멤브레인(Membrane Journal)
Vol.7, No.3, October, 1997, 150-156

정밀여과에서 임계플럭스(Critical flux)에 관한 이론 및 실험적 고찰

윤 성 훈 · 이 정 학

서울대학교 공과대학 공업화학과
(1997년 6월 23일 접수)

The Critical Flux in Microfiltration: Comparison between Theoretical and Experimental Values

Seong-Hoon Yoon and Chung-Hak Lee

Dept. Chemical Technology, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
(*Received June 23, 1997*)

요 약 : 입자의 정밀여과에 있어 임계플럭스의 이론치를 계산하기 위해 확산(diffusion), 횡방향이동(lateral migration), 전단유도확산(shear induced diffusion), 그리고 입자의 정전기적 반발력에서 기인하는 상호작용에 의한 상승이동(interation enhanced migration) 등의 입자의 역전달 이동을 고려하였다. 보통의 여과조건에서 제타전위의 절대치가 20~40mV이고 직경이 0.1㎛~10㎛인 입자의 경우 상호작용에 의한 이동이 가장 중요한 역전달 메카니즘이었다. 입자크기에 따라 계산된 임계플럭스값을 실험적으로 확인하기 위해 다양한 크기를 갖는 구형인 적철광(hematite)입자를 합성하여 여과실험을 수행하였다. 이 실험치는 역전달 이론에 의해 예측된 플럭스의 이론치와 비교적 잘 일치하였다.

Abstract : The particle back transport velocity from the membrane surface were evaluated to determine the critical flux. Four kinds of back transport mechanisms were considered, *i.e.* back diffusion, shear induced migration, lateral migration, and interaction enhanced migration. The interaction enhanced migration caused by electrostatic repulsion between particles and membrane surface was found to be the most important mechanism of particle back transport for the charged particles of 0.1~10㎛ diameter with 20 to 40 mV of zeta potential. Hematite particles with different sizes were synthesized with ferric chloride ($FeCl_3$) and hydrochloric acid (HCl) at high temperature, and subsequently experimental critical fluxes for each sized particle were obtained. The experimental results were well coincident with the calculated critical fluxes based on back transport mechanisms.

1. 서 론

많은 산업에 있어서 막분리는 유망한 분리공정으로 각광받고 있다. 그러나 여과공정중 발생하는 막오염현상에 의한 플럭스 감소는 여전히 막분리공정의 경제성을 제약하는 요소로 남아있다. 이에따라 지난 수 십년 동안 막오염방지를 통한 플럭스 향상을 위해 많은 연구를 수행하고 있다[1].

이러한 연구 중 하나는 적절한 운전조건을 찾음으로써 막오염을 최소화하여 플럭스를 향상 시키는 것이다. 입자의 확산 현상만을 고려한 필름이론(film model)으로 예측된 플럭스보다 훨씬 높은 플럭스가 나타나는 플럭스과라독스(flux paradox) 현상이 1970년대 발견되었으며[2] 이를 설명하기 위한 다양한 이론들이 나타났다. 이 현상은 농도분극층(concentration polarization layer)으로부터 입자가 역확산되어 나올

때 확산 이외의 메카니즘이 있음을 암시한다. Belfort 등[3]은 유체의 속도장에서 입자의 관성력에 의한 횡방향이동을, Zydney와 Colton 등[4]은 입자와 입자의 충돌에 의한 전단유도확산을 고려하였다. 최근에 Bacchin 등은[5, 6] 입자사이의 정전기적인 반발력을 고려한 새로운 역전달 모델을 제안하였다.

이러한 역전달 메카니즘들의 존재는 입자가 막표면으로 전달되는 속도가 역전달되는 속도보다 작거나 같을 경우 입자가 막표면에 침강하지 않음으로써 막오염이 발생하지 않아 플럭스를 일정하게 유지할 수 있음을 의미한다. 그런데 입자의 막표면으로의 전달속도는 플럭스에 의한 항력(drag force)에 의해 결정된다. 이때 입자의 막표면으로의 침착(deposition)을 방지하면서 얻을 수 있는 최대의 플럭스를 임계플럭스(critical flux)라고 하며 여기에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다[7-10].

