

판형 열교환기에서 유동 과냉도 및 냉각속도가 연속제빙에 미치는 영향

이 동 규, 백 종 현*, 홍 희 기**, †강 채 동***

전북대학교 기계공학과, *한국생산기술연구원 냉동공조연구팀,

경희대학교 기계산업시스템공학부, *전북대학교 기계항공시스템공학부

Effect of supercooling and cooling rate on a continuous ice slurry formation using a plate heat exchanger

Donggyu Lee, JongHyun Peck*, Hiki Hong**, †Chaedong Kang***

ABSTRACT: The peculiarity of ice slurry, such as liquidity, high heat transfer rate and easy storage can also find to supercooled type dynamic ice storage system(DISS) which is one of the DISS. However, in order to accomplish continuous ice formation in the system without mechanical moving parts, supercooled aqueous solutions should be formed stable through cooling heat exchanger and be dissolved in storage tank. In previous research, the time of ice slurry increased as the pressure of the cooling heat exchanger(PHX) increased. In this study, a cooling experiment of an ethylene glycol 7mass% solution was performed with various inlet temperature of the PHX, which has constant brine inlet temperature of -7 °C. The temperature in the storage tank maintained to freezing point of the solution. At results, the time of ice slurry formation increased as the supercooling degree decreased and the cooling rate increased.

Key words: Continuous ice slurry making device(연속제빙장치), Plate heat exchanger(판형 열교환기), Supercooling degree(과냉도), Cooling rate(냉각속도)

기 호 설 명

P : 압력 [kPa]

T : 온도 [°C]

P.H.X : 판형 열교환기

B : 브라인

S : 수용액

i : 열교환기에서 입구측

o : 열교환기에서 출구측

하첨자

1. 서 론

물 또는 수용액을 작은 입자 상태로 제빙하여 축열조에 저장하는 아이스슬러리형 빙축열 시스템은 전열효율이 높아 부하추종성이 뛰어나고,

†Corresponding author

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

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

고밀도의 냉열에너지를 부하 측까지 직접 수송할 수 있는 장점이 있다⁽¹⁾. 하지만 이러한 아이스슬러리형 빙축열 시스템의 장점을 살리기 위해서는 유동성이 뛰어난 미소입자 크기의 슬러리를 연속적으로 생성하는 것이 매우 중요하다.

슬러리 제조 방법에는 얼음을 만들어 분쇄하는 방법, 스크레이퍼에 의한 빙 회수 방법, 유동상(fluidized bed)에서 고형물질과 열전달하는 방법, 과냉각수를 생성하여 과냉각을 해소 방법, 삼중점 제빙방식 등 다양한 방법들이 있다⁽²⁾. 이 가운데 과냉각수 생성 방식은 기계적 구동부가 없어 시스템을 단순화 시킬 수 있고 전열 효율 증가에 의한 성능개선 및 유지/관리 면에서도 장점이 많다. 그러나 안정적인 과냉각을 유지하기 어렵고, 과냉각기의 냉각표면에서 과냉각수 동결로 인한 폐색 문제를 해결해야 하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 연구팀을 비롯한 일각에서는 연속 제빙과정에서 과냉각 해소를 억제하는 인자(첨가제의 종류와 농도, 계면 상태, 냉각면 형상, 냉각속도, 유량 등)에 대해 살피고 있다^(3,4).

한편 Inaba et al.⁽⁵⁾ 은 이중관형 열교환기를 이용한 수용액의 연속제빙 장치를 구성하고 아이스슬러리의 연속 생성율과 무차원수의 상관관계에 대해 밝혔다.

또한 Okada et al.⁽⁶⁾ 는 관에서 water-oil 에멀전을 냉각하여 아이스슬러리의 연속생성에 관하

여 보고하였다.

