

순환유동층에서 기체-고체 흐름 거동의 Stochastic 해석

강 용[†] · 송평섭 · 우광재 · 정의영 · 김상돈*

충남대학교 화학공학과

*한국과학기술원 화학공학과

(1997년 1월 18일 접수, 1997년 9월 8일 채택)

Stochastic Analysis of Gas-Solid Flow in a Circulating Fluidized Bed

Yong Kang[†], Pyung-Seob Song, Kwang-Jae Woo, Yi-Yeong Jeong and Sang-Don Kim*

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea

*Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejeon 305-701, Korea

(Received 18 January 1997; accepted 8 September 1997)

요 약

순환유동층에서 기체-고체의 접촉과 흐름현상의 특성을 해석하고자 riser에서의 압력요동신호를 fractal 해석방법 및 상공간 투영방법을 도입하여 해석하였다. 유동고체입자는 평균입도가 0.454 mm이고 밀도가 920 kg/m³인 폴리에틸렌을 사용하였으며 riser의 직경과 높이는 각각 0.102 m와 3.5 m이었다. 기체의 공탑속도 및 고체의 재순환속도 등의 변화가 riser내부에서 고체입자의 실제속도, 기체와 고체의 slip속도, 고체입자의 체류량의 변화 등 수력학적 특성에 미치는 영향에 대한 검토를 하였으며, 이들 변수의 변화에 따른 Hurst지수의 변화와 상공간투영의 변화를 고찰하였다. 각 실험변수의 변화에 따른 Hurst지수값은 재조정된 구간해석에 의한 Pox diagram으로부터 얻었으며, 상공간투영은 다차원상공간 투영에 의한 자료의 재구성방법에 의해 얻었다. 본 연구의 결과 riser에서 고체입자의 choking속도와 수송속도는 같은 개념으로 해석할 수 있었으며, 이 조업조건에서 Hurst지수는 최대값을 나타내었고 상공간투영은 자료에 포함된 정보상호간의 연관성과의 의존성이 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

Abstract—Pressure fluctuations in the riser of a circulating fluidized bed have been analyzed by means of stochastic analysis such as fractal analysis and phase space portrait, to analyze the characteristics of gas-solid contact and flow behavior in the riser. Polyethylene whose mean diameter is 0.454 mm and density is 920 kg/m³ has been used as a solid. The diameter and height of the riser are 0.102 m and 3.5 m, respectively. Effects of superficial gas velocity and solid circulation rate on the hydrodynamic characteristics such as solid interstitial velocity, slip velocity between gas and solid, and solid holdup have been determined. Effects of operating variables on the Hurst exponent and phase space portrait have been also examined. The values of the Hurst exponent have been recovered from the Pox diagram obtained by the rescaled range analysis of the data. The phase space portraits have been obtained by means of the rearrangement of the data by the multidimensional phase space portrait method. As a result of this study, the concept of choking velocity is very similar to that of transportation velocity in the riser. The Hurst exponent has exhibited its maximum value and the phase space portrait has focused its tracing within the limited boundary at the transition regime of gas-solid flow.

Key words: Circulating Fluidized Bed, Stochastic Analysis, Hurst Exponent, Phase Space Portrait, Gas/Solid Flow

1. 서 론

순환유동층은 석유화학공장에서 촉매 크래킹공정, 석탄의 연소공정 및 가스화공정, 라테나이트 니켈광과 같은 미세 분말의 원광을 환원하는 공정 등에 매우 효율적으로 사용되어져 왔을 뿐만 아니라, 앞으로 순환유동층의 장점들을 이용하여 이를 공업적으로 응용하려는 연구들은 현재도 국내·외를 막론하고 매우 활발하게 진행되고 있다[1-6]. 그러나, 순환유동층은 기존의 기포유동층에 비하여 매우 높은 유속으로 조업되기 때문에 유동층 내부에서 고체입자들의 격

렬한 재순환이 일어나고, 기체와 유동입자 그리고 순환되는 고체 입자들과의 접촉과 혼합현상들도 매우 격렬하여서 기존의 기포유동층과는 그 수력학적 특성이 매우 다르게 나타난다[7-9]. 이와 같은 기체-고체의 흐름특성은 순환유동층 내부에서의 열전달과 물질전달 그리고 기체-고체 반응 등에 직접적인 영향을 미치므로 순환유동층을 공업적으로 응용하기 위해서는, 유동층 내부에서의 기체-고체 흐름의 수력학적 특성을 많은 가정을 도입하여 유동층을 모델화한 후 연역적 방법으로 해석하는 방법보다는 기체-고체의 접촉과 흐름에 의해 유동층내부에서 나타나는 종합적인 특성을 통계적인 방법으로

고찰하는 것이 좀더 실제 운전되는 계에 대한 공학적 정보를 제공할 수 있다 하겠다.

순환유동층 내부에서의 기체와 고체의 접촉 및 흐름현상은 다상의 접촉현상이며 또 비선형적이고 불규칙적이며 동적(dynamic)인 것이므로 지금까지 많이 사용된 결정론적(deterministic) 해석방법으로는 그 해석이 매우 어려울 뿐만 아니라, 계의 지배방정식(governing equation)을 세웠다 하더라도 이를 풀기 위해서는 많은 가정과 모델을 도입하여야만 그 해석이 가능하므로 그 해석결과가 실제공정이거나 반응계의 거동과는 동떨어진 결과를 초래할 가능성이 많다고 하겠다 [10, 11]. 이와 같은 다상흐름의 동적계는 귀납적 개념을 도입한 통계적(stochastic)인 방법으로 매우 효율적이며 정량적으로 해석이 가능하며 또 계의 해석에서 그 계의 특성을 종합적으로 해석하는 것이 가능하므로 이에 대한 연구들이 최근 활발하게 진행되고 있다 [12-18]. 한편, 지금까지의 순환유동층에 대한 많은 연구자들의 연구는 순환유동층의 scale이나 모양, 설계조건, 조업 및 운전영역 등이 많이 다른 조건에서 이루어진 것들이었으며, 그 해석방법에서도 많은 차이가 있어서 기체-고체의 흐름특성과 흐름영역의 해석에서 많은 혼돈과 개념정립에 미흡한 점이 많았다 [19].

