

교반조에서 고체입자-액체간 물질전달

박상욱 · 이종욱 · 박문기

부산대학교 공과대학 화학공학과
(1990년 8월 29일 접수, 1991년 2월 2일 채택)

Mass Transfer in the Solid Particle-Liquid System with a Mechanically Agitated Vessel

Sang Wook Park, Jong Wook Lee and Moon Ki Park

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Pusan National University
(Received 29 August 1990; accepted 2 February 1991)

요 약

고체입자와 액체간의 물질전달계수를 교반조에서 측정하였다. 입자의 크기가 $100\ \mu\text{m}$ 이하의 작은 범위에서 측정한 물질전달계수는 문헌에서 제시한 상관관계와 큰 차이를 나타내었으며 입자의 크기가 감소함에 따라 분자 확산 이론식에 접근하였다. 미세한 입자영역의 격류 교반에서의 Kolmogorov 이론을 적용하여 고체입자-액체간 물질전달기구를 해석할 수 있었으며 입자크기가 $100\ \mu\text{m}$ 보다 큰 범위에서 $100\ \mu\text{m}$ 보다 작은 범위까지 적용되는 경험식을 Beek Bakker 식을 사용한 근사식으로부터 구하였으며, 이에 대한 결과식은 실험치와 평균편차 5.6% 이내에서 잘 일치하였다.

Abstract—The mass transfer coefficients between fine particles and liquids were measured in an agitated vessel. As the particle's diameter decreased, the values of mass transfer coefficient deviated below the previous correlation for large particles and approached the value of the theoretical molecular diffusion theory. The mass transfer with fine particles in the turbulent agitation was analysed with the conventional concept of a specific power group from the Kolmogorov theory. An approximate solution for the mass transfer in the wide range of experimental variables was also obtained by using the Beek-Bakker model with which the experimental data were in good agreement.

1. 서 론

액체 내에 현탁된 고체입자(suspended solid particles)와 액체간의 물질전달에서 유효단계가 액체 측에 있을 경우 액체측 물질전달계수는 슬러리 반응기, 침출조(leaching), 생물화학반응기의 균 배양기, 결정화 조작 등의 적당한 장치를 선정하고 설계함에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 고정층, 유동층, 교반조, 기포탑, 2상 튜브흐름(two-phase tube flow) 등의

접촉장치를 사용하여 고체입자와 액체간의 물질전달에 관한 많은 연구가 진행되어 왔으며 이 중에서도 교반조는 고체입자들을 현탁시키는데 효과적이며 물질전달 속도의 신빙성이 높은 실험치를 얻을 수 있는 장점 때문에 교반조를 사용한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 지금까지 발표된 많은 연구들의 대부분은 물질전달계수와 실험변수들과의 상관관계식을 미끄럼속도모델(slip velocity model), 침투모델(penetration model)과 국부 등방성 격류(local isotropic turbulence)에 관한

Table 1. Previous correlations of mass transfer coefficient

Investigators	Correlation
Barker and Treybal(1960)[7]	$Sh = 0.0158(T^2 n / \nu)^{0.833} Sc^{1/2}$
Harriott(1962)[1]	$Sh = 2 + 0.6(dv_r / \nu)^{1/2} Sc^{1/3}$
Brian et al.(1969)[27]	$Sh = f[(\epsilon^{1/3} d^{4/3} / \nu)^{1/3} Sc^{1/3}]$
Miller(1971)[28]	$Sh = 2 + 0.222(\epsilon^{1/3} d^{4/3} / \nu)^{4/3} Sc^{1/3}$
Nagata and Nishikawa(1972)[2]	$Sh = 0.101(d_r dn / \nu)^{0.83} Sc^{1/3}$
Sano et al.(1974)[4]	$Sh = [2 + 0.4(\epsilon^{1/3} d^{4/3} / \nu)^{3/4} Sc^{1/3}] \phi$
Kikuchi et al.(1988)[29]	$Sh = 2 + 0.52(\epsilon^{1/3} d^{4/3} / \nu)^{0.59} Sc^{1/3}$

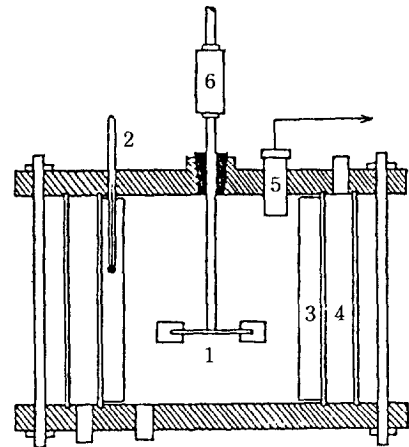
Kolmogorov 이론에 기초를 둔 경험식이며, 사용된 고체입자의 크기가 100 μm 이상의 경우를 취급하였다 [1-13]. 그러나 경막설에서 설명되는 용질의 확산 액막 두께보다 작은 고체입자의 경우 물질전달계수를 추정함에 있어서 발표된 경험식으로부터 산출된 계산값과 측정치와의 차이가 현저하게 크기 때문에 100 μm 보다 작은 경우에서의 새로운 경험식이 필요하나 이에 대한 연구가 미비한 상태이다. 이에 대한 연구 결과를 Table 1에 나타내었다. 본 연구는 교반조를 사용하여 고체입자의 크기가 100 μm 보다 작은 입자로부터 큰 입자의 넓은 범위에서 액체측 물질전달계수를 측정하여 고체입자를 격류 상태로 현탁시키는데 필요한 에너지와 물질전달계수와의 상관관계를 도출하고 입자크기가 넓은 범위에서 적용되는 경험식을 구하기 위한 방법을 제시하여, 이미 발표된 경험식과 비교 검토하고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치

