

## 결빙 관막음시 배관내 유체 결빙현상의 실험적 연구

박영돈<sup>\*</sup> · 조현철<sup>\*</sup> · 최병익<sup>\*\*</sup> · 김귀순<sup>\*\*\*</sup>  
(2000년 8월 16일 접수, 2000년 12월 21일 심사완료)

### An Experimental Study for the Liquid Freezing Phenomena in a Pipe During Ice Plugging

Yeong-Don Bak, Hyun-Chull Cho, Byoung-Ik Choi and Kui-Soon Kim

**Key Words:** Ice Plugging(결빙 관막음), Freeze Sealing(결빙 차단), Freezing Jacket(결빙 재킷)

#### Abstract

The ice plugging process consists of placing liquid nitrogen around a pipe and removing heat until the water in the pipe freezes and provides a solid plug or seal against fluid movement. This technique enables us to repair or inspect a pipe system without shutdown of entire system. A set of test apparatus for investigation of the liquid freezing phenomena during ice plugging is prepared. This study shows the characteristics of the liquid freezing and the heat transfer with various pipe and freezing jacket conditions. And in case there is flow of the fluid inside the pipe, the flow rate which can be able to form the ice plug is identified with the effect of the pipe diameter and freezing jacket length on the plug formation. The permissible maximum flow rate for the complete plug formation is approximately proportional to the freezing jacket length at the same pipe diameter condition.

#### 1. 서론

배관 결빙차단(freeze sealing) 혹은 배관 결빙관막음(ice plugging)이란 초저온의 냉매를 이용하여 관내의 유체를 급속 냉각 결빙시켜 유체흐름을 차단하는 방법을 말한다. 배관결빙 기술은 그 작업 가능성과 안전에 대한 신뢰성이 확보된다면, 많은 배관 설비들로 이루어진 화학, 정유공장과 원자력발전소 같은 곳에서 배관의 누설에 따른 위험성이나 계통의 정지로 인한 경제적인 손실을 최소화할 수 있어 안전성이나 경제성이 보장되는 좋은 방법이라고 할 수 있다.<sup>(1~3)</sup>

이러한 배관 결빙차단 기술에 있어 안전성과 관련된 문제 중의 하나가 내부유체와 배관의 여

러 가지 조건에 따른 열전달 현상에 관한 문제이다. 내부 유체의 온도, 유량, 압력 등의 조건과 배관의 재질, 크기, 방향 등의 조건에 따른 열전달 현상<sup>(4)</sup>은 배관막음의 형성에 직접적인 영향을 주게되어 배관 결빙차단 작업 자체의 성패를 결정하는 중요한 문제가 된다.<sup>(5)</sup> 이 때까지의 이 문제에 대한 규명노력은 주로 실험에 의한 것으로서, Burton<sup>(6)</sup>과 Tavner<sup>(7)</sup>가 지름 100mm 수직 배관의 결빙실험을, 또 Keary 등<sup>(8)</sup>이 100mm~250mm 배관에 대한 실험을 수행해서 배관의 수직 단면적과 내부 유체의 초기 온도에 따른 결빙시간, 그리고 수직 배관에서 중요한 문제인 자연대류의 영향에 대해 고찰하였다.

그러나 아직도 어떤 조건하에서 결빙이 가능하지, 결빙이 완전하게 이루어지는지 등에 대한 규명이 충분히 이루어지지 않고 있다. 특히 결빙과정이나 현상에 대한 고찰은 아주 미미한 상태이고 알려져 있는 게 거의 없는 실정이다. 그러나, 배관내의 유동은 외부에서 눈으로 확인할 수 없으므로 이 결빙조건 규명은 결빙작업에 가장

