

# 피복된 미립 상변화물질 슬러리를 이용한 대류 열전달의 향상에 관한 연구

정 동 주\* · 최 은 수\*\*

(2000년 4월 28일 접수)

## Enhancement of Convective Heat Transfer by Using a Micro-Encapsulated Phase-Change-Material Slurry

Dongju Jung and Eunsoo Choi

**Key Words:** Micro-Encapsulated(미립피복), Phase-Change-Material(상변화물질), Slurry(슬러리), Convective Heat Transfer(대류열전달), Capillary Tube Viscometer(모세관점도계), Latent Heat(잠열), Effective Thermal Capacity(유효열용량)

### Abstract

To enhance heat transfer characteristics of water, micro-encapsulated octadecane of about 10 $\mu$ m diameter was added to water. Viscosity of the slurry was measured by using a capillary tube viscometer. The measured viscosity decreased as the temperature of the slurry increased, and it increased as the fraction of the capsules in the slurry increased. Thermal characteristics of the octadecane were studied by using a differential scanning calorimeter. The melting temperature and the melting energy of the octadecane were found to be 28.6 $^{\circ}$ C and 34.4kcal/kg, respectively. The convective heat transfer characteristics of the slurry were investigated in a flow loop with a constant heat flux test section. Friction factor of the slurry flow was found to be similar to the expected curve by Petukhov. The Nusselt number of the slurry flow was highest when the octadecane melted. Effective thermal capacity of the 14.2% slurry was found to have 1.67 times of the thermal capacity of water.

### 기호설명

C : 열용량 [J/kg ·  $^{\circ}$ C]  
C<sub>eff</sub> : 유효 열용량 [J/kg ·  $^{\circ}$ C]  
D : 시험부의 관내 직경 [m]  
 $\dot{m}$  : 질량 유량 [kg/s]  
Nu : 뉴셀트수  
Pr : 프란틀수  
Q : 단위 시간당 가열열량 [Watts]  
T : 온도 [ $^{\circ}$ C]  
 $\Delta T$  : 유체의 출구 온도-유체의 입구온도 [ $^{\circ}$ C]

X : 시험부에서 유동 방향으로의 길이 [m]

### 하첨자

avg. : 평균값  
bi : 입구에서 유체의 유동방향으로의 국소적인 평균  
bo : 출구에서 유체의 유동방향으로의 국소적인 평균  
exp. : 실험에 의해 측정된 값  
Pet. : Petukhov에 의해 계산된 값  
w : 물의 경우

### 1. 서론

열전달 유체로서 열적, 기계적, 화학적으로 안정하며 우수한 물성과 높은 축열 밀도를 바탕으로 한 경제적 우위 때문에 물을 많이 사용하여

\* 회원, 명지대학교 대학원

E-mail : lte@wh.myongji.ac.kr

\*\* 회원, 명지대학교 기계공학과

E-mail : choies@wh.myongji.ac.kr

TEL : (031)330-6429 FAX : (031)321-4959

왔다. 그러나, 최근 선진국가들 사이에 열 에너지 전달의 다양한 방법과 에너지 절약의 일환으로 새로운 열전달 유체인 상변화물질 슬러리<sup>(1,2)</sup> (PCM slurry, Phase - Change - material slurry)에 관한 연구가 진행되고 있다. 이는 상변화시 발생하는 엄청난 크기의 잠열(latent heat)의 추가로 인한 열전달 측면에서의 높은 효율성, 즉 체적 열용량(volumetric thermal capacity) 및 열전달 계수(heat transfer coefficient)의 증가 때문이다.

기존의 상변화물질 슬러리에 관한 연구는 축열<sup>(3,4,5,6)</sup>의 관점에서 진행되어 왔으며, 이는 상변화물질이 고상이 되면 유동성이 없어 상변화물질을 필요한 위치로 운반시키기가 용이하지 않으며, 막힘 현상(clogging)으로 인한 연구의 어려움 때문이다. 근래에는 유동성 향상 및 막힘 현상의 방지를 위하여 상변화물질을 아주 미세한 입자로 만들어 운반유체와 함께 흘러 보내는 방법<sup>(7)</sup>이 연구되고 있으며, 이는 미세한 입자들 주위에서 일어나는 미소대류(micro-convection)에 의한 열전달의 향상 또한 기대할 수 있다. 상변화물질 슬러리는 열교환기의 부피를 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 태양열 저장시스템, 항공전자공학, 미소유로 열전달 및 지역냉난방시스템 등에 응용되어질 수 있다.

