

가압 기체-고체 유동층에서 내부열원과 유동층간의 열전달

강 용[†] · 김영렬 · 고명한 · 서용철* · 진경태** · 손재익** · 김상돈***

충남대학교 화학공학과

*연세대학교 산업환경학과

**한국에너지기술연구소 에너지 환경연구부

***한국과학기술원 화학공학과

(1996년 8월 28일 접수, 1997년 1월 14일 채택)

Immersed Heater-to-Bed Heat Transfer in a Pressurized Gas-Solid Fluidized Bed

Yong Kang[†], Young-Real Kim, Myung-Han Ko, Yong-Chil Seo*, Gyoung-Tae Jin**,
Jae-Ek Son** and Sang-Don Kim***

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

*Department of Ind. Environment & Health, Yonsei Univ., Wonju 222-701, Korea

**Energy & Environment Research Dept., Korea Institute of Energy, Taejeon 305-343, Korea

***Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejeon 305-701, Korea

(Received 28 August 1996; accepted 14 January 1997)

요 약

가압기체-고체 유동층의 열전달 특성을 연구하고자 직경이 0.15 m이고 높이가 3.58 m인 스테인레스 스틸로 제작된 가압유동층에서 내부열원과 유동층간의 열전달 특성을 고찰하였다. 주요 실험변수로는 유동층의 압력과 온도 그리고 기체의 유속을 선정하였으며 이들 변수들이 가압유동층 내부열원과 유동층 내부 영역간의 국부열전달계수와 총괄열전달계수에 미치는 영향을 검토하였다. 가압 기체-고체유동층에서 압력이 증가할수록 국부열전달계수는 유동층의 높이 증가에 따라 더 빨리 일정한 값으로 수렴해 갔으며, 압력의 증가는 열적 안정성에 효과적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 가압유동층에서 총괄 열전달계수는 온도와 압력이 증가할수록 증가하였으며 기체유속이 증가함에 따라 최대값을 나타내었다. 가압유동층에서 총괄 열전달계수는 다음과 같이 무차원군의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$N_u = 0.083 P_r^{0.33} P_d^{0.08}$$

$$N_u = 0.105 P_r^{0.33} R_c^{0.11}$$

Abstract—Heat transfer characteristics between the immersed heater and the bed were investigated in a pressurized gas-solid fluidized bed of 0.15 m ID and 3.58 m in height. Effects of operating pressure and temperature and gas flow rate on the local and overall immersed heater-to-bed heat transfer coefficient were examined. The increase of operating pressure can contribute to the thermal stability of the pressurized gas-solid fluidized bed. The local heat transfer coefficient increased and approached a almost constant value along with the height in the heater zone, and the convergence occurred more early with an increase in the pressure. The overall heat transfer coefficient increased with increasing operating temperature and pressure, but it exhibited its maximum value with the variation of gas flow rate. The heat transfer coefficient was well correlated in terms of dimensionless groups as

$$N_u = 0.083 P_r^{0.33} P_d^{0.08}$$

$$N_u = 0.105 P_r^{0.33} R_c^{0.11}$$

Key words: Pressurized Fluidized Bed, Heat Transfer, Immersed Heater to Bed, Gas-Solid System

1. 서 론

가압유동층은 복합발전이 가능하며, 총괄열효율이 높을 뿐만 아니라 가압에 의한 장치의 소형화 및 탈황 효율의 증대 그리고 배기

가스 중의 NO_x 농도를 줄일 수 있어서 공해 배출 물질의 감소 등 상압유동층 연소에 비하여 많은 장점들을 가지고 있으나, 가압 시스템을 사용하고 있으므로 이에 동반되는 조작변수의 변화와 실험의 어려움 그리고 스케일업 등, 장치제작에 고려해야 할 문제점 등이 많

이 있어서 이에 대한 연구는 앞으로 많이 진행되어야 할 것이다. 우리 나라와 같은 석유 및 천연가스가 부족한 나라에서는 석탄의 효율적 이용 측면에서 가압유동층 연소 시스템 개발이 절실히 요청되고 있는데, 이 시스템의 개발을 위해서는 가압유동층에서 열전달 특성의 규명이 선행되어야 한다[1-8].

가압유동층 연소계에 대한 연구는 미국, 영국, 독일, 스웨덴 등 선진 국가들에서도 이미 상당한 진전을 보고 있으며, 가까운 중국이나 일본에서도 차세대 연소기술로서 최근에 이에 대한 연구가 매우 활발히 진행되고 있으나, 우리 나라에서는 아직 가압유동층 연소 및 이 시스템에서의 열전달 특성 등 요소기술들에 대한 연구가 매우 미흡한 실정이다[3].

가압유동층 시스템에서의 주요 운전변수로는 압력, 온도, 유동층 내의 유속, freeboard에서의 유속, 유동층의 깊이 등을 들 수 있으며, 가압유동층계의 실험적 연구가 성공적으로 이루어져 상용화되기 위해서는 이 연소계에 대한 수력학적 특성과 물질전달, 열전달 특성 등 전달현상, 그리고 기체-고체의 흐름 및 접촉현상 등에 대한 정보와 이해가 매우 절실하다 하겠으며, 이와 같은 필수정보를 위해서는 가압유동층 연소계에서 각각의 세부적인 사항들에 대한 체계적인 연구가 필요적으로 요청된다 하겠다.

