교반동력에 의한 기능성 물질 함유 수용액의 빙부착 평가

승 현, 백 종 현*, 홍 희 기**, 강 채 동***†
전북대학교 대학원, *생산기술연구원 냉동공조연구팀,
**경희대학교 기계산업시스템공학부, ***전북대학교 기계항공시스템공학부

Evaluation of Ice Adhesion in an Aqueous Solution with Functional Materials by Stirring Power

Hyun Seung, Jong-Hyeon Peck*, Hiki Hong, Chaedong Kang***†**
Graduate School of Mechanical Eng., Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea
**HVAC/R Research Team, KITECH, Chonan 330-820, Korea*
***School of Mechanical and Industrial System Eng., KyungHee University, Yongin 449-701, Korea*
****College of Eng., Division of Mechanical Eng., Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea*

(Received April 9, 2004; revision received June 14, 2004)

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 thermal storage material with additives is investigated quantitatively. Various solutions of 300 g in a stainless vessel were frozen under stirring. Through the experiment the ice adhesion between cooling wall and ice-slurry was compared with each other by measuring the stirring power. From the experiment, the stirring power in EG, SCA solution was smaller than those in the solution containing functional materials, such as poly-vinyl-alcohol or kitchen detergent.

Key words: Freezing(동결), Ice adhesion(빙부착), Ice slurry(아이스슬러리), Additive(첨가제)

기 호 설 명

C_m : 평균 비열 [kJ/kg·K]
L_m : 평균 잠열 [kJ/kg]
m : 질량, 총질량 [g]
Q : 냉각열량 [kJ]
r : 신뢰도 [%]
t : 제빙시간 [s]
T_{brine} : 냉각브라인 온도 [℃]
T_{fp} : 수용액의 동결점 [℃]
$T_{mixture}$: 동결 개시 이후의 시료온도 [℃]
ΔT_{sc} : 과냉도 [K]
x : 농도 [mass%]

그리스 문자

σ : 동결점의 표준편차 [℃]
ω_{stir} : 교반회전수 [rpm]
$\varnothing$: 직경 [mm]

하첨자

a : 수용액 중 EG와 SCA 농도의 합
EG : 에틸렌글리콜(ethylene glycol)

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

f : 최종상태
i : 초기상태
ice : 얼음
m : 평균
n : 횟수
SCA : 실란커플링제(silane coupling agent)
w : 물

1. 서 론

빙축열시스템은 여름철 주·야간의 전력수요 격차가 심화됨에 따른 소비전력부하의 평준화에 적용되고 있으며 그 도입이 점차 확대되어 에너지의 효율적 이용에 기여하고 있다.

빙축열시스템 가운데 아이스슬러리를 연속적으로 형성하는 동적형 제빙방식은 두꺼운 얼음층이 형성을 억제하여 제빙효율이 높으며 얼음입자가 작아 해빙속도가 빠르기 때문에 부하추종성이 우수하며 단위유량당 냉열수송량이 커서 건물냉방, 집단냉방 및 각종 산업용 냉각시스템을 위한 효과적인 적용이 기대되고 있다.[1] 그러나 동적형 빙축열방식의 제빙과정에서는 과냉각상태를 유지하기 곤란한 점과 관 폐색의 문제점을 안고 있다. 돌발적 또는 지속적으로 발생하는 냉각면에서의 빙부착은 축열재료에 대해 유동성 및 열전달 저하를 가져오는 주된 요인으로서 시스템 성능에 직접적인 영향을 미친다.

현재 냉각면에서의 빙부착 억제와 관련하여 다수의 연구가 진행되고 있다. Okada et al.[2,3]은 에멀션—표면장력이 작은 실리콘 기름을 첨가제가 함유된 물에 분산시킨 혼합물—을 이용한 제빙방식으로부터 기름과 첨가제가 빙부착의 억제에 기여함을 보였다.

