

판형 열교환기를 이용한 과냉각수용액에서 유동과냉도 및 냉각속도가 연속제빙에 미치는 영향

이 동 규, 백 종 현*, 홍 희 기**, 강 채 동***†

전북대학교 대학원, *한국생산기술연구원, **경희대학교 기계산업시스템공학부,

***전북대학교 기계공학과 전북대학교 공업기술연구센터

Influence of the Supercooling Degree and Cooling Rate on a Continuous Ice Formation by a Supercooled Aqueous Solution in Flow Using a Plate Heat Exchanger

DongGyu Lee, Jong-Hyeon Peck*, Hiki Hong**, Chaedong Kang***†

Graduate School, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

*Korea Institute of Industrial Technology, Chonan 330-825, Korea

**School of Mechanical and Industrial System Engineering, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

***Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea and

Research Center of Industrial Technology, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

(Received July 18, 2007; revision received August 25, 2007)

ABSTRACT: In dynamic ice storage system(DISS), ice slurry is formed not only from solution freezing by mechanical removing parts but also supercooled solution. However, in order to perform continuous ice formation in the system without mechanical moving parts, supercooled aqueous solution should be formed stable through cooling heat exchanger and be dissolved uniformly in storage tank. In previous study, 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)

기호설명

P : 절대압력 [kPa]

T : 온도 [°C]

U : 냉각속도 [K/cycle]

하첨자

P.H.X : 판형 열교환기

B : 브라인

S : 수용액

f : 동결점(freezing point)

i : 열교환기에서 입구측

o : 열교환기에서 출구측

* Corresponding author

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

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

1. 서 론

물 또는 수용액을 작은 입자 상태로 제빙하여 축열조에 저장하는 아이스슬러리형 빙축열 시스템은 전열효율이 높아 부하추종성이 뛰어나고, 고밀도의 냉열에너지를 부하측까지 직접 수송할 수 있는 장점이 있다.⁽¹⁾ 하지만 이러한 아이스슬러리형 빙축열 시스템의 장점을 살리기 위해서는 유동성이 뛰어난 미소입자 크기의 얼음을 연속적으로 생성하는 것이 매우 중요하다.

현재 슬러리 제조 방법에는 주로 얼음을 만들어 분쇄하는 방법, 스크레이퍼에 의한 빙 회수 방법이 사용되고 있으며 과냉각수의 과냉각 해소에 의한 방법⁽²⁾ 또한 있다. 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 보안하기 위해 본 연구팀을 비롯한 일각에서는 연속 제빙과정에서 과냉각 해소를 억제하는 인자(첨가제의 종류와 농도, 계면 상태, 냉각면 형상, 냉각 속도, 유량 등)에 대해 조사하고 있다.^(3,4)

Lee et al.⁽⁵⁾은 유동과냉각수를 이용한 제빙관 내에서의 동결실험을 통하여 수용액의 Reynold 수가 증가할수록 동결되는 온도가 높아지고 과냉도가 작아지는 특성을 파악하였다.

한편 Inaba et al.⁽⁶⁾은 이중관형 열교환기를 이용한 수용액의 연속제빙장치를 구성한 실험으로부터 아이스슬러리의 연속 생성율이 냉각속도, Reynold수 및 수용액 농도가 증가함에 따라 대수적으로 비례함을 밝혔다.

또한 Okada et al.⁽⁷⁾는 나선형 구조의 tube 냉각장치를 이용하여 water-oil 혼합액의 유속 및 브라인 냉각온도, tube 두께에 따른 제빙특성에 관하여 보고하였다.

본 연구팀은 선행연구에서 판형 열교환기를 이용한 연속제빙 실험을 통하여 수용액의 유량과 냉각온도 및 가압조건이 연속제빙에 미치는 영향을 파악한 바가 있다.⁽⁸⁾ 현재 판형열교환기는 내부 유동현상의 복잡성으로 인해 실제 연속제빙부에 적용된 사례가 보고된 바 없으며, 특히 소형으로서의 가능성 검토가 불충분한 실정이다.

