

## 배관의 Ice Plugging에 의하여 유발되는 열응력의 실험적 규명

박영돈\*, 이민우\*, 구태완\*\*, 김귀순\*\*\*, 강범수\*\*\*  
(1998년 9월 12일 접수)

### Experimental Evaluation on the Thermal Stress Due to Ice Plugging of Tubes in Nuclear Power Plant

Young-Don Park, Min-Woo Lee, Tae-Wan Ku, Kui-Soon Kim  
and Beom-Soo Kang

**Key Words:** Thermal Stress (열응력), Ice Plugging (배관 막음), Ice Freezing (배관 결빙)

#### Abstract

Ice-plugging of tube in nuclear power plant has been widely used for the purpose of preventing flow of the tube temporarily like a valve. Most common plugging method employs Liquid Nitrogen Gas of  $-196^{\circ}\text{C}$ . According to the change of tube materials and its dimension, the thermal stress caused from the application of the frozen gas can be varied. In this research, a series of experiments have been carried out to inspect the effect of tube geometry on thermal stresses induced due to ice-plugging. Two typical dimension of stainless and mild steels of 3 and 6 inch diameters were used for the experiments. Each critical spots were checked using strain rosette gages. Another inspection was made on the pressure and temperature of the fluid. It is shown that significant thermal stress level which can cause plastic deformation of failure has not been noticed in this series of experiments.

#### 1. 서 론

배관주위에 결빙 자켓(freeze jacket)을 제작 부착하여 자켓 내부로 연결된 관을 통하여  $-196^{\circ}\text{C}$  액화질소(liquid nitrogen,  $\text{LN}_2$ )인 냉매를 계속 공급하여 파이프로부터 열을 제거함으로써 배관 내부유체를 결빙시켜 아이스 플러그(ice plug)를 형성하게 된다. 이는 밸브의 내부 누설 등으로 인해 차단할 수 없는 부위를 얼음(ice)으로 하여금 배관 관막음(pipe plugging)을 형성할 수 있도록 하는 것이다. 배관 결빙(pipe freezing)

작업은 관내 유체가 매우 유독성이거나 원자력 발전소에서와 같이 높은 방사능을 띠고 있는 유체인 경우에 관련 배관이나 기기의 수리를 요할 때 널리 사용될 수 있는 매우 효율적이고, 경제적으로 선택될 수 있는 보수 방법이다.<sup>(1)</sup>

이러한 배관 결빙 작업이 지닌 많은 이점으로 인해 원자력 산업과 일반 산업계에 널리 사용되고 있다. 최초의 결빙 차단 기술은 1904년으로 기록되고 있으며, 원자력 발전소에서 이 기술을 이용한 것은 1968년도에 캐나다 원자력 발전소에서였다. 최근 캐나다 온타리오 발전소에서는 캐나다가 개발한 가압 중수형 원자력 발전소의 원자로에 해당하는 압력관과 연결되는 급수배관에 결빙 자켓을 영구설비로 부착하여 압력관 보수 작업시마다 방사능을 띤 원자로 냉각재를

\* 회원, 한국전력공사

\*\* 부산대학교 항공우주공학과

\*\*\* 회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

배수하지 않고 결빙에 의한 차단으로 값비싼 증수(D<sub>2</sub>O)의 손실없이 효율적이고 경제적인 작업을 수행하고 있다.<sup>(2)</sup> 또한, 이 발전소에서는 실험적 방법으로 배관 결빙 작업시 배관 재질에 발생할 수 있는 고응력 가능성과 기존 배관에 존재할 수 있는 결함과 저온의 영향에 따른 배관 재질의 파괴 인성 감소에 대한 여러 가지 측면의 안전성 분석을 수행하였다.<sup>(3)</sup> 그러나 우리나라에서는 아직 이에 대한 사용이 미비하며 원자력 발전소에서 간혹 사용하는 사례가 있다. 배관결빙 작업시 배관내에 아이스 플러그 형성을 위해서는 초저온의 냉매를 이용하여 급속도로 냉각시켜야 하나 파이프 재질의 파단 강도가 급격히 감소하므로 파이프내의 아주 작은 결함이라도 아이스 플러그를 형성하는 과정에서 발생할 수 있는 높은 응력에 의해서 심각한 파괴를 유발할 수 있어 이에 대한 안전성을 고찰하기도 하였다.<sup>(4)</sup>

그러므로 배관 결빙 작업시의 안전성과 효율을 높이기 위하여 실험에 의하여 작업도중에 발생하는 응력 및 온도 분포 등에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 현장 적용의 신뢰성을 확보하기 위하여 직접 실험 장치를 제작하여 기존의 연구에서 배관 결빙 작업시 소성변형의 가능성이 높은 스테인리스강에 대한 대표적인 배관을 몇 개 선정하여 관막음 현상에 대한 배관 크기, 두께에 따른 열응력적 관계를 고찰함으로써 배관 결빙 작업시 발생할 수 있는 배관 재질의 소성변형 가능성을 살펴보고자 한다.

또한 이러한 연구는 주어진 조건하에서 아이스 플러그 형성가능성 여부, 형성 소요시간 및 적절한 액화질소(LN<sub>2</sub>)의 소모량 예측 등의 실제적인 현장에서 필요로 하는 사항에 대한 답을 제시해 줄 것이다.

