

역충격형 중공사모듈의 동특성 연구

박상현·장진호·노수홍[†]

연세대학교 환경공학과
(2000년 12월 7일 접수, 2001년 3월 6일 채택)

Dynamic Characterization of Backpulsing Hollow Fiber Module System

Sang-hyun Park · Jin-ho Chang · Soo-hong Noh

Department of Environmental Engineering, Yonsei University
(Received December 7, 2000, Accepted March 6, 2001)

요 약 : 막오염을 줄이기 위해 고빈도 역충격 시스템을 적용한 새로운 분리막 모듈을 연구하였다. 폴리아크릴로니트릴(Polyacrylonitrile) 재질의 외경 1.4 mm, 내경 0.9 mm, 분획분자량 50,000인 한외여과막과 라텍스(latex)용액을 사용하여 실험하였다. 역충격을 중공사막에 적용했을 때 제안된 모델식에 의한 이론치와 실험치를 비교 분석하였고, 역충격을 적용 했을 때와 하지 않았을 때의 경우를 비교하였다. 이론치를 계산하기 위해 비저항 계수(specific cake resistance), 케익성장시간상수(time constant for cake growth), 확산계수(diffusion coefficient), 그리고 4가지 오염모델의 속도상수를 구하였다. 고빈도의 역충격을 가한 모듈의 투과율은 역충격이 없을 때의 투과율보다 약 40~120%가 증가하였고 모델을 이용한 예상값과 1~14% 내의 오차 범위를 나타냈다. 최적 역충격 세기는 20~40%의 범위에서 20%였고 최적 역충격 빈도수는 0.67~3 Hz 범위에서 2 Hz로 나타났다.

Abstract : Rapid backpulsing to reduce membrane fouling of hollow fiber ultrafiltration module (polyacrylonitrile with 50000 MWCO, 1.4 mm OD and 0.9 mm ID) was studied with latex solutions. Values estimated by a theoretical model were compared with the ones obtained from the systems with or without backpulsing. Specific cake resistance, time constant for cake growth, diffusion coefficient, and the rate constants of four fouling models; the complete, intermediate, standard blocking and cake filtration were calculated to obtain the theoretical values. High frequency backpulsing gave net increase of fluxes by 40~120%. Fluxes predicted by the model were in good agreement with experimental ones within 14% error bound. The optimum backpulsing strength was acquired at 20% in the ranges of 20~40% strength and the optimum frequency was acquired at 2 Hz in the ranges of 0.67~3 Hz.

1. 서 론

막공정에서 막오염을 저감시키는 데는 여러 가지 방법이 있는데 이중 한 방법이 역충격(backpulsing)이다. 이는 고빈도로 막여과 방향의 반대 방향으로 흐름을 주어 세척하는 것이다. 여기서 고빈도는 보통 1초 이내의 빈도를 말한다.

역충격은 보다 잘 알려진 역류세척(backflushing) 운용과 비슷하다. 하지만 역류세척과 역충격의 중요

한 차이는 빈도의 차이이다. 역류세척에 비해 보다 짧은 간격으로 역세척을 해주는 역충격은 오염층 성장시간과 비슷하게 역세척을 적용하여 오염층을 플럭스의 현격한 감소가 일어나기 전에 제거시킨다는 것에 초점을 맞춘 것이다[1,2].

그러므로 역충격은 동적인 공정이기 기존 정밀여과(microfiltration, MF)와 한외여과(ultrafiltration, UF)의 역세척에서는 밝혀지지 않은 순간적인 효과를 나타낸다. 막간차압의 방향이 반대가 될 때 유체의 가

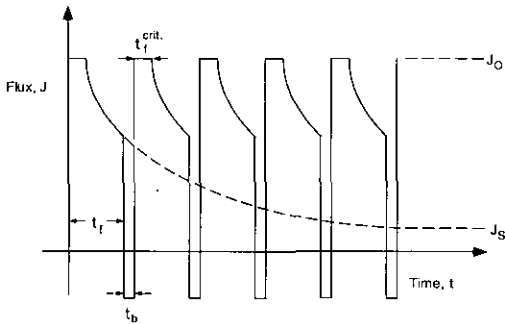


Fig. 1. Schematic of rapid backpulsing and the associated permeate flux during repeated cycles forward and reverse filtration[6].

