

액체-입자 Swirling 유동층에서 유동입자 흐름 및 열전달 특성

손성모 · 강석환 · 강 용[†] · 김상돈*

충남대학교 화학공학과

305-764 대전시 유성구 궁동 220

*한국과학기술원 생명화학공학과

305-701 대전시 유성구 구성동 373-1

(2006년 3월 24일 접수, 2006년 6월 16일 채택)

Characteristics of Particle Flow and Heat Transfer in Liquid-Particle Swirling Fluidized Beds

Sung-Mo Son, Suk-Hwan Kang, Yong Kang[†] and Sang-Don Kim*

School of Chemical Engineering, Chungnam National University, 220, Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

*Department of Chemical and Biomolecular Engineering, KAIST, 373-1, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

(Received 24 March 2006, accepted 16 June 2006)

요 약

직경이 0.102 m이고 높이가 2.5 m인 액체-입자 swirling(나선)흐름 유동층에서 유동 입자의 흐름 및 열전달 특성을 고찰하였다. 액체유속(U_L), 유동 입자의 크기(d_p) 그리고 연속상인 액체의 나선 유도흐름 액체량의 비(R_S)가 유동층 내 유동입자의 체류량 유동층 내부 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수에 미치는 영향을 검토하였다. 액체-입자 나선흐름 유동층에서 입자 체류량은 입자의 크기와 나선유도흐름 액체량의 비가 증가함에 따라서 증가하였으나, 액체유속의 증가에 따라서는 감소하였다. 유동층 내부에서 나선 유도 흐름 액체량의 비가 0.1~0.3인 경우에 유동 입자의 국부체류량은 유동층 중심부에서 큰 값을 나타내었으나, R_S 의 값이 0.5일 때는 반경 방향 입자 체류량은 거의 균일한 분포를 보이며, R_S 의 값이 0.7일 때는 유동층 중심부의 입자 체류량이 상대적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 유동층 내부 열원과 유동층간의 열전달 특성은 열원 표면과 유동층간의 온도차 요동 자료의 위상공간 투영과 kolmogorov 엔트로피 해석으로 고찰할 수 있었으며, 나선 유도 흐름 액체량의 비(R_S)가 0.1에서 0.5까지 증가할수록 온도차 요동 자료의 위상공간 투영은 점점 안정되고 규칙성이 증대되는 상태를 나타내고, kolmogorov 엔트로피 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 열원 표면과 유동층간의 온도차 요동 자료의 kolmogorov 엔트로피 값은 액체의 유속이 증가함에 따라 최대값을 나타내었다. 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수는 액체유속, 층공극률, 나선 유도 흐름 액체량의 비가 증가함에 따라서 최대값을 나타내었으며, 유동 입자의 크기가 증가함에 따라 증가하였다. 내부 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수가 최대값을 나타낼 때의 액체의 유속 조건에서 온도차 요동자료의 kolmogorov 엔트로피의 값도 최대값을 나타내었다. 액체-입자 나선흐름 유동층에서 입자 체류량과 열전달 계수를 무차원군의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

Abstract – Characteristics of particle holdup and heat transfer were investigated in a liquid-particle swirling fluidized bed whose diameter was 0.102 m and 2.5 m in height. Effects of liquid velocity, particle size and swirling liquid ratio(R_S) on the particle holdup and immersed heater-to-bed overall heat transfer coefficient were examined. The particle holdup increased with increasing particle size and swirling liquid ratio but decreased with increasing liquid velocity. The local particle holdup was relatively high in the region near the heater when the R_S value was 0.1~0.3, but the radial particle holdup was almost uniform when the R_S value was 0.5, whereas, when the R_S value was 0.7, the local particle holdup was relatively low in the region near the heater. The heat transfer characteristics between the immersed heater and the bed was well analyzed by means of phase space portraits and Kolmogorov entropy(K) of the time series of temperature difference fluctuations. The phase space portraits of temperature difference fluctuations became stable and periodic and the value of Kolmogorov entropy tended to decrease with increasing the value of R_S from 0.1 to 0.5. The Kolmogorov entropy exhibited its maximum value with increasing liquid velocity. The value of overall heat transfer coefficient(h) showed its maximum value with the variation of liquid velocity, bed porosity or swirling liquid ratio, but it increased with increasing particle size. The value of K exhibited its maximum at the liquid velocity at which the h value

[†] To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

attained its maximum. The particle holdup and overall heat transfer coefficient were well correlated in terms of dimensionless groups of operating variables.

Key words: Liquid-particle Swirling Fluidized Bed, Temperature Fluctuations, Particle Holdup, Heat Transfer Coefficient

1. 서 론

촉매 반응기나 이온교환수지를 이용한 특정 물질의 분리 및 회수, 흡착, 침강 및 폐수 처리 등 산업적으로 널리 이용되는 액체-입자 유동층 반응기는 열전달 및 물질전달 효과가 우수하며, 액체-입자들 간의 접촉효율이 높고, 혼합 효과가 좋은 장점을 가지고 있다[1, 2]. 그러나 액체-입자 유동층 반응기의 생산 능력이나 특정 성분 분리 또는 폐수 처리 용량을 높이기 위해서는 액체의 유속이 높은 범위에서 조작되는 것이 요구되는데, 액체-입자 유동층에서 액체의 유속이 높은 범위에서는 층의 팽창으로 인하여 입자 체류량이 매우 감소하게 되므로 액체-입자의 접촉 효율이 현저히 감소할 뿐만 아니라 유동층 내의 열전달 계수도 심각한 감소를 가져온다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 최근 액체-입자 순환 유동층에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[3-6].

액체-입자 유동층 반응기나 접촉공정에서 촉매 입자나 입자 반응물, 흡수제 또는 흡착 매체인 유동입자의 체류량은 전체 반응기나 공정의 효율 및 기능의 결정에 직결되므로 같은 유속의 유동 조건에서 액체상이나 고체 유동입자의 체류량을 조절할 수 있는 공정의 개발은 매우 중요하다. 즉, 액체의 같은 유속범위에서 장치나 시스템의 큰 변화 없이 액체-입자의 접촉 효율을 증가시키고, 유동층 내부에서 액체-입자의 불균일상 흐름을 상대적으로 규칙적으로 하여 액체와 입자의 접촉 강도를 증가시킬 뿐만 아니라, 무작위적이며 재현성이 떨어지는 공정 거동의 조절능력을 증가시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 절실히 요청되고 있다.

