

## 가압조건이 정지상태 과냉각 수용액의 해소에 미치는 영향

김 병 선, 백 종 현\*, 홍 회 기\*\*, †강 채 동\*\*\*

전북대학교 기계공학과, \*한국생산기술연구원 냉동공조연구팀,

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

### Effect of pressurization on dissolution of a supercooled aqueous solution with a stationary state

Byungseon Kim, Jong-Hyun Peck\*, Hiki Hong\*\*, †Chaedong Kang\*\*\*

**ABSTRACT** : Supercooled type ice slurry system is hard to keep a proper supercooling degree when solution becomes supercooling state. This is the reason of the ice blockage in pipe or cooling part due to an unstable cooling state. In this study, a cooling experiment was performed to pressurized solution in a stationary state. The behaviors during the supercooled aqueous solution were investigated at fixed flow rate of brine and aqueous solution of ethylene glycol 7 mass%. Also the effect to the freezing point of supercooled aqueous solution was investigated to the different pressure 101, 202, 303, and 404 kPa. At results, the pressure of the aqueous solution in the cylinder increased the supercooling degree increased and dissolution of supercooled point decreased.

**Key words** : Supercooled aqueous solution(과냉각수용액), Pressurized condition(압력조건), Supercooling degree(과냉도), Dissolution of supercooled(과냉각해소)

#### 기 호 설 명

G : 체적유량 [LPM]  
P : 압력 [kPa]  
T : 온도 [℃]

#### 하첨자

BRI : 브라인  
SOL : 수용액  
SUR : 전열판 표면  
CYL : 냉각실린더

#### 그리스 문자

$\phi$  : 직경 [mm]

#### 1. 서 론

과냉각형 빙축열시스템은 과냉각 열교환기로부터 물을 0℃ 이하의 과냉각수로 냉각시킨 다음, 열교환기 출구 측에서 과냉각을 해소시킴으로써 미세한 얼음 알갱이를 연속적으로 생성한다. 이

†Corresponding author

Tel.: +82-63-270-2318; fax: +82-63-270-2315

E-mail address : ckang@chonbuk.ac.kr

시스템은 기계적 구동부가 없어서 시스템 구성이 간단하며, 축열매체로 물 만을 사용하여 안전성, 환경친화성이 높은 등 장점을 가지고 있다. 그러나 이러한 과냉각형 제빙방식은 냉각과정에서 축열매체가 동결점 이하의 불안정한 과냉각 상태로, 더구나 일정 과냉도로 유지해야 하는 어려움으로 인해 간혹 냉각면 또는 좁은 유로에서의 빙부착과 그로 인한 관폐색 발생 등의 문제를 안고 있다. 이러한 문제점에 대한 대안으로서 물 대신 저농도 수용액을 이용하거나 연속 제빙과정에서 과냉각 해소를 억제하는 인자(첨가제의 종류와 농도, 계면 상태, 냉각면 형상, 냉각속도, 유량 등등)에 대한 다각적인 연구가 이루어지고 있는 실정이다.<sup>(1,2)</sup>

본 연구팀은 선행연구에서 관형열교환기를 이용한 연속제빙 실험을 통하여 관형열교환기 내부의 압력이 증가할수록 연속제빙 지속시간이 증가하는 것을 확인하였다.<sup>(3)</sup> 한편, 가압에 의한 동결점 저하 현상은 Clapeyron-Clausius 관계로 알려져 있으며, 물 또는 수용액의 제빙속도 및 과냉도 크기에 영향을 미친다고 보고 되어있다.<sup>(4,5)</sup> 이들 연구는 100 MPa 이상의 고압영역에서 물

또는 수용액 대한 동결실험을 통해 제시되어 있다.

이전 연구에서 살폈던 가압이 유동상태의 과냉각 수용액 해소에 영향을 준 점에 착안하여 본 연구에서는 1 MPa이하의 저가압 상태에서 정적상태에 놓여 있는 수용액의 제빙특성을 검토하고자 한다. 즉, 용기내의 수용액을 가압상태 하에서 냉각시킴으로써 압력변화가 정적상태 수용액의 과냉각 특성 및 제빙에 미치는 영향을 파악하는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 제빙장치와 계측장비를 나타낸 구성도이다. 실험장치는 냉각실린더, 저온항온조, 공기압축기 및 기타 계측장비로 구성된다.

