

회전원판을 이용한 침지형 분리막 모듈의 투과특성

조 영 수 · 김 중 표* · 정 건 용[†]

서울산업대학교 화학공학과, *연세대학교 화학공학과
(2006년 2월 23일 접수, 2006년 3월 17일 채택)

Permeation Characteristics of the Submerged Membrane Module Using the Rotating Disks

Young Su Cho, Jong Pyo Kim*, and Kun Yong Chung[†]

Department of Chemical Engineering, Seoul National University of Technology

*Department of Chemical Engineering, Yonsei University

(Received February 23, 2006, Accepted March 17, 2006)

요 약: 본 연구는 침지형 분리막 모듈에 자체 설계한 회전원판을 적용하여 운전시간 경과에 따른 막오염 감소효과와 최적의 운전조건을 투과실험으로 알아보았다. 원료용액으로는 kaolin과 bentonite를 농도별로 제조하여 사용하였고, 원판의 회전수를 120 rpm까지 변화시키면서 60분 동안 실험하였다. 회전원판에 의한 막오염 감소 효과로 kaolin 수용액을 대상으로 한 실험에서는 흡입압력이 약 28%까지 감소하였다. 또한 kaolin 농도에 따라서 최적 투과유속이 감소하였으며 0.4 wt% 일 경우는 60 내지 70 LMH가 적당하였다. Bentonite 수용액에 대하여 투과유속이 30 LMH 일 경우에 원판의 회전속도가 80 rpm 이상이 되면 흡입압력이 대략 0 mmHg에 접근하였다.

Abstract: The permeation experiments were carried out for the submerged membrane module equipped with self-designed rotating disks in order to determine the effect of fouling reduction and the optimum operating conditions as a function of operating time. Kaolin and bentonite particles were used to prepare various concentrations of feed solution. Every experiment was continued until 60 minutes at various rotating disk speeds up to 120 rpm. The suction pressure for kaolin solutions decreased to 28% by using rotating disk to decrease the fouling. Also, the optimum permeation flux decreased as kaolin concentration increased, and became 60 to 70 LMH for 0.4 wt% of kaolin solution. The suction pressure for bentonite experiment approached to 0 mmHg at 30 LMH and above 80 rpm rotating disk speed.

Keywords: submerged plate membrane, rotating disk module, permeation characteristics, kaolin, bentonite

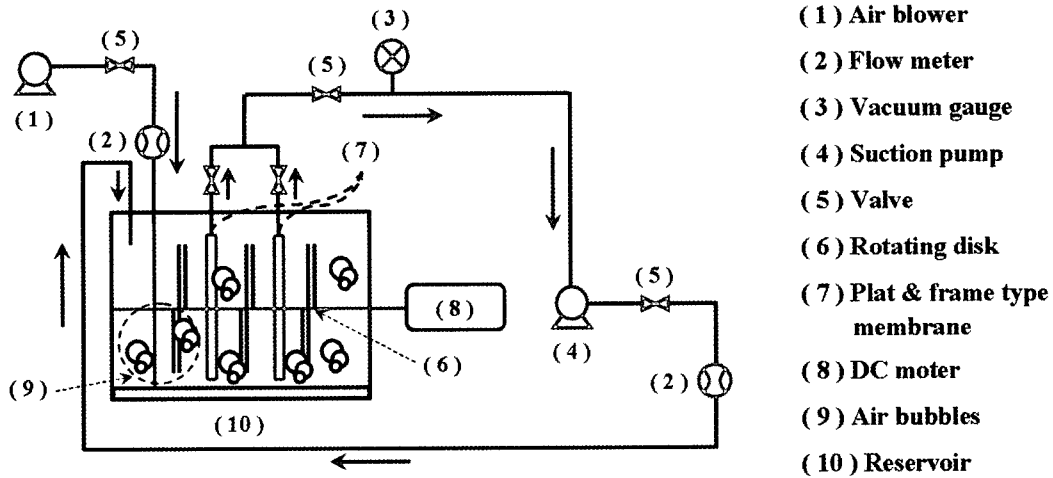
1. 서 론

세계적인 수자원의 급속한 수요 증가와 인구 증가에 따라 향후 2025년에는 인류의 2/3 정도가 물 부족 현상에 직면하게 될 것이다. 현재 물위기는 대부분 아시아, 아프리카, 라틴아메리카 등의 개발도상국에서 발생하고 있으며 선진국들도 물 부족과 수질오염의 심화로 물 관리 여건이 악화될 것으로 예상하고 있다. 따라서 물의 효과적인 재활용과 고유가 시대에 따른 에너지 절약형 공정의 필요성이 증가하고 있으며 분리막

공정에 관한 연구와 응용은 국내·외적으로 급속하게 확대되고 있다.

