

잠열 마이크로캡슐 슬러리의 열전달 특성

김 명 준^{*}, 박 기 원^{*}

군산대학교 동력기계시스템공학전공, 전남대학교 냉동공학과

Heat Transfer Characteristics of Micro-encapsulated Phase-Change-Material Slurry

Myoung-Jun Kim^{*}, Ki-Won Park^{*}

Department of Power System Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

**Department of Refrigeration Engineering, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea*

(Received January 9, 2006; revision received May 22, 2006)

ABSTRACT: The present experiments have been performed for obtaining the melting heat transfer characteristics of micro-encapsulated solid-liquid phase-change material and water mixture slurry flow in a circular tube heated with constant wall heat flux. The phase change material having a low melting point was selected for a domestic cooling system in the present study. The governing parameters were found to be latent heat material concentration, heat flux, and the slurry velocity. The experimental results revealed that the increase of tube wall temperature of latent microcapsule slurry was lower than that of water caused by the heat absorption of fusion.

Key words: Solid-liquid phase change(고-액 상변화), Melting heat transfer(용해열전달), Latent heat microcapsule water slurry(잠열 마이크로캡슐 슬러리), Constant wall heat flux(관 벽 열유속)

기 호 설 명

A : 파이프 단면적 [m^2]
 C : 상변화물질 입자의 질량농도
 C_p : 비열 [$kJ/kg \cdot K$]
 D : 파이프 직경 [m]
 d : 마이크로캡슐 직경 [m]
 f : 관마찰계수
 Gz : Graetz 수($Re \cdot Pr \cdot D/x$)
 h : 열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]
 L : 상변화물질의 잠열 [kJ/kg]

l : 길이 [m]
 P : 압력 [Pa]
 Pr : Prandtl 수
 Q : 열교환량 [kW]
 q : 열유속 [kW/m^2]
 Ra : Rayleigh 수
 Re : Reynolds 수
 T : 온도 [K]
 u : 유속 [m/s]
 x : x-방향 위치 [m], 국소

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]

* Corresponding author

Tel.: +82-63-469-1849; fax: +82-63-469-1849

E-mail address: mjkim@kunsan.ac.kr

하첨자

- b : 혼합유체(PCM 슬러리)
- hw : 가열벽
- m : 용해, 평균
- t : 테트라데칸
- te : 시험부
- w : 물

1. 서 론

미세한 고액 상변화 잠열 축열재를 액체 열유체와 혼합한 슬러리상태의 잠열 축열재는 고밀도 축열 및 유동성을 가지고 있기 때문에 기능성 열유체로서 주목을 받고 있다.⁽¹⁾ 특히, 융점이 얼음보다 높은 파라핀계의 잠열 축열재를 미세화시켜 물과 혼합한 잠열 에멀전⁽²⁾이나 잠열 마이크로캡슐⁽³⁻⁴⁾의 이용은 열원기인 냉동기의 성적계수를 향상시킬 수 있게 된다. 파라핀과 같은 고액 상변화 잠열 축열재를 입자경이 수 마이크로미터의 크기로 캡슐화시킨 후 물과 혼합한 슬러리상태의 열유체는 분산되어 있는 입자경이 상당히 작기 때문에 분산성이 좋으며 고밀도의 잠열 축열과 열의 이송이 동시에 가능하게 되어 최근에 들어 기능성 열유체로 각광을 받고 있다.⁽¹⁾ 잠열 축열재로 사용된 파라핀은 그 종류 및 슬러리에 분산되어 있는 파라핀의 질량농도를 변화시켜 이용 가능한 온도(융점)와 잠열 축열량을 임의로 설정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 한편, 이러한 잠열 마이크로캡슐 슬러리(잠열슬러리)는 질량농도의 증가에 따라 점성이 크게 증가하는 단점을 가지고 있어 유송시 펌프동력의 상승을 초래한다.

