

## 삼상 순환 유동층 생물반응기에서 열전달 계수

강태규 · 송평섭 · 최길수 · 조용준\* · 강 용† · 최호석 · 김상돈\*\*

충남대학교 화학공학과

\*한국원자력연구소 핵화학연구팀

\*\*한국과학기술원 화학공학과

(2002년 3월 29일 접수, 2002년 6월 13일 채택)

## Heat Transfer Coefficient in a Three-Phase Circulating Fluidized-Bed Bioreactor

Tae-Gyu Kang, Pyung-Seob Song, Gill-Soo Choi, Yong-Jun Cho\*, Yong Kang†, Ho-Suk Choi and Sang-Don Kim\*\*

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

\*Nuclear Chemical Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353 Korea

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

(Received 29 March 2002; accepted 13 June 2002)

### 요 약

직경이 0.102 m이고 높이가 1.0 m인 기체-액체 순환 및 삼상 순환유동층 생물반응기의 상승관에서 열전달 특성을 고찰하였다. 기체 및 액체의 유속 그리고 생물막 담체의 체류량이 상승관 내부의 수직 열원과 반응기 사이의 열전달 계수에 미치는 영향을 결정하였다. 기체-액체 순환 반응기에서 열전달 계수는 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하였으나 액체 유속의 증가에 따라서는 약간 증가하였다. 삼상 순환유동층 생물반응기에서 열전달 계수는 기체의 유속과 유동 생물막 매체의 체류량이 증가함에 따라 증가하였으나 액체의 유속이 증가함에 따라서는 약간 증가하였다. 본 연구의 실험 범위에서 이들 열전달 계수는 실험 조작 변수의 상관식으로 잘 나타낼 수 있었다.

**Abstract** – Heat transfer characteristics have been investigated in the riser of gas-liquid circulation and three-phase circulating fluidized-bed bioreactors whose diameter and height are 0.102 m and 1.0 m, respectively. Effects of gas and liquid velocities and holdup of fluidized biofilm media on the heat transfer coefficient between the immersed vertical heater and the bed have been determined. The heat transfer coefficient in the gas-liquid circulation reactor increases with increasing gas velocity, but increases only slightly with increasing liquid velocity. The h(heat transfer coefficient) value in the three-phase circulating fluidized-bed bioreactor also increases with increasing gas velocity or holdup of fluidized biofilm media, but it increases only slightly with liquid velocity. The value of heat transfer coefficient has been well correlated in terms of operating variables.

**Keywords:** Heat Transfer Coefficient, Gas-Liquid Circulation, Three-Phase, Circulating Fluidized Bed, Bioreactor

### 1. 서 론

유동층은 작은 유속의 운전조건에서도 기체-액체-고체 유동입자 간의 접촉효과가 좋을 뿐만 아니라 연속조작이 편리하여 생물반응기에 매우 유용하게 사용될 수 있다[1-5]. 특히, 유동 매체를 이용한 유동층 생물막 반응기에서는 유동 생물막 고체입자의 밀도가 연속 액상보다 작거나 생물막을 형성한 고체 유동입자가 다공성인 경우가 대부분인데 이때에는 유동 매체입자의 종말속도가 매우 작기 때문에 생물반응기의 운전이 제한되어 왔다. 이와 같은 생물반응기에서는 기존의 삼상유동층보다 삼상순환유동층의 운전형태가 매우 효율적으로 연속 공정을 수행할 수 있어서 유동매체를 이용한 생물반응기 등에 효과적으로 응용 할 수

있다 하겠다[6-10]. 삼상 순환유동층에 대한 연구는 유동층의 상승관(riser) 내부에서 수력학적 특성으로 연속액상의 혼합이나 상체류량 등이 지금 연구되어지고 있으며, 열전달 및 물질전달에 대한 연구도 제한적인 범위내에서 수행되고 있다[6-9]. 삼상 순환유동층을 유동 생물막 고체입자를 사용하는 생물반응기로 사용하기 위해서는 유동입자 주위에 형성된 생물막에 존재하는 미생물의 성장에 적합한 온도가 유지되어야 하기 때문에 반응기내의 열전달 현상은 생물반응기의 거동 및 전환율의 결정에 중요한 요소가 된다. 특히, 생물반응은 장시간에 걸쳐서 일어나므로 효과적인 생물반응기의 온도조절을 위해서는 생물반응기 내부에서의 열전달 특성에 대한 정보는 필수적이라 할 수 있다. 뿐만 아니라, 생물막이 형성된 유동 매체입자의 보강, 생물반응이 진행된 후 활성이 떨어진 유동 매체입자의 재활성화나 교환 등을 연속적으로 수행하기 위해서는 생물막이 형성된 유동 매체입자를 순환시키는 순환계의 적용이 필수적이라 할 수 있다. 그러나 삼상 순환유동층 생물반응기에

