

〈논 문〉

## 파라핀 슬러리의 생성 및 관내 대류열전달에 관한 연구

최 은 수\*  
(1997년 2월 20일 접수)

### Formation of a Paraffin Slurry and Its Convective Heat Transfer in a Circular Pipe

Eunsoo Choi

**Key Words :** Phase-change(상변화), Paraffin(파라핀), Slurry(슬러리), Convective(대류), Heat Transfer(열전달), Emulsifier(유화제), Thermal Analysis(열분석)

#### Abstract

As a method to develop an enhanced heat transfer fluid, the fine particles of a phase-change material were mixed with a conventional heat transfer fluid. Paraffin, which can be obtained easily in domestic market, was used for the phase-change material and water was used as a carrier fluid. Fine liquid particles of paraffin were formed in water as an emulsion by using an emulsifier, and they were cooled rapidly to become solid particle, resulting in paraffin slurry. The average diameter of produced solid particles was inversely proportional to the amount of the added emulsifier, which was theoretically proved. The produced paraffin slurry was tested thermally in heat transfer test section having a constant-heat-flux boundary condition. The test section was made of a circular stainless-steel pipe, which was directly heated by the power supply having a maximum of 50Volts-500Amperes. DSC(Differential scanning calorimeter) tests showed that two kinds of phase change were involved in the melting of paraffin, and it was explained in two different ways. A five-region-melting model was developed by extending the conventional three-region-melting model, and was used to obtain the local bulk mean temperatures of paraffin slurry in the heating test section. The local heat transfer coefficient showed a maximum where the bulk mean temperature of the paraffin slurry reached at the melting temperature of paraffin.

#### 기 호 설 명

Ae : 유화제의 총 표면적 [m<sup>2</sup>]  
Ap : 파라핀 입자의 총 표면적 [m<sup>2</sup>]  
C : 열용량 [J/°C]  
C<sub>1</sub> : 비례상수  
C<sub>2</sub> : 비례상수  
d : 파라핀 입자의 직경 [m]

I : 가열시험부에 흐르는 전류의 세기 [Amp]  
L : 구간의 길이 [m]  
m : 질량유량 [kg/s]  
n : 파라핀 입자의 개수  
Q : 단위시간당 가열 열량 [Watts]  
T : 온도 [°C]  
V : 가열시험부에 흐르는 전압의 세기 [Volt]  
Ve : 유화제의 총부피 [m<sup>3</sup>]  
Vp : 파라핀의 총부피 [m<sup>3</sup>]

\*회원, 명지대학교 기계공학과

$x$  : 시험부에서 유동방향으로의 길이 [m]

#### 그리스문자

$\lambda_1$  : 파라핀의 용융시 첫 번째 상변화에너지 [kJ/kg]

$\lambda_2$  : 파라핀의 용융시 두 번째 상변화에너지 [kJ/kg]

#### 하첨자

1, ..., 5 : 각각의 구간(구간1, ..., 구간5)

b : 유체의 유동방향으로의 국소적인 평균

$b_i$  : 입구에서 유체의 유동방향으로의 국소적인 평균

$b_e$  : 출구에서 유체의 유동방향으로의 국소적인 평균

m1 : 용융에 관련된 첫 번째 상변화

m2 : 용융에 관련된 두 번째 상변화

p : 파라핀 (Paraffin)

pl : 액체 파라핀

pm : 반고체 또는 반액체 파라핀

ps : 고체 파라핀

w : 물(운반유체)

## 1. 서 론

미소유로열전달(Micro-channel heat transfer)은 최근에 연구가 활발히 진행되고 있는 분야로서, 대류열전달계수를 극대화시키기 위해 유로의 수력반경을 작게 만드는 냉각기술이다. 즉, 같은 뉴셀트 수(Nusselt number)에 대하여 대류열전달계수는 유로의 수력반경에 반비례하므로, 유로의 수력반경을 작게하면 이론상 대류열전달계수는 무한대가 될 수 있다. 따라서 열유속이 큰 부분의 냉각에 미소유로열전달이 이용될 전망이 높다. 그러나 미소유로열전달의 효과를 극대화시키기 위해서는 열전달 유체의 열용량이 높아야 한다. 실제로 미소유로열전달을 반도체칩의 냉각에 적용해 보면, 유동입구 및 출구에서의 열전달유체의 온도차가 보통 60°C 이상이 되어 국소적으로 온도분포가 불균일하여 진다. 일반적인 유체의 열용량은 이문제를 해결하기에는 너무 작기 때문에 열용량이 큰 새로운 유체의 개발이 필요하다.

상변화물질은 원래의 의미로 보면 고체, 액체 또는 기체의 상태변화를 하는 모든 물질을 일컫을 수

있으나, 일반적으로 고체와 액체 사이에서의 상태변화를 하는 물질을 주로 말한다. 상변화물질은 액상에서 고상, 또는 고상에서 액상으로 상변화할 때 방출, 또는 흡수되는 엄청난 잠열 때문에, 오래 전부터 축열을 위해 많이 이용되어 왔으나, 이를 대류열전달에 이용하고자 하는 노력은 미국의 일부 연구소 및 대학을 중심으로 십여년 전부터 시작되었고 최근에는 일본에서도 상당히 활발히 연구가 진행되고 있는 것으로 알려지고 있다. 상변화물질은 액체상태에서 고체상태가 되면 유동성이 없어지므로, 이를 에너지의 저장과 같이, 상변화물질이 유동하지 않는 시스템에 적용하는 것은 문제가 없으나, 대류열전달과 같이 상변화물질이 유동을 하는 시스템에 적용하는데에는 여러가지 기술적인 어려움이 따른다. 그러나 이것이 실용화된다면 고효율용량을 가진 새로운 열전달유체로서 그 가치가 대단히 높다.

상변화물질이 유동을 하는 시스템을 구성하는 방법으로는 크게 두 가지가 연구 중에 있다. 첫 번째 방법은 슬러리를 만들어 유동을 시키는 방법으로서, 얼음슬러리 및 파라핀슬러리에 대한 연구<sup>(1~4)</sup>가 이러한 방법을 이용한다. 여기서는 상변화물질인 얼음 또는 고체파라핀을 미세한 입자(직경이 수십-수백  $\mu\text{m}$  정도)로 만들어 운반유체와 함께 흘러 보내, 가열부에서 이들이 녹을 때 그 잠열을 이용하여, 운반유체의 온도 상승을 감소시키고, 아울러 열전달계수의 상승도 기대할 수 있다. 여기서 운반유체의 온도 상승을 감소시킨다는 것은 운반유체의 열용량을 증가시킨다는 것으로 해석할 수도 있으므로, 유효열용량이 증가 되었다고 말할 수 있다.

