

미립잠열슬러리의 유체역학적 특성연구

Fluid dynamical characteristics of microencapsulated phase change material slurries

이 효 진*, 이 승 우**, 이 재 구***
 H. J. Lee, S. W. Lee, J. G. Lee

Key words: Microencapsulated phase change materials(미립잠열제), Slurry(슬러리), Latent heat(잠열), Viscosity(점도), Pressure drop(압력강하), Friction factor(마찰계수)

ABSTRACT

An experimental study was performed to measure the viscosity of microencapsulated PCM slurries as the functions of its concentration and temperature, and also influence to its fluid dynamics. For the viscosity measurement, a rotary type viscometer, which was equipped with temperature control system, was adopted. The slurry was mixed with water and Sodium Lauryl Sulphate as a surfactant by which its suspended particles were dispersed well without the segregation of particles during the experiment. The viscosity was increased as the concentration of MicroPCM particle added. The surfactant increased 5% of the viscosity over the working fluid without particles. Experiments were proceeded by changing parameters such as PCM particles' concentration as well as the temperature of working fluid. As a result, a model to the functions of temperature for the working fluid and its particle concentration is proposed. The proposed model, for which its standard deviation shows 0.8068, is agreed well with the reference's data. The pressure drop was measured by U-tube manometer, and then the friction factor was obtained. It was noted that the pressure drop was not influenced by the state of PCM phase, that is solid or liquid in its core materials at their same concentration. On the other hand, it was described that the pressure drop of the slurry was much increased over the working fluid without particles. A friction factor was placed on a straight line in all working fluids of the laminar flow regardless of existing particles as we expected.

기 호 설 명

D_i : 관 내경 [m]

L : 관의 총 길이 [m]

Q_s : 슬러리 체적유량 [m^3/s]

ΔP : 압력강하 [$N/m^2, Pa$]

R_i : 관의 반경 [m]

Re : Reynolds 수, $\frac{\rho_s u_{avg} D_i}{\mu_s}$

t : 온도 [$^{\circ}C$]

* 정회원, 대전산업대학교, 건축설비공학과

** 정회원, 우송공업대학, 건축설비과

*** 한국에너지기술연구소

- t_m : 상물질 융점 [°C]
 T : 온도 [K]
 u_{avg} : 평균유속 [m/s]

그리스 문자

- μ : 점성 계수
 ρ : 밀도
 φ_m : 중량 농도비
 φ_v : 부피 농도비
 φ_m : 중량농도비 [%]

하첨자

- s : 슬러리
 l : 입자를 포함하지 않은 작동유체
 avg : 밀도

1. 서 론

에너지에 대한 관심이 기존 자원의 활용적인 측면에서 절약적인 이용으로 전환되어 가고 있는 시점에 있다. 즉 금세기 주 에너지원인 화석연료의 고갈과 지구온난화의 주범인 이산화탄소 발생을 감축하기 위한 협약이 진행 중에 있으며, 이를 대비하여 화석연료의 사용을 최소화하면서 대체연료와 도시 및 산업 폐열을 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 이 중에서도 기존의 에너지를 효율적으로 이용하기 위하여 다방면에서 새로운 장치가 개발되고 있으며, 이렇게 얻어진 열을 다량으로 장기간 저장하기 위한 축열시스템을 개발하기 위하여 노력하고 있다.

축열재로서 상 변화시 얻어지는 잠열을 가장 쉽게 이용할 수 있는 것이 물이다. 그러나 물은 잠열에너지가 큰 반면에 상 변화시 과냉각 현상이 크게 나타나고 부피의 변화가 심하다. 물의 단점을 보완하기 위한 축열재로서 무기수화물이나 유기물을 이용한 다양한 종류의 상 변화 물질이 이용되고 있다. 축열을 위해서는 상 변화 물질을 용기에 담아 열 교환을 시키는 것이 가장 일반적인 방법으로 이용되고 있다. 즉, 저장된 열을 이용하기 위해서는 작동유체가 축열조로부터 열을 회수하여 수요처에 공급하게 된다. 열을 회수하는데 열교환기의 효율만큼 열손실이 발생하

게 된다. 이를 보완하기 위하여 고밀도의 잠열재를 직접 수송하여 열을 공급하는 시스템이 연구되고 있다.

이들을 살펴보면 현재 국내외에서도 연구가 추진되고 있는 아이스슬러리 냉방용 시스템을 들 수가 있다. 얼음을 입자상태로 만들어 수요처까지 직접 수송하여 고밀도의 축열을 이용할 수 있는⁽¹⁾ 냉방시스템으로 심야전기를 이용할 수 있고, 고밀도의 열을 수송함으로써 얻어지는 이점을 가지고 있어 상용화를 위한 연구가 진행되고 있다. 이 밖에도 축열재를 직접 수송하는 방법으로 난방용 잠열재인 고농도 폴리에틸렌(HDPE)를 표면처리하여 수송하는 연구가⁽²⁾ 추진되었었다. 그러나 여러 가지의 문제점으로 현재 이에 대한 연구는 미진한 실정에 있다.

상변화 물질자체로는 높은 점도나 혹은 강한 부식성으로 인하여 특별한 저장용기에 담아 축열하는 방법으로 지금까지 연구가 추진되어 오고 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 상물질을 신축성이 뛰어나고 화학적으로 안정성이 있는 표피로 감싸 10~50 μm 의 크기의 입자를 만들어 축열을 하고, 이를 작동유체와 혼합하여 수요처까지 직접 수송할 수 있도록 하는 연구가 추진되고 있다⁽³⁻⁴⁾. 잠열미립자를 이용한 열수송시스템의 적용은 최근의 일로서 아직 연구단계에서 추진되고 있으며, 본 제품의 초기개발 목적은 전자부품의 냉각장치에 사용하거나⁽⁵⁾ 우주 왕복선에서 열 회수장치에 응용하기 위한 것이었다⁽⁶⁾. 이밖에도 다양한 분야에서 응용이 되고 있다.

