

회전막을 이용한 동역학적 정밀여과의 특성

박진용 · 최창균 · 김재진*

서울대학교 공과대학 화학공학과

*한국과학기술연구원 분리막연구실

(1991년 6월 27일 접수, 1991년 12월 12일 채택)

Characteristics of Dynamic Microfiltration using Rotating Membrane

Jin Yong Park, Chang Kyun Choi and Jae Jin Kim*

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*Membrane Lab., Korea Institute of Science & Technology, Seoul 130-650, Korea

(Received 27 June 1991; accepted 12 December 1991)

요 약

본 연구에서는 Taylor 와류를 이용하는 동역학적 여과의 특성을 조사하였다. 실리카 슬러리에 대한 여과 실험을 하고, 여과 특성을 과도기와 준정상 상태로 구분하여, 투과선속에 대한 Taylor 수와 막 여과의 회전 속도와와의 상관관계를 살펴보았다. 그 결과, 과도기에서 여과부피에 대한 투과선속의 초기 변화율은 Taylor 수에 선형적으로 감소하는 경향을 보였으나, 준정상 상태에서의 투과선속은 막의 회전속도에 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 실험결과를 근거로 관련된 여과특성을 대변할 실험식들을 제시하였다.

Abstract—In this study characteristics of dynamic filters using Taylor vortices are investigated. Filtration experiments are conducted with silica slurry and filtrate fluxes are analysed on the basis of the Taylor number and the rotational velocity of the membrane filter by dividing them into two regions: the transient state and the pseudosteady state. During the transient period the initial variation of the filtrate flux to filtrate volume is found to decrease linearly with increasing the Taylor number, while the filtrate flux at the pseudo-steady state is found to increase linearly with increasing the rotational velocity of membrane. Based on these results, empirical correlations to represent filtration characteristics are provided.

1. 서 론

본 연구에서는 십자흐름여과(crossflow filtration)의 개선책으로 고안된 Taylor 와류를 이용한 동역학적 여과의 특성에 대하여 고찰하였다. 동역학적 여과의 일반적인 특성 및 연구 배경은 이미 박 등[1]에 의하여 상세히 보고된 바 있다. 그들은 위치에너지를 구동력으로 입자의 평균 크기가 4 μm 인 실리카 1.0 wt% 슬

러리를 사용하여 평균 공경이 1.2 μm 인 셀룰로오스 아세테이트 막을 투과한 여액의 선속이 준정상 상태에서 회전속도가 증가함에 따라 증가함을 보이고, 이러한 실험결과를 초기 과도기와 준정상 상태로 구분하여 투과선속을 예측할 수 있는 무차원 상관식을 제시하였다. 최근 Murase 등[2, 3]은 세라믹 막을 사용하여 Korean kaolin, PMMA, 효모를 대상으로 동역학적 여과의 특성을 고찰하였다. 특히, Murase 등[2]의 논문에서는

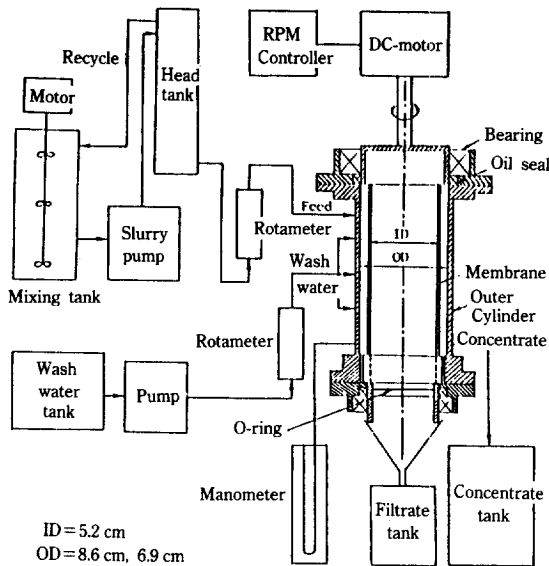


Fig. 1. Apparatus of dynamic filter.

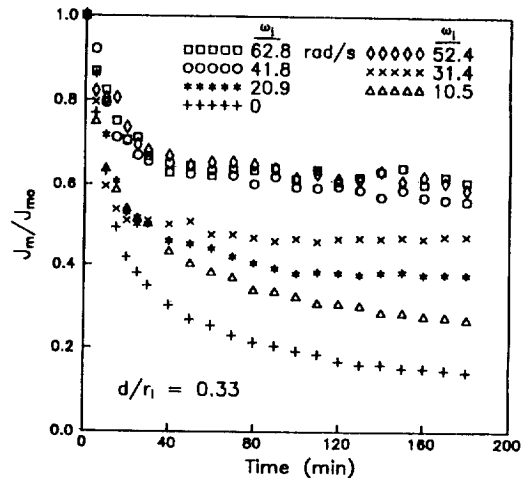
입자의 평균 크기가 $0.41 \mu\text{m}$ 인 PMMA를 대상으로 실험한 결과를 Ruth의 여과식을 근거로 하고 회전여과 속도계수를 도입하여 해석하였다. 또한, Cooney 등[4]은 본 연구에서 사용한 동역학적 여과기와 그 원리가 동일한 여과기를 VFF(vortex flow filtration)이란 명칭으로 bovine serum albumin으로 실험한 결과를 보고하였다.

