

평행냉각평판을 갖는 구형용기내에서의 해수동결거동에 관한 연구

박대식*, 박상균*, 김명환**, 윤석훈**, 오 철**

An Experimental Study on the Sea Water Freezing Behavior Around Parallel Cooled Plate in the Rectangular Duct

D. S. Park, S. K. Park, M. H. Kim, S. H. Yoon, C. Oh

Abstract

This study was experimentally performed to investigate sea water freezing behavior along parallel cooled plate with bubbly flow. The experiments were carried out for a variety of parameter, such as sea water velocity, air-bubble flow rate, and cooled-plate temperature. The shape of freezing layer, freezing rate and salinity of frozen layer were observed and measured. It was found that the experimental parameters gave a great influence on the freezing rate and the salinity of the frozen layer.

Key words : Bubbly flow, Freezing rate, Salinity, Sea water freezing behavior

1. 서 론

최근의 급속한 산업의 발달, 폭발적인 인구팽창 및 생활수준의 향상에 따라 농공업용수 및 생활용수의 사용이 급증하여 물부족현상이 심화되고 있다. 우리 나라의 경우도 UN이 발표한 보고서에 의하면 현재 물(1인당 수자원의 총량)이 부족한 물 압박국으로 분류되고 있으며, 강우량이 여름철에 집중적으로 분포되어 있는 기후적 특성으로 인해 적절한 물 공급이 이루어지지 못해 점차적으로 물부족현상이 심화되어가고 있다. 정부의

발표에 따르면 2011년에는 연간20억톤의 물이 부족할 것으로 예측하고 있다. 이에 2011년까지 90조원을 투입해 34개의 댐을 추가로 건설하고자 하고 있으며 아울러 인공강우 기술개발과 해수의 담수화 연구 등을 적극 추진할 것임을 밝히는 등 용수부족의 심각성을 인식하고 용수확보의 중, 장기적인 대책수립에 노력을 기울이고 있다.

한편, 우리나라는 석유에너지의 의존도를 줄이고 환경오염 해결책의 하나로써 청정에너지인 LNG에 대한 발전용, 산업용 및 가정용의 수요가 급증하고 있다. LNG의 전국 배관망의 완성과 공급기기의 증설 등으로 LNG의 수요는 더욱 더 증가하리라 본다. LNG는 수송 및 저장의 형태가 -162℃ 이하의 저온

* 한국해양대학교 대학원

** 한국해양대학교 기관시스템공학부

액체상태이며 공급기지의 저장탱크에서 각 수요지로 가스를 공급하고자 할 때에는 LNG를 기화시켜 고압상온의 상태로 공급하고 있다. 이때 LNG는 많은 양의 냉열을 주위로 방출하게 된다. LNG의 보유냉열에너지를 유용하게 이용하는 방법으로서 동결식품, 드라이 아이스, 액화수소, 액화질소의 제조 등과 함께 해수 동결담수화장치가 있다. LNG 1kg이 0°C의 대기압 가스로 상태변화(기화)를 할 경우 흡수하는 에너지는 약 850kJ이며 이것은 0°C빙을 약 2.5kg제조할 수 있는 열량이 된다.

따라서 본 연구에서는 LNG의 유효 폐냉열을 이용하기 위한 노력의 한 방안으로 해수동결 담수화장치의 개발에 관한 연구를 목표로 하고 있다.

