

## 돌기형 평판 분리막 모듈의 투과특성

전성일·정건용<sup>†</sup>

서울산업대학교 화학공학과

(2008년 5월 14일 접수, 2008년 6월 20일 수정, 2008년 6월 23일 채택)

### Permeation Characteristics of the Plate & Frame Membrane Module with Protuberances

Sung Il Jeon and Kun Yong Chung<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Seoul National University of Technology, 172 Kongneung-dong, Nowon-ku, 139-743  
Seoul, Korea

(Received May 14, 2008, Revised June 20, 2008, Accepted June 23, 2008)

**요약:** 본 연구에서는 평판 지지층 위에 부착된 플라스틱 돌기에 의하여 형성되는 와류가 투과성능에 미치는 영향을 측정하기 위하여 돌기 있는 모듈과 돌기 없는 모듈에서 각각 투과 실험하였다. 운전압력을 0.4 bar에서 1.6 bar까지 증가시키면서 카올린 용액을 투과시킬 경우, 돌기형 평막 모듈은 돌기가 없는 모듈과 비교하여 초기 투과유속 감소 시간이 2배 이상 연장되었고 순수 대비 투과유속의 감소비 역시 1 내지 5% 가량 낮게 나타났다. 레이놀즈수가 1,750인 층류영역에서 돌기에 의한 투과유속 향상은 전이영역에 비하여 약 2배 높게 나타났다. 전반적으로 평막 모듈에 부착된 돌기는 60분 후 투과유속 향상에는 크게 기여하지 못하였지만, 투과실험 초기에는 막오염 방지에 효과적인 것으로 확인되었다.

**Abstract:** This study was carried out for the plate and frame membrane modules equipped with and without plastic protuberances on the support frame in order to determine the effect of eddy flow induced by the protuberances on permeate flux. The initial time for rapidly declined permeate flux on the module with protuberances was delayed twice or more than that on the module without protuberances when kaolin solution was permeated at the operating pressures from 0.4 to 1.6 bar. Also decreasing ratio of the kaolin solution to pure water flux for module with protuberances was 1 to 5% lower than that for module without protuberances. The flux improvement due to protuberances at laminar flow corresponding Reynolds number 1,750 was about double as compared with that in the transition flow region. In general, the kaolin fouling reduction for the plate module with protuberances during initial filtration process was very effective, even though the permeate flux after 60 minutes filtration did not increase significantly.

**Keywords:** plate membrane module, protuberances, fouling, permeate improvement, fouling

### 1. 서론

수처리용 분리막 공정은 화학반응이나 추가적인 용매를 사용하지 않고 단지 혼합물 입자의 크기 차이를 이용하여 현탁물질이나 콜로이드를 선택적으로 분리하는 기술이다. 또한 증류공정에서와 같이 응축, 증발 등의 상변화를 이용하지 않기 때문에 분리막 공정은 증류 공정에 비하여 1/3 이하로 에너지를 절약할 수 있으며 현재와 같은 초 고유가시대에 화학공학적으로 매우 유

용한 분리공정으로 평가받고 있다.

그러나 분리막 공정은 이러한 여러 가지 장점에도 불구하고 공정상 불가피하게 막오염이라는 큰 문제를 수반한다. 이러한 막오염 및 농도분극화 현상은 투과유속의 저하와 막여과 공정의 경제성을 크게 저하시키므로 막오염을 최소화할 수 있는 여러 가지 방법이 지속적으로 연구되고 있다[1-5]. 최근에는 FTIR-ATR 방법을 이용한 막오염 측정[6]과 유체역학적 컴퓨터 수치모사로 분리막 모듈 내에서의 유체흐름과 이를 이용한 모듈의 최적화에 관한 연구[7] 등이 진행되고 있다. 현재까지의

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

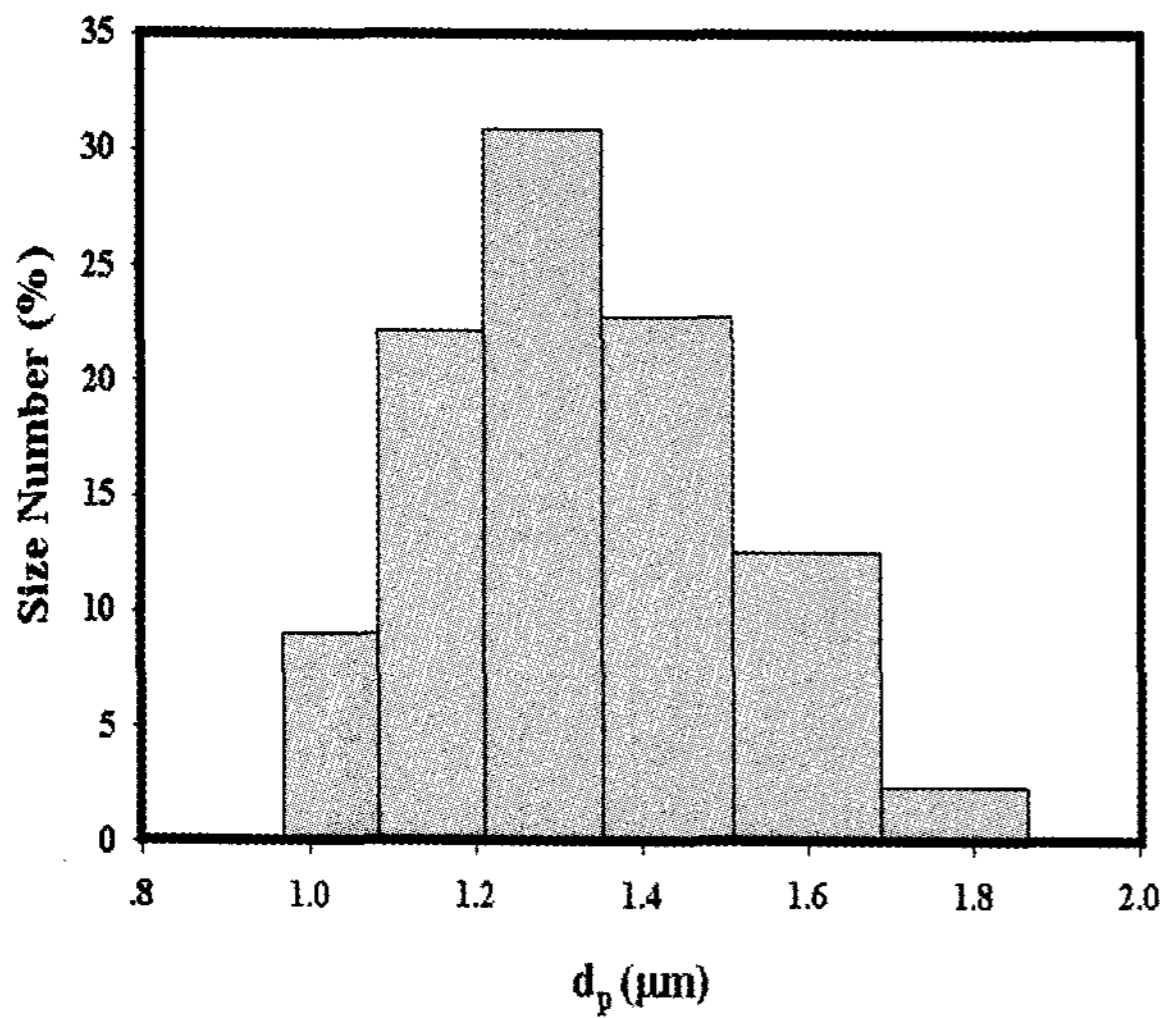


Fig. 1. Kaolin particle size distribution.

막오염 및 농도분극화 현상을 감소시키는 방법을 요약하면 (1) 원료 수용액의 농도를 낮게 유지하는 방법 (2) 분리막 양단의 압력을 낮추거나 투과유속을 조절하는 방법 그리고 (3) 분리막 근방에 농도분포를 최소화하는 방법으로 구분할 수 있다. 마지막의 방법으로 분리막 표면 근방에 유체역학적으로 난류를 형성시켜 막 표면에 축적되는 오염물을 용액 속으로 재순환시키는 방법이 한외여과 및 정밀여과 공정에서 효과적으로 활용되고 있다. 예를 들면 관형 분리막 모듈 내에 static mixer를 삽입시켜 자연적으로 난류를 유도하는 방법[8], 모듈 내에 작은 유리 구 등을 삽입하여 유체 흐름에 따라 와류를 발생시키는 방법[9], 회전원판을 이용하는 방법[10-13], 진동소자를 삽입하여 분리막 근방의 유체를 진동시키는 방법[14], 원심력을 이용한 방법[15] 등이 활용되고 있다.

본 연구에서는 이상의 유체역학적 시도 중에 한 방법으로서 평막 지지층 위에 유체의 흐름과 수직인 방향으로 플라스틱 돌기를 부착시켜 분리막 표면 위로 원료 수용액이 흐를 경우 자연스럽게 와류를 형성시키는 모듈의 분리 성능을 측정하는 것이다. 따라서 돌기가 존재하는 평막과 돌기가 없는 평막에 대하여 원료용액의 농도, 공급 유량, 운전 압력을 변화시키면서 투과유속의 차이를 측정하고 최적 운전 조건 및 분리 성능을 평가하는데 그 목적이 있다.

