

## 회전막 여과기에서의 케이크 저항에 관한 실험적 연구 및 모델링

박원철, 김현우, 최창균, 박진용\*, 김재진\*\*

서울대학교 공과대학 화학공학과

한림대학교 환경학과\*

한국과학기술연구원 고분자 연구부\*\*

## An Experimental Study and Modelling of Cake Resistance in Rotating Membrane Filtration

W. C. Park, H. W. Kim, C. K. Choi, J. Y. Park\*, J. J. Kim\*\*

Department of Chemical Engineering, Seoul National University

Department of Environmental Science, Hallym University\*

Division of Polymer Science and Technology, KIST\*\*

### 1. 서 론

본 연구에서는 매우 안정된 유동의 하나로서 막 표면의 전단력을 향상시켜 여과가 진행됨에 따라 막의 표면에서 발생하여 여과선속을 저하시키는 케이크층의 형성을 억제하는 데에 효과가 있다고 알려진 Taylor와류를 응용한 회전막 여과기를 사용하여 여과실험을 수행함으로써 이러한 유동이 케이크의 형성에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 여과선속에 영향을 미치는 여러 매개인자들을 포함하는 새로운 모델식을 제안하고 실험결과와 비교해봄으로써 그 타당성을 살펴보았다.

### 2. 이 론

본 연구에서는 두 개의 동심원통 사이에서 내부원통에 장치된 막을 회전시킬 때 Fig. 1에 보인 바와 같이 발생하는 Taylor 와류가 여과시간의 경과에 따른 케이크 층의 형성에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보았다.

일반적으로 케이크의 형성과정은 다음의 간단한 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dM_c}{dt} = \dot{M}_{cd} - \dot{M}_{cr} \quad \dots(2.1)$$

여기서 좌변은 케이크의 순수 형성속도를 나타내며,  $M_c$ 는 단위면적당 케이크의 질량,  $\dot{M}_{cd}$ 는 입자의 퇴적속도 그리고  $\dot{M}_{cr}$ 는 입자의 제거속도를 나타낸다.

$\dot{M}_{cd}$ 는 벌크 농도에 비례한다고 알려져 있으므로 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{M}_{cd} = k_d C_o \quad \dots(2.2)$$

여기서  $C_o$ 는 벌크농도이며  $k_d$ 는 퇴적계수이다. 본 연구에서는 퇴적계수  $k_d$ 가 입

자부착 영역에서의 Brown성 확산과 입자부착 영역으로의 유체운동의 두 성분으로 이루어져 있다고 생각하여 다음의 식을 제안하였다.

$$k_d = \left( \frac{1}{k_m} + \frac{1}{k_a} \right)^{-1} \quad \dots(2.3)$$

여기서  $k_m$ 은 입자의 전달계수이며,  $k_a$ 는 입자의 부착계수이다.

한편 본 연구의 계에서는 막을 향한 입자의 선속을 막에 수직방향의 확산에 의한 전달과 막의 회전으로 인한 전단력에 의한 전달의 합으로 볼 수 있으므로 입자의 전달계수  $k_m$ 을 다음과 같이 제안하였다.

$$k_m = k_1 J + k_2 \tau_{\omega i}^n \quad \dots(2.4)$$

여기서  $k_1, k_2$ 는 실험상수이며  $\tau_{\omega i}$ 는 막 표면에 작용하는 전단력으로서 다음과 같이 정의되며 여과가 진행됨에 따라 막 표면에 형성되는 케이크층의 해석에 중요한 인자로 작용하게 된다.

$$\tau_{\omega i} = f \rho r_i^2 \omega_i^2 / 2 \quad \dots(2.5)$$

식에서  $f$ 는 마찰계수이다. (2.4)식에서 지수  $n$ 은 잘 발달된 난류흐름에서의 물질 전달 계에서는 0.8이 제안되기도 하나 본 연구에서는 Epstein[1]에 의해 제안된 바와 같이 0.5를 사용하였다.

