

마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 열물성에 관한 연구

김명준[†] · 임재근* · 최순열*

(원고접수일 : 2004년 4월 12일, 심사완료일 : 2004년 6월 25일)

A Study on Thermo-Physical Properties of Microencapsulated Phase Change Material Slurry

Myoung-Jun Kim[†] · Jae-Keun Lim* · Soon-Youl Choe*

Abstract : This paper has dealt with thermo-physical properties of microencapsulated phase change material slurry as a latent heat storage material having a low melting point. The measured results of the thermo-physical properties of the test microencapsulated phase change material slurry, those are, density, specific heat, thermal conductivity and viscosity, were discussed for the temperature region of solid and liquid phases of the dispersion material (paraffin). The measurements of these properties of microencapsulated phase change material slurry have been carried out by using a specific-gravity meter, a water calorimeter, a differential scanning calorimeter(DSC), a transient hot wire method and rotating type viscometer, respectively. It was clarified that the additional properties law could be applied to the estimation of the density and specific heat of microencapsulated phase change material slurry and also the Euckens equation could be applied to the estimation of the thermal conductivity of this slurry.

Key word : Thermo-Physical Property(열물성), Microencapsulated Phase Change Material Slurry (마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수), Paraffin(파라핀)

기호설명

C : 질량비율[-]	H : 높이[mm]
C_p : 비열[kJ/(kg·K)]	k : 열전도도[W/(m·K)]
d : 마이크로캡슐 잠열 축열재의 입자 직경 [μm]	l : 길이[mm]
D : 직경[mm]	L : 잠열량[kJ/kg]
	M : 질량[kg]
	n : 덕법칙 유체의 점성지수[-]
	P : 전단 응력[Pa]

[†] 책임저자(군산대학교 해양과학기술대학), E-mail : mjkim@kunsan.ac.kr, Tel : (063)469-1849

* 군산대학교 해양과학기술대학 동력기계시스템공학전공

- q : 가는 백금선의 길이당 열유속[W/m]
- Q : 열량[J]
- R : 반경[mm]
- t : 시간[s]
- T : 온도[K]
- V : 전단 속도[s⁻¹]
- W : 식(3)에 있어서의 열용량[kJ/K]
- Y : 식(4)에 있어서의 열용량차[kJ/kg]

그리스 문자

- η' : 점성계수[mPa·sⁿ]
- ρ : 밀도[kg/m³]
- Φ : 테트라데칸의 체적 비율[-]
- φ : 물과 테트라데칸의 체적 비율의 합[-]
- Ω : 회전점도계 로타의 가변회전 각속도 [rad/s]

첨 자

- ave : 평균
- b : 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수
- c : 수열량계 용기
- fi : 평형
- l : 액상상태
- loss : 손실
- m : 교반봉
- me : 메라닌 수치
- s : 고상상태
- sam : 시료(샘플)
- t : 테트라데칸
- w : 물
- ws : 초기 열량계에 들어있는 물

1. 서 론

최근, 수년간 주야간의 소비전력의 격차가 크게 증가하고 있으며, 이는 에너지 유효이용의 관점에서 볼 때 바람직하지 못한 문제로 생각되고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 방법으로 서 야간의 값싼 잉여전력을 열에너지로 전환 및 저장하는 축열기술이 크게 주목 받고 있으며 최근 에 들어 물질의 용해·응고의 상변화를 이용할 수 있는 잠열축열에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다^{(2)~(6)}. 잠열축열에 의한 축열시스템은 현열축열에 비해서 축열밀도가 높기 때문에 축열시스템을 소형화 할 수 있고 또한 축열효율을 상승시킬 수 있어서 앞으로 크게 각광을 받을 것으로 예측된다.

이러한 잠열 축열재로서 요구되는 성질들을 간략하게 열거하면 다음과 같다.

- 상변화 온도가 사용목적의 온도에 가까울 것
- 단위체적당의 축열량이 클 것
- 열의 이용(축열·방열)이 용이할 것
- 반복 사용시에 열화가 없을 것
- 안전성(무해, 비가연성 등)이 높을 것
- 가격이 싸고 대량공급이 가능할 것

임의의 이용 온도 영역에 있어서 이러한 조건들을 만족시키는 것은 상당히 어렵기 때문에 특성에 적합한 재료와 장치의 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽²⁾.

현재, 잠열 축열 재료로서는 미세한 탄화수소물(파라핀)을 물 또는 수용액에 분산 혼합하여 사용하는 에멀전과 미세한 캡슐의 내부에 축열재를 주입하여 물 등에 분산하여 사용하는 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수 등이 제안되고 있다. 이러한 고·액 상변화 잠열 축열재를 액체 열매체와 혼합한 슬러리상의 축열 열유체가 고밀도 축열과 배관 반송 가능성 등의 효과에 힘입어 새로운 기능성 열유체로서 주목 받고 있다^{(2), (3)}.

