工學碩士 學位論文

圓管內의 海水凍結擧動에 관한 實驗的 研究

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

指導教授 吳 喆

2000年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機 關 工 學 科

朴 鍾 德

本 論文을 朴鍾德의 工學碩士 學位論文으로 認准함

主審 金京根 (印)

委員 尹錫勳 (印)

委員 吳 喆 (印)

1999年 12月 24日

韓國海洋大學校 大 學 院

機 關 工 學 科 朴 鍾 德

목 차

Abstract

Everyone knows that water is the most important thing to make our living. However in Korea, many expert organizations have predicted that it will also become water deficiency in the near future.

As becoming generally known, the most effective method is to desalinize the sea water in order to obtain the fresh water. In this present, there are various methods for the desalination of sea water. But the most considerable point for adopting the desalination system is the production cost of fresh-water based on an energy source which should be obtained easily and cheaply. Recently in Korea, the demand of Liquified Natural Gas (LNG), as a cheap and clean energy which does not cause an environmental problem, is greatly being increased. In general, we put this LNG in storage as a liquid state at below -162℃ in a tank. When the LNG transforms to the gaseous state at high pressure, it absorbs energy from a heat source. In this process, a large amount of cold energy is wasted. Therefore, we focused to make the desalination system by utilizing this wasted cold

energy. In characteristic point of sea water, high concentration of aqueous solution becomes an eduction from frozen surface in case it frozen over. Therefore, it is possible to desalinize from sea water.

First of all, we have to reveal the freezing mechanism of sea water so as to make the desalination system. The goal of this study is to measure the freezing quantity and freezing rate, and to investigate the freezing heat-transfer characteristics in a Circular Tube. The experimental results will help to provide a general understanding of the sea water freezing behavior to reach completion of the desalination system in the future.

사용기호

C_i	: 초기염분농도	[‰]
F_o	: Fourie 수	
H_o	: 초기용액의 높이	[m]
R_f	: 무차원 동결량	
T_f	: 농도에 따른 평형 동결온도	[℃]
T_i	: 수용액의 초기온도	[℃]
T_o	: 물의 동결온도	[℃]
T_w	: 냉각면 온도	[℃]
V_f	: 냉각면 단위면적당의 동결량	[㎥/㎡]
X	: 원관 냉각면에서 중심까지의 거리	[mm]

α	: 얼음의 온도전도율	[㎡/s]
θ_w	: 무차원 냉각면 온도	
τ	: 시간	[s]

제 1 장 서론

1.1 연구의 배경

인류역사상 물은 오랫동안 공기와 같이 무한정, 자유로이 사용할 수 있는 자유재(free goods)로 인식되어 욕구에 따라 자유로이 소비할 수 있을 뿐 아니라 이것을 얻는데 아무런 노동을 필요로 하지 않는다는 관념이 지배되어 왔다. 그러나 현대의 산업문명과 생활수준의 향상으로 물 수요의 폭증과 인구증가로 인한 수질악화 등으로 이제 물은 더 이상 자유재일 수 없으며 경우에 따라 석유 등 기타 경제재보다 더 소중한 자원으로 인식되기에 이르렀다.

오늘날 80개국에서 전세계 인구의 40%가 식수난과 농업, 산업용수난을 겪고 있으며 중동, 북아프리카, 중국, 멕시코, 인도, 남미 등은 물 부족이 특히 심각하다. 세계 800여 개의 하천이 2개국 또는 다수국에 의해 공유되고 있고 세계인구 40%가 인접국의 물에 의존하고 있는 가운데 유량통제를 둘러싸고 상·하류국가간의 분규가 빈발하고 있으며, 특히 중동의 요르단강, 아프리카의 나일강 인도-방글라데시의 갠지스강 등은 인접국들간의 물을 둘러싼 갈등이 폭발할 가능성이 높은 지역들로 꼽히고 있다. 20세기 많은 분쟁의 원인이 석유였다면 21세기는 물 분쟁의 시대가 될 것이라는 예고가 있다.

우리 나라는 60년대의 경제개발계획과 더불어 물에 대한 경제적 가치를 인식하게 됨에 따라 수자원종합계획의 필요성이 크게 대두되었으며 다목적 댐 건설을 주축으로 본격적인 수자원개발사업이 시작되었다. 국제연합(UN)의 국제인구행동연구소의 발표(1990년)에 따르면 우리 나라 등 8개국이 물압박국가군(1인당 물 사용량 연간 1,500톤 미만)으로 분류되어 있는 것을 고려해 볼 때, 우리 나라도 앞으로 수년 내에 물 부족 현상이 발생될 것이라고 예상된다(Table 1.1 참조). 오늘날 이와 같이 물에 대한 경제적 가치가 증가됨에 따라 수자원 확보를 위한 새로운 방안으로서 중수도의 이용, 우수의 이용, 처리수의 재 이용 및 해수의 담수화(1),(2) 등 수자원의 다각적인 이용방안이 검토되고 있다.

지구상에는 약 14억km3의 물이 있다고 알려진다. 그 중 약 97%가 해수(3)이고 나머지는 극지방의 빙과 지하수이다. 더욱이 담수의 약 70%는 남극, 북극, 각 지역의 빙하 등의 얼음으로서 존재하고 실제로 사용되는 지하수, 하천수, 호수 등의 담수는 지구상 수자원 양의 약 0.8%에 지나지 않는다(Table 1.2참조). 우리 나라의 지리적인 특성상 3면이 바다이며 또한 많은 섬을 가지고 있어 국토의 많은 부분이 바다와 자연스럽게 접하고 있다. 따라서 향후 물 부족의 해결에 있어서 그 방향을 바다로 향하지 않을 수 없음을 암시한다고 할 수 있다. 해수는 기상이변에 관계없이 안정적으로 무한히 많은 양을 확보할 수 있는 자원이기 때문에 해수의 담수화는 장기적인 면에서 용수확보에 중요한 역할을 하리라 생각된다. 댐이나 광역상수도로부터 공단까지 수도관으로 물을 끌어올 경

Table 1.1 물 공급량과 수요예상량 비교

구분	1994년	2001년	2006년	2011년
공급량	322.1	342.9	345.4	346.5
수요량	299.0	336.4	349.9	366.5
과부족량	+23.1	+6.5	- 4.5	- 20.0

단위 : 억톤

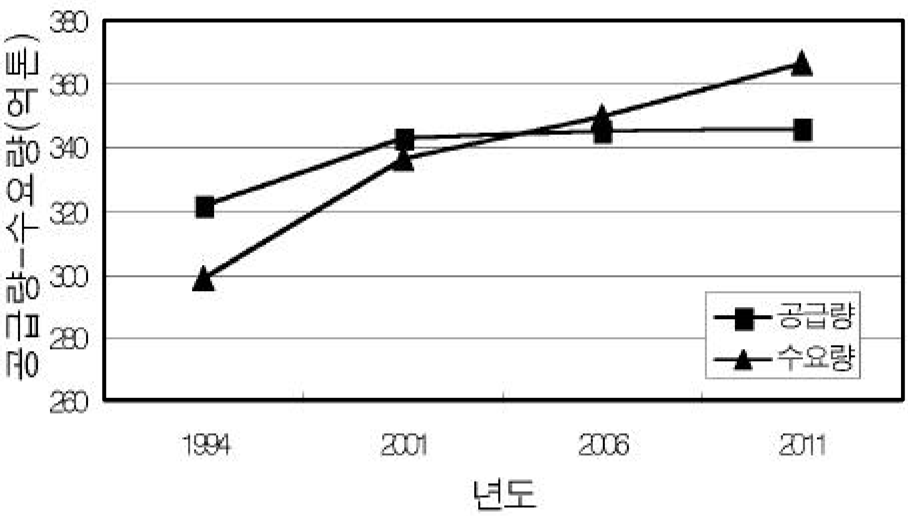
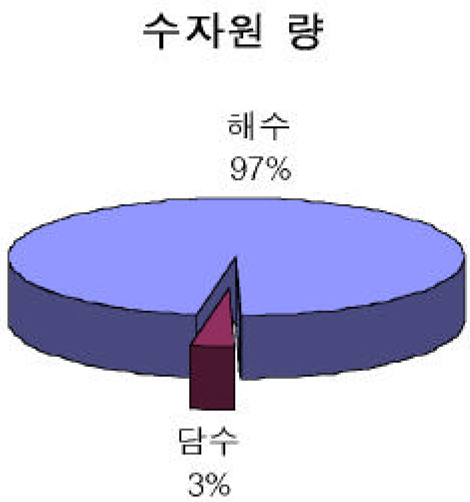
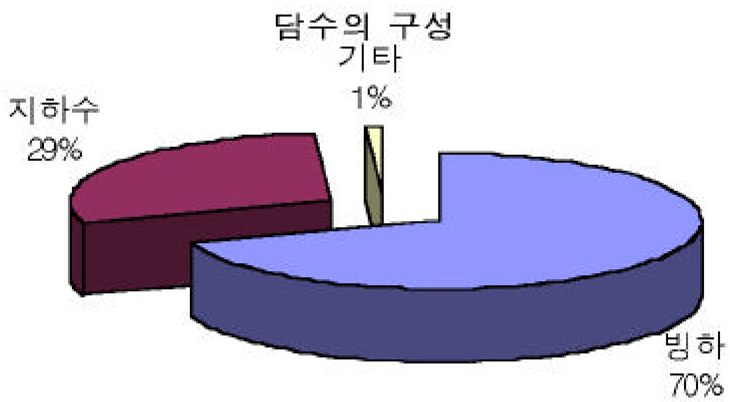


Table 1.2 세계 수자원의 분포 상황





우 이것으로부터 야기되는 제반문제는 복잡하다. 우선 시설공사비가 막대하게 소요되며 공사기간이 너무 길어질 뿐 아니라 경우에 따라서는 환경문제도 심각하게 된다. 따라서 해수담수화설비는 기존의 수도설비에 비하여 우리 나라의 지리적인 특성 때문에 많은 장점을 가지고 있다. 우리 나라의 수많은 섬에 안정적으로 양질의 물을 공급하기 위해서는 해수를 담수화하는 것이 가장 경제적인 방안이라고 생각된다.

알려진 바와 같이, 해수 중에 포함되어 있는 염분은 약 3%정도이고, 나머지 97%는 수분이다. 따라서, 이들 염분을 해수로부터 경제적으로 제거하기 위해서는 특별한 방법을 사용해야 한다. 원리적으로는 대량의 물과 희박한 염분을 분리시키면 되기 때문에 이들 방법에는 크게 보아 해수로부터 염분을 제거하든지 물을 제거하면 되는 것이다. 지금까지 인공적인 용수 생산을 위하여 무한정한 해수를 담수화하려는 기술이 개발되어 왔으며 그 방법으로는 증발법, 삼투막법, 냉동법 등을 들 수 있다(Table 1.3 참조). 먼저 증발법은 해수를 가열 증발시켜 발생한 수증기를 냉각하므로서 담수를 얻는 방법으로, 에너지 대량 소비형(담수 1kg 당 약 540kcal)이기 때문에 산유국에 적당한 기술이다. 그리고 삼투막법으로는 역침투법과 전기투석법이 있는데, 전자는 물만 통과하고 염분은 통과하지 않는 반투막으로 용기를 나누고 그 한쪽 편에는 해수를 넣어 해수에 압력을 가함으로써 담수만을 투과시키는 방법이다. 그리고 후자는 양이온 교환막과 음이온 교환막 사이에 해수를 통과시킨 후 양막의 외측에 직류전압을 걸면 막을 통하여 해수 중의 염소이온과 나트

Table 1.3 해수 담수화방법의 분류

- 증발법
  - MSF방식 (Multi Stage Flash Method)
  - ME방식 (Multi Effect Method)
  - ME-MSF방식
- 막분리법
  - R/O (Reverse Osmosis)
  - ED (Electro Dialysis)
- 냉동법
  - 직접냉동법
  - 간접냉동법
- 투과 기화법

- 에너지 원
  - 폐열이용 (화력발전소, 원자력발전소)
  - 추기이용
  - 태양에너지이용
  - 풍력이용
  - LNG냉열이용

륨이온을 제거하고 담수를 얻는 방법이다. 이 삼투막법은 염분농도가 낮은 염수를 담수화 할 경우에 조수비용을 저감시킬 수는 있지만 막을 자주 교체해 주어야 하는 단점이 있다. 다음으로 냉동법은 해수를 동결하여 얻어진 빙을 해수로부터 분리시켜 담수를 얻는 방법으로서, 빙의 결정격자 중에는 냉각속도에 따라서 염 분자가 몰입되지 않으므로 빙을 융해시켜 담수를 얻을 수 있는 기술이다. 이 방법은 얼음의 융해잠열 약 80kcal을 열교환하면 되기 때문에 앞서 설명한 증발법에 비해 소비열이 1/7 정도로 줄어든다. 이것은 냉동법이 이론적으로 더 적은 에너지를 소비하는 것을 나타내고 있다.

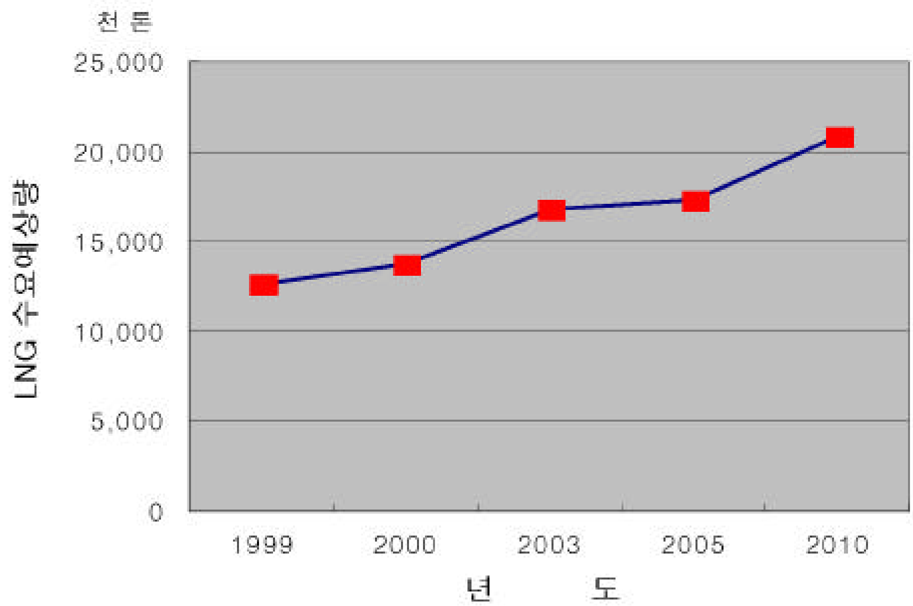
담수화 방법의 선정에 대한 논의는 최종적으로 담수생산비용으로 집약된다. 즉, 값싸고 쉽게 얻을 수 있는 담수용 에너지원이 무엇인가에 따라 결정되는 것이다. 현재 설치된 임해공업단지 주변의 담수화설비는 증발법과 역삼투막법이 대부분이며 이는 쉽게 그리고 저렴하게 고열원과 전력을 확보할 수 있기 때문이다.

