

## 내부 순환식 기포탑에서의 유체 혼합 특성

박 찬 진

시립 인천전문대학 환경공학과  
(1994년 7월 23일 접수, 1994년 12월 6일 채택)

### The Fluid Mixing Characteristics of Internal Loop Bubble Column

Chan Jin Park

Department of Environmental Engineering, Junior College of Incheon, Incheon, Korea  
(Received 23 July 1994; accepted 6 December 1995)

#### 요 약

본 연구에서는 습식배가스탈황 공정이나 이산화탄소 제거 공정과 같이 유해가스의 화학적 처리과정에서 발생할 수 있는 침전물이 존재하는 고-액 이상류에서의 액상물질 혼합효율을 고찰하기 위하여 내부 순환식기포탑 내에 슬러리 순환류를 유도하고 체류시간분포곡선을 측정하여 유체혼합특성을 고찰하였다. 그 결과 기체유속과 고체입자의 농도가 증가할수록, 그리고 고체입자의 크기에 대해서는 주로 낮은 범위의 기체유속에서 입경이 클수록 기포의 합체현상이 촉진되어 유체혼합시간이 감소하여 혼합효율이 증가하였다. 이러한 경향을 난류등방성 이론과 Bodenstein수를 함수로 하는 식으로 해석한 결과 혼합 특성을 잘 설명할 수 있었다.

**Abstract**—To study the characteristics of mixing of liquid in gas-liquid flow with solid particles which can be applied in the wet FGD process and carbon dioxide wet removal process, Residence Time Distribution curves obtained in the circulating slurry flow were analyzed. Mixing time of liquid was reduced with the increase of superficial gas velocity and concentration of solid particles due to coalescence of bubbles, and it had the same tendency with the size of particles at low gas flow rate. Such tendencies could be well explained by the equation from Kolmogoroff's isotropic turbulence theory with Bodenstein numbers.

#### 1. 서 론

기포탑은 반응기로 주입되는 기포에 의한 액상교반으로 기계적인 마찰이 없고 액상 반응물질의 신속한 이동으로 혼합효과가 매우 우수하며 이에 따라 열전달 및 물질전달속도가 높으므로 주로 대기오염물질의 습식세정공정, 폐수의 생화학적 처리공정 및 석탄액화공정에 널리 이용되어 왔으며[1-3], 앞으로도 많은 활용이 기대된다.

기포는 상승과정에서 액상으로 반응물질을 공급하거

나 제공받는 동시에 액상교반을 촉진시키는 에너지 공급원으로서의 역할을 수행한다. 많은 처리공정이 액상 중 고체물질을 입자형태로 수반하며 이같은 고체입자는 액상혼합특성에 적지 않은 영향을 미치게 된다. 지금까지 기포탑의 혼합효율에 관한 연구는 고점도 액체나 비뉴턴성 액체에 관한 연구가 대부분이며 고체부유물이 존재하는 액상에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 고체물질이 존재하는 액상 혼합특성을 고찰하기 위하여 체류시간분포곡선의 해석에 의한 혼합시간을 측정하고 아울러 상체류량특성을 고

찰하여 유체혼합특성을 구명하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

액상 혼합정도를 특성화할 수 있는 방법으로는 유체 흐름에 따른 축방향확산계수의 측정법과 혼합에 소요되는 혼합시간측정의 2가지 방법이 있다. 본 연구에서는 지난 연구[4]에 이어서 혼합시간 측정에 의한 혼합정도를 측정하고자 하며 여기에서 혼합시간이란 혼합이 개시된 시점에서 유체가 일정수준의 균일도(homogeneity)에 도달할 때까지의 소요시간을 의미한다. 유체의 혼합정도를 나타내는 혼합도(degree of mixing)는 다음과 같이 정의된다.

