

## 고체입자 순환유동층 열교환기의 열전달률 및 압력강하 측정

이 금 배<sup>†</sup>, 전 용 두, 박 상 일\*  
 공주대학교 기계공학부, \*한국에너지기술연구소 공업로연구팀

### Measurement of Heat Transfer Rates and Pressure Drops in a Solid Particle Circulating Fluidized Heat Exchanger

Kum-Bae Lee<sup>†</sup>, Yong-Du Jun, Sang-Il Park\*

Department of Mechanical Engineering, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

\*Industrial Furnace Research Team, KIER, Daejeon 305-343, Korea

(Received February 21, 1999; revision received July 12, 2000)

**ABSTRACT:** The fluidized solid particles not only increase heat transfer rates but have a cleaning function eliminating contaminated substances caused from condensate water. An experiment was performed to measure heat transfer rates and pressure drops in a fluidized heat exchanger with circulating solid particle for constant heat transfer rate. As a results, the heat transfer rate increased by 26.9~2.6%, heat transfer coefficient by 11.9~2.7%, and pressure drop by 79.1~10.9% at the gas velocity of 6.1~12.1 m/s and solid particle flow rate of 100~50 kg/h with the heat exchanger of H=50 mm,  $D_p=2$  in, and  $D_{BP}=30$  mm.

**Key words:** Circulating fluidized heat exchanger(순환유동층 열교환기), Solid particles(고체입자)

#### 기 호 설 명

$DP$  : 압력강하 [mmAq]  
 $D_{BP}$  : 배플 플레이트 구멍지름 [mm]  
 $D_p$  : 열교환기 관 직경 [in]  
 $H$  : 배플판부터 열교환기 입구까지 거리 [mm]  
 $h$  : 열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]  
 $m$  : 질량 유량 [kg/h]  
 $Q$  : 열전달률 [W]  
 $Q_{add}$  : 고체입자에 의해 전달된 열전달률 [W]  
 $T$  : 온도 [ $^{\circ}C$ ]

$T_{ic}$  : 입구실 온도 [ $^{\circ}C$ ]  
 $V_g$  : 가스 속도 [m/s]

#### 그리스 문자

$\delta_c$  : 고체입자들에 (clusters) 의해 덮여진 벽면적 부분  
 $\eta_Q$  : 식(5)에서 정의된 열전달률 증가  
 $DP$  : 식(8)에서 정의된 압력강하 증가율

#### 하첨자

ave : 평균  
 g, s, w : 가스, 고체입자, 벽  
 tot : 총  
 1, 2 : 입구, 출구

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-41-857-3527; fax: +82-41-854-1449

E-mail address: kumbae@knu.kongju.ac.kr

## 1. 서 론

고체입자는 열용량이 커서 열교환기의 소형화가 가능하고, 내식성이 강하므로 부식성의 배가스에서도 사용 가능하며, 응축수에 의해 분진 등이 전열면에 축적되는 것을 제어하여 청소기능을 가지며, 열교환기 전열면에 고체입자가 유동화되기 때문에 전열효율이 크게 증대된다. 특히 화학적으로 안정되어서 오염될 가능성이 적고 반복 사용이 가능하여 환경 오염을 크게 줄일 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있다. 이와 같이 많은 장점을 지니고 있는 고체입자를 이용한 순환유동층 열교환기 시스템과 관련한 연구는 국외에서는 활발하게 연구개발이 진행되어 왔고 상용화도 되고 있으나, 국내에서는 초보적인 연구가 진행되고 있다.

