

구형용기내의 상부냉각에 의한 해수동결거동의 실험적 연구

최부홍*, 김명환**

An Experimental Study on Freezing Behavior of Sea Water in a Rectangular Vessel with Cooled Top Wall

B.H.Choi, M.H.Kim

Abstract

In recent years, we are coming up against serious water deficiency, due to a explosive increase in population and a rapid industry growth. it is a pressing matter to build dams and to develop desalination system for a continuous and stabilized water supply. Therefore many efforts have been concentrated on the turning salt water into fresh water. Recently in Korea, the demand of Liquefied Natural Gas(LNG) is very being increased, because of a cheap and clean energy which does not cause an enviromental pollution problem. As a general rule, LNG is stored in a tank as a liquid state with below -162°C . However, when it is serviced, the LNG of liquid state absorbs a heat source from the sea water and transforms to the gaseous state. By the way, during that process, a tremendous amount of cold energy accumulated in the LNG is wasted in the sea water. This wasted cold energy can be utilized for the source of a desalination system, resulting into the cost reduction of fresh water production and a continuous, stable supply of water to the factories and the houses around the LNG base. Therefore the purpose of this study is to develop sea water freezing desalination system for utilizing LNG wasted cold energy. In this study, First of all, in order to obtain the fundmental data concerned with a freezing behavior of sea water, the freezing of sea water were performed experimentally in a rectangular vessel with cooled top wall

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($^{\circ}\text{C}$)
T_f : 농도에 따른 평형 동결온도	T_w : 냉각면 온도($^{\circ}\text{C}$)

* 한국해양대학교 대학원

** 한국해양대학교 기관시스템공학부

1. 서론

최근 세계적으로 급속한 산업의 발달과 인구의 증가에 따라 생활용수 및 공업용수의 소비량은 비약적으로 증가하고 있는 반면 담수자원의 한계성과 수질오염의 확산 등으로 담수부족현상은 갈수록 심화되어 가고 있다. 따라서 가장 풍부한 자원으로만 인식되었던 물은 21세기의 분쟁의 원인이 될 것이라고 많은 전문가들이 예고하고 있다.

최근 정부의 발표에 따르면 Table. 1과 같이 우리나라에서도 2006년에는 4억5천톤의 물이 모자라는 등 앞으로 7~8년 뒤부터는 심각한 물부족 현상이 전국 도처에서 빈번히 발생할 것으로 예상되고 있다. 따라서 정부는 그 심각한 물부족문제에 대비하여 수자원 장기종합개발계획을 수립하고, 2011년까지 30~40개의 신규 다목적댐을 건설할 계획이며, 인공강우 기술개발 및 해수의 담수화 등 새로운 수자원의 공급원이나, 대체수자원의 개발에 심혈을 기울이고 있다. 특히 해수의 담수화는 해수의 양이 무한정이고 쉽게 취수할 수 있다는 측면에서 지속적이고 안정적인 용수확보에 중요한 역할을 하리라 본다. 또한 댐의 건설과 상수도시설 등은 장기간 그리고 막대한 건설비용이 요구되는데 반해 담수화 설비는 입지선정이 자유롭고 제작기간과 생산관리가 용이할 뿐만아니라 주변시설의 에너지원·활용은 담수생산비용의 측면에서도 경제적인 평가를 받고 있다.

한편, 최근 우리나라에서는 환경오염의 주요 원인인 석유에너지의 소비량을 점점 줄여가고 있는 반면, 공해가 적어 청정에너지라 일컬어지는 액화천연가스(LNG)의 사용을 적극 권장하고 있으며, 그 수요량은 Table. 2에 나타낸 바와 같이 비약적으로 급증하리라 예상하고 있다. 그런데 -162°C , 초저온액체상태의 LNG가 대기압, 0°C 기체상태로 변환되기 위해서는 약 850KJ/kg 의 보유냉열을 방출해야만 하며, 이 열량은 0°C 얼음 약 2.5kg 정도를 제조할 수 있는 막대한 폐냉열에너지이다.

