

판형 열교환기에서 가압조건이 아이스슬러리의 생성에 미치는 영향

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

전북대학교 기계공학과, *한국생산기술연구원 냉동공조연구팀,

경희대학교 기계산업시스템공학부, *전북대학교 기계항공시스템공학부

Effect of Pressurized Plate Heat Exchanger on the Ice Slurry Formation

DongGyu Lee, ByungSeon Kim, Jong-Hyun Peck*, Hiki Hong**, † Chaedong Kang***

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

*HVAC/R Research Team, KITECH, Chonan 330-820, Korea

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

***Division of Mechanical and Aerospace System Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

ABSTRACT: An ice formation was tried with a commercial small plate heat exchanger under pressurized condition in order to find the possibility of utilization to dynamic type- ice thermal storage system (DISS). The behaviors during the ice formation were investigated at a fixed flow rate of brine and aqueous solution of ethylene glycol 7mass%. As a condition of experiment, a valve was installed with giving a pressure to heat exchanger which was maintained to a constant brine temperature -5°C and a flow rate. Also, the characteristics of the ice formation were investigated to the different temperature of brine as -5, -7 and -10°C under a constant pressure condition. At results, the time of ice slurry formation increased as the pressure of the plate heat exchanger increased. Moreover, it was proved that the pressurization may contribute to suppress the dissolution of supercooled aqueous solution in the heat exchanger.

Key words: Continuous ice slurry making device(연속제빙장치), Plate heat exchanger(판형 열교환기), Pressurized condition(압력조건), Supercooled aqueous solution(과냉각수용액)

———— 기 호 설 명 ————

T : 온도 [°C]

G : 체적유량 [LPM]

하첨자

P : 압력 [kPa]

B : 브라인

S : 수용액

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. 서론

높은 유동성을 갖는 아이스슬러리는 두꺼운 얼음층이 형성되지 않아 제빙효율이 높으며 얼음 입자가 작아 해빙속도가 빠르기 때문에 부하추중성이 우수한 점과 많은 냉열에너지를 수송할 수 있는 장점 등의 이유로 집단 냉방시스템, 각종 산업용 냉각시스템 및 식품 냉동·냉장산업, 의료 산업 등에 적용이 기대된다.⁽¹⁾ 특히 열교환기에서 과냉각 수용액을 제조하여 축열조로 수송한 후, 과냉각을 해소시켜 미세한 얼음을 연속적으로 생성하는 과냉각 수용액형 아이스슬러리 제조방법이 본 연구팀을 비롯한 일각에서 연구되고 있다^(2,3). 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.

한편 아이스슬러리의 냉열회수 시 판형열교환기의 열전달 특성이 Bellas et al.⁽⁴⁾에 의해 보고되고 있으며 열교환기 내에서 압력강하와 총괄열전달계수는 유량의 증가와 함께 증가함을 밝혔다. 또한 선행연구에서 본 연구팀은 판형 열교환기를 이용한 연속제빙 실험을 통하여 수용액의 유량 및 냉각온도가 연속제빙에 미치는 영향을 파악하였다⁽⁵⁾. 현재 판형열교환기가 실제 연속제

빙 시스템에 적용된 구체적인 사례는 보고된 바 없으며, 특히 소형으로서의 가능성 검토가 불충실점이다.

본 연구에서는 기계적인 구동부가 없는 아이스슬러리 생성을 위해 스테인레스강(SS316) 재질의 판형 열교환기를 제빙 열교환기로 하여 연속제빙의 적정 조건을 검토하고자 한다. 세부적으로는 열교환기 내에 일정한 압력을 가함으로써 제빙실험을 실시하여 압력 변화가 연속 제빙에 미치는 영향을 파악하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험 방법

연구에서 사용된 실험장치는 슬러리 탱크와 수용액 탱크 사이에 히터를 추가시킨 것을 제외하고는 선행 연구에서 사용된 장치 대부분을 사용하였다. 즉 냉동기와 저온브라인 탱크로 구성된 1차 냉각계통, 수용액 탱크, 슬러리 탱크, 판형 열교환기 및 펌프로 구성된 수용액 순환 냉각계통, 또한 제빙과정에서 열교환기의 폐색이 발생할 경우 해빙을 목적으로 한 상온브라인 탱크, 기타 계측장비로 구성되어 있다. 슬러리 탱크 출구부분의 히터는 슬러리 탱크에서 수용액 탱크로 이송되는 얼음입자를 제거하기 위한 보조 장치이다. Fig. 1에서 검은 실선은 수용액의 순환경로를, 회색실선은 저온브라인의 순환 경로를 나타

