

## 파형관 튜브가 있는 순환유동층 원통다관형 열교환기 내의 유체유동

안 수 환<sup>†</sup>, 이 병 창<sup>\*</sup>, 배 성 태<sup>\*</sup>  
경상대학교 기계항공공학부 해양산업연구소, \*경상대학교 대학원

### Fluid Flow in the Fluidized Bed Shell and Tube Type Heat Exchanger with Corrugated Tubes

Soo Whan Ahn<sup>†</sup>, Byung-Chang Lee<sup>\*</sup>, Sung Taek Bae<sup>\*</sup>

School of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University,  
Institute of Marine Industry, Tongyong 650-160, Korea

<sup>\*</sup>Marine Engineering Dpt, Graduate School, Gyeongsang National University, Tongyong 650-160, Korea

(Received January 4, 2003; revision received April 9, 2003)

**ABSTRACT:** An experimental study was carried on the characteristics of fluid flow and heat transfer in a fluidized bed shell-and-tube type heat exchanger with corrugated tubes. Seven different solid particles having same volume were circulated in the tubes. The effects of various parameters such as water flow rates, particle geometries and materials, and geometries of corrugated tubes on relative velocities and drag coefficients were investigated. The present work showed that the drag force coefficients of particles in the corrugated tubes were usually lower than those in the smooth tubes, meanwhile the relative velocities between particles and water in the corrugated tubes were little higher than those in the smooth tubes except the glass.

**Key words:** Fluidized bed heat exchanger(순환유동층 열교환기), Solid particle(고체입자), Corrugated tube(파형관), Drag coefficient(항력계수), Relative velocity(상대속도)

#### 기 호 설 명

$A$  : 접촉면 [ $m^2$ ]  
 $C_d$  : 마찰저항계수  
 $D$  : 직경 [ $m$ ]  
 $D_b$  : 내경, Fig. 1 참조 [ $m$ ]  
 $D_e$  : 포락선 직경, Fig. 1 참조 [ $m$ ]  
 $D_h$  : 시험부 덕트 수력 직경,  $4A/P$  [ $m$ ]

$D_{oi}$  : 외관 내경 [ $m$ ]  
 $D_{vi}$  : 체적에 의한 내관의 평균 내경 [ $m$ ]  
 $D_{vo}$  : 체적에 의한 내관의 평균 외경 [ $m$ ]  
 $e$  : 홈 높이,  $(D_e - D_b)/2$  [ $m$ ]  
 $e^*$  : 무차원 홈 깊이,  $e/D_{vo}$   
 $F_b$  : 부력 [ $N$ ]  
 $F_d$  : 저항력 [ $N$ ]  
 $F_g$  : 중력 [ $N$ ]  
 $g$  : 중력가속도 [ $m/s^2$ ]  
 $h$  : 열전달계수 [ $W/m^2K$ ]  
 $P$  : 홈피치, 둘레 [ $m$ ]  
 $P^*$  : 무차원 홈피치,  $P/D_{vo}$

<sup>†</sup> Corresponding author

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

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

- Pr : Prandtl 수,  $\nu/\alpha$
- Re : Reynolds 수,  $UL/\nu$
- Re<sub>1</sub> : 고체입자에 의한 레이놀즈수,  $(u_b D_h)/\nu$
- U : 유체속도 [m/s]
- U<sub>r</sub> : 상대속도,  $U - U_s$  [m/s]
- U<sub>s</sub> : 입자속도 [m/s]

**그리스 문자**

- $\theta$  : 나선각,  $\tan^{-1}(\pi D_{wo}/NP)$
- $\theta^*$  :  $\theta/90$
- $\nu$  : 동점성계수 [m<sup>2</sup>/s]

