



# 원전 배관 결빙 작업에 대한 안전성 분석

박 영 돈

한전 원자력교육원 교수



**배**관 결빙(pipe freezing) 작업은 관내 유체가 매우 유독성이거나 원자력발전소에 서와 같이 높은 방사성을 띠고 있는 유체인 경우에 관련 배관이나 기기의 수리를 요할 때 널리 사용될 수 있는 매우 효율적이고, 경제적으로 선택될 수 있는 보수 방법이다.

그 원리는 배관 주위에 결빙 자켓(freeze jacket)을 제작 부착하여 자켓 내부로 연결된 관을 통해  $-196^{\circ}\text{C}$ 의 액화 질소(liquid nitrogen, LN2)인 냉매를 계속 공급, 배관으로

부터 열을 제거함으로써 배관 내부 유체를 결빙시켜 아이스 플러그(ice plug)를 형성되게 하여, 밸브의 내부 누설 등으로 인해 차단할 수 없는 부위를 얼음(ice)으로 하여금 배관 관막음(pipe plugging)을 형성할 수 있도록 하는 것이다.

이러한 배관 결빙 작업은 많은 이점 때문에 원자력산업과 일반 산업계에 널리 사용되고 있다.

원자력발전소에 대한 결빙 차단 기술은 미국이 78년도에 적용하였으며, 캐나다 원자력발전소에서는 68년도에 이미 이 기술을 사용하였다.

캐나다 온타리오 발전소에서는 캐나다가 개발한 가압 중수형 원자력발전소의 원자로에 해당하는 압력관과 연결되는 급수 배관에 결빙 자켓을 영구 설비로 부착하여, 압력관 보수 작업 때마다 방사능을 띤 원자로 냉각재를 배수하지 않고 결빙에 의한 차단으로 값비싼 중수(D<sub>2</sub>O)의 손실없이 효율적이고 경제적인 작업을 수행하고 있다.

또한 이 발전소에서는 실험으로 탄

소강 배관에 대해 고응력 가능성과 기존 배관에 존재할 수 있는 결함과 저온에서의 배관 재질의 파괴 인성의 감소에 대한 여러 가지 측면의 안전성 분석을 수행하였다.

그러나 이 실험은 탄소강 배관에 대해 국한되어 있어 다양한 재질을 사용하고 있는 산업계에서 범용으로 적용하는 데 다소 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 현장 적용의 신뢰성을 확보하기 위하여 직접 실험 장치를 제작하여, 기존의 연구에서 사용하지 않은 스테인리스강에 대한 대표적인 배관 몇 개를 선정, 관막음 현상에 대한 배관 크기·두께에 따른 열응력적 관계를 고찰함으로써 배관 결빙 작업시 발생할 수 있는 배관 재질의 소성 변형 가능성을 살펴보고자 한다.

또한 이 실험을 토대로 다양한 크기의 배관과 배관 내부 유체의 고압력·고온도 등 다양한 조건하에서 발생할 수 있는 온도 분포와 응력 분포를 도출하여 열충격(thermal shock)현상과 소성 변형 가능성에 대해 분석하

기 위해 유한 요소법을 활용하고자 한다.

유한 요소법은 정밀하고 광범위한 정보를 제공할 수 있으며, 실험으로 측정이 곤란한 부분까지도 소재의 온도 분포, 유효 응력 분포 및 변형 양상 등의 정보를 제공하므로, 실험으로 구현하지 못하는 경우까지도 합리적인 결과를 얻을 수 있다.

그리고 복잡한 형상의 소재에도 적용할 수 있는 범용성을 가지고 있으므로, 효율적이고 신뢰성 있는 해석 시스템 확립은 유사한 연구에 높은 활용도를 보일 것으로 예상된다.

또한 극저온(-196°C)하에서 재료의 결정 구조를 관찰함으로써 예상되는 모든 작업 저해 요소들을 검토해 보고자 한다.

**실험에 의한 분석**

**1. 이론적 배경**

일반적으로 응력을 해석하기 위해서는 변위 및 스트레인을 먼저 구하고 응력을 구한다.

모든 응력 성분이 존재할 때 Hooke's law에 의한 응력 - 변형률 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} \{ \sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \} \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} \{ \sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z) \} \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} \{ \sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Y_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} \\ Y_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G} \\ Y_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에 대한 주 변형률 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{\sigma_2}{E} = \frac{\tau(1+\nu)}{E} \\ \epsilon_2 &= \frac{\sigma_2}{E} - \nu \frac{\sigma_1}{E} = \frac{\tau(1+\nu)}{E} \\ Y_{xy} &= \epsilon_1 - \epsilon_2 = 2 \frac{\tau(1+\nu)}{E} \end{aligned} \quad (3)$$

위의 식 (1)과 식 (2)에서 온도가 변형률에 미치는 영향을 고려하면, 온도가 T<sub>0</sub>에서 T까지 변화하였을 경우에 생기는 열변형률은 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon'_x = \epsilon'_y = \epsilon'_z = \alpha(T - T_0) \quad (4)$$

$$Y'_{xy} = Y'_{yz} = Y'_{zx} = 0$$

α : 선팅창 계수

따라서 응력 - 변형률 - 온도 관계 식은 식 (1)에 식 (4)를 적용하여 식 (5)로 나타내진다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} \{ \sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \} + \alpha(T - T_0) \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} \{ \sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z) \} + \alpha(T - T_0) \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} \{ \sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \} + \alpha(T - T_0) \end{aligned} \quad (5)$$

스트레인 인디케이터에서 나타나는 수치는 mV(10-3V)단위로 나타

나기 때문에, 이들 각 단위에 대해서 우선 공통 단위를 ε으로 변환하는 과정을 거쳐 스트레인-스트레스 관계식을 이용하여 각 실험에 대한 응력 발생 정도를 계산하였다.

실험에서 얻어지는 mV(10-3 volt)를 ε으로 변환하는 과정은 식 (6)에 나타내었다.

$$\epsilon = (mV + X) * 10^{-3} / (Vin * GF * Gain) \quad (6)$$

식 (6)에서의 상수 X는 초기 ε을 보정하기 위한 값이며, Vin은 입력 전압이고 GF는 계기 인자(gage factor), Gain은 스트레인 이득(gain)값이다.

위의 식들을 이용하여 각각의 실험에서 얻은 ε으로부터 σ(스트레스)를 계산하는 관계식은 식 (5)를 배관에 적용한 식 (7)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} \{ \sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \} + \alpha \Delta T \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} \{ \sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z) \} + \alpha \Delta T \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} \{ \sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \} + \alpha \Delta T \end{aligned} \quad (7)$$

E : Young's modulus,

ν : Poison's ratio

α : 열팽창 계수

ΔT : 온도 변화량

식 (7)을 이용하여 응력을 계산하는 프로그램은 FORTRAN 언어를 사용하여 프로그래밍하여 본 연구에서 응력 해석에 이용하였다.

배관 재질의 물성치(properties)를

〈표 1〉 304 스테인리스강의 물성치

		Value
Tensile Modulus	197,000MPa	
Tensile Strength	490MPa	
Yield Stress	24℃	205MPa
	-196℃	433MPa
Ultimate Strength	24℃	658MPa
	-196℃	1524MPa
최대 사용 온도	800℃	
Thermal Expansion Coefficient(α) (0~316℃)	17.8×10 <sup>-6</sup>	
Density	8.0g/cm <sup>3</sup>	
Elongation	24℃	85.5%
	-196℃	48.1%

〈표 1〉에 나타내었다.

