

판형 열교환기를 이용한 아이스슬러리 생성장치

승 현, 홍 희 기*, 강 채 동**

전북대학교 대학원, *경희대학교 기계산업시스템공학부, **전북대학교 기계항공시스템공학부

Continuous Ice Slurry Formation Using by a Plate Heat Exchanger

Hyun Seung, Hiki Hong*, Chaedong Kang**

Graduate School of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, 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

ABSTRACT: Scraper type ice slurry formation is sophisticated because the ice removal from the cooling wall depends on the mechanical driving and the scraper. In this study, an ice slurry generating system was introduced using by plate type heat exchanger without mechanical moving part. The thermal storage material added the ethylene glycol 7 mass% in the water. The control temperature of brine is maintained each of -5, -6 and -7°C. The flow rate of solution establish each of 4, 7, and 10 LPM. After generating ice formation continuously for an hour, ice blockage did not happen in the heat type exchanger under the condition of 4 LPM.

Key words: Ice slurry(아이스슬러리), Plate type heat exchanger(판형 열교환기), Ice blockage(관폐색), Ethylene glycol solution(EG 수용액)

기 호 설 명

Cp	: 평균 비열 [kJ/kg · K]	t	: 총 제빙시간 [s]
EG	: 에틸렌글리콜	Δt	: 계측 시간 [s]
G	: 체적유량 [LPM]		
m	: 질량유량 [kg/s]		
PHE	: 판형 열교환기	avg	: 평균
q̇	: 열유속 [kW]	B	: 브라인
Q	: 열량 [kJ]	i	: 열교환기에서 입구측
T	: 온도 [°C]	o	: 열교환기에서 출구측
		S	: 수용액

하첨자

† Corresponding author

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

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

1. 서 론

전력 수요의 평활화 차원에서의 에너지 관리와 CO₂ 배출 감소 등의 환경적 요인을 고려할 때 빙축열 시스템은 유리한 점을 가지고 있다.⁽¹⁾

유동성을 가지고 있는 아이스슬러리는 두꺼운 얼음이 형성되지 않아서 제빙 효율이 우수하고, 열교환 면적이 넓어서 해빙 효율이 우수하며, 이용 시 응답성이 빠르며, 많은 냉열에너지를 수송할 수 있는 장점등의 이유로 집단적인 냉방시스템, 산업용 냉각 시스템 식품 냉동·냉장산업 및 의료산업 등에 적용이 기대된다.⁽¹⁾

현재 돌발적이고 지속적으로 발생하는 냉각면에서 빙부착과 그로 인한 관폐색 문제는 동적형 연속 제빙 시스템에서 아직 해결되지 못한 부분으로 아이스슬러리 시스템 보급에 있어서 장애가 되고 있다. 이를 개선하기 위해 개발된 기존 동적형 시스템 가운데 스크래퍼에 의한 빙회수 방식은 기계적 구동부가 있어 시스템이 복잡하고 유지·보수에 어려움과 운전비용의 상승이 따른다.⁽²⁾

수용액을 축열매체로 이용하는 동적형 빙축열 방식에서 빙부착을 억제하기 위하여 기존 연구에서는 첨가제의 종류와 조성, 농도, 냉각속도, 유량 및 계면상태 등의 다양한 인자가 빙부착에 미치는 영향을 파악하고 있다.⁽³⁾

한편, 아이스슬러리 제빙을 위한 판형 열교환기를 이용한 여러 연구들이 진행되어 왔다.

Stamatiou et al.⁽⁴⁾은 판형 열교환기에서 열전달을 조사하였고 열교환기 내에서 Re 수가 증가와 함께 Nu 수가 증가되는 관계를 밝혔다.

Bellas et al.⁽⁵⁾은 판형열교환기에서 아이스슬러리의 열전달과 압력 강하에 관한 연구를 발표하였다. 열교환기내에서 압력강화와 총괄열전달 계수는 유량의 증가와 함께 증가함을 밝혔다.

본 연구에서는 기계적인 구동부 없이 아이스슬러리 생성을 위해 스테인레스 스틸 재질의 판형 열교환기를 제빙 열교환기로 하여 수용액의 유량 및 냉각온도가 연속 제빙에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

Fig. 1은 판형 열교환기를 이용한 아이스슬러리 생성 장치의 구성도를 나타내었다. 실험장치는 수용액 탱크, 슬러리 탱크, 판형 열교환기, 냉동기, 저온 브라인 탱크, 상온 브라인 탱크, 수용액 및 브라인 펌프, 및 계측장비로 구성된다. 수용액은 제빙열교환기와 수용액 및 슬러리 탱크 사이를 순환하며 검은 실선으로 나타내었고, 브라인은 제빙열교환기와 저온브라인탱크를 순환하며 회색 실선으로 나타내었다.

