

工學碩士 學位論文

동결분리방법을 이용한 폐수농축에
관한 실험적 연구

An Experimental Study on Waste Water Concentration by
Separating Method of Freezing

指導教授 吳 喆

2006年 8月

韓國海洋大學校 大學院

機關 시스템 工學科

金正植

本 論文을 金正植의 工學碩士學位論文으로 認准함

主審 尹 錫 勳 印

副審 金 京 根 印

副審 吳 喆 印

2006年 8月 30日

韓國海洋大學校 大 學 院

機 關 시 스템 工 學 科 金 正 植

목 차

Abstract	iii
사용기호	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 종래의 연구	5
제 2 장 실험장치 및 실험방법	8
2.1 실험장치	8
2.2 실험방법	12
제 3장 냉각원관의 열전달해석	15
제 4 장 수직원관에서 염화나트륨수용액의 동결	21
4.1 냉각면 온도에 따른 영향	21
4.2 농도에 따른 영향	28

4.3 유동방법에 따른 영향	36
제 5 장 수직원관에서 폐수의 농축	52
5.1 냉각면 온도에 따른 영향	52
5.2 유동에 따른 영향	61
5.3 초기 동결얼음 두께에 따른 영향	64
제 5 장 결 론	72
참 고 문 헌	74
감사의 글	76

**An Experimental Study on Waste Water Concentration by
Separating Method of Freezing
JUNG-SIK, KIM**

Department of Marine Engineering System
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

Water is one of the most valuable material in this world and it is connected directly to all organisms including human being. But currently many countries is experiencing a water shortage and this condition will be deteriorated. Another problem which threatens the mankind with water shortage is water pollution. A lot of pollutants are discharged as a result of population growth and industrial development and the quantity is increasing continuously. Specially water pollution inflicts a fatal effect on not only the mankind but also an organism. So various control techniques were developed and applied to treat pollutants but most of the methods was suitable to treat a great quantity of waste water.

This study was progressed on the freezing behavior of waste water in relation to freeze concentration method useful to waste water treatment system of small and middle size and which can re-use purified water.

First, the fundamental experiments were carried out for a variety of parameters on a NaCl aqueous solution. Afterward, the waste water composed with the lead(Pb) and the chrome(Cr) was used in actual experiments. The research on the freezing behavior of NaCl aqueous solution has been continuously progressed and this research results were applied to actual experiments.

The fundamental experiments was performed to investigate freezing behavior of NaCl aqueous solution along a vertical cooled circular tube with bubbly flow. The experiments were carried out for a variety of parameters, such as air-bubble injection method, and cooling wall temperature. It was found that the experimental parameters gave a great influence on the freezing rate and the salinity of the frozen layer.

The object of this actual experiments is comparing a pollutant contain of the frozen layer and of an aqueous solution by cooling wall temperature, a flow field effect and a initial thickness of frozen layer. In this experiment, the followings was applied as cooling wall

temperature: -2°C , -7°C , -12°C and especially -17°C on 5mm initial frozen thickness. Air-bubble was directly injected on the surface of frozen layer to check a flow effect and the experiments were carried out for each one of 1mm and 5mm to investigate the effect of initial thickness of frozen layer.

사 용 기 호

Alphabet

A	: 면적	$[m^2]$
C_i	: 초기 수용액의 NaCl 농도	$[\text{wt}\%]$
H	: 원관의 높이	$[m]$
r	: 반지름	$[m]$
r_i	: 원관 내경 반지름	$[m]$
r_o	: 원관 외경 반지름	$[m]$
S_i	: 초기 동결층의 두께	$[\text{mm}]$
T_{fs}	: 동결층 표면온도	$[^\circ\text{C}]$
T_i	: 수용액의 초기온도	$[^\circ\text{C}]$
T_w	: 냉각면의 온도	$[^\circ\text{C}]$

Greeks symbol

δ	: 원통의 두께	$[m]$
k	: 온도에 따른 열전도도	$[W/m \cdot K]$
ρ	: 밀도	$[kg/m^3]$

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

급속한 경제 성장과 생활수준의 향상으로 환경에 대한 관심도 증가하여 환경오염을 줄이기 위한 대책 마련의 필요성이 세계적으로 요구되고 있으며, 이에 따라 각국에서는 환경규제가 강화되고 있다. 산업의 발달로 인해 발생하는 유해물질의 증가로 인해 환경의 오염이 더욱 심각해짐에 따라 이에 대한 조사·연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 최근 산업의 발달에 따른 유해물질 사용량이 계속 증가하고 있고, 이들 유해물질은 그 양의 많고 적음과 상관없이 자연환경에 대한 심각한 오염과 파괴를 야기하고 있으며 인체에 유해성을 지니고 있음이 밝혀짐에 따라 큰 관심의 대상이 되고 있다.

세계 적으로 주목받고 있는 각 종 환경오염 중에 인간을 포함한 모든 생물이 살아가는데 없어서는 안 될 가장 중요한 물의 오염문제는 물 부족 현상과 더불어 인류가 반드시 해결해야 할 과제로 부각되고 있다. 지구상의 지표면은 71%가 물로 덮여있으며, 그 양은 13억860만 킬로톤(kiloton)으로 해수가 약 97%를 차지한다.⁽¹⁾ 물은 태초부터 인류의 발전과 그 길을 같이 하였고, 인간을 비롯한 모든 생물체의 생사에 가장 밀접하게 영향을 미치는 요소이기도 하다.

최근에는 새로운 유해 물질의 등장으로 인간이나 자연환경에 대한 위해성이 날로 증가하고 있어 폐수중의 오염물질을 처리할 수 있는 처리

시설 개선과 더불어서 폐수 성상에 따라 적절한 새로운 처리기술 개발이 시급히 요구되고 있다. 따라서 근래에는 기존의 화학적인 처리방법보다는 미생물에 의한 생물학적인 처리, 활성탄 흡착 또는 분리 막을 이용한 처리 등이 큰 관심의 대상이 되고 있다. 그 예로서 폐수 중에 유해물질인 2,3,6-트리클로로페닐아세트산(2,3,6-trichlorophenylacetic acid)은 화학적 처리보다는 미생물에 의한 생물학적인 방법에 의해 주로 처리하고 있으며, 분해율의 정도에 따라 그 처리시설을 개선하고 보완하고 있다.⁽²⁾

유해물질이 완전히 처리되지 않고 식수나 하천 등으로 유출되면 극소량일지라도 커다란 수질오염 문제를 야기 시키기 때문에 환경 선진국에서는 이런 유해물질의 관리를 강화하고 있으며 오염원의 배출을 사전에 차단하기 위한 각종 규제를 마련하고 있다. 또한 이들 유해물질로 인한 피해를 사전에 예방하고 효율적으로 처리하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다.

다양한 형태의 폐수가 각종 산업 활동 및 인간 활동에 의해 생성 배출되며, 이러한 오염된 물의 처리는 환경 보호의 관점에서 매우 중요하다. 폐수 처리의 근본적인 목적은 오염원을 제거하고, 각종 법률과 규제에서 정하는 기준을 만족하도록 물을 정화하는 것이다. 이러한 폐수의 처리 방식에는 크게 오탁 물질의 성질에 의해서 물리적 처리, 생물학적 처리, 화학적 처리 및 이 방식들을 조합한 방식들이 사용되고 있으며 이를 통해 고액분리, 유기물·환원성물질의 산화·분해, pH의 조절, 유해 물질

의 제거, 무기영양 염류의 제거, 오니의 처리·처분을 목적으로 채용되고 있다.

이러한 폐수의 처리는 복잡한 처리시설을 필요로 하며 많은 처리비용이 요구된다. 따라서 처리비용이 적고 처리효율이 높은 기술의 개발은 환경보전의 측면뿐만 아니라 원가 절감에도 큰 영향을 미칠 것이다. 기존의 폐수 처리에 대한 연구들이 대부분 대용량 특정 오염물질에 초점이 맞추어 진행되었으나 중·소규모의 기업에서 운영하기에는 지나치게 비용 부담이 큰 경향이 있다.

이에 비해 본 연구의 대상이 되는 동결농축방법은 조작성이 간편하면서 비용이 저렴하고 중·소규모의 시설로 가능하며 현장 적용성이 우수하다는 장점이 있다. 최근 문헌에 따르면 동결농축법이 중·소규모의 오·폐수 정화 및 재이용에 뛰어난 것으로 보고 되고 있다. 또한 동결시킨 얼음을 저장하여 냉열을 이용함으로써 에너지 절감의 효과가 큰 장점을 갖고 있다. 동결농축방법은 오염물질이 포함된 폐수를 빙점이하로 냉각하므로 순수한 빙결정이 형성되며 이 과정에서 오염물질은 액체로 분리농축되는 원리를 이용한 것으로 장치의 열역학적 효율이 높고 에너지의 소비량이 적다. 또한 부식문제가 없고 재료비도 적게 소요되며 첨가할 화학 물질이 필요 없는 장점이 있다.⁽³⁾

본 연구는 중·소규모의 패키지형 폐수처리기술로서 활용도가 높은 동결농축방법에 기초를 두고 수질오염 발생원인인 공장폐수, 축산폐수 및 가정폐수의 효율적인 재처리 과정을 위하여 폐수를 동결 처리하는 것을

목적으로 폐수중의 순수한 물과 폐수 농축액을 분리하는 동결농축방법의 대한 가장 효과적 이용방법의 실험적 연구를 수행하였다. 따라서 본 실험은 가장 많은 양의 순수한 얼음을 얻는 방법을 알아내기 위하여 냉각온도 및 유동의 영향, 초기 순수한 얼음의 두께가 결과물인 얼음 내 중 중금속 농도에 미치는 영향을 실험적 방법으로 검토함으로써 동결방법을 이용한 가장 이상적인 폐수 동결농축처리법의 기본방향을 제시하고자 하였다.

1.2 종래의 연구

인간의 생존과 생활에 직접적인 영향을 미치는 물의 동결에 대한 연구는 이미 오래 전부터 많은 해석적·실험적 연구가 진행되어 왔다.

물의 동결에 있어 얼음의 열전도율은 이동하는 열량의 척도가 되는 중요한 열물성이다. 이와 같은 이유에서 많은 실험 및 측정 결과들이 보고 되고 있으며, Powell⁽⁴⁾은 1958년부터 이전의 측정결과를 정리하였으며, Landauer와 Plumb⁽⁵⁾에 의해 실험실에서 인공적으로 제작된 단결정빙, 빙하의 단결정빙 및 시판 다결정빙의 열전도율의 큰 차이가 없음을 발견하였다.

특히, Gilpin^{(6)~(8)}은 정지중인 물을 수평 원관 내에서 서서히 냉각시키면 물이 응고점 이하임에도 불구하고 상변화를 일으키지 않는 상태, 즉 과냉각상태에서 관 상부부터 갑작스럽게 침상빙(Dendritic Ice)이 발생하고, 최대밀도영역에서 자연대류 역전현상이 발생한다는 사실을 발견하였고, 이러한 현상은 그 후 Cheng⁽⁹⁾이나 Fukusako⁽¹⁰⁾등에 의한 여러 실험들을 통해 입증되었다.

平田⁽¹¹⁾등은 원관 내 유동수의 동결에 관한 실험을 행하여 원관 내에서 발생하는 동결현상을 레이놀즈수와 무차원 냉각온도비로 실험식을 제시하였으며, 관내 동결폐색의 발생영역을 구분하였다. 稻葉⁽¹²⁾등은 같은 원관 내 유동수의 동결거동에 관한 연구를 행하여, 동결폐색에 미치는 유속, 유입수온 및 냉각온도의 효과에 대해서 실험적으로 검토하고 동결에 의해 관폐색의 한계조건 및 관 폐색까지의 시간을 냉각온도비와

레이놀즈수(Re)와의 관계를 정량적으로 나타내었다.

수용액의 동결은 2성분계 용액의 응고문제의 범위에 속하는 것으로 금속의 응고 문제와 유사하다.⁽¹³⁾ 따라서 Stephan⁽¹⁴⁾ 등은 해석적 연구를 시초로서 열전도율과 확산 계수 등의 물성치 및 상평형도가 비교적 잘 알려져 있는 염화나트륨 수용액에 관해서 해석적 연구를 하였다. 해수의 동결과 같은 수용액의 동결문제는 순수한 물과 다르게 동결현상이 발생하게 되는데 그 이유 중 하나는 용질의 존재에 의해 그 물질과 농도에 따른 평형응고온도가 낮아지기 때문이다. 또 동결이 진행함에 따라 용질이 석출되면서 생기는 구성적 과냉각 때문에, 일반 순수 얼음에서는 균일한 층을 볼 수 있는 것에 반해, 해수와 같은 수용액의 동결층은 일반적으로 고액공존의 불 균질 층으로 되고, 용질의 종류, 농도, 냉각조건 및 대류의 영향 등에 의해 다양한 성상을 나타낸다.⁽¹⁵⁾

한편, 유동을 동반한 물의 동결 거동은 유동장, 냉각표면의 열전달율 및 동결빙층의 형상 3가지 상호 간섭을 동반하는 전열문제라 할 수 있다. Hirata⁽¹⁶⁾는 동결 빙층의 형상 및 동결빙층내의 2차원 열전달 효과를 정상상태에 대하여 검토하였다.

Terwilliger⁽¹⁷⁾는 실린더에서 염화나트륨 수용액의 동결실험을 통하여 석출현상을 관찰하였으며, 농축된 용질의 경계층이 고액 경계면 근처에서 형성되며 구성적 과냉각 및 동결 구동 포텐셜이 동결계면 부근의 농도와 용질의 재 분포에 큰 영향을 미치는 중요한 인자임을 실험적으로 연구하였다. 林⁽¹⁸⁾ 등은 구형용기내의 수평냉각면상에 있는 염화나트륨

수용액의 동결에 관한 실험 및 해석을 행하였다. 그들은 냉각온도를 염화 나트륨수용액의 공정온도(Eutectic Point: -21.12°C) 이하로 유지한 경우의 빙결정의 발생상태와 온도장의 과냉각에 관해 검토하였다. 또 해석에 있어서는 액층과 고액공존층⁽¹⁹⁾ 및 고체층(공정층)의 각각에 대하여 열전도방정식 및 확산방정식을 구하고 온도분포와 함께 동결층 두께의 비교를 행하였다.

이상과 같이 지금까지의 수용액의 동결현상에 관한 대부분의 연구는 얼음의 성장 거동과 동결로 인하여 형성된 얼음의 미시적 및 거시적 형태에 초점을 두고 주로 연구되어 왔으며, 수용액 중에서 순수한 물만을 추출하기 위한 목적으로 동결계면의 온도, 수용액의 농도 등의 효율적 제어에 관한 연구는 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구는 중·소형 규모의 폐수 처리 장치로 개발되고 있는 동결농축방식에서 효율적으로 순수한 물을 추출하는 방법을 연구하여 폐수처리 장치를 개발하는데 최종 목적을 두고, 냉각면의 온도, 유동장 유무 등 각각의 인자에 따른 폐수의 동결현상과 오염물질의 농도 변화를 실험적으로 검토하여 폐수처리와 처리수의 재이용 가능성을 조사하였다.

