

미립자를 포함한 현탁액의 전단율에 의존적인 열전도율 측정

이 성 혁* · 신 세 현**

(1998년 2월 25일 접수)

Measurement of the Shear Rate-Dependent Thermal Conductivity for Suspension with Microparticles

Sung-Hyuk Lee and Sehyun Shin

Key Words : Microconvection(미세대류), Thermal Conductivity(열전도율), Suspension(현탁액), Microparticle(미립자), Shear Rate(전단율)

Abstract

An effective thermal conductivity measurement for suspensions of microparticles in oil mixture is conducted in order to evaluate the shear rate-dependence of the thermal conductivity of suspensions. Measurements are made for rotating Couette flows between two concentric cylinders. The rotating outer cylinder is immersed into a constant temperature water bath while the stationary inner cylinder is subject to a uniform heat flux. Test fluids are made to be homogeneous suspensions, in which neutrally buoyant microparticles ($d = 25 \sim 300 \mu m$) are uniformly dispersed. The present measurements show strong shear-rate dependent thermal conductivities for the suspensions, which are higher than those at zero shear rate. The shear rate dependent thermal conductivity increases with the particle size and volume concentration. A new model for shear rate-dependent thermal conductivity of microparticle suspensions is proposed; the correlation covers from zero shear rate value to asymptotic plateau value at moderately high shear rates.

기 호 설 명

Br : Brinkman수 ($Br = \frac{\mu u_0^2}{k(T_i - T_o)}$)

Ec : Eckert수 ($Ec = \frac{(1/2) u_0^2}{c_p(T_i - T_o)}$)

c_p : 비열, J/kg·K

d : 미립자의 평균 직경, μm

D : 이중실린더 간격, μm

k : 열전도율, W/mK

L : 내부실린더의 길이, mm

Pe : Peclet수 ($Pe = \frac{\dot{\gamma} d^2}{\alpha_f}$)

Pr : Prandtl수 ($Pr = \frac{\mu c_p}{k}$)

q'' : 열유속, W/m²

Q : 전원공급 열량, W

r : 실린더 반경

T : 온도

u : 속도

그리스문자

α : 열확산 계수

ρ : 밀도

μ : 점도

$\dot{\gamma}$: 전단율

ϕ : 부피농도 (volume concentration), %

*경북대학교 대학원 기계공학과

**회원, 경북대학교 기계공학부

ω : 외부실린더의 회전 각속도

θ : 실린더의 원주방향

하첨자

e : 유효

i : 내부

o : 외부 실린더

0 : 정지 유동장

∞ : 외부 유동장

1. 서 론

최근의 열전달 향상기술에 관한 연구 중 열수송 매체로 사용되는 작동유체의 전열성능 향상에 대하여 흥미있는 연구결과들이 보고되고 있다. 피동적 열전달 향상기법의 한 형태로서 고체입자^(1,2) 또는 상변화물질^(3,4) 등을 유체내의 첨가제(additives)로 사용하여 작동유체의 대류열전달 계수를 향상시키는 방법으로서 최근에는 상변화물질(phase change material)의 미립피복(microencapsulation) 기술^(4,5)이 발전함에 따라 열용량이 큰 새로운 작동유체의 개발이 가속화되고 있다.^(6,7) 즉, 에멀전(emulsion) 형태로 사용하던 상변화물질이 갖는 단점인 파울링(fouling)이나 막힘(clogging) 문제를 극복한 방법이 미립피복 기술인데, 이는 상변화물질을 5~500 μm 크기로 복합수지를 이용하여 피복시킨 것으로서 상변화가 발생하여도 미립자의 형태로 균일하게 분산되어있는 현탁액(suspension)으로 거동할 수 있게된 것이다. 이와 같이 피복된 상변화물질 피복 미립자가 균일하게 분산된 현탁액을 작동유체로 사용하게되면, 상변화시의 잠열이용에 따라 전열성능의 획기적 향상을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 항력 감소(drag reduction)⁽⁸⁾를 동반하기 때문에 열수송 매체로서 중요한 잠재성을 갖고 있다.

그러나 현탁액에 포함된 미립자가 열전달 특성에 미치는 영향에 대해서는 충분한 연구가 이루어지지 않았다. 다만, 잘 알려진 잠열효과 이외에 입자 거동에 의한 복합적인 효과로 열전달 특성에 관계되어 있는 것으로 보고되어 있으며, 특히 상변화를 수반하는 피복 미립자의 전열성능을 분석하는데 있어 매우 어려운 문제로 대두되고 있다.⁽⁹⁾ 따라서 상변화를 수반하는 미립자에 대한 직접적 연구보다는 상변화를 수반하지 않는 경우에서의 미립자 영향을 별도로 고찰하는 연구 방법이 필요하다. 유체 속에

분산된 미립자가 유발하는 열전달 메커니즘에 대해 입자규모의 미세대류(microconvection) 이론⁽⁷⁾이 다시 관심을 끌고있다. 즉, 상변화를 수반하지 않는 미립자가 열유동장에 미치는 영향만을 고려한 미세대류 현상은 전단유동장에 놓인 미립자가 전단유크에 비례하는 회전운동을 하게 되어 유동에 에디(eddy)를 형성하게 되고 이러한 에디가 결국 입자의 크기와 입자의 표면 속도의 함수관계인 미소규모의 대류를 야기시키게 된다는 설명이다. 사실은, 점성유체에 포함된 미립자 거동에 관한 연구가 상당히 오래 전에 보고된 바 있다. 매우 작은 미립자($\sim 10\mu\text{m}$)의 경우에는 Brownian 운동과 미립자간의 상호간섭 등에 대한 연구⁽¹⁰⁾와 전단 유동장에서의 미립자 회전에 대한 이론 및 실험 등이 보고되어서⁽¹¹⁾ 이러한 미세대류를 뒷받침하고 있다.

미세대류적 열전도율(Microconvective Thermal Conductivity, MTC), 즉 유체 분자간의 열전달 개념인 전도열전달 개념에 미소규모의 미세대류를 포함시켜 고려하면⁽⁷⁾ 미립자의 미세대류 효과로 인한 유효 열전도율의 증가로 나타나는 것을 볼 수 있다. 유효 열전도율의 증가는 특히 상변화를 수반하지 않는 미립자의 현탁액 유동에서의 주요한 열전달 향상 원인으로 대두될 수 있다. 미립자를 포함한 현탁액에 대한 유효 열전도율 관련 연구는 뉴턴 유체를 기본 유체로 하여 여러 가지 종류의 미립자를 혼합한 현탁액에 대해 몇 개의 중요한 실험적 연구결과가 보고되었다.