수용액 탱크와 슬러리 탱크는 80ℓ 용량으로 50 mm의 두께의 발포 폴리스틸렌으로 단열된 아이스박스를 사용하였고 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 770 mm, 500 mm, 530 mm 이다. 열교환기는 (주)레프콤프코리아사의 상용 판형열교환기로 재질은 스테인레스 스틸(AISI 316)이며, 가로, 세로, 폭은 각각 120 mm, 526 mm, 32 mm이고, 전열면적은 0.63 m²이다. 저온 브라인 탱크는 용량 200ℓ이며, 냉동기를 통하여 설정 온도까지 브라인을 냉각 시킨다. 브라인의 제어는 ± 0.2℃의 오차를 갖는다. 브라인은 에틸렌글리콜 수용액으로 36 mass%의 농도를 갖는다. 상온 브라인 탱크는 열교환기 내에서 관폐색이 발생할 경우 해빙을 위해 작동된다.

2.2 실험방법

축열재로는 알콜계 브라인으로 널리 사용하고 있는 에틸렌글리콜 수용액을 이용하여 빙부착력이 억제되는 농도인 7 mass%로⁽³⁾ 일정하게 하여 70ℓ를 사용하였다. 수용액은 마그네틱 펌프를 통하여 각 4 LPM, 7 LPM, 10 LPM으로 변화 하면서 열교환기에 공급하였다. 냉각에 사용되는 브라인은 냉동기를 통하여 각 유량조건에 대하여 브라인 열교환기 입구 측 온도를 각각 -5℃, -6℃, -7℃로 하여 순환시켰다. 이 때 브라인 유량은 마그네틱 펌프를 이용하여 10.8 LPM으로 일정하게 하였다.

아이스슬러리의 생성이 시작되면 20 메쉬의 스테인레스 스틸 필터 4장을 겹쳐 슬러리를 걸러내고 수용액은 수용액 탱크로 흘러 보냈다.

수용액과 브라인의 열교환기 입·출구와 슬러리 탱크내의 온도를 측정하기 위하여 T-형 열전대를 사용하였다. 측정된 데이터는 데이터 로거(Agilent 34970A)와 계측용 프로그램(HP-VEE)