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

대한 연구는 국내·외를 막론하고 현재 매우 미흡하며, 지금 시작 단계에 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 삼상 순환유동층 생물반응기에서 기체-액체 및 기체-액체-고체의 접촉과 흐름 현상에 의해 나타나는 반응기 내부에서의 열전달 특성을 고찰하였다. 즉, 삼상 순환유동층 생물반응기에서 기체와 액체의 유속 그리고 유동 매체입자의 체류량 등이 반응기 내부에서의 열전달 계수에 미치는 영향을 규명하였다. 이와 같은 연구는 삼상 순환유동층 생물 반응기의 운전, 설계, 제어 등에 필수적인 공학적 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 실험

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 미생물의 막이 형성된 고체입자를 유동화하여 유출시키는 상승관과 유출된 액체와 고체 생물막 매체입자가 하강하는 하강관 그리고, 액체와 매체입자를 일정한 순환속도로 다시 상승관에 주입시키는 재순환부로 구성되어 있다. 상승관은 직경이 0.102 m이고 높이가 1.0 m인 아크릴 관을 사용하였다. 연속액상과 기체분산을 위한 분산판은 다공판 형태를 사용하였는데, 액상의 분산 주입을 위해 직경이  $3.0 \times 10^{-3}$  m의 구멍을 삼각파치로 분산판에 균일하게 배치하였다. 기체 분산상의 주입을 위해서는 연속상 분배기 중간에 직경  $6.35 \times 10^{-3}$  m의 관을 삽입하여 용접한 후 이 관에 직경  $1.0 \times 10^{-3}$  m의 오리피스를 만들어 분산 기체상과 연속 액상

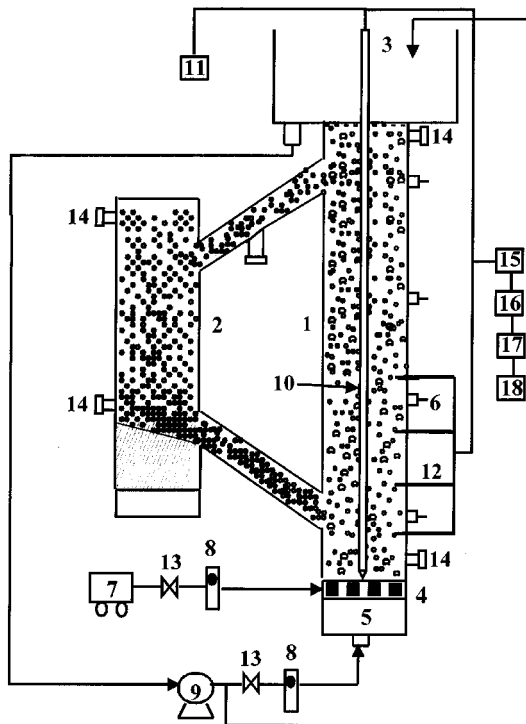


Fig. 1. Experimental apparatus for heat transfer characteristics in three-phase circulating fluidized-bed bioreactors.

- |                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| 1. Riser           | 10. Heater          |
| 2. Down comer      | 11. Power supply    |
| 3. Weir            | 12. Thermocouple    |
| 4. Distributor     | 13. Control valve   |
| 5. Calming section | 14. Port            |
| 6. Pressure tap    | 15. Amplifier       |
| 7. Compressor      | 16. Low-pass filter |
| 8. Flowmeter       | 17. A/D converter   |
| 9. Pump            | 18. Computer        |

Table 1. Physical property of polymer resin

|                        |           |
|------------------------|-----------|
| Specific gravity       | 1.13      |
| Shipping weight (g/L)  | 700       |
| Moisture retention     | 39-44     |
| Effective size(mm)     | 0.401     |
| Uniformity coefficient | under 1.5 |
| Operating pH range     | 0-14      |

Table 2. Composition of the concentrated synthetic wastewater

| Component                                       | Concentration(g/L) |
|---|--------------------|
| Glucose   | 5.6                |
| CH <sub>3</sub> COONa · 3H <sub>2</sub> O       | 9.7                |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>                 | 1.32               |
| FeCl <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O           | 0.006              |
| CaCl <sub>2</sub>                               | 0.075              |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 2.8                |
| MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O           | 1.0                |
| MnSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O            | 0.1098             |
| NaHCO <sub>3</sub>                              | 2.1                |

이 동일면에서 유동층 내에 주입되도록 하였다[9-11]. 본 연구의 실험에 사용한 기체는 여과된 압축공기를 사용하였고, 고체 생물막 입자로는 (주)삼양사에서 제조된 직경이  $4.0 \times 10^{-4}$  m이고 밀도가  $1,130 \text{ kg/m}^3$ 인 음이온 교환자수지(DIAIONSA 20AP)를 사용하였는데 이의 물성을 Table 1에 나타내었다. 고체 담체 입자의 표면에는 미생물을 100시간 이상 충분히 접촉시켜 연속 액상에 포함된 암모니아 성분을 분해하는 반응이 진행되도록 하였다. 미생물은 대전광역시 원천동 폐수처리장에서 사용된 활성슬러지 중 반응슬러지를 공급받아 합성폐수를 사용하여 충분한 양으로 배양한 후 사용하였다. 본 실험에 사용한 연속 액상인 합성폐수의 조성은 Table 2에 나타내었다.

