

순환 유동층 열교환기내 유체유동과 열전달

안수환† · 김원철* · 배성택** · 이병창**

(원고접수일 : 2003년 8월 4일, 심사완료일 : 2003년 11월 10일)

Fluid Flow and Heat Transfer in the Fluidized Bed Heat Exchanger

Soo-Whan Ahn† · Won-Cheol Kim* · Sung-Tack Bae** · Byung-Chang Lee**

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 flow velocity range for possible collision between the tube wall and the particles was higher with heavier density solid particles, in addition, the solid particle periodically hitting the tube wall broke the thermal boundary layer, and increased the rate of heat transfer.

Key words : Fluidized Bed Heat Exchanger(순환유동층 열교환기), Solid Particle(고체입자), Heat Transfer Coefficient(열전달계수), Counter Flow(대향류), LMTD(대수평균온도차)

기호설명

아래첨자

A : 횡단면 [m^2]	c : 차가운, 튜브측
d : 튜브 직경 [m]	c1 : 튜브측 입구
D : 열교환기 출구 직경 [m]	c2 : 튜브측 출구
h : 열전달계수 [$W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$]	f : 평균
LMTD : 대수평균온도차 [$^\circ\text{C}$]	h : 뜨거운, 셸측
Nu : 누셀트수	h1 : 셸측 입구
U : 출구유체속도 [m/s]	h2 : 셸측 출구
V : 튜브내 유속 [m/s]	i : 내경
v : 동점성계수 [m^2/s]	o : 외경

† 책임저자(경상대학교 기계항공공학부 해양산업연구소), E-mail : swahn@gaechuk.gsnu.ac.kr, T : 055)640-3125

* 경상대학교 기계항공공학부

** 경상대학교 대학원 기관공학과

U : 출구

w : 유체(물), 벽면

1. 서 론

고체입자는 열용량이 크므로 열교환기내 순환 유동시키면 열전달능력이 향상되어 열교환기의 소형화가 가능하다. 그리고 내식성이 강하므로 부식성의 배기가스에서도 사용 가능하며, 응축수에 의한 분진 등이 전열면에 축적되는 것을 제어하는 청소기능을 한다. 그러므로 열교환기의 전열면에 고체입자가 유동하면 전열효율이 크게 향상된다.

특히 화학적으로 안정되어 오염될 가능성이 적고 반복 사용이 가능하여 환경오염을 크게 줄일 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있다. 이와 같이 많은 장점을 지니고 있는 고체입자를 이용한 순환 유동층 열교환기 시스템과 관련된 연구는 국외에서도 활발하게 연구개발이 진행되어 상용화되고 있다. 그러나, 국내에서의 연구는 초보적인 단계이다.⁽¹⁾ 이러한 순환유동층 열교환기는 미국에서 Hatch와 Wetch⁽²⁾에 의해 처음 조수기의 브라인 가열기로 개발되었다. 순환유동층 열교환기 제작에 필요한 연구에서 Basu와 Nag⁽³⁾는 피상속도, 고체입자 유량, 고체입자의 크기 등을 변화시켜 조사한 결과, 벽면으로부터의 열전달은 부유물의 비중에 비례하나, 고체입자 유량이 일정한 상태에서 유동속도를 증가시키면 열전달율은 감소함을 보였다. Grace⁽⁴⁾는 순환유동층밀도가 열전달에 큰 영향을 미친다고 예측하였다. 이러한 예측은 Stromberg⁽⁵⁾의 실험자료에 기초를 두었다. 국내에서는 Lee and Park⁽⁶⁾은 열교환기 내부의 유동을 프러그 흐름으로 가정하여 고체입자 이동층과 관벽사이의 열전달에 대한 연구를 실험과 이론적으로 수행하였다. 그리고 이 등⁽¹⁾이 공기를 작동유체로 한 순환유동층 열교환기에서 열교환기 직경, 배플관 구멍직경, 그리고 혼합실 높이를 변수로 하여 열전달계수와 압력강하에 대해 조사하였다. 이 등⁽⁷⁾은 2 mm와 3mm 직경의 유리입자를 대상으로 한 가시화 실험을 통한 유체입자의 거동특성과, 열전달 실험 그리고 장시간에 걸친