본 연구에서는 순환유동층에서 기체-고체의 흐름특성을 유동층 내부에서의 압력 변동 특성을 통계적인 방법으로 해석함으로써 기체-고체흐름의 수력학적 특성을 종합적으로 해석하고자 하였으며, 이를 통하여 기체-고체의 흐름영역의 변화와 기체-고체흐름의 거동 특성을 고찰하고자 하였다.

2. 해 석

본 연구에서는 순환유동층 내부에서의 압력변동 특성을 해석하기 위하여, 시간의 변화에 따른 압력 요동 자료 $X(t)$ 를 재조정된 구간 해석을 통하여 이들 자료들의 규칙성, 주기성 그리고 무작위성 등을 검토하는 fractal 해석방법과, 주어진 자료들의 상호연관성과 정보의 상호의존성 그리고 자료가 내포하고 있는 정보의 구조를 표현하기 위해서 상공간투영(phase space portraits)해석 방법을 사용하였다.

2-1. Fractal 해석 [14-16]

순환유동층 내부에서의 압력 요동을 측정된 압력 요동 신호 $X(t)$ 의 시간에 따른 series 중에서 시간 $t=1$ 에서 $t=T$ 의 영역을 선택하여 다음과 같이 압력 변동 신호의 subset를 생각할 수 있는데

$$X^*(t) = \sum_{u=1}^t X(u) \quad (1)$$

이를 이용하여 압력 요동 신호의 series 중에서 시간 $t+1$ 에서 $t+\tau$ 까지의 subrecord에서 압력 요동 신호의 평균값을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{\tau} [X^*(t+\tau) - X^*(t)] \quad (2)$$

한편, 시간 $t+1$ 에서 $t+\tau$ 까지의 subrecord에서 압력 요동 신호 $X(t, u)$ 가 그 평균값으로부터 벗어나는 편차의 합을 $B(t, u)$ 라하면, 이는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$B(t, u) = [X^*(t+u) - X^*(t)] - (u/\tau)[X^*(t+\tau) - X^*(t)] \quad (3)$$

여기서, 압력 요동 신호의 표본 연속 구간(sample sequential range), $R(t, \tau)$ 를 다음과 같이 정의하면,

$$R(t, \tau) = \text{Max } B(t, u) - \text{Min } B(t, u) \quad (4)$$

$$0 \leq u \leq \tau \quad 0 \leq u \leq \tau$$

압력 요동 자료의 시간에 따른 series 중 시간 $t+1$ 에서 $t+\tau$ 까지의 subrecord의 표본 연속 분산(sample sequential variance), $S^2(t, \tau)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S^2(t, \tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{u=t+1}^{t+\tau} X^2(u) - \left[\frac{1}{\tau} \sum_{u=t+1}^{t+\tau} X(u) \right]^2 \quad (5)$$

이들로부터 압력 요동 신호의 재조정된 구간(rescaled range), $R(t, \tau)/S(t, \tau)$ 를 다음과 같이 시간 τ 의 Power 함수로 나타낼 수 있다.

$$\frac{R(t, \tau)}{S(t, \tau)} \propto \tau^H \quad (6)$$

식 (6)에서 재조정된 구간 R/S 에 대한 소요시간(τ)을 log-log plot하면 Pox diagram을 구할 수 있고 이 그래프의 기울기가 바로 Hurst 지수이다.

한편, 압력 요동 자료의 국부적 fractal 차원(dimension)인 d_H 과 Hurst 지수인 H 와의 관계는 다음과 같으므로 이 식으로부터 압력 요동 자료의 국부적인 fractal 차원을 구할 수 있다.

$$d_H = 2 - H, \quad 0 < H < 1 \quad (7)$$

압력 변동 신호의 fractal 차원은 그 신호에 내재되어 있는 특성을 예측하는 척도가 될 수 있는데, 예를 들면 완전 Brownian 운동을 하는 신호인 경우에 fractal 차원은 1.5가 된다. 그리고 fractal 차원이 1.0에 가까워질수록 계의 안정성과 주기성이 증가한다.

2-2. 상공간 투영(Phase Space Portrait)

순환유동층 내부에서의 압력 요동 자료인 $\{X(t_k); t_k = k\Delta t, k=1, \dots\}$ 는 다차원 상공간 투영(multidimensional phase space portrait)에 의해 재구성될 수 있는데, 이 투영은 m -차원 상공간에서 $\{X(t_k), X(t_k+\tau), \dots, X(t_k+(m-1)\tau)\}$ 의 점들을 지나게 되어 있다. 이때 m 은 embedding 차원이 되며 τ 는 지체시간(time delay)이 된다.

여기서, 지체시간 τ 의 선택은 일반적으로 상투영의 재구성에 의해 가장 최적조건인 때의 값을 취하므로 본 연구에서는 다음 식에서와 같은 압력 요동 자료의 시간의 변화에 따른 상호정보함수(mutual information function)가 국부적 최소값을 갖는 때의 조건을 최적으로 잡았다.

$$I = \iint P(X, Y) \log_2 [P(X, Y)/P(X)P(Y)] dX dY \quad (8)$$

식 (8)에서 X 는 $X(t)$ 이고 $Y=X(t+\tau)$ 이며, $P(X)$ 와 $P(X, Y)$ 는 각각 확률밀도함수(probability density function)와 결합확률밀도함수(joint probability density function)이다.

