

# 동결농축법을 이용한 염수 및 중금속 수용액의 동결거동에 관한 실험 연구

김정식\* · 임승택\*\* · † 오철

\*,\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학과 대학원, † 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

## An Experimental Study on Freezing Behavior of NaCl and Heavy Metal Aqueous Solution Using Freeze Concentration Method

Jung-Sik Kim\* · Seung-Taek Lim\*\* · † Cheol Oh

\*\*\* Graduate school of National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

† Professor, Division of Marine Systems Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요 약** : 동결농축폐수처리의 기술은 열역학적 효율이 높고 에너지 소비량이 작아 중소규모로 적합하며, 용수 재활용과 용해열의 냉열 재이용이 가능한 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 폐수 처리효율이 높은 동결농축폐수처리장치의 개발을 위해 수직원관 형태의 제빙관을 대상으로 염화나트륨수용액을 이용한 기초 실험을 통해 냉각면 온도, 기포 분사 방법에 따른 분리 성능을 확인 후 대표적 중금속인 Pb, Cr 수용액을 대상으로 냉각면 온도, 기포 직접 분사, 과냉각을 방지하기 위한 용질을 포함하지 않은 초기 빙층 두께의 영향에 따른 중금속 분리 성능을 실험 통해 확인하였다. 실험결과 두 수용액에서 모두 냉각면의 온도가 낮을수록 동결층의 성장속도가 빨라지고 용질의 분리효율이 저하되었다. 기포를 분사하는 방법 중에는 환모양의 노즐을 통해 동결면에 직접 분사하는 방법이 원통벽면을 통해 간접 분사하는 것 보다 분리효율이 높게 나타났으며, 초기 빙층의 두께에 따른 실험에서는 1mm 보다는 5mm의 두께에서 분리효율이 더 우수한 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 동결농축, 동결거동, 동결속도, 기포유동법, 초기동결층

**Abstract** : Recently, waste water treatment system is developed in small and middle size to get more economic advantage . Freeze concentration system has high thermodynamic efficiency and low energy consumption, can re-use purified water and cold energy obtained from ice. This study was experimentally performed to investigate pollution containment in frozen layer by cooling wall temperature, air-bubble flow methods, initial ice-lining thickness of frozen layer in NaCl aqueous solution and the representative heavy metals, Pb and Cr aqueous solution. As the result, a decrease in the cooling wall temperature bring a higher growth rate on ice front and the more solute was involved in frozen layer. The method to inject directly air-bubble into ice-liquid interface through ring shape nozzle gave high purity of ice compared to indirect method. Ice lining in 5mm thickness resulted in frozen layer with higher purity than 1mm thickness.

**Key words** : freeze concentration, freezing behavior, freezing velocity, air-bubble flow method, initial ice-lining

## 1. 서 론

각종 산업의 발달로 다양한 종류의 고농도 산업 폐수들이 배출되고 있어, 산업 폐수의 처리는 수질오염을 막기 위한 중요한 요소로 연구되고 있다. 중소규모의 산업용 폐수는 증발농축법, 분리막법, 전기투석법 등과 같은 물리·화학적인 방법을 사용하고 있으나 복잡한 처리 시설과 큰 설치 면적, 높은 처리 비용이 요구되어 중소규모에 적합한 경제적이며 환경 친화적으로 용수 재이용, 자원 및 에너지의 회수, 저비용 고효율이 가능한 방법들이 연구되고 있다(Kim, 2010).

이 중 동결농축법은 빙점이하의 수온에서 순수한 얼음결정이 생성되는 동안에 폐수에 함유된 유·무기 물질이 동결되지 않는 액체로 분리 농축되는 원리를 이용한 것으로 중소규모로 발생하는 폐수의 정화 및 재이용 기술에 응용성이 뛰어난 것으로 알려져 있다(Jeong, 2005; Song and Lee, 1998).

또한 동결농축법은 해수를 동결시키는 과정에서 빙의 결정격자에는 냉각속도에 따라 염분이 몰입되지 않고 배제됨을 이용하여 해수 담수화 기술로도 응용 가능한 장점을 지니고 있으며(Park et al., 2001), 냉동장치를 갖추지 못한 소형 어선에서 종래 청수를 사용하여 제빙하는 대신 해수를 이용하여 어류와 삼투압을 일으키지 않는 염분 농도의 얼음을 생산

† 교신저자 : 종신회원, ohcheol@hhu.ac.kr 051)410-4268

\* 연회원, kjsk2@komeri.re.kr 051)400-5141

\*\* 연회원, dhdfhj@hhu.ac.kr 051)410-4268

하는데도 응용이 가능하다. 그리고 최근 해양투기가 금지된 음식물 폐수 및 분뇨, 산업 폐수를 농축하여 배출량을 최소화 할 수 있어 대안 기술로도 검토 가능한 장점이 있다.

