

냉각 운전 조건이 연속제빙에 미치는 영향

백 광 민, 홍 희 기*, 강 채 동†

경희대학교 대학원, *경희대학교 기계산업시스템공학부, † 전북대학교 기계항공시스템공학부

Effect on Operating Conditions for cooling to Continuous Ice Formation by Using an Aqueous Solution

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

Graduate School, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

*School of Mechanical and Industrial System Engineering, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

† Dept. of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

ABSTRACT: This study is to be found a proper condition of a way out of flow rate and control temperature of solution in ice slurry type about ice adhesion problem of dynamic system manufacturing ice slurry system with non-mechanical motion. An additive of solution consists of ethylene glycol(EG) 1 mass%, silane coupling agent(SCA) 3 mass% and water 96 mass%, and control temperature of brine is maintained at regular temperature through the basic test. The flow rate of solution establish each of 5, 10, 14 LPM and the control temperature of solution is tested at 0.5°C intervals from -1.0°C to -3.0°C considering to the density of additives. After supercooling is reduced, generating continuous ice formation for over an hour which is not produced ice adhesion is chosen the best stable condition.

Key words: Ice slurry(아이스슬러리), Ice adhesion(빙부착), Temperature control(온도제어), Flow rate(유량), Supercooling(과냉각)

기 호 설 명

<p>A : 제빙열교환기의 열전달 면적 [m²]</p> <p>C_p : 정압비열 [kJ/(kg · K)]</p> <p>L : 열교환기의 길이 [m]</p> <p>$mesh$: 1 inch 길이 안에 들어 있는 눈금 수</p> <p>\dot{m} : 질량유량[kg/s]</p> <p>Pr : Prandtl 수, ν/α</p> <p>Re : Reynolds 수, $\rho v D/\nu$</p>	<p>U : 총괄열전달계수 [W/(m² · K)]</p> <p>r_i : 관내경 [mm]</p> <p style="text-align: center;">그리스 문자</p> <p>ΔT : 열교환기 입출구 온도차 [°C]</p> <p>θ_m : 대수평균온도차[°C]</p> <p style="text-align: center;">그리스 문자</p>
---	--

† Corresponding author

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

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

b : 브라인
 c : 저온 측
 h : 고온 측
 i : 내부, 입구

- o : 외부, 출구
- s : 수용액

1. 서론

동적형 빙축열 시스템은 아이스슬러리 생성으로 인하여 열응답성이 빠르고 냉열에너지의 수송 능력이 있는 시스템으로 알려져 있다. 동적형 시스템 가운데 스크레퍼에 의한 빙회수 방식은 기계적 구동부가 있어 시스템이 복잡하여 동력비 증가 및 유지·보수에 어려움이 따른다. 또한, 동적형 시스템에서의 문제점인 제빙과정에서 돌발적 또는 지속적으로 발생하는 냉각면에서의 빙부착은 축열재료에 대해 유동성 및 열전달 저하를 가져오는 주된 요인으로 시스템 성능에 직접적으로 영향을 끼친다. 이는 아이스슬러리형 제빙방식에서 해결해야 할 가장 큰 문제로 슬러리 제빙도중 혹은 수송 중에 발생하는 빙부착 현상을 해결해야 한다.

수용액을 축열매체로 이용하는 비구동형 연속 제빙방식에서 빙부착을 억제하기 위하여 기름이 함유된 축열재를 이용한 사례가 있으나 환경적 및 경제성 측면에서 문제점을 안고 있다.^(1, 2) 본 연구팀은 batch형 냉각실험을 통하여 축열재에 함유된 첨가제의 종류, 냉각조건, 수용액의 조성 및 계면상태 등이 빙부착에 미치는 영향을 파악한 바 있다.^(3, 4)

본 연구에서는 기계적 구동부가 없는 아이스슬러리 시스템을 실험실 규모로 제작하고 첨가제

함유 수용액의 유량 및 열교환기 입구온도가 빙부착 현상에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 연속제빙장치 구성

아이스슬러리를 연속적으로 생산하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하였다. 연속제빙장치는 그림과 같이 실외에서 브라인을 냉각하는 냉동기, 브라인 저장 탱크, 브라인과 수용액이 열교환하는 제빙열교환탱크, 수용액 및 생산된 아이스슬러리를 저장하는 축열조와 그를 제어하는 제어기들로 구성되어 있다. 브라인은 반밀폐형 냉동기에서 0℃ 이하로 충분히 냉각되어 브라인 탱크와 제빙열교환탱크를 차례로 순환하고, 제빙열교환탱크 내부에 배치된 수용액 코일을 냉각시켜 수용액이 아이스슬러리가 되도록 한다. 수용액은 축열조와 제빙열교환탱크 내부에 위치한 열교환기를 통하여 순환한다.

