

(論 文)

# 극저온 환경에서 스트레인 게이지의 게이지상수 및 변형률 측정에 관한 연구

김갑순\* · 주진원\*\*

(1992년 12월 8일 접수)

## The Characteristic Test for Gage Factors of Strain Gages in Cryogenic Environment

Gab S. Kim and Jin W. Joo

**Key Words :** Strain Gage(스트레인 게이지), Gage Factor(게이지 상수), Creep(크립), Cryogenic Environment(극저온 환경), Mechanical Strain(기계적 변형률)

### Abstract

The characteristic test for gage factors of temperature self-compensated strain gages at cryogenic temperature is presented. By joining the international round robin test on electrical strain gages at cryogenic temperatures, the gage factors of three kinds of widely-used strain gages are obtained at the room temperature, the temperatures of liquid nitrogen and liquid helium. The calibration system which produce precise bending strain is by mechanical loading at cryogenic temperature. This paper also presents the creep characteristic of strain gages at maximum strain level.

### 1. 서 론

기계나 구조물은 하중이나 열 등 외부로부터의 조건이 변화하게 되면 변형을 하며 이와같은 변형을 정확하게 측정하기 위하여 가장 널리 쓰이는 센서가 스트레인 게이지(strain gage)이다. 스트레인 게이지를 사용하여 상온에서 변형을 측정하는 경우에는  $2 \mu\text{m}/\text{m}$  이내의 오차로 정확하게 변형률을 측정할 수 있으나, 온도의 변화가 있는 경우에는 그에 따른 영향을 크게 받기 때문에 온도에 따른 스트레인 게이지 자체의 특성을 규명할 필요가 있다. 특히 항공우주산업, 원자력산업 등의 분야에서 널리 응용되는 액체질소 온도인 77 K 이하의 극

저온 환경에서는 상온에서는 일어나지 않았던 여러 가지 현상이 나타나고 재료의 물성치들이 예측할 수 없는 변화를 보이기 때문에 실제 시험을 통하여 물성치들이 온도에 따라 어떠한 값을 갖는지 결정해야 한다.

온도변화에 따라 스트레인 게이지의 측정결과가 변하는 이유는 주로 겉보기 변형률(apparent strain)의 발생과 게이지 상수(gage factor)의 변화 때문<sup>(1)</sup>이다. 온도변화에 따르는 겉보기 변형률에 대해서는 스트레인 게이지 제작회사를 중심으로 연구가<sup>(2-4)</sup>진행되어 왔으며, 극저온에서의 스트레인 게이지 겉보기 변형률에 대해서도 최근 연구결과가 발표<sup>(5)</sup>되었다. 게이지 상수는 물체가 하중을 받아 변형할 때 물체위에 부착된 스트레인 게이지의 저항변화율과 물체의 변형률 사이의 비례상수이며 변형률을 결정할 때 반드시 필요한 값이므로 측

\*정회원, 한국표준과학연구원 역학물성연구실

\*\*정회원, 충북대학교 기계공학과

정시 변형률 측정기에 입력하도록 되어 있다. 이 게이지 상수는 온도에 따라서 다른 값을 갖기 때문에<sup>(5)</sup> 각 스트레인 게이지마다 상온에서의 게이지 상수 값과 온도의 변화에 따른 게이지 상수의 변화율을 명시하여서 정확한 측정을 할 수 있도록 되어 있다. Greenough와 Lee<sup>(6)</sup>는 온도의 변화에 따르는 스트레인 게이지의 게이지 상수값에 대한 실험 결과를 제시하고 그 물리적인 현상을 푸아송비(poisson ratio)와 연관하여 설명하였다. 그러나 극저온까지 사용할 수 있도록 제작된 스트레인 게이지에 대해서도 77 K 이하에서는 게이지 상수값이 명시되지 않고 있으며 이에 대한 시험결과도 발표되지 않아서 극저온에서의 변형률 측정과 응력 결정에 어려움이 많았다.

극저온에서의 스트레인 게이지의 특성을 결정하기 위하여 세계의 측정표준기관과 대학 및 스트레인 게이지 제작회사가 참여하는 라운드 로빈(round robin) 시험<sup>(7)</sup>이 진행되고 있다. 국내에서도 이 계획에 참여하여 본 연구를 수행하였다. 라운드 로빈 시험계획의 궁극적인 목적은 세계의 주요 스트레인 게이지에 대해 극저온 환경에서 변형 측정에 이용될 수 있는 최적의 스트레인 게이지, 시험재료, 전선연결, 시험장치 등의 시험조건을 선택하고, 선택된 시험조건에서 스트레인 게이지의 특성값을 결정하여 변형측정에 이용하는 것이다. 이 목적을 위하여 본 논문에서는 세계적으로 가장 널리 쓰이는 3종류의 스트레인 게이지에 대하여 상온, 액체질소온도(77 K) 및 액체헬륨온도(4.2 K)에서 게이지 상수를 구하였다.

