

미립피복 로릭산 슬러리의 층류 관내 대류 열전달에 관한 연구

최 은 수[†], 정 동 주^{*}

명지대학교 기계공학과, *명지대학교 열공학실험실

A Study on Convective Heat Transfer of Microcapsulated Lauric Acid Slurry in Laminar Flows Through a Circular Pipe

Eunsoo Choi[†], Dongju Jung^{*}

Department of Mechanical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

*Thermal Engineering Laboratory, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

(Received July 30, 2003; revision received September 30, 2004)

ABSTRACT: The objective of the present study is to reveal thermal characteristic of microcapsulated lauric acid slurry, which has high latent heat during phase change from solid to liquid, in circular pipe. Tests were performed with the microcapsulated lauric acid slurry in the heating test section with a constant heat flux boundary condition. Local Nusselt number and the effective thermal capacity were measured. As the sizes of microcapsulated lauric acids were increased, local Nusselt numbers of microcapsulated lauric acid slurries were increased. The effective thermal capacity of microcapsulated lauric acid slurry was 1.43 times larger than that of water.

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

기 호 설 명

C : 비열 [J/kg·K]

D : 관 내경 [m]

f : 관 마찰계수

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

Nu : Nusselt 수, hD/k

Pr : Prandtl 수, $\mu C/k$

Q : 슬러리에 공급된 열량 [W]

Re : Reynolds 수, $\rho V D/\mu$

T : 온도 [°C]

x : 관에서의 축방향 거리 [m]

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m³]

ϕ : 첨가농도 [%]

하첨자

0 : 출구

eff : 슬러리의 유효 열용량

i : 입구

pw : 물

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-335-2325; fax: +82-31-321-4959

E-mail address: choies@mju.ac.kr

s : 미립피복 로릭산 슬러리

1. 서 론

성능이 우수한 열전달 유체를 개발하는 작업의 하나로서, 열전달 유체의 열용량 및 열전달계수를 증가시키기 위하여, 열전달 유체의 한 종류인 물에 상변화 물질을 첨가하는 방법이 있다. 이러한 열전달 유체는 우선 고밀도 축열 및 축냉이 가능하고, 고밀도 열에너지의 고속 수송과 열에너지 수송시 요구되는 반송 동력의 감소를 위한 유동저항 감소, 열적 온도 이용폭의 확대와 이용열량의 증대 및 환경 친화적인 문제 등 여러 요구조건을 만족하여야만 한다. 최근 들어 이에 부합하는 새로운 열전달 유체로 상변화물질 슬러리(phase-change-material slurry)에 관한 연구⁽¹⁻⁷⁾가 최근 들어 진행되고 있다.

상변화물질 슬러리는 기존에 축열재료로 사용되었던 상변화물질을 유동이 가능한 미립입자로 만들어 운반유체에 분산시킨 것으로서, 현열뿐만 아니라 상변화시에 발생하는 잠열을 이용한 열전달계수의 증가와 미립입자 첨가에 따른 마찰계수의 감소를 위한 새로운 개념의 열전달 유체이다. 상변화물질 슬러리를 사용할 경우에 예측되는 효과로는 지역 난방시스템과 냉방시스템의 단일화에 따른 경제적 우위, 즉 난방 및 냉방 시스템에서의 난방수와 냉방수의 점도 및 에너지 밀도차이로 야기되는 분배시스템의 이원화 문제를 해결하여, 동일한 배관시스템에 여름철에는 냉방수를 겨울철에는 난방수를 공급하여 분배시스템의 일원화가 가능할 것으로 생각되며, 고밀도 에너지 열전달 유체의 사용으로 인해 수송되는 열전달 유체의 양이 크게 감소하여 배관 및 저장탱크의 크기와 반송 동력의 감소로 인한 경제적 우위를 점할 수 있을 것으로 예측된다. 뿐만 아니라, 소형화되는 전자부품의 새로운 냉각기술인 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 이상유동에 관한 연구로서 미국을 비롯한 몇몇 선진국가들에 의해 수행된 바는 있으나, 아직까지는 실험적 자료들이 정성적 그리고 정량

적으로 매우 부족하고, 이에 따른 이론적 배경 또한 미흡한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 상변화물질 슬러리의 일종인 미립피복 로릭산 슬러리를 이용한 층류 영역에서의 관내 대류 열전달 특성에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