**1. 서론**

열교환기의 오염(fouling)을 세정시키기 위하여 열교환기 내 튜브 삽입장치를 설치하거나 입자를 첨가한 순환유동층 열교환기와 같은 장치를 이용하고 있다. 대체로 산업현장에서 발생하는 오염을 완전히 제거할 수 있는 입자를 첨가한 순환유동층 열교환기에 관한 기초적인 지식에 대한 최적 설계의 지식 부족으로 인하여 순환유동층 열교환기가 다양한 운전조건에 적용되지 않고 있다. 순환유동층 열교환기에서 200 μm 이하의 직경인 미소(micro-sized)입자 순환이 열전달에 미치는 영향은 Bowen and Epstein,<sup>(1)</sup> Basu and Nag,<sup>(2)</sup> Sjollem and Busscher,<sup>(3)</sup> 그리고 Adomeit and Renz<sup>(4)</sup>에 의해 연구되었다. Basu and Nag<sup>(2)</sup>은 피상속도, 고체입자 유량, 고체입자 크기 등의 변화에 대해 조사한 결과 벽면으로부터의 열전달은 부유물(suspension)의 비중에 비례하나, 고체입자 유량이 일정한 상태에서는 유동속도를 증가시키면 열전달률은 감소함을 보였다. Adomeit and Renz<sup>(4)</sup>는 난류유동에서 입자의 이송과 벽면 접촉에 관해 수치적으로 해석하여 실험치와 비교하였다. 그 결과 유체유량이 증가할수록 입자가 열교환기 표면으로 전달되는 비율이 감소함을 보였다. 이는 유체유량이 증가하면 미소입자가 열교환기 표면으로 전달되는 비율이 증가할 것이라는 일반적인 상식과는 다른 결과를 보였다. 그리고 열교환기 표면에 정착된 미소입자의 분리는 전단율의 상승효과<sup>(5)</sup>와 세정목적으로 첨가되는 화학약품의 영향<sup>(6)</sup>에 의해 각각 연구된 바 있다. 열

교환기 내 직경이 2 mm 이상인 입자의 액체용 순환유동층 열교환기에 관한 연구는 Hatch and Weth,<sup>(7)</sup> Rautenbach and Kollbach,<sup>(8)</sup> Kollbach et al.,<sup>(9)</sup> Tianqing,<sup>(10)</sup> 그리고 Kim and Lee<sup>(11)</sup>에 의해 행하여졌다. Hatch and Weth<sup>(7)</sup>는 액체용 순환유동층 열교환기를 많이 사용하는 분야인 해수를 이용한 조수장치(desalination system), Rautenbach and Kollbach<sup>(8)</sup>는 폐수처리장치 설계를 위한 연구를 각각 행하였다. Kollbach et al.<sup>(9)</sup>은 13종의 다양한 입자들에 관해 열전달계수와 오염세정효과를 측정하였다. 그리고 Kim and Lee<sup>(11)</sup>는 직경이 3.0 mm인 유리입자를 이용한 순환유동층 열교환기에 관한 연구를 행하였다. 그 결과 유속이 1.0 m/s 이하에서는 고체입자가 압력강하를 증가시키나 1.0 m/s 이상에서는 열전달계수와 압력강하는 고체입자를 첨가하지 않은 경우와 거의 같았음을 보였다. 이에 반해 연소실이나 건조장치의 설계에 기초자료를 제공하는 기체용 순환유동층 열교환기에 관한 연구는 Lee et al.,<sup>(12)</sup> Kim et al.,<sup>(13)</sup> 그리고 Chun et al.<sup>(14)</sup>에 의해 행하여진 바 있다.

위의 연구들은 별도의 열전달촉진(heat transfer enhancement) 장치가 없는 매끈한 원관이나 사각채널을 가진 순환유동층 열교환기에 관한 연구이며, 나선파형관이나 나선흡관의 열전달촉진관을 이용한 순환유동층 열교환기에 관한 연구자료는 거의 보고된 바가 없는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 내관에 열전달촉진관으로 2종의 나선파형관(spirally corrugated tube)을 설치한 원통다관형 순환유동층 열교환기에서 직경이 2.0mm 이상인 유리 1종, 알루미늄 2종, 구리 1종, 스테인레스 2종, 그리고 모래 1종인 7종류 고체입자에 관한 가시화 실험으로부터 항력계수와 상대속도를 측정하여 최적의 액체 순환유동층 열교환기 제작에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다. 본 실험적 연구의 순환유체는 물을 사용한다.

