

삼상 Swirling 유동층에서 열전달 특성

손성모 · 신익상 · 강 용[†] · 조용준* · 양희철*

충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
*한국원자력연구원
305-353 대전시 유성구 덕진동 150
(2007년 12월 13일 접수, 2007년 12월 27일 채택)

Characteristics of Heat Transfer in Three-Phase Swirling Fluidized Beds

Sung-Mo Son, Ik-Sang Shin, Yong Kang[†], Yong-Jun Cho* and Hee-Chun Yang*

School of Chemical Engineering, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea
*Nuclear Fuel Cycle R&D Group, Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea
(Received 13 December 2007; accepted 27 December 2007)

요 약

직경이 0.102 m이고 높이가 2.5 m인 삼상 swirling(나선) 흐름 유동층에서 열전달 특성을 고찰하였다. 기체유속(U_G), 액체유속(U_L), 유동 입자의 크기(d_p), 그리고 연속상인 액체의 나선 유도 흐름 액체량의 비(R_S)가 유동층 내부 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수에 미치는 영향을 검토하였다. 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 0.4까지 증가할수록 온도차 요동 자료의 위상 공간 투영은 점점 안정되고 규칙성이 증대되는 상태를 나타내고, Kolmogorov 엔트로피 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 열원 표면과 유동층간의 온도차 요동 자료의 Kolmogorov 엔트로피 값은 나선 유도 흐름 액체량이 증가함에 따라 최소값을 나타내었다. 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수는 기체 유속 및 유도입자의 크기가 증가함에 따라서 증가하였으나, 액체유속, 층공극률, 나선 유도 흐름 액체량의 비가 증가함에 따라서 최대값을 나타내었다. 내부 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수가 최대값을 나타낼 때의 액체의 유속 조건에서 온도차 요동자료의 Kolmogorov 엔트로피의 값도 최대값을 나타내었다. 삼상 나선흐름 유동층에서 열전달 계수와 Kolmogorov 엔트로피를 실험 변수 및 무차원군의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

Abstract – Characteristics of heat transfer were investigated in a three-phase swirling fluidized bed whose diameter was 0.102 m and 2.5 m in height. Effects of gas and liquid velocities, particle size and liquid swirling ratio (R_S) on the immersed heater-to-bed overall heat transfer coefficient were examined. 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 liquid swirling ratio from 0.1 to 0.4. The value of Kolmogorov entropy exhibited its minimum with increasing liquid swirling ratio. The value of overall heat transfer coefficient (h) showed its maximum with the variation of liquid velocity, bed porosity or liquid swirling ratio, but it increased with increasing gas velocity and particle size. The value of K exhibited its maximum at the liquid velocity at which the h value attained its maximum. The overall heat transfer coefficient and Kolmogorov entropy were well correlated in terms of dimensionless groups and operating variables.

Key words: Three-Phase, Swirling Fluidized Bed, Temperature Fluctuations, Heat Transfer Coefficient

1. 서 론

삼상유동층은 다상들 간의 반응이나 접촉 공정을 연속적으로 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 각 상(phase)들간의 접촉이 매우 효과적

이고 반응기 층 내의 압력강하를 획기적으로 줄일 수 있으며, 반응기 내부에서 열전달 및 물질전달 효과가 뛰어나 화학 및 정유 산업 공정, 이온교환수지를 사용한 특정물질의 분리 및 회수, 오일의 수소화 및 탈황공정 뿐만 아니라 폐수처리, 발효, 효소의 고정화와 같은 생물 공학적 공정 등에 널리 사용되어지고 있다[1-4]. 그러나, 삼상 유동층 반응기의 생산 능력이나 특정 성분 분리 또는 폐수 처리 용량을 높이기 위해서는 액체의 유속이 높은 범위에서 조작되는 것

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

*이 논문은 KAIST 정인재 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

이 요구되는데, 삼상 유동층에서 액체의 유속이 높은 범위에서는 층의 팽창으로 인하여 입자 체류량이 매우 감소하게 되므로 기체-액체-유동입자들간의 접촉 효율이 현저히 감소할 뿐만 아니라 유동층내의 열전달 계수도 심각한 감소를 가져오는 문제점이 있어 왔다[5]. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 최근 나선흐름(swirling) 유동층에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[6, 7].