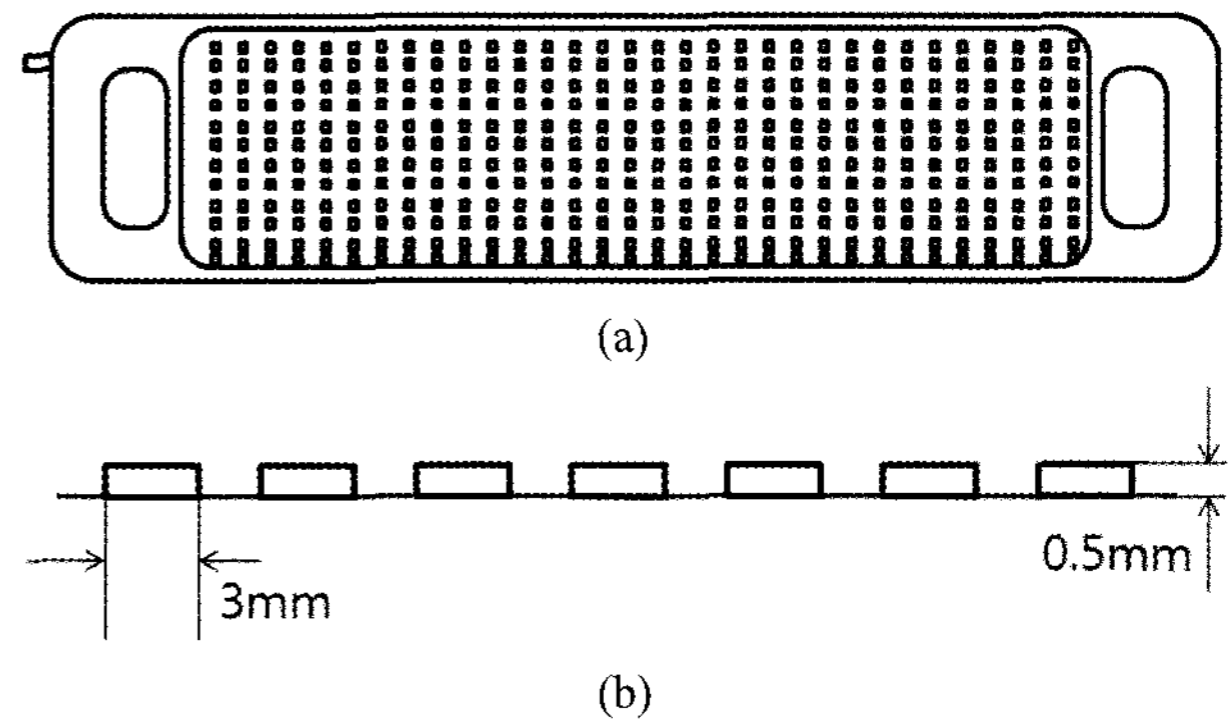


Fig. 2. Schematic diagram of plate and frame module with protuberances (a) top and (b) side views.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험재료

막 오염 실험을 위하여 Aldrich사의 카올린 입자를 사용하였으며 입자분석기(Malvern, LS230)로 입자 분포를 측정된 결과 Fig. 1에서와 같이 평균 입자크기는 약 1.3  $\mu\text{m}$ 이었다. 또한 본 실험에 사용한 순수는 수돗물을 공칭 0.5  $\mu\text{m}$  크기의 전처리 필터로 전처리한 후 카본 필터, 한외여과막으로 여과하여 사용하였다.

### 2.2. 분리막 모듈 및 실험장치

투과실험에 사용한 분리막은 폭이 0.185 m, 길이가 0.975 m이고 유효 막면적이 0.2  $\text{m}^2$ 인 CPVC막으로 (주)퓨어엔비텍에서 제조하였으며 평균 세공이 0.4  $\mu\text{m}$ 인 정밀여과용 가압형 평막 모듈이다. 돌기가 형성된 막은 Fig. 2와 같이 높이 0.5 mm, 폭이 3 mm 크기의 돌기가 가로 15개와 세로 40개로 이루어져 있다. 평막 위, 아랫면에는 용액이 누설되지 않도록 고무로 된 가스켓을 사용하였고 모듈밖에는 20개의 볼트로 밀봉하였다. 그리고 평막모듈의 윗부분은 15 mm 두께의 아크릴판으로서 평막 상부를 육안으로 관찰할 수 있도록 설계 제작하였다.

### 2.3. 실험방법

실험 장치는 Fig. 3에서와 같이 10 L의 원료용액이 들어있는 탱크(1)로부터 가압펌프(3)를 이용하여 평막 모듈(5) 내로 수용액을 가압하여 이송하였다. 또한 바이패스 밸브(2-1) 및 압력조절 밸브(2-2)를 이용하여 원하는 유량과 압력을 조절하였으며 분리막 모듈 출구에는 압력계를(6) 부착하여 운전압력을 측정하였다. 분리

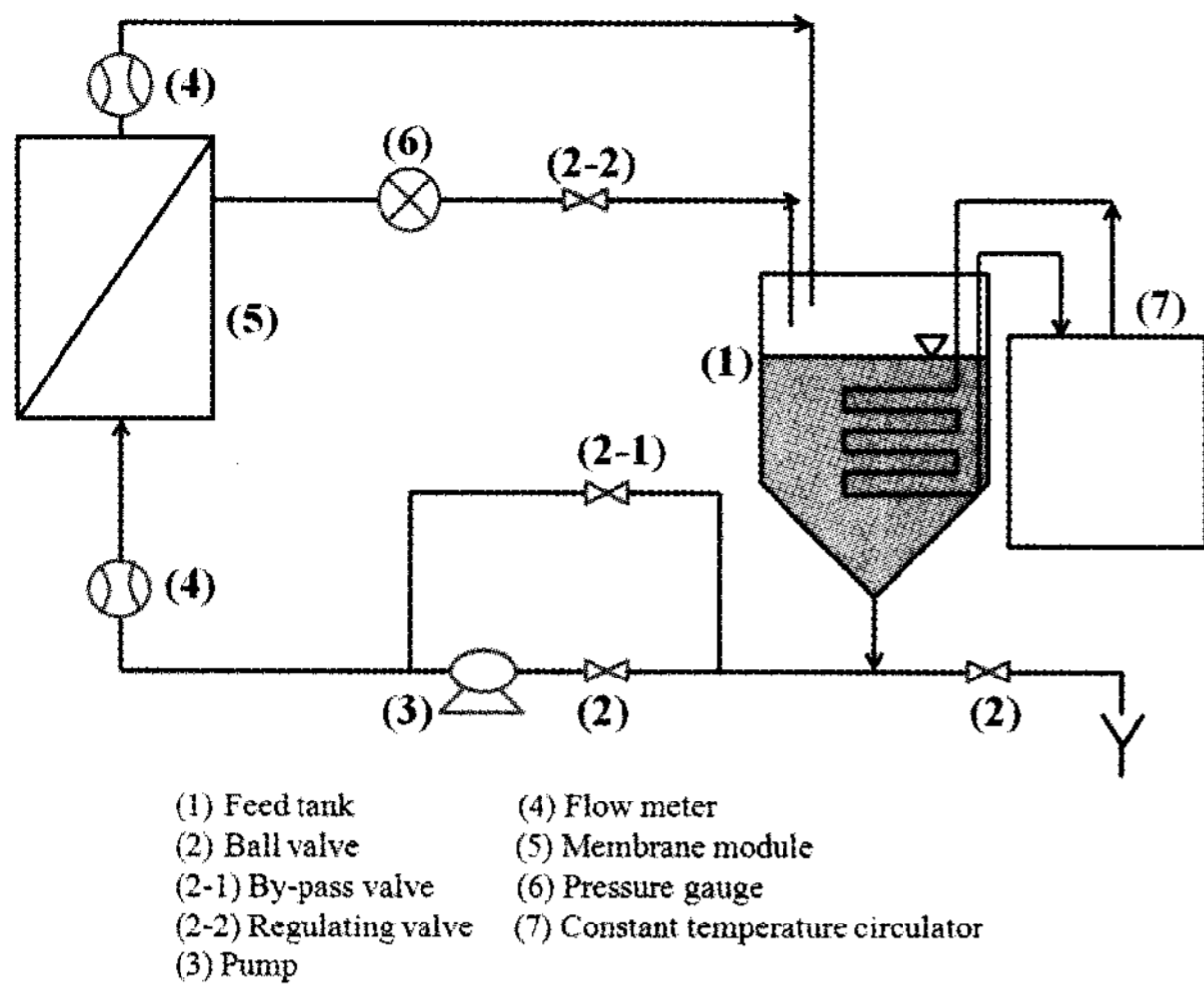


Fig. 3. Schematic flow diagram of membrane module test system.

막을 통과한 투과액은 유량계(4)로 측정된 후 입자의 농도 유지를 위하여 원료탱크로(1) 재순환시켰으며 분리막 농축액도 원료 저장탱크로 재순환시켰다. 또한 탱크 내에 원료용액은 항온순환조(7)의 물을 순환시켜  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

카울린의 입자크기가 비교적 크며 세척이 용이하므로 투과실험 후 흐르는 물로 분리막을 세척하였다. 실험 용액은 0.1, 0.2, 0.5 wt%의 카울린 수용액을 사용하였고, 압력의 변화는 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 bar로 변화시키면서 투과 실험하였다. 유량은 실험장치의 운전범위인 전이영역과 층류범위에서의 효과를 알아보기 위하여 15와 10 L/min로 변화시키면서 운전하였으며 레이놀즈 수는 각각 2,620, 1,750에 해당된다.

### 3. 실험결과 및 토론

#### 3.1. 순수 투과실험

카울린 수용액 투과실험에 앞서 평막의 순수 투과실험을 1.6 bar, 15 L/min,  $25^\circ\text{C}$ 에서 실시하여 Fig. 4에 나타내었다. 실험 시작 후 약 10분 동안은 투과유량이 급속히 감소하였으며 20분 이후에는 3% 이내로 일정하게 유지됨을 확인하였다. 이는 막 표면의 고밀도층과 이 층을 지지하는 다공질 지지층의 압밀화가 이루어진 후 일정한 투과유량을 보이는 것으로 판단된다. 평막의 순수 투과도를 측정하기 위하여 실험장치의 운전 범위 내인 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 bar에서 투과유속을 측정하였다. 먼저 돌기가 없는 평막의 순수 투과실험에 대하여 나타

