

정적제빙형인 관외 제빙에 관한 연구

김명준[†]

(원고접수일 : 2008년 2월 4일, 심사완료일 : 2008년 3월 6일)

A Study on the Ice-on-coil as a Static Ice Making Type

Myoung-Jun Kim[†]

Abstract : This study was experimentally investigated to understand the ice making characteristics of ice on a coil type ice maker. The experiment was carried out under the following conditions which are the brine temperatures of $-10(^{\circ}\text{C})$, $-8(^{\circ}\text{C})$, $-6(^{\circ}\text{C})$, brine flow velocities of $1.0(\text{m/s})$, $1.4(\text{m/s})$, $1.8(\text{m/s})$ and initial water temperatures of $6(^{\circ}\text{C})$, $9(^{\circ}\text{C})$, $12(^{\circ}\text{C})$, etc. The acquired conclusions shows: 1) Ice making amount is increased with decreasing in the temperature of brine. 2) Total ice making amount shows higher value in larger size coil. However, the ice making amount per heat transfer area is increased in smaller one. 3) The ice making amount is increased with decreasing in the initial water temperature. 4) It is cleared that the overturn of natural convection existed in this experimental result.

Key words : Ice-on-coil type ice maker(관형 제빙기), Ice making amount(제빙량), Heat transfer area(전열면적), Apparent ice making amount(겉보기 제빙량)

기호설명

A	: 단면적 [m^2]	T_w	: 수조 내 물의 초기온도 [$^{\circ}\text{C}$]
A_{ice}	: 얼음의 단면적 [m^2]	T_b	: 브라인의 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
A_{tube}	: 동관의 단면적 [m^2]	u_b	: 브라인의 유속 [m/s]
D_I	: 동관의 내경 [mm]	Re	: Reynolds 수 [-]
D_o	: 동관의 외경 [mm]	V_{ice}	: 얼음의 체적 [m^3]
L_{tube}	: 동관의 길이 [mm]	μ_e	: 에칠렌글리콜의 점도 [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$]
M_{ice}	: 얼음의 겉보기 질량 [kg]	μ_w	: 물의 점도 [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$]
$Mass_{ice}$: 제빙된 얼음의 질량 [kg]	ρ_e	: 에칠렌글리콜의 밀도 [kg/m^3]
\dot{M}_{ice}	: 단위면적당 제빙량 [kg/m^2]	ρ_w	: 물의 밀도 [kg/m^3]
		ρ_{ice}	: 얼음의 밀도 [kg/m^3]

[†] 교신저자(군산대학교 동력기계시스템공학전공), E-mail: mjkim@kunsan.ac.kr, Tel:063-469-1849

1. 서 론

최근 들어 우리나라의 에너지 소비가 급격히 상승하고 있으며, 전력의 소모 역시 매년 증가하고 있다. 또한 유가의 폭등 등으로 인한 에너지 수급에 관한 불확실성 및 환경오염에 대한 우려가 사회 전반에 걸쳐 널리 퍼져 있다. 이러한 국내외적인 문제들을 해결하기 위한 하나의 방안으로 심야의 잉여 전력을 이용하여 축열하는 노력이 실시되고 있고, 많은 연구가 이루어지고 있다.^{[1]~[5]}

우리나라의 경우 여름철 일일 전기에너지 소비패턴을 살펴보면 아침 8시부터 오후 6시 사이에 집중되어 있어, 발전설비의 운용이 비효율적으로 이루어지고 있다.

한국전력공사에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 심야전기제도를 도입하여 심야시간인 저녁 10시부터 익일 아침 8시까지의 전기료를 1/4정도인 26.9원/kWh로 낮추어 공급하는 등 전력수요의 평준화를 꾀하고 있다. 또한 주간의 냉방부하를 감소시키기 위한 축열시스템의 구축에 대한 도입을 긍정적으로 검토하고 있는 실정이다. 그리고 지가폭등에 따른 토지·건축공간의 유효이용을 목적으로 공조산업분야를 중심으로 예전의 물을 주체로 한 냉수축열(현열축열) 외에 축열용량이 큰 빙축열(잠열축열)에 관한 수요가 증가하고 있다.^[6] 이러한 것은 냉동기술이 진보되면서 더욱 빠른 속도로 발전되고 있다.

