

## 계면활성제 첨가수용액의 제빙에 관한 기초연구

박 기 원<sup>†</sup>, 稻葉英男<sup>\*</sup>, 堀部明彦<sup>\*</sup>

여수대학교 냉동공학과, \*岡山大學 大學院 自然科學研究科

### Study on Ice Making Behavior of Water Solution with Surfactant

Ki-Won Park<sup>†</sup>, Hideo Inaba<sup>\*</sup>, Akihiko Horibe<sup>\*</sup>

Department of Refrigeration Engineering, Yosu University, Yosu, Chonnam 550-749, Korea

<sup>\*</sup>Graduate School of Natural Science & Technology, Okayama University, Okayama 700-8530, Japan

(Received July 4, 2001; revision received October 4, 2001)

**ABSTRACT:** Recently, a great attention has been paid to the ice thermal storage system for the purpose of energy saving and reduction in peak electrical demand. In the present study, it has been investigated the freezing behavior of several kinds of water solutions with nonionic surfactant. In order to prevent ice blockage in a cooled pipe, the amount and wall adhesion behavior of ice of the test fluids were observed experimentally under different concentration of water solution with surfactant, temperature of cooled wall, and the shear velocity of test fluids. The results showed that the size of ice crystal became smaller at higher shear velocity at wall. And the lowest limit of wall adhesion of ice in water solution with surfactant was found at 230 W/m<sup>2</sup> of heat flux.

**Key words:** Surfactant(계면활성제), Water solution(수용액), Shear velocity(주속도), Ice making amount(얼음생성량), Wall adhesion(벽면부착)

#### 기 호 설 명

$A_{BE}$  : 시험용기의 내면적 [mm<sup>2</sup>]  
 $C_{sol}$  : 시험수용액의 질량농도 [mass%]  
 $C_{sur}$  : 계면활성제의 첨가농도 [ppm]  
 $d_{BE}$  : 시험용기의 내경 [mm]  
 $d_{ice}$  : 빙결정의 입자경 [mm]  
 $d_{m32}$  : 빙결정의 체적-면적 평균 직경 [mm]  
 $d_w$  : 교반날개의 직경 [mm]  
 $h_{BE}$  : 시험용기의 높이 [mm]

$L_{ice}$  : 물의 응고잠열 [kJ/kg]  
 $m_{ice}$  : 얼음생성량 [g]  
 $N$  : 빙결정수  
 $n_w$  : 교반날개의 회전수 [s<sup>-1</sup>]  
 $t_{adh}$  : 시험용기 벽면부착시간 [min]  
 $T_b$  : 냉각 브라인 온도 [K]  
 $t_{BE}$  : 시험용기의 두께 [mm]  
 $T_{fi}$  : 빙핵물질 투입시의 수용액온도 [K]  
 $T_{fs}$  : 수용액 초기농도에 대한 응고온도 [K]  
 $u_{sol}$  : 수용액의 주속도 [m/s]  
 $q_{ice}, q_{ice}^*$  : 얼음생성 평균 열유속 [W/m<sup>2</sup>]  
 $\Delta T_{fi}$  : 빙핵 투입 과냉각도 [K]  
 $\Delta T_{fb}$  : 브라인 과냉각도 [K]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-61-659-3274; fax: +82-61-659-3274

E-mail address: pkw@yosu.ac.kr

## 1. 서 론

최근에 화석연료에 의존하는 에너지 생산으로 인해 지구가 온난화되는 문제나 여름철에 주야간의 전력수요격차가 커지는 문제 등이 대두되면서 일반인들 사이에서도 환경보존에 관한 관심이 높아지고 있다. 또한 국내외적으로도 환경보존에 효과적이면서 에너지를 효율적으로 이용할 수 있는 기술개발에 박차를 가하고 있고, 그 대책 중 하나로써, 소비전력부하의 평균화가 가능한 빙축열 시스템의 도입이 추진되고 있는 실정이다.<sup>(1)</sup>

특히 최근에는 스테틱형 제빙에서의 문제점을 해소하면서 미세한 슬러리 모양의 얼음을 생성함으로써 축열매체인 얼음입자를 쉽게 수송할 수 있는 다이내믹형 제빙이 주목받고 있다.<sup>(2-5)</sup> 이처럼 빙수 슬러리는 큰 축열밀도와 우수한 유동성을 지니고 있어 냉열축열수송매체로 주목받고 있지만, 얼음으로 인해 전열면 위에 빙결정이 부착하거나 얼음끼리 응집성하는 등이 문제되고 있다.

