

유동장을 동반한 수직 원관 주위의 폐수동결에 관한 실험적 연구

김정식† · 원종호* · 배성우** · 지재훈*** · 오 철****

An experimental study on waste-water freezing behavior along vertical cooled cylinder in flow field

J-S Kim†, J-H Won*, S-W Bae**, J-H Jee***, C Oh****

Abstract : The study was experimentally performed to investigate waste water freezing behavior in circular tube. The experiments were carried out for a variety of parameter, such as air-bubble flow rate, and cooled-plate temperature. It was found that the experimental parameters gave a great influence on the freezing rate and a heavy metal concentration of the waste-water.

Key words : Air-bubble flow(기포유동), Concentration of waste-water(폐수농축), Flow-field(유동장), Freezing rate(동결속도)

1. 서 론

최근 인류의 생활수준이 향상됨에 따라 환경에 대한 관심도 증가하여 환경오염을 줄이기 위한 대책 마련의 필요성이 세계적으로 요구되어지고 있다. 이러한 세계적 추세에서 인간을 비롯한 모든 생물이 살아가는데 없어서는 안 될 가장 중요한 물의 오염 문제는 인류가 반드시 해결해야 할 과제로 부각되고 있다. 지구상의 지표면은 약 71%가 물로 덮여있다. 지구전체의 물의양은 1천 3백60여 억 톤, 그중 염수가 1천 32억 톤을 차지한다. 물은 태초부터 인류의 발전과 그 길을 같이 하였고, 인간을 비롯한 모든 생물체의 생사에 가장 밀접하게 영향을 미치는 요소이기도 하다. 이러한 물이 오염된다면 인류의 미래는 과연 어떻게 될까? 이러한 질문에 기초하고 수질

오염을 줄이는 방법에 착안하여 수질오염 발생원인인 공장폐수, 축산폐수, 가정폐수의 효율적인 재처리 과정은 동결처리법, 가열처리법, 화학처리법 및 필터처리법 등 여러 가지 방법이 있으나 동결처리법에 착안점을 두어 연구를 진행하였다.

이와 관련하여 선행 연구로서 해수동결담수화장치와 관련하여 많은 연구가 진행되어 왔으나 중금속처리를 위한 연구는 아직 미흡한 실정이다.^[1-6]

따라서 본 연구에서는 폐수 속에 들어 있는 중금속 성분을 농축시키기 위한 방법으로서 냉각온도의 영향과 유동의 유무, 초기 순수한 얼음의 두께가 결과물인 얼음 중 중금속 농도에 미치는 영향을 실험적 방법으로 검토함으로써 동결방법을 이용한 가장 이상적인 동결폐수처리법의 기본방향을 제시하고자 하였다.

† 책임저자(한국조선기자재연구원)
* 한국해양대학교 대학원
** 한국기계연구원
*** (주)펜타텍
**** 한국해양대학교 기관시스템공학부

2. 실험 장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig 2.1은 본 실험의 실험 장치로서 환 모양의 고리를 만든 후 고리의 양쪽 방향에서 공기를 주입한 실험장치도를 나타내고 있다. 실험장치는 크게 브라인을 순환시키기 위한 순환부, 원관 표면의 온도강하를 측정하기 위한 측정부, 원관내 얼음의 두께를 관찰하기위한 관찰부, 유체에 유동을 주기위해 공기를 유입하는 공기유입부로 구성된다. 한편 Fig 2.2와 Fig 2.3은 본 실험의 시험부(test section)로서 동관 표면에 얼음 두께를 관찰하기에 용이한 투명아크릴로 제작하였으며, 공기 유입방법을 변화시키기 위해 다음과 같이 구성하였다. Fig 2.2는 공기를 주입하지 않은 경우이고, Fig 2.3은 원관 내 환 모양의 고리를 만든 후 고리의 양쪽 방향에서 공기를 주입한 경우이다.

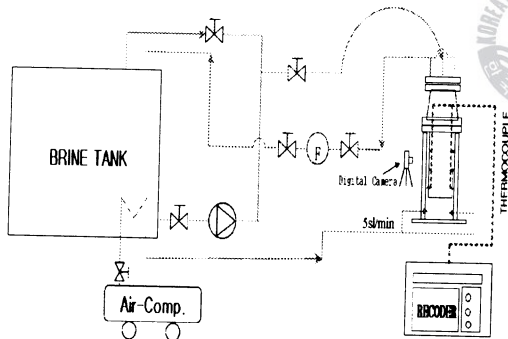


Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus

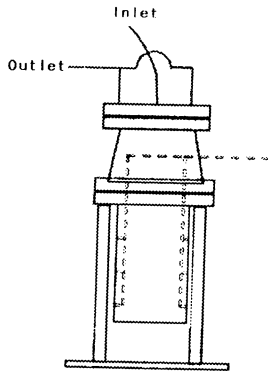


Fig. 2.2 Test section(Not flow field)

