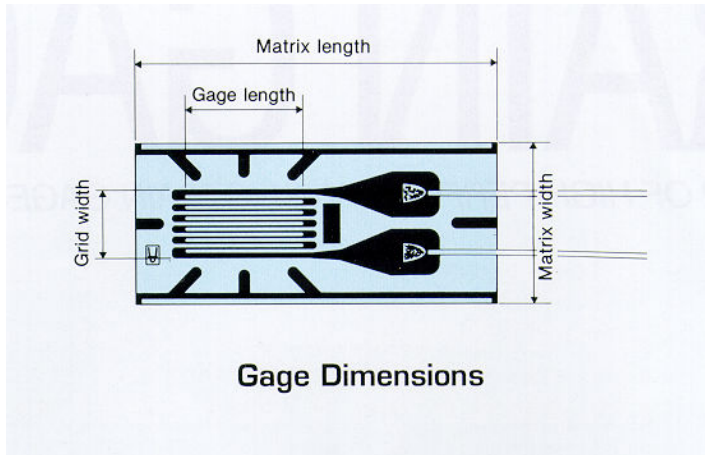


Strain Gauge Manual

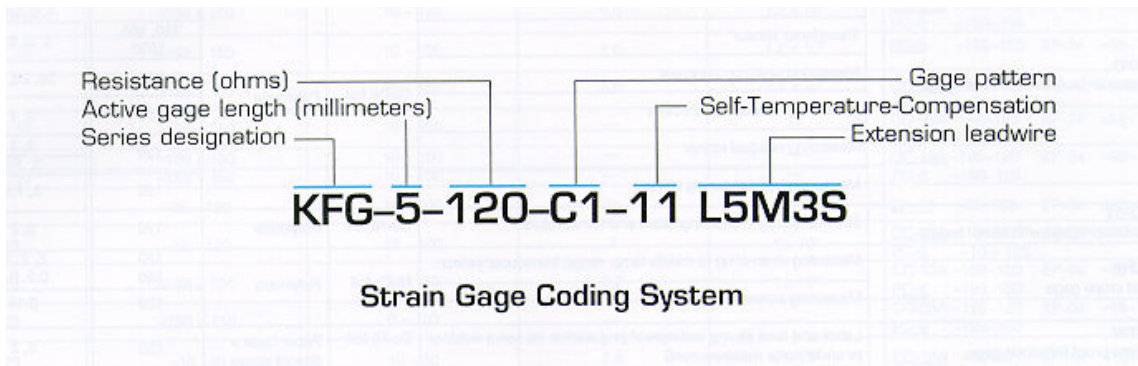
➤ Electrical-Resistance Strain Gauge

스트레인을 측정하기 위한 방법으로는 기계적(mechanical) 방법, 광학적 (Optical) 방법, 음향적(Acoustic) 방법, 그리고, 전기적(Electrical) 방법이 있다[1]. 본 사용자 설명서는, 이들 중에서 전기 저항의 변화를 이용한 전기 저항(Electrical-Resistance) 스트레인 게이지를 그 대상으로 한다.

KYOWA STRAIN GAUGE



Gage Dimensions



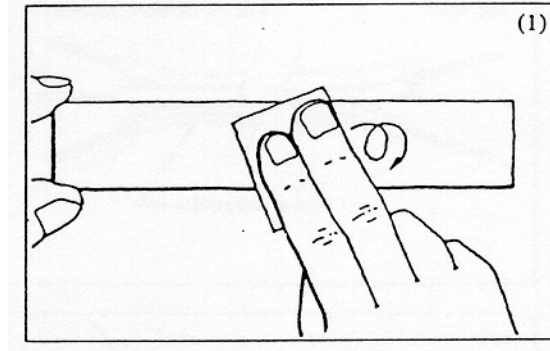
Strain Gauge Coding System

Strain Gauge 를 선택할 시에 고려해야 할 조건으로는 부착 대상의 종류(Steel, Wood, Composite, Glass, etc.), 게이지 패턴(Rosette Pattern), 저항 크기, 게이지 팩터(Gage Factor), 게이지의 길이, 등을 먼저 고려해야 한다. 부착 대상의 온도에 따른 선 팽창률을 고려하여 알맞은 게이지를 선택해야 하고, 측정 목적에 따라 게이지의 공간적 구성을 고려한 게이지 패턴을 선택하여야 한다. 게이지 팩터는 스트레인에 대한 저항의 변화율 변화를 나타내는 것으로, 측정 감도(Sensitivity)와 관련이 있다. 식 (1)은 게이지 팩터 K 를 나타내는 식이다. R 은 저항을 ϵ 는 스트레인을 각각 나타낸다.

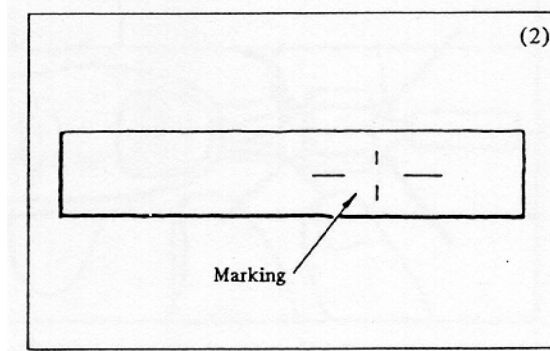
➤ Strain Gauge Attachment

접착 위치의 표면 가공

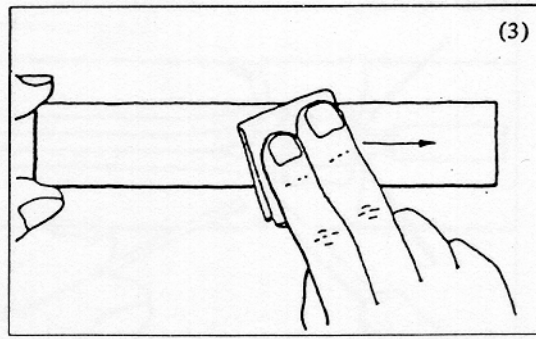
1. 접착 표면의 페인트, 녹, 코팅 등을 그라인더(Grinder)나 Sand Blasting 등을 사용하여 제거한다. 다음으로 Sand Paper(100 to 300 grit)을 사용하여, 원을 그리면서 접착위치를 연마한다.



2. 접착 위치를 정확히 하기 위하여, 철필이나 연필(5H,6H) 등을 사용하여 위치를 표시한다.

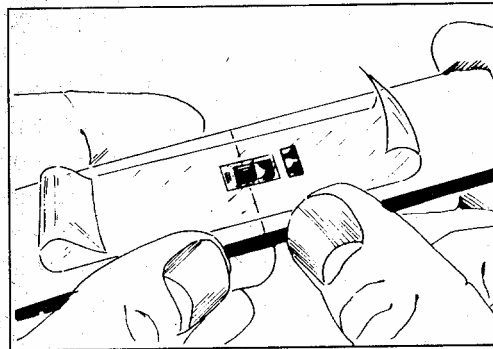


3. 표면의 기름이나 그리스(Grease) 등을 제거하기 위하여, 거즈(Gