

제빙관의 형태변화에 따른 제빙특성

정 은 호, 박 기 원^{**}

전남대학교 대학원, ^{*}전남대학교 냉동공조공학과

Ice Making Characteristics According to Changing Shape of Ice Making Tube

Eun-Ho Jung, Ki-Won Park^{**}

Graduate School, Chonnam National University, Yeosu, 550-749, Korea

^{*}Dep. of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Chonnam National University, Yeosu, 550-749, Korea

(Received December 22, 2008; revision received April 10, 2009)

ABSTRACT: Ice accumulating system patterned ice-on-coil is the way of refrigerating re-generative materials on the surface of copper-tube inserted into the inside of ice-storage. The study experimented to understand ice-on-coil type ice making characteristics according to changing shape of ice making tube. The experiment were carried out under various conditions, that used brine temperature(-10 °C, -6 °C), brine flow rate(1.0 m/s, 1.8 m/s) and inlet water temperature(6 °C, 12 °C) etc. Mass of ice per making area increased according to the decrease of the brine temperature and inlet water temperature, but that was increased according to the increase of the brine flow rate. And I set up two hypotheses and compared the capacity of ice-making of the two cases; each had the same thermal area and one had an round-shaped copper tube but the other had an oval-shaped copper tube.

Key words: Coil type ice maker(관형제빙기), Heat transfer coefficient(열전달계수) Ice-on-coil (관외착빙형), Mass of ice(제빙량), Oval tube(타원관), Round tube(원관)

기 호 설 명	
A	: 열교환 면적 [m^2]
c	: 비열 [$kJ/kg \cdot ^\circ C$]
d	: 관경 [m]
G	: 유량 [kg/h]
h	: 열전달계수 [$kW/m^2 \cdot ^\circ C$]
k	: 열전도율 [$kW/m \cdot ^\circ C$]
l	: 원둘레 [m]
q	: 열유속 [kW/m^2]
M	: 질량 [kg]
Q	: 열교환량 [kW]
t	: 온도 [$^\circ C$]

Δt	: 온도차 [$^\circ C$]
V	: 유속 [m/s]
Δz	: 시험부 길이 [m]

하첨자

b	: 브라인
c	: 동관
i	: 내측
ice	: 얼음
m	: 평균
o	: 외측
$tube$: 동관
r	: 원관
v	: 타원관
w	: 관벽
w	: 물

† Corresponding author

Tel.: +81-61-659-3274; fax: +82-61-659-3274

E-mail address: pkw@chonnam.ac.kr

1. 서 론

축열이라 함은 온도에 따라 저온에서 고온에 이르기까지의 넓은 온도범위가 있으며, 저장 방법으로 물을 비롯하여 여러 가지 물질들이 사용될 수 있다. 그 중 얼음을 이용한 빙축열은 고-액 간의 상변화를 동반하는 잠열축열이면서 다른 물질에 비해 저렴하고 안전하며 축열용량도 큰 우수한 축열이라 할 수 있다. 빙축열시스템 중 정적형 방식의 하나인 관외착빙형 빙축열시스템은 축열조 내에 코일을 설치하여 그 주위에는 물을 채우고, 코일의 내부에는 브라인 또는 냉매를 순환시켜 코일주위에 착빙시키고, 방냉시에는 축열조 내의 물 또는 브라인을 부하 측에 압송시키는 시스템으로 가장 많이 사용되고 있다.⁽¹⁾

이에 관한 기초연구로서 Min et al.⁽²⁾의 축냉코일의 배열에 따른 축냉모델에 관한 연구, Lee et al.⁽³⁾의 빙축열시스템에서 냉방부하를 담당하는 방법에 대한 연구와 Jang et al.⁽⁴⁾의 축냉운전시 냉매코일 주위의 제빙현상에 대한 연구가 있다. 또 관외착빙형 시스템에서의 운전특성에 관한 연구⁽⁵⁾도 있으며, 제빙물질에 관해 수용액에 계면활성제를 첨가한 제빙특성에 관한 연구⁽⁶⁾나 기능성 물질의 첨가에 의한 제빙현상에 관한 연구⁽⁷⁾ 등도 있고, 내부 과냉각액적으로부터의 빙-수 액막 성장에 대해 살펴본 연구⁽⁸⁾도 있다.

그러나 이러한 관외착빙형의 최대 결점은 전열면에 형성된 얼음층의 두께가 증대함에 따라 냉동기의 성적계수가 감소하는 것이었다.