삼상 유동층에서 다상들간의 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 하는 것으로 보고되고 있다[1, 2, 5]. 또한 다상들간의 계면에서의 흡착이나 흡수 및 반응은 연속상인 액체의 점도나 표면장력, 밀도 등 중요한 물리적 성질들에 의해 큰 영향을 받는데, 이들 물리적 성질들은 온도의 함수이므로 삼상 유동층의 계면에서의 반응성이나 물질 전달 현상을 규명하는데 있어 열전달 현상은 중요한 요소로 작용한다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 삼상 유동층의 특성을 그대로 유지하기 위해 공정의 큰 변화 없이도 액체의 유속 증가에 따른 유동입자의 과도한 층 팽창을 효과적으로 줄이면서 다상들 간의 접촉효율이나 접촉강도를 기존의 삼상 유동층계보다 효과적으로 증가시키기 위한 방법의 하나로 액체의 주입 흐름을 나선흐름으로 유도하고자 하였다. 유동층 내부에서 액체의 나선 흐름 유도는 기체, 액체, 유동입자들간의 유동 흐름 거동의 규칙성을 증가시킬 수 있으므로, 이와 같은 연속성 흐름 공정의 변화가 유동층 내부에서 온도요동과 열전달 현상의 향상에 미치는 영향을 고찰 하였다. 본 연구 결과는 지금까지의 방법으로 매우 어려웠던 삼상 유동층 반응기나 공정의 효과적인 조절(control)과 결점 진단에 획기적인 공학적 정보를 제공할 수 있어서 삼상 유동층 반응기의 성능향상에 공헌할 수 있을 것으로 예견된다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 실험 장치는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 직경이 0.102 m이고 높이가 2.5 m인 아크릴 관을 사용하였다. 기체는 압축 공기를 사용하였고, 액체는 물을 사용하였으며, 유동입자로는 밀도가 2,500 kg/m³인 유리구슬을 사용하였다. 본 연구의 실험범위는 액체유속이 3.5~17.2 cm/s이었으며, 입자의 크기는 1.7~6.0 mm이었다. 유동층 내부의 나선 흐름 유동을 유도하기 위하여 유동층 하부 액체의 분산판으로부터 0.2 m 높이에서 나선 유도 흐름 액체를 투입하였는데, 액체 분산판을 통해 관의 하부에서 유입되는 액체의 부피를 기준으로 나선 유도 흐름 주입 액체량의 비인 $R_S(V_2/V_1)$ 는 0~0.5이었다. 각 실험 조건을 Table 1에 정리하여 나타내었다. 액체 연속상의 분산판은 다공판 형태를 사용하였는데, 직경 3 mm의 구멍을 삼각피치로 균일하게 배치하였으며 기체분산상의 주입을 위해 액체 연속상 분배기에 직경 6.35 mm의 관을 삽입하여 용접한 후 이 관에 직경 1 mm의 오리피스를 만들어 기체 분산상과 액체 연

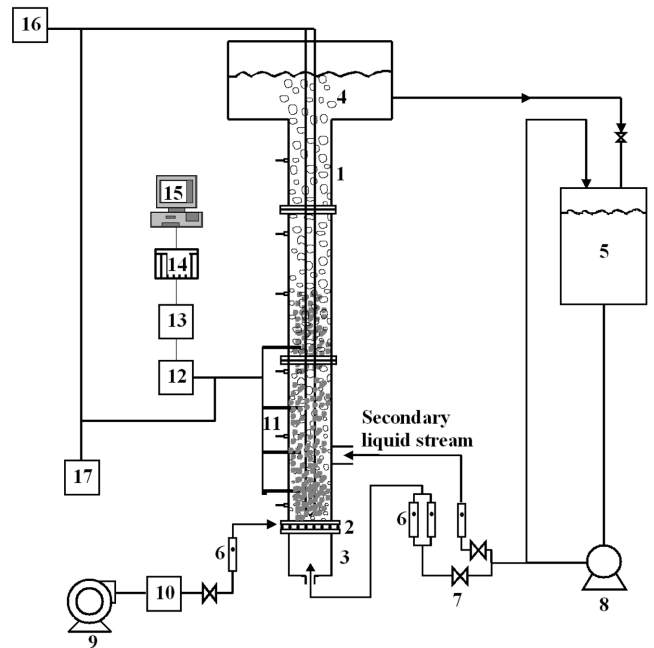


Fig. 1. Experimental apparatus.

- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| 1. Fluidized bed | 10. Gas filter & regulator |
| 2. Distributor | 11. Thermocouple |
| 3. Liquid calming section | 12. Amplifier |
| 4. Liquid weir | 13. Low-pass Filter |
| 5. Liquid reservoir | 14. A/D Converter |
| 6. Flowmeter | 15. Computer |
| 7. Control valve | 16. Power supply |
| 8. Liquid pump | 17. Temperature indicator |
| 9. Air compressor | |

속상이 동일면에서 유동층 내에 주입되도록 하였다.

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 ΔT 를 구하여[9] 식 (1)에 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)[9, 10]과 Kolmogorov 엔트로피[11, 12]를 구하였다. 실험적으로 측정된 온도 요동 신호의 시간에 따른 변화자료 $X(t)$ 를 재구성하여 식 (2)와 같은 벡터 자료를부터 만들었으며 이 자료를 이용하여 상공간 투영을 구하였다.

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

Table 1. Experiment conditions

Gas phase	Compressed air	Gas velocity [m/s]	0.01~0.09
Liquid phase	Tap water	Liquid velocity [m/s]	0.035~0.172
Solid phase	Glass bead	Swirling liquid ratio [-]	0~0.5
Solid density [kg/m ³]	2,500	Solid size [mm]	1.7~6.0

$$i = 1, 2, 3, \dots, [m - (p-1)k] \quad (2)$$

여기서, $\tau = k \cdot \Delta t$, $k=1, 2, 3, \dots$ 이며, p 는 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 식 (3)과 같이 정의되므로,

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

측정된 data의 조합 확률의 상관계수로부터 식 (4)에 의해 구하였다[10].

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

3. 결과 및 고찰

3-1. 온도차 요동 특성

삼상 나선 흐름 유동층에서 내부 열원과 유동층간의 온도차 요동의 전형적인 예를 나선 흐름 유도를 위해 유동층에 주입되는 2차 액체량의 비(R_s)의 증가에 따라 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 나선 흐름 액체량의 비가 증가함에 따라 온도차 요동의 진폭이 감소하였으며, 평균 온도차(ΔT)도 감소함을 알 수 있다. 이는 나선 흐름 액체량의 비가 증가함에 따라 같은 기체 유속 및 액체 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

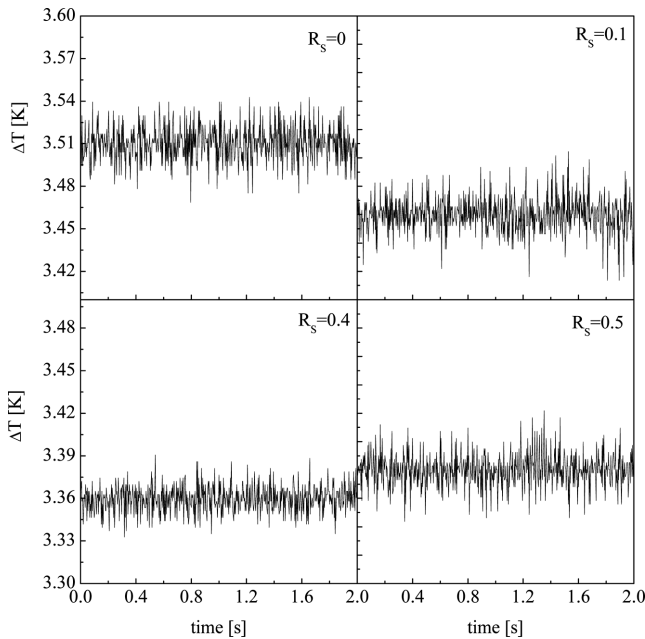


Fig. 2. Typical temperature difference fluctuations in the three-phase swirling fluidized beds ($U_G = 5 \times 10^{-2}$ m/s, $U_L = 10.28 \times 10^{-2}$ m/s, d_p : 3.0 mm).