한편, 우리 나라는 타 연료에 비하여 비교적 저가이고 환경오염문제를 야기하기 않는 청정에너지인 LNG(Liquified Natural Gas : 액화천연가스)에 대한 수요가 산업용 및 가정용으로 확산되어 왔다. 1987년 LNG공급을 시작한 이래 1997년에는 년간 1000만 톤 공급이 초과 달성되었고 그 수요는 매년 증가할 것으로 예상하고 있다(Table 1.4 참조). LNG는 주성분인 메탄의 비점이 -162℃로 초저온 상태이기 때문에 그 이용가치가 매우 크다고 할 수 있다. LNG냉열 이용방식으로 실용화된

Table 1.4 우리나라의 LNG 수요예상량

구분	1999년	2000년	2003년	2005년	2010년
LNG 수요전망	12,617	13,702	16,777	17,260	20,814
LNG 공급전망	13,142	14,596	16,980	16,980	14,680
과부족량	+525	+894	+203	- 280	- 6,134

단위 · 천톤



산업으로는 공기액화분리, 냉열발전, 식품동결 및 저장, 초저온 창고, 드라이아이스 및 액체탄산가스 제조, 저온분쇄산업 등이다. 그러나 여전히 LNG가 기지의 저장탱크에서 각 수요지로 공급될 때 다량의 냉열이 배관망을 지나오면서 손실되고 있어서 에너지 절약 차원에서 냉열회수를 위한 적극적인 기술개발이 필요하다고 생각된다.

본 연구에서는 경쟁력 있는 담수화장치의 개발이라는 궁극적인 목표 아래, 폐기되거나 사용율이 낮은 LNG의 냉열을 해수동결담수화장치의 에너지원으로 이용함으로서 LNG기지 주변의 공단 및 주택지에 값 싼 용수를 안정적으로 공급할 수 있는 효과적인 방법을 제시하고자 한다. 이 방법은 앞서 언급한 각종 담수화장치에 비하여 생산단가의 문제도 상당히 해결될 가능성이 있을 뿐 아니라 LNG보유에너지의 극대이용으로 성에너지의 차원에서도 가장 바람직한 시스템이라고 할 수 있겠다.

1.2 종래의 연구

1.2.1 동결문제

동결과 관련된 문제는 인간의 실생활과 직접적인 관련이 있는 부분이 많고 과냉각 현상이나 침상빙(Dendritic Ice)의 발생 등 특이한 점이 많아 대단히 흥미로운 분야라고 할 수 있다. 예를 들어 우리가 흔히 경험할 수 있는 일로서 가정용 수도관 등에서 일어나는 동결은 단수 혹은 수도관 파괴와 같은 사고로 이어지기도 하는 데, 그 물리적 현상 및 역학적 특성에 대해서는 일부 문헌에서 찾아볼 수 있다(4) (8).

1.2.1.1 순수액의 경우

물의 동결 및 그기에 관여하는 자연대류현상에 대하여 오래 전부터 많은 해석적·실험적 연구가 진행되어 왔다. 순수액(0wt%)인 경우에 있어서는 Gilpin(4) (6)의 원관내 동결실험을 시초로 빙의 형성과정에 나타날 수 있는 여러 가지 흥미로운 사실이 밝혀졌다. 그는 수평 원관 내의 정수를 서서히 냉각시키면 물이 과냉각된 후 관 상부로부터 갑자기 침상빙(Dendritic Ice)이 발생하고, 최대 밀도 영역에서 자연대류 역전현상이 발생한다고 보고하였다. 그 후, Cheng(7)이나 Fukusako(8) 등에 의해 Gilpin의 실험을 뒷받침해주는 여러 가지 실험적 연구가 진행되었다.

한편, 물을 냉각시키면, 전열면 근방의 물은 응고점 이하임에도 불구하고 상변화를 일으키지 않는 과냉각 상태를 수반하게 된다. 이것은 동결실험에 있어서 상당히 흥미로운 부분이며 과냉각 해제(침상빙의 생성) 시기 및 동결개시 시기의 예측에 관한 통계적인 연구가 진행중이다. Kashiwagi(9) 등은 용기에 정수를 채우고, 냉각에 의해 생기는 자연대류의 유동양식이 과냉각도에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 보고하였다. 또한 Saito(10) 등은 과냉각을 수반하는 순수의 응고과정에 대한 관찰을 수행하였는데, 그는 표면의 물리적 성질이 다른 전열면을 사용하여 과냉각도에 미치는 표면 성질의 영향에 대하여 검토하였다.

Fig. 1.1은 관내에 물을 가득 채워 냉각면 온도를 빙점이하로 유지하였을 때 관내의 온도분포의 시간경과에 따른 변화와 관내 빙의 형성과정을 나타낸 것이다. 초기온도 T_i에서 빙점하 냉각면 온도 T_w로 원관을 노출시키면 관 내벽온도(A)는 급격히 저하하고 동시에 관 상부의 수온(B)도 저하한다. 먼저 관 내벽 부근의 물이 냉각되면서 여러 가지 자연대류가 발생하고 물의 최대밀도인 4℃의 수층이 관 아랫부분에 정체하게 된다. 그 결과 관 중앙부의 수온(C)도 영향을 받아 상부온도(B)를 추종하지 않게 된다. 더욱 관벽온도가 저하하면 관 상부의 수온(B)는 과냉각이 되고, 그 과냉각도는 시간의 경과와 함께 증대한다. 이 과냉각 상태는 어떤 과냉각온도에서 돌연 해방되고, 그 순간 빙핵의 생성이 일어나며 관 상부의 과냉각도가 큰 부분에 침상빙(Dendritic Ice)이 발생하

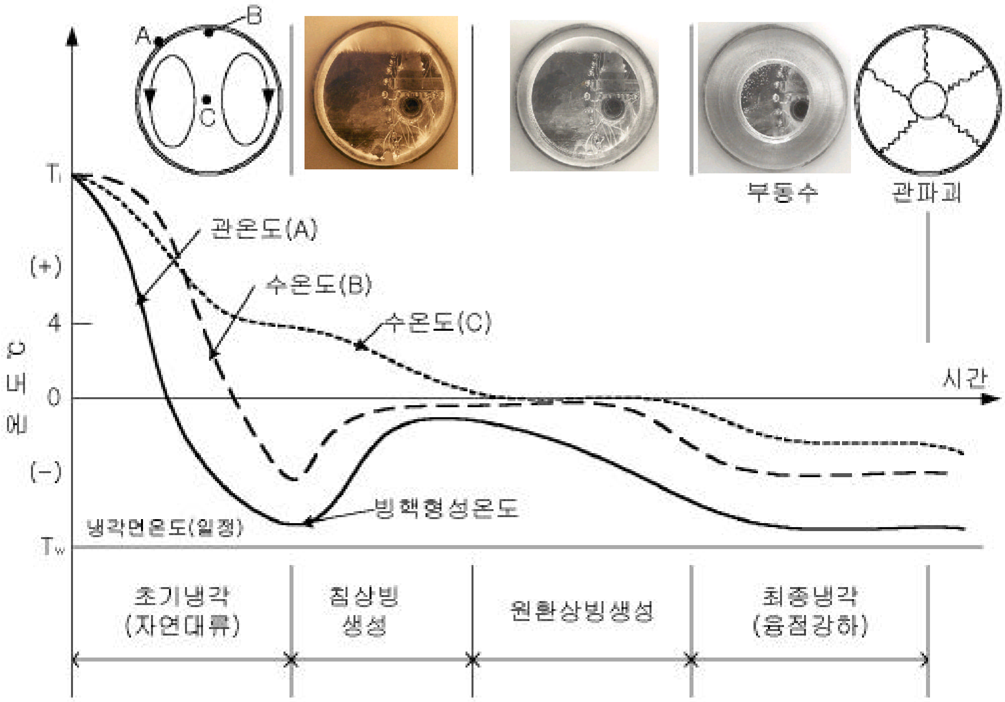


Fig. 1.1 Fresh water freezing behavior in a circular tube

여 방사상으로 관 중앙부로 향하여 발달한다. 침상빙의 발생과 함께 상변화로 인하여 발생한 열이 주변의 과냉각수로 흡수되기 때문에 수온이 0℃로 된다. 그 후, 관 내벽에서 일반 빙층이 관 중심을 향해 서서히 원환상(Annular Ice)으로 발달하게 된다.

1.2.1.2 수용액의 경우

과냉각 현상은 수용액의 동결실험에서도 관찰할 수 있는데, 순수액 동결실험에서와 마찬가지로 침상빙 결정의 생성과 구성적 과냉각(Constitutional Supercooling)이라고 불리는 과냉각 현상이 바로 그것이다. 구성적 과냉각이란, 수용액 중에 형성된 고액계면은 요철계면이 되고 계면 전방(前方)으로의 열(온도)확산계수가 염분의 물질확산계수보다 큰 경우가 원인이 되는데, 계면부근의 짙은 수용액 중에는 실제의 온도가 그 농도에 있어서의 평형동결온도보다도 낮은 영역이 존재하게 된다. 이와 같은 수용액농도에 기인하는 과냉각 현상을 구성적과냉각이라 한다.

Fig. 1.2은 염분을 함유한 수용액에 대한 원관의 표면온도 변화를 보여준다(11). 수용액의 동결은 응고점강하나 구성적 과냉각 등 수용액의 농도에 기인하는 현상 또는 고·액공존층의 불균질동결층의 생성 등 다성분계 물질의 응고에 나타날 수 있는 특이한 성질을 가지고 있다.

그림 중의 A점에 있어서, 냉각면 근방에서 수용액의 과냉각 상태가 해

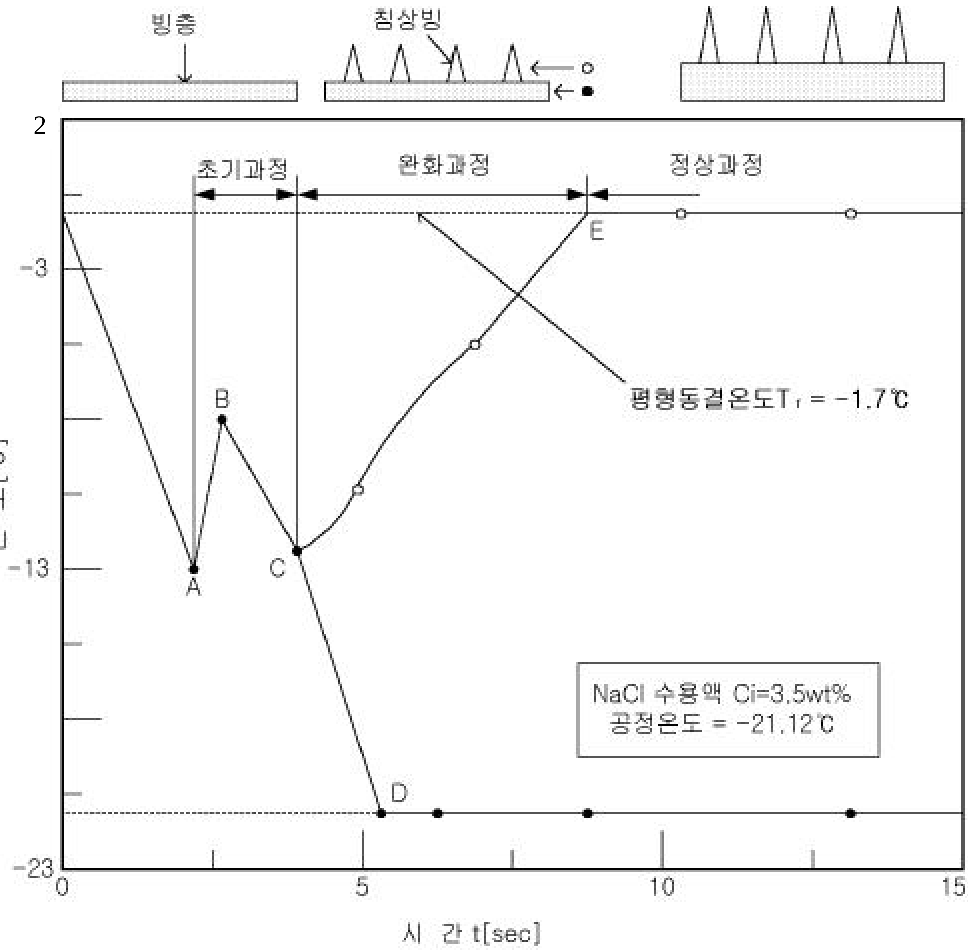


Fig. 1.2 Mechanism of supercooling phenomenon on salt water

제되어 돌연 침상빙의 발생이 일어나고 응고잠열의 방출에 의한 냉각면 근방의 수용액 온도의 급격한 상승 경향이 있다(그림중의 B점). 그리고 단시간의 과냉각 해제과정을 거친 후 냉각면 근방에서 발생한 빙결정은 그림 중 C점까지 동안에 조밀하고 평탄한 빙층으로 발달하게 된다. 고·액계면 근방에서는 석출된 용질에 의하여 농도가 현저히 증가하고 그 농도분포에 해당하는 평형동결온도(T_f)보다 고·액공존층의 온도가 낮아지게 되면 구성적과냉각 상태로 되어 열역학적으로 불안정한 온도영역이 생긴다. 그리고 구성적과냉각 상태가 해소됨과 동시에 재차 침상빙 결정이 생기고 그 침상빙 결정사이에 고농도의 수용액이 몰입된 고·액공존역이 서서히 성장하여 결국에는 고·액 평형상태로 된다.

1.2.2 염화나트륨수용액의 동결실험

염화나트륨수용액과 같은 이성분계 물질의 냉각시 발생하는 동결현상을 실험적으로 검토한 연구로서 Terwilliger(12) 등은 실린더에서 염화나트륨 수용액의 동결실험을 통하여 용질의 석출현상을 관찰했으며, 농축된 용질의 경계층이 고액경계면 근처에서 형성되며 구성적과냉각 및 동결구동포텐셜이 동결계면 부근의 농도와 용질의 재분포에 큰 영향을 미치는 중요한 인자임을 실험적으로 연구했다.

해수를 냉각시킴으로써 발생하는 동결현상은 염화나트륨수용액과 같은 이성분계 물질의 응고문제에 해당되며, 상변화를 포함한 열·물질

이중확산 및 유동을 동반하게 된다. 수용액의 동결실험에 있어서 구형 용기내의 실험에 대해서는 상당수 문헌(13) (17)에서 찾아 볼 수 있지만 원관내에서의 동결실험은 그다지 많지 않은 것 같다.

1.3 본 연구의 방향

지금까지의 수용액 동결현상에 관한 대부분의 연구는 동결로 인하여 형성된 빙의 미시적, 거시적 형태에 초점을 맞추어 연구되고 있으며 해수동결에 의한 해수 담수화에 초점을 맞추어 검토한 연구는 거의 없는 실정에 이다. 따라서 본 연구에서는 염화나트륨 수용액의 동결현상을, 담수채취 가능성과 효율성 측면에서 검토하고자 기초적인 실험을 목적으로 하고 있다.

