

이중 나선형 제빙 열교환기에 있어서 냉각조건이 연속제빙에 미치는 영향(수용액 및 냉각 온도 영향에 의한)

백 광 민, 홍 회 기*, 강 채 동†

경희대학교 대학원, *경희대학교 기계산업시스템공학부, † 전북대학교 기계항공시스템공학부

Effect on Operating Conditions for Cooling to Continuous Ice Formation in Double Spiral Type Heat Exchanger(Effect on Aqueous Solution and Cooling Temperature)

Kwang-Min Baek, Hiki Hong*, Chaedong Kang†

ABSTRACT: In order to form ice continuously, the suppression of ice adhesion on cooling wall or the flowing without blockage in ice making heat exchanger. In this study, a double spiral type-heat exchanger with non-metallic tube was used to make ice slurries. An aqueous solution(ethylene glycol 1 mass%, silane 3 mass%) was supercooled in the heat exchanger with changing the solution flow rate and the solution inlet temperature of heat exchanger. At results, when the flow rate was small, the continuous ice formation occurred even though the supercooling degree was large.

Key words: Ice slurry(아이스슬러리), Ice adhesion(빙부착), Supercooling-type(과냉각수형), Flow rate(유량), Supercooling(과냉각)

기 호 설 명

T : 온도 [°C]

F, P : 동결점

$mesh$: 1 inch 길이 안에 들어 있는 눈금 수

1. 서 론

빙축열 시스템은 국가 차원 측면에서 살펴보면 피크부하를 경부하 시간대인 심야로 이전시켜 최대부하 억제와 기저부하조성을 동시에 추진하고, CO₂ 가스 배출억제로 환경영향에서도 유리하다. 또한 개인 측면에서는 초기투자비는 다소 많이 소요되나 국가 지원과 심야전력의 이용으로 경제

성이 충분한 시스템이다.⁽¹⁾ 그 중 동적형 시스템은 제빙 효율이 우수하고, 열 응답성이 빠르며, 냉열 에너지의 수송능력을 가지고 있어 다른 시스템에 비해 더 많은 이점을 가지고 있다. 하지만, 돌발적이고 지속적으로 발생하는 냉각면에서의 빙부착과 그로 인한 관폐색 문제로 축열재료에 대해 유동성 및 열전달 저하를 가져와 원활한 시장보급에 큰 장애로 남겨져 있다. 또한 이를 해결하기 위한 스크레이퍼에 의한 빙회수 방식은 기계적 구동부가 있어 시스템이 복잡하고 동력비 증가 및 유지·보수에 어려움이 따른다.⁽²⁾

수용액을 축열매체로 이용하는 동적형 빙축열 방식에서 빙부착을 억제하기 위하여 기름이 함유된 축열재를 이용한 사례가 있으나 환경적 및 경제적 측면에서 문제점을 가지고 있다.⁽³⁾ 이에 따른 문제점을 해결하기 위한 연구는 새로운 첨가제의 개발 및 개발된 첨가제와 기존의 첨가제 혼합 또는 단독으로 이용한 조성, 냉각조건 및 계면상태 등의 다양한 인자가 빙부착에 미치는 영

† Corresponding author

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

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

향을 파악하고 있다. ^(4, 5)

본 연구에서는 기계적 구동부가 없는 아이스슬러리 시스템을 실험실 규모로 제작하고 첨가제 함유 수용액의 유량 및 열교환기 입구온도가 빙부착 현상에 미치는 영향을 파악하였다.⁽⁶⁾ 이에 따른 추가 연구로 수용액의 유량 변화에 따른 아이스슬러리의 생산 변화, 아이스슬러리를 생산하면서 첨가제 농도 변화를 관찰하여 첨가제 농도와 제빙에 미치는 영향 및 수용액이 열교환기를 통과하면서 생기는 온도차에 의한 빙부착 영향을 파악하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

Fig. 1은 제빙 열교환기를 이중 나선관으로 제작하여 아이스슬러리를 연속적으로 생산하기 위한 실험 장치이다. 이때, 제빙열교환기는 외경 20 mm, 두께 1.5 mm의 연질 PVC(열전도도: 0.16 W/m·K, 비열: 0.95 kJ/kg·K)의 튜브를 이용하여 제작하였다. 실험 장치 구성과 용도에 관한 설명 및 제빙열교환기 설계는 선행 연구에 상세하게 밝혔다.⁽⁶⁾