두 번째 방법은 상변화물질을 속이 빈 미세한 용기(직경이 5-600  $\mu\text{m}$ )에 담아 운반유체와 함께 유동시키는 방법<sup>(5~9)</sup>으로서, 이러한 슬러리를 미립피복 상변화물질 슬러리 (MCPCM slurry: Micro-Capsule-Phase-Change Material slurry 또는 Micro-encapsulated phase change material slurry)라고 불린 바 있다. 무탄소복사지를 생산하는 제지회사가 중심이 되고 이를 연구소가 뒷받침하여 주어 이러한 슬러리를 생산하는 예가 있다. 상변화물질을 미세하게 만들고 이를 피복하면, 첫째, 상변화물질이 운반유체와 혼합되는 것을 막을 수 있다. 즉, 상변화물질이 운반유체와 열전달만 하게 하고 물질전달이 없게 만듦으로써, 상변화물질의 노화현상을 막을 수 있다. 둘째, 상변화물질이 불필

요한 부분에서 응고하는 파울링을 막을 수 있다. 셋째, 상변화물질을 피복하는 물질의 재료 및 두께를 잘 선택함으로써, 부력의 영향을 막아, 유동이 없어도 운반유체 중에서 항상 균일하게 분산되어 있도록 할 수 있다.

상변화물질 슬러리와 비교하여 미립피복 상변화물질 슬러리의 단점을 들어 본다면, 첫째, 가격이 비싸다는 것, 둘째, 오랜 시간 사용하면, 피복이 깨어져 상변화물질이 운반유체 중에 누출 될 수도 있다는 것 등이다. 특히 국내의 실정을 고려하면, 상변화물질의 미립피복을 하기가 쉽지 않다는 것도 하나의 단점이 될 수 있다.

본 연구에서는 국내에서 비교적 구하기 쉬운 상변화물질인 파라핀을 이용하여, 먼저 안정된 파라핀슬러리를 물 속에 생성시키고, 이를 관내대류열 전달에 적용하는 실험을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 상변화물질의 선정

파라핀이라 하면 일반적으로 원유를 추출하는 과정에서 거의 직접적으로 얻어지는 파라핀을 말하며, 이를 여러 단계의 정제 및 분리 단계를 거치면, 분자내의 탄소 함유량에 따라, 여러 종류의 파라핀이 생기는데, 이를 n-알케인(n-alkane)이라 부르며, 화학적 분자식으로는  $C_nH_{2n+2}$ 로 나타낸다. 예를 들면, 헥사데케인(Hexadecane)이나 테트라데케인(Tetradecane)은 n이 각각 16 및 14인 알케인으로서, 분자내에 탄소원자가 각각 16개 및 14개인 정제된 파라핀이다. 탄소 수가 증가하면 용융온도도 상승하는데, n이 6인 헥산(Hexane)은 용융온도가  $-95.4^{\circ}C$ 이고, n이 44인 테트라테트라콘테인(Tetra-tetra-contane)의 경우 용융온도가  $86.4^{\circ}C$ 에 이른다. 탄소 수가 증가함에 따라 일반적으로 용융에너지(Fusion energy)도 증가한다. 테트라콘테인 및 헥사데케인의 용융에너지는 각각  $227 \text{ kJ/kg}$  및  $236 \text{ kJ/kg}$ 이다. 이들의 용융온도 및 용융에너지는 순수한 물질(Laboratory grade, purity 99%이상)의 경우이고, 산업용 물질(Commercial grade)의 경우는 순도에 따라, 생산회사에 따라 각각 다르므로 반드시 용융온도 및 용융에너지를 직접 측정하여야 한다.

본 연구에서는 상변화물질로서 파라핀을 선정하였다. 그 이유는 첫째, 가격이 저렴하고 국내에서

**Table 1** Thermal properties of paraffin.

Melting temperature	$54^{\circ}C$
Heat of fusion	$146.5 \text{ kJ/kg}$
Boiling temperature	$300^{\circ}C$
Specific heat	$2.906 \text{ kJ/kgK}$ (at $20^{\circ}C$ )
Density	$860-930 \text{ kg/m}^3$
Thermal conductivity	$0.244-0.291 \text{ W/mK}$

쉽게 구입할 수 있기 때문이다. 반면에 정제된 파라핀의 일종인 헥사데케인이나 테트라데케인은 국내에서 구하기도 어려울 뿐더러 가격도 파라핀에 비하여 매우 비싸다. 둘째, 파라핀의 용융온도가 상온보다 높다. 과거의 파라핀슬러리 실험에서는 헥사데케인 또는 테트라데케인이 사용되었으며,<sup>(3,4)</sup> 이들의 용융온도가 상온보다 낮아 슬러리를 오래 보관할 수가 없었다. 그러나 파라핀의 경우 일단 슬러리가 만들어지면, 열을 가하지 않는 한, 항상 그 입자를 그대로 유지하는 장점이 있다.

### 2.2 파라핀의 열적 특성 실험

파라핀의 열적특성을 문헌을 통하여 조사하여 보면 Table 1과 같다.<sup>(10)</sup> 여기서 용융온도 및 용융에너지는, 앞에서 언급한 바와 같이, 각각의 제품에 따라 다를 수 있으므로, 열분석기의 일종인 DSC(Differential Scanning Calorimeter)를 이용하여 직접 측정하였다. DSC의 원리는 두 개의 작은 용기(Pan)에, 분석하고자 하는 상변화물질(Sample) 및 특성을 알고 상변화가 일어나지 않는 물질(Reference)을 각각 소량(5-10 mg 정도)씩 넣어, 이 용기를 일정속도의 열량으로 가열하면서 용기의 온도변화를 측정하여, 두 온도변화의 차이를 곡선으로 나타내고, 이 곡선을 해석함으로써, 용기에 담긴 상변화물질의 용융온도 및 용융에너지를 구하는 것이다.

