

## 미립잠열슬러리의 물성에 관한 실험적 연구

이 효 진<sup>†</sup>, 홍 재 창<sup>\*</sup>, 이 재 구<sup>\*</sup>

대전산업대학교 건축설비공학과, \*한국에너지기술연구소 에너지환경연구부

### Physical Properties of Microencapsulated Phase Change Material Slurries

Hyo-Jin Lee<sup>†</sup>, Jae-Chang Hong<sup>\*</sup>, Jae-Goo Lee<sup>\*</sup>

Dept. of Building Service Engineering, Taejon National University of Technology, Taejon 305-320, Korea

<sup>\*</sup>Energy and Environment Research Department, KIER, Taejon 305-600, Korea

(Received December 2, 1999; revision received August 3, 2000)

**ABSTRACT:** The thermal conductivity and density of slurries entrained with the particles of Micro-PCM are measured with respect to its temperatures as well as concentrations. For the thermal conductivity of slurries, a device made from P.A. Hilton (Model No. H470) is adopted. There is a well-scaled 0.3 mm gap between shells into which the slurry is injected. The temperatures of the slurry are changed to 5~25°C, for which it is controled by the supplied voltage and cooling water circulated around the outer shell. The concentrations of Micro-PCM slurries are varied from 5 wt% to 50 wt%. Some general equations such as Maxwell's equation, are evaluated for their applicability with Micro-PCM slurry. As a result, it happens to be some 20% discrepancy between the experiment and the applied equations.

The density measurements of Micro-PCM slurry to its temperature and concentration are performed by hydrometer. For the experiment, tetradecane encapsulated slurry ( $t_m \approx 6^\circ\text{C}$ ) and a mixed wax ( $t_m \approx 50^\circ\text{C}$ ) are tested. The temperature changes of tetradecane are applied for 0°C to 20°C and a mixed wax for 20°C to 60°C, and its concentrations are changed from 5 wt% to 30 wt%. The results are compared with a general equation and the referenced data. For the conclusion, the experimental result and a general equation are well agreed.

**Key words:** Microencapsulated phase change materials(미립잠열재), Density(밀도), Thermal conductivity(열전도도), Thermal storage(축열)

#### 기 호 설 명

$A$  : 면적 [ $\text{m}^2$ ]

$C$  : 식(4)에서의 상수

$k$  : 열전도도 [ $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$ ]

$m$  : 질량 [ $\text{kg}$ ]

$Q$  : 열전달율 [ $\text{W}$ ]

$R$  : 저항 [ $\text{Ohm}$ ]

$Re$  : Reynolds 수,  $\frac{2\rho_f v_{avg} r_i}{\mu_f}$

$T$  : 온도 [ $^\circ\text{C}$ ]

$v$  : 유속 [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$V$  : 부피 [ $\text{m}^3$ ]

$Volt$  : 전압 [ $\text{Volt}$ ]

#### 그리스 문자

$\mu$  : 점성 계수

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-821-1181; fax: +82-42-821-1175

E-mail address: hyojin@hyunam.tnut.ac.kr

$\rho$  : 밀도  
 $\phi$  : 농도비

**하첨자**

$e$  : 유효값(effective value)  
 $f$  : 슬러리  
 $l$  : 입자를 포함하지 않은 작동유체  
 $m$  : 질량, 융점( $t_m$ )  
 $p$  : 상변화 입자  
 1,2,3,4: 실험장치내 실린더의 온도 측정위치

**1. 서론**

열전달 현상과 유체역학적인 특성을 이해하기 위한 중요한 물성을 살펴보면 점도, 전도도, 밀도 등이 있으며, 이 밖에도 비열 등이 중요한 물성으로 여겨지고 있다. 이러한 물성은 온도에 따라 변화하는 특성을 가지고 있다. 특히 물질이 혼합형태인 경우에는 매우 복잡한 특성을 보이고 있기 때문에 실험치와 경험식과의 상당한 오차를 유발하고 있다. 미립잠열슬러리의 점도에 관한 물성의 변화특성은 연구 발표한 바 있으며,<sup>(1)</sup> 본 연구에서는 열전도도 및 밀도가 온도 및 입자의 농도에 미치는 영향을 실험을 통하여 해석하였다.

**1.1 열전도도**

액체의 열전도도를 측정하기 위한 장치는 자체의 대류현상으로 인하여 정확한 값을 측정하기가 매우 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Kaye and Higgins<sup>(2)</sup>는 여러 종류의 액체(물, 오일류, 파라핀계 등)에 대한 열전도도를 측정하는 실험을 하였다. Li<sup>(3)</sup>는 두 가지의 혼합액에 대한 열전도도를 예측하기 위한 모델을 제시하고 실험치와 비교하고 있다.

상기에 언급된 논문에서는 주로 순수 액체나 혼합액체에 대한 결과이며, 본 논문에서는 미립잠열입자를 포함한 슬러리에 대해서는 최근에 연구가 시작되었으나, 열전도도가 표피의 재질, 상변화 물질의 종류, 미립자의 함유량, 혼합액에 대한 온도가 영향을 미치는 함수로서 작용되기 때문에 간단한 식으로써 표현되기가 매우 어려운 실정이다. 이러한 이유로 대부분의 연구논문에서

는 주로 미립자 함유량에 대한 함수로서 표현된 일반식을 이용하고 있다.<sup>(4-6)</sup> 이들 논문에서 도입된 일반식은 Maxwell<sup>(7)</sup>에 의하여 제시된 다음과 같은 식을 이용하여 계산하고 있다.