선행 연구와 달리 본 연구에서는 수용액 유량 변화가 연속제빙에 미치는 영향을 폭넓게 연구할 필요성을 느꼈다. 이에 따라 수용액 측 펌프를 양정보다는 유량변화를 크게 하기 위한 방법으로 병렬로 2중 설치하였다. 제빙 열교환기의 길이가

50 m가 넘기 때문에 유량이 크게 늘어나지는 않았지만, 보다 손쉬운 조절이 가능하게 되었다. 또한, 축열조를 개선하여 아이스슬러리 탱크에는 점선으로 표시된 것과 같이 아크릴과 28 mesh의 망을 설치하여 생산된 슬러리가 수용액 탱크로 빠져나가지 않도록 막아 더욱 효과적으로 슬러리만을 취합할 수 있도록 하였다. 수용액 축열조에는 실선으로 표시한 것처럼 아크릴 막을 부착하여 실험상 오차로 슬러리가 생성될 경우 슬러리가 제빙열교환기 내부로 들어가는 것을 방지하였다. 슬러리가 제빙열교환기 내부로 다량 들어가게 되면 빙부착이 더욱 쉽게 이루어짐을 관찰하여 취한 조치인데, 이는 슬러리가 수용액보다 비중량이 낮아 부력에 의해 뜨는 현상을 이용한 것이다.

2.2 실험 방법

선행 연구와 동일하게 수용액의 농도는 에틸렌 글리콜(ethylene glycol, 이하EG) 1 mass%, 실란 커플링제(silane coupling agent, 이하 SCA) 3 mass%로 설정하였으며, 수용액 용량은 80 ℓ로 하여 아이스슬러리 생성 시, 수용액 부족으로 연속적인 제빙이 일어나지 않아 실험이 중단되지 않도록 하였다. 유량은 마그네틱 펌프를 이용하여 4 LPM부터 16 LPM까지 2 LPM 간격으로 변화시키면서 제빙열교환기에 공급을 하였다. 이때 브라인은 제빙열교환탱크에 일정 수준의 브라인이 머물게 하여 열교환이 이루어지도록 하였

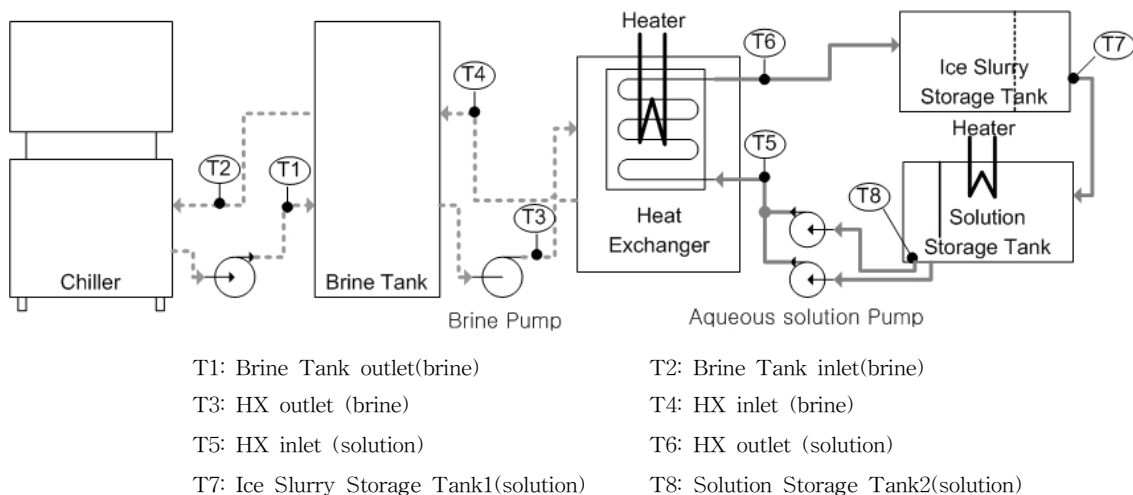


Fig. 1 Continuous ice slurry maker.