한편, 액체-입자 유동층에서 액체와 입자간의 접촉이나 반응은 공정이나 반응기 내부의 반응온도와 직접적으로 연관 되며, 유동층과 같은 연속 공정에서 반응기의 가열이나 냉각은 반응기 외부의 열매체나 내부 열원에 의해 조절되므로 이들 공정이나 반응기에서 열전달 현상은 반응기의 성능 결정에도 중요한 역할을 한다[1, 2]. 또한, 액체와 입자 계면에서의 흡착이나 흡수 및 액체-입자 반응은 액체의 점도나 표면장력, 밀도는 중요한 물리적 성질들에 의해 큰 영향을 받는데, 이들 물리적 성질들은 온도의 함수이므로 액체-입자 유동층의 계면에서의 반응성이나 물질 전달 현상을 규명하는데 있어 열전달 현상은 중요한 요소로 작용한다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 액체-입자 유동층의 단순성과 경제적 특성을 그대로 유지하기 위해 공정의 큰 변화 없이도 액체와 입자간의 접촉효율이나 접촉강도를 기존의 액체-입자 유동층계보다 효과적으로 증가시키기 위한 방법의 하나로 액체의 주입 흐름을 나선흐름(swirling)으로 유도하여 액체-입자 유동 흐름 거동의 규칙성을 증가시키고자 하였으며[7], 이와 같은 연속성 흐름 공정의 변화가 유동층 내부에서 입자 체류량과 온도 요동 그리고 열전달 현상의 향상에 미치는 영향을 고찰하였다. 이와 같은 연구 결과는 지금까지의 방법으로 매우 어려웠던 액체-입자 유동층 반응기나 공정의 효과적인 조절(control)과 결점 진단에 획기적인 공학적 정보를 제공할 수 있어서 액체-입자 유동층 반응기의 성능향상에 공헌할 수 있을 것으로 예상된다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 실험 장치는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 직경이 0.102 m이고 높이가 2.5 m인 아크릴 관을 사용하였다. 연속상인 액체는 물을 사용하였으며, 분산상인 유동입자로 밀도가 $2,500 \text{ kg/m}^3$ 인 유리구슬을 사용하였다. 본 연구의 실험범위는 액체유속이 $3.5 \sim 17.2 \text{ cm/s}$ 이었으며, 입자의 크기는 $1.7 \sim 6.0 \text{ mm}$ 이었다. 유동층 내부의 나선흐름 유동을 유도하기 위하여 유동층 하부 액체의 분산판으로부터 0.2 m 높이에서 나선유도흐름 액체를 투입하였는데, 액체 분산판을 통해 관의 하부에서 유입되는 액체의 부피를 기준으로 나선유도흐름 주입액체량의 비인 $R_s(V_2/V_1)$ 는 $0 \sim 0.7$ 이었다. 액체 연속상의 주입을 위한 분산판은 개구비가 12.8%인 다공판 형태를 사용하였으며, 직경 3 mm의 구멍을 삼각파치로 균일하게 배치하였다.

일정 유동 조건에서 유동층 내부 시험 영역의 압력은 압력변환기(Validyne, Model P24D)를 사용하였으며, 압력차 측정은 직경이 6.5 mm

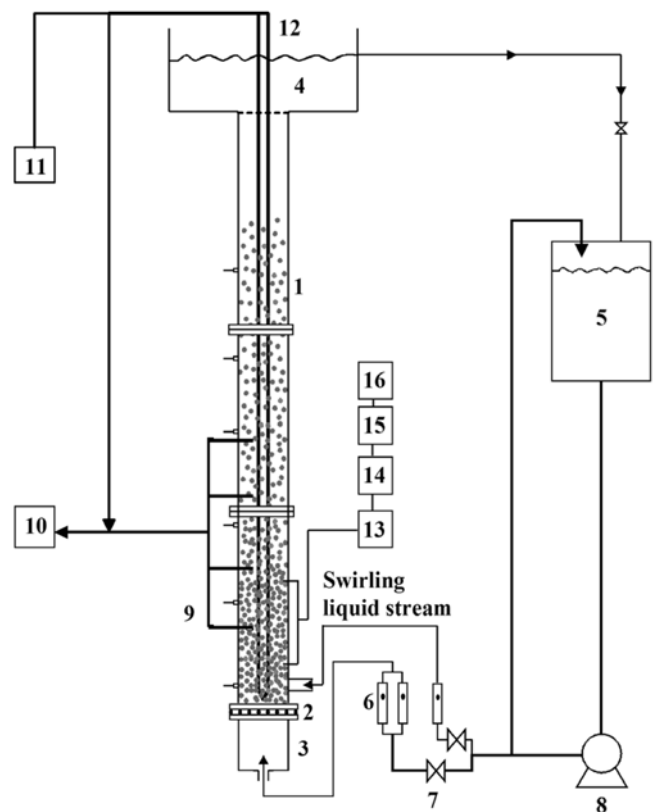


Fig. 1. Experimental apparatus.

- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| 1. Fluidized bed | 8. Liquid pump |
| 2. Distributor | 9. Air compressor |
| 3. Liquid calming section | 10. Gas filter & regulator |
| 4. Liquid weir | 11. Thermocouple |
| 5. Liquid reservoir | 12. Temperature indicator |
| 6. Flowmeter | 13. Power supply |
| 7. Control valve | 14. Heater |

인 관(tube)을 사용하였는데, 이 관들은 나선흐름(swirling) 액체 주입부로부터 0.1 m의 위치에서 0.2 m 간격으로 유동층 벽면에 설치하였고, 관의 끝은 층 물질의 유입을 막기 위하여 200 mesh의 망을 부착하였다. 유동층 시험 영역에서 액체 및 유동입자 상들의 평균 체류량은 정압강하법에 의해 구하였다[7]. 유동입자의 반경방향 국부 체류량(local particle holdup)을 측정하기 위하여 차압 변환기를 나선흐름 유도 흐름액체 투입구로부터 0.2 m의 위치에서 열원 벽면으로부터 0.8 cm, 1.6 cm, 2.4 cm, 3.2 cm 지점에 설치하였으며 차압 변환기 센서의 간격은 4 cm이었다.