Basu and Nag<sup>(1)</sup>는 공압속도(superficial velocity), 고체입자 유량, 고체입자의 크기 등을 변화시켜 벽면으로부터의 열전달은 부유비중(suspension density)에 비례하나, 고체입자 유량이 일정한 상태에서 유동속도를 증가시키면 열전달률은 감소하는 것을 보여주었다. Wu et al.<sup>(2)</sup>은 평균 열전달계수와 부유비중은 거의 선형적(linearly)으로 비례하는 것을 보였으며, Luong and Bhattacharya<sup>(3)</sup>는 국부열전달계수는 부유비중과 입자유량이 증가하면 증가하고, 고체입자가 크면 작아지는 것을 보여 주었다. 이외에도 실험 및 이론으로 순환유동층을 이용한 연구를 많은 사람들이 수행하였다.<sup>(4-8)</sup>

국내에서는 Lee and Park<sup>(9)</sup>은 열교환기 내부의 유동을 프러그 흐름으로 가정하여 고체입자 이동층과 관벽 사이의 열전달에 대한 연구를 실험 및 이론적으로 수행하였다. Park et al.<sup>(10)</sup>은 고체입자와 고온의 배가스를 직접 접촉시켜 고체입자를 1차로 가열시킨 다음, 2차로 공업로 등으로 들어가는 저온의 연소용 공기를 가열된 고체입자와 직접 접촉시켜 가열하는 다단 유동층 공기에열기 시스템을 연구 개발하였다. 또한 Lee et al.<sup>(11-12)</sup>은 단일관내에 고체입자를 유동시켜 열전달률은 부유비중(suspension density)과 비례하여 증가하고, 고체입자 유량이 일정한 상태에서 공기속도를 증가시키면 열전달률은 감소하는 경향을 보여 주고 있으며, 이는 Basu and Nag<sup>(1)</sup>의 결과와 비슷하다.

본 연구는 고체입자 유동층 열교환기 설계시 주요한 변수들인 열교환기 직경, 배플판 구멍직경, 혼합실 높이들이 열전달률과 압력강하에 미치는 영향을 알아보았다. 이를 위하여 단일관내로 흐르는 유체 및 고체입자의 전열량 및 압력강하를 구하기 위해 관 표면의 열유속을 일정하게 유지시키고, 관내로 흐르는 기체의 열전달을 촉진시키기 위해 고체입자를 순환유동시켜 실험을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 이론해석

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 상온의 공기가 송풍기(blower)에 의해 유량조절밸브 및 유량계를 거쳐 열교환기로 들어간다. 유량조절밸브는 3" 게이트밸브를 사용하였다. 유량계는 터빈타입이며 측정범위는 10~160 m<sup>3</sup>/h이다. 열교환기 표면에 일정한 열을 공급하기 위해 용량 3kW의 슬라이덕스를 사용하였으며, 전력량을 측정기 위해 디지털 전력계(digital wattmeter)를 사용하여 전압(V), 전류(A), 전력량(W)을 측정하였다. 압력은 마이크로 차압계(micro manometer와 scanning box)를 이용하여 온도와 같이 60채널의 기록계(recorder)로 받아 컴퓨터를 통하여 자료를 얻었다.

Fig. 2는 열교환기 및 그 주변장치들을 자세히 보여주고 있다. 송풍기로부터 보내진 공기는 입구실(⑤ inlet chamber)을 거쳐 배플판(④ baffle

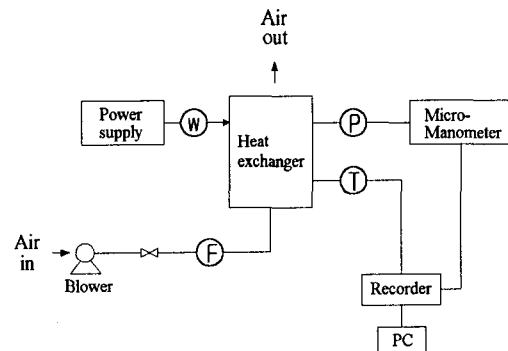


Fig. 1 Flow diagram of experimental apparatus.

plate)의 작은 구멍을 지나 혼합실(③ mixing chamber)에서 고체입자와 혼합하여 관성력(inertial force)에 의해 열교환기(② 상승관(riser))를 거쳐 저장실(① storage chamber)을 지나 외부로 배출된다. 열교환기에서 저장실로 보내진 고체입자는 중력에 의해 하강관(⑦ return leg)으로 내려오며 고체입자 유량 조절밸브를 거쳐 혼합실에서 다시 공기와 혼합하여 관성력에 의해 상승관으로 보내져 순환과정을 반복한다. 저장실 상단에는 공기만 외부로 배출되고 고체입자는 통과하지 못하도록 조밀한 철망을 설치하였다.