브라인이 냉동기에서 냉각되어 직접 순환되면 온도 제어하기가 용이하지 않기 때문에 브라인 탱크를 냉동기와 제빙열교환탱크 사이에 위치시켜 온도제어가 가능하도록 하였다. 또한 제빙열교환탱크 내부에서 브라인 온도를 보다 정밀하게 제어하기 위하여 전력조절장치와 히터를 이용하였다. 전력조절장치는 제빙열교환탱크 내부 브라인 온도를 K-type 열전대를 이용하여 측정하고, 측정된 온도와 제어 온도 차이에 따라 3 kW 용

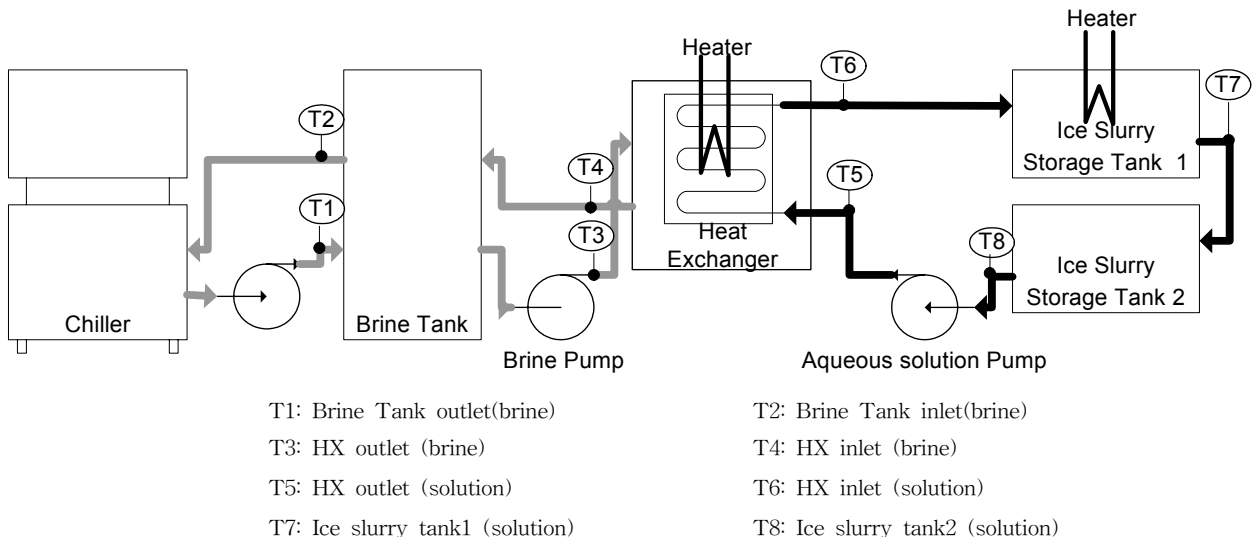


Fig. 1 Continuous ice slurry maker.

량의 히터에 흐르는 전류량을 조절하므로, 제빙 열교환기 내부의 브라인 온도를 제어할 수 있다.

수용액 축열조는 에틸렌글리콜(ethylene glycol, 이하EG) 1 mass%, 실란커플링제(silane coupling agent, 이하 SCA) 3 mass%, Water 96 mass% 로 이루어진 수용액 탱크와 수용액으로 만들어진 아이스슬러리를 저장하는 탱크로 나누어졌다. 축열조 내부에는 28 mesh 철망이 설치되어 있는데, 이는 슬러리가 철망에 의해 수용액과 분리되도록 하기 위한 것이다. 또한 전력조절장치에 연결된 히터가 수용액 온도를 제어하기 위해 설치되어 있다.

