

액체 유동층 열교환기의 압력 손실, 열전달 성능 및 화울링 조절에 대한 연구

김내현 · 이윤표* · 윤성영*

인천대학교 기계공학과

*한국과학기술연구원 공조환경연구실

A Study on the Pressure Loss, Heat Transfer Performance and Fouling Control in Liquid fluidized Bed Heat Exchanger

Na Hyun Kim, Youn Pyo Lee* and Seong Young Yoon*

Department of Mechanical Engineering, University of Incheon

*Air-Conditioning and Environment Control Team, KIST

요 약

본 연구에서는 액체 유동층 열교환기의 수직관내에 유리알 (직경 3.0 mm, 비중 2.54) 이 물과 함께 흐를 때 압력 손실, 열전달 계수 및 화울링 계수를 측정하였다. 실험 결과 유리알은 1.0 m/s 이하의 낮은 유속에서 열전달을 증진시켰고 실험범위 내에서 열전달 계수는 유속 및 고체의 흐름양에 관계없이 거의 일정하였다. 압력 손실은 고체의 흐름양이 증가할수록 급격히 증가하였다. 실험 결과를 토대로 압력손실 및 열전달 계수를 예측할 수 있는 상관식을 개발하였다. 유리알 유동층 흐름은 화울링 조절에 효과적인 것으로 판명되었다. 산화철을 매체로한 화울링 실험에서 처음부터 유리알을 같이 순환한 경우는 화울링이 일어나지 않았고 이미 화울링이 심하게 일어난 때에도 유리알은 효과적으로 산화철을 제거할 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract—In this study, pressure loss, heat transfer coefficient and fouling coefficient of the glass bead (3 mm diameter, 2.54 specific gravity) slurry flow were measured. Data shows that glass beads augmented the heat transfer at a flow velocity lower than 1 m/s. Within the experimental range, the heat transfer coefficient remained approximately constant irrespective of the flow velocity and the solid volume fraction. Pressure loss increased as the solid volume fraction increased. Correlations to predict the pressure loss and heat transfer coefficient were developed based on the experimental data. Glass beads effectively controlled the Fe_2O_3 fouling. When the beads were circulated from the start of the fouling experiment, no fouling occurred. When the beads were circulated after the fouling occurred, they effectively removed the pre-formed fouling deposit.

1. 서 론

유체가 관내를 흐르는 열교환기의 경우 유체 중의 이물질이 관벽에 부착되면 표면의 열전달 성능이 감소하게 되고 또한 압력 손실도 증가하게 되는데 이를 화울링이라 한다. 화울링은 열교환기의 설계 및 운용에 있어서 매우 중요한 인자인데 때로는 전체 열저항 중

화울링 저항이 반을 넘는 경우도 있다. 특히 작동 유체에 이물질이 많은 경우, 예를들면 발전소의 응축기나 폐수 처리 장치, 식품 농축장치 등에 있어서 이물질의 조절 및 제거는 중요한 문제가 된다. 일반적으로 작동 유체 중 화울링이 심한 유체를 관 내측으로 흐르게 하는데 그 이유는 관 내측이 이물질 제거에 용이하기 때문이다. 이물질을 제거하기 위하여 여러가지 방법이 사용된다.

발전소 응축기의 경우 브러쉬나 스펀지 불을 관 내측으로 주기적으로 순환시켜 이물질 제거하는데 이 경우 브러쉬나 스펀지불을 작동시키기 위한 펌프나 밸브 등 여분의 장치가 별도로 설치되어야 한다.

최근들어 화올링이 심한 경우에 유동층 열교환기의 사용이 제안되었다. 유동층 열교환기는 원래 1970년경 미국에서 해수 담수화 설비의 브라인 가열기로 개발되었고, 네덜란드에서는 1973년부터 브라인 가열기 및 다중 플래쉬 증발기의 열회수기로 사용되었으며, 독일에서는 폐수처리장치에 적용되었다.¹⁾ 국내에서는 이 등²⁾이 폐수처리장치의 열교환기로 개발하였다. Fig. 1에 이 등²⁾이 개발한 유동층 열교환기의 개략도가 보여진다. 그들의 열교환기는 관 외측에서 응축하는 수증기의 응축열로 관 내측의 폐수를 가열하는 장치로 관 내측에는 폐수와 함께 직경 3mm 유리알이 순환한다. Fig. 2에는 관측된 유리알 유동의 스케치가 보여진다. 이 열교환기는 다수의 상승관과 중앙에 위치한 하나의 하강관으로 구성되는데 유리알은 액체와 함께 상승관을 통하여 상승하고 중앙에 위치한 하강관을 통하여 하강한다. 이

