

구형용기의 상부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 실험적 연구

김명준*, 최부홍*, 김명환**, 길병래***

An Experimental Study on Sea Water Freezing Behavior in a Rectangular Vessel Cooled From Above

M.J.Kim, B.H.Choi, M.H.Kim, B.L.Kil

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

Abstract

Currently, as due to the rapid development of industry and increase in population, we meet serious problems concerning the shortage and pollution of water. In the country, many experts predict a shortage of water approaching 450 million tons by the year 2006. To cope with this serious problem, it is necessary to construct desalination plants. In the adoption of a desalination system, the most important factor is the cost of fresh water production. In general, LNG is stored in a tank as a liquid state below -162°C . When it is serviced, however, the LNG absorbs energy from a heat source and transforms to a high pressure gaseous state. During this process, a huge amount of cold energy accumulated in cooling LNG is wasted. This wasted cold energy can be utilized to produce fresh water by using a sea water freezing desalination system. In order to develop a sea water freezing desalination system and to establish its design technique, qualitative and quantitative data regarding the freezing behavior of sea water is required in advance. The goals of this study, are to reveal the freezing mechanisms of sea water, to measure the freezing rate, and to investigate the freezing heat-transfer characteristics. The experimental results will provide a general understanding of sea water freezing behavior in a rectangular vessel cooled from above.

* 정회원, 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 98년 5월)

** 정회원, 한국해양대학교 기관시스템공학부

*** 정회원, 한국해양대학교 운항시스템공학부

기호설명

- R_f : 무차원 동결량(V_f/H_0)
- H_0 : 초기용액의 깊이(m)
- F_0 : Fourier 수($\alpha \cdot \tau/H_0^2$)
- α : 얼음의 온도전도율(m^2/s)
- V_f : 냉각면 단위면적당의 동결량(m^3/m^2)
- τ : 시간(s)
- θ_w : 무차원 냉각면 온도 $[(T_f - T_w)/(T_0 - T_f)]$
- T_0 : 물의 동결온도($^{\circ}C$)
- T_f : 농도에 따른 평형 동결온도($^{\circ}C$)
- T_w : 냉각면 온도($^{\circ}C$)

1. 서 론

산업화에 따른 용수수요의 급격한 증가와 가용수자원의 오염에 따른 물부족현상이 최근 우리나라의 심각한 문제로 대두되고 있다. 이에 대하여 정부는 2000년대의 물부족(참조 Table. 1)에 대비하고 안정적인 용수 확보를 위하여 추가적인 댐의 건설과 해수의 담수화 연구에 많은 관심을 표명하고 있다. 세계적으로도 물부족국가에 속하는 우리나라의 현실로서는 자연 강우에 대한 치수의 노력과 아울러 인공적인 용수생산에 대한 노력이 절실히 요구되어진다.

인공적인 용수생산에 있어서는 해수를 담수화¹⁾하려는 노력이 지배적이며 일반적으로 행하여지고 있는 담수화 방법으로는 증발법, 역삼투막법 및 동결법 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(참조 Table. 2)하고 있으며, $-162^{\circ}C$ 의 액체상태인 LNG를 각 수요지로 기체화하여 공급하는 과정에서 LNG가 가지고 있는 다량의 냉열이 폐기된다. 이렇게 폐기되는 LNG 보유냉열을 단계적이고 효과적으로 이용하기 위한 하나의 방법으로서 LNG의 보유냉열을 해수동결 담수화장치²⁾의 에너지원으로 이용하는 방법을 생각할 수 있다. 이 방법은 폐기되는 냉열을 저렴하게 이용하므로써 담수화

비용을 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라, LNG기지 주변의 시설과 주택지에 용수를 안정적으로 공급할 수 있으며, LNG 보유에너지의 극대이용으로 성에너지의 목적도 달성할 수 있다.