이론적으로는 상대적으로 작은 물 분자의 동결과정에서는 용질을 결정으로부터 배제하려는 영향에 따라 순수한 빙이 성장하게 되지만 실제적으로는 조건에 따라 용질이 빙층 내에 포함되어 분리효율이 떨어지게 된다. 이러한 원인 중 동결계면의 진행속도가 농축효과에 크게 영향을 미치는 것으로 기존 연구는 보고하고 있다(Bae, 1995). 특히 전열방향으로 1차원적인 동결층이 성장되는 전진동결농축(progressive freeze concentration)에서는 수용액과 얼음간의 분리효율이 고액경계면에서의 물질전달율과 얼음의 성장속도에 의해 지배된다고 알려져 있다(Chidphong et al., 2003; Ling et al., 1997).

또한, 일반적으로는 액체를 저온환경 하에서 응고점이하로 냉각하는 경우 응고점에서 동결하지 않고 과냉각된 후 시간의 경과와 함께 과냉각도가 증가하다가 빙핵이 생성되며 얼음이 성장하게 된다. 이때 형성되는 수지상(樹枝狀)의 얼음에 석출되는 고농도의 용질이 물입되어 초기 동결 빙층의 용질 농도가 상승하는 현상이 발생한다(Oh, 1999; Hiroshi, 1999). Fig. 1은 냉각면의 온도를 빙점이하로 유지하였을 때 시간경과에 따른 동결거동을 나타낸 것이다.

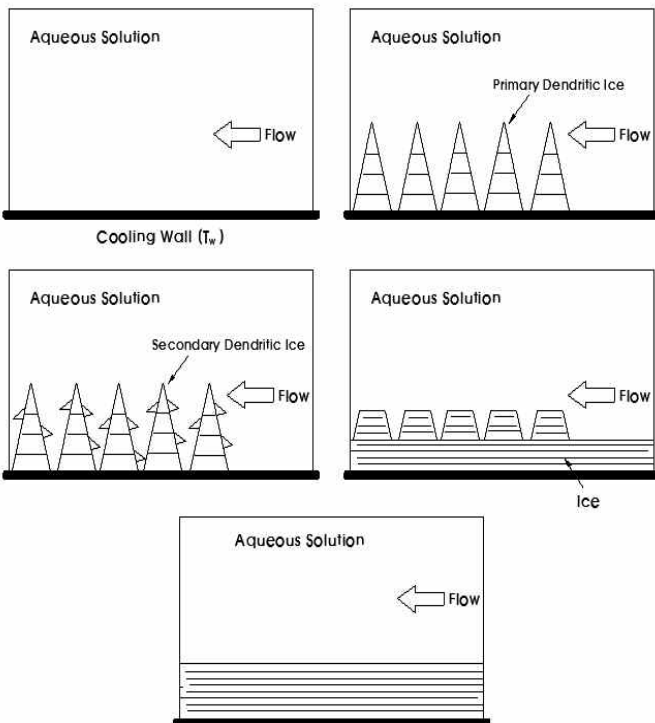


Fig. 1 Model of water freezing behavior

따라서 본 연구에서는 동결계면의 진행속도와 관련된 냉각면의 온도 변화에 따른 분리효율과 동결계면의 속도와 물질 전달율을 동시에 조절할 수 있는 기포 분사의 방법에 따른

영향에 대해 관찰하였다. 또, 초기 과냉각에 따른 용질의 물입을 방지하기 위해 적용하는 초기 빙층에 대한 영향을 평가하기 위해 초기 빙층의 적용 두께에 따른 분리효율을 실험하였다. 실험은 향후 해수 담수화를 위한 응용을 고려하여 염화나트륨수용액을 이용 기초 실험을 실시하고 우수한 분리효율을 갖는 기포 분사 방법으로 대표적인 산업폐수 성분인 Pb, Cr 수용액을 임의 조성 후 실시하여 향후 이상적인 동결 폐수농축처리시스템 개발의 방향을 제시하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 2는 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 동결이 진행되는 실험부(Test Section), 냉각면을 소정의 온도로 일정하게 유지하기 위한 브라인 순환부, 수용액에 기포를 가하기 위해 일정한 온도로 조절된 공기를 분사하는 기포 분사 장치, 동결 냉각면 및 수용액의 온도 측정 장치와 동결층 두께를 가시화하기 위한 가시화 장치로 구성되어 있다.

시험부 ①은 가시화가 가능하도록 내경 200mm, 길이 400mm, 두께 5mm의 투명 아크릴 재질의 원통으로 제작하였고, 중앙에 내경 100mm, 길이 300mm, 두께 2.5mm 원형 동관을 수직으로 설치하였다. 동관 내에는 노즐을 설치하여 냉각면에 균등하게 브라인을 분사하여 냉각면의 온도를 일정하게 유지하도록 하였다. 냉각면 온도는 동관의 양쪽 표면에 6개의 열전대(K type)를 설치하여 측정하였다. 시험부의 수직 원관 표면을 냉각시키는 냉매로는 소정의 온도로 조절된 브라인(에틸렌글리콜 40% 수용액)을 사용하였고 브라인 탱크 ②에서 순환 펌프③를 이용 수직원관의 내측면의 온도가 균일하게 되도록 노즐을 통하여 분사하였다. 기포의 분사는 공기압축기 ⑧에 의해 공급된 공기를 냉각기를 거쳐 소정의 온도로 조절한 후 유량계를 통하여 일정 유량으로 공급하였으며, 공급 방식으로 아크릴 원통의 벽면에서 네 방향에서 분사하는 방법과 환모양의 고리형 노즐을 수직원관 하부에 설치하여 냉각면에 직접 분사하는 방법을 사용하였다.