상온에서는 크립(creep)현상이 거의 나타나지 않는 재료일지라도 극저온에서는 일반적으로 크립현상이 크게 나타나는 것으로 알려져 있다. Ogata와 Ishikawa<sup>(8)</sup>는 극저온에서 스테인리스 강에 대하여, 그리고 Yen 등<sup>(9)</sup>은 구리에 대하여 각 하중단계에서 변위 게이지로 측정된 크립특성 결과를 발표하였다. 그러나 극저온에서 스트레인 게이지를 사용하여 변형을 측정할 때 재료의 크립특성과 스트레인 게이지의 크립특성이 복합적으로 측정되므로 재료의 종류와 사용한 스트레인 게이지의 종류에 따라 측정되는 크립특성은 다르게 나타난다. 본 논문에서는 각 스트레인 게이지의 크립특성을 평가하는 것이 목적이므로 같은 재료(스테인리스강)에 대하여 각 온도의 최대변형 상태에서 크립시험을 수행하였다.

## 2. 시험장치

시험장치의 구성도가 Fig. 1에 나타나 있다. 시험장치는 스트레인 게이지가 부착될 시험편과 시험편에 변형을 주기 위한 변형발생장치(calibration system), 극저온의 환경을 발생시키는 액체헬륨 혹은 액체질소 용기 및 스트레인 게이지에서 발생하는 출력을 측정하기 위한 변형률 측정장치(strain indicator)로 구성되어 있다. 시험편과 스트레인 게이지는 라운드 로빈 계획에 따라 이태리 IMGC에서 제공하였다. 사용한 스트레인 게이지는 MM(Micro-Measurement), Kyowa와 HBM(hottinger baldwin messtechnik)의 세 가지이며, 각각의 특성은 Table 1에 나타나 있다. 이 스트레

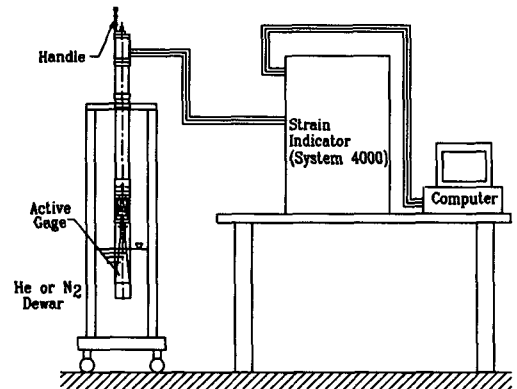


Fig. 1 The experimental equipment of the cryogenic test for strain gages

Table 1 Performance characteristics of strain gages used

Strain Gage	MM	Kyowa	HBM
• Gage type	MM-WK-09-250BG-350	KFL-5-350-C1-16	6/350LC11/5
• Gage resistance at 24°C and 50% RH	350.Ω±0.3%	350.Ω±0.6%	350.Ω±0.35%
• Gage factor at 24°C and 50% RH	2.05±1%	2.04±1%	2.19±1%
• Thermal expansion	16.2 ppm/K	16.2 ppm/K	10.8 ppm/K

인 게이지들은 상온부터 극저온(4.2 K)까지 사용할 수 있도록 제작되었으며 자체온도보상이 되어 있다.

Fig. 2는 시험편과 변형발생장치를 보여주고 있다. 이 장치는 극저온의 환경에서 시험편에 5단계의 일정한 굽힘 변형을 발생시킬 수 있도록 설계되어 있다. 용기의 바깥에서 핸들을 이용하여 축을 회전시키면 연결된 캠에 의하여 시험편을 지지하고 있는 계단식 블럭이 단계별로 이동된다. 블럭이 이동되면 시험편의 끝단에 붙어 있는 지지핀이 위로 움직이게 되어 시험편에 단계별로 굽힘변형이 발생된다. 시험편의 재질은 스테인리스강(AISI 316 LN)이며, 굽힘변형에 의하여 모든 위치에서 같은 굽힘변형률이 발생되도록 두께 10 mm인 삼각판의 형태를 하고 있다. 시험편에 치수는 각 블럭의 단계로 굽힘변형을 발생시켰을 때 스트레인 게이지가 부착될 지점에 정확하게 0, 200, 400, 600, 800  $\mu$ m/m가 발생되도록 하였다. 시험편에 굽힘변형이 일어날 때 인장 굽힘변형률과 압축 굽힘변형률을 동시에 측정할 수 있도록 같은 스트레인 게이지를 시험편의 양쪽면에 2개씩 모두 12개를 길이 방향으로 부착하였다.