따라서 본 연구에서는 지금까지 극히 일부분만 이용되었거나 대부분 무의미하게 사장되었던 LNG 폐냉열에너지를 적극 활용하기 위한 방안의 일환으로써 해수동결 담수화장치¹⁾의 개발에 그 목적을 두고 있다. 특히 다량의 담수채취 가능성에 중점을 둔 해수동결 담수화장치의 개발 및 설계기술에 필요한 제반적인 기초자료를 확보하기 위하여 구형용기내의 상부면 냉각에 의한 해수동결거동에 대하여 실험적으로 검토 하였다. 본 연구에 있어서는 해수의 동결시 발생하는 상변화(액체→고체)에 따른 열·물질이동의 특성⁽²⁾⁻⁽⁶⁾, 수용액의 농도 및 냉각면의 온도변화^{(7),(8)}가 동결량과 동결속도⁽⁹⁾에 미치는 영향 등을 파악하고 그 결과를 가시화 하였다.

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 : m³

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

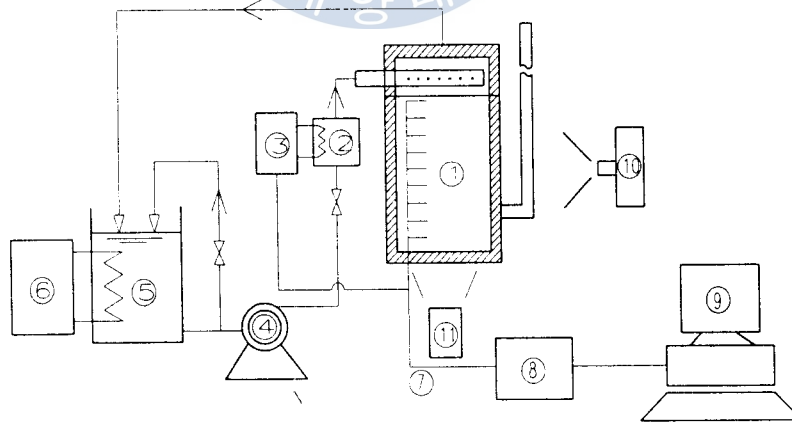
2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1의 실험장치 전체계통도에서 보는 바와 같이 실험장치는 크게 시험부, 측정부, 브라인 순환부 및 가시화부로 구성되어 있고 시험부는 $150 \times 100 \times 230\text{mm}$ 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 거쳐 상부동판의 뒷면에 끌고루 분사되도록 하였다. 구형용기의 상부냉각면의 온도는 동판의 표면에 부착된 3개의 열전대로부터 검출되어 정온도조절장치 및 데이터 처리장치로 입력된다. 또한 구형용기내의 동결부와 용액부의 온도분포를 파악하기 위하여 42개의 열전대를 수직으로 위치시켰으며, 데이터처리장치를 통해 P.C에서 온도를 기록하도록 하였다. 구형용기의 측면에는 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°C 이며 소정의 냉각온도로 조절된 브라인을 냉각면의 뒷면에 분사하는 시각을 실험의 시작점으로 하였다. 실험이 진행됨에 따라 성장하는 빙층의 형상, 두께, 동결량 및 온도분포는 지속적으로 관찰, 측정되었으며 He-Ne Gas Laser를 이용한 그림자영법 등의 방법으로 동결거동을 가시화하였다. 동결량은 팽창봉을 통한 수용액의 체적팽창율로부터 계산하였다.



- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| ① Test Section | ⑥ Refrigerating Machine |
| ② Heater | ⑦ Thermocouple Wire |
| ③ Constant Temperature Controller | ⑧ Data Acquisition System |
| ④ Brine Pump | ⑨ Personal Computer |
| ⑤ Brine Tank | ⑩ Camera |
| | ⑪ He-Ne Gas Laser |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