막여과 공정은 여러 가지 장점에도 불구하고 공정상 불가피하게 막오염이라는 큰 문제를 동반한다. 이러한 막오염 및 농도분극화 현상은 투과유속의 저하와 막여과 공정의 경제성을 크게 저하시키므로 막오염을 최소화할 수 있는 여러 가지 방법이 연구되고 있다[1]. 이러한 연구에는 분리막 표면의 개질을 통한 anti-fouling 분리막 제조기술 개발이나 막모듈의 최적 설계 및 운전방법 개선으로 분리막 표면 근방에 난류를 형성시켜 막오염 발생을 감소시키는 방법이 있다[2-6]. 또한 회전 원판형 모듈로서 원판형의 분리막이 회전 중심축에

[†]주저자(e-mail : kychung@snut.ac.kr)



- (1) Air blower
- (2) Flow meter
- (3) Vacuum gauge
- (4) Suction pump
- (5) Valve
- (6) Rotating disk
- (7) Plat & frame type membrane
- (8) DC motor
- (9) Air bubbles
- (10) Reservoir

Fig. 1. Schematic diagram of the submerged membrane system using the rotating disk.

고정 설치되고 분리막은 중심축의 회전에 의해 회전하며 투과액은 중심부의 회전축에 집수된 후 외부로 배출되는 방식으로 자체 회전에 의해 발생하는 높은 전단응력이 분리막 표면에 난류를 형성하여 막오염 형성을 감소시키는 연구사례가 있다[7-11]. 그러나 이상의 시스템은 분리막 자체가 회전하므로 밀봉에 대한 추가적인 문제와 더욱이 모듈 전체를 회전시켜야 하므로 에너지의 소비가 크다.

본 연구에서는 기존의 침지형 공정에 회전 원판만을 추가적으로 삽입하여 비교적 적은 에너지 소비로 분리막 표면에 충분한 난류 효과를 얻을 수 있도록 설계하였다[12]. 또한 투과성능을 확인하기 위하여 무기입자인 kaolin과 bentonite 수용액을 농도별로 제조하여 원판의 회전속도에 따른 흡입압력의 변화를 측정하여 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 분리막 및 실험재료

실험에 사용한 분리막은 코레드사의 공칭크기 0.2 μm , 막면적 0.09 m^2 인 PES (polyether sulfone) 재질의 정밀여과용 침지형 평막 모듈이다. 입자는 삼전화학의 kaolin과 bentonite 입자를 사용하여 일정 농도별로 수용액을 제조하여 실험하였다. 입자분석기(Malvern, LS230)로 분석한 결과 kaolin의 입자 범위는 0.04~193 μm , bentonite는 0.04~84 μm 이었다. 또한 본 실험

에 사용한 순수는 수돗물을 공칭 0.5 μm 크기의 전처리 필터로 처리하여 사용하였다.

2.2. 실험장치

실험장치는 Fig. 1에서와 같이 저장조(10)의 중앙에 모터와 연결된 회전축이 있으며, 이 회전축은 3장의 회전원판과 연결되어 있다. 회전원판 사이에는 2장의 PES 평막 모듈(7)을 설치할 수 있도록 설계하였다. 운전 중 분리막 표면에 강한 난류를 형성시켜 막오염을 절감시키는 역할을 하는 회전원판은 아크릴 재질의 직경이 28 cm인 원형의 회전판에 각 면에 4개씩 양면에 총 8개의 날개가 부착되어 있다. 저장조의 하부에는 일정 간격의 기공이 있는 튜브로 공기(9)를 공급하여 원료 입자용액의 원활한 혼합과 농도를 일정하게 유지하게 하였다.

2.3. 실험방법

수용액 45 L를 저장조(10)에 공급한 후 공기 송풍기(1)를 작동시켜 저장조 하부로 공기를 주입하면서 회전원판(6)을 일정한 속도로 회전시킨다. 그 후 흡입펌프(4)를 작동시키면서 조절밸브(5)와 유량계(2)를 사용하여 분리막 흡입유량을 조절하였다. 시간에 따른 흡입압력(3)을 측정하고 분리막 투과수는 원료용액의 농도를 일정하게 유지하기 위하여 저장조로 재순환시켰다. 또한 입자용액의 투과실험 전후에는 별도로 순수 저장조에 분리막을 침지시켜 투과실험을 수행하므로