## 2. 이론 및 실험 장치 구성

### 2.1 이론적 배경

일반적으로 응력을 해석하기 위해서는 변위 및 변형률을 먼저 구한다. 모든 응력 성분이 존재할 때 Hooke's law에 의한 응력-변형률 관계를 고려한 후, 온도가 T<sub>0</sub>에서 T까지 변화 하였을 경우에 생기는 열변형률을 유도하여, 응력-변형률-온도관계식을 정리한다.<sup>(5-8)</sup>

스트레인 인디케이터에서 나타나는 수치는 mV(10<sup>-3</sup>V) 단위로 나타내어지기 때문에 이들 각 단위에 대해서 우선 공통 단위를 ε으로 변환하는 과정을 거쳐 응력-변형률 관계식을 이용하여 각 실험에 대한 응력 발생정도를 계산하였다. 실험에서 얻어지는 mV를 ε으로 변환하는 과정은 식 (1)에서 나타내었다.<sup>(9)</sup>

$$\epsilon = (mV + X) \times 10^{-3} / (V_{in} \times G_F \times Gain) \quad (1)$$

식 (1)에서의 상수 X는 초기 ε을 보정하기 위한 값이며, V<sub>in</sub>은 입력 전압이고 G<sub>F</sub>는 gage factor, Gain은 스트레인 gain값이다. 또한, 식 (1)에서의 입력전압(V<sub>in</sub>)은 AC 5 Volt, gage factor(G<sub>F</sub>) = 2.04, Gain은 1,000이다. 위의 식을 이용하여 각각의 실험에서 얻은 ε(변형률)으로부터 σ(응력)를 계산하는 관계식은 식 (2)에 나타내었다.<sup>(10)</sup>

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{1}{E} \{ \sigma_r - \nu (\sigma_\theta + \sigma_z) \} + \alpha \Delta T \\ \epsilon_\theta &= \frac{1}{E} \{ \sigma_\theta - \nu (\sigma_r + \sigma_z) \} + \alpha \Delta T \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} \{ \sigma_z - \nu (\sigma_\theta + \sigma_r) \} + \alpha \Delta T \end{aligned} \quad (2)$$

E : Young's modulus,    ν : Poison's ratio  
α : 열 팽창 계수,    ΔT : 온도변화량

또한, 식 (2)에서 유도될 수 있는 유효 응력 (effective stress)과 유효 변형률(effective strain)의 관계를 von Mises식을 이용하여 식 (3)에 나타내었다.<sup>(11)</sup>

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \sqrt{\frac{1}{2} [ (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 ]} \\ \bar{\epsilon} &= \sqrt{\frac{1}{2} [ (\epsilon_r - \epsilon_\theta)^2 + (\epsilon_\theta - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_r)^2 ]} \end{aligned} \quad (3)$$

본 연구에서 각 방향의 응력 성분 중에서 반경 방향의 응력성분(σ<sub>r</sub>)은 그 값이 매우 작거나 '0'에 근접할 것이라는 가정 하에 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 응력을 계산하고, 이를 위한 프로그램은 FORTRAN Language를 사용하였으며 본 연구에서의 응력 해석에 이용하였다. 배관 재질의 물성치를 Table 1에 나타내었다.<sup>(12)</sup>

Table 1 Material properties of SUS-304.

	Value	
Tensile Modulus	197,000 MPa	
Tensile Strength	490 MPa	
Yield Strength	24 °C	205 MPa
	-196 °C	433 MPa
Ultimate Strength	24 °C	658 MPa
	-196 °C	1524 MPa
Max. Temperature	800 °C	
Thermal Expansion Coefficient( $\alpha$ ) (0~316°C)	17.8 × 10 <sup>-6</sup>	
Density	8.0 g/cm <sup>3</sup>	
Elongation	24 °C	85.5 %
	-196 °C	48.1 %

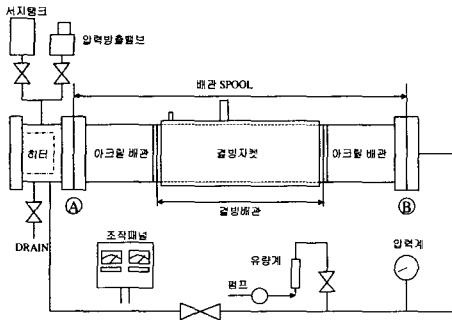


Fig. 1 Layout drawing for the test apparatus.

배관의 경계조건에 대한 고려는 Fig. 1에서 실험용 배관인 3인치, 6인치 배관이 결합되는 플랜지 A 부위와 플랜지 B 부위에서 배관이 고정 상태에 있다고 가정하였다.

2.2 실험 장치 구성

이 실험을 위해 실험장치(Fig.2)를 구성하였다. 실험 장치의 구성은 배관 내부의 유체를 약 200°C까지 가열하기 위한 약 20kW급의 히터(heater)를 배관 내부에 설치하였고 배관 내부의 압력을 측정하기 위하여 0~14.75MPa의 측정 범위를 갖는 압력계를 설치하였으며, 유체에 압력을 가하기 위하여 펌프를 설치하였다. 내부 유체의 온도를 측정하기 위해 온도계 (thermo-couple)를 설치하고, 유체 유동 및 가열시 압력 해소를 위하여 완충탱크(surge tank) 및 안전 밸브(pressure release valve)를 설치하였다. 그리고 실제 실험 중 변형률을 측정하기 위하여 사용되는 배관은 SUS304-SCH80의 3인치 배관과

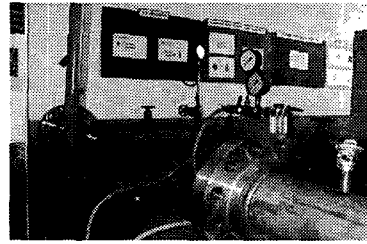


Fig. 2 Picture of the test apparatus.