유동층 내부에서 열전달계수 측정을 위해 유동층의 중앙에 직경이 0.03 m, 길이가 1 m인 카트리지 형태의 수직열원을 분산판위에 설치하였다. 유동층 내부에서의 온도와 열원표면의 온도 측정은 J-type의 열전대를 사용하였고, 액체-입자 유동층의 내부열원과 유동층간의 열전달 계수는 열원에 가해진 열량(Q)과 열원표면과 유동층간의 평균 온도차 T를 구하여[8] (1)식에 의해 구하였다.

$$h = \frac{Q}{A\Delta T} \quad (1)$$

열원과 유동층간의 평균 온도차는 시간의 변화에 따른 온도차 요동(fluctuation)을 측정하여 구하였다. 열원과 유동층간의 온도차 요동 특성을 분석하기 위하여 측정된 온도 요동 신호로부터 다차원의 상공간 투영(multidimensional phase space portraits)[8, 9]과 kolmogorov 엔트로피[10]를 구하였다. 실험적으로 측정된 온도 요동 신호의 시간에 따른 변화자료 X(t)를 재구성하여 (2)식과 같은 벡터 자료를 만들었으며 이 자료를 이용하여 상공간 투영을 구하였다.

$$Z_i(t) = [X(i \cdot \Delta t), X(i \cdot \Delta t + \tau), \dots, X(i \cdot \Delta t + (p-1)\tau), \\ i = 1, 2, 3, \dots, [m - (p-1)k] \quad (2)$$

여기서, $\tau = k \cdot \Delta t$, $k = 1, 2, 3, \dots$ 이며, p는 벡터 Z(t)의 차원이 된다.

내부열원과 유동층간 열전달 계(system)의 온도 요동 현상에 내재된 동역학적 특성을 정량적으로 분석하기 위하여 온도차 요동 자료의 kolmogorov 엔트로피(entropy)를 구하였는데, 이는 다차원(multi-dimension)의 계(system)에서 (3)식과 같이 정의되므로,

$$K = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} \sum_{i_1, i_2, \dots, i_d} P(i_1, i_2, \dots, i_d) \log_2 P(i_1, i_2, \dots, i_d) \quad (3)$$

측정된 data의 조합 확률의 상관계수로부터 (4)식에 의해 구하였다[9].

$$K = \frac{1}{\tau} \ln \frac{C_d(r)}{C_{d+1}(r)} \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 입자 체류량(ϵ_s)

액체-입자 나선흐름(swirling) 유동층에서 액체의 유속이 입자 체류량(ϵ_s)에 미치는 영향을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 액체의 유속이 증가함에 따라 입자 체류량이 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 유동층 내부에서 나선 흐름을 유도하기 위한 액체의 유속이 증가함에 따라서 유동층내 유동입자의 층팽창 높이가 증가하기 때문에 입자 체류량이 감소한다고 할 수 있다. 이와 같은 현상은 액체의 나선 흐름이 없는 일반 액체-입자 유동층에서도 찾아 볼 수 있다[1, 2].

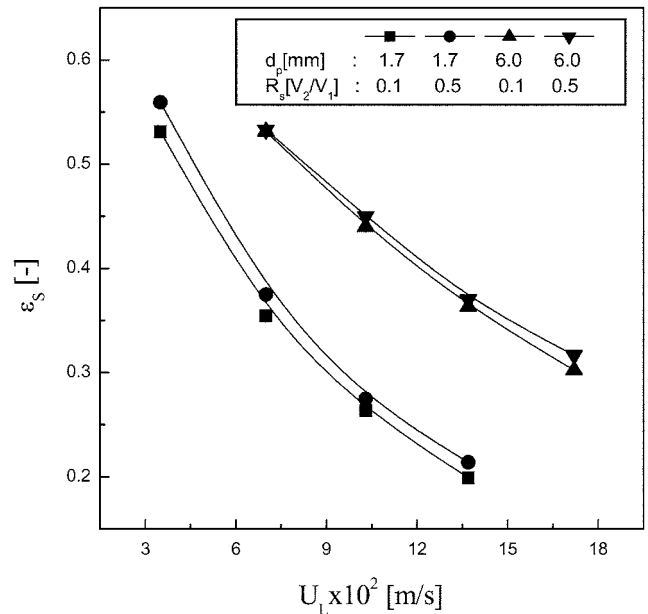


Fig. 2. Effects of U_L on ϵ_s in liquid-particle swirling fluidized beds.

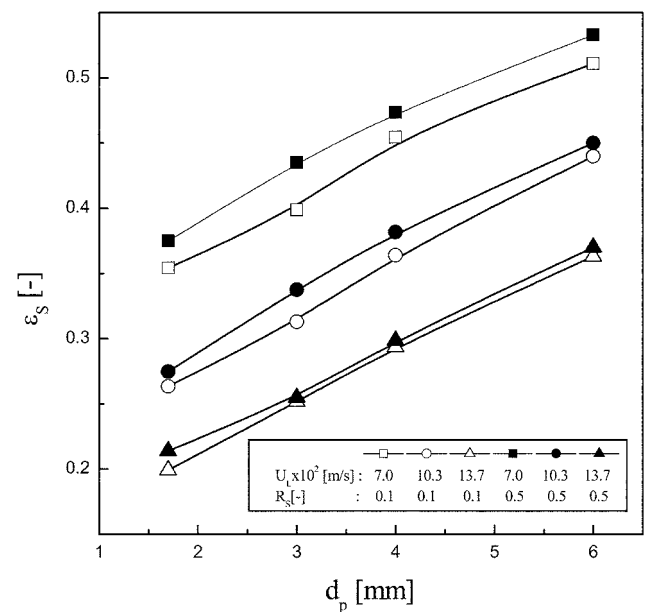


Fig. 3. Effects of d_p on ϵ_s in liquid-particle swirling fluidized beds ($R_s=0.3$).

