

소형 슬러시 제조기 증발기에서 슬러시 형성시 전열 특성

최 용 민*, 김 도 영*, 김 내 현†, 이 을 종*, 김 수 환*, 변 호 원*

인천대학교 기계공학과, †인천대학교 대학원

Heat Transfer Characteristics During Slush Formation in the Evaporator of a Small Slush Maker

Yong-Min Choi*, Do-Young Kim*, Nae-Hyun Kim†, Eul-Jong Lee*, Soo-Hwan Kim*,
Ho-Won Byun*

Department of Mechanical Engineering, University of Incheon

†Graduate School, University of Incheon

(Received July 29, 2009; revision received September 29, 2009)

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 evaporator cylinder to cool the outer surface. Below a certain brine temperature, which was $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in this study, the solution was supercooled, and suddenly turned into ice crystals. During slush formation, the heat transfer coefficient oscillated significantly, due to periodic removal of ice chunk form the surface. The average heat transfer coefficient during slush formation was 40~70% higher than that obtained during single phase cooling. The heat transfer coefficient was also affected by the brine temperature with increasing heat transfer coefficient at higher brine temperature.

Key words: Slush(슬러시), Heat transfer characterstic(전열 특성), Subcooling(과냉)

기 호 설 명		
A	: 전열면적 [m]	Re : Reynolds 수($= \rho_f V d_h / \mu_f$) [-]
cp	: 비열 [J/kgK]	Pr : Prandtl 수 [-]
dh	: 수력직경 [m]	t : 관벽 두께 [m]
D	: 선회직경 [m]	T : 온도 [K]
h	: 열전달계수 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	U : 총합열전달계수 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
k	: 열전도도 [W/mK]	V : 유속 [m/s]
\dot{m}	: 유량 [kg/s]	μ : 점성계수 [kg/ms]
Nu	: Nusselt 수($= h_o d_h / k_f$) [-]	ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

† Corresponding author

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

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

e : 선회

i : 내측

- in* : 입구
- f* : 유체
- m* : 평균
- o* : 외측
- out* : 출구
- s* : 직선, 슬러시

1. 서 론

최근들어 국민 식생활 문화가 개선되고 생활수준이 향상됨에 따라 슬러시, 아이스크림과 같은 냉동 유제품의 소비가 급증하고 있다. 이들은 식품원액을 냉각시켜 제조되는데 식품 냉각에는 소형 냉동사이클이 사용된다. 에어컨이나 냉장고등과 같은 일반 제품은 모세관과 증발기가 하나인 반면 슬러시 제조기에는 다수의 모세관과 증발기가 사용되기도 한다. Fig. 1에 2개의 증발기로 구성된 슬러시 제조기 사진이 나타나 있다. Fig. 2에는 2개의 증발기로 구성된 냉동사이클의 개략도가 나타나 있다. 냉매는 전방 모세관에서 1차로 팽창한 후 양분되어 후방 모세관으로 공급된다.⁽¹⁾

Fig. 3 에는 증발기의 개략도를 나타내었다. 증발기는 원통형으로 내측에는 냉매가 흐르는 코일형 증발관이 장착되고 외측에는 슬러시 원액이 저장된다. 슬러시 원액은 냉매로부터 냉열을 받아



Fig. 1 Photo of a slush maker.

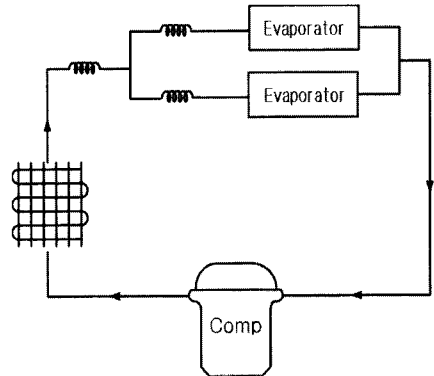


Fig. 2 Schematic drawing of the slush refrigeration cycle.

원통 외벽에서 얼음으로 변화된다. 이 얼음은 원통 외측에서 회전하는 스크레이퍼에 의하여 탈착되어 원액과 섞여 슬러시가 된다. 냉매로부터 원액으로의 열전달을 원활하게 하기 위하여 증발관과 원통 사이에 전열 실리콘을 바르고 원통 내부에서 우레탄 폼을 발포하여 증발관을 원통에 압착시켰다. 증발관은 집축이 원활하도록 납작하게 가공되었다.