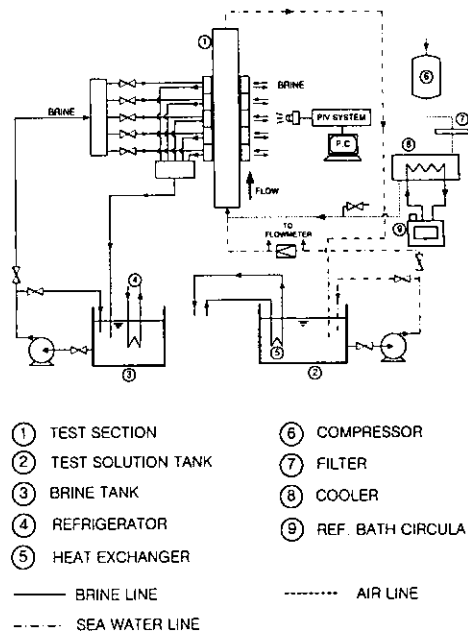


Fig.2.1 Schematic of experimental apparatus

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 2.1은 본 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 해수의 동결이 진행되는 시험부, 냉각평판을 소정의 온도로 유지하기 위한 브라인 순환부, 해수 동결면에서의 유동을 가시화하기 위한 가시화부와 소정의 해수와 공기를 분사하기 위한 제반장치들로 구성되어있다. 시험부 ①은 가로 150mm, 깊이 190mm, 높이 1800mm의 구형용기로 가시화를 위해서 두께 15mm의 투명 아크릴로 제작하였으며, 중앙에 가로 120mm, 세로 500mm의 냉각용 평판을 좌우측에 각각 평행하게 설치하였다. 브라인 순환부는 냉동기에서 냉각된 소정온도의 브라인이 냉각면에 균등하게 분사되도록 하였다. 그리고 해수의 평균농도를 감안하여 염화나트륨 3.5wt수용액으로 시료를 제작하여 사용하였으며 냉동기를 사용하여 -0.5°C로 냉각하여 시험부에 유입시켰다. 압축기 ⑥에 의해 공급된 분사공기는 냉각기 ⑧에 의해 -0.5°C로 냉각시켜

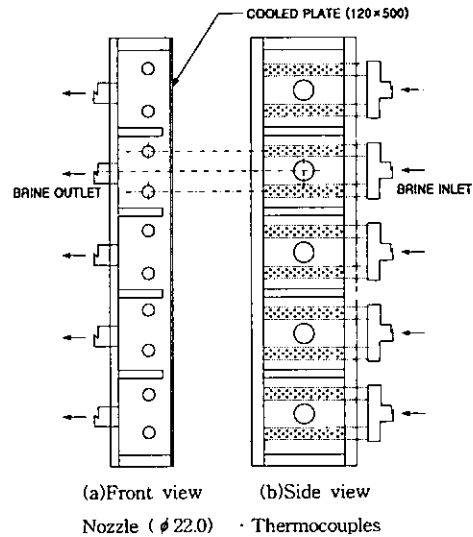


Fig. 2.2 Details of test section

시험부에 유입되도록 하였다.

Fig. 2.2는 시험부의 상세도로서 가로 120mm, 세로 500mm, 높이 70mm의 구형용기에 두께 3mm의 동판을 사용하였다. 냉각면의 내표면에는 등온상태를 확인하기 위하

여 10개의 열전대(C-A Type)를 50mm 간격으로 각각 부착하였다. 또한 등간격으로 노즐을 설치해서 이를 통해 브라인(에틸렌-글리콜 수용액)을 냉각면 전체에 고루 분사 시킴으로서 냉각면을 일정하게 유지하였다.

2.2 실험방법

실험은 냉동기를 작동시켜 각부의 온도를 실험조건에 맞게 유지시켜, 해수와 분사공기를 시험부내로 유입시킨 후 냉각면에 브라인을 분사하는 시각을 실험의 시작으로 하여 실험 종료시까지 매10분 간격으로 빙층의 형상 및 두께를 측정하였으며 매 30분마다 이를 가시화 하였다. 실험의 종료시각은 더 이상 빙이 성장하지 않는 정상상태(steady state)를 기준으로 하였으며 실험 종료 후 전체 동결량과 빙의 각 부분 및 평균염분농도를 측정하였다.

본 실험에서 해수의 속도, 냉각면의 온도, 공기의 유량에 따른 동결량과 생성빙의 염분농도에 미치는 영향을 평가하였다. 실험조건은 Table. 2.1과 같다.

