

## 냉각면 성상이 빙부착에 미치는 영향

승 현, 백 종 현\*, 홍 희 기\*\*, †강 채 동\*\*\*

전북대학교 대학원, \*생산기술연구원 냉동공조연구팀,

\*\*경희대학교 기계산업시스템공학부, \*\*\*전북대학교 기계항공시스템공학부

### Effect on the Adhesion of Ice Slurry by Characteristic of Cooling Surface

Hyun Seung, Jong-Hyeon Peck\*, Hiki Hong\*\*, Chaedong Kang\*\*\*

Graduate School of mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

\*HVAC/R Research Team, KITECH, Chonan 330-820, Korea

\*\*School of Mechanical and Industrial system engineering, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

\*\*\*College of Engineering, Division of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

**ABSTRACT:** In the process of ice-slurry making, the phenomenon of ice adhesion influences extremely to ice making system. In this study, the effect on the ice adhesion by the different coling wall property is investigated quantitatively. Three types of solutions of 300g in various coating vessel were frozen under stirring. Through the experiment, the ice adhesion between cooling wall and ice-slurry was compared to each cooling surface by measuring the stirring power. From the experiment, the stirring power at PTFE coating vessel was smaller than those at PE, PFA and SUS coating vesssel.

**Key words:** Ice adhesion(빙부착), Ice slurry(아이스슬러리), Cooling surface(냉각면)

#### 기 호 설 명

- $m$  : 질량, 총질량 [g]
- $r$  : 신뢰도 [%]
- $T_{fp}$  : 수용액의 동결점 [°C]
- $\bar{q}$  : 평균냉각열전달률 [kW]
- $x$  : 농도 [mass%]
- $\bar{C}$  : 평균비열 [kJ/kg · K]
- $\bar{L}$  : 평균잠열 [kJ/kg]

$\tau$  : 제빙시간 [sec]

#### 그리스 문자

$\sigma$  : 동결점의 표준편차 [°C]

#### 하첨자

- a : 수용액 중 침가제의 합
- total : 수용액 총량
- ice : 얼음
- w : 물
- i : 초기상태
- n : 횟수

† Corresponding author  
Tel.:+ 82-63-270-2318; fax:+ 82-63-270-2315  
E-mail address: ckang@chonbuk.ac.kr

## 1. 서론

유동성을 가지고 있는 아이스슬러리는 두꺼운 얼음이 형성되지 않아서 제빙 효율이 우수하고, 열교환 면적이 넓어서 해빙 효율 우수하며, 많은 냉열에너지를 수송할 수 있고, 이용 시 응답성이 빠르하다는 장점을 가지고 있다. 또한 많은 냉열에너지를 수송할 수 있어서 집단적인 냉방시스템에 적용이 기대된다.<sup>(1)</sup>

그러나 돌발적이고 지속적으로 발생하는 냉각면에서 빙부착의 문제가 아직 해결되지 못하여 아이스슬러리 보급에 장애가 되고 있는 현실이다.

현재 냉각면에서의 빙부착 억제와 관련된 연구가 많이 진행되고 있다. 표면장력이 작은 실리콘 기름을 첨가제가 함유된 물에 분산시킨 에멀션을 이용한 제빙방식이 Okada 등에 의해 제안되었고 기름과 첨가제의 역할에 의해 빙부착이 억제되는 것이 보고되었다.<sup>(2, 3)</sup>

에틸렌글리콜(ethylene glycol, 이하 EG)은 물에 혼합되기 쉽고 분자 구조적으로 비교적 물과 무기물 사이에 개입하기 쉬운 구조를 하고 있으며, 첨가제의 일종인 실란커플링제(silanecoupling agent, 이하 SCA)는 분자 구조적으로 유기물과 무기물 그리고 물과 무기물 사이에 개입하여 빙부착을 억제하는 데에 효과가 있다고 확인되었다.<sup>(4, 5)</sup>

1,6헥산디올은 분자구조가 EG와 비슷하게 양 끝단 작용기가 OH기로 구성되어 있어 첨가제로 빙부착 억제에 효과가 있을 것이라 추정된다.

