

냉각원관 주위의 해수동결거동에 관한 실험적 연구

김성태* · 김명환** · 오 철***

An Experimental Study on Sea Water Freezing Behavior around a Cooled Tube

S T. Kim · M H. Kim · C. Oh

〈 목 차 〉

- | | |
|-----------------|-----------------|
| I. 서 론 | IV. 동결량의 무차원 정리 |
| II. 실험장치 및 실험방법 | V. 결 론 |
| III. 실험결과 및 고찰 | ※ 참고문헌 |

Abstract

Recently, With the explosive increase in population and a rapid industry growth, we are confronted with serious water deficiency problem. In Korea, the demand of LNG, as a cheap and clean energy which does not cause an environmental pollution is in creasing every year. However, when it is serviced, a huge amount of cold energy accumulated in LNG is wasted. The goal of this study is to develop a sea water freezing desalination for using LNG with wasted cold energy.

So we have to establish a qualitative and quantitative data regarding the freezing behavior of sea water. In order to obtain this data, the freezing of sea water was performed experimentally around a cooled tube in a rectangular vessel.

Key words

Environmental Pollution, Freezing Desalination system, LNG Cold Energy, Sea Water Freezing Behavior.

* 한국해양대학교 대학원

** 한국해양대학교 기관시스템공학부 교 수

*** 한국해양대학교 기관시스템공학부 부교수

○ 기호설명

C_i : 초기염분농도[wt%]	F_o : Fourier수[-]
H_o : 초기수용액의 깊이[m]	R_f : 무차원 동결량[-]
t : 시간[hr]	T_f : 농도에 따른 평형동결온도[°C]
T_o : 물의 동결온도[°C]	T_w : 냉각면온도[°C]
V_f : 냉각면 단위면적당 동결량[m ³ /m ²]	α : 얼음의 온도전도율[m ² /s]
θ_w : 무차원 냉각면온도[-]	τ : 시간[s]

I. 서 론

물은 모든 생물체가 살아가는데 있어서 필수 불가결한 것으로, 인류문명의 발달은 물을 중심으로 하여 전개되어 왔으며 현대의 모든 산업 발전에 기본이 되었다.

현재 지구상의 물은 약 13억8600만킬로톤이다. 이중 바닷물이 전체 97%인 13억5000만킬로톤으로 물부족량의 절대량을 차지하고 나머지 3%만이 담수이다. 담수중에서도 69%는 빙산과 빙하이고, 지하수가 29%, 지표수는 담수의 2%인 100만킬로톤에 불과하다.

세계 수자원 수요는 인구증가, 산업화 등으로 증가하고 있는 반면, 공급잠재력은 수자원 고갈 및 수질오염 확산 등으로 급감함에 따라 수자원 부족 심화는 물론 국제 물 분쟁이 확산될 가능성이 커지고 있다. 세계은행(IBRD)의 발표에 따르면 20세기 많은 분쟁의 원인이 석유였다면 21세기는 물분쟁의 시대가 될 것이라는 예고도 있다.

한편, UN의 국제인구행동연구소(PAI)가 발표한 보고서에 따르면 한국은 현재 1인당 물사용량이 1,500톤 미만으로 물압박국으로 분류되고 있으며, 우리나라는 지형적, 기후적 특성으로 인하여 점차적으로 물부족이 심화되고 있다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 우리나라의 물 공급 전망도 좋지 못하다. 우리나라의 물 수요와 공급은 '94년말 324억톤 공급에 301억톤 수요로 23억t의 여유가 있었으나 2011년에는 367억톤의 수요가 발생할 것으로 예측되고 있다. 또 현재 건설중인 6개 댐을 2000년까지 완공해도 2001년 이후에는 용수예비율이 2.1%에 불과하여 2011년에는 예비율이 마이너스 5.5%로 역전될 전망이다.