**2. 실험장치 및 방법**

Fig. 1은 시험부의 파형 튜브에 대한 상세도이다. Fig. 2는 가시화 실험과 열전달 실험을 동시에 할 수 있는 본 연구의 실험장치 개략도와 실제모습이다. 시험부의 높이는 705 mm이고 셸(shell)의 직경은 80.4 mm, 다관(tubes)의 직경은 14.2 mm

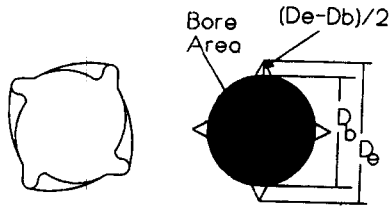


Fig. 1 Volumetric diameter of a corrugated tube.

로 하였다. 셸은 스테인레스, 다관은 동(copper)제의 나선과형관을 사용하였고 제원은 Table 1과 같다.<sup>(15)</sup> 시험부 출구측에 스크린을 설치하여 고체입자들이 밖으로 나가지 않게 하였고, 입구측에는 입구관을 U자형으로 제작하여 운전중 입자들이 U관의 아래부분 쪽으로 입자들이 모이게 하여 더 이상 입자들이 전진되지 않게 하였다. 시험부는 셸(shell) 내부에 수도물을 채우고 그 속에 관들(tubes)을 설치하였으며 내부 다관 간에 유체와 고체입자가 순환되도록 하였다. 가시화용 시험부에는 나선과형관의 경우에는 열전달 시험부와 동일한 관을 사용하여 CCD 카메라 촬영에 용이하도록 창(window)을 설치하여 예비실험부(preparatory experiment section)에서 가시화 실험을 행하였고 매끈한 경우에는 투명아크릴 시험부(Fig. 2의 오른쪽 시험부)와 창이 설치된 예

Table 1 Test matrix for visualization measurements

	Inner tube (unit : mm)							
	$D_s$	$D_{vi}$	$D_{vo}$	$P$	$N$	$e^*$	$P^*$	$\theta^*$
$S_0$	15.8	14.2	15.8					
$T_1$	15.8	13.88	15.48	7	1	0.045	0.45	0.91
$T_2$	15.8	13.97	15.57	10	1	0.045	0.64	0.89

- $D_s$  : Original smooth tube diameter
- $D_{vi}$  : Volume-based grooved tube inner diameter
- $D_{vo}$  : Volume-based grooved tube outer diameter
- $P$  : Flute or corrugation pitch
- $N$  : Number of flute or corrugation starts
- $S_0$  : Smooth tube
- $T_{1,2}$  : Spirally corrugated tube

비실험부에서 각각 행하였다.

실험은 3시간에 걸쳐 한 번씩 나누어 두 번 측정하였다. 주위의 온도는 22°C에서 24°C 사이였다. 유체순환은 자석식(magnetic type) 펌프를 사용하여 고체입자나 오염된 환경에서 작동에 문제가 없도록 하였다. 열전달 실험장치는 스테인레스강(SUS 304)으로 제작하였다. Fig. 2와 같이 가시화 시험부와 열전달 시험부는 밸브에 의해 분리되므로 가시화 실험을 행할 때에는 유체순환이

