

순환유동층 열교환기내 유동과 열전달 특성

안 수 환[†], 이 병 창^{*}, 김 원 철, 이 윤 표^{**}

경상대학교 수송기계공학과 해양산업연구소, ^{*}경상대학교 대학원, ^{**}한국과학기술연구원

Characteristics of Fluid Flow and Heat Transfer in a Fluidized Bed Heat Exchanger

Soo Whan Ahn[†], Byung-Chang Lee^{*}, Won-Cheol Kim, Yoon-Pyo Lee^{**}

School of Transport Vehicle Engineering, Gyeongsang National University, Institute of Marine Industry, Tongyong 650-160, Korea

^{*}Marine Engineering Dpt, Graduate School, Gyeongsang National University, Tongyong 650-160, Korea

^{**}Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute Science Technology, Seoul 136-791, Korea

(Received November 17, 2001; revision received February 7, 2002)

ABSTRACT: The commercial viability of heat exchanger is mainly dependent on their long-term fouling characteristics because the fouling increases the pressure loss and degrades the thermal performance of a heat exchanger. An experimental study was performed to investigate the characteristics of fluid flow and heat transfer in a fluidized bed heat exchanger with circulating various solid particles. The present work showed that the drag force coefficients of particles in the internal flow were higher than those in the external flow, in addition, the solid particle periodically hitting the tube wall broke the thermal boundary layer, and increased the rate of heat transfer. Particularly when the flow velocity was low, the effect was more pronounced.

Key words: Fluidized bed heat exchanger(순환유동층 열교환기), Solid particle(고체입자), Drag coefficient(항력계수), Fouling(오염), Heat transfer(열전달)

기 호 설 명

A : 접촉면 [m^2]

C_d : 마찰저항계수

D : 직경 [m]

D_e : 수력 직경 [m]

F_b : 부력 [N]

F_d : 저항력 [N]

F_g : 중력 [N]

g : 중력가속도 [m/s^2]

h : 열전달계수 [W/m^2K]

Nu : 누셀트수

Re : 레이놀즈수

U : 열교환기 출구 유체속도 [m/s]

U_r : 상대속도 [m/s]

V : 관내 유체속도 [m/s]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-557-640-3125; fax: +82-557-640-3128

E-mail address: swahn@gshp.gsnu.ac.kr

현주소 : 창원대학교 대학원 기계공학과

그리스 문자

ν : 동점성 계수 [m^2/s]

하첨자

- 1 : 고체입자 직경
 2 : 튜브 직경
 o : 고체입자가 순환하지 않는 경우
 p : 고체입자가 순환하는 경우
 w : 유체(물)

1. 서 론

열교환기 내에서 내식성이 강한 고체입자를 순환유동시키면, 고체입자는 열용량이 크므로 열교환기의 소형화가 가능하고, 내식성이 강하므로 부식성의 배기가스에서도 사용 가능하며, 응축수에 의한 분진 등이 전열면에 축적되는 것을 제어하는 청소기능을 한다. 그러므로 화학적으로 안정되어 오염될 가능성이 적고 반복 사용이 가능한 고체입자가 열교환기 전열면에 유동하면 전열 효율을 향상시키고 환경오염을 크게 줄일 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있다. 이와 같이 많은 장점을 지니고 있는 고체입자를 이용한 순환유동층 열교환기 시스템과 관련된 연구는 국외에서도 활발하게 연구개발이 진행되어 상용화되고 있으나, 국내에서의 연구는 초보적인 단계이다.⁽¹⁾ 열교환기 내 유동하는 유체 속에 고체입자를 첨가하여 순환유동층 열교환기 성능을 향상시키는 방법에 관하여 몇몇 연구자들에 의하여 연구되고 있다.⁽²⁻⁴⁾ 이러한 순환유동층 열교환기는 미국에서 Hatch and Wetch⁽⁵⁾에 의해 처음 조수기(desalination system)의 브라인(brine) 가열기로 개발되었다. 순환유동층 열교환기 제작에 필요한 연구에서 Basu and Nag⁽⁶⁾는 피상속도(superficial velocity), 고체입자 유량, 고체입자의 크기 등을 변화시켜 조사한 결과 벽면으로부터의 열전달은 부유(suspension) 비중에 비례하나, 고체입자 유량이 일정한 상태에서 유동속도를 증가시키면 열전달률은 감소함을 보였다. 그리고 Grace⁽⁷⁾는 순환유동층 밀도가 열전달에 큰 영향을 미친다고 예측하였으나 이러한 예측은 Fraley et al.,⁽⁸⁾ Kiang et al.,⁽⁹⁾ 그리고 Stromberg⁽¹⁰⁾의 실험자료에 기초를 두었다. 국내에서는 Lee and Park⁽¹¹⁾은 열교환기 내부의 유동을 프러그 흐름으로 가정하여 고체입자 이동층과 관벽 사이의 열전달에 대한 연구를 실험과 이론적으로 수행하였다. 그

