

非뉴턴 流體內에서 氣泡의 物質傳達

김 영 태 · 김 기 창
농업 화학과

〈要 旨〉

非뉴턴 流體內에서 氣泡의 物質傳達係數와 抵抗係數를 測定하기 위하여 CMC水溶液에 대한 CO₂가스의 吸收實驗을 행하였다. 液塔內를 上昇하는 CO₂ 氣泡의 上昇速度와 부피變化를 高速 촬영기로 촬영하고, 이로부터 CO₂氣泡의 物質傳達係數 및 抵抗係數를 計算하였다. CO₂ 氣泡의 物質傳達は 초기의 振動상태에서 氣泡의 形態가 變化하는 경우에 활발해 짐을 알 수 있었으며, 이러한 경향은 流體의 성질이 뉴턴流體에 가까울 수록 현저한 경향을 나타 냈다.

Mass Transfer from Gas Bubbles in non-Newtonian fluids

Kim Young Tai · Kim Ki Chang
Dept. of Industrial Chemistry

Abstract

Mass transfer coefficients between the gas phase and the liquid phase, and the drag force coefficients of bubbles in non-Newtonian fluids were measured through the absorption of CO₂ gas bubbles in the CMC solution.

The rising rates, size changes of CO₂ gas bubbles in the CMC solution column were recorded by using the high speed photography technique, and from these results instantaneous mass transfer coefficients and drag force coefficients were evaluated.

Mass transfer coefficients decreased rapidly with time during the early stage and slowly during the later stage of the bubble life.

It was found that tendencies of mass transfer were increased when rising bubbles oscillated and its shape was changed.

The calculated drag force coefficients turned out to be in good agreements with the relations of Sherwood number and Peclet number, applied to power-law model.

I. 緒 論

液相內에서 固體粒子, 氣泡 및 液滴 등의 運動現狀에 대하여는 많은 研究者들의 관심의 끌여 왔다. ^{1,2,3)} 특히 이들 중 液相內에서 氣泡의 發泡操作 및 移動操作은 공업적으로 자주 이용 되고 있을 뿐 아니라, 非뉴턴 流體內에서의 氣泡 運動現狀은 生化學工程에서의 發酵과정, 또는 폐수의 生化學的

처리과정 등에도 應用 될 수 있다.

뉴턴 流體內에서의 固體粒子, 氣泡 및 液滴 등의 運動現狀에 대하여는 많은 研究가 보고 되어 있으나 非뉴턴 流體에 대한 研究論文은 드문 편이며, 60年代에 와서 몇편의 理論的 研究나 實驗的 研究結果가 보고 된 바 있다. ^{4,5,6)}

一般적으로 非뉴턴 流體內에서 物質傳達을 수반하는 氣泡의 運動現狀에서는 우선 氣泡運動에 대한 抵抗力을 理論적으로 해석하기가 난해하며, 또한 抵

抗力에 따라 運動하는 氣泡의 形態가 變化하여 이에 따라 物質傳達速度가 달라지므로 이에 대한 해석도 복잡한 경향을 띄고 있다.

非뉴톤 流體內에서 氣泡 運動現狀에 대하여 발표된 研究내용을 살펴 보면 다음과 같다.

Barnett⁷⁾ 등은 非뉴톤 流體의 性質을 power-law 모델과 Ellis모델에 적용시켜 氣泡의 形態가 物質傳達 및 抵抗抗力에 미치는 영향을 中心으로 考察하였으며, Astarita⁸⁾ 등은 氣泡의 上昇速度, 또는 氣泡 形態變化등에 따른 抵抗係數의 變化를 考察하였다.

