

기체-고체 유동층에서 Chaos 파라메타에 의한 흐름영역의 해석

송평섭 · 최왕규 · 정종현 · 오원진 · 강석환* · 손성모* · 강 용*[†]

한국원자력연구소 제염·해체기술연구개발부, *충남대학교 화학공학부
(2005년 11월 4일 접수, 2005년 12월 20일 채택)

Analysis of Flow Regimes by Using Chaos Parameters in Gas-Solid Fluidized Beds

Pyung-Seob Song, Wang-Kye Choi, Chong-Hun Jung, Won-Zin Oh, Suk-Hwan Kang*,
Sung-Mo Son*, and Yong Kang*[†]

Division of R&D on Decontamination and Decommissioning Technology, KAERI

*School of Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received November 4, 2005; accepted December 20, 2005)

기체-고체 유동층 시스템에서 유동화 흐름영역을 결정할 수 있는 방법들에 대하여 고찰하였다. 기체-고체 시스템의 흐름영역 해석을 위한 상태변수로 상승관내에서의 압력요동을 측정하여 유동화 흐름영역을 해석하였으며, 차압변환기로부터 얻은 압력요동의 자료를 기존의 방법인 평균 및 표준편차를 사용하여 해석하였을 뿐만 아니라, 상관차원이나 Kolmogorov 엔트로피와 같은 chaos 해석 방법을 이용하여 기체-액체 유동층에서 흐름영역을 고찰하였다. 그 결과, 기체-고체 유동층에서 유동화 영역은 평균과 표준편차와 같은 통계적 방법에 의해 결정할 수 있었을 뿐만 아니라, 상관차원과 Kolmogorov 엔트로피와 같은 Chaos 해석방법으로도 유동화영역을 구별할 수 있는 특성으로 사용할 수 있었다.

Methods to distinguish flow regimes in gas-solid fluidized bed have been investigated by adopting the concept of chaos theory. Pressure fluctuations have been chosen as a state variable for the analysis of the system. Pressure fluctuations obtained from differential pressure transducer have been investigated using the chaos analysis (Correlation dimension and Kolmogorov entropy) as well as the average and standard deviation. As a result, fluidization regimes in gas-solid fluidized bed can be distinguished by statistics methods as the average and standard deviation. Also, Correlation dimension and Kolmogorov entropy could be used to classify the fluidization regimes.

Keywords : flow regime, fluidized bed, pressure fluctuations, chaos analysis

1. 서 론

기체-고체 유동층에서 흐름영역에 대한 연구는 현재까지 수많은 연구자들에 의해 진행되어 왔으며, 대부분 실험적 증거에 의해 최소 다섯 가지의 흐름영역에 대하여 보고하였다. 유동층내에 기체의 유속을 증가시키면, 기체에 의해서 고체에 가해지는 항력(drag force)이 증력과 같아지면서 유동화가 되고, 기체의 유속이 더 증가함에 따라 미립(particulate) 유동층(Geldart A 그룹만 존재), 기포(bubbling) 유동층, 난류(turbulent) 유동층, 고속(fast) 유동층 그리고 기체수송(pneumatic transport) 등의 흐름영역으로 분류된다[1]. 한편, Geldart B 그룹의 입자들에 대한 흐름영역은 단일(single) 기포영역, 다수(multiple) 기포영역, 분해(exploding) 기포영역, 난류 영역, 슬러그(slug) 영역 그리고 고

속 유동층영역 등으로 분류하였다[2-4]. 기체-고체 유동층에서 위와 같은 흐름영역을 대부분의 연구자들은 주로 충적경, 입자의 형태(크기, 밀도, Geldart에 의한 분류), 분산관의 설계, 측정 기술 및 해석 방법에 의해 결정하였지만[1,4,5], 측정기술과 해석방법이 실험 결과의 타당성에 미치는 영향에 관한 연구는 일부 연구자들에 의해서만 진행되어 왔을 뿐 상당히 미흡한 실정이다.