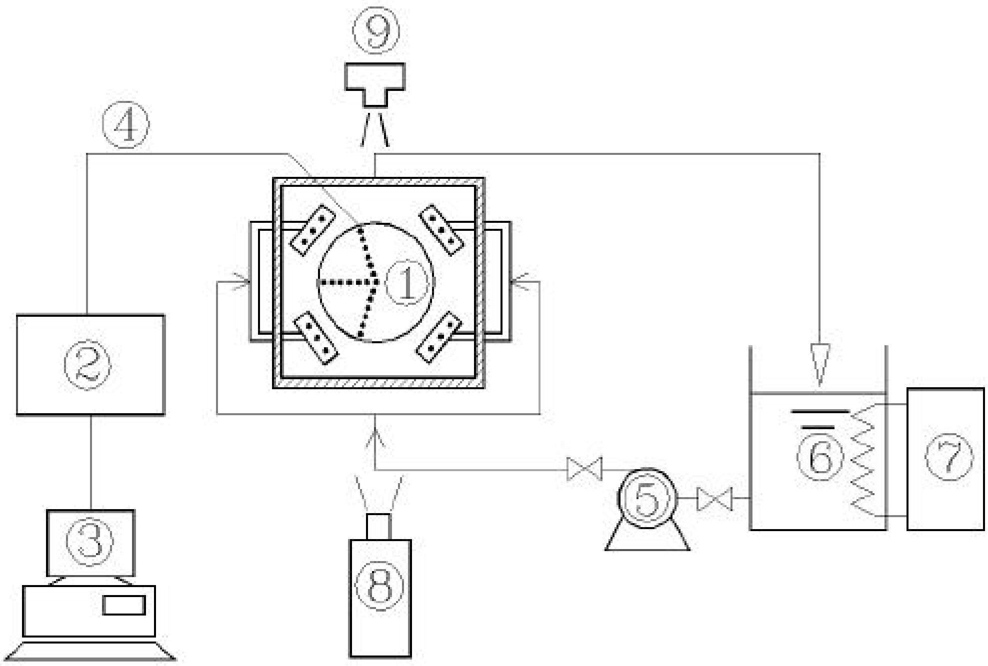
LNG의 냉열을 이용하여 해수를 동결함으로서 담수를 생산하는 방법 중 비교적 간단하고 쉬운 방식으로서 LNG의 냉열로부터 냉각된 냉매 즉, 브라인을 해수동결의 냉열원으로 이용하는 간접접촉식 냉동법에 관한 기술이 우선적으로 확립되어야 한다. 이와 같은 2차냉매(브라인) 간접접촉식 해수동결 담수화장치의 개발과 설계에 있어서는 우선적으로 해수동결현상에 대한 특성의 이해와 다양한 운전조건에 대한 해수동결의 정성적, 정량적인 특성의 규명이 기초적으로 이루어져야 한다. 본 연구에서는, 이미 발표된 구형용기의 하부 및 상부의 브라인접촉 실험 (18),(19)에 있어서 해수동결거동의 기초자료를 기본 바탕으로 하여, 보다 종합적인 연구의 일환으로서 원관내에서의 해수동결에 대한 메카니즘과 해수 농도 및 냉각면 온도가 동결량 및 동결율 그리고 열·물질이동 특성(20) (23)에 미치는 영향 등을 실험적 방법으로 검토하고자 한다.

제 2 장 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

실험장치의 전체 계통도를 Fig. 2.1에 나타내었다. 크게 나누어, 수용액의 동결거동이 이루어지는 시험부, 원관인 냉각면을 소정의 온도로 유지하기 위한 브라인(에칠렌글리콜) 순환부, 동결층 및 수용액층의 온도분포를 측정하기 위한 측정부 그리고 수용액의 동결거동을 가시화 하기 위한 가시화부로 구성되어 있다.

우선 ①시험부(Test Section)는 가로290㎜, 세로180㎜, 높이290㎜의 두께 15㎜의 아크릴로 제작하였다. 그리고 열·물질이동의 효과적인 가시화를 위하여 가능한 한 직경이 큰 동(銅)재료의 원관(내경148㎜, 길이160㎜, 두께3.5㎜)을 아크릴 상자 내에 고정시켰다. 원관의 전·후면 아크릴에는 원관경에 맞게 홈을 파고 누수방지를 위하여 실리콘으로 채운 다음 원관과 조립하였다. 전、후면은 두께 15㎜의 투명 아크릴로 제작하여 원관내 해수동결거동을 가시화 할 수 있게 하였다. 원관 사방에는 브라인 분사노즐을 취부하여 소정의 온도로 유지된 브라인이 원관 전체에 골고루 분사되도록 하였다. 즉 원관 외부에 브라인이 접촉하여 원관 내부의 수용액을 냉각하는 방식으로 구성되었다. 브라인이 접촉되는 원관의 총 전열면적은 약 735㎠이며 내부용적은 약 2450㎤이다.



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

Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus

원관의 내표면을 소정의 냉각면 온도로 유지하기 위하여 ⑦냉동기(Refrigerating Machine)에 의해 소정의 온도로 조절된 브라인(40%의 에칠렌글리콜 수용액)을 ⑤순환펌프(Brine Pump) 및 브라인 분사 노즐은 거쳐 냉각면에 골고루 분사되도록 하였다. 분사된 브라인은 다시 시험부 상부의 출구를 거쳐 ⑥브라인 탱크(Brine Tank)로 되돌아오는 순환방식을 취하고 있다.

원관의 표면온도는 C-A Type 열전대를 원관 내표면에 90° 간격으로 상면, 측면, 하면의 중앙부 3개소에 각각 부착하여 측정하였다. 또한 원관 내부에는 동결부와 용액부의 온도분포 측정을 위하여 같은 Type의 열전대 19개를 15o, 90o, 165o방향으로 위치시켜 검출된 온도가 ②데이터 처리장치(Data Acquisition System)로 통해 ③Personal Computer에서 기록하도록 하였다.

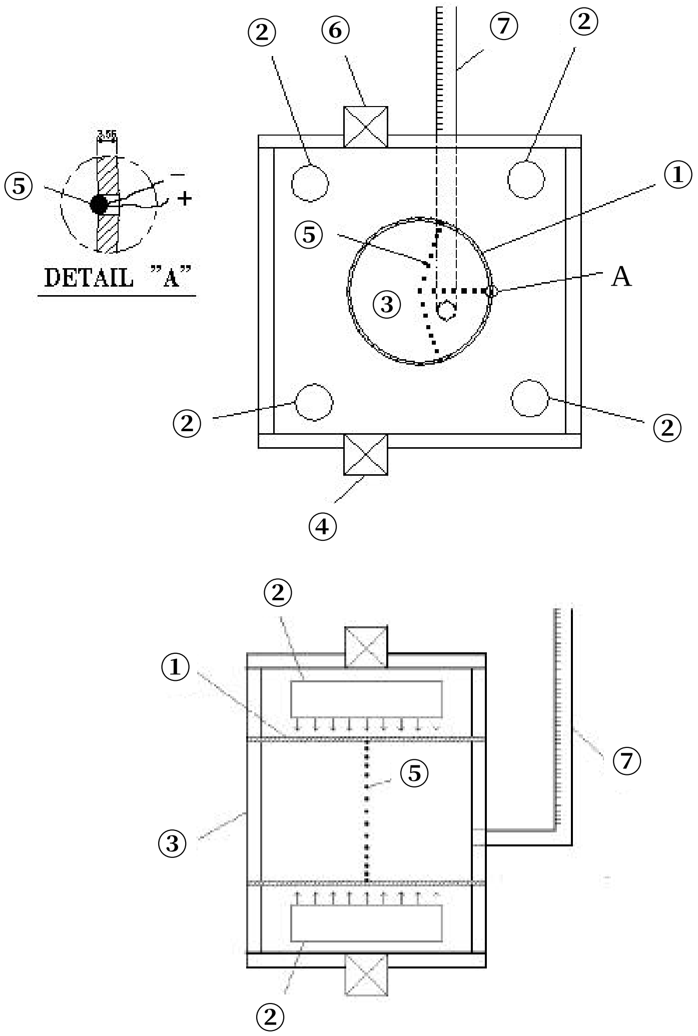
동결의 진행에 따라 고농도 수용액의 석출 및 용액부의 유동현상을 관찰하기 위하여 그림자영법(Method of Shadow Picturing)을 사용하였다. 광원에는 ⑧Ar Gas Laser(ARGON 3.5W)를 사용하였으며, 이 레이져 빔을 조사하여 시험부를 통하게 한 후 그림자가 Tracing Paper에 투사되는 것을 ⑨카메라로 촬영하여 가시화 하였다.

원관 내부 수용액의 동결 진행과 함께 증가하는 빙의 체적량을 보상하기 위하여 원관 전방의 아크릴에 구멍을 내고 외부에 팽창봉을 부착하였다. 팽창봉은 내경 14㎜, 높이 1000㎜의 투명 아크릴 관으로 1㎜ 단위로 눈금을 읽을 수 있게 만들었다. 수용액의 동결량 및 동결율의 변

화상태는 팽창봉에서 체크되는 체적증가량으로 계산 될 것이다.

Fig. 2.2는 시험부(Test Section)의 상세도를 보여준다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 앞서 설명하였던 원관의 조립 상태, 열전대의 배치 상태 및 브라인 순환계통을 나타내고 있다. 원관 내부의 ⑤열전대(Thermocouples)의 배치는 얼음의 동결속도(Freezing Rate)를 감안하여 냉각면 근방에는 그 간격을 좁히고 점차 중앙부로 갈수록 넓은 간격을 유지하도록 하였다.

Fig. 2.3은 본 연구에 사용되어진 실험장치의 전경사진을 나타낸다.



① **Copper Tube**
② **Brine Nozzle**
③ **Pair Glass**
④ **Brine Inlet**
⑤ **Thermocouples**
⑥ **Brine Outlet**
⑦ **Expansion Tube**

Fig. 2.2 Diagram of test section apparatus

Fig. 2.3 Photo of experimental apparatus

2.2 실험방법

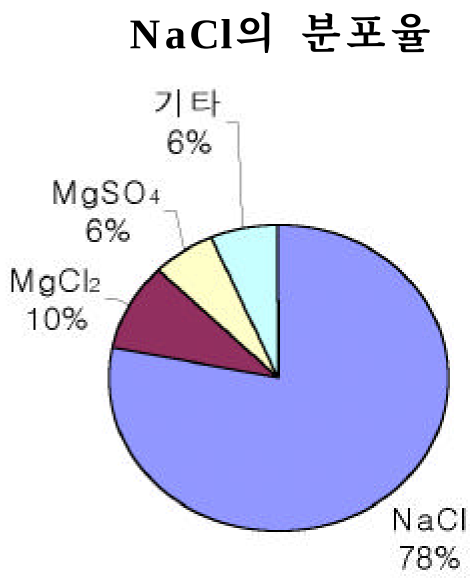
본 연구는 교반을 일으키지 않는 상태에서 염화나트륨 수용액의 동결에 있어서 일어나는 열 및 물질의 이중확산에 관한 기초자료를 수집하기 위한 것이다. 먼저, 해수의 주성분에 대해서 간략히 설명하자면, 해양학의 영역에서는 일반적으로 Na, Mg, Ca, K, Cl, SO_4, CO_3, Br에 H_3BO_3, F를 첨가해 10가지 원소를 주성분으로 보고 있다. 한편 해수이용공업에서는 전통적으로 Na, Mg, Ca, K, Cl, SO_4의 6원소를 주성분으로서 취급하고 있는데 이들 성분을 공업적으로 이용하는 분야에서는 염류결합형으로서 나타내기도 한다. 염류결합형이란 해수를 증발농축시켰을 때의 석출염의 염분형태를 말한다. 해수의 주성분을 음이온, 양이온 및 염류결합형으로 분류하여 Table 2.1에 나타내었다(24). Table 2.1에서와 같이 해수의 대부분을 차지하는 성분은 염화나트륨(NaCl)이라는 것이 명백하다.

따라서, 본 실험에서의 시료로서는 해수의 평균농도가 약 3.5wt%임을 감안하여 0.0wt%, 1.8wt%, 3.5wt%의 염화나트륨 수용액을 사용하였다. 시료는 증류수와 정제염을 소정의 비율로 섞어서 만들었고 만들어진 시료의 농도체크를 위해 농도측정계(모델 : ATAGO S-10E)를 이용하여 정확한 농도를 재차 검증하였다.

Fig 2.4에는 염화나트륨수용액의 변태도(25)를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 염화나트륨수용액의 공정온도는 -21.1℃이다.

Table 2.1 Constituent parts on concentration of sea water (g/kg-s.w.)

음이온		양이온		염류결합형	
Cl	**18.9799**	**Na**	**10.5561**	CaSO4	1.3786
SO4	2.6486	Mg	1.2720	MgSO4	2.1025
HCO3	0.1397	Ca	0.4001	MgBr2	0.0775
Br	0.0646	K	0.3800	MgCl2	3.2813
F	0.0013	Sr	0.0133	KCl	0.7242
H3BO3	0.0260			**NaCl**	**26.6912**
계	21.8601		12.6215		34.2553



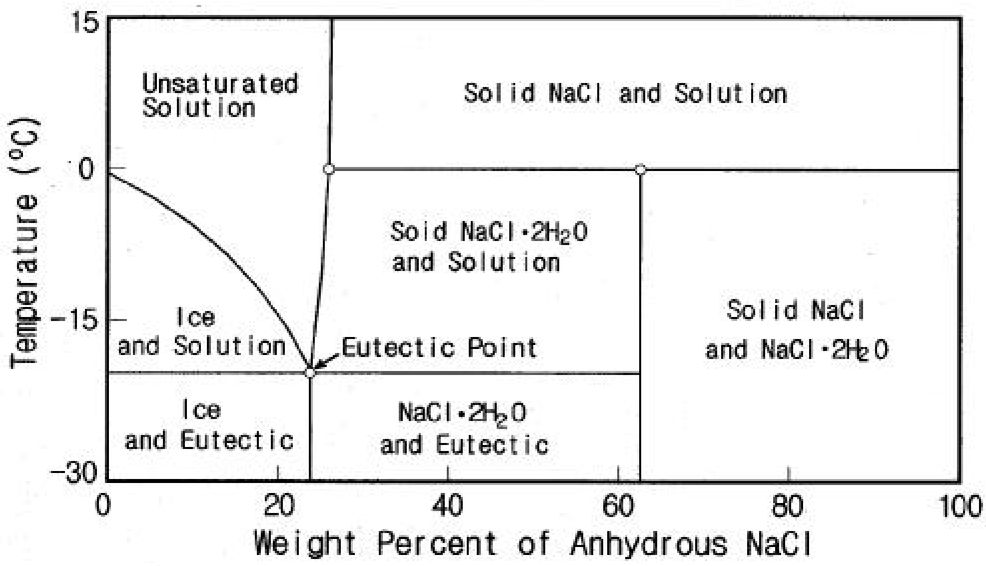


Fig. 2.4 Equilibrium phase diagram of aqueous solution

따라서 본 실험에서는 공정온도를 초과하지 않는 범위 내에서 실험 Parameter를 결정하였다. Table 2.2에 본 실험의 실험조건(Experimental conditions)을 전체적으로 보여준다.

