

## 아이스 슬러리의 수송 및 냉열이용에 관한 연구

길복임, 이윤표\*, 정동주\*\*, 조봉현\*\*, 최은수\*\*  
 안양대학교 식품영양학과, \*한국과학기술원 열유동제어연구센터, \*\*명지대학교 기계공학과

### A Study on Transport and Heat Utilization of Ice Slurries

Bogim Gil, Yoonpyo Lee\*, Dongju Jung\*\*, Bonghyun Cho\*\*, Eunsoo Choi\*\*

Department of Food and Nutrition, Anyang University, Anyang 430-714, Korea

\*Department of Thermal-Flow Control Research, KIST, Seoul 136-791, Korea

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

(Received August 13, 2001; revision received September 4, 2001)

**ABSTRACT:** To investigate hydraulic and thermal characteristics of ice slurries in a circular tube, ice slurries were tested in a flow loop with a constant heat flux test section, for ranges of flow velocity, ice fraction and heat flux. Heat transfer coefficients and friction factors of ice slurries were calculated by measuring the outer wall temperatures of the test section and the pressure drops over the test section. Heat transfer coefficients of ice slurries were 9% higher than the heat transfer coefficients expected by Petukhov. Friction factors were about 4% lower than the friction factors expected by Petukhov. The effective thermal capacity of ice slurry with 12.8% ice fraction, was found to be about 3 times higher than the thermal capacity of water.

**Key words:** Ice slurry(아이스 슬러리), Heat flux(열유속), Heat transfer coefficient(열전달계수), Friction factor(마찰계수), Effective thermal capacity(유효 열용량)

#### 기호 설명

$C$  : 열용량 [ $J/kg \cdot ^\circ C$ ]

$C_{eff}$  : 유효 열용량 [ $J/kg \cdot ^\circ C$ ]

$D$  : 시험부의 관내 직경 [m]

$\dot{m}$  : 질량 유량 [ $kg/s$ ]

$Nu$  : Nusselt 수,  $hD/k$

$Pr$  : Prandtl 수,  $\nu/\alpha$

$Q$  : 단위시간당 가열열량 [Watts]

$Re$  : Reynolds 수,  $UL/\nu$

$\Delta T$  : 유체의 출구온도-유체의 입구온도 [ $^\circ C$ ]

$X$  : 시험부에서 유동 방향으로의 길이 [m]

#### 그리스 문자

$\phi$  : 얼음입자의 농도 [%]

#### 하첨자

$b_i$  : 시험부 입구에서 유체온도

$b_o$  : 시험부 출구에서 유체온도

exp. : 실험에 의해 측정된 값

Pet. : Petukohv에 의해 계산된 값

$w$  : 물의 경우

† Corresponding author

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

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

## 1. 서 론

최근 들어 컴퓨터 등으로부터의 내부발열이 증가함에 따라서 냉열 수요가 높은 빌딩이 증가하고 있으며, 국내 산업의 발전 및 국민소득 향상에 따른 하절기 냉방수요의 급격한 증가는 여름철 전력 예비율의 급격한 하락을 초래하고 있다. 이에 따라 전력수급의 안정화 및 전력피크 부하의 평준화를 위하여 새로운 지역냉방시스템의 도입에 대한 필요성이 증대되고 있으며, 이미 미국과 캐나다를 비롯한 몇몇 국가에서는 지역냉방시스템을 위한 연구를 1970년대 초부터 시작하였다. 현재 우리나라의 경우엔 에너지효율 증대의 한 방편으로 열병합발전소를 이용한 지역냉방시스템이 가동 또는 건설되고 있으며, 지역냉방시스템은 사용하고 있지 않는 실정이다.

