

침상형 Göethite를 분산시킨 현탁기포탑에서의 기체체류량과 용량물질 전달계수 [I]

고재천·김범식·이정민·이보성*

한국화학연구소 화학공학 제 1연구실
*충남대학교 공과대학 화학공학과
(1988년 5월 17일 접수, 1988년 10월 31일 채택)

Gas Holdup and Volumetric Mass Transfer Coefficient in Slurry Bubble Column of Acicular Göethite Suspension [I]

Jaechon Koh, Beomsik Kim, Jungmin Lee, and Bo-Sung Rhee*

Chemical Engineering Lab. 1., KRICT
*Dept. of Chem. Eng., Chungnam National University
(Received 17 May 1988; accepted 31 October 1988)

요 약

1N-NaOH 수용액에 장축의 길이가 $0.27\mu\text{m}$ 이고 표준편차가 $0.07\mu\text{m}$ 인 정구분포를 갖는 Göethite 침상입자를 현탁시켜 각 농도별로 현탁액의 점도를 측정하고 Ostwald-de Waele의 power law에 적용됨을 알았으며, 직경 0.5mm 의 분산기가 사방 1cm 간격으로 89개 뚫린 1cm 두께의 acryl 분산판을 이용한 직경 10cm 과 높이 200cm 인 bubble column에 현탁용액 6리터를 채워 공기의 유속 $1.4\text{--}15.0\text{cm/sec}$ 범위와 system 온도 20°C 에서 실험을 행한 결과 기체체류량 및 산소의 용량물질 전달계수를 아래와 같이 나타낼 수 있었다.

$$\epsilon_g = 0.0321 U_g^{0.611} \eta_{eff}^{-0.0896}$$

$$k_L \cdot a = 0.00307 U_g^{0.787} \eta_{eff}^{-0.185} / (1 + 0.165 \phi^{3.33})$$

Abstract—It was found that a slurry prepared from acicular Göethite particle ($0.27\mu\text{m}$ in long axis and standard deviation is $0.07\mu\text{m}$) in 1N-NaOH aqueous solution obeys the Power Law of Ostwald-de Waele by measuring the viscosity of the slurry for each solid concentration. Subsequently, the gas holdup and volumetric mass transfer coefficient of oxygen were determined by measuring slurry density and dissolved oxygen in a slurry bubble column (10cm in diameter and 200cm in height) equipped with a perforated plate (1cm thickness of acryl) having 89 holes (0.5cm in diameter) with 1cm rectangular interval and filled with 6 liters of the above slurry, using air flow rate of $1.4\text{--}15.0\text{cm/sec}$ at 20°C . Gas holdup and volumetric mass transfer coefficient can be represented by the following equations.

$$\epsilon_g = 0.0321 U_g^{0.611} \eta_{eff}^{-0.0896}$$

$$k_L \cdot a = 0.00307 U_g^{0.787} \eta_{eff}^{-0.185} / (1 + 0.165 \phi^{3.33})$$

1. 서 론

현탁기포탑을 이용한 화학공업분야는 매우 넓으며 특히 Fisher Tropsch, 석탄액화반응, 그리고 발효공업 등에 활발한 연구[1]가 진행되고 있으나 $1\mu\text{m}$ 미만의 미립자를 사용한 현탁기포탑에 대한 연구는 많지 않다.

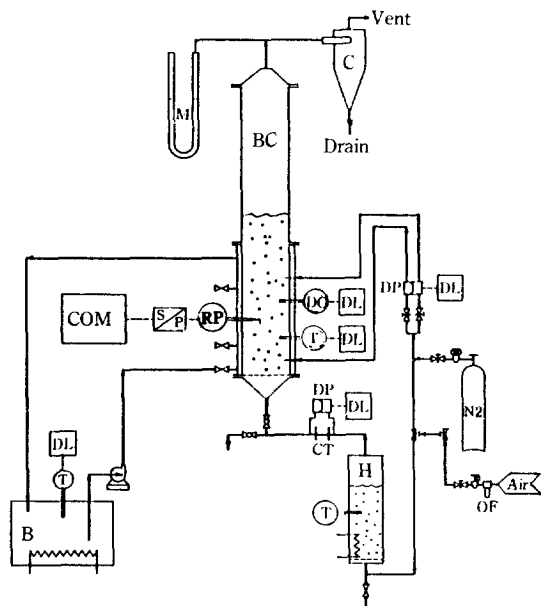
현탁기포탑에서 Deckwer 등[2]은 고체입자의 직경이 $50\mu\text{m}$ 이하이고 현탁농도가 16wt%를 넘지 않을 때 2상 기포탑으로 취급하여 흐름영역(flow region)을 구분하였고 기존의 연구들이 대부분 bubble flow 영역에서 이루어졌음을 보고하였다. 이들은 고체입자의 영향에 대해 언급하지 않았지만 Godbole 등[3]과 Capuder 등[4]은 기체체류량과 용량물질 전달이 현탁액의 점도(effective viscosity)에 반비례함을 보고하였다. 미세고체가 분산된 현탁액의 점도는 고체입자의 형상과 농도에 의하여 많은 점탄성 변화[5]가 있다. 특히 이러한 현탁기포탑에서 측정범위를 기상유속이 빠른 churn turbulent 영역까지 확대시키면 유동기포로 인하여 현탁액은 과도한 shear rate를 받게 되고 따라서 용액의 점탄성 성질에 의하여 기체체류량 및 용량물질 전달 등 제반 계수에 영향을 미칠 것은 확실하다. 현탁기포탑을 이용한 반응기설계 등에 필요한 자료를 얻기 위하여 일반적으로 2상 기포탑에서 얻어진 경험식 혹은 무차원식을 이용할 경우 앞서의 현상을 고려하여야 하며 식의 이용에 각별한 주의가 요구되고 있다.