Ahuja 등은^(12,13) 50~100 μm 크기의 Polystyrene 입자를 고체입자의 밀도와 동일한 액체에 균일하게 분산시켜 중립적으로 부유 상태인 현탁액을 제조하고 이를 관내 층류 유동장에서 유속을 변화시키면서 전단유크에 따른 유효 열전도율 변화를 측정하였다. 그 결과 유효 열전도율의 증가를 관찰하였으며, 미립자의 농도, 미립자의 크기 등의 영향을 분석하여 관심을 끌었으나, 측정 방법에서 전단유크가 일정치 않은 관내 유동장에서의 열전도율 측정으로 이중 동심원관 내부의 Couette 유동장과 같은 비교적 전단유크가 일정한 다른 측정 결과와의 비교가 곤란하다. Sohn과 Chen⁽⁷⁾은 이러한 점을 착안하여 폴리에틸렌(Polyethylene) 미립자를 이용한 현탁액으로 이중 원형관내의 Couette 유동장을 형성하여 현탁액의 전단유크에 따른 열전도율을 측정하였다. 그 결과 분석에서 미립자의 크기를 특성 길이로 하는 Peclet 수의 함수로 된 유효 열전도율 모델은

제시하였으며 또한 이를 이용하여 에너지 식에 삽입하고 온도장이 발달중인 구역에 대해 각각 열전달계수를 구하였다. 그러나 Sohn과 Chen⁽⁷⁾의 모델에서는 유효열전도율이 Peclet 수의 지수 함수적 증가를 보이고 있어 높은 Peclet 수에 대한 물리적 한계의 구멍이 부족하다.

본 연구에서는 미립자가 포함된 2상 혼합물에 대하여 전단율이 일정한 Couette 유동장에서의 유효 열전도율 측정하고 이에 영향을 미치는 인자들에 대한 체계적 실험을 수행하여 상관식을 도출하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

본 실험에서 열전도율은 고정된 내부 실린더와 회전하는 외부 실린더 사이에 측정하고자 하는 혼합물을 주입하여 전단율이 일정한 이중 동심원관 내부 Couette 유동장에서 측정되었다. 실험장치에 대한 상세한 그림이 Fig. 1에 도시되어 있다. 내부 실린더는 외경이 48 mm이고 길이는 61.8 mm이며 두께는 3.85 mm이다. 외부 실린더는 외경이 55 mm이고 길이는 110 mm이며 두께는 2 mm이다. 실린더 내부에서 균일한 온도분포를 갖도록 실린더의 소재는 모두 열전도율이 높은 알루미늄으로 하였다. 이중 동심원관 사이의 간격은 1.5 mm이다.

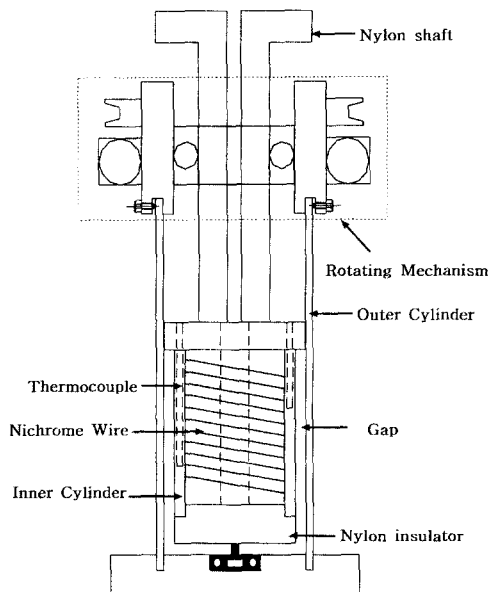


Fig. 1 Detail view of test section.

내부 실린더 가운데 삽입되는 나일론 봉 표면에 조밀한 홈을 내고 그 안에 니크롬선을 감아 일정한 전원을 공급하여 열발생 장치를 구성하였으며 이때 가해지는 전류의 양과 전압, 그리고 니크롬선의 저항으로부터 입력 열량을 계산하였다. 이렇게 입력된 열은 내부 실린더의 벽면에 전달되고 간극에 채워진 현탁액을 통해 외부 실린더의 벽으로 전달되도록 구성하였다. 반경방향의 1차원 전도 열전달 현상이 지배적이고 실린더의 축방향으로의 열전달을 최소화하기 위해 실린더의 길이를 실린더 간격에 비해 충분히 길게 하였으며, 또한 축방향의 열손실 발생을 고려하여 축방향의 온도구배가 0이 되는 실린더 길이 방향의 중심부에 열전대를 설치하였다. 온도측정에서 내측 온도 측정은 내부 실린더에 수직방향으로 구멍을 내어 T-type 열전대를 삽입하여 측정하였다. 그리고 외측온도는 외부 실린더의 바깥쪽에 장착된 항온조를 통해 유입되는 유체의 온도를 측정하여 이를 사용하였다. 회전하고 있는 외부실린더의 바깥표면 온도를 측정하는 방법으로 무선(wireless) 온도 측정을 시도하였으나 결과적인 온도의 정밀도가 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 정도이어서 본 연구의 오차 허용범위에 부적합하였다. 이에 대한 대안으로서 실린더 외부에 항온조로 새로이 유입되는 냉각수를 분사시키는 방법을 채택하여 외부 실린더 외벽면의 열전달계수 값을 크게 증가시킴으로써 냉각수의 온도를 외부실린더의 외측온도에 근접시켜 본 측정실험의 오차 허용범위를 만족시켰다. 이에 대한 자세한 내용은 실험의 오차 해석 부분에서 언급되어 있다. 본 연구에 사용된 실험장치의 구성도를 Fig. 2에 도시하였다.

본 실험에서는 4가지의 현탁액을 측정유체로 사용하였다. 두가지 현탁액은 입경이 각각 $25\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$ 의 고밀도 폴리에틸렌 미립자(Polyscience Inc.)를 실리콘 오일(Dow Corning 200)과 등유(Kerosene)를 각각 66.2%와 33.8%의 부피비로 혼합한 액상 혼합물에 혼합하여 균일 분산시켰다. 이때 혼합 액체를 사용한 이유는 고체 미립자가 밀도차에 의하여 침전되지 않고 균일하게 분산되도록 하기 위해 미립자의 밀도를 액체간의 부피비로 조절하여 사용하였기 때문이다. 이 때, 미립자의 비중은 0.915였다. 셋째 현탁액은 Aldrich사 제품인 고밀도 폴리에틸렌 미립자(HDPE, $d=180\ \mu\text{m}$)를 실리콘 오일 80.3%와 등유 19.7%의 액체 혼합물에 혼합하였다. 앞서 구입한 미립자와 종류는 동일