이에 판형열교환기의 다양한 냉각조건은 장치의 실용화에 중요하므로 본 연구에서는 선행연구의 후속으로서 냉각면을 통한 냉각속도와 유동 수용액의 과냉도가 연속제빙에 미치는 영향을 파악하

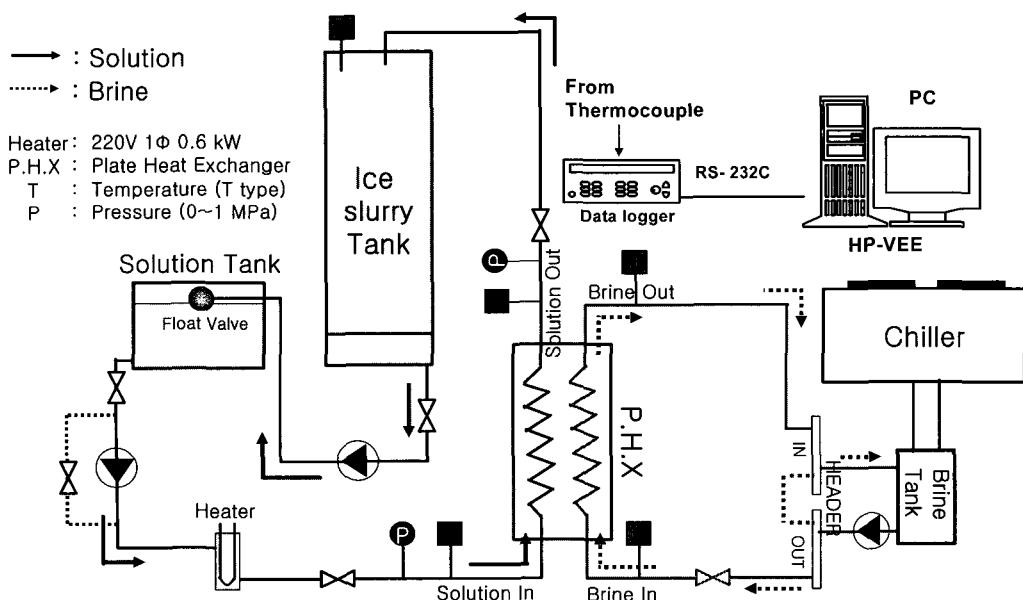


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus.

였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

연속제빙 실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 선행연구⁽⁸⁾에서 사용된 장치에 비해 슬러리탱크 및 Heater를 개선하였으며 수용액탱크에 수위조절밸브를 추가 장착하였다. 개선된 슬러리탱크는 부·피변화가 측정 가능한 구조로 생성된 얼음량을 산출할 수 있도록 하였다. 실험 장치는 브라인을 냉각하여 열교환기로 공급하는 1차 냉각계통과 수용액을 열교환기로 공급하는 수용액 순환계통으로 구성되었다. 1차 냉각계통은 외부 냉각장치와 브라인 탱크, 순환펌프, 브라인Header로 이루어졌으며 수용액 순환 계통은 슬러리 탱크, 수용액 탱크, 순환펌프(2개), Heater, 열교환기로 이루어졌다.

슬러리 탱크는 스텐레스 강판으로 제작된 80 Liter 용량의 원통형($\varnothing 340 \text{ mm} \times 860 \text{ mm} : D \times h$)탱크를 사용하였고, 생성된 얼음 입자로 인한 탱크 출구의 폐색을 방지하기 위해 탱크 바닥으로부터 10 cm 상부위치에 스크린을 설치하였다. 수용액 탱크로는 밸포폴리스틸렌으로 단열된 20 Liter 용량의 아이스박스를 사용하였다. 또한 제빙과정동안 슬러리 탱크와 수용액 탱크의 수위를 일정하게 유지하기 위해서 수용액 탱크 입구에 수위조절 밸브(Float valve)를 설치하였으며, 수용액 순환계통을 따라 열교환기 내부로 유입되는 얼음입자 및 빙 핵을 제거하기 위해 수용액 탱크와 열교환기 사이에 Heater(220 V 단상 300 W)를 설치하였다. 장치에 사용된 관형 열교환기는 Thermokey사의 스테인레스 강재(AISI 316) 상용 혼열 열교환기로서 크기는 120 mm × 526 mm × 32 mm(w × h × d)이며 전열면적은 0.63 m²이다.