실험을 위해 우선 냉동기를 가동하여 탱크 내 브라인의 온도를 소정의 수준으로 냉각시키고, 시료로 사용될 수용액의 농도를 정확하게 맞추어 두었다. 수용액의 초기온도는 냉각면의 적용 온도범위 및 밀도역전현상 등을 고려하여 5℃로 하였다. 수용액을 원관 내부에 충진시킬 때는 가능한 냉각벽면에 기포가 남지 않도록 주의하여 충진하였으며 소정의 냉각온도로 조절된 브라인을 냉각표면에 분사하는 시각을 실험의 시작으로 하였다. 냉각면의 온도는 소정의 온도로 일정하게 유지하였다. 또한 브라인의 온도유지를 위해 외기 의한 열손실의 영향도 고려하여 충분히 단열한 후 가능한 외기온도가 낮은 상태에서 실험을 실시하였다.

실험이 진행됨에 따라 원관 내부에서 성장하는 빙층의 형상, 두께, 동결량 및 온도분포를 매10분마다 지속적으로 관찰, 측정하였다. Fig 2.5에 나타낸 바와 같이 Ar가스레이저를 이용한 그림자영법으로 동결거동을 가시화하였고 동결량(Quantity of Freezing) 및 동결속도(Freezing Rate)는 팽창봉을 통한 수용액의 체적증가율로부터 계산하였다.

Table 2.2 An experimental conditions

Experiment	C_i (wt%)	T_w (℃)	T_f (℃)
1	0.0	- 15	0.0
2	1.8	- 15	- 0.7
3	3.5	- 15	- 1.7
4	0.0	- 10	0.0
5	1.8	- 10	- 0.7
6	3.5	- 10	- 1.7
7	0.0	- 5	0.0
8	1.8	- 5	- 0.7
9	3.5	- 5	- 1.7

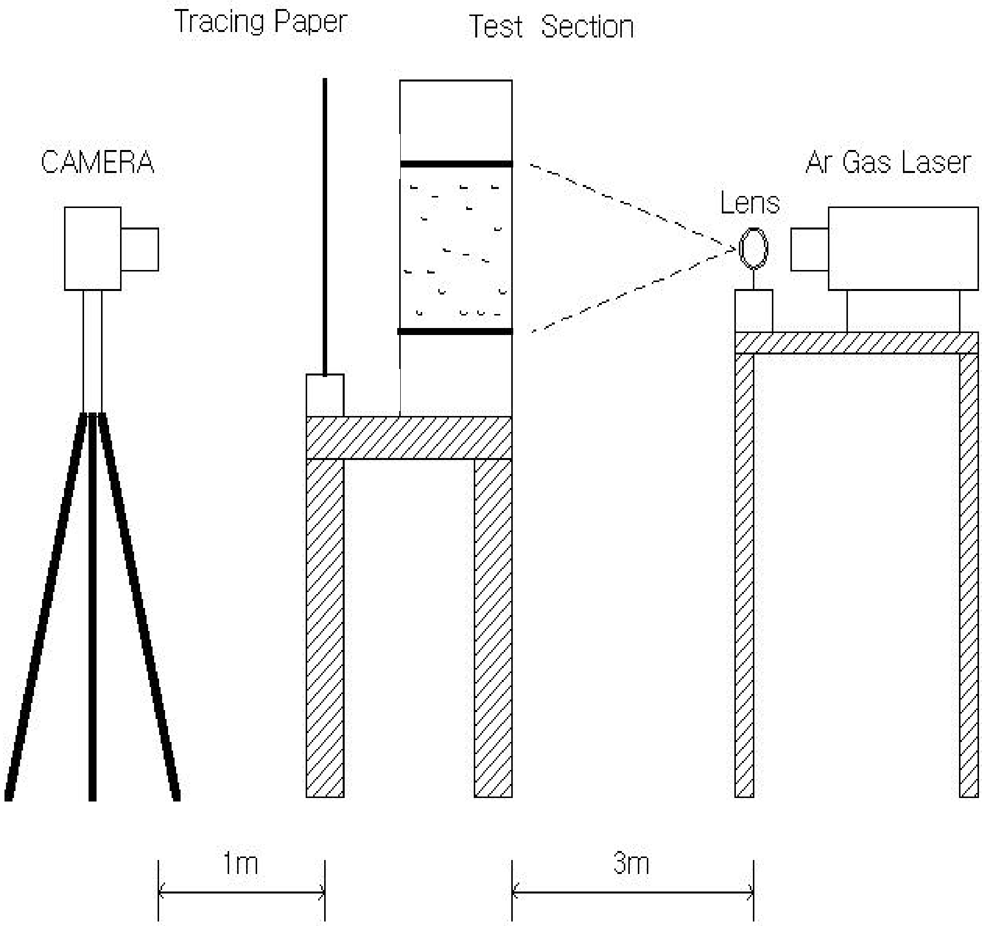


Fig. 2.5 Method of shadow picturing

제 3 장 실험결과 및 고찰

3.1 해수의 동결거동

해수의 동결현상은 염화나트륨수용액과 같은 수용액 응고 문제에 해당된다. 동결에 의한 수용액의 농축조작이나 해수를 동결시켜 담수를 제조하는 기술 등이 바로 수용액의 동결현상을 이용한 것이라 하겠다. 또한 식품·화학공업 및 의학기술 등 여러 분야에서 수용액의 동결현상을 이용한 방법이 중요한 문제로 대두되고 있으며, 더욱이 수용액을 동결시켜 얻을 수 있는 액상빙(Liquid Ice)이 축냉매체(26),(27)로써의 가치가 인정되고 있다. 수용액을 동결시키면 응고점의 강하 및 구성적과냉각 등의 용액의 농도에 기인하는 현상이나 고·액공존의 불균질동결층의 생성 등의 특징이 존재하는데 이들은 용질의 종류에 따라 다르게 나타난다. 또한 수용액은 동결의 진행과 함께 용질이 석출되고 빙결정 중에는 용질이 포함되지 않는 현상이 일어난다(20).

해수의 동결은 농도에 따라서 최대밀도온도와 결빙온도가 변하게 되고 그 염분농도에 의해 동결에 이르는 과정이 다르다. Fig. 3.1에 나타낸 바와 같이 해수농도 C=2.49%에서 최대밀도온도와 결빙온도가 같게 됨에 따라 C=2.49%의 농도를 경계로 동결과정이 다르게 된다. 해수농도 C가 2.49%이하에서는 호수의 동결과정과 같은 거동을 하지만 일반

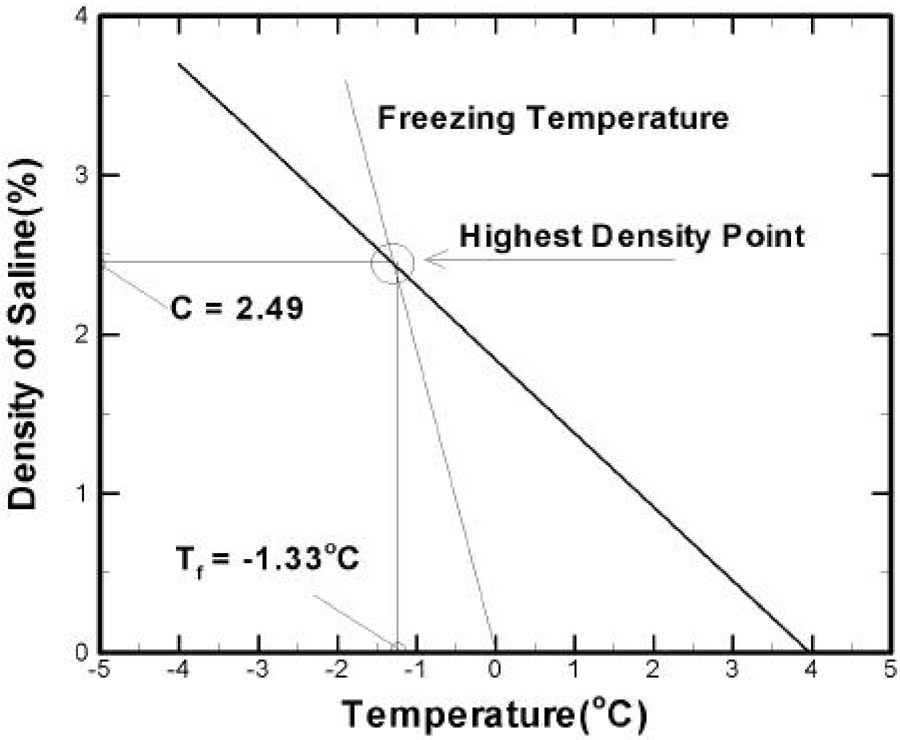
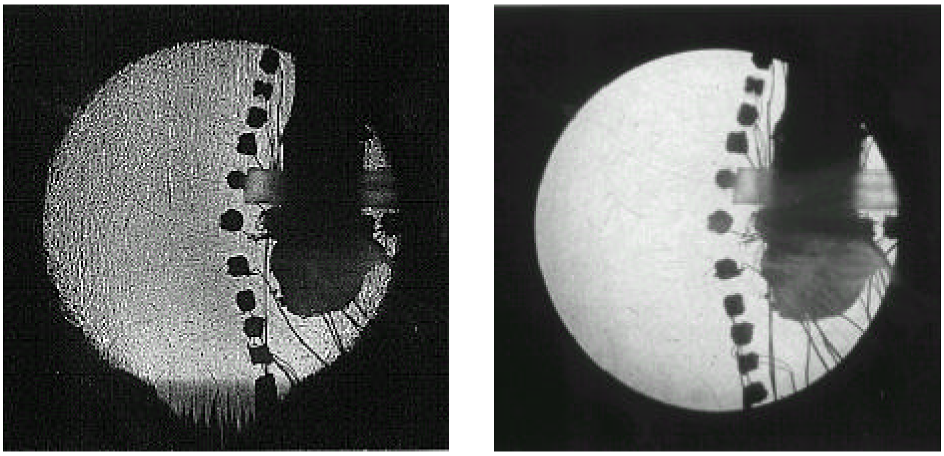


Fig 3.1 The relation of max. density temperature and freezing temperature of sea water

적인 해수의 염분농도인 C=3.4%에서는 C가 2.49%보다도 크기 때문에 기·액계면의 온도강하와 함께 끊임없이 해수표면층의 밀도는 커지고 자연대류를 수반하면서 혼합층 전체가 결빙온도로 된다. 결국 자연계에 있어서 해수의 동결은 호수의 동결거동과는 달리 결빙온도가 0℃보다 낮고 그 대류혼합층 전체가 결빙온도로 됨으로써 호수의 경우와 비교하여 보다 많은 냉각열은 필요로 하게 된다.

결빙온도 이하로 된 해수는 동결을 시작하여 그 염분은 빙의 결정계면으로 석출되고 동결온도 보다 낮은 고농도의 수용액으로 되어 아래의 해수 중으로 가라앉으면서 혼합되게 된다. 그리고 일부 고농도 수용액은 빙 결정과 결정사이에 몰입되어 액체의 상태로 빙층 중에 남는 현상이 일어난다.

Fig. 3.2에 수용액의 동결진행과 함께 동결계면으로부터 용질이 석출하고 있는 현상을 가시화한 사진을 나타내며 동결과정이 순수액(0wt%)의 경우와는 확연한 차이가 있음을 알 수 있다. 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. 수용액의 동결 시 석출된 용질은 원관 벽면을 따라 하부에 모이게 되고 하부 동결계면 근방에는 수용액의 농도분포가 생기게 되어 이로 인한 구성적과냉각(Constitutional Supercooling)현상이 일어나게 되어 계면에 불안정성이 발생하게 됨에 따라 침상빙(Dendritic Ice)을 형성시킨다. 그림자 영



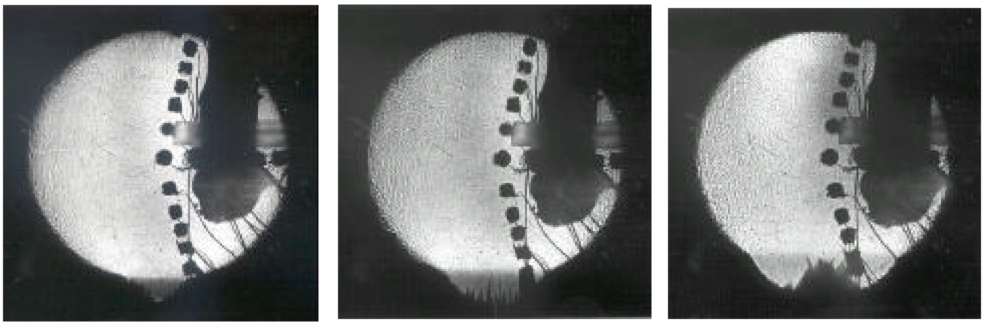
(a) Ci = 3.5wt%   (b) Ci = 0.0wt%

Fig. 3.2 Effect of flow pattern on concentration of aqueous solution

법으로 가시화 한 사진에서 알 수 있는 바와 같이 수용액의 경우 원관 하부에 횡방향의 음영의 띠가 관찰된다. 이것은 석출된 고농도의 수용액이 하부 동결부분에 정체함으로 인하여 큰 농도구배가 음영의 띠로 나타나기 때문이다. 또한 농도분포선은 Fig. 3.3에 나타낸 바와 같이 시간이 경과함에 따라 상승하면서 점점 옅어진다. 이것은 용질의 석출이 진행될수록 용액부의 전체적인 농도가 점점 증가하기 때문이다.

Fig. 3.4는 수용액 동결 초기에 확실히 나타날 수 있는 용질의 석출현상과 하부 동결계면 근방에서 생기는 침상빙 및 농도분포 선을 모델화 한 그림이다. 용액부를 살펴보면 저농도의 수용액은 상부에 그리고 고농도의 수용액은 하부에 분포하는 동결메카니즘을 보이면서 전체적으로는 용액부의 평균농도가 초기농도 보다 높아지게 된다. 용질이 석출함에 따라 이들은 원관 하부에 모여들게 되고 원관 하부에는 침상빙의 생성과 함께 농도가 짙은 고농도의 수용액으로 점점 변해 간다. 그리고 침상빙 상부로부터 일부 부상하고 있는 침상빙 조각이 관찰되는데 이것은 고농도화에 따른 평형동결온도의 하강으로 일부 침상빙의 연약한 부분이 융해하기 때문이라고 생각된다. 한편 수용액 내부에는 용질 석출의 지배적인 영향으로 인한 자연대류 현상을 볼 수 있다. 이 때문에 하부보다는 상부의 온도구배가 적게 됨으로써 결국 상부 측 동결계면의 성장속도를 지연시키는 효과를 일으킨다.

