

난류유동층으로의 전이속도 결정

남궁 원*, 김 성원, 김 상돈
한국과학기술원 화학공학과 및 에너지·환경 연구센터

Determination of Transition Velocity to Turbulent Fluidization

W. Namkung*, S. W. Kim and S. D. Kim
Dept. of Chem. Eng. and Energy & Environment Research Center
KAIST, Taejeon, Korea

서론

기포유동층에서 기상유속이 증가될 때 turbulence 는 기포의 증가로 인하여 발생한다. 이 turbulence는 압력진동에 즉각적으로 영향을 미친다 (Arnaldos and Casal, 1996). 이 영역에서는 기상유속증가에 따라 압력변이의 표준편차는 기포의 합체로 인하여 증가한다. 이때 유속이 계속 증가하면 압력변이의 표준편차가 최대인 점에 도달하게 되고, 이때의 유속이 기포유동층에서 난류유동층으로의 전이속도 (U_c) 가 된다. 이 이상의 유속으로 증가하면 큰 기포나 slug 가 작은 기포로 붕괴되어 압력변이의 표준편차는 감소하게 되며 층은 점차적으로 안정하게 된다. 난류유동층은 일반적으로 공극과 압력의 low-amplitude fluctuation 을 가지며 큰 기포나 voids 가 존재하지 않으며(Bi and Grace, 1995), 기체와 고체의 우수한 접촉효율로 인하여 연소반응 및 많은 촉매유동층 반응기는 이 영역에서 조업되고 있다. 그러나, 현재까지 기포유동층 및 고속유동층에 비하여 이에 대한 연구는 적은 편이며 turbulent 영역에 대한 명확한 정의도 이루어지고 있지 않다. 기상유속이 증가하면 기포의 합체와 공극의 증가로 인하여 층팽창이 일어난다. 층팽창은 기포유동층으로부터 전이가 일어나는 U_c 에서 최대가 되며(Rhodes and Geldart, 1986), 이후에는 freeboard 내로 입자 비산의 증가로 다시 감소하게 된다. 그러므로, 층팽창이 최대가 되는 유속에서 층팽창식을 이용하여 U_c 를 예측할 수 있다.

그러므로, 본 연구에서는 측정된 압력변이로부터 turbulent 영역으로의 전이속도를 결정하고, 층팽창을 이용하여 전이속도를 구하는 식을 제안하였다.

실험

본 연구에 사용된 실험장치를 Fig. 1 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 장치는 상승관, 사이클론, 호퍼와 loop-seal 로 구성되어 있다. 상승관은 내경이 0.1 m고 분산판으로부터 상단까지의 높이는 5.3 m 이다. 상승관은 내부의 흐름현상을 관찰하기 위하여 아크릴로 제작되었으며, 축방향으로 압력을 측정하기 위하여 0.1 m 간격으로 압력탭을 설치하였다. 공기는 유량이 조절되어 상승관의 하부에서 분산판을 통하여 반응기내로 주입되었다. 비산되는 입자는 사이클론에서 포집되어 필요시 loop-seal 를 통하여 상승관내로 재주입되었다. 본 실험에 사용된 입자

는 FCC 로써 평균입경은 $65 \mu\text{m}$, 밀도는 1720 kg/m^3 이다. 실험은 층높이를 1.0m 로 유지하면서 기상유속의 증가에 따라 층내의 압력강하를 측정하였다. 압력은 분산판위 0.1 - 0.77 m 지점에서 pressure transducer 를 사용하여 측정하였고, 여기서 나온 신호는 data acquisition system 으로 보내져 저장된후 IBM PC 에서 off line 으로 처리된다. 압력변동신호의 sampling 은 10ms 의 간격으로 41s 동안 총4100개의 data 를 수집하였다.