첨가제의 일종인 실란커플링제(silane coupling agent, 이하 SCA)는 분자 구조적으로 유기물과 무기물, 그리고 물과 무기물 사이에 개입하여 빙부착을 억제하는 효과를 얻기 위해 사용되고 있으나 고가이며 대부분 환경친화성을 보이지 않기 때문에 소량으로 사용해야 한다. 이를 부분적으로 대체시키기 위한 물질로써 알코올계 브라인으로 널리 사용되고 있는 에틸렌글리콜(ethylene glycol, 이하 EG)이 있다. EG는 물에 혼합되기 쉽고 분자 구조적으로 비교적 물과 무기물 사이에 개입하기 쉬운 구조를 하고 있으며, 또한 물성이 상당부분 알려져 있고 소량 사용시 환경에 큰 영향을 주지 않는 물질로 알려져 있다.[4]

현재까지 EG[4-6] 또는 프로필렌글리콜(propylene glycol, 이하 PG),[6,7] TOPOES(trioleate-polysorbate),[6] SCA[5,7] 등의 계면활성제를 첨가제로 한 수용액, 에탄올,[7] 폴리비닐알콜(Poly-Vinyl-Alcohol, 이하 PVA), Tween80[8] 등의 기능성 물질이 첨가된 다양한 성분의 수용액에 의한 동결실험이 이루어졌고 아이스슬러리의 생성 및 열유동 특성에 관하여 보고[4-8]되었다. 그러나 다양한 첨가제 및 계면활성제의 종류에 비하면 아직까지 아이스슬러리의 실용화를 위한 실험적인 기초 데이터가 턱없이 부족한 실정이다.

기능성 물질인 PVA는 환경친화적인 증점제로 알려져 있으며 분자량 3,000 이상에서 얼음의 재결정 및 성장억제에 영향을 미치는 물질로서 분자량 89,000~98,000을 가진 고분자 PVA에서는 재결정 및 성장억제에 더욱 뚜렷한 성향을 보이고 있음이 Yabe et al.[8]에 의해 보고되었다.

또한 주방용 세제에 함유된 음이온 계면활성제인 직쇄알킬벤젠설폰네이트(Linear-Alkylbenzene-Sulphonate, 이하 LAS)는 비교적 환경친화적인 물질로서 가정에서 일상적으로 많이 사용하고 있다. SCA가 양(+)이온과 음(−)이온 두 가지의 성질을 가지고 있는 반면, LAS는 음(−)이온계 계면활성제로 유기물 분리에 효과가 있다고 알려져 있다.[9]

환경친화형 빙축열재를 모색하기 위한 초기단계로서 여러 첨가제를 도입하여 그 적합성을 살펴보기 위하여 본 연구에서는 SCA 및 EG를 함유한 일정량의 3성분계 수용액을 교반/냉각하는 제빙실험을 수행하는 한편, SCA에 비해 비교적 환경친화적인 기능성 물질로서 첨가제 PVA, LAS가 함유된 EG 수용액을 교반 냉각시키는 동안 소정의 용액농도, 과냉도, 냉각속도가 빙부착에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 실 험

2.1 실험방법

2.1.1 실험 및 계측장치

Fig. 1에 제빙실험 및 측정장치의 구성도를 나타내었다. 실험장치는 저온항온조, 교반기, 시료비

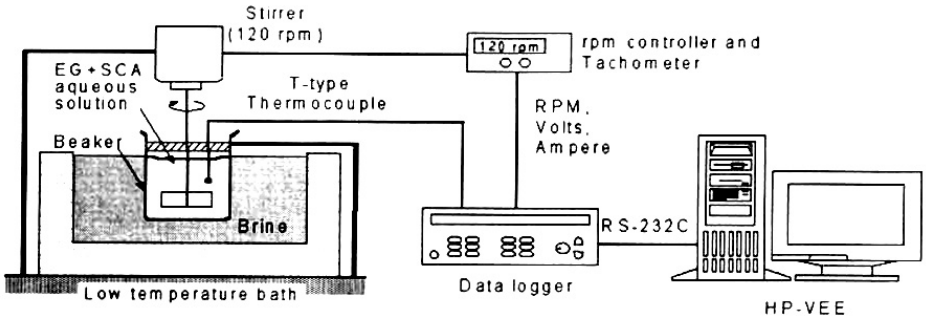


Fig. 1 Experimental apparatus for ice formation.

커, 계측장비로 구성된다.