\* 회원, 한국전력공사

† 책임저자, 회원, 한국전력공사

E-mail : byd8410@kepco.co.kr

TEL : (051)726-6122 FAX : (051)726-6158

\*\* 부산대학교 대학원

\*\*\* 회원, 부산대학교 항공우주공학과

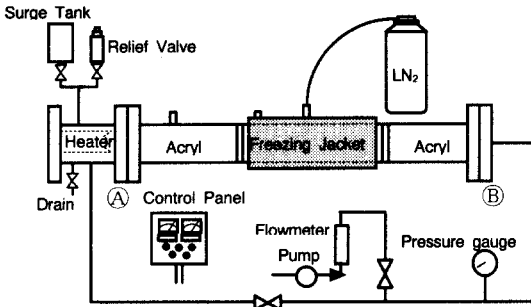


Fig. 1 Schematic drawing of test apparatus

중요한 요소라 할 수 있다.<sup>(10-11)</sup>

이에 따라, 본 연구에서는 실제 원자력 발전소에서 이루어지고 있는 배관 결빙차단 과정에서의 배관직경과 유체의 온도, 압력 등에 따른 내부 유체 결빙 현상 및 열전달 특성과 배관 내부 유체 유동(flow)이 있을 경우에 대한 결빙가능 유량을 실험적으로 규명하고자 한다

## 2. 본 론

### 2.1 실험장치의 구성 및 실험 방법

배관결빙 실험 장치는 200℃이상의 고온과 최고 70 kgf/cm<sup>2</sup>의 고압 조건을 만들 수 있도록 설계되었으며, 고온 고압의 조건에서 수행되는 만큼 그 안전성이 보장되도록 설계가 요구되었다.

직접 결빙을 시도하게 되는 실험배관은 SUS 304 재질로 직경 168mm(6인치), 두께 11mm(스케줄 80)이며, Fig. 1과 같이 직경 50.8mm(2인치)인 단소강 배관과 함께 페루프 형태로 제작하여 고온/고압 실험과 임의의 유동 조건에 의한 결빙실험을 할 수 있도록 하였다. 고온/고압의 경우가 아닌 상온/대기압의 실험에서는 실험배관의 양쪽에 아크릴 재질의 배관을 설치하여 결빙에 따른 유체의 유동현상을 관찰할 수 있도록 하였다. 이때 결빙재킷이 부착되는 부위는 열응력에 의한 아크릴 배관의 파손 때문에 아크릴배관을 사용할 수가 없어 스테인레스 배관을 사용하였으며 아크릴 배관과의 접속은 O-링에 의해 밀봉시켰다. 실험 시 유량의 조절 및 측정을 위해 소형 원심펌프(PWN-236M, LG), 글로브 밸브 및 유량계를 직경 25.4mm 배관에 설치하였다. 내부유체의 온도는 직경 168mm 배관에 설치된 40kW 용량의 히

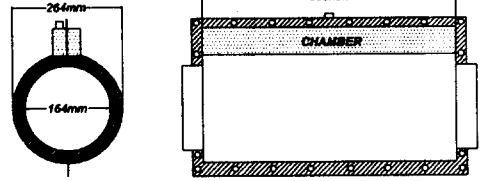


Fig. 2 Freezing Jacket

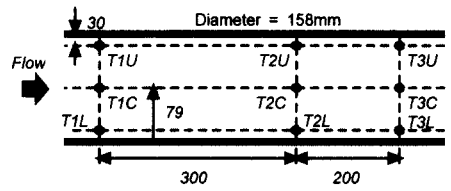


Fig. 3 Thermocouple position

터를 통해 조절된다. 서지탱크와 릴리프 밸브는 결빙시의 체적팽창으로 야기되는 갑작스런 압력 증가에 의한 파손을 방지하기 위해 설치되었다. 배관내부 유체로는 일반 수도물을 그리고 냉매로는 비등점이 -196℃인 액체질소를 사용하였다. 실험배관을 둘러싸면서 액체질소가 공급될 결빙재킷은 스테인레스 스틸로 Fig. 2와 같이 두 부분으로 나누어져 볼트 조임을 하게 만들어졌고 재킷의 외벽에 보온을 하였다. 실험배관의 내부에는 열전대(K-type, OMEGA)를 Fig. 3과 같이 재킷이 부착되는 배관의 입출구와 가운데 상중하 각각 3곳, 총 9곳에 부착하여 온도 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

위치별로 각 열전대를 구분하기 위해 길이방향의 세 곳을 위치1, 2, 3으로 정의하고, 지름방향의 세 곳을 각각 상부(U), 중앙(C), 하부(L)로 구분하여 전체를 T1U, T1C, T1L, T2U, T2C, T2L, T3U, T3C, T3L로 명명하였으며, 온도지시계(DF41-TC, OMEGA)를 통해 온도를 측정하였다.