본 연구는 녹음 및 녹화용 자성기록재료의 기초원료인 침상형 Göethite($\alpha\text{-FeOOH}$)를 제조하기 위한 반응기 설계자료를 획득하고자 하였다. 침상형 Göethite의 제조는 알칼리용액에 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (고체)가 현탁된 기포탑에서 용해된 $\text{Fe}(\text{OH})^+$ 이온과 용존산소의 화학반응으로 제조[15, 16]되며 현탁액의 고체농도는 약 0.20-0.25 mol에서 행하여지고 있다. 특히 산소의 물질이 동은 화학반응을 동반한 전달현상으로 설명되며 가장 핵심적인 부분이다. 따라서 본 반응기설계를 위하여 알칼리수용액에서 일어나는 이가철이온의 화학반응속도[18]와 현탁기포탑에서 공기기포로부터 이동되는 산소의 물리적 물질전달속도 및 기포탑 내부의 현상파악은 매우 중요하다. 이상과 같이 산소의 물리적 전달현상을 연구하고자 알칼리수용액에 불용인 Göethite를 1 N-NaOH 수용액에 분산시켜 공기로 기포화(bubbling)시킬 때 일어나는 기체체류량과 산소의 용량물질 전달계수를 구하고자 하였다.

2. 실험

2-1. 장 치

기체체류량과 용량물질 전달계수를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 제작하였으며 반회분식(semi-batch)으로 실험을 행하였다. 탑의 내경은 10 cm, 높이 100 cm인 acryl관 2개를 이어서 사용하였으며 현탁기포층이 존재하는 하부탑의 내부온도를 균일하게 유지하기 위하여 탑의 외부에 jacket를 만들고 물을 순환시켜 기포탑의 온도가 20°C 로 일정히 유지되도록 하였다. 산소의 공급원으로 압축공기를 사용하였으며 압축공기는 oil filter를 거쳐 가습기를 통하여 기포탑에 공급되도록 하였다. 가습기를 통과한 공기는 미리 검량된 모세관 차압유량계를 지나 system으로 공급되도록 하고 차압유량계에서 발생하는 차압을 차압전송기(differential pressure transmitter- 일본 Yokog-



SP: Signal processor

T: Thermocouple

COM: IBM P/C AT computer

B: Const. temp. bath

BC: Bubble column

C: Cyclone

CT: Capillary tube

DL: Data logger

DO: Dissolved oxygen meter

DP: Differential pressure transmitter

H: Humidifier

M: Manometer

OF: Oil filter

RP: Resistance probe

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Experimental conditions

Gas	Air
Temperature	20 °C
Solution	0 to 1N-NaOH aq.
Ionic strength*	1.0
Balance reagent	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O
Solid concentration	0 to 2.0 wt%
Superficial gas velocity	1.0 to 15 cm/s
Liquid volume	6000 cm ³

$$* I = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2$$

Table 2. Column and distributor dimension

Column diameter, cm	10.0
Column length, cm	200.0
Distributor	
Hole diameter, cm	0.05
Length of pitch, cm	1.0
Type of pitch	rectangularity
Number of hole, -	89
Open area, %	0.22

awa model UNE 11-SLS2)를 통해 자료수집기(data logger- 일본 Yokogawa model 3848)로 보내어 기록되도록 하였다. 기체체류량 측정을 위한 압력측정구멍은 분산판위 20cm와 60cm 위치에 고정 설치하고 이 두 지점간의 차압을 검량된 차압계로 연속 측정하여 차압계에서 나오는 전기신호도 자료수집기에서 받아 기록되도록 하였다. 용존산소의 농도를 측정하기 위하여 분산판위 50cm 위치에 용존산소 probe를 설치하고 용존산소계(dissolved oxygen meter; 미국 YSI model 52)로 용액의 용존산소변화를 측정하고 자료수집기와 연결하여 측정치는 각 부위의 온도와 함께 정확히 15초간격으로 기록되도록 하였다. 산소의 흡수실험이 끝난 후 현탁용액에 용존된 산소를 제거하기 위하여 압축질소를 이용하였고 3way 밸브로 공기를 공급하는 본선과 연결하여 사용하였다.

본 실험조건은 Table 1과 같으며 기포탑의 column 크기와 분산판은 Table 2와 같다.

2-2. 재료와 현탁액의 점도 특성

2-2-1. 재 료

현탁액의 제조에 사용된 물은 이온교환수지를 통과시켜 전기전도도가 0.3 μ mho 이하인 것을 사용하였고 알칼리농도를 조절하기 위한 시약은 미국 Anachemia Tedia사의 1N-NaOH 표준용액을 사용하였으며 또한 이온강도를 맞추기 위하여 일본 Wako사의 1급 시약인

Table 3. Properties of solid particle

Solid	α -FeOOH
Density, g/cc	4.28
Shape	Needle
Average length, μ m #	0.27
STD deviation, μ m	0.07
Aspect ratio, length/dia.	15-20
Specific surface area, m ² /g*	33

