

## 삼상유동층에서 압력변동의 Spectral 해석

강 용\* · 우광재 · 고명한 · 김상돈\*

충남대학교 화학공학과

\*한국과학기술원 화학공학과

(1995년 7월 14일 접수, 1995년 9월 27일 채택)

## Spectral Analysis of Pressure Fluctuations in a Three Phase Fluidized Bed

Yong Kang<sup>†</sup>, Kwang Jae Woo, Myung Han Ko and Sang Done Kim\*

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

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

(Received 14 July 1995; accepted 27 September 1995)

### 요 약

직경 0.152 m, 높이 2.5 m인 삼상유동층에서 압력변동신호를 power 스펙트럴 밀도함수를 이용하여 해석하였으며, 그 거시적 거동을 검토하였다. 기체유속(0.01-0.07 m/s), 액체유속(0.06-0.18 m/s) 그리고 고체 유동입자의 크기(0.001-0.006 m) 등을 변수로 선정하였으며 이들 변수들이 압력변동신호의 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 삼상유동층에서 압력변동의 스펙트럴 지수는 기체유속이 증가하면 감소하였고, 유동입자의 크기가 증가하면 증가하였으나 액체유속의 증가에 따라서는 국소적인 최대값을 나타내었다. 압력변동의 스펙트럴 지수로 나타낸 삼상유동층에서 다상의 접촉거동은 persistent한 것으로 나타났으나 높은 차원의 deterministic chaos 특성을 나타내었다. 삼상유동층에서 압력변동자료  $X(t)$ 의 스펙트럴 지수는 등방난류 이론에 의한 무차원 유동입자의 크기와 무차원 유체유속의 상관식으로 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$\alpha = 4.445 \left( \frac{d_p}{D_r} \right)^{0.0668} \left( \frac{U_L}{U_L + U_G} \right)^{0.7100}$$

**Abstract**—Pressure fluctuation signals from three phase fluidized beds(0.152 m ID×2.5 m in height) have been analyzed by means of the power spectral density function. Effects of gas flow rate(0.01-0.07 m/s), liquid flow rate(0.06-0.18 m/s) and particle size(0.001-0.006 m) on the characteristics of pressure fluctuations have been investigated. The spectral exponent obtained from the spectral analysis of pressure fluctuations from three phase fluidized beds has decreased with an increase in the gas flow rate, but it has increased with particle size, however, it has attained its local maximum with the variation of liquid flow rate. The flow behavior resulting from multiphase contact in three phase fluidized beds has been appeared to be persistent and it can be characterized as a higher order deterministic chaos. The spectral exponent has been well correlated in terms of dimensionless particle size and dimensionless fluid velocity based on the isotropic turbulence theory.

**Key words** : Spectral Analysis, Pressure Fluctuations, 3-phase Fluidized Bed

### 1. 서 론

삼상유동층은 기체와 액체의 흐름에 고체 입자들이 유동하고 있는 계이므로 다상간의 접촉에 의해 그 흐름현상이 난류의 흐름형태를 나타내는 것이 대부분이며, 이와 같은 흐름형태에서 조업해야만 삼상유동층을 응용한 반응기나 접촉기 또는 다상의 흐름공정에서 삼상유동층의 장점이나 특성을 효율적으로 이용할 수 있다 하겠다. 다시 말하면, 기체, 액체, 고체간의 매우 효율적인 접촉이나 유동층 내부에서의 탁월한 열전달 및 물질전달 등의 삼상유동층의 특성은 주어져 있는 삼상유동층계에서 그 조업조건에 따라 다르게 나타난다[1-3].

따라서, 가장 효율적인 삼상유동층의 공업적 응용이나 그 효용가치의 증대를 위해서는 선정된 주요 조업변수의 변화에 따라 각 조업조건에서 삼상유동층의 수력학적 특성의 해석은 필수적이라 하겠다. 특히, 삼상유동층을 이용한 반응기와 접촉공정의 설계나 공업화를 위해서는 삼상유동층의 동특성에 대한 해석과 이에 대한 자료는 매우 중요하다 하겠다.

삼상유동층에서는 정적(static) 특성보다는 동적(dynamic) 특성이 전체의 특성을 좌우하고 지배하며, 다상의 순간적인 접촉현상으로 인해 균일한 매체의 성질로 일관성있고 쉽게 예견할 수 있게 나타나는 결정론적계(deterministic system) 아니고, 시간이나 위치에 따라 변화하면서 무작위하게 나타나므로 통계론적계(stochastic system)로

그 해석방법을 강구해 왔다[4-8].

이와 같은 stochastic 방법에 의한 삼상유동층의 미시적, 거시적 현상의 해석 및 모델링은 각각의 방법에 따라 특징적으로 특정현상의 규명이나 해석에 매우 효율적인 것으로 알려져 있다. 즉, 삼상유동층에서 압력변동을 자기상관함수(autocorrelation function)를 사용하여 해석할 경우에는 다상간의 접촉현상이나 기포의 거동에 대한 주기적 요소에 대한 해석에 매우 효율적이며, fractal 해석방법을 사용하여 해석할 경우에는 유동층 내부에서 다상간의 접촉과 흐름현상에 의해 나타나는 무작위적 요소(random component)의 해석에 매우 효율적인 것으로 보고되고 있다[4-8].