따라서 인공적인 용수생산에 있어서 해수를 담수화하려는 기술이 개발되어 왔으며, 우리나라의 경우 삼면이 해안과 접하고 있기 때문에 해수를 이용하는 것이 용이하다. 이것은 안정적인 원수(原水)의 확보를 의미하며, 중요한 공단지역이 해안과 접하고 있는 것을 감안할 때 더욱 유리하다. 해수의 담수화 방법으로서 대표적인 방법은 증발법, 역삼투막법, 냉동법, 전기투석법 등이 있다. 이러한 담수화 방법들의 선정에 있어서 가장 중요한 요소는 담수생산비용이며, 이는 쉽고 값싸게 얻을

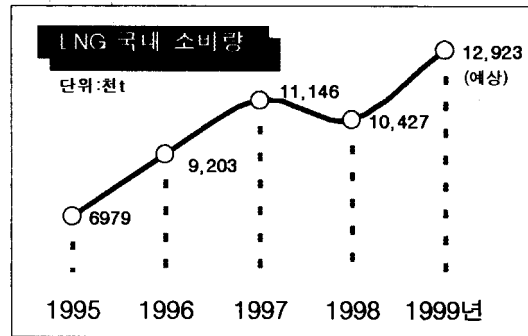
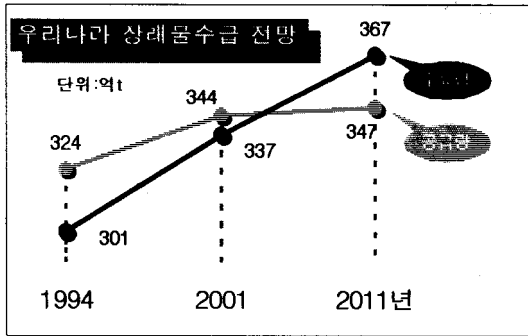


Fig. 1 Comparison of water supply and consumption

Fig. 2 Estimated consumption of LNG

수 있는 담수용 에너지원에 의해 따라 결정되고 있다. 현재 우리나라의 경우 임해공업단지 주변 등에 설치된 담수화설비는 증발법과 역삼투막법 등이 대부분이며, 이것은 단지로부터의 폐열과 전력을 용이하게 확보할 수 있기 때문이다.

한편, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 우리나라는 1987년 다른 연료에 비하여 비교적 저가이며 환경오염문제를 유발시키지 않는 청정연료인 LNG(액화천연가스)공급을 시작한 이래 1997년에는 연간 1000만톤 공급이 초과 달성되었고, 그 수요량은 IMF사태로 인한 1998년을 제외하면 그 수요가 매년 증가할 것으로 예상하고 있다. LNG는 메탄을 주성분으로 하는 천연가스를 액화시킨 것으로 1kg당 200kcal의 냉열을 보유하고 있다. 1m³의 LNG를 대기압하에서 -162℃까지 냉각시키면 0.0017m³의 액체로 액화되고 체적은 1/600로 된다. 특수하게 제작된 LNG저장탱크에 저장된 LNG는 발전소 연료 및 도시가스용으로 공급하기 위하여 -162℃의 초저온액체인 LNG를 0℃의 기체로 기화시킨 후 공급배관망을 통하여 전국으로 공급하게 된다. 이때 LNG 1kg이 0℃의 대기압하에서 상태변화(기화)를 할 경우에 주위로부터 흡수하는 에너지는 약 850kJ(LNG발열량의 1.5%)이며 이것은 0℃의 얼음을 2.5kg을 제조할 수 있는 열량이 된다. 따라서 폐기되는 다량의 LNG냉열은 해수동결의 에너지원으로 해수동결 담수화장치에 유용하게 사용될 수 있으며, 이러한 해수동결담수화장치의 운용은 감압증발 방식에 비하여 담수생산비용에 있어서 비교우위를 점하게 될 뿐만 아니라 LNG공급기지 주변의 공업단지 및 주택지에 공업용수 및 생활용수를 지속적이고 안정적으로 공급할 수 있게 되어 LNG보유 에너지의 극대사용이 가능하다.