냉각실린더는 아크릴 재질로서 150 mm × 1000 mm × 10 mm ( $\phi \times H \times t$ )인 것을 사용하였으며 실린더 하부에 브라인과의 열교환을 위해 전열판이

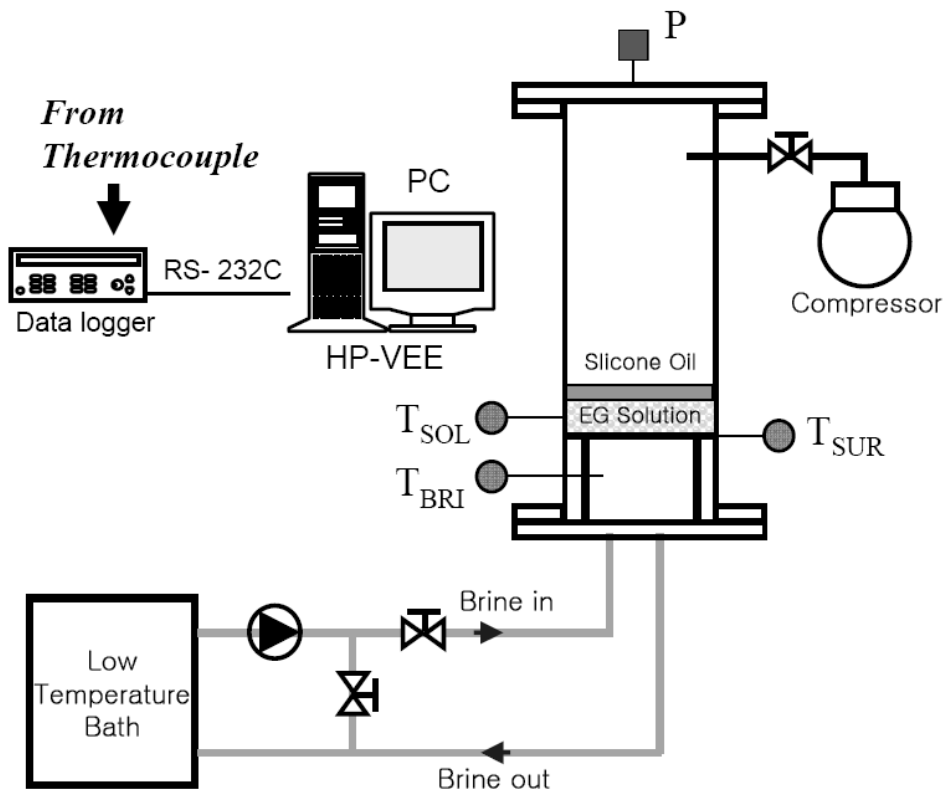


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

부착되어 있는 형태이다.

전열판은 스테인레스 스틸 파이프 (125 A, L = 100 mm) 와 같은 재료의 원형 평판 ( $\phi$ 140 mm) 을 용접하여 제작하였으며 냉각실린더 안에서의 과냉각해소인자를 제거하기 위하여 실린더와의 간극과 용접부분까지 실리콘을 도포하여 수용액의 냉각이 전열판을 통해 이루어지도록 하였다.

저온항온조(Range :  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ )는 용량이 30 liter로서 브라인을 설정온도까지 냉각시킨다.

냉각실린더는 소형 공기압축기를 사용하여 내부로 직접 압축공기를 공급함으로써 가압되었다. 실린더 내 압력이 목표값에 도달하면 공기압축기 토출구측에 설치된 밸브를 닫아 냉각 과정동안 일정한 압력을 유지하도록 하였다. 또한 압축공기의 미소한 압력변동을 완충하기 위해 실리콘오일 상층부는 두터운 공기층을 형성시켰다.

본 연구에서는 제빙 대상으로서 알콜계 브라인으로 사용되고 있는 초기농도 7 mass%<sup>(6)</sup>의 에틸렌글리콜(Ethylene glycol, 이하 EG)수용액을 사용하였다. 또한 냉각에 사용되는 브라인은  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 동결점을 갖는 EG농도 36 mass%인 것을 사용하였다.