Table 1과 Table 2는 제빙에 사용된 수용액 조성 및 제빙조건을 나타내고 있다. 조성은 질량비(mass%)로 구성되었으며, 각 조건에서 시료의 질량은 300 g으로 하였다. 제작된 혼합액은 스테인리스 재질의 용기(75×120×1 mm^3(직경×높이×두께), 용량 500 mL)에 담아 용기 외부를 저온항온조의 브라인으로 냉각하고 용기 내부의 혼합액은 강제대류가 형성되도록 교반기(익형 : 수직평판식, 3×2 cm^2 익수 : 3개)에 의해 120 rpm으로 교반시켰다. 교반 냉각 중에는 공기로부터의 열유입을 줄이기 위해 용기 상부를 교반봉이 관통되는 발포 폴리스틸렌 마개로 씌웠다. 수용액 온도가 목표로 하는 과냉도(Table 1, 2 참고)에 이르렀을 때 약 1 g의 빙핵을 과냉각 상태의 수용액에 투입하여 강제적으로 동결시켰다. 제빙과정은 과냉각 해소와 함께 시작되며 제빙량을 일정하게 유지하기 위하여 각 수용액의 종료시의 동결점을 추정하였다. 항온조 내부의 브라인 및 용기 내의 혼합액의 온도(용기 중심부의 교반익 상부 근처)를 측정하기 위해 T-형 열전대(∅ 0.3 mm)를 사용하였다. 교반기 모터로부터 송출된 전압 및 전류는 교반동력 계산을 위한 측정값으로 이전 연구[5,7]에서의 변환방식을 개선 · 보완하였다. 교반기 모터에 허용되는 전압과 전류값을 데이터 로거(Agilent 34970A)와 계측용 프로그램(HP-VEE)을 사용하여 5초마다 PC에 저장하였다. 또한 타코메터로 교반속도를 측정하여 마찬가지로 PC에 저장하였다.

Table 1 Composition of solution-Group 1 (Unit: mass%)

No.	Ethylen-glycol	SCA	water	Supercooling degree [K]	T_{brine} [℃]
1	4	0	96	2	−7.5
2	3	1	96	2	−7.5
3	0	4	96	2	−7.5
4	1	3	96	1	−7.5
5	1	3	96	4	−7.5
6	7	0	93	3	−7.5
7	0	7	93	3	−7.5
8	4	3	93	1	−5.5
9	4	3	93	1	−7.5
10	4	3	93	1	−9.0
11	4	3	93	4	−7.5
12	7	3	90	3	−7.5

Table 2 Composition of solution-Group 2 (Unit: mass%)

Water	PVA (LAS)	EG (PG)	T_{brine} [℃]
86	7	7	−7.5
93	(3)	4	−7.5
93	-	4(1.5)	−7.5

2.1.2 제타포텐셜(ζ-potential) 측정

기능성 물질이 수용액에 기여하는 정도를 살피기 위해 기능성 물질 함유 수용액의 제타포텐셜 값을 측정하였다.

미세하게 구분되는 입자가 액체에 분산되어 있거나 부유되어 있는 콜로이드 또는 수용액 내에서 이온이 존재할 때 전기적인 전하를 띠게 되며, 이러한 전하의 대부분은 수용액으로부터 선택적인 이온흡착의 형태를 나타내며 이를 제타포텐셜이라 한다. 제타포텐셜은 액체상에 존재하고 있는 입자 또는 이온과 표면 사이에서 전기적인 거동과 표면 간 상호작용을 이해하는 데 중요한 개념이다.[10]

용액 중에 분산되어 있는 입자는 입자 표면의

표면극성기의 해리와 이온의 흡착에 의하여 전기적으로 음극 또는 양극으로 대전하고 있다. 제타포텐셜이 0이 되는 pH를 등전점이라고 부르고, 입자와 표면 혹은 입자와 입자 사이의 제타포텐셜이 같은 부호이면 서로 반발력이 작용하고, 또 다른 부호이면 인력이 작용한다. 따라서 제타포텐셜이 같은 부호로 최대의 절대값을 가질 때 상호 반발력이 커져서 표면으로부터 입자의 분리가 일어나 제거가 쉽게 된다.[10]

제타포텐셜값은 EG와 SCA에 관하여 제빙실험과 별도의 과정에서 (주)오츠카전자의 ELS-8000 장비를 사용하여 측정하였다.

