

유동층 열교환기의 수평관에서 열전달 및 기포특성

김성원, 안정렬, 김상돈
 한국과학기술원 화학공학과 및 에너지·환경 연구 센터

Characteristics of heat transfer and bubble around horizontal tube
 in a fluidized bed heat exchanger

S. W. Kim, J. Y. Ahn and S. D. Kim
 Dept. of Chem. Eng. & Energy and Environment Research Center
 KAIST, Taejon, Korea

서론

유동층 열교환기 (Fluidized Bed Heat Exchanger; FBHE) 는 온도 균일성이라는 유동층의 특징을 이용하여 적당한 전열면적을 갖는 열교환관을 층 내 설치하여 일정한 양의 열을 전열시키는 것으로, 최근 순환유동층 연소로의 scale-up 을 통한 열용량 증대와 함께 고온의 재순환물질로부터 열을 회수, 연소로의 온도제어 및 열회수율의 극대화를 얻고자 재순환부에 연결하여 사용하고 있다. 또한, 가압순환유동층의 개발과 더불어 유효열전달 면적의 증대를 통한 상대적인 연소로 소형화를 위해 채택되고 있다. 특히, 유동층 열교환기는 전체 공정에서 20~60% 의 열을 회수할 수 있어, 열전달에 있어 매우 중요한 역할을 차지한다 [1].

유동층 열교환기의 설계 및 유동층연소로에 대한 적용에 있어, 가장 중요한 정보는 열전달계수로서, 본 연구의 관심대상인 순환유동층에 설치된 유동층 열교환기에 적용되는 100 - 300 μm 의 입도 분포를 갖는 재순환 회재[1] 의 경우 그 연구결과가 매우 적다. 또한, 유동층과 전열관 사이의 열전달은 관 표면으로의 입자 이동과 기포에 의한 입자 이탈이라는 반복과정에 의한다. 그러나, 기존의 연구들은 적당한 측정방법의 부재로 인하여 열전달의 해석에 있어 충분한 실험적 증거없이 추측에 의한 극단적인 해석을 해온 문제들이 있다[2]. 그러므로, 본 연구에서는 순환유동층 내 유동층열교환기의 전열관에서의 열전달특성을 재순환회재의 입도를 갖는 입자를 대상으로 연구하고자 하였다. 또한, 국부 열전달계수 (local heat transfer coefficient) 와 입자 및 기포의 전열관의 접촉을 동시에 측정함으로써 열전달 과정에 대한 이해를 향상시키고자 하였다.

실험

본 연구에서 사용한 상온 유동층 열교환기의 개략도는 Fig. 1 과 같다. FBHE 는 내부현상을 관찰할 수 있도록 아크릴로 제작되었고, 내부 단면적을 기준으로 세로는 0.34 m 이고 가로는 0.50 m 이며, 높이는 0.65 m 이다. 내부에는 1 in. sus 관이 고체흐름 방향에 직각으로 설치되어 벽면에 연결되어 있고, 관사이의 간격은 0.08 m 이며 관의 배열

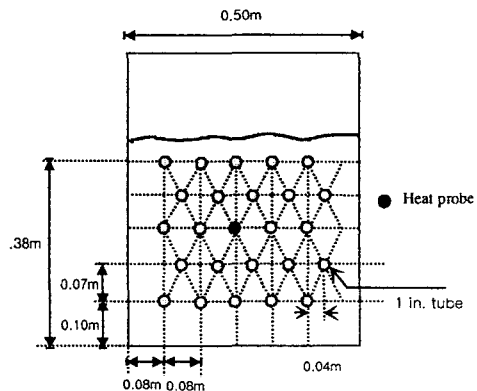


Fig. 1 Schematic diagram of FBHE

은 삼각배열 (triangular pitch) 형태를 갖는다. 또한, 첫 번째 열은 분산판 상부에 jet length 를 고려하여 0.10 m 높이에 존재하며, 총 25 개의 관들이 설치되어 있다.

총괄 열전달계수 및 반경방향에 따른 국부 열전달계수를 측정할 수 있는 probe 를 Fig. 2 에 나타내었다. 열전달계수 측정 probe 는 전열관 내부를 가열하여 층물질로의 열전달 계수를 측정하는 방식으로, 이는 실제 연소로와는 반대방향의 열전달 흐름을 갖는다. Probe 의 길이는 전열관과 동일한 470 mm 이고, 중심에는 반경방향 열전달계수 측정을 위한 80 mm 의 구리관 (copper tube) 이 있으며, 이를 중심으로 양쪽으로 횡축을 따른 전열 방지를 위한 테프론 봉이 부착되어 있다. 구리관은 낮은 Biot number 를 갖기 때문에 표면에서의 온도변화는 무시할 수 있어 열전달계수 측정을 위한 재질로 선택되었다.