속과 관성에 의한 추가적인 힘이 축적되고 있거나 막 세공을 막으려고 하는 입자에 주어져 효과적으로 막 표면에서 입자를 제거할 수 있다. 순간적인 역충격 효과는 또한 막 폐쇄 등을 일으키는 입자를 막 표면으로부터 벌크 흐름 쪽으로 이동을 촉진시키는데 이것은 농도 분극 현상을 줄여 결과적으로 투과수량을 증가시킬 수 있다[2-4].

전여과(Dead end filtration)에 대한 역충격 공정은 Fig. 1과 같이 예측될 수 있다. 정방향 여과시간(forward filtration time, t_f)이 지난 후에 역방향 여과, 즉, 역충격 시간(backpulsing time, t_b)이 바로 뒤따르는 주기적인 반복 공정이 사용되는데 정방향 여과가 시작될 때 막표면에 농도분극층이나 케이크 층이 형성되기 직전까지 매우 짧은 시간 동안 초기 플럭스가 유지되는 임계시간(critical time, t_{crit})이 존재한다[5,6]. 역충격 동안 막을 반대로 투과하는 역흐름(reverse flow)은 농도분극과 케이크 또는 겔층이 막 표면에 비가역적인 결합을 이루기 전에 제거할 수 있게 한다.

분리막의 투과율을 감소시키는 원인은 막 부근에 용질의 농도가 증가하여 삼투압이 커짐에 따라 투과율이 감소하는 농도분극 현상과, 막 표면 혹은 내부에 용질이 축적 또는 침적되어 투과율이 감소하는 막 오염 현상이 있다[7-9]. 농도분극 현상은 막 자체의 성질에는 영향을 주지 않으며 막 표면의 수리화적인 상태에 따라 좌우된다. 따라서, 농도분극 현상은 막 표면에서의 투과율을 감소시키지만, 영구적으로 막의 재질 및 투과율을 변화시키는 것은 아니기 때문에 막 모듈의 형태를 다양하게 개발하여 유체 역학적인 측면을 고려하면 최소화시킬 수 있다. 그러나, 막오염은 유입수의 특성에 따라 막 표면에서 오염물질이 강하게 결합, 축적되므로 투과율을 영구히 감소시킬 수도

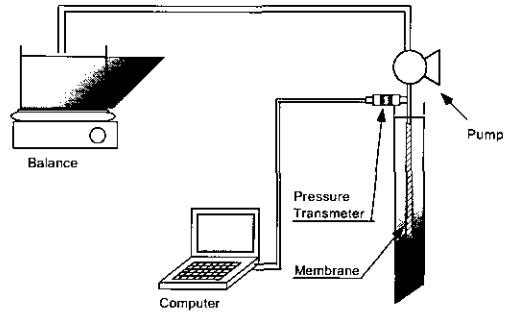


Fig. 2. Schematic diagram of backpulsing UF system.

있으며 분리막의 성질 또한 변하게 하여 분리기능을 비가역적으로 저하시킨다.

따라서 본 연구는 역충격 시스템의 효율성과 최적 조건을 분석하고 제안된 모델식[10]에 의한 예측치와 실제치를 비교 분석하여 모델식의 타당성 여부를 검증하는 것이다.

2. 실 험

2.1. 최적 역충격 시간 측정

최적 역충격 시간을 구하기 위한 실험장치는 Fig. 2와 같다.