지역냉·난방시스템은 난방의 경우 열병합발전소의 각종 터빈을 이용하여 전력을 생산한 후 남은 여열을 이용 80~85°C의 온수를 그리고 냉방의 경우는 5~13°C의 냉수를 파이프라인을 통해 해당 지역에 공급하는 시스템이다. 이러한 지역냉·난방시스템은 전체 공정의 70%가 배관공사이며 냉·난방을 위한 대량의 열전달 유체를 배관을 통해 공급함으로써 어마어마한 양의 공급전력이 필요하게 된다. 이에 따라 반송동력 감소 및 효율적인 열전달 촉진을 위한 연구가 진행되어 왔으며, 상변화물질(phase-change material)을 운반유체인 물 속에 분산시킨 상변화물질 슬러리(phase-change material slurry)에 관한 연구<sup>(1,2)</sup>와 마찰저항 감소(friction reduction)를 위해 폴리머 또는 계면활성제를 소량 운반유체에 분산시켜 수용액을 만들어 유동시키는 연구<sup>(3)</sup>가 그것이다. 폴리머 또는 계면활성제 첨가의 경우는 단지 마찰저항의 감소를 통한 반송동력의 절감을 위한 것이며 열전달 측면에서는 오히려 열전달률을 감소(colburn analysis)시키는 경향이 있어 열전달률 향상을 위한 추가적인 연구가 수행되어야 한다.

아이스 슬러리에 관한 연구는 미립 얼음입자를 운반유체인 물 속에 분산시킨 상변화물질 슬러리에 관한 연구의 일환으로, 지역냉방시스템에 사용될 경우, 열 수송밀도의 증대와 열 수송거리의 장거리화 및 높은 냉열용량에 따른 수송배관 크기 축소에 의한 점유공간의 감소와 부설비의 절감 및 반송동력의 감소 등이 예상된다.

아이스 슬러리를 이용한 압력 강하에 관한 연구를 살펴보면, Sellgren<sup>(4)</sup>와 Takahashi et al.<sup>(5)</sup>은 아이스 슬러리의 유속이 일정 유속 이상인 경우는 단상 유동인 물의 경우와 유사한 압력 강하를 나타내며, 일정 유속 이하인 경우는 물보다 큰 압력 강하를 나타내는데 이는 관벽과 얼음입자 사이에 발생하는 마찰에 기인한다고 발표하였으며, Kawashima<sup>(6)</sup> 또한 저속의 경우 압력 강하가 물에 비해 크게 나타난다고 발표하였다. 이와는 달리 Knodel<sup>(7)</sup> 등은 슬러리의 유속이 1.5~3 m/s인 경우, 물에 비해 마찰 저항이 25~30% 감소하였으며, 이는 얼음입자에 의해 형성된 플러그 지역(plug region)에서의 난류 억제에 의한 것으로 추정하였다. 열전달에 관한 연구는 Knodel이 동일한 Re 수에서 농도변화에 따른 열전달계수를 측정한 결과, 농도가 증가함에 따라 임계농도가 지는 열전달계수가 감소하나 그 이상의 경우는 일정하며, 이러한 감소현상은 얼음입자에 의한 난류억제효과에 기인한다고 발표하였으나, Cleary et al.<sup>(8)</sup>은 열교환기를 이용한, 얼음입자 농도변화에 따른 열전달 실험을 수행하여 농도가 증가함에 따라 열전달계수 또한 증가한다고 발표하였다. Snoek et al.<sup>(9)</sup>은 얼음입자의 농도와 유속 및 공급전력을 변화시키면서 관내 대류 열전달 실험을 수행하여, 실험값과 Dittus-Boelter의 이론값과의 보정계수(correction factor)를 구하였다.

아이스 슬러리 유동은 상변화를 수반하는 다상 유동으로서 그 현상이 매우 복잡하여 아직 명확한 설명이 부족한 실정이며, 상기의 문헌에서도 서로 상충되는 설명이 많다. 본 연구에서는 관내 유동에서 얼음입자로 인한 압력 강하 및 열전달계수의 변화를 중점적으로 관찰하여 결론을 얻고자 한다.