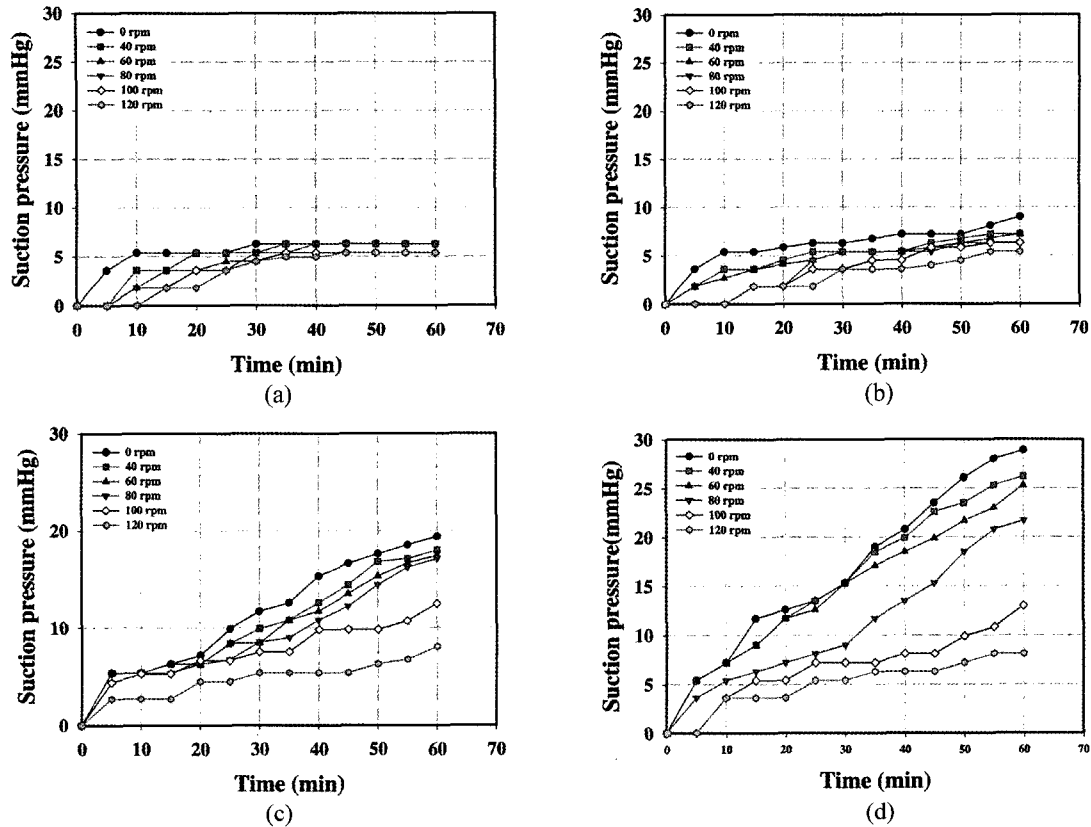


Fig. 2. Suction pressure for (a) 0.1 wt%, (b) 0.2 wt%, (c) 0.3 wt% and (d) 0.4 wt% kaolin solution as a function of rpm at 60 LMH and $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

써 막오염도를 확인하였다.

PES 평막은 소수성을 지니고 있으므로 먼저 10% 에탄올 수용액에 약 30분정도 담귀 친수화시킨 후 순수로 세척하고 투과실험을 실시하였다. 실험용액은(0.1, 0.2, 0.3, 0.4 wt%의 kaolin과 0.1 wt% bentonite 수용액을 사용하였고 회전원판을 최대 회전속도인 120에서 40 rpm까지 20 rpm씩 감소시키면서 투과유량 변화에 따른 흡입압력을 측정하였다. 마지막으로 회전원판을 정지시키고 이상의 실험을 반복하였다. 각 rpm별로 60분 동안 5분 간격으로 흡입압력의 변화를 측정하였고 30분마다 처리수의 탁도를 측정하여 농도와 제거율을 계산하였다.