특히, 용점이 얼음보다 높은 파라핀계 잠열 축열재를 이용한 에멀전⁽⁴⁾이나 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수^{(5), (6)}를 이용하면 냉열원기로서의 냉동기를 높은 성적계수로 운전할 수가 있다. 또한, 잠열 축열재로 이용되는 파라핀의 종류나 함유 질량비를 조절함에 따라 이용 가능한 온도와 잠열 축열량을 임의로 설정할 수가 있다. 이러한 특징을 가지고 있는 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수는 앞서 설명한 장점이 있는 반면 점성이 크

므로 반송시 펌프동력이 증가한다는 문제점도 안고 있다. 따라서 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수를 열교환기의 작동유체로 적용하기에는 아직 미해결된 부분들이 많다고 할 수 있다. 따라서, 본 논문의 목적은 전술한 특징을 가지고 있는 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 열물성을 명확히 하기 위함이며, 이에 실험을 통한 열물성치의 측정 결과를 보고한다.

2. 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 특징 및 열물성치

Table 1은 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 조성이다. 그리고 Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 바와 같이 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수는 유동성을 가지고 있는 유백색의 유체이며 물에 잘 분산되어 있는 미세캡슐화된 상변화 물질의 형상은 구형이다. 그리고 Fig. 3에는 입자경의 체적분포를 나타내었으며 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 마이크로캡슐의 직경분포는 0.5~2.5 μ m의 범위내에 존재하고 있으며 평균 직경은 1.5 μ m임을 알 수 있다. 본 연구에 사용되어진 파라핀계 상변화 물질은 n-Tetradecane이고 고상에서 액상으로의 상변화 온도는 $T_m=278.9K$ 이며 잠열량은 $L=164kJ/kg$ 이다. 또한 혼합수중의 마이크로캡슐 잠열 축열재의 분산 안정상태는 분산혼합 후 최저 3000시간 이상 계속됨을 확인 하였다.

2.1 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 밀도

상변화 물질인 테트라데칸의 고상 및 액상 상태에서의 밀도 측정을 위하여 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수를 교반 혼합할 수 있는 시험관내에 부자식 비중계를 설치하는 방법과 체적계를 이용한 두 가지의 방법을 이용하였다.

Fig. 4는 밀도측정에 사용된 부자식 비중계와 체적계의 개략적인 그림이다.

측정방법으로서는, 먼저 항온조(설정가능온도 범위 $T=253.1\sim 373.1K$, 제어온도 정밀도 $\pm 0.1K$) 내에 Fig. 4(a)에서와 같이 부자식 비중계를 설치하여 항온조의 온도를 조절해 가면서 마이크로캡

슐 잠열 축열재 혼합수의 비중을 측정함으로써 밀도를 산출하였다.

체적계를 이용한 방법에 있어서도 마찬가지로 항온조내에 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수가 들어 있는 체적계를 설치함으로써 항온조의 온도 변화에 따른 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 체적변화를 측정해 밀도를 산출하였다.

이러한 측정을 위하여 그 값이 잘 알려져 있는 증류수를 이용하여 각 밀도 측정 장치의 정밀도를 확인 하였으며 측정된 증류수의 밀도는 참고문헌치⁽¹⁾의 밀도와 $\pm 0.05\%$ 이내에서 일치하였다.

Table 1 Consistent ratio of microencapsulated phase change material slurry

Mass ratio of Microcapsule latent heat storage material, C_b	Mass ratio of water, C_w
0.1	0.9
0.2	0.8
0.3	0.7
0.4	0.6

