

# 스트레인 게이지의 온도특성과 극저온 환경에서의 거동



주진원

한국표준과학연구원 역학물성연구실

● 1959년생.  
● 고체의 설계 및 해석을 전공하였으며, 센서의 설계, 실험능력해석, 접촉문제에 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리말

기계나 구조물은 하중이나 열 등이 가해져서 외부로부터의 조건이 변화하게 되면 변형이 되며 이와 같은 변형을 정확하게 측정하기 위하여 가장 널리 쓰이는 센서가 스트레인 게이지(strain gage)<sup>(1)</sup>이다. 스트레인 게이지를 사용하여 상온에서 변형을 측정하는 경우에는 올바른 사용방법과 적당한 측정기기를 선택하였을 때  $2\mu\text{m}/\text{m}$  이내의 오차로 정확하게 변형도를 측정할 수 있다. 그러나 일반적으로 널리 쓰이는 저항선식 스트레인 게이지의 경우 온도변화에 따른 영향을 크게 받기 때문에 측정시 큰 오차를 발생시킬 수 있다. 이러한 이유로 최근에 개발된 대부분의 스트레인 게이지는 사용하는 재료에 따른 자체 온도보상을 하여 온도의 영향을 최소화시키고 있다.

스트레인 게이지의 자체 온도보상에도 불구하고 온도의 변화가 심하면 측정시 오차의 원인이 되는 두 가지 현상이 나타나게 되는데, 그것은 겉보기 변형도(apparent strain)의 발생과 게이지 상수(gage factor)의 변화이다. 겉보기 변형도는 재료의 외부에서 하중이 가해지지 않더라도 온도의 변화에 따라서 스트레인 게이지의 저항변화로 인하여 생겨나는 변형도 출력값이며, 게이지 상수는 실제의 변형도와

스트레인 게이지의 저항 변화 사이의 비례상수로 온도의 함수이다.

여기에서는 스트레인 게이지를 이용하여 변형측정을 할 때 온도변화의 영향으로 나타나는 겉보기 변형도와 게이지 상수의 변화에 대하여 설명하고 실제 측정시 정확한 측정 값을 얻기 위한 온도보상 방법에 대하여 설명한다. 또한 국내외에서 가장 널리 쓰이고 있는 세 종류의 스트레인 게이지를 대상으로 하여 극저온 환경에서 겉보기 변형도와 게이지 상수의 변화에 대한 실제 실험값을 제시한다.

## 2. 스트레인 게이지를 이용한 변형측정 원리

### 2.1 스트레인 게이지

스트레인 게이지는 길이의 작은 변화를 그에 상응하는 저항변화로 변환하는 일종의 저항체이다. 이와 같은 게이지를 사용하면 변형도를 전기적인 신호로 측정하고 기록할 수 있다. 길이가  $L$ 이고 단면적인  $A$ 인 저항선의 저항값은 다음식으로 표현된다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 저항선의 고유저항이다. 현재 많이 쓰이고 있는 스트레인 게이지의 저항 값은  $120\Omega$ 이고 좀더 정확한 측정을 위해서는  $350\Omega$

을 사용하기도 한다. 재료에 변형이 일어나면 재료에 부착된 스트레인 게이지의 길이가 변화하고 그에 따라 저항체의 저항값이 변화하게 된다. 저항체의 길이가  $\Delta L$ 만큼 변화하면 단면적도 따라서 변화하므로 저항변화율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} = K\varepsilon \quad (2)$$

여기서,  $K$ 를 스트레인 게이지의 게이지 상수라 한다. 게이지 상수는 스트레인 게이지가 갖고 있는 고유치이며 재료에 따라서 보통 1.8~2.4의 값을 갖는다. 저항체는 고유저항이 충분히 크고 게이지 상수의 값이 온도변화에 따라 크게 변화하지 않는 것이 좋다. 이러한 재료로 구리-니켈 합금인 Constantan 및 니켈-크롬 합금인 Karma가 많이 쓰이고 있다.

## 2.2 신호처리 방법

앞에서 설명한대로 물체가 변형하여 스트레인 게이지의 저항이 변화하면 그림 1과 같이 스트레인 게이지로 구성된 브리지 회로(bridge circuit)<sup>(2)</sup>의 평형상태가 깨지게 된다. 사용하는 스트레인 게이지의 연결방식에 따라 브리지 회로는 1/4 브리지(quarter bridge), 1/2 브리지(half bridge), 완전결선 브리지(full bridge)