현재 가동 중이거나 계획 중인 빙축열시스템 가운데 제빙방법을 중심으로 나누면 열교환기 전열면에 얼음을 고착시켜 저장하는 정적(static)제빙방식이 대부분을 차지하고 있다.^[7]

제빙에 관한 종래의 연구를 살펴보면, 축냉코일의 배열에 따른 축냉모델에 관한 연구^[8], 빙축열시스템에서 냉방부하를 담당하는 방법에 대한 연구^[9]와 축냉운전시 냉매코일 주위의 제빙현상을 다룬 연구가 있다.^[10] 또 관외착빙형시스템에서의 운전특성에 관한 연구^[11]도 있으며, 제빙물질에 관해 수용액에 계면활성제를 첨가한 제빙특성에 관한 연구^[12]나 기능성 물질의 첨가에 의한 제빙현상에 관한 연구^[13] 등도 있고, 내부 과냉각액적으로부터 빙수

액막 성장에 대해 살펴본 연구^[14]도 있다.

본 연구는 이러한 배경에 힘입어 야간의 잉여 전력을 이용한 빙축열시스템을 구축하기 위한 기초 실험으로 관외착빙형 제빙기의 동결현상에 영향을 미치는 각 인자에 대한 실험을 수행한 것이다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타내고 있다.

장치는 크게 브라인(에틸렌글리콜 수용액 30(vol.%) , 융점 -13(°C))의 온도를 조절하는 항온조, 동관을 냉각시키기 위한 브라인순환계, 동결이 진행되는 동안 수조 안의 동결층과 수용액층의 온도분포를 측정하기 위한 온도계측부 및 물의 동결현상을 촬영하기 위한 가시화부로 구성되어 있다.

브라인의 유동은 폐회로로 구성되어 있으며 시험구간은 수평의 동관이 삽입된 아크릴수조로 구성되어 있다.

실험은 항온조를 이용하여 브라인을 일정한 온도로 냉각시키고, 축열매체인 물을 수조 내에 공급하여 일정한 온도로 유지 시킨 후, 브라인을 펌프 및 밸브를 이용하여 유량을 조절하면서 순환시킨다.

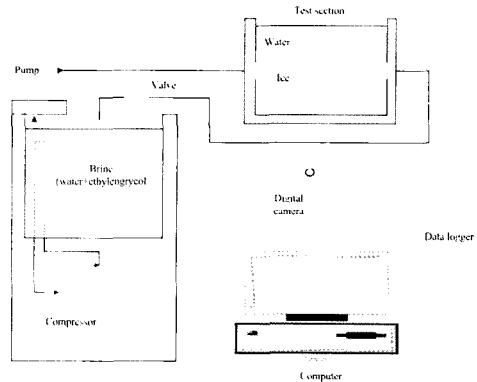


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

본 연구에서 사용된 실험인자 및 범위를 Table 1에 정리하였다. 주된 파라미터는 브라인의 온도, 브라인의 유속, 동관의 크기, 수조 내 물의 초기온도로 구성되어 있다.

Table 1 Experimental range

brine temperature, T_b [°C]		-10, -8, -6
brine flow velocity, u_b [m/s]		1.0, 1.4, 1.8
tube size	O.D., D_o [mm]	9.0, 16.0, 22.0
	I.D., D_i [mm]	7.0, 14.0, 20.0
	length, L_{tube} [mm]	180
initial water temperature, T_w [°C]		6, 9, 12

동관의 외표면에 생성되는 얼음은 눈금자와 버니어캘리퍼스로 측정함과 동시에 일정한 시간간격을 두고 디지털 카메라로 얼음의 제빙량을 촬영하였다. 그리고 열전대를 수조 내에 2[mm]간격으로 설치하여 수조 내 물의 온도와 얼음의 온도변화를 측정하였다.

3. 동결거동 및 결보기 제빙량

본 실험과 같은 관의착빙(ice-on-coil)형인 동관 외표면에 생성되는 얼음의 제빙량은 전체적으로 관의 전 길이에 걸쳐 비교적 균등하게 얼음이 형성되지만, 관의 입구부 및 출구부에서는 외부와의 열전달에 의해 제빙이 거의 일어나지 않는다(Fig. 2 Non freezing region참조). 그리고 관의 상부 및 하부에 생성되는 얼음의 두께가 시간에 따라 변하기 때문에 다음과 같은 과정을 걸쳐 시간에 따른 전체적인 제빙량을 산출하였다.