그러나 대부분의 경우 여기에 대한 연구는 실험적 고찰과 이론적 고찰이 별도로 진행되어 이론적으로 예측한 임계플럭스의 타당성을 확인하기 어렵다[7-9, 11]. 또 실험방법에 있어서도 투과수 쪽의 음의 압력(negative pressure)을 서서히 높여가면서 플럭스를 관찰하는 방법을 써왔다[7-9].

이에따라 본 연구에서는 정밀여과에서의 임계플럭스를 입자의 역전달을 고려한 이론식과 합성입자의 정밀여과 실험을 통하여 각각 구한 후에 직접 비교해석하였다. 또 실험방법에 있어서도 감압여과(suction filtration)보다는 실제공정에서 보다 일반적으로 사용되고 있는 가압여과(pressure filtration)방식을 채택하였다.

2. 이 론

2.1. 임계 플럭스(Critical flux)

막표면에서 입자가 침착되어 케이크층을 형성하는 정도는 투과항력(permeation drag)에 의한 막표면으로의 입자의 침강속도와 막모듈내의 유체역학(hydrodynamics) 및 입자사이의 물리화학적 상호작용에 의한 입자의 부상속도(back transport velocity)의 크기에 의해 좌우된다. 입자의 부상속도가 침강속도보다 큰 경우 입자가 침강하지 않으므로 케이크층 형성이 더이상 진행되지 않아 일정한 플럭스를 얻을 수 있다. 이때 막오염이 일어나지 않고 얻을 수 있는 최대 플럭스를 임계플럭스라고 한다. 일반적으로 임계플럭스는 입자의 크기 및 막면유속에 크게 좌우되지만 보통의 운전조건하에서의 플럭스보다는 매우 낮은 영역에 존재한다[12].

임계플럭스 개념을 일반적인 막분리 공정에 적용시켰을 경우 다음과 같이 해석할 수 있다. 막오염이 일어나는 조건인 경우, 시간이 경과함에 따라 막표면에 입자가 쌓여 케이크층이 증가하게 되고 결과적으로 플럭스가 감소하게 된다. 플럭스 감소에 따라 유체의 투과항력(permeation drag)에 의한 입자의 막표면 접근속도도 감소하게 된다. 일정 시점에서 입자의 하강속도는 부상속도와 동일하게 되며 입자는 더이상 막표면에 쌓이지 않게 된다. 이때의 플럭스를 정상상태 플럭스(steady-state flux)라고 하며 넓은 의미에서 임계플럭스로 볼 수 있고 막분리의 경제성과 직결된다. 임계플럭스 이하에서 운전할 경우 막오염이 일어나지 않아 플럭스 감소를 원천적으로 막을 수 있으며 효율적 에너지 이용이 가능하기 때문이다.

2.2. 막표면에서 입자의 거동

막표면에서의 입자 전달 현상은 입자가 막표면으로 이동할 때 입자에 가해지는 힘과 토오크의 합에 의해 기술된다. 유체가 막모듈에 공급되면 유체의 일부는 막양쪽의 압력차에 의해 막을 투과하여 투과수로 배출된다. 이에따라 유체중에 부유되어 있는 입자는 막표면으로 이동하게 된다.

이때 입자에 작용하는 힘들을 살펴보면 Fig. 1과 같이 먼저 막모듈로의 유체 공급에 의한 막표면과 평행한 방향의 종방향항력(axial drag), 투과수의 투과에 의해 발생하는 막표면쪽으로의 투과항력, 입자와 유체의 밀도차에 의한 중력 또는 부력, 입자의 브라운 운동(Brawnian diffusion), 입자의 관성력에 의한 관성부상, 입자끼리의 충돌에 의해 발생하는 전단유도확산, 그리고 입자와 입자 또는 입자와 막표면사이의 인력(attraction) 및 척력(repulsion)이 존재한다[13].

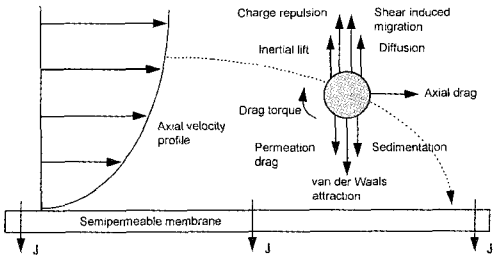

Fig. 1. Forces and torques acting on a charged, spherical particle suspended in a viscous fluid undergoing laminar flow in the proximity of a flat porous surface. [reproduced from 13]