액체질소의 공급량은 액체 질소탱크의 유량조절밸브로 조절하는데, 재킷의 챔버(chamber)내에 열전대를 삽입시켜 챔버 내의 온도가 -196℃를 유지하도록 그 공급량을 조절한다. 한편 액체질소의 소모량을 확인하기 위해 디지털저울을 사용하여 일정시간마다 무게 변화를 측정하였다.

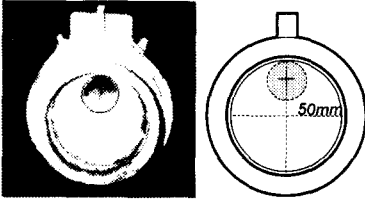


Fig. 4 Profile of ice formation (volume flow rate = 0.0 m<sup>3</sup>/min)

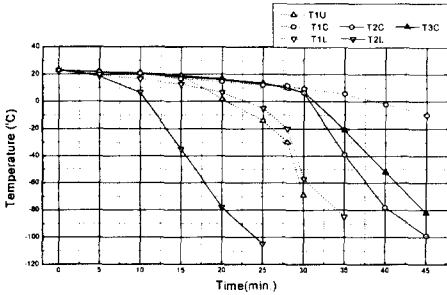


Fig. 5 Temperature profile (volume flow rate = 0.0 m<sup>3</sup>/min)

2.2 실험 및 결과 고찰

2.2.1 실험 (1) : 상온/대기압 정지 유체의 경우 초기온도가 상온, 즉 22°C인 물을 대기압 상태에서 실험 배관 내에 가득 채우고 실험했다.

결빙시간은 총 42분이 소요되었고, 액체질소 소모량은 약 90kg이었으며, 전체 실험 소요시간에서의 질소 평균소모율은 2.14kg/min이다.

결빙을 완료한 후 결빙의 형상을 관찰한 결과 아크릴 관에서는 결빙현상이 없었다. 그리고 실험 배관의 중앙부에서는 결빙이 완전히 이루어졌으나, Fig. 1의 플랜지 A측에서 결빙형상은 Fig. 4와 같이 배관 중심점에서 수직 상부로 약 50mm높이에 약 40mm 직경의 깊숙한 구멍이 형성되었다. 이 지점은 실험시간을 충분히 지속시켰으면 최종적으로 결빙될 부위로 판단된다. 액체질소를 주입하기 시작한 뒤 실험배관내의 시간에 따른 온도 분포는 Fig. 5와 같다. 액체질소를 주입하기 시작하면 모든 위치에서 온도가 떨어지는데, 특히 T2L 위치에서 온도가 가장 빨리 떨어지고 11분 후에 0°C 이하로 떨어지면서 결빙이 이루어졌다. 결빙순서는 T2L, T1U, T1L, T2C, T3C, T1C로 진행되었고, 결빙과정 중 열전대의 손상으로 T3U와 T3L, T2U의 결과는 얻을 수 없었다. 이 온도분포와 결빙형상으로 보아 정지된 유체의 결빙형상은 반경방향 분포에서 배

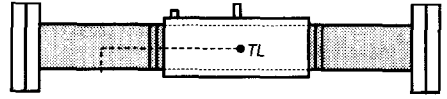


Fig. 6 Thermocouple position : high temperature and high pressure experiment

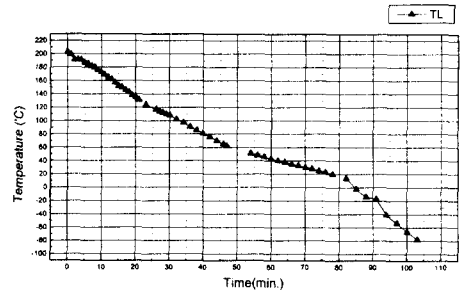


Fig. 7 Temperature profile (initial condition : temperature = 203°C, volume flow rate = 0.0 m<sup>3</sup>/min)

관의 외부에서 시작되어 중앙부로, 그리고 횡방향 분포에서 보면 실험배관의 중앙부에서 시작되어 좌우의 순서로 결빙이 진행되는 것을 알 수 있다. 실험배관의 상부에 구멍이 형성된 것으로 볼 때 정지유체에서의 결빙은 자연대류의 영향이 있는 것으로 해석된다.