LNG냉열을 이용한 해수동결 담수화장치의 개발과 설계기술의 확립에 있어서 요구되어지는 해수동결거동에 관한 정성적, 정량적 기초자료를 확보하기 위하여 구형용기의 하부면 냉각에 대한 해수동결거동의 실험적 연구를 수행하고 그 결과를 이미 보고^{3,4)}한 바 있다. 본 연구에서는 이어지는 계속적인 연구과정의 일환으로서 구형용기의 상부면 냉각에 의한 해수동결거동의 메카니즘과 염분농도 및 냉각면온도가 동결량 및 열·물질이동적인 특성^{5) 7)}에 미치는 영향 등을 가시화를 포함하는 실험적 방법으로 연구하고 그 결과를 하부면 냉각의 경우와 비교, 검토하였다.

Table. 1 Comparison of supply with demand of water

단위 : 억톤

년 도	1994	2001	2006	2011
공 급 량	322.1	342.9	345.4	346.5
수 요 량	299.0	336.4	349.9	366.5
공급부족량			4.5	20.0

Table. 2 Estimated supply of LNG

단위 : m^3

년 도	1997	1998	1999	2000
LNG	6.3×10^9	7.0×10^9	7.9×10^9	9.0×10^9

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1의 실험장치 전체계통도에서 보는 바와 같이 실험장치는 크게 시험부, 측정부, 브라인 순환부 및 가시화부로 구성되어 있고 시험부는 $150 \times 100 \times 230mm$ 의 구형용기로 전면과 후면은 투명유리, 측면과 밑면은 투명아크릴로 이루어져 있으며 윗면에는 등온의 냉각을 위해 두께 3mm의 동판으로 이루어져 있다. 냉각면을 소정의 온도로 유지하기 위하여 냉동기에 의해 온도가 조절된 브라인이 펌프와 미세온도조절용의 정온도가열장치를