극저온에서 시험이 수행되어 신뢰성 있는 결과를 얻기 위하여 스트레인 게이지와 시험편의 접착에 세심한 주의를 하여야 한다. 본 시험에서 사용된 극저온용 접착제는 극저온 온도까지 사용할 수 있고 온도처리(curing)를 통하여 극한 환경에서도 좋은 접착 상태를 유지할 수 있는 MM사의 M-Bond 610이다. 접착 후 250 kPa의 압력으로 클램핑한 다음, 전기로 속에서 163  $^{\circ}$ C로 2시간동안 온도처리하였다. 클램핑으로 인해서 생기는 잔류응력을 제거하기 위하여 205  $^{\circ}$ C로 2시간동안 후처리(post-

curing)를 하였다. 급격한 온도 변화에도 안정된 측정값을 갖게하고 게이지의 표면에 생길 수 있는 헬륨가스 거품으로부터 게이지를 보호하기 위하여 표면에 실리콘 그리스(Apeizon N Grease)를 1 mm 두께로 도포하였다.

Fig. 2와 같이 스트레인 게이지가 부착된 시험편을 포함한 변형발생장치를 액체질소나 액체헬륨이 담겨진 용기(dewar) 안에 고정시켜서 시험편을 원하는 온도로 유지시켰다. 극저온 용기 속의 스트레인 게이지는 실험실의 습도도 조건에서 유지된 변형률 측정기에 1/4 브리지(quarter bridge)로 연결하였다. 변형률 측정기는 동시에 여러 채널의 자료를 컴퓨터와 연결하여 처리할 수 있도록 하는 System 4000을 사용하였다. 이 측정기는 입력전압을 1 V, 2 V, 5 V, 10 V로 조절할 수 있도록 되어 있으며 자료 처리속도는 1초당 30채널이다.

### 3. 시험방법

게이지 상수를 측정하기 위해서는 정확하게 알고 있는 기계적인 하중을 가해야 될 뿐아니라 시험온도를 정확하게 유지시켜야 한다. 본 시험에서는 이를 위하여 액체질소(77 K)와 액체헬륨(4.2 K)에 시험편을 직접 담가서 극저온을 발생시켰다. 또한 스트레인 게이지로 구성된 회로중 대부분의 전선은 용기 밖에서 실험실의 온도와 습도의 변화에 저항이 변화하게 되고, 용기 안과 밖 사이에서 변형측정장치를 통하여 열전달이 일어나므로 안정된 실험실의 환경관리가 필요하다. 시험중 실험실의 온도는 19  $^{\circ}$ C  $\pm$  0.2  $^{\circ}$ C이었고, 습도는 45% RH에서 52% RH 사이이었다.

시험은 굽힘 하중에 따른 변형률 측정시험과 각 온도에서 크립에 따른 변형률 측정시험의 두가지로 하였다. 상온과 액체질소온도, 액체헬륨온도의 3가지 다른온도에 대하여 각각의 시험을 수행하였다. 극저온에서는 스트레인 게이지로 구성된 회로의 입력전압이 측정 변형률에 심한 영향을 미칠 수 있으며 입력전압을 크게하면 열이 발생되어 극저온 상태의 유지가 어려우므로 상온에서는 입력전압을 10 V로 하는 것이 보통이나 본 시험에서는 회로의 입력전압을 1 V와 5 V로 하고 각각에 대해 시험을 수행하였다. 측정기에 입력시키는 게이지 상수 값은 각 스트레인 게이지 마다 상온에서의 상수 값이 명시되어 있으나, 여기에서는 각 온도에서 측정된

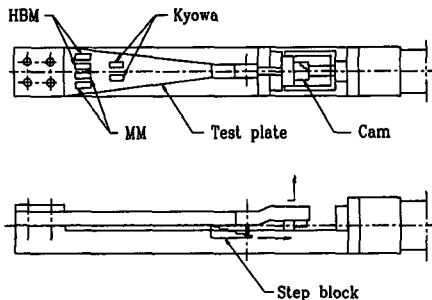


Fig. 2 The schematic diagram of the test plate and the calibration system

변형률을 이용하여 게이지 상수 값을 구하는 것이 목적이므로 비교를 위하여 모두 기준 값인 2.0으로 입력하였다. 실제의 게이지 상수는 다음식에 의해서 구해질 수 있다.

$$\frac{R}{\Delta R} = K_s \epsilon_s = K_r \epsilon_r \quad (1)$$

여기서  $\Delta R/R$ 은 스트레인 게이지의 저항 변화율이고  $K_s$ 와  $K_r$ 은 각각 실제의 게이지 상수와 기준 게이지 상수(2.0)이며  $\epsilon_s$ 와  $\epsilon_r$ 은 각각 실제의 변형률(800  $\mu\text{m}/\text{m}$ )과 2.0의 게이지 상수를 입력하였을 때의 측정된 변형률을 나타낸다.

