

## 해수 동결담수화장치 개발을 위한 해수동결에 관한 실험적 연구

박대식\*, 김명환\*\*, 오 철\*\*

### AN EXPERIMENTAL STUDY ON SEA WATER FREEZING BEHAVIOR FOR DEVELOPMENT OF SEA WATER DESALINATION SYSTEM

D-S Park, M-H Kim, C Oh

**Key words** : Bubbly flow, Freezing rate, Salinity of frozen layer, Sea water freezing behavior

#### 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.

#### NOMENCLATURE

$Q_{air}$  : air-bubble flow rate, [L/min]

$R_f$  : Dimensionless freezing quantity, [ - ]

$T_i$  : initial temperature of sea water, [°C]

$T_w$  : temperature of cooled part, [°C]

$X$  : dimensionless air flow rate(= $W_{air}/(W_{air}+W_i)$ ), [ - ]

$\theta_w$  : dimensionless temperature(= $(T_f - T_w)/(T_o - T_f)$ ), [ - ]

$Re$  : Reynolds number(= $U_i \cdot D_h / \nu$ ), [ - ]

$T_f$  : equilibrium freezing temperature, [°C]

$T_o$  : freezing temperature of water, [°C]

$U_i$  : velocity of sea water, [m/s]

#### 1. 서 론

물은 인간생활에 있어 절대적인 요소로서 지구  
의 역사에서 가장 최초로 생긴 물질 중 하나로 지

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교

급까지도 지구상에서 가장 풍부한 자원으로 꼽히고 있다. 지구상에 존재하는 물의 총량은 약 13억 8600만킬로톤으로 이중 바닷물이 97%인 13억 5000만킬로톤으로 물부족량의 절대량을 차지하고 나머지 3%만이 담수이다. 현재 인류가 사용가능한 물의 총량은 약 9천킬로톤으로 현재 물소비량 4천3백킬로톤에 비해 여유가 있는 편이다. 그러나 사용가능량의 절반밖에 쓰고 있지 않으면서도 인류가 물부족 위기에 직면하게 된 이유는 20세기 들어 시작한 급격한 인구의 증가와 집중현상, 물자원의 지역적 편재, 그리고 생활수준 향상으로 인한 물 소비량의 증가 때문이다.

우리 나라의 경우도 인구의 증가와 강우량이 여름철에 집중적으로 분포되어 있는 기후적 특성으로 인해 적절한 물 공급이 이루어지지 못해 점차적으로 물부족현상이 심화되어 가고 있다. 이에 정부는 막대한 규모의 자금을 투자해 댐을 추가로 건설하고자 하고 있으며 아울러 인공강우 기술개발과 해수의 담수화 연구 등을 적극 추진할 것임을 밝히는 등 용수부족의 심각성을 인식하고 용수확보의 중, 장기적인 대책 수립에 노력을 기울이고 있다.

우리나라는 삼면이 바다와 접해 있기 때문에 해수의 담수화는 장기적인 면에서 용수 확보의 중요한 역할을 하리라 본다. 댐의 건설과 상수도 시설 등은 장기간에 걸쳐 막대한 건설비용이 요구되는데 반해 해수담수화 설비는 일차선정이 자유롭고 제작기간과 생산관리가 용이할 뿐만 아니라 주변 시설의 에너지원 활용은 담수 생산비용의 측면에서도 경제적인 평가를 받고 있다.

한편, 우리나라는 석유에너지의 의존도를 줄이고 환경오염 해결책의 하나로써 청정에너지인 LNG에 대한 발전용, 산업용 및 가정용의 수요가 급증하고 있다. LNG는 수송 및 저장의 형태가 -162℃ 이하의 저온액체 상태이며 공급지의 저장탱크에서 각 수요지로 가스를 공급하고자 할 때에는 LNG를 기화시켜 고압상태의 상태로 공급하고 있다. 이때 LNG는 많은 양의 냉열을 주위로 방출하게 된다. LNG의 보유 냉열에너지를 유용하게 이용하는 방법으로서 동결식플, 드라이 아이스, 액화수소, 액화질소의 제조 등과 함께 해수 동결담수화장치가 있다. LNG 1kg이 0℃의 대기압 가스로

상태변화(기화)를 할 경우 흡수하는 에너지는 약 850kJ이며 이것은 0℃ 빙을 약 2.5kg 제조할 수 있는 열량이 된다.