본 연구팀은 선행연구⁽⁷⁾에서 관형 열교환기를 이용한 연속제빙 실험을 통하여 수용액의 유량 및 냉각온도 및 가압조건이 연속제빙에 미치는 영향을 파악한 바가 있다. 하지만 현재 관형열교환기가 실제 연속제빙 시스템에 적용된 사례가 보고된 바 없으며, 특히 소형으로서의 가능성 검토가 불충분한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 선행연구의 후속으로서 냉각면에서의 냉각속도와 수용액의 과냉도가 연속제빙에 미치는 영향을 파악하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

연구에서 사용된 실험 장치는 Fig. 1에 나타내었다. 선행 연구에서 사용된 장치를 토대로 장시간 연속제빙이 가능하고, 제빙량을 측정할 수 있는 구조로 변경하였다. 실험 장치는 브라인을 냉각하여 열교환기로 공급하는 1차 냉각계통과 수용액을 열교환기로 공급하는 수용액 순환계통으로 구성되었다. 1차 냉각계통은 외부 냉각장치와 브라인 탱크, 순환펌프, Header로 이루어졌으며 수용액 순환 계통은 슬러리 탱크, 수용액 탱크,

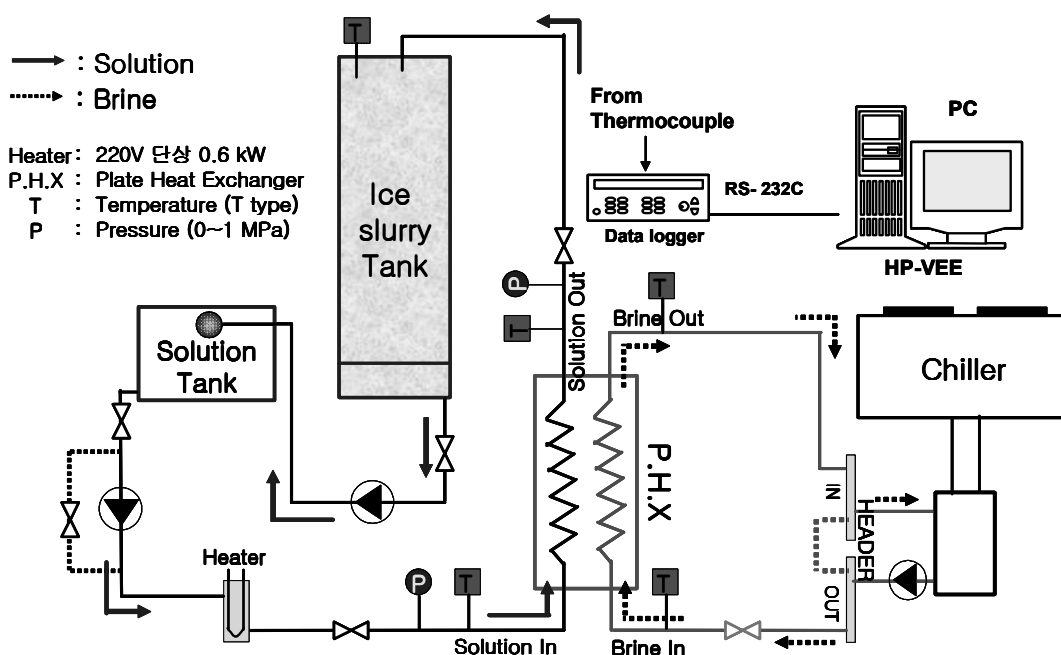


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus.

순환펌프(2개), Heater, 열교환기로 이루어졌다.