2.2 평균 냉각 열량

2.2.1 EG, SCA 수용액 평균 냉각열량

에틸렌글리콜(EG), 실린커플링(SCA) 수용액의 냉각열량을 구하기 위해 제빙과정에서의 동결점 강하에 따른 농도변화를 이용하여 제빙량을 산출하였다. Fig. 2는 동결점과 수용액 농도와의 관계를 나타낸 것으로 비교적 저농도 영역인 4~11 mass%에서 최소제곱법을 이용하여 식(1)과 같은 1차 함수로 근사시켰다. 동결점은 농도에 대하여 약 ±0.2℃(신뢰도 99%)의 범위 내에서 만족한다. 식(2)는 식(1)에서 측정된 동결점을 통하여 구해진 농도와 초기상태의 물의 양과 첨가제의 양을 이용하여 얼음량을 산출한다. 식(3)는 비이커로부터의 임의의 시간에서의 열전달률이다. 동결 개시 시점에서 생성되는 얼음량은 총제빙시간 동안 생성되는 얼음량의 1% 미만으로 무시하였다. 따라서 식(3)에서 총제빙시간에 걸쳐 적분한 냉각열량은 식(4)으로 나타난다.

$$T_{fp}[℃] = Ax + B \quad (A=-0.36,\ B=0.093) \tag{1}$$

$$x = \frac{m_a}{m_{wi} + m_a - m_{ice}} \times 100\ [\text{mass\%}] \tag{2}$$

$$\dot{Q} \cong \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta m_{ice} L_{m,ice} + m_a C_{m,a}(T_{fp,t+\Delta t} - T_{fp,t})}{\Delta t} \tag{3}$$

여기서

$$\Delta m_{ice} = m_{ice,n} - m_{ice,0}$$

$$m_{ice,0} = \frac{m_{w,0} C_{m,pw}(T_{fp,0} - T_{sc})}{L_{m,ice}}$$

$$m_{ice,n} = m_{total} - \frac{100 A m_a}{T_{fp,n} - B} \quad (m_{ice,n} \gg m_{ice,0})$$

$$\int_0^\tau \dot{Q} dt \fallingdotseq \Delta m_{ice,N} L_{ice} + m_a C_{m,a}(T_{fp,N} - T_{fp,0}) \tag{4}$$

여기서, 수용액의 평균 잠열 $L_{m,ice}$=240 kJ/kg, 물의 비열 $C_{m,pw}$=4.186 kJ/kg·K 수용액 평균 비열 $C_{m,a}$=4.0 kJ/kg·K로 사용하였다.

수용액의 응고잠열은 기존의 SCA 3 mass% 첨가수용액에 대한 값인 240 kJ/kg으로 하였으며,[3] 동결점의 진행과 함께 농도증가에 따른 응고잠열의 변화는 무시하였다.

2.2.2 PVA, LAS 첨가수용액 평균 냉각열량

PVA나 LAS 수용액의 냉각열량 계산에 필요한 비열 및 잠열은 현재까지 공개된 자료가 없는 실정으로 본 연구에서는 PVA, LAS에 관하여 제빙에 따른 냉각 열전달량을 구할 수 없어 교반동력값을 통하여 정성적으로 비교하였다.

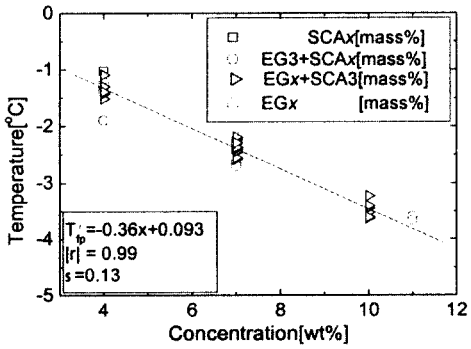


Fig. 2 Freezing point of aqueous solution to EG component.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 EG, SCA 첨가수용액

아이스슬러리의 상태는 수용액의 조성 및 냉각온도에 의해 변화되고 경계면에서 물리적 방법에

의한 직접측정에는 현실적 제약이 따른다. 본 실험에서는 아이스슬러리 제빙과정 동안 수용액의 교반에 사용되는 동력값을 각 용액에 대하여 상대적으로 측정하였다.

