

수직관내를 흐르는 유체의 현탁입자에 의한 열전달속도 증진에 관한 실험적 및 이론적 연구

박찬진 · 최근오* · 도동섭

고려대학교 화학공학과

*금호석유화학

(1989년 5월 1일 접수, 1989년 8월 14일 채택)

An Experimental and Theoretical Study on the Augmentation of Heat Transfer by Suspended Solid Particles in the Flowing Fluid in a Vertical Tube

Chan Jin Park, Keun Oh Choi*, and Dong Sup Doh

Department of Chem. Eng., College of Eng., Korea University, Seoul, Korea

*Keumho Petrochemical Industry

(Received 1 May 1989; accepted 14 August 1989)

요 약

수직관의 내부를 통하여 흐르는 슬러리와 관벽간의 열전달특성을 연구하기 위하여 수직의 이중관 열교환기에서 슬러리속도와 고체입자의 크기 및 농도를 변화시켜가며 각각의 조건에 따른 열전달계수를 산출하였다. 그 결과 슬러리흐름에서의 열전달속도는 슬러리의 속도 및 입자의 농도가 증가할수록 그리고 입자의 크기가 감소할수록 증가하였으며 실험범위 전반에 걸쳐서 순수한 물의 경우보다 크게 나타났다. 이러한 현상을 설명하기 위하여 액체막으로 둘러 쌓여 있는 고체입자가 관벽과 충돌하면서 발생하는 입자표면의 액체막을 통한 열전달현상을 고려한 모델을 제시하였으며 이에 의해 현탁입자의 유동이 열전달속도에 미치는 영향을 정량적으로 설명할 수 있었다.

Abstract— The study on the heat transfer characteristics between tube wall and slurry flowing through the vertical tube was investigated. To calculate heat transfer coefficient, experiments were conducted by varying slurry flow rate, particle size and concentration of particles and it was found that the rate of heat transfer in the slurry flow was larger than that in the simple water flow and it increased as the slurry flow rate and concentration of particles increased and particle size decreased. A heat transfer model considering the effect of the collision of suspended solid particles with its clinging film with the surface of copper tube was proposed and from which the heat transfer characteristics could be explained very well.

1. 서 론

대부분의 화학공정은 가열 또는 냉각을 수반하므로

효율적인 열교환과 온도조절은 매우 중요하다. 이때 열전달이 보다 더 효율적으로 이루어진다면 이에 따른 열교환면적의 감소로 인하여 전체공정의 규모를 작게

할 수 있고 장치비 및 설치비도 크게 절감할 수 있다. 이와 같이 공정상의 경제적 효과를 야기하는 열전달속도의 효율적인 증진법의 한 가지 방법으로 열전달 계면 갱신법을 들 수 있는데 이 방법은 전열면에 존재하는 열전달경계층을 효과적으로 파괴시켜 열전달에 대한 저항을 줄이는 데에 그 목적이 있으며, 그 중에서 유체에 단순히 고체입자를 첨가하여 전열속도를 촉진시키는 방법이 자주 사용되어 왔다[1]. 한편 현탁액의 수송을 수반하는 슬러리 반응기의 경우에는 슬러리 흐름내에서 발생되는 반응열의 효과적인 제거나 공급이 필수적인 과제로 대두된다.

이러한 모든 경우에 있어서 관내 슬러리흐름에 관한 열전달특성의 규명은 필수적이며 이에 관하여 다음과 같이 많은 학자들의 연구가 이루어져 왔다. 우선 Salamone 등[2]은 관내 난류영역의 고-액 이상류에 대한 열전달속도식을 차원해석적인 방법으로 구하였고, Kunii 등[3]과 Ahuja[4, 5]는 고체입자가 분산되어 있는 유체의 분산입자층의 유효열전도도에 관한 식을 발표하여 고-액 이상류의 열전달현상의 해석을 위한 보다 정확한 자료를 제시하였으며, Konno 등[6]은 glass bead와 이온교환수지를 고체입자로 하여 고-액 이상류와 관벽간의 열전달특성에 관하여 연구하였다. 또한 Quader 등[7]은 관내에 의가소성(pseudoplastic) TiO_2 현탁액이 흐를 때의 열전달특성을 연구하여 열과 운동량전달과의 상사성에 관하여 검토하였다. 그러나 이와 같이 고-액 이상류의 열전달특성을 연구하여 온 학자들은 전술한 바와 같은 열전달 현상들이 어떻게 이루어지는가에 대한 현상학적인 규명이 이루어지지 않은 상태에서 단순히 실험결과를 토대로 문제들을 다루어 왔다. 액상에 고체입자가 첨가되면 거시적으로는 벌크 점도가 증가하여 열전달계수가 감소되어야 하지만 실제적으로는 이와 상반되는 현상이 나타나며 여기에서 미시적으로 현탁입자의 역할이 존재함을 예측할 수 있다. 그래서 본 연구에서는 열전달속도가 고체입자표면에 형성된 액체막을 통하여 이루어지는 열전달과 벌크용액에서 일어나는 고전적인 열전달의 합으로 표현되는 이론적인 모델을 제시하여 현탁입자의 유동이 열전달계수에 미치는 영향을 정량적으로 설명하고자 하였다.