따라서, 본 연구에서는 가압유동층 연소계에서 주요 설계요소 중의 하나인 열전달 특성에 대한 실험적 연구를 통하여 온도, 인력, 기체속도 등 시스템의 주요 운전변수들이 열전달 특성에 미치는 영향과 상호 연관성들을 고찰하고자 하였다. 이와 같은 연구에서 얻은 경험과 정보는 가압유동층 연소계에서 기포의 특성, 기체-고체의 흐름 특성과 접촉현상 등 수력학적 특성에 대한 정보들과 더불어 가압유동층 공정이나 연소계의 설계, 운전 및 스케일업 등에 매우 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 기체 공급 부분, 가압유동층 부분, 분체 포집 부분 그리고 온도 측정 부분으로 구성되어 있다. 기체 공급 부분은 30 hp의 컴프레서와 공기필터 그리고 건조 시스템으로 되어 있으며 공급 기체의 압력 조절을 위하여 regulator와 밸브를 부착하였고, 공급 기체의 유량은 rotameter를 사용하여 측정하였다. 가압유동층은 직경 0.15 m의 스테인레스 스틸관을 사용하여 제작하였으며 유효 높이는 3.58 m 정도 되었다. 가압유동층의 벽면에는 기체분산관으로부터 0.2 m의 일정 간격으로 tap을 설치하여 압력과 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 기체분산관은 스테인레스 스틸관을 이중으로 사용하여 제작하였다.

가압유동층 내부에 설치된 카트리지 열원은 스테인레스 스틸관 내부에 열원을 삽입하여 봉하였으며 열원의 용량은 1 KW의 전력소비가 되도록 하여 내부 저항은 48.4 Ω 이었다. 카트리지 열원의 유효 길이는 0.9 m이며 열원이 설치된 끝부분은 기체분산관과 격리하여 분산관에 의한 열전도를 방지하기 위하여 단열재로 끝부분을 처리하였다. 카트리지 열원은 기체분산관 위의 중앙에 설치되었으며 가압유동층 내부에서 immersed heater-to-bed 열전달계수를 측정하는 실험에 적합하도록 하였다. 가압유동층 내부의 온도를 측정하기 위하여 가압유동층 벽면에 기체분산관으로부터 0.2 m 간격으로 bed의 양쪽에 6개의 열전대를 설치하였는데 열전대는 유동층 벽면과 격리하여 삽입함으로써 유동층 벽면에서의 전도에 의한 열전달을 제거하고자 하였다. 열원 표면의 온도 측정을 위해 열전대를 열원 내부 표면에 용접하여 부착하였는데 그 위치는 열원의 끝부분에서 0.15 m되는 부분부터 0.3 m 간격으로 양쪽에 6개 설치하였다.

열원이나 bed에 사용된 열전대는 모두 J-type을 사용하였으며, 일

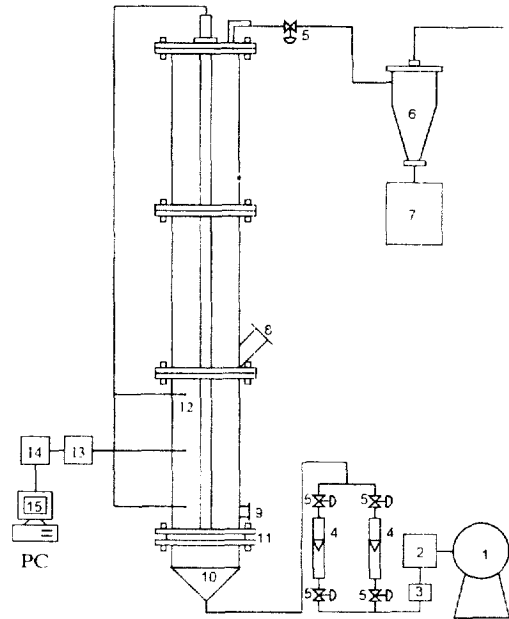


Fig. 1. Experimental apparatus.

- | | |
|-----------------|-------------------------|
| 1. Compressor | 9. Solid discharge |
| 2. Filter | 10. Calming section |
| 3. Regulator | 11. Gas distributor |
| 4. Rotameter | 12. Thermocouple |
| 5. Valve | 13. Data logging system |
| 6. Cyclone | 14. A/D converter |
| 7. Hopper | 15. Personal computer |
| 8. Loading port | |

Table 1. Physical properties of the FCC particles

Mean diameter(μm)	71.4
Apparent density(kg/m^3)	1839
Minimum fluidized velocity(cm/sec)	1.02
Terminal velocity(cm/sec)	26.8
Thermal conductivity(W/mK)	0.95
Specific heat(J/kgK)	874.5
Specific surface area(m^2/cc)	0.0862

정 유동조건에서 각 지점의 온도는 열전대와 연결된 Data Logging 시스템(OMEGA Co.)을 사용하여 PC(Personal Computer)에 입력시켰다. 가압유동층에서 유출되는 입자나 분진의 포집을 위해서 스테인레스 스틸로 제작된 싸이클론계를 사용하였으며 가압유동층 내부의 압력 유지를 위한 밸브 등이 부착되어 있다.