식 (6)에서의 입력 전압(Vin)은 AC 5 Volt, gage factor(GF) = 2.04, Gain은 1,000이다.

## 2. 실험 장치 구성

이 실험을 위해 실험 장치를 구성하였다(그림 1).

실험 장치의 구성은 배관 내부의 유체를 약 200℃까지 가열하기 위한

히터(heater)를 약 20kW급으로 배관 내부에 설치하였고, 배관 내부의 압력을 측정하기 위하여 0~150kg/cm<sup>2</sup>의 측정 범위를 갖는 압력계를 설치하였으며, 유체에 압력을 가하기 위하여 플린저 펌프를 설치하였다.

내부 유체의 온도를 측정하기 위해 온도계(Thermocouple)를 설치하고, 유체 유동 및 가열시 압력 해소를 위하여 완충 탱크(surge tank) 및 안전 밸브(relief valve)를 설치하였다.

그리고 실제 실험중 스트레인(strain)을 측정하기 위하여 사용되는 배관은 SUS304 SCH80의 3인치 배관과 6인치 배관 두 종류, 그리고 결빙 과정을 육안으로 확인할 수 있는 6인치 아크릴 배관을 제작하였으며, 아크릴 배관의 열적 성질 때문에 결빙 자켓 부착 부위는 스테인리스강으로 하고 아크릴관과의 사이에는 고무 O-링으로 밀봉하였다.

각 배관의 길이는 모두 2m로 제작하여 교체 가능하도록 플랜지를 부착

하였다.

실험 장치 도면은 〈그림 2〉에 나타내었다.

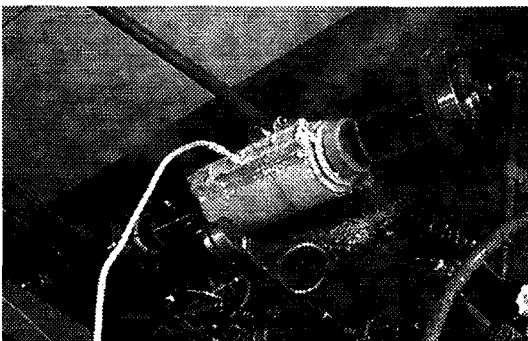
이번 연구에 사용된 스트레인 게이지(strain gage)는 미국 Measurements사의 WK-06-125TM-350으로 사용 가능한 온도 조건이 -269℃~400℃로 본 연구의 실험 조건에 맞는 게이지를 사용하였다.

이 게이지는 배관 외부 표면의 정해진 위치에 수지 계열의 접착제를 바른 후 약 200℃로 3시간 동안 가열하여 부착하였다.

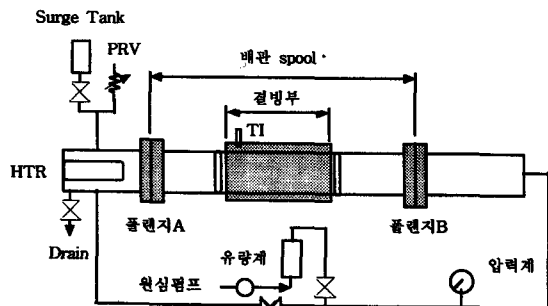
스트레인 게이지의 부착 작업이 끝난 후 인입선(lead wire)을 이용하여 스트레인 인디케이터(strain indicator)에 연결하였다.

스트레인 측정 장비인 스트레인 인디케이터는 정적(static) 스트레인 측정기와 동적(dynamic) 스트레인 측정기를 실험 조건에 맞게 사용하였다.

실험 전에 스트레인 게이지의 정상 작동 유무를 확인하기 위하여 디지털 멀티미터(digital multimeter)를 이



〈그림 1〉 실험 사진



〈그림 2〉 실험 도면

용하여 스트레인 게이지의 저항 확인을 거친 후, 스트레인 인디케이터에서 측정되는 변형률을 초기값으로 보정하였다.

배관의 결빙 현상을 구현하기 위한 결빙 자켓은 6인치용과 3인치용을 각각 제작하여 필요시 교체 가능하도록 하였다.

자켓의 외부에는 액화 질소가 유입되는 흡입구 및 배기구를 각기 마련하여 실험에 용이하도록 하였다.

또한 액화 질소(LN<sub>2</sub>)는 압력 용기의 무게를 포함하여 200kg인 액화 질소를 실험 전 그 소모량을 측정하기 위해 전자 저울에 올려 놓은 뒤 결빙 자켓에 연결하였다.

그리고 실험 준비의 마지막 단계로 자켓 배기구에서 유출되는 LN<sub>2</sub>에 의한 실험자의 중독을 막기 위해 실험 장소의 환기를 하여 연속적인 실험을 수행할 수 있도록 하였으며, 실험 장치는 이동용으로 제작하였다

### 3. 응력 측정 실험

#### 가. 실험

배관의 아이스 플러그 현상을 규명하기 위한 결빙 실험은 총 6회에 걸쳐 수행하였다.

각각의 실험에서는 단위 시간에 따른 온도, 질소 소모량 및 스트레인 인디케이터에서 측정되는 스트레인을 기록하였다.

실험은 자켓 내부에 -196℃의 LN<sub>2</sub>를 유입시켜 이때 발생하는 스트

레인을 측정하여 이를 이용하여 응력을 측정하고자 한다.

#### 나. 실험 1

이 실험에서는 6인치 아크릴 배관을 실험 장치에 설치하여 배관 내부의 결빙 과정을 알아보고자 실험을 수행한 결과 순조롭게 결빙이 진행되었으며, 결빙 후의 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 결빙 과정이 배관 내부 표면에서부터 배관 중심으로 동심원 형태로 결빙되고 있음을 알 수 있었다.

#### 다. 실험 2

SUS 304 SCH80인 6인치 배관을 실험 장치의 양쪽 플랜지에 부착하였다.

초기 조건은 배관 내부에 압력을 가하지 않고 내부 유체의 온도를 상온(18℃)에서부터 200℃까지 가열한 후 액화 질소를 자켓에 유입시켜 결빙 실험을 수행하였다.

이 때 변형률 측정 위치는 (그림 3)에서와 같이 자켓 내부 배관에 4개, 자켓 외부 배관 경계부에 1개(P1)를 설치하였으며, 자켓 내부 배관에는 배관 중심에 2개(P4, P5), 배관 하부에 1개(P3), 배관 경계부에 1개(P2)를 설치하였다.

배관 결빙이 완료되는 데 소요된 시간은 약 150분, 온도는 -14℃이었으며

액화 질소 소모량은 322.5kg이었다.

배관 내부의 온도를 -78℃까지 냉각하였을 때 소요된 시간은 164.8분이었고 질소 소모량은 350.4kg이었다.

#### 라. 실험 3

SUS 304 SCH80인 6인치 배관을 실험 장치의 양쪽 플랜지에 부착하였다.

초기 조건은 배관 내부에 압력을 75kgf/cm<sup>2</sup>로 유지하면서 내부 유체의 온도를 상온(16℃)에서부터 200℃까지 가열한 후 액화 질소를 자켓을 통하여 유입시켜 결빙 실험을 수행하였다.

배관의 결빙이 완료되는 데 소요된 시간은 액화 질소 유입 후 약 109분이었고 액화 질소 소모량은 313.6kg이었다.

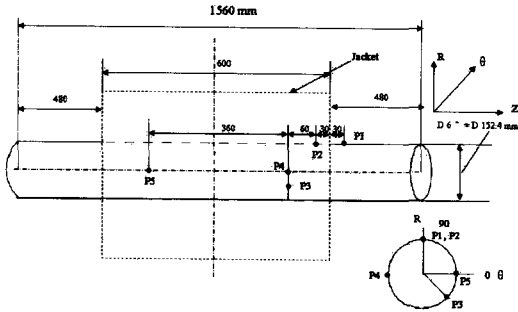
배관 결빙 완료시의 내부의 최종 온도는 -20℃이었다.

