

〈論 文〉

# 극저온 환경에서 스트레인 게이지의 걸보기 변형률 특성에 관한 연구

주진원\* · 김갑순\*

(1992년 1월 8일 접수)

## The Apparent Strains of Strain Gages in Cryogenic Environment

Jin Won Joo and Gab Soon Kim

**Key Words :** Strain Gage (스트레인 게이지), Apparent Strain (걸보기 변형률), Thermal Output (열적 출력), Cryogenic Environment (극저온 환경)

### Abstract

The apparent strain 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, apparent strain curves of up to the fourth order with respect to the temperature are obtained with different strain gages and different materials. The liquid nitrogen and the liquid helium are employed to get the cryogenic environment. The results can be effectively utilized to determine the real strains by mechanical loading at cryogenic temperature. This paper also describes the optimal selection of strain gages and test materials for the use of strain gages at cryogenic temperature.

### 1. 서 론

항공우주산업, 원자력산업 등의 분야에서 널리 응용되는 극저온 환경은 질소의 액화온도인 77 K 이하의 환경을 말하는 것이 보통이다. 이와같은 극저온 환경에서는 상온에서는 일어나지 않았던 여러 가지 현상이 나타나며, 특히 20 K 이하의 온도에서는 재료의 물성치들이 예측할 수 없는 변화를 보이기 때문에 실제 시험을 통하여 물성치들이 온도에 따라 어떠한 값을 갖는지 결정해야 한다.

기계나 구조물은 하중이나 열 등 외부로부터의 조건이 변화하게되면 변형을 하며 이와같은 변형을 정확하게 측정하기 위하여 가장 널리 쓰이는 센서

가 스트레인 게이지(strain gage)이다. 스트레인 게이지를 사용하여 상온에서 변형을 측정하는 경우에는  $5 \mu\text{m/m}$  이내의 오차로 정밀하게 변형률을 측정할 수 있으나 온도의 변화가 있는 경우에는 온도변화에 따른 영향을 크게 받기 때문에 대부분의 스트레인 게이지는 사용하는 재료에 따른 자체온도 보상을 하여 온도의 영향을 최소화시키고 있다. 그러나 이러한 자체온도 보상에도 불구하고 온도의 변화가 심하면 재료에 외부에서 하중이 가해지지 않더라도 출력이 변화하게 되며 온도의 변화 때문에 생겨나는 스트레인 게이지의 출력값을 걸보기 변형률(apparent strain) 혹은 열적출력(thermal output)이라고 한다. 이러한 걸보기 변형률은 재료의 열팽창 변형 및 온도에 따른 스트레인 게이지의 저항변화로 인하여 발생한다.

걸보기 변형률에 대해서는 스트레인 게이지 제작

\*정회원, 한국표준과학연구원 역학물성연구실

회사를 중심으로 연구<sup>(1,2)</sup>가 진행되어 각 스트레인 게이지마다 온도에 따른 걸보기 변형도의 값을 명시하여 실제 변형도를 측정할 때 보정하여 사용할 수 있도록 하였다. 그러나 4.2 K까지의 극저온에서 사용할 수 있도록 제작된 스트레인 게이지에 대해서도 77 K 이하에서는 걸보기 변형도의 값이 명시되지 않아서 극저온에서 변형도 측정시 큰 오차를 수반할 수 있다. 극저온에서 스트레인 게이지의 특성에 대해서는 여러 연구<sup>(3-5)</sup>가 진행되어 왔으나 걸보기 변형도를 각 재료와 각 스트레인 게이지에 대하여 명시할 수 있는 시험결과는 발표되지 않았다.

극저온에서의 스트레인 게이지의 특성을 결정하기 위하여 이태리의 표준기관인 IMGC (Istituto Di Metrologia "G.Colonnetti")를 중심으로 세계의 측정표준 기관과 대학이 참여하는 라운드 로빈 (round robin) 시험<sup>(6)</sup>이 진행되고 있다. 국내에서도 이 계획에 참여하여 본 연구를 수행하였다. 라운드 로빈 시험계획의 궁극적인 목적은 세계의 주요 스트레인 게이지에 대해 여러가지 시험조건에 의한 시험결과를 가지고 극저온 환경에서의 변형측정에 이용될 수 있는 최적의 스트레인 게이지, 시험재료, 전선연결, 시험장치 등의 시험조건을 선택하는 것이다. 이 목적을 위하여 본 연구에서는 가장 널리 쓰이는 3종류의 스트레인 게이지—미국 Micro-Measurement, 일본 Kyowa, 독일 Hottin-

ger Baldwin Messtechnik—에 대한 걸보기 변형률 대 온도의 곡선을 시험을 통하여 4.2 K로부터 293 K까지의 온도 범위에서 구한다. 사용된 시편은 스테인레스 강(AISI 316 LN), 구리(Cu), 알루미늄(Al)이고 온도는 액체헬륨과 액체질소를 이용하여 변화시켰으며, 그외의 모든 시험조건은 국제법정계량기구(OIML) 규정에 따라 모든 기관이 통일되도록 하였다.