본 연구는 새로운 기능성 열유체로 주목을 받고 있는 잠열 슬러리에 대한 실험을 통해 잠열 슬러리의 관내 용해 열전달 특성에 영향을 미치는 평균 유속과 질량농도, 그리고 관 벽면으로부터 공급되는 열유속 등의 효과를 파악하는 것이다.

2. 잠열 슬러리의 특성

본 연구에서 대상으로 하는 잠열 슬러리는 미세화된 파라핀계 물질인 n-테트라데칸(융점 $T_m = 278.9\text{ K}$, 잠열량 $L_f = 229\text{ kJ/kg}$)을 매라닌수지를 이용한 막으로 도포하여 만든 것으로 Fig. 1에 나



Fig. 1 External appearance of PCM slurry.

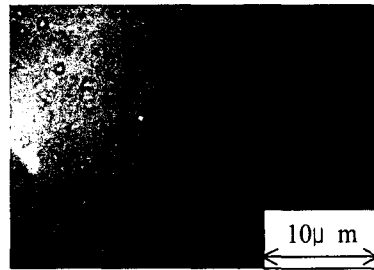


Fig. 2 Microphotograph of PCM slurry.

타낸 것과 같이, 유동성을 가지는 유백색의 액체이다. 광학현미경을 이용해 잠열 마이크로캡슐의 입자형상을 관찰한 결과 Fig. 2에 나타난 것과 같이 균일한 크기의 구형상태임을 알 수 있다. 또한 입자경 d 는 입도분포 측정결과로부터 $0.5 \sim 2.5\ \mu\text{m}$ 의 범위에 존재하고 있으며, 평균 입자경은 $1.5\ \mu\text{m}$ 였다. Table 1에는 본 실험의 범위를 나타내고 있다. 그리고, 종래의 연구⁽⁵⁾를 바탕으로 각 물성치를 측정할 결과 잠열 축열재의 파생각현상은 관찰되지 않았다. 또한, 잠열 슬러리의 물과 상변화물질인 미세캡슐화된 n-테트라데칸 입자와의 상분리에 대한 정도를 측정할 것을 분산안정성이라 정의하였고, 측정할 결과 정지상태

Table 1 Experimental range

Heat flux, q_{hw} [kW/m ²]	1.3~2.1
Concentration, C_b [-]	0.1~0.4
Velocity, u_b [m/s]	0.01~0.1
Latent heat material	n-tetradecane
Pipe diameter, D [m]	0.015
Latent heat, L_f [kJ/kg]	229
Melting point [K]	278.9
Particle diameter, d_m [m]	1.5×10^{-6}

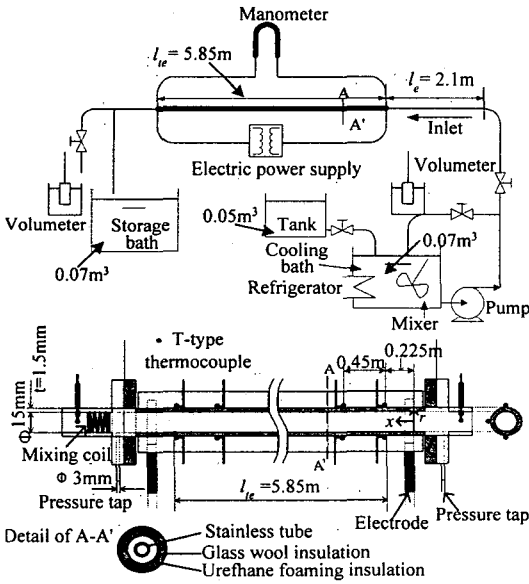


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus.

에서 약 3,000시간 이상 동안 n-테트라데칸 입자가 부유하지 않는 정도의 양호한 분산안정성을 가지고 있으며, 2년에 걸친 실험기간 동안 잠열 축열재를 싸고 있는 캡슐의 파괴는 관찰되지 않았다. 본 논문에서 사용한 실험인자 중 질량농도는 Fig. 3의 냉각조 내에 저장되어 있는 잠열 슬러리의 분산매체인 물의 질량과 분산질인 잠열 마이크로캡슐과의 질량비를 말한다.