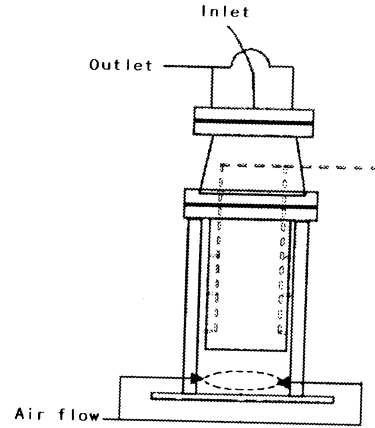


Fig. 2.3 Test section(A shape of ring flow field)

2.2 실험방법

실험은 시간에 따른 냉각면의 온도 강하의 측정을 위해 열전대를 원관 양쪽에 $\phi 1$ 의 구멍(6개)을 내 용접을 하였으며 온도기록계를 이용하여 측정하였다. 원관 표면을 냉각시키는 작동 유체는 에틸렌글리콜(Ethylen Glycol)을 사용하였고 브라인 탱크내의 작동유체는 약 $0.23\text{m}^3/\text{min}$ 의 용량을 갖는 순환 펌프를 거쳐 시험부의 동관을 거쳐 디지털 유량계로 유입된다. 또한 원관 내 유동장을 주기위한 공기 순환량을 측정하기 위하여 공기 유량계가 사용되었다. 그리고 중금속 오염물질로는 납과 크롬이 포함된 폐수를 사용하였으며 정밀한 농도 측정을 위하여 칼라미터(Color-meter)를 사용하였다.

실험에서의 분석항목은 생성된 얼음의 두께, 얼음의 염도, 수용액의 염도 등 3개 항목이며, Table 2.1에 본 실험의 실험조건을 나타내었다.

Table 2.1 An experimental condition

| Primary freezing thickness | Flow method | Heavy metal content | Cooling temp. |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|
| 1mm | Not flow field | Pb 0.2 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 0.2 ppm Cr 0.07 ppm | -7°C -12°C -15°C |

실험방법으로서 일정한 두께의 순수한 얼음을 동결시킨 후에 일정한 농도와 온도로 조절된 폐수를 시험부에 넣고 냉각브라인을 공급하는 시점을 실험개시 시간으로 하였다.

실험조건으로는 Table 2.1에 나타낸바와 같이 초기얼음의 두께의 영향을 파악하기 위하여 각각 1mm와 5mm의 얼음을 이용하였고, 냉각면의 온도를 -2~-15℃까지 변화시켜서 냉각온도에 따른 동결 속도의 영향 및 공기의 유동특성에 따른 영향에 대하여 각각 실험적으로 수행하였다.

또한 냉각시간에 관계없이 일정한 두께의 얼음에 포함된 중금속의 양을 측정하여 각각 비교 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 냉각온도에 따른 영향

Fig. 3.1과 Fig. 3.2는 실험시간 경과에 따른 동결 양을 나타낸다. 시간이 경과함에 따라 동결 양이 증가하며, 냉각온도가 낮으면 낮을수록 동결 양이 많음을 알 수 있다. 또한 시험부 내에 유동을 준 경우가 주지 않은 경우에 비하여 얼음의 동결량이 적음을 알 수 있다.

또한 Fig. 3.3에는 일정한 시간이 경과한 후의 냉각온도에 따른 영향을 나타낸 것으로 냉각온도가 낮을수록 동결 양이 증가함을 알 수 있고, 같

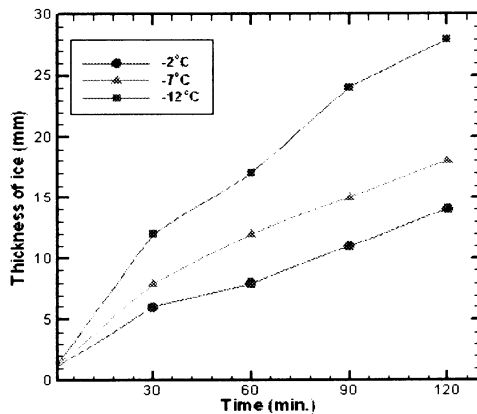


Fig 3.1 Thickness of ice(1mm)
<Not flow field>

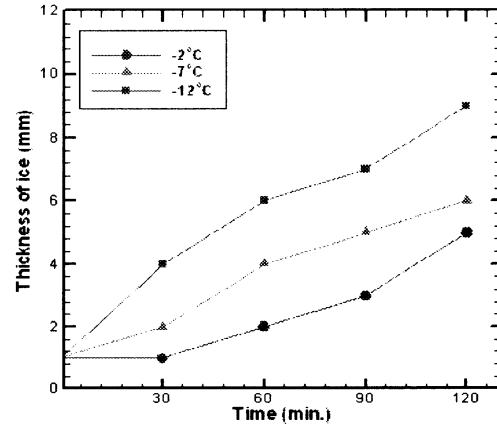


Fig 3.2 Thickness of ice (1mm)
<A shape of ring flow field>

은 온도에서 초기얼음 5mm의 경우가 많은 동결 양을 나타내는 것은 초기얼음의 두께에 의한 것에 기인한다.