가압유동층에서 사용된 유동입자는 평균입도가 71.4 μm 이고 밀도가 1893 kg/m^3 인 FCC(Fluid Cracking Catalyst)이었으며 이의 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다. 유동화에 사용된 유체로는 건조된 압축공기를 사용하였는데 유속의 범위는 3.8-19.0 cm/sec 이었다. 가압유동층의 가압조건을 유지시키기 위해 bed내의 압력은 100, 200, 300, 400 kPa 그리고 500 kPa의 5종류로 실험을 하였으며, 각 유동조건에서의 온도 변화는 318 K, 346 K, 371 K 그리고 396 K 등 4종류로 하였다. 각 유동조건에서 가압유동층 내부에서의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 유동층 벽면은 석면피복과 알루미늄호일을 사용하여 단열하였다.

2-1. 열전달계수

본 연구에서는 가압유동층에서의 열전달특성 규명을 위해서 국부

열전달계수와 총괄 열전달계수를 구하고자 하였다. 즉, 유동층 중심부에 삽입되어 있는 열원에 가해진 열량과 열원표면의 온도 그리고 bed의 온도를 측정하여서 식 (1)에 의해 총괄열전달계수 U 를 구하였다.

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

여기서 A 는 열원의 표면적을 나타낸다.

한편, 국부 열전달계수 h 는 유동층 내부 국부 지점의 온도차 ΔT 와 가해진 열량 Q , 그리고 열원의 국부표면적 A 값들을 식 (1)의 ΔT , Q 및 A 에 각각 대입하여 구하였다. 국부 열전달계수를 구하기 위하여 열원전체표면에서 단위표면적당 일정열량이 bed내로 전달된다고 가정하였으며 열전달이 거의 일어나지 않는 상태에서 열원의 표면온도가 균일하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 A 는 국부표면적으로 선정하였으며 Q 는 A 가 전체 열원표면에서 차지하는 면적비율로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 가압유동층에서 내부열원과 유동층 벌크영역간의 온도차

가압유동층에서 내부열원과 유동층 내부영역간의 온도차는 bed의 높이에 따라 약간의 차이를 나타내었는데 이는 가압유동층에 유입되는 공기의 유속과 운전온도 그리고 운전압력에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 내부열원과 유동층 내부 영역간의 온도차기 일정 온도와 압력의 운전조건에서 bed의 높이에 따라 변화하는 양상은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 bed의 높이가 증가함에 따라 점차적으로 감소하였으며, 그 감소율은 bed의 높이가 증가함에 따라 점점 둔화되어 일정 높이 이상에서는 일정한 값을 나타내며 수렴하여가는 양상을 나타내었다.

또한 Fig. 2에서 유동층의 운전압력이 증가할수록 온도차는 작은 값을 나타내었고 또 빨리 일정한 값에 수렴해가는 것을 알 수 있다. 내부열원과 내부영역의 온도차가 빨리 일정한 값으로 수렴해 가는 운전조건에서는 가압유동층 내부에서의 열전달이 비교적 일정하게 잘 일어난다고 볼 수 있으며 이와 같은 경우에는 유동층 내부에서의

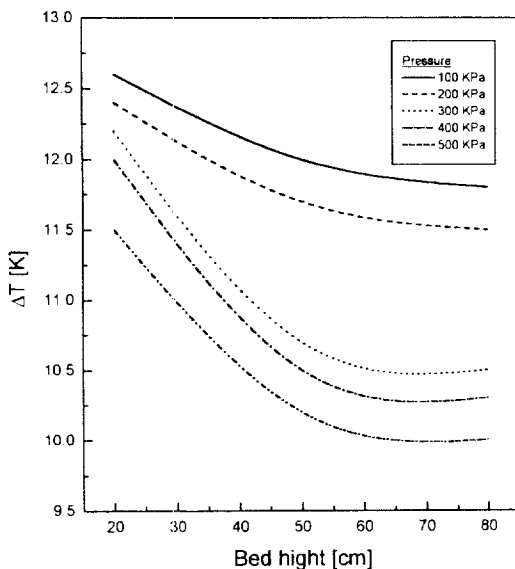


Fig. 2. Effects of bed height on ΔT in pressurized fluidized beds ($T=371$ K, $U_G=7.6$ cm/sec).

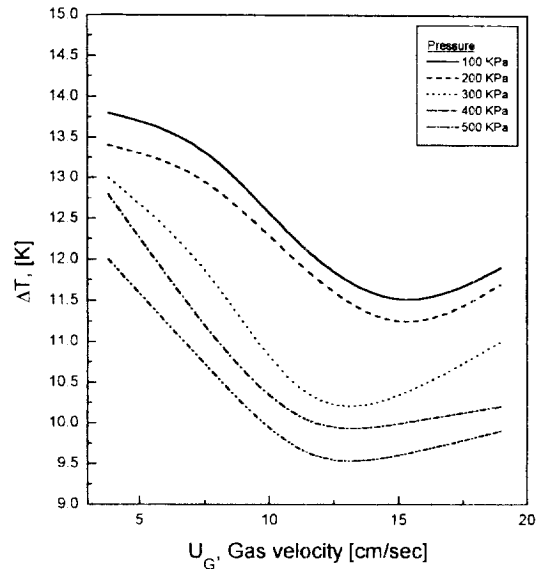


Fig. 3. Effects of U_G of ΔT in pressurized fluidized beds ($T=396$ K, $H=80$ cm).