제 2 장 실험장치 및 실험방법

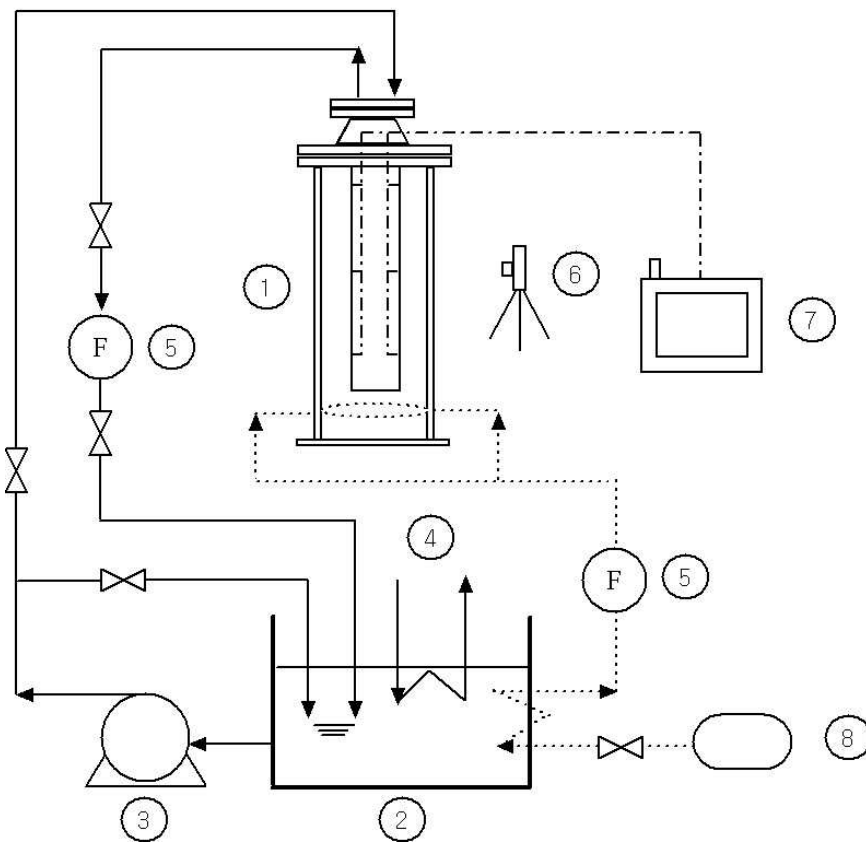
2.1 실험장치

Fig. 2.1은 실험장치의 전체 계통도를 나타낸 것으로 그림과 같이 실험장치는 시험부(Test Section), 냉각면의 온도를 일정하게 유지하기 위한 브라인 순환부, 해수 또는 폐수에 유체 유동을 가하기 위해 일정한 온도로 조절된 공기를 분사하는 기포 분사부, 동결이 진행되는 동안 냉각면 및 수용액의 온도를 측정하기 위한 온도 측정부 및 원관 내 동결층 두께를 가시화하기 위한 가시화부로 구성되어 있다. Fig. 2.2는 본 실험장치의 전경사진이다.

먼저 시험부는 가시화가 가능하도록 투명한 아크릴 재질로 내경 200 \varnothing , 길이 400mm, 두께 5mm인 원통을 이용하여 제작하였고, 시험부의 중간 위치에 내경이 100 \varnothing , 길이 300mm, 두께 2.5mm의 원형 동관을 설치하였다. 동관 내에는 노즐을 설치하여 냉각면에 균등하게 브라인을 분사하여 냉각면의 온도를 일정하게 유지하도록 하였다. 냉각면 온도를 측정하기 위하여 동관의 표면 양쪽에 6개의 열전대(C-A Type)를 설치하고, 열전대로부터 측정된 온도는 데이터처리장치(DR-230)에 기록되게 하였다.

시험부의 수직 원관 표면을 냉각시키는 작동유체는 소정의 온도로 조절된 브라인(에틸렌글리콜 40% 수용액)을 사용하였고, 브라인 탱크(Brine Tank)에서 순환 펌프를 이용 수직 원관의 내측면의 온도가 균일하게 되도록 PVC 파이프로 제작한 노즐을 통하여 분사하게 하였다.

기포의 분사는 원형에서 기포를 분사하는 방법과 수직 원관 밑에 환모양의 고리 형태 노즐을 만든 후 고리의 양쪽 방향에서 공기를 주입하여 기포가 분사되도록 하는 방법을 사용하였으며, 분사되는 공기는 냉각기를 거쳐 소정의 온도를 조절하였으며 공기 유량계를 통하여 일정 유량($5\ell/\text{min}$)을 유지하였다.



- | | |
|--------------------|-------------------------|
| ① Test section | ⑤ Flow-meter |
| ② Brine tank | ⑥ Digital camera |
| ③ Circulation pump | ⑦ Temperature recorder |
| ④ Refrigerator | ⑧ Air compressor |
| ———— Brine line | ----- Thermocouple wire |
| ----- Air line | |

Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus



Fig. 2.2 Photograph of experimental apparatus

2.2 실험방법

폐수농축실험의 기초실험으로서 염화나트륨 수용액을 이용하여 냉각면의 온도변화, 공기분사를 통한 유동 및 얼음내의 염분농도의 영향을 검토하였으며, 본 실험에서는 모든 업종의 원 폐수에 대부분 함유되어 있는 중금속 Cr, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb, As, Fe 중 대표적인 오염물질인 Pb 및 Cr을 혼합한 수용액을 사용하여 실험하였다.

실험은 먼저 냉동기를 가동하여 브라인 탱크의 온도를 소정의 온도로 조절하고, 수용액의 초기 온도를 0.0℃로 유지시킨 후 시험부에 공급하는 시점을 실험시작 시간으로 하였으며, 매 30분마다 빙층의 형상과 두께를 측정하고 가시화 하였다. 동결실험은 120분간 진행하였다. 실험 종료 후 빙을 채취하여 디지털 염분계(Salinity meter: ES-421)를 이용하여 염분농도를, LAMOTTE의 Colorimeter를 이용하여 중금속의 농도를 측정하였다.

기초 실험은 전술한 바와 같이 작동유체의 온도를 일정하게 조절한 후 브라인을 공급하는 시점을 실험시작으로 하여 120분이 경과한 시간을 실험종료시간으로 하였다. 냉각온도에 따른 영향을 평가하기 위하여 냉각온도를 -2℃, -7℃ 및 -12℃로 변화시켜 실험하였으며, 수용액의 농도에 따른 영향을 평가하기 위하여 수용액의 농도를 1.8wt% 및 3.6wt%의 염분 수용액을 이용하였다. 또한 실험은 기포를 분사하지 않는 경우, 원통 벽면의 4방향에서 유입하는 경우 및 수직 원관의 수직하면에서 환모양으로 공급하여 공기 분사량을 조절하는 경우로 나누어 실험을 수행

하였다. Table 2.1에 기초 실험의 실험조건을 나타내었다.

본 실험은 크게 3단계로 행하였으며, 단계별 실험 방법은 다음과 같다. 먼저 초기 순수한 동결층의 1mm를 조성한 후에 0℃의 중금속 수용액을 투입하고 비유동장 상태에서의 특성을 고찰하였다. 냉각온도는 -2℃, -7℃ 및 -12℃로 하였고, Cr 0.07ppm, Pb 2.2ppm의 농도로 구성하여 120분 동안 얼음의 성장 속도와 실험후의 빙 내의 중금속 농도, 수용액의 중금속 농도를 측정, 비교하였다.

2차 실험으로는 초기 동결층 두께를 1mm로 하였을 시 유동상태에서의 동결특성을 관찰하기 위해 아크릴로 제작된 실험 원 관내에 환 모양의 공기 분사 노즐을 설치하고 공기를 유입하고 기포유동을 주었다. 지속적이고 일정한 공기 유량(5ℓ/min)을 주입하기 위해 공기유량을 공기유량계를 이용하여 조절하였다.

3차 실험은 초기 얼음 두께에 따른 영향을 알아보기 위하여 초기 동결층 두께를 5mm로 하고, 온도조건을 변화시켰는데, -2℃일 경우 얼음의 두께가 4시간 경과 후에도 5mm를 넘지 못하므로 초기 동결층 두께 이상으로 성장하지 못하였고, 그 대신 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 -15℃의 온도조건을 추가하였다. 나머지 조건은 2차 실험과 동일하게 하여 동결특성을 관찰하였다. Table 2.2 에 본 실험의 실험조건을 나타내었다.

Table 2.1 An experimental condition(NaCl aqueous solution)

Flow method	Salinity	Cooling Temperature
Not flow field	1.8wt% 3.6wt%	-2°C -7°C -12°C
Air injection From a cylinder wall		
A shape of ring flow field		

Table 2.2 An experimental condition(waste water)

Primary freezing thickness	Flow method	Heavy-metal content	Cooling temperature
1mm	Not flow field	Pb 2.2 ppm Cr 0.07 ppm	-2°C
	A shape of ring flow field		-7°C -12°C
5mm	A shape of ring flow field	Pb 2.2 ppm Cr 0.07 ppm	-2°C -7°C -12°C -15°C

제 3 장 냉각원관의 열전달 해석

냉각원관의 열전달 해석을 위해서는 우선 원통형 좌표계에 대한 열전도 방정식이 결정되어야 한다.

Fig. 3.1과 같은 중공원통형 관을 놓고 반지름을 r , 높이 H 라고 할 때 원통좌표계 열전도방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\kappa r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} (\kappa \frac{\partial T}{\partial \phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

반경방향으로만 열전달이 존재하고 내부 발열이 없는 정상상태 조건 하에서는 $\frac{\partial T}{\partial \phi} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$, $q = 0$, $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ 이므로, 식(3.1)은 다음과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\kappa r \frac{\partial T}{\partial r}) = 0 \quad (3.2)$$

반경방향 r 이 되는 곳의 원통표면을 통과해서 전도되는 열전달량 q_r 은

$$q_r = -\kappa A \frac{\partial T}{\partial r} = -k(2\pi r H) \frac{\partial T}{\partial r} \quad (3.3)$$

식(3.2)를 적분하여 $\frac{\partial T}{\partial r}$ 를 구하여 식(3.3)에 대입함으로써 열전달량 q_r 을 구할 수 있다.

식(3.2)에서 반경방향 r 에 대하여 κ 가 일정하다고 가정하면,

$$\partial \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (3.4)$$

이다. 식 (3.4)를 부정적분하면,

$$r \frac{\partial T}{\partial r} = C_1 \quad (3.5)$$

식 (3.5)를 변수 분리하면,

$$\partial T = \frac{C_1}{r} \partial r \quad (3.6)$$

식(3.6)을 다시 부정적분하면,

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (3.7)$$

식(3.7)은 계의 반경방향의 온도 분포를 나타내는 식이다. 이 식에서 적분상수 C_1 과 C_2 를 구하기 위해서는 경계조건,

$$r = r_i \text{ 에서, } T = T_2$$

$$r = r_0 \text{ 에서, } T = T_1$$

를 적용하면 식(3.7)은,

$$T(r_i) = T_2 = C_1 \ln r_i + C_2 \quad (3.8)$$

$$T(r_o) = T_1 = C_1 \ln r_o + C_2 \quad (3.9)$$

$$T_2 - T_1 = C_1 (\ln r_i - \ln r_o) = C_1 \ln \frac{r_i}{r_o}$$

$$\therefore C_1 = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \quad (3.10)$$

식(3.10)을 식 (3.9)에 대입하면,

$$T_1 = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \ln r_o + C_2$$

$$\therefore C_2 = T_1 - \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \ln r_o \quad (3.11)$$

식(3.10)과 식(3.11)을 식 (3.7)에 대입하면,

$$T(r) = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \ln r + T_1 - \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \ln r_o$$

$$\therefore T(r) = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \ln \frac{r}{r_o} + T_1 \quad (3.12)$$

식(3.12)으로부터 반경 방향의 온도분포를 알 수 있다. 그리고 식(3.10)을 식(3.5)에 대입하면,

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \frac{1}{r} \quad (3.13)$$

식(3.13)을 식(3.3)에 대입하면 반경방향으로의 전열량을 구할 수가 있다.

$$q_r = -k(2\pi rH) \frac{\partial T}{\partial r} = -k(2\pi rH) \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \frac{1}{r} \quad (3.14)$$

$$q_r = 2\pi rH \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \quad (3.15)$$

따라서 열전달율의 계산은 Fig 3.1과 같이 동관 표면의 온도를 측정하여 열유속 q_{r1} 을 구하고, 동결층 표면에서의 열유속 q_{r2} 는 식(3.17)에 의해, 열유속의 방향을 반경방향으로 가정하여 식(3.16)과 식(3.17)식을 같다고 보고 계간하여 식 (3.18)식에 의해 구할 수 있다.

$$q_{r1} = -\lambda \cdot (T_1 - T_2) / \delta \quad (3.16)$$

$$q_{r2} = h (T_{fs} - T_i) \quad (3.17)$$

$$h = \lambda \cdot (T_1 - T_2) / [\delta (T_{fs} - T_i)] \quad (3.18)$$

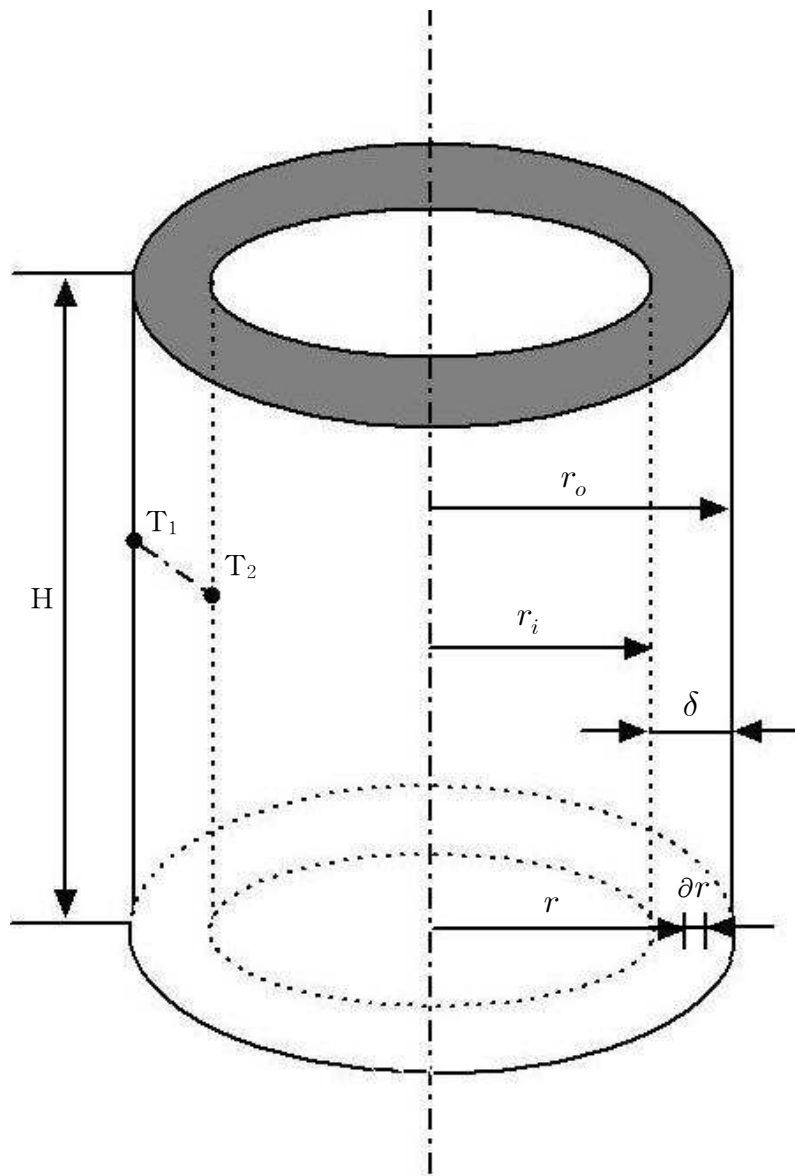


Fig. 3.1 One dimensional heat transfer model in a cylindrical tube

제 4 장 수직원관에서 염화나트륨수용액의 동결

4.1 냉각면 온도에 따른 영향

Fig. 4.1과 Fig.4.2는 각각의 수용액 염분 농도 1.8wt%와 3.6wt%에서 유동을 주지 않고 동결을 시작하여 120분간 실험을 실시한 후의 동결거동을 가시화한 사진이다. 그림에서 냉각면의 온도가 저하될수록 동결층이 두꺼워지는 것을 알 수 있으며, 이는 냉각면의 온도가 낮을수록 동결계면에서의 온도구배가 커짐으로 인해 냉각면의 열유속이 증가하고, 그에 따라 동결량도 커지게 되기 때문이다. 또 염분의 농도가 낮을수록 동결층의 두께가 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4.3은 1.8wt% 농도의 염화나트륨 수용액에서 냉각면 온도를 각각 -2°C , -7°C 및 -12°C 로 변화시켰을 때 냉각면 온도가 동결층에 미치는 영향을 나타낸 것으로 냉각면 온도가 낮을수록 동결층의 두께가 두꺼워짐을 알 수 있다. 이는 냉각면 온도가 낮을수록 즉, 냉각면과 동결계면 사이의 열 낙차가 증가할수록 냉각면에서 동결계면으로의 열유속이 증가하여 동결층이 두껍게 성장하기 때문이다. 특히 냉각면 온도 -2°C 의 경우에는 60분이 경과한 후에야 동결층이 형성되는 것을 알 수 있다. 이것은 냉각초기에는 원관 주위의 수용액이 과냉각상태로 존재하다가 주위의 수용액과의 밀도차이로 과냉각상태가 해소되면서 동결층이 생성되기 때문이다.