2. 이 론

총 열전달속도가 고체입자의 표면에 형성된 액체막(liquid film)을 통하여 이루어지는 열전달과 벌크용액

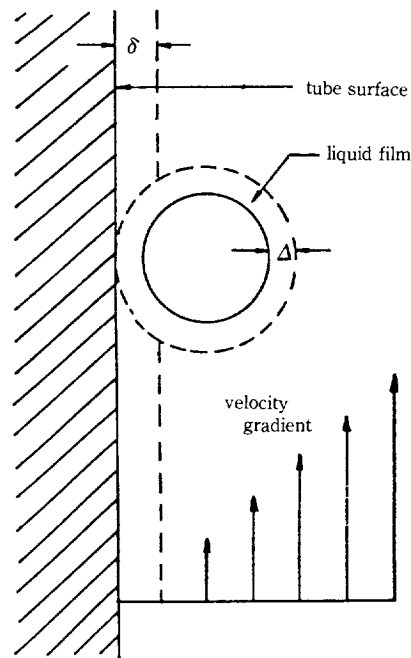


Fig. 1. Particle surrounded by a film of liquid Δ thick, being rolled over tube surface by a velocity gradient.

에서 발생하는 고전적인 열전달의 합으로 표시되는 모델에 의하여 총 열전달계수, h_t 가 고체입자의 운동에 기인하는 열전달계수, h_p 와 슬러리상에서의 열전달계수, h_s 의 합으로 설명되는 mechanism을 고려한다. 우선 h_p 를 구하기 위하여 관내의 액상에 구형의 고체입자들이 균일하게 분포한다고 가정하고 Fig. 1에서 보는 바와 같이 액체가 고체입자의 표면에 붙어서 두께, Δ 인 액체막을 형성하며 이 막은 고체입자가 벽면과 충돌할 때 전도과정을 통하여 관표면에서 열을 흡수하여 벌크용액으로 방출한다고 가정한다. 열전달계층, 특히 관표면을 에워싸고 있는 층류영역에서의 열전달은 주로 전도에 의해서 이루어지고 이때의 열전달속도는 관표면에 존재하는 경계층내부에서의 온도구배(temperature gradient)에 비례하므로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$q = k_w A (T_w - T) / \Delta \quad (1)$$

여기에서 k_w 는 관벽과 직접 접하고 있는 액체의 열전도도이고 A 는 고체입자의 전열면적으로 $2\pi a^2$ 이며, T_w 는 관표면의 온도 그리고 Δ 는 입자를 둘러싸고 있는 액체막의 두께이다.

한편 한 개의 입자가 얻는 열량은 다음과 같이 나타

낼 수 있다.

$$q = \rho_s V_s C_{ps} dT/dt \quad (2)$$

여기에서 ρ_s 는 입자의 밀도이고, V_s 는 입자의 부피 그리고 C_{ps} 는 입자의 비열이다.