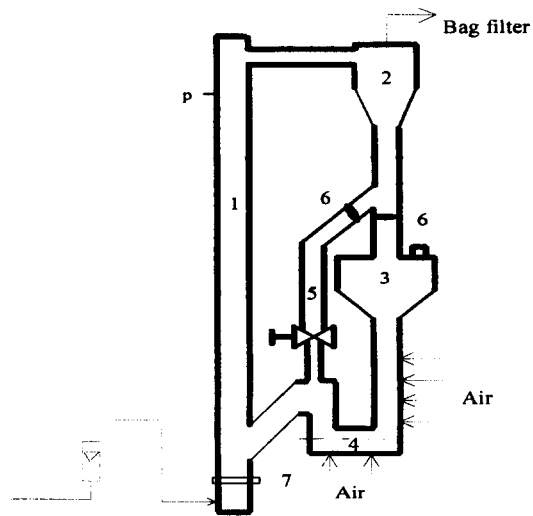


Fig. 1 Schematic diagram of apparatus
 1. riser, 2. cyclone, 3. hopper, 4. Loop-seal
 5. sampling port, 6. butterfly valve
 7. distributor, p: pressure taps

결과 및 고찰

Fig. 2 는 기상유속의 증가에 따라 층내 압력강하 fluctuation

의 평균 amplitude 와 standard deviation 의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 초기에 기상유속의 증가에 따라 평균 amplitude 와 standard deviation 은

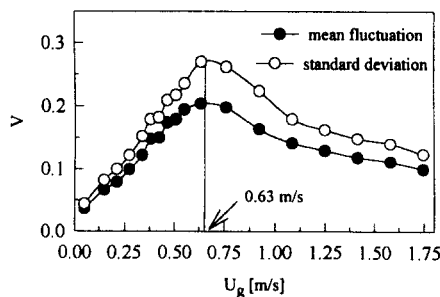


Fig. 2 Mean amplituds and standard devaioton of pressure drop fluctuations with gas velocity.

증가하였다. 이것은 기상유속의 증가에 따라 작은 기포들이 합체되어 기포의 크기가 증가하였기 때문이다. 이때 bed 의 heterogeneity 는 증가한다. 기상유속이 더욱 증가하면 기포의 크기가 층 전체를 차지할 만큼 커지게 되고, 이때 층은 가장 불안정하게 된다. 이때 압력강하 변이의 표준편차는 최대값을 갖는다. 이후에 기상유속이 증가하면 기포는 붕괴되기 시작하고 층은 점차 안정한 상태가 된다. 이때 압력변이의 표준편차가 최대가 될 때의 유속이 기포유동층에서 난류유동층으로의 전이속도 U_c 가 된다. 이 실험에서 U_c 는 약 0.63 m/s 이다. 이것은 Lee and Kim(1989) 이 제시한 상관식에 의하여 구한 값 0.65 m/s 와 잘 일치한다.

Fig. 3 에 기상유속의 증가에 따라 층내 고체체류량의 변화를 나타내었다. 그림에서 보듯이 고체체류량은 기상유속의 증가에 따라 감소하였다. 그리고, 유속의 증가에 따라 고체체류량 기울기의 변화가 관찰되는데 이때의 유속이 약 0.63 m/s 로써 이것은 압력변이의 표준편차로부터 구한 전이속도 U_c 와 일치하였다. 그러므로, 전이속도에서 고체체류량의 변이가 일어나는 것을 알 수가 있다. 이때

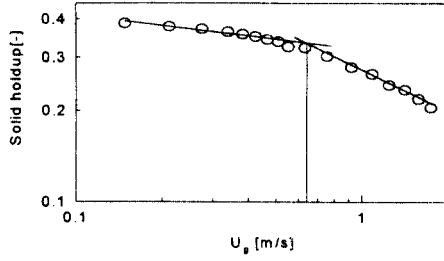


Fig. 3 Effect of gas velocity on solid holdup.

려하여 slug break-down model 을 이용하여 U_c 를 예측하였다. 본 실험에서는 전이속도 U_c 에서 층팽창이 최대가 되는 것을 이용하여 전이속도를 예측하였다. 기포유동층에서 난류유동층으로의 전이가 일어날 때의 유속 U_c 에서 bed height 는 최대값을 갖는다(Rhodes and Geldart, 1986). Bed expansion 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{H}{H_{mf}} = \frac{1 - \epsilon_{mf}}{1 - \epsilon} \quad (1)$$

그리고, slugging regime 에서의 two-phase theory 에 의한 bed expansion 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{H}{H_{mf}} = 1 + \frac{U_g - U_{mf}}{0.35\sqrt{gD_t}} \quad (2)$$

이때, 층팽창이 최대가 될 때 기포의 성장으로 기포가 반응기 전체를 차지한다고 가정하여($D_t = d_{bmax}$), 최대 기포크기는 다음과 같이 구할 수 있다(Harrison et al., 1961).

$$d_{bmax} = 1.32 \frac{\rho_s}{\rho_g} d_p \quad (3)$$

(3)식은 coarse 입자의 경우에 대하여 제안되었지만 fine 입자에도 적용 가능하다 (Sun and Chen, 1989).