2.2.1. 확산에 의한 입자부상

용액중에 포함된 입자나 용질의 전달현상은 종종 단순화된 필름이론에 의해 설명된다. 필름이론(Film theory)은 플럭스가 압력에 무관하고 입자의 확산 속도에 의존하는 상황에서 플럭스를 예측하는데 적용된다. 이때 막표면에서의 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. 이때 역확산에 의한 평형 플럭스는 다음과 같이 표시된다[4, 13].

$$J_D = 0.807\left(\frac{D_f^2\gamma_w}{L}\right)^{1/3}\ln\left(\frac{C_w}{C_b}\right) \quad (1)$$

여기에서 D_f는 입자의 확산계수, γ_w 는 막표면에서의 전단속도(shear rate), L은 막의 길이, C_w 는 막표면에서의 입자의 부피분율, 그리고 C_b 는 벌크용액에서의 입자부피분율이다. 한편 확산계수 D_f는 Stokes-Einstein 식을 사용하여 계산하였다.

$$D_f = \frac{k_B T}{6\pi\mu a_p} \quad (2)$$

여기에서 k_B는 Boltzmann 상수, T는 절대온도, 그리고 a_p는 입자의 반경, μ 는 유체의 점도이다.

2.2.2. 횡방향이동(Lateral migration)에 의한 입자부상

층류전단흐름(laminar shear flow)에서 평면위를 지나는 입자는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 입자의 위쪽과 아래쪽에 작용하는 항력이 다르므로 회전하게 된다. 그리고 회전력은 표면에서 멀어짐에 따라 작아진다. 이에따라 입자는 평면에서 멀어지려는 힘을 받는다. 이러한 입자전달현상을 횡방향이동이라고 하고 이것은 입자의 관성력에서 기인한다. Cox와 Brenner [14], Ho와 Leal[15]은 레이놀즈수가 매우 낮은 plane-Poiseille 흐름에서 단단하고(rigid) 자유회전(freely rotating)을 하는 부력이 없는(neutrally buoyant) 입자의 관성력에 의한 횡방향이동속도를 표현하는 식을 제안하였다. Belfort 등[3, 16-18]은 이 식을 확장하여 모든 범위의 층류영역에서 입자의 횡방향 이동에 의한 입자 부상속도, VL을 계산하는 다음과 같은 식을 제안하였다[3].

$$V_L = \frac{a_p^3}{\ell^2}\frac{U_m^2}{\nu}U^0{}_{w3} \quad (3)$$

여기에서 ℓ은 채널의 높이, U_m은 채널 입구에서 유체의 최대속도이며 ν는 유체의 동점도(kinematic viscosity)이다. 한편 $U^0{}_{w3}$는 입자의 무차원 부상속도인데 막표면으로 부터의 무차원 거리 ($\overline{d}(\overline{d} = d(\gamma \cdot Re)^{1/2})$, 여기에서 γ는 막표면으로부터의 거리 d에서의 Poiseuille shear rate, $Re=2a_pU_m/\nu$)의 함수이다. 막표면으로부터의 무차원 거리 $\overline{d}$가 0.6일 때 입자는 최대 부상속도를 갖게 되며 이보다 낮은 속도로 침강하는 입자의 침강이 배제된다. 결과적으로 이에 따른 횡방향 이동에 의한 평형 플럭스는 다음과 같이 표시된다.

$$J_L = 0.577\frac{U_m^2 a_p^3}{\nu\ell^2} \quad (4)$$

2.2.3. 전단유도확산(Shear induced diffusion)에 의한 입자부상

전단흐름(Shear flow)에 있어서 입자의 확산계수는 정지한 유체에서의 입자의 확산계수와는 다르다. 즉 흐르는 유체내부의 입자의 경우 서로간의 충돌에 의한 영향을 고려해야 한다. 막 표면의 농도 분극층과 같은 농도 및 속도구배가 있는 곳에 존재하는 입자의 경우 농도가 높은 쪽이 낮은 쪽에 비해 입자간의 충돌에 의한 상호작용을 크게 받게 된다. 이러한 충돌은 농도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로의 입자의 이동을 더욱 촉진시키게 된다. 이러한 현상을 전단유도 입자확산(shear induced particle diffusion)이라고 한다[19].