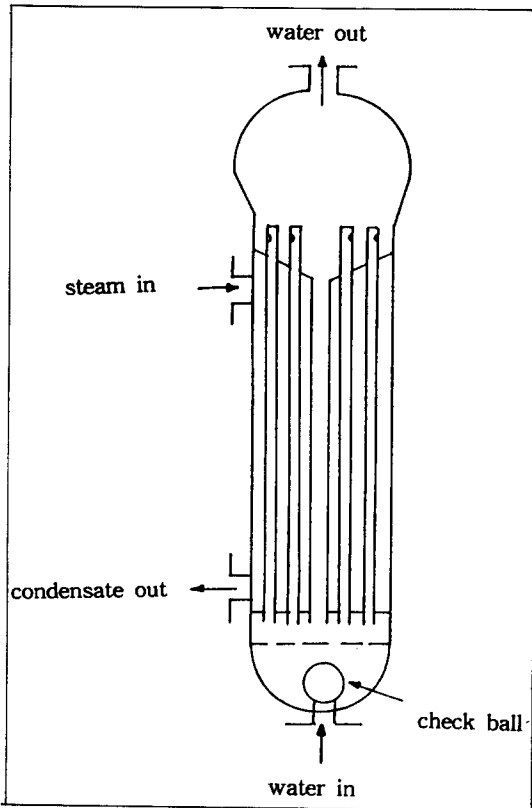


Fig. 1. Sketch of the liquid fluidized bed heat exchanger²⁾.

때 액체 중의 일부도 유리알과 함께 하강하게 된다. 하강한 유리알은 열교환기의 하부에 위치한 배분판(distribution plate) 위에 모아져 있다가 유입하는 유체를 따라 다시 상승한다. 열교환기 하부의 순환수 유입구에는 스테인레스강으로 제작된 구형의 체크볼이 장착되어 열교환기 작동 정지시 유리알이 열교환기 밖으로 유출되는 것을 방지한다. 이러한 유동층 열교환기는 기존 열교환기의 상하부 plenum 등 일부를 수정함으로써 손쉽게 변형이 가능하여 스펀지불이나 브러쉬 씨 시스템을 대체할 수 있을 것으로 사료된다.

유동층 흐름은 열전달을 증가시키고 벽면에 생긴 이물질을 제거함으로써 화올링을 방지하는 등 장점이 많은데 이의 설계를 위해서는 유동층의 압력 손실 및 열전달에 대한 이해가 필요하다. 열교환기 내를 흐르는 유체는 난류이고 또한 고체입자와의 상호 작용을 통하여 그 현상은 더욱 복잡해진다. 이런 경우 이론적인 해석보다는 실험에 근거한 상관식을 개발함으로써 설계에 직접 이용할 수 있는데 본 연구에서도 실험을 통하여 압력손실 및 열전달계수를 구하였다. 실험은 단일 수직관에서 수행되었고 수직관 내로 물과 함께 직경 3.0 mm 이고 비중이 2.54인 유리알을 순환 시키며 압력 손실과 열전달 계수를 측정하였다. 또한 화올링 실험도 수행하였다. 본 연구의 결과는 액체 유동층 열교환기 설계의 기초자료로써 활용될 수 있을 것이다.

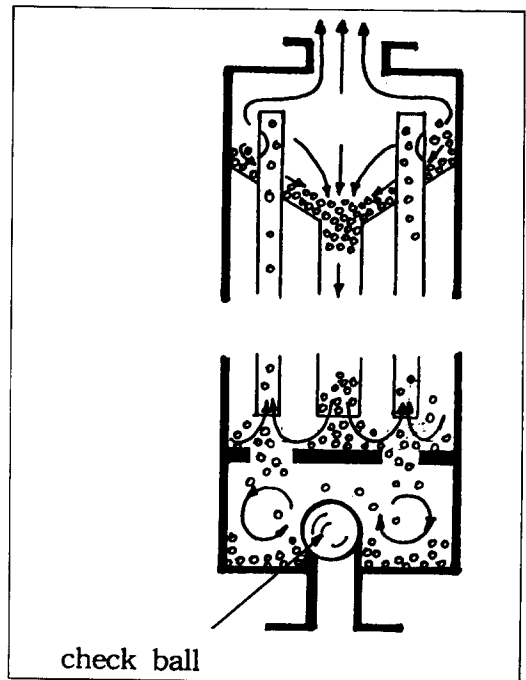


Fig. 2. Sketch showing circulating glass beads²⁾.