상변화물질 슬러리에 관한 연구는 크게 파라핀 슬러리<sup>(8)</sup>(Paraffin slurry)와 얼음 슬러리<sup>(9)</sup>(Ice slurry) 및 미립피복 상변화물질 슬러리(MCPCM slurry)로 나눌 수 있다. 파라핀 슬러리 및 얼음 슬러리는 상변화물질인 파라핀과 얼음을 각각 운반유체 속에 분산시킨 것이며, MCPCM slurry는 상변화물질을 속이 빈 미세한 구형용기(직경이

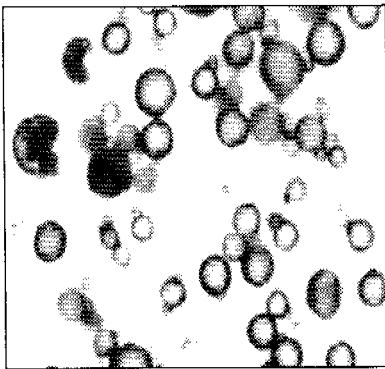


Fig. 1 MCPCM photograp obtained by an optical microscopes

10-200 $\mu\text{m}$ 정도) 속에 채워 넣어, 이를 운반유체에 분산시킨 것으로 Fig. 1에 확대시켜 도시하였다.

이러한 기술은 약품, 식품, 비료 및 무탄소 복사지의 제조 등에 널리 쓰이고 있는 기술을 상변화물질에 적용한 것으로서, Roy 등<sup>(10,11)</sup>에 의해 MCPCM의 기계적 강도에 관한 연구가 있었다. MCPCM slurry는 상변화물질을 운반유체로부터 완전히 분리할 수 있고, 파라핀 슬러리와는 달리 운반유체의 극성에 관계없이 사용할 수 있다. 뿐만 아니라 피복하는 물질의 종류 및 두께를 적절히 선택함으로써 입자의 밀도를 조절하여, 운반유체의 밀도와 같게 만들 수 있어 슬러리의 유동이 안정적이며 균질(homogeneous)하다. 그러나 다른 슬러리에 비하여 고가이며, 이에 따라 대량생산 및 제작비 절감을 위한 기술 개발이 요구되어진다.

Charunyakorn 등<sup>(12)</sup>은 수치해석을 통한 열전달 해석을 하였고, Colvin 등<sup>(13)</sup>이 자체 제작된 MCPCM을 이용하여 열전달 실험에 관한 연구를 하였다고 하나 MCPCM slurry를 이용한 열전달에 관하여 아직 체계적인 연구가 이루어진 바가 없다.

본 연구에서는 MCPCM slurry의 관내 대류 열전달 실험을 통한 특성을 해석하였다. 본 연구에 사용된 MCPCM은 평균 외경이 10 $\mu\text{m}$ 인 멜라민 수지로 피복된 옥타데케인을 사용하였다.

## 2. 관내 대류 열전달 실험장치

본 연구를 위해 Fig. 2와 같은 실험장치를 사용하였다. 본 장치는 크게 가압부, 고압용 용기, 시험부, 전원부 및 Data 인식부로 나눌 수 있다. 가압부는 압축기, 압력탱크 및 수은 마노미터로 구성되어 있다. 본 실험 장치의 가장 큰 특징은 펌프가 아닌 압력차에 의한 유체 순환에 있다. 이는 펌프를 사용할 경우 발생할지도 모르는 캐슬의 파손 및 진동으로 인한 오차를 없애기 위해서이다. 단열된 고압용 용기는 내경 200mm, 길이 500mm, 두께 6.5mm인 스테인리스 스틸로 제작되었으며, 일반적인 관통형 교반기 대신에 용기의 밀부분에 Hot plate형 교반기(자석 교반기)를 설치하였다. MCPCM의 밀도는 물의 밀도와 비슷하나 장시간 방치할 경우 작은 밀도차에 의해 물에 뜨므로 균일하게 섞여주기 위하여 사용하였다.