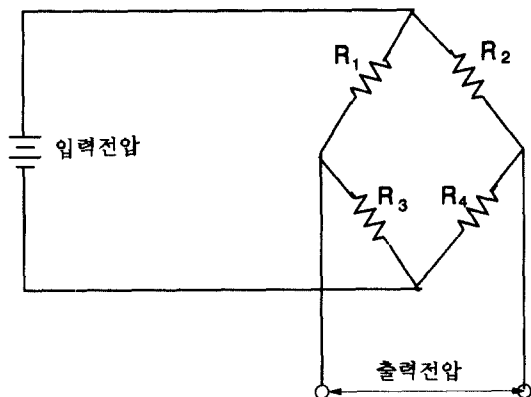


그림 1 스트레인 게이지를 이용한 변형측정을 위한 브리지회로

로 구분할 수 있다. 1/4브리지는 네 개의 저항체 중 한 개의 스트레인 게이지를 저항체로 사용하는 경우로 나머지 세 개의 저항체는 측정기에 내장되어 있는 경우이고, 1/2 브리지는 두 개의 스트레인 게이지를 직렬로 연결하고 나머지 두 개의 저항체는 측정기에 내장되어 있는 경우이며, 완전결선 브리지는 스트레인 게이지 네 개 혹은 여덟 개로 브리지 회로를 완전하게 구성하여 출력단자만을 측정기에 연결하는 경우에 사용한다. 변형을 감지하는 스트레인 게이지의 갯수가 많을수록 입력인 변형도와 출력인 전압변화 사이의 직선성이 좋아지므로 각종센서 등에 완전결선브리지를 많이 사용한다.

브리지 회로에 외부에서 일정한 전압이 가해지게 되면 스트레인 게이지의 저항변화에 의하여 브리지의 출력전압이 변화하게 된다. 이 출력전압은 입력전압에 비해 대단히 작은 양이기 때문에 증폭기에 의하여 적절히 증폭되어 출력값을 표시하게 된다. 출력전압은 전압기(voltage meter)에 의해 전압 자체로 표시되기도 하고, 변형도 측정기(strain indicator)를 사용하면 사용한 스트레인 게이지의 게이지 상수 값, 저항값, 브리지 종류 등을 입력함으로써 변형도 값으로 바로 표시할 수도 있다.

## 3. 온도특성

스트레인 게이지를 사용하여 변형도를 측정할 때 가장 중요하게 고려하여야 할 사항은 온도에 대한 영향이다. 스트레인 게이지의 온도특성은 결보기 변형도와 게이지 상수의 변화로 설명<sup>(3,4)</sup>할 수 있다. 온도가 변화했을 때의 결보기 변형도는 크게 두 가지 이유 때문에 발생한다. 첫째는 저항체의 저항이 온도의 함수이며, 저항의 변화가 변형도 측정기에 변형도 값으로 표시되기 때문이다. 두번째 이유는 스트레인 게이지를 이루는 재료와 시험하고자 하는 재료의 열팽창 계수 차이 때문이다. 따라서 온도의 변화가  $\Delta T$ 일 때 스트레인 게이지의 저

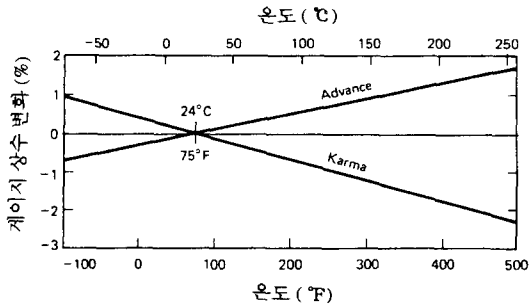


그림 2 Advance와 Karma합금으로 제작된 스트레인 게이지의 온도에 따른 게이지 상수의 변화

항변화는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon + \gamma T + K(\beta - \alpha) \Delta T \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 감지 저항부의 열팽창 계수,  $\beta$ 는 시편 재료의 열팽창 계수,  $\gamma$ 는 감지 저항부의 저항온도계수 (temperature coefficient of resistivity)를 나타낸다.

식 (3)에서 오른쪽 변의 둘째 항과 셋째 항으로 인하여 걸보기 변형도가 발생하며 식에서 보는 바와 같이 걸보기 변형도는 스트레인 게이지 자체의 재료뿐만 아니라 게이지가 부착되는 시편의 재료에 따라 달라지게 된다. 또한 일반적으로 온도변화에 직선적으로 변화하여서 널리 쓰이는 Karma합금 스트레인 게이지를 강에 부착하였을 때 온도가 10°C 증가하면 걸보기 변형도는 약 480 $\mu\text{m}/\text{m}$ 가 된다. 이것은 강의 항복이 일어나는 변형도가 약 1200 $\mu\text{m}/\text{m}$ 임을 고려할 때 대단히 큰 값이다.

식 (3)에서 게이지 상수 K도 온도의 영향을 받아서 변화한다. 이 영향은 걸보기 변형도에 의한 오차요인보다는 작지만, 정확한 측정이 요구되거나 온도변화가 큰 경우에는 고려되어야 한다. 그림 2는 Advance합금과 Karma합금에 대한 온도에 따른 게이지상수의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Karma합금의 경우 온도가 100°C 증가함에 따라 게이지 상수는 약 1%가 감소한다.