본 연구에서는 박 등[1]이 사용한 여과기에서 내부막 여과기의 제원은 동일하나, 동심원통 사이의 간격을 절반으로 축소한 여과기를 제작하여 동일한 실리카 슬러리를 사용하여 실험하였다. 두 여과기의 실험결과를 비교함으로써, 여과기의 동심원통 사이의 간격이 여과기의 성능에 미치는 영향을 고찰하여 동역학적 여과기의 설계에 필요한 정보를 제공하였다. 실험결과를 해석하는 방법으로는, Murase 등[2]이 회전여과 속도계수를 사용한 해석방법과 본 연구실에서 제안한 과도기와 준정상상태로 구분하여 해석하는 방법을 사용하였다. 이 두 해석결과를 비교함으로써 그 차이점과 앞으로의 연구 방향을 제안하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 동역학적 압력여과기는, Millipore 회사 제품인 "MF-Cellulose ester" 막 여과기를 결합시켜, Fig. 1과 같이 제작하였다. 실험장치와 방법은 박 등[1]의 논문에서 상세히 설명되어 있다. 다만 동심

Fig. 2. Dimensionless filtrate flux vs. time for slurry($d/r_1 = 0.33$).

원통 사이의 간격을 1/2로 축소하기 위하여 직경 6.9 cm 외부원통을 추가로 제작하였다. 또한 새로 제작한 여과기에서는 슬러리를 $1.73 \text{ cm}^3/\text{s}$ 로 일정하게 공급하여, 슬러리의 체류시간은 10.4분으로 동일하게 유지하였다. 본 논문에서 사용한 막의 면적은 1095 cm^2 이고, 여과기의 용량 V_0 는 $d/r_1 = 0.33$ 인 경우 1082 cm^3 이고, $d/r_1 = 0.65$ 인 경우 2469 cm^3 이다. 동역학적 여과기의 내부원통과 외부원통의 직경은 Fig. 1에 제시하였다.

2-2. 시료

슬러리로는 이미 보고한 논문[1]과 동일하게 한불화학 제품인 Tix-O-Sil 34 K를 1.0 wt%로 물과 혼합하여 사용하였다. 주요 성분은 SiO_2 이고, Horriba 회사 제품인 원심입도분석기(모델 CAPA-300)를 사용하여 입도를 분석한 결과, 평균 입자 크기가 $4.00 \mu\text{m}$ 이었고 $1 \mu\text{m}$ 이하의 입자는 전체의 7.1%에 해당하였다. 또한, Tix-O-Sil 34 K의 벌크 밀도는 생산회사 한불화학에서 제시한 바에 의하면 0.10 g/cm^3 이다.

3. 결과 및 검토

3-1. 회전여과 속도계수를 사용한 해석

내부원통의 반경에 대한 두 원통 사이의 간격의 비 d/r_1 가 0.33인 동역학적 여과기로 실험한 결과를 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 3은 본 실험결과와 비교하기 위하여 박 등[1]에서 검토된 바 있는 외부원통의 직경이 8.6 cm이고, d/r_1 가 0.65인 여과기의 실험결과를 rad/s 단위로 전환시켜 도시한 것이다. Fig. 2와 3을 비교하여 보면 막의 회전속도가 52.4 rad/s 이상인 경우에, 3시간 여

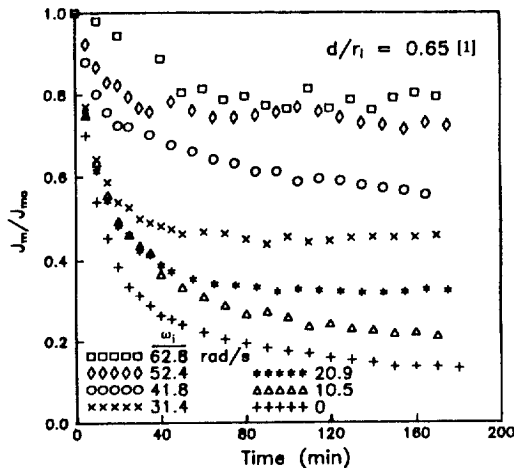


Fig. 3. Dimensionless filtrate flux vs. time for slurry($d/r_i = 0.65$).

과한 후 $d/r_i = 0.33$ 일 때의 J_m/J_{m0} 값이 $d/r_i = 0.65$ 일 때의 값보다 작은 값을 유지하였다. 반면에 막의 회전속도가 41.8 rad/s 이하인 경우에는 J_m/J_{m0} 값이 d/r_i 에 무관하거나, 오히려 $d/r_i = 0.33$ 일 때의 J_m/J_{m0} 값이 $d/r_i = 0.65$ 일 때의 값보다 약간 크게 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 16에 비교하여 제시하였다. J_m/J_{m0} 가 감소하였다는 것은 막의 표면에 형성된 케이크의 저항이 증가하였다는 것을 의미한다. 따라서 막의 회전속도가 빠른 경우에, 막과 외부원통 사이의 간격이 좁아질수록 케이크의 형성이 빠른 속도로 진행하여, 케이크의 저항이 급격히 증가한 것이다.

우선 Murase 등[2]이 세라믹 막으로 PMMA를 여과한 결과를 해석한 방법을 도입하여, 본 연구의 실험 결과를 비교 고찰한다. 그들의 해석방법은 다음과 같은 Ruth[5]의 여과식으로부터 출발하였다.

$$\frac{1}{J} = \frac{d\theta}{dv} = \frac{\mu \alpha_{av} \rho s^*}{\Delta P(1 - m^* s^*)} v + \left(\frac{d\theta}{dv} \right)_M \quad (1)$$

여기서 J 는 투과속도, θ 는 여과시간, v 는 막의 단위면적당 투과한 여액의 부피, μ 는 여액의 점도, α_{av} 는 평균여과비저항, ρ 는 여액의 밀도, s^* 는 슬러리 중의 고체의 농도, ΔP 는 여과압력, m^* 는 케이크의 습진질량비이다. 하첨자 M 은 막을 의미하며, $(d\theta/dv)_M$ 은 여과개시시점에서의 $d\theta/dv$ 의 값이다.