$$h = (C_i - C_h) / C_h \quad (1)$$

여기에서  $C_i$ 와  $C_h$ 는 각각 초기 액상농도와 완전혼합시의 액상농도를 의미한다. 실제 혼합시간은 유체순환시간 및 무차원혼합시간과 다음과 같은 관계를 지닌다.

$$t_m = t_c \times \tau_m \quad (2)$$

무차원 혼합시간은 다음과 같은 상관관계식을 갖는다 [5-7].

$$\tau_m = k_1 B_o \quad (3)$$

여기에서  $B_o$ 는 Bodenstein수이며 다음과 같이 정의된다.

$$B_o = U_L L_r / D_L \quad (4)$$

$U_L$ 은 액체의 공탕속도이며  $L_r$ 는 순환길이,  $D_L$ 은 축방향확산계수이다. 축방향확산계수는 에너지소산속도와 다음과 같은 관계를 지닌다[4].

$$D_L = 0.868 D_T^{4/3} \epsilon^{1/3} \quad (5)$$

여기에서  $D_T$ 는 length parameter로서 기포가 상승하는 탑형이며  $\epsilon$ 는 기포탑 내 순환유체의 단위질량당 에너지 소산속도이며 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{1}{m_L} \left\{ P_k Q_G \ln \left( \frac{P_k + \rho_{SL} g h_{SL}}{P_k} \right) - \frac{1}{2} \rho u_{SL}^3 A_i \left[ \frac{f_{fb}}{(1 - \epsilon_{GO})^2} \left( \frac{A_i}{A_0} \right) + 4 h_D \left\{ \frac{f_i}{d_i} + \left( \frac{A_i}{A_0} \right)^2 \frac{f_o}{d_o} \right\} \right] \right\} \quad (6)$$

여기에서  $m_L$ 는 액체의 질량,  $P_k$ 는 기포탑상부의 압력,  $f_{fb}$ ,  $f_i$ ,  $f_o$ 는 각각 탑하부의 Darcy 마찰계수, 주관과 순환관의 Fanning 마찰계수이며  $Q_G$ 는 기체부피유속,  $\rho_{SL}$ 은 슬러리액체의 밀도이며  $h_{SL}$ 과  $\epsilon_{GO}$  및  $U_{SL}$ 는 각각 유동화되는 슬러리의 높이와 순환관의 기체체류량 및

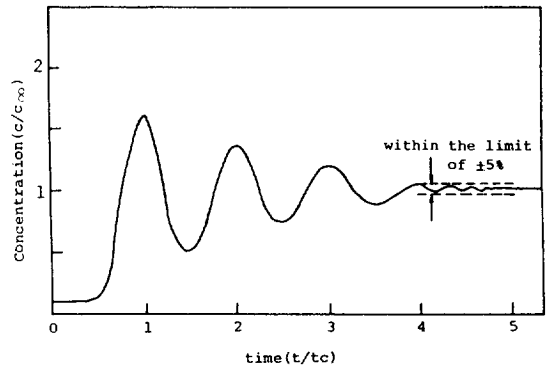


Fig. 1. Typical RTD curve of tracer with internal recirculation of fluid.

슬러리의 유속을 나타낸다.

그러므로 (3)-(6)식을 조합하여 (2)식에 대입하면 혼합시간에 대한 식을 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$t_m = k_2 t_c^2 U_L^2 D_T^{-4/3} \epsilon^{1/3} \quad (7)$$

여기에서  $k_1$ ,  $k_2$ 는 주어진 계에 대한 실험정수이다.

