

삼상순환유동층에서 내부열원과 층간의 열전달특성

조용준 · 남석희 · 강 용[†] · 김상돈*

충남대학교 화학공학과

*한국과학기술원 화학공학과

(2000년 7월 12일 접수, 2000년 10월 25일 채택)

Immersed Heater-to-Bed Heat Transfer Characteristics in Three-Phase Circulating Fluidized Beds

Yong-Jun Cho, Seok-Hee Nam, Yong Kang[†] and Sang-Don Kim*

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, Daeduk Science Town, Teajon 305-764, Korea

*Department of Chemical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Teajon 305-701, Korea

(Received 12 July 2000; accepted 25 October 2000)

요 약

직경이 0.102 m, 높이 3.5 m인 삼상순환유동층의 상승관(riser)에서 내부열원과 유동층간의 열전달 특성을 고찰하였다. 기체유속(0.01-0.07 m/s), 액체유속(0-0.31 m/s) 그리고 고체순환속도(2-8 kg/m²s) 등을 변수로 선정하였으며 이들 변수들이 열원과 유동층간의 온도차와 열전달계수에 미치는 영향을 고찰하였다. 각 실험조건에서 열전달특성 규명을 위하여 온도차요동신호를 측정하였으며 측정된 온도차요동신호의 표준편차를 구하였다. 삼상순환유동층의 상승관에서 열원과 유동층간의 온도차요동의 표준편차는 기체유속과 고체순환속도가 증가하면 증가하였으나, 액체유속의 증가에 따라서는 감소하는 경향을 나타내었다. 상승관에서 내부열원과 유동층간의 열전달계수는 기체유속과 고체순환속도가 증가함에 따라서 증가하였으나 액체의 유속에 따라서는 거의 변화가 없었다. 상승관에서의 열전달 계수는 기체와 액체의 유속 그리고 고체순환속도의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

Abstract – Heat transfer characteristics between the immersed heater and the fluidized bed have been investigated in the riser of a three-phase circulation fluidized bed (0.102 m ID × 3.5 m in height). Effects of gas (0.01-0.07 m/s) and liquid velocities (0-0.31 m/s) and solid circulating rate (2-8 kg/m²s) on the temperature difference fluctuations between the immersed heater and the bed, and thus on the heat transfer coefficients have been examined. The temperature difference fluctuation signals have been measured at a steady state and interpreted in terms of the standard deviation. The heat transfer coefficient and standard deviation of temperature fluctuations have increased with increasing gas velocity or solid circulating rate, however, the standard deviation has decreased while the heat transfer coefficient has not changed considerably, with increasing liquid velocity. The heat transfer coefficient has been well correlated in terms of gas and liquid velocities and solid circulation rate.

Key words: Three-Phase Circulating Fluidized Bed, Heat Transfer, Immersed Heater-to-Bed, Temperature Fluctuations

1. 서 론

삼상유동층은 액체의 연속흐름계에 분산상인 기포가 존재하며, 고체입자들이 유동하고 있는 게임로 기체-액체-고체상들간의 접촉에 의해 그 흐름 현상이 난류의 흐름형태를 나타낸다[1-2]. 삼상순환유동층은 액체의 유속을 더욱 증가시켜 유동입자를 순환시키는 게임로 반응기나 접촉기 또는 다상의 흐름 공정에서 기존 삼상유동층의 장점이나 특성을 효율적으로 이용하면서 다음과 같은 삼상유동층의 단점을 보완할 수 있다는 점에서 최근 관심을 모으고 있다. 즉, 삼상순환유동층은 dead zone의 발생으로 인하여 접촉효율이 감소되거나, 촉매의 재생작업