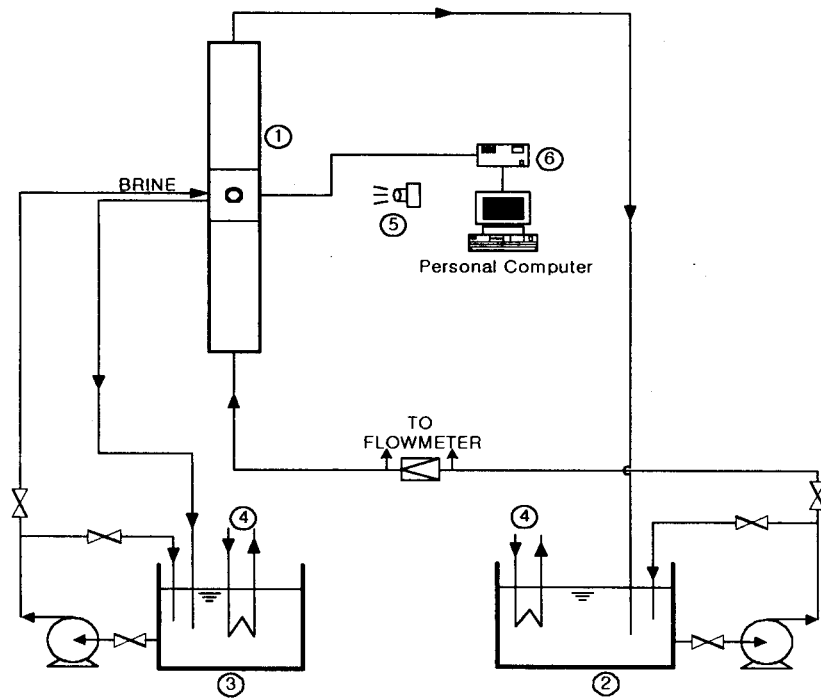
따라서, 본 연구에서는 유용한 LNG 냉열을 이용한 해수동결 담수화 장치의 개발과 설계기술에 필요한 제반적인 기초자료를 확보하기 위하여 구형용기의 상하부냉각에 의한 실험과 원관내에서의 해수동결거동에 관한 실험에 이어서 계속적인 연구의 일환으로서 냉각원관 주위의 해수동결에 관한 매카니즘과 해수농도변화 및 냉각면온도에 따른 동결량 등의 정량적인 데이터를 확보하기 위하여 실험적 방법으로 검토하였다.

II. 실험장치 및 실험방법

1. 실험장치

Fig. 3은 본 연구에서 사용되어진 실험장치의 전체계통도이다. 그림에 나타난 바와 같이 실험장치는 크게 동결이 진행되는 시험부, 동관과 수용액의 온도를 측정하는 온도 측정부, 동관의 냉각 각면을 소정의 온도로 유지해 주기 위한 브라인 순환부 및 동결층의 형상을 나타내기 위한 가시화부로 구성되어 있다.

시험부(test section)는 230×155×1700mm의 구형용기로 가시화를 위하여 두께 15mm의 투명아크릴로 이루어져 있으며, 중앙에 63(D)×158(L)×3t의 냉각용 동관(cooled copper tube)을 설치하였고, 시험부 중앙의 뒷면에는 동결이 진행됨에 따라 동결량을 측정하기 위하여 표준눈금 줄자를 부착하였다.



- | | |
|----------------------|--------------------------|
| ① Test Section | ④ Refrigerating Machine |
| ② Test Solution Tank | ⑤ Digital Camera |
| ③ Brine Tank | ⑥ Data Aquisition System |