$$k_f = k_l \cdot \frac{2k_l + k_p + 2\phi(k_p - k_l)}{2k_l + k_p - \phi\phi(k_p - k_l)} \quad (1)$$

식(1)은 전기장에 대한 전도도에 적용하기 위해 유도된 식으로 이 식을 적용하기 위해서는 입자간에 상호 작용을 무시한 희박용액(dilute solution)에 국한하여 적용이 가능한 것으로 알려져 있다. 미립잠열재를 활용한 열 수송장치는 대부분이 체적비가( $\phi$ )가 15~20%가 이용되고 있으며, 이러한 농도에서는 입자간의 상호작용이 무시할 정도로 작은 것으로 알려져 식(1)의 적용이 가능하나, 이 보다 높은 농도의 수송이나 축열을 위한 장치에서는 식(1)을 적용하기에는 무리가 있는 것으로 판단되어 이에 대한 적절한 경험식이 요구되는 실정이다. 열전도도는 열 매체의 열적 물성치로 일컬으며, 일반적인 식인 Fourier's Law에 의해 표기된다. 즉,

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

여기서  $Q$ 는  $x$  방향으로의 열전달율을 나타내며, 비례상수  $k$ 는 주어진 물질의 열전도도를 나타낸다. 식(2)에서 주어진 열전도도는 무수한 자료에서 발표되고 있으나, 주로 단일 상이나 순수한 물질에 대한 실험적인 결과를 발표하고 있다. 반면에 두 가지 이상의 상변화물질이 혼합된 경우에는 보편적인 관계식으로 유도하기에 어려움이 있어 극히 제한적인 용도에 관련하여 연구가 수행되어 오고 있다. 즉 분산유체(emulsion fluid)나 미립잠열재(Micro-encapsulated PCM)가 함유된 혼합유체 혹은 고체입자를 함유하고 있는 혼합유체 등이 그 예가 될 수 있다.

Kasza and Chen<sup>(8)</sup>는 2개의 혼합 상변화 물질의 열전도도를 다음의 식으로 표현하였다.

$$k_e = k_f Ke^n \quad (3)$$

여기서  $k_e$ 는 입자의 와류작용(eddy motion)에 의

한 미세대류현상(microconvection)을 포함한 유효 열전도도이다. 그러나 식(3)에서 상수인  $K$ 와 지수  $n$ 은 실험적으로 얻어질 수 있는 값으로 각각의 특수한 조건에 맞게 구해진 일반적인 값이 없는 실정이다. Torquato<sup>(10)</sup>는 유사한 열전도도를 갖는 두 개의 혼합유체에 대한 경험식을 다음과 같이 표현하였다.

$$k_f = \frac{k_l(1 + C_1\beta + C_2\beta^2)}{(1 + C_3 + C_4\beta^2)} \quad (4)$$

식(4)에서  $\beta$ 는 상변화 물질의 열전도도인  $k_p$ 와 유체의  $k_f$ 의 함수로서 다음의 관계식으로 표현된다.

$$\beta = (k_p - 2k_l) + 1 \quad (5)$$

식(4)에 주어진 상수인  $C_1 \sim C_4$ 의 값도 실험적으로 구해야 하는 값으로 이에 대한 일반적인 값은 알려져 있지 않다. 단지 두 개의 물질의 열전도도가 매우 유사할 때  $\beta \rightarrow 0$ 에 접근하고 식(4)에서  $k_f = k_l$ 가 된다.

상기에서 언급된 바와 같이 도출된 경험식을 일반화하기 위하여 실험을 통한 상수의 결정이 필요하지만 이들의 자료가 도출되지 않은 상태에서 두 개의 혼합유체에 대한 물성치를 예측하기 위한 일반식으로서 다음의 관계식을 활용할 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$k_f = \phi_m k_p + (1 - \phi_m) k_l \quad (6)$$

본 연구에서는 식(6)과 실험을 통하여 얻어진 혼합유체의 열전도도를 비교하고, 이들의 활용 가능성을 진단해 보고 미립자열재를 포함한 슬러리의 온도 및 농도에 대한 함수와의 관계를 관찰해 보고자 한다. 입자의 농도 및 온도의 변화를 주어 정해진 상태에서의 열전도도를 측정하였다. 열전도도를 측정하기 위하여 입자의 농도를 5~30%의 질량농도를 변화시켜가면서 농도, 온도, 입자에 포함된 상변화 물질의 종류에 따른 영향을 알아보기 위한 실험을 수행하였다.

## 1.2 밀도

밀도는 앞에서 서술된 열전도도나 점성계수에

비하여 소홀히 취급되어져 오고 있는 유체역학적인 변수이다. 상기 두 개의 변수에 대하여는 많은 연구와 결과에 대하여 논의되고 경험식을 도출하기 위하여 노력하고 있으나, 밀도는 비교적 단순변수로서 적용되어 오고 있는 실정이다. 그러나 밀도는 무차원수인 레이놀즈 수에 직접 활용되고 있으며, 통상적으로 측정되고 있는 부피유량을 질량유량으로 환원하기 위해서는 반드시 적용되어야 할 중요한 변수이다. Kasza and Chen<sup>(6)</sup>에 의해 분석된 밀도에 대한 펌프동력의 영향은 레이놀즈 수와 질량유량 등이 영향을 미치는 인자로서 압력강하는  $(\rho_f A v)^{1.8}$ 에 비례하고 펌프동력은  $(\rho_f A v)^{2.8}$ 에 비례하며 마찰계수는  $Re^{-0.2}$ 에 대한 함수로서 입증하고 있다. 그러나 물의 예를 보면 사용온도의 범위가 적은 곳(0~100°C)에서의 밀도의 변화는 최대 4%의 오차를 나타내므로 다른 인자에 비하여 영향은 비교적 적은 것으로 판단된다. 가령 물의 점성계수는 0°C 때와 100°C 때의 차이가 약 84%까지 변화를 하고 열전도도는 약 20%의 증가를 나타내므로 펌프의 동력 및 열 전달 특성을 이해하기 위해서는 무엇보다도 선행되어야 할 변수인 것으로 판단된다. 그러나 밀도가 모든 유체역학적인 분석에 필수적으로 활용되기 때문에 이에 대한 체계적인 분석이 요구되는 바이다.

