

Geldart 분류 A, B, D 입자의 기체유동층에서 기포크기에 관한 통일된 상관식

최 정 후

건국대학교 화학공학과
(1994년 9월 8일 접수, 1994년 12월 13일 채택)

A Unified Correlation for the Bubble Size in Gas Fluidized Beds of Geldart Group A, B, D Particles

Jeong-Hoo Choi

Department of Chemical Engineering, Kon-Kuk University, Seoul 133-701
(Received 8 September 1994; accepted 13 December 1994)

요 약

Geldart group A, B, D 입자의 기체유동층에서 기포의 합체빈도와 분쇄빈도가 동시에 고려된 기포크기에 관한 통일된 모델 상관식을 제시하였다. 또 기포흐름분율, 단일기포의 분쇄빈도, 합체빈도와 분쇄빈도가 같은 조건에서 평형기포크기에 관한 상관식도 제시하였다. 제시된 상관식은 문헌의 보고된 기포크기와 만족스러운 일치를 보였다.

Abstract—A unified correlation on the bubble size which considered coalescence and splitting of bubbles has been derived in gas fluidized beds of Geldart group A, B and D particles. In addition, correlations has been proposed to describe respectively the bubble flow fraction of the excess gas flow rate $A(U-U_{mf})$, the splitting frequency of the single bubble and the equilibrium bubble diameter on the condition that the coalescing rate is equal to the splitting rate in bubbles. The proposed correlation on the bubble diameter agreed satisfactorily to the data reported in the literature.

1. 서 론

기체-고체 기포 유동층에서 기포크기의 예측은 유동 화현상의 주체로서 또 기포의 특성 중 하나로 오랜 동안 추구되었고, 여러 상관식이 제시되었다[1-12]. 기포크기의 변화는 기포상호간의 합체에 의한 성장 혹은 한 기포의 분쇄에 의한 크기감소에 기인하는 것으로 접근되었다. 그러나 대부분의 상관식들은 전자만을 고려하여 Geldart B, D 입자에 한정되어 적용되었고, 기포분쇄가 무시될 수 없는 Geldart A 입자에 적용될 수 있는 상

관식으로는 근래의 Horio와 Nonaka[10]의 일반화된 상관식이 제시되어 있다.

Horio와 Nonaka[10]의 상관식은 합체 및 분쇄의 일반화된 기포크기변화에 관한 항을 모두 고려하였고, 완전하지는 않으나 기포분쇄빈도를 처음으로 수식화한 것에 의미가 있다. 이들은 Mori와 Wen[5]의 기포크기에 관한 상관식을 이용하여 기포합체빈도를 유추하였고, Toei 등[13]이 실험적으로 보고한 기포분쇄빈도(bubble splitting frequency)에 더하여 기포크기가 온도가 상승함에 따라 작아진다는 Tone 등[14]의 보고를 기

반으로 기포분쇄빈도를 최소유동화속도에 반비례하는 것으로 간주하고 기존에 보고된 기포크기자료를 가장 잘 만족시키는 조건에서 기포크기에 관한 상관식을 제시하였다.

그러나 Horio와 Nonaka[10]의 상관식은 기포합체빈도의 유추방법과 기체의 기포흐름분율(bubble flow fraction)의 고려에서 합리성이 부족하였다. 기포합체빈도는 기존의 Geldart B, D 입자계에서 얻어진 기포크기에 관한 상관식에서 유도되었으며, 기포분쇄효과는 Geldart A 입자계에 국한하여 고려하였는데 이는 기포분쇄빈도를 실험적으로 제시한 Toei 등[13]의 보고가 Geldart B 입자계에 속함을 간과하였을 뿐만 아니라 기본적으로 기포합체 및 분쇄 속도를 분명히 구분하여 규명하지 못한 것이었다. 또 기포유량은 단순한 2상 이론에 따라 과잉기체[A(U-U_{mf})]로 간주되었는데, 이미 보고된 것과 같이 이는 타당하지 못하며, 결과적으로 얻어진 기포크기 상관식은 총괄기체유량, 조밀상 기체유량, 기포유량, 기포크기, 기포빈도 사이의 양론적인 관계를 명쾌하게 해석하지 못하는 큰 결점이 있다.