모래입자의 거동을 관찰키 위해 저장실, 혼합실 및 입구실 상단을 아크릴로 제작하였으며, 하강관도 입자의 하강상태 관찰 및 입자유량을 측정키 위해 아크릴관으로 설치하였다. 하강관 하단에 설치한 2" 볼밸브(ball valve)는 입자유량 조절용이다. 열교환기는 스테인레스 스틸(SUS 304)로 제작하였다. Fig. 2에서 열교환기 하단의 플랜지부터 상단 플랜지까지의 길이 1m가 열교환기

이다. 열교환기에 일정한 열을 전달키 위해 사용한 니크롬선은 지름 0.5 mm, 저항 6.2 Ω/m의 Silver Kohki사 제품을 사용하였으며, 5 mm 간격으로 설치하였다.

열전대는 T타입을 사용하였으며 공기온도 측정용으로 입구실 1개, 열교환기 내에 7개, 실험실 내에 1개 등 9개를 설치하였다. 열교환기 외벽에는 각 지점에 2개씩 10개, 고체입자 측정용으로는 하강관 상단 및 하단에 각 1개씩 2개를 설치하였다. 'x'로 표시된 곳이 열전대 설치위치이며, 'Ⓟ'로 표시된 곳은 압력 측정위치이다.

2.2 실험방법

사용한 고체입자는 지름이 0.5~0.8 mm 정도 되는 타원형의 미세한 유리입자(borosilicate; SiO<sub>2</sub>)이며, 비중은  $\rho = 2230 \text{ kg/m}^3$ , 정압비열은  $c_p = 0.779 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (25°C에서), 열전도도는  $k = 1.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , 정지상태에서 다공성은  $\epsilon = 0.33 \sim 0.36$ 이다.

실험은 먼저 하강관(return leg)에 고체입자를 가득 채운 후 기록계, 압력계 및 컴퓨터를 가동시켜 열전대 및 압력계의 작동상태를 점검한 후, 송풍기를 가동시킨다. 이어 고체입자 조절밸브를 열어 실험하고자 하는 유량에 입자유량과 공기유량을 맞춘다. 공기 및 고체입자가 원하는 유량으로 가동되면 슬라이더스를 가동시켜 200 W에 열 입력량을 고정시킨다. 열교환기 입구에서 공기온도가  $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$  범위에 있도록 7.5 HP의 항온항습기를 가동시켜 실내온도를 일정하게 한다. 온도

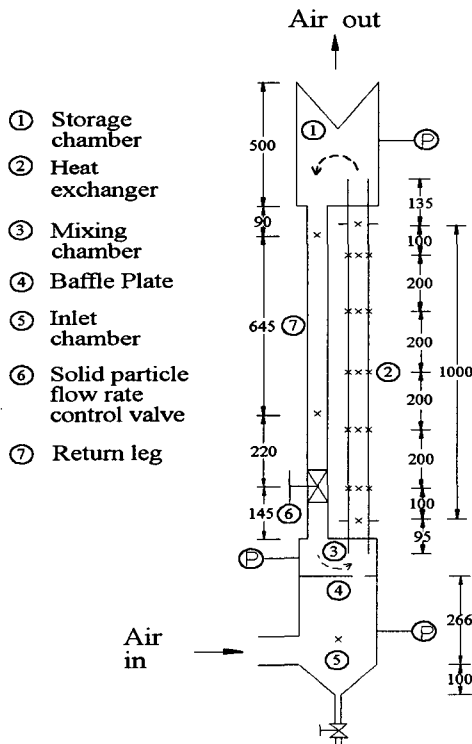


Fig. 2 Schematic diagram of a heat exchanger system.