본 연구의 실험범위는 기체유속이  $0.5\text{--}5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 이고 액체 유속이  $0.01\text{--}0.03 \text{ m/s}$ 였다. 상승관에서는 하부에서 순환되는 연속액상과 유동생물막 입자들이 분산판에서 유입되는 기체와 액체상과 같이 상승하면서 미생물 분해 반응이 진행되었으며, 상승관의 상부에서 기체는 외부로 유출되고 연속액상과 유동생물막 입자들은 하강관에 유출되도록 반응기를 설계하였다. 하강관의 하부에는 상승관에서 유출된 액상과 유동생물막 입자가 상승관에 다시 유입되도록 직경  $5.08 \times 10^{-2} \text{ m}$ 의 연결관이 상승관의 하부에 경사지게 설치되었다. 또한, 반응기 최상부에 스크린을 설치하여 유동생물막 입자가 반응기 외부로 유출되지 않도록 하였으며 내부에 순환되는 유체의 흐름과 중력에 의해 유동생물막 입자가 하강관을 통해 천천히 순환되었고, 연결관을 경사지게 하여 유동매체의 순환이 잘 일어나도록 하였다.

반응기의 상승관에서 열전달 현상은 반응기 내부의 열원과 상승관과의 열전달계(system)에서 고찰하였다. 열원(heat source)으로는 표면이 동으로 된 직경이 0.03 m이고 길이가 1.2 m인 카트리지 히터를 사용하였는데, 이를 상승관의 중심에 설치하였다(Fig. 1). 히터와 분산판과의 접촉을 방지하기 위하여 히터의 끝에 테프론으로 제작된 절연 물질로 역 원뿔모양을 만들어 부착하였다[9-11]. 히터의 표면과 상승관 내부의 온도 측정을 위해 열전대를 사용하였는데, 열전대(thermocouple)는 J-type으로서 분산판으로부터 0.1 m의 높이에서 측방향으로 0.08 m 간격으로 4지점에서 열원과 상승관 벽면의 중앙위에서 각각 측정하였다. 열원표면과 유동층 간의 온도차 측정은 열전대에 의해 측정된 온도차 신호를 전압(voltage)신호로 바꾸어 증폭기를 거쳐 A/D변환기를 사용하여 디지털 신호로 바꾸었고, 이 자료들을 자동 자료 수록계(data acquisition system)인 DT 2805 Lap Card를 사용하여 수집하였다. 수집한 자료는 PC에 입력시킨 후 off-line process로 처리하여 해석하였다.

이들 온도차 요동 자료크기와 수집 속도의 조합은 각 조건에서 상승관 내부의 온도차 특성을 나타내는 전체 스펙트럼을 해석하는데 충분하였다[8, 10, 13].

삼상 순환유동층 생물반응기의 상승관에서 열전달계수는 식 (1)에 의해 구하였다. 식 (1)에서  $A$ 는 열원인 히터의 표면적을 나타내며, 내부 열원표면의 온도( $T_h$ )와 상승관 반응기층의 온도( $T_b$ )차는 정상상태에서 온도차 자료의 평균값을 사용하였으며, 열원에 가해진 열량  $Q$ 는 열원에 연결된 볼트-암페어미터에 의해 계산하였다[9-11].

$$h = \frac{Q}{A(T_h - T_b)} \quad (1)$$

### 3. 결과 및 고찰

삼상 순환유동층 생물반응기의 상승관에서 내부열원과 반응기 간의 온도차 요동(temperature fluctuation)의 예를 기체유속의 변화에 따라 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 열원과 반응기간의 온도차 요동은 기체유속이 증가함에 따라 증가하였다. 이와 같은 온도차 요동의 평균값으로  $\Delta T$ 를 결정하였다.

