

가압 판형 열교환기에 의한 수용액의 아이스슬러리 생성

이 동 규, 김 병 선, 백 종 현*, 홍 희 기**, 강 채 동***†

전북대학교 대학원, *한국생산기술연구원, **경희대학교 기계산업시스템공학부, ***전북대학교 기계항공시스템공학부

Ice Slurry Formation of a Solution in a Pressurized Plate Heat Exchanger

DongGyu Lee, ByungSeon Kim, 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

(Received March 6, 2006; revision received June 12, 2006)

ABSTRACT: Ice adhesion and blockage problems have been issued in continuous ice slurry making process. So we composed continuous ice slurry making device using a commercial small plate heat exchanger (PHX), and investigated character of ice formation. An experiment of ice formation was performed with an aqueous solution of ethylene glycol 7 mass%. In the experiment, the effect of the pressurization on ice slurry formation during the cooling process was investigated. The pressurization test for the aqueous solution was performed by setting valves at the PHX inlet and outlet. At the results, the time of continuous ice formation increased as the pressure of the plate heat exchanger increased for cooling temperature of -5°C . Also continuous ice formation at the cooling temperature of -7°C showed a possibility. It was found that the pressurization may contribute to suppress the dissolution of supercooled aqueous solution in the PHX.

Key words: Ice slurry(아이스슬러리), Continuous ice formation(연속제빙), Plate heat exchanger(판형 열교환기), Pressurization(가압), Supercooling(과냉각)

기 호 설 명

하첨자

G : 체적유량 [LPM]

P : 압력 [kPa]

T : 온도 [$^{\circ}\text{C}$]

B : 브라인

i : 열교환기에서 입구측

o : 열교환기에서 출구측

S : 수용액

1. 서 론

아이스슬러리는 냉각면에서 짧은 주기로 빙 생성 및 이탈에 의해 얻어진다. 따라서 두꺼운 얼음층이 형성되지 않아 제빙효율이 높고 얼음입자

† Corresponding author

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

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

가 작아서 해빙속도가 빠르기 때문에 부하추종성이 우수하고 고유동성으로 인하여 많은 냉열에너지를 수송할 수 있다. 이와 같은 장점들로 인해 집단 냉방시스템, 각종 산업용 냉각시스템 및 식품 냉동·냉장산업, 의료산업 분야로서의 적용이 기대되고 있다.⁽¹⁾ 이미 만액식 제빙열교환기와 기계적 빙분리기를 이용하여 주기적으로 제빙/탈빙에 의해 연속제빙을 구현한 제빙기가 상용화되어 있다.⁽²⁾ 한편, 과냉각기로 물을 과냉각시켜 해소 후 축열조로 수송하는 과냉각 연속제빙방식에 관한 연구도 부분 상용화되어 있는 실정이다.⁽³⁾ 그러나 상용화된 두 제빙장치에 있어서 기계적 장치의 복잡성, 또는 제빙제어의 불안정성 등이 문제점으로 나타나고 있다. 또한 수용액에 혼입된 첨가제는 빙 성장억제에 기여함이 밝혀져 있다.⁽⁴⁾

저자 등은 이러한 기존의 연구결과를 바탕으로 제빙열교환기를 이용한 수용액형 아이스슬러리 생성에 대한 연구를 수행한 바 있다.^(5,6) 이를 통하여 열교환기에서 과냉각 수용액을 제조하여 축열조로 수송한 후, 과냉각을 해소시켜 미세한 얼음을 연속적으로 생성하는 연구내용은 제빙과정 중에 발생하는 냉각면에서의 빙부착과 그로 인한 폐색을 억제하기 위해 첨가제의 종류와 조성, 농도, 냉각속도, 유량, 냉각면 형상 및 계면상태 등의 다양한 인자가 빙부착에 미치는 영향을 고려하고 있다.⁽⁷⁾