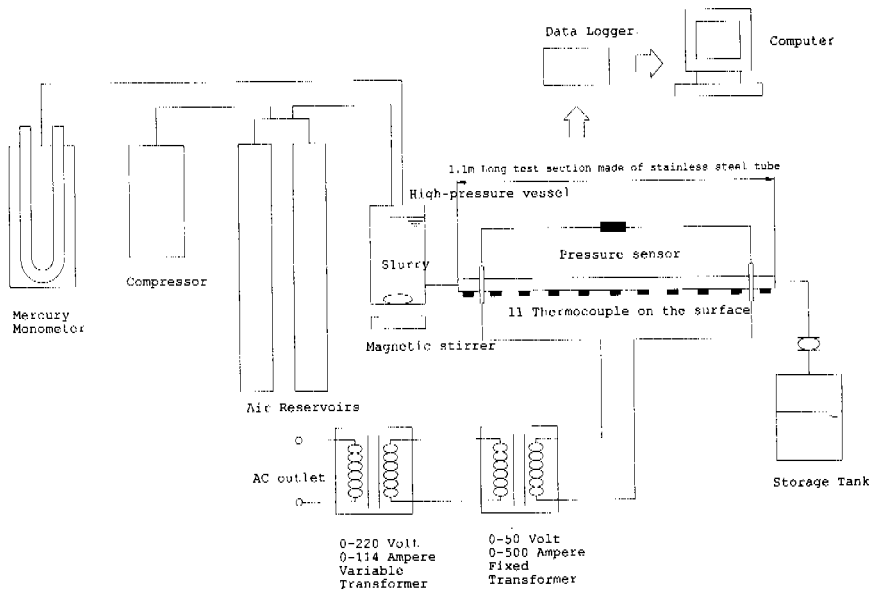


Fig. 2 Experimental apparatus of convective heat transfer test

용기와 시험부 사이에 고무튜브를 사용하여 용기의 미세한 진동에도 시험부는 영향을 받지 않도록 하였다. 시험부는 내경이 3.66mm, 총길이가 1.1m인 스테인리스 스틸관으로 제작하였다. 작은 관의 내경을 정확하게 직접 측정하는 것이 어렵기 때문에, 먼저 시험부로 이용된 관의 일부를 잘라내, 외경을 다섯 군데 측정하여 평균을 내고, 시험부의 질량을 측정하여 내경을 환산해 내는 방법을 이용하였다. 시험부는 유체역학적 발달 영역부와 가열시험부로 구성되어 있으며, 유체역학적 발달부는 시험부 입구에서부터  $X/D=50$ 이 되는 부분이다. 그리고 가열시험부는 난류에서의 열적 발달영역을 충분히 고려하여 전체길이를 870mm로 하였다. 가열시험부의 양쪽 끝은 전력 공급용 플랜지를 용접하여 전원부에서 나오는 전력을 가열시험부에 전달하도록 하였다. 가열시험부에는 11개의 T type 열전대 및 2개의 압력탭이 설치되었다. 열전대는 관 내부 중앙에 설치하는 것이 이상적이나, 이는 유체의 유동에 방해가 되며 관의 내경이 너무 작아 설치가 불가능하므로 관 외벽에 설치하여 열전도공식을 이용하여 내벽 온도로 환산하였다. 전원부는 Power supply와 Transformer로 구성되어 직접 교류 전류를 공급하였다. 유량은 시험부의 출구에서 일정시간 동안 슬러리를 받아서 질량을 측정함으로써 구하였으며, 이때 받은 슬러리는 진공필터형 분리기에

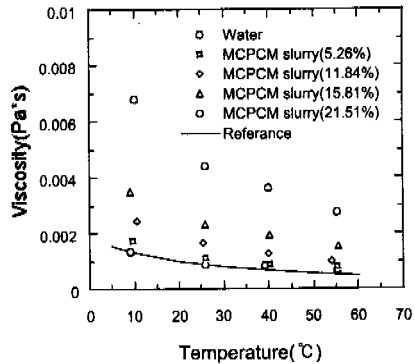


Fig. 3 Measured viscosity by using a capillary tube viscometer with various temperature

의하여 물을 제거하고, 진공오븐에서 건조시켜 입자의 농도를 계산하였다.

