고 이들 각각의 경우에 대해서 역세척 시간을 0에서 60초까지 20초 간격으로 변화시키면서, 전체운전시간에 따른 투

과플럭스의 변화거동을 관찰하였다. 이 경우, 세척수에서의 수용성 절삭유의 농도는 0.1%로 일정하였고 막투과압력과 역세척압력도 일정하게 유지하였다. 주어진 정상운전/역세척시간에서의 역세척압력과 원료공급속도가 투과플럭스에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 0~2.0 atm 범위의 역세척압력에서 원료공급속도가 95.5, 145.5, 218.3  $\text{cm}^3/\text{sec}$ 인 경우에 대해 투과플럭스를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 실험에 사용된 중공사막 (HF1-45-CM50)의 막투과압력에 따른 순수에 대한 투과플럭스를 측정된 결과, 순수투과플럭스는 막투과압력의 증가에 따라 직선적으로 증가하였으며 순수투과계수는  $110 \text{ l/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{atm}$  이었다. 순수투과플럭스를 측정하기 전에 1.9 atm의 막투과압력으로 약 100분 동안 충분히 압밀화시켰으나 초기 투과플럭스에 대해 약 2% 이내의 감소를 보여 막의 압밀화는 거의 일어나지 않음을 확인하였다.

Fig. 3은 알칼리 세척수인 Cerfa Kleen 5380D 3 및 4 wt% 희석용액의 막투과압력의 변화에 대한 투과플럭스를 나타낸 것이다. 세척수의 투과플럭스를 순수투과플럭스와 비교할 때 차이가 거의 나타나지 않았고 따라서 막표면에서 세척수에 의한 농도분극이나 막오염은 적어도 단시간내에는 발생하지 않는 것으로 유추할 수 있다. Fig. 4는 역세척 (역세척압력: 1.0 atm)을

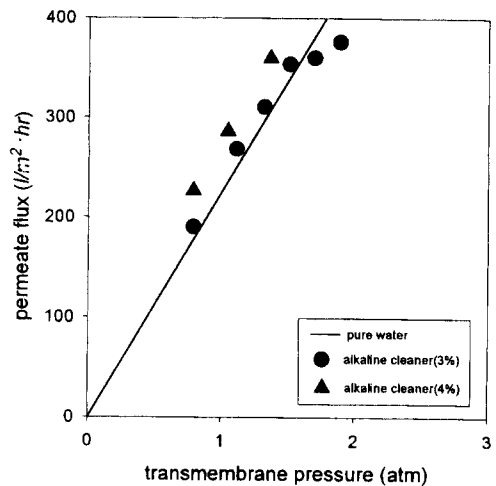


Fig. 3. Permeate fluxes of pure water and alkaline cleaner (Cerfa Kleen 5380D) of 3 and 4 wt/wt% solutions versus transmembrane pressure.

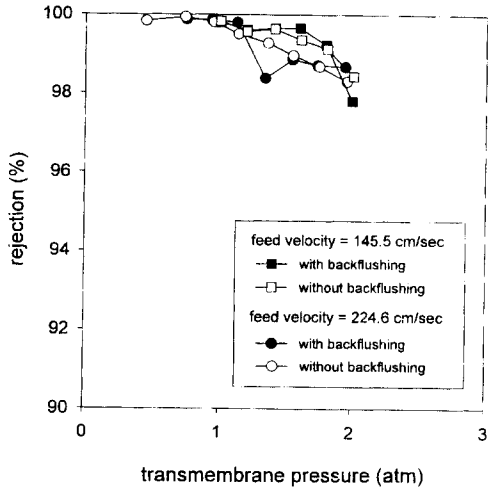


Fig. 4. The rejection of oil from alkaline cleaner versus transmembrane pressure with different flow velocity of feed solution.

수행한 경우와 안한 경우에 대해 막투과압력에 따른 오일의 배제율을 측정하는 것이다. 배제율은 역세척의 유무와 원료공급속도에 의한 변화보다는 막투과압력에 일차적으로 의존됨을 알 수 있다. 즉, 막투과압력이 낮을수록 배제율이 높음을 알 수 있다. 0.5~2.0 atm의 막투과압력 범위에서 배제율은 98% 이상의 높은 값을 유지하여 본 실험에 사용된 중공사막이 실험용액의 오일 제거용도로 매우 적합함을 확인할 수 있다.