#### 4. 온도보상방법

앞에서 설명한 것과 같이 스트레인 게이지는 온도에 상당히 큰 영향을 받기 때문에 안정된 실험실 온도 조건에서 사용할 때를 제외하고는 기계적인 하중에 의한 실제적인 변형도를 측정하기 위하여 온도의 영향을 최소화시켜야 한다. 온도보상 방법에는 회로 온도보상 방법과 스트레인 게이지 자체 온도보상 방법이 있다.

##### 4.1 회로에 의한 온도보상

회로에 의한 온도보상법으로는 동일한 스트레인 게이지를 더미 게이지로 사용하여 1/2 브리지로 연결하는 액티브-더미법(active-dummy method)이 많이 사용된다. 변형을 측정하려는 스트레인 게이지(액티브 게이지)를 시험편에 부착시키고 동일한 종류의 게이지(더미 게이지)를 시험편의 다른 곳에 부착하거나, 시험편과 같은 재료의 다른 시편에 부착한다. 이 때, 더미 게이지는 액티브 게이지와 외부 온도조건이 같도록 하여야 하고, 기계적인 변형을 받지 않거나 변형이 아주 작은 곳에 위치하도록 하여야 한다. 이와 같이 부착된 스트레인 게이지들을 그림 3과 같이 브리지 회로에 1/2브리지로 구성한다.

액티브 게이지와 더미 게이지가 동일한 스트레인 게이지 이고, 온도조건이 같으며, 더미 게이지가 전혀 변형을 받지 않는 경우, 브리지

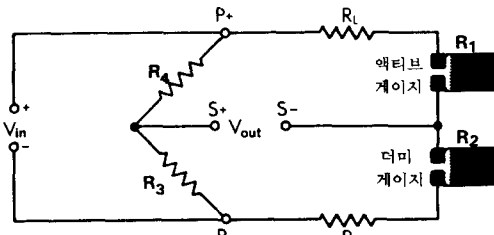


그림 3 액티브-더미법에 의한 스트레인 게이지의 온도보상

회로에서 이론적으로 온도에 의한 영향이 상쇄된다. 따라서 브리지 회로를 통하여 출력되는 변형도 값은 실제 기계적인 변형에 의하여 발생하는 변형도 값과 일치하게 된다.

#### 4.2 자체 온도보상 스트레인 게이지

식 (3)에서 저항체의 열팽창 계수  $\alpha$ 와 저항 온도계수  $\gamma$ 는 합금의 화학성분에 따라 대단히 민감하게 변화하며, 얇은 박판을 성형하는 냉각작업의 조건에 따라 달라진다. 이러한 현상을 이용하여 가능한 넓은 온도 범위에서 걸보기 변형도를 최소화시키도록 제작된 게이지를 자체 온도보상 스트레인 게이지라 한다. 이러한 게이지는 다음식이 만족하도록 제작되어 있다.

$$\gamma = K(\alpha - \beta) \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하면 식 (2)가 되어 이론적으로 온도의 영향이 상쇄되어 제거됨을 알 수 있다. 그러나 이러한 스트레인 게이지는 정해진 열팽창 계수를 가진 재료에 사용했을 때

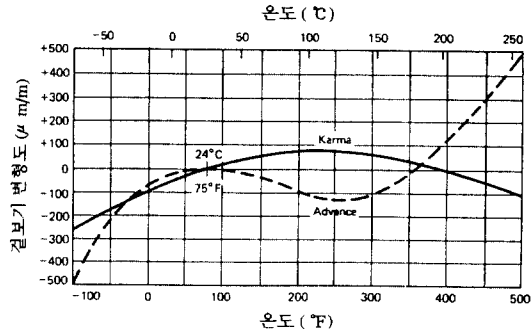


그림 4 Advance와 Karma합금으로 제작된 자체 온도보상 스트레인 게이지의 온도에 따른 걸보기 변형도

만 걸보기 변형도를 최소화시킬 수 있다. 그러한 이유로 상품화된 스트레인 게이지는 사용재료를 명시하고 있다.

이러한 자체 온도보상 스트레인 게이지는 온도보상을 하지 않은 게이지에 비해서 걸보기 변형도를 상당히 줄일 수 있지만 완벽하게 온도보상이 되는 것은 어렵다. 그림 4는 자체 온