식 (1)에서 케이크의 저항 R_C 와 막의 저항 R_M 으로 대체하여 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d\theta}{dv} = \frac{R_C + R_M}{\Delta P} \quad (2)$$

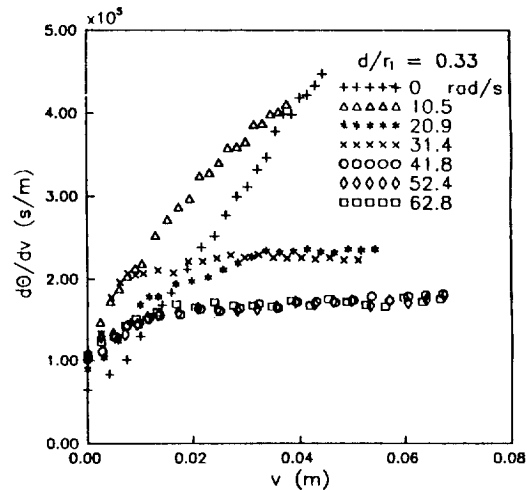


Fig. 4. Reciprocal of filtrate flux vs. filtrate volume per unit area($d/r_i = 0.33$).

여기서 R_C 는 $\mu \alpha_{av} \rho s^* v / (1 - m^* s^*)$ 이고, R_M 은 $\Delta P(d\theta/dv)_M$ 이다.

동역학적 여과기에 식 (2)를 적용하기 위하여 변형하여 보면 다음과 같다.

$$\frac{1}{J_r} = \left(\frac{d\theta}{dv} \right)_r = \frac{R_C}{\Delta P} + \left(\frac{d\theta}{dv} \right)_M \quad (3)$$

여기서 하첨자 r 은 막이 회전함을 의미하는 것으로, J_r 은 동역학적 여과기에서의 투과속도, R_C 은 동역학적 여과기에서의 케이크의 저항을 나타낸 것이다.

식 (1)을 이용하여 투과속도의 역수 $d\theta/dv$ 를 v 에 대하여 도시한 것이 Fig. 4와 5이다. d/r_i 가 0.65인 경우 막을 회전시킬 때의 $d\theta/dv$ 의 값은 회전시키지 않을 때의 값과 일치하다가 어떤 v 값을 기점으로 벗어나기 시작하여 Murase 등[2]의 결과와 비슷한 경향을 보이는 듯했으나, d/r_i 가 0.33인 경우에는 회전시키지 않을 때의 $d\theta/dv$ 값보다 회전시킬 때의 값이 더 큰 영역이 뚜렷이 나타났다. 즉, 막을 회전시킬 때 투과속도가 오히려 회전시키지 않을 때보다 더 작게 나타나는 영역이 존재한다는 것인데, 이것은 막이 회전하면 원심력에 의하여 투과속도가 감소하는 것으로 추측된다. 이는 박 등[1]의 순수한 물만으로 여과했을 때에도 회전할 때의 투과속도가 감소하는 경향과 일치하는 결과이다. Murase 등[2]이 지적하지 않은 이러한 현상은 본 실험은 외부에서 압력을 가하여 슬러리를 공급하는 것이 아니라, 여과기 내의 슬러리 무게에 의한 중력이 구동력으로 작용하기 때문에 원심력과 같은 미세한 영향으로도 구동력을 변환시킬 수 있었던 것으로 추측된다. 본 연구에서 사용한

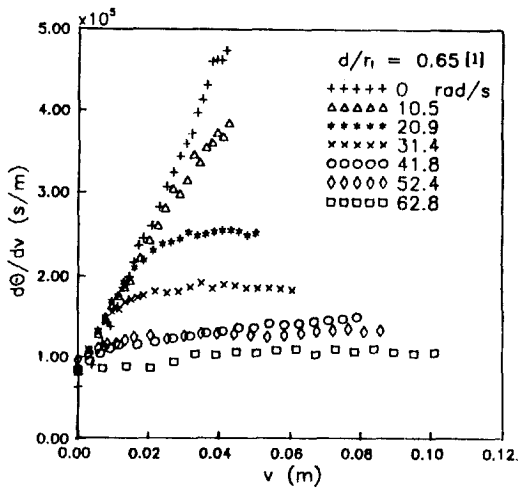


Fig. 5. Reciprocal of filtrate flux vs. filtrate volume per unit area ($d/r_i=0.65$).

동역학적 여과기에서는 슬러리의 위치에너지가 압력으로 변환하여 여과의 구동력으로 작용한다는 사실을, 이미 박 등[1]이 실험적으로 증명하였다.

식 (3)에 동역학적 여과기의 여과효율을 나타내는 회전여과 속도계수 j_r 을 도입하여 Murase 등[2]이 제시한 식은 아래와 같다.

$$j_r = \frac{\frac{d\theta}{dv} - \left(\frac{d\theta}{dv}\right)_M}{\left(\frac{d\theta}{dv}\right)_r - \left(\frac{d\theta}{dv}\right)_M} \quad (4)$$

