

## 원관내의 해수동결거동에 관한 실험적 연구

박종덕\* · 김명준\* · 김명환\*\*

## An Experimental Study on Sea Water Freezing Behavior in a Cooled Circular Tube

J. D. Park\*, M. J. Kim\*, M. H. Kim\*\*

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

## Abstract

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  $-162^{\circ}\text{C}$ . When it is serviced, however, the LNG absorbs energy from a heat source and it is transformed 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 in a cooled circular tube, to measure the freezing rate, and to investigate the freezing heat - transfer characteristics. The experimental results provide a general understanding of sea water freezing behavior in a cooled circular tube.

## 기호설명

 $F_0$  : Fourier 수( $\alpha \cdot \tau / H_0^2$ ) $H_0$  : 초기용액의 반경(m) $R_f$  : 무차원 동결량( $V_f / H_0$ ) $T_f$  : 농도에 따른 평형 동결온도( $^{\circ}\text{C}$ ) $T_0$  : 물의 동결온도( $^{\circ}\text{C}$ ) $T_w$  : 냉각면 온도( $^{\circ}\text{C}$ ) $V_f$  : 냉각면 단위면적당의 동결량( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ) $X$  : 원관내표면으로부터 중심까지의 거리(mm) $\theta_w$  : 무차원 냉각면 온도 $[(T_f - T_w) / (T_0 - T_f)]$  $\alpha$  : 얼음의 온도전도율( $\text{m}^2/\text{s}$ ) $\tau$  : 시간(s)

\* 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 98년 7월)

\*\* 한국해양대학교 기관시스템 공학부

## 1. 서 론

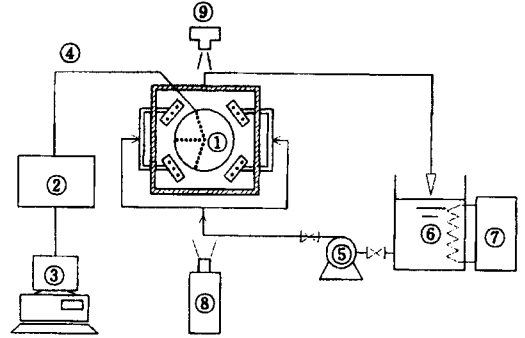
세계 수자원정책연구소에서는 20세기에 많은 분쟁의 원인이 석유였다면 21세기에서는 수자원이 분쟁의 씨앗이 될 것으로 분석하고 있으며, 현재에도 일부 지역간 및 국가간에 안정적인 수자원의 확보와 수자원의 권리를 놓고 심각한 대립의 양상을 보이고 있다. 점차 이 현상은 산업화의 진전과 규모의 확장으로 수자원 수요의 증가와 함께 더욱 더 빈번하고 폭력적인 분쟁으로 발전할 가능성을 충분히 지니고 있다. 수자원이 부족하여 물부족 국가로 분류되고 있는 우리나라도 이와같은 문제에서 예외일 수 없으며, 21세기 고도의 산업화를 계획하고 있는 우리나라 정부로서는 예상되는 수자원의 수요와 공급의 불균형을 해소하기 위하여 자연강우에 대한 치수의 노력과 아울러 인공강우 기술 및 효과적인 담수화장치<sup>1)</sup>의 개발 등 다각적인 대응책을 제시하고 있다.

본 연구에서는 경쟁력 있는 담수화장치의 개발이라는 궁극적인 목표 아래, 폐기되거나 사용율이 낮은 LNG의 냉열을 해수동결담화장치의 에너지원으로 이용함으로써 LNG기지 근접 지역에 값싼 용수를 안정적으로 공급할 수 있는 효과적인 방법을 제시하고자 하며, 먼저 관련하는 설계 기술 확립을 목적으로 해수동결 거동에 대한 기초적인 자료를 수집하고자 한다. 이러한 연구의 일환으로서 구형용기내의 한쪽면 냉각에 의한 해수동결거동의 특성을 실험적으로 검토하고 도출된 연구결과의 일부를 이미 발표<sup>2)</sup>한 바 있다. 계속되는 연구과정의 하나로서 냉각원관 내에서의 해수동결거동에 대하여 해수농도 및 냉각면온도가 동결층형상, 동결량 및 열·물질 이동적인 특성<sup>3)</sup>에 미치는 영향 등을 가시화를 포함하는 실험적 방법으로 검토하고 그 결과를 보고하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1에 실험장치의 전체 계통도를 나타내었다. 실험장치는 크게 시험부, 브라인 순환부, 측정부 및 가시화부로 구성되어 있으며, 시험부는 내경



