

# 미립피복 로릭산 슬러리의 관내 대류 열전달에 관한 연구

정 동 주<sup>†</sup> · 최 은 수<sup>\*</sup>

## A study on convective heat transfer with microcapsulated lauric acid slurry in circular pipe

Dongju Jeong, Eunsoo Choi

Key Words: Convective heat transfer(대류 열전달), Local Nusselt number(국소 누셀트 수), Microcapsulated lauric acid slurry(미립피복 로릭산 슬러리), Thermal capacity(열용량)

### Abstract

The objective of the present study is to reveal thermal characteristic of microcapsulated lauric acid slurry, which have high latent heat during phase change from solid to liquid, in circular pipe. Test were performed with microcapsulated lauric acid slurry in a heating test section with a constant heat flux boundary condition. Local Nusselt number and the effective thermal capacity were measured. As the size of microcapsulated lauric acid were increased, Local Nusselt number of microcapsulated lauric acid slurry were increased. The effective thermal capacity of microcapsulated lauric acid slurry was 0.5 times than it of water

#### 기호설명

$C$  : 열용량 [kJ/(kg · K)]  
 $D$  : 관 내경 [m]  
 $Pr$  : 프란틀 수  
 $Q$  : 슬러리에 공급된 열량 [W]  
 $Re$  : 레이놀드 수  
 $Ste$  : 스테판 수  
 $T$  : 온도 [°C]  
 $MT$  : 용융 온도 [°C]  
 $x$  : 관에서의 축 방향 거리 [m]  
 $\phi$  : 첨가 농도 [%]  
 $\lambda$  : 잠열 [kJ/kg]  
 $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

#### 하첨자

$eff$  : 슬러리의 유효 열용량  
 $i$  : 입구  
 $o$  : 출구  
 $pr$  : 물  
 $w$  : 관 내벽  
 $p$  : 미립피복 로릭산  
 $s$  : 미립피복 로릭산 슬러리

### 1. 서론

기존에 사용되었던 열전달 유체인 냉수, 온수, 증기 및 냉매 등은 이용 조건에 따라 사용 한계가 있으므로 이러한 문제 해결을 위해서는 새로운 개념의 열전달 유체에 대한 연구가 필요하다. 새로운 개념의 열전달 유체는 우선 고밀도 축열 및 축냉이 가능하고, 고밀도 열에너지의 고속 수송과 열에너지 수송 시 요구되는 반송 동력의 감소를 위한 유동 저항 감소, 열적 온도 이용 폭의

<sup>†</sup> 명지대학교 대학원

E-mail : dongju\_j@hanmail.net

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

<sup>\*</sup> 명지대학교 기계공학부

확대와 이용 열량의 증대 및 환경 친화적인 문제 등 여러 요구 조건을 만족하여야만 한다. 최근들어 이에 부합하는 새로운 열전달 유체로 상변화물질 슬러리(phase-change-material slurry)에 관한 연구<sup>(1)-(6)</sup>가 최근들어 진행되고 있다.

상변화물질 슬러리는 기존에 축열 재료로 사용되었던 상변화물질을 유동이 가능한 미립 입자로 만들어 운반 유체에 분산시킨 것으로 현열 뿐만 아니라 상변화 시에 발생하는 잠열(latent heat)을 이용한 열전달 계수의 증가와 미립 입자 첨가에 따른 마찰 계수의 감소를 위한 새로운 개념의 열전달 유체로서 상변화물질 슬러리를 사용할 경우에 예측되는 효과로는 지역 난방 시스템과 냉방시스템의 단일화에 따른 경제적 우위, 즉 난방 및 냉방 시스템에서의 난방수와 냉방수의 점도 및 에너지 밀도 차이로 야기되는 분배 시스템의 이원화 문제를 해결하여, 동일한 배관 시스템에 여름철에는 냉방수를 겨울철에는 난방수를 공급하여 분배시스템의 일원화가 가능할 것으로 생각되며, 고밀도 에너지 열전달 유체의 사용으로 인해 수송되는 열전달 유체의 양이 크게 감소하여 배관 및 저장 탱크의 크기와 반송 동력의 감소로 인한 경제적 우위를 점할 수 있을 것으로 예측된다. 뿐만 아니라, 소형화되는 전자 부품의 새로운 냉각 기술인 미소유로 열전달(micro-channel heat transfer)에 적용이 가능하며, 열전달 유체의 질적인 향상과 양적인 감소를 통해 열교환기의 소형화도 가능할 것으로 생각된다.