슬러리 탱크는 스테인레스로 제작된 80 Liter용량의 원통형(340mm × 860mm : D × H)탱크를 사용하였고, 슬러리 입자로 인한 탱크 출구의 폐색을 방지하기 위해 탱크 바닥으로부터 10 cm 상부위치에 스크린을 설치하였다. 수용액 탱크는 폴리스틸렌으로 단열된 20 Liter용량의 아이스박스를 사용하였다. 또한 제빙과정동안 슬러리 탱크와 수용액 탱크의 수위를 일정하게 유지하기 위해서 수용액 탱크 입구에 수위조절 밸브(Float valve)를 설치하였다. 수용액 순환계통을 따라 열교환기 내부로 유입되는 빙 입자 및 빙핵을 제거하기 위해 수용액 탱크와 열교환기 사이에 Heater(220V 단상 300W)를 설치하였다. 장치에 사용된 관형 열교환기는 Thermokey사의 스테인레스 강재(AISI 316) 상용 현열 열교환기로써 크기는 120 mm × 526 mm × 32 mm(W × H × D)이며 전열면적은 0.63 m²이다.

장치 각 부분의 온도를 측정하기 위하여 열교환기의 수용액 및 브라인의 입·출구부분과 각 저장 탱크에 T-형 열전대를 설치하였고, 제빙과정 중 열교환기에 가해지는 압력을 측정하기 위하여 수용액 입·출구 부분에 압력센서를 설치하였다. 열전대 및 압력센서를 통해 측정된 데이터는 데이터 로거(Agilent 34970A)와 계측용 프로그램(HP-VEE)을 이용하여 5초 단위로 PC에 저장하였다.

2.2 실험 방법

1차 냉각계통의 냉각장치에서 설정온도로 냉각된 브라인은 브라인탱크(200 Liter)를 통해 일정 유량(10LPM)으로 열교환기에 공급되며, 수용액 순환계통에서 일정유량(4LPM)으로 공급된 수용액과 열교환기에서 열 교환을 한다. 여기서 생성된 과냉각수는 슬러리 탱크에 저장하고, 일정 과냉도에서 과냉각을 해소시켜 슬러리를 생성하였다.

본 실험에서 사용된 수용액은 동결점 강하 및 빙부착력 억제를 고려하여 알콜계 브라인으로서

Table 1. Experimental condition

No.	$T_{S,i}$ (°C)	Supercooling degree (K)	$P_{P,H,X}$ (kPa)
1	0	1	130
2	-1	1.5	130
3	-2	2	130
5	-2	2	327

초기 농도 7 mass% 수용액 90 Liter를 사용하였다. 또한 냉각에 사용되는 브라인은 -20°C의 동결점을 갖는 EG농도 36 mass%인 수용액을 사용하였다.

Table 1에 본 연구의 실험조건을 나타내었다. 열교환기 내부 및 다른 요소(피팅부품, 밸브)에서 폐색이 발생하거나, 수용액 출구온도가 동결점온도보다 상승하였을 경우 폐색으로 간주하여 제빙 실험을 중지하였다.

2.2.1 제빙량 측정 방법

본 연구에서는 제빙실험과정 중 생성된 아이스 슬러리 질량을 측정하였다. 물이 얼음으로 상변화 할 경우 9 %체적 증가가 발생하므로 슬러리 탱크의 부피 변화를 측정하여 제빙량을 산출하였다. 슬러리 탱크 부피 변화는 제빙실험 완료 후 스크린을 이용 생성된 슬러리를 수용액에 잠기도록 하여 측정된 수면 높이와 슬러리를 완전히 녹인 후 측정된 수면 높이를 비교하여 산출하였다. Fig. 2에 측정원리 및 계산방법을 나타내었다.

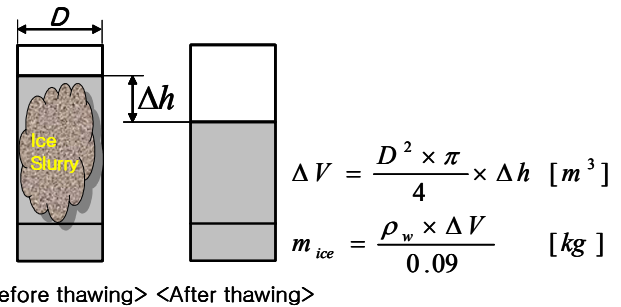


Fig. 2 Amount of ice slurry by measuring the change of volume.