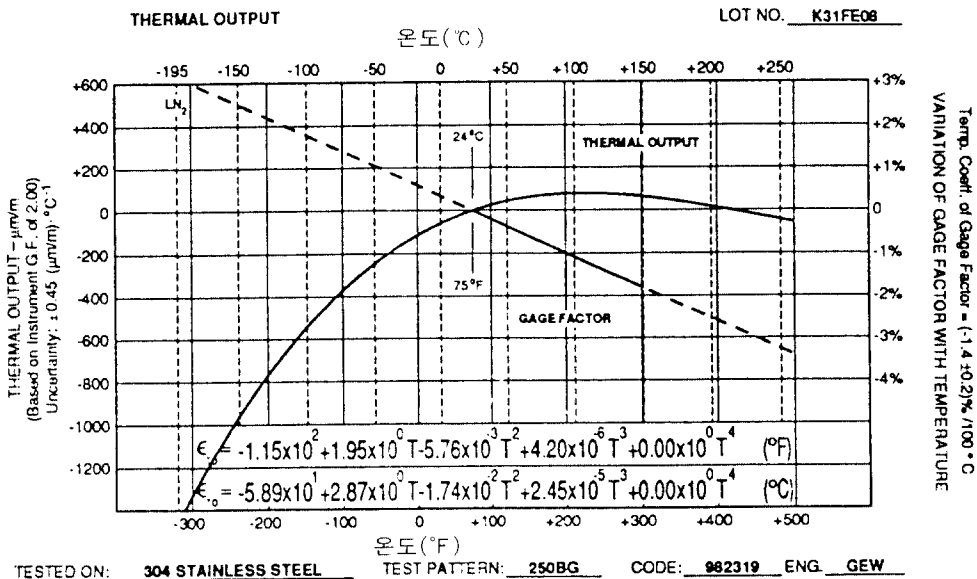


그림 5 상품화된 극저온용 스트레인 게이지에서 명시된 온도에 따른 걸보기 변형도와 게이지 상수의 변화의 한 예

도보상된 게이지의 전형적인 길보기 변형도를 보여주고 있다. 상온근처의 작은 온도변화에서는 길보기 변형도의 변화가 거의 없지만 상온에서 크게 떨어진 온도에서는 큰 길보기 변형도를 나타내고 있어서 측정값의 보정이 필요함을 알 수 있다.

**4.3 측정값의 보정**

온도변화의 영향을 받아 나타내는 측정오차의 회로를 사용하거나 자체온도보상 스트레인 게이지를 사용하여 크게 줄일 수 있지만 좀더 정확한 측정을 위해서는 각 스트레인 게이지마다 명시되어 있는 온도에 따른 길보기 변형도와 게이지 상수값을 이용하여 보정 후 사용하여야 한다. 그림 5는 상품화된 스트레인 게이지에 명시되어 있는 길보기 변형도와 게이지 상수에 대한 온도특성의 한 예이다. 변형도 측정기로부터 측정된 변형도를  $\epsilon_r$ 이라 하고 온도에 따른 길보기 변형도를  $\epsilon_a$ 라 하면 실제적으로 기계적하중에 의하여 생겨난 변형도  $\epsilon$ 는 다음 식으로부터 구해질 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_r - \epsilon_a \tag{5}$$

또한 온도변화에 의하여 게이지 상수가  $K_r$ 에서  $K$ 로 변화하였다면 실제의 변형도와 측정되는 변형도 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon = K_r\epsilon_r \tag{6}$$

온도변화에 의한 길보기 변형도와 게이지 상수의 변화를 동시에 고려한다면 식 (5)와 식 (6)에 의하여 다음과 같이 실제적인 변형도를 구해낼 수 있다.

$$\epsilon = (\epsilon_r - \epsilon_a) \frac{K_r}{K} \tag{7}$$

**5. 극저온에서 길보기 변형도 특성<sup>(5,6)</sup>**

극저온 환경은 질소의 액화온도인 77K이하의 환경을 말하는 것이 보통이다. 이와 같은 극저온 환경에서는 상온에서 일어나지 않았던

여러 가지 현상이 나타나며, 특히 20K 이하의 온도에서는 재료의 물성치들이 예측할 수 없는 변화를 보이기 때문에 실제 시험을 통하여 물성치들이 온도에 따라 어떠한 값을 갖는지 결정할 필요가 있다.

앞에서 설명한 바와 같이 온도에 따른 길보기 변형도와 게이지 상수값은 스트레인 게이지 뿐만 아니라 사용하려는 시편의 재질에 따라서 다른 값을 갖기 때문에<sup>(7-10)</sup> 상품화된 스트레인 게이지에는 그림 5와 같은 보정곡선을 명시하고 있다. 그러나 4.2K까지의 극저온에서도 사용할 수 있도록 제작된 스트레인 게이지에 대해서도 그림과 같이 77K 이하에서는 보정곡선이 명시되지 않아서 극저온에서 변형도 측정시 큰 오차를 수반할 수 있다. 극저온에서의 스트레인 게이지의 특성을 결정하기 위하여 이태리의 표준기관인 IMGCI(Istituto Di Metrologia "G. Colontti")를 중심으로 세계의 측정표준기관과 산업체 및 대학이 참여하는 라운드 로빈(round robin) 시험이 진행되고 있다. 다음의 5절과 6절에서 기술한 내용은 이 계획에 참여하여 국내에서 수행된 시험결과이다.

