

순환유동층 열교환기 내의 화울링 저감 및 열전달 향상 기구

Mechanism of Fouling Reduction and Heat Transfer Enhancement in a Circulating Fluidized Bed Heat Exchanger

이 윤 표,* 윤 성 영,* 정 종 수,* 김 내 현**

Y. P. Lee, S. Y. Yoon, J. S. Jurng, N. H. Kim

Key words : Circulating fluidized bed heat exchanger(순환 유동층 열교환기), Visualization(가시화), Particle collision(입자충돌), Particle velocity(입자속도), Terminal velocity(종단속도)

Abstract

A modified circulating fluidized bed heat exchanger under severe fouling condition is developed. The effects of fouling deposits on the performance of a heat exchanger are investigated. The principle and operating characteristics of a circulating fluidized bed heat exchanger are discussed. A modified circulating fluidized bed heat exchanger shows more stable operating than the other circulating fluidized bed heat exchanger. The characteristics of self cleaning and heat transfer enhancement of a circulating fluidized bed heat exchanger are studied. The movement of spherical particles in a tube is visualized and heat transfer enhancement and scale reduction mechanism by particles are investigated.

기 호 설 명

- a : 입자의 반경 [m]
- c : 열용량 [W/kg K]
- c_d : 항력계수
- c_v : 고체 체적분율
- D : 관직경 [m]
- E : 노출율
- F : 입자에 작용하는 외력 [N]
- g : 중력 가속도 [m/s^2]
- h : 열전달 계수 [W/m^2s]
- Q : 열전달률 [W]
- T : 온도 [K]
- U : 속도 [m/s]

하 침 자

- b : 부력
- d : 수력
- w : 물
- r : 상대적인 량
- s : 고체입자

1. 서 론

최근 산업의 발달에 따라 폐수의 형상도 매우 다양해 지고 있다. 폐수의 처리방법에는 여러가지가 있으나 산업폐수의 종류에 따라 열에 의한 분리가 폐수의 처리에 효과적인 경우가 있다. Fig.1은 열교환기를 사용하는 폐수분리장치의 개념도이다¹⁾.

* : 한국과학기술연구원 기전연구부

** : 인천대학교 기계공학과

즉 폐수는 열교환기에 의하여 가열되고 증발기에서 프래쉬 현상에 의하여 폐수중 수분의 일부가 증발된다. 증발되지 않은 폐수는 농축되며 프래쉬 현상에 의하여 온도가 내려가게 된다. 농축된 폐수는 장치의 설계값에 이르기까지 다시 열교환기로 들어가 가열된다. 이때 순환액의 농축도가 증가함에 따라서 열교환기 내의 관내 튜브벽에서 화올링이 발생한다. 화올링은 열교환기에서 열전달을 방해하거나 유동저항을 일으키는 침적물로서 정의한다²⁾. 열교환기 관벽에 발생한 화올링은 관벽의 열저항을 증가시켜 열전달을 현저하게 감소시킬 뿐 아니라 관벽의 거칠기를 증가시켜 관마찰에 의한 압력손실을 증가시키므로 주기적인 세정이 요구된다. 세정방법에는 여러가지가 있으나 대개 화공약품에 의한 세정이 일반적이다. 따라서 세정액에 의한 2차 오염을 야기시킨다. 이에대하여 본 연구에서는 유리구슬의 자연 순환에 의하여 세정이 되므로 화올링이 되지 않는 순환 유동층 열교환기를 개발하였다. 또한 순환 유동층 열교환기의 자율세정 특성 및 열교환 특성을 고찰하였다. 레이저를 이용한 단일관내의 유리구슬의 거동을 가시화하여 유리구슬에 의한 열전달 향상 및 화올링 제거 기구를 고찰하였다.

환기에는 열교환기면에 심한 화올링이 형성된다. 따라서 주기적인 세정이 필요하다. 세정시 운전중 중단하는지 여부에 따라 Off-Line과 On-Line 방식으로 구분된다³⁾. On-Line 방식은 시스템을 가동시키고도 세정이 가능하므로 경비면에서 보다 유리한 On-Line 방식이 선호되고 있다. 그러나 스폰지 볼 등을 순환시키는 On-Line 방식은 부대장치가 소요되는 단점이 있다.

이와 같은 이유로 입자의 자연순환에 의하여 열교환기 내부가 세정되는 순환 유동층 열교환기가 독일에서 개발되었다^{4),5)}. 독일에서 개발된 순환 유동층 열교환기는 튜브의 길이 차이에 의하여 유리 입자가 순환하게 되어 있다. 초기에 원액의 상승과 함께 입자는 상승하게 되는데 이때 긴 튜브의 끝단이 더 아래로 내려와 있으므로 긴 튜브의 끝단으로 입자가 먼저 상승하게 된다. 입자의 재료는 주로 유리로서 밀도는 물의 약 2배이므로 긴 튜브 내부의 밀도는 짧은 튜브 내부보다 높게 된다. 따라서 긴 튜브의 압력 손실은 짧은 튜브보다 크게 되어 짧은 튜브로 입자의 상승이 일어나고 긴 튜브에서는 입자의 하강이 이루어 진다. 즉 입자의 순환이 이루어 지기 위해선 긴 튜브와 짧은 튜브 간의 압력 차이가 존재하여야 한다. 그러나 초기 유량이