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

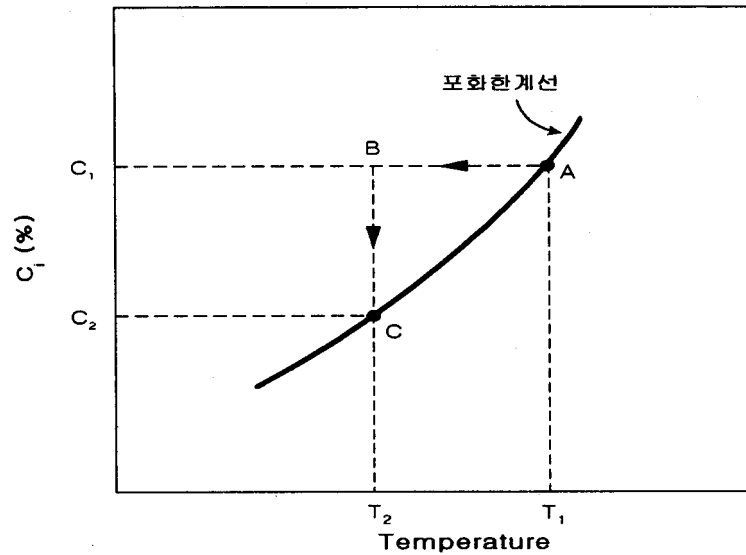


Fig. 4 A general relationship of temperature and salt concentration on sea water

온도 측정부는 냉각면인 동관의 내표면에 3개의 C-A type의 열전대(thermo couple)를 동관 내표면의 상, 하측면에 부착하여 냉각면 전체가 등온의 냉각을 유지하도록 하였으며, 구형용기내의 용액부의 수직온도분포를 측정하기위해 시험부의 상하부에도 각각 열전대를 부착하여 온도를 측정하였다. 열전대로부터 측정된 온도는 데이터처리장치(data aquisition system)를 거쳐 PC에서 기록하도록 하였다. 브라인순환부는 냉동기에 의해 소정의 온도로 조절된 브라인(에칠렌글리콜 40%수용액)이 브라인 탱크에서 순환펌프를 통하여 동관의 내측면에 직접 접촉하도록 PVC파이프에 1mm의 등간격으로 구멍을 내어 냉각면이 동일온도분포가 될 수 있게 끌고루 분사되는 구조로 하였다. 동관의 내면은 브라인의 순환이 자유롭도록 입구와 출구를 이중관 형식으로 하였다. 또한 주위로부터 열유입을 방지하기 위하여 단열재를 시험부의 주위에 부착하여 주위의 열영향을 배제하도록 노력하였다.

2. 실험방법

본 실험에서의 작동유체는 해수의 대부분이 물과 염분으로 구성되어 있고, 평균농도가 3.5wt%임을 감안하여 물과 염화나트륨을 혼합하여 만든 0wt%, 1.8wt% 및 3.5wt%의 염화나트륨(NaCl)수용액을 사용하였다. 즉 정제염을 정밀전자저울로 측정하여 물과 정제염을 소정의 비율로 섞어서 시료를 제작하였다. 만들어진 수용액은 염분측정계(ES-421)를 이용하여 정확한 농도를 측정하였다. 온도 측정시 Fig. 4 에서 나타낸 바와 같이 해수는 온도의 변화에 따라 농도가 변화하므로 작동유체의 농도를 일정히 유지하기 위하여 수용액은 물의 온도 15℃를 기준으로 하여 각각의 수용액의 농도를 조절하였으며, 수용액탱크에서 수용액의 초기온도는 소정의 온도로 일정히 유지시키면서 시험부내를

순환시켰다. 시험부내의 수직온도분포가 일정해지면 소정의 온도로 냉각된 수용액의 순환을 멈추어 수용액을 정지상태로 유지한 후, 해수의 공정온도인 -21°C 를 초과하지 않는 범위내에서, 소정의 온도로 냉각된 브라인이 냉각면에 분사되는 시각을 실험의 시작으로 하여 해수의농도와 냉각원관의 온도를 변화시키면서 실험하였다.

또한 실험이 진행됨에 따라 성장하는 동결층의 형상, 두께, 및 온도를 지속적으로 측정하였으며, 빙층의 형상은 카메라로 매시간 빙층의 동결거동을 촬영하였다.

실험 종료후 빙을 채취하여 용해된 빙의 온도를 실험시작전과 마찬가지로 15°C 로 일정히 유지한 후 염도를 염분측정계로 측정하였으며, 동결량은 각부의 빙의 두께측정 및 최종 동결량의 무게를 측정함으로써 산정하였다.

Ⅲ. 실험결과 및 고찰

1. 해수의 동결거동

Fig. 5는 3.5wt%의 염화나트륨 수용액을 냉각면온도 -20°C 로 유지하였을 경우에 실험개시후 4시간까지의 동결층의 성장과정을 30분 간격으로 나타낸 것이다. 그림으로부터 실험시작 초기에는 급격한 빙의 성장이 이루어지는데, 이는 냉각면의 온도가 낮음으로 인하여 초기 온도구배가 커지기 때문에 열유속이 증가하므로 동결량이 커지게 되는 것이다. 시간이 경과하면서 빙의 성장속도는 점차적으로 낮아지는데 이것은 두껍게 성장한 동결층이 열유속의 저항으로 작용함으로써 온도구배가 작아지기 때문이다. 한편 빙이 생성될 때의 침상빙의 생성과정을 개략적으로 살펴보면, 그림에서처럼 냉각이 진행되면서 냉각면에 수직방향으로 l_1 의 간격으로 1차빙이 성장하고, 이러한 1차빙에서 다시 수직방향으로 l_2 의 간격을 가지고 2차빙이 성장한다. 계속해서 빙이 성장하면서 서로 연결되게 되고, 결국 침상빙은 하나의 빙으로 성장하면서 점차 두꺼워지지만, 빙두께의 증가로 인하여 냉각면에서의 열유속은 감소하면서 침상빙의 성장도 점차 감소된다.