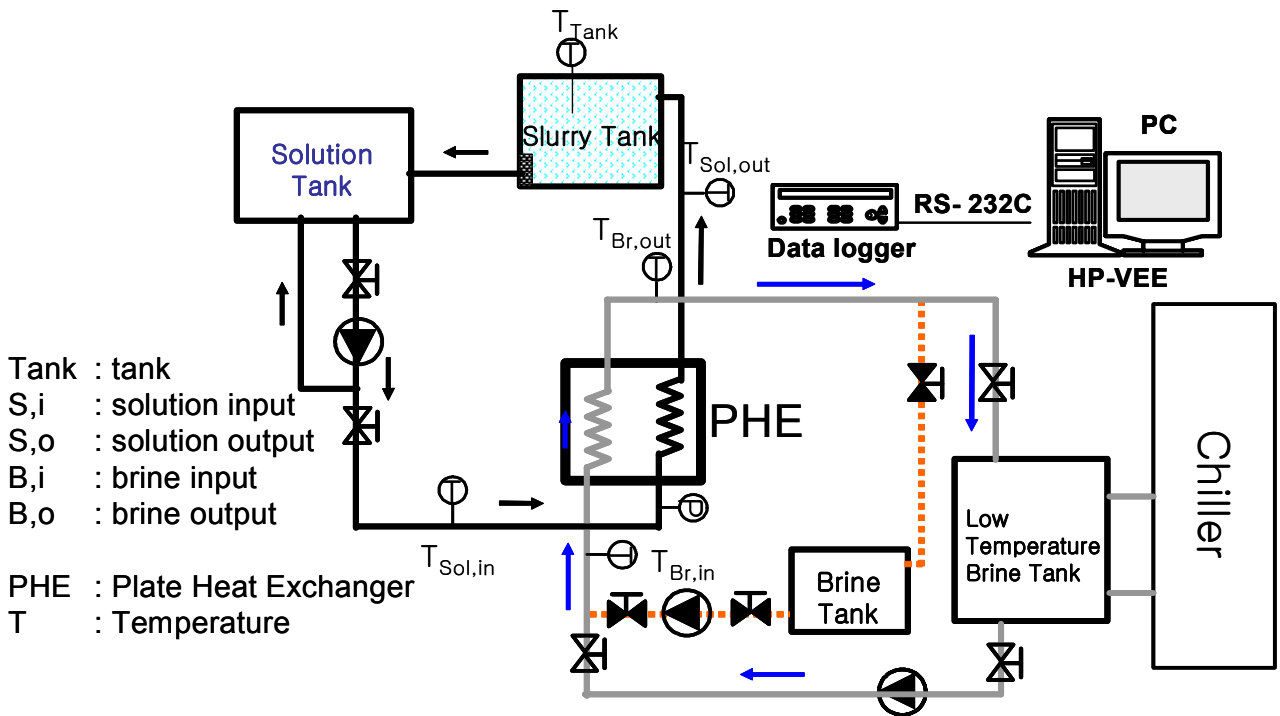


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental facility.

을 사용하여 5초마다 PC에 저장하였다.

2. 1 평균 냉각 열유속

수용액에서는 상변화를 동반하므로 냉각 열유속을 구하기 위해서는 상변화 시 잠열과 제빙량 산출 등의 과정이 필요하지만, 수용액의 냉각 열유속은 브라인 공급 열유속과 같다는 가정 하에 다음과 같이 계산하였다.

순간 냉각 열유속은 판형 열교환기에서 브라인의 현열 열전달률로 식 (1)과 같다. 순간 냉각 열유속에 측정간격 시간의 곱하여 총 냉각 열량을 식 (2)와 같이 계산하였다. 평균 냉각 열유속은 식 (3)과 같이 총 냉각열량에 총 제빙 시간을 나누어 계산하였다.

$$q_i = \dot{m} c_p (T_{B,o} - T_{B,i}) \quad (1)$$

$$Q = \int_0^t q_i dt$$

$$\approx \sum_{i=1}^t q_i \Delta t \quad (2)$$

$$q_{avg} = \frac{Q}{t} \quad (3)$$

여기서 질량유량을 구하기 위한 밀도와 비열은 에틸렌글리콜 36 mass%에서 각 온도조건에 관한 값을 보간하여 Table 1과 같이 구하였다.

또한 열교환기에서 열교환 손실, 배관 및 펌프 손실 등을 무시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 에틸렌글리콜 7 mass% 수용액을 열교환기로 4 LPM을 공급하면서 브라인측의 입구 온도를 -5°C 로 냉각시킨 실험결과이다. 수용액

Table 1 Thermophysical properties of ethylene glycol 32 mass%⁽⁶⁾

Temperature at brine inlet [°C]	Density [kg/m ³]	Specific heat [kJ/kg·K]
-5	3.467	1056.5
-6	3.455	1056.8
-7	3.444	1057.1

측은 열교환기 출구에서는 -4°C 로 과냉각된 수용액을 배출하였으며, 탱크에서 과냉각이 해소되어 연속적으로 제빙이 이루어지고 있다.

Fig. 3은 Fig. 2 조건에서 실험으로 과냉각수가 탱크 내에 제빙되어 아이스슬러리가 생성되고 있는 사진이다. Fig. 4는 Fig. 2 조건에서 제빙 중간 탱크에서 생성된 슬러리를 추출하여 찍은 입

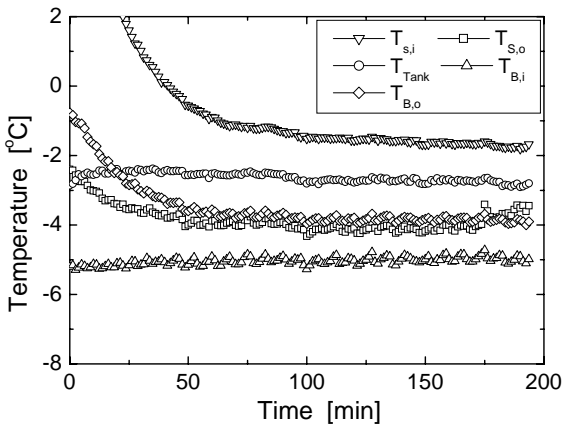


Fig. 2 Time history of temperature variation in heat exchanger. (continuity ice formation EG 7 mass%, $G_s=4$ LPM, $T_{b,i}=-5^{\circ}\text{C}$)



Fig. 3 The photograph of making ice slurry in slurry tank ($G_s=4$ LPM, $T_{b,i}=-5^{\circ}\text{C}$)

자 사진으로 입자 둥글고 경계가 완만한 형상의 빙입자를 확인할 수 있다.