2. 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 3에 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 실험 장치는 유체를 순환시키기 위한 펌프와 유량 조절을 위한 유량 조절 장치, 보조 물 탱크와 열교환기 그리고 시험부로 구성된다. 펌프는 유리알이 임펠러 사이를 통과하여야 하므로 임펠러 사이의 간격이 큰 마그네틱 펌프 (용량 190 W, 금성사 모델 PM-100 PD)를 직렬로 연결하여 사용하였다. 유량은 일반적으로 밸브를 사용하여 조절하나 유리알이 같이 흐르는 경우는 밸브를 사용하면 유리알이 밸브를 잘 통과하지 못하여 관로가 막히게 되므로 Fig. 3에 나타난 바와 같이 적정 유량을 우회시켜서 유량을 조절하였다. 시험부는 내경 14.0 mm의 동관으로 제작되었는데 Fig. 4에 보여진다. 압력

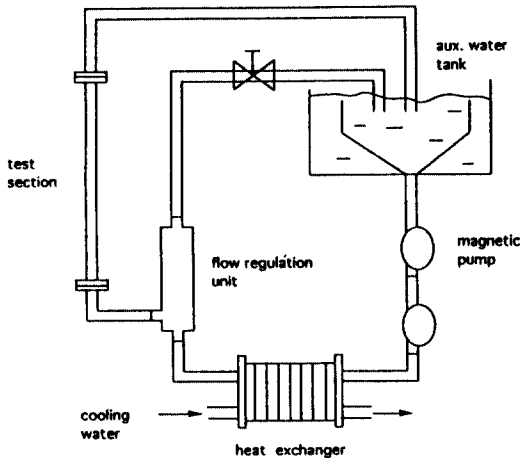


Fig. 3. Schematic drawing of experimental apparatus.

손실 실험은 길이 2m의 동관에 축 방향으로 37 mm 간격으로 두개의 압력 탭을 가공하여 수행하였다. 실험이 완전 발달 영역에서 수행되도록 입구 영역의 길이 (1 m)를 충분히 확보하였다. 열전달 실험은 길이 1.4 m의 동관을 사용하여 수행되었다. 시험부로의 열전달은 동관에 폭 5 mm의 판형 니크롬선을 촘촘히 감은 후 니크롬선의 양단에 적정량의 전류를 공급함으로써 이루어졌다. 동관과 니크롬선 사이는 석면 테이프를 감아 절연을 유지하였다. 또한 외부로의 열손실을 막기 위하여 폭 5 cm의 유리 섬유로 단열하였다. 시험부에서 공급된 열량은 열교환기에서 냉각수로 전달된다.

벽면 온도는 열전대를 관벽 내부에 심어 측정하였다. 열전대 부착 상세도는 Fig. 4에 보여진다. 우선 측정 위치에서 관벽에 길이 20 mm, 폭 1 mm, 깊이 0.7 mm의 홈을 가공한 후 열전대를 홈에 끼워 넣고 남은 부분에 실버 페이스트를 채워 넣었다. 실버 페이스트의 상부에는 얇게 에폭시를 발라 열전대를 고정하였다. 열전대는 축 방향으로 20 cm씩 6군데 설치하였다. 열전대로는 직경 0.3 mm의 테프론 처리된 Cu-Co를 사용하였다. 시험부 입출구의 물의 온도는 열유속을 결정하는데 중요한 인자이므로 정밀하게 측정되어야 한다. 본 연구에서는 열전대 5개를 직렬로 연결한 5-junction thermopile을 사용하였다. 이 경우 온도 측정의 정밀도는 0.06 K 이내로 된다.

유량은 순환수를 4~6초간 물통에 받아 그 체적을 측정하여 결정하였다. 유량을 측정하는 동안 보조 물 탱크로부터 시스템으로 연속적으로 물을 공급하여 측정에 따른 오차를 최소화하였다. 순환수에 유리알이 포함된 경우는 유량 측정시 유리알은 빠져나가고 물만이 공급되므로 펌프의 마찰수두가 다소 변화할 수 있다.

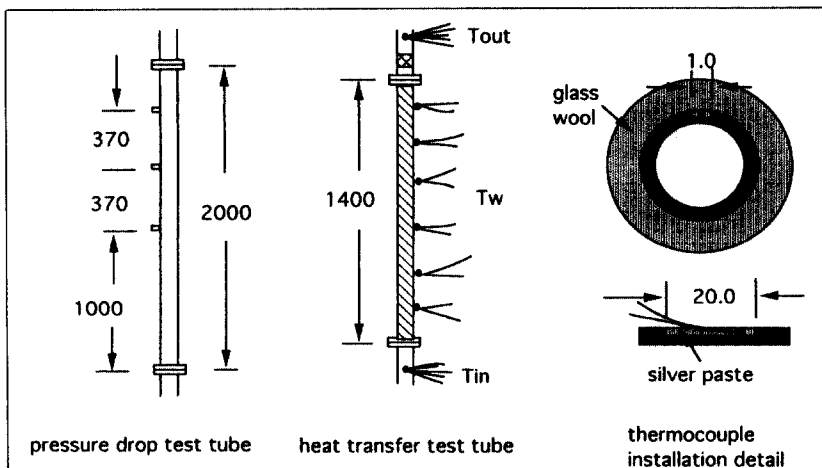


Fig. 4. Schematic details of test section and thermocouple installation.