- ① Test Section
- ② Data Acquisition System
- ③ Personal Computer
- ④ Thermocouple Wire
- ⑤ Brine Pump
- ⑥ Brine Tank
- ⑦ Refrigerating Machine
- ⑧ Ar Gas Laser
- ⑨ Camera

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

148mm, 길이 160mm, 두께 3mm의 동관 외측에 소정의 온도로 유지된 브라인이 직접 접촉할 수 있는 구조로 되어 있으며, 전·후면은 투명의 아크릴로 제작하여 원관내 해수동결거동을 관찰할 수 있게 하였다. 원관의 내표면을 소정의 냉각면 온도로 유지하기 위하여 냉동기로 온도가 조절된 브라인을 미세온도조절장치를 거쳐 원관의 뒷표면에 골고루 분사되도록 하였으며, 원관의 내표면 온도를 측정하기 위하여 3개의 열전대를 동관 내표면의 상, 하, 측면에 부착하였다. 또한 원관내의 동결부와 용액부의 온도분포를 파악하기 위하여 19개의 열전대를 위치시켜 데이터처리장치를 통해 PC에서 온도를 기록하도록 하였다. 원관의 후면에는 동결이 진행됨에 따라 증가하는 체적량을 보상하기 위하여 내경 14mm의 팽창봉을 부착하였다.

### 2.2 실험방법

본 실험에서의 시료로서는 해수의 평균농도가 3.5wt%임을 감안하여 0wt%, 1.8wt%, 3.5wt%의 염화나트륨 수용액을 사용하였다. 원관내의 염화나트륨 수용액의 초기온도는 5℃이며, 소정의 냉각온도로 조절된 브라인을 냉각면의 뒷면에 분사하는 시각을 실험의 시작으로 하였다. 실험이 진행됨에 따라 성장하는 빙층의 형상, 두께, 동결량 및 온도분포는 지속적으로 관찰, 측정되었으며 Ar가

스레이저를 이용한 그림자영법 등의 방법으로 동결거동을 가시화하였다. 동결량은 팽창봉을 통한 수용액의 체적증가율로부터 계산하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 농도의 영향

Fig. 2는 냉각면온도  $-5^{\circ}\text{C}$ , 실험개시 4hr. 후의 염화나트륨 수용액 농도의 변화에 대한 동결층 형상을 가시화한 사진이다. 그림으로부터 농도가 저하됨에 따라 동결층이 두꺼워짐을 즉, 동결량이 증가함을 알 수 있다. 이것은 농도가 감소할수록 평형동결온도가 상승하여 동결계면에서 냉각면으로의 열유속이 증가하기 때문이다. 수용액인 (a), (b)의 경우에는 동결이 진행됨에 따라 용질이 석출 (Fig. 9참조)하게 되고, 용액부의 농도상승과 함께 동결계면의 평형동결온도가 더욱 하강하게 되어 동결율의 감소를 가속화시킨다. 또한 동결층의 형상을 보면 순수액의 경우는 견고하고 투명하나, 수용액의 경우는 용질의 석출로 침상빙 형태를 하고 액공존층이 전반적으로 형성되고 있음을 알 수 있다. 그리고 수용액의 경우 석출된 고농도 수용액이 하부에 축적됨으로 인하여 하부의 동결율이 저감되어 달걀모양을 한 형상을 취하며, 아울러 하부동결층에는 침예하고 빙율이 낮은 침상빙이 높게 형성됨을 볼 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 4에는 Fig. 2와 같은 조건에서 수용액 농도에 대한 동결량 및 동결율의 변화를 나타