#### 마. 실험 4

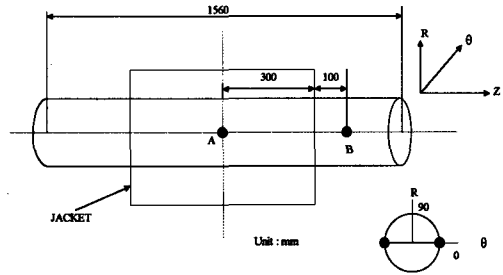
실험 3의 배관을 사용하였다.

초기 조건은 배관 내부에 압력을 가하지 않은 상태에서 내부 유체의 온도를 상온(16℃)으로 유지한 후 액화 질소를 자켓을 통하여 유입시켜 -196℃까지 온도를 하강시켜 결빙 실험을 수행하였다.

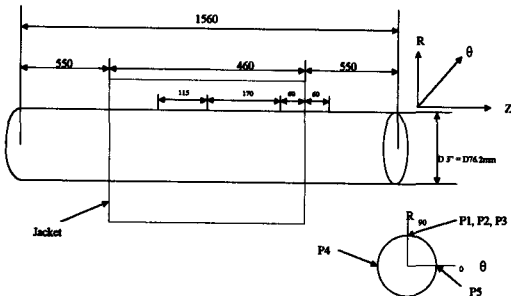
배관의 결빙이 완료되는 데 소요된 시간은 액화 질소 유입 후 약 50분이었고, 결빙 자켓이 부착되는 위치의 초기 외경과 자켓이 부착되지 않은 외부 배관의 초기 외경을 각각 측정하였다(그림 4).



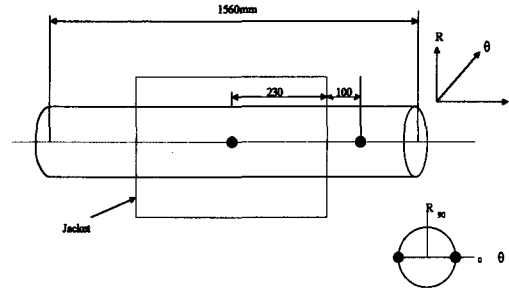
〈그림 3〉 6인치 배관의 스트레인 게이지 부착 위치(단위 : mm)



〈그림 4〉 배관 직경 측정 부위(실험 4)



〈그림 5〉 3인치 배관의 스트레인 게이지 부착 위치(단위 : mm)



〈그림 6〉 배관 직경 측정 위치(6인치 배관)

〈표 2〉 실험 전후 직경 비교

	실험전		실험 종료 직후		실험 종료 48시간 후	
	Center	Arround	Center	Arround	Center	Arround
3"PIPE 외경(mm)	89.02	88.99	88.80	89.03	89.04	89.05
6"PIPE 외경(mm)	168.192	167.31	168.03	168.01	168.02	167.07

결빙이 종료된 후의 각 외경을 측정하여 이를 〈표 2〉에 나타내었다.

결빙 상태를 확인하기 위해 외부에서 압력 펌프를 이용하여 유체를 유입시켜 배관 내부의 압력 상태를 기준으로 결빙을 확인하였다.

바. 실험 5

SUS 304 SCH80의 3인치 배관에 스트레인 게이지를 정해진 위치

〈그림 5〉와 같이 부착하여 실험을 수행하였다.

초기 조건은 배관 내부에 압력을 75kgf/cm<sup>2</sup>로 유지하면서 내부 유체의 온도를 상온(14℃)에서부터 202℃까지 가열한 후 액화 질소를 자켓을 통하여 유입시켜 결빙 실험을 수행하였다.

배관의 결빙이 완료되는 데 소요된

시간은 액화 질소 유입 후 약 60분이었고 액화 질소 소모량은 139.0kg이었다.

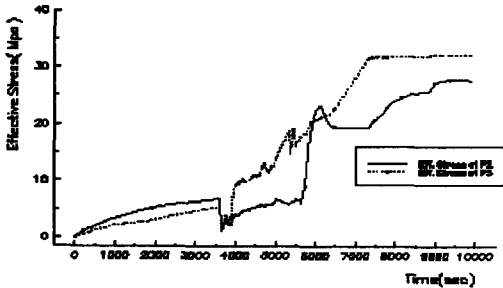
배관 내부의 결빙 온도는 -4℃, 최종 결빙 온도는 -15℃이었다.

사. 실험 6

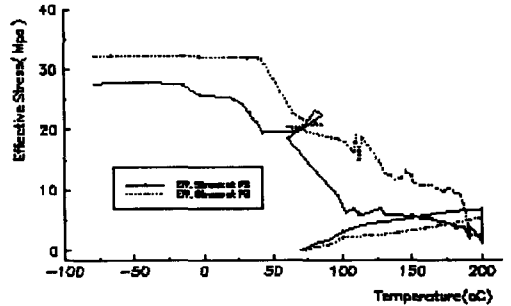
실험 5의 배관을 이용하였다.

초기 조건은 배관 내부에 압력은 가하지 않은 상태에서 내부 유체의 온도를 상온(14℃)에서부터 액화 질소를 자켓을 통하여 유입시켜 결빙 실험을 수행하였다.

결빙 자켓이 부착되는 위치의 초기 외경과 자켓 외부 배관 초기 외경을 각각 측정하였고〈그림 6〉, 결빙이 중



(그림 7)(a) 시간-응력 곡선(실험 2)



(그림 7)(b) 온도-응력 곡선(실험 2)

료된 후의 각 외경을 측정하여 이를 <표 2>에 나타내었다.

배관의 결빙이 완료되는 데 소요된 시간은 액화 질소 유입 후 약 15분이었고 결빙 완료 온도는 -4℃이었다.

결빙이 완료되고 난 후 약 9분 동안 측정(온도 -72℃)을 계속하여 결빙 이후 연속적인 액화 질소 유입에 따른 스트레인의 변화를 관찰하였다.

이는 배관 내부에 결빙이 된 후에 아이스 플러그의 성장에 따른 응력의 변화를 살펴보기 위하여 계속 액화 질소를 유입시켰다.

#### 4. 응력의 분석

##### 가. 실험 2

이 실험에서 P2(자켓 내부 배관 경계면), P3(자켓 내부 배관 하부)에서의 변형률 측정치를 토대로 응력 해석을 시도하였다.

이 실험에서는 6인치 배관 내부에 압력을 가하지 않은 상태에서 배관 내부 유체 온도를 200℃까지 가열한

후 결빙 실험을 수행하였다.

이 실험에서는 결빙 자켓에 액화 질소가 유입되고 난 후부터 P2보다 P3에서 보다 높은 응력이 발생하였다.

실제로 배관 내부에 결빙이 완료되었을 때(-14℃) P2에서는  $\bar{\epsilon}$ (유효 변형률 : effective strain)이  $474 \times 10^{-6}$ ,  $\bar{\sigma}$ (유효 응력 : effective stress)가 27.4Mpa로 나타났고, P3에서  $\bar{\epsilon}$ 이  $557 \times 10^{-6}$ ,  $\bar{\sigma}$ 가 32.2Mpa로 나타났다.

이는 배관 재료의 항복 응력인 205.0Mpa에 미치지 못하는 값이었다.