## 3. 실험방법

본 연구에서 기포탑의 혼합특성을 연구하기 위하여 사용한 실험장치는 순환 특성에 관한 보문[8]과 동일한 장치이다. 기포탑은 주탑의 크기가 내경 0.089 m, 길이 1.5 m이고 내관이 내경 0.0563 m, 길이 0.9 m인 아크릴 관으로 제작하였고 기타의 제원은 슬러리순환류의 순환특성에 관한 연구[8]에 사용되었던 것과 동일하다. 기포탑 내 순환유체의 체류시간분포곡선을 측정하기 위한 전기전도도 탐침은 가로세로 각각 0.007 m인 백금판 2장을 platinization시킨 후 기체분배기에서 0.08 m의 높이에 순환관 측으로 설치하였고 분배기에서 0.84 m의 높이에 추적자 주입기를 설치하여 충격 입력형태로 주입하도록 하였으며 전도도 탐침으로 출력된 신호는 A/D 전환기를 통하여 IBM 개인용 컴퓨터에 기록하여 분석하였다. 추적자로는 NaCl 3 M 용액을 사용하였으며 추적자의 존재가 기포의 거동에 거의 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

추적자의 주입으로 얻은 체류시간분포곡선으로부터 주입 후 일정 시간 경과 후 도달되는 추적자의 농도변이가 최초와 최종농도 차의 5% 이내가 될 때까지의 시간 경과를 측정하여 Fig. 1과 같이 혼합시간을 구하였다. 이것은 전술한 (1)식에 의하면 혼합도(degree of mixing),  $h$ 가 95% 이상이 되는 경우를 의미한다. 실험에 사용된 고체입자는 유니온사 제작의 glass beads로서

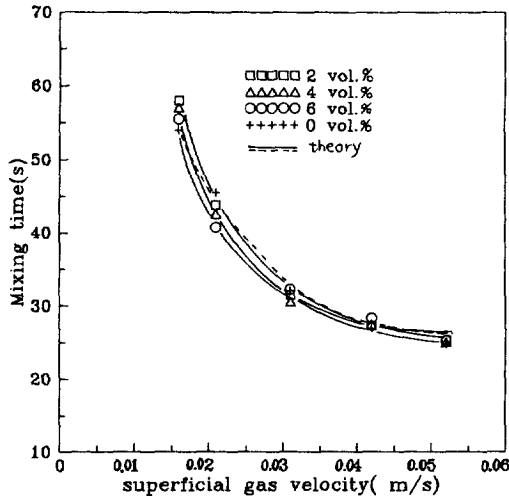


Fig. 2. Effect of superficial gas velocity on the mixing time of liquid(91 micron).

평균입경이 47.0, 69.0 및 91.0 미크론이며 입자의 평균밀도는  $2450 \text{ kg/m}^3$ 이다. 입자의 농도는 기포탑 내 슬러리의 총 부피에 대한 값으로 0, 2, 4 및 6 vol%이며 기체유속은 주탑을 기준으로 공탑기체속도 0.016-0.052 m/s로 변화시켰다. 기체체류량은 총팽창측정법으로 전체체류량을, 압력구배측정법으로 내관 및 순환관의 국부기체체류량을 측정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

본 연구의 기-액 이상류 흐름영역은 주로 기포의 상승이 이루어지는 내관을 기준으로 하면 Barnea의 도표 [9]에 의하여 bubbly 흐름에서 slug 흐름까지 다양한 영역에 속하며 액상 혼합 특성에 미치는 고체입자의 영향은 주로 bubbly 흐름에서 전이흐름 영역인 공탑속도 0.016 m/s에서 0.031 m/s 까지의 범위에서 주로 관찰되었다.

##### 4-1. 공탑기체속도의 영향

공탑기체속도가 혼합시간에 미치는 영향을 고체입자 농도를 매개변수로 하여 나타낸 그림이 Fig. 2이며 여기에서 제반 기호는 실험 data를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 공탑기체속도의 증가에 따라 혼합시간이 실험범위 전반을 통하여 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다. 혼합시간은 특히 bubbly 흐름 및 전이 영역에서 급격히 감소하는데 이것은 기체공탑속도의 증가에 따라 기포의 생성속도가 비례적으로 상승하며 이에 따른 유체