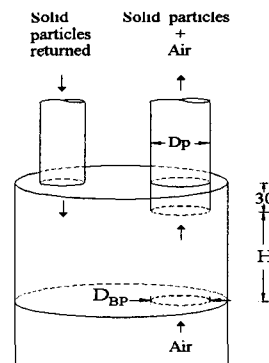


Fig. 3 Main design factors of heat exchanger system.

및 압력이 정상상태가 되면 실험자료들을 기록한 후 고체입자 유량이나 공기유량을 변화시켜 실험을 계속한다.

Fig. 3은 열전달, 압력강하, 고체입자와 공기의 혼합 등에 지대한 영향을 끼치는 열교환기 시스템의 주요한 구조인자들을 보여주고 있으며, 실험시 이들을 주요 변수로 채택하였다. 본 실험에서는 배플판의 구멍직경( $D_{BP}$ )은 30 mm, 25 mm, 20 mm 3종류, 열교환기의 직경( $D_p$ )은 2" 및 1.5" 2종류를 사용하였으며, 배플판으로부터 열교환기 입구까지의 거리( $H$ )는 50 mm, 35 mm, 20 mm로 변화시켜 실험을 수행하였다. 공기유량 범위는 40~100 m<sup>3</sup>/hr, 고체입자 유량은 0~100 kg/hr로 하였으며, 열교환기의 입열량은 200 W로 고정하였다.

### 2.3 이론해석

열교환기를 통과하면서 관벽으로부터 공기 및 고체입자에 전달된 전열률은 각각

$$Q_g = m_g \cdot c_p \cdot (T_{g,2} - T_{g,1}) \quad (1)$$

$$Q_s = m_s \cdot c_p \cdot (T_{s,2} - T_{s,1}) \quad (2)$$

이며, 혼합실내 혼합과정 중 고체입자로부터 공기에 전달된 열은

$$Q_{add} = m_g \cdot c_p \cdot (T_{g,1} - T_{i,c}) \quad (3)$$

이다. 따라서 열교환기 시스템으로부터 회수되어 지는 총 전열률은

$$Q_{tot} = Q_g + Q_s + Q_{add} \quad (4)$$

이다. 열전달률 증가율  $\eta_Q$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_Q = \frac{Q(m_s) - Q(m_s=0)}{Q(m_s=0)} \quad (5)$$

여기서  $Q(m_s=0)$ 는 고체입자 없이 공기만 사용할 경우이고,  $Q(m_s)$ 는 공기유량은  $Q(m_s=0)$  시와 같고 추가로 고체입자를 순환유동시켰을 때

의 전열률이다. 어느 미소구간에서 총 국부전열 계수는 참고문헌<sup>(1,4)</sup>에 의하면 다음과 같이 정의하였다.

$$h = (1 - \delta_c) \cdot h_g + \delta_c \cdot h_s \quad (6)$$

여기서

$$(1 - \delta_c) \cdot h_g = \frac{dQ_g}{dA \cdot (T_w - T_g)}$$

$$\delta_c \cdot h_s = \frac{dQ_s}{dA \cdot (T_w - T_s)}$$

여기서  $T_s$ 는 다음과 같이 구하였다. 고체입자 출구온도  $T_{s,2}$ 는 Fig. 2의 하강관(⑦)의 상단에서 측정된 온도로 가정하였다. 이는 열교환기 외부로 배출된 고체입자는 저장실(①)을 거쳐 하강관으로 들어오는 시간이 매우 짧아 열손실이 거의 없다고 가정하였다. 하강관에서는 고체입자가 쌓여서 천천히 밑으로 내려가도록 하였다. 고체입자 입구온도  $T_{s,1}$ 은 하강관 하단에서 측정된 고체입자 온도와 식(3)에서 계산한  $Q_{add}$ 로부터 구하였다. 고체입자 입출구온도를 가지고 열교환기 내에서 선형으로 분포되었다고 가정하여 고체입자 국부온도를 구하였다. 열교환기 내에서 고체입자 온도를 측정하기가 매우 어렵기 때문이다.