수용액이 펌프에 의해 제빙열교환탱크 내부의 튜브를 지나 브라인과 열교환되어 아이스슬러리가 되면, 슬러리는 중간에 걸리고 미처 슬러리로 변하지 못한 수용액은 밑으로 떨어지도록 하여 계속 제빙열교환탱크 내부의 튜브를 순환하도록 하였다.

배관의 각 입·출구는 K-type 열전대를 이용한 Agilent사의 34970A 데이터 로거를 통해 온도를 측정하였고, 측정 위치는 그림에 표시된 바와 같이 수용액과 브라인의 온도변화가 민감하게 이루어지는 곳을 선정하였다.

2.2 제빙열교환기 설계

제빙 열교환기 길이는 LMTD(logarithmic mean temperature difference)법에 의하여 정하였다. 열교환기에서 수용액 측 현열변화에 의한 열전달률은 관 표면을 지나 브라인으로 방출되는 열전달률과 같으며 이에 대한 에너지 보존식은 식(1)과 같다. 식(2)는 대수평균온도차(LMTD)이다.

$$\dot{m}C_p\Delta T = UA\Delta\theta_m \quad (1)$$

$$\theta_m = \frac{\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2}{\ln \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2}} \quad (2)$$

$\Delta\theta_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$ 이고, $\Delta\theta_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$ 이다.

열교환기의 수용액 측에서의 유량은 5, 10, 14 lpm로 하였다. 따라서 유동은 난류($Re=2650 \sim 6900$)로서 관 내측 대류열전달계수는 식(3)의

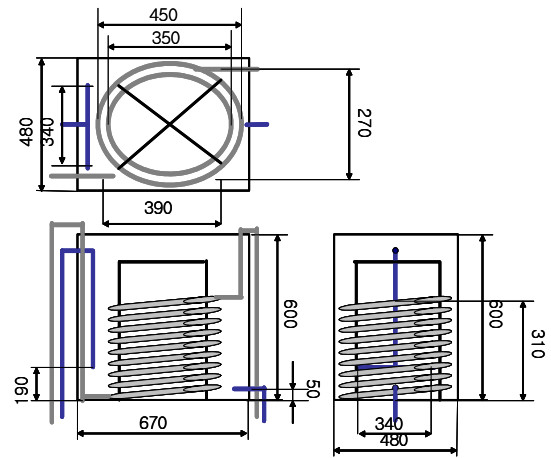


Fig. 2 Heat exchanger.

Dittus-Boelter식을 사용하여 계산하였고 따라서 식(4)로부터 총괄열전달계수를 산출하였다. 수용액 측 열교환관의 전체 길이는 식(1')에서 열교환관의 전체 열전달 면적을 산출한 다음, 식(5)을 이용하여 튜브의 길이를 계산할 수 있다.

$$A = \frac{\dot{m}C_p\Delta T}{U\Delta\theta_m} \quad (1')$$

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.3} \quad (3)$$

$$U = \frac{\dot{m}C_p\Delta T}{A\Delta\theta_m} \quad (4)$$

$$L = \frac{A}{2\pi r_i} \quad (5)$$

따라서 열교환기는 외경 20 mm, 두께 1.5 mm의 연질 PVC(열전도도: 0.16 W/m·K, 비열: 0.95 kJ/kg·K)의 튜브를 선정하였을 때, 위의 식으로부터 그 길이는 약 50 m가 되었다. 또한 수용액 코일이 들어갈 수 있도록 제빙열교환기의 몸체 측은 아크릴수지를 이용하여 육면체의 pool형태(가로×세로×높이=670 mm×80 mm×600 mm, 두께 10 mm)로 구성하였다. 따라서 열교환기는 Fig. 2와 같이 내측 권선지름을 350 mm로, 외측 권선지름을 450 mm로 하는 이중나선관(double spiral type)형태로 제작하였다. 코일은 재질이 연질 PVC로서 그림과 같이 동관 지지대에 의하여 지지하도록 하였다.

