

판형열교환기를 이용한 과냉각수용액 방식의 연속제빙특성

이 동 규, 백 종 현*, 홍 희 기**, †강 채 동***

전북대학교 기계공학과, *한국생산기술연구원,

경희대학교 기계산업시스템공학부, *전북대학교 공업기술연구센터

Characteris of Continuous Ice Slurry Formation from a Supercooled Aqueous Solution by a Plate Heat Exchanger

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

ABSTRACT: An experimental study was performed to an ice slurry making system with supercooled aqueous solution under pressurization, which is in series of our previous study. The system was utilized to a gasket-type plate type heat exchanger(PHX) as supercooling device. In order to improve the fluidity during freezing in the PHX, the solution side walls of the flow path were coated with PTFE. At results, the amount of ice formation obtained from the device(PTFE coated PHX) was nearly equal to that of the bare PHX from our previous study. Even though the cooling wall of the PHX was coated to PTFE, supercooled solution was dissolved and ice spreaded to all the cooling surface, and finally ice blockage occurred. From the visualization of a PHX with the single path, the dissolution occurred easier as the temperature difference between the solution and brine increased, and as the cooling heat flux increased. Moreover, the occurance of the ice blockage was dependent to the existence of the shape of flow field after the dissolution in the PHX.

Key words: Supercooled type(과냉각 방식), Plate heat exchanger(판형 열교환기), Form of flow field(유동장 형상), Cooling rate(냉각속도)

기 호 설 명

P : 압력 [kPa]

T : 온도 [°C]

B : 브라인

S : 수용액

i : 열교환기에서 입구 측

o : 열교환기에서 출구 측

하첨자

P.H.X : 판형 열교환기

1. 서론

빙축열 시스템 가운데 슬러리형태의 얼음을 생성하는 동적형 방식은 유동성이 뛰어나고 부하추종성이 우수한 특징으로 인하여 최근 많은 주목을 받고 있다. 특히 본 연구에서 다루고 있는 과

† Corresponding author

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

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

연구에서 사용된 실험 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 선행연구⁽⁷⁾에서 연속제빙장치의 구성은 자세히 설명하였으며 본 연구에서는 제빙 열교환기 부분을 Thermokey사의 Brazing type의 판형열교환기에서 Dong-A engineering 사의 가스켓형 판형열교환기로 교체하였다. 교체된 제빙 열교환기의 사양은 Fig. 2에 나타내었다. 선행연구에서 사용된 제빙열교환기는 브레이징 된 판형 열교환기로 그 내부구조 파악 및 관찰이 어려운 단점이 있었으나 교체된 판형열교환기는 분해조립이 가능한 가스켓형 판형열교환기로서 전열면적을 임의적으로 변경이 가능하였다. 본 연구에서는 선행연구에서 사용된 열교환기와 동일한 전열면적(0.7m²)조건에서 실험을 실시하였다.

2.1.1 금속 냉각면

가스켓형 판형 열교환기의 실제냉각판 형태 및 재질은 Fig. 3 (a)에서 보는 것과 같다. 냉각판의 형태는 판형열교환기의 열전달효율 및 전열면적을 증가 시키기 위해 물결(corrugate)모양의 복잡한 구조를 가지고 있다. 냉각판의 재질은 SUS316 계열로서 선행연구⁽⁷⁾에서 사용된 제빙열교환기와

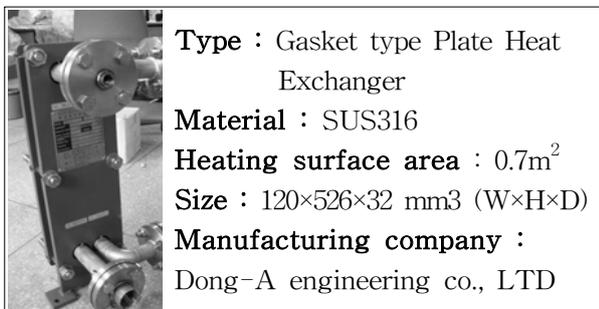


Fig. 2 The specification of Plate Heat Exchanger.