이러한 빙결정의 응집성을 억제하기 위한 연구로서, Grandum et al.<sup>(6)</sup>은 저온환경생물의 체내에 존재하는 부동화단백질(antifreeze protein, AFP)을 이용하여 재결정하기 어려운 침 모양의 빙결정을 만들어 이것을 빙수 슬러리에 적용하도록 제안하고 있다. 이 빙수 슬러리는 빙축열 시스템에 이용할 수 있는 유동 특성을 가지고 있다는 것이 입증되기도 하였다. 그러나 AFP 자체가 고가이고 박테리아나 고온에 약해서 빙결정 성장억제기능이 떨어진다는 점이 문제되고 있다. Saito (矢部) et al.<sup>(7)</sup>은 AFP 대체물로 AFP의 분자구조와 유사한 실란 카플링제(silane coupling agent, SCA)를 써서 빙결정 성장과 과냉각도의 관계를 검토하고, 생성되는 빙결정의 표면을 관찰하였다. 이에 따르면 SCA는 빙결정 표면에 규칙적으로 흡착하기 때문에 SCA로 빙결정의 성장을 억제하고, AFP의 빙결정 성장억제기능을 재현하는 데 성공하였다고 한다. 그러나 이것도 고가여서 AFP와 마찬가지로 일반화되지는 못한다.

따라서 본 연구에서는 새로운 빙결정 성장억제제로서 계면활성제에 주목하였다. 현재 계면활성제는 유화, 가용화, 분산, 기포 등 다양한 계면현상을 일으키는 중요한 화학물질로서, 세제, 화장품, 에너지 등 광범위한 상업 분야에서 이용되고 있다.<sup>(8)</sup> 본 연구에서는 이러한 계면활성제의 첨가

농도, 과냉각도, 수용액의 용질 등이 빙결정 성장에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 실험적으로 검토하였다.

## 2. 시료의 물성

본 연구에서 수용액의 용질로 사용한 유기물질 및 무기물질의 종류와 물성값을 Table 1에 나타내었다. 유기물질로는 동결방지제로 사용되는 유기염인 초산칼륨과 부동액이나 빙결완화제로 널리 사용되는 알코올계인 프로필렌글리콜을 선정하였으며, 무기물질 용질로는 일반적으로 축냉제나 브라인으로 사용되는 무기염인 염화나트륨을 선정하였고, 모두 고순도급(순도 99.9%)을 사용하였다.

용매로서의 물은 계면활성제 및 용질의 특성을 명확하게 알 수 있도록 수도수를 이온교환기에 걸러 얻어진 비저항  $5 \times 10^6 \Omega \text{cm}$  이상인 순수를 사용하였다.

계면활성제를 수용액에 첨가할 때에는 계면활성제가 가지는 특성에 대해 고려할 필요가 있다. 일반적으로 계면활성제는 1분자 속에 성질이 다른 친수기와 소수기를 가지는 구조로 되어 있는데, 이 친수기의 표면전하상태에 따라 분류된다.

이 중 이온성 계면활성제를 물에 용해시킬 때 그 수용액의 온도를 높이면 일정 온도에서 계면활성제가 급격하게 용해되는 현상이 관찰되는 크래프트점(Krafft point)가 존재한다. 이 크래프트점 이하에서 계면활성제를 필요 이상 많이 첨가하면 계면활성제의 단분산 수용액과 고체상 계면활성제의 두 층으로 분리하고, 크래프트점 이상에서는 고체상 계면활성제의 수화고체가 녹아 액체상태로 된다. 이 때문에 저온에서 이온성 계면활성제 첨가수용액을 사용하는 것은 부적절하다

Table 1 Properties of solute

Solute	Chemical formula	Molecular weight	$\Delta T_f$ [K] at 1.7 mass%
Potassium acetate	CH <sub>3</sub> COOK	98.14	0.66
Propylene glycol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	76.10	0.40
Sodium chloride	NaCl	58.44	1.10

고 판단된다.

따라서 본 실험에서는 빙결정끼리 합체되는 것을 막는 분산제로서 크래프트점이 없어 저온에서도 사용할 수 있을 것으로 판단되는 비이온계 계면활성제인 TOPOES(trioleatepolysorbate)를 사용하였다. TOPOES는 기본적인 화학조성은 P.O.E 솔비탄 지방산 에스테르형이고, 기본 조성 1 mol당 친수성을 가진 산화에틸렌(ethylene oxide)기를 20 mol 첨가한 것이다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 실험장치의 개략을 나타낸 것이다. 본 실험장치는 시료를 냉각하는 저온항온조, 교반기를 포함한 시료교반계, 시험용기 및 시료온도를 측정하는 온도측정계로 구성된다. 저온항온조는 조내 크기 400 mm×500 mm×350 mm이고, -35℃에서 상온까지 ±1℃ 범위 내에서 일정 온도로 유지되도록 설계되어 있다. 또 저온항온조 내의 냉각브라인으로는 농도 45 mass%인 에틸렌글리콜 수용액을 사용하였다.

시험수용액을 담은 시험용기로는 교반속도를 광범위하게 변화시키는 것과 빙결정 생성에 대한 시험용기 직경의 영향을 검토하기 위해 내경  $d_{BE}=50$  mm, 높이  $h_{BE}=71.5$  mm, 두께  $t_{BE}=1.0$  mm인 것과 내경  $d_{BE}=55$  mm, 높이  $h_{BE}=115.5$  mm, 두께  $t_{BE}=1.0$  mm인 2가지의 파이렉스 유리 비커를 사용하였다. 시료교반계는 전압변환기에서 교반기 모터에 걸리는 직류전압 및 교반기의 기어

비를 변경함으로써 회전수를 조정하였고, 날개는 프로펠러형 3매이며, 날개직경은 24 mm와 34 mm의 2종류를 사용하였다.