3.2 유동에 따른 영향

본 실험에서는 유동을 주지 않았을 경우와 원통 내부에 환모양의 공기 유입구를 설치하여 유동을 주었을 경우로 나누어 실험 하였다. 환모양의 공기 유입구를 설치한 이유는 동관 주위에 직접적인 공기유동을 주어 침상빙과 함께 중금속 입자가 착상하려는 현상을 의도적으로 방해하여 더욱더 순수한 빙을 생산하기 위해서이다.

Fig. 3.1은 유동이 없을 경우 얼음의 두께변화 그래프 이며 Fig. 3.2는 유동이 있을 경우의 변화이다. 유동이 없을 경우에 비해 유동을 주었을 경우 얼음의 양이 현저히 낮아지는 것을 알 수 있는데 이는 시험부에 유입되는 공기에 의한 유동이 동결 계면과 중금속의 접촉을 방해하는 절연체 역할을 하므로 동결계면에서 중금속으로의 열전달을 방해하여 빙층의 성장이 감소하는 것으로 생각된다. 또한 Fig 3.4 와 Fig. 3.5를 보면 유동을 주었을 시 얼음 속 중금속의 농도가 낮아지는 것을 알 수 있는데 이것은 공기의 유동이 동결층에 유입되려는 중금속의 성분을 배제하기 때문이라 생각된다.

3.3 초기 동결얼음두께에 따른 영향

초기얼음두께 1mm와 5mm일 경우에 각각 얼음과 수용액의 중금속 농도 변화를 고찰하였다. Fig 3.4 와 Fig. 3.5에 나타난바와 같이 얼음 속 중금속 농도를 살펴보면 1mm일 경우보다 5mm일 경우에 더 낮아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 초기 순수한 얼음의 두께가 두꺼워질수록 동결속도가 저하되어 중금속이 얼음과 같이 동결하려는 성질보다 분리속도가 더 크기 때문이라 생각된다. 또한 5mm일 경우 -7℃, -12℃에서는 얼음에서 두 중금속이 모두 검출되지 않음을 알 수 있다. 그리고 Fig 3.6 와 Fig. 3.7의 수용액 농도 그래프에서 동결된 얼음 속에 많은 수분이 동결되었기 때문에 수용액의 중금속 농도가 증가됨을 알 수 있다.

따라서 이 결과들을 종합해 본 결과 초기 얼음, 동결두께 5mm일 경우 -12℃에서의 효율이 본 실험에서 가장 높다는 것을 알 수 있다.

