

소형 슬러시 제조기의 전열현상에 관한 연구

김도영*, 김내현†, 오왕규*, 최용민*, 변호원*

인천대학교 기계공학과, *인천대학교 대학원

Heat Transfer Characteristics of Small Slush Maker

Do-Young Kim*, Nae-Hyun Kim†, Wang-Kyu Oh*, Yong-Min Choi*, Ho-Won Byun*

† Department of Mechanical Engineering, University of Incheon

*Graduate School, University of Incheon

ABSTRACT: Tests were conducted to obtain heat transfer coefficients during slush formation from 10% sucrose solution. The slush was made by scraping the ice formed on the cylinder. Cold brine was supplied inside of the cylinder to cool the outer surface. Below a certain brine temperature, which was 5°C in this study, the solution was supercooled, and suddenly turned into ice. The super-cooling increases as the brine temperature increased. During slush formation, the heat transfer coefficient oscillated significantly, due to periodic removal of ice chunk from the surface. The average heat transfer coefficient during slush formation was approximately twice of that obtained during single phase cooling. The heat transfer coefficient was also affected by the brine temperature with increasing heat transfer coefficient at lower brine temperature.

Key words: Slush(슬러시), Heat transfer characterstic(전열 특성), Super-cooling(과냉)

1. 서론

최근들어 국민 식생활 문화가 개선되고 생활 수준이 향상됨에 따라 슬러시, 아이스크림과 같은 냉동 유제품의 소비가 급증하고 있다. 이들은 식품원액을 냉각시켜 제조되는데 식품 냉각에는 소형 냉동사이클이 사용된다. 에어컨이나 냉장고 등과 같은 일반 제품은 모세관과 증발기가 하나인 반면 슬러시 제조기에는 다수의 모세관과 증발기가 사용되기도 한다. Fig. 1에 2개의 모세관과 증발기로 구성된 냉동사이클의 개략도가 나타나 있다. Fig. 2 에는 증발기의 개략도를 나타내었다. 증발기는 원통형으로 내측에 냉매가 흐르는 코일형 원관이 장착된다. 원통 외벽에는 냉매로부터 냉열을 받아 얼음이 형성되고 스크레이퍼

가 회전하며 이 얼음을 깎아내어 슬러시를 만든다. 증발기의 전열 성능을 좋게 하기 위해서는 증발관과 원통사이의 접촉 열저항을 최소화 하여야 한다. 이를 위하여 전열 실리콘을 바르고 원통 내부에는 우레탄 폼을 발포하여 단열을 시킴과 동시에 납작하게 만든 증발관을 원통에 압착시킨다. 슬러시 원액은 당도 10%로 제조되어 증발기 내부로 투입된다. 당도 10%의 원액은 -2°C에서 슬러시로 변화하고 이 때 증발기 냉매의 온도는 슬러시가 형성됨에 따라 대략 -5°C에서 -17°C로 감소한다. 슬러시가 형성되면서 스크레이퍼에 걸리는 토크는 증가하게 되는데 이 토크 변화로부터 슬러시의 완성여부가 결정되고 완성시는 압축기 가동을 중단한다. 슬러시가 녹아 스크레이퍼에 걸리는 토크가 감소하면 다시 압축기가 가동된다.

