

슬러리에 CO₂ 기체의 흡수(III)

—NaOH가 포함된 Kaolin과 White Carbon 슬러리의 층류막에 CO₂의 흡수—

박상욱 · 김성수*

부산대학교 공과대학 화학공학과

*지산간호보건전문대학

(1989년 11월 24일 접수, 1990년 3월 23일 채택)

Absorption of CO₂ into Slurries (III)

—The Absorption of CO₂ into Laminar Falling Films of Slurries of
Kaolin and White Carbon with NaOH—

Sang Wook Park and Sung Soo Kim

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Pusan National University,
Pusan 609-735, Korea

*Ji-San Junior College

(Received 24 November 1989; accepted 23 March 1990)

요 약

젖은 벽탐을 사용하여 20°C, 1 atm에서 NaOH 수용액에 CO₂ 기체를 흡수시켜 기-액 접촉 시간을 변
화시키면서 CO₂의 흡수속도를 측정하였다.

실험결과는 침투설을 근거로 한 반응흡수 이론에 의해 해석하였으며, 반응촉진 인자의 실험치가 CO₂와
OH⁻와의 비가역 2차 반응을 동반하는 흡수에 대한 대류-확산 방정식의 근사 이론치와 평균 편차 8%
이내에서 일치하였다.

Power-law 거동을 나타내는 NaOH-kaolin slurry 계와 NaOH-white carbon slurry 계의 비뉴튼액체
에서의 화학흡수기구는 비뉴튼액체의 특성치인 power-law index와 consistency index를 가미한 뉴튼액
체에서의 화학흡수기구를 사용하여 설명할 수 있었다.

Abstract—The absorption rate of carbon dioxide into laminar falling films of aqueous NaOH solution, NaOH-
kaolin slurry and NaOH-white carbon slurry was measured by various changes of contact time between gas and liquid
using a wetted-wall column at 20°C.

The experimental data were analyzed by the penetration theory based on the gas absorption with second-order ir-
reversible chemical reaction between CO₂ and OH⁻. The measured reaction enhancement factors were consistent with
those predicted by the approximate equation (14) derived by the convective-diffusion equation within an average
deviation of 8, 7.8 and 9.3% in the NaOH, NaOH-kaolin slurry and NaOH-white carbon slurry, respectively.

The mechanism of gas absorption with reaction into Newtonian liquid could be also used in the case of power-law
liquids.

1. 서 론

화학반응을 수반한 기체흡수(이하 화학흡수라 칭함)는 기체분리조작, 화학제품 합성, 고분자가공, slurry 반응 등 산업분야에 응용범위가 대단히 넓다. 뉴튼액체에서 화학흡수에 관한 연구는 물리흡수에서 사용된 흡수기구의 이론식에 화학반응 항목을 첨가하여 흡수기구를 해석하고, 흡수속도를 구하여 실험치와 비교하거나[1-3], 반응촉진 인자를 산출하여 측정된 흡수속도로부터 화학반응속도식 또는 반응속도 정수값의 산출[4-8], 또는 교반조에서 기-액 계면면적을 구하거나 기-액 계면의 계면저항의 현상에 대한 해석[9-11] 등 많은 연구자들에 의하여 광범위한 연구가 진행되어 왔다. Yih와 Huang[12]는 화학흡수가 형성되는 비뉴튼 층류막에서 용질기체의 농도분포에 대한 이론식을, Hikita 등[13], Juvekar와 Sharma[14], Uchida 등[15]은 power-law 거동을 나타내는 비뉴튼 층류막에서 순간 비가역반응이 수반된 화학흡수기구를 해석하여 반응 촉진 인자의 이론치와 실험치를 비교하였으나 현재까지 비뉴튼액체에서의 화학흡수에 관한 연구는 충분치 되어 있지 않은 실정이다.