전통적으로, 유동화 영역은 널리 알려진 바와 같이 압력요동과 같은 측정 변수의 진폭과 표준편차에 의해 확인할 수 있다[3,6]. 그 외에도 Schouten 등[7]은 시스템 내에서 정보의 생성 또는 소멸되는 속도를 정량화시킨 Kolmogorov 엔트로피를 유동층의 동적 거동에 대한 대항화에 적용하였다. 또한, Zijerveld 등[2]은 순환유동층의 상승관에서 기체의 유속, 고체 체류량 및 층의 직경 등을 변수로 하고, 그 결과를 Kolmogorov 엔트로피에 의해 실험적으로 흐름영역을 구별하였다. 기체-고체 유동층에서 유동화영역의 분류는 Table 1에서 보는 바와

[†] 주 저자(e-mail: kangyong@cnu.ac.kr)

Table 1. Summary of Previous Studies on Regime Classification in Fluidized Beds

Experimental Technique	Parameters Studied	Operating conditions						Analysis Methods	Flow Regime	Source
		System	Bed (m)	Particle	Particle density (kg/m ³)	Particle size (μm)	Temp. (°C)			
Pressure taps	DP fluctuations	Circulating FB	0.0097 Dia.	FCC Silica sand	1623 2220	166 51.9	A.C.	SD Solid hold up	Bubbling Turbulent Fast	Bai <i>et al.</i> [1]
Pressure taps Visual observation	AP fluctuations	Circulating FB	1.7 × 1.5	Silica sand	2600	300	25 850	FFT Kolmogorov entropy	Bubbling Slugging Turbulent Transport	Zijerveld <i>et al.</i> [2]
Pressure taps Visual observation Video recording	DP fluctuations	Circulating FB riser	0.12 × 0.7	Silica sand		310	A.C.	SD FFT	Bubbling Slugging Turbulent Transport	Johnsson <i>et al.</i> [3]
Pressure taps Optical probes	DP fluctuations Porosity variations	Circulating FB	8.5 × 13.5	Silica sand	2600	150~500	40 850	FFT	Bubbling	Svensson <i>et al.</i> [4]
Pressure taps	DP fluctuations	FB	0.1~0.8 Dia.	Polystyrene Sand	1102 2640	560 400	A.C.	Kolmogorov entropy	Bubbling Slugging	Schouten <i>et al.</i> [7]
Electrical capacitance tomography	Solid fraction fluctuations	FB	0.138 Dia.	Glass ballotini	2600	530	A.C.	Average SD FFT	Bubbling Slugging Turbulent Transport	Makkawi and Wright [8]
Pressure taps	DP fluctuations	Circulating FB riser	0.083 Dia.	Sand	2600	200	A.C.	FFT	Bubbling Slugging Turbulent Transport	van der Schaaf <i>et al.</i> [9]

DP, differential pressure; FB, fluidized bed; FFT, fast fourier transform; AC, ambient condition; SD, standard deviation;

같이 주된 측정변수는 압력요동이나 고체의 분율 요동을 사용한 반면, 실험결과와 해석과 조업조건은 전혀 다르다는 것을 볼 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 유동화영역을 결정하는데 Kolmogorov 엔트로피의 개념을 도입하고자 하였다. 먼저 차압변환기로부터 얻은 압력요동에 대하여 자료수집 속도가 미치는 영향을 고찰하여 압력요동의 해석에 필요한 적절한 자료수집 속도를 결정하였으며, 또한 기체-고체 유동층에서 유동화 영역과 고정층에서 난류유동층까지의 전이를 구분하기 위하여 기존의 방법(평균과 표준편차)과 카오스(chaos) 이론(상관차원과 Kolmogorov 엔트로피)을 이용하여 해석하였다.

2. 해 석

2.1. 상관차원(Correlation Dimension)

압력요동 신호의 위상상관함수를 나타내는 상관함수(correlation function)인 C(r)는 다음과 같이 표현될 수 있으므로

$$C(r) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m^2} [\text{number of pairs } (i, j) \text{ whose distance } |Z_i(t) - Z_j(t)| < r] \quad (1)$$

이를 수식화하면 다음 식으로 표현된다[10].

$$C(r) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i,j=1, i \neq j}^m H[r - |Z_i(t) - Z_j(t)|] \quad (2)$$

여기서, m은 처리하는 자료의 수를 나타내고 H는 다음 식으로 표시되는 Heavyside 함수이다.

$$H[r - |Z_i(t) - Z_j(t)|] = \begin{cases} 1 & \text{if } r > |Z_i(t) - Z_j(t)| \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

통계적으로 처리하여 얻은 상관적분을 위상공간구형(hypersphere)의 반경 r에 대해 다음과 같은 상관식으로 나타낼 수 있는데,

$$C(r) = k r^{D_c} \quad (4)$$

여기서, 지수 D_c가 상관차원이며, 이는 시스템의 자유도(degree of freedom)를 나타내는 정량적인 척도로써 사용될 수 있다[10].