잠열 슬러리의 분산매체로 사용된 물은 일반적인 수돗물을 사용하였으며 잠열 슬러리의 물성은 저자의 종래의 연구⁽⁵⁾에서 구해진 값을 사용하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 3은 잠열 슬러리의 축열(용해) 실험장치의 개략을 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 실험장치는 크게 수평으로 놓여 있는 가열 원관 시험부, 잠열 슬러리의 저장탱크 및 배관 계통으로 구성되어 있다. 그림의 하부에는 가열 원관 시험부의 단면을 나타내고 있다. 원관 시험부 입구인 $x=0.225$ m 위치에서부터 0.45 m 간격으로 T형 열전대를 시험부의 상·하·측면에 부착시켜 온도를 측정하였으며, 온도의 변화가 시간에 대하여 약 1시간 이상 일정하게 되었을 때 정상상태로 가정하여 그 평균값을 관벽온도 T_{hw} 로

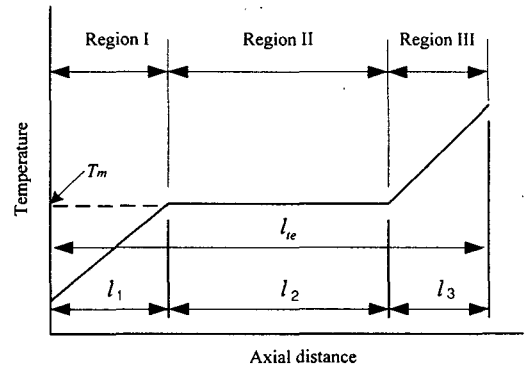


Fig. 4 Model for bulk mean temperature of microcapsule water slurry.

하였다. 그리고 Fig. 4에 나타난 바와 같이 각 온도영역에 대하여 열에너지 평형식⁽⁶⁾으로부터 관내 잠열 슬러리의 혼합 평균 온도 T_b 를 산출하였다. 실제의 경우는 Region II와 같은 수평의 온도구간이 존재하기 어렵지만 본 연구에서는 해석의 편의를 위해 참고문헌⁽⁶⁾의 열평형식을 인용하였다.

Region I의 혼합 평균 유체온도

$$T_b(x) = T_{in} + \frac{Q}{\rho_w C_w u_b A C p_w + \rho_i C_i u_b A C p_i} \frac{x}{l_e}$$

Region I의 거리 l_1 산출

$$\frac{l_1}{l_e} = \frac{(\rho_w C_w u_b A C p_w + \rho_i C_i u_b A C p_i)(T_m - T_b)}{Q}$$

Region II의 혼합 평균 유체온도

$$T_b(x) = T_m$$

Region II의 거리 l_2 산출

$$\frac{l_2}{l_e} = \frac{\rho_i C_i u_b A L_i}{Q}$$

Region III의 혼합 평균 유체온도

$$T_b(x) = T_m + \frac{Q(x - l_1 - l_2)}{(\rho_w C_w u_b A C p_w + \rho_i C_i u_b A C p_i) l_e}$$

Region III의 거리 l_3 산출

$$\frac{l_3}{l_{te}} = 1 - \frac{l_1 + l_2}{l_{te}}$$

여기서, $C_t = C_b(73.4/100)$, 즉 C_t 는 테트라데칸의 질량비율로서 참고문헌⁽⁵⁾의 잠열량 측정결과로부터 마이크로캡슐의 피복재인 멜라닌수지와 상변화물질인 테트라데칸과의 비율이 약 26.6 : 73.4인 것으로부터 산출한 n-테트라데칸만의 질량비율을 말한다.

원관 시험부 상부에는 발달한 잠열 슬러리의 유동을 유도하기 위한 발달구간($l_e = 2.1$ m)이 설치되어 있다. 원관 시험부의 압력손실 ΔP 를 측정하기 위하여 직경 3mm의 압력탭을 시험부 전후의 플랜지에 설치하여 그 차압을 마노메타를 통해서 측정하였다. 또한 시험부로부터 주위로의 열손실을 차단하기 위하여 두께 20mm의 글라스울 단열재와 30mm 두께의 발포타입 단열재를 2층으로 설치하여 최소화시켰다. 결과적으로 잠열 슬러리에 전달되는 열량의 3% 이내의 극소량의 열손실이 발생했다. 본 실험에 사용한 열전대의 검증은 표준온도계를 사용하여 행했으며, ± 0.1 K의 정도로 교정이 가능하였다. 시험부의 출구 측에는 동코일이 설치되어 있어, 충분히 혼합된 잠열 슬러리의 평균 출구온도 T_{bout} 를 측정하였다. 원관 시험부의 열전달에 관한 측정 정도를 검토하기 위해 같은 열유속 가열조건에서 물을 이용하여 열전달률을 측정한 결과, Fig.5에 나타낸 바와 같이 종래의 연구⁽⁷⁾와 비교해 $\pm 3\%$ 이내에서 일치하는 결과를 얻었다. 따라서 본 실험장치 및 측정부의 정밀도는 충분한 것으로 판단된다.

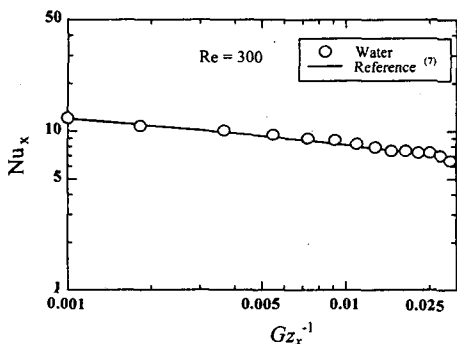


Fig. 5 Measuring accuracy of heat transfer.

실험방법으로서는 먼저 Fig.3에 나타낸 냉동기에 의해 잠열 슬러리를 용점($T_m = 278.9$ K) 이하의 온도까지 조절한 다음, 교반기를 이용해 충분히 잠열 슬러리를 혼합시켜 잠열 축열재인 n-테트라데칸이 고상영역에 도달하였음을 체적계를 이용한 밀도의 측정으로부터 확인한 후 인버터를 이용한 펌프의 회전수와 바이패스 밸브를 이용하여 유량을 일정하게 조절한다. 체적계에 의한 상변화 측정은 2페이지에서 전술한 잠열 슬러리의 물성 측정⁽⁶⁾방법 중 밀도를 측정하기 위해 사용한 방법으로서 그 원리는 시료인 잠열 슬러리의 체적팽창을 이용한 것이다. 즉, 냉각조(cooling bath) 내의 잠열 슬러리의 온도가 테트라데칸의 고상온도($T_m = 278.9$ K) 이하 영역까지 내려갔음을 열전대로 확인한 후, 잠열 슬러리를 Fig.6의 체적계에 넣은 후 항온조의 온도를 상승시켜 체적팽창률을 측정하여 상변화를 산출하였다. 잠열 슬러리의 밀도변화에 대한 데이터를 기존의 연구결과⁽⁵⁾로부터 확보하고 있어 상변화도(고상 정도)를 산출할 수 있다.

잠열 슬러리가 일정한 유속으로 시험부를 유동하기 시작하면, 전원공급장치를 이용하여 소정의 열유속으로 가열되도록 전원을 공급한다. 잠열 슬러리의 입구온도 $T_{bin} = 278.5$ K로 일정하게 유지하였고, 서브쿨도는 $\Delta T_s = T_m - T_{bin} = 0.4$ K로 잠열 슬러리의 입구온도조건으로 하였다. 또한 한번 시험부를 통과한 잠열 슬러리는 온도가 상승해 있기 때문에 재순환시키지 않고 별도의 저장탱크

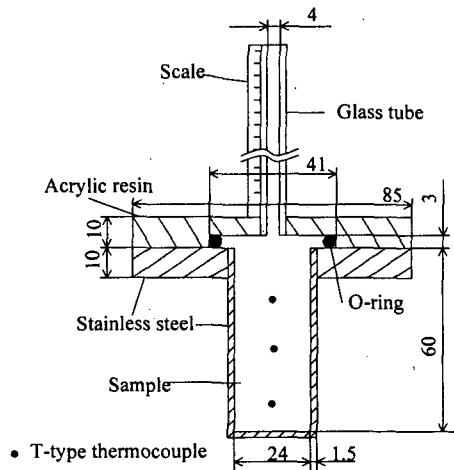


Fig. 6 Volumeter.