2.2.2 실험 (2) : 고온/대기압의 정지유체

본 실험에서는 유체의 초기온도가 결빙에 미치는 영향을 살펴보기 위해 대기압에서 배관에 물을 완전히 채우고 전기히터로 실제 발전소의 배관 내부 유체 온도인 203°C까지 가열한 다음 결빙 실험하였다. 이 실험에서는 아크릴 배관을 사용하지 않고 배관 스펴 전체를 SUS 304 배관을 사용하였으며, 또한 열전대는 Fig. 6과 같이 배관의 중심에 설치하였다.

대기압에서 유체를 203°C까지 가열한 결과 계통의 압력은 포화압력인 16kg/cm<sup>2</sup>을 유지하였으나, 실험이 시작된 후 유체냉각에 의한 비체적 감소로 계통의 압력은 대기압 수준으로 줄어들었다. 그리고 아크릴 배관을 사용했을 때에는 달리 결빙재질을 벗어난 곳에서도 결빙이 되는 것을 확인할 수 있었는데, 이것은 아크릴 배관을 이용한 실험에서는 SUS 304에 비해 상대적으로 전도열전달 계수가 작아 아크릴 배관과 SUS 304 배관간에 열전달이 잘 이루어지지 못했지만 전체가 SUS 304인 경우에는 배관길이 방향으로도 상대적으로 열전달이 잘

이루어지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7과 같이 온도분포는 203℃의 고온에서 0℃까지 냉각될 때까지의 82분동안 거의 직선적으로 변화하였고 온도 강하율은 2.45℃/min 이었다. 0℃ 이하로 떨어진 후에도 냉각의 정도는 거의 직선적이거나 온도 강하율은 4.1℃/min으로 물의 상태보다 그 변화율은 크게 나타났다. 이는 물의 비열(1.0kcal/kg℃)과 얼음의 비열(0.487kcal/kg℃) 차이에 기인한 것으로 판단된다. 물과 얼음 상태에서의 평균 온도 강하율은 2.73℃/min이고, 실험소요시간 103분까지 액체질소의 총 소모량은 348.6kg 이며 평균 소모율은 3.38kg/min 이다.

여기서 1℃ 온도감소를 위한 액체질소의 공급량을 상온/대기압 상태에서의 값과 비교해 보면, 상온/대기압 상태에서 단위온도강하를 위한 액체질소 소모량은 다음과 같다(Fig. 5의 T2C 기준).

$$\frac{\text{LN}_2 \text{ 평균소모율}}{\text{온도 강하율}} = \frac{2.14\text{kg/min}}{2.71\text{℃/min}} = 0.79\text{kg/℃}$$

203℃의 고온/대기압에서 단위 온도 강하를 위한 액체질소 소모량은 다음과 같다.

$$\frac{\text{LN}_2 \text{ 평균소모율}}{\text{온도 강하율}} = \frac{3.38\text{kg/min}}{2.73\text{℃/min}} = 1.23\text{kg/℃}$$

따라서 초기 온도가 높을수록 단위 온도 강하를 위한 액체질소의 소모량은 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 액체질소의 평균 소모율이 상온/대기압 상태에서 2.14kg/min이고, 고온/대기압에서는 3.38kg/min 임을 감안할 때 고온일 경우에 많은 양의 액체질소가 사용되므로 현장에 적용할 때는 초기 온도를 상온으로 냉각시켜 작업을 하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 실제로 EPRI<sup>(9)</sup>에서는 가급적 대기 온도조건까지 유체의 온도를 냉각시켜서 결빙작업을 수행하도록 권장하고 있다.

2.2.3 실험 (3) : 고온/고압의 정지유체

유체에 작용하는 압력이 결빙에 미치는 효과를 살펴보기 위해 50kg/cm<sup>2</sup> 까지 압력을 유지시키고 215℃까지 가열시킨 후 결빙 실험하였다.