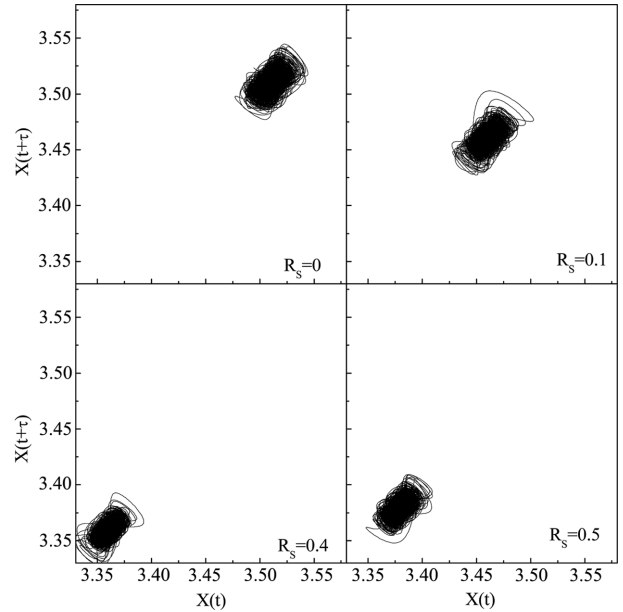


Fig. 3. Typical example of phase space portraits of temperature difference fluctuations ($U_G = 5 \times 10^{-2}$ m/s, $U_L = 10.28 \times 10^{-2}$ m/s, d_p : 3.0 mm).

진폭은 감소한다고 할 수 있다. 하지만 나선 흐름 유체량의 비가 0.4보다 증가하여 0.5가 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. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 나선 흐름 유체의 양이 증가함에 따라 온도 요동의 위상공간 투영은 중심으로 모이는 것을 알 수 있고, 위상 공간 투영의 중심이 점점 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 나선 흐름 유체의 주입 비가 증가함에 따라 열원 표면과 유동층간의 온도차 요동이 안정화 되고, 평균 온도차가 감소하기 때문이라고 할 수 있다.

삼상 나선 흐름 유동층에서 기체 유속의 증가에 따라 유동층 내

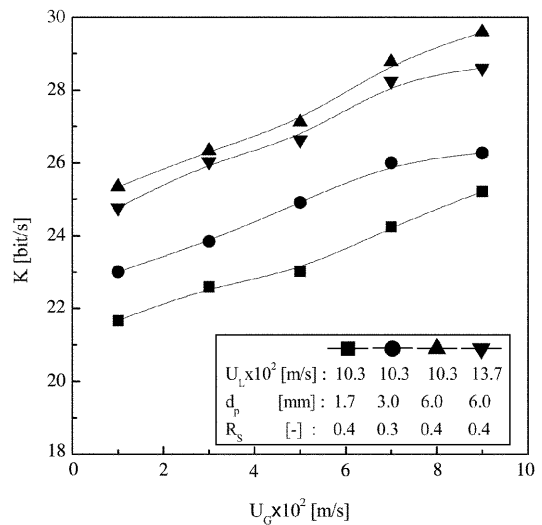


Fig. 4. Effects of gas velocity on the Kolmogorov entropy of temperature difference fluctuations in three-phase swirling fluidized beds.

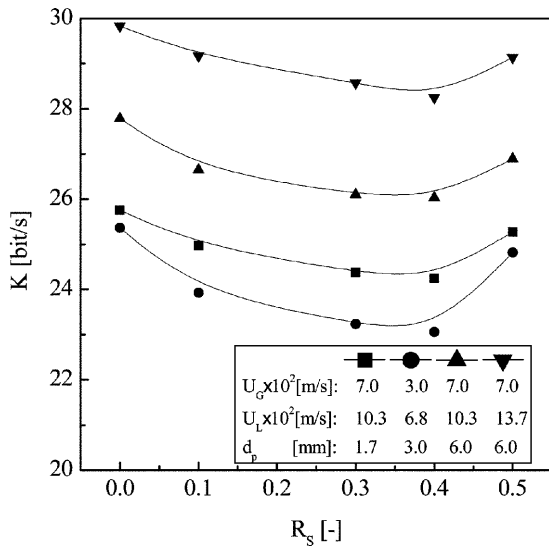


Fig. 5. Effects of swirling ratio on the Kolmogorov entropy of temperature fluctuations in three-phase swirling fluidized beds.

부에서 나타나는 온도차 요동의 Kolmogorov 엔트로피 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 기체 유속이 증가함에 따라 온도차 요동 자료의 Kolmogorov 엔트로피는 증가하였다. 이는 기체 유속이 증가함에 따라 반응기내에 주입되는 기체의 양이 증가하여 반응기에 생성되는 기포의 양이 증가하며, 이는 유동층 내의 난류 강도 및 열원 표면과의 접촉 강도를 증가시켜 열원표면의 열 경계층의 두께를 감소시켜 주기 때문이다.