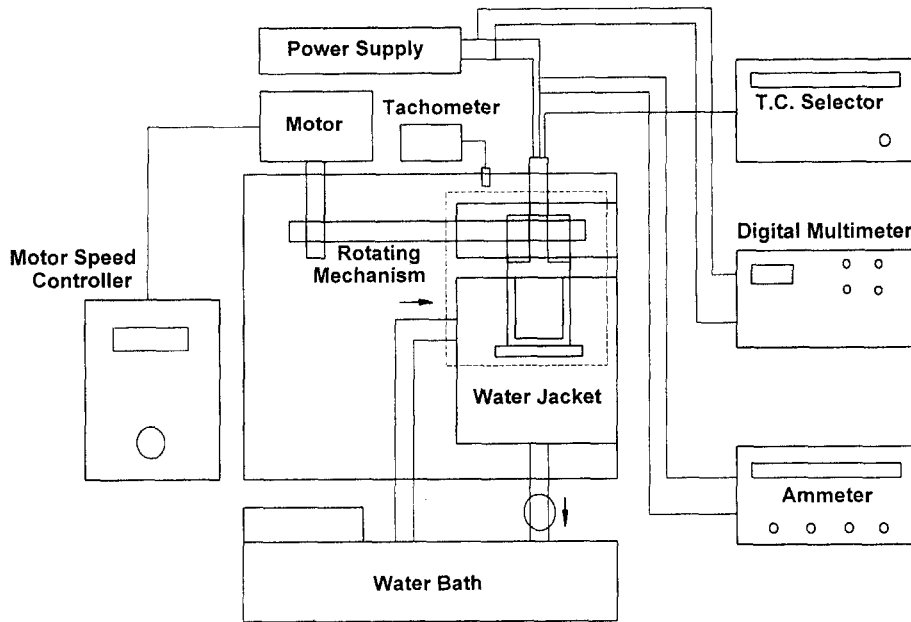


Fig. 2 Schematic diagram of overall experimental apparatus.

Table 1 Properties of each test suspension.

	Silicon Oil (S)	Kerosen (K)	Suspension I	Suspension II	Suspension III	Suspension IV
particle size (μm)	-	-	25	100	180	300
mixing ratio (S : K)	-	-	66.2 : 33.8	66.2 : 33.8	80.3 : 19.7	44.0 : 56.0
ρ (kg/m ³)	975	797.4	915	915	940	876
k (W/mK)	0.164	0.150	0.159	0.159	0.163	0.156
c_p (J/kg K)	1736.1	2249.6	1909.56	1909.56	1828.46	2023.66
α_f (m ² /sec)	9.6×10^{-8}	8.3×10^{-8}	9.1×10^{-8}	9.1×10^{-8}	9.6×10^{-8}	8.8×10^{-8}

하지만 제조 회사의 차이에 따라 약간 큰 비중(SG = 0.940)을 갖는다. 넷째 현탁액은 고밀도 폴리프로필렌 미립자(Polyscience Inc., d=300 μm)를 실리콘 오일 44.0%와 등유 56.0%를 혼합한 액체에 혼합하였다. 이때 비중은 0.876이었다. 사용된 현탁액들의 물성치를 Table 1에 정리하여 나타내었다. 고체 미립자와의 밀도가 동일한 액체를 사용하여 제조된 현탁액은 시간에 관계없이 침전되거나 표면위로 부유되지 않고 본 실험의 온도 범위 내에서 미립자가 거의 중립적으로 부유된 상태로 균일

하게 분산되어 있었다.

3. 열전도율 측정 및 오차해석

위와 같은 실험 장치를 구성하고 측정된 온도로 부터 각 전단율에 따른 유체의 열전도율을 계산하기 위하여 아래와 같은 이론 해석과 지배방정식을 이중원통내의 Couette 유동에 적용하였다.

$$\text{연속방정식 : } \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = 0 \tag{1}$$

$$r\text{-운동량방정식} : \frac{dp}{dr} = \frac{\rho u_\theta^2}{r} \quad (2)$$

$$\theta\text{-운동량방정식} : \frac{d^2 u_\theta}{dr^2} + \frac{d}{dr} \left(\frac{u_\theta^2}{r} \right) = 0 \quad (3)$$

에너지방정식 :

$$\frac{k}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \mu \left(\frac{du_\theta}{dr} - \frac{u_\theta}{r} \right)^2 = 0 \quad (4)$$

여기서 경계조건은

$$\begin{aligned} r=r_i : u_\theta=0, \quad T=T_i, \quad p=p_0 \\ r=r_o : u_\theta=r_o\omega_o, \quad T=T_o \end{aligned}$$

여기서 ω_o 는 외부실린더의 각속도이다. 그리고

$$u_\theta = r_o\omega_o \frac{r/r_i - r_i/r}{r_o/r_i - r_i/r_o} \quad (5)$$

이러한 속도분포를 에너지방정식에 대입하면 아래 식과 같은 온도분포를 얻을 수 있다.

$$\frac{T-T_i}{T_o-T_i} = Pr \cdot Ec \cdot f(r, \omega) + \frac{\ln(r/r_i)}{\ln(r_o/r_i)} \quad (6)$$

여기서, $Pr \cdot Ec$ 는 Brinkman수(Br)로서 $Br = \mu r_o^2 \omega_o^2 / k(T_i - T_o)$ 이다. 이러한 Br수는 점성소산에 의해 발생하는 온도상승을 나타낸다. 그러나 본 실험에서는 이 Br수가 약 10^{-4} 이다. 따라서 본 실험에서 점성소산에 의한 영향은 매우 작으며 온도장 관계식에서 점성소산 항을 무시하여도 된다. 공급되는 열량에 의한 열전달은 열전도방정식을 이용하여 정리하면 아래 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Q = Aq'' = 2\pi rL \left(-k \frac{dT}{dr} \right) \\ = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i)} \quad (7) \end{aligned}$$

최종적으로 본 연구에서 구하고자 하는 유체의 열전도율 값은 아래 식으로부터 계산할 수 있다.

$$k = \frac{\dot{Q} \ln(r_o/r_i)}{2\pi L(T_i - T_o)} \quad (8)$$

불확실성 해석

한편, 유효 열전도율에 관계하는 불확실성(Uncertainty) 인자들은 식 (8)로부터 다음과 같이 정리되고 각각의 영향을 고려하여야 한다.

$$k = k(Q, r_o, r_i, l, \Delta T) \quad (9)$$

$$dk = \left(\frac{\partial k}{\partial Q} \right) dQ + \left(\frac{\partial k}{\partial r_o} \right) dr_o + \left(\frac{\partial k}{\partial r_i} \right) dr_i$$

$$+ \left(\frac{\partial k}{\partial \Delta T} \right) d\Delta T + \left(\frac{\partial k}{\partial l} \right) dl \quad (10)$$

