공학석사 학위논문

유동장을 동반한 해수동결거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Sea Water Freezing Behavior in a Flow Field

지도교수 김 명 환

2000년 2월

한국해양대학교 대학원

기 관 공 학 과

조 이 제

本論文을趙利濟의工學碩士學位論文으로認准함

主審　尹 錫 勳　印

副審　吳　 喆　印

副審　金 明 煥　印

1999年　12月　27日

韓國海洋大學校　大 學 院

機 關 工 學 科　趙 利 濟

목　　차

Abstract iii

사용기호 v

제 1 장 서　론 1

1.1 연구의 배경 1

1.2 LNG 냉열이용 기술개발과 그 가치 11

1.3 종래의 연구 16

1.3.1 유동장을 동반하지 않는 수용액의 동결에 관한 연구 16

1.3.2 유동장을 동반한 수용액의 동결에 관한 연구 17

제 2 장 실험장치 및 실험방법 19

2.2 실험방법 및 실험범위 24

제 3 장 해수 담수화 방법 29

제 4 장 실험결과 및 고찰 34
4.1 해수의 동결거동 34
4.2 농도의 영향 46
4.3 냉각면 온도의 영향 55
4.4 유속의 영향 64
4.5 동결량의 무차원정리 73

제 5 장 결 론 75

참 고 문 헌 77
맺 음 말 82

Abstract

Recently, we have serious problems due to lack of water because of the rapid development of industry and increasing in population. In Korea, a lot of researchers predict that we will have lack of water about 2 billion tons on 2011 year. Therefore, it has absolutely be demanded to build dams and to develop desalination systems in order to supply fresh water continually. The most important factor for adopting the desalination system is the production cost of fresh water. The cost depends on what and how to use an energy source which should be obtained easily and cheaply.

Generally, Liquid Natural Gas(LNG) is stored in a tank as a liquid state at below -162℃. When serviced, however, the LNG absorbs energy form an ambient heat source and then transforms to the gaseous state at high pressure. In this process, a large amount of cold energy is wasted.

What is a method to use this wasted LNG cold energy? So, we focused to make the sea water freezing desalination system by utilizing this wasted cold energy. In advance, we need to possess the qualitative and quantitative data regard to sea water freezing behavior of sea water to establish its design technique.

The goal of this study is to reveal the freezing mechanism, to measure the freezing rate, and to investigate the freezing heat transfer characteristics of sea water. A lot of new informations being made clear through the sea water freezing in flow field will help for us to understand sea water freezing behavior generally.

사 용 기 호

Alphabet

A_c	: 흐름에 대한 단면적	[㎡]
C	: 염분농도	[wt%]
D_h	: 수력직경($= 4A_c/P$)	[m]
H_o	: 초기용액의 높이	[m]
P	: 접수주변	[m]
Re	: Reynolds수	[-]
R_f	: 무차원 동결량	[-]
t	: 시 간	[hr]
T_f	: 농도에 따른 평형 동결온도	[℃]
T_i	: 수용액의 초기온도	[℃]
T_o	: 물의 동결온도	[℃]
T_w	: 냉각면 온도	[℃]
U	: 유 속	[m/s]

Greeks symbol

ν	:	**수용액의 농도에 따른 동점성계수**	[m^2/s]
θ_w	:	**무차원 냉각면 온도**	[-]

Subscript

f	:	**평형동결점**
i	:	**초기 및 주류**
w	:	**냉각면**

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

지구상에서 가장 풍부한 자원으로 꼽히고 있는 물(1)은 약 13억8600만 킬로톤으로 그 중 해수가 97%인 13억5000만킬로톤으로 물부존량의 절대량을 차지하고 나머지 3%만이 담수이다. 담수 중에서도 69%는 빙산과 빙하이고, 지하수가 29%. 지표수는 담수의 2%인 100만킬로톤에 불과하다(Fig. 1.1 참조).

이 중에서도 인간이 사용할 수 있는 지구의 물 공급량은 민물의 10%도 안되는 9000킬로톤으로 한정된 자원이지만 아직까지는 여유가 있는 편이다. 인류가 쓰는 물의 양은 4300킬로톤에 불과하기 때문이다.

사용가능한 물의 양에서 절반 밖에 쓰고 있지 않으면서도 인류가 물부족 위험에 직면하게 된 이유는 20세기 들어 시작된 급격한 인구증가와 대도시로의 인구집중, 필요한 곳에 충분한 물이 있지 못한 물자원의 지역편재 때문이다. 세계 담수량의 15%를 차지하는 아마존강은 95%이상이 인간의 접근을 거부하고 있어 강물 이용 인구가 겨우 2500만명에 불과하다. 또 1940년대 23억명이던 세계 인구는 90년 53억명으로 2배 이상 증가했으며, 2025년에는 83억명에 이를 것으로 추산되고 있다.

인류의 생활수준 향상으로 인한 물 소비량은 인구 증가율을 앞질러, 물 소비는 과거 40년 동안 3배 이상 늘어났다. 물부족 국가도 현재 28

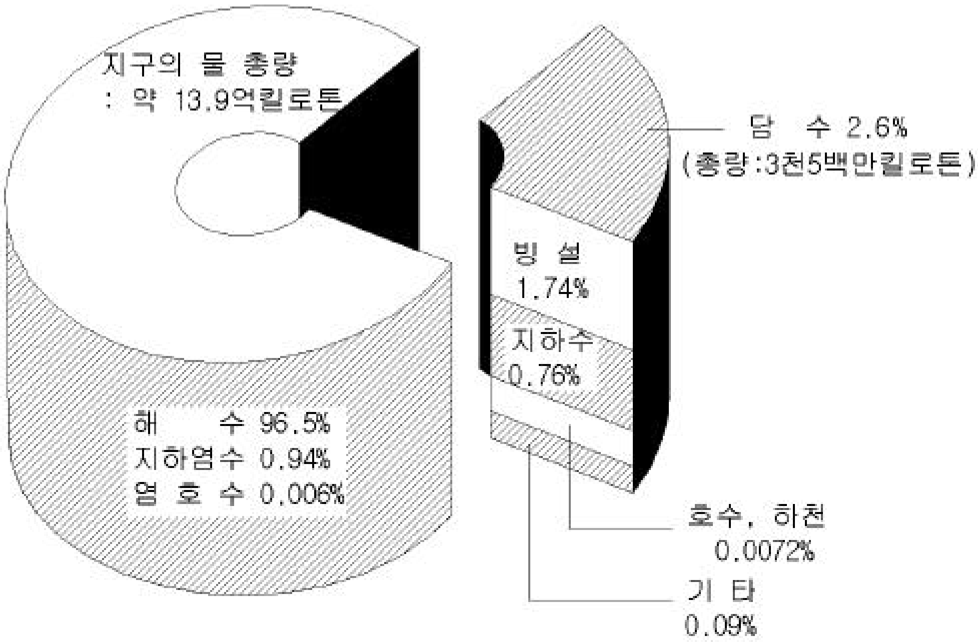


Fig. 1.1 Distribution of water sources in the world

개국에서 2025년에는 34개국으로 늘어날 것으로 전망되고 있다. 결국 물을 골고루 나눠 쓴다 해도 21세기 말에는 물 소비량이 공급량을 추월, 전 인류가 물부족에 빠지고 말 것으로 예상되고 있다.

이러한 물부족 현상이 점점 심각해지면서 인류는 지금까지 주목하지 않았던 수자원의 확보에 눈을 돌리고 있다. 지구상 물의 97%를 차지하는 바닷물을 담수화하고 인공강우로 강제로 비를 내리게 만들거나, 중수도를 설치해 사용한 물을 다시 사용하는 등 물고갈 위기를 극복하기 위한 노력들이 이루어지고 있다. 유엔 인구행동연구소(PAI)가 발표한 내용(Sustaining Water, Population and Future of Renewable Water Supplies)에 따르면 연간 1인당 물사용량 1,000톤 미만을 물 부족국가군으로 1,500톤 미만을 압박군으로 분류하고 있다. 한국의 활용 가능한 수자원량은 연간 630억톤. 이를 국민 1인당 사용가능량으로 환산하면, 1955년에는 2940톤이었으나 급격한 인구 증가로 인해 35년만인 90년에는 1452톤으로 줄어들었다. 물 부족국가 분류 기준으로 보면 우리나라도 90년부터 물부족 국가 대열(Table 1.1 참조)에 들어선 것이다.

앞으로의 물 공급 전망도 좋지 못하다. 우리나라의 물수요와 공급은 Table.1.2에 나타난 바와 같이 94년말 약 322억톤 공급에 299억톤 수요로 약 23억톤의 여유가 있었으나, 2011년에는 약 367억톤의 수요가 발생할 것으로 예측되고 있다. 또 현재 건설중인 6개 댐을 2000년까지 완공해도 2001년 이후에는 용수예비율이 1.9%에 불과해서 살얼음판을 걷게 되며, 2011년에는 예비율이 마이너스 5.5%로 완전히 역전될 전망이다.

개인 물사용량 국가별 분류	
물기근 국가군	지부티, 쿠웨이트, 몰타, 카타르, 바레인, 바베이도스, 싱가포르, 사우디아라비아, 아랍에미레이트연방, 요르단, 예멘, 이스라엘, 튀니지, 카포베르데, 케냐, 부룬디, 알제리, 르완다, 말라위, 소말리아
물부족 국가군	라비아, 모로코, 이집트, 오만, 키프로스, 남아프리카, 한국, 폴란드
물풍요 국가군	벨기에외 120개국

Table 1.1 The national classification of an indivisual water consumption

단위:억톤

년　　도	1994	2001	2006	2011
공 급 량	322.1	342.9	345.4	346.5
수 요 량	299.0	336.4	349.9	366.5
과 부 족 량	23.1	6.5	- 4.5	- 20.0
예 비 율(%)	7.7	1.9	- 1.3	- 5.5

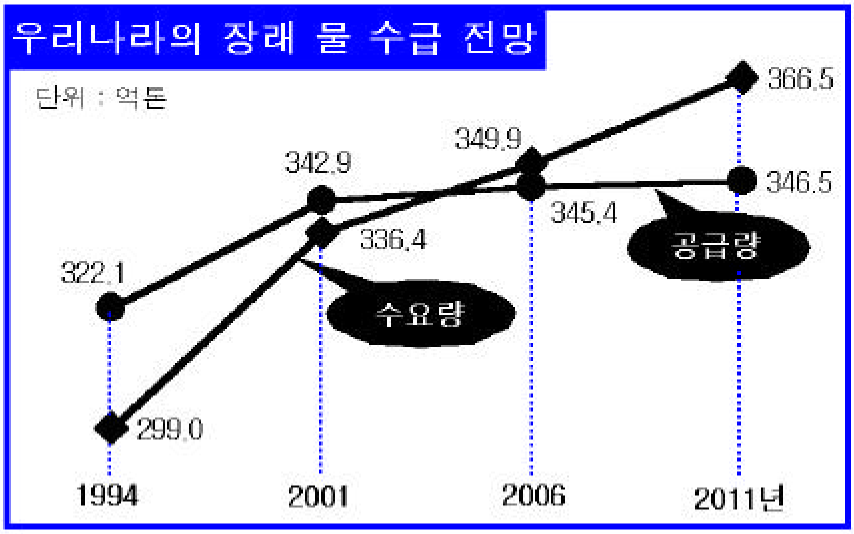


Table 1.2 Comparison of water supply and consumption

이에 따라 정부는 2000년대의 물부족에 대비하고 안정적인 용수 확보를 위하여 2011년까지 다목적 댐 등 적정규모의 댐 건설로 신규수자원 47억톤을 개발하여 용수예비율을 8.5%로 증대시킬 계획이며, 인공강우 및 해수담수화 연구 등 인공용수생산 기술개발에 많은 관심을 표명하고 있다. 담수화 기술은 세계적으로 안정화 단계에 접어 들었으며 미국, 일본, 독일, 이스라엘, 프랑스, 덴마크 등이 선진기술을 주도하고 있다. 우리나라에서도 아주 소규모의 담수화 장치가 운용되고 있고, 과거 대형설비를 해외에 시공한 경험도 있지만, 이를 계속 발전시킬 기회를 잃고 있음은 참으로 안타까운 일이다.

인공적인 용수생산에 있어서는 해수를 담수화(2)하려는 노력이 지배적으로 행하여지고 있다. 해수의 담수화 방법(Fig. 1.2 참조)으로는 증발법, 막법, LNG냉열이용법, 투과기화법 및 태양열이용법 등이 있으며, 그 특징 및 원리는 Table 1.3에 나타냈다.

담수화 설비의 적부를 평가할 때는 그것이 설치되는 지형적인 여건을 고려해야 된다. 우리나라의 경우 삼면이 해안과 접하고 있기 때문에 해수를 확보하는 것이 용이하다. 이것은 원수를 기상이변에 관계없이 안정적으로 무한히 많은 양을 확보할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 중요한 공단이 해안과 접하고 있어 공업용수를 필요로 하는 지역의 바로 곁에 무한히 많은 물을 가지고 있는 셈이다. 따라서 담수화를 할 경우 그 경비를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 설비공사가 간단하고 공사기간이 절약될 수 있는 잇점(3)이 있다.

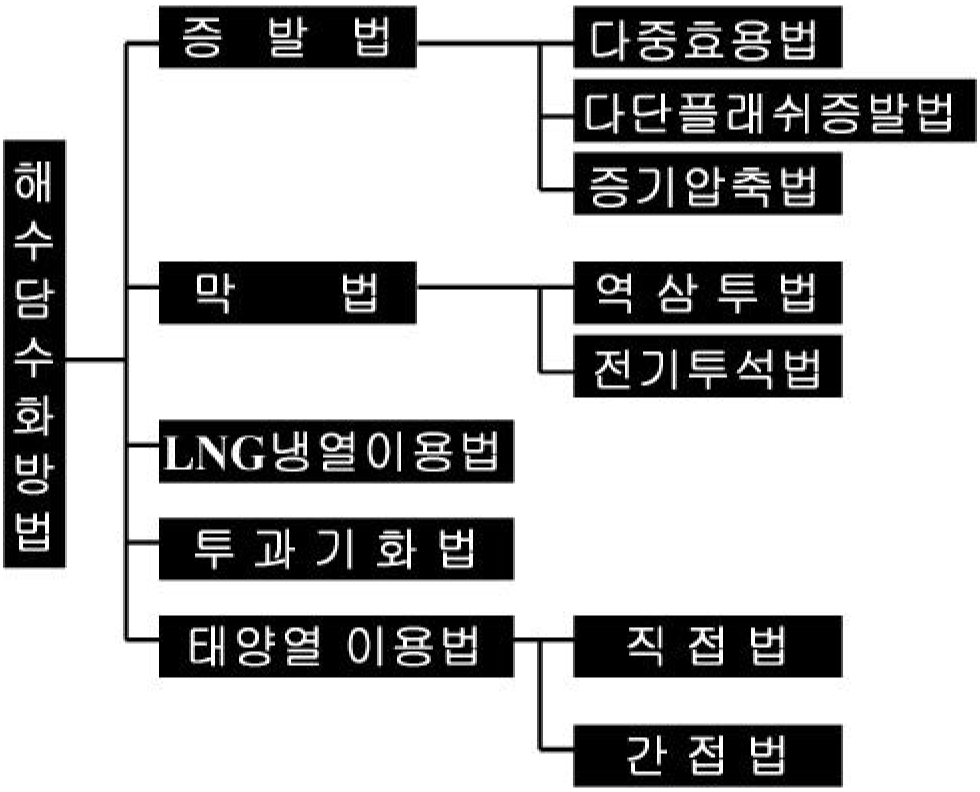


Fig. 1.2 Classification of sea water desalination system

방 법	원 리	특 징	비 고
증 발 법	해수를 가열하여 증발시켜, 발생하는 수증기를 냉각하여 담수를 얻는 방법.	규모가 장점인 효과가 있는 방식으로서, 에너지 다소비형이기 때문에 산유국에 적합한 기술이다.	
역삼투법	물은 통과하지만, 염분은 통과하지 못하는 반투막용기를 경계로 그 한쪽 편에 해수를 넣어 압력을 가하는 것에 의해 담수만을 투과시키는 방법.	전기소비량이 적고, 성에너지형 기술이다. 염분농도가 낮은 짠물의 담수화를 행하는 경우에는 조수비용의 저감이 가능하다.	
전기투석법	양이온 교환막과 음이온 교환막의 사이에 해수를 통과시켜, 양막의 외측으로부터 직류전압을 걸어 막을 통과하는 해수중의 염소이온과 나트륨이온을 제거하여 담수를 얻는 방법.	염분농도가 낮은 짠물의 담수화를 행하는 경우에는 조수비용의 저감이 가능하다. 온도가 높은 해수를 담수화하는 경우에도 담수화의 효율이 상승하여 조수비용의 저감이 가능하기 때문에 배기열의 조합이 검토되어지고 있다.	
LNG냉열 이용법	LNG를 이용하여 해수를 동결시켜, 빙을 녹여서 담수를 얻는 방법. (해수를 동결시키고, 염분을 함유하지 않은 물이 생긴다.)	현재 거의 이용되고 있지 않은 LNG의 냉열을 유효하게 이용함으로서 적은 에너지로서 담수를 얻는 것이 가능하다. 적용지역이 LNG 기지주변에 한정되어진다.	
투과기화법	수증기는 통과하지만 액체의 물은 통과하지 않는 투과기화막용기를 경계로 그 한쪽 편에 해수를 넣어서, 수증기만 투과시켜서 담수를 얻는 방법.	성에너지화가 충분히 진행되어 있고, 배기열의 유효한 이용이 가능하기 때문에 태양열 등을 이용할 수 있는 배기열이 충분히 존재하는 지역에 적합한 기술이다.	