3 실험결과 및 고찰

3.1 상부면 냉각에 의한 해수의 동결거동

Fig. 2는 해수의 동결과정중 구형용기내에 성장하는 동결층 및 동결계면에서 석출된 용질이 고농도수용액의 형태로 흘러내리는 현상을 He-Ne Gas Laser를 이용한 그림자영법으로 가시화한 것이다. 그림으로부터 동결층 하부계면에서 석출된 차가운 고농도수용액이 연속적인 유선형 형태로 용액부의 대류를 조장하며 용기의 하부측으로 흘러내고 있음을 알 수 있다. 또한 고·액상 경계면에는 석출된 용질의 농축으로 인한 구성적 과냉구역이 형성되면서 그 주위에 바늘모양의 빙이 성장하고, 석출되어 나오는 용질의 일부가 동결층내에 고농도수용액의 형태로 혼입되어 잔존하기 때문에 유동성이 강한 사베트모양의 동결층을 형성한다. 동결이 진행됨에 따라 석출된 용질은 동결층의 하부계면으로부터 차가운 고농도수용액의 형태로 용액부에 흘러내리면서 인접 수용액의 농도를 증가시킬 뿐만아니라 전반적으로 용액부의 온도를 강하 시킨다. 또한 용액부의 저농도 수용액은 상방으로, 고농도의 수용액은 하부로 이동하며 수용액의 동결메카니즘을 나타낸 Fig. 3과 같이 용액부의 높이 방향으로 농도가 재분포되면서 용액부의 평균농도가 초기농도 보다 높게 된다. 아울러 용액부에는 상층으로 갈수록 온도가 저하하는 온도구배가 발생하게 되어 결국 용액부에서는 온도 및 농도구배의 상호 상승작용으로 인한 자연대류가 형성된다. 이렇게 형성된 자연대류 흐름은 동결층 계면을 용해시켜 실험초기의 동결량 및 동결속도를 저하시키지만 석출된 용질을 신속히 하부측으로 운반함에 따라 대류흐름에 의한 용해량 보다 동결층의 성장속도가 결국 우세하게 된다.

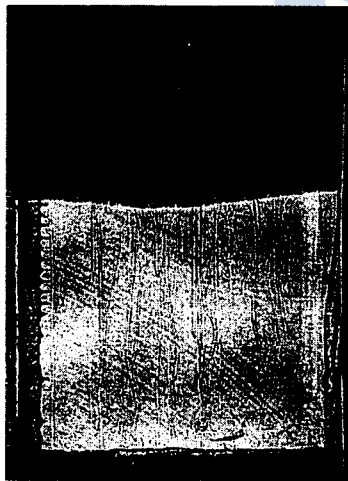


Fig 2 Freezing characteristic

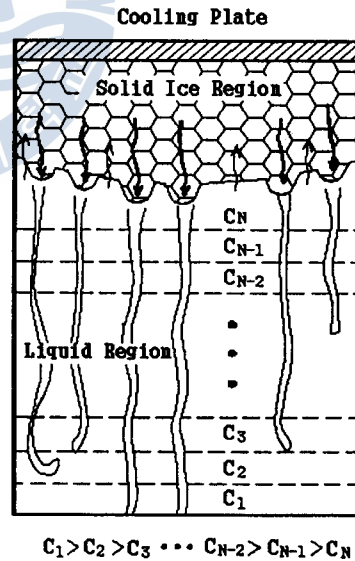


Fig 3 Freezing of mechanism

3.2 초기농도의 영향

Fig. 4는 냉각면온도 -5°C , 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 수용액의 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. 5, Fig. 6은 염화나트륨 수용액의 초기농도변화가 동결량과 동결율에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림으로부터 실선인 상부 냉각면의 경우 수용액의 초기농도가 낮을수록 동결량이 증가하고 동결율 역시 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 초기농도가 낮을수록 평형동결온도가 상승하므로 동결계면에서 상부 냉각면으로의 열유속이 증가하기 때문이다. 동결율은 동결의 초기에 큰 값을 가지나 빙층이 두꺼워짐에 따라 급격히 감소하여 비교적 완만한 경사를 이루며 줄어드는 경향을 보이고 있다. 초기의 큰 값은 빙층의 두께가 비교적 얇은 경우에 동결계면에서의 온도구배가 크게 되므로서 냉각면으로의 열



Fig. 4 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior ($T_w = -5^\circ\text{C}$, $t = 13\text{hr}$)