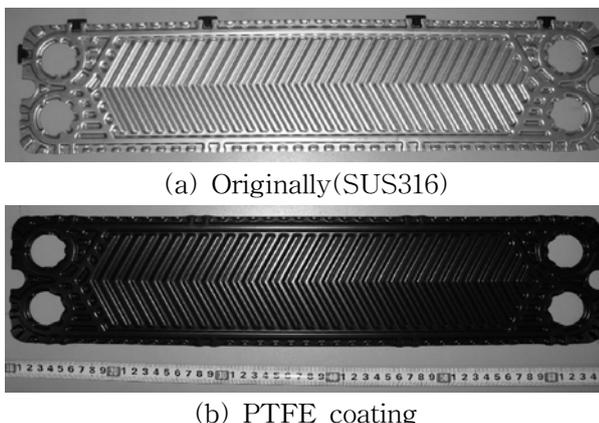


Fig. 3 The photograph of a cooling surface.

동일한 재질이다.

2.1.2 코팅 냉각면

본 연구에서는 냉각면 성상이 빙부착에 미치는 영향에 대하여 살펴본 선행연구⁽⁸⁾에서 냉각면에 PTFE(Poly-tetra-fluoro-ethylene)코팅을 하였을 경우가 빙부착 특성이 가장 낮게 측정된 결과를 바탕으로 가스켓형 판형열교환기 냉각면을 PTFE로 코팅을 하여 제빙실험을 실시하였다. PTFE 코팅으로 인한 열전달효율의 감소를 최소로 하기 위하여 단면코팅, 즉 판형열교환기의 각각의 수용액 통로쪽에만 코팅이 이루어지도록 하였다. Fig. 3 (b)는 일반 냉각면에 두께 100μm PTFE가 코팅된 모습을 보여 준다.

2.2 판형열교환기 실험 방법

선행연구⁽⁷⁾와 같은 방법으로 1차 브라인 냉각계통의 냉각장치에서 설정온도로 냉각된 브라인은 브라인탱크(200 Liter)를 통해 일정유량(10LPM)으로 제빙열교환기에 공급하며, 수용액 순환계통에서 일정유량(4LPM)으로 공급된 수용액과 제빙 열교환기에서 열 교환을 하게 된다. 여기서 생성된 과냉각수는 슬러리 탱크에 저장하고, 슬러리탱크 상부온도가 일정온도(-3℃)에 도달하였을때 과냉각을 빙투여 방법을 이용 강제 해소시켜 슬러리를 생성하였다.

본 실험에서 사용된 수용액은 동결점 강하 및 빙부착력 억제를 고려한 알콜계 브라인 초기 농도 7 mass% 수용액 90 Liter를 사용하였다. 또한 냉각에 사용되는 브라인은 -20℃의 동결점을 갖는 EG농도 36 mass%인 수용액을 사용하였다.

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

3. 판형열교환기 실험결과

3.1 가스켓형 판형열교환기(기존 냉각면)

선행연구⁽⁷⁾에서 사용된 연속제빙장치에서 제빙열교환기를 가스켓형 판형열교환기로 교체하여 선행연구^(6,7)와 동일한 조건으로 실험을 실시하였다. Fig. 4, 5는 SUS316계열의 금속 냉각면하에 제빙열교환기 브라인 입구측 온도가 -7°C , PHX 내부 압력이 130kPa, 424kPa 일때의 실험결과를 보여준다. Fig. 4는 PHX 내부압력이 130kPa 일때의 결과로서 과냉각해소 이후 약 20분동안 제빙이 이루어지고 폐색되었으나 Fig. 5에서 처럼 PHX 내부압력을 424kPa로 가압을 하였을 경우 약 8시간 이상 연속제빙이 이루어졌다. 이는 열교환기 교체이전의 실험결과와 같이 제빙열교환기 내부를 가압하였을 경우 관내부 폐색이 발생하지 않고 연속 제빙이 이루어지는 동일한 경향을 보였다.

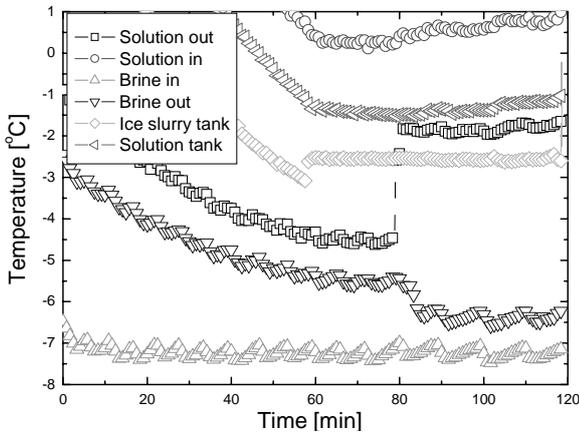


Fig. 4 Time history of temperature variation. (SUS316, $T_{B,i}=-7^{\circ}\text{C}$, $P_{P,HX}=130\text{kPa}$.)