3.1. 정상운전/역세척 주기에 따른 투과플럭스의 거동

정상운전시간 5.0과 7.5분에 대해서 역세척 시간을 20, 40, 60초로 증가시켜 가면서 매 역세척 시간마다 각각 60분 동안 실험한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 20초간 역세척을 수행하였을 경우, 국부적으로는 역세척 효과가 아주 미미하게 나타나지만 투과플럭스의 전체적인 경향에 거의 영향을 미치지 못하였다. 반면에, 40 및 60초 역세척에서는 그 효과가 현저히 나타나고 있다. 40초간 역세척을 수행하였을 경우 투과플럭스는 직전보다 약 1.5배 정도 상승하였고 그 이후로 역세척 전후의 투과플럭스가 평균적으로 약  $8 \text{ l/m}^2 \cdot \text{hr}$  범위의 진폭을 가지며 계속 진동하는 모습을 보여 주었다. 60초간 역세척을 수행하였을 경우에도 40초 역세척과 유사한 형태를 나타내었으나 40초 역세척보다는 전체적으로 약간의 투과플럭스 상승이 있었다. 7.5분의 정상운전시간인 경우는, 우선 20초 역세척에 대해서 초

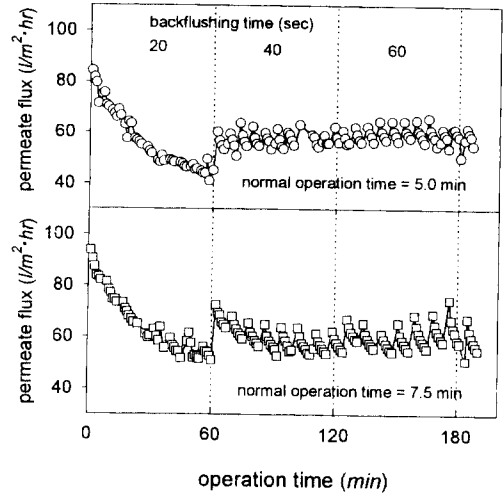


Fig. 5. The profile of permeate flux with operation time for the normal operating times of 5.0 and 7.5 min: feed flow velocity = 145.5 cm/sec, transmembrane pressure = 1.7 atm, backflushing pressure = 0.5 atm.

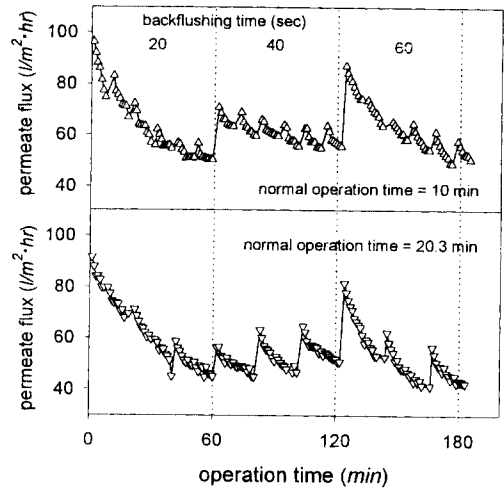


Fig. 6. The profile of permeate flux with operation time for the normal operating times of 10.0 and 20.3 min: feed flow velocity = 145.5 cm/sec, transmembrane pressure = 1.7 atm, backflushing pressure = 0.5 atm.

기의 높은 투과플럭스의 범위에서는 역세척의 영향이 나타나지 않으나 투과플럭스가 약  $60 \text{ l/m}^2 \cdot \text{hr}$  이하로 감소하게 되면 역세척의 효과가 약간 나타나기 시작했다. 그러나 평균적인 투과플럭스의 감소가 있었다.

40초 및 60초 역세척에서는 역세척의 효과가 정상운전시간이 5.0분인 경우와 마찬가지로 크게 나타났으며 진동폭도 약간 증가하는 경향을 보여 주었다.

Fig. 6은 각각 10분과 20.3분의 정상운전시간에 대한 역세척 결과를 나타낸 것이다. 이들 실험결과도 Fig. 5와 마찬가지로 20초 역세척의 효과는 거의 없었다. 반면에 40초 및 60초 역세척에서는 그 효과가 나타나고 있지만, 이 경우 투과플럭스의 변화거동에 있어서 5.0분과 7.5분의 정상운전 실험과는 다른 동적인 특징을 갖고 있다. 특히 40초간 역세척 실험을 60분간 수행한 후 60초간 역세척을 수행하였을 때 순간적으로 높은 투과플럭스가 발생하였으나 이러한 투과플럭스는 계속 유지되지 않고 곧 감소하는 불안정한 형태를 나타내었다.