오염실험을 행하였다. 이 실험으로 농축폐수시스템에 적용할 수 있는 순환유동층 열교환기 제작에 필요한 기초자료를 제공하였다. 본 연구에서는 고체입자의 자연순환에 의하여 오염물질을 세정함으로써 오염이 되지 않는 최적의 순환유동층 열교환기를 개발하는데 필요한 자료를 제공하기 위하여, 유리입자, 철, 구리, 알루미늄, 모래 등 다양한 입자들에 대하여 순환유동층 열교환기의 열전달 특성과 CCD 카메라를 이용한 가시화 실험을 통해 고체입자가 튜브벽면을 충돌하는 유속범위를 고찰하고자한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 가시화실험과 열전달 실험을 동시에 할 수 있는 본 연구의 실험장치 개략도와 실제모습이다. 시험부의 높이는 705 mm이고 통(shell)의 직경은 80.4 mm, 다관의 직경은 14.2 mm로 하였고 다관의 수는 3개이다. 시험부 출구측에 스크린을 설치하여 고체입자들이 밖으로 나가지 않게 하였고, 입구 측에는 입구관을 U자형으로 제작하여 운전이 정지 시에는 입자들이 U관의 아랫부분 쪽으로 모이게 하여 더 이상 입자들이 전진되지 않게 하였다. 시험부의 통 내부에는 뜨거운 수돗물이 튜브내의 차가운 물과 대향류로 흐르게 하였다. 내부 다관 간에 유체와 고체입자는 Fig. 2의 좌측 그림처럼 배플 판을 튜브보다 2 cm 밑에 설치함으로써 순환되도록 하였다. 주위의 온도는 22℃에서 24℃사이였다. 유체순환은 자석식 펌프를 사용하여 고체입자나 오염된 환경에서 작동에 문제가 없도록 하였다. 열전달 실험장치는 스테인레스 강(SUS 304)으로 제작하였다.

Fig. 1과 같이 가시화 시험부와 열전달 시험부는 밸브에 의해 분리되므로 가시화 실험을 행할 때에는 유체순환이 열전달 시험부측에는 가지 않도록 하였다. 가운데 튜브에는 상층부에서 경사에 의해 쌓이는 구슬 때문에 압력손실이 상승하게 된다. 정지판과 상승된 입자들로 인하여 가운데 튜브는 주변 튜브 내부보다 압력손실이 크므로 주변 튜브에서는 계속적인 유체의 상승과 함께 입자