Fig. 3은 EG 4 mass%_SCA 3 mass%인 수용액을 과냉도 4 K 조건으로 냉각과정으로서 수용액 및 브라인 온도, 교반 회전수 및 교반동력의 변화를 나타낸 것이다. 브라인 온도가 −7.5℃로 일정하게 유지하였다. 동결개시 후 얼음 증가와 함께 농도 증가에 따라 동결점이 서서히 강하하고 있으며 동시에 벽면에서 성장, 이탈되는 얼음의 저항 증가에 의해 약 1시간 후부터 교반동력이 상승하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 EG 4 mass%_SCA 3 mass% 냉각온도 −7.5℃ 과냉도 4 K에서 제빙 후의 비이커 속 모습을 나타낸 것으로 비이커를 기울이기 전후의 사진이다. 왼쪽 사진과 같이 제빙된 아이스슬러리는 비이커를 기울인 직후 오른쪽 사진처럼 모두 쏟아져 나온 모습을 보여준다.

Fig. 5는 EG와 SCA의 조성별 냉각열량(Cooling load) 변화에 따른 교반동력을 나타낸 것이다. 여기서 냉각열량은 제빙개시 후부터 비이커 내 수용액에서 브라인으로 방출되는 열량을 의미하고, 그 값이 연속적으로 변화하나 그래프 상에서는 간헐적으로 계산하여 나타내었다.

물과 실란커플링제의 화학반응에 의해 생성된 실라놀(silanol)에 EG를 첨가한 수용액으로 제빙된 아이스슬러리는 Fig. 4와 같이 일정농도(7 mass% 이상)에서 비이커 벽면에서의 부착력이 약해짐을 알 수 있다.

조성에 의한 영향을 살피기 위해 EG와 SCA의 농도를 변화시켜 가면서 제빙실험을 수행하였다. Fig. 5는 수용액의 농도를 4 mass%로 4가지 조성에 대하여 교반동력과 냉각 열전달량의 관계를

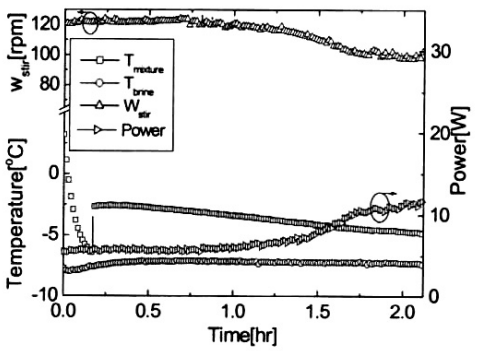


Fig. 3 Time history of temperature and power to an aqueous solution (EG 4 mass%_SCA 3 mass%, ΔT_{sc}=4 K).

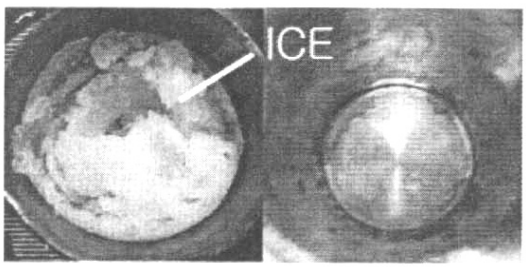


Fig. 4 Non-adhesion of ice on cooling wall (inside wall and bottom, EG 4 mass%_SCA 3 mass%, ΔT_{sc}=4 K, T_{brine}=−7.5℃).

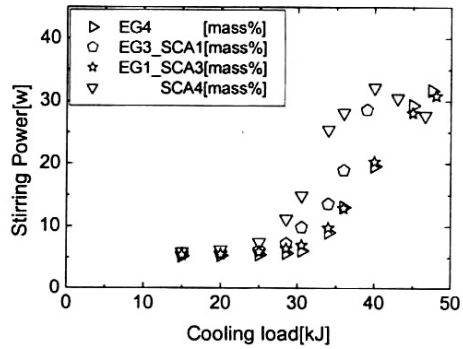


Fig. 5 The effect of component on stirring power (Total 4 mass%).

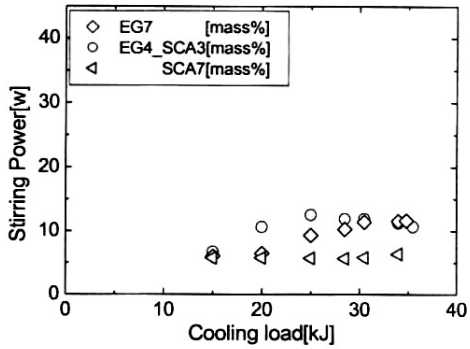


Fig. 6 The effect of component on stirring power (Total 7 mass%).