본 연구에서는 관외착빙형에서 사용되는 제빙관의 능력을 향상시킬 수 있는 방안을 찾기 위한 방법의 일환으로 수행하였다. 즉, 제빙관의 제빙 능력에 영향을 미치는 것으로 파악되는 주요 파라미터인 냉각매체의 온도와 유량, 제빙대상인 축열조내 물의 온도 등에 따른 제빙능력을 파악하고자 한다. 그리고 유사한 전열면적을 가지면서 제빙관의 형태를 원형으로 한 경우와 타원형으로 한 경우의 제빙능력을 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 관외착빙형 제빙 실험장치

는 Fig. 1과 같으며, 장치는 크게 브라인(에틸렌 글리콜 30% 수용액)의 온도를 조절하는 항온조와 브라인 순환계, 그리고 시험구간으로 동관이 삽입된 아크릴 수조로 구성되어 있다.

본 연구에서 사용된 실험인자 및 범위를 Table 1에 정리하였다.

아크릴 수조 내로는 일정한 온도의 물이 공급된다. 실험제빙관이 삽입되는 탱크(축열조)의 한 면은 투명 아크릴판으로 마감하여 제빙기에서의 얼음형성과정을 확인할 수 있도록 하였으며, 생성되는 얼음의 두께를 알 수 있도록 아크릴판 외면 전면과 탱크 상부에 카메라를 설치하여 일정한 시간간격마다 촬영하여 제빙량을 확인하였다. 또 제빙관 출구측에는 유량계를 설치하여 순환되는 냉각브라인의 유량을 측정하고, 제빙관 입구와 출구, 탱크 입구와 출구, 동관 외표면의 원주방향으로 상·중·하 3개소씩과 길이방향으로 3개소에 T형 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 브라인 냉각탱크에서는 일정한 온도로 유지되는 브라인을 생성시켜 제빙관 내로 유동시킴으

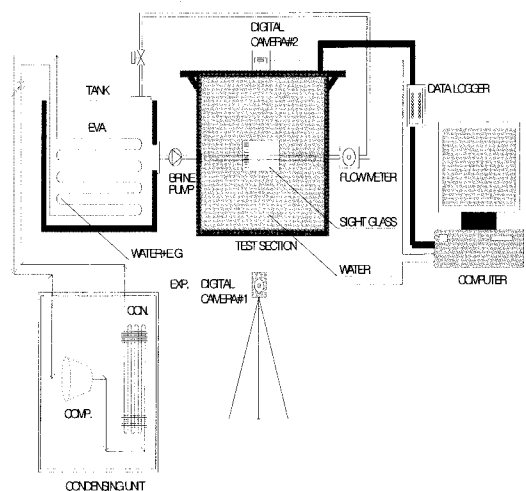


Fig. 1 Schematic diagram of ice making experimental apparatus.

Table 1 Experimental range

brine temperature [°C]		-10, -6
brine flow velocity [m/s]		1.0, 1.8
tube diameter [mm]	Round	9
	Oval	8.32
initial water temperature [°C]		6, 12

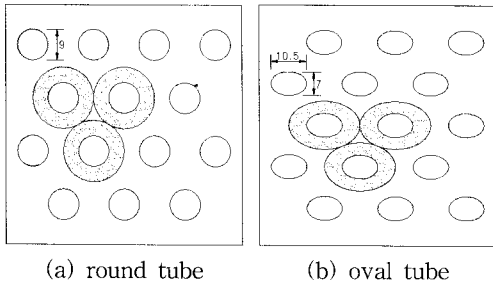


Fig. 2 Schematic arrangement diagram of ice making tube.

로써 제빙관 표면의 온도를 거의 일정하게 유지할 수 있도록 하여 제빙관 표면에서의 얼음생성 특성을 파악할 수 있도록 하였다.

시험부는 유효열교환 길이가 0.415 m인 구리관으로, 직경이 9 mm인 원형관 및 9 mm 원형관을 이용하여 제작한 타원관으로, 그 장경(長徑)이 수평(○)으로 설치되었다.

Fig. 2는 시험부로 사용한 원관 및 타원관을 실제 관외착빙형 빙축열 시스템의 축열조에 배치하였을 때의 예상 단면도를 나타낸 것이다. 타원관은 축비가 1.5(장축 10.5 mm, 단축 7 mm)가 되도록 제작하였으며, 동일한 크기의 탱크 내에서 관경과 동일한 비율로 제빙된다고 가정하여 배치할 경우 원관보다 타원관을 더 많이 배치할 수 있음을 알 수 있다.