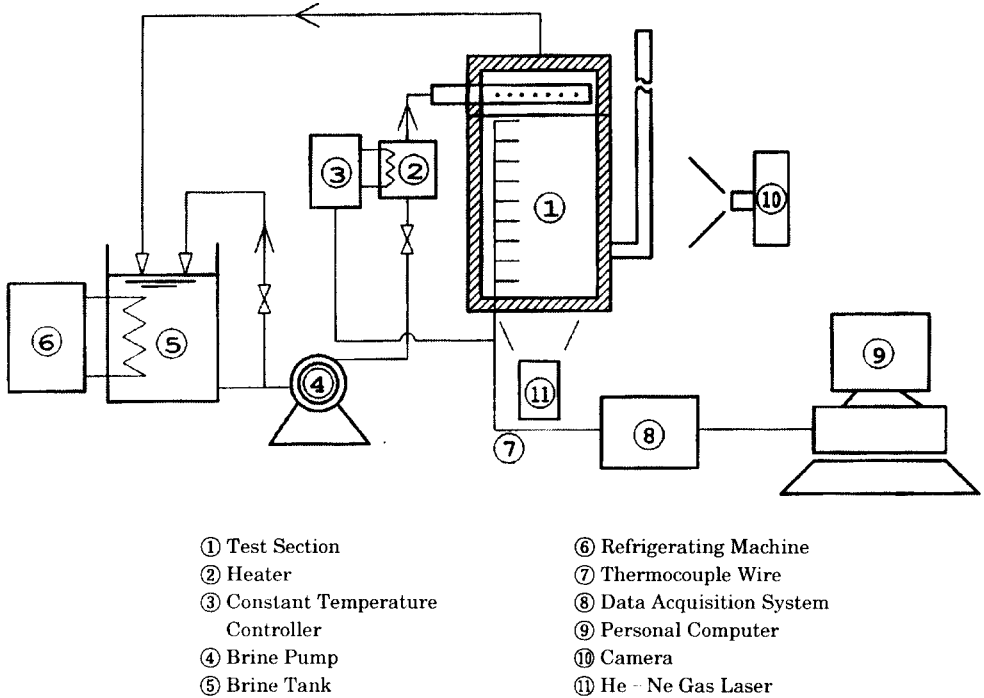


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

거처 상부동판의 뒷면에 팔고루 분사되도록 하였다. 구형용기의 상부냉각면의 온도는 동판의 표면에 부착된 3개의 열전대로부터 검출되어 정온도 조절장치 및 데이터 처리장치로 입력된다. 또한 구형용기내의 동결부와 용액부의 온도분포를 파악하기 위하여 42개의 열전대를 수직으로 위치시켰으며, 데이터처리장치를 통해 P.C에서 온도를 기록하도록 하였다. 구형용기의 옆면에는 동결이 진행됨에 따라 증가하는 체적량을 측정하기 위하여 내경 10mm의 팽창봉을 부착하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 해수의 염분평균농도가 3.5wt% 임을 감안하여 시료로서 0wt%, 1.8wt%, 3.5wt%의 염화나트륨 수용액을 사용하였다. 구형용기내에 충전되어 있는 염화나트륨 수용액의 초기온도는 5℃이며 소정의 냉각온도로 조절된 브라인을 냉각면의 뒷면에 분사하는 시각을 실험의 시작점으로 하였다. 실험이 진행됨에 따라 성장하는 빙

층의 형상, 두께, 동결량 및 온도분포는 지속적으로 관찰, 측정되었으며 He - Ne Gas Laser를 이용한 그림자영법 등의 방법으로 동결거동을 가시화하였다. 동결량은 팽창봉을 통한 수용액의 체적 팽창율로부터 계산하였다.

3 실험결과 및 고찰

3.1 농도의 영향

Fig. 2는 냉각면온도 -5℃, 실험개시 13hr. 후의 염화나트륨수용액 농도변화에 대한 동결층 형상을 가시화한 사진이다. 그림으로부터 농도가 저하됨에 따라 동결층경계면이 하강하고 있음을 알 수 있다. 즉, 농도가 적어질수록 평형동결온도선이 상승하므로 동결량이 많아진다는 것을 알 수 있다. 또한 그림으로부터 동결층의 형상은 순수액인 물의 경우 견고하고 투명하나, 염화나트륨 수용액의 경우는 동결이 진행됨에 따라서 동결계면에서 석출되어 나온 용질의 일부가 고농도 수용액

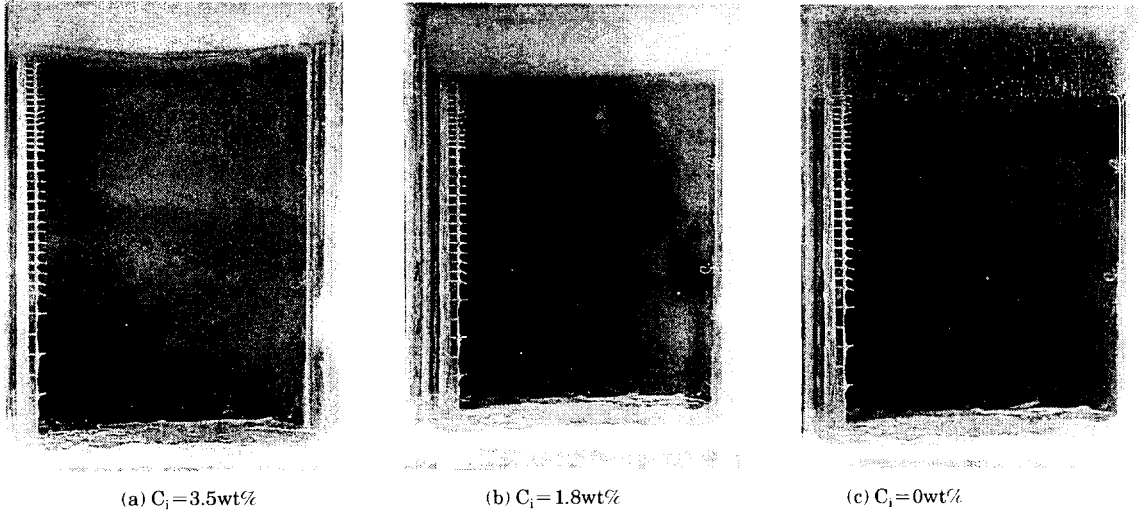


Fig. 2 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior $T_w = -5^\circ\text{C}$, $t = 13\text{hr}$