슬러시 원액은 당도 10%로 제조되어 증발기 내부로 투입된다. 당도 10%의 원액은 -0.6℃에서 얼음으로 변화하고 이 때 증발기 냉매의 온도는 슬러시가 형성됨에 따라 대략 -6℃에서 -17℃로 감소한다. 슬러시가 형성되면서 스크레이퍼에 걸리는 토크는 증가하게 되는데 이 토크 변화를 감지하여 슬러시의 완성여부를 결정한다. 슬러시가 녹아 스크레이퍼에 걸리는 토크가 감소하면 다시 압축기가 가동된다.

슬러시 제조기의 설계를 위해서는 슬러시 형성 과정 중 증발관 내를 흐르는 저온 냉매로부터 원액으로의 전열에 관한 이해가 필요하다. 관 내측 냉매의 증발에 대해서는 다수의 연구 결과가 존재하나 본 연구와 같이 원통 외부로부터 스크레이퍼에 의해 얼음이 탈착되어 슬러시가 형성되는 전열현상에 대해서는 연구결과가 전무한 형편이다. 유관 연구로 원통 내측에 얼음을 생성시키고 회전하는 블레이드에 의해 제빙하는 scraped surface 열교환기의 전열 현상에 대해서는 일부 결과가 보고되었다. Lakhdar et al.⁽²⁾은 scraped surface 열교환기에서 에탄올 수용액과 과당 수용액의 유량, 블레이드 회전속도, 블레이드와 벽면과의 간격 등이 제빙 열전달계수에 미치는 영향을 실험적으로 검토하

었다. 블레이드 회전속도가 클수록 열전달계수가 증가하였고 벽면과의 간격이 1 mm 이내인 경우 벽면으로부터 형성된 얼음을 효과적으로 제거할 수 있음을 보고하였다. Qin et al.⁽²⁾도 scraped surface 열교환기에서 10% 과당 수용액을 사용하여 실험을 수행하였는데 제빙시 열전달계수는 단상 열전달 계수의 5배 가량이 됨을 보고하였다.

상기 연구들은 원통관 내에 얼음이 형성되는 경우에 대한 실험이고 본 연구와 같이 원통 외부로부터 얼음이 형성되는 전열현상에 대해서는 연구결과가 전무하다. 본 연구에서는 현재 국내에서 사용되고 있는 슬러시 제조기⁽¹⁾의 증발기를 사용하여 슬러시 제조 실험을 수행하였다. 증발관 내측에는 냉매가 아닌 브라인을 순환시켜 관 내측 전열량 계산을 손쉽게 하겠다. 실험은 브라인의 온도를 -4 °C에서 -8 °C까지 변화시키며 수행되었다.

2. 시험장치 및 자료처리

Fig. 4에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험에 사용된 슬러시 증발기는 내용적 14 리터이고 증발통의 외경은 120 mm, 길이는 287 mm이다. 증발통 내측에는 외경 6.5 mm 원관이 납작한 코일 형태로 밀착되어 있다. 증발통과 코일 사이는 접촉열저항을 최소화하기 위하여 전열실리콘을 바른 후 내부에서 우레탄을 발포하여 밀착이 되도록 하였다. 증발관 코일의 총 길이는 990 cm이다. Fig. 5에는 스크레이퍼의 사진이 보여진다. 스크레이퍼는 증발통 외측에서 회전하며 증발통에 형성된 얼음을 깎아내어 슬러시를 만든다. 스크레이퍼는 폴리프로필렌으로 제작되었고 스크레이퍼 블레이드의 핏치는 92.5 mm, 내경은 122 mm이다. 따라서 스크레이퍼와 증발통과의 간격은 1.0 mm로 유지되고 스크레이퍼의 회전 속도는 120 rpm 이다. 실험은 10%

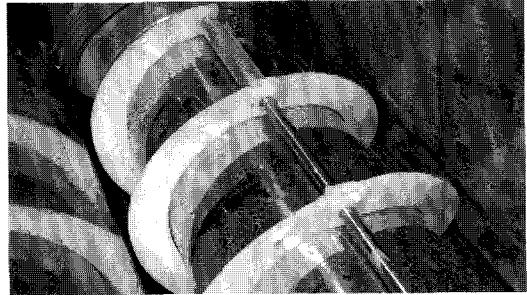


Fig. 5 Photo of the scraper.