이 변화를 줄이기 위해서는 측정시간을 작게하는것이 바람직하나 너무 작게 하면 유량 측정에 따른 오차가 증가하게된다. 여러번 시행 착오를 거친 결과 측정 시간을 4초 정도하면 펌프의 마찰 수두 변화량도 무시할 만하고 측정에 따른 오차도 최소화할 수 있음을 알 수 있었다. 실험의 불확실도 해석을 수행하였다. 본 실험에 관련된 인자 중 유량 측정 및 온도 측정에 따른 불확실도가 가장 큰데 유량 측정의 불확실도는 5% 이내이었고 온도 측정의 불확실도는 낮은 유속에서는 8%, 높은 유속에서는 15% 가량되었다. 따라서 열전달 계수의 불확실도는 낮은 유속에서는 10%, 높은 유속에서는 16% 정도이다.

3. 실험 결과 및 논의

3-1. 압력 손실 실험 결과

고체 입자가 물과 함께 흐르는 유동층 흐름은 고체 입자가 없는 물만의 흐름과는 유속이 낮은 영역에서 상이한 경향을 보이게 된다. Fig. 5에 대표적인 액체 유동층 흐름선도가 나타나 있다.³⁾ 이 선도는 수평흐름에서 유속과 압력 손실과의 관계를 보여주는데 유동층 흐름의 경우 세 개의 영역으로 구분됨을 보여준다. Homogeneous 영역은 유속이 빠른 경우에 나타나는데 이때는 고체 입자가 관 내에 균일하게 분포되어 흐르게 된다. Pseudo-homogeneous 영역에서는 유속이 다소 느려져 비중이 무거운 고체 입자가 관의 아래쪽에 몰려서 흐르게 되는 영역이다. 유속이 더욱 느려지면 고체 입자는 관의 하부에 쌓여 층을 형성하게 되고 그 층의 상부에 있는 고체 입자만이 유체 유동에 의하여 entrain 되는 saltation 영역이 존재하게 된다. 이 saltation 영역에서는 유속이 작아질수록 압력 손실이 증가하는 독특한 양상을 띄게 된다. 본 실험은 유속 0.5 m/s에서 2.0 m/s 사이에서 수행되었는데 흐름이 수평이 되는 부분에서 관측한 결과 pseudo-homogenous 영역에 해당함을 알 수 있었다.

압력 손실 실험 결과는 Fig. 6에 나타나 있다. Fig. 6은 유속과 압력손실 (단위 길이당) 과의 관계를 보여 준다. 유속은 유량을 수조간 측정하여 결정하였는데 유리알이 같이 흐르는 경우 유속은 물통에 반어진 체적 (물과 유리알이 동시에 측정된 체적) 으로부터 계산되었다. 압력 손실은 액주계를 사용하여 측정하였는데 유리알이 물과 함께 흐르는 경우 흐름의 밀도는 물의 밀도보다 커지게 되고 따라서 액주계로부터 읽은 수두차로부터 식 (1)로 나타난 수두 만큼을 빼주어야 한다.

$$\Delta h = C_v(s-1)L \quad (1)$$

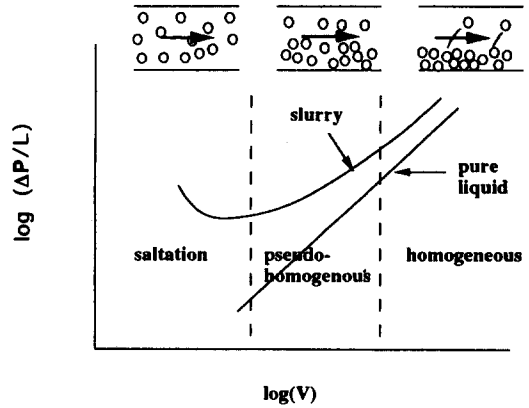


Fig. 5. Slurry flow regime³⁾.

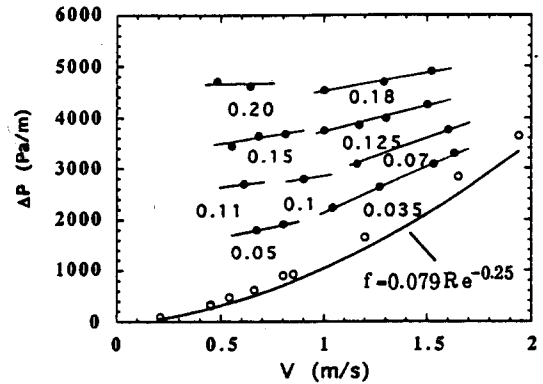


Fig. 6. Pressure drop data of 3.0 mm glass beads circulation with water. Numbers shown in the figure denotes solid volume fraction.

여기서 s는 고체 입자의 비중, L은 압력탭 사이의 거리 (m), C_v 는 고체의 체적 흐름량이다. 고체의 체적흐름량이란 흐름 중 고체 입자가 차지하는 체적으로 유량 측정시 측정하였다. 실험 중 같은 양의 유리입자가 순환 하더라도 유속에 따라 C_v 값이 달라졌다. 유속이 감소할수록 측정된 C_v 값은 증가하였는데 이는 유속이 느려지면 고체입자와의 미끄럼 속도(slip velocity)가 감소하게되고 따라서 C_v 값이 증가한 것으로 판단된다. Fig. 6은 C_v 가 증가할수록 압력손실이 급격히 증가함을 보여준다. Fig. 6에는 Blasius 상관식⁴⁾도 나타나 있는데 물만 흐를때의 실험 자료와 잘 일치함을 보여준다. 실험 중 물의 온도는 20°C로 유지되었다.