또한 배관 내부의 온도가 -78℃일 때, P3에서  $\bar{\epsilon}$ 는  $558 \times 10^{-6}$ ,  $\bar{\sigma}$ 는 32.3Mpa이었다.

전체적인 결과는 P2에서 배관 내부의 온도가 -54℃일 때  $\bar{\epsilon}$  및  $\bar{\sigma}$ 는  $559 \times 10^{-6}$ , 32.3Mpa로 최대 변형률 및 최대 응력이 존재하는 것을 알 수 있었다.

변형률 측정 위치에 따른 응력 분

포를 <그림 7>에 나타내었다.

<그림 7> (b)는 200℃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.

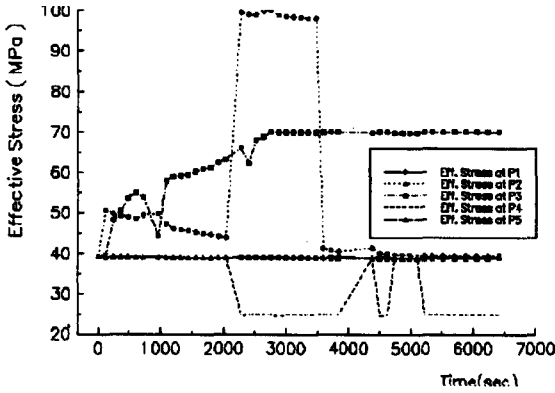
##### 나. 실험 3

이 실험에서는 6" 배관을 상온(15℃)에서 200℃까지 가열하고 압력을 상승시켜 결빙 실험을 수행하였다.

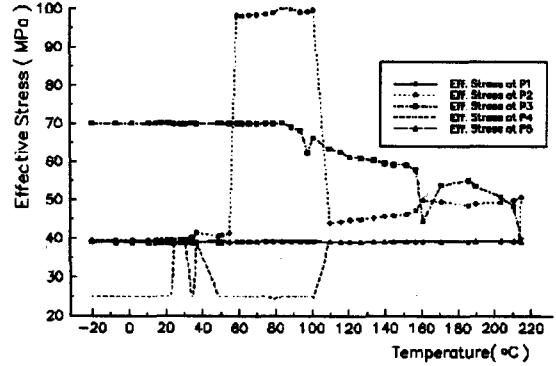
배관 내부에 결빙이 완료되었을 때 (-20℃) P3에서  $\bar{\epsilon}$ (effective strain)이  $782 \times 10^{-6}$ ,  $\bar{\sigma}$ (effective stress)가 70.1Mpa로 나타났다.

이는 배관 재료의 항복 응력인 205.0Mpa에 미치지 못하는 값이었다.

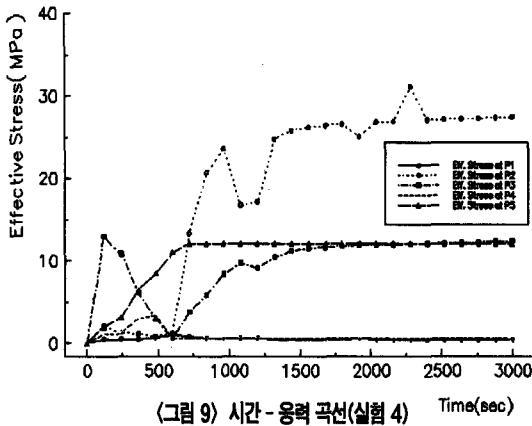
전체적인 결과는 P2에서 배관 내부의 온도가 84℃일 때  $\bar{\epsilon}$  및  $\bar{\sigma}$ 는  $1517 \times 10^{-6}$ , 100.1Mpa로 최대 스트레인 및 최대 응력이 존재하는 것을 알 수



(그림 8)(a) 시간-응력 곡선(실험 3)



(그림 8)(b) 온도-응력 곡선(실험 3)



(그림 9) 시간-응력 곡선(실험 4)

최대 응력이 존재하는 것을 알 수 있었다.

P2는 자켓의 부착 경계에 있기 때문에 이로 인한 자켓 내부와 외부 사이의 열응력에 기인한 국소적인 최대 응력값을 보이고 있다.

스트레인 측정 위치에 따른 응력 분포를 (그림 9)에 나타내었다.

이번 실험에서도 액화 질소가 결빙 자켓 내부로 유입되고 난 후 일시적인 응력 감소가 발생하였다.

#### 라. 실험 5

이 실험은 3인치 배관을 설치하여 배관 내부의 압력을 75kgf/cm<sup>2</sup>으로 유지하면서 상온(15℃)에서 200℃까지 가열하고 난 후 결빙 실험을 수행하였다.

배관 내부에 결빙이 완료되었을 때 (-15℃) P3에서  $\bar{\epsilon}$ (effective strain)이  $546 \times 10^{-6}$ ,  $\bar{\sigma}$ (effective stress)가 45.1Mpa로 나타났다.

이는 배관 재료의 항복 응력보다 낮은 값이었다.

있었다.

P2는 자켓의 부착 경계에 있기 때문에 이로 인한 자켓 내부와 외부 사이의 열충격 및 배관 내부의 압력에 기인한 국소적인 최대 응력값을 보이고 있다.

스트레인 측정 위치에 따른 응력 분포를 (그림 8)에 나타내었다.

(그림 8)(b)에서도 액화 질소가 유입되고 난 후 일시적인 응력 감소가 발생함을 알 수 있었다.

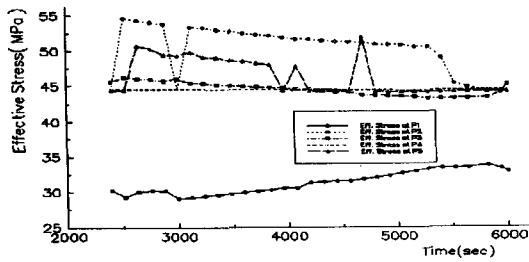
#### 다. 실험 4

이번 실험은 상온에서 결빙 작업을 수행한 실험이다.

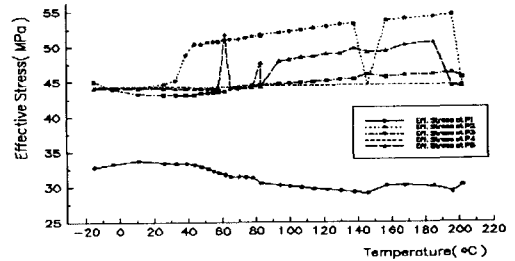
배관 내부에 결빙이 완료되었을 때, P2에서  $\bar{\epsilon}$ (effective strain)이  $476 \times 10^{-6}$ ,  $\bar{\sigma}$ (effective stress)가 27.5Mpa로 나타났다.

이는 배관 재료의 항복 응력보다 낮은 값이었다.