### 2.3 파라핀슬러리의 생성 실험

파라핀슬러리를 만드는 것은 최은수 등<sup>(3,4,11)</sup>의 방법과 유사한 방법을 사용하였다. 이것은 유화제(emulsifier)를 사용하여 먼저 액체 상변화물질과 물의 에멀션(emulsion : 액체 입자가 액체에 분산된 혼합물)을 만들고, 이를 냉각시켜 서스펜션(suspension : 고체 입자가 액체에 분산된 혼합물),

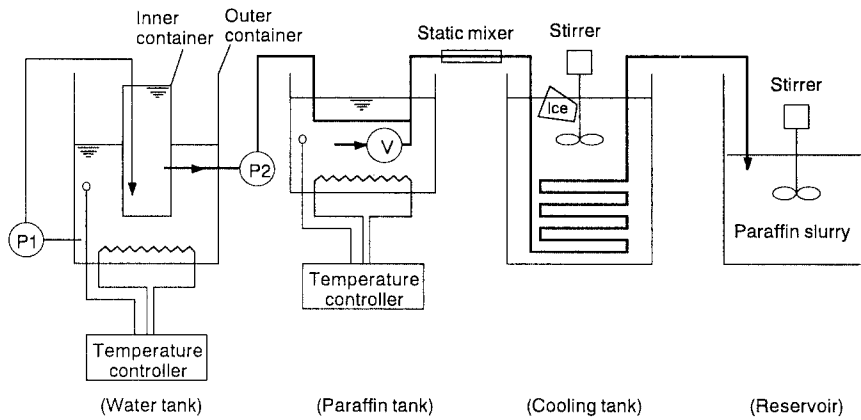


Fig. 1 Schematic diagram of a system to form the paraffin slurry.

또는 슬러리를 만드는 방법이다. 그러나 최은수 등의 경우에는 상변화물질의 용융온도가 상온보다 낮아, 상온에서 항상 액체상태로 존재하였고, 본 연구의 경우에는 파라핀의 용융온도가 54℃ 근처이므로 상온에서 항상 고체상태로 존재하므로 슬러리를 생성시키는 방법을 변형하여야 한다.

Fig. 1은 파라핀슬러리를 생성시키는 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 물탱크와 파라핀탱크에는 온도조절기가 있는 가열기가 있어서, 각각 60℃ 및 65℃로 온도가 조절된다. 이것은 파라핀의 용융점이 54℃이기 때문에 이보다는 약간 온도가 높아야 에멀션을 만들 수 있기 때문이며, 파라핀탱크의 온도가 약간 높게 조절되는 것은 파라핀이 쉽게 녹게 하기 위한 것이다. 물탱크에는 내부에 용기가 하나 더 있고, 펌프(펌프1)가 바깥용기로부터 항상 물을 내부용기로 순환시켜, 이 물이 내부용기로부터 외부용기로 넘쳐 나오게 함으로써, 주펌프(펌프2)에 대한 물의 높이를 항상 일정하게 유지시켜 주었다. 파라핀의 유량은 물의 유량에 비하여 작기 때문에 별도의 내부용기를 설치하지는 않았다.

주펌프(펌프2)의 흡입관은 물탱크의 내부용기로부터 시작하여 파라핀탱크 내부를 지나가면서 파라핀도 흡입될 수 있도록 밸브가 설치되었다. 흡입관은 대기압보다 저압이므로 파라핀탱크의 밸브를 열면 액체 파라핀이 흡입관으로 흡입되어 물과 혼합된다. 물탱크에는 적절한 양의 유화제가 물에 섞여 있는데, 그 적절한 정도는 실험에 의해 결정되었다. 물, 액체파라핀 및 유화제는 펌프를 거쳐 정지혼합기(static mixer)를 지나면서 에멀션이 된다.

즉, 액체파라핀의 미세한 입자가 유화제의 도움으로 물 속에 분산된다.

생성된 에멀션은 냉각탱크의 관 속을 지나면서 급속히 냉각되어 서스펜션, 즉 슬러리가 된다. 냉각탱크는 다량의 얼음을 채우고, 교반기를 사용함으로써 급속한 냉각이 될 수 있도록 하였다. 냉각속도가 충분히 빠르지 않으면, 입자들이 성장할 수 있는 시간이 주어지므로, 입자의 덩어리가 만들어질 수도 있다. 파라핀은 과냉각(undercooling)이 적은 물질로 알려져 있지만, 열분석실험에서 알 수 있듯이 두 개의 상변화점이 있으므로 냉각이 충분하지 않으면 입자가 성장하여 덩어리를 만들 가능성이 더욱 많은데 이를 나중에 기술하겠다.

파라핀의 용융온도가 상온보다 높으므로, 생성된 파라핀슬러리는 상온에서는 몇 달을 두어도 그 형상에 변화가 없었다.

#### 2.4 파라핀슬러리의 관내대류 열전달 실험

파라핀슬러리를 열전달유체로 이용하면 앞에서 기술한 바와 같이, 파라핀이 용융할 때의 잠열만큼 열전달유체의 열용량이 증가하는 것은 자명하다. 그러나 이것이 열전달율에는 어떠한 영향을 미칠지는 확실하지 않다. 따라서 Fig. 2와 같은 관내대류 열전달 실험 장치를 구성하였다.

시험부(test section)는 직경이 10 mm, 길이가 6 m인 스테인레스강관으로 제작되었으며, 앞부분의 1 m는 유체역학적 발달구역이고 그 다음의 4.5 m는 가열시험부(heating test section)이다. 유동이 난류이므로 유체가 가열시험부에 도달하면 충분히 발달한 속도분포를 가진다고 할 수 있다. 가열시험

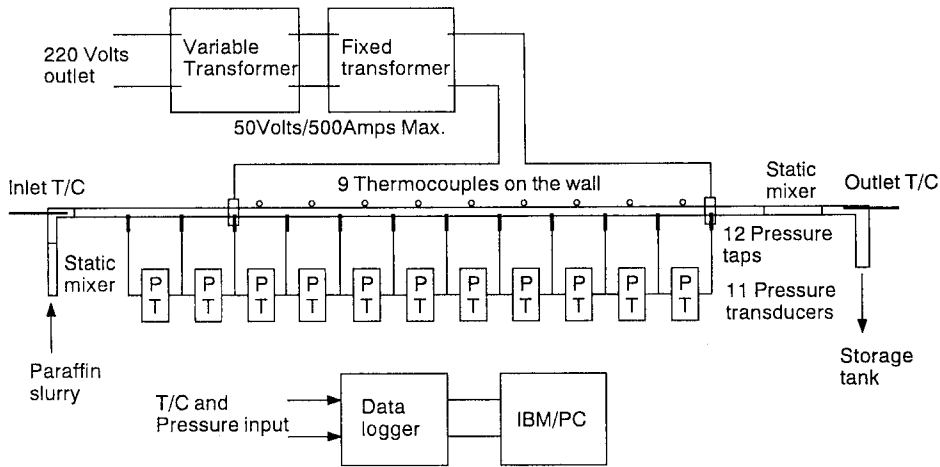


Fig. 2 Schematic diagram of a system for forced convection heat transfer experiment of paraffin slurry.