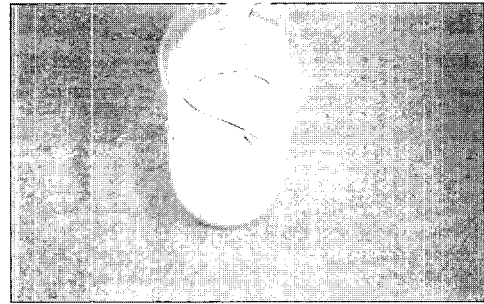


Fig. 1 Appearance of microencapsulated phase change material slurry

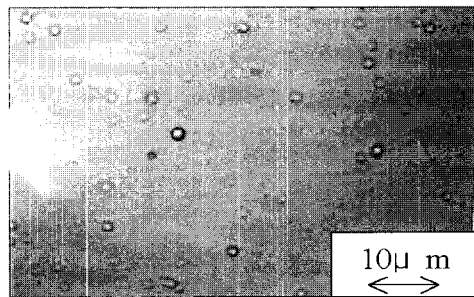


Fig. 2 Microphotograph of microencapsulated phase change material slurry

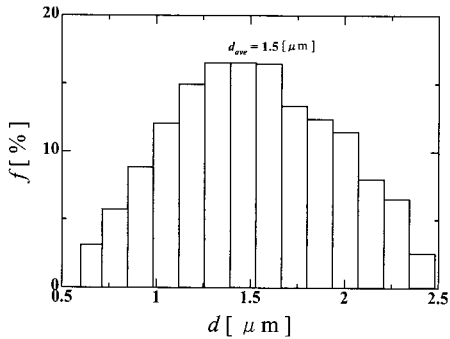


Fig. 3 Distribution of microcapsule size

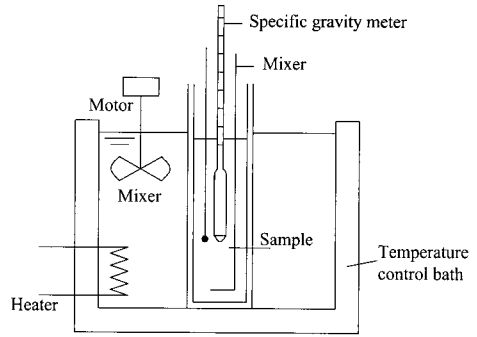
Fig. 5는 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 밀도 ρ_b , 테트라데칸의 밀도 ρ_t 그리고 물의 밀도 ρ_w 의 측정결과이다. 본 연구의 대상인 테트라데칸의 액상상태에서의 밀도 ρ_{tl} 는 온도의 증가와 함께 약간 감소하지만 고상상태에서의 밀도는 테트라데칸의 응고점 T_m 을 경계로 액상상태보다 증가한다. 이러한 현상은 테트라데칸 응고점 이하($T < 278.9K$)의 온도영역에서는 테트라데칸이 응고해 고밀도로 되기 때문이다. 또한 ρ_b 는 잠열 축열재인 테트라데칸의 밀도 보다 물의 밀도가 크기 때문에 C_b 가 증가함에 따라 밀도는 감소하고 있음을 알 수 있다.

이러한 잠열 축열재로 사용된 테트라데칸과 캡슐피복재로 사용된 메라닌 수지의 조성 질량비율은 마이크로캡슐 잠열 축열재의 제반적인 열물성 값을 산출하는데 있어서 아주 중요하다. 따라서 본 연구에서는 온도 $T=278.9K$ 에서 마이크로캡슐 잠열 축열재의 평균 입자직경 $d_{ave}=1.5\mu m$ (Fig. 3 참조)을 이용해 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수, 물, 테트라데칸(잠열 축열재) 및 메라닌수지(캡슐 피복재)의 밀도와 C_b 로부터 잠열 축열재와 캡슐 피복재의 조성질량비율을 계산하였다. 여기서 ρ_b 및 ρ_w 는 각각 실측치와 문헌치⁽¹⁾를 이용했다. 그리고 캡슐 피복재로 사용된 메라닌 수지의 밀도 ρ_{me} 는 문헌치⁽⁸⁾로부터 $\rho_{me} = 1490kg/m^3$ 의 일정한 값을 이용해 계산하였다.

또한 ρ_t 는 실측치로부터 얻은 고상영역 ($273.2K < T \leq 278.9K$)에서는 $\rho_{ts} = 803kg/m^3$ 의

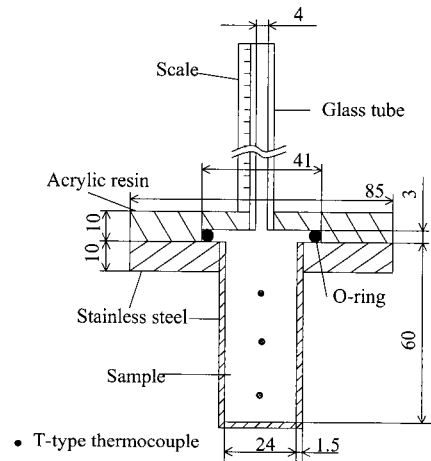
거의 일정한 값을 이용하였고 액상영역 ($279K < T \leq 290K$)에서는 다음 식의 값을 이용하였다.

$$\rho_{tl} = -0.5994 \times T + 944.2 \quad (1)$$



• T-type thermocouple

Fig. 4(a) Schematic diagram for the density measurement by Specific-gravity meter