액체-입자 나선흐름(swirling) 유동층에서 입자의 크기가 입자 체류량(ϵ_s)에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 입자의 크기가 증가함에 따라서 입자 체류량이 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 액체-입자 유동층에 투입되는 액체의 양이 동일한 조건에서 유동입자의 층팽창이 입자의 크기가 증가함에 따라 감소하기 때문이라 할 수 있다. 즉, 유동 입자의 크기가 증가함에 따라서 상승 액체에 의해 유동입자에 작용하는 부력보다 유동 입자에 작용하는 중력의 영향이 증가하기 때문이라 할 수 있다. 한편, Fig. 3에서 액체의 유속이 증가함에 따라 ϵ_s 에 작용하는 나선흐름 유체의

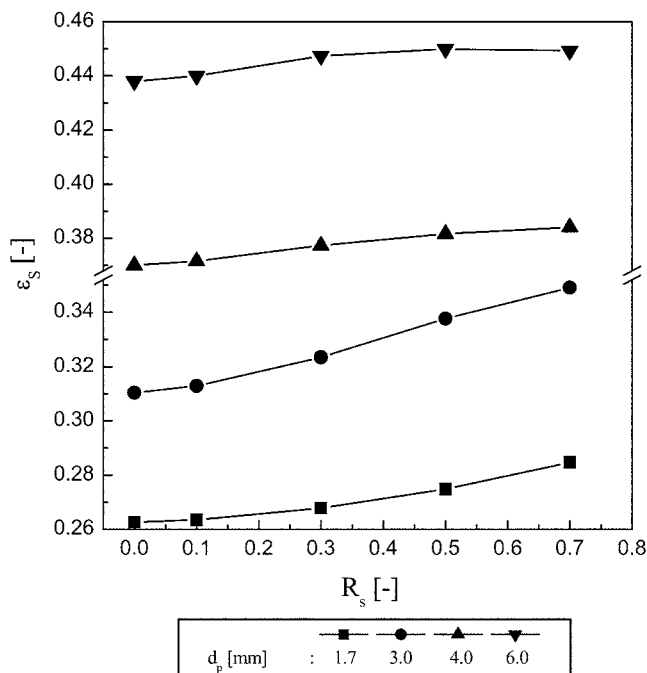


Fig. 4. Effects of R_s on ϵ_s in liquid-particle swirling fluidized beds ($U_L = 0.103$ m/s).

비(R_s)의 영향은 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 액체 유속이 증가함에 따라 유동층의 팽창이 심각하여져서 유동층의 조절부피(control volume)가 증가하므로 나선 흐름을 유도하는 나선흐름 유체에 의해 전달되는 힘 즉, 운동량이 상대적으로 작아지기 때문으로 해석할 수 있다.

액체-입자 나선흐름(swirling) 유동층에서 나선흐름유도를 위해 유동층에 주입되는 2차 액체량의 주 액체량에 대한 비(R_s)가 입자 체류량(ϵ_s)에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 모든 경우에 나선흐름유도를 위한 2차 액체를 주입하면 동일 조건에서 입자 체류량은 증가하는 것을 알 수 있는데, 본 연구의 범위에서 10~13%까지 입자 체류량을 증가시킬 수 있었다. 이는 액체-입자 유동층에 나선흐름유도 액체를 투입하면 액체-입자 유동층에 투입되는 액체의 양이 동일한 조건에서 유동 입자의 팽창이 상대적으로 감소하기 때문이다. 즉, 유동 입자의 층 팽창 감소는 층밀도의 증가를 가져와 입자 체류량은 증가한다고 할 수 있다. 한편, Fig. 4에서 R_s 의 증가가 ϵ_s 의 증가에 미치는 영향은 유동입자의 크기가 작은 경우가 유동 입자의 크기가 큰 경우 보다 더욱 크게 나타남을 알 수 있는데, 이는 유동입자의 크기가 작아질수록 나선 흐름 유도 액체의 주입에 의해 유동입자의 나선 흐름이 쉽게 유도되기 때문이라고 해석할 수 있다.

3-2. 온도차 요동 특성

액체-입자 나선흐름(swirling) 유동층에서 내부 열원과 유동층간의 온도차 요동의 전형적인 예를 나선흐름유도를 위해 유동층에 주입되는 2차 액체량의 비(R_s)의 증가에 따라 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 나선 흐름 액체량의 비가 증가함에 따라 온도차 요동의 진폭이 감소하였으며, 평균 온도차(T)도 감소함을 알 수 있다. 이는 나선 흐름 액체량의 비가 증가함에 따라 같은 액체

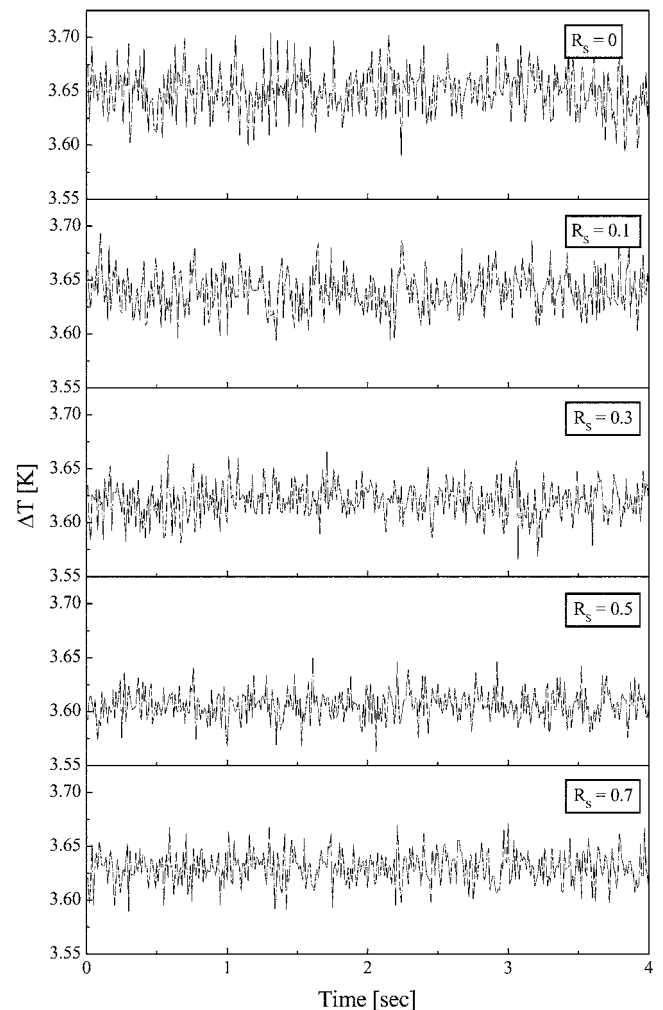


Fig. 5. Typical temperature difference fluctuations in the liquid-particle swirling fluidized beds ($d_p = 3$ mm, $U_L = 13.7 \times 10^2$ m/s).