장치 각 부분의 온도를 측정하기 위하여 열교

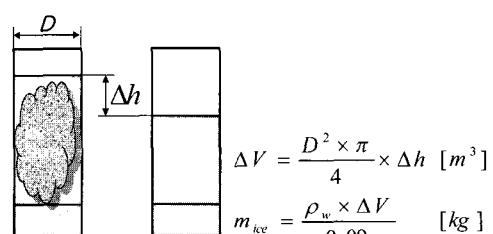
환기의 수용액 및 브라인의 입·출구 부분과 각 저장탱크에 T-형 열전대를 설치하였고, 제빙과정 중 열교환기에 가해지는 압력을 측정하기 위하여 수용액 입·출구 부분에 압력센서를 설치하였다. 열전대 및 압력센서를 통해 측정된 데이터는 데이터 로거(Agilent 34970A)와 계측용 프로그램(HP-VEE)을 이용하여 5초 단위로 PC에 저장하였다.

2.2 실험 방법

1차 냉각계통의 냉각장치에서 설정온도로 냉각된 브라인은 브라인탱크(200 Liter)를 통하여 일정 유량(10 LPM)으로 열교환기에 공급시켰다. 열교환기에서의 브라인은 수용액 순환계통을 통하여 일정유량(4 LPM)으로 공급된 수용액으로부터 열을 흡수한다. 열교환기에서 과냉각 상태로 배출된 수용액은 슬러리 탱크에 저장되며 일정 과냉도하에서 과냉각을 해소시켜 슬러리를 생성하였다.

본 실험에서 사용된 수용액은 동결점 강하 및 빙부착력 억제를 고려하여 알코올계 브라인으로서 초기 농도 EG 7 mass% 수용액 90 Liter를 사용하였다.

Table 1에 본 연구의 실험조건을 나타내었다. 실험동안에 열교환기 내부 및 다른 요소(피팅부품, 밸브)에서 폐색이 발생하거나, 수용액 출구온도가 동결점온도보다 상승하였을 경우 폐색으로 간주하여 제빙실험을 중지하였다. 또한 실험조건으로 열교환기 내부의 압력을 설정하기 위해 수용액 순환펌프 출구 측의 바이пас스 밸브와 열교환기 수용액 출구 측 밸브를 조절하여 유동하는 수용액의 동압을 항상 일정하게 유지하면서 정압에 변화를 주는 원리를 이용하였다.



<Before thawing> <After thawing>

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

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

2.2.1 제빙량 측정 방법

제빙 실험 종료 후 생성된 얼음의 양을 측정하였다. 측정 방법은 물이 얼음으로 상변화 할 경우 약 9%의 체적 증가가 나타나는 것에 착안하여, 슬러리의 탱크내 부피 변화를 측정하여 얼음량을 산출하였다. 슬러리의 탱크내 부피 변화는 제빙 실험 완료 후 스크린을 이용, 생성된 얼음입자를 수용액에 잠기도록 하여 측정한 수면 높이와 슬러리를 완전히 녹인 후 측정한 수면 높이를 측정하여 산출하였다. Fig. 2에 측정원리 및 계산방법을 나타내었다.

