

유동저항 감소유체를 운반유체로 한 파라핀 슬러리의 대류 열전달에 관한 연구

정 동 주, 최 은 수[†]

명지대학교 대학원, *명지대학교 기계공학과

Convective Heat Transfer of a Paraffin Slurry in a Drag Reducing Carrier Fluid

Dongju Jung, Eunsoo Choi[†]

Graduate School, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

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

(Received September 13, 2001; revision received November 5, 2001)

ABSTRACT: Aqueous polymer solutions are known to have small pressure reduction. Paraffin slurries are known to have high thermal capacity. Paraffin particles are mixed into an aqueous polymer solution to make a new heat transfer fluid having high thermal capacity but low pressure reduction. The heat transfer characteristics of the new slurry was tested in a circular tube having a constant heat transfer boundary condition. The new slurry was found to have high Nusselt numbers as well as high thermal capacity and low pressure reduction in the laminar flow. The trends of the Nusselt numbers along the heating test section were studied for various heating conditions.

Key words: Paraffin slurry(파라핀 슬러리), Phase-change material(상변화물질), Convective heat transfer(대류열전달), Aqueous polymer solution(폴리머 수용액), Friction factor(마찰계수), Viscosity(점도), Latent heat(잠열), Shear thinning(전단희박)

기 호 설 명

D : 시험부의 관내 직경 [m]
 h : 대류 열전달계수 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]
 k : 유체의 열전도계수 [$W/m \cdot ^\circ C$]
 Nu : Nusselt 수, hD/k
 Pr : Prantl 수, ν/α
 q : 가열부에서의 열유속 [W/m^2]
 V : 유체의 평균 속도 [m/s]

Re : Reynolds 수, UL/ν
 T : 온도 [$^\circ C$]
 x : 시험부에서의 유동 방향으로의 길이 [m]
 x^+ : 무차원화한 x , 식(1)

그리스 문자

ρ : 유체의 밀도 [kg/m^3]
 τ : 관내벽에서 유체에 의한 전단응력

하첨자

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-330-6429; fax: +82-31-321-4959

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

bi : 가열부 입구에서 유체의 유동 방향으로의

국소적인 평균

bo : 가열부 출구에서 유체의 유동 방향으로의 국소적인 평균

bx : 가열부 내에서의 유체의 유동 방향으로의 국소적인 평균

wi : 관내 벽면에서의 값

1. 서 론

우수한 성능의 열전달 유체를 개발하기 위해서는 열전달 유체의 중요한 특성을 먼저 고려하여야 한다. 우수한 열전달 유체의 중요한 특성은 일반적으로 유체역학적인 측면에서는 압력강하가 작아야 하고, 열적인 측면에서는 열전달계수가 높아야 한다. 그러나 관내 유동의 경우에는 유체의 열용량도 중요한 특성 중의 하나이다. 즉, 유체의 열용량이 클수록 적은 양의 유체를 공급하여도 충분한 냉각 또는 가열의 효과를 얻을 수 있는 경우가 많다. 한 예로서 전자부품을 냉각하는 경우를 생각하여 보자. 최근의 전자부품은 일반적으로 단위면적당 발생열량이 매우 크다. 열전달계수를 높이기 위하여 유로의 단면적을 작게 하고(미소유로 열전달) 전자부품 냉각용 광유를 유로 내로 흘려 보내도 광유의 열용량이 작으면 광유의 온도가 급격히 상승하여 부품 내의 온도를 균일하게 유지시킬 수가 없다. 이를 막기 위하여 유량을 증가시켜도 유로의 단면적이 작아 압력강하가 지나치게 커질 수 있다. 유체의 열용량은 유체의 특성으로서 임의로 변화시킬 수 없으나, 유체에 상변화하는 미세한 입자를 첨가하여 유효 열용량을 증가시키는 방법이 연구되어 왔다.