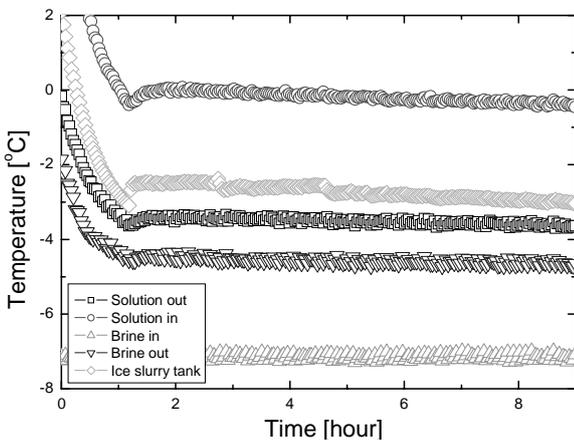


Fig. 5 Time history of temperature variation. (SUS316, $T_{B,i}=-7^{\circ}\text{C}$, $P_{P,HX}=424\text{kPa}$.)

3.2 PTFE 코팅

냉각면 성상에 따른 빙부착 특성을 파악한 선행연구⁽⁸⁾에서 가장 좋은 빙부착 억제 특성을 보인 PTFE를 실제 냉각면에 코팅을 하여 실험을 실시하였다. Fig. 6은 제빙열교환기의 냉각판을 PTFE 코팅 냉각판으로 교체 후 Fig. 5와 동일한 조건에서 실시한 실험 결과이다. Fig. 5과 6을 비교하였을 때 두 조건모두 연속제빙시간은 약 8시간 이상으로 장시간 제빙이 가능하였으며 각 측정점의 온도 변화도 동일한 경향을 보였다. 이는 코팅을 하였음에도 불구하고 열전달률이 거의 동일하여 PTFE 코팅이 수용액의 연속제빙특성에 영향을 미치는 않는다는 것을 보여준다.

다음은 PTFE 코팅 냉각면을 이용한 연속제빙 실험에서 강제적으로 제빙열교환기 내부에서 과냉각을 해소를 일으켰다. 이는 빙부착 특성이 가장 적은 PTFE로 코팅할 경우 열교환기 내부에

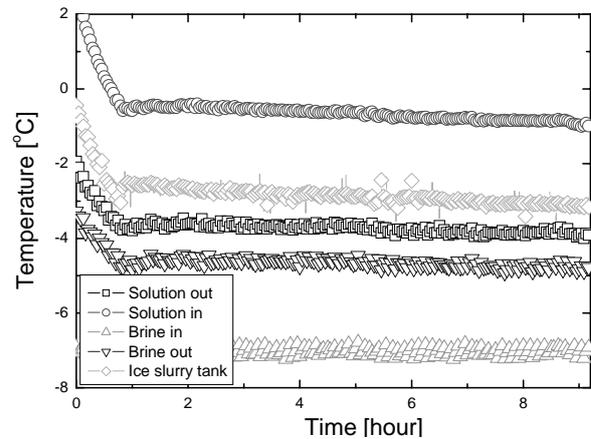


Fig. 6 Time history of temperature variation. (PTFE, $T_{B,i}=-7^{\circ}\text{C}$, $P_{P,HX}=424\text{kPa}$.)

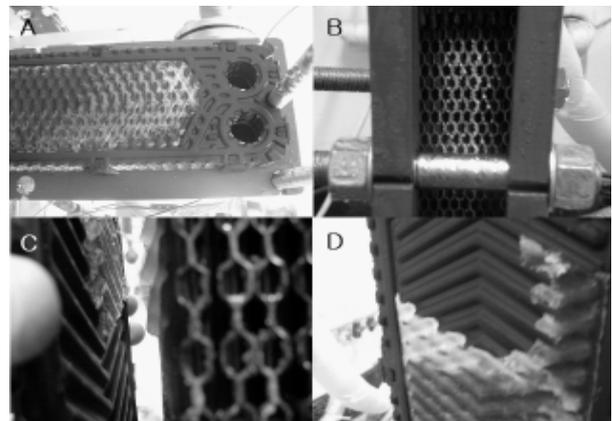


Fig. 7 The P.H.X inside picture after the blockade.(PTFE, $T_{B,i}=-7^{\circ}\text{C}$, $P_{P,HX}=424\text{kPa}$.)

서 빙이 생성될 경우에도 폐색이 발생하지 않고 수용액의 유동에 의해 빙이 박리되어 슬러리 탱크로 이동 하는지 관찰하기 위하여 실시하였다. 하지만 Fig. 7 에서 보는 것과 같이 제빙열교환기 내부의 전 수용액 통로에서 빙부착이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 빙부착은 냉각면을 PTFE로 코팅하기 전과 동일한 경향을 보였다.