따라서 측정된 값들을 식 (8)에 대입하여 얻어지는 유효 열전도율의 전체 예상 오차는 다음과 같은 식으로 도출해 낼 수 있다.

$$\frac{\Delta k}{k} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q} \right)^2 + \frac{1}{(\ln r_o - \ln r_i)^2} \left[\left(\frac{\Delta r_o}{r_o} \right)^2 + \left(\frac{\Delta r_i}{r_i} \right)^2 \right] + \left(\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2} \quad (11)$$

먼저, 열량의 측정에서 발생할 수 있는 오차 ΔQ 를 살펴보면, 실험장치에 공급되는 전체 열량은 ($Q_T = E \cdot I$) 전원 공급부에서 공급되어지는 전력량을 측정하여 구할 수 있다. 그러나 공급되는 열량의 일부가 다른 경로로 유실되어 이에 따른 열손실이 발생된다. 예상되는 열손실에는 실린더 및 나일론 봉의 축방향으로의 열손실과 전열선에서의 전력 소산 등이 있다. 이를 고려할 때, 축방향으로 손실되는 열량은 전체 입력되는 열량중 0.15% 정도이고, 전열선에서 소산되는 손실열량은 약 1.76%이다. 그러므로 전체 열량공급에 대한 오차는 아래와 같다.

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{0.987}{51.9} = 1.9\% \quad (12)$$

한편, 본 실험의 온도측정에서 발생하는 오차를 고려하면 아래와 같다. 먼저, 열전대의 온도보정을 통해 열전대의 정확도를 $\pm 0.08^\circ\text{C}$ 수준으로 높였다. 또한 회전하는 외부 실린더의 온도를 좌우하는 항온 수조의 물을 발생열량에 맞추도록 적절하게 채워넣어 최대 온도 변동폭을 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 정도로 하였다. 따라서 온도측정에서 발생할 수 있는 오차, $\Delta(\Delta T)$ 는 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이다. 실험에서 측정되었던 두 개의 실린더 벽면의 온도차(ΔT)는 12°C 이다. 따라서 측정된 온도차에 대한 오차분석은 아래와 같다.

$$\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T} \times 100(\%) = \frac{0.1}{12} \times 100(\%) = 0.83\% \quad (13)$$

마지막으로, 길이 측정에서의 오차 해석이다. 두 실린더의 반경과 내부실린더의 길이측정은 각각 마이크로미터와 버어니어캘리퍼스를 사용하여 측정하였는데, 반경과 축방향 길이에 대한 오차는 각각 다음과 같다.

$$\frac{\Delta r_o}{r_o} = 0.0078\%, \quad \frac{\Delta r_i}{r_i} = 0.0083\%$$

$$\frac{\Delta I}{I} = 0.016\% \quad (14)$$

위에서 구해진 모든 인자들에 대한 오차, 즉 식 (12)-(14)에서 얻은 각각의 오차를 식(11)에 대입하면, 유효 열전도율 측정에서의 불확실성은 2.1%로 분석된다.

4. 결과 및 고찰

결과 분석에 앞서 본 실험의 열전도율 측정 장치의 보정과 검증 실험을 하였다. 즉, 열전도율 값이 잘 알려진 물과 오일에 대하여 각각 본 측정장치를 통하여 전단율을 변화시키면서 열전도율을 측정하여 비교한 것을 Fig. 3에 나타내었다. 물 속에 포함되었을 불순물의 영향을 배제하기 위하여 증류수를 사용하였으며 이에 대한 열전도율 값은 증기표에서 구할 수 있었다. 증류수의 경우, 본 실험에서 측정된 열전도율의 값은 낮은 전단율의 일부 구간을 제외하고는 전단율의 크기에 상관없이 일정한 값을 나타내고 있으며 그 값은 이 증기표에 나타난 값(0.609 W/mK)에 비해 약 1% 큰 값이다. 또한, 전단율이 0인 지점에서의 열전도율 측정은 외부 실린더가 정지상태이기 때문에 외부 실린더 벽의 온도를 열전대를 이용한 직접 측정을 통해 얻을 수 있으며, 이를 통한 정지유동장에서의 열전도율 값은 높은 전단율 구간에서의 값과 동일한 값을 나타내고 있다. 그러나 낮은 전단율 구간, 즉 외부 실린더의 회전속도가 느린 구간에서는 전단율에 따라

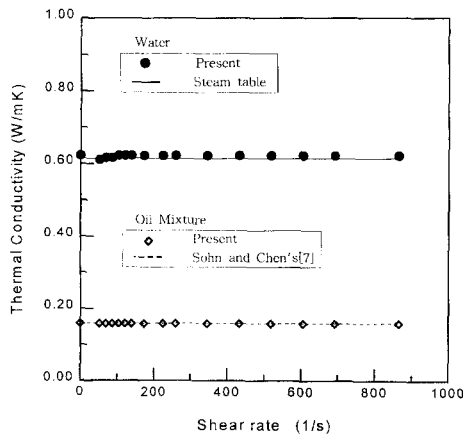


Fig. 3 Thermal conductivity vs. shear rate for distilled water and a mixed oil (silicon oil + kerosene) at 26°C.

약간 증가하는 추세를 보였는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 회전하는 외부 실린더의 회전 속도가 낮기 때문에 항온조와 실린더 벽면의 온도가 동일하다는 가정에 상대적으로 큰 오차가 발생하였기 때문이다. 그러나 이러한 오차 범위는 앞서 사용한 냉각수의 수중 분사 방식을 통하여 증기표의 값으로부터 1% 이내에 들어오게 할 수 있었다. 또한, 이러한 수중 분사 방식을 적용한 액체 혼합물의 열전도율 측정 결과는 전 구간의 전단율 영역에서 매우 일정한 값을 나타내었으며 동일유체를 실험한 Sohn과 Chen^[7]의 측정치와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

본 실험에서 사용된 4가지 크기의 미립자를 오일 혼합물에 균일 분산시켜 만든 현탁액에 대하여 각각의 측정 결과를 Fig. 4(a), (b), (c), (d)에 나타내었다. 각각의 현탁액에 대하여 서로 다른 부피비, 즉 2% 간격으로 0%에서 10%까지 6가지의 부피비가 다른 현탁액을 준비하였으며, 이를 외부 실린더의 회전 속도를 변화시키면서 전단율의 변화에 따른 열전도율을 측정하였다.