이 어려우며, 유동입자가 균일해야하며, 액체의 점도가 작아야 효율적인 유동층을 형성할 수 있을 뿐만 아니라 액체유속의 범위가 유동입자의 최소유동화 속도와 종말속도 사이에 국한된다는 등의 단점을 극복할 수 있기 때문에 기체-액체-고체간의 접촉효율을 더욱 증가시켜 반응전환율을 획기적으로 증가시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다. 뿐만 아니라, 발열 반응시 고체의 순환은 열에너지를 층 내에서 제거시키는 역할을 하여 반응기 내의 안정성을 잘 유지할 수 있다. 특히 유동 고체가 밀도가 매우 작거나 입자의 크기가 매우 작은 경우 또는, 고체유동입자가 다공성인 촉매이거나 흡착제 또는 흡수제 등일 경우 이러한 작업을 효과적으로 수행할 수 있는 반응기가 삼상순환유동층 반응기라 할 수 있다[3-7].

하지만 삼상순환유동층에 대한 연구는 국내·외적으로 지금 시작단계

[†]E-mail: kangyong@hanbat.chungnam.ac.kr

에 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 삼상순환유동층에서 기체-액체-고체의 접촉과 흐름 현상에 의해 나타나는 내부열원과 유동층간의 열전달 특성을 고찰하였다. 즉, 삼상순환유동층에서 기체와 액체의 유속 그리고 고체순환속도가 내부열원과 유동층간의 온도차 요동 및 열전달 계수에 미치는 영향을 규명하였다. 이와 같은 연구는 삼상순환유동층 반응기의 운전, 설계, 제어 등에 필수적인 공학적 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 고체입자를 유동화하여 유출시키는 상승관과 상승관 상부의 액체-고체 분리부, 고체입자를 저장하는 hopper, 그리고 고체입자를 일정한 순환속도로 다시 상승관에 주입시키는 내부 loop-seal로 구성되어 있다. 상승관은 직경이 0.102 m이고 높이가 3.5 m인 아크릴 관을 사용하였다. 연속액상과 기체분산상의 분산관은 다공관 형태를 사용하였는데, 직경 3 mm의 구멍을 삼각피치로 균일하게 배치하였다. 기체분산상의 주입을 위해서

는 연속상 분배기 중간에 직경 6.35 mm의 관을 삽입하여 용접한 후 이 관에 직경 1 mm의 오리피스를 만들어 분산상과 연속상이 동일면에서 유동층 내에 주입되도록 하였다. 연속상인 액체로는 상온의 물을, 분산상인 기체로는 여과된 압축공기를 사용하였고, 고체 입자로는 직경이 2.1 mm이고 밀도가 2,500 kg/m³인 유리구를 사용하였다. 실험범위는 기체유속이 0.01-0.07 m/s이고 액체의 유속은 0.25-0.31 m/s였다. Loop-seal의 하부와 측면에서는 일정한 유속의 액체를 주입하여 상승관으로 다시 유입되는 고체의 양을 조절하였고, 순환되는 고체의 양은 butterfly valve를 이용하여 실험적으로 측정하였는데[6-8] 본 연구의 실험범위에서 고체 순환 속도는 2-8 kg/m² · s이었다.

Heater로는 표면이 동으로 된 직경이 3 cm인 카트리지 히터를 사용하였는데, 이를 상승관의 중심에 설치하였다(Fig. 1). 히터와 분산관의 접촉을 방지하기 위하여 히터의 끝에 테프론으로 제작된 절연 물질로 역원뿔모양을 만들어 부착하였다[9-11]. 히터의 표면과 상승관 내부의 온도 측정을 위해 열전대를 사용하였는데, Thermocouple은 J-type으로 분산관으로부터 0.5, 0.9, 1.3, 1.7 m의 높이의 측방향 4지점에서 열원과 상승관 벽면의 중앙위치에서 측정하였고 이 값들의 평균값을 상승관에서 유동층의 온도로 사용하였다. 상승관 내부에서 열원표면과 유동층 내부간의 온도차요동의 측정은 열전대에 의해 측정된 온도차-시간 신호를 볼트(Volt)-시간 신호로 바꾸어 증폭기를 거쳐 A/D 변환기를 사용하여 디지털 신호로 바꾸고, 이 자료들을 자동자료수집계(Data acquisition system)인 DT 2805 Lap Card를 사용하여 수집하였다. 수집한 자료의 크기는 각 실험조건에서 500 Hz로 6초동안 수집하여 3000 개 자료를 얻어 PC에 입력시킨 후 off-line process로 통계적으로 처리하여 해석하였다. 이들 온도차요동 자료크기와 수집속도의 조합은 각 조건에서 상승관 내부의 온도차요동 특성을 나타내는 전체 스펙트럼을 해석하는데 충분하였다.