농도의 과당 수용액 6.2 리터를 충전한 상태로 수행되었다. 실제 슬러시 제품의 경우는 과당 수용액에 색소를 포함한 여러 가지 첨가제를 넣어 제품을 다양화하나 본 연구에서는 가시화를 위하여 투명한 과당 수용액만으로 실험을 수행하였다.

실제 슬러시 제조기에서는 관 내측으로 냉매가 순환하나 본 연구에서는 전열량 계산이 손쉽게 되도록 브라인 (농도 50%)을 순환시켰다. 따라서 증발기로의 전열량은 브라인의 입출구온도와 순환량을 계측하여 결정된다. 슬러시의 온도는 증발기 내에 열전대를 6개를 균일하게 분포시켜 측정하였다. 슬러시 제조시 열전달계수는 브라인 측에서 측정된 전열량으로 부터 총괄열전달계수를 구하고 이로부터 관내측과 관벽저항을 빼내어 구한다.

$$UA = \dot{m}c_p \ln \frac{T_s - T_{in}}{T_s - T_{out}} \tag{1}$$

$$\frac{1}{h_o} = \frac{A_o}{UA} - \frac{tA_o}{kA_m} - \frac{A_o}{h_iA_i} \tag{2}$$

이 경우 실험의 정확도를 높이기 위해서는 관 내측 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 쉽지 않았다.⁽⁴⁾ 본 실험시 관 내측은 층류로 유지되었고 관내측 열저항은 전체 열저항의 20%~80%가 되었다.

층류의 경우 열전달계수는 형상, 열경계 조건 등에 영향을 받는다. 본 실험시 가공된 납작관을 7.5 mm × 3.7 mm 인 사각채널로 가정하고 경계조건으로 상부는 등온, 나머지 세면은 단열조건을

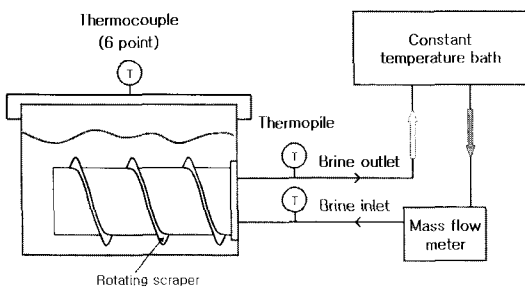


Fig. 4 Schematic drawing of the apparatus.

적용하면⁽⁵⁾ Nusselt 수는 3.185이다. 또한 전열관이 코일 형상이므로 선회에 따른 열전달 증진 식(3)을 고려하여야 한다.⁽⁶⁾ 여기서 d_h 는 사각채널의 수력 직경, D 는 선회직경이다.

$$\frac{Nu_c}{Nu_s} = 1.09 \frac{(Re \sqrt{d_h/D})^{1/2}}{1 + \sqrt{1 + 19.25/Pr^2}} \quad (3)$$

Kline and McClintock⁽⁷⁾의 제안에 따라 불확실도 해석을 수행하였다. 관 내측 열전달계수 식(3)의 불확실도를 10%로 가정하였을 때 슬러시 제조에 따른 관 외측 열전달계수의 불확도는 11%~17%이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 6에 브라인 입구 온도 -8°C 에서 측정된 브라인 입출구의 온도와 슬러시 온도가 나타나 있다. 슬러시는 초기온도 10°C 에서 400초 후에 -0.6°C 로 감소함을 보인다. 이 온도는 10% 과당 수용액의 응고점과 일치한다. 그 이후는 얼음이 형성되면서 수용액 중의 과당 농도가 높아지고 응고점은 점차로 낮아지게 되는데 Fig. 6에 나타난 슬러시 온도는 이러한 경향을 보여준다. 브라인 출구온도는 400초까지는 일정하게 감소하다가 400초를 넘어서 부터는 진동하는 경향을 보인다. 증발통 표면에 형성되는 얼음은 두께가 1mm(스크레이퍼와 증발통의 간격)를 넘어서면 스크레이퍼에 의해 탈빙이 되는데 탈빙과 착빙이 반복되면서 브라인 출구온도가 진동하는 것으로 보인다. Fig. 6에 내삽된 사진도 400초 이후에는 원통 표면에 얼음 층이 형성됨을 보여준다.