리고 Lee et al.⁽¹¹⁾이 공기를 작동유체로 한 순환유동층 열교환기에서 열교환기 직경, 배플관 구멍 직경, 그리고 혼합실 높이를 변수로 하여 열전달계수와 압력강하에 대해 조사하였다. Lee et al.⁽¹²⁾은 2 mm와 3 mm 직경의 유리입자를 대상으로 한 가시화 실험을 통하여 유체입자의 거동특성을 조사한 뒤 열전달실험과 장시간에 걸친 오염(fouling)실험을 행하여 농축폐수 시스템에 적용할 수 있는 순환유동층 열교환기 제작에 필요한 기초자료를 제공하였다.

본 연구에서는 고체입자의 자연순환에 의하여 오염물질을 세정함으로써 오염(fouling)이 되지 않는 최적의 순환유동층 열교환기를 개발하는 데 필요한 자료를 제공하고자 유리입자, 철, 구리, 알루미늄, 모래 등 다양한 입자들에 대하여 순환유동층 열교환기의 자울세정특성 및 열교환특성, 그리고 CCD 카메라를 이용한 가시화 실험을 통해 유동특성과 고체입자의 거동을 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 가시화 실험과 열전달 실험을 동시에 할 수 있는 본 연구의 실험장치 개략도와 실제모습이다. 시험부의 높이는 705 mm이고 통(shell)의 내경은 80.4 mm, 다관(tubes)의 내경은 13.86 mm로 하였다. 시험부 출구측에 스크린을 설치하여 고체입자들이 밖으로 나가지 않게 하였고, 입구측에는 입구관을 U자형으로 제작하여 운전이 정지시에는 입자들이 U관의 아래부분 쪽으로 입자들이 모이게 하여 더 이상 입자들이 전진되지 않게 하였다. 시험부에는 통(shell) 내부에 수돗물을 채우고 그 속에 관들(tubes)을 설치하였으며 내부 다관 간에 유체와 고체입자가 순환되도록 하였다. 주의의 온도는 22℃에서 24℃ 사이였다. 유체순환은 자석식(magnetic type) 펌프를 사용하여 고체입자나 오염된 환경에서 작동에 문제가 없도록 하였다. 열전달 실험장치는 스테인레스강(SUS 304)으로 제작하였다. Fig. 1과 같이 가시화 시험부와 열전달 시험부는 밸브에 의해 분리되므로 가시화 실험을 행할 때에는 유체순환이 열전달 시험부측에는 가지 않도록 하였다.

가시화 실험에 사용된 입자들은 유리 1종, 알루미늄 2종, 스테인레스 2종, 구리 1종, 그리고 모래 1종으로 전부 7종이며 자세한 제원은 Table