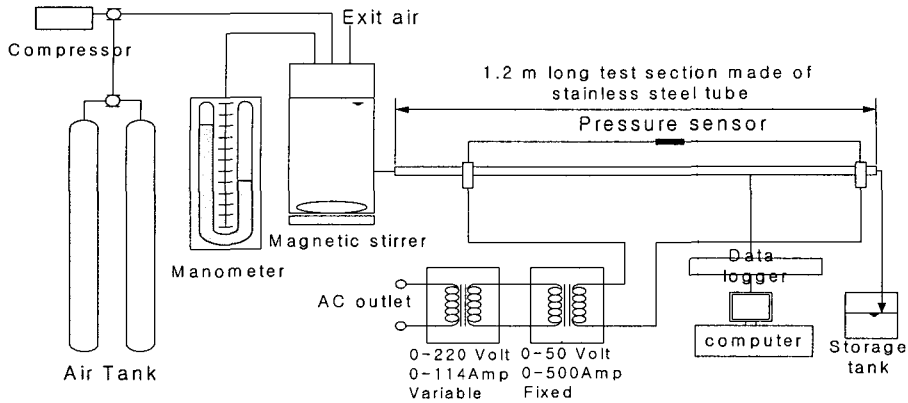
2.1 실험장치

Fig. 1(a)는 본 연구를 위해 제작된 일정 열유속을 경계조건으로 하는 관내 대류 열전달 장치의 개략도이다. 본 장치는 압력차에 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.

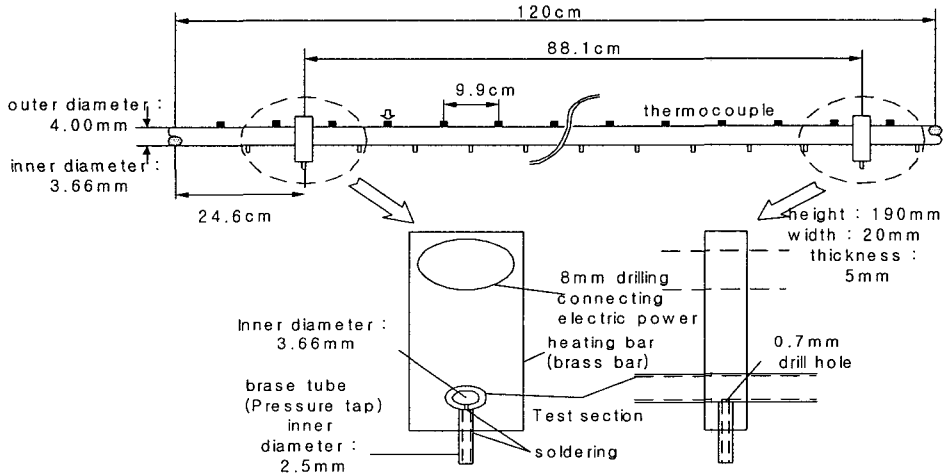
가압부는 압축기, 공기탱크 및 수은 마노미터로 구성되어 있으며, 공기탱크는 용기의 부피를 고려하여 압축공기가 충분히 안정적으로 시험부에 공급되도록 두 개를 연결하여 사용하였다.

저장부는 내경이 200 mm, 높이가 500 mm, 그리고 두께가 6.5 mm이며 스테인리스 스틸로 제작되었고, 저장부의 외벽에 원통형의 물 자켓(water jacket)을 설치하여 항온순환수조에서 나오는 일정온도의 물을 순환시킴으로써 저장부 내의 슬러리의 온도를 조절하였고, 온도변화를 고려하여 단열재를 사용하여 단열시켰다. 저장부 하단에 자석교반기를 설치하였으며, 용기 내부에서 자석막대가 회전하여 상변화 물질이 균질하게 운반유체에 섞일 수 있게 하였다. 이는 미립피복 상변화물질 슬러리의 밀도는 물의 밀도와 비슷하나 장시간 방치할 경우 약간의 밀도차에 의해 물에 뜨기 때문이다.