일반적인 혼합용액에 대한 밀도는 상기 식(6)에서 주어진 형태와 같이 다음 식으로 주어진다.

$$\rho_f = \phi_m \rho_p + (1 - \phi_m) \rho_l \quad (7)$$

본 연구에서는 실제 실험결과와 현재 일반적으로 사용하고 있는 식(7)을 적용했을 때와의 차이를 분석하고 문제점을 토의 하고자 한다. 즉, 밀도가 미립자의 농도 및 적용온도에 따라 어떻게 변하는지를 실험적으로 입증하고, 현재 일반적으로 사용되는 식을 적용하여 밀도를 구하였을 때 발생하는 오차의 정도를 파악하여 활용여부를 판단하는 자료로 삼고자한다.

## 2. 실험 및 분석방법

### 2.1 열전도도

Fig. 1에 나타난 바와 같이 실험 장치의 구성

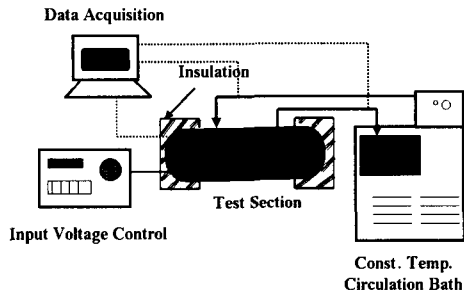


Fig. 1 Experimental System measuring the thermal conductivity for MicroPCM.

은 열전도도를 측정하기 위한 장치(Test Section)와 냉각수 순환장치, 데이터 처리시스템, 일정한 전압(Voltage)을 조절하기 위한 슬라이더스스로 구성되어 있다.

열전도도는 P.A. Hilton사(Model No.; H470)에서 제작된 액체 및 가스용 열전도도 측정장치를 이용하였다. 본 장치의 개략적인 특징을 살펴보면 Fig. 1에서 보는 바와 같이 외경이 45 mm이고 길이가 108 mm인 원통으로 제작되었으며, 내부는 중심에 반경이 19.6 mm의 크기인 알루미늄 재질로 만들어져 있으며, 중심실린더 가운데에는 저항이 33.6 Ω인 히터가 내장되어 있다. 중심실린더와 0.3 mm의 간격이 떨어져 있는 반경이 19.9 mm인 청동(Brass)으로 제작된 외부부를 감싸고 있는 외부실린더가 있으며, 외부실린더 밖으로 냉각수를 순환하도록 구성되어 있다. 중심실린더와 외부실린더 사이의 온도차를 측정하기 위해 K-type의 열전대가 삽입되어 있다. 본 장치는 쉽게 분해하여 청소를 할 수 있도록 조립식으로 제작되어 있다.

실험은 20볼트부터 60볼트까지 사이에 10볼트씩 증가시키면서 온도의 변화를 주었다. 총 공급 전력이 일정하게 유지하면서 시스템의 온도가 안정이 되기 위해서는 상당한 시간이 소요되기 때문에 제작사에서 추천한 냉각수 순환 방식을 사용하였다. Fig. 1의 개략도에서와 같이 항온수조를 이용하여 일정한 온도를 유지시켰는데, 항온수조의 온도 정밀도는 ±1℃를 나타내었다. 그러나 시편에 펌프로 공급되는 공급수의 온도는 거의 일정한 온도로 유지되었다. 원통형의 실험장치는 안쪽에 위치한 알루미늄( $k_{12}=208 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ )원통과, 그 외부에는 황동( $k_{34}=107 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ )재인 원

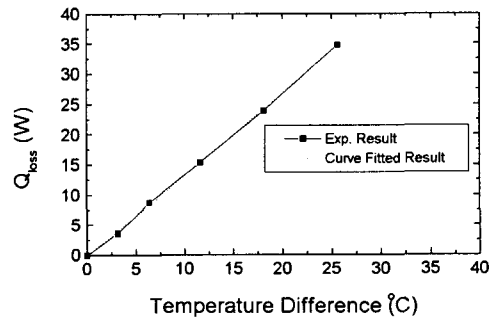


Fig. 2 Heat loss from the experimental apparatus for the measurement of the thermal conductivity.

통이 감싸고있는 3개의 복합체로 구성되어 있으며, 이에 대한 열전도도 값은 다음 식으로 계산할 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$Q_{corr} = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_{12}} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_{34}}} \quad (8)$$

식(8)로 부터 구하고자 하는 전도도  $k$ 를 구할 수 있다.