실험방법으로는 먼저 항온조를 이용해 브라인을 일정한 온도로 냉각시킨 뒤 수조 내에 소정의 온도로 유지되는 물을 넣은 후 브라인의 유량을 일정한 상태로 조절하면서 수조 내의 물을 냉각시켜 동관 외표면에서 얼음을 생성시킨다.

이 때 시간에 따른 제빙량을 계측하였는데, 얼음의 성장이 상부와 하부에서 다르게 나타나므로 접사촬영기를 시험부 전면과 상부에 설치하여 얼음의 두께를 촬영하여 타원형의 면적을 구하는 식으로 제빙량을 계산하였다.

모든 측정은 각각 브라인의 온도, 유량 등이 일정하게 유지되는 상태에서 측정하였으며, 실험과정 및 결과에 대한 정보를 실시간 확인하면서 실험을 진행하였다.

2.2 실험결과 처리 방법

관의 상부와 하부에서 생성되는 얼음의 두께가

동일하지 않기 때문에 제빙량을 측정할 때 상부와 하부로 나누어 측정한다.⁽⁹⁾ 얼음은 중력방향으로 동관 아래쪽에서 많이 생성되므로 타원형의 모양이 된다. 따라서 단면적 상에서 가로측의 반지름을 a , 세로측의 반지름을 b 라고 할 때, 그 단면적을 식(1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$A = \pi \times a \times b \tag{1}$$

여기에 관의 단면적을 뺀 값에 시험부 길이를 곱하여 얼음만의 체적을 구한 후 얼음의 밀도 920 kg/m^3 을 곱하여 제빙량[kg]을 구하였다.

전열면적을 구하기 위해서는 타원관의 둘레를 알아야 하는데 식(2)를 이용하여 근사값을 구할 수 있다.

$$l_v \approx \pi \left[\frac{5}{4}(a+b) - \frac{ab}{a+b} \right] \tag{2}$$

외벽온도를 내벽온도로 환산하기 위해서는 타원관의 상당직경을 구해야 하는데 식(3)을 사용하여 $d_v = 8.32 \text{ mm}$ 로 적용하였다.

$$d_v \approx \frac{4ab}{\left[1.25(a+b) - \frac{ab}{a+b} \right]} \tag{3}$$

본 실험에서 코일에서의 전열량 Q_b 는 시험부 입구와 출구에서의 브라인 온도차와 유량계에 의한 유량으로부터 산출한 값에 브라인 비중 1.04 kg/m^3 을 적용하여 구한 G_b 와 식(4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$Q_b = G_b \cdot c_b \cdot \Delta t_b \tag{4}$$

열유속은 식(5)을 이용하여 전열량을 시험부 내 표면적으로 나누어 계산하였고, 열전달계수는 열유속을 관내 브라인의 평균온도와 관내벽면 평균온도의 차로 나누었으며, 이는 식(6)으로 나타내었다.

$$q = \frac{Q_b}{\pi d_i \Delta z} \tag{5}$$

$$h = \frac{q}{t_{bm} - t_{wm}} \tag{6}$$

여기서, t_{bm} 은 관내 브라인의 평균온도이고, t_{wm} 은 브라인과 접하고 있는 내벽면의 평균온도이다. 그러나 실제 측정된 것은 외벽면에서의 온도이기 때문에 정상상태 일 때 일차원 열전도 방정식이 성립한다고 가정하여 관 외벽에서 측정된 온도로부터 식(7)을 사용하여 관 내벽온도로 환산한 것이다.

$$t_{wi} = t_{wo} + \frac{Q_b}{2\pi k_c \Delta z} \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (7)$$

여기서 t_{wo} 는 실험을 통해 측정된 외벽 각 위치의 온도이고, d_o 와 d_i 는 동관의 외경과 내경이며, k_c 는 동관의 열전도율($\approx 0.4 \text{ kW/m} \cdot \text{C}$)이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 브라인 온도의 영향