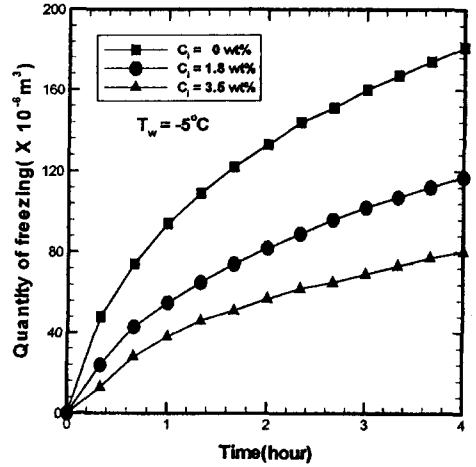


Fig. 3 Quantity of freezing

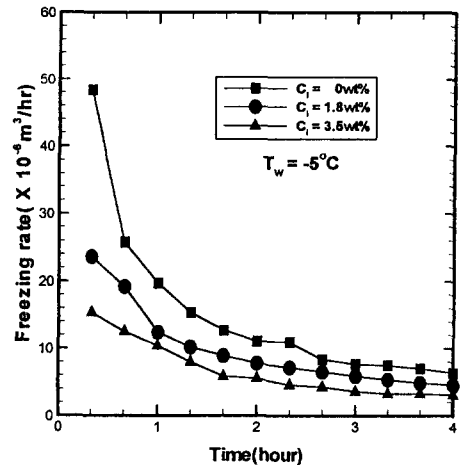
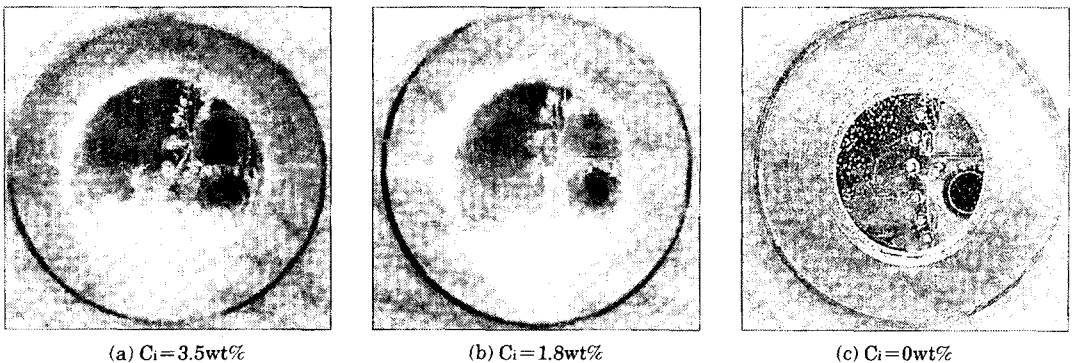


Fig. 4 Freezing rate



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

(b)  $C_i = 1.8 \text{ wt}\%$

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

Fig. 2 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior  
 $T_w = -5^{\circ}\text{C}$ , Time = 4hr

내고 있다. 그림에서 농도가 감소함에 따라 동결량 및 동결율이 증가하는 것은 전술한 바와 같이 농도 감소에 따라 평형동결온도가 상승하여 동결계면에서 원관 하부로의 열유속이 증가하기 때문이며, Fig. 4에서 실험의 초기에 동결율이 크게 나타나는 이유는 빙층의 두께가 비교적 얇은 경우에는 동결계면에서의 온도구배가 크기 때문에 원관으로의 열유속이 증가하기 때문이다.

### 3.2 냉각면 온도의 영향

Fig. 5는 냉각면 온도의 영향에 따른 해수(염화나트륨 수용액 평균농도 : 3.5wt%)의 동결거동을 가시화한 사진이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 냉각면의 온도가 낮을수록 동결층이 두꺼워짐을 알 수 있다. 즉 냉각면의 온도가 낮을수록 동결면으로부터 원관 외측으로의 열유속이 증가하여 동결량이 크게 되기 때문이다. 동결층은 전술한 바와 같이 고액공존층의 형성과 침상빙의 성장으로 빙층이 불투명하게 보이며, 석출되어 나온 고농도의 수용액이 하부에 축적됨으로 말미암아 하층의 동결율이 감소하는 달걀모양의 형상을 이루고, 하부동결계면에는 침예하고 빙율이 낮은 침상빙이 상방향으로 크게 형성되어 있음을 그림으로부터 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 Fig. 5와 같은 조건에서 시간에 대한 동결량과 동결율의 변화를 나타낸 것으로 가시화된 Fig. 5의 결과와 같이 냉각면 온도가 감소할수록 동결량 및 동결율이 증가하고 있음을 알 수 있다.

