

# 수평 관에서 고체입자 농도가 압력강하 및 마찰계수에 미치는 효과 Effects of Particle Concentrations on Friction Factors and Pressure Drops in a Horizontal Pipe

안수환 · 이병창 · 강호근

S. W. Ahn, B. C. Lee and H. K. Kang

**Key Words** : Fluidized Bed(순환유동층), Solid Particle(고체입자), Friction Factor(마찰계수), Pressure Drop (압력강하)

**Abstract** : Generally, the economic concept of optimized design and operating conditions in fluidized bed heat exchangers can hardly be realized. Because the lack of fundamental knowledge about the particle flows, the optimum design of the fluidized bed heat exchanger is rather limited.

In the present work, measurements are made on pressure drops and friction factors in the horizontal circular tube with solid particles in the circulating water. Two different solid particles of diameters of 3mm and 4mm are covered. The Reynolds numbers are ranged from 10,000 to 45,000. It is concluded that the friction factors for the particles of 4mm diameter are much higher than those for the particles of 3mm diameter. And at the lower particle concentration, the friction factors are strongly influenced by the fluid velocity rather than the particle concentration; However, the effect of the particle concentration on friction factors is also significantly higher at a higher particle concentration operating condition.

## 기호 설명

## 1. 서 론

- A : 열전달면적 [ $m^2$ ]
- $D_h$  : 수력직경(hydraulic diameter) [m]
- f : 마찰계수
- L : 시험부의 길이 [m]
- Re : 레이놀즈 수
- u : 유속 [m/s]
- v : 동점도 [ $m^2/s$ ]
- G : 공기질량속도 [ $kg/m^2 \cdot s$ ]
- $g_c$  : 변환상수
- $\Delta P$  : 압력차(Pa)
- $u_b$  : 체적평균속도[m/s]
- $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]

오염(fouling)이란 열교환기의 압력손실을 증가시키고 열적성능을 감소시키는 열전달 표면에 부착된 퇴적물로 정의된다. 순환 유체속에 이물질이 포함될 경우 오염(fouling) 억제 문제가 중요하다. 그러므로 전열면의 열전달 성능은 오염(fouling)여부에 따라 결정된다. 실제로 오염(fouling)의 열저항은 전체 열전달 저항의 절반을 초과하는 경우도 종종 있다. 열전달용 열교환기에서 오염(fouling) 문제는 일반적으로 작동유체가 기체보다 액체일 경우 더욱 심각하다. 고체입자를 유체유동과 같이 순환토록 하여 오염(fouling) 형성을 미연에 방지시키고 유동하는 고체 입자로부터의 전도열에 의해 열전달을 향상시킨다. 이러한 효과를 정량적으로 보고한 Webb<sup>(1)</sup>의 연구에 의하면 입자의 직경이 20~600  $\mu m$  범위의 고체입자를 유동 유체속에 순환시키면 고체입자를 넣지 않은 경우보다 열전달 증가율이 350%까지 증가한다고 보고하였다.

장기간 열교환기를 사용시 고체입자는 화학적으로 안정되어 오염될 가능성이 적고 반복 사용이 가능하여 환경오염을 크게 줄일 수 있다. 고체입자를

---

접수일 : 2007년 6월 18일, 채택확정 : 2007년 10월 9일  
 안수환(책임저자) : 경상대학교 기계항공공학과  
 해양산업연구소

E-mail : swahn@gaechuk.gsnu.ac.kr, Tel : 055-640-3125  
 이병창 : 경상대학교 대학원 기계시스템공학과  
 강호근 : 경상대학교 해양산업연구소

이용한 순환유동층 열교환기 시스템과 관련된 연구는 아직 초보적인 단계이다.