시험수용액의 온도를 측정하기 위해 0.3 mm인 T형 열전대를 직접 시험용기 내의 시험수용액 속에 삽입하였는데, 열전대 자체가 시험수용액의 유동을 방해할 가능성이 있어, 본 실험에서는 시험수용액 온도측정시에만 시험용기 내 시료에 열전대를 삽입하였다.

본 실험에 들어가기 전에 3종류의 계면활성제 첨가수용액을 교반하면서 냉각한 결과 비교적 안정하게 과냉각상태를 유지하는 것을 관찰할 수 있었다. 이 때문에 시험수용액으로부터 제빙할 때 서로 다른 과냉각도에서 과냉각상태를 해소시키면 수용액의 초기 빙결정량이 달라져 계면활성제에 의한 빙결정의 응집성 방지 및 성장억제효과를 정량적으로 평가하기 곤란하다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 수용액 속의 초기 빙결정량을 일정하게 하기 위하여 일정한 과냉각도에서 자체제작한 빙핵물질인 빙결정<sup>(9)</sup>을 투입하였다.

본 연구에서 사용한 빙핵 투입 과냉각도  $\Delta T_{fi}$ 는 식(1)을 사용하여 구하였고, 빙핵 투입 후에 빙결정 성장의 구동력이 되는 냉열량을 결정하는 냉각 브라인 온도  $T_b$ 는 식(2)의 관계를 이용하였다.

$$\Delta T_{fi} = T_f - T_{fi} \quad (1)$$

$$\Delta T_{fb} = T_f - T_b \quad (2)$$

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 수용액의 주속도에 따른 영향

여기서는 계면활성제 첨가에 따른 빙결정의 벽면부착 억제효과를 확인하는 측정조건을 찾기 위해 벽면에서의 유체 전단력에 영향을 미치는 수용액의 주속도  $u_{sol}$ 를 변수로 하는 동결실험을 하여 계면활성제의 첨가효과를 검토하였다. 수용액의 주속도는 본 실험과 동일한 조건에서 여러 개의 트레이서(색고무를 약 1 mm 크기로 자른 것)를 혼입한 시험수용액을 유동시켜 용기 벽면 근방을 유동하는 트레이서의 속도를 이용하여 산출하였다.

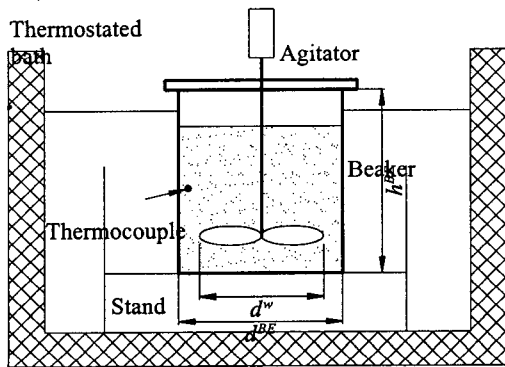


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

수용액은 농도  $C_{sol}=1.7\text{ mass\%}$ 인 초산칼륨(potassium acetate, PA) 수용액에 비이온계 계면활성제 TOPOES를 여러 가지 농도로 첨가하였고, 저온항온조에서 교반하면서 냉각한 뒤 빙핵물질인 빙결정을 투입한 지 2시간 후의 얼음생성량  $m_{ice}$ 를 측정하였다.

4.1.1 얼음생성량

Fig. 2는 브라인 과냉각도  $\Delta T_{fk}=1.5, 2.0, 5.0\text{ K}$  일 때 수용액의 용기 벽면 주속도  $u_{sol}$ 과 얼음생성량  $m_{ice}$ 의 관계를 계면활성제 첨가농도에 따라 나타낸 것이다.

그림에서 과냉각도가 커질수록 수용액의 시험용기 벽면 주속도가 증가에 따른 얼음생성량 증가 경향이 둔화됨을 알 수 있다. 이는 과냉각도가 적으면 주속도가 증가함에 따라 시험수용액과 시험

용기 냉각면 사이의 열전달률이 커지는 영향을 받지만, 과냉각도가 커지면 시험수용액과 냉각 브라인의 온도차가 커져 열유속이 증가하므로 실험 초기에 시험용기 벽면에 얼음이 부착하여 성장하면서 열저항으로 작용하여 얼음생성량은 많지만 주속도의 영향은 적다고 생각된다.

그러나 과냉각도가 커질수록 생성되는 얼음량은 크게 증가하고 있고, 계면활성제의 농도에 따른 영향은 거의 나타나지 않고 있다.

4.1.2 빙결정의 벽면부착시간

여기서는 빙결정의 벽면부착시간  $t_{adh}$ 에 대한 시험수용액 주속도  $u_{sol}$ 의 영향을 살펴보고자 한다.