• T-type thermocouple

Fig. 4(b) Schematic diagram for the density measurement by Volumeter

이상의 측정치와 문헌치 그리고 C_b 등을 고려해 구해진 조성 질량비율은 테트라데칸 : 메라닌 수지 = 73.4 : 26.6이었다. 이러한 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 조성 질량비율로부터 밀도는 다음 식과 같이 정리할 수 있다⁽⁹⁾.

$$\rho_b = \rho_{me} \times C_{me} + \rho_w \times C_w + \rho_t \times C_t \quad (2)$$

Fig. 5의 파선은 식(2)에 의해 구한 값이다. 여기서 물의 밀도는 문헌치⁽¹⁾를 이용하였고, 테트라데칸의 밀도는 Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 고상영역(273.2K<T≤278.9K)은 803kg/m³, 액상영역(279K<T≤290K)에서는 식(1)에 의하여 계산한 값을 이용했다. 본 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 밀도 측정값은 최대편차 ±0.05%(적용온도 범위 T=273.1~290K)이내에서 일치하였다. 따라서 가성성법칙에 의하여 본 연구의 대상인 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 밀도를 예측하는 것은 큰 문제가 없는 것으로 확인 되었다.

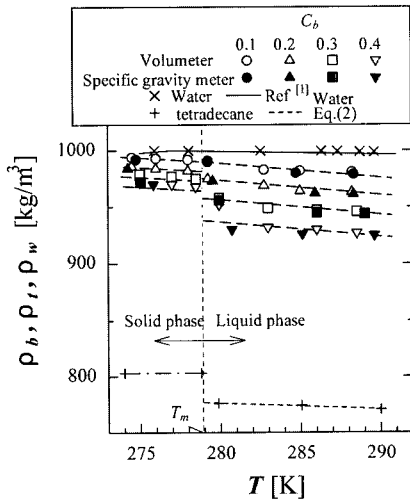


Fig. 5 Relationship between density and temperature

2.2 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 비열 및 잠열량

마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 비열은 테트라데칸의 과냉각해소를 쉽게 행할 수 있고 또한 측정이 간편한 수열량계 및 DSC(Differential Scanning Calorimeter)를 이용하였다. 수열량계에 의한 비열의 측정은 수열량계의 손실열량 등을 고려해 식(3)에 의해 산출하였으며 Fig. 6(a)는 수열량계의 개략도이다.

$$Cp_b = \frac{(M_w \times Cp_w + W_c + W_m) \times (T_{fi} - T_{ws}) - Q_{loss}}{M_b \times (T_b - T_{fi})} \quad (3)$$

여기서 T_{fi} 는 시간경과 후의 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 평형온도, T_{ws} 는 수열량계의 초기 온도를 나타내고 있다. 본 측정장치의 정밀도는 질량측정 정밀도 ±0.1%, 온도 측정 정밀도 ±0.4% 그리고 수열량계 자체의 비열 등의 물성치의 불확실성 등을 감안해 볼 때 ±5.0%정도로 추정할 수 있다. 그리고 본 측정장치의 정밀도 검증을 위하여 증류수를 이용하여 비열을 측정한 결과 문헌치⁽¹⁾와의 편차가 ±5.0%이내에서 일치하는 결과를 얻었다.

한편, DSC에 의한 비열의 측정에서는 Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 레퍼런스측의 비교 물질로서 알루미늄 분말을 사용했고 샘플측에는 기준물질로서 비열이 널리 알려져 있는 사파이어를 사용했다. 측정방법은 먼저 레퍼런스측에는 알루미늄 분말을 넣은 용기를 설치하고 샘플측에는 빈 용기를 설치한 다음 이러한 공용기의 열용량을 측정하였다. 다음으로 샘플측을 사파이어가 들어있는 용기로 교체한 후 측정을 행하여 사파이어의 열용량을 얻는다. 또한 샘플측에 시료인 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수를 넣어 같은 측정을 반복해서 행한 후 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 비열을 아래의 식을 이용해 산출하였다.

$$Cp_b = \frac{M_c \times Y_b}{M_b \times Y_c} \times Cp_c \quad (4)$$

Fig. 7은 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수($C_b = 0.1 \sim 0.4$), 물 그리고 테트라데칸의 비열 Cp_b , Cp_w , Cp_l 의 측정결과를 온도 T 와의 관계로 나타낸 것이다. Cp_l 는 고상영역(273.2K<T≤278.9K)에 있어서 온도의 증가와 함께 조금 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 식(5)와 같이 근사시킬 수 있다.

$$Cp_{ls} = 3.88 \times 10^{-2} \times T - 8.82 \quad (5)$$

한편, 액상영역(279K<T≤290K)에서의 테트라데칸의 비열은 거의 일정한 값($Cp_{li} = 2.1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)을 나타내고 있다. Cp_b 는 테트라데칸의 응고점인 $T_m = 278.9 \text{ K}$ 를 경계로 고상과 액상상태에서의 비열의 차를 보이고 있으며 액상상태에서의 비열이

더 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또 C_{p_i} 가 물의 비열 보다도 작기 때문에 C_b 가 증가함에 따라 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 비열은 감소하고 있다.