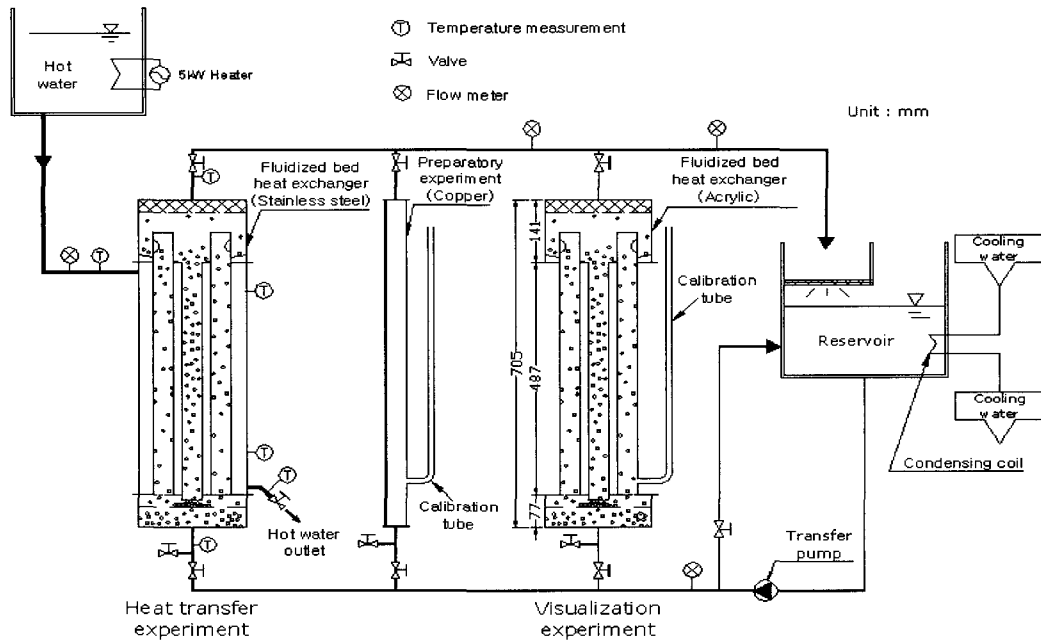


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

의 상승이 일어나고 가운데 튜브에서는 입자의 하강과 함께 유체의 하강이 이루어진다. 하부의 분배판은 유체가 순환 중에는 유체를 각 튜브내로 보내는 역할을 한다. 또한 작동 중에는 하강한 입자가 평판 아래로 내려오지 않고 평판 위에서 다시 상승 튜브로 보내어진다. 그러나 펌프가 정지하여 유체의 순환이 정지하면 입자의 일부는 판위의 구멍을 통하여 아래로 내려오고 일부는 판위에 얹혀져 다음 작동을 기다리게 된다. 작동유체는 오염도가 낮은 수돗물을 사용하였다. 순환유량은 정지밸브와 바이패스 장치에 의해 조절하였다.

유량계는 적층식을 사용하였고 시험부 입구에 1개와 가시화 시험부와 열전달 시험부측 출구에 각각 1개씩 설치하였다. 가시화용 시험부에는 투명 아크릴재료를 사용하여 CCD 카메라 촬영에 용이하도록 하였다. 열전달 실험에 사용된 입자들은 가시화실험에 사용한 입자들과 같다. 실험은 먼저 물만이 흐른 경우에 대해 유속이 0.4에서 2.0m/s 까지 열전달실험을 수행하였으며 3시간에 걸쳐 한 번씩 나누어 두 번 측정하였다.

Table 1 Details of particles in fluidized bed.

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

온도 측정은 자료 획득 장치와 수은 온도계로 보정한 PT105 Ω 로 행하였고 고체입자의 체적농도는 1.8 v%로 일정하게 유지하였다. 입자의 벽면 충돌이 열전달에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 Fig. 1 과 같이 3개의 수직관을 이용한 실험을 수행하였다. 열전달 실험은 길이 487mm의 스테인

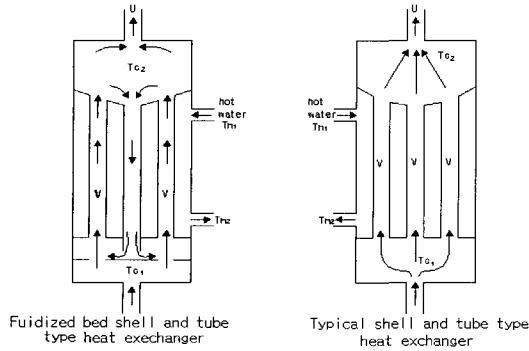


Fig. 2 Comparison of fluidized bed type and typical type shell and tube heat exchanger

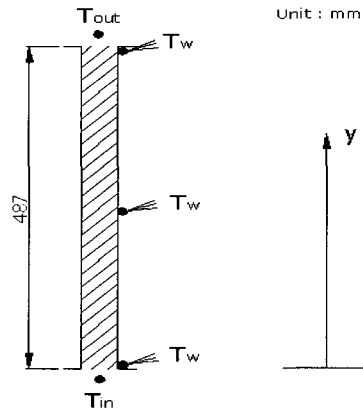


Fig. 3 Heat transfer test tube

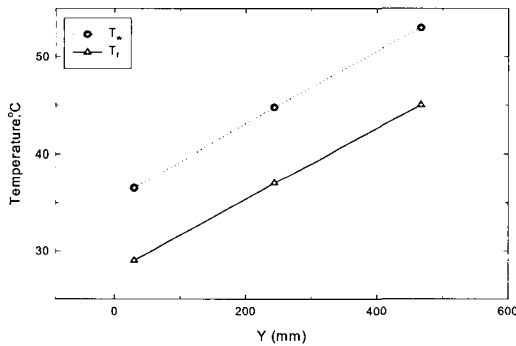


Fig. 4 Variation of wall temperature (T_w) and bulk temperature (T_f)