Fig. 3은 브라인 과냉각도  $\Delta T_{fk}=1.5, 2.0, 5.0\text{ K}$ 인 냉각조건에서 수용액의 주속도  $u_{sol}$ 과 시험용기 내에 생성된 얼음이 용기의 벽면에 부착할 때

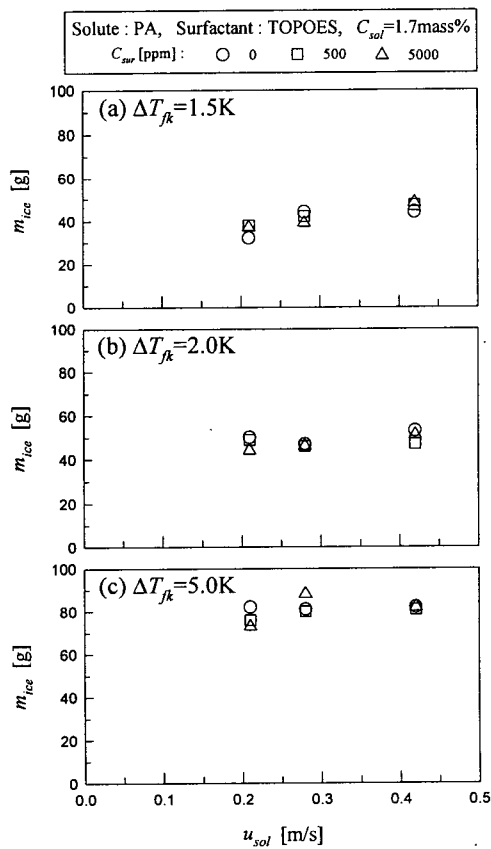


Fig. 2 Ice making amount to shear velocity and supercooling degree.

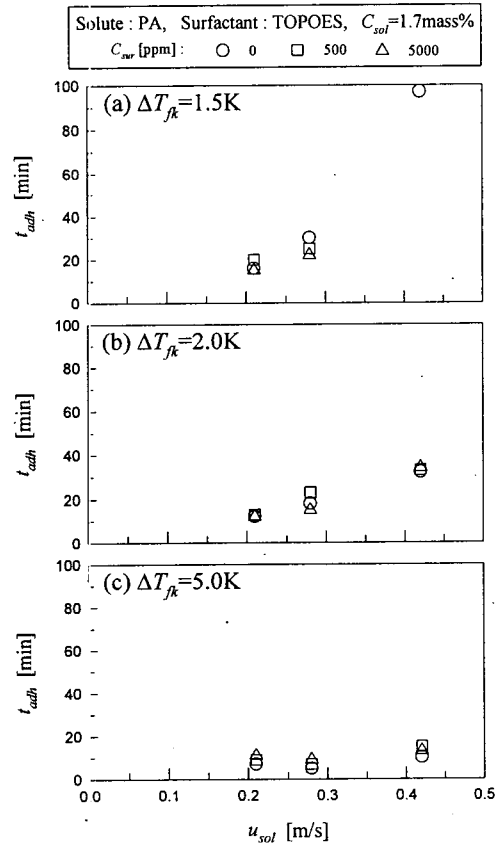


Fig. 3 Ice adhesion time to shear velocity and supercooling degree.

까지의 시간  $t_{adh}$ 의 관계를 PA 수용액에 대한 계면활성제 첨가농도  $C_{sur}$ 를 변수로 하여 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 수용액의 주속도가 증가함에 따라 벽면부착시간이 길어지는 경향에 있으나, 과냉각도가 커질수록 이런 경향은 다소 둔화되고 있음을 알 수 있다. 이는 과냉각도가 작을 때에는 시험용기 벽면 근처에서의 전단력이 증가하기 때문에 시험용기의 냉각면에서 얼음이 박리되기 쉽지만, 과냉각도가 커짐에 따라 시험수용액의 열유속이 커지고 이에 따라 생성되는 얼음의 성장속도가 빨라지고 얼음끼리 합체되기 쉬우며, 시험용기 냉각면과 생성된 얼음의 부착력이 증대되기 때문이라고 판단된다. 또 수용액의 과냉각도가 증가함에 따라 벽면에서 생성되는 얼음의 핵 생성빈도가 증가하여 냉각면 위에서는 급격하게 수많은 빙결정이 석출되어 얼음입자 사이가 연결되기 때문이라고도 생각된다.

그러나 어느 경우에도 계면활성제 첨가농도의 효과는 그다지 크게 나타나지 않고 있으나,  $\Delta T_{fk} = 1.5 \text{ K}$ ,  $u_{sol} = 0.42 \text{ m/s}$ 인 조건에서는 계면활성제

의 첨가로 인해 얼음의 벽면부착현상이 관찰되지 않았다.

4.1.3 얼음입자의 성장

여기서는 앞에서 서술한 계면활성제 첨가수용액의 동결실험시에 빙핵을 투입한지 2시간이 지난 후 슬러리 모양 시험수용액이 유동성을 유지할 때 시험수용액 속에 존재하는 빙결정의 크기를 측정하여 계면활성제가 빙결정의 성장에 미치는 영향에 대해 검토하고자 한다.