본 연구에서는 기포의 성장에 있어서 합체 및 분쇄 속도를 분명히 분리하여 고려하고, 총괄기체유량, 조밀상 기체유량, 기포유량, 기포크기, 기포빈도 사이의 양론적인 관계를 일관성있게 해석하는 모델을 유도하고, Geldart group A, B, D 입자계에 적용될 수 있는 기포크기에 관한 상관식을 제시하였다. 기포의 합체속도는 Choi 등[11]의 모델을 사용하였다. Choi 등[11]은 처음으로 기포의 거동을 3차원적으로 묘사한 합체빈도 모델을 제시하였다. 그들은 기포의 순간거동을 3차원 공간에서 임의의 상방향으로 동일한 확률빈도, 동일한 속도로 움직이는 것으로 모델화하여 충돌에 의한 합체빈도를 고려하였고, 과잉기체 중 기포유량분율을 보고된 측정값들의 평균값 0.5로 고려하여 Geldart B, D 입자에 적용되는 기포크기에 관한 상관식을 보고하였다.

2. 이론적 배경

기체-고체 유동층에서 Choi 등[11]의 기포의 순간거동에 대한 모델에 의하면 단위부피의 공간에서 기포합체빈도는 다음과 같이 표현된다.

$$F_c = 0.5658 \pi d_b^2 V_b n^2 \quad (1)$$

여기서 d_b , V_b , n 은 각각 구형기포직경, 기포속도, 단위부피의 공간안에 기포의 수를 나타낸다. 또 한 기포의 분쇄빈도를 f_s^* 라고 하면, 단위부피의 공간에서 기포의 분쇄빈도는 다음과 같이 표현된다.

$$F_s = f_s^* n \quad (2)$$

Horio와 Nonaka[10]의 모델식에 의하면 한 기포의 분쇄빈도는 최소유동화속도에 반비례하여 다음으로 표현된다.

$$f_s^* = \alpha U_{mf}^{-p} \quad (3)$$

여기서 $p=1-1.2$

$$\alpha = 0.016 \text{ m/s}^2 \text{ (for } p=1)$$

$$= 0.0046 \text{ m}^{1/2}/\text{s}^{2/2} \text{ (for } p=1.2)$$

기포농도(number-based bubble concentration), n 을 다음으로 나타낼 때

$$n = 6 \epsilon_b / (\pi d_b^3) \quad (4)$$

높이에 따라 유동층단면에서 기포흐름(number-based bubble flow rate)의 변화는 다음으로 표현된다.

$$-dN_f/dh = A(0.5658 \pi d_b^2 V_b n^2 - f_s^* n) \quad (5)$$

$$= A \left(\frac{20.37}{\pi} \frac{V_b \epsilon_b^2}{d_b^4} - \frac{6f_s^* \epsilon_b}{\pi d_b^3} \right) \quad (5)$$

$$\text{Initial condition : } N_f = N_0 \text{ at } h=0 \quad (6)$$

여기서 A 는 단면적을 나타낸다. 단면에서 기포흐름, 기포분율, 평균기포상승속도를 각각 다음으로 표현할 때

$$N_f = 6k(U - U_{mf}) A / (\pi d_b^3) \quad (7)$$

$$\epsilon_b = k(U - U_{mf}) / U_b \quad (8)$$

$$U_b = U - U_{mf} + 0.711(g d_b)^{1/2} \quad (9)$$

Choi 등[11]의 모델에서 평균기포상승속도는 기포속도의 1/2이며($U_b = V_b/2$), 기포크기의 변화는 다음으로 표현된다.

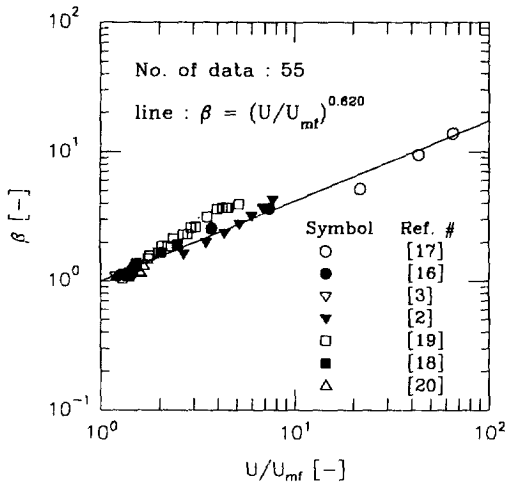
$$\begin{aligned} dd_b/dh &= \left[2.264 - \frac{f_s^* d_b}{3k(U - U_{mf})} \right] \epsilon_b \\ &= \frac{2.264k(U - U_{mf}) - f_s^* d_b/3}{U - U_{mf} + 0.711(gd_b)^{1/2}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{Initial condition : } d_b = d_{b0} \text{ at } h=0 \quad (11)$$

임의의 조건으로 기포의 합체와 분쇄빈도가 일치하여 기포크기가 변화하지 않는 상태가 고려될 수 있다. 이때 기포의 크기를 평형기포크기라고 하면 윗식에서 이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$d_{b,eq} = 6.792k(U - U_{mf}) / f_s^* \quad (12)$$

그러므로, 윗식으로부터 기포크기에 관한 상관식은 다

Fig. 1. Relationship between β and U/U_{mf} [2, 3, 16-20].