Condition	Range		
Temperature of Sea Water (T_i , °C)	-0.5		
Temperature of Air-Bubble (T_{air} , °C)	-0.5		
Fluid Velocity (U_i , m/s)	0.02	0.05	0.1
Temperature of Cooled Part (T_w , °C)	-10.0	-15.0	-20.0
Air-Bubble Flow Rate (Q_{air} , L/min)	10.0	20.0	30.0

Table 2.1 Experimental conditions

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평행평판 주위에서의 해수동결거동

Fig. 3.1과 Fig. 3.2는 각각 동결층의 형상과 염분농도를 냉각면의 위치별로 나타낸 것이다. 시험부 하부에서 유입된 작동유체는 냉각면의 하부에서 상부로 상승하면서 평형 동결온도이하로 냉각되어 상부면부터 착빙이 되면서 순간적으로 냉각면 전체에 걸쳐 빙이 생성된다. 냉각면의 위치별로 살펴보면 냉각면의 상부면 즉, 흐름의 하류측의 동결량이 흐름의 상류측의 동결량에 비해 동결속도가 빠르고 동결량이 큰 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 해수가 냉각면의 상부면에서 냉각되어 냉각면과의 온도차가 작아져서 상부측의 열유속이 감소하여 열경계층(heat boundary layer)이 하부측에 비해 두꺼워지기 때문이다.

실험초기의 빙의 성장은 냉각면과 작동유체 사이의 큰 온도구배로 급격하게 성장하지만 동결량이 증가할수록 빙 자체가 열저항으로 작용해 동결계면으로의 열유속을 방해할 뿐만 아니라 교축작용을 심화시켜 속도의 증

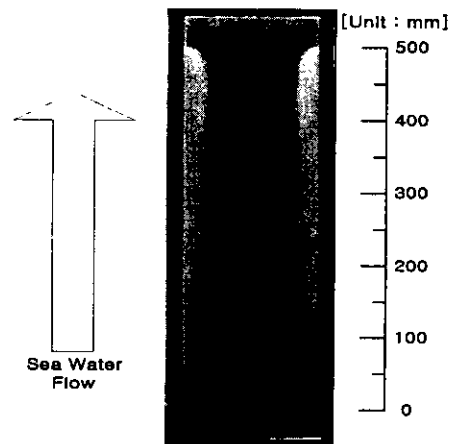


Fig. 3.1 Shape of the frozen layer

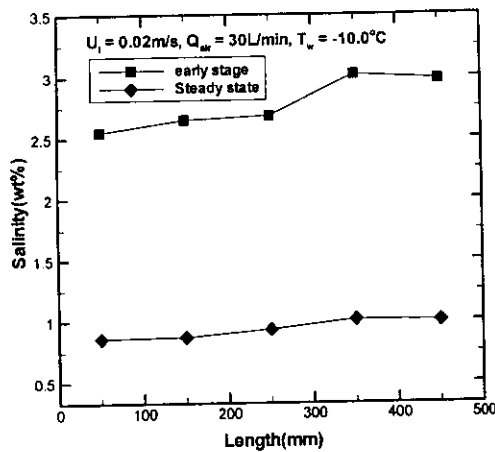


Fig. 3.2 Distribution of salinity in the frozen layer

대를 가져옴으로써 빙의 성장률은 급격히 저하하면서 정상상태(steady status)에 다다르게 된다.

한편, 초기에 생성된 빙의 조직은 급속한 침상빙의 성장으로 인해 조직이 치밀하지 못하고 회고 밀도가 작은 상태의 조직이며, 빙의 평균염분농도는 비교적 높게 나타났다. 이는 급속한 빙의 성장으로 인해 빙결정에 의해 석출된 NaCl이 빙면 밖으로 배제되지 못하고 침상빙의 동결층 내부로 다량의 용질이 함께 몰입하기 때문이다. 그러나, 시간이 경과하면서 빙의 두께에 의한 동결속도의 저하와 유속변화에 따른 강제대류작용의 증대로 인한 침상빙 형성의 억제 및 석출된 용질의 제거작용의 증대로 말기에 생성된 빙의 염분농도는 초기 생성빙의 농도에 비해 낮은 염분농도를 나타내었다. Fig. 3.2로부터 빙의 성장률이 빠른 상부면이 중·하부면에 비해 높은 염분농도를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 초기 급격한 온도구배에 의해 성장한 빙의 염분농도가 정상상태의 동결층의 염분농도에 비해 훨씬 높게 나타남을 알 수 있다.