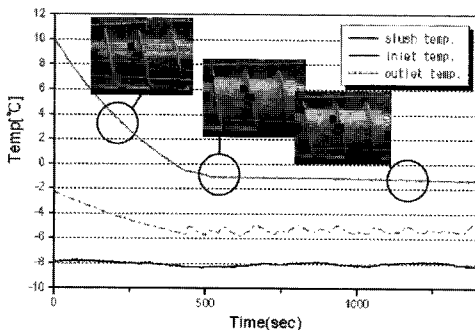


Fig. 6 Measured temperatures at -8°C brine inlet temperature.

Fig. 7에는 관외측 기준 총합열전달계수를 나타 내었다. 수용액 상태의 단상류 유동(400초까지)에서는 평균 $380\text{ W/m}^2\text{K}$ 의 값을 보인다. 단상류 열전달계수는 후반부에 다소 증가하는 경향을 보이는데 이는 후반부에 원통에서 얼음이 일부 탈착되어 수용액 내에 존재하기 때문으로 추측된다. 관벽에 얼음이 형성되면서 부터는 (400초 이후) 총합 열전달계수가 $400\sim 600\text{ W/m}^2\text{K}$ 사이에서 진동한다. 이는 전술한 바와 같이 관벽에 형성된 얼음이 스크레이퍼에 의해 탈착되기 때문인데 진동 주기는 대략 120초이다. 또한 큰 탈착 진동 주기 사이에 작은 진폭의 탈착이 일어나고 있음도 알 수 있다. Fig. 8에는 식(2)로 구해진 관 외측 열전달계수가 나타나 있다. 단상류 영역에서는 평균 $520\text{ W/m}^2\text{K}$ 이고 제빙 시는 $600\sim 1000\text{ W/m}^2\text{K}$ 사이에서 진동함 (평균 $750\text{ W/m}^2\text{K}$) 을 보인다.

Fig. 9에는 브라인온도 -6°C 에서의 관 외측 열

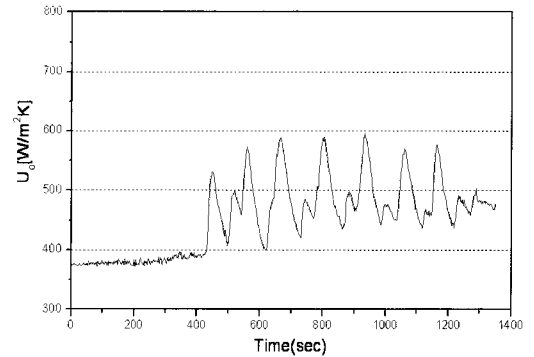


Fig. 7 Overall heat transfer coefficients at -8°C brine inlet temperature.

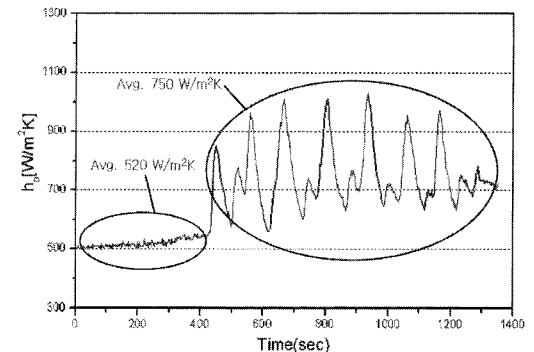


Fig. 8 Heat transfer coefficients at -8°C brine inlet temperature.

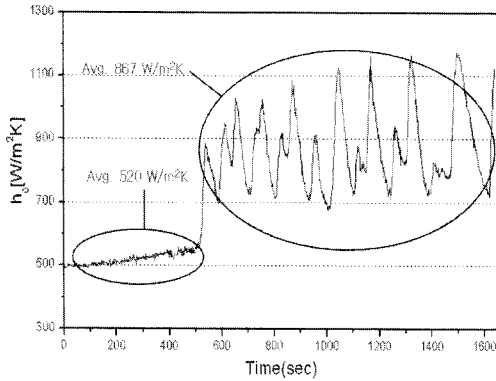


Fig. 9 Heat transfer coefficient at -6 °C brine inlet temperature.

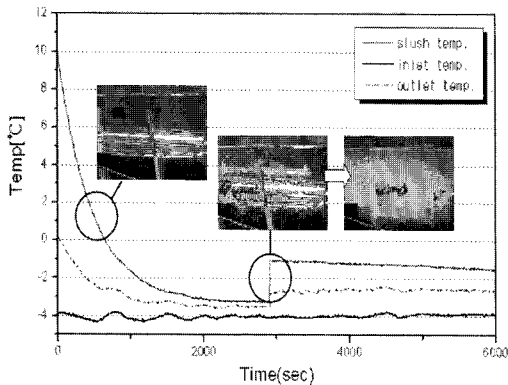


Fig. 10 Measured temperatures at -4 °C brine inlet temperature.