음으로 표현된다.

$$\left(\frac{d_{bo} - d_{b,eq}}{d_b - d_{b,eq}} \right)^b \left[\frac{(d_{bo}^{1/2} - d_{b,eq}^{1/2})(d_b^{1/2} + d_{b,eq}^{1/2})}{(d_b^{1/2} - d_{b,eq}^{1/2})(d_{bo}^{1/2} + d_{b,eq}^{1/2})} \right]^{d_{b,eq}^{1/2}} = \exp[2(h/a + d_b^{1/2} - d_{bo}^{1/2})] \quad (13)$$

$$a = 4.266 \, g^{1/2}/f_s^* \quad b = \frac{(U - U_{mf})}{0.711g^{1/2}} \quad (14)$$

여기서 d_{bo} 는 기체분배기에서 초기 평균기포직경을 나타내며, Miwa 등[15]의 상관식으로 구할 수 있다. 앞의 보고[11]에서와 같이 기포의 (frontal diameter)/(spherical diameter) 비는 1.10, (eruption diameter)/(spherical diameter) 비는 1.5로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 기포흐름분율

비록 단편적이기는 하나, 여러 입자 및 유속 조건의 유동층에서 기포흐름분율이 측정되어 보고되었으며[2, 3, 16-20], 이들을 기준으로 고찰하였다. 유동층에서 기체흐름을 세후적으로 분석하면, 총괄기체 중 기포흐름분율은 조밀상(dense phase)의 공극으로 흐르는 기체유량(interstitial gas flow rate)을 제외한 나머지로 고려될 수 있다. 한편 조밀상의 기체유량은 유동층의 단면에서 운동량흐름과 그에 따른 조밀상의 팽창과 밀접한 관계가 있으며, 따라서 기포흐름분율은 다음으로 표현될 수 있다.

$$k = \frac{U - \beta U_{mf}}{U - U_{mf}} \quad (15)$$

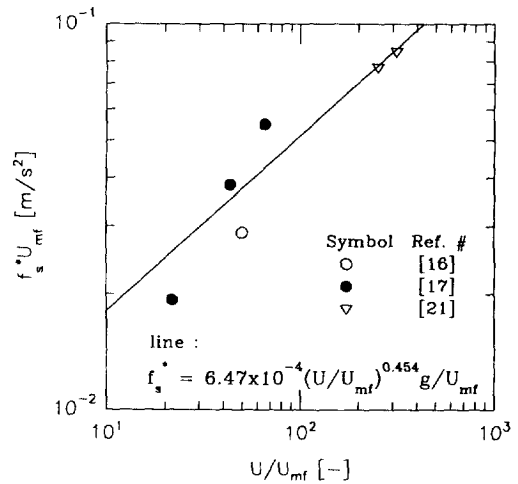
Fig. 2. Relationship between $f_s^* U_{mf}$ and U/U_{mf} [16, 17, 21].

Fig. 1은 보고된 기포흐름분율로부터 얻어진 조밀상의 기체유량의 최소유동화유량에 대한 비(β)를 유동화속도의 최소유동화속도에 대한 비로 나타내었다. 그림에서 나타내는 것과 같이 β 는 U/U_{mf} 에 지수적으로 비례하였으며, $U/U_{mf}=1$ 일 때 기포유량이 없는 조건을 고려하여 기포흐름분율(k)은 다음의 상관식으로 표현되었다.

$$\beta = (U/U_{mf})^{0.620}, \text{ mean deviation} = 0.322 \quad (16)$$

$$k = \frac{U - (U/U_{mf})^{0.620} U_{mf}}{U - U_{mf}} \quad (17)$$

3-2. 단일기포의 분쇄빈도

3차원 기체유동층에서 단일기포의 분쇄빈도를 측정한 보고는 아직 없으며, Horio와 Nonaka[10]의 상관식인 식 (3)을 광범위한 유동화영역에 적용하기에는 신뢰성이 부족하다. 한편 식 (12)에 의하면, 기포유량이 결정된 가운데 측정된 평형기포크기로부터 단일기포의 분쇄빈도를 역산할 수 있다. 평형기포크기는 $U_{mf}=0.2, 0.23$ cm/s의 유동층에서 측정한 Werther[16, 17]의 기포특성과 $U_{mf}=0.16$ cm/s의 유동층에서 측정한 Morooka 등[21]의 기포특성으로부터 얻을 수 있다.