고체입자와 액체간 물질전달계수를 측정하기 위하여 사용된 교반조를 Fig. 1에 나타내었다. 교반조는 내경 13.2 cm, 높이 13.2 cm인 원통형 pyrex 유리로 제작하였으며, 교반조 내벽에 폭이 교반조 직경의 1/10인 유리판 4개를 일정 간격으로 부착시켜 방해판(baffles) 역할을 할 수 있도록 하였으며, stainless steel로 만든 Rushton type 6-flat blade discurbine을 교반조 바닥에서 1/3 높이에 설치하고 가변속 모터로서 교반시켰다.

교반기의 축에 torsion dynamometer를 부착시켜 torque를 측정하여 교반조내의 액체 단위 질량당 에너지 소멸속도(energy dissipation rate), ϵ 를 구하였다[14]. 교반조 외벽에 항온을 유지하기 위한 jacket을 부착시켜 액체의 온도를 25°C로 유지시켰다. 교반기의 회전속도, n 은 digital tachometer를 사용하여 측정하였다. 액체내에 있는 고체입자가 완전 현탁(suspension) 상태로 존재할 수 있는 조건은 고체입자가 교반조 바닥에 1초 이상 정지하지 않은 상태를 기준[15, 16]으로 하여 본



1. Impeller(6-flat-blade turbine)
2. Thermometer
3. Standard baffle
4. Water jacket
5. Electric conductivity analyzer probe
6. Torsion dynamometer

Fig. 1. Schematic diagram of agitated vessel.

실험에서 사용된 고체입자들의 현탁조건 범위에서 교반기의 회전수를 130에서 1500 rpm까지 변화시켰다.

2-2. 시료 및 물성치 측정

본 실험에서 사용된 고체입자는 물에 팽윤시킨 H형 양이온 교환수지(Daiaion, SKIB), 파쇄형 H형 양이온 교환수지(Daiaion, SKIB), 구형 OH형 이온교환수지(Daiaion, SKIOA), 입상 $PbSO_4$ (Shinyo Pure Chem. Ind., Japan), 입상 K_2SO_4 (Hayashi Pure Chem. Ind., Japan) 및 입상 $CaCO_3$ (Wako Chem. Ind., Japan)의 시약급이다. 고체입자는 체(sieve)분리법 및 wet classification 법을 사용하여 입자크기를 분리하였으며, 구형 입자의 직경 파쇄형 및 입상 입자의 직경은 현미경법 및 입자크기 분석기를 사용하여 측정하였다. 입자의 비표면적(specific surface area)은 입자크기분석기를

Table 2. The physical properties used in experiments

Run no.	System	d [μm]	ρ _p [kg/m ³]	ρ _L [kg/m ³]	v × 10 ⁷ [m ² /s]	D × 10 ⁹ [m ² /s]	Sc [-]
1	Cation exchanger-0.001 M NaOH sol.	23-813	1220	997	8.97	2.13	421
2	Anion exchanger-0.001 M HCl sol.	463-834	1115	997	8.97	3.33	269
3	Anion exchanger-0.001 M picric acid	463-834	1115	997	8.97	1.49	602
4	Lead sulfate-water	20	6200	997	8.97	0.99	902
5	Lead sulfate-22 wt% glycerine sol.	20	6200	1051	15.66	0.54	2899
6	Potassium sulfate-60 wt% isopropyl alc.	55	2600	879	34.13	0.46	7491
7	Calcium carbonate-water	21	2830	997	8.97	0.68	1324

사용하여 측정하고, 입자의 밀도는 재래식 방법인 수 치환법(water displacement method)에 의해 측정하였다. 고체입자와 액체간의 물질전달계수를 측정하기 위하여 사용된 고-액계는 반응속도가 매우 빨라 율속단계가 액측 물질전달 범위에 존재하는 H형 양이온 교환수지에 의한 NaOH 수용액의 중화반응, OH형 음이온 교환수지에 의한 HCl 및 picric acid 수용액의 중화반응과 K₂SO₄ 입자와 60% iso-propylalcohol에서 K₂SO₄의 용해, PbSO₄ 입자와 물, CaCO₃ 입자와 물에서의 입자의 용해과정을 선택하였다. NaOH, HCl, picric acid, PbSO₄ 및 CaCO₃의 액상 확산계수는 전해질 용액의 확산계수를 추산할 수 있는 Nernst-Haskell식[17]으로부터 구하였다. 한편 PbSO₄-22 wt% glycerine 수용액계와 K₂SO₄-60 wt% isopropylalcohol 수용액계의 경우 점도의 증가에 의한 확산계수의 변화는 Stokes-Einstein식[18]을 보정한 Nernst-Haskell식으로부터 구하였다. 용액의 밀도는 pyconometer, 점도는 Ostwald 점도계를 사용하여 각각 측정하였다.