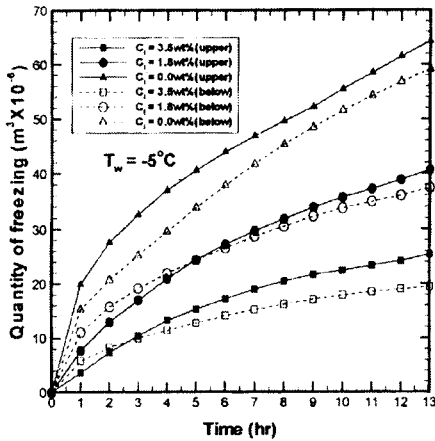


Fig. 3 Quantity of freezing

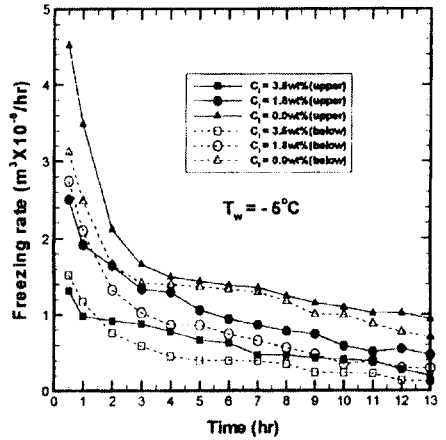


Fig. 4 Freezing rate

의 형태로 동결층내에 남아 푸석푸석하고 불투명한 고액공존층을 형성하게 됨을 알 수 있다. 그리고 하부면을 냉각하는 경우와의 비교에서 상부면 냉각의 경우는 단위체적당의 빙율이 높은 고액공존층을 형성하며, 표면의 침상빙 또한 침예하지 못함을 관찰하였다.

Fig. 3, Fig. 4는 염화나트륨 수용액의 농도변화가 동결량과 동결율에 미치는 영향을 나타내고 있으며 실선으로 표시한 것이 본 실험결과이고 점선

으로 나타낸 것이 하부냉각면에 관한 전보⁴⁾의 결과이다. 실선인 상부 냉각면의 경우 수용액의 농도가 낮을수록 동결량이 증가하고 동결율 역시 커지는 것을 그림으로부터 알 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 농도가 적어질수록 평형동결온도가 상승하므로 동결계면에서 상부 냉각면으로의 열유속이 증가하기 때문이다. 동결율은 동결의 초기에 큰 값을 가지나 빙층이 두꺼워짐에 따라 급격히 감소하여 비교적 완만한 경사를 이루며 줄어드