### 2.2 실험방법

실험은 염화나트륨수용액을 이용한 기초 실험과 대표적인 중금속인 Pb, Cr 수용액을 이용한 본 실험으로 나누어 실시하였다. 냉동기를 작동시켜 각 부의 온도를 시험조건에 맞게 유지시키고 수용액을 5℃로 일정하게 냉각하여 시험부에 공급한 후 브라인 펌프를 가동하여 냉각면에 브라인을 공급하는 시점을 각 실험의 시작으로 하였다. 실험 시작 후 매 30분마다 동결층의 두께를 측정하였으며 2시간이 경과한 시간을 정상상태로 하여 종료 후 이를 가시화 하고 동결층과 잔류 농축 수용액의 농도를 측정하였다. 염화나트륨의 농도는 디

지털 염분계(Salt refractometer ES-421)를 중금속의 농도는 LAMOTTE Colorimeter를 이용하여 각각 측정하였다.

기초 실험에서는 1.8wt% 및 3.6wt% 염화나트륨 수용액을 이용하여 냉각면 온도, 기포 분사 방법의 영향을 실험하여 분리효율이 높은 기포 분사 방법을 선택 후 본 실험에 적용하였다. 본 실험에서는 Pb 2.2ppm, Cr 0.07ppm 중금속 수용액에 대하여 냉각면 온도, 기포 분사 유동, 과냉각을 방지하기 위한 용질을 포함하지 않은 초기 빙층 두께의 영향을 실험하였다. Table 2.1와 Table 2.2는 기초 및 본 실험의 조건을 나타내었다.

냉각면의 온도는 동결농축처리장치의 일반적인 사용온도로 연구되는  $-2^{\circ}\text{C}$ ,  $-7^{\circ}\text{C}$ ,  $-12^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켜 실험을 수행하였으며, 기포 분사 방법은 원통벽면에서 유입하는 간접분사방식과 수직원관의 수직하면에서 환모양의 노즐을 통해 동결계면에 직접 공급하는 경우를 나누어 실험하였다. 중금속 수용액에 대해서는 추가적으로 초기 빙층 두께 영향을 관찰하기 위해 각각 1mm, 5mm의 초기 빙층을 실험 시작 전 착빙시켜 결과를 관찰하였다.

Table 2.1 Experimental condition(NaCl)

Salinity(S)	Cooling wall Temperature( $T_w$ )	Bubble flow method
1.8wt%	$-2^{\circ}\text{C}$	Injection from wall( $F_{wall}$ )=15L/min
	$-7^{\circ}\text{C}$	Ring Nozzle( $F_{ring}$ )=15L/min
3.6wt%	$-12^{\circ}\text{C}$	Ring Nozzle( $F_{ring}$ )=30L/min

Table 2.2 Experimental condition(Pb, Cr)

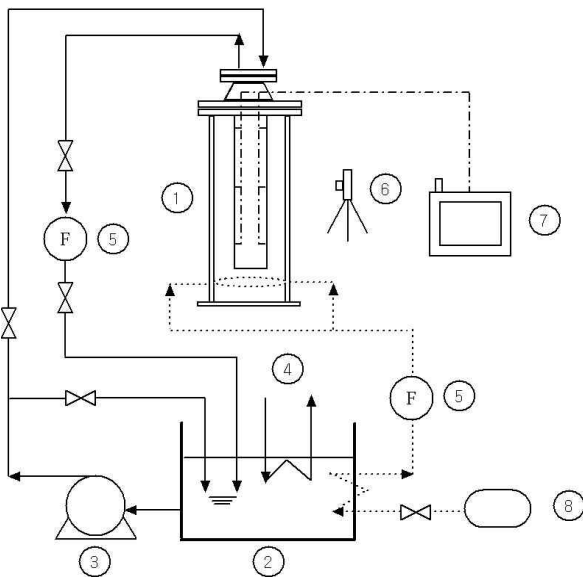
Ice-Lining thickness( $L_{th}$ )	Flow method	Cooling wall temperature( $T_w$ )
1mm	Not flow field( $F_{non}$ )	$-2^{\circ}\text{C}$
		$-7^{\circ}\text{C}$
5mm	Ring flow field( $F_{ring}$ )=5L/min	$-12^{\circ}\text{C}$
		$-15^{\circ}\text{C}$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 염화나트륨 수용액의 냉각면 온도 영향