### 3.1 굽힘 변형에 따른 변형률 측정

시험에 사용되는 스트레인 게이지의 종류는 3가지이나 모두 한 시험편에 부착되어 있기 때문에 한번의 시험에 스트레인 게이지에 대한 측정을 동시에 수행하였다. 한 사이클의 시험과정은 다음과 같다.

- (1) 스트레인 게이지로 구성된 회로를 측정기에 1/4 브리지로 연결하고 측정기의 영점조정을 한다.
- (2) 상온이나 액체질소 혹은 액체헬륨의 용기 속에서 시험편과 변형발생장치를 충분히 유지시킨다.
- (3) 걸보기 변형률을 측정하고 측정기의 영점조정을 하며 이때 실험실의 온도를 기록한다.
- (4) 변형발생장치의 핸들을 돌려서 시험편의 변형률을 200  $\mu\text{m}/\text{m}$ 만큼 증가시키고 변형률을 기록한다. 이때 변형률이 안정될 때까지 충분한 시간을 유지시킨다.
- (5) 변형률이 800  $\mu\text{m}/\text{m}$ 이 될 때까지 (4)의 과정을 반복한다.
- (6) 상온, 액체질소와 헬륨온도에서 위와 같은

과정을 각 3회씩 반복한다.

### 3.2 크립에 따른 변형률 측정

- (1) 스트레인 게이지로 구성된 회로를 측정기에 1/4 브리지로 연결하고 측정기의 영점조정을 한다.
- (2) 상온이나 액체질소 혹은 액체헬륨의 용기 속에서 시험편과 변형발생장치를 충분히 유지시킨다.
- (3) 시험편에 800  $\mu\text{m}/\text{m}$ 의 최대 변형률이 발생되도록 변형발생장치의 핸들을 돌린다.
- (4) 측정기의 영점조정을 한다.
- (5) 1분에 한번씩 30분간 변형률을 기록한다.

## 4. 시험결과 및 토의

각 스트레인 게이지에 대한 변형률의 측정결과를 Table 2에서 Table 5까지 나타내었다. 표에서 나타낸 값들은 인장과 압축으로 구분된 같은 스트레인 게이지 2개에 대한 3 사이클의 평균값을 표시한 것이다. 각 사이클 간의 차이는 상온에서 2  $\mu\text{m}/\text{m}$ , 액체질소 온도에서 7  $\mu\text{m}/\text{m}$ , 액체헬륨 온도에서는 16  $\mu\text{m}/\text{m}$ 을 넘지 않았다. 이 값들은 걸보기 변형률을 제외한 기계적인 하중만에 의해서 측정된 값들이다. 즉, 측정하고자 하는 온도에 도달한 후 걸보기 변형률을 측정하고 변형률 측정기를 영점조정함으로써 전체적인 변형률에서 기계적인 하중에 의한 변형률만을 선택하여 측정하였다. 상온에서의 변형률 값이 실제적으로 가해진 변형률 200  $\mu\text{m}/\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}/\text{m}$ , 600  $\mu\text{m}/\text{m}$ , 800  $\mu\text{m}/\text{m}$ 과 차이가 나는 것은 변형률 측정기에 실제의 게이지 상수를 입력하지 않고, 모든 스트레인 게이지에 대하여 기준이 되는 2.0의 값을 입력하였기 때문이다.

Table 2 Strains of strain gages of MM, Kyowa, HBM at room temperature (input voltage : 1 V)

Strain gage		Strain ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )				
Maker	Deform.	1 step	2 step	3 step	4 step	5 step
MM	Ten.	0	207	411	615	819
	Com.	0	-206	-414	-616	-820
Kyowa	Ten.	0	205	408	609	812
	Com.	0	-206	-412	-616	-819
HBM	Ten.	0	221	443	659	877
	Com.	0	-221	-440	-659	-878

**Table 3** Strains of strain gages of MM, Kyowa, HBM at room of liquid nitrogen (input voltage : 1 V)

Strain gage		Strain ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )				
Maker	Defor.	1 step	2 step	3 step	4 step	5 step
MM	Ten.	0	208	415	621	827
	Com.	0	-209	-416	-621	-827
Kyowa	Ten.	0	209	416	623	829
	Com.	0	-210	-418	-625	-833
HBM	Ten.	0	231	459	687	914
	Com.	0	-231	-459	-687	-917