3. 실험결과 및 토론

3.1. Kaolin 수용액

3.1.1. 농도에 의한 영향

Kaolin 농도 0.1, 0.2, 0.3 그리고 0.4 wt%의 수용액

을 60 LMH ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)의 투과유속으로 각각 일정하게 유지시키면서 회전원판의 회전속도를 0에서 120 rpm까지 변화시킬 경우, kaolin농도에 따른 흡입압력의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 또한 탁도 측정에 의한 kaolin의 배제율은 모든 경우에 대하여 99% 이상으로 나타났다. 0.1 wt% kaolin 수용액에 경우 Fig. 2(a)에서와 같이 0 rpm일 경우 투과시간 10분까지는 시간에 따라 지속적으로 흡입압력이 상승하였으며 30분에 흡입압력이 약 2.0 mmHg 정도 상승한 것을 제외하면, 전체적으로 흡입압력의 큰 변화가 없었다. 또한 회전원판을 0 rpm에서 120 rpm까지 증가하였을 때, 운전시간 60분에서 흡입압력이 6.3에서 5.4 mmHg로 감소하였다. 0.2 wt% kaolin 수용액에 경우는 Fig. 2(b)에서와 같이 투과시간이 경과함에 따라서 흡입압력이 서서히 증가함을 알 수 있었다. 회전원판의 회전수가 120 rpm일 경우 운전시간 60분에서 5.4 mmHg로서 0.1 wt% kaolin 수용액 경우와 같았다. 그러나 회전원판이 작동하지 않을 경우는 9.0 mmHg로 0.1 wt% kaolin 수

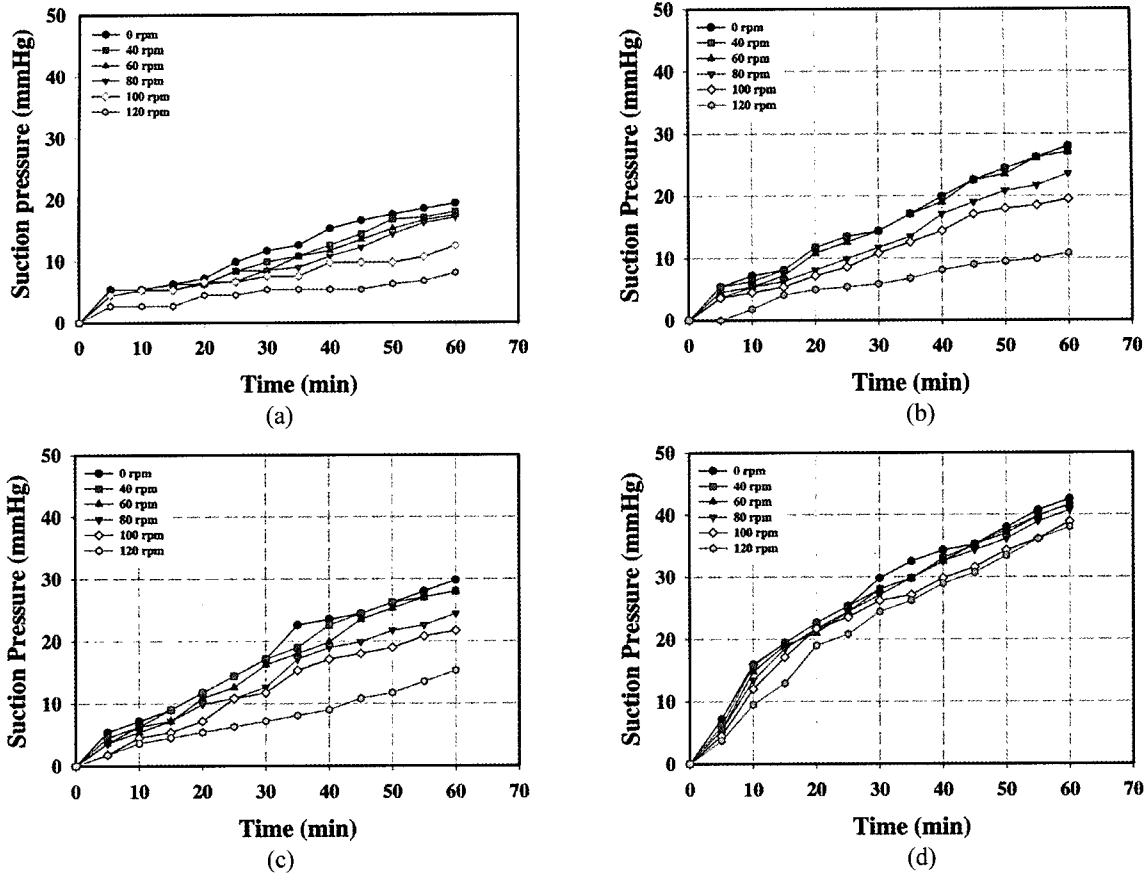


Fig. 3. Suction pressure for (a) 60 LMH, (b) 70 LMH, (c) 75 LMH and (d) 80 LMH as a function of rpm for 0.3 wt% kaolin solution at $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