본 실험에서 사용한 입자 중에 가장 작은 입자는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 재질로 크기는 25 μm 로서, 이에 대한 측정 결과는 Fig. 4(a)에 나타나 있다. Fig. 4(a)에서의 특이한 점은 우리가 실험에 앞서 예측한 것과는 달리 측정된 유효 열전도율은 전단율의 증감에 무관하게 일정한 값을 가졌으며 영전단율, 즉 정지 유동장에서의 값과 동일한 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 25 μm 의 미립자의 부피비를 증가하여도 동일하였으며 전단율 의존성을 보이지 않고 있다. 단지, 미립자의 부피비를 증가시키기에 따라 현탁액의 열전도율이 증가하는 현상을 나타내고 있다. 이와 같이 25 μm 의 미립자를 포함한 현탁액의 열전도율의 측정 결과는 기존에 보고된 결과와 상반되는 것으로 수차례에 걸친 측정장치의 전체 분해 및 조립과 검증, 그리고 반복 실험을 거쳐 동일한 결과를 얻었다.

선행 실험의 결과 분석을 통해 미립자의 크기와 열전도율의 전단율 의존성에 중요한 관계가 있을 것으로 분석하고 이에 미립자의 크기를 약 4배 정도 증가시킨 고밀도 폴리에틸렌의 입경 100 μm 미립자를 선택하였다. 위와 동일한 방법으로 현탁액을 각각의 부피비에 대해 준비하여 열전도율을 측정 한 결과가 Fig. 4(b)에 도시되어 있다. 먼저, 미립자가 포함되지 않은 오일 혼합액(0%)의 열전도

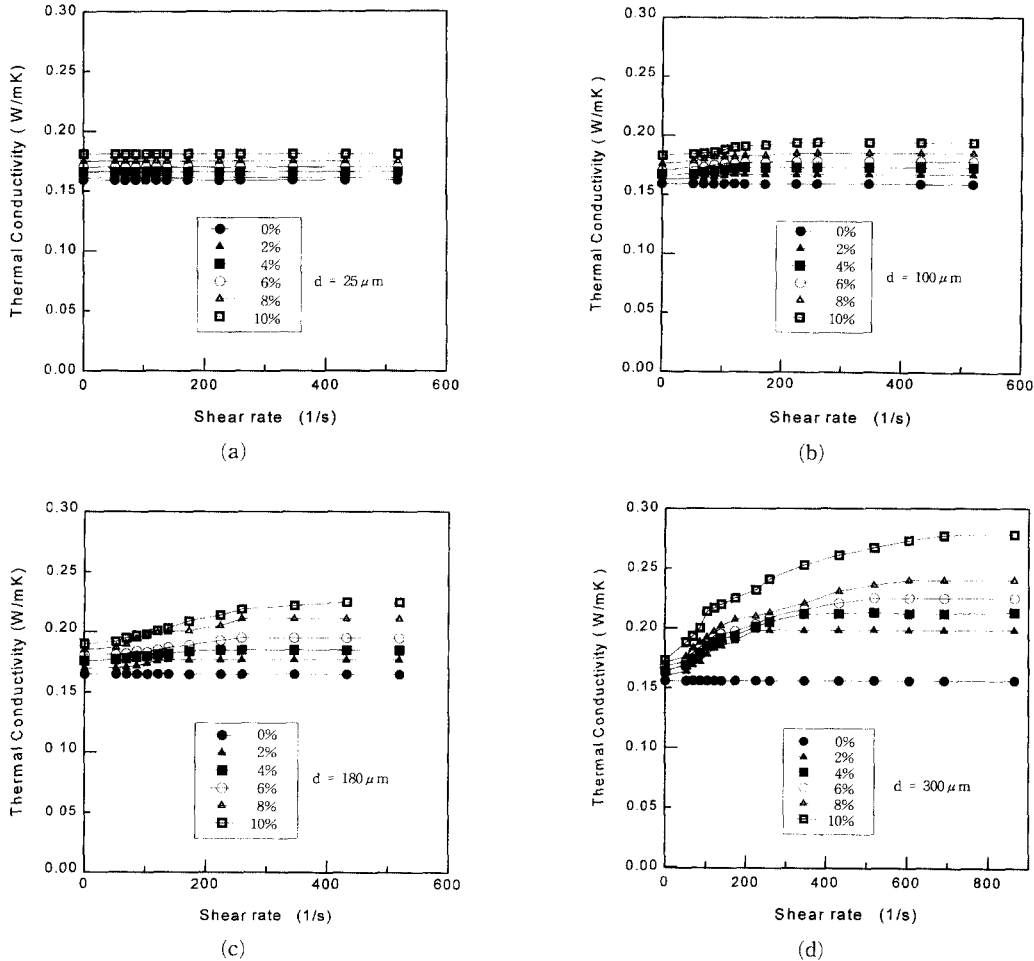


Fig. 4 Thermal conductivity vs. shear rate for 300 μm -microparticle suspensions.

율은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 전단율에 독립적인 일정한 값을 나타내고 있다. 그러나 입경 100 μm 미립자가 2% 포함된 현탁액의 열전도율은 전단율의 증가에 처음에는 영전단율의 값과 동일한 값을 보이다가 일정한 전단율 이상의 구간에서부터 약간의 증가되는 추세를 보이다가 곧 일정한 최대값에서 변하지 않는 경향을 보였다. 이러한 경향은 부피비가 증가된 4%, 6%, 8%, 10%의 현탁액에서도 거의 유사하게 나타나고 있다. 부피비가 증가함에 따라 열전도율이 증가하기 시작하는 전단율이 감소하는 추세를 보였으며, 또한 최대값에 도달하여 일정한 값을 나타내기 시작하는 전단율도 증가된 값을 보이고 있다.

이러한 전단율에 의존적인 열전도율의 측정 결과는 미립자의 입경이 더욱 큰 180 μm 와 300 μm 의

경우에는 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다. Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)는 이들에 대한 각각의 결과를 나타내고 있다. 물론, 입자가 커질수록 열전도율의 전단율에 대한 의존성은 더욱 크게 나타나고 있다. 바꾸어 말하면, 전단율에 대한 열전도율의 증가 기울기는 미립자의 크기가 클수록 증가하고 있다. 또한, 본 실험에서 가장 입경이 큰 폴리프로필렌 재질의 미립자 300 μm 의 경우, Fig. 4(d)에서 나타난 바와 같이 부피비의 증가에 따라 열전도율의 증가폭이 상대적으로 작은 미립자들의 경우에 비해 큰 폭으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 열전도율이 전단율에 직선 또는 곡선 형태로 증가하다 점근적으로 최대값에 도달하는 것을 볼 수 있다. 폴리프로필렌의 부피비가 10%인 경우, 이러한 최대값은 영전단율에의 값에 160% 크기의 값을 보

이고 있다.

이상의 Fig. 4(a)-(d) 결과들로 비추어 볼 때, 미립자의 크기는 전단율 의존성에 결정적 영향인자로서 작용하고 있으며, 또한 입계인자로서 작용하고 있다. 즉, 입경이 어느 정도 작은 미립자를 포함한 현탁액은 부피비에 상관없이 전단율에 독립적인 열전도율의 특성을 보이다가 어느 크기 이상에서부터는 전단율 의존적인 경향을 보이며 미립자가 커지면 커질수록 그 의존성은 증대되는 것이다. 또한 고체 미립자의 부피비는 일정한 크기의 미립자 현탁액에서 전단율 의존성의 척도인 증가 기울기에 직접적인 관계가 있는 것으로 나타나고 있다.