Eckstein 등은[20] 이러한 현상을 실험적으로 관찰하였는데 입자의 유효 확산계수는 입자의 반경의 제곱에 비례하였다. 그의 실험에서 입자의 확산계수는 체적분율(volume fraction) 0.2까지는 증가하였으며 그 이후에는 대체로 일정했는데 전단유도 입자확산계수(shear induced particle diffusivity)는 다음과 같이 표현된다.

$$D_{f,s} = 0.03a_p^2\gamma_\omega \quad (5)$$

식(5)의 유효 확산계수를 식(1)에 대입하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다[4].

$$J_s = 0.078\left(\frac{a_p^4}{L}\right)^{1/3}\gamma_w \ln\left(\frac{C_w}{C_b}\right) \quad (6)$$

2.2.4. 상호작용에 의한 상승이동(Interaction enhanced migration)

콜로이드 입자사이의 상호작용은 DLVO(Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek)이론에 의해 기술된다[21].

이 이론의 핵심은 전하를 띤 콜로이드 입자 사이에 존재하는 상호작용을 전하에 의한 반발력과 런던분산력(London dispersion force)에 의한 인력의 합으로 나타내는 것이다. 이때 두 구형입자간의 반발에너지는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$V_{Rep} = 32\pi\varepsilon a_p\left(\frac{kT}{ze}\right)^2\left(\tanh\frac{ze\Psi_0}{4kT}\right)^2\exp(-\kappa h) \quad (7)$$

$$\kappa = \left(\frac{2e^2 n_0 z^2}{\varepsilon kT}\right)^{1/2} \quad (8)$$

여기에서 ε은 유체의 유전상수(permitivity constant), z는 전해질의 전하수(charge number of electrolyte), e는 전자의 전하, Ψ_0는 입자의 제타전위(zeta-potential), h는 입자간 거리, n_0는 입자농도, 그리고 κ^{-1}은 Debye length이다. 이 포텐셜은 입자간 반발력의 척도이며 입자의 제타전위가 커질수록 커진다. 이에따라 입자의 제타전위가 커질수록 입자가 막표면의 케이크층에 침착되기 어려워지며 플럭스는 증가하게 된다.

$$V_{Att} = -\frac{Aa_p}{12h} \quad (9)$$

이때 A는 입자간의 런던힘(London force)에 관한 계수인 Hamaker 상수이다.

입자간 거리가 비교적 클 때($\kappa h>>1$) 선형중첩근사(linear superposition approximation)를 적용할 수 있는데[22-23], 이에따라 입자간에 작용하는 전체 포텐셜을 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$V_{Total} = V_{\mathrm{Rep}} + V_{Att} \quad (10)$$

Bacchin 등은 입자간 상호작용을 고려한 콜로이드 입자의 막표면에의 침착을 기술하는 이론적 모델을 제시하였다[5, 6]. 이 모델에서는 시스템의 유체역학적 상태만을 고려하던 기존 모델과 달리 입자간의 포텐셜에너지 장벽 등을 포함하는 입자의 물리화학적 특성을 고려한 입자의 침착속도(deposition rate)가 계산되었다. 이 모델에 의하면 비교적 큰 입자의 정밀한외여과 및 역삼투여과에서 다음과 같은 식으로 표현되는 평형플럭스가 존재한다.

$$J_1 = \frac{D_f}{\delta}\ln\left(\frac{V_B}{\delta}\right) \quad (11)$$

$$V_B = \int_0^\infty (e^{-\frac{V_{Total}}{kT}} - 1)dh \quad (12)$$

여기에서 δ는 경계층 두께이며 이는 다음과 같은 Leveque 식에 의해 구해진다[6].

$$\frac{d_h}{\delta} = 1.62[Re\cdot Sc(d_h/L)]^{1/3} \quad (13)$$

여기에서 d_h는 채널입구의 수력학적 직경(hydraulic diameter), Sc는 Schmidt수($=\nu/D_f$) 이다.

3. 실 험

3.1. 콜로이드 용액의 제조

본 실험에서는 ferric salt와 염산을 이용하여 입자를 합성하였으며 사용된 시약은 모두 시약급이었고 추가적인 정제 없이 사용하였다. Millipore사의 Mili-Q 장치에 의해 제조된 초순수를 사용하였으며 저항은 18MΩ-cm이상이었다. 입자 합성에 사용될 용액은 0.22μm Milipore filter에 의해 정제하였다. 모든 초자기구는 산에 의해 세척한 후 사용하였다. 재현성 있는 실험을 위하여 ferric salt의 농도, HCl의 농도 그리고 온도를 정밀하게 조절하였다.