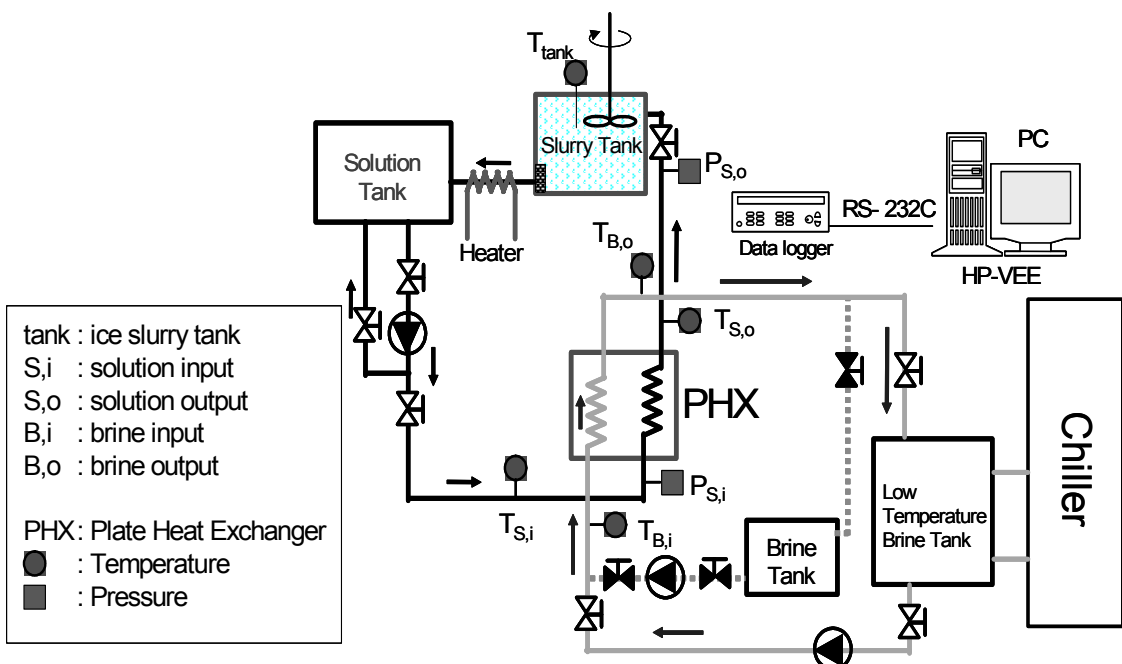


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus.

낸다.

장치에 사용된 판형 열교환기는 Thermokey사 스테인레스 강재(AISI 316)의 상용 현열 열교환기로써 크기는 120 mm × 526 mm × 32 mm(W × H × D)이며, 전열면적은 0.63 m²이다. 수용액 탱크와 슬러리 탱크의 용량은 각각 80 l로 폴리스틸렌으로 단열된 아이스박스를 사용하였다. 1차 냉각장치는 브라인을 설정온도(0℃ 이하)까지 냉각시킨다. 저온브라인 탱크는 용량이 200 l로서 1차 냉각계통에서 냉각된 브라인을 저장하는 탱크이다.

본 실험에서 사용된 수용액은 알콜계 브라인으로 사용되고 있는 에틸렌글리콜(Ethylene glycol, 이하 EG)을 동결점 강하 및 빙부착력 억제를 고려한 초기농도 7 mass%⁽⁵⁾ 70 l를 사용하였다. 냉각에 사용되는 브라인은 -20℃의 동결점을 갖는 EG농도 36 mass%인 수용액을 사용하였다.

수용액은 열교환기 출구에서 유량이 일정(4 LPM)하도록 유지하였다. 1차측 냉각계통에서 냉각된 저온브라인은 10 LPM의 유량으로 일정하게 공급하였다. 열교환기에서 브라인과 수용액의 열교환을 통해서 생성된 과냉각수를 슬러리 탱크에 저장하고 과냉각을 해소시킴으로서 슬러리를 생성하였다. 이때 두께가 3 mm인 아크릴판으로 자체 제작한 필터(φ1.5 mm, 5 mm간격, 36 mesh)를 이용하여 슬러리는 걸러내고 제빙이 이루어지지 않은 수용액은 다시 수용액 탱크로 흘러보냈다. 이때 설치된 히터를 이용하여 슬러리 탱크 출구에서 1차 필터로 걸러지지 않은 빙핵을 제거하였다.