순환유동층 열교환기 장치는 미국에서 Hatch와 Wetch<sup>(2)</sup>에 의해 처음 조수기(desalination system)의 브라인(brine) 가열기로 개발되었다. 순환유동층 열교환기 제작의 기초 연구에서 Basu Nag<sup>(3)</sup>는 피상속도(superficial velocity), 고체입자 유량, 고체입자의 크기의 변화에 대한 조사를 한 결과 벽면으로부터의 열전달은 고체입자 비중에 비례하나, 고체입자 유량이 일정량 이상인 상태에서는 유동속도를 증가시키면 열전달율은 오히려 감소함을 보였다. 그리고 Grace<sup>(4)</sup>는 순환유동층 밀도가 열전달에 미치는 영향을 예측하였으며 이러한 수치해석에 의한 예측은 Fraley 등<sup>(5)</sup>, Kiang 등<sup>(6)</sup> 그리고 Stromverg<sup>(7)</sup>의 실험 자료에 기초를 두었다. 국내에서는 이 등<sup>(8)</sup>이 열교환기 내부의 유동을 프러그 흐름으로 한 경우 고체 입자 유동층과 관벽 사이의 열전달에 대한 연구를 실험과 이론적으로 수행하였다. 그리고 이 등<sup>(9)</sup>은 순환유동층 열교환기에서 열교환기 직경, 배플판 구멍직경, 그리고 혼합실 높이를 변수로 하여 열전달계수와 압력강하에 대해 조사하였다.

위의 연구들은 입자의 유동이 용이 하도록 하기 위해 고체 입자의 직경이 대체로 작은 1mm 직경 이하의 경우를 취급하였다. 고체입자가 작은 경우 벽면과의 충돌이 드물게 일어나고 입자의 열용량이 작아서 열전달율이 낮다.

Ahn 등<sup>(10)</sup>은 산업폐수 등을 이용하는 오염요소가 큰 환경 속에서 작동되는 열교환기의 자연오염 세정 수직형 열교환기 제작기술에 관한 기초연구로서

수직형 순환유동층 열교환기 파이롯트 모델로부터 입자 체적이 비교적 큰 14mm<sup>3</sup>인 7종류의 고체입자에 대한 유동특성과 열전달에 대해 조사하였다. 그 결과 입자의 밀도가 크고 거친 구조일수록 열전달계수가 컸다. 수직형 순환유동층 열교환기의 경우는 순환하는 고체입자가 유속이 일정 범위를 벗어날 때는 고체입자가 관 벽면에 충돌되지 않아서 세정 효과가 없었다. 그러므로 본 연구에서는 수평형 순환유동층 열교환기 시스템을 제작하여 수직형의 단점을 보완하고자 한다. 수평형 순환유동층 열교환기 제작에 필요한 기초 연구로서 고체입자의 유동특성을 파악하기 위해 수평형 투명 순환유동층 시스템에서 고체입자 농도와 유속에 대한 압력강하와 마찰계수를 실험적으로 측정하였다. 순환유체는 수돗물을 사용하였고 물과 함께 순환하는 고체는 3mm 와 4mm 직경의 구(sphere)형의 유리입자를 사용하였다.

## 2. 실험 장치

Fig. 1은 본 연구의 실험장치 개략도와 실제 모습이다. 장치 전체 크기는 가로 880mm 세로 1060mm이다. 그리고 관의 내경은 14mm를 사용하였다. 가시화를 위하여 시험부는 투명아크릴로 제작하였으며 Photo. 1과 같이 실험부 출구에 투명하게 관으로 제작하여 정채되어 아래로 내려가는 입자를 CCD 카메라로 촬영하여 농도를 측정하였다.