## 2. 시험재료 및 시험준비

### 2.1 시편

스트레인 게이지가 부착될 시편의 재질은 스테인레스 강(stainless steel AISI 361 LN), 구리(Cu), 알루미늄(Al)의 세가지로 하였다. 시편은 이태리 IMGC가 제공한 것으로 길이 40 mm, 폭 40 mm, 두께 10 mm의 사각판이며 OIML의 규정에 따라 찌그러짐(distorsion)과 thermal hysteresis에 의한 변형이  $5 \mu\text{m}/\text{m}/100^\circ\text{C}$ 가 넘지 않도록 하였다.

### 2.2 스트레인 게이지

시험에 사용된 스트레인 게이지는 IMGC에서 제공한 것으로, 미국 Micro-Measurement사의 MM-WK-09-250BG-350, 일본 Kyowa사의 KFL-5-350-C1-16과 독일 Hottinger Baldwin Messtechnik사의 6/350LC11/5이며, 각각의 특성은 Table 1에 나

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
• Lot	DU-K31FE08	Y002-001	ES33476/OB
• Gage resistance at 24°C and 50% RH	$350 \Omega \pm 0.3\%$	$350 \Omega \pm 0.6\%$	$3501 \Omega \pm 0.35\%$
• Gage factor at 24°C and 50% RH	$2.05 \pm 1\%$	$2.04 \pm 1\%$	$2.19 \pm 1\%$
• Gage factor /temperature	$(-1.4 \pm 0.2\%)/100^\circ\text{C}$ /100°C	$-0.02\%/^\circ\text{C}$	$-310\text{ppm}/\text{K}$
• Thermal expansion	$16.2\text{ppm}/\text{K}$	$16.2\text{ppm}/\text{K}$	$10.8\text{ppm}/\text{K}$

타나 있다.

### 2.3 온도센서

본 시험에서 시편의 온도를 측정하기 위하여 사용하는 센서는 Micro-Measurement사의 Cryogenic Linear Temperature Sensor (CLTS-2B)이다. 이 센서는 니켈합금과 망간합금의 저항체를 직렬로 연결하여 온도 변화에 따라 저항이 선형적으로 변하는 저항온도 측정장치의 한 종류이다. 이 온도센서는 상온에서 극저온으로 갑자기 온도가 변할 때 발생하는 열적충격으로 인한 손상을 방지할 수 있도록 설계되어 있고 온도변화에 따른 빠른 응답성과 정확성을 가지고 있으며 4.2 K로부터 약 530 K까지의 온도범위에서 사용할 수 있다. CLTS-2B의 공칭 저항(nominal resistance)은 297 K에서  $290.0 \pm 0.5 \text{ ohms}$ 이고 온도저항 변화율은 0.2391 ohms/K이며 0.01 K의 온도분해능을 보인다.

시편의 온도를 변형도로 표시하기 위하여 변형률 측정기(strain indicator)의 한 채널을 사용할 수 있도록 설계된 Micro-Measurement사의 저항 회로망(CLTS-N-C)을 사용하였다. 이 회로망은 온도센서 CLTS-2B와 변형률 측정기 사이에 연결하도록 되어 있으며 1/2브리지(half bridge)를 구성하여 변형률 측정기에 연결한다. 감도는 절대온도 1도당  $10 \mu\text{m}/\text{m}$ 으로 표시되며 분해능은 0.1 K이다.

### 2.4 접착과 납땜

극저온에서 시험이 수행되어 신뢰성 있는 결과를 얻기 위하여는 스트레인 게이지의 접착과 전선의 연결을 위한 납땜에 손상이 일어나지 않도록 세심한 주의를 하여야 한다. 본 시험에서 사용된 극저온용 접착제는 넓은 온도 범위에서 사용할 수 있고 온도처리(curing)를 통하여 극한 환경에서도 좋은 접착상태를 유지할 수 있는 MM사의 M-Bond 610이다. 스트레인 게이지와 온도센서의 접착상태는 접착제 뿐만 아니라 접착되는 시편의 표면 조도에도 영향을 받게 되므로 접착되는 부분을 #400의 사포로 연삭하였다. 접착후, 250 kPa의 압력으로 클램핑한 다음, 전기로 속에서 스테인레스 강과 구리 시편은 163°C에서 2시간, 알루미늄 시편은 170°C에서 2시간 동안 온도처리 하였다. 클램핑으로 생기는 응력집중을 제거하기 위하여 스테인레스 강과 구리의 시편은 205°C에서 2시간, 알루미늄 시편은 170°C에서 2시간 후처리(post-curing)를 하였다.