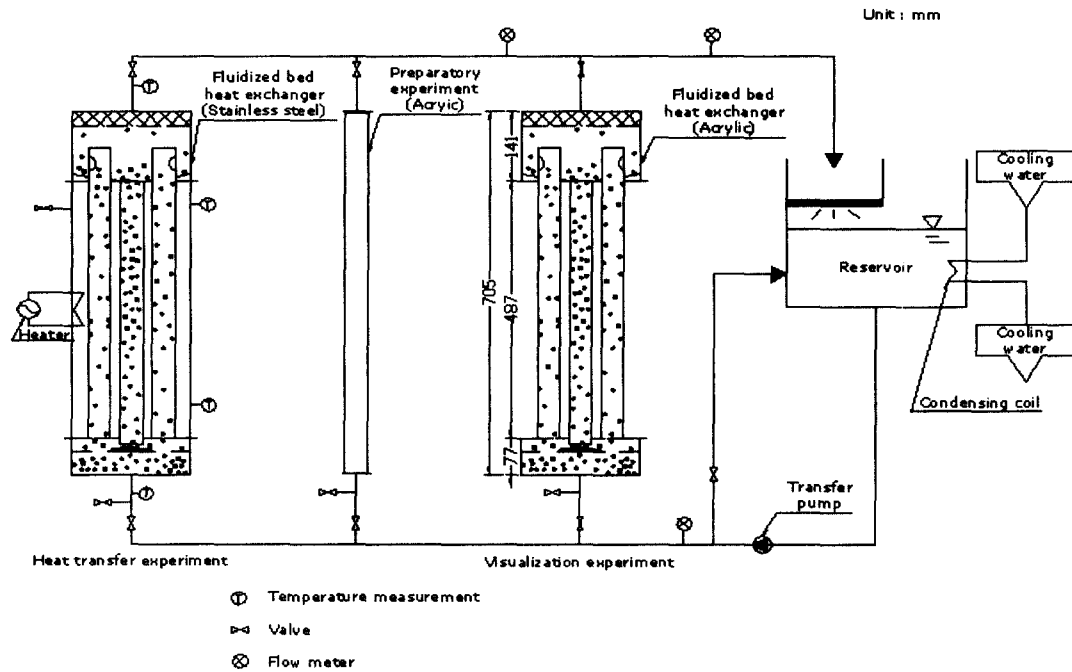


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

Table 1 Details of particles in fluidized bed

Classification	Material	Geometry	Dimension
Case (A)	glass	bead	3 mm ϕ
Case (B)	Al	cylinder	2 mm ϕ , 4.5 mmL
Case (C)	Al	cylinder	3 mm ϕ , 2 mmL
Case (D)	steel	cylinder	2 mm ϕ , 4.5 mmL
Case (E)	steel	cylinder	2.5 mm ϕ , 2.88 mmL
Case (F)	Cu	cylinder	2.5 mm ϕ , 2.88 mmL
Case (G)	sand	grain	2.0 mm ~ 4.0 mm ϕ

1과 같다. 경사면을 가진 순환유동층 열교환기의 입자순환은 주변의 튜브에 의하여 상승한 구슬은 상부의 확대된 단면에 의하여 속도가 감소하게 된다. 따라서 자중에 의하여 바닥에 떨어지게 되는데 이때 경사에 의하여 가운데 튜브로 굴러 가게 된다. 가운데 튜브는 하부에 유체의 상승이 가급적 적게 되도록 정지판을 둬으로써 가운데 튜브로 가는 유량은 매우 적게 된다.

가운데 튜브에는 상층부에서 경사에 의해 쌓이는 구슬 때문에 압력손실이 상승하게 된다. 정지판과 상승된 입자들로 인하여 가운데 튜브 내부는 주변 튜브 내부보다 압력손실이 크므로 주변 튜브에서는 계속적인 유체의 상승과 함께 입자의

상승이 일어나고 가운데 튜브에서는 입자의 하강과 함께 유체의 하강이 이루어진다. 하부의 분배판은 유체가 순환 중에는 유체를 각 튜브 내로 보내는 역할을 한다(Fig. 2 참조).

또한 작동중에는 하강한 입자가 평판 아래로 내려오지 않고 평판 위에서 다시 상승 튜브로 보내어진다. 그러나 펌프가 정지하여 유체의 순환

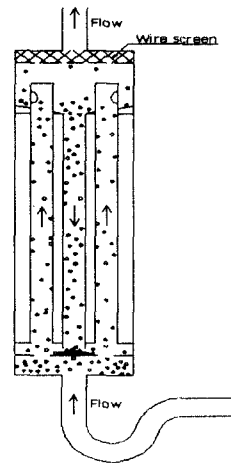


Fig. 2 Principle of particle circulation.

이 정지하면 입자의 일부는 판 위의 구멍을 통하여 아래로 내려오고 일부는 판 위에 얹혀져 다음 작동을 기다리게 된다. 작동유체는 오염도가 낮은 수돗물을 사용하였다. 순환유량은 정지밸브와 바이패스 장치에 의해 조절하였다. 유량계는 적층식을 사용하였고 시험부 입구에 1개와 출구에 2개를 설치하였다. 가시화용 시험부에는 투명 아크릴재료를 사용하여 CCD 카메라 촬영에 용이하도록 하였다. 열전달 실험에 사용된 입자들은 가시화 실험에 사용했던 유리(bead, 직경 3 mm) 1종, 알루미늄(cylinder, 직경 3 mm) 1종, 구리(cylinder, 직경 2.5 mm) 1종, 그리고 강(cylinder, 직경 2.5 mm) 1종으로 체적은 모두 동일하게 하였고 모래(직경 2~4 mm)를 사용하여 모두 5종으로 하였고 모래를 제외하고 모두 거의 동일한 체적을 사용하였고 체적값은 14 mm^3 이었다. 실험은 먼저 물만이 흐른 경우에 대해 유속이 0.4에서 2.0 m/s까지 열전달 실험을 수행하였으며 3시간에 걸쳐 한번씩 나누어 두 번 측정하였다. 주위 온도는 모든 실험과정에서 23°C 와 26°C 사이에 들었다. 그리고 온도측정은 자료획득장치(MIRAE ENG., 36Ch)와 수은 온도계로 보정한 PT105 Ω 로 행하였고 고체입자의 체적농도는 4.8 v%로 일정하게 유지하였다.