시험부내 유체유동에 대한 압력구배 측정을 위해 입구에서 완전히 발달된 영역임을 확인한 250mm와

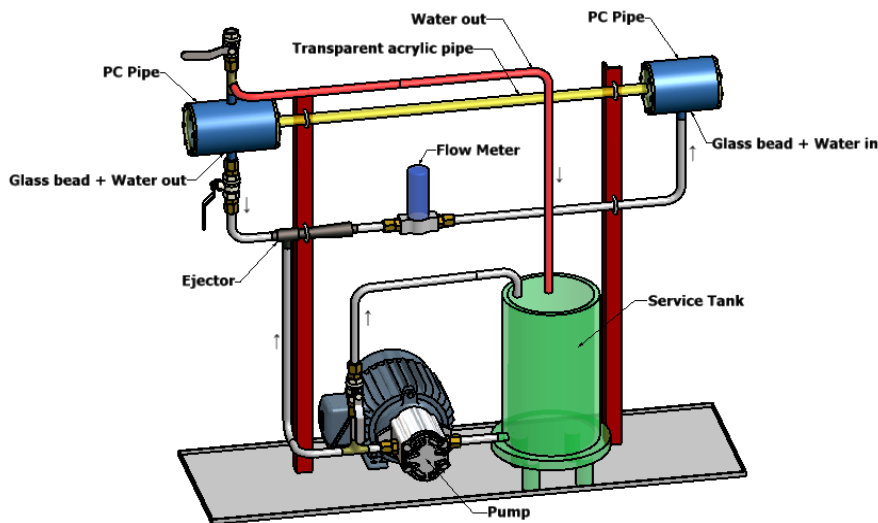


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

650mm의 거리에 각각 압력 탭을 만들고 그 압력 탭에 경사 마노미터를 연결하여 행하였다. 이젝터를 사용하여 유속을 증가시켜 물의 역류를 방지하였으며 순환펌프는 용수량이 18ℓ/min인 원심펌프를 사용하였다.

펌프에서 이젝터로 가는 유로 사이에 밸브와 바이패스를 설치하여 밸브의 개폐정도에 따라 유량을 조절을 할 수 있고, 시험부내 평균유속은 유량계로부터 구한 값에서 연속법칙을 적용하여 구하였다. 본 연구에서는 레이놀즈 수의 범위가 10,000에서 45,000이었다. 유량계는 최대 유량 2.4m<sup>3</sup>/h까지 측정 할 수 있는 부유식(floating type)을 사용하였다. 시험부 출구측 상단에는 유입된 공기를 제거하고 입자를 투입 할 수 있는 관과 밸브를 설치하였으며 출구쪽에서 서비스탱크로 가는 관로 역시 출구측 상단에 설치되어있다. 탱크의 물은 펌프에 의해 공급되어 이젝터를 지나 실험부구측으로 이동한다. 이젝트는 역류를 방지하고 속도를 높이기 위해 사용되었으며 본 연구에서는 용도에 맞게 특별히 제작하였다. 시험부의 플런지 부분에는 O링으로 누수를 방지하였고 각부 파이프 이음새에서의 누수는 실링 테이프로 방지하였다. 실험 장치에 사용한 입자는 유리소재 구를 사용하였으며 크기는 두 종류로 구분하였다. 작은 입자의 직경은 3mm, 큰 입자의 직경은 4mm를 각각 사용하였다.

Fig. 1과 같은 시스템에서 혼입하는 고체 입자의 양이 적을 경우에는 순환하는 유체속에 유리입자를 혼입하여도 순환 시스템내 앵글과 요철 부분에 끼여 투명관의 시험부에는 고체입자가 유동하지 않았



Photo. 1 Downward test section

다. 어느 정도 시스템 내 고체입자의 농도를 증가시키면 시험부로 고체 유리입자가 유동하였는데 고체입자는 매우 불균일하였으므로 시험부내에서 고체입자의 농도를 본 연구원들이 요구하는 대로 정확히 조절할 수가 없었다. 순환유동층 시스템의 고체입자 순환이동은 펌프와 제트에 의해 가능하였다. 순환펌프는 마그네틱 펌프를 사용 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

레이놀즈수를 계산하기위한 공식은 다음과 같다.

$$Re = (u_b \times D_h) / \nu \quad (1)$$

$u_b$ 는 유체의 유속이고,  $\nu$ 는 유체의 동점도,  $D_h$ 는 관의 직경이다. 관내의 유량은 바이패스 밸브의 개폐정도에 따라 변화시켰다.