따라서 본 연구에서는 LNG의 유효 폐냉열을 이용하여 위한 노력의 한 방안으로 해수동결 담수화 장치의 개발을 목표로 하고 있다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 해수의 동결이 진행되는 시험부, 냉각평판을 소정의 온도로 유지하기 위한 브라인 순환부, 해수 동결면에서의 유동을 가시화하기 위한 가시화부와 소정 온도의 공기를 분사하기 위한 제반장치들로 구성되어 있다. 시험부 ①은 가로 150mm, 길이 190mm, 높이 1800mm의 구형용기로 가시화를 위해서 두께 15mm의 투명 아크릴로 제작하였으며, 중앙에 가로 120mm, 세로500mm의 냉각평판을 좌우측에 각각 평행하게 설치하였다. 브라인 순환부는 냉동기에서 냉각된 소정 온도의 브라인이 냉각면에 균등하게 분사되도록 하였다. 그리고 해수의 평균농도를 감안하여 염화나트륨 3.5wt%수용액으로 시료를 제작하여 사용하였으며 냉동기를 사용하여 -0.5℃로 냉각하여 시험부에 유입시켰다. 압축기 ⑥에 의해 공급된 분사공기는 냉각기 ⑧에 의해 -0.5℃로 냉각시켜 시험부에 유입되도록 하여 기포의 충격력에 의한 교반작용으로 물질 확산을 증대를 도모하였다.

Fig. 2는 시험부의 상세도로써 가로 120mm, 세로 500mm, 높이 70mm의 구형용기(Rectangular Duct)에 두께 3mm의 동관을 사용하였다. 냉각면의 내표면에는 등온상태를 확인하기 위하여 10개의 열전대(C-A Type)를 50mm 간격으로 각각 부착하였다. 또한 내부에 등간격으로 노즐을 설치하여 브라인(에틸렌-글리콜 수용액)을 냉각면 전체에 고루 분사시켜 냉각면 온도를 일정하게 유지하였다.

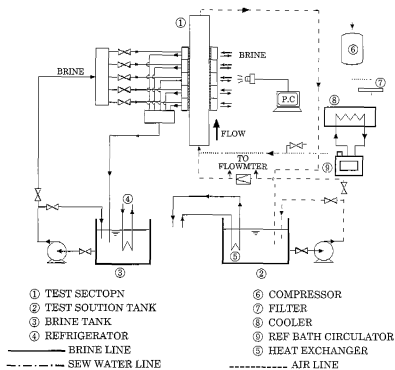


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

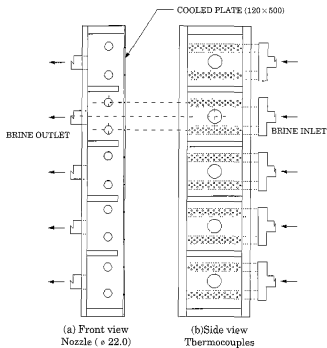


Fig. 2 Details of test section

### 2. 실험방법

실험은 냉동기를 작동시켜 각부의 온도를 실험 조건에 맞게 유지시켜, 해수와 분사공기를 시험부 내로 유입시킨후 냉각면에 브라인을 분사하는 시각을 실험의 시작으로 하여 실험 종료시까지 매 10분 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 평균텔분농도를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 평행평면 주위에서의 해수동결거동

Fig. 3은  $T_w = -20^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{air} = 10\text{L/min}$ ,  $U_f = 0.02\text{m/s}$ 의 조건에서 동결층의 형상으로 흐름의 하부로 갈수록 동결층이 두껍게 나타남을 알 수 있다. 이는 시험부 하부에서 유입된 작동유체는 냉각면의 하부에서 상부로 상승하면서 평행동결온도이하로 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 작동해 빙의 성장률은 급격히 저하하면서 정상상태(steady status)에 다다르게 된다.