보다 상세한 침상결정선단부의 성장모델을 보면 Fig. 3.5에 나타낸 바



(a) Time = 10 min (b) Time = 15 min (c) Time = 25 min

Fig. 3.3 Freezing characteristic of aqueous solution ; C_i=3.5wt%

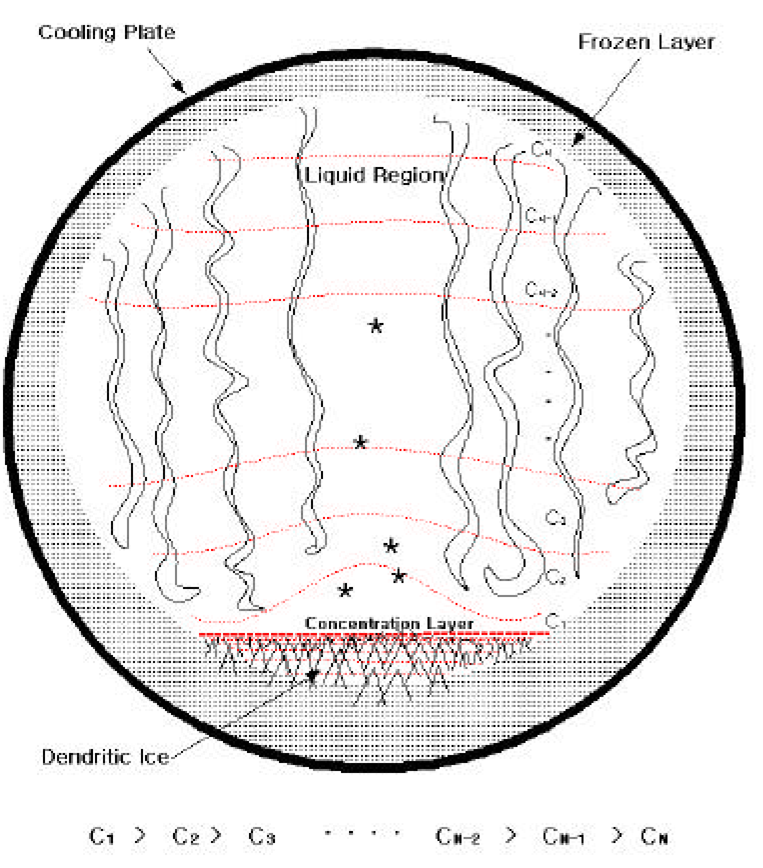
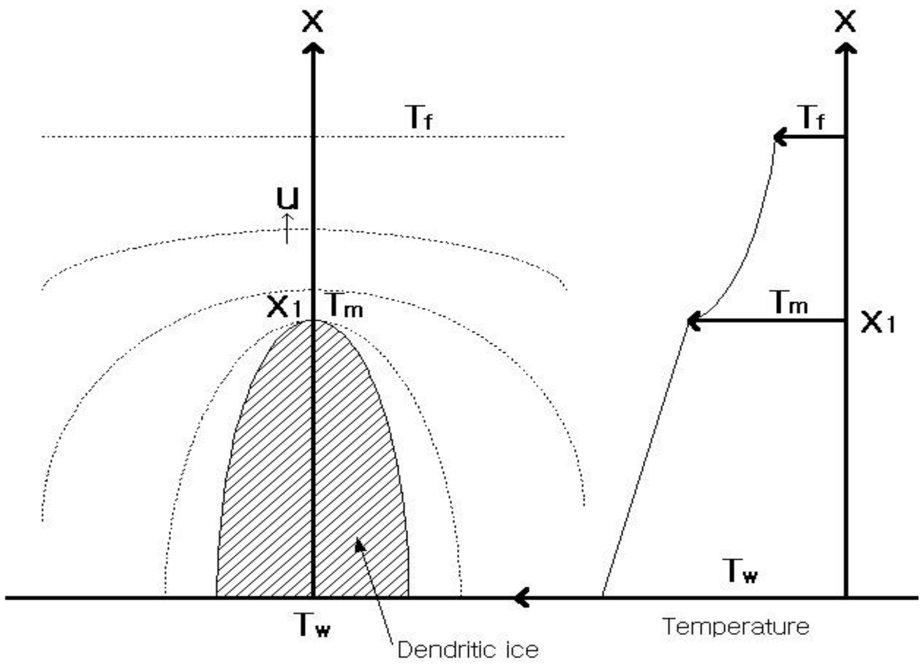


Fig. 3.4 Freezing mechanism of aqueous solution


X
X
Tf
Tf
u
X1
Tm
Tm
X1
Tw
Tw
Dendritic ice
Temperature

와 같이 평형동결온도(T_f), 결정선단부온도(T_m) 및 냉각면온도(T_w)에는 그림과 같은 일정한 온도구배를 가진다. 이 결정선단부의 성장 진행과정 중, 결정계면 근방으로부터의 과냉각액상 온도구배가 상당히 크다는 것을 알 수 있는데, 이것은 상변화에 따른 잠열의 확산을 용이하게 하여 결정성장을 조장하는 힘으로 된다. 따라서 동결이 진행될수록 침상빙의 높이는 더욱 높아지게 된다.

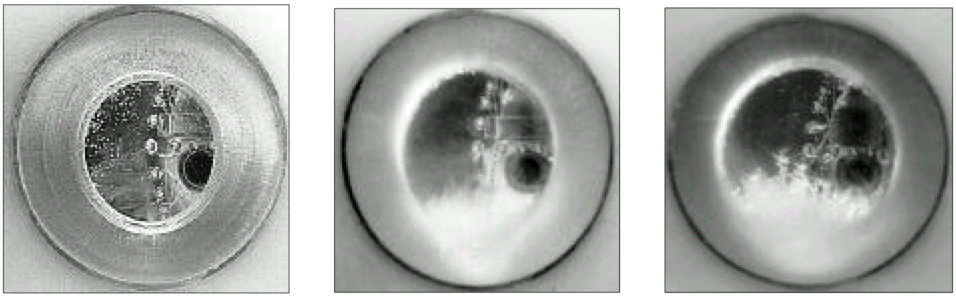
3.2 초기농도의 영향

Fig. 3.6 Fig. 3.8은 냉각면 온도 T_w=-5℃에서 수용액의 초기농도를 0.0wt%, 1.8wt%, 3.5wt%로 변화시켰을 때의 수용액의 동결거동을 나타낸다. 먼저 Fig. 3.6은 냉각면온도 T_w=-5℃, 실험개시 4hr. 후의 염화나트륨 수용액 농도의 변화에 대한 동결층 형상을 가시화한 사진이다. 그림으로부터 농도가 저하됨에 따라 동결층이 증가함을 알 수 있다. 이것은 농도가 감소할수록 평형동결온도가 상승하여 동결계면에서 냉각면으로의 열유속이 증가하기 때문이다. 수용액인 (b), (c)의 경우에는 동결이 진행됨에 따라 용질이 석출(Fig. 3.2참조)하게 되고, 용액부의 농도상승과 함께 동결계면의 평형동결온도가 더욱 하강하게 되어 동결량의 감소를 가속화시킨다. 동결층의 형상을 보면 순수액(a)의 경우는 동결계면의 높이가 일정한 견고하고 투명한 빙이 관찰되지만, 수용액의 경우는 용질의 석출로 인한 침상빙의 성장과 고액공존층의 형성으로 빙층이 불투명하다는 것을 알 수 있다. 그리고 수용액의 경우 동결층을 보면 석출된 고농도 수용액이 하부에 축적됨으로 인하여 하부의 동결량이 저감되어 타원형의 형상을 취하며, 아울러 하부동결층에는 첨예하고 빙율이 낮은 침상빙이 높게 형성됨을 볼 수 있다. 이것은 염화나트륨수용액과 같은 이성분계 물질이 동결될 때 고·액상 경계면에서 석출된 용질은 하부에 농축되어짐에 따라 인접한 용액의 응고점을 더욱 저하시키고

고·액 계면의 불안정성을 야기시키는 즉, 물질확산율이 열확산율 보다 매우 낮은 경우에 형성되어지는 구성적과냉각현상 때문이다.

Fig. 3.7과 Fig. 3.8에는 Fig. 3.6과 같은 조건에서 수용액 농도에 대한 동결량(Quantity of freezing) 및 동결율(Freezing rate)의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 농도가 감소함에 따라 동결량 및 동결율이 증가하는 것은 전술한 바와 같이 농도 감소에 따라 평형동결온도가 상승하여 동결계면에서 원관 하부로의 열유속이 증가하기 때문이다. Fig. 3.8에서 실험의 초기에 동결율이 크게 나타나는 이유는 빙층의 두께가 비교적 엷은 경우에는 동결계면과 냉각면간의 온도구배가 크기 때문에 원관으로의 열유속이 증가하기 때문이다.

마찬가지로 Fig. 3.9 Fig. 3.11은 냉각면온도 T_w=-10℃, Fig. 3.12 Fig. 3.14는 냉각면온도 T_w=-15℃인 경우의 가시화 사진과 동결량 및 동결율을 각각 나타낸다. Fig. 3.7, 3.10 및 3.13에서 냉각면온도가 낮으면 낮을수록 동결량 및 동결율이 증가함을 알 수 있다.



(a) Ci = 0.0wt%　　(b) Ci = 1.8wt%　　(c) Ci = 3.5wt%

Fig. 3.6 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior ; Tw = -5℃, Time = 4hr.

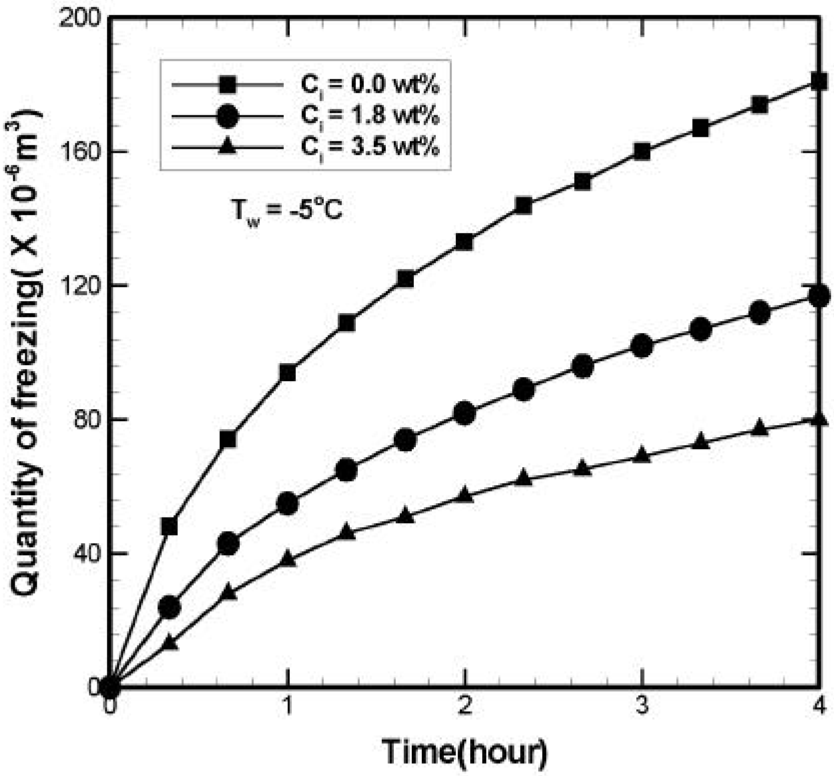


Fig. 3.7 Quantity of freezing

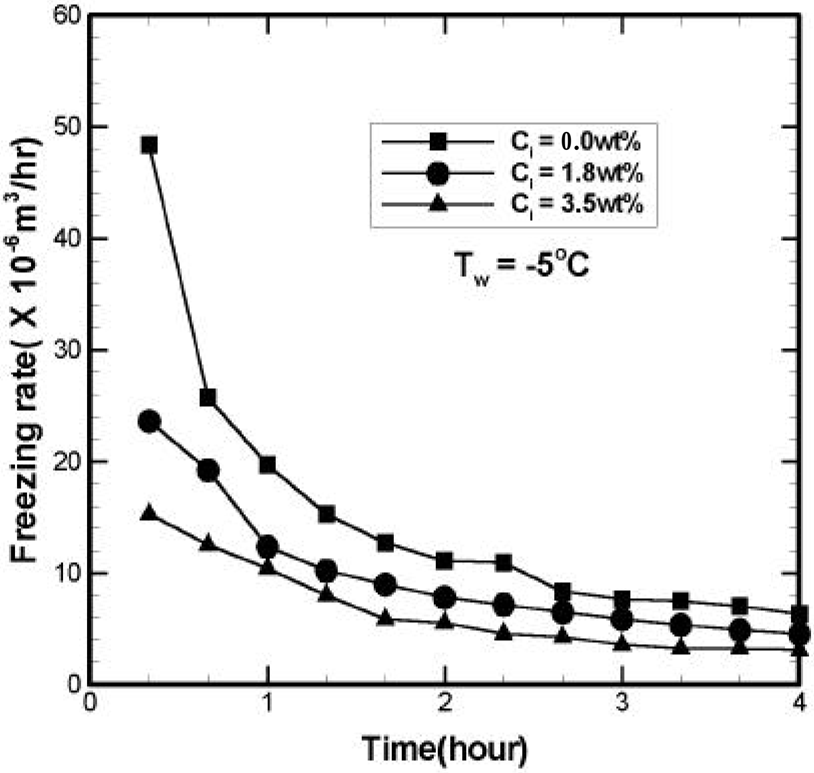


Fig. 3.8 Freezing rate

(a) Ci = 0.0wt%　　(b) Ci = 1.8wt%　　(c) Ci = 3.5wt%

Fig. 3.9 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior ; Tw = -10℃, Time = 3hr.