2. 순환 유동층 열교환기의 개발

앞서의 설명과 같이 농축시스템에 사용되는 열교

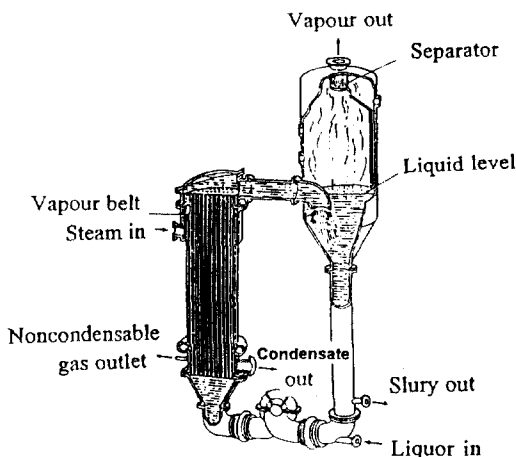


Fig.1 Flashing evaporation using a vertical heat exchanger¹⁾

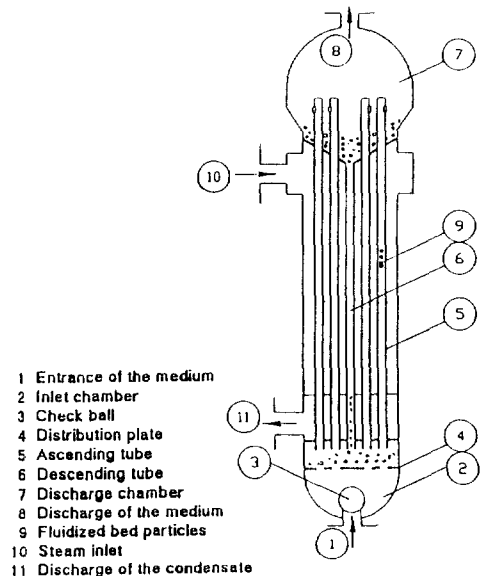


Fig.2 Circulating fluidized bed heat exchanger with a slope

크면 긴 튜브와 짧은 튜브 모두 입자의 상승이 이루어지고 모든 구슬은 상승부에 존재하게 되어 순환이 불가능하게 되는 유량 영역이 존재한다.

이와 같이 순환 유동층 열교환기는 화올링 제거 면에서는 훌륭하나 넓은 유량대에서 좀더 안정된 입자의 순환이 이루어 지는 열교환기의 개발이 필요하게 되었다.

이에 대하여 Fig.2는 이번 연구에서 개발된 경사면을 가진 순환 유동층 열교환기이다. 입자의 순환 원리는 Fig.3에서 보는 바와 같이 다음과 같이 설명된다. 주변의 튜브에 의하여 상승한 입자는 상부의 확대된 단면에 의하여 속도가 감소하게 된다. 따라서 자중에 의하여 바닥에 떨어지게 되는데 이때 경사에 의하여 가운데 튜브로 굴러가게 된다. 가운데 튜브는 하부에 원액의 상승이 가급적 적게 되도록 정지판을 둥그로써 가운데 튜브로 가는 유량은 매우 적게 된다. 더욱이 가운데 튜브에는 상층부의 경사에 의하여 쌓이는 구슬에 의하여 압력

손실이 상승하게 된다. 정지판과 높은 입자밀도로 인하여 가운데 튜브 내부는 주변 튜브 내부보다 압력손실이 크므로 주변 튜브에서는 계속적인 원액의 상승과 함께 입자의 상승이 일어나고 가운데 튜브에서는 입자의 하강과 함께 원액의 하강이 이루어진다. 하부의 분배판에는 튜브 단면적의 1/2에 해당하는 구멍이 튜브의 2배 정도의 갯수만큼 뚫려 있다. 이 판은 원액의 순환 중에는 원액을 각 튜브 내로 균일하게 보내는 역할을 한다. 또한 작동 중에는 하강한 입자가 분배판 아래로 내려오지 않고 분배판 위에서 다시 상승 튜브로 보내어진다. 그러나 펌프가 정지하여 원액의 순환이 정지하면 입자의 일부는 판위의 구멍을 통하여 아래로 내려오고 일부는 판 위에 얹혀져 다음 작동을 기다리게 된다. 본 시스템에서 사용한 입자는 유리구슬로서 평균직경은 약 2.955mm이며 밀도는 2,635kg/m³이다.

시스템을 중단시키거나 갑자기 중단되었을 때 열교환기 내부의 입자가 역류하여 열교환기 외부로 유출될 수 있다. 이 경우 유출된 입자는 펌프 등에 들어가 시스템을 손상시킬 수 있다. 이와 같은 입자의 역류를 방지하기 위하여 유입구 부분에 체크볼을 설치하였다. 이 체크볼은 시스템의 작동 중에는 유입수의 압력과 자중의 차이에 의하여 뜨게 되므로 전체 유입수를 균일하게 하는 역할도 하게 된다.

상승관에서 상승한 입자가 유동에 의하여 열교환기 밖으로 나가는 현상을 방지하여야 한다. 이를 위하여서는 가급적 상부에서 입자의 속도를 줄일 수 있는 구조가 있어야 한다. 이를 위하여 상승 튜브의 끝단이 막혀져 있고 벽면으로 구멍이 뚫려져 있다. 따라서 상승한 입자는 상승관의 끝단에서 방향을 바꾸면서 속도가 줄고 벽면과 충돌하여 더욱 속도가 줄어 든다. 실제로 구멍의 방향을 벽면을 향하지 않고 중심을 향하게 설치한 경우 입자의 상당부분이 유동과 함께 외부로 유출됨을 관찰하였다.

