

유동장을 동반한 해수동결거동에 관한 실험적 연구

조이제* · 오 철** · 김명환***

An Experimental Study on Sea Water Freezing Behavior in Flow Field

Y.J.Cho, C.Oh, M.H.Kim

Abstract

Recently, we have serious problems due to lack of water because of the rapid development of industry and increasing in population. In Korea, a lot of researchers predict that we will have lack of water about 2 billion tons on 2011 year. Therefore, it has absolutely be demanded to build dams and to develop desalination systems in order to supply fresh water continually. The most important factor for adopting the desalination system is the production cost of fresh water. The cost depends on what and how to use an energy source which should be obtained easily and cheaply. Generally, Liquid Natural Gas(LNG) is stored in a tank as a liquid state at below -162°C. When serviced, however, the LNG absorbs energy from an ambient heat source and then transforms to the gaseous state at high pressure. In this process, a large amount of cold energy is wasted. What is a method to use this wasted cold energy? So, we focused to make the sea water freezing desalination system by utilizing this wasted cold energy. In advance, we need to possess the qualitative and quantitative data regard to freezing behavior of sea water to establish its design technique. The goal of this study is to reveal the freezing mechanism, to measure the freezing rate, and to investigate the freezing heat transfer characteristics of sea water. A lot of new informations being made clear through the sea water freezing in flow field will help for us to understand sea water freezing behavior generally.

Key Words : LNG Cold Energy(액화천연가스 보유냉열), Freezing Heat-Transfer(동결열전달),
Sea Water Freezing Behavior(해수동결거동), Desalination System(담수화장치)

* 한국해양대학교 대학원 기관공학과

** 한국해양대학교 기관시스템공학부 부교수

*** 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

기호설명

A_c	: 흐름에 대한 단면적[m ²]	C_i	: 수용액의 염분농도[wt%]
D_h	: 수력직경(= $4A_c/P$)[m]	H_o	: 초기수용액의 높이[m]
P	: 접수주변[m]	Re	: Reynolds수(= $U_i \cdot D_h/\nu$)
R_f	: 무차원 동결량(V_f/H_o)	t	: 시 간[hr]
T_f	: 농도에 따른 평형 동결온도[°C]	T_i	: 수용액의 초기온도[°C]
T_o	: 물의 동결온도[°C]	T_w	: 냉각면 온도[°C]
U_i	: 수용액의 유속[m/s]	ν	: 수용액의 농도에 따른 동점성계수[m/s]
θ_w	: 무차원 냉각면 온도[($T_f - T_w$) / ($T_o - T_f$)]		

1. 서 론

물부족 현상이 점점 심각해지면서 인류는 지금까지 주목하지 않았던 수자원의 확보에 눈을 돌리고 있다. 지구상 물의 97%를 차지하는 해수를 담수화하고 인공강우로 강제로 비를 내리게 만들거나, 중수도를 설치해 사용한 물을 다시 사용하는 등 물고갈 위기를 극복하기 위한 노력들이 이루어지고 있다. 유엔 인구행동연구소(PAI) 발표에 따르면 연간 1인당 물사용량 1,000톤 미만을 물부족국가군으로 1,500톤 미만을 압박군으로 분류하고 있다. 한국의 활용 가능한 수자원량은 연간 630억톤. 이를 국민 1인당 사용가능량으로 환산하면, 1955년에는 1941톤이었으나 급격한 인구 증가로 인해 35년만인 90년에는 1470톤으로 줄어들었다. 물 부족국가 분류 기준으로 보면 우리나라도 90년부터 물부족 국가 대열에 들어선 것이다. 이에 따라 정부는 2000년대의 물부족(Fig. 1 참조)에 대비하고 안정적인 용수 확보를 위하여 추가적인 댐의 건설과 해수의 담수화 연구 등 인공용수 생산에 많은 관심을 표명하고 있다.

우리나라와 같이 바다와 접한 경우에는 당연히 바다가 그 대안이 되어야 한다. 담수화 기술은 세계적으로 안정화 단계에 접어 들었으며 미국, 일본, 독일, 이스라엘, 프랑스, 덴마크 등이 선진기술을 주도하고 있다. 우리나라에서도 아주 소규모의 담수화 장치가 운용되고 있고, 과거 대형설비를 해외에 시공한 경험도 있지만, 이를 계속 발전시킬 기회를 잊고 있음을 참으로 안타까운 일이다.

인공적인 용수생산에 있어서는 해수를 담수화^[1]하려는 노력이 지배적으로 행하여지고 있다. 해수의 담수화 방법으로는 증발법, 막법, LNG냉열이용법, 투과기화법 및 태양열이용법 등이 있다.