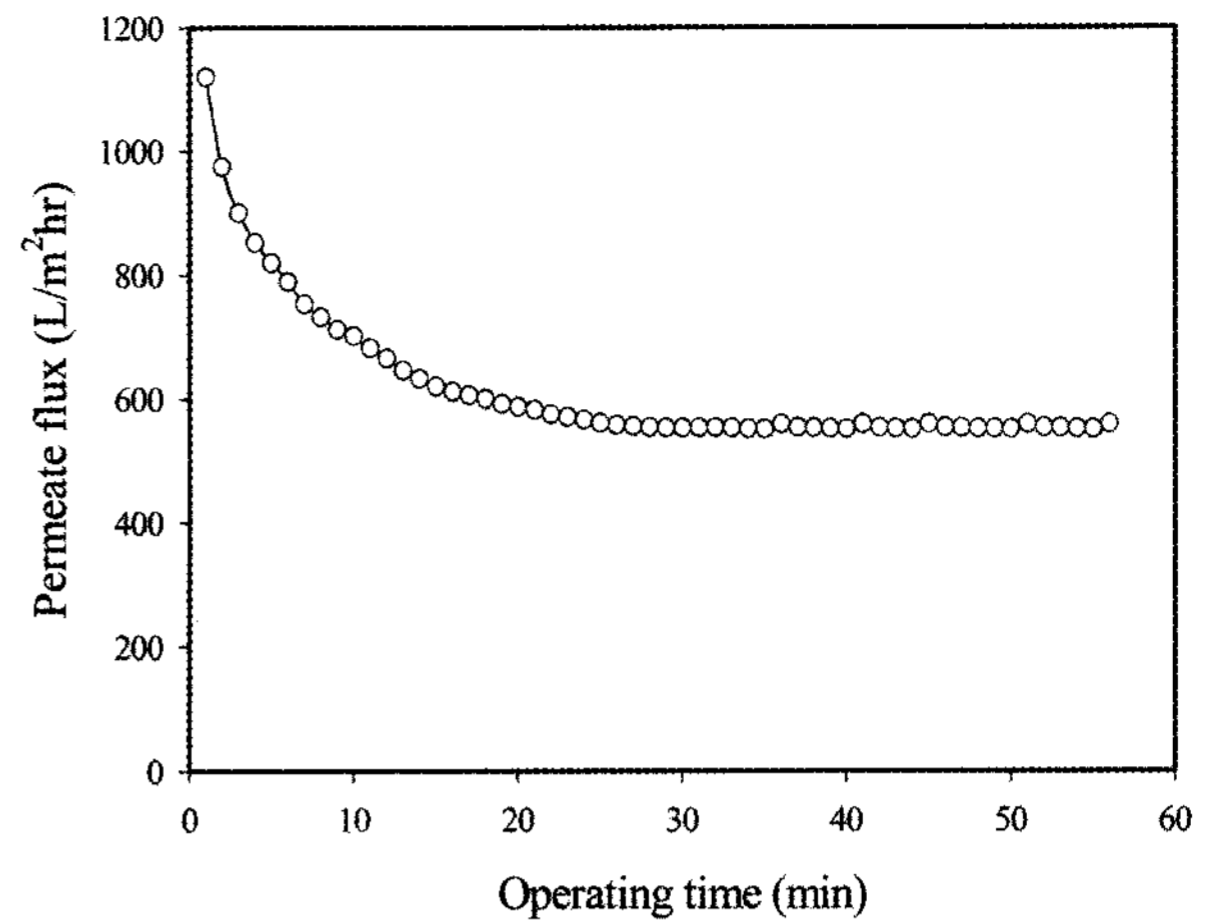
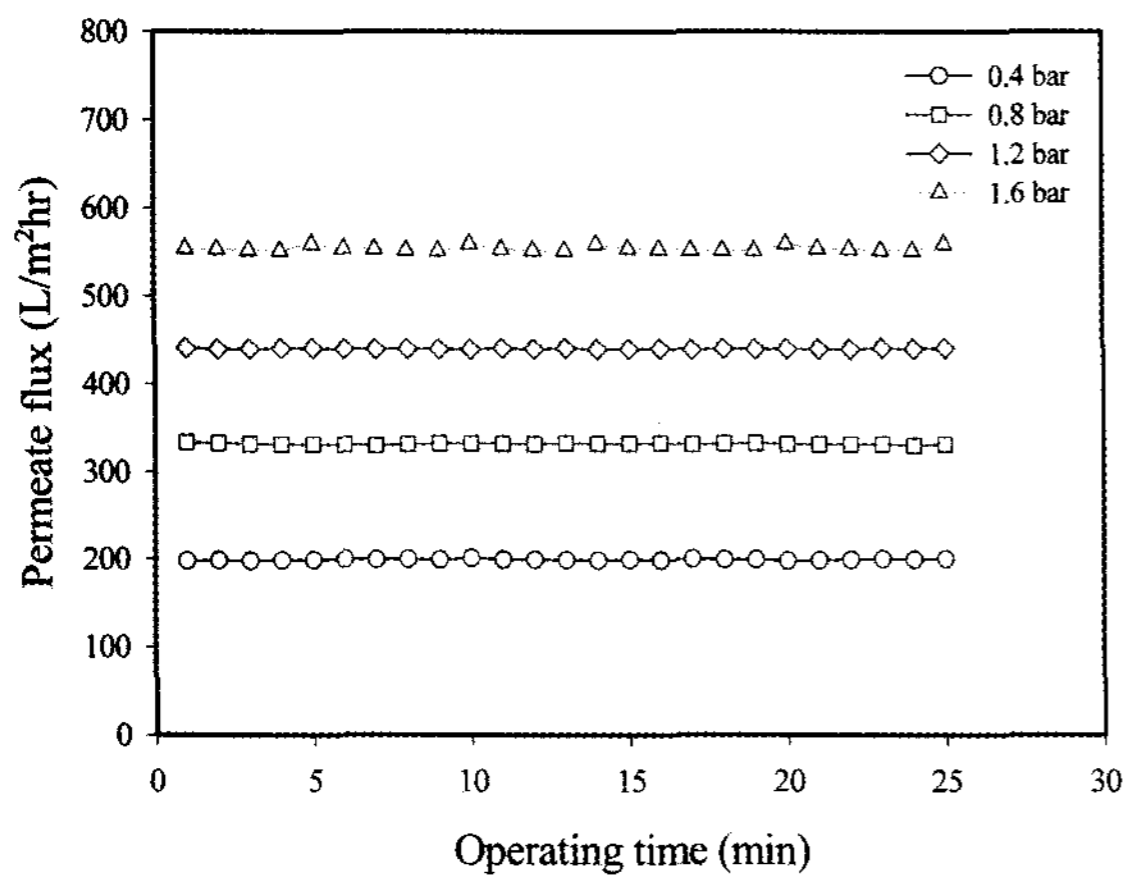


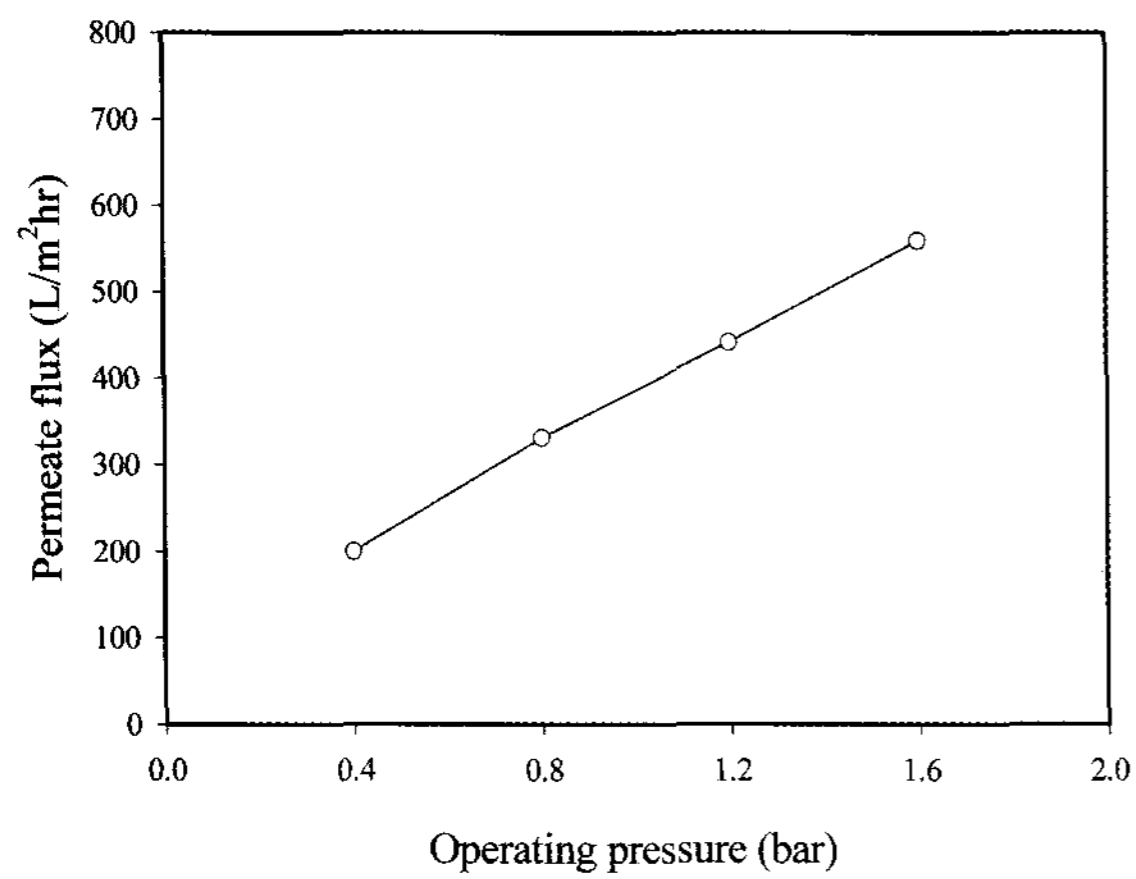
Fig. 4. Permeate flux with respect to operating time for pure water at 1.6 bar, 15 L/min and  $25^\circ\text{C}$  using a membrane module without protuberances.

내면 Fig. 5(a)에서와 같이 순수 투과유량은 각각의 운전압력, 운전시간에 따라서 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 투과실험 시작 25분 후 투과유속 변화가 3% 이내로 안정되었을 경우에 운전압력에 대한 투과유속을 Fig. 5(b)에 나타내었다. 운전압력 0.4 bar에서의 투과유속은  $200 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ , 0.8 bar에서는  $331 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ , 1.2와 1.6 bar에서는 각각 441과  $559 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 를 나타내었다. 운전압력에 대한 투과유속의 기울기(투과도)는  $300 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{bar}$ 로 나타났다. 특히 운전압력에 대한 투과유량의 직선이 원점을 통과하지 못하는 것은 압력 및 유량계의 측정오차와 순수의 오염 등에 의한 것으로 판단된다.