다. 본 실험에서 브라인측 열교환기 입구온도는 -9°C 로 설정하였고, 과냉도 값을 작게 하기 위한 실험에서는 -7°C 까지 올려 실험을 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과

선행 연구에 이은 계속된 실험을 통하여 연속 제빙이 되는 조건과 빙부착으로 인한 관폐색이 일어나는 조건 및 과냉각 상태로 진행되는 조건들을 실험으로 재연성을 확인하고 추가 실험을 하였다.

Fig. 2는 수용액 유량 4 LPM, 수용액 열교환기 입구 측 온도(T_5)를 0°C 로 한 실험으로, 과냉각수 형상으로 연속제빙이 일어난 실험이다. 기존 아이스슬러리가 연속적으로 제빙되는 실험에서는 제빙열교환기 내부에서 과냉각이 해소되어 수용액과 아이스슬러리가 혼합되어 나오는 경향을 보였다. 하지만 Fig. 2에서 보여주는 실험은 열교환기 출구 측에서 측정되는 수용액의 온도가 동결온도보다 낮게 위치하고 있는 것으로 보아 수용액이 과냉각 상태로 배출됨을 쉽게 알 수 있다. 또한 열교환기 입구 측 온도는 동결온도 및 슬러리 축열조 온도보다 높게 측정되므로 동결이 이루어지지 않았고, 슬러리 축열조 내부의 온도는 일정하게 유지되어 슬러리가 일정한 온도로 저장되고 있음을 알 수 있다.

수용액은 제빙열교환기를 통과하면서 과냉각 상태로 변하게 되고, 완전히 통과 후 슬러리 축열조에서 얼음 입자로 상변화하는 현상을 보였다. 이는 제빙열교환기 내부를 지나는 수용액 양이 작기 때문에 열교환이 이루어지는 시간이 길어지게 되어 열교환기 입·출구 측 온도차가 큰 과냉각수형 연속제빙이 일어났다고 사료된다.

Fig. 3은 연속제빙이 일어난 실험으로 유량 12 LPM, 수용액 열교환기 입구온도는 -1.0°C 이다. 제빙이 이루어지기 시작한 이후 열교환기 입·출구 온도와 슬러리 축열조 내부 온도 모두 동결온도보다 높게 측정되었음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 2와는 다르게 과냉각수형 연속제빙이 아닌 열교환기 내부에서 상변화가 이루어져 아이스슬러리가 생산됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 빙부착으로 인한 관폐색 현상이 일어

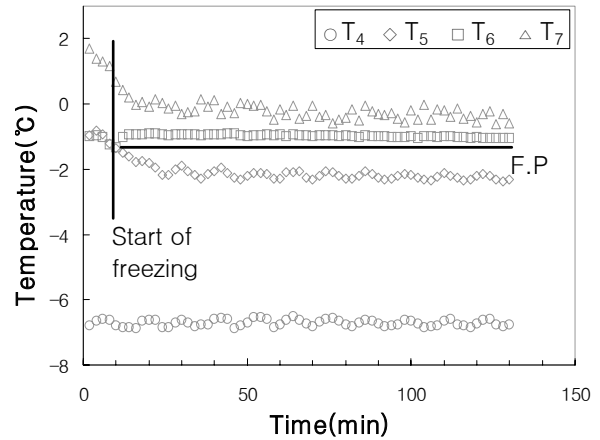


Fig. 2 Time history of temperature variation in heat exchange. (supercooling-type)

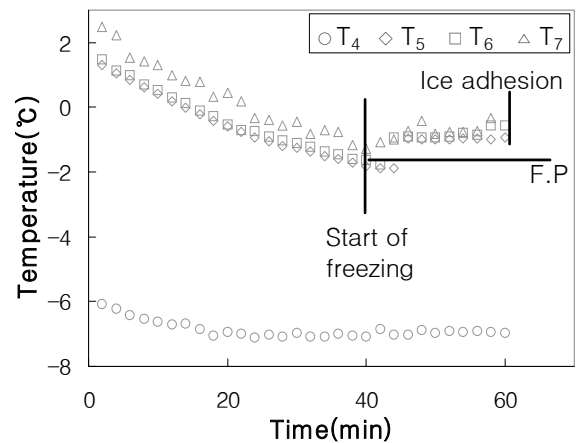


Fig. 4 Time history of temperature variation in heat exchange. (ice adhesion)