평균 열전달계수  $h_{ave}$ 는 다음 식으로부터 구한다.

$$h_{ave} = \frac{1}{L} \int_0^L h \, dx \quad (7)$$

여기서  $L$ 은 열교환기의 길이이다.

압력강하  $DP$ 는 입구실(inlet chamber)과 열교환기 출구(storage chamber) 사이에서의 압력차이다. 압력강하 증가율은 다음과 같이 정의한다.

$$\phi_{DP} = \frac{DP(m_s) - DP(m_s=0)}{DP(m_s=0)} \quad (8)$$

### 3. 실험결과 및 분석

고체입자 유동층 열교환기 설계시 주요한 변수

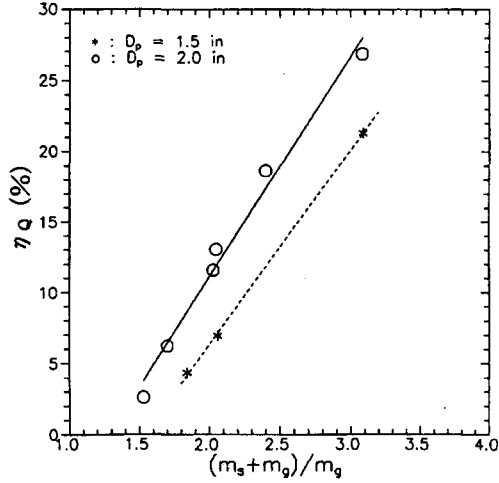


Fig. 4 Effect of solid particle mass flow rate on heat transfer ( $H=50$  mm,  $D_{BP}=30$  mm).

들인 열교환기 직경( $D_p$ ), 배플판 구멍직경( $D_{BP}$ ), 혼합실 높이( $H$ )들을 변화시켜 실험을 수행하였으며, 이들이 각각 열전달률과 압력강하에 미치는 영향을 조사하였다.

### 3.1 열교환기 직경

Fig. 4~5는 열교환기 직경이 열전달률 및 압력강하에 미치는 영향을 보여준다. 사용되어진 판의 직경은 2 in와 1.5 in이다. Fig. 4는 질량유량비( $(m_s+m_g)/m_g$ )에 대한 열전달률의 증가율( $\eta_Q$ )을 보여주고 있다. 질량유량비가 증가함에 따라  $\eta_Q$ 는 열교환기 직경에 상관없이 거의 선형으로 증가하고 있다. 같은 질량유량비인 경우  $D_p=2$  in인 경우가  $D_p=1.5$  in보다 증가율이 더 크게 나타나고 있다.

Fig. 5는 질량유량비에 대한 압력강하의 증가율( $\phi_{DP}$ )을 보여주고 있다. 질량유량비가 증가함에 따라 압력강하 증가율은 서서히 증가하다가 기율이 점점 커지면서 급격하게 증가하고 있다. 같은 질량유량비에서는  $m_s$ 가 작고,  $D_p$ 가 작아짐에 따라 증가율은 더 커지고 있다. 따라서 같은 질량유량비에서 2 in 판이 1.5 in 판보다 열전달 증가율은 더 크고 압력강하 증가율은 작으므로 성능면에서 2 in 판이 더 우수하다.

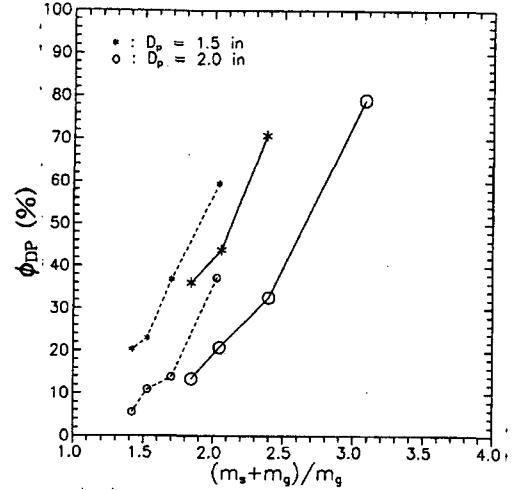


Fig. 5 Effect of solid particle mass flow rate on pressure drop ( $H=50$  mm,  $D_{BP}=30$  mm, --- :  $m_s=50$  kg/h, — :  $m_s=100$  kg/h).