Fig. 4.4는 Fig. 4.3과 동일한 조건에서 염분 농도 3.6wt% 수용액을

대상으로 하였을 경우의 실험결과를 나타낸 것으로 냉각면 온도가 낮을수록 얼음의 두께가 증가한다. 이는 염분 농도 1.8wt%와 마찬가지로 냉각면의 온도가 낮을수록 냉각면과 동결계면 사이의 온도구배 및 열유속이 증가하기 때문이다. 그러나 -2°C 의 경우에는 동결층이 형성되지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 수용액이 과냉각 온도까지 냉각은 되지만 수용액에서 용질과 물의 분리가 일어날 정도의 과냉각 온도까지 되지 않기 때문이다.

Fig. 4.5는 실험종료 후의 얼음을 채취하여 동결층 내의 염분농도를 나타낸 것으로 냉각면 온도가 높을수록 동결된 얼음의 염분농도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 냉각면 온도가 상승할수록 냉각면과 동결계면의 열유속이 작아져 얼음의 성장이 저감되며, 석출된 고농도의 염화나트륨이 동결계면 밖으로 충분히 배제되기 때문이다.

Fig. 4.6은 실험종료 후 원통에 남겨진 수용액의 염분농도를 나타낸 것으로 그림에서 알 수 있듯이 냉각면 온도가 낮을수록 수용액의 염분농도는 낮아지는데 이는 냉각면 온도가 낮을수록 수용액에서 염분용질이 분리되는 속도보다 동결층의 동결속도가 빠르게 되어 염화나트륨이 동결층에 함유되므로 수용액내의 염분농도가 낮아지기 때문이다.



(a) $T_w = -2^\circ\text{C}$ (b) $T_w = -7^\circ\text{C}$ (c) $T_w = -12^\circ\text{C}$

Fig. 4.1 Photograph of freezing at $C_i = 1.8 \text{ wt}\%$



(a) $T_w = -2^\circ\text{C}$ (b) $T_w = -7^\circ\text{C}$ (c) $T_w = -12^\circ\text{C}$

Fig. 4.2 Photograph of freezing at $C_i = 3.6 \text{ wt}\%$

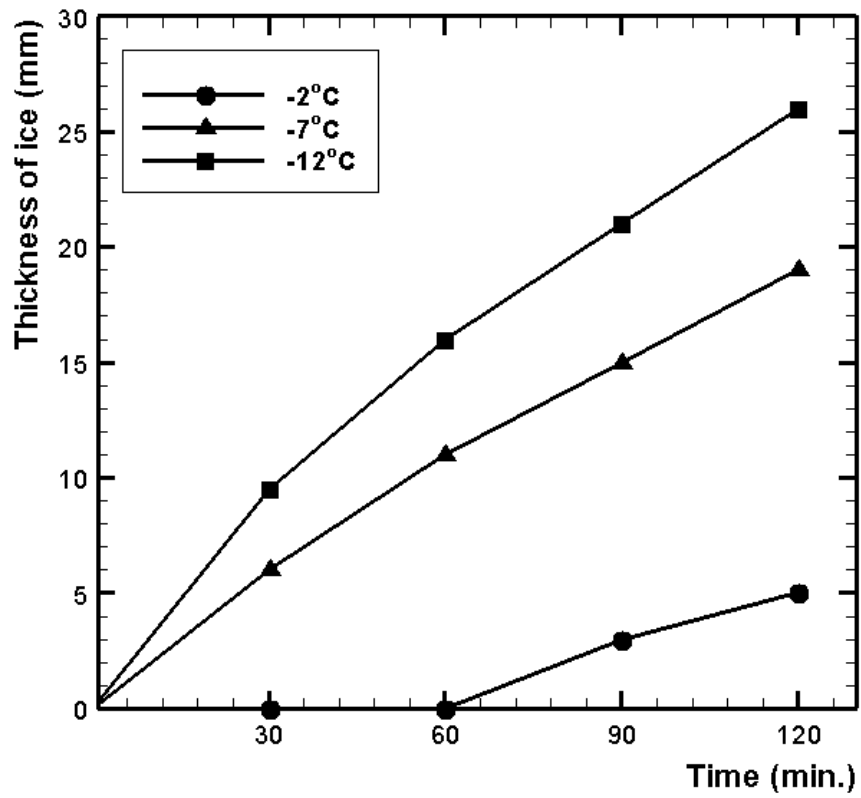


Fig. 4.3 Thickness of freezing at $C_i=1.8\text{wt}\%$

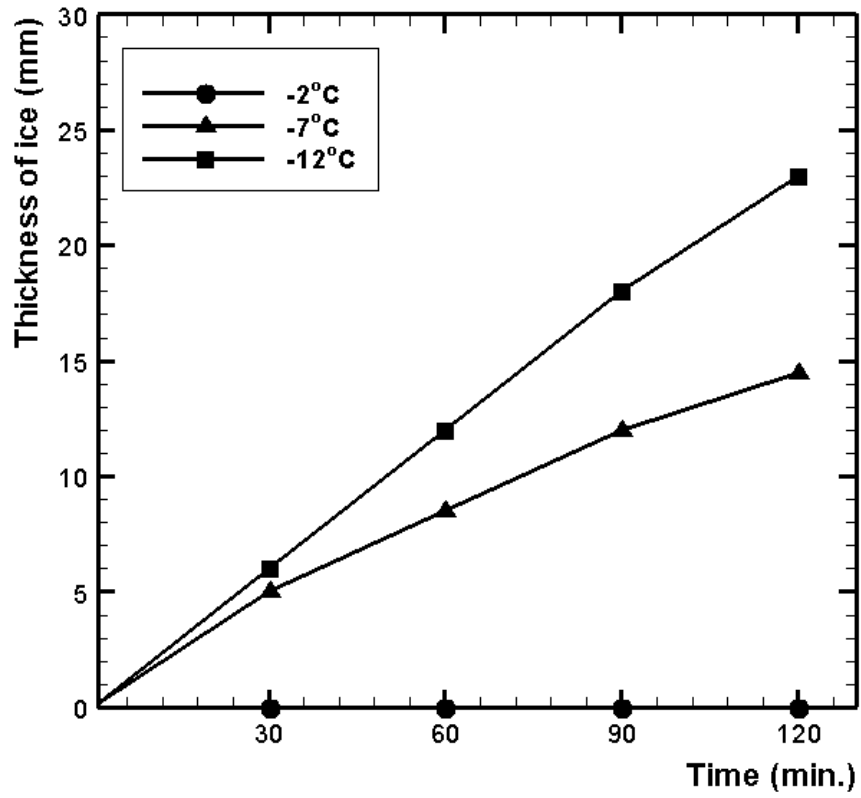


Fig. 4.4 Thickness of freezing at $C_i=3.6\text{wt}\%$

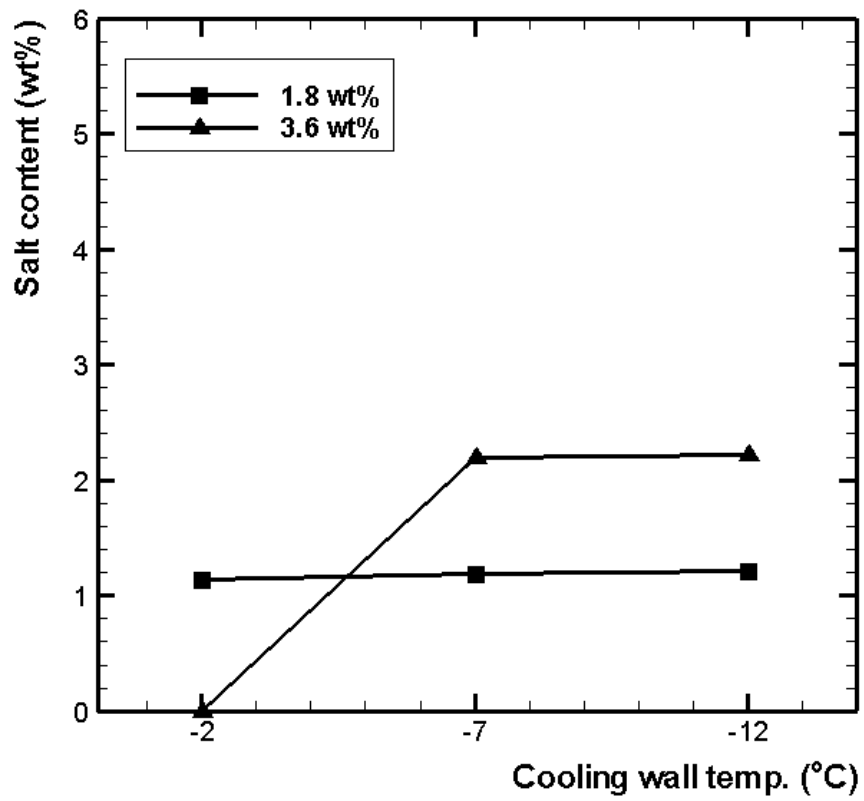


Fig. 4.5 Salt content of Ice

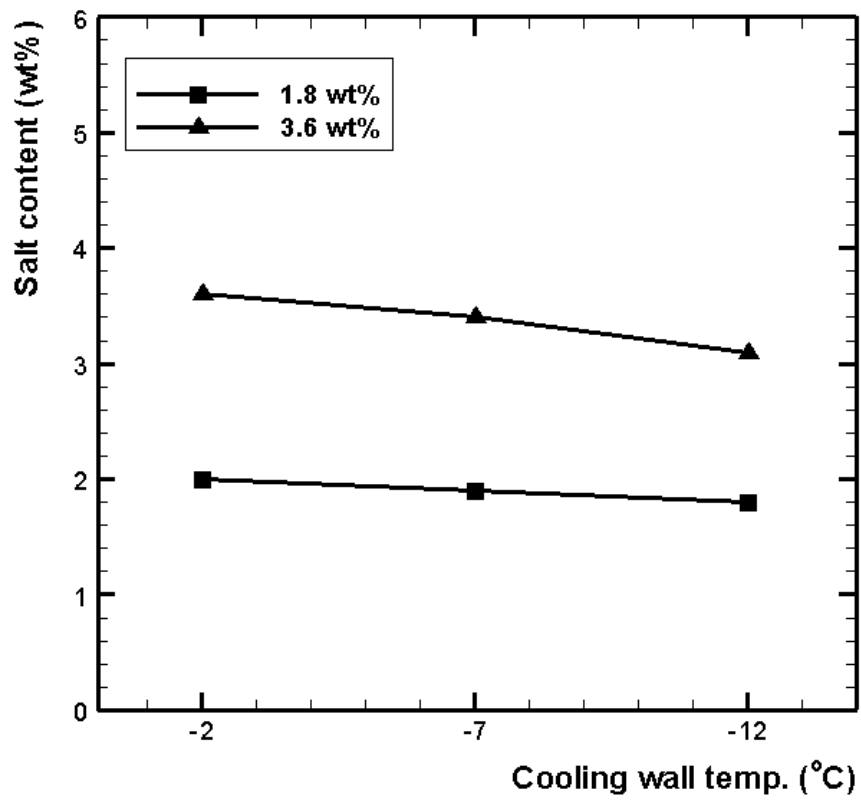


Fig. 4.6 Salt content of aqueous solution

4.2 농도에 따른 영향

Fig. 4.7~Fig. 4.9는 유동을 가하지 않은 염화나트륨수용액에서 염분 농도가 냉각면의 온도 -2°C , -7°C 및 -12°C 각각에서 동결거동에 미치는 영향을 가시화한 사진이다. 그림으로부터 농도가 저하됨에 따라 동결층의 두께가 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 냉각면의 온도가 낮아질수록 동결층이 불투명하며 이는 낮은 냉각면 온도로 인해 얼음의 성장속도가 빨라져 염분용질이 다량 몰입되기 때문이다.

Fig. 4.10 ~ Fig. 4.12는 각각의 냉각면 온도에서 수용액의 염분농도에 따라 성장한 동결층의 두께를 나타낸 것으로, 각각의 냉각면 온도에서 염분농도가 낮을수록 동결층의 두께가 두꺼워지는 것을 알 수 있다. 이는 농도가 감소할수록 평형 동결온도가 상승하여 동결계면과 냉각면간 열유속이 증가하기 때문이다.

Fig. 4.13 ~ Fig. 4.14는 실험 종료 후 동결층의 염분농도와 원통 내 잔류 수용액의 염분농도를 측정된 값을 각각의 수용액 농도별로 나타낸 것으로 전체적으로 수용액의 농도가 낮을수록 동결층의 염분농도가 낮게 나타남을 알 수 있다. 이는 수용액의 염분 농도가 낮을수록 상대적으로 석출되는 용질의 양이 적기 때문이라고 생각되며, 농도가 높을수록 다량의 염화나트륨이 동결층 내부로 몰입되기 때문에 동결층의 염분농도가 높은 것으로 생각된다.