Table 1.3 Principle and character of each species sea water desalination system

담수화 방법의 채택에 있어서 가장 중요한 요소로 작용하는 것은 담수생산비용이며, 이는 쉽고 값싸게 이용할 수 있는 담수화의 에너지원이 무엇인가에 달려 있다. 최근 우리나라는 석유에너지의 의존도를 줄이고 환경오염 방지의 해결책의 하나로서 청정에너지인 LNG에 대한 발전용, 산업용 및 가정용의 수요가 급증하고 있다. 그 수요는 Table 1.4에 나타낸 바와 같이1987년 LNG공급을 시작한 이래 1997년에는 연간 1000만톤 공급이 초과 달성되었고, 2010년에는 2000만톤 이상의 수요가 예상되고 있다.

단위 : 천톤

연 도	1997	1999	2000	2003	2005	2010
LNG 수요량	11,147	12,617	13,702	16,777	17,260	20,814
LNG 공급량	11,629	13,142	14,596	16,980	16,980	14,680
과 부 족 량		▲525	▲894	▲203	▼280	▼6,134

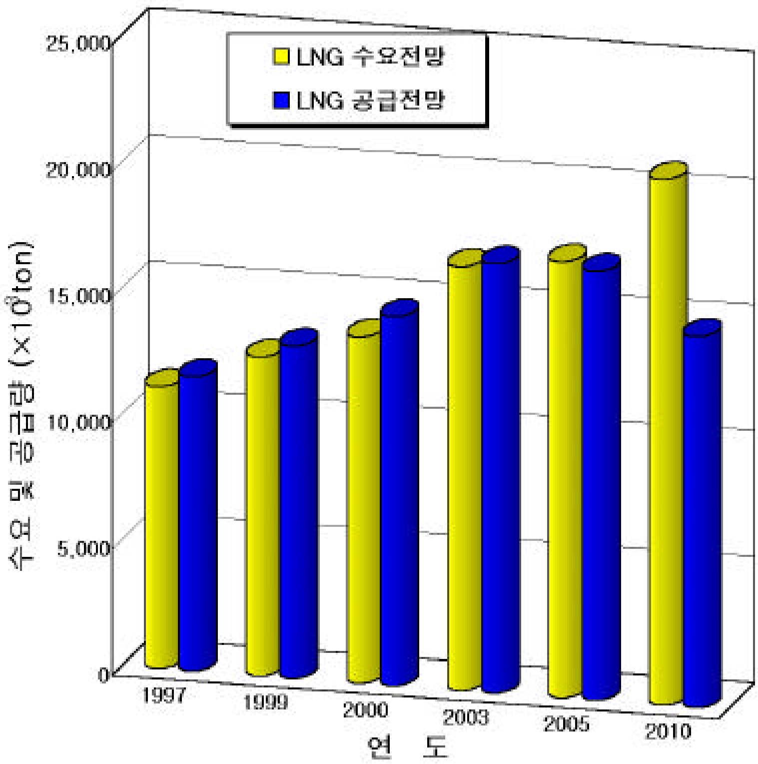


Table 1.4 Estimated demand and supply of LNG

1.2 LNG 냉열이용 기술개발과 그 가치

LNG란 Liquified Natural Gas의 약어로 천연가스 생산지에 따라 그 조성이 약간 차이가 있지만 메탄을 주성분으로 하는 천연가스를 액화시킨 것으로 1kg당 200kcal의 냉열을 보유하고 있다. LNG는 -162℃의 초저온액체상태이기 때문에 에너지가치가 매우 크므로 에너지 절약 차원에서 냉열회수를 위한 기술개발이 세계각국에서 진행되고 있다.

1㎥의 메탄을 대기압하에서 -162℃까지 냉각시키면 0.0017㎥의 액체로 액화되고 체적은 1/600로 된다. 이와같은 액화과정에 의해 산지에서 수요지까지 해상을 통하여 대량으로 수송이 가능하게 된다. LNG는 인도네시아, 말레이시아 등 천연가스 산지로부터 액화과정중 분진제거, 탈황, 탈탄산, 탈수의 처리과정을 거쳐 액화된 후 LNG수송선에 의해 해상으로 운반되어 LNG인수기지에 하역하여 특수하게 제작된 저장탱크에 저장된다. 저장된 LNG는 발전소 연료 및 도시가스용으로 공급하기 위하여 -162℃의 초저온액체인 LNG를 0℃의 기체로 기화시킨 후 공급배관망을 통하여 전국으로 공급하게 된다. 이때 LNG를 기화시키기 위한 열원으로 해수를 사용하거나 천연가스 연소열에 의한 열원을 사용한다. 따라서 기화과정중 LNG 1kg당 200kcal의 냉열이 외부로 배출되며 기화를 위한 해수펌프 동력 및 천연가스 등 에너지가 소비되게 된다. 이렇게 폐기되는 LNG 보유냉열을 단계적이고 효과적으로 이용하기 위한 하나의 방법으로서 LNG의 보유냉열을 해수동결 담수화장치(4)의 에너지원으로 이용할 수 있다.

LNG냉열이용기술 개발은 에너지 절약 및 효율적이용 차원에서 외부로 버려지는 LNG 저온에너지를 유용하게 활용하기 위한 기술개발이다. 일반적으로 사용되는 냉열의 이용온도 범위는 Table 1.5와 같이 10 -273℃이며 이중에서 LNG의 비등점은 -162℃부근이므로 이 냉열을 이용할 경우 여러 가지 산업에 적용할 수 있다. 액체상태의 LNG가 대기압하에서 상온까지 기화될 경우 증발잠열 120kcal/kg과 현열 80kcal/kg을 합하여 약 200kcal/kg의 냉열에너지가 발생된다. 양적으로 200kcal/kg인 LNG냉열을 질적인 가치로 평가하기 위해서 역카르노 사이클을 고려할 경우, -162℃에서 1kcal의 냉열을 얻기 위해서는 0℃에서의 1kcal보다 이론적으로 17배의 가치가 있다. 따라서, 낮은 온도범위에서 냉열을 회수할 경우 경제적 가치는 커지게 된다.

LNG냉열을 해수동결의 에너지원으로서 해수동결 담수화장치에 활용할 수 있다면, LNG 1kg이 0℃의 대기압가스로 상태변화(기화)를 할 경우 흡수하는 에너지는 약 850kJ이며 0℃ 빙을 약 2.5kg 제조할 수 있는 열량이 된다. 이것은 담수생산비용의 대폭적인 절감은 물론이고 LNG공급기지 주변의 공단 및 주택지에 공업용수를 안정적이고 지속적으로 공급할 수 있으며 성에너지의 차원에서도 바람직한 시스템이 될 수 있다.

국내외적으로 LNG냉열이용산업의 적용현황은 Table 1.6과 같다. LNG냉열이용산업의 실용화는 일본에서 활발하게 진행되었으며, 따라서 냉열산업기술도 LNG의 최대 수요국인 일본이 선도적 위치에 있다. 우리나라도 현 LNG사용량과 앞으로의 증가하는 공급예정량으로 보아 막대

간접(2차)이용	온 도 (℃)	직접(1차)이용
	+10	인공양식,재배
	0	해수담수화
동결식품 보관, 수송	-20	인공스키,아이스링크 저온창고
	-40	암모니아제조 액화탄산제조
	-60	초저온창고
드라이아이스 온도	-80	드라이아이스 제조 파락실렌정제
식품동결	-100	식품동결,에틸렌정제 혈액보관
식품동결분쇄 플라스틱분쇄	-120	
폐자동차, 폐가전제품분쇄	-140	
고온초전도	-160	LNG온도
지반동결공법 극저온케이블	-180	공기액화분리
액체질소온도	-200	
	-220	
수소액화	-240	수소액화
초저온전도 헬륨액화	-260	
	-273	

Table 1.5 Temperature range and process which make use of LNG cold energy

국　　가	냉 열 발 전	공 기 액 화	액 화 탄 산	기　　타
일　　본	10 개소	6 개소	3 개소	냉동/냉장 창고 1개소 저온분쇄 1개소
한　　국	-	1 개소	-	
호　　주	-	1 개소	-	
프 랑 스	-	1 개소	-	
대　　만	-	1 개소	-	

Table 1.6 Industrial present conditions which make use of LNG cold energy

한 양의 LNG보유에너지를 적극 활용하기 위하여 LNG폐냉열의 유효이용 등 다양한 방면으로의 연구에 관심과 노력을 경주해야 할 것이다.

본 연구에서는 LNG냉열을 이용한 해수동결 담수화장치의 개발과 설계기술의 확립에 있어서 요구되어지는 해수동결거동에 관한 정성적, 정량적 기초자료를 확보하기 위하여 구형용기 및 원관내에서의 해수동결거동에 관한 실험적 연구를 수행하고 그 결과를 이미 보고(5) (7)한 바 있다. 본 연구에서는 계속적인 그 연구과정의 일환으로서 정지중의 해수동결에서 나타난 침상빙 동결층내 염분용질의 축적을 억제하기 위하여 해수를 냉각원관 주위로 유동시켜 해수동결과 함께 석출되는 용질을 동결층으로부터 제거하는 방법을 제안하면서, 이에 대한 정성적, 정량적 자료를 수집하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 유동장을 동반하는 원관외 해수동결거동의 메카니즘과 염분농도, 냉각면온도 및 유속이 동결량 및 열·물질이동적인 특성(8) (11)에 미치는 영향 등을 실험적 방법으로 검토하였다.

1.3 종래의 연구

1.3.1 유동장을 동반하지 않는 수용액의 동결에 관한 연구

수용액의 동결은 말하자면 2성분계용액의 응고문제의 범위에 속하는 것이기 때문에 금속의 응고문제와 유사하다. 그래서 Stephan(12) 등은 해석적연구를 시초로서 열전도율과 확산계수등의 물성치 및 상평형도가 비교적 잘 알려져 있는 염화나트륨 수용액에 관해서 해석적연구를 하였다.

실험적연구로서는 林(13)등이 생체세포의 동결을 가정하고 수평셀(cell) 내에서 염화나트륨수용액의 동결에 관해 셀 간격을 2 8mm, 수용액농도 2 15wt%에 두고 실험을 행했다. 또 온도분포와 함께 동결계면위치에 관해 Neumann해와 실험결과와의 비교검토를 행하였다. 또 林(14)등은 구형용기내의 수평냉각면상에 있는 염화나트륨수용액의 동결에 관해 실험 및 해석을 행했다. 그들은 냉각면온도를 염화나트륨수용액의 공정온도(Eutectic Point ; -21.12℃) 이하로 유지한 경우의 빙결정의 발생상태와 온도장의 과냉각에 관한 검토를 행하였다. 또 해석에 있어서는 액층, 고액공존층(15) 및 고층(공정층)의 각각에 관해 열전도방정식 및 확산방정식을 풀고 온도분포와 함께 동결층두께의 비교를 행하고 있다. 더욱 林(16)등은 염화나트륨의 과냉각수용액의 동결에 관해 과냉각에 의한 온도장의 불안정의 해소과정과 형성되는 동결층의 빙결정의 형상에 관해 실험적 검토를 행하고 있다.

Fang(17)등은 유리재료의 수직이중원통의 환상부를 진공으로 유지하고 그 내관부의 약 반정도까지 기포가 없는 순수빙을 만들고 그 위에 염화나트륨 수용액의 동결층을 형성시켜 침상의 빙결정으로 형성된 고액공존층에 대해 관찰 및 동결층두께, 온도분포의 측정을 행했다. 또 염화나트륨수용액중에 있어 확산계수가 온도전도율의 약 100분의 1이기 때문에 농도확산은 무시한다고 가정하고 해석을 행했다.

이들의 수용액 동결문제에 관한 연구는 물성치가 비교적 잘 알려져 있는 염화나트륨 수용액에 한정되어 있다. 또 O'Callaghan(18)등은 침상의 동결층이 형성되는 메카니즘에 관해서, Mullins(19) (21)등은 계면안전성이론을 이용해 고찰을 행하고 있다.

1.3.2 유동장을 동반한 수용액의 동결에 관한 연구

Bennon(22)등은 고액공존층을 동반한 상변화문제를 취급하는 방법의 하나로서 엔탈피법에 기초한 연속 모델을 제창했다. 종래의 해석방법에서는 고상, 액상, 및 고액공존상의 각각에 관해 기초방정식을 할당하고 이것들의 계면에 있어서 환경조건을 고려할 필요가 있었다. 또 고액공존상내의 유동장을 고려하면 액상의 환경에 있어서 속도장의 연속조건을 고려할 필요가 있기 때문에 취급이 매우 복잡하게 된다.

한편, Bennon등의 연속모델에서는 각 영역의 것에 기초방정식을 할당할 필요가 없고 따라서 계면의 경계조건을 고려할 필요가 없게 된다. 이들은 유동장의 계산에는 Patanker(23)에 의한 SIMPLER법을 채용하고 이

방법을 이용해 염화암모늄 수용액의 구형용기내에서 자연대류를 동반한 동결문제(24) (25) 또 구형유로내의 강제대류장에 있어서 동결문제(26)의 해석 및 실험적(27) 방법으로 검토를 행했다.

Cristensen(28) (29)등은 수직냉각가열벽을 가지는 밀폐구형용기내에 있어서 염화암모늄 수용액의 동결에 관해 Bennon등의 방법을 적용해 해석 및 실험적 방법으로 검토를 행했다.

Engel(30)등은 상부에 자유표면을 가지는 구형용기내에 있는 자연대류를 동반한 염화암모늄 수용액의 동결에 관해 Bennon등의 방법을 이용해 해석을 행하고 실험결과와 비교를 하였다.

Bennon등의 연속모델은 상기와 같은 유동장을 동반한(혹은 동반하지 않는)고액공존층이 형성되는 동결(응고)문제에서는 비정상적으로 유효하다는 이점이 많지만 계산에 있어서는 정수나 물성치가 주어져만하고 또 이것들의 값은 물질이 잘 알려져 있지 않은 것들이 많다.

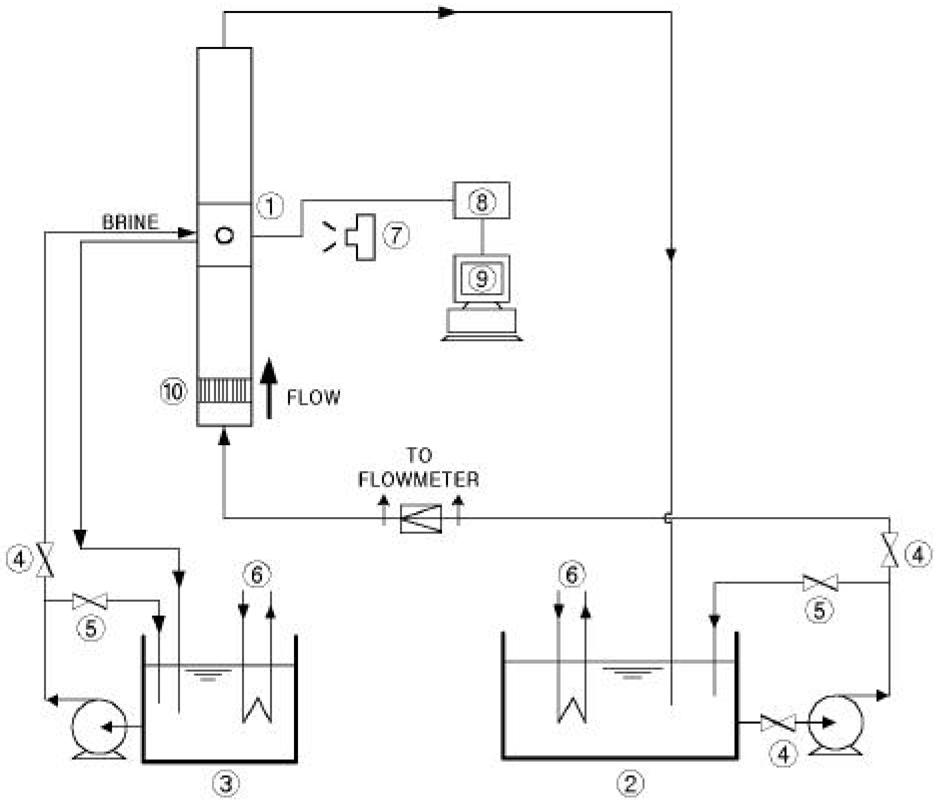
Bennon등의 연구가 염화암모늄 수용액에 한정되어 있는 것은 아마 이러한 이유라고 생각된다.