생물반응기의 상승관에서 생물막이 형성된 유동 매체입자를 투입하지 않은 상태에서 액상의 암모니아 성분을 분해하기 위해 합성폐수와 반송슬러지를 각각 50%씩 혼합하여 반응기 내부에서 미생물의 농도를 4,100 mg/l로 유지하는 조작조건에서 수행한 열전달 계수의 측정 결과를 Fig. 3과 4에 나타내었다. Fig. 3은 기체인 압축공기의 유속변화가 생물반응기 내부에서의 총괄 열전달 계수에 미치는 영향을 나타내고 있는데, 기체 유속이 증가함에 따라 모든 조업조건에서 열전달 계수는 거의 선형적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 생물반응기에서 기체유속의 증가는 반응기 내부에 분산상으로 존재하는 기포의 체류량을 증가시키며 기포흐름에 의해 유도되는 연속액상과 슬러지의 유동성을 증

가시켜 난류흐름을 유발하므로 기체의 유속이 증가함에 따라 열전달 계수는 증가한다고 할 수 있다. 그러나 생물 반응기의 상승관에서 액체유속의 증가는 반응기 내부의 열전달 계수의 증가에 크게 기여하지 못하고 열전달 계수를 약간 증가시키는 정도인 것으로 나타났다(Fig. 4). 이와 같은 현상은, 반응기 내부에서 액체유속의 증가는 액체유속 자체에 의한 난류현상은 증가하지만 연속 액상의 체류량이 증가하기 때문에 이에 상응하는 기포 체류량의 감소를 가져와 기포의 분산 및 흐름현상에 의한 난류현상은 감소하게 되어 유동층 반응기 내부의 열원영역에 형성되는 경계층에 효과적으로 난류의 영향이 미치지 못하므로 액체유속의 증가는 열전달 계수에 크게 영향을 미치지 못하며 약간 증가시키는 정도라 할 수 있다.

연속액상에 존재하는 암모니아 성분을 미생물을 사용하여 분해시키는 생물반응기에서, 미생물을 유동 매체입자의 주위에 점착시켜 사용하

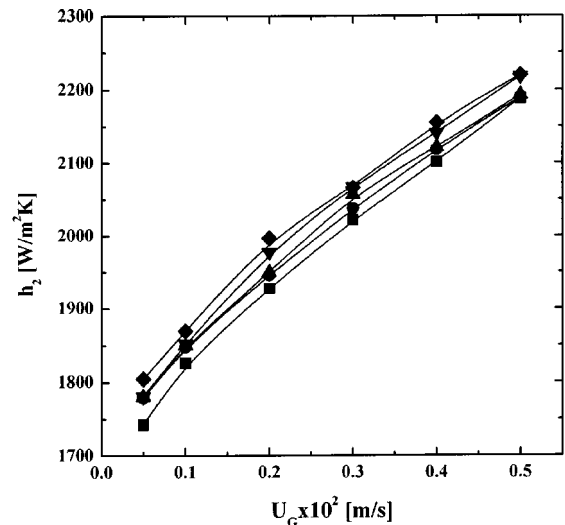


Fig. 3. Effects of  $U_G$  on the heat transfer coefficient in the riser of gas-liquid circulating bioreactors without solid media ( $\epsilon_s=0$ ).

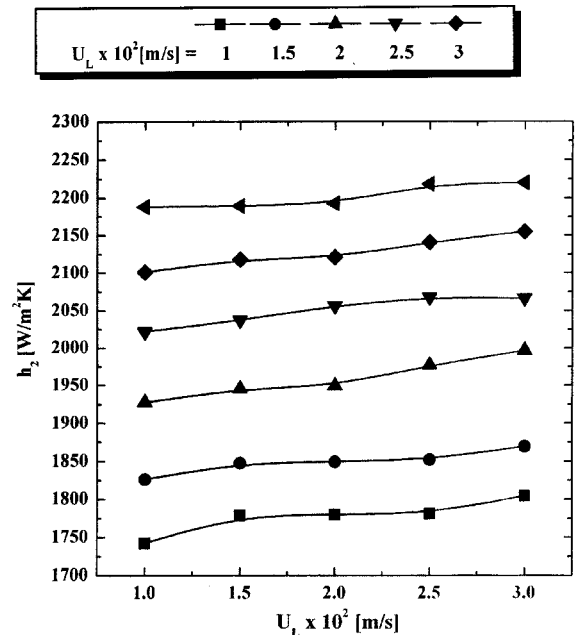


Fig. 4. Effects of  $U_L$  on the heat transfer coefficient in the riser of gas-liquid circulating bioreactors without solid media ( $\epsilon_s=0$ ).