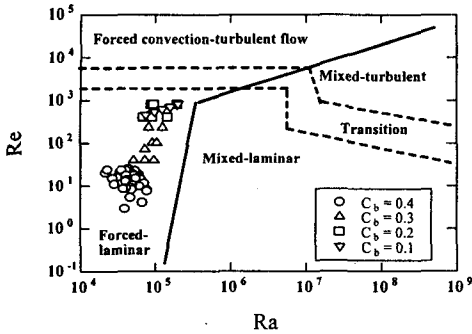


Fig. 7 Relationship between Re and Ra.

로 유도하였다. 원관 가열 시험부를 통과한 잠열 슬러리의 상변화도(고상-액상)를 측정하기 위해 시험부 출구에 설치한 취출구를 통해 약간의 잠열 슬러리를 채취한 후 체적계에 넣어 항온조 내에 설치한 후 입구 측으로부터 채취한 잠열 슬러리와와 체적팽창률로 상변화도를 산출하였다. 또한 측정하여 구한 상변화도와 에너지평형식을 이용하여 관내의 상변화 완료위치 l_c 를 구하였다.

Fig. 7은 본 실험의 범위인 레이놀즈(Reynolds) 수 Re와 자연대류의 강도를 나타내는 레일리히(Rayleigh) 수 Ra의 관계를 나타낸 것으로, 유동상태의 구분은 Metais et al.⁽⁸⁾에 의한 것이다. 종래의 유동영역구분으로부터 본 실험의 범위는 강제대류가 지배적인 층류영역임을 알 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 관마찰계수 f

Fig. 8은 시험부에 잠열 슬러리를 유동시킨 경

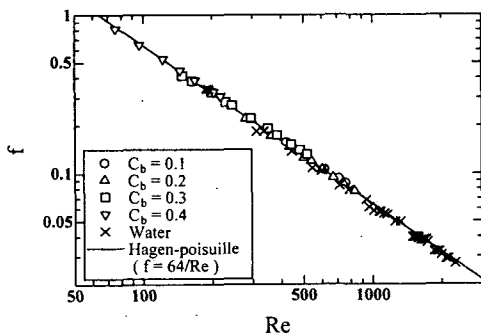


Fig. 8 Variation of f with Re.

우의 관마찰계수 f 와 레이놀즈수 Re와의 측정결과를 나타낸 것이다. 실선은 Hagen-Poiseuille의 관계식이고 \times 심볼은 물의 측정데이터를 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있는 것과 같이 물의 측정데이터는 Hagen-Poiseuille의 관계식과 최대편차 $\pm 5\%$ 이내에서 일치하고 있다. 따라서 압력손실을 측정하기 위한 본 실험장치의 정밀도는 충분하다고 할 수 있다. 잠열 슬러리의 경우 잠열 축열재의 농도가 증가할수록 비뉴턴성(점성지수 $n=0.97\sim 0.92$)이 약간 증가하지만, 관마찰계수값은 뉴턴유체의 관계식인 Hagen-Poiseuille의 식과 거의 일치하는 관계에 있다. 본 실험의 범위 내(느린 유속, $Re=80\sim 1000$)에서는 잠열 축열재인 마이크로캡슐과 물과의 상대속도가 작고 충돌효과 또한 거의 나타나지 않았기 때문에 종래의 실험식과 일치하는 결과가 얻어진 것으로 판단된다.

4.2 관벽면 온도 T_{hw}

Figs. 9~11은 시험부에 잠열 슬러리를 유동시킨 경우와 물을 유동시킨 경우의 관벽면 평균 온도 T_{hw} 의 x 방향 분포를 가열 열유속 q_{hw} , 유속 u_b , 그리고 잠열 축열재의 농도 C_b 에 대하여 각각 나타낸 것이다.