2.2.2 냉각 열량계산 방법

실험 과정 동안 EG 7mass% 수용액이 열교환기를 통해 얻은 냉각열량을 계산하기 위해 열교환기 수용액 출구측 온도($T_{s,o}$)와 수용액의 동결점 온도(T_{tank})를 비교하여 산출하였다. 계산에 사용된 수용액의 비열($C_p=4.108\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$) 및 밀도($\rho=1010.5\text{kg/m}^3$)는 Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants 열물성치⁽⁹⁾를 보간하여 사용하였다. 단위 시간당 수용액이 얻은 냉각열량은 (1)식과 같다.

$$\dot{q} = \dot{m} \times C_{sol} \times (T_{s,o} - T_f) \quad (1)$$

여기서, \dot{m} 은 수용액의 유량(kg/s), C_{sol} 은 수용액의 비열(kJ/kg·K), $T_{s,o}$ 는 수용액 출구 온도, T_f 는 수용액의 동결점 온도이다. 제빙과정동안 수용액이 받은 열량은 (1)식을 시간에 대하여 적분하여 (2)식으로 계산하였다.

$$Q = \int_0^t \dot{q} dt = \int_0^t [\dot{m} \times C_{sol} \times (T_{s,o} - T_f)] dt$$

$$= \sum_{t=0}^{t=end} [\dot{m} \times C_{sol} \times (T_{s,o} - T_f)] dt$$

(2)

하지만 제빙이 지속될수록 동결점 강하가 나타나므로 동결점 온도 T_f 는 T_{tank} 온도를 사용하였다. 또한 배관 및 탱크에서의 열 손실은 무시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 측정 제빙량과 냉각열량의 비교

각 조건에서 실험 완료 후 제빙시간동안 생성된 아이스슬러리의 양을 슬러리 탱크의 부피 변화로부터 측정하였다. 또한 (2)식으로부터 얻은 수용액이 제빙과정동안 얻은 냉각열량을 얼음의 잠열량(344kJ/kg)으로 나누어 이론 제빙량을 계산하였다.

Fig. 3에 측정된 제빙량과 이론 제빙량을 제빙시간과 비교하여 나타내었다. 측정된 제빙량과 이론 제빙량은 서로 유사한 경향을 보였으며, 제

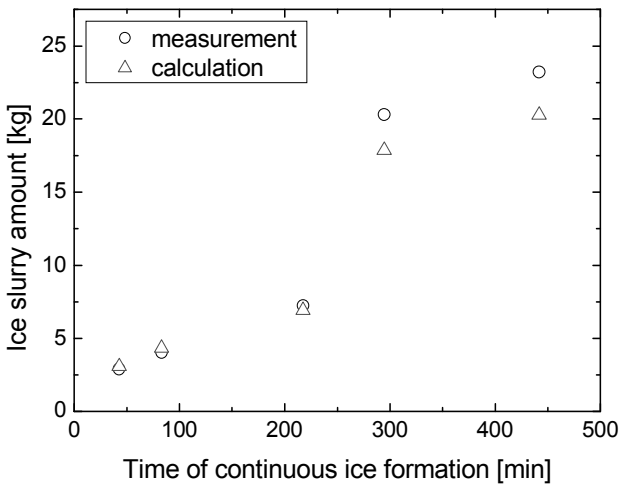


Fig. 3 Comparison of the ice slurry amount between measurement and calculation.

빙시간이 길어질수록 제빙량의 증가율이 점점 감소함을 보였다. 이는 제빙시간이 길어질수록 수용액의 농도가 증가하여 수용액의 동결점이 강하되는, 즉 농도가 증가함에 따라 제빙량의 증가율이 서서히 감소하는 현상으로 파악된다⁽⁸⁾. 또한 제빙시간이 길어질수록 측정된 제빙량과 이론 제빙량의 오차가 커지고 있는데 이는 배관 및 슬러리 탱크에서 초기보다 상대적으로 열손실이 크게 발생했기 때문으로 추정된다.