이상과 같이 본 실험에서 사용된 고체입자-액체계의 종류 및 물성치를 Table 2에 나타내었다.

2-3. 액상측 물질전달계수 측정

Styrene계 gel 형태의 이온교환수지는 중화반응 과정에서 입자크기의 변화가 극히 적어 중화반응 과정에서의 입자변화를 무시할 수 있다. 또한 PbSO₄(용해도 0.0028 g/100 g 물, 0°C)와 CaCO₃(용해도 0.0014 g/100 g 물, 0°C)는 물에 대한 용해도가 모두 매우 작으며, K₂SO₄의 경우 물에 대한 용해도(7.35 g/100 g 물, 0°C)는 크지만, 60% isopropylalcohol 수용액[19]을 이용하면 그 용해도가 0.0019 g/100 g으로서 매우 적게 되며 용해 실험 종료후 현미경으로 관찰된 입자크기의 변화가 3-4% 이하이기 때문에 물질전달계수를 측정하는데 입자크기의 변화는 무시할 수 있었다. 따라서 고체입자와 액체간의 물질전달 과정에서 액상에서의 확산이 율속 단계가 될 경우 용질의 확산속도는 회분식 반응기에서의 물질 수지식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있겠다.

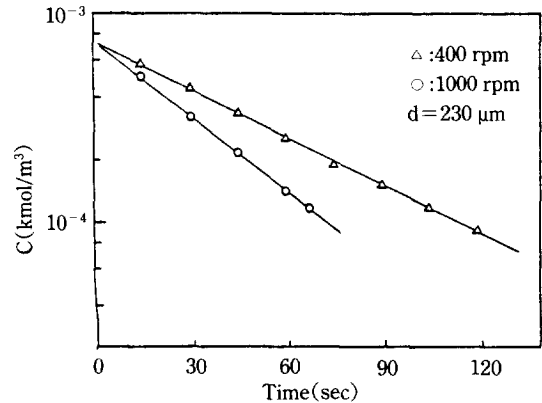


Fig. 2. Typical diagram of neutralization for cation exchange resin-NaOH solution system.

$$-V \frac{dC}{dt} = k_L A(C - C_i) \quad (1)$$

식 (1)에서 이온교환 반응의 경우는 $C_i = 0$, 염의 용해에서 C_i 는 염의 포화농도 C_s 로 가정할 수 있으며, $t=0$ 에서 $C=C_0$ 의 초기조건을 사용하여 식 (1)을 적분하며 시간에 대한 농도변화로부터 물질전달계수, k_L 를 구할 수 있다. 시간변화에 의한 농도변화 실험에 대한 대표적인 경우로서 입자크기 230 μm인 양이온 교환수지-NaOH계에 대하여 Fig. 2에 나타내었으며, plot는 직선을 만족하였고, 이 직선의 기울기로부터 k_L 를 구하였다. 이온교환 반응에 있어서 수용액의 용질의 농도가 물질전달계수에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 용질의 초기 농도변화에 대한 물질전달계수를 측정하여 초기농도와 물질전달계수를 plot한 결과, 용질의 농도가 1×10^{-3} Kmol/m³ 이하의 경우 물질전달계수가 용질의 초기농도에 무관하게 일정하여 액상내 확산이 이온교환 반응에 있어서 율속임을 알 수 있으나 초기농도가 1×10^{-3} Kmol/m³ 이상의 경우 용질의 농도 증가에 따라 물질전달계수가 감소하여 물질전달계수가 용질의 농도에 의존하게 됨으로 본 실험에서는 이온교환 반응에 대한

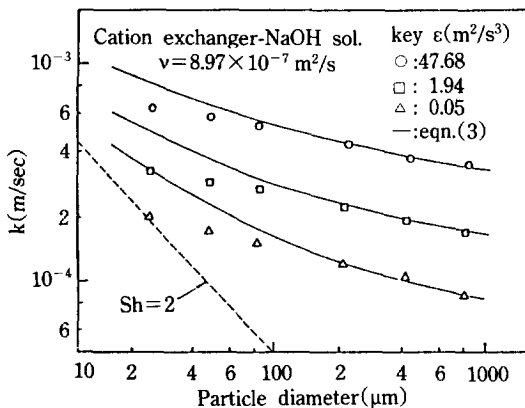


Fig. 3. Effect of relevant parameter on mass transfer coefficients for fine particles.