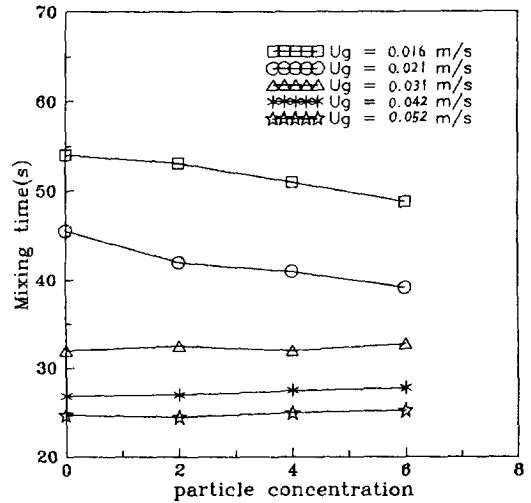


Fig. 3. Effect of particle concentration on the mixing time of liquid(47 micron).

순환속도의 증가로 인한 강제대류의 촉진으로 유체 혼합이 더욱 활발하여 지고 순환유체의 에너지소산속도도 증가하기 때문이다. 이러한 경향은 전술한 (7)식에서 알 수 있듯이 유체의 순환시간과도 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다. 액체의 혼합시간은 bubbly 흐름과 전이흐름영역에서 기체유속에 따라 급격히 감소하다가 기포의 생성율이 둔화되는 slug 흐름영역에서 감소율이 둔화되는데 여기에서 혼합효율에 미치는 기포상승의 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 기포상승속도의 증가는 액체순환을 촉진시키고 이에 따라 난류생성이 유도되고 결과적으로 유체의 혼합속도를 증가시키게 된다. 그러므로 높은 기체유속의 범위에서는 상승 기포가 slug 흐름 형태로 기포탑 내를 상승하기 때문에 기포의 합체에 따른 기포크기의 증가율이 감소되므로 기포상승속도의 증가율도 줄어들어 유체의 순환 기전력도 그만큼 감소하게 된다. 혼합효율은 액상의 난류와 운동량(momentum) 전달속도에 큰 영향을 받으며 열전달 속도와 물질전달속도에도 영향을 미치게 된다. 반응물질이 기포탑 내에 주입되었을 때 액상 전체의 농도 균일화(homogenization)는 생물학 반응의 pH 조절이나 미생물 촉매반응과 같은 반응기의 성능에 큰 영향을 미치며 신속한 반응물질의 기-액계면 이동이 요구되는 물질전달에도 매우 중요하다.

##### 4-2. 고체입자농도의 영향

고체입자의 농도가 혼합시간에 미치는 영향을 고체입자농도를 매개변수로 하여 나타낸 그림이 Fig. 3이다.

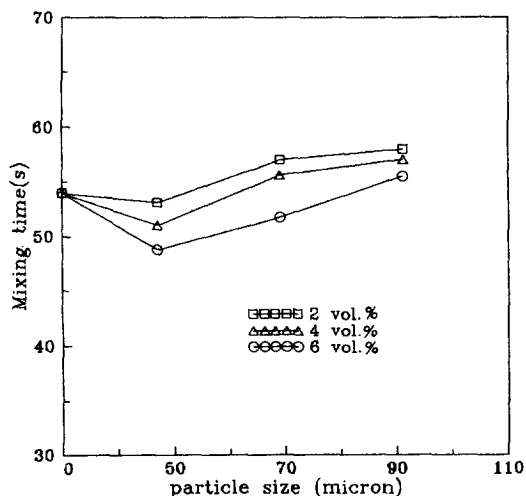


Fig. 4. Effect of particle size on the mixing time of liquid ( $U_g = 0.016$  m/s).