급격한 온도 변화에도 안정된 측정값을 갖게 하고, 게이지의 표면에 생길 수 있는 헬륨가스 거품으로부터 게이지를 보호하기 위하여 스트레인 게이지와 온도센서의 표면에 Apiezon사에서 제작한 실리콘 그리스(N Grease)를 1 mm 두께로 도포하였다.

스트레인 게이지와 온도센서를 전선(wire)과 연결하는 납땜은 극저온용인 Micro-Measurement사의 주석 납(361A-20R)을 사용하였다. 이 납은 주석 63%, 납 36.65%, 안티몬 0.35%의 화학적 성분을 가지고 있다. 일반적으로 저온에서 연결이 끊어지는 현상을 막기 위하여 사용되는 납은 안티몬을 포함하여야 한다.

### 2.5 전선

스트레인 게이지에서 발생한 전기적 신호를 측정기에 연결시켜 주는 전선은 폴리이미이드 에나멜(polyimide enamel)로 피복한 구리선(MM 134-AWQ)을 사용하였다. 이 전선은  $-269^\circ\text{C} \sim 325^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서 사용될 수 있다. 극저온 환경에서 시험할 때에 사용되는 전선은 적당한 굵기를 가져야 한다. 즉, 전선이 너무 가늘면 저항값이 커져서 저항 변화율이 상대적으로 작아지므로 스트레인 게이지의 감도가 낮아지고, 전선이 너무 굵으면 전선을 통하여 열전달이 쉽게 일어나므로 극저온의 온도유지가 어렵게 된다. 본시험에서 사용된 전선의 직경은 0.16 mm이고 저항은  $0.991 \Omega/\text{m}$ 이다. 전선의 길이는 극저온 환경에서 즉, 헬륨용기 안에서 약 0.8 m이고 상온에서 즉, 헬륨용기로부터 측정기까지는 2.0 m이었다.

## 3. 주변환경 및 실험장치

### 3.1 실험실 환경조건

스트레인 게이지로 구성된 회로중 대부분의 전선과 외부 저항체는 용기 밖에서 실험실의 온도와 습도의 변화에 저항이 변화하게 되고, 또한 용기 안과 밖 사이에서 시험봉을 통하여 열전달이 일어나므로 안정된 실험실의 환경조건이 필요하다. 시험중 실험실의 온도는 19°C에서 21°C 사이이었고, 습도는 45%RH에서 55%RH이었다. 시험이 1사이클 진행되는 동안 온도와 습도의 변화는 각각 1.5 K와 8% RH를 넘지 않았다.

3.2 전기회로

극저온 용기속의 스트레인 게이지(active gage)는 실험실 조건에서 유지된 외부 저항체(dummy gage)와 함께 측정기에 1/2브리지(half bridge)로 연결하였다. 외부 저항체로는 시험할 시편과 동일한 재료에 부착된 스트레인 게이지를 사용하였다. 스트레인 게이지를 연결하는 도선이 온도변화에 따라 저항값이 바뀌는 영향을 보상하기 위하여 Fig. 1과 같이 3선 연결 방법을 택하였으며, 스트레인 게이지와 측정기를 연결하는 도선들의 저항을 같도록 ( $R_1=R_2=R_3+R_4$ ) 도선의 길이를 결정하였다.

3.3 실험장치

스트레인 게이지와 온도센서가 부착된 세가지 재료의 시험편을 Fig. 2와 같이 삼각 지지판에 고정시켰다. 삼각 지지판의 한쪽 끝은  $\phi 10$  mm의 스테인레스 봉에 연결하여 액체질소나 액체헬륨이 담겨진 용기(dewar)에 집어넣고 용기 덮개 위에 설치된 볼트로 시험편의 높이를 조절할 수 있도록 하였다. 액체질소가 담겨지는 용기(용량 10 l)는 이중벽으로 되어 있고, 그 사이를 진공처리 하였다. 액체 헬륨이 담겨지는 용기(용량 15 l)는 삼중벽으로 되어 있고 한쪽 공간에는 진공처리 하였으며 다른 쪽 공간에는 액체헬륨의 기화를 막기 위하여 액체 질소로 사전냉각(pre-cooling) 하였다. 전선들은 스테인레스 봉의 안쪽 구멍을 통하여 용기로부터 밖으로 나가서 스트레인 측정기에 Fig. 3과 같이 연결하였다.