본 연구는 NaOH가 포함된 power-law 거동을 나타내는 kaolin과 white carbon[amorphous(SiO₂)_n] slurry의 층류막에 흡수된 CO₂ 기체의 흡수속도를 측정하여 반응촉진 인자를 사용하여 화학반응이 수반된 기체 흡수기구를 해석하고, 화학반응 항목이 첨가된 대류 확산 방정식으로부터 흡수속도에 대한 근사해를 제시하고자 한다.

2. 이 론

Power-law 거동을 나타내는 slurry의 층류막에 기체가 흡수되어 slurry의 연속상에 용해되어 있는 반응물 B와 흡수기체 A와의 반응이 식 (1)과 같이 순간 비가역 반응일 경우



Fig. 1에 나타낸 바와 같이 A와 B의 반응은 반응면(reaction plane), x_r 에서 일어나고 x_r 에서 A, B의 농도는 0이 되며, 반응속도는 A, B 두 반응물이 반응면으로 전달되는 속도와 동일하다고 할 수 있다. 이 때 두 반응물의 물질전달은 층류막의 흐름 방향과 동일한 대류전달과 기-액 계면에 직각 방향으로의 분자확산에 의하여 일어난다고 가정하면, A, B 두 반응물에 대한

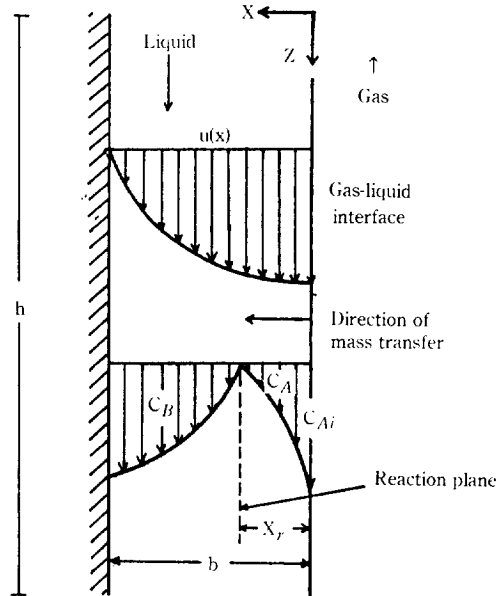


Fig. 1. Flow model and coordinate system in chemical absorption.

대류-확산 방정식은 식 (2)와 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$D_A \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} = u(x) \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad (2)$$

$$D_B \frac{\partial^2 C_B}{\partial x^2} = u(x) \frac{\partial C_B}{\partial z} \quad (3)$$

여기서 $u(x)$ 는 층류액막에서의 속도분포이며 다음과 같이 주어진다[13].

$$u(x) = \frac{2n+1}{n+1} u_m \left[1 - \left(\frac{x}{b} \right)^{n+1/n} \right] \quad (4)$$

여기서 b 는 층류액막의 두께이며, u_m 은 층류액막의 평균속도로서 각각 식 (5), (6)에서 구하여 진다.

$$u_m = \left[\frac{n}{2n+1} \left(\frac{\rho g}{k} \right)^{1/n} \left(\frac{\Gamma}{\rho} \right)^{n+1/n} \right]^{n/2n+1} \quad (5)$$

$$b = \left[\frac{2n+1}{n+1} \left(\frac{k}{\rho} \right)^{1/n} \left(\frac{\Gamma}{\rho} \right) \right]^{n/2n+1} \quad (6)$$

다음과 같은 식 (7)의 경계조건을 사용하여 식 (2)와 (3)의 해로부터 층류막에서의

$$z=0; 0 < x < b; C_B = C_{B0}$$

$$z > 0; x=0; C_A = C_{Ai}$$

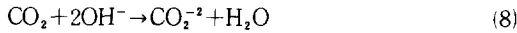
$$z > 0; x=x_r; C_A = C_B = 0,$$

$$D_A \frac{\partial C_A}{\partial x} + \frac{D_B}{\mu} \frac{\partial C_B}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

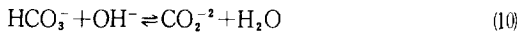
$$z > 0; x = b; \frac{\partial C_B}{\partial x} = 0$$

A, B 두 반응물의 농도분포를 구한다.