Kasza and Chen⁽¹⁾은 처음으로 단상의 유체에 상변화물질을 첨가함으로써 유체의 열전달계수가 증가할 것이라는 예측을 하였고, 이는 상변화물질이 용융할 때의 잠열이 유효 열용량이란 개념으로 열용량 증가에 기여하기 때문이라는 이론을 제시하였다. 상변화물질을 첨가하는 방법으로서 상변화물질을 미세한 입자로 만들어 운반유체에 분산시키는 방법과 마이크로 캡슐에 상변화물질을 채워 운반유체에 분산시키는 방법이 제시되었으며, 마이크로 캡슐에 의한 방법이 채택되어 이후 많은 연구자^(2,3)에 의하여 연구 개발되어 왔다. 상변화물질을 마이크로 캡슐에 채운 것을 MCPCM

(micro-encapsulated phase change material)이라 부르며, 실제로 직경이 10~200 μm 정도의 것이 많이 연구되어져 왔으나, 가격이 비싸 대용량의 열전달유체에는 적용하기 어려운 점이 있다. 반면에 최은수 등^(4,5)은 파라핀 슬러리에 대한 연구를 수행한 바 있는데, 파라핀 슬러리는 파라핀을 미세한 입자로 만들어 물에 분산시킨 것으로서 MCPCM에 비하여 가격이 저렴한 장점이 있다. 얼음 슬러리⁽⁶⁾도 상변화물질을 직접 운반유체인 물에 분산시킨 것으로서 파라핀 슬러리와 유사하나, 상변화물질 입자와 운반유체가 같은 물질인 물이라는 점이 파라핀 슬러리와 크게 다르다.

일반적으로 유체에 MCPCM이든, 슬러리가든, 고체입자를 분산시키면 밀도의 차이 때문에 균일한 분산액을 얻기가 힘들고, 동시에 압력강하가 증가할 것이라는 예상을 할 수 있다. 본 연구에서는 폴리머(polymer)의 일종인 세파란(separan-270)을 물 속에 용융시켜 수용액을 만든 후, 여기에 상변화물질로서 파라핀입자를 첨가시켰다. 폴리머 수용액을 사용함으로써 저항감소 효과뿐만 아니라 전단희박(shear thinning) 점성에 의해 비중이 다른 미세한 파라핀입자들을 고르게 분산시키는 것이 가능하며, 이를 열전달 유체로 사용할 때의 특성을 알아보려고 한다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 관내 대류열전달 실험장치

본 연구를 위해 Fig. 1과 같은 실험장치를 사용하였다. 본 장치는 크게 가압부, 고압용 용기, 시험부, 전원부 및 데이터 처리부로 나눌 수 있다. 가압부는 압축기, 압력탱크 및 수은 마노미터로 구성되어 있다. 본 실험장치의 가장 큰 특징은 펌프가 아닌 압력차에 의한 유체유동에 있다. 이는 펌프를 사용할 경우 발생할지도 모르는 폴리머의 기계적인 퇴화 및 진동으로 인한 오차를 없애기 위해서다. 시험부는 내경이 3.66 mm, 총 길이가 1.2 m인 스테인레스 스틸관으로 제작하였다. 유체역학적 발달부를 제외한 가열시험부는 열적 입구영역을 고려하여 전체 길이를 870 mm ($x/D=238$)로 하였다. 가열시험부의 처음과 끝에 2개의 압력탭이 설치되었다. 가열시험부 외벽에 열전대가 설치되었고, 외벽온도를 측정하여