부는 양단에 플랜지가 은납으로 납땜되어 있고 여기에 교류전류가 직접 가하여 진다. 스테인레스강관의 전기저항이 균일하다고 보므로, 전기적으로 균일하게 가열되어, 균일한 열유속 경계조건을 가진다고 할 수 있다.

가열시험부를 가열하기 위한 교류전원은 슬라이더탁스(variable transformer)와 변압기를 이용하여 구성하였다. 즉, 220 Volt 단상 교류전원을 슬라이더탁스를 이용하여 0-220 Volt로 가변시키고, 이를 최고 50 Volt-500 Amp가 출력되도록 변압기를 제작하였다. 따라서 슬라이더탁스를 조정하면 출력이 0-25 kW로 조정된다. 이를 가열시험부의 내부 표면에서의 열유속으로 환산하면, 최고 1,768 kW/m<sup>2</sup>의 열유속이 된다.

시험부의 길이 방향으로의 국소압력강하를 측정하기 위하여, 유체역학적 발달구간 및 가열시험부에 내경의 50배 간격으로 12개의 압력탭(pressure tap)을 설치하고 11개의 압력센서를 연결하여 각 위치에서의 압력강하를 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 파라핀이 물보다 가벼워 위로 뜨므로, 압력탭을 아래로 향하게 하여 파라핀입자들이 압력탭을 막지 않게 하였다. 압력탭의 구멍은 직경이 0.7 mm인 드릴로 뚫었다. 시험부의 입구 및 출구에서 유체의 평균온도(bulk-mean temperature)를 측정하기 위하여 각 위치에 열전대를 설치하였으며, 정지혼합기를 각각의 열전대의 앞에 두어, 그 위치에서의 유체를 섞게 하였다. 시험부의 길이 방향으로의 국소 내부 벽온도를 구하기 위하여 11개의 열전

대를 가열부의 외부벽면에 설치하였다. 전원으로부터의 노이즈를 막기 위하여 열전대와 가열시험부를 테플론 테이프로 전기절연하였다. 가열부의 외부벽온도를 측정하면, 열원이 있는 열전도식을 이용하여 내부벽온도를 계산하여 낼 수 있는데, 이것은 박범진<sup>(12)</sup>에 나타나 있는 바와 같이, 스테인레스 파이프의 외부는 단열이 되어 있고, 내부는 관내대류에 의해 열이 유체로 전달되고, 파이프 자체에서는 전기적 발열에 의하여 체적에 대하여 균일하게 열이 발생하는 열전도 문제를 풀면된다. 여기서 유체의 국소평균온도(local-bulk-mean temperature)만 알면 유동의 대류열전달계수를 구할 수 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 파라핀의 열적 특성

파라핀을 세 번 추출하여 각각 13.1, 11.5 및 11.5 mg의 샘플을 만들고, 이들을 각각 DSC-cell에 넣어 냉각시켜 고체로 만들고, 1°C/min의 가열속도로 서서히 가열하였다. Fig. 3은 그 한 경우의 결과를 나타낸 것이다. 두 번의 상변화과정이 존재함을 알 수 있고, 그 온셋(on-set)점이 39.6°C 및 55.9°C이다. 증류수의 On-set 점, 0.8°C를 고려하여 교정하면, 각각 38.8°C 및 55.1°C가 된다. DSC실험에서 어떤물질의 상변화온도를 정점값으로 할 수도 있고, 온셋점(상변화가 없는 구간의 직선과 상변화가 있는 구간의 직선이 만나는 점에서의 온도)으로 할 수도 있으나, 온셋점이 샘플의 질

량 및 가열속도의 영향을 덜 받는 것으로 알려져 있어 본 연구에서는 온셋점을 선택하였다.

두 번의 상변화 과정이 존재하는 것에 대하여는 두 가지의 설명을 할 수가 있다. 첫 번째의 설명은 다음과 같다. 파라핀의 고체 상태가 두 종류가 있고, 파라핀이 용융할 때 먼저 첫 번째의 고체상태에서 두 번째의 고체상태로 상변화하고, 온도가 더 상승하면 두 번째의 고체상태에서 액체상태로 상변화 한다. 즉, 파라핀을 낮은 온도에서 가열하면, 38.8°C에서는 한 고체상태에서 다른 고체상태로 상변화하고, 55.1°C에서는 그 고체상태에서 액체상태로 상변화하는 것이다. 두 번째의 설명은, 파라핀이 본래 정제되지 않은 혼합물이므로 최소한 두 가지의 순수물질이 혼합되어 있고, 이 물질들이 각각 용융하는 것이라는 설명도 가능하다. 즉, 구입한 파라핀은 Hexacosane( $C_{26}H_{54}$ , 용융온도=56.4°C) 이 주성분이고 Heneicosane( $C_{21}H_{44}$ , 용융온도=40.4°C)이 소량 혼합된 것으로 추정된다. 여기서 두 상변화온도가 각각의 순수물질의 용융온도보다 약간 낮게 측정된 것은 각각의 성분이 다른 성분을 미소량씩 불순물로서 포함하고 있기 때문에 순수물질의 불순물에 의한 용융점강하라 할 수 있다.