Fig. 2는 이와 같이 얻어진 평형기포크기와 식 (12)를 사용하여 역산된 단일기포의 분쇄빈도를 식 (3)을 기본으로 하여($p=1$) α 와 U/U_{mf} 사이의 관계로 나타내었다. Morooka 등[21]의 보고 중에서는 porous plate 분배기 유동층에서 얻어진 자료만을 사용하였으며, 최종적으로 얻어진 상관식은 단일 노즐 분배기의 유동층에도 적용될 수 있었다. 결과적으로 Toei 등[13]의 실

Table 1. Mean deviation between bubble diameters reported in the literature and those calculated by various correlations

| Measured data | No. of data | U_{mf} [m/s] | $U - U_{mf}$ [m/s] | Mean deviations of correlations(mm) | | | | | |
|---------------------------|-------------|----------------|--------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|---------------|
| | | | | Rowe (1976) | Darton et al. (1977) | Horio & Nonaka (1987) | Choi et al. (1988) | Cai et al. (1993) | Present study |
| Morooka et al.(1972) | 33 | 0.0016 | 0.2984-0.4984 | 270.0 | 211.3 | 15.8 | 308.9 | 157.0 | 16.4 |
| Werther(1976, 1984) | 36 | 0.0020, 0.0023 | 0.0477-0.1477 | 30.2 | 18.5 | 8.5 | 34.1 | 20.5 | 6.2 |
| Whitehead & Young(1967) | 111 | 0.025 | 0.02-0.1425 | 19.8 | 27.1 | 45.2 | 23.8 | 70.2 | 40.5 |
| Geldart(1970/71) | 42 | 0.012 | 0.02-0.08 | 4.2 | 8.7 | 13.2 | 3.4 | 8.8 | 6.4 |
| Rowe & Everett(1972) | 66 | 0.0254-0.08 | 0.0127-0.1545 | 12.2 | 5.6 | 7.3 | 12.4 | 6.4 | 10.8 |
| Werther(1973) | 22 | 0.018 | 0.072 | 3.9 | 6.7 | 7.1 | 3.5 | 5.9 | 3.6 |
| Fryer & Potter(1976) | 26 | 0.017 | 0.007-0.104 | 9.2 | 9.2 | 6.8 | 7.2 | 8.0 | 7.9 |
| Rowe et al.(1983) | 19 | 0.0486-0.11 | 0.0204-0.039 | 5.7 | 8.7 | 5.8 | 7.7 | 9.5 | 11.2 |
| Stubington et al.(1984) | 32 | 0.028-0.073 | 0.016-0.106 | 4.6 | 2.8 | 2.4 | 4.8 | 6.0 | 3.6 |
| Hatate et al.(1985) | 35 | 0.0089-0.332 | 0.08-0.35 | 8.1 | 19.7 | 25.0 | 9.9 | 22.9 | 14.9 |
| Cranfield & Geldart(1974) | 26 | 0.52 | 0.05-0.25 | 13.0 | 14.4 | 13.8 | 14.2 | 15.0 | 11.2 |
| Zhang et al.(1982) | 20 | 0.28-0.47 | 0.04-1.67 | 45.1 | 86.3 | 74.4 | 42.1 | 184.0 | 44.5 |
| Glicksman et al.(1987) | 9 | 0.58 | 0.31-0.87 | 63.0 | 112.2 | 107.6 | 56.4 | 144.0 | 58.7 |

형조조건이 거의 최소유동화 조건임을 고려하여 최소유동화속도에 접근시 분쇄빈도를 0이 아닌 한정된 값으로 간주하고 또 그들의 보고에서 기포가 커짐에 따라 불안정해지는 경향이 있었음을 고려하여 단일기포의 분쇄빈도는 다음의 상관식으로 표현하였다.

$$f_s^* = 6.47 \times 10^{-4} (U/U_{mf})^{0.454} \frac{g}{U_{mf}},$$

mean deviation = 2.50/s (18)

3-3. 측정된 기포크기와 비교

주어진 조건의 유동층에서 본 모델에 의해 예측되는 이론기포크기는 식 (12)부터 식 (18)에 의해서 계산될 수 있다.