식 (4)에서 j_r 이 1이면, 막이 회전할 때의 투과선속의 역수는 회전하지 않을 때의 값과 같게 된다. 회전여과 속도계수를 정의에 의하여 구하여 v 에 대하여 도식한 것이 Fig. 6과 7이다. j_r 값이 크다는 것은, 막의 회전에 의한 투과선속의 감소를 억제하는 효과가 증가한다는 것을 의미한다. $d/r_i=0.65$ 일 때 막의 회전효과가 $d/r_i=0.33$ 일 때보다 높다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 회전시킬 때의 투과선속이 회전시키지 않을 때의 투과선속보다 오히려 작아지는 영역이 존재한다는 사실이 이 두 그림에서 뚜렷이 나타났다. j_r 이 1보다 작은 부분이 이 영역에 해당된다. 막이 회전할 때의 투과선속의 역수가 회전하지 않을 때의 값에서 벗어나는 v 값을 v_i 라 하면, 회전여과 속도계수는 v 의 범위에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$j_r = 1 \quad \text{at } v \leq v_i \quad (5a)$$

$$j_r = 1 + k^*(v - v_i) \quad \text{at } v \geq v_i \quad (5b)$$

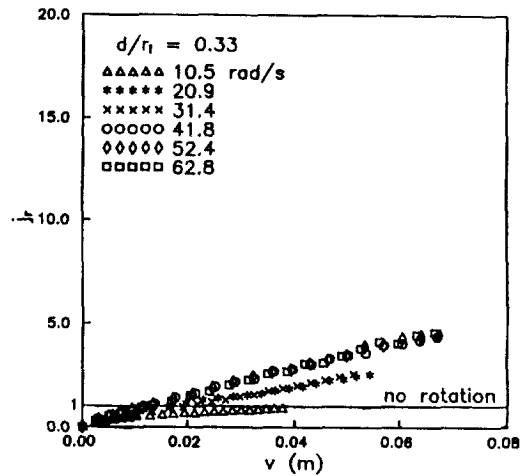


Fig. 6. Variation of rotatory filtrate rate factor j_r with filtrate volume per unit membrane area v ($d/r_i=0.33$).

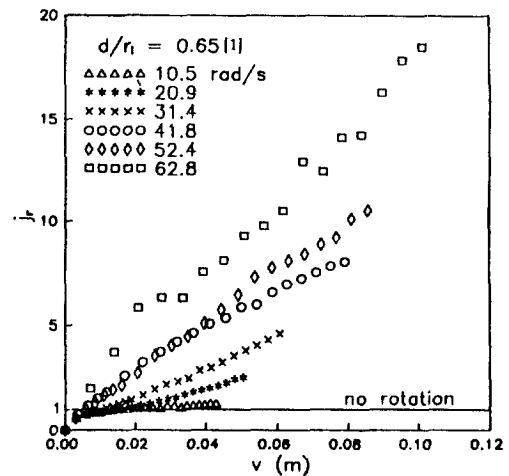
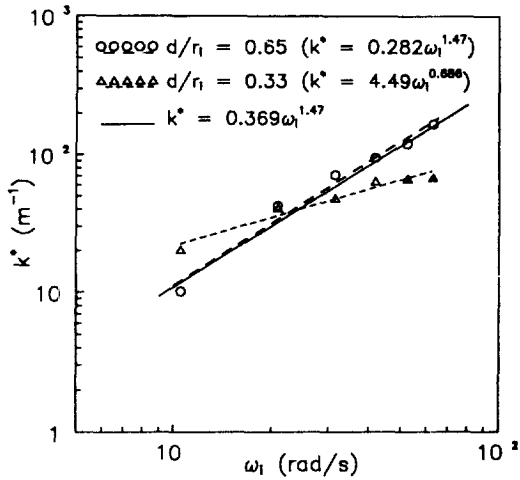
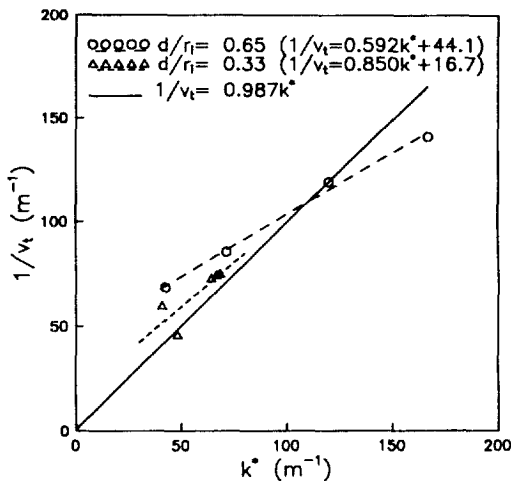


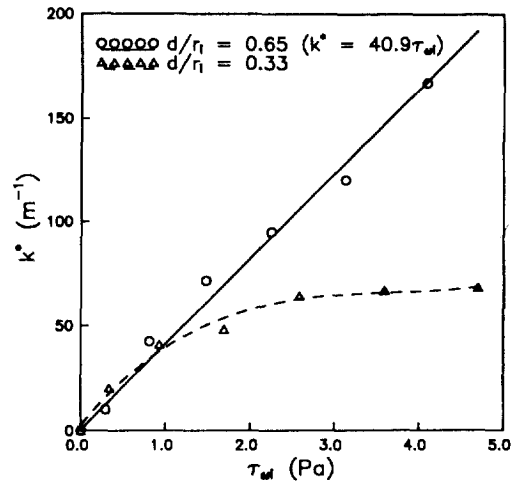
Fig. 7. Variation of rotatory filtrate rate factor j_r with filtrate volume per unit membrane area v ($d/r_i=0.65$).