제 2 장 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

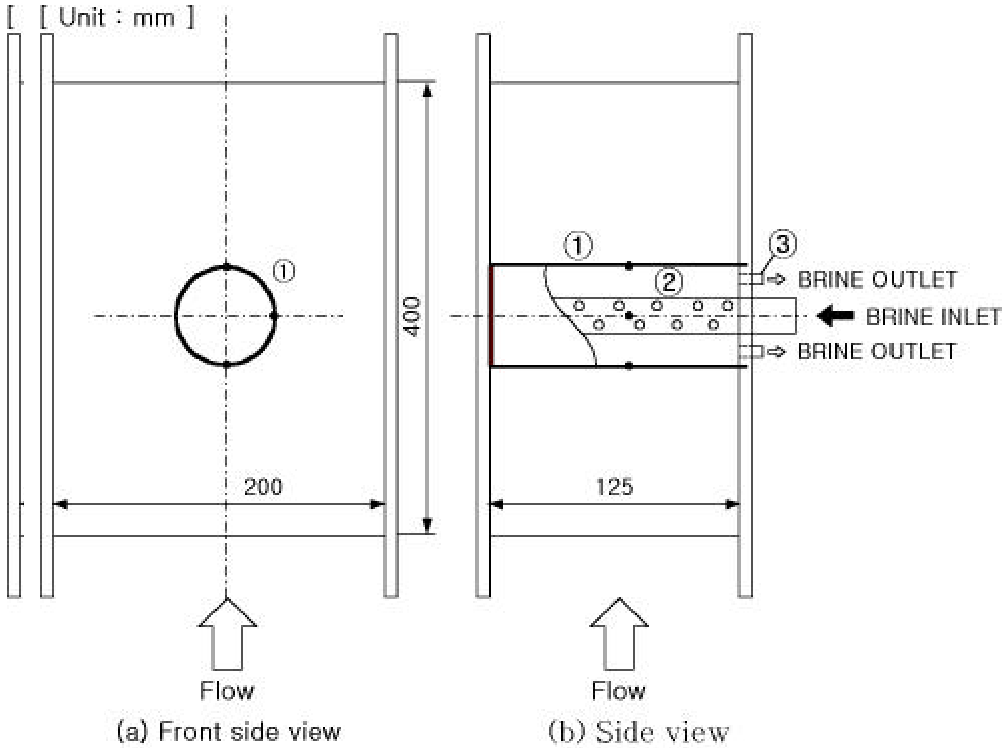
Fig. 2.1과 Fig. 2.2에 실험장치의 전체계통도와 시험부를 나타낸다. 그림에 나타내는 바와 같이 실험장치는 크게 수용액의 동결이 진행되는 시험부, 냉각면을 소정의 온도로 유지해 주기 위한 브라인 순환부, 수용액을 일정한 온도와 속도로 유지하기 위한 수용액 순환부, 동결이 시작되는 동안 냉각면 및 수용액의 온도를 측정하기 위한 온도계측부 및 수용액의 동결층 형상을 촬영하기 위한 가시화부로 구성되어 있다.

먼저 ①시험부(Test Section)는 230×155×1700㎜의 구형용기로 두께 15mm의 투명아크릴로 제작하였고, 상하면에는 수용액의 입출구를 만들고 해수가 안정적으로 유입될 수 있도록 하였으며, 시험부의 중간 위치에 외경 66.8mm, 두께 2mm, 길이 125mm의 동관을 설치하였다. 동관 내부를 소정의 냉각온도로 유지하기 위하여 ⑥냉동기에 의하여 온도가 조절된 브라인(에칠렌글리콜 수용액)이 순환수펌프를 거쳐 PVC 파이프로부터 일정하게 분사되도록 하였다. 이러한 순환계의 탱크, 배관 및 온도제어부는 열손실을 방지하기 위하여 단열재로 충분히 단열을 하였다. 냉각면온도(T_w)는 동관의 표면에 Fig. 2.2와 같이 동관 중간위치의 상부・측면・하부에 부착된 3개의 C-A Type 열전대로부터 검출되어 ⑧데이터 처리장치(Data Aquisition System ; DR-230)로 입력된다. 또한



① Test Section
② Test Solution Tank
③ Brine Tank
④ Controlling Valve
⑤ Bypass Valve
⑥ Refrigerator
⑦ Digital Camera
⑧ Data Aquisition System
⑨ Personal Computer
⑩ Honeycomb

Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus



① Cooling Tube (ø 66.8)

② PVC Pipe (ø 22.0)

③ Acryl Tube (ø 8.0)

○ Nozzle (ø 1.0)

● Thermocouples

Fig. 2.2 Diagram of test section apparatus

시험부에 수용액이 안정적으로 공급될 수 있도록 하기 위하여 ⑥냉동기에 의하여 일정한 온도로 조절된 수용액이 순환수펌프(2HP, 1.5KW)에 의해 유량계(Magnetic Flowmeter)를 거쳐 시험부 입구의 ⑩Honeycomb을 통과하도록 하였다. 수용액의 온도(T_i)는 시험부 입·출구에 K-Type 열전대를 부착하여 ⑧데이터 처리장치를 거쳐 ⑨PC에서 온도를 자동으로 기록하도록 하였다. 그리고, Fig. 2.3은 본 연구에서 이용되어진 실험장치의 전경사진을 나타낸다.

Fig. 2.3 Photo of experimental apparatus

2.2 실험방법 및 실험범위

본 연구에서는 유동장을 동반한 염화나트륨 수용액의 동결시 발생하는 열 및 물질의 이중전달에 관한 기초자료를 수집하기 위하여 시료로서는 해수(Table 2.1 참조)의 평균농도가 3.5wt%임을 감안하여 시료로서 0.0wt%, 1.8wt%, 3.5wt%의 3종류의 염화나트륨 수용액을 사용하였고, 수용액의 평균유속을 0.02m/s, 0.05m/s, 0.1m/s로 하여 그 영향을 검토하였다. 또한 냉각면의 온도는 유속에 따른 빙의 동결개시 최고온도 및 Fig. 2.4의 변태도(31)에서 나타낸 바와 같이 염화나트륨수용액의 공정온도가 -21.12℃임을 고려하여 각각 -10.0℃, -15.0℃, -20.0℃로 유지시켰다(Table 2.2). 시료는 정제염을 사용하여 염화나트륨 수용액을 만들었으며 시료의 염분농도는 디지털염분계(Salt Meter ; ES-421)를 이용하여 측정하였다.

실험은 먼저 냉동기를 가동하여 브라인 탱크의 온도를 소정의 온도로 조절하고, 수용액 탱크의 초기온도를 0.0℃로 유지시켰다. 소정의 온도로 조절된 수용액을 순환수펌프로 유량계를 거쳐 소정의 유속으로 조절하여 시험부에 공급하였으며, 실험종료시까지 그 온도를 초기온도와 동일하게 유지시켰다. 실험개시 시각은 소정의 냉각온도로 조절된 브라인을 동관내부의 냉각면에 분사하는 시각으로 하였다. 실험이 진행됨에 따라 성장하는 빙층의 형상, 두께, 동결량은 지속적(10분간격)으로 측정되었으며, 매시간 동결층의 형상을 Digital Camera(RDC-4300)로 가시화하였다. 실험종료 시각은 냉각면과 동결계면과의 온도구배와 수용액

구 성 성 분	성 분 함 량
Sodium Na^+	1.0561
Magnesium Mg^{2+}	0.1272
Calcium Ca^{2+}	0.0400
Potasium K^+	0.0380
Chloride Cl^-	1.8980
Sulfate SO_4^{2-}	0.2649
Bicabonate HCO_{3-} -	0.0142
Bromide Br^-	0.0065
Other Solids	0.0034
TDS (Total Dissolved Solids)	3.4483
Density (20℃)	1.0243×10-3
Water	96.5517

Table 2.1 Concentration of important ingredient according to sea water salinity(wt%)

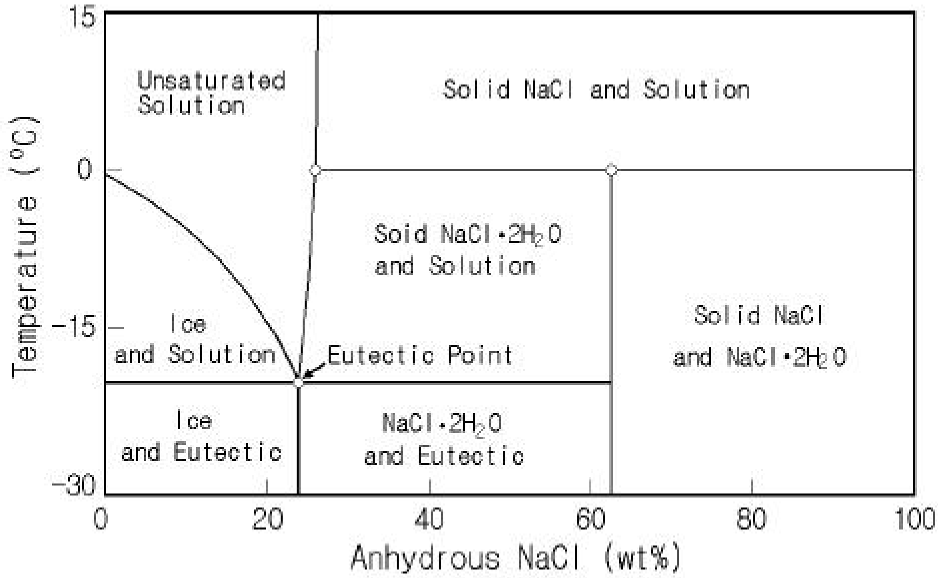


Fig. 2.4 Equilibrium phase diagram of aqueous solution

Conditions	Range		
Initial Temperature of Aqueous Solution T_i [℃]	0.0		
Concentration of Aqueous Solution C_i [wt%]	0.0	1.8	3.5
Cooling Wall Temperature T_w [℃]	−10.0	−15.0	−20
Flow Velocity of Aqueous Solution U_i [m/s]	0.02	0.05	0.1

Table 2.2 Experimental conditions

의 강제대류간의 열평형이 이루어져 빙의 성장이 더 이상 없는 정상상태를 기준으로 하였고, 실험종료후 빙을 채취하여 각부의 염도를 디지탈염분계로 측정하였으며, 동결량은 각부의 빙의 두께측정 및 최후동결량의 무게를 측정하므로서 산정하였다.

제 3 장 해수 담수화 방법

지구상의 수계에 있어 염수(Saline Water)는 상당한 양의 TDS(Total Dissolved Solids)를 함유하고 있는 물로써 담수화에 의해 음용수, 공업용수 및 관개용수용 등의 수자원이 된다. 이 염의 양은 염수의 종류에 따라 다르며 담수화에 있어서 물은 TDS 농도에 따라 4종류로 구분할 수 있다. TDS농도에 따라 분류하면 담수(Fresh Water), 짭짤한 물(Brackish Water), 해수(Sea Water), 소금물(Brine)이며 그 분류기준은 Table 3.1과 같다. 이 분류기준에 의하면 Brackish Water의 TDS 농도는 0.1wt%이상 3.5wt%이하를 말하지만 실질적인 담수화에서는 1.0wt% 이하를 Brackish Water라고 한다.

지금까지 행하여져 온 해수동결담수화법에는 기본적인 결점이 있다. 그것은 해수를 동결시켜 생성한 빙결정에 부착한 염분과 빙결정인자간의 사이에 포함된 해수의 양이 많아 얻어진 담수의 염분농도가 높게 되는 점이다. 동결담수화법에 의해 높은 생산성으로 담수를 얻기 위해서는 수용액으로부터 동결되는 빙결정에 용질(염화나트륨)의 몰입을 어떻게 방지하느냐가 가장 큰 과제이다.

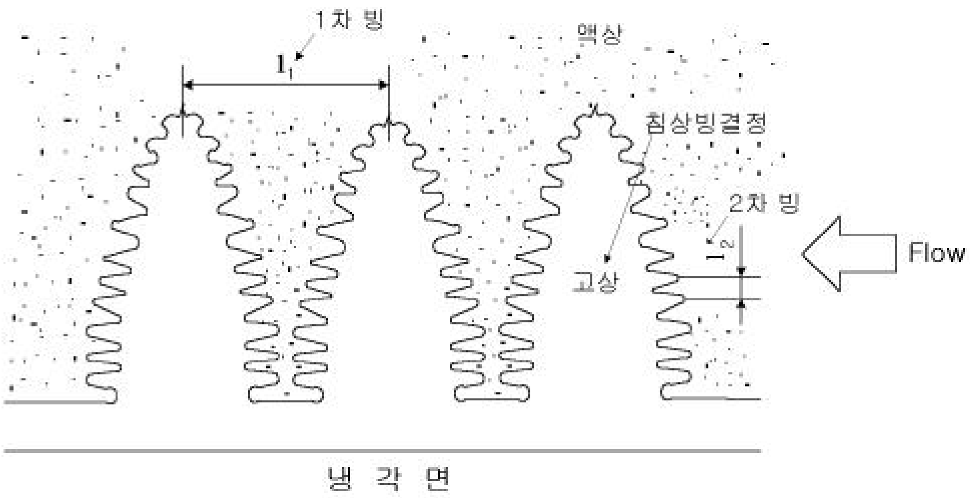
해수의 동결거동에 있어서는 순수한 물의 경우에 발생하지 않는 침상빙(Dendritic Ice)이 관찰되어지는데, 이는 동결이 진행됨에 따라 동결계면에서 석출된 고농도수용액에 의한 과냉구역이 형성되면서 그 주위에

물의 종류	TDS (Total Dissolved Solids)	비 고
Fresh Water	0.1wt% 이하	
Brackish Water	0.1wt% 3.5wt%	
Sea Water	3.5wt%	
Brine	3.5wt% 이상	

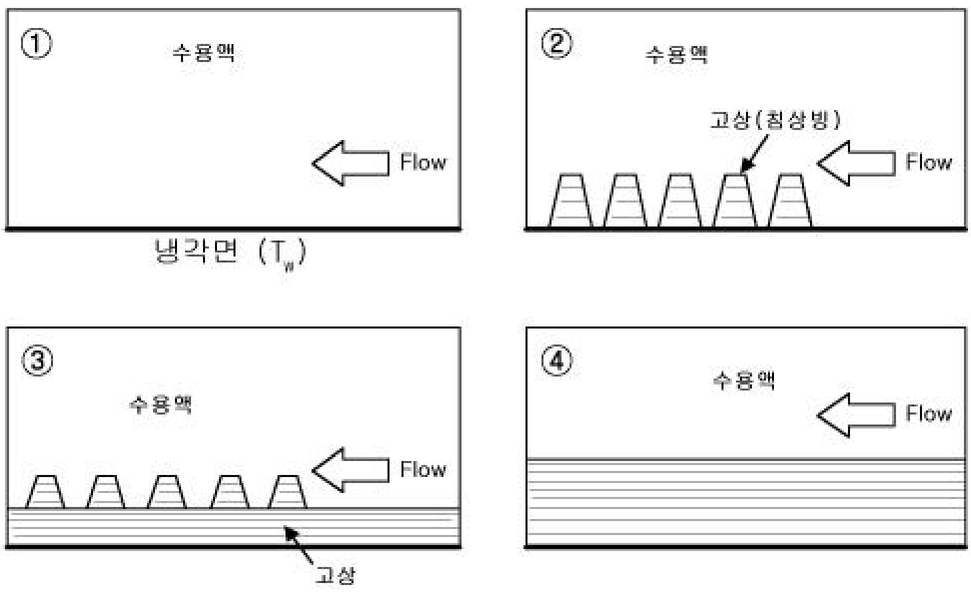
Table 3.1 Classification of water in sea water desalination system

침상빙이 성장하기 때문이다. Fig. 3.1(a)는 성장한 침상빙의 성상을 표시한다. 그림으로부터 우선 침상빙의 성장형태를 설명하면 침상비의 줄가가 되는 1차 빙이 간격 l_1에서 냉각면으로부터 과냉각수중으로 성장한다. 이후, 1차 빙의 성장방향과 거의 수직으로 조밀한 간격 l_2를 가지고 2차 빙이 형성되어 침상빙결정구조가 완성된다. 이 침상빙의 사이에 용질이 몰입되어 동결층이 침상빙과 고농도수용액으로 이루어진 고액공존층을 이루어 동결된 빙의 염분농도가 높게 되는 것이다. Fig. 3.1(b)에 수용액의 유동을 이용하여 이 고액공존층을 제거하는 방법을 나타내었다. 먼저 ①에서 수용액이 과냉각상태로 되는 것을 억제시키고, 결정핵의 발생과 함께 ②와 같이 순간적으로 수용액을 향해 발생하는 침상빙결정(1차 빙)을 성장과 동시에 제거하여 그 성장속도를 둔화시킨다. 이후에 ③과 같이 1차 빙상결정방향과 다른방향으로 2차 빙상결정이 성장을 하면서 냉각면 근방에는 원자가 조밀하게 충진된 응고상의 빙이 서서히 나타나게 되며, 응고상 빙의 성장과 함께 수용액의 흐름의 영향과 흡열측의 열저항의 증대에 의해 일단 성장이 둔화된 침상결정의 동결계면에 수용액으로부터 열이 들어가 융해하기 시작하고, 또한 응고상 빙근방의 2차 빙상의 발달에 의해 용질이 다소 제거된 고・액계면이 되고, 그 후 흡열량과 수용액의 흐름의 영향에 의해서 평활한 계면이 발달하게 된다.