구리관 안에는 관 표면 온도를 일정하게 하기 위하여 저항 히터 (resistance heater) 가 설치되어 있고, 온도 조절을 위해 가변 교류 전원공급기를 연결해 놓았다. 또한, 전열관에 공급된 열흐름속도 (heat flow rate) 를 알기 위하여 공급된 전원의 전압과 전류를 측정하였다. 총괄 열전달계수 및 반경방향의 국부 열전달계수를 측정하기 위하여 구리관 표면에 표면과 동일한 높이로 반경방향으로 수평면을 기준으로 + 90° 에서 - 90° 까지 45° 의 각을 가지고 5개의 thermocouple 을 부착하였다. Thermocouple (fast response probe; Cole-Parmer P-08419-41, USA) 은 T-type 으로 접합부 bead 는 0.13 mm 의 직경을 갖는다. Thermocouple 에서 나온 신호는 amplifier 를 거쳐 A/D converter 를 통해서 PC 에 신호가 저장되도록 하였다. 1번 측정시, sampling 은 8 ms 간격으로 50 초 동안 6,250개의 data 를 포집하였다.

본 실험에서 전열관의 벽면에서 기포 및 emulsion 상의 성질을 열전달계수와 동시 측정하기 위해서 기존의 transmission type optical fiber probe 원리[3] 를 이용하였다. Optical fiber probe 는 500 μ m 의 직경을 갖는 한 쌍의 fiber 로 구성되어 있다. 한 쪽은 He-Ne laser 로부터 나온 빛을 투사하고, 나머지 한 쪽은 투과된 빛을 받는 역할이며, 이들은 3.0 mm 간격을 갖는다. 투과된 빛을 받는 fiber 에서 나온 빛은 photo transistor, amplifier 및 A/D converter 를 거쳐 PC 에 신호가 저장되었다. Sampling 은 2ms 간격으로 28 초 동안 14,000개의 data 를 포집하였고, 동시에 thermocouple 의 신호도 동일한 sampling 주기를 가지고 측정하였다. 실험에 사용된 입자는 순환유동층 재순환물질의 입도범위에 해당하는 240 μ m 의 silica sand 로 겉보기 밀도는 2582 kg/m³ 이고, 최소유동화속도는 0.048 m/s 이다.

Data 해석

1. 열전달 data 해석

국부열전달계수는 heater 에 공급된 전압과 전류로부터 식 (1) 에 의하여 계산될 수 있다.

$$h_i = \frac{Q}{A_{tube}(T_s - T_b)} = \frac{IV}{A_{tube}(T_s - T_b)} \quad (1)$$

여기서 A_{tube} 는 관의 면적, T_s 는 관 표면 온도, T_b 는 bed 온도이며, I 와 V 는 각각 heater 에 공급된 전류 및 전압이다. 또한, 총괄열전달 계수는 다음과 같다.

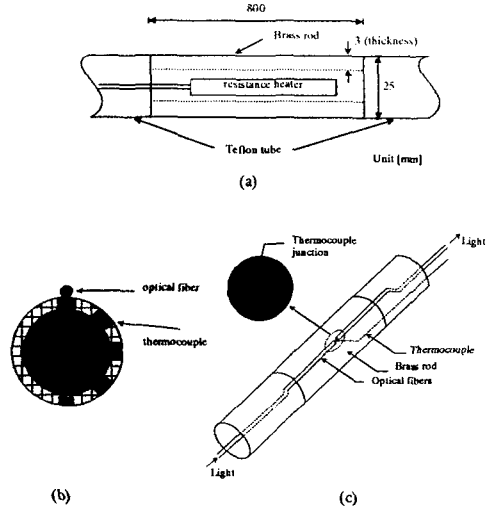


Fig. 2 Schematic diagram of heat transfer probe
(a) Heater assembly (b) Cross section of the tube
(c) Instrumented cylinder

$$h_{avg} = \frac{h_{-90^\circ} + 2h_{-45^\circ} + 2h_{0^\circ} + 2h_{45^\circ} + h_{90^\circ}}{8} \quad (2)$$