Fig. 3은 브라인 온도가 -6 C , 브라인의 유속이 1.0 m/s 일 때 시험구간에서의 열전달계수를 나타낸 것으로, 얼음층이 형성되었을 때 관 내면에서의 전열이 제빙에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하기 위한 것이다. 열전달계수는 식(6)을 이용하여 산출하였으며 얼음의 생성과정에 따라 일정한 값으로 나타나지는 않지만 원관에 비해 타원관에서 다소 높게 나타났다. 이는 원관에서의 유동보다 타원관에서의 유동이 다소 난류화가 촉진되어 열전달계수가 증가하는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 원관과 타원관에서 제빙매체인 물의 초기온도가 6 C , 브라인 유속 1.0 m/s 의 조건에서 브라인의 온도가 -6 C 와 -10 C 일 때의 제빙량을 시험구간 외표면적(전열면적)으로 나누어 나타낸 것이다. 단위표면적당 제빙량은 브라인의 온도에 관계없이 원관에서 보다 타원관에서 많이 생성됐다. 특히 타원관은 원관에 비해 단면적이 약 9%, 표면적이 약 1.2% 적음에도 이런 현상이 나타나는 것은 원관에서 보다 타원관에서의 열전달계수가 높기 때문인 것으로 생각된다.

또, 운전을 시작한 지 100분이 경과한 후에는 타원관에서 브라인온도 -6 C 인 경우보다 -10 C 에서 열유속이 증가하여 단위표면적당 제빙량이 약 2.76배 많이 생성됐다. 그리고 브라인 온도가 -10 C 일 때 타원관은 원관에 비해 약 1.11배 많은

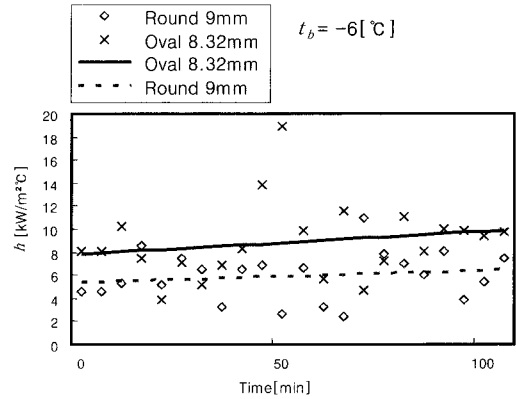


Fig. 3 Heat transfer coefficient according to coil type ($t_w = 6 \text{ C}$, $V_b = 1.0 \text{ m/s}$).

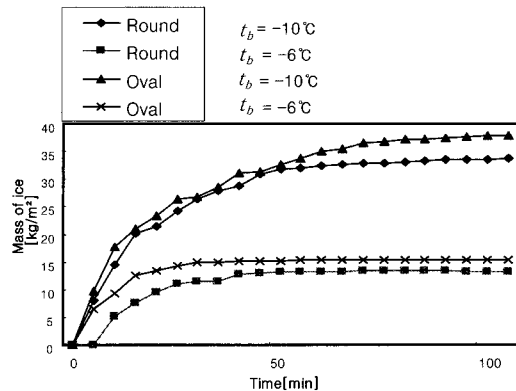


Fig. 4 Mass of ice according to brine temperature ($t_w = 6 \text{ C}$, $V_b = 1.0 \text{ m/s}$).

단위표면적당 제빙량을 나타냈다.

3.2 브라인 유속의 영향

Fig. 5는 원관과 타원관에서 축열매체인 물의 초기온도가 12 C , 브라인 온도가 -10 C 일 때, 브라인 유속을 1.0 m/s 로 하여 시험구간에서의 열전달율을 나타낸 것이다. 전체적으로 타원관이 원관에 비해 열전달계수가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 타원관에서의 유동이 원관에서의 유동보다 난류축진이 일어남과 동시에 관 상하부의 폭이 원관보다 좁기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 6는 제빙매체인 물의 초기온도가 12 C , 브라인온도가 -10 C 일 때 브라인의 유속이 1.0 m/s 일 때와 1.8 m/s 일 때를 비교하여 나타낸 것이다. 전체적으로 큰 차이는 아니지만 관내를 유동하는

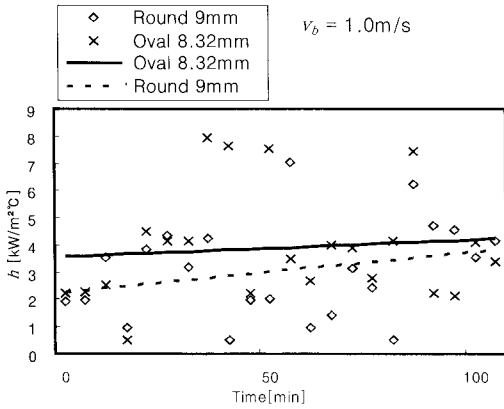


Fig. 5 Heat transfer coefficient according to brine flow rate ($t_w = 12^\circ\text{C}$, $t_b = -10^\circ\text{C}$).