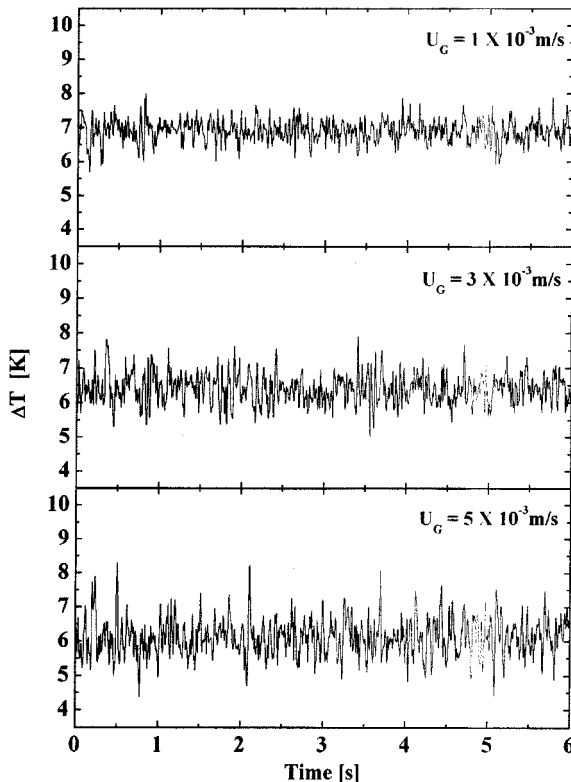


Fig. 2. Typical temperature difference fluctuations in the riser of three-phase circulating fluidized-bed bioreactors.

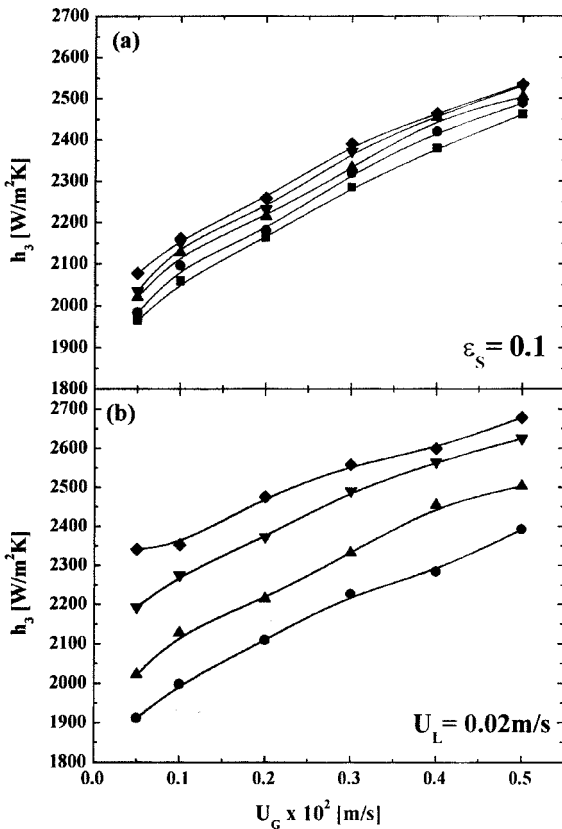


Fig. 5. Effects of  $U_G$  on the heat transfer coefficient in the riser of three-phase circulating fluidized-bed bioreactors.

|                               |      |     |      |     |   |
|-------------------------------|------|-----|------|-----|---|
| (a) $U_L \times 10^2$ [m/s] : | 1    | 1.5 | 2    | 2.5 | 3 |
| (b) $\epsilon_s$ :            | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 |   |

면 매우 효과적으로 생물반응을 수행하며 그 효율을 높일 수 있으므로 유동 생물막 입자를 투입한 경우의 열전달 계수를 측정하였다. 유동 생물막 반응기에서 기체유속이 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 생물막 매체 유동입자의 체류량이 0.1인 경우, 생물반응기 내부에서 기체의 유속이 열전달 계수에 미치는 영향을 나타낸 것이며, Fig. 5(b)는 액체유속을 0.02 m/s로 일정하게 유지하면서 기체유속의 변화가 열전달 계수에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이들 그림에서 볼 수 있듯이 생물 반응기에서 기체의 유속이  $0.5 \sim 5 \times 10^{-3}$  m/s로 변하는 범위에서 열전달 계수는 기체유속이 증가함에 따라 모든 경우에 증가하였다. 이는 생물반응기 내부에 유입되는 기체유속이 증가함에 따라 반응기 내부에 기포의 체류량이 증가하게 될 뿐만 아니라, 반응기 내부에서 유동하는 유동매체의 유동화 거동이 더욱 활발하게 되고 반응기 내부의 난류의 강도가 증가하기 때문이라고 해석할 수 있다. 이와 같은 현상은 일반적인 삼상유동층에서의 결과와도 유사하다고 할 수 있다[12, 14, 15].