용액의 경우보다 약 150% 높게 나타났다. 그러나 0.1과 0.2 wt% kaolin 수용액에 대한 흡입압력이 10 mmHg를 초과하지 않았다. 결국 이상의 두 실험에서 사용한 kaolin 수용액 농도가 낮아 아직까지는 막 표면에 오염물질 형성이 충분하지 않았으며 따라서 회전원판에 의한 감소효과도 작았다고 판단된다. Kaolin농도 0.3 wt%에 대한 투과실험은 Fig. 2(c)에 나타난 바와 같이 0 rpm일 때 운전시간이 60분에서 흡입압력이 19.4 mmHg까지 상승하였다. 이는 0.2 wt% kaolin 수용액의 경우보다 2배 이상 높은 수치이다. 하지만 120 rpm 일 경우에 흡입압력은 0 rpm의 약 42%에 불과하다. 0.4 wt% kaolin수용액에 대한 흡입압력은 Fig. 2(d)에 나타내었으며 흡입압력이 투과시간에 따라서 급속히 증가함을 알 수 있다. 0 rpm일 때, 투과시간 60분에서 흡입압력이 28.9 mmHg까지 상승하였으나 120 rpm의 흡입압력은 0 rpm의 28% 수준으로 낮게 측정되었다. 결국 kaolin 농도가 증가함에 따라서 분리막 오염이 많아지

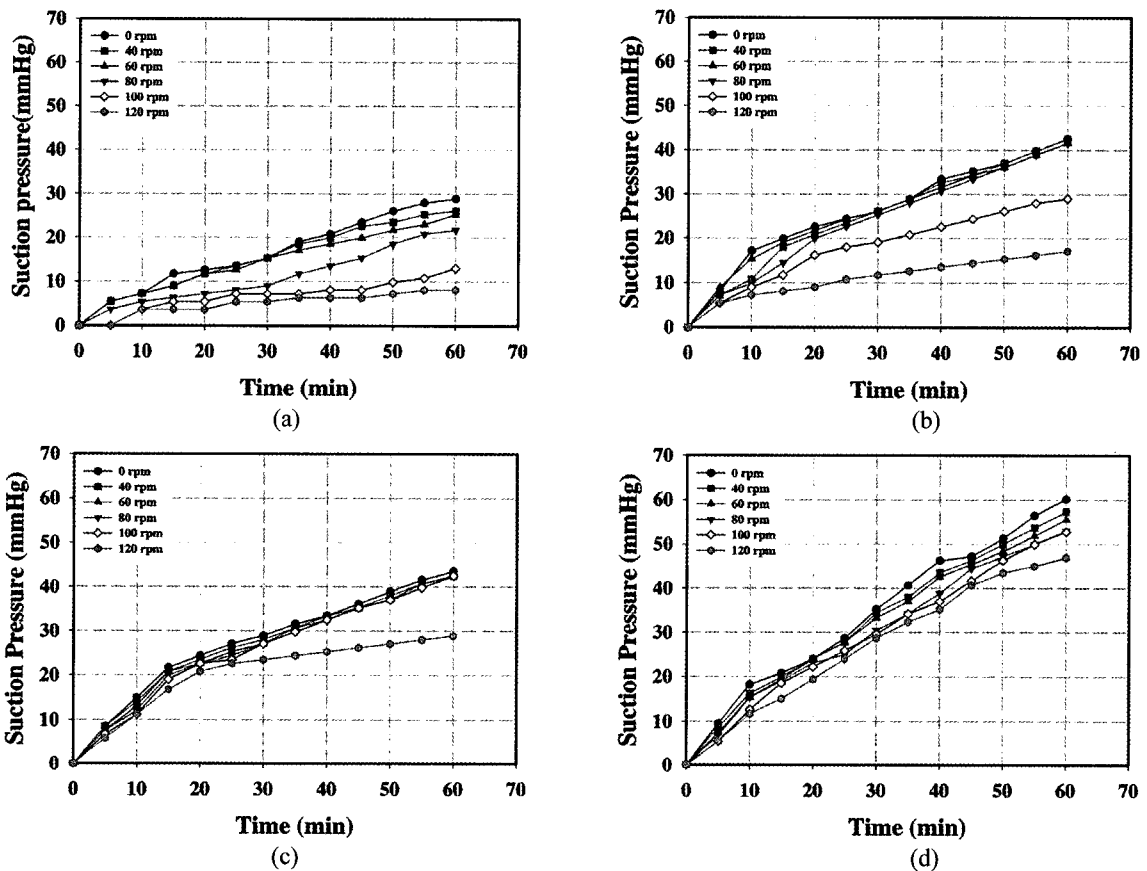
고 회전원판의 막오염 감소효과도 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