3. 열전달 성능실험

순환 유동층 열교환기의 화올링 제거 성능을 가시적으로 검증하기 위하여 동일한 형태의 열교환기

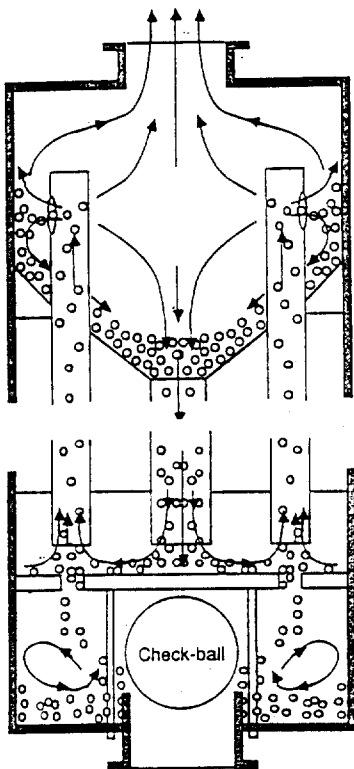


Fig.3 Circulating pattern of inner particles

2개를 아크릴로 제작하였다. 열교환기 내부에서 발생하는 화올링의 생성 정도를 육안으로 관찰하는 정성적인 방법을 사용하였다.

그 중 1개의 열교환기에는 원수와 함께 유리 입자들을 순환시켰고 나머지 한개의 열교환기는 원수만을 순환시켰다. 본 실험에 사용된 펌프의 양정은 7m이고 유량은 분당 200리터인 것을 사용하였다. 각 열교환기로 순환되는 유량은 각각 5ton/hr로 일정하게 유지하였다.

실험방법은 우선 순환 펌프를 작동시킨 후 각 열교환기로 유입되는 유량을 비교한다. 각 열교환기로 유입되는 순환수 유량이 다를 경우 유량조절용 밸브를 사용하여 유량이 같도록 조절한다. 일단 유량이 조절되면 장시간 동안 실험장치를 가동시켜서 열교환기 벽에서 생성되는 화올링을 육안으로 관찰한다. 실험을 20일 동안 수행하였고 열교환기에서 화올링을 촉진하기 위해서 야간에는 펌프의 작동을 중지시킨 후 열교환기내에 순환수를 가득 채운채

두었다. 이것은 열교환기 내부의 유동이 없을 경우가 유동이 있을 경우보다 화올링이 보다 더 촉진되기 때문이다. 본 실험에 사용된 폐수는 화올링 실험에 일반적으로 자주 사용되는 산화철 즉 Fe_2O_3 를 수도물에 부피비로 15,000ppm 농도가 되도록 첨가하여 인위적으로 만들었다.

순환펌프를 20일 동안 작동시킨 후 화올링 형성 정도를 비교하기 위해서 순환수를 실험장치 밖으로 배출시킨 후 두 열교환기의 화올링 상태를 육안으로 관찰하였다. 기존의 열교환기 경우 화올링이 형성되어서 내부를 볼 수 없지만 순환 유동층 열교환기는 Fig.4에서 보는 것과 같이 거의 벽면이 투명하기 때문에 내부를 볼 수 있는 정도로 양호한 특성을 보였다. 이것은 순환 열교환기 내부에서 순환되고 있는 입자들이 열교환기 벽면을 충돌하면서 스케일을 제거한 결과이다.

입자의 벽면 충돌이 열전달에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 Fig.5와 같이 단일 수직관을 이용한 실험을 수행하였다. 열전달 실험은 길이 1.4m의 동관을 사용하였다. 시험부로의 열전달은 동관에 폭 5m의 파형 니크롬선을 촘촘히 감은 후 니크롬양단에 적정량의 전류를 공급함으로써 이루어 졌다. 시험부에서 공급된 열량은 열교환기에서 냉각수로 전달된다.

벽면온도는 열전대를 관벽 내부에 심어 측정하였다. 열전대는 축방향으로 20cm씩 6군데 설치하였다. 측정된 온도와 유량으로 부터 열전달계수 h 는 다음 식으로 구해진다.

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

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

여기서 m_w 는 유량(kg/s), C_{pw} 는 액체의 비열, T_{out} 는 시험부 출구 액체온도($^{\circ}C$), T_{in} 은 입구액체온도, T_w 는 평균 벽면온도, T_f 는 평균 유체온도이다. 시험부에서 공급된 열량 Q 는 식(2)로 부터 계산된다. 실험은 유속 0.5m/s에서 2.0m/s까지, 고체의 체적흐름 양 즉 전체 유량 중에서 고체 입자가 차지하는 부피비 C_s 는 0.21까지 변화시키며 수행하였다.

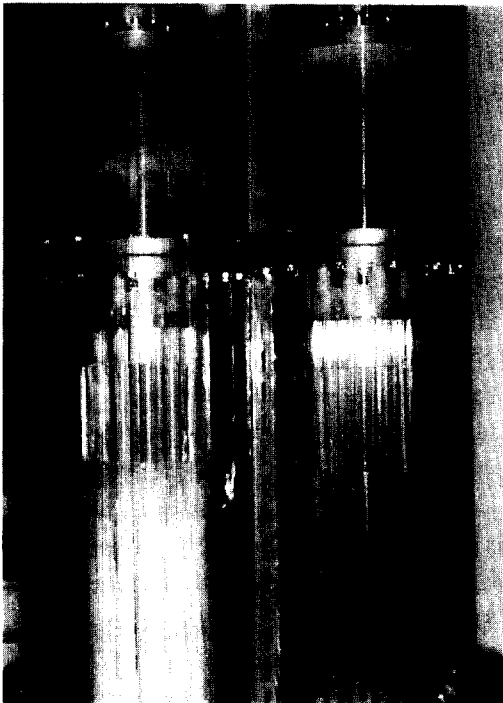


Fig.4 Comparison of fouling condition between conventional and fluidized heat exchanger