현재까지 EG 또는 PG수용액, 첨가제가 함유된 수용액, 계면활성제 함유 수용액 등 다양한 성분의 수용액에 의한 동결실험을 통하여 아이스슬러리의 생성 및 열유동특성에 관하여 보고 되어있다.<sup>(6,7)</sup>

그러나 기존 연구에서는 열교환 효율이 좋은 금속성 물질 표면을 사용하여 냉각면에서의 빙부착 현상을 관찰하였고 냉각면 정상 조건은 고려되지 않았다. 비금속성인 불소수지의 테프론계 물질은 저마찰성과 소수성 성질을 가지고 있어 빙부착에 억제에 효과가 있는 것으로 보고되었다.<sup>(8)</sup>

본 연구에서는 냉각면의 조건을 비금속성 물질의 테프론 계열 물질인 폴리테트라플루오르에틸

렌(Poly-tetra-fluoro-ethylene 이하 PTFE)와 테트라플루오르에틸렌페르플루오르알킬비닐에테르공중합체(Tetra-fluoro-ethylene-perfluoro-alkylviyl-ether-copolymer 이하 PFA) 플라스틱 계열의 폴리에틸렌(Poly-ethylene 이하 PE) 재질을 사용하여 냉각면의 조건을 변화시키면서 빙부착에 나타난 영향을 관찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2. 1 실험방법

실험장치는 이전 교반·냉각 실험장치와 동일하며 제빙실험을 위한 저온항온조, 교반기, 시료 비이커와 온도 교반동력을 측정하기 위한 계측장비로 구성되었다.<sup>(5)</sup>

실험에 사용된 비이커는 스테인리스 재질의 용기(75 × 120 × 1 mm(D<sub>o</sub> × H × t), 용량 500 ml)와 그 용기 내면에 PTFE, PFA, PE의 재질을 두께 100 $\mu$ m이하로 전기저항 코팅을 하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 코팅 비이커의 사진이다. 표면 재질은 (a)는 SUS (b)는 PTFE, (c)는 PFA (d)는 PE이다.

Table 1은 코팅 재질의 특성 데이터로써 이 값은 대푯값으로 나타내며 규격값은 아니다.

실험에 사용된 수용액은 EG 7 mass% 수용액, EG 4 mass%와 SCA 3 mass%, EG 4 mass%와 1,6헥산디올 1.5 mass%, PG 1.5 mass% 수용액을 사용하였으며, 시료량은 300 g으로 하였다. 제빙조건으로 브라인 온도를 -7.5 $^{\circ}$ C, 과냉각도는 1 K로 유지하였다.

제작된 혼합액은 각 재질별 용기에 담아 용기 외부를 저온항온조의 브라인으로 냉각하고 용기 내부의 혼합액은 강제대류가 형성되도록 교반기(익형: 수직평판식, 3 x 2 mm 익수: 3개)에 의해 120 rpm으로 교반하였다. 교반 냉각 중에는 공기로부터의 열 유입을 줄이기 위해 용기 상부를 교반봉이 관통되는 발포 폴리스틸렌 마개로 씌웠다. 수용액 온도가 목표로 하는 과냉도에 이르렀을 때 약 1 g의 빙핵을 과냉각 상태의 수용액에 투입하여 강제적으로 동결시켰다.

교반·냉각 과정동안 T-형 열전대( $\varnothing$  0.3 mm)를 사용하여 항온조 내부의 브라인 및 용기 내의

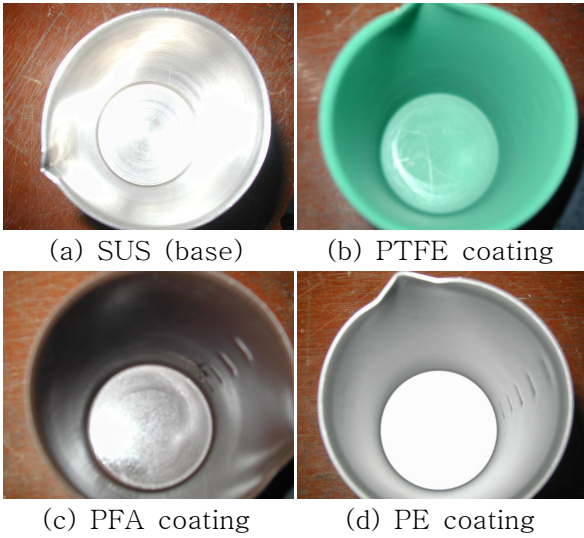


Fig. 1 Photo of the inside of coating vessel.