3.1.2. 투과유량에 의한 영향

0.3 및 0.4 wt% kaolin 수용액에 경우, 투과시간, 투과유량 및 회전원판의 회전속도에 대한 흡입압력의 변화를 Fig. 3과 4에 각각 나타내었다. 투과시간 60분, 원판 회전속도가 0 rpm에서 투과유량을 60에서 80 LMH까지 증가시킬 때 흡입압력은 19.4에서 42.5 mmHg까지 증가하였다. 또한 원판의 회전속도가 120 rpm일 경우는 투과유량을 60에서 80 LMH까지 증가시킬 때 흡입압력이 8.1에서 38.0 mmHg까지 증가하였다. Fig. 3(a)에서와 같이 60 LMH의 경우는 투과시간 20분 이내에서 흡입압력이 비교적 낮게 유지되었다. 그 이후에는 흡입압력이 서서히 증가하였으나 120 rpm의 경우에는 투과시간 전체에 걸쳐서 흡입압력이 낮게 유지되었음을 알 수 있다. 70, 75 LMH의 경우는

Table 1. Cake Resistances (R_c) for Kaolin Solution as a Function of rpm and Permeate Flux at $24 \pm 1^\circ\text{C}$ and 60 min

		$R_c \text{ (m}^{-1}) \times 10^{17}$							
Flux		60 LMH		70 LMH		75 LMH		80 LMH	
Kaolin Conc.		0.3 wt%	0.4 wt%	0.3 wt%	0.4 wt%	0.3 wt%	0.4 wt%	0.3 wt%	0.4 wt%
rpm									
0		1.15	1.43	1.42	1.79	1.41	1.72	1.88	2.22
40		1.07	1.29	1.37	1.79	1.33	1.68	1.84	2.12
60		1.04	1.25	1.37	1.76	1.33	1.68	1.84	2.05
80		1.01	1.07	1.19	1.76	1.16	1.68	1.80	1.96
100		0.74	0.64	0.99	1.22	1.03	1.68	1.72	1.95
120		0.48	0.40	0.54	0.72	0.72	1.14	1.68	1.74

**Fig. 4.** Suction pressure for (a) 60 LMH, (b) 70 LMH, (c) 75 LMH and (d) 80 LMH as a function of rpm for 0.4 wt% kaolin solutions at $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

투과시간 전반에 걸쳐서 흡입압력이 선형적으로 증가하였다. 80 LMH, 0 rpm일 경우는 투과시간 5 내지 10 분 사이에 흡입압력이 증가하기 시작하여 투과시간 60 분에는 흡입압력이 42.5 mmHg까지 도달하였다. 따라서 0.3 wt% kaolin 수용액의 경우 70 내지 75 LMH 이하로 투과유속을 유지하면서 회전원판을 활용하는 것

이 효율적일 것으로 판단된다.

0.4 wt% kaolin 수용액에 경우 투과시간에 따른 흡입압력은 0.3 wt% kaolin 수용액의 경우보다 높게 측정되었다. 60과 70 LMH에서는 100 내지 120 rpm에서 회전원판의 효과가 뚜렷하게 나타났으나 더 높은 75와 80 LMH에서는 회전원판의 막오염 감소효과가 현저하