나타낸 것이다. 그 결과 열량이 30 kJ에서부터 교반동력이 급속히 상승하였다. EG 1 mass%_SCA 3 mass%의 조건에서 교반동력 상승시점과 최대점이 다른 조건에 비하여 우수하게 나타났다. SCA 4 mass%의 조건에서는 교반동력이 최고점에 이르렀다가 감소하면서 안정화되었다. Fig. 6은 SCA 7 mass% 조건에서 교반동력이 10 W 이하로 나타났으며 EG 4 mass%_SCA 3 mass%의 조건에서는 교반동력 11 W까지 상승하다가 10 W에서 안정화되었다.

Fig. 7은 SCA를 3 mass%로 유지한 채 EG의 조성을 변화시키면서 총농도 변화를 4 mass%, 7 mass%, 10 mass%로 변화시켰을 때 냉각열량과 교반동력의 관계를 나타낸 그래프로서 조성이 높을수록 교반동력값은 낮게 나타나고 있다.

Fig. 8은 조성이 EG 4 mass%_SCA 3 mass%인 수용액의 냉각속도에 따른 교반동력 변화를 나타

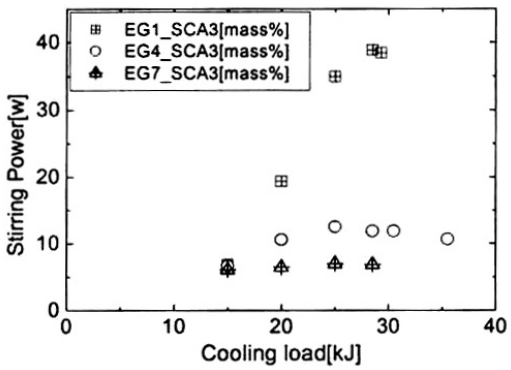


Fig. 7 The effect of concentration on stirring power.

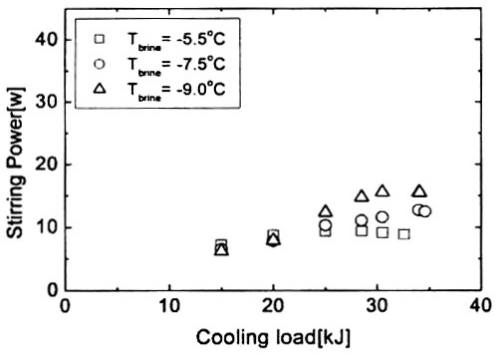


Fig. 8 Comparison of stirring power in different cooling temperatures (EG 4 mass%_SCA 3 mass%, ΔT_{sc} = 1 K).

낸 그래프이다. 냉각속도는 비이커를 냉각하는 브라인의 온도와 비이커 내 혼합물 온도와의 차에 비례하는 냉각 열유속을 의미한다. 그 결과 냉각속도가 커질수록 교반동력이 증가되었다.

3.2 제타포텐셜 측정

Fig. 9는 각각 농도 7 mass%를 갖는 EG와 SCA에 관한 제타포텐셜값을 나타내고 있다. Fig. 12(a)는 EG의 제타포텐셜값은 최대값이 −2.74 mV이고 Fig. 12(b)는 SCA의 제타포텐셜값은 최대값이 −2.38 mV로 측정되었다. 제타포텐셜값을 절대값으로 환산하였을 때 EG가 0.36 mV 더 크게 측정되었으나 이 값은 안정영역(>|30 mV|)값과 비교하여 매우 작고 오차범위 내에 포함되어 본 측정결과로는 판단하기 어렵다. 제타포텐셜 절대값의 증가는 표면장력 감소를 의미하며 EG의 제타포텐셜값은 EG의 표면장력이 43 dyne/cm[11]에 해당된다고 볼 수 있다. 향후 과제로서 벽면재료를 달리할 경우, 첨가제의 분산특성 등의 변화를 관찰할 필요가 있다.

3.3 PVA 및 LAS 첨가수용액

3.3.1 PVA 첨가수용액

PVA는 흰색 고체인 난용성 물질로서 물에서는 팽윤현상을 나타내는 특성을 가지므로 PVA를 물에 잘 분산시켜 EG 또는 SCA 등을 첨가하여 빙부착에 미치는 영향을 측정하였다.