본 연구에서는 삼상유동층에서 기체-액체-고체의 각 상들의 흐름과 접촉현상에 따른 유동층 내부에서의 수력학적 특성을 정량적으로 나타내고자 power spectral 밀도함수를 이용한 spectral 해석을 하였으며, 삼상유동층의 거시적 거동을 파라미터(parameter)화 하여 주요 실험변수에 따른 거시적 거동의 변화를 검토함으로써 거시적 거동과 실험변수의 상관성을 고찰하고자 하였다. 또한 삼상유동층내에서 다상의 흐름현상이 chaotic 거동을 나타내는지의 여부를 검토하고자 하였다.

이와 같은 연구는 국내 · 외적으로 매우 미약한 삼상유동층의 거동해석과 제어(control) 그리고 결점진단(fault diagnosis) 등에 획기적인 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 해 석

삼상유동층내에서 압력변동을 시간에 따른 변화 기록 자료들(historical random data)로부터 무작위적 과정(random process)으로 나타낼 수 있는데, 압력변동을 나타내는 시간응답기록  $X(t)$ 의 앙상블을 임의의 시간  $t$ 에서 평균하면 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$X_M(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) P(X:t) dX \quad (1)$$

식 (1)에서 일차 확률밀도함수  $P(X:t)$ 가 시간에 무관하면 이 계는 에르고딕(ergodic)하며, 정지상태(stationary state)의 통계적 성질을 가지므로 확률밀도함수  $P(X)$ 로 나타낼 수 있으며, 계의 평균값은 식 (2)와 같이 쓸 수 있다[9-10].

$$X_M(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) P(X) dX \quad (2)$$

또한, 정지상태 응답자료인 압력변동의 자기상관함수(autocorrelation function)는 식 (3)과 같이 정의되며, 스펙트럴 밀도함수(power spectral density function, PSDF)는 자료의 직접 푸리에 변환(Fourier Transformation)이나 상관함수의 푸리에 변환 등으로 구할 수 있으므로[9-10], 식 (4)와 같이 압력변동의 자기상관함수를 푸리에 변환하여 나타낼 수 있다.

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) X(t+\tau) dt \quad (3)$$

$$G_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4)$$

식 (4)에서  $j$ 는 복소수를 나타낸다.

한편, 시간응답자료  $X(t)$ 의 power 스펙트럴 밀도함수의 형태는 그 자료의 거시적 특성을 나타내는데, 진동수(frequency)의 변화에 따른 스펙트럴 밀도의 변화양상에 따라 그 자료속에 내재해 있는 자체유사성(self-similarity)이나 자체연고성(self-affinity)을 예측할 수 있다[11-15].

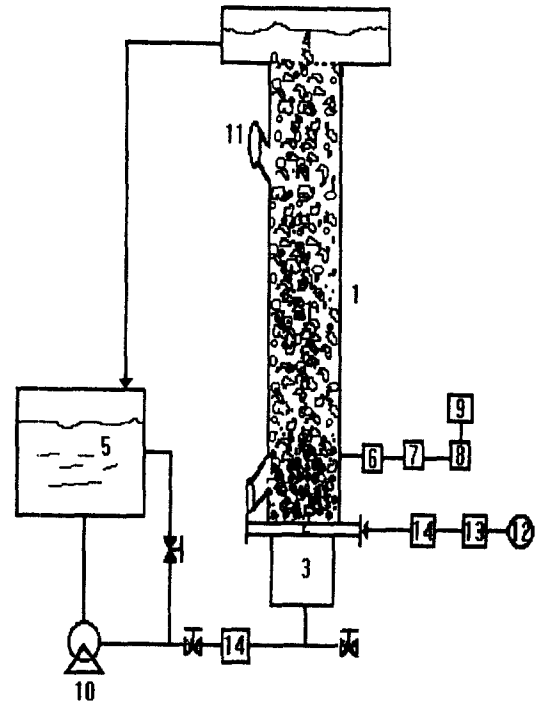


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus:

- |                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| 1. Main column         | 8. A/D converter       |
| 2. Distributor         | 9. Computer            |
| 3. Calming section     | 10. Pump               |
| 4. Weir                | 11. Solid loading port |
| 5. Liquid reservoir    | 12. Compressor         |
| 6. Pressure transducer | 13. Filter & Regulator |
| 7. Amplifier           | 14. Rotameter          |

즉, 진동수의 변화에 따른 스펙트럴 밀도함수의 log-log plot으로부터 스펙트럴 지수(spectral exponent)를 얻을 수 있는데, 이 스펙트럴 지수는 시간응답자료  $X(t)$ 의 무작위적 요소를 정량적으로 나타내므로 이 값으로부터 시간응답자료의 특성을 예측할 수 있다.