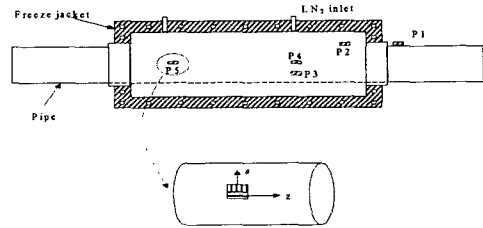


Fig. 3 Attachment method of strain gage.

6인치 배관 두 종류 그리고 결빙과정을 육안으로 확인할 수 있는 6인치 아크릴 배관을 제작하였으며 아크릴 배관의 열적 성질 때문에 결빙 자켓 부착부위는 스테인리스강으로 하고 아크릴관과의 사이에는 고무 O-링으로 밀봉하였다. 각 배관의 길이는 모두 1.56m로 제작하여 교체 가능하도록 플랜지를 부착하였다.

이번 연구에 사용된 스트레인 게이지(strain gage)는 미국 Measurements Group사의 WK-06 -125TM-350으로 사용가능한 온도 조건이 -269°C ~400°C로 본 연구의 실험조건에 맞는 게이지를 사용하였다.<sup>(13)</sup> 이 게이지는 배관 외부 표면의 정해진 위치에 수지계열의 접착제를 바른 후 약 200°C로 3시간 동안 가열하여 부착하였다. 부착 방법은 배관 외벽 5개 위치에 2축 스트레인 게이지를 배관의 길이 방향을 0°, 반경 방향을 90° 가 되게 부착하였다.(Fig.3)

스트레인 게이지의 부착작업이 끝난 후 인입선(lead wire)을 이용하여 스트레인 인디케이터(strain indicator)에 연결하였다. 변형률 측정장비인 스트레인 인디케이터는 동적(dynamic) 변형률 측정기를 사용하였다. 실험 전에 스트레인 게이지의 정상 작동 유무를 확인하기 위하여 디지털 멀티미터(digital multimeter)를 이용하여 스트레인 인 게이지의 저항 확인을 거친 후, 스트레인 인

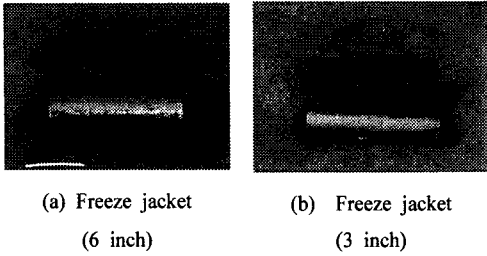


Fig. 4 Freeze jacket apparatus.

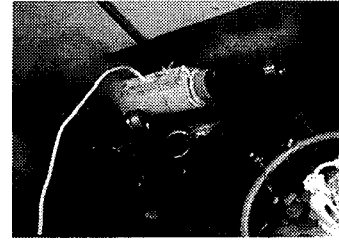


Fig. 5 Acryl pipe for test-1.

디케이터에서 측정되는 변형률을 초기값으로 보정하였다.

배관의 결빙현상을 구현하기 위한 결빙 자켓은 6인치용(Fig.4.(a))과 3인치용(Fig.4.(b))를 각각 제작하여 필요시 교체 가능하도록 하였다. 자켓의 외부에는 액화질소가 유입되는 흡입구 및 배기구를 각기 마련하여 실험에 용이하도록 하였다. 또한, 액화질소는 압력용기의 무게를 포함하여 200kg인 액화질소를 실험전 그 소모량을 측정하기 위해 전자저울에 올려놓은 뒤 결빙 자켓에 연결하였다. 그리고, 실험 준비의 마지막 단계로 자켓 배기구에서 유출되는 액화 질소에 의한 실험자의 중독을 막기 위해 실험 장소의 환기를 하여 연속적인 실험을 수행할 수 있도록 하였으며, 실험장치는 이동용으로 제작하였다

### 3. 응력 측정 실험

#### 3.1 배경

원자력 발전소에서는 중수(D<sub>2</sub>O)로 채워진 원자로 압력관의 임시 차단용으로 배관 내부에 아이스 플러그를 형성한다. 이를 위해 원통형 자켓을 배관 주위에 부착하고 그 자켓 내부로 액화질소(-196℃)를 공급하여 배관 내부의 열을 제거하여 고체 아이스 플러그를 형성시킨다. 본 연구에서는 배관 내부의 유체를 중수가 아닌 물(H<sub>2</sub>O)과 특수 제작된 자켓을 이용하여 실험을 수행하여 이 플러깅(plugging) 동안 배관의 재질에 발생할 수 있는 고응력(high stress) 가능성과 배관의 온도변화와 아이스 플러그와의 상호 작용에 기인한 열적, 기계적 응력의 수용 가능성, 그리고 배관 내부의 내압에 대한 응력 변화를 고찰하였다.

#### 3.2 실험

배관의 아이스 플러그 현상을 규명하기 위한 결빙 실험은 총 5회에 걸쳐 수행하였다. 각각의 실험에서는 단위 시간에 따른 온도, 질소 소모량 및 스트레인 인디케이터에서 측정되는 변형률을 기록하였다. 실험은 자켓 내부에 -196℃의 액화 질소를 유입시켜 이때 발생하는 변형률을 측정하여 이를 이용하여 응력을 측정하고자 한다.