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



(b) $C_i = 3.6 \text{ wt\%}$

Fig. 4.7 Photograph of freezing at $T_w = -2^\circ\text{C}$



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



(b) $C_i = 3.6 \text{ wt\%}$

Fig. 4.8 Photograph of freezing at $T_w = -7^\circ\text{C}$



(a) $C_i=1.8$ wt%



(b) $C_i=3.6$ wt%

Fig. 4.9 Photograph of freezing at $T_w=-12^{\circ}\text{C}$

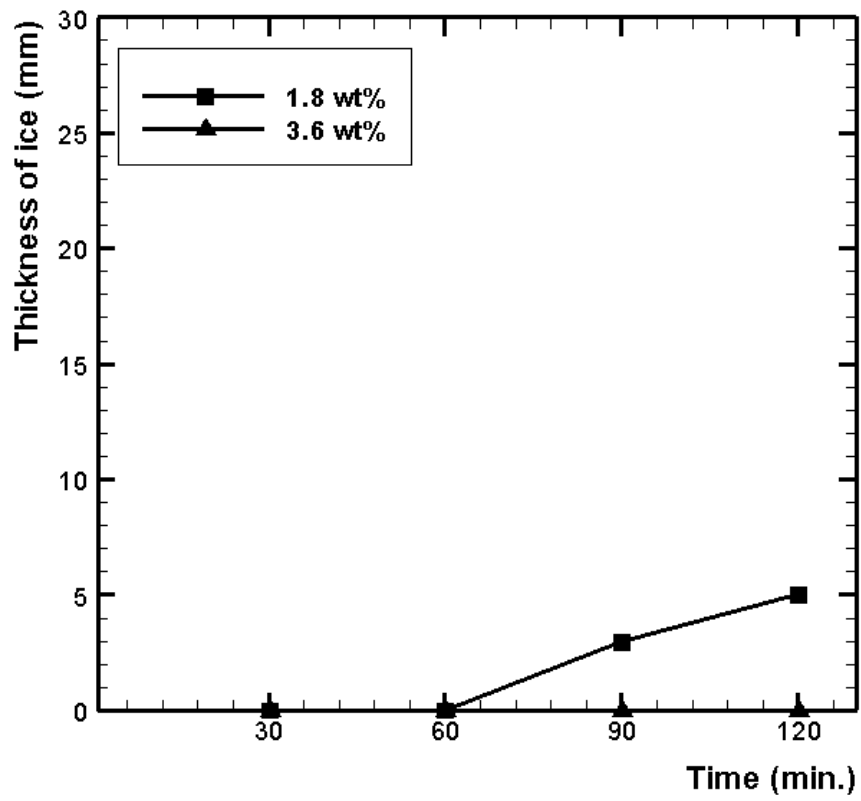


Fig. 4.10 Thickness of freezing at $T_w = -2^\circ\text{C}$

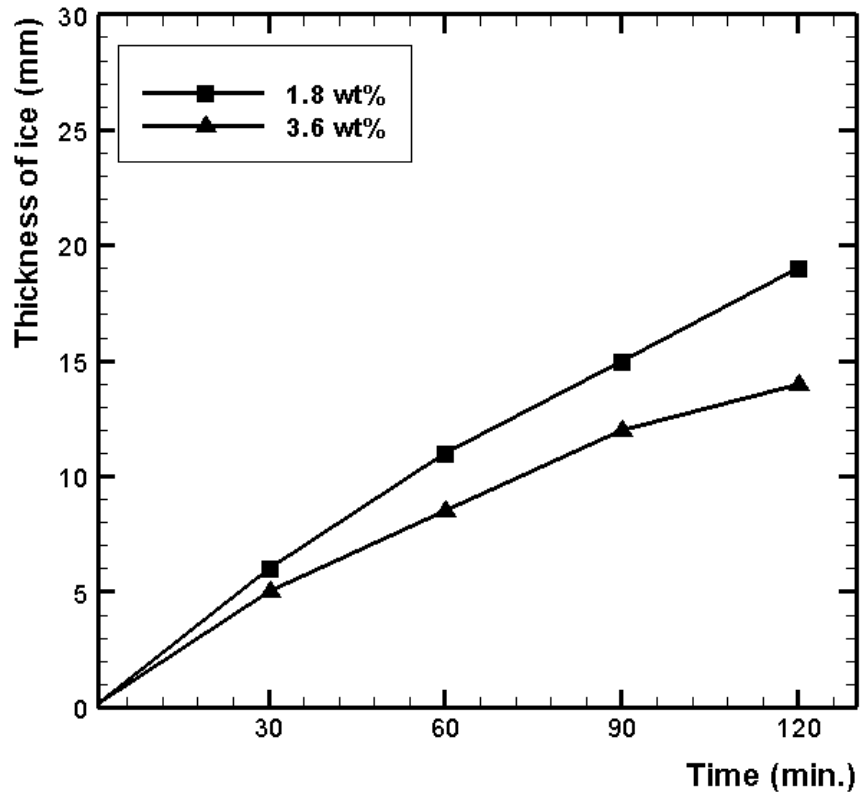


Fig. 4.11 Thickness of freezing at $T_w = -7^\circ\text{C}$

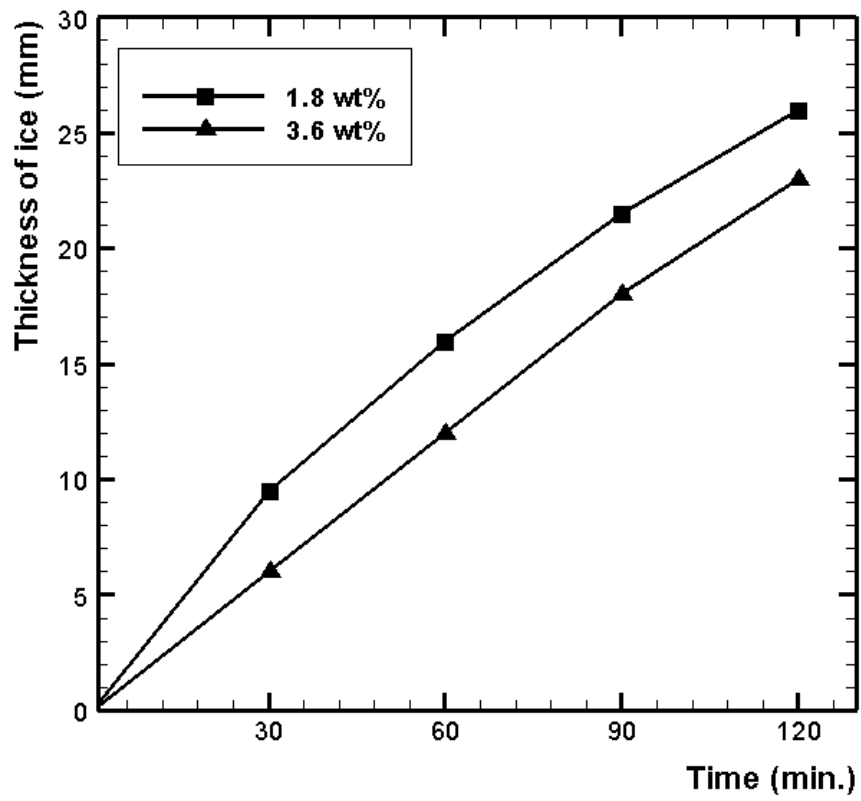


Fig. 4.12 Thickness of freezing at $T_w = -12^\circ\text{C}$

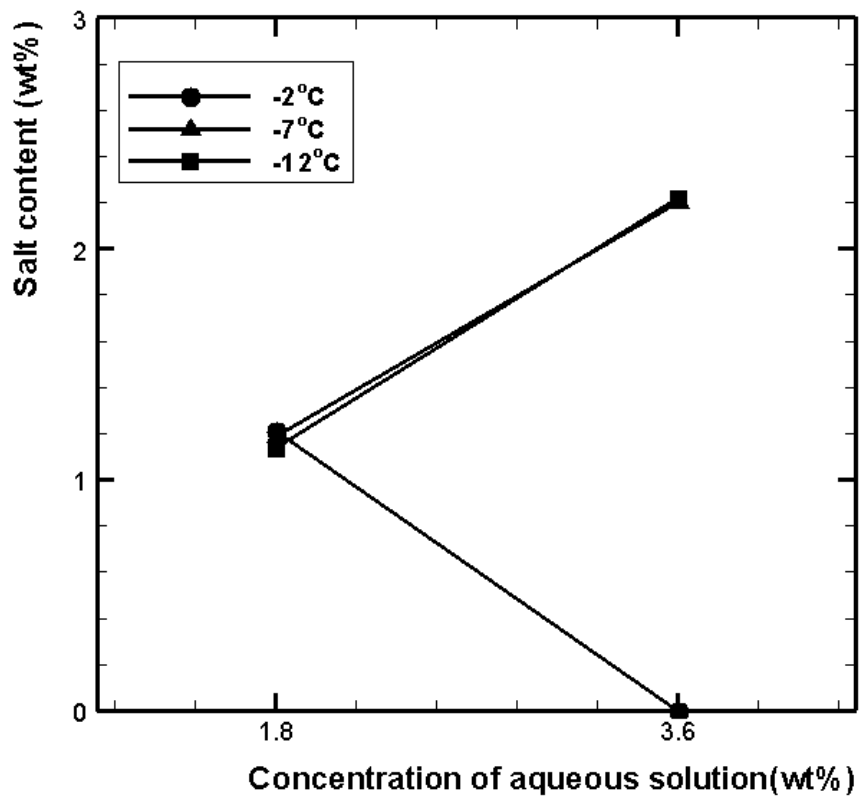


Fig. 4.13 Salt content of Ice

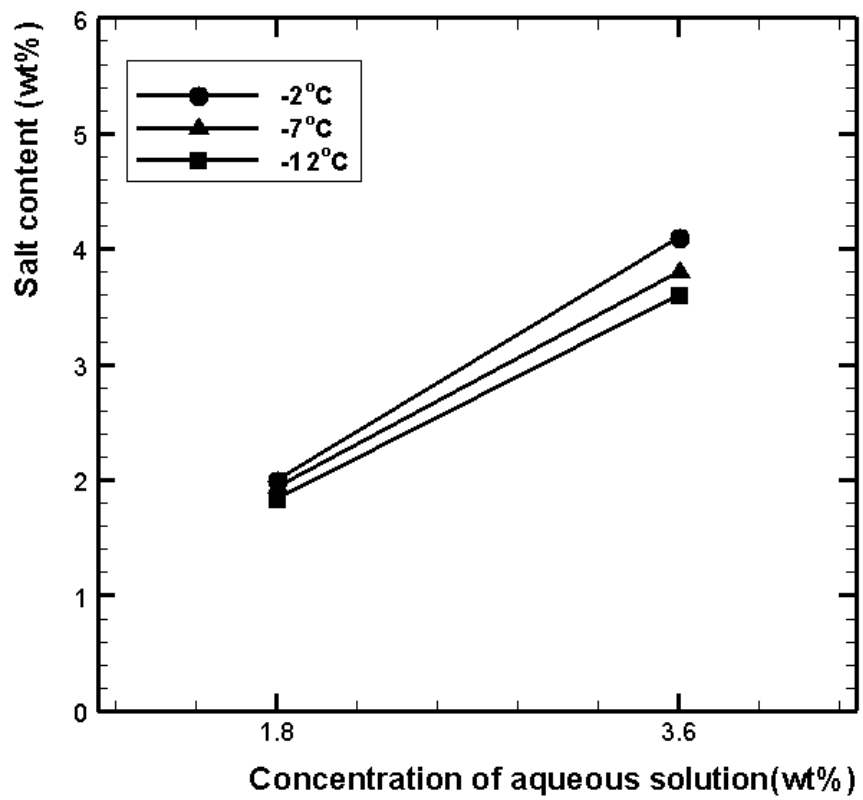


Fig. 4.14 Salt content of aqueous solution

4.3 유동방법에 따른 영향

유동방법에 따른 영향을 실험하기 위하여 원통 벽을 통해 기포를 분사하는 방법(Exp. No. 1)과 환모양의 분사 노즐을 통하여 냉각면에 직접 분사하는 방법(Exp. No. 2)을 그리고 분사량을 증가시켜(Exp. No. 3) 각각 실험하였다.

Fig 4.15~ Fig. 4.17은 는 수용액 농도가 1.8wt% 일 경우의 유동방법이 동결층 형성에 미치는 영향을 가시화한 사진이다.

Fig 4.18 Fig. 4.20은 각 냉각면에서 유동방법에 따른 동결층의 두께 변화를 나타낸다. 그림에서 기포를 환모양의 분사 노즐을 통하여 냉각면에 직접 분사하는 방법이 원통벽면을 통해 간접적으로 분사하는 방법보다 동결층이 얇은 것을 알 수 있다. 이는 분사되는 기포가 열전달을 방해하는 절연체 역할을 하고 있으며, 분사되는 기포의 양이 증가하면 더욱 동결층이 얇아지는 이유는 열 저항의 증가와 유속 증가에 따른 대류 열전달의 증가가 그 원인으로 추정된다. Fig. 4.18에서는 30분이 경과한 후에 동결층이 형성되는데, 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 수용액의 과냉각현상 때문이다.

또한 Fig 4.21 및 Fig. 4.22는 각각의 냉각면 온도에서 유동 방법에 따른 동결층과 잔류 수용액의 염분 농도를 나타내는 것으로 냉각면 온도와 관계없이 환 모양 노즐을 통해 냉각면에 직접 유동을 주는 방식이 동결층 내의 염화나트륨 농도가 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 시험부에 유입되는 공기가 절연체로써 작용하여 고농도의 용질이 충분히 동결층 밖으로 석출될 수 있도록 시간을 제공하여 주며 동시에 직접 동결층에 유입되려는 염분을 배제하기 때문이라고 생각된다.