먼저, Fig. 9의 가열 열유속의 영향을 살펴보면 q_{hw} 의 증가와 함께 T_{hw} 의 값도 증가하고 있으며, q_{hw} 가 증가할수록 잠열 슬러리의 상변화 완료위치 l_c 가 가열 원관 입구측($x=0$)으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 또한 가열 벽면의 조건이 등열유속조건이기 때문에 상변화 완료위치 $x=l_c$ 보다 하류에서는 현열에 의한 열전달이 일어나 T_{hw} 의 상승률이 증가하고 있음을 알 수 있다.

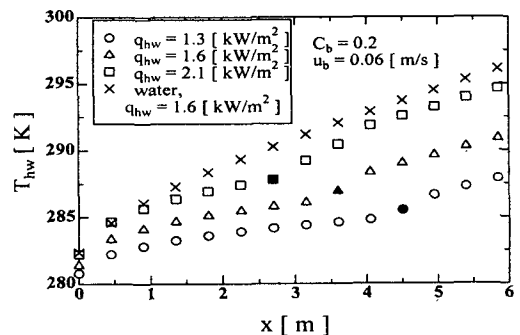


Fig. 9 Variation of T_{hw} with q_{hw} .

Fig. 10으로부터는 잠열 슬러리의 유속 u_b 이 증가함에 따라 T_{hw} 값이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유는 일정 열유속 $q_{hw}=2.1\text{ kW/m}^2$ 의 조건에서 u_b 의 증가와 함께 대류열전달이 촉진되어 결과적으로 T_{hw} 값이 감소하게 되었기 때문이다. 또한 상변화 완료위치 l_c 는 u_b 의 증가와 함께 시험부의 하류 쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 즉, u_b 의 증가에 따라 대류열전달이 촉진되어 잠열 축열제로의 열전달이 증가하지만 u_b 의 증가와 함께 잠열 슬러리가 시험부 내에서 정체하는 시간이 짧아져 잠열 축열제의 상변화(용해)가 늦어지는 경향이 더 크게 작용하기 때문으로 판단된다.

Fig. 11은 잠열 슬러리에 대한 잠열 축열제의 농도 C_b 와 관벽면 평균 온도 T_{hw} 의 x 방향 분포를 일정한 조건 ($u_b=0.04\text{ m/s}$, $q_{hw}=2.1\text{ kW/m}^2$)에 대해서 나타낸 그래프이다. 그래프로부터 알 수 있는 바와 같이 C_b 의 감소와 함께 T_{hw} 의 값

은 증가하여 물을 이용하여 측정한 값에 가깝게 접근하고 있음을 알 수 있다. 그리고 C_b 의 증가(슬러리의 잠열량 증가)와 함께 상변화 완료위치가 시험부의 하류 쪽으로 이동함을 알 수 있다.

4.3 국소 열전달계수 h_x

4.2절에서 언급한 관벽면온도 데이터와 Fig. 4에서 정의한 관내 유동 잠열 슬러리의 혼합 평균온도를 이용하여 아래의 식(1)로부터 국소 열전달계수 h_x 를 구하였다.

$$h_x = \frac{q_{hw}}{T_{hx} - T_b} \quad (1)$$

Fig. 12는 관벽으로 공급되는 열유속에 대한 영향을 파악한 것으로서, q_{hw} 의 증가에 따라 그 값들이 감소하고 있다. 이러한 결과는 q_{hw} 의 증가

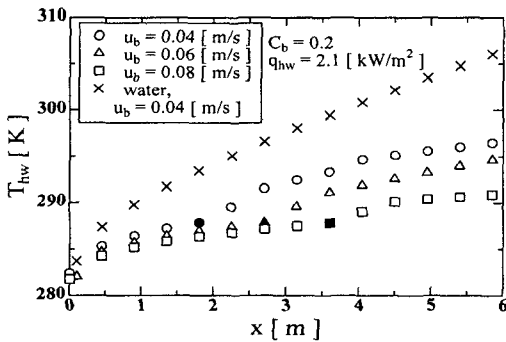


Fig. 10 Variation of T_{hw} with u_b .