2.2.2 냉각 열량계산 방법

실험 과정 동안 EG 7 mass% 수용액이 열교환기를 통해 얻은 냉각열량을 계산하기 위해 수용액의 열교환기 출구측 온도($T_{s.o}$, 이하 수용액 출구측 온도)와 수용액의 동결점 온도(T_{tank})를 비교하여 산출하였다. 계산에 사용된 수용액의 비열($C_p = 4.108 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, 0^\circ\text{C}$) 및 밀도($\rho = 1010.5 \text{ kg/m}^3$)는 국제냉동협회의 2차냉매 열물성치⁽⁹⁾를 보간하였다. 단위 시간당 수용액이 얻은 냉열량은 식(1)과 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 식(1)을 시간에 대하여 적분하여 식(2)으로 계산하였다.

$$Q = \int_0^t \dot{q} dt = \int_0^t [\dot{m} \times C_{sol} \times (T_{s.o} - T_f)] dt \quad (2)$$

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

제빙이 지속될수록 농도증가에 따라 동결점 강하가 나타나며 슬러리 탱크 내 슬러리 증가에 따른 온도 변화를 적용시키기 위해 동결점 온도 T_f 는 T_{tank} 온도를 사용하였다. 한편 실험조건으로 제빙열교환기 통과 전후의 수용액 온도차($T_{S.i} - T_{S.o}$ K/cycle)를 수용액의 냉각속도라고 정의하였으며 그 크기를 달리하였다. 또한 배관 및 탱크에서의 열 손실은 무시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 과냉도 및 냉각속도의 영향

Fig. 3는 열교환기 내부 절대압력이 130 kPa 하에서, 브라인 입구온도 -7°C , 수용액의 열교환기 입구측 온도($T_{S.i}$, 이하 수용액 입구 온도)를 -2°C 로 유지했을 경우의 실험결과로 제빙 시간에 따른 각 측정점의 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 제빙시작 후 아이스슬러리 탱크 온도가 -3°C 까지 냉각될 때 빙핵을 투여하여 과냉각을 강제 해소하였다. 이때 열교환기 측 수용액 입구온도는 -2°C 로 일정하게 유지시켜 공급하였다. 수

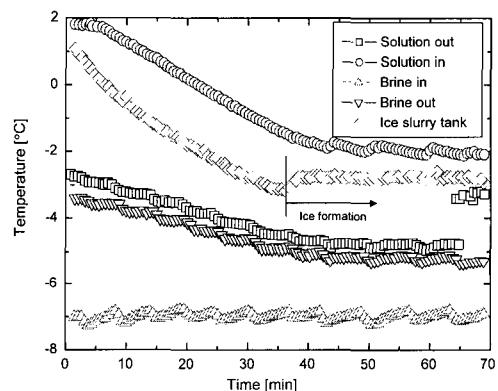


Fig. 3 Time history of brine and solution temperature variation($T_{S.i} = -2^\circ\text{C}$, $P_{P.H.X} = 130 \text{ kPa}$).

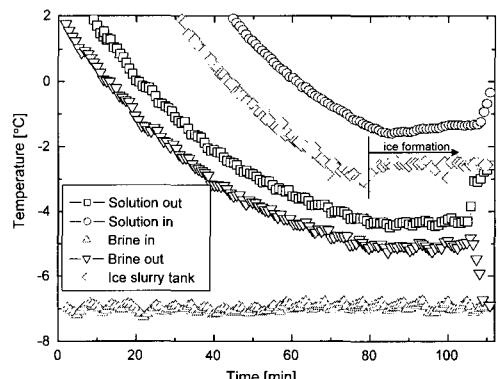


Fig. 4 Time history of brine and solution temperature variation($T_{S.i} = -1^\circ\text{C}$, $P_{P.H.X} = 30 \text{ kPa}$).

용액 입구온도가 일정하게 유지됨에 따라 수용액 출구온도 또한 -4.6°C 로 일정하였다. 과냉각해소 후 유동과 냉도는 2K 로 일정하게 유지되었다. 제빙과정은 과냉각해소 이후 약 30분간 시스템의 내부에서 폐색 없이 시스템이 구동되었으며, 30분후에는 수용액 출구 온도가 동결점온도까지 상승하였다. 이는 열교환기 내부에서 과냉각 해소로 인하여 생성된 얼음이 냉각면에 부착됨에 따른 열전달 효과의 감소가 원인으로 추정된다. 내부에서 얼음 발생 5분후 열교환기 및 열교환기 출구측 배관에서 완전 폐색이 발생하였다. 실험 종료 후 부피변화로 제빙량을 산출한 결과 약 5.1 kg 의 얼음량을 얻었다.