본 연구는 아직 초기의 응용화 단계로서 실용화를 위한 많은 기초연구를 필요로 하고 있다. Goel등⁽⁷⁾은 잠열미립자를 직접 수송할 때 얻어지는 열 유체적인 특성을 수치해석적인 방법으로 접근하였다. 수치해석을 위한 기초 물성은 주로 고체입자를 이용한 경험식을 대입하였다. 그러나 미립 잠열재는 상 변화 전후에 내부의 상 물질이 고상이나 액상의 형태로 존재하기 때문에 이에 대한 정확한 영향 평가가 이루어져야 해석적인 방법의 신뢰도를 높일 수 있을 것이다. Inaba등⁽⁸⁾은 미립잠열재 입자를 작동 유체인 물과 혼합하여 밀도, 잠열, 및 열전도율을 온도의 함수로서 측정하였다. Yamagishi등⁽⁹⁾은 잠열재의 상 변환시 일어나는 과냉각현상을 실험적으로 측정하였다.

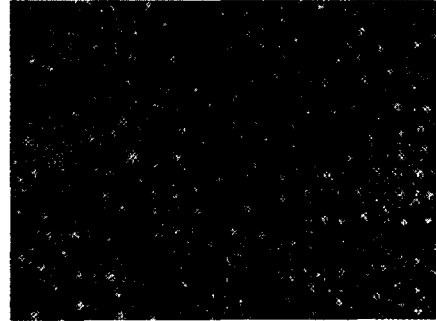
열 수송시 제일 먼저 요구되는 물성은 점도이다. 점도는 미립잠열재가 혼합된 슬러리의 온도뿐만 아니라 미립자농도의 함수로서 표기된다. 또한 점도의 변화가 상 물질이 고상일 때와 액상일 때의 특성이 파악되어야 미립잠열재를 이용한 정확한 해석이 가능해질 수 있을 것이다. 본 연구에서는 잠열 입자의 크기가 30~50 μm 이고, 용점이 6 $^{\circ}\text{C}$, 18 $^{\circ}\text{C}$, 50 $^{\circ}\text{C}$ 인 미립자의 농도 및 온도 변화에 따른 점도변화 특성을 측정하였다. 또한 3가지 다른 용점을 갖는 미립잠열재의 점도를 온도와 농도에 관한 비선형 적합법(Non-linear Curve Fitting)을 이용하여 한 개의 식을 도출하였다. 실험에 의하여 압력강하를 측정하고, 이를 이용하여 마찰계수를 구하여 잠열미립자를 포함한 슬러리 수송시 층류상태에서의 영향을 평가하였다.

2. 미립잠열재의 구조 및 특성

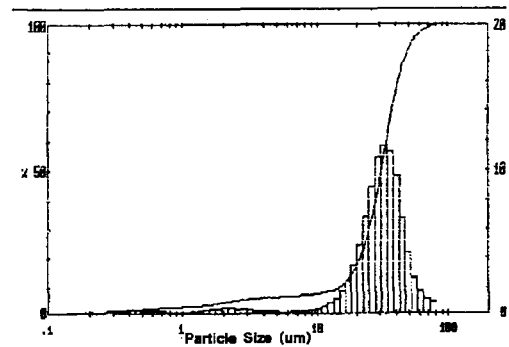
2.1 미립잠열재의 구조

미립잠열재의 제조는 다양한 방법이 적용되고 있으나, 상 변화 물질의 캡슐화를 위해서는 In-Situ중합법과 계면중합법을 이용하는⁽¹⁰⁾ 방법이 적합한 것으로 판단되며, 본 연구에서는 이 둘 두 가지 방법을 이용하여 제조하고 있다. 그러나 입자제조 능력이 소량의 실험실적인 생산 규모로 실험에 직접 적용하기 위하여 일부는 외부에서 주문 제작하였다. 내부의 상 물질의 온도는 냉방과 난방을 고려하여 6 $^{\circ}\text{C}$, 18 $^{\circ}\text{C}$, 50 $^{\circ}\text{C}$ 를 각각 선정하였으며, 외피는 우레아계통의 폴리머를 사용하였다.

Fig. 1은 용점이 6 $^{\circ}\text{C}$ 인 입자의 형태를 광학현미경으로 촬영한 사진의 일부이다. 완전한 구의 형태를 갖추고 있음을 알 수 있으며, 내부의 상 변화 물질은 헥사데칸이 주 원료로 되어 있고, 표피는 우레아가 주성분이다. 표피는 입자의 약 10~15 wt%를 차지하고 있다. 입자의 크기는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 평균 약 30 μm 의 크기를 나타내고 있으며, 입도분포는 적은 것은 수 마이크로에서 약 100 μm 까지의 분포를 나타내고 있다. 입자의 크기에 대한 측정은 Malvern사의 입도분석기를 이용하였다. 본 실험에 사용된 다른 용점을 갖고 있는 입자들의 평균 입도는 약



(a) MicroPCM particles



(b) Particle size distribution

Fig. 1 Sample photographs of MicroPCM particles and its size distribution measurement.

30~50 μm 의 크기를 나타내고 있다. 또한 자체 제작된 입자의 크기는 약 100 μm 로 외부에서 구매된 입자에 비하여 비교적 크게 나타나고 있다. 그러나 수송시 입자의 파괴에 대한 가능성을 비추어 볼 때 입도가 작을수록 입자의 훼손율이 적어지는 것으로 알려져 있다⁽³⁾.

2.2 미립잠열재의 특성

입자의 용고와 용해온도 및 상변환 입자의 잠열량을 파악하는 것은 잠열재를 이해하는데 매우 중요한 요소이다. 이미 앞에서 언급한 바와 같이 이번 연구에서는 용점이 각기 다른 세 가지의 미립잠열재를 이용한 실험을 수행하였다. 또한 Fig.