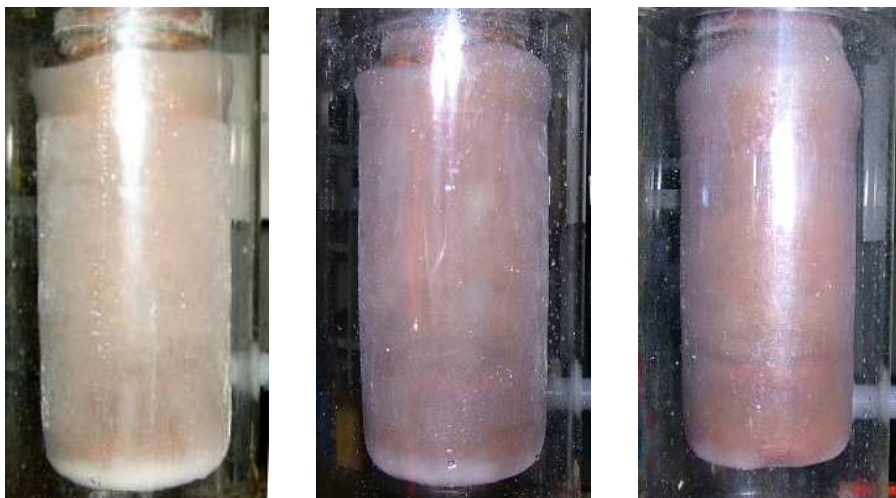


(a) Exp. No. 1

(b) Exp. No. 2

(c) Exp. No. 3

Fig. 4.15 Photograph of freezing at $C_i=1.8$ wt%, $T_w=-2^\circ\text{C}$

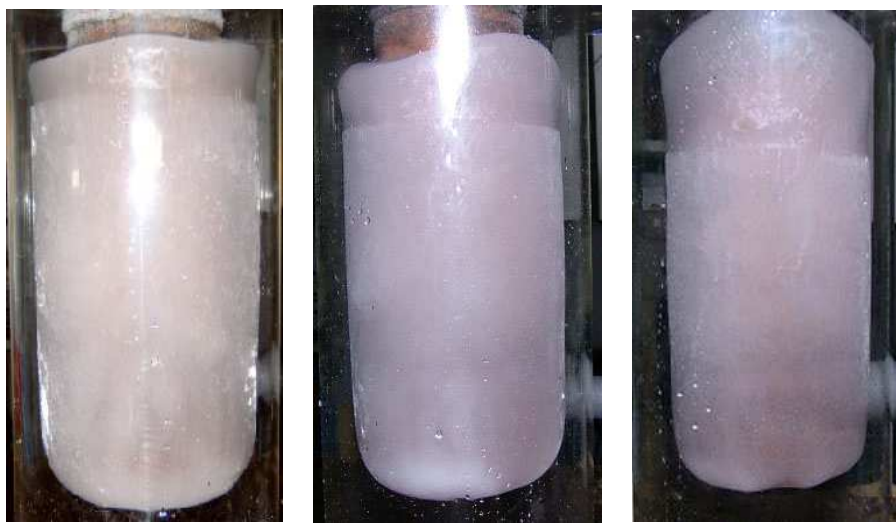


(a) Exp. No. 1

(b) Exp. No. 2

(c) Exp. No. 3

Fig. 4.16 Photograph of freezing at $C_i=1.8$ wt%, $T_w=-7^\circ\text{C}$



(a) Exp. No. 1 (b) Exp. No. 2 (c) Exp. No. 3

Fig. 4.17 Photograph of freezing at $C_i=1.8$ wt%, $T_w=-12^\circ\text{C}$

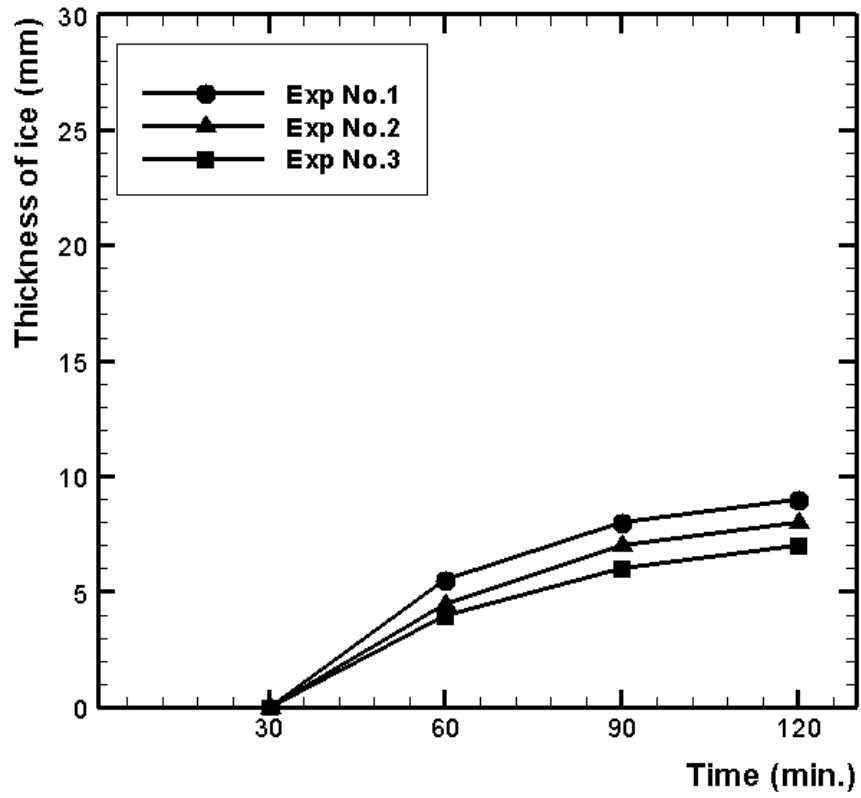


Fig. 4.18 Thickness of freezing at $C_i=1.8$ wt%, $T_w=-2^\circ\text{C}$

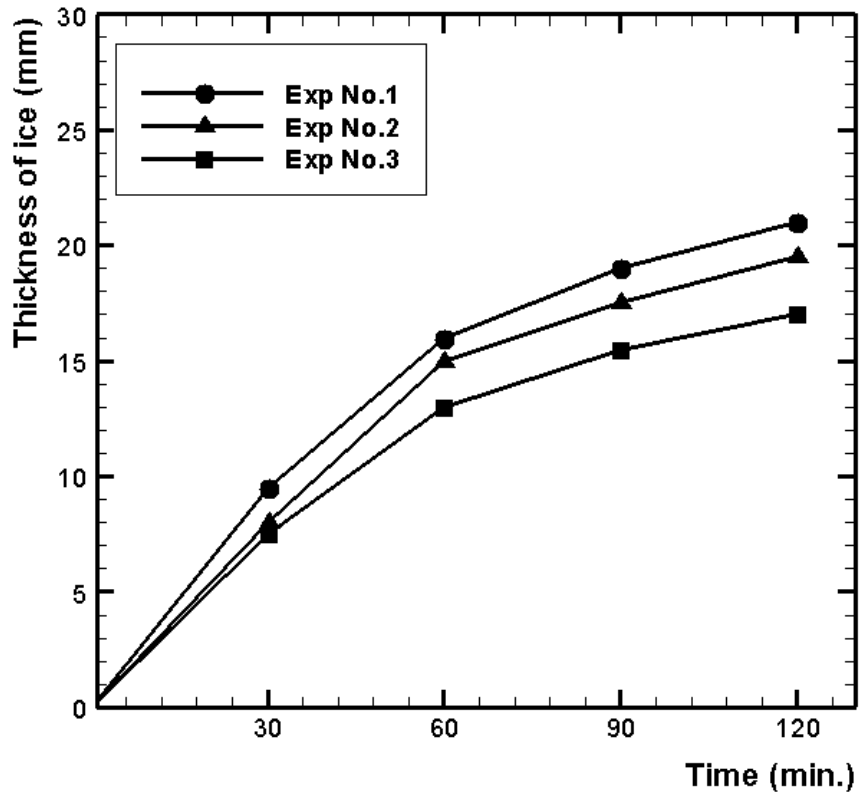


Fig. 4.19 Thickness of freezing at $C_i=1.8$ wt%, $T_w=-7^\circ\text{C}$

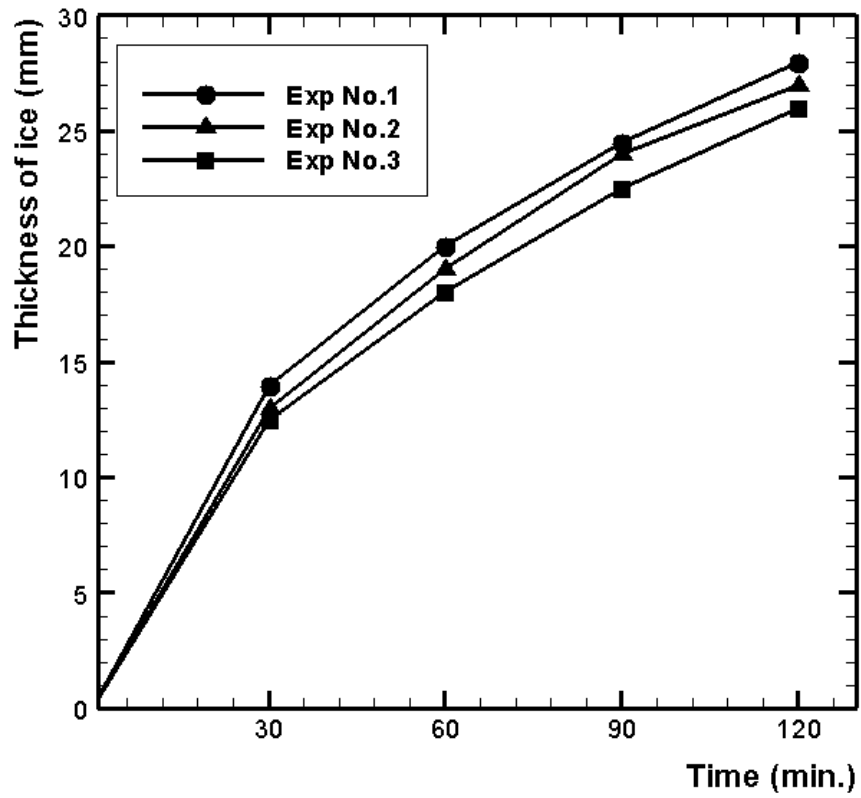


Fig. 4.20 Thickness of freezing at $C_i=1.8$ wt%, $T_w=-12^\circ\text{C}$

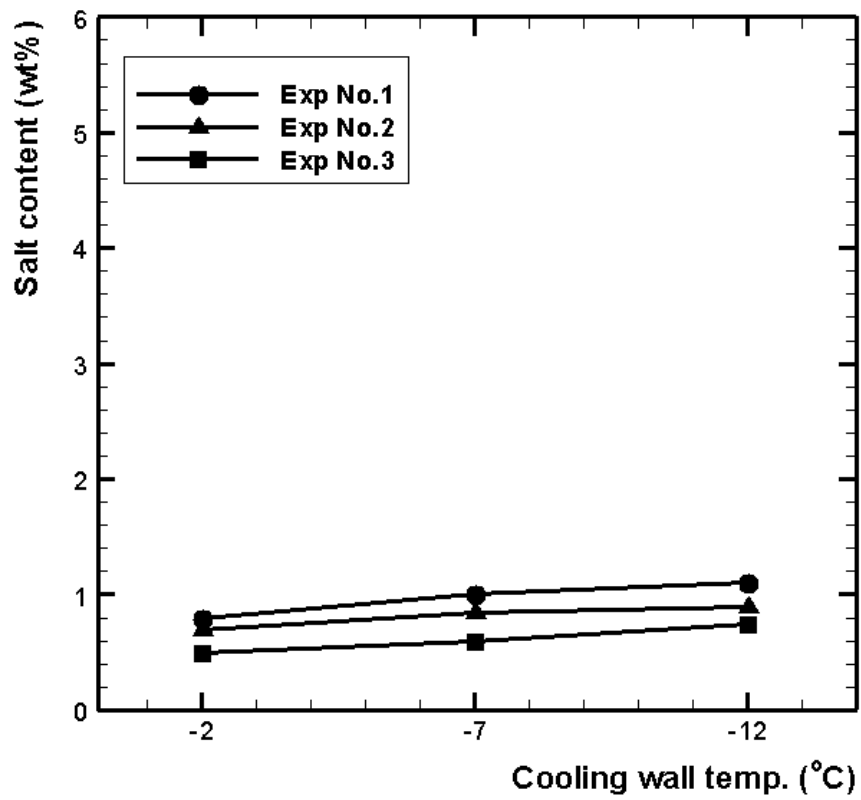


Fig. 4.21 Salt content of Ice

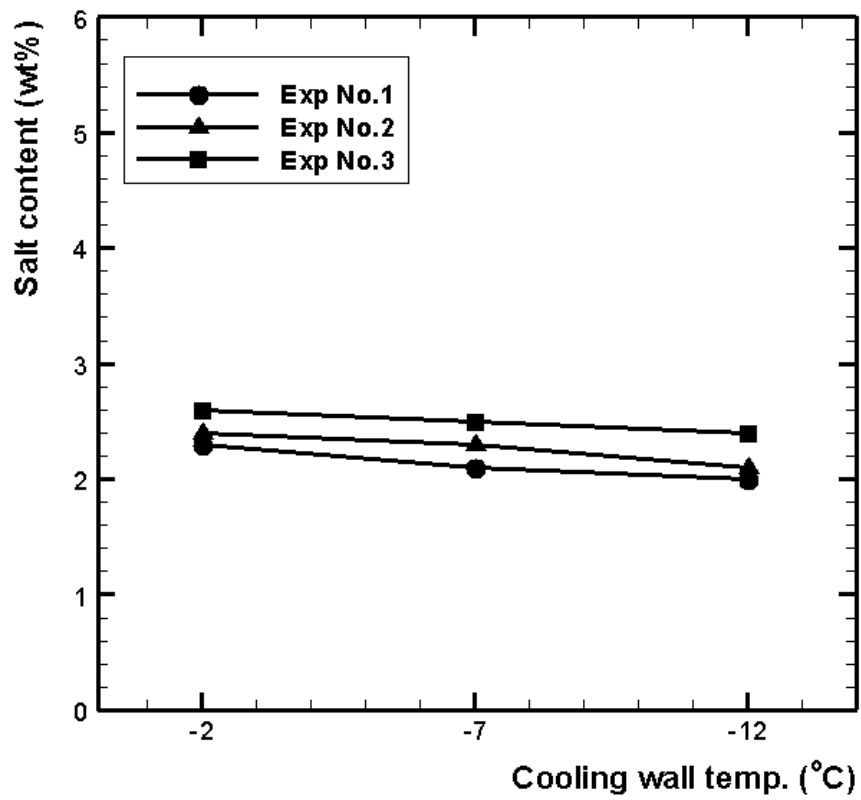


Fig. 4.22 Salt content of aqueous solution

Fig. 4.23 ~ Fig. 4.25는 수용액 농도가 3.6wt%일 경우의 유동방법이 동결층 형성에 미치는 영향을 가시화한 사진이다.

Fig. 4.26 ~ Fig. 4.28은 각 냉각면에서 유동방법에 따른 동결층의 두께 변화를 나타내는 것이다. 전술한 1.8wt% 와 같이 기포를 환모양의 분사 노즐을 통하여 냉각면에 직접 분사하는 방법이 원통벽면을 통해 간접적으로 분사하는 방법보다 동결층이 얇은 것은 분사되는 기포가 열전달을 방해하는 절연체 역할을 하고 있으며, 분사되는 기포의 양이 증가하면 열저항의 증가와 대류 열전달의 증가로 동결층은 더욱 발달할 수 없는 것으로 추정된다.

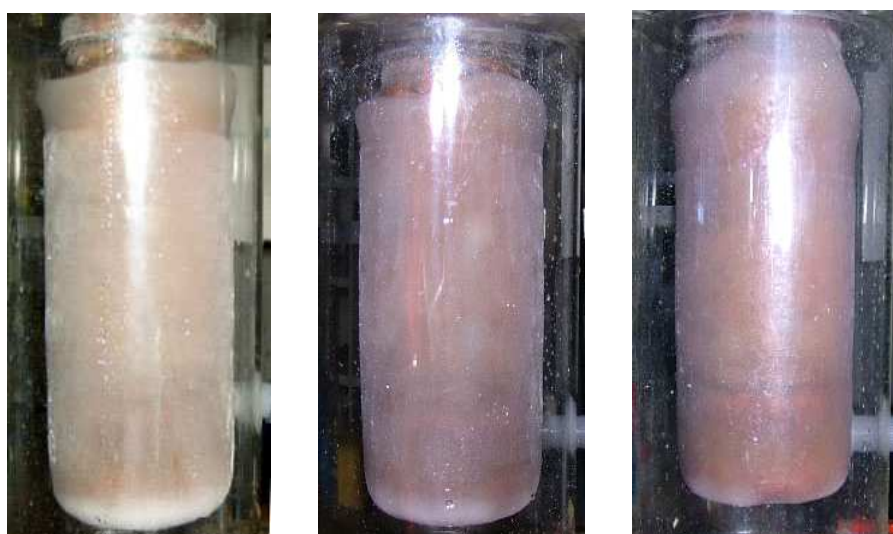
또한 Fig. 4.29 및 Fig. 4.30은 각각의 냉각면 온도에서 유동 방법에 따른 동결층과 잔류 수용액의 염분농도를 나타내는 것으로 이 경우에도 수용액의 농도 1.8wt%의 경우와 같이, 냉각면 온도와 관계없이 환모양 노즐을 통해 냉각면에 직접 유동을 주는 방식이 동결층 내의 염분농도가 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 시험부에 유입되는 공기가 절연체로써 작용하여 고농도의 용질이 충분히 동결층 밖으로 석출될 수 있도록 시간을 제공하여 주며 동시에 직접 동결층에 유입되려는 염분을 배제하기 때문이라고 생각된다.

결국 원통을 통해 기포를 분사하는 간접방식의 유동보다는 환모양의 노즐을 통해 냉각면에 직접 유동을 주어 유동특성을 좋게 함에 따라서 동결층에 염분농도가 낮아짐을 알 수 있으며, 이 결과 잔류 수용액의 농도가 증가함을 알 수 있다. 따라서 직접 분사 방식으로 유동특성을 좋게 하면 할수록 수용액 중 염분의 분리효과가 좋게 됨을 알 수 있다.



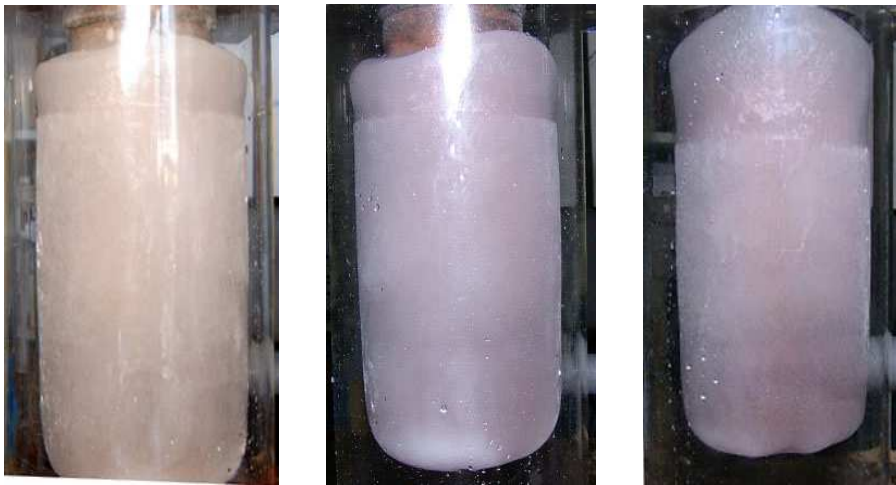
(a) Exp. No. 1 (b) Exp. No. 2 (c) Exp. No. 3