세 번의 실험을 평균하면, 주용융온도는 55.2°C였다. 일반적으로 DSC에서의 용융온도 측정범위는 수백°C에 이르기 때문에 정확한 용융온도의 측정이 어렵다. 본 연구에서는 정확한 용융온도를 구하기 위하여, 파라핀의 고체-액체 평형상태를 만들어, 그 평형온도를 구하였으며, 이와 같이 하여 구한 용융온도는 54°C로서 Table 1의 값이 맞음을 알 수 있다.

용융온도와 함께 또 하나의 중요한 성질은 용융 에너지로서, Fig.3에서 보면 직선 AB와 두 개의 상변화곡선으로 둘러 싸인 면적을 의미한다. 이것은 파라핀이 39.6°C이하에서 가열이 시작되어 두 개의 상변화를 모두 하였을 때까지 가열되었을 때 파라핀의 전체 용융에너지를 말한다. 따라서 하나의 상변화가 일어나도록 가열되었을 때는 그 상변화에 해당하는 용융에너지 만을 고려하여 주어야 한다. 여기서의 곡선은 두 개의 상변화곡선이 서로 겹친 것이므로, 첫 번째 상변화의 용융에너지는 직선AD 및 DC와 첫 번째 상변화곡선으로 이루어진 면적에 해당하고, 두 번째 상변화의 용융에너지는 직선BD 및 DC와 두 번째 상변화곡선으로 이루어진 면적에 해당한다고 보아야 한다. 이와 같이 하

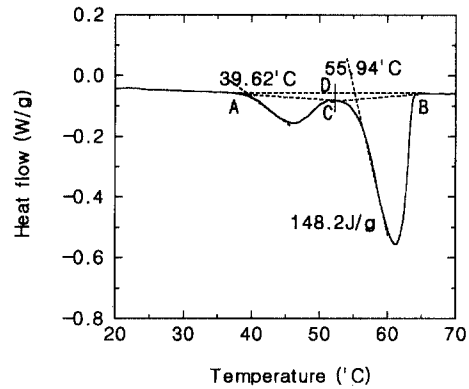


Fig. 3 A DSC curve obtained from a paraffin sample: heating rate=1°C/m, sample mass=13.1 mg, heating range=from 0°C to 70°C.

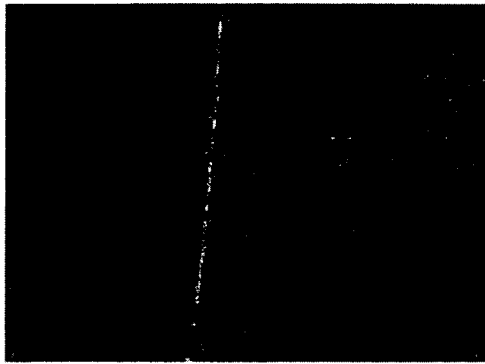
고, 세 번의 실험을 평균하면, 첫 번째 및 두 번째 상변화의 용융에너지는 각각 34 J/g 및 156 J/g으로 측정되었다. Table 1에서 파라핀의 용융에너지인 147 J/g은 Fig.3에서 직선 BC와 두 번째 상변화곡선으로 둘러 싸인 면적에 해당하는 148.2 J/g에 가까운 것이나, 이것은 앞에서의 설명에서와 같이 실제 용융에너지 보다 작은 값이다.

### 3.2 상변화물질 슬러리의 입자 크기

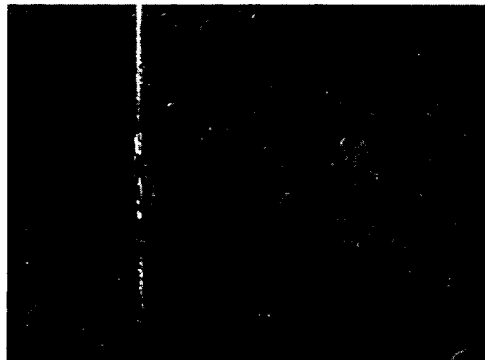
상변화물질 입자의 크기는 일차적으로 슬러리의 안정성과 관련하여 대단히 중요한 변수로 인식되고 있다. 즉, 입자가 작을수록 큰 입자에 비하여 상대적으로 부력의 영향을 적게 받고 점성의 영향을 많이 받아, 상변화물질입자의 밀도가 운반유체에 어느 정도 달라도 유동중에는 운반유체에 균일하게 분산된다. 냉각 중에 입자가 크게 생성되면 입자의 성장이 가속되어 유동관로를 막아 버리는 수도 있다. 또한 입자의 크기는 열전달유체의 압력강하 및 열전달특성을 크게 바꾸어 놓을 수도 있는 요소로 생각된다.

유화제의 분자는 친수성의 머리부분(hydrophilic head group)과 소수성의 꼬리부분(hydrophobic tail)으로 나눌 수 있는데, 물과 기름이 에멀션을 이룰 수 있는 것은 소수성의 꼬리부분이 기름입자를 둘러싸고 친수성의 머리부분이 물과 접촉하는 식으로 유화제가 물과 기름을 연결시키기 때문이다. 따라서 같은 양의 기름에 대하여 유화제의 양이 많을수록 기름의 입자가 작아진다.<sup>(13,14)</sup>

Fig.1에서 물탱크에 첨가할 유화제의 적절한 양



(a)



(b)



(c)

**Fig. 4** Photographs obtained by a CCD camera; (a) emulsifier 0.0125ml, paraffin wax 1g, (b) emulsifier 0.125ml, paraffin wax 1g, and (c) emulsifier 0.25ml, paraffin wax 1g.

을 결정하기 위하여, 기름의 일종인 파라핀의 양을 1g으로 일정하게 하고, 유화제의 양을 달리하면서 생성된 파라핀입자의 크기를 관찰하였다. Fig. 4의

(a), (b) 및 (c)는 1:40으로 희석한 유화제를 각각 0.5, 5, 10 ml를 가한 경우에 생성된 고체상태의 파라핀입자들을 촬영한 것이다. 그림에서 막대로 나타난 것은 크기의 비교를 위하여 넣은 직경 1 mm의 크롬선이다. 유화제의 양이 0.5 ml일 때는 0.15-0.2 mm 직경의 작은 입자들이 주로 생성되었으나, 부분적으로 이들이 뭉쳐 큰 덩어리를 이루어 전체적으로 불균일한 형태를 나타내었다. 유화제의 양이 5 ml일 때는 0.07-0.09 mm 직경의 작은 입자들이 생성되었으며, 전체적으로도 균일한 형상을 보여주고 있다. 유화제의 양이 10 ml일 때는 더욱 작고 크기도 균일한 입자들이 생성되었다. 그림에서 큰 덩어리로 보이는 부분은 입자의 덩어리가 아니라 공기방울이다. 결론적으로 말하면, 파라핀 1g에 대하여 1:40으로 희석한 유화제 10 ml를 가하면 미세하고 균일한 고체 파라핀입자들을 생성시킬 수 있다.