삼상 나선 흐름 유동층에서 나선흐름 유도를 위한 2차 액체의 주입량의 증가에 따라 유동층 내부에서 나타나는 온도차 요동의 Kolmogorov 엔트로피의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 나선 흐름 유도를 위한 2차 액체의 주입량의 증가에 따라서는 유동층 내 온도차 요동 자료의 Kolmogorov 엔트로피 값은 감소하다 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 나선 흐름 액체 주입량의 증가에 따라 유동입자의 흐름 거동이 상대적으로 규칙적인 거동을 나타내어 엔트로피 값을 감소시키지만, 나선 흐름 유도를 위한 2차 액체의 주입량을 더욱 증가시키면, 유동입자의 흐름 거동이 복잡해지기 때문이라 할 수 있다.

삼상 나선 흐름 유동층에서 액체 유속의 증가에 따라 유동층 내부에서 나타나는 온도차 요동의 Kolmogorov 엔트로피의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 액체의 유속이 증가함에 따라 온도차 요동자료의 Kolmogorov 엔트로피는 증가하다 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 기체 및 입자 체류량이 매우 감소하기 때문에 유동입자의 거동이 열원과 유동층간의 온도차 변화에 미치는 영향이 상대적으로 감소하게 되어 온도차 요동자료의 엔트로피 값이 감소한다고 할 수 있다[9, 11].

본 연구의 실험 범위에서 온도차 요동 자료의 Kolmogorov 엔트로피를 실험 변수들로 구성된 상관식으로 식 (5)로 나타낼 수 있었는데, 상관 계수는 0.9로 실험 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

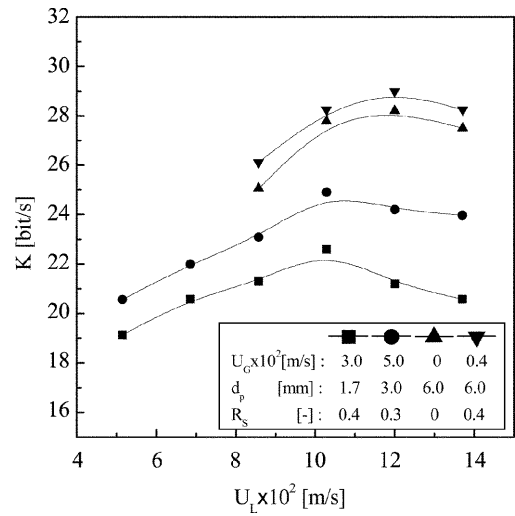


Fig. 6. Effects of liquid velocity on the Kolmogorov entropy of temperature difference fluctuations in three-phase swirling fluidized beds.

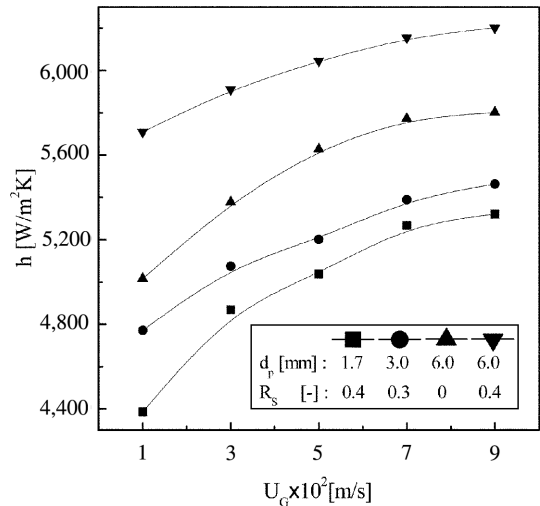


Fig. 7. Effects of gas velocity on the heat transfer coefficient in three-phase swirling fluidized beds ($U_L = 0.103$ m/s).

$$K = 88.234 U_G^{0.070} U_L^{0.169} d_p^{0.116} R_s^{-0.008} \quad (5)$$

3-2. 열전달 특성

삼상 나선 흐름 유동층에서 기체의 유속의 증가가 유동층내부 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 기체 유속이 증가함에 따라 열전달 계수 값은 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기체 유속이 증가함에 따라 유동층내로 유입되는 기체의 양이 증가하게 되어, 유동층내의 기포의 생성이 증가하여 유동층내의 난류 강도를 증가시킬 뿐만 아니라, 내부 열원과 분산상과의 접촉 강도를 증가시켜, 내부 열원 표면의 열적 경계층의 두께를 감소시키기 때문이라 할 수 있다.