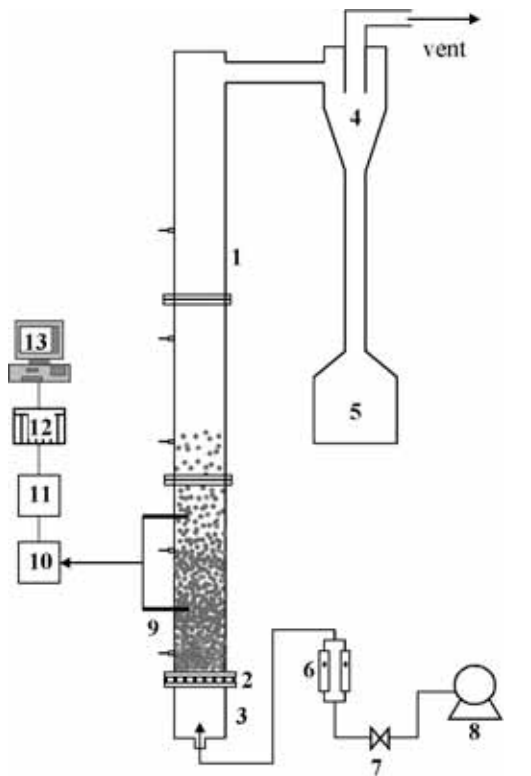
2.2. Kolmogorov 엔트로피

Kolmogorov 엔트로피(entropy)는 계(system)의 카오스 현상과 이에 내재된 동역학에 대하여 정성적이며, 정량적인 정보를 제공할 수 있는데, 위상공간에서 특정화할 수 있는 결정론적 카오스적인 거동에 의한 중요한 양으로서 상호정보함수를 보완하여 모든 과거의 정보를 재구성하며, 다차원(multi-dimension)의 계(system)에서 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다[10].

$$K = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{i_1, \dots, i_d} P(i_1, i_2, \dots, i_d) \log_2 P(i_1, i_2, \dots, i_d) \quad (5)$$

Table 2. Fluidized bed Facility and Experimental Conditions

Fluidized bed	[m]	I.D. 0.102 × Height 2.0
Distributor type		Perforated plate
Orifice diameter,	[mm]	1.0
Particle properties		Silica Sand
Apparent density,	[kg/m ³]	2,590
Average diameter,	[mm]	0.413
Fluidized gas		Compressed dry air
Gas velocity,	[m/s]	0.02 ~ 3.0
Data acquisition system		
Pressure transducer		Validyne, Model P24D
Sampling rate,	[Hz]	800
Sample size,	[points]	16,000



- 1. Fluidized bed
- 2. Distributor
- 3. Air box
- 4. Cyclone
- 5. Hopper
- 6. Flow meter
- 7. Control Valve
- 8. Air compressor
- 9. Differential pressure transducer
- 10. Amplifier
- 11. Low-pass Filter
- 12. A/D Converter
- 13. Computer

Figure 1. Schematic diagrams of gas-solid fluidized bed.

측정된 data로부터 kolmogorov 엔트로피의 계산은 d-dimension의 조합확률을 구해야하는데, 상관계수로부터 kolmogorov 엔트로피를 구할 수 있다. 즉, d-dimension의 조합확률과 상관계수사이의 관계를 이용하면 $K_{2,d}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$K_{2,d} = \frac{1}{\tau} \ln \frac{C_d(\tau)}{C_{d+1}(\tau)} \quad (6)$$

여기서 $K_{2,d}$ 를 kolmogorov 엔트로피, K_2 로 결정할 수 있다[11]. 양수인 K_2 는 카오스계를 선정하는데 중요한 척도가 되며, 무작위(rand-omness)의 정도를 분석하는데 이용될 수 있다.

3. 실험

본 연구에서 사용한 기체-고체 유동층은 Figure 1에서 보는 바와 같이 직경이 0.102 m이고, 높이가 2.0 m인 아크릴관으로 구성되어 있다. 충물질은 평균입경이 0.413 mm이고 밀도가 2,590 kg/m³인 인조규사를 사용하였으며, 건조된 공기는 유량제어기에 의해 정량적으로 유동층 내부로 유입되어 perforate 형태의 분산판을 통하여 제공되었다.

동적인 압력 요동 신호는 직경이 6.5 mm인 관(tube)에 의해 수집되었으며, 이 관들은 분산판으로부터 0.2, 0.4 m의 위치에서 유동층 벽면에 부착되어 관의 끝이 유동층의 중앙까지 오도록 설치하였다. 관의 끝은 충 물질의 유입을 막기 위하여 400 mesh의 망으로 덮어 실험하였다.