### 3.3 유화제의 양과 입자크기의 이론적 고찰

전술한 바와 같이 생성된 파라핀입자의 크기는 유화제의 양이 많아짐에 따라 작아진다. 구체적으로 어떻게 작아 지는지를 이론적으로 알아보기 위하여 다음과 같이 생각하여 보았다.

먼저 유화제가 분자 하나의 층으로 얇게 펼쳐졌다고 생각했을 때의 면적을  $A_e$ 라 하면, 이것은 유화제의 부피  $V_e$ 에 비례할 것이므로 비례상수  $C_1$ 을 써서 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$A_e = C_1 V_e \quad (1)$$

파라핀이  $n$ 개의 직경이  $d$ 인 입자로 분산되었다고 생각하면 파라핀 입자들의 총 면적,  $A_p$ 는

$$A_p = n\pi d^2 \quad (2)$$

가 되고, 파라핀 입자들의 총 부피,  $V_p$ 는

$$V_p = n\pi d^3/6 \quad (3)$$

가 된다. 유화제가 하나의 층으로 된 면적으로 펼쳐져서 개개의 파라핀 입자를 완전히 둘러싼다고 가정하면,

$$A_e = A_p \quad (4)$$

이고, 여기에 (3)식을 이용하면 다음의 결과를 얻는다.

$$d = C_2 \frac{V_p}{V_e} \quad (5)$$

즉, 파라핀 입자의 크기는 주어진 양의 파라핀을 사용하였을 경우, 가하여 준 유화제의 양에 반비례함을 알 수 있다. 다시 말해서, 유화제의 양을 증가시키면 처음에는 입자의 크기가 급속히 작아지다가, 나중에는 유화제의 양을 크게 증가시켜도 입자의 크기가 거의 변화하지 않음을 예상할 수 있다. Fig. 5는 이를 잘 말해 주고 있다. 본 실험에서  $C_1$  및  $C_2$ 는 각각 14300/mm 및 0.000421mm로서 이는 유화제와 혼합물간의 특성에 따라 달라질 수 있다.

### 3.4 파라핀 슬러리의 관내대류열전달 실험

#### 3.4.1. 파라핀슬러리의 국소평균온도에 대한 가정

파라핀슬러리의 파라핀 입자가 대류열전달에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 앞에서와 같이 생성된 파라핀슬러리를 관내대류열전달 시험부에 가하였다. 전술한 바와 같이, 측정된 가열시험부의 외벽온도로부터 내벽온도를 구할 수 있고, 가열시험부에 가하여지는 전류 및 전압으로부터 가열시험부 내면의 열유속을 계산할 수 있으므로, 파라핀슬러리의 국소평균온도만 알 수 있다면 가열시험부에서 국소열전달계수를 구할 수 있다.

상변화가 없는 유체의 국소평균온도는 가열시험부의 입구 및 출구에서의 평균온도를 알면, 일정열유속 경계조건의 경우 에너지균형식에 의해 국소평균온도가 선형적으로 변화됨을 알 수 있다. 그러나

상변화가 있는 경우에는 선형적이 될 수가 없음이 확실하고, 아직 여기에 대한 연구가 부족하다. 따라서 몇 가지의 가정에 의해 모델을 만드는 것이 필요하다.

최은수 등<sup>(3,4)</sup>은 헥사데케인슬러리의 관내대류열전달 실험에서 삼영역용융모델을 제시한 바가 있다. 여기서의 가정은 첫째, 헥사데케인의 입자가 극히 작아서 운반유체와 온도 차이가 극히 작다는 것이며, 따라서 둘째 가정은, 헥사데케인슬러리가 헥사데케인의 용융온도 이하에서부터 가열되기 시작한다면, 슬러리의 평균온도가 헥사데케인의 용융온도에 도달하기 전에는 비록 가열시험부의 내벽의 온도가 헥사데케인의 용융온도보다 높더라도 헥사

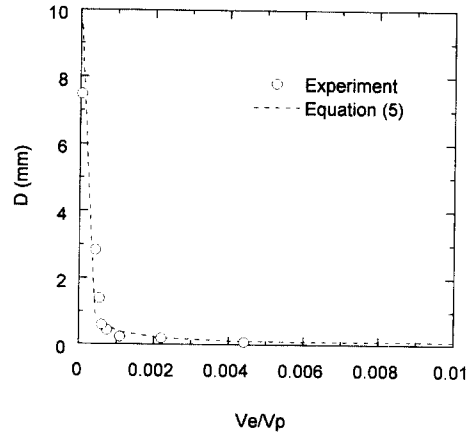


Fig. 5 Average diameters of particles according to various ratios of the amounts of emulsifier and paraffin.

Table 2 Five region melting model.

Regions	Bulk-mean-temperature profiles, $T_b(x)$	Length of each region, $\frac{L_i}{L}$
Region 1	$T_{bi} + \frac{Q}{m_w C_w + m_p C_p} \cdot \frac{x}{L}$	$\frac{L_1}{L} = \frac{m_w C_w + m_p C_{ps}}{Q} \cdot (T_{m1} - T_{bi})$
Region 2	$T_{m1}$	$\frac{L_2}{L} = \frac{m_p \lambda_1}{Q}$
Region 3	$T_{m1} + \frac{Q}{m_w C_w + m_p C_p} \cdot \frac{x - (L_1 + L_2)}{L}$	$\frac{L_3}{L} = \frac{m_w C_w + m_p C_{pm}}{Q} \cdot (T_{m2} - T_{m1})$
Region 4	$T_{m2}$	$\frac{L_4}{L} = \frac{m_p \lambda_2}{Q}$
Region 5	$T_{m2} + \frac{Q}{m_w C_w + m_p C_{pt}} \cdot \frac{x - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)}{L}$	$\frac{L_5}{L} = 1 - \frac{(L_1 + L_2 + L_3 + L_4)}{L}$



데케인 입자의 용융이 무시할만큼 작다는 것이다. 따라서 삼영역용융 모델의 경우, 헥사데케인의 입자가 거의 용융하지 않고 슬러리의 평균온도만 선형적으로 상승하는 제1영역, 슬러리의 평균온도가 헥사데케인의 용융온도에 도달하여 입자들이 급격히 용융하면서 슬러리의 평균온도는 헥사데케인의 용융온도를 그대로 유지하는 제2영역, 더 이상의 고체 입자들이 존재하지 않아 평균온도가 선형적으로 상승하는 제3영역이 존재하게 된다.