압력 손실 자료는 무차원량으로 나타내지는 것이 바람직한데 고체입자 흐름에 관련된 무차원량은 식 (2)로 정의되는 Froude 수이다.

$$Fr = \frac{V^2 C_d^{1/2}}{gD(s-1)} \quad (2)$$

여기서 V 는 유속(m/s), C_d 는 고체입자군의 항력계수, s 는 고체입자의 비중, D 는 관의 내경(m)을 나타낸다. 고체입자군의 항력계수 C_d 는 아래식으로 구한다.⁵⁾

$$C_d = C_{d0}/(1 + CV^3) \quad (3)$$

$$C_{d0} = (0.632 + 4.8Re_p^{-1/2})^2 \quad (4)$$

$$Re_p = [(14.42 + 1.827Ar^{1/2})^{1/2} - 3.798]^2 \quad (5)$$

$$Re_p = \frac{V_t d}{\gamma} \quad (6)$$

$$Ar = \frac{d^3 g(s-1)}{\gamma^2} \quad (7)$$

여기서 C_{d0} 는 단일 입자흐름의 항력계수, Re_p 는 입자 Reynolds 수, Ar 는 Archimedes 수, V_t 는 입자의 종단 속도(m/s), d 는 입자의 직경(m), ν 는 유체의 동점성계수 (m^2/s)이다.

Fig. 7에 실험 자료를 무차원 압력손실계수 ϕ 와 Froude 수의 관계식으로 나타내었다. 이러한 무차원수는 Durand³⁾에 의하여 제안되었다. 압력손실계수 ϕ 는 식 (8)로 정의된다.

$$\phi = \frac{i_m - i_f}{C_v i_f} \quad (8)$$

여기서 i_m 은 유동층 흐름의 단위 길이당 압력 손실 (Pa/m), i_f 는 순수 유체 흐름의 단위 길이당 압력 손실이다. Fig. 7은 실험자료가 식 (9)로 잘 상관됨을 보여준다.

$$\phi = 84Fr^{-0.92} \quad (9)$$

Fig. 7에는 또한 Durand 상관식³⁾도 나타나 있다. Durand는 액체 유동층 흐름에 대한 여러 실험자료로부터 식 (10)의 상관식을 제안하였다. Fig. 7은 Durand의 상관식과 실험자료가 잘 일치함을 보여준다.

$$\phi = 150Fr^{-1.5} \quad (10)$$

3-2. 열전달 실험 결과

물과 함께 흐르는 고체 입자는 주기적으로 벽면과 충돌하면서 열경계층을 파괴하고 흐름의 난류 강도를 증가시켜 열전달율을 증가시키게 된다. 이는 특히 유속이 낮은 경우 (0.5 m/s 이하) 현저히 나타나는데 낮은 유속에서는 상대적으로 고체 입자가 난류 강도를 증가시키는 역할이 중요해지기 때문에 판단된다.

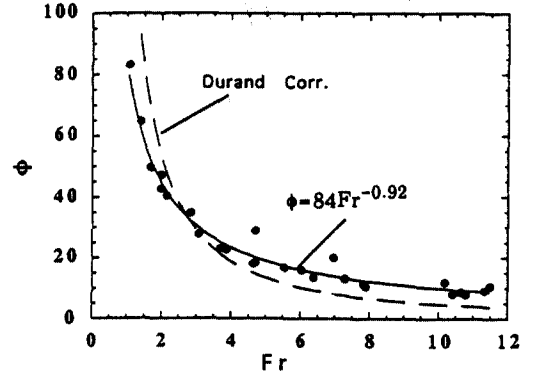


Fig. 7. Non-dimensional plot of the pressure data. Data compared with Durand correlation³⁾.

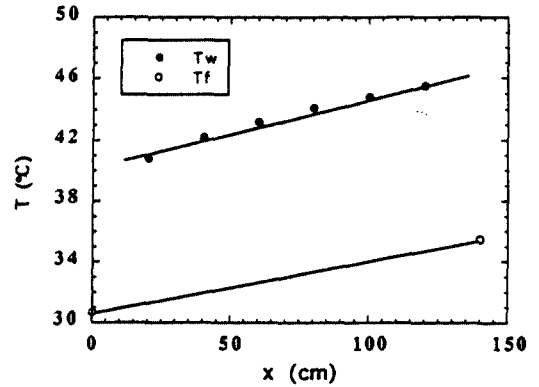


Fig. 8. Typical tube wall, water inlet and outlet temperature data.