레스 강(SUS 304)를 사용하였다. 유체순환은 Fig. 2처럼 시험부의 셸 측에는 80°C 이상의 뜨거운 수돗물이 차가운 튜브 측의 흐름과 대향류로

흘러 가열하였고, 셸 측의 뜨거운 물은 5kW 히터가 설치된 탱크로부터 공급되었다. 튜브 측 열전달계수(h_c)는 Fig. 1의 실험장치에서 가운데 있는 동(copper)제의 예비실험부에서 측정된 자료를 이용하였다. 예비 시험부는 woven heater를 튜브전체에 감고 그 주위에는 유리섬유로 단열처리하였다. 관벽의 온도(T_w)와 유체평균온도(T_f)와의 차이가 튜브전체길이에 걸쳐 일정한지를 확인하기 위해 Fig. 3과 같이 열전대(k형)를 관벽 내부에 십여 벽면온도를 측정하였다. 열전대는 축방향으로 각각 3군데에 설치하였다. 그리고 튜브 입출구에 별도로 열전대를 설치하여 길이에 따른 유체평균온도(T_f)를 측정하였다. Fig. 4처럼 벽면온도와 유체평균온도와의 차이는 Fig. 4와 같이 위치에 따라 거의 일정하여, 튜브 전체길이에 걸쳐서 오차범위는 0.5°C 이내에 들어 대류열전달계수는 식 (1)과 (2)와 같이 구할 수 있었다. 열전대(k형)는 열에폭시로 고정하였다. 예비실험부에서 측정된 온도와 유량으로부터 튜브측 열전달 계수 h_c 는 다음 식으로 구해진다.

$$h_c = \frac{Q}{\pi DL(T_w - T_f)} \quad (1)$$

$$Q = \dot{M}_w C_{pw}(T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

여기서 \dot{M}_w 는 유량(kg/s), C_{pw} 는 액체의 비열, T_{out} 은 시험부 출구 액체온도(°C), T_{in} 은 입구 액체온도, T_w 는 벽면 평균온도, T_f 는 평균유체 온도이다. 시험부에 공급된 열전달을 Q 는 공식 (2)으로부터 계산하였다. 실험의 유속은 Table 2처럼 고체입자가 벽면에 충돌할 수 있는 범위에서 하였다.

3. 결과 및 고찰

순환유동층 열교환기에서 상승하는 유체속도는 가운데 관에서 하강하는 유체속도와 거의 일정하여⁽⁷⁾ 연속법칙으로부터 튜브 내 유속을 다음과 같이 유도하였다.

$$\pi \frac{D_i^2 U}{4} = \pi \frac{d_i^2 V_c}{4} \quad (3)$$

$$V_c = U \frac{D_i^2}{d_i^2} \quad (4)$$

Fig. 5에서와 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 흐르는 유체의 유량을 정확히 알 수 없어 시험부 전체 체적에 대한 고체입자의 농도를 1.8%로 하여 배플판 위에 쌓인 고체입자들이 가운데관의 유체유동에 영향이 없도록 한 상태에서 열전달 실험을 행하였다. 입자농도 정도에 따른 유량의 변화에 대한 연구는 추후의 과제로 남겨두었음을 밝힌다.

튜브 측과 셸 측의 열전달율은 다음과 같이 구했다.

$$Q_c = \dot{m}_c c_p (T_{c1} - T_{c2}) \quad (5)$$

$$Q_h = \dot{m}_h c_p (T_{h1} - T_{h2}) \quad (6)$$

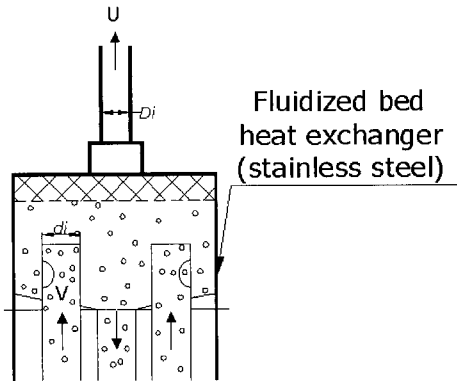


Fig. 5 Details of test section

그리고 시험부의 대수평균온도차는 식 (7)과 같다.

$$LMTD = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln[(T_{h1} - T_{c2}) / (T_{h2} - T_{c1})]} \quad (7)$$

Table 2 Particle flow velocity for collision.