앞서 제시된 결과를 토대로 전단율에 의존적인 현탁액의 유효 열전도율에 대하여 기존 모델의 한계성을 극복하는 새로운 모델과 식을 제시하는 것은 매우 중요한 의미를 갖고 있다. 즉, 이제까지 일정한 값으로 가정하여 정지유동장에서만 측정된 현탁액의 열전도율이 전단율이 증가함에 따라 또는 부피비와 입경의 크기에 따라 상당히 큰 값으로 측정되었기 때문에, 현탁액에 관계된 제반 열전달 현상의 재고가 필요하다. 이를 위해서는 현탁액의 열전도율에 대한 새로운 모델과 식이 제시되고 이러한 가변적 유효 열전도율이 열전달 현상에 정량적으로 어떠한 영향이 있는지 조사하여야 한다. 본 연구에서는 전단율 의존적 유효 열전도율의 영향을 잘 고려할 수 있는 모델을 개발하고자 다음과 같은 단위 영향인자에 대한 개별적 분석을 하고 이를 통합하였다.

먼저, 미립자의 부피비를 증가시킴에 따라 영전단율, 즉 정지유동장에서 측정된 현탁액의 열전도율이 점차 증가하는 현상을 나타내고 있는데, Fig. 5는 정지상태($\dot{\gamma}=0$)에서 측정된 현탁액의 열전도율(k_0)을 미립자가 포함되지 않은 액체 혼합물의 열전도율(k_L)로 무차원화하여 미립자의 부피비에 따라 나타낸 결과이다. 입자 크기에 따른 현탁액마다 액체 혼합물의 혼합비가 다른데, 이는 미립자마다 서로 다른 비중을 갖고 있기 때문에 이를 맞추어 주기 위해 오일의 혼합비로 조절한 것이다. 따라서 각각의 현탁액의 실제 k_0 는 약간씩 서로 다른 값을 나타내고 있다. 그러나 부피비에 따라 증가하는 기울기가 비교적 비슷하여서 이를 무차원화하여 Fig. 5에 도시한 것으로서 이러한 현상은 이미 기존의 Brailsford-Major 모델이나⁽¹⁴⁾ Litchnecker 모델⁽¹⁵⁾에 의하여 비교될 수 있다. 기존 모델의 예

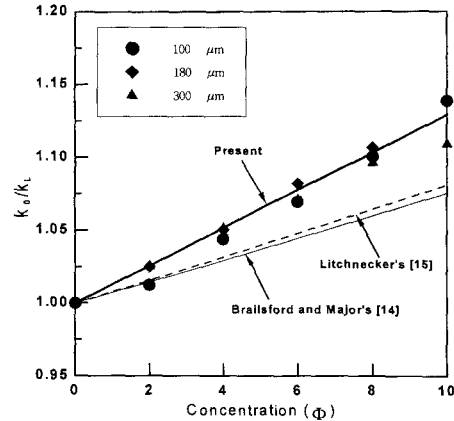


Fig. 5 The effect of concentration on the zero shear-rate thermal conductivity.

측치 보다는 본 측정 결과가 약간 높은 값을 띄고 있는데, 이는 본 실험에서 측정된 현탁액이 비교적 낮은 부피비이기 때문에 이와 같은 차이를 갖는 것으로 생각된다. 따라서 약간의 낮은 값을 예측하는 기존의 모델을 사용하는 것보다는 본 실험 결과에 맞는 관계식을 찾아 사용하는 것이 좋을 것 같다. 그러나 한정된 자료를 가지고 기존의 모델과 같은 형태로 관계식을 찾는 것에 한계성을 갖고 있지만, 측정된 결과들이 $\pm 3.0\%$ 의 오차범위 안에 들어오는 선형적인 함수를 찾아내어 식(15)로 나타내었다.

$$\frac{k_0}{k_L} = \left[\frac{2k_L + k_p - 0.023\Phi(k_L - k_p)}{2k_L + k_p + 0.023\Phi(k_L - k_p)} \right] \quad (15)$$

여기서 k_0 : 정지유동장에서의 현탁액의 열전도율

k_L : 순수 액체 혼합물의 열전도율

k_p : 미립자의 열전도율

한편, 위의 그림 Fig. 4에서 유효 열전도율이 전단율이 영인 지점에서의 영 열전도율 값(k_0)을 나타내다가 증가되기 시작하는 지점의 전단율을 본 연구에서는 영전단율, 즉, $\dot{\gamma}_0$ 로 정의하였다. 이렇게 정의된 영전단율, $\dot{\gamma}_0$ 를 찾기 위해 Fig. 6에서 열전도율 비(k_e/k_0)를 전단율에 따라 나타내었다. 그러나 본 실험에서의 최저 전단율 값이 51.8(1/s)로서 이는 본 실험에서 모터의 회전수를 제어하는 인버터가 균일하게 회전시킬 수 있는 최저 회전수에 해당되는 전단율 값이다. 따라서 그 이하의 전단율 구간($\dot{\gamma}=0$ 제외)에서는 열전도율을 측정하지 못하였다. 그러나 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와

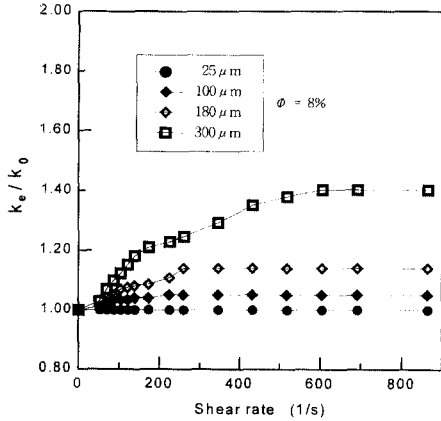


Fig. 6 The enhancement of thermal conductivity vs. shear rate for a fixed volume concentration ($\phi=8\%$).

같이 일정한 부피비에 대해서 미립자의 크기에 따라 열전도율 비를 나타낸 결과, 아주 낮은 전단율에서부터 유효 열전도율이 증가하는 것으로 나타나, 본 연구에서 정의한 영전단율을 0 또는 50 이하의 작은 값으로 가정하여도 큰 어려움이 없을 것으로 보인다. 이러한 결과는 Lee⁽¹⁶⁾의 비뉴턴성 유체의 열전도율 결과와는 다른 경향이다. 즉, Lee의 결과에서는 영전단율이 80~100 정도의 크기로서 그 이후부터 열전도율이 증가하는 현상을 나타내었다. 이같은 차이를 설명하기 위해서는 폴리머 수용액과 같은 비뉴턴성 유체와 미립자가 포함된 현탁액의 유변학적 고찰, 그리고 미립자 및 폴리머의 물에 대한 상대적 열전도율의 비 등을 함께 고려한 연구가 필요하다.