전달계수가 나타나 있다. 이 그림은 -8 °C 경우와 유사하다. 단상류 열전달 계수도 평균 520 W/m²K로 동일하다. 하지만 단상류로 유지되는 시간은 500초 정도로 -8 °C에 비하여 다소 늘어났는데 이는 시간당 전열량이 감소하였기 때문이다. 500초 이후에는 700~1200 W/m²K 사이에서 진동하는 경향 (평균 867 W/m²K)을 보인다. 진동 주기는 대략 100초이다. -8 °C와 비하여 보면 진동주기가 감소했는데 이는 관벽 온도가 높아지면 관벽에 형성되는 얼음의 밀도가 작아져 얼음의 탈착이 손쉬워지고 따라서 진동 주기가 감소하는 것으로 추측된다. 반면 열전달계수는 증가하였다.

Fig. 10에는 브라인 입구온도 -4 °C에서 측정된 데이터가 나타나 있다. 이 그림은 -0.6 °C에서 상 변화가 일어나는 앞의 경우와는 달리 원액의 온

도가 -3 °C까지 과냉되었다가 2500초에서 -1 °C로 급증하는 현상을 보인다. 이 경우 브라인 온도가 상대적으로 높아서 원액으로의 전열량이 적고 따라서 원액의 과냉이 가능한 것으로 판단된다.⁽²⁾ 그러다 어느 순간(2500초 후) 과냉이 풀리고 액 내부에서 얼음입자가 생기면서 평형 온도로 올라 가게 된다. 첨부된 그림은 이러한 현상이 순간적으로 나타남을 보여준다. 브라인 입구온도를 변화시키며 실험한 결과 입구온도가 감소하면 과냉도가 감소하며 -6 °C에서는 과냉현상이 없어지는 것을 확인하였다. 이 때 브라인 출구온도는 -4 °C이었다. 실제 슬러시 제조기에서는 냉매의 증발온도가 -6 °C에서 -17 °C정도로 원액의 과냉 현상은 관측되지 않는다.

4. 결 론

본 연구에서는 10% 과당 수용액을 사용하여 소형 슬러시 제조기에서 슬러시 제조 시 열전달계수를 측정하였다. 주된 결론은 다음과 같다.

- (1) 브라인 입구온도 -6 °C(출구온도 -4 °C)이상에서는 원액이 과냉되었다가 순간적으로 얼음입자로 변하는 현상이 관측되었다. 과냉도는 입구온도가 올라갈수록 증가하였다.
- (2)브라인 입구온도 -6 °C 이하에서는 과냉현상이 관측되지 않았다. 이 경우 슬러시는 관벽의 얼음을 스크레이퍼로 탈빙하여 형성된다.
- (3) 슬러시 제조시 열전달계수는 큰 폭으로 진동한다. 이는 스크레이퍼에 의해 관벽의 얼음이 주기적으로 탈착되기 때문으로 판단된다.
- (4) 관벽온도가 높아지면 진동주기는 감소함을 보인다. 관벽 온도가 높아지면 관벽에 형성되는 얼음의 밀도가 작아져 얼음의 탈착이 손쉬워지고 따라서 진동 주기가 감소하는 것으로 추측된다.
- (5) 단상 열전달계수는 520 W/m²K 정도이다.
- (6) 슬러시 제조 시 열전달계수는 단상 열전달계수보다 40~70% 크게 나타났다. 이 값은 관벽 온도가 높아질수록 증가하였다.

후 기

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

참고문헌

1. Se-A E&C, Slush Machine Model SSM180, www.icemaker.co.kr
2. 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.
3. 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.
4. Ehylene Glycol Product Guide, www.meglobal.biz.
5. Shah, R. K. and London, A. L., 1978, Laminar flow forced convection in ducts, *Advances in Heat Transfer*, Eds., T. F. Irvine and J. P. Hartnett, Supplement 1, Academic Press.
6. *Handbook of Heat Transfer*, 1973, edited by W. M. Rohsenow and J. P. Harnett, Chapter 7, pp. 150-151.
7. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, The description of uncertainties in single sample experiments, *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-9.