## 3. 실험

실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같은 직경 0.152 m이고 높이가 2.5 m인 아크릴관을 사용하였으며, 연속상인 액체는 물을 분산상인 기체와 유동입자로써 압축공기와 밀도가  $2500 \text{ kg/m}^3$ 인 유리구슬을 사용하였는데, 실험범위는 기체유속이 0.01-0.07 m/s, 액체유속이 0.06-0.18 m/s 그리고 유동입자의 크기는  $1.0-6.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ 이었다. 기체와 액체가 유동층내에 잘 분산되도록 하기 위하여 기체와 액체를 같은 면에서 유동층에 주입시킬 수 있도록 분산판을 제작하였다[16-20]. 유동층에서의 전체 압력강하 및 유동층의 높이 측정을 위하여 유동층 벽면에 분산판으로부터 0.15 m의 높이에서부터 0.15 m 간격으로 압력탭을 설치하여 이들을 액체 마노미터에 연결하여서 정압력강하(static pressure drop)를 측정하였다. 유동층 내부에서의 동압력(dynamic pressure drop) 측정을 위한 압력센서를 분산판으로부터 0.1 m와 0.2 m 높이에 각각 설치하였으며, 이를 압력변환기(semiconductor type, Copel Electronics)를 사용하여 volt-time 신호로 바꾸어 증폭기와 A/D 변환기를 거쳐 30 Hz 이내의 자료를 자료수집계(data acquisition system, PCLS-805 SNAPSHOT, Master Lab Card)에 의해 PC에 입력시켰으며, off-line process로 통계적 처리를 하였다. 각 실험조건에서 sample의 크기는 3000 point였으며 sampling rate는

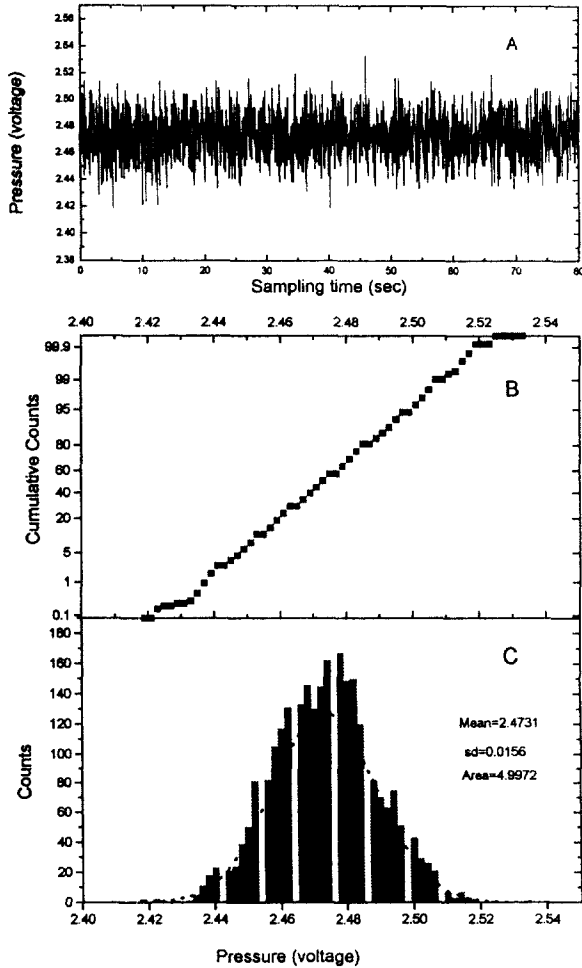


Fig. 2. Typical histogram and probability plots at the steady state in three phase fluidized beds( $d_p=3$  mm,  $U_c=0.05$  m/s,  $U_L=0.10$  m/s,  $H=0.10$  m).

31 ms이었는데, 이는 각 조건에서의 압력요동(pressure fluctuations) 및 동압력 변화 해석에 충분하였다. 통계적 처리에 사용한 자료는 재현성을 고찰하기 위하여 2-4회 측정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

삼상유동층이 일정조업조건에서 정상상태에 도달된 다음 측정된 압력변동신호는 Fig. 2A에서 보는 바와 같이 시간의 변화에 따라 volt-time signal로 나타났다. 이를 압력변동 크기에 따른 누적 퍼센트로 나타내면 Fig. 2B와 같으므로, 이를 확률밀도함수로 나타내면 Fig. 2C와 같다. 이렇게 구한 각 유동조건에서의 확률밀도함수  $P(X)$ 를 사용하여 식 (2)에 의해 압력변동신호의 평균값을 구하였으며, 이 평균값을 사용하여 각 유동조건에서 구한 압력변동신호 자료들을 재정리한 자료들이 Fig. 3과 4이다.

삼상유동층에서 기체유속의 증가는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 압력변동신호의 진폭의 증가를 가져오는데, 이는 기체유속의 증가에 따라 삼상유동층 내부에 형성되어 상승하는 기포의 크기가 증가되기 때문으로 해석할 수 있다. 삼상유동층에서 기체유속의 증가는 기포의 크기만 증가시키는 것이 아니고 기포의 갯수도 뚜렷이 증가시키는데 이 기포 갯수의 증가는 압력변동신호의 밀도로서 예측할 수 있다. 즉, Fig. 3에서 볼 수 있듯이 압력변동신호의 요동밀도는 기체의 유속이 증가함에 따라 점차적으로 증가되고 있음을 알 수 있다.