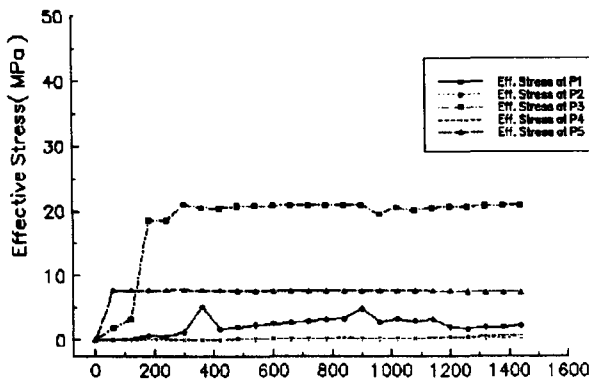
전체적인 결과는 상온에서 액화 질소가 유입되고 난 후 약 38분이 경과하였을 때 P2에서  $\bar{\epsilon}$  및  $\bar{\sigma}$ 가  $539 \times 10^{-6}$ , 31.1Mpa로 최대 스트레인 및



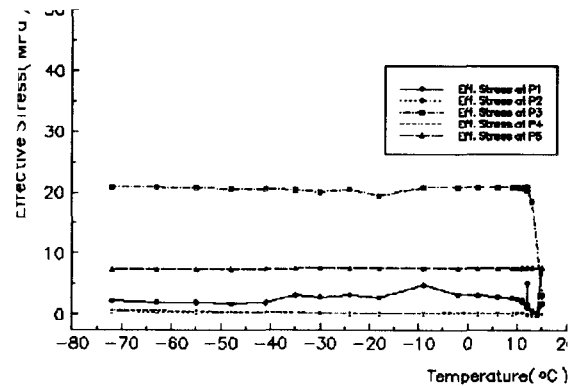
(그림 10)(a) 시간-응력 곡선(실험 5)



(그림 10)(b) 온도-응력 곡선(실험 5)



(그림 11)(a) 시간-응력 곡선(실험 6)



(그림 11)(b) 온도-응력 곡선(실험 6)

전체적인 결과는 P2에서 배관 내부의 온도가 196℃일 때  $\bar{\epsilon}$  및  $\bar{\sigma}$ 는  $474 \times 10^{-6}$ , 54.6Mpa로 최대 스트레인 및 최대 응력이 존재하는 것을 알 수 있었다.

P2는 자켓의 부착 경계에 있기 때문에 이로 인한 자켓 내부와 외부 사이의 액화 질소 가스 유입으로 인한 열응력 및 배관 내부의 압력에 기인한 국소적인 최대 응력값을 보이고 있다. 스트레인 측정 위치에 따른 응력 분포를 <그림 10>에 나타내었다.

이번 실험에서는 액화 질소가 유입된 후 앞의 실험에서와는 달리 일시적인 응력 감소 현상이 발생하지 않았다.

#### 마. 실험 6

이번 실험은 상온(14℃)에서 3인치 배관을 이용하여 결빙 실험을 수행하였다.

배관 내부에 결빙이 완료되었을 때 (-24℃) P3에서  $\bar{\epsilon}$ (effective strain)이  $452 \times 10^{-6}$ ,  $\bar{\sigma}$ (effective stress)가 20.5Mpa로 나타났다. 이는 배관 재

질의 항복 응력보다 낮은 값이었다.

전체적인 결과는 P3에서 배관 내부의 온도가 12℃일 때  $\bar{\epsilon}$  및  $\bar{\sigma}$ 는  $463 \times 10^{-6}$ , 21.0Mpa로 최대 스트레인 및 최대 응력이 존재하는 것을 알 수 있었다.

P3는 유입되는 액화 질소 가스가 직접적으로 배관에 닿는 부위이기 때문에 이로 인한 열응력에 기인한 국소적인 최대 응력값을 보이고 있다.

스트레인 측정 위치에 따른 응력 분포를 <그림 11>에 나타내었다.



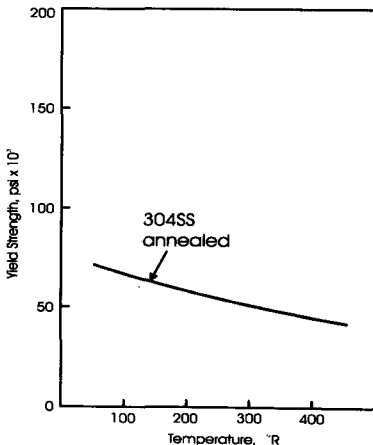
### 5. 실험의 결과 분석

실험 결과의 분석은 각 실험에서 나타난 배관에 걸리는 최대 응력과 실험에 사용된 배관 재료의 항복 응력을 비교함으로써 결빙 작업시 열응력의 과도한 변화에 의한 재료의 파손 가능성을 판단하는 것이다.

이와 같이 파손의 기준이 SUS 304 배관의 항복 응력은 <그림 12>에 나타난 바와 같이 항복 응력이 상온(약 20℃)에서 205.0Mpa에서 -196℃에서는 약 428.0Mpa로 온도가 낮아질수록 항복 응력값은 증가하는 것을 볼 수 있다.

#### 가. 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.



(그림 12) SUS-304의 저온 항복 강도 변화

200℃에서 약 7Mpa로 항복 응력에 비해 아주 미미하고 <그림 7>(b)에서와 같이 이 양은 액화 질소 가스를 주입하자 일시적으로 거의 0으로 하강함을 나타내고 있다.

실험 3과 실험 5는 각기 다른 직경의 배관에 온도와 압력을 동시에 적용하여 액화 질소 가스 주입시 <그림 8>(a)와 <그림 10>(a)에서 보면 온도의 영향이 실험 2에서와 같이 나타나지 않고 있다.

이는 압력의 영향이 훨씬 크기 때문에 온도의 영향이 압력의 영향에 포함되는 것으로 판단된다.

#### 나. 압력의 영향

실험에서 배관 내부에 압력은 실험 3과 실험 5에서 75kgf/cm<sup>2</sup>이었다.

압력에 따른 유효 응력은 실험 3에서 약 39.0Mpa, 실험 5에서 약 45.0Mpa가 냉각을 하기 전에 배관에 작용하고 있다.

<그림 8>(a)에서 압력에 의한 응력 증가치 약 40.0Mpa를 감안한다면 대략 30.0Mpa를 유지하고 있어 <그림 9>와 비교해 볼 때 비슷한 수준을 나타내고 있음을 알 수 있다.

실험 2에서 중간에 P2에서 약 100.0Mpa까지 증가한 것은 실험간에 나타나는 불확실한 요소로 캐나다 온타리오 발전소 실험에서도 실험간에 나타난 ±50.0Mpa의 변화가 존재하였다. <그림 10>(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 질소 가스의 공급 전 배관 내부 압력에 의한 응력 증가치 만큼 배관 결빙시 나타나는 응력에 추가됨을 알 수 있다.

#### 다. 배관 직경 및 두께의 영향

본 연구에서는 3인치 배관과 6인치 배관을 사용하여 실험을 수행하였다. 이 배관의 직경 차이로 인한 응력의 변화는 <그림 9>(그림 11)(a)에서 보듯이 동일한 압력 조건하에서 6인치 배관이 약 15.0Mpa 정도 큰 유효응력을 나타내고 있으며, <그림 8>(a), <그림 10>(a)에 나타난 바와 같이 6인치 배관에서 약 10.0Mpa 정도 크게 나타나고 있어 결과적으로 배관 직경 증가 및 두께 증가시 결빙에 의한 응력은 다소 증가하는 것으로 나타났다.

### 유한 요소(FEM) 해석

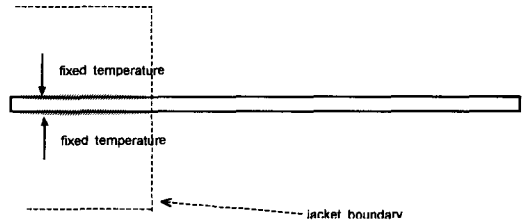
#### 1. 개요

배관 결빙에 의한 보수 작업의 다양하고 광범위한 적용을 위해 우선 실험에 의한 열충격 분석을 근거로 유한 요소 해석을 수행하여 표준 조건을 설정한 후 재질, 배관 크기 및 두께별로 다음과 같이 해석을 수행하여 작업의 안전성을 규명하고자 한다.