전원부는 전원공급장치와 대용량 슬라이닥스로 구성되어 있으며, 슬라이닥스의 최대 전압 및 전류는 각각 220 V 및 114 A이고, 전원 공급장치의 최대 전압 및 최대 전류는 각각 50 V 및 500 A이다. 전원부에서 공급되는 전력은 시험부의 양단에 연결된 공급용 플랜지를 통해 공급하여 시험부가 일정 열유속 경계조건이 되도록 하였다. 가열 시험부에 전달되는 전력을 측정하기 위하여 전원부와 가열판과의 연결전선에 전류계와 전압



(a) Schematic diagram of experimental apparatus



(b) Schematic diagram of test section and heating plate

Fig. 1 Schematic diagram of heat transfer experimental apparatus, test section and heating plate.

계를 설치하여 전류 및 전압을 측정하였다. 본 장치에 사용된 자료 인식부는 오메가 사의 Temscan 1000A 모델이다.

Fig. 1(b)는 관내 대류 열전달 실험장치의 시험부와 시험부에 연결된 가열판을 도시한 것이다. 시험부는 내경이 3.66 mm, 외경이 4 mm, 총 길이가 1.2 m인 스테인리스 스틸관으로 제작하였다. 시험부의 유체역학적 발달영역부는 시험부 입구에서부터 $x/D=47$ 가 되는 부분이다. 가열시험부는 전체 길이를 $x/D=237$ 로 하였고, 가열시험부의 외벽에는 총 9개의 T형 열전대를 $x/D=27$ 의 간격으로 설치하였으며, 외벽 온도를 측정 한 후, 관의 열전도계수를 이용하여 내벽 온도를 구하여 해석에 사용하였다. 시험부 끝은 밸브가 부착된 고무

튜브를 연결하였으며, 가해 주는 압력뿐만 아니라 밸브를 통해서도 유량조절이 가능하도록 하였다.

가열시험부의 양단은 열전도계수를 고려하여 길이가 190 mm 및 폭이 20 mm인 구리로 제작된 가열판을 은납땜하여서 전원부에서 공급되는 전력이 가열시험부에 전달되도록 하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 알케인류의 일종인 로릭산을 요소 수지와 젤라틴을 이용하여 삼중으로 피복을 입힌, 입자직경이 각각 25, 50, 100 및 200 μm 인 미립피복 로릭산⁽⁹⁾을 운반유체인 물에 일종 농도로 분산시켜 슬러리로 만들어 사용하였으며, Table 1

Table 1 Experimental conditions

Input power (W)	110~182
Inlet temperature 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

에 실험조건을 나타내었다.

실험은 로릭산의 상태를 고려하여, 시험부의 입구 및 출구 온도가 로릭산의 용융온도보다 낮아 로릭산이 유동시에 고체상태로만 존재하는 경우, 시험부의 입구온도는 용융온도보다 낮고 출구온도는 용융온도보다 높아 유동시에 고체에서 액체로의 상변화를 수반하는 경우, 그리고 입구 및 출구 온도가 로릭산의 용융온도보다 높아 유동시에 항상 액체상태로 존재하는 경우로 나누어 수행하였다. 여기서 로릭산의 용융온도⁽⁹⁾는 46.4°C이다. 미립피복 로릭산의 첨가농도는 실험에 사용된 슬러리를 일정량 샘플링한 후에 슬러리의 전체 질량과 수분이 제거된 미립피복 로릭산의 질량을 각각 측정하여 질량비로 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 관 마찰계수

본 연구에서 측정된 관 마찰계수는 시험부 양단에서의 압력차를 무차원화한 것으로서 Fig. 2에 나타내었다. 5, 10 및 15%는 미립피복 로릭산의

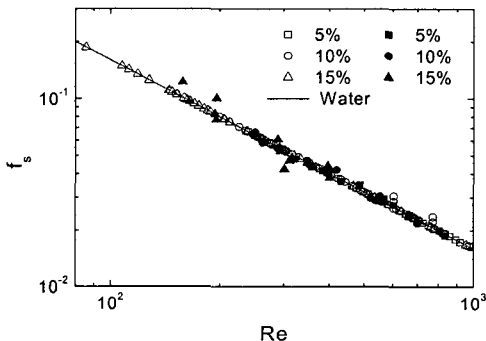


Fig. 2 Friction coefficients of slurries with various fractions.