2. 기포 및 emulsion phase data 해석

Optical fiber probe 의 신호는 기준값을 사용하여 emulsion phase 와 bubble phase 로 나눌 수 있다. 이를 기준으로 tube 에서 bubble 또는 emulsion 이 머무는 시간을 각각 B_i , E_i 라고 할때 평균 기포 및 emulsion contacting time 은 다음식에 의해 구할 수 있다.

$$T_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i, \quad T_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad (n: \text{bubble, emulsion phase 개수}) \quad (3)$$

Tube 에서 bubble 및 emulsion 이 차지하는 분율을 시간 개념으로 계산할 수 있다. 즉, 기포가 probe 에 머무는 시간 ($\sum B_i$) 을 전체 sample time 으로 나누어서 계산할 수 있다.

$$\delta_b = \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{T(\text{total sample time})}, \quad \delta_e = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{T(\text{total sample time})} \quad (4)$$

Probe 를 통과하는 기포 또는 emulsion phase 의 빈도수는 다음과 같다.

$$f_b, f_e = \frac{n(\text{number of bubble or emulsion phase})}{T(\text{total sample time})} \quad (5)$$

실험결과

본 연구에서는 기존의 FBHE 에서의 기포특성 연구 [4] 를 통하여 얻어진 결과를 바탕으로, 전체 흐름을 잘 나타낼 수 있는 위치인 3 열 중앙부에 probe 를 설치하였다 (Fig. 1).

Fig. 3 에 기체유속 변화에 따른 전열관에서의 평균 열전달계수 변화를 나타내었다. 평균 열전달계수는 기상유속이 증가할수록 증가하였고, 기상유속의 변화에 대해 최대값을 나타내었다. 이러한 경향은 기존에 보고된 다른 종류의 입자에 대한 결과와도 일치하나 [5], 그 증가하는 정도나 최대값은 입자의 크기에 서로 다른 결과를 나타낸다. 본 연구의 모래입자의 경우 최대 열전달계수 (h_{max}) 는 0.13 m/s ($2.7 U_{mf}$) 에서 얻어졌고, 그 값은 $394 \text{ W/m}^2\text{K}$ 였다. Zabrodsky[6] 는 h_{max} 에 대하여 기존 연구결과를 바탕으로 아래와 같은 상관관계식을 제시하였다.

$$h_{max} = 35.8 \rho_b^{0.2} K_g^{0.6} d_p^{-0.36} \quad (6)$$

여기서 K_g 는 기체의 열전도도 값이다.

Zabrodsky 의 상관식을 Fig. 3 에 도시하였고, 본 연구의 최대값과 잘 일치함을 나타내었다. 특이한 점은 최소유동화속도 미만에서는 고정층내 기체유속 변화에 따른 열전달계수의 변화현상이 나타날 것이라는 예상과는 달리, 최소유동화속도 미만인 0.03 m/s 이상에서 열전달계수의 급격한 증가가 나타난다는 것이다. 이는 기포의 관찰에서 알 수 있듯이 유동층 내 튜브 존재 시 튜브사이에서 기체유속이 증가함으로써 간헐적인 국부기포가 관찰되고, 이들이 열전달계수를 증가시키는 결과를 낳는 것이다.

Fig. 4 에 일정한 기체유속에서 전열관 표면 반경 방향에서의 국부 열전달계수의 분포와 동시에 측정

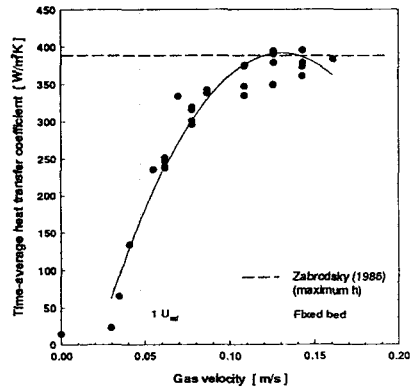


Fig. 3 Effect of gas velocity on average heat transfer coefficient

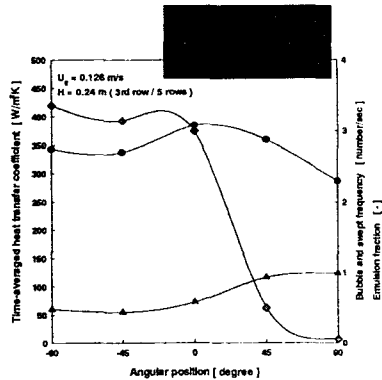


Fig. 4 Local averaged heat transfer coefficient bubble frequency and emulsion phase fraction versus the angular positions