압력손실과 유속에 의해 마찰계수는 아래의 식에 의해 정의된다.

$$f = \frac{\Delta P}{4(L/D_h)G^2/2\rho g_c} \quad (2)$$

여기서  $\Delta P$ 는 시험부 입구와 출구간의 압력강하,  $L$ 은 시험부 입구측과 출구측 압력탭 간의 거리,  $D_h$ 는 직경,  $G$ 는 유체 질량속도, 그리고  $g_c$ 는 변환 상수이다.

Fig. 2는 시험부 입구에서 250mm와 650mm의 거리에서의 압력값을 측정 한 예이다. 대체로 고체 입자의 농도와 유체속도가 높을수록 압력구배가 컸

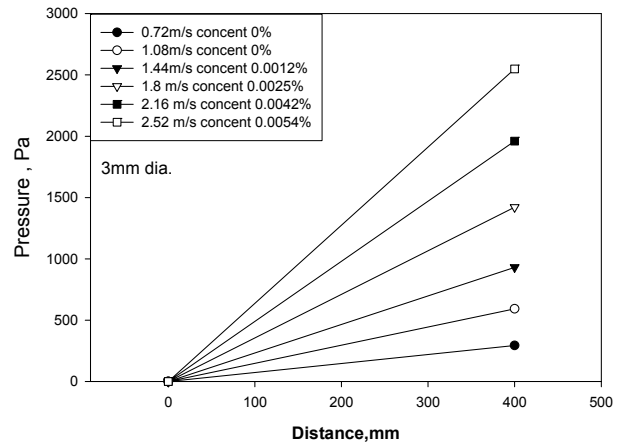


Fig. 2 Variations of pressure gradients

고, 유속이 2.52m/s이고 입자농도가 0.0054v%에서 압력구배가 가장 컸다. 이는 유속과 입자농도가 클

수록 운동에너지보다 전단응력 에너지가 크게 나타났기 때문이라 사료된다.

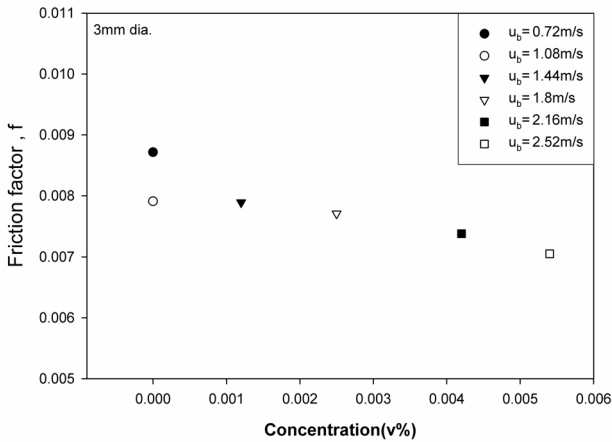
본 연구에서는 시스템 내에 투입한 유리입자 중에서 시험부 내를 통과하는 입자의 량을 농도로 나타내었다. Fig. 3은 매끈한 아크릴관 시험부에 3mm 직경의 유리입자들을 물과 같이 순환하도록 하여 유체입자 농도에 대한 마찰계수 값을 보여준다. 유속이 클수록 운동에너지가 증가하여 유체농도가 증가하였고 물의 속도와 유리입자의 농도가 증가 할수록 마찰계수가 감소하였다. 이는 튜브 속에 흐르는 유리 입자와 물의 혼합류의 전단응력에 비해 운동에너지의 증가가 크기 때문이라 사료된다.

본 연구에서 유리입자의 혼입농도가 적은 경우인 Case(a)에서는 고체입자의 농도는 유체속도에 비례하였다. 그러나 유리입자의 농도가 증가 한 경우인 Case(b)와 Case(c)에서는 순환고체입자의 농도가 반드시 유체속도에 비례하지 않았다. 이는 유리입자가 순환하는 중 시스템내의 요철부와 굴곡(turning)부에 잠입되어 실제로 시험부로 유동하는 유리입자 농도는 매우 분산적이었다.