**5.1 시험방법**

시험에 사용된 시편의 재료는 스테인레스강(AISI 316LN), 구리, 알루미늄이고 스트레인

표 1 극저온 시험에 사용된 스트레인 게이지들의 성질

스트레인게이지	MM	Kyowa	HBM
· 모델명	MM-WK-09-250BG-350	KFL-5-350-C1-16	6/350LC11/5
· 포장번호	DU-K31FE08	Y002-001	ES33476/OB
· 저항값 (상온)	350 Ω ± 0.3%	350 Ω ± 0.6%	350 Ω ± 0.35%
· 게이지 상수 (상온)	2.05 ± 1%	2.04 ± 1%	2.19 ± 1%
· 게이지 상수 / 온도	(-1.4 ± 0.2%) / 100°C	-0.02% / °C	-310ppm / K
· 열팽창 계수	16.2ppm / K	16.2ppm / K	10.8ppm / K

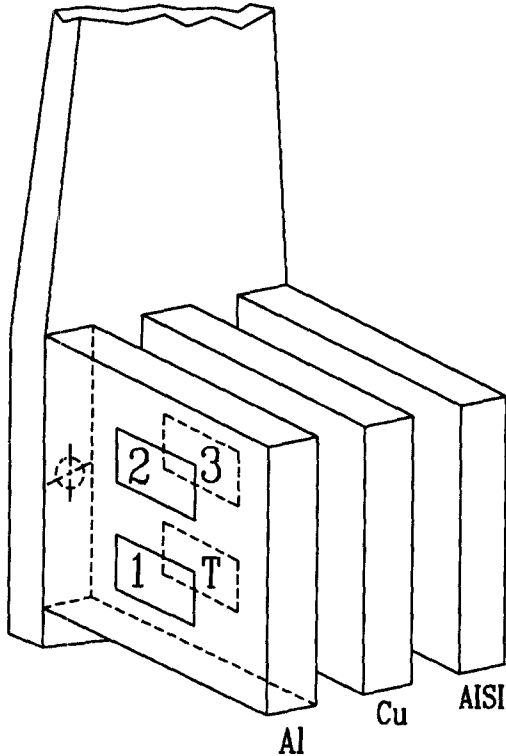


그림 6 극저온에서 겹보기 변형도측정을 위한 시험편의 형상.  
\*1,2와 3은 스트레인 게이지를 나타내고 T는 온도센서를 나타낸다.

게이지로는 국내외에서 가장 널리 쓰이는 MM, Kyowa, HBM 세 종류의 게이지를 선택하였다. 사용한 스트레인 게이지는 모두 극저온 4.2K까지 사용할 수 있도록 제작된 것이며 각각의 특성은 표 1에 나타나 있다.

그림 6과 그림 7은 실험장치틀을 보여주고 있다. 그림 6과 같이 한 개의 시험편에 세 개의 스트레인 게이지와 시험편의 온도를 정확하게 측정할 수 있는 저항식 온도센서를 부착하였다. 극저온 용기 속의 스트레인 게이지(active gage)는 실험실 조건에서 유지된 외부 저항체(dummy gage)와 함께 측정기에 1/2브리지로 연결하였다. 그림 7과 같이 액체질소 혹은 액체헬륨이 담겨진 용기(dewar)에서 시험편의

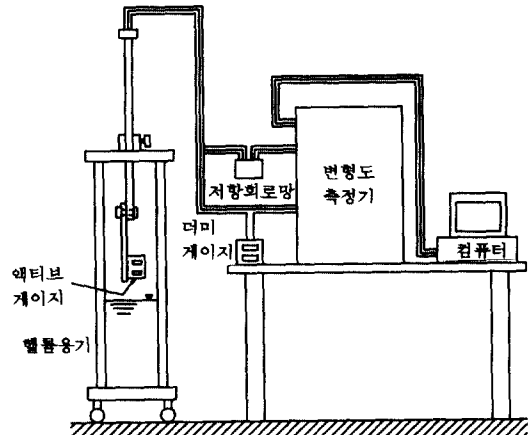


그림 7 극저온에서 스트레인 게이지의 온도특성 시험을 위한 시험장치

높이를 조정하여 상온부터 액체헬륨 온도인 4.2K까지를 단계적으로 유지시켰다. 시험중 실험실의 온도는 19°C에서 21°C 사이였었고, 습도는 45%RH에서 55%RH이었다.

## 5.2 시험결과

상온에서 극저온까지의 온도에 따른 겹보기 변형도의 시험결과를 그림 8에서 그림 10까지에 나타내었다. 293K에서 4.2K로 온도를 낮

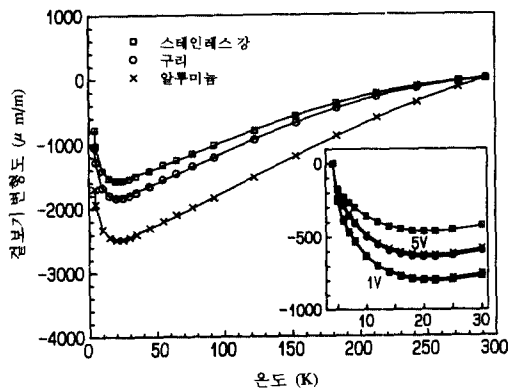


그림 8 MM 스트레인 게이지의 온도에 따른 겹보기 변형도.  
\*삽입된 그림은 4.2K~30K 온도범위에서 확대된 곡선을 나타낸다.