Fig. 10는 조성이 PVA 7 mass%_EG 7 mass%인 수용액을 과냉도 3 K의 조건으로 동결과정에서의 교반동력을 나타내고 있다. 제빙개시 후 교반동력이 상승하기 시작하여 1시간 후의 교반동

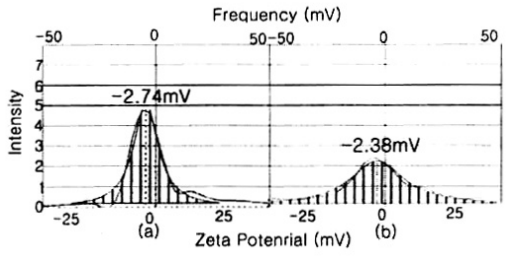


Fig. 9 Zeta potential of 7 mass% aqueous solution (a) EG (b) SCA.

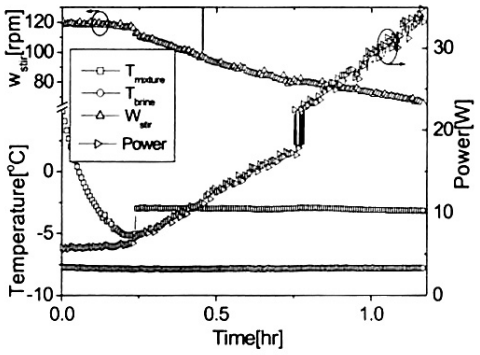


Fig. 10 Time history of temperature and power to an aqueous solutions (PVA 7 mass%_ EG 7 mass%, ΔT_{sc}=3 K).

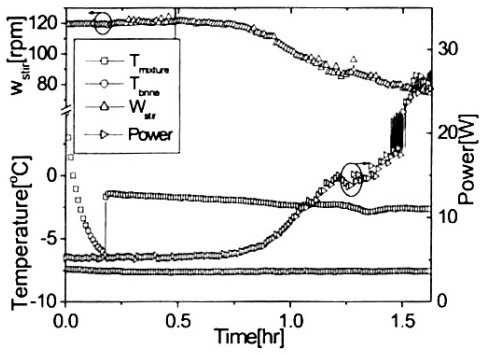


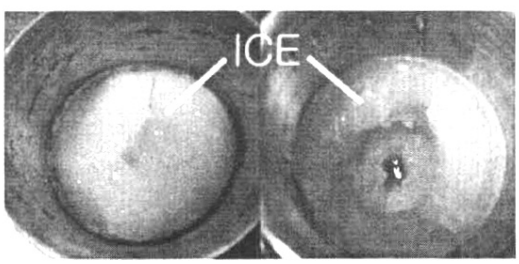
Fig. 12 Time history of temperature and power to an aqueous solutions (LAS 3 mass%_ EG 4 mass%, ΔT_{sc}=4 K).

력은 30 W 이상으로 나타났다. 이는 Fig. 6의 EG 7 mass% 수용액에서 나타난 교반동력값 약 12 W와 비교할 때 PVA를 첨가한 경우가 약 3배 정도 크게 나타났고 제빙완료 후에는 비커 내의 부착이 심하게 되어 있었다. 이는 PVA 자체가 빙부착에 기여하고 있는 것으로 사료된다. Fig. 11(a)는 PVA를 함유한 수용액의 동결 후 사진이다. 형성된 얼음은 위쪽으로 부풀어 있고 상부는 젤과 같은 상태였다.

Fig. 10에서 제빙개시 후 약 30분 경과 후 교반동력이 급격히 상승하였다. 이는 벽면에서부터 성장한 경화성 얼음이 비이커 내부의 교반익과 접하면서 나타난 것으로 추정된다.

3.3.2 LAS 첨가수용액

EG_SCA 수용액에서 비교적 빙부착 억제효과가 나타난 농도인 7 mass% 조건에서 실험하기 위하여 EG 4 mass%_LAS 3 mass%의 조건에서



(a) PVA 7 mass%_ EG 7 mass%　　(b) LAS 3 mass%_ EG 4 mass%

Fig. 11 Adhesion of ice on cooling wall.

실험을 수행하였다.