라텍스(latex) 용액을 2 L 메스실린더에 담고 중공사막을 길이는 약 30 cm 8가닥으로 하여 모듈을 만들고 트랜스미터를 통해 감지된 전기적신호를 랩-뷰(lab-view) 프로그램을 이용하여 초당 500회 변화를 측정하였다. 자체 고안된 역충격 펌프는 정방향 여과와 역방향 여과를 동시에 수행할 수 있는 피스톤 방식의 펌프를 이용하였다. 분리막은 분획분자량 50,000 (O.D. : 1.4 mm, I.D. : 0.9 mm)인 폴리아크릴로니트릴 재질의 중공사막을 사용했다.

2.2. 순수 및 Latex 투과실험

순수 투과실험을 위해 2 L 메스실린더에 순수를 담고 각 압력과 빈도 조건에서의 순수 투과율을 측정하였다. 1분간 투과수량을 1/100 g 단위로 측정할 수 있는 저울을 이용하였고, 그때의 압력을 0.002초 간격으로 측정하여 시간에 따라 감소하는 투과수량과 순수투과율의 비(J/J_0)로 나타내어 역세 주기별, 운전 압력 세기별로 비교하였다. 역충격주기는 0.67 Hz (1.35초 정방향여과 / 0.15초 역충격)에서, 1.33 Hz (0.6초 정방향여과 / 0.15초 역충격), 2 Hz (0.35초 정방향여과 / 0.15초 역충격), 3 Hz (0.183초 정방향

여과 / 0.15초 역충격)로 변화시켰다.

역충격이 시작되어서 끝나는 시간간격은 약 0.15초로 하고, 투과 흐름 방향이 바뀌는 시간은 약 0.07로 고정하였다. 정방향 여과시간은 각 주기에 따라 1.35초, 0.6초, 0.35초 0.183초였다. 막에 걸리는 압력세기는 펌프 피스톤의 세기(strength)를 20, 30, 40%로 변화하여 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 최적 역세주기와 플럭스의 이론치

전체 반복 주기에 대한 실제 플럭스는 다음 식으로 정의된다[6].

$$\langle J \rangle = \frac{\int_0^{t_f} J_f dt - \int_{t_f}^{t_f+t_b} J_b dt}{t_b + t_f} \quad (1)$$

여기서, J_f 와 J_b 는 각각 정방향과 역방향의 플럭스이다. $t_f < t_f^{crit}$ 일 때 케이크나 겔층은 형성되지 않는다. 흡착이나 세공 막힘(pore plugging)에 기인하는 막의 내부 오염이 없고 삼투압의 영향이 없다고 가정하면 정방향과 역방향의 플럭스는 단순히 오염되지 않은 막에 대한 값인데 이 값은 Darcy's law에 의한 막 저항과 관련된다.

$$J_f = \frac{\Delta P_f}{\mu_0 R_m} \equiv J_0, \quad J_b = \frac{\Delta P_b}{\mu_0 R_m} \equiv \alpha J_0, \quad t_f < t_f^{crit} \quad (2)$$

여기서, μ_0 는 투과수의 점도, R_m 은 막의 저항, J_0 는 순수 플럭스, ΔP_f 는 정방향 여과시의 투과 압력이고 $\alpha = \Delta P_b / \Delta P_f$ 는 역방향 여과와 정방향 여과시의 투과압력 비이다. 그러므로 주기당 실제 플럭스는 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$\langle J \rangle = J_0 (t_f - \alpha t_b) / (t_f + t_b), \quad t_f \leq t_f^{crit} \quad (3)$$

그리고 $t_f > t_f^{crit}$ 일 경우, 배제된 입자들에 의해 막표면 케이크 층이나 겔층이 형성된다[5]. 그와 관련된 플럭스 감소는 짧은 시간동안에는 십자흐름 조건 하에서도 진여과(dead-end filtration) 이론에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_f = J_0 / (1 + (t_f - t_f^{crit}) / \tau), \quad t_f > t_f^{crit} \quad (4)$$

여기서, τ 는 케이크 층의 증가에 따른 시간 상수이고 다음 식으로 나타낼 수 있다[4].