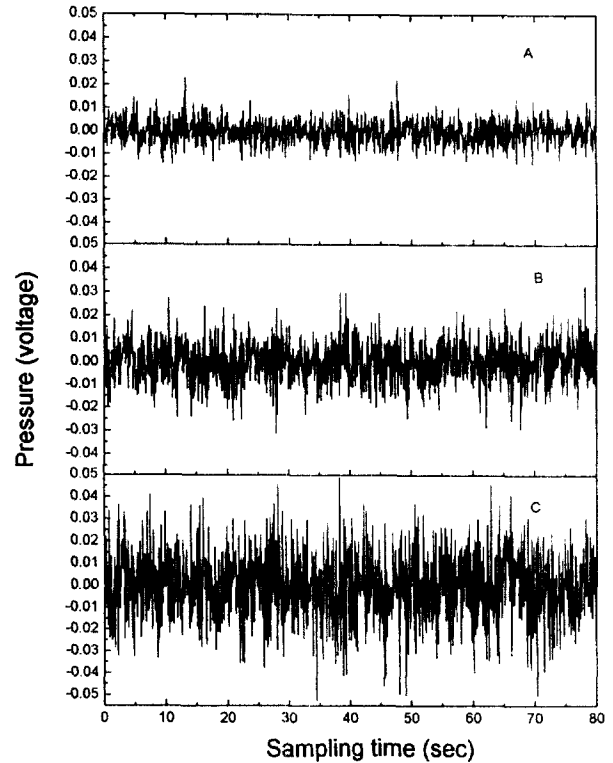


Fig. 3. Typical pressure fluctuation signals at the steady state in three phase fluidized beds( $d_p=1$  mm,  $U_L=0.10$  m/s,  $H=0.10$  m).

	A	B	C
$U_g$ (m/s):	0.03	0.05	0.07

삼상유동층에서 유동입자의 크기 변화에 따라 압력변동신호가 변화하는 양상을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서, 유동입자의 크기가 6 mm인 경우에는 유동입자의 크기가 1 mm나 3 mm인 경우보다 압력변동신호의 진폭이 작음을 쉽게 식별할 수 있는데, 이는 유동입자의 크기가 6 mm인 경우에 삼상유동층 내부에 존재하는 기포를 효과적으로 분쇄해 줄 수 있어서 기포의 크기가 대체적으로 감소하기 때문으로 해석할 수 있다[1,3,5]. 또한 Fig. 4의 A, B에서 볼 수 있듯이 1 mm와 3 mm 입자의 삼상유동층에서 일반적으로 발견할 수 있는 기포의 합체현상은 심각하게 나타나지 않았는데, 그 이유는 Fig. 4A와 B의 유동조건은 기체유속이 5 cm/s로 이미 유동입자에 의한 기포의 합체가 심각하게 일어나는 영역을 벗어났기 때문으로 해석할 수 있다[1-3].

각 유동조건에서 압력변동 특성을 해석하여 그 유동조건에서 삼상유동층의 거시적 거동을 분석하고자 Fig. 3, 4와 같은 압력변동신호들을 식 (3)과 (4)를 이용하여 각 유동조건에서의 진동수(frequency)에 따른 power 스펙트럼 밀도를 구하였으며, 이들 power 스펙트럼 밀도함수를 log-log 스케일로 Fig. 5와 6에 나타내었다. 시간의 변화에 따른 어떤 자료(time series)의 power spectra는 그 자료의 내부에 내재해 있는 어떤 규칙성이나 특성 또는 불규칙의 정도나 무작위의 연계성 등을 나타낼 수 있는데, 이 time series의 거시적 거동은 power 스펙트럼 밀도함수의 log-log plot으로 얻을 수 있는 기울기, 즉 power 지수로 파라미터화 할 수 있다[11-15]. Fig. 5와 6에서 볼 수 있듯이 주어진 유동조건에서 압력변동자료  $X(t)$ 의 power 스펙트럼 밀도는 진동수가 1.0 이하일 때에는 거의 일정한 값을 나타내다가 1.0 이상으로 진동수가 증가해감에 따라 power law로 감소해 가는 것을 알 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 식 (5)와 같이 쓸 수 있으므로