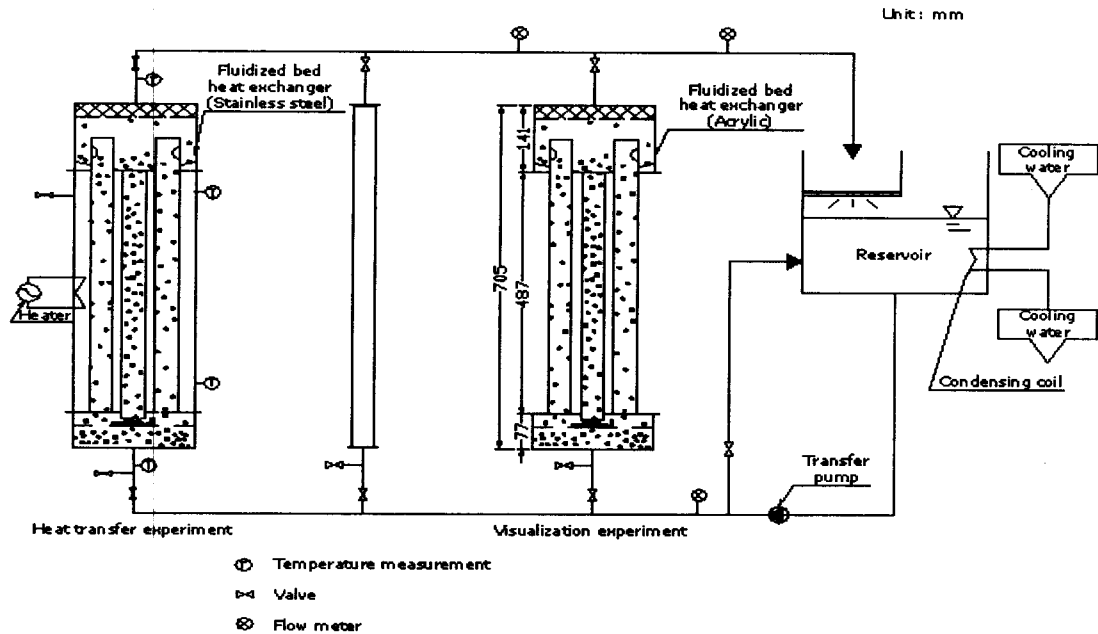


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup.

Table 2 Details of particles in fluidized bed

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

열전달 시험부측에는 가지 않도록 하였다. 가시화 실험에 사용된 입자들은 유리 1종, 알루미늄 2종, 강 2종, 그리고 구리 1종, 그리고 모래 1종으로 전부 7종이며 1개의 체적은 14 mm<sup>3</sup>으로 모두 동일하게 하였고 자세한 제원은 Table 2와 같다. 경사면을 가진 순환유동층 열교환기의 입자 순환은 주변의 튜브에 의하여 상승한 구슬 상부의 확대된 단면에 의하여 속도가 감소하게 된다. 따라서 자중에 의하여 바닥에 떨어지게 되는데 이때 경사에 의하여 가운데 튜브로 굴러가게 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 지속적인 유체의 상승과 함께 입자의 상승이 일어나고 가운데 튜브에서는 입자의 하강과 함께 유체의 하강이 이루어진다. 하부의 분배판은 유체가 순환중에는 유체를 각 튜브 내로 보내는 역할을 한다. 또한 작동중에는 하강한 입자가 평판 아래로 내려오지 않고 평판 위에서 다시 상승 튜브로 보내어진다. 그러나 펌프가 정지하여 유체의 순환이 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 조절하여 펌프의 과부하가 일어나지 않도록 하였다. 유량계는 적층식을 사용하였고 시험부 입구에 1개와 출구에 2개를 설치하였다. 파형관의 체적 평균 내경( $D_{vi}$ )의 결정은 관 속에 물을 채우고 그 양을 길이로 나누었고, 체적 평균 외경( $D_{vo}$ )은 체적 평균 내경( $D_{vi}$ )

에서 두께를 더하여 구하였다.<sup>(15)</sup>

### 3. 실험결과 및 고찰

유동중인 유체속의 고체입자에 작용하는 힘은 Fig. 3과 같이 작용한다. 고체입자의 질량  $m_p$ 이 라 하면 중력  $g$ 에서 고체입자에 작용하는 중력( $F_g$ )은

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

이다. 이 힘은 고체입자의 유동방향이 나 속도크기에 관계없이 일정하게 작용한다. 고체입자 주위유체에 대한 부력( $F_b$ )은 주위유체와 밀도차에 의해서 발생하는 힘이다. 고체입자 주위를 지나는 유체의 질량을  $m_w$ 라 하면 부력( $F_b$ )은 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

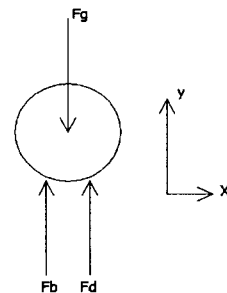


Fig. 3 Force acting on a solid particle.