3. 실험

본 연구의 실험은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직경 10.2 cm, 높이 3.5 m의 아크릴관으로 된 순환유동층을 사용하였다. 즉, Fig. 1에서 볼 수 있듯이 실험장치에는 riser와 standpipe, cyclone, 입자의 재순환 장치 그리고 riser의 각 위치에서 압력 변동을 측정할 수 있는 압력측정 장치와 저장 system으로 구성되어 있다. 유동고체 입자로는 밀도가 920 kg/m³이고 평균입도가 0.454 mm인 폴리에틸렌(polyethylene)을 사용하였으며 기체로는 압축공기를 사용하였다. 실험방법은 각 실험변수의 일정조건에서 순환유동층의 riser에서 비산된 고체입자들을 1, 2차 cyclone에서 기체와 분리하여 standpipe를 통하여 하강시킨 후 standpipe의 하단에 부착된 rotary valve를 사용하여 일정시간, 일정 유속으로 riser에 순환시키며 riser내부에서의 압력 요동을 측정하였

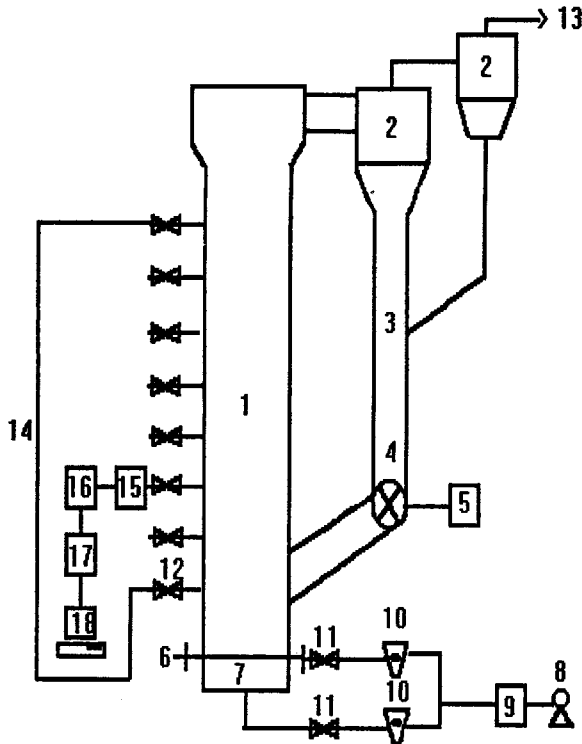


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | |
|----------------------------|-------------------|
| 1. Riser | 2. Cyclone |
| 3. Down comer | 4. Rotary valve |
| 5. Rotary valve controller | 6. Distributor |
| 7. Calming section | 8. Blower |
| 9. Air regulator | 10. Flowmeter |
| 11. Control valve | 12. Manometer tap |
| 13. Carry over | 14. Manometer |
| 15. Pressure transducer | 16. Amplifier |
| 17. A/D convertor | 18. Computer |

다. 또한 2차 cyclone을 거쳐 나온 공기에 포함된 분진을 제거하기 위해서 이들 공기는 bag filter를 거쳐 밖으로 vent시켰다. 순환유동층 내부에서 정압력과 동압력, 압력요동을 모두 측정하였는데, 정압력을 측정하기 위해서는 riser의 기체분산판으로부터 0.5 m와 1.6 m의 거리에 압력 tap을 설치하여서 이를 액체 manometer에 연결하여 압력강하를 측정하였으며, 분산판에서부터 0.6 m와 0.9, 1.2 m의 riser 벽면에서 압력 sensor를 사용하여 시간의 변화에 따른 압력 요동을 측정하였다.

압력센서는 반도체형태(copel electronics; 사용범위: 0-0.5 kg/cm², 압력오차범위: $\pm 0.3\%$, thermal error 범위: $\pm 0.02\%$)로 충분히 민감하여 riser 내부의 동압력측정에 매우 효과적이었는데, 압력 sensor로 측정된 동압력과 압력 요동(pressure fluctuation) 자료는 압력변환기를 거쳐 볼트-시간 신호로 바꾸어 증폭기와 필터를 거쳐서 A/D 변환기를 사용하여 디지털 신호로 바꾼 다음 data acquisition제에 의해 computer에 입력시킨 후 off-line으로 해석하였다. 실험변수로는 기체의 유속, 유동입자의 재순환 비율 또는 재순환량, 유동입자의 suspension density 등을 주요 실험변수로 다루었다. 각 실험조건에서 sampling rate는 42.86 Hz이었으며 sampling time은 70 sec로 하여 sample의 크기를 3,000 point로 하였다. 이와 같이 sampling rate와 sampling time은 각 조업조건에서 압력 요동 및 동압력 변화의 해석 및 분석에 충분하였다.

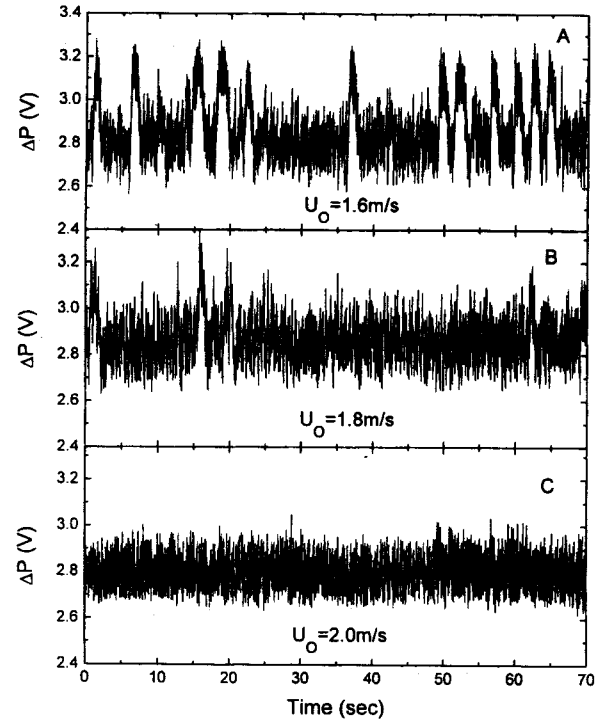


Fig. 2. Typical pressure fluctuation signals in the riser of circulating fluidized beds ($G_s = 15 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$).