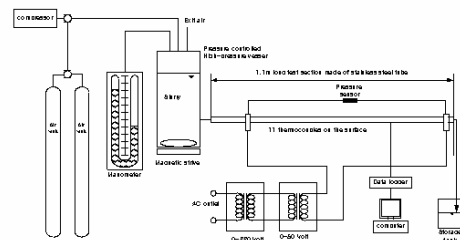
상변화물질 슬러리에 관한 연구는 고상에서 액상으로의 이상 유동에 관한 연구로서 미국을 비롯한 몇몇 선진국가들에 의해 수행된 바는 있으나, 아직까지는 실험적 자료들이 정성적 그리고 정량적으로 매우 부족하고 이에 따른 이론적 배경 또한 미흡한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 상변화물질 슬러리의 일종인 미립피복 로릭산 슬러리를 이용한 총류 영역에서의 관내 대류 열전달 특성에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

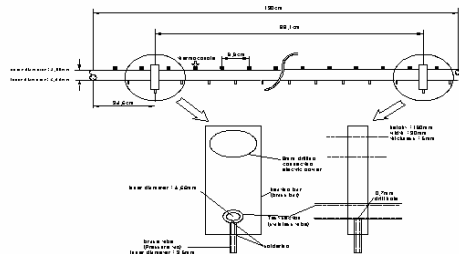
### 2.1 실험 장치

Fig.1 (a)는 본 연구를 위해 제작된 일정 열유속을 경계 조건으로 하는 관내 대류 열전달 장치의 개략도이다. 본 장치는 압력 차에 의해 유체를 순환시키도록 제작되었으며, 이는 펌프를 사용할 경우에 발생할지도 모르는 미립피복 로릭산의 파손과 진동으로 인한 오차를 줄이기 위해서이다. 본 장치의 구성은 크게 가압부, 저장부, 시험부, 전원부 및 자료 인식부로 나눌 수 있다. 가압부는 압축기, 공기 탱크 및 수은 마노미터로 구성되어 있으며, 공기 탱크는 용기의 부피를 고려하여 압축 공기가 충분히 안정적으로 시험부에 공급되도록 두 개를 연결하여 사용하였다.

저장부는 내경이 200 mm, 높이가 500 mm 그리고 두께가 6.5 mm 이며 스테인리스 스틸로 제작되었고, 저장부의 외벽에 원통형의 물 순환부(water jacket)를 설치하여 항온순환수조에서 나오는 일정 온도의 물을 순환시킴으로서 저장부 내의 슬러리의 온도를 조절하였고, 온도 변화를 고려하여 단열재를 사용하여 단열시켰다. 저장부 하단에 자석 교반기를 설치하였으며, 용기 내에서 자석 막대가 빠른 속도로 회전하여 상변화



(a) Schematic diagram of experimental apparatus



(b) Schematic diagram of test section and heating plate

Fig. 1 Schematic diagram of heat transfer experimental apparatus

물질이 균질하게 운반 유체에 섞일 수 있게 하였다. 이는 미립피복 상변화물질 슬러리의 밀도는 물의 밀도와 비슷하나 장시간 방치할 경우 약간의 밀도차에 의해 물에 뜨기 때문이다.

전원부는 전원 공급 장치와 대용량 슬라이다스로 구성되어 있으며, 슬라이다스의 최대 전압 및 전류는 각각 220 Volts 및 114 Amperes 이고, 전원 공급 장치의 최대 전압 및 최대 전류는 각각 50 Volts 및 500 Amperes 이다. 전원부에서 공급되는 전력은 시험부의 양단에 연결된 공급용 플랜지를 통해 공급하여 시험부가 일정 열 유속 경계 조건이 되도록 하였다. 가열 시험부에 전달되는 전력을 측정하기 위하여 전원부와 가열 판과의 연결 전선에 전류계와 전압계를 설치하여 전류 및 전압을 측정하였다. 본 장치에 사용된 자료 인식부는 오메가사의 *temscan1000A* 모델이다.

*Fig.1 (b)*는 관내 대류 열전달 장치의 시험부와 시험부에 연결된 가열 판을 도시한 것이다. 시험부는 내경이 3.66 mm, 외경이 4 mm, 총길이가 1.2 m 인 스테인리스 스틸관으로 제작하였다. 시험부의 유체역학적 발달영역부는 시험부 입구에서부터  $x/D = 47$ 가 되는 부분이다. 가열 시험부는 전체 길이를  $x/D = 237$ 로 하였고, 가열 시험부의 외벽에는 총 11 개의 T형 열전대를  $x/D = 27$ 의 간격으로 설치하였으며, 외벽 온도를 측정 후, 관의 열전도 계수를 이용하여 내벽 온도를 구하여 해석에 사용하였다. 시험부 끝은 밸브가 부착된 고무 튜브를 연결하였으며, 가해주는 압력 뿐만 아니라 밸브를 통해서도 유량 조절이 가능하도록 하였다.