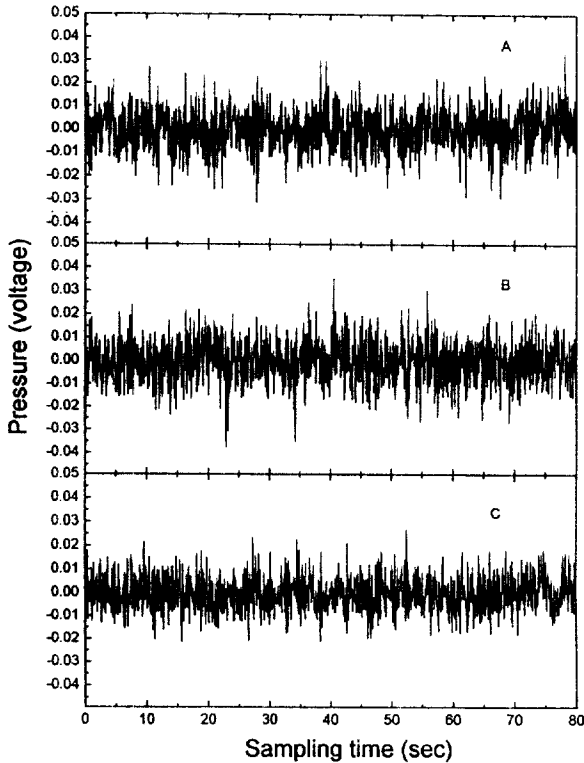


Fig. 4. Typical pressure fluctuation signals at the steady state in three phase fluidized beds ( $U_0=0.05$  m/s,  $U_L=0.10$  m/s,  $H=0.10$  m).

	A	B	C
$d_p$ (mm):	1	3	6

$$G_{xx} \propto f^{-\alpha} \quad (5)$$

각 유동조건에서 얻은  $X(t)$ 의 power 스펙트럼 밀도함수의 log-log plot으로부터 power 지수  $\alpha$ 를 구할 수 있는데, 이 power 지수는 각 유동조건에서 time series  $X(t)$ 의 특성에 따라 변화하였다.

다시 말하면, power 지수의 값으로 그 자료에 내재해 있는 특성을 정량적으로 나타낼 수 있는데, Schroeder[13]에 의하면 power 지수인  $\alpha$ 값이 2이면 그 time series  $X(t)$ 는 Brownian 거동을 나타내며  $\alpha$ 값이 0이면 그 자료는 white noise로써 거의 모든 정보를 예측할 수 없는 자료로 알려져 있다.

Fig. 5에서 A와 B는 입자크기가 3mm인 유동층에서 다른 유동조건은 같으면서 기체유속만 A는 3cm/s이고 B는 7cm/s인 경우를 나타내었는데, 기체유속이 증가하면 power 스펙트럼 밀도함수에서  $\alpha$ 값이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 6은 다른 유동조건은 같으면서 유동입자의 크기가 다른 경우 즉, 1mm인 경우(A)와 6mm인 경우(B)에 대해 각각 스펙트럼 밀도함수의 변화양상을 나타내었는데, 이 그림들에서 볼 수 있듯이 유동입자의 크기가 큰 경우가 작은 경우보다  $\alpha$ 값은 크게 나타났다. 이와 같이 삼상유동층에서의 압력변동자료  $X(t)$ 의 power 스펙트럼 함수가 진동수 증가에 따라 지수적으로 감소(power law decay)하는 경향을 나타내는 것은 삼상유동층의 거동이 높은 차원의 deterministic chaos 특성을 나타내고 있기 때문인 것으로 해석할 수 있다[12, 14].

Fig. 5, 6과 같은 방법으로 구한 time series  $X(t)$ 의 power 지수인  $\alpha$ 값을 주요실험변수인 기체유속, 액체유속 그리고 유동입자의 크기의 변화에 따라 각각 Fig. 7-9에 나타내었다. Fig. 7에서 power 지수  $\alpha$ 값은 모든 경우에 기체유속의 증가에 따라 감소하였는데, 이는 기

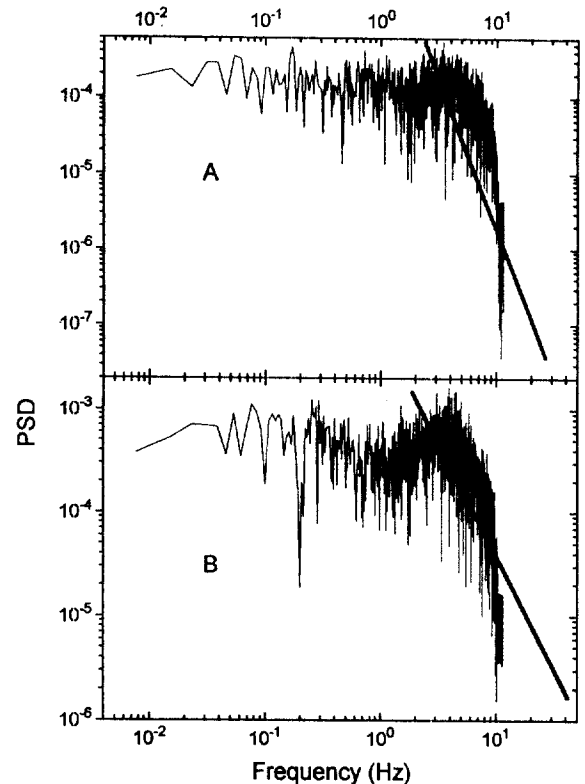


Fig. 5. Log-Log plots of power spectra of pressure fluctuations from three phase fluidized beds ( $d_p=3$  mm,  $U_L=0.10$  m/s,  $H=0.10$  m).