(1)식과 (2)식을 관련시키고 변수분리시키면 다음과 같이 표시된다.

$$dT/(T_w - T) = k_w \Delta t / (\rho_s C_{ps} V_s \Delta) \quad (3)$$

초기조건 $T(t) = T(0)$, $t=0$ 을 이용하여 (3)식을 적분하고 정리하면 다음과 같다.

$$T_w - T(t) = [T_w - T(0)] \cdot \exp\left(-\frac{3}{2C_1 a^2} \frac{k_w}{\rho_s C_{ps}} t\right) \quad (4)$$

여기에서 C_1 는 비례상수이며 Δ 가 입자의 반경에 비례하므로 $\Delta = C_1 a$ 로 표시될 수 있다. 한편 관표면의 단위면적당 입자수, N_p 와 관표면과 입자막의 상호작용너비, W 는 다음과 같이 표시된다[8].

$$N_p = \frac{\phi \cdot (\frac{\Delta^3}{4a^2} - \frac{\Delta^4}{16a^3})}{\frac{\pi \Delta}{4} (\frac{4}{3} a \Delta - \frac{1}{3} \Delta^2)} \quad (5)$$

$$W = a \left[\pi (C_1 + \frac{2}{3} C_1^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

여기에서 ϕ 는 벌크용액내의 입자가 차지하는 부피분율이며 a 는 입자의 반경이다. 결국 전체입자가 얻는 열량은 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{q} = \frac{k_w}{\Delta} N_p 2\pi a^2 (T_w - T(0)) \cdot \exp\left(-\frac{3}{2C_1 a^2} \frac{k_w}{\rho_s C_{ps}} \frac{W}{V_p}\right) \quad (7)$$

여기에서 V_p 는 입자의 속도이다[9-12].

그리하여 전체입자가 벌크용액으로 방출하는 열량은 다음과 같다.

$$\dot{q} = h_p (\Delta T)_{lm} \quad (8)$$

여기에서 $(\Delta T)_{lm}$ 은 입자막과 벌크용액 사이의 대수평균온도차이다. (7)식과 (8)식에서 입자운동에 기인하는 열전달계수, h_p 를 구하면 다음과 같다.

$$h_p = \frac{k_w}{\Delta} N_p \cdot 2\pi a^2 \frac{(T_w - T(0))}{(\Delta T)_{lm}} \cdot \exp\left(-\frac{3}{2C_1 a^2} \frac{k_w}{\rho_s C_{ps}} \frac{W}{V_p}\right) \quad (9)$$

한편 도관내를 난류형태로 흐르는 유체와 관벽간의 열전달속도는 다음과 같이 점도보정인자를 포함한

Colburn 방정식으로 나타낼 수 있다[13].

$$St = 0.023 Re^{-0.2} Pr^{-2/3} (\mu_b/\mu_w)^{0.14} \quad (10)$$

여기에서 St , Re 및 Pr 은 각각 Stanton 수, Reynolds 수 그리고 Prandtl 수이며 μ_b 및 μ_w 는 벌크유체 및 관표면과 인접한 유체의 점도이다. 그리하여 현탁액과 관의 내벽간의 열전달속도를 산출하기 위하여 (10)식을 현탁액의 물성치를 고려한 식으로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{h_s}{\rho_{sl} \bar{V}_{sl} C_{psl}} = 0.023 \left(\frac{\rho_{sl} \bar{V}_{sl} D}{\mu_{sl}} \right)^{-0.2} \left(\frac{C_{psl} \mu_{sl}}{k_{sl}} \right)^{-2/3} \left(\frac{\mu_{b,sl}}{\mu_{w,sl}} \right)^{0.14} \quad (11)$$

여기에서 ρ_{sl} , \bar{V}_{sl} , C_{psl} 및 μ_{sl} 은 각각 슬러리의 밀도, 공탐속도, 비열 및 점도이며 \bar{V}_{sl} , ρ_{sl} 및 C_{psl} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{V}_{sl} = 4 (\dot{m}_l/\rho_l + \dot{m}_s/\rho_s) / \pi D^2 \quad (12)$$

$$\rho_{sl} = (1 - \phi) \rho_l + \phi \rho_s \quad (13)$$

$$C_{psl} = (\dot{m}_l C_{pl} + \dot{m}_s C_{ps}) / (\dot{m}_l + \dot{m}_s) \quad (14)$$

그리하여 (11)식에서 h_s 는 다음과 같이 표현된다.

$$h_s = 0.023 \rho_{sl} \bar{V}_{sl} C_{psl} Re_{sl}^{-0.2} Pr_{sl}^{-2/3} (\mu_{b,sl}/\mu_{w,sl})^{0.14} \quad (15)$$

여기에서 Re_{sl} 및 Pr_{sl} 은 슬러리의 물성치를 보정한 Reynolds 수와 Prandtl 수이다.