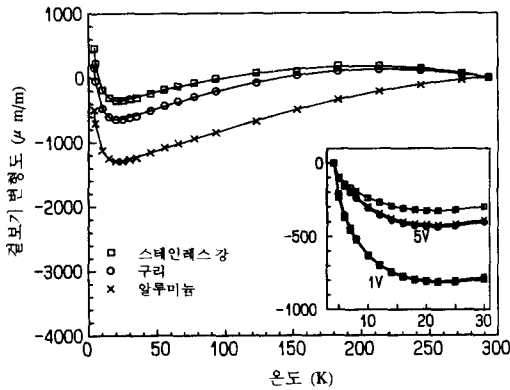


그림 9 Kyowa 스트레인 게이지의 온도에 따른 길보기 변형도.  
\*삽입된 그림은 4.2K~30K 온도 범위에서 확대된 곡선을 나타낸다.

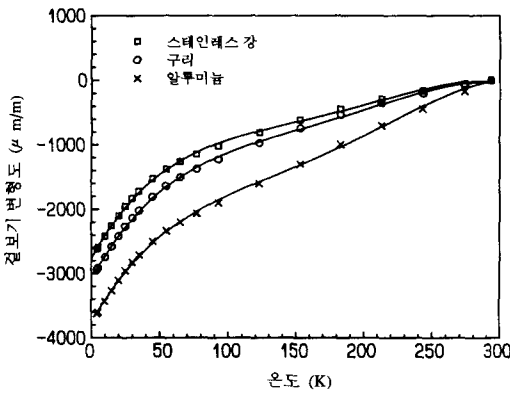


그림 10 HBM 스트레인 게이지의 온도에 따른 길보기 변형도.  
\*삽입된 그림은 4.2K~30K 온도 범위에서 확대된 곡선을 나타낸다.

추며 시험한 결과는 293K일 때의 길보기 변형도를 기준으로 그 차이를 나타냈으며 4.2K에서 30K까지 온도를 높이며 시험한 결과는 4.2K를 기준으로 차이를 나타내었다. 그림에 보인 길보기 변형도는 3 사이클의 평균 값을 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 온도가 내려감에 따라 변하는 길보기 변형도는 시험편의 재료에 따라 다르고, 특히 스트레인 게이지의 종류에

따라서 곡선의 형태가 매우 다르게 나타난다. MM 스트레인 게이지의 경우는 온도가 내려감에 따라 길보기 변형도가 계속 감소하다가 20K 근처<sup>(11)</sup>에서 다시 급격하게 증가한다. Kyowa 스트레인 게이지의 경우는 재료에 따라서 처음에는 증가하기도 하고 감소하기도 하다가 20K 근처까지 계속 감소한 후 급격하게 증가한다. HBM 스트레인 게이지의 경우는 상온서부터 4.2K까지 온도가 내려감에 따라 길보기 변형도는 계속 감소한다. 같은 스트레인 게이지에서 출력되는 길보기 변형도의 값도 게이지가 부착되는 시험편의 재료에 따라 크게 다르게 나타난다. 모든 게이지에서 알루미늄, 구리, 스테인레스강의 순서로 절대값이 크게 나타났다.

상온에서 사용하는 스트레인 게이지의 경우에는 외부에서의 잡음에 대한 영향을 적게 하고 민감도를 크게 하기 위하여 입력전압을 10V 정도로 하는 것이 보통이다. 그러나 극저온에서 사용할 때에는 입력전압을 크게 하면 자체가열(self heating)현상이 나타나기 때문에 결과가 정확하게 얻어지기가 어렵다. 본 시험에서는 입력전압을 1V와 5V 두 가지로 하였고 그 결과를 그림에 나타내었다. 상온부터 20K까지에서 길보기 변형도는 입력전압의 크기에 관련이 없는 것으로 나타났으나 20K 이하에서는 스트레인 게이지의 종류나 부착된 시험편의 재료에 따라 입력전압의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

실험결과에서 보는 바와 같이 극저온에서의 길보기 변형도는 상온에서 기계적인 하중에 의하여 재료에 항복이 일어나는 변형도가 1200~2500 $\mu\text{m/m}$ 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 변형도를 보정하여 사용하여야 한다. 이를 위하여 길보기 변형도

표 2 각 스트레인 게이지에 대한 온도(T)와 결보기 평형도( $\mu\text{m/m}$ )와의 특성곡선

스트레인 게이지	시편	식	입력 전압 (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	4.464E+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	0.061E-3	-1.478E-6
	Al	DA	1	-3.774E+3	3.835E+1	-2.829E-1	1.147E-3	-1.635E-6

○식 DB : 상온~20K, 식 AB : 액체헬륨온도~20K, 식 D : 상온~액체헬륨온도

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

( $\mu\text{m/m}$ )를 온도 T(K)에 대하여 다음과 같이 4차 다항식으로 가정하였다.

$$AS = A_0 + A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4 \quad (8)$$

최소자승법(least square method)을 사용하여 실험결과를 앞의 4차식으로 근사하였으며 구해진 계수를 표 2에 나타내었다. 그림 8부터 그림 10의 곡선들은 이러한 특성곡선을 보여주고 있다. 위와 같은 특성식은 4.3항에서 설명한 온도보정을 통하여 실제측정에 효과적으로

이용할 수 있다.