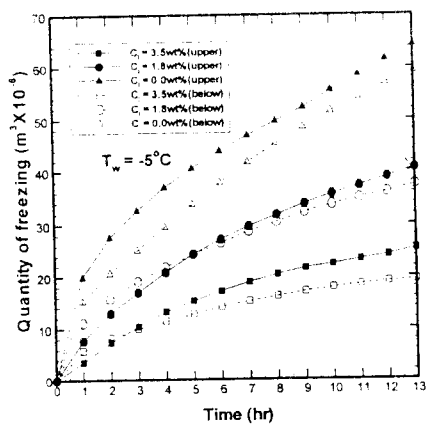


Fig. 5 Quantity of freezing

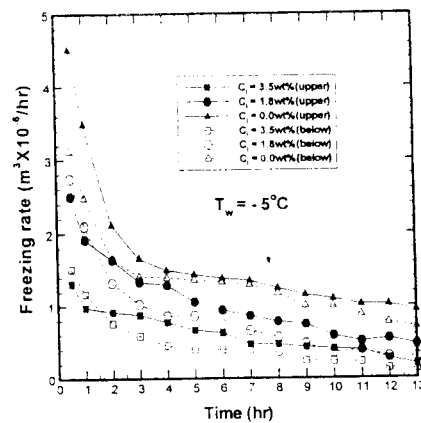


Fig. 6 Freezing rate

유속이 증가하기 때문이다. 그림으로부터 하부면 냉각의 경우와 비교하여 동결량 및 동결율이 같은 조건에 대하여 상부면 냉각의 경우가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 상부 면이 냉각되어 수용액이 동결됨에 따라 석출된 대부분의 용질은 하부 용액부로 흘러내려 하부 냉각면의 경우와 같이 동결층내에 고농도의 수용액으로 축적되는 율이 적으므로 동결계면의 평형 동결온도의 하강율이 낮게 되기 때문이다. 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°C로 유지되어 있는 용액부의 대류를 조장하므로서 동결계면에 대한 대류열전달의 영향으로 전도열전달이 지배적인 하부 냉각면의 경우에 비하여 동결초기에는 오히려 동결량 및 동결율이 감소하기 때문이다.

3.3 냉각면 온도의 영향

Fig. 7은 He-Ne Gas Laser를 이용한 그림자영법으로 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. 8과 Fig. 9는 Fig. 7과 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.

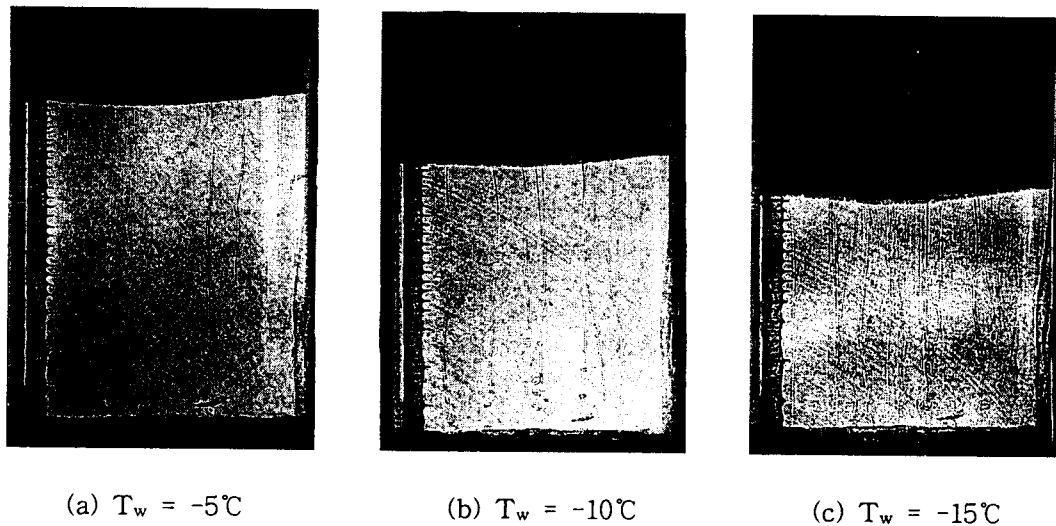


Fig. 7 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior
($C_i = 3.5\text{wt}\%$, $t = 13\text{hr}$)