여기서 v_i 값은 Fig. 6과 7에서 j_r 이 1이 되는 v 값이 되고, k^* 값은 v 에 대한 j_r 의 기울기이다. 막의 각속도에 대하여 k^* 값을 도식한 것이 Fig. 8이다. $d/r_i=0.65$ 인 경우 k^* 는 막의 각속도 ω 와 $k^*=0.282 \omega^{1.47}$ 의 상관관계가 있고, $d/r_i=0.33$ 인 경우 $k^*=4.49 \omega^{0.686}$ 의 상관관계가 있음을 알 수 있었다. Murase 등[2]이 기공의 크기가 $0.2 \mu\text{m}$ 인 세라믹 막을 사용하여 입자의 평균 크기가 $0.41 \mu\text{m}$ 인 PMMA를 대상으로 d/r_i 가 0.22인 동역학적 여과기로 실험한 결과, k^* 값이 막의 각속도의 1.35승에 비례하는 것으로 나타났다. 이 값은 본 연구결과 $d/r_i=0.65$ 인 경우의 1.47승과 유사한 값이다. v_i 의 역수를 k' 에 대하여

Fig. 8. Effect of rotating angular velocity on k^* .Fig. 9. Relation between $1/v_t$ and k^* .

도시한 결과가 Fig. 9인데, $d/r_1=0.65$ 인 경우 $1/v_t=(0.592 k^*+44.1)$ 의 상관성이 있고, $d/r_1=0.33$ 인 경우 $1/v_t=(0.850 k^*+16.7)$ 의 상관성이 있는 것으로 밝혀졌다. 그러나, Murase 등[2]의 결과에는 $1/v_t$ 와 k^* 의 상관관계가 원점을 지나는 직선으로 제시하였는데 본 연구결과와 상당한 차이를 보였다. 이러한 결과의 차이에 대한 원인 규명이 앞으로의 연구과제로 남아 있다. Fig. 9에서 실선은 본 실험결과를 원점을 지나는 직선으로 최소자승법을 사용하여 계산한 결과로, $1/v_t=0.987 k^*$ 이라는 상관식을 얻을 수 있었다. 이 상관식은 Murase 등[2]이 보고한 비례상수 1.18과 유사한 값을 보였다.

동심원통에서 내부원통이 회전할 때 내부원통의 표면에 작용하는 전단력은 실험적으로 결정된 식으로 다

Fig. 10. Effect of shear stress at rotating cylinder surface on k^* .

음과 같이 나타낼 수 있다[6-8].

$$\tau_{\omega} = f \rho_l r_i^2 \omega_i^2 / 2 \quad (6)$$

여기서 f 는 마찰계수이고, ρ_l 은 유체의 밀도이다. 마찰계수와 d/r_i , Reynolds 수 Re 와의 상관관계식은 다음과 같다.

$$f = \frac{4(1+d/r_i)^2}{(2+d/r_i)Re} \quad \text{for } 20 \leq Re \leq Re_c \quad (7a)$$

$$f = 0.80(d/r_i)^{0.35} Re^{-0.53} \quad \text{for } Re_c \leq Re \leq 10^4 \quad (7b)$$

여기서 Re 는 $\omega_i r_i$ 의 속도, d 의 길이 단위를 갖게 되며, 위의 식이 적용되는 범위는 $0.03 \leq d/r_i \leq 1.0$ 이고, Taylor 와류가 나타나는 임계 Reynolds 수와 d/r_i 의 상관관계를 실험적으로 결정된 식은 다음과 같다.

$$Re_c = 41.2(d/r_i)^{-0.5} + 27.2(d/r_i)^{0.5} + 2.8(d/r_i)^{1.5} \quad (8)$$

위의 식들로부터 구한 막 표면에 작용하는 전단력 τ_{ω} 에 대하여 k^* 를 도시한 것이 Fig. 10과 같다. 간격비 d/r_i 가 0.65인 경우에는 k^* 가 전단력에 선형적으로 비례하였으나, 간격비가 0.33인 경우에는 전단력이 3.0 Pa 이상이 되면 k^* 가 더 이상 증가하지 않았다. 동심원통 사이의 간격이 Taylor 와류의 단위세포의 길이가 된다고 알려져 있으므로, 간격이 좁아지면 단위길이당 Taylor 와류의 수가 증가하게 된다. 이러한 Taylor 와류의 증가가, $d/r_i=0.33$ 인 경우 전단력이 증가하여도 k^* 가 더 이상 증가하지 않는 원인으로 작용한 듯하다. 본 실험은 임계 Reynolds 수보다 큰 영역이므로 식 (7b)를 식 (6)에 대입하여 막의 각속도에 대하여 정리하여 보면, 막의 표면에 작용하는 전단력은 각속도의 1.47승에 비례함을

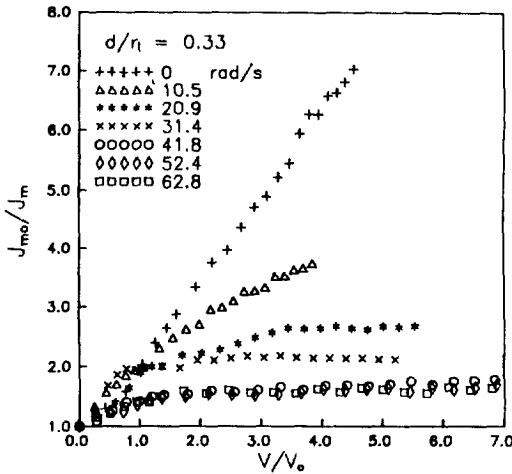


Fig. 11. Reciprocal of filtrate flux vs. cumulative throughput for slurry($d/r_i=0.33$).

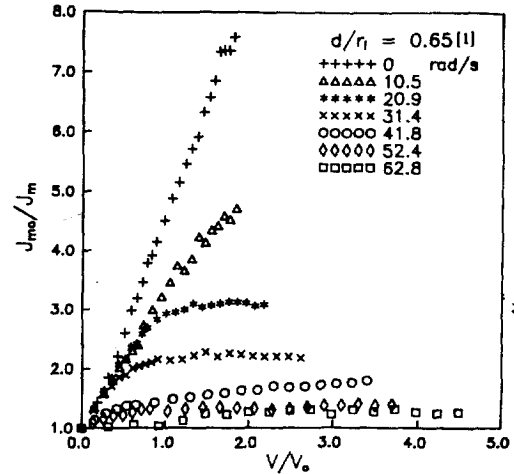


Fig. 12. Reciprocal of filtrate flux vs. cumulative throughput for slurry($d/r_i=0.65$).