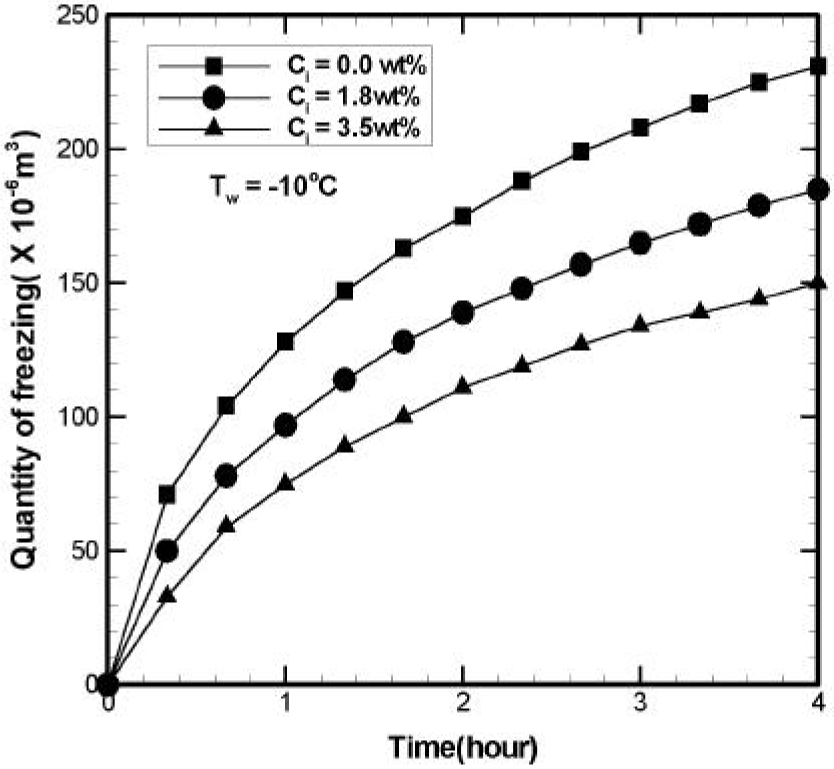


Fig. 3.10 Quantity of freezing

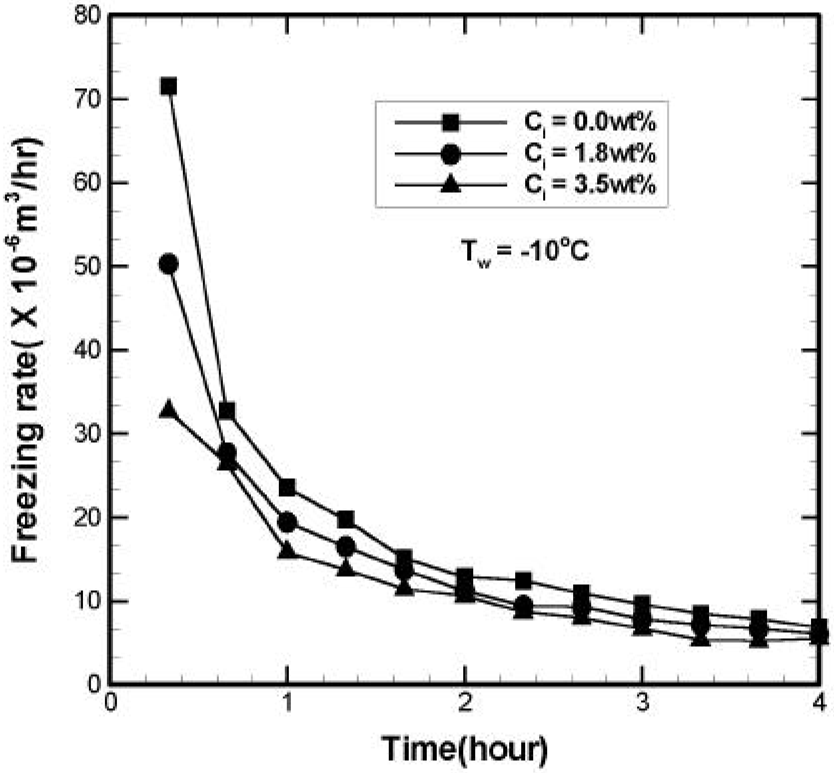


Fig. 3.11 Freezing rate

(a) Ci = 0.0wt%　　(b) Ci = 1.8wt%　　(c) Ci = 3.5wt%

Fig. 3.12 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior ; Tw = - 15℃, Time = 2hr.

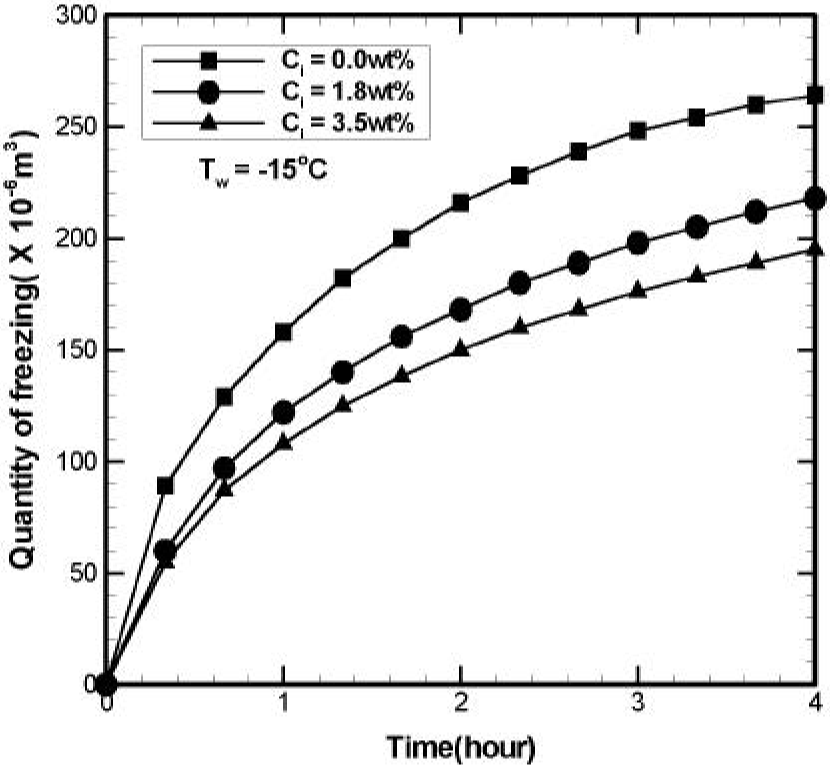


Fig. 3.13 Quantity of freezing

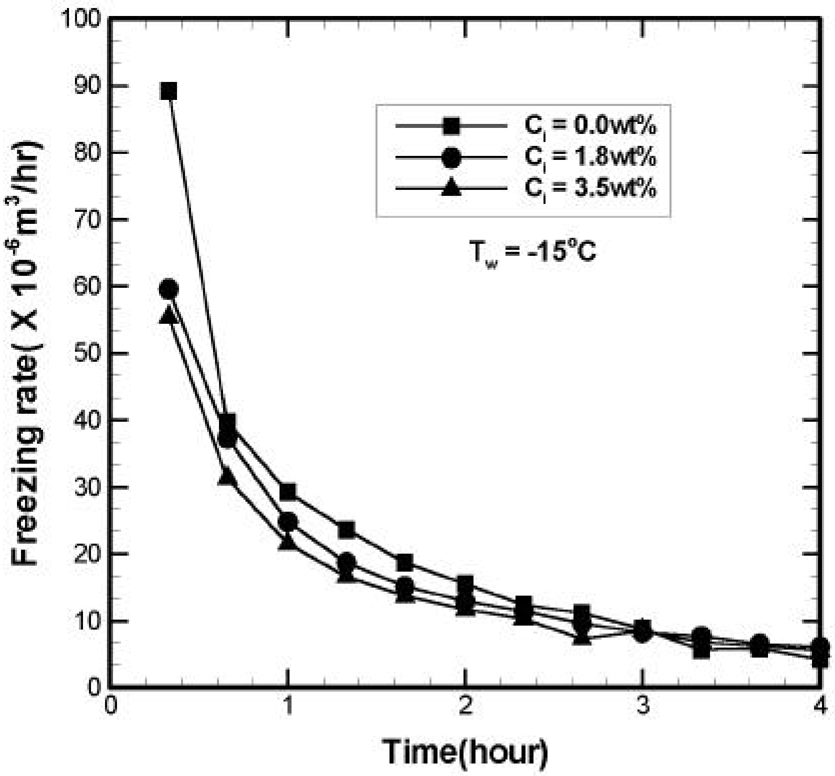


Fig. 3.14 Freezing rate

3.3 냉각면 온도의 영향

Fig. 3.15는 초기 수용액의 농도 Ci=3.5wt%에서 냉각면의 온도를 -15℃, -10℃, -5℃로 변화시켰을 때의 동결거동을 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 냉각면의 온도가 낮을수록 동결층이 두꺼워짐을 알 수 있다. 즉 냉각면의 온도가 낮을수록 동결계면으로부터 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 감소하여 타원형을 이루고, 하부동결계면에는 첨예하고 빙율이 낮은 침상빙이 높이 방향으로 크게 형성되어 있음을 그림으로부터 알 수 있다.

Fig. 3.16과 Fig. 3.17은 Fig. 3.15의 조건에서 시간에 대한 동결량과 동결율의 변화를 정량화시킨 그래프이다. 가시화된 Fig. 3.15의 결과와 같이 냉각면 온도가 낮을수록 동결량 및 동결율이 증가하고 있음을 알 수 있는데 이것은 냉각면 온도가 낮을수록 동결계면에서 냉각면으로의 열유속이 증가하기 때문이다. 또한 그래프의 기울기를 보면, 동결초기에는 급속한 경사를 보이다가 점차 시간이 지날수록 완만한 경사를 보여주고 있다. 이것은 시간이 지날수록 점차 두꺼워지는 빙층의 두께가 열유속의 저항으로 작용하기 때문이라고 할 수 있다. 실험에 의하면, 동결시간 1시간만에 전체 동결량의 약 50%가 얼음으로 상변화하는 것으로

나타났다.

마찬가지로 Fig. 3.18 Fig. 3.20은 농도 C_i=1.8wt%, Fig. 3.21 Fig. 3.23은 농도 C_i=0.0wt%인 경우의 가시화 사진과 그 실험결과를 동결량 및 동결율로 정량화시킨 그래프를 각각 나타낸다.

(a) Tw = -15℃ (b) Tw = -10℃ (c) Tw = -5℃

Fig. 3.15 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior ; Ci = 3.5wt%, Time = 2hr.

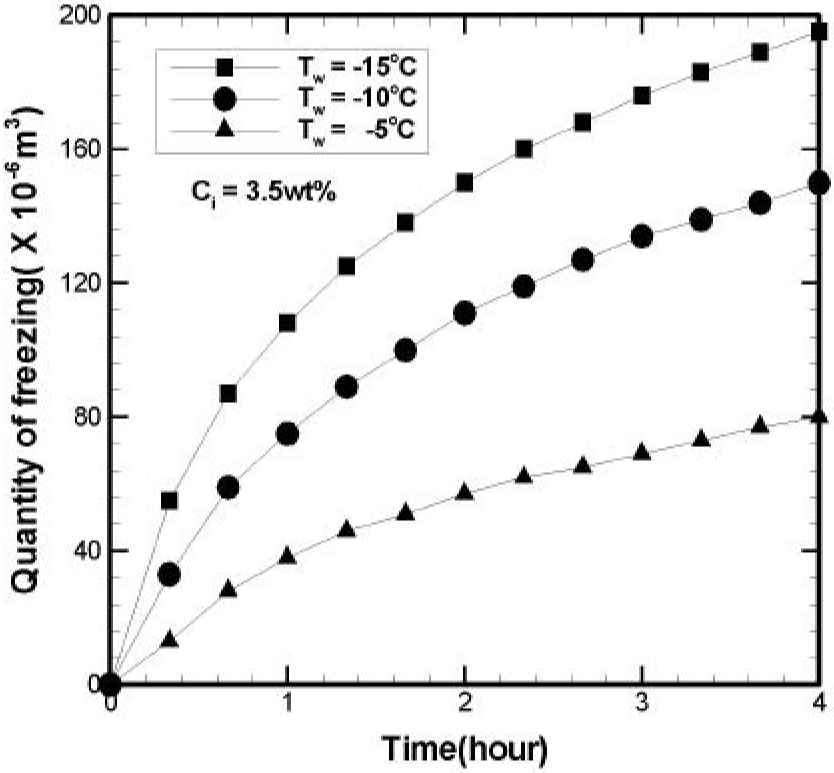


Fig. 3.16 Quantity of freezing

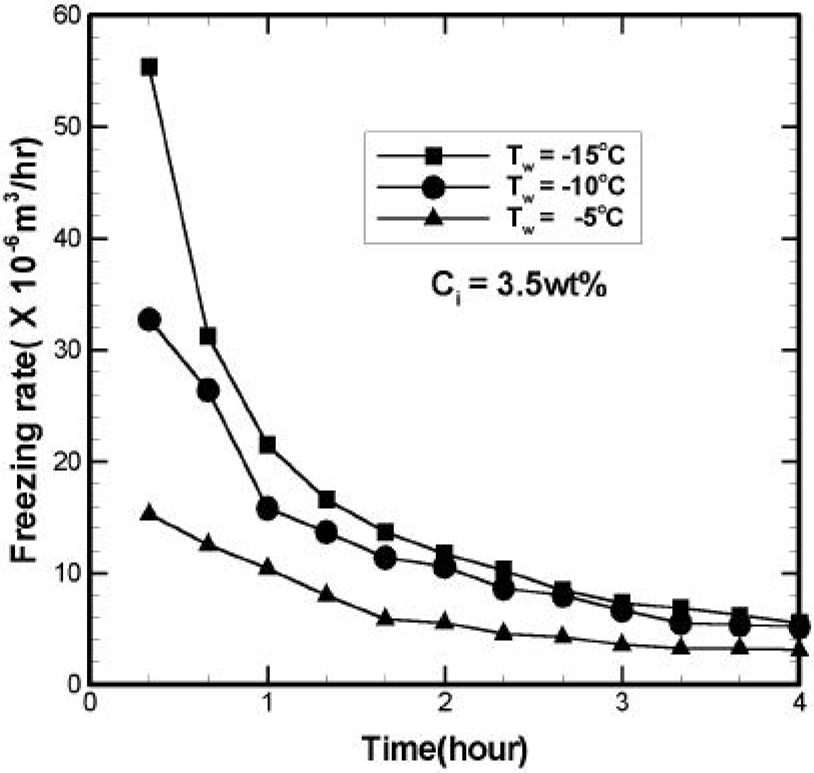


Fig. 3.17 Freezing rate

(a) Tw = -15℃ (b) Tw = -10℃ (c) Tw = -5℃

Fig. 3.18 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior ; Ci = 1.8wt%, Time = 2hr.