이미 많은 연구[1, 8, 16-18]에 알려진 바와 같이 액체 중에 용해된 CO₂ 기체와 NaOH와 총괄 반응은



이지만 이 반응은



의 순서로 일어나며 이들 반응 중에서 식 (9) 반응이 반응속도를 지배하는 율속 단계가 됨으로[19] 식 (9) 반응은 CO₂와 OH⁻에 대하여 각각 1차인 2차 비가역 반응이라 할 수 있다. 비가역 2차 반응을 수반하는 기체 흡수에서 CO₂와 OH⁻의 대류-확산 방정식은 식 (2)와 (3)에서 나타낸 바와 같이 비선형으로 나타나며 순간 반응 또는 유사 1차(pseudo 1st order) 반응과 같은 두 극한의 경우에만 흡수속도의 해가 얻어진다[19]. 따라서 일반적인 순간 비가역 반응흡수에 대한 이론적 해석은 전산에 의한 수치해[13] 또는 근사해[20]에 의해서만 가능하다.

OH⁻의 농도가 비교적 큰 경우(PH>10), 용해 기체의 침투거리에서 OH⁻의 농도가 계면 농도와 동일하게 일정하다고 가정하면[21], 액막내에서의 CO₂ 성분의 화학반응을 수반한 확산 방정식은 침투설[22]로부터 다음과 같이 나타내어진다.

$$D_A \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} = \frac{\partial C_A}{\partial t} - k_1 C_{B0} C_A \quad (11)$$

여기서 t는 기-액 접촉 시간이다.

식 (11)에서 해를 구하기 위하여 필요한 초기 및 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} t=0, x>0; C_A &= 0 \\ t>0, x=0; C_A &= C_{A0} \\ t>0, x=X_s; C_A &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 침투설에 의한 비가역 2차 반응흡수에 대한 평균 흡수속도는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_A = \beta N_{A0} = \beta^2 C_{A0} (D_A / \pi t)^{1/2} \quad (13)$$

여기서 N_{A0}는 물리흡수의 평균 흡수속도, β는 화학반응이 수반될 경우의 N_A와 N_{A0}와의 비가 되는 반응 촉진 인자이며, β는 Hikita와 Asai[20]가 제안한 근사 이론에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\beta = \left(\gamma \eta + \frac{\pi}{8 \gamma \eta} \right) \text{erf} \left(\frac{2 \gamma \eta}{\sqrt{\pi}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(- \frac{4 \gamma^2 \eta^2}{\pi} \right) \quad (14)$$

여기서

$$\gamma = \left(\frac{\pi}{4} C_{B0} k_1 t \right)^{1/2} \quad (15)$$

$$\eta = \left(\frac{\beta_\infty - \beta}{\beta_\infty - 1} \right)^{1/2} \quad (16)$$

식 (16)에서 β_∞는 순간반응(instantaneous reaction)이 수반된 화학흡수에서의 평균 흡수속도와 N_{A0}와의 비가 되며 식 (17)에서 구하여진다[23].

$$\beta_\infty = 1 / \text{erf}(\sigma) \quad (17)$$

식 (17)에서 σ는 식 (18)에서 구한다.

$$\frac{C_{B0}}{2C_{A0}} \sqrt{D_B/D_A} \text{erf} \left[\sigma^2 \left(1 - \frac{D_B}{D_A} \right) \right] + \text{erf}(\sigma \sqrt{D_B/D_A}) = 1.0 \quad (18)$$

3. 실험방법

Power-law 거동을 나타내는 비뉴턴 슬러리에 화학반응을 수반한 기체흡수에서 기체의 흡수속도를 측정하기 위하여 사용되는 기체는 CO₂기체(대원가스 주식회사, 99.9%)이고, slurry로서는 kaolin(Hayash : Chem. Co., Japan)과 white carbon(삼양화학 주식회사)을 사용하였고, 액체내의 반응물 NaOH(Junse : Chem. Co., Japan)을 slurry에 첨가하여 흡수액으로 사용하였다. CO₂기체의 흡수속도를 측정하기 위하여 사용된 흡수탑은 Roberts와 Danckwerts[2]가 사용하였던 젖은 벽탑에서 젖은 벽탑내 rod의 말단 효과를 보정한 개량된 흡수탑[8, 24]이며, rod의 주위로 흘러 내리는 층류막의 주름모양(ripping) 현상을 제거하기 위하여 흡수액에 비이온 계면 활성제(Scourol 100, Kao Chem. Co., Japan)을 소량 첨가하였다.