Fig. 5는 에틸렌글리콜 7 mass% 수용액을 4 LPM의 유량으로 열교환기로 공급하면서 브라인 측의 입구 온도를 -5°C 로 냉각시킨 실험결과이다. 제빙개시 후 약 7분 후 수용액 출구 온도가 동결점 이상으로 올라가고 브라인 입·출구 온도차가 줄어들고 있다. 이는 열교환기 내부에서 열교환이 자연스럽게 이루어지지 않는 것으로 열교환기 내부에서 수용액의 동결로 인하여 부분 폐쇄가 원인이라 판단할 수 있다.

Fig. 6은 에틸렌글리콜 7 mass% 수용액을 열

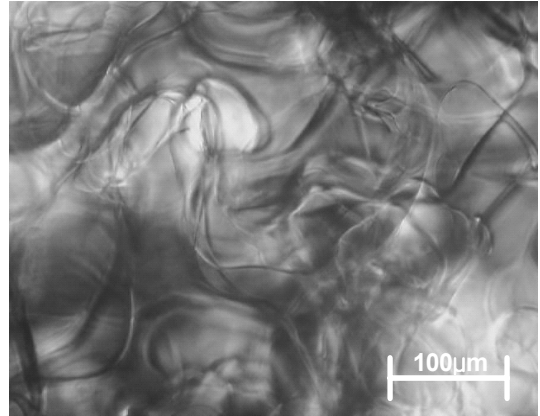


Fig. 4 The photograph of ice slurry.

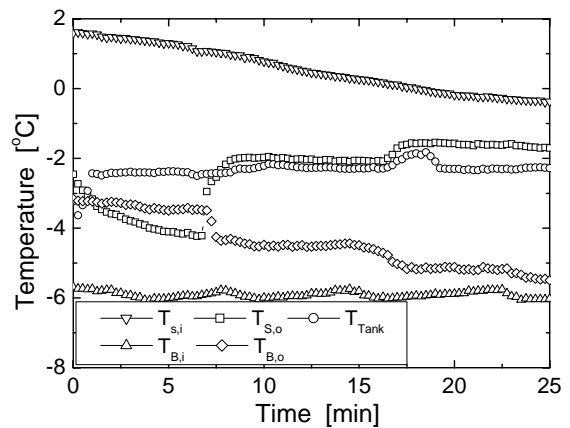


Fig. 5 Time history of temperature variation in heat exchanger. (partial ice blockage, EG 7 mass%, $G_s=4$ LPM, $T_{b,i}=-6^{\circ}\text{C}$)

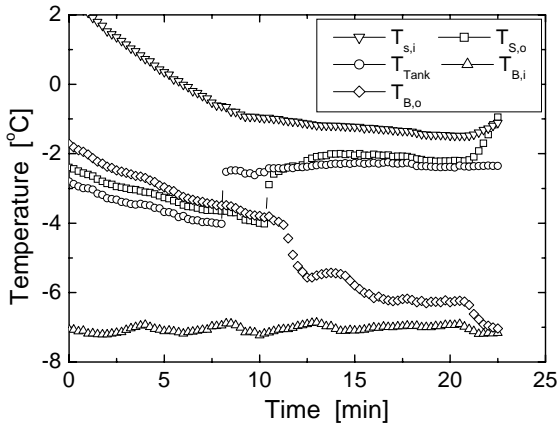


Fig. 6 Time history of temperature variation in heat exchanger. (ice blockage, EG 7 mass%, $G_s=7$ LPM, $T_{b,i}=-7^\circ\text{C}$)

교환기로 7 LPM을 공급하면서 브라인측의 입구 온도를 -7°C 로 냉각시킨 실험결과이다. 과냉각된 지 약 8분 후 탱크 내부에서 제빙이 시작하였고, 11분 후 열교환기 내부에서도 제빙되기 시작하였다. 그 후 10분 후 열교환기 내에서 완전 폐색된 것을 알 수 있다.