Table 1은 문헌에 보고된 기포직경[2, 3, 9, 16, 17, 19-27]과 대표적인 상관식[6, 7, 10-12] 및 본 모델의 비교를 요약하여 나타내었다. 표에서 상부의 Morooka 등[21]과 Werther[16, 17]의 측정값은 Geldart A, 하부의 Cranfield와 Geldart[3], Zhang 등[19], Glicksman 등[9]의 측정값은 Geldart D, 중간의 나머지는 Geldart B 입자의 유동층에 해당된다. Darton 등[7]의 상관식은 Geldart D 입자의 유동층에서 차이가 크지만 알려진 것과 같이 Rowe[6], Darton 등[7], Choi 등[11]의 상관식은 Geldart B, D 입자의 유동층에서 비교적 유사한 일치를 보였다. 그러나 이들의 상관식은 Geldart A 입자의 유동층에서는 측정값과 큰 차이를 나타냈다. 최근에 제시된 Cai 등[12]의 상관식은 Geldart A, D 입자의 유동층에서 측정값과 큰 차이를 나타냈다. Horio와

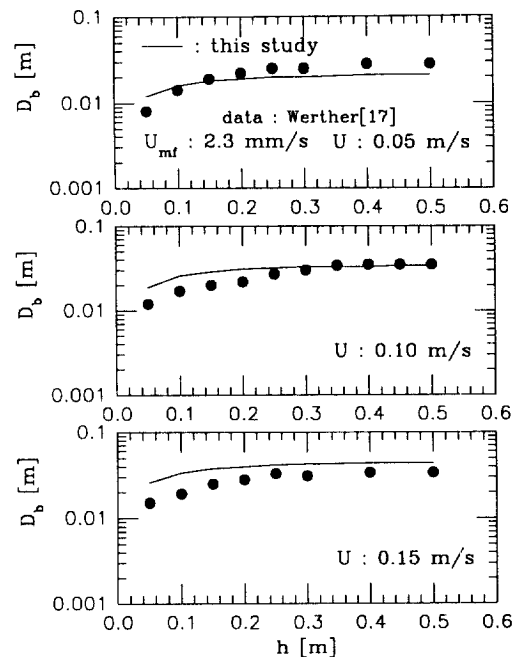


Fig. 3. Comparison between measured bubble diameters [17](symbols) and calculated values of this study (lines).

Nonaka[10]의 상관식은 Geldart A, B 입자의 유동층에서는 측정값과의 차이가 본 연구의 상관식과 유사하나 Geldart D 입자의 경우에는 Darton 등[7]의 상관식과 같이 측정값과의 차이가 컸다. 본 연구의 상관식은 비

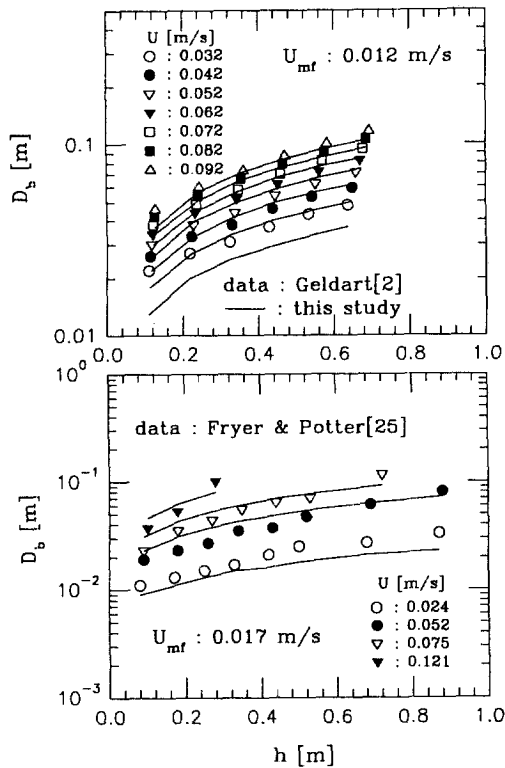


Fig. 4. Comparison between measured bubble diameters [2, 25](symbols) and calculated values of this study(lines).

교된 전측정값 범위에서 고르게 좋은 일치를 보였다.

Fig. 3은 Geldart A 입자의 유동층에서 Werther[17]에 의해서 측정된 기포크기와 본 연구의 상관식과 비교를 나타낸다. 상관식의 예측은 측정값과 유사한 경향을 보였다.

Fig. 4와 5는 Geldart B 입자의 유동층에서 Geldart [2], Fryer와 Potter[25], Choi 등[11]에 의해서 측정된 기포크기와 본 연구의 상관식과 비교를 나타낸다. 상관식의 예측은 측정값과 좋은 일치를 보여주었다.