Fig. 8 에서 보는 바와 같이 고압 상태에서도 대기압 상태에서와 마찬가지로 온도는 거의 직선적으로 변했으며, 0℃까지의 온도 변화율은 2.0℃/min으로 나타났다. 그리고 결빙 후 얼음 상태에서 온도변화율은 5.0℃/min, 평균 온도강하율은 2.14℃/min이었으며, -20℃까지 감소되는 시간은 109분이 걸렸다. 실험(2)에서 유체 초기온도 20

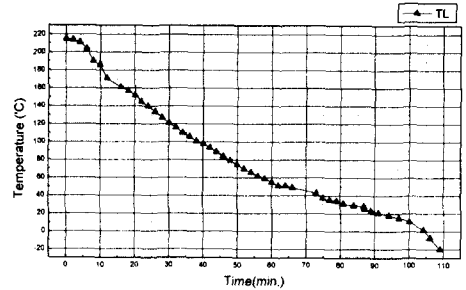


Fig. 8 Temperature profile (initial condition : pressure=50kg/cm<sup>2</sup>, temperature=215℃, volume flow rate=0.0m<sup>3</sup>/min

3℃와 결빙된 후 -20℃까지 약 91분 소요되었고, 같은 조건을 Fig. 8에서 비교해 보면 약 100분 정도 소요되었다. 액체질소의 총소모량은 291.3kg, 분당 평균 액체질소의 소모율은 2.67kg/min 이었다. 그리고 고온/대기압 상태에서의 실험과 비교하여 결빙속도에 대한 압력의 영향을 알아보면, 먼저 고온/대기압 상태의 실험에서 단위 온도 강하를 위한 액체질소의 소모량은 1.23kg/℃이고, 50kg/cm<sup>2</sup> 상태의 실험에서 단위 온도 강하를 위한 액체질소의 소모량은 다음과 같다.

$$\frac{2.67\text{kg/min}}{2.14\text{℃/min}} = 1.24\text{kg/℃}$$

따라서 고압일 경우와 대기압일 경우의 단위 액체 질소 소모량이 거의 같음을 알 수 있다.

2.2.4 실험 (4) : 상온/대기압의 유동 유체 (i)

유량이 있는 상태에서 결빙현상을 파악하기 위해 초기온도가 17℃인 물을 유량계가 설치된 배관을 통해 공급하고, 배관의 전기히터 부근에 위치한 배수관을 통해 계속적으로 배수시키면서 결빙실험을 하였다. 공급유량은 0.004m<sup>3</sup>/min로 유지하였고, 열전대는 실험 (1)과 동일하게 설치하고 위치1쪽으로 유체가 유입되도록 하였다.

Fig. 9는 액체질소가 공급되고 난 후 시간에 따른 온도변화를 나타내는데 결빙순서는 T2L→ T3L→ T3U→ T1L→ T2U→ T1U→ T3C→ T2C→ T1C의 순서로 나타났다. 이 실험에서는 결빙가능 유량을 살펴보기 위해 물의 공급유량을 조절하면서 수행하였는데, 최종적으로 유량을 0.0025m<sup>3</sup>/min으로 조정하는 순간 TIC의 온도가 -3.5℃로 떨어지면서 결빙이 완료되었다.

결빙상태를 관찰한 결과 Fig. 10과 같이 배관 중심점의 수직상부 약 20mm 높이에 직경 10mm

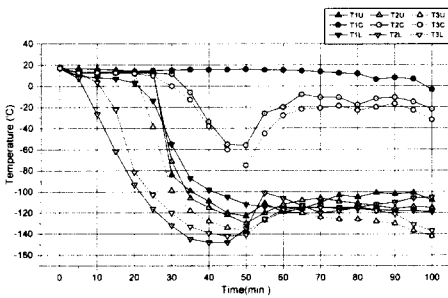


Fig. 9 Temperature profile (jacket length = 600mm, initial volume flow rate = 0.004m<sup>3</sup>/min)

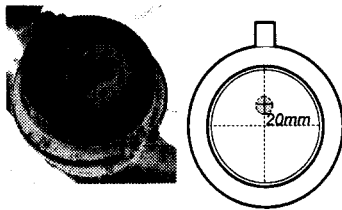


Fig. 10 Profile of ice formation (jacket length = 600mm, initial volume flow rate = 0.004 m<sup>3</sup>/min)



Fig. 11 Profile of ice formation at high flow rate

정도의 오목한 결빙형상이 나타났다. 총 결빙시간은 100분이 소요되었고, 액체질소 총소모량은 180kg, 평균소모율은 1.8kg/min이다.