3. 이론해석

3.1 가시화 실험에 대한 해석

유동중인 유체 속의 고체입자에 작용하는 힘은 Fig. 3과 같이 작용한다. 고체입자의 질량(kg)을 m_p 라 하면 중력 g 에서 고체입자에 작용하는 중

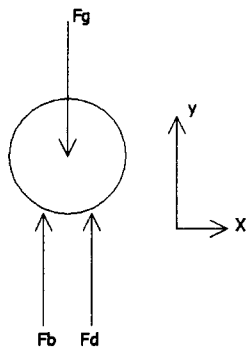


Fig. 3 Force acting on a solid particle.

력(F_g)은

$$F_g = m_p g \quad (1)$$

이다. 이 힘은 고체입자의 유동방향이나 속도크기에 관계없이 일정하게 작용한다. 고체입자 주위유체에 대한 부력(F_b)은 주위유체와 밀도차에 의해서 발생하는 힘이다. 고체입자와 동일한 체적의 유체질량을 m_w 라 하면 부력(F_b)는 다음과 같이 표시된다.

$$F_b = m_w g \quad (2)$$

그리고 고체입자에 작용하는 외력으로서 유체의 저항력은 고체입자와 주위유체와의 점성에 의해 발생하는 힘이다. 접촉면을 A 로 두면 마찰계수에 관한 일반적 정의로부터 유체의 저항력(F_d)은 아래와 같다.

$$F_d = 0.5 \rho_w U_r^2 C_d A \quad (3)$$

여기서 U_r 은 고체입자와 유체와의 상대속도이고 C_d 는 마찰저항계수이다. 본 연구에서는 레이놀즈수(Re)를 입자거동의 가시화용 레이놀즈수(Re_1)과 항력계수와 열전달 측정용 레이놀즈수(Re_2)로 구분하였으며 다음과 같이 각각 정의하였다.

$$Re_1 = \frac{U_r D_{e1}}{\nu_w} \quad (4)$$

여기서 ν_w 는 유체의 동점성 계수이고, D_{e1} 은 고체입자의 수력 직경이다. 고체입자에 작용하는 힘들의 평형으로부터 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$-F_g + F_b + F_d = 0 \quad (5)$$

중력, 부력, 그리고 유체 저항력에 관한 식을 식(5)에 대입하면 다음과 같다.

$$-m_p g + m_w g + 0.5 \rho_w U_r^2 C_d A = 0 \quad (6)$$

식(6)에서 특정 고체입자의 상대속도로부터 마찰

저항계수 (C_d)를 구할 수 있다.

3.2 열전달 실험에 대한 해석

입자의 벽면충돌이 열전달에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 Fig. 1과 같이 3개의 수직관을 이용한 실험을 수행하였다. 열전달 실험은 길이 487 mm의 스테인레스강(SUS 304)을 사용하였다. 시험부의 원통(shell)에는 물을 가득 채워 밀봉하고 원통(shell) 외부 표면에 단상교류 5 kW 히터로 전원을 공급하여 가열하였고 가열된 봉수(sealed water)로부터 시험부인 내관 튜브측에 열전달이 이루어졌다. 벽면온도는 열전대를 관벽 내부에 심어 측정하였다. 열전대는 축방향으로 윗쪽 3개의 관 내부에, 그리고 중간부와 아래쪽 관 내부에 각각 3군데에 설치하였다. 열전대는 열에폭시(thermal epoxy)로 고정하였다. 측정된 온도와 유량으로부터 열전달계수 h 는 다음 식으로 구해진다.

$$h = \frac{Q}{\pi DL(T_w - T_f)} \quad (7)$$

$$Q = M_w C_{pw}(T_{out} - T_{in}) \quad (8)$$

여기서 M_w 는 질량유량(kg/s), C_{pw} 는 액체의 비열, T_{out} 은 시험부 출구 액체온도(°C), T_{in} 은 입구 액체온도, T_w 는 벽면 평균 온도, T_f 는 평균 유체온도이다. 시험부에 공급된 열량 Q 는 식(8)로부터 계산하였다. 실험은 유속 0.3 m/s에서 2.0

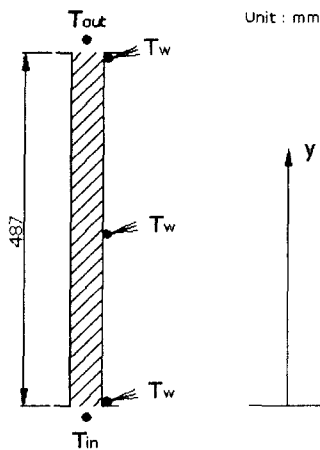


Fig. 4 Heat transfer test tube.