담수화 방법의 채택에 있어서 가장 중요한 요소로 작용하는 것은 담수생산비용이며, 이는 쉽고 값싸게 이용할 수 있는 담수화의 에너지원이 무엇인가에 달려 있다. 최근 우리나라는 청정연료인 LNG에 대한 수요가 급증(Table 1 참조)하고 있으며, -162°C의 액체상태인 LNG를 각 수요지에 기체로 공급하는 과정에서 LNG가 가지고 있는 다량의 냉열이 폐기된다. 이렇게 폐기되는 LNG 보유냉열을 단계적이고 효과적으로 이용하기 위한 하나의 방법으로서 LNG의 보유냉열을 해수동

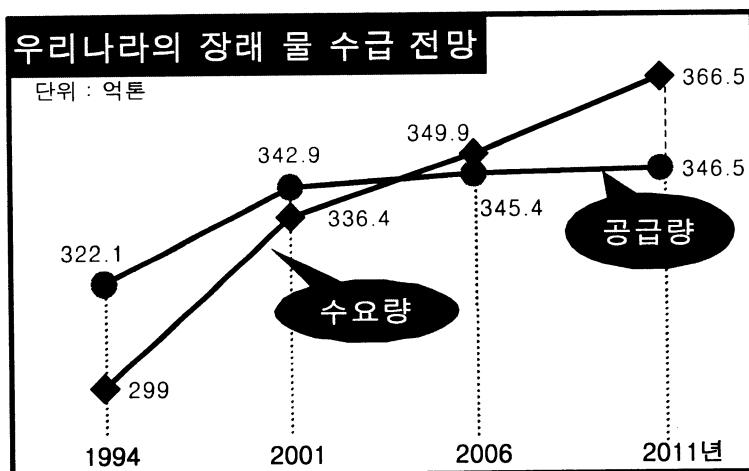


Fig. 1 Comparison of water supply and consumption

결 담수화장치^[2]의 에너지원으로 이용할 수 있다.

이 방법은 폐기되는 냉열을 저렴하게 이용함으로서 담수화 비용을 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라, LNG기지 주변의 시설과 주택지에 용수를 안정적으로 공급할 수 있으며, LNG 보유에너지의 극대이용으로 성에너지의 목표도 달성할 수 있다.

LNG냉열을 이용한 해수동결 담수화장치의 개발과 설계기술의 확립에 있어서 요구되어지는 해수동결거동에 관한 정성적, 정량적 기초자료를 확보하기 위하여 구형용기 및 원관내에서의 해수동결거동에 관한 실험적 연구를 수행하고 그 결과를 이미 보고한 바 있다^{[3]~[5]}. 본 연구에서는 계속적인 그 연구과정의 일환으로서 정지중의 해수동결에서 나타난 침상빙 동결층내 염분용질의 축적을 억제하기 위하여 해수를 냉각원관 주위로 유동시켜 해수동결과 함께 석출되는 용질을 동결층으로부터 제거하는 방법을 제안하면서, 이에 대한 정성적, 정량적 자료를 수집하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 유동장을 동반하는 원관외 해수동결거동의 메카니즘과 염분농도, 냉각면온도 및 유속이 동결량 및 열·물질이동적인 특성^{[6]~[8]}에 미치는 영향 등을 연구하여 검토하였다.

Table 1 Estimated supply of LNG

단위 : 천톤

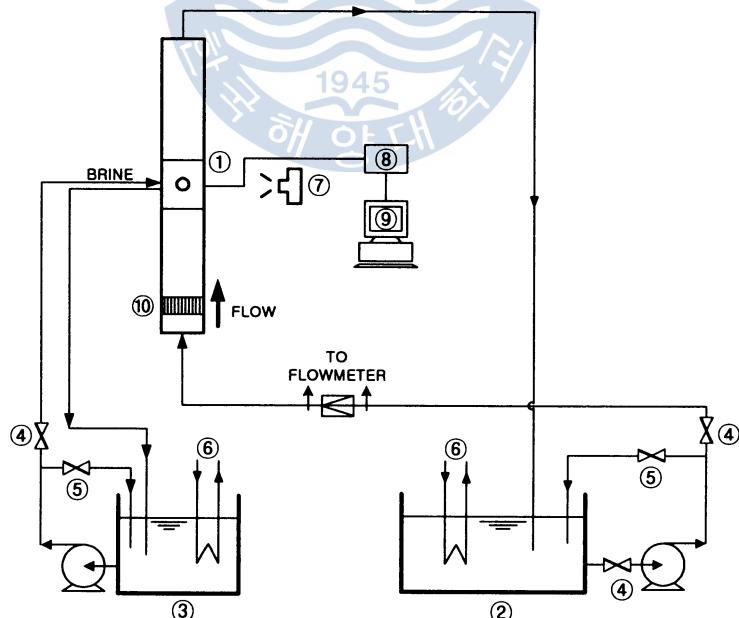
년도	1997실적	1998잠정	1999	2000	2003	2005	2010
LNG	11,147	10,421	12,617	13,702	16,777	17,260	20,814

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 2는 실험장치의 전체계통도를 나타낸다. 그림에서 나타내는 바와 같이 실험장치는 크게 수용액의 동결이 진행되는 시험부, 냉각면을 소정의 온도로 유지해 주기 위한 브라인 순환부, 수용액을 일정한 온도와 속도로 유지하기 위한 수용액 순환부, 동결이 진행되는 동안 냉각면 및 수용액의 온도를 측정하기 위한 온도계측부 및 수용액의 동결층 형상을 촬영하기 위한 가시화부로 구성되어 있다.

먼저 시험부는 $230 \times 155 \times 1700\text{mm}$ 의 구형용기로 두께 15mm의 투명아크릴로 제작하였고, 시험부의 중간 위치에 외경 66.8mm, 두께 2mm의 동판을 설치하였다. 동판 내부를 소정의 냉각온도로 유지하기 위하여 냉동기에 의하여 온도가 조절된 브라인(에칠판글리콜 수용액)이 순환펌프를 거쳐 PVC 파이프로부터 일정하게 분사되도록 하였다. 이러한 순환계의 탱크, 배관 및 온도제어부는 열손실을 방지하기 위하여 단열재로 충분히 단열하였다. 동판 내표면의 온도(T_w) 및 수용액의 입출구의 온도(T_i)를 파악하기 위하여 동판내표면의 상부, 측면, 하부 및 시험부의 입·출구에 C-A Type의 열전대를 부착하고, 검출된 온도는 데이터 처리장치를 통해 PC에 자동으로 기록되도록 하였다.