Fig. 7와 Fig. 8은 브라인 온도를 -5°C , -6°C , -7°C 로에 대하여 수용액 유량을 4 LPM, 7 LPM, 10 LPM으로 변화시키면서 실험한 결과를 평균 냉각 열유속 계산을 위해 식 (3)에 대입하여 계산한 결과를 나타낸 그래프이다.

Fig. 7은 열교환기의 브라인 입구 온도에 대한 평균 냉각 열유속에 관한 그래프이다. 수용액 유량이 4 LPM 조건에서 브라인 온도 -5°C 에서 연속 제빙이 일어났으며, -6°C , -7°C 에서는 열교환기 내 부분 폐색이 발생하였다. 수용액 유량 7 LPM, 10 LPM에서는 열교환기 내부에서 완전 폐색이 발생하였다. 수용액 유량 7 LPM와 10 LPM에서는 브라인 온도가 낮을수록 평균 냉각 열유속은 높게 나타났다.

Fig. 8은 수용액 유량 변화에 대한 평균 냉각 열유속에 관한 그래프이다. 수용액 유량 7 LPM과 10 LPM에서는 냉각 온도가 낮을수록 평균 냉각 열유속은 증가함을 알 수 있다.

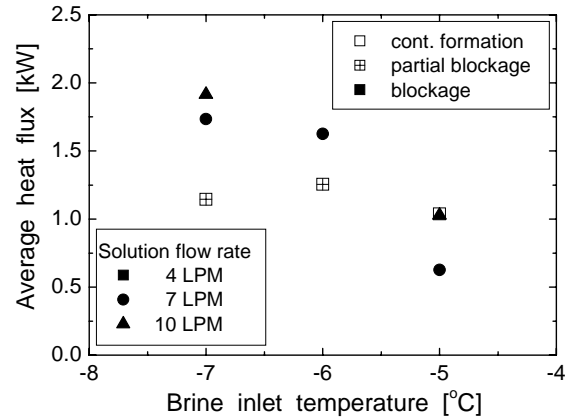


Fig. 7 Effect on heat exchanger inlet brine temperature on average heat flux

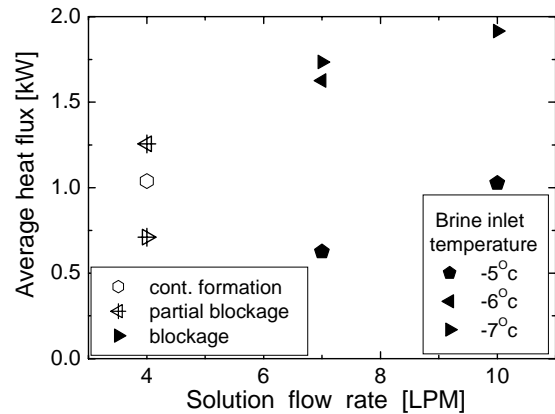


Fig. 8 Effect on flow rate on average heat flux.

4. 결론

에틸렌글리콜 7 mass% 수용액을 판형 열교환기를 이용한 아이스슬러리 생성 장치를 사용하여 제빙 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열교환기의 브라인측 입구의 온도를 -5°C , 수용액의 열교환기 유입량을 4 LPM으로 유지하였을 경우 3시간 이상 연속 제빙이 일어났다.

(2) (1)의 조건에서 생성된 빙입자는 둥글고 완만한 형태를 보였다.

(3) 수용액의 열교환기 유입량을 4 LPM으로 유지하면서 브라인측 입구의 온도를 -6°C , -7°C 에서는 열교환기 내의서 부분 폐색이 일어나 열교환이 원활이 이루어지지 않았다.

(4) 수용액의 열교환기 유입량을 7, 10 LPM 조건에서는 브라인 입구의 온도와 관계없이 모두 폐색이 일어났다.

(5) 동일 냉각온도 하에서 수용액의 유량이 클수록 관폐색의 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지기술 학술진흥사업(과제번호 2002-E-BD03-P-01-0-000)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

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. Lim, H. M., Pyo, S. H. Scraped-surface Ice slurry generator, the SAREK 2004 Summer Annual Conference, pp. 441-468
3. Seung, H., Pack, 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. E. Stamatiou, M. Kawaji, B. Lee, V. Goldcstein, 2001, Experimental investigation of ice-slurry flow and heat transfer in a plate-type heat exchanger, Proceeding of the 3rd IIR Workshop on Ice Slurries, pp. 61-68.
5. 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.
6. International institute of Refrigeration, Thermophysical Properties of Liquid Secondary Refrigerant : Ethylene Glycol and Propylen Glycol, p. 80.