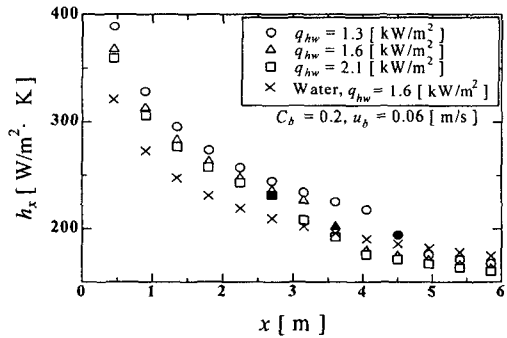


Fig. 12 Relationship between h_x and x (effect of wall heat flux, q_{hw}).

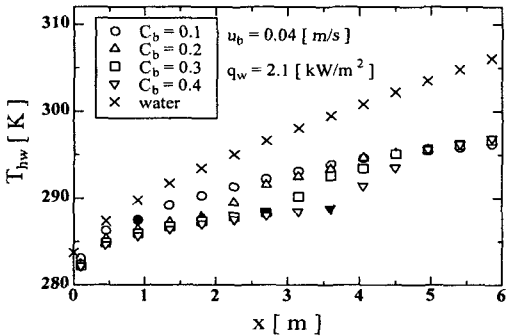


Fig. 11 Variation of T_{hw} with C_b .

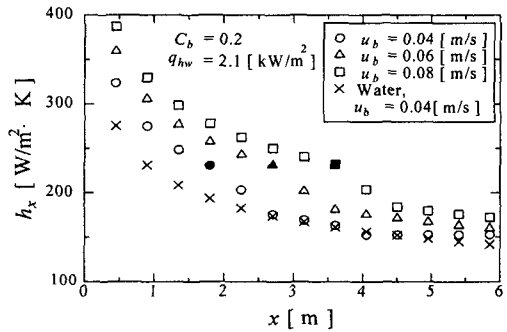


Fig. 13 Relationship between h_x and x (effect of velocity, u_b).

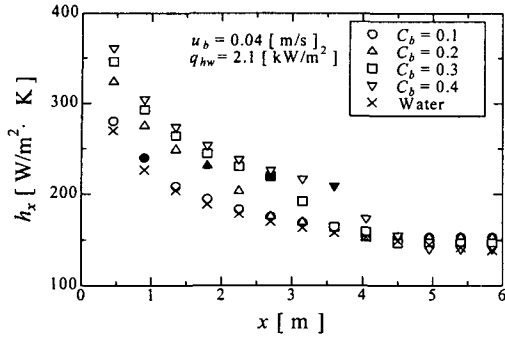


Fig. 14 Relationship between h_x and x (effect of concentration, C_b).

에 따라 관내를 유동하는 잠열 슬러리의 관벽면 부근에서 성장하는 온도경계층이 두꺼워지기 때문이다. 또한 l_c 를 경계로 h_x 의 뚜렷한 변화가 존재함을 알 수 있다. $x > l_c$ 영역(상변화 완료위치 후부)에서는 현열에 의한 열전달이 존재하게 되어 T_{hw} 가 급격하게 상승하고 결과적으로 h_x 의 감소로 된다.

Fig. 13으로부터 알 수 있듯이 고-액상 변화를 동반하지 않는 물의 경우(그림 내 X심볼)에 대한 실험결과와 비교해 보면 모든 유속에 있어 잠열 슬러리의 h_x 값이 상승하고 있음을 알 수 있다. 이것은 전술한 잠열 축열재인 테트라데칸의 상변화(용해)에 의한 일정온도($T_m = 278.9$ K)에서 잠열에 의한 열이동의 영향이며 잠열 슬러리의 가장 큰 특징 중의 하나이다.