따라서 본 연구에서는 짭짤한 물 및 담수를 얻기 위한 한 방법으로서



(a) Growing process of dendritic ice



(b) Removing process of dendritic ice

Fig. 3.1 Model of Sea water Freezing behavior

수용액을 유동시켜 강제대류로서 석출염분용질을 제거하는 방법을 채택하였다.

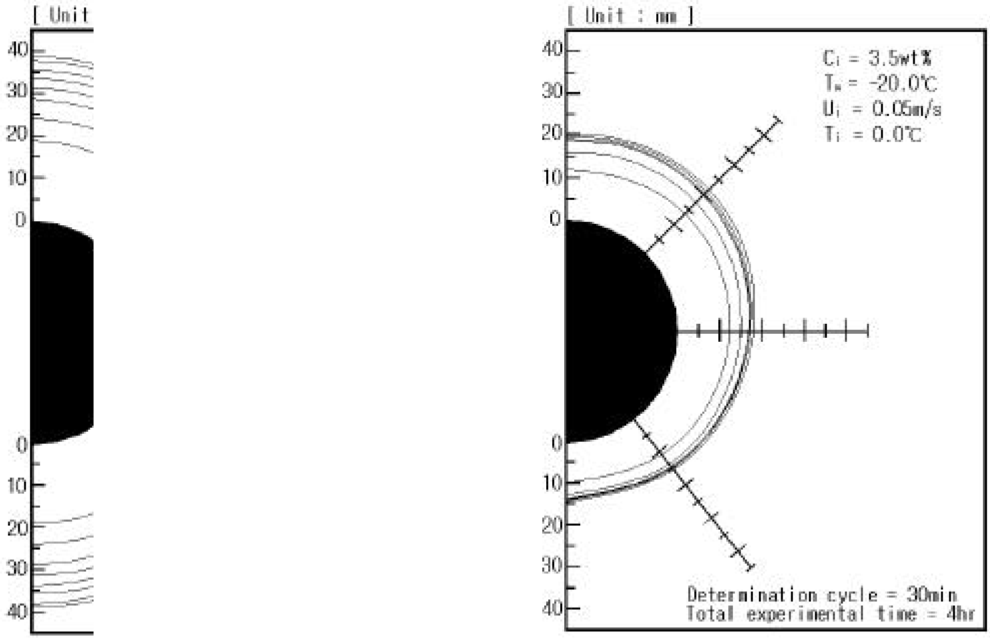
제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 해수의 동결거동

본 실험에 앞서 먼저 유동장을 동반하지 않은 정지상태하에서의 해수 동결실험을 행하여 그 해수동결거동의 메카니즘을 Fig. 4.1(a)에 그 가시화 사진을 Fig. 4.3에 나타내었다. Fig. 4.1(a)와 Fig. 4.3은 3.5wt%의 염화나트륨 수용액을 정지상태인 0.0m/s, 냉각면온도 -20.0℃로 유지하였을 경우에 실험개시후 4hr까지의 동결층의 성장거동을 30분 간격으로 보여준다. 그림으로부터 시간이 경과함에 따라 초기에는 냉각면과 동결계면의 온도구배가 크기 때문에 급속한 빙의 성장을 보이다가 30분 이후에는 빙의 두께가 열저항으로 작용하여 그 성장속도가 현저히 저하함을 관찰할 수 있으며, 각 부의 동결계면의 위치(빙의 두께)는 정방형으로 동일함을 알 수 있다. 실험종료 후 채취한 빙으로부터 염도를 측정한 결과를 Fig. 4.2의 실선부분으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 실험초기, 즉 동관 표면 근방에서는 염도가 매우 높게 측정되었는데, 이것은 실험초기에는 냉각이 급속하게 진행되므로 순간적으로 발생되는 침상빙의 동결층 내부로, 다량의 용질이 몰입하기 때문이다. 한편, 시간이 경과하면서 빙의 두께에 의한 동결속도의 저감으로 인한 용질 석출량의 감소로 빙의 외측 염분농도가 조금 낮게 유지됨을 볼 수 있다. 융해된 빙의 전체 농도는 2.2wt%로서 다소 높게 측정되었다.

다음으로 본 실험의 유동장을 동반한 해수동결거동의 메카니즘을 Fig. 4.1(b)에 그 가시화 사진을 Fig. 4.4에 나타내었다. Fig. 4.1(b)와 Fig. 4.4는 정지상태와 같은 조건에서 수용액의 유속을 0.05m/s로 유지하였을 경우에 마찬가지로 실험개시후 4시간까지의 동결층의 성장거동을 30분 간격으로 보여주고 있다. 초기에는 냉각면과 동결계면의 온도구배가 크기 때문에 급속한 빙의 성장을 보이다가 30분 이후에는 빙의 두께 및 유속의 영향으로 빙의 성장은 현저히 저하함을 알 수 있다. 그리고, 측면 및 하부의 빙의 형성은 수용액의 유동에 의한 대류작용으로 상부에 비하여 작아짐을 알 수 있으며, 전체 동결량도 정지상태하에서보다 현저히 작아짐을 알 수 있다. 또한 동결된 빙을 채취하여 정지상태하에서의 실험결과와 염도를 비교한 결과를 Fig. 4.2의 사선부분으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 유동장을 동반한 경우가 빙의 각부에서의 염분농도가 낮게 나타났고, 특히, 외측 염분농도가 다른 부분과 비교하여 매우 낮게 나타남을 알 수 있다. 이것은 시간이 경과하면서 동결속도의 저감으로 인한 용질 석출량의 감소와 함께 강제대류작용으로 인한 침상빙 형성의 억제 및 석출 용질의 제거 작용의 영향 때문이다. 융해된 빙의 전체농도는 1.7wt%로서 정지상태하에서의 2.2wt%와 비교하여 농도가 저감됨을 알 수 있었다.

Fig. 4.4 Fig. 4.6은 냉각면 온도가 -20.0℃, 수용액의 유속이 0.05m/s일 때의 수용액의 각 농도에 대하여 냉각시간의 변화에 따른 해수의 동결거동을 가시화한 사진이다. 그림으로부터 시간이 지남에 따라 동결량



(a) Ui = 0.00m/s　　　　　　　　(b) Ui = 0.05m/s

Fig. 4.1 Freezing behavior of sea water
; Ci = 3.5wt%, Tw = - 20.0℃, Ti = 0.0℃

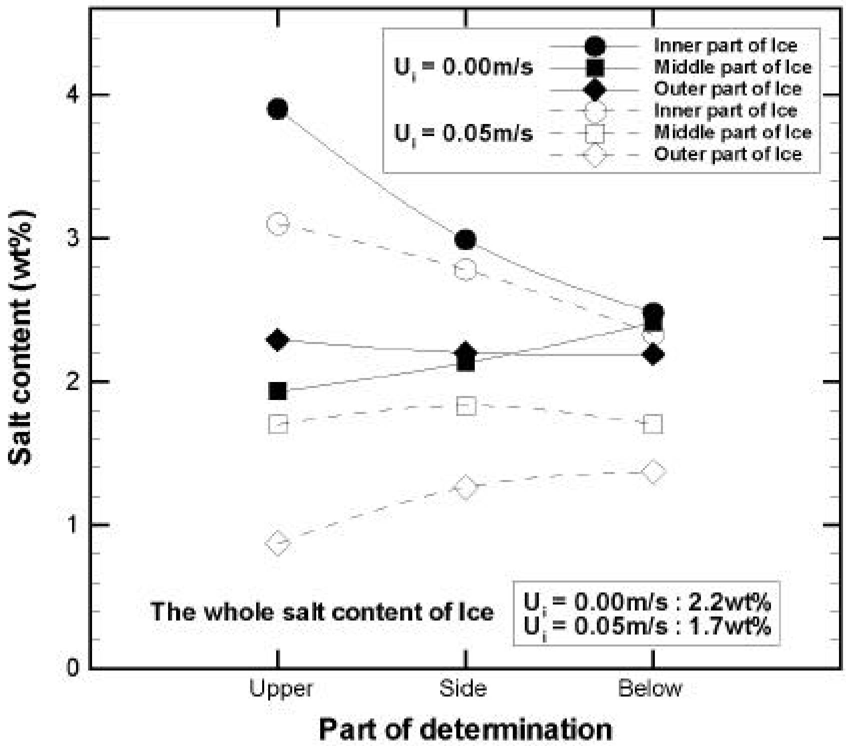
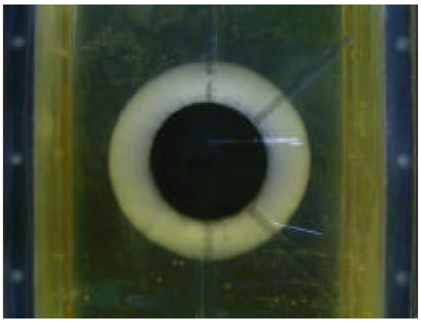
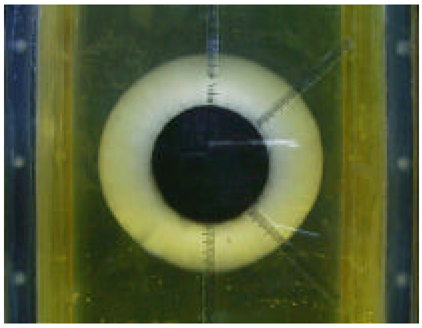


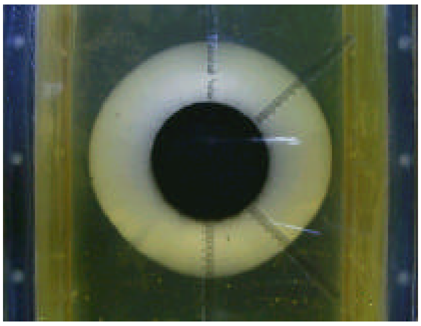
Fig. 4.2 Compare with distribution of salt content
; Ci = 3.5wt%, Tw = - 20.0℃, Ti = 0.0℃



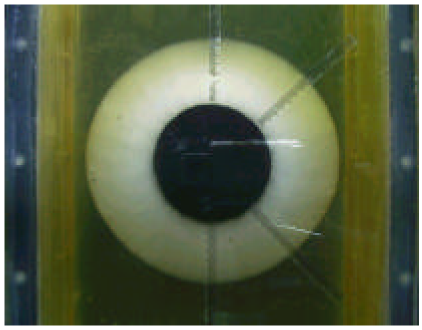
(a) 1hr



(b) 2hr

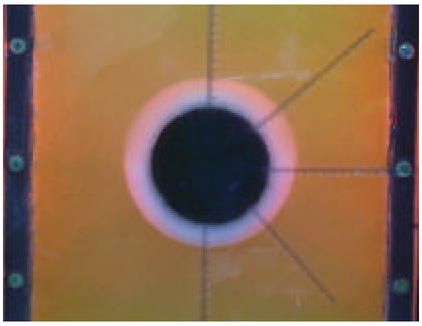


(c) 3hr

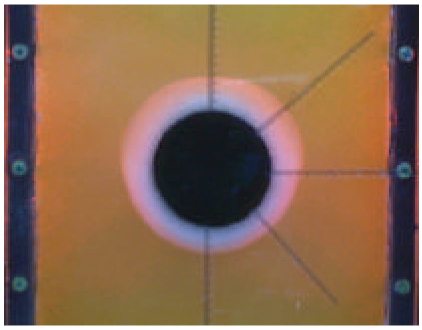


(d) 4hr

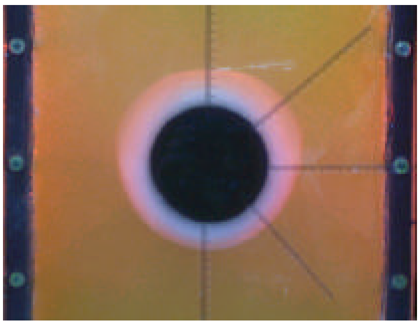
Fig. 4.3 Freezing Behavior of sea water
; Ci = 3.5wt%, Tw = -20.0℃, Ui = 0.00m/s,
Ti = 0.0℃



(a) 1hr



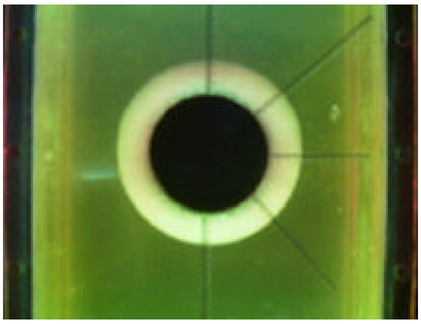
(b) 2hr



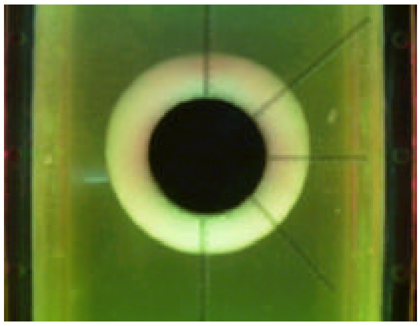
(c) 3hr

(d) 4hr

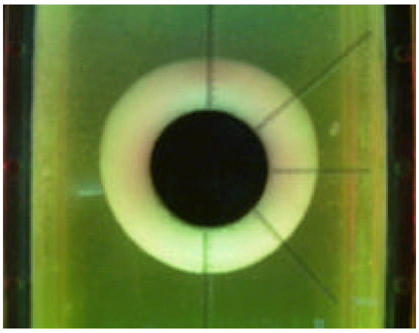
Fig. 4.4 Freezing Behavior of sea water
; Ci = 3.5wt%, Tw = -20.0℃, Ui = 0.05m/s,
Ti = 0.0℃