최종 결빙점이 중심점의 수직상부에 나타난 것으로 보아 유동유체에서는 유체흐름에 따른 강제대류에 직접적인 영향을 받고, 유량이 커질수록 자연대류의 영향이 점점 작아져 최종 결빙점은 정지유체시 보다 중심점으로 가까워지며, Fig. 10과 같이 중심점 상부 20mm의 지점에 위치한다.

이 실험의 결과에서 보면 유동유체에서 결빙을 가능케 하는 유량의 정도는 자연대류현상이 온도분포에 영향을 미칠 정도의 미량이 된다는 것을 알 수 있다. 한편, 실험과정 중 결빙이 불가능한

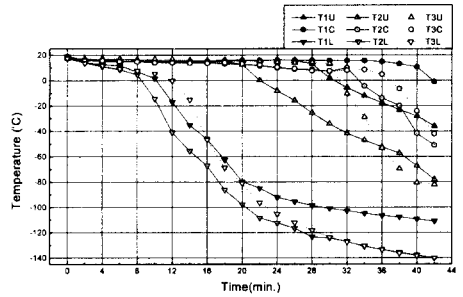


Fig. 12 Temperature profile (jacket length = 600mm, initial volume flow rate = 0.0025m<sup>3</sup>/min)



Fig. 13 Profile of longitudinal ice formation

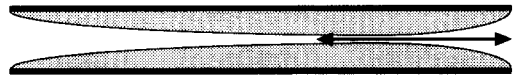


Fig. 14 Range of ice plug formation

유량에서의 결빙 진행 특성을 관찰할 수 있는데, 중심부분의 온도강하 순서가 T3C→ T2C→ T1C 순서로 나타나 Fig. 11과 같이 결빙이 불가능한 유량에서는 출구 끝단에서 온도가 가장 낮아지는 것을 알 수 있다. 이 모양은 동심원관 환상공간 내에서 물의 유동에서 결빙층의 형성 형태와 유사함을 알 수 있다.<sup>(11)</sup>

2.2.5 실험 (5) : 상온/대기압의 유동 유체(ii)

실험 (4)에서 6인치 배관에 대한 결빙 유량이 결정되어 처음부터 0.0025m<sup>3</sup>/min으로 유량을 형성 시켜서 유동형상을 관찰하였다. 결빙 과정에서의 온도 강하 순서는 T2L→ T3L→ T1L→ T2U→ T3U → T1U→ T2C→ T3C→ T1C의 순서로 나타났고, 최종 결빙점 위치도 실험 (4)와 거의 동일한 위치에서 나타났다. 액체질소의 총 소모량은 140kg이며 평균 소모율은 2.9kg/min, 결빙시간은 48분이 소요되었다.

Fig. 12에서 보면 약 33분이 경과된 시점부터 수평 중앙선 부분의 온도 분포는 온도차가 벌어지기 시작하는데 T2C→ T3C→ T1C의 순서로 온도

분포가 나타나고 있다. 이 순서는 각 지점의 온도가 0°C에 도달될 때까지 계속 유지되고, 결빙 후에도 이 온도 분포 순서는 지속되는 것을 알 수 있다.

온도분포에 따라 결빙 형상을 그려보면 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있는데, 이 그림에서 유로가 가장 작은 부분인 결빙 형성 시작점이 실험배관의 끝단이 아닌 중간 정도에 위치하는 것을 확인할 수 있다.

정지유체에서 결빙 형성 시작점은 Fig. 3 위치 2 부근에 나타나는데, 유량이 형성되어 증가할수록 이 점은 점점 유로의 출구 쪽으로 이동되며, 이 점이 출구 선단을 벗어나는 정도의 유량에서는 결빙이 불가능해진다는 것을 알 수 있다. 즉 유량이 형성되는 배관 내에서 결빙이 가능하려면 결빙 형성 시작점이 Fig. 14와 같이 배관출구 끝단 이내의 범위 내에 들어올 수 있는 정도의 유량이 되어야 한다.

2.2.6 실험(6) : 결빙재킷 길이와 유량과의 관계 규명 실험

같은 배관조건에서 결빙재킷의 길이와 내부 유체의 유량과의 관계를 고찰하기 위해 결빙재킷의 길이를 줄여가며 결빙현상을 관찰하였다.