삼상순환유동층의 상승관에서 열전달계수는 식 (1)에 의해 구하였다. 식 (1)에서 A는 열원인 히터의 표면적은 나타내며, 내부 열원표면의 온도(T_h)와 유동층의 온도(T_b)의 차는 정상상태에서 온도차 요동자료의 평균값을 사용하였으며, 열원에 가해진 열량 Q는 열원에 연결된 볼트-암페어미터에 의해 계산되었다[9-11].

$$Q = hA(T_h - T_b) \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

삼상순환유동층의 상승관에서 내부열원과 유동층간의 온도차 요동의 전형적인 예를 기체유속(U_G), 액체유속(U_L) 그리고 고체입자의 순환속도(G_S)의 변화에 따라 각각 Fig. 2에 나타내었다. 즉, 일정한 액체의 유속과 고체입자의 순환속도조건에서 기체유속의 변화에 따라 온도차요동의 특성 변화를 Fig. 2(a)에 나타내었는데, 기체유속의 증가에 따라 온도차요동의 진동수와 진폭이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 경향은 기체체류량의 변화에 따른 이유에서 찾아볼 수 있는데, 기체유속의 증가로 기체체류량은 증가하게 되어 유동층 내부에 기포의 크기가 증가하고 기포의 크기 분포가 넓어져 기포의 개별거동이 증가하기 때문으로 해석할 수 있다[12, 13]. 뿐만 아니라 기체체류량의 증가는 같은 액체 유속의 조건에서 상승유체에 의해 유동입자에 작용하는 drag force의 감소를 가져와 유동입자의 체류량이 약간 증가하며, 이는 또한 액체와 기체의 정상흐름 거동을 방해하는 방해효과(hindrance effect)를 나타내 계의 수력학적 거동의 불규칙도가 증가하기 때문으로 볼 수 있다[1, 2]. 이와 같은 열전달계에서의 난류현상의 증가는 열전달효과를 증가시켜 Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 ΔT 의 평균값은 기체유속이 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다.

삼상순환유동층에서 고체 입자가 유리구슬이고 그 크기가 2.1 mm인

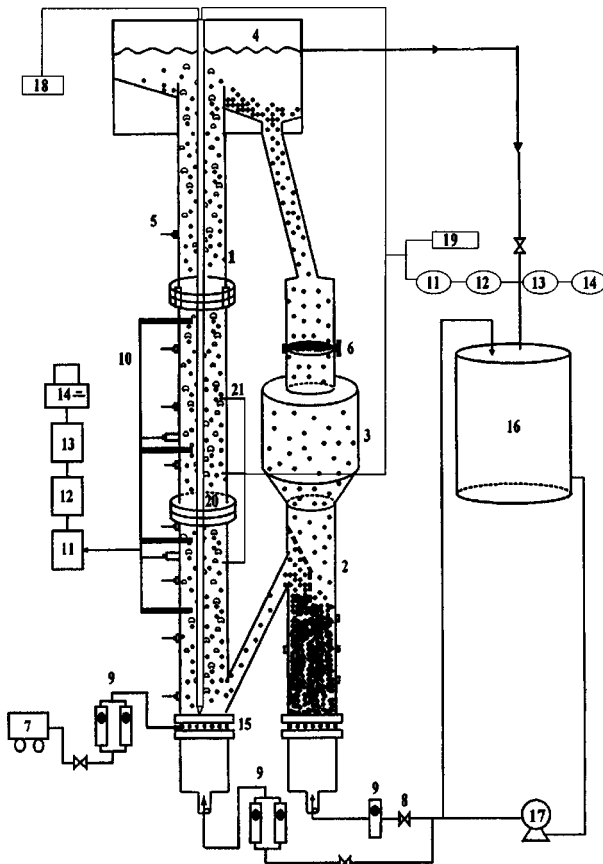


Fig. 1. Experimental apparatus.