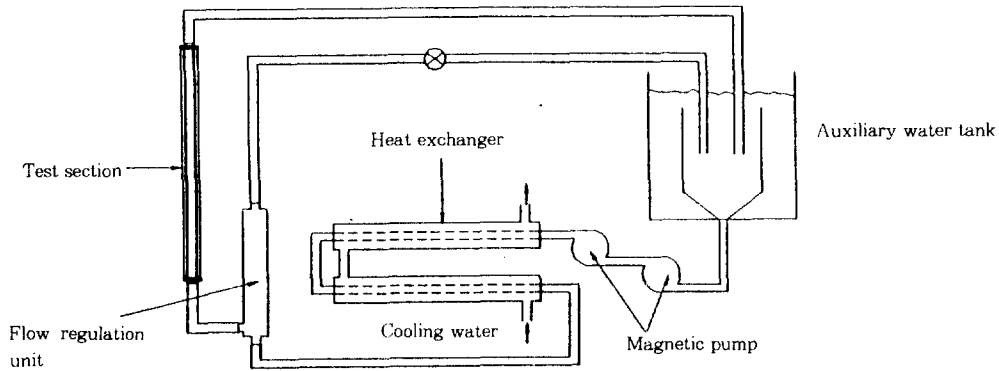


Fig.5 Schematic drawing of the experimental apparatus for the effect on the heat transfer coefficient

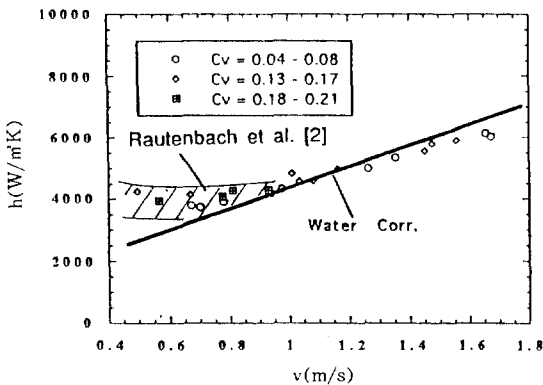


Fig.6 Improvement of the heat transfer through operation of a fluidized bed

Fig.6은 유리구슬을 물과 같이 순환시키며 측정 한 열전달계수이다. 유속 1.0m/s 이상에서는 열전달계수가 물만이 흐를 때의 열전달계수와 거의 같음을 보여준다. 또한 유속 1.0m/s 이하에서는 열전달계수는 물만이 흐를 때에는 유속이 작아짐에 따라 감소하는데 유리구슬이 함께 순환하는 경우 물만이 흐를 때 보다 증가하여 거의 일정해짐을 보여준다. 고체의 체적 흐름량 C_v 가 증가하면 열전달계수는 다수 증가하나 C_v 에 따른 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

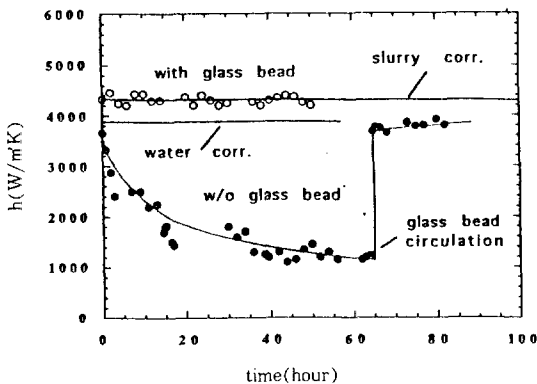


Fig.7 Cleaning effect of the fluidized bed on Fe_2O_3 scale

유동층 열교환기의 스케일 제거 효과를 열전달을 측정함으로써 확인하는 실험을 수행하였다. 실험장치는 열전달 실험 장치를 그대로 사용하였고 관벽에 화물링을 인위적으로 일으키기 위하여 30000ppm의 산화철(Fe_2O_3)을 물과 함께 순환시켰다. 실제 폐수 처리 장치에 형성되는 스케일은 폐수의 종류에 따라 스케일의 성분이 달라지게 되는데 본 연구에서는 대표적으로 산화철을 선택하였다. 고농도 폐수 내에 포함되어 있는 고형분은 대략 10,000ppm 정도이나 일정시간 내에 화물링을 일으키기 위하여 30,000ppm을 선택하였다. 본 실험에 사용된 산화철의 입자 평균 직경은 $0.98\mu m$ 이고 평균 비중은 5.12이다.

화물링 실험은 시스템이 정상상태에 도달한 후에 일정량의 산화철을 순환수에 투입함으로써 시작된다. 시간이 흐름에 따라 관벽에 산화철이 침적되고 따라서 열전달계수는 감소하는데 Fig.7에 화물링

곡선이 보여진다. 시험중 유속은 0.8m/s로 유지되었고 유리구슬의 체적흐름량은 0.1이었다. 실험은 처음부터 유리구슬과 같이 순환시킨 경우(가운데가 빈 원으로 표시)와 유리구슬 없이 일정시간 운전한 후 화올링이 충분히 일어났다고 판단되면 유리구슬을 순환시킨 경우(가운데가 채워진 원으로 표시)로 나누어 수행되었다. Fig.7은 처음부터 유리구슬을 같이 순환시킨 경우에는 열전달계수가 초기값을 유지하고 있음을 보여준다. 이는 물과 같이 순환하는 유리구슬이 연속적으로 벽면에 부딪힘으로써 산화철 침적을 방지하기 때문에 판단된다. 초기에 물만을 순환한 경우는 시간이 지남에 따라 열전달계수가 급격히 감소함을 보여준다. 또한 곡선 형상은 점근적으로 감소함을 보여주는데 이는 입자 화올링의 일반적 경향이다. Fig.7은 실험 시작 후 약 65시간 후에 유리구슬을 투입한 결과를 보여주는데 열전달계수는 투입직 후 급격히 상승하였고 그 후 점차로 화올링이 없는 경우의 열전달계수로 접근해 감을 보여준다. 이는 이미 화올링이 심하게 일어났을 경우라도 유리구슬은 효과적으로 침적물을 제거할 수 있음을 보여준다.