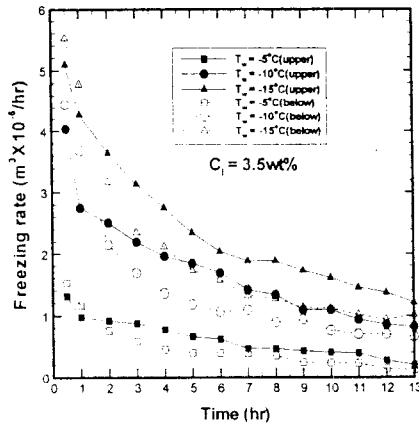


Fig. 8 Quantity of freezing

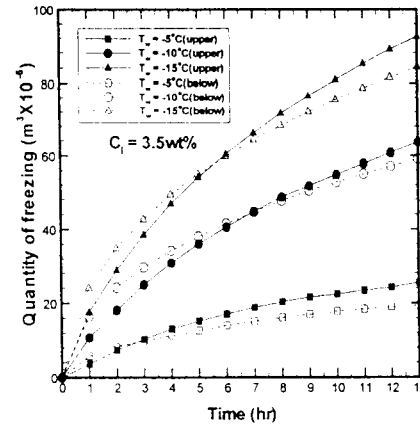
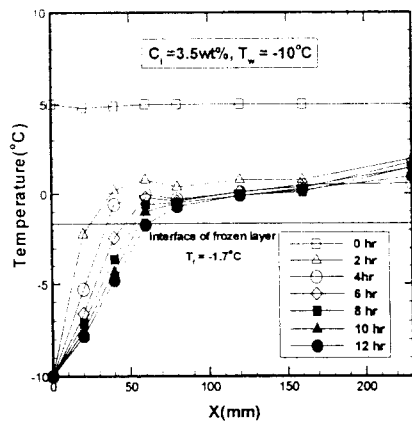


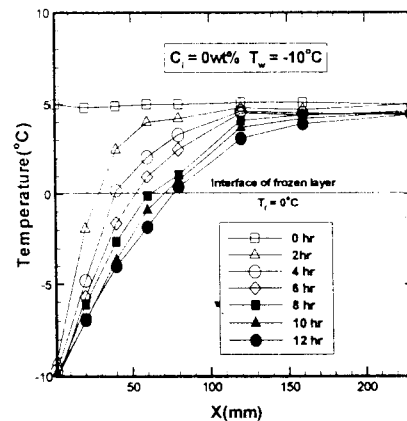
Fig. 9 Freezing rate

3.4 동결층의 형상 및 온도분포

Fig. 10에는 상부 냉각면에 대하여 측정된 동결계면의 위치와 온도분포를 상부 냉각면으로부터의 거리에 대하여 표시하였다. 그림으로부터 동결계면의 위치와 평형 동결온도선이 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 해수와 순수한 물의 용액부 온도분포의 비교에서 분포형태가 대단히 상이함을 확인할 수 있다. 해수와 순수한 물의 용액부 온도분포가 상이하게 나타나는 것은 해수동결의 경우 석출되는 고농도수용액이 자연대류를 조장하여 용액부가 대류에 의하여 지배되는 전형적인 온도분포를 나타내고 있으며, 순수한 물의 경우에는 3.98°C에서 밀도가 최대가 되는 물성의 특성에 따라 용액부에서의 열의 이동이 전도에 의하여 지배되기 때문에 전도에 의한 온도분포의 형태를 나타내고 있기 때문이다. Fig. 11에서 나타낸 하부면 냉각의 경우와 상부면 냉각의 경우의 온도분포 특성을 비교하여 보면 그 경향이 반대임을 알 수 있다. 즉 상부면 냉각에서 해수의 경우는 하부면 냉각의 순수한 물의 온도분포 경향과 동일하며, 상부면 냉각의 순수한 물인 경우



(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. 10 Position of frozen layer and temperature distribution in the case of cooling top wall

에는 하부면 냉각의 해수의 온도분포 경향과 동일하다. Fig. 12는 동결면 형상을 나타낸 것으로 순수한 물인 경우는 투명하고 견고한 반면, 해수의 경우는 동결층이 불투명하고 고액공존층의 형성으로 푸석푸석하며 동결계면은 둔한 침상빙의 형태를 취하고 있음을 볼 수 있다.