실험의 준비단계에서 스트레인 게이지의 부착 및 측정의 정확도가 매우 중요하다. 이는 '실험 2'에서 다섯 장소(P1, P2, P3, P4, P5)에 10개의 스트레인 로켓게이지를 부착하였음에도 불구하고 두 곳에서의 4개의 스트레인 게이지만이 정확한 변형률을 측정하여 다소 어려움이 있었으며, 실험시 높은 온도의 유체조건과 냉각시 사용하는 액화질소의 사용할 때 위험성 등을 고려하여 실험과정에서 실험실 주위의 환경 및 실험진행 요원들의 주의가 각별히 요구되었다.

본 실험에서 배관에 액화질소를 주입하는 동안, 배관내부의 결빙이 완료되었음을 결정하는 방법은 Fig. 1의 원심 압력펌프를 이용하여 유체를 강제 유입시켜 압력계에서 나타나는 압력의 상승 유무를 토대로 배관 결빙완료를 결정하였다.

#### 3.3 실험 1

이 실험에서는 Fig. 5에서와 같이 6인치 아크릴 배관을 실험장치에 설치하여 배관 내부의 결빙과정을 알아보고자 실험을 수행한 결과 순조롭게 결빙이 진행되었으며 결빙후의 모습을 아크릴 배관을 장치에서 분리하여 관찰하였다.

결빙에 소요된 시간은 약 40분, 소모된 액화 질소량은 약 100kg이었다. 내부 유체 유동이나 압력 상승이 없는 기본적인 상태를 토대로 수행되었으며 Fig. 6에서와 같이 결빙 과정이 배관

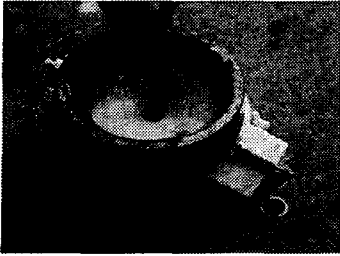


Fig. 6 Picture of the frozen pipe.

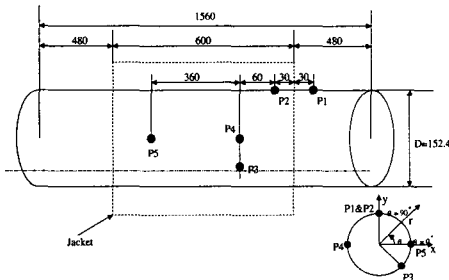


Fig. 7 Location of the strain gage on 6 inch pipe. (unit : mm)

내부 표면에서부터 배관 중심으로 동심원 형태로 결빙되고 있음을 알 수 있었다.

3.4 실험 2

SUS304-SCH80인 6인치 배관을 실험장치의 양쪽 플랜지에 부착하였다. 초기조건은 배관 내부에 압력을 가하지 않고 내부 유체의 온도를 상온(18℃)에서부터 200℃까지 가열한 후 액화질소를 자켓에 유입시켜 결빙실험을 수행하였다. 이 때, 변형률 측정 위치는 Fig. 7 에서와 같이 자켓 내부 배관에 4개, 자켓 외부 배관 경계부에 1개(P1)를 설치하였으며 자켓 내부 배관 에는 배관 중심에 2개(P4, P5), 배관 하부에 1개(P3), 배관 경계부에 1개(P2)를 설치하였다.

배관결빙이 완료되는데 소요된 시간은 약 150 분, 온도는 -14℃이었으며 액화질소 소모량은 322.5kg이었다. 배관 내부의 온도를 -78℃ 까지 냉각하였을 때 소요된 시간은 164.8분이었고 질소 소모량은 350.4kg이었다.

3.5 실험 3

SUS304-SCH80인 6인치 배관을 실험장치의 양쪽 플랜지에 부착하였다. 초기조건은 배관 내부에 압력을 7.35MPa로 유지하면서 내부 유체의

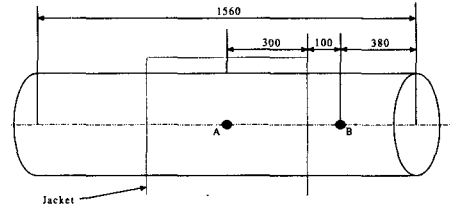


Fig. 8 Measurement point of the pipe diameter in test-4. (unit : mm)

Table 2 Comparison of diameter before and after test.

			3 inch pipe	6 inch pipe
Base dimension	Inner diameter		76.20	152.40
	Thickness		7.60	10.90
Outer diameter in the experiments	Before test	Center	89.02	168.19
		Around	88.99	167.31
	Just after test	Center	88.80	168.03
		Around	89.03	168.01
48 hours after test	Center	89.04	168.02	
	Around	89.05	167.07	

온도를 상온(16℃)에서부터 200℃까지 가열 한 후 액화질소를 자켓을 통하여 유입시켜 결빙 실험을 수행하였다. 배관의 결빙이 완료되는 데 소요된 시간은 액화질소 유입후 약 109 분이었고 액화질소 소모량은 313.6Kg 이었다. 배관 결빙 완료시의 내부의 최종 온도는 -20℃ 이었다.

3.6 실험 4

실험 3의 배관을 사용하였다. 초기조건은 배관 내부에 압력은 가하지 않은 상태에서 내부 유체의 온도를 상온(16℃)으로 유지한 후 액화질소를 자켓을 통하여 유입시켜 -196℃까지 온도를 하강시켜 결빙 실험을 수행하였다. 배관의 결빙이 완료되는데 소요된 시간은 액화질소 유입 후 약 50분이었고, 결빙 자켓이 부착되는 위치의 초기 외경과 자켓 외부 배관 초기 외경을 각각 측정하였고(Fig.8), 결빙이 종료된 후의 각 외경을 측정하여 이를 Table 2에 나타내었다.