Fig. 4.23 Photograph of freezing at $C_i=3.6$ wt%, $T_w=-2^\circ\text{C}$



(a) Exp. No. 1 (b) Exp. No. 2 (c) Exp. No. 3

Fig. 4.24 Photograph of freezing at $C_i=3.6\text{wt}\%$, $T_w=-7^\circ\text{C}$



(a) Exp. No. 1

(b) Exp. No. 2

(c) Exp. No. 3

Fig. 4.25 Photograph of freezing at $C_i=3.6$ wt%, $T_w=-12^\circ\text{C}$

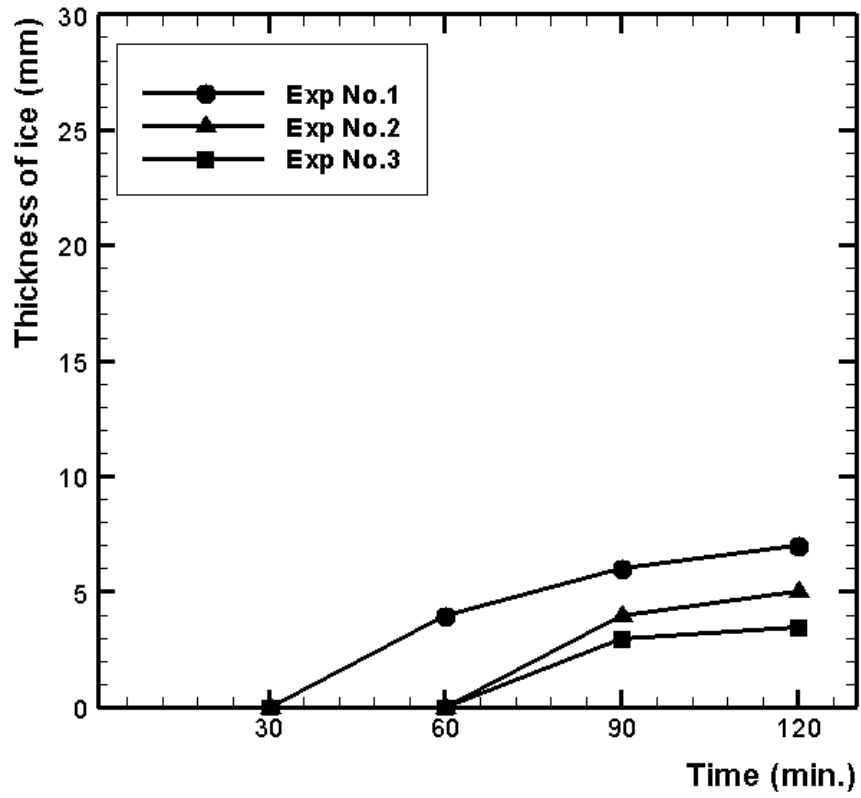


Fig. 4.26 Thickness of freezing at $C_i=3.6$ wt%, $T_w=-2^\circ\text{C}$

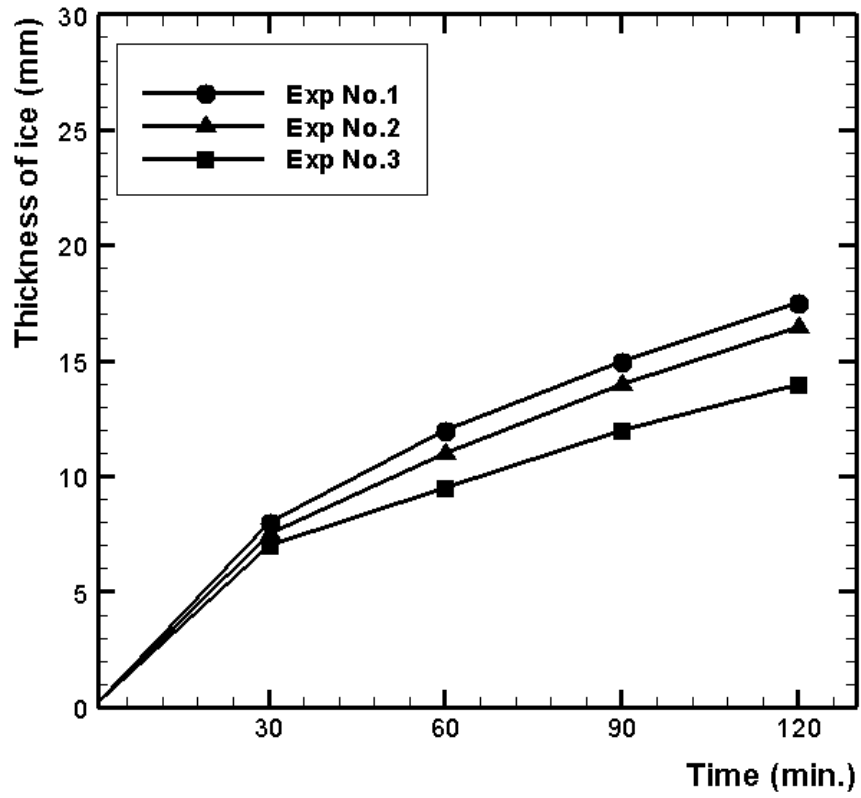


Fig. 4.27 Thickness of freezing at $C_i=3.6$ wt%, $T_w=-7^\circ\text{C}$

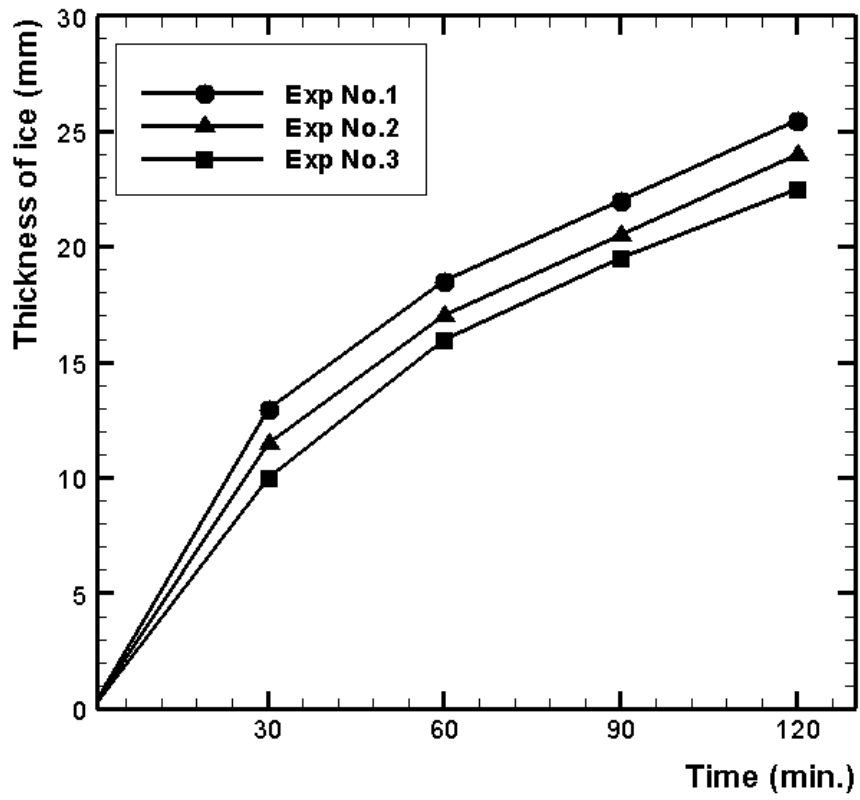


Fig. 4.28 Thickness of freezing at $C_i=3.6\text{wt}\%$, $T_w=-12^\circ\text{C}$

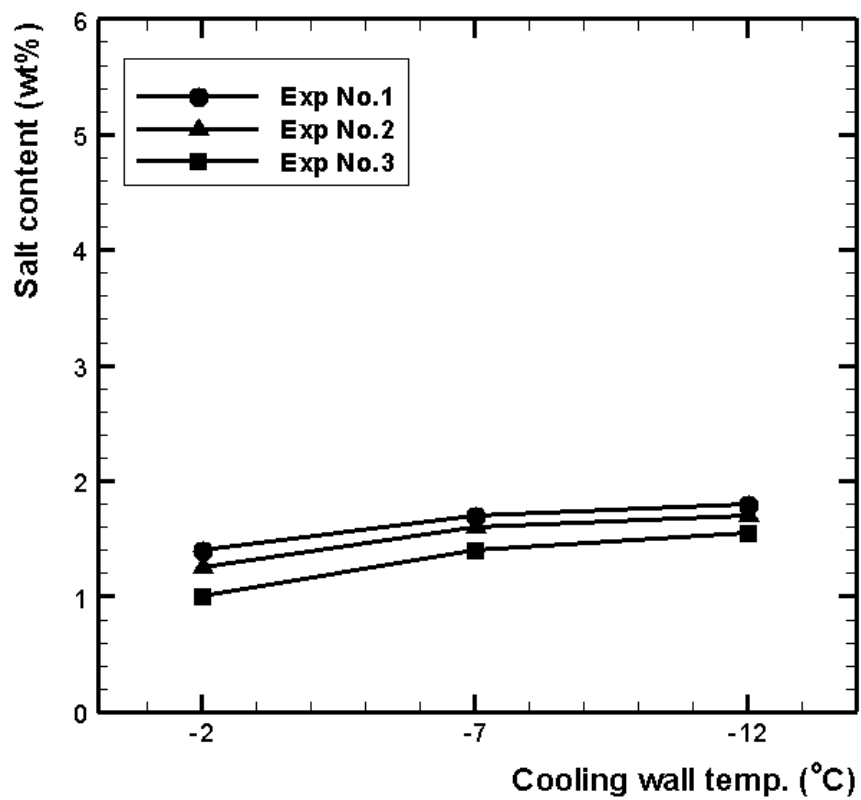


Fig. 4.29 Salt content of Ice

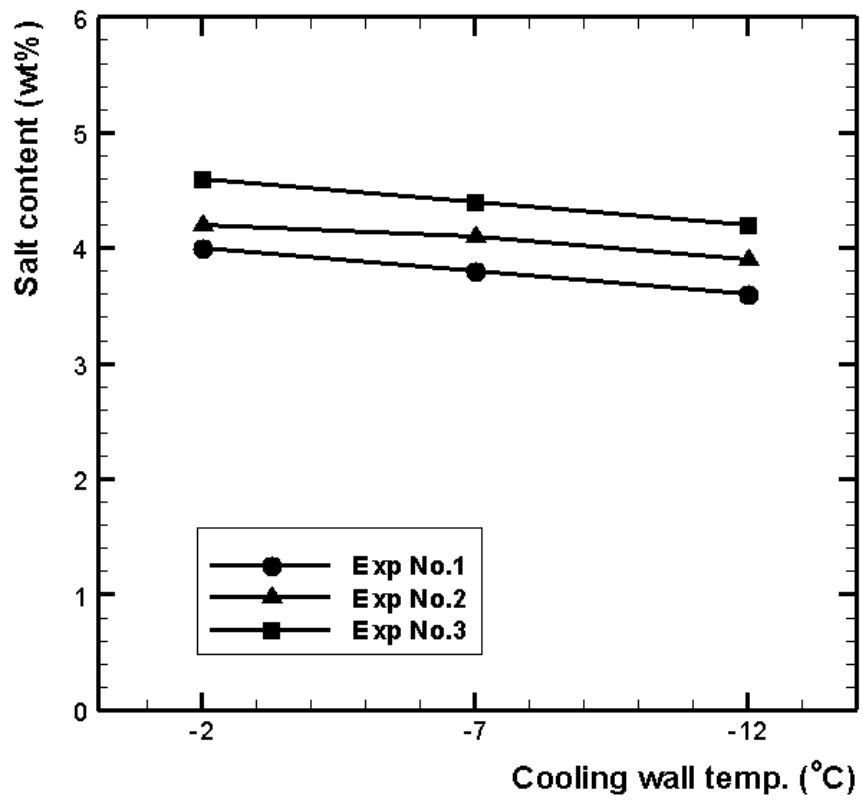


Fig. 4.30 Salt content of aqueous solution

제 5 장 수직원관에서 폐수의 농축

5.1 냉각면 온도에 따른 영향

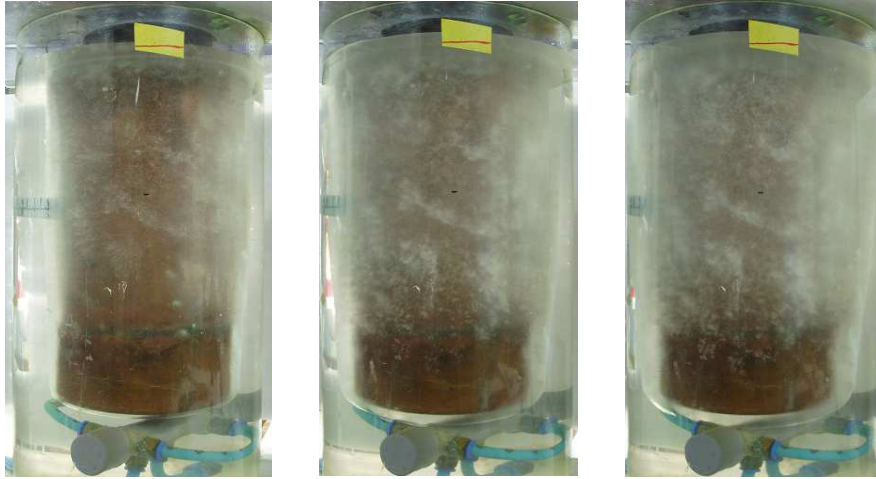
냉각면에서의 동결현상은 동결층, 동결거동, 열전달의 3가지가 상호 작용을 통해 밀접한 관계를 가지는 현상으로, 냉각면의 온도는 직접적으로 동결층 두께에 커다란 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 냉각면에서 초기에 침상빙이 급격하게 성장하게 되며 이로 인해 석출된 고농도의 중금속이 초기 동결층에 몰입되므로 이를 방지하기 위해 일정한 두께(1mm)로 초기 동결층을 형성하였다.

Fig. 5.1은 유동을 주지 않고 초기 동결층 1mm에서 동결을 시작하여 120분간 실험을 실시한 후의 동결거동을 가시화한 사진이며, Fig 5.2는 동일한 조건에서 유동을 가하여 실험을 실시한 후의 동결거동을 가시화한 사진이다. 그림으로부터 냉각면의 온도가 낮을수록 동결층이 두께가 더 두꺼워지고 있음을 알 수 있다. 이는 전술한 염화나트륨 수용액에서와 동일하게 냉각면의 온도가 낮을수록 동결계면에서의 온도구배가 커짐으로 냉각면의 열유속이 증가하게 되며, 그 결과 동결량도 커지게 되기 때문이다. 또한 Fig 5.1과 Fig 5.2를 비교하면 Fig 5.2의 동결층 조직이 치밀하고 단단한 투명 얼음을 형성하고 있으며, 이는 유동의 영향에 따라 얼음의 밀도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig 5.3~Fig 5.4는 각각의 온도 조건에 따라 시간 경과에 대한 동결

속도와 동결량의 변화를 나타낸 것으로, 그림과 같이 냉각면 온도가 상승할수록 동결량과 동결속도가 급격하게 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 냉각면 온도가 상승할수록 즉, 냉각면과 동결계면 사이의 열 낙차가 감소할수록 냉각면으로의 열유속이 감소하기 때문이다. 또 유동이 가해지는 조건에서 동결속도가 저하되는 것은 냉각면에 부착되려는 빙결정의 움직임이 유동에 의해 방해받기 때문으로 생각된다.

Fig. 5.5 와 Fig. 5.6은 냉각면 온도의 변화에 따른 얼음의 Pb, Cr 농도의 변화를 나타낸 것이며 Fig. 5.7과 Fig. 5.8은 동결 종료 후 잔류 수용액의 해당 중금속 농도를 나타낸 것이다. 그림으로부터 냉각면 온도가 높아질수록 얼음의 중금속 농도가 저감됨을 알 수 있다. 이는 냉각면 온도가 상승할수록 동결층의 성장률이 둔화되고 동결에 의해 석출된 중금속이 동결계면 밖으로 배제될 수 있는 시간이 증대되기 때문이다. 냉각면의 온도가 낮을수록 중금속의 농도가 상승하는 것은 초기 급속한 동결의 진행과정에서 석출된 중금속이 두껍게 형성된 침상빙 사이에 몰입되기 때문인 것으로 생각된다.