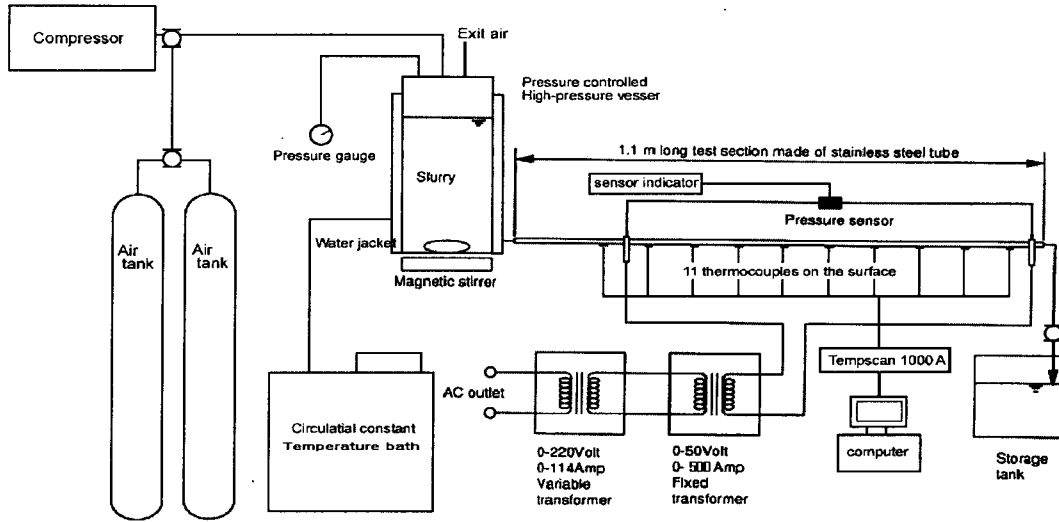


Fig. 1 Experimental apparatus of convective heat transfer test.

내벽온도를 계산하였다. 온도측정을 위해서는 미국 오메가사의 T-type 열전대와 일본 요코가와 의 DA100 데이터로그를 사용하였다. Nu 수를 구 하는데 필요한 측정치는 관 내경, 가열량 및 온도이다. 관 내경은 관의 일부를 절단하여 질량을 측정하여 관의 두께를 구하고 이를 관의 여러 부분에서 측정된 외경의 평균에서 빼는 방법으로 구하였다. 관 외경은 버어니어 캘리퍼스로 측정 하였으며, 평균 4.00 mm이었으며, 계기의 정밀도는 0.05 mm이었다. 관의 질량은 정밀도가 0.0001 g인 전자저울을 사용하여 측정하였으며, 측정값은 1.6532 g이었다. 가열량은 전류와 전압의 곱으로서 가열량이 최소인 경우에 오차가 가장 크며, 이때의 전류 및 전압이 7.8 Volt 및 25.6 Amp.이었으며, 계기의 정밀도는 각각 0.1 Amp. 및 0.1 Volt이었다. Nu 수가 대류 열전달계수에 비해하

고 대류 열전달계수는 관벽온도와 유체의 국소 평균 온도의 차에 비례한다. 시험부에 일정온도의 물을 흘리면서 온도측정장치의 교정을 수행하였으며, 교정 후 온도측정오차가 0.05°C 미만이었다. 본 실험에서는 온도차가 가장 작은 경우에도 5°C 이상이였다.

2.2 파라핀 입자 생성장치 및 열전달 실험조건

일반적으로 파라핀은 상온에서 고체지만 취성이 적어 기계적인 방법으로 미세한 입자를 만들기가 어려운 물질로서 파라핀 슬러리 제작을 위해 특수한 생성장치를 제작하였다. 즉, 파라핀을 녹여 고온에서 유화제를 첨가한 물과 함께 에멀전을 만들고 이를 냉각시켜 서스펜션을 만들면 미세한 파라핀 입자를 얻을 수 있다. 생성된 파

Table 1 Classified table of heating test condition

	Average T_{bi} (°C)	Average T_{bo} (°C)	Average power (W)	Number of exp.
Water	23.3	47.2	158	31
Separan (1,000 ppm)	23.2	38.7	156	19
Paraffin slurry (12%)	23.7	31.8	183	3
	23.2	42.3	364	2
	36.5	44.7	246	5
	36.3	57.1	463	2
	41.4	49.5	245	7
	42.7	58.6	394	2

라핀 입자를 광학 현미경으로 관찰하였으며, 모양이 구형이며, 직경이 약 $10 \mu\text{m}$ 이었다.