유동조건이 열적으로 안정되어 있다고 볼 수 있다. 다시 말하면, 가압유동층 내부에서 내부열원과 유동층 내부 영역간의 온도차가 일정한 값으로 빨리 수렴해갈수록 이 열전달 시스템은 빨리 열전달의 정상상태에 도달되며 이 경우 빨리 열적 안정성에 도달해 간다고 할 수 있다. 따라서, 압력이 증가할수록 가압유동층 시스템의 열적 안정성이 증가한다고 볼 수 있다.

가압유동층에서 기체의 유속이 내부열원과 유동층 내부영역간의 온도차에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 내부열원과 유동층 내부영역간의 온도차 ΔT 는 기체유속이 증가함에 따라 점점 감소하다가 최소값을 보인 후 다시 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 기체유속이 증가함에 따라 유동고체입자의 체류량과 기체의 유속에 의한 유동층 내부에서 발생하는 난류현상 등의 변화가 일어나기 때문에 기체유속의 중간지점 정도에서 이들 복합적인 현상들이 내부열원과 유동층간의 열전달이 가장 잘 일어난다는 조건을 형성하기 때문으로 해석할 수 있다.

3-2. 가압유동층의 국부 열전달계수

유동층 내부에서 기체분산판으로부터의 높이에 따른 국부 열전달계수를 측정하는 것은 유동층 입구에서의 열전달 특성 해석에 필요하므로 본 연구에서는 유동층 높이에 따른 국부 열전달계수, h 를 구하였다. 유동층 높이에 따른 국부 열전달계수는 기체분산판으로부터 20-80 cm의 위치에서 측정하였다.

유동층 내부에 압력을 가하여 가면서 유동층의 높이 변화에 따른 유동층 내부의 열원과 유동층간의 국부 열전달계수의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 유동층의 높이가 증가함에 따라 국부 열전달계수가 증가하여서 일정값에 수렴해 가는 것을 알 수 있으며, 유동층의 운전압력이 증가할수록 일찍 수렴해감을 알 수 있다. 또한, 가압유동층 내부에서의 국부 열전달계수는 기체의 유속이 증가함에 따라 유동층의 높이 증가에 따른 증가율이 증가해감을 알 수 있다.

이와 같은 현상은 유동층 내부의 압력이 증가하여 갈수록 유동층 내부에서의 열적 안정도가 더 높다는 것을 설명하여 준다고 볼 수 있다. 즉 유동층 내부에서 기체의 압력증가는 기체의 밀도를 증가시

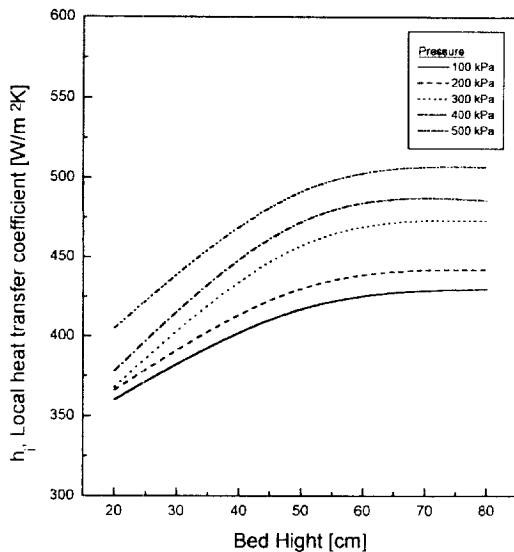


Fig. 4. Variation of local heat transfer coefficient along with height in pressurized fluidized beds ($T=396$ K, $U_g=15.2$ cm/sec).

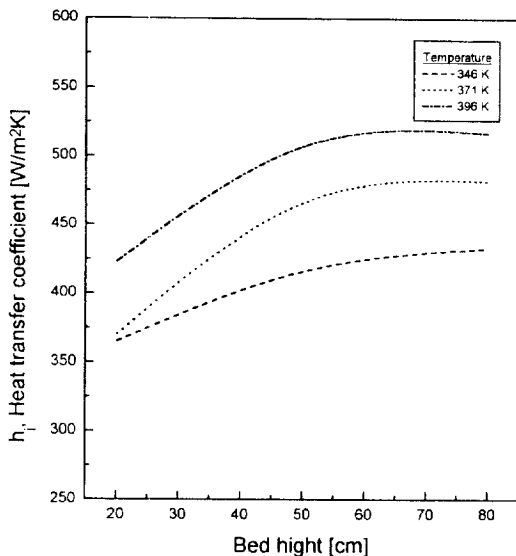


Fig. 5. Variation of local heat transfer coefficient along with height in pressurized fluidized beds ($P=500$ kPa, $U_g=19.0$ cm/sec).