압력요동은 압력 probe에 연결된 차압 변환기(Validyne, Model P24D)에 의해 신호로 수집되었으며, 이 압력신호는 A/D 변환기(DT3001 Lab Card)에 의해 디지털로 컴퓨터에 저장되었다. 16,000개의 압력요동 자료를 20, 50, 100, 200, 400, 800, 1,600 Hz의 속도로 측정하였으며, 이 때 측정 시간을 60 sec로 하였다. 기체의 배출은 분산판으로부터 1.80 m 높이에 위치하며, 기체는 사이클론을 거쳐 압력용기의 외부에 연결된 필터(ceramic filter)와 압력조절밸브(pressure control valve)를 거쳐서 대기로 배출되도록 하였다. 위에서 설명한 실험 장치의 구성 및 실험 조건들은 Table 2에 요약하여 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 자료수집 속도에 따른 영향

본 절에서는 기체-고체 유동층에서 흐름영역을 해석하기 위하여 필요한 자료수집 속도의 범위를 고찰하였다. Figure 2에는 최소유동화속도 보다 높은 유속에서 자료수집 속도가 20, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 Hz의 조건의 압력요동을 나타낸 것이며, 이 압력요동에 대한 자기상관함수의 결과를 Figure 3에 나타내었다. 자기상관함수는 신호의 주기성과 기포 및 슬러지의 빈도수를 측정할 수 있는 매우 유용한 방법으로 알려져 있으며, 유동층 반응기내의 거동이 완전히 주기적이면 1과 -1을 사이를 주기적으로 움직이고, 카오스적이면 점차 0으로 수렴하고, 무작위적인 경우에는 0 근처에서 움직임을 보인다[3]. 그림에서 볼 수 있듯이 20, 50 Hz에서의 자기상관함수 값보다는 100 Hz 이상의 자료수집 속도에서 함수 값을 이용한 해석이 가능한 것으로 확인되었다. 그 중에서도 800 Hz의 경우가 함수의 값이 선명하게 나타났으며, 그러므로 본 연구에서는 800 Hz의 자료수집 속도에서 얻은 압력요동의 신호를 이용하여 해석하였다.

4.2. 최소유동화속도의 결정

기체-고체 유동층에서 최소유동화속도(U_{mf})는 기체의 유속변화에 따라 고체 입자의 층에 작용하는 압력강하의 측정에 의해 쉽게 결정할 수 있다. 최소유동화속도에서 층의 무게는 전적으로 기체의 흐름에 의해 유지되며, 이때 압력강하는 일정한 값을 갖는다. 최소유동화속도를 결정하기 위하여 기체의 유속 증가에 따른 압력강하와 표준편차의 변화 양상을 Figure 4에 나타내었다. Figure 4a의 압력강하는 압력요동 신호의 평균값이며, Figure 4b에서는 이 신호의 표준편차를

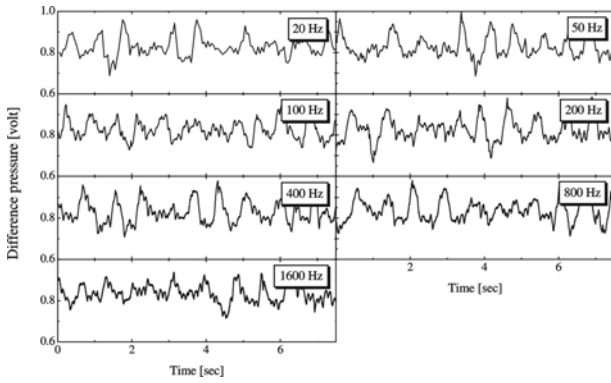


Figure 2. Effects of pressure fluctuations on the data sampling rate in bubbling fluidized bed.

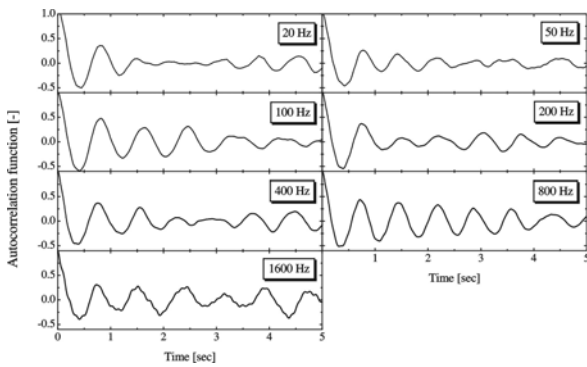


Figure 3. Effects of autocorrelation function on the data sampling rate in bubbling fluidized bed.

나타낸 것이다. Figure 4b에서 볼 수 있듯이 표준편차는 기체의 유속이 최소유동화속도에 도달할 때까지 일정한 값을 가지며, 최소유동화속도 이상의 유속에서 압력요동의 표준편차는 선형적으로 증가하였다. 이와 같이 압력요동의 평균과 표준편차를 이용하여 0.17 m/s의 최소유동화속도를 결정할 수 있었다.