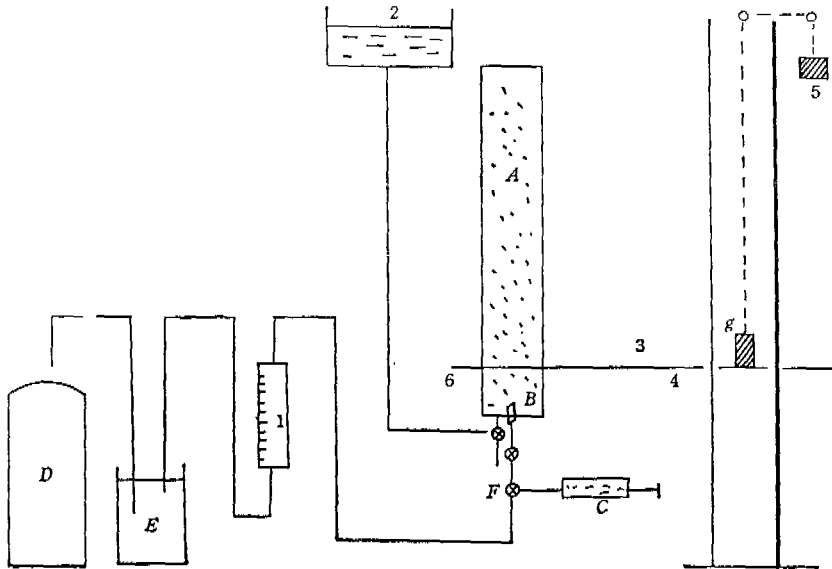
한편 Hirose⁹⁾ 등은 power-law 모델로부터 氣泡의 運動이 creeping flow에 해당되는 경우에서 抵抗係數에 대한 近似解를 얻었으며, Slattery¹⁰⁾ 등은 variational法에 의하여 抵抗係數에 대한 近似解를 얻었다.

本 研究에서는 위와 같은 一連의 研究로써 우선 氣泡의 크기 및 形態가 物質傳達係數 및 抵抗係數등에 미치는 영향을 實驗의 事實로부터 考察하고자 하였다. 實驗에 使用된 非뉴톤 流體로써는 power-law 모델에 비교적 잘 適用되리라 예측되는 sodium carboxyl methyl cellulose (CMC) 水溶液을 택하였고, 氣泡의 上昇速度는 creeping flow에 해당되는 범위

에 限하였으며, 吸收가스로는 CO₂ 가스를 使用하였다.

II. 實驗裝置 및 方法

液相內에서 氣泡 거동에 關한 實驗方法으로는 研究方向에 따라 寫眞攝影法, dilatometric法, 壓力降下測定法 등이 있으나,^{9,10)} 本 實驗에서는 寫眞攝影法을 택하였다. 本 實驗을 위하여 제작한 裝置의 概略圖는 Fig. 1과 같다. ④는 經제된 液相을 유지하기 위한 液塔으로써 빛이 통과하는 앞, 뒷면은 투명 아크릴판으로, 그외 면은 일미늄판으로 되어 있는 직육면체(10×10×130cm)이다. ⑤는 單一氣泡을 生成하기 위한 nozzle이며 ③은 一定량의 氣體를 捕集하기 위한 syringe이다. 實驗方法은 우선 ④의 가스뱅크를 나온 CO₂ 가스는 ⑤에서 水分이 제거되며 ③의 syringe 속에 一定량의 CO₂ 가스가 捕集된다. 다음 三方cork ⑥를 切換하고 syringe의 피스톤을 눌러 ⑤의 nozzle로부터 單一氣泡이 生成하도록 한다. 生成된 氣泡이 nozzle로부터 上昇하는 과정은 ③의 高速攝影機로 撮影하므로써 氣泡의 形態變化, 크기變化, 位置變化등은 測定한다.



- | | |
|----------------------|----------------------|
| 1 : Rotameter | 4 : Movable Platform |
| 2 : Liquid Reservoir | 5 : Weight |
| 3 : Light | 6 : Stop watch |

Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

한편 CMC水溶液의 濃度는 0.433, 0.612wt%로 각각의 경우에 대하여 實驗하였으니 氣泡의 初期直徑은 變化시키기 위하여 nozzle의 直徑을 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.4, 0.6cm로 바꾸어 가면서 實驗을 行하였다.