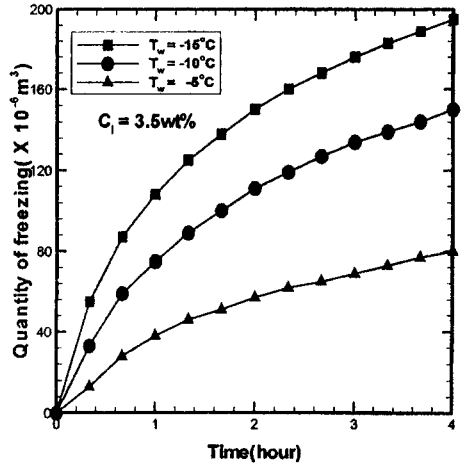


Fig. 6 Quantity of freezing

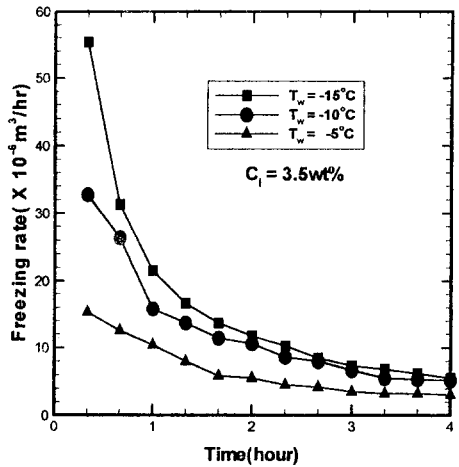


Fig. 7 Freezing rate

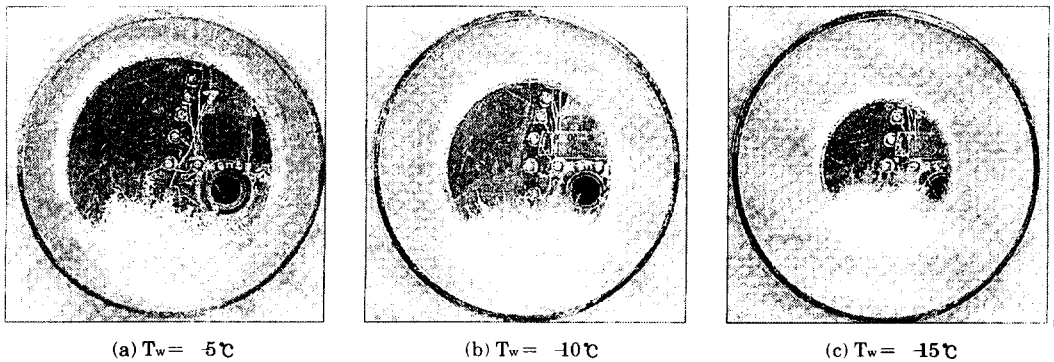


Fig. 5 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior  
C<sub>i</sub> = 3.5wt%, Time = 2hr

3.3 동결층 형상과 온도분포 특성

Fig. 8은 동결층과 용액부를 포함하는 원관내 측면방향 온도분포를 원관내표면에서부터 원관 중심까지의 거리에 대하여 나타낸 것으로 초기온도 5°C에서 시간의 경과와 함께 직선적으로 온도가 상승하다가 임의의 거리에서 일정온도를 유지하는 분포를 하고 있다. 직선적인 온도 변화부는 대부분이 동결층의 온도분포에 해당하며 동결층내의 열이동이 전도에 의하여 지배됨을 알 수 있다. 또한, 일정온도 영역은 용액부에 해당되며 대류에 의한 열이동이 지배적으로 시간의 경과와 함께 초기수용액농도에 해당하는 평형동결온도에 접근함을 알 수 있다. 순수액의 경우 충분히 시간이 경과한 후의 용액부 온도가 동결계면의 평형동결온도

와 잘 일치하는 반면, 해수의 경우 용액부의 온도가 초기농도의 평형동결온도보다 낮게 유지됨을 알 수 있다. 이와 같이 해수의 경우 용액부의 온도가 초기농도의 평형동결온도보다 낮게 유지되는 것은 동결이 진행됨에 따라 석출된 고농도의 수용액으로 말미암아 용액부의 농도가 상승됨으로서 동결계면에서의 동결온도가 하강하기 때문이다. 그리고 냉각 초기에 용액부의 온도 하강율을 비교하여 보면 해수가 순수액의 경우보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 해수의 경우 동결과 함께 석출되는 낮은 온도의 고농도 수용액이 하부로 흘러내림으로 인하여 온도차로 인한 자연대류의 발생에 부가적인 대류의 견인력으로 작용함으로써 용액부의 냉각을 가속화 시키기 때문이다. Fig. 9는