### 3. 실험결과 및 해석

#### 3.1 MCPCM 슬러리의 점도

가열시험부가 가열되면 가열비율에 따라 슬러리의 국소혼합평균온도는 증가하고, 이에 따라 슬러리의 물성치도 변하게 된다. 특히 다른 물성치에 비해 점도의 변화가 크므로 온도변화에 따른 점도변화는 반드시 고려되어야 한다.

점도 측정을 위해서는 전단율의 범위에 따라 높은 전단율에서는 모세관 점도계, 중간 범위의 전단율에서는 회전형 점도계, 낮은 범위의 전단율에서는 낙구점도계가 사용되어야만 한다. 본 연구에서 필요한 점도값은 높은 전단율에서의 점도값이므로 주로 모세관 점도계를 이용하였으며, 측정된 점도값을 온도 및 농도에 대해 보간을 하여 사용하였으며 Fig. 3에 도시하였다.

일반적으로 슬러리의 농도가 25% 이상이 되면 유체는 비뉴턴 유체의 특성을 나타내며, 점도 측정시 점도값이 불안정해지기 때문에 전체 농도를 25%미만으로 하였다. Fig. 3에 도시된 바와 같이 온도가 증가함에 따라 점도가 감소하였으며, 슬러리의 농도가 증가함에 따라 미립피복 상변화물질이 물의 점도에 영향을 미쳐 물의 점도와 큰 차를 보임을 알 수 있었다. Fig. 3의 결과를 이용하여 임의의 온도 및 농도에서의 슬러리의 점도를 보간법을 이용하여 구하였다.

### 3.2 MCPCM 슬러리의 열적 특성

파라핀 왁스의 정제과정을 통해 얻어진 알케인 중의 하나인 옥타데케인의 열적 특성 측정을 위해 일본 텍사이언스사의 WS002모델을 이용 DSC 실험을 하여 Fig. 4에 도시하였다. 그림에서 아래를 향한 첫 번째 곡선이 용융을 나타내는 것으로서, 옥타데케인 용융시 한 번의 상변화를 보였고, 측정된 용융 온도와 용융 에너지는 각각 27.4℃

및 31.6kcal/kg이었으나 물을 이용한 교정치로 교정한 결과 용융 온도는 28.6℃이며, 용융 에너지는 34.4kcal/kg로 이 값을 data해석에 사용하였다. 물을 이용한 교정실험의 가열 속도는 2℃/min으로 하였다.

### 3.3 MCPCM 슬러리의 관내 대류 열전달 실험

MCPCM 슬러리의 관내 대류 열전달 실험에서는 유량을 적절하게 유지시키면서 다음과 같은 변수들을 고려하여 실험을 수행하였다. 먼저 슬러리의 가열시험부 입구 및 출구온도 모두가 옥타데케인의 용융온도 이하가 되도록 입구온도를 유지하는 경우(case-1)와, 입구온도는 옥타데케인의 용융온도 이하이지만 출구에서는 용융온도 이상이 되도록 입구온도를 유지하는 경우(case-2) 및 입구온도를 옥타데케인의 용융온도 이상으로 유지하는 경우(case-3)의 세 가지가 있다. 첫 번째 경우에는 슬러리 중 캡슐에 들어있는 옥타데케인이 용융하지 않는 경우를 말하며, 두 번째 경우에는 옥타데케인이 가열시험부를 전후하여 고체에서 액체로 용융하는 경우를 말하고, 세 번째 경우에는 옥타데케인이 가열시험부 전부터 액체 상태로 존재함을 의미한다.