### 3.2 배플판 구멍직경

Fig. 6~7은 배플판 구멍직경을 변화시켜 열전달률 및 압력강하의 증가율을 조사하였다.

Fig. 6에서는 질량유량비가 증가하면서 배플판 구멍직경의 크기에 상관없이 열전달 증가율도 비례하여 거의 선형으로 증가하고 있다.  $D_{BP}$ 가 25 mm와 30 mm인 경우 차이가 별로 없으나,  $D_{BP}=20$  mm인 경우는  $\eta_Q$ 가 훨씬 작게 나타났다. 따라서 배플판 구멍직경이 클수록 열전달 증가율은 더 커지고 있다.

$D_{BP}=30$  mm인 경우  $(m_s+m_g)/m_g=1.5\sim 3.1$ 일 때  $\eta_Q=2.6\sim 26.9\%$ 의 증가율을 보여주고 있다.

Fig. 7은 질량유량비에 대한 압력강하 증가율을 보여주고 있다. 질량유량비가 증가하면 압력강하증가율은 빠르게 증가하고 있으며, 배플판 구멍직경이 증가함에 따라 압력강하 증가율은 더 커지고 있다.

Fig. 8은 평균 열전달계수( $h_{ave}$ )에 따른 압력강하의 값들을 보여주고 있다. 평균 열전달계수와 압력강하는 거의 선형으로 증가하고 있으며, 이는 Wirth<sup>(5)</sup>의 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다. 배플판 구멍의 크기를 변화시켜도 그 경향은 거의 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 구멍이 작아

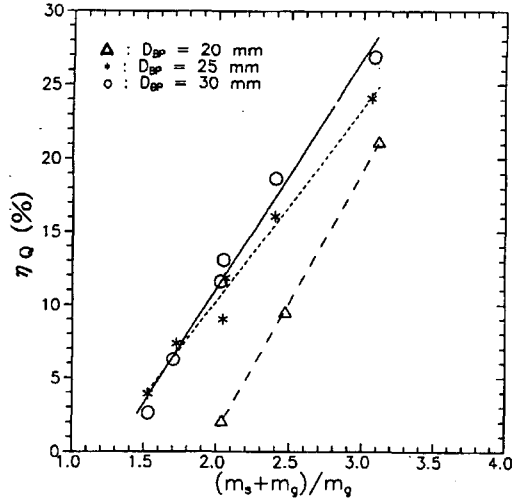


Fig. 6 Effect of solid particle mass flow rate on heat transfer ( $H=30$  mm,  $D_p=2$  in).

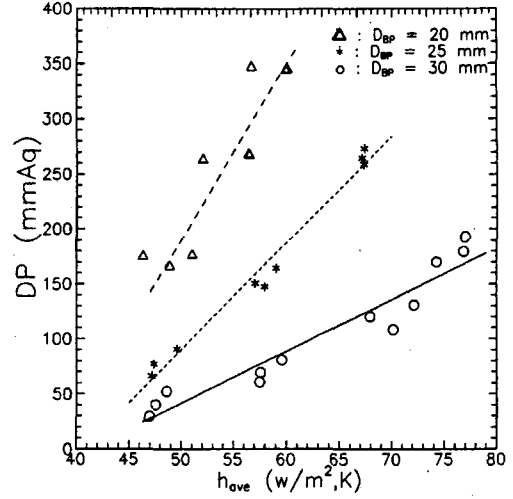


Fig. 8 Pressure drops as a function of average heat transfer coefficient ( $H=50$  mm,  $D_p=2$  in).