Fig. 12는 EG 4 mass%_LAS 3 mass%의 수용액에 과냉도 4 K에서 동결실험을 한 결과로 Fig. 3과 비교하여 볼 때 동일농도에서 교반동력값이 25 W로 2배 이상 크게 나타났다. 이의 원인으로는 음이온계 계면활성제인 LAS가 유기물 성분과의 결합력은 뛰어나지만 물과 벽면 사이에서 개입할 수 있는 능력이 부족하여 빙결정 성장억제에 영향을 미치지 못하고 있음이 추측된다. LAS를 함유한 수용액의 동결 후 사진을 Fig. 11(b)에 나타내었다. 벽면에서 강한 빙부착이 형성되었다.

Fig. 12에서도 Fig. 10과 같이 1.5시간 때에 교반동력의 급상승이 나타났다.

4. 결 론

기능성 물질이 첨가된 다성분계 혼합물의 비이커(75×120×1 mm^3(직경×높이×두께), 용량 500 mL)를 이용한 교반 제빙실험으로부터 다음과 같은 빙부착 특성을 얻었다.

(1) 동일 냉각열량 하에서 수용액의 농도가 클수록 교반동력값이 낮게 나타났다(Fig. 7).

(2) 동일 냉각열량 하에서 냉각속도가 작을수록 교반동력값이 낮게 나타났다(Fig. 8).

(3) 제빙 후 1.5시간 경과 후 총 농도 7 mass% 대에서는 SCA 7 mass%가 교반동력이 7 W 정도로 우수하게 나타났다(Fig. 6).

(4) 제타포텐셜값은 EG가 SCA에 비하여 오차범위 내에서 절대값으로 0.36 mV 더 크게 나타났다(Fig. 9).

(5) 제빙 후 1.5시간 경과 후에서,

① PVA를 첨가한 수용액의 경우 교반동력이 30 W 이상 크게 나타났다(Fig. 10).

② LAS를 첨가제 한 수용액은 교반동력이 25 W 정도 나타났다(Fig. 12).

(6) 모든 실험을 통하여 교반동력이 약 15 W 이하에서 빙부착이 일어나지 않았다.

(7) EG에 SCA를 첨가한 수용액은 PVA나 LAS를 첨가했을 때보다 빙부착 억제에 있어서 효과적이다.

후 기

본 연구는 2002년 전북대학교 신임교수 지원 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, Y. P., 2003, Trends in supply of ice thermal storage system and its technolgy, Proceeding of the SAREK 2003 Summer Annual Conference (Special session), pp. 1-52.
2. Matsumoto, K., Okada, M., Kawagoe, T. and Kang, C., 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., Okada, M., Oda, S., Matsumoto, K. and Kawagoe, T., 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. Lee, D. W., Yoon, C. I. and Yoon, E. S., 2002, Experimental study on flow patterns and pressure drop characteristics of ice slurry in small size pipe, The magazine of the SAREK, Vol. 14, No. 5, pp. 385-397.
5. Kang, C., Shon, K., Peck, J. H. and Hong, H., 2002, Adhesion of ice slurry in an aqueous solution cooling with stirling, The Magazine of the SAREK, Vol. 14 No. 12, pp. 1071-1077.
6. Park, K. W., Inaba, H. and Horibe, A., 2001, Study on ice making behavior of water solution with surfactant, The Magazine of the SAREK, Vol. 13, No. 12, pp. 2001-2012.
7. Kang, C., Kang, Y. T. and Hong, H., 2002, Adhesion of ice slurry in a multicomponent aqueous solution with stirring and cooling, The Magazine of the SAREK, Vol. 14, No. 12, pp. 1063-1070.
8. Lu, S. S., Inada, T., Yabe, A., Zhang, A. and Grandum, S., 2002, Microscale study of poly (vinyl alcohol) as an effective additive for inhibiting recrystallization in ice slurries, International Journal of Refrigeration, Vol. 25, pp. 562-568.
9. Kariyone, T., 1980, Properties and Application of Surfactant Saiwai-shobo Co., pp. 369-384.
10. Kirby, B. J. and Hasselbrink, E. F., 2004, Review zeta potential of microfluidic substrates: 1. Theory, experimental techniques, and effects on separations, The Magazine of the Eletrophoresis, Vol. 25, pp. 187-202.
11. Suh, K. Y. and Robert, L., 2003, Microstructures of poly (ethylene glycol) by molding and dewetting, Appleied Physics Letters, Vol. 83, No. 8 pp. 1668-1670.