Nijsing 등[1], Hikita 등[24], Park 등[8]에서와 같이 비누막 유량계(soap bubble flowmeter)를 사용하여 기체의 흡수속도를 측정하였다. 기체 유량이 흡수속도에 영향을 미치지 않는 범위에서 기체의 유량을 250 cm³/min[8], rod의 길이는 12 cm, slurry의 유량을 80에서 250 cm³/min까지 변화시키어 액막을 층류로 형성시키고, NaOH 수용액, NaOH-slurry에서 NaOH 농도범위는 0-0.75 M, kaolin과 white carbon의 농도는 5 wt%에서 전보[8]와 동일한 방법으로 흡수실험을 20 °C, 1 atm에서 행하였다.

Table 1. Physical and chemical properties of CO₂-NaOH-slurry at 20°C

| Material | NaOH (gmol/l) | n | $k \times 10^2$ (dyne·s ² /cm ²) | ρ (g/cm ³) | $k_1 \times 10^6$ (cm ³ /mole·s) | $C_{Ai} \times 10^5$ (gmol/cm ³) | $D_A \times 10^5$ (cm ² /s) | D_{OH^-}/D_A |
|-----------------|------------------|------|--|--------------------------------|--|---|---|----------------|
| Water | 0 | 1.00 | 1.00 | 0.988 | — | 3.829 | 1.610 | — |
| | 0.1464 | 1.00 | 1.033 | 1.004 | 5.936 | 3.649 | 1.557 | 1.78 |
| | 0.3724 | 1.00 | 1.078 | 1.014 | 6.351 | 3.389 | 1.492 | 1.78 |
| | 0.7508 | 1.00 | 1.070 | 1.029 | 7.113 | 2.993 | 1.375 | 1.78 |
| Kaolin | 0 | 0.94 | 1.96 | 1.035 | — | 3.763 | 1.571 | — |
| | 0.1926 | 0.89 | 2.99 | 1.042 | 6.019 | 3.533 | 1.514 | 1.78 |
| | 0.3684 | 0.87 | 4.24 | 1.050 | 6.344 | 3.335 | 1.460 | 1.78 |
| | 0.5638 | 0.83 | 5.67 | 1.068 | 6.726 | 3.127 | 1.400 | 1.78 |
| | 0.7584 | 0.80 | 8.89 | 1.076 | 7.129 | 2.934 | 1.474 | 1.78 |
| White carbon | 0 | 0.94 | 2.55 | 1.027 | — | 4.167 | 1.558 | — |
| | 0.0958 | 0.93 | 2.76 | 1.028 | 5.847 | 4.038 | 1.532 | 1.78 |
| | 0.1457 | 0.93 | 2.89 | 1.031 | 5.935 | 3.972 | 1.516 | 1.78 |
| | 0.1918 | 0.93 | 3.00 | 1.037 | 6.017 | 3.913 | 1.504 | 1.78 |
| | 0.3744 | 0.92 | 3.70 | 1.044 | 6.355 | 3.685 | 1.448 | 1.78 |
| | 0.5722 | 0.90 | 4.52 | 1.053 | 6.473 | 3.454 | 1.389 | 1.78 |
| | 0.7488 | 0.89 | 6.01 | 1.016 | 7.109 | 3.259 | 1.338 | 1.78 |

4. 결과 및 고찰

4-1. 물성치 측정 및 추산

20°C, 1 atm에서 kaolin과 white carbon slurry 및 NaOH-white carbon slurry의 power-law index, n과 consistency index, k는 모세관 점도법[25]에 의해 측정하였으며, kaolin과 white carbon slurry에서 CO₂의 용해도, C_{AO} 는 중량법[25]에 의해, 확산계수, D_A 는 전보 [8]에서 사용한 동일한 젖은 벽타에서 측정하였다.