## 2. 실험장치 및 조건

### 2.1 실험장치

아이스 슬러리의 압력강하 및 열전달 실험을 위하여 Fig. 1와 같은 일정 열 유속 경계조건(constant heat flux boundary condition)을 가진 실험장치를 사용하였다. 실험장치는 크게 아이스 슬러리 생성 및 저장부, 시험부, 전원부 및 Data 인식부로 나눌 수 있다. 얼음입자는 Hoshizaki사

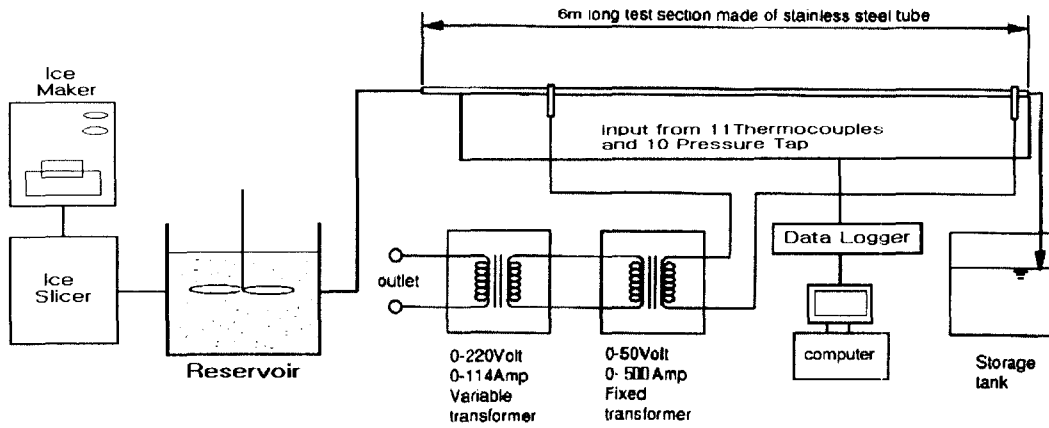


Fig. 1 Experimental apparatus of convective heat transfer test.

의 IM-85 모델인 수냉식 제빙기와 동사의 HC-27 모델인 Slicer로 구성되어 있으며, 제빙기에서 생성된 직사각형 모양의 얼음 덩어리(2.5×3.0×2 cm)를 Slicer를 이용 1~2 mm 크기의 입자로 만들어 운반유체인 물 속에 분산시켜 저장부에 저장하였으며, 이를 펌프를 사용하여 시험부로 순환시켰다. 시험부는 내경이 10.1 mm, 외경이 12 mm, 길이가 600 mm인 스테인레스 스틸관으로 제작하였다. 시험부는 다시 유체역학적 발달영역과 가열시험부로 나뉘며, 유체역학적 발달영역은 가열시험부에서 유체의 흐름이 완전발달흐름이 되도록 만들기 위하여 내경의 100배가 되는 약 1 m의 길이로 하였다. 보통 대류 열전달의 단상류(single-liquid flow)에서 가열시험부의 길이는 80 D보다 작다. 그 이유는 난류에서 열적 입구영역이 약 15~20 D 정도이기 때문이다. 그렇지만 이 상류(two-phase flow)에서는 상변화현상을 관찰하기 위해서는 가열부의 길이가 80 D로는 너무 작다. 따라서 본 실험에서는 가열시험부의 길이를 약 450 D로 설치하였다. 가열시험부의 양쪽 끝은 전력공급용 플랜지를 용접하여 교류전원 공급장치와 대용량 슬라이드스로 구성된 전원부에서 나오는 전력을 가열시험부에 전달하도록 하였다. 슬라이드스는 최대전압이 220 V, 최대전류가 114 A이고, 전원공급장치는 최대전압 및 최대전류가 각각 50 V, 114 A이며 실험상 위험부담을 줄이기 위해 교류전원을 사용하였다. 가열시험부에는 관 외벽에 9개의 열전대와 입출구 부분에 각각 열전대를 설치하여 총 11개의 T type 열전대와 10개의 압력탭이 설치되었고, 압력탭은 Omega

사의 PX26 계열 모델인 압력센서와 연결되어 구간별 차압을 측정하였다. 측정된 온도값 및 압력값은 일본 Yokogawa사의 DA100 모델을 data logger로 사용하여 2초 간격으로 10회에 걸쳐 컴퓨터에 가시화 및 저장하였으며, 평균값을 자료 해석에 사용하였다.