From Electron Micro Scope Picture, TEM

* N₂-BET Method

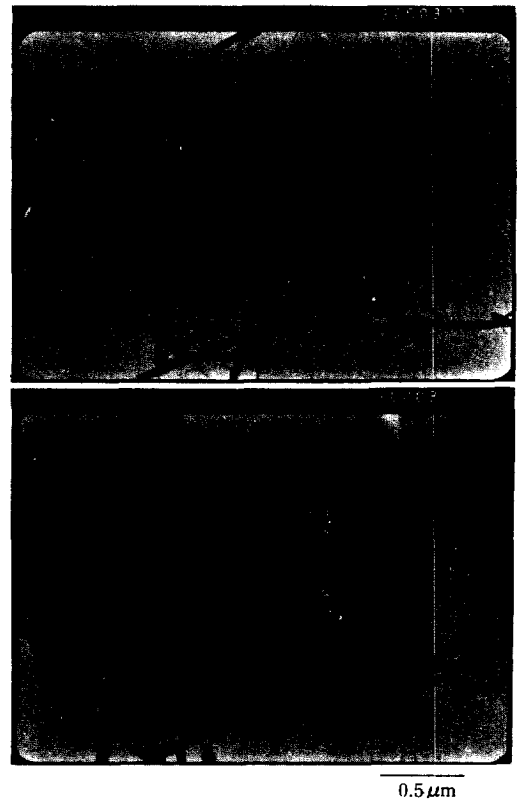


Fig. 2. Typical picture of Göethite by TEM.

Na₂SO₄·10H₂O를 사용하였다. 현탁고체는 실험실적 방법[6]으로 제조한 Göethite를 증류수로 세척하여 60°C 이하의 온도에서 건조한 후 사용하였다. 고체입자에 대한 제반특성은 Table 3과 같으며 전자현미경사진(TEM)을 Fig. 2에 수록하였다. 전자현미경에 나타난 입자의 크기분포는 Fig. 3과 같은 정규분포곡선으로 나타났다.

2-2-2. 현탁액의 점도특성

미세한 고체입자가 용액에 분산되면 현탁액의 점성은

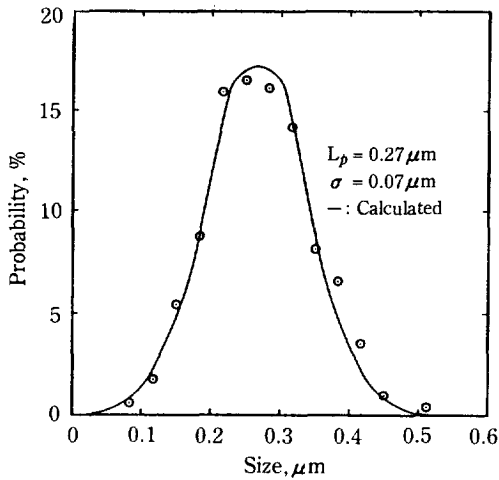


Fig. 3. Longitudinal particle size distribution of Göethite.

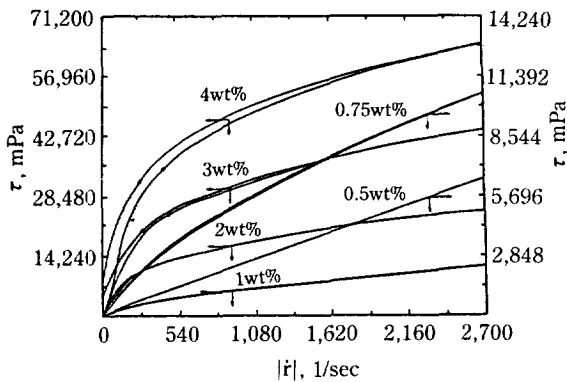


Fig. 4. Shear rate vs. shear stress of Göethite wt% in 1N-NaOH solution.

비뉴턴 점성 특성을 지니며 고체의 농도가 높을수록 비뉴턴 점성 특성은 더욱 커진다. 일반적으로 용액의 점도가 크면 물질 전달현상은 저하되므로 미세입자를 분산시킨 현탁액의 유동특성 파악은 매우 중요하다. 따라서 Göethite를 분산시킨 현탁수용액의 유동특성을 측정하기 위하여 Haake viscometer(model RV-100)를 사용하였고 sensor로서 NV standard type을 이용하였다. Fig. 4는 고체농도를 변화시킨 현탁액의 유동특성을 shear rate와 shear stress로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 이 용액의 유동특성으로부터 Ostwald-de Waele의 power law에 적용할 수 있음을 유추할 수 있다. 따라서 Ostwald-de Waele의 power law인 식 (1)을

$$\bar{\eta} = K|\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (1)$$

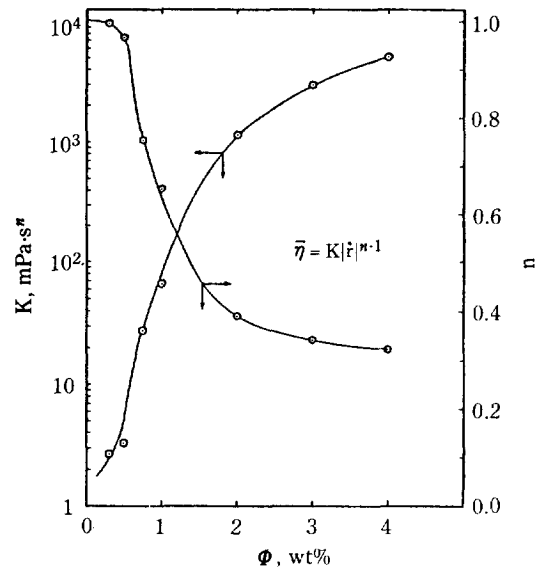


Fig. 5. Rheological behavior index K & n as a function of Göethite wt% in 1N-NaOH solution.

적용하여 고체농도에 따른 각각의 점성계수를 최소자승법으로 구하고 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 각각의 고체농도에서의 점도측정결과와 식 (1)과의 상관관계계수는 0.947-0.999 범위였고 평균오차는 0.5% 미만이었다.