4. 유동층 열교환기 내의 유리입자의 운동

본 절에서는 유리구슬의 거동을 고찰함으로써 유리구슬에 의한 화올링 제거와 열전달 성능 향상 기구를 규명하고자 한다. 즉 유속 1.0m/s이하에서는 유리구슬의 순환의 경우가 물만의 유동의 경우보다 열전달이 증가하나 1.0m/s이상에서는 열전달 증가가 일어나지 않는 이유를 살펴보고자 한다.

본 연구에서는 유리구슬의 직경이 2mm와 3mm인 경우에 대해서 관내부로 흐르고 있는 유체가 상승하고 또한 유리구슬도 상승하는 경우에 대하여 레이저를 이용하여 유리구슬의 거동을 관찰하였다. 상승하는 유체의 속도가 변화함에 따라서 유리구슬의 속도 변화와 유리구슬이 유리관 벽을 충돌하는 현상등을 조사하였다. 이로 부터 유속에 따른 열전달 성능 향상 기구를 규명하고자 하였다.

Fig.8은 유리구슬의 거동을 조사하기 위한 가시화장치이다. 가시화를 위해서 사용된 레이저는 출력이 4W이고 카메라는 고속촬영이 가능한 Kodak사 제품인 High Speed Motion Analyser(모델명

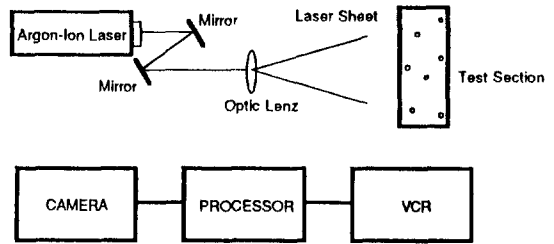


Fig.8 Schematic diagram of the experimental apparatus for the visualization of the particle movement

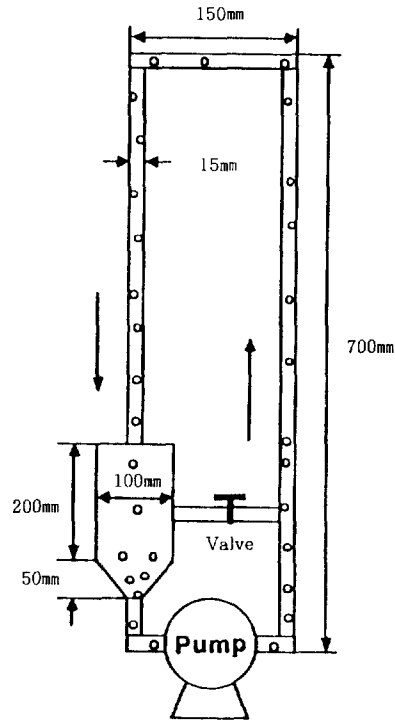


Fig.9 Experimental apparatus for visualization

EKTAPRO)를 사용하였다.

Fig.9는 유동층 열교환기의 상승관에서 발생하는 구슬입자의 거동을 조사하기 위해서 만든 가시화용 실험 장치이다.

사진촬영과 측정을 위해서 내경이 12mm이고 길이가 700mm유리관을 사용하였다. 특히 레이저를 사용할 때 빛의 산란을 방지하기 위해서 파이렉스

유리로 제작하였다. 유리관 내부로 유입되는 유리 구슬은 직경이 2mm와 3mm로 두가지의 종류에 대해서 실험을 수행하였다.

실험은 유리구슬을 일정하게 유체와 흐르도록 한 후 레이저로 가시화하고 가시화된 화상을 프로세서로 분석한다. 유리관 내부의 유동조절은 수직유리관 입구에 설치된 바이패스용 밸브를 사용하여 유체 및 유리입자의 속도를 변화시켰다.

유리구슬 및 유체의 속도측정은 화상에서 최초의 위치로 부터 유체 및 유리구슬의 최종위치까지의 이동거리와 소요된 시간을 측정하면 속도를 계산할 수 있다. 이동거리는 촬영된 화상에서 Pixel 수와 화상에서 1 Pixel 거리와 실제의 거리비를 측정하면 계산할 수 있다. 그리고 소요 시간은 촬영된 화상의 수와 고속 카메라의 Exposure Rate를 알면 산출할 수 있다.

여기서 화상에서 1 Pixel 거리와 실제 거리와의 비는 화상에 나타난 실제 길이를 알고 있는 유리관 직경과 촬영된 화상의 Pixel를 측정하여 계산하였다.

카메라의 Exposure Rate가 E, 프레임 수가 N 화상에서 1 Pixel의 거리와 실제 길이의 비가 s라고 하면 속도는 다음식으로 부터 계산할 수 있다.

$$U = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{Nx E} \times s \tag{3}$$

여기서 X와 Y는 구슬입자의 X 및 Y방향으로의 이동거리이다.