한편, Fig. 6는 냉각원관의 온도가 -15°C 인 경우 1.8wt%수용액과 0wt% 빙의 동결형상을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)와 같이 수용액의 경우 빙층의 동결이 증가하면서 불투명한 성상을 나타내는데, 이것은 용질의 함유와 초기 급속한 냉각에 의해 발달한 침상빙의 영향으로 불투명하고 푸석푸석한 저밀도의 동결층을 형성하는 것을 알 수 있지만, Fig. 6(b)처럼 순수한 물의 경우는, 시간이 지나면서 외부의 빙층은 투명하게 바뀌게 된다. 이것은 초기에는 수용액과 마찬가지로 초기 급속한 빙층의 형성으로 인한 기포의 물입으로 빙의 내측면은 불투명한 성상을 나타내지만, 동결속도가 낮아지면서 침상빙에 존재하던 고농도의 용질이 배출되면서 투명한 빙을 형성하므로 내부의 불투명층과 외부 투명층의 뚜렷한 2계의 모습을 볼 수 있다.

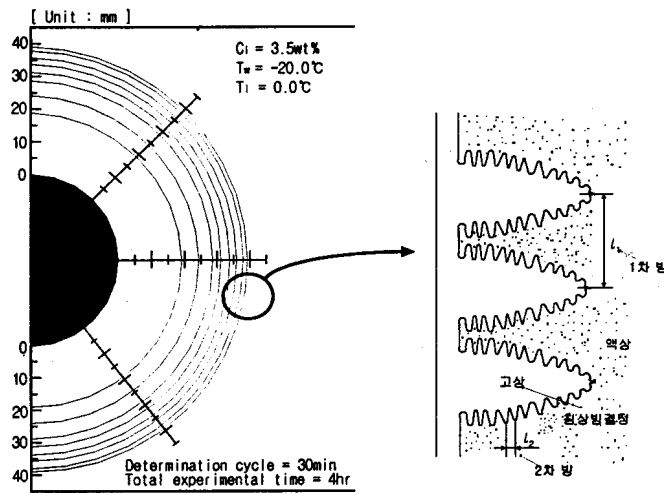


Fig. 5 The growing model of sea water freezing behavior



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



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

Fig. 6 Configuration of frozen layer ; $T_w = -15^\circ\text{C}$, $t = 4\text{hr}$

2. 농도의 영향

Fig. 7은 3.5wt%와 1.8wt%수용액의 실험종료후 채취한 빙으로부터 각각의 냉각온도별로 평균농도를 나타낸 것이다. 그림과 같이 전체적으로 냉각면온도가 낮을수록 높은 염도를 나타내는데, 농도가 3.5wt%, 냉각면온도가 -20°C 인 경우 약 44%의 농도감소가 있지만, -10°C 인 경우는 약 60%의 농도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 냉각면온도가 낮을수록 초기 급속한 냉각으로 인하여 발생한 침상빙에 고농도의 용질이 몰입된 상태로 동결되기 때문이라고 생각된다. 한편 1.8wt%의 경우 각각의 냉각온도에 대하여 전체적으로 34~43%정도의 농도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 그 감소 경향은 3.5wt%의 경우보다 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 상대적으로 석출되는 용질의 양이 작기 때문이라고 생각된다.