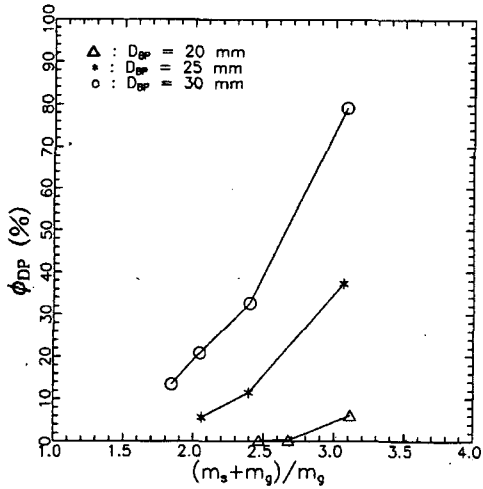


Fig. 7 Effect of solid particle mass flow rate on pressure drop ( $H=30$  mm,  $D_p=2$  in,  $m_s=100$  kg/h).

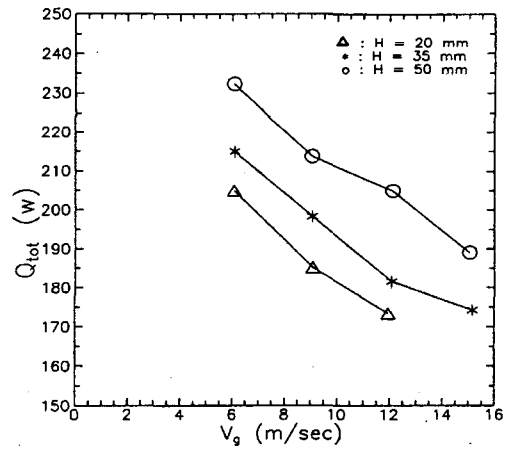


Fig. 9 Total heat transfer rates as a function of air velocity ( $D_p=2$  in,  $D_{BP}=30$  mm,  $m_s=100$  kg/h).

지면 압력강하의 크기가 더 커지면서 기울기는 점점 증가하고 있다.

3.3 혼합실 높이

Fig. 9~10은 배플판으로부터 열교환기 입구까지 거리  $H$ 를 변화시켰을 때 총 전열량( $Q_{tot}$ ) 및 압력강하(DP)의 값들을 보여주고 있다.

Fig. 9에서 공기속도가 증가하면 전열량은 감소하며, 같은 속도하에서  $H$  값이 클수록 열전달률이 더 커지고 있다. 이는 혼합실에서 고체입자와 공기의 혼합시간이 길어 온도가 높은 고체입자에서 저온의 공기로 열( $Q_{add}$ )이 더 많이 전달되기 때문이다.

Fig. 10은  $H$  값에 따라 압력강하의 크기를 보여주고 있다.  $H=20$  mm와  $H=35$  mm일 때 크기

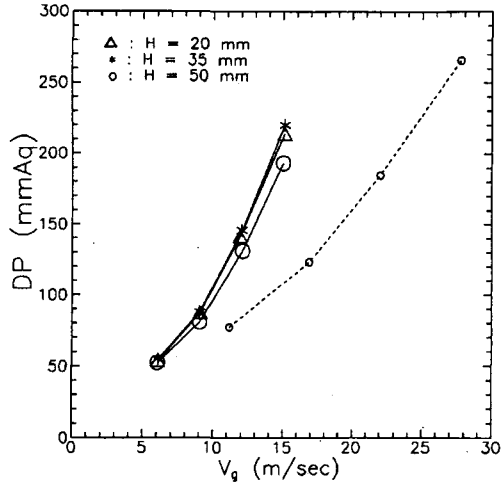


Fig. 10 Pressure drops as a function of air velocity ( $D_{BP}=30$  mm,  $m_s=100$  kg/h, ---- :  $D_p=1.5$  in, — :  $D_p=2$  in).