삼상 순환유동층 생물반응기에서 액체의 유속이 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 생물반응기 내부에 유동 매체입자의 체류량이 0.15인 경우이고 Fig. 6(b)는 기체의 유속을  $3 \times 10^{-3}$  m/s로 일정하게 유지한 경우이다. 이들 그림에서 볼 수 있듯이 생물반응기 내부의 열전달 계수는 액체의 유속이 증가함에 따라 모든 경우에 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, Fig. 4와 비교하여 보면 유동매체입자가 존재하는 삼상 생물반응기의 경우가 유동매체입자가 없는 액체-기체 흐름계보다 액체의 유속이 증가함에 따라 반응기 내부에서의 열전달 계수

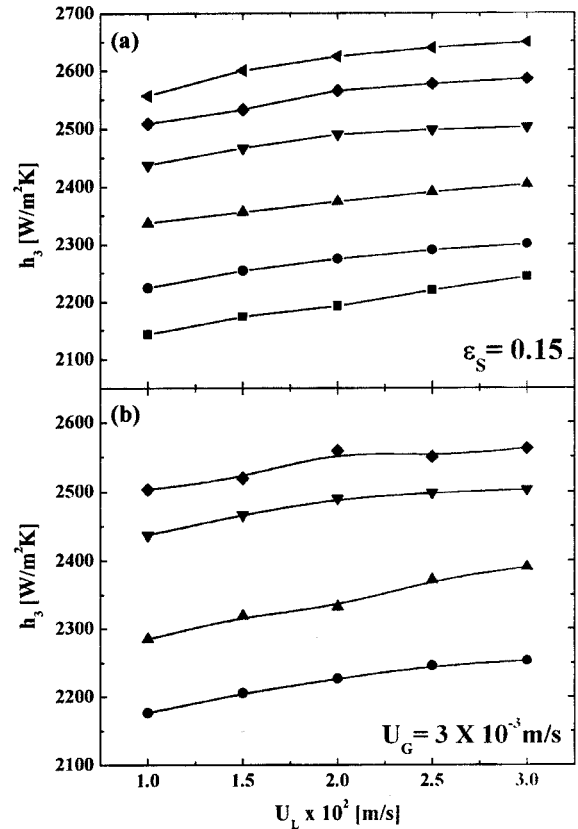


Fig. 6. Effects of  $U_L$  on the heat transfer coefficient in the riser of three-phase circulating fluidized-bed bioreactors.

|                               |      |     |      |     |     |     |
|-------------------------------|------|-----|------|-----|-----|-----|
| (a) $U_G \times 10^2$ [m/s] : | 0.05 | 0.1 | 0.2  | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
| (b) $\epsilon_s$ :            | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 |     |     |

가 더 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기포와 같이 생물반응기 내부에 분산상으로 존재하는 유동 매체입자들이 액체의 유속이 증가함에 따라 더욱 활발하게 유동화되어 반응기 내부에서 난류현상의 증가를 가져올 뿐만 아니라, 각 상들의 접촉효과도 증대되어 반응기 내부영역과 반응기 내부에 존재하는 열원의 주위에서 열전달이 잘 일어난다고 할 수 있다. 이와 같은 현상은 일반적인 삼상 유동층 반응기나 액체 유동층 반응기에서 액체의 유속이 증가함에 따라 유동층 내부에서의 열전달 계수가 최대값을 보이는 것과 대조적이라 할 수 있다[12, 15]. 즉, 일반적인 삼상 유동층 반응기에서는 액체유속이 작은 범위에서는 액체의 유속이 증가함에 따라 유동층 내부에서 열전달 계수가 증가하나 액체유속이 큰 범위에서는 층 팽창이 너무 커져서 유동입자의 체류량의 심각한 감소를 가져와 오히려 열전달 계수가 감소하는 것으로 보고 되고 있다. 그러나 본 연구와 같은 매체가 순환되는 순환유동층 반응기에서는 액체의 유속이 변화하여도 유동 매체입자의 순환속도를 일정하게 유지시켜 주므로 유동 매체입자의 체류량의 심각한 감소현상이 일어나지 않아 액체유속이 증가하여도 열전달 계수는 계속 증가하고 감소하지 않는다고 할 수 있다.

삼상 순환유동층 생물반응기에서 유동 매체입자의 체류량이 반응기 내부의 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 액체유속이 0.015 m/s로 일정하게 유지되는 조건이며, Fig. 7(b)는 기체유속이  $4 \times 10^{-3}$  m/s로 유지되는 조건의 실험결과이다. 이들 그림에서 볼 수 있듯이 생물반응기 내부에서 열전달 계수는 반응기 내부에 존재하는 유동매체입자의 체류량이 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이