2-3. 방 법

2-3-1. 기체체류량의 측정

탑 내부의 현탁액이 기상의 유동으로 인하여 일어나는 현탁액의 밀도를 측정하여 기체체류량을 구한다. 현탁액의 밀도를 측정하기 위하여 현탁기포탐에 설치한 두 곳의 압력 측정구멍으로부터 발생하는 차압을 측정하고 다음과 같은 방법으로 기상의 체류량을 구한다. 즉 현탁기포탐내의 고상은 기상의 유동으로 인하여 완전혼합되므로 상체류량은 식 (2)로 쓸 수 있다.

$$\epsilon_g + \epsilon_{sl} = 1 \quad (2)$$

또한 현탁기포탐에서 기체체류량은 식 (3)으로 정의되므로, 이는 일정한 직경을

$$\epsilon_g = \frac{H_{gs1} - H_{sl}}{H_{gs1}} \quad (3)$$

가지는 column 속에서 단위부피에 대한 중량, 즉 밀도의 차로써 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_g = \frac{\rho_{sl} - \rho_{gs1}}{\rho_{sl}} \quad (4)$$

따라서 기체체류량을 측정하기 위하여 현탁기포탑의 하부 압력 측정점과 일정한 거리에 위치한 상부 압력측정점에서 나타내는 차압을 측정하여 식 (5)와 같이 연속적으로 기체체류량을 정확히 측정할 수 있다.

$$\epsilon_g = 1 - \frac{\Delta P_{gst}}{\Delta P_{st}} \quad (5)$$

2-3-2. 용량물질 전달계수의 측정

기포탑에서 용량물질 전달계수의 측정을 위하여 Deckwer 등[12]은 기상과 액상으로 연속 조작하며 촉방향 분산 모델을 이용하여 기포탑 내부에서 일어나는 물질전달과 촉방향 분산계수를 구하였으며 Kataoka 등[7]과 Nakao 등[8]은 반회분식 기포탑에서 액상이 완전혼합이라고 가정하여 용량물질 전달계수를 구하였다. 본 연구에서 사용한 실험장치는 유사2상의 반회분식이므로 후자들[7, 8]이 사용한 방법을 사용하였다. 본 system에서도 아래와 같은 가정

(1) 기상에서의 물질 전달 저항은 액상에서의 물질 전달 저항에 비하여 무시할만큼 작다.

(2) 기상과 액상의 흐름은 정상상태에 있다.

(3) 액막(liquid film)에서의 물질 전달 저항이 유효 단계이다.

(4) 기체의 용해도는 Henry의 법칙을 따른다.

을 하고 두가지 흐름 model, 즉 (A); 기상과 액상이 각각 완전혼합상인 model과 (B); 기상은 plug flow 이고 액상이 완전혼합상인 model로서 분리하여 각각의 결과식을 구할 수 있다. 이 식을 간략히 하기 위하여 증류수를 이용한 기포탑에서 얻을 수 있는 최대측정범위[20], 즉 $k_L \cdot a / U_g$ 0.012-0.0055 cm^{-1} 와 20°C에서 산소의 Henry의 상수 $8.35 \times 10^{-4} \text{ mole/l} \cdot \text{atm}$ 및 기포탑의 높이가 100 cm 미만일 경우에 대하여 이를 대입하여 보면 각 model의 결과식들은 5% 미만의 오차 범위내에서 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\ln \frac{C^* - C_0}{C^* - C} = - \frac{k_L \cdot a}{1 - \epsilon_g} \cdot t \quad (6)$$

따라서 용량물질 전달계수를 구하기 위하여 용존산소의 농도를 시간간격을 두고 연속측정하므로써 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\ln \frac{C^* - C_f}{C^* - C_i} = - \frac{k_L \cdot a}{1 - \epsilon_g} (t_f - t_i) \quad (7)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 기체체류량

알칼리농도 및 이온강도는 이가철이온의 화학반응속

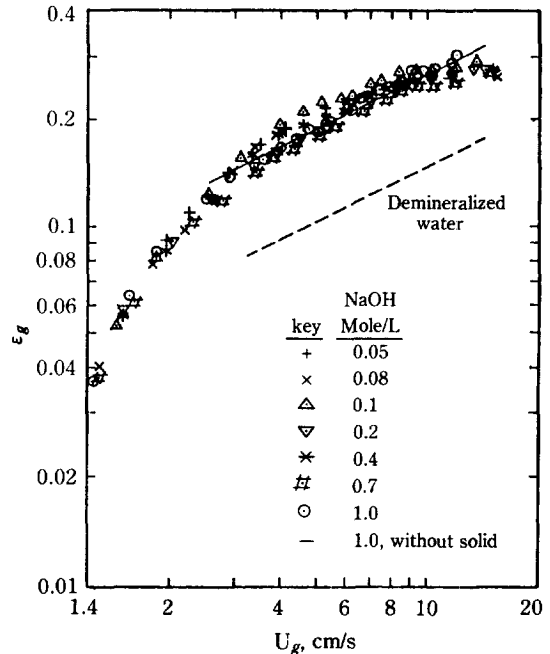


Fig. 6. Gas holdup relation to alkaline concentration in suspension of Goethite (Ionic strength 1.0, solid wt % 0.75).

도에 영향[17]을 주고 있으나 물질전달에 중요한 기체체류량에도 큰 영향[19-21]을 주고 있다. 본 실험에서 구하고자 하는 산소의 물리적 용량물질 전달은 기체체류량의 변화에 따라 많은 영향을 가져오므로 알칼리농도 변화에 대한 기체체류량의 변화를 조사할 필요가 있다.