슬러리에 포함된 옥타데케인의 용융이 실험에 미치는 영향 외에도 슬러리 내의 MCPCM의 농도 및 가열시험부에서의 가열량의 영향을 알아보기 위하여, 농도는 5, 9 및 14%로 변화시켰으며, 가

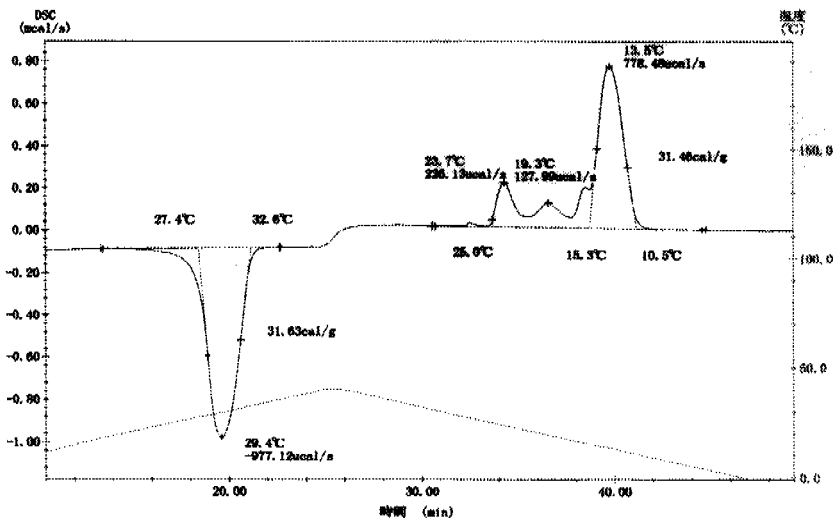


Fig. 4 Thermal analysis of octadecane

열량은 가열시험부 양단의 전압을 10, 15 및 20V로 변화시켰다. 슬러리 내의 MCPCM의 농도를 20%로 하여 실험한 경우도 있었으나, 결과가 5, 9 및 14%의 경우와 너무 달라 본 해석에서는 제외하였다. 따라서 실험조건은, 입구온도가 세 가지, 농도가 세 가지 및 가열량이 세 가지로서 모두 아홉 가지의 경우가 있고, 각각의 경우에 대하여 여러 번의 실험을 한 후 모두 47회의 데이터를 본 연구에서 해석하였다.

슬러리 실험을 하기 이전에 실험의 신뢰성을 알아보기 위하여 물을 가열시험부에 흘리면서 압력 강하 및 대류열전달계수를 구하여, 이를 관마찰계수 및 뉴셀트수로 환산하여 Petukhov의 결과

와 비교하였다. 물의 경우 관마찰계수 및 뉴셀트수가 Petukhov<sup>(14)</sup>의 결과에 거의 근접함을 알 수 있었다.

47회의 슬러리 실험에서 압력강하를 구하여 이를 관마찰계수로 환산하여 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 세 가지의 표시기호는 앞에서 설명한 case-1, case-2 및 case-3을 나타내는 것으로서, 각각 옥타데케인이 가열시험부에서 용융하지 않는 경우, 용융하는 경우 및 처음부터 용융한 경우를 나타내며 이 때의 평균입구온도가 각각 5.8, 26.1 및 33.0°C였음을 말한다. 여기서 레이놀드수를 구할 때 슬러리의 점도가 필요한데, 이것은 각각의 실험에서 평균 슬러리 온도 및 MCPCM 농도에 해당하는 슬러리의 점도를 Fig. 3에서 보간하여 구하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 세 가지의 경우에 모두 Petukhov의 이론식과 잘 일치함을 알 수 있다. 파라핀슬러리의 경우에는 파라핀입자가 고체인가 액체인가에 따라 압력강하가 달라졌지만,<sup>(1)</sup> MCPCM 슬러리의 경우에는 옥타데케인이 캡슐 속에 존재하기 때문에 옥타데케인의 용융이 압력강하에 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