3.7 실험 5

SUS304-SCH80의 3인치 배관에 스트레인 게이지를 정해진 위치(Fig.9)와 같이 부착하여 실험

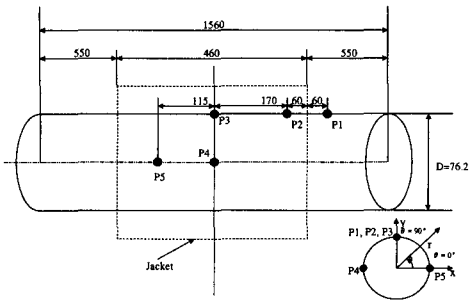


Fig. 9 Location of the strain gage on 3 inch pipe. (unit : mm)

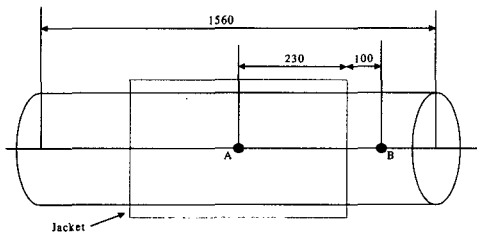


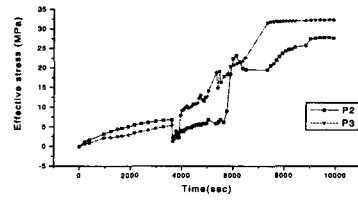
Fig. 10 Measurement point of the pipe diameter in test-6. (unit : mm)

을 수행하였다. 초기조건은 배관 내부에 압력을 7.35MPa로 유지하면서 내부 유체의 온도를 상온(14℃)에서부터 202℃까지 가열한 후 액화질소를 자켓을 통하여 유입시켜 결빙 실험을 수행하였다. 배관의 결빙이 완료되는데 소요된 시간은 액화질소 유입후 약 60분이었고 액화질소 소모량은 139.0kg이었다. 배관 내부의 결빙 온도는 -4℃, 최종 결빙온도는 -15℃이었다.

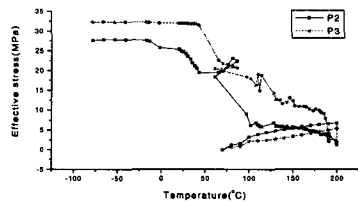
### 3.8 실험 6

실험 6의 배관을 이용하였다. 초기조건은 배관 내부에 압력은 가하지 않은 상태에서 내부 유체의 온도를 상온(14℃)에서부터 액화질소를 자켓을 통하여 유입시켜 결빙 실험을 수행하였다. 결빙 자켓이 부착되는 위치의 초기 외경과 자켓 외부 배관 초기 외경을 각각 측정하였고(Fig. 10), 결빙이 종료된 후의 각 외경을 측정하여 이를 Table 2에 나타내었다.

배관의 결빙이 완료되는데 소요된 시간은 액화질소 유입 후 약 15분이었고 결빙 완료 온도는 -4℃이었다. 결빙이 완료되고 난 후 약 9분 동안



(a) Time-effective stress curves



(b) Temperature-effective stress curves

Fig. 11 Experiment results in test-2.

측정(온도 -72℃)을 계속하여 결빙 이후 연속적인 액화질소 유입에 따른 변형률의 변화를 관찰하였다. 이는 배관 내부에 결빙이 된 후에 아이스 플러그의 성장에 따른 응력의 변화를 살펴보기 위하여 계속 액화질소를 유입시켰다.

## 4. 응력의 분석

### 4.1 실험 2

이 실험에서 P2(자켓 내부 배관 경계면), P3(자켓 내부 배관하부)에서의 변형률 측정치를 토대로 응력해석을 시도하였다. 이 실험에서는 6인치 배관 내부에 압력을 가하지 않은 상태에서 배관 내부 유체온도를 200℃까지 가열한 후 결빙 실험을 수행하였다. 이 실험에서는 결빙 자켓에 액화질소가 유입되고 난 후부터 P2보다 P3에서 보다 높은 응력이 발생하였다. 실제로 배관 내부에 결빙이 완료되었을 때(-14℃) P2에서는  $\bar{\epsilon}$ 이  $4.74 \times 10^{-4}$ ,  $\bar{\sigma}$ 가 27.4MPa로 나타났고, P3에서  $\bar{\epsilon}$ 이  $5.57 \times 10^{-4}$ ,  $\bar{\sigma}$ 가 32.2MPa로 나타났다. 이는 배관 재료의 항복강도(yield strength)인 205.0MPa에 미치지 못하는 값이었다. 또한, 배관 내부의 온도가 -78℃일 때, P3에서  $\bar{\sigma}$ 와  $\bar{\epsilon}$ 는

각각  $5.58 \times 10^{-4}$ , 32.3MPa이었다. 전체적인 결과는 P2에서 배관 내부의 온도가  $-54^{\circ}\text{C}$ 일 때  $\bar{\epsilon}$  및  $\bar{\sigma}$ 는  $5.59 \times 10^{-4}$ , 32.3MPa로 최대 변형률 및 최대 응력이 존재하는 것을 알 수 있었다. 변형률 측정 위치에 따른 응력 분포를 Fig. 11(a), Fig. 11(b)에 나타내었다.