1(b)에서 나타난 입도의 분포를 다섯 개의 영역으로 나누어 입도에 따른 용점온도에 미치는 영향을 관찰하였다. 이에 대한 정확한 분석을 위하여 DSC를 이용한 응고 및 용해온도와 잠열에너지를 각 종류별(용점, 입도)로 분석하였다. 이에 대한 결과는 Fig. 2에 보는 바와 같다.

Fig. 2에 대한 결과는 입도에 따른 잠열량, 응고 및 용점온도를 보여주고 있다. 즉 입도에 따라 다소간의 잠열량에 차이는 나타나고 있으나 파라핀 왁스의 경우 잠열량이 평균 202 J/g으로 확인 되었으며, 테트라데칸의 경우는 응고시 평균 240 J/g, 용해시 약 252 J/g을 보였다. 이번 실험결과에서는 입도에 따른 차이를 정확히 파악할 수 없었다. 즉 DSC는 시료의 양이 수 mg으로 표본 샘플을 정확히 채취하기가 불가능하였다. 더욱이 시료가 물과 혼합된 슬러리 상태에서 입자의 수 및 표본 입도를 고르게 얻기가 어려웠

기 때문에 매 샘플 마다 다소의 차이가 발생하였다. 그러나 잠열량에 있어서는 $\pm 2\%$ 내의 오차를 보였다.

3. 실험장치

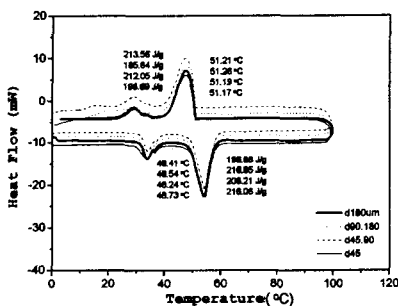
3.1 점성 측정장치

미립잠열 슬러리의 온도에 따른 점도변화를 측정하기 위하여 Brookfield사의 로터리 타입 점도계(모델명 :LDVD-II)를 이용하였다. 실험장치의 구성은 Fig. 3에 나타나 있는 바와 같이 점도계, 항온순환수조, 데이터로거 및 컴퓨터로 되어있다. 점도계는 저 점도측정을 위하여 길이가 91 mm이고 직경이 23 mm인 실린더형태의 추를 사용하였다. 시료의 온도를 조절하기 위하여 항온순환수조와 연결된 점도계를 사용하였다. 이 점도계는 측정실린더와 냉각순환부로 구성되어 있으며, 측정실린더의 내경은 25 mm이고 길이가 133 mm이다. 점도측정용 추와의 여유는 1 mm의 공간을 가지고 있다. 냉각 순환부는 측정실린더의 외부 주위에 일정한 온도로 유지하기 위하여 제어된 온도의 물이 순환하도록 제작하였다. 사용된 측정장치는 제작사로 부터 주문 제작된 제품으로, 표준 용액을 이용한 점도 측정 결과 $\pm 0.5\%$ 의 오차를 갖는 정확도를 나타내었다.

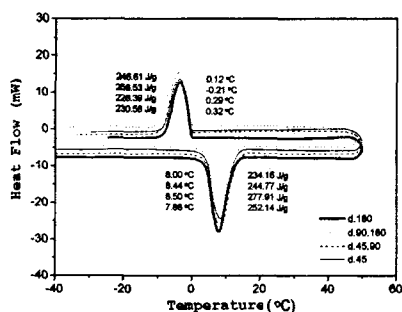
점도측정 슬러리의 온도조절을 위하여 $\pm 1^\circ\text{C}$ 까지 정밀 제어가 가능한 항온순환수조를 사용하였고, 항온수는 순환펌프를 이용하여 공급하였다. 저 온도에서 순환수의 동결을 방지하기 위하여 물과 에틸렌글리콜을 혼합하여 사용하였다. 점도 측정장치가 소형이기 때문에 어느 정도 시간이 경과한 후에는 공급수와 회수된 냉각수의 온도차가 거의 없음이 관찰되었고, 이때 점도측정을 시작하였다. 슬러리의 온도는 실린더 하부에 삽입된 K-type의 열전대를 이용하여 측정하였다.

3.2 슬러리 제조

점도측정 실험에서는 세 종류의 미립잠열 슬러리에 계면활성제를 넣은 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 온도와 농도를 변화시키면서 점성계수의 변화를 측정하였다. 이 때 온도는 각 잠열



(a)



(b)

Fig. 2 Results of DSC analysis for (a)paraffin wax ($t_m = 50^\circ\text{C}$) and (b)tetradecane ($t_m = 6^\circ\text{C}$).

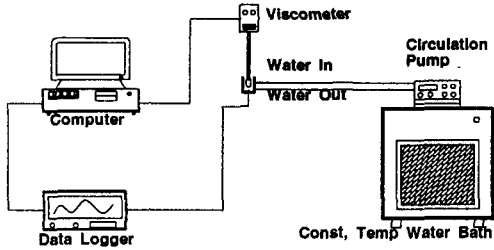


Fig. 3 Schematic diagram for the viscosity measurement of the slurry.

재의 상 변화온도 전후로 선택하였다. 계면활성제를 넣는 이유는 잠열재의 비중이 약 0.9로 물보다 가볍기 때문에 물과 분리되는 현상이 발생된다. 이 때 분산성의 지속시간은 첨가하는 계면활성제의 종류에 따라 달라진다. 본 연구에서는 11가지의 원료를 사용하여 첨가량 및 종류를 조합함으로써 28가지의 계면활성제를 제조하여 시험하였다. 이 중에서 점도에 영향을 가장 적게 미치고 장시간 고르게 부유시킬 수 있는 계면활성제로 Sodium Lauryl Sulfate를 선정하였다.