한편, 기체 유속의 증가에 따른 상관차원과 Kolmogorov 엔트로피의 변화양상은 Figure 5에 나타내었다. 상관차원은 재구성된 끌개 (attractor)에 대한 매립차원(embedding dimension)으로 결정할 수 있으며, 기체의 흐름에 의한 유동층내의 거동이 주기적이면 차원은 1이고, 무작위적인 운동인 경우에는 무한대의 값을 가지며, 카오스적인 운동에 대하여는 정수의 값을 가지게 된다[12]. 그림에서 볼 수 있듯이 기체유속의 증가가 압력요동의 상관차원에 미치는 영향을 Figure 5a에 나타내었는데, 유속의 증가에 따라 상관차원의 값은 증가하였다. 이와 같이 고정층에서 기포 유동층으로 유동화 영역의 전이는 정량적인 D_c 값에 의해서 결정할 수 있었다.

Kolmogorov 엔트로피는 카오스적 흐름거동을 평가할 수 있고 시간 진행에 따른 동력학적 시스템의 정보 손실율을 나타낸다. Kolmogorov 엔트로피는 카오스적 시스템에서의 신호에서 제한적이고 양의 값을 가져야 한다[12]. 고정층에서 기포 유동층으로의 유동화 영역으로의 전이는 Kolmogorov 엔트로피 값의 변화로 Figure 5b에 나타내었다. Figure 5b에서 볼 수 있듯이 유동화 영역의 전이가 일어난 후 기체 유속을 더욱 증가시키면 엔트로피 값은 서서히 증가하였다. Kolmogorov 엔트로피 값의 경향은 고정층에서 기포 유동층으로 유동화 영역의 전이에 따라서 측정된 다른 값들(평균, 표준편차, 상관 차원)의 경향과 일치하였다.

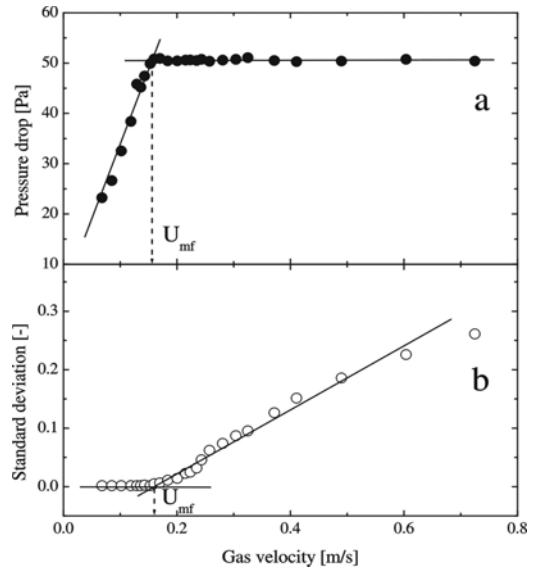


Figure 4. Determination of minimum fluidization velocity using pressure drop (a) and standard deviation (b) in gas-solid fluidized bed.

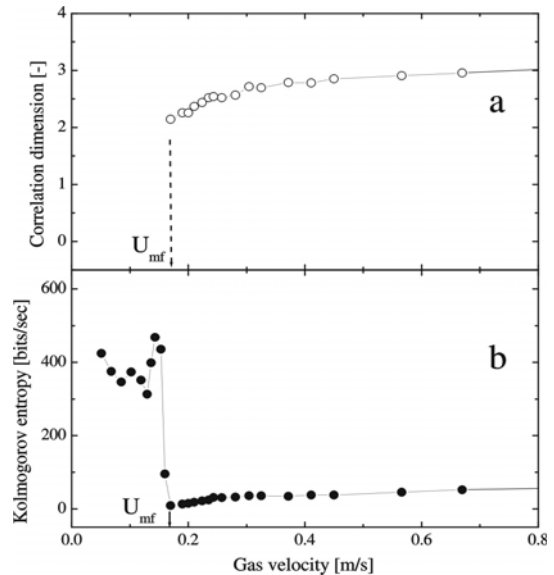


Figure 5. Determination of minimum fluidization velocity using Correlation dimension (a) and Kolmogorov entropy (b) in gas-so fluidized bed.