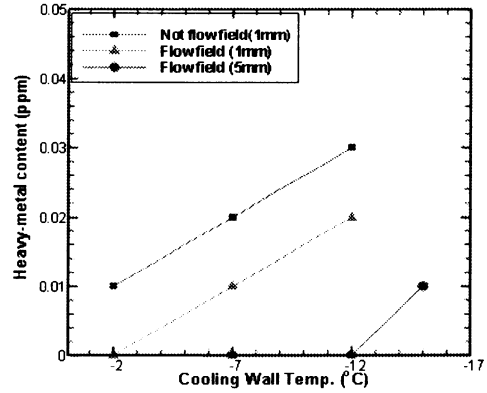


Fig. 3.5 Cr content in ice

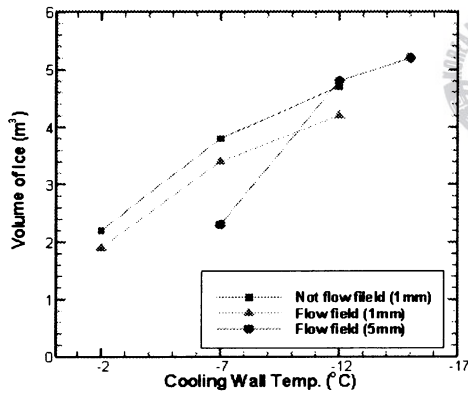


Fig 3.3 Effect of cooling temperature

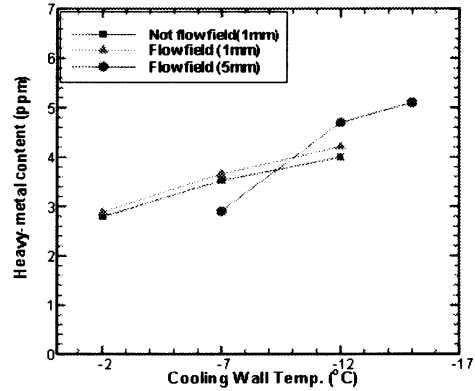


Fig. 3.6 Pb content in water solution

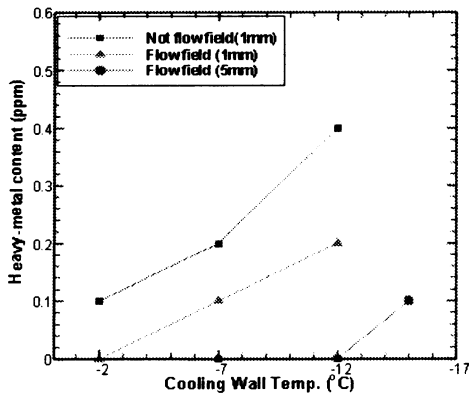


Fig. 3.4 Pb content in ice

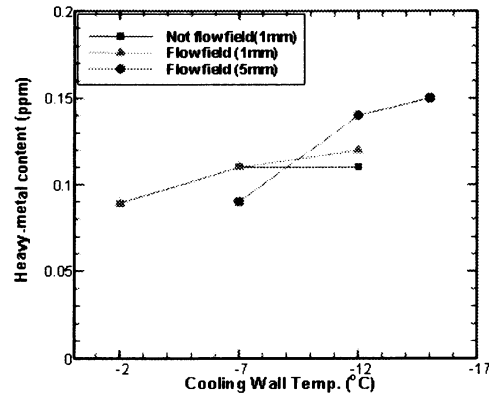


Fig. 3.7 Cr content in water solution

일반적으로 폐수의 동결농축처리에 의한 방법은 가열처리방법과 비교하여 열효율이 저하된다고 평가되고 있으나, 동결농축 시에 발생하는 냉열을 건물의 냉난방용으로 활용할 경우 시스템의 전체 효율은 크게 향상되는 것으로 나타나 있다^[7].

4. 결 론

Pb와 Cr을 이용하여 폐수동결실험을 한 본 연구에서는 유동특성과 농도에 따른 영향 및 냉각면의 온도특성, 초기 순수한 얼음 동결 두께에 따른 실험적 연구를 통하여 본 실험 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 냉각온도가 낮을수록 생성되는 얼음의 양이 많으며, 얼음의 성장속도가 빠르고, 얼음내의 중금속 농도는 높아진다.
2. 유동의 영향이 클수록 생성되는 얼음의 양이 적어지고, 얼음내의 중금속 농도는 낮아진다.
3. 초기 얼음 두께가 두꺼울수록 얼음내의 중금속 농도는 낮아진다.

이러한 기본적 실험에 대한 결론을 바탕으로 다음 연구에서는 동결폐수처리 장치의 실용화를 위해서는 실용적 범위에서의 다양한 초기 얼음의 두께, 유속의 변화, 폐수농도의 변화 등이 필요하다고 생각하며 이에 관한 실험은 다음의 과제로 남기기로 한다.

참고문헌

- [1] 오철 외 4인, “기포를 동반한 유동장에서의 냉각원관 주위의 해수 동결에 관한 실험적 연구”, 한국박용기관학회지, 제25권 제4호, pp. 825~831, 2001.
- [2] 최부흥 외 2인, “구형 용기의 상부면 냉각에 의한 해수 동결 거동의 실험적 연구”, 한국박용기관학회 추계 학술대회 논문집, pp. 23~29, 1998.
- [3] 오철, “저온환경에 있어서의 동결 현상과 그 응용”, 한국박용기관학회지 제23권 제3호, pp. 275~283, 1999.
- [4] 김명준 외 2명, “구형 용기의 하부면 냉각에 의한 해수 동결 거동의 기초적 연구”, 공기조화 냉동공학회 하계 학술 발표회 논문집 제1권, pp. 347~353, 1997.
- [5] Cho, Y.J, “An Experimental Study on Seawater Freezing Behavior in Flow Field”, Master Thesis(1999), Korea Maritime University (Busan).
- [6] 오철 외 3명 “유동장을 동반한 수직원관 주위의 해수동결에 관한 실험적 연구”, 한국해양대학교 선박냉동공조공학전공 학부논문, 2004.
- [7] “凍結分離法による水再生技術”, 일본냉동공조학회 학회지, Vol. 74 No.857, pp. 196~200, 1999