결국 관내를 흐르는 슬러리와 관벽간의 총 열전달계수는 (9)식과 (15)식의 합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_t = h_p + h_s = \frac{2\pi k_w}{\Delta} N_p a^2 \frac{(T_w - T(0))}{(\Delta T)_{lm}} \cdot \exp\left(-\frac{3}{2C_1 a^2} \frac{k_w}{\rho_s C_{ps}} \frac{W}{V_p}\right) + 0.023 \rho_{sl} \bar{V}_{sl} C_{psl} Re_{sl}^{-0.2} Pr_{sl}^{-2/3} (\mu_{b,sl}/\mu_{w,sl})^{0.14} \quad (16)$$

3. 실험

3-1. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치를 나타낸 그림이 Fig. 2이다. 이중관 열교환기의 형태로 제작한 열교환장치의 test section은 내관이 내경 0.83 cm, 외경 1.0 cm이고 길이 120 cm인 동관으로 제작하였으며, 외관은 내경 3 cm, 외경 4.2 cm이고 내관과 동일한 길이의 아크릴관으로 제작하였다. 그리하여 내관으로는 슬러리 흐

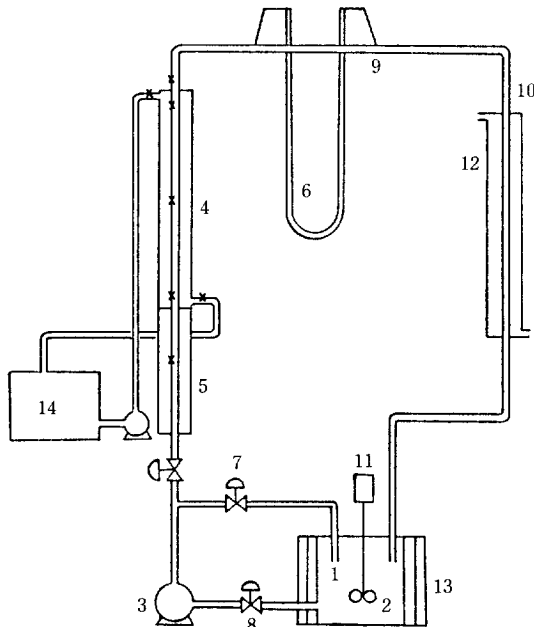


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

1. mixing tank
2. impeller
3. centrifugal pump
4. test section
5. glass wool
6. manometer
7. ball valve
8. stop valve
9. venturi meter
10. copper tube
11. motor
12. heat exchanger
13. cooling pipe
14. constant temperature regulator
- x. position of thermocouples

를 유도하였고 환형공간으로는 동관 외벽의 온도가 일정하게 유지되도록 더운 유체를 일정유속으로 유입하였다. 그리고 각 실험조건에 따른 test section의 기벽 온도를 측정하기 위하여 내관벽의 세지점에 copper-constantan 열전대를 부착하였으며 환형부분의 입구와 출구에도 동일한 재료의 열전대를 부착하였다. 이러한 test section에서의 열전대의 위치를 Fig. 2에 도시하였다. 한편 슬러리를 완전혼합형태로 만들기 위하여 혼합조를 설치한 후 pump의 흡입부와 연결하여 항상 균일한 농도의 슬러리가 유입되도록 하였으며, 슬러리의 속도를 측정하기 위하여 실험장치 상부의 수평관에 venturi meter를 제작, 부착하였다. 그리하여 각각의 실험조건에서 설치된 열전대로부터 온도를 측정기록하여 다음 식에 의하여 열전달계수를 산출하였다.

$$h = \left[\frac{2\pi r_i L}{(\dot{m}_i C_{pi} + \dot{m}_s C_{ps}) \ln \left(\frac{t_w - t_i}{t_w - t_o} \right)} - \frac{r_i \ln(r_o/r_i)}{k_{cu}} \right]^{-1} \quad (17)$$

Table 1. Experimental conditions

Variables	Range of operations
Mean diameter of solid particles (μm)	47.50 - 135.48
Solid concentration (%V/V)	4.0 - 10.0
Flow rate of slurry (l/min)	6.0 - 10.0

여기에서 \dot{m}_i 와 \dot{m}_s 는 각각 액체와 고체의 질량유속이며 k_{cu} 는 관의 열전도도, t_w , t_i 및 t_o 는 관벽과 유체의 유입온도 그리고 출구온도를 나타내고 L 은 관의 길이를 표시한다. 한편 현탁액의 점도는 Vand[14]의 식을 이용하였고, 현탁액의 열전도도는 Tareef[15]의 식을 이용하여 산출하였다.