삼상 나선 흐름 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 감소

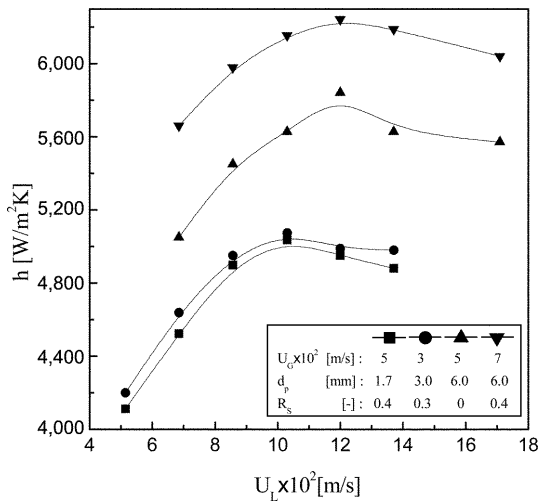


Fig. 8. Effects of liquid velocity on the heat transfer coefficient in three-phase swirling fluidized beds.

하는 경향을 나타내었다. 액체 유속이 증가함에 따라서 입자의 유동이 시작되어, 유동층내의 유동입자의 거동이 활발해짐에 따라서 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, 6, 7]. 하지만 액체의 유속이 더욱 증가하게 되면 유동층내의 열전달 시험영역 내에서 기체 및 고체 체류량이 심각하게 감소하여 분산상의 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, 9].

이와 같은 현상은 층 공극률이 열전달 계수에 미치는 영향을 분석함으로써 더욱 뚜렷이 할 수 있다. 삼상 나선 흐름 유동층에서 층 공극률의 증가가 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 층공극률이 증가함에 따라서 열전달 계수는 증가하다 최대값을 가진 후 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 앞서서도 언급하였듯이 층공극률이 작은 영역에서는 유동 입자가 열원 경계층 두께를 감소시키지만, 층공극률이 큰 영역에서는 고체

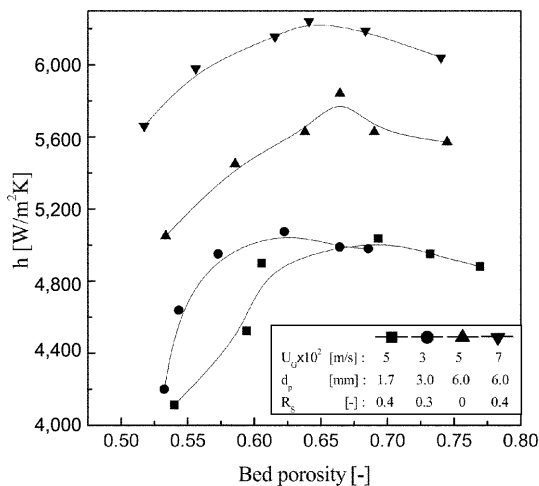


Fig. 9. Effects of bed porosity on the heat transfer coefficient in three-phase swirling fluidized beds.

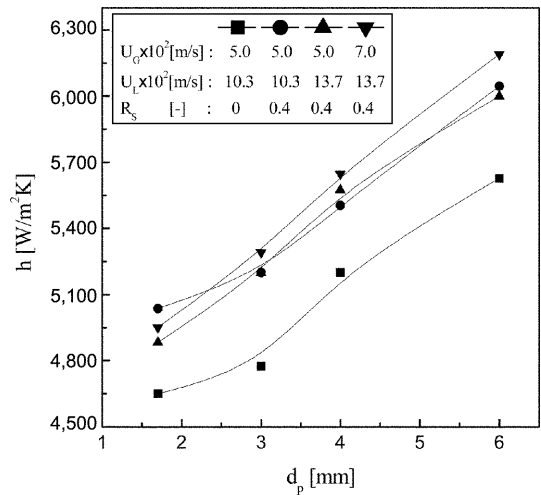


Fig. 10. Effects of particle size on the heat transfer coefficient in three-phase swirling fluidized beds.

체류량이 감소하여 열원 경계층의 두께를 감소시키지 못하기 때문에 열전달 계수는 감소한다고 할 수 있다.

삼상 나선 흐름 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 기체 및 고체 체류량이 증가 할 뿐만 아니라 입자의 크기가 작은 입자에 비해 큰 입자가 같은 액체 유속에서 운동량이 더 크기 때문에 열원 경계층의 두께를 더욱 감소시켜 열전달 계수가 증가 한다고 할 수 있다[1, 2].