흡수액의 밀도, ρ 는 pycnometer를, NaOH 수용액의 점도, μ 는 Cannon-Fenske routine viscometer를 사용하여 측정하였다. NaOH 수용액 및 NaOH-slurry 계에서 CO₂ 기체의 용해도, C_{Ai} 는 OH⁻와 CO₂의 화학 반응으로 측정할 수 없기 때문에 전해질 용액에서 사용되는 Van Krevelen과 Hoftijzer[2]의 방법에 의해 다음과 같이 추산하였다.

$$\log\left(\frac{C_{Ai}}{C_{Ao}}\right) = -h_s I \quad (19)$$

여기서 C_{Ao} 는 물에서의 용해도, 또는 NaOH-slurry의 경우 slurry에서의 용해도를 각각 나타내며, h_s 는 전해질 용액에서 이온들과 기체 종류에 따라 정해지는 salt-ing-out parameter이며, I 는 식 (20)에서 구해지는 이온 강도이다.

$$I = 1/2 \sum_i C_i Z_i^2 \quad (20)$$

여기서 C_i 는 이온 농도, Z_i 는 이온의 배위수이다.

NaOH 수용액 및 NaOH-slurry 계에서 CO₂의 확산 계수, D_A 는 물 및 slurry에서 측정한 확산계수[27] 값을 Stokes-Einstein 관계식에 의해서 흡수액의 점도 보정을 하여 추산하였다. 식 (18)에서 필요한 D_B/D_A 를 구하기 위하여 D_B/D_A 의 값이 필요하며, Nijssing 등 [1]이 제시한 바와 같이 D_B/D_A 의 값은 NaOH 수용액의 OH⁻ 농도에 관계없이 일정하다고 가정하여, Vinograd McBain[28]이 구한 20°C에서 무산화석 수용액에서 OH⁻의 확산계수, 2.86×10^{-5} cm²/s를 사용하고, D_A 는 전보[29]에서 측정한 확산계수, 1.61×10^{-5} cm²/s와 함께 NaOH 수용액에서의 D_B/D_A 값을 1.78로 사용하였다. NaOH-slurry계에서 D_B/D_A 값은 slurry내 불활성 고체입자의 물은 용액으로 인하여 전보[29]의 NaOH-CMC(carboxy methyl cellulose)에서와 같이 NaOH 수용액에서 D_B/D_A 의 값을 1.78로 사용하였다.

CO₂와 OH⁻ 이온과의 2차 반응속도정수, k_1 은 Pin-sent 등[30]이 구한 추산식에 이온 강도를 보정하여 얻어진 다음과 같은 추산식[1]에 의해 산출되었다.

$$\log k_1 = 13.635 - \frac{2895}{T} + 0.13I \quad (21)$$

이상과 같이 흡수액의 물성치 및 추산값들을 Table 1에 나타내었다.

4-2. 화학흡수 실험결과 해석

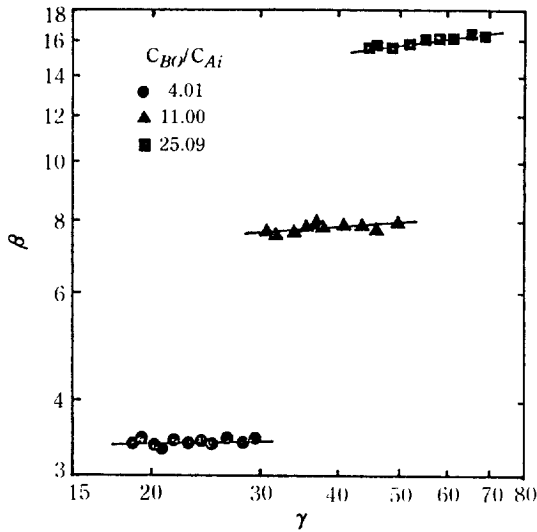


Fig. 2. Enhancement factor for absorption of CO₂ into NaOH solution at 20°C.