Ferric salt와 염산을 이용하여 구형인 균일 입자를 합성하는 조건은 알려져 있으며[24], 사용된 입자합성 조건을 Table 1에 요약하였다. 합성된 콜로이드 입자의 크기는 용액의 농도 및 숙성시간(aging time), 그리고 숙성온도에 의해 좌우된다. 보다 큰 입자 제조를 위해 이미 제조된 작은 입자(α-Fe_2O_3)를 핵으로 사용하기도 하였다(Table 1, sample 4, 5). 또 Degussa사의 이산화티타늄 콜로이드인 Titandioxid P25를 핵으로 사용하였다(Table 1, sample 6).

Table 1. Experimental conditions for the synthesis of particles

Sample	FeCl3(M)	HCl(M)	Temperature (℃)	Seed	Reaction (Hr)
No. 1	0.01585	0.003162	100	x	72
No. 2	0.01585	0.003162	130	x	24
No. 3	0.03162	0.003162	130	x	24
No. 4	0.01585	0.003162	130	Sample No.2	24
No. 5	0.03162	0.003162	130	Sample No.3	24
No. 6	0.01585	0.003162	130	Titania(24nm)	24

합성된 콜로이드 용액에서 콜로이드 입자를 분리하기 위해 3,000rpm에서 20분간 원심분리하였다. 상등액을 제거한 후 침전물에 초순수를 첨가하여 원심분리를 반복함으로써 합성된 입자에 포함된 미반응 이온을 제거하였다. 최종적으로 얻어진 입자를 50℃에서

건조시켰다.

입자의 제타전위는 Coulter사의 Delsa-440 제타전위 측정기를 사용하여 측정하였으며 이온세기는 NaCl을 사용하여 10^{-3}M로 유지하였다. 제타전위 측정에 있어서 입자의 응집에 의한 영향을 제거하기 위해 측정전 샘플을 2-3분간 초음파를 사용하여 샘플용액에 포함된 입자를 분쇄하였다. 입자의 크기 측정에는 Malvern사의 Mastersizer/E를 사용하였다.

3.2. 임계플럭스

본 실험에서는 0.2㎛의 균일한 세공크기를 갖는 Poretics사의 polycarbonate 재질인 track-etched 막을 사용하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 실험 장치를 나타내고 있다. 사용된 막모듈은 평판형으로서 채널의 크기는 높이, 가로, 길이 각각 3×25×110 mm였다. 순환펌프를 사용하여 저장조안의 슬러리(slurry) 용액을 분당 1리터 순환시킴으로써 막면 평균유속 24 cm/sec를 유지시켰다. 실험은 20±2℃에서 수행하였으며 플럭스는 점도를 고려하여 20℃에서의 값으로 환산하였다. 투과수의 무게는 전자저울로 측정하였으며 최종적으로 컴퓨터에 의해 읽혀진 데이타는 시간을 고려하여 플럭스로 계산하였다. 제조된 콜로이드 입자용액은 사용전 초음파 세척기로 처리하였다.

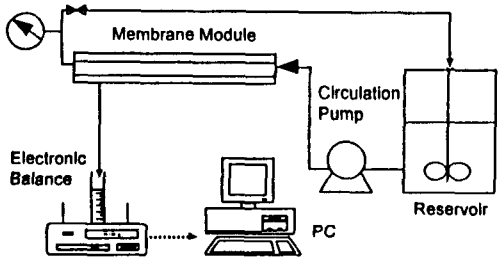

Fig. 2. Schematic diagram of experimental device

4. 결과 및 고찰

4.1. 합성된 콜로이드 입자의 크기 및 제타전위

여섯 개의 시료들은 Table 2.에서 보이는 바와 같이 0.122㎛에서 1.25㎛까지 다양한 크기를 가지고 있었다. 직경이 0.302㎛인 샘플3을 핵으로 사용한 경우 직경 1.25㎛인 입자를 얻을 수 있었다.