한편 Bellas et al.⁽⁸⁾은 아이스슬러리의 냉열회수시 판형 열교환기의 열전달 특성을 살폈으며 유량의 증가와 함께 열교환기 내에서 압력강하 및 총괄 열전달계수가 증가함을 밝혔다. 또한 본 연구팀은 선행연구에서 판형 열교환기를 이용한 연속제빙실험을 통하여 수용액의 유량 및 냉각온도가 연속제빙에 미치는 영향을 파악하였다.⁽⁵⁾ 그러나 과냉각상태에 있는 수용액은 연속제빙과정 중 여러 인자의 미소한 변화에 의해 쉽게 과냉각이 해소되므로, 판형 열교환기의 구조적 복잡성은 연속제빙에 큰 장애요소라 할 수 있다. 가압에 의한 동결점 강하현상은 Clapeyron-Clausius 관계로 알려져 있으며, 고수분 함유물질의 제빙속도 및 빙 결정크기에 영향을 미친다고 보고되어 있다.^(9,10) 이들 연구는 100 MPa 이상의 고압영역에 대한 보고로서 저압영역의 가압에 의한 제빙 연구는 아직까지 사례를 찾아볼 수 없다. 이에 저자 등은 1 MPa 미만의 가압조건이 제빙에 미치는 영향을 살피고자 하였다.

본 연구에서는 다른 종류의 열교환기에 비해 부피를 작게 차지하면서 열교환 능력이 우수한 판형 열교환기(스테인리스강, SUS316)를 제빙열교환기로 하여, 기계적 구동부가 없는 연속제빙 시스템을 구성하고, 연속제빙의 적정조건을 검토하고자 한다. 세부적으로는 열교환기 내에 일정한 압력을 가함으로써 제빙실험을 실시하여 압력

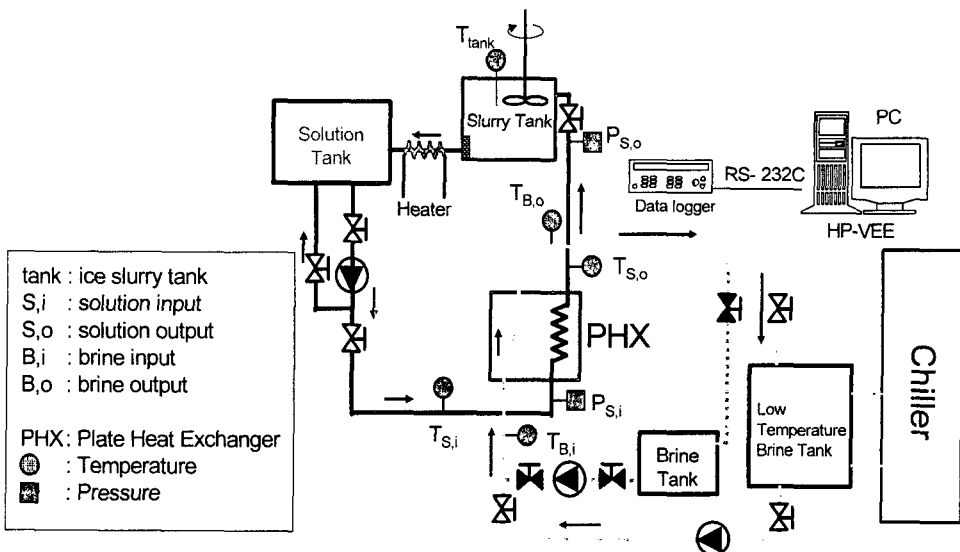


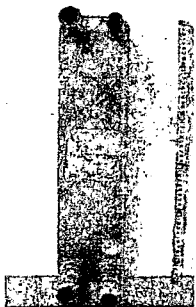
Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus.

변화가 연속 제빙에 미치는 영향을 파악하는 것을 본 연구의 목적으로 한다.