3.2 해수의 유속에 의한 영향

Fig. 3.3은 $T_w = -20^\circ\text{C}$, $Q_{\text{air}} = 10 \text{ l/min}$ 의 조건에서 정상상태에 있어서의 유속의 변화에 따른 해수의 동결량의 변화를 가시화한 사진이다. 그림으로부터 시험부에서의 유속이 빨라짐에 따라 전체 동결량이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 또한, 빙의 형태를 보면 전체적으로 냉각면 하부에서 상부로 갈수록 동결층의 두껍게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 냉각면의 각각의 부위별로 대류열 전달율이 다르기 때문이다.

Fig. 3.4와 Fig. 3.5는 Fig. 3.3과 동일조건에서 해수의 유속의 변화에 따른 동결량과 동결률의 변화를 시간의 흐름에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 빙의 성장은 실험초기에는 냉각면에서 동결계면으로의 큰 온도구배에 따른 열유속의 지배를 받아 급속히 빙이 성장하다가 점차 유속의 영향을 지배적으로 받게 되므로써 빙의 성장속도가 둔화되어 정상상태에 다다름을 확인할 수 있다. 또한, 유속이 빠를수록 대류열전달율이 증대하여 빙이 지속적으로 성장을 하지 못하고 빨리 정상상태에 도달함을 확인할 수 있다.

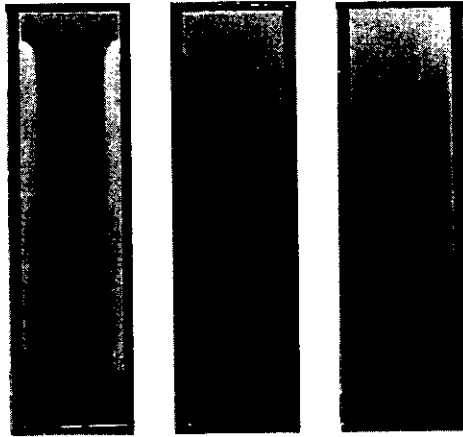
한편, 빙의 조직은 유속이 낮은 0.02 m/s 의 경우에 비해 유속이 큰 0.1 m/s 의 경우에 생성된 빙이 훨씬 조직이 치밀하고 단단한 투명빙을 생성하였는데 이는 유속이 증가함에 따라 동결로 인해 석출된 고농도의 염화나트륨 수용액의 제거효과가 증대하여 동결층내에 고액공존층이 감소하기 때문이다. 이러한 경향은 생성빙의 염분농도에도 큰 영향을 미친다. 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도의 변화를 유속에 따라 나타내면 Fig. 3.6과 같다. 그림으로부터 유속이 증가할수록 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도가 저감됨을 알 수 있다.

그러나, 전체 생성빙의 염분농도는 Fig. 3.7에서 나타낸 바와 같이 유속이 증가할수록 생성빙의 평균염분농도는 급격히 증가

하는 경향을 보인다.

이는 유속이 증가할수록 빙의 성장률이 감소함에 따라 전체 동결량이 작아져서 실험초기 큰 열유속에 의해 급격히 성장한 염분농도가 높은 빙이 전체 생성빙에 대해 차지하

는 비율이 증가함으로써 평균염분농도에 미치는 영향이 유속의 증가에 따른 용질의 제거효과를 증가하기 때문에 생성빙의 평균염분농도는 급격히 상승하는 경향을 보인다.