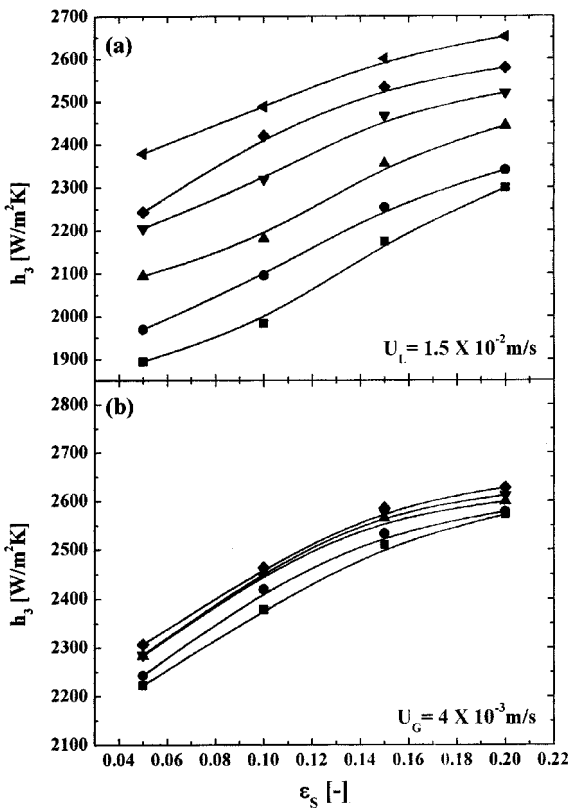


Fig. 7. Effects of  $\epsilon_s$  on the heat transfer coefficient in the riser of three-phase circulating fluidized-bed bioreactors.

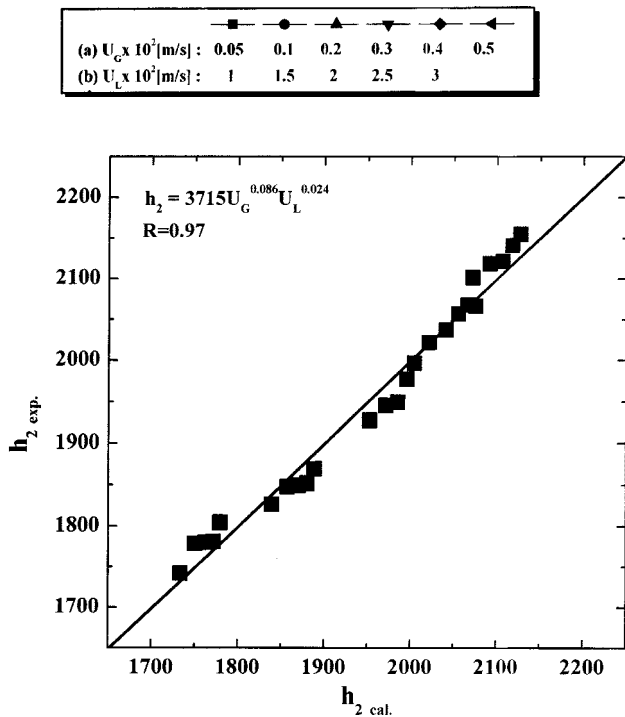


Fig. 8. Correlation for the heat transfer coefficient for gas-liquid system.

는 일반적인 삼상유동층 반응기에서와 같이 유동 매체입자의 체류량이 증가함에 따라 유동 매체입자와 열원간의 접촉 빈도수가 증가하며, 유동 매체입자에 의해 반응기 내부에서 상승하는 유체요소(fluid element)의 흐름을 방해하는 효과들에 의해 생물반응기 내부에서의 난류강도

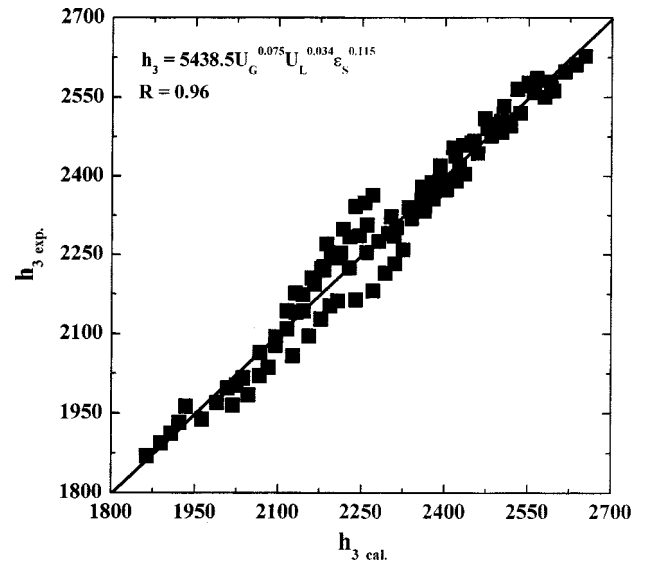


Fig. 9. Correlation for the heat transfer coefficient for gas-liquid-solid system.

(turbulence intensity)가 증가하기 때문에 반응기 내부에서의 열전달 저항을 효과적으로 감소시킬 수 있어서 열전달 계수는 증가한다고 할 수 있다.

표면에 미생물막을 형성한 유동 매체입자가 없는 기-액 이상반응기에서 내부열원으로부터 반응기층으로의 열전달 계수는 식 (2)와 같은 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$h_2 = 3715 U_G^{0.086} U_L^{0.024} \quad (2)$$

식 (2)의 상관계수는 0.97로 Fig. 8에서 보는 바와 같이 실험결과와 잘 일치하였다.