장치의 각 부분의 온도를 측정하기 위하여 전열판 표면과 냉각실린더 내부, 그리고 브라인 순환부에 T-형 열전대를 설치하였고, 전열판 표면과 냉각실린더 내부에 설치된 열전대는 과냉각해소 요인을 억제하기 위해 실리콘으로 코팅을 하였다. 실험 중 제빙실린더에서 가해지는 압력을 관측하기 위하여 Bourdon 압력계를 실린더 상부에 설치하였다. 열전대를 통해 측정된 데이터는 데이터 로거(Agilent 34970A)와 계측용 프로그램(HP-VEE)을 이용하여 2초 간격으로 PC에 저장하였다.

## 2.2 실험방법

실험에 사용된 EG 7 mass% 수용액의 동결점

Table 1. Experimental test condition

No.	$T_{BRI}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$G_{BRI}$ (LPM)	$P_{CYL}$ (kPa)
1	-9	25	101
2	-9	25	202
3	-9	25	303
4	-9	25	404

은  $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이며 본 실험에서 측정된 값( $-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ )과 거의 일치한다.

본 연구는 과냉각 해소를 위한 특별한 장치를 부착하지는 않았으며 모든 실험에서 전열판 표면에서 과냉각 해소가 먼저 일어났다. 그러므로 과냉도는 EG 7 mass%의 동결점에서 과냉각 해소 직전의 수용액 측 전열면 표면온도를 뺀 값으로 나타내었다. 본 연구에서는 수용액에 전달되는 냉각 열량을 일정하게 유지하기 위해서 가급적 모든 실험에 있어서 수용액 온도는  $4\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 전열판 표면온도는  $0\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 이를 때를 측정원점으로 하여 실험하였다. 이때 저온 브라인은 시작 온도  $-4\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 해당되며  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 저온항온조에서 일정하게 냉각되어 순환펌프를 통하여 25 LPM의 유량으로 냉각실린더의 하부로 공급되어 부착된 전열판을 통해 실린더 안쪽의 수용액을 냉각시켰다. 이 때 실린더 내부는 각 조건에 따라 가압되어 일정한 압력을 유지한 상태이다.

또한 과냉각 수용액의 표면에 10mm 두께로 실리콘 오일층을 형성하여 압축공기에 의한 수용액 표면에서의 돌발적인 과냉각 해소를 방지하였다. 그러나 가압의 경우 실리콘 오일층 상부로부터 공기 유입에 관해서는 고려하지 않았다.

본 연구에서의 실험 조건을 Table 1에 나타내었다. 냉각이 지속되면서 자연해소가 되어 실린더 내부의 수용액이 얼음으로 변하면 실험을 중지하였으며, 같은 조건에서 2회씩 실험을 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 가압조건

Fig. 2는 대기압(101 kPa) 조건에서 냉각브라인을  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각시키며 공급하여 실시한 실험의 결과로 경과 시간에 따른 각 측정점의 온도변화를 나타낸 그래프이다.

Fig. 2 (a)의 경우 실험 시작 약 23분 후 브라인이 설정 온도까지 냉각되었으며, 이 때 전열판 표면온도는 약  $-6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 였다. 이후 20분간 점차적으로 냉각속도가 둔화되다가 전열판 표면온도가  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 이르렀을 때 전열판 표면에서 자연해소가 일어나서 얼음이 생성되었으며 이 때 수용액의 온도는  $-3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서  $-3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 약간 변하였다.

이때 수용액의 온도상승분 0.2 K는 전열관 표면에서 형성된 얼음으로부터 방출된 잠열량에 의한 기여로 판단된다. 수용액 측정점이 동결점에 도달하기 이전에 브라인 냉각온도 및 수용액의 온도차로 인하여 아주 짧은 시간사이에 주위로 잠열량이 분산되는 까닭에 수용액 측정점은 동결점까지 도달하지 못한 것으로 판단된다.

(b)에서는 앞의 경우와 비교하여 과냉각 해소 시점에서 전열관 표면의 온도차는 거의 변화가 없었으며 과냉각 유지시간이 좀 더 짧아지고 수용액의 온도가  $-3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서  $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 변화하여 앞의 경우와 비교하여 약간 높아졌다. 두 데이터를 바탕으로 계산된 대기압 조건에서 평균 과냉도는 4.6 K을 나타내었다.

Fig. 3은 가압조건이 202 kPa 일 때의 실험 결과이다. (a)의 경우 전열면 표면의 온도가  $-7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  일 때 과냉각이 해소되어 얼음이 생성되었다. 이때의 수용액의 온도는 약  $-4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 였으며 얼음생성 후 온도는  $-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로서 0.4  $^{\circ}\text{C}$ 의 온도차를 보였다.