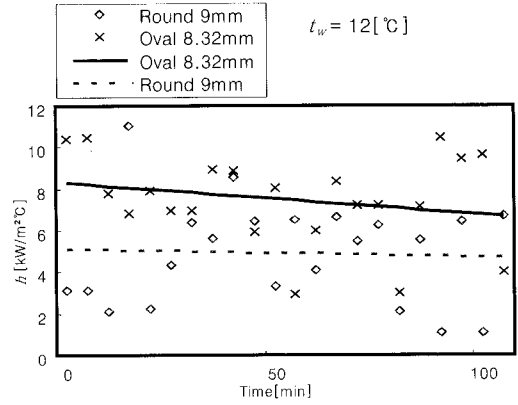


Fig. 7 Heat transfer coefficient according to initial water temperature ($t_b = -6^\circ\text{C}$, $V_b = 1.8\text{m/s}$).

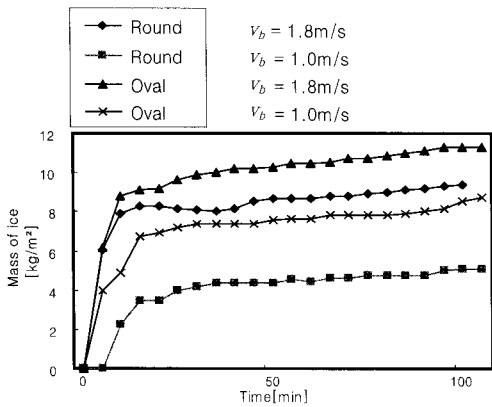


Fig. 6 Mass of ice according to brine flow rate ($t_w = 12^\circ\text{C}$, $t_b = -10^\circ\text{C}$).

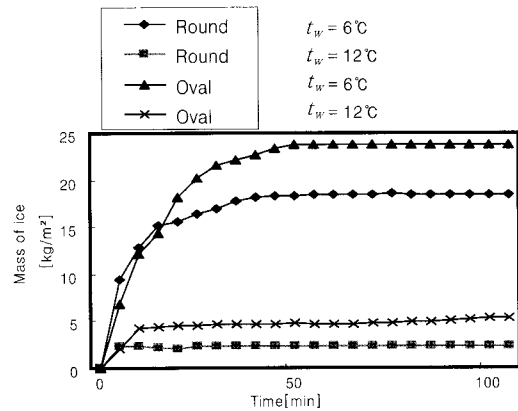


Fig. 8 Mass of ice according to initial water temperature ($t_b = -6^\circ\text{C}$, $V_b = 1.8\text{m/s}$).

브라인의 유속이 빠를수록 열유속이 증가하여 제빙량이 증가하고 있음을 알 수 있다.

그리고 원형관의 경우 브라인 유속 1.8m/s일 때가 1.0m/s일 때에 비해 약 1.18배 많은 단위표면적당 제빙량을 나타냈으며, 브라인 유속 1.8m/s일 때 타원관은 원관에 비해 약 1.2배 많은 단위표면적당 제빙량은 나타냈다. 이는 브라인 온도변화에 따른 제빙량의 차이보다 원관과 타원관의 제빙량의 차이가 더 큼을 알 수 있다.

3.3 제빙매체 온도의 영향

Fig. 7은 원관과 타원관에서 브라인 온도가 -6°C , 브라인 유속이 1.8m/s일 때, 제빙매체인 물의 온도를 12°C 로 하여 시험구간에서의 열전달율을 나

타낸 것이다. 전체적으로 관내 유동의 난류화가 촉진되어 타원관이 원관에 비해 열전달계수가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 3 및 Fig. 5에서 원관 및 타원관 시간경과에 따라 열전달 계수가 증가하고 있는 반면 Fig. 7에서는 시간경과에 따라 열전달 계수가 감소하고 있는데, 본 실험에서 사용한 열전달계수는 관내면과 관내 브라인 사이의 열전달계수이므로 제빙량과 열전달계수의 경향이 다를 수가 있다.