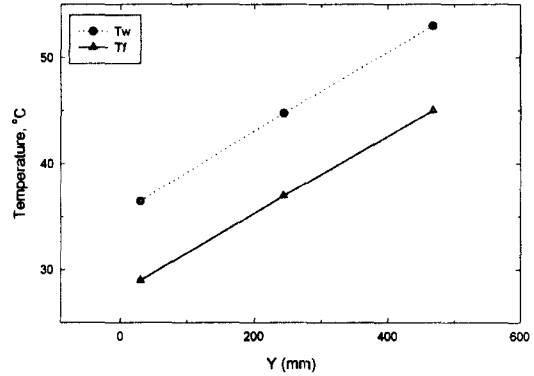


Fig. 5 Variation of T_w and T_f along the axial distance.

m/s까지 그리고 고체의 체적농도는 4.8 v%로 일정하게 하였다. 평균 유체온도(T_f)는 열적으로 충분히 발달된 영역에 해당하는 입구와 출구측 튜브 중심에 열전대를 설치하여 측정하였다. 내벽면온도(T_w)는 관외벽에 심은 열전대의 온도로부터 계산한다. 열전대 부착 상세도는 Fig. 4에서 보여진다. 3군데의 각지점에서 벽면 평균 온도(T_w)와 평균 유체온도(T_f)의 차이는 Fig. 5에서와 같이 0.5°C 범위 내에 들었으므로 열전달 계산의 식(7)에서 ΔT 를 ($T_w - T_f$)로 놓을 수 있었다.

3.2.1 입자가 가운데 관에 쌓이지 않는 경우의 레이놀즈수

상승관의 유체유동 속도와 하강류의 유체유동 속도를 일치한다고 가정하면⁽¹²⁾ 연속법칙으로부터 아래와 같이 유도된다.

$$\frac{\pi}{4} D_i^2 \rho U = \rho \frac{\pi}{4} d_i^2 \times NV - \rho \frac{\pi}{4} d_i^2 V \quad (9)$$

여기서 $\frac{\pi}{4} D_i^2 \rho U$, $\rho \frac{\pi}{4} d_i^2 \times NV$, $\rho \frac{\pi}{4} d_i^2 V$ 는 각각 출구 질량유량, 상승관 질량유량, 그리고 하강류 질량유량이다. 그리고 N 은 상승관의 개수이다.

$$V = \frac{\frac{\pi}{4} D_i^2 \rho U}{\frac{\pi}{4} d_i^2 (N-1) \rho} = \frac{D_i^2 U}{d_i^2 (N-1)} \quad (10)$$

여기서 V 는 내부 관 중 1개 관의 유속이며 본 연구에서 $N=2$ 이므로 다음과 같이 유도된다.

$$V = \frac{D_i^2 U}{d_i^2} \quad (11)$$

그리고 레이놀즈수(Re_2)는

$$Re_2 = \frac{V d_i}{\nu} \quad (12)$$

이며 수력 직경은 d_i 로 나타내었다.

3.2.2 입자가 가운데 관에 쌓이는 경우의 레이놀즈수
 가운데 관에 입자가 쌓여서 유체의 이동이 미소하다고 가정한다. 가운데 관에서는 유동이 거의 일어나지 않으므로 연속법칙으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\pi \frac{D_i^2 U}{4} = 2\pi \frac{d_i^2 V}{4} \quad (13)$$

$$V = U \frac{D_i^2}{d_i^2} \frac{1}{2} \quad (14)$$

$$Re_2 = \frac{V d_i}{\nu} \quad (15)$$

Fig. 6에서와 같이 D_i 는 외부로 나가는 관의 직경, d_i 는 내부 관의 직경이다. 본 연구에서는 열전달 실험에서 입자를 순환시킬 경우 가운데 관에 입자가 쌓이는 정도에 따라 가운데 관으로 흐르

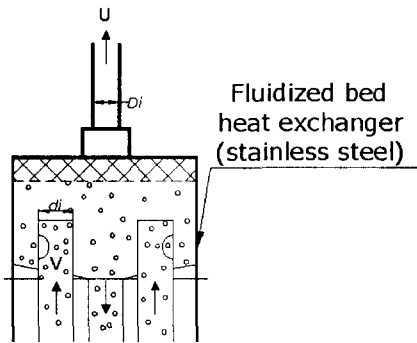


Fig. 6 Schematic of the heat exchanger.

는 유체의 유량을 정확히 알 수 없어 충분히 입자가 쌓이는 조건에서 열전달 실험을 행하였다. 입자가 쌓이는 정도에 따른 유량의 변화에 대한 연구는 추후의 과제로 남겨 두었음을 밝힌다.