는 경향을 보이고 있다. 초기의 큰 값은 빙층의 두께가 비교적 얇은 경우에 동결계면에서의 온도구배가 크게 되므로서 냉각면으로의 열유속이 증가하기 때문이다. 그림으로부터 하부면 냉각의 경우와 비교하여 동결량 및 동결율이 같은 조건에 대하여 상부면 냉각의 경우가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 상부면이 냉각되어 수용액이 동결됨에 따라 석출된 대부분의 용질은 하부 용액부로 흘러내려 하부 냉각면의 경우와 같이 동결층내에 고농도의 수용액으로 축적되는 일이 적으므로 동결계면의 평형동결온도의 하강율이 낮게 되기 때문이다. 또한 순수인 경우에는 후술하는 바와 같이 용액부내의 열의 이동이 상부면 냉각의 경우 전도에 의하여 지배되고 하부면의 경우는 대류의 영향을 받기 때문이다. 그러나 수용액의 경우 동결 초기에 한하여 상부 냉각면의 경우가 하부면의 경우보다 동결량 및 동결율이 적게 나타남을 알 수 있다. 이것은 상부 냉각면의 경우 석출된 용질이 용액부 하부로 흘러내리는 이동현상으로 초기 온도 5℃로 유지되어 있는 용액부의 대류를 조장하므로서 동결계면에 대한 대류열전달의 영향으로 전도열전달이 지배적인 하부 냉각면의 경우에 비하여 동결초기에는 오히려 동결량 및 동결율이 감소하기 때문이다.

3.2 냉각면 온도의 영향

Fig. 5는 He-Ne Gas Laser를 이용한 그림자 영법으로 동결거동에 미치는 냉각면 온도의 영향을 가시화한 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 냉각면의 온도가 낮을수록 동결계면이 하강하고 있음을 즉, 동결량이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 앞서 설명한 바와 같이 냉각면의 온도가 낮을수록 동결계면에서의 온도구배가 커짐으로 인하여 냉각면으로의 열유속이 증가하여 동결량이 크게 되기 때문이다. 또한 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 상부면 냉각의 경우 동결이 진행됨에 따라 석출되는 고농도의 수용액이 하부로 흘러내리는 현상을 뚜렷하게 볼 수 있다. 그리고 그림으로부터 고농도 수용액이 석출되는 장소는 일정한 지점으로 한정되며 고정된 위치로부터 흘러내림을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 Fig. 5와 같은 조건에서 시간에 대한 동결량과 동결율의 변화를 나타낸 것으로 전술한 바와 같이 냉각면의 온도가 낮을수록 동결량이 증가하고 동결율 역시 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 하부 냉각면의 경우와 비교하여 전술한 동결량 및 동결율의 변화 경향을 재차 확인할 수 있다.

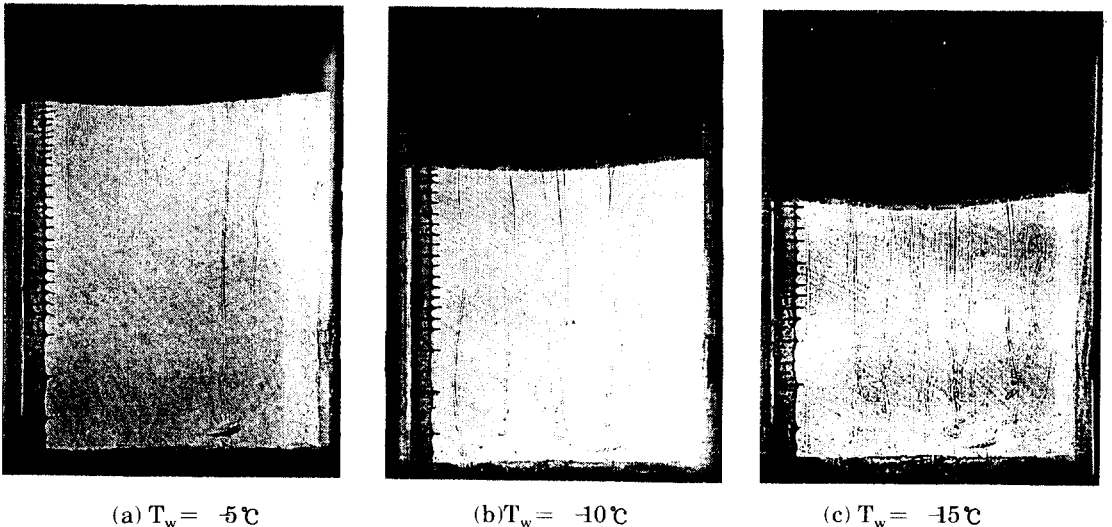


Fig. 5 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior $C_1=3.5\text{wt}\%$, $t=13\text{hr}$