2. 아이스슬러리 생성실험

Fig. 1은 판형 열교환기를 이용한 아이스슬러리 생성을 위한 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다. 실험장치는 슬러리탱크와 수용액탱크 사이에 히터를 추가시킨 것을 제외하고는 선행연구⁽⁵⁾에서 사용된 장치의 대부분을 사용하였다. 즉, 냉동기와 저온 브라인탱크로 구성된 1, 2차 냉각계통, 수용액탱크, 슬러리탱크, 판형 열교환기 및 펌프로 구성된 수용액 순환냉각계통, 또한 제빙과정에서 열교환기의 폐색이 발생할 경우 해빙을 목적으로 한 상온 브라인탱크, 기타 계측장비로 구성되어 있다. Fig. 1에서 검은 실선은 수용액의 순환경로를, 회색실선은 저온브라인의 순환경로를 나타낸다. 1차 냉각계통은 외부 냉동기와 저온 브라인탱크(용량 200 Liter) 사이를 순환하면서 에틸렌글리콜(Ethylene glycol, EG)계 수용액인 브라인을 설정온도(0℃ 이하)까지 냉각시킨다. 2차 냉각계통은 저온 브라인탱크와 제빙용 열교환기 사이를 10 LPM의 유량으로 순환하면서 수용액을 냉각시키도록 구성되어 있다. 냉각 및 제빙부는 상용의 현열 열교환기로서 판형 열교환기(Thermokey사, 전열면적 0.63 m²)를 사용하였다. 재질은 스테인리스 강재(AISI 316)이고 크기는 120 mm × 526 mm × 32 mm(W × H × D)이다. Fig. 2에 열교환기의 사진 및 사양을 나타내었다. 수용액탱크와 슬러리탱크의 용량은 각각 80 Liter로서 발포 폴리스틸렌으로 단열되어 있다.

본 실험에서 사용된 시료는 동결점 강하 및 빙



Type: Plate
Material: AISI 316
Heat transfer area: 0.63 m²
Size: 120 × 526 × 32
(W × H × D mm³)
Company: Thermokey
(model No.: P7-10)

Fig. 2 Photograph of a small plate heat exchanger.

부착력 억제를 고려하여 알코올계 브라인으로 알려져 있는 에틸렌글리콜(Ethylene glycol, 이하 EG)을 농도 7 mass%⁽⁵⁾로 하여 70 Liter를 사용하였다. 냉각실험 동안 열교환기 출구에서 수용액유량은 일정(4 LPM)하도록 유지하였다. 열교환기에서 브라인과 수용액의 열교환을 통하여 생성된 과냉각수는 슬러리탱크에서 과냉각이 해소됨으로써 수용액과 미세얼음의 혼합물인 슬러리로 변환된다. 이때 슬러리는 슬러리탱크 내부에 아크릴 격판으로 자체 제작한 필터(∅1.5 mm, 5 mm 간격, 36 mesh)에서 가급적 걸러지도록 하고 얼음 입자를 제외한 수용액은 수용액탱크로 공급된다. 슬러리탱크에서 빠져나온 빙핵 또는 미세 빙결정은 슬러리탱크 출구에 히터를 설치하여 제거를 꾀하였다. 또한 유량조절 및 열교환기 내부 수용액에 압력을 가하기 위해 펌프와 밸브를 사용하였으며 펌프는 열교환기 입구측에, 밸브는 열교환기 출구측에 각각 장착하였다.

Table 1에 본 연구에서의 실험조건을 나타내었다. 열교환기 내부 폐색의 경우, 열교환기의 수용액 입구측 압력이 상승하고, 수용액 출구측 온도가 슬러리탱크 온도보다 상승하는 현상이 나타났으며, 이 경우 연속제빙이 불가능한 조건으로 판단하였다.

장치의 각 부분의 온도를 측정하기 위하여 열교환기의 수용액, 브라인 입·출구 부분 및 각각의 저장탱크에 T-형 열전대를 설치하였고, 제빙과정 중 열교환기에 가해지는 압력을 측정하기 위하여 수용액 입·출구 부분에 브르동 압력계를 설치하였다. 열전대를 통해 측정된 데이터는 데이터 수집장치(Agilent 34970A)와 계측용 프로그램(HP-VEE)을 이용하여 5초 간격으로 PC에 저장하였다.

Table 1 Experimental test condition

No.	G_S (LPM)	G_B (LPM)	$T_{B,i}$ (℃)	$P_{S,o}$ (kPa)	Valve size
1	4	10	-5	101	N.A.
2	4	10	-5	101	20 A
3	4	10	-5	171	20 A
4	4	10	-5	289	20 A
5	4	10	-5	416	20 A
6	4	10	-7	416	20 A
7	4	10	-10	416	20 A

3. 실험결과 및 고찰

3.1 밸브의 유무

열교환기의 수용액 출구(이하 수용액 출구)측에 밸브가 장착되지 않은 대기압에 근사한 상태(대기압보다 9.8 kPa 높은 상태로 논문에서는 대기압으로 봄)로 하여 브라인 입구 온도 -5°C 로 냉각을 실시하였다. 이때 EG 7 mass% 수용액의 동결점(-2.5°C)보다 낮은 온도로 냉각시켜 얻어진 과냉각수를 슬러리탱크에서 빙을 투여하여 과냉각을 강제 해소한 후, 약 150분 동안 수용액계통 구간에서 결빙에 의한 폐색 없이 연속적으로 아이스슬러리가 생성되었다. 또한 브라인 입구 온도를 -6°C 로 하여 냉각한 결과, 약 15분 동안 아이스슬러리가 얻어진 다음 열교환기에서 폐색이 발생하였다.