3.3 단열 판형열교환기 이용 과냉각실험

선행연구⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 및 PTFE 코팅 실험에서 판형열교환기 내부에서 과냉각 해소가 발생하는 원인 및 과냉각 해소 이후 폐색이 발생하는 메커니즘을 확인하기 위하여 Fig. 8과 같은 가시화 판형열교환기를 제작하여 실험을 실시하였다. 과냉각 수용액이 제빙열교환기 내부에서 해소되는 경향을 파악하기 위해서 Fig. 1에 나타난 것과 같이 연속제빙장치의 제빙열교환기 수용액 출구에 가시화 판형열교환기를 추가로 설치하였다. 추가된 판형열교환기는 아크릴 재질로 구성하였으며 냉각관은 연속제빙장치의 제빙열교환기와 동일 재질인 SUS316계열을 이용하여 제작하였다. 추가된

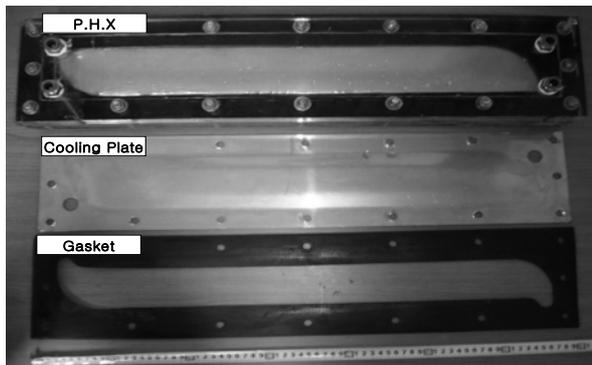


Fig. 8 The photograph of visualization P.H.X

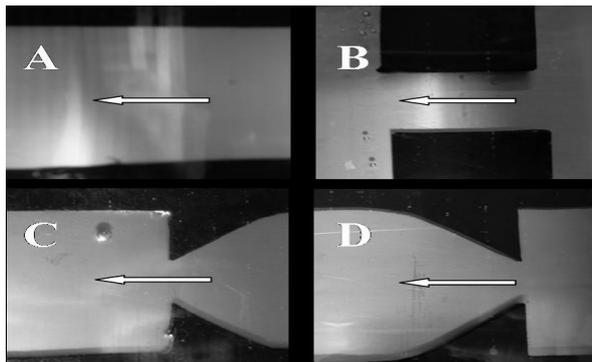


Fig. 9 The photograph of different flow field.

판형열교환기에 공급되는 브라인은 항온조에서 설정온도로 일정하게 유지되도록 하였다.

또한 가시화 판형열교환기에 일정한 조건의 과냉각수를 연속적으로 보내주기 위해서 연속제빙장치는 장시간 제빙이 가능한 Fig. 6의 실험조건을 이용하여 실험을 실시 하였다. 먼저 연속제빙장치에서 생성된 과냉각수용액을 가시화 열교환기로 일정한 유량(4LPM)으로 공급하였으며 가시화열교환기의 브라인 공급은 항온조에서 설정 온도를 변화시켜 일정하게 공급하였다. 또한 가시화열교환기의 과냉각수용액 유동통로를 Fig. 9에서 보는 것과 같은 종류로 변화를 주어 과냉각 해소 이후 폐색이 발생하는 현상을 관찰하였다.

Fig. 10은 Fig. 9의 A 형태의 유동장에서 가시화열교환기의 과냉각수용액 및 브라인의 입·출구 온도를 보여주고 있다. 실험시작 약100분 후에 연속제빙장치의 슬러리 탱크에서 과냉각을 강제해소 하였으며 그 이후 일정한 과냉각수용액을 가시화열교환기에 공급할 수 있었다. 이 이후 30분 간격으로 항온조의 브라인 설정온도를 -1.4°C