- | | |
|--------------------|---------------------------|
| 1. Riser | 12. Low-pass filter |
| 2. Down comer | 13. A/D convertor |
| 3. Hopper | 14. Computer |
| 4. L/S separator | 15. G/L distributor |
| 5. Pressure tap | 16. Liquid reservoir |
| 6. Butterfly valve | 17. Pump |
| 7. Compressor | 18. Power supply |
| 8. Control valve | 19. Temperature indicator |
| 9. Flowmeter | 20. Heater |
| 10. Resistivity | 21. Probe thermocouple |
| 11. Amplifier | |

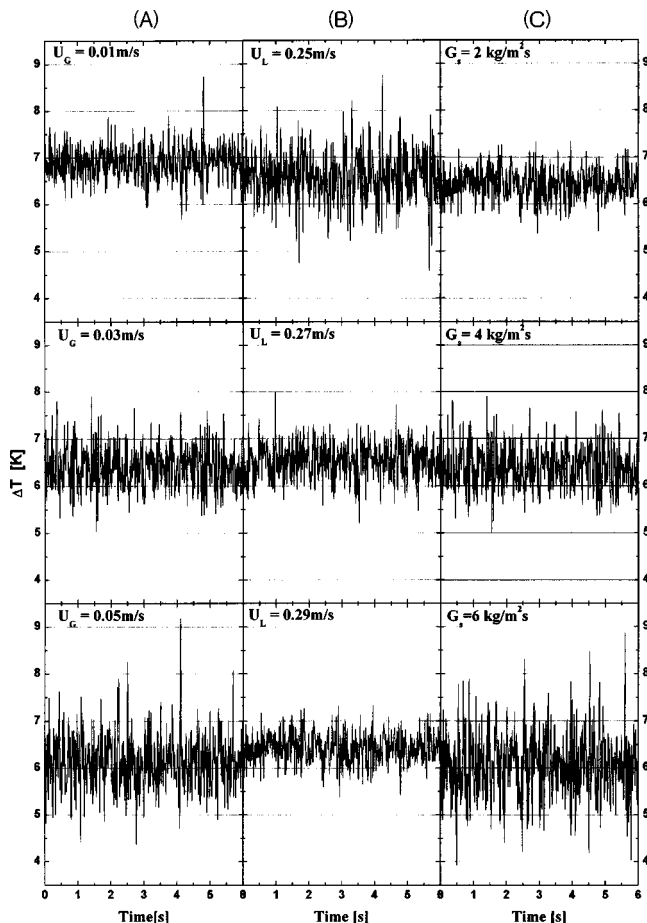


Fig. 2. Typical examples of temperature difference fluctuations in the riser of three-phase circulating fluidized beds.

A: $U_L=0.29$ m/s, $G_s=4$ kg/m²s, B: $U_G=0.03$ m/s, $G_s=2$ kg/m²s, C: $U_G=0.03$ m/s, $U_L=0.29$ m/s

경우 상승관에서 유동입자가 비순환상태에서 순환상태로의 전이는 액체의 유속이 0.25 m/s 이상에서 나타나게 되는데[6, 7] 고체입자의 순환 유동조건에서 액체유속의 증가는 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 내부열원과 유동층간의 온도차 요동의 진폭과 진동수의 감소를 가져왔으나, 평균온도차(ΔT)는 큰 변화없이 거의 일정한 것으로 나타났다. 삼상순환유동층의 상승관에서 일정한 기체와 액체유속의 조건에서 고체입자 순환속도의 변화가 열원과 유동층간의 온도차요동에 미치는 영향을 Fig. 2(c)에 나타내었는데, G_s 가 증가함에 따라 온도차요동의 진동수와 진폭은 증가

하나 ΔT 의 평균값은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 G_s 가 증가함에 따라 상승관 내부에서 난류현상이 증가하기 때문으로 해석할 수 있다.