돌기가 있는 평막의 순수 투과실험 역시 Fig. 6에 나타내었다. 막의 돌기 유무에 상관없이 각각의 운전압력, 운전시간에 따른 투과유량은 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 운전압력 0.4, 0.8, 1.2 및 1.6 bar에서의 투과유속은 각각 216, 387, 516 및  $628 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 나타났다. 또한 운전압력에 대한 투과유속의 기울기(투과도)는  $344 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{bar}$ 로 나타났다. 투과실험에서 사용된 돌기 있는 분리막과 돌기없는 분리막의 순수 투과도는 약 13% 범위의 차이가 확인되었다. 따라서 본 실험에서는 돌기있는 막과 돌기없는 막의 카울린 투과유속과 순수 투과유속을 각각 비교하여 막오염 현상을 예측하였다. 또한 공급유량이 10 L/min인 층류영역에서의 순수 투과 실험 결과 역시 실험오차범위 내에서 같은 결과 값을 보였다. 카울린 수용액 실험한 후에는 막을 물리적으로 세척하고 다시 순수 투과실험을 실시하였으며 투과유량의 감소는 Fig. 9, 10과 같이 거의 보이지 않았다. 결국



(a)



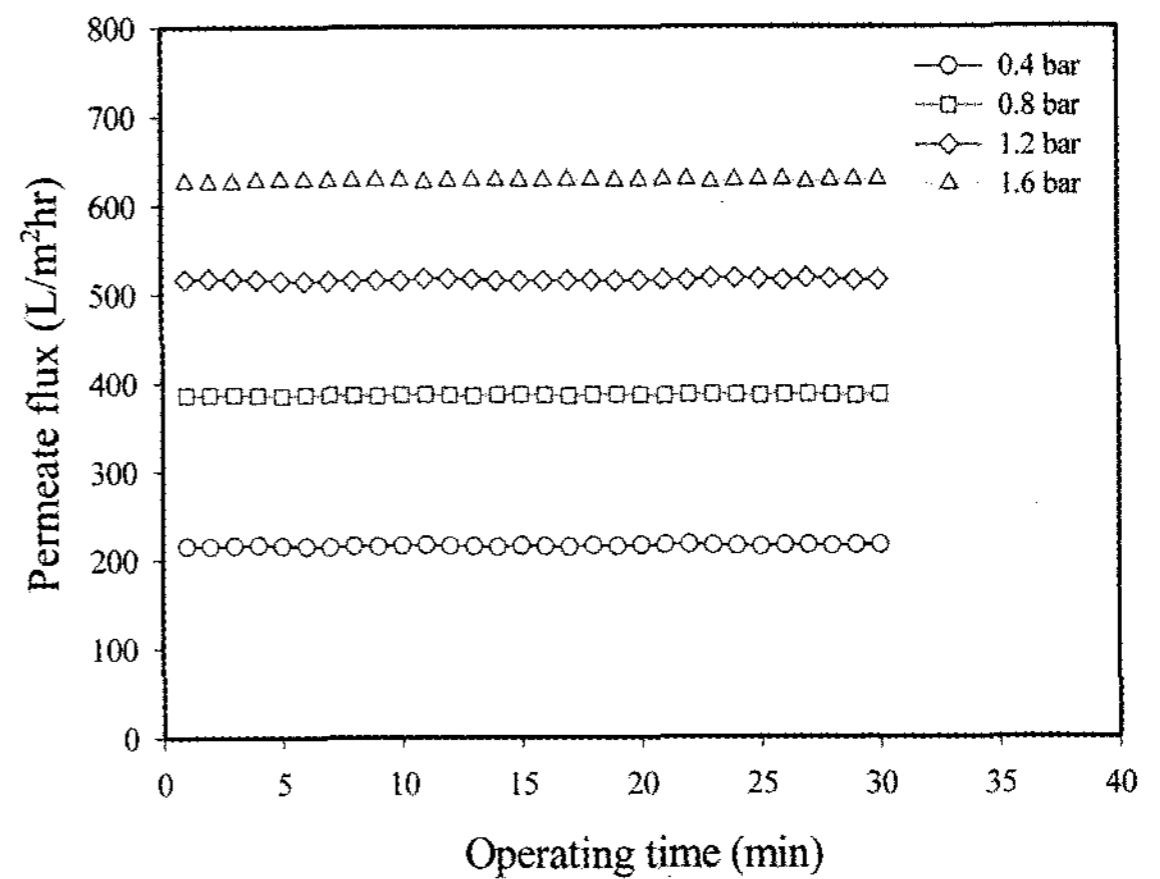
(b)

**Fig. 5.** (a) Permeate flux with respect to pressure for pure water at 15 L/min, 25°C using a membrane module without protuberances and (b) permeate flux at steady state for pure water with respect to operating pressure.

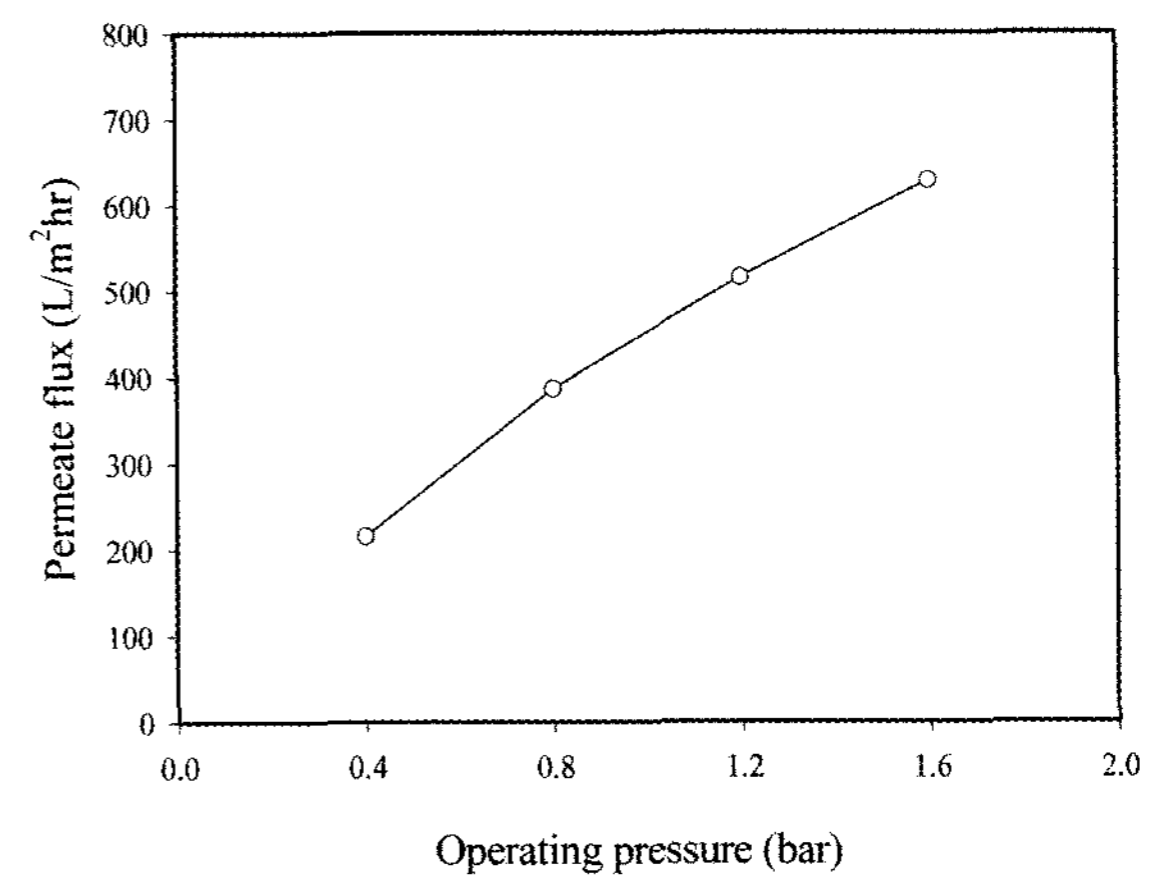
카울린 투과실험에서 투과저항은 투과실험 후 세척이 가능한 케이크 저항이 지배적임을 확인할 수 있었다.

### 3.2. 압력변화에 의한 영향

돌기가 없는 평막에서 유입유량 15 L/min, 온도 25°C로 유지한 후 0.1 wt% 카울린 수용액을 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 bar에서 투과실험하고 막의 투과성능 변화를 알아보기 위해 순수와 비교하여 Fig. 7(a)에 나타내었다. 모든 투과실험은 60분 동안 실시하여 막의 오염정도를 측정하였다. 투과압력이 0.4 bar인 카울린 수용액의 투과유속은 투과 시작 후 약 11분까지 급격히 감소한 후 3% 범위에서 지속적으로 감소하였다. 투과압력이 0.8, 1.2 그리고 1.6 bar인 경우 각각 투과 시작 후 약 8분, 5분 그리고 4분 후 까지 급격한 투과유속의 감소를 나타낸