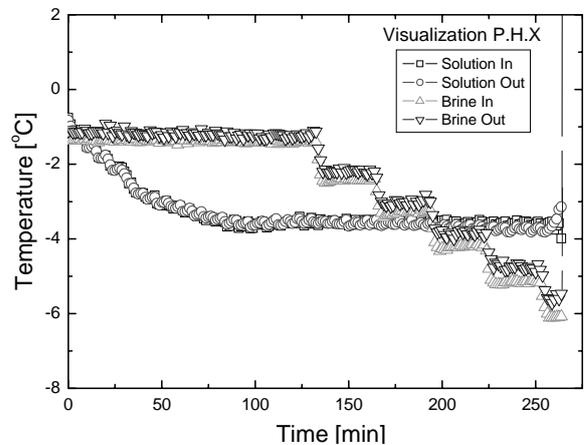


Fig. 10 Time history of temperature variation at the visualization P.H.X

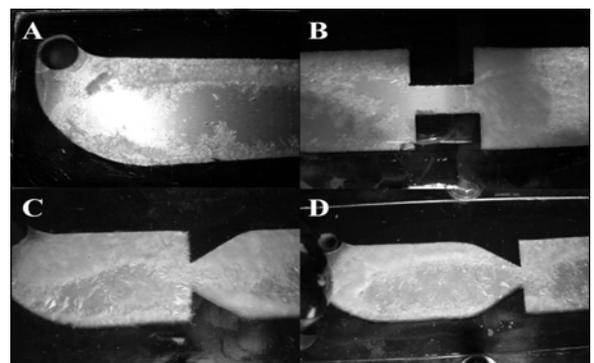


Fig. 11 The photograph of visualization P.H.X inside after the dissolution of supercooled..

에서 1℃씩 감소하면서 과냉각수용액이 해소될때 까지 실험을 계속하였다. 그 결과 브라인 설정온도가 -6.4가 되었을 때 과냉각이 해소되는 결과를 얻었다. Fig. 9의 B, C, D 유동장에서도 동일한 결과를 얻었다. 이로 인해 과냉각 수용액의 해소에는 유동장의 형태보다는 수용액의 냉각속도에 더 영향을 받는 것을 알 수 있었다. Fig. 11은 각 유동장 실험에서 과냉각수용액이 해소된 이후 빙 입자의 유동형태를 관찰한 사진이다. Fig. 11에서 보는 것과 같이 열교환기 내부에서 빙이 생성될 경우 유로의 형태가 복잡할 수록 빙에 의한 폐색이 잘 일어나는 것을 확인할 수 있다. 즉 유로의 복잡한 형태가 과냉각 해소의 직접적인 원인은 아니지만 빙 생성시 빙의 유동저항이 커져 폐색이 발생하는 것으로 판단된다.

3. 결 론

상용 판형열교환기를 이용한 과냉각수용액 방식의 연속제빙장치를 구성하여 제빙실험을 실시한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 선행연구에서 구성된 연속제빙장치에서 제빙 열교환기를 가스켓형 판형열교환기로 교체하여 실험한 결과 선행연구와 동일한 결과를 얻었다.

(2) 가스켓형 판형열교환기의 냉각면을 빙부착을 억제하는 효과가 있는 PTFE로 코팅하여 제빙실험을 한 결과 코팅 전 실험결과와 차이가 없었으며 제빙열교환기 내부에서 빙 발생시 폐색이 발생하였다.

(3) 가시화 판형열교환기를 이용한 과냉각수용액의 해소특성을 파악해 본 결과 수용액과 브라인의 온도차가 클수록 즉 냉각속도가 클수록 쉽게 해소되는 것을 확인하였다.

(4) 제빙열교환기 내부에서 과냉각이 해소되는 것을 유동장 형태의 영향이라고 볼수 없지만 해소 이후 생성된 빙 입자들은 유동장의 형태에 의해서 관내부가 폐색되는 것을 확인 할 수 있었다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. M. S. Chu, J. I. Yoon, J. D. Kim, Yoshinobu Kamata, Toyofumi Kato, 1997, Analysis of Cooling Phenomenon of Water with the Supercooled, The Magazine of the KSME(1997) Vol. 21, No. 7, pp. 862-872.
2. Y. H. Park, J. I. Ryu, 1999, Freezing Characteristics of still water under a subcooling condition, Energy Engg J(1999) Vol. 8, No. 4, pp 576-582
3. Okada M., Oda Y., Nakagawa S., Matsumoto K., Kawagoe T., 2004, Continuous ice formation in a tube by using water-oil emulsion for dynamic-type ice-making cold thermal energy storage, International Journal of Refrigeration 27, pp. 353-359.
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. 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. D. G. Lee, B. Kim, J. H. Peck, H. Hong, C. Kang, 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
7. D. G. Lee, J. H. Peck, H. Hong, C. Kang, 2006, Effect of supercooling and cooling rate on a continuous ice slurry formation using a plate heat exchanger, Proceeding of the SAREK 2006 Summer Annual Conference, pp. 138-143
8. 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