Fig. 7에 나타낸 일점쇄선은 테트라데칸, 메라닌 수지 그리고 물의 비열 C_{p_i} , $C_{p_{me}}$, C_{p_w} 과 질량 비율 C_i , C_{me} , C_w 을 이용한 식(6)으로부터 계산한 값이다.

$$C_{p_b} = C_{p_i} \times C_i + C_{p_w} \times C_w + C_{p_{me}} \times (1 - C_i - C_w) \quad (6)$$

식(6)으로부터 계산된 비열과 측정에 의한 비열을 비교한 결과 최대편차 $\pm 4.0\%$ 이내에서 일치하는 결과를 얻었다. 전술한 밀도에서와 같이 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 비열도 가성성식을 이용해 산출할 수 있음을 알 수 있다.

마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 잠열량 L_b 은 축열 및 방열 시스템에 이러한 슬러리를 열유체로서 적용함에 있어서 매우 중요한 기초 데이터일 뿐만 아니라 설비의 운용 목적을 결정하는 인자이다.

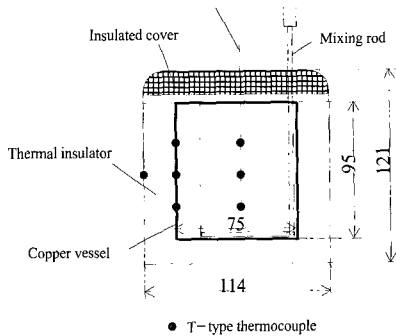


Fig. 6(a) Schematic diagram of water calorimeter

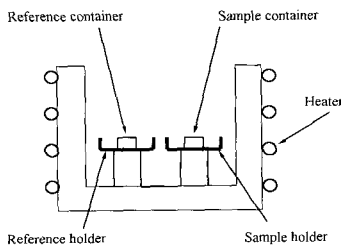


Fig. 6(b) Schematic diagram of DSC

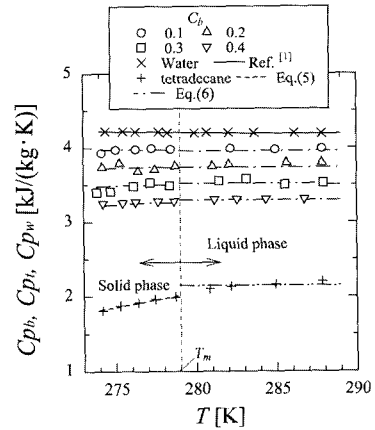


Fig. 7 Relationship between specific heat and temperature

마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 잠열량 측정에는 비열의 측정에서 사용한 DSC를 이용하였다.

Table 2는 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 잠열량을 나타내고 있다.

Fig. 8은 DSC에 의한 L_b , 건조 마이크로캡슐 잠열 축열재 및 테트라데칸의 잠열량 L_i 의 측정결과와 함유 테트라데칸의 질량비율 C_i 과의 관계를 나타낸 것이다. 그림 중의 실선은 식(7)에 의해 산출한 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 잠열량을 나타내고 있다. 또한 Fig. 8로부터 알 수 있는 바와 같이 DSC에 의해 측정된 잠열량과 식(7)로부터 계산한 잠열량이 $\pm 7.0\%$ 이내에서 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

$$L_b = C_i \times L_i = C_b \times \frac{73.4}{100} \times L_i \quad (7)$$

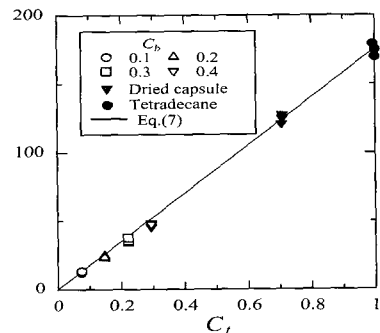


Fig. 8 Relationship between latent heat and concentration of paraffin

Table 2 Latent heat of microencapsulated phase change material slurry

C_b	L_b [kJ/kg]	L_r $L_r = \frac{L_b}{L_i} \times 100$	L_b/C_b
0.1	12.3	7.5	75.0
0.2	24.0	14.6	73.0
0.3	35.3	21.5	71.7
0.4	48.5	29.6	74.0

2.3 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 열전도도

본 연구에 사용되어진 마이크로캡슐화된 테트라데칸 입자가 물에 분산되어 있는 슬러리아기 때문에 다음과 같은 조건 아래에서 비정상세선법 (Transient hot wire method)을 이용하여 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 열전도도를 측정하였다.