4. 결과 및 고찰

순환유동층의 riser내부에서 측정된 전형적인 압력 요동 신호를 Fig. 2에 기체의 공탐속도의 변화에 따라 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 riser내부에서의 압력 요동 특성은 기체의 공탐속도에 따라 그 양상이 많이 달라지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 압력 요동의 시간에 따른 변화를 재구성된 구간(rescaled range)해석에 의해 재구성할 수 있으며 그 결과 Fig. 3에서 볼 수 있는 것과 같은 Pox diagram을 얻을 수 있었다. Fig. 3과 같은 Pox diagram으로부터 식 (6)과 (7)에 의해 Hurst지수와 국부 fractal차원을 얻을 수 있었다. 이렇게 구한 Hurst지수인 H 값을 riser내의 기체의 공탐속도의 변화에 따라 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 Hurst지수는 기체의 공탐속도가 1.65 m/s에서 1.80-1.85 m/s의 범위에서는 기체의 공탐속도가 증가함에 따라 증가하는 양상을 나타내었으나, 공탐속도가 1.80-1.85 m/s에서 1.95-2.0 m/s의 범위에서는 기체의 공탐속도가 증가함에 따라 Hurst지수인 H 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 결과는 기체의 유속이 1.65 m/s에서 1.80-1.85 m/s의 범위에서는 riser 내부에서 기체-고체의 흐름현상이 일어나는 동적계(dynamic system)가 기체의 유속이 증가됨에 따라 riser 내부에서 기체-고체흐름이 균일하고 일정해 진다는 것을 의미한다. 결국 이 유속의 범위에서는 기체의 공탐속도가 증가함에 따라 기체-고체의 흐름현상의 규칙성이나 주기성이 증가한다는 것을 의미한다. 즉 불가사의 무질서(incomprehensible disorder) 상태인 카오스에서 자기유사성(self-similarity)을 나타내는 주기적이고 안정성있는 카오스로 변한다[16, 17, 20]. 반면에, 기체의 공탐속도가 1.80-1.85 m/s에서 1.95-2.0 m/s의 범위에서는 앞에서 설명한 바와는 반대로 기체의 공탐속도가 증가함에 따라 기체-고체의 접촉흐름계에 존재하는 정보를 유지할 수 있는 확률이 감소하기 때문에 계는 점점 주기적 거동이나 규칙성 거동보다는 무작위적 거동을 나타낼 확률이 높아진다고 할 수 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 5에서 기체의 공탐속도가 순환유동층 riser내부의 고체

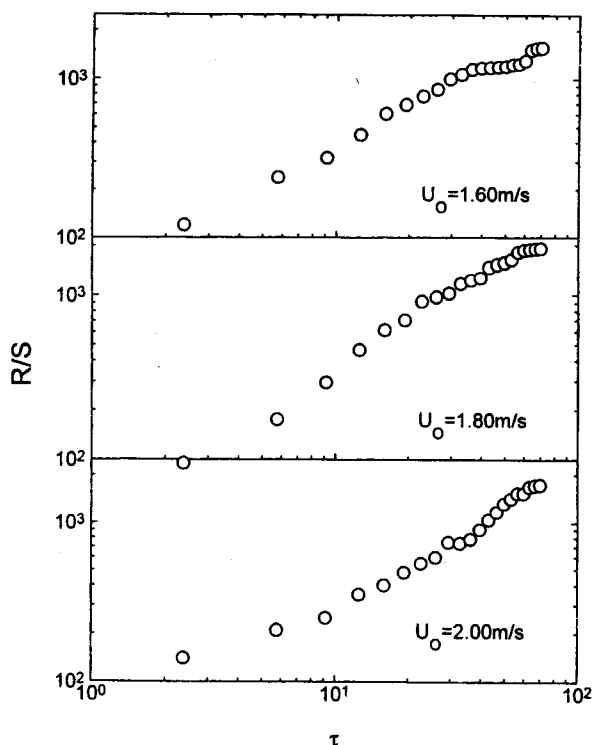


Fig. 3. Typical pox diagram from the rescaled range analysis of pressure fluctuations in the riser of circulating fluidized bed ($G_s=20 \text{ kg/m}^2\text{s}$).

입자체류량에 미치는 영향에서도 찾아볼 수 있다. 즉, Fig. 5에서 고체 입자체류량도 기체의 공탐속도가 1.80-1.85 m/s보다 낮은 범위에서는 급격히 감소하고 이 유속의 범위보다 증가된 유속의 범위에서는 완만히 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 고체입자의 체류량변화현상은 실험을 수행하면서 육안으로도 관찰이 될 수 있을 정도로 뚜렷이 나타났다. 즉, 순환유동층의 riser에서 기체의 공탐속도가 1.80-1.85 m/s의 범위보다 낮은 유속범위에서는 riser에 고체체류량이 많은 dense bed와 상대적으로 고체체류량이 적은 dilute영역의 경계인 bed height를 형성하다가 기체의 유속이 더욱 증가하면 이에 따라 riser내부의

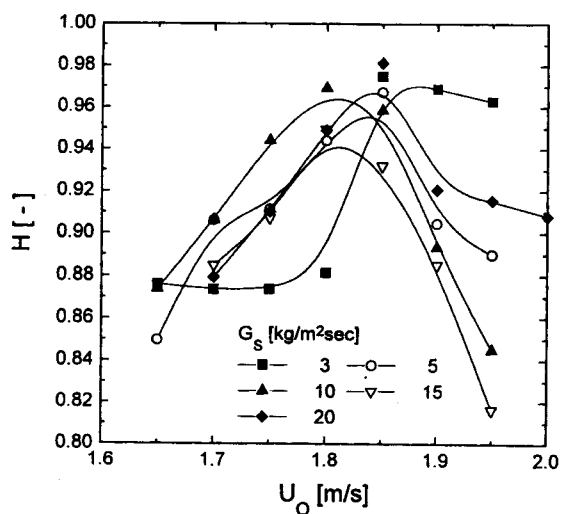


Fig. 4. Effects of superficial gas velocity on the Hurst exponent of pressure fluctuations in the riser.