III. 實驗結果 및 考察

1. 物性定數의 計算

CMC 水溶液의 非뉴턴性을 알기 위하여 stoner 粘度計로부터 shear rate와 shear stress와의 關係를 살펴 보았다. shear rate와 shear stress는 Metzner¹¹⁾ 方法에 의하여 計算하였으며, 이 둘 關係를 power-law 모델의 關係식은 다음식에 의하여

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

플롯트한 結果 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 power-law 모델에 잘 一致함을 알 수 있었다. Fig. 2에서 직선

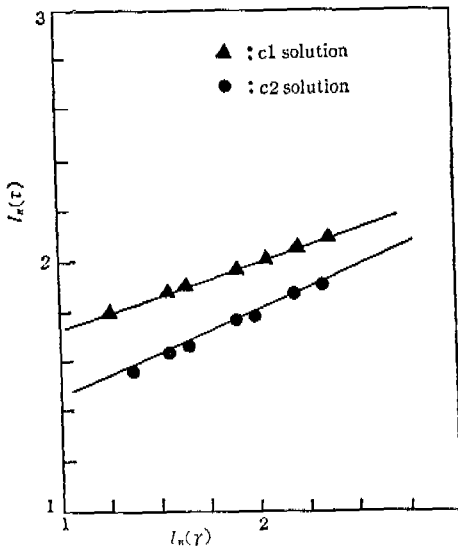


Fig. 2 Shear stress vs. Shear rate

의 기울기로부터 n 값을 切片값에서부터 k 값을 얻었다.

한편 CMC 水溶液內에서 CO_2 가스의 diffusivity (D_L)값은 Wilke¹²⁾의 理論式으로부터 구하였다. CMC水溶液 및 CO_2 가스의 物性値는 表 1과 같다.

2. 物質傳達係數

氣·液 接觸 物質傳達에서 液相境界膜에 기준한 物

Table 1. Properties of CMC solution

Solution	C1	C2
wt %	0.433	0.612
Density(g/cm ³)	1.009	1.013
$D_L \times 10^6$ (cm ² /sec)	1.265	1.176
Viscosity(c. p.)	8.48	10.26
n (dimensionless)	0.761	0.702
k (dimensionless)	2.293	4.126

質傳達速度는

$$\frac{dN}{dt} = k_L A (C^* - C_L) \quad (2)$$

라 表示되니, 이때 k_L 은 瞬間 物質傳達係數(instantaneous mass transfer coeff.)가 된다. 이때 다음과 같은 假定, 즉 吸收가스는 理想가스이며, 液은 非입용성이고, 系의 溫度는 일정하며, 氣·液 吸收 現狀에서 平衡關係는 Henry's law에 만족 한다고 하면 物質傳達係數 k_L 은 다음과 같이 表示된다.⁹⁾

$$k_L = -\frac{1}{HRT} \left[\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} + \frac{V}{A(Z+Z_b)} \frac{dZ}{dt} \right] \quad (3)$$

이 때 氣泡의 부피 V 와 表面積 A 는 氣泡을 橢圓形이라 간주 하고

$$V = \frac{4}{3} \pi D_A^2 D_B \quad (4)$$

$$A = \pi D_A^2 + \frac{\pi}{6} C_B^2 \left(\frac{1+\epsilon}{1-\epsilon} \right) \quad (5)$$

$$\epsilon = \left[\frac{D_A^2 - D_B^2}{D_A^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

라 定義하였다.¹³⁾

實驗에서 測定된 氣泡의 부피變化율 $\frac{dV}{dt}$ 와 位置變化율 $\frac{dZ}{dt}$ 로부터 式 ③에 의하여 瞬間 物質傳達係數를 計算할 수 있었다. 한편 Fig. 3, 4는 實驗에서 測定된 氣泡의 부피를 時間에 따라서 플롯트한 것이다. 이들 그림에서 보면 初期에는 氣泡의 부피가 급격히 감소하다 時間이 경과하면서 서서히 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이와 같은 現狀은 氣泡이 nozzle로부터 떠나 上昇하면서 처음에는 激한 振動을 하다 차차 時間이 경과하면서 安定狀態에 도달하는 것으로 보아 振動이 일어 날때 物質傳達이 빨라져 다나는 現狀으로 생각된다. 이런 現狀을 物質傳達係數로 考察하기 위하여 式③에 의하여 計算된 값을 Fig. 5, 6과 같이 時間에 따라 플롯트하였다. 이 그림에서도 初期狀態 즉 振動이 일어 날