Fig. 3.1과 Fig. 3.2는 각각 염분 농도(S) 1.8wt%와 3.2wt% 수용액에 대해 수직원관의 냉각면 온도( $T_w$ )를  $-2^{\circ}\text{C}$ ,  $-7^{\circ}\text{C}$ ,  $-12^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켰을 때 동결층의 성장을 나타낸다. 냉각면 온도가 낮을수록 동결층이 두꺼워 지는 것을 알 수 있으며, 이는 냉각면과 동결계면 사이의 열낙차가 증가할수록 냉각면에서 동결계면으로의 열유속이 커지기 때문이다.  $-2^{\circ}\text{C}$ 의 경우는 냉각 초기에 수직원관 주위의 수용액이 과냉각상태로 존재하다가 과냉각이 해소되면서 동결층이 생성되는데 1.8wt% 수용액은 과냉각 해소 시간이 지연되고 3.2wt% 수용액에서는 과냉각이 해소되지 못해 동결층이 형성되지 못하였다.

Fig. 3.3 및 Fig. 3.4는 실험 종료 후 동결층 내외 농축 수용액의 염분 농도를 측정된 것으로 냉각면의 온도가 낮을수록 동결층의 염분 농도는 높아지고 수용액의 염분 농도는 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 냉각면의 온도가 낮을수록 동결층의 성장속도가 빨라 동결계면의 고액공존층에서 용질이 배제효과가 일어나기 전에 얼음결정에 포섭되기 때문으로 얼음의 성장속도의 조절이 분리효율의 중요한 제어 요소임을 알 수 있다. 또 1.8wt% 수용액의 동결층 염분 농도가 낮은 결과는 용질의 농도가 낮을수록 분리효율이 높다는 기존연구와 일치한 결과를 보이고 있다(Kammerer and Lee, 1969). 결과적으로 냉각면의 온도는 처리 효율과 비례적이며 처리량인 얼음의 제빙량과는 상반되는 관계가 성립되는 것을 확인할 수 있었다.



- ① TEST SECTION
  - ② BRINE TANK
  - ③ CIRCULATION PUMP
  - ④ REFRIGERATOR
  - ⑤ FLOW-METER
  - ⑥ DIGITAL CAMERA
  - ⑦ TEMP. RECORDER
  - ⑧ AIR COMPRESSOR
- BRINE LINE  
 - - - - - AIR LINE  
 ······ THERMOCOUPLE WIRE

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

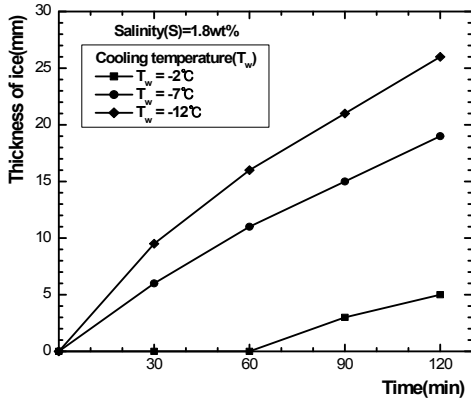


Fig. 3.1 Thickness of frozen layer at S=1.8wt%

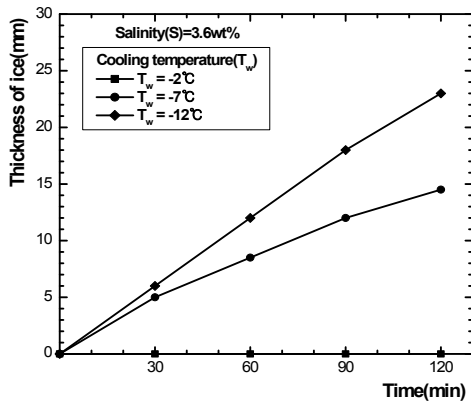


Fig. 3.2 Thickness of frozen layer at S=3.6wt%

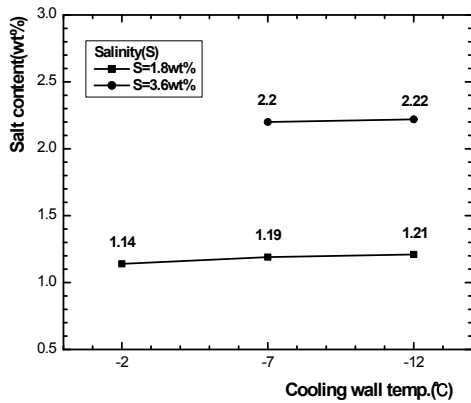


Fig. 3.3 Salt content of frozen layer

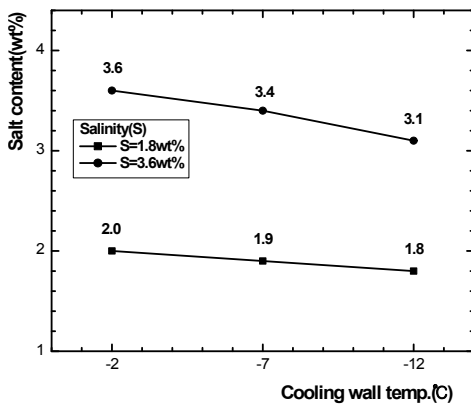


Fig. 3.4 Salt content of concentrated aqueous solution

### 3.2 염화나트륨 수용액의 기포 분사 방법 영향

기포 분사 방법에 따른 영향을 실험하기 위해 농도 1.8wt% 염화나트륨 수용액에 각각의 냉각면 온도에 대해 원통벽을 통해 기포를 간접 분사하는 방법( $F_{wall}$ )과 환모양의 분사 노즐을 통하여 동결계면에 직접 분사 하는 방법( $F_{ring}$ )을 비교 실험하였고 추가적으로 분사량을 늘려 환모양의 분사 노즐로 냉각면에 직접 분사하였다.