첨가농도를 나타낸 것이고, Open mark는 캡슐 속에 고체 로릭산이 존재하는 경우이며, Solid mark는 캡슐 속에서 로릭산이 고체에서 액체로 상변화를 수반하는 경우이다. 또한 층류에서의 관 마찰계수는 잘 알려져 있는 바와 같이 16/Re로서 Fig. 2에서는 직선으로 나타내었다. 첨가농도 변화가 마찰계수에 미치는 영향은 본 실험조건에서는 거의 나타나지 않았고, 캡슐 속의 로릭산의 용융상태 또한 영향을 미치지 않는 것으로 나타나서, 결국 세 경우 모두 16/Re의 직선과 거의 일치함을 알 수 있었다.

3.2 국소 누셀트 수

Fig. 3은 층류영역에서의 입자 직경이 각각 25, 50, 100 및 200 μm인 미립피복 로릭산 슬러리들의 국소 누셀트 수를 시험부로부터 유동방향으로의 거리인 x를 무차원화한 변수인 x⁺에 따라 도시한 것이고, x⁺의 정의는 다음과 같다.

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

그림에 도시된 x⁺의 구간은 앞서 설명한 가열 시험부의 전 구간을 나타내는 것으로서 비록 동일한 시험관 위치를 가지고 있으나, 슬러리의 레이놀드 수와 프란틀 수에 따라 각 구간별로 차이를 나타낸다. 본 연구의 해석을 위해 사용된 레이놀드 수와 프란틀 수는 미립피복 로릭산 슬러리의 점도와 유효 열용량을 직접 측정⁽⁶⁾하여 얻은 값을 이용한 값이며, 슬러리의 밀도는 문헌에 제시된 로릭산의 밀도를 온도에 따라 보간하여 평균한 값을 사용하였다. 그림에서 실선으로 나타낸 곡선은 층류영역에서 물의 국소 누셀트 수를 이론적⁽⁸⁾으로 얻은 결과이며 4.364에 수렴한다. 도시된 %는 미립피복 로릭산의 첨가농도를 나타내며, solid, mixture 및 liquid는 슬러리가 관내를 유동할 때에 로릭산의 상태를 나타낸 것으로서, 고체상태의 경우, 고체에서 액체로 용융과정을 거칠 경우, 그리고 액체상태로만 존재할 경우를 나타낸다. 또한 각각의 그림에 도시된 국소 누셀트 수의 범위는 이론적으로 열적으로 완전 발달된 구간 이후에서 측정된 최소 및 최대 국소 누셀트 수의 범위를 나타낸 것이다.