3-2. 실험재료 및 실험변수범위

실험에 사용된 시료는 호주산 규사이며 평균밀도는 2.647 g/cm^3 이다. 이때 고체입자는 진동체에 충분한 진동시간을 주어 분류하였고, 평균 입경은 PSA(Particle Size Analyser)를 이용하여 구하였으며 이를 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 확인하였다. 실험변수범위는 Table 1과 같다.

4. 실험결과 및 고찰

우선 (4)식에서 사용된 C_i 를 실험적으로 결정한 값은 0.75이었으며 다음의 그림들에서 본 연구에 제시한 이론식에 의한 열전달계수와 실험에 의한 값을 슬러리 속도와 고체입자의 크기 및 농도변화에 대한 변화량으로 도시하였다.

4-1. 슬러리속도의 영향

우선 고체입자를 첨가하지 않은 순수한 액체에서의 열전달계수를 (10)식에 의하여 산출하고 이를 본 연구의 실험치와 비교한 결과를 Fig. 3에 나타내었으며 그림에서 알 수 있듯이 전반적으로 실험치가 이론식에 의한 계산치와 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 슬러리의 속도가 열전달계수에 미치는 영향을 고체입자 농도를 매개변수로 하여 도시한 그림이 Fig. 4이다. 그림에서 볼 수 있듯이 열전달계수는 슬러리속도가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 나타내며 이는 슬러리의 유속이 증가함에 따라 관표면에 형성되는 열전달경

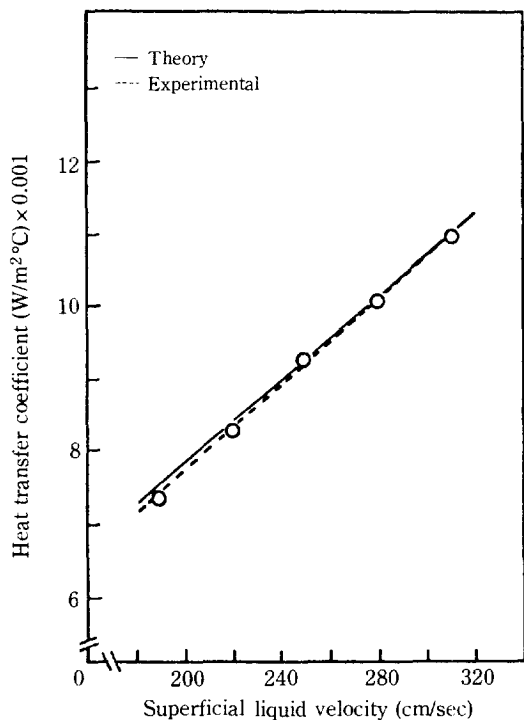


Fig. 3. Heat transfer coefficient without particles. Comparison of experimental data with theoretical.

계층의 두께가 얇아지므로 열전달에 대한 저항이 감소하여 그만큼 더 열량을 효과적으로 벌크용액에 전달할 수 있으며 관내 고체입자의 이동속도도 증가하여 입자가 열에너지를 벌크용액으로 좀 더 신속하게 전달하여 주기 때문이다. 또한 열전달계수가 슬러리속도의 증가에 대하여 거의 직선형태의 증가를 보이는 것은 (10)식에서 볼 수 있는 것처럼 벌크용액의 단위시간 및 단위면적당의 열전달량이 슬러리속도의 0.8승에 비례하여 증가하는 데 여기에 고체입자 표면의 액체막에 의한 열전달량이 더하여지기 때문이다.