Fig. 7은 앞에서 언급한 유효 열전도율의 점근적 최대값을 나타내기 시작하는 전단율 값, 즉 무한 전단율($\dot{\gamma}_\infty$)을 분석하였다. $\dot{\gamma}_\infty$ 은 고체 미립자의 크기와 부피비가 복합적으로 영향을 끼치고 있는 것으로 선행 분석에서 나타났다. 따라서 각각의 변수가 $\dot{\gamma}_\infty$ 에 관계하는 함수 형태를 찾아 이를 조합한 결과 두 변수를 동시에 고려한 관계식을 아래와 같이 찾을 수 있었다.

$$\dot{\gamma}_\infty = C_1 + C_2 \left[\phi \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^{1.5} \right] \quad (16)$$

여기서 $C_1=66.417$, $C_2=831.9$ 이다.

한편, 전단율이 증가함에 따라 유효 열전도율 값이 점근적으로 일정한 값 k_∞ 에 도달하게 된다. 앞

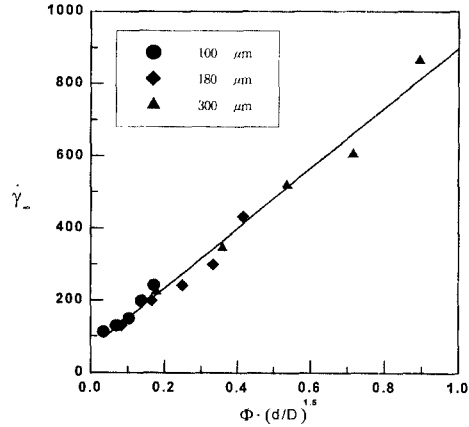


Fig. 7 The correlation of the infinite shear rate with volume concentration and particle diameter.

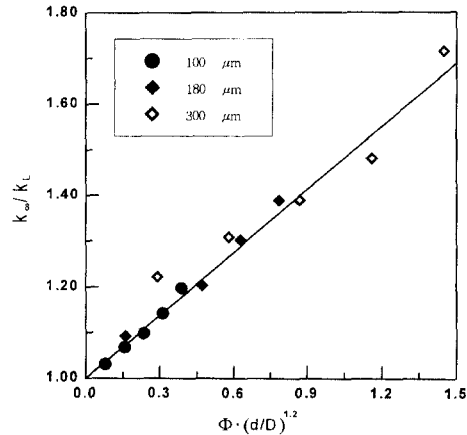


Fig. 8 The effect of volume concentration and diameter ratio on the plateau values of thermal conductivity for various suspensions.

서 살펴본 k_0 는 미립자의 부피비의 함수인 것에 반하여, k_∞ 는 미립자의 부피비와 미립자의 크기 모두에 지배되는 것으로 Fig. 4에서 나타났다. Fig. 8에는 측정된 k_∞ 와 순 액체혼합물의 열전도율 k_L 의 차를 부피비와 미립자 크기의 함수로 나타낸 것으로서 상관관계를 찾은 결과, 부피비에 선형적으로 비례하고 미립자 크기의 1.2 제곱으로 비례하는 것으로 나타났다. 이를 상관식으로 표현하면 아래 식과 같다.

$$\frac{k_\infty}{k_L} = 1 + C_3 \phi \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^{1.2} \quad (17)$$

여기서 $C_3=0.459$ 이다.

본 실험 장치와 같은 회전형 Couette 전단 유동장에서 미립자가 포함된 2상 혼합물에서의 열전도율의 증가는 Sohn과 Chen⁽⁷⁾이 제시한 미립자의 회전(self rotation)을 통한 미소 규모의 대류 효과에 기인한 것으로 해석할 수 있다. 이러한 미세대류 이론은 Sohn과 Chen⁽⁷⁾이 열전달에 미치는 미립자 효과를 그들의 실험 결과로부터 전단율 차이와 입자의 크기 등을 고려하여 액체 혼합물에 포함된 고체 미립자의 회전운동으로 야기되는 미소 규모의 대류현상으로 해석한 것이다. 그러나 이와같은 해석은 실험 결과에 대한 현상을 설명하기위한 유추 해석이기 때문에 실제 미립자의 회전에 따른 영향을 실험에 근거하여 이론을 확립하고 이를 기초로 한 수치해석을 통한 고찰이 필요하다. 본 실험에서도 미세대류의 존재 유무 확인 또는 메커니즘 규명에 대한 고찰은 이루어지지 않았으며 추후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그러나 본 실험에서는 이러한 미립자가 열전달에 미치는 영향인자로 고체 미립자의 크기비(d/D), 액체혼합물에 대한 미립자의 부피비(ϕ), 그리고 전단율($\dot{\gamma}$) 등으로 분석되었으며 본 실험에서 고려치 않은 기타의 변수가 더 존재할 수 있다. Sohn과 Chen⁽⁷⁾은 이러한 인자들 중에서 미립자의 입경과 전단율, 그리고 액체의 열확산계수 등을 하나의 무차원 변수인 Peclet수로서 고려하여 유효 열전도율의 증가비를 Peclet수의 멱법칙 모델로 제시하기도 하였다. 그러나 본 연구 결과와 비교할 때, Fig. 6에서 나타난 유효 열전도율은 어느 정도의 전단율 그 이상에서는 점근적 최대값을 보이며 일정하다는 점이다. 이러한 결과는 기존의 Peclet수 모델이 이상 혼합물의 열전도율 향상에 관하여 과대한 예측치가 나올 우려가 있다는 점을 지적할 수 있다.

전단율에 의존적인 유효 열전도율의 점근적 최대값의 관찰은 기존의 비뉴턴성 유체나 2상 혼합물에 관련된 대부분의 전단율과 열전도율과의 상관 모델에 대한 수정이 불가피하다. 즉, Shin 등⁽¹⁷⁾은 Fig. 9(a)와 같이 전단율에 선형적으로 계속 증가하는 모델을 사용하여 왔으나 본 실험의 결과로 비추어 볼 때 그 모델은 높은 전단율 구간에서는 적합치 못한 것으로 여겨진다. 따라서 본 측정 결과로부터 영전단율, 농도, 입자 크기비 등을 고려하여 다양한 현탁액의 측정 결과들을 하나의 곡선위에 올려 놓을 수 있는 상관식을 제시하고 이를 Fig. 9(b)에 도시하였다.