$$\tau = \frac{(c_c - c_b) \Delta P_f}{2 \widehat{R}_c \mu_0 c_b J_0} \quad (5)$$

여기서, C_b 와 C_c 는 각각 벌크 용액과 케이크 층에서의 농도이고 \widehat{R}_c 는 오염층의 비 케이크 저항(specific cake resistance, 단위 두께당 저항)이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{2 \Delta P A^2}{\mu_0 C} a = \widehat{R}_c \quad (6)$$

이상에서 나타낸 식(1)~(6)을 조합하면 역충격을 줄 때의 평균 또는 실제 투과 플럭스는 식(7)로 표현된다.

$$\langle J \rangle = J_0 (t_f^{crit} - \alpha t_b + 2 \tau (1 + (t_f - t_f^{crit}) / \tau)^{1/2} - 1) / (t_f + t_b), \quad t_f > t_f^{crit} \quad (7)$$

용액 중에 포함된 입자나 용질의 전달현상은 종종 단순화된 필름이론에 의해 설명된다. 필름이론(film theory)은 플럭스가 압력에 무관하고 입자의 확산 속도에 의존하는 상황에서 플럭스를 예측하는데 적용된다. 이 때 막 표면에서의 입자의 농축에 의해 발생하는 농도분극층이 저항으로 작용하게 된다. 정상상태에서 유체가 막을 투과하면서 발생하는 투과항력에 의한 입자의 침강속도는 농도분극층에 의한 입자의 역확산 속도와 평형을 이루게 된다[8,9]. 한편 확산계수 D_f 는 Stokes-Einstein식을 사용하여 계산하였다.

$$D_f = \frac{\kappa_B T}{6 \pi \mu a_p} \quad (8)$$

여기서 κ_B 는 Boltzmann 상수, T 는 절대온도, 그리고 a_p 는 라텍스입자의 반경, μ 는 라텍스 용액의 점도이다. 라텍스 입자의 반경은 입도 분석기를 이용하여 측정된 결과 약 0.32 μm 를 나타냈다. 이론과 실제에서 t_f 는 t_f^{crit} 보다 크므로 식 (4)를 사용하였다. 여기서 τ 는 식(5)에 의해 구했다. 역시 τ 를 구하기 위하여 비저항 \widehat{R}_c 값을 구하였다. Table 1과 Table 2는 각각 식(5)와 (6)에 의해 계산된 각 실험조건에의 τ 값과 \widehat{R}_c 값을 나타낸 것이다. 각 식에서 C_c 서

Table 1. Variation of τ (the time constant for cake growth) on frequency and with backpulsing and without backpulsing(sec)

Strength \ Frequency	20% with Backpulsing	30% with Backpulsing	40% with Backpulsing	20% without Backpulsing
0.67 Hz	2.583×10^{12}	3.783×10^{12}	4.174×10^{12}	3.632×10^{12}
1.33 Hz	1.729×10^{12}	2.890×10^{12}	2.772×10^{12}	3.240×10^{12}
2 Hz	1.388×10^{12}	1.927×10^{12}	2.196×10^{12}	4.236×10^{12}
3 Hz	1.956×10^{12}	2.104×10^{12}	2.818×10^{12}	-

Table 2. Variation of R_c (specific resistance) on frequency and with backpulsing and without backpulsing.(m)

Strength \ Frequency	20% with Backpulsing	30% with Backpulsing	40% with Backpulsing	20% without Backpulsing
0.67 Hz	0.0684	0.0410	0.0409	0.0647
1.33 Hz	0.0691	0.0505	0.0496	0.0583
2 Hz	0.1151	0.0757	0.0753	0.0431
3 Hz	0.0439	0.0399	0.0344	-

는 유입수내의 오염물질(foulant)의 입경이 일정하다고 가정했을 때 최대 값 0.524로 놓았다. a 는 투과수 부피증가에 따른 시간당의 부피이고 투과수 점도 μ_0 는 0.01 g/cm²·sec로 가정했다.