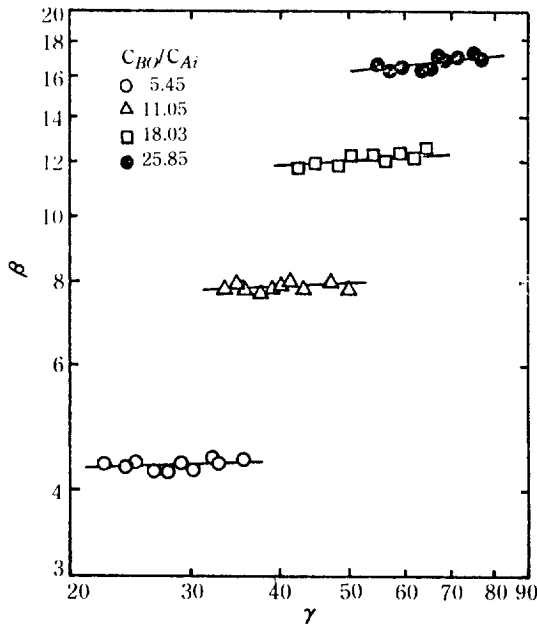


Fig. 3. Enhancement factors for absorption of CO₂ into 5 wt% aqueous kaolin slurries containing various concentration of NaOH at 20°C.

본 실험에서 측정된 N_A 와 N_{AO} 의 비, β 와 식 (14)에서 계산된 β 값을 비교 검토하기 위하여, 식 (15)에서 흡수액의 유량과 NaOH 농도변화로부터 얻어지는 γ 에 대한 실험치 β 를 plot하여 Fig. 2, 3, 4에 나타내었다. 이들 그림에서 실선은 식 (14)에서 계산된 β 와 γ 와의

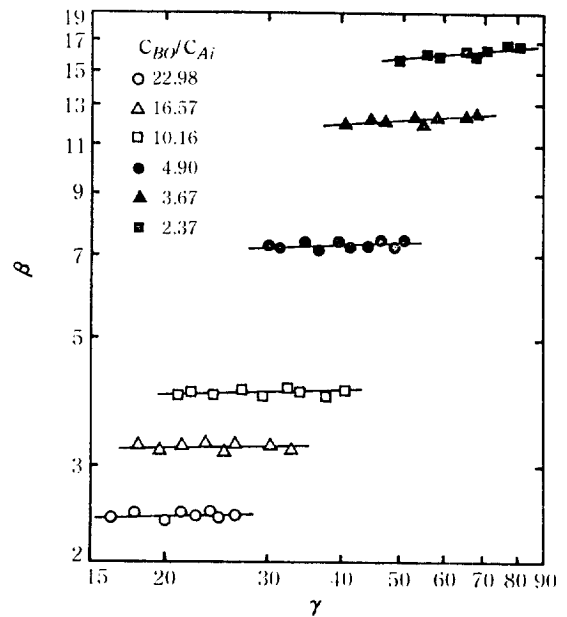


Fig. 4. Enhancement factors for absorption of CO₂ into 5 wt% aqueous white carbon slurries containing various concentration of NaOH at 20°C.