4-2. 고체입자 크기의 영향

고체입자 크기에 따른 열전달계수의 변화를 슬러리속도를 매개변수로 하여 나타낸 그림이 Fig. 5이다. 그림에서 볼 수 있듯이 열전달계수는 동일한 슬러리속도에서 고체입자의 크기가 작아질수록 높은 값을 갖는 데 그 이유는 입자의 크기가 작아질수록 열전달계층을 효과적으로 파괴하여 열전달저항을 줄이고 액체막을 통하여 관벽과 벌크유체간의 열에너지를 활발하게 교환시키지만 큰 입자들은 작은 입자들에 비하여 열전달계

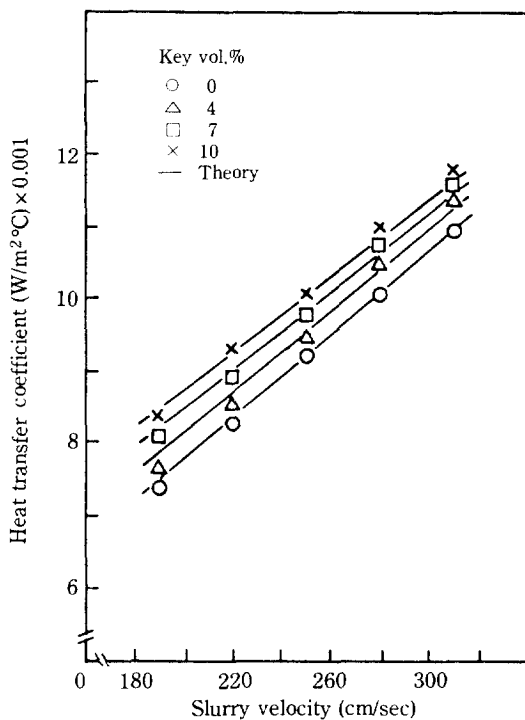


Fig. 4. Effect of slurry velocity on the heat transfer coefficient ($d_p=94.06 \mu\text{m}$).

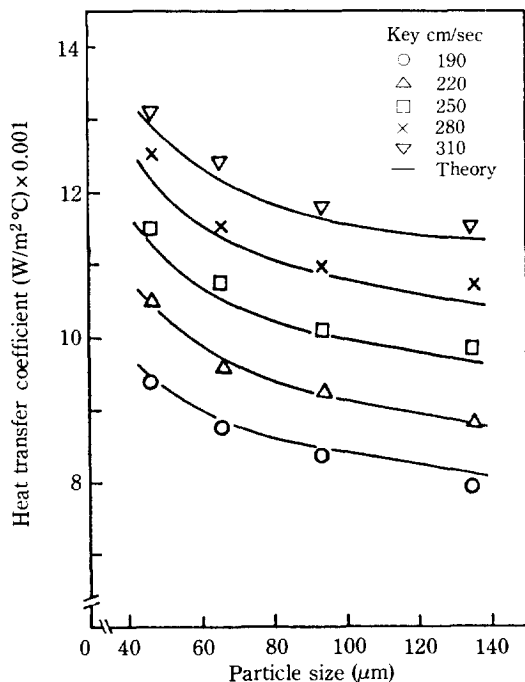


Fig. 5. Effect of particle size on the heat transfer coefficient ($\phi=10 \text{ vol. \%}$).

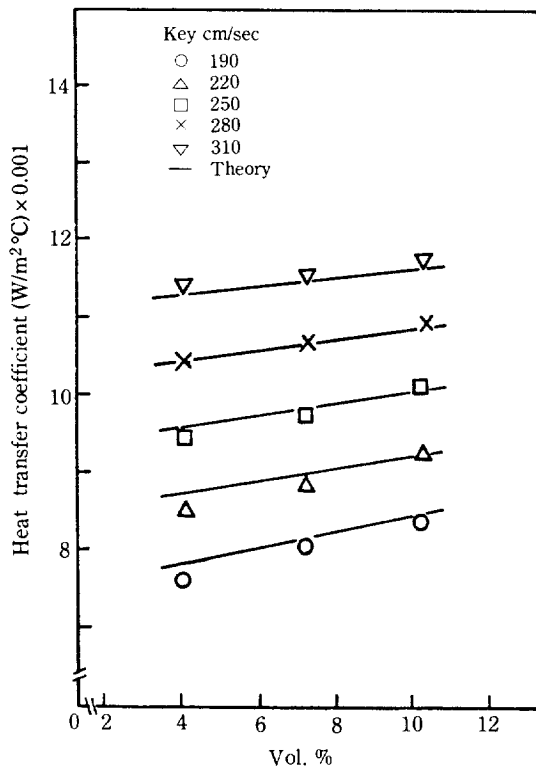


Fig. 6. Effect of volumetric solid concentration on the heat transfer coefficient ($dp=94.06 \mu m$).