물, 폴리머 수용액(separan 1,000 ppm) 및 파라핀 슬러리(폴리머 수용액에 파라핀 입자를 섞은 것)를 이용하여 열전달 실험을 하였으며, 가열 실험의 경우에 실험조건은 Table 1에 표시하였다. 파라핀 슬러리는 가능하면 최대의 농도를 만들고자 하였으나, 실제로 입자가 매우 미세하여 농도가 큰 경우에는 유동이 불안정하여, 본 연구에서는 유동에 어려움이 없으면서도 최대의 농도로서 12%를 만들어 실험하였다. 이상의 실험장치 및 조건에 대하여는 참고문헌⁽⁷⁾에 상세히 기술하였다.

3. 실험결과 및 해석

3.1 파라핀, 폴리머 수용액 및 파라핀 슬러리의 특성

DSC(differential scanning calorimeter)를 사용하여 파라핀의 용융점(melting point) 및 용융에너지(fusion energy)를 구하였다. 파라핀은 용융할 때 두 번의 상변화를 하며, 각각의 상변화온도가 38.8°C 및 55.1°C 로 측정되었으며, 각각의 용융 에너지는 34 kJ/kg 및 156 kJ/kg 으로 측정되었다.

본 연구에 사용된 폴리머 수용액(separan AP-273)은 전단희박유체(shear thinning fluids)로서, 낮은 전단율에서는 점도가 매우 크고, 전단율이 증가함에 따라 점도가 감소하는 특징을 나타낸다. 이러한 수용액에 파라핀 입자를 분산시키면 입자가 고르게 분산되면서 압력강하는 감소하는 열전달유체를 얻을 수 있을 것이다. 1,000, 5,000, 10,000 ppm의 세파란 수용액에 파라핀 입자를 분산시켜 분산상태를 관찰하였으며, 본 연구에서는 1,000 ppm의 경우가 적당한 것으로 판단되었다.

1,000 ppm 세파란 수용액 및 여기에 파라핀 입자를 질량비에 따라 12% 첨가한 파라핀 슬러리의 점도를 측정하기 위하여 브룩필드사의 회전실린더형 점도계를 사용하였다. 각각의 경우에 온도를 20°C 에서 65°C 로 변화시켰다. 전단희박유체의 일반적인 특성과 같이 1,000 ppm 세파란 수용액은 전단력이 증가함에 따라 점도가 급격히 감소하다가 점차 일정한 값에 근접하였으며, 또한 온도증가에 대하여도 점도가 감소하였다. 파

라핀 슬러리도 이와 유사한 경향을 보였으나 파라핀 입자의 영향으로 점도가 약간 높게 측정되었으며, 파라핀 입자가 완전히 용융된 경우에는 오히려 세파란 수용액보다 점도가 더 낮게 측정되었다. 고전단력점도(high shear rate viscosity)를 유체의 온도에 따라 구하고, 이를 관내 대류 열전달 해석에서 관마찰계수 및 레이놀즈수를 구하는 데 이용하였다. 파라핀의 열적 특성 및 폴리머 수용액과 파라핀 슬러리의 점도측정 결과에 대한 더 상세한 내용은 참고문헌⁽⁷⁾에 기술하였다.

3.2 마찰계수

마찰계수는 $\tau / (\frac{1}{2} \rho V^2)$ 로서 τ 는 관내벽에서 유체에 의한 전단력으로서 시험부에서의 압력차를 구하여 계산하였다. 파라핀 슬러리를 실험하기 전에 먼저 물을 실험함으로써 실험장치의 성능을 알아보았다. 물의 경우에는 관마찰계수가 완전발달 층류의 이론식인 $16/\text{Re}$ 와 거의 일치함을 알 수 있었다. Fig. 2는 1,000 ppm의 세파란 수용액과 여기에 파라핀 입자를 질량비로 12% 첨가한 파라핀 슬러리의 유동에 대한 관마찰계수를 나타낸 것이다. 전단희박유체에서 흔히 볼 수 있듯이 마찰계수가 완전발달 층류 관내 유동에서의 이론치인 $16/\text{Re}$ 에 비하여 대단히 작게 측정되었다. 더욱이 12%의 파라핀 입자를 첨가한 경우도 첨가하지 않은 경우와 유사한 마찰계수를 가졌다.