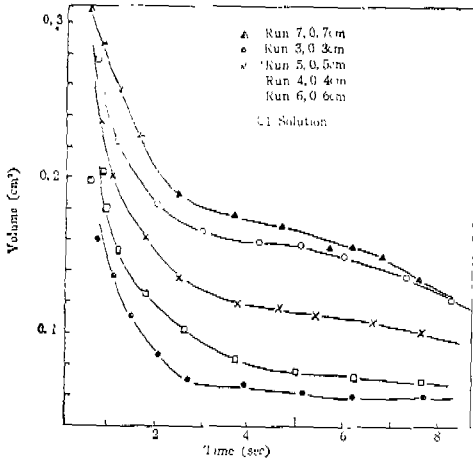


Fig. 3 Bubble Volume vs. Time

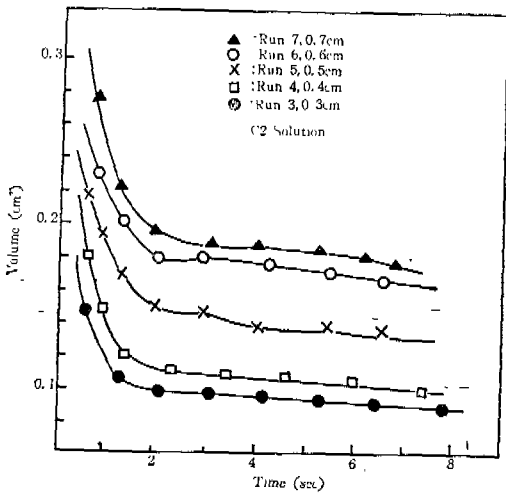


Fig. 4 Bubble Volume vs. Time

때는 물질 전달 계수가 급격히 변화하다. 기포의 운동 안정 상태에 도달 되면서 점차 감소율이 줄어드는 경향을 볼 수 있는데, 이는 앞서의 부피 변화에서의 내용과 일치하고 있다. 이와 같은 경향들은 뉴턴 유체에 대한 Deindoerfer¹⁴⁾, Calderbank¹⁵⁾ 등의 연구 결과와도 일치한다. 한편 비뉴턴 유체의 농도가 큰 수溶液(0.612wt%)에서는 0.433wt의 수溶液에서 보다도 더 짧은 시간 내에 물질 전달 계수가 급격히 감소하는 것으로 보아, 농도가 클수록 초기 振動 시간이 짧아져 빠른 시간 내에 안정 상태에 도달되는 것으로 생각 된다.

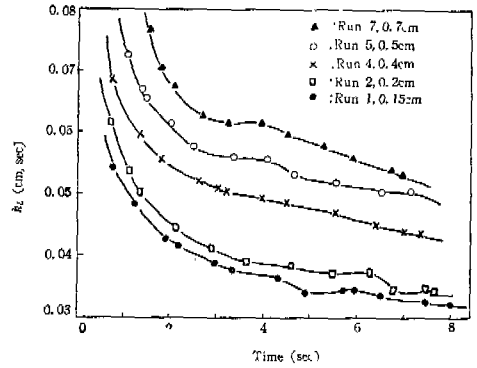


Fig. 5 Instantaneous Mass Transfer Coefficient vs. Time, C1 solution

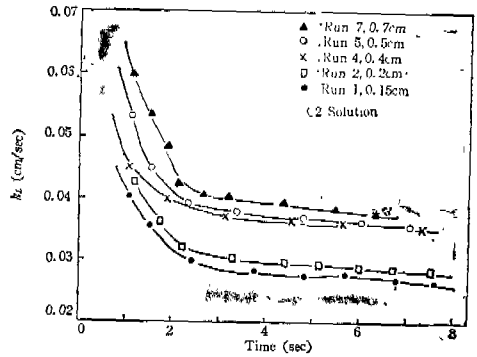


Fig. 6 Instantaneous Mass Transfer Coefficient vs. Time, C2 solution

한편 Fig. 7, 8에서는 물질 전달 계수와 기포 직徑과의 관계를 나타 내었다. 이들 그림에서 보던 기포 직徑이 감소함에 따라 물질 전달 계수가 감소함을 알 수 있으며 또한 곡선상에 極大點이 존재함을 볼 수 있는데 이는 다음과 같이 설명된다. 기포의 초기直