4.3. 난류영역으로의 전이

기포흐름 영역에서 기체의 유속을 더 증가시키면, 반응기내의 온도, 압력, 반응기의 크기, 입자의 크기 및 밀도 등의 조업조건에 따라 슬러그(slug) 영역이나 바로 난류유동화 영역으로 전이된다. 난류유동층은 Yerushalmi와 Cankurt[13]에 의해 소개된 두 전이유속(U_c , U_k)으로부터 구별되어지며, 일반적인 난류유동화 영역의 양상을 Figure 6에 보여주었다. U_c 는 압력요동의 표준편차가 최대점에 도달했을 때의 전이유속이며, U_k 는 기체의 유속을 더 증가시킬 경우 압력요동의 진폭이 균일한 공탐속도이다. 대부분의 연구자들[14-17]은 난류유동층은 U_c 에서 시작되고 U_k 의 유속에서 끝난다고 보고하였는데, 이 시점이 난류유동층에서 고속유동층으로 전이되는 유속이라 볼 수 있다. 본

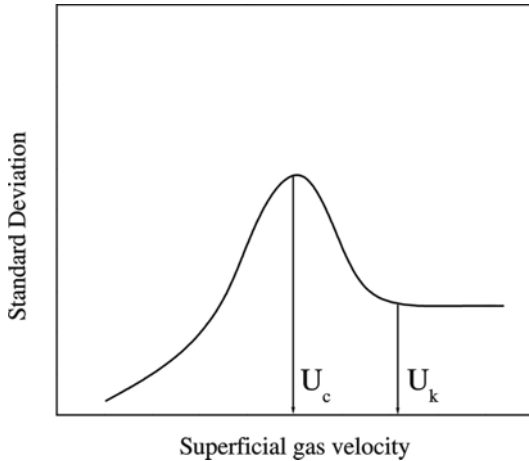


Figure 6. Definition of transition velocities U_c and U_k based standard deviation of pressure fluctuations.

연구에서도 실험결과에 의한 U_c 를 다른 연구자들의 결과와 비교 검토하였다. 기포유동층에서 난류유동층으로 전이되는 양상을 압력요동의 평균값과 표준편차를 이용하여 Figure 7에 나타내었다. 그림의 빗금친 부분은 Luca 등[18]과 Ryu[19]에 의해 보고된 슬러그 영역이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 슬러그 영역의 끝인 U_c 는 Figure 6의 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

한편, 기포유동층에서 난류유동층으로 전이되는 양상을 압력요동에 대한 상관차원과 Kolmogorov 엔트로피를 이용하여 Figure 8에 나타내었다. Figure 8a와 8b의 두 그림에서 보는 바와 같이 상관차원과 Kolmogorov 엔트로피의 값은 슬러그 영역이 시작되면서 감소하였다. 이는 기체의 유속이 더 증가하더라도 슬러그의 규칙적인 운동에 의해 야기되는 유동층내의 주기적인(periodic) 운동이 발생되며, 난류유동층 영역에 도달할 때까지 그 값들은 감소하기 때문이라고 볼 수 있다 [2]. 반면에 난류유동층이 시작되면서부터 상관차원과 Kolmogorov 엔트로피의 값은 다시 증가하였는데, 그것은 기체의 유속이 증가함에 따라 난류 현상의 효과에 의해 유동층 내부는 더 복잡하고 카오스적인 거동을 한다고 볼 수 있다.

4.4. 유용한 상관식과 실험 결과의 비교

U_{mf} 와 U_c 에 대하여 본 연구에서 얻은 결과와 보고된 몇몇의 상관식들을 이용하여 계산된 값들을 Table 3에 나타내어 비교하였다. 최소유동화속도의 경우 Wen & Yu[20], Grace[21] 및 Kang[22] 등의 상관식의 결과와 유사하였으며, U_c 는 Chehbouni 등[14], Horio[15], Lee & Kim[16], 그리고 Nakajima 등[17]의 상관식 결과에 근접하였다. 이 중 Chehbouni 등[14]의 식은 유동층의 직경(D)을 고려한 것이며, Table 3에서 볼 수 있듯이 전반적으로 본 연구의 실험결과와 잘 일치하지는 않았다. 이것은 상관식의 대부분이 층의 높이와 유동층의 직경, 고체 입자의 크기분포, 분산관 설계 등의 영향을 충족시키지 못하기 때문으로 볼 수 있으며[8], 또한, U_c 값의 변화는 측정방법에 따른 차이로도 볼 수 있다. 한 예로, Bi 등[6]은 차압측정기에 의해 얻은 U_c 의 값은 절대압의 요동에 얻은 U_c 의 값보다 더 높게 나타났으며, 공극률의 변화에 의한 전이유속은 압력요동에 의한 전이유속보다 항상 낮게 나타났다. 이러한 이유로, Table 3에서 보는 바와 같이 단순히 Reynolds 수와 Archimedes 수를 이용한 상관식들은 명확하다고 볼 수 없다. 그러므로 전이유속의 예측을 위하여 폭넓은 조업 변수들을 도입하여 상관식을 유도하는 것이 요구된다.