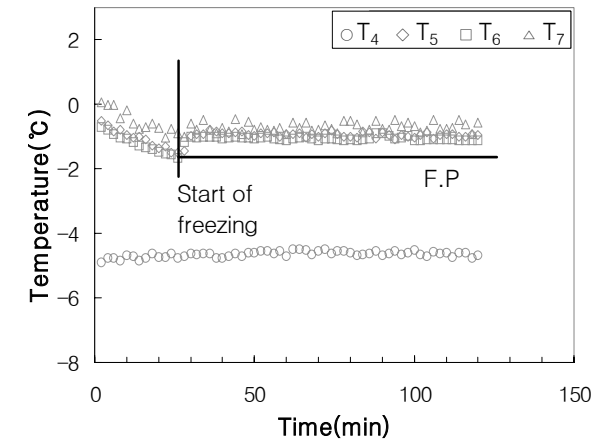


Fig. 3 Time history of temperature variation in heat exchange. (ice non-adhesion)

난 실험으로 유량 16 LPM, 수용액 열교환기 입구 온도 -3.0°C 에서 나타난 그래프이다. 이 실험 역시 Fig. 3에서 나타난 경향을 초기에 보였다. 하지만, 빙부착이 일어나면서 유량이 급격하게 감소하기 시작하였고, 그 후 열교환기 출구 측에서 측정되는 온도가 급격하게 상승하면서 관폐색 현상이 일어났다.

3.2 질량 측정

Fig. 5에는 수용액의 유량 변화에 따라 아이스 슬러리 생성을 질량 변화로 나타내었다. 이때 질량은 빙층전률이 약 50% 정도로 아이스 슬러리 입자 사이에 많은 양의 수용액이 머물고 있어, 측정된 질량이 순수한 아이스 슬러리만의 질량이 아니다. Fig. 6은 유량 4 LPM, 제어 온도 -1.0°C

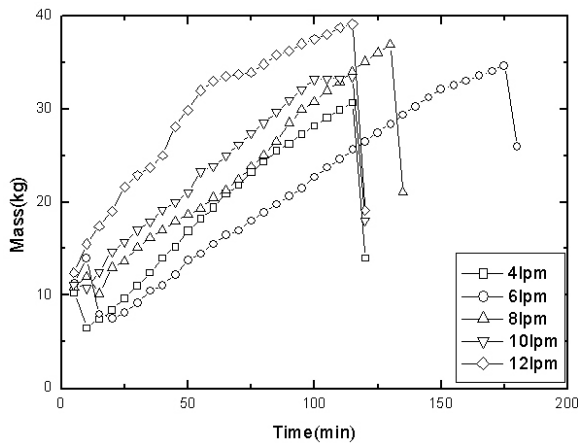


Fig. 5 Time history of Ice slurry mass with flow rate.

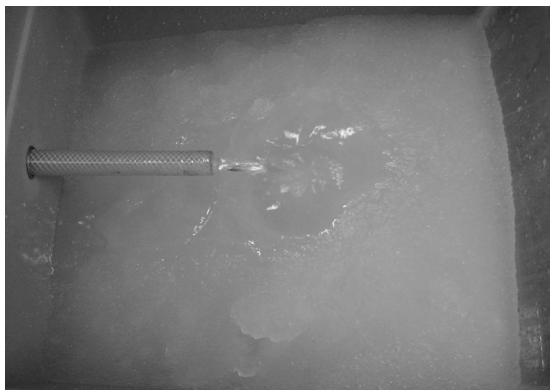


Fig. 6 The photograph of making ice slurry in ice slurry tank.

에서 빙층전률이 약 50%인 아이스 슬러리 생성 모습이다.

과냉각이 해소되고 아이스 슬러리가 생산되는 초반 10분에서 20분 사이에 아이스 슬러리아이 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 초반 생산된 아이스 슬러리가 축열조 내부에 땅을 막아 수용액이 흘러내리는 것을 방해하여 생기는 현상이다. 또한 각각의 유량에서 마지막에 급격하게 질량이 감소하는 것은 실험을 종료하고 아이스 슬러리 축열조 내부에 남아있는 수용액을 제거한 뒤에 측정된 질량이다. 이는 실험을 종료하고 5분여 동안 수용액이 충분히 빠져나간 뒤에 측정된 질량으로 아이스 슬러리 사이에 많은 양의 수용액이 머물고 있지 않음을 확인할 수 있었다.