가시화용 레이놀즈수( $Re_1$ )로 다음과 같이 정의하였다.

$$Re_1 = \frac{U_r D_{h1}}{\nu_w} \quad (4)$$

여기서  $\nu_w$ 는 유체의 동점성계수이고,  $D_{h1}$ 은 고체 입자의 수력 직경이다. 고체입자에 작용하는 힘들의 평형으로부터 아래와 같이 유도된다.

$$C_d = \frac{(m_p - m_w)g}{0.5 \rho_w U_r^2 A} \quad (5)$$

식(5)에서 특정 고체입자의 상대속도로부터 항력계수( $C_d$ )를 구할 수 있다. Fig. 4는 7종의 고체 입자들이 매끈한 관내를 유동할 때 유체속도에 따른 고체입자들의 상대속도를 나타낸다. 2.5 mm  $\phi$

의 구리입자가 가장 크고 2 mm  $\phi$ 인 알루미늄 입자가 가장 작았다. 이는 입자의 밀도가 클수록(순환유체인 물의 밀도와 차이 클수록), 동일한 체적에서 구에 가까울수록 압력면적이 증가되기 때문에 유체저항을 많이 받기 때문이라 사료된다. 대체로 모든 경우 유속이 증가할수록 상대속도가 증가하였다가 감소하는 양상을 보이는데, 이는 유속이 클수록 고체입자가 파형구조의 튜브 벽면에 부딪혀 입자상승저항이 증가되어 일정속도 이상에서는 유속이 증가할수록 오히려 상대속도가 감소하는 양상을 보이는 것으로 사료된다. 각 입자들에 대한 임계값은 앞으로 자세한 정량적 연구가 요구된다. Fig. 5와 Fig. 6은 파형관의 상대속도를 나타낸다. 매끈한 관보다 파형관의 경우 유리(glass)를 제외한 모든 입자들에서 상대속도가 컸다. 이는 파형관의 경우 파형관의 홈(trough)이 고체입자의 흐름을 방해하여 상대속도가 증가한 것으로 사료된다. 유리입자는 매끈한 관보다 파

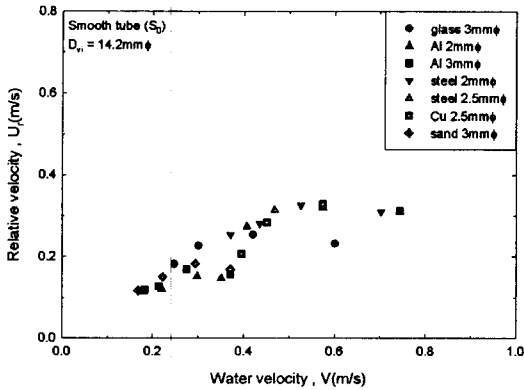


Fig. 4 Relative velocity for smooth tube.

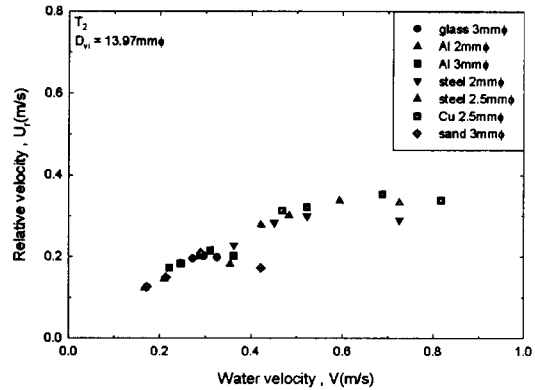


Fig. 6 Relative velocity for  $T_2$ .

