

사각형 용기내 물의 하부면 냉각에 의한 동결거동에 관한 연구

김 명 준[†]

(원고접수일 : 2008년 12월 17일, 원고수정일 : 2009년 1월 8일, 심사완료일 : 2009년 5월 9일)

Water Freezing Behavior in a Rectangular Vessel Cooled from Below Direction

Myoung-Jun Kim[†]

Abstract : This study has dealt with the ice making characteristics in a rectangular vessel cooled from below direction with experiment and numerical analysis. The experiment and numerical analysis were carried out under the following conditions which are the cooling wall temperatures of $-5[^\circ\text{C}]$, $-10[^\circ\text{C}]$, and $-15[^\circ\text{C}]$. The temperature profile of non-frozen layer was calculated by numerical analysis as the form of non-dimensional temperature. From this study, it is cleared that the existence of natural convection is clearly known. And also the non-dimensional freezing amount was derived from experimental result. This correlation equation will give a useful information to the designers of ice making system.

Key words : Water freezing behavior(물의 냉각 거동), Rectangular vessel(사각형 용기), Numerical analysis(수치해석), Non-dimensional freezing amount(무차원 동결량)

기호설명

A : 계수 [-]

D : 계수 [-]

E : 동쪽의 격자점 [-]

Fo : Fourier 수 [-]

g : 중력가속도 [m/s^2]

Gr : Grashof 수 [-]

H : 수조 깊이 [mm]

i : x방향 index [-]

j : y방향 index [-]

N : 북쪽의 격자점 [-]

p : 압력 [Pa]

P : 격자점위치 [-]

Pr : Prandtl 수 [-]

Ra : Rayleigh 수 [-]

R_f : 무차원 동결량 [-]

S : 남쪽의 격자점 [-]

T : 온도 [$^\circ\text{C}$]

T_0 : 수조내 물의 초기 온도 [$^\circ\text{C}$]

T_f : 물의 동결온도 [$^\circ\text{C}$]

T_w : 냉각벽면의 온도 [$^\circ\text{C}$]

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

- u : x 방향 속도 [m/s]
- U : x방향 무차원 속도 [-]
- v : y 방향 속도 [m/s]
- V : y방향 무차원 속도 [-]
- W : 서쪽의 격자점 [-]
- X : x 방향 무차원 거리 [-]
- Y : y 방향 무차원 거리 [-]
- Z : 와도 [-]

그리스어

- θ : 무차원온도 [-]
- θ_w : 무차원 냉각면 온도 [-]
- a : 온도확산율 [m^2/s]
- β : 체적팽창계수 [$1/K$]
- ψ : 유동함수 [-]
- ξ : 와도함수 [-]

1. 서 론

유체의 상변화를 이용하는 연구가 최근에 들어 축열분야에서 크게 각광을 받고 있으며, 전열공학의 일부분으로 자리매김하고 있다^{[1]~[3]}. 이러한 상변화를 이용하는 가장 큰 장점은 바로 축열밀도를 높일 수 있다는 것으로 공조설비 중 저장조의 크기를 축소시킬 수 있게 되며 최종적으로는 에너지 효율을 높일 수 있게 된다^[4].

우리나라의 경우도 에너지 소비가 매년 증가하고 있는 추세에 있어 이러한 연구는 매우 바람직한 연구라고 할 수 있다. 빙축열에 대한 연구는 국내에서 이미 수년전부터 활발히 연구가 진행되고 있고^{[5]~[7]}, 일본의 경우 파라핀계 물질을 사용하여 적용온도 범위를 능동적으로 제어할 수 있는 연구가 수행되고 있다^{[8]~[11]}.