(b)의 경우 (a)보다 실험시간이 약간 짧았지만

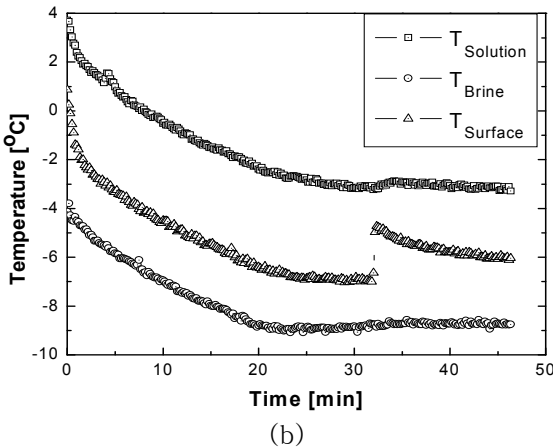
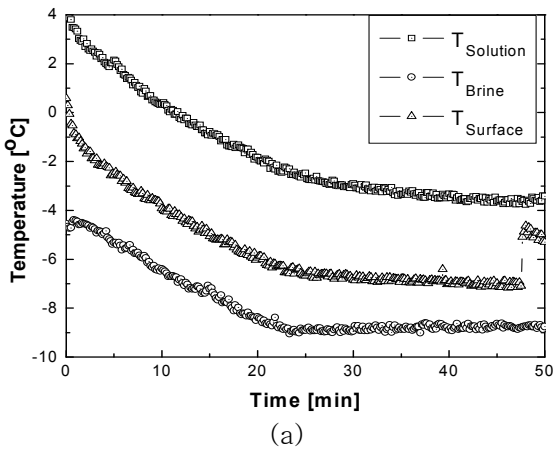


Fig. 2 Time history of temperature variation ( $T_{BRI} = -9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{CYL} = 101\text{ kPa}$ )

과냉각 자연해소 시기는 (a)의 경우와 거의 비슷한 경향을 보였다. 자연해소 수용액의 온도는  $-4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 얼음 생성 후 온도는  $-3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로서 (a)의 경우보다 약간 증가하였다. Fig. 3의 실험조건에서는 평균 과냉도가 5.2 K으로 나타냈다.

Fig. 4는 압력 303 kPa 조건에서 시간에 따른 각 측정점의 온도변화를 나타낸 그래프이다. (a), (b) 그래프에서 수용액의 온도변화는 같은 경향을 나타내었으며 자연해소 전후로  $-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서  $-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 변화하여 0.6  $^{\circ}\text{C}$ 의 온도차를 나타냈다. 과냉각 자연해소 온도는 각각  $-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로서 두 실험의 평균 과냉도는 약 5.3 K이었다.

Fig. 5는 제빙실린더에 404 kPa의 가압을 했을 경우의 실험 결과들이다. 두 그래프 모두 거의 비슷한 경향을 보여주며 수용액은 자연해소 전후로 약 0.6  $^{\circ}\text{C}$  온도차를 보여준다. 과냉각해소온도는 각각  $-7.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  정도로 이전의 경우보다 더 낮은 것을 확인할 수 있고, 두 실험의 평균 과냉도는 5.45 K으로서 실험조건 내에서 가장 크게 나타났다.

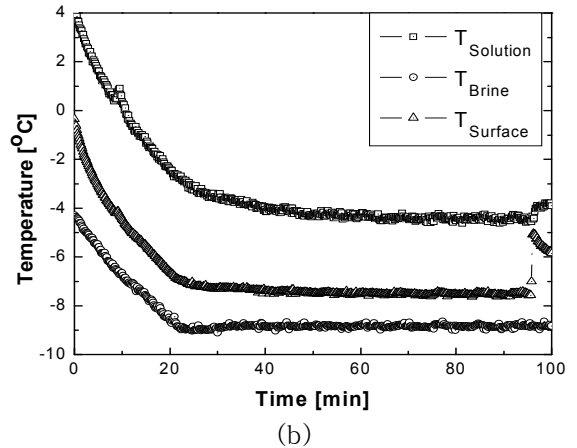
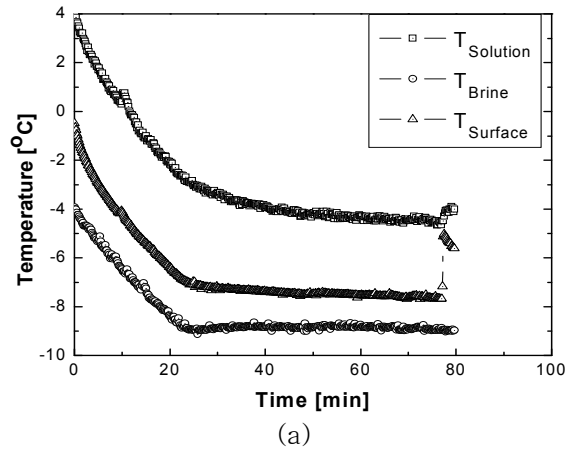