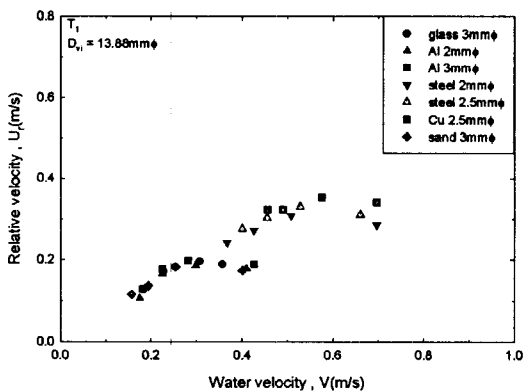


Fig. 5 Relative velocity for  $T_1$ .

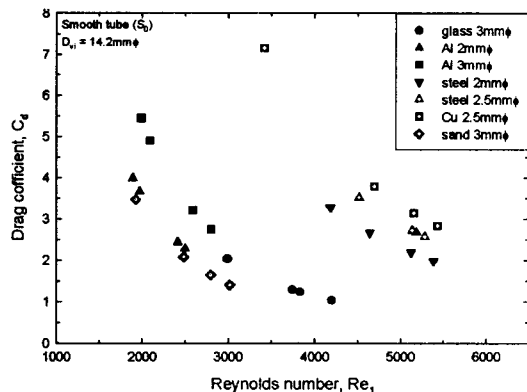


Fig. 7 Drag coefficient for smooth tube.

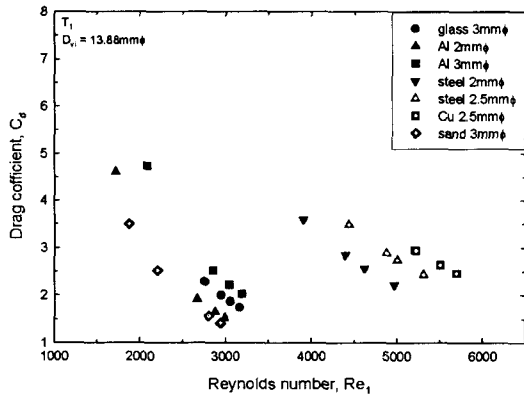


Fig. 8 Drag coefficient for  $T_1$ .

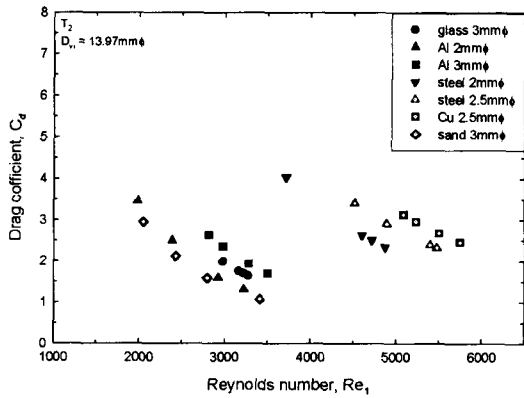


Fig. 9 Drag coefficient for  $T_2$ .

형관에서 상대속도가 감소하였다. 이는 다른 입자들에 비해 유리입자는 모서리(ridge)가 없는 매끈한 구의 형상이므로 파형관 벽면 저항을 적게 받고 동일한 체적 평균 유속일 경우 관 중심부의 유속이 증가되기 때문이라 판단된다. Figs. 4~6은 입자가 관 벽면에 충돌이 일어나는 경우의 상대속도값이다. Figs. 5~6은 대체로 유사한 향상을 보인다. 이는 Table 1에 나타난 파형관의 구조적 차이로 인한 유동 양상(pattern)의 변화는 크지 않음을 의미한다. 밀도의 크기에 의하여 구리인 경우 상대속도가 가장 크고 알루미늄이 가장 작았다. 강의 경우 직경이 2mm보다 2.5mm에서 상대속도가 컸는데 이는 구(sphere)에 가까운 2.5mm 고체입자가 유체유동에 대한 저항이 크기 때문이라 사료된다. Figs. 7~9는 입자 직경과 상대속도를 기초로 한 레이놀즈수에 대한 항력계수의 변화를 보여준다. 항력계수에 관한 일

반적인 예측과는 달리 파형관보다 Fig. 7의 매끈한 경우에서 항력계수가 더 높은 결과를 얻었다. 이는 본 연구의 항력계수는 파형관보다 매끈한 원관에서 상대속도가 적기 때문에 식(5)에 의해 항력계수가 더 큰 것으로 사료된다. 모든 그림에서 비중이 클수록 항력계수가 증가하였는데 이는 비중이 큰 고체일수록 점성력이 증가하기 때문이라 사료된다.