**Table 4** Strains of strain gages of MM, Kyowa, HBM at the temperature of liquid helium (input voltage : 1 V)

Strain gage		Strain ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )				
Maker	Defor.	1 step	2 step	3 step	4 step	5 step
MM	Ten.	0	183	373	567	757
	Com.	0	-224	-436	-645	-862
Kyowa	Ten.	0	196	393	592	788
	Com.	0	-215	-425	-633	-842
HBM	Ten.	0	214	421	629	838
	Com.	0	-208	-418	-627	-834

**Table 5** Strains of strain gages of MM, Kyowa, HBM at the temperature of liquid helium (input voltage : 5 V)

Strain gage		Strain ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )				
Maker	Defor.	1 step	2 step	3 step	4 step	5 step
MM	Ten.	0	185	378	573	766
	Com.	0	-214	-416	-621	-827
Kyowa	Ten.	0	202	403	603	803
	Com.	0	-208	-412	-617	-821
HBM	Ten.	0	218	426	637	846
	Com.	0	-206	-414	-620	-827

측정기에 입력전압을 1V와 5V의 두가지로 한 결과 상온과 액체질소온도에서는 측정된 변형률이  $2\mu\text{m}/\text{m}$  이내의 차이를 보였기 때문에 입력전압 5V의 측정결과는 나타내지 않았다. Table 4와 Table 5에서 보는 바와 같이 액체헬륨 온도에서는 MM 게이지와 Kyowa 게이지의 경우 입력전압에 따른 변형률의 차이가 대단히 크게 나타났다.

Fig. 3에서 Fig. 6까지는 변형발생장치의 각 변형 단계에서 기준 변형률에 대한 실제 측정변형률의 직선성의 정도를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 각 변형률 단계에서 최대변형률에 대한 비직선도는 상온의 경우 최대 0.51%, 액체질소 온도의 경우에는 최대 0.3%로 나타나서 변형률 증분이 상당히 균일하게 작용된 것을 알 수 있다. 액체헬

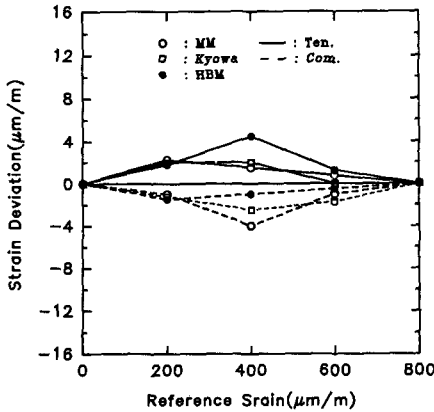


Fig. 3 The characteristic curve of MM, Kyowa and HBM at the room temperature

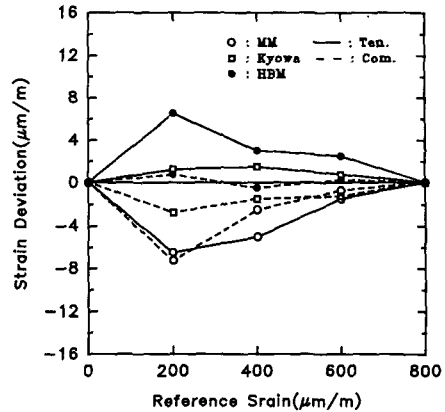


Fig. 6 The characteristic curve of MM, Kyowa and HBM at the temperature of liquid helium(input voltage: 5 V)

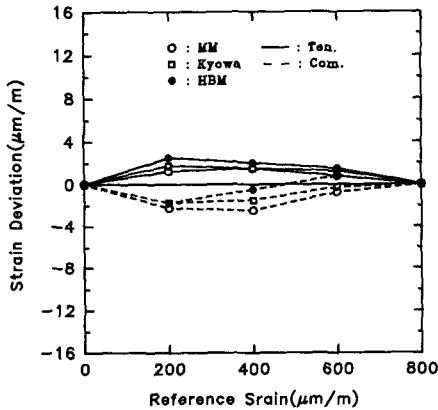


Fig. 4 The characteristic curve of MM, Kyowa and HBM at the temperature of liquid nitrogen

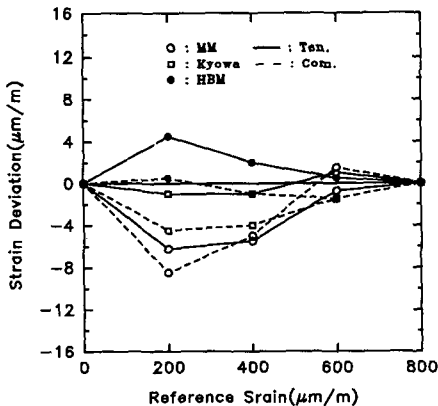


Fig. 5 The characteristic curve of MM, Kyowa and HBM at the temperature of liquid helium(input voltage: 1 V)

room temperature에서는 MM 게이지의 경우 비직선도가 최대 0.99% (입력전압 1 V), 0.88% (입력전압 5 V)로 크게 나타났고, Kyowa 게이지의 경우는 0.54% 이하로 비교적 작게 나타났다. 이상의 결과로 극저온에서는 가해진 하중값과 측정되는 변형률값이 직선적으로 변화하지 않는 경우도 나타남을 알 수 있다.