실험장치의 열손실 보정을 하기 위하여 제작사에서는 이미 알려진 공기에 대한 값을 측정하여 실제 열전도도를 구하기 위한 보정을 하였다. 즉 공기는 열전달과 관련된 자료에서 보편적으로 얻을 수 있는 값으로<sup>(11)</sup> 본 실험에서 적용된 총 열량은 다음 식에서 계산한다.

$$Q = Volt^2/R \quad (9)$$

식(9)의 계산에서 주어진 열량과 주어진 공기의 열 전도도를 계산한 식(8)과 차로서 손실된 열량을 계산할 수 있다. 이 차이는 온도차  $\Delta T$ 에 비례하므로 이에 대한 손실을 추후 계산에서 빼준 후 시료의 실제 열전도도를 계산하면 된다. 여기서 구해진 손실열량  $Q_{loss}$ 가 온도차  $\Delta T$ 에 대하여 Fig. 2에 주어져 있다.

$$Q_{corr} = Q - Q_{loss} \quad (10)$$

## 2.2 밀 도

실험은 0.0005까지 정밀도를 갖춘 비중계를 이용하여 측정하였으며,  $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 정밀도를 갖춘 항온조내에 담가서 시험액의 온도를 조절하였다. 실험은 미립자의 농도를 각각 5 wt%, 10 wt%, 15 wt%, 20 wt%, 25 wt%, 30 wt%로 각각 나누어 실험을 수행하였으며, 각 농도별로 온도의 변화를 융점이  $50^\circ\text{C}$ 인 경우 각각의 농도에 대하여  $20^\circ\text{C}$ 에서  $60^\circ\text{C}$ 까지 매  $10^\circ\text{C}$  간격으로 측정하였으며, 융점이  $6^\circ\text{C}$ 인 경우  $0\sim 30^\circ\text{C}$ 의 6단계의 온도별로 실험을 실시하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 열전도도

Fig. 3 (a)~(h)는 융점이  $6^\circ\text{C}$ 인 테트라데칸(Tetradecane)을 이용한 미립자열계의 열전도도를 측정된 결과이다. 그림에 나타난 결과는 실험한 데이터를 온도에 대한 1차 선형접합(1st order linear curve fitting)에 의하여 만들어진 결과이다. 직선접합의 결과 표준편차가 크기는 0.03946이었고 적계는 50 wt%인 축열입자의 경우 표준편차가 0.02625이었다. 실험한 결과를 식(6)과 식(1)을 이용한 결과와 비교하였다. 유사한 실험이 Inaba and Morita<sup>(12)</sup>에 의하여 실시된 바 있다. 그러나 실험 대상이  $t_m=10^\circ\text{C}$ 인 펜타데칸을 이용하였으며, 본 실험결과와 비교하기 위하여 실험조건이 유사한 실험결과만을 발표된 논문으로부터 직접 발췌하여 비교하였다. 실험결과와 일반식의 결과가 크기는  $0.12\text{ W/m}^\circ\text{C}$ 에서 적계는  $0.06\text{ W/m}^\circ\text{C}$ 의 차이가 모든 농도 변화에서 나타나고 있음을 Fig. 3에서 보여주고 있다. 이러한 차이는 식(1)과 식(6)의 적용이 물리적인 특성의 차이에서 발생하고 있음을 예측할 수 있다. 미립자는 단일의 물성을 갖는 입자로 구성되어 있지 않기 때문이다. 즉 내부에는 파라핀계의 상변화 물질이 존재하고 있고 외부에는 전체의 약 10~20%의 중량을 차지하고 있는 멜라민 수지의 외피물질이 감싸고 있기 때문에 순수한 상변화 물질이 작동유체와 혼합된 유화(emulsion)상태의 2상 유체와는 다른 3상의 물질이 존재하는 형태의 혼합액이기 때문인 것으로 여겨진다. 실험결과는 온도

가 점차 상승함에 따라 열전도도가 약간의 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 Kaye and Higgins<sup>(2)</sup>는 100% 순수 파라핀 및 오일의 경우 온도가 증가함에 따라 열전도도가 감소하는 결과와 일치함 보여주고 있다. 반면에 식(1)과 식(6)에 의한 예측결과들은 두 가지 모두가 온도의 상승에 따라 점차 증가하는 것을 보여 주고 있다. 즉, 작동유체의 온도에 따른 상승률이 테트라데칸의 감소율보다 훨씬 크기 때문에 이러한 현상이 발생하는 것으로 예상된다.

Inaba and Morita<sup>(12)</sup>는 융융점을 중심으로 열전도도의 변화가 상변화 물질이 고상일 때가 액상일 때보다 높은 열전도도가 있음을 보여주고 있다. 그러나 본 실험결과는 이러한 뚜렷한 경향이 나타나지 않았으며 단지 식(6)을 적용한 결과에서만 확실한 차이가 나타나고 있다. 즉, 실험결과를 분석할 때 전체 온도구간에 관하여 1차 선형접합법에 실시한 결과이기 때문이다. 즉 본 연구의 열전도도 실험결과의 오차범위가 약  $\pm 5\%$  정도로 나타났으며, 이는 고체와 액체의 융점온도를 사이에 두고 다른 전도도를 보이고 있는지를 분석하기에는 무리가 따르기 때문에 전체 온도구간에 대한 분석을 실시하였다. 결과적으로 전 구간에서 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 3(a)~(h)에서 나타난 바와 같이 모든 농도에 대하여 비슷한 경향을 보이고 있다. 결과적으로 식(1)과 (6)을 잠열미립자를 이용한 혼합 슬러리의 상변화 물질에 적용하기에는 문제가 있으며, 실험결과는 일반식을 적용할 경우에 약 20%의 오차가 발생하는 것으로 확인되었다. 이는 Inaba and Morita는(12)에 의한 결과에서도 5~25%의 오차를 보이고 있음을 확인하였으며, 향후 이에 대한 체계적인 일반식이 요구되는 바이다.