슬러시 제조기의 설계를 위해서는 슬러시 형성 과정 중 증발관 내를 흐르는 저온 냉매로부터 원

† Corresponding author

Tel.: +82-32-770-8420; fax: +82-32-770-8410

E-mail address: knh0001@incheon.ac.kr

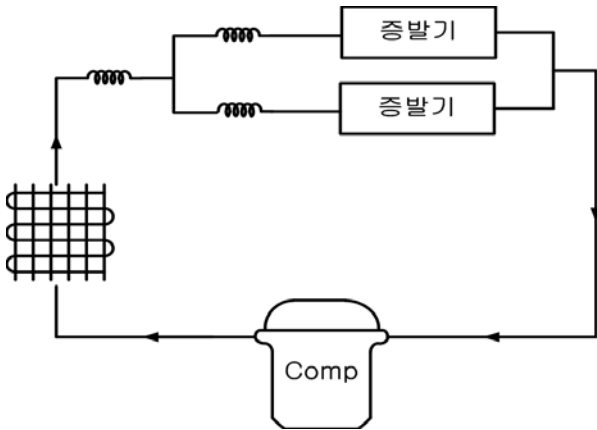


Fig. 1 Schematic drawing of the slush refrigeration cycle

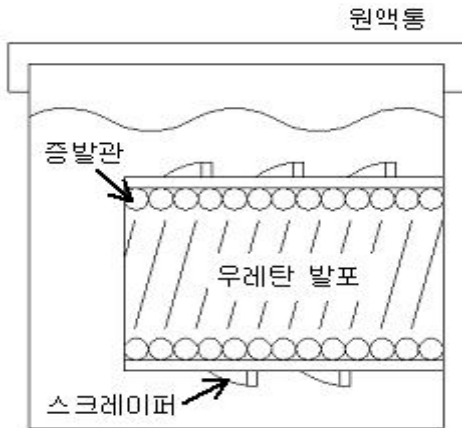


Fig. 2 Schematic drawing of the evaporator

액으로의 전열에 관한 이해가 필요하다. 관 내측 냉매의 증발에 대해서는 다수의 연구 결과가 존재하나 본 연구와 같이 원통 외부로부터 스크레이퍼에 의해 얼음이 깎여 나가 슬러시가 형성되는 전열현상에 대해서는 연구결과가 전무한 형편이다. 다만 원통 내측에 얼음을 생성시키고 회전하는 블레이드에 의해 제빙 또는 슬러시를 형성하는 하는 scraped surface 열교환기의 전열 현상에 대해서는 일부 연구가 보고되었다. Lakhdar et al. ⁽¹⁾은 scraped surface 열교환기에서 에탄올 수용액과 과당 수용액의 유량, 블레이드 선속도, 블레이드와 벽면과의 간격등이 제빙 열전달 계수에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다. 블레이드 선속도가 클수록 열전달계수가 증가하였고 벽면과의 간격이 1mm 이내인 경우 벽면으로부터 형성된 얼음을 효과적으로 제거할 수 있음을 보고하였다. Qin et al. ⁽²⁾도 scraped surface 열교환기에서 10% 과당 수용액을 사용

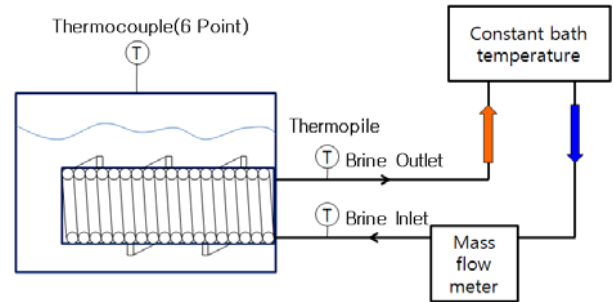


Fig. 3 Schematic drawing of the apparatus



Fig. 4 Photo of the scraper

하여 실험을 수행하였는데 제빙시 열전달계수는 단상 열전달계수의 5배 가량이 됨을 보고하였다. 상기 연구들은 원통관내 얼음이 형성되는 경우에 대한 실험이고 본 연구와 같이 원통 외부로부터 얼음이 형성되는 전열현상에 대해서는 연구결과가 전무하다. 본 연구에서는 현재 국내에서 사용되고 있는 슬러시 제조기에 대하여 제빙 실험을 수행하였고 실험 결과로부터 제빙시 열전달계수를 도출하였다. 실험은 냉매측을 순환하는 브라인의 온도를 -4°C 에서 -8°C 까지 변화시키며 수행되었다.

2. 시험장치 및 자료처리

Fig. 3에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험에 사용된 슬러시 증발기는 내용적 14,000 cc 이고 증발통의 외경은 120 mm, 길이는 287 mm 이다. 증발통 내측에는 외경 6.5mm 원관이 납작한 코일형태로 증발관 내측에 밀착되어 있다. 증발통과 코일 사이는 접촉열저항을 최소화하기 위하여 열에폭시를 바른 후 내부에서 우레탄을 발포하여 밀착이 되도록 하였다. 증발관 코일의

총 길이는 9907 mm이다. 실험시 슬러시 제조를 위하여 10% 농도의 과당 수용액 6200 cc를 충전하였다. Fig. 4에는 스크레이퍼의 사진이 보여진다. 스크레이퍼는 PP 재질로 제작되었고 블레이드 핏치는 92.5 mm, 내경은 122 mm 이다. 따라서 블레이드와 원통과의 간격은 1.0 mm 로 유지되었다.

슬러시 제조기에서 증발통 관 내측으로는 냉매가 순환하나 본 연구에서는 전열량 계산이 손쉽도록 브라인 (농도 50%)을 순환시켰다. 따라서 증발기로의 전열량은 브라인의 입출구온도와 순환량을 측정하여 결정된다. 슬러시의 온도는 증발기 내에 열전대를 6개를 균일하게 분포시켜 측정하였다.