열전달 실험은 Fig. 3의 실험장치를 사용하여 수행되었다. 측정된 온도와 유량으로부터 열전달 계수 h 는 식 (11)로부터 구해진다.

$$h = \frac{Q}{\pi DL(T_w - T_f)} \quad (11)$$

$$Q = m_w c_{pw}(T_{out} - T_{in}) \quad (12)$$

여기서 m_w 은 유량(kg/s), c_{pw} 은 액체의 비열(J/kg °C), T_{out} 은 시험부 출구 액체 온도(°C), T_{in} 은 입구 액체 온도(°C), L 은 시험부의 길이(m), T_w 은 평균 벽면 온도, T_f 는 평균 유체 온도이다. 시험부에 공급된 열량 Q 는 입출구 온도와 유량으로부터 알 수도 있지만 시험부에 공급된 전류 I 와 전압 V 로부터 계산할 수도 있다.

$$Q = VI = Q_{conv} - Q_{rad} \quad (13)$$

$$Q_{conv} = h_0(T_0 - T_{inf}) \quad (14)$$

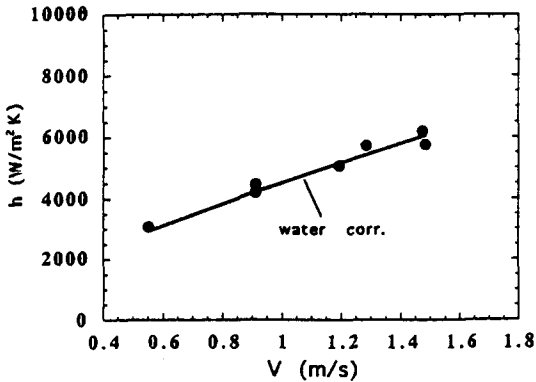


Fig. 9. Heat transfer coefficient of the water flow.

$$Q_{\text{rad}} = \sigma \epsilon (T_0^4 - T_\infty^4) \quad (15)$$

여기서 Q_{conv} 는 자연대류에 의한 시험부 열손실(W), Q_{rad} 는 복사에 의한 시험부 열손실, h_0 는 자연대류 열전달계수($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), σ 는 스테판-볼츠만 상수 ($=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$), ϵ 은 유리섬유의 방사율, T_0 는 유리섬유의 외벽온도, T 는 대기온도이다. 유리섬유의 외벽온도 T_0 는 열전대를 반경방향으로 유리섬유 내에 두군데 설치하여 온도를 측정 한 후 외삽법으로 구하였다. 측정 결과 T_0 는 대기온도 T_∞ 와 거의 일치하였다. 식 (13)으로 계산된 열량은 입출구 온도와 유량으로부터 계산된 열량과 2% 내에서 일치하였다.

Fig. 8은 측정된 벽면 온도와 입출구 물온도의 대표적인 그림이다. 벽면 온도는 축 방향으로 선형적으로 증가함을 보여주는데 이로부터 열유속이 균일하게 공급되었음을 알 수 있다. 열전달 계수는 벽면온도와 입출구 물온도로부터 식 (11)과 (12)를 사용하여 구하였다. Fig. 9는 물만이 흐를 때 측정된 열전달 계수를 보여준다. Fig. 9에는 물에 대한 열전달 상관식⁹⁾도 나타나 있는데 이 상관식은 실험자료와 잘 일치함을 보여준다. 열전달 상관식은 식 (16)과 같다.

$$h = 120(1 + 0.013T_{\text{film}})V^{0.8}/D^{0.2} \quad (16)$$

$$T_{\text{film}} = (T_w + T_i)/2 \quad (17)$$

여기서 온도는 $^\circ\text{F}$, 유속 V 는 ft/s , 관내경 D 는 inch , 열전달 계수 h 는 $\text{Btu/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$ 의 단위를 사용한다.

Fig. 10은 유리알을 물과 같이 순환시키며 측정 한 열전달 계수이다. 이때 시험부에 공급된 열량 Q 는 시험부에 공급된 전류 V 와 전압 I 로부터 식 (13)을 사용하여 계산하였다. 시험부에 공급된 열량은 일부는 물로 전해지고 일부는 유리알로 전해진다. 유리알로 전해진 열량은 시험부에 공급된 열량 [식 (13)]에서 물로 공

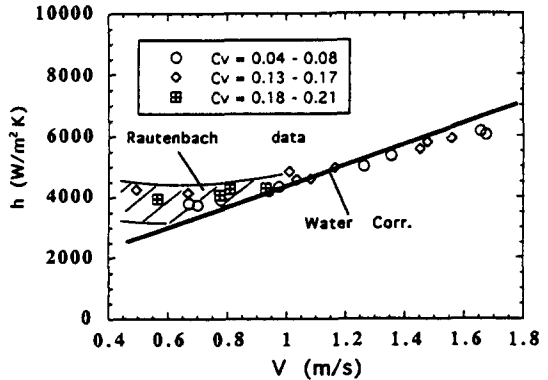


Fig. 10. Heat transfer coefficient of the slurry flow (3.0 mm glass beads circulating with water).