캡슐 속의 옥타데케인의 용융이 슬러리의 열전달에 미치는 영향을 Fig. 6과 같이 나타내었다. 여기서 Nu는 슬러리의 뉴셀트수이며, Nu<sub>w</sub>는 같은 레이놀드수 및 같은 평균온도에서의 물의 뉴셀트수를 나타낸다. 10, 15 및 20V는 가열시험부 양단에 걸어준 전압을 나타내는 것으로서 각각의 수치의 제곱에 비례하는 가열량을 의미한다. 5, 9 및 14%는 슬러리 내의 MCPCM의 농도를 말한

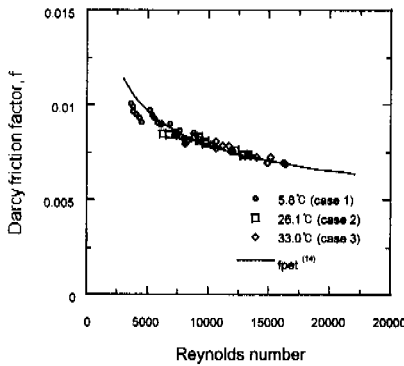


Fig. 5 Friction factor of MCPCM slurry for case-1, case-2, case-3

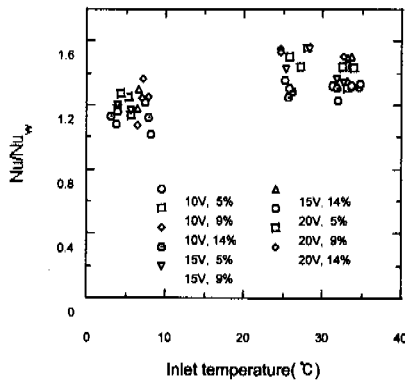


Fig. 6 Nusselt number of MCPCM slurry with inlet temperature of the slurry

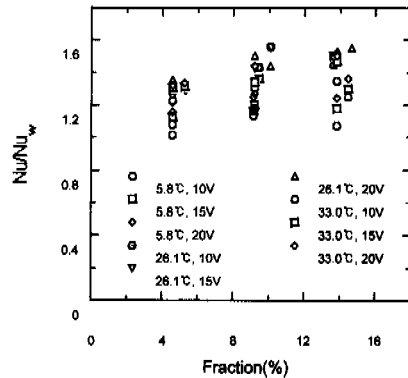


Fig. 7 Nusselt number of MCPCM slurry with fraction of the slurry

다. 전술한 바와 같이 입구온도가 26.1℃인 경우가 옥타데케인이 가열시험부에서 용융하는 경우로서, 뉴셀트수가 가장 높게 나타났으며, 이것은 Kasza and Chen,<sup>(5)</sup> Colvin and Mulligan<sup>(2,4)</sup> 및 Colvin 등<sup>(13)</sup>이 말한 바와 같이 옥타데케인의 용융으로 인한 잠열이 유효열용량을 증가시키고 이것이 프란틀수를 증가시켜 뉴셀트수를 증가시킨 결과라고 생각된다.

옥타데케인이 용융하지 않는 경우에도 뉴셀트수가 상당히 크게 나타난 것은 캡슐 입자들이 유동장을 교란시켜 뉴셀트수가 증가했다고 생각된다. 이것은 용융된 캡슐의 경우가 약간 더 크게 관찰되었다.

Fig. 7은 슬러리 내의 MCPCM의 농도의 영향을 나타낸 것이다. 농도가 증가할수록 뉴셀트수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 물의 경우는  $Nu/Nu_w$ 가 1인 것을 생각하면 농도증가에 따라 뉴셀트수의 증가가 선형적이 아니며, 이것은 뉴셀트수가 프란틀수에 비례하는 것이 아닌 것을 생각하면 타당하다고 생각된다.