Fig. 3은 수용액 출구측에 구경 20 A 크기의 PVC 밸브를 장착한 상태로 브라인 입구 온도 -5°C , 열교환기 내부를 가압하지 않았을 경우 제빙 시간에 따른 각 측정점의 온도변화를 나타낸 것이다. 슬러리탱크 내 과냉각 해소로부터 약 15분 경과 후 수용액 출구측 온도가 0.5°C 상승한 다음 약 7분 동안 일정온도를 유지하다가 다시 급격히 상승하였다. 또한 열교환기의 브라인 입·출구 온도차(이하 브라인 입·출구 온도차)는 감소하였으며, 이는 열교환기에서 열전달이 원활히 이루어지지 않은 것으로 보인다. 실험결과 과냉각 해소 후 약 15분 후 열교환기 내부로부터 완전폐색이 발생하여 작동이 중지되었다. 이러한 열교환기 내부에서의 폐색은 수용액 출구에 장착된

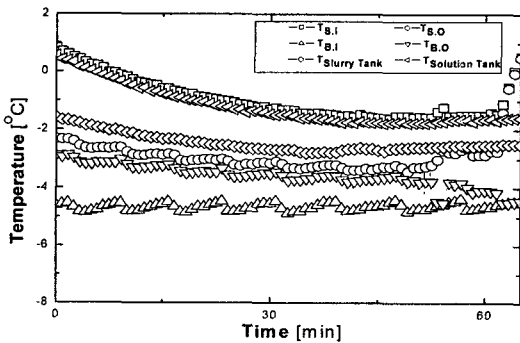


Fig. 3 Time history of temperature variation ($T_{B,i} = -5^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o} = 101 \text{ kPa}$, 20A valve).

밸브가 원인인 것으로 추정된다. 즉, 밸브에 의해 관내 과냉각 수용액의 유동에 미소한 교란이 발생하여서 저온상태인 열교환기 내부의 수용액으로 과냉각 해소가 전파되어 냉각 표면에서 빙 부착이 발생한 것으로 추정된다. 따라서 과냉각상태의 수용액 유동영역에서의 밸브나 다른 유동저항 요소의 설치는 과냉각의 해소인자를 제공하는 요인으로 볼 수 있다.

3.2 가압에 의한 영향

브라인 입구 온도를 -5°C 로 일정하게 한 가운데 열교환기 내부 절대압력을 각각 171, 281, 416 kPa로 유지하여 제빙을 실시하였다. 이때 수용액 순환펌프 출구측의 바이패스 밸브와 열교환기 수용액 출구측 밸브를 조절하여 열교환기를 지나는 수용액의 유량은 항상 일정하게 유지하였다. 즉, 가압 하에서도 동압은 일정하게 유지되었으며 정압만 증가하도록 하였다. 또한 열교환기의 수용액 입·출구 압력은 측정결과 거의 동일하였기 때문에 열교환기 내부에서의 압력강하는 무시하였다.

Fig. 4는 절대압력이 171 kPa인 조건에서의 실험결과 그래프이다. 과냉각 해소로부터 약 10분 경과 후 수용액 출구온도가 동결점 온도(-2.5°C)까지 상승하였다가 다시 약 -2.8°C 에서 일정하게 유지되었다. 이는 열교환기 내부에서 과냉각 해소에 의해 냉각면 상에 얼음이 부착되어 열전달이 원활히 이루어지지 않아, 그 결과 수용액 출구온도가 상승하고, 브라인 입·출구 온도차의 감소를 일으킨 것으로 보인다. 결국 과냉각 해소 후

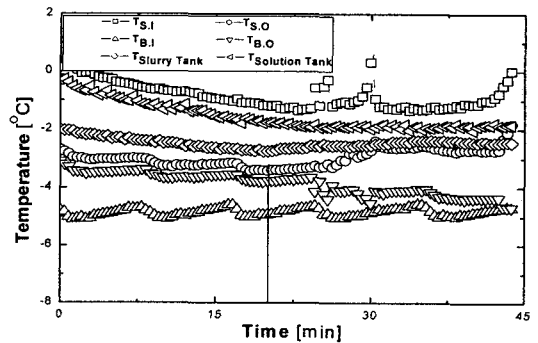


Fig. 4 Time history of temperature variation ($T_{B,i} = -5^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o} = 171 \text{ kPa}$, 20A valve).