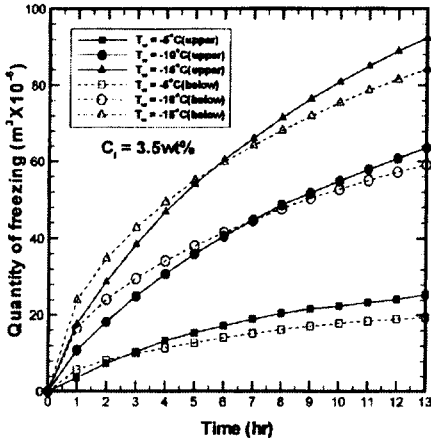


Fig. 6 Quantity of freezing

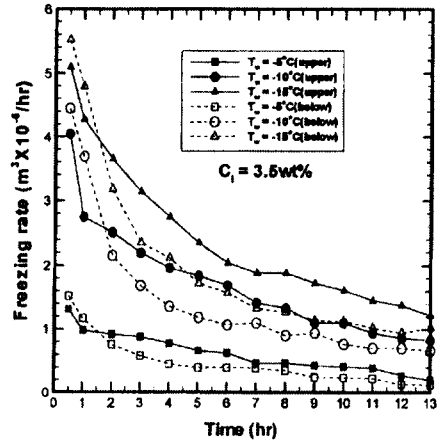


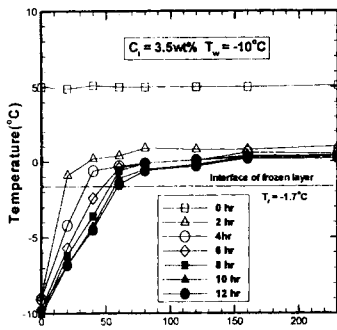
Fig. 7 Freezing rate

3.3 동결층 형상, 계면의 위치 및 온도 분포

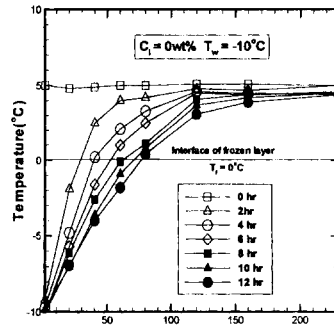
Fig. 8에 상부 냉각면에 대하여 측정된 동결계면의 위치와 온도분포를 상부 냉각면으로부터 거리에 대하여 표시하였다. 그림으로부터 동결계면의 위치와 평형 동결온도선이 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 해수와 순수액의 용액부 온도분포의 비교에서는 분포형태가 대단히 상이함을 확인할 수 있다. 해수와 순수액의 용액부 온도분포가 상이하게 나타나는 것은 해수동결의 경우 석출되는 고농도 수용액이 자연대류를 조장하여 용액부가 대류에 의하여 지배되는 전형적인 온도분포를 나타내고 있으며, 순수액의 경우에는 4°C에서 밀도가 최대가 되는 물성의 특성에 따라 용액부에

서의 열의 이동이 전도에 의하여 지배되기 때문에 전도에 의한 온도분포의 형태를 나타내고 있기 때문이다. 상부면이 냉각되는 경우의 온도분포 특성을 Fig. 9에서 나타낸 하부면의 경우와 비교하여 보면 그 경향이 반대임을 알 수 있다. 즉 상부면 냉각에서 해수의 경우는 하부면 냉각의 순수액의 온도분포 경향과 동일하며, 상부면 냉각의 순수액인 경우는 하부면 냉각의 해수의 온도분포 경향과 동일하다.

Fig. 10은 동결면 형상을 나타낸 것으로 순수액인 경우는 투명하고 견고한 반면, 해수의 경우는 동결층이 불투명하고 고액공존층의 형성으로 푸석푸석하며 동결계면은 둔한 침상빙의 형태를 취하고 있음을 볼 수 있다.