2.3 실험방법

Table 1 Experimentation condition

Flux(LPM)	5, 10, 14
Control temperature of solution(°C)	-1.0, -1.5, -2.0, -2.5, -3.0

본 연구에서는 빙부착 현상인 관폐색 문제를 해결하기 위하여 Table 1에서 분류한 바와 같이 실험을 하였다. 첫째, 수용액의 유량을 변화시켜 실험을 해야 한다. 유량 변화에 의한 수용액의 열전달률 변화가 연속제빙 및 관폐색에 미치는 영향을 살펴보기 위함이다. 둘째, 브라인 및 수용액의 냉각온도 제어가 필요하다. 열교환이 이루어지는 열교환기 내부의 브라인 온도와 과냉도를 줄이기 위한 수용액의 온도를 제어함으로써 관폐색 현상을 미연에 방지할 수 있다. 덧붙여 수용액의 조성 및 열교환기 재질 선택이 중요하다.

수용액의 조성은 알코올계로서 브라인으로 널리 사용되고 있는 EG와 첨가제로서 유기물과 무기물 그리고 물과 무기물 사이에 개재하여 빙부착을 억제하는 효과를 가지고 있는 SCA 등을 선행연구에^(3, 4) 따라 EG 1 mass%와 SCA 3 mass%로 하였다. 열교환기 재질은 앞에서 언급하였듯이 PVC 재질의 튜브를 사용한 열교환기를 제작하였다.

본 연구에서 열교환기 내부 브라인 온도 제어는 현행 연구의 기초실험을 통하여 -8.9°C의 일정온도로 제어하였고, 수용액의 유량은 5, 10, 14 LPM에 대하여 제빙열교환기 입구온도를 -1.0°C부터 -3.0°C까지 0.5°C 간격으로 실험을 하였다.

3. 실험결과

3.1 실험결과

제빙실험동안 제빙열교환기로 들어온 수용액은 동결점 이하 온도까지 냉각되어 과냉각 상태를 나타낸다. 본 실험에서는 실험 중 열교환기 출구 측 수용액 온도가 입구온도보다 낮은 상태로 20분 이상 지속할 경우 과냉각이 지배적인 경우로 간주하였다. 또한, 연속제빙 상태는 아이스슬러리 생산 시점으로부터 최소 60분 이상 관폐색 현상을 보이지 않은 경우라 하였다

연속제빙장치를 이용하여 실험을 한 결과를 과냉각을 해소한 뒤 연속제빙이 이루어지는 경우와

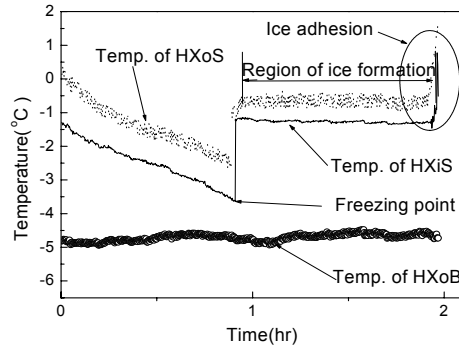


Fig. 3 Time history of temperature variation in heat exchanger. (ice adhesion case)

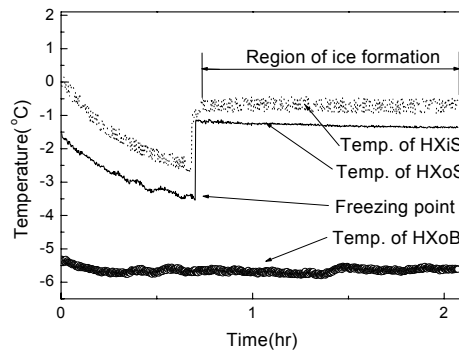


Fig. 4 Time history of temperature variation in heat exchanger. (ice non-adhesion case)

아이스슬러리 생산 중 빙부착이 일어나는 경우의 그래프를 나타내었다.

Fig. 3은 수용액 유량 10 LPM, 수용액 측 열교환기 입구온도 -2.5°C 실험으로부터 관폐색 상태를 보인 그래프이다. 수용액 온도가 -3.5°C일 때 과냉각이 해소되었고(과냉각 ΔT는 2.2°C), 제빙개시로부터 약 1시간 경과 후 관폐색 현상이 일어나 수용액 측 열교환기 입출구 온도가 급격하게 상승하였다.