4. 결과 및 고찰

고체입자들이 관내 벽면에 충돌하는 최저속도와 최대속도를 Table 2에 나타내었다. 대체로 높은 밀도의 재료일수록 높은 입자 유동속도에서 충돌이 발생하였는데 이는 높은 밀도의 경우 높은 고체유동 마찰저항이 작용하기 때문이라 사료된다. Fig. 7은 고체입자들이 관내 유체속도변화에 따른 고체입자들의 상대속도를 보여준다. 밀도의 크기에 비례하므로 구리인 경우 상대속도가 가장 크고 알루미늄이 가장 작았다. 강의 경우 직경이 2mm보다 2.5mm에서 상대속도가 컸는데 이는 표면적(A)과 구(ball)와 실린더(wire) 구조의 차이 때문이라 사료된다. 비교를 위하여 3

Table 2 Particle flow velocity for possible collision

Classification	Particle velocity range for possible collision	
	Minimum	Maximum
Case (A)	0.346 m/s	1.0 m/s
Case (B)	0.278 m/s	0.7 m/s
Case (C)	0.284 m/s	0.8 m/s
Case (D)	0.550 m/s	1.25 m/s
Case (E)	0.627 m/s	1.3 m/s
Case (F)	0.648 m/s	1.3 m/s

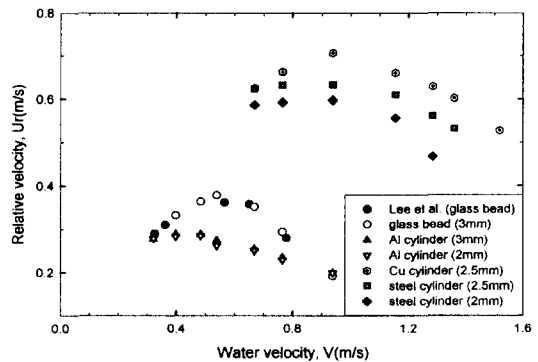


Fig. 7 Relative velocity versus water velocity.

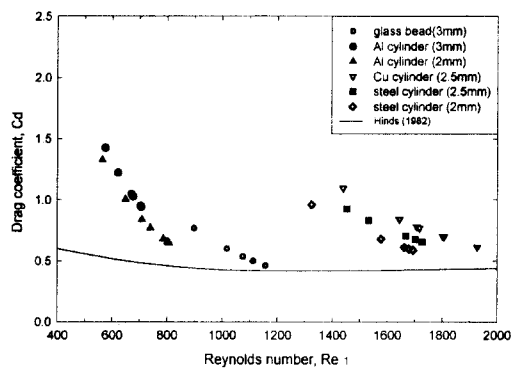


Fig. 8 Drag coefficient versus Reynolds number.

mm 직경의 유리구슬에 대한 Lee et al.⁽¹²⁾의 결과를 포함하였다. 본 연구의 결과와 비교적 잘 일치함을 보였다.

대체로 모든 입자들은 유속이 증가하면 상대속도가 증가하였다가 감소하였고 특히 유리과 구리의 경우 심하였다. 이는 상대속도의 증가는 유체에 의한 저항감소를 의미하며 유체에 의한 저항은 밀도, 입자형상, 그리고 표면적 등의 변수에 의해 결정된다고 사료된다.

Fig. 8은 레이놀즈수에 따른 항력계수의 변화를 보여준다. 밀도가 클수록 항력계수가 증가하는데 이는 밀도가 큰 고체입자일수록 점성력이 증가하기 때문이라 사료된다. 비교를 위하여 유리구슬입자에 대한 Hinds⁽¹³⁾의 결과를 포함하였다. 본 연구의 결과보다 값이 작았다. 이는 본 연구의 경우는 긴 튜브의 내부유동인데 반해 Hinds⁽¹³⁾의 결과는 외부유동이므로 유동형상의 차이에 기

인한 것이라 사료된다. Fig. 9은 고체입자들과 함께 순환시키며 측정된 열전달계수이다. 유속 1.0 m/s 이상에서는 열전달계수가 물만이 흐를 때보다 작게 나타났고 유속 1.0m/s 이하에서는 물만이 흐를 때보다 열전달계수가 크게 나타났다. 이러한 현상은 유속이 낮은 경우 입자의 순환에 의해 난류유동을 촉진시키나 충분한 난류유동이 발생하는 유속이 높은 경우에는 입자의 순환이 오히려 난류혼합을 방해시키기 때문이라 추측된다. 그러나 이러한 경우는 오염(fouling)이 전혀 없는 상태에 관한 것이므로 실제오염(fouling)이 발생되어 운전되는 대부분의 열 산업기기에서는 높은 유속에서도 물만 순환시킬 경우보다 열전달계수가 훨씬 높을 것이라 사료된다. 본 연구에서는 4.8 v%로 모든 고체입자들의 체적 흐름양을 동일하게 유지하였다. Fig. 9에서는 열전달계수가 모래입자(sand grain)가 가장 높은 것으로 나타나는데 이는 모래입자의 표면이 매끈한 경우가 아닌 울퉁불퉁한 불규칙적인 형상으로 인하여 난류의 형성이 촉진되어 열전달계수가 다른 입자에 비해 다소 높은 것으로 사료된다.