본 연구의 목적은 사각용기내 하부면에서 냉각이 일어나는 경우에 대한 물의 동결거동에 관한 실험 및 수치해석을 통해 일반화된 무차원정리식을 도출하여 정적제빙형 제빙장치를 설계함에 있어 유용한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

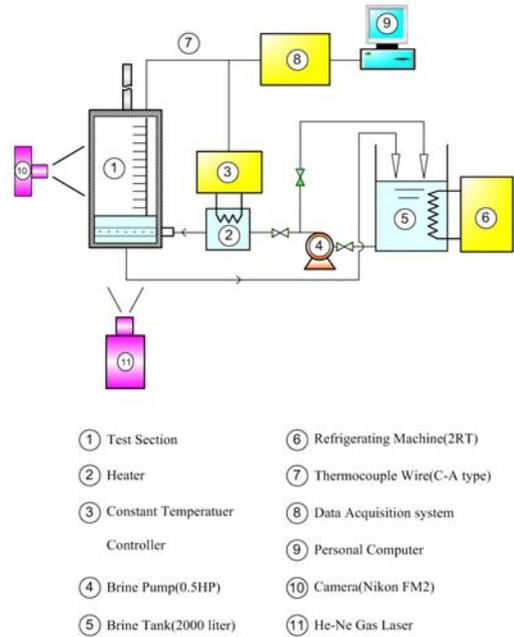


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 계통도를 나타내고 있다. 실험장치는 크게 투명 아크릴 판 및 유리관으로 제작된 시험부(150×100×230[mm])와 하부면 냉각을 위한 브라인(30 [wt%] 에틸렌글리콜수용액)순환계 그리고 수조내 온도를 측정하기 위한 온도측정부 및 가시화를 위한 부분으로 구성되어 있다.

동결이 진행되는 직사각형 용기의 하부면은 등온 냉각 조건을 구성하기 위해 열전도도가 높은 동판(두께 2mm)으로 구성되어 있고, 용기의 내부에는 얼음의 온도 및 미동결층인 물의 온도를 측정하기 위한 열전대가 수직상방향으로 일정한 간격을 유지하며 42개 설치되어 있다. 또한 하부면 냉각에 의한 동결이 진행됨에 따라 증가하는 체적량을 보상하기 위하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 내경($\phi = 10$ [mm]) 및 높이 620[mm]의 아크릴 관을 부착하였다.

실험방법으로는 먼저 냉동기를 가동하여 냉각수인 에틸렌글리콜수용액의 온도를 소정의 온도까지

냉각시킨 후 펌프 및 바이패스밸브를 통해 유량을 일정히 조절하여 시험부의 아래부분에 위치한 냉각수 분출부로 유동시킨다. 또한 시험부인 사각형 용기내에 정지 상태로 있는 물의 초기온도는 5℃로 유지시킨다. 실험이 진행됨에 따라 성장하는 빙층의 형상 및 두께, 동결량 그리고 미동결층의 온도 분포는 5분 간격으로 측정하였고 실험의 종료시간은 빙의 성장이 30분 이상 일정한 상태를 유지했을 때를 실험의 종료시간(대략 13시간)으로 간주하였다. 시험부 외면에는 외부와의 열전달을 차단하기 위해 단열재(두께 50mm)를 설치하였다.

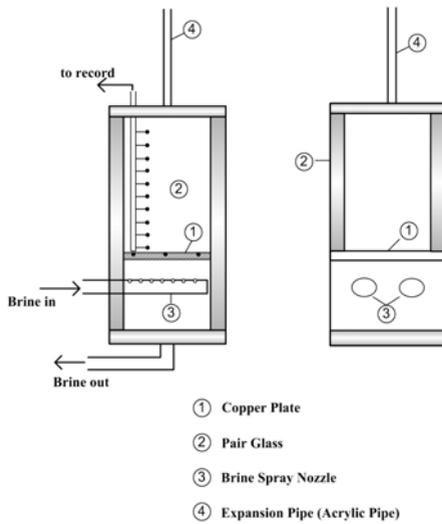


Fig. 2 Details of test section

본 실험의 정도를 파악할 수 있는 온도의 측정은 열전대로부터 들어오는 정보로 파악할 수 있으며, 본 실험에 사용된 열전대는 표준(절대)온도계를 이용하여 충분히 보정하였다. 따라서 충분한 정도를 가지고 있다고 판단되며, 데이터로거의 측정오차를 감안할 때 약 95%정도의 정확도를 가지고 있다고 할 수 있다.