그림에서 알 수 있듯이 수용액의 유량이 증가할수록 아이스 슬러리가 생성되는 양은 증가하였다. 하지만, 아이스 슬러리 내부에 위치하고 있던 수용액이 빠져나간 뒤 측정된 얼음 질량이 역전되는 현상으로 보아 유량변화에 따른 슬러리 생성량은 크게 차이가 없는 것으로 판단된다. 또한, 아이스 슬러리를 다량으로 생산하기 위하여 유량을 증가시키게 되면 외부 환경 영향에 의해 관폐색이 될 확률이 높아졌다.

3.3 농도 측정

생성되는 아이스 슬러리에 의해 변화하는 수용액의 농도를 측정하였다. 측정기구는 ATAGO사의 굴절식 농도계 BR-1E를 이용하였다. SCA와 EG를 첨가한 수용액이기 때문에 정확한 농도는 측정 불가능 하지만, 아이스 슬러리가 생산되는 양에 따른 농도를 측정하고자 하는 목적으로 실험하였다.

Table 1에 생산되는 슬러리 양에 따라 아이스 슬러리, 수용액의 농도를 측정하였다. 아이스 슬러리에겐 거의 동일한 농도가 측정되었고, 수용액

Table 1 Change of concentration in making the slurry

slurry Mass(kg) state	10	15	20	25	30
slurry(%)	5	5	5	5	5
soution(%)	5	5	5	5.5	6
ice(%)	·	·	·	·	2.5

에는 아이스슬러리가 25 kg 이상 생산되면서 약 간씩 농도가 짙어짐을 알 수 있었다. 또한, 실험을 종료하고 아이스슬러리에서 수분이 다 빠져나간 얼음 알갱이의 농도를 측정된 결과 일반 아이스슬러리의 절반에 해당하는 농도가 측정되었다.

이에 따라 어느 정도의 아이스슬러리를 생산할 때까지는 생성온도가 일정하게 유지되어 첨가제에 의한 온도 하강이 일어나지 않음을 알 수 있었다.

3.4 과냉도에 따른 영향

수용액의 유량을 변화 시킬 때, 수용액의 과냉도가 연속제빙에 미치는 영향에 대하여 실험을 하였다. 이때 수용액의 입·출구 온도는 수용액이 과냉각 해소가 이루어지고 아이스슬러리를 생산하기 시작할 때부터 실험이 종료한 시점까지 온도를 평균한 값이다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 수용액의 제빙 열교환기 입·출구 측 온도차가 연속제빙, 관폐색, 과냉각 상태에 큰 영향을 주었음을 알 수 있다. 열교환기 입·출구 측 온도차를 줄이는 방법으로는 유량만으로는 줄일 수 없어 열교환기 내부 브라인 온도를 조절하여 해결하였다. 이때, 흰색 바탕으로 된 점들은 -8.9°C 로 고정한 실험이고 검은 색 바탕으로 된 점들은 -7.0°C 로 고정한 실험이다.

점선으로 표시한 그래프는 위부터 차례로 과냉

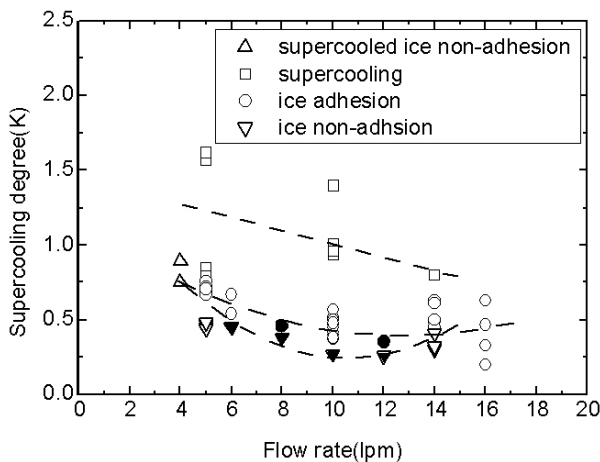


Fig. 7 Effect on solution flow rate of heat exchanger to supercooling degree. (filled: brine temp. -7°C , unfilled: brine temp. -9°C)