Fig. 6은 여러 농도의 알칼리수용액에 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 로 이온강도를 1.0으로 일정하게 한 후 Goethite를 0.75 wt% 현탁시켜 공기의 공압속도에 대한 기체체류량을 측정하여 증류수와 1N-NaOH수용액의 기체체류량과 비교 도시하였다. 이 결과에 의하면 일정한 이온강도에서 기체체류량은 알칼리농도 변화에 무관하였고 증류수와 비교한 바에 의하면 이온강도에 대하여 영향을 받음을 알 수 있다. Lessard 등[9]은 인접한 두 기포간의 기포합체율을 이온강도의 변화와 혹은 물과의 상대점도변화로서 실험하여 그림으로 나타내었다. 이 결과에 의하면 이온강도가 0.18-0.2범위에서 두 기포의 합체율이 100%에서 20% 이하로 급격히 떨어지고 0.8인 곳에서 5%부근을 보이고 있으므로 이온강도가 1.0인 본 현탁수용액에서는 5%내외로 예상된다. 따라서 본 기포탑내의 기포합체율이 이온강도의 영향으로 인하여 증류수를 사용한 기포합체율보다 상당히 낮으므로 기체체류량의 증가를 가져온 것으로 보인다.

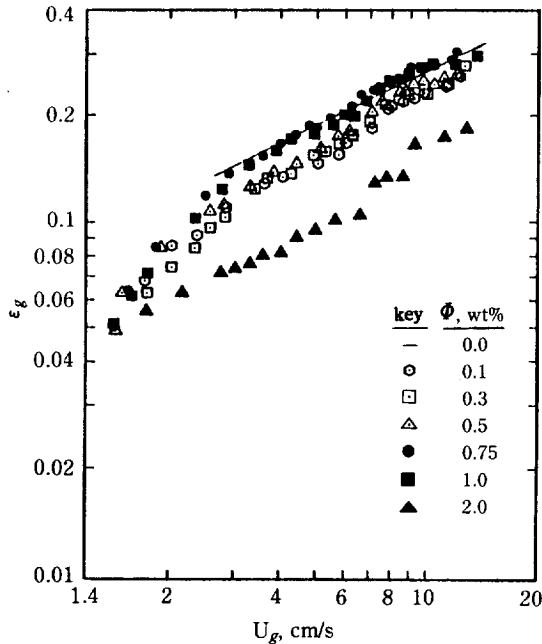


Fig. 7. Gas holdup vs. superficial gas velocity at solid concentration in 1N-NaOH solution.

Fig. 7에 1N-NaOH수용액에 현탁시킨 고체의 농도 변화에 따른 기체체류량을 도식한 것이다. Bubble flow 영역 ($U_g < 3$ cm/sec)에서의 기체체류량은 고체농도변화에 대한 영향이 없지만 transition 영역 ($U_g > 3$ cm/sec) 이상에서 고체가 현탁되지 않은 경우보다 줄어들고 있음을 보이고 있다. 특히, 고체농도를 0.1 wt% 정도 소량 투입하였을 때 기체체류량은 현저히 저하되었고 고체량을 계속 증가시켰을 때 기체체류량은 1N-NaOH수용액의 경우보다 더 증가되지 않았다. 1N-NaOH수용액에 고체를 소량 투입 (0.1 wt%) 했을 때 일어나는 기체체류량의 급격한 감소현상은 전해질용액속의 기포표면에 형성된 높은 전하밀도가 작은 고체입자들에 의하여 산란되고 이로 인하여 기포합체율을 증가시켜 일어난다. 그러나 고체를 0.75 wt%까지 투입시켰을 경우, 일시적인 기체체류량의 증가는 고체의 투입에 의하여 기포주위의 전하를 산란시키기 보다는 점도의 영향을 더 많이 받아 일어난 현상으로 보여진다. Lessard 등[9]의 전하와 점도의 복합효과(a charge and viscosity combination effect)의 설명중 기포합체율은 위에서 설명한 이온강도 뿐만 아니라 점도에도 상당한 영향이 있음을 나타내었다. 즉 용액의 물에 대한 상대점도가 1.015-1.03부근에서 기포의 합체율이 10% 미만으로 떨어지고 있어 점도가 증가하면 기체체

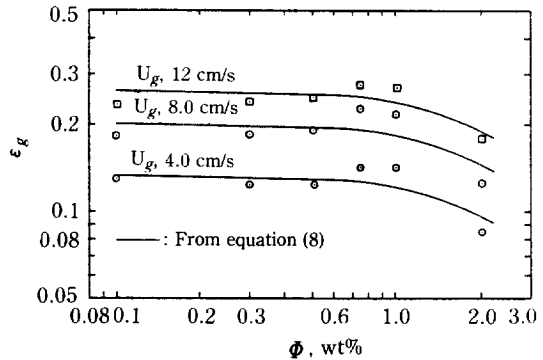


Fig. 8. Gas holdup vs. solid concentration.

류량도 증가할 수 있음을 시사하고 있다. 본 실험에서도 고체를 0.75 wt%까지 현탁시킬 경우 점도는 완만히 상승되어 Lessard의 전하와 점도의 복합효과중 점도에 기인한 효과로서 기체체류량을 증가시킨 것으로 보인다. 그러나 고체농도를 0.75 wt% 이상 증가시켰을 때 현탁액의 점도는 급격한 상승(Fig. 5 참조)을 나타내는데도 불구하고 기체체류량은 오히려 떨어지고 있으므로 Lessard의 상기효과를 확대해석하기 어렵다. 일반적으로 기포탐내 용액의 점도가 커지면 합체(coalescence)된 기포는 분열(breakage)이 억제되어 기포경의 증가를 가져와 기체체류량이 줄어드는 현상으로 설명할 수 있으나 그 정확한 한계를 본 실험결과로서 수식으로 나타낼 수 없었다.