제빙량의 산정은 시험부 상부에 설치된 팽창봉을 통해 팽창된 물의 양으로부터 역산하여 제빙량을 산정하였다. 즉, 팽창봉(내경 10mm, 높이 620mm)내의 팽창한 물의 눈금을 매 측정시간에 측정하여 물의 체적 팽창량을 산출하여 제빙량으로 간주하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 제빙량 및 제빙율의 시간에 대한 변화

Fig. 3은 냉각면의 온도를 -15℃로 유지하면서 물의 동결거동을 살펴본 실험 결과를 시간에 대해서 나타낸 것이다. Fig. 3으로부터 알 수 있는 바와 같이 시간이 경과함에 따라 제빙량도 증가하고 있음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 3으로부터는 제빙량에 대한 시간변화율을 파악하기에 곤란한 점이 있어, 실험장치부분에서 설명한 제빙에 따른 체적 팽창량을 측정하여 산정한 제빙율로부터 시간에 따른 제빙율은 Fig. 4와 같이 시간의 증가에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 열전달

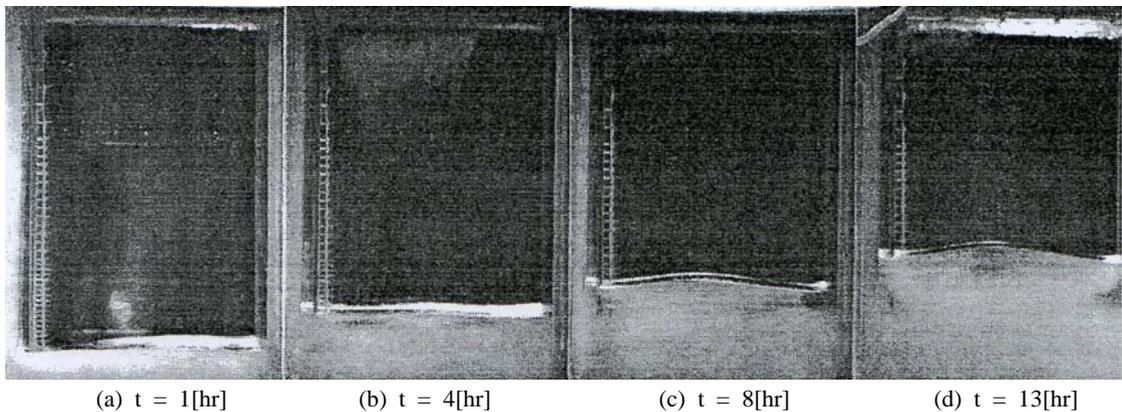


Fig. 3 Freezing behavior of water with time ($T_w = -15[^\circ\text{C}]$)

의 기본적인 현상으로 시간이 경과함에 따라 사각 용기내의 물의 온도가 내려가 냉각면인 하부면으로부터의 열유속이 감소하기 때문이며, 또한 시간의 경과와 함께 성장한 제빙층이 열전달의 저항으로 작용하기 때문에 동결시작부분에서 가장 제빙율이 높고 시간의 경과와 함께 제빙율이 감소하고 있다.

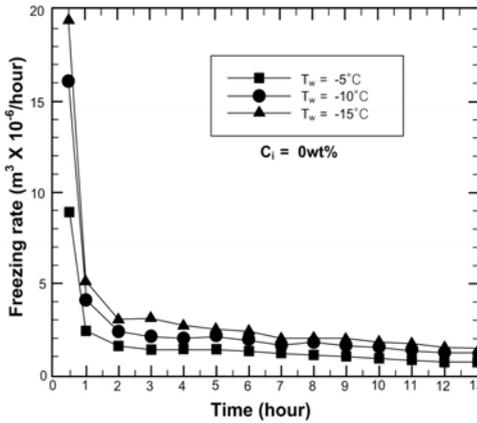
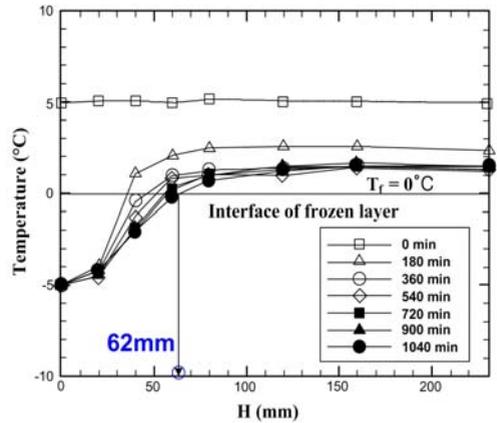