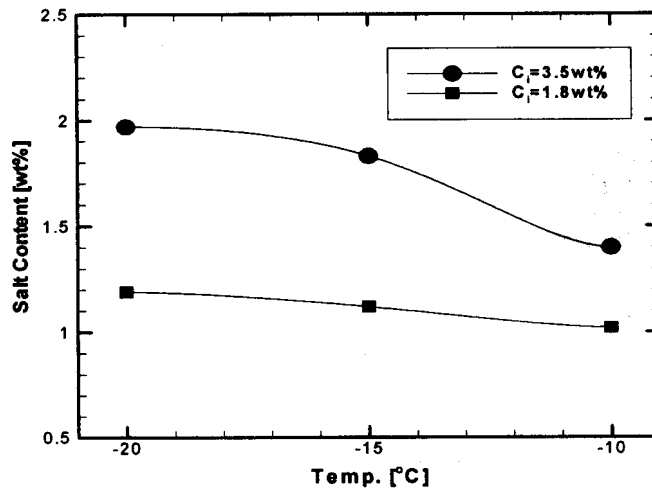
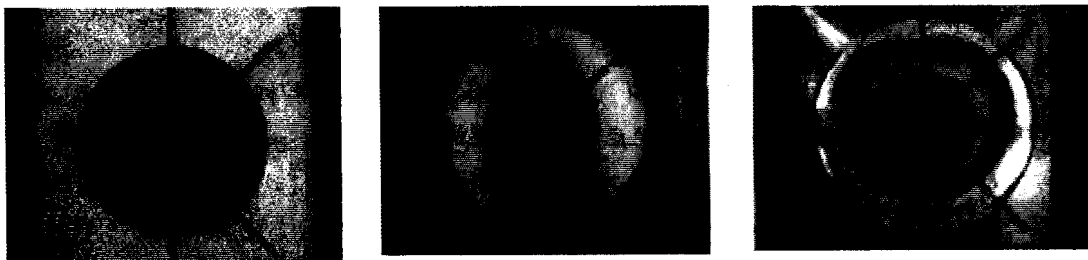


Fig. 7 The whole salt content of ice

또한 Fig. 8은 냉각면온도 -20°C , 실험개시 4시간후의 각각의 염화나트륨 수용액 농도와 순수수에 대한 동결층의 형상을 가시화한 사진이다. 사진으로부터 초기농도가 감소할수록 동결층의 동결량이 증가함을 알 수 있다. 이것은 초기농도의 감소에 따라 평형동결온도(T_f)가 상승하여 동결계면에서 냉각면으로의 열유속이 증가하기 때문이다.

한편, Fig. 9(a)는 같은 조건에서의 수용액의 농도에 대하여 시간의 변화에 따른 동결량을 나타낸 것이고, Fig. 9(b)는 동결속도의 변화를 나타낸 것이다. 그림으로부터 농도가 감소함에 따라 동결량 및 동결속도가 증가함을 알 수 있다. 특히 그림에서와 같이 동결초기에 동결속도가 크게 나타나는 것은 빙층의 두께가 비교적 얇은 초기의 경우에 동결층과 냉각면과의 큰 온도구배가 존재하기 때문이다.

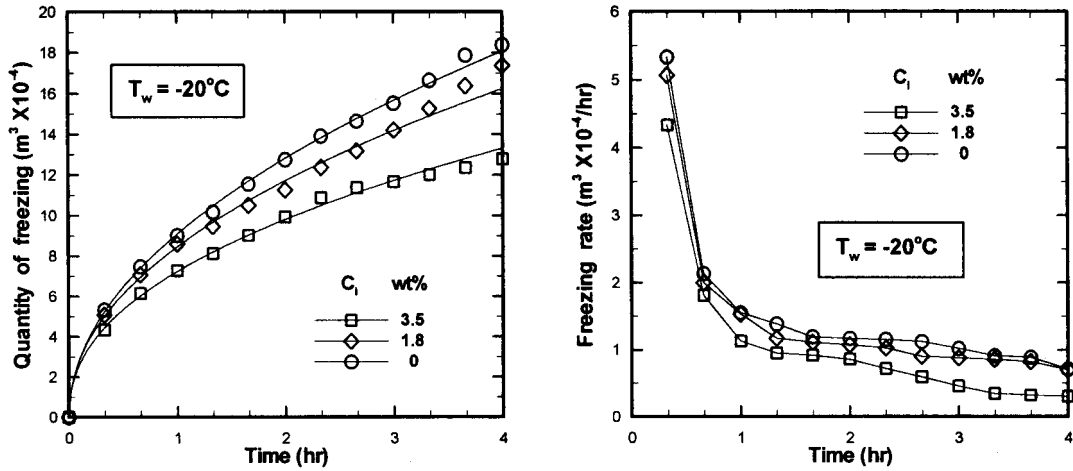


(a) $C_i=3.5\text{wt}\%$

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

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

Fig. 8 Effect of concentration of aqueous on freezing behavior. ; $T_w = -20^{\circ}\text{C}$, $t = 4\text{hr}$