최은수 등의 연구에서는 상변화물질로서 헥사데케인을 사용하였고, 헥사데케인은 용융될 때 한 번의 상변화만 생기나, 본 실험에서 사용된 파라핀의 경우 앞의 열분석 실험에서 보인 바와 같이 두 번의 상변화가 생김을 알 수 있다. 따라서 최은수 등의 가정을 따를 경우, 가열시험부내에서 오염역이 생길 수 있고 이를 Table 2에 나타내었다. 가열시험부의 입구에서 파라핀슬러리의 평균온도가 첫 번째 상변화가 일어나는 온도보다 낮은 온도였다면, 파라핀의 입자가 거의 용융하지 않고 슬러리의 평균온도만 선형적으로 증가하는 제1영역, 슬러리의 평균온도가 파라핀의 첫 번째 상변화 온도에 도달하여, 입자들의 첫 번째 상변화가 급격히 일어나면서 슬러리의 평균온도는 첫 번째 상변화온도로 일정하게 유지되는 제2영역, 입자들이 첫 번째 상변화를 모두 마치고 슬러리의 평균온도가 다시 선형적으로 증가하는 제3영역, 슬러리의 평균온도가 파라핀의 두 번째 상변화온도에 도달하여, 입자들의 두 번째 상변화가 급격히 일어나면서 슬러리의 평균온도가 두 번째 상변화온도로 일정하게 유지되는 제4영역, 입자들이 완전히 액체 상태로 되어 더 이

상의 상변화가 없고 슬러리의 평균온도가 선형적으로 증가하는 제5영역이 존재한다. 따라서 관내대류 열전달에서 파라핀슬러리의 국소평균온도를 구할 때는 이상과 같은 오염역 용융모델을 고려하여야 한다.

### 3.4.2. 가열시험부의 에너지균형비

가열시험부의 단열의 정도를 나타낼 때 에너지균형비(Energy balance ratio)를 이용한다. 이것은 열전달유체에 외부에서 가하여 준 열에 대한, 가열시험부의 입구 및 출구에서 열전달유체의 엔탈피 변화량의 비를 말하는 것으로서, 외부에서 가하여 준 열이란 것은 전기적인 주열, 즉, 가열시험부에 가하여지는 전류 및 전압의 곱으로 나타나는 것이고, 열전달유체의 엔탈피 변화량은 총열용량의 차이에 질량유속을 곱한 것이므로,

$$E.B.R = \frac{mC(T_{be} - T_{bi})}{I \cdot V} \quad (6)$$

이다. Fig. 6은 물을 순환시키면서 전기적으로 가하여 준 열과 이 때의 에너지균형비를 측정하는 것으로서, 열이 4.3 kW 이상이면, 에너지균형비가 3%의 오차 안에 들면서 1에 근접하였다. 열이 4.3 kW가 미만이면 오차가 급격히 증가하는데, 이것은 온도측정상의 오차는 일정하지만, 가열시험부의 입구와 출구 사이에서 유체의 평균온도상승이 상대적으로 작아지면서(3.7°C 및 2.0°C) 오차가 상대적으로 커진 것으로 보인다. 따라서 가열시험부가 4.3 kW 이상의 열로 가열되도록 실험을 진행하였다.

### 3.4.3. 파라핀슬러리의 국소대류열전달계수

생성된 파라핀슬러리를 일정한 유속으로 가열시험부에 가하면서, 가열시험부의 국소외벽온도를 측정하여 국소내벽온도로 환산하고, 가열시험부의 입구 및 출구에서의 파라핀슬러리의 평균온도를 측정하여 국소평균온도를 전술한 모델에 의하여 추정함으로써 가열시험부 내에서의 국소대류 열전달계수를 구하였다. 이 때 물 및 파라핀의 유량은 먼저, 가열시험부의 출구에서 혼합물을 일정시간 동안 받고, 이를 진공분리기를 이용하여 물과 파라핀을 분리하여 각각의 질량을 측정함으로써 구하였다. Fig. 7은 레이놀즈수가 같은 부피유량의 물로 환산하였을 때, 평균 48,400이고, 파라핀의 함유량이 4.9-5.1%로 조절되었을 경우, 가하는 열량을 변화

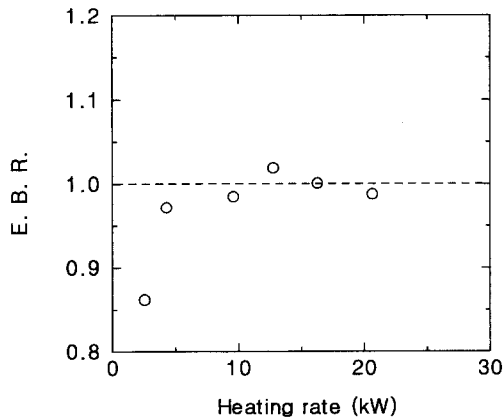


Fig. 6 Energy balance ratios at various heating rates.

시켜 가면서 국소 열전달계수를 측정한 결과이다. 본 실험에서는 열량이 9.5 kW인 경우에 가장 높은 열전달계수가 관찰되었다. 가열부의 출구에서 파라핀이 대규모로 용융되려 하는 경우이다. 열량이 4.3 kW인 경우에는 가하여 지는 열량이 작아 출구의 온도가 아직 파라핀의 용융온도보다 훨씬 낮은 경우이다. 16.4 kW나 20.7 kW의 경우에는 가열부에서 파라핀의 입자가 빠른 속도로 녹기 때문에 열전달계수의 측면에서는 물의 경우보다 별로 높지 않고, 20.7 kW의 경우에는 오히려 물보다 낮다.