예를 들면 초기 t_1 시각에서 프레임수가 N_1 이고 위치 X_1, Y_1 에 존재한 유리구슬이 유체의 유동에 의해서 일정한 시간 후 t_2 에 프레임수와 위치가 각각 N_2, X_2, Y_2 로 이동하였다고 하면 입자의 이동 속도를 계산할 수 있다. Table 1은 위의 식으로 부터 계산된 유리구슬의 X, Y 방향으로의 속도들이다.

상승하는 유체유동에 대하여 유리 구슬주위에 작용하는 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 유체중에서 운동하는 유리구슬에 작용하는 힘은 Fig.10과 같이 3가지 힘으로 구별할 수 있다. 먼저 자신의 중력(F_g), 부력(F_b), 그리고 유리구슬 운동에 의한 유체 저항력(F_d)을 받게 되며 이들 힘의 균형에 의해서 운동을 하게 된다.

Fig.10에서 유리구슬의 반경과 밀도를 각각 a, ρ_s 라고 하면 중력 g 에서 유리구슬에 작용하는 중력(F_g)은

$$F_g = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_s g \tag{4}$$

이고 이 힘은 유리구슬의 유동방향이나 속도의 크기에 관계 없이 일정하게 작용된다.

Fig.10에서 F_b 는 유리구슬이 주위유체에 대한

Table 1 Particle velocity data

CASE	1	2	3	4	5	6	7
E	1/1,000	1/1,000	1/1,000	1/1,000	1/1,000	1/1,000	1/1,000
$s \times 10^3$	0.083	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076
N_1	-82	-223	-148	-78	-247	-247	-117
N_2	-73	-211	-138	-62	-239	-237	-82
X_1	0	5	0	0	0	0	0
Y_1	0	28	0	0	0	0	0
X_2	1	5	1	6	1	1	2
Y_2	34	63	141	163	84	72	5
U_s [m/s]	0.312	0.221	1.071	0.774	0.797	0.546	0.011
U_x [m/s]	0.009	0.000	0.007	0.028	0.009	0.007	0.004
U_y [m/s]	0.312	-0.221	1.071	0.773	0.797	0.546	0.011

부력으로서 이것은 주위 유체와의 밀도차에 의해서 발생하는 힘이다. 유리구슬 주위를 지나는 유체의 밀도를 ρ_w 라고 하면 부력 (F_b)은 다음과 같다.

$$F_g = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_w g \quad (5)$$

그리고 유리구슬에 작용하는 외력으로서 유체의 저항력이 있다. 이것은 유리구슬과 주위유체와의 점성에 의해서 발생하는 힘이다.

유리구슬과 유체와의 상대속도가 U_r 이라고 하면 저항력(F_d)은 다음과 같다.

$$F_d = \frac{1}{2}\rho_w U_r^2 C_d \pi a^2 \quad (6)$$

여기서 C_d 는 마찰저항 계수로서 유리구슬을 지나는 속도에 따라서 그 값이 다르며 일반적으로 다음과 같이 정의되는 레이놀즈 수에 따라서 정의된다.

$$Re = \frac{\rho_w U_r 2a}{\mu_w} \quad (7)$$

그리고 유체저항 계수는 구슬주위로 지나는 유체의 레이놀즈수가 1이하인 경우 1보다 크고 1,000

이하인 경우 그리고 1,000이상인 경우에 대해서 다음과 같이 주어진다.⁶⁾

Re<1인 경우

$$C_d = \frac{24}{Re} \quad (8)$$

1<Re<1,000인 경우

$$C_d = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2/3}\right) \quad (9)$$

Re>1,000인 경우

$$C_d = 0.44 \quad (10)$$

유리구슬의 종단속도는 유체와 유리구슬의 물성치에 의해서 결정되며 그 크기는 유리구슬 주위에 작용하는 힘의 균형식으로 부터 계산할 수 있다.

그림에서 유리구슬에 작용하는 힘들의 균형식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$-F_g + F_b + F_d = 0 \quad (11)$$

윗식에서 중력, 부력 그리고 유체저항력에 관한

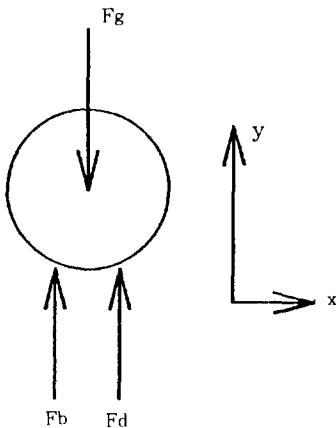


Fig.10 External forces acting on a glass particle

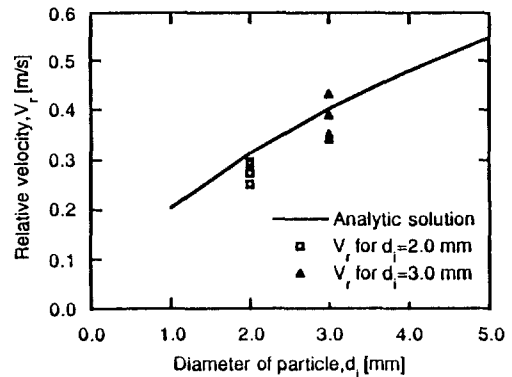


Fig.11 The variation of relative velocity with particle diameter

식을 대입하면 다음과 같다.

$$-\frac{4}{3}\pi a^3 \rho_s g + \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_w g + \frac{1}{2}\rho_w U_r^2 C_d \pi a^2 = 0 \quad (12)$$

식에서 종단속도인 U_r 을 계산할 수 있다.