(a) Quantity of freezing

(b) Freezing rate

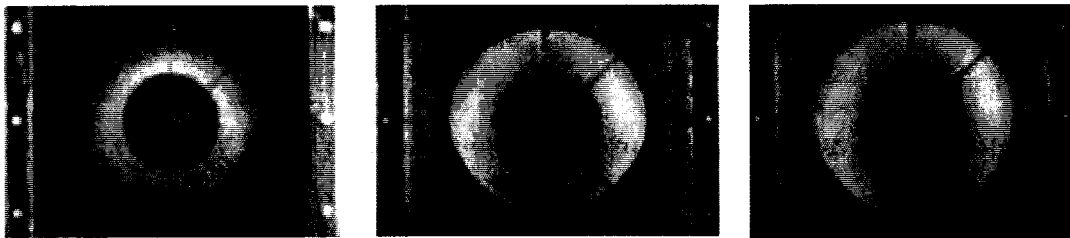
Fig. 9 Effect of concentration of aqueous on freezing behavior. ; $T_w = -20^\circ\text{C}$, $t = 4\text{hr}$

3. 냉각면 온도의 영향

일반적으로 냉각면이 있을 때의 동결현상은 동결층, 동결거동 및 열전달의 3가지가 상호 밀접한 관계를 가지는 현상으로서, 냉각면온도는 직접적으로 동결층두께에 커다란 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Fig. 10은 냉각면온도의 영향에 따른 수용액의 동결거동을 가시화한 사진이다.

사진으로부터 알 수 있는 바와 같이 냉각면의 온도가 낮을수록 동결층이 두꺼워짐을 알 수 있다.

이러한 이유는 전술한 바와 같이 냉각면의 온도가 낮을수록 동결계면에서의 온도구배가 커짐으로 인하여 냉각면으로의 열유속이 증가하므로 동결량이 크게 되기 때문이다. 이러한 열유속의 차이에 의해 동결속도는 변화하게 되고, 냉각면온도가 낮을수록 급속한 동결에 의해 침상빙이 발달하여 빙의 모습은 전체적으로 푸석푸석한 저밀도의 빙을 형성하는 것을 알 수 있다.



(a) $T_w = -10^\circ\text{C}$

(b) $T_w = -15^\circ\text{C}$

(c) $T_w = -20^\circ\text{C}$

Fig. 10 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior. ; $C_i = 1.8\text{wt}\%$, $t = 4\text{hr}$

한편, Fig. 11(a)와 (b)는 각각의 온도에 따라 시간의 경과에 대한 동결량의 변화와 동결속도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 냉각온도가 낮으면 낮을수록 동결량 및 동결속도가 증가한다. 특히 냉각면 온도가 낮을수록 초기의 동결속도가 크게 변화하는 것을 알 수 있다.

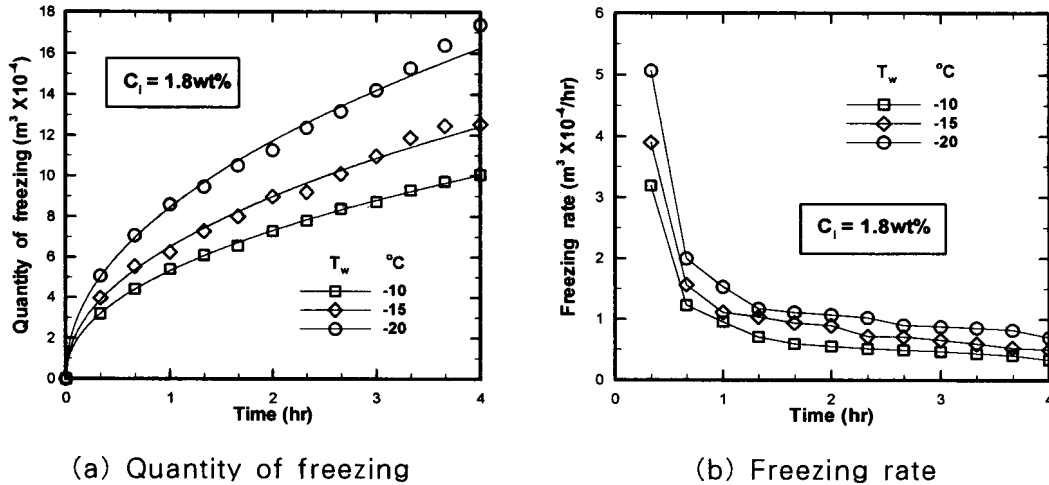


Fig. 11 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior. ; $C_i = 1.8\text{wt}\%$, $t = 4\text{hr}$

IV. 동결량의 무차원 정리

본 실험범위내에서 동결량에 영향을 미치는 인자들을 정리하여 나타내면 무차원 동결량 R_f 는 다음과 같이 식(1)로 나타낼 수 있다.