한편, 액상에 포함된 암모니아 성분을 효과적으로 분해하기위해 표면에 미생물 막을 형성한 유동 매체입자를 사용한 삼상 순환유동층 생물반응기에서의 열전달 계수는 식 (3)과 같이 조작변수의 상관식으로 나타낼 수 있었는데,

$$h_3 = 5439 U_G^{0.075} U_L^{0.034} \epsilon_s^{0.115} \quad (3)$$

식 (3)의 상관계수는 0.96으로 Fig. 9에서 보는 바와 같이 실험결과와 잘 일치 하였다.

#### 4. 결 론

삼상 순환유동층 및 기체-액체 순환 생물반응기에서 열전달 특성을 순환반응기의 상승관에 설치된 내부열원과 상승관과의 열전달 계수를 측정함에 의해 효과적으로 해석할 수 있었다. 기체-액체 순환 생물반응기에서 열전달 계수는 기체의 유속이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였으나, 액체유속이 증가함에 따라서는 크게 변화하지 않았다. 삼상 순환유동층 생물반응기에서 열전달 계수는 기체의 유속 및 유동 생물막 매체입자의 체류량이 증가함에 따라 증가하였으나 액체 유속이 증가함에 따라서는 약간 증가하였다. 본 연구의 실험범위에서 기체-액체 순환 생물반응기와 삼상 순환유동층 생물반응기에서의 열전달 계수는 각각 다음과 같은 운전변수의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$h_2 = 3715 U_G^{0.086} U_L^{0.024}$$

$$h_3 = 5439 U_G^{0.075} U_L^{0.034} \epsilon_s^{0.115}$$

## 감 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구과제(1999-1-307-006-3)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 사용기호

|            |  |
|------------|--|
| $A$        | : surface area of heater [ $m^2$ ]   |
| $h_2$      | : heat transfer coefficient in gas-liquid circulation bioreactor [ $W/m^2K$ ]                |
| $h_3$      | : heat transfer coefficient in three-phase circulation fluidized-bed bioreactor [ $W/m^2K$ ] |
| $Q$        | : heat flow [ $J/s$ ]  |
| $T_b$      | : bed temperature [ $K$ ]  |
| $T_h$      | : heater temperature [ $K$ ]   |
| $\Delta T$ | : mean temperature difference [ $K$ ]  |
| $U_G$      | : superficial gas velocity [ $m/s$ ]   |
| $U_L$      | : superficial liquid velocity [ $m/s$ ]  |

## 그리스 문자

|              |                          |
|--------------|--------------------------|
| $\epsilon_s$ | : solid phase holdup [-] |
|--------------|--------------------------|

## 참고문헌

1. Yu, J., Ji, M. and Yue, P. L.: *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **74**, 619 (1999).
2. Chang, H. T., Rittmann, B. E., Amar, D., Heim, R., Ehlinger, O. and Lesty, Y.: *Biotech. Bioeng.*, **38**, 499(1991).
3. Kang, Y., Fan, L. T., Min, B. T. and Kim, S. D.: *Biotech. Bioeng.*, **37**, 580(1991).
4. Converti, A., Borghi, M. D. and Ferraiolo, G.: *Can. J. Chem. Eng.*, **52**, 1321(1993).
5. Yu, H. and Rittman, B.: *Water Res.*, **31**, 2604(1997).
6. Liang, W., Wu, Q., Yu, Z., Jin, Y. and Wang, Z.: *Can. J. Chem. Eng.*, **73**, 656(1995).
7. Yang, W., Wang, Z., Zhou, L. and Jin, Y.: *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 5523 (1999).
8. Cho, Y. J., Nam, S. H., Kim, S. J., Kang, Y. and Kim, S. D.: *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 1275(2001a).
9. Cho, Y. J., Song, P. S., Kim, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **34**, 254(2001b).
10. Kang, Y., Song, P. S., Woo, K. J., Jeong, Y. Y. and Kim, S. D.: *HWA-HAK KONGHAK*, **35**, 819(1997).
11. Kang, Y., Fan, L. T. and Kim, S. D.: *AIChE J.*, **37**, 1101(1991).
12. Kim, S. D. and Kang, Y.: *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 3639(1997).
13. Cho, Y. J., Park, H. Y., Kim, S. W., Kang, Y. and Kim, S. D.: *I&EC Research*, in press(2002).
14. Park, H. Y., Kim, S. W., Cho, Y. J., Kang, Y. and Kim, S. D.: *HWA-HAK KONGHAK*, **39**, 619(2001).
15. Kim, S. D. and Kang, Y.: *Mixed Flow Hydrodynamics, Advances in Engineering Fluid Mechanics*, Gulf Pub. Co., New York, U.S.A(1996).