알 수 있다. 결국 k' 가 각속도의 1.47승에 비례한다는 것이다. 이것을 Fig. 8에 실선으로 나타낸 것인데, 본 실험에서 $d/r_i=0.65$ 일 때 구한 지수와는 일치하였으나, $d/r_i=0.33$ 일 때 구한 지수 0.686과는 많은 차이를 보였다.

3-2. 과도기와 준정상 상태로 구분한 해석

앞의 여과특성 해석방법은 이미 설명한 바와 같이, 과도기에서 본 실험결과와 해석에 적용하기 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 투과선속의 변화를 케이크가 급격히 형성되는 과도기와 케이크의 형성과 Taylor 와류에 의한 케이크의 제거가 평형을 이루는 준정상 상태로 구분하여 해석하여 보겠다. 식 (2)를 역수로 취한 형태로부터 시작하면 투과선속은 다음과 같다.

$$J = \frac{\Delta P}{R_M + R_C} \quad (9)$$

케이크의 저항 R_C 는 다음과 같이 표현되기도 한다[9].

$$R_C = \frac{\alpha m V (\Delta P)^s \mu}{A} \quad (10)$$

여기서 α 는 케이크의 성질에 의존하는 상수, m 은 단위 투과부피당 건조된 입자의 질량, V 는 유체의 누적투과량, s 는 케이크의 압축률 지수, A 는 막의 면적이다. 식 (10)을 식 (9)에 대입하여 역수를 취하면 다음과 같은 형태가 된다.

$$1/J = \frac{\alpha m V (\Delta P)^{s-1} \mu}{A} + \frac{R_M}{\Delta P} \quad (11)$$

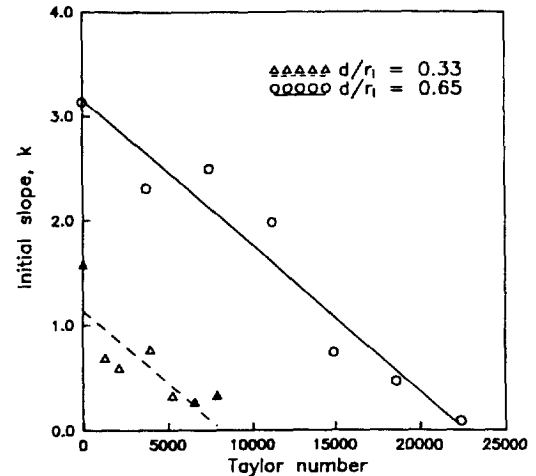


Fig. 13. Initial slope vs. Taylor number for slurry.

식 (11)에서 $\Delta P/R_M$ 은 여과개시 시점의 투과선속 J_{m0} 이다. 여기서 하첨자 m 은 평균값을 의미하는데, 이것은 본 실험에서 사용한 동역학적 여과기에서는 여과기의 수직방향의 위치에 따라 투과선속이 다르기 때문에 평균값을 취한 것이다. 식 (11)에 J_{m0} 을 곱하여 주고, V 를 여과기 내부의 용량 V_0 로 무차원화하면 다음과 같다.

$$J_n / J_m = k(V/V_0) + 1 \quad (12)$$

본 실험결과를 식 (12) 형태에 따라 도시한 것이 Fig. 11과 12이다. 두 경우 모두 막의 각속도가 10.5 rad/s 이하에서는 J_{m0}/J_m 이 선형적으로 계속 증가하였지만, 각속도가 그 이상이 되면 초기에는 J_{m0}/J_m 이 선형적으로

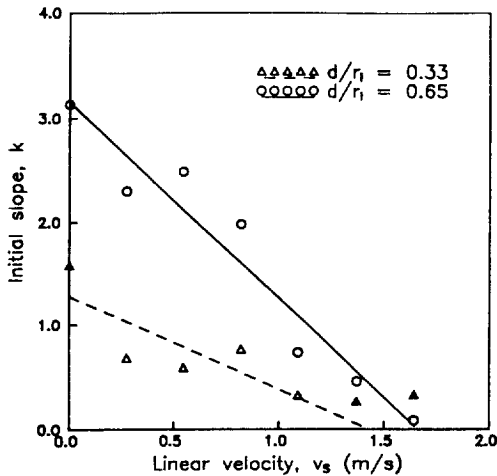


Fig. 14. Initial slope vs. linear velocity of rotating membrane for slurry.

증가하다가 일정한 값을 유지하는 준정상 상태에 도달하였다. 여과 초기의 J_{ms}/J_m 의 증가율 k 를 Taylor 수에 대하여 도식한 것이 Fig. 13이다. k 는 Taylor 수에 대하여 선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있는데, 두 여과기 모두 기울기가 동일하게 나타났다. 다만 동심원통의 간격이 작은 여과기는 Taylor 수가 작은 영역에 분포하였다. 과도기에서 실험적으로 구한 k 와 Taylor 수 사이의 상관식은 다음과 같다.

$$k = -1.40 \times 10^{-4} Ta + 3.16 \quad \text{for } d/r_1 = 0.65 \quad (13)$$

$$k = -1.40 \times 10^{-4} Ta + 1.14 \quad \text{for } d/r_1 = 0.33 \quad (14)$$

Fig. 13에서 검게 칠한 실험값은 k 가 더 이상 감소하지 않는 범위이다. 여기에서 d/r_1 가 0.65인 경우에는 Taylor 수 22000부근이, 0.33인 경우에는 8000부근이 최적조건으로 추정된다. 여과초기의 J_{ms}/J_m 의 증가율 k 와 막의 선속도 사이의 상관성을 알아 본 것이 Fig. 14이다. 두 여과기 모두 선형적으로 감소하는데, Fig. 13에서와는 달리 동심원통 사이의 간격이 작은 경우 그 직선의 기울기가 증가하였다. 또한, 특이한 점은 선속도 1.5 m/s 부근에서 두 경우의 값이 일치하였는데, 바로 이 부분이 최적 선속도일 것으로 추측된다.