Fig. 4는 각각 동결층의 형상과 얼분농도를 냉각면의 위치별로 나타낸 것이다. 그럼으로부터 빙의 성장률이 빠른 상부면이 중·하부면에 비해 낮은 얼분농도를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 초기 급격한 온도구배에 의해 성장한 빙의 얼분농도가

정상상태의 동결층의 얼분농도에 비해 훨씬 높게 나타남을 알 수 있다. 이것은 초기에 생성된 빙의 조직은 급속한 침상빙의 성장으로 인해 조직이 치밀하지 못하고 회고 밀도가 작은 상태의 조직이며, 빙의 평균얼분농도는 비교적 높게 나타났다. 이는 급속한 빙의 성장으로 인해 빙결정에 의해 석출된 NaCl이 빙면위로 배제되지 못하고 침상빙의 동결층 내부로 다량의 용질이 함께 묶이기 때문이다. 그러나, 시간이 경과하면서 빙의 두께에 의한 동결속도의 저하와 유속변화에 따른 강제대류작용의 증대로 인한 침상빙 형성의 억제 및 석출된

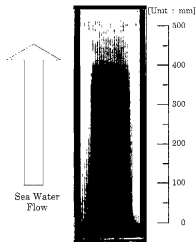


Fig. 3 Shape of the frozen layer ;  $T_w = -10.0^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{air} = 10\text{L/min}$ ,  $U_f = 0.02\text{m/s}$

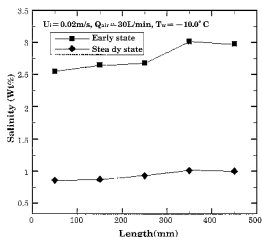
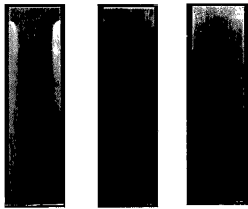


Fig. 4 Distribution of salinity in the frozen layer ;  $T_w = -10.0^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{air} = 30\text{L/min}$ ,  $U_f = 0.02\text{m/s}$

용질의 제거작용의 증대로 말기에 생성된 빙의 열분농도는 초기 생성빙의 농도에 비해 낮은 열분농도를 나타내었다.

### 3.2 해수의 유속에 의한 영향

Fig. 5는  $T_w = -20^\circ\text{C}$ ,  $Q_{\text{air}} = 10\text{L/min}$ 의 조건에서 정상상태에 있어서의 유속의 변화에 따른 해수의 동결의 형상을 가시화한 사진이다. 사진으로부터 시험부에서의 유속이 빨라짐에 따라 전체 동결량이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 또한, 빙의 형상을 보면 전체적으로 냉각면 하부에서 상부로 갈수록 동결층이 두껍게 형성되는 것을 알 수 있다. 이는 유속이 빨라짐에 따라 냉각면에서 해수로의 대류열전달율이 증가하기 때문이다.



(a)  $U_1 = 0.02\text{m/s}$  (b)  $U_1 = 0.05\text{m/s}$  (c)  $U_1 = 0.1\text{m/s}$

Fig. 5 Effect of fluid velocity on freezing behavior ;  $Q_{\text{air}} = 10\text{L/min}$ ,  $T_w = -20^\circ\text{C}$

Fig. 6과 Fig. 7은 Fig. 5와 동일조건에서 해수의 유속의 변화에 따른 동결량과 동결률의 변화를 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 그림에 나타난 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 알 수 있다. 또한, 유속이 빠를수록 대류열전달율이 증대하여 빙이 지속적으로 성장을 하지 못하고 빨리 정상상태에 도달함을 확인할 수 있다. Fig. 8은  $U_1 = 0.02\text{m/s}$ ,  $Q_{\text{air}} = 10\text{L/min}$ ,  $T_w = -20^\circ\text{C}$ 의 조건에서 시간의 경

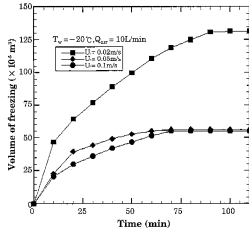


Fig. 6 Effect of mean velocity on volume of freezing ;  $Q_{\text{air}} = 10\text{L/min}$ ,  $T_w = -20^\circ\text{C}$

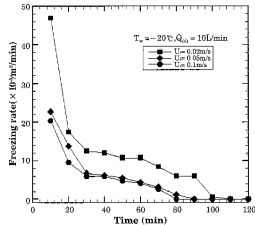


Fig. 7 Effect of mean velocity on freezing rate ;  $Q_{\text{air}} = 10\text{L/min}$ ,  $T_w = -20^\circ\text{C}$

과에 따른 동결량을 가시화한 사진이다.