시험에서 사용한 변형발생장치의 시험편은 얇은 보의 형태로 굽힘변형을 받기 때문에 윗면과 아랫면에서 압축변형률과 인장변형률을 나타내게 되며 그 절대값은 같아야 한다. 상온에서와 액체질소 온도에서는 예상한대로 각 스트레인 게이지의 인장변형률과 압축변형률의 절대값이 거의 일치함을 보였으나 액체헬륨 상태에서는 최대 105 μm/m의 큰 차이를 보였다. 그 차이는 입력전압에 따라 달라져서 입력전압이 1 V일 때, 5 V일 때보다 차이가 더욱 크게 나타났다. HBM 스트레인 게이지의 경우에는 액체헬륨 온도에서도 인장변형률과 압축변형률의 절대값 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig. 7에서 Fig. 9까지는 각각 식(1)에 의하여 구해진 MM, Kyowa, HBM 스트레인 게이지의 온도에 따른 게이지 상수값을 보여주고 있다. 상온에서는 MM 게이지의 경우 게이지 상수가 인장, 압축에서 모두 2.05이고 Kyowa 게이지의 경우 인장, 압축에서 각각 2.03과 2.05이며 HBM 게이지의 경우 2.19와 2.20이었다. 이것은 각각의 스트레인 게이지에 명시된 상온에서의 게이지 상수 2.05, 2.04 및 2.19와 정확하게 일치하여서 본 시험의 측

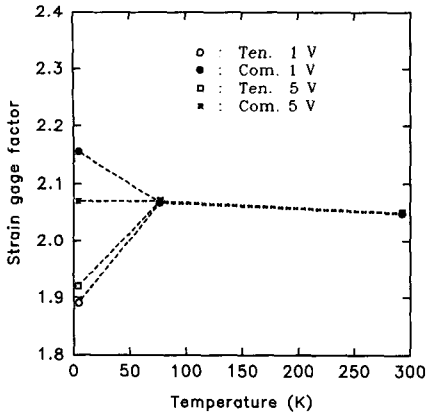


Fig. 7 Gage factor variations at the temperatures of room, liquid N<sub>2</sub> and liquid He for MM strain gage

정장치와 시험방법이 신뢰성이 높음을 알 수 있다. 상온에서 액체질소 온도까지는 게이지 상수가 거의 직선적으로 변화한다고 알려져<sup>(3)</sup> 있으며 실제 측정 시 온도차이와 게이지 상수의 변화율로 그 온도에서의 게이지 상수를 구하여 입력하여도 측정오차는 무시할 수 있을만큼 작다. MM 게이지의 경우 평균증가율 0.0045%/K, Kyowa 게이지의 경우 평균증가율 0.0079%/K로 완만하게 증가하였고, HBM 게이지의 경우는 평균 증가율 0.0200%/K로 증가하였다.

액체헬륨 온도에서는 각 게이지마다 입력전압에 따라 그리고 인장 혹은 압축상태에 따라 상당히 다른 값을 나타내었다. MM 게이지의 압축상태일 때와 Kyowa 게이지의 압축상태(입력전압 1 V)일 때만 게이지 상수가 계속 증가하였고, 나머지 경우에는 급격하게 감소하여 상온에서의 게이지 상수값보다 낮게 나타났다. HBM 스트레인 게이지의 경우에는 입력전압과 변형상태에 의한 변화가 상대적으로 작게 나타났다. 실험결과를 보면 극저온에서 스트레인 게이지를 사용하여 변형률을 측정할 때에는 스트레인 게이지의 종류 뿐만 아니라 측정기에 가해지는 입력전압과 변형상태를 정확히 구분하여 사용하여야 함을 알 수 있다.