3.2 과냉도 및 냉각속도의 영향

Fig. 4는 열교환기 내부 절대압력이 130 kPa 하에서, 브라인 입구온도 $-7\text{ }^\circ\text{C}$, 수용액 입구온도 ($T_{s,i}$)를 $-2\text{ }^\circ\text{C}$ 로 유지했을 경우의 실험결과로 제빙시간에 따른 각 측정점의 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 제빙시작 후 아이스슬러리 탱크 온도가 $-3\text{ }^\circ\text{C}$ 일때 빙핵을 투여하여 과냉각을 해소하였다. 이때 열교환기 측 수용액 입구온도를 $-2\text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지시켜 공급하였다. 수용액 입구온도가 일정하게 유지됨에 따라 수용액 출구온도 또한 $-4.6\text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하였다. 과냉각해소 후 실험은 2 K의 일정 과냉도를 유지하였다. 제빙과정은 과냉각해소 이후 약 30분간 시스템의 내부에서 폐색 없이 시스템이 구동되었으며, 30분후에는 수용액 출구 온도가 동결점온도 까지 상승하였다. 이는 열교환기 내부에서 과냉각이 해소되어 얼음이 생성되었기 때문이다. 내부에서 얼음 발생 5분후에 완전 폐색이 발생하였다. 실험완료 후 약 5.1 kg의 아이스 슬러리가 측정되었다.

Fig. 5는 Fig. 4의 동일조건에서 수용액 입구온

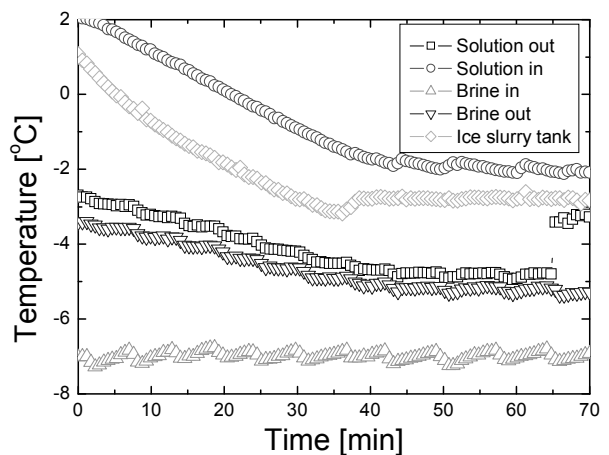


Fig. 4 Time history of temperature variation. ($T_{B,i}=-7\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{s,i}=-2\text{ }^\circ\text{C}$, $P_{P,H,X}=130\text{ kPa}$.)

도를 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 상승시켜 일정하게 유지할 경우의 실험 결과 그래프이다. 수용액 입구온도가 상승함에 따라 수용액 출구온도 역시 $-4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 상승하였다. 또한 제빙과정동안 과냉도는 약 1.5 K 를 유지하였다. 연속제빙 시간은 약 25분으로 Fig. 4 실험과 비교하여 5분 감소하였으나 거의 변화가 없었다. 이때 생성된 제빙량은 3.3 kg 이었다.

Fig. 6은 수용액 입구온도를 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 상승시켰을 때의 결과 그래프이다. 이때 수용액 출구온도는 $-3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 일정하였고, 과냉도 역시 1 K 를 유지하였다. Fig. 4, 5와 비교하여 연속제빙 시간은 약 50분으로 25분 증가하였으며, 제빙량은 4.03 kg 이 측정되었다.