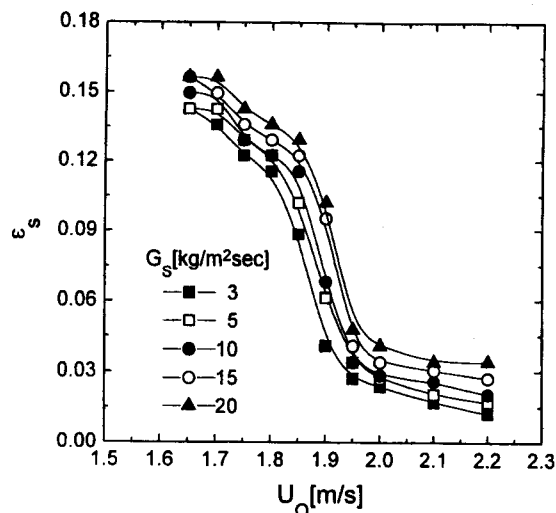


Fig. 5. Effects of superficial gas velocity on the solid holdup in the riser.

bed height가 점점 증가하다가 사라지며 기체의 공탐속도가 1.80-1.85 m/s범위가 되면 riser 전체에서 bed height가 형성되지 않으며 riser 내부전체에 입자가 균일하게 분포되면서 고체입자가 상승하는 것을 관찰할 수 있었다. Avidan과 Yerushalmi[21]는 유속에 따른 고체체류량실험을 통하여 fast 영역에서는 S모양의 형태, 즉 bottom에서는 dense phase를 top에서는 dilute phase를 나타내고 pneumatic 영역에서는 전체적으로 일정한 고체체류량의 분포를 나타낸다고 하였다.

한편, 고체입자의 riser내부에서의 실제속도 U_i (interstitial velocity)를 식 (9)와 같이 구할 수 있는데 이를 기체의 공탐속도의 변화에 따라 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 기체의 공탐속도가 1.80-1.85 m/s 범위까지는 riser내부에서의 고체입자의 실제상승속도가 0-0.1 m/s로 크게 변화하지 않다가 그 이상이 되면 0.1-2.0 m/s로 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

$$U_i = \frac{G_s}{\epsilon_s \rho_s} \quad (9)$$

또한, riser에서 기체와 고체입자의 slip속도를 식 (10)과 같이 정의될 수 있으므로 이 식에 의해 구한 기체와 고체입자의 slip속도를

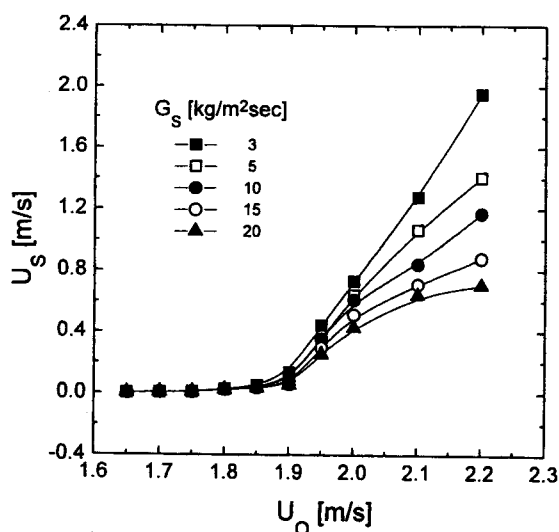


Fig. 6. Effects of superficial gas velocity on the particle interstitial velocity in the riser.

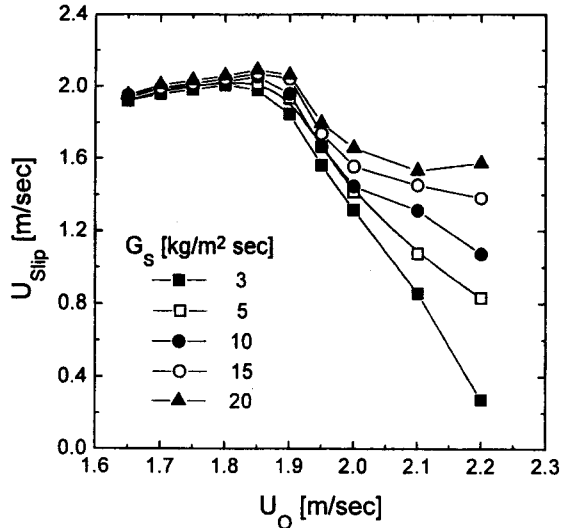


Fig. 7. Effects of superficial gas velocity on the slip velocity between gas and solid in the riser.

기체의 공탐속도의 변화에 따라 Fig. 7에 나타내었다.

$$U_{slip} = U_G - U_s = \frac{U_0}{\epsilon_g} - \frac{G_s}{\epsilon_s \rho_s} \quad (10)$$

Fig. 7에서, slip속도는 기체의 공탐속도가 1.80-1.85 m/s보다 작은 범위에서는 기체의 공탐속도의 증가에 따라 완만하게 증가한다. 이 유속범위보다 기체의 공탐속도가 더 증가하면 slip속도는 감소하는 경향을 나타내었다. Yang 등[22]은 slip velocity는 식 (10)과 같이 계산식에 의해 구할 수 있는 apparent slip velocity와 고체속도를 Laser Doppler Velocimetry(LDV)로 구하여 얻은 local slip velocity가 있다고 했으며 Matsen[23]은 고체채류량과 terminal velocity를 이용하여 slip velocity를 구하는 식을 다음과 같이 얻었다.

$$U_{slip} = 10.8U_t(1 - \epsilon_g)^{0.293} \quad (11)$$

이와 같은 현상들은 순환유동층의 riser에서 기체의 유속이 증가함에 따라 기체-고체의 흐름현상의 형태가 변화하기 때문으로 해석할 수 있다. 다시 말하면, 본 연구의 실험조건에서는 기체의 공탐속도가 1.80-1.85 m/s의 범위에서 고체입자의 수송속도(transportation velocity)가 된다고 할 수 있다[12, 13, 19].