한편, 빙의 조직은 유속이 낮은  $0.02\text{m/s}$ 의 경우에 비해 유속이 큰  $0.1\text{m/s}$ 의 경우에 생성된 빙이 훨씬 조직이 치밀하고 밀도가 큰 투명빙을 생성하는데, 이는 유속이 증가함에 따라 동결로 인해 석출된 고농도의 염화나트륨수용액의 제거효과가 증대하여 동결층내에 고액공존층이 감소하기 때문이다. 이러한 경향은 생성빙의 열분농도에도 큰 영향을 미친다. 정상상태에 도달한 동결층의 열분농도의 변화를 유속에 따라 나타내면 Fig. 9와 같

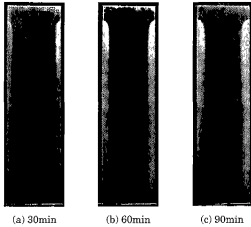


Fig. 8 Freezing behavior of sea water ;  $U_i=0.02\text{m/s}$ ,  $Q_{\text{air}}=10\text{L/min}$ ,  $T_w=-20^\circ\text{C}$

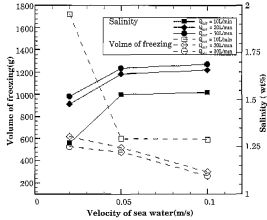


Fig. 10 Mean salt concentration of frozen layer ;  $T_w=20^\circ\text{C}$

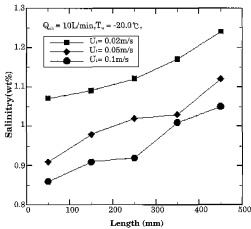


Fig. 9 Salinity of external frozen layer in steady state ;  $Q_{\text{air}}=10\text{L/min}$ ,  $T_w=20^\circ\text{C}$

다. 그림으로부터 유속이 증가할수록 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도가 저감됨을 알 수 있다.

그러나, 전체 생성빙의 염분농도는 Fig. 10에서 나타낸 바와 같이 유속이 증가할수록 생성빙의 평균염분농도는 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 유속이 증가할수록 빙의 성장률이 감소함에 따라 전체 동결량이 작아져서 실현초기 큰 열유속에 의해 급격히 성장한 염분농도가 높은 빙이 전체 생성빙에 대해 차지하는 비율이 증가함으로써 평균염분농도에 미치는 영향이 유속의 증가에 따른

유질의 제거효과를 증가하기 때문에 생성빙의 평균염분농도는 급격히 상승하는 경향을 보인다.

### 3.3 분사 공기량에 의한 영향

Fig. 11은  $T_w=20^\circ\text{C}$ ,  $U_i=0.02\text{m/s}$ 의 조건에서 정상상태의 해수의 동결 형상을 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.

한편, 빙의 조직은 공기 분사량이 작은 10L/min의 경우는 다소 강도가 약한 상태의 빙질을 보이는 반면 공기 분사량이 큰 30L/min의 경우에는 빙질이 상대적으로 훨씬 조직이 치밀하고 단단한 투명빙을 생성하였다. 이는 공기 분사량이 증가함에 따라 기포의 충격력에 의해 동결로 인해 석출된 고농도의 염화나트륨수용액의 제거효과가 증대하여 동결층내에 고액공존층이 감소하기 때문이다.