(Fig. 4의 연속선부분) 약 22분 동안 연속제빙이 이루어졌으며, 그후 열교환기 내부에서 폐색이 발생하였다.

Fig. 5는 절대압력 281 kPa로 가압시킨 경우이다. Figs. 3, 4와 비교하여 과냉각 해소로부터 제빙지속시간은 30분으로 증가하였으나 연속제빙 가능조건을 만족하지는 못하고 열교환기 내부의 빙부착으로 인하여 열전달이 감소하였다.

Fig. 6은 열교환기의 절대압력이 416 kPa인 경우로 Figs. 3~5와 비교하여 과냉각 해소로부터 측정시간(약 2시간 30분간) 동안 연속제빙이 구현되었다. 이는 밸브를 장착하지 않았을 때의 결과와 비슷한 경향을 보였으며 육안으로 측정한 제빙량 또한 비슷하였다. 또한 직경 15 A 밸브를 이용한 동일 가압, 냉각조건 하에서 약 6시간 이상의 연속제빙이 구현되었다.

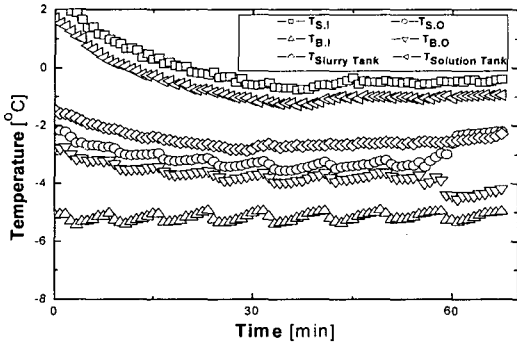


Fig. 5 Time history of temperature variation ($T_{B,i} = -5^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o} = 281\text{ kPa}$, 20A valve).

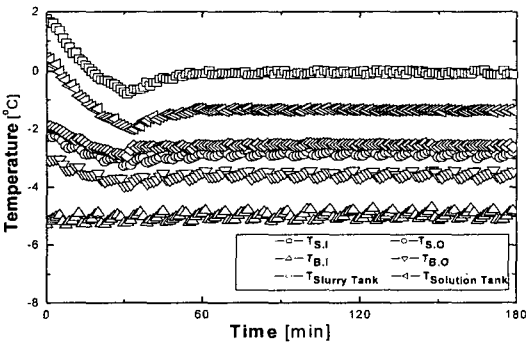


Fig. 6 Time history of temperature variation ($T_{B,i} = -5^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o} = 416\text{ kPa}$, 20A valve).

3.3 열교환기의 브라인 입구온도에 의한 영향

연속제빙 지속시간에 효과를 보인 압력(416 kPa) 하에서 브라인의 입구온도를 -7°C 와 -10°C 로 하여 제빙실험을 실시하였다. Fig. 7은 -7°C 의 브라인을 열교환기에 공급하였을 때의 결과 그래프이다. 과냉각 해소 이후 과냉도는 2.2K으로 거의 일정하였으며 -5°C 브라인을 공급하였을 때의 과냉각도(1.5 K)보다 크게 나타났다. 이는 열교환을 하는 두 액체(수용액과 브라인) 사이의 온도차가 커져서 열전달이 활발히 이루어진 것으로 보인다. 과냉각 해소 이후 약 50분 동안 연속제빙이 지속되었으며, Fig. 8은 제빙완료 후의 슬러리탱크에 저장된 아이스슬러리의 사진이다. 정량적인 제빙량은 확인할 수 없었으나, Fig. 6의 제빙시간보다 짧았음에도 불구하고, 보다 많은 제빙량을 육안으