입자의 부유정도는 정지된 유체내에서는 약 50분간 지속되었으며, 외부에서 자극을 주는 즉시 분산성을 회복하였다. 점도계나 압력강하를 측정하기 위하여 슬러리를 순환하는 중에는 전혀 상 분리현상이 일어나지 않았다.

3.3 압력강하 측정장치

유동상태 잠열슬러리의 압력강하 실험장치는 용액 저장탱크, 펌프, 배관, 항온장치 및 계측장치로 이루어졌으며 이에 대한 구성도 및 사진을 Fig. 4에 나타내었다.

슬러리를 저장하기 위하여 직경이 400 mm이고 높이가 800 mm인 원통형의 아크릴 탱크를 제작하였다. 탱크내부에는 나선형 배관을 설치하고 나선형 배관은 항온조와 연결시켜 MPCM용액이 항상 일정한 온도를 유지할 수 있도록 하였다. 또한 슬러리의 균일한 농도분포를 유지할 수 있도록 탱크 중앙에 교반기를 설치하였다. 잠열슬러리는 탱크의 하부를 통하여 공급되고 상부를 통하여 회수되도록 제작하였다.

미립자 상태의 잠열재를 함유하고 있기 때문에

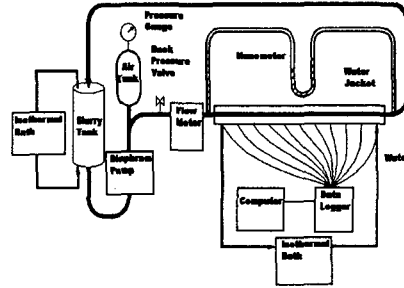


Fig. 4 Schematic diagram for the test of MicroPCM slurry transportation system.

일반적인 펌프를 사용하면 입자의 파손우려가 있다. 이를 방지하기 위하여 본 연구에서는 다이어프램 펌프를 사용하였다. 다이어프램 펌프는 용적펌프의 일종으로 격판의 움직임으로 유동을 발생시킨다. 유량조절은 격판의 변위를 나사로 조절함으로써 가능하다. 다이어프램 펌프의 단점은 유동시 맥동현상이 나타난다는 것이다. 맥동현상은 격판의 움직임으로 인한 것으로, 이를 최소화시키기 위하여 펌프트출 측에 공기탱크와 후압밸브(Back pressure valve)를 설치하였다. 설치결과 맥동 현상이 현저히 줄어들었다.

본 연구에서는 슬러리의 냉각(또는 가열)수용으로 2개의 유량계를 사용하였다. 잠열슬러리의 특성을 고려하여 세척의 필요성이 없는 열선방식의 유량계를 사용하였다. 여기서 사용된 열선 유량계는 독일의 Weber Sensor Technik(Model No : D-2201)사 제품의 열선 유량계를 사용하였다.

냉각수용으로는 OVAL제품(Model No: D012S-22-200)의 질량유량계를 사용하였다. 질량유량계는 진동의 원리로 유량을 측정하는 장치로 정확성이 매우 높은 것으로 알려져 있다.

배관은 잠열슬러리의 압력강하 및 열전달실험을 수행할 수 있도록 제작되었으며 실험부위의 재질은 스테인리스 스틸튜브를 사용하였고 그 외의 부분에서는 주로 유연성과 내열성이 좋은 타이콘 튜브를 사용하였다. 실험부 배관의 내경은 4.4 mm이고 외경은 4.5 mm이며 길이는 2000 mm이다.

잠열 슬러리에 열을 공급(또는 제거)하기 위하여 대향류형 2중 동심원관 열교환기를 사용하였다. 냉각수용 튜브의 내경은 40.4 mm이고 외경은 55.4 mm이며 길이는 2030 mm이다. 냉각수는 일정한 온도로 공급되도록 항온조와 연결하였다. 배관내의 압력강하를 측정하기 위하여 Fig. 4에 나타난 U자형 마노메타를 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 계면활성제 첨가로 인한 영향

Fig. 5에는 계면활성제를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우의 용점이 50°C이고 농도가 5% 용액 (이하 중량기준)의 온도변화에 따른 점성계수의 변화를 나타내었다. 두 경우 모두 온도가 상승함에 따라 점성계수는 약간 감소하는 것으로 나타났다. 온도의 상승에 따라 점성계수가 감소하는 것은 일반적으로 알려져 있는 유체의 성질과 일치하는 결과이다. 그림에서 온도가 15°C에서 60°C까지 변화하는 동안 점성계수는 2 cP에서 1 cP 정도로 변화하고 있는데 이는 슬러리의 농도가 5%에 불과하여 물의 성질에 가까운 성향을 나타내기 때문인 것으로 생각된다. 그림으로부터 10°C에서 40°C사이에서는 계면활성제를 첨가한 슬러리의 점성계수가 첨가하지 않은 것에 비하여 약간 높은 것으로 나타났다. 이로부터 40°C 이하의 5% 용액은 계면활성제를 첨가함으로써 점성계수가 미미하게 상승하고 40°C이상의 온도에서는 계면활성제의 영향이 거의 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 용점이 50°C이고 농도가 30% 슬러리의 온도변화에 따른 점성계수의 변화를 나타내었다. 그림에서 온도가 15°C에서 60°C까지 변화하는 동안 점성계수는 13 cP에서 7 cP로 변화하고, 낮은 농도의 용액에 비하여 매우 상승하였음을 알 수 있다. 이 경우 15°C에서 60°C의 구간에서는 온도 전환점이 존재하지 않으며 온도의 증가에 따라 점성계수를 감소시키는 계면활성제의 영향이 더욱 증대됨을 알 수 있다. 한편 이 경우에도 50°C부근에서의 상 변화과정을 전후로 하여 용액의 점성계수가 증가하는 효과가 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 50°C이상의 온도에서 입자간의 응결(agglomeration)현상이 관측되었으며,

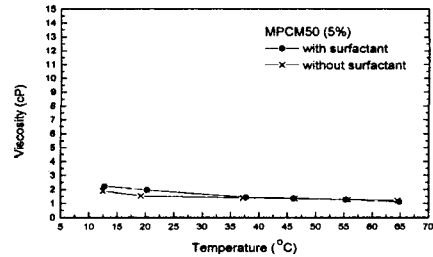


Fig. 5 Viscosity of MicroPCM slurry ($t_m=50^\circ\text{C}$, $\varphi_m=5\%$).