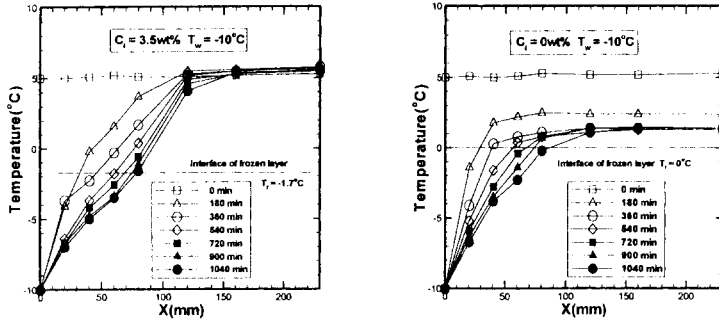


(a) $C_i = 3.5wt\%$, $T_w = -10^\circ\text{C}$



(b) $C_i = 0wt\%$, $T_w = -10^\circ\text{C}$

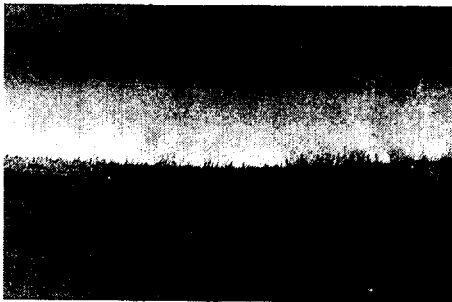
Fig. 8 Position of frozen layer and temperature distribution in the case of cooling top wall



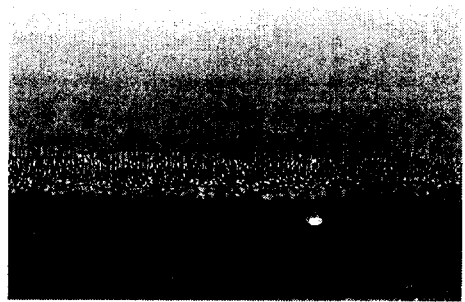
(a) $C_i = 3.5\text{wt}\%$, $T_w = -10^\circ\text{C}$

(b) $C_i = 0\text{wt}\%$, $T_w = -10^\circ\text{C}$

Fig. 9 Position of frozen layer and temperature distribution in the case of cooling bottom wall



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



(b) $C_i = 0\text{wt}\%$

Fig. 10 Configuration of frozen layer

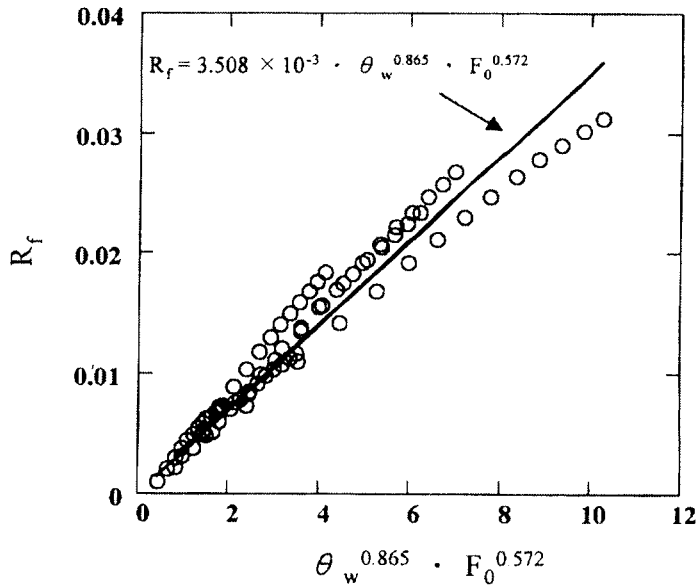


Fig. 11 Nondimensional freezing rate

3.4 동결량

본 실험의 범위내에서 무차원 동결량은 아래와 같은 식으로 정리될 수 있다.