Fig. 4는 Fig. 3의 동일조건에서 수용액 입구온도를 -1°C 로 상승시켜 일정하게 공급하였을 경우의 실험 결과이다. 수용액 입구온도가 상승함에 따라 수용액 출구온도 역시 -4.1°C 로 0.5°C 상승하였다. 또한 제빙과정동안 유동과냉도는 약 1.5K 를 유지하였다. 연속제빙 시간은 약 25분으로 Fig. 3 실험과 비교하여 5분 감소하였으나 거의 변화가 없었다. 이때 생성된 얼음량은 3.3 kg 이었다.

Fig. 5은 수용액 입구온도를 0.2°C 로 상승시켰을 때의 실험 결과이다. 이때 수용액 출구온도는 -3.6°C 로 일정하였고, 유동과냉도는 1K 를 유지하였다. Fig. 3, 4와 비교하여 연속제빙 시간은 약 50분으로 약 25분 증가하였으며, 얼음량은 4.03 kg 이 측정되었다.

Fig. 3~Fig. 5에서와 같이 동일 압력조건에서 수

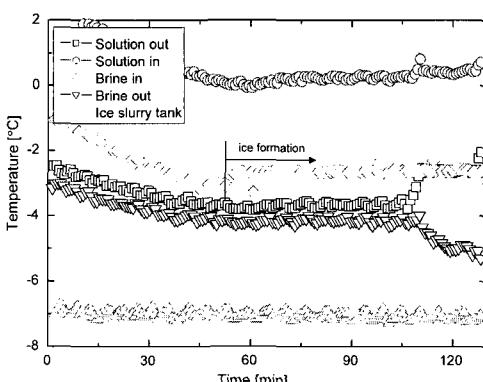


Fig. 5 Time history of brine and solution temperature variation($T_{S,i} = 0.2^{\circ}\text{C}$, $P_{P.H.X} = 130\text{ kPa}$).

용액 입구온도를 제어하면 시스템의 작동시간을 더욱 지속시킬 수 있으며, 제빙과정동안 과냉각수의 과냉도를 일정하게 유지할 수 있었다. 또한 수용액 입구 온도가 상승함에 따라 수용액의 냉각속도는 증가하고 유동과냉도는 작아지는 경향을 보였다. 따라서 제빙지속시간은 수용액의 냉각속도보다는 유동과냉도가 더 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 하지만 제빙량 측면에서 보면 수용액의 과냉도가 큰 경우, 즉 열교환기 입구온도를 -2°C 로 하였을 경우가 단위 시간에 따른 아이스슬러리 생성율이 크게 나타났다.

3.2 가압에 의한 제빙특성

선행연구⁽⁸⁾를 바탕으로 Fig. 3의 조건에서 열교

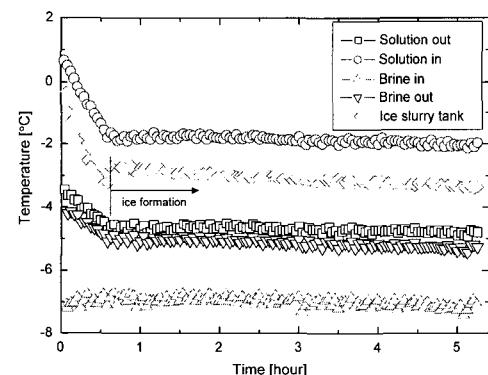


Fig. 6 Time history of brine and solution temperature variation($T_{S,i} = -2^{\circ}\text{C}$, $P_{P.H.X} = 327\text{ kPa}$).