	A	B
$U_0$ (m/s):	0.03	0.07

체유속의 증가에 따라 time series  $X(t)$ 의 영속성(persistence)이 감소한다는 것을 의미한다[12, 13]. 이로부터 삼상유동층에서 기체유속이 증가함에 따라 이 유동층의 거시적인 거동의 예측확률이 떨어지며 무작위적 거동의 정도가 증가한다고 할 수 있다. 이와 같은 현상은 삼상유동층에서 기체유속이 증가함에 따라 유동층 내부에 형성되는 난류의 강도가 강해지고 난류로 인한 eddy의 크기가 커지기 때문이라고 판단된다.

삼상유동층에서 액체의 유속이 power 스펙트럼 밀도함수의 power 지수에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 power 지수  $\alpha$ 값은 액체유속이 증가함에 따라 증가하다가 국소적인 최대값을 보인 후 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 액체유속이 낮은 범위에서는 액체유속이 증가함에 따라 삼상유동층 내부에서 다상들의 접촉과 흐름현상에 의해 종합적으로 표시되는 유동층의 거시적인 거동이 점점 영속성을 증가시키는 방향으로 나타나고 무작위적 요소의 감소를 가져오나, 액체유속이 높은 범위에서는 액체의 유속증가는 점점 더 유동층 내부에서의 다상 접촉현상의 무작위적 거동의 증가를 가져온다고 해석할 수 있다. 실제로 삼상유동층에서의 무작위적 거동을 해석한 연구들에 의하면 액체의 유속이 증가하면 유동층 내부 거동의 무작위적 요소는 최소값을 나타내는 것으로 보고되고 있다[16, 17]. 일반적으로 삼상유동층에서 액체의 유속은 유동층 내부에 존재하는 기포의 특성에 미치는 영향보다는 고체입자의 유동특성에 미치는 영향이 더욱 두드러지는 것으로 알려져 있는데, 액체의 유속이 증가하면 유동층 내에 존재하는 유동입자들의 흐름형태가 바뀌게 되고 이에 따라 다상 접촉현상의 예측정도도 바뀌게 된다고 해석할 수 있다. Fig. 8의 결과로부터 삼상유동층에서 다상 접촉현상의 예측정도는 액체유속의 중간단계에

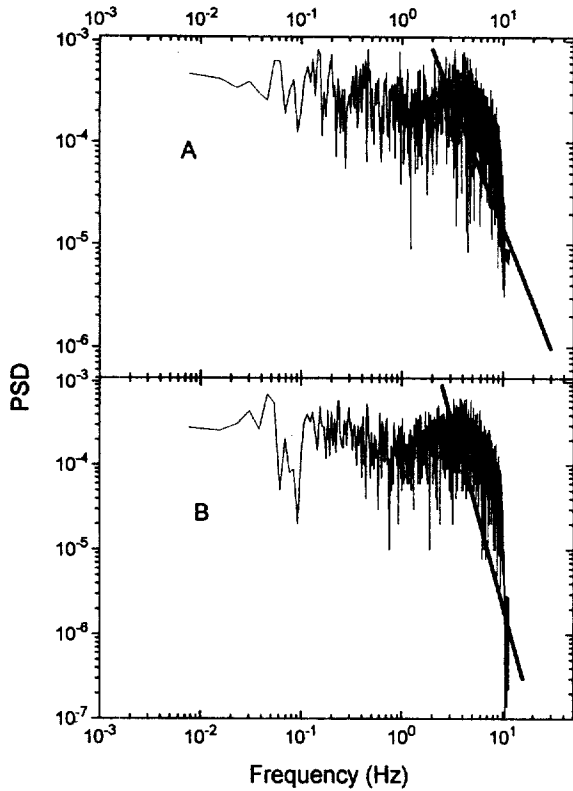


Fig. 6. Log-Log plots of power spectra of pressure fluctuations from three phase fluidized beds( $U_G=0.05$  cm/s,  $U_L=0.10$  m/s,  $H=0.10$  m).

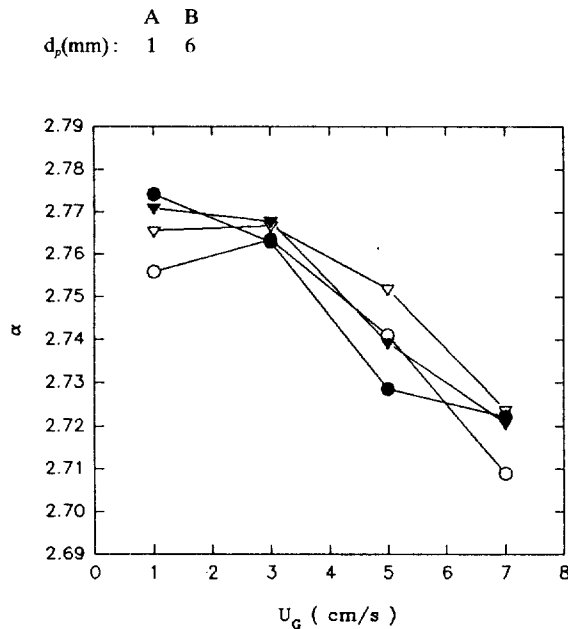


Fig. 7. Effects of  $U_G$  on  $\alpha$  in three phase fluidized beds( $U_L=0.10$  m/s).