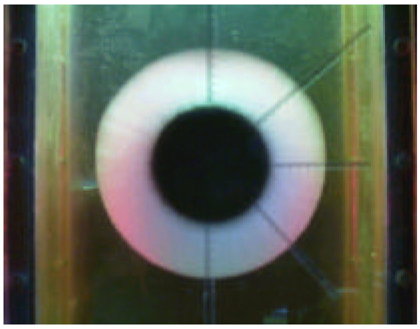
(a) 1hr



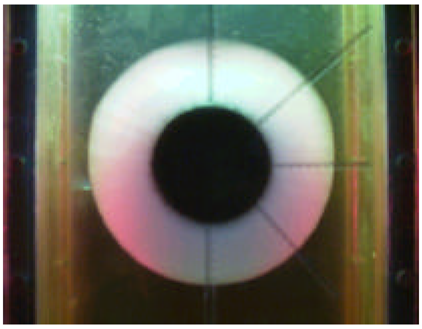
(b) 2hr



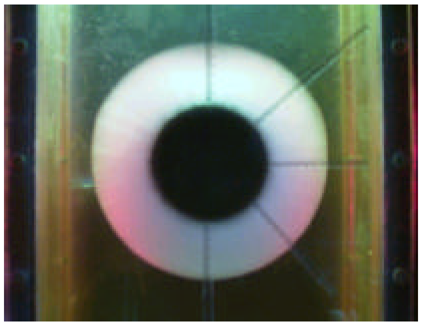
(c) 3hr



(d) 4hr

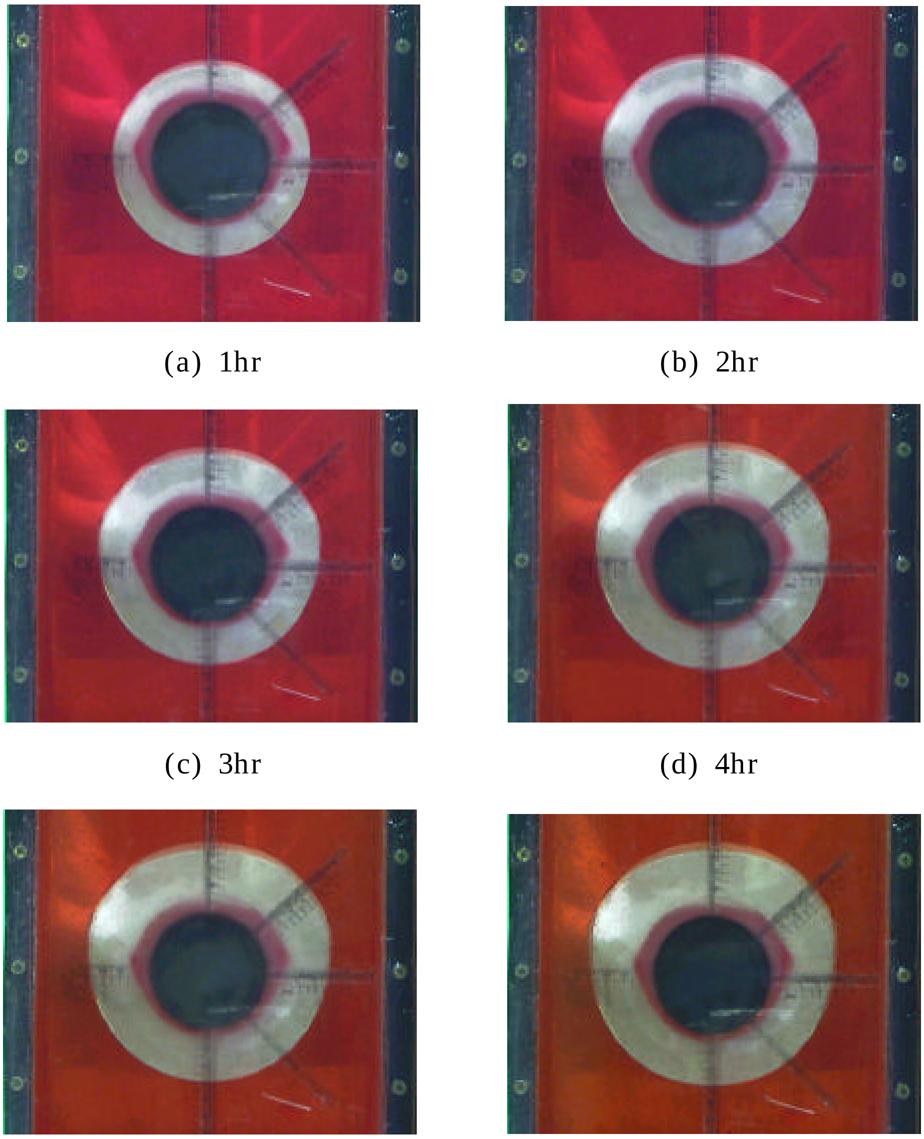


(e) 5hr



(f) 6hr

Fig. 4.5 Freezing Behavior of sea water
; Ci = 1.8wt%, Tw = -20.0℃, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃



(a) 1hr (b) 2hr

(c) 3hr (d) 4hr

(e) 5hr (f) 6hr

Fig. 4.6 Freezing Behavior of sea water
; Ci = 0.0wt%, Tw = -20.0℃, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃

즉 동결계면의 위치가 전체적으로 증가하고 있음을 알 수 있고, 시간당의 동결량변화율(동결속도)은 점차적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 동결층은 상부면(흐름의 하부)으로 갈수록 동결층이 점차 두꺼워지다가 상부면 근방에서 감소하는 형상을 하고 있으며, 또한 수용액의 농도가 낮을수록 동결량은 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 4.7에서 보는 바와 같이 시간이 경과할수록 동결층이 형성된 후류의 영역이 넓어지면서 상부면으로 갈수록 동결계면에서의 강제대류열전달율이 감소하기 때문이며, 후류로 인해 석출된 용질이 상부의 동결계면을 따라서 아래로 흐르고, 이것이 주류와 충돌하여 박리영역(Separated Region)을 형성하면서 상부면 근방에서 흐름의 박리로 인한 후류의 대류열전달율의 촉진 때문이다. 그리고, 이 박리영역은 시간이 경과할수록 상부측으로 이동하여 나타남을 알 수 있다.

해수동결거동에 의한 동결층의 형상을 살펴보면 다음과 같다. Fig. 4.8(a)와 (b)는 실험종료 후 채취한 0.0wt%와 3.5wt%의 빙의 형상을 가시화한 사진으로 순수액의 경우인 (a)는 초기 급속한 빙층의 형성으로 인한 기포의 몰입으로 빙의 내측면이 불투명하게 보이는 부분을 제외하곤 투명하게 나타남을 보여주고 있는 반면, 침상빙의 성장을 유발하는 수용액의 경우인 (b)는 용질의 함유와 침상빙의 영향으로 불투명한 저밀도의 동결층을 형성하고 있음을 보여주고 있으며, 동결된 빙의 형상은 측면과 하부면은 수용액의 유속의 영향에 의한 대류작용의 영향으로 융해의 영향을 받아 상부면에 비하여 동결량은 줄어들었으나, 상부면의

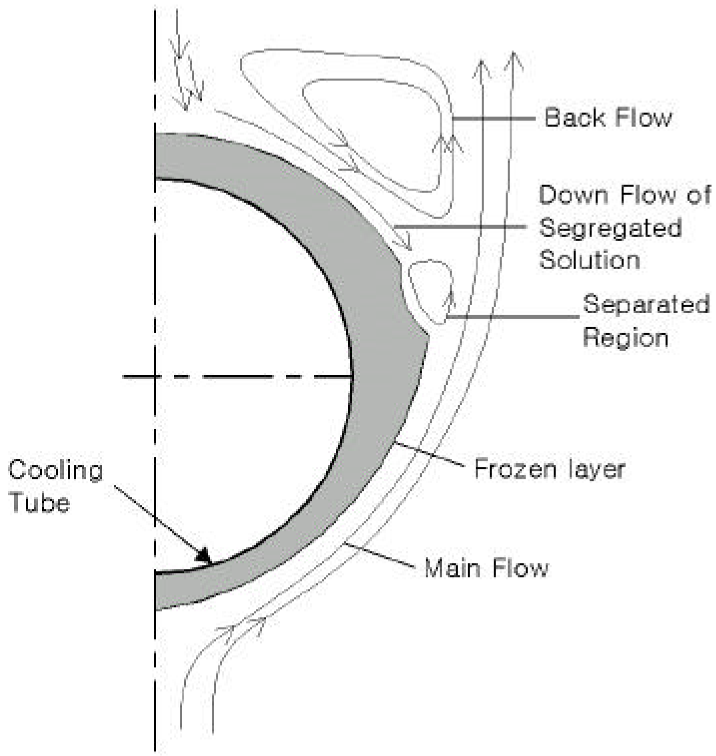
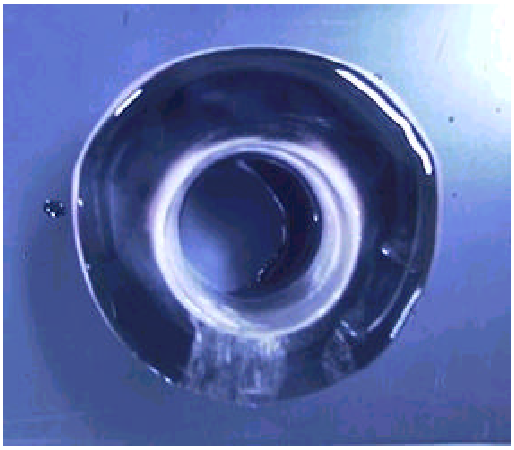


Fig. 4.7 Model of flow field



(a) Ci = 0.0wt%

(b) Ci = 3.5wt%

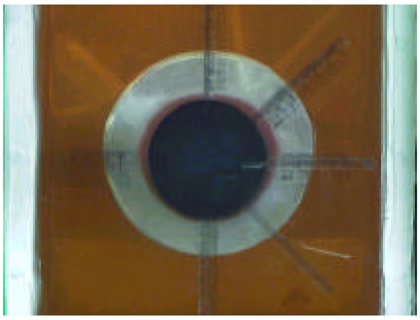
Fig. 4.8 Configuration of frozen layer

불투명하고 침상동결층을 알아 볼 수 있는 다소 푸석푸석한 저밀도의 동결층과는 달리 측면과 하부면은 외부빙으로 갈수록 침상동결층을 볼 수 없으며, 표면의 융해의 영향을 알 수 있는 다소 투명한 거울모양으로 된다.

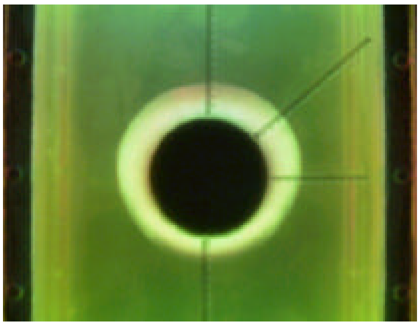
4.2 농도의 영향

Fig. 4.9 Fig. 4.11은 동결거동에 미치는 염화나트륨수용액 농도의 영향을 나타낸 것으로 냉각면 온도가 각각 -10.0℃, -15.0℃, -20.0℃이고, 수용액의 유속이 0.05m/s일 때의 수용액의 농도 3.5wt%가 정상상태에 도달한 실험종료시각을 기준으로 하여 염화나트륨수용액의 농도변화에 따른 동결층을 가시화하여 비교한 사진이다. 그림으로부터 농도가 저하됨에 따라 동결층의 두께가 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉 농도가 낮을수록 평형동결온도가 상승함으로써 동결량이 많아진다는 것을 알 수 있으며, 동결층은 상부면(흐름의 하부)으로 갈수록 점차 두꺼워지다가 상부면 근방에서 감소하는 형상을 하고 있다. 그리고, 1.8wt% 및 3.5wt%는 0.0wt%의 투명하고 견고한 빙에 대하여 동결층이 불투명하게 나타남을 확연하게 알 수 있으며, 내부빙이 외부빙에 비하여 다소 불투명하게 나타남을 알 수 있다. 이것은 실험초기 급속한 침상빙의 성장과 염분용질의 다량 몰입의 영향이 다소 크기 때문으로 생각되어지며, 시간이 경과하면서 외부쪽으로 갈수록 빙의 두께 및 수용액의 유속이 열저항으로 작용하여 동결계면에서의 열이동률이 줄어들기 때문에 침상빙의 성장이 억제되고 염분용질의 제거작용의 영향도 크게 된다. 0.0wt%의 가시화 사진을 보면 내부빙이 불투명한 것을 볼 수 있는데, 이것의 형상으로 초기의 급속한 빙의 성장을 예측할 수 있다.

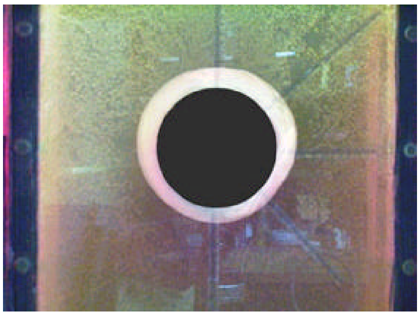
Fig. 4.12 Fig. 4.14는 Fig. 4.9 Fig. 4.11에서와 같은 조건에서 시간에 대한 동결량 및 동결속도의 변화를 나타낸 것이다. 동결량 및 동결



(a) Ci = 0.0wt%



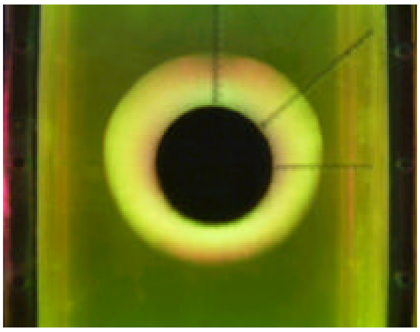
(b) Ci = 1.8wt%



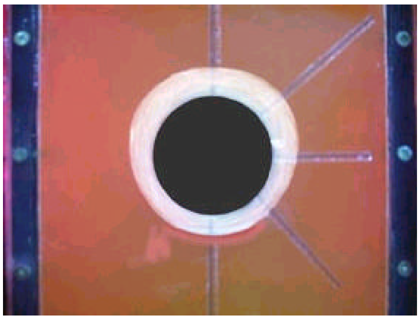
(c) Ci = 3.5wt%

Fig. 4.9 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior ; Tw = -10.0℃, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃, t = 4hr

(a) Ci = 0.0wt%



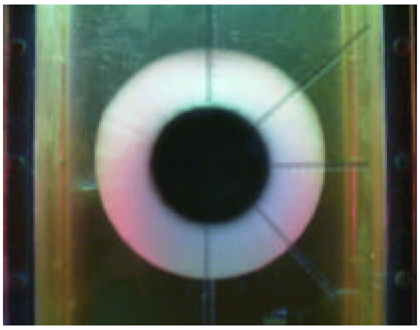
(b) Ci = 1.8wt%



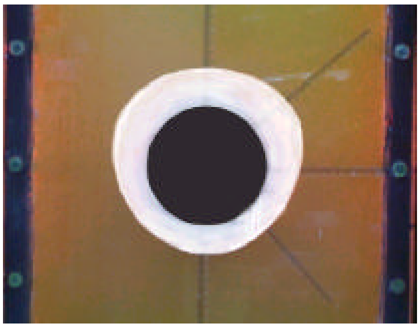
(c) Ci = 3.5wt%

Fig. 4.10 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior ; Tw = -15.0℃, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃, t = 4hr

(a) Ci = 0.0wt%

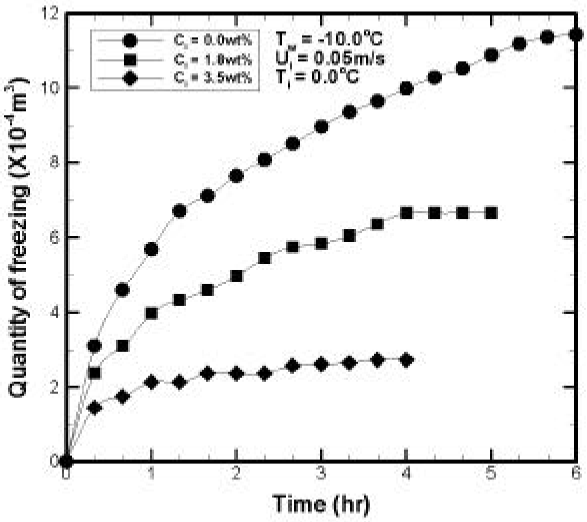


(b) Ci = 1.8wt%

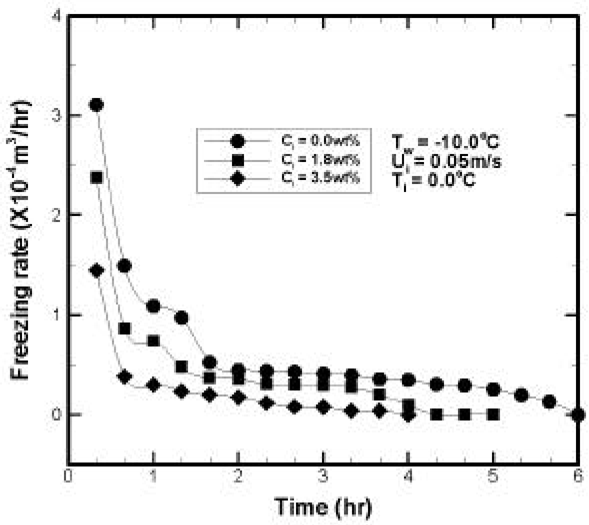


(c) Ci = 3.5wt%

Fig. 4.11 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior ; Tw = -20.0℃, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃, t = 4hr