### 3.2 밀 도

Fig. 4 (a) 및 (b)는 상변화 물질의 융점이 각각  $50^\circ\text{C}$ 와  $6^\circ\text{C}$ 인 미립자열계의 온도 변화에 따른 밀도변화를 보여주고 있다. 상변화 물질에서 질량농도가 5~30 wt%를 6단계로 분류하여 실험을 실시하였다. Fig. 4(a)와 (b)에서 밀도의 변화가 온도에 따라 다른 경향을 보이고 있다. 융점이  $50^\circ\text{C}$ 인 Fig. 4(a)에서 온도가 상승함에 따라 미립자 농도에 대한 밀도 차가 점차 크게 확대되고

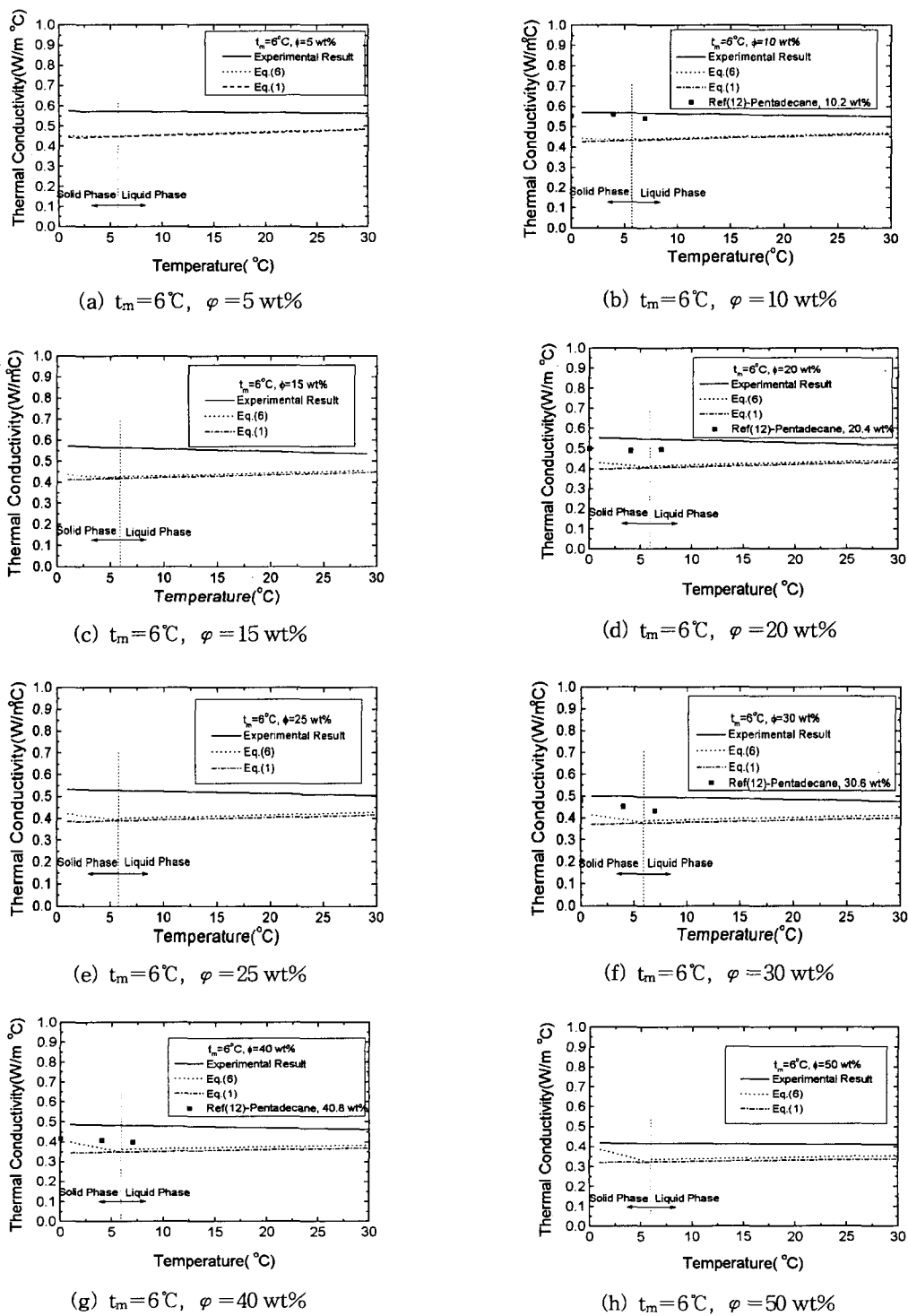


Fig. 3 Comparison with the experimental results, general equation, and Maxwell equation (continued).

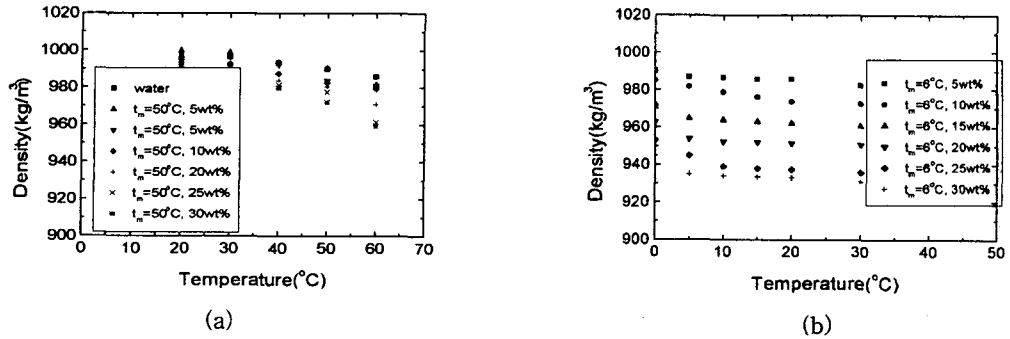


Fig. 4 Density measurement on the temperature and concentration changes of Micro-PCM particle