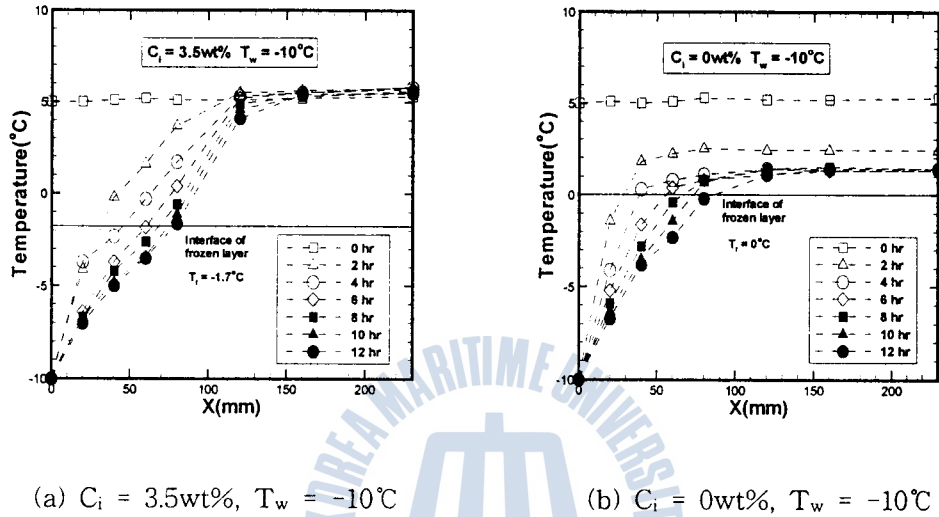


Fig. 11 Position of frozen layer and temperature distribution in the case of cooling bottom wall

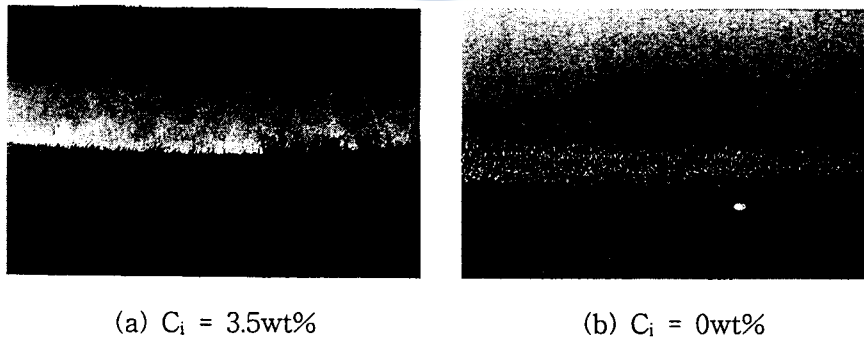


Fig. 12 Configuration of frozen layer

3.5 동결량의 무차원 정리

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

$$R_f = f(\theta_w, F_0) \tag{1}$$

모든 실험데이터를 최소자승법을 이용하여 식 (1)의 형식으로 정리하면 무차원 동결량은 ±15%의 범위내에서 Fig. 13과 같이 나타나며, 아래와 같은 식(2)로 표기할 수 있다.