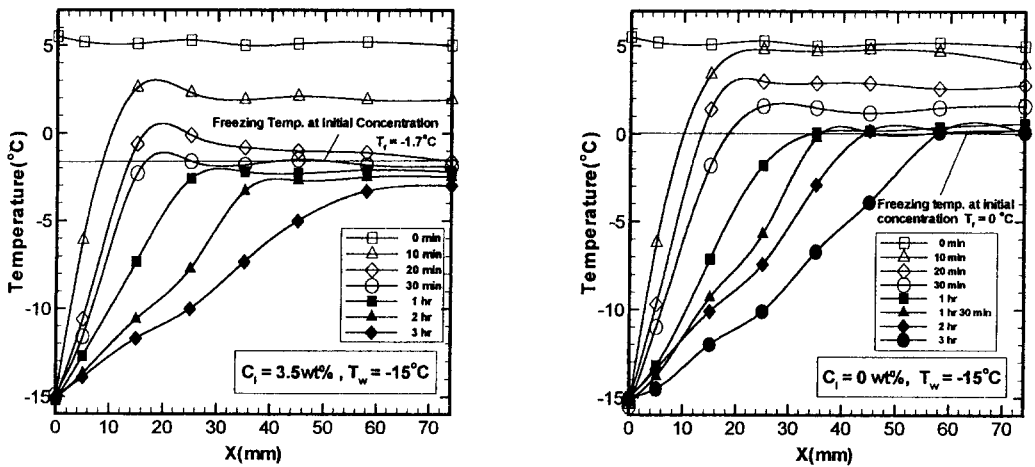


Fig. 8 Frozen layer and temperature distribution T<sub>w</sub> = -15°C

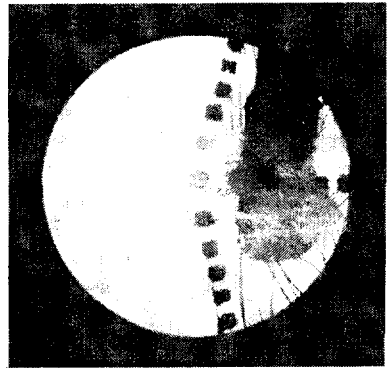
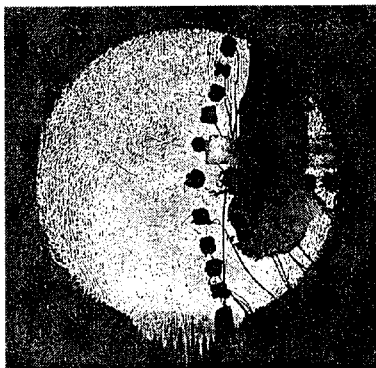


Fig. 9 Flow pattern

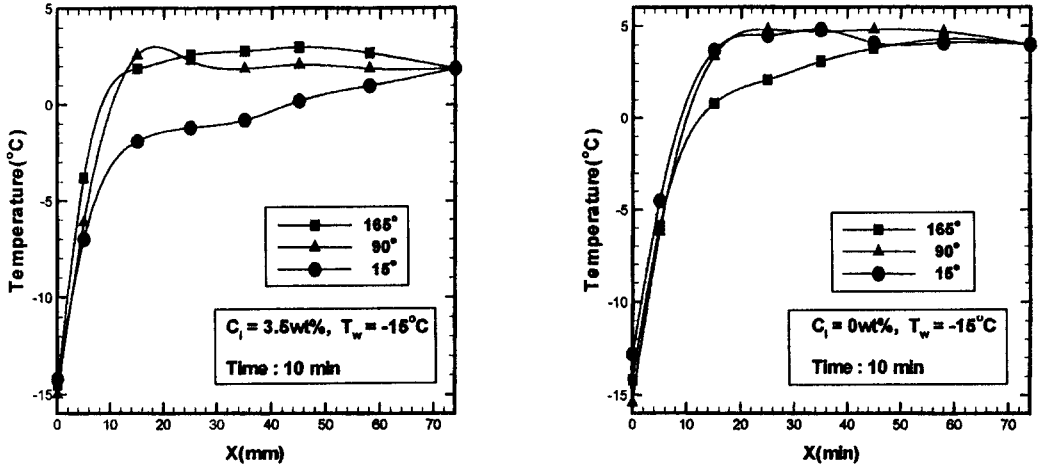


Fig. 10 Comparison of temperature distribution  
 $T_w = -15^\circ\text{C}$ , Time = 10min

Ar가스레이저를 사용하여 음영법으로 액상부의 유동특성을 가시화한 사진이다. 그림으로부터 해수의 경우에는 동결에 따른 고농도 수용액의 석출을 분명히 확인할 수 있으며, 이로 인한 가중되는 대류의 영향을 예측할 수 있는 반면, 순수액의 경우에는 온도차에 의한 대류의 영향만을 고려할 수 있다. 또한 그림으로부터 해수의 경우 하부면에 날카로운 침상빙의 그림자와 횡방향의 음영의 띠를 볼 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 하부 동결층에는 침예하고 빙율이 낮은 침상빙이 형성되고, 석출된 고농도의 수용액이 하부 동결층에 정체함으로 인하여 큰 농도구배가 음영의 띠로 나타나기 때문이다.