Fig. 10는 물만이 흐를 때의 누셀트수와 고체입자와 같이 흐를 때의 누셀트수에 대한 비를 유속에 따른 레이놀즈수로 무차원화하여 나타낸 그래프이다. 모래의 열전달계수가 가장 크고 다음으로 구리의 순이었다는 점을 볼 때 열전달계수에 미치는 가장 중요한 인자는 입자 표면 거칠기이고 그 다음으로 열용량과 전도도인 것으로 추측된다. 유동층 열교환기의 큰 장점은 스케일 형성을 방지하는 데 있다. 이를 확인하기 위하여 화올링 실험을 수행하였다. 화올링이란 관벽에 이물

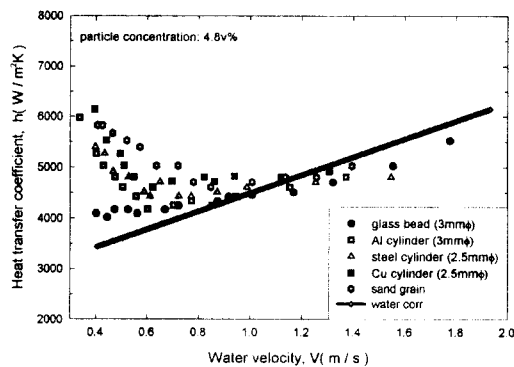


Fig. 9 Improvement of the heat transfer through a fluidized bed.

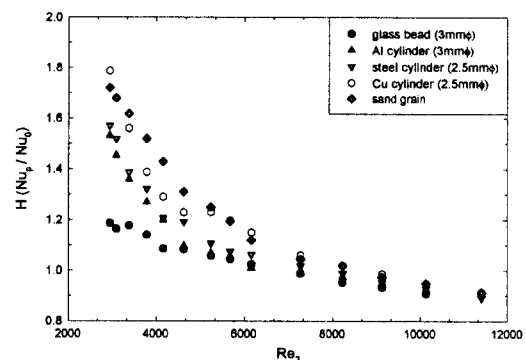


Fig. 10 Reynolds number, Re_2 .

질이 침적하여 열전달률을 감소시키는 현상을 통칭한다. 열전달 실험장치를 그대로 사용하였고 관벽에 화올링을 인위적으로 일으키기 위하여 25,500 ppm의 산화철(Fe_2O_3)을 물과 함께 순환시켰다. 실제 오수로 인한 스케일은 오수의 종류에 따라 스케일의 성분이 달라지게 되는데 본 연구에서는 대표적으로 산화철을 사용하였다. 본 실험에 사용된 산화철의 입자 평균 직경은 $0.98 \mu m$ 이고 평균 비중은 5.12이다.

파울링 실험은 시스템이 정상상태에 도달한 후에 일정량의 산화철을 순환수에 투입함으로써 시작된다. 시간이 흐름에 따라 관벽에 산화철이 침적되고 따라서 열전달계수는 감소하는데 Fig. 11은 화올링 곡선을 보여준다. 실험중 유속은 0.561 m/s로 유지되었고 Al 3 mm 입자의 체적농도는 4.8 v%이었다. 실험은 처음 Al 3 mm와 같이 순환시킨 경우와 입자 없이 일정 시간 운전한 후 화올링이 충분히 일어났다고 판단되었을 때 Al 3 mm를 순환시킨 경우로 나누어 수행하였다. Fig. 11은 처음부터 Al 3 mm 입자를 같이 순환시킨 경우에는 열전달계수가 초기값을 유지하고 있음을 보여준다. 이는 물과 같이 순환하는 알루미늄이 연속적으로 벽면에 부딪힘으로 산화철 침적을 방지하기 때문이라 판단된다. 초기에 물만을 순환한 경우는 시간이 지남에 따라 열전달계수가 급격히 감소함을 보여준다. 또한 곡선 형상은 점근적으로 감소함을 보여주는데 이는 입자 화올링의 일반적인 경향이다. 실험은 4일 동안 수행하였고 열교환기에서 파울링을 촉진하기 위해서 야간에는 펌프의 작동을 중지시킨 후 열교환기 내 순환수를 가득 채운 채 두었다. 이것은 열교환기

내부의 유동이 없을 경우가 파울링이 촉진되기 때문이다. Fig. 11에서 실험 시작 후 약 58시간 후에 알루미늄을 투입한 결과를 보여주는데 열전달계수는 투입 직후 급격히 상승하였고 그 후 점차로 화올링이 없는 경우의 열전달계수(slurry correlation)로 접근해 감을 보여준다. 이는 이미 화올링이 심하게 일어났을 경우라도 알루미늄은 열전달 효과뿐만 아니라 효과적으로 침적물을 제거할 수 있음을 보여준다.