Yousfi와 Gau[24], Yang[25], Smith[26] 및 Satija 등[13]을 비롯한 많은 연구자들은 이와 같은 현상을 초킹(choking)이라 하였으며 Drahos 등[12]도 이와 유사한 현상을 설명하고 있다. 최근에 Rhodes[19]는 개념과 현상의 측면에서 초킹속도와 수송속도는 같은 값을 나타낸다고 설명하고 있다. 실제로, 본 연구의 실험조건을 Yousfi와 Gau[24], Yang [25] 그리고 Smith[26]의 제안식에 의해 choking의 여부를 판단해 본 결과 본 연구실험의 조건에서 choking이 일어나는 것으로 나타났다.

따라서, Fig. 4.7로부터 순환유동층의 riser에서 기체-고체의 흐름 및 접촉현상은 고체입자의 수송속도근처의 조업범위에서 주기성과 규칙성이 확률적으로 가장 높으며, 이 조건에서 기체-고체의 흐름현상은 다른 조건에 비하여 비교적 균일한 거동을 나타낸다고 볼 수 있다.

부유밀도를 변화시키는 가장 큰 요소는 공탐속도와 고체순환속도이다. 따라서 공탐속도에 따른 Hurst지수를 Fig. 4에 나타내었으며 고체순환속도에 따른 Hurst지수는 공탐속도에 따른 변화와 유사하였다. 순환유동층의 여러 조업조건에서 부유밀도(suspension density)의 변화에 따른 기체-고체입자의 흐름과 접촉현상의 해석은 순환유동층의 조업조건결정에 매우 중요한 요소가 되므로 부유밀도의 변

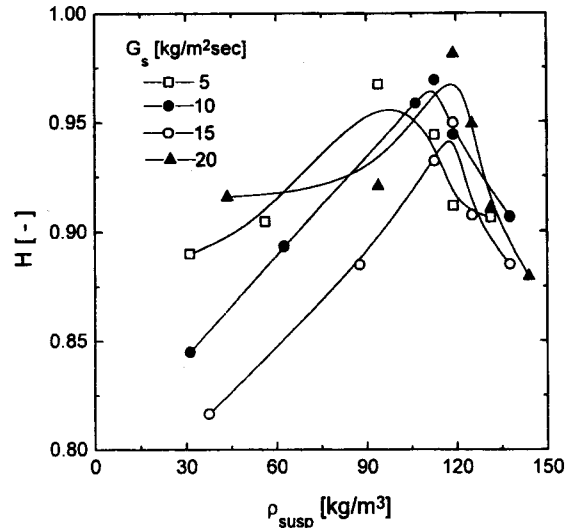


Fig. 8. Effects of suspension density on the Hurst exponent of pressure fluctuations in the riser.

화에 따라 riser내부에서 얻은 압력변동신호로부터 Hurst지수를 구하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 riser내부에서 기체-고체 혼합물의 부유밀도가 변화함에 따라 Hurst지수인 H값은 최대값을 나타내고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 Hurst지수의 값이 최대값을 나타내는 조업조건에서 riser내부에서 기체-고체의 접촉과 흐름 현상이 상대적으로 균일하다고 판단되기 때문에, 주어진 조건에서 riser에서의 기체-고체혼합물의 부유밀도(suspension density)는 Hurst 지수가 최대값을 나타낼 때의 운전조건에서 조업하는 것이 riser내부에서의 기체-고체반응효율이나 접촉효율의 증대에 바람직하다고 하겠다. 또한 Fig. 8에서 Hurst지수가 최대값을 나타낼 때의 기체-고체 혼합물의 부유밀도는 고체입자의 순환속도가 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

순환유동층의 riser에서 고체입자의 실제속도(interstitial velocity)인 U_s 의 변화가 riser 내부의 압력요동 자료로부터 해석된 Hurst지수인 H값에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 본 연구의 실험조건에서 고체입자의 실제속도가 0.03-0.05 m/s의 범위에서 H값이 최대값을 나타내었는데, 이는 이와 같은 조업조건

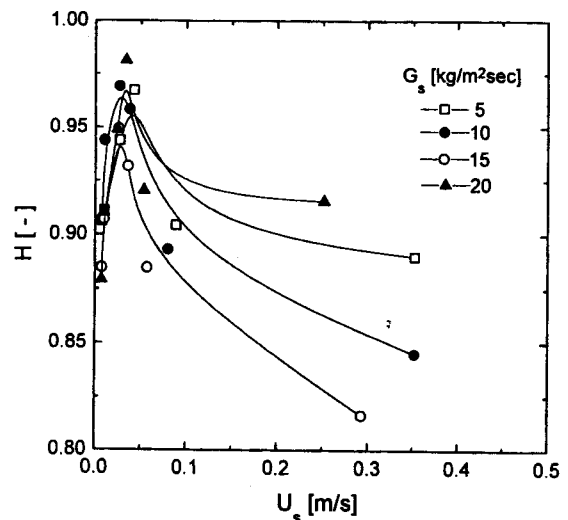


Fig. 9. Effects of particle interstitial velocity on the Hurst exponent of pressure fluctuations in the riser.