급된 열량 [식 (12)]를 빼면 알 수 있는데 이 값은 무시할만하였다. 실험은 유속을 0.5 m/s에서 2.0 m/s까지, 고체의 체적 흐름량 C_v 는 0.21까지 변화시키며 수행되었다. Fig. 10은 유속 1 m/s 이상에서는 열전달 계수가 물만이 흐를 때의 열전달 계수와 거의 같음을 보여준다. 유속 1 m/s 이하에서는 열전달 계수가 유속에 관계 없이 거의 일정하다. 또한, 고체의 체적 흐름량 C_v 가 증가하면 열전달 계수는 다소 증가하나 C_v 에 따른 차이는 크지 않음을 보여준다. Fig. 10에는 Rautenbach¹⁾가 본 실험과 같은 크기 및 밀도의 유리알을 가지고 실험한 결과도 보여지는데 본 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

고체입자가 액체와 같이 순환할 때의 열전달과 관련된 무차원 수로는 입자 Nusselt 수 $Nu_p = hd_p/k$, 입자 Reynolds 수 $Re_p = Vd_p/\nu$, Prandtl 수 그리고 고체의 체적 흐름량 C_v 를 들 수 있다. 열전달 실험 자료를 무차원 수로 회귀분석한 결과 식 (18)로 나타났다.

$$Nu_p = 0.312Re_p^{0.43}Pr^{0.4}(1 - C_v)^{-0.25} \quad (18)$$

식 (18)에서 Prandtl 수의 지수 0.4는 원관내 흐름이나 구 주위의 흐름에서 일반적으로 사용하는 값을 도입하였다. Fig. 11은 식 (18)이 실험자료를 $\pm 10\%$ 이내에서 예측함을 보여준다.

3-3. 화올링 실험결과

유동층 열교환기의 가장 큰 장점은 스케일 형성을 방지한다는 데 있다. 이를 확인하기 위하여 화올링 실험을 수행하였다. 화올링이란 관벽에 이물질이 침적하여 열전달율을 감소시키는 현상을 통칭한다. 실험장치는 열전달 실험 장치를 그대로 사용하였고 관벽에 화올링을 인위적으로 일으키기 위하여 30000 ppm의 산화철 (Fe_2

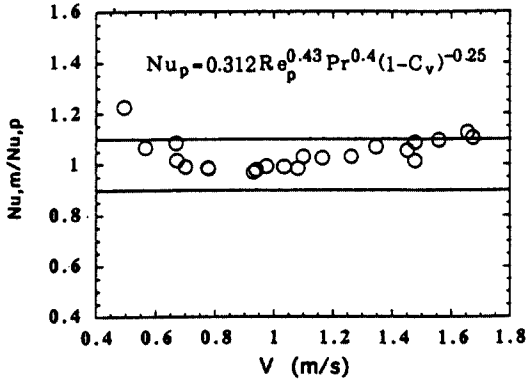


Fig. 11. Measured vs. predicted heat transfer data. Prediction by Eq. (18).

O₃)을 물과 함께 순환시켰다. 실제 폐수 처리 장치에 형성되는 스케일은 폐수의 종류에 따라 스케일의 성분이 달라지게 되는데 본 연구에서는 대표적으로 산화철을 선택하였다. 또한 농축 초기 이물질의 농도도 30000 ppm 보다는 낮으리라 예상되지만 단시간 내에 화올링을 일으키기 위하여 30000 ppm을 선택하였다. 본 실험에 사용된 산화철의 입자 평균 직경은 0.98 μm이고 평균 밀도는 5.12이다.

화올링 실험은 시스템이 정상 상태에 도달한 후에 일정량의 산화철을 순환수에 투입함으로써 시작된다. 시간이 흐름에 따라 관벽에 산화철이 침적되고 따라서 열전달 계수는 감소하는데 Fig. 12에 화올링 곡선이 보여진다. 실험중 유속은 0.8 m/s로 유지되었고 유리알의 체적 흐름량은 0.1 이었다. 실험은 처음부터 유리알을 같이 순환시킨 경우(가운데가 빈 원으로 표시)와 유리알 없이 일정시간 운전한 후 화올링이 충분히 일어났다고 판단되면 유리알을 순환시킨 경우(가운데가 채워진 원으로 표시)로 나누어 수행되었다. Fig. 12는 처음부터 유리알을 같이 순환시킨 경우에는 열전달 계수가 초기 값을 유지하고 있음을 보여준다. 이는 물과 같이 순환하는 유리알이 연속적으로 벽면에 부딪힘으로 산화철 침적을 방지하기 때문으로 판단된다. 초기에 물만을 순환한 경우는 시간이 지남에 따라 열전달 계수가 급격히 감소함을 보여준다. 또한 곡선 형상은 점근적으로 감소함을 보여주는데 이는 입자 화올링의 일반적 경향이다. Fig. 12는 실험 시작 후 약 65시간 후에 유리알을 투입한 결과를 보여주는데 열전달 계수는 투입 직후 급격히 상승하였고 그 후 점차로 화올링이 없는 경우의 열전달 계수(slurry correlation)로 접근해 감을 보여준다. 이는 이미 화올링이 심하게 일어났을 경우라도 유리알은 효과적으로 침적물을 제거할 수 있음을 보여