기존의 재킷에 줄이는 길이만큼의 폴리우레탄 단열재를 설치해서 재킷길이를 줄이는 효과를 주었다. 기존의 길이 600mm의 결빙재킷에 200mm 폭의 단열재와 100mm 폭의 단열재를 삽입하여 각각 400mm, 500mm 길이인 재킷을 만들고, 상온/대기압 조건에서 실험을 수행했다. 열전대는 각각 재킷길이의 가운데와 경계에서 50mm되는 부분의 상중하에 설치했다.

(i) 결빙재킷의 길이가 500mm일 때

대기압 조건에서 초기수온은 24.8°C, 초기유량 0.003m<sup>3</sup>/min의 조건으로 시작해서 결빙유량을 찾기 위해, 온도와 실제유량계에 나타나는 유량의 추이를 관찰하며 공급유량을 조절하였다. Fig. 15와 같이, 실험경과시간 약 100분이 될 때까지 위치 1과 2를 중심으로 급격한 오르내림을 거듭해서 0.003m<sup>3</sup>/min이라는 유량이 결빙 한계를 많이 넘어선 것임을 알 수 있다. Fig. 16과 같이 유량을 조절하여 235분에 유량을 0.002m<sup>3</sup>/min으로 줄이자 243분에 순간적으로 TIC, T3C가 떨어지면서 결빙이 완료되었다. Fig. 16에서 "supplied volume

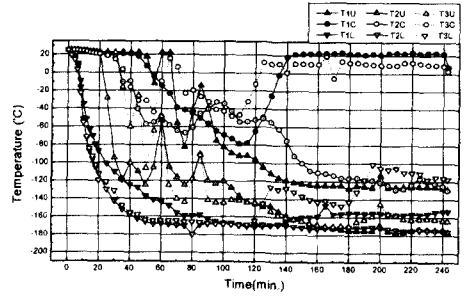


Fig. 15 Temperature profile (jacket length=500mm)

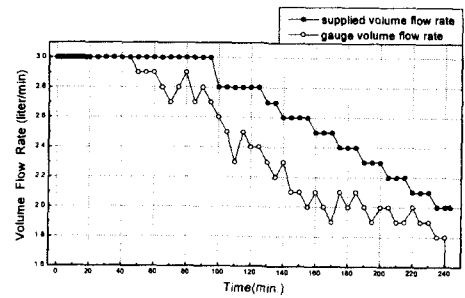


Fig. 16 Volume flow rate profile (jacket length = 500mm)

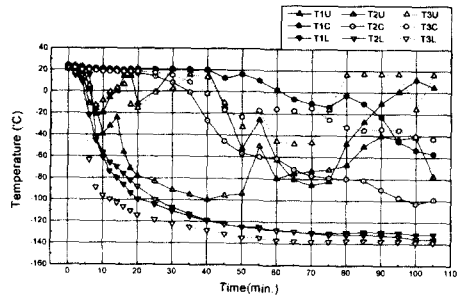


Fig. 17 Temperature profile (jacket length=400mm)

flow rate"란 공급원에서 배관에 직접 공급된 유량(밸브유량)을 나타내는 것이고, "gauge volume flow rate"란 실제로 배관 내를 지나고 있는 유량을 유량계를 통해 읽은 것을 말한다.

재킷의 길이가 짧아진 만큼 상대적으로 유체가 열을 덜 빼앗기면서 지나가게 되므로 결빙과 해빙이 반복적으로 나타나 결빙가능 한계를 넘어섰다는 것을 보여 준다.

(ii) 결빙재킷의 길이가 400mm일 때

재킷의 길이가 많이 짧은 만큼 결빙 가능한 유량이 재킷길이가 600mm일 때 보다 훨씬 적다고

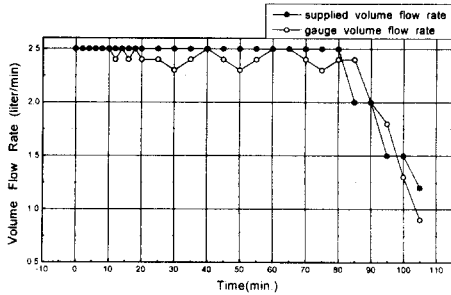


Fig. 18 Volume flow rate profile (jacket length = 400mm)

예상되므로 초기유량으로 0.0025m<sup>3</sup>/min을 주고 시작했다.