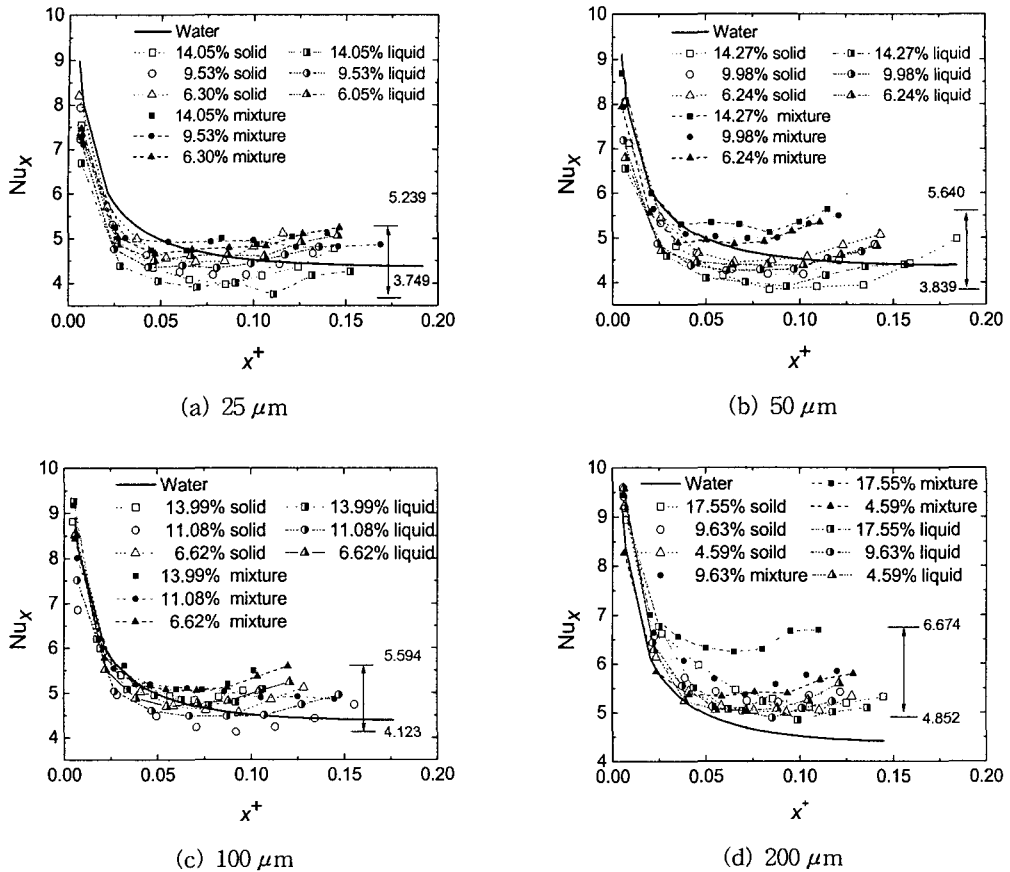


Fig. 3 Local Nusselt numbers of slurries with various capsule sizes.

이론적으로 밝혀진 물의 국소 누셀트 수는 처음에는 급격히 감소하다 점차 감소의 폭이 작아지고 결국 일정한 값에 수렴하는 것으로 알려져 있으나, 그림에 도시된 바와 같이 캡슐의 크기와 무관하게 모든 슬러리의 경우 급격히 감소하는 구간을 지나 이론적으로 열적으로 완전 발달된 구간에서도 불규칙한 값들이 측정되어 일정한 값으로 수렴되지 않는 것으로 나타났다. 이는 가열에 의한 지속적인 물성치 변화에 따른 재발달 영역의 형성과 그 영향에 기인한 것으로 추정되고, 따라서 시험부 길이가 충분히 길더라도 재발달 영역의 형성으로 인해 일정한 값에 수렴하는 경향은 나타나지 않을 것으로 추정된다.

캡슐의 크기가 클수록 전체적으로 국소 누셀트 수가 큰 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 입자 주위에서 발생하는 미소 대류 열전달에 기인한 것으로, 입자크기가 클수록 입자 주위에 미소 대류가 크게 형성되며, 이에 따라 국소 누셀트 수가

증가한 것으로 추정된다. 반면에 입자의 크기가 작으면 이론값보다 오히려 누셀트 수가 작은 것은, 물보다 캡슐이 열전달 측면에서는 열등함을 나타낸다고 할 수 있다. 즉, 캡슐의 열전도계수가 물보다 열등하기 때문이다.

캡슐 속의 로릭산의 상태에 따른 국소 누셀트 수의 영향을 살펴보면, 캡슐 속의 로릭산이 용융하는 경우에는 캡슐의 크기에 관계없이 상변화를 수반하지 않는 경우의 국소 누셀트 수에 비해 크게 나타났으며, 이는 로릭산의 고체에서 액체로의 상변화시 수반되는 잠열이 누셀트 수를 상승시키기 때문이다. 열전달 유체의 잠열이 누셀트 수를 증가시킬 수 있는지는 아직 명확히 알려지지 않았으나, 본 실험의 경우에는 명확해 보인다.

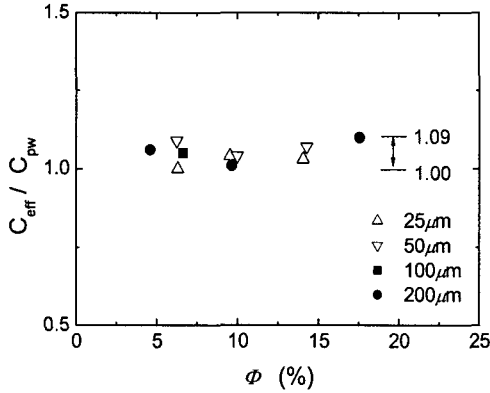
첨가농도 변화에 따른 국소 누셀트 수는 상변화를 수반하는 경우에는 첨가농도가 증가할수록 누셀트 수 또한 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.