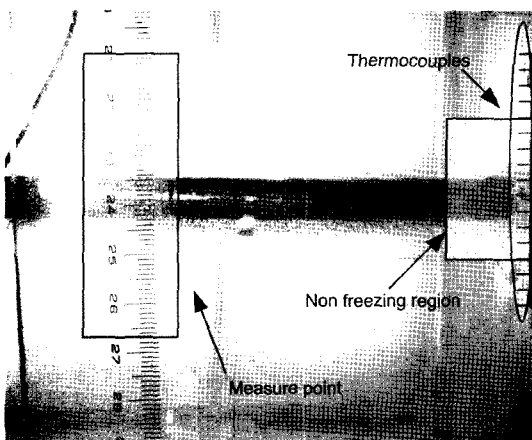


Fig. 2 Photo of freezing process

1. 일정한 시간간격마다 얼음의 두께를 상부 및 하부로 나누어 측정한다.
2. 얼음의 성장이 상부 및 하부에 따라 다르기 때문에 타원형의 면적을 구하는 식으로 얼음의 단면적 A_{ice} 를 먼저 계산하고, 여기서 관의 단면적 A_{tube} 를 뺀 값에 관의 길이 L_{tube} 를 곱하여 얼음만의 체적 V_{ice} 을 구한다. 이 때 얼음의 단면적 A_{ice} 는 얼음의 형태를 Fig. 3과 같이 타원형으로 가정하여 계산하였다.

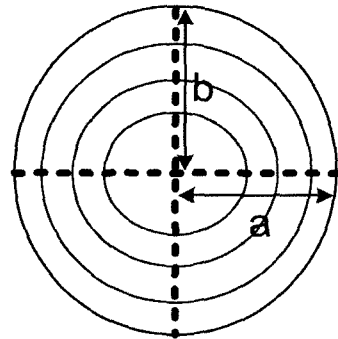


Fig. 3 Considered cross section of ice

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

$$V_{ice} = (A_{ice} - A_{tube}) \times L_{tube} \tag{2}$$

3. 구해진 얼음의 체적 V_{ice} 에 이미 알려진 0[°C]의 얼음의 밀도 $\rho_{ice} = 920 [kg/m^3]$ 를 곱하여 구해진 얼음의 결보기 질량 M_{ice} 를 구한다.

Table 2 Measured ice thickness with time

Time(min)	a	b
5	0 [mm]	0 [mm]
45	6 [mm]	4 [mm]
85	9 [mm]	6 [mm]
125	10 [mm]	9 [mm]
165	11 [mm]	13 [mm]
200	11 [mm]	15 [mm]
Experimental condition	D_o : 9[mm] T_w : 12[°C] T_b : -8[°C] u_b : 1.8[m/s]	

$$M_{ice} = V_{ice} \times \rho_{ice} \quad (3)$$

- 얼음의 형상을 촬영한 사진을 이용하여 동관의 입구 및 출구부의 무제빙영역의 비율(평균적으로 5%정도)을 산출한다.
- 제빙영역의 비율을 위의 식 (3)에서 구한 얼음의 겉보기 질량에 곱하여 실제빙량 $Mass_{ice}$ [kg]으로 한다.

Table 2는 눈금자와 버니어캘리퍼스를 사용하여 동관주위에 생성된 얼음의 두께를 측정된 결과의 한 예를 보여주고 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 브라인 온도에 따른 영향

Fig. 4는 브라인 온도를 $-6[^\circ\text{C}]$, $-8[^\circ\text{C}]$, $-10[^\circ\text{C}]$ 로 하였을 때 시간에 따라 생성되는 얼음의 제빙량을 5분 간격으로 측정된 결과를 나타내고 있다. 실험조건은 물의 초기온도를 $12[^\circ\text{C}]$, 브라인의 유속을 $1.8[\text{m/s}]$ 로 한 것이다.

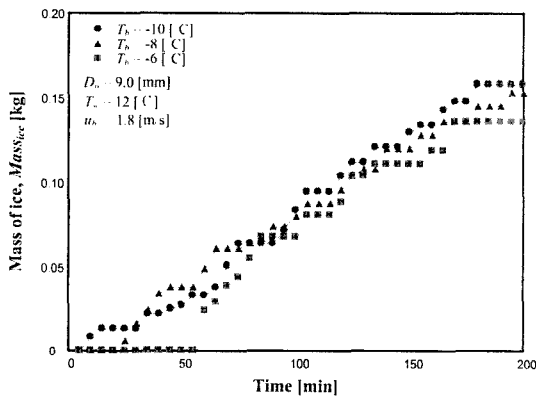


Fig. 4 Effect of brine temperature

Fig. 4로부터 알 수 있는 바와 같이 관내를 유동하는 브라인의 온도가 낮을수록 열유속이 증가하여 제빙량도 증가하고 있지만, 브라인의 온도가 $-6[^\circ\text{C}]$, $-8[^\circ\text{C}]$ 인 경우 제빙속도가 다소 느리게 나타나고 있다. 그 이유는 $-6[^\circ\text{C}]$ 와 $-8[^\circ\text{C}]$ 인 경우는 $-10[^\circ\text{C}]$ 와 비교해 열유속이 작아지기 때문에 동관