Fig. 4는 빙결정의 체적-면적 평균 직경  $d_{m32}^{(9)}$ 와 빙핵물질 투입 전 시험수용액의 주속도  $u_{sol}$ 의 관계를 나타낸 것이다.

그림의 (a)는 빙핵물질을 투입한지 1시간 경과한 경우로 그림에서와 같이 주속도를 증가시킴에 따라 빙결정의 크기는 작아진다는 것을 알 수 있다. 그 원인으로는 주속도가 증가함에 따라 시험용기 벽면 위에서의 전단력이 커져 빙결정 성장의 비교적 초기단계에서 빙결정이 벽면으로부터 박리되기 때문이라고 생각된다. 또  $C_{sur} = 0 \text{ ppm}$ 인 경우에 비해 계면활성제를 첨가한 경우에도 생성된 빙결정의 크기가 다소 작아지는 것을 볼 수 있다.

그림의 (b)는 빙핵물질을 투입한지 2시간이 경과한 뒤의 경우로 그림 (a)와 마찬가지로 계면활성제를 첨가함에 따라 빙결정의 성장이 다소 억제된다는 것을 알 수 있다. 특히 주속도가 작은  $u_{sol} = 0.21 \text{ m/s}$  및  $0.28 \text{ m/s}$ 인 조건에서는 계면활성제의 첨가에 의한 빙결정의 성장억제효과가 현저하게 나타나지만, 주속도가 큰  $u_{sol} = 0.42 \text{ m/s}$ 에서는 그 효과가 작게 나타나고 있다. 그 이유로는 수용액의 주속도가 증가함에 따라 시험용기 벽면에서의 수용액 유동에 의한 전단력이 커져 벽면에서 박리될 때의 초기 빙결정 입자경이 작아지고, 이로 인해 계면활성제에 의한 빙결정 성장 억제효과가 상대적으로 작아지는 것으로 생각할 수 있다.

4.2 수용액의 종류에 따른 효과

앞에서 이미 시험수용액의 주속도를 증가시킴에 따라 빙결정의 벽면부착이나 성장을 억제하는 효과가 있다는 것을 확인하였고, 계면활성제 첨

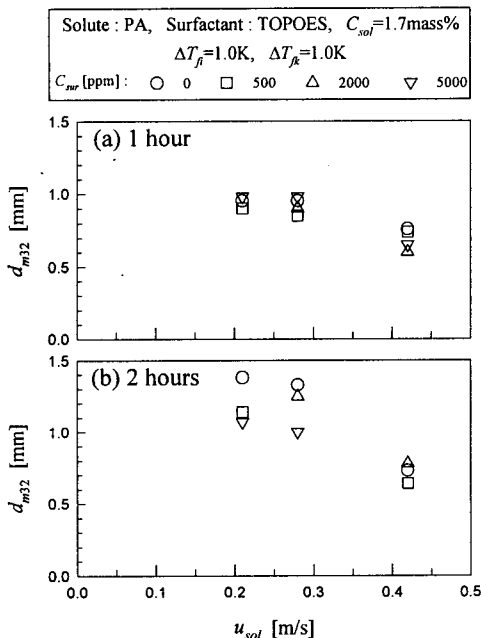


Fig. 4 Ice particle mean diameter to shear velocity and time after ice crystal injection.

가에 따라서도 약간이지만 영향이 있다는 것을 확인하였다. 따라서 여기서는 물성이 다른 용질에 대해 계면활성제에 의한 얼음의 벽면부착 억제효과를 확인하기 위하여 수용액의 용질로 초산칼륨(PA) 외에도 프로필렌글리콜(propylene glycol, PG)과 염화나트륨(sodium chloride, SC)를 사용하였다. 계면활성제의 첨가농도는 0, 500, 2000, 5000 ppm으로 하고, 수용액의 농도는 0.3 mol/kg으로 일정하게 하였다.

4.2.1 생성얼음량과 벽면부착시간

Fig. 5는 각각의 농도로 계면활성제를 첨가한 PA, PG, SC 수용액을 동결시켰을 때 계면활성제 첨가농도  $C_{sur}$ 와 빙핵투입 2시간 후에 생성된 빙결정의 질량  $m_{ice}$ 의 관계를 용질의 종류에 따라 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 6은 계면활성제 첨가

농도  $C_{sur}$ 와 벽면부착시간  $t_{adh}$ 의 관계를 나타낸 것이다. 실험조건은 수용액의 주속도  $u_{sol}=0.42$  m/s, 브라인의 과냉각도  $\Delta T_{fk}=1.5\sim 5.0$  K이다.