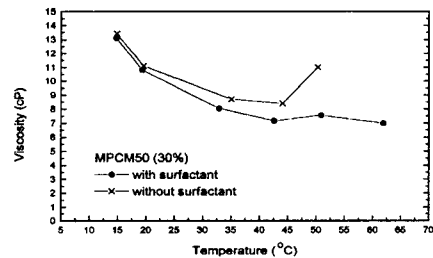
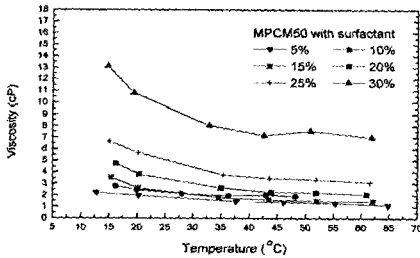


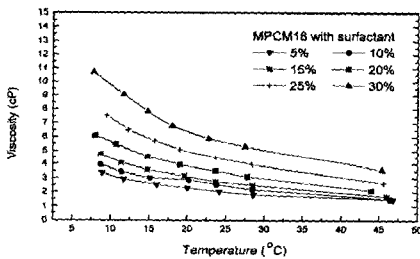
Fig. 6 Viscosity of MicroPCM slurry ($t_m=50^\circ\text{C}$, $\varphi_m=30\%$).

이로 인한 점도의 상승이 발생한 것으로 여겨지고 있다. 반면에 농도가 25%이하에서는 응결현상이 나타나지 않았다. 이에 대한 가장 큰 원인으로 생각할 수 있는 것은 농도가 30%이상에서는 희석용액(dilute solution)의 개념을 벗어난 상태로 볼 수 있다. 즉 입자간의 상호작용에 의한 영향이 급격히 증대하는 것으로 생각된다.

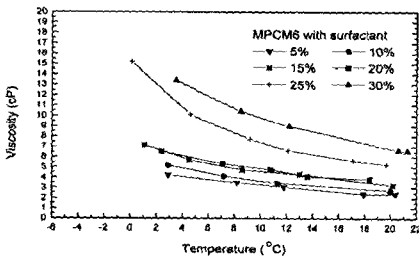
실험에 사용된 계면활성제의 최적량으로 물에 대한 2%의 중량비인 것으로 확인되었다. 이러한 비율로 혼합된 슬러리에서는 입자의 친수성을 증대시켜 고른 분산을 시키고 있는 것으로 판명되었다. 이러한 원인은 25%이하의 농도에서 계면활성제의 첨가로 인한 점도에 미치는 영향은 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 극히 미미한 정도의 점도상승을 유발하는 것으로 확인되었으며, 계면활성제를 첨가하지 않았을 때는 30% 이상의 농도에서 입자간의 응결현상이 발생하였다. 이는 입자간의 분산성 악화로 인한 원인으로 추측된다.



(a) $t_m=50\text{ }^\circ\text{C}$



(b) $t_m = 18\text{ }^\circ\text{C}$



(c) $t_m=6\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 7 Experimental results of viscosity measurement with surfactant.

4.2 점도에 관한 실험결과

Fig. 7에는 계면활성제를 첨가한 경우의 용점이 50°C, 18°C, 6°C인 미립잠열 슬러리의 온도변화에 따른 점성계수의 변화를 나타내었다. 모두

온도가 상승함에 따라 점성계수는 약간 감소하는 것으로 나타났으며 이 또한 일반적인 유체의 성질과 일치하는 결과이다. Fig. 7(a)에서 용점이 50°C인 슬러리의 점도특성을 살펴보면 다음과 같다. 농도가 10%인 경우 15°C에서 60°C까지 변화하는 동안 점성계수는 3 cP에서 2 cP로 변화하고 있는데 이는 Fig. 5에서 나타난 5%의 경우에 비하여 각 온도 별로 전반적으로 1 cP 정도 상승한 결과이다.

결과로부터 10%의 경우가 5%의 경우에 비해 점도가 증가한 사실을 알 수 있는데 이러한 것은 2상 유체에서 농도 증가에 따라 예상되는 결과와 일치하는 것이다. 그러나 이 경우에도 15°C에서 60°C사이의 온도범위에서 점성계수의 변화 폭은 1 cP로 5%에서의 경우와 동일한 결과를 나타내고 있다. 10°C에서 50°C의 범위에서 계면활성제를 첨가한 슬러리의 점성계수는 첨가하지 않은 슬러리에 비하여 약간 높은 것으로 나타났다.

농도가 15% 용액의 온도변화에 따른 점성계수의 변화에서도 온도가 상승함에 따라 점성계수가 감소하는 경향은 5% 및 10%의 경우와 동일하지만 감소의 폭이 약간 증가하였다. 그림에서 온도가 15°C에서 60°C까지 변화하는 동안 점성계수는 3.5 cP에서 1.5 cP로 변화하고 있다. 35°C이상의 구간에서는 5% 및 10%용액의 경우와 비슷한 값을 나타내고 있으나 35°C이하의 범위에서는 상승한 값을 나타내고 있다. 이로부터 농도가 증가함에 따라 전반적으로 점성계수가 증가하며 온도가 낮을수록 증가폭이 상승함을 알 수 있다.