유속 조건에서 유동층내의 층팽창이 감소하여 층밀도를 증가시키기 때문에 유동입자가 열원 경계층에서 열원 표면과 충돌할 때 접촉 효율 및 접촉 강도가 증가하게 되며, 따라서 유동층과 열원사이의 평균 온도차는 감소한다고 할 수 있다. 또한, 나선 흐름 유동 액체의 주입으로 유동층내에 나선 흐름이 유도되어 유동입자 거동의 규칙성이 상대적으로 증가하여 평균 온도차 요동의 진폭은 감소한다고 할 수 있다. 하지만, 나선 흐름 유체량의 비가 0.5보다 증가하여 0.7이 되면 평균 온도차와 진폭은 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

이와 같은 열원 표면과 유동층간의 온도차 요동 특성을 도식화하여 나타내기 위하여 시간의 흐름에 따른 온도 요동 시계열을 다차원의 위상 공간에 투영으로 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 나선 흐름 유체의 양이 증가함에 따라서 온도 요동의 위상 공간 투영은 중심으로 모이는 것을 알 수 있고, 위상 공간 투영의 중심이 점점 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 나선 흐름 유체의 주입비가 증가함에 따라 열원 표면과 유동층간의 온도차 요동이 안정화되고, 평균 온도차가 감소하기 때문이라고 할 수 있다.

액체-입자 나선흐름(swirling) 유동층에서 액체 유속의 증가에 따라 유동층 내부에서 나타나는 온도차 요동의 kolmogorov 엔트로피

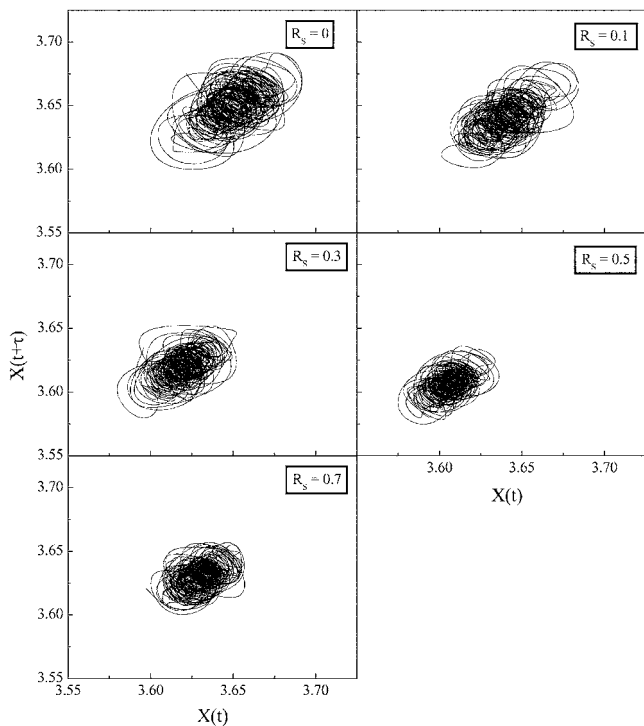


Fig. 6. Typical example of phase space portraits of temperature difference fluctuations ($d_p=3$ mm, $U_L=13.7 \times 10^2$ m/s).

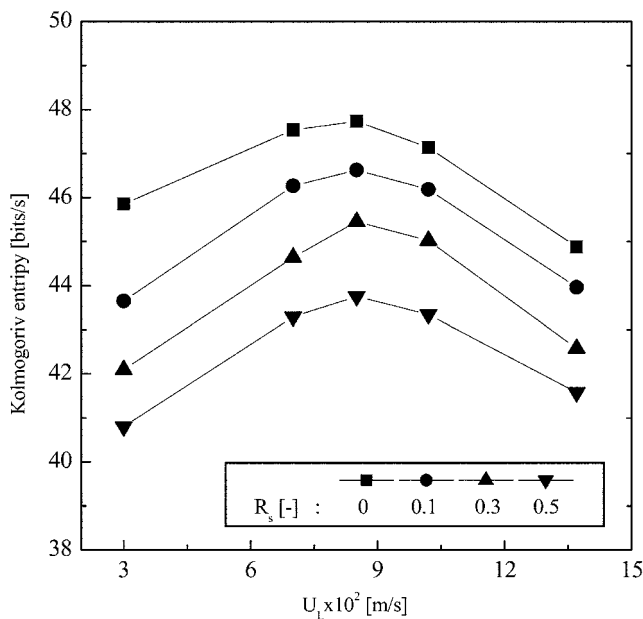


Fig. 7. Effects of liquid velocity on the Kolmogorov entropy of temperature difference fluctuations with variation of swirling ratio ($d_p=1.7$ mm).

의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 액체의 유속이 증가함에 따라 온도차 요동자료의 kolmogorov 엔트로피는 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 액체 유속이 증가함에 따라 유동입자의 흐름 거동이 활발해져 열원 표면과 유동입자 간의 접촉과 충돌현상이 증가하기 때문에 이로 인한 열원과 유동층간의

온도차 요동 자료의 엔트로피 값을 증가시키지만, 액체 유속이 더욱 증가하게 되면 입자 체류량이 매우 감소하기 때문에 유동입자의 거동이 열원과 유동층간의 온도차 변화에 미치는 영향이 상대적으로 감소하게 되어 온도차 요동자료의 엔트로피 값이 감소한다고 할 수 있다[8, 10]. 하지만, 나선흐름 유도를 위한 2차 액체 주입량의 증가에 따라서는 유동층내 온도차요동 자료의 kolmogorov 엔트로피 값은 점점 감소하였는데, 이는 나선 흐름 액체 주입량의 증가에 따라 유동입자의 흐름 거동이 상대적으로 규칙적인 거동을 나타내기 때문이라 할 수 있다.