Fig. 3.5는 각 냉각온도와 기포 분사 방법에 따른 동결층 성장 변화를 나타낸 것이다. 냉각온도가 낮을수록 동결층이 발달되고, 동결계면에 공기를 직접 분사하는 방법이 간접적으로 분사하는 방법보다 동결층이 얇은 것을 알 수 있다. 이는 직접 분사되는 기포가 동결계면에서의 열전달을 방해하는 절연체 역할을 하기 때문이며, 분사되는 기포의 양이 증가함에 따라 동결층이 얇아지는 것은 열 저항의 증가와 유속 증가에 따른 대류 열전달촉진이 증가하기 때문이다.

Fig. 3.6은 각각의 냉각면 온도에서 기포 분사 방법에 따른 동결층의 염분 농도를 나타내는 것으로 냉각면 온도와 관계 없이 환모양 노즐을 통해 냉각면에 직접 유동을 주는 방식이 동결층 내의 염화나트륨 농도가 낮은 것을 알 수 있다. 이는 유입되는 공기의 절연효과로 동결층의 성장속도가 늦어져 염분이 충분히 수용액으로 배제될 수 있는 시간을 제공하며, 동시에 기포가 직접 동결계면에 작용하여 석출된 염분을 수용액으로 확산시켜 동결계면에서의 용질의 밀도를 저감시키기 때문으로 생각된다. 기포의 분사량이 증가하면 절연효과와 증대와 동결계면에 존재하는 고농도 농축액의 확산 속도가 빨라져 동결층에 내포되는 염분량은 더욱 감소하게 된다.

Fig. 3.7는 잔류 농축수용액의 염분 농도를 비교한 것으로 직접 분사하는 방법이 간접 분사보다 동결층에서 수용액으로 용질을 배제하는 효과가 높아져 잔류 수용액내의 염분 농도가 높아지며, 기포 분사량이 더 많을수록 이러한 경향은 더 두드러진다. 이로써 기포를 분사하여 처리 효율을 높이는 방법에서는 간접적인 분사 방식 보다는 동결계면에 직접 분사하는 방법이 효과적이며, 분사량에 비례적으로 처리효율의 향상을 확인할 수 있었다.

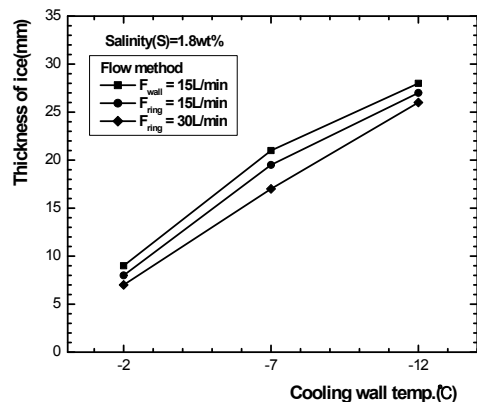


Fig. 3.5 Thickness of frozen layer at  $F_{wall} = 15\text{L/min}$ ,  $F_{ring}=15\text{L/min}$ ,  $F_{ring}=30\text{L/min}$