3.3 유효 열용량

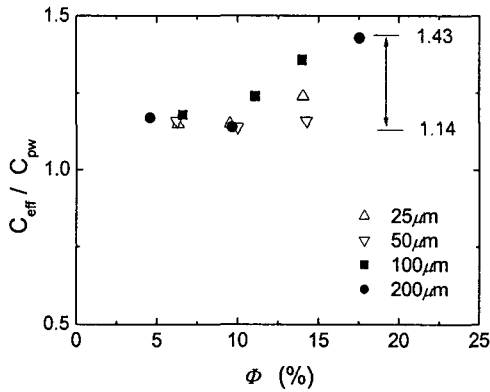
상변화물질 슬러리의 가장 큰 특징은 잠열의

영향에 따른 유효 열용량의 증가를 들 수 있으며, 유효 열용량의 정의는 비열과 유사한 개념으로 다음과 같다.⁽²⁾

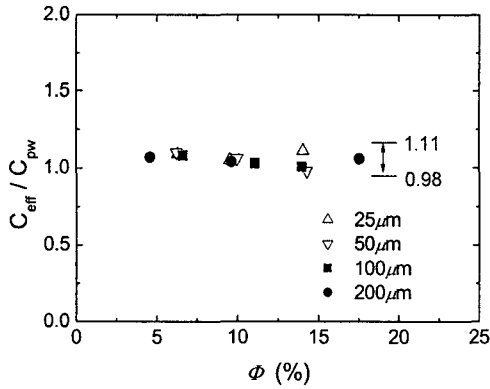
$$C_{eff} = \frac{Q}{\dot{m}(T_{s,o} - T_{s,i})} \quad (2)$$



(a) Solid



(b) Mixture



(c) Liquid

단일 상의 경우에는 온도가 변하여도 비열이 거의 변하지 않으므로 측정의 온도범위가 변하여도 문제가 될 것이 없으나, 물질이 상변화하는 경우에는 측정의 온도범위에 따라 유효 열용량이 크게 변할 수 있다. 시험부 입구 및 출구에서의 온도차가 작으면 작을수록 유효 열용량은 크게 측정된다. Fig. 4는 슬러리의 유효 열용량과 동일한 조건에서의 물의 열용량과의 비를 첨가농도 변화에 따라 도시한 것이다. (a)와 (c)의 경우는 상변화 과정을 거치지 않은 경우를 나타낸 것으로서, 첨가농도와 무관하게 1 부근의 값을 나타내어 물의 경우와 거의 같은 값을 나타낸 반면에, (b)의 경우는 용융과정을 거치는 경우로 캡슐크기와 첨가농도에 따라 다소 차이가 나타나며, 전체적으로 14%에서 43%까지 증가한 값을 나타내었고, 첨가농도가 증가할수록 유효 열용량 또한 증가하였다. 그러나 첨가농도의 증가에 따라 유효 열용량이 선형적으로 증가하지는 않는데, 이는 앞서 언급한 것과 같이 시험부 입구 및 출구의 온도차에 따라 달리 해석될 수 있기 때문이다.

4. 결론

입자 직경이 25, 50, 100 및 200 μm 인 미립피복 로릭산 슬러리를 이용한 층류영역에서의 관내 대류 열전달에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 슬러리의 관 마찰계수는 일반적인 층류 관 마찰계수로 사용되는 $16/Re$ 와 거의 일치하였다.
- (2) 슬러리의 국소 누셀트 수는 입자가 클수록 증가하였으며, 캡슐 속의 로릭산이 용융할 때 커짐을 알 수 있었다.
- (3) 슬러리의 유효 열용량은 용융과정을 거칠 경우에 14%에서 43%까지 증가하였으며, 이때 첨가농도가 증가할수록 유효 열용량 또한 증가하였다.

Fig. 4 The effective thermal capacity ratio of slurries with various fractions.

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, Micro-convective thermal conductivity in disperse two-phase mixtures as observed in a low velocity Couette flow experiment, *ASME J. 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, University of Illinois, U.S.A.
5. 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*.
6. 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.
7. Colvin, D. P., Mulligan, J. C. and Bryant, Y. G., 1992, Enhanced heat transfer in environmental systems using microcapsulated phase change materials, *22nd International Conference on Environmental Systems*.
8. Kays, W. M. and Crawford, M. E., 1980, *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York, pp. 132-134.
9. Choi, E. S., 2001, Phase-change temperature of Micro-encapsulated phase-change material, *Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 168-174.