Fig. 10은 해수와 순수액의 상(165°), 하(15°), 측면(90°) 방향 온도분포를 비교한 것으로 해수의 경우 하면방향의 온도가 상면, 측면 방향보다 낮게 나타나며, 반대로 순수액의 경우에는 상면방향의 온도가 낮게 유지됨을 알 수 있다. 즉, 해수와 순수액의 용액부 흐름방향이 반대이며, 해수는 동결계면을 따라 내려와 하면 중앙부에서 상승하는 흐름을, 순수액인 물의 경우에는 4°C에서 최대밀도가 되는 물성으로부터 하부에서 동결계면을 따라 상승하는 흐름을 가진다는 것을 알 수 있다.

### 3.4 동결량

본 실험의 범위내에서 무차원 동결량은 아래와

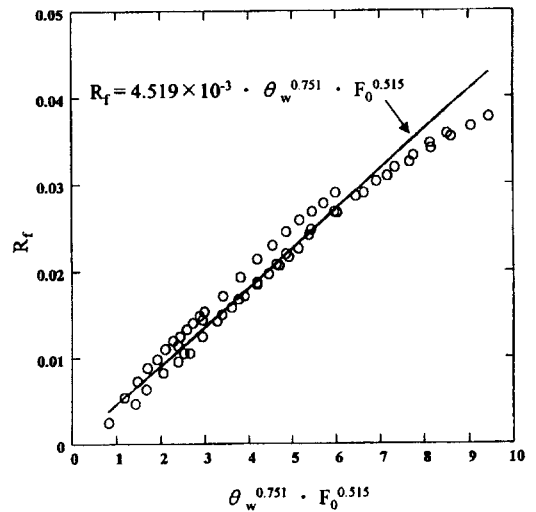


Fig. 11 Nondimensional freezing rate

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 Fig. 11과 같이 나타나며 아래와 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$R_f = 4.519 \times 10^{-3} \cdot \theta_w^{0.751} \cdot F_0^{0.515} \tag{2}$$

### 4. 결 론

본 연구에서는 원관내에서 염화나트륨 수용액의 농도와 냉각면 온도가 해수의 동결거동에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동결량과 동결율은 염분농도가 저하됨에 따라, 그리고 냉각면의 온도가 낮을수록 증가한다.
- (2) 해수의 동결이 진행됨에 따라 석출되는 고농도 수용액으로 말미암아 동결계면은 달걀모양의 형상을 취하며, 하부면에는 빙울이 낮고 첨예한 침상빙이 높이 방향으로 크게 자란다.
- (3) 석출되는 고농도의 수용액은 자연대류를 촉진시키는 방향으로 작용하여 용액부의 온도 변화에 큰 영향을 준다.
- (4) 무차원 동결량은 다음식으로 정리 된다.

$$Rf = 4.519 \times 10^{-3} \cdot \theta_w^{0.751} \cdot F_0^{0.515}$$

### 참고문헌

1. 김명환, 김용모, 김철환, "LNG냉열이용과 축냉시스템의 장래", 한국박용기관학회 논문집, 제18권, 제5호, pp. 1~11, 1994.12
2. 김명준, 김명환, 박형진, "해수동결 담수화장치 개발을 위한 해수동결 거동의 기초적 연구", 한국박용기관학회 춘계학술 강연회, pp.100~106, 1997.4
3. 김명준, 김명환, 박형진, "구형용기 하부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 기초적 연구", 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회 논문집, 제1권, pp. 347~353, 1997.6
4. 김명준, 김병래, 김명환, "구형용기의 하부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 기초적 연구", 한국박용기관학회지, 제21권, 제5호, pp.564~570, 1997.11
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



**박종덕(朴鍾德)**

1972년 7월생. 1995년 한국해양대학교 해사대학 기관공학과 졸업. 현재 한국해양대학교 대학원 기관공학과 재학중(석사). 당학회 회원



**김명준(金明俊)**

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