일반적으로 막 표면에서의 입자의 부착확률은 막 표면에서의 전단력  $\tau_{\omega i}$ 에 반비례하는 것으로 알려져 있으므로 이를 고려하면 입자의 퇴적속도  $\dot{M}_{cd}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{M}_{cd} = C_o \left( \frac{1}{k_1 J + k_2 \tau_{\omega i}^{0.5}} + \frac{1}{k_3 / \tau_{\omega i}} \right)^{-1} \quad \dots(2.6)$$

본 연구에서는 물질전달 구조가 달라지는 데에 따라 입자 제거속도에 미치는 전단력의 영향을 고려하기 위하여 Kern과 Seaton[2]의 결과와 유사하게 다음의 형태로 입자의 제거속도에 관한 식을 제안하였다.

$$\dot{M}_{cr} = k_4 \tau_{\omega i} R_c \quad \dots(2.7)$$

여기서  $\rho_d$ 는 퇴적물의 밀도,  $k_4$ 는 실험상수,  $R_c$ 는 여과시간이 경과함에 따라 입자가 막 표면에 부착되어 생기는 케이크층의 저항을 의미한다.

본 연구에서 사용된 계에 대하여 입자의 퇴적속도와 제거속도를 고려하여 제안된 본 연구의 모델식은 다음과 같다.

$$\frac{dR_c}{dt} = C_o \left( \frac{1}{k_1 J + k_2 \tau_{\omega i}^{0.5}} + \frac{1}{k_3 / \tau_{\omega i}} \right)^{-1} - k_4 \tau_{\omega i} R_c \quad \dots(2.8)$$

### 3. 실험

본 연구에서 사용한 회전막 여과기가 Fig. 2에 나타나 있다. 여과기의 내부원통으로 사용된 Millipore 회사의 MF 정밀여과기는 굴곡기공을 가지며 지지층이 없는 대칭막의 형태로 두께 약 160  $\mu\text{m}$ , 기공의 크기 1.2  $\mu\text{m}$ 인 셀룰로우스 에스테르 막이다. 이 정밀여과기의 상단부를 모터와 연결하여 회전하게 하였으며, 내부

원통의 반경에 대한 동심원통 사이의 간격의 비  $d/r_1$ 가 각각 0.15, 0.44, 0.73인 3개의 아크릴 원통을 제작하여 고정된 외부원통으로 사용하였다.

시료로 일본 SEKISUI사 제품인 MB20X-5, MBX-12, MBX-20, MBX-50을 순수한 물과 혼합한 슬러리 형태로 사용하였다. 이들 입자는 구형의 형태를 가지며, 평균비중은  $1.15 \text{ g/cm}^3$ 이고 평균직경이 각각 5, 12, 20, 50  $\mu\text{m}$ 이다.

순수한 물에 대한 막의 고유저항과 회전막 여과기의 구동력 그리고 막의 회전으로 인한 막 표면에서의 압력강하를 알아보는 실험을 수행하였고, 케이크층의 형성에 영향을 미치는 조업인자로 회전수, 입자의 크기, 슬러리 농도의 변화 그리고  $d/r_1$ 를 설정하여 이러한 인자들의 변화에 따른 여과실험을 수행하였다.

#### 4. 결과 및 토론

본 연구에서 제안된 모델식 (2.8)에서 막이 회전하지 않는 경우에는 전단력  $\tau_{oi}=0$ , 막표면에서의 압력강하  $P^*=0$ 이므로 식은 다음의 간단한 형태가 된다.

$$\frac{dR_c}{dt} = k_1 C_o J = \frac{k_1 C_o \Delta P}{\mu (R_c + R_o)} \quad \dots(4.1)$$

이 식을 시간에 대하여 적분하면 다음과 같다.

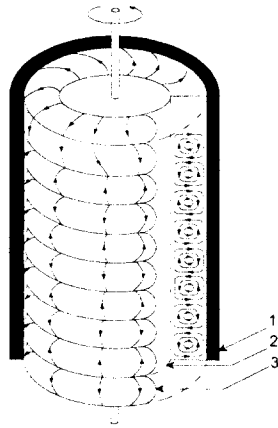
$$\frac{\mu (R_c^2 + R_c R_o)}{C_o \Delta P} = k_1 t \quad \dots(4.2)$$

막이 회전하지 않는 경우의 실험결과에 대해 (4.2)식의 좌변을 계산하고 이를 시간에 대해 도시하여 본 것이 Fig. 3이며, 이로부터 회귀분석법에 의해 기울기인  $k_1$ 을 구할 수 있다. 또한 수치해석적인 방법을 이용하여 모델식의 계수  $k_i$  ( $i=2,3,4$ )를 구해보고 이 계수값을 이용하여 예측한 케이크층의 저항을 시간에 따라 실험결과와 비교한 결과가 Fig. 4이다.