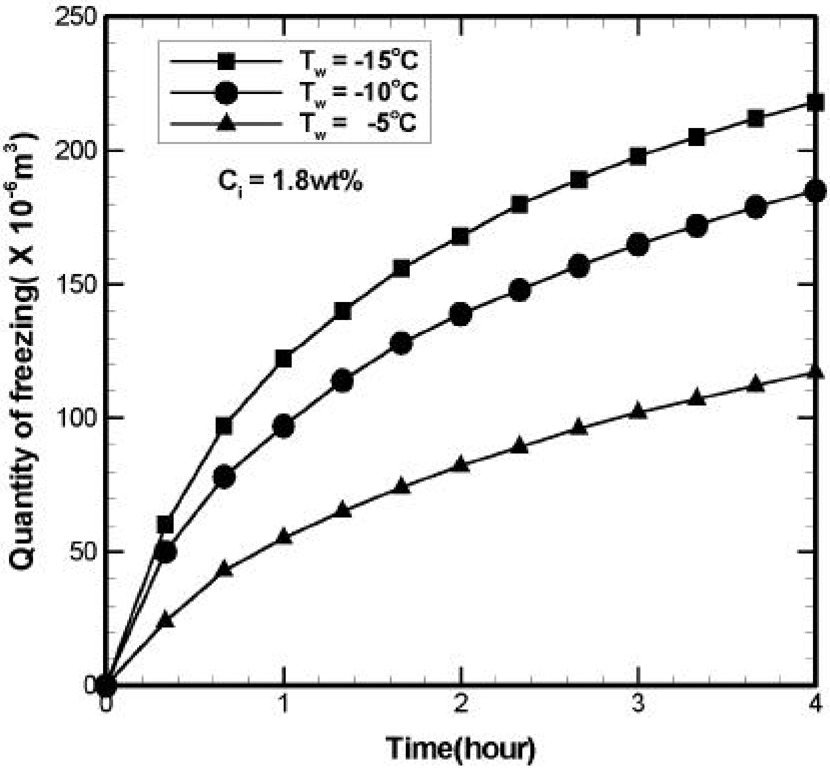


Fig. 3.19 Quantity of freezing

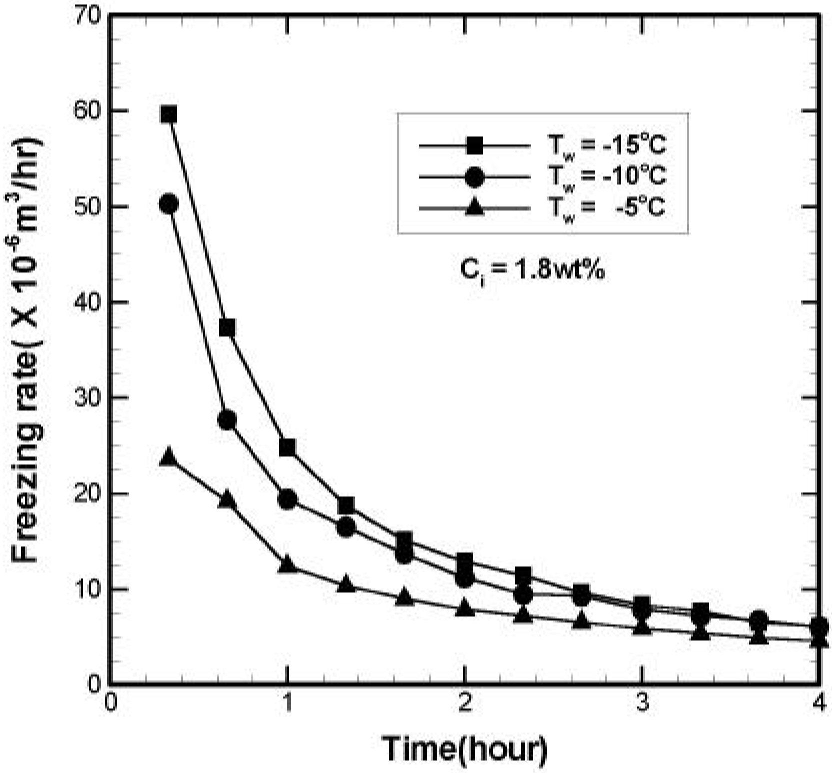
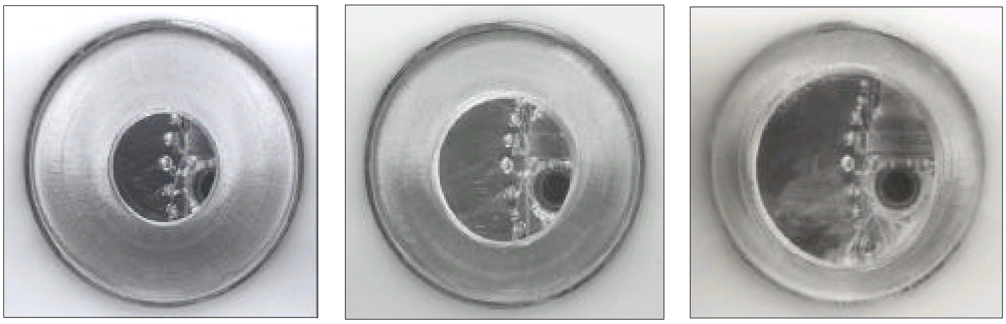


Fig. 3.20 Freezing rate



(a) Tw = -15℃ (b) Tw = -10℃ (c) Tw = -5℃

Fig. 3.21 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior ; Ci = 0.0wt%, Time = 2hr.

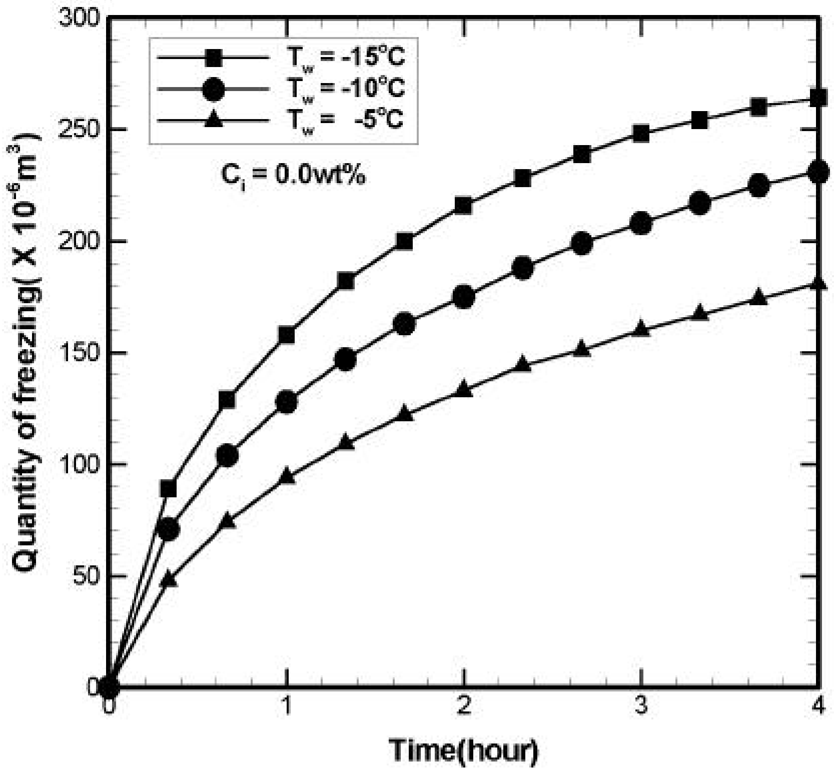


Fig. 3.22 Quantity of freezing

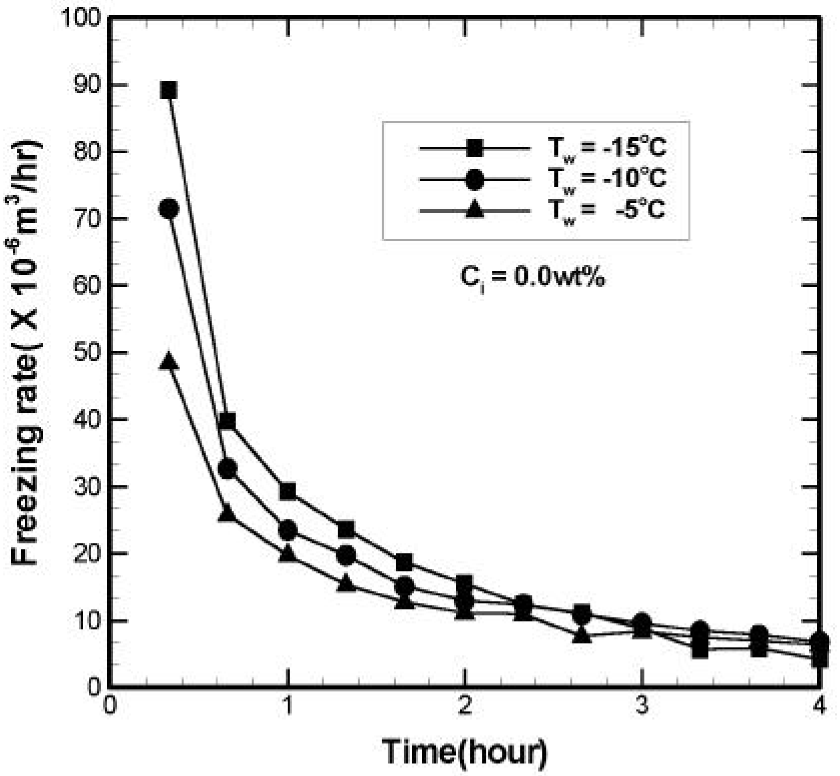


Fig. 3.23 Freezing rate

3.4 동결층 형상과 온도분포 특성

Fig. 3.24는 동결층의 형상을 나타낸 것으로 C_i=3.5wt%의 동결층에서는 첨예한 침상빙을 확인할 수 있으며, C_i=0.0wt%에서는 동결계면의 높이가 일정한 견고한 빙이 관찰된다.

Fig. 3.25 및 Fig. 3.26은 동결층과 용액부를 포함하는 원관내 측면방향의 온도분포를 시간경과에 따라, 원관내표면에서부터 원관중심까지의 거리에 대하여 나타낸 것이다. 냉각면 온도 T_w=-15℃에서 원관중심으로 갈수록 일정한 기울기로 온도가 상승하다가 임의의 거리에서 수평의 일정온도를 유지하는 분포를 하고 있다. 그래프에서 평형동결온도(T_f) 아래부분은 동결층으로 볼 수 있는데, 동결층내의 열이동은 전도에 의하여 지배됨을 예측할 수 있고, 시간의 경과에 따른 온도분포가 거의 일정한 직선적인 기울기로 변하고 있음을 알 수 있다. 또한, 평형동결온도(T_f) 윗부분은 용액부에 해당되며 대류에 의한 열이동이 지배적이고, 시간의 경과와 함께 초기수용액의 농도에 해당하는 평형동결온도에 접근함을 관찰할 수 있다. 단, 0.0wt%의 경우는 충분히 시간이 경과한 후에도 용액부의 온도분포가 평형동결온도와 잘 일치하는 반면, 3.5wt%의 경우에서는 용액부의 온도분포가 평형동결온도 보다도 낮은 영역이 존재하고 있다. 이와 같이 수용액의 경우 용액부의 온도가 초기농도의 평형동결온도보다 낮게 유지되는 것은 동결이 진행됨에 따라 석출된 고농

(a) C_i = 3.5 wt%　　(b) C_i = 0.0 wt%

Fig. 3.24 Configuration of frozen layer

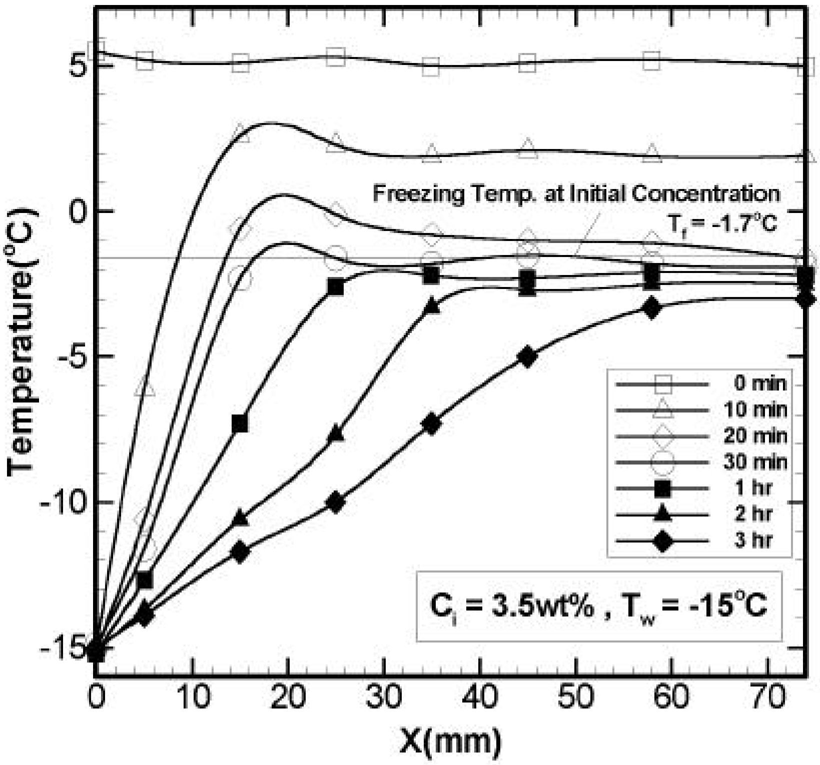


Fig. 3.25 Frozen layer and temperature distribution

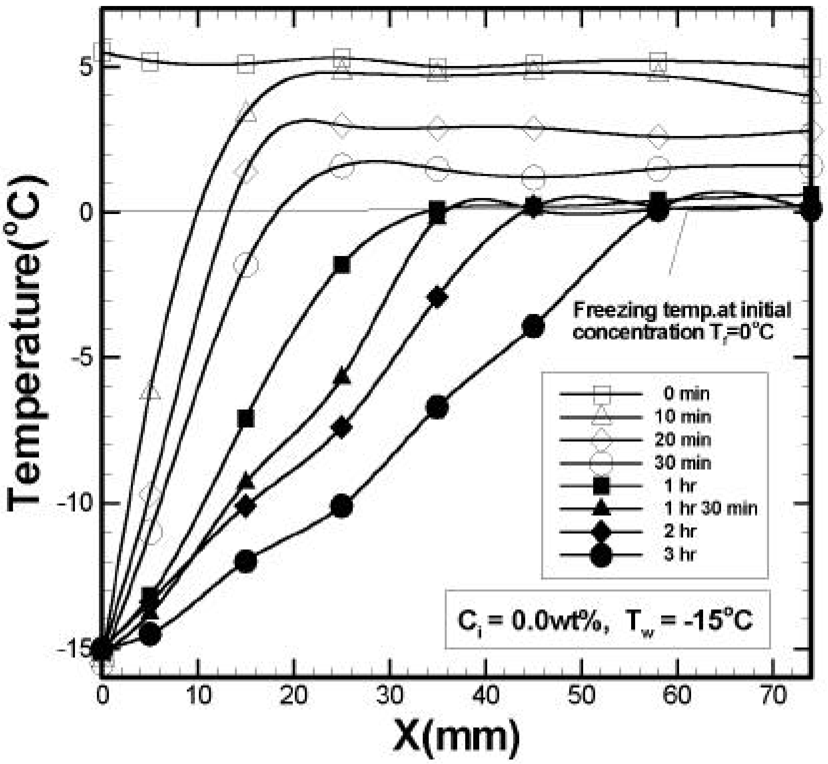
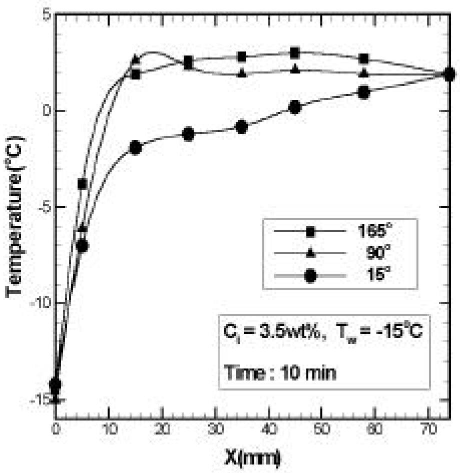


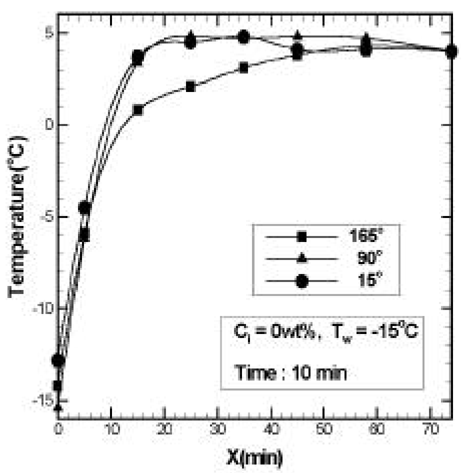
Fig. 3.26 Frozen layer and temperature distribution

도의 수용액으로 말미암아 용액부의 농도가 상승됨으로서 동결계면에서의 동결온도가 하강하기 때문이다. 그리고 냉각 초기에 용액부의 온도 하강율을 비교하여 보면 수용액이 순수액의 경우보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 수용액의 경우 동결과 함께 석출되는 낮은 온도의 고농도 수용액이 하부로 흘러내림으로써 온도차로 인한 자연대류의 발생에 부가적인 대류의 견인력으로 작용함으로써 용액부의 냉각을 가속화 시키기 때문이다.