외표면의 온도가 융점인 $0[^\circ\text{C}]$ 이하에 다다른 시간이 소요되어 얼음의 생성이 늦어지고 있음을 알 수 있다.

본 실험을 통해 얻어진 특이한 현상으로 거의 모든 실험에서 제빙량이 계단식으로 증가하고 있었다. 이러한 원인 중 하나로는 제빙량을 측정할 때 눈금자와 버니어캘리퍼스로 측정하였기 때문에 육안 측정에 의한 약간의 오차를 고려할 수 있으며, 또 다른 원인으로는 실험에 사용하는 항온조(브라인 냉각용)의 운전주기에 의한 영향으로 사료된다.

그리고 시간이 경과함에 따라 동관 주위에 형성된 얼음으로 인해 열저항이 증가하게 되지만, 본 실험의 범위 내에서는 이러한 현상이 나타나지 않았다. 하지만 많은 시간을 두고 실험을 계속하면 열저항 증가에 의한 영향이 나타날 것으로 예상되나 본 실험은 산업적으로 사용되고 있는 관외제빙기의 모델을 이용해 실험한 것이기 때문에 실험시간을 그다지 길게 하지 않았다.

4.2 브라인 유속에 따른 영향

Fig. 5는 관외착빙형 제빙관(동관)내를 유동하는 브라인의 유속을 $1.0[\text{m/s}]$, $1.4[\text{m/s}]$, $1.8[\text{m/s}]$ 로 하였을 때 시간에 따라 생성되는 얼음의 제빙량을 5분 간격으로 측정된 그래프를 나타내고 있다.

실험조건은 물의 초기온도를 $12[^\circ\text{C}]$ 로 하고, 브라인의 온도를 $-10[^\circ\text{C}]$, 그리고 동관의 외경을 $9[\text{mm}]$ 로 한 경우이다.

Fig. 5로부터 알 수 있는 바와 같이 거의 모든 실험조건에서 브라인의 유속이 가장 빠른 $1.8[\text{m/s}]$ 에서는 비교적 제빙량이 많지만, 전반적으로는 유속에 의한 영향이 그다지 크지 않음을 확인할 수 있다. 그 원인을 파악하기 위해 각 유속에서의 Reynolds 수(Re)를 다음과 같은 비례식을 이용해 산출해 본 결과, 실험 범위내의 유속은 모두 층류영역에 존재함을 알 수 있었다.

$$Re = \frac{(\rho_e \cdot 0.3 + \rho_w \cdot 0.7) \cdot u_b \cdot D}{\mu_e \cdot 0.3 + \mu_w \cdot 0.7} \quad (4)$$

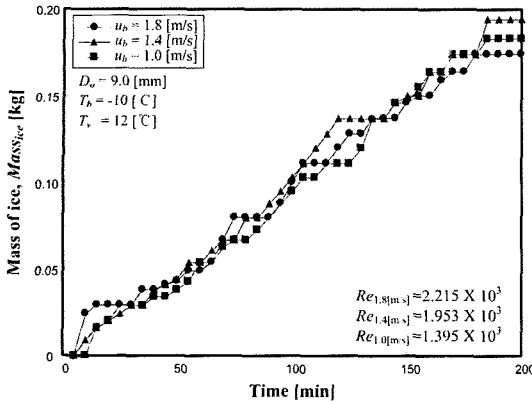


Fig. 5 Effect of brine velocity

여기서 비례상수인 0.3과 0.7은 물을 혼합한 수용액의 체적비율이 3:7이기 때문에 얻어지는 상수이다.

이와 같이 각 유속에서의 Re 수가 모두 층류영역에 해당된다는 것으로부터 강제대류의 양상이 변하지 않기 때문에 전술한 바와 같이 유속에 대한 영향이 그다지 크게 나타나지 않음을 알 수 있다(Fig. 6 참조).