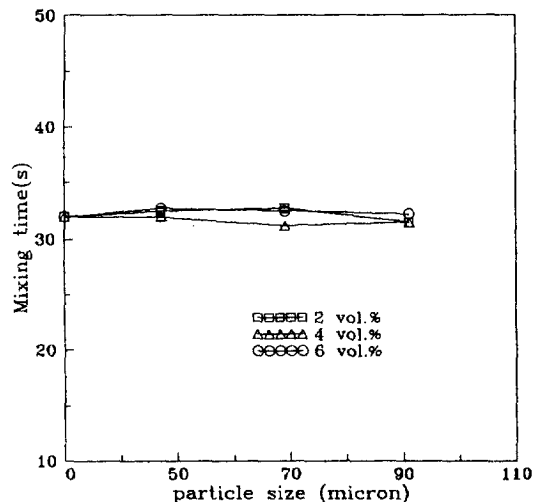


Fig. 5. Effect of particle size on the mixing time of liquid ( $U_g = 0.031$  m/s).

그림에서 볼 수 있듯이 액체의 혼합시간은 본 연구의 실험범위에서 수행한 고체입자농도 증가시 전반적으로 감소되어 고체입자 존재시에 혼합효율이 증진됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 점도가 높은 액체에서 관찰된 혼합효율의 증대와 관련이 있으며 고체입자농도의 증가로 야기되는 고-액 이상류의 점도변화와 축방향 입자농도의 불균일도[10]에 의한 기포의 합체현상에 기인한다고 할 수 있다. 기체속도가 0.016 m/s일 때 평균입경이 91 및 69 micron인 입자에서는 순수한 액체에서 보다 혼합시간이 길었으나 입자농도 증가시 감소되어 기포합체에 의한 기포상승속도의 촉진으로 혼합효율이 증진됨을 알 수 있다. 기체유속이 0.021 m/s일 경우에는 실험 범위 내의 모든 입자에 대하여 순수한 액체순환시보다 혼합시간이 작게 나타났으며 입자농도의 증가시에도 혼합시간이 감소됨을 알 수 있었다. 이같은 결과는 전술한 바와 같은 기포합체에 의한 기포상승 속도의 증가에 따른 액체 순환의 촉진과 기포후면의 bubble wake 형성에 따른 에너지소산의 증가가 원인이라고 할 수 있다. 이와 같은 경향은 주로 입경이 작은 미세입자영역에서 나타나며 입경이 커지면 액체와 고체입자간의 slip현상에 의하여 액체순환속도가 감소하여 혼합효율이 감소하게 된다.

입자농도의 영향은 주로 공탐 기체속도가 0.016-0.031 m/s인 영역에서 현저하였고 유속이 더욱 증가되면 영향이 나타나지 않았다. 이같은 경향은 기체유속이 증가됨에 따라 상승기포가 탑 내를 차지하고 상승하는 slug 흐름이 형성되어 기포의 크기가 입자농도에 거의 영향을 받지 않기 때문이며 이에 따라 낮은 유속에서

입자의 영향을 받아 고체입자농도의 증가에 따라 감소되던 혼합시간이 기체유속 증가에 따라 그 영향이 거의 없어지게 된다.

#### 4-3. 고체입자 크기의 영향

입자의 크기가 기포에 미치는 영향은 Kim 등[11]에 의하면 입경 2 mm인 입자를 경계로 구분되며 본 실험의 입경 범위는 기포의 합체영역에 속한다.

본 연구 영역에서 입자의 크기에 따른 혼합시간의 변화는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 입경이 감소할수록 특히 낮은 기체유속 범위에서 혼합시간이 다소 감소하였으며 이와 같은 경향은 본 실험 범위 내에서 입경이 커질수록 기포의 합체현상이 심화되어 혼합효율이 증진될 것으로 사료되나 입자크기가 커질수록 종말속도가 증가하여 탑하부에 쌓여 있는 고체입자의 갯수가 증가하여 액체순환이 고체입자와 액체간의 마찰력으로 저지되며 혼합효율은 전술한 두가지의 상반되는 경향의 증감에 의하여 결정되는데 입경 47 micron인 입자의 경우 기포의 합체로 인한 액체순환 촉진이 우세하여 그림과 같이 순수한 액상에서 보다 혼합속도가 크게 나타난다. 이는 기포합체시 액체 중 기포의 상승속도는 증가되며[12], 이로 인하여 생성된 액체의 흐름이 반응기 내 액체의 축방향 및 반경 방향으로의 확산을 촉진시키어 혼합효과가 증진되기 때문이다. 그러나 이러한 경향은 기체유속의 증가에 따라 점차 없어지는데 이것은 높은 기체유속에서는 상승기포가 탑 내를 채우는 slug 흐름을 형성하여 고체입자의 영향이 거의 없어지기 때문이다. Fig. 5에 기체유속이 0.031 m/s에서의 입자의 영향을