2.2 실험조건

실험은 크게 물 및 아이스 슬러리를 가열 및 비가열 실험으로 나누어 수행하였으며, Table 1은 아이스 슬러리를 이용한 실험 조건이다.

Table 1에 도시된 바와 같이 가열실험의 경우, 가열시험부 내에서 얼음입자가 완전히 용융되도록 공급열량(heat flux), 얼음입자의 농도(ice fraction) 및 유량(velocity)을 변화시키며 총 100번의 반복실험을 수행하였고, 비가열실험의 경우 농도 및 유량을 변화시키며 총 48번의 반복실험을 수행하였다. 얼음입자의 농도는 가열시험부에 공급된 전기적인 공급열량과 아이스 슬러리의 엔탈피

Table 1 Experimental test condition

	Test without heating	Test with heating
Heat flux (kW)	-	9.75~18.04
Velocity (m/s)	1.5~2.73	1.96~2.54
Ice fraction (%)	4.7~12.58	3.08~12.58
Re no.	8800~15400	12900~17700
Outlet temp.(°C)	0.0	3.98~20.47
Inlet press.(kgf/cm <sup>2</sup> )	0.4~0.9	0.44~0.6

증가량과 같다는 에너지 평형을 이용하여 구하였다. 즉, 공급열량은 물의 온도 상승에 따른 엔탈피 증가량과 얼음입자의 용융시 흡수된 열량의 합과 동일하다는 가정하에서 얼음입자의 농도를 계산하였으며, 수식은 다음과 같다.

$$V \cdot I = C \cdot \dot{m} \cdot \Delta T + 334 \cdot \Phi \cdot \dot{m} \quad (1)$$

실제 에너지 밸런스를(E.B.R) 측정을 위하여 공급열량을 변화시키면서 물을 이용한 가열실험을 한 결과 4% 오차범위 내에 들었다.

### 3. 실험결과 및 해석

#### 3.1 아이스 슬러리의 열전달

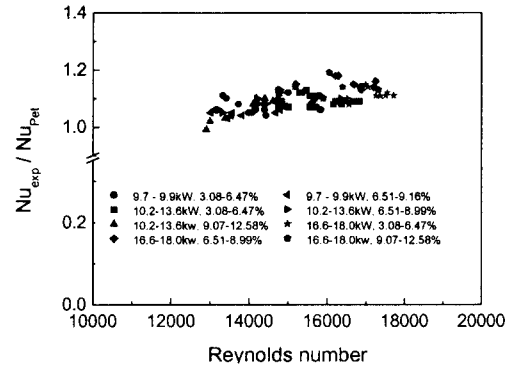
Fig. 2는 아이스 슬러리의 유량과 얼음 입자의 농도 및 공급열량을 변화시키면서 측정한 Nu 수를 Petukhov의 이론값<sup>(10)</sup>과 비교하여 도시한 것이며, Petukhov의 이론식은 다음과 같다.

$$Nu_{Pet} = \frac{RePr(f/8)}{1.07 + 12.7(Pr^{2/3} - 1)\sqrt{f/8}} \quad (2)$$

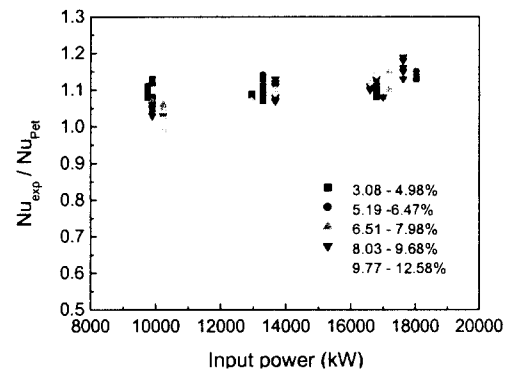
$$f_{Pet} = (1.82 \log_{10} Re - 1.64)^{-2} \quad (3)$$

본 해석에 사용된 Nu 수는 아이스 슬러리의 혼합유체 평균 온도(bulk mean temperature), 즉 입구와 출구 온도의 평균 온도를 구하고자 하는 물성치의 기준 온도(reference temperature)로 사용하여 구한 값이다.