관계이다. Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 γ 의 증가에 따라 β 가 증가하고 있으며, 이론치와 실험치는 평균 편차 8.0% 이내에서 잘 일치하고 있어 NaOH 수용액에 대한 CO₂의 화학흡수는 침투설에 의한 비가역 2차 반응에 의하여 이루어진다고 해석할 수 있으며, 이는 Danckwerts와 Kennedy[16, 31], Nijsing 등[1], Hikita 등[19, 21], Park 등[8]이 NaOH 수용액에서 행한 CO₂의 화학흡수 결과와 동일하였다. 또한 Fig. 3과 4에서 알 수 있는 바와 같이 γ 의 증가에 따라 β 가 증가하고 있으며, 이론치와 실험치와는 NaOH-kaolin계와 NaOH-white carbon 계에서 평균 편차 7.8%, 9.3% 이내에서 각각 잘 일치하고 있다. 이는 NaOH-slurry 계의 CO₂ 기체의 화학흡수에서 불활성 고체로서 작용하는 kaolin slurry 계에서나 불활성 고체로 작용하지 않는 white carbon slurry 계에서 용해도를 수정한 경우[27]와 같은 power-law 거동을 나타내는 비뉴턴액체에서의 화학흡수에서 흡수기구는 침투설을 사용하여 설명할 수 있으며, 화학흡수의 반응촉진 인자를 Hikita와 Asai [20]가 제안한 근사식 (14)로 나타낼 수 있다.

5. 결 론

젖은 벽타를 사용하여 20°C, 1 atm에서 NaOH 수용

액에 CO₂ 기체를 흡수시켜 기-액 접촉시간을 변화시키면서 CO₂의 흡수속도를 측정하였다. 실험결과는 침투설을 근거로 한 반응흡수 이론에 의해 해석하였으며, 반응촉진 인자의 실험치가 CO₂와 OH⁻와의 비가역 2차 반응을 동반하는 흡수에 대한 대류-확산 방정식의 Hikita와 Asai가 제안한 근사식으로부터 구한 계산치와 평균 편차 8% 이내에서 일치하였다.

Power-law 거동을 나타내는 NaOH-kaolin slurry 계와 NaOH-white carbon slurry 계의 비뉴튼액체에서의 화학흡수기구는 비뉴튼액체의 특징치인 power-law index와 consistency index를 가미한 뉴튼액체에서의 화학흡수기구를 사용하여 설명할 수 있었다.

감 사

본 연구는 1986년도 한국과학재단 연구비 지원(과제번호: 862-1002-017-2)으로 수행한 연구결과와 일부입니다.

NOMENCLATURE

| | |
|----------------------------------|--|
| A | : reactant of gas dissolved in liquid |
| b | : liquid film thickness [cm] |
| B | : reactant of solute in liquid phase |
| C _A | : concentration of A in a liquid [gmol/cm ³] |
| C _{Ai} | : interfacial concentration of A in a liquid [gmol/cm ³] |
| C _{A1} | : average inlet concentration of A [gmol/cm ³] |
| C _{AO} | : saturated solubility of A in water and slurry [gmol/cm ³] |
| C _i | : ionic concentration [gion/l] |
| C _B | : concentration of B [gmol/cm ³] |
| C _{BO} | : initial concentration of OH ⁻ in a liquid [gmol/cm ³] |
| D _A | : diffusivity of A [cm ² /sec] |
| D _B | : diffusivity of B [cm ² /sec] |
| g | : gravitational acceleration [cm/sec ²] |
| h _s | : salting-out parameter [l/gmol] |
| I | : ionic strength [gion/l] |
| k | : consistency index [dyne-sec ⁿ /cm ²] |
| k ₁ | : reaction rate constant [cm ³ /gmol-sec] |
| n | : power law index |
| N _A , N _{AO} | : average absorption rate per unit area with and without chemical reaction, respectively [gmol/cm ² -sec] |
| t | : contact time between gas and liquid [sec] |
| T | : temperature [°K] |
| u(x) | : velocity of liquid in laminar falling liquid [cm/s] |

| | |
|----------------|--|
| x | : distance beneath liquid surface [cm] |
| x _r | : distance to reaction plane from interface [cm] |
| z | : distance in the flow direction of liquid [cm] |
| Z _i | : valencies of ions |

Greek Letters

| | |
|----------------|---|
| β | : reaction enhancement factor |
| β _∞ | : reaction enhancement for gas absorption with instantaneous reaction |
| Γ | : mass flow rate of liquid per unit perimeter [g/cm-sec] |
| γ | : parameter defined by eq. (15) |
| η | : parameter defined by eq. (16) |
| σ | : parameter defined by eq. (18) |
| μ | : liquid viscosity [g/cm-sec] |
| ν | : stoichiometric coefficient |
| ρ | : liquid density [g/cm ³] |