Fig. 3.27은 수용액(3.5wt%)과 순수액(0.0wt%)에 대하여 상면(165°), 측면(90°), 하면(15°)방향의 냉각표면에서부터 원관중심까지의 온도분포를 비교한 것이다. 그래프에서 나타난 바와 같이 수용액의 경우 하면방향의 온도분포가 상면, 측면 방향보다 낮게 나타나며, 반대로 순수액의 경우에는 상면방향의 온도분포가 낮게 유지됨을 알 수 있다. 이것은 앞서 설명한 고농도 수용액의 석출 그리고 밀도역전현상 등에 기인한 것이라고 할 수 있다. 또한, 수용액과 순수액의 용액부 흐름방향이 반대이며 수용액은 동결계면을 따라 내려와 하면 중앙부에서 상승하는 흐름을, 순수액인 물의 경우에는 4℃에서 최대밀도가 되는 물성으로부터 하부에서 동결계면을 따라 상승하는 흐름을 가진다는 것을 의미한다.



(a) Ci = 3.5wt%



(b) Ci = 0.0wt%

Fig. 3.27 Comparison of temperature distribution ; Tw = -15℃, Time = 10min.

3.5 동결량의 무차원 정리

본 실험을 통하여 얻어진 동결량을 정리하여 무차원 수식화를 시도하였다. 동결량에 영향을 미치는 인자들을 정리하여 나타낸 무차원 동결량 R_f는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$R_f = f(\theta_w, F_0) \tag{3.1}$$

여기서 R_f (무차원 동결량) = $\dfrac{V_f}{H_0}$

θ_w (무차원 냉각면 온도)= $\dfrac{T_f - T_w}{T_0 - T_f}$

F_0 (Fourie수) = $\dfrac{\alpha \cdot \tau}{H_0^{2}}$

이다. 모든 실험데이터를 최소자승법을 사용하여 θ_w와 F_0의 함수로서 무차원 동결량 R_f를 정리하면 Fig. 3.28과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 그림으로부터 무차원 동결량은 ±15%의 범위내에서 아래의 식으로 정리될 수 있다.

$$R_f = 4.52 \times 10^{-3} \cdot \theta_w^{0.75} \cdot F_0^{0.52} \tag{3.2}$$

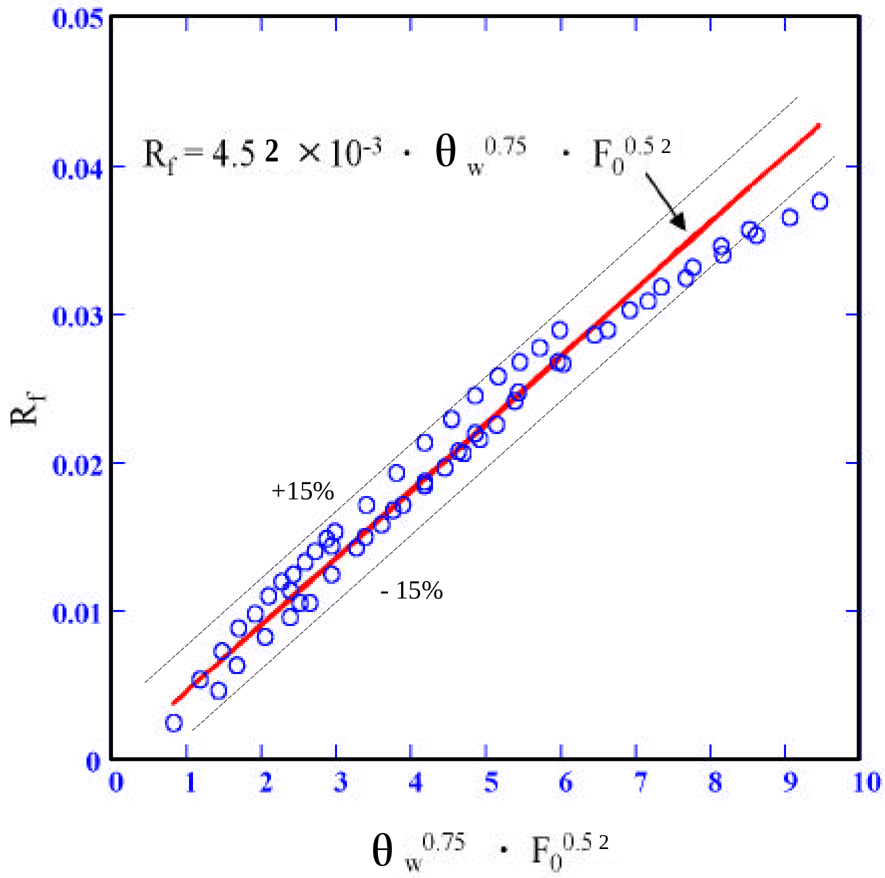


Fig. 3.28 Nondimensional freezing rate

제 4 장 결론

본 연구에서는 LNG 폐냉열에너지를 이용한 해수동결 담수화장치의 개발 및 설계기술의 확립에 있어서 핵심이 되는 해수동결거동에 대한 정성적, 정량적 기초자료를 수집, 검토하기 위하여 원관내에서 염화나트륨 수용액의 농도와 냉각면 온도가 해수의 동결거동에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 검토하여 본 실험의 범위내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동결량과 동결율은 염분농도가 저하됨에 따라, 그리고 냉각면의 온도가 낮을수록 증가한다.

(2) 해수의 동결이 진행됨에 따라 석출되는 고농도 수용액으로 인하여, 동결계면은 타원형의 형상을 취하며, 하부면에는 빙율이 낮고 첨예한 침상빙이 높이 방향으로 성장한다.

(3) 석출되는 고농도의 수용액은 용액부의 대류를 가중시키는 요인으로 작용하고 용액부의 온도변화에 큰 영향을 준다.

(4) 무차원 동결량은 다음식으로 정리 된다.

$$Rf = 4.52 \times 10^{-3} \cdot \theta_w^{0.75} \cdot F_0^{0.52}$$

향후과제

현재 시점에서 해수동결담수화법의 기본적인 결점으로써, 빙결정을 만들 때에 미세한 크기의 빙결정 밖에 얻을 수 없고 또한 빙표면에 부착되는 염분과 빙결정의 입자 사이에 몰입되어 버리는 해수의 양이 많기 때문에 얻어지는 담수의 염분농도가 비교적 높다는 것이다. 따라서 가능한 한 부착되는 농축염분의 양을 적게 하기 위한 실험적 연구가 필요하리라 생각된다. 이 문제를 해결하기 위해서는 가능한 한 큰 빙입자를 만들어 빙의 비표면적을 작게 하여 빙에 부착되는 염분량을 최대한 줄이는 것이다(28). 그리고 다른 방법으로서 동결과정 중 동결면에 계속해서 물리적인 충돌(공기방울 등)을 일으켜 농축염분의 몰입을 최대한 줄이는 방법도 생각할 수 있다.

한편 필자는 앞에서 수용액의 동결거동 문제를 논하면서, 수용액을 동결시켜 얻을 수 있는 액상빙(Liquid Ice)이 최근 들어 주목되고 있다고 밝힌 바 있다. 성에너지 유효이용기술 개발을 위한 연구의 일환으로써 야간의 저렴한 전력으로 제조된 빙의 융해잠열을 냉방에 이용한다고 하는 기술(29)이다. 현재, 보통의 고형빙이 축냉재로써 이용되고 있기는 하지만 융해시의 전열성능이 낮기 때문에 이것을 대신하는 축냉매체로써 수용액을 동결시켜 얻을 수 있는 액상빙(Liquid Ice)이 축냉매체로써 주목되고 있는 것이다.

본 연구에서 기술한 해수담수화장치는 LNG 폐냉열을 이용하여 담수

화를 이룩한다는 점에서 성에너지의 차원에서의 바람직한 시스템이다. 나아가 LNG 폐냉열로 생성된 1차 액상빙(Liquid Ice)은 수 차례의 동결과 융해과정을 거쳐야만 순수빙의 생성까지 접근할 수 있으리라 생각된다. 그리고 그 과정에서 발생하는 융해잠열을 이용하는 축냉시스템의 실용화 방안도 검토해 볼 가치가 있다고 생각된다. 즉, 해수담수화장치를 통상은 빙축열을 이용한 공조장치로서 이용하고 물이 부족할 때에는 담수를 공급하는 시스템인 것이다.

참 고 문 헌

(1) **김명환**, **김용모**, **김철환**, "LNG**냉열이용과 축냉시스템의 장래**", **한국박용기관학회 논문집**, **제**18**권**, **제**5**호**, pp. 1 11, 1994

(2) **김병덕**, **김재윤**, "**물부족 현황과 국내 담수화 기술개발 현황**", **한국박용기관학회 춘계학술 강연회**, pp. 105 109, 1996

(3) David, J.Kukulka, Benjamin, Gebhart, and Joseph, C.Mollendorf, "Thermodynamic and Transport Properties of Pure and Saline Water", Advances in Heat Transfer, Vol 18, Academic Press, Inc., 1987

(4) Gilpin, R.R., "The Effect of Cooling Rate on the Formation of Dendritic Ice in a Pipe With No Main Flow", Trans. ASME. J. Heat Transfer, 99, pp. 419 424, 1977

(5) Gilpin, R.R., "The Effects of Dendritic Ice Formation in Water Pipe", Int. J. Heat Mass Transfer, 20, pp. 693 699, 1977

(6) Gilpin, R.R., "Cooling of a Horizontal Cylinder of Water Through its Maximum Density Point at 4℃", Int. J. Heat Mass Transfer, 18, pp. 1307 1315, 1975

(7) Cheng, K.C., Takeuchi, M., "Transient Natural Convection of Water in a Horizontal Pipe with Constant Cooling Rate Thought 4℃"

J. Heat Transfer, 98, pp. 581　587, 1976

(8) **福迫尙一郎ら**, "**成層をなす圓管內流體の自然對流熱傳達**", **日本機械學會論文集**, 54, 499, pp. 641, 1989

(9) **柏木孝夫ら**, "**過冷却域を有する水の凍結開始に及ぼす自然對流の影響**", **日本機械學會論文集**, 53, 490, pp1822　1827, 1988

(10) **齋　ら**, "**過冷却をともなう凝固科程の研究**", **日本機械學會論文集**, 54, 502, pp. 1439　1446, 1989

(11) **福迫尙一郎ら**, "**低溫環境下の傳熱現想とその應用**", **養賢堂發行**, pp. 156　157, 1996

(12) Terwilliger, P. and Dizio, S.F., "Salt rejection phenomena in the freezing of saline solutions in cells", Chemical Engineering Science 25, pp. 1331　1349, 1970

(13) 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

(14) Hayashi, Y., and Komori, T., "Investigation of Freezing of Salt Solution in Cells", J. Heat Transfer, Vol.101, pp. 459-464, 1979

(15) 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

(16) 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

(17) Chellaiah, S. and Viskanta, R., "Freezing of Salt Solution on a Vertical Wall", Exp. Heat Transfer 1, pp. 181 195, 1988

(18) 김명준, 길병래, 김명환, "구형용기의 하부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 기초적 연구", 한국박용기관학회지, 제21권, 제5호, pp. 564 570, 1997

(19) 최부홍, 김명준, 김명환, "구형용기의 상부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 실험적 연구", 한국박용기관학회지, 추계학술대회 논문집, pp. 23 29, 1998

(20) 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

(21) Beckermann. C, "Melting and Solidification of Binary Mixtures with Double-Diffusive Convection in the Melt", Ph.D.Thesis, Purdue University, 1987

(22) 福迫・山田, "エチレングリコール水溶液凍結擧動", 日本機械學會論文集, 55, 502, pp. 3787 3793, 1989

(23) O.G. Callaghan, E.G. Cravalho & C.E. Huggins, Int. J. Heat Mass Transfer, 25, 4, pp. 553, 1982

(24) 日本海水學會・ソルト・サイエンス研究財團共編, "海水の科學と工業",

東海大學出版社, pp. 28　29

(25) M.W. Kellog Company, "Saline Water Conversion Engineering Data Book", Office of Saline Water Report, U.S. Department of the Interior, Washington D.C.

(26) 宮坂, 冷凍, 62, 714, pp. 32, 1987

(27) 二瓶, 冷凍, 62, 715, pp. 3, 1987

(28) 白井義人, "凝集氷結晶の生成と海水淡水化への應用", ケミカル・エンジニヤリング, 1995

(29) Shirai. Y., Sugimoto. T., Hashimoto. M., Agric. Biol. Chem, 53, pp. 2731, 1987

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 많은 조언과 가르침을 주신 오 철 교수님과 김명환 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

본 논문심사를 위해 시간을 할애하신 김경근 교수님과 윤석훈 교수님께 심심한 사의를 표합니다.

그리고 실험장치의 완성과 데이터정리에 이르기까지 아낌없이 보살펴주신 전열제어연구실의 김명준 선배님과 본 연구실에서 함께 밤을 지새웠던 여러 선후배 님들께도 고마움의 뜻을 표합니다.

또한 항상 관심과 격려를 아끼지 않으셨던 제마코플레어의 강병수 과장님과 이충기 부장님께도 감사의 말씀을 전합니다.

끝으로 오늘에 이르기까지 사랑과 정성으로 보살펴주신 아버님, 어머님께 이 영광을 드립니다.