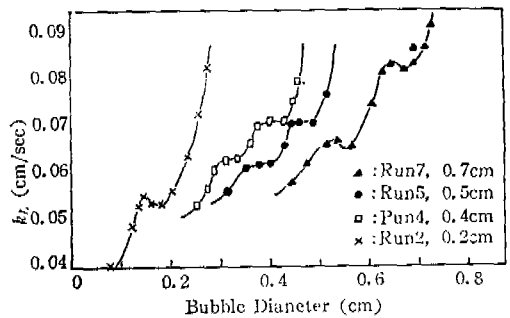


Fig. 7 Instantaneous Mass Transfer Coefficient vs. Bubble Diameter, C1 solution

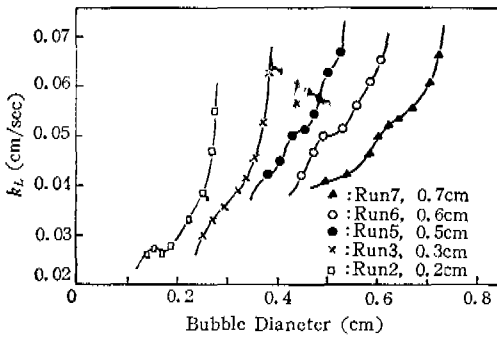


Fig. 8 Instantaneous Mass Transfer Coefficient vs. Bubble Diameter, C2 solution

徑이 비교적 큰 경우(약 0.4cm 이상)에서, 처음에 나타난 極大點은 氣泡形態가 초기의 “cap”形에서 “ellipsoid”形으로 變化함에 나타나는 경향이며, 그 후 氣泡직경이 작아져서 나타나는 두번째 極大點은 “ellipsoid”形에서 球形으로 變化함에 나타나는 경향으로 생각한다.

이런 경향으로 미루워 보아, 氣泡의 形態가 變化할때 物質傳達이 활발해 질것을 알 수 있었다. 또한 비교적 큰 氣泡直徑이 작은 경우(약 0.4cm 이하)에는, “cap”形에서 “ellipsoid”形으로의 變化에 대한 영향은 별로 나타나지 않은 반면, “ellipsoid”形에서 球形으로 變化할때 物質傳達係數가 약간 증가하는 경향을 볼 수 있었다.

한편 이와 같은 경향들은 Fig. 7, 8에서와 같이 水溶液의 濃도가 커서 非뉴톤의 性質이 볼때는 별로 나타나지 않는 것으로 보아 流體의 性質이 뉴톤流體에 가까울 수록 氣泡形態變化에 따른 物質傳達係

數의 變化 경향이 커지는 것으로 생각 된다.

한편 物質傳達係數로부터 Sherwood No와 Peclet No.와의 關係는 Hirose의 理論式⁸⁾으로부터

$$Sh = 0.65 \left[1 - \frac{4n(n-1)}{2n+1} \right]^{\frac{1}{2}} P_e^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Fig. 9와 같은 結果를 얻었다.

여기서 보던 物質傳達係數에 대한 實驗値는 Hirose의 理論式을 잘 만족하고 있다.