그러므로, (1)=(2) 식에 (3) 식을 대입하여 U_c 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_c = U_{mf} + 0.402\sqrt{g \frac{\rho_s}{\rho_g} d_p} \left(\frac{1 - \epsilon_{mf}}{1 - \epsilon_c} - 1 \right) \quad (4)$$

(4) 식은 $\rho_s - \rho_g \approx \rho_s$ 이므로 다음과 같이 Re_c 와 Ar 형태로 나타낼 수 있다.

$$Re_c = Re_{mf} + 0.402 Ar^{1/2} \left(\frac{1 - \epsilon_{mf}}{1 - \epsilon_c} - 1 \right) \quad (5)$$

여기서, Re_{mf} 는 Wen and Yu(1966) 의 상관식을 이용하여 구할 수 있다. 여기서, ϵ_{mf} 는 0.42(Wen and Yu, 1966), ϵ_c 는 0.65(Bai et al., 1996) 을 대입하였다.

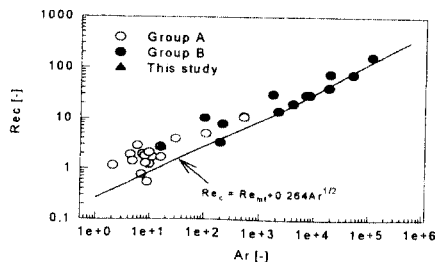


Fig. 4 Comparison of Reynolds number based on the transition velocity to the turbulent regime between the measured and calculated values from eqs. (5)

의 고체체류량은 약 0.322 로써 이것은 Lee and Kim(1990) 의 약 0.32, Bai 등(1996)이 제시한 고체 체류량 0.35와 거의 일치하였다. 현재까지 U_c 를 이론적으로 예측하고자 하는 시도가 일부 연구자들에 의해 수행되어 왔다. Cai 등(1992)은 기포의 합체와 붕괴를 고려하여 U_c 를 예측하는 model 식을 제안하였고, Lee and Kim(1989) 은 Froude number 를 고

기존의 발표된 연구자료와 식 (5) 에서 구한 Re_c 값의 비교를 Fig. 4 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 층팽창에 의하여 예측된 값은 실험값과 대체로 잘 일치하였다.

결론

기상유속의 증가에 따라 압력변이의 표준편차로부터 기포유동층에서 난류유동층으로의 전이속도를 구하였다. 이 전이속도는 약 0.63 m/s 이다. 이 전이속도에서 고체체류량의 기울기변화가 관찰되었다. 그리고, 충팽창에 대한 수식으로부터 전이속도를 예측할 수 있는 상관식을 제시하였다. 제시된 상관식은 비교적 실험결과를 잘 예측하였다.

참고문헌

- Arnaldos, J. and J. Casal, *Powder Technol.*, **86**, 285(1996).
- Bai, D., E. Shilbuya, N.Nakagawa and K.Kato, *Powder Technol.*, **87**, 105(1996).
- Bi, H.T. and Grace, J.R., *Chem. Eng. J.*, **57**, 261(1995).
- Harrison, D., J.F. Davidson and J.W.de Kock, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **39**, 202(1961).
- Lee, G.S. and Kim, S.D., *Korean J. of Chem. Eng.*, **6**(4), 338-346(1989).
- Lee, G.S. and S.D. Kim, *Powder Technol.*, **62**, 207(1990).
- Lee, G.S. and S.D. Kim, *J. Chem. Eng. Japan*, **21**(5), 515(1988).
- Rhodes, M.J. and D. Geldart, *Fluidization V*, K.Ostergaard and A.Sorenson(eds.), Engineering Foundation, New York, p.281(1986).
- Sun, G. and Chen, G., *Fluidization VI*, Grace, J.R., Schemilt, L.W. and Bregougnou, M.A. (eds.), p.33(1989).