슬러시 제조시 열전달계수는 브라인 측에서 측정된 전열량으로부터 총합열전달계수를 구하고 이로부터 관내측과 관벽저항을 빼내어 구한다. 실험의 정확도를 높이기 위해서는 관내측 저항을 최소화할 필요가 있고 따라서 관 내측을 난류로 형성하는 것이 바람직하다. 하지만 관내의 유속을 너무 빠르게 하면 브라인 입출구의 온도차가 감소하므로 온도측정의 정밀도가 떨어진다. 특히 브라인의 경우는 점성계수가 커서 관 내측을 난류로 유지하는 것이 어렵다. 본 실험시 관 내측은 층류로 유지되었고 관내측 열저항비는 35%~80%로 나타났다. 층류의 경우 열전달계수는 형상, 열경계조건등에 크게 영향을 받는다. 본 실험시 가공된 납작관은 7.5 mm x 3.7 mm 로 사각채널로 가정하였고 경계조건은 상부는 등온, 나머지 세면은 단열조건을 적용하였다, 특히 코일내를 유동하므로 선회에 따른 열전달 증진을 고려하였다⁽³⁾.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5에 브라인 입구온도 -8°C에서 측정된 브라인 입출구의 온도와 슬러시 온도가 나타나 있다. 슬러시는 초기온도 10°C에서 400초에 -0.6°C로 감소함을 보인다. 이 온도는 10% 과당 수용액의 응고점과 일치한다⁽⁴⁾. 그 이후는 얼음이 형성되면서 수용액 중의 과당 농도가 높아지고 응고점은 점차로 낮아지게 되는데 Fig. 4는 이러한 경향을 보여준다. 브라인출구온도도 400초까지는 일정하게 감소하다가 400초를 넘어서 부터는

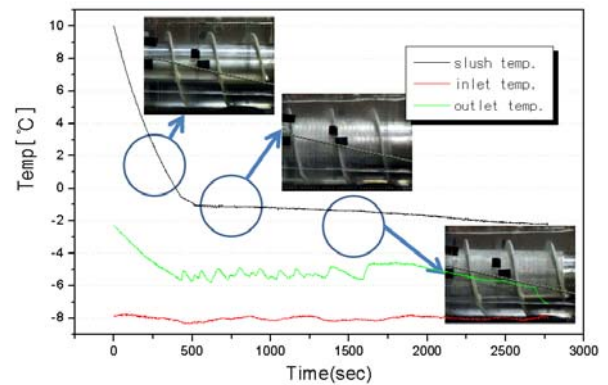


Fig. 5 measured temperatures at -8°C brine inlet

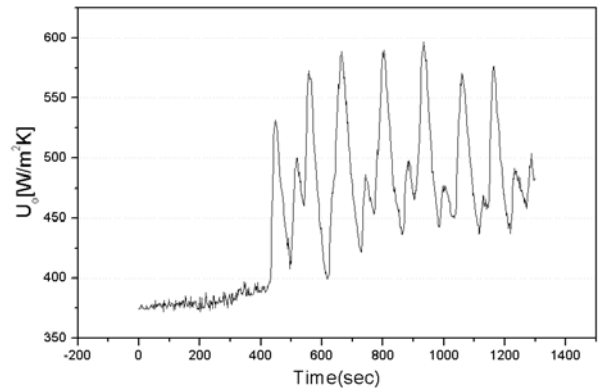


Fig. 6 U_o at -8°C brine inlet temperature

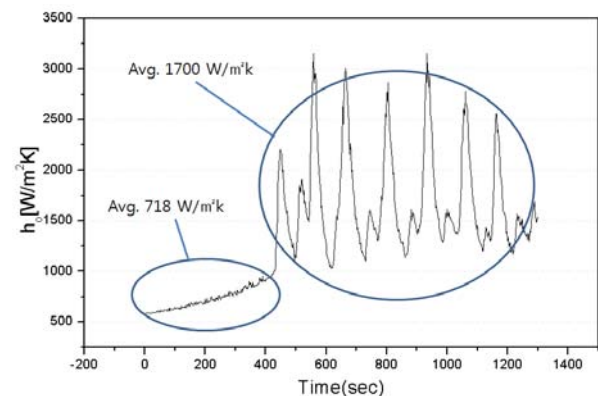


Fig. 7 Heat transfer coefficient at -8°C brine inlet temperature

진동하는 경향을 보인다. 이는 증발통 표면에 부착된 얼음이 부분적으로 탈착하면서 일부는 표면이 노출되고 일부는 얼음이 덮혀 있어 부가적인 열저항으로 작용하기 때문으로 판단된다. Fig. 6에는 관외측 기준 총합열전달계수의 변화가 나타나 있다. 단상류 (400초까지)는 평균 380 W/m²K의 값을 보이다 얼음이 형성되면서 400 ~600