스트레인 측정기는 컴퓨터와 연결하여 자료를 처리 할 수 있도록 Micro-Measurement사에서 제작한 System 4000을 사용하였다. System 4000은 110 채널까지의 스트레인게이지나 온도게이지 또는 반도체게이지에 연결하여 사용할 수 있는 측정기기로서 1초에 30채널의 자료를 측정할 수 있다. 입력전압은 1 V, 2 V, 5 V, 10 V의 4가지로 조절할 수 있

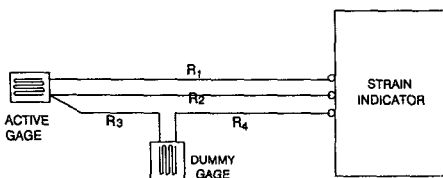


Fig. 1 3-wire half bridge circuit with active and dummy strain gages

다. 본 실험에서는 스테인레스 강, 구리, 알루미늄 각각의 시편에 스트레인 게이지 3개, 온도센서 1개의 출력을 측정할 수 있도록 총 12개의 채널을 사용하였다.

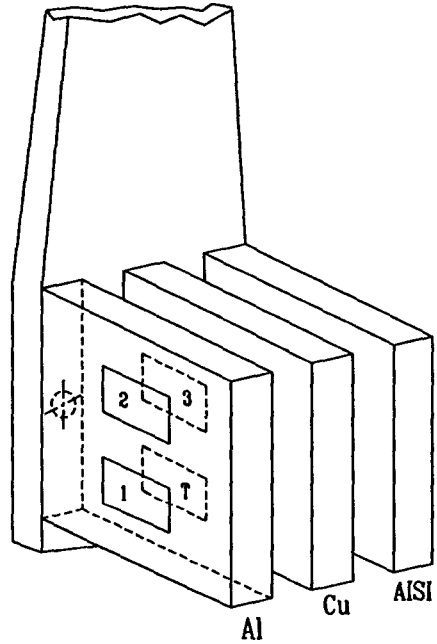


Fig. 2 Configuration of test plates with strain gages. 1, 2 and 3 represent strain gages and T represents temperature sensor

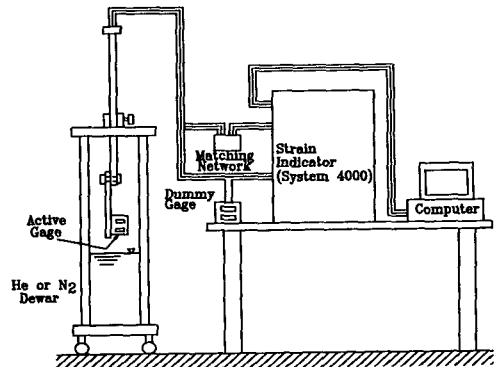


Fig. 3 Experimental equipment of cryogenic test for strain gages

## 4. 시험방법

### 4.1 영점 변형도 조정

변형률 측정기는 절대적인 변형률 값을 측정하는 것이 아니고 상대적인 변형률 값을 측정하기 때문에 기준이 되는 온도를 설정하여 이 온도에서의 변형률을 0으로 초기 조정해야 한다. 본 실험에서는 증류수로 얼린 얼음과 증류수를 반반씩 혼합한 액체에 시편을 충분한 시간동안(약 15분) 담가서 시편의 온도를 0°C로 만들고, 이 때의 결보기 변형률을 0으로 하였다.

### 4.2 열적 충격시험

본 시험에 들어가기 전에 스트레인 게이지 혹은 온도센서와 시험편과의 접촉상태 및 전선과의 연결상태를 점검해야 하며, 이 게이지들의 거동상태에 이상이 없는지를 파악해야 한다. 본 실험에서는 이와같은 열적 충격시험을 위하여 0°C에서 영점 조정 한 후 시편을 액체질소에 담근 다음 다시 0°C로 유지시킨 후에 결보기 변형률을 측정하였다. 한 시편에 대하여 3번의 시험을 한 결과, 각각의 시험에서 결보기 변형률값의 변화는 5  $\mu\text{m}/\text{m}$  이내 이었다.

### 4.3 온도변화에 따른 변형도의 측정

실험에서 사용되는 스트레인 게이지의 종류는 3가지이고 스트레인 게이지와 온도센서가 부착된 시험편도 스테인레스 강, 구리, 알루미늄의 3가지이다. Fig. 2와 같이, 한번의 시험에 같은 종류의 스트레인 게이지가 부착된 3가지 시험편을 동시에 시험하였다. 한 사이클의 시험과정은 다음과 같다.

(1) 시험편의 회로를 스트레인 측정기에 연결한다.

(2) 증류수의 얼음과 물이 혼합된 액체에 시험편을 충분한 시간동안(약 15분) 넣고 영점 변형률 조정을 한다.

(3) 액체질소가 용기의 30% 정도 담긴 질소용기에 시험편을 넣고 부착된 열선에 전압을 걸고 293 K를 유지시킨 후 결보기 변형률을 측정한다.