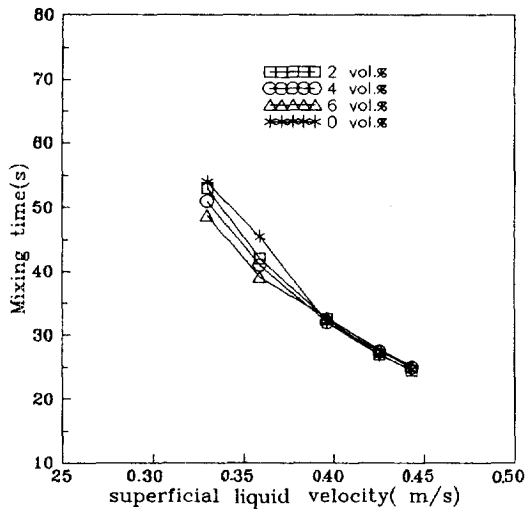


Fig. 6. Effect of superficial liquid velocity on the mixing time of liquid(47 micron).

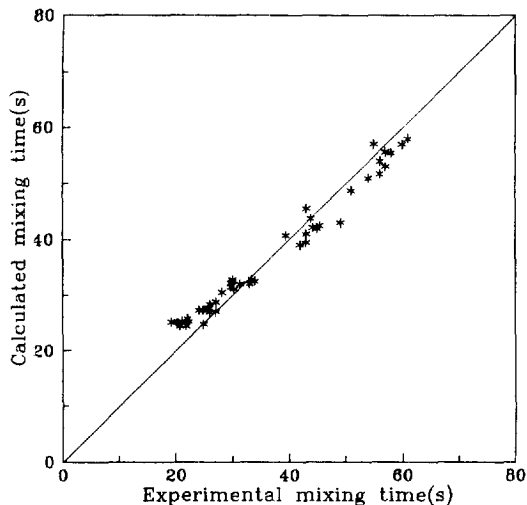


Fig. 7. Comparison of experimental and calculated values of mixing time.

나타내었다. 한편 순환 유체의 유속이 혼합시간에 미치는 영향을 입자의 농도를 매개변수로 하여 나타낸 그림이 Fig.6인데, 그림에서 알 수 있듯이 혼합시간은 유체의 속도와 밀접한 관계를 갖고 있다. 즉 유체의 속도가 증가함에 따라 혼합시간은 급격히 감소하며 비교적 낮은 기체 유속에서 순수한 액체보다 입자가 첨가되었을 때의 혼합시간이 감소함을 알 수 있다. 여기에서 유체의 속도는 전 부문[8]에서 산출된 값을 이용하였다. 이와 같은 경향은 47 micron 입자 전체와 69 micron

입자 6% 농도 조건에서 나타났으며 기타의 경우 입자 존재시 유체속도는 순수한 액체보다 높은 순환속도를 나타내었다.