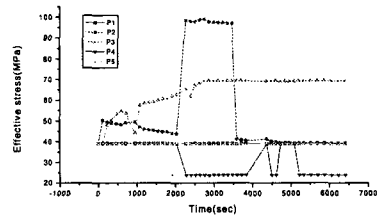
Fig. 11(b)는  $200^{\circ}\text{C}$ 에서 액화 질소 가스가 유입되자마자 배관 온도 증가에 따른 열응력 양상이 멈추고, 일시적인 응력 감소가 발생하고 그 후 배관 내부의 벽면에 아이스 플러그가 형성되기 시작하면서 다시 열응력이 증가함을 보여주고 있다.

4.2 실험 3

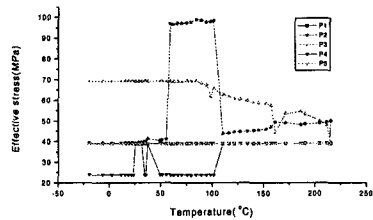
이 실험에서는 6인치 배관을 상온( $15^{\circ}\text{C}$ )에서  $200^{\circ}\text{C}$ 까지 가열하고 난 후 결빙실험을 수행하였다. 배관 내부에 결빙이 완료되었을 때( $-20^{\circ}\text{C}$ ) P3에서  $\bar{\epsilon}$ 이  $7.82 \times 10^{-4}$ ,  $\bar{\sigma}$ 가 70.1MPa로 나타났다. 이는 배관 재료의 항복강도에 미치지 못하는 값이었다. 전체적인 결과는 P2에서 배관 내부의 온도가  $84^{\circ}\text{C}$ 일 때  $\bar{\epsilon}$  및  $\bar{\sigma}$ 는  $15.17 \times 10^{-4}$ , 100.1MPa로 최대 변형률 및 최대 응력이 존재하는 것을 알 수 있었다. P2는 자켓의 부착 경계에 있기 때문에 이로 인한 자켓 내부와 외부사이의 열충격 및 배관 내부의 압력에 기인한 국소적인 최대 응력값을 보이고 있다. 변형률 측정 위치에 따른 응력 분포를 Fig. 12(a), Fig. 12(b)에 나타내었다. Fig. 12(b)에서도 액화 질소가 유입되고 난 후 일시적인 응력 감소가 발생함을 알 수 있었다.

4.3 실험 4

이번 실험은 상온에서 결빙작업을 수행한 실험이다. 배관 내부에 결빙이 완료되었을 때, P2에서  $\bar{\epsilon}$ 이  $4.76 \times 10^{-4}$ ,  $\bar{\sigma}$ 가 27.5MPa로 나타났다. 이는 배관 재료의 항복강도보다 낮은 값이었다. 전체적인 결과는 상온에서 액화질소가 유입되고 난 후 약 38분이 경과하였을 때 P2에서  $\bar{\epsilon}$  및  $\bar{\sigma}$ 가  $5.39 \times 10^{-4}$ , 31.1MPa로 최대 변형률 및 최대 응력이 존재하는 것을 알 수 있었다. P2는 자켓의 부착 경계에 있기 때문에 이로 인한 자켓 내부와 외부사이의 열충격에 기인한 국소



(a) Time-effective stress curves



(b) Temperature-effective stress curves

Fig. 12 Experiment results in test-3.

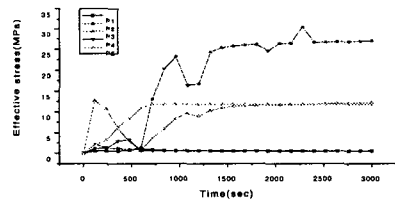


Fig. 13 Time-effective stress curves in test-4.

적인 최대 응력값을 보이고 있다. 변형률 측정 위치에 따른 응력 분포를 Fig. 13에 나타내었다. 이번 실험에서도 액화 질소가 결빙 자켓 내부로 유입되고 난 후 일시적인 응력 감소가 발생하였다.

4.4 실험 5

이 실험은 3인치 배관을 설치하여 배관 내부의 압력을 7.35MPa로 유지하면서 상온( $15^{\circ}\text{C}$ )에서  $200^{\circ}\text{C}$ 까지 가열하고 난 후 결빙실험을 수행하였다. 배관 내부에 결빙이 완료되었을 때 ( $-15^{\circ}\text{C}$ ) P3에서  $\bar{\epsilon}$ 이  $5.46 \times 10^{-4}$ ,  $\bar{\sigma}$ 가 45.1MPa로 나타났다. 이는 배관 재료의 항복강도보다 낮은 값이었다. 전체적인 결과는 P2에서 배관

내부의 온도가 196℃일 때  $\bar{\epsilon}$  및  $\bar{\sigma}$ 는  $4.74 \times 10^{-4}$ , 54.6MPa로 최대 변형률 및 최대 응력이 존재하는 것을 알 수 있었다. P2는 자켓의 부착 경계에 있기 때문에 이로 인한 자켓 내부와 외부사이의 액화질소가스 유입으로 인한 열충격 및 배관 내부의 압력에 기인한 국소적인 최대 응력값을 보이고 있다. 변형률 측정 위치에 따른 응력 분포를 Fig. 14(a), Fig. 14(b)에 나타내었다. 이번 실험에서도 액화질소가 유입된 후 매우 적은 감소이나 일시적인 응력 감소 현상이 발생하였다.