(4) 시험편을 질소용기에서 서서히 내려가면서 액체질소 온도(77 K)까지 8단계의 온도에 대하여 각각의 스트레인 게이지(9개)에 출력되는 결보기 변형률을 측정한다. 이때 각 온도단계가 충분히 안

정확될 때까지 충분한 시간을 유지시킨다.

(5) 시험편을 액체질소 용기에서 꺼내고 액체 헬륨이 20% 정도 담긴 용기에 넣는다.

(6) 시험편을 서서히 내리면서 액체질소 온도에 서 액체헬륨 온도(4.2 K)까지 11단계의 온도에 대하여 결보기 변형률을 측정한다.

(7) 시험편을 액체헬륨에 담가서 충분한 시간이 경과한 후, 시험편을 서서히 올리면서 30 K까지 13단계의 온도에 대하여 결보기 변형률을 측정한다.

(8) 같은 시험편에 대하여 위와 같은 과정을 3회 반복한다.

극저온 온도에서는 스트레인 게이지로 구성된 회로의 입력전압이 결보기 변형도에 영향을 미칠 수 있으므로 입력전압을 1 V와 5 V로 하였으며, 온도센서에 대하여는 제작 회사의 추천에 따라 입력전압을 2 V로 하였다. 측정기에 연결되어 있는 컴퓨터 제어에 의하여 변형률 측정기를 작동하였으며, 측정된 값들은 컴퓨터에서 처리되었다.

## 5. 시험결과 및 고찰

시험결과를 Fig. 4에서 Fig. 6까지에 나타내었다. 293 K에서 4.2 K로 온도를 낮추며 시험한 결과는 293 K일 때의 결보기 변형률을 기준으로 그 차이를 나타내었으며 4.2 K에서 30 K로 온도를 높이며 시험한 결과는 4.2 K를 기준으로 차이를 나타내었다. 그림에 보인 결보기 변형률은 입력전압이 1 V일 때 3사이클의 평균값을 나타내고 있다. 시험에

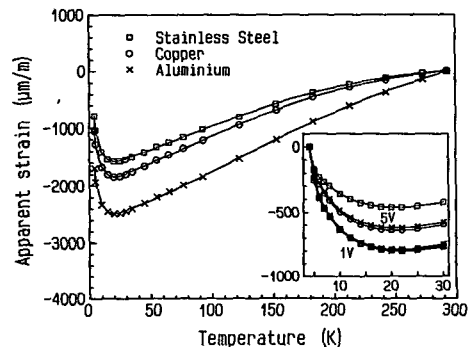


Fig. 4 Apparent stain vs. temperature for MM strain gages. Insert shows magnified curves normalized at 4.2 K

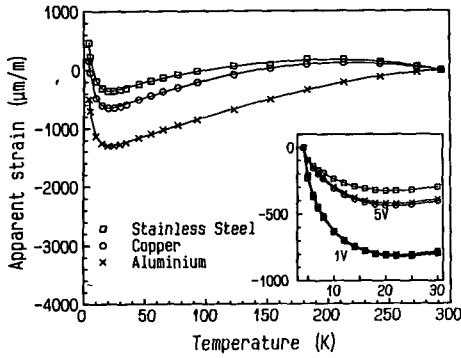


Fig. 5 Apparent stain vs. temperature for Kyowa strain gages. Insert shows magnified curves normalized at 4.2 K

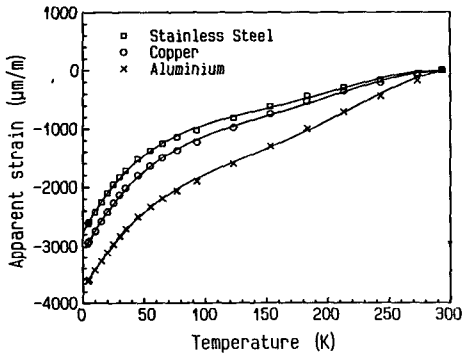


Fig. 6 Apparent stain vs. temperature for HBM strain gages

서 각 사이클 간의 차이는  $12 \mu\text{m/m}$ 를 넘지 않았다. 그림에서 보는 바와 같이 온도가 내려감에 따라 변하는 결보기 변형률은 시험편의 재료에 따라 다르고, 특히 스트레인 게이지의 종류에 따라서 곡선의 형태가 크게 2종류로 나타난다. 첫째는 MM과 Kyowa 스트레인 게이지의 경우로 온도가 내려감에 따라 결보기 변형률이 감소하다가 20 K 근처에서 다시 급격하게 증가하는 형태이고, 다른 한가지는 HBM 게이지의 경우로 상온에서 4.2 K까지 온도가 내려감에 따라 결보기 변형률은 계속 감소한다.