Fig. 3 Time history of temperature variation ( $T_{BRI} = -9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{CYL} = 202\text{ kPa}$ )

### 3.2 고찰

Fig. 6은 각 압력조건별로 과냉각이 자연해소했을 때 측정된 전열판의 표면온도를 나타내는 그래프이다.

그래프에서 보는 바와 같이 정적상태 동일 냉각조건 하에서 압력이 증가할수록 더 낮은 온도에서 제빙이 시작되어 과냉도가 증가함을 알 수 있다. Kochnev<sup>(7)</sup>에 의하면 물의 경우 압력이 증가할수록 점도가 감소하는 경향을 보임을 시뮬레이션을 통하여 확인하였고 실험결과와도 일치함을 보이고 있다.

본 연구에서 가압에 따른 점도감소가 과냉도 증가에 미치는 영향을 직접적으로 살피기는 어려웠으나 추후 연구를 통하여 밝혀져야 할 부분이라고 생각된다.

### 4. 결론

본 연구에서 EG 7 mass% 수용액을 일정한

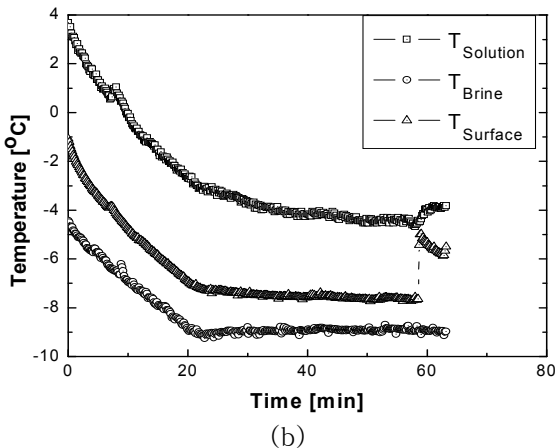
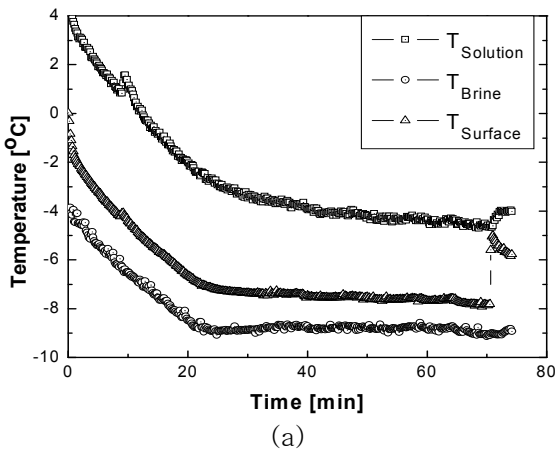


Fig. 4 Time history of temperature variation ( $T_{BRI} = -9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{CYL} = 303 \text{ kPa}$ )

냉각조건( $T_{BRI} = -9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G_{BRI} = 25 \text{ LPM}$ )으로 압력조건을 101 ~ 404 kPa까지 변화시키며 실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 제빙 실린더 내부의 압력이 증가할수록 수용액이 낮은 온도에서도 과냉각상태를 유지하였다.