각 상태, 관폐색, 연속제빙 상태를 평균하여 나타낸 것이다. 과냉각 상태 선은 비록 유량이 작은 쪽에서 큰 편차를 갖지만 1차 함수 경향을 보이며 유량이 커질수록 제빙열교환기를 지나는 수용액의 온도차가 작아짐을 알 수 있다. 또한 관폐색 선과 연속제빙 선은 2차 함수형태로 나왔다. 관폐색이 일어나는 경향은 10 LPM과 12 LPM에서 최저를 이루었고, 특히 10 LPM에서는 폭넓은 분포에서 관폐색이 이루어졌다. 연속제빙선 또한 10 LPM에서 가장 작은 과냉도로 연속제빙이 이루어지고, 그보다 유량이 커지거나 작아질 경우 큰 과냉도에서 연속제빙이 이루어짐을 알 수 있다.

4 LPM에서 14 LPM까지 수용액의 유량이 일정할 때, 과냉도 차가 작을수록 빙부착 현상이 없는 연속제빙이 일어남을 알 수 있다. 또한 온도차가 커질수록 빙부착으로 인한 관폐색 현상이 일어나고 더 커지게 되면 과냉각 해소가 일어나지 않는 과냉각 상태로 유지됨을 알 수 있다. 특히, 4 LPM에서는 과냉각형 연속제빙이 이루어졌고, 16 LPM에서는 과냉도가 작음에도 불구하고 관폐색이 발생하였다.

4. 결론

본 연구에서는 기계적 구동부가 없는 동적 제빙방식으로부터 수용액 유량, 제빙열교환기 입구 측 온도 및 수용액 과냉도가 아이스슬러리 생성량, 제빙과정 동안의 농도 변화 및 아이스슬러리의 연속 생성에 미치는 영향을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수용액 유량이 증가할수록 과정 중에 증가하는 아이스슬러리 양에 반하여 최종적으로 큰 차이가 없었고, 오히려 유량이 증가할수록 관폐색의 위험이 커졌다.

(2) 수용액의 농도는 아이스슬러리가 일정질량 이상이 생산되기 전에는 약 5%로 거의 일정한 수준을 유지하였다.

(3) 유량이 비교적 작은 4 LPM의 경우, 과냉도가 비교적 큰 영역에서 연속제빙이 구현되었다.

(4) 유량이 12 LPM 이상인 경우, 수용액 측 과냉도가 낮아질수록 연속제빙이 쉽게 나타났으나, 16 LPM 경우 과냉도가 작은 경우에도 관폐

색이 나타났다.

(5) 수용액 유량이 일정할 때 과냉도가 작아질수록 연속제빙이 쉽게 나타났다.

(6) 연속제빙의 경우 과냉도는 유량 변화와 함께 아래로 볼록한 2차 곡선을 나타내며 유량이 약 10 LPM에서 최소의 과냉도 값을 보였다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 선도연구자 지원사업으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Song, K. -N., Lee, M. -H., and Kim, J. -H., 2004, Demand-side management and the distribution of thermal storage type cooling system, Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference, pp. 436-441.
2. Lim, H. M., and Pyo, S. H., 2004, Scraped-surface ice slurry generator, Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference, pp. 461-468.
3. Chibana K., Kang C., Okada M., Matsumoto K. and Kawagoe T., 2002, Continuous formation of slurry ice by cooling water-oil emulsion in a tube, Int. J. of Refrigeration, 25, 259-266.
4. Chung, D. -Y., Pack J. -H., Kang, C., Hong, H., 2004, Effect of functional groups on ice adhesion in aqueous solution cooling with stirring, Proceedings of the SAREK 2004 Winter Meeting, pp. 394-399.
5. Kang, C. Kang, Y. -T. and Hong, H., 2002, Adhesion of Ice slurry in a multi-component aqueous solution with stirring and cooling, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 12, pp. 1063-1070.
6. Baek, K. -M., Kang, C., Hong, H., 2004, Effect on operating conditions for cooling to continuous ice formation by using an aqueous solution, Proceedings of the SAREK 2004 Winter Meeting, pp. 39-44.