- | | |
|----------------------|--------------------------|
| ① Test Section | ⑥ Refrigerator |
| ② Test Solution Tank | ⑦ Digital Camera |
| ③ Brine Tank | ⑧ Data Aquisition System |
| ④ Controlling Valve | ⑨ Personal Computer |
| ⑤ Bypass Valve | ⑩ Honeycomb |

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험방법 및 실험범위

본 실험에서는 유동장을 동반한 염화나트륨 수용액의 동결시 발생하는 열 및 물질의 이중전달에 관한 기초자료를 수집하기 위하여 해수의 평균염분농도가 3.5wt%임을 감안하여 시료로서 0.0wt%, 1.8wt%, 3.5wt%의 염화나트륨 수용액을 사용하였고, 평균유속을 0.02m/s, 0.05m/s, 0.1m/s로 달리 하여 그 영향을 검토하였다. 또한 냉각면의 온도는 유속에 따른 빙의 동결개시 최고온도 및 염화나트륨수용액의 공정온도(-21.12°C)를 고려하여 각각 -10.0°C, -15.0°C, -20.0°C로 유지시켰다. 시료는 정제염을 사용하여 염화나트륨 수용액을 만들었으며 시료의 염분농도는 디지털 염분계(Salt Meter ; ES-421)를 이용하여 측정하였다.

실험은 먼저 냉동기를 가동하여 브라인 텅크의 온도를 소정의 온도로 조절하고, 수용액의 초기 온도를 0.0°C로 하여 시험부에 공급하였으며, 실험종료시까지 그 온도를 초기온도와 동일하게 유지시켰다. 소정의 냉각온도로 조절된 브라인을 원관냉각면의 내면에 분사하는 시각을 실험의 시작점으로 하여 실험이 진행됨에 따라 성장하는 빙층의 형상, 두께 및 동결량을 지속적(10분간격)으로 측정하였으며, 매시간 동결층의 형상을 사진촬영을 통하여 가시화하였다. 실험종료 시각은 냉각면과 동결계면과의 온도구배와 수용액의 강제대류간의 열평형이 이루어져 빙의 성장이 더 이상 없는 정상상태를 기준으로 하였고, 실험종료후 빙을 채취하여 각부의 온도를 측정하였으며, 동결량 및 동결속도는 각부의 빙의 두께측정 및 최후동결량의 무게를 측정하므로서 산정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 해수의 동결거동

본 실험에 앞서 먼저 유동장을 동반하지 않은 정지상태하에서의 해수동결실험을 행하여 그 해수동결거동의 메카니즘을 Fig. 3(a)에 나타내었다. Fig. 3(a)는 3.5wt%의 염화나트륨 수용액을 정지 상태인 0.0m/s, 냉각면온도 -20.0°C로 유지하였을 경우에 실험개시후 4시간까지의 동결층의 성장 거동을 30분 간격으로 나타낸 결과이다. 그림으로부터 시간이 경과함에 따라 초기에는 냉각면과 동결계면의 온도구배가 크기 때문에 급속한 빙의 성장을 보이다가 30분 이후에는 빙의 두께가 열 저항으로 작용하여 그 성장속도가 현저히 저하함을 관찰할 수 있으며, 각 부의 동결계면의 위치(빙의 두께)는 정방형으로 동일함을 알 수 있다.

다음으로 본 실험의 유동장을 동반한 해수동결거동의 메카니즘을 Fig. 3(b)에 나타내었다. Fig. 3(b)는 정지상태와 같은 조건에서 수용액의 유속을 0.05m/s로 유지하였을 경우에 마찬가지로 실험개시후 4시간까지의 동결층의 성장거동을 30분 간격으로 보여주고 있다. 초기에는 냉각면과 동결계면의 온도구배가 크기 때문에 급속한 빙의 성장을 보이다가 30분 이후에는 빙의 두께 및 유속의 영향으로 빙의 성장은 현저히 저하함을 알 수 있다. 그리고, 측면 및 하부의 빙의 형성은 수용액의 유동에 의한 대류작용으로 상부에 비하여 작아짐을 알 수 있으며, 전체 동결량도 정지상태하에서보다 현저히 작아짐을 알 수 있다.

실험종료 후 채취한 빙으로부터 염도를 측정하여 비교한 결과를 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4의 사선부분은 유동장을 동반하지 않는 정지상태하의 해수동결거동에 있어서의 동결된 빙의 각부의 염도를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 실험초기, 즉 동관 표면 근방에서는 염도가 매우 높게 측정되었는데, 이것은 실험초기에는 냉각이 급속하게 진행되므로 순간적으로 발생되는 침상빙의 동결층 내부로, 다량의 용질이 몰입하기 때문이다. 한편, 시간이 경과하면서 빙의 두께가 절저항으로 작용하면서 동결속도의 저감으로 인한 용질석출량의 감소로 빙의 외측 염분농도가 조금 낮게 유지됨을 볼 수 있다. 융해된 빙의 전체 농도는 2.2wt%로서 다소 높게 측정되었다. Fig. 4의 사선부분은 유동장을 동반한 해수동결거동에서의 동결된 빙의 각부의 염도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 유동장을 동반한 경우가 빙의 각부에서의 염분농도가 낮게 나타났고, 특히, 외측 염분농도가 다른 부분과 비교하여 매우 낮게 나타남을 알 수 있다. 이것은 시간이 경과하면서 동결속도의 저감으로 인한 용질 석출량의 감소와 함께 강제대류작용으로 인한 침상빙 형성의 억제 및 석출 용질의 제거 작용의 영향 때문이다. 융해된 빙의 전체농도는 1.7wt%로서 정지상태하에서의 2.2wt%와 비교하여 농도가 저감됨을 알 수 있었다.