4.5 실험 6

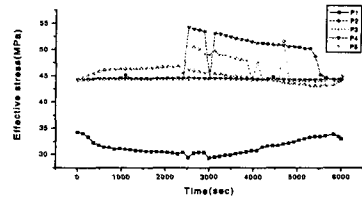
이번 실험은 상온(14℃)에서 3인치 배관을 이용하여 결빙실험을 수행하였다. 배관 내부에 결빙이 완료되었을 때(-24℃) P3에서  $\bar{\epsilon}$  이  $4.52 \times 10^{-4}$ ,  $\bar{\sigma}$  가 20.5MPa로 나타났다. 이는 배관 재질의 항복강도보다 낮은 값이었다. 전체적인 결과는 P3에서 배관 내부의 온도가 12℃일 때  $\bar{\epsilon}$  및  $\bar{\sigma}$ 는  $4.63 \times 10^{-4}$ , 21.0MPa로 최대 변형률 및 최대 응력이 존재하는 것을 알 수 있었다. P3는 유입되는 액화질소가스가 직접적으로 배관에 닿는 부위이기 때문에 이로 인한 열충격에 기인한 국소적인 최대 응력값을 보이고 있다.

변형률 측정 위치에 따른 응력분포를 Fig. 15(a), Fig. 15(b)에 나타내었다.

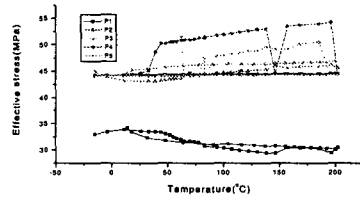
5. 실험의 결과 분석

실험 결과의 분석은 각 실험에서 나타난 배관에 걸리는 최대 응력과 실험에 사용된 배관 재질의 항복강도를 비교함으로써 결빙 작업시 열응력의 과도한 변화에 의한 열충격으로 재질의 파손 가능성을 판단하는 것이다. 이와 같이 파손의 기준이 SUS 304 배관의 항복강도는 Fig. 16에 나타난 바와 같이 상온(약 20℃)에서 205.0MPa에서 -196℃에서는 약 428.0MPa로 온도가 낮아질수록 항복강도는 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고, 이들 실험에 대한 결과를 Table 3에 정리하였다.

Table 3에서 나타나는 바와 같이 대부분의 실험에서 P1(자켓 외부)과 P2(자켓 내부)의 유효 응력의 차가 가장 큰 것으로 나타나고 있다.

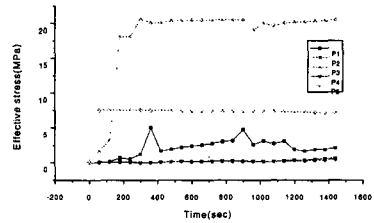


(a) Time-effective stress curves

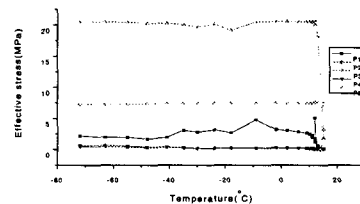


(b) Temperature-effective stress

Fig. 14 Experiment results in test-5.



(a) Time-effective stress curves



(b) Temperature-effective stress curves

Fig. 15 Experiment results in test-6.

이는 자켓 내·외부의 온도 차이로 인한 열응력의 급격한 변화의 결과이다. 또한, 실험 6에서는 다른 위치보다 P3에서 가장 큰 유효 응력을 나타내고 있는 데 이는 액화질소 유입시 자켓 내부에서 액화질소가 가장 처음 접촉하는 부위에 P3를 위치 시켰기 때문이다.



5.1 배관 가열과 응력

실험 2에서 보면 시간에 따른 유효 응력 및 유효 변형률의 관계는 선형적인 증가 양상을 보이고 있으며 그 증가량이 적음을 알 수 있다. 200℃에서 약 7MPa로 항복강도에 비해 아주 미미하고 Fig. 11(b)에서와 같이 이 양은 액화 질소 가스를 주입하자 일시적으로 거의 0으로 하강함을 나타내고 있다. 실험 3과 실험5는 각기 다른 직경의 배관에 온도와 압력을 동시에 적용 하여 액화질소 가스 주입시 Fig. 12(a)와 Fig. 14(a)에서 보면 온도의 영향이 실험 2에서와 같이 나타나지 않

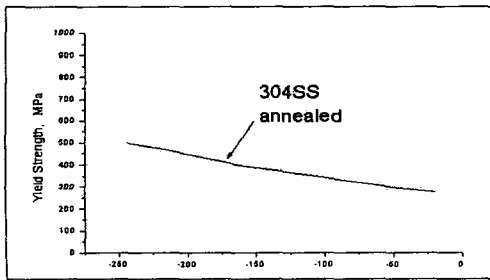


Fig. 16 Cryogenic material property of SUS-304.

고 있다. 이는 압력의 영향이 훨씬 크기 때문에 나타나는 영향으로 판단된다.

5.2 압력의 영향

실험에서 배관 내부의 압력은 실험 3과 실험 5에서 7.35MPa이었다. 압력에 따른 유효응력은 실험 3에서 약 39.0MPa, 실험 5에서 약 45.0MPa가 냉각을 하기 전에 배관에 작용하고 있다. Fig. 12(a)에서 압력에 의한 응력 증가치 약 40.0MPa를 감안한다면 액화질소 주입후 대략 30.0MPa의 온도차에 의한 응력을 유지하고 있어 Fig. 13과 비교해 볼 때 비슷한 수준을 나타내고 있음을 알 수 있다. 실험 3에서 중간에 P2에서 약 100.0 MPa까지 증가한 것은 실험간에 나타나는 불확실한 요소로 캐나다 온타리오 발전소 실험에서도 각 실험간에 나타난 ±50.0 MPa의 변화가 존재하였다. Fig. 14(a)에서도 압력에 의한 응력 증가치를 빼고 나면 다소 차이(약 10.0MPa)가 있긴 하나 비슷한 경향을 보이고 있어 결과적으로 배관 결빙시 내부 유체의 압력에 의한 영향은 액화

Table 3 Comparison of the tests.