층을 효율적으로 침투하지 못하므로 그만큼 더 경계층의 파괴효과가 감소하기 때문이다. 또한 동일한 입자농도에서 큰 입자보다 작은 입자의 갯수가 훨씬 많으므로 작은 입자의 총 표면적이 큰 입자에 비하여 크며 이에 따라 입자막에 붙어 있는 액체막의 양도 크므로 고체입자에 의하여 벌크유체로 전달되는 열에너지의 양은 입자크기가 작아질수록 증가하게 되어 고체입자의 크기가 감소할수록 열전달계수가 증가하는 원인이 된다. 본 연구에서 최대 열전달계수를 나타내는 고체입자는 평균입경이 $47.50 \mu m$ 인 입자이며 이를 10 vol.%로 첨가하고 슬러리속도를 310 cm/sec로 하였을 때 동일한 유속에서 입자를 첨가하지 않은 경우보다 약 1.2배까지 열전달계수를 증가시킬 수 있었다.

4-3. 고체입자 농도의 영향

유체 내에 첨가된 고체입자 농도의 변화에 따른 열전달계수의 증가를 슬러리속도를 매개변수로 하여 도시한 그림이 Fig. 6이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 열전달계수는 모든 크기의 입자에 대하여 입자의 농도가 증

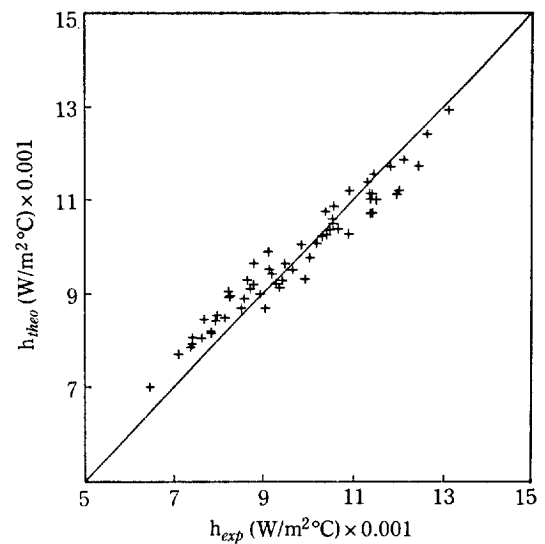


Fig. 7. Comparison of experimental values of heat transfer coefficient with theoretical ones.

가함에 따라 커지는 데 이는 입자량이 커질수록 유체에 첨가된 고체입자들의 상호밀집에 의한 입자의 기벽충돌 회수의 증가로 인하여 보다 더 효율적으로 열전달경계층을 파괴하고 더욱 신속하게 고체입자 표면의 액체막을 통한 에너지전달을 수행하기 때문이다. 그리하여 현탁액의 물성치변화에 의한 벌크용액의 열전달속도의 저하에도 불구하고 고체입자의 운동에 의한 열전달에 의해 총 열전달속도는 고체입자의 농도가 커짐에 따라 증가하게 된다. 이와 같은 경향을 (16)식에 의하여 잘 설명할 수 있었으며 실험범위 전반에 걸친 실험치와 이론식에 의하여 산출된 값을 비교분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었는데 최대오차 6%로써 전반적으로 잘 일치됨을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

유체내에 첨가된 고체입자가 열전달속도의 증진에 미치는 영향을 연구하기 위하여 슬러리속도를 190-310 cm/sec, 고체입자의 농도를 4-10 vol.% 그리고 고체입자의 농도를 평균입경 $47.50-135.48 \mu m$ 로 하여 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수직관내에 슬러리흐름에서 고체입자가 열전달속도에 미치는 영향을 정량적으로 설명할 수 있는 이론적인 모델을 다음과 같이 제시하였다.