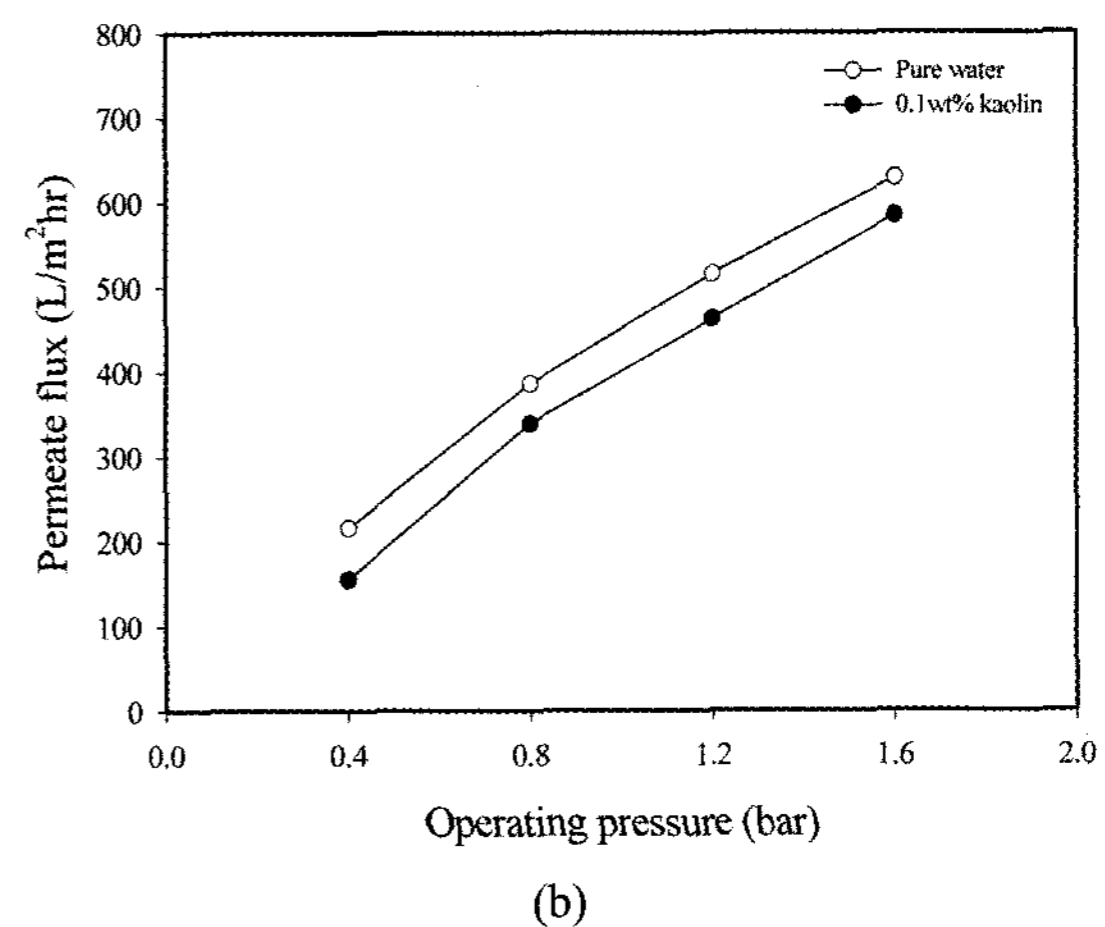
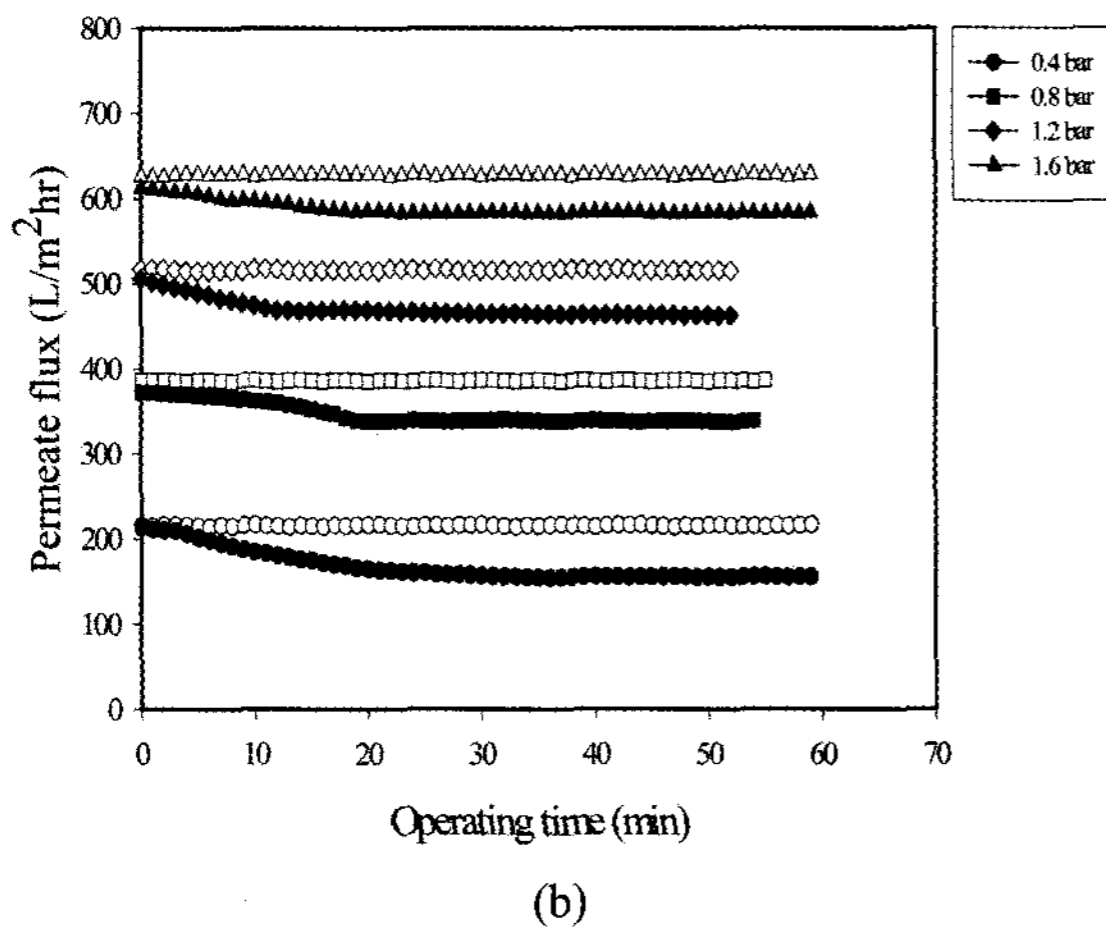
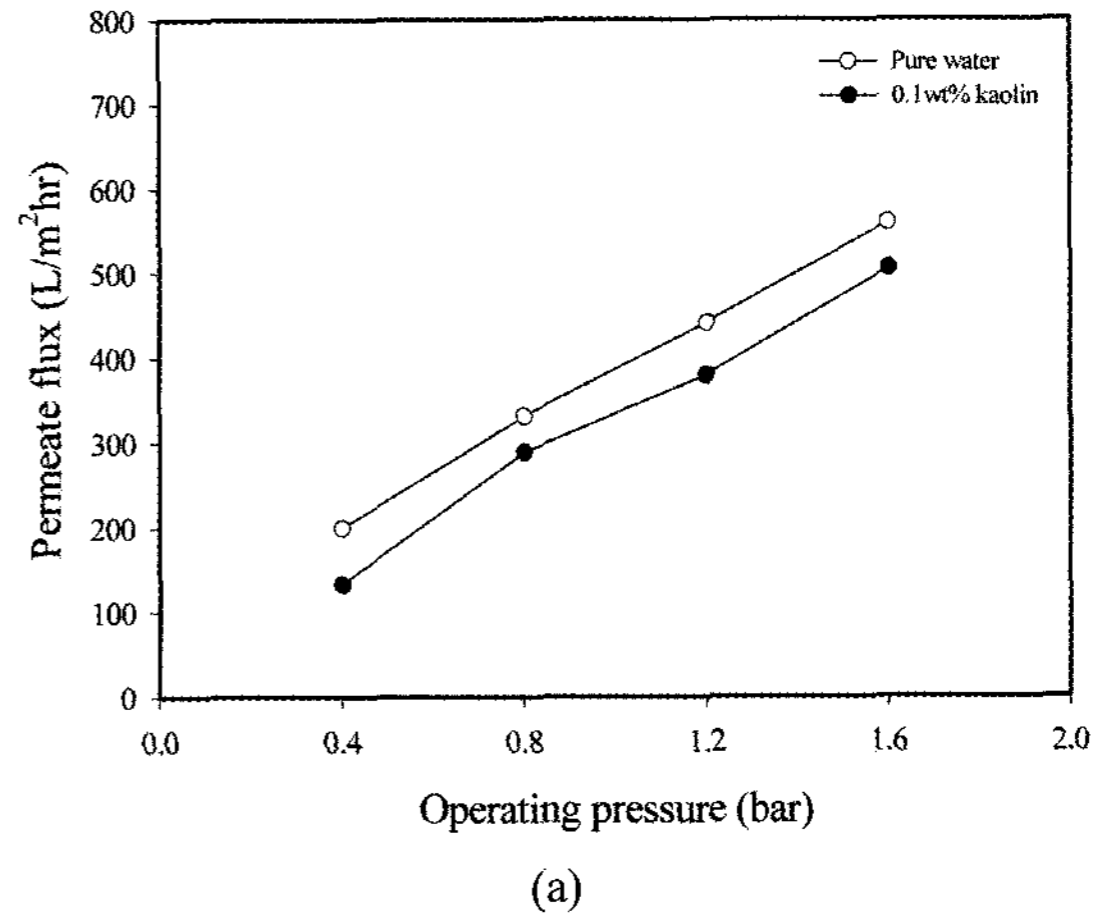
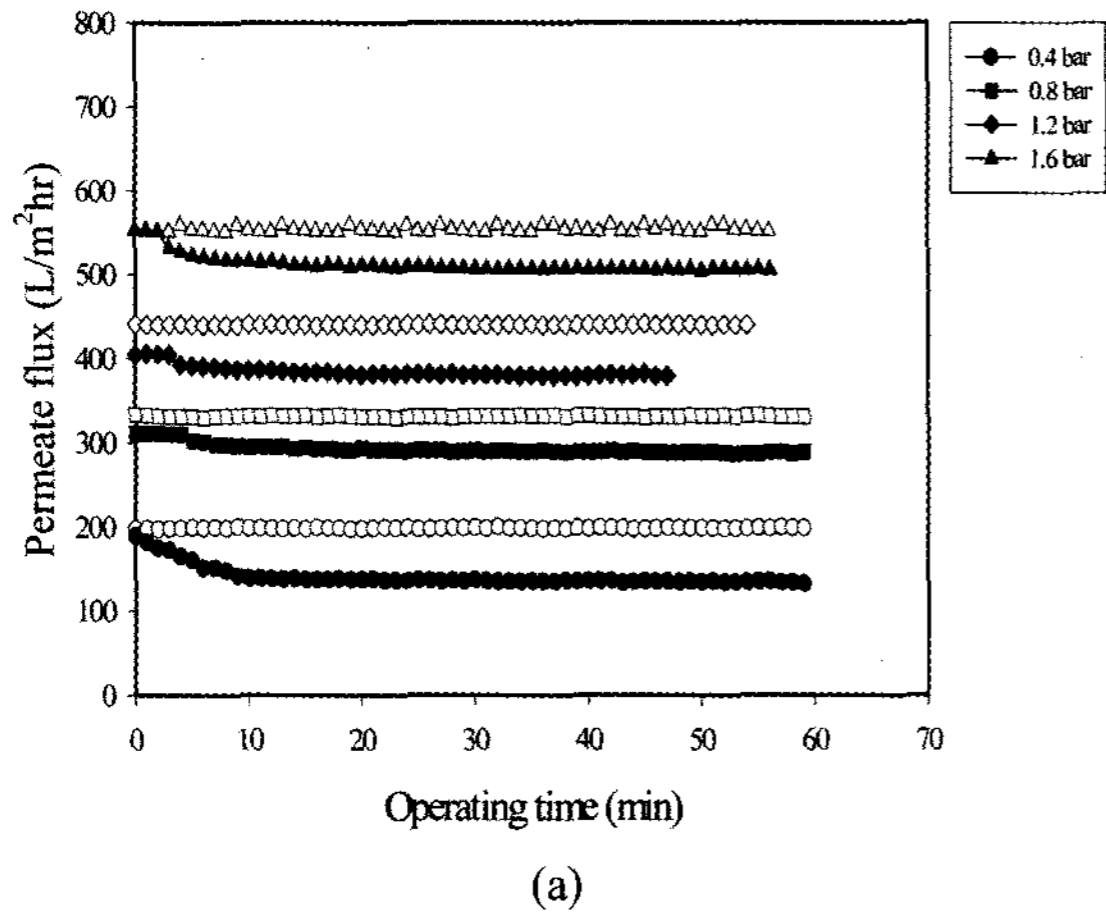
(a)



(b)

**Fig. 6.** (a) Permeate flux with respect to pressure for pure water at 15 L/min, 25°C using a membrane module with protuberances and (b) Permeate flux at steady state for pure water with respect to operating pressure.