Fig. 4에서 모델의 예측과 Geldart[2]의 측정값 사이의 차이가 유속이 작은 영역에서 다소 커지는 경향을 보이는데 이는 측정상의 오차에 의한 상대오차의 증가에 상당한 원인이 있는 것으로 사료되었다. Geldart[2]는 충표면에서 파괴되는 기포의 크기(eruption diameter)를 사진촬영으로 측정하였다. 또 (eruption diameter)/(spherical diameter)의 비는 기포크기에 상관없이 실험적으로 관찰된 1.5로 고려되었다. 결국 이와 같은 측정방법과 환산으로 인하여 기포크기의 결정에 어느 정도의 절대오차가 수반되며, 이의 영향으로 기포크기가

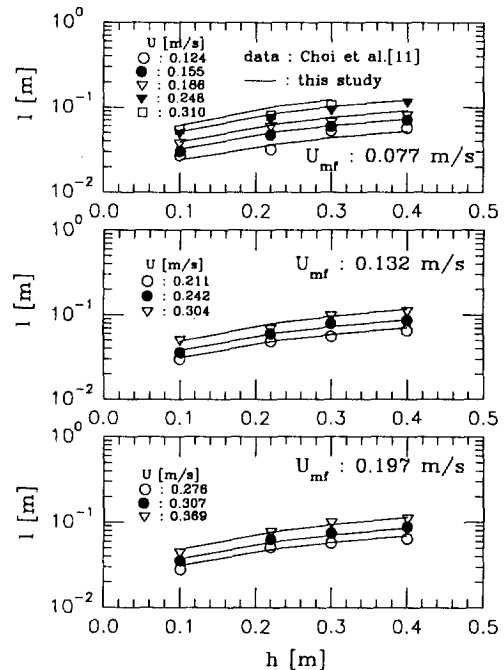


Fig. 5. Comparison between measured bubble lengths[11] (symbols) and calculated bubble diameters of this study(lines).

작은 경우에는 상대오차가 커져서 모델의 예측과 측정값의 차이가 커지는 경향을 나타내는 것으로 사료되었다. 측정값과 예측값의 비교에서 절대편차는 0.01 m 이하이었다.

Fig. 6은 Geldart D 입자의 유동층에서 Cranfield와 Geldart[3]와 Zhang 등[19]에 의해서 측정된 기포크기와 본 연구의 상관식의 비교를 나타낸다. 그림에서 나타내는 것과 같이 Geldart D 입자의 경우에도 예측값은 측정값과 비교적 좋은 일치를 보였다.

그림에서 Cranfield와 Geldart[3]의 측정값의 경우에 유속이 작은 영역 즉 기포크기가 작은 영역에서 모델에 의해서 예측된 값과 측정값 사이에 차이가 다소 큰 경향을 보였다. 한편 Cranfield와 Geldart[3]도 충표면에서 파괴되는 기포크기(eruption diameter)를 사진촬영으로 측정하였으며, 이 경향도 Geldart[2]의 측정결과와 같이 기포크기가 작은 영역에서 상대오차가 커지기 때문으로 사료되었다. 측정값과 예측값의 비교에서 절대편차는 0.018 m 이하이었다.

Fig. 7은 총직경이 1 m이고, $U - U_{mf} = 0.5$ m/s이며, 기체는 공기이고 기체 및 고체의 밀도는 각각 1.178 kg/m^3 , $1,500 \text{ kg/m}^3$ 일 때, 본 상관식 (12), (17), (18)에 의해서

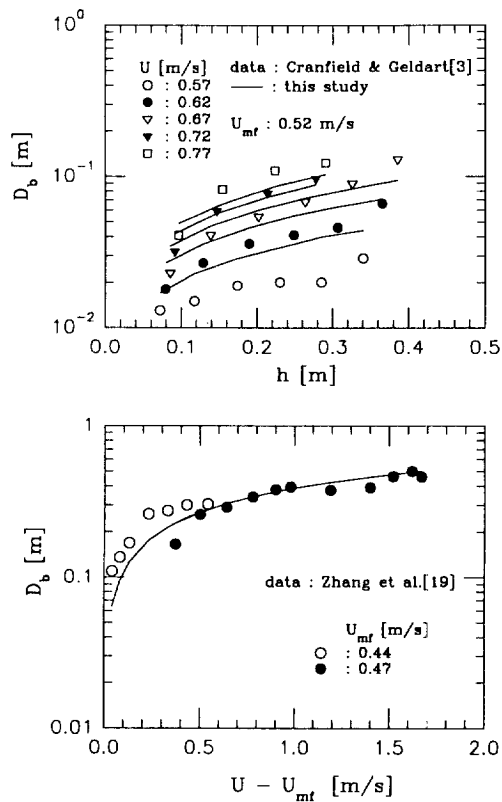


Fig. 6. Comparison between measured bubble diameters [3, 19](symbols) and calculated values of this study(lines).