농도가 20%, 25% 슬러리의 온도변화에 따른 점성계수의 변화에서도 온도가 상승함에 따라 점성계수가 감소하는 경향은 5%, 10% 및 15%의 경우와 동일하게 나타났다. 25% 농도의 슬러리에 온도변화에 따른 점성계수의 변화를 살펴보면 15°C에서 60°C까지 변화하는 동안 점성계수는 6.5 cP에서 3 cP로 변화하고, 농도의 증가에 따라 점성계수도 증가함을 확인할 수 있다. 여기서도 35°C이하의 온도범위에서 증가의 폭이 크고 35°C이상의 구간에서는 비교적 낮은 증가율을 나타내고 있다.

Fig. 7(b)는 용점이 18°C의 실험결과를 보여주고 있다. 5~30% 슬러리의 온도변화 따른 점성계수의 변화를 나타내었다. 10°C의 점성계수는 4.2 cP를 나타내고 20°C에서는 3.2 cP가 됨을 알 수

있다. 이로부터 10% 슬러리는 5% 경우에 비하여 점성계수가 전반적으로 상승하며, 상온인 경우 물에 비하여 점성계수가 약 2.2배 증가함을 알 수 있다. 이 수치는 용점이 50°C인 슬러리의 경우와 거의 일치하는 값이다. 이로부터도 용점이 50°C와 18°C의 두 물질의 종류에 따른 점성계수의 변화는 없음을 알 수 있다. 15% 용액의 온도 변화 따른 점성계수는 10°C에서 5.2 cP를 나타내고 20°C에서는 4.2 cP가 됨을 알 수 있다. 이로부터 MPCM18 15% 용액은 10%용액의 경우에 비하여 점성계수가 전반적으로 1 cP 상승하며, 상온인 경우 물에 비하여 점성계수가 약 3.2배 증가함을 알 수 있다. Fig. 7(c)에 계면활성제를 넣은 경우의 용점온도가 6°C이고, 농도가 5~30% 용액의 온도변화에 따른 점성계수의 변화를 나타내었다. 그림으로부터 2.5°C의 낮은 온도에서 점성계수는 5.5 cP를 나타내고 온도증가에 따라 감소하여 20°C에 이르면 2.5 cP가 됨을 알 수 있다. 이로부터 5% 용액은 상온에서 물에 비하여 점성계수가 약 1.5배 증가함을 알 수 있다.

10% 슬러리의 온도변화에 따른 점성계수의 변화를 살펴보면 2.5°C의 점성계수는 8 cP를 나타내고 20°C에서는 3.3 cP가 됨을 알 수 있다. 이로부터 10% 슬러리는 상온의 물에 비하여 점성계수가 약 2.3배 증가함을 알 수 있다. 계면활성제를 첨가한 용액은 첨가하지 않은 용액에 비하여 대략 0.5 cP 정도 낮은 점성계수를 나타내고 있었다.

농도가 15%인 경우 0.5°C의 점성계수는 11 cP를 나타내고 20°C에서는 4.5 cP가 됨을 알 수 있다. 5°C이하의 저온에서는 점성계수의 증가가 특히 두드러짐을 알 수 있었다. 계면활성제를 첨가한 용액은 첨가하지 않은 용액에 비하여 대략 1cP 정도 낮은 점성계수를 나타내고 있었다. 농도가 20% 이상의 경우 6°C이하의 저온상태에서 점성계수의 증가폭이 매우 크다는 것을 알 수 있었다.

실험결과에 의하면 입자내에 포함된 잠열재가 고체상태에 있는 슬러리와 액체상태인 슬러리 사이에 점도의 특별한 변화를 발견하지 못하였다. 즉 점성의 변화에 미치는 요소로는 단지 온도 및 농도에 좌우됨을 알 수 있었고, 또는 계면활성제나 저온에서의 작동유체에 대한 동결방지를 위하여 첨가되는 에틸렌글리콜의 농도에 영향을 받음

을 알 수 있었다.

4.3 점성계수에 대한 경험식 도출

슬러리 상태의 용액에 대한 점성계수 경험식⁽¹¹⁻¹⁶⁾은 매우 다양한 형태로 제안되어 오고 있다. 그러나 이들의 대부분은 Table 1에 주어진 바와 같이 고체의 구상입자를 이용한 농도만의 함수로서 경험식을 유도한 것이다. 즉 잠열 미립자의 상변화를 동반한 점성계수에 이용하기에는 여러 가지 문제가 있으며, 이를 일반화하기 위해서는 농도와 온도의 함수로서 표기하여야 보편적으로 이용이 가능하게 될 것이다.

최근에 Inaba 등⁽¹⁷⁾은 용점이 약 10°C이고 크기가 0.1~3.0 μm인 펜타데칸(C₁₅H₃₂)을 이용한 점성계수의 경험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\mu_s = A \times \exp(2666/T) \quad (1)$$

여기서, $A=1.49 \times 10^{-7} \phi'_m{}^3 - 7.61 \times 10^{-6} \phi'_m{}^2 + 1.42 \times 10^{-4} \phi'_m - 6.35 \times 10^{-4}$.

상기에서 유도된 경험식은 한 가지 잠열제만을 이용하여 얻어진 식인데 반하여, 본 연구에서는 미립자 내부 잠열물질의 용점이 각 기 다른 세 가지 종류를 이용하여 농도와 온도를 모두 포함하는 경험식을 유도하였다. 이를 위하여 비 선형 곡선 맞춤법 (Non-linear curve fitting)을 이용하였다. 구해진 경험식을 살펴보면 다음과 같다.

$$\mu_s = \mu_l \{1 + B \exp(12.6 \phi_v)\} (1 + C \times t^{-0.2489}) \quad (2)$$

여기서, B = 0.0347, C = 1.226 이다. 또는,

$$\mu_s = \mu_l \{1 + B' \exp(14.4 \phi_m)\} (1 + C' \times t^{-0.2554}) \quad (3)$$

여기서, B' = 0.0327, C' = 1.281이고, 점성계수의 단위는 cp(centi-poise)로 구해진 값이다. 식(2)와 식(3)에서 구해진 경험식의 표준편차(Standard deviation)는 각각 0.8068과 0.8223으로 Fig. 8에서 보는 바와 같이 실험결과와 비교적 일치하고 있음을 보여주고 있다.