상온으로부터 온도변화가 큰 환경에서 스트레인 게이지를 이용하여 변형률을 측정할 때에는 앞에서 설명한 결보기 변형률과 게이지 상수의 변화를 고려하여 변형률을 결정하여야 한다. 상온에서의 게이지 상수를  $K_0$ 라 하고 측정하고자 하는 온도에서

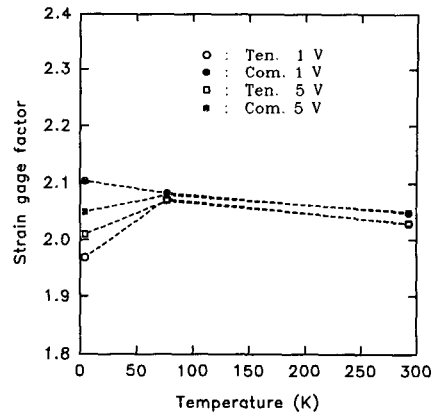


Fig. 8 Gage factor variations at the temperatures of room, liquid N<sub>2</sub> and liquid He for Kyowa strain gage

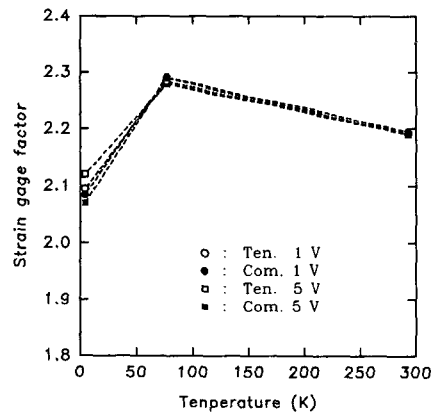


Fig. 9 Gage factor variations at the temperatures of room, liquid N<sub>2</sub> and liquid He for HBM strain gage

의 게이지 상수를  $K$ 라고 하면 실제적으로 기계적인 하중에 의하여 생겨난 변형률  $\epsilon$ 는 다음 식으로부터 구해질 수 있다.

$$\epsilon = (\epsilon_r - \epsilon_a) \frac{K_0}{K} \quad (2)$$

여기서  $\epsilon_a$ 는 그 온도에서의 결보기 변형률이고  $\epsilon_r$ 은 측정된 변형률이다.

극저온환경에서 하중을 받은 금속재료는 크립현상이 무시할 수 없을 만큼 나타난다. 이와같은 크립현상은 변형상태나 응력상태를 측정하여 실제 설계에 응용하는데 중요하게 고려되어야 한다. 극저온에서 스트레인 게이지를 사용하여 변형을 측정할

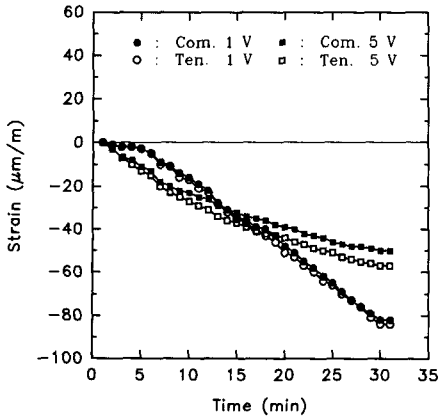


Fig. 10 The creep curve for MM strain gage at the temperature of liquid helium

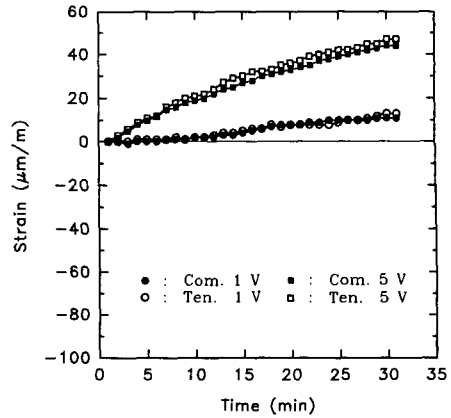


Fig. 12 The creep curve for HBM strain gage at the temperature of liquid helium

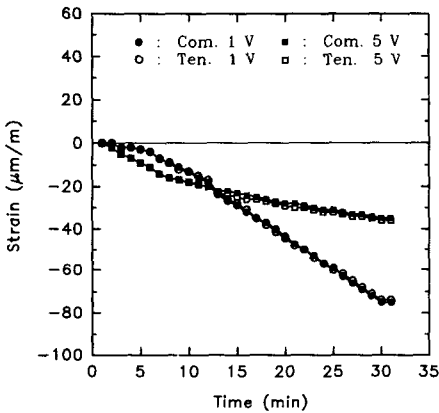


Fig. 11 The creep curve for Kyowa strain gage at the temperature of liquid helium

때 재료의 크립특성과 스트레인 게이지의 크립특성이 복합적으로 측정되므로 재료의 종류와 사용한 스트레인 게이지의 종류에 따라 측정되는 크립특성은 다르게 나타난다. 본 시험에서는 같은 재료(스테인레스 강 AISI 316 LN)에 부착된 스트레인 게이지의 크립특성을 평가하기 위하여 최대변형률(800  $\mu\text{m}/\text{m}$ )을 30분간 유지한 채로 매 1분마다 변형률을 측정하였다. 액체질소 온도에서는 3가지의 게이지 모두 모든 상태에서 크립특성을 거의 보이지 않았다. 다만 Kyowa 게이지의 경우 상온에서  $-12 \mu\text{m}/\text{m}$ 의 작은 크립현상을 보였다.