Test	Pipe (inch)	Strain gage No.	Initial/final/max. temperature(℃)	Frozen time (min)	LN <sub>2</sub> consumption (kg)	Max. effective /min. effective stress(MPa)
2	6	P2	18/-78/200	164.8	350.4	32.30/0.00
		P3				32.25/0.00
3	6	P1	16/-20/200	109.0	313.6	39.23/38.94
		P2				101.04/39.20
		P3				70.06/39.20
		P4				39.20/24.51
		P5				39.20/38.88
4	6	P1	16/-196/16	50.0		0.97/0.00
		P2				31.14/0.00
		P3				12.94/0.00
		P4				3.34/0.00
		P5				12.10/0.00
5	3	P1	14/-15/202	60.0	139.0	33.80/29.24
		P2				54.62/44.24
		P3				46.86/43.15
		P4				44.58/44.24
		P5				50.69/44.05
6	3	P1	14/-72/14	15.0		5.05/0.00
		P2				0.48/0.00
		P3				21.03/0.00
		P4				0.65/0.00
		P5				7.59/0.00

질소 가스의 공급전 배관 내부압력에 의한 응력 증가치 만큼이 배관 결빙시 나타나는 응력에 추가됨을 알 수 있다.

### 5.3 배관 직경 및 두께의 영향

본 연구에서는 3인치 배관과 6인치 배관을 사용하여 실험을 수행하였다. 이 배관의 두께와 직경 차이로 인한 응력의 변화는 Fig. 13, Fig. 15(a)에서 보듯이 동일한 압력조건하에서 6인치 배관이 약 15.0MPa 정도 큰 유효응력을 나타내고 있으며, Fig. 12(a), Fig. 14(a)에 나타난바와 같이 6인치 배관에서 약 10.0MPa 정도 크게 나타나고 있어 결과적으로 같은 SUS304-SCH80에 대해 배관 직경 증가 및 두께 증가시 결빙에 의한 응력은 다소 증가하는 것으로 나타났다.

## 6. 결론 및 고찰

본 실험에서는 아크릴 배관을 사용하여 배관의 결빙진행형상의 관찰을 시도함으로써 배관 결빙작업시의 현상을 이해하는데 많은 도움이 되었으며 앞으로의 배관결빙에 관한 연구에도 많은 도움이 되리라 생각된다. 본 연구에서 수행한 실험에서의 측정결과는 예측한 결과에 근접하고 있고 배관결빙작업시 별다른 무리가 없다는 것을 알 수 있다.

이번 실험에서의 결과를 종합 정리해 보면 아래와 같다.

(1) 배관 내부유체 온도의 영향은 열충격(thermal shock)에 의한 파손만 발생하지 않는다면 배관 결빙시 나타나는 응력 변화에 거의 영향을 미치지 않는다.

(2) 배관 내부유체 압력의 영향은 액화질소를 주입하기 전에 내부유체 압력에 의한 응력이 배관 결빙시 추가로 작용하며 열응력과 상호 상승효과는 없다.

따라서 SUS304 배관에서의 배관 내부유체 결빙시 배관재질에 미치는 응력은 불확정 요소를 감안하더라도 나타나는 응력값이 항복응력에 훨씬 못 미치므로 작업시 배관의 다른 구속조건이 없는 한 소성변형은 없다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공

연구센터의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 한국전력공사 원자력 건설처, 1980, 해외 연수 보고서.
- (2) Flaman, M. T. and Shah, N. N., 1985, Structural Integrity Investigation of Ice Plugging Procedure in Feeder Pipe, Ontrio Hydro Reserch Division.
- (3) EPRI, 1990, Freeze Sealing(Plugging) of Piping (NP-6384D).
- (4) 박영돈, 변상규, 강범수, 1998, "배관의 결빙에 의한 열변형 및 열응력 해석," 대한기계학회논문집 A권 제22권 제1호, pp. 227~237.
- (5) Hosford, F. H. and Caddell, R.M., 1993, Metal Forming, Mechanics an Metallurgy, Prentice-Hall International Inc., pp. 28~48.
- (6) Kaufman, J. G., Marshall, H. and Wanderer, E. T., 1967, "Aluminum Alloys for Cryogenic Temperatures," Cryogenic Engineering Symposium, Canadian Chemical Conference, Toronto, Ontario, Canada.
- (7) Olleman, R. D. and Wolfer, G. C., 1960, Advanced in Cryogenic Engineering, Vol. 5, p.430
- (8) Miller, G. A., 1969, "Fatigue Fracture Appearance and the Kinetics of Strain Formation in some High-Strength Steels," Transactions, American Society for Metals, Vol. 62.
- (9) Farnell, 1997, The newark range from Farnell, Farnell Electric Components Limited, United Kingdom.
- (10) Thomson, E. G., 1965, Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing, The Macmillan Company, New York, pp. 30~51.
- (11) Crandal, S. H., Dahl, N. C. and Lardner, T. J., 1986, An Introduction to the Mechanics of Solids, Dept. of Mech. Eng., MIT.
- (12) 이성규, 손유홍, 김학모, 박 철, 구용권, 1978, 특수강 핸드북, 한국종합특수강(주).
- (13) 한응교, 1998, 스트레인게이지 이론과 응용, 보성 문화사.