Fig. 8은 가열시험부에서의 가열량의 영향을 나타낸 것이다. case-2 및 case-3의 경우에는 가열량에 대하여 거의 변화가 없어 보이나, case-1의 경우에는 가열량에 따라 뉴셀트수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 Choi 등<sup>(1)</sup> 및 최은수<sup>(8)</sup>가 주장하였던 3영역 및 5영역 용융모델의 내용과 일부 상통한다. 즉, 가열시험부 내의 슬러리의 평균온도는 옥타데케인의 용융온도에 도달하지 못

하였지만, 가열량이 크면 관 내부 벽면에 인접한 캡슐은 국소적으로 용융을 할 수가 있어 이것이 뉴셀트수의 증가에 기여할 가능성이 있다고 할 것이다.

3.4 유효 열용량

상변화물질을 슬러리 형태로 기존의 유체에 섞어 열전달유체로 사용할 경우 가장 큰 변화는 열전달유체의 열용량의 증가로 나타난다. 그러나 이것은 엄밀한 의미에서의 열용량이 아니고 유효 열용량(5, 13)이라고 함이 옳을 것이다. 유효열용량을  $C_{eff}$ 라 하면,

$$C_{eff} = \frac{Q}{\dot{m} \cdot (T_{bo} - T_{bi})}$$

따라서 유효열용량은 실험조건, 즉, 열전달유체의 입출구온도에 따라 변하는 값이므로 엄밀한 의미에서 성질이라고 할 수는 없다고 생각된다.

47회의 실험을 아홉 가지의 경우의 실험으로 각각 평균하여 Table 1에 나타내었다. 옥타데케인의 용융온도가 앞에서의 DSC실험 결과에서와 같이 28.6℃임을 고려하면 case-1 및 case-3에서는 옥타데케인이 가열시험부에서 각각 고체 및 액체로 존재하고, case-2의 경우에는 고체에서 액체로 상변화 하였음을 알 수 있다. case-1 및 case-3의 경우에는 유효열용량이 농도에 관계 없이 거의 물의 경우와 같으나, case-2의 경우에는 농도에 따라 크게 변하고, 특히 14.2%의 경우에는 열전달유체의 가열부의 입출구에서 온도차가 작아 가

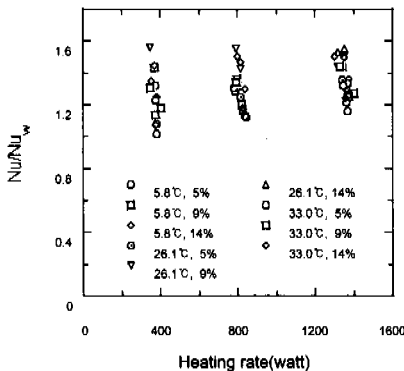


Fig. 8 Nusselt number of MCPCM slurry with the total heating rate in the test section

Table 1 Effective thermal capacity

	$T_{bi}$ (℃)	$T_{bo}$ (℃)	fraction(%)	$C_{eff}$	$C_{eff}/C_w$
case-1	6.93	12.76	14.1	4147	0.99
	4.82	10.57	9.13	4174	0.99
	5.74	11.33	4.57	4162	0.99
case-2	24.63	29.61	14.2	6997	1.67
	26.95	31.43	9.70	5464	1.31
	25.67	31.46	4.96	4740	1.13
case-3	33.16	38.64	13.7	4003	0.96
	32.77	37.90	9.30	4177	1.00
	33.00	37.90	4.93	4303	1.03

열부의 온도 분포를 균일하게 할 것임을 짐작할 수 있다.

수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

#### 4. 결론

#### 참고문헌

새로운 열전달 유체의 개발의 일환으로 운반유체인 물에 미립피복 옥타데케인을 각기 다른 농도로 첨가시켜 슬러리를 만들어 점도 및 열적특성, 그리고 관내 강제대류 열전달 실험을 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 온도가 증가함에 따라 슬러리의 점도는 감소하였으며, 10℃ 및 55℃의 경우 물의 점도가 각각 0.0013Pa·s 및 0.000664Pa·s인데 비해 최고 농도인 21%의 경우 각각 0.0068Pa·s 및 0.002757 Pa·s로서 슬러리의 농도가 클수록 물의 점도와 큰 차가 남을 알 수 있다.