Fig. 4, 5, 6에서와 같이 동일 압력조건에서 수용액 입구온도를 제어하면 시스템의 작동시간을 더욱 지속시킬 수 있으며, 제빙과정동안 과냉각

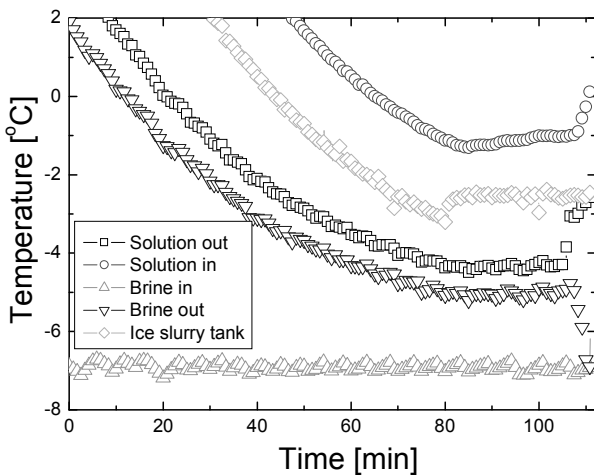


Fig. 5 Time history of temperature variation. ($T_{B,i}=-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{S,i}=-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{P,H,X}=130\text{ kPa}$.)

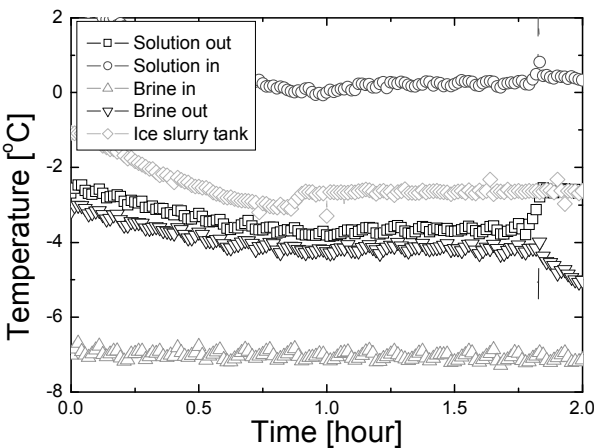


Fig. 6 Time history of temperature variation. ($T_{B,i}=-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{S,i}=0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{P,H,X}=130\text{ kPa}$.)

수의 일정한 과냉도를 유지할 수 있었다. 또한 입구 온도가 상승함에 따라, 냉각속도는 빨라지는 경향을 보였다. 즉 냉각속도가 빨라져도 제빙 지속시간에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 하지만 제빙량 측면에서 보면 수용액의 과냉각도가 클수록 즉 입구온도를 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 하였을 경우가 단위 시간에 따른 아이스슬러리 생성율이 크게 나타냈다.

따라서 본 연구팀은 선행연구를 바탕으로 Fig. 4의 조건에서 열교환기 내부 절대압력을 327 kPa 로 가압하여 실험을 실시하였다. Fig. 7은 나타낸 그래프이다. 가압을 실시하였음에도 불구하고 Fig. 4와 마찬가지로 제빙과정 동안 수용액 출구온도는 $-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 유지하였고, 과냉도 또한 2 K 로 일정하게 유지되었다. 하지만 제빙지속 시간은 약 5시간으로 장시간 작동하였다. 이때 장시간 제빙으로 인하여 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 동결점 강하가 나타났으며, 수용액 농도에 따른 IPF와 동결점 관계⁽⁸⁾에 따르면 수용액 농도는 8.86% 로 농도가 증가하였다. 실험 종료후 측정된 제빙량은 약 21 kg 이었다.