$d_p$ (mm):      ○      ●      △      ▼  
 probe height(m): 0.10   0.20   0.10   0.10

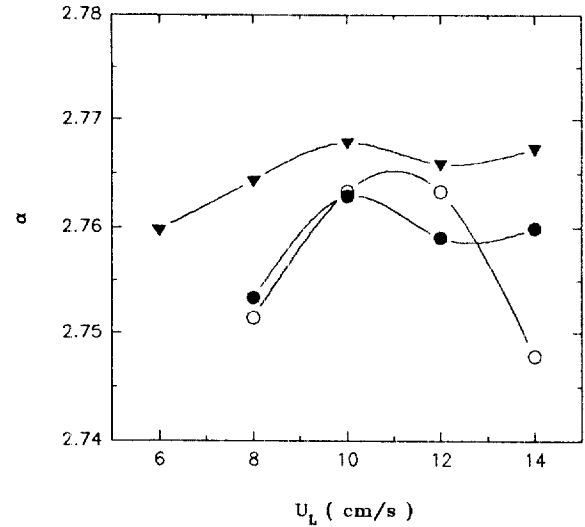


Fig. 8. Effects of  $U_L$  on  $\alpha$  in three phase fluidized beds( $U_G=0.03$  m/s).

$d_p$ (mm):      ○      ●      ▼  
 probe height(m): 0.10   0.20   0.10

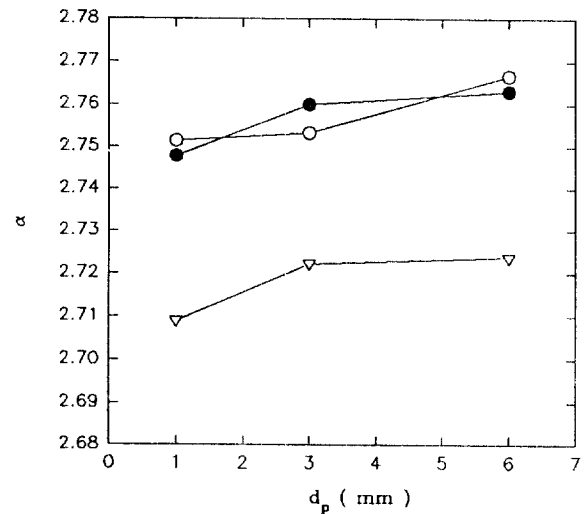


Fig. 9. Effects of  $d_p$  on  $\alpha$  in three phase fluidized beds(probe height=0.10 m).

$U_G$ (m/s):      ○      ●      △  
 $U_L$ (m/s): 0.08   0.12   0.10

예측정도는 유동입자가 순환 흐름형태에서 난류무작위적 흐름형태로 그 흐름형태를 바꾸는 액체유속의 중간단계에서 가장 그 확률이 높으며, 이때에 거시적 거동의 무작위적 요소는 최소가 된다고 할 수 있다[16-19].

삼상유동층에서 유동입자의 크기가 power 스펙트럴 밀도함수의 스펙트럴 지수에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 스펙트럴 지수  $\alpha$ 는 유동입자의 크기가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 삼상유동층에서 유동입자 크기의 증가는 유동층 내부에 존재하는 기포의 효과적인 분쇄를 가져와 기포의 크기를 감소시켜 주므로 유동입자가 작은 경우보다 유동층 내부에서 기포의 불균일 흐름현상의 감소를 가져와 결국 무작위적 요소의 감소를 가져오므로 거시적 거동 예측의 정도는 증가하게 된다고

서 가장 그 확률이 높다고 볼 수 있으며, 이 때에는 보다 주기적인 접촉이 일어난다고 볼 수 있다. 삼상유동층에서 유동입자의 요동빈도수도 이와 같은 액체유속의 중간단계에서 가장 높은 것으로 보고되고 있다[17]. 따라서, 삼상유동층에서 다상 접촉현상의 연속성이

해석할 수 있다.

삼상유동층에서 압력변동을 Fractal 해석한 연구들에 의하면 유동입자의 크기가 증가하면 Hurst 지수의 증가를 가져와 계의 영속성이 증가하는 것으로 보고되고 있다[4, 5, 16, 18].

본 연구의 실험범위에서 스펙트럴 지수  $\alpha$ 의 값은 모든 경우에 2보다 큰 값을 나타내어서 정도의 차이는 있지만 계(system)의 특성은 전반적으로 영속성(persistent)을 나타내고 있다고 해석되었으며, 이  $\alpha$ 값을 등방난류모델[20, 21]에 기초하여 무차원 유동입자의 크기인  $(d_p/D_r)$ 와 무차원 유체의 유속인  $(U_L/U_L + U_G)$ 으로 식 (6)과 같이 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$\alpha = 4.445 \left( \frac{d_p}{D_r} \right)^{0.0668} \left( \frac{U_L}{U_L + U_G} \right)^{0.7100} \quad (6)$$

식 (6)에서 상관계수는 0.961로서 비교적 잘 수렴되었다.