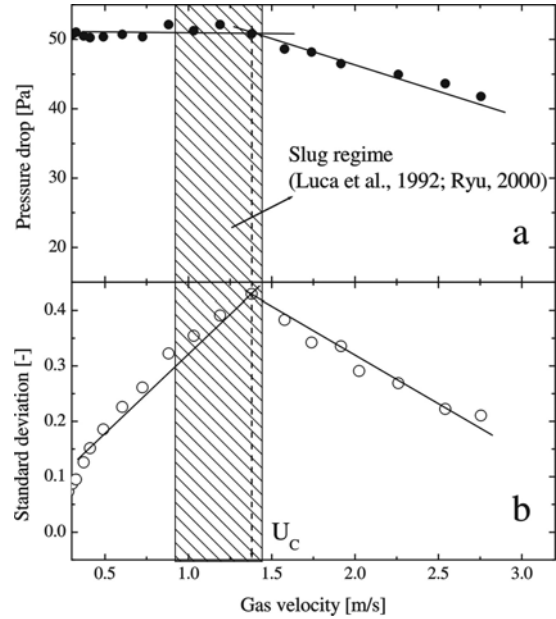


Figure 7. Determination of transition velocity to turbulent fluidizati using the pressure drop (a) and standard deviation (b) in gas-sol fluidized bed.

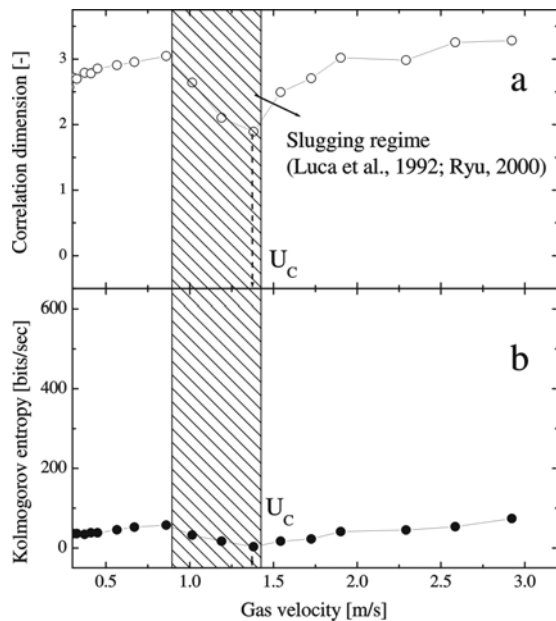


Figure 8. Determination of transition velocity to turbulent fluidizati using using the Correlation dimension (a) and Kolmogorov entropy (b) in gas-solid fluidized bed.

5. 결 론

기체-고체 유동층에서 압력요동 신호를 이용하여 흐름영역을 구분하기 위해서는 100 Hz 이상의 자료수집 속도에서 실험을 수행하는 것이 적합하며, 이 중 800 Hz가 최적의 조건이었다. 이러한 조건에서 얻은 압력요동 신호를 이용하여 최소유동화속도와 전이유속을 압력강하와 표준 편차와 같은 확률론적인 방법과 상관 차원과 Kolmogorov 엔트로피와 같은 결정론적인 방법에 의해서 결정할 수 있었다. 또한,

Table 3. Summary of Fluidization Regimes

Source	Equations	Predictions		% [Error]
		U _{mf}	U _c	
Wen & Yu [20]	$U_{mf} = \left(\frac{\mu}{d_p \rho_g} \right) \left(33.7^2 + \frac{0.0408 d_p^3 \rho_g \rho_p}{\mu_g^2} \right)^{0.5}$	13.16	-	19
Grace [21]	$Re_{mf} = (22.7^2 + 0.0408 Ar)^{0.5} - 27.2$ $U_{mf} = 0.00075 d_p^2 \rho_p g / \mu_g$	18.08	-	11
Kang [22]	$Re_{mf} = (35.71^2 + 0.0408 Ar)^{0.5} - 35.71$	13.00	-	20
Chehbouni <i>et al.</i> [14]	$U_c / (gD_p)^{0.5} = 0.463 Ar^{0.145}$	-	165.22	20
Horio [15]	$Re_c = 0.936 Ar^{0.475}$	-	222.57	61
Lee & Kim [16]	$Re_c = 0.7 Ar^{0.485c}$	-	181.71	32
Nakajima <i>et al.</i> [17]	$Re_c = 0.633 Ar^{0.457}$	-	140.31	2

^a From differential pressure fluctuation data

^b From absolute pressure fluctuation data

^c From bed expansion data

유동화 영역을 위의 방법에 의해 고정층에서 난류 유동층까지 분류할 수 있었다. 결과적으로, 상관 차원과 Kolmogorov 엔트로피와 같은 확률론적인 방법으로도 유동화 영역을 분류하는데 사용될 수 있었다. 이러한 결과들을 문헌에 의한 상관관계식들과 비교 할 수 있었다.