3.3 고찰

Table. 2에 실험결과를 정리하여 나타내었다. 동일 압력조건에서 수용액 입구온도가 하강함에 따라 과냉도 및 열교환기 수용액 입·출구온도차는 증가하였다. 즉 수용액 입·출구 온도차가 증가한다는 것은 냉각표면에서 열전달률이 증가함을 의미한다. 그럼에도 불구하고 연속제빙은 냉각속도가 빠른, 수용액 입구온도가 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인 조건

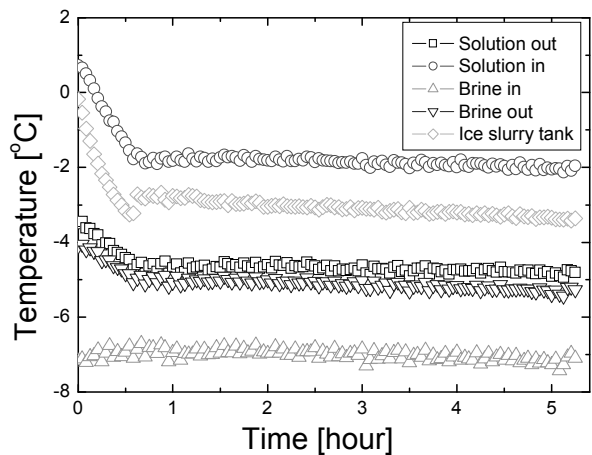


Fig. 7 Time history of temperature variation. ($T_{B,i}=-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{S,i}=-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{P,H,X}=327\text{ kPa}$.)

에서 길게 작동하였다. 이로부터 냉각속도보다는 과냉도가 연속제빙에 미치는 영향이 더 크다고 할 수 있다. 또한 과냉각수 방식의 제빙장치에서 수용액 입구온도를 조절하면 원하는 과냉도를 일정하게 유지할 수 있음을 확인하였다.

Table 2. Experiment results

$T_{S,i}$ (°C)	Supercooling degree (K)	$P_{P.H.X}$ (kPa)	ΔT (°C)	Time of ice formation (min)	ice amount (kg)
0	1	130	3.6	50	4.03
-1	1.5	130	3.1	25	3.3
-2	2	130	2.6	30	5.1
-2	2	327	2.6	290	21

4. 결 론

제빙 열교환기로 판형 열교환기를 장착한 연속 제빙장치를 이용하여, EG 7 mass% 수용액을 동일 냉각조건($T_{B,i}=-7$ °C, $G_B=10$ LPM)에서 수용액 입구온도 제어로부터 과냉도와 냉각속도를 변화시켜 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 제빙시간 완료 후 측정 제빙량과 공급 냉열량으로 산출한 이론 제빙량을 비교하였을 때, 서로 유사한 경향을 보였으며 제빙시간이 증가할수록 제빙량 증가율이 점점 감소하였다.

(2) 수용액 입구온도를 0, -1, -2 °C로 변화시킬 경우 제빙과정동안 수용액의 출구온도는 낮아지고, 즉 수용액의 과냉도는 증가하고 냉각속도는 감소하였다.

(3) 수용액의 과냉도가 증가하면 동일시간 제빙량은 증가하고 제빙지속시간은 감소하였다. 또한 냉각속도는 과냉각보다 제빙지속시간에 영향을 주지 않음을 파악하였다.

후 기

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

참고문헌

1. Lee, Y.P., 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. E. Stamatoua, J.W. Meewisse, M. Kawaji, 2005, Ice slurry generation involving moving parts, International Journal of Refrigeration 28 (2005), pp. 60-72.

3. 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

4. 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.

5. Inaba H, Miyahara S, Takeda K. 1995, Fundamental study on continuous ice making in a circular tube by flowing water solution. Trans of JSME, Series B, pp. 296-303.

6. Masashi Okada, Kazutaka Chibana, Chaedong Kang, Koji Matsumoto, Tetsuo Kawagoe, 2002, Continuous formation of slurry ice by cooling water-oil emulsion in a tube, International Journal of Refrigeration 25 (2002), pp. 259-266.

7. Lee, D.G., 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. 315-320.

8. Chung, D.Y., Peck, J.H., Kang, C., Hong, H., 2004, Relation of power characteristics and IPF in an Aqueous solution cooling with stirring, Proceeding of the SAREK 2004 Summer Annual Conference, pp. 406-411.

9. Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants, International institute of refrigeration.