열전달계수의 증가가 마찰계수의 증가를 초래하지는 않았다. 파라핀슬러리의 파라핀 함유량이 5% 근처인 경우에는 압력강하가 운반유체 만의 경우에 비하여 거의 차이가 없었다. 파라핀 입자가 압력측정용 구멍을 막는 일이 가끔 나타났으며, 추후의 실험에서는 이를 개선할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

관내대류열전달에 이용할 수 있는 상변화물질 슬러리로 는 일반적으로 순수한 파라핀들(예를 들면 헥사데케인, 테트라데케인 등)이 이용되어 왔으나, 이들은 국내에서 구하기가 쉽지 않고 가격이 비싸다. 따라서 국내에서 쉽게 구할 수 있고 값싼 파라핀을 사용하는 방법을 모색하고자 하였다. 본 연구에서는 일반 상용의 파라핀(Paraffin wax)을 슬러리로 만들어 관내대류열전달에 이용하고자 할 때 생기는 문제점 및 이의 해결책을 다음과 같이 알아 보았다.

(1) 일반 상용의 파라핀의 열분석 실험의 결과, 고체 파라핀이 용융할 때 두 번의 상변화가 각각 다른 온도 (38.8°C 및 55.2°C)에서 일어남을 알 수 있었다. 또 각각의 상변화에너지는 34 J/g 및 156 J/g이었다. 따라서 상용의 파라핀을 사용할 때는 순수한 파라핀과는 달리 열전달의 온도 범위에 따라 두 가지의 상변화를 함께 고려하여 주어야 하고, 이에 따라 기존의 삼영역 용융 모델을 오영역 용융 모델로 확장하여야 한다.

(2) 파라핀은 그 특성상 미세한 입자로 만들기가 쉽지가 않아, 유화제를 이용하는 실험을 수행하였다. 먼저 액체 파라핀을 유화제를 이용하여 물과 함께 에멀전의 형태로 만들어 미세한 액체 파라핀 입자로 만들고 이를 냉각시켜 미세한 고체 파라핀

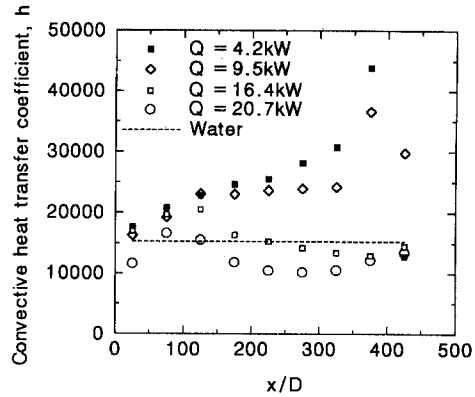


Fig. 7 Local convective heat transfer coefficients along test section (Re=35,000 for water, paraffin volumetric fraction=4.9-5.1%).

입자를 얻었다. 일반 상용의 파라핀도 순수한 파라핀과 같이 주어진 양에 대하여, 입자의 직경은 가하여 준 유화제의 양에 반비례하였고 이를 이론적으로 검증하였다. 유화제의 양이 어느 정도 증가하면 입자의 크기가 크게 변하지 않았으며, 이 때의 직경이 약 0.1 mm 이었다.

(3) 생성된 파라핀슬러리를 일정 열유속 경계조건인 관내로 흘려보내면서 관내대류열전달 특성을 실험하였다. 상용의 파라핀슬러리는 순수한 파라핀슬러리의 경우와는 달리, 파라핀의 양이 부피비로 10%를 넘으면 유동이 불안정하여졌다. 이것은 상용파라핀의 용융온도는 넓은 범위에 걸쳐 있어서 파라핀입자들이 때때로 서로 뭉치면서 관을 막는 현상이 생겼기 때문으로 생각된다. 파라핀의 양이 5%인 경우에는 그러한 현상이 생긴 적이 없으며 항상 안정된 유동을 얻을 수 있었으며, 이 경우에 대하여 관내대류열전달 실험을 수행하였다. 파라핀슬러리의 유량을 일정하게 하면서, 열유속을 변화시키면서 국소열전달계수를 관찰하였다. 순수한 파라핀슬러리의 경우<sup>(3,4)</sup>와 경향이 유사한 결과를 얻었다. 즉, 열전달계수가 최대가 되는 열량조건이 있음을 알 수 있었다. 이것은 열유속이 너무 크면 용융층의 두께가 커서 열전달에 방해가 되고, 반대로 열유속이 너무 작으면 입자들이 잘 용융이 되지 않아 상변화의 효과를 볼 수가 없기 때문이다. 전체적으로는 물보다 높은 열전달계수가 관찰되었다.

## 후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME95-A-01)에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Clearly, 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.
- (2) Winters, P. T., 1991, "Phase Two Laboratory Testing of Direct Freeze Ice Slurry District Cooling,"-Project final report.
- (3) Choi, E., 1993, "Forced Convection Heat Transfer with Water and Phase-Change-Material Slurries: Turbulent Flow in a Circular Tube," Ph. D. Thesis, Drexel University.
- (4) 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.
- (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) 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.
- (7) Sohn, C. W. and Chen, M. M., 1984, "Heat Transfer Enhancement in Laminar Slurry Pipe Flows with Power Law Thermal Conductivities," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 539~542.
- (8) Colvin et al., 1990, "Method of Using a PCM Slurry to Enhance Heat Transfer in Liquids," U. S. Patent 4, 911, 232.
- (9) Colvin et al. 1992, "Enhanced Heat Transport in Environmental Systems Using Microencapsulated Phase Change Materials," *22nd International Conference on Environmental Systems*, pp. 1~9.
- (10) Raznjevic, K, 1976, *Handbook of Thermodynamic Tables and Charts*, p. 4, 21, 38.
- (11) 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.
- (12) 박범진, 1996, "원형관내 난류 유동장에서 파라핀 슬러리와 물을 이용한 강제대류열전달에 관한 연구," 석사학위논문, 명지대학교.
- (13) 박범진, 최은수, 1996, "파라핀슬러리에서 유화제의 양과 입자의 크기에 관한 연구," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B, pp. 300~303.
- (14) Choi, E., Cho, Y. I. and Lorsch, H. G., 1992, "Thermal analysis of the Mixture of Laboratory and Commercial Grades Hexadecane and Tetradecane," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 19, pp. 1~15.