그림이서와 같이  $\Delta T_{fk}=1.5$  K일 때 3종류 수용액의  $m_{ice}$ 는 PG 수용액이 약간 낮은 값을 나타내지만 거의 차이가 없어  $m_{ice}$ 에 대해서는 수용액의 용질종류가 미치는 영향이 적은 것으로 생각된다. 그러나 PG 수용액 외에는 2시간 동안 벽면부착을 확인할 수 없었다. 이것은 농도  $C_{sol}=0.3$  mol/kg에서 PG 수용액의 점성계수가 다른 시험수용액보다 약간 높고, 또한 IPF가 높아져 수용액농도가 높아졌을 때 그 영향이 더 심하기 때문에 얼음이 박리되기 어려운 것으로 판단된다. 이런 결과로 볼 때 계면활성제는 빙결정의 응집성

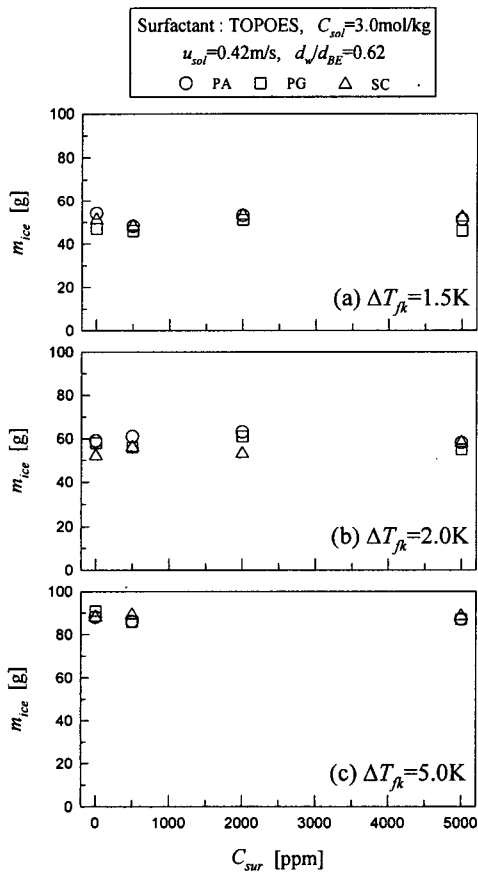


Fig. 5 Ice making amount to concentration of surfactant and supercooling degree.

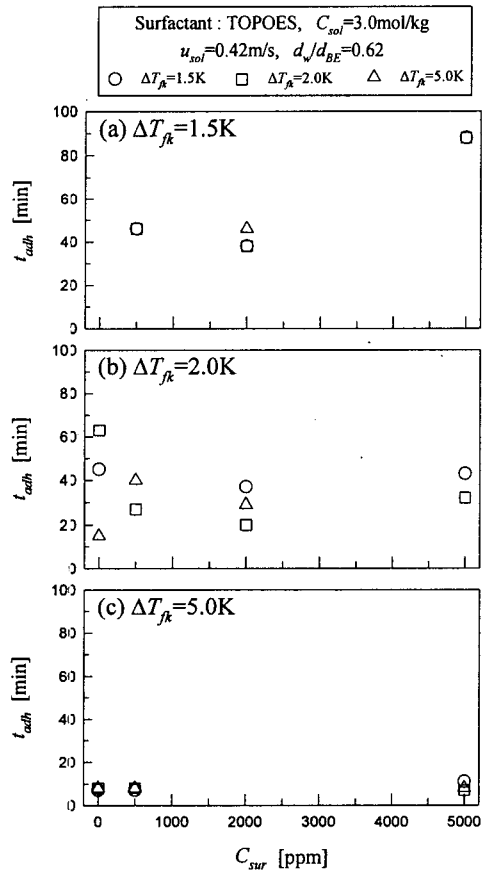


Fig. 6 Ice adhesion time to concentration of surfactant and supercooling degree.

을 억제하여 분산제로서 작용하고 있는 것으로 생각된다.

$\Delta T_{fk}=2.0$  K인 조건에서도 세 수용액 모두  $m_{ice}$ 가 거의 같은 값을 나타내어  $m_{ice}$ 에 대한 용질의 영향은 볼 수 없었다. 또 빙핵물질 투입 초기에 시험용기 벽면 위에서 빙결정이 미끄러지듯이 이동하는 모습이 관찰되었지만, 빙핵투입 2시간 이내에 얼음이 시험용기 벽면에 부착하였다.

$\Delta T_{fk}=5.0$  K인 조건에서는 계면활성제 첨가농도나 수용액 용질의 종류에 관계없이 빙핵투입 후 약 10분 이내에 생성된 얼음이 벽면부착을 일으켰다. 이때 생성된 얼음의 양도 약 90 g이었다.

이상으로부터 계면활성제를 첨가한 3종류의 시험수용액을 사용한 제빙에서 얼음생성량은 큰 차이를 나타내지 않았기 때문에 PA, PG, SC 수용액과 계면활성제 TOPOES의 조합에는 부적절하지 않다는 것을 알 수 있다.

4.2.2 생성된 빙결정 입자경의 분포

여기서는 냉각 브라인의 과냉각도  $\Delta T_{fk}=1.0$  K인 조건에서 3종류의 계면활성제 첨가수용액의 동결실험을 하여 빙핵물질 투입 1시간과 2시간 후에 수용액에 생성되는 빙결정의 입자경을 측정하여 생성되는 빙결정의 크기에 미치는 계면활성제의 첨가효과를 살펴보았다.