$$h_t = \frac{2\pi k_w}{\Delta} N_p a^2 \frac{[T_w - T(0)]}{(\Delta T)_{lm}} \exp\left(-\frac{3}{2C_1 a^2} \frac{k_w}{\rho_{sl} C_{ps}} \frac{W}{V_p}\right) + 0.023 \rho_{sl} \bar{V}_{sl} C_{ps} Re_{sl}^{-0.2} Pr_{sl}^{-2/3} (\mu_{b,sl}/\mu_{w,sl})^{0.14}$$

2. 열전달계수는 순수한 액체의 경우보다 고체입자를 첨가한 경우에 실험범위 전반에 걸쳐서 높은 값을 나타내었고 전반적으로 고체입자의 첨가량이 증가할수록, 고체입자의 크기가 감소할수록 그리고 슬러리의 속도가 커질수록 증가하였다.

3. 평균입경 47.50 μm 인 고체입자를 10 vol.%로 첨가하고 슬러리속도를 310 cm/sec로 하였을 때 동일한 유속에서 입자를 첨가하지 않은 경우보다 약 1.2배까지 열전달계수를 증가시킬 수 있었다.

NOMENCLATURE

- A : characteristic surface area of solid particle [cm^2]
a : radius of solid particle [cm]
 C_1 : proportionality constant in eq. (4)
 C_p : heat capacity [$\text{cal/g}^\circ\text{C}$]
D : inner diameter of pipe [cm]
f : Fanning friction factor [-]
h, h_i , h_p , h_s : heat transfer coefficient [$\text{W/m}^2^\circ\text{C}$]
j : Colburn j factor
k : thermal conductivity [$\text{cal/sec}\cdot\text{cm}\cdot^\circ\text{C}$]
L : length of pipe [cm]
 \dot{m} : mass flow rate [g/sec]
 N_p : number of particles per unit area
Nu : Nusselt number, hD/k
Pr : Prandtl number, $C_p \mu/k$
q : heat flow rate [cal/sec]
 \dot{q} : heat flux [$\text{cal/sec}\cdot\text{cm}^2$]
Re : Reynolds number, $\rho DV/\mu$
St : Stanton number, $h/\rho VC$
T : temperature [$^\circ\text{C}$]
t : time [sec]
V : velocity [cm/sec]
 V_p : velocity of a particle [cm/sec]
 V_s : volume of a particle [cm^3]
W : width [cm]

Greek Letters

- Δ : thickness of film surrounding particle surface

- [cm]
 δ : boundary layer thickness [cm]
 ρ : density [g/cm^3]
 μ : viscosity [$\text{g/cm}\cdot\text{sec}$]
 ϕ : volume fraction of particles

Subscripts

- cu : copper tube
b : bulk fluid phase
l : liquid phase
s : solid phase
sl : slurry phase
w : at tube wall

REFERENCES

- Murakami, Y. and Toh, M.: *Kakaku Kogaku Ronbunshu*, **49**, 275 (1985).
- Salamone, J.J. and Newman, M.: *Ind. Eng. Chem.*, **47**, 283 (1955).
- Kunii, D. and Smith, J.M.: *AIChE J.*, **71**, 6 (1960).
- Ahuja, A.S.: *J. Applied Physics*, **46**, 3408 (1975).
- Ahuja, A.S.: *J. Applied Physics*, **47**, 775 (1976).
- Konno, H. et al.: *Kagaku Kokagu Ronbunshu*, 464 (1979).
- Quader, A.K.H.A. and Wilkinson, W.L.: *Int. Multiphase Flow*, **12**, 545 (1981).
- Kwon, S.K. and Doh, D.S.: *HWAHAK KONGHAK*, **23**, 19 (1985).
- Toda, M. et al.: *Int. Chem. Eng.*, **9**, 553 (1969).
- Ohashi, H. et al.: *J. Chem. Eng. Japan*, **13**, 343 (1980).
- Toda, M. et al.: *J. Chem. Eng. Japan*, **6**, 140 (1973).
- Bhaga, D. and Weber, M.E.: *The Canadian J. of Chem. Eng.*, **50**, 323 (1972).
- McAdams, W.H.: *Heat Transmission*, 3rd ed., McGraw-Hill, 1954.
- Vand, V.: *J. Phys. and Colloid Chem.*, **52**, 300 (1948).
- Tareef, M.: *Colloid J. USSR*, **6**, 545 (1940).