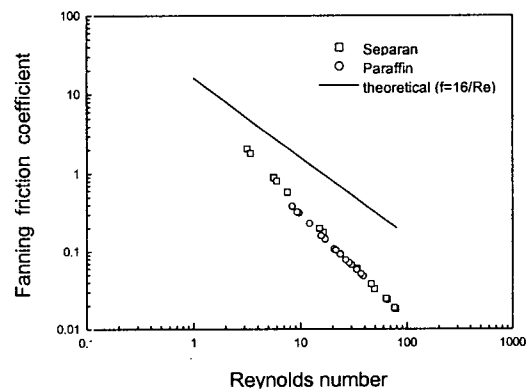


Fig. 2 Fanning friction factor measured for the 1,000 ppm aqueous solution of separan and the paraffin slurry in the aqueous solution.

3.3 Nu 수

유체역학적 발달구간이 가열시험부 이전에 있기 때문에, 가열시험부 내에서 유체역학적으로는 완전발달이라고 볼 수 있지만 열적으로는 발달하고 있는 구간이며, 특히 비뉴턴 유체인 경우에는 열적 발달구간이 뉴턴 유체에 비하여 길다고 알려져 있기 때문에 본 실험에서 가열시험부 내에 여덟 개의 위치에서 각각 국소 Nu 수를 구하여 비교하였다. 국소 Nu 수는 $h_x D/k$ 이며 여기서 h_x 는 $q/(T_{wi}-T_{bx})$ 에 의하여 구하였다. 관내 벽온도 T_{wi} 는 각 위치에서 측정된 관외벽온도를 이용하여 계산하였으며, 유체의 온도 T_{bx} 는 입구 및 출구온도가 선형적으로 변한다고 보고 계산하였다.

Fig. 3에서 가로 좌표는 가열시험부로부터 유동 방향으로의 거리인 x 를 무차원화한 변수인 x^+ 로서 다음과 같이 정의되었다.

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

이 그래프에서 실선으로 나타낸 곡선은 일반적인 뉴턴 유체의 층류 이론에서 얻은 결과로서 급수해로 나타난 것을 계산하여 얻은 것이다. 세파란 1,000 ppm에 대한 19회의 실험결과가 모두 작은 점으로 나타나 있으며, 여러 가지 Re 수와 가열량에 대하여 모두 하나의 곡선으로 나타났다. 뉴턴 유체의 경우에는 x^+ 가 0.1인 경우에 열적으로 완전발달에 가까우나, 세파란 1,000 ppm의 경우에는 x^+ 가 10 정도에서 완전발달이 됨