입자의 크기에 따른 실험적 임계플럭스 값을 얻기 위해서는 입자들이 응집되지 않는 조건을 유지하는 것이 필수적이다. 그런데 입자응집은 입자의 제타전위가 클수록 어려워진다. 100℃에서 제조한 입자(sample 1)

Table 2. The average sizes of synthesized particles

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Size (㎛)	0.122	0.205	0.302	0.506	1.25	0.445

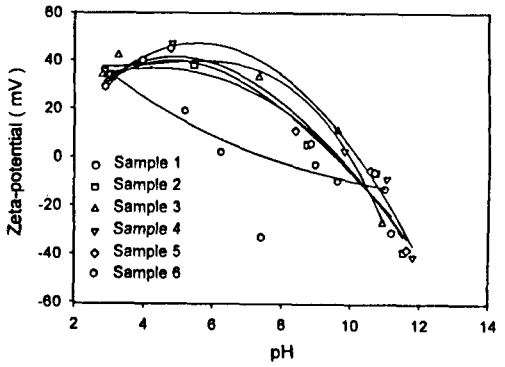

Fig. 3. Zeta-potential of synthesized colloidal particles as a function of pH. 0.01M NaCl, 25℃

를 제외하고는 제타전위가 비교적 일정하였다. 즉, Fig. 3에서 보이는 바와 같이 등전위점(isoelectric point)은 sample 1을 제외하면 pH 9에서 10 사이였으며, 매우 낮은 pH에서는 약 +40mV 정도의 높은 전위를 가지고 있었다. 이에따라 실험중 입자 응집에 의한 입자크기 변화를 방지하기 위해 입자의 제타전위가 약 +40mV인 pH4에서 실험을 수행하였다.

4.2. 임계플럭스의 이론치

이론에서 언급한 바와 같이 막표면에서 입자의 역전달현상을 설명하는 데에는 최소한 네 개의 서로 다른 메카니즘이 관계된다. Fig. 4는 이러한 메카니즘에 의한 역전달속도를 입자크기의 함수로서 나타내고 있다. 이 계산은 실험방법에서 언급한 실제 실험 조건에 따랐다. 여기서 사용한 Hamaker상수는 3.4×10^{-20} J이었으며[25] pH 4에서의 제타전위 +40mV를 사용하였다. 또 막표면에서 입자의 농도, C_w는 균일입자의 무작위적인 충진에 의해 이루어진 충진층의 밀도인 61 vol.%를 사용하였다[11].

Fig. 4에 의하면 일반적인 정밀여과 조건에서 크기 0.1~10㎛인 콜로이드 입자의 경우 정전기적 반발력이 입자의 역전달현상에 있어서 가장 중요한 역할을 함을 알 수 있다. 한편 유체의 유체역학에 관계되는 횡방향이동과 전단유도확산의 경우 입자크기가 10㎛ 이상인 경우 입자의 하전여부와 관계 없이 지배적인 메카니즘이 될 것으로 예상된다. 또 입자크기 0.1㎛이하인 경우 농도 분극층에서 벌크(bulk)로의 확산에 의한 역전달이 지배적일 것으로 예측되었다.

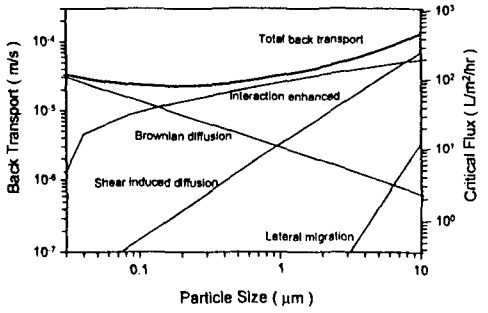

Fig. 4. Comparison of different models explaining a critical flux over a range of particle size. (293K, 40mV zeta-potential, A = 3.4 $\times 10^{-20}$ J)

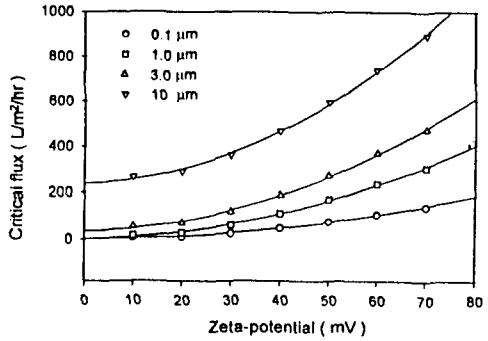

Fig. 5. Critical flux as a function of zeta-potential and particle size. (Flow velocity = 0.24m/s, Channel dimension = 3×25×110mm, 293K)

Fig. 5는 입자의 제타전위에 따른 이론적인 임계플럭스의 변화를 보이고 있다. 임계플럭스는 입자의 제타전위가 커질수록 증가하는데 입자크기가 클수록 현저히 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 제타전위가 커질수록 침강하는 입자와 막표면의 케이크층 혹은 농도분극층에 존재하는 다른 입자간의 반발력이 커져 입자의 침강속도가 감소하기 때문이다.