Fig. 14는 잠열 슬러리의 질량농도 C_b 의 영향에 따른 국소 열전달계수를 산출한 것으로 C_b 의 증가에 따라 잠열 슬러리가 가지는 잠열량이 증가하기 때문에 h_x 의 값이 증가하고 있고, l_c 의 위치가 시험부의 후부로 이동하고 있음을 보여준다. 즉, C_b 의 증가에 따라 Fig. 4에서 나타낸 상변화 영역(Region II)이 증가하고 잠열축열재의 상변화에 의한 일정온도에서 열의 흡수가 일어나 관내에 생성되는 온도경계층이 얇아져 국소 열전달이 상승하기 때문이다.

5. 결 론

잠열 축열재를 상변화 물질로 하는 마이크로캡슐과 물과의 혼합수인 잠열 슬러리를, 이용한 본 실험을 통해서 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 관내 층류유동의 실험을 통해서 잠열 슬러리의 관마찰계수를 산출한 결과 뉴턴유체의 값과 거의 일치하는 결과를 얻었다. 즉, 본 실험의 범위($Re = 80 \sim 1000$) 내에서 마이크로캡슐과 물과의 상대속도는 작고 캡슐의 충돌효과는 나타나지 않았다.

(2) 시험관의 벽면온도를 측정된 결과 잠열 슬러리에 분산되어 있는 캡슐 내 n-테트라데칸의 용해에 의한 잠열이동이 존재함을 알 수 있었고 결과로 관벽의 온도상승률이 물을 이용한 경우에 비해 급격히 저하되고 있음을 알았다.

(3) 체적계를 이용한 상변화도를 측정된 결과와 에너지평형식으로 구한 상변화 완료위치에 영향을 미치는 열유속, 잠열 슬러리의 평균 유속 및 잠열 축열재의 농도에 대한 관계를 실험을 통해 알 수 있었다. 즉, 열유속이 증가할수록 상변화 완료 위치가 시험부의 상부로 이동하며, 잠열 슬러리의 평균 유속과 잠열 축열재의 질량농도가 증가할수록 상변화 완료 위치가 시험부의 하부로 이동함을 알았다.

(4) 관내 국소 열전달계수를 산출한 결과, 물과 같은 상변화를 동반하지 않는 경우에 비해 국소 열전달계수값이 약 1.5배 정도 상승함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2006년 군산대학교 수산과학연구소 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Inaba, H., 1998, Functionally Thermal Fluid and It's Application, Report of Research & Development Center of Takasaga Thermal Engineering Co., Ltd., No. 12.
- Inaba, H. and Morita, S., 1995, Flow and cold heat-storage characteristics of phase-change emulsion in a coiled double-tube heat exchanger, Transactions of the ASME, Vol. 117, pp. 440-446.
- Inaba, H., Kim, M. J. and Horibe, A., 2002, Heat transfer characteristics of latent microcapsule-water mixed slurry flowing in a

- pipe with constant wall heat flux (Numerical analysis), Transactions of the JSME, Vol. 68, No. 665, pp. 161-168.
4. Inaba, H., Kim, M. J. and Horibe, A., 2002, Cold heat storage characteristics of latent heat microcapsule-water mixture flowing in a pipe with constant temperature wall, Transactions of the JSME, Vol. 68, No. 673, pp. 156-163.
 5. Kim, M. J., Lim, J. K. and Choe, S. Y., 2004, A study on thermo-physical properties of microencapsulated phase change material slurry, Transactions of the KOSME, Vol. 28, No. 6, pp. 962-971.
 6. Choi, E. S., Cho, Y. I. and Lorsch, H. G., 1994, Forced convection heat transfer with phase-change-material slurries: Turbulent flow in a circular tube, Int. J Heat Mass Transfer, Vol. 37, No. 2, pp. 207-215.
 7. Kays, W. M. and Crawford, M. E., 1980, Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, New York.
 8. Metais, B. and Eckert, E. R. G., 1964, Forced, mixed, and free convection regimes, Journal of Heat Transfer, Vol. 86, pp. 295-296.