- 열전달(heat transfer) 해석
- 열응력 해석

〈표 3〉 배관 크기, 두께, 재질

Outer Diameter	Material	schedule	Etc.
3"	SUS 304	80	pressue
6"	SUS 304		
	AISI 1020		
8"	SUS 304	160	
10"			
12"			
14"			
16"			
18"			
20"			
24"			



〈그림 13〉 열전달 경계 조건

- 재질에 따른 해석
- 배관 두께/크기 변경에 따른 해석

**2. 유한 요소 모델링**

본 연구는 상용 유한 요소 패키지인 MARC를 사용하였으며, 해석에 사용된 격자(element)는 8개의 절점(node)을 가진 2차원의 4각형 요소이다.

해석에 사용된 소재는 실험에서 사용한 파이프와 재질 및 직경이 같은 SUS 304, sch 80의 3", 6" 배관을 기준으로 선택했다.

배관의 길이는 각 실험에서의 축을 대칭으로 자른 1m를 사용했다.

열응력은 재질의 열전달에 의한 온도 분포에 따른 변위 차이에 의해 나타나므로, 먼저 열전달 해석을 하고 그 결과를 이용하여 열응력 해석을 수행하였다.

그리고 압력의 영향을 알아보기 위

해 위의 기준 모델에 압력을 가하여 조합(couple)해석을 수행하였다.

해석은 소재의 대칭성을 감안하여 축대칭 기법으로 수행되었으며, 응력 해석에서는 소재의 소성 거동까지도 파악할 수 있도록 탄소성 유한 요소법을 사용하였다.

기준 모델 3"와 6" 배관을 표준으로 삼고 나머지는 〈표 3〉과 같이 압력·직경·두께별로 해석을 하여 기준 모델과 비교하였다.

여기에 사용된 기계적 물성치(mechanical properties)와 열적 물성치(thermal properties)는 〈표 1〉과 같다.

**3. 경계 조건 및 초기 조건**

가. 초기 조건(initial condition)  
열전달 해석에 사용된 초기 조건은 주위 온도(room temperature) 조건인 16℃를 전체 배관의 절점에 모두 동일하게 주었다.

나. 경계 조건(boundary condition)  
열전달 해석의 경계조건〈그림 13〉은 배관 외부 결빙 자켓에는 질소에 의한 대류 열전달 계수를 구하는 것이 중요한 사항 중의 하나인데, 실험에서와 같이 액체 질소를 직접 배관 외부에 분사할 경우 비등에 의한 열전달이 일어나므로 여기에 대한 정확한 값을 구하기가 불가능하였다.

그리고 배관 내부에 존재하는 유체에 대해서는 온도 변화에 따라 열유속(heat flux)이 변하므로 정확한 수치는 실험에 의한 배관 내부 유체의 온도 측정 없이는 불가능하였다.

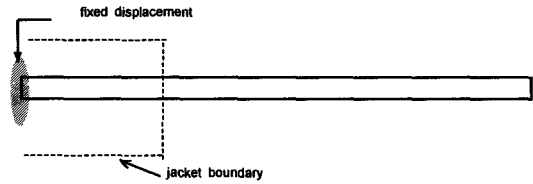
따라서 배관의 외부에 온도계(thermocouple)를 부착하여 직접 표면의 온도를 측정하여 이 값을 이용하여 해석을 수행하였다(표 4).

그리고 이 값을 토대로 기준을 설정하고 각기 다른 모델에 이 값을 이용하여 크기별 두께별 열응력 해석에 적용하였다.

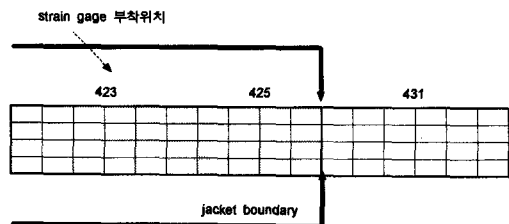
열응력 해석의 경계 조건은 배관의 1/2 지점(1m)에 대칭 경계 조건을 적용하여 고정시켰고, 양쪽의 끝점은 실험 조건과 유사하게 배관을 구속하지 않고 자유단으로 해석하였다(그림

〈표 4〉 배관 내외부 측정 온도

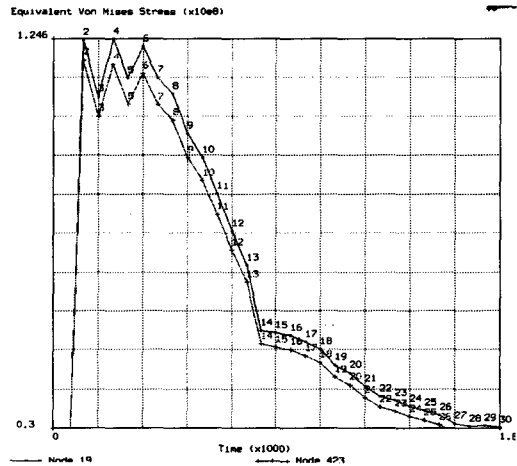
time(minute)	Temperature(°C)	
	outside	inside
1	-0.7	2.1
2	-67.4	-2.8
3	-95	-38
4	-118	-53.9
5	-124	-65
6	-138	-75
7	-140	-81
8	-141	-84
9	-141	-89
10	-142	-93
11	-142.8	-103
12	-144.3	-109.9
13	-144.3	-117.3
14	-144.4	-117.7
15	-144.5	-118
16	-144.5	-118.8
17	-144.5	-119.7
18	-144.5	-121.6
19	-144.4	-122.6
20	-144.5	-124.5
21	-144.5	-125.4
22	-144.5	-126
23	-144.5	-126.6
24	-144.6	-127.1
25	-145.6	-127.8
26	-144.5	-128.8
27	-144.6	-128.8
28	-144.6	-129.1
29	-144.5	-129.1



〈그림 14〉 열응력 경계 조건



〈그림 15〉 스트레인 게이지 부착 부위의 노드 위치



〈그림 16〉 3인치 배관의 응력 분포(노드 19, 423)

14).

4. 응력 분포

실험에서 스트레인 게이지 부착 위치와 유한 요소 해석에서의 노드(node) 위치를 〈그림 15〉에서 나타내

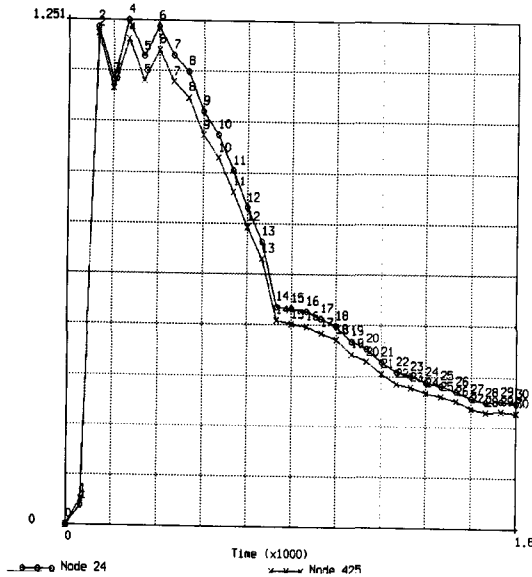
고 있다.