이러한 경향은 전술한 유속의 영향에서와 마찬가지로 생성빙의 염분농도에도 큰 영향을 미친다. Fig. 12는 정상상태에 있어서 공기 분사량의 변화에 따른 동결층의 염분농도의 변화를 나타내

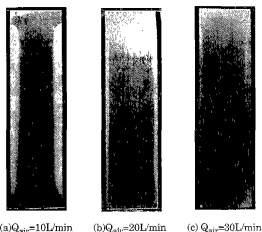


Fig. 11 Effect of air-bubble flow rate on freezing behavior;  $T_w=20^\circ\text{C}$ ,  $U_f=0.02\text{m/s}$

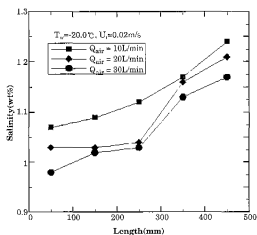


Fig. 12 Salinity of external frozen layer in steady state;  $T_w=20^\circ\text{C}$ ,  $U_f=0.02\text{m/s}$

었다. 그럼으로부터 공기 분사량이 증가할수록 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도가 저감됨을 알 수 있다.

그러나, 전체 생성빙의 염분농도는 진술한 유속의 영향과 비슷한 경향을 보인다. Fig. 13은 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 감소함에 따라 전체 동결량이 작아져서 실험초기

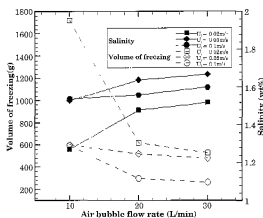


Fig. 13 Mean salt concentration of frozen layer;  $T_w=20^\circ\text{C}$

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 평균염분농도는 상승하는 경향을 보인다.

### 3.4 냉각면 온도에 의한 영향

Fig. 14는  $Q_{air}=10\text{L/min}$ ,  $U_f=0.02\text{m/s}$ 의 조건에서 정상상태에 있어서의 해수의 동결 형상을 가시화한 사진이다. 그림으로부터 냉각면 온도가 상승함에 따라 전체 동결량이 급격하게 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 냉각면 온도가 상승할수록 즉, 냉각면과 동결계면 사이의 열낙차가 감소할수록 냉각면에서 동결계면으로의 열유속이 감소하기 때문이다.

한편, 빙의 조직은 냉각면 온도가 낮은  $T_w=20^\circ\text{C}$ 의 경우는 다소 강도가 약한 상태의 빙질을 보이는 반면 냉각면 온도가 높은  $T_w=-10^\circ\text{C}$ 의 경우에는 빙질이 상대적으로 훨씬 조직이 치밀하고 단단한 부영빙을 생성하였다. 이는 냉각면 온도가 상승함에 따라 열유속이 작아져 생성된 침상빙이 지속적으로 성장하지 못하고 다시 용해되어 빙의 성장 속도가 느려지기 때문에 동결로 인해 석출된 고농도의 염화나트륨이 침상빙 사이에 분입되지 않고 빙면 밖으로 배제되어 동결층내에 고액공존층이 감소하기 때문이다.

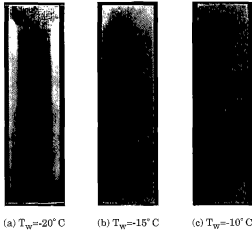


Fig. 14 Effect of cooled plate temperature on freezing behavior;  $Q_{air}=10L/min, U_f=0.02m/s$

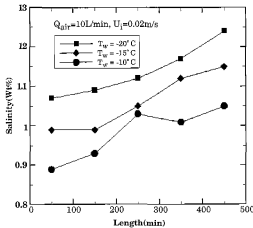


Fig. 15 Salinity of external frozen layer in steady state;  $Q_{air}=10L/min, U_f=0.02m/s$

Fig. 15는 Fig. 14의 조건에서 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. 16은 냉각면 온도에 따른 평균염분농도의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 냉각면 온도가 상승할수록 동결량은 급격히 감

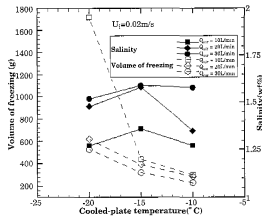


Fig. 16 Mean salt concentration of frozen layer;  $Q_{air}=10L/min, U_f=0.02m/s$

소한다. 생성빙의 평균염분농도는  $-20^{\circ}C$ 에서  $-15^{\circ}C$ 로 상승할때는 전술한 공기 분사량의 영향에서와 같은 이유로 염도가 상승하는 경향을 나타낸다. 그러나,  $-10^{\circ}C$ 로 온도가 상승하면 냉각면에서 동결계면으로의 열유속이 작아져 실험초기부터 빙의 동결속도가 저하함으로써 석출된 고농도의 염화나트륨이 동결계면 밖으로 배제되는 효과가 증대되어 동결층 전체의 평균염분농도가 저하함을 알 수 있다.