Fig. 8은 Fig. 7의 결과를 고체의 농도에 따라 각각의 유속에서 기체체류량을 나타낸 것으로 0.75 wt%부근에서 기체체류량은 일시적인 증가를 보이고 있다. 이러한 현상은 앞서 설명한 바와 같이 기체체류량에 대한 실험식을 도출하기 위하여 Lessard의 전하와 점도의 복합효과를 무시하고 기체의 유속과 점도의 영향만으로 나타낸다면 Deckwer 등[12]의 실험 model식인 (8) 식으로 표현할 수 있다. 여기서 현탁기포탐내부의 점도를 구하기 위하여 기포의 상승작용에 따라 용액이 받는 shear rate(r)는 Nishikawa 등[13]의 실험식을 이용하고 고체의 농도에 대한 점성계수인 K 와 n 값을 Fig. 5에서 찾아 Ostwald-de Waele의 power law로서 계산하였다. 기체체류량에 대한 유속 및 점도의 상관관계를 구하기 위하여 본 실험에서 얻어진 결과를 이용하여 최소자승법으로서 각각의 상수를 구하여 (8)식으로

$$\epsilon_g = 0.0321 U_g^{0.611} \eta_{eff}^{-0.0896} \quad (8)$$

$$\text{단, } \eta_{eff} = K \cdot (50 U_g)^{n-1}$$

나타내었다. 이 식에 대한 기체체류량의 표준편차는

0.026으로 고체농도가 2 wt% 미만인 곳에서 잘 일치한다.

3-2. 용량물질 전달계수

삼상유동층에서 고체입자의 존재는 기포의 크기와 형태 및 속도에 영향을 주어 물질전달을 촉진한다. 그러나 현탁기포탑에서 미세고체의 유동특성이 물질 전달에 미치는 영향에 대하여 일반적으로 확립된 학설은 없다. Joosten 등[10]은 53-205 μm 크기의 glass bead나 sugar 및 polypropylene을 사용한 현탁용액에서 solid 농도가 20 V/V% 정도까지 용량물질 전달은 변화가 없다가 그 이후 고체농도가 높아질수록 용량물질 전달계수가 급격히 감소함을 보였으며, Ledakowiz 등[11]도 32-200 μm 크기의 Al_2O_3 를 현탁시킨 기포탑에서 10 V/V% 근처에서 일시적인 용량물질 전달의 상승현상을 보이다 그 후 급격히 감소함을 보고하였다.

Fig. 9는 1N-NaOH수용액에 G  ethite를 여러 농도로 현탁시켜 용량물질 전달계수를 공기유속에 대하여

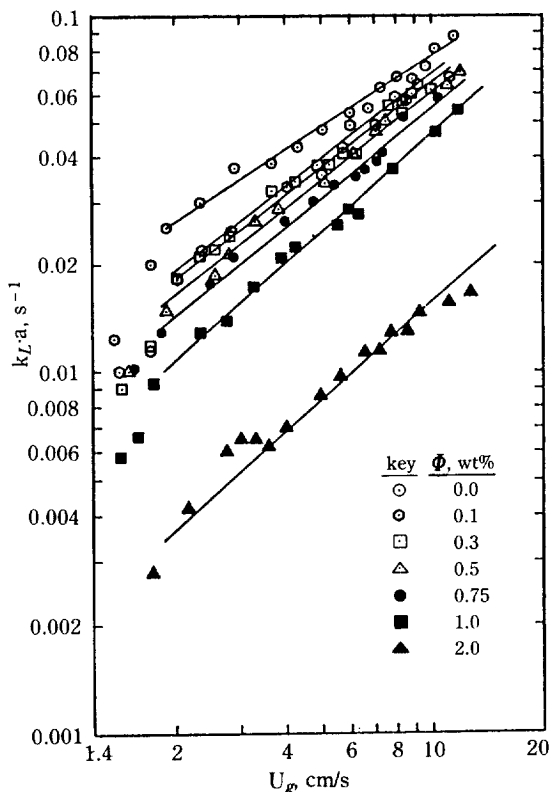


Fig. 9. Volumetric mass transfer coefficient vs. superficial gas velocity at solid concentration in 1N-NaOH solution.

측정한 결과이다. 그림의 결과와 같이 용량물질 전달계수는 고체가 현탁되지 않았을 때보다 소량 현탁된 경우 큰 감소를 보인 다음 현탁고체의 양이 증가될수록 용량물질 전달계수는 Fig. 10과 같이 완만히 감소하는 경향이 있으나 0.75 wt% 이상일 경우 그 감소 추세는 더욱 급격하였다. 이와같은 현상은 Joosten 등[10]의 연구 결과와 잘 일치하였으나 초기 미량의 고체농도에 대한 실험결과와는 서로 상반된 결과를 보인다. 이와같은 현상은 투입된 고체의 크기와 표면물성 등의 영향을 받아 일어난 것으로 생각된다. 특히 고체를 어떤 농도 한계 이상으로 현탁시킬 때 용량물질 전달계수가 급격히 감소하는 이유는 현탁액의 점도가 이 지점을 경계로 하여 급격히 증가하여 액의 원활한 유동현상과 기액계면의 물질 전달을 억제하기 때문에 일어난 것으로 보인다. 점도의 영향을 검토하기 위하여 본 연구에서 행한 현탁 용액과 유사한 Pseudo-plastic 용액으로서 기포탑내의 점도변화에 대하여 용량물질 전달계수를 구한 Deckwer 등[12, 14]의 (9)식을 이용하여 본 실험결과로서 각각의 상수를 구하고 이 식에 의한 계산결과와 실험결과를 비교하여 보았다. 식 (9)는 일반적으로 기포탑내의 액상의 점도가 물질 전달을 감소시킨다는 명제하에 나타낸 식으로 상수 a_3 는 음의 값을 가진다.