REFERENCES

1. Nijssing, R.A.T.O., Hendriksz, R.H. and Kramers, H.: *Chem. Eng. Sci.*, **10**, 88 (1959).
2. Robert, D. and Danckwerts, P.V.: *Chem. Eng. Sci.*, **17**, 961 (1962).
3. Hikita, H., Asai, S., Ishikawa, H. and Honda, M.: *Chem. Eng. J.*, **13**, 7 (1977).
4. Perry, R.H. and Pigford, R.L.: *Ind. Eng. Chem.*, **45**, 1247 (1953).
5. Astarita, G.: *Chem. Eng. Sci.*, **16**, 202 (1961).
6. Hikita, H., Asai, S., Katsu, Y. and Ikuno, S.: *AIChE J.*, **25**, 793 (1979).
7. Sada, E., Kumazawa, H. and Ham, Z.Q.: *AIChE J.*, **32**, 347 (1986).
8. Park, S.W., Park, P.W., Kim, S.J. and Yun, Y.W.: *HWAHAK KONGHAK*, **25**, 447 (1987).
9. Porter, K.E.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **41**, 320 (1963).
10. Sada, E., Kumazawa, H., Butt, M.A. and Lozano, J.E.: *Can. J. Chem. Eng.*, **55**, 293 (1977).
11. Riazi, M. and Faghri, A.: *AIChE J.*, **32**, 696 (1986).
12. Yie, S. and Huang, P.G.: *Chem. Eng. Sci.*, **36**, 387 (1981).
13. Hikita, H., Ishimi, K. and Koroyasu, S.: *Can. J. Chem. Eng.*, **63**, 522 (1985).
14. Juvekar, V.A. and Sharma, M.M.: *Chem. Eng. Sci.*, **28**, 825 (1973).
15. Uchida, S., Kaide, K. and Shindo, M.: *Chem. Eng. Sci.*, **30**, 644 (1975).
16. Danckwerts, P.V. and Kennedy, A.M.: *Chem. Eng. Sci.*, **8**, 20 (1958).
17. Sharma, M.M. and Danckwerts, P.V.: *Chem. Eng.*

- Sci.*, **18**, 729 (1963).
18. Astarita, G.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **2**, 294 (1963).
 19. Hikita, H. and Takatsuka, T.: *Chem. Eng. J.*, **11**, 131 (1976).
 20. Hikita, H. and Asai, S.: *Int. Chem. Eng.*, **4**, 322 (1964).
 21. Hikita, H. and Asai, S.: *Kagaku Kogaku*, **28**, 1017 (1964).
 22. Higbie, R.: *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, **31**, 365 (1935).
 23. Sherwood, T.K. and Pigford, R.L.: "Absorption and Extraction" 2nd. ed., pp. 322, McGraw-Hill Inc., New York, N.Y. (1952).
 24. Hikita, H., Asai, S. and Himukashi, Y.: *Kagaku Kogaku*, **31**, 818 (1967).
 25. Kim, S.S.: Ph.D. dissertation, Pusan National University (1989).
 26. Van Krevelin, D.W. and Hofstijzer, P.J.: *Chem. Eng. Prog.*, **44**, 529 (1948).
 27. Park, S.W., Kim, S.S. and Ham, S.B.: *HWAHAK KONGHAK*, **28**(1990) (to be published).
 28. Vinograd, J.R. and McBain, J.W.: *J. Am. Chem. Soc.*, **63**, 2008 (1941).
 29. Park, S.W., Ham, S.B., Kim, S.S. and Park, T.Y.: *HWAHAK KONGHAK*, **26**, 280 (1988).
 30. Pinsent, B.R.W., Pearson, L. and Roughton, F.J.W.: *Trans. Faraday Soc.*, **52**, 1512 (1956).
 31. Danckwerts, P.V. and Kennedy, A.M.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **32**, 53 (1954).