MM과 Kyowa 스트레인 게이지의 경우에 20 K 이하에서 나타나는 위와 같은 현상은 스트레인 게이지의 저항체로 사용되는 재료의 성질에 기인한다. 극저온에서 가장 널리 사용되는 스트레인 게이지는 Karma나 Karma합금(73% Ni+20% Cr+Al+Fe)으로 제작되었으며, 이러한 재료는 20 K

이하에서 온도가 내려갈수록 저항값이 반대로 증가하게 된다. 저항값이 최소가 되는 온도(Kondo's temperature)와 저항의 증가율은 주로 희석된 마그네틱 불순물의 농도에 따라 결정된다(Kondo's effect)<sup>(7)</sup>고 알려져 있다. 이러한 스트레인 게이지에 대한 결보기 변형률의 급증가 현상을 설명하기 위하여 4.2 K부터 30 K까지의 결과를 그림의 안쪽에 나타내었다. 상온에서 사용하는 스트레인 게이지의 경우에는 외부에서 잡음에 대한 영향을 적게하고 감도를 크게 하기 위하여 입력전압을 10 V 정도로 하는 것이 보통이다. 그러나 극저온에서 사용할 때에는 입력전압을 크게 하면 자체가열(self heating) 현상이 나타나기 때문에 결과가 정확하게 얻어지기가 어렵다. 본 시험에서는 입력전압을 1 V와 5 V 두 가지로 하였고 그 결과를 그림에 나타내었다.

MM과 Kyowa 스트레인 게이지의 경우에 상온부터 20 K까지에서 결보기 변형률은 입력전압의 크기에 관련이 없는 것으로 나타났으나 20 K 이하에서는 스트레인 게이지의 종류나 부착된 시험편의 재료에 따라 입력전압의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 또한 입력전압을 1 V로 작게 했을 때는 20 K 이하에서 온도의 감소에 따른 결보기 변형률의 증가가 게이지의 종류나 시험편의 재질에 관계없이 항상 일정한 값을 보였다. HBM 스트레인 게이지의 경우에는 결보기 변형률이 입력전압의 크기에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

입력전압에 따르는 자체가열이 결보기 변형률에 미치는 영향을 Fig. 7과 8에 나타내었다. 온도범위 4.2 K~30 K에서 Fig. 7은 MM 스트레인 게이지에

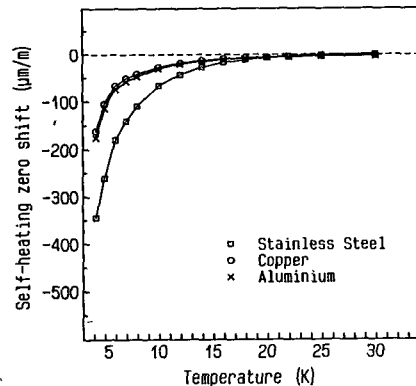


Fig. 7 Self-heating zero shift ( $AS_{5V}-AS_{1V}$ ) vs. temperature for MM strain gages

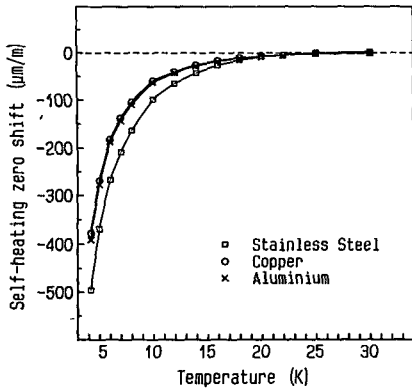


Fig. 8 Self Heating zero shift ( $AS_{SV}-AS_{IV}$ ) vs. temperature for Kyowa strain gages

대하여 Fig. 8은 Kyowa 스트레인 게이지에 대하여 입력전압 1 V에 대한 입력전압 5 V의 결보기 변형률의 차이를 세로축에 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 그 차이는 4.2 K에서  $100 \mu\text{m/m} \sim 500 \mu\text{m/m}$  정도로 비교적 크게 나타났으며 스테인레스강, 알루미늄, 구리 시험편의 순으로 큰 값을 나타내었다.