후 지속적으로 감소함을 확인할 수 있었다. 운전압력이 높을수록 카울린 투과유속은 높을수록 높게 나타났으며 결국 분리막 표면에 케이크의 형성 속도가 증가하면서 투과유속의 급격한 감소가 측정되었다. Fig. 8(a)는 투과시간 60분에서의 카울린 투과유속을 같은 운전압력에서의 순수 투과유속과 비교하여 카울린 입자에 따른 막오염 현상을 상대적으로 나타낸 그림이다. 0.1 wt% 카울린의 투과유속은 0.4, 0.8, 1.2 및 1.6 bar에서 각각 137, 291, 381 및 513 L/m²·hr로 나타났으며 이는 순수대비 33.0, 13.9, 12.8 및 8.4%의 투과유속 감소에 해당된다. 카울린 수용액과 순수에 대한 투과유속의 차이는 0.8 bar일 경우가 가장 낮게 나타났으며 이는 본 실험조건하에서 막오염 저항을 최소화할 수 있는 효과적인 운전영역이라 할 수 있다.



**Fig. 7.** Permeate flux with respect to operating pressure and time for 0.1 wt% kaolin solution at  $Q = 15$  L/min and  $25^{\circ}\text{C}$  (a) membrane module without protuberances and (b) membrane module with protuberances. ● ■ ◆ ▲ represent for kaolin solution, ○ □ ◇ △ for pure water at the same conditions, respectively.

**Fig. 8.** Permeate flux with respect to operating pressure for 0.1 wt% kaolin solutions at  $Q = 15$  L/min,  $25^{\circ}\text{C}$  (a) membrane module without protuberances and (b) membrane module with protuberances.

돌기가 있는 평막에서도 유입유량을 15 L/min, 온도  $25^{\circ}\text{C}$ 로 유지한 후 0.1 wt% 카올린 수용액을 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 bar에서 투과실험하고 막의 성능저하 정도를 알아보기 위해 순수와 비교하여 Fig. 7(b)에 나타내었다. 돌기가 있는 평막 모듈에서 투과시간 경과에 따른 카올린 투과유속 감소의 전반적인 경향은 돌기없는 모듈과 유사하였다. 그러나 투과압력 0.4, 0.8, 1.2 그리고 1.6 bar에서 투과유속이 현저하게 감소하는데까지 소요되는 투과시간은 각각 약 25분, 21분, 16분 및 11분으로 크게 지연됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 8(b)에서와 같이 투과시간 60분에서의 카올린 투과유속을 나타내면 0.4, 0.8, 1.2 그리고 1.6 bar에서 각각 156, 339, 462 및  $584 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 이며 순수대비 28.2, 12.0, 10.2 및

7.1%의 투과유속 감소로서 돌기없는 경우보다 상대적으로 우수함을 알 수 있다. 이밖에 운전압력이 0.8 bar 일 경우 돌기없는 모듈의 경우와 마찬가지로 카올린 오염으로 인한 투과유속 감소가 최소임이 확인되었다. 결과적으로 돌기있는 평막은 분리막 표면에 작은 와류를 형성시켜 카올린 입자의 분리막 표면 오염을 절감시키고 비록 본 투과실험 범위에서는 5% 범위의 투과유속 향상이지만 투과초기에 막오염 방지에는 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.

3.3. 농도변화에 의한 영향

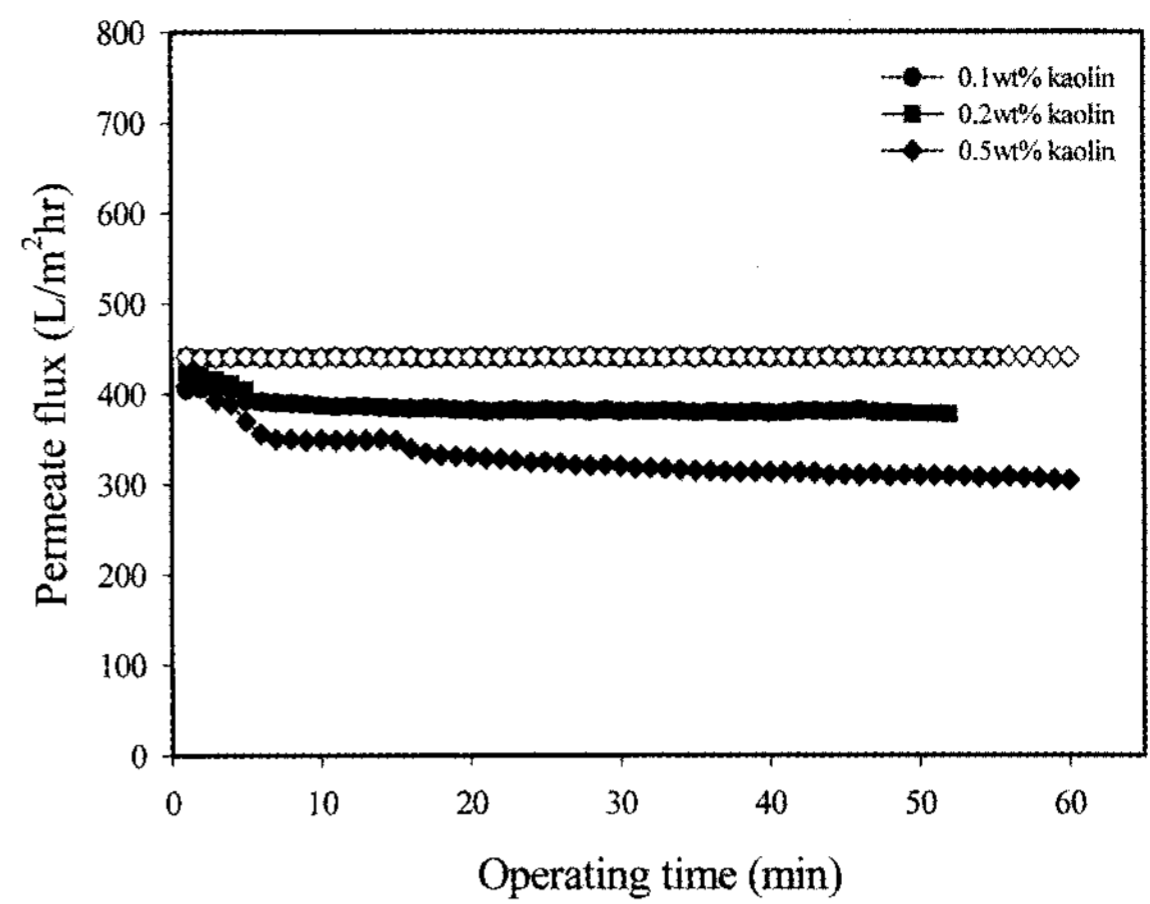
농도변화에 의한 투과특성을 측정하기 위하여 카올린 수용액의 농도를 0.1, 0.2, 0.5 wt%로 변화시키면서 실험을 실시하였다. 유입유량 15 L/min, 온도  $25^{\circ}\text{C}$ 로 유지한 후 0.1 wt% 카올린 수용액을 1.2 bar에서 돌기

가 없는 막의 투과실험을 실시하고 막의 성능저하 정도를 알아보기 위해 순수와 비교하여 Fig. 9(a)에 나타내었다. 막의 투과유량은 실험 시작부터 급격히 감소하여 약 5분 후에  $381 L/m^2 \cdot hr$ 를 나타내었으며 순수투과유속과 비교하여 12.8%의 성능저하를 보였다. 동일한 조건에서 카올린의 농도를 0.2 wt%로 조제하여 실험한 결과 약 5~6분에서  $378 L/m^2 \cdot hr$  값을 유지하며 더 이상의 투과유량의 감소는 보이지 않았다. 이는 순수 투과유속과 비교하여 14.0%의 투과유속 감소에 해당된다. 0.5 wt% 카올린 수용액으로 실험을 수행한 결과 역시 운전시작부터 급격한 투과유량 감소를 나타냈으며 실험진행 시간인 60분까지도 조금씩 유량이 감소함을 보였다. 실험 종료시의 투과유속은  $304 L/m^2 \cdot hr$ 이었으며 순수 투과유속과 비교하면 31.3%가 감소되었다.