본 연구에서의 실험 조건을 Table 1에 나타내었다. 유량조절 및 열교환기 내부 수용액에 압력을 가하기 위해 펌프와 밸브를 사용하였으며 펌프는 열교환기 입구 측에, 밸브는 열교환기 출구 측에 각각 장착하였다.

제빙실험과정동안 열교환기 내부 및 다른 요소

Table 1. Experimental test condition

No.	Gs (LPM)	GB (LPM)	T _{Bi} (°C)	Ps.o (kPa)	valve size
1	4	10	-5	101	N.A.
2	4	10	-5	101	20A
3	4	10	-5	171	20A
4	4	10	-5	289	20A
5	4	10	-5	416	20A
6	4	10	-7	416	20A
7	4	10	-10	416	20A

(피팅부품, 밸브)에서 폐색 없이 한 시간 이상 장치가 작동되었을 경우를 연속제빙 가능 조건으로 간주하였다. 또한 열교환기의 수용액 입구측 압력이 상승하고, 수용액 출구측 온도가 슬러리 탱크 온도보다 상승하면 열교환기 내부에서 폐색이 일어나는 것으로 간주하여 연속제빙 불가 조건으로 판단하였다.

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 밸브의 유무

Fig. 2는 브라인 온도를 -5℃로, 열교환기 내부 절대압력이 101 kPa, 수용액 출구 측에 밸브가 장착되지 않은 상태에서의 실험결과로 제빙시간에 따른 각 측정점의 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 작동시작 30분경과 후 과냉각을 해소했으며, 과냉각해소 후 150분간 장치내부에 폐색 없이 연속적으로 아이스 슬러리가 생성되었다. 제빙이 계속 이루어지는 동안 열교환기 가해지는 압력은 101 kPa로 일정하게 유지되었다. 이때 생성된 아이스 슬러리는 100~500μm크기를 가지며 둥글고 완만한 형상을 보였다.

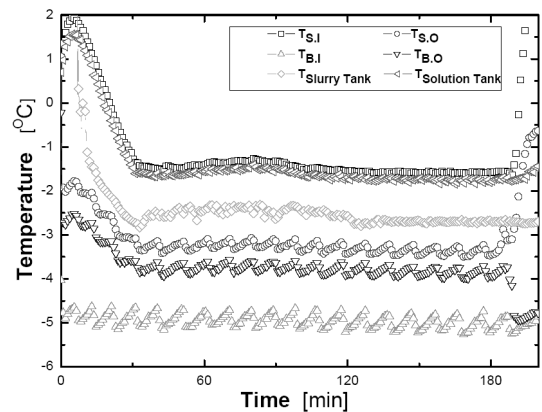


Fig. 2 Time history of temperature variation. (T_{B,o}=-5℃, P_{S,i}=99.05 kPa, no valve)

Fig. 3은 Fig. 2 실험조건에 수용액 출구에 구경 20A 크기의 PVC밸브를 장착하여 실험을 실시한 결과이다. 과냉각해소로부터 약 15분경과 후 수용액 출구측 온도가 증가하다 다시 감소하였다. 그 이후 열전달이 감소하였으며, 약 10분후 열교환기 내부가 완전폐색이 발생하여 작동이 중지하였다. 이러한 열교환기 내부에서의 폐색은 Fig. 2와 비교하여 수용액 출구에 장착된 밸브의 영향으로 관내의 수용액 유동 현상에 미소한 변화가 발생하여 그 영향으로 열교환기 내부 표면에서 빙 부착이 발생한 것으로 보인다. 따라서 과냉각상태의 수용액 유동영역에서의 밸브나 다른 유동저항 요소의 설치는 과냉각 해소에 계기를 마련해 줄 수 있는 요인이 될 수 있다.