Table 1 Empirical correlations for viscosity of slurry

Equation	Source
$\mu_s = \mu_l (1 + 2.5\phi_v)$	Einstein ⁽¹¹⁾
$\mu_s = \mu_l \exp(2.5\phi_v / (1 - s\phi_v))$ s (crowding factor) : 1.35 < s < 1.91	Mooney ⁽¹²⁾
$\mu_s = \mu_l / (1 - \phi_v)^{2.5}$	Brinkman ⁽¹³⁾
$\mu_s = \mu_l \{1 + 2.5\phi_v + 10.05\phi_v^2 + 0.00273\exp(16.6\phi_v)\}$	Thomas ⁽¹⁵⁾
$\mu_s = \mu_l (1 - \phi_v - 3.4\phi_v^2)^{-2.5}$	Core ⁽¹⁶⁾

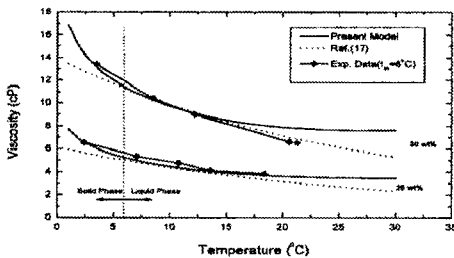


Fig. 8 Comparison of the present results and reference on the viscosity as functions of temperature and concentration.

상기에 제시된 경험식과 비교하면 식(1)의 경험식은 10 wt%이하에서 마이너스의 결과가 초래되므로 적용이 불가능하다. 또한 본 실험은 5~30 wt%의 범위에서 실험이 수행되었으며, 적용 온도 범위에 있어서도 용점이 6°C인 경우에는 모두 20~25°C 이하에 대하여 경험식을 구한 값이다. Fig. 8에서 보여주듯이 25°C 이후에 실험결과와 모델의 오차가 증대되는 이유는 3가지의 다른 용점과 각 용점별 6가지의 농도변화를 종합한 모델링의 결과로서 추측이 된다. 식(1)의 결과에 이

용된 물질은 펜타메칸으로 용점이 10°C이고 크기가 0.1~3.0 μm 인 매우 미세한 크기로 본 실험에서 사용된 것과는 차이가 있다. 또한 식(1)의 유체에는 물을 사용하였기 때문에 물에 계면활성제를 첨가한 본 실험과는 약간의 차이가 있을 것으로 여겨지기 때문에 정확한 정량적인 비교는 어려움이 있다.

4.4 압력강하 실험결과

압력강하에 대한 실험을 하기 위하여 앞에서 언급된 바와 같이 Fig. 4에 주어진 형태의 실험장치를 이용하였다. 본 실험은 층류 조건이 되도록 유속을 조절하여 Reynolds수가 2000이하로 한정하였다. 압력강하는 점도에 직접적인 영향을 받는다는 사실을 다음과 같은 종류의 파이프 흐름을 정의한 Poiseuille⁽¹⁸⁾식에 의해 유도할 수 있다.

$$\Delta P = 8\mu_s \frac{L}{\pi R_i^4} Q_s \quad (4)$$

$$Q_s = \pi R_i^2 u_{avg} \quad (5)$$

즉 정확한 점도에 의하여 압력강하를 평가할 수 있다. 본 실험에서는 Fig. 4에 주어진 장치로부터 압력강하(ΔP)를 직접 구하고, 식(4)와 식(5)를 이용하여 u_{avg} 를 구한 후 다음 식에 의하여 마찰계수를 구하였다.

$$f = \frac{\Delta P}{L/D_i \frac{u_{avg}^2}{2} \rho_s} \quad (6)$$

Fig. 9는 실험에 의하여 얻어진 결과로서 Reynolds 수에 따른 변화를 보여주고 있다. 이 그림의 실험조건으로는 용점이 50°C와 6°C인 두 종류의 미립자와 30°C의 미립자를 포함하고 있지 않은 작동유체의 압력강하를 마노메타에 의해 측정하였다. 실험에 사용된 미립자는 용점이 50°C인 경우 내부 잠열물질이 고체상태이고 6°C인 경우는 액체상태인 것을 알 수 있다. 이들 각각의 상태가 압력강하에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실험조건이 가급적 일치하도록 조절하였다.

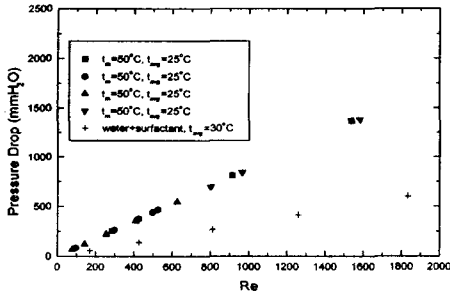


Fig. 9 Experimental result of the pressure drop to Reynolds number ($\phi_m=15\%$).

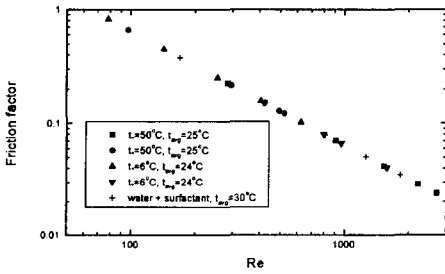


Fig. 10 Friction factor to Reynolds number for the MicroPCM slurries at the same condition.

사용된 미립자의 농도는 모두 15 wt% 이고 작동 유체의 평균온도가 24~30°C의 범위에서 실험을 수행하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 압력강하는 내부 상 변화물질의 상태에 영향을 받지 않는 것으로 판명되었다. 그러나 입자가 포함된 작동 유체가 포함하고 있지 않은 작동유체에 비하여 상당히 높은 압력강하가 일어나고 있음을 보여주고 있으며, 이는 수송을 위한 펌프의 소비전력을 가중시키는 원인으로 작용됨을 알 수 있다.