실제의 막분리공정에서는 단위시간당의 투과량이 많을수록 유리한데 역세척을 수행할 경우에는 역세척 운전기간 동안에 발생하는 막투과 정지시간을 고려해야 한다. 역세척 운전기간 동안의 투과플럭스를 제외한 실질투과플럭스  $J_{net}$ 는

$$J_{net} \text{ (} l/m^2 \cdot hr \text{)} = \text{투과플럭스 (} l/m^2 \cdot hr \text{)} \left[ \frac{\text{전체 운전시간 (hr)} - \text{전체 역세척시간 (hr)}}{\text{전체 운전시간 (hr)}} \right] \quad (1)$$

와 같이 계산되며, 그 결과를 Table 3에 제시하였다.

실질투과플럭스값으로부터 그에 대한 증가율 (improvement)을 다음으로

$$\text{improvement (\%)} = \left[ \frac{(\text{투과플럭스/막투과압력})_{backflushed}}{(\text{투과플럭스/막투과압력})_{non-backflushed}} - 1 \right] \times 100 \quad (2)$$

산출하였는데, 막투과압력으로 나는 것은 역세척과 비역세척 실험을 동일한 압력에서 수행하기가 현실적인 운전상으로 어렵기 때문에 이에 따른 압력 영향을 보정한 것이다.

역세척 시간의 함수로 각각의 정상운전시간에 대한 증가율을 Fig. 7에 나타내었다. 우선 어떠한 정상운전시간에 대해서도 실질투과플럭스는 40초 역세척에 대해서 최대의 증가율을 보였다. 5분 정상운전의 경우에, 실질투과플럭스가 20초 역세척에서는 역세척을 수행하지 않은 것보다 투과플럭스가 오히려 감소하였으며 40초 역세척에서는 실질투과플럭스가  $51.12 \text{ } l/m^2 \cdot hr$ 으로 역세척 비수행시보다 약 15%, 60초 역세척에서는  $48.98 \text{ } l/m^2 \cdot hr$ 으로 10%의 낮은 증가율을 보였다. 이것은 짧은 정상운전시간에 비해 잦은 역세척 시간으로 인하여 실질적으로 막투과에 소요된 시간이 감소하였기 때문이다. 참고로 역세척 시간을 고려하지 않은 명목적인 투과플럭스는 40초와 60초 역세척에서 각각 30%와 32%의 높은 값과 잘 비교된다. 7.5분 정상운전시간을 가질 때 역세척 시간이 증가함에 따라 투과플럭스의 증가가 있었으며, 명목적인 투과플럭스

Table 3. Permeate Flux and Net Permeate Flux According to N<sub>2</sub> Backflushing Cycles

operating time (min)	backflushing time (sec)	permeate flux		total backflushing time (sec)	net permeate flux	
		$l/m^2 \cdot hr$	improvement (%)		$l/m^2 \cdot hr$	improvement (%)
5.0	20	44.74	0.56	225	41.94	-5.73
	40	57.94	30.23	424	51.12	14.90
	60	58.77	32.10	600	48.98	10.09
7.5	20	53.35	19.91	153	51.47	15.69
	40	57.70	29.69	294	52.99	19.11
	60	58.51	31.51	424	51.62	16.03
10.0	20	51.75	16.32	116	50.08	12.56
	40	58.83	31.11	225	54.68	22.90
	60	52.97	19.06	327	48.16	8.24
20.3	20	49.96	12.29	58	49.16	10.50
	40	55.42	24.57	114	53.67	20.63
	60	46.49	4.50	169	44.31	-0.40

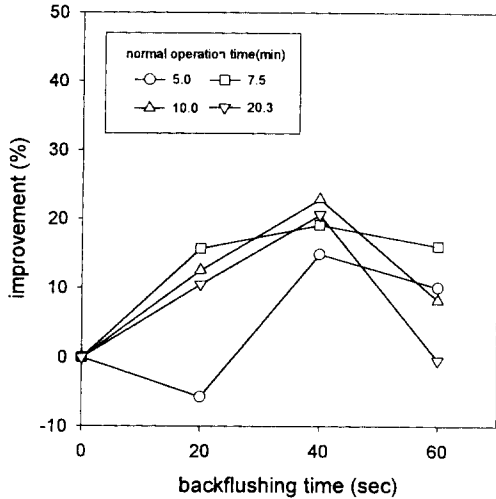


Fig. 7. The improvement of net permeate flux as a function of backflushing time with different normal operating times.