상승관에서 실험변수의 변화가 내부열원과 유동층간의 온도차인 ΔT 의 요동에 미치는 영향을 정량적으로 나타내기 위해, ΔT 요동의 표준편차를 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 ΔT 요동의 표준편차는 액체의 유속이 증가하면 감소하나, 기체유속과 고체입자의 순환속도가 증가하면 증가하였다. 상승관에서 기체의 유속이 증가하면, 앞에서 언급한 바와 같이 유동층 내에 기체의 체류량이 증가하게 되어 기포의 수가 많아지고 크기가 커진 분산상인 기포의 무작위적이고 불규칙적인 개별거동이 증가하게 되어 열전달계의 규칙성은 감소하게 되고 [12-15] 따라서 ΔT 요동의 표준편차는 증가하게 된다고 설명할 수 있다. Fig. 3에서 액체유속이 0.25 m/s 이상이 되면 액체의 유속이 증가함에 따라 열전달 system 거동의 불규칙성과 무작위성이 감소한다고 할 수 있다. 삼상순환유동층에서 고체입자의 순환속도가 일정할 때, 액체의 유속이 증가함에 따라서 고체입자의 체류량이 감소하게 되는데, 이는 액체유속의 증가로 인해 입자 상승속도의 증가를 가져와 유동입자의 비산속도도 증가되기 때문으로 해석할 수 있다[5, 9]. 이와 같은 상승관에서 고체입자체류량의 감소는 기체와 액체의 병류흐름이 고체입자와의 충돌에 의한 방해효과(hindrance effect)의 감소를 가져와 이로 인한 난류의 발생정도가 감소하기 때문으로 해석할 수 있다. 한편 고체입자 순환속도의 증가는 고체체류량을 증가시키는 결과를 가져오며, 이는 유동층 내부에서 기체-액체흐름에 대한 방해 효과의 증가를 가져와 상승관내에서 발생하는 난류의 강도를 증가시키며, 고체입자가 열원경계층과 접촉하는 횟수가 빈번하게 되어 경계층이 얇아지게 되므로 ΔT 는 감소하게 되나 열전달계의 불규칙적이고 무작위적인 거동은 증가되게 되어 ΔT 요동의 표준편차가 증가한다고 할 수 있다[10].

삼상순환유동층의 상승관에서 기체의 유속이 내부열원과 유동층간의 열전달계수에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 기체유속이 증가하면 열전달계수가 증가하였다. 이는 일정한 고체순환속도와 액체유속의 조건에서 기체유속이 증가하면 기포의 크기가 커지고, 따라서 기포와 동반되는 기포후면의 와류(wake)의 크기도 커지게 되어 열전달에 유효한 난류의 강도가 증가되기 때문에 내부열원의 표면과 유동층간의 열전달계수는 증가한다고 할 수 있다.

기체유속과 고체순환속도가 일정할 때 연속상인 액체유속의 증가에 따른 열전달계수의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 고체유동입자가 순환되기 시작하는 액체유속(0.25 m/s)에서는 열전달계수가 약간 증가하다가 0.25 m/s 이상에서, 즉 순환유동층영역에서 열전달계수는 액체유속의 변화에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이는 액체유속의 증가로 인해 발생하는 난류로 열원주위의 층류경계층의 두께가 얇아져 열전달계수를 증가시키려는 영향과, 액체유속이 증가함에 따른 상승관내에 고체체류량의 감소로 인하여 고체와 열