#### 4. 결 론

- (1) 상대속도가 2.5 mm  $\phi$ 인 구리입자가 가장 크고 2mm  $\phi$ 인 알루미늄 입자가 가장 작았다.
- (2) 매끈한 관보다 파형관에서 상대속도가 유리(glass)를 제외한 모든 입자들의 상대속도가 컸다.
- (3) 파형관보다 매끈한 원관에서 항력계수가 더 컸다.

#### 후 기

이 논문은 2002년도 과학재단지원 목적기초연구(R05-2002-000-00013-0)와 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음.

#### 참고문헌

1. Bowen, B.D. and Epstein, N., 1979, Fine particle deposition in smooth parallel-plate channels, J. Coll. Interf. Sci., Vol. 72, pp. 81-97.
2. 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.
3. Sjollem, J. and Busscher, H.J., 1988, Deposition of polystyrene latex particle toward polymethylmethacrylate in a parallel flow cell, J. Coll. Interf. Sci., Vol. 132, pp. 382-394.
4. Adomeit, P. and Renz, U., 1995 The influence of liquid flow rate on particle deposition and detachment, Proc. of Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchange Equipment, An International Conference, San Luis Obispo, California, pp. 421-433.

5. Hubbe, M. A., 1985, Detachment of colloidal hydrous oxide spheres from flat solids exposed to flow: 2. Mechanisms of release, *Coll. Surf.*, Vol. 16, pp. 249-270.
6. Kallay, N., Biskup, B., Tomic, M. and Matijevic, E., 1986, Particle adhesion and removal in model systems: X. The effect of electrolytes on particle detachment, *J. Coll. Interf., Sci.*, Vol. 114(2), pp. 357-362.
7. Hatch, L. P. and Weth, G. G., 1970, Scale control in high temperature distillation utilizing fluidized bed heat exchanger, R & D Progress Report, No. 571.
8. Rautenbach, R. and Kollbach, J. 1986, New developments in fluidized bed heat transfer for preventing fouling, *Swiss Chem.*, Vol. 8, No. 5, pp. 47-55.
9. Kollbach, J., Dahm, W. and Rautenbach, R., 1987, Continuous cleaning of heat exchanger with recirculating fluidized bed, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 8, No. 4, p. 26.
10. Tianqing, L., 1995, Mechanism study on circulating flow of particles within a fluid bed antifouling heat exchanger, *Proc. of Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchange Equipment, An International Conference, San Luis Obispo, California*, pp. 377-384.
11. Kim, N. H. and Lee, Y. P., 1995, A study on the pressure loss, heat transfer enhancement and fouling control in liquid fluidized bed heat exchanger, *Proc. of Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchange Equipment, An International Conference, San Luis Obispo, California*, pp. 421-433.
12. Lee, K. B., Jun, Y. D. and 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.
13. Kim, T. K., Youn, H. K., Seung, S. S. and Park, S. W., 2002, Development of a simulation software for the fluidized bed sludge incinerator, *Proc. of KSME Autumn Annual Meeting*, pp. 2179-2184.
14. Chun, W. P., Lee, K. W., Park, K. H., Lee, K. J. and Hwang, H. W., 2002, Heat transfer characteristics of organic sludge particles in rotary dryer, *Proc. of KSME Autumn Annual Meeting*, pp. 2185-2190.
15. Ahn, S. W. and Son, K. P., 2002, Experimental studies on heat transfer in the annuli with corrugated tubes, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 683-689.