4.3 제빙관 사이즈에 따른 영향

Fig. 6은 전열면적의 영향을 살펴보기 위해 제빙관의 외경을 9[mm], 16[mm] 그리고 22[mm]로 하였을 때의 시간에 따른 제빙량의 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

실험조건은 물의 초기온도를 9[°C], 브라인의 유속을 1.8[m/s], 그리고 브라인 온도를 -10[°C]로 한 경우이다.

Fig. 6으로부터 알 수 있는 바와 같이 동관의 직경이 증가할수록 제빙량이 많아지고 있음을 알 수 있다.

다시말해 동관의 직경이 증가할수록 전열면적이 증가하여 열전달이 향상되기 때문으로 판단된다. 하지만 y2축으로 나타낸 단위면적당 제빙량의 경우는 세관($D_o=9$ [mm])에서 가장 큰 값이 됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 일반적인 세관에서의 열전달이 상승하는 효과인데, 관경이 작아질수록 경계층의 성장이 억제되어 관내의 열전달이 향상되기 때문이다.

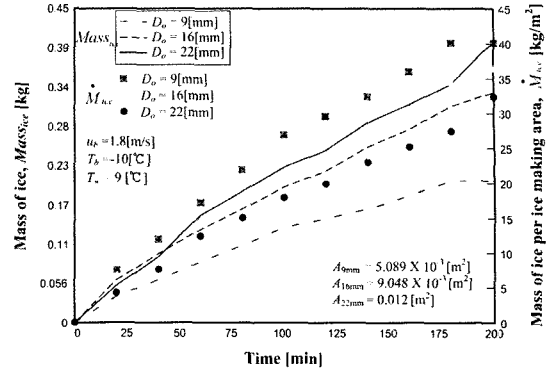


Fig. 6 Effect of heat transfer area

4.4 축열매체 온도에 따른 영향

Fig. 7은 축열매체인 물의 초기 온도를 6[°C], 9[°C], 12[°C]로 하였을 때 시간에 따라 생성되는 얼음의 제빙량을 5분 간격으로 측정된 결과를 나타낸 그래프이다.

실험조건은 브라인의 온도를 -10[°C]로 하고, 브라인의 유속을 1.8[m/s], 그리고 동관의 외경을 9[mm]로 한 경우이다.

Fig. 7로부터 알 수 있는 바와 같이 초기의 수조 내 물의 초기온도가 낮을수록 제빙량이 증가함을 알 수 있다. 즉, 동관과 수조사이에 존재하는 온도경계층은 수조 안의 온도가 낮을수록 얇아지기 때문에 물의 초기온도가 낮을수록 열전달이 향상되어 얼음의 제빙량이 증가하는 결과를 보이고 있다.

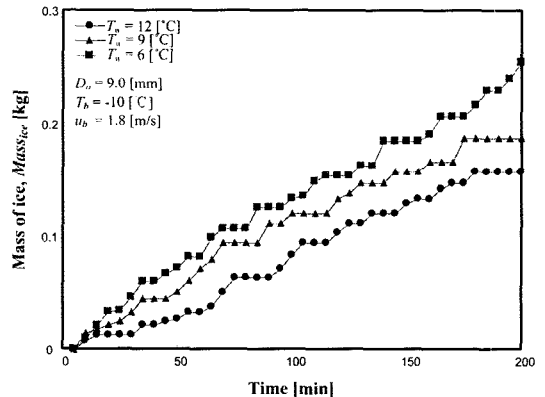


Fig. 7 Effect of initial water temperature

4.5 수조 내 온도변화

Fig. 8은 시간에 따른 각 위치에서의 온도분포를 나타 내었다. 그래프의 x축은 동관을 중심으로 수직방향으로 부착한 열전대의 위치를 나타낸 것이고, y축은 각 위치에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 이 그래프로부터 알 수 있는 바와 같이 시간이 지남에 따라 수조 내부의 온도가 전체적으로 하강하고 있음을 알 수 있다. 특히 동관보다 아랫부분($27 \leq x \leq 43$)에서는 초기에 자연대류가 활발히 일어나고 있음을 알 수 있다. 그리고 시간이 경과됨에 따라 자연대류가 이동하여 상부영역($0 \leq x \leq 18$)에서도 급격한 폭으로 온도가 내려가고 있음을 알 수 있다.