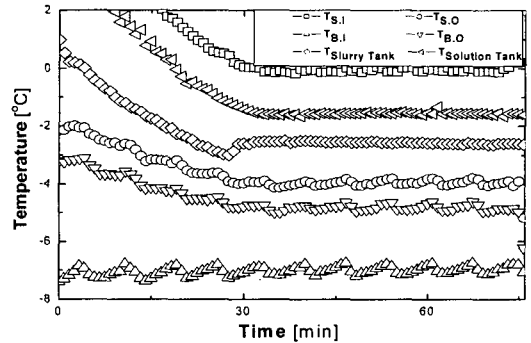


Fig. 7 Time history of temperature variation ($T_{B,i} = -7^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o} = 416\text{ kPa}$, 20A valve).



Fig. 8 Photograph of making ice slurry in slurry tank ($T_{B,i} = -7^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o} = 416\text{ kPa}$, 20 A valve).

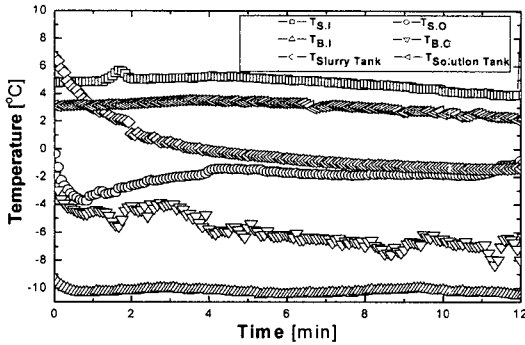


Fig. 9 Time history of temperature variation ($T_{B,i} = -10^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o} = 416\text{ kPa}$, 20A valve).

로 확인하였다.

Fig. 9는 Fig. 7과 동일유량으로 브라인 입구 온도를 -10°C 로 공급하였을 때의 제빙 동안의 온도변화를 나타내고 있다. 급속한 열전달로 인하여 수용액의 과냉도가 약 2.2 K인 지점에서 과냉각이 자연해소되었고, 브라인 입·출구의 온도차가 점점 감소하는 것으로 보아 열교환기 내부 냉각면에 빙부착이 발생한 것으로 보인다. 과냉각이 자연해소된 후로부터 약 10여분만에 완전폐색이 발생하였다.

3.4 고찰

Fig. 10은 본 연구의 실험결과를 열교환기 가압 조건에 대하여 연속제빙시간으로 나타낸 것이다. 본 연구에서 실시한 여러 실험조건 중에서 연속제빙 지속에 많은 영향을 미친 요소는 열교환기 내부에 가해진 압력의 변화라고 할 수 있다. Fig. 10에서 보는 것과 같이, 동일 냉각온도조건에서 열교환기 내부에 가해지는 압력이 상승함에 따라 연속제빙 지속시간이 증가하는 경향을 보였다. 또한 가압하지 않았을 때보다 350~450 kPa로 가압하였을 경우에 연속제빙 지속시간이 가능하였으며, 브라인 입구온도 -5°C 에서 15A 밸브를 이용하여 416 kPa로 가압한 경우에는 480분 이상 연속제빙이 지속되었다. -7°C 에서도 가압을 함으로써 연속제빙시간이 20분에서 50~100분으로 증가하였다.

이는 입자(또는 분자)로 구성된 일정공간 내의 물질에 가압에 의한 압력증가는 공간 내의 입자

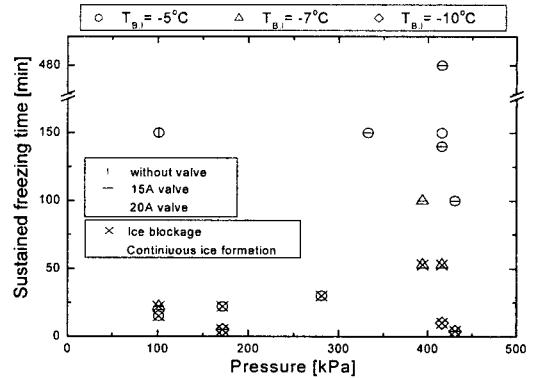


Fig. 10 Pressure history of sustained freezing time variation.