결과를 보면, Fig. 17에 나타나듯 온도분포가 아랫부분을 제외하고 전체적으로 다른 조건의 실험들에 비해 높게 나왔다.

Fig. 18과 같은 유량조절을 통해 105분에 0.0012m<sup>3</sup>/min으로 줄여 2분 뒤 결빙이 이루어졌다.

### 3. 결론

본 연구에서는 배관 결빙과정에서의 내부유체의 열유동현상을 고찰하기 위해 유체의 초기 온도, 압력, 유량 및 결빙재킷의 조건을 달리하며 실험하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 재킷길이가 600mm이고 직경 168mm SUS 304 배관에서 유량이 없고 상온/대기압의 경우 자연대류의 영향이 크게 작용해서 최종결빙점이 배관 중심의 수직 상부 약 50mm 지점에 나타난다.

(2) 내부유체가 고온/대기압일 경우는 상온/대기압과 비교하여 단위온도 강하당 냉매 소모량이 증가하나, 고온/고압일 경우는 냉매 소모량이 고온/대기압일 경우와 거의 같음을 보여준다.

(3) 배관내부 유체가 유동될 경우 (1)과 같은 조건에서 결빙 관막음(ice plugging)이 가능한 유량은 0.0025m<sup>3</sup>/min이고, 최종 결빙점은 배관 중심의 수직 상부 약 20mm 지점에 나타나는 것으로 보아 자연대류 현상을 무시할 수 없는 미소 유량에서 결빙이 가능함을 알 수 있다. 이는 수직배관에서만 강조되던 자연대류현상이 수평배관에서도 무시할 수 없음을 보여준다.

(4) 배관내부 유체가 유동될 경우 (1)과 같은

배관조건에서 재킷길이가 500mm의 경우는 0.002m<sup>3</sup>/min, 400mm인 경우는 0.0012m<sup>3</sup>/min으로 결빙 관막음이 가능한 유량이 줄어든다.

### 참고문헌

- (1) 박영돈, 변상규, 강범수, 1998, "배관의 결빙에 의한 열변형 및 열응력 해석," 대한기계학회논문집 A권 제22권 제1호, pp. 227~237.
- (2) 박영돈, 이민우, 구태완, 김귀순, 강범수, 1999, "배관의 Ice Plugging에 의하여 유발되는 열응력의 실험적 규명," 대한기계학회논문집 A권, 제23권 제7호, pp. 1094~1103.
- (3) 한국전력공사원자력건설처, 1980, 해외 연수 보고서.
- (4) Burmeister, L., C., 1993, *Convective Heat Transfer*, John Wiley & Sons.
- (5) Bowen, R. J., 1997, *Introduction Physical Separation & Multiphase Research Group*, University of Southampton
- (6) Burton, M. J., 1986, "An Experimental and Numerical Study of Plug Formation in Vertical Pipes During Pipe Freezing," *Ph.D Thesis*, University of Southampton, U. K.
- (7) Tavner, A. C. R., Bowen, R. J. and Bishop, C. W., 1996, "Heat Flux Monitoring Cryogenic Pipe Freezing : A Case Study," *Institution of Chemical Engineers*, Vol. 74, pp. 239~241.
- (8) Keary, A. C. and Bowen, R. J., 1998, "Analytical Study of the Effect of Natural Convection on Cryogenic Pipe Freezing," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No 10, pp. 1129~1138.
- (9) EPRI Nuclear Maintenance Applications Center, 1989, *Freeze Sealing(plugging) of Piping, A Guide for Nuclear Power Plant Maintenance Personnel*, EPRI.
- (10) 서정세, 김무근, 노승탁, 임장순, 1998, "협착관내 층류유동에서 물의 결빙현상," 공기조화냉동공학논문집 제10권 제1호, pp. 11~21
- (11) 서정세, 노승탁, 1997, "동심원관 환상공간내의 완전히 발달된 층류유동에서 물의 결빙현상에 대한 해석," 대한기계학회논문집 B권, 제21권 제11호, pp. 1552~1561.