3.2 가압조건

Fig. 4, 5 및 6 은 Fig. 3과 동일냉각 조건하에서 열교환기 내부에 절대압력을 각각 171, 281,

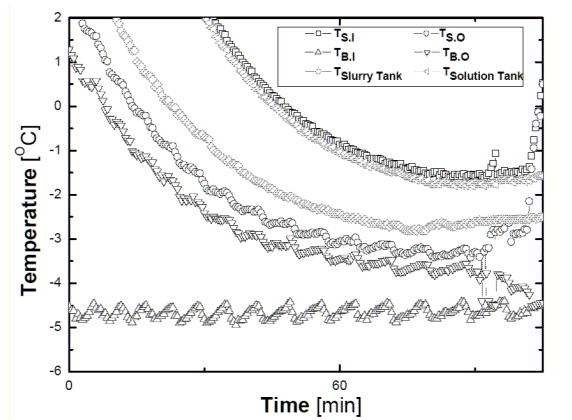


Fig. 3 Time history of temperature variation. ($T_{B,i} = -5^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o} = 101\text{kPa}$, 20A valve)

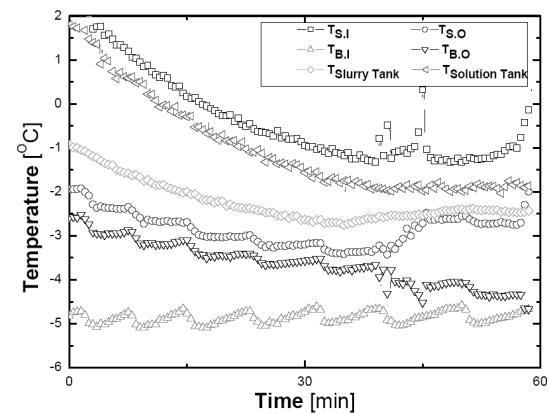


Fig. 4 Time history of temperature variation. ($T_{B,i} = -5^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o} = 171\text{kPa}$, 20A valve)

416 kPa로 달리하였을 때 제빙 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 이때 열교환기의 수용액 입·출구 압력은 거의 동일하였으며 이에 가압조건 하에서의 압력 강하는 무시하였다.

Fig. 4는 절대압력이 171 kPa인 조건에서의 실험결과 그래프이다. 과냉각해소로부터 약 22분경과 후 수용액 출구의 압력이 상승하다 감소하였으며, 수용액 입구 온도도 급격히 상승하였다. 그 이후 열교환기의 브라인 입·출구 온도차도 점점 감소하였다. 이는 수용액 출구측 압력이 상승한 것으로 보아 출구에 설치된 밸브에서 폐색이 먼저 발생한 것으로 보이며 이 영향으로 열교환기 내부에서 빙 부착이 발생하여 원활한 열전달이 이루어지지 않은 것으로 사료된다.

Fig. 5는 절대압력이 281 kPa인 경우이다. Fig. 3, 4와 비교하여 과냉각해소로부터 제빙지속 시간은 30분으로 증가하였으나 연속제빙 가능 조건을 만족하지는 못하고 열교환기 내부의 빙 부착으로 열전달이 감소하였다.

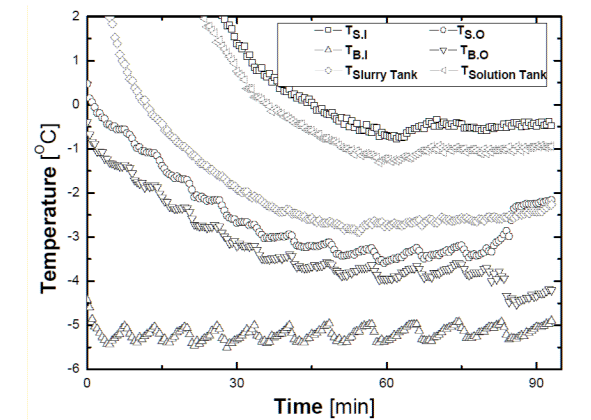


Fig. 5 Time history of temperature variation. ($T_{B,i} = -5^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o} = 281\text{kPa}$, 20A valve)