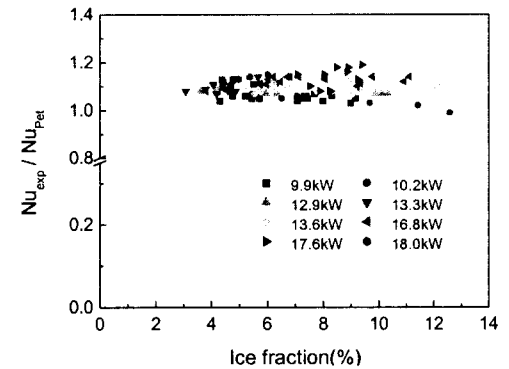
Fig. 2에 도시된 바와 같이 측정된 Nu 수는 Petukhov의 이론값에 비해 Re 수가 증가함에 따라 2%에서 19%까지의 증가폭을 가지며 증가하였고, 평균 9.4% 증가한  $Nu_{exp} = 1.094 Nu_{Pet}$ 을 나타내었다. 이는 Re 수가 증가함에 따라 얼음입자들의 영향이 점점 증가하는 것으로서, 즉 Re 수가 증가함에 따라 난류강도가 더욱 커져 얼음입자들이 관 내벽에 부딪히는 정도가 증가하여 열경계층을 교란하여 열전달을 향상시켰다고 볼 수 있다. Fig. 2(b)에서는 가열부에 가하는 전력의 크기를 증가시킴에 따라 Nu 수가 Petukhov의 예상치보다 약간씩 증가함을 볼 수 있다. 이는 공급열량이 증가함에 따라 가열부 내벽의 온도가 증



(a) Reynolds number



(b) Input power



(c) Ice fraction

Fig. 2 Nusselt number of ice slurry with various test conditions.

가함으로 인하여 벽에 부딪히는 얼음입자의 용융이 촉진되어 Nu가 상승하는 것으로 생각된다.

Fig. 2 (c)에서는 얼음입자의 농도를 증가시킴으로 인하여 Nu 수가 단상유동에 비하여 크게 변

하지 않을 것을 예상하게 하여 준다. 일반적으로 상변화물질 입자를 단상유동에 첨가하게 되면 유동의 Nu 수가 입자의 농도에 비례하여 증가할 것으로 기대되는데, 본 연구에서는 입자의 크기가 1~2 mm로서 충분히 작지 않아, 얼음입자의 농도가 3.1~12.6%인 범위에서는 농도의 영향이 뚜렷이 나타나지 않았다.

3.2 아이스 슬러리의 압력강하

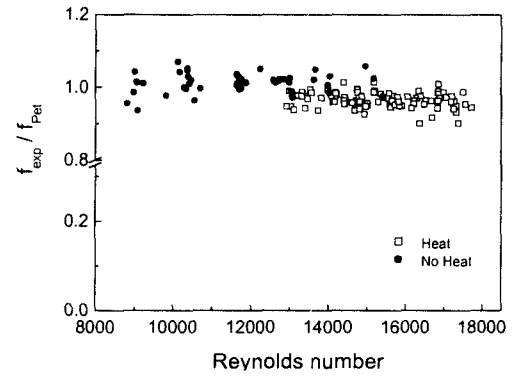
Fig. 3은 아이스 슬러리의 가열 및 비가열 실험에서 유량, 농도 및 공급열량을 변화시키면서 측정된 마찰계수를 Petukhov의 이론값<sup>(10)</sup>과 비교한 값이며, Petukhov의 마찰계수는 식(3)에 나타내었다. 본 연구에 사용된 마찰계수는 각 구간별로 측정된 국소적인 압력강하를 평균한 값을 사용하여 계산한 Fanning friction factor를 사용하였다.