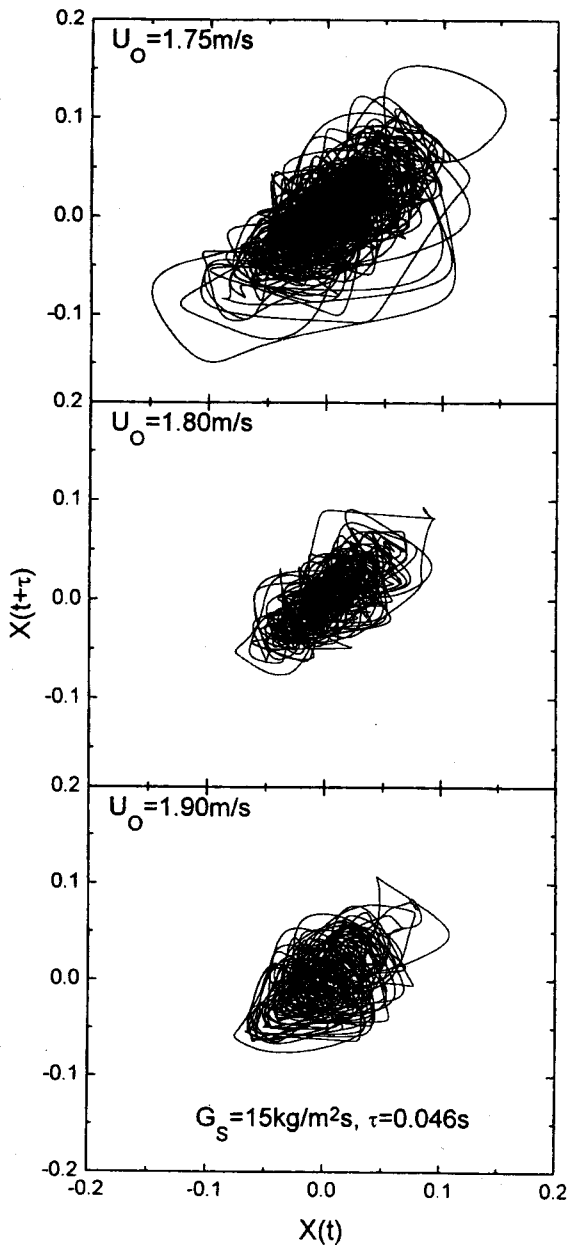


Fig. 10. Phase space portrait of pressure fluctuations in the riser.

에서 riser 내부의 기체-고체의 접촉과 흐름현상이 다른 조업조건에서와 비교하여 비교적 일정하고 안정적이며 주기성과 규칙성을 나타낸다고 볼 수 있다.

이와 같은 현상들의 해석결과 순환유동층의 riser에서 기체-고체의 접촉 및 흐름현상은 완전한 회박흐름양상이 나타나기 바로 직전의 상태에서 기체와 고체의 혼합물이 riser 전체에 비교적 균일하게 분포되며 이때의 접촉과 흐름상태가 계의 내부에 존재하는 정보를 비교적 잘 보존할 수 있는 상태(persistent)라 할 수 있다. Smith[26]는 초킹속도(choking velocity)일 때의 조업조건에서 riser에서 기체-고체혼합물의 접촉과 흐름이 가장 잘 일어나며 매우 안정한 흐름을 나타낸다고 하였으며 이때에 그 흐름영역(flow regime)이 바뀐다고 하였다.

이와 같은 현상은 압력 요동 신호의 time series를 상공간 해석한 결과에서도 도식적으로 볼 수 있다. 본 연구에서 상공간투영은 지체 시간(time delay) τ 가 0.046 sec인 경우에 시간의 변화에 따른 정보의 상호정보함수가 최초로 국부적 최소값을 나타내기 때문에 이 값을

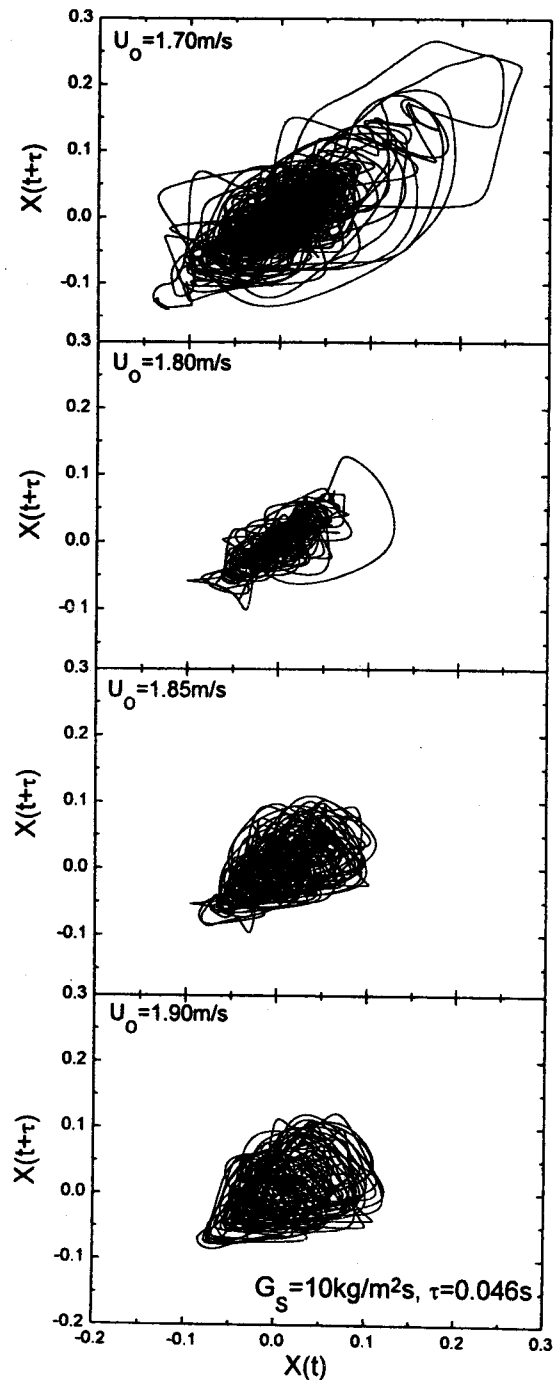


Fig. 11. Phase space portrait of pressure fluctuations in the riser.

지체시간으로 선택하였다.

Fig. 10과 11에서 볼 수 있듯이 압력 요동 신호의 상공간투영은 고체 순환속도 G_S 가 $15 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 및 $10 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 일 때 riser에서 기체의 공탐속도가 1.80 m/s일 때에 계에 내포된 정보의 유지와 수렴이 상대적으로 용이한 것으로 나타나 있다. 이는 앞에서 설명한 fractal 해석의 결과와도 일치하며, 이와 같은 조건을 조업조건으로 선택하는 것은 기체-고체의 접촉이나 반응효율의 증대에 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

5. 결 론

이와 같은 본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 순환유동층의 riser에서 기체-고체 흐름거동의 해석에 재조정된 구간 해석을 통한 fractal 해석방법과 상공간투영(phase space portrait)방법은 매우 효과적으로 적용될 수 있었으며 이 방법들을 사용하여 riser에서 기체-고체의 흐름거동을 하나의 파라미터로 나타낼 수 있었다.