4.3. 이론과 실험결과의 비교

Fig. 6은 제조된 입자를 사용하여 십자형 정밀여과(cross-flow microfiltration)를 하였을때 시간에 따른 플럭스 감소를 나타내고 있다. 입자의 크기가 상대적으로 매우 큰 5번 시료를 제외한 나머지 시료의 경우 여과시작 30분 경과 후 플럭스는 비교적 안정된 값을 유지하였다.

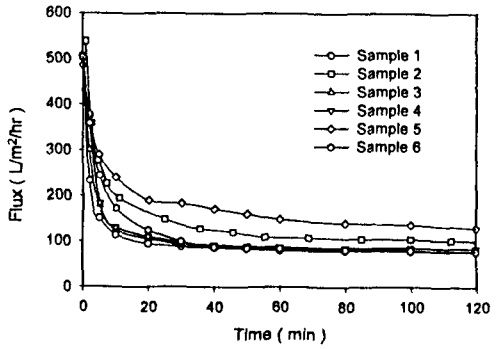

Fig. 6. Flux decline during crossflow microfiltration of the synthesized colloidal particles. (0.005 vol.%, pH 4, 293K, flow velocity = 0.24 m/s, 0.2 mm track-etched pc membrane)

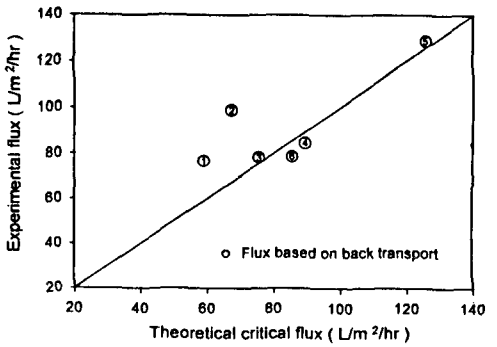

Fig. 7. Comparisons between the calculated and experimental fluxes, particle size : No. 1; 0.122mm, No. 2; 0.205mm, No. 3; 0.302mm, No. 4; 0.506mm, No. 5; 1.25mm, No. 6; 0.445mm.

Fig. 7에서는 입자의 크기에 따라 이론적으로 계산된 임계플럭스 값과 실험적으로 구해진 임계플럭스를 비교하고 있다. 계산된 임계플럭스는 직경 0.122㎛(No.1) 및 0.205㎛(No.2)인 입자를 제외하고 실험값과 비교적 잘 일치하였다.

5. 결 론

막표면에서의 입자의 역전달과 관련된 네가지 메카니즘을 고려한 이론식으로부터 임계플럭스를 예측하여 실험치와 비교하였다. 입자 크기 및 제타전위 측정에 있어서의 실험오차를 고려했을 때 비교적 잘 일치하였다. 이때 입자의 유체역학적 거동의 결과에 의해 발생하는 입자의 부상력보다 입자간의 정전기적 반발력에 의해 발생하는 상호작용에 의한 이동이 가장 중

요한 입자부상의 원인이었다. 이에따라 정밀여과에서 입자의 제타 전위가 극대가 되는 여과 조건(pH, 이온세기 등)을 선정함이 막오염 방지에 매우 중요함을 예상할 수 있었다.