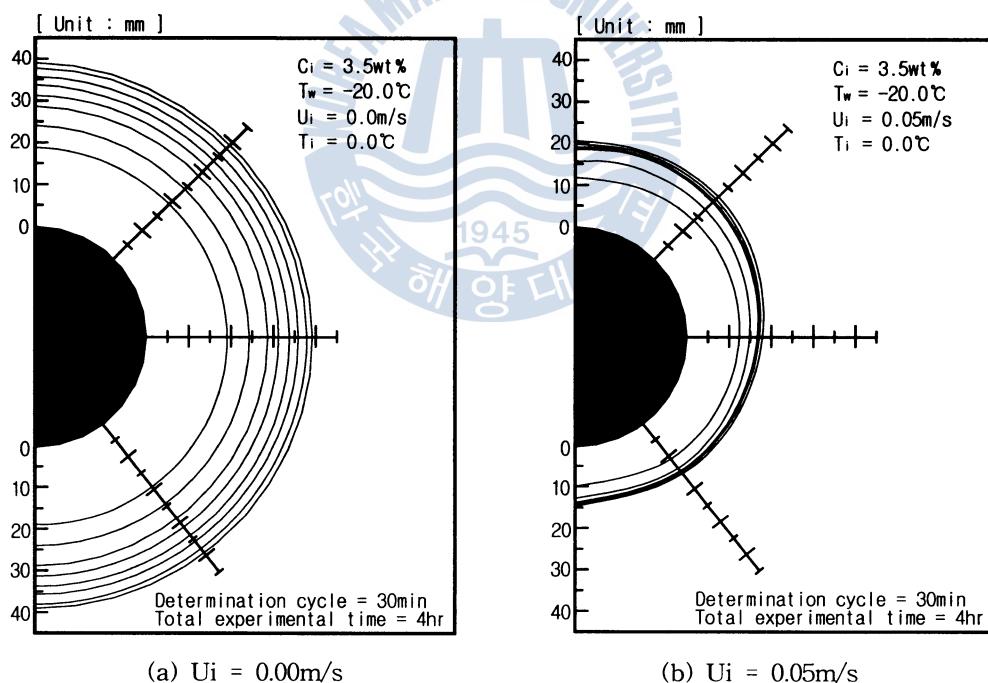


Fig. 3 Freezing behavior of sea water

; $C_i = 3.5\text{wt\%}$, $T_w = -20.0^\circ\text{C}$, $T_i = 0.0^\circ\text{C}$

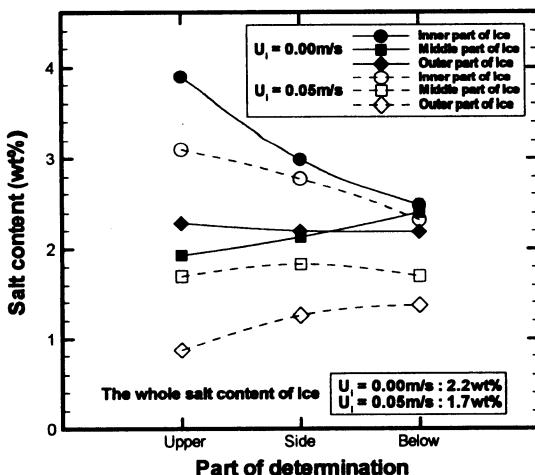


Fig. 4 Compare with distribution of salt content

3.2 농도의 영향

Fig. 5는 냉각면온도 -15.0°C , 유속 0.05m/s , 수용액의 농도 3.5wt\% 의 정상상태를 기준으로 실 험개시 4시간후의 염화나트륨수용액 농도변화에 따른 동결충 형상을 가시화한 사진이다. 그림으로 부터 농도가 저하됨에 따라 동결충의 두께가 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉, 농도가 낮을수록 평 형동결온도(T_f)가 상승함으로써 동결량이 많아진다는 것을 알 수 있으며, 동결충은 상부면(흐름의 하부)으로 갈수록 점차 두꺼워지다가 상부면 근방에 감소하는 형상을 하고 있다. 그리고, 1.8wt\% 및 3.5wt\% 는 0.0wt\% 의 투명한 빙에 대하여 동결충이 불투명하게 나타남을 알 수 있으며, 내부빙이 외부빙에비하여 다소 불투명하게 나타남을 알 수 있다.