가열 시험부의 양단은 열전도 계수를 고려하여 길이가 190 mm 및 폭이 20 mm 인 구리로 제작된 가열판을 은납땜하여서 전원부에서 공급되는 전력이 가열시험부에 전달되도록 하였다.

## 2.2 실험 방법

본 연구에서는 알케인류의 일종인 로릭산을 요소 수지와 젤라틴을 이용하여 삼중으로 피복을 입힌, 입자 직경이 각각 25, 50, 100, 200  $\mu\text{m}$  인 미립피복 로릭산을 운반 유체인 물에 일종 농도

로 분산시켜 슬러리로 만들어 사용하였으며, *table.1*에 실험 조건을 나타내었다.

실험은 로릭산의 상태를 고려하여, 시험부의 입구 및 출구 온도가 로릭산의 용융 온도 보다 낮아 로릭산이 유동 시에 고체 상태로만 존재하는 경우, 시험부의 입구 온도는 용융 온도 보다 낮고 출구 온도는 용융 온도 보다 높아 유동 시에 고체에서 액체로의 상변화를 수반하는 경우 그리고, 입구 및 출구 온도가 로릭산의 용융 온도 보다 높아 유동 시에 항상 액체 상태로 존재하는 경우로 나누어 수행하였다. 여기서 로릭산의 용융 온도는 46.4°C이다. 미립피복 로릭산의 첨가 농도는 실험에 사용된 슬러리를 일정량 샘플링한 후에 슬러리의 전체 질량과 수분이 제거된 미립피복 로릭산의 질량을 각각 측정하여 질량비로 나타낸 것이다.

Table. 1 Experimental conditions

Input power (W)	110 - 182
Inlet temperatur of slurry (°C)	11.9 - 52.6
Outlet temperature of slurry (°C)	29.9 - 74.9
Reynolds number	160 - 840
Mass fraction (%)	5 - 18
Mass flow rate (g/s)	0.9 - 1.7

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 국소 누셀트 수

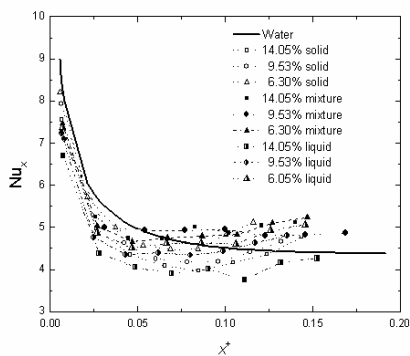
*Fig. 2*는 층류 영역에서의 입자 직경이 각각 25, 50, 100 및 200  $\mu\text{m}$  인 미립피복 로릭산 슬러리들의 국소 누셀트 수를 시험부로 부터 유동 방향으로의 거리인  $x$ 를 무차원화한 변수인  $x^+$ 에 따라 도시한 것이고,  $x^+$ 의 정의는 다음과 같다.

$$x^+ = \frac{2x/D}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \quad (1)$$

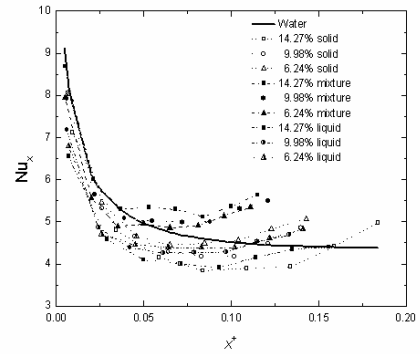
본 연구의 해석을 위해 사용된 레이놀드 수와 프란틀 수는 미립피복 로릭산 슬러리의 점도와 유효 열용량을 직접 측정<sup>(7)</sup>하여 얻은 값을 이용한 값이며, 슬러리의 밀도는 문헌에 제시된 로릭산의 밀도를 온도에 따라 보간하여 평균한 값을 사용하였다. 그림에서 실선으로 나타낸 곡선은 층류 영역에서 물의 국소 누셀트 수를 이론적<sup>(8)</sup>으로 얻은 결과이고, %는 미립피복 로릭산의 첨가 농도를 나타낸다. 도시된 *solid*, *mixture* 및 *liquid*는 슬러리가 관내를 유동할 때에 로릭산의 상태를 나타낸 것으로 고체 상태의 경우, 고체에서 액체로 용융 과정을 거칠 경우, 그리고 액체 상태로만 존재할 경우를 나타낸다.