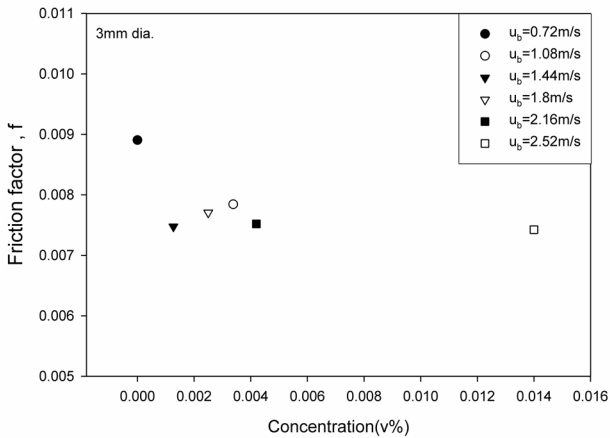
Case(c)는 시험부속에 고체입자 농도가 가장 높은 경우이다. 고체 입자농도가 가장 큰 평균유속  $v_b = 2.52m/s$ 에서는 Case(b)와 비교하면 농도에 증가할수록 마찰계수가 상승함을 보여준다.

이는 고체입자 농도가 낮은 경우에는 입자농도의 영향보다 유속의 영향이 마찰계수 변화에 크게 미치나 입자 농도가 일정 수준이상에서는 입자의 농도도 마찰계수에 큰 영향을 줄 것이라 사료된다. 그 일정 수준의 임계치를 구하는 일은 차후 과제로 남겨둔다.