삼상 나선 흐름 유동층에서 나선 흐름 유도를 위해 유동층에 투입되는 2차 주입 액체량의 비(R_s)가 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 나선 흐름 유도를 위해 유동층에 투입되는 2차 주입 액체량의 비가 증가할수록 열전달 계수는 증가하다가 R_s 값이 0.4 일때 최대값을 나타낸 후 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 나선 흐름 액체의 비가 증가함에 따라서 유동층에 나선 흐름 액체를 투입하지 않은 것에 비해 유동 입자의 층팽창이 감소하

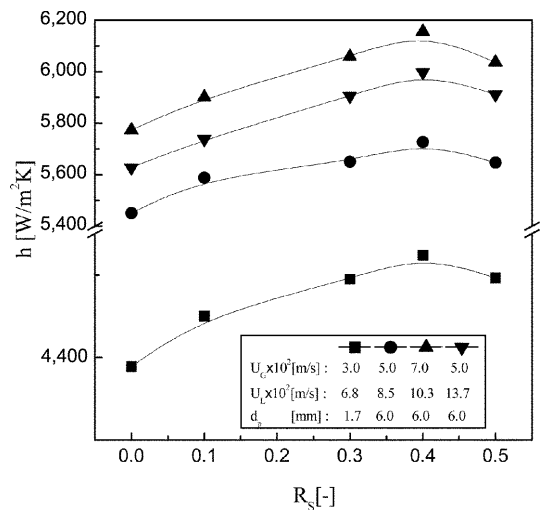


Fig. 11. Effects of swirling ratio on the heat transfer coefficient in three-phase swirling fluidized beds.

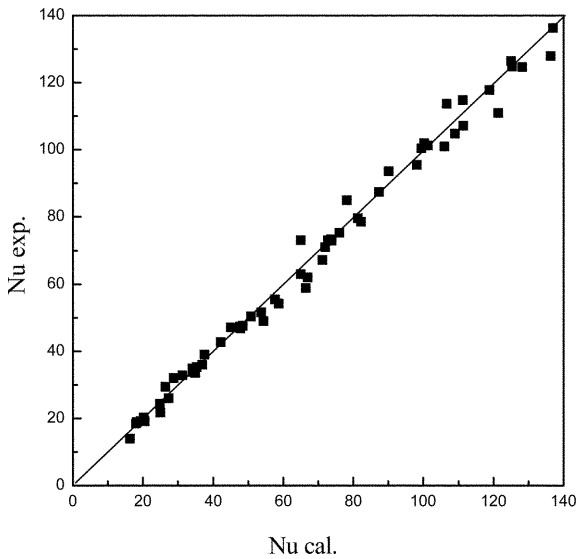


Fig. 12. Comparison with Nu number between experimental and calculation value.

여 시험영역에서의 기체 및 고체 체류량이 증가하며[6], 유동입자 흐름의 규칙성이 상대적으로 증가하여 유동 입자와 열원 표면간의 접촉과 충돌 효율이 증대되어 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수가 증가하게 된다. 그러나 나선 흐름 유도 액체의 비를 0.5 이상으로 증가시키면 전체 기체 및 고체 체류량은 약간 증가하게 되나 나선 흐름 유도 유체의 운동량이 너무 커져서 유동 입자들을 열원이 아닌 유동층 내부로 분산 시켜 유동 입자와 열원 표면간의 효과적인 접촉과 충돌을 저해하며 총괄 열전달 계수는 오히려 감소한다고 할 수 있다[7].

본 연구의 실험 범위에서 총괄 열전달 계수를 실험 변수들과 무차원군의 상관식으로 식 (6)~(7)으로 나타낼 수 있었는데, 각 식들의 상관 계수는 각각 0.9, 0.95이었고, Fig. 12에 나타나는 것처럼 실험 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

$$h = 4337(U_G)^{0.061}(U_L)^{0.119}(d_p)^{0.148}R_S^{0.007} \quad (6)$$

$$(\text{Nu}) = 2.932(\text{Pr})^{0.041}(\text{Re})^{0.614}\left(\frac{d_p}{D}\right)^{0.401}(R_S)^{0.001} \quad (7)$$

식 (7)에서 $\text{Nu} = hd_p(1-\epsilon_S)/k_L\epsilon_S$, $\text{Pr} = C_p\mu_L/k_L$, $\text{Re} = d_p\rho_L(1-\epsilon_S)(U_G+U_L)/\mu_L\epsilon_S$ 이고, 이 식을 만족시키는 실험범위는 $0.25 \leq \epsilon_S \leq 0.46$ 이었다.