키며, 유동층 내부에 존재하는 기포의 크기를 감소시켜 주며 기포의 모양이 원형에 가깝게 형성되도록 함으로써[9-11] 기포의 수평분포를 고르게 하여 주어 유동층 내부에서의 기체-고체흐름의 안정도를 증가시켜 준다고 볼 수 있다. 일반적으로 상압의 기포유동층에서는 기체유속의 증가에 따라 기체의 합체와 분쇄가 매우 빈번하게 일어나므로 기포의 크기분포가 매우 넓게 분포하게 되는데, 유동층내에 존재하는 기포는 기포의 크기에 따라 부력을 다르게 받으므로 기포의 크기가 큰 것이 작은 것에 비해 그 상승속도가 매우 빠르므로 이에 따른 난류현상의 증가를 가져오며 기포의 수평적 분포는 매우 큰 불균형을 유지하게 될 수 있다. 그러나, 가압유동층의 경우 기포의 크기분포가 다소 좁아지고 기포의 평균 크기도 감소하게 되므로[10-13] 기포 수평분포의 상대적인 안정도를 증가시킬 수 있는 것으로 판단되며, 따라서 내부열원과 유동층간의 열전달이 일어나는 메카니즘에서도 상대적인 안정도가 증가하며 주어진 운전 여건에서 국부적인 열전달계수도 상대적으로 빨리 일정한 값에 수렴해 간다고

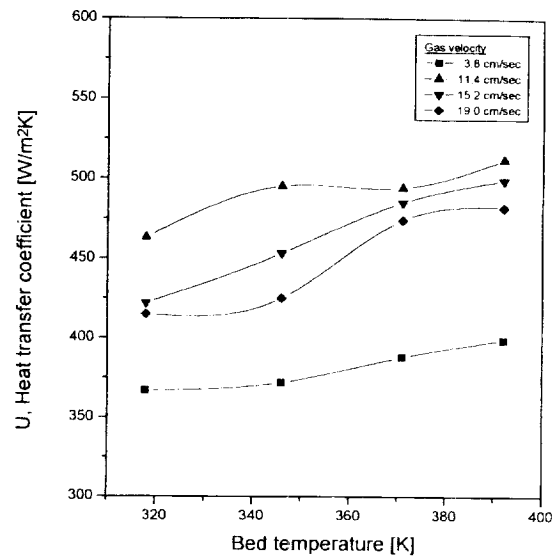


Fig. 6. Effects of T on the heat transfer coefficient in the pressurized fluidized beds ($P=500$ kPa).

볼 수 있다.

가압유동층에서 일정 압력과 공기유속의 조건에서 온도의 변화가 유동층 높이에 따른 국부 열전달계수에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 유동층의 운전온도가 증가할수록 국부 열전달계수는 큰 값을 나타내며 또 빨리 일정한 값에 도달되는 것을 알 수 있다.

3-3. 가압유동층의 열전달계수

기체-고체유동층에서 내부열원과 유동층간의 열전달이 일어나는 메카니즘에는 유동입자의 대류에 의한 열전달, 기체의 대류에 의한 열전달 그리고 열원에서의 복사에 의한 열전달 등 크게 3가지로 분류할 수 있다[10-15]. 물론 유동입자의 대류에 의한 열전달은 유동입자만의 거동에 의해 결정되는 것이 아니고 유동층 내부에 존재하며 상승, 분쇄, 합체되며 그 흐름형태가 변화되는 기체의 흐름과 기포의 특성에도 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 지금까지 보고된 문헌들[10-15]에 의하면, 기체-고체유동층에서 내부열원과 유동층간의 열전달에 주요 역할을 하는 메카니즘은 유동입자의 크기와 반응온도에 따라 다르게 나타나는데, 유동입자의 크기가 $800 \mu m$ 이내이며 반응온도가 대략 900 K 이하이면 기체-고체유동층에서의 열전달 메카니즘은 주로 유동입자의 대류에 의한 것이며, 유동입자의 크기가 $500 \mu m$ 이상되면 기체에 의한 대류가 고려대상이 되며 유동입자의 크기가 $1000 \mu m$ 이상되면 유동기체의 대류에 의한 열전달이 총괄 열전달계수에 매우 큰 영향을 미치게 되며, 반응온도나 유동층의 운전온도가 900 K를 넘으면 열원에 의한 복사가 총괄 열전달계수에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 나타나 있다. 본 연구에서의 운전조건은 유동입자의 크기가 $71 \mu m$ 이고 또 운전온도도 $300-400$ K 정도 이므로 내부열원과 유동층간에 일어나는 주요 메카니즘은 유동입자의 대류에 의해 일어난다고 사료된다.

3-3-1. 유동층 온도가 열전달계수에 미치는 영향

가압에서 운전되는 기체-고체유동층에서 유동층의 운전온도가 내부열원과 유동층간의 총괄 열전달계수에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었는데 유동층의 온도가 증가함에 따라 열전달계수는 점차로 증가하여감을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 유동층의 온도가 증가함에 따라 유동층 내부의 유동입자와 공기 혼합물의 열전도도가 증가하게 되어서 열전달계수가 증가한다고 해석할 수 있다[10, 11].