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

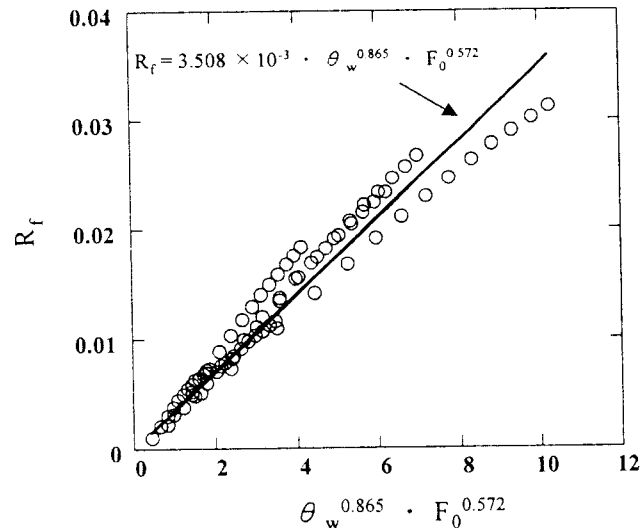


Fig. 13 Nondimensional freezing rate

4. 결론

본 연구에서는 LNG 폐냉열에너지를 이용한 해수동결 담수화장치의 개발 및 설계기술의 확립에 있어서 핵심이 되는 해수동결거동에 대한 정성적, 정량적 기초 자료를 수집, 검토하기 위하여 구형용기내의 상부면 냉각에 의한 염화나트륨수용액의 동결거동을 실험적으로 검토 하였다. 상부면 냉각에 의한 해수동결 메카니즘의 파악과 냉각면 온도가 동결량 및 열·물질이동 특성에 미치는 영향 등을 가시화를 포함한 실험적 방법으로 연구 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동결량 및 동결율은 염화나트륨수용액의 농도 및 냉각면 온도가 낮을수록 증가한다.
- (2) 상부면 냉각의 경우 동결량과 동결률은 하부면의 경우와 비교하여 같은 조건에서 큰 값을 가지나 해수동결의 경우 동결초기에 한하여 물질이동에 의한 자연대류의 영향으로 동결량과 동결률은 일시적으로 낮은 값을 갖는다.
- (3) 상부면 냉각에 의한 해수동결의 경우 동결층은 하부면 냉각의 경우에 비하여 단위체 적당 빙율이 높고 푸석푸석하나 비교적 견고한 형상을 취하며 계면은 둔하고 짧은 침상 빙을 형성한다.
- (4) 용액부의 온도분포는 해수동결의 경우 고농도수용액의 석출로 인한 자연대류의 영향이 뚜렷하게 나타나며 하부면 냉각의 경우와는 반대의 온도분포 경향을 나타낸다.
- (5) 본 연구에서 실시한 실험을 통하여 얻어진 수용액의 동결량을 무차원화하여 정리하면 무차원 동결량 R_f 는 다음식으로 나타낼 수 있다.

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

참고문헌

- (1) 김명환, 김용모, 김철환, "LNG 냉열이용과 축냉시스템의 장래", 한국박용기관학회 논문집 제 18권, 제5호, pp. 1~11 (1994)

- (2) 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)
- (3) Choi, j. and Viskanta, R., "Freezing of aqueous sodium chloride solution saturated packed bed from above", In *Topics in National Heat Transfer*, Vol. 2 (Edited by Toner, M., Flik, M.I., Webb, W, B., et al), HTD-Vol. 206, No. 2, pp. 159~166, ASME, New York (1992)
- (4) Beckermann, C. and Viskanta, R., "An experimental study of solidification of binary mixtures with double-diffusive convection in the liquid", *Exp. Thermal Fluid Sci.* 2, pp. 17~26 (1989)
- (5) Beckermann, C., "Melting and Solidification of Binary Mixture with Double-Diffusive Convection in the Melt", Ph.D. Thesis, Purdue University (1987)
- (6) Beckermann, C. and Viskanta, R., "Double-Diffusive Convection During Dendritic Solidification of a Binary Mixture", *Physico Chemical Hydrodynamics*, Vol. 10, No. 2, pp. 195~213 (1988)
- (7) Christensen, M. S. and Incropera, F. P., "Solidification of an Aqueous Ammonium Chloride Solution in a Rectangular Cavity- I. Experimental Study", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 47-67 (1989).
- (8) Chellaiah, S., Water, R.A. and Zampino, M.A., "Solidification of an aqueous salt solution in the presence of thermosolutal convection", In *Proceedings of the ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*, Vol. 2, pp. 165~173 (1991)
- (9) 福迫尙一郎, 栢葉英男, "低溫環境下の伝熱現象とその応用", 養賢堂発行, pp. 320~342 (1996)