실험에서 초기농도는 $1 \times 10^{-3} \text{ Kmol/m}^3$ 이하에서 행하였다. 본 실험에서 사용된 고체입자의 크기변화는 20-834 μm , Schmidt 수, Sc는 420-7490, 교반속도는 130-1500 rpm의 광범위한 범위에서 물질전달계수를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

고체입자-액체간 물질전달계수, k_L 에 영향을 미치는 인자들로서 취급될 수 있는 고체입자의 크기 및 밀도, 용질의 확산계수, 에너지 소멸속도, 액체의 점도, 밀도 등에 대해서 검토하였다. 액체내에 현탁되는 고체입자에 제공되는 에너지를 구하기 위하여 교반조내의 액체 단위 질량당의 에너지 소멸속도, ε 를 식 (2)와 같이 정의하고

$$\varepsilon = \frac{2\pi n \tau_0 g}{V \rho_L} \quad (2)$$

주어진 교반기의 회전속도에 대해서 torque, τ_0 를 측정하여 식 (2)로부터 ε 를 구하였다. 고체입자의 크기에 대한 k_L 의 영향을 관찰하기 위하여 에너지 소멸속도, ε 를 매개변수로 하여 고체입자의 변화에 대한 k_L 의 변화를 H형 이온교환수지-NaOH 수용액계를 대표적으로 하여 Fig. 3에 도시하였다. 또한 Fig. 3에 고체입자-액체간 물질전달에 관한 상관관계식으로 널리 사용되고 있는 Levins와 Glastonbury[3]가 제안한 식 (3)으로부터 계산한 물질전달계수값을 실선으로 나타내었다.

$$\text{Sh} = 2 + 0.50(\varepsilon^{1/3} d^{4/3} / \nu)^{0.62} \text{Sc}^{1/3} \quad (3)$$

Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 입자크기에 대해서 에너지 소멸속도가 증가할수록 물질전달계수는

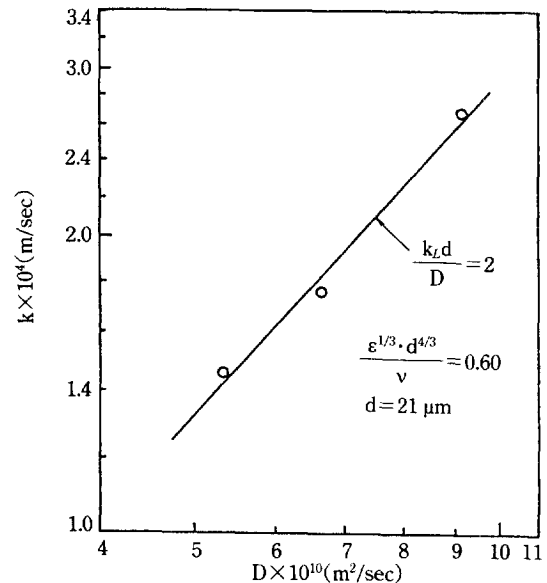


Fig. 4. Effect of diffusivity on mass transfer coefficients between fine particles and liquids systems.

증가하고 동일한 에너지 소멸속도에 대해서 입자크기가 증가할수록 물질전달계수는 감소하였다. 입자크기가 100 μm 이상인 경우 식 (3)에서 계산된 물질전달계수 값과 측정치는 잘 일치하고 있어 본 연구의 실험치에 대한 타당성을 확인할 수 있었다.

한편 100 μm 보다 작은 입자에서 측정된 물질전달계수값은 식 (3)에서 계산한 값보다 작게 나타나기 시작하였으며, 100 μm 이하에서 입자크기가 감소할수록 계산값과의 차이가 증가하였으며 에너지 소멸속도가 작을수록 그 차이는 크게 나타났다. 고체입자가 무한 정체유체(infinite stagnant fluid) 사이에서 물질전달이 일어날 경우 용질의 물질전달은 분자확산에 의하여 이루어지게 되며, 이 때 Sherwood 수, Sh는 2가 되어 분자확산 이론치를 Fig. 3에 점선으로 나타내었다.

본 실험에서 에너지 소멸속도가 작을수록 또한 입자크기가 100 μm 이하에서 더욱 작아질수록 측정된 물질전달계수값이 점선에 접근하고 있음을 알 수 있다. 따라서 입자크기가 50 μm 이하인 경우 물질전달계수값은 식 (3)으로부터 구할 수 없으며, Nagata와 Nishigawa[2]가 제안한 바와 같이 입자의 크기가 40 μm 이하인 입자는 난류에서 발생하는 microeddy의 크기(약 50-60 μm)보다 작아서 입자들은 eddy에 휩싸여 eddy와 함께 운동하게 되며 eddy 내에서 입자와 액체간의 물질전달은 분자확산이론을 적용할 수 있으며 본 실험조건에서 입자가 감소할수록 물질전달계수의 측정값이 점선에 접근하는 현상을 해석할 수 있다. 한편 Kolmo-