Table 1 Characteristic of coating material.

\*표 (9)

	SUS	PTFE	PFA	PE
Thermal conductivity [W/m·K]	16.3	0.25	0.25	0.33
Dynamic coefficient of friction	0.19	0.04	0.08	0.18~0.08
Critical surface tension [dyne/cm]	-	18*	18*	31*

혼합액의 온도(용기 중심부의 교반의 상부근처)를 측정하였다. 또한 수용액 및 브라인온도와 교반동력 계산을 위한 교반기 모터에 허용되는 전압과 전류값을 데이터로거(Agilent 34970A)와 계측용 프로그램(HP-VEE)을 사용하여 5초마다 PC에 저장하였다.

## 2.2 평균냉각열전달률

실험에 사용된 각 수용액의 평균냉각열전달률을 구하기 위해 먼저 제빙 과정에서의 동결점 강하에 따른 농도 변화를 이용하여 제빙량을 간접

적으로 구하였다.

에틸렌글리콜(EG) 실린커플링(SCA) 수용액의 냉각열량을 구하기 위해 제빙 과정에서의 동결점 강하에 따른 농도 변화를 이용하여 제빙량을 산출하였다.

Fig. 2는 동결점과 수용액 농도와 관계를 나타낸 것으로 비교적 4~11 mass%의 저농도 영역에서 최소제곱법을 이용하여 식 (1)과 같은 1차 함수로 근사시켰다. 동결점은 농도에 대하여 약  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ (신뢰도99%)의 범위 내에서 만족되며, 식 (1)에서 구해진 농도를 이용하여 식 (2)는 얼음량을 간접적으로 산출한다. 동결개시 시점에서 생성되는 얼음량은 전 제빙시간동안 생성되는 얼음량의 1%미만으로 무시하였다. 식 (3)은 수용액의 평균냉각열전달률 식이다.

$$x = \frac{T_{fp} - B}{A} [\%], \quad \text{식 (1)}$$

	A	B
EG, EG+ SCA	-0.353	0.068
EG+ PG+ 1,6Hex	-0.352	0.360

$$x = \frac{m_a}{m_{wi} + m_a - m_{ice}} \times 100 [\%]$$

여기서

$$m_{ice} = m_{total} - \frac{100Am_a}{T_{fp,N} - B} \quad \text{식 (2)}$$

$$\bar{q} = \frac{1}{\Delta\tau} [(m_{ice,n} - m_{ice,n-1})\bar{L}_{ice} + m_a\bar{C}_a\Delta T] \quad \text{식 (3)}$$

여기서 수용액의 평균비열은  $\bar{C}_a = 4.12 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ,  $\Delta T = T_{fp,i} - T_{fp,i-1}$ , 수용액 평균잠열  $\bar{L}_{ice} = 334 \text{ kJ/kg}$ ,  $m_w = m_{wi} - m_{ice}$ 로 하였다.  $\bar{C}_a$ 는 혼합물질 가운데 상대적으로 함량이 많은 EG를 기준으로 EG수용액에 대한 비열값으로 근사하여 수용액의 비열로 하였다. EG 4 masst% 일때 비열은  $4.17 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  10 wt%일때  $4.12 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 으로 약 1%감소하므로 동결에 의한 농도 변화로부터 크게 영향 받지 않는 것으로 간주하여 평균 비열값인  $4.12 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 을 사용하였다. 또 평균 잠열값은 제빙 과정동안 물만이 얼음으로 상

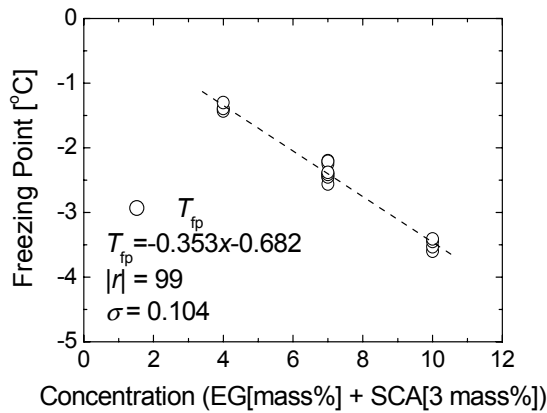


Fig. 2 Freezing point of aqueous solution to EG component

변화 한다는 가정하에 얼음의 용융 잠열을 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3 비이커 내부의 평균냉각열전달률과 시간에 따른 관계를 나타내고 있다. 비이커 내부의 평균 열 유속은 시간에 따라 그 크기와 기울기가 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6은 평균열전달률과 교반동력값과의 관계이며, 냉각면의 재질별로 구분하여 나타내었다. 평균열전달률은 비이커 내부의 열이 방출되기 때문에 그 값은 음수(-)로 나타난다.