는 60초 역세척에서 31.51%의 최대증가율을 나타낸다. 하지만, 실질투과플럭스에서는 40초 역세척에서 52.99  $l/m^2 \cdot hr$ 로 19.1%의 최대증가율을 가지며 60초 역세척에서는 16.0%의 증가율로 40초 역세척보다 오히려 감소하였다. 60초 역세척 시간에서 40초 역세척 시간에 비하여 실질투과플럭스가 감소하는 것은 역세척에 의한 농도분극의 역제는 40초 정도에서 충분하며 그 이상의 시간은 농도분극의 역제에는 영향을 미치지 못하고 막투과시간을 감소시키는 데에만 소요됨을 의미한다. 10분과 20.3분의 정상운전시간에서도 실질투과플럭스는 40초 역세척에서 최대 증가율인 22.9% 및 20.6%를 보였으며 이들 증가율도 7.5분의 경우와 동일한 해석이 가능하다. 종합적으로 보면, 정상운전/역세척시간을 10분/40초로 하였을 때 실질투과플럭스가 최대 증가율 22.9%를 갖는 최적의 역세척 주기로 보이지만, Figs. 5와 6에서 보듯이 역세척 시간에 대한 투과플럭스의 안정성 유지에 있어서는 7.5분/40초보다 좋지 않음을 알 수 있다.

### 3.2. 역세척압력과 투과플럭스

절삭유 농도가 0.1%인 세척수에 대해 주어진 원료 공급속도에서 역세척압력 ( $\Delta P_{back}$ )을 변화시켜 가면서 투과플럭스를 측정하였다. 역세척압력이 2 atm 이상에서는 막의 찌그러짐이 발생하여 역세척압력을 0-2 atm 범위로 하였고, 원료공급속도에서 산출된 레이놀즈수 (Reynolds number: Re)를 제시하여 Fig. 8의 실험결과를 얻었다. 여기서, 막투과플럭스의 증가 거동은

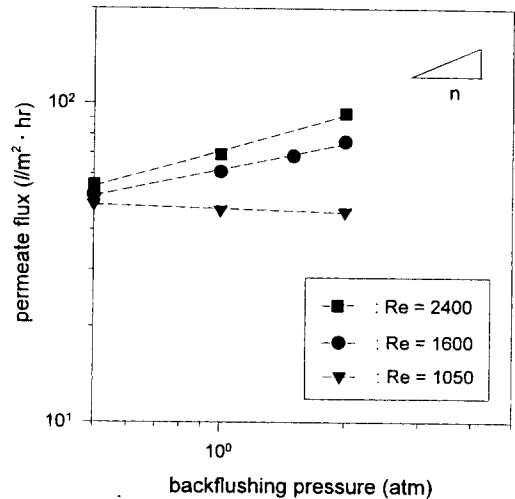


Fig. 8. Permeate flux as a function of backflushing pressure with different flow velocity of feed solution: transmembrane pressure = 1.7 atm, backflushing cycle = 7.5 min/40 sec.

역세척압력의  $n$ 제곱승 (i.e.,  $J \propto \Delta P_{back}^n$ ) 인 관계가 있음을 알 수 있다. 일반적으로 Re가 증가하면 물질전달계수(mass transfer coefficient)가 증가하게 되어 막투과플럭스가 증가하는데, 역세척을 병행하여 실험한 본 연구에서도 비슷한 결과가 나타났다. 그렇지만, 원료공급속도가 느린 낮은 Re에서는 역세척압력의 증가에 따라 막투과플럭스는 오히려 약간 감소되고, Re이 증가함에 따라서  $n$ 값이 커지고 있음을 볼 수 있다. 막투과플럭스가 역세척압력에 무관하게 일정한 거동을 보이는 Re가 1050과 1600사이 (보다 정확하게는, 1050보다 약간 큰 Re)에 존재함을 예측할 수 있는데, 임계 Re 이하에서는 역세척운전이 불필요한 것으로 사료된다. 임계 Re 이상에서는 막기공 내부에 형성된 오염과 막표면에 형성된 농도분극층을 효과적으로 제거하기 위해서 막기공에서의 임계압력 이상인 충분한 크기의 역세척압력이 요구된다. 따라서 역세척압력이 낮은 경우, 막표면과의 상호작용력이 약한 오일입자의 오염물을 제외하고 대부분은 역세척에 의한 농도분극을 해소하지 못할 것이다. 그러나 역세척압력이 높을수록 더 많은 오염물을 제거하게 되며 이러한 오염 및 농도분극의 역제정도는 역세척압력과 결국  $n$ 제곱승인 관계를 보여 주는 것이다.