또한 조업인자들인 회전수, 입자의 크기, 슬러리 농도의 변화 그리고  $d/r_1$ 과 모델식 계수간의 상관관계를 구할 수 있었으며, 결과를 다른 저항예측 모델들과 비교해봄으로써 본 연구에서 제안된 모델식이 시간에 따른 케이크층의 저항을 매우 효과적으로 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 5. 참고문헌

1. Epstein, N., Particulate Fouling of Heat Transfer Surfaces: Mechanisms and Models, Fouling Science and Technology, eds. L. F. Melo et al., pp. 143-164, 1988.
2. Kern, D.Q. and Seaton, R.A., A Theoretical analysis of thermal surface fouling, Br. Chem. Eng., No. 4, pp. 258-262, 1959.



- 1 : stationary outer cylinder
- 2 : rotating inner cylinder
- 3 : Taylor vortices

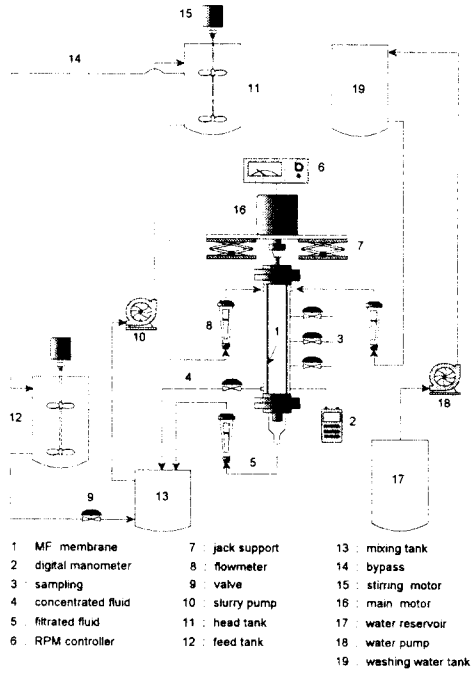


Fig. 1. Taylor Vortices between two cylinders.

Fig. 2. Experimental Apparatus.

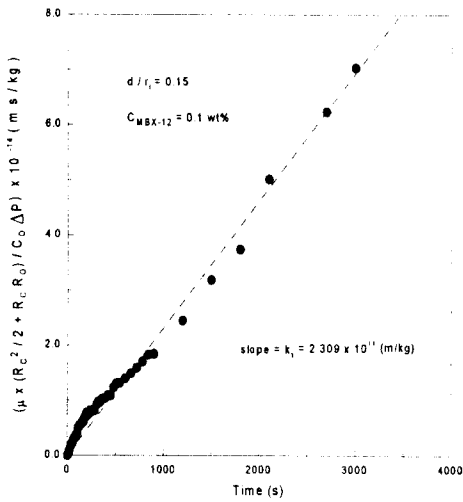


Fig. 3. Determination of  $k_1$  ( $C_{MBX-12}$  = 0.1 wt%,  $d/r_1=0.15$ ).

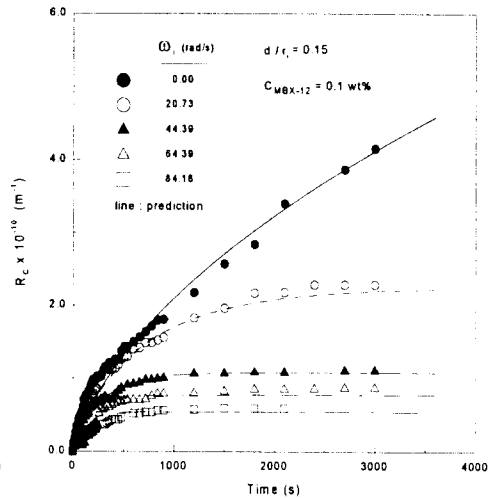


Fig. 4. Comparison of cake resistance predicted by model equation with measured values ( $C_{MBX-12}$  = 0.1 wt%,  $d/r_1 = 0.15$ ).