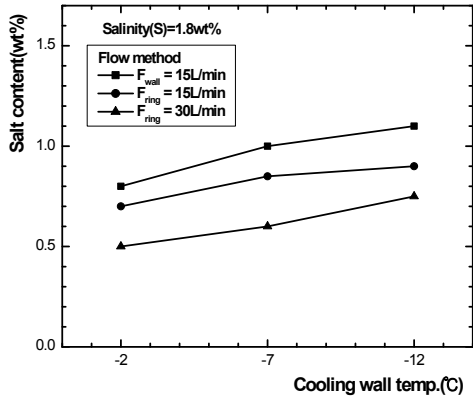


Fig. 3.6 Salt content of frozen layer

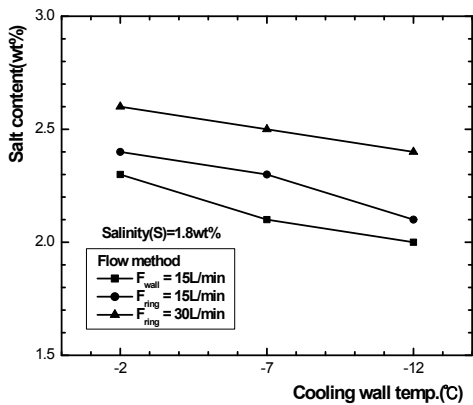


Fig. 3.7 Salt content of concentrated aqueous solution

### 3.3 중금속 수용액의 냉각면 온도 및 기포 분사 영향

본 실험에서는 과냉각 현상으로 인해 동결 초기에 오염물질이 초기 동결층에 포섭되는 것을 방지하기 위해 일정한 두께로 용질을 포함하지 않은 수용액을 이용 초기 빙층 1mm를 형성하고 냉각면의 온도와 유동의 효과를 실험하였다 (Hiroshi, 1999). 기포의 분사는 기초 실험에서 용질의 분리 효율이 높은 수직 원관 하부에서 환모양의 기포 분사 노즐로 동결계면에 직접 분사하는 방식을 선택하였으며, 이 때의 유량은 기초 실험 보다 기포와 냉각면의 접촉시간 증가를 위해 5L/min로 공급량을 조절하였다.

Fig. 3.8은 공기 분사 유량 5L/min일 경우 냉각온도에 따른 동결층의 성장과정을 나타낸다. 시간의 경과에 따라 동결층이 두꺼워지며, 냉각온도가 낮을수록 더 두껍게 발달함을 알 수 있다. 이는 냉각온도가 높을수록 냉각면과 동결계면 사이의 열낙차가 감소하여 열유속이 감소하기 때문이다. Fig. 3.9는 기포 분사 유무에 따른 동결거동을 나타낸다. 냉각온도가 낮을수록 빙층이 두껍게 형성되며, 기포분사를 하였을 경우가 빙층이 얇게 형성됨을 알 수 있다. 이는 가해진 기포가 동결계면과 수용액의 접촉을 방해하는 절연체 역할을 하므로 동결계면에서 수용액으로의 열전달이 작아져 동결층의 성장이 감소하는 것으로 생각된다.

Fig. 3.10과 Fig. 3.11은 냉각온도와 기포 분사 유동에 따른 동결층의 Pb, Cr 농도의 변화를 나타낸 것으로, 냉각온도가 높아질수록 얼음속의 중금속 농도가 저감됨을 알 수 있다. 이는 냉각온도가 높을수록 동결층의 성장률이 둔화되고 동결에 의해 석출된 중금속이 동결계면 밖으로 배제될 수 있는 시간이 증대되기 때문이다. 또, 기포 분사를 가하였을 때 동결층 내 중금속의 농도가 낮아지는 것을 알 수 있는데 이는 기포의 유동이 동결층의 성장속도를 늦추어 중금속이 석출될 수 있는 시간을 증대시켜 줌과 동시에 기포가 직접 동결계면에 작용하여 석출된 용질을 주위의 수용액으로 확산시키기 때문이다.