Fig. 4 Freezing rate

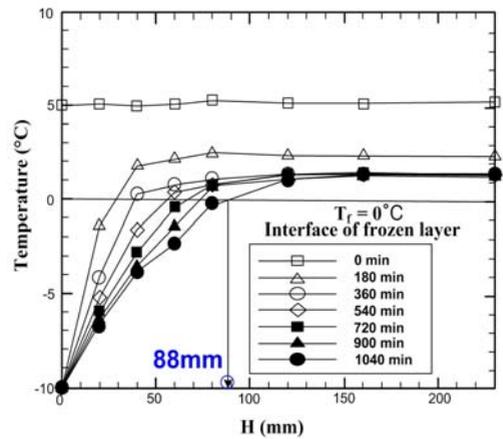
3.2 냉각면 온도에 대한 영향

Fig. 5에 나타낸 바와 같이 냉각면의 온도가 낮을수록 사각형 용기내 동결층이 같은 시간대와 비교해 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유는 전술한 바와 같이 냉각면의 온도가 낮을수록 미동결층인 물과의 온도차로 인해 물로부터 냉각면으로의 열유속이 증가하여 냉각면의 온도가 낮을수록 제빙량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 제빙이 완료된 얼음층의 경우도 열전도에 의한 열이동의 결과로 냉각면의 온도가 낮을수록 얼음의 온도 역시 낮게 나타나고 있으며 동결층의 위치를 나타내고 있는 수평실선(Interface of frozen layer)과 만나는 교차점도 냉각면의 온도가 낮을수록 $H(62\text{mm} \rightarrow 88\text{mm} \rightarrow 145\text{mm})$ 가 증가하고 있음을 알 수 있다.

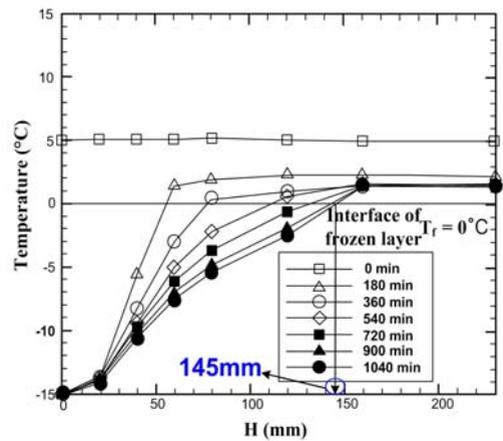
동결이 진행됨에 따른 수조내 미동결층인 물의 온도도 시간의 경과와 함께 하강하게 되고 물이 가진 가장 큰 특징인 온도에 따른 밀도의 변화에 의



(a) $T_w = -5[^\circ\text{C}]$



(b) $T_w = -10[^\circ\text{C}]$



(c) $T_w = -15[^\circ\text{C}]$

Fig. 5 Frozen layer and temperature distribution

해 미동결층내에서 자연대류가 발생하여 실험의 시작점인 0[min]일때의 온도(5°C)가 실험이 완료되는 시점에는 대략 1°C 근방까지 하강하게 된다. 즉, 물은 온도가 4°C 근방에서 최대 밀도점이 존재하기 때문에 실험시작 후 3시간인 180[min] 사이에 밀도역전이 존재하게 되어 큰 폭으로 물의 온도가 내려감을 알 수 있다. 그 후에는 미동결층내 온도분포에 따른 밀도가 안정되어 전도에 의한 열이동으로 시간이 경과하여도 큰 폭의 온도하강은 보이지 않고 있다.