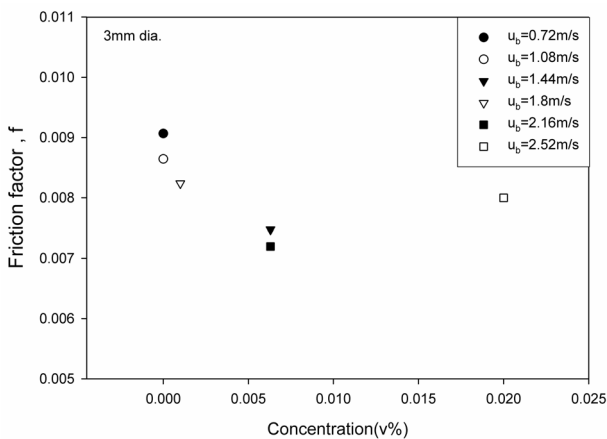
Fig. 4는 레이놀즈 수에 대한 마찰계수 값의 변화



Case (a) Particles of 67cc in the system



Case (b) Particles of 135cc in the system



Case (c) Particles of 169cc in the system

Fig. 3 Friction factors for particles of 3 mm diameter

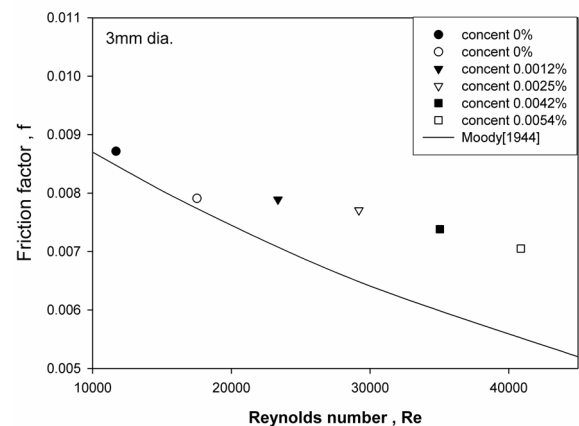
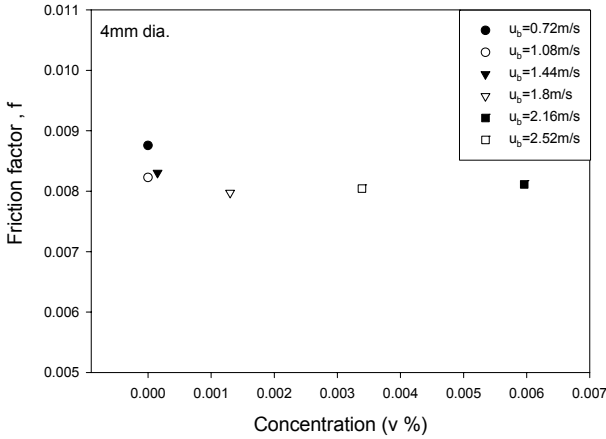
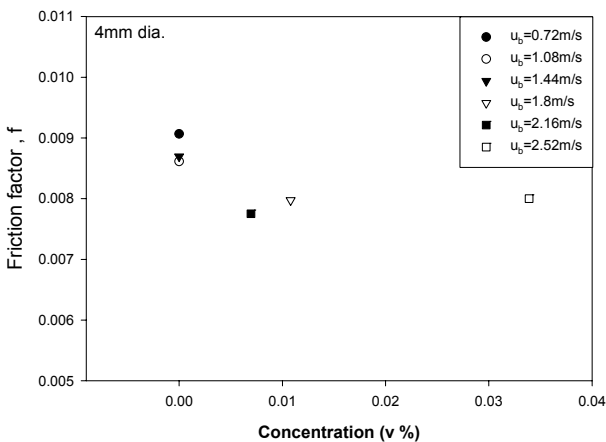


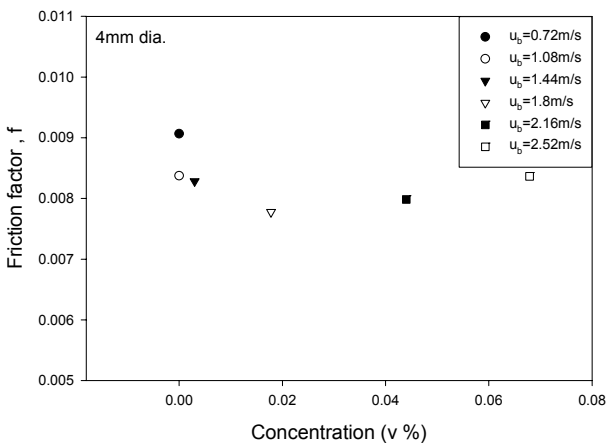
Fig. 4 Friction factors against Reynolds number (particles of 67 cc in the system)



Case(a) Particles of 67cc in the system



Case(b) Particles of 135cc in the system



Case(c) Particles of 169cc in the system

Fig. 5 Friction factors for particles of 4mm dia.

를 보여준다. 레이놀즈 수 계산에서 평균유속과 동점도는 순환수의 값을 사용하였다. 비교를 위해 매끈한 원관에서 고체입자가 혼입되지 않은 경우의

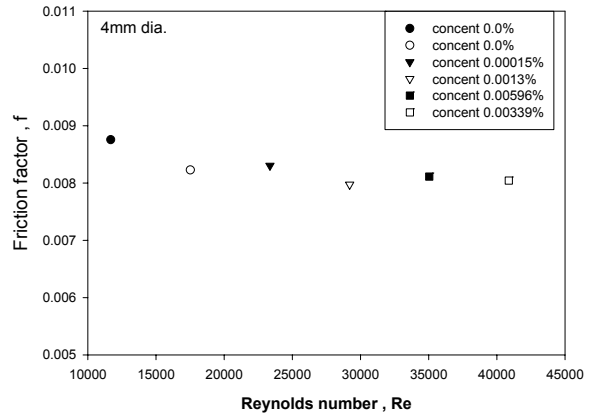


Fig. 6 Friction factors against Reynolds number

Moody<sup>(11)</sup> 값을 포함하였다. 본 연구의 결과는 모든 경우 Moody의 결과보다 크게 나타났다. 이는 고체입자가 혼입됨으로서 벽 면 전단응력이 상승되기 때문이라 사료된다.