계산된 평형기포크기, Horio와 Nonaka[10]의 상관식에 의한 평형기포크기, Harrison 등[28]에 의한 안정한 최대기포크기의 비교를 나타낸다. 본 상관식에 의해서 계산된 평형기포크기는 Horio와 Nonaka[10]의 상관식이 Mori와 Wen[5]의 최대기포크기에 수렴하기 시작하는 조건이하에서는(그림에서는 $U_i \approx 1$ m/s 이하) 서로 매우 유사한 값을 나타내었다. 한편 Horio와 Nonaka[10]의 상관식이 최대기포크기에 수렴하는 것은 유도과정의 모체인 Mori와 Wen[5]의 상관식의 특성, 즉 예측되는 기포크기가 증착경에 영향을 받는 특성 때문이며, 본 상관식의 값은 U_i 가 증가함에 따라 계속해서 증가하는 경향을 보이는데 이의 한계에 대해서는 지속적인 고찰이 더 필요한 것으로 사료되었다.

결과적으로 본 연구에서 제시된 상관식은 Geldart 분류 A, B, D 입자계의 전이영역에서 통일된 기포크기의 해석을 가능하게 하였다. 이는 기존의 어느 보고와 달리 본 연구는 Choi 등[11]의 보고와 함께 기본적으로 기포의 성장 체계를 완성하고, 이를 기본으로 상관식이

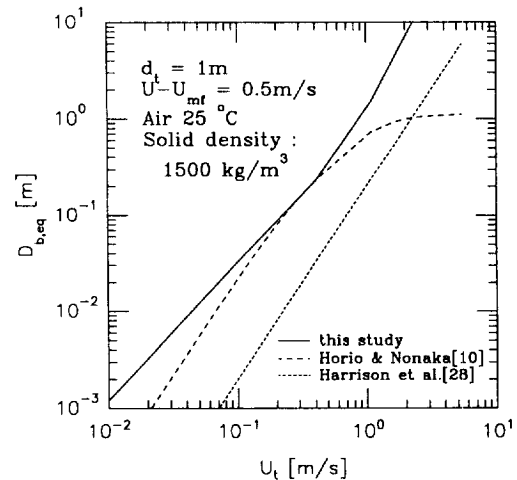


Fig. 7. Relationships between U_i and $D_{b,eq}$ calculated by [10], [28] and this study.

제시되었기 때문에 논리적으로 취약점이 적어 광범위한 유동층 영역에 적용될 수 있는 것으로 해석되었다.

본 연구는 이상의 광범위한 유동화영역에서 수리학, 열전달, 물질전달, 반응기모델의 일관성있는 해석에 상당한 도움을 줄 수 있음에 큰 의의가 있다. 특히 본 연구에서는 Horio와 Nonaka[10]의 보고와 다르게 조밀상에서 기체유량과 기포유량에 관한 정량적인 고려를 식 (16)으로 분명히 나타내었다. 총괄기체유량, 조밀상 기체유량, 기포유량, 기포크기, 기포빈도 사이의 양론적인 관계를 명확하게 나타내었고, 조밀상에서 기체유량과 기포유량의 정량적인 제시는 기존의 상관식에서는 표현할 수 없었던 기포크기와 기포빈도 사이의 관계를 분명히 하여 기포크기의 예측과 동시에 구체적인 기포 빈도의 해석을 가능하게 하였다. 또 본 연구결과는 조밀상의 팽창과 아울러 층팽창의 해석을 크게 개선시킬 수 있으며, 나아가서 기포흐름영역과 난류흐름영역의 전이영역의 해석에도 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

Geldart group A, B, D 입자의 기체 유동층에서 기포의 합체빈도와 분쇄빈도가 동시에 고려된 기포크기에 관한 통일된 모델 상관식을 제시하였다. 또 기포흐름 분율, 단일기포의 분쇄빈도, 합체빈도와 분쇄빈도가 같은 조건에서 평형기포크기에 관한 상관식도 제시하였다. 제시된 상관식은 문헌의 보고된 기포크기와 만족스러운 일치를 보였다.