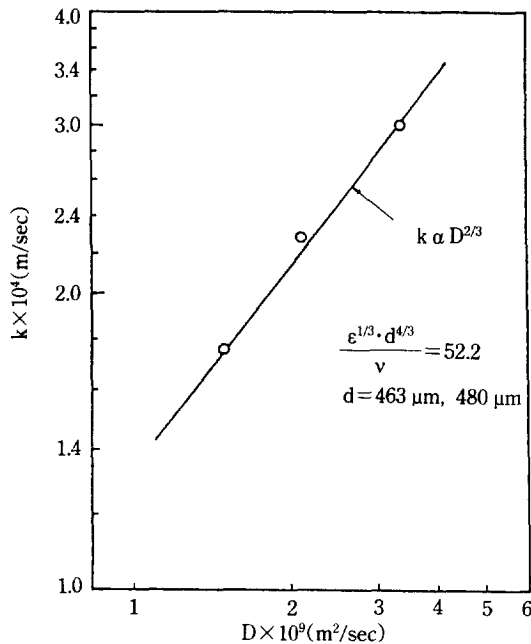


Fig. 5. Effect of diffusivity on mass transfer coefficients between large particles and liquids.

gorov의 등방성 격류 이론[13]에 따라 입자를 교반시키는데 필요한 에너지 소멸속도, ϵ 에 따라 발생하는 eddy의 크기가 결정되며, 발생하는 eddy의 크기는 $(\nu^3/\epsilon)^{1/4}$ 가 되므로, eddy의 크기는 ϵ 가 작을수록, ν 가 클수록 증가한다. 본 실험에서 ϵ 가 작을수록 측정치 k_L 이 점선에 접근하게 됨을 eddy의 크기와 ϵ 의 관계로부터 해석할 수 있다. 또한 입자의 크기가 격류에서 발생하는 microeddy의 크기보다 작은 경우에 있어서 물질전달기구를 Kolmogorov 이론에 적용 가능성을 확인하기 위하여 Fig. 4에 PbSO_4 -22 wt% glycerine 수용액, CaCO_3 -물, PbSO_4 -물계에서 입자크기가 21 μm , specific power group (SPG라 칭함) 값이 0.6인 경우를 대표적으로 하여 확산계수와 물질전달계수를 도시하였다. 이 점들의 기울기로부터 물질전달계수는 확산계수의 1승에 비례함을 알 수 있다. 이들 계에 있어서 계산된 microeddy의 크기는 30 μm 이기 때문에 입자의 크기보다 작아 분자확산에 의해 물질전달이 이루어져 입자의 크기가 작은 경우 Kolmogorov이론을 적용할 수 있음을 알 수 있다. 한편 입자의 크기가 100 μm 보다 큰 경우에 있어서 입자크기가 463 μm 인 OH형 음이온교환수지-HCl수용액, OH형 음이온교환수지-picric acid와 480 μm 인 H형 양이온교환수지-NaOH 수용액계에서 SPG 값이 52.2인 경우를 대표적으로 하여 확산계수와 물질전달계수를 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이

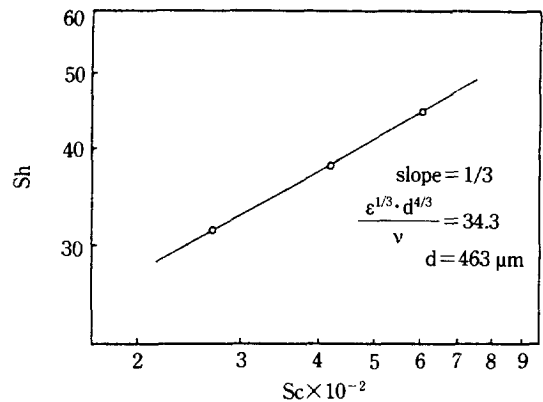


Fig. 6. Effect of Sc on Sh for large particles.

물질전달계수는 확산계수의 2/3승에 비례하였다. Levich[13]는 Schmidt수, Sc가 100보다 큰 격류에서 eddy의 크기가 입자의 크기보다 훨씬 작은 경우 입자 표면 근방에서 형성되는 diffusion sublayer의 두께는 Reynolds수, Re의 증가에 따라 점점 얇아지며 물질전달계수는 확산계수의 2/3승에 비례한다고 보고하였다. 따라서 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 입자의 크기가 eddy의 크기보다 큰 경우 물질전달은 Levich의 laminar boundary layer에 대한 이론과 잘 일치하였다. 즉, Fig. 4와 5에 나타난 현상으로부터 입자의 크기가 microeddy의 크기보다 큰 경우와 작은 경우에 물질전달기구를 Levich와 Kolmogorov이론을 각각 적용하여 설명할 수 있었다. Table 1에서 이미 발표된 대부분의 논문들은 물질전달계수와 인자들 사이에 무차원군을 사용하여 상관관계식을 나타내었으며, Fig. 6에 물질전달계수가 포함된 무차원군 Sherwood수, Sh와 Schmidt수, Sc와의 관계를 SPG가 34.3, 입자크기 463 μm 인 경우를 대표적으로 도시하였다. 이 그림에서 Sh는 Sc의 1/3승에 비례하고 있음을 알 수 있으며, Table 1에 나타난 문헌과 동일한 경향을 얻었다. 또한 Sc를 매개변수로 하여 SPG의 변화에 대한 Sh를 Fig. 7에 도시하였다. 실선은 각 실험값을 연결한 선이며, 점선은 Levins와 Glastonbury의 식 (3)으로부터 구하였다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 Sc와 SPG가 클수록 실험치는 식 (3)에 잘 일치하고 있으나 Sc와 SPG가 작을수록 식 (3)과의 편차가 증가하였으며 SPG가 감소할수록 실험치들은 Sh 값이 2에 접근함을 알 수 있다. 특히 SPG 값은 입자크기, d가 포함되어 있기 때문에 입자크기가 100 μm 이하의 계에서는 Levins와 Glastonbury가 제안한 식 (3)을 적용할 수 없음을 나타낸다. 이상과 같이 물질전달계수에 영향을 미치는 인자들의 영향에 대해서 관찰하였으며, 입자크기가 100 μm 보다 큰 경우의 물질전달계수의 무