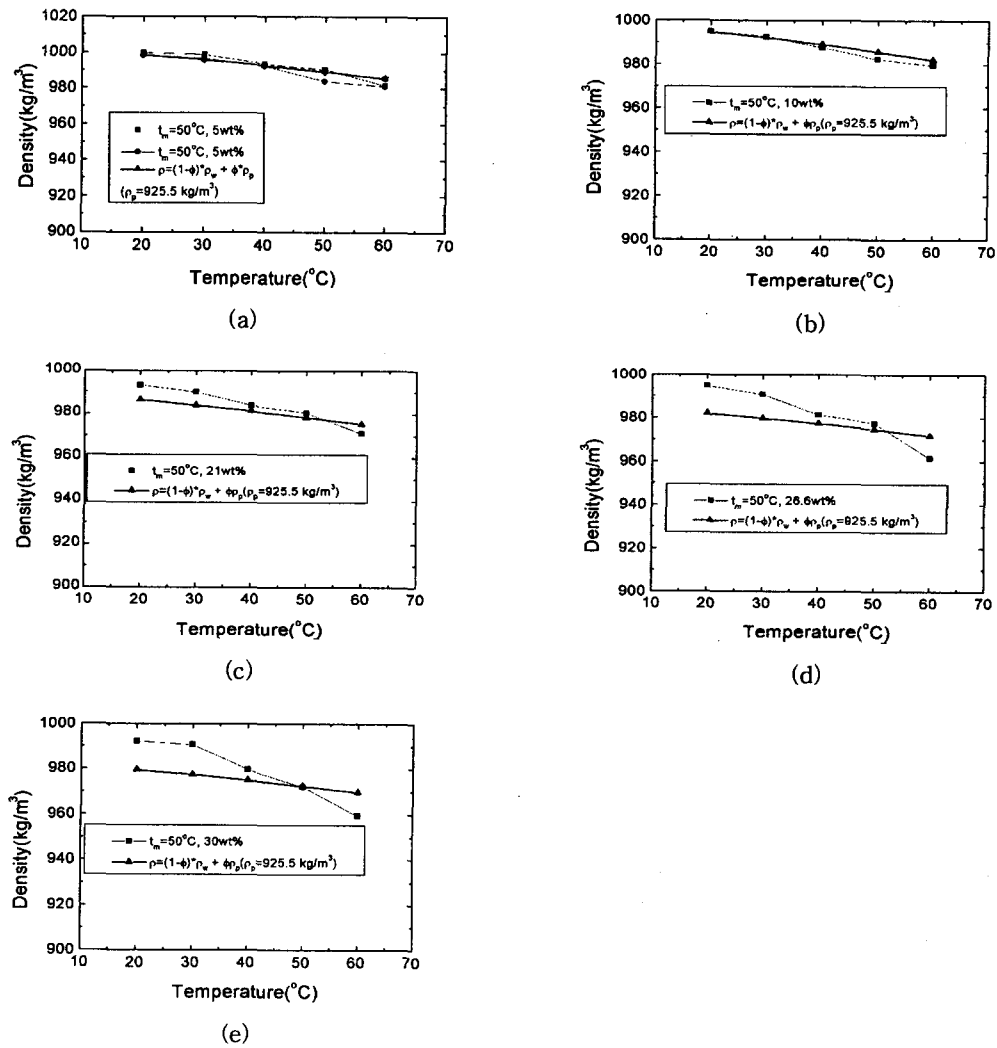


Fig. 5 Comparison between experiment results and general equation on  $t_m=50^\circ\text{C}$ , (a) 5 wt%, (b) 10 wt%, (c) 21 wt%, (d) 26.6 wt%, (e) 30 wt%.

있다. Fig. 4(b)에서는 초기부터 미립자 농도의 변화에 대한 뚜렷한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 4(a) 경우 대부분이 융점이하에서 존재하므로 상변화 물질의 상당부분이 고체상태임을 알 수 있으며, 반면에 Fig. 4(b)인 경우는 융점 이상의 온도이기 때문에 거의 모두가 액체상태로 존재하고 있음이 확인되는 바이다. 즉 미립잠열재가 고상 혹은 액상의 차이에서 야기되는 변화로 여겨진다. 이는 얼음의 경우 고상이 액상

보다 밀도가 적은 반면 상변화 물질은 고상이 액상에 비하여 밀도가 크기 때문에 입자가 고상일 때는 작동유체에 근접하는 밀도를 보인 반면 액상일 때는 작동유체보다 훨씬 낮기 때문에 ( $t_m=50^{\circ}\text{C}$ 는  $925.5\text{ kg/m}^3$ ,  $t_m=6^{\circ}\text{C}$ 는  $899.5\text{ kg/m}^3$ ) 농도에 따른 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 추정할 수 있다. 또한 융점 이하에서 고상일 때는 온도의 변화에 대한 상 변화가 없어 밀도의 변화가 거의 나타나고 있지 않지만 융점 온도 이상에서는 온도