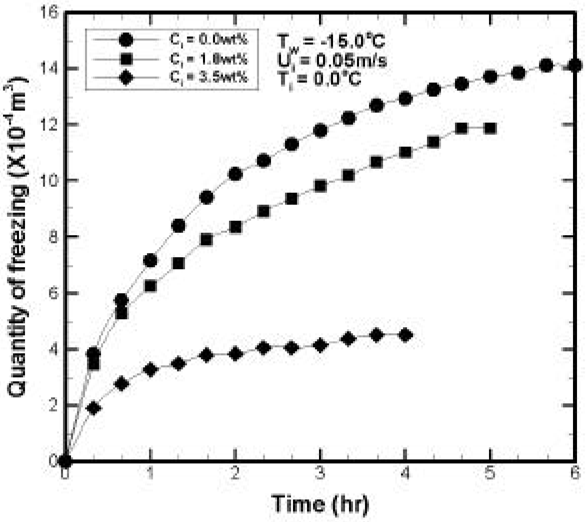


(a) Quantity of freezing

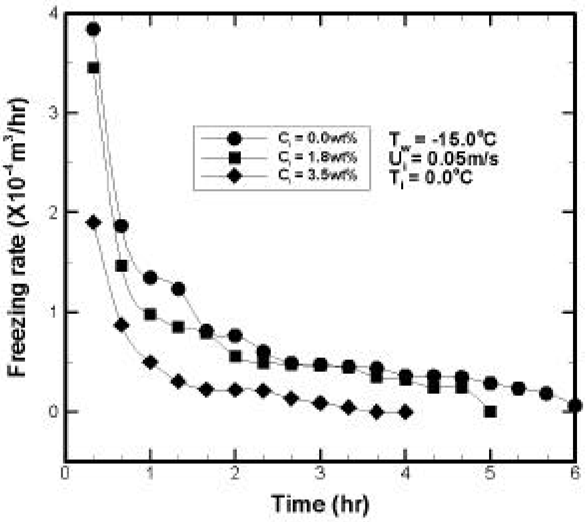


(b) Freezing rate

Fig. 4.12 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior
; Tw = - 10.0℃, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃

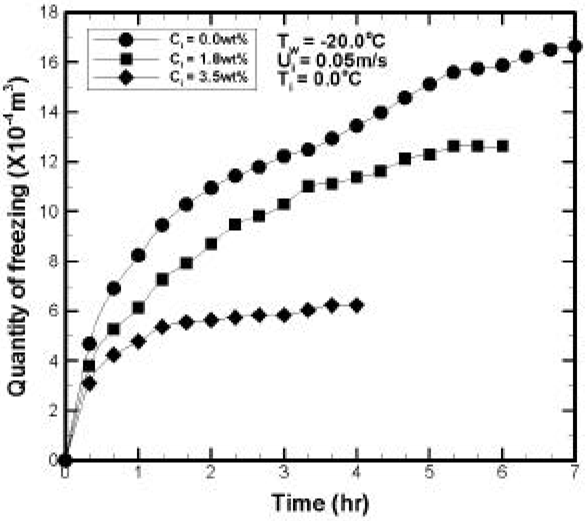


(a) Quantity of freezing

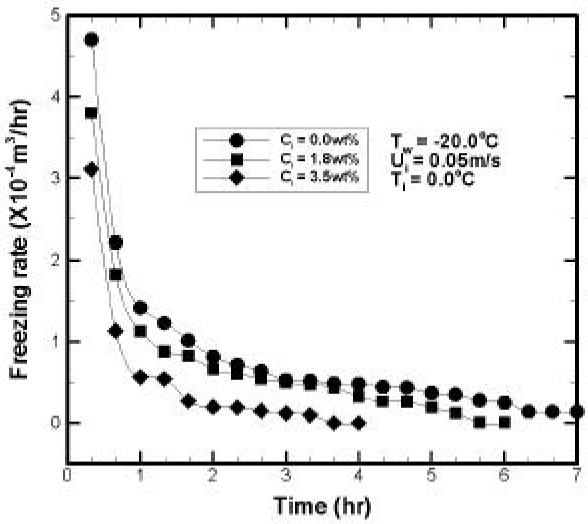


(b) Freezing rate

Fig. 4.13 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior
; Tw = -15.0℃, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃



(a) Quantity of freezing



(b) Freezing rate

Fig. 4.14 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior
; Tw = - 20.0℃, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃

속도는 수용액의 동결시 각 부의 빙의 두께를 측정하여 실험종료 후 매 20분마다의 빙의 체적을 산정하였으며, 그 체적변화율로부터 동결속도를 계산하였다. 그림으로부터 농도가 감소함에 따라 동결량 및 동결속도가 증가하는 것은 전술한 바와 같이 농도감소에 따라 평형동결온도(T_f)가 상승하여 동결계면과 냉각면과의 온도구배가 커짐으로 인해서 열유속이 증가하기 때문이다. 동결량 및 동결속도는 실험초기에 급속히 증가하지만 시간의 경과와 함께 점차 증가폭이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이것은 초기동결시 동결층이 얇아 동결계면과 냉각면과의 온도구배가 크게 되는 즉, 냉각면으로의 열저항이 작게 나타나기 때문이다.

Fig. 4.15는 같은 조건하에서 실험종료후의 빙을 채취하여 각 수용액의 농도에 대한 융해된 빙의 평균 염도를 나타낸 것으로 수용액의 염분농도가 낮을수록 융해된 빙의 평균염도가 낮게 유지됨을 알 수 있다. 이것은 1.8wt% 및 3.5wt%의 경우 침상빙의 형성을 유발함으로서 동결층 내부로 다량의 용질이 몰입하는 영향이 증대하기 때문이다.

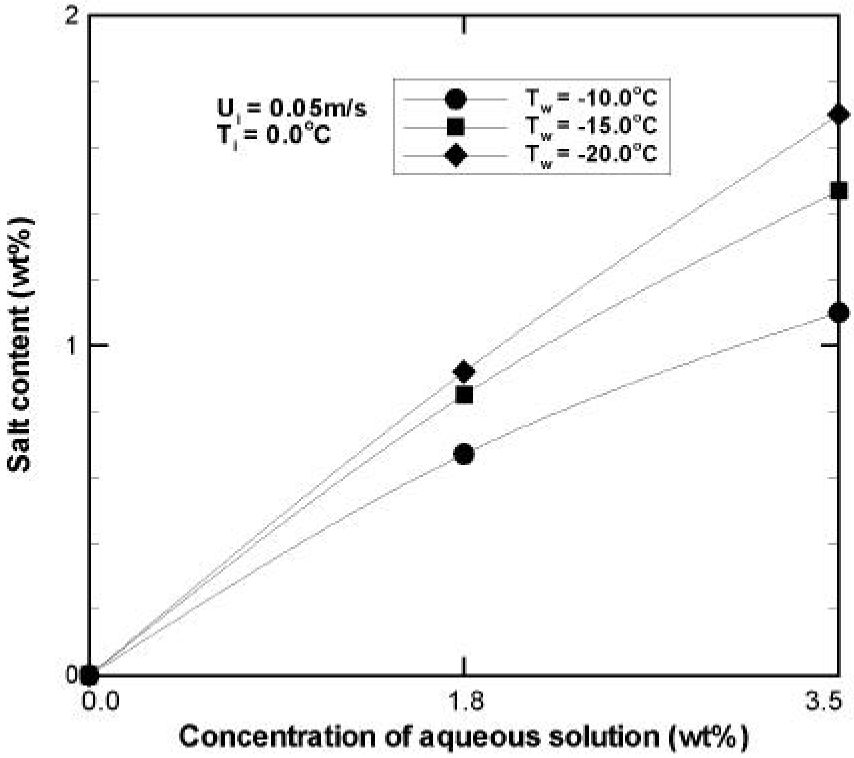


Fig. 4.15 Compared with the whole salt content of ice

4.3 냉각면 온도의 영향

Fig. 4.16 Fig. 4.18은 동결거동에 미치는 냉각면 온도의 영향에 따른 수용액의 정상상태의 동결거동을 가시화한 사진으로 수용액의 농도가 각각 0.0wt%, 1.8wt%, 3.5wt%이고, 수용액의 유속이 0.05m/s일 때, 실험 파라미터 중 가장 먼저 빙의 성장이 없는 정상상태에 도달한 시각을 기준으로 하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 냉각면의 온도가 낮을수록 동결량이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 전술한 바와 같이 냉각면의 온도가 낮을수록 동결계면에서의 온도구배가 커짐으로 인하여 냉각면으로의 열유속이 증가하여 동결량이 크게 되기 때문이다. 동결층은 마찬가지로 상부면(흐름의 하부)으로 갈수록 동결층이 점차 두꺼워지다가 상부면 근방에서 감소하는 형상을 하고 있다. 수용액의 농도 0.0wt%의 경우를 보면 내측빙의 불투명한 부분이 냉각면의 온도가 낮을수록 증가함을 알 수 있는데, 이것은 냉각면의 온도가 낮아질수록 냉각면과 동결계면의 사이에 온도구배 및 열유속이 증가하여 실험초기에 급속한 빙의 성장으로 기포 몰입의 양이 많아짐을 알 수 있다.

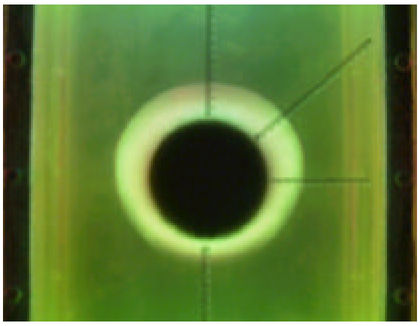
Fig. 4.19 Fig. 4.21는 Fig. 4.16 Fig. 4.18에서와 같은 조건에서 수용액 동결량 및 동결속도의 변화를 시간에 대하여 나타낸 것이다. 마찬가지로 냉각면 온도가 낮을수록 동결량 및 동결속도가 증가함을 알 수 있으며, 실험초기에 급속한 증가를 보이다가 실험시간이 경과하면서 그 증가폭이 둔화됨을 알 수 있다.

(a) Tw = - 10.0℃

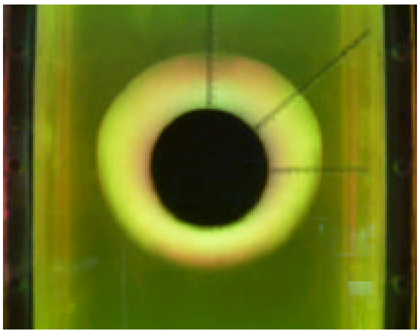
(b) Tw = - 15.0℃

(c) Tw = - 20.0℃

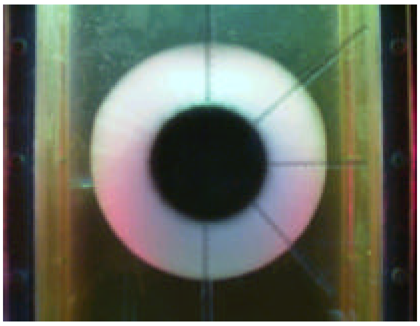
Fig. 4.16 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior
; Ci = 0.0wt%, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃, t = 6hr



(a) Tw = - 10.0℃

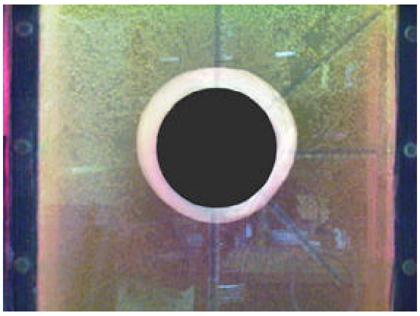


(b) Tw = - 15.0℃

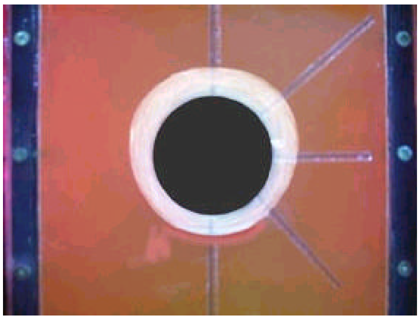


(c) Tw = - 20.0℃

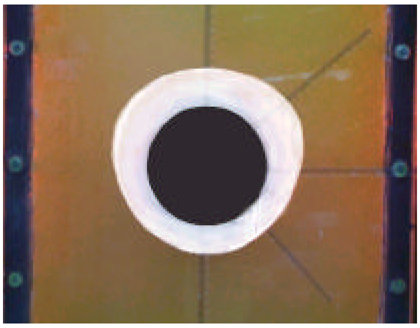
Fig. 4.17 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior
; Ci = 1.8wt%, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃, t = 5hr



(a) Tw = - 10.0℃

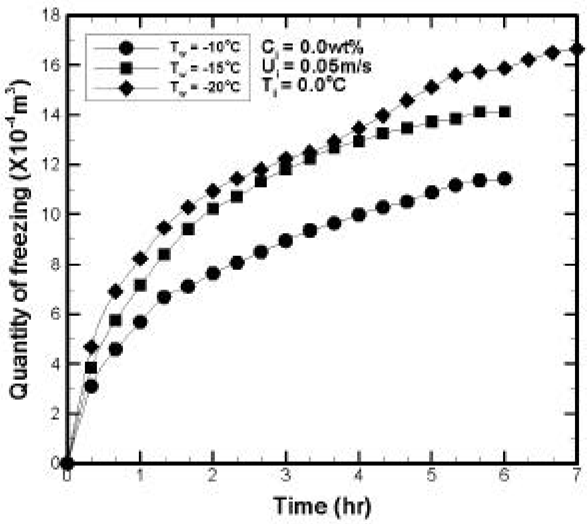


(b) Tw = - 15.0℃

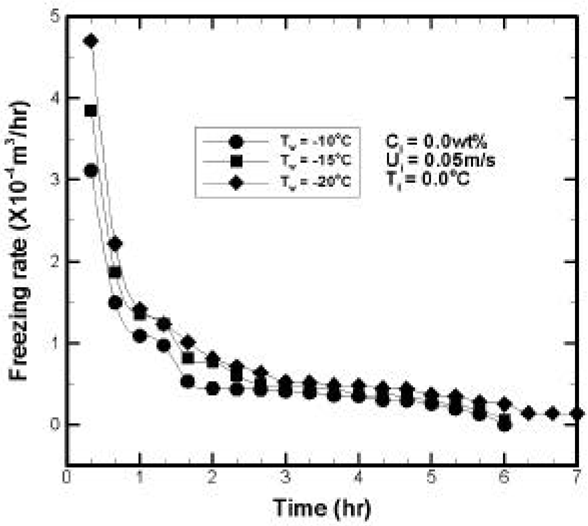


(c) Tw = - 20.0℃

Fig. 4.18 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior
; Ci = 3.5wt%, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃, t = 4hr

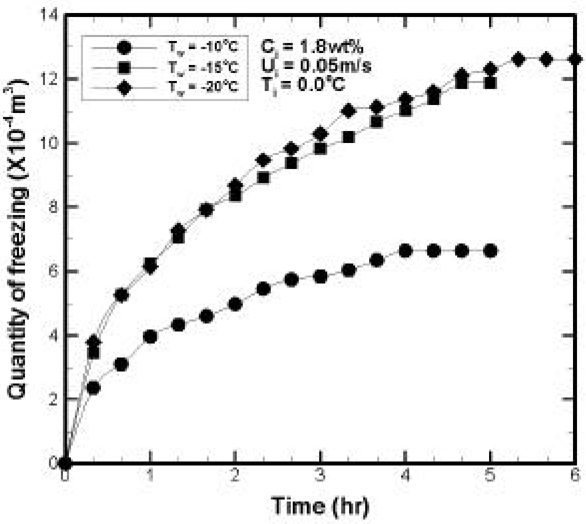


(a) Quantity of freezing

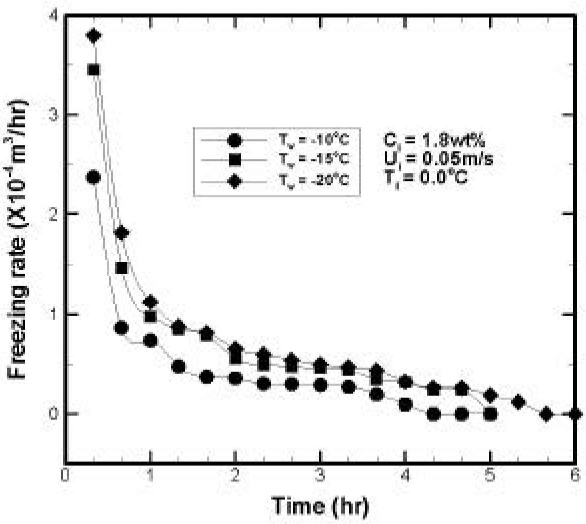


(b) Freezing rate

Fig. 4.19 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior
; Ci = 0.0wt%, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃

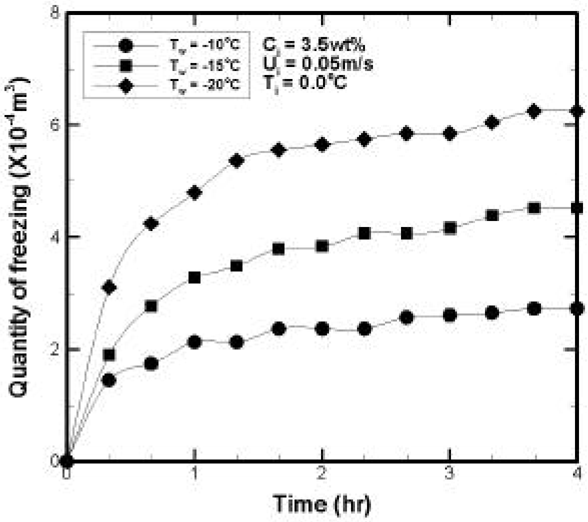


(a) Quantity of freezing

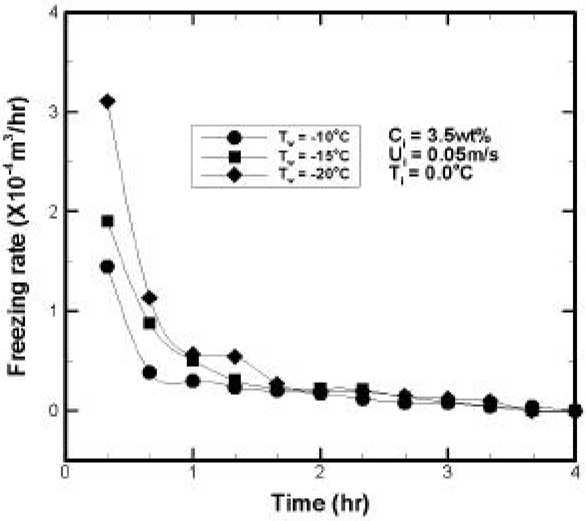


(b) Freezing rate

Fig. 4.20 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior
; Ci = 1.8wt%, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃



(a) Quantity of freezing



(b) Freezing rate

Fig. 4.21 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior
; Ci = 3.5wt%, Ui = 0.05m/s, Ti = 0.0℃

Fig. 4.22는 같은 조건하에서 실험종료후의 빙을 채취하여 각 수용액의 냉각면 온도에 대한 융해된 빙의 평균 염도를 나타낸 것으로서, 냉각면 온도가 높을수록 동결된 빙의 염도도 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 냉각면 온도가 낮을수록 초기의 동결속도가 증가하면서 염분용질 석출량의 증가와 두껍게 형성되는 침상빙의 형성으로 염분용질이 침상빙 사이에 몰입되는 영향이 증가하기 때문으로 생각된다.

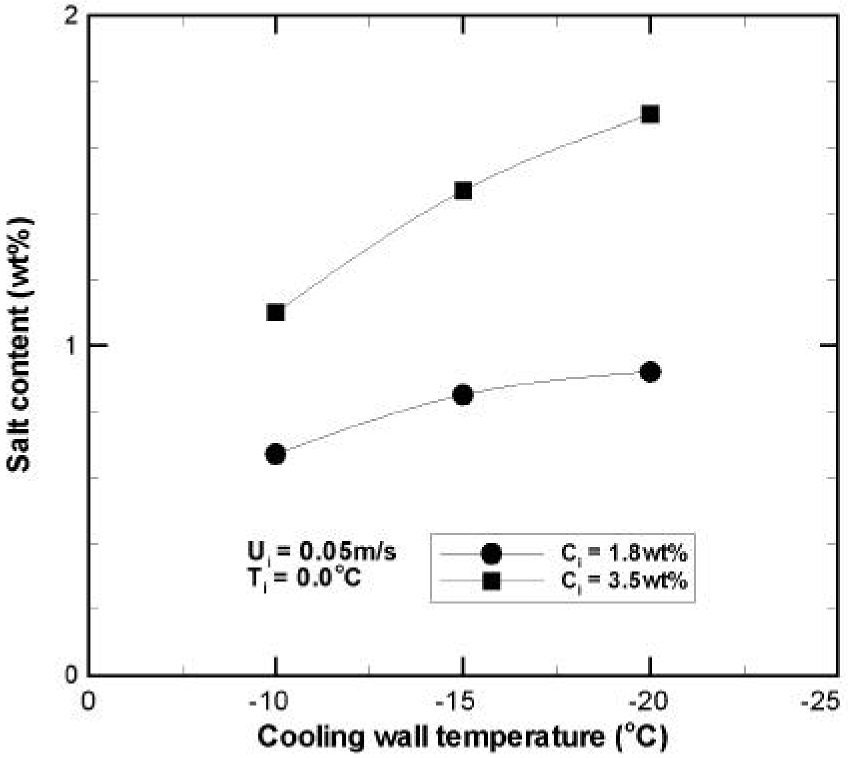
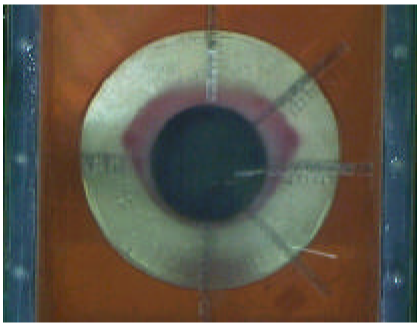


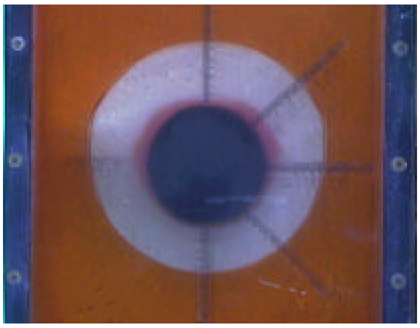
Fig. 4.22 Compared with the whole salt content of ice

4.4 유속의 영향

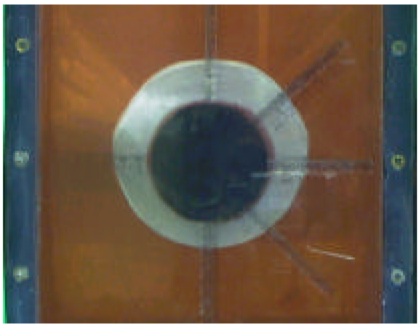
Fig. 4.23 Fig. 4.25는 동결거동에 미치는 염화나트륨수용액의 유속의 영향을 각각 수용액의 농도 0.0wt%, 1.8wt%, 3.5wt%이고, 냉각면 온도 -15℃일 때, 가장 먼저 정상상태에 도달한 수용액의 유속 0.1m/s의 실험종료 시각을 기준으로 하여 유속변화에 따른 동결층의 형상을 가시화한 사진이다. 그림으로부터 시험부에서의 유속이 빨라짐에 따라 동결량은 감소하고, 하부면의 빙의 형성이 측면이나 상부면에 비하여 확연히 작아짐을 알 수 있다. 이것은 유속의 증가와 함께 동결층과 유동해수와의 사이에 대류열전달이 촉진되므로서 동결량이 감소하기 때문이다. 또한 수용액의 유속이 0.02m/s로 느릴 경우에는 동결층의 형상이 정방형으로 거의 원형에 가깝게 나타나지만, 유속이 증가하면 상부면(흐름의 하부)으로 갈수록 동결층이 점차 두꺼워지다가 상부면 근방에서 감소하는 형상이 확연하게 나타나고 있다. 이것은 1.8wt%와 3.5wt%의 경우에 있어서 유속의 증가로 인하여 전술한 바와 같이 석출되었던 용질이 동결층표면에 따라서 아래로 흐르고, 주류와 충돌하여 발생된 박리점에서의 유동영역이 넓어지기 때문이다. 1.8wt%와 3.5wt%의 경우 내부빙이 외부빙에 비하여 불투명하게 나타남을 알 수 있는데 그 이유는 전술한 바와 같으며, 3.5wt%의 경우에서는 가시화 사진으로는 판단이 불가능하나 1.8wt%의 경우를 보면 유속이 증가할수록 유속의 영향을 직접 받게 되는 하부면의 빙이 투명하게 나타남을 알 수 있다. 이것은 유속이 증가할수록 동결계면과 수용액간의 석출염분용질의 제거작용의 영향이 크



(a) Ui = 0.02m/s

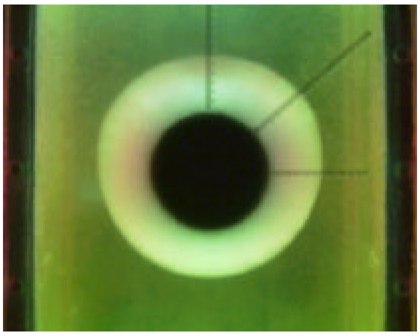


(b) Ui = 0.05m/s

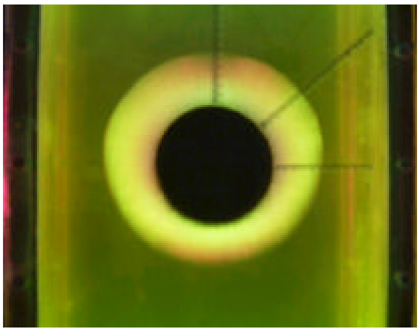


(c) Ui = 0.1m/s

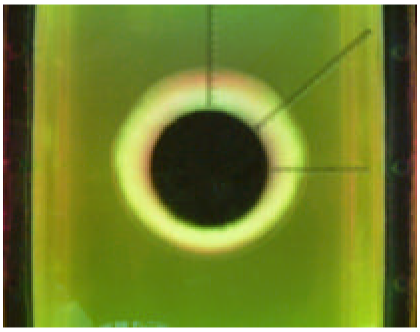
Fig. 4.23 Effect of flow velocity on freezing behavior ; Ci = 0.0wt%, Tw = -15.0℃, Ti = 0.0℃, t = 5hr



(a) Ui = 0.02m/s

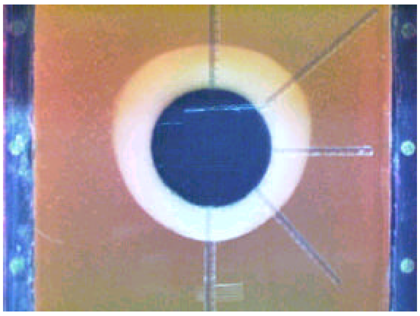


(b) Ui = 0.05m/s

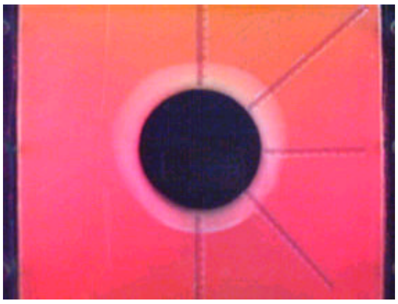


(c) Ui = 0.1m/s

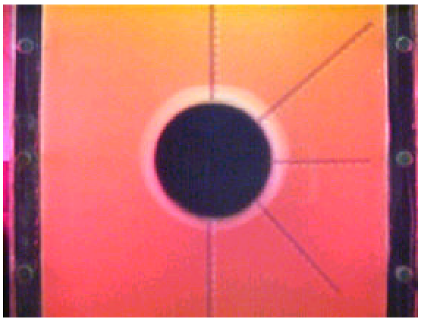
Fig. 4.24 Effect of flow velocity on freezing behavior
; Ci = 1.8wt%, Tw = -15.0℃, Ti = 0.0℃, t = 4hr



(a) Ui = 0.02m/s



(b) Ui = 0.05m/s



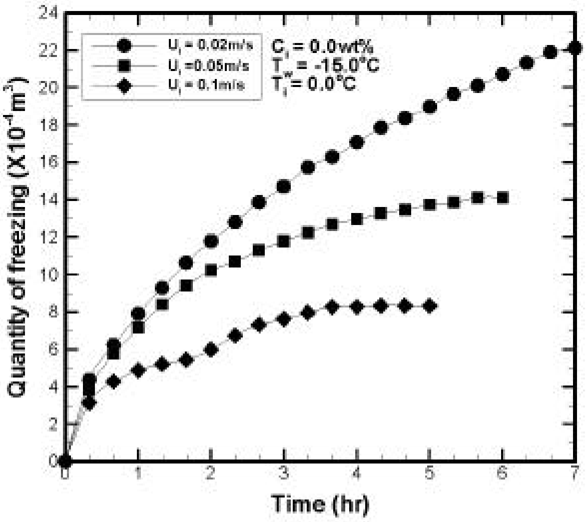
(c) Ui = 0.1m/s

Fig. 4.25 Effect of flow velocity on freezing behavior ; Ci = 3.5wt%, Tw = -15.0℃, Ti = 0.0℃, t = 3hr

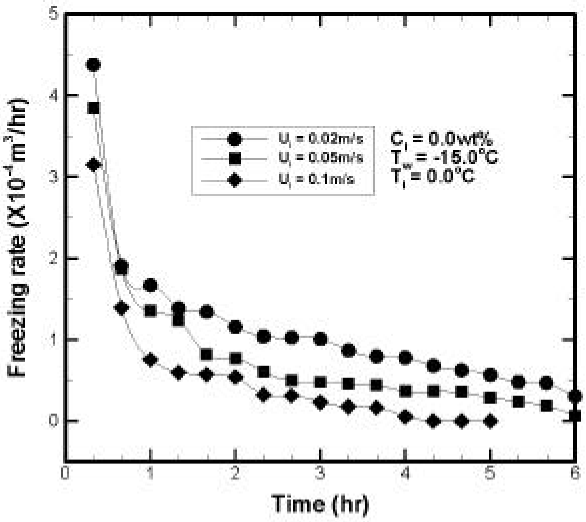
게 나타나기 때문이다.

Fig. 4.26 Fig. 4.28은 Fig. 4.23 Fig. 4.25에서와 같은 조건에서 수용액의 유속에 따른 시간에 대한 동결량 및 동결속도의 변화를 나타낸 것으로 그림에서 알 수 있듯이 유속이 증가함에 따라 동결량 및 동결속도가 감소함을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 유속의 증가와 함께 동결층과 유동해수와의 사이에 대류열전달이 촉진되고 후류측의 박리영역이 넓어짐으로서 동결량 및 동결속도가 감소하기 때문이다.

Fig. 4.29는 같은 조건하에서의 실험종료후 채취한 빙의 각각의 평균 염분농도를 나타낸 것으로 유속이 증가함에 따라 빙의 평균 염분농도가 작아짐을 알 수 있다. 이것은 유속의 증가로 인하여 유도된 석출 염분용질의 제거 효과가 증가하기 때문으로 판단된다. 해수담수화에 있어 짭짤한 물(Brackish Water)의 기준이 1.0wt%이하임을 고려할 때 본 수용액의 농도 3.5wt%의 경우에 있어 그림에 나타난 바와 같이 유속이 빠를수록 빙의 염분농도는 Brackish Water의 조건에 근접하게 나타남을 알 수 있다.