이렇게 구한 τ , t_f^{crit} , J_a , α 값을 가지고 식(5)에 대입하여 J/J_0 를 예측하였다. 각각의 조건들을 갖고 다음식 (9)와 같이 t_f^{crit} 를 구할 수 있다. 여기서 D_f 는 식 (8)에 의해 계산되었다[6].

$$t_f^{crit} = D_f (C_c - C_b) / C_b J_0^2 \quad (9)$$

이렇게 계산된 값을 갖고 식(7)의 변형식(10)으로 계산하여 나타내었다.

$$\frac{\langle J \rangle}{J_0} = \frac{(t_f^{crit} - at_b + 2\alpha(1 + (t_f - t_f^{crit})/\tau)^{1/2} - 1)}{(t_f + t_b)} \quad (10)$$

실험조건에서 구하여진 임계시간을 이용하여 평균 투과율을 예측한 결과 모든 조건에서 t_r 가 증가함에 따라 평균투과율이 급격히 증가하다 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 t_r 가 t_b 에 비해 지나치게 짧으면 오히려 플럭스의 손실을 야기한다는 것을 의미한다. 또한 t_r 이 일정할 때 t_b 과 여과압력이 감소할수록 평균투과율이 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 여과압력이 높

으면 그만큼 막오염이 급속히 이루어져 역충격이 가해 지더라도 분리막의 투과율 회복이 잘 되지 않기 때문이다. 이는 역충격 주기가 짧아질수록 막표면에 입자들이 쌓일 수 있는 시간이 줄어들어 역충격을 가했을 때 분리막의 투과율 회복이 커진다는 것을 의미한다.

3.2. 역충격 시스템에서 투과율의 변화

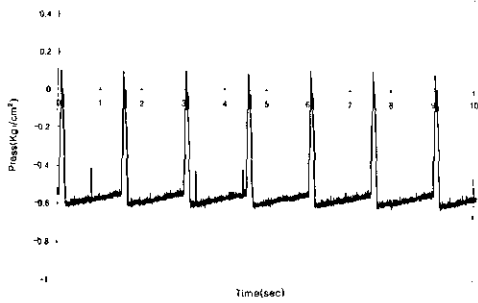
역충격 시스템에서의 순간적인 압력의 변화를 알아 보기 위하여 초당 500회의 압력변화를 측정하였다.

Fig. 3 (a), (b)는 역충격을 적용했을 때와 하지 않았을 때의 막모들의 순간적인 압력의 변화를 나타낸 것이다. (a)의 경우 약 0.15초간 막표면에서 벌크 쪽으로의 흐름을 발생시켜 역충격의 효과를 나타낸 것이고, (b)의 경우는 기존의 변형되지 않은 펌프에서의 압력변화로서 막표면에서 벌크 쪽으로의 흐름이 거의 없는 상태를 나타낸 것이다.

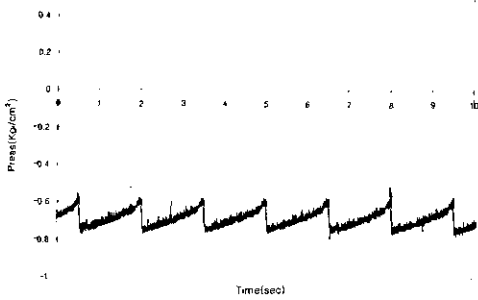
Fig. 4는 각 조건에서 역충격을 적용했을 때와 하지 않았을 때 실험 시작 후 2시간이 지났을 때의 플럭스를 나타낸 것이다. 20% 압력세기에서 역세빈도가 높아질수록 역충격을 준 것과 안준 것의 차이가 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 역충격을 적용했을 때의 각 주기와 압력 세기에 따른 투과율(실험시작 2시간 후) 변화를 나타낸 것이다.