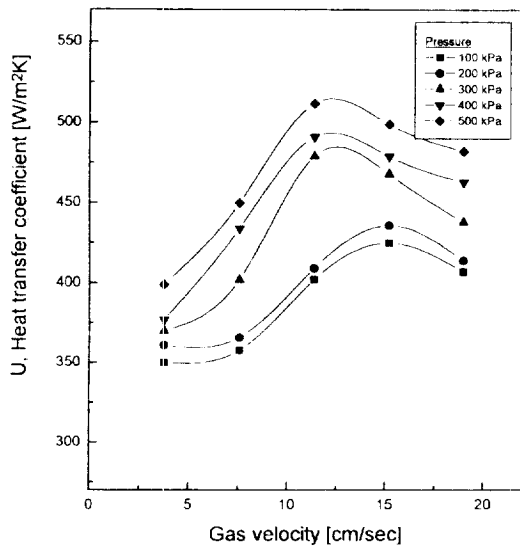


Fig. 7. Effects of U_G on the heat transfer coefficient in pressurized fluidized beds ($T=396$ K).

3-3-2. 기체유속이 열전달계수에 미치는 영향

기체-고체유동층에서 열전달 현상은 유동입자의 대류에 의한 열전달 메커니즘이 주요 요소이지만 유동층 내부에서 유동입자의 기동 자체가 유체 즉 기체에 의해 조절되므로 기체의 유속이 열전달계수에 미치는 영향은 매우 크다고 판단된다.

Fig. 7에 기체의 유속이 가압유동층 내부에서의 열원과 유동층간의 총괄 열전달계수에 미치는 영향을 나타내었다. 각각의 일정 운전 온도에서 열전달계수는 상압과 가압의 운전조건 모두에서 기체유속의 증가에 따라 최대값을 나타낼 수 있다. 이와 같은 현상은 기체유속의 변화에 따라 유동입자의 흐름 현상과 기체-고체의 접촉효율이 변화하기 때문으로 해석할 수 있다. 즉, 유속이 낮은 조건에서는 기체의 유속을 증가시키면 유동고체입자의 흐름과 접촉현상이 점점 격렬해지며 유동층 내부에서의 난류현상의 증가는 유동고체입자와 유동층 내부의 열원 표면의 접촉강도와 빈도수를 증가시켜서 유동고체입자에 의한 대류성 열전달 효과를 증가시키기 때문에 기체유속의 증가에 따라 열전달계수가 증가한다고 볼 수 있다. 그러나, 기체의 유속을 더욱 증가시키면 유동층 내부에 존재하는 기포의 체류량의 증가를 가져와 상대적으로 고체 유동입자의 체류량의 심각한 감소를 가져오므로 유동층 내부에서 열전달이 일어나는 열원의 표면과 단위 시간당 접촉하는 유동입자수와 그 빈도수가 급격히 감소하므로 총괄 열전달계수는 오히려 감소한다고 할 수 있다. 이와 같은 경향은 상압과 가압상태 하에서 연구한 연구자들의 연구결과와도 일치한다[10-15]. 한편, Fig. 7에서 열전달계수 변화양상을 살펴보면, 기체유속이 증가함에 따라 열전달계수가 최대값을 보일 때의 기체유속은 유동층이 운전되는 운전압력에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 유동층의 운전조건이 100-200 kPa인 경우에는 열전달계수가 최대값을 나타내는 기체의 유속이 15.2 cm/sec이었으나 유동층의 운전압력이 증가함에 따라 열전달계수가 최대값을 나타내는 때의 기체유속은 감소하는 경향을 나타내어 유동층의 운전압력이 300-500 kPa인 경우에는 기체유속이 11.4 cm/sec인 경우에 열전달계수가 최대값을 나타내었다. 이와 같이 열전달계수가 최대값을 나타낼 때의 기체유속은 압력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내는 것은 각 운전온도에서도 동일하게 나타났다. 이와 같은 현상은 유동층의 운전압력이 증가함에 따라 유동화 매체인 기체의 밀도가 증가하여 유동입자의 최소 유동화속도가 감소하기 때문으로 해석할 수 있

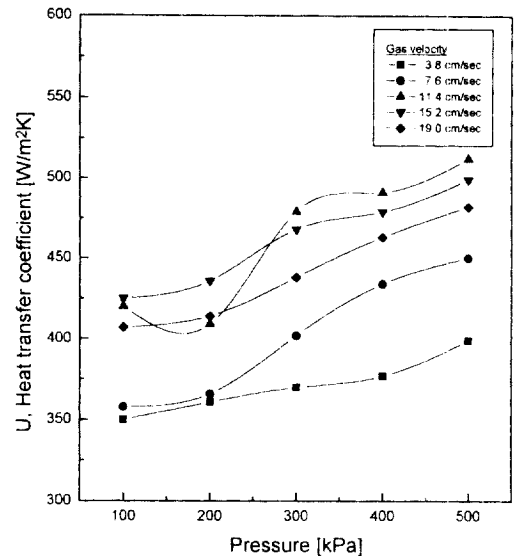


Fig. 8. Effects of pressure on the heat transfer coefficient in pressurized fluidized beds ($T=396$ K).

다. 즉, 기체-고체유동층에서 운전압력이 증가하면 유동층 내부에 생성되는 기포의 크기가 작아지기 때문에 기포의 상승속도를 감소시키고 기포의 수평확산이 촉진되므로 상압유동층에 비하여 같은 유속의 조건에서도 유동층 내부의 증공극률은 상대적으로 큰 값을 나타내게 된다.

따라서, 유동층 내부에서 열전달이 일어나는 열원의 표면과 접촉하는 유동고체입자 체류량이 열전달이 잘 일어나는 매우 효율적인 값을 가질 때의 기체유속은 상압의 경우나 비교적 운전압력이 낮은 경우보다 운전압력이 높은 경우가 감소한다고 해석할 수 있다.