- (1) 시료가 전기 전도성 재료일 것.
- (2) 온도의 변화에 따라서 잠열 축열재가 상변화를 일으켜도 열전도도의 측정이 용이할 것.
- (3) 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수가 유체이며 측정을 행하는 동안 자연대류를 발생시킬 수 있기 때문에 빠른 속도의 측정이 가능 할 것.

Fig. 9는 비정상세선법에 의한 열전도도 측정 장치의 개략도이며, 소선의 직경이 76 μm인 가는 백금선을 이용하여 양극에 직류전원을 부가하여 열전도도를 측정하였다. 백금선의 전기저항과 온도와의 관계는 $T = 273.2 \sim 313.1K$ 의 범위에서 표준온도계와 정밀 전기 저항 측정기에 의해 검증하였고 측정 시료의 백금선 축 방향의 온도상승은 1.0K이하로 하였다. 즉, 이러한 온도 제어에 의하여 측정장치의 상부와 하부와의 온도차를 0.1K이하로 유지하여 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 자연대류에 의한 영향을 무시할 수 있도록 하였다. 측정은 측정용 용기를 항온조내에 설치하고 소정의 온도에 이르렀을 때 백금선에 직류전원을 인가하여 백금선의 온도 상승 ΔT 과 경과시간 t_1 및 t_2 와의 관계로부터 아래의 식을 이용하여 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 열전도도를 구하였다.

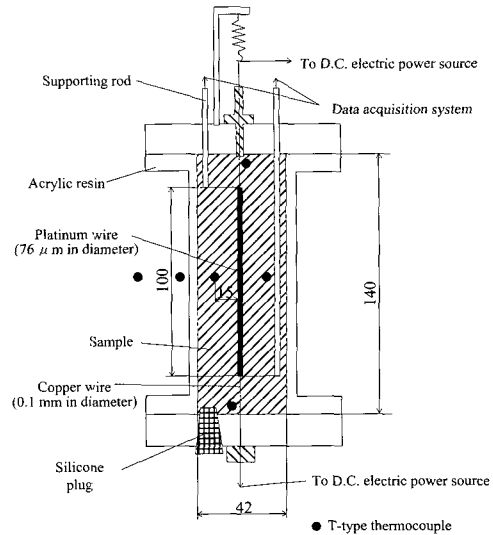


Fig. 9 Cut view of measuring device of thermal conductivity

$$k_b = q \times \frac{\ln(t_2 / t_1)}{4\pi\Delta T} \tag{8}$$

측정정도는, 절연피복에 의한 백금선 온도상승에 대한 영향이 2%, 전압측정정밀도 0.05%, 그리고 총 측정정밀도의 오차는 2.5% 이내이다.

Fig. 10은 k_b , 테트라데칸의 열전도도 k_t 및 물의 열전도도 k_w 를 온도와 관계로 나타낸 그래프이다. 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수는 전술한 바와 같이 잠열 축열재로서의 테트라데칸, 캡슐 피복재로서의 메라닌 수지 그리고 물로 이루어져 있기 때문에 Eucken의 분산상 모델을 이용하여 식 (9)로부터 산정하여 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 열전도도에 대한 추정치를 일점쇄선으로 나타내었다.

$$k_b = k_w \times \frac{1 - 2 \left[\phi \frac{k_w - k_t}{2k_w + k_t} + (\phi - \phi) \frac{k_w - k_{me}}{2k_w + k_{me}} \right]}{1 + \left[\phi \frac{k_w - k_t}{2k_w + k_t} + (\phi - \phi) \frac{k_w - k_{me}}{2k_w + k_{me}} \right]} \tag{9}$$

여기서 ϕ 는 테트라데칸의 체적비율이고 ϕ_n 는 물과 테트라데칸의 체적비율의 합이다. 즉 물과 메라닌수지의 체적비율은 각각 $(\phi - \phi)$, $(1 - \phi)$ 로 나타낼 수 있다.

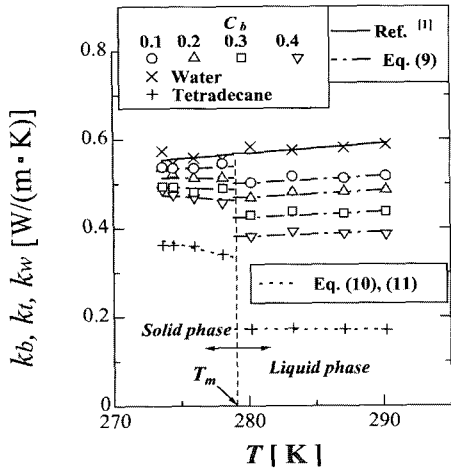


Fig. 10 Relationship between thermal conductivity and temperature

그리고 테트라데칸의 고상상태 및 액상상태의 열전도도의 값은 측정된 값으로부터 아래의 식으로 근사하여 식(9)에 대입하였고 메라닌 수지의 열전도도도 k_{me} 는 문헌치⁽⁸⁾의 값($k_{me}=0.42W/(m \cdot K)$)을 이용하였다.