투과선속이 거의 평형을 이루는 준정상 상태에서의 J_{ms}/J_{mo} 를 Taylor 수 사이의 상관성을 알아 본 것이 Fig. 15이다. 막의 각속도가 10.5 rad/s 이하에서는 준정상 상태에 도달하지 않았으므로, 3시간 여과한 후의 투과선속을 다른 심볼로 표시하였다. J_{ms}/J_{mo} 는 Taylor 수에 대하여 선형적으로 증가하였는데, $d/r_1 = 0.33$ 일 때의 기울기가 $d/r_1 = 0.65$ 일 때보다 증가하였다. 그 상관관

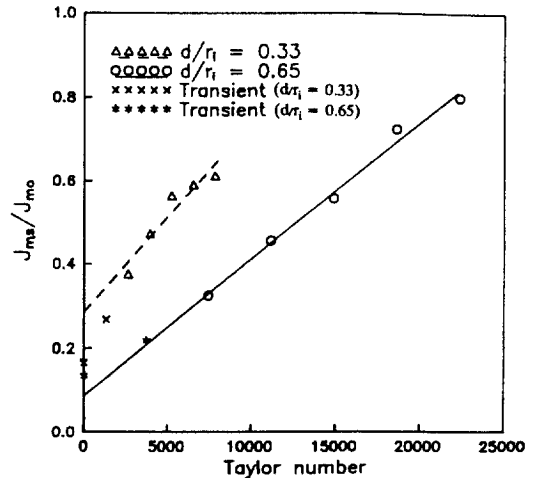


Fig. 15. Dimensionless filtrate flux vs. Taylor number at pseudosteady state.

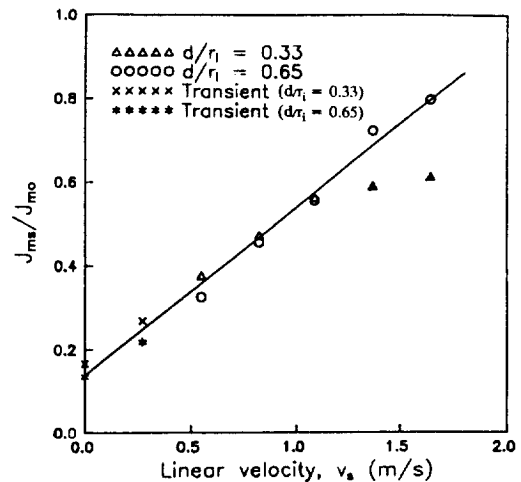


Fig. 16. Dimensionless filtrate flux vs. linear velocity of rotating membrane at pseudosteady state.

계는 다음과 같다.

$$J_{ms}/J_{mo} = 3.25 \times 10^{-5} Ta + 8.72 \times 10^{-2} \quad \text{for } d/r_1 = 0.65 \quad (15)$$

$$J_{ms}/J_{mo} = 4.51 \times 10^{-5} Ta + 2.87 \times 10^{-1} \quad \text{for } d/r_1 = 0.33 \quad (16)$$

준정상 상태의 J_{ms}/J_{mo} 를 막의 선속도에 대하여 도식하여 본 것이 Fig. 16이다. d/r_1 가 0.33인 경우에 각속도가 큰 범위를 제외하고는 Fig. 15와는 달리, 준정상 상태의 투과선속이 동심원통 사이의 간격에 상관없이 막의 각속도에 선형적으로 비례하였다. 그 상관식은 다음과 같다.

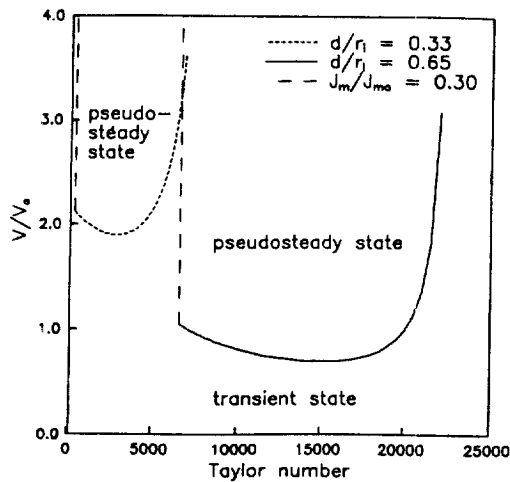


Fig. 17. Application of present predictions.

$$J_{ms}/J_{m0} = 0.401 V_s + 0.138 \quad (17)$$

Taylor 수와 무차원화한 여과부피 V/V_0 사이의 상관관계를 알아 보기 위하여, 과도기에서의 식 (12)와 준정상 상태에서의 식 (15), (16)에서 J_m/J_{m0} 을 소거하여 구한 식을 Fig. 17에 도시하였다. 이 영역도에서 Taylor 수가 정해지면 준정상 상태까지 도달하는데 필요한 여과부피를 예측할 수 있어, 현장에서 용이하게 사용할 수 있을 것이다. $d/r_1=0.65$ 일 때의 영역도가 이미 보고된 논문 [1]과 차이를 보이는 것은, 논문[1]에서는 준정상 상태의 투과선속 $J_{ms}/J_{m0}=1$ 이 되는 Taylor 수에서 초기 투과선속이 감소하지 않고 계속 유지된다는 가정하여 k 가 그 Taylor 수에서 0이 된다고 예측하였기 때문이다. 그러나, 본 논문에서는 이러한 가정의 타당성을 확인할 수 없기에, 과도기에서의 실험결과만을 근거로 하여 k 와 Taylor 수 사이의 상관식을 구하여 Fig. 17의 영역도를 얻었다. 여기서 점선은 투과선속이 초기 투과선속의 30%로 감소하는 시점을 나타내고 있는데, 이 시점에서는 막을 교환하던가 막을 세척하여 투과선속을 높게 유지하여야 효과적인 여과를 할 수 있을 것이다.