실험에서 얻어진 압력강하를 이용하여 식(6)에 의하여 마찰계수를 구하여 Fig. 10에 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 미립자의 포함여부에 관계없이 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있었다. 이는 층류의 조건으로 실험을 조절한 결과로서 마찰계수의 특성을 잘 보여주고 있는 결과

라 할 수 있을 것이다. 이에 대한 결과는 Yamagishi 등⁽³⁾의 층류 범위에서의 실험적 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구는 잠열미립자를 축열재 및 열 수송 물질로 이용하기 위한 가능성 실험의 기초단계로서 잠열슬러리의 물성 중 점성 및 수송시 야기되는 유체역학적인 특성을 이해하기 위하여 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 계면활성제로서 Sodium Lauryl Sulfate가 사용되었으며, 물과의 혼합시 물의 2 wt%를 혼합하였다. 정지상태의 유체에서 약 50분간 양호한 부유상태를 나타냈다.

(2) 계면활성제는 작동유체의 점도를 약 5~10%를 상승시키는 효과를 가져왔다.

(3) 미립자 슬러리의 점성계수는 계면활성제를 혼합한 유체와 혼합하지 않은 유체간의 잠열제의 농도 상승으로 점점 증대되는 것으로 나타났다.

(4) 용점이 50°C 잠열입자의 농도가 30%인 경우에는 계면활성제를 첨가하지 않았을 때 작동유체의 온도가 용점부근부터 입자간의 응결현상을 보였다.

(5) 세 가지 다른 용점($t_m=6, 18, 50^\circ\text{C}$)을 갖고 있는 잠열슬러리의 점도를 각각의 농도 및 온도의 함수로서 비 선형곡선맞춤법을 이용하여 한 개의 경험식을 얻었다. 적용 농도는 $0 \leq \phi_m \leq 30\%$ 이며, 적용온도는 $0^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 이다.

(6) 층류조건에서는 같은 온도 및 농도조건에서 압력강하는 상물질의 상태와 무관함을 알 수 있었다.

(7) 잠열슬러리는 입자를 포함하고 있지 않은 작동유체에 비하여 상당히 높은 압력강하를 보였다.

(8) 마찰계수는 잠열미립자의 존재여부에 관계없이 모든 상태에서 거의 일치하는 결과를 얻었다. 이는 층류 상태의 유체유동과 같은 결과이다.

후 기

이 연구는 부분적으로 1998년도 대전산업대학교 학술연구비 지원에 의해 이루어진 것의 일부

이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Yamamoto, M., Matsumoto, Y., Nagamori, S., Sekine, M., and Yoshinaga, H., 1993, "Development of ice slurry transportation system for district cooling", 일본기계학회 제71회 학술대회, Vol. 71, pp. 88-90.
2. Liu, K.V., Choi, U.S., and Kasza, K.E., 1988, "Measurements of pressure drop and heat transfer in turbulent pipe flow of particulate slurries", ANL-88-15.
3. Yamagishi, Y., Sugeno, T., Ishige, T., Takeuchi, H., and Pyatenko, A., 1996, "An evaluation of microencapsulated PCM for use in cold energy transportation medium", IECEC-96, pp. 2077-2082.
4. Mehalik, E.M., Tweedie, A.T., 1975, "Two component thermal energy storage material", PB-252592.
5. Pal, D. and Joshi, Y.K., 1995, "Application of phase change materials to thermal control of electronic modules: A Computational study", Advances in Electronic Packaging, Vol. 10, No. 2, pp. 1307-1315.
6. Mulligan, J.C., Colvin, P.D., and Bryant, Y.G., 1994, "Use of two component fluids of microencapsulated phase-change materials for heat transfer in spacecraft thermal systems", AIAA paper No. 94-2004.
7. Goel, M., Roy, S.K., and Sengupta, S., 1994, "Laminar forced convection heat transfer in microencapsulated phase change material suspensions", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, No. 4, pp. 593-604.
8. Inaba, H., Fujisaki, M., and Morita, A., 1995, "Evaluation of thermophysical properties of fine latent heat storage and water mixture", The 16th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Vol. 16, pp. 245-248.
9. Yamagishi, Y., Sugeno, T., Ishige, T., Takeuchi, H., and Pyatenko, A., 1995, "An experimental study of the melting and freezing process in microencapsulated PCM", The 16th Japan Symposium on Thermophysical properties, Vol. 16, pp. 241-244.
10. Thies, C., 1995, How to make microcapsules, Thies Technology.
11. Einstein, A., 1956, Investigation the theory of the Brownian movement, Dover, New York.
12. Mooney, M., 1951, "The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles", J. Colloid Sci., Vol. 6, pp. 161-170.
13. Brinkman, M.C., 1952, "The viscosity of concentrated suspensions and solutions", J. Chem. Phys., Vol. 20, pp. 571.
14. Rutgers, R. 1962, "Relative viscosity of suspensions of rigid spheres in Newtonian fluid", Rheol. Acta, Vol. 2, pp. 202-210.
15. Thomas, D.G. 1965, "Transport characteristics of suspension: VIII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles", J. Colloid Sci., Vol. 20, pp. 267-277.
16. Core, K.L., 1987, The use of microencapsulated phase change materials to enhance heat transfer in liquid-coupled heat exchange systems, M.S. thesis, North Carolina State University, Raleigh, USA.
17. Inaba, M. and Morita, S., 1994, "Physical properties of water system with fine latent heat storage materials", The 15th Symposium on Thermophysical properties, pp. 203~206.
18. Schlichting, H., 1985, Boundary layer theory, McGraw-HILL, 7th ed., New York, pp. 85-87.