같은 스트레인 게이지에서 출력되는 결보기 변형률 값도 게이지가 부착되는 시험편의 재료에 따라 크게 다르게 나타난다. MM 스트레인 게이지의 경우 입력전압이 1 일때 알루미늄, 구리, 스테인레스강의 순서로 절대값이 크게 나타나서 알루미늄은 최대값이  $-2481 \mu\text{m/m}$ , 4.2 K에서는  $-1695 \mu\text{m/m}$  이고 구리는 최대값이  $-1893 \mu\text{m/m}$ , 4.2 K에서는  $-1047 \mu\text{m/m}$ 이며 스테인레스 강은 최대값이  $-1572 \mu\text{m/m}$ , 4.2 K에서는  $-776 \mu\text{m/m}$  이었다. Kyowa 스트레인 게이지의 경우는 MM 스트레인 게이지의 경우와 약간 다른 분포를 보였다. 스테인레스 강은 온도가 내려감에 따라 증가하다가 감소하여 20 K 근처에서  $-348 \mu\text{m/m}$  이었고, 다시 급격하게 증가하여 4.2 K에서  $462 \mu\text{m/m}$  을 보였다. 구리는 스테인레스 강과 비슷한 분포를 가지나 변화는 더 커서  $-643 \mu\text{m/m}$  의 최소값을 보이고 20 K부터 증가하여 4.2 K에서  $161 \mu\text{m/m}$  을 보였으며, 알루미늄은 MM 스트레인 게이지의 경우와 비슷하게 최대  $-1294 \mu\text{m/m}$  까지 감소하였다가 증가하여서 4.2 K에서는  $-494 \mu\text{m/m}$  이었다. HBM 스트레인 게이지의 경우는 앞의 MM이나 Kyowa 스트레인 게이지와 다른 형태를 보였으며 4.2 K까지 계속

큰 폭으로 감소하였다. 그 감소하는 양은 알루미늄, 구리, 스테인레스 강의 순서로 큰 값을 나타내었고 4.2 K에서 결보기 변형률 값은 각각  $-3627 \mu\text{m/m}$ ,  $-2934 \mu\text{m/m}$ ,  $-2614 \mu\text{m/m}$  이었다.

실험결과에서 보는 바와 같이 극저온에서의 결보기 변형률은 상온에서 기계적인 하중에 의하여 재료에 항복이 일어나는 변형률이  $1200 \sim 2500 \mu\text{m/m}$  임을 감안할 때, 대단히 큰 값을 나타내고 있다. 또한 극저온 근처에서는 예측할 수 없는 변화를 보인다. 따라서 실험결과를 실제 극저온에서의 스트레인 게이지를 이용한 변형측정에 응용하기 위해서는 각각의 스트레인 게이지와 재료에 대한 특성식을 구하고 이 식을 이용하여 실제 측정된 변형률을 보정하여 사용하여야 한다. 이를 위하여 결보기 변형률( $\mu\text{m/m}$ )은 온도 T(K)에 대하여 다음과 같이 4차 다항식으로 가정하였다.

$$AS = A_0 + A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4$$

최소승자법(least square method)을 사용하여 실험결과를 앞의 4차식으로 근사(fitting)하였으며 구해진 계수를 Table 2에 나타내었고 Fig. 4~6의 곡선들은 근사된 특성식을 보여주고 있다.

극저온 환경에서 스트레인 게이지를 이용하여 변형을 측정할 때에는 결보기 변형률의 값이 작고 예측하기 쉬운 조건을 가져야 한다. 다시 말하면, 변형에 의한 스트레인 게이지의 출력이 온도변화에 크게 영향을 받지 않거나, 불가피하게 온도의 영향을 받더라도 온도변화에 따른 결보기 변형률을 정확히 보상하여 실제 외부 하중에 의한 스트레인 게이지의 출력을 결정하는 것이 필요하다. 이러한 관점에서 볼 때, AISI 361LN 스트레인 강, 구리, 알루미늄 중에서 스테인레스 강에 경우에 결보기 변형률이 가장 작았다. 또한 시험된 스트레인 게이지 중에서 MM 게이지는 전체적으로 온도에 따른 결보기 변형률의 값이 크게 나타나고 Kondo의 효과도 보였으며, Kyowa 게이지는 결보기 변형률 변화량은 가장 적었으나 압력전압의 영향이 크게 나타났다. HBM 게이지는 온도에 따른 결보기 변형률의 값이 가장 크게 나타났으나 Kondo의 효과를 보이지 않았고 입력전압에 대한 영향도 거의 없었기 때문에 예측이 쉬운 것으로 나타났다. 본 시험의 결과는 극저온에서 스트레인 게이지를 사용하여 변형을 측정할 때 사용목적에 따라 측정기기와

**Table 2** Apparent strain (AS) in  $\mu\text{m}/\text{m}$  expressed as a polynomial of temperature (T) in K. Least square method is used for curve fitting