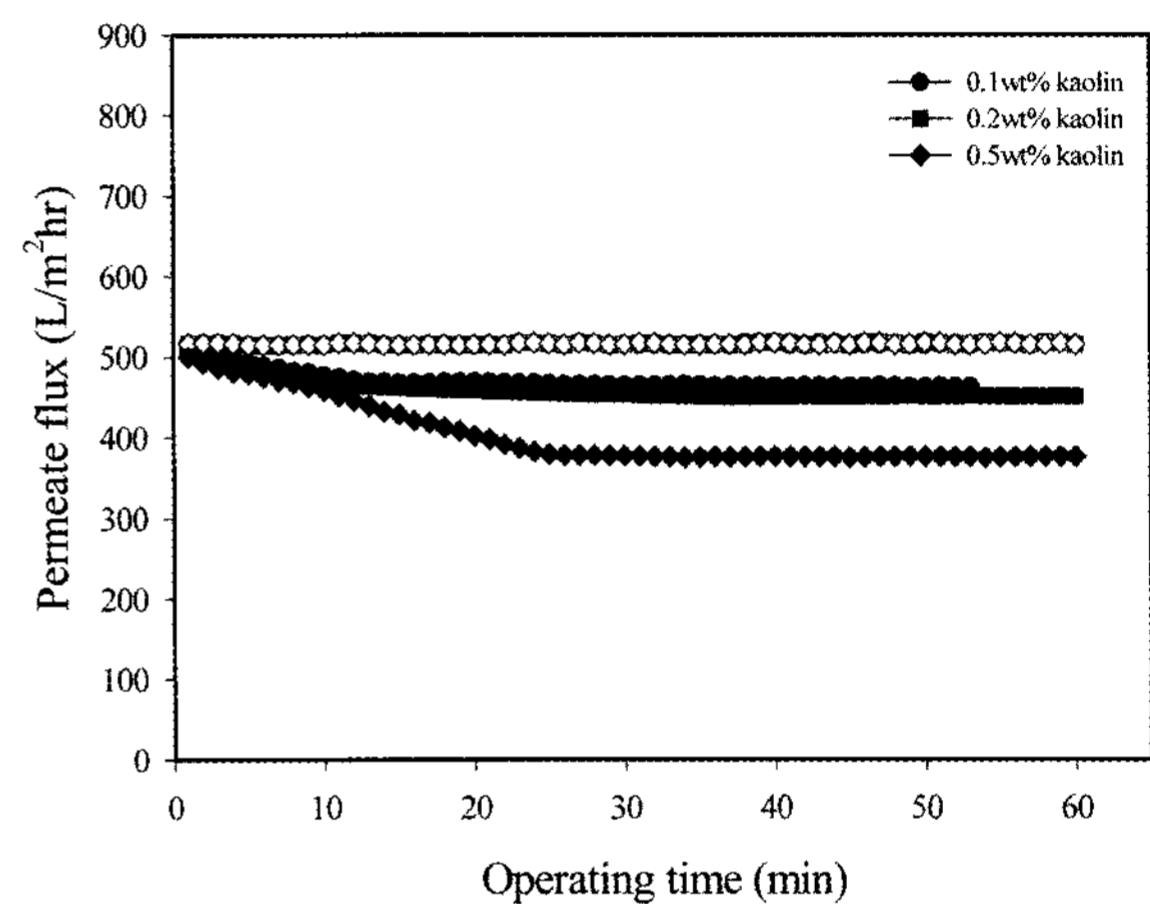
돌기가 있는 막에서의 농도변화에 의한 투과특성을 측정하기 위하여 카올린 수용액의 농도를 동일한 조건의 농도로 조제하여 실험을 실시하였다. 유입유량 15 L/min, 온도 25°C로 유지한 후 0.1 wt% 카올린 수용액을 1.2 bar에서 투과실험하고 순수의 투과유속과 비교하여 Fig. 9(b)에 나타내었다. 막의 투과유량은 실험 시작부터 서서히 감소하여 투과시간 16분 후에  $462 L/m^2 \cdot hr$ 를 보이며 순수 투과유속과 비교하여 10.2%의 성능저하를 보였다. 동일 조건에서 카올린의 농도를 0.2 wt%로 조제하여 실험한 결과 약 14분에서  $451 L/m^2 \cdot hr$  값을 유지하며 더 이상의 투과유량의 감소는 보이지 않았으며 순수 투과유속과 비교하여 12.5%의 막성능저하가 이루어졌음을 알 수 있었다. 0.5 wt%의 카올린 수용액으로 실험을 수행한 결과 서서히 투과유량이 감소하여 투과 실험 후 25분까지 투과유량이 감소하여  $376 L/m^2 \cdot hr$  나타냈고 더 이상 감소하지 않았다. 이것을 순수 투과유속과 비교하면 27.0% 감소이다. Fig. 9에서와 같이 돌기 유무에 관계없이 0.1 및 0.2 wt% 카올린 투과유속의 경우는 상당히 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 카올린 농도를 2.5 내지 5배로 증가시 0.5 wt%로 유지하면 예상하던 바와 같이 분리막 표면에 카올린의 축적이 현저하게 발생하여 육안으로도 확인할 수 있었으며 투과유속 역시 낮게 측정되었다.

### 3.4. 유량변화에 의한 영향

유량변화에 의한 투과특성을 알아보기 위해 운전온도 25°C 운전압력 1.2 bar로 유지하였으며 0.1 wt% 카올린 수용액을 사용하여 공급유량을 10, 및 15 L/min로



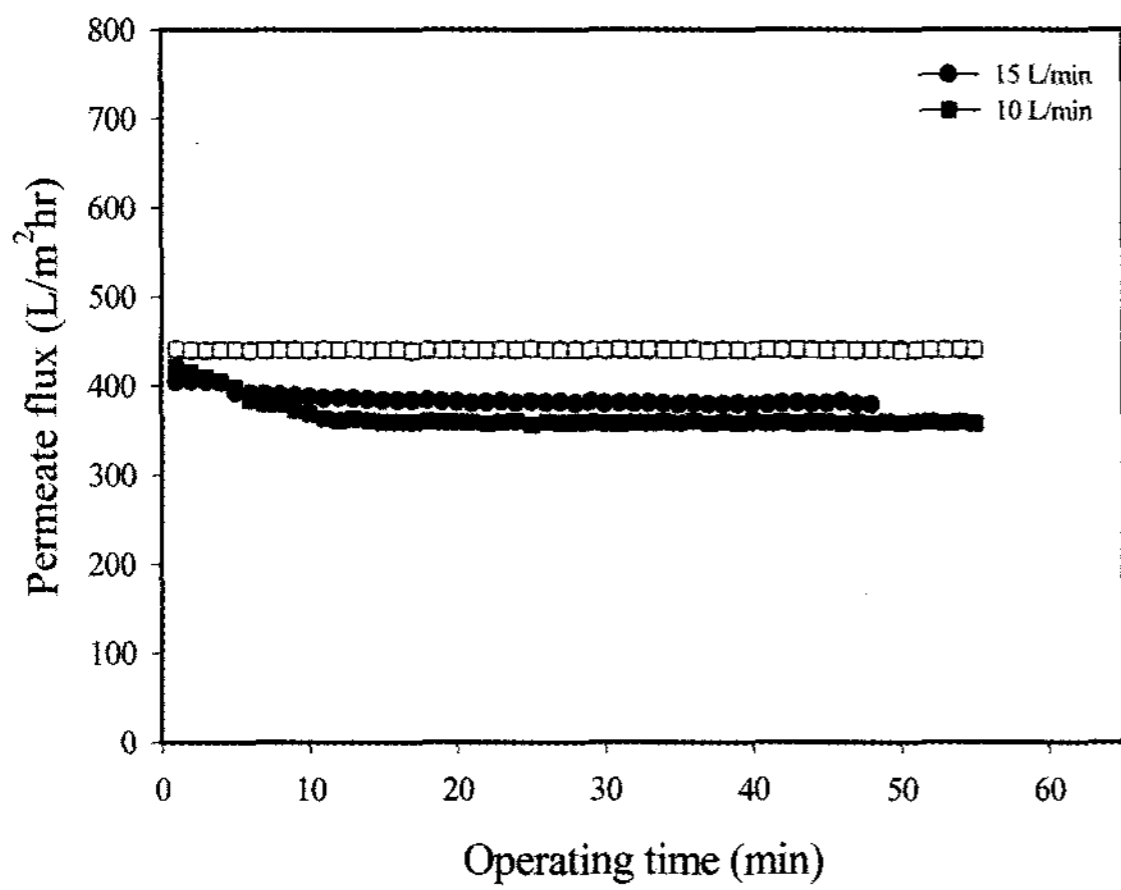
(a)



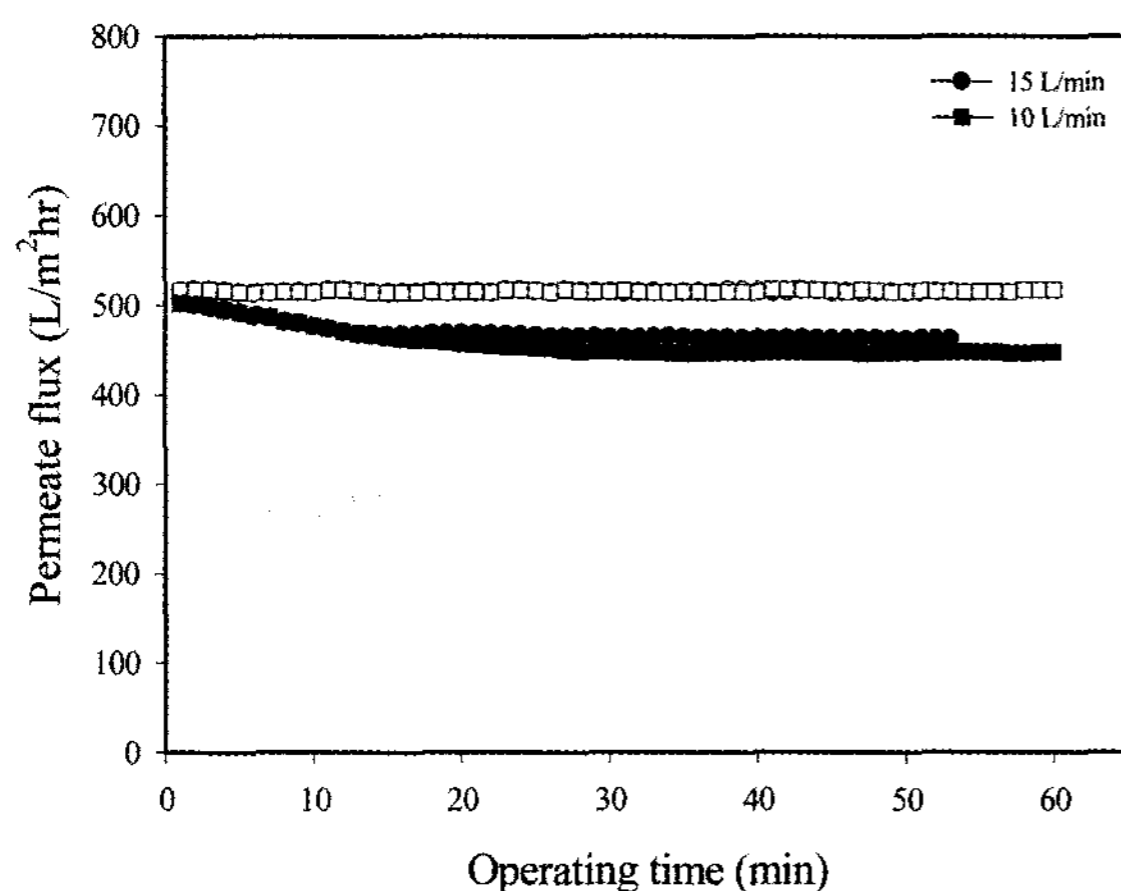
(b)

**Fig. 9.** Permeate flux with respect to kaolin concentrations and time for kaolin solution at  $Q = 15 L/min$ , 1 bar and 25°C (a) membrane module without protuberances and (b) membrane module with protuberances. ● ■ ◆ represent for kaolin solution, ○ □ ◇ for pure water at the same conditions, respectively.