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

여기서,

$$R_f \text{ (무차원 동결량)} = \frac{V_f}{H_o} \quad (2)$$

$$\theta_w \text{ (무차원 냉각면 온도)} = \frac{(T_f - T_w)}{(T_o - T_f)} \quad (3)$$

$$F_o \text{ (Fourie 수)} = \frac{\alpha \cdot \tau}{H_o^2} \quad (4)$$

이다. 실험에서 얻어진 동결량에 대한 데이터를 최소자승법을 이용하여 θ_w 와 F_o 의 함수로서 무차원 동결량 R_f 를 정리하면 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며, Fig. 12에서 무차원 동결량은 약 $\pm 15\%$ 의 오차한계 범위내에서 정리가 가능하다.

$$R_f = 0.118 \theta_w^{0.49} F_o^{0.44} \quad (5)$$

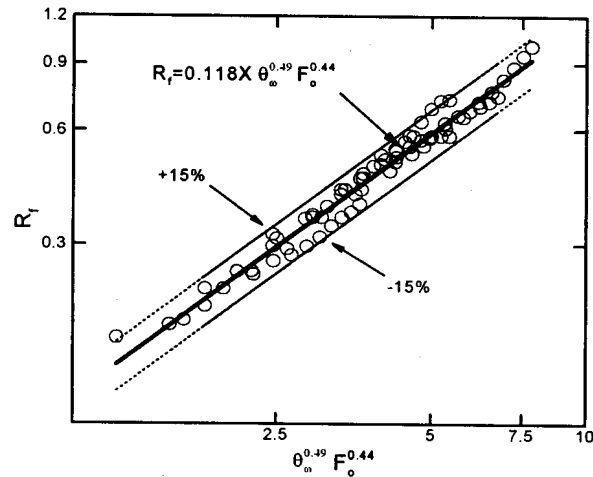


Fig. 12 Nondimensional frozen quantity

V. 결 론

본 연구에서는 구형용기내 냉각원관 주위에서의 염화나트륨 수용액 동결거동의 메카니즘과 수용액 농도 및 냉각면 온도가 해수의 동결거동에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 검토한 결과 본 실험의 범위내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동결량은 염화나트륨수용액의 농도가 저하됨에 따라, 냉각면의 온도가 낮을수록 증가한다.
- (2) 초기 수용액의 농도가 낮을수록, 냉각면온도가 높을수록 염도가 낮은 고밀도의 빙을 얻을 수 있다.
- (3) 순수한 물의 경우 일정시간이후 동결속도의 변화로 인한 불투명층과 투명층의 뚜렷한 경계를 확인할 수 있다.
- (4) 본 연구의 범위내에서 염화나트륨 수용액의 무차원 동결량은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$R_f = 0.118 \theta_w^{0.49} F_o^{0.44}$$

참고문헌

1. 김병덕, 김재운, “물부족현황과 국내 담수화 기술개발 현황”, 한국박용기관학회 춘계학술강연회, pp.105~109, 1996
2. 김명환, 김용모, 김철환, “LNG냉열이용과 축냉시스템의 장래”, 한국박용기관학회 논문집, 제18권, 제5호, pp.1~11, 1994

3. 김명준, 박형진, 김명환, “구형용기의 하부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 기초적 연구”, 공기조화냉동공학회 하계학술발표회 논문집, 제1권, pp.347~353, 1997
4. 박종덕, 김명준, 김명환, “원관내의 해수동결거동에 관한 실험적 연구”, 한국박용기관학회 춘계학술 강연회, pp.M-1~M-7, 1998
5. 최부홍, 김명준, 김명환, “구형용기의 상부면냉각에 의한 해수 동결거동의 실험적 연구”, 한국박용기관학회 추계학술 강연회, pp.23~29, 1998
6. Carey.V.P and Gebhart.B, “Trandsport 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