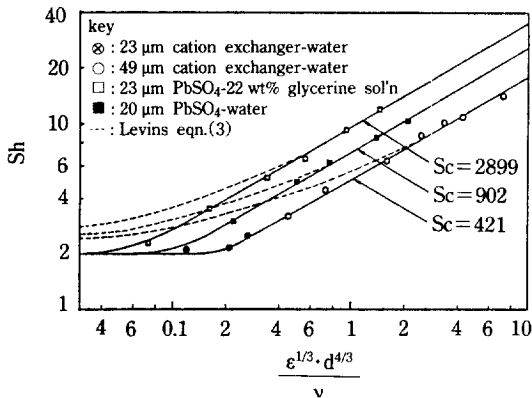


Fig. 7. Effect of specific power group on Sh for fine particles.

차원군 Sh는 Levins와 Glastonbury가 제안한 식 (3)과 같은 형태로 나타낼 수 있으나, 입자크기가 작은 경우에는 적용되지 않기 때문에 본 실험에는 입자크기가 100 μm 보다 작은 범위에도 동시에 적용될 수 있는 상관관계식을 다음과 같이 구하였다.

Beek와 Bakker[20]는 일정한 속도로 움직이는 고체의 표면으로부터 고체의 표면과 접촉하여 흐르는 유체 쪽으로 전달되는 용질의 농도 분포를 구하기 위하여 사용되는 대류확산 방정식에서 유체의 속도분포를 고체표면 속도의 1차식으로 나타내어, 침투설을 사용하여 고체표면의 속도방향축이 포함된 독립변수가 0과 ∞ 의 두 범위에서 용질의 물질전달계수를 구하고, 0과 ∞ 사이의 범위에서 적용될 수 있는 상관관계식을 식 (4)와 같은 형태의 Beek와 Bakker 근사식을 제시하였다.

Churchill과 Usagi[21]는 층진층내에서 압력강하를 Reynold수로 나타낼 경우 층류 범위에서 적용되는 Kozeny-Carman 식과 격류 범위에서 적용되는 Burke-Plummer 식을 층류와 격류 범위에서 적용될 수 있는 Ergun 식과 비교하여 Ergun식은 상기 두 식의 극한 범위를 Beek-Bakker의 근사식을 사용하여 나타낼 수 있음을 제시하였다. Byers와 King[22]은 유동(flow), 열전도, 강제대류, 자연대류 현상 및 독립변수의 두 극한 범위에서 종속변수의 극한치가 주어질 수 있는 어느 현상에서도 Beek-Bakker의 근사식이 사용될 수 있다고 제시하였다.

Beek와 Bakker[20]가 용질의 물질전달계수를 독립변수 0과 ∞ 에서 침투설을 사용하여 구한 반면 Hatanaka[23]는 독립변수 0에서의 물질전달계수를 침투설을 사용하여 구하고 ∞ 에서는 Leveque 해를 사용해서 구하여 0과 ∞ 사이의 독립변수 범위에서 적용될 수 있는 근사식을 구하였다. Asai 등[24]과 Park 등[25]은 젖은

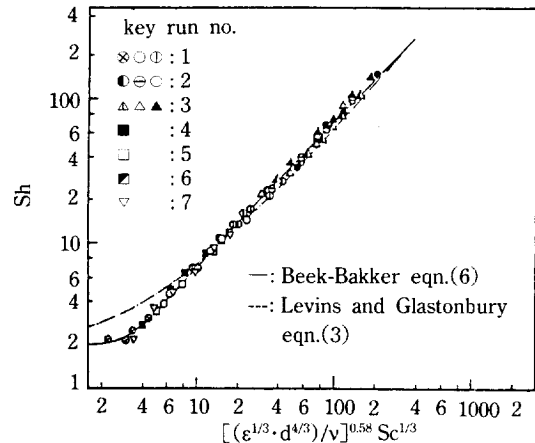


Fig. 8. Correlation of present experimental data.