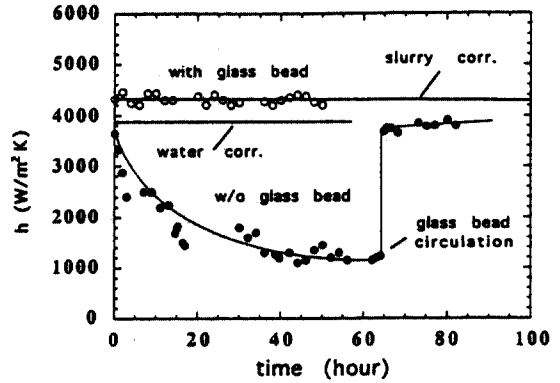


Fig. 12. Fouling curves obtained when 30000 ppm Fe₂O₃ circulating in water at V=0.8 m/s and C_v=0.1.

준다.

4. 결 론

본 연구에서는 직경 3.0 mm, 비중 2.54인 유리알이 물과 함께 수직관 내로 흐를 때 압력 손실, 열전달 계수 및 화올링 계수를 측정하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 유리알은 1.0 m/s 이하의 낮은 유속에서 열전달을 증진시킨다. 이 때 실험범위 내에서 열전달 계수는 유속 및 고체의 흐름양에 관계없이 거의 일정하였다.
- 2) 압력 손실은 고체의 흐름양이 증가할수록 급격히 증가하였다. 따라서 고체의 흐름양이 너무 많지 않은 것이 바람직하다고 판단된다.
- 3) 압력 손실은 식 (9)로 열전달 계수는 식 (18)로 예측할 수 있다.
- 4) 유리알 유동층 흐름은 화올링 조절에 효과적이다. 산화철을 매체로한 화올링 실험에서 처음부터 유리알을 같이 순환한 경우는 화올링이 일어나지 않았고 이미 화올링이 심하게 일어난 때에도 유리알은 효과적으로 산화철을 제거할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 G-7 과제(감압 중류식 폐수처리장치의 개발)의 일부로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

사용기호

- Ar : Archimedes number [Eq. 7]
 C_d : drag coefficient of a swarm of particles

C_{do} : drag coefficient of a single particle
 C_v : volume flow fraction of the solid particles
 d : particle diameter [m]
 D : tube inside diameter [m]
 Fr : Froude number [Eq. 2]
 g : gravity [m/s^2]
 h : water column height [m] or heat transfer coefficient [$W/m^2 K$]
 h_o : natural convection heat transfer coefficient [$W/m^2 K$]
 i_l : pressure loss per length for liquid flow [Pa/m]
 i_m : pressure loss per length for slurry flow [Pa/m]
 I : current [A]
 k : thermal conductivity [$W/m K$]
 L : length between pressure taps or heat transfer test section [m]
 Nu_p : Particle Nusselt number [hd_p/k]
 Pr : Prandtl number
 Q : heat transferred to the test section [W]
 Re_p : particle Reynolds number [Eq. 6]
 s : specific gravity of a solid particle
 T_f : average liquid temperature [K]
 T_{film} : average liquid temperature [K] [Eq. 17]
 T_{in} : liquid inlet temperature [K]
 T_o : glass wool wall temperature [K]

T_{out} : liquid outlet temperature [K]
 T_w : wall temperature [K]
 T_∞ : atmospheric temperature [K]
 V : liquid velocity [m/s] or electric voltage [Volt]
 V_t : terminal velocity [m/s]
 ε : emissivity
 ϕ : pressure loss coefficient [Eq. 8]
 γ : dynamic viscosity [m^2/s]
 σ : Stephan-Boltzmann coefficient [$=5.68 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$]

참고문헌

1. Rautenbach, R., Erdmann, C. and Kolbach, J. : St. Desalination, Vol. 81, pp. 285-298 (1991).
2. 이윤표, 윤성영, 안이기, 김내현 : "The Third JSME/KSME Fluids Engineering Conference", pp. 363-368, Sendai, Japan (1994).
3. Darby, R. : "Encyclopedia of Fluid Mechanics", Gulf Publishing Co., Vol. 5-1, pp. 49-91 (1986).
4. White, F. M. : "Viscous Fluid Flow", McGraw-Hill Co. (1974).
5. Barnea, E. and Mizrahi, J. : *Chem. Eng. J.*, Vol. 5, pp. 171-184 (1973).
6. McAdams : "Heat Transmission", McGraw-Hill Co. (1954).