Fig. 4는 EG 수용액을 사용하여 교반동력과 평균 열전달률을 나타낸 그래프이다. (a)는 비이커 재질이 SUS와 PTFE를 사용하고 (b) PFA와 PE 재질의 비이커를 사용하였다. Fig. 5는 EG, SCA 수용액을 사용하여 교반동력과 평균 열전달률을 나타낸 그래프이며, Fig. 6은 EG와 PG 1,6 헥산디올을 사용하여 평균 열전달률과 교반동력을 나타낸 그래프이다.

Fig. 4는 열전달률과 교반동력은 반비례관계로 나타나고 있다. 실험과정동안 열전달률이 감소하면서 교반동력은 증가하다가 변곡점이 생기며, 재질에 따라 영향이 있다. 교반동력은 PTFE, SUS, PE, PFA순으로 커지며, 이 교반동력은 벽면 빙 부착과 관계를 가진다.

Fig. 5역시 Fig. 4와 비슷한 경향을 나타낸다.

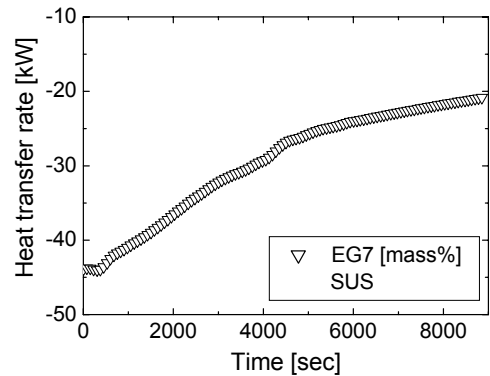


Fig. 3 Relationship between time and heat flux in beaker.

특히 PTFE 재질의 비이커를 사용한 경우 열전달률이 감소하면서 최대 교반동력이후 다시 교반동력이 감소되고 있다.

Fig. 6은 열전달률과 교반동력이 반비례로 감소하다가 최대 교반동력이후 다시 감소하는 추세가 코팅 비이커에서 모두 나타나고 있다. 이는 Fig. 6에서 첨가제로 첨가된 1,6헥산디올의 영향으로 나타나는 현상으로 추정된다.

EG, SCA수용액에서 PTFE코팅을 한 비이커를 이용하여 실험한 결과 평균 열전달률이 -15.5 W에서 최대교반동력이 10.3 W가장 낮게 나타났다.

EG, PG, 1,6헥산디올 첨가 수용액에서 평균열전달률이 -18.6 kW에서 교반동력 12.7로 최대값에 이른 후 점차 감소하여 평균열전달률 -14.2 kW에서 교반동력이 8.1 W까지 감소하였다.

실험 결과에 의하면 임계표면장력이 동일한 PTFE와 PFA의 경우 동마찰계수가 작은 PTFE에서 교반동력이 작게 나타났다. 또 임계표면장력 및 동마찰계수가 PTFE보다 모두 큰 PE가 교반동력이 모두 크게 나왔다. 그러나 PFA보다 임계표면장력 및 동마찰계수가 다소 큰 PE 코팅 비이커에서는 교반동력이 작게 나타났다.