5. 결 론

이미 보고된 논문[1]에 이어 동심원통 사이의 간격을 1/2로 축소한 동역학적 여과기를 제작하여 실험한 여과기의 결과를 고찰하였다. Murase 등[2]의 해석방법을 본 연구에 도입하여, 내부원통의 반경에 대한 동심원통 사이의 간격의 비가 다른 두 여과기의 실험결과를 해석하였다. 그 결과 Murase 등의 결과에서는 볼 수 없었던, 막을 회전할 때 투과선속이 오히려 감소하는 영

역이 나타났다. 이는 원심력에 의하여 발생한 것으로 추측된다. 본 실험결과를 해석한 것과 Murase 등의 결과는 대부분 일치하였으나, 동심원통 사이의 간격이 작은 여과기에서 막의 회전속도가 클 때 벗어나는 영역이 존재하였다.

투과선속의 변화를 과도기와 준정상 상태로 구분하여 해석하였다. 그 결과 과도기에서는 Taylor 수를 인자로 하여 해석하면 투과선속의 역수의 변화율이 두 여과기에서 일치하였다. 반면에 준정상 상태에서는 투과선속이 막의 선속도에 선형적으로 비례하였다. 이러한 결과를 실제에 응용하기 편리하도록 Taylor 수에 대한 투과부피의 영역도를 제시하였다. 앞으로 내부원통의 반경에 대한 동심원통 사이의 간격의 비가 다른 여과기를 더 제작하여, 여과기의 간격이 여과특성에 미치는 영향을 실험적으로 살펴 볼 예정이며, 아울러 보다 체계적인 동역학적 여과기의 모델을 설정할 계획이다.

감 사

본 논문은 한국과학재단의 목적기초연구의 일환으로 수행되었으며, 연구를 후원하여 준 한국과학재단에 감사드립니다.

사용기호

- A : area of membrane surface [m^2]
- d : gap length between two cylinders [m]
- f : friction factor of rotating cylinder
- g : gravitational constant [m/s^2]
- J : filtrate flux [m/s]
- J_m : total average flux [m/s]
- J_{m0} : initial filtrate flux [m/s]
- j_r : rotatory filtration rate factor defined by Eq.(4)
- k : slope of line at J_{m0}/J_m vs. V/V_0
- k' : constant defined by Eq.(5b) [m^{-1}]
- m : weight of dry particulates per unit volume of filtrate [kg/m^3]
- m' : ratio of wet to dry cake mass
- P : pressure [Pa]
- R : resistance [$Pa \cdot s/m$]
- Re : Reynolds number, $d r_1 \omega_1 / \nu$
- Re_c : critical Reynolds number
- r : radius of cylinder [m]
- s : compressibility exponent of cake
- s' : mass fraction of solid in slurry
- Ta : Taylor number, $(u_c d/\nu)(d/r_1)^{1/2}$
- V : cumulative throughput [m^3]

V_o : volume of filter [m^3]
 v : filtrate volume per unit membrane area [m]
 v_s : linear velocity of rotating membrane [m/s]
 v_t : value of v defined in Eq. (5a) and (5b) [m]

그리스 문자

α : constant in Eq. (10)
 α_{av} : average specific filtration resistance [m/kg]
 θ : filtration time [s]
 μ : dynamic viscosity [$kg/m \cdot s$]
 ν : kinematic viscosity [m^2/s]
 ρ : density of liquid [kg/m^3]
 ρ_t : density of slurry in filter chamber [kg/m^3]
 τ_{ω} : shear stress at rotating cylinder surface [Pa]
 ω : angular velocity [rad/s]

하첨자

C : cake at membrane surface
 i : inner cylinder
 M : membrane
 r : rotatory filtration
 s : steady state

참고문헌

1. 박진용, 최창균, 김재진 : 화학공학, **27**, 637(1989).
2. Murase, T., Iritani, E., Chidphong, P., Kano, K., Atsumi, K. and Shirato, M.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **15**, 630(1989).
3. Murase, T., Iritani, E., Chidphong, P. and Kano, K.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **15**, 1179(1989).
4. Cooney, C. L., Holeschovsky, U. and Agarwal, G.: Proc. 2nd Int. Biotech. Conf., Seoul, 33(1990).
5. Ruth, B. F.: *Ind. Eng. Chem.*, **25**, 153(1933).
6. Atsumi, K., Makino, T., Kato, K., Murase, T., Iritani, E., Chidphong, P. and Shirato, M.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **14**, 14(1988).
7. Ito, R., Hamazaki, S. and Morishige, A.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **8**, 351(1982).
8. Kataoka, K.: "Encyclopedia of Fluid Mechanics" (ed. by N. P. Chermisinoff), Vol. 1, Gulf Pub., Houston (1985).
9. Schweitzer, P. A.: "Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers", 2nd Ed., McGraw-Hill, New York(1988).