3-3-3. 압력이 열전달계수에 미치는 영향

기체-고체유동층에서 운전압력이 열전달계수에 미치는 영향은 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 유동층 내부열원과 유동층간의 열전달계수는 유동층의 압력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 즉, Fig. 8에서 유동층 운전온도가 318 K이고 기체유속이 3.8 cm/sec일 때 운전압력이 100 kPa인 경우 열전달계수는 275 W/m²K 정도이었으나 운전압력이 500 kPa인 경우 열전달계수는 370 W/m²K 정도로 증가하였으며, 기체유속이 11.4 cm/sec일 때는 운전압력이 100 kPa인 경우 열전달계수가 352 W/m²K 정도이었으나 운전압력이 500 kPa인 경우 460 W/m²K를 나타내어서 운전압력이 5배 정도로 증가할 때 열전달계수는 약 30% 이상 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 유동층의 운전압력이 내부열원과 유동층간의 열전달계수를 증가시키는 이유는 앞서서도 언급한 바와 같이 기체의 압력증가로 인하여 기체의 밀도가 증가되어 유동층 내부에 생성되어 상승하는 기포의 크기가 감소하고 또한 기포의 크기분포가 좀 더 균일해지기 때문에 유동층 내부에서 유동하는 고체 유동입자와 열원의 표면과의 접촉빈도수와 강도가 증가되어 접촉효율이 증대되기 때문이라 할 수 있다. 이와 같은 이유에서 가압유동층을 사용하여 200 μ m 이하의 미분체를 연소할 경우에는 그 연소효율이 압력에 거의 비례하여 증가하게 되며[12]. 또한 가압유동층의 경우 같은 기체의 유속 조건에서도 유동층 가열면적당 열부하가 증가되어 소요되는 열원의 열전달 면적의 상대적인 감소를 가져와 유동층의 소형화 및 장치비의 절감 등이 가능할 수 있다[10-15].

한편, Molerus와 Schweinger[11]는 기체-고체유동층에서 유동층의 운전압력을 증가시키면 그에 비례하여 유동매체인 기체의 동점도도 감소하게 되어 유동층 내부에서 열전달을 촉진시킨다고 하였다.

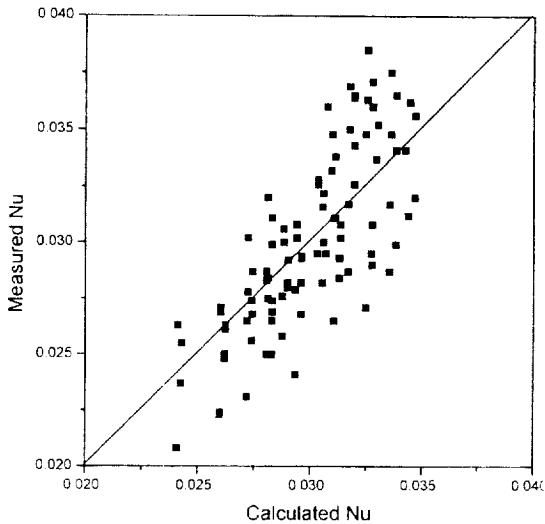


Fig. 9. Comparison of heat transfer coefficient between the calculated and measured values in pressurized fluidized beds.

3-4. 열전달계수의 상관식

가압유동층에서 열전달계수에 영향을 미치는 주요 요소들은 입자의 크기 d_p , 유동입자의 열전도도 k_p , 비열 C_p , 유동층에서의 압력강하 ΔP , 유동화입자의 밀도 ρ_s , 유동매체인 기체의 밀도 ρ_g , 유동매체의 점도 μ , 그리고 유동층 내부에서의 증공극률이나 입자의 체류량 등으로 압축할 수 있다. 다시 말하면, 가압유동층에서의 운전조건인 온도, 압력 등은 모두 유동매체의 밀도, 점도, 그리고 상 체류량에 영향을 미치며 또 유동입자의 열전도도와 열용량 등에 영향을 미치며, 기체유속은 유동층 내부에서의 압력강하, 증공극률이나 체류량 등으로 나타나기 때문이다. 따라서, 이들 요소들을 무차원 해석하여 얻을 수 있는 무차원군은 식 (2)와 같이 표현되는 닛셀수와

$$Nu = \frac{U_d \rho_s}{k_p} \quad (2)$$

식 (3)과 같이 표현되는 압력강하수,

$$P_d = \frac{\Delta P d_p^3}{\epsilon_s \Delta L \rho_s \nu^2} \quad (3)$$

그리고

$$Pr = \frac{C_p \mu_s}{k_p} \quad (4)$$

식 (4)로 표현되는 프란틀수라 할 수 있다.

한편, 가압유동층에서 유동층 내부에서의 단위길이당 압력강하는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으므로

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \epsilon_s (\rho_s - \rho_g) g \quad (5)$$

식 (3)과 (4)에서 압력강하수 P_d 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_d = \frac{d_p^3 g}{\nu^2 \rho_s} (\rho_s - \rho_g) \quad (6)$$

따라서, 가압유동층 열전달계에서 무차원군 닛셀수 Nu 는 압력강하수 P_d 와 프란틀수 Pr 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$Nu = k_1 P_d^{a_1} Pr^{a_2} \quad (7)$$

본 연구의 결과를 식 (7)에 의해 상관식으로 만든 결과 식 (8)을 얻었는데,

$$Nu = 0.083 P_d^{0.33} Pr^{0.08} \quad (8)$$

이때의 상관 계수는 0.9508을 얻었다.