식(12)로 부터 특정한 크기의 유리구슬에 해당하는 상대속도를 구할 수 있다. 즉 계산영역의 레이놀즈 수는 1에서 1,000이므로 C_d 는 레이놀즈 수의 함수이고 또한 레이놀즈 수는 유리구슬의 상대속도(U_r)의 함수이므로 따라서 식(12)에서 유리구슬은 직경 d 와 상대속도와와의 관계를 나타낼 수 있다. 그것을 나타내면 Fig.12와 같다.

Fig.11은 유리구슬의 크기 및 유체와 유리구슬의 밀도가 2,635kg/m³일때의 상대속도를 나타낸 그림이다. 계산결과에서 알 수 있듯이 유리구슬의 지름이 클수록 상대속도는 증가한다. Fig.11에서 사각형은 유리구슬 지름 2mm에 대한 상대속도를 측정 한 것이다. 지름 2mm인 경우 이론에서의 상대속도는 0.3m/s로 고정된다.

그러나 실험에서는 상대속도는 0.23m/s~0.29m/s로 이론값보다 약간 낮게 나왔다. 그림에서 삼각형은 지름 3.0mm인 경우의 상대속도이다. 이론 상대속도는 0.4m/s이나 실험값은 0.28m/s~0.42m/s로 이 또한 이론값과 차이를 보인다. 이 이유는 이론에서 원관 벽의 영향을 포함시키지 못함으로써 발생한 오차로 추측된다.

Fig.12는 유리구슬의 직경이 3.0mm인 경우 관 내의 유체속도 변화에 따른 유리구슬의 상대속도를 나타낸 것이다. 그림에서 유체의 속도가 0.55m/s에서 가장 상대속도가 크고 그 전후에는 상대속도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 유체속도가 0.55m/s에서 유체에 의한 저항이 가장 적다는 것을 의미한다.

Fig.13은 유리구슬의 직경이 3.0mm인 경우 관 내의 유체속도와 유리구슬의 속도를 나타낸 것이다. 유체속도가 증가함에 따라 유리구슬 속도도 상승하는데 유체속도 0.33m/s이하에서는 유리구슬이 상승하지 않고 하강한다.

Fig.14는 Fig.13의 유체속도와 유리구슬 속도에 대하여 log-log 좌표로 그린 것이다. 유리구슬 속도는 유체속도에 대하여 직선으로 나타낼 수 있으

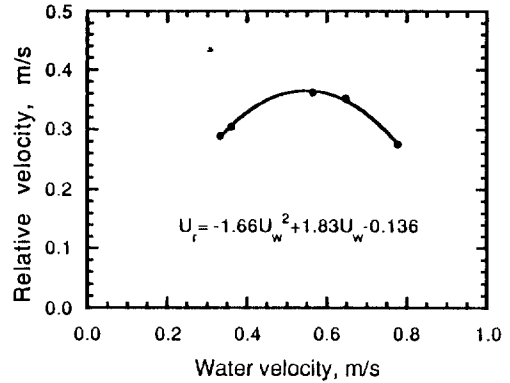


Fig.12 Relative velocity of a particle against water velocity

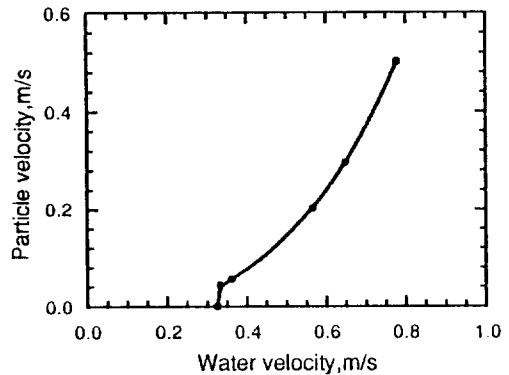


Fig.13 The variation of particle velocity with water velocity

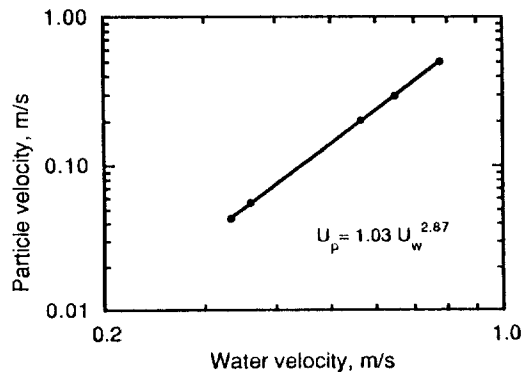


Fig.14 Correlation of particle velocity with water velocity(Log-log coordinate)

며 이 때 식은 Fig.14에 나타나 있다.

Fig.15는 구슬직경이 3.0mm인 유리구슬 입자가 열교환기 벽과 충돌할 때 그 궤적을 나타낸 것이다. 유체 속도에 따라서 처음 충돌지점과 다음 충돌지점과의 거리(충격파장으로 정의)를 나타낸 것이다. 여기서 충격파장은 충돌 현상을 고속 카메라로 촬영한 후 VCR로 재생한 화면을 통해서 측정하였다.

유체의 속도가 증가할수록 유리구슬의 충격파장도 증가한다. 즉 유체속도가 0.361m/s과 0.592m/s에서는 충격파장이 각각 3.8mm, 13mm이고 유체속도가 0.778m/s에서는 20mm로 유체속도에 따라서 증가한다.

또한 유체속도 0.325m/s에서는 유리구슬은 상승하지 않고 제자리에서 벽면을 계속 두드리는 것이 발견되었다. 그러나 관찰범위 내에서 벽면 근처

에 있는 유리구슬은 튜브의 가운데로 들어오지 않고 반경 6mm인 튜브의 벽면근처 4mm정도의 액체층(δ)내에서 벽면을 계속 충돌하면서 상승하였다. 그러나 튜브 중심에 있는 유리구슬은 튜브 벽면으로 밀리지 않고 주 흐름을 따라 상승하였다.