사용된 펌프의 각각의 세기에서 역충격 주기를



(a) with backpulsing



(b) without backpulsing

Fig. 3. Variation of pressure of the permeate side (a)with backpulsing and (b)without backpulsing at 0.67 Hz, 20% strength.

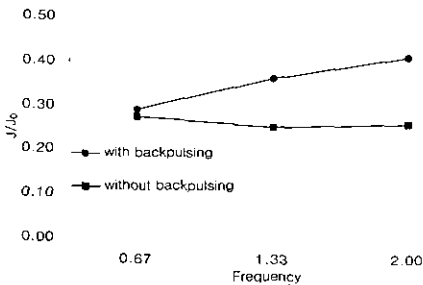


Fig. 4. Variation of J/J_0 with and without backpulsing

0.67 Hz, 1.33 Hz, 2 Hz, 3 Hz로 변화시켰을 때 2 Hz에서 가장 큰 J/J_0 를 나타냈다.

3. 3. 이론치와 실험치의 비교

제한된 모델식에 의한 이론치는 식(8)에서 계산된 확산계수 값을 이용하여 식(9)에 대입을 하고 여기서 구해진 임계시간을 갖고 다시 식(10)을 이용하여 각 조건에서 구했다.

Fig. 6 (a), (b), (c)는 1% 라텍스를 갖고 실험했을 때 계산된 이론치와 실제 실험에서 구하여진 실제치를 비교한 것이고 Fig. 7 (a), (b), (c)는 5% 라텍스

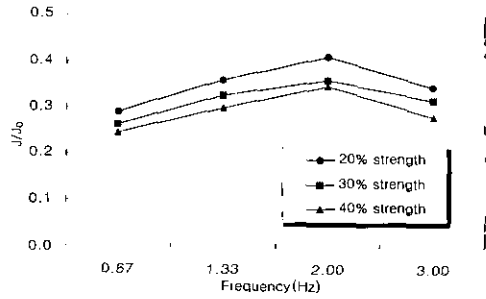
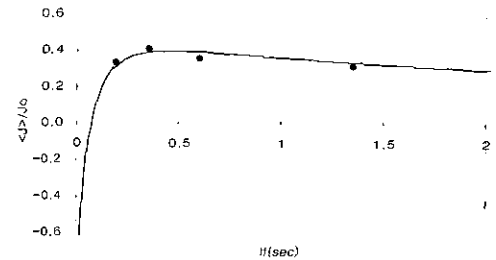
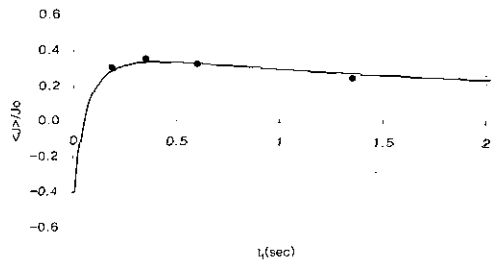


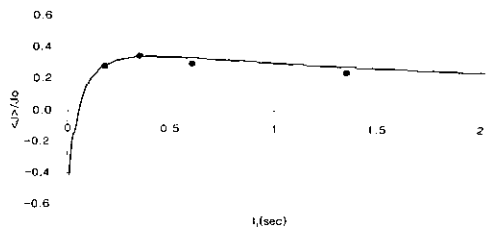
Fig. 5. Variation of J/J_0 with backpulsing on frequency with 1% latex solution.



(a) 20% strength



(b) 30% strength



(c) 40% strength

Fig. 6. Global average net flux versus forward filtration time for a fixed backpulse duration of $t_b = 0.15s$ with (a)20%, (b)30%, (c)40% strength, $C_b = 1\%$ volume basis.

를 갖고 실험했을 때 계산된 이론치와 실제 실험에서 구해진 실제치를 비교한 것이다.