사용 기호

C(r)	: correlation function
D _C	: correlation dimension
d _p	: particle diameter, m
g	: gravitational acceleration, m/s ²
H	: Heavyside function defined as Eq. (3)
H(X),H(Y)	: average entropy corresponding to X(t) and Y(t), bits
H(X, Y)	: average joint entropy, bit
k	: constant in Eq. (4)
K ₂	: kolmogorov entropy, bits/s
K _{2,d}	: Renyi entropy, bits/s
m	: number of data point
p	: dimension of vector, Z(t)
P(x)	: probability density function of X(t)
Re	: Reynolds number, $d_p \rho_g \mu_g / \mu_g$
t	: time, s
U _C	: transition velocity to turbulent fluidization regime, m/s
U _k	: superficial gas velocity corresponding to leveling out of pressure fluctuation amplitude, m/s
U _g	: gas velocity, m/s
U _{mf}	: minimum fluidization velocity, m/s
X(t)	: time series of pressure fluctuations, V

Greek Letters

ρ_g	: gas density, kg/m ³
ρ_p	: particle density, kg/m ³
τ	: time lag, s

참고 문헌

1. D. Bai, E. Shibuya, N. Nakagawa, and K. Kato, *Powder Technol.*, **87**, 105 (1996).
2. R. C. Zijerveld, F. Johnsson, A. Marzocchella, J. C. Shoutten, and C. M. van den Bleek, *Powder Technol.*, **95**, 185 (1998).
3. F. Johnsson, R. C. Zijerveld, J. C. Schouten, C. M. van den Bleek, and B. Leckner, *International Journal of Multiphase flow*, **26**, 663 (2000).
4. A. Svensson, F. Johnsson, and B. Leckner, *Powder Technol.*, **86**, 299 (1996).
5. J. Wiman and J. E. Almstedt, *Chem. Eng. Sci.*, **53**, 2167 (1998)
6. H. T. Bi, N. Ellis, I. A. Abba and J. R. Grace, *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 4789 (2000).
7. J. C. Schouten, M. L. M. van der Stappen, and C. M. van den Bleek, *Chem. Eng. Sci.*, **51**, 1991 (1996).
8. Y. T. Makkawi and P. C. Wright, *Chem. Eng. Sci.*, **57**, 2411 (2002).
9. J. Van der Schaaf, F. Johnsson, J. C. Schouten, and C. M. van den Bleek, *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 5541 (1999).
10. A. I. Karamavruç, N. N. Clark, and J. S. Halow, *Powder Technol.*, **84**, 247 (1995).
11. P. Grassberger and I. Procaccia, *Physical review A*, **28**, 2591 (1983).
12. S. P. Thomas and O. C. Leon, Practical numerical algorithms for chaotic systems, Springer-Verlag, New York, Inc. (1989).
13. J. Yerushalmi and N. T. Cankurt, *Powder Technol.*, **24**, 187 (1979).
14. A., Chehbouni, J. Chaouki, C. Guy, D. Klvana, In H. T. Bi, N. Ellis, A. Abba, and J. R. Grace, *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 4789 (2000).
15. M. Horio, in Circulating fluidized bed technology Vol. III, P. Basu, M. Horio, and M. Hasatani Ed., Oxford, Pergamon (1991).
16. G. S. Lee and S. D. Kim, *J. Chem. Eng. Japan*, **21**, 515 (1988).
17. M. Nakajima, M. Harada, R. Asai, Y. Yamazaki, and G. Jimbo, Circulating fluidized bed technology, Vol. II, P. Basu, and J. F. Large Ed., Pergamon Press (1991).
18. L. D. Luca, R. Di Felice, P. U. Foscolo, and P. P. Boattini, *Powder Technol.*, **69**, 171 (1992).
19. H. J. Ryu, Ph.D. Thesis, Konkuk University, Seoul, Korea (2000).

20. C. Y. Wen and Y. H. Yu, *Powder Technol.*, **96**, 129 (1966).
21. J. R. Grace, *Handbook of multiphase systems*, G. Hetsroni Ed., Washington, DC, Hemisphere (1982).
22. S. H. Kang, Ph.D. Thesis, Chungnam National University, Daejeon, Korea (2003).