여기서 파장의 길이가 크면 클수록 유리구슬이 단위길이당 열교환기 벽면을 충돌하는 횟수는 감소한다는 것이고 파장이 작으면 작을수록 유리구슬의 충돌횟수는 증가한다는 것을 의미한다.

Fig.16은 유체의 속도변화에 따른 열교환기 벽에서 충돌하는 유리구슬의 충돌횟수를 나타낸 그림이다. 충돌횟수는 열교환기의 수직방향으로 1cm당 유리구슬이 벽면과 충돌하는 횟수를 의미한다. 그림에서와 같이 유체의 속도가 작은 영역에서는 유리입자의 충돌횟수가 증대하지만 유속이 증가할수록 충돌횟수는 점차 감소한다. 특히 유속이 0.8m/s 이상인 영역에서는 관찰대상 길이에서 거의 충돌하지 않고 상승하게 된다. 따라서 이 영역에서는 유리입자에 의한 화올링 감소 현상은 크게 나타나지 않으며 또한 열전달 성능의 향상도 크게 기대하지 못한다.

이 실험결과로 앞서 언급한 Fig.6의 열전달 실험 결과를 정성적으로 설명할 수 있다. 즉 유체속도 1m/s 이하에서는 유리구슬을 넣었을 때 유리구슬이 없을 때보다 열전달이 증가하나 1m/s이상에서는 유리구슬이 없을 때와 열전달이 일치하는 이유는 가시화 결과 다음과 같이 설명할 수 있다. 유속이 적을 때는 유리구슬이 벽에 자주 충돌함으로써 온도 경계층을 교란하나 유속이 증가함에 따라 벽을 거의 때리지 않으므로 온도 경계층에 영향을 주지 않기 때문일 것이다.

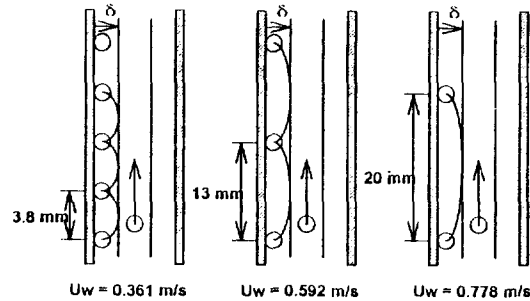


Fig.15 Collision pattern of the particle near the tube wall

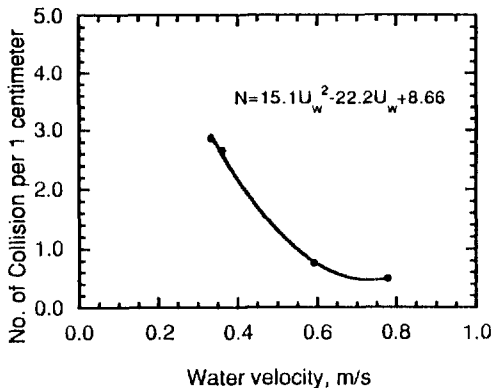


Fig.16 Number of collision vs. water velocity

5. 결 론

농축 공정용 화올링이 적은 순환 유동층 열교환기를 개발하였다. 화올링 실험결과 유리구슬의 순환에 의하여 현저한 화올링 저감효과가 이루어짐을 관찰하였다. 열전달 실험에서 1.0m/s 이하에서는 유리구슬에 의해서 물만의 유동경우보다 열전달이 상승하는 효과를 얻었으나 1.0m/s이상에서는 물만의 유동경우에 비해 열전달계수의 상승효과가 없었다.

레이저를 이용한 가시화 실험으로부터 0.8m/s이하의 유속에서는 유리구슬이 벽면을 자주 때리나 0.8m/s이상에서는 벽면의 충돌이 관찰되지 않았다.

가시화에 의한 유리구슬의 충돌거동 관찰로부터 열전달 향상 기구를 다음과 같이 추론한다. 관찰범위 내에서 유속이 적을 때는 유리구슬이 벽면을 자주 때림으로써 온도 경계층을 교란하나 유속이 상승함에 따라 유속구슬은 거의 벽면을 때리지 않으므로 온도 경계층에 영향을 주지 않았다.

따라서 순환유동층 열교환기의 튜브내 유속을 0.4m/s~0.8m/s 범위로 하면 화울링을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 열전달도 보통 열교환기보다 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

1. Sadik Kakac, Arthur E. Bergles and E. Oliveira Fernandes, 1987, Two-Phase Flow Heat Exchangers Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design. p. 688, Kluwer Academic Publishers., Dordrecht.
2. Somerscales E. F. C., 1979, "Introduction and Summary : The Fouling of Heat Transfer Equipment", Proceedings of the International conference on the Fouling of Heat Transfer Equipment, pp. 1-27.
3. Sadik Kakac, 1991, Boilers, Evaporators and Condensers. p. 137, John Wiley & Sons., New York.
4. Klaren, D. G., 1981, "Fluid Bed Heat Exchangers", Resources and Conservation, Vol. 7, pp. 303~314.
5. Rautenbach, R., Erdmann, C. and Kolbach, J. ST., 1991, "The Fluidized Bed Technique in the Evaporation of Wastewaters with Severe Fouling/scaling Potential-Latest Developments, Applications, Limitations", Desalination, Vol. 81, pp. 285~298.
6. William C. Hinds, 1982, Aerosol Technology, Chap. 3, John Willey & Sons., New York.