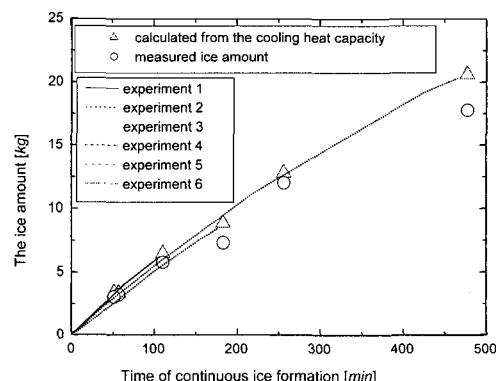


Fig. 7 Comparison of the formed ice between measurement and calculation.

환기 내부 절대압력을 327 kPa로 가압하여 실험을 실시하였다. Fig. 6은 그 실험결과를 나타낸 그래프이다. 가압을 실시하였음에도 불구하고 Fig. 3과 마찬가지로 제빙과정 동안 수용액 출구온도는 -4.6°C 를 유지하였고, 유동파냉도 또한 2 K로 일정하게 유지되었다. 하지만 제빙지속 시간은 약 5시간 이상으로 장시간 작동하였다. 이때 장시간 제빙으로 인하여 0.5°C 의 동결점 강하가 나타났으며, 수용액 농도에 따른 IPF와 동결점 관계⁽¹⁰⁾에 따르면 수용액 농도는 8.86 %로 농도가 증가하였다. 실험 종료 후 부피변화 방법으로 측정한 제빙량은 약 21 kg이었다.

3.3 측정 제빙량과 냉각열량의 비교

각 조건에서 실험 완료 후 제빙시간동안 생성된 제빙량을 슬러리 탱크의 부피 변화로부터 측정하였다. 또한 식(2)로부터 얻은 수용액이 제빙과정 동안 얻은 냉각열량을 얼음의 잠열량(334 kJ/kg)으로 나누어 이론 제빙량을 계산하였으며 Fig. 7에 그 결과를 나타내었다. 측정된 제빙량과 이론 제빙량은 서로 유사한 경향을 보였으며, 제빙시간이 길어질수록 제빙량의 증가율이 점점 감소함을 보였다. 이는 제빙 시간이 길어질수록 수용액의 농도가 증가하여 수용액의 동결점이 강화되는, 즉 농도가 증가함에 따라 제빙량의 증가율이 서서히 감소하는 현상으로 파악된다.⁽¹⁰⁾ 또한 제빙시간이 길어질수록 측정된 제빙량과 이론 제빙량의 오차가 커지고 있는데 이는 배관 및 슬러리 탱크에서 초기보다 상대적으로 큰 열손실과 생성된 얼음입자 사이에 공기층의 형성이 주된 원인

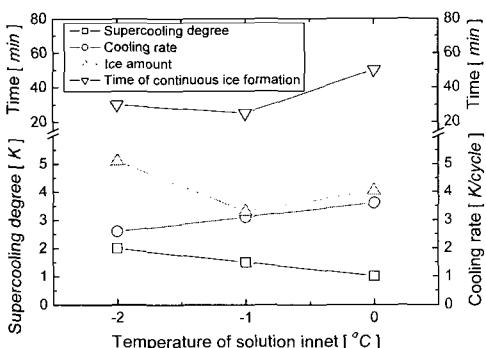


Fig. 8 Experimental results at the $P_{\text{P.H.X}} = 130 \text{ kPa}$.

으로 판단된다.

3.4 고찰

Fig. 8에 열교환기 내부압력이 130 kPa인 경우의 실험결과를 정리하여 나타내었다. Fig. 8에 열교환기 내부압력이 130 kPa인 경우의 실험결과를 정리하여 나타내었다. 동일 압력조건에서 수용액 입구온도가 낮아짐에 따라 유동파냉도는 커지고 제빙열교환기 통과 전·후의 수용액 온도차 즉 냉각속도는 감소하였다. 또한 연속제빙시간은 수용액 입구 온도가 -1°C 인 조건에서 가장 짧은 결과를 보였지만 대체적으로 수용액 입구 온도가 상승할수록 증가하는 경향을 보였다. 수용액 입구온도가 -1°C 인 조건이 -2°C 인 조건보다 연속제빙시간이 짧은 이유는 실험과정 중에 수용액 입구온도 이외의 다른 파냉각 해소인자의 영향이라고 판단된다. 따라서 이러한 불규칙적인 현상에 대한 세심한 고찰이 필요하다고 판단된다.