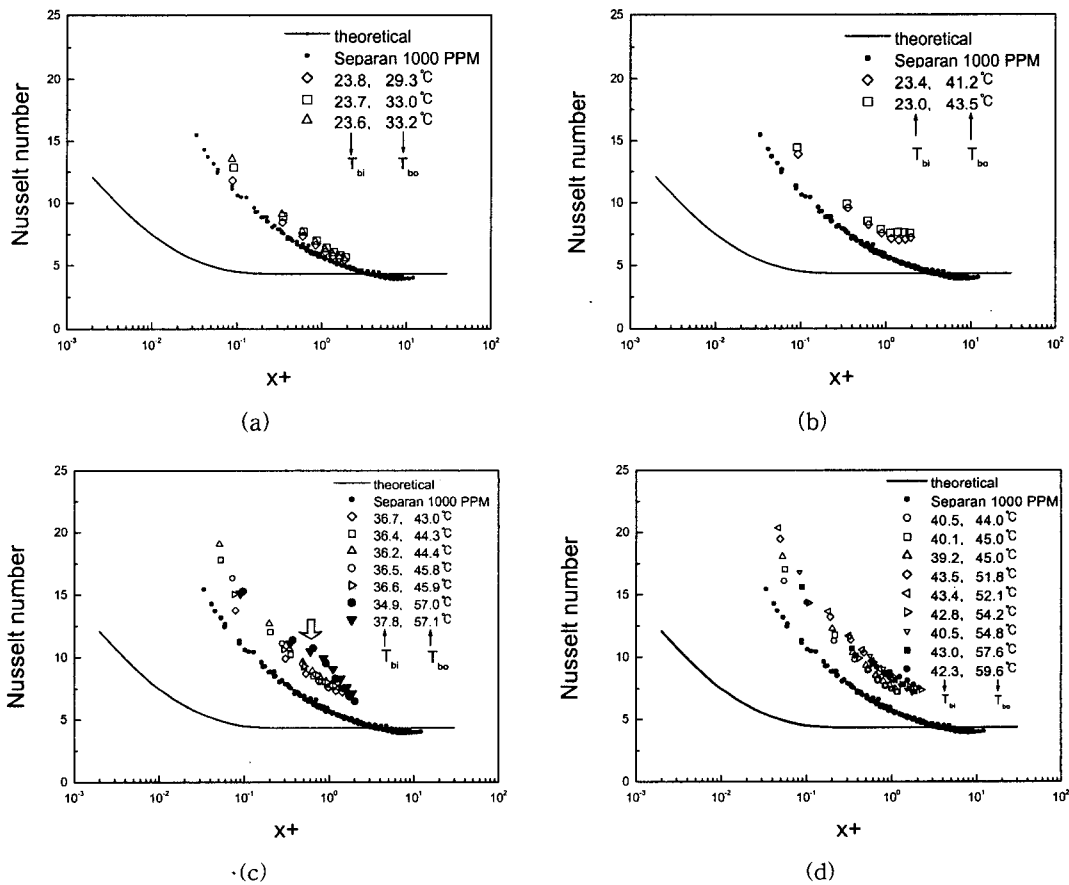


Fig. 3 Nusselt number measured for the 1,000 ppm aqueous solution of separan and the paraffin slurry in the aqueous solution.

알 수 있었다. 뉴우톤 유체의 경우에는 완전발달 Nu 수가 4.364로 알려져 있으나, 세파란 1,000 ppm의 경우에는 그보다 좀 작은 값으로서 4.0이었다.

세파란 1,000 ppm에 파라핀 입자를 질량비 12%로 섞은 파라핀 슬러리의 실험결과를 세파란 1,000 ppm의 경우와 비교하였다. 상용 파라핀은 1차 및 2차 용융점이 38.8°C 및 55.1°C임을 고려하면, Fig. 3(a)는 파라핀이 가열시험부 전체에서 용융하지 않은 경우를 말한다. 즉, 파라핀 슬러리의 입구 및 출구에서의 평균 온도가 파라핀의 1차 용융 온도보다 낮은 경우로서 평균적으로 파라핀이 전 영역에서 녹지 않았음을 말한다. 그러나 Choi et al.^(4,5)의 연구에서 볼 수 있듯이 가열시험부의 내벽은 파라핀의 1차 용융 온도보다 높을 수 있고, 따라서 파라핀 입자가 국부적으로 녹았다가 다시 응고할 수는 있다. 이 때문에 가열량이 클수록, 출구온도가 높아지고, Nu 수가 약간씩 증가하였다. 반면에 Fig. 3(b)는 출구온도가 파라핀의 1차 용융온도보다 높은 경우로서 가열시험부의 출구 부근에서 Nu가 앞의 경우에 비하여 현저히 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 3(a) 및 (b)의 경우에는 파라핀 슬러리의 입구온도(평균 23.5°C)가 파라핀의 1차 용융온도보다 현저히 낮은 경우이나, Fig. 3(c)는 파라핀 슬러리의 입구온도(평균 36.4°C)가 파라핀의 1차 용융온도보다 약간 낮은 경우이다. 속이 빈 표식으로 나타난 데이터는 파라핀 슬러리의 출구온도(평균 44.7°C)가 파라핀의 1차 용융온도보다는 높고, 2차 용융온도보다 낮은 경우이며, 검은 표식으로 나타난 데이터는 출구온도(평균 57.1°C)가 파라핀의 2차 용융온도보다도 높은 경우이다. 전체적으로 Nu 수가 높게 나타났으며, 특히 출구온도가 2차 용융온도보다도 높은 경우에는 출구 근처에서 또 한번 Nu 수가 현저히 증가함을 볼 수 있다. 이 그래프상에서 보면, 세파란 수용액에 파라핀 입자를 첨가함으로써 인하여 세파란 수용액의 국소 Nu 수가 최대 1.73배(Fig. 3(c)에 화살표로 나타낸 부분)까지 증가할 수 있음을 보여주었다. Fig. 3(d)는 파라핀 슬러리의 입구온도(평균 41.7°C)가 파라핀의 1차 용융온도보다 높고 2차 용융온도보다 낮은 경우이다. 속이 빈 표식으로 나타난 데이터는 슬러리의 출구온도(평균 49.5°C)가 파라핀의 2차 용융온도보다 낮은 경우로서, 평균적으로는 가열시험부 내에서 파라핀 입자의 용융