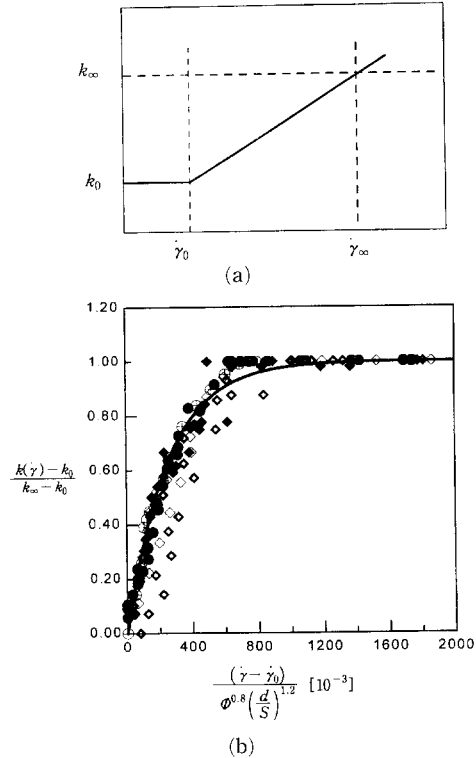


Fig. 9 Non-Newtonian thermal conductivity model for microparticle suspensions.

$$k = k_0 \quad (\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0) \tag{18}$$

$$\frac{k(\dot{\gamma}) - k_0}{k_\infty - k_0} = 1 - \exp\left[-\frac{C_4(\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_0)}{\phi^{0.8}\left(\frac{d}{S}\right)^{1.2}}\right] \quad (\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0)$$

여기서 $C_4 = 14.28 \times 10^{-6}$ 이다.

5. 결 론

본 연구는 고체 미립자를 포함한 현탁액에 대하여 전단율에 따른 열전도율을 측정하고 이에 영향을 미치는 주요 변수에 대하여 조사하였다. 전단 유동장에서 고체 미립자를 포함한 현탁액의 열전도율은 전단율의 증가에 따라 크게 증가되었다. 그러나 미립자가 일정 크기 이하의 현탁액에서는 전단율에 독립적인 열전도율, 즉 일정한 값을 나타내었다. 이는 미립자의 크기가 임계적 변수로서 작용한다는 점을 암시하고 있으며 그 이하의 작은 미립자 현탁액의 경우에는 전단율 의존성을 기대할 수 없게 된다. 또한 현탁액의 유효 열전도율은 포함된

고체 미립자의 크기와 부피비에 따라 크게 증가되었다. 본 연구에서 관찰한 특이점으로서 비교적 높은 전단율 영역에서의 유효 열전도율이 점근적 최대값을 갖는다는 점이다. 유효 열전도율 향상에 영향을 미치는 인자들로써 고체 미립자의 크기, 액체 혼합물에 대한 부피비, 액체 혼합물의 물성치 그리고 전단율 등이 있는데, 그중에서도 고체 미립자의 크기가 가장 큰 영향을 미치는 인자로 분석되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 '96-97 핵심전문연구과제(961-1006-056-2) 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 깊은 감사사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Pak, B. C., Choi, S. H., Baek, B. J. and Masuda, H. 1994, "A Turbulent Friction and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Ultra-Micronized Metallic Particles," *KSME Journal*, Vol. 8, No. 3 pp. 314~324.
- (2) Ahuja, A. S., 1982, "Thermal Design of a Heat Exchanger Employing Laminar Flow of Particle Suspensions," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, No. 5, pp. 725~728.
- (3) Choi, E., Cho, Y. I. and Lorsch, H. G., 1994, "Forced Convection Heat Transfer with Phase-Change-Material Slurries: Turbulent Flow in a Circular Tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 2, pp. 207~215.
- (4) Inava, H. and Sato, K., 1994, "Fundamental Study on Latent Cold Heat Storage by means of Oil Droplets with Low Freezing Point," *일본기계학회논문집(B편)*, 제60권, 580호, pp. 4236~4243.
- (5) Inava, H. and Morita, S., 1995, "Flow and Cold Heat-Storage Characteristics of Phase-Change Emulsion in a Coiled Double-Tube Heat Exchanger," *Transactions of the ASME*, Vol. 117, pp. 440~446.
- (6) Goel, M., Roy, S. K. and Sengupta, S., 1994, "Laminar Forced Convection Heat Transfer in Microcapsulated Phase Change Material Suspensions," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 4, pp. 593~604.
- (7) Sohn, C. W. and Chen, M. M., 1981, "Microconvective Thermal Conductivity in Disperse Two-Phase Mixtures as Observed in a Low Velocity Couette Flow Experiment," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 47~51.
- (8) Watanabe, K., Zhang, Y. and Fujita, T., 1996, "Drag Reduction in Flow Past a Circular Cylinder in Water/Fine Solid Particle Suspension," *일본기계학회논문집(B편)*, 제62권, 603호, pp. 3818~3823.
- (9) 최은수, 1997, "파라핀 슬러리의 생성 및 관내 대류열전달에 관한 연구," *대한기계학회 논문집(B)*, 제22권, 제1호, pp. 50~60.
- (10) Russel, W. B., 1981, "Brownian Motion of Small Particles Suspended in Liquids," *Ann. Rev. Fluid Mech.* Vol. 13, pp. 425~455.
- (11) Leal, L. G., 1980, "Particle Motions in A Viscous Fluid," *Ann. Rev. Fluid Mech.* Vol. 12, pp. 435~476.
- (12) Ahuja, A. S., 1975, "Augmentation of Heat Transport in Laminar Flow of Polystyrene Suspensions, I. Experiments and Results," *J. of Applied Physics*, Vol. 46, pp. 3408~3416.
- (13) Ahuja, A. S., 1975, "Augmentation of Heat Transport in Laminar Flow of Polystyrene Suspensions, II. Analysis of the data," *J. of Applied Physics*, Vol. 46, pp. 3417~3425.
- (14) Brailsford, A. D. and Major, K. G. 1964, "The Thermal Conductivity of Aggregates of Several Phases Including Porous Materials," *J. Appl. Physics*, Vol. 15, pp. 313~319.
- (15) Litchnecker, K., 1926, "The Electrical Conductivity of Periodic and Random Aggregates," *Physik*, X., Vol. 27, pp. 115~120.
- (16) Lee, D. Y., 1995, "Thermal Conductivity Measurements of Non-Newtonian Fluids in a Shear Fields," Ph. D. Thesis, SUNY at Stony Brook.
- (17) 신세현, 이성혁, 손창현, 1996, "전단율에 의존적인 비뉴턴 유체의 열전도율이 열전달 향상에 미치는 영향," *대한기계학회 논문집(B)*, 제20권, 제5호 pp. 1717~1724.