(a) 0.02m/s (b) 0.05m/s (c) 0.1m/s

Fig. 3.3 Effect of fluid velocity on freezing behavior

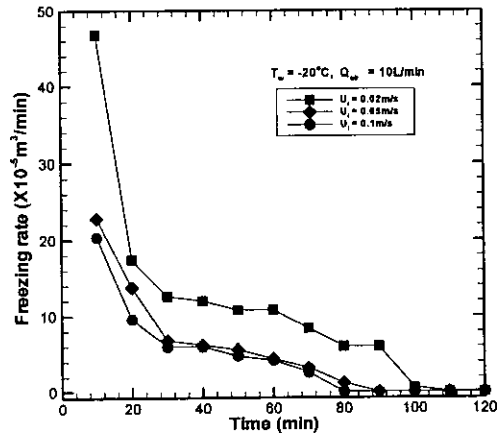


Fig. 3.5 Effect of fluid velocity on freezing rate

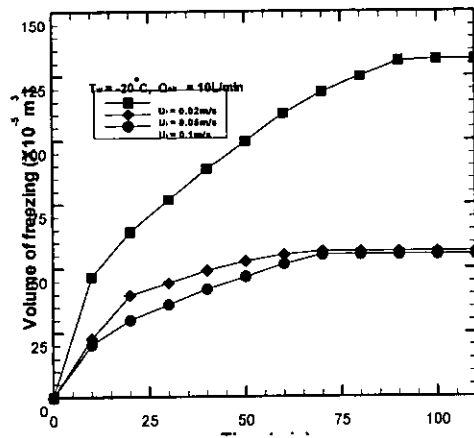


Fig. 3.4 Effect of fluid velocity on volume of freezing

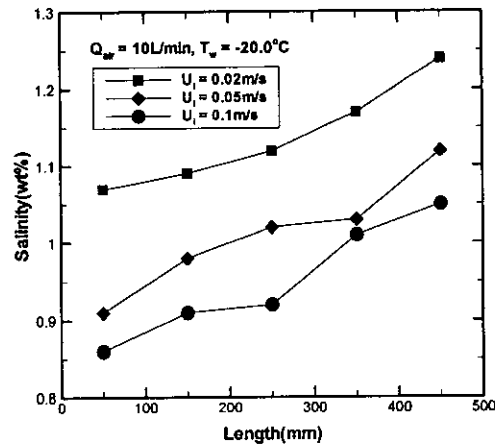


Fig. 3.6 Salinity of external frozen layer in steady state

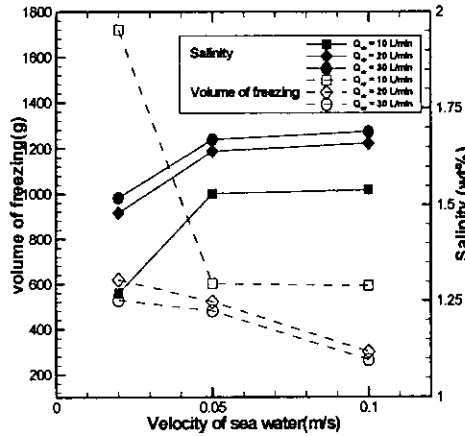


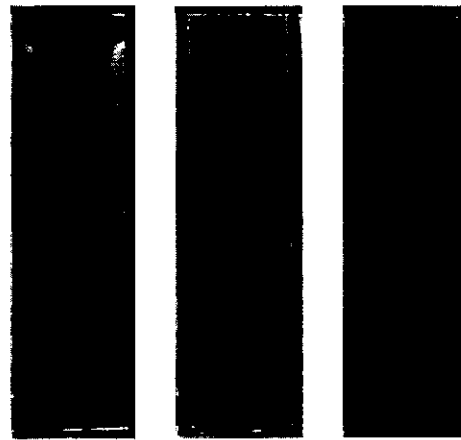
Fig. 3.7 Total salt concentration of frozen layer

3.3 분사 공기량에 의한 영향

Fig. 3.8은 $T_w = -20^\circ\text{C}$, $U_i = 0.02\text{m/s}$ 의 조건에서 정상상태의 해수의 동결량의 변화를 가시화한 사진이다. 그림으로부터 공기 분사량이 증가함에 따라 전체 동결량이 현저하게 감소하는 경향을 알 수 있다. 이는 공기 분사량이 증가할수록 동결계면에 가해지는 기포의 충격력이 증가하고, 기포류가 동결계면과 수용액의 접촉을 방해하는 절연체 역할을 하여 동결계면에서 해수로의 열전달을 방해하기 때문으로 생각된다.