## 6. 극저온에서의 게이지 상수 특성<sup>(12)</sup>

### 6.1 시험방법

게이지 상수를 측정하기 위해서는 시험온도를 정확하게 유지시켜야 할 뿐만 아니라 정확하게 알고 있는 기계적인 하중을 가해야 한다. 그림 11은 시험편과 하중발생장치를 보여주고 있다. 이 장치는 극저온의 환경에서 시험편에 5단계의 일정한 굽힘변형을 발생시킬 수 있도록



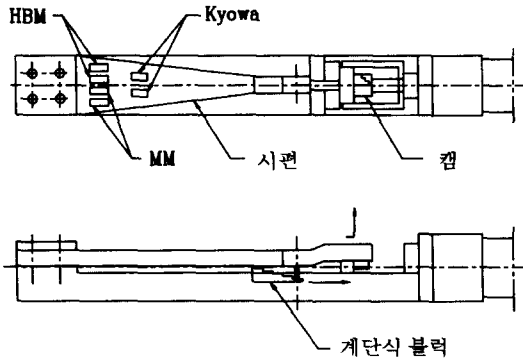


그림 11 게이지 상수 특성시험을 위한 시편과 하중 발생장치

록 설계되어 있다. 시험용기의 바깥에 설치되어 있는 핸들을 돌리면 캡에 의하여 계단식 블럭이 앞뒤로 이동하게 되어 굽힘변형을 발생시킨다. 각 블럭은 정확하게 시편에  $200\mu\text{m}/\text{m}$ 의 변형도를 발생시켜서 최대  $800\mu\text{m}/\text{m}$ 의 변형도가 발생된다. 스트레인 게이지는 인장 및 압축 변형도를 감지할 수 있도록 시편의 앞면과 뒷면에 두 개씩 모두 12개를 부착하였으며 사용한 시편의 재료는 스테인레스강(AISI316LN)이다. 측정장치는 그림 7과 같이 걸보기 변형도 측정장치와 동일하게 하였다.

### 6.2 시험결과

본 시험에서는 각 온도에서의 실제적인 게이지 상수를 구하기 위하여 모든 스트레인 게이지에 대하여 2.0의 게이지 상수를 공통적으로 변형도 측정기에 입력하였다. 실제의 게이지 상수는 앞에서 설명한 식 (6)에 의해서 구해질 수 있다. 그림 12부터 그림 14까지는 각각 MM, Kyowa, HBM 스트레인 게이지의 온도에 따른 게이지 상수를 보여주고 있다.

상온에서는 MM 게이지의 경우 게이지 상수가 인장, 압축에서 모두 2.05이고 Kyowa게이지의 경우 인장, 압축에서 각각 2.03과 2.05이며 HBM 게이지의 경우 2.19와 2.20이었다. 이것은 스트레인 게이지에 명시된 각각의 게이지 상수 2.05, 2.04 및 2.19와 정확하게 일치