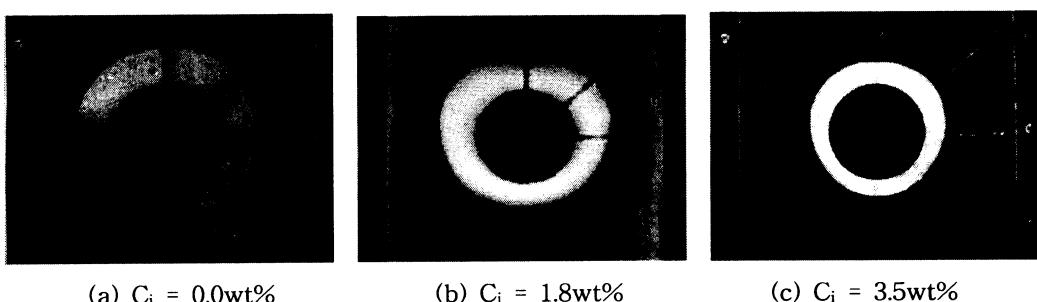


Fig. 5 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior
; $T_w = -15.0^{\circ}\text{C}$, $U_i = 0.05\text{m/s}$, $T_i = 0.0^{\circ}\text{C}$, $t = 4\text{hr}$

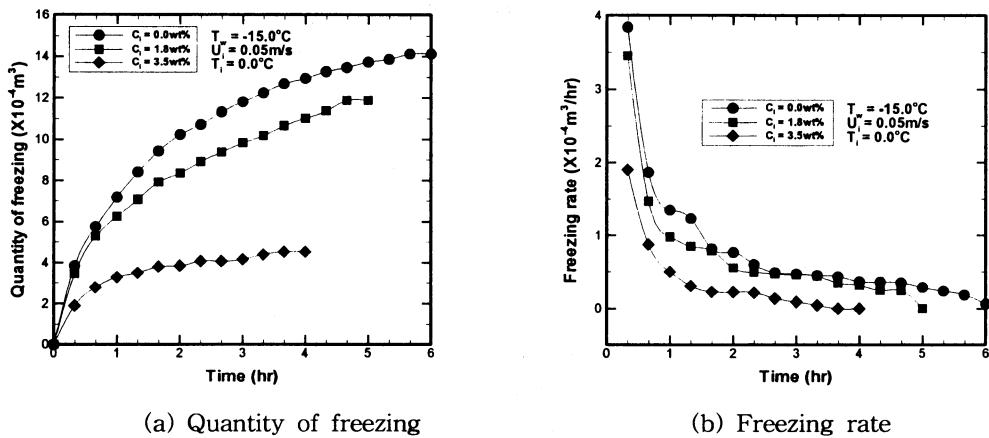


Fig. 6 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior
: $T_w = -15.0^\circ\text{C}$, $U_i = 0.05\text{m/s}$, $T_i = 0.0^\circ\text{C}$, $t = 4\text{hr}$

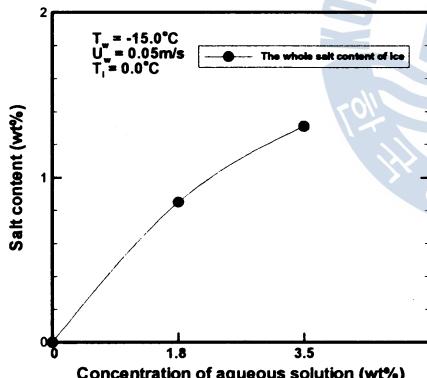


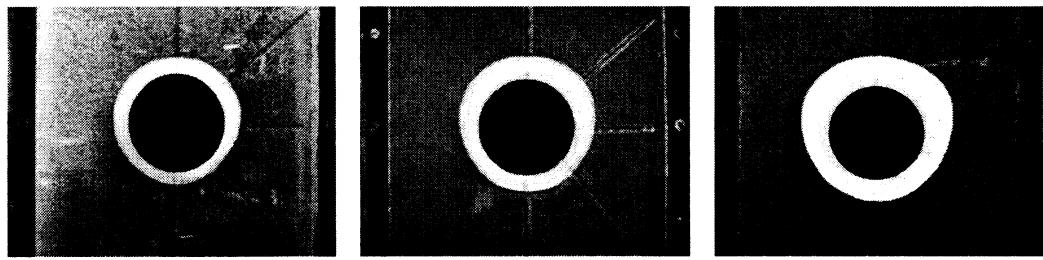
Fig. 7 The whole salt content of ice

Fig. 6(a)와 (b)는 Fig. 5와 같은 조건에서의 수용액의 농도에 대한 동결량과 동결속도를 보여 준다. 그림에서 농도가 감소함에 따라 동결량이 증가하는 것은 전술한 바와 같이 농도감소에 따라 평형동결온도가 상승하여 동결계면과 냉각면과의 온도구배가 커짐으로 인해서 열유속이 증가하기 때문이다.

Fig. 7은 Fig. 5와 같은 조건하에서 실험종료 후의 빙을 채취하여 각 수용액의 농도에 대한 용해된 빙의 평균염도를 나타낸 것으로 수용액의 염분농도가 낮을수록 용해된 빙의 평균염도가 낮게 유지됨을 알 수 있다.