Fig. 3의 세 그래프를 보면 전체적으로 아이스 슬러리의 마찰계수가 Re 수, 공급열량 및 얼음입자 농도에 거의 영향을 받지 않음을 보여준다. 즉, Petukhov의 예상치에 거의 근접함을 알 수 있다. Fig. 3(a)는 가열 및 비가열실험의 결과를 보여주는 것으로서, 각각의 경우에 Re 수의 영향이 거의 없음을 알 수 있으나, 가열의 경우에는 Petukhov의 예상치보다 3% 증가하였고, 비가열의 경우에 비하여 Petukhov의 예상치보다 4% 정도 감소하여 가열의 경우가 비가열의 경우에 비하여 약 7% 감소하였다. 이는 가열시험부가 가열되면, 관 내벽에서 얼음 입자의 용융으로 인하여 마찰이 감소하는 것으로 생각된다.

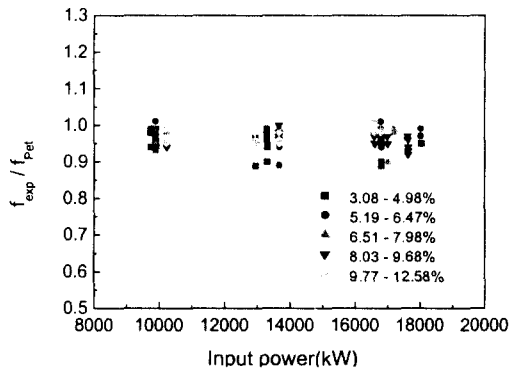
아이스 슬러리의 압력강하는 슬러리의 유량과 얼음입자의 크기 및 농도에 따라 그 경향이 다른 것으로 발표되었으나, 본 실험 조건하에의 아이스 슬러리의 마찰계수는, 증가 또는 감소폭 등을 고려해 볼 때 Petukhov의 마찰계수와 큰 차이가 없다고 보는 것이 옳은 것 같다.

3.3 아이스 슬러리의 유효 열용량

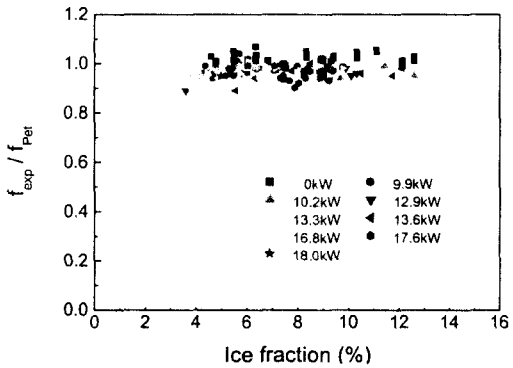
Fig. 4는 아이스 슬러리의 농도 변화에 따른 유효 열용량을 도시한 것으로 얼음입자의 농도가 최저농도(3.08%)인 경우에 동일조건에서의 물의 열용량에 비해 17% 증가하였고, 최고농도(12.58%)인 경우엔 305% 증가하였으며, 유효 열용량의 근사곡선은 다음과 같다.



(a) Reynolds number



(b) Input power



(c) Ice fraction

Fig. 3 Friction factor of ice slurry with various test conditions.

$$Y = 1.000 + 0.014x + 0.007x^2 \quad (4)$$

본 연구에 사용된 유효 열용량은 다음 식으로 정의되었다.

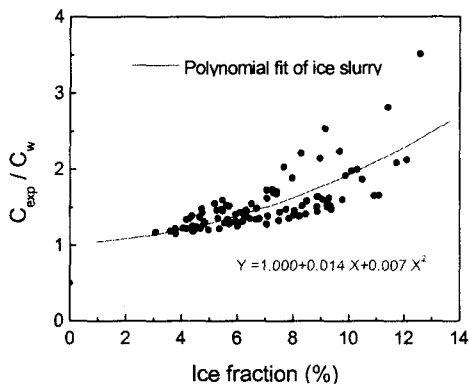


Fig. 4 Effective thermal capacity of ice slurry with various ice fraction.

$$C_{eff} = \frac{Q}{\dot{m} \cdot (T_{bo} - T_{bi})} \quad (5)$$

Fig. 5는 아이스 슬러리의 유효 열용량과 미립 피복 상변화물질 슬러리의 유효 열용량을 비교 도시한 그림으로 아이스 슬러리의 유효 열용량이 다른 상변화물질 슬러리에 비해, 상변화물질의 농도가 증가할수록 그 증가폭 또한 커짐을 알 수 있다. 이는 상변화물질의 용융에너지의 차이에 의한 결과로서 얼음, 옥타데케인 및 로릭산의 용융에너지는 각각 80 kcal/kg, 34.4 kcal/kg, 38.5 kcal/kg였다.