Fig. 4는 유량 5 LPM, 수용액 측 열교환기 입구온도 -2.0°C의 실험으로, -3.5°C에서 과냉각 해소가 이루어져(ΔT= 2.3°C), 아이스슬러리를 생산한 이후 80여분이 지나도록 관폐색 현상이 일어나지 않는 등 연속제빙 상태를 유지하였다.

Fig. 4 및 5 모두 과냉각이 해소되고 슬러리

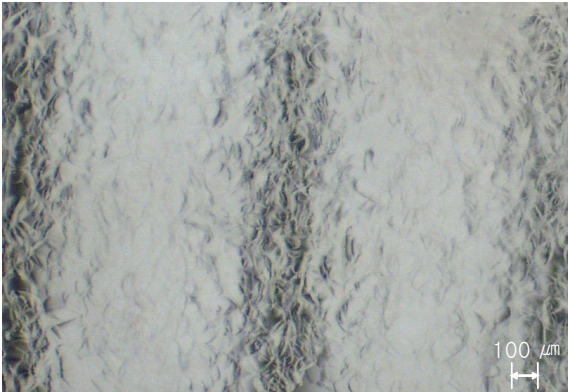


Fig. 5 Photograph of ice slurry.

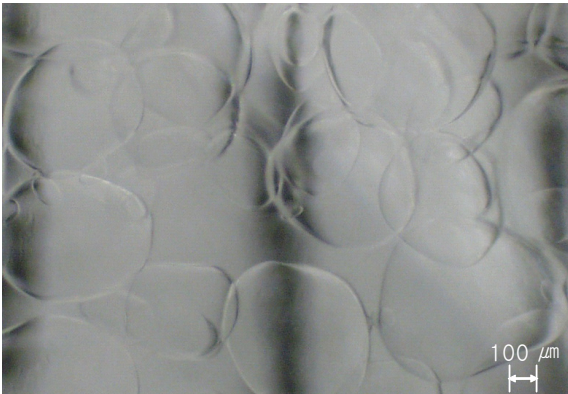


Fig. 6 Photograph of ice slurry.
(10 hours after experimentation)

가 생산되는 도중에는 열교환기 입출구에서 수용액의 온도가 동결점에 가까운 온도로 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

Fig. 5은 관폐색 현상이 일어난 실험 도중에 채취한 아이스슬러리를 CCD카메라로 촬영한 모습이다. 축열조에서 슬러리를 채취한 직후 촬영을 하였음에도 불구하고, 촬영 도중에도 슬러리 입자가 녹거나 미세한 입자들끼리 응집하는 등 평균 지름을 구하기가 어려웠다. 그러나 대체로 수십 마이크로미터의 미세한 슬러리임을 알 수 있다. Fig. 6 사진은 실험 종료 10시간 후 촬영한 사진이다. 입자가 크고 둥근 형상을 띄고 있음을 알 수 있는데, 이는 자연상태에서 빙 입자의 가장자리에서 SCA첨가제가 빙 성장을 방해하여 결정화가 완만해짐으로서 나타나는 경향으로 사료된다.

3.2 수용액 냉각온도 및 유량에 따른 영향

Fig. 7 그래프는 수용액 측 열교환기 입구온도에 따른 과냉도변화를 나타낸 것이다. 그림에서

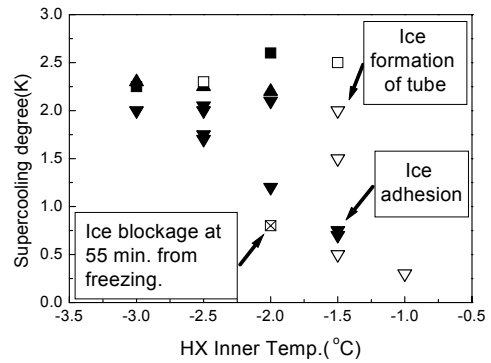


Fig. 7 Effect on solution inlet temperature of heat exchanger to supercooling degree.