$$k_L \cdot a = a_1 U_g^{a_2} \eta_{eff}^{a_3} \quad (9)$$

Fig. 11은 본 실험에서 구하여진 용량물질 전달계수와 점도(effective viscosity) 및 기체유속의 함수로서 표현되는 식 (9)에서 보인 각각의 상수를 최소자승법에

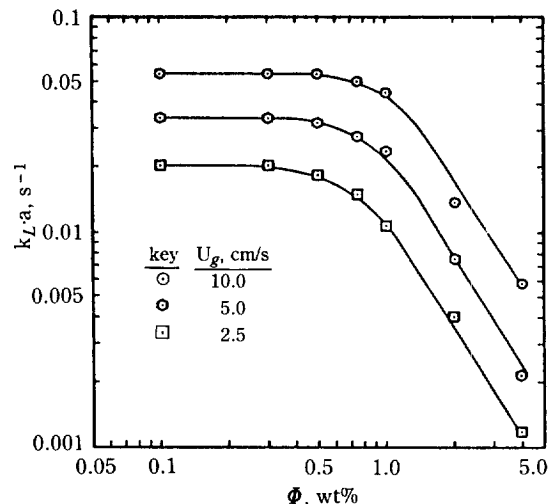


Fig. 10. Effect of solid concentration on volumetric mass transfer coefficient in 1N-NaOH solution.

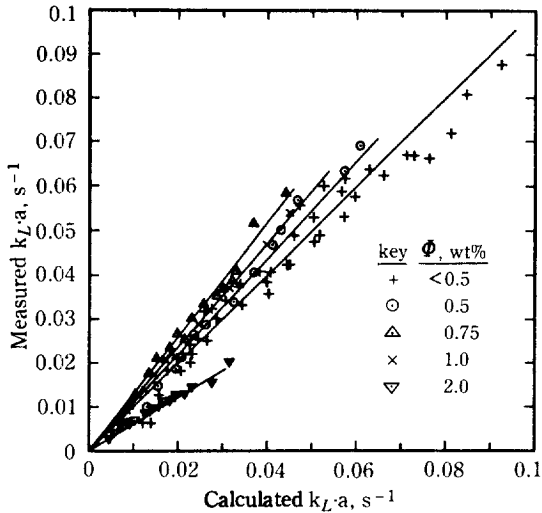


Fig. 11. Comparison of measured $k_L \cdot a$ data with those calculated from equation (9).

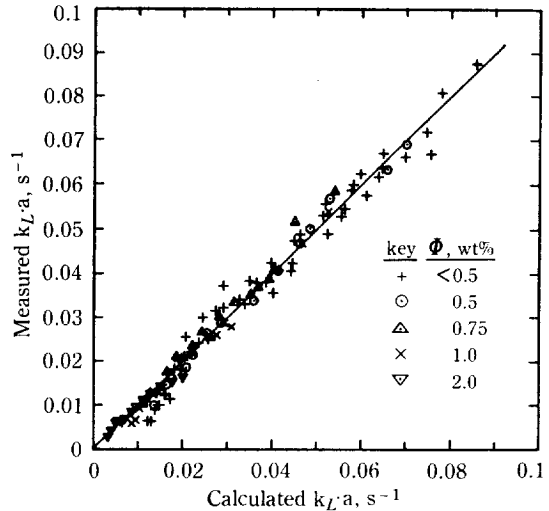


Fig. 12. Comparison of measured $k_L \cdot a$ data with those calculated from equation (11).

Table 4. Calculated parameters of equation (11) from experimental data

Parameters	Value	Standard Deviation
a_1	0.0031	0.000365
a_2	0.787	0.0160
a_3	-0.185	0.0186
a_4	0.165	0.0505
a_5	3.329	0.347

의하여 구하고 이 실험식으로 계산된 값과 실험치를 비교 도시한 것이다. 이 그림에 의하면 현탁농도가 2 wt% 이하에서 실험식과의 오차는 30% 이하이나 45° 선주위에서 각각의 현탁농도에 대하여 일직선을 가지고 나열되어 있으므로 현탁고체의 농도에 대하여 어떤 함수관계가 있음을 알 수 있고 이상의 결과로서 점도의 영향에 대하여 다시 검토해 볼 필요가 있다. Nakanoh 등[22]은 2상기포탑에서 점탄성(viscoelastic) 수용액과 비점탄성(inviscoelastic) 수용액의 용량물질 전달 계수의 비를 식 (10)과 같이 무차원군으로 나타내고

$$\frac{(k_L \cdot a)_{IE}}{(k_L \cdot a)_{VE}} = 1 + C' N_{ve}^m \quad (10)$$

점탄성 수용액의 용량물질 전달계수는 비점탄성 수용액보다 항상 작으며 그 비는 Debora number와 함수관계가 있음을 발표하였다. 그러나 Debora number를 이용하려면 현탁액의 이완시간 측정[18]과 기포탑 내부를 상승하는 기포의 평균경과 평균유속을 측정하거나

계산하여야 하는 불편이 따른다. 본 연구에서 사용된 현탁수용액이 점탄성 성질을 가지고 있다고 가정한다면 이완시간(relaxation time or characteristic material time)은 현탁된 고체의 농도와 형상 등의 함수관계에 있을 것이다. 따라서 Debora number가 고체의 농도와 비례적인 함수관계를 가진다고 예측하여 Debora number 대신 고체농도를 대입하여 식 (9)와 (10)에서 식 (11)을 만들 수 있다.

$$k_L \cdot a = a_1 U_g^{a_2} \eta_{eff}^{a_3} / (1 + a_4 \Phi^{a_5}) \quad (11)$$

본 연구의 실험결과로부터 식 (11)의 상수를 최소자승법으로 구하여 나타내면 Table 4와 같고 이 상수를 식 (11)에 대입하여 계산된 값과 측정된 값을 비교 도시하면 Fig. 12와 같다. 이 결과 발생한 오차는 10% 이하로서 (11)의 model 식과 잘 일치하였다. 따라서 Göethite를 현탁기포탑의 용량물질 전달계수는 기상의 공탐속도와 점도 및 고체의 현탁농도의 함수로서 잘 나타낼 수 있었다.