4. 결 론

냉열 수송을 위한 아이스 슬러리를 이용한 열 전달 및 압력강하 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 아이스 슬러리의 Nu 수는, 본 실험조건하에서 Re 수와 공급열량이 증가함에 따라 증가하였으며, Petukhov의 이론값에 비해 2%에서 19%까지 증가폭을 보였으며, 평균  $Nu_{exp} = 1.094Nu_{Pet}$ 로 나타났다. 얼음입자의 농도에 따라 Nu 수가 크게 변하리라 예상되었으나, 본 연구의 농도범위(3.1~12.6%)에서는 Nu 수의 변화가 명확하지 않았다.

(2) 아이스 슬러리의 마찰계수는 비가열의 경우에 Petukhov의 이론값보다 3% 증가하였으나

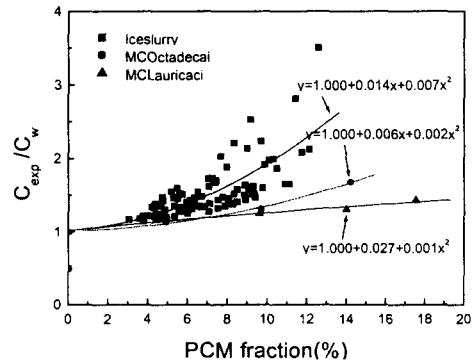


Fig. 5 Effective thermal capacity of PCM slurry.

가열의 경우는 4% 감소하였다.

(3) 아이스 슬러리의 유효 열용량은 얼음입자의 농도가 증가함에 따라 큰 폭으로 증가하였으며 물에 비해 17%에서 305%까지 증가함을 보였다.

참고문헌

1. 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. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 207-215.
2. Charunyakorn, P., Sengupta, S. and Roy, S. K., 1991, Forced convection heat transfer in micro-encapsulated phase change material slurries: Flow in circular ducts, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 3, pp. 819-833.
3. Patterson, R. L. and Little, R. C., 1975, The drug reduction of poly ethyleneoxide-Carboxylate Soap Mixtures., *J. Colloid and Interface science*, Vol. 53, pp. 110-114.
4. Sellgren, A., 1986, Hydraulic behavior of ice particles in water, 10th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, Innsbruck, Austria.
5. Takahashi, H., Masuyama, T., and Kawashima, T., 1993, A laboratory study of pressure loss and pressure fluctuation for ice-water in a horizontal pipe, *Slurry*

- Handling and Pipeline Transport - Hydratransport 12, Mechanical Engineering Publication Ltd., London, pp. 497-510.
6. Kawashima, T., Sasaki, M. and Takahashi, H., Experimental study of snow-water mixture flows in a horizontal pipe, Slurry Handling and Pipeline Transport-Hydratransport 12, Mechanical Engineering Publication Ltd., London, pp. 525-533.
  7. Knodel, B. D., 1988, Pressure drop and heat transfer in turbulent ice-water slurries in horizontal pipes, MS thesis, Illinois university, USA.
  8. Cleary, C., Day, S., Lindsay, R., Murray, C., Gupta, R., Larkin, B., Tompson, H. and Wiggan, M., 1991, Hydraulic characteristics of ice slurry and chilled water flows, IEA District Heating: Advanced energy transmission fluids-Final report of research.
  9. Snoek, C. W. and Bellamy, J., 1997, Heat transfer measurements of ice slurry in tube flow., G. P. Celata and R. K. Shah (Editor), Edizioni ETS, pp. 1993-1997.
  10. Petukhov, B. S., 1970, Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties, Advances in Heat Transfer, Vol. 6, pp. 503-564.