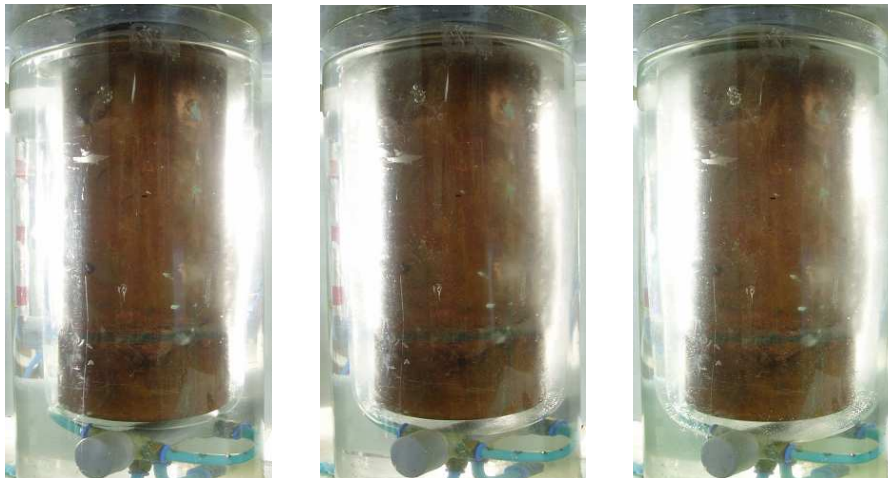


(a) $T_w = -2^\circ\text{C}$

(b) $T_w = -7^\circ\text{C}$

(c) $T_w = -12^\circ\text{C}$

Fig. 5.1 Photograph of freezing at not flow field



(a) $T_w = -2^\circ\text{C}$

(b) $T_w = -7^\circ\text{C}$

(c) $T_w = -12^\circ\text{C}$

Fig. 5.2 Photograph of freezing at a shape of ring flow field

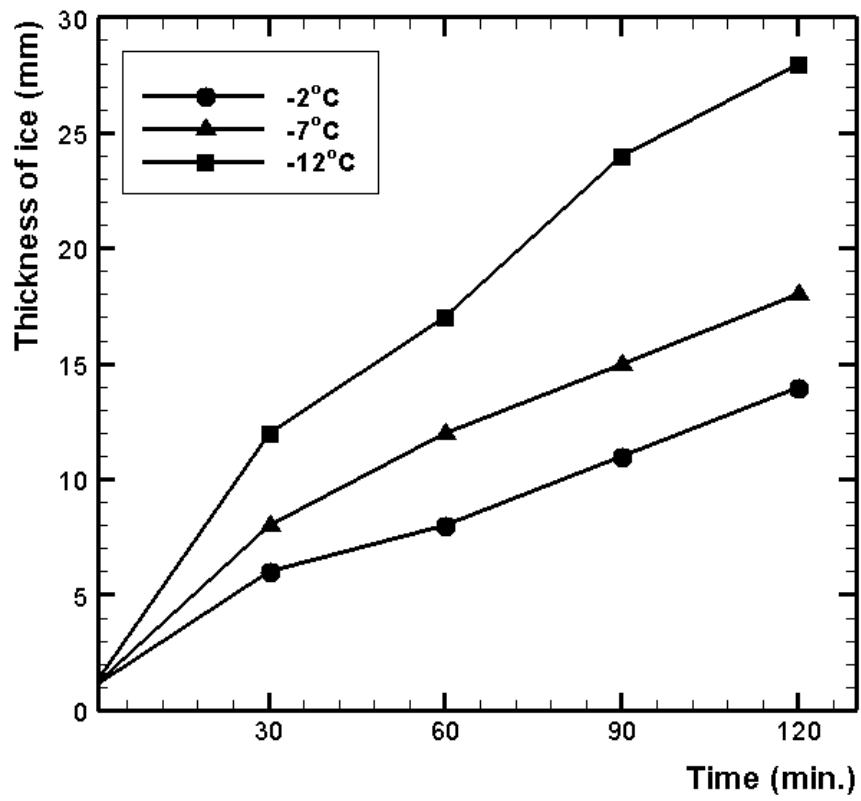


Fig 5.3 Thickness of ice at not flow field

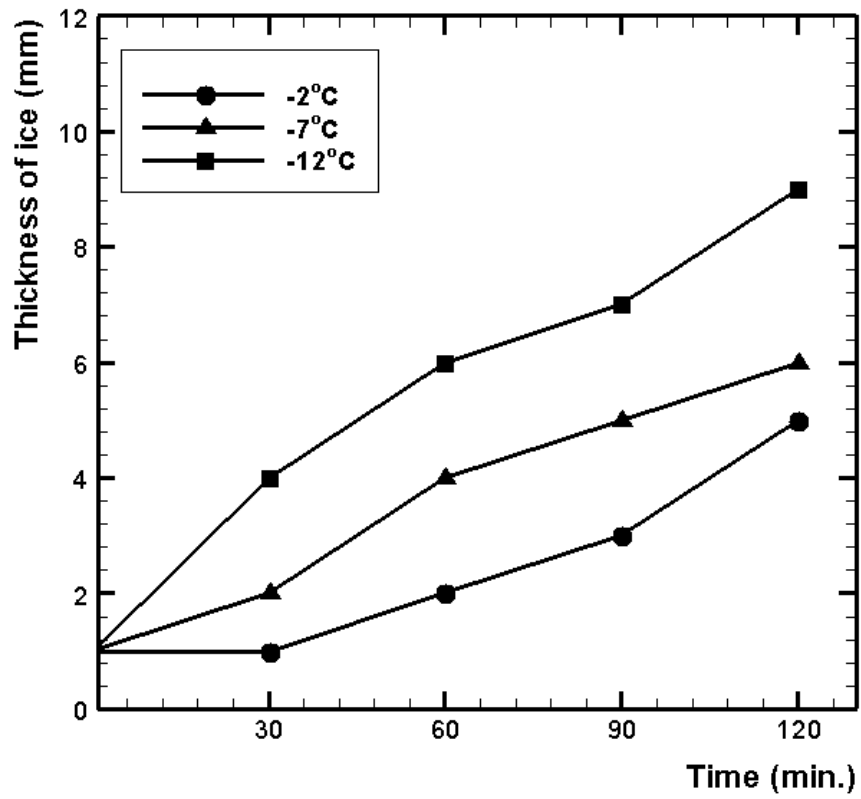


Fig 5.4 Thickness of ice at a shape of ring flow field

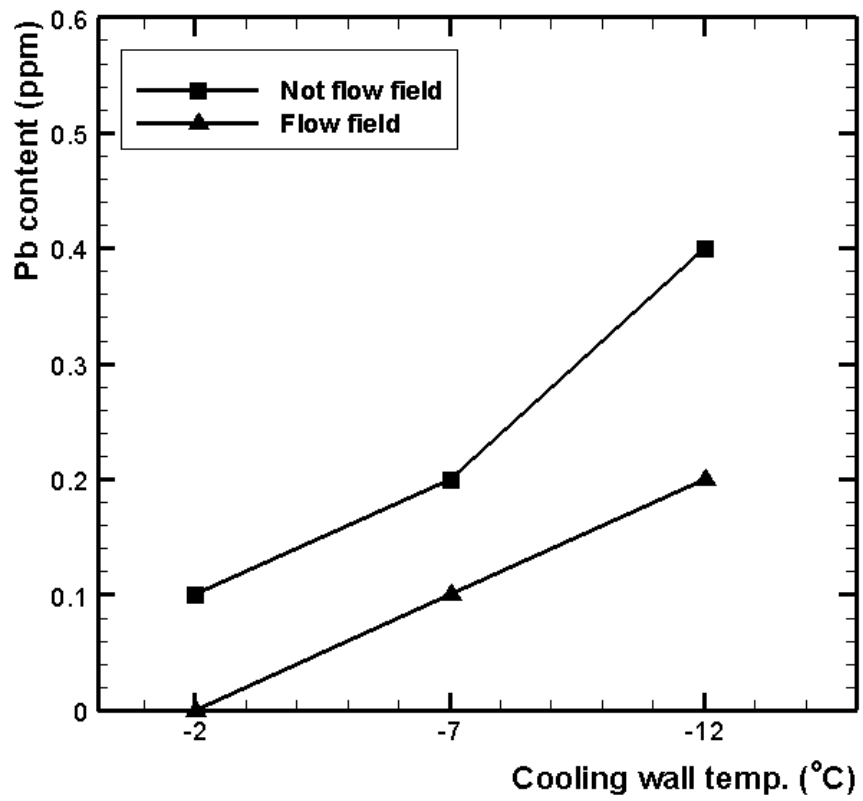


Fig. 5.5 Pb content in ice

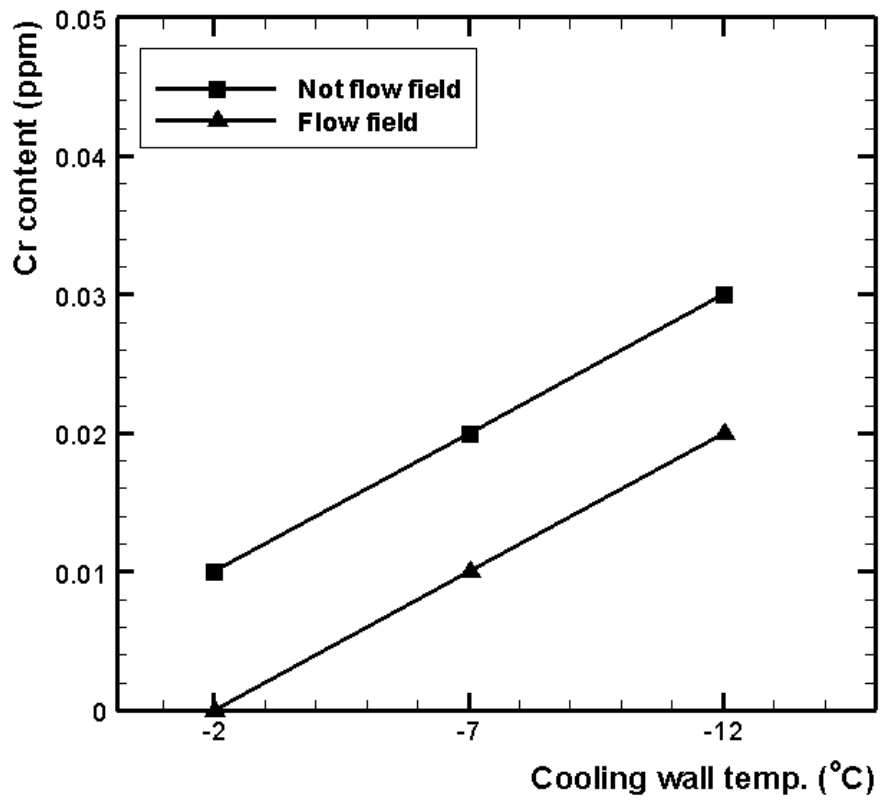


Fig. 5.6 Cr content in ice

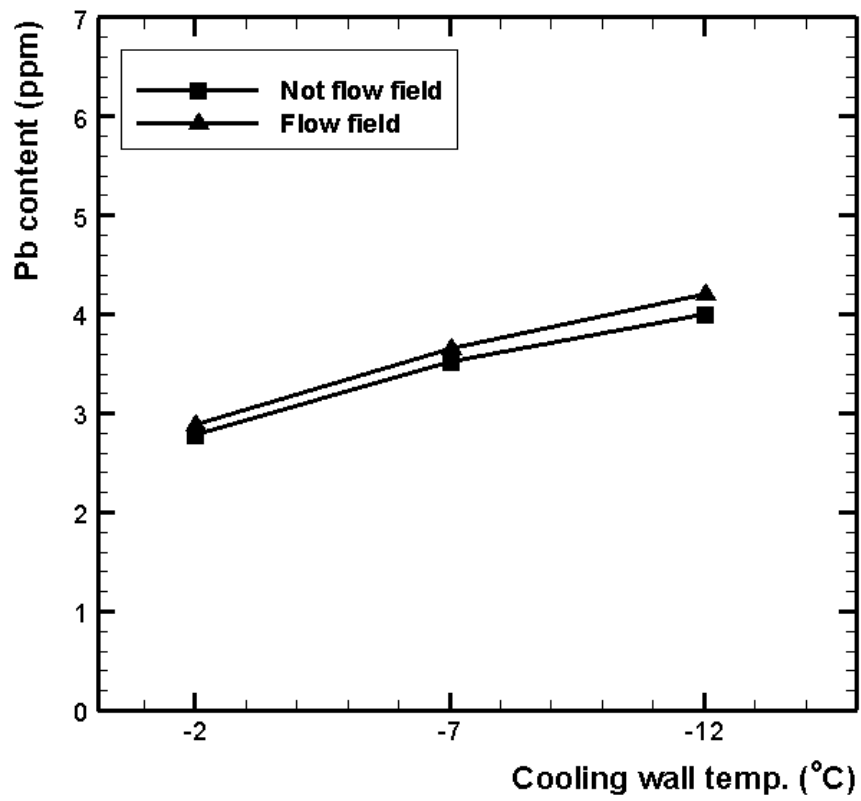


Fig. 5.7 Pb content in aqueous solution

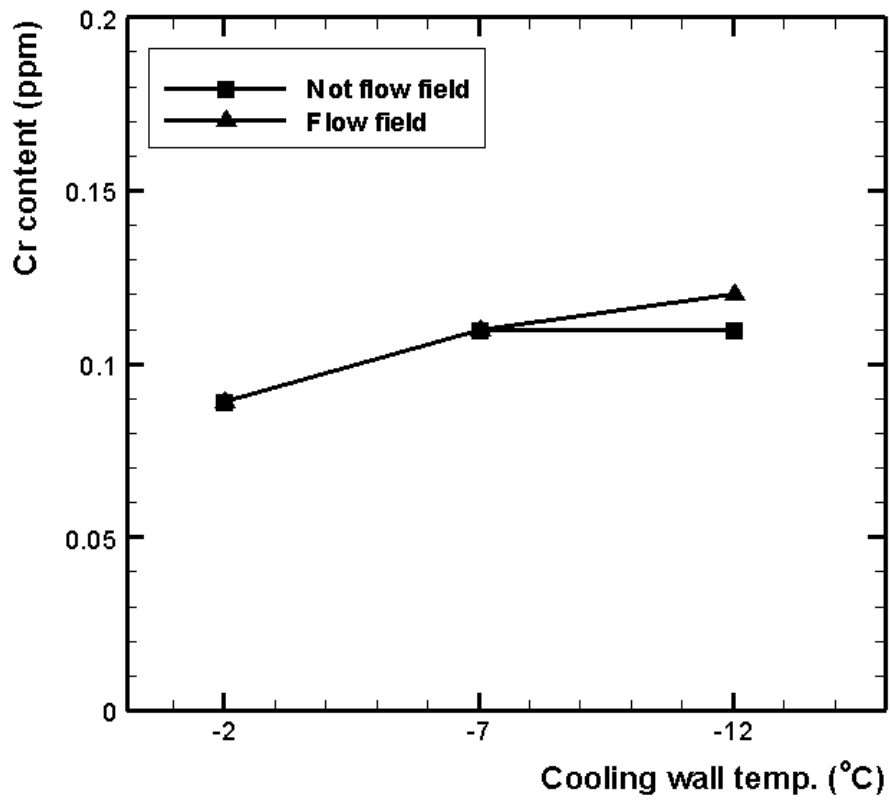


Fig. 5.8 Cr content in aqueous solution

5.2 유동에 따른 영향

본 실험은 수용액의 유동이 동결거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 유동이 주어지지 않았을 때와 기초 실험에서 확인 한 것과 같이 환모양의 노즐을 통해 냉각면에 직접 기포를 분사하여 유동을 형성 했을 때를 비교 시험하였다. 원통내부에 환모양의 기포분사 노즐을 설치하여 직접 유동을 가하는 방식을 선택한 이유는 기초 실험에서 확인된 바와 같이 수직원관 주위에 직접적인 공기유동을 주어 침상빙과 함께 중금속 입자가 착상하려는 현상을 의도적으로 방해하여 더욱더 순수한 빙을 생산하기 위해서이다.

Fig. 5.9 ~ Fig 5.11은 각각 유동이 없을 경우 동결층의 두께와 유동을 가하였을 때의 동결층 두께의 변화를 보여 주고 있다. 유동이 없을 경우에 비해 유동을 주었을 경우 얼음의 양이 현저히 낮아지는 것을 알 수 있는데 이는 시험부에 분사되는 기포에 의한 유동이 동결 계면과 수용액의 접촉을 방해하는 절연체 역할을 하므로 동결계면에서 수용액으로의 열전달을 방해하여 동결층의 성장이 감소하는 것으로 생각된다.

Fig 5.5 와 Fig. 5.6을 보면 유동을 주었을 때 동결층 내 중금속의 농도가 낮아지는 것을 알 수 있는데 이것은 기포의 유동이 동결층의 성장속도를 늦추어 중금속이 석출될 수 있는 시간을 증대시켜 줌과 동시에 동결층에 유입되려는 중금속의 성분을 배제하기 때문이라 생각된다.

Fig. 5.7과 Fig. 5.8은 동결 종료 후 잔여 수용액의 해당 중금속 농도를 나타낸 것이다.



(a) not flow field



(b) flow field

Fig. 5.9 Photograph of freezing at $T_w = -2^\circ\text{C}$



(a) not flow field



(b) flow field

Fig. 5.10 Photograph of freezing at $T_w = -7^\circ\text{C}$



(a) Not flow field



(b) Flow field

Fig. 5.11 Photograph of freezing at $T_w = -12^\circ\text{C}$

5.3 초기 빙층 두께에 따른 영향

Fig 5.12~Fig 5.15는 유동이 주어진 조건하의 각각의 냉각면 온도에서 초기 동결층 두께 각각 1mm와 5mm에서의 동결을 시작하여 120분간 실험을 실시한 후의 동결거동을 가시화한 사진이다. Fig 5.12에서는 초기 동결빙층이 5mm이고 냉각면의 온도가 -2°C 인 경우에는 동결층이 성장하지 못하였으며, 냉각면의 온도 -7°C 와 -12°C 에서는 동결층의 두께가 거의 비슷한 것을 알 수 있으며, 이는 동결빙층이 얇은 1mm에서 동결층의 성장 속도가 빠르기 때문이다. Fig 5.15는 실험의 정확도를 높이기 위하여 냉각면의 온도 -15°C 를 추가하여 실험하였다.

Fig. 5.16 와 Fig. 5.17은 각각 얼음 속에 포함된 Pb와 Cr의 농도 변화를 나타내었으며 Fig. 5.18과 Fig. 5.19는 잔류수용액 속에 포함된 중금속의 농도 변화를 나타내었다. Fig 5.16과 Fig 5.17 에서 얼음 속에 포함된 중금속 농도를 살펴보면 1mm일 경우보다 5mm일 경우에 더 낮은 수치를 나타내는 것을 알 수 있는데 이는 초기 순수한 얼음의 두께가 두꺼워질수록 동결층의 성장속도가 느려져 용질을 충분히 동결계면에서 배재시기 때문이라 생각한다. 또한 5mm일 경우 -7°C , -12°C 에서는 동결층에서 두 중금속이 모두 검출되지 않는 이상적인 분리가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig 5.18와 Fig 5.19 에서 잔류 수용액에 포함된 중금속의 농도가 나타나 있다. Pb와 Cr이 동일한 양상을 보이고 있으며, -2 와 -7°C 에서는 중금속의 농도가 초기 동결층 5mm보다 1mm가 높게 측정되는데 이는 초

기 동결층 5mm에서 보다 1mm에서 동결층의 발달이 우수하여 중금속이 물입되더라도 많은 양의 물이 동결되므로 수용액의 중금속 농도가 높아지기 때문이며, 냉각면 온도 -12°C 와 -15°C 에서는 5mm에서도 동결층의 형성이 발달되고, 동결층에서 중금속이 배제되면서 원통 내 잔류 수용액의 중금속 농도가 급상승하는 것을 볼 수 있다.

이 결과들을 종합해 보면 초기 얼음 동결두께 5mm일 경우 -12°C 에서의 효율이 본 실험에서 가장 높다는 것을 알 수 있다.