된 기포 빈도수 및 emulsion 상 분울의 분포를 나타내었다. 기체유속은 최대 열전달계수를 나타낸 0.126 m/s 이다. 그림에서 보듯이 열전달계수는 0° 위치에서 최대값을 나타내었고, 기포 빈도수는 전열관의 상부에서 매우 낮은 반면 0° 이하의 위치에서는 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 유동층 내 층물질과 전열관 사이의 열전달은 기포의 거동에 의한 emulsion phase 의 움직임 즉, solids mixing 에 의해 지배받는다. 전열관 하부의 경우, 분산판으로부터 상승하는 기포가 전열관과 접촉함으로써 상부 영역보다 상대적으로 높은 기포 빈도수를 나타낸다. 그러나, 상부 영역에서는 간헐적인 기포의 상승만 보일 뿐, 고체의 정체층 형성과 이의 무너짐 현상이 반복됨으로써 낮은 열전달계수를 갖는다. 그러나, 0° 이하의 하부영역은 기포의 높은 빈도수에도 불구하고, 높은 기체유속에서는 상대적으로 높은 기포 분울 또는 낮은 emulsion phase 분울을 갖음으로써 고체입자와의 접촉을 통한 열전달 정도가 낮아짐으로써 낮은 열전달계수를 갖게되는 것이다. 따라서, 높은 열전달 계수를 갖기 위해서는 기포 빈도수와 emulsion phase 의 분울에 있어 최적점이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 5 는 tube 표면 반경방향에서의 emulsion 접촉시간의 변화를 열전달계수 및 기포빈도수와 함께 나타내었다. Emulsion 접촉시간은 상부로 갈수록 증가하였고, tube 상부 즉, 정체층 형성 지역에서는 매우 높은 값을 나타낸다. 유동층 내 전열관과 층물질 사이의 열전달은 관 표면에서의 고체입자 체류량과 체류시간에 의해 지배된다. 관 표면에서의 열전달계수는 표면 고체입자의 높은 체류량 또는 고체밀도와 짧은 체류시간을 갖을수록 증가하게 된다. 이때 고체입자의 체류시간은 하부에서 상승하는 기포에 기인된 고체혼합 (solid mixing) 에 의존한다[5]. 따라서, 전열관 상부의 경우 높은 고체입자 체류시간을 갖지만 이는 하나의 정체층으로 열전달에 있어 고체혼합이 없는 하나의 저항요소로서 열전달을 방해하는 역할을 하여 낮은 열전달계수 값을 갖는다. 하부의 경우, + 90° 지점이 가장 짧은 emulsion 접촉시간을 갖지만 상대적으로 높은 기포 분울(낮은 emulsion 분울, Fig. 4)을 갖음으로써 0° 지점보다 낮은 열전달계수 값을 나타낸다.

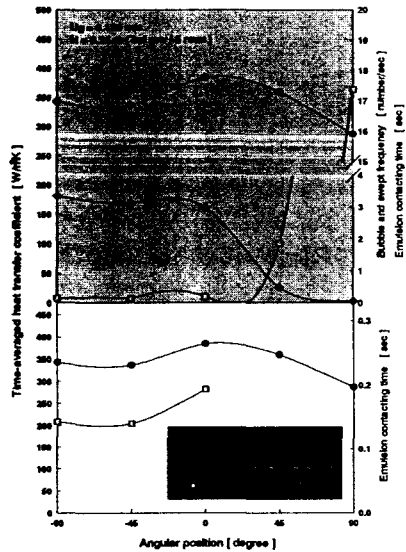


Fig. 5 Emulsion phase contacting time versus the angular positions

감사의 글

본 연구는 산업자원부가 지원하는 청정에너지기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Basu, P. and Praiser S. A., In " Circulating fluidized bed boilers", Butterworth-Heinemann (1991)
2. Molerus, O. and Wirth, K. E., In "Heat Transfer in Fluidized Beds", Chapman & Hall, London, UK (1997)
3. Choi, Y. T. and Kim, S. D. *J. Chem. Eng. Japan*, **24**(2), 195 (1991)
4. Ahn, J. Y., Kim, S.W. and Kim, S.D., *Theories and Applications of Chem. Eng.*, **6**(2), 3509 (2000)
5. Grewal, N. S. and Saxena, S. C., *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **20**, 108 (1981)