Fig. 7은 EG, PG, 1,6헥산디올 첨가 수용액을 PTFE 재질의 비이커에서 재빙 종료후 비이커 내부와 벽면의 사진이다. 비이커 내부의 얼음 (Fig. 7 (a))을 쏘았을 때 거의 다 쏘아져 빙부착이 일어나지 않았음을 확인 할 수 있다.(Fig. 7 (b))

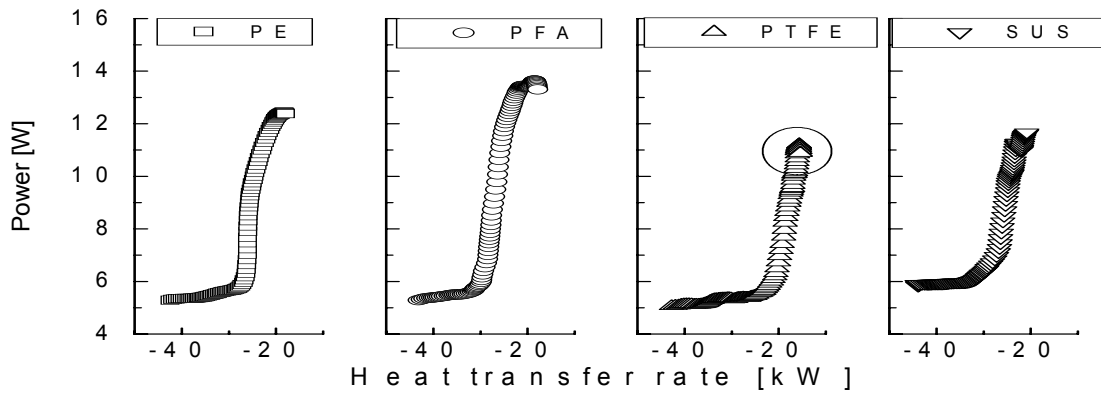


Fig. 4 Comparison of Heat transfer rate in different Stirring power (EG 7 mass%).

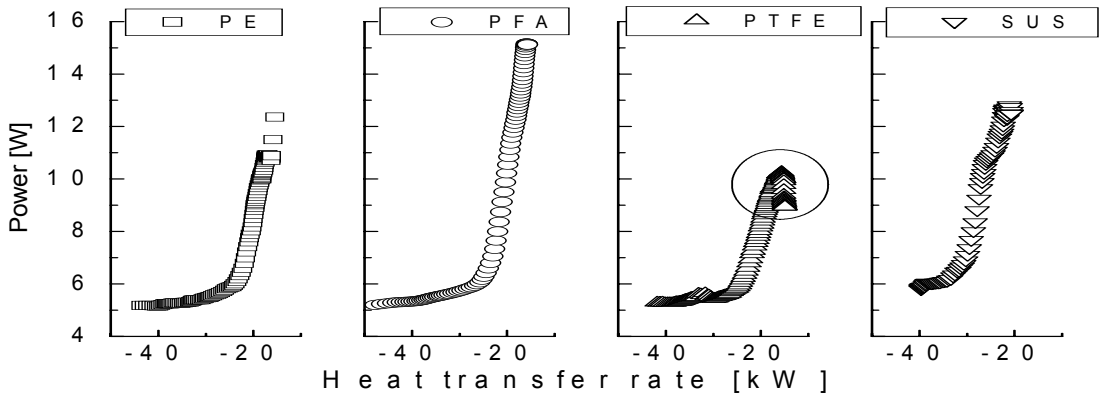


Fig. 5 Comparison of Heat transfer rate in different Stirring power (EG 4, SCA 3 mass%).

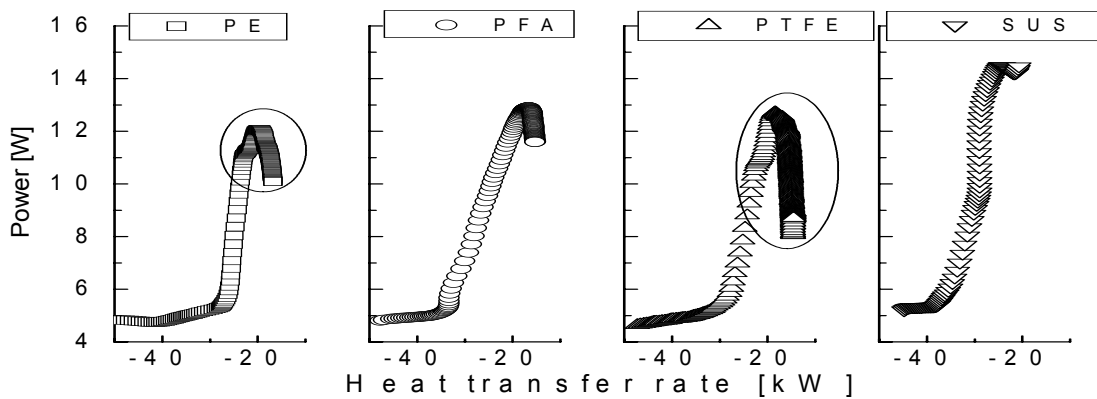


Fig. 6 Comparison of Heat transfer rate in different Stirring power. (EG 4, PG 1.5, H 1.5 mass%).