Fig. 8은 브라인 온도 -6°C , 브라인 유속 1.8m/s로 하였을 때 제빙매체인 물의 초기온도를 6°C 와 12°C 로 구분하여 원형관과 타원관을 비교하여 나타낸 것이다. 물의 온도가 6°C 인 경우는 12°C 인 경우에 비하여 온도경계층이 얇기 때문에

제빙이 빨리 진행되고 열전달이 커서 많은 제빙 차이를 나타내고 있다. 운전초기에 원관에서의 제빙량이 타원관에서의 제빙량보다 더 많은데 유속, 브라인온도, 제빙매체온도의 복합적인 영향으로 인해 초기에는 정확한 패턴을 나타내지 않는 것으로 보여진다.

그리고 제빙매체인 물의 초기온도가 6℃인 경우에는 약 15분 까지 제빙이 진행되다가 이 후부터 얼음생성이 늦고, 얼음의 열저항으로 인해 표면 경막상의 열전달이 상호 균형을 이뤄 해빙량과 제빙량이 거의 같아져 제빙량이 일정하게 유지되는 것으로 생각된다. 또 원형관의 경우 운전 시작 후 100분 뒤에는 물의 초기온도 12℃에 비해 6℃에서 약 4.44배 많은 단위 표면적당 제빙량을 나타냈다. 타원관의 경우에는 운전시작 후 100분 뒤에는 물의 초기온도가 12℃에 비해 6℃에서 약 4.8배 많은 단위 표면적당 제빙량을 나타냈다. 물의 초기온도가 6℃일때 타원관은 원관에 비해 1.22배 많은 단위표면적당 제빙량을 나타냈다.

4. 결 론

본 연구에서는 제빙관의 형태를 원관과 타원관으로 하고, 각종 인자들이 제빙량에 미치는 영향에 대해 실험적으로 살펴 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 타원관은 원관에 비해 단면적이 약 9% 작고, 외표면적은 약 1.2% 작지만 열전달계수가 증가하였다.

(2) 관내를 유동하는 브라인의 유속이 빠를수록 열전달계수가 증가하여 제빙량도 증가하였다.

(3) 제빙매체인 물의 초기온도가 낮을수록 온도 경계층이 얇아져 제빙량이 증가하였다.

(4) 타원형 제빙관은 원형 제빙관에 비해 약 11~28% 제빙량이 증가하였다.

(5) 운전시작 후 약 30~40분 정도까지 급격히 제빙이 진행되다가 이후부터는 제빙량이 상승곡선이 완만하거나 일정하게 유지되는 열평형 상태를 나타내었다.

후 기

이 논문은 2007년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 결과의 일부이며 이에 감사

드립니다.

참고문헌

1. Park, K. W., Park, J. M., Jung, S. C. and Lee, H., 2005, Recent Domestic Research Trend on Ice Thermal Storage and Various Thermal Storage, Proceedings of the SAREK summer annual conference, pp. 303-208.
2. Min, J. K., Yoo, A. G., Kim, J. H. and Kim, S., 1993, A study on real time model of transfer process in an ice-on-coil tank, Proceedings of the SAREK winter annual conference, pp. 40-46.
3. Lee, S. R., Lee, K. H. and Choi, B. Y., 2000, Laboratory test of optimal control algorithm for ice storage system, Proceedings of the SAREK winter annual conference, pp. 446-450.
4. Jang, Y. K., Heo, C. K. and Kim, S., 2002, An experimental study on the ice making characteristics of an ice-on-coil type ice storage system, Proceedings of the SAREK summer annual conference, pp. 84-88.
5. Ahn, Y. H., Kang, B. H., Kim, S. and Lee, D. Y., 2005, The operation characteristics and cost analysis of an ice thermal storage system, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 156-164.
6. Park, K. W., Inaba, H. and Horibe, A., 2001, Study on ice making behavior of water solution with surfactant, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 12, pp. 1175-1183.
7. Seung, H., Peck, J. H., Hong, H. and Kang, C., 2003, Effects of Functional Materials Adding on Adhesion of Ice Surry, Proceedings of the SAREK winter annual conference, pp. 501-506.
8. Myers, T. G. and Hammond, D. W., 1999, Ice and water film growth from incoming super-cooled droplets, Heat and Mass Transfer, Vol. 42, pp. 2233-2242.
9. Kim, M. J., 2008, A study on the ice-on-coil as a static ice making type, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, pp. 292-298.