3. 抵抗係數

非뉴톤 流體內에서 氣泡의 運動에 의한 抵抗係數의 理論式을 運動方程式으로부터 解析의으로 얻기 어려우며 理論진개과정에서 적당한 approximation을 하거나 數值解析에 의한 近似解를 얻고 있다.¹⁰⁾

Hirose⁸⁾는 power-law 모델에 적용되는 流體에서 氣泡의 運動이 creeping flow에 해당되는 경우, 뉴톤流體에 approximation하여 抵抗係數에 대한 近似 理論式을 다음과 같이

$$C_D = \frac{16}{N_{Re}'} (2)^{n-1} (3)^{\frac{n-1}{2}} \frac{13+4n-8n^2}{(2n+1)(n+1)} \quad (7)$$

$$N_{Re}' = \frac{(2D_b)^n U_{\infty}^{2-n} \rho}{k} \quad (8)$$

정의 하였다. 한편 實驗結果로부터 氣泡의 抵抗係數는 다음과 같은 關係에서¹⁰⁾

$$C_D = \frac{8}{3} \frac{\rho - \rho_g}{\rho} \frac{g D_b}{U^2} \quad (9)$$

計算할 수 있었다. Fig. 10은 實驗結果로부터 計算된 抵抗係數를 플롯한 것이다.

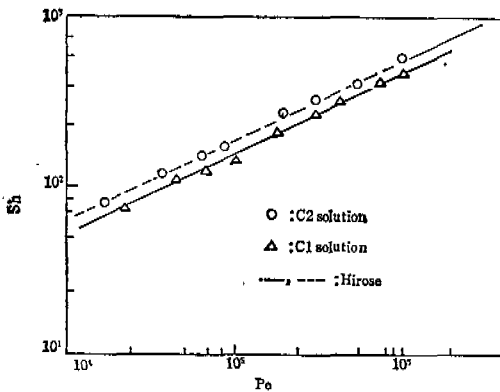


Fig. 9 Sherwood Number vs. Peclet Number

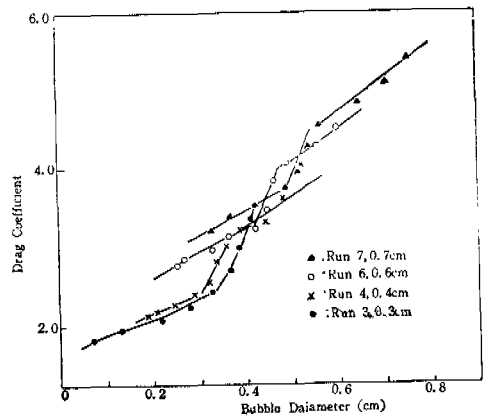


Fig. 10 Drag Coefficient vs. Bubble Diameter, C1 solution

이 그림에서 보던 氣泡의 크기직경이 비교적 큰 경우에서는 氣泡直徑감소에 따른 抵抗係數의 감소율이 두번에 걸쳐 變化함을 알 수 있는데 첫번째 變化 및 두번째 變化 要因은 각각 氣泡形態가 “cap”形에서 ellipsoid形으로 변화하는 과정, “ellipsoid”形에서 球形으로 변화하는 과정에 基因되는 것으로 생각된다. 반면 초기직경이 작은 경우에는 抵抗係數의 감소율 變化가 한번에 걸쳐 인어 나는 것으로 미루어 이는 氣泡形態가 “ellipsoid”形에서 球形으로 變化함에 나타나는 현상으로 생각된다. 이와 같은 사항은 앞시의 氣泡形態에 따른 物質傳達係數의 영향에서 考察된 內容과 一致하고 있다.

한편 實驗結果로부터 計算된 C_D 값과 앞의 理論式 ⑦式과의 比較를 Fig. 11에 나타 냈다. 이 그림에서 보던 抵抗係數 C_D 와 修正레이놀즈 係數 N_{Re}' 의 對數값이 선형관계를 만족하고 있다. 이와 같은 사실은 power-law모델에 따르는 流體에서 氣泡의 運動

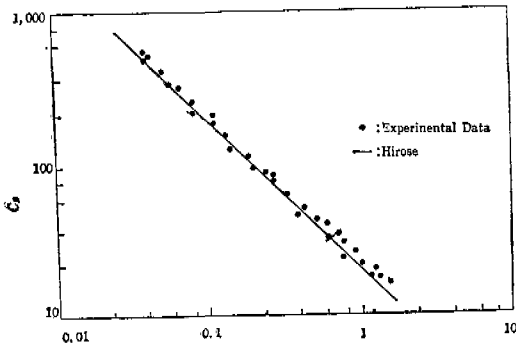


Fig. 11 Drag Coefficient vs. Modified Reynolds Number, C1 solution

이 creeping flow에 해당되는 경우에 나타나는 일관적인 경향이며, 8, 16) 實驗値와 Hirose의 理論値가 잘 一致함을 알 수 있었다.