피드공급속도에 따른 역세척압력과 투과플럭스의 상관관계, 그리고 이에 따른 최적 운전조건의 결정에 관해서는 중공사 막모듈에 대한 물질전달 해석을 적용하여 보다 심도있고 체계적인 고찰이 향후 필요하다.

다고 사료된다. 한편, 역세척압력이 증가할수록 투과 플럭스도 증가하지만 일반적인 비대칭성 고분자 중공사막은 중공사 내부에서 받는 압력보다 외부에서 받는 압력에 약하므로[7], 역세척압력을 증가시키기에 있어 한도가 있고 사용되는 막재질과 특성을 충분히 이해해야 함에 유의해야 한다.

#### 4. 결 론

금속표면처리 세척수 (cleaner)로부터 에멀전의 오일 입자를 제거하기 위해 역세척방식의 한외여과 처리를 실시하였다. 최적의 역세척 주기를 결정하기 위하여 5, 7.5, 10, 20.3분 동안의 막투과시간을 가진 후 20, 40, 60초 씩 질소기체로 각각 역세척을 하였고, 역세척압력 및 원료공급속도에 따라 투과플럭스 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 사용된 중공사막은 막투과압력이 증가함에 따라 약간의 감소를 보였지만, 모든 실험 범위에서 오일 입자의 배제율은 약 98% 이상의 높은 수준을 유지하였다.
- 모든 정상운전시간에 대해 20초 역세척에서는 그 효과가 거의 나타나지 않았고 40 및 60초 역세척에서는 투과플럭스가 진동하면서 역세척 효과를 보여주었다. 60초 역세척에서는 증가된 투과플럭스가 급격히 떨어지는 불안정한 거동을 보였고, 평균적으로 보아서 투과플럭스의 진동폭은 정상운전시간이 길어질수록 커졌다.
- 실제 역세척방식의 막분리공정에서 중요한 인자로서 역세척 운전시간 동안의 투과플럭스를 제외한 실질투과플럭스와 이에 대한 증가율을 산출할 수 있고 이는 최적 역세척주기에 대한 기본적인 판단 근거가 되었다. 증가율은 모든 정상운전시간에 대해 40초 역세척시간에서 최대값을 가진 후 감소하였다. 막투과플럭스는 정상운전/역세척운전주기가 5분/60초에서 최대 증가율 32.0%를 나타내었으나 실질투과플럭스에 있어서는 10분/40초에서 최대 증가율 22.9%를 나타내었다.

- 막투과플럭스가 역세척압력에 무관하게 일정한 거동을 보이는 Re 이상에서는 역세척압력이 증가할수록 투과플럭스는 n계급승으로 증가하는 상관관계를 보였고, Re가 증가할수록 막투과플럭스의 증가정도는 상승하였다.

#### 감 사

본 연구는 과학기술부 엔지니어링핵심기반기술개발사업 (1996-97)의 수행결과로서 연구비 지원에 감사드린다.

#### 참 고 문 헌

1. M. Cheryan, "Ultrafiltration Handbook", Technomic Publishing Inc., Lancaster (1986).
2. N. P. Tirmizi, B. Raghuraman, and J. Wiencek, *AIChE J.*, **42**, 1263 (1996).
3. P. Lipp, C. H. Lee, A.G. Fane, and C. J. D. Fell, *J. Memb. Sci.*, **36**, 161 (1988).
4. M. Hlavacek, *J. Memb. Sci.*, **102**, 1 (1995).
5. S. M. Mahdi and R. O. Sköld, *Tribology Int.*, **24**, 389 (1991).
6. S. M. Mahdi and R. O. Sköld, *Lubr. Engr.*, **47**, 686 (1990).
7. L. J. Zeman and A. L. Zydney, "Microfiltration and Ultrafiltration", Marcel Dekker Inc., New York (1996).
8. F. Vigo, C. Uliana, E. Ravina, A. Lucifredi, and M. Gandoglia, *Sep. Sci. Tech.*, **28**, 1063 (1993).
9. R. V. Lopez, S. Elmaleh, and N. Ghaffor, *J. Memb. Sci.*, **102**, 55 (1995).
10. S. Redkar, V. Kuberkar, and R. H. Davis, *J. Memb. Sci.*, **121**, 229 (1996).
11. J. N. Kuruzovich and P. R. Piergiovanni, *J. Memb. Sci.*, **112**, 241 (1996).
12. R. R. Bhave, "Inorganic Membranes", Van Nostrand Reinhold, New York (1991).