#### 4. 결론

첨가제가 함유된 수용액을 이용하여 각 재질로 코팅된 비이커(75 × 120 × 1 mm(D. × H × t), 용량 500 ml)를 이용한 교반 제빙실험으로부터 다

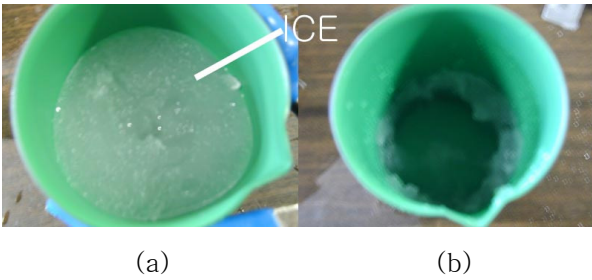


Fig 7. Non-adhesion of ice on cooling wall (PTFE vessel is inside wall and bottom,)

음과 같은 빙부착 특성을 얻었다.

(1) 비이커 내부에서 제거되는 평균 열전달률이 감소할수록 교반동력은 증가한다.

(2) 냉각면이 금속재질인 SUS재질 보다 비금속재질인 PTFE, PFA, PE 코팅비이커에서 빙부착 현상 억제가 확인되었다.

(2) PTFE 코팅 비이커에서는 교반 동력이 최대값에 이른 후 감소하는 추세가 모든 수용액에서 나타났다.

(3) EG, PG, 1,6헥산디올 첨가 수용액에서 모든 코팅 비이커에서는 교반동력이 최대값에 이른 후 감소하는 추세가 나타났다.

(4) 각 조건에서의 교반 동력을 비교한 결과 최대 교반동력 값은 EG, SCA수용액에서 PTFE 코팅을 한 경우 10.3 W로 가장 낮게 나타났으며, 최대 교반동력 이후 감소폭은 EG, PG, 1,6헥산디올에서 약 4.5W로 최대로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 에너지기술 학술진흥사업(과제번호 2002-E-BD03-P-01-0-000)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Lee, Y. P. ed., 2003, Trends in supply of ice thermal storage system and its Technology, Proceeding of the SAREK 2003 Summer Annual Conference (Special session), pp. 1-52.

2. Matsumoto, K., et al., 2000, Ice storage system with oil-water mixture (Actual proof of formation of high IPF suspension without adhesion of ice to cooling wall, Trans. JSME (B), Vol. 66, No. 641, pp. 182-188 (Japanese)
3. Kang, C. D., et al., 2001, Investigation of Effective Factor on Ice Formation Process of Ice Thermal Energy Storage Using Water-Oil Emulsion Effective of Wall Material and Cooling rate to Ice Adhesion on Cooling Wall, Trans. of the JSRAE, Vol. 18, No. 1, pp. 51-59 (Japanese).
4. Kang, C. et al. 2002, Adhesion of IceSlurryin a Multicomponent Aqueous Solution with Stirring and Cooling, Proceedings of the SAREK Vol. 14 No. 12 pp. 1063-1070.
5. Seung, H. et al. 2003, Effect on Adhesion of Ice Surry by Adding Functional Materials, Proceeding of the SAREK 2003 Winter Annual Conference, pp. 501-506.
6. Lee, D. W., et al., 2002, Experimental study on flow patterns and pressure drop characteristics of ice slurry in small size pipe, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 385-397.
7. Gil, B. I., et al., 2001, Astudy on transport and heat utilization of ice slurries, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 11, pp. 1065-1071.
8. Daisuke, T., et al. 2002, Ice formation process by cooling water-oil emulsion with stirring a vessel. International Journal of Refrigeration Vol. 25 pp. 250-258.
9. Kariyone, T., 1980, Properties and Application of surfactant Saiwai-shobo co., p. 39