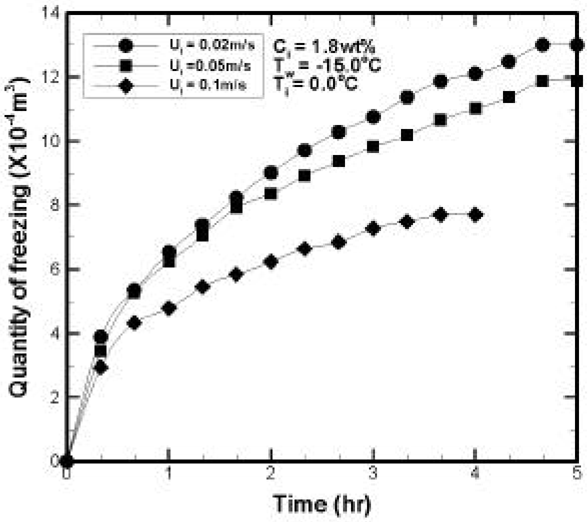


(a) Quantity of freezing

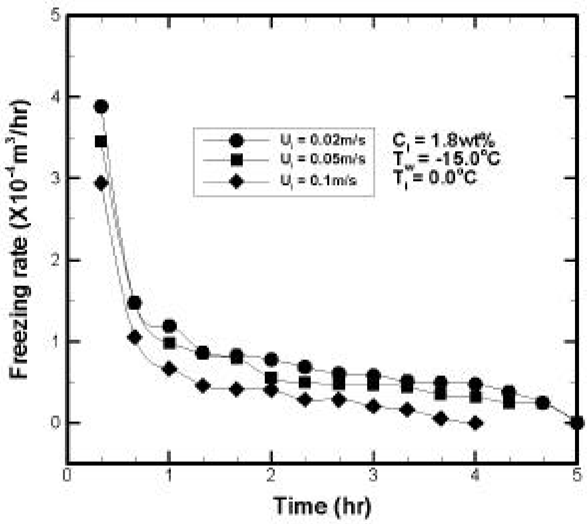


(b) Freezing rate

Fig. 4.26 Effect of flow velocity on freezing behavior
; Ci = 0.0wt%, Tw = -15.0℃, Ti = 0.0℃

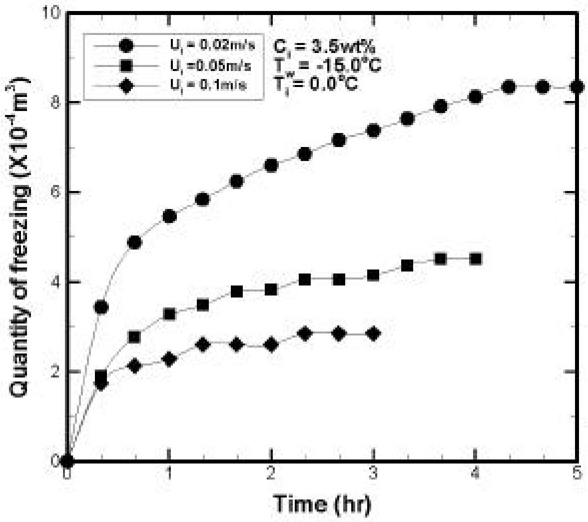


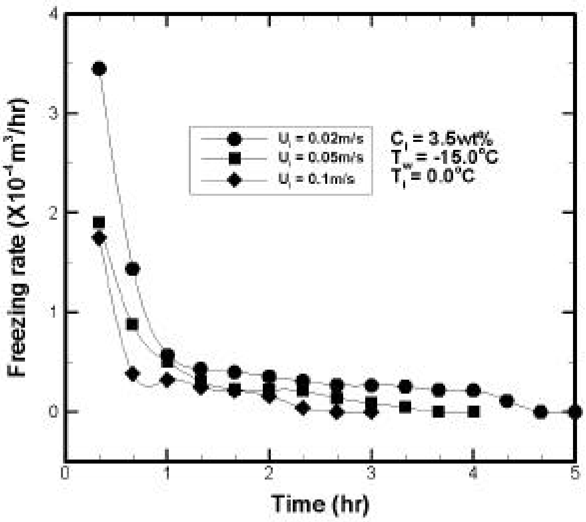
(a) Quantity of freezing



(b) Freezing rate

Fig. 4.27 Effect of flow velocity on freezing behavior ; Ci = 1.8wt%, Tw = - 15.0℃, Ti = 0.0℃





(b) Freezing rate

Fig. 4.28 Effect of flow velocity on freezing behavior ; Ci = 3.5wt%, Tw = -15.0℃, Ti = 0.0℃

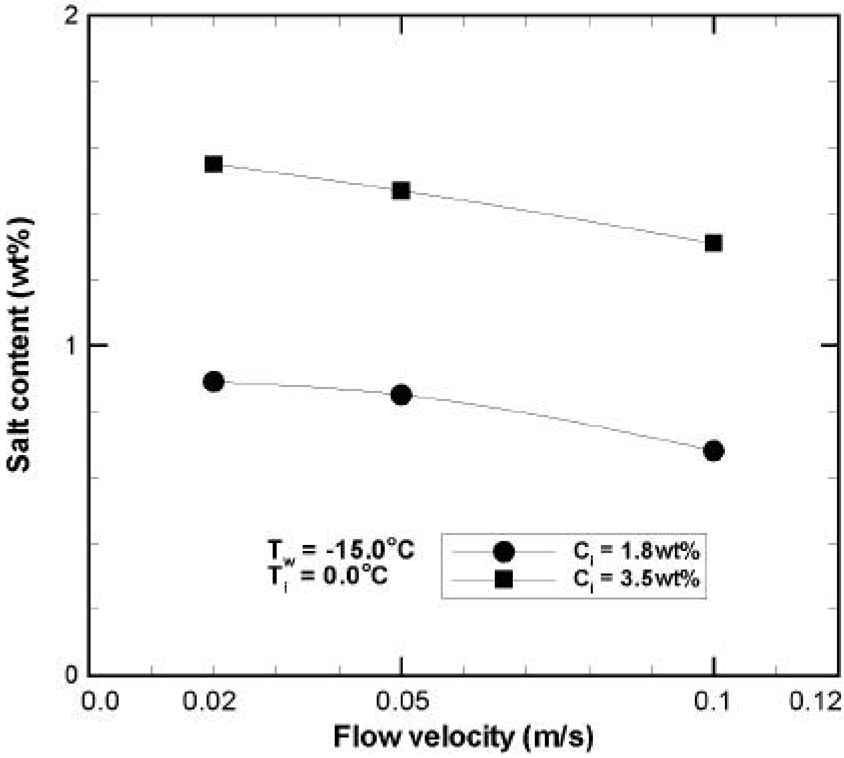


Fig. 4.29 Compared with the whole salt content of ice

4.5 동결량의 무차원정리

본 실험의 연구결과로부터 동결량은 시간의 경과, 냉각면 온도의 감소, 수용액 농도의 감소 및 유속의 감소와 함께 증가함을 알 수 있다. 본 절에서는 실험에서 얻어진 동결량에 대한 결과들을 정리하여 무차원 수식화를 시도하였다. 본 실험범위내에서 동결량에 영향을 미치는 인자들을 정리하여 나타내면 무차원 동결량 R_f는 (4.1)식으로 표시가 가능하다.

$$R_f = f(\theta_w, R_e) \tag{4.1}$$

여기서, R_f (무차원동결량) $= \dfrac{V_f}{H_o}$,

θ_w (무차원냉각면온도) $= \dfrac{(T_f - T_w)}{(T_o - T_f)}$,

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

이다. θ_w를 구할 수 없는 0.0wt%를 제외한 1.8wt%, 3.5wt%의 모든 자료를 최소자승법을 이용하여 θ_w와 Re의 함수로서 무차원 동결량 R_f를 정리하면 Fig. 4.30으로 나타낼 수 있다. 따라서 그림으로부터 무차원 동결량은 ±20%의 범위 내에서 (4.2)식으로 정리될 수 있다.

$$R_f = 8.73\ \theta\, w0.83\ Re\text{-}0.60 \tag{4.2}$$

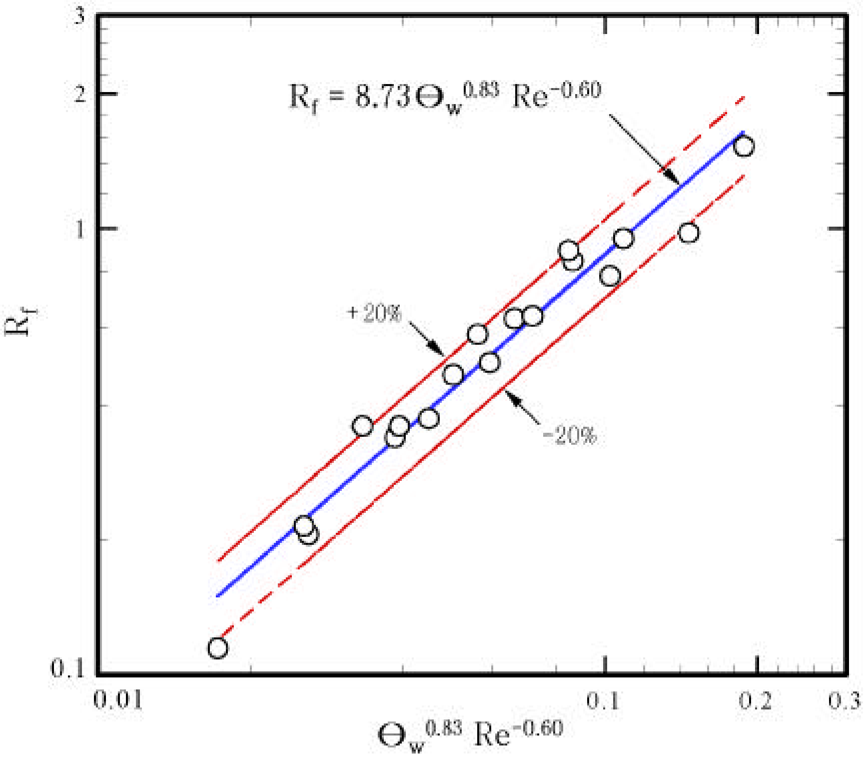


Fig. 4.30 Nondimensional frozen quantity

제 5 장 결　론

본 연구에서는 LNG 폐냉열에너지를 이용한 해수동결 담수화장치의 개발 및 설계기술의 확립에 있어서 핵심이 되는 해수동결거동에 관한 정성적, 정량적 기초자료를 확보하기 위한 계속적인 연구과정의 일환으로서 유동장을 동반한 원관외 해수동결거동의 메카니즘과 염분 농도, 냉각면 온도 및 유속이 해수의 동결거동에 미치는 영향 등을 가시화를 포함하는 실험적인 방법으로 연구 검토하여 본 실험의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 염화나트륨수용액의 농도 및 냉각면 온도가 낮고, 유속이 느릴수록 평형동결온도의 상승과 동결계면과 냉각면과의 사이에 온도구배가 커짐으로서 냉각면으로의 열유속이 증가하기 때문에 동결량 및 동결속도는 증가한다.

(2) 냉각면온도가 높을수록 초기의 급속한 침상빙의 성장이 억제되어지고, 유속이 빠를수록 수용액과 동결계면과의 사이에 염분용질의 제거작용의 영향이 크게 되기 때문에 수용액의 유속이 빠르고, 냉각면 온도가 높을수록 그리고 초기 염분농도가 낮을수록 염도가 낮은 고밀도의 빙을 얻을 수 있다.

(3) 실험초기 냉각이 급속하게 진행되므로 순간적으로 발생되는 침상빙의 동결층 내부로 다량의 염분용질이 몰입하기 때문에 동결속도가 큰

내부빙이 외부빙에 비하여 염도가 높게 나타나고, 시간이 경과하면서 빙의 두께 및 유속의 영향으로 동결속도의 저감으로 인한 용질 석출량의 감소와 함께 대류작용의 영향으로 침상빙 억제 및 석출용질의 제거작용의 영향으로 외측빙의 염분농도가 낮게 나타난다.

(4) 수용액의 유속의 증가와 함께 동결층과 유동해수와의 사이에 대류열전달이 촉진되므로서 동결량이 감소하기 때문에 유속이 증가할수록 동결량은 감소하고, 하부면의 빙의 형성이 측면이나 상부면에 비하여 확연하게 줄어듬을 알 수 있다.

(5) 냉각면의 온도가 높고, 수용액의 유속이 증가할수록 융해작용의 영향이 높아지기 때문에 측면과 상부면에 홈이 형성되고, 더욱이 융해가 진행되면 표면은 매끄러워지며, 특히 동결층의 하부면에서 염도가 매우 낮은 고밀도의 빙을 얻을 수 있다.

(6) 본 연구의 범위내에서 염화나트륨 수용액의 무차원 동결량은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$R_f = 8.73\ \theta_w^{0.83}\ Re^{-0.60}$$

참 고 문 헌

(1) Gleick.P.H., "Water in Crisis"(1993)

(2) 김병덕, 김재윤, "물부족 현황과 국내 담수화기술개발 현황", 한국박용기관학회 춘계학술강연회, pp. 105 109(1996)

(3) 김병덕, 장용재, 이유환, "해수담수화의 필요성 및 지역적 타당성", 기계와 재료 8권 3호, pp. 6 10(1996)

(4) 김명환, 김용모, 김철환, "LNG냉열이용과 축냉시스템의 장래", 한국박용기관학회 논문집, 제18권, 제5호, pp. 1 11(1994)

(5) 김명준, 김명환, 박형진, "구형용기의 하부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 기초적 연구", 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회 논문집, 제1권, pp. 347 353(1997)

(6) 박종덕, 김명준, 김명환, "원관내의 해수동결거동에 관한 실험적 연구", 한국박용기관학회 춘계학술강연회, pp. M-1 M-7(1998)

(7) 최부홍, 김명준, 김명환, "구형용기의 상부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 실험적 연구", 한국박용기관학외 추계학술 강연회, pp. 23 29 (1998)

(8) 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)

(9) 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)

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

(11) Beckermann, C., and Viskanta, R., "Double-Diffusive Convection During Dendritic Solidification of a Binary Mixture", Physico Chemical Hydrodynamics, Vol. 10, No. 2, pp. 195 213(1988)

(12) 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)

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

(14) **林勇二郎、加 信治**, “ **溶液の凝固についての研究(第一報, 凝固の過程と移動速度論)**”, **第17回日本 熱シンポジウム講演論文集**, pp. 523-525 (1980)

(15) **福迫尚一郎, 葉英男**,“**低溫環境下の 熱現象とその 用**”, **養賢堂 行**(1996)

(16) 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)

(17) 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)

(18) O'Callaghan, O. G., Cravalho, E. G., and Huggins, C. E., "Instability of the Planer Freezing Front During Solidification of an Aqueous Binary Solution", J. of Heat Transfer, Vol. 102, pp. 673-677(1980)

(19) Mullins, W. W., and Sekerka, R. F., "Stability of a Planer Interface During Solidification of a Dilute Binary Alloy", J. of Applied Physics, Vol. 35, pp. 444-451(1964)

(20) Sekerka, R. F., "A Stability Function for Explicit Evaluation of the Mullins-Sekerka Interface Stability Criterion", J. of Applied Physics, Vol. 36, pp. 264-268(1965)

(21) Mullins, W. W., and Sekerka, R. F., "Morphological Stability of a Particle Growing by Diffusion or Heat Flow", J. of Applied Physics, Vol. 34, pp. 323-329(1963)

(22) Bennon, W., D., and Incropera, F. P., "A Continuum Model for Momentum, Heat and Species Transport in Binary Solid-Liquid Phase Change Systems - Ⅰ. Model Formulation", Int, J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, pp. 2161-2170(1987)

(23) Patanker, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, New York(1980)

(24) Bennon, W., D., and Incropera, F. P., "A Continuum Model for Momentum, Heat and Species Transport in Binary Solid-Liquid Phase Change Systems - Ⅱ. Application to Solidification in a Rectangular Cavity", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, pp.2171-2187(1987)

(25) Bennon, W., D., and Incropera, F. P., "Numerical Analysis of Binary Solid-Liquid Phase Change Using a Continuum Model", Numerical Heat Transfer, Vol. 13, pp. 277-296(1988)

(26) Bennon, W., D., and Incropera, F. P., "Numerical Simulation of Binary Solidification in a Vertical Channel with Thermal and Solutal Mixed Convection", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp. 2147-2160(1988)

(27) Bennon, W., D., and Incropera, F. P., "An Experimental Investigation of Binary Solidification in a Vertical Channel with Thermal and Solutal Mixed Convection", J. Heat Transfer, Vol. 111, pp. 706-712(1989)

(28) Christensen, M. S., and Incropera, F. P., "Solidification of an Aqueous Ammonium Chloride Solution in a Rectangular Cavity - Ⅰ. Experimental Study", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, pp. 47-67(1989)

(29) Christensen, M. S., Bennon, W. D. and Incropera, F. P., "Solidification of an Aqueous Ammonium Chloride Solution in a Rectangular Cavity - Ⅱ. Comparison of Predicted and Measured Results", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, pp. 69-79(1989)

(30) Engel, A. H. H., and Incropera, F. P., "Solidification of a Binary Mixture in a Square Cavity with a Free Surface", Wärme-und Stoffübertragung, Vol. 24, pp. 279-288(1989)

(31) M.W.Kellog Company, “Saline Water Conversion Engineering Data Book”, Office of Saline Water Report, U.S. Department of the Interior, Washington D.C.(1972)

맺 음 말

본 논문이 완성되기까지 부족한 저를 이끌어 주시고, 학문적, 정신적으로 큰 도움을 주신 김명환 교수님께 진심으로 감사 드립니다.

언제나 주위에서 많은 조언과 자상한 가르침을 주시고, 소중한 시간을 할애하여 저의 논문을 심사해 주신 오 철 교수님과 윤석훈 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

본 논문을 완성하는 데까지 큰 도움을 주신 실험실의 김명준님, 최부홍님, 박종덕님, 김성태님, 박상균님, 박대식님, 최재혁님과 항상 주위에서 많은 조언을 아낌없이 해주신 여러 선후배님들께 깊은 고마움을 올립니다.

끝으로 항상 뒤에서 헌신적인 사랑과 정성으로 뒷바라지해 주신 어머님과 언제나 저의 곁에서 격려와 보조를 아끼지 않으셨던 형님내외분, 누님내외분, 그리고 사랑하는 김은영님에게 이 모든 공을 돌립니다.