3.3 냉각면 온도의 영향

Fig. 8은 해수동결거동에 미치는 냉각면 온도의 영향에 따른 수용액의 정상상태의 동결거동을 가시화한 사진으로 수용액의 농도 3.5wt%, 유속 0.05m/s일 때의 경우이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 냉각면의 온도가 낮을수록 동결량이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 전술한 바와 같이 냉각면의 온도가 낮을수록 동결계면에서의 온도구배가 커짐으로 인하여 냉각면으로의



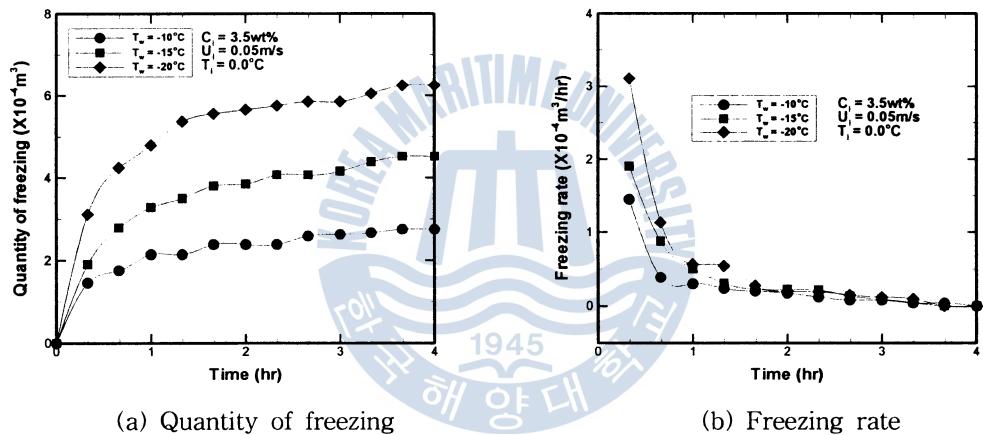
(a) $T_w = -10.0^\circ\text{C}$

(b) $T_w = -15.0^\circ\text{C}$

(c) $T_w = -20.0^\circ\text{C}$

Fig. 8 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior

; $C_i = 3.5\text{wt\%}$, $U_i = 0.05\text{m/s}$, $T_i = 0.0^\circ\text{C}$, $t = 4\text{hr}$



(a) Quantity of freezing

(b) Freezing rate

Fig. 9 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior

; $C_i = 3.5\text{wt\%}$, $U_i = 0.05\text{m/s}$, $T_i = 0.0^\circ\text{C}$, $t = 4\text{hr}$

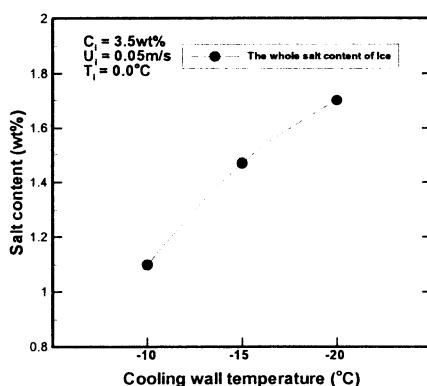


Fig. 10 The whole salt content of ice

열유속이 증가하여 동결량이 크게 되기 때문이다.

Fig. 9(a)와 (b)는 Fig. 8에서와 같은 조건에서 수용액 동결량 및 동결속도의 변화를 시간에 대하여 나타낸 것으로, 냉각면 온도가 낮을수록 동결량이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 8과 같은 조건하에서의 실험종료후 빙을 채취하여 각 수용액의 냉각온도에 대한 용해된 빙의 평균 염도를 나타낸 것으로서, 냉각면 온도가 낮을수록 동결된 빙의 염도도 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 냉각면 온도가 낮을수록 초기의 동결속도가 증가하면서 염분용질 석출량의 증가와 두껍게 형성되는 침상빙의

형성으로 염분용질이 침상빙 사이에 몰입되는 영향이 증가하기 때문으로 생각된다.

3.4 유속의 영향

Fig. 11은 수용액의 농도 1.8wt%, 냉각면 온도 -15.0°C 를 유지하여 실험개시 후 가장 먼저 정상상태에 도달한 수용액의 유속 0.1m/s의 실험종료 시각을 기준으로 하여 유속변화에 따른 동결층의 형상을 가시화한 사진이다. 시험부에서의 유속이 빨라짐에 따라 동결량은 감소하고, 하부면의 빙의 형성이 측면이나 상부면에 비하여 확연히 작아짐을 알 수 있다. 이것은 유속의 증가와 함께 동결층과 유동해수와의 사이에 대류열전달이 촉진되므로 동결량이 감소하기 때문이다. 또한 수용액의 유속이 0.02m/s로 느릴 경우에는 동결층의 형상이 정방형으로 거의 원형에 가깝게 나타나지만, 유속이 증가하면 상부면으로 갈수록 동결층이 점차 두꺼워지다가 상부면 근방에서 감소하는 형상이 확연하게 나타나고 있다.

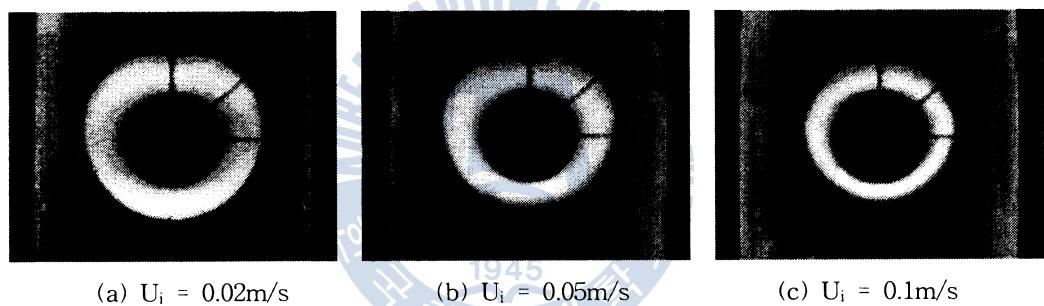


Fig. 11 Effect of flow velocity on freezing behavior

: $C_i = 1.8\text{wt\%}$, $T_w = -15.0^{\circ}\text{C}$, $T_i = 0.0^{\circ}\text{C}$, $t = 4\text{hr}$