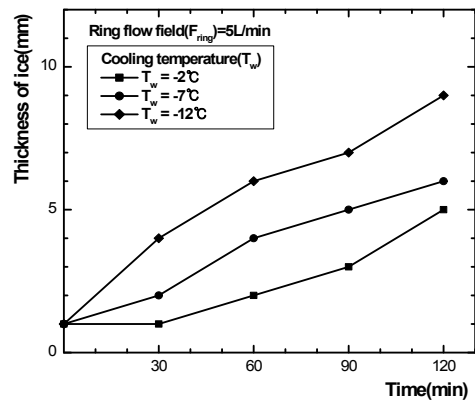


Fig. 3.8 Thickness of frozen layer at Fring=5L/min

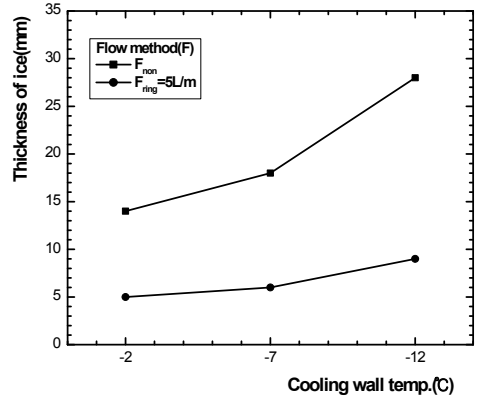


Fig. 3.9 Thickness of frozen layer at F<sub>non</sub>, F<sub>ring</sub>=5L/min

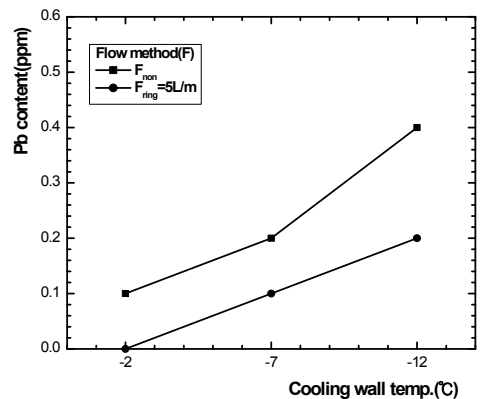


Fig. 3.10 Pb content of frozen layer

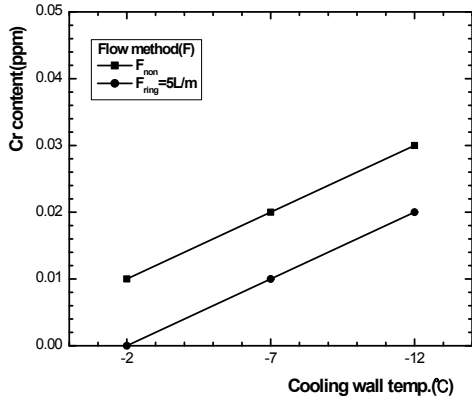


Fig. 3.11 Cr content of frozen layer

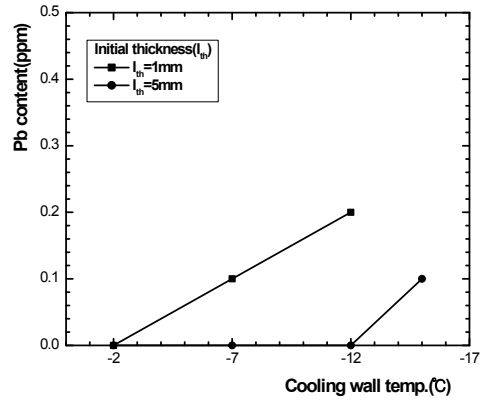


Fig. 3.12 Pb content of frozen layer

### 3.4 중금속 수용액의 초기 빙층 두께 영향

동결과정 초기에 발생하는 과냉각에 의한 수지상의 얼음에 불순물이 포함되는 것을 방지하여 폐수의 처리 효율을 높이기 위한 방법으로 청수로 얇은 얼음을 냉각면에 미리 착빙하는 방법이 있다(Ling et al., 1998). 이러한 영향을 평가하기 위해 초기 빙층 두께에 따른 실험을 실시하였다.

Fig. 3.12와 Fig. 3.13은 초기 빙층의 두께별 최종 생성 동결층에 포함된 Pb와 Cr의 농도 변화를 나타내고 있다. 동결층 내 포함된 중금속 농도는 1mm 보다 5mm일 때 더 낮은 수치를 나타내는데 이는 열저항의 증가로 동결층의 성장속도가 느려져 용질을 충분히 동결계면 밖으로 배제하고, 초기 순수한 얼음의 두께가 두꺼워질수록 동일한 동결량에서의 초기 빙층이 차지하는 비율이 높아지기 때문으로 고찰된다. 또, 초기 빙층이 5mm일 경우 냉각면 온도 -7°C, -12°C에서는 동결층 내 두 중금속이 모두 검출되지 않는 이상적인 분리가 이루어지고 있음을 알 수 있는데 이는 과냉각의 해소와 동결층 성장 속도의 저하로 빙층에서 오염물질이 완전히 배제되는 것으로 추정된다. 5mm의 경우 냉각면 온도 -2°C에서는 동결층이 형성되지 못하여 실험의 정확도를 위해 -15°C를 추가 시험하였다. -15°C에서는 동결층의 성장이 빨라져 오염물질이 포집되는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.14와 Fig. 3.15는 잔류 농축액 속에 포함된 Pb와 Cr의 농도 변화를 나타내고 있다. 잔류 농축 수용액에 포함된 중금속의 농도는 Pb와 Cr이 동일한 양상을 보이고 있으며, 냉각면 온도 -2°C와 -7°C에서는 중금속의 농도가 초기 동결층 5mm보다 1mm가 높게 측정되는데 이는 초기 빙층 5mm에서 보다 1mm에서 동결층의 발달이 우수하여 중금속이 일부 동결층으로 물입되더라도 많은 양의 물이 동결되므로 수용액의 중금속 농도가 높아지기 때문으로 생각된다. 냉각면 온도 -12°C와 -15°C에서는 5mm에서도 동결층의 형성이 발달되고, 동결층에서 중금속이 배제되면서 원통 내 잔류 수용액의 중금속 농도가 급격히 상승하는 것을 알 수 있다.