변화하여 투과실험 하였다. 유체가 흐를 수 있는 평막 모듈의 폭은 18.5 cm, 97.5 cm로서 유체역학적인 상당 직경(equivalent diameter) 1.2 cm에 해당하며 이를 고려한 10 및 15 L/min 순수 공급유량은 각각 1,750 및 2,620에 해당하는 레이놀즈 수가 된다. 즉 유체역학적으로 층류와 전이영역 흐름에 해당된다. 레이놀즈 수를 1,000 이하로 유지하려고 시도하였으나 유량의 선속도가 너무 낮아 평막 모듈 내에 기포를 제거할 수 없었으며 따라서 분리막 표면에 일정한 유속을 유지할 수 없었다. 또한 난류영역의 투과실험은 원료 가압펌프의 용량 부족으로 인하여 불가능 하였다. 돌기가 없는 막에서 전이영역인 15 L/min과 층류영역인 10 L/min에서의



(a)



(b)

**Fig. 10.** Permeate flux with respect to flow rate and time for 0.1 wt% kaolin solution at 1 bar and 25°C (a) membrane module without protuberances and (b) membrane module with protuberances. ● ■ represent for kaolin solution, ○ □ for pure water at the same conditions, respectively.

투과실험 결과를 Fig. 10(a)에 나타내었다. 유량 15 L/min 투과실험을 시작 후 약 5분 후에 381 L/m<sup>2</sup>·hr, 순수투과유속 대비 12.8%의 성능 저하를 보였다. 반면 유입유량을 층류영역인 10 L/min로 낮추면 투과유속은 투과 시작후 8분까지 358 L/m<sup>2</sup>·hr이었으며 순수투과유속 대비 18.4%의 성능저하를 보였다.

돌기가 있는 막 역시 같은 조건인 전이영역 15 L/min과 층류영역 10 L/min에서 비교하여 Fig. 10(b)와 같이 나타내었다. 유입유량 15 L/min에 경우 투과 시작 후 16분대 463 L/m<sup>2</sup>·hr를 보이며 순수투과유속대비 10.2%의 성능 저하를 보였다. 유입유량을 층류영역인 10 L/min로 감소시키면 투과유속은 전이영역에서의 투

과유속보다 투과 시작 후 18분까지 지속적으로 감소하여 447 L/m<sup>2</sup>·hr를 보이며 순수 투과유속 대비 13.5% 성능저하를 보인다. 본 평막 모듈에 돌기 유무에 관계없이 공급유량이 증가하면 분리막 표면에 선속도에 따른 전단력의 증가로 막오염을 감소시킬 수 있으므로 순수대비 투과유속 감소율이 줄어들음을 확인할 수 있었다. 또한 층류영역에서 돌기에 의한 투과유속 효과는 4.9% (=18.4~13.5)로 전이영역의 2.6% (=12.8~10.2)보다 약 2배가량 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 유체의 공급유량이 낮을수록 층류를 형성하여 유체역학적으로 분리막 표면에서의 혼합을 유발할 수 없기 때문이다. 그러나 돌기가 있는 평막 모듈의 경우는 분리막 표면에 와류를 자연적으로 형성시켜 보다 효과적인 분리막 표면의 혼합을 유발할 수 있기 때문이다. 따라서 평막 모듈의 돌기는 공급유량이 낮은 층류영역에서 분리막 표면의 오염을 감소시키는데 더욱 효과적임을 알 수 있다.

또는 카올린 배제율은 원료용액과 분리막 투과용액을 탁도계로 측정하여 계산하였으며, 본 투과실험에서의 배제율은 98% 이상으로 대부분의 카올린이 제거되었음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 (주)퓨어엔비텍에서 제작한 돌기형 평판 분리막 모듈 막오염 및 투과성능 향상에 미치는 영향을 측정하기 위하여 돌기가 없는 동일한 평판 분리막 모듈과 비교 실험을 수행하였다. 돌기형 평판 분리막과 돌기가 없는 평판 분리막의 순수 투과도가 13% 정도의 차이가 있었으므로 카올린 투과실험시 투과유속을 직접 비교하지 않았으며 각각의 분리막 모듈에 대하여 순수대비 카올린 투과유속의 변화를 측정하여 돌기가 평판형 분리막 모듈에 미치는 영향을 분석 평가하였다. 압력, 카올린 용액농도 및 공급유량을 운전변수로 투과 실험하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 먼저 운전압력을 0.4 bar에서 1.6 bar까지 증가시키면서 카올린 용액을 투과시킬 경우, 돌기 유무에 관계없이 운전압력이 증가함에 따라서 투과유속의 급격한 감소 후 정상상태에 도달하는 운전시간이 단축되었고 순수대비 투과유속 감소비가 낮게 나타남을 확인하였다. 돌기형 평막 모듈에 경우, 투과유속이 정상상태에 도달하는 운전시간을 2배 이상 연장되었으며 순수대비 투과유속의 감소비 역시 1 내지 5%가량 낮게 나타났

다. 따라서 평막형 모듈의 돌기 존재여부가 정상상태 하에서의 투과유속 향상에는 크게 기여하지 않았지만 적어도 분리막 표면에 카올린 오염을 크게 지연시킴을 확인하였다.

2) 카올린 농도에 따른 돌기형 평막 모듈의 효과 역시 정상상태 투과유속 도달시간 2배 이상 연장, 순수대비 투과유속 감소비가 1 내지 4% 가량 낮게 나타났다. 특히 농도가 높은 0.5 wt% 카올린 입자 투과시 돌기에 의한 막오염 절감 효과가 큰 것으로 나타났다.

3) 층류 및 전이영역에서의 카올린 용액 투과유속을 측정하면 공급유량이 높아 분리막 표면에서의 전단력이 큰 전이영역에서의 투과유속이 돌기 존재에 무관하게 높게 나타났다. 그러나 돌기에 의한 막오염 감소 내지 투과유속의 향상은 용액 혼합의 정도가 낮은 층류영역이 2배 가량 높게 나타남을 확인하였다.

4) 결론적으로 평막 모듈에 부착된 돌기는 정상상태 투과유속을 5% 범위에서 향상시킬 수 있었으며 특히 카올린 입자의 막오염 현상을 상당부분 지연시키는데 효과가 있었다.

## 감 사

본 연구수행을 위하여 평막형 분리막 모듈과 각종 기술 자료를 제공하여 주신 (주)퓨어엔비텍의 협조에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. K. Y. Chung and M. S. Lee, "Flux enhancement in a helical microfiltration module with gas injection", *Sep. Sci. Tech.*, **40**, 2479 (2005).
2. K. Y. Chung, M. E. Brewster, and G. Belfort, "Dean vortices with wall flux in a curved channel membrane system 3. Concentration polarization in a spiral reverse osmosis slit", *J. Chem. Eng. Japan*, **31(5)**, 683 (1998).
3. K. Y. Chung and K. M. Chang, "Fouling steps in the microfiltration of kaolin suspensions", *J. Ind. Eng. Chem.*, **7(4)**, 250 (2001).
4. 박영규, 이영무, "분리막 공정에서 막오염", *멤브레인*, **6(1)**, 1 (1996).
5. 이용택, 오중교, "분리막을 이용한 정수처리공정에

서 유, 무기물질이 막오염에 끼치는 영향", *멤브레인*, **13(4)**, 219 (2003).

6. D. Delaunay, M. R. Baudry, J. G. Zafrilla, B. Balanec, M. Frappart, and L. Paugam, "Mapping of protein fouling by FTIR-ATR as experimental tool to study membrane fouling and fluid velocity profile in various geometries and validation by CFD simulation", *Chem. Eng. Proc.* (2008) in press.
7. Y. L. Li and K. L. Tung, "The effect of curvature of a spacer-filled channel on fluid flow in spiral-wound membrane modules", *J. Membr. Sci.*, **319(1/2)**, 286 (2008).
8. J. Hiddink, D. Kloosterboer, and S. Bruin, "Evaluation of static mixer as convective promoters in the ultrafiltration of dairy liquids", *Desalination*, **35**, 149 (1980).
9. J. P. Kim, J. J. Kim, M. S. Chun, B. R. Min, and K. Y. Chung, "Flux enhancement by glass balls inserted into a membrane module", *Water Sci. Tech.: Water Supply*, **1(5/6)**, 285 (2001).
10. R. Bouzerar, P. Paullier, and M. Y. Jaffrin, "Concentration of mineral suspensions and industrial effluents using a rotating disk dynamic filtration module". *Desalination*, **158**, 79 (2003).
11. 정건용, 조영수, 김종표, "회전원판을 이용한 침지형 분리막 모듈의 투과특성", *멤브레인*, **16(1)**, 51 (2006).
12. 김제우, 노수홍, "1축 회전판형 UF모듈의 투과모델 및 oil emulsion 분리 특성", *멤브레인*, **6(2)**, 86 (1996).
13. 김제우, 노수홍, "2축 회전판형 UF모듈의 oil emulsion 분리 특성 연구", *멤브레인*, **6(4)**, 219 (1996).
14. O. Akoum, M. Y. Jaffrin, L. H. Ding, and M. Frappart, "Treatment of dairy process waters using a vibrating filtration system and NF and RO membranes", *J. Membr. Sci.*, **235**, 111 (2004).
15. G. Belfort, J. M. Pimbley, A. Greiner, and K. Y. Chung, "Diagnosis of membrane fouling using a rotating annular filter. 1. Cell culture media", *J. Membr. Sci.*, **77**, 1 (1993).