벽타를 사용하여 층류 범위에서 액-액간 용질의 물질전달계수를 측정하고 Beek-Bakker의 두 극한치를 사용한 근사식으로부터 물질전달계수를 계산하여 비교검토하였으며, Park 등[26]은 젖은 벽타를 사용하여 CO_2 기체와 slurry 수용액과의 접촉제면을 통해서 전달될 경우 독립변수의 두 극한 범위에서 구한 CO_2 의 물질전달계수의 극한치를 사용하여 Beek-Bakker 근사식에 적용하여 측정치와 비교검토하였다.

본 연구에서 입자의 크기가 100 μm 보다 작은 경우 Sh수는 2에 접근하고 100 μm 보다 큰 경우에는 $(\epsilon^{1/3} d^{4/3} / \nu) Sc^{1/3}$ 에 접근하는 실험결과로부터 입자크기가 100 μm 보다 작은 범위에서 큰 범위까지 동시에 적용될 수 있는 근사식을 Beek-Bakker가 제시한 근사식에 적용할 경우 다음과 같은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$Y^m = Y_o^m + Y_\infty^m \quad (4)$$

여기서, $Y = \text{Sh}$

$$Y_o = 2$$

$$Y_\infty = a(\epsilon^{1/3} d^{4/3} / \nu)^b Sc^{1/3}$$

본 실험에서 사용한 전체 계에 대한 실험값을 식 (4)에 대입하여 Simplex방법을 사용하여 상수를 구한 결과, $m=5.8$, $a=0.70$, $b=0.58$ 이며 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Sh} = [2^{5.8} + \{0.70(\epsilon^{1/3} d^{4/3} / \nu)^{0.58} Sc^{1/3}\}^{5.8}]^{1/5.8} \quad (5)$$

식 (5)의 실험조건은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} 0.12 < \epsilon^{1/3} d^{4/3} / \nu < 317 \\ 269 < Sc < 7491 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Fig. 8에 실험치 Sh와 $(\epsilon^{1/3} d^{4/3} / \nu)^{0.58} Sc^{1/3}$ 을 plot하였으

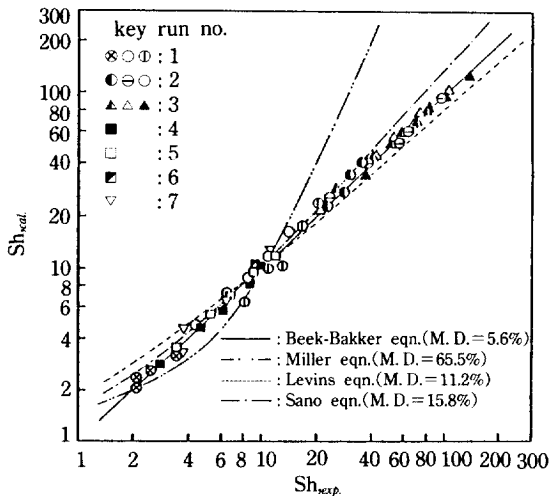


Fig. 9. Comparison of Sh_{exp} to Sh_{cal} . (M. D. = $|Sh_{cal} - Sh_{exp}| / Sh_{cal} \times 100$).

며 식 (5)에서 계산한 근사치를 실선으로 나타내었으며, 점선은 Levins와 Glastonbury의 식 (3)을 나타내었다. Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 측정치는 근사치와 5.6%의 평균편차로서 잘 일치함을 알 수 있고, 식 (3)과의 비교에서 입자직경이 $100 \mu\text{m}$ 이상인 경우도 실험치와 계산치는 잘 일치하고 있으나, 입자직경이 $100 \mu\text{m}$ 이하에서 평균편차 50%의 차이를 나타내고 있어 Levins와 Glastonbury가 제시한 식 (3)은 입자크기가 적은 계에서는 사용할 수 없음을 알 수 있다. Fig. 9에 본 연구에서 얻어진 실험치를 식 (5) 및 Table 1에 나타낸 타 연구자들의 경험식을 사용하여 계산된 값들을 나타내어 비교하였으며, Beek-Bakker model에 의한 경험식이 보다 실험치에 잘 일치됨을 알 수 있다.

4. 결 론

25°C , 1 atm에서 H형 이온교환수지-NaOH수용액, OH형 이온교환수지-HCl수용액 및 picric acid, PbSO_4 -물, CaCO_3 -물, K_2SO_4 -물계에 있어서 방해판이 부착된 교반조를 사용하여 액상층 물질전달계수를 측정하였다. 입자의 크기가 교반조 내의 격류에서 발생하는 microeddy의 크기보다 작은 경우의 물질전달계수는 고체입자-액체간 분자확산 이론값에 접근하였다. 물질전달계수에 영향을 미치는 입자크기, 교반속도, 액체의 점도, 용질의 확산계수 등의 실험변수에 대한 상관관계식을 Beek-Bakker식을 사용한 근사식으로부터 구하였으며, 이에 대한 결과식은 다음과 같다.

$$Sh = [2^{5.8} + \{0.70(\epsilon^{1/3} d^{4/3} / \nu)^{0.58} Sc^{1/3}\}^{5.8}]^{1/5.8}$$

감 사

본 연구는 1989년도 한국과학재단 연구비지원(과제번호: 89-1002-026-2)으로 수행한 연구 결과의 일부입니다.