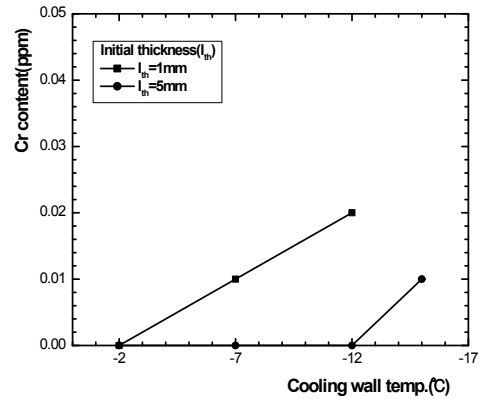


Fig. 3.13 Cr content of frozen layer

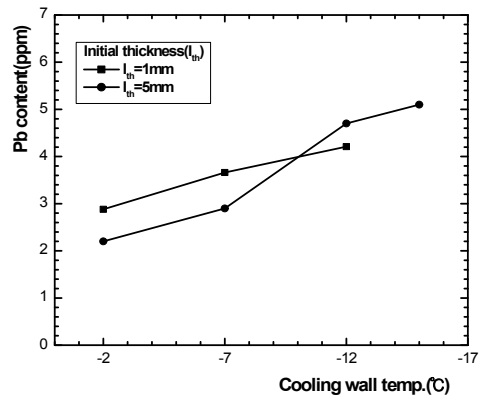


Fig. 3.14 Pb content of concentrated aqueous solution

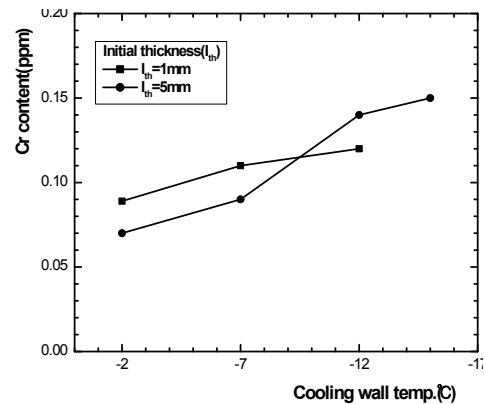


Fig. 3.15 Cr content of concentrated aqueous solution

#### 4. 결 론

동결농축폐수처리장치의 개발에 있어 핵심 기술인 제빙부의 설계를 위한 기초 자료를 확보하고자 냉각면의 온도, 기포 분사 형태, 초기 빙층 두께의 영향에 대한 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 냉각면 온도가 낮을수록 동결계면에서의 온도 구배가 커지고 열유속이 증가하여 동결층의 성장 속도는 빨라지나 용질이 배제될 수 있는 충분한 시간이 제공되지 않아 동결층의 용질 농도는 상승하는 상반된 결과를 확인하였다.

(2) 정지상태 보다는 기포 분사 유동이 주어졌을 때의 분리 효율이 향상되며 기포 분사의 방법에서는 간접 분사 보다는 동결계면에 직접 분사하는 방법이 절연 효과의 증가로 동결층의 성장속도를 저하시켜 충분히 용질을 배제시키며, 동결계면에 형성되는 고농도 수용액의 확산을 촉진시켜 더 순수한 얼음을 얻을 수 있다.

(3) 과냉각을 방지하기위한 용질이 포함되지 않은 초기 빙층의 두께가 두꺼울수록 초기 과냉각 현상의 해소와 열저항이 증가하여 동결층의 성장속도가 늦어져 충분히 용질이 배제되어 동결층의 용질 농도가 저하되고 분리 효율이 향상된다.

#### 후 기

이 논문은 해양수산부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

#### 참 고 문 헌

[1] Bae, S. K.(1995), "Effect of freezing condition on the concentration-Efficiency in the progressive freeze-concentration", Korean Soc. Food Nutr., Vol. 24, No. 6, pp. 984-989.

[2] Chidphong Pradistsuwana, Prapasri Theprugsa, Osato Miyawaki(2003), "Measurement of limiting partition coefficient in progressive freeze-concentration", Food Sci. Technol, Vol. 9, No. 2, pp. 190-192

[3] Hiroshi Sato(1999), "Water treatment technology using freezing separation method", Refrigeration, Vol. 74, No. 8557, pp. 32-36.

[4] Jeong, H. D.(2005), "Influence of operational factors on the falling film freeze concentration system for wastewater treatment", Korea Maritime University, Master thesis, pp. 1-2.

[5] Kammerer, P. A. and Lee, G. F.(1969), "Freeze concentration of organic compounds in dilute aqueous

solution", Environ. Sci. Technol., Vol. 3, No. 3, pp. 276-278.

[6] Kim, J. O.(2010), "Future promising green environment technology : About water treatment technology", Journal of KOSHAM, Vol. 10, No. 1, pp. 6-10.

[7] Ling Liu, Osato Miyawaki, Kozo Nakamura(1997), "Progressive freeze-concentration of model liquid food", Food Sci. Technol., Vol. 3, No. 4, pp. 248-352.

[8] Ling Liu, Tomoyuki Fujii, Kiro Hayakawa, Osato Miyawaki(1998), "Prevention of initial supercooling in Progressive freeze-concentration", Biosci. Biotechnol. Biochem., Vol. 62, No. 122, pp. 2467-2469.

[9] Oh, C.(1999), "Freezing phenomenon and application in cold environment", Korean Society of Marine Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 275-283.

[10] Park, D. S., Kim, M. H. and Oh, C.(2001), "An experimental study on sea water freezing behavior for development of sea water desalination system", Korean Society of Marine Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 1250-1259.

[11] Song, Y. C. and Lee, E. G(1998), "Effect of components on the freeze concentration of live stock wastewater treatment", KOSENVE, Autumn Conference.

---

원고접수일 : 2013년 02월 18일  
 심사완료일 : 2013년 03월 21일  
 원고채택일 : 2013년 03월 25일