Fig. 3.9는 정상상태에 있어서 공기 분사량의 변화에 따른 동결층의 염분농도의 변화를 나타내었다. 그림으로부터 공기 분사량이 증가할수록 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도가 저감됨을 알 수 있다. 그러나, 전체 생성빙의 염분농도는 전술한 유속의 영향과 비슷한 경향을 보인다. Fig. 3.10은 공기 분사량에 따른 평균염분농도의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 공기 분사량이 증가할수록 생성빙의 평균염분농도 또한 증가하는 경향을 보인다. 이는 공기 분사량이 증가할수록 빙의 성장률이 감

소함에 따라 전체 동결량이 작아져서 실험 초기 급격히 성장한 염분농도가 높은 빙이 전체 생성빙에 대해 차지하는 비율이 증가함으로써 평균염분농도에 미치는 영향이 공기 분사량에 의한 충격력의 증가에 따른 용질의 제거효과를 증가하기 때문에 생성빙의 평균 염분농도는 상승하는 경향을 보인다.



(a) 10 l/min (b) 20 l/min (c) 30 l/min

Fig. 3.8 Effect of air-bubble flow rate on freezing behavior

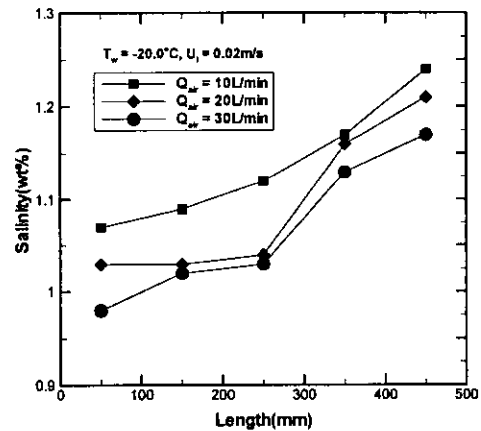


Fig. 3.9 Salinity of external frozen layer in steady state

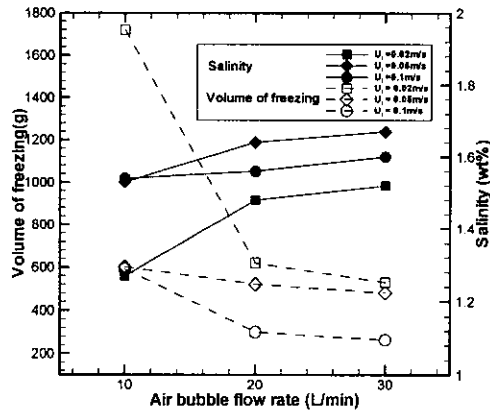


Fig. 3.10 Total salt concentration of frozen layer

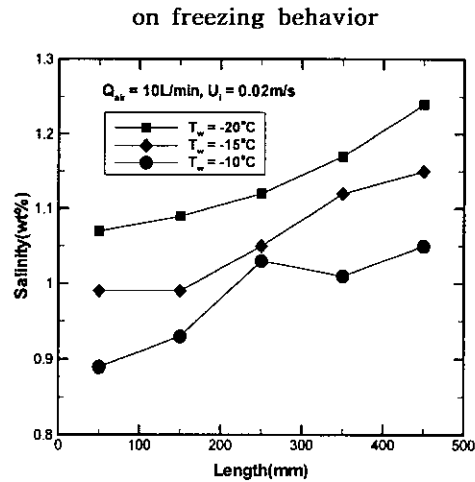


Fig. 3.12 Salinity of external frozen layer in steady state

3.4 냉각면 온도에 의한 영향

Fig. 3.11은 $Q_{air}=10 \text{ l/min}$, $U_i=0.02\text{m/s}$ 의 조건에서 정상상태에 있어서의 해수의 동결량의 변화를 가시화한 사진이다. 그림으로부터 냉각면 온도가 상승함에 따라 전체 동결량이 급격하게 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 냉각면 온도가 상승할수록 즉, 냉각면