3-3. 열전달 특성

액체-입자 나선흐름(swirling) 유동층에서 액체의 유속의 증가가 유동층 내부 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 총괄 액체의 유속이 증가함에 따라 열전달 계수 값은 증가하다가 최대값을 가진 후 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 액체 유속이 증가함에 따라 입자의 유동이 시작되어, 유동층내의 유동입자의 거동이 활발해짐에 따라 내부열원과 연속상이 액체 사이에 형성되는 열적 경계층의 두께를 감소시키기 때문에 유속이 상대적으로 작은 영역에서 액체의 유속이 증가함에 따라 열전달 계수는 증가한다고 할 수 있다 [1, 2, 7]. 하지만, 액체의 유속이 더욱 증가하게 되면 유동층내의 열전달 시험영역 내에서 입자 체류량이 심각하게 감소하여 유동입자의 충돌과 접촉에 의해서 열원 주위에 형성된 경계층의 두께를 감소시키는 역할이 상대적으로 감소하기 때문에 유속의 증가에 의한 유동층 내부의 난류현상의 증가에도 불구하고 열전달 계수는 감소하게 된다고 할 수 있다[1, 2, 8].

이와 같은 현상은 액체 체류량이 열전달 계수에 미치는 영향을 분석함으로써 더욱 뚜렷이 할 수 있다. 액체-입자 나선흐름(swirling) 유동층에서 액체 체류량의 증가가 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 액체 체류량이 증가함에 따라 열전달 계수는 증가하다가 최대값을 가진 후 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 앞서서도 언급하였듯이 액체 체류량이 적은

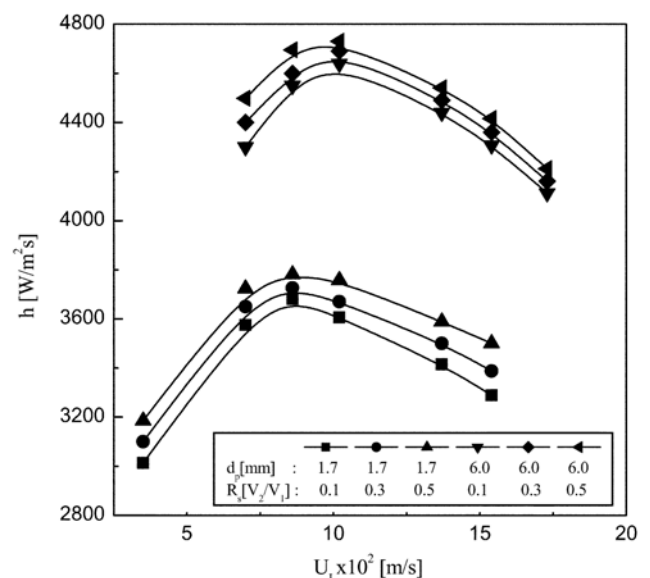
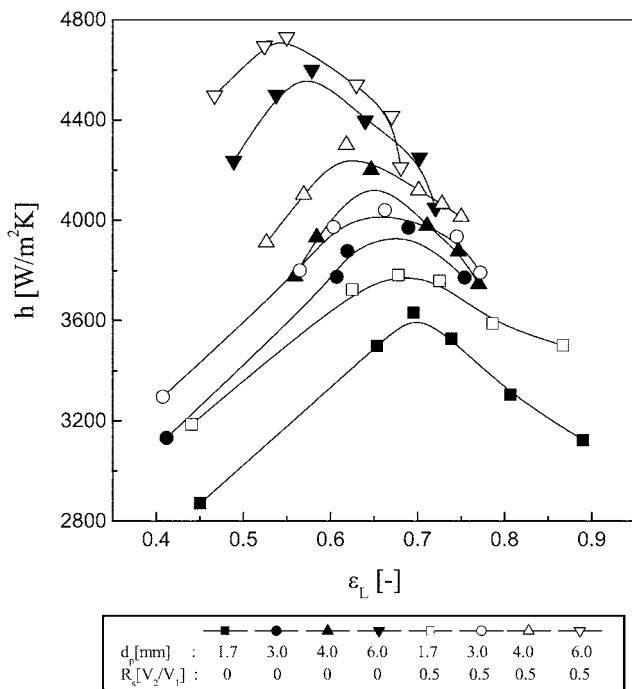
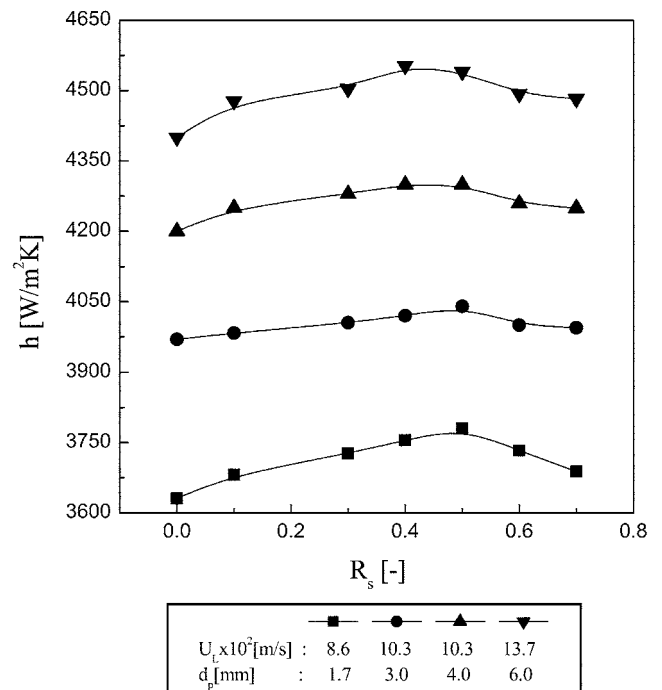
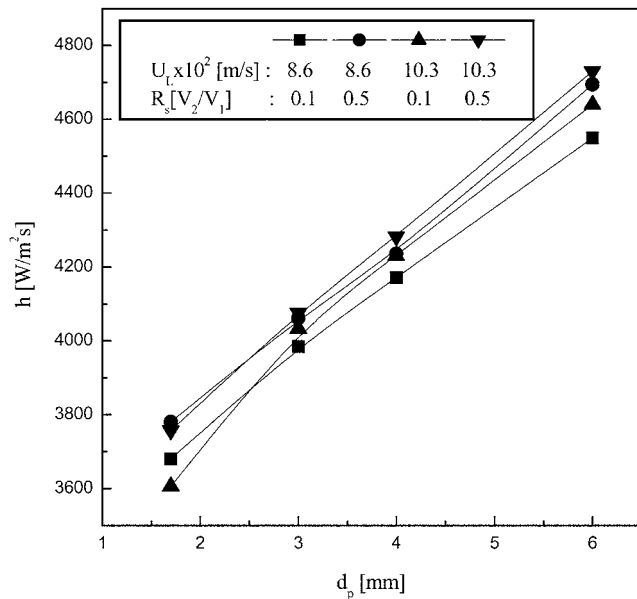


Fig. 8. Effects of U_L on h in liquid-particle swirling fluidized beds.