4. 결 론

1. 전해질 용액인 1N-NaOH수용액에 장축의 평균 길이가 $0.27 \mu\text{m}$ 이고 표준편차가 $0.07 \mu\text{m}$ 인 정규분포를 갖는 침상입자인 Göethite를 현탁시킨 현탁용액의 점도는 Ostwald-de Waele의 power law에 잘 적용할 수 있었다.

2. 현탁기포탑에서 상기 1의 현탁수용액을 사용하여 기체유속과 점도 및 고체농도의 함수로서 표현한 기체체류량과 용량물질 전달계수는 식 (8)과 (11)로 나타낼 수 있었다.

NOMENCLATURE

a_1, a_2, \dots, a_5	: Parameters
a	: Specific interfacial area [l/cm]
c	: Concentration [mol/l]
C'	: Constant from equation (10)
C_i	: Concentration of each ion [mol/l]
\bar{d}_{vs}	: Sauter mean diameter [cm]
k_L	: Gas-liquid mass transfer coefficient [cm/sec]
K	: Fluid consistency index [$Pa \cdot sec^n$]
$k_L \cdot a$: Volumetric mass transfer coefficient [l/sec]
$(k_L \cdot a)_{IE}$: Volumetric mass transfer coefficient in inviscioelastic solution [l/sec]
$(k_L \cdot a)_{VE}$: Volumetric mass transfer coefficient in viscoelastic solution [l/sec]
H	: Height of liquid [cm]
I	: Ionic strength [—]
\bar{L}_p	: Mean longitudinal particle size [μm]
m	: Exponent from equation (10)
n	: Flow behavior index [—]
N_{De}	: Debora number, $U_B \lambda / \bar{d}_{vs}$
ΔP	: Differential pressure [$mm H_2O$]
$\dot{\gamma}$: Shear rate [l/sec]
t	: Time [sec]
U_B	: Bubble rising velocity [cm/sec]
U_g	: Superficial gas velocity [cm/sec]
$V/V\%$: Solid volume per liquid volume percent
Z_i	: Valance of the ion [—]

Greek Letters

ϵ	: Hold up [—]
$\bar{\eta}$: Mean viscosity, non-Newtonian fluid [$mPa \cdot sec$]
η_{eff}	: Effective viscosity [$mPa \cdot sec$]
λ	: Relaxation time [sec]
σ	: Standard deviation of longitudinal particle size distribution
τ	: Shear stress [mPa]
ρ	: Density [g/cm]
Φ	: Solid concentration [$wt\%$]

Subscripts

f	: Final
-----	---------

i	: Initial
l	: Liquid phase
s	: Solid phase
g	: Gas phase

Superscripts

o	: Without solid
$*$: Interface

REFERENCES

- Muroyama, K.: *Chem. Eng. J. Japan*, Dec., **26**, 26(1984).
- Deckwer, W.-D., Louisi, Y., Zaidi, A., and Ralek, M.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **19**, 699(1980).
- Godbole, S.P., Schumpe, A., Shah, Y.T., and Carr, N.L.: *AIChE Journal*, **30**, 213(1984).
- Capuder, E. and Koloini, T.: *Chem. Eng. Res. Des.*, **62**, 255 (1984).
- Black, W., et al.: "Dispersion of Powders in Liquids", Applied Science Publishers LTD., London (1985).
- 이정민, 이철호, 이학성, 고재천, 류병환: "알칼리수용액중에서 이가철의 공기 산화에 관한 연구", 과학기술처, 기본연구과제, (1986).
- Kataoka, H. and Takeuchi, H., et al.: *J. of Chem. Eng. of Japan*, **12**, 105(1979).
- Nakao, K., Takeuchi, H., Kataoka, H., Kaji, H., Otake, T., and Miyauchi, T.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **22**, 577(1983).
- Lessard, R.R. and Zieminski, S.A.: *Ind. Eng. Fundam.*, **10**, 260(1971).
- Joosten, G.E.H., Schilder, J.G.M., and Janssen, J.J.: *Chem. Eng. Sci.*, **32**, 563(1977).
- Ledakowicz, S., Kokuun, R., Brehm, A., and Deckwer, W.-D.: *Chem.-Ing.-Tech.*, **8**, 648(1983).
- Deckwer, W.-D. and Serpemen, Y.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **21**, 231(1982).
- Nishikawa, M., Kato, H., and Hashimoto, K.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **16**, 133(1977).
- Quicker, G., Schumpe, A., and Deckwer, W.-D.: *Chem. Eng. Sci.*, **39**, 179(1984).
- Kiyama, M.: *Bull. of the Chemical Society of Japan*, **47**, 1646(1974).
- 木山雅雄: "微粉末の湿式法による製造技術", Ceramic Data Book 137(1983).
- Koh, J.C., Lee, J.M., and Rhee, B.S.: *HWAHAK KONGHAK*, **25**, 435(1987).
- Prest, W.M. Jr. and Poter, R.S.: *J. of Applied Polymer Science*, **14**, 2697(1970).

19. Lee, C.H.: Ph.D. Dissertation, Kyoto Univ., Kyoto, Japan (1985).
20. Akita, K. and Yoshida, F.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **12**, 76(1973).
21. Deckwer, W.-D., Burckhart, R., and Zoll, G.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 2177(1974).
22. Nakanoh, M. and Yoshida, F.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **19**, 190(1980).