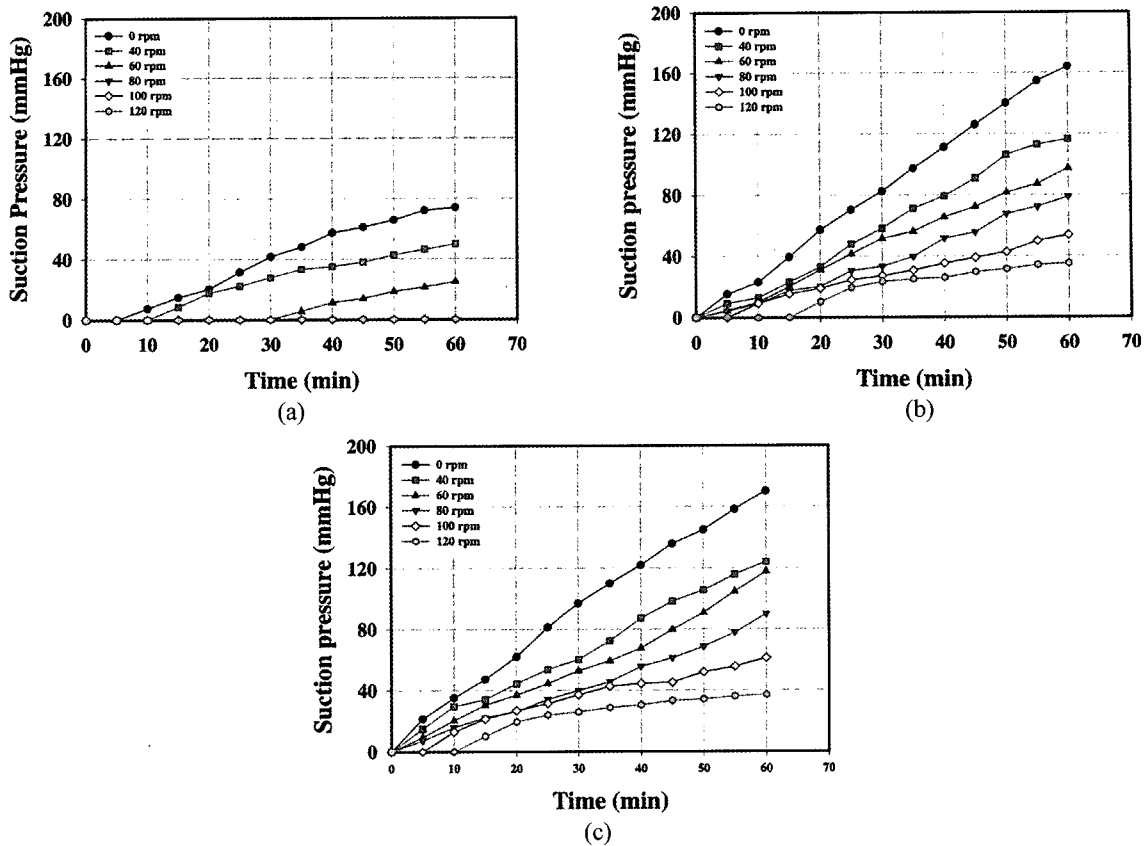


Fig. 5. Suction pressure for (a) 30 LMH, (b) 40 LMH and (c) 45 LMH as a function of rpm for 0.1 wt% bentonite solution at $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

Table 2. Cake Resistances (R_c) for 0.1 wt% Bentonite Solution as a Function of rpm and Permeate Flux at $24 \pm 1^\circ\text{C}$ and 60 min

rpm	$R_c \text{ (m}^{-1}\text{)} \times 10^{17}$		
	30 LMH	40 LMH	45 LMH
0	5.78	7.87	8.86
40	3.90	5.08	6.45
60	1.95	2.29	6.12
80	0	2.29	4.67
100	0	1.98	3.18
120	0	1.54	1.92

지 않음을 알 수 있었다. 따라서 0.4 wt% kaolin 수용액의 경우 60 LMH 이하로 투과유속을 유지하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

투과시간 60분에서 0.3 및 0.4 wt% kaolin 수용액 투과실험에 대하여 케이크 저항(R_c)을 계산하여 Table 1에 나타내었다. 참고적으로 R_c 가 10^{-17} m 보다 작게 나타나는 경우는 투과유속이 작고 원판 회전속도가 100

rpm 보다 높은 경우임을 알 수 있다.

3.2. Bentonite 수용액

Bentonite 0.1 wt% 수용액을 대상으로 투과유량 30, 35, 40 그리고 45 LMH에 따라 투과시간에 따른 rpm 별 흡입압력을 Fig. 5에 나타내었다. 투과유량 30 LMH, 0 rpm에서는 투과시간 5분 이후에 막오염에 의한 흡입압력이 측정되기 시작하여 60분 후에는 74.1 mmHg까지 상승하였다. 그러나 원판의 회전속도가 증가할수록 흡입압력이 줄어들어서 80 rpm부터는 0 mmHg를 유지하여 막오염 현상이 거의 제거되었다. 투과유속이 40 내지 45 LMH까지 증가하면 흡입압력은 급속하게 증가하며 회전원판에 의한 막오염 감소효과도 현저하게 나타난다. Kaolin 수용액 투과실험과 비교하였을 때 수용액의 농도와 투과유량이 낮음에도 불구하고 상대적으로 높은 흡입압력과 막오염 감소효과를 보이고 있다. 이러한 이유는 bentonite 입자가 극

히 얇은 박편상의 결정입자로 구성되어 있으며 수용액 상태일 때 결정층 간의 간격이 팽창하여 체적의 10배 이상 팽윤하는 성질이 있으며 요변성을 가진 겔(gel)상태의 투수성이 극히 낮은 막을 형성하는 특징이 있기 때문이다[13]. 탁도 측정에 의한 bentonite의 배제율은 모든 경우에 대하여 99% 이상으로 나타났다. 또한 R_c 를 계산하여 Table 2에 나타내었으며 매우 소량의 bentonite 케이크층이 존재하더라도 R_c 값이 kaolin 층과 비교하여 상대적으로 높음을 알 수 있고 이는 회전원판에 의한 케이크층 감소가 매우 효과적임을 암시한다.