NOMENCLATURE

- A : surface area of solid particle [m^2]
- C : concentration of solute in liquid [kmol/m^3]
- C_i : concentration of solute at solid-liquid interface [kmol/m^3]
- C_o : concentration of solute in liquid at initial reaction [kmol/m^3]
- C_s : concentration of solute on solid surface [kmol/m^3]
- D : liquid phase diffusivity [m^2/s]
- d : particle diameter [μm]
- g : gravity accelerate constant [$\text{kg}/\text{kg}_0 \cdot \text{sec}$]
- k_L : mass transfer coefficient [m/sec]
- m : correlation constant defined by equation (4)
- n : revolution per minute of impeller in an agitated vessel [$1/\text{s}$]
- Sc : Schmits number [ν/D]
- Sh : Sherwood number [$k_L d/D$]
- SPG: specific power group [$\epsilon^{1/3} d^{4/3} / \nu$]
- T_o : torque [$\text{m} \cdot \text{kg}_0$]
- t : reaction time [sec]
- V : liquid volume of agitated vessel [m^3]

Greek Letters

- ϵ : energy dissipation rate per unit mass of liquid [m^2/m^3]
- ρ_L : density of liquid [kg/m^3]
- ρ_p : density of solid particle [kg/m^3]
- μ : viscosity of liquid [$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{sec}$]
- ν : kinematic viscosity [m^2/sec]
- τ_o : torque [$\text{m} \cdot \text{kg}_0$]

REFERENCES

1. Hariott, P.: *AIChE J.*, **8**, 93(1962).
2. Nagata, S. and Nishikawa, M.: Proceedings of First Pacific Chemical Engineering Congress, Session 18, 301(1972)
3. Levins, D. M. and Glastonbury, J. R.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **50**, 132(1972).
4. Sano, T., Yamaguchi, N. and Adachi, T.: *J. Chem.*

- Eng. Japan*, 7, 255(1974).
5. Yagi, H., Iwazawa, A., Sonobe, R., Matsubara, T. and Hikita, H.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **23**, 153 (1984).
 6. Hixon, A. W. and Baum, S. J.: *Ind. Eng. Chem.*, **36**, 528(1944).
 7. Bakker, J. J. and Treybal, R. E.: *AIChE J.*, **6**, 289 (1960).
 8. Sykes, P. and Gomezplata, A.: *Can. J. Chem. Eng.*, **45**, 189(1967).
 9. Nienow, A. W.: *Can. J. Chem. Eng.*, **47**, 248(1969).
 10. Boon-Long, S., Laguerie, C. and Couderc, J. P.: *Chem. Eng. Sci.*, **33**, 813(1978).
 11. Lal, P., Kumar, S., Upadhyay, S. N. and Upadhyay, Y. D.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**, 1246(1988).
 12. Asai, S., Konishi, Y. and Sasaki, Y.: *J. Chem. Eng. Japan*, **21**, 107(1988).
 13. Davis, J. J.: "Turbulent Phenomena", Academic Press, New York, p. 53(1972).
 14. Rushton, J. H., Costich, E. W. and Everett, H. J.: *Chem. Eng. Progr.*, **46**, 395(1950).
 15. Zwirtering, T. N.: *Chem. Eng. Sci.*, **8**, 244(1958).
 16. Wichterle, K.: *Chem. Eng. Sci.*, **43**, 467(1988).
 17. Reid, R. C., Plausnitz, J. M. and Sherwood, T. K.: "The Properties of Gases and Liquids", 3rd ed., McGraw Hill, New York, p. 591(1977).
 18. Cussler, E. L.: Cambridge Univ. Press, New York, p. 118(1984).
 19. Mydlarz, J., Jones, A. G. and Millan, A.: *J. Chem. Eng. Data*, **34**, 124(1989).
 20. Beek, W. J. and Bakker, C. A. P.: *Appl. Sci. Res.*, **A10**, 241(1961).
 21. Churchill, S. W. and Usagi, R.: *AIChE J.*, **18**, 1121 (1972).
 22. Byers, C. H. and King, C. J.: *AIChE J.*, **13**, 628 (1967).
 23. Hatanaka, J.: *Chem. Eng. J.*, **28**, 127(1989).
 24. Asai, S., Hatanaka, J., Kimura, T. and Yoshizawa, H.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **26**, 483(1987).
 25. Park, S. W., Yang, S. S., Kim, J. H. and Asai, S.: *HWAHAK KONGHAK*, **27**, 744(1989).
 26. Park, S. W., Kim, S. S. and Han, S. B.: *HWAHAK KONGHAK*, **28**, 327(1990).
 27. Brian, P. L. T., Hales, H. B. and Sherwood, T. K.: *AIChE J.*, **15**, 727(1969).
 28. Miller, D. N.: *Ind. Chem. Process Res. Dev.*, **10**, 365 (1971).
 29. Kikuchi, K., Sugawara, T. and Ohashi, H.: *Chem. Eng. Sci.*, **43**, 2533(1988).