가. 3" 배관

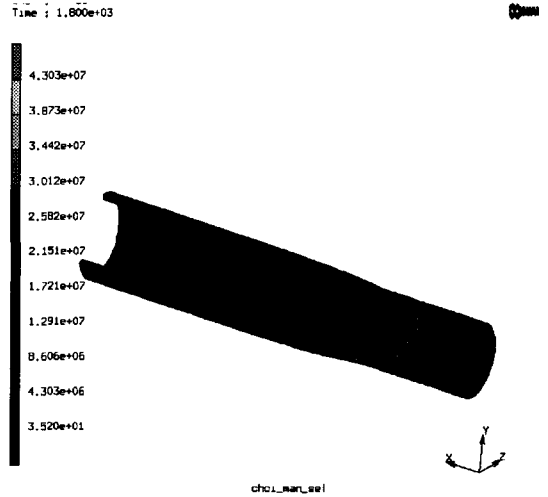
처음 3~5분 사이에 응력이 124.6 MPa로 최대치를 보여주는데, 이는 급격한 온도 변화에 따른 열충격(thermal shock) 현상이 이 부분에

서 발생함을 알 수 있다.

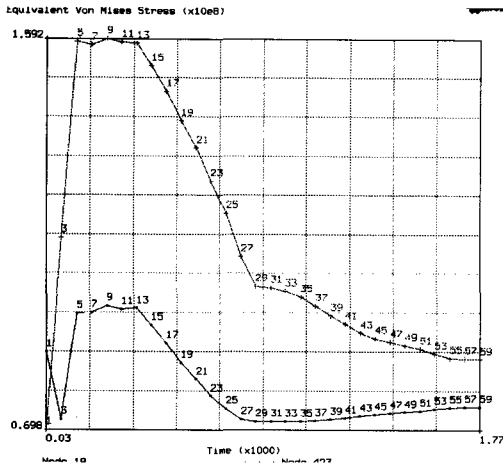
그리고 시간이 경과됨에 따라 정상 상태로 진행되는데, 약 20~25 MPa 정도로 일정해짐을 알 수 있다. 자켓 경계에서도 비슷한 분포가 보여진다 〈그림 16〉.



(그림 17) 6인치 배관의 응력 분포(노드 24, 425)



(그림 18) 6인치 배관 전체 응력 분포



(그림 19) 3인치 배관에서 압력하의 응력 분포(노드 19, 423)

나. 6" 배관

처음 3~5분 사이에 노드 24와 425에서 응력이 125.1 MPa로 최대치를 보여주는데, 이는 급격한 온도 변화에 따른 열충격 (thermal shock)현상이 이 부분에서 발생함을 알 수 있다.

그리고 시간이 경과됨에 따라 정상 상태로 진행되는데, 약 30~35 MPa 정도로 일정해짐을 알 수 있다.

자켓 경계에서도 비슷한 분포가 보여진다(그림 17).

(그림 18)은 전체 응력 분포를 나타내고 있다.

5. 압력 영향하의 응력 분포

가. 3" 배관( 압력 : 75kgf/cm<sup>2</sup>)

처음 3~5분 사이에 응력이 159.2 MPa로 최대치를 보여주는데, 이는 급격한 온도 변화에 따른 열충격 (thermal shock)현상이 이 부분에서 발생함을 알 수 있다.

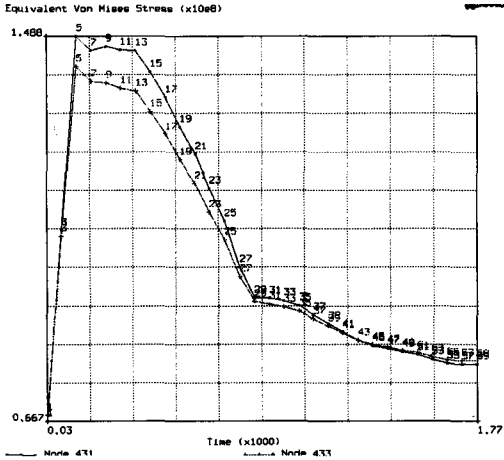
그리고 시간이 경과됨에 따라 정상 상태로 진행되는데 약 70~75 MPa 정도로 일정해짐을 알 수 있다.

자켓 경계에서도 비슷한 분포가 보여진다.

그리고 응력 분포의 유형은 압력이 가해지기 전과 비슷한 유형을 가진다 (그림 19).

나. 6" 배관( 압력 : 50 kgf/cm<sup>2</sup>)

처음 3~5분 사이에 응력이 144.8 MPa로 최대치를 보여주는데, 이는 급격한 온도 변화에 따른 열충격 (thermal shock)현상이 이 부분에



(그림 20) 6인치 배관에서 압력하의 응력 분포(노드 431, 433)

〈표 5〉 배관 크기별 여러 압력 조건에서의 최대 응력

배관의 크기	재질	yield stress(MPa)	max. stress(MPa)	압력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	압력이 가해졌을 경우 max. stress(MPa)
3"	SUS 304	24℃:205 -196℃:433	124.6	75	159.2
6"			125.1	50	144.8
8"			70.84	160	145.7
10"			68.26		147
12"			83.6		150.3
14"			76.16		154.8
16"			76.91		156.8
18"			75.47		158.5
20"			74.32		159.7
24"			77.3		165.7
6"	AISI 1020	296.485	129.9		

서 발생함을 알 수 있다.

그리고 시간이 경과됨에 따라 정상 상태로 진행되는데, 약 68~71 MPa 정도로 일정해짐을 알 수 있다.

자켓 경계에서도 비슷한 분포가 보여진다.

그리고 응력 분포의 유형은 압력이 가해지기 전과 비슷한 유형을 가진다 (그림 20).

### 6. 배관 크기별 응력 분포

이상과 같은 방법으로 배관 크기별로 압력을 원자력 발전소 최대 압력 조건인 160kg/cm<sup>2</sup>에 맞추어 가장 어려운 조건에서의 응력 변화를 분석해 보았다(표 5).

### 7. 결과 분석

#### 가. 실험과의 비교

해석에서는 최대 응력값이 약

100MPa가 넘는 값이 보여지는데, 그것은 이때까지 걸리는 시간이 매우 짧고 급격한 온도 변화에 따른 열충격 현상으로 생각되어진다.

본 실험에서는 액화 질소 주입 초기에 응력이 급격히 증가하는 양상이 나타나지 않고 있으나, 캐나다의 온타리오 실험에서도 액화 질소 주입 초기에 응력의 급격한 증가 현상이 보여지고 실험간의 오차 (±50MPa) 값을 고려할 때, 그리고 (그림 8)(a)와 (b)에서와 같이 실험중에 갑자기 응력이 증가하는 불확정적 요소를 감안하여 급작스런 응력 변화를 제거하고 정상 상태로 도달한 이후의 값을 적용하면 실험값과 비슷한 20~30 MPa 정도의 값을 가지는 것으로 실험 조건과 비슷하게 수행되었음을 알 수 있다.

나. 두께/직경의 변화

실험에서 3" 배관과 6" 배관의 유효응력을 비교해 보면 6" 배관의 경우가 정상 상태 도달 후 더 크게 걸림을 알 수 있다.

그리고 해석에서도 이와 유사한 값을 가지며 6" 배관이 더 큰 유효응력이 걸림을 알 수 있다.

위의 결과를 토대로 배관의 두께/직경을 크게 하면서 해석을 수행한 결과 정상 상태 도달 후의 값을 비교해보면 두께/직경이 커져감에 따라 점차적으로 증가함을 알 수 있다.

그리고 위의 값들은 재료의 온도에 따른 항복 응력값에 비해 훨씬 못 미치는 값이다.

따라서 배관의 안정성에는 문제가 없을 것으로 사료되어진다.

#### 다. 압력의 영향

해석에서 압력만 작용할 경우는 내외벽에 일정한 응력이 걸리게 됨을



〈그림 21〉 등축정 오스테나이트 미세 조직

알 수 있다.