Classification	particle flow velocity for 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

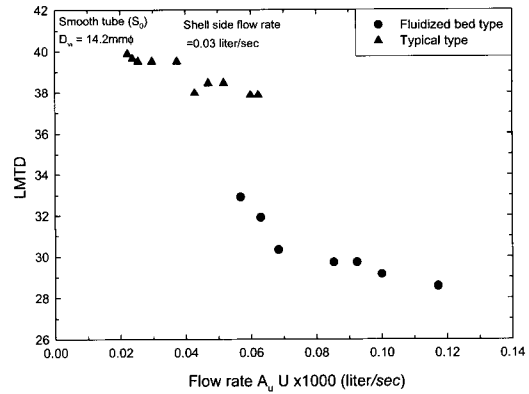


Fig. 6 LMTD versus flow rate

원통 다관형 순환유동층 시스템이 열교환기 입출구온도차에 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig. 2와 같은 경우에 대해 조사하였다. 좌측 그림처럼 배플을 설치한 경우의 순환유동층 원통 다관형 열교환기와 우측 그림처럼 배플이 없는 경우의 전형적인 원통 다관형 열교환기에 대해 입·출구 온도차를 비교하기 위해 대수평균온도차를 각각 측정하여 Fig. 6과 같이 나타내었다. 순환유동층 원통 다관형 열교환기의 경우가 전형적인 원통다관형 열교환기에서보다 대수평균온도차가 훨씬 작게 나타났다. 이는 순환유동층의 경우 시험부내에서 유체가 재순환하기 때문에 튜브 측 입구의 온도가 상승하기 때문이라 사료된다. 그리고 모든 경우 유량이 많을수록 대수평균 온도차가 증가하는데, 이는 셸 측 유속이 일정할 경우 튜브 측 유량이 많

을수록 열전달(Q)이 증가하므로, 튜브 내 열전달 계수 h_c 는 Fig. 3의 단일 튜브로부터 구하였다. 대수평균온도차는 대향류의 경우 Fig. 2의 열교환기 입구와 출구의 온도로부터 식 (7)과 같다. 셀 측 입구온도는 75°C 이고 튜브 측 입구온도는 21°C 로 하였다. 순환유동층의 경우 유체를 가열하는 시간을 증가시키는 효과가 있어 열교환기 크기를 줄이는데 유익하다고 사료된다.