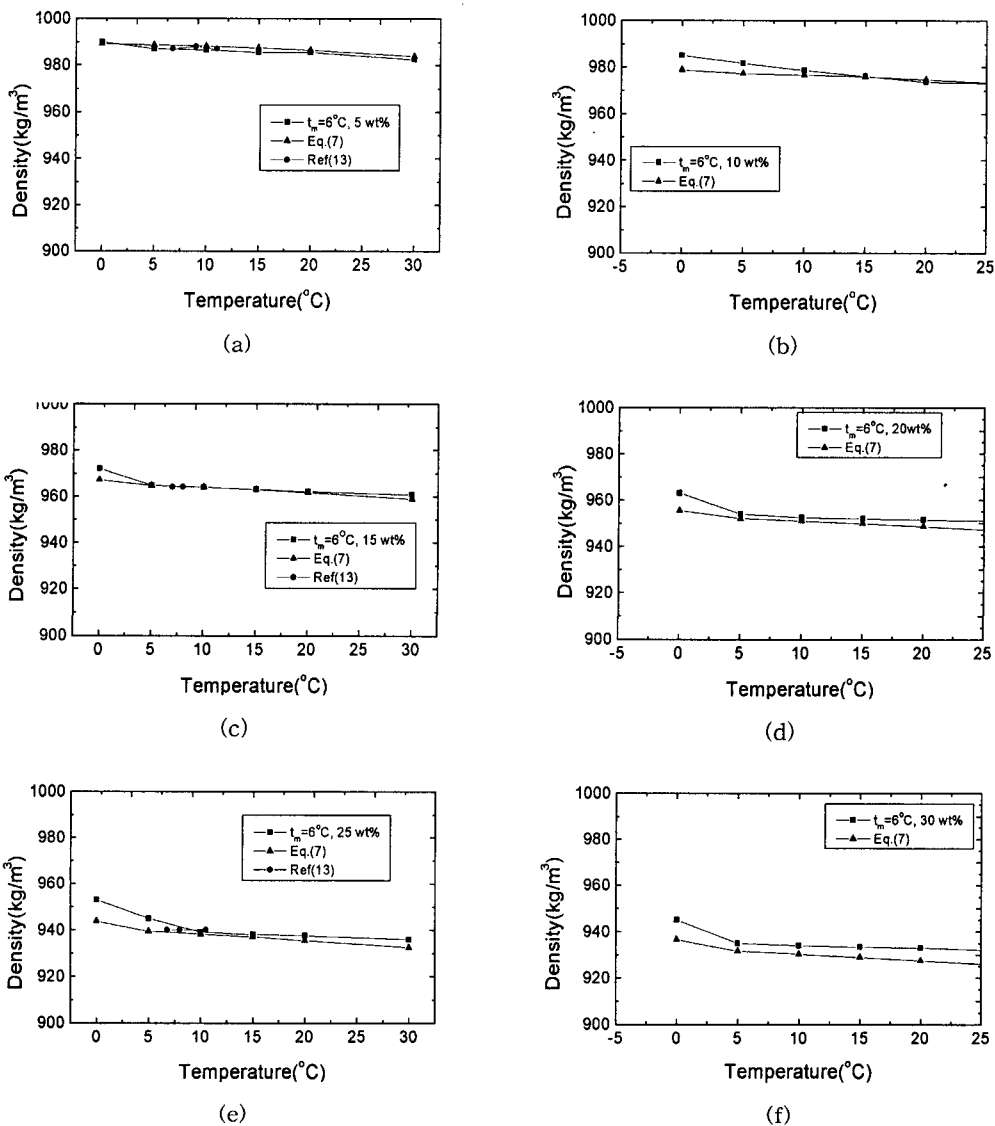


Fig. 6 Comparison between the experimental results and the general equation on  $t_m=6^{\circ}\text{C}$ , (a) 5 wt%, (b) 10 wt%, (c) 15 wt%, (d) 20 wt%, (e) 25wt%, (f) 30 wt%.



에 따른 액체 상 물질의 밀도변화가 뚜렷하게 나타나고 있음을 입증해 주고 있다.

이미 앞에서 언급한대로 혼합유체의 밀도를 구하기 위하여 통상적으로 식(7)을 이용하고 있다. 본 연구에서는 미립화된 잠열 슬러리 용액의 경우에도 식(7)을 활용할 수 있는지를 확인하기 위하여 실험한 결과와 비교하여, 어느 정도의 오차가 발생하는지를 확인하고자 하였다. Fig. 5(a)~(e)는 각 질량농도에 대하여 온도에 따른 밀도의 변화를 용점이 50°C인 미립자에 대하여 비교한 결과이다. Fig. 5(a)는 실험결과와 상당히 일치함을 알 수 있다. 농도가 5wt%로 낮은 상태이기 때문에 미립자의 밀도가 전체의 밀도에 큰 영향을 미치지 않은 결과이다. Fig. 5(b)도 (a)의 경우와 같이 매우 근사한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 (c)~(e)의 결과는 앞의 (a)와 (b)의 결과와 비교하여 비교적 차이가 발생함을 보여 주고 있다. Fig. 5(c)를 살펴보면 초기에는 차이를 보이다가 점차 줄어들면서 융점부근에서 교차한 후 차이가 다시 벌어지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 (d) 및 (e)에서도 확인이 되고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 미립잠열재의 상이 고상일 때와 액상인 경우에 뚜렷한 밀도의 변화를 보이고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5의 결과만을 보면 미립자의 상이 고체일 때와 액체일 때의 일반적인 식(7)을 적용하는 데는 최대 1.2%의 차이가 발생한다. 여기서 얻어진 차이인 1.2%는 일반적인 실험의 오차범위에 속하는 값으로 무시할 수 있는 크기이다. 식(7)에서  $\rho_p$ 를 적용할 때 미립자의 약 20wt% 가량을 차지하고 있는 외피를 고려해야 실험결과와의 차이를 줄일 수 있을 것으로 여겨진다. Fig. 5의 결과로부터 두 개의 서로 다른 상변화 물질이 미립자 형태로 존재할 경우 각각의 밀도에 질량농도를 곱해주는 일반식을 적용해도 실험결과와의 차가  $\pm 1.2\%$ 의 범위 내에 들어가기 때문에 양적인 결과만을 볼 때는 식(7)을 사용하는 데는 문제가 없을 것으로 판단된다. 단지 융점을 전후해서 밀도의 변화가 증대하는 것에 주지할 필요가 있다. 이는 비중이 큰 고체에서 비중이 작은 액체로 변화하는 과정에서 얻어지는 결과로 여겨진다.