가 거의 같으나,  $H=50$  mm일 때는 약간 작아지고 있다. 관 직경에 따라 압력강하의 차는 크게 나타나고 있으나, 같은 관직경인 경우  $H$ 값은 압력강하에 거의 영향을 미치지 않고 있다.

#### 4. 결 론

열전달을 촉진시키기 위하여 상온의 공기에 고체입자를 순환유동시켜 일정한 열을 받는 관벽으로부터 열을 회수하는 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 관 직경이 클수록 열전달 증가율은 더 크고 압력강하 증가율은 더 작다.

(2) 배플판 구멍직경이 클수록 열전달 및 압력강하 증가율은 동시에 증가하고 있으나, 압력강하 증가에 비해 열전달계수가 더 빠르게 증가하고 있다.

(3) 배플판으로부터 열교환기 입구까지의 거리 ( $H$ )는 클수록 고체입자와 공기의 혼합 시간이 길어 전열량은 크게 증가하고 있으나, 압력강하에는 거의 영향을 미치지 않고 있다.

이들 결과들로부터 본 연구의 실험범위 내에서 관 직경은 2 in, 배플판 구멍은 30 mm, 혼합실 높이는 50 mm가 가장 우수한 성능을 낼 수 있는 열교환기 설계치수들이다.

#### 후 기

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비(과학기술기초 중점연구과제; 과제번호 1998-018-E00013) 지원에 의해 일부 추진되고, 일부는 1997년도 한국에너지기술연구소 위탁과제로서 수행된 것으로, 이에 관계자 제위께 진심으로 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Basu, P. and Nag, P. K., 1987, An investigation into heat transfer in circulating fluidized beds, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 11, pp. 2399-2409.
2. Wu, R. L., Lim, C. J. and Grace, J. R., 1989, The measurement of instantaneous local heat transfer coefficients in a circulating fluidized bed, *The Canadian J. of Chemical Engineering*, Vol. 67, April, pp. 301-307.
3. Luong, P. H. and Bhattacharya, S. C., 1993, A study of heat transfer in a circulating fluidized bed, *International J. of Energy Research*, Vol. 17, pp. 491-501.
4. Bhattacharya, S. C. and Luong, P. H., 1994, Modelling heat transfer in a circulating fluidized bed, *International J. of Energy Research*, Vol. 18, pp. 1-7.
5. Wirth, K. E., 1995, Heat transfer in circulating fluidized beds, *Chemical Engineering Science*, Vol. 50, No. 13, pp. 2137-2151.
6. Chen, C. C. and Chen, C. L., 1992, Experimental study of bed-to-wall heat transfer in a circulating fluidized bed, *Chemical Engineering Science*, Vol. 47, No. 5, pp. 1017-1025.
7. Qi, C. and Farag, I. H., 1994, Heat transfer mechanism due to particle convection in circulating fluidized bed", *The Canadian J. of Chemical Engineering*, Vol. 72, April, pp. 354-357.
8. Watanabe, T., Chen, Y., Hasatani, M. and Naruse, I., 1993, Gas-solid interfacial heat transfer in circulating fluidized beds, *Heat*

- Transfer-Japanese Research, 22(3), pp. 269-280.
9. Lee, K. B. and Park, S. I., 1994, Heat transfer to a downward moving solid particle bed through a circular tube, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 18, No. 6, pp. 1551-1558.
  10. Park, S. I., etc., 1990, 1991, 1992, Development of direct-contact heat exchanger using solid particles (I), (II), (III), Research report of Korea Institute of Energy and Resources.
  11. Lee, K. B., Lee, Y. M. and Park, S. I., 1998, Measurement of heat transfer coefficient and pressure drop in a circulating fluidized heat exchanger, Proceedings of the SAREK '98 Winter Annual Conference (II), pp. 784-789.
  12. Lee, K. B. and Lee, Y. M., 1998, Measurement of the heat transfer coefficient in a circulating fluidized heat exchanger using solid particles, Research report of Kongju National Uni., Korea.