$$R_f = f(\theta_w, F_0) \quad (1)$$

모든 실험데이터를 최소자승법을 이용하여 식 (1)의 형식으로 정리하면 무차원 동결량은 $\pm 15\%$ 의 범위내에서 Fig. 11과 같이 나타나며, 아래와 같은 식(2)로 표기할 수 있다.

$$R_f = 3.508 \times 10^{-3} \cdot \theta_w^{0.865} \cdot F_0^{0.572} \quad (2)$$

4. 결 론

본 연구에서는 구형용기의 상부면 냉각에 의한 해수동결거동의 매카니즘과 염분농도 및 냉각면 온도가 해수의 동결거동에 미치는 영향 등을 실험적으로 검토하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동결량 및 동결율은 수용액 농도 및 냉각면 온도가 낮을수록 증가한다.
- (2) 상부면 냉각의 경우 동결량과 동결율은 하부면의 경우와 비교하여 같은 조건에서 큰 값을 가지나 해수동결의 경우 동결초기에 한하여 물질이동에 의한 자연대류의 영향으로 동결량과 동결율은 일시적으로 낮은 값을 갖는다.
- (3) 상부면 냉각에 의한 해수동결의 경우 동결층은 하부면 냉각의 경우에 비하여 단위체적당 빙울이 높고 푸석푸석하나 비교적 견고한 형상을 취하며 계면은 둔하고 짧은 침상빙을 형성한다.
- (4) 용액부의 온도분포는 해수동결의 경우 고농

도 수용액의 석출로 인한 자연대류의 영향이 뚜렷하게 나타나며 하부면 냉각의 경우와는 반대의 온도분포 경향을 보인다.

(5) 무차원 동결량은 다음의 식으로 정리된다.

$$R_f = 3.508 \times 10^{-3} \cdot \theta_w^{0.865} \cdot F_0^{0.572}$$

참고문헌

1. 김병덕, 김재윤, "물부족현황과 국내담수화 기술개발 현황", 한국박용기관학회 춘계학술강연회, pp. 105~109, 1996.4
2. 김명환, 김용모, 김철환, "LNG냉열이용과 축냉시스템의 장래", 한국박용기관학회 논문집, 제18권, 제5호, pp. 1~11, 1994.12
3. 김명준, 김명환, 박형진, "해수동결 담수화장치 개발을 위한 해수동결 거동의 기초적 연구", 한국박용기관학회 춘계학술 강연회, pp. 100~106, 1997.4
4. 김명준, 김명환, 박형진, "구형용기의 하부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 기초적 연구", 공기조화 냉동 공학회 하계학술발표회 논문집, 제1권, pp. 347~353, 1997.6
5. 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
6. 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
7. Beckermann.C, "Melting and Solidification of Binary Mixtures with Double Diffusive Convection in the Melt", Ph.D.Thesis, Purdue University, 1987

저 자 소 개



김명준(金明俊)

1971년 3월생. 1994년 한국해양대학교 해사대학 기관공학과 졸업. 1998년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사). 당학회 회원



길병래(吉炳來)

1957년 11월생. 1981년 한국해양대학교 해사대학 기관공학과 졸업. 1996. 9~현재 한국해양대학교 운항시스템 공학부 전임강사. 당학회 회원.



최부홍(崔美洪)

1971년 1월생. 1994년 한국해양대학교 해사대학 기관공학과 졸업. 현재 한국해양대학교 대학원 기관공학과 재학중(석사). 당학회 회원.



김명환(金明煥)

1959년 1월생. 1981년 한국해양대학교 해사대학 기관공학과 졸업. 1983년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사). 1994년 일본 북해도대학 대학원 졸업(공학박사). 1994~현재 한국해양대학교 기관공학부 부교수.