4. 결 론

본 연구에서는 침지형 평막에 적용할 수 있는 회전원판형 모듈을 설계하였으며 kaolin 및 bentonite 입자 수용액을 적용하여 그 투과특성에 대해 알아보았다. 운전변수로는 회전원판의 rpm, 투과유속, 원료용액의 농도이며, 실험조건에 따라 회전원판에 의한 막오염 감소효과를 흡입압력의 변화를 통하여 살펴보았으며 이를 요약하면 다음과 같다.

1) 투과유량이 60 LMH이고 kaolin 입자 농도가 0.2 wt% 이하일 경우 분리막 오염이 충분하게 형성되지 않아 회전원판에 의한 막오염 감소효과가 낮았다. 그러나 kaolin 농도를 0.4 wt%까지 증가시키면 원판의 회전속도가 120 rpm이고 투과시간 60분에서 흡입압력은 회전원판이 작동하지 않을 경우의 28%에 불과하여 막오염 제거효과가 우수함을 확인하였다.

2) 0.3 wt% kaolin 수용액의 경우 원판의 회전속도가 120 rpm이고 투과유속이 70 내지 75 LMH 일 때, 회전 원판에 의한 막오염 제거 효과가 높았다.

3) 0.4 wt% kaolin 수용액의 경우 원판의 회전속도가 120 rpm 일 때 0.3 wt% kaolin 입자의 최적 투과유속보다 낮은 60 내지 70 LMH에서 회전 원판의 막오염 제거 효율이 우수하며 그 이상이 되면 분리막 표면의 입자 또는 케이크 제거 능력이 떨어져서 흡입압력이 크게 상승하였다.

4) 0.1 wt% bentonite 수용액의 투과유속을 30 LMH로 유지할 경우 원판의 회전속도는 80 rpm 이상에서는 거의 완벽하게 막오염이 제거되어 흡입압력의 상승이 나타나지 않았다. 또한 투과유속이 45 LMH 까지 증가하면 원판이 회전하지 않을 경우의 투과시간 60분

에서 흡입압력이 170 mmHg까지 도달하지만 120 rpm으로 회전시키면 37 mmHg에 불과하였다.

5) Bentonite 케이크 저항은 kaolin 케이크 저항보다 훨씬 크며 따라서 원판 회전으로 인한 투과 성능의 향상이 kaolin 수용액 일때 보다 우수하였다.

참 고 문 헌

1. 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. Chemical Eng. Japan*, **31(5)**, 683 (1998).
2. Y. Wang, J. Howell, R. Field, and D. Wu, "Simulation of cross-flow filtration for baffle tubular channels and pulsatile flow", *J. Membrane Sci.*, **95**, 243 (1994).
3. H. Millward, B. Bellhouse, L. Sobey, and R. Lewis, "Enhancement of plasma filtration using the concept of the vortex wave", *J. Membrane Sci.*, **100**, 121 (1995).
4. S. Najarian and B. Bellhouse, "Effect of liquid pulsation on protein fractionation using ultrafiltration processes", *J. Membrane Sci.*, **114**, 245 (1996).
5. S. H. Lee and R. M. Lueptow, "Rotating membrane filtration and rotating reverse osmosis", *J. Chemical Eng. Japan*, **37(4)**, 471 (2004).
6. 정건용, "혼합입자 용액의 정밀여과막 오염특성", *멤브레인*, **11(4)**, 161 (2001).
7. J. Nuotila-Jokinen and M. Nystrom, "Comparison of membrane separation processes in the internal purification of paper mill water", *J. Membrane Sci.*, **119**, 99 (1996).
8. R. Bouzerar, M. Y. Jaffrin, L. H. Ding, and P. Paullier, "Influence of geometry and angular velocity on performance of a rotating disk filter", *AIChE J.*, **46(2)**, 257 (2000).
9. 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).
10. L. Ding, O. Al-Akoum, A. Abraham, and M. Y. Jaffrin, “Milk protein concentration by ultrafiltration with rotating disk modules”, *Desalination*, **144**, 307 (2002).
 11. 이 영, 최찬섭, 노수홍, “양돈폐수 처리를 위한 나노여과 회전판형 분리막 모듈의 특성 연구”, 한국막학회 추계학술대회 116-119 (2003).
 12. 정건용, 김종표, “회전원반 또는 프로펠러가 장착된 침지형 분리막 모듈 및 장치”, 특허출원번호 10-2006-0004744, 1월 17일 (2006).
 13. L. Broussous, E. Prouzet, L. Beque, and A. Larbot “An experimental study of helically stamped ceramic microfiltration membrane using bentonite suspensions”, *Separation & Purification Tech.*, **24**, 205 (2001).