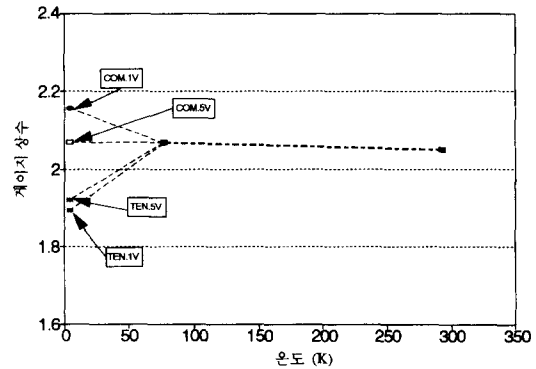


그림 12 MM스트레인 게이지의 온도에 따른 게이지 상수의 변화

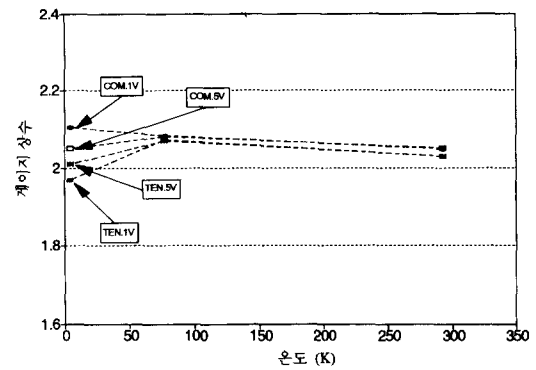


그림 13 Kyowa스트레인 게이지의 온도에 따른 게이지 상수의 변화

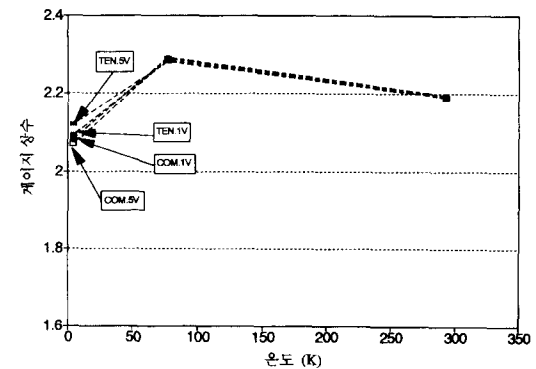


그림 14 HBM 스트레인 게이지의 온도에 따른 게이지 상수의 변화

하여서 본 시험의 하중발생장치와 측정방법이 신뢰성이 높음을 알 수 있다. 상온에서 액체 질소 온도까지는 MM 게이지의 경우 증가율

0.0045%/K, Kyowa게이지의 경우 증가율 0.0079%/K로 완만하게 증가하였고 HBM게이지의 경우 0.02%/K로 증가하였다. 액체헬륨 온도에서는 각 게이지마다 입력전압에 따라 그리고 인장 혹은 압축상태에 따라 상당히 다른 값을 나타내었다. MM게이지의 압축상태일 때만 게이지 상수가 계속 증가하였고, 나머지 경우에는 급격하게 감소하였다. 따라서 액체헬륨 온도 근처에서 스트레인 게이지를 사용하여 변형도를 측정할 때에는 스트레인 게이지의 종류뿐만 아니라 측정기에 가해지는 입력전압과 변형상태를 정확히 구분하여 사용하여야 함을 보여주고 있다.

## 7. 맺음말

이상으로 스트레인 게이지를 이용하여 변형 측정을 할 때 온도변화의 영향으로 나타나는 겉보기 변형도와 게이지 상수의 변화에 대하여 설명하였고 실제 측정시 정확한 측정값을 얻기 위한 온도보상 방법에 대하여 기술하였다. 온도변화에 의한 겉보기 변형도의 값은 기계적 하중에 의한 변형도에 비하여 무시할 수 없는 큰 값을 나타내기 때문에 적절한 보상에 의하여 정확한 측정값을 얻어내야 한다.

항공우주산업, 원자력산업 등의 분야에서 널리 응용되는 극저온 환경에서 겉보기 변형도와 게이지 상수의 측정결과를 제시하였다. 극저온에서는 자체 온도보상된 스트레인 게이지라 할지라도 대단히 큰 온도영향을 받기 때문에 본 시험에서 제시한 바와 같이 측정결과를 온도보상하여 처리해야만 의미있는 결과를 얻을 수 있다. 본 시험에서 4차식으로 구해진 겉보기 변형도에 대한 특성곡선과 게이지 상수에 대한 시험결과는 극저온에서 변형을 측정할 때 직접적으로 보상하여 사용될 수 있다.

## 참고문헌

(1) Daily, J.W. and Riley, W.F., 1987, Hand-

- book on Experimental Mechanics-Chapter 2. Strain Gages, Prentice-Hall Englewood Cliffs, pp.41~78.
- (2) 백종승 외 5인, 1987, 힘, 공업진흥청, pp.89~112.
- (3) Keil, S., 1988, "The Thermal Output of a Strain Gages," Reports in Applied Measurement, Vol.4, No.1, pp.15~17.
- (4) 1983, "Temperature-Induced Apparent Strain and Gage Factor Variation in Strain Gages," Measurement Group Tech Note, TN-504, pp. 1~10.
- (5) Greenough, R.D. and Lee,E.W., 1967, "Behavior of Electrical Resistances Stratin Gages at Low Temperatures : 1. Magnetoresistance," Cryogenics, pp.7~9.
- (6) 주진원, 김갑순, 1991, "극저온 환경에서의 스트레인 게이지 특성연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(1), 청주, pp.457~461.
- (7) Clark, A.F., Childs, G.E. and Wallace, G. H., 1970, "Electrical Resistivity of Some Engineering Alloys at Low Temperatures," Cryogenics, pp.295~298.
- (8) Telinde, 1970, "Strain Gages in Cryogenic Environment," Experimental Mechanics, Vol.10., pp.394~401.
- (9) Ferrero, C. Analysis Down to Liquid Helium Temperature," Cryogenics, Vol.30., pp.249~254.
- (10) 1984, "Bondable Resistance Temperature Sensors and Associated Circuity," Measurement Group Tech Note, TN-5, pp.1~12.
- (11) Kondo, J., 1969, Theory of Dilute Magnetic Alloysin : Solid State Physics, Academic Press, New York, p. 1173
- (12) 김갑순 외 3인, 1992, "극저온 환경에서의 스트레인 게이지의 변형도 측정 및 게이지 상수에 관한 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(I), 울산, pp. 171~175. 