Fig. 5는 4mm 직경의 유리입자가 시험부에 유동하는 경우의 마찰계수 값이다. 농도가 증가 할수록 3mm 직경의 입자보다 마찰 계수가 크게 나타났다. 이는 입자가 클수록 고체입자 주위의 유체 경계층의 증가로 인하여 고체입자 전후의 압력차가 커지기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 5의 Case(a)는 Fig. 3의 Case(a)보다 컸다. 이는 Fig. 5는 입자직경이 4mm이고 Fig. 3은 입자 직경이 3mm이기 때문에 압력을 받는 면적이 크기 때문에 동일한 유체 유속일 경우 입자직경이 클수록 입자 상승력이 커지기 때문이라 사료된다.

Fig. 5의 Case(c)는 시험부내 고체입자 농도가 0.07%체적농도 이하 범위에 대한 마찰계수이다. Fig. 5를 보면 고체입자의 농도가 증가할수록 마찰계수가 증가하였다. Fig. 6은 레이놀즈 수에 대한 마찰계수의 값들이다. 고체입자 직경이 3mm에 대한 Fig. 4의 경우보다 마찰계수 값이 약간 높다. 이는 Fig. 6의 경우 고체입자 직경이 4mm이며 고체입자 직경이 크면 고체입자 주위에 유체 경계층이 크게 형성되기 때문이라 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 수평형 순환유동층 열교환기 제작에 필요한 기초 연구를 위해 행하였다. 매끈한 튜브내 고체입자(3mm 와 4mm 직경의 유리)가 혼입된 물을 순환하는 시스템에서 고체입자농도와 유체속도에 따른 마찰계수와 압력강하를 조사한 결과 아래

와 같은 결론을 얻었다.

1. 유체 속도가 증가 할수록 유체 입자의 혼입농도가 대체로 증가 하였고, 이러한 농도 증가가 압력강하를 상승 시켰다.
2. 유리 입자의 크기가 4mm 직경인 경우가 3 mm 직경의 경우보다 마찰계수가 더 컸다.
3. 고체입자 농도가 낮은 경우에는 입자농도 보다 유속의 영향이 마찰계수의 변화에 크게 영향을 미치나 입자농도가 일정수준 이상에는 입자농도도 마찰계수에 큰 영향을 주었다.

### 후 기

이 논문은 지방대학 혁신역량강화사업(NURI)에 의해 지원 되었습

### 참고 문헌

1. Webb, R. L, 1994, "Principles of Enhanced Heat Transfer", Wiley Inter Science, pp. 56~86.
2. 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.
3. 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
4. Grace, J. R., 1986, "Heat Transfer in Circulating Fluidized Beds", In Circulating Fluidized Bed Technology(Edited by Basu, P.) pp. 63~81, Pergamon press, Canada
5. 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.
6. 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), Vol. 2, pp. 1152~1163.
7. Stromberg, L., 1982, "Experiences of Coal Combustion of a Fast Fluidized Bed", Proc. 7th International Fluidized Bed Combustion Conference, Vol. 2, pp. 1152~1163
8. 이금배, 전용두, 박상일, 2000, "고체입자 순환유동층 열교환기의 열전달율 및 압력강하측정", 설비공학논문집, 제 12권, 제 9호, pp. 817~824.
9. 이윤표, 윤성영, 정종수, 김내현, 1995, "순환유동층 열교환기내의 화올링 저감 및 열전달 향상 기구", 공기조화 냉동 공학 논문집, 제 7권 제 3호, pp. 450~460
10. Ahn, S. W., Bae, S. T., Lee, B. C., Bae, M. W. and Kim W. C., 2005, "Fluid Flow and Heat Transfer in Fluidized Bed Vertical Shell and Tube Type Heat Exchanger", Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 32, No. 1, pp. 224~232.
11. Moody, F. F. 1944, "Friction Factors For Pipe Flow", Trans. ASME, Vol. 66, pp. 671~684.