5. 결론

- (1) 유체속도가 증가할수록 층돌핍수가 감소하였고 구리의 경우 1.3 m/s 이상의 유속에서는 층돌이 이루어지지 않고 상승하였다.
- (2) 비중이 클수록 대체로 항력계수가 증가하였고 내부 유동일 경우가 외부 유동일 경우보다 항력계수가 컸다.
- (3) Al 입자의 경우 순환유동층 열교환기의 튜브 내 유속을 0.4~0.7 m/s 범위로 하면 화올링을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 열전달계수도 고체 입자를 순환하지 않는 열교환기보다 2배 이상의 열전달계수 상승효과를 얻었다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었으며 실험장치를 제작해 준 (주)제로테크에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, K. B., Jun, Y. D., Park, S. I., 2000, Measurement of Heat Transfer Rates and Pressure Drops in a Solid Particle Circulating Fluidized Heat Exchanger, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12 No. 9, pp. 817-824 (in Korean).
2. Bhattacharya, S. C. and Luong, P. H., 1994, Modelling Heat Transfer in a Circulating Fluidized Bed, Int. J. of Energy Research, Vol. 18, pp. 1-7.
3. Wirth, K. E., 1995, Heat Transfer in Circulating Fluidized Beds, Chemical Engineer-

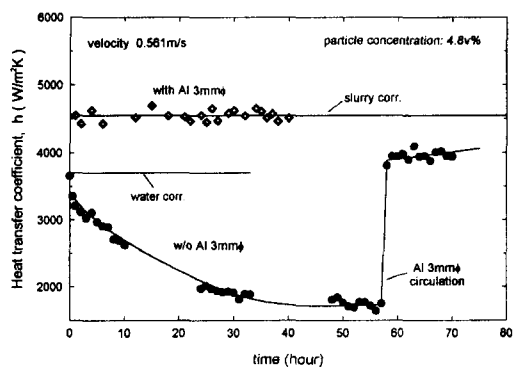


Fig. 11 Cleaning effect of the fluidized bed on Fe_2O_3 scale.

- ing Science, Vol. 50, No. 113, pp. 2137-2151.
4. Chen, C. C. and Chen, C. L., 1992, Experimental study of Bed, Chemical Engineering Science, Vol. 47, No. 5, pp. 1017-1025.
 5. Hatch, L. P. and Wetch, G. G., 1970, Scale Control in High Temperature Distillation Utilizing Fluidized Bed Heat Exchanger, R & D Progress Report, No. 571.
 6. 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.
 7. Grace, J. R., 1986, Heat Transfer in Circulating Fluidized Beds, In Circulating Fluidized Bed Technology (Edited by Basu, P.), Pergamon Press, Canada, pp. 63-81.
 8. Fraley, L., Lin, Y. Y., Hsiao, K. H. and Solbakken, A., 1983, Heat Transfer Coefficient in Circulating Bed Reactor, ASME Paper 83-HT-92, Seattle.
 9. Kiang, K. D., Liu, K. T., Nack, H. and Oxley, J. H., 1976, Heat Transfer in Fast Fluidized Beds, In Fluidization Technology (Edited by Keairns), Hemisphere, Washington DC, Vol. 2, pp. 471-483.
 10. Stromberg, L., 1982, Experiences of Coal Combustion in a Fast Fluidized Bed, Proc. 7th International Fluidized Bed Combustion Conference, Vol. 2, pp. 1152-1163.
 11. Lee, K. B. and Park, S. I., 1994, Heat Transfer to a Downward Moving Solid Particle Bed Through a Circular Tube, Trans. KSME, Vol. 18, No. 6, pp. 1551-1558.
 12. Lee, Y. P., Yoon, S. Y., Jurng, J. S., Kim, N. H., 1995, Mechanism of Fouling Reduction and Heat Transfer Enhancement in a Circulating Fluidized Bed Heat Exchanger, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 7 No. 3, pp. 450-460 (in Korean).
 13. Hinds, W. C., 1982, Aerosol Technology, Chap. 3, Wiley & Sons, New York.