사용기호

- a : variable defined by eq. (14) [$m^{1/2}$]
 A : bed area [m^2]
 b : variable defined by eq. (14) [$m^{1/2}$]
 d_b : equivalent spherical bubble diameter having same volume as that of bubble [m]
 $d_{b,eq}$: d_b in equilibrium [m]
 d_{b0} : d_b at distributor [m]
 d_t : bed diameter [m]
 F_{cv} : coalescence frequency per unit volume [$1/s \cdot m^3$]
 F_s : splitting frequency per unit volume [$1/s \cdot m^3$]
 f_s^* : splitting frequency of a single bubble [$1/s$]
 g : gravitational acceleration, 9.8 [m/s^2]
 h : height above distributor [m]
 k : bubble flow fraction of excess gas flow $A(U - U_{mf})$ [-]
 l : pierced bubble length [m]
 n : number-based bubble concentration [$1/m^3$]
 N_f : number-based bubble flow rate [$1/s$]
 N_{f0} : N_f at distributor [$1/s$]
 p : exponent [-]
 U : fluidizing gas velocity [m/s]
 U_b : bubble rising velocity [m/s]
 U_t : terminal velocity [m/s]
 U_{mf} : minimum fluidizing velocity [m/s]
 V_b : bubble speed [m/s]
 α : proportional constant [m^3/s^{p+1}]
 β : variable defined by eqs. (15), (16) [-]
 ϵ_b : bubble voidage [-]

참고문헌

- Yasui, G. and Johanson, L. N.: *AIChE J.*, **4**, 445 (1958).
- Geldart, D.: *Powder Technol.*, **4**, 41(1970/1971).
- Cranfield, R. R. and Geldart, D.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 935(1974).
- Yacono, C. X. R.: Ph. D. Dissertation, Univ. of London, London(1975).
- Mori, S. and Wen, C. Y.: *AIChE J.*, **21**, 109(1975).
- Rowe, P. N.: *Chem. Eng. Sci.*, **31**, 285(1976).
- Darton, R. C., La Nauze, R. D., Davidson, J. F. and Harrison, D.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **55**, 274 (1977).
- Werther, J.: Fluidization, Cambridge Univ. press, 7(1978).
- Glicksman, L. R., Lord, W. K. and Sakagami, M.: *Chem. Eng. Sci.*, **42**, 479(1987).
- Horio, M. and Nonaka, A.: *AIChE J.*, **33**, 1865 (1987).
- Choi, J. H., Son, J. E. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **21**, 171(1988).
- Cai, P., Michele, G. D., Gradassi, A. T. and Miccio, M.: Proc. 1993 Int. Conf. on FBC, **2**, 991(1993).
- Toei, R., Matsuno, R., Oichi, M. and Yamamoto, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **7**, 447(1974).
- Tone, S., Seko, H., Maruyama, H. and Otake, T.: *J. Chem. Eng. Japan*, **7**, 44(1974).
- Miwa, K., Mori, S., Kato, T. and Muchi, I.: *Intern. Chem. Eng.*, **12**, 187(1972).
- Werther, J.: Fluidization Technology, edited by Keairns, D. L., Hemisphere, 215(1976).
- Werther, J.: Fluidization IV, edited by Kunii, D. and Toei, R., Engineering Foundation, 93(1984).
- Lord, W. K., McAndrews, G., Sakagami, M., Valenzuela, J. A. and Glicksman, L. R.: Proc. 7th Int. Conf. on FBC, **2**, 76(1982).
- Zhang, M. C., Walsh, P. M. and Beer, J. M.: Proc. 7th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, **1**, 77(1982).
- Rowe, P. N., Foscolo, P. U., Hoffman, A. C. and Yates, J. G.: Proc. 4th Int. Conf. on Fluidization, 53 (1983).
- Morooka, S., Tajima, K. and Miyauchi, T.: *Int. Chem. Eng.*, **12**, 168(1972).
- Whitehead, A. B. and Young, A. D.: Proc. Int. Symp. on Fluidization, Netherlands Univ. Press, Amsterdam, **1**, 515(1967).
- Rowe, P. N. and Everett, D. F.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **50**, 55(1972).
- Werther, J.: AIChE National Meeting, Detroit(1973).
- Fryer, C. and Potter, O. E.: *AIChE J.*, **22**, 38(1976).
- Stubington, J. F., Barrett, D. and Lowry, G.: *Chem. Eng. Res. Des.*, **62**, 173(1984).
- Hatate, Y., King, D. F., Migita, M. and Ikari, A.: *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 99(1985).
- Harrison, D., Davidson, J. F. and Kock, J. W.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **39**, 202(1961).