3.3 미동결층에 대한 수치해석

본 연구에서는 전술한 미동결층에 대한 자연대류의 존재를 파악하기 위하여 유한차분법을 이용한 수치해석을 수행하였다. 엄밀한 수치해석을 위해서는 경계층이 이동하는 경계조건 및 동결에 대한 수치해석이 포함되어야 하지만, 계산의 복잡함을 해소하기 위해 얼음의 성장에 따른 경계층의 이동에 해당하는 부분은 고려하지 않았다. 또한 본 수치해석의 목적은 미동결층내의 자연대류를 규명하는 것이기 때문에 상술한 바와 같이 얼음층의 성장에 따른 부분은 수치해석에서 배제하였다.

수치해석에 사용된 주된 지배미분방정식 및 차분방정식은 수식(1)~(11)에 나타내었다.

• 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

• 에너지방정식

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

• 운동방정식(x, y 방향)

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_0)$$

• 와도함수

$$Z = - \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial Y} \right) \right] \quad (4)$$

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, \quad V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}, \quad Z = \frac{\partial V}{\partial X} - \frac{\partial U}{\partial Y} \quad (5)$$

• 와도수송방정식

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(Z \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \right) - \frac{\partial}{\partial Y} \left(Z \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right) = \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial Z}{\partial Y} \right) + Gr \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (6)$$

• 에너지식

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\theta \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \right) - \frac{\partial}{\partial Y} \left(\theta \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right) = \frac{1}{Pr} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right] \quad (7)$$

• 무차원량과 무차원수

$$\left\{ \begin{aligned} X &= \frac{x}{b}, \quad Y = \frac{y}{b}, \quad U = \frac{ub}{v}, \quad V = \frac{vb}{v} \\ \theta &= \frac{T - T_0}{T_0 - T_w}, \quad Gr = \frac{g\beta(T_h - T_c)b^3}{\nu^2} \\ Pr &= \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k}, \quad Ra = GrPr \\ \Psi &= \frac{\Psi}{v}, \quad Z = \frac{\zeta}{b^2}, \quad \theta_w = \frac{T_f - T_w}{T_0 - T_f} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\Psi_{i,j} = \frac{1}{4} (Z_{i,j} \Delta X^2 + \Psi_{i+1,j} + \Psi_{i-1,j} + \Psi_{i,j+1} + \Psi_{i,j-1}) \quad (9)$$

$$Z_{i,j} = \frac{1}{A_E + A_W + A_N + A_S + 4} \left[\begin{aligned} &(1 + A_E)Z_{i+1,j} + \\ &(1 + A_W)Z_{i-1,j} + \\ &(1 + A_N)Z_{i,j+1} + \\ &(1 + A_S)Z_{i,j-1} + \\ &\frac{1}{2} Gr \Delta X \\ &(\theta_{i+1,j} - \theta_{i-1,j}) \end{aligned} \right]$$

$$\theta_{i,j} = \frac{1}{A_E + A_W + A_N + A_S + \frac{4}{Pr}} \left[\begin{aligned} &\left(\frac{1}{Pr} + A_E \right) \theta_{i+1,j} \\ &+ \left(\frac{1}{Pr} + A_W \right) \theta_{i-1,j} \\ &+ \left(\frac{1}{Pr} + A_N \right) \theta_{i,j+1} \\ &+ \left(\frac{1}{Pr} + A_S \right) \theta_{i,j-1} \end{aligned} \right]$$

$$\left\{ \begin{aligned} A_E &= \frac{1}{8} (D_E + |D_E|) \\ A_W &= \frac{1}{8} (D_W + |D_W|) \\ A_N &= \frac{1}{8} (D_N + |D_N|) \\ A_S &= \frac{1}{8} (D_S + |D_S|) \end{aligned} \right. \quad (10)$$

$$\begin{cases}
 D_E = -\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i+1,j+1} + \Psi_{i+1,j-1} + \Psi_{i,j-1} \\
 D_W = \Psi_{i-1,j+1} + \Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j-1} - \Psi_{i-1,j-1} \\
 D_N = \Psi_{i+1,j+1} + \Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j+1} - \Psi_{i-1,j} \\
 D_S = -\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i+1,j-1} + \Psi_{i-1,j} + \Psi_{i-1,j-1}
 \end{cases} \quad (11)$$