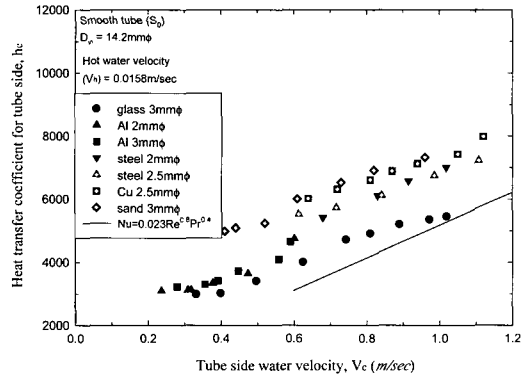


Fig. 7 Heat transfer coefficients for tube side

Fig. 7은 튜브 내 유속(V_c)변화에 대한 튜브 측 열전달계수 h_c 를 나타낸 것이다. 셀 측 뜨거운 물의 유속은 0.0158 m/s 로 일정하게 유지하였다. 대체로 열전달계수의 크기는 구리와 모래가 가장 크고, 스테인레스, 알루미늄, 그리고 가장 작은 것은 유리입자이었다. 이는 열전달계수를 증가시키는 데는 고체의 열용량과 형상이 중요함을 보여주는 것이다. 즉, 밀도가 클수록, 표면이 거칠수록 증가하였다. 알루미늄과 스테인레스 강의 경우 $2\text{ mm}\phi$ 보다 $2.5\text{ mm}\phi$ 나 $3\text{ mm}\phi$ 에서 열전달계수가 컸다. 이는 알루미늄과 스테인레스 입자의 경우 모두 실린더 구조이고, $2\text{ mm}\phi$ 보다 $2.5\text{ mm}\phi$ 과 $3\text{ mm}\phi$ 가 구(sphere)에 가까워 투영압력면적의 증가로 유체저항이 상승하여 입자가 벽면에 충돌하는 회수가 증가되었기 때문이라 사료된다. 튜브 측에서 고체입자가 튜브벽면을 충돌하는 속도의 범위는 Table 2와 같이 한정된다. 그러므로 튜브 측의 열전달율과 셀 측의 열전달율이 동일한 조건을 유지하는 것이 불가능 하였다. 튜브 측과

셀 측간에 완전한 열역학적 평형이 이루어지지 않으므로 정확한 총합 열전달계수를 구할 수 없어, 셀 측의 열전달계수계산이 불가능 하였다. 비교를 위해 고체입자가 포함되지 않는 경우에 대한 값을 실선으로 나타내었다. 튜브 측 대류열전달 계수는 고체입자가 순환유체 속에 포함된 경우가 포함되지 않은 경우보다 대체로 컸다. 특히 유속이 낮을수록 차이가 심하였다. 이는 유속이 낮을수록 고체입자가 튜브 벽면에 충돌하는 수가 많기 때문이라 사료된다.

4. 결 론

- 1) 고체입자가 튜브벽면에 충돌하는 속도는 밀도가 클수록 높은 범위에서 발생하였다.
- 2) 입자의 비중이 크고 거칠수록 그리고 구에 가까울수록 열전달계수가 증가 하였다.
- 3) 순환유동층일 경우 대수평균온도차가 적어 열교환기 크기를 줄이는데 유익하였다.

후 기

이 논문은 2003~4년도 과학재단지원 목적기초연구(R05-2002-000-00013-0)와 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음

참고 문헌

- [1] 이금배, 전용두, 박상일, 2000. 고체입자 순환유동층 열교환기의 열전달률 및 압력강하 측정. 설비공학논문집, 제 12권, 제 9호, pp. 817-824.
- [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] Stromberg, L., 1982, Experiences of Coal Combustion in a Fast Fluidized Bed, Proc. 7th International Fluidized Bed Combustion Conference, Vol. 2, pp. 1152-1163.
- [6] 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.
- [7] 이윤표, 윤성영, 정종수, 김내현, 1995, 순환 유동층 열교환기내의 화울링 저감 및 열전달 향상 기구, 공기조화냉동공학논문집, 제 7권 3호, pp. 450-460.

저 자 소 개



안수환 (安守煥)

1953년생. 1976년 부산수대 졸업. 1981년 부산수대 대학원 졸업(석사). 1990년 캐나다 Ottawa 대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1995년 부산대학교 대학원 생산기계공학과 졸업(박사). 현재 경상대학교 기계항공공학부 교수 재직. 당학회 증진회원.



김원철(金源喆)

1950년생. 1972년 부산수산대학교 기관공학과 졸업. 1986년 동대학원 졸업(석사). 1993년 동대학원 졸업(박사). 1976년 2월~1982년 10월 송출선 승선 근무. 현재 경상대학교 기계항공공학부 교수.



배성택 (裴成擇)

1976년생. 2002년 2월 경상대학교 수송기계공학과 졸업. 2002년 9월~현재 경상대학교 대학원 기관공학과 석사과정 재학중.



이병창 (李炳昌)

1974년생. 2000년 경상대학교 기관공학과 졸업. 2000년 3월~2002년 2월 동대학원 기관공학과 졸업(석사). 2003년 2월 창원대학교 기계공학과 박사 1년 수료. 2003년 3월~현재 경상대학교 대학원 기계시스템 공학과 박사과정 재학중.