이론적인 국소 누셀트 수는 급격히 감소하는 구간을 거친 후에 서서히 감소하여 4.364에 수렴하는 경향을 나타내는 반면에, 슬러리의 경우는 급격히 감소하는 구간을 거친 후에 다소 불규칙하게 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 슬러리가 지속적으로 가열됨에 따라 반지름 방향으로 뿐만아니라 유동 방향으로도 슬러리의 물성치들이 지속적으로 변화하는 재발달 효과(*redeveloping effect*)에 의한 것으로 추정되며, 따라서 일정한 값으로 수렴하는 경향은 나타나지 않는 것으로 해석되어진다.

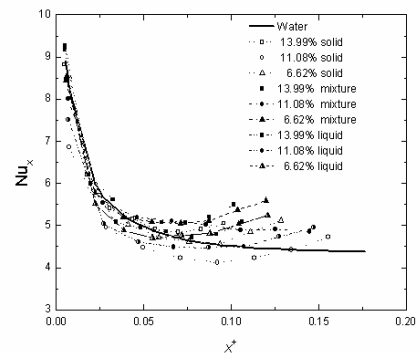
동일 농도에서의 입자 크기에 따른 경향을 살펴보면, 로릭산의 상태에 무관하게 입자 크기가 클수록 국소 누셀트 수도 비선형적으로 크게 나타났으며, 용융 과정을 거칠 경우에 더욱 크게 나타났다. 이러한 경향은 입자 주위에서 발생하는



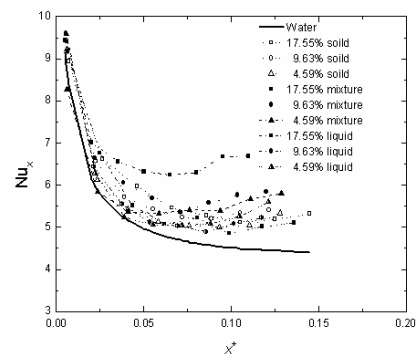
(a) 25  $\mu\text{m}$



(b) 50  $\mu\text{m}$



(c) 100  $\mu\text{m}$



(d) 200  $\mu\text{m}$

Fig. 2 Local Nusselt number for in laminar flow for MC-lauric acid slurry

미소 대류 열전달에 기인한 것으로 입자 크기가 증가할수록 입자 주위에 미소 대류가 크게 형성되며, 이에 따라 국소 누셀트 수가 비선형적으로 증가한 것으로 추정된다. 또한 용융 과정을 거칠 경우에는 잠열에 의한 영향으로 용융 과정을 거

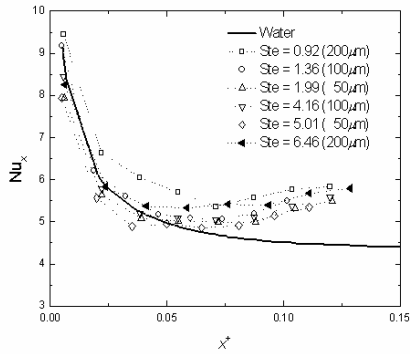


Fig. 3 Local Nusselt number with various stefan number for MC-lauric acid slurry

치지 않는 경우에 비해 크게 나타난 것으로 해석되어진다.

Fig. 3은 용융 과정을 거칠 경우에 잠열과 현열의 영향에 대한 비를 나타내는 스테판 수 변화에 따른 국소 누셀트 수의 변화를 도시한 것이며, 스테판 수<sup>(9)</sup>의 정의는 다음과 같다.

$$Ste = \frac{C_{eff} \cdot |T_w - MT|}{\Phi \cdot \lambda \cdot (\rho_p / \rho_s)} \quad (2)$$

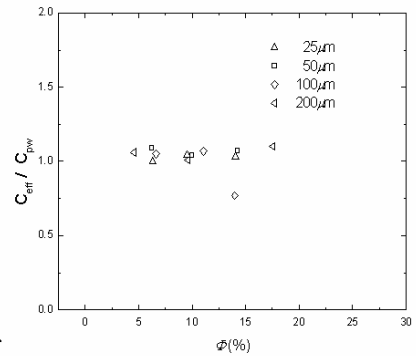
전체적으로 스테판 수가 감소할수록 국소 누셀트 수는 증가하는 경향을 나타내었다. 스테판 수의 감소는 잠열의 영향의 증가를 나타내며, 이는 첨가 농도의 증가를 나타낸다. 따라서 첨가된 미립 피복 로릭산의 농도가 클수록 국소 누셀트 수가 증가하는 것으로 해석되어진다. 그러나 스테판 수가 가장 큰 6.46인 경우에 국소 누셀트 수가 크게 나타난 것은 입자 크기에 따른 영향으로 다른 경우에 비해 입자 크기가 200 µm 로 가장 크기 때문이다.