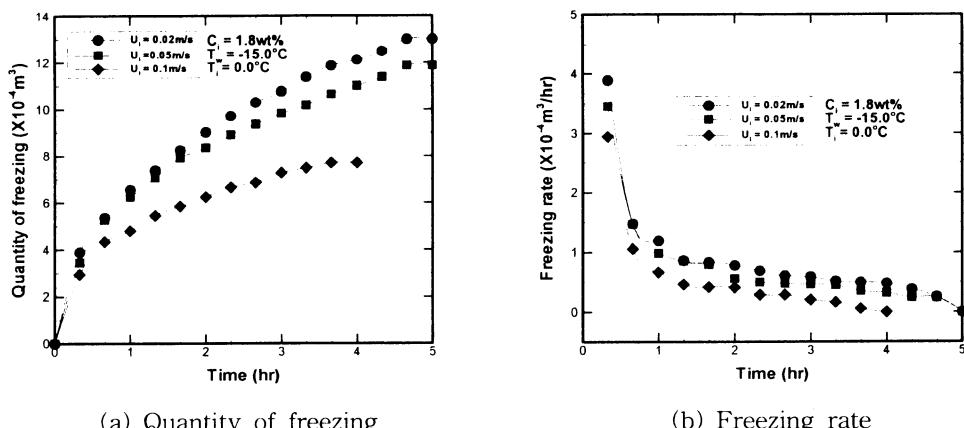


Fig. 12 Effect of flow velocity on freezing behavior

: $C_i = 1.8\text{wt\%}$, $T_w = -15.0^{\circ}\text{C}$, $T_i = 0.0^{\circ}\text{C}$, $t = 4\text{hr}$

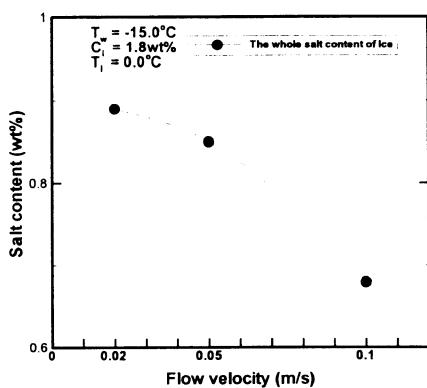


Fig. 13 The whole salt content of ice

여 유도된 석출 염분용질의 제거 효과가 증가하기 때문으로 판단된다.

3.5 동결층의 형상

Fig. 14(a)와 (b)는 실험종료후 채취한 0.0wt%와 3.5wt%의 빙의 형상을 가시화한 사진으로 순수액의 경우인 (a)는 초기 급속한 빙층의 형성으로 인한 기포의 몰입으로 빙의 내측면이 불투명하게 보이는 부분을 제외하곤 투명하게 나타남을 보여주고 있는 반면, 침상빙의 성장을 유발하는 수용액의 경우인 (b)는 용질의 함유와 침상빙의 영향으로 불투명한 저밀도의 동결층을 형성하고 있음을 보여주고 있으며, 동결된 빙의 형상은 측면과 하부면은 수용액의 유속의 영향에 의한 대류작용의 영향으로 융해의 영향을 받아 상부면에 비하여 동결량은 줄어들었으나, 상부면의 불투명하고 침상동결층을 알아 볼 수 있는 다소 푸석푸석한 저밀도의 동결층과는 달리 측면과 하부면은 외부빙으로 갈수록 침상동결층을 볼 수 없으며, 표면의 융해의 영향을 알 수 있는 다소 투명한 거울모양으로 된다.

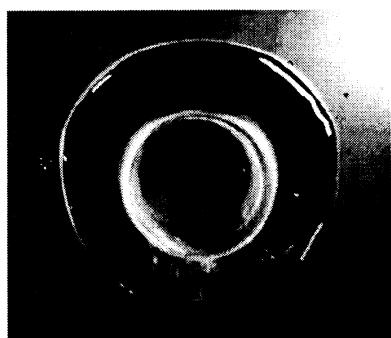
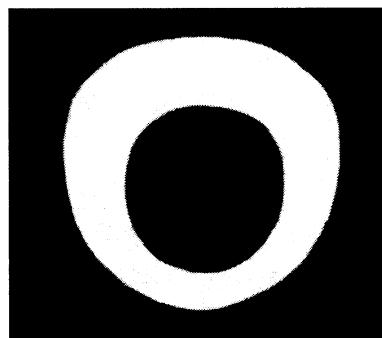
(a) $C_i = 0.0\text{wt\%}$ (b) $C_i = 3.5\text{wt\%}$

Fig. 14 Configuration of frozen layer

3.6 동결량의 무차원정리

본 실험의 연구결과로부터 동결량은 시간의 경과, 냉각면 온도의 감소, 수용액 농도의 감소 및 유속의 감소와 함께 증가함을 알 수 있다. 본 절에서는 실험에서 얻어진 동결량에 대한 결과들을 정리하여 무차원 수식화를 시도하였다. 본 실험 범위내에서 동결량에 영향을 미치는 인자들을 정리하여 나타내면 무차원 동결량 R_f 는 식(3.1)과 같은 관계로 나타낼 수가 있다.