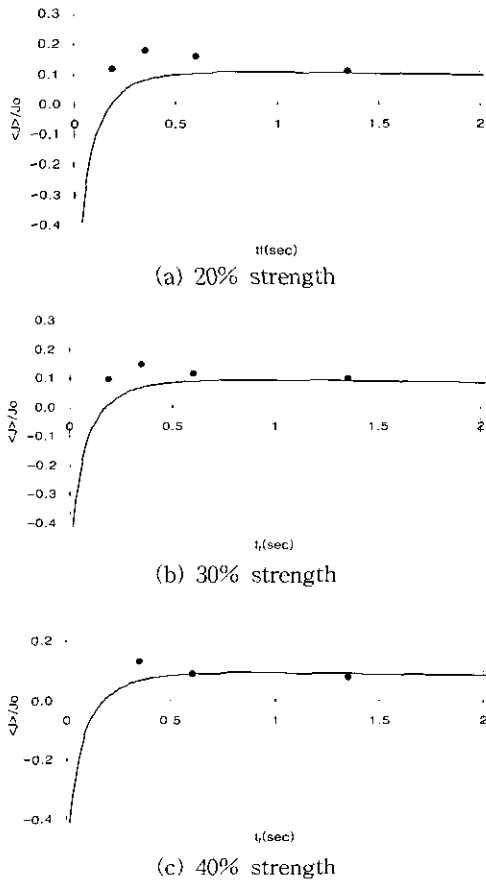


Fig. 7. Global average net flux versus forward filtration time for a fixed backpulse duration of $t_b = 0.15$ s with (a)20%, (b)30%, (c)40% strength, $C_b = 5\%$ volume basis.

Table 3은 1% 라텍스를 실험했을 경우 제안된 모델식에 의한 역충격주기에 따른 투과율 이론치와 실험치를 나타내었는데 실험치는 이론치의 1~14%의 범위 내에서 존재하였다. Table 4는 5% 라텍스를 실험했을 경우 제안된 모델식에 의한 역충격주기에 따른 투과율 이론치와 실험치를 나타낸 것이다.

1% 라텍스의 경우 0.524로 C_c 값을 가정하여 이론치를 계산했을 때 실제치와 비슷했지만 5% 라텍스의 경우 C_c 값으로 가정한 0.524가 실제케이크의 농도보다 작기 때문에 이론치와 실제치가 차이가 나므로 추측된다. 실제치로 역제한한 결과 5% 라텍스의 경우 C_c 값이 약 0.82일 때의 이론치가 실제치와 비슷한 값을 나타냈다.

4. 결 론

제안된 모델식을 이용하여 평균 투과율을 예측한 결과 모든 조건에서 t_f 가 증가함에 따라 평균투과율이 급격히 증가하다 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 t_f 가 t_b 에 비해 지나치게 짧으면 오히려 순 플럭스의 손실을 야기한다는 것을 의미한다. t_f 가 일정할 때 t_b 과 여과압력이 감소할수록 평균투과율이 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 여과압력이 높으면 그만큼 막오염이 급속히 이루어지기 때문이다. 역충격이 없는 시스템에서의 J/J_0 는 0.67 Hz, 1.3 Hz, 2 Hz으로 변화하여도 차이가 적었다. 이는 펌프의 특성상 투과압력의 계속적인 변화가 있기 때문이다.

1% 라텍스의 경우 C_c 값을 0.524로 가정하여 이론치를 계산했을 때 실제치와 비슷한 값을 나타냈고 5% 라텍스의 경우 실제 역충격실험에서 구한 값

Table 3. Theoretical experimental steady state fluxes the corresponding forward filtration times with 1% latex solution $t_b = 0.15$ sec

Strength	Flux t_f	Theoretical	Experimental
		$\langle J/J_0 \rangle$	$\langle J/J_0 \rangle$
20%	0.183	0.312	0.34
	0.35	0.390	0.41
	0.6	0.395	0.36
	1.35	0.339	0.32
30%	0.183	0.274	0.31
	0.35	0.337	0.36
	0.6	0.336	0.33
	1.35	0.285	0.26
40%	0.183	0.267	0.28
	0.35	0.340	0.35
	0.6	0.338	0.30
	1.35	0.286	0.25