사용기호

δ 경계층 두께 (m)
ε 유체의 유전상수(permitivity constant, $C^2/N/m^2$)
γ 막표면으로부터의 거리 d에서의 Poiseuille shear rate (/s)
γ_w 막표면에서의 전단속도 (shear rate, /s)
κ^{-1} Debye length (m)
μ 유체의 점도 (kg/m/s)
ν 유체의 동점도(kinematic viscosity, m^2/s)
Ψ_0 입자의 제타전위 (zeta-potential, V)
a_p 입자의 반경 (m)
A Hamaker 상수(J)
Cb 벌크용액에서의 입자부피분율
Cw 막표면에서의 입자의 부피분율
$\overline{d}$ 막표면으로부터의 무차원 거리, $\overline{d} = d(\gamma \cdot Re)^{1/2}$
d_h 채널입구의 수력학적 직경(hydraulic diameter, m)
D_f 입자의 확산계수 (m^2/s)
D_{fS} 전단력에 의한 입자확산계수 (m^2/s)
e 전자의 전하 (C)
h 입자간 거리 (m)
J_D 입자 확산에 의한 임계플럭스 (m/s)
J_I 정전기적 반발력에 의한 임계플럭스 (m/s)
J_L 입자의 관성력에 의한 임계플럭스 (m/s)
J_S 전단속도에 의해 발생한 입자확산에 의한 임계플럭스 (m/s)
k_B Boltzmann 상수 (J/s)
ℓ 채널의 높이 (m)
L 막의 길이 (m)
n_0 입자농도 ($/m^3$)
U_m 채널 입구에서 유체의 최대속도 (m/s)
Sc Schmidt수($=\nu/D_f$)
T 절대온도 (K)
z 전해질의 전하수(charge number of electrolyte)

참 고 문 헌

1. 전명석, 김재진, 장문석, 화학공업과 기술, **15**, 196-203 (1997)
2. M. C. Porter, *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develop.*, **11**, 233-248 (1972)
3. D. A. Drew, J. A. Schonberg, and G. Belfort, *Chem. Eng. Sci.*, **46**, 3219-3224 (1991)
4. A. L. Zydney, and C. K. Colton, *Chem. Eng. Commun.*, **47**, 1-21 (1986)
5. P. Bacchin, P. Aimar, and V. Sanchez, *J. Membrane Sci.*, **115**, 49-63 (1996)
6. P. Bacchin, P. Aimar, and V. Sanchez, *AIChE J.*, **41**, 368-376 (1995)
7. D. Y. Kwon, S. Vigneswaran, H. H. Ngo, R. BenAim, A. G. Fane, and H. S. Shin, *Proceedings of IMSTEC 96,* **2**, 59-61(1996)
8. P. Aimar, P. Harmant, and P. Bacchin, *Proceedings of IMSTEC 96,* **1**, 115-117 (1996)
9. S. S. Madaeni, A. G. Fane, and D. E. Wiley, *Proceedings of IMSTEC 96,* **1**, 142-143 (1996)
10. R. Rautenbach, and G. Schock, *J. Membrane Sci.*, **36**, 231-242(1988)
11. S. H. Yoon, C. H. Lee, K. J. Kim, and A. G. Fane, submitted to *J. Membrane Sci.*
12. R. W. Field, D. Wu, J. A. Howell, and B. B. Gupta, *J. Membrane Sci.*, **100**, 259-272 (1995)
13. M. R. Wiesner, and S. Chellam, *J. AWWA*, **84**, 88-95 (1992)
14. R. G. Cox, and H. Brenner, *Chemical Eng. Sci.*, **23**, 147-173 (1968)
15. B. P. Ho, and L. G. Leal, *J. Fluid Mech.*, **65**, 365-400 (1974)
16. G. Belfort, R. J. Weigand, and J. T. Mahar, *ACS symp. Ser.*, 281 (1985)
17. G. Belfort, *J. Membrane Sci.*, **40**, 123-147 (1989)
18. G. Belfort, R. H. Davis, and A. L. Zydney, *J. Membrane Sci.*, **96**, 1-58 (1994)
19. R. H. Davis, and D. T. Leighton, *Chemical Engineering Science*, **42**, 275-281 (1987)
20. E. C. Eckstein, D. G. Bailey, and A. H. Shapiro, J. Fluid Mech., **79**, 191-208 (1977)
21. B. V. Derjaguin, and L. D. Landau, Acta Physicochim, **14**, 733-762 (1941)
22. G. M. Bell, S. Levine, and L. N. McCartney, *J. Colloid Interface Sci.*, **33**, 335-359 (1970)
23. M. Elimelech, J. Gregory, X. Jia, and R. A. Williams, Particle Deposition and Aggregation, Butterworth and Heinemann, 33-67 (1995)
24. E. Matijevic, and P. Scheiner, *J. Coll. & Interface Sci.*, **63**, 509-524 (1978)
25. J. Visser, *Advan. Colloid Interface Sci.*, **3**, 331-363 (1972)