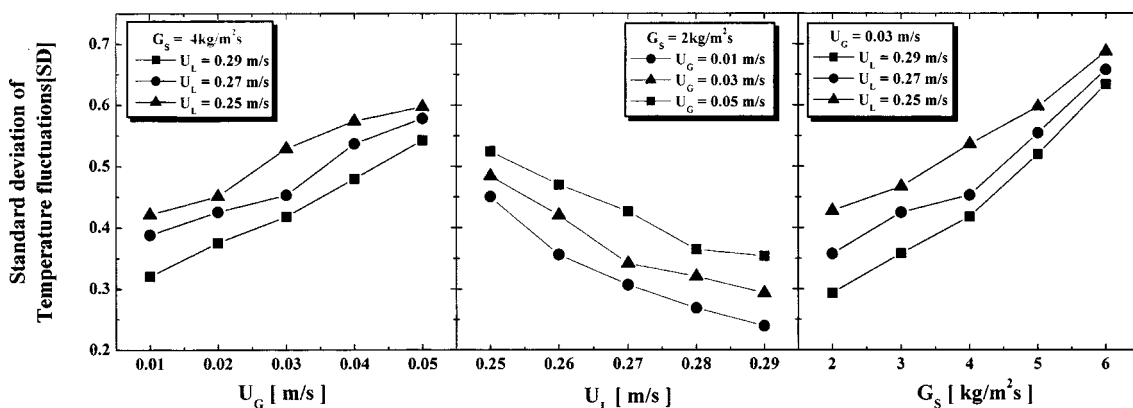


Fig. 3. Standard deviation of temperature fluctuations with the variation of U_G , U_L and G_s in three-phase circulating fluidized beds.

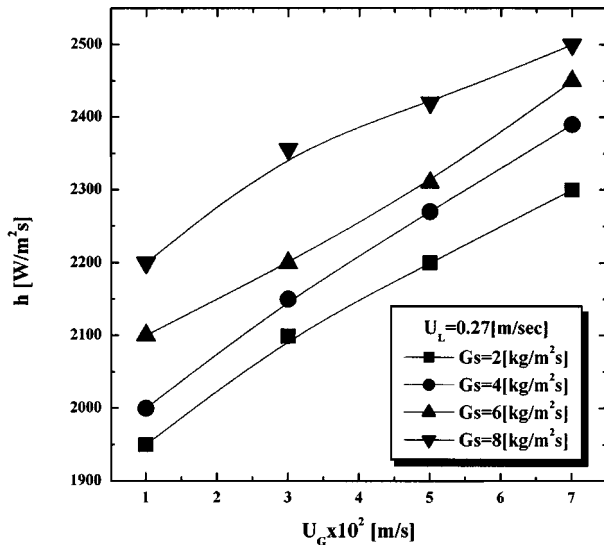


Fig. 4. Effects of U_G on the heat transfer coefficient in the riser of three-phase circulating fluidized beds.

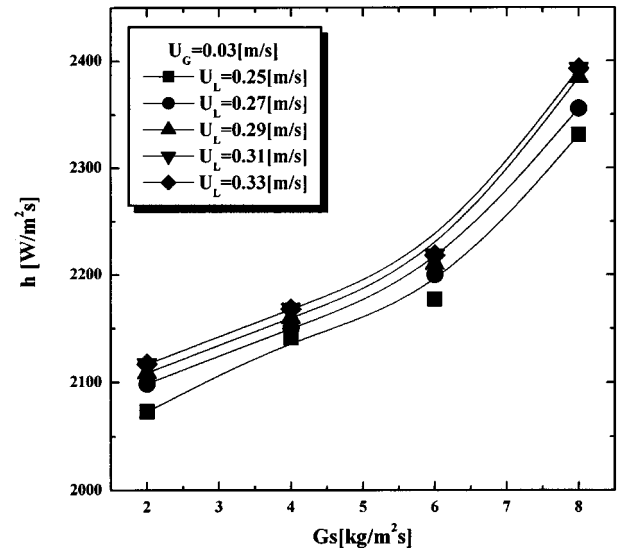


Fig. 6. Effects of G_S on the heat transfer coefficient in the riser of three-phase circulating fluidized beds.