Fig. 6(a)~(f)는 융점이 6°C인 테트라데칸의 미립화슬러리 온도 및 농도변화에 대한 밀도변화를 실험결과와 식(7)을 비교하였으며, 두 개의 결

과가 전반적으로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 융점이 6°C의 경우에는 융점 이하의 온도에서는 상변화 물질이 고체상태로 존재하고 있기 때문에 0°C에서 측정된 밀도는 액체 상태로 존재하는 5°C 이상에서의 밀도보다 상당히 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이 결과는 Fig. 5에서 50°C를 기점으로 밀도의 급격한 감소가 나타나는 현상에서도 잘 나타나고 있다. 또한 온도의 증가에 따라 밀도가 감소하고 있음을 보여주고 있다. 또한 Inaba et al.<sup>(13)</sup>에 의하여 측정된 분산유체의 일부 결과를 발췌하여 비교 분석한 결과 미립잠열재인 본 실험결과와 상당히 일치하고 있음을 보여주고 있다. 즉 입자의 구성형태가 유화형태로 혼합된 경우와 상변화 물질이 멜라민 수지로 피복된 미립잠열재의 혼합유체가 밀도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보여진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 융점이 6°C와 50°C이고, 입도가 평균 10  $\mu\text{m}$  크기로 미립화된 잠열재를 증류수에 혼합하여 온도 및 농도에 따른 열전도도와 밀도의 변화를 측정하고, 실험결과를 일반식으로 대표할 수 있는지를 검증하였다. 이에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열전도도는 온도의 증가에 따라, 농도의 증가에 따라 감소하였다.
- (2) 식(1)과 (6)에 비하여 전체적으로 약 20%의 오차를 보이고 있다.
- (3) 밀도는 융점이 6°C와 50°C인 두 종류에 대하여 온도와 농도의 변화에 따른 실험을 실시하였다.
- (4) 밀도는 고상일 때가 액상일 때보다 높게 나타났으며, 액상에서는 온도와 농도의 증가에 따라 감소함을 보였다.
- (5) 식(7)은 실험결과와 상당히 일치함을 나타내었으며, 분산유체나 상 물질이 미립화한 혼합유체에 모두 적용할 수 있음을 입증하였다.

#### 후 기

본 연구는 1998~1999년도 과기부 국가중점연구개발사업(에너지절약기술개발)의 위탁연구과제로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Lee, H. J., Lee, S.W., Lee, J. G., 1999, Fluid dynamical characteristics of microencapsulated phase change materials, Korean Journal of Air conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 549-559.
2. Kaye, W. C. and Higgins, W. F., 1928, The thermal conductivities of certain liquids, Proc. Roy. Soc., London, Vol. 117, No. 459, pp. 459-470.
3. Li, C. C., 1976, Thermal conductivity of liquid mixtures, AIChE J., Vol. 22, No. 5, pp. 927-930.
4. Romesberg, L. J., 1988, Enhancement of heat transfer in liquids with microencapsulated Phase-Change Materials, M. Sc. Thesis, North Carolina State University.
5. Charunyakorn, P., 1989, Forced Convection Heat Transfer in Microencapsulated Phase Change Materials Slurry, Ph.D. Thesis, University of Miami.
6. Lee, S. W., Min, M. K., Lee, H. J., Lee, J. G., Han, C. S., 1999, An Experimental study on the enhancement of heat transfer in liquids with microencapsulated phase change materials, Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century, Hawaii, April 11-15.
7. Maxwell, J. C., 1954, A Treatise on electricity and magnetism, 3rd ed., Dover Pub., New York, pp. 440-441.
8. Kasza, K. E. and Chen, M. M., 1983, Development of Enhanced Heat Transfer/Transport/Storage Slurries for Thermal-System Improvement, DE83009688.
9. Kasza, K. E. and Chen, M. M., 1985, Improvement of the performance of solar energy or waste heat utilization systems by using phase-change slurry as an enhanced heat transfer storage fluid, J. Solar Energy Engineering, Vol. 107, pp. 229-236.
10. Torquato, S., 1986, Thermal Properties of Heterogeneous Media, Physics of Fluids, Vol. 3.
11. Chapman, A. J., 1974, Heat Transfer, 4th ed., Macmillan Publishing Co., New York.
12. Inaba, H. and Morita, S., 1994, Physical properties of water solution with fine latent heat storage materials, 15th Japan Symposium on Thermophysical Properties, pp. 203-206.
13. Inaba, H., Morita, S., Nozu, S., 1994, Fundamental study of cold heat-storage of O/W-type emulsion having latent-heat-dispersion material. Part 1, Heat Transfer Japanese Research, Vol. 23, No. 3, pp. 292-312.