### 3.2 유효 열용량

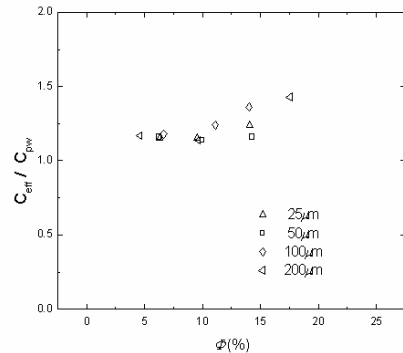
상변화물질 슬러리의 가장 큰 특징은 잠열의 영향에 따른 유효 열용량의 증가를 들 수 있으며, 유효 열용량의 정의는 물의 비열과 유사한 개념으로 다음과 같다.

$$C_{eff} = \frac{Q}{\dot{m} (T_{s,o} - T_{s,i})} \quad (3)$$

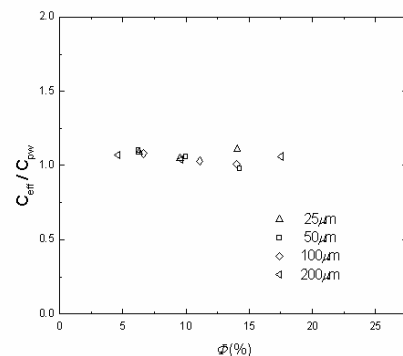
Fig.4는 슬러리의 유효 열용량과 동일한 조건에서의 물의 열용량과의 비를 첨가 농도 변화에 따라 도시한 것이다. (a)와 (c)의 경우는 상변화 과



(a) Solid



(b) Mixture



(c) Liquid

Fig. 4 The effective thermal capacity ratio with various mass fraction

정을 거치지 않을 경우를 나타낸 것으로 첨가 농도와 무관하게 1 부근의 값을 나타내어 물의 경우와 거의 같은 값을 나타낸 반면에, (b)의 경우는 용융 과정을 거치는 경우로 최고 50% 증가한 값을 나타내었고 첨가 농도가 증가할수록 유효 열용량 또한 증가하였다

#### 4. 결 론

입자 직경이 다른 미립피복 로릭산 슬러리를 이용한 층류 영역에서의 관내 대류 열전달에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 슬러리의 국소 누셀트 수는 입자 크기가 증가할수록 비선형적으로 증가하였으며, 이는 미소 대류 열전달에 의한 것으로 미소 대류 열전달은 입자 크기가 증가할수록 비선형적으로 증가하였다.
- (2) 슬러리의 국소 누셀트 수는 스테판 수가 감소 할수록 증가하였으며, 이는 첨가 농도 증가에 따른 잠열의 영향의 증가 때문이다.
- (3) 슬러리의 유효 열용량은 용융 과정을 거칠 경우에 최고 50% 증가 하였으며, 첨가 농도가 증가 할수록 유효 열용량 또한 증가 하였다.

#### 참고문헌

- (1) Choi, E., 1998, "Formation of a paraffin slurry and its convective heat transfer in a circular pipe," *Korean Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 50~60.
- (2) 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," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 47~51.
- (3) Charunyakorn, P., Sengupta, S., and Roy, S. K., 1991, "Forced convection heat transfer in microencapsulated phase change material slurries: flow in circular ducts," *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 3, pp. 819~833.
- (4) Knodel, B. D., 1988, "Pressure drop and heat transfer in turbulent ice-water slurries in horizontal pipes," *MS thesis*, Illinois university, USA.
- (5) Charunyakorn, P., Sengupta, S., and Roy, S. K., 1991, "Forced convection heat transfer in microencapsulated phase change material slurries: flow in circular ducts," *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 3, pp. 819~833.
- (6) Inaba, H., 1997, "Current status of research on functionally thermal fluid-new challenge in advanced thermal energy storage and thermal energy transportation-Experimental Heat Transfer," *Fluids Mechanics and Thermodynamics*.
- (7) Choi, E. S. and Kim, J. W., 1997, "Viscosity of slurry of microencapsulated lauric acid in various sizes measured by a rotating-cylinder viscometer," *Proceedings of the KSME Autumn Annual Meeting*, pp. 552~557.
- (8) Kays, W. M. and Crawford, M. E., 1980, *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York, pp. 132~134.
- (9) 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*,