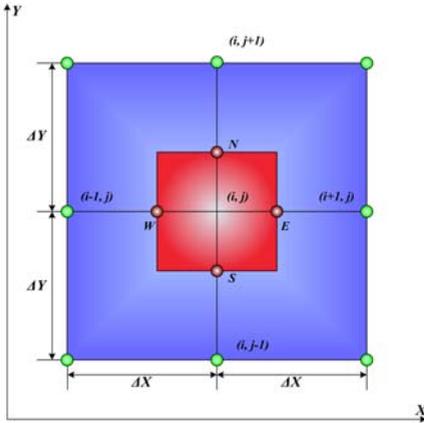


Fig. 6 Difference lattice

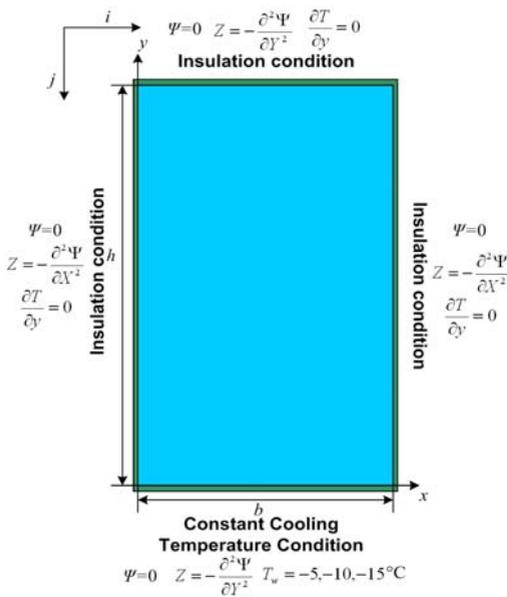


Fig. 7 Boundary conditions

상기의 지배미분방정식과 무차원수들로 유도된 와도수송방정식 및 에너지식을 이용하여 이산화한 물리량의 수렴조건은 주된 물리량인 ψ 및 θ 의 변화 한도를 10^{-4} 으로 하였다.

차분에 관한 각 격자점에 대해서는 Fig. 6에 나타내었으며, Fig. 7은 계산에 적용한 경계조건들을 나타낸 것이다.

상기의 차분식 및 계수들을 이용하여 계산된 무차원온도 및 유동함수의 해를 Fig. 8에 나타내었다. 이 그래프로부터 알 수 있는 바와 같이 시간의 경과와 함께 미동결층의 온도변화에 의한 자연대류가 존재함을 알 수 있다. 즉, 미동결층의 초기온도는 $5[^\circ\text{C}]$ 이지만 하부면의 냉각에 의해 온도가 하강하게 되고 온도가 $4[^\circ\text{C}]$ 근방에 도달하였을 때 최대 밀도가 존재하는 점이 미동결층의 상부에 위치하게 되어 자연대류에 의해 하강하는 흐름이 존재하게 됨을 Fig. 8로부터 알 수 있다. 이러한 현상은 실험을 통해 촬영된 Fig. 9의 동결층 상부면 형상으로도 확인할 수 있다.

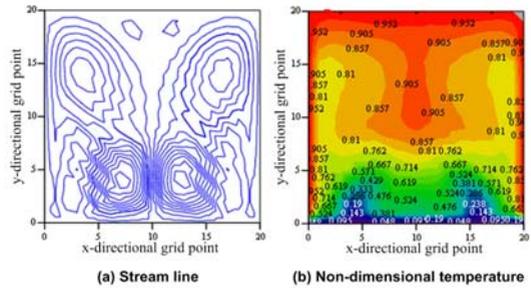


Fig. 8 Numerical analysis result



Fig. 9 Configuration of frozen layer

3.4 동결량에 대한 무차원정리

본 실험의 연구결과로부터 동결량은 시간 및 냉각면의 온도에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 실험을 통해 얻어진 동결량에 대한 무차원수인 무차원 동결량 R_f 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_f = f(\theta_w, Fo) \tag{12}$$

실험을 통해 측정된 데이터를 기초로 최소자승법을 이용하여 정리하면 최대편차 ± 13%의 범위내에서 수식 (13)과 같은 무차원 정리식을 얻을 수 있다.