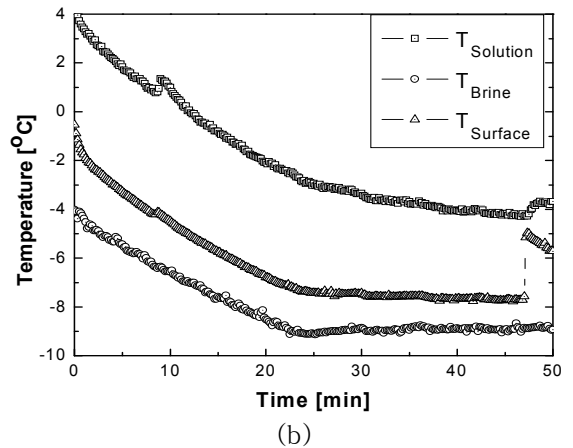
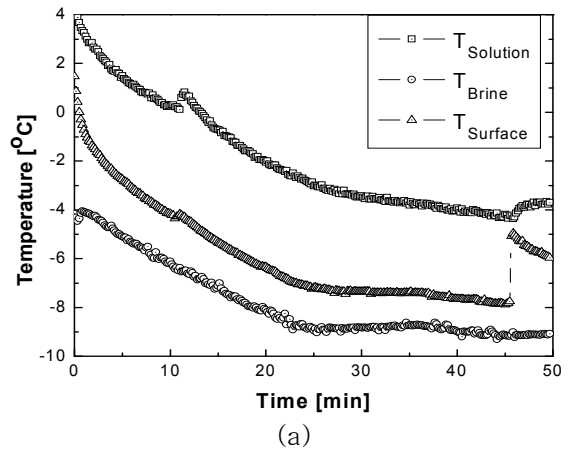


Fig. 5 Time history of temperature variation ( $T_{BRI} = -9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{CYL} = 404 \text{ kPa}$ )

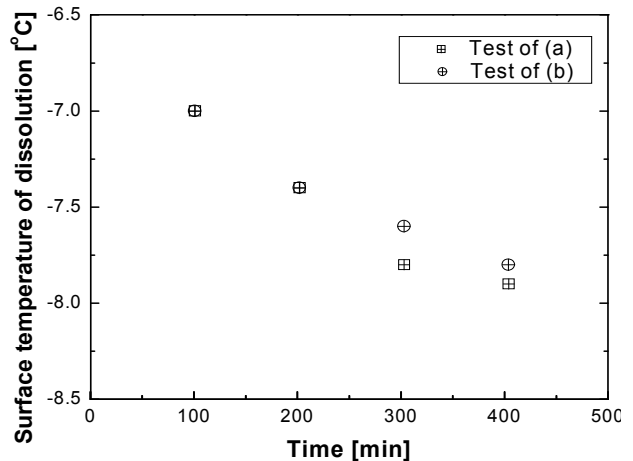


Fig. 6 Surface temperature history of dissolution on pressure condition

(2) 실험조건 내에서 제빙 실린더 내부의 압력이 증가할수록 과냉도가 크게 나타났다.

## 후 기

본 연구는 정부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(104399001).

## 참고문헌

1. Seung, H., Hong, H., Kang, C., 2004, Continuous ice slurry formation using by a plate heat exchanger, Proceeding of the SAREK 2004 Winter Annual Conference, pp. 33-38.
2. Baek, K. M., Hong, H., Kang, C., 2005, Effect on operating conditions for cooling to continuous ice formation in double spiral type heat exchanger(Effect on aqueous solution and cooling temperature). Proceeding of the SAREK 2005 Summer Annual Conference, pp. 309-314.
3. Lee, D., Kim, B., Peck, J.H., Hong, H., Kang, C., 2005, Effect of Pressurized Plate Heat Exchanger on the Ice Slurry Formation. Proceeding of the SAREK 2005 Summer Annual Conference, pp. 309-314.
4. D. Chevalier, A. Le Bail, M. Ghoul, 2000, Freezing and ice crystals formed in a cylindrical food model: part II. Comparison between freezing at atmospheric pressure and pressure-shift freezing, Journal of Food Engineering 46, pp. 287-293.
5. T. Hozumi, A. Saito, S. Okawa, T. Matsumura, 2002, Effect of bubble nuclei in freezing of supercooled water, International Journal of Refrigeration 25, pp. 243-249.
6. Seung, H., Peck, J. H., Hong, H., Kang, C., 2004, Evaluation of Ice Adhesion in an Aqueous Solution with Functional Materials by Stirring Power, The Magazine of the SAREK, Vol. 16 No. 8, pp. 720-727.
7. I. N. Kochnev, 2006, Anharmonic dynamics : melting and mass transfer in liquid, Physica B 373, pp. 217-228.