## 5. 결 론

이상과 같은 실험결과 다음 몇 가지의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 삼상유동층에서 압력변동을 power 스펙트럴 밀도함수를 이용한 스펙트럴 해석을 통하여 그 거시적 거동을 효과적으로 해석할 수 있었으며, 삼상유동층에서 다상의 접촉거동은 높은 차원의 deterministic chaos 특성을 나타내고 있는 것으로 분석할 수 있었다.

(2) 삼상유동층에서 압력변동 스펙트럴 밀도함수의 스펙트럴 지수  $\alpha$ 값은 기체유속이 증가하면 감소하였고 유동입자의 크기가 증가하면 증가하였으나 액체유속의 증가에 따라서는 국소적인 최대값을 나타내었다.

(3) 삼상유동층에서 압력변동자료  $X(t)$ 의 스펙트럴 지수  $\alpha$ 값은 기체유속이 1.0-7.0 cm/s, 액체유속이 6.0-18.0 cm/s 그리고 유동 고체입자의 크기가 1.0-6.0 mm인 범위에서 2보다 큰 값을 나타내어 이 계는 영속성을 나타내고 있다고 해석할 수 있었다.

(4) 삼상유동층에서 압력변동자료  $X(t)$ 의 스펙트럴 지수  $\alpha$ 값은 등방난류 이론에 의한 무차원 유동입자의 크기와 무차원 유체속도의 상관식으로 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$\alpha = 4.445 \left( \frac{d_p}{D_r} \right)^{0.0668} \left( \frac{U_L}{U_L + U_G} \right)^{0.7100}$$

## 사용기호

$d_p$  : particle size [m]

$D_r$  : column diameter [m]

$f$  : frequency [Hz]

$G_{xx}(t)$  : power spectral density function of  $X(t)$

$P(X)$  : probability density function of  $X(t)$

$R_{xx}(t)$  : autocorrelation function of  $X(t)$

$U_L$  : liquid flow rate [m/s]

$U_G$  : gas flow rate [m/s]

$X(t)$  : pressure fluctuation time series [v]

$X_m(t)$  : mean value of  $X(t)$  [v]

그리스 문자

$\alpha$  : spectral exponent

## 참고문헌

1. Fan, L. S.: "Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering", Butterworths Publish, Stoneham, MA(1989).
2. Epstein, N.: "Handbook of Fluids in Motion", Cheremisinoff, N. P. and Gupta, R. ed., Ann Arbor Science(1983).
3. Kim, S. D. and Kang, Y.: "Mixed Flow Hydrodynamics", Cheremisinoff, N.P. ed., Gulf Pub. Co., 845(1995).
4. Kang, Y. and Kim, S. D.: *Chem. Ind. Technol.*, **13**, 27(1995).
5. Kwon, H. W., Kang, Y., Kim, S. D., Yashima, M. and Fan, L. T.: *I&EC Research*, **33**, 1852(1994).
6. Fan, L. T., Nieogi, D., Yashima, M. and Nassar, R.: *AIChE J.*, **36**, 1529(1990).
7. Kikuchi, R., Tsutsumi, A. and Yoshida, K.: Proc. 4th Asian Conf. on Fluidized Beds and Three Phase Reactors, 289(1994).
8. Yashima, M., Nassar, R., Fan, L. T. and Kang, Y.: *AIChE J.*, **38**, 629(1992).
9. Priestler, M. B.: Spectral Analysis and Time Series, Vol. I & II, AP Inc.(1981).
10. Schumwang, R. H.: "Applied Statistical Time Series Analysis", Prentice Hall, NJ(1988).
11. Hillborn, R. C.: "Chaos and Nonlinear Dynamics", Oxford University Press, N.Y.(1994).
12. Sigeti, D. and Horsthemke: *Physical Review A*, **35**, 2276(1987).
13. Schroeder, M. R.: "Fractals, Chaos, Power Laws", Freeman and Company, N.Y.(1991).
14. Greenside, H. S., Ahlers, G., Hohenberg, P. C. and Walden, R. W.: *Physica D*, **5**, 322(1982).
15. Brandstater, A. and Swinney, H.: *Phys. Rev. A*, **35**, 2207(1987).
16. Kang, Y., Min, B. T., Ko, M. H. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **32**, 65(1994).
17. Kang, Y., Woo, K. J., Ko, M. H. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **33**, 633(1995).
18. Fan, L. T., Kang, Y., Nieogi, D. and Yashima, M.: *AIChE J.*, **39**, 513(1993).
19. Kang, Y. and Kim, S. D.: *Particulate Sci. Technol.*, **6**, 133(1988).
20. Kim, S. D. and Kim, C. H.: *J. Chem. Eng. Japan*, **16**, 172(1983).
21. Sanger, P. and Deckwer, W. D.: *Chem. Eng. J.*, **22**, 179(1981).