Fig. 9. Effects of ϵ_L on h in liquid-particle swirling fluidized beds.Fig. 11. Effects of R_s on h in liquid-particle swirling fluidized beds.Fig. 10. Effects of d_p on h in liquid-particle swirling fluidized beds.

영역에서는 유동 입자가 열원 경계층 두께를 감소시키지만, 액체 체류량이 큰 영역에서는 입자 체류량이 감소하여 열원 경계층의 두께를 감소시키지 못하기 때문에 열전달 계수는 감소한다고 할 수 있다.

액체-입자 나선흐름(swirling) 유동층에서 유동 입자의 크기가 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이, 입자의 크기가 증가함에 따라서 열전달 계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 입자의 크기가 증가함에 따라서 같은 유속 범위에서 입자 체류량이 증가할 뿐만 아니라 입자의 크기가 작은 입

자에 비해 큰 입자가 같은 액체 유속에서 운동량이 더 크기 때문에 열원 경계층의 두께를 더욱 감소시켜 열전달 계수가 증가한다고 할 수 있다[1, 2].

액체-입자 나선흐름(swirling) 유동층에서 나선흐름유도를 위해 유동층에 투입되는 2차 주입 액체량의 비(R_s)가 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 나선흐름유도를 위해 유동층에 투입되는 2차 주입 액체량의 비가 증가할수록 열전달 계수는 증가하다가 R_s 값이 0.4~0.5일 때 최대값을 나타낸 후 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 나선흐름 액체의 비가 증가함에 따라서 유동층에 나선흐름액체를 투입하지 않은 것에 비해 유동 입자의 층팽창이 감소하여 시험영역에서의 입자 체류량이 증가하고, 유동입자 흐름의 규칙성이 상대적으로 증가하여 유동 입자와 열원 표면간의 접촉과 충돌 효율이 증대되어 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수가 증가하게 된다. 그러나 나선흐름유도 액체의 비를 0.4~0.5 이상으로 증가시키면 전체 입자 체류량은 약간 증가하게 되나 나선 흐름 유도 유체의 운동량이 너무 커져서 유동입자들을 열원이 아닌 유동층 내부로 분산시켜 유동 입자와 열원 표면간의 효과적인 접촉과 충돌을 저해하며 총괄 열전달 계수는 오히려 감소한다고 할 수 있다. 즉, Fig. 12에서 볼 수 있듯이, 나선흐름유도 액체량의 비가 증가하게 되면 유동 입자의 평균 체류량은 증가하면서 반경방향의 유동 입자 체류량도 점점 균일하여 지는 것을 알 수 있다. Fig. 12에서 R_s 의 값이 0.5가 되면 R_s 의 값이 0.3인 경우보다 유동입자 체류량이 증가하면서 반경방향 체류량도 거의 균일하게 되었다. 그러나 R_s 의 값이 0.7이 되면, 유동입자에 작용하는 원심력이 크게 증가하여 유동입자가 내부 열원주위보다 유동층 내부로 더 많이 분포하는 것을 알 수 있다. 액체-입자 유동층에서 나선흐름 유도 액체의 투입으로 열전달계수는 15~20%까지 증가시킬 수 있었다(Fig. 9).

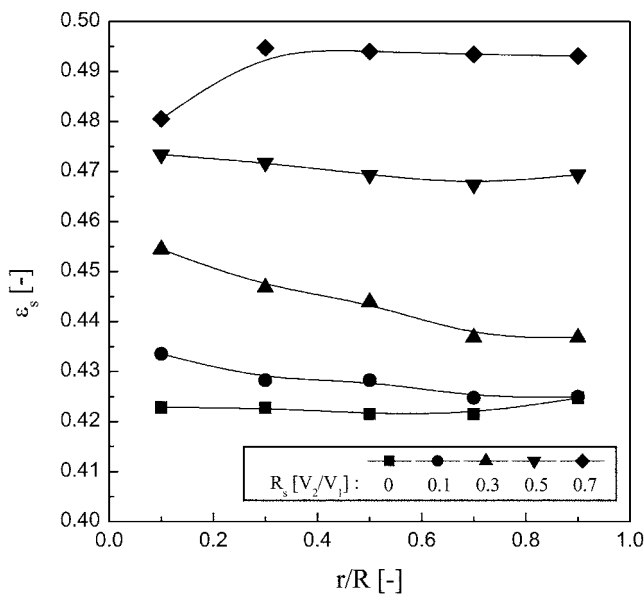


Fig. 12. Radial distribution of particle holdup in liquid-particle swirling fluidized beds ($U_L=10.2$ cm/s, $d_p=6.0$ mm).

본 연구의 실험 범위에서 유동 입자 체류량과 총괄 열전달 계수를 실험 변수들로 구성된 무차원군의 상관식으로 식(5)~(6)으로 나타낼 수 있었는데, 각 식들의 상관 계수는 각각 0.96, 0.93이었다.

$$\varepsilon_s = 715.5 \left(\frac{d_p(\rho_s - \rho_L)U_L}{\mu_L} \right)^{-0.654} \left(\frac{d_p}{D} \right)^{1.036} (R_s)^{0.026} \quad (5)$$

$$\left(\frac{hd_p(1 - \varepsilon_s)}{k_L \varepsilon_s} \right) = 0.584 \left(\frac{C_p \mu_L}{k_L} \right)^{0.536} \left(\frac{d_p(\rho_s - \rho_L)\varepsilon_L U_L}{\mu_L \varepsilon_s} \right)^{0.672} \left(\frac{d_p}{D} \right)^{0.367} (R_s)^{0.01} \quad (6)$$

(6)식을 만족시키는 실험범위는 $0.2 \leq \varepsilon_s \leq 0.55$ 이었다.