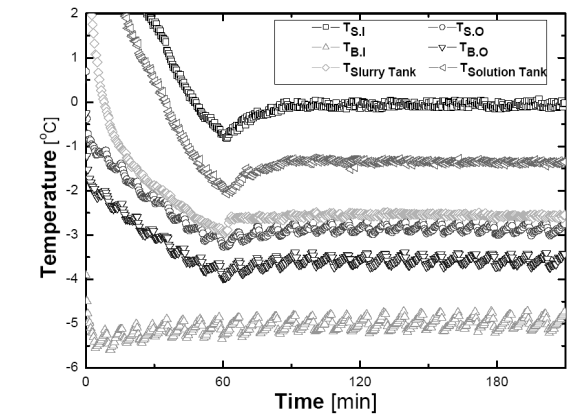


Fig. 6 Time history of temperature variation. ($T_{B,i} = -5^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o} = 416\text{kPa}$, 20A valve)

Fig. 6은 416 kPa의 절대압력을 가한 경우로 Fig. 3, 4, 5와 비교하여 수용액 입·출구의 온도차가 증가($\Delta T=3.5^{\circ}\text{C}$)하여 열전달효율이 향상됨을 알 수 있고 과냉각해소로부터 측정시간(약 2시간 30분간)동안 연속제빙이 이루어졌다. 이는 밸브를 장착하지 않았을 때의 Fig. 2의 결과에 비슷한 경향을 보였으며 목측에 의한 제빙량 또한 비슷하였다.

3.3 브라인의 열교환기 입구온도

Fig. 7, 8은 연속제빙 지속 시간에 효과를 보인 압력(416 kPa)하에서 브라인의 입구온도를 -7°C 와 -10°C 로 하여 실험을 실시한 결과이다.

Fig. 7은 -7°C 의 브라인을 공급하였을 때의 결과 그래프이다. 과냉각해소 이후에 수용액 입·출구의 온도차($\Delta T=6^{\circ}\text{C}$)는 거의 일정하게 유지되었고, -5°C 브라인을 공급하였을 때 보다 열교환기 표면에서 열전달이 활발히 이루어진 것으로 보인다. 과냉각해소 이후 약 한 시간동안 연속제

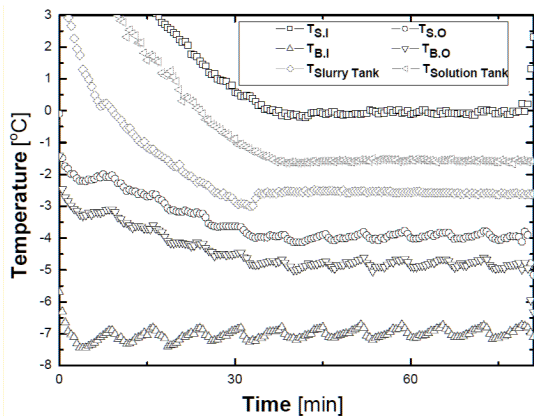


Fig. 7 Time history of temperature variation.
($T_{B,i}=-7^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o}=416\text{kPa}$, 20A valve)

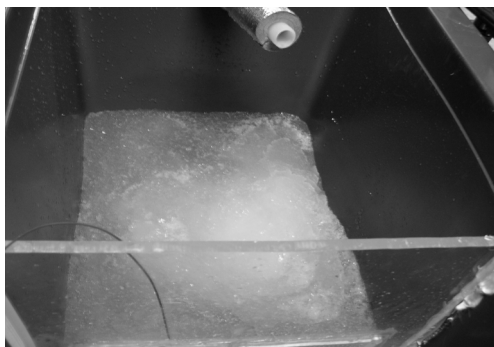


Fig. 8 Photograph of making ice slurry in slurry tank.
($T_{B,i}=-7^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o}=416\text{kPa}$, 20A valve)

빙이 지속되었다. Fig. 8은 제빙완료후의 슬러리 탱크에 저장된 아이스 슬러리의 사진이다. Fig. 6 실험과 비교하여 제빙지속 시간을 짧았지만 제빙량에서 현저한 차이를 보였다.

Fig. 8은 -10°C 의 브라인을 공급하였을 때의 결과이다. 작동시작 1분경과 후 급속한 열전달에 의하여 과냉각이 자연해소 되었고, 브라인 입·출구의 온도차가 감소하는 것으로 보아 열교환기 표면에 빙 부착이 발생한 것으로 보인다. 브라인의 입·출구 온도차는 점점 감소하였고, 작동시작 12분후에 완전폐색이 발생하여 지속적인 실험을 진행할 수 없었다.

연속제빙 조건과 제빙량을 고려할 때 Fig. 7의 조건이 Fig. 6, 8조건보다 우수하다.