고상상태 ($273.2 < T \leq 278.9K$)

$$k_{is} = -9.03 \times 10^{-6} T^2 - 2.2 \times 10^{-3} T + 1.65 \quad (10)$$

액상상태 ($278.9 < T \leq 290.1K$)

$$k_{il} = 4.69 \times 10^{-7} T^2 - 4.49 \times 10^{-2} T + 0.261 \quad (11)$$

2.4 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 점성

마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수는 비뉴턴유체의 거동을 나타내기 때문에 전단속도를 변화시켜가며 그 점성을 측정할 수 있는 회전점도계를 이용하였다.

Fig. 11은 점성 측정 장치의 개략도를 나타내고 있다. 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 점성 측정에 있어서도 앞서 행한 방법과 마찬가지로 항온조에 점성 측정 장치를 설치한 후 온도를 조절해가면서 측정하였다. 또한 점성 측정장치의 상하부의 온도차는 $\pm 0.1K$ 이내로 유지했고 점성 측정 장치의 정밀도, 회전 점도계의 정밀도 $\pm 1\%$ 및 시료 온도 측정의 정밀도 $\pm 0.3\%$ 등을 고려해 볼 때 그

오차는 $\pm 2.0\%$ 이내로 추정할 수 있다. 증류수를 이용한 측정 결과 문헌치⁽¹⁾와 $\pm 1.9\%$ 이내에서 일치하는 값을 얻었으므로 본 연구에 사용된 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 점성 측정장치의 정밀도는 충분하다고 판단할 수 있다.

Fig. 12는 식(12)로부터 계산한 η'_b 와 T 와의 관계를 나타낸 것이다. 점성계수 η'_b 는 모든 C_b 에서 온도의 감소와 함께 줄어들고 있음을 알 수 있다. 또한 η'_b 는 C_b 의 증가와 함께 증가하고 있음을 나타내고 있다. 즉, 온도의 증가에 따른 물의 점성이 약해지기 때문이며 그리고 잠열 축열재인 미세화된 테트라데칸의 질량비율의 증가에 따라 점성이 커지기 때문이다. 한편, 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수에 분산해 있는 상변화 물질인 테트라데칸의 상변화 온도를 경계로 뚜렷한 차이가 점성에서는 보이지 않는다. 이는 상변화 물질이 메라닌 수지 피복에 의해 캡슐화 되어있기 때문이며 미세화된 입자의 직경($d=0.5 \sim 2.5 \mu m$)이 아주 작기 때문에 상변화가 점성계수 η'_b 의 변화에는 크게 영향을 미치지 않기 때문이라고 생각되어진다.

$$P_b = \eta'_b \times V^n \quad (12)$$

Fig. 13은 식(12)와 같은 근사로부터 얻은 점성지수, n 와 T 와의 관계를 나타낸 것으로서 모든 질량비율에 있어서 $n < 1$ 의 값을 나타내고 있으므로 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수는 비뉴턴유체의 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편 잠열 축열재의 질량비율이 증가할수록 비뉴턴유체의 성질이 강해짐을 알 수 있다.