$$R_f = f(\theta_w, Re) \quad \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

식(3.1)의 관계를 이용하여 모든 실험데이터를 최소자승법을 이용하여 정리하면 무차원 동결량은 Fig. 15와 같이 나타나며, Fig. 15로부터 무차원 동결량은 $\pm 20\%$ 의 범위내에서 (3.2)식으로 정리될 수 있다.

$$R_f = 8.73 \theta_w^{0.83} Re^{-0.60} \quad \dots \dots \dots \quad (3.2)$$

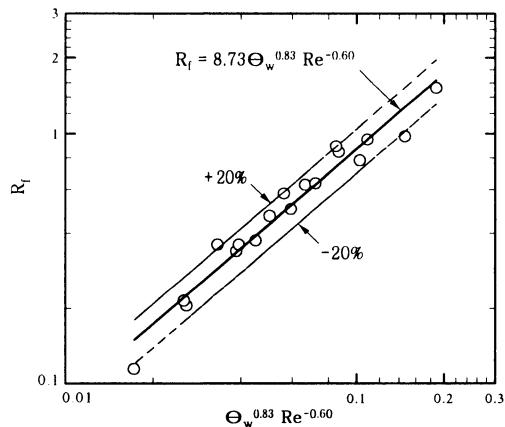


Fig. 15 Nondimensional Frozen Quantity

4. 결 론

본 연구에서는 유동장을 동반한 원관의 해수동결거동의 메카니즘과 염분 농도, 냉각면 온도 및 유속이 해수의 동결거동에 미치는 영향 등을 실험적으로 연구 검토하여 본 실험의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 염화나트륨수용액의 농도 및 냉각면 온도가 낮고, 유속이 느릴수록 평형동결온도의 상승과 동결계면과 냉각면과의 사이에 온도구배가 커짐으로서 냉각면으로의 열유속이 증가하기 때문에 동결량 및 동결속도는 증가한다.
- (2) 냉각면온도가 높을수록 초기의 급속한 침상빙의 성장이 억제되어지고, 유속이 빠를수록 수용액과 동결계면과의 사이에 염분용질의 제거작용의 영향이 크게 되기 때문에 수용액의 유속이 빠르고, 냉각면 온도가 높을수록 그리고 초기 염분농도가 낮을수록 염도가 낮은 고밀도의 빙을 얻을 수 있다.
- (3) 실험초기 냉각이 급속하게 진행되므로 순간적으로 발생되는 침상빙의 동결층 내부로 다량의 염분용질이 몰입하기 때문에 동결속도가 큰 내부빙이 외부빙에 비하여 염도가 높게 나타나고, 시간이 경과하면서 빙의 두께 및 유속의 영향으로 동결속도의 저감으로 인한 용질 석출량의 감소와 함께 대류작용의 영향으로 침상빙 억제 및 석출용질의 제거작용의 영향으로 외측빙의 염분농도가 낮게 나타난다.
- (4) 수용액의 유속의 증가와 함께 동결층과 유동해수와의 사이에 대류열전달이 촉진되므로서 동

결량이 감소하기 때문에 유속이 증가할수록 동결량은 감소하고, 하부면의 빙의 형성이 측면이나 상부면에 비하여 확연하게 줄어듬을 알 수 있다.

- (5) 냉각면의 온도가 높고, 수용액의 유속이 증가할수록 융해작용의 영향이 높아지기 때문에 측면과 상부면에 흠이 형성되고, 더욱이 융해가 진행되면 표면은 매끄러워지며, 특히 동결층의 하부면에서 염도가 매우 낮은 고밀도의 빙을 얻을 수 있다.
- (6) 본 연구의 범위내에서 염화나트륨 수용액의 무차원 동결량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_f = 8.73 \theta_w^{0.83} Re^{-0.60}$$

참 고 문 헌

- [1] 김병덕, 김재윤, “물부족 현황과 국내 담수화기술개발 현황”, 한국박용기관학회 춘계학술강연회, pp. 105~109, 1996
- [2] 김명환, 김용모, 김철환, “LNG냉열이용과 축냉시스템의 장래”, 한국박용기관학회 논문집, 제18권, 제5호, pp. 1~11, 1994
- [3] 김명준, 김명환, 박형진, “구형용기의 하부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 기초적 연구”, 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회 논문집, 제1권, pp. 347~353, 1997
- [4] 박종덕, 김명준, 김명환, “원관내의 해수동결거동에 관한 실험적 연구”, 한국박용기관학회 춘계학술강연회, pp. M-1~M-7, 1998
- [5] 최부홍, 김명준, 김명환, “구형용기의 상부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 실험적 연구”, 한국박용기관학회 추계학술강연회, pp. 23~29, 1998
- [6] Carey.V.P and Gebhart.B, “Transport Near a Vertical Ice Surface Melting In Saline Water-Experiments at Low Salinities”, J.Fluid Mech, Vol. 117, pp. 403~423, 1982
- [7] Johnson.R.S and Mollendorf.J.C, “Transport From a Vertical Ice Surface Melting In Saline Water”, Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 10, pp. 1928~1932, 1982
- [8] Beckermann.C, “Melting and Solidification of Binary Mixtures with Double-Diffusive Convection in the Melt”, Ph.D.Thesis, Purdue University, 1987