(또는 분자)들 사이의 내부에너지, 확산률 및 점도의 증가를 가져올 수 있다. 또한, 압축된 매질에 냉각이 진행될 경우 입자의 운동에너지 감소로 인하여 열적 안정성이 증가한다. 따라서 물을 동결점 이하로 과냉각시킬 때 나타나는 불안정성은 가압에 의해 부분적으로 개선되며 여기에 알코올계 물질인 에틸렌글리콜의 분산이 과냉각 수용액의 안정성을 가져다 주는 것으로 추정된다. 따라서 과냉각 수용액에서 압력의 증가는 열전달 및 수용액 안정성 등 이중적 측면이 유동장에 영향을 준 것으로 판단된다.

4. 결론

판형 열교환기를 장착한 연속제빙장치를 이용하여 EG 7 mass% 수용액을 가압 냉각조건 하에서의 제빙 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 대기압 하에서 브라인 입구온도가 -5°C 일 때 열교환기 수용액 출구의 밸브가 없을 경우 2시간 40분간 연속제빙이 지속되었으나 밸브를 장착하였을 경우 약 20분 연속제빙 후 폐색이 발생하였다. 또한 브라인 입구온도가 -6°C 일 때 밸브가 없을 경우 과냉각 해소 후 15분만에 폐색이 발생하였다.

(2) 열교환기 내부에 가해지는 압력이 상승함에 따라 연속제빙 지속시간도 증가하는 경향을 보였다.

(3) 가압하지 않았을 때보다 350~450 kPa로 비교적 높게 가압하였을 때 100분 이상의 연속제빙이 가능하였으며, 낮은 브라인 입구온도(-7°C)

에서도 연속제빙 가능성을 보였다.

(4) 열교환기 내부의 절대압력이 비교적 높은 350~450 kPa일 때 브라인 입구온도가 -10°C 에서는 폐색으로 인해 연속제빙이 이루어지지 않았다.

(5) 브라인 입구온도가 -5°C , 관경 15 A의 맨브에 의해 416 kPa로 가압하였을 때 480분 이상의 연속제빙이 구현되었다.

본 연구에서 추구하고 있는 가압에 의한 안정된 과냉각 수용액의 공극은 과냉각수액이 다수화액에 직결된다. 본 실험에서는 냉각면의 가압으로 인하여 냉각과정에서 생성된 과냉각수의 안정성이 증가하는 것으로 보인다. 하지만 가압이 유동상 과냉각 수용액의 어떤 물리적 인자에 영향을 미치는지는 추후 실험을 통하여 밝혀야 할 것이다.

후 기

이 논문은 정부의 재원으로 한국과학기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구임(104399001).

참고문헌

- 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.
- Stamatioua, E., M., 2005, Ice slurry generation involving moving part. *International Journal of Refrigeration* 28, pp.60-72.
- Kozawa, Y., Aizawa, N. and Tanino, M., 2005, Study of ice storing characteristics in dynamic type ice storage system by using supercooled water, *International Journal of Refrigeration* 28, pp.73-82.
- Grandum, S., Yabe, A., Nakagomi, K., Tanaka, M., Takemura, F., Kobayashi, Y. and Frivik, P., 1999, Analysis of ice crystal growth for a crystal surface containing adsorbed antifreeze proteins, *Journal of Crystal Growth* 205, pp.382-390.
- Seung, H., Hong, H. and Kang, C., 2004, Continuous ice slurry formation using by a plate heat exchanger, *Proceeding of the SAREK 2004 Winter Annual Conference*, pp.33-38.
- Baek, K.M., Hong, H. and Kang, C., 2004, Effect of operating conditions for cooling to continuous ice formation by using an aqueous solution. *Proceeding of the SAREK 2004 Winter Annual Conference*, pp.39-44.
- Seung, H., Peck, J.H., Hong, H. and Kang, C., 2004, Effect on the adhesion of ice slurry by the characteristic of cooling surface, *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigerating Engineering*, Vol.17, No.2, pp.183-190.
- Bellas, J., Chaer, I. and Tassou, S.A., 2002, Heat transfer and pressure drop of ice slurries in plate heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, Vol.22, pp.721-732.
- Chevalier, D., Le Bail, A. and Ghoul, M., 2003, 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.
- Otero, L. and Sanz, P.D., 2006, High-pressure-shift freezing: Main factors implied in the phase transition time, *Journal of Food Engineering* 72, pp.287-293.