3.4 고찰

본 연구에서 실시한 여러 실험조건 중에서 연속제빙 지속에 많은 영향을 미친 요소는 열교환

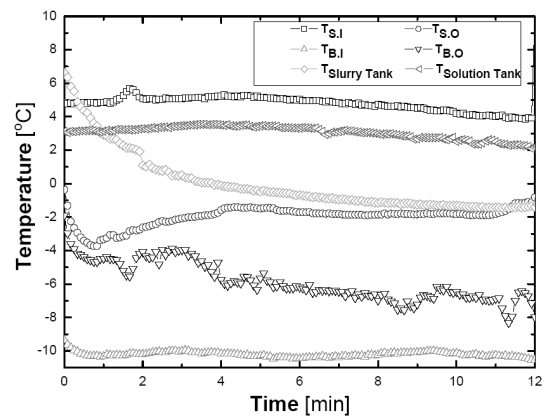


Fig. 9 Time history of temperature variation.
($T_{B,i}=-10^{\circ}\text{C}$, $P_{S,o}=416\text{kPa}$, 20A valve)

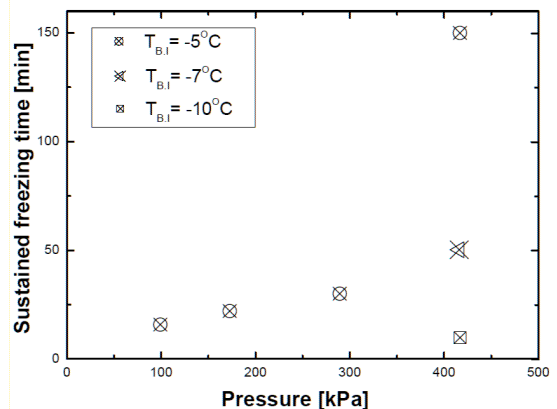


Fig. 10 Pressure history of sustained freezing time variation.

기 내부에 가해진 압력의 변화라고 할 수 있다. Fig. 10에서 보는 것과 같이 가압을 함으로써 동일 냉각조건 하에서 제빙지속시간이 증가 하였고, 낮은 온도에서도 연속제빙을 유지 할 수 있었다. 물리적으로 일정 공간 내의 압력증가는 공간 내의 입자 또는 분자들 사이의 내부에너지, 확산률 및 점도 증가를 가져올 수 있다. 반면, 압축된 매질에 냉각이 진행될 경우 입자의 운동에너지 감소로 인하여 열적 안정성이 증가한다. 물의 경우 4°C이하에서는 분자 간 평균거리가 다시 증가하기 때문에 동결점 이하에서 물리적인 충격이 가해질 경우 수소결합을 일으키기 쉬운 상태가 된다고 사료된다. 따라서 과냉각 수용액에서 압력의 증가는 열전달 촉진 및 열적 안정성의 이중적 측면이 유동장에 영향을 준 것으로 판단된다.

4. 결 론

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

(1) 수용액 출구의 밸브의 유무에 따라 서로 다른 연속제빙 특성을 보였다. 즉 밸브가 없을 경우 2시간 40분간 연속제빙이 지속되었으나 밸브를 장착하였을 경우 약 20분 연속제빙 후 폐색이 발생하였다.

(2) 열교환기 내부에 가해지는 압력이 상승할 때 열전달이 향상되고 연속제빙 지속시간도 증가하는 경향을 보였다.

(3) 열교환기 내부의 절대압력이 높은 416 kPa 일 때 브라인의 온도가 -5°C와 -7°C일 때에는 연속제빙이 이루어졌으나 제빙량에서는 현저한 차이를 보였다. -10°C에서는 폐색으로 인해 연속제빙이 이루어지지 않았다.

후 기

본 연구는 전북대학교 공학연구원 산하 공학연구센터 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

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. 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
3. Baek, K.M., Hong, H., 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
4. J. Bellas, I. Chaer, S. A. Tassou, 2002, Heat transfer and pressure drop of ice slurries in plate heat exchangers, Applied Thermal Engineering, Vol 22, pp. 721- 732.
5. 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
6. Seung, H., Peck, J. H., Hong. H., Kang, C., 2003, Effect on Adhesion of Ice Slurry by Adding Functional Materials. Proceeding of the SAREK 2003 Winter Annual Conference, pp. 501-506