이 없으나 국소적으로는 내벽 근처에서 파라핀이 녹았다가 다시 내벽에서 멀어지면서 응고하는 것을 반복하여 Nu 수의 증가에 기여한다고 보여진다. 검은 표식으로 나타난 데이터는 슬러리의 출구온도(평균 58.6°C)가 파라핀의 2차 용융온도보다 높은 경우로서 Nu 수가 더 증가하였다.

4. 결 론

세파란 1,000 ppm 수용액에 미세한 파라핀 입자를 질량비 12%로 섞어 만든 파라핀 슬러리의 관내 대류 열전달 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) 파라핀 입자가 부력에 의하여 위로 뜨는 것을 막기 위해서는 세파란의 농도가 높을수록 좋으나, 세파란의 농도가 높으면 점도가 높아지기 때문에 압력손실이 커진다. 본 실험에서는 세파란 수용액의 적절한 농도는 1,000 ppm이었다.

(2) 전단회박유체인 세파란 1,000 ppm의 관마찰계수는 뉴우톤 유체의 관마찰계수에 비하여 작았다. 세파란 1,000 ppm에 파라핀 입자를 12% 분산시킨 파라핀 슬러리의 관마찰계수는 세파란 1,000 ppm 수용액의 관마찰계수와 유사하였다.

(3) 파라핀 슬러리의 입구온도를 여러 가지로 변화시키면서 Nu 수를 측정하였으며, 전체적으로 세파란 1,000 ppm 수용액의 경우보다 높게 측정되었다. 특히 파라핀 슬러리의 입구온도가 파라핀의 1차 용융온도보다 약간 낮고, 출구온도가 2차 용융온도보다 약간 높게 유지한 경우에 Nu 수가 가장 높았으며, 본 실험에서는 최대 1.73배로 증가한 Nu 수를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구의 지원(971-1006-035-2)으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. 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, *J. Solar Energy Engineering*, Vol. 107, pp. 229-236.
2. Charunyakorn, P., Sengupta, S. and Roy, S. K., 1991, Forced convection heat transfer in microencapsulated phase change material slurries: flow in circular ducts, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34. No. 3, pp. 819-833.
 3. 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.
 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. 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.
 6. Cleary, C., Day, S., Lindsay, R., Murry, C., Gupta, R., Larkin, B., Thompson, H., Wiggins, 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.
 7. Jeong, D. and Choi, E., 1999, Convective heat transfer of a paraffin slurry in a shear thinning carrier fluid, *Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting* pp. 612-617.