Fig. 10부터 Fig. 12까지에서 보는 것과 같이 액체헬륨 상태에서는 게이지마다 큰 크립현상을 보였으며 입력전압에 따라서 변화도 크게 나타났다. 변

형상태 즉 인장 또는 압축상태에 따라서는 거의 같은 정도의 크립현상을 보여주고 있다. MM과 Kyowa 게이지의 경우는 시간이 갈수록 계속 감소하여서 30분후에 MM 게이지의 경우 입력전압 1V에서는  $-83 \mu\text{m}/\text{m}$ , 5V의 경우에는 계속 증가하여서 약  $45 \mu\text{m}/\text{m}$  정도를 나타내었다. 30분 후에는 모든 경우에 측정값이 안정되려는 경향을 보였다.

## 5. 결 론

국제간의 라운드 로빈 시험계획에 참여하여 상온, 액체질소 온도 및 액체헬륨 온도에서 기계적인 변형률을 측정함으로써 스트레인 게이지의 게이지 상수에 대한 특성을 시험하였다. 또한 시편에 최대 굽힘하중을 30분간 작용시킨 상태에서 크립시험을 하였다.

시험결과 세계적으로 많이 사용되고있는 극저온용 MM, Kyowa, HBM 스트레인 게이지에 대한 게이지 상수값과 크립현상에 의한 변형률의 변화량이 결정되었다. 실험실에서 구해진 상온에서의 게이지 상수값은 스트레인 게이지에 명시된 값과 정확하게 일치하였으며 상온에서 액체질소 온도까지는 게이지 상수가 MM, Kyowa, HBM 스트레인 게이지의 경우 각각 0.0045%/K, 0.0079%/K, 0.0200%/K의 평균증가율로 증가하였다. 액체헬륨 온도에서는 각 게이지마다 입력전압에 따라 그리고 인장 혹은 압축상태에 따라 상당히 큰 변화를 나타내었다. 크립특성을 시험한 결과 상온과 액체질소



온도에서는 크립특성을 거의 보이지 않았으나, 액체헬륨온도에서는 게이지마다 큰 변형률의 변화를 보였으며 이 변화량은 회로의 입력전압에 따라 크게 다르게 나타난다. 따라서 극저온에서 변형을 측정할 때 재료의 크립특성 뿐만 아니라 스트레인 게이지 자체의 크립특성이 다르게 나타나므로 재료의 종류와 스트레인 게이지의 종류에 따라 각각의 특성시험 결과를 사용하여야 한다.

이상의 결과로 액체헬륨 온도근처의 극저온 환경에서 스트레인 게이지를 사용하여 변형률을 측정할 때에는 스트레인 게이지의 종류뿐만 아니라 측정기에 가해지는 입력전압과 변형상태를 정확히 구분하여 사용하여야 한다는 것을 알 수 있다.

### 참고문헌

- (1) Dally, J. W. and Riley, W. F., 1987, Handbook on Experimental Mechanics-Chapter 2. Strain Gages, Prentice-Hall Englewood Cliffs, pp. 41~78.
- (2) Keil, S., 1988, "The Thermal Output of a Strain Gages," Reports in Applied Measurement, Vol. 4, No. 1, pp. 15~17.
- (3) 1983, "Temperature-Induced Apparant Strain and Gage Factor Variation in Strain Gages," Measurement Group Tech Note, TN-504, pp. 1~9.
- (4) Walstrom, P. L., 1980, "Strain Gauges for Superconducting Magnet Testing," Cryogenics, Vol. 20, pp. 509~512.
- (5) 주진원, 김갑순, 1992, "극저온 환경에서의 스트레인 게이지의 걸보기 변형률 특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제16권 제6호, pp. 1099~1107.
- (6) Greenough, R. D. and Lee, E. W., 1967, "Behavior of Electrical Resistance Strain Gages at Low Temperature: II. Gage Factor," Cryogenics, Vol. 7, pp. 10~12.
- (7) Ferrero, C, 1990, "Stress Analysis Down to Liquid Helium Temperature," Cryogenics, Vol. 30, pp. 249~254.
- (8) Ogata, T. and Ishikawa, K., 1986, "Time-dependent Deformation of Austenite Stainless Steels at Cryogenic Temperatures," Cryogenics, Vol. 26, pp. 365~369.
- (9) Yen, C., et al., 1984, "Creep of Copper at Cryogenic Temperatures," Cryogenics, Vol. 24, pp. 371~377.