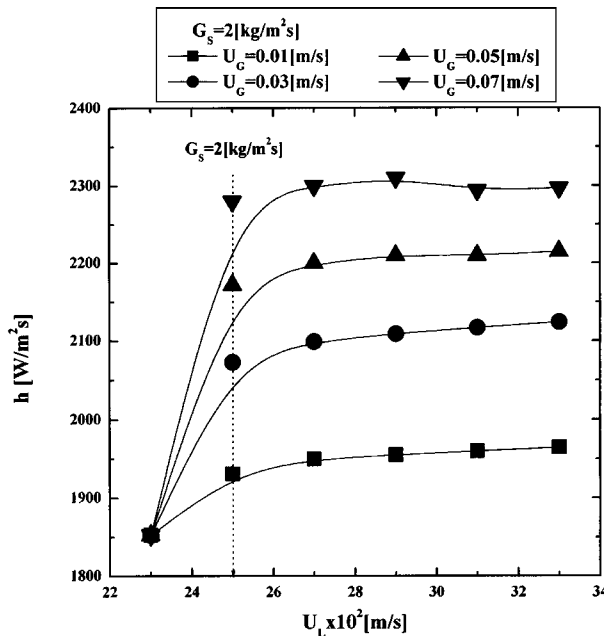


Fig. 5. Effects of U_L on the heat transfer coefficient in the riser of three-phase circulating fluidized beds.

원간의 접촉 빈도수가 감소함으로 열원표면 경계층의 두께를 얇게하는 효과의 감소로 인한 열전달계수를 감소시키는 영향이 서로 상쇄되기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 2(b)의 온도요동에서도 찾아볼 수 있는데, 액체유속이 0.25 m/s 이상일 때 액체유속의 증가에 따라 온도요동폭은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 위에서 말한 바와 같이 고체체류량의 감소로 인한 난류의 강도가 점점 감소하기 때문이며, 이들 영향의 상쇄효과로 인해 액체유속의 증가에도 불구하고 ΔT 는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

일정한 액체와 기체의 유속조건에서 고체의 순환속도가 열전달계수에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었는데, 고체순환속도가 증가함에 따라 내부열원과 유동층간의 열전달계수는 증가함을 보였다. 고체유동입자의 순환이 없는 삼상유동층에서 열전달 현상을 좌우하는 중요한 요인들로 고체입자와 열원간의 접촉빈도수, 상향 유체요소(fluid element)의

방해 효과, 고체입자의 운동에 의해 야기되는 기포의 분쇄효과 그리고 이로 인해 발생하는 난류강도의 증가 등을 들 수 있는데[6, 7, 11, 12], 고체의 순환속도가 증가하면 상승관 내의 액체체류량은 감소하고 고체체류량은 증가하므로, 증가된 고체입자들의 유동화 현상을 통해 열원표면과 고체간의 더욱 빈번한 접촉빈도수를 나타낼 뿐만 아니라 열원표면주위의 층류경계층에 micro eddy의 증가를 가져와 열원주위의 경계층의 두께를 감소시키게 되어 열전달계수는 증가한다고 할 수 있다.

본 연구의 실험범위에서 내부열원과 유동층간의 열전달계수는 식 (2)와 같이 실험변수들의 상관식으로 나타낼 수 있었는데 이는 상관계수 0.932로 실험결과와 잘 맞았다.

$$h = 3235 u_G^{0.106} u_L^{0.054} G_S^{0.090} \quad (2)$$

4. 결 론

(1) 삼상유동층의 상승관에서 내부열원과 유동층간의 열전달특성을 내부열원과 유동층간의 온도요동특성을 분석함으로써 효과적으로 해석할 수 있었다.