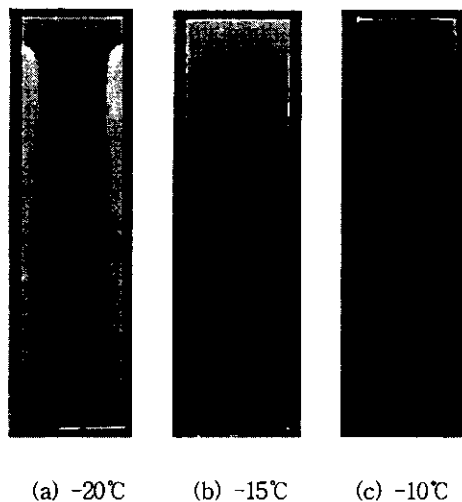


Fig. 3.11 Effect of cooled plate temp.

과 동결계면 사이의 열낙차가 감소할수록 냉각면에서 동결계면으로의 열유속이 감소하기 때문이다.

Fig. 3.12는 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도를 냉각면 온도의 변화에 따라 나타낸 그림이다. 그림으로부터 냉각면 온도가 상승할수록 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도가 저감됨을 알 수 있는데, 그 이유는 냉각면 온도가 상승할수록 빙성장률이 둔화되어 동결에 의해 석출된 고농도의 염화나트륨이 동결계면 밖으로 배제될 수 있는 시간이 증대되기 때문이다.

Fig. 3.13은 냉각면 온도에 따른 평균염분농도의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 냉각면 온도가 상승할수록 동결량은 급격히 감소한다. 생성빙의 평균염분농도는 -20°C 에서 -15°C 로 상승할때는 전술한 공기 분사량의 영향에서와 같은 이유로 염도가 상승하는 경향을 나타낸다. 그러나, -10°C 로 온도가 상승하면 냉각면에서 동결계면으로의 열유속에 작아져 실험초기부터 빙의 동결속도가 저하함으로써 석출된 고농도의 염화나트륨이 동결계면 밖으로 배제되는 효과가 증대되어 동결층 전체의 평균염분농도가 저하함을 알 수 있다.

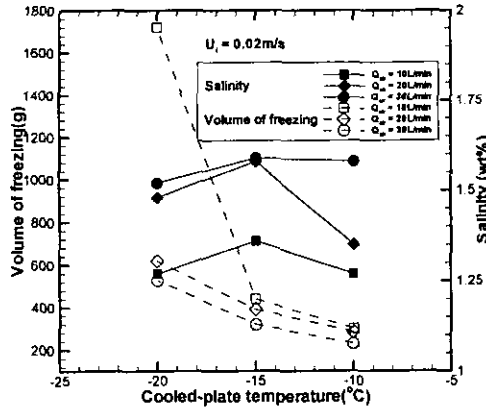


Fig. 3.13 Total salt concentration of frozen layer

3.5 무차원 정리

본 실험의 연구결과로부터 수직평행판에서의 동결량은 시간의 경과, 유속의 감소, 공기 분사량의 감소 및 냉각면 온도의 저하와 함께 증가함을 알 수 있다. 본 절에서는 실험에서 얻어진 동결량에 대한 결과를 무차원화하여 정리하였다. 본 실험범위내에서 동결량에 영향을 미치는 인자들을 정리하면 무차원 동결량 R_f 는 (3.1)식으로 정리가 가능하다.