$$AS = A_0 + A_1T + A_2T^2 + A_3T^3 + A_4T^4$$

Strain gage	Test tion	Equa-plate	Input volt(V)	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
MM	AISI	DB	1	-1.718E+3	5.479E+0	3.719E-2	-1.923E-4	2.385E-7
		AB	1	1.841E+3	-7.081E+2	7.665E+1	-3.747E+0	6.777E-2
		AB	5	1.042E+3	-4.103E+2	4.564E+1	-2.291E+0	4.237E-2
	Cu	DB	1	-2.005E+3	6.273E+0	4.326E-2	-2.217E-4	2.756E-7
		AB	1	1.788E+3	-6.803E+2	7.249E+1	-3.502E+0	6.285E-2
		AB	5	1.306E+3	-4.909E+2	5.104E+1	-2.440E+0	4.363E-2
	Al	DB	1	-2.630E+3	5.480E+0	4.871E-2	-1.810E-4	1.888E-7
		AB	1	1.757E+3	-6.685E+2	7.109E+1	-3.431E+0	6.154E-2
		AB	5	1.243E+3	-4.675E+2	4.845E+1	-2.315E+0	4.143E-2
Kyowa	AISI	DB	1	-5.060E+2	7.111E+0	-2.415E-2	4.578E-5	-8.939E-8
		AB	1	1.725E+3	-6.520E+2	6.859E+1	-3.290E+0	5.873E-2
		AB	5	6.335E+2	-2.464E+2	2.687E+1	-1.348E+0	2.504E-2
	Cu	DB	1	-8.078E+2	6.954E+0	1.420E-3	-9.023E-5	1.246E-7
		AB	1	1.633E+3	-6.086E+2	6.252E+1	-2.952E+0	5.217E-2
		AB	5	6.493E+2	-2.360E+2	2.271E+1	-1.061E+0	1.902E-2
	AL	DB	1	-1.440E+3	6.044E+0	8.233E-3	-5.462E-5	4.540E-8
		AB	1	1.636E+3	-6.100E+2	6.273E+1	-2.964E+0	5.241E-2
		AB	5	6.327E+2	-2.298E+2	2.220E+1	-1.041E+0	1.874E-2
HBM	AISI	DA	1	-2.752E+3	3.763E+1	-2.893E-1	1.113E-3	-1.555E-6
	Cu	DA	1	-3.085E+3	3.845E+1	-2.797E-1	1.061E-3	-1.478E-6
	Al	DA	1	-3.774E+3	3.835E+1	-2.829E-1	1.147E-3	-1.635E-6

Equation DB : from 293 K to 20 K

Equation AB : from the temperature of liquid He to 20 K

Equation DA : from 293 K to the temperature of liquid He

입력전압, 스트레인 게이지와 시편 재료의 선택, 실험방법 등에 세심한 주의가 필요함을 보여주고 있다.

## 6. 결론

국제간의 라운드 로빈 시험계획에 참여하여 극저온 환경에서 스트레인 게이지의 온도변화에 따른 결보기 변형률에 대한 특성을 시험하였다. 시험결과 현재 많이 사용되고 있는 MM, Kyowa, HBM 스트레인 게이지와, 스테인레스 강, 구리, 알루미늄

시험편에 대한 온도-결보기 변형률 특성곡선이 얻어졌다. 4차식으로 구해진 특성곡선은 극저온에서 변형을 측정할 때 직접적으로 보상하여 사용될 수 있다.

결보기 변형률의 크기는 시험편의 재료에 따라 알루미늄, 구리, 스테인레스 강의 순으로 크게 나타났다, 특히 스트레인 게이지의 종류에 따라서 특성곡선의 형태가 매우 다르게 나타났다. MM과 Kyowa 스트레인 게이지에 대해서는 20 K 이하에서 Kondo의 효과가 나타났으며 결보기 변형률의 증가율은 스트레인 게이지의 자체가열 현상 때문에



입력전압에 큰 영향을 받았다. 따라서 극저온까지에서 변형을 측정할 때에는 스트레인 게이지나 시편재료를 사용목적에 맞도록 신중하게 선택하여야 하며 자체가열 현상을 최소화시키기 위하여 입력전압을 1 V 이하로 하여야 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

### 참고 문헌

- (1) Keil, S., 1988, "The Thermal Output of a Strain Gages," Reports in Applied Measurement, Vol.4, No.1, pp.15~17.
- (2) 1984, "Bondable Resistance Temperature Sensors and Associated Circuitry," Measurement Group Tech Note, Tn-506-1, pp.1~12.
- (3) Greenough, R.D. and Lee, E.W., 1967, "Behavior of Electrical Resistance Strain Gages at Low Temperatures : I.Magneto-resistance," Cryogenics, pp.7~9.
- (4) Clark, A.F., Childs, G.E. and Wallace, G.H., 1970, "Electrical Resistivity of Some Engineering Alloys at Low Temperatures," Cryogenics, pp. 295~298.
- (5) Telinde, 1970, "Strain Gages in Cryogenic Environment," Experimental Mechanics, Vol.10, pp.394~401.
- (6) Ferrero, C., 1990, "Stress Analysis Down to Liquid Helium Temperature," Cryogenics, Vol. 30, pp.249~254.
- (7) Kondo, J., 1969, Theory of Dilute Magnetic Alloys in : Solid State Physics, Academic Press, New York, p.1173.