수용액 입구 온도가 낮아질수록 냉각속도가 감소되는 것은 브라인과 수용액 사이의 대수평균온도차가 작아져서 열전달량이 감소한 것으로 판단된다. 다른 실험조건과 비교하여 수용액 입구온도가 0°C 인 조건에서 유동파냉도가 가장 작지만 수용액의 냉각속도는 가장 크고 연속제빙시간은 가장 길게 유지되었다. 이로부터 동일압력 하에서 연속제빙이 지속되는 과정동안 냉각속도와 유동파냉도 두 인자가 연속제빙에 동시에 작용할 경우 유동파냉도가 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 그리고 파냉각수 방식의 제빙장치에서 수용액 입구온도를 제어하면 제빙과정동안 수용액의 파냉도를 일정하게 유지할 수 있음을 확인하였다. 그리고 파냉각수 방식의 제빙장치에서 수용액 입구온도를 제어하면 제빙과정동안 수용액의 파냉도를 일정하게 유지할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

제빙 열교환기로 판형 열교환기를 장착한 연속제빙장치를 이용하여, EG 7 mass% 수용액을 동일 냉각조건($T_{\text{B.i}} = -7^{\circ}\text{C}$, $G_{\text{B}} = 10 \text{ LPM}$)에서 수용액 입구온도를 제어하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 수용액 입구온도를 0, -1, -2 °C로 변화 시킬 경우 제빙과정동안 수용액의 출구온도는 낮아지고, 즉 수용액의 유동과냉도는 증가하고 냉각속도는 감소하였다.
- (2) 수용액의 유동과냉도가 증가하면 동일냉각시간 동안 생성된 제빙량은 증가하지만 제빙지속시간은 감소하였다.
- (3) 연속제빙 지속 시간에 영향을 미치는 수용액의 냉각속도와 유동과냉도 두 인자 중 유동과냉도인자가 냉각속도보다 더 많은 영향을 미치는 것을 확인하였다.
- (4) 제빙시간 완료 후 측정 제빙량과 공급 냉열량으로 산출한 이론 제빙량을 비교하였을 때, 서로 유사한 경향을 보였으며 제빙시간이 증가할수록 제빙량 증가율이 점점 감소하였다.

후 기

이 논문은 2004년 정부(교육인적자원부)의 지원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2004-041-D00112).

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. Stamatioua, E.J., Meewisse, W. and M. Kawaji, 2005, Ice slurry generation involving moving parts, International Journal of Refrigeration Vol. 28, pp. 60-72.
3. Seung, H., Peck, J. H., Hong, H. and 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. and 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. Lee, D. W., Park, Y. H. and Hyun, M. T., 2000, Experimental study on the freezing conditions in a ice-making tube using flowing sub-cooled water, The Journal of Energy Engg., Vol. 9, No. 3, pp. 178-183.
6. Inaba, H., Miyahara, S. and Takeda, K., 1995, Fundamental study on continuous ice making in a circular tube by flowing water solution. Trans. of JSME, Series B1, pp. 296-303.
7. Okada M., Chibana, K. and Kang, C., Matsumoto K., Kawagoe T., 2002, Continuous formation of slurry ice by cooling water-oil emulsion in a tube, International Journal of Refrigeration Vol. 25, pp. 259 - 266.
8. Lee, D. G., Kim, B., Peck, J. H., Hong, H. and Kang, C., 2006, Ice Slurry Formation of a Solution in a Pressurized Plate Heat Exchanger, The Magazine of the SAREK, Vol. 18 No. 7, pp. 596-602.
9. Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants, International institute of refrigeration.
10. Peck, J. H., Chung, D. Y., Kang, C. and Hong, H., 2005 Measurement of the ice packing factor of an aqueous solution using the index of refraction, The Magazine of the SAREK, Vol. 17 No. 11, pp. 1088-1094.