한편, 다상유동층의 열전달계수와 운전변수는 일반적으로 Nu 수와 P_d 수 그리고 Re 수로 상관되기 때문에 본 연구의 결과 얻은 열전달계수는 식 (9)와 같은 상관식으로 표현되었는데,

$$Nu = 0.105 P_d^{0.31} Re^{0.11} \quad (9)$$

이 식의 상관계수는 0.9636으로 Fig. 9에서 보는 바와 같이 실험결과와 잘 일치하였다.

4. 결 론

가압유동층에서 열전달 특성을 고찰한 본 연구의 결과 본 연구의 실험조건에서 다음의 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 가압유동층에서 국부 열전달계수는 유동층의 층높이 증가에 따라 일정한 값으로 수렴해 갔으며 압력이 증가할수록 수렴하는 현상은 더욱 뚜렷이 나타나 가압이 기체-고체유동층의 열전달안정성에 효과적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(2) 가압유동층에서 운전온도와 압력의 증가는 열전달계수의 증가를 가져왔다.

(3) 가압유동층에서 열전달계수는 기체유속이 증가함에 따라 최대값을 나타내었으며 운전압력이 증가함에 따라 열전달계수가 최대값을 나타내는 때의 기체의 유속이 감소하는 것으로 나타났다.

(4) 가압유동층에서 내부열원과 기체-고체유동층간의 열전달계수는 다음과 같이 무차원수에 의한 상관식들로 나타낼 수 있었다.

$$Nu = 0.083 P_d^{0.33} Pr^{0.08}$$

$$Nu = 0.105 P_d^{0.31} Re^{0.11}$$

사용기호

A	: surface area [m ²]
C_p	: specific heat [J/kgK]
d_p	: particle size [m]
g	: gravity acceleration [m/sec ²]
h	: local heat transfer coefficient [W/m ² K]
k_p	: thermal conductivity [J/m sec K]
ΔL	: bed height [m]
Nu	: Nusselt number [-], $U_d \rho_s / k_p$
P	: pressure [Pa]
ΔP	: pressure drop [Pa]
P_d	: pressure drop number [-], $\Delta P d_p^3 / \epsilon_s \Delta L \rho_s \nu^2$
Pr	: Prantl number [-], $C_p \mu_s / k_p$
Q	: heat flow [W]
Re	: Roynolds number [-], $d_p U_g \rho_g / \mu_g$
T	: temperature [K]
ΔT	: temperature difference [K]
U	: overall heat transfer coefficient [W/m ² K]
U_g	: gas velocity [m/sec]

그리스 문자

ρ	: density [kg/m^3]
ϵ	: particle holdup [-]
ν	: kinetic viscosity of gas [m^2/sec]
μ_g	: gas viscosity [kg/m sec]

하첨자

g	: gas phase
s	: particle phase

참고문헌

1. 송병호, 강 용, 서용철, 진경태, 손재익, 김상돈: 화학공학의 응용과 이론, **2**(1), 833(1996).
2. 송병호, 강 용, 서용철, 진경태, 손재익, 김상돈: 화학공학, **34**(5), 619(1996).
3. Degang, R., Baosheng, J. and Mingyao, Z.: "Fluidized Bed Combustion", ASME, 1233(1991).
5. Shiao, S. Y., Warchol, J. J. and Botros, P. E.: "Fluidized Bed Combustion", ASME, 1183(1991).
6. Wallman, P. H. and Carlsson, R. C. J.: "Fluidized Bed Combustion", ASME, 1517(1991).
7. Shen, X., Zhou, N. and Xu, Y.: *J. of Southeast Univ.*, **20**(2), 29(1990).
8. 이영우, 손재익: 화학공업과 기술, **13**(1), 53(1995).
9. Chiba, S., Kawabata, J. and Chiba, T.: "Encyclopedia of Fluid Mechanics", Cheremisinoff, N. P. ed., Gulf Publishing Co., **4-2**, 929(1986).
10. Grewal, N. S.: "Encyclopedia of Fluid Mechanics", Cheremisinoff, N. P. ed., Gulf Pub. Co., **4-2**, 647(1996).
11. Molerus, O. and Schweinzer, J.: Proc. 9th International Conf. on Fluidized Bed Combustion, 624(1987).
12. Bouratoua, R., Molodtsov, Y. and Koniuta, A.: "Fluidized Bed Combustion", ASME, 63(1993).
13. Verloop, W. C., Boersma, D., Vanden Akker, H. E. A. and Hein, K. R. G.: "Fluidized Bed Combustion", ASME, 53(1993).
14. Carpenter, L., Langan, W., Dellefield, R., Nelkin, G. and Hand, T.: "Fluidized Bed Combustion", ASME, 467(1991).
15. Figliola, R. S.: "Mixed-Flow Hydrodynamics", Cheremisinoff, N. P. ed., Gulf Co., 647(1996).