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

여기서,

$$R_f (\text{무차원 동결량}) = \frac{V_f}{H_0}$$

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

$$Re (\text{레이놀즈수}) = \frac{U_i \cdot D_h}{\nu}$$

$$X (\text{무차원 공기유량}) = \frac{W_{air}}{W_{air} + W_i}$$

이다. 최소자승법을 이용하여 θ_w , Re , X 의 함수로서 무차원 동결량 R_f 를 정리하면 Fig. 3.14로 나타낼 수 있다. 따라서 그림으로부터 무차원 동결량은 약 $\pm 20\%$ 의 오차한

계 범위 내에서 (3.2)식으로 정리될 수 있다.

$$R_f = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_w^{1.05} \cdot Re^{-0.32} \cdot X^{-0.52} \quad (3.2)$$

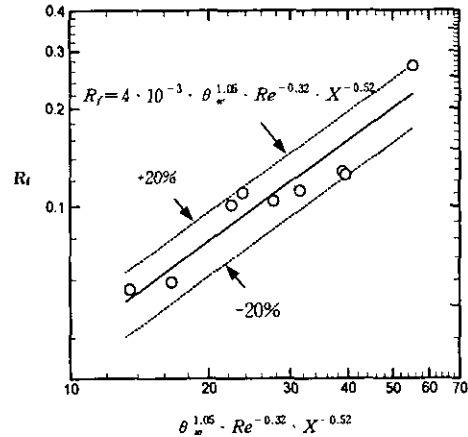


Fig. 3.14 Dimensionless frozen quantity

4. 결론

LNG냉열을 이용한 해수담수화장치의 개발을 위한 연구의 일환으로 해수의 유속, 공기 분사량, 냉각면 온도 등의 영향을 실험적으로 연구, 검토한 결과 본 실험범위내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험초기의 동결층의 동결속도는 냉각면과 동결계면 사이의 큰 열유속에 의해 대단히 빠르며, 생성된 빙은 높은 염분농도를 가진다.
- (2) 빙의 동결량은 해수의 유속이 작을수록, 공기 분사량이 감소할수록, 냉각면 온도가 낮을수록 증가한다.
- (3) 전체 동결층의 평균염분농도는 해수의 유속이 증가할수록, 공기분사량이 증가할수록 증가한다.
- (4) 정상상태의 동결층의 표면부위의 염분농도는 해수의 유속이 클수록, 공기분사량이 증가할수록, 냉각면 온도가 높을수록 감소한다.

(5) 본 실험 범위내에서 해수의 무차원 동결량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_f = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_w^{1.05} \cdot Re^{-0.32} \cdot X^{-0.52}$$

experimental study on sea water freezing behavior along horizontal cooled cylinder with bubbly flow" 4th KSME-JSME Thermal engineering Conf. pp.1-337~1-341.(2000)

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 지원에 의한 것이며, 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Stephan, K, Genthner, K, and Holzkecht, B, "Heat Conduction in Solidification Coupled with Phase Transformation in the Solid", Proc. of the 5th. Int. Heat Transfer Conf. Vol. 1, pp.235~239(1974)
- (2) Hayashi, Y., Kunimine, K. and Ngamoto, T., "Study on Freezing of Undercooled Solution", Proc. of 1989 Int. Symposium on Cold Regions Heat Transfer, pp. 85~90(1989)
- (3) Fang, L. J., Cheung, F. B., Linehan, J. H., and Pedersen, D R., "Seletive Freezing of a Dilute Salt Solution on a Cold Ice Surface", J. Heat Transfer, Vol. 106, pp. 385~393(1984)
- (4) 김명준, 김명환, 박형진, "구형용기의 하부면 냉각에 의한 해수동결거동의 기초적 연구", 한국박용기관학회 춘계학술강연회, pp. M-1~M-7 (1998).
- (5) 최부흥, 김명준, 김명환, "구형용기의 상부면 냉각에 의한 해수동결거동의 실험적 연구". 한국박용기관학회 추계학술강연회 pp. 23~29(1998).
- (6) 조이제, "유동장을 동반한 해수동결거동에 관한 실험적 연구", 한국해양대학교 대학원 석사논문, pp.75~76.(1999).
- (7) 박대식, 오철, 김명환, 이영호, "An