Fig. 7은 빙결정 입자경으로부터 산출한 체적-면적 평균 직경  $d_{m32}$ 와 계면활성제 첨가농도  $C_{sur}$ 의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 빙핵투입 1시간 후에는  $d_{m32}$ 에 대한  $C_{sur}$ 의 영향은 그다지 나타나지 않았지만, 2시간 후에는 계면활성제를 첨가한 쪽이 첨가하지 않은 쪽( $C_{sur}=0$  ppm)보다 확실하게 빙결정 크기가 작다는 것을 알 수 있다. 이런 사실에 따라 계면활성제는 빙결정의 표면에 부착하여 빙결정의 성장 억제 또는 응집성 억제에 효과적이라고 할 수 있다. 그러나 낮은 계면활성제 농도인 500 ppm인 경우에는 시간이 지날수록 평균 입자경이 증가하는 경우도 관찰되었는데, 이것은 시험수용액의 IPF가 증가하면서 빙결정의 표면적은 증가되는데 비해 표면에 부착되는 계면활성제의 절대량이 다소 부족하였기 때문으로 판단된다. 따라서 계면활성제를 이용하여 효과적인 얼음성장 억제효과를 얻으려면 목표 IPF를 계획하여 수용액에 대

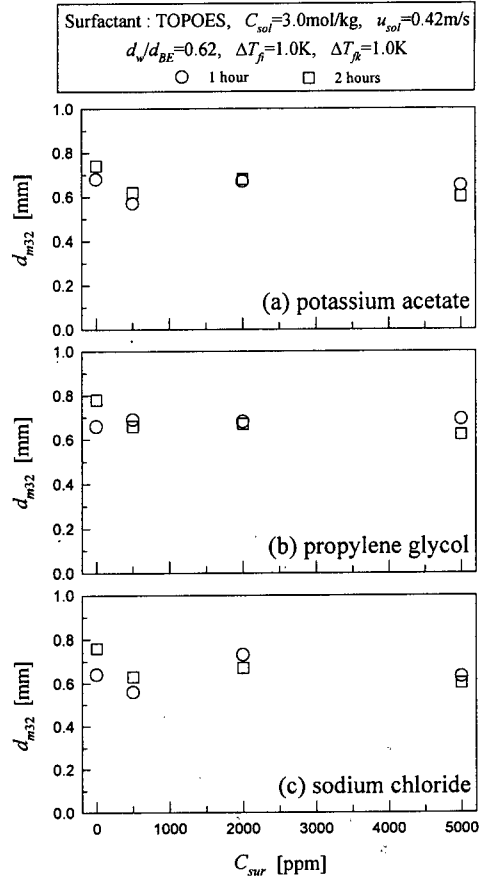


Fig. 7 Ice particle mean diameter to concentration of surfactant and time after ice crystal injection.

한 계면활성제 첨가량을 산출하여야 할 것이다. 이상으로부터 계면활성제를 수용액에 첨가하였을 때 시간에 관계없이 거의 일정한 크기의 빙결정을 만들 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 벽면부착의 영역분포

여기서는 얼음생성량을 이용하여 냉각 브라인에서 시험수용액으로의 열유속  $q_{ice}$ 를 구하여 빙결정의 벽면부착을 방지할 수 있는 영역을 검토하고자 한다.

빙핵투입 2시간 후에도 슬러리 상태의 시험수용액이 유동성을 유지하고 있을 때 얼음생성에 필요한 평균 열유속  $q_{ice}$ 는 식(3)을 이용하여 구할 수 있다. 따라서 얼음이 시험용기 벽면에 부

착할 때까지의 평균 열유속  $q_{ice}^*$ 는 식(4)를 사용하여 구할 수 있다.

$$q_{ice} = \frac{m_{ice} \times L_{ice}}{A_{BE} \times t} \quad (3)$$

$$q_{ice}^* = \frac{m_{ice} \times L_{ice}}{A_{BE} \times t_{adh}} \quad (4)$$

여기서,  $L_{ice}$ 는 물의 응고잠열(=333.6 kJ/kg),  $A_{BE}$ 는 시험용기의 내면적,  $t$ 는 측정시간(=7200 sec)이고,  $t_{adh}$ 는 얼음의 벽면부착시간이다.

Fig. 8은 각각 PA, PG, SC 수용액에 첨가한 계면활성제의 농도  $C_{sur}$ 와 빙핵투입 2시간 후에도 수용액이 유동성을 유지할 때의 얼음생성량에서 산출한 열유속  $q_{ice}$ (○표) 및 벽면부착시의 얼음

생성량에서 산출한 열유속  $q_{ice}^*$ (●표)의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 3종류의 계면활성제 첨가수용액의 벽면부착영역 하한을 나타내는 열유속은 계면활성제 첨가농도  $C_{sur}$  및 수용액 용질의 물성에 관계없이  $230 \text{ W/m}^2$ 으로 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. 이런 사실로부터 얼음의 벽면부착현상은 계면활성제 첨가농도에 의존하지 않고 일정한 열유속에 따른다는 것을 알 수 있다. 이 결과로 볼 때 계면활성제에 의한 얼음의 벽면부착 억제효과는 적은 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

잠열축열제로 얼음을 이용하고자 할 때 가장 큰 문제점의 하나로 지적되었던 얼음입자의 응집이나 덩어리화를 억제하는 방법으로 빙수 슬러리에 계면활성제 TOPOES를 첨가하는 것을 고려하여 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주속도가 작은 조건에서는 계면활성제의 첨가에 따른 빙결정 성장억제효과가 일부 나타났으며, 주속도가 빠를수록 수용액에서 생성되는 빙결정의 크기가 작아졌다.