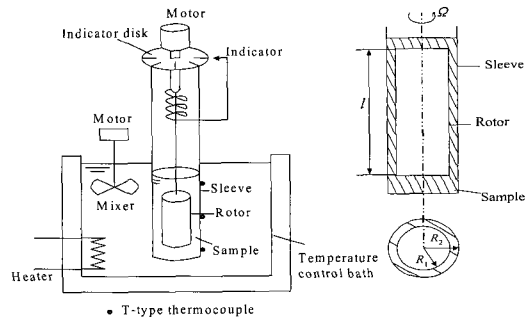


Fig. 11 Cut view of measuring device of viscosity

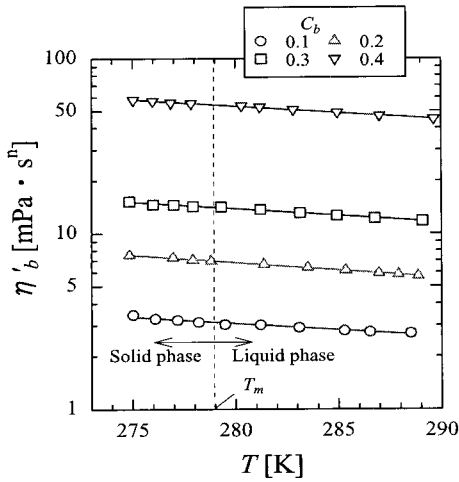


Fig. 12 Relationship between viscosity and temperature

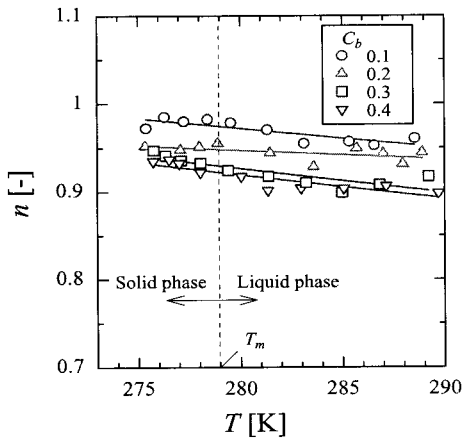


Fig. 13 Relationship between viscosity index and temperature

3. 결 론

본 논문에서는 잠열 축열재를 분산상으로 하는 유동 가능한 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수를 이용한 축열 및 방열 그리고 잠열 반송 시스템의 구축에 있어서 우선적으로 요구되는 중요한 기초 데이터인 제반 열물성치(밀도, 비열, 잠열량, 열전도도, 점성)에 대한 측정을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 부자식 비중계와 체적계를 이용한 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 밀도 및 수열량계와 DSC를 이용하여 비열을 측정한 결과, 마이크

로캡슐 잠열 축열재를 구성하고 있는 물질과 질량비율로부터 산출할 수 있는 가성성법칙의 식을 얻었다.

- (2) 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 잠열량은 함유 잠열 축열재의 질량비율로부터 산출 가능하다.
- (3) 비정상세선법을 이용한 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 열전도도는 Eucken의 분산상의 모델을 적용시킴으로써 예측 가능하다.
- (4) 회전식 점도계에 의한 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수의 점성측정을 행한 결과 비뉴턴유체의 거동을 나타냈으며 멱법칙에 의한 식으로부터 그 점성을 계산하였다. 또한 마이크로캡슐 잠열 축열재 혼합수에 분산해 있는 미세화된 잠열 축열재의 질량비율이 증가할수록 비뉴턴성이 강해졌다.

참 고 문 헌

- [1] 日本熱物性學會編, 熱物性ハンドブック, 養賢堂(1990), 119
- [2] 稻葉英男, 日本機械學會誌, 98, 925(1995), 999-1000
- [3] 稻葉英男, 冷凍, 73, 844(1998), 98-106
- [4] 稻葉英男, 森田愼一, 機械學會論文集(B編), 61, 585(1995), 1841-1848
- [5] P., Charunyakorn, S., Sengupta and S. K., Roy, Int. J. Heat Mass Transfer, 34(1991), 819-833
- [6] E. S., Choi, Y. I., Cho and H. G.,Lorsch, Int. J. Heat Mass Transfer, 37(1994), 207-215
- [7] 日本機械學會編, 傳熱工學資料(改訂4版), (1986), 331
- [8] 日本プラスチック工業連盟, プラスチック物性便覽, (1968), 88
- [9] H., Inaba, M.J., Kim and A., Horibe, Proceedings of the 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, 3(2000), 361-366

저 자 소 개



김명준 (金明俊)

1971년3월18일, 1994년 한국해양대학교 해사대학 기관공학과 졸업(공학사), 1998년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(공학석사), 2002년 일본 오카야마대학 대학원 자연과학연구과 졸업(공학박사), 2002년~2003년 일본 오카야마대학 기계공학부 외국인 객원연구원, 2003.9~현재 군산대학교 해양과학대학 동력기계시스템 공학부 전임강사.



임재근 (林載根)

1950년 4월 3일, 1972년 한국해양대학교 기관학과 졸업(공학사), 1983년 조선대학교 대학원 기계공학과(공학석사), 1993년 조선대학교 대학원 기계공학과(공학박사), 현재 군산대학교 동력기계시스템공학부 교수, 한국박용기관학회 상임 연구이사, 관심분야 : 동력기계.



최순열 (崔順烈)

1947년 6월생, 1986년 서울산업대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1992년 조선대학교 기계공학부 대학원 졸업(공학석사), 1999년 한국해양대학교 기관시스템공학부 대학원 졸업(공학박사), 1992~현재 군산대학교 동력기계시스템공학부 교수, 관심분야 : 동력기계.