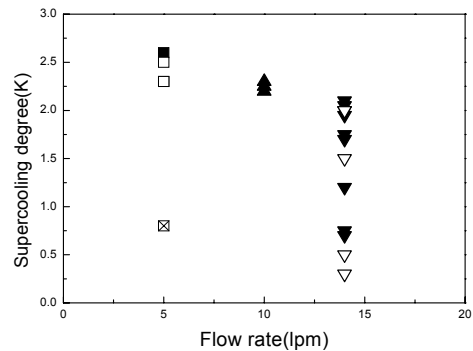


Fig. 8 Effect on solution flow rate of heat exchanger to supercooling degree.

수용액 입구온도가 낮을수록 과냉각 해소온도가 낮아지고, 수용액 과냉도에 관계없이 입구온도가 높을수록 연속제빙이 일어날 가능성이 큼을 알 수 있다. 한편, 유량 5 LPM, 수용액 입구온도 -1.5°C 의 실험에서는 제빙 시간이 55분이 경과하면서 빙부착이 되었다. 비록 관폐색은 일어났으나, 아이스슬러리 생산 시간이 60분을 지속한 것으로 미루어 비슷한 입구온도 및 유량조건에서 나타난 연속제빙 현상에 가깝다고 볼 수 있다.

Fig. 8은 수용액 유량 변화에 따른 과냉도 변화를 나타낸 그래프이다. 아이스슬러리가 생성되는 과냉각 해소온도는 각각의 유량에서도 차이가 있으나, 유량에 관계없이 과냉도가 작은 조건에서 연속적인 제빙이 많이 나타났다.

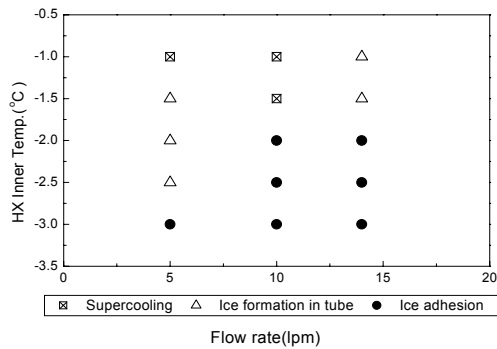


Fig. 9 Effect on temperature control and flow rate change on ice slurry product form.

Fig. 9은 유량 및 수용액 입구측 온도조건에 따른 관폐색 여부의 결과를 나타낸 것이다. 그림으로부터 유량이 5 LPM일 때 수용액의 열교환기 입구온도가 -1.5°C 부터 -2.5°C 까지의 실험과 유량 14 LPM 일 때 입구온도 -1.0°C , -1.5°C 의 실험에서 연속제빙을 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 기계적 구동부가 없는 동적 제빙방식으로부터 수용액 유량 및 제빙열교환기 입구측 온도가 아이스슬러리의 연속적 생성에 미치는 영향을 관찰하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 연속제빙 장치 제어조건에서 유량이 작고, 입구온도가 낮을 때, 60여분 이상 제빙이 되었다.

(2) 브라인을 -8.9°C 로 제어하여 유량 5 LPM에서 $-1.5^{\circ}\text{C} \sim -2.5^{\circ}\text{C}$ 일 때, 14 LPM에서 $-1.0^{\circ}\text{C} \sim -1.5^{\circ}\text{C}$ 일 때, 빙부착이 없는 연속제빙이 가능하였다. 또한 수용액 유량에 관계없이 제어 온도를 -3.0°C 이하로 제어할 경우 관폐색이 일

어났다.

(3) 빙결정 성장 할 때, 빙입자 가장자리에서 SCA 첨가제가 빙 성장을 방해하여 결정화가 완만해 졌다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지 기술 학술진흥사업(과제번호 2002-E-BD03-01-0-000) 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 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.
- Oda Y., Okada M., Nakagawa S., Matsumoto K. and Kawagoe T., 2004, Continuous ice formation in a tube by using water-oil emulsion for dynamic-type ice-making cold thermal energy storage, *Int. J. of Refrigeration*, 27, 252-259.
- Sohn, K., Kang, C. and Hong, H., 2001, Formation and adhesion of ice slurry by cooling water mixture with stirring, *Proceedings of the SAREK 2001 Winter Meeting*, pp. 612-616.
- 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.