(2) 미립피복 옥타데케인의 용융 온도는 28.6℃이며, 용융 에너지는 34.4kcal/kg으로 측정되었다.

(3) 물 실험을 통하여 Petukhov의 열전달 상관식이 잘 맞음을 다시 한번 확인하였다. 47회에 걸친 슬러리의 열전달실험에서도 마찰계수는 옥타데케인의 용융에 관계없이 Petukhov의 식과 잘 일치하였다. 이것은 파라핀슬러리의 결과와 다른 것으로서 상변화물질이 캡슐에 갇혀 있기 때문이다.

(4) 옥타데케인이 용융하는 경우에 뉴셀트수가 물 보다 평균 43% 증가한 값으로 가장 크게 관찰되었다. 용융하지 않는 경우에도 물 보다 평균 18% 증가한 값이 나타나는데 이는 캡슐이 유동을 교란시켜 열전달계수가 증가하기 때문으로 추정된다.

(5) 일반적으로 MCPCM의 농도가 증가할수록 뉴셀트수가 증가하였으며, 본 실험에서는 최고 14.65%의 농도까지 실험 결과를 해석하였으며, 이 때의 최대 뉴셀트수는 55% 증가하였다. 또한 옥타데케인이 용융하는 경우에는 가열량이 증가할수록 뉴셀트수가 감소하는 것을 관찰할 수 있었는데, 이는 기존의 3영역 용융모델의 내용이 일부가 맞음을 의미한다.

#### 후 기

본 연구는 교육부 기계공학연구의 지원(ME96-A-04) 및 일본 원자력연구소(JAERI)의 도움으로

- (1) 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. Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 207~215.
- (2) Colvin, D. P. and Mulligan, J. C., 1990, "Method of Using a PCM Slurry to Enhance Heat Transfer in Liquids," U.S. Patent 4,911,232.
- (3) Kauranen, P., Peippo, K., and Lund, P.D., 1991, "An Organic PCM Storage System with Adjustable Melting Temperature," *Solar Energy*, Vol. 46, No.5, pp. 275~278.
- (4) Colvin, D. P. and Mulligan, J. C., 1989, "Thermal Energy Storage Apparatus Using Enhanced Phase Change Material," U.S. Patent 4, 807, 696.
- (5) 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," *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 107, pp. 229~236.
- (6) Lane, G., ed., 1986, *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*, Vol. II: Technology, CRC Press.
- (7) Choi, E., Cho, Y. I., and Lorsch, H. G., 1991, "Effects of Emulsifier on Particle Size of a PCM in a Mixture with Water," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, No. 6, pp. 759~766.
- (8) 최은수, 1998, "파라핀 슬러리의 생성 및 관내 대류열전달에 관한 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제22권 제1호, pp. 50~60.
- (9) Cleary, C., Day, S., Lindsay, R., Murry, C., Gupta, R., Larkin, B., Thompson, H., Wiggin, M., and Young, J.C.O'C., 1990, "Hydraulic Characteristics of Ice Slurry and Chilled Water Flows," IEA District Heating: Advanced Energy Transmission Fluids - Final Report of Research.
- (10) Roy, S. K. and Sengupta, S., 1991, "An Evaluation of Phase Change Microcapsules for uUe in Enhanced Heat Transfer Fluids," *Int.*

- Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 495~507.
- (11) Roy, S. K. and Sengupta, S., 1987, "The Melting Process Within Spherical Enclosures," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 460~462.
- (12) Charunyakorn, P., Sengupta, S., and Roy, S. K., 1991, "Forced Convection Heat Transfer in Microencapsulated Phase Change Material Slurries: Flow in Circular Ducts," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 3, pp. 819~833.
- (13) Colvin, D. P., Mulligan, J. C., and Bryant, Y. G., 1992, "Enhanced Heat Transfer In Environmental Systems Using Microencapsulated Phase Change Materials," *22nd International Conference on Environmental Systems*.
- (14) Petukhov, B.S., 1970, "Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow With Variable Physical Properties," *Advances in Heat Transfer* Vol. 6, pp. 503~564.