(2) 삼상순환유동층의 상승관에서 분산상인 기체유속이 증가함에 따라 내부 열원표면과 유동층간의 온도차 요동신호의 진동수와 진폭이 증가하여 이의 표준편차가 증가하였으며, 내부열원과 유동층간의 열전달계수도 증가하였다.

(3) 연속상인 액체유속의 증가는 기체와 액체의 병류흐름에서 고체입자의 비산속도를 증가시켜 고체체류량은 감소하게 되고, 따라서 고체입자와의 충돌에 의한 난류발생 정도의 감소로 온도요동의 진동수와 진폭은 감소하였지만, 액체유속의 증가에 의해 열원경계층의 두께가 감소하며 액체흐름 자체의 난류가 증가하여 고체체류량의 감소로 인한 난류감소의 상쇄효과 때문에 열전달계수는 크게 변화하지 않았다.

(4) 상승관에 투입되는 고체순환속도의 증가는 상승관내 기체흐름의 방해효과의 증가로 인해 난류현상의 증가를 가져왔으며, 이로 인해 열원표면과 유동층간의 온도차요동의 진동수와 진폭이 증가하여 표준편차가 증가하였으며 G_S 의 증가에 따라 열전달계수도 증가하였다.

(5) 삼상순환유동층의 상승관내에서의 열전달계수는 기체와 액체의 유속 그리고 고체순환속도의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

사용기호

A	: surface area of heater [m^2]
d_p	: particle diameter [mm]
G_s	: solid circulation rate [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
h	: heat transfer coefficient [$\text{W}/\text{m}^2\text{s}$]
Q	: amount of heat [cal/s]
ΔT	: temperature difference between the heater surface and the bed proper [K]
T_b	: temperature in the bed proper [K]
T_h	: temperature of heater surface [K]
U_G	: superficial gas velocity [m/s]
U_L	: superficial liquid velocity [m/s]
SD	: standard deviation of ΔT fluctuation

그리스 문자

ρ_p	: particle density [kg/m^3]
----------	---

참고문헌

- Kim, S. D. and Kang, Y.: "Mixed Flow Hydrodynamics. Advances in Engineering Fluid Mechanics Series," N.P. Cheremisinoff edn., Gulf Houston, 845(1996).
- Kim, S. D. and Kang, Y.: *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 3639(1997).
- Shejiao, H., Jian, Z., Yong, J., Kai, C. L. and Zhanwen, W.: *Chemical Engineering Journal*, **70**, 9(1998).
- Liang, W., Wu, Q., Yu, Z., Jin, Y. and Wang, Z.: *Can. J. Chem. Eng.*, **73**, 656(1995).
- Liang, W. G., Wu, Q. W., Yu, Z. Q., Jin, Y. and Bi, H. T.: *AIChE J.*, **41**, 267(1995).
- Cho, Y. J., Song, P. S., Kim, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, in press(2000).
- Kim, S. H., Cho, Y. J., Song, P. S., Kang, Y. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 916(1999).
- Wang, T. Lin, Z. T., Zhu, C. M., Liu, D. C. and Saxena, S. C.: *AIChE J.*, **39**, 1406(1993).
- Kang, Y. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **5**, 154(1988).
- Kang, Y. and Fan, L. T. and Kim, S. D.: *AIChE J.*, **37**, 1101(1991).
- Kang, Y., Suh, I. S. and Kim, S. D.: *Chem. Eng. Commun.*, **34**, 1(1985).
- Chiu, T. M. and Ziegler, E. N.: *AIChE J.*, **29**, 677(1983).
- Kumar, S., Kusakabe, K. and Fan, L. S.: *Chem. Eng. Sci.*, **48**, 2407(1993).
- Muroyama, K., Fukuma, M. and Yasunishi, A.: *Can. J. Chem. Eng.*, **64**, 409(1986).
- Briens, C. L., Pozo, M. D., Trudell, C. and Wild, G.: *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 731(1999).