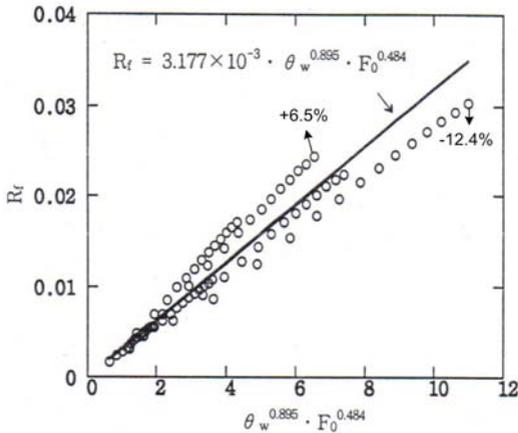


Fig. 10 Non-dimensional frozen amount

Fig. 10에는 실험을 통해 얻어진 무차원 동결량을 나타내었다.

$$R_f = 3.177 \times 10^{-3} \cdot \theta_w^{0.895} \cdot Fo^{0.484} \tag{13}$$

4. 결 론

본 연구는 직사각형 용기내의 물의 동결거동에 대한 실험 및 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 냉각면의 온도가 낮을수록 축열매체인 물과 온도차에 의한 열유속이 증가하여 제빙량이 상승함을 알았다.
- (2) 시간의 경과와 함께 제빙량이 증가하여 얼음층의 성장과 함께 열저항이 증가함을 알았다(열저항 최대 4.8배 증가). 이러한 이유로 제빙율은 시간의 경과와 함께 감소하였다(제빙율 최대 9.5배 감소).
- (3) 수치해석을 통해 미동결층인 물의 자연대류가 존재함을 알았고, 실험을 통한 동결층 표면의

형상으로도 자연대류가 존재함을 알았다.

(4) 본 실험의 범위내에서 무차원 동결량에 대한 실험식을 유도하였다.

후 기

이 논문은 2009년 군산대학교 수산과학연구소 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] Inaba, H., Kim, M. J. and Horibe, A., "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, 2002.
- [2] Inaba, H., Horibe, A., Tsukamoto, H. and Kim, M. J., "Heat storage characteristics of latent Microcapsules using hot air bubbles by direct contact heat exchange", Transactions of the JSME, Vol. 66, No. 645, 2000.
- [3] Inaba, H., Kim, M. J., Horibe, A., "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, 2002.
- [4] Goel, M., Roy, S. K., Sengupta, S., "Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, No. 4, pp. 593-604, 1994.
- [5] 김명준, 길병래, 김명환, "구형용기의 하부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 기초적 연구", 한국박용기관학회지, Vol. 21, No. 5, pp.

102~108, 1997.

- [6] 김명준, 최부흥, 김명환, 길병길, “구형용기의 상부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 실험적 연구”, 한국박용기관학회지 Vol. 22, No. 4, pp. 111~119, 1998.
- [7] 김명준, “직사각형용기내 물의 자연대류현상에 관한 수치해석”, 한국마린엔지니어링학회지, Vol. 32, No. 2, pp. 299~305, 2008.
- [8] Hayashi, Y., and Komori, T., “Investigation of freezing of salt solution in cells”, J. Heat Transfer, Vol. 101, pp. 459~464, 1979.
- [9] 林勇二郎, 加 信治, 溶液の凝固についての研究, 第17回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp. 523~525, 1980.
- [10] 福迫尙一浪, 稻葉英男, 低溫環境下の伝熱現象とその応用, 養賢堂發行, 1996.
- [11] Hayashi, Y., Kunimine, K. and Ngamoto, T., “Study on freezing of undercooled solution”, Proc. of 1989 Int. Symposium on Cold Regions Heat Transfer, pp. 85-90, 1989.

저 자 소 개



김명준(金明俊)

1971년3월18일. 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.