그리고 압력이 걸리지 않은 경우와 압력이 있을 경우의 응력 차이가 일정한 값을 나타냄을 볼 때 압력의 작용은 응력을 더해줌을 알 수 있다.

실험에서도 해석과 마찬가지로 압력이 걸리지 않은 경우와 압력이 걸린 경우의 차이가 어느 정도 일정한 값을 가지고 그 유형이 비슷함을 알 수 있다.

**미세 조직 변화**

**1. 이론적 배경**

실제로 재료의 성질은 그 물질의 내부 구조에 크게 의존한다.

특정한 화학 조성의 재료 내부에 대해서도 그 내부 구조는 정확한 공정 처리 조건과 어떤 조건(온도·압

력 등)하에서 그 재료를 사용할 것인가에 따라 크게 달라진다.

단일 물질이라도 그 내부 구조가 다르면 그 성질도 다른 것이기 때문에 여러 가지의 물리적 성질이 요구되는 곳에 한 가지 재료가 이용될 수 있다.

재료의 기계적 성질은 그 재료가 사용되는 곳의 온도에 예민하며 강도 변화가 일어나는 경우를 이해하기 위해서는 재료의 내부 구조를 좀 더 자세하게 살펴볼 필요가 있다.

실험으로 사용한 SUS 304는 오오스테나이트계 스테인리스강(19Cr, 10Ni)로 고온에서 5분간 어닐링하고 공냉시킨 미세 조직이 핵생성과 성장 조건들이 결정들을 모든 방향에서 거의 동등하게 성장시키는 등축정(equiaxed grain) 오오스테나이트로 이루어져 있다(그림 21).

그러나 만일 고온에서부터 870~6000℃ 영역을 통해 서냉되거나 용접되면 크롬을 함유한 탄화물이 결정립계에 석출되어서 입자 용융이 일어나기 쉽다는 것을 우리는 많은 문헌에서 알 수 있다. 여기서 우리는 고온에서 급냉이 아닌 상온에서 급랭 후의 조직 변화에 대해 실험을 하여 보았다.

**2. 조직 관찰**

상온 상태(그림 22)와 -196 0℃의 액체 질소로 냉각 후 상온 상태(그림 23) 유지시 재료의 비교 변화에 따른 내부 구조를 관찰한 것이다.

실험에서 사용한 SUS304 재료 시편 2개를 표면이 매끈하게 되도록 연마(Polishing)작업을 거친다.

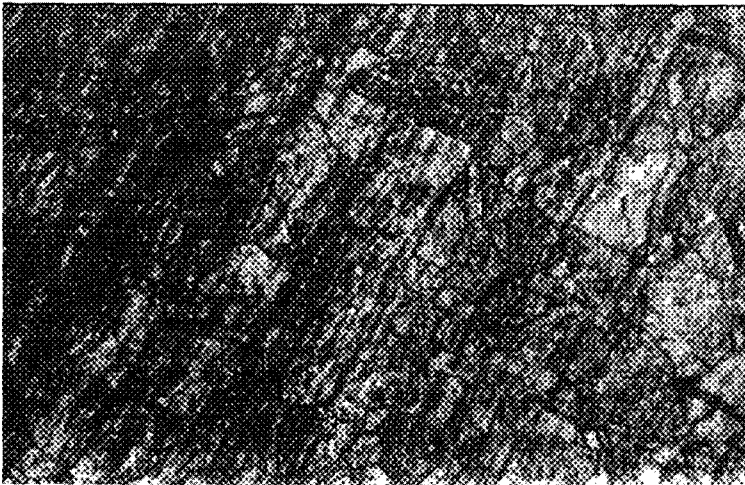
그 후 적절한 화학 용액에 접촉시켜 에칭(etching) 작업을 수행하도록 한다.

단 여기서 화학 용액(부식액)은 염산:질산:알콜을 3:5:8비로 혼합한다.

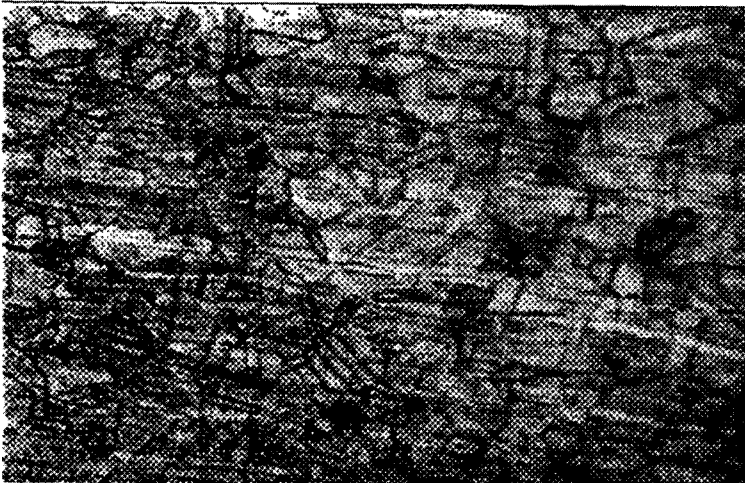
이 에칭 작용에 의해 상온 상태와 -196 0C의 액체 질소로 냉각 후 상온 상태 각각의 시편에 대한 미세한 구조의 변화를 광학 현미경을 사용(200배율)하여 측정하였다.

**3. 관찰 결과**

상온 상태에서 SUS304 시편에 대해서 그 결정 구조에 대한 전위(dislocation)와 약 20분간 -196℃의 액체 질소로 냉각 후 상온 상태 유지시 재료에 대한 그 결정의 전위



(그림 22) 상온 상태 미세 조직(×200)



(그림 23) 냉각(-196°C)후 상온 상태 미세 조직(×200)

(dislocation)는 같은 등축정 오오스테나이트로 이루어져 있다는 것을 알 수가 있다.

즉 배관 내 액체 질소 유입에 따른 재질상의 변화는 없는 것으로 판단되며, 이는 곧 급작스런 온도 변화(상온 → -196°C)에 따른 결정 구조의

변화 가능성은 없으므로 안전성에 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다.

**결론 및 고찰**

실험과 유한 요소 해석(FEM)의 결과, 그리고 미세 조직 관찰 결과를

종합 정리하면 다음과 같다.

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

② 배관 내부 유체 압력의 영향은 액화 질소를 주입하기 전에 내부 유체 압력에 의한 응력이 배관 결빙시 추가로 작용하며 열응력과 상호 상승 효과는 없다.

③ 결빙 작업시 배관 직경과 두께가 증가할 때 응력이 증가한다.

④ 유한 요소 해석 결과 원자력발전소 1차측 압력인 160kg/cm<sup>2</sup>에서도 결빙 작업이 가능하며 배관 소성 변형의 가능성은 극히 희박하다.

⑤ 스테인리스강이 극저온(-196°C)의 액화 질소에 접촉하고 다시 상온으로 회복 후 미세 조직의 변화는 없다.

따라서 SS304 배관에서의 배관 내부 유체 결빙시 배관 재질에 미치는 응력은 불확정 요소를 감안하더라도 나타나는 응력값이 항복 응력에 훨씬 못미치므로 작업시 배관의 다른 구속 조건이 없는 한 소성 변형은 없다.

그리고 배관 내의 고압력과 배관 두께가 두껍고 크기가 변화 하더라도 배관 결빙 작업에 대한 안전성에는 영향이 없다.

또한 미세 조직 변화도 없어 현장에서 결빙 작업시 작업에 대한 주의 사항만 준수하면 특별한 문제없이 작업이 가능하다. ☞