실험변수의 상관 관계를 산출한 결과 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$t_m = 5.523 U_G^{-0.643} (1 - \Phi_S)^{0.683} d_p^{0.042} \quad (8)$$

이 때의 상관계수는 0.986이며 표준편차는 0.0495이었다. 그리고 이와 같은 경향을 액상의 에너지 소산속도와 관련지어 설명할 수 있었으며 실험 data를 전술한 (7)식에 관련지은 결과 다음과 같은 식을 순환유체의 혼합시간에 관한 식으로 제시할 수 있었으며 이 때의 표준편차는 0.06이었다.

$$t_m = 0.7364 t_c^2 U_L^2 D_T^{-4/3} \epsilon^{-1/3} \quad (9)$$

(8)식에 의한 혼합시간의 계산치와 실험치를 비교하여 나타낸 그림이 Fig.6이며 실험 범위 전반에 걸쳐서 모든 data가 잘 일치함을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

기포탑 내 순환유체가 기포의 교반으로 순환될 때 유체의 혼합에 고체입자가 미치는 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유체의 혼합시간은 공탑기체속도의 증가에 따라 지수함수적으로 감소하였다.

(2) 유체의 혼합시간은 고체입자의 농도 증가에 따라 전반적으로 감소하였다.

(3) 유체의 혼합시간은 낮은 기체유속에서 입자크기가 증가할수록 점차 증가하였으나 전반적으로는 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다.

(4) 이러한 경향을 난류등방성이론 및 Bodenstein 수에 관한 식으로 잘 설명할 수 있었으며 그 식은 다음과 같다.

$$t_m = 0.7364 t_c^2 U_L^2 D_T^{-4/3} \epsilon^{-1/3}$$

## 사용기호

$A_w$  : cross-sectional area of downcomer [ $m^2$ ]

$A_r$  : cross-sectional area of riser [ $m^2$ ]

$Bo$  : Bodenstein number [-]

$C$  : concentration of tracer

$d_e$  : equivalent diameter of annulus [ $m$ ]

$D_L$  : axial dispersion coefficient [ $m^2/s$ ]

$D_T$  : diameter of main column [ $m$ ]

$f_{ph}$  : Darcy friction factor at bottom section [-]

- $f_i$  : Fanning friction factor in riser section [-]  
 $f_o$  : Fanning friction factor in downcomer section [-]  
 $h$  : degree of mixing [-]  
 $L_c$  : circulation path of liquid  
 $P_h$  : pressure at head space of bubble column [m H<sub>2</sub>O]  
 $Q_G$  : volumetric gas flow rate [m<sup>3</sup>/s]  
 $U_L$  : superficial liquid velocity [m/s]  
 $U_{SL}$  : superficial slurry velocity [m/s]

#### 그리스 문자

- $\epsilon$  : dissipation rate of energy [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]  
 $\tau_m$  : dimensionless mixing time [-]  
 $\rho_{SL}$  : density of slurry [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\epsilon_{GO}$  : gas holdup in downcomer [-]

#### 참고문헌

- Shah, Y. T.: "Gas-Liquid-Solid Reactor Design", McGraw-Hill, New York, NY(1979).
- Kim, S. D. and Kim, C. H.: *J. Chem. Eng. Japan*, **16**, 172(1983).
- Hirata, A., Hosaka, Y. and Umezawa, H.: World Congress III of Chem. Eng., 3, Tokyo, 556(1986).
- Park, C. J., Oh, K. J. and Doh, D. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **5**(28), 493(1990).
- Verlaan, P. and Tramper, J.: *Chem. Eng. Sci.*, **5**(44), 1139(1989).
- Blenke, H.: *Adv. Biochem. Eng.*, **13**, 121(1979).
- Murakami, Y. et al.: *J. Chem. Eng. Japan*, **15**, 121(1982).
- Park, C. J. and Doh, D. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **4**(27), 459(1989).
- Brauner, N. and Barnea, D.: *Chem. Eng. Sci.*, **1**(41), 159(1986).
- Smith, D. N. and Ruther, J. A.: *Chem. Eng. Sci.*, **5**(40), 741(1985).
- Kim, S. D. and Kim, J. O.: *Particulate Sci. Tech.*, **5**, 309(1987).
- Fukuma, M., Muroyama, K. and Yasunishi, A.: *J. Chem. Eng. Japan*, **1**(20), 28(1987).