(2) 순환유동층의 riser에서 압력 요동의 time series로부터 해석된 Hurst지수는 기체의 공탐속도가 choking속도 또는 수송속도보다 작은 범위에서는 기체의 공탐속도가 증가함에 따라 증가하다가 이 속도의 범위에서는 최대값을 보이고 이 choking속도 또는 수송속도보다 공탐속도가 커지면 기체의 공탐속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

(3) 순환유동층의 riser에서 얻은 압력요동자료의 상공간투영 해석결과 기체의 공탐속도가 choking속도 또는 수송속도의 범위에서는 자료에 내포된 정보의 분산이 상대적으로 작았다. 즉, 기체유속이 초킹속도 또는 수송속도와 유사한 값을 가질 때 기체-고체 혼합물의 접촉이 가장 잘 일어나고 흐름 또한 균일하고 안정적으로 나타났다. 따라서 이 범위에서는 기체-고체의 접촉이나 흐름현상을 나타내는 정보상호간의 연관성과 의존성이 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 재현성이 크다고 할 수 있다.

(4) 순환유동층의 riser에서 기체-고체의 접촉 및 흐름현상해석에서 choking 속도와 수송속도(transportation velocity)는 같은 개념으로 나타났으며, 이 조건의 조업조건에서 기체-고체흐름현상의 flow regime이 변환하였고 이 변환을 통계적 해석방법으로 매우 효과적으로 감지할 수 있었다.

감 사

본 연구는 1995년도 교육부지원 학술진흥재단의 국제협력연구과제 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

사용기호

d_{FL}	: local fractal dimension
d_p	: particle size [m]
G_s	: circulation rate of solid particles [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
H	: Hurst exponent
I	: mutual information function
$P(X)$: probability density function
$P(X, Y)$: joint probability density function
$R(t, \tau)$: sample sequential range for lag τ
$S^2(t, \tau)$: variance
t	: time [sec]
T	: total available sample size
u	: time lag [sec]
U_0	: superficial velocity of gas [m/s]
U_G	: interstitial velocity of gas [m/s]
U_s	: interstitial velocity of particles [m/s]
U_{slip}	: slip velocity between gas and solid [m/s]
$X(t)$: time series [v]
$X'(t)$: subset of time series [v]

그리스 문자

ϵ_s	: solid holdup [-]
ρ_s	: solid density [kg/m^3]

τ : time lag [sec]

하첨자

G	: gas
S	: solid

참고문헌

1. Yersalmi, J. and Cankurt, N. T.: *Powder Technol.*, **24**, 187(1984).
2. Geldart, D. and Rhodes, M. J.: *Circulating Fluidized Bed Technology*(ed. Basu, P.), 21(1986).
3. Horio, M., Ishii, H. and Nishimuro, M.: *Powder Technol.*, **70**, 229(1992).
4. Ahn, G. R. and Han, G. Y.: *Proc. 5th International Conf. on Circulating Fluidized Beds*, May 28-June 1, HM7 Beijing(1996).
5. Basu, P. and Nag, P. K.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **30**, 2399(1987).
6. Ouyang, S., Li, X. G. and Potter, O. E.: *AIChE J.*, **41**, 1534(1995).
7. Choi, J. H., Park, J. H., Choung, W. M., Kang, Y. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **12**, 141(1995).
8. Cho, Y. J., Namkung, W. and Kim, S. D.: *Proc. 6th Symp. on Chem. Eng.*, September 6-7, Taejeon, 9(1993).
9. Namkung, W. and Kim, S. D.: *Proc. 5th Asian Conf. Fluidized Beds and Three Phase Reactors*, December 16-20, Taiwan 147(1996).
10. Huilin, L., Gidaspow, D. and Bouillard, J. X.: *AIChE Symp. Series*, **91**(308), 103(1995).
11. Daw, C. S. and Halow, J. S.: *AIChE Symp. Series*, **88**(289), 61(1992).
12. Drahos, J., Cermak, J., Guardani, R. and Schiigerl, K.: *Powder Technol.*, **56**, 41(1988).
13. Satija, S., Young, J. B. and Fan, L. S.: *Powder Technol.*, **43**, 257(1985).
14. Kang, Y., Woo, K. J., Ko, M. H. and Kim, S. D.: *Proc. 5th International Conf. on Circulating Fluidized Beds*, May 28-June 1, Beijing, MSD3(1996).
15. Kang, Y., Shim, J. S., Kim, S. D., Ko, M. H. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **13**, 317(1996).
16. Fan, L. T., Kang, Y., Yashima, M. and Neogi, D.: *AIChE J.*, **39**, 513(1993).
17. Kang, Y., Ko, M. H., Kim, S. D., Yashima, M. and Fan, L. T.: *AIChE J.*, **42**, 1164(1996).
18. Kim, S. D. and Kang, Y.: "Mixed Flow Hydrodynamics", Chermisimiff, N. P. ed. Gulf Pub. Co., 845(1996).
19. Rhodes, M.: *Proc. of 5th International Conf. on Circulating Fluidized Beds*, May 28-June 1, DT5, Beijing(1996).
20. Mandelbrot, B. B. and Van Ness, J. W.: *SIAM Rev.*, **10**, 422(1968).
21. Avidan, A. and Yerushami, J.: *Powder Technol.*, **32**, 223(1982).
22. Yang, Y.-L., Jin, Y. and Bi, H. T.: *AIChE Symp. Series*, **296**(89), 81(1992).
23. Matsen, J. M.: *Powder Technol.*, **31**, 21(1982).
24. Yousfi, Y. and Gau, G.: *Chem. Eng. Sci.*, 29(1974).
25. Yang, W. C.: *Powder Technol.*, **35**, 143(1983).
26. Smith, T. N.: *Chem. Eng. Sci.*, **33**, 745(1983).