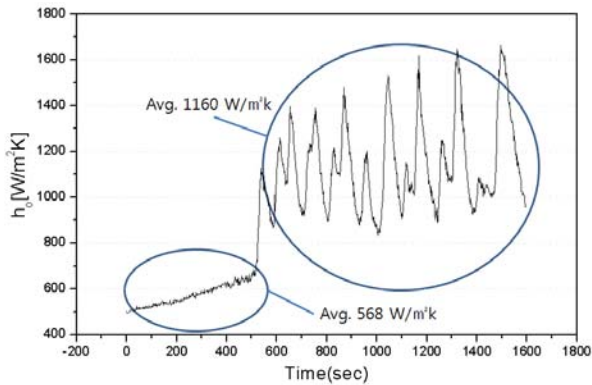


Fig. 8 Heat transfer coefficient at -6°C brine inlet temperature

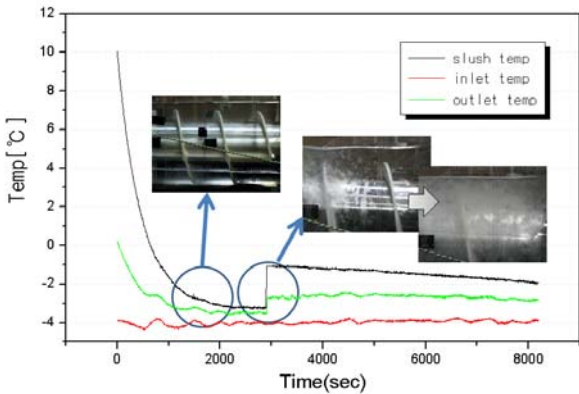


Fig. 9 Measured temperatures at -4°C brine bath

$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 사이에서 진동함을 보인다. Fig. 7에는 제빙 열전달계수가 나타나 있다. 단상류 영역에서는 평균 $718 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ 이고 제빙시는 $1000\sim 3000 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ 사이에서 진동함 (평균 $1700 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$) 을 보인다. 데이터 리덕션시 관 내측 열저항은 전체의 $35\sim 80\%$ 를 차지하였다. Fig. 8에는 브라인온도 -6°C 에서의 열전달계수가 나타나 있다. 단상류에서는 평균 $568 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ 이고 제빙시는 평균 $1160 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ 으로 -8°C 에 비하여 다소 감소함을 보인다. 제빙시 진동 폭도 $900\sim 1600 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ 로 다소 줄어들음을 알 수 있다. 또한 제빙시 열전달계수는 단상류의 2배가량이 됨을 보여준다.

Fig. 9에는 브라인 입구온도 -4°C 에서 측정된 데이터가 나타나 있다. 이 그림은 -8°C 에서와는 달리 슬러시 원액온도가 -3°C 까지 과냉되었다가 2500초 부근에서 -1°C 로 급증하는 현상을 보인다. 브라인 온도가 상대적으로 높은 경우 용액으로의 전열량이 많지 않고 따라서 과냉액이 형성된다. 그러다 어느 순간 과냉액 내부에서 얼음

결정이 생기면서 주위에 방열을 하여 슬러시의 온도가 올라가게 된다. 첨부된 그림은 이러한 현상이 순간적으로 나타남을 보여준다. 브라인 입구온도를 변화시키며 실험한 결과 입구온도가 감소하면 과냉도가 감소하여 -6°C 에서는 과냉현상이 없어지는 것을 확인하였다. 이 때 출구온도는 -4°C 이었다.

4. 결론

본 연구에서는 10% 과당 수용액을 사용하여 슬러시 제조시 열전달계수를 측정하였다. 주된 결론은 다음과 같다.

- (1) 브라인 입구온도 -6°C (출구온도 -4°C) 이상에서는 원액이 과냉되었다가 순간적으로 얼음 결정으로 변하는 현상이 관측되었다. 과냉도는 입구온도가 올라갈수록 증가하였다.
- (2) 브라인 입구온도 -6°C 이하에서는 과냉현상이 관측되지 않았다. 이 경우 제빙은 관벽의 얼음을 스크레이퍼로 깎아내어 형성된다.
- (3) 제빙시 열전달계수는 큰 폭으로 진동한다. 이는 스크레이퍼에 의해 관벽의 얼음이 부분적으로 탈착되기 때문으로 판단된다.
- (4) 제빙시 열전달계수는 단상 열전달계수의 2배 가량으로 나타났다. 또한 브라인 온도가 감소할수록 열전달계수는 크게 나타났다. 이는 얼음의 탈착부가 브라인온도에 영향을 받아 열전달계수에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 2007년도 산학연컨소시엄 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Lakhdar, M. B., Cerecero, R., Alvarez, G., Guilpart, J., Flick, D. and Lallemand, A., 2005, Heat transfer with freezing in a scraped surface heat exchanger, Applied

- Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 45-60.
2. Qun, F., Chen, X. D., Ramachandra, S. and Free, K., 2006, Heat transfer and power consumption in a scraped surface heat exchanger while freezing aqueous solution, Separation and Purification Technology, Vol. 48, pp. 150-158.
 3. Handbook of Heat Transfer, 1973, edited by W. M. Rohsenow and J. P. Harnett, Chapter 7.
 4. Ethylene Glycol Product Guide, www.meglobal.biz