4. 결 론

본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 액체-입자 유동층에서 나선흐름 유도 액체의 주입은 일반 유동층과 비교하여 같은 실험조건에서 입자의 체류량을 10~13% 그리고 내부 열원과 유동층간의 열전달계수를 15~20% 증가시킬 수 있었다.

(2) 액체-입자 나선흐름 유동층에서 입자 체류량은 유동입자의 크기와 나선유도흐름 액체량의 비(R_s)의 증가에 따라서 증가하였으나, 액체유속의 증가에 따라서는 감소하였다. 유동층 내부에서 R_s 의 값이 0.1~0.3인 경우에 유동 입자의 국부체류량은 유동층 중심부에서 큰 값을 나타내었으며, R_s 의 값이 0.5일 때는 거의 균일한 분포를 나타내나 R_s 의 값이 0.7일 때는 유동층 중심부의 입자 체류량이 상대적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

(3) 열원 표면과 유동층간 온도차 요동 자료의 위상 공간 투영은 나선 유도 흐름 액체량의 비(R_s)가 0.1에서 0.5까지 증가할수록 점점 안정되고 규칙성이 증대되는 경향을 나타내었고, kolmogorov 엔

트로피 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 액체의 유속이 증가함에 따라서는 kolmogorov 엔트로피 값은 최대값을 나타내었다.

(4) 나선 흐름 유동층에서 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수는 액체유속, 총공극률, 나선 유도 흐름 액체량의 비가 증가함에 따라서 최대값을 나타내었으며, 유동 입자의 크기가 증가함에 따라 증가하였다.

(5) 액체-입자 나선흐름 유동층에서 입자 체류량과 열전달 계수를 다음과 같은 무차원군의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$\varepsilon_s = 715.5 \left(\frac{d_p(\rho_s - \rho_L)U_L}{\mu_L} \right)^{-0.654} \left(\frac{d_p}{D} \right)^{1.036} (R_s)^{0.026}$$

$$\left(\frac{hd_p(1 - \varepsilon_s)}{k_L \varepsilon_s} \right) = 0.584 \left(\frac{C_p \mu_L}{k_L} \right)^{0.536} \left(\frac{d_p(\rho_s - \rho_L)\varepsilon_L U_L}{\mu_L \varepsilon_s} \right)^{0.672} \left(\frac{d_p}{D} \right)^{0.367} (R_s)^{0.01} \quad 0.2 \leq \varepsilon_s \leq 0.55$$

사용기호

A	: column area [m ²]
c_p	: specific heat [J/kgK]
D	: column diameter [m]
d_p	: particle size [mm]
g	: gravity acceleration [m/s ²]
h	: heat transfer coefficient [W/m ² K]
k_L	: thermal conductivity of liquid phase [W/mK]
L	: fluidized bed length [m]
P	: pressure [mmHg]
Q	: heat flow rate [W]
R_s	: swirling ratio of continuous liquid phase
ΔT	: temperature difference [K]
U_L	: superficial liquid velocity [m/s]
V_1	: primary liquid stream [m ³ /s]
V_2	: secondary liquid stream [m ³ /s]

그리스 문자

ε	: holdup
μ	: liquid viscosity [Pa.s]
ρ	: density [kg/m ³]

아래첨자

L	: liquid phase
S	: particle phase

참고문헌

1. Fan, L. S., "Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering, Butterworths," Stonehair, MA.(1989).
2. Kim, S. D. and Kang, Y., "Heat and Mass Transfer in Three-phase Fluidized Beds; An Overview," *Chem. Eng. Sci.*, **52**(21), 3639-3660(1997).
3. Kang, Y., Cho, Y. J., Lee, C. G., Song, P. S. and Kim, S. D., "Radial Liquid Dispersion and Bubble Distribution in Three-phase Circulating Fluidized Beds," *Can. J. Chem. Eng.*, **81**(3),

- 1130-1138(2003).
4. Kang, S. H., Lee, C. G., Song, P. S., Kang, Y., Kim, S. D. and Kim, S. J., "Radial Liquid Dispersion and Chaotic Behavior of Liquid-solid Flow in Liquid-solid Circulating Fluidized Beds," *Korean Chem. Eng. Res.*, **42**(2), 241-247(2004).
5. Zhu, J. X., Zheng, Y., Karamanev, D. G. and Bassi, A. S., "(Gas) Liquid-solid Circulating Fluidized Beds and Their Potential Applications to Bioreactor Engineering," *Can. J. Chem. Eng.*, **78**(1), 82-94(2000).
6. Zheng, Y. and Zhu, J. X., "The Onset Velocity of a Liquid-solid Circulating Fluidized Bed," *Powder Technol.*, **114**(3), 244-251 (2001).
7. Son, S. M., Shin, H. J., Kang, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D., "Characteristic of Phase Holdups and Pressure Fluctuations in a Three-Phase Swirling Fluidized Bed," *J. Korean Ind. Eng. Chem.* **15**(6), 652-658(2004).
8. Shin, K. S., Song, P. S., Lee, C. G., Kang, S. H., Kang, Y., Kim, S. D. and Kim, S. J., "Heat Transfer Coefficient in Viscous Liquid-Solid Circulation Fluidized Beds," *AIChE J.*, **51**(2), 671-677 (2005).
9. Van der Bleek, C. M. and Shouten, J. C., "Deterministic Chaos New tool in Fluidized Bed Design and Operation," *Chem. Eng. J.*, **53**(1), 75-87(1993).
10. Cho, Y. J., Song, P. S., Kim, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D., "Stochastic Analysis of Gas-liquid-solid Flow in Three-phase Circulating Fluidized Beds," *J. Chem. Eng. Japan.*, **34**(2), 254-261 (2001).
11. Grassberger, P. and Procaccia, I., "Estimation of the Kolmogorov Entropy from a Chaotic Signal," *Physical review A*, **28**(4), 2591-2593(1983).