Ⅳ. 結 論

(1) 非뉴턴 流體內에서 氣泡運動에 따른 物質傳達는 氣泡가 振動을 할때, 氣泡의 形態가 變化함에 활발해지는 것을 알 수 있었으며,

(2) 抵抗係數는 氣泡의 形態가 變化할때 감소되는 것을 알 수 있었다.

(3) 實驗을 행한 條件에서 초기의 氣泡直徑이 약

0.4cm 이상일때는 氣泡의 形態가 “cap”形에서 “ellipsoid”形을 거쳐 球形으로 變化함을 알 수 있었으며, 초기 直徑이 그 以下일 때는 “cap”形에서 ellipsoid形으로의 變化가 抵抗係數 및 物質傳達에 미치는 영향은 적은 것으로 생각 된다.

(4) CMC水溶液은 이 0.1wt% 以下에서는 非이론 性質이 power-law모델에 잘 적용됨을 알 수 있었다.

使用 記號

$\dot{\gamma}$: Shear rate (sec^{-1})

τ : Shear stress (dync/cm^2)

k : Fluid behavior index in power-law model
(-)

n : Fluid consistency in power-law model (-)

k_L : Instantaneous mass transfer coefficient
(cm/sec)

A : Bubble surface area(cm^2)

V : Bubble volume (cm^3)

C^* : Concentration of dissolved gas in equilibrium with gas phase (moles/cc)

C_L : Concentration of dissolved gas in liquid phase (moles/cc)

t : Time (sec)

H : Henry constant

R' : Gas constant

U : Rising rate of Bubble (cm/sec)

Z : Liquid depth from top of liquid column
(cm)

Z_b : Height of Liquid Bed (cm)

D_A : Major radius of Bubble (cm)

D_B : Minor radius of Bubble (cm)

C_D : Drag Coefficient (-)

U_∞ : Terminal velocity of Bubble (cm/sec)

D_h : Hydraulic equivalent diameter of Bubble
(cm)

ρ : Density of liquid (g/cm^3)

ρ_g : Density of gas (g/cm^3)

Sh : Sherwood Number ($2k_L D_b / D_L$)

Pe : Peclet number ($2U_\infty D_b / D_L$)

引用 文 獻

1. R. R. Hughs and E. R. Gilliland, Chem. Eng. Progr., **48**(10), 497(1952)
2. Y. Nakano and Chi Tien, AICHEJ., **14**(1), 145(1968)
3. F. N. Peebles and H. J. Garber, Chem. Eng. Progr. **49**(2), 88(1953)
4. Y. Nakano and Chi Tien, AICHEJ., **16**(4), 569(1970)
5. J. C. Slattery, AIDHEJ., **8**(5), 663(1962)
6. G. Astarita and G. Apugzo, AICHEJ., **11**(5), 815(1965)
7. S. M. Barnett, A. E. Humphrey and M. Litt, AICHEJ., **12**(2), 253(1966)
8. T. Hirose and M. Moo-Yong, The Canadian J. of Chem. Eng., **47**, 265(1969)
9. G. R. Garbarini and Chi Tien, The Candian J. of Chem. Eng., **47**, 35(1969)
10. J. A. Redfield and Houghton, Chem. Eng. Sci. **20**, 13(1965)
11. A. B. Metzner and R. E. Otto, AICHEJ., **3**(1), 3(1957)
12. C. R. Wilke and P. Chang, AICHEJ., **1**, 264(1955)
13. T. D. Taylor and A. J. Acrivos, J. Fluid Mech., **18**, 466(1964)
14. F. H. Deindorefer and A. E. Humphrey, I. E. C., **52**, 755(1961)
15. P. H. Colderbank and A. C. Lochiel, Chem. Eng. Sci., **19**, 485(1964)
16. J. Happel and H. Brenner, Low Reynolds number Hydrodynamics, Printice-Hall (1965)