Table 4. Theoretical experimental steady state fluxes the corresponding forward filtration times with 5% latex solution $t_b = 0.15$ sec

Strength \ t_f		Flux		Theoretical	Experimental
				$\langle J/J_0 \rangle$	$\langle J/J_0 \rangle$
20%	0.183			0.0096	0.12
	0.35			0.0793	0.18
	0.6			0.104	0.16
	1.35			0.103	0.11
30%	0.183			0.006	0.1
	0.35			0.066	0.15
	0.6			0.091	0.12
	1.35			0.093	0.1
40%	0.183			0.064	0.11
	0.35			0.089	0.09
	0.6			0.091	0.08

(J/J_0) 은 제안된 모델식에서 예측된 값(J/J_0)과 비교했을 때 큰 차이를 나타냈는데 이는 모델식에서 가정한 C_c 값이 실제에서는 가정값(0.524)보다 크기 때문인 것으로 추측된다. 실제치로 역계산한 결과 5% 라텍스의 경우 C_c 값이 약 0.82일 때의 이론치가 실제치와 비슷한 값을 나타냈다. 1%와 5%에서 모두 각 실험 조건 0.67 Hz, 1.33 Hz, 2 Hz, 3 Hz 중에서 2 Hz에서 역시 가장 많은 투과율을 나타냈고, 압력세기는 20%, 30%, 40% 중 20%에서 가장 큰 투과율을 나타내었다.

감 사

본 연구는 1998년도 연세대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었기에 이에 감사드립니다.

사용기호

K_b constant of the complete blocking law (s^{-1})
 K_i constant of the intermediate blocking law (s^{-1})
 K_s constant of the standard blocking law (s^{-1})
 K_c constant of the cake filtration law (s^{-1})
 k_b the Boltzmann constant (J/s)
 T the absolute temperature (K)
 C_c the concentration of the fouling species in the cake layer (Volume %)
 C_b the concentration of the fouling species in

the bulk solution (Volume %)
 J_v volume flow (m^3/s)
 V total volume permeated through the membrane (m^3)
 τ the time constant for cake growth (s)
 t_b backpulsing time (s)
 t_f forward filtration time (s)
 t_f^{crit} critical forward filtration time (s)
 J_0 purewater flux. (lmh)
 J permeate flux (lmh)
 \widehat{R}_c specific resistance (1/m)
 μ_0 dynamic permeate viscosity ($kg/s \cdot m$)
 μ dynamic viscosity of solution ($kg/s \cdot m$)
 D diffusion coefficient (m^2/s)
 a particle diameter (m)
 α the ratio of the magnitudes of the transmembrane pressure

참 고 문 헌

1. R. H. Davis, *Sep. Purif. Methods*, **21**, 75 (1992)
2. 이규현, 제1회 하계분리막 Workshop, 한국막학회 (1993)
3. V. G. J. Rodgers and R. E. Sparks, *AIChE J.*, **37**(10), 1517 (1991)
4. G. Jonsson and I. G. Wenten, *Workshop ASEAN-EU on Membrane Technology*,

- Kuala Lumpur (1994)
5. Sanjeev G. Redkar and Robert H. Davis, *AIChE J.*, **41**(3), 501 (1995)
 6. Sanjeev G. Redkar, Vinod Kuberkar, and Robert H. Davis, *J. Membrane Sci.*, **121**, 229 (1996)
 - A. S. Michaels, Fifteen years of ultrafiltration : problems and future promises of an adolescent technology, in A.L. Cooper(Ed.), *Polymer Science and Technology*, Plenum Press, New York (1980)
 8. 윤성훈, 이정학, *Membrane Journal*, **7**(3), 150 (1997)
 9. 김재석, 서울대학교 공업화학과 박사학위 논문 (1999)
 10. W. R. Bowon, J. I. Calvo, and A. Hernandez, *J. Membrane Sci.*, **101**, 153 (1995)