### 3.5 무차원 정리

본 실험의 연구결과로부터 수직평행판면에서의 동결량은 시간의 경과, 유속의 감소, 공기 분사량의 감소 및 냉각면 온도의 저하와 함께 증가함을 알 수 있다. 본 실험범위내에서 동결량에 영향을 미치는 인자들을 정리하면 무차원 동결량  $R_f$ 는 (3.1)식과 같이  $\theta_w, Re$  및  $X$ 의 함수 관계임을 알 수 있다.

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

여기서,  $R_f$  (무차원 동결량) =  $\frac{V_f}{H_c}$

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

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

$$X \text{ (질량유량조건)} = \frac{W_{air}}{W_{ice}}$$



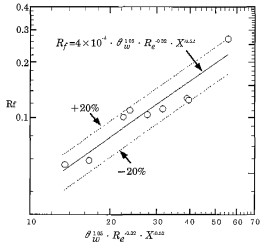


Fig. 17 Dimensionless frozen quantity

$$W_{air} + W_i$$

이다. 최소자승법을 이용하여  $\theta_w, Re, X$ 의 함수로서 무차원 동결량  $R_f$ 를 정리하면 Fig. 17로 나타낼 수 있다. 따라서 그림으로부터 무차원 동결량은 약  $\pm 20\%$ 의 오차한계 범위 내에서 (3.2)식으로 정리될 수 있다.

$$R_f = 4 \times 10^{-3} \cdot \theta_w^{1.05} \cdot Re^{0.22} \cdot X^{0.42} \quad (3.2)$$

#### 4. 결 론

LNG냉열을 이용한 해수담수화장치의 개발을 위한 연구의 일환으로 평행평판상에서의 해수동결거동을 해수의 유속, 공기 분사량, 냉각면 온도의 영향에 대하여 실험적으로 연구, 검토한 결과 본 실험범위내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험초기의 동결층의 동결속도는 냉각면과 동결체면 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.

$$R_f = 4 \times 10^{-3} \cdot \theta_w^{1.05} \cdot Re^{0.22} \cdot X^{0.42}$$

#### 참 고 문 헌

- (1) Stephan, K, Genthner, K, and Holzknecht, 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., "Selective Freezing of a Dilute Salt Solution on a Cold Ice Surface", J. Heat Transfer, Vol. 106, pp. 385~393(1984).
- (4) 김명환, 김명환, 박형진, "구형용기의 하부면 냉각에 의한 해수동결거동의 기초적 연구", 한국박용기학회 춘계학술강연회, pp. M-1~M-7 (1998).
- (5) 최부홍, 김명환, 김명환, "구형용기의 상부면 냉각에 의한 해수동결거동의 실험적 연구", 한국박용기학회 추계학술강연회 pp. 23~29(1998).
- (6) 조이제, "유동장을 동반한 해수동결거동에 관한 실험적 연구", 한국해양대학교 대학원 석사논문, pp.75~76(1999).
- (7) 박대식, 오원, 김명환, 이영호, "An 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).

**저 자 소 개**



**박대식(朴大植)**

1972년 9월 18일생. 1997년 2월 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 2001년 2월 한국 해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사). 현재 한국해양대학교 대학원 기관공학과 재학중.



**김명환(金明煥)**

1959년 1월 16일생. 1981년 한국해양대학교 기관과 졸업. 1985년 한국해양대학교 박용기관학과 졸업(석사). 1984년 일본 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1981년~현재 한국 해양대학교 해사대학 기관시스템공학과 교수.



**오철(吳 喆)**

1958년 6월 29일생. 1983년 한국해양대학교 기관과 졸업. 1985년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 졸업(석사). 1989년 일본 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1983~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학과 부교수.