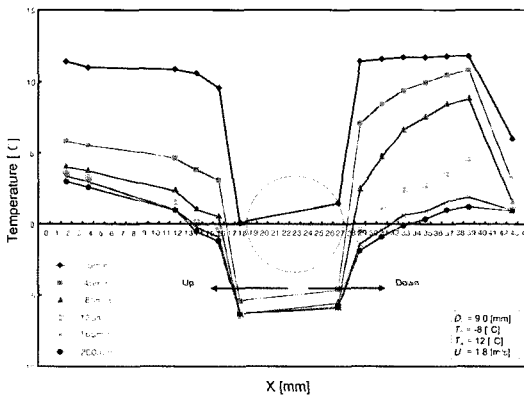


Fig. 8 Temperature change with time

Fig. 8 내 중심에 있는 원은 동관을 표현한 것이며 온도가 0[°C]보다 낮은 영역은 제빙영역을 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구는 정적제빙형인 관외제빙기에 대한 기초 자료를 제공하기 위한 목적으로 관외제빙에 영향을 미치는 인자인 브라인 온도, 초기 물의 온도, 동관의 크기, 브라인의 유속 등에 대한 실험을 통해 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 관내를 유동하는 브라인의 온도가 낮을수록 축열매체인 물과의 온도차에 의한 열유속이 증가하

여 제빙량이 상승하였다.

(2) 실제 생성되는 제빙량은 동관의 환경이 커질수록 많았지만, 단위면적당 제빙량은 동관의 환경이 작을수록 단위면적당 제빙량은 증가 하였다.

(3) 제빙매체인 물의 초기온도가 낮을수록 동관 주위에 존재하는 온도경계층이 얇아져 열전달이 촉진되어 제빙량이 증가함을 알았다.

(4) 동관 중심으로 상부 및 하부영역의 자연대류에 의한 영향으로 수조 내 물의 온도 변화폭이 달라짐을 알았다.

후 기

이 논문은 2008년 군산대학교 수산과학연구소 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] Inaba, H., Kim, M. J. and Horibe, A., 2002. Heat Transfer Characteristics of Latent Microcapsule-Water Mixed Slurry Flowing in a Pipe with Constant Wall Heat Flux(Numerical Analysis), Transactions of the JSME, Vol. 68, No. 665.

[2] Inaba, H., Horibe, A., Tsukamoto, H. and Kim, M. J., 2000. Heat Storage Characteristics of Latent Microcapsules Using Hot Air Bubbles by Direct Contact Heat Exchange, Transactions of the JSME, Vol. 66, No.645.

[3] Inaba, H., Kim, M. J., Horibe, A., 2002. Melting Heat Transfer Characteristics of Latent Heat Microcapsule-Water Mixed Slurry Flowing in a Pipe with Constant Wall Heat Flux(Experimental Study), Transact of the JSME, Vol.19 No.1 pp.13-22.

- [4] Kim, M. J., Park, K. W., 2006, Heat Transfer Characteristics of Micro-encapsulated Phase-change-Material Slurry, Journal of the SAREK, Vol.18, No.6, pp.518-526
- [5] Kim, M. J., Lim, J. K., Choe, S. Y., 2004, A Study on Thermo-Physical of Microencapsulated Phase Change Material Slurry, Journal of the KOSME, Vol.28, No.6, pp.962~971.
- [6] Yu, J. S., Park, J. M., Kim, M. J., Park, K. W., Ice Making Characteristics on Ice-on-coil Type Ice Maker, ISMT 2007 Proceedings, pp.225-230
- [7] Kang, C., Peck, J.H., Park, K.W. and Hong, H., 2003, Trends in supply of ice thermal storage system, Proceedings of the SAREK summer annual conference, pp.1-6.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Seung, H., Peck, J.H., Hong, H. and Kang, C., 2003, Effects of Functional Materials Adding on Adhesion of Ice Slurry, Proceedings of the SAREK winter annual conference, pp.501-506
- [14] Myers, T.G. and Hammond, D.W., 1999, Ice and water film growth from incoming supercooled droplets, Heat & Mass Transfer, Vol.42, pp.2233-2242

저 자 소 개



김명준(金明俊)

1971년 3월 18일, 1994년 한국해양대학교 해사대학 기관공학과 졸업(공학사), 1998년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(공학석사), 2002년 일본 오카야마대학 대학원 자연과학연구과 졸업(공학박사), 2002년~2003년 일본 오카야마대학 기계공학부 외국인 객원연구원, 2003.9~현재 군산대학교 해양과학대학 동력기계시스템 공학부 조교수.