(2) 수용액의 과냉각도가 작은  $\Delta T_{fk}=1.5 \text{ K}$ 에서는 PG 수용액을 제외하고는 2시간 동안 벽면부착이 나타나지 않아 계면활성제가 분산제로서 작용하고 있다고 생각된다.

(3) 계면활성제 첨가수용액에서 생성되는 빙결정은 계면활성제가 빙결정 표면에 흡착함으로써 그 성장을 억제하여 빙결정의 크기가 작아졌다.

(4) 빙결정의 표면에 계면활성제의 흡착막이 존재함에도 불구하고 비교적 수용액의 과냉각도가 큰 경우에 물분자의 수소결합에 의한 응집력이 증가함으로써 계면활성제에 의한 응집성 억제효과는 발휘되기 어려웠다.

(5) 계면활성제 첨가수용액의 벽면부착영역 하한은 열유속  $230 \text{ W/m}^2$  정도였다.

## 참고문헌

1. Park, S. S. and Back, J. H., 2000, Ice making thermal storage, energy saving and environment, Journal of Korean Society of Me-

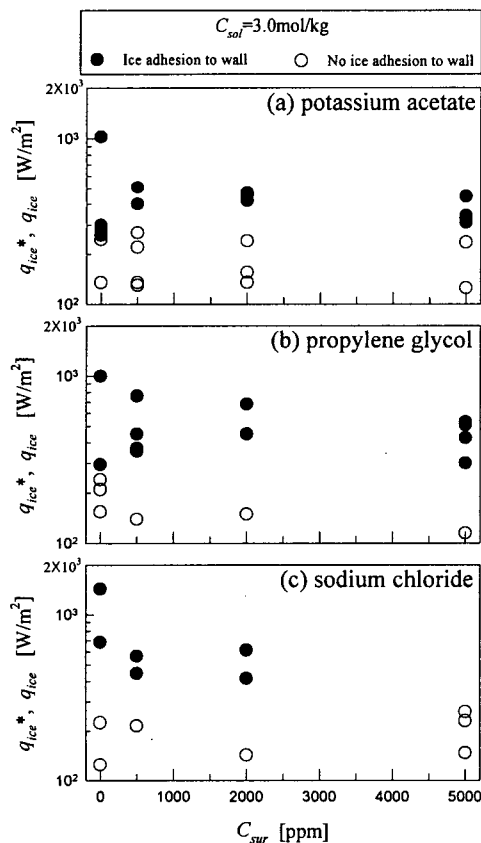


Fig. 8 Heat flux to concentration of surfactant.



- chanical Engineers, Vol. 40, No. 4, pp. 40-44.
2. Park, K. W., 1998, Current status of research and new development on ice heat storage system technology, The Magazine of the Korean Refrigerating and Air Conditioning Technology Association, Vol. 15, No. 4, pp. 119-131.
  3. Kim, B. S., Lee, Y. P., Yoon, S. Y. and Lee, J. H., 1997, A study on ice-slurry production by water spray, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 134-143.
  4. Yoon, S. M. and Kim, J. B., 2000, Characteristics of Drag Reduction Additives in the Application of District Cooling System, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 251-257.
  5. Park, Y. H., Hyun, M. T. and Lee, D. W., 2000, Experimental Study on the Freezing Conditions in a Ice-making Tube Using Flowing Subcooled Water, Energy Engg. J., Vol. 9, No. 3, pp. 178-183.
  6. Grandum, S., Yabe, A., Nakagomi, K., Tanaka, M., Takemura, F., Kobayashi, Y. and Frivik, P. E., 1997, Microscale Analysis of Crystals in Ice Slurry Made from an Antifreeze Protein Solution, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (B), Vol. 63, No. 607, pp. 1029-1034.
  7. Saito, T., Yabe, A., Inada, T., Zhang, X. and Tanaka, M., 1999, Microscopic Observation of Ice Surface Containing Adsorbed Silane Coupling Agents, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (B), Vol. 65, No. 630, pp. 463-468.
  8. Horiuchi, T., 1998, Development technology of functionary surfactant, CMC, Chap. 2.
  9. Park, K. W., Miura, H., Horibe, A. and Inaba, H., 2000, Quantity of Ice Slurry in Cooled Tube by Continuous Ice Making Using Organic Water Solution, Energy Engg. J., Vol. 9, No. 3, pp. 221-227.