4. 결 론

본 연구의 삼상 나선 흐름 유동층에서 열원 표면과 유동층간의 열전달 특성을 고찰하기 위하여, 온도차 요동 신호를 해석하여 도식적으로, 정량적으로 나타내었고, 온도차를 이용하여 총괄열전달 계수를 측정하였다. 또한 조업조건에 관한 상관성을 도출하여 효과적으로 실험 변수에 변화에 따른 열전달 특성을 나타낼 수 있었고, 본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열원 표면과 유동층간 온도차 요동 자료의 위상 공간 투영은 나선 유도 흐름 액체량의 비(R_S)가 0.1에서 0.4까지 증가할수록 점

점 안정되고 규칙성이 증대되는 경향을 나타내었고, 온도차 요동 자료의 Kolmogorov 엔트로피 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 기체 유속이 증가함에 따라서는 온도차 요동 자료의 Kolmogorov 엔트로피 값은 증가하는 경향을 나타내었고, 액체의 유속이 증가함에 따라서는 Kolmogorov 엔트로피 값은 최대값을 나타내었다.

(2) 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수는 액체유속, 층공극률, 나선 유도 흐름 액체량의 비가 증가함에 따라서 최대값을 나타내었으며, 기체의 유속과 유동 입자의 크기가 증가함에 따라 증가하였다.

(3) 삼상 나선흐름 유동층에서 온도차 요동 자료의 Kolmogorov 엔트로피 값과 열전달 계수를 다음과 같은 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$K = 88.234U_G^{0.070}U_L^{0.169}d_p^{0.116}R_S^{-0.008}$$

$$h = 4337(U_G)^{0.061}(U_L)^{0.119}(d_p)^{0.148}R_S^{0.007}$$

$$(\text{Nu}) = 2.932(\text{Pr})^{0.041}(\text{Re})^{0.614}\left(\frac{d_p}{D}\right)^{0.401}(R_S)^{0.001}$$

$$0.25 \leq \epsilon_S \leq 0.46$$

감 사

본 연구는 한국원자력연구원(R-2005-0-079)과 충남대학교 연구력강화사업의 지원으로 진행되었으며, 귀 기관들에 감사드립니다.

사용기호

- A : column area [m²]
- c_p : specific heat [J/kgK]
- D : column diameter [m]
- d_p : particle size [mm]
- g : gravity acceleration [m/s²]
- h : heat transfer coefficient [W/m²K]
- k_L : thermal conductivity of liquid phase [W/mK]
- L : fluidized bed length [m]
- Nu : Nusselt number [$\text{Nu} = hd_p(1-\epsilon_S)/k_L\epsilon_S$]
- P : pressure [mmH₂O]
- Pr : Prandtl number [$\text{Pr} = C_p\mu_L/k_L$]
- Q : heat flow rate [W]
- Re : Reynolds number [$\text{Re} = d_p\rho_L(1-\epsilon_S)(U_G+U_L)/\mu_L\epsilon_S$]
- R_S : swirling ratio of continuous liquid phase
- ΔT : temperature difference [K]
- U_G : superficial gas velocity [m/s]
- U_L : superficial liquid velocity [m/s]
- V_1 : primary liquid stream [m³/s]
- V_2 : secondary liquid stream [m³/s]

그리스 문자

- ϵ : holdup
- μ : liquid viscosity [Pa.s]
- ρ : density [kg/m³]

아래첨자

- G : gas phase
 L : liquid phase
 S : solid 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**(21-22), 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**(6), 1130-1138(2003).
4. Lefebvre, S., Guy C. and Chaouki, J., "Solid Phase Hydrodynamics of Three-phase Fluidized Beds-A Convective/dispersive Mixing Model," *Chem. Eng. J.* **133**(1-3), 85-95(2007).
5. Kim, S. D. and Kang, Y., "Hydrodynamic, Heat and Mass Transfer in Inverse and Circulating Three-phase Fluidized-bed Reactors for Waste Water Treatment," *Studies in Surface Science and Catalyst*, **159**, 103-108(2006).
6. 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).
7. Son, S. M., Kang, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D., "Characteristics of Particle Flow and Heat Transfer in Liquid-Particle Swirling Fluidized Beds," *Korean Chem. Eng. Res.* **44**(5), 505-512(2006).
8. Lin, T. J. and Chiu, H. T., "Effects of Macroscopic Hydrodynamics on Heat Transfer in a Three-phase Fluidized Bed," *Catalysis Today*, **79-80**, 159-167(2003).
9. 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).
10. 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).
11. 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).
12. Grassberger, P. and Procaccia, I., "Estimation of the Kolmogorov Entropy from a Chaotic Signal," *Physical review A*, **28**(4), 2591-2593(1983).