(a) $S_i=1\text{mm}$



(b) $S_i=5\text{mm}$

Fig. 5.12 Photograph of freezing at $T_w=-2^\circ\text{C}$



(a) $S_i=1\text{mm}$



(b) $S_i=5\text{mm}$

Fig. 5.13 Photograph of freezing at $T_w=-7^\circ\text{C}$



(a) $S_i=1\text{mm}$

(b) $S_i=5\text{mm}$

Fig. 5.14 Photograph of freezing at $T_w=-12^\circ\text{C}$



(a) $S_i=5\text{mm}$

Fig. 5.15 Photograph of freezing at $T_w=-15^\circ\text{C}$

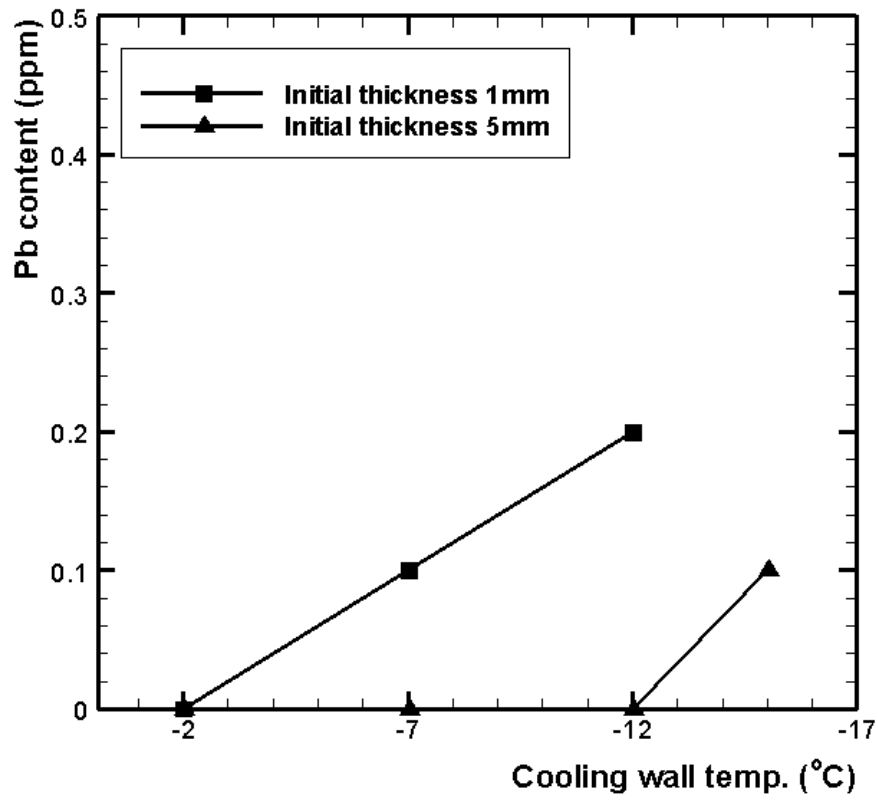


Fig. 5.16 Pb content in ice

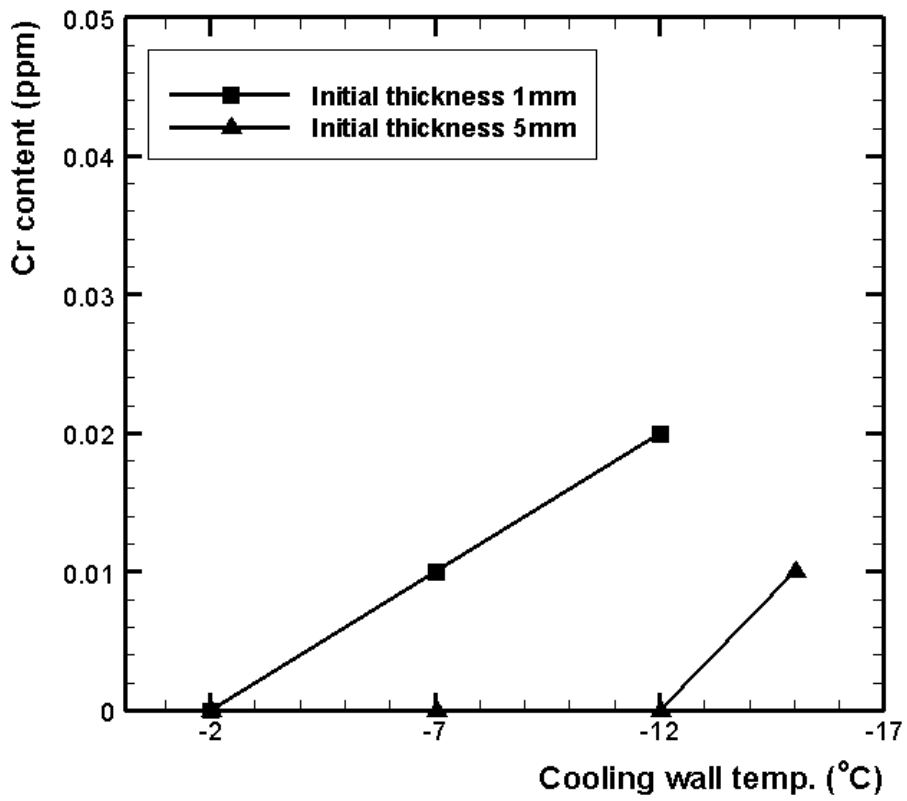


Fig. 5.17 Cr content in ice

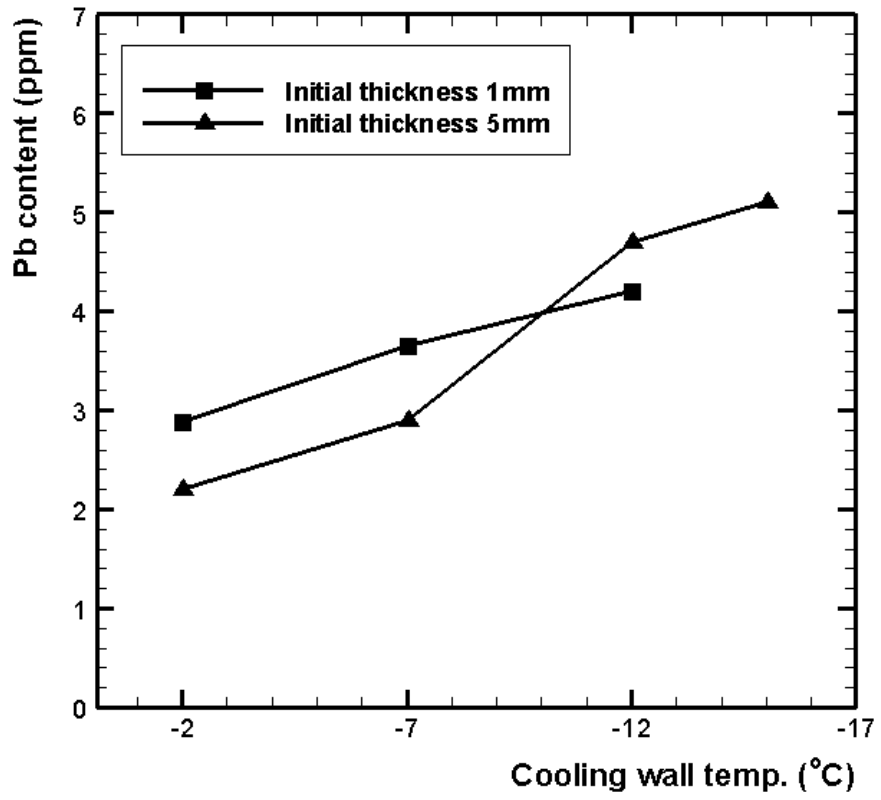


Fig. 5.18 Pb content in aqueous solution

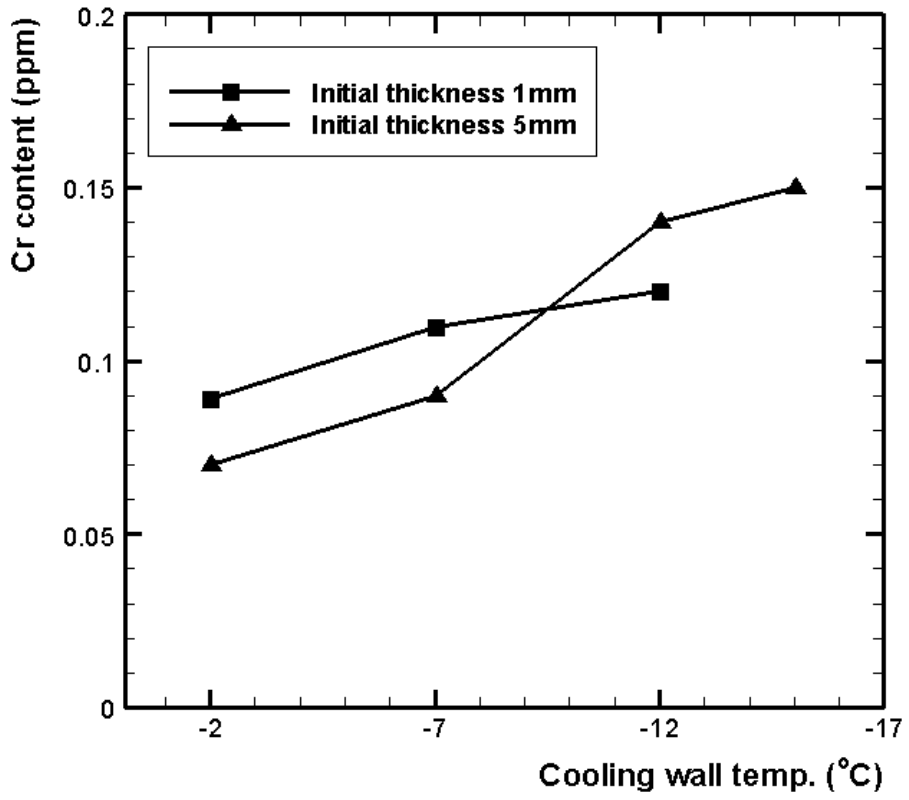


Fig. 5.19 Cr content in aqueous solution

제 5 장 결 론

본 연구에서는 동결폐수처리장치의 핵심 기술인 폐수의 동결거동에 대한 기초 자료를 확보하기 위하여 예비실험과 본 실험을 통하여 본 실험 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 냉각면 온도가 낮아질수록 생성되는 동결층은 발달하나 동결층내의 염분농도는 1.8wt%와 3.6wt% 수용액 각각에 대하여 1.14~1.21wt% 및 0~2.22wt%로 농도가 높아진다.
- (2) 수용액의 농도가 높을수록 생성되는 동결층의 두께는 얇으며, 동결층 내의 염분 함유량은 높다.
- (3) 냉각면 직접분사방식의 유동 특성을 갖을수록 표 5.1과 같이 동결층의 염분농도는 감소한다.

Table 5.1 The effect of flow method

Cooling temperature(°C)	Salt content of Ice(wt%)			
	1.8wt% aqueous solution		3.6wt% aqueous solution	
	Exp. no 1	Exp. no 2	Exp. no 1	Exp. no 2
-2	0.8	0.7	1.4	1.2
-7	1.0	0.8	1.7	1.6
-12	1.1	0.9	1.8	1.7

(4) 냉각면 온도가 낮아질수록 생성되는 동결층은 발달하며 동결층 내 중금속의 농도는 유동장과 비유동장에 각각에 대해 Pb 농도는 0.1~0.4ppm 및 0.0~0.2ppm, Cr 농도는 0.01~0.03ppm 및 0~0.02ppm로 농도가 높아진다.

(5) 유동의 영향이 가해지면 동결층의 발달이 적어지고, 동결층 내의 중금속 농도는 낮다.

(6) 초기 얼음 두께가 두꺼울수록 표 5.2와 같이 동결층 내의 중금속 농도는 작다.

Table 5.2 The effect of initial thickness

Cooling temperature(℃)	Pb content of Ice(ppm)		Cr content of Ice(ppm)	
	1mm	5mm	1mm	5mm
-2	0	0	0	0
-7	0.1	0	0.01	0
-12	0.2	0	0.02	0

참 고 문 헌

- (1) Gleick P.H., "Water in Crisis"(1993).
- (2) 박선구 외 2인, "업종별 산업폐수의 수질오염물질 배출 특성", analytical science & technology, Vol.12, No.2, pp.142, (1999).
- (3) 송영채, 이은경, " 동결농축법에 의한 축산폐수의 처리에 있어서 폐수성상의 영향", 대한환경공학회 '98 추계학술대회, (1998).
- (4) R.W. Powell, "Advance in Physics", Vol. 7, pp.276,(1958).
- (5) J.K. Landauer & H. Plumb, SIPRE Research Paper, Vol. 16, (1956).
- (6) Gilpin, R.R., "The Effect of Cooling Rate on the Formation of Dendritic Ice in a Pipe With No Mail Flow", Trans, ASME. J. Heat Transfer, 99, pp.419~424, (1977).
- (7) Gilpin, R.R., "The Effect of Dendritic Ice Formation in Water Pipe", Int. J. Heat Mass Transfer, 20, pp.693~699, (1977).
- (8) Gilpin, R.R., " Cooling of a Horizontal Cylinder of Water Through its Maximum Density Point at 4°C", Int. J. Heat Mass Transfer, 18, pp.1307~1315, (1975).
- (9) Cheng, K.C., Takeuchi, M., "Transient Natural Convection of Water in a Horizontal Pipe with Constant Cooling Rate Thought 4°C" J. Heat Transfer, 98, pp.581~587, (1976).

- (10) 福迫尙一郎, “成層をなす圓官内流體の自然對流熱傳達”, 日本機械學會論文集, 54, 499, pp.641, (1989).
- (11) 平田哲夫, “圓官内流れの凍結閉そくに關する研究”, 日本機械學會論文集(B編) 51券, 464号, pp.1243~1250, (1985).
- (12) 稻葉英男, 福田武幸, 齋藤凶, 戸倉郁夫, “圓官内流動水の凍結舉動に關する研究”, 日本冷凍協會論文集, Vol.4, No.2, pp.71~79, (1987).
- (13) 조이제, “유동장을 동반한 해수동결거동에 관한 실험적 연구”, 한국해양대학교 석사학위논문. pp.16, (2000).
- (14) Stephan, K., Genthner, K., and Holzkecht, B., “Heat Conduction in Solidification Coupled with Phase Transformation in the Solid”, Proc. of the 5th. Int. Heat Transfer Conf. Vol.1, pp.235~239, (1988)
- (15) 김성태, “냉각원관 주위의 해수동결거동에 관한 실험적 연구”, 한국해양대학교 석사학위논문, pp.12, (2000).
- (16) T. Hirata, R.R. Gilpin & K.C. Cheng, Int. J. Heat Mass Transfer., 22, pp.1435, (1979).
- (17) 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).
- (18) 林勇二郎・加 信治, “液體凝固研究(第一報, 凝固の過程と移動速度論)”, 第17回日本伝熱講シンプジウム演論文集, pp.523~525, (昭55).
- (19) 福迫尙一郎, 稻葉英男, “低溫環境下の伝熱現象とその應用”, 養賢堂, pp.320~335, (1996).

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 부족한 저를 항상 따뜻한 사랑과 세심한 정으로 보살펴 주시고 학문적, 정신적으로 많은 가르침을 주신 오철지 교수님께 머리 숙여 감사드립니다.

또한 바쁘신 가운데에도 많은 조언과 자상한 가르침을 주시고 세심하게 심사해 주신 윤석훈 교수님과 김경은 교수님께 마음속 깊은 감사를 드립니다.

그리고 본 논문이 완성되기 까지 힘들고 어려울 때 끊임없는 격려와 도움을 주신 박대식님, 손용길님, 최영규님, 원종호님, 배성우님, 지재훈님과 연구실 후배님들께 깊은 감사의 마음을 전합니다. 또한 학문에 전념할 수 있도록 물심양면으로 도와주신 연구원 원장님 이하 전 직원분들께 감사드리며, 항상 많은 관심과 격려를 주신 김정환님, 정인님, 광민석님, 김태형님, 차지협님께 깊은 감사를 드립니다.

끝으로 지금까지 많은 어려움 속에서도 저를 믿고 든든한 후원자가 되어 주었던 어머님과 모든 가족들, 사랑하는 아내에게 오늘의 모든 기쁨을 드리며 비록 짧은 시간이었지만 많은 것을 배우게 된 대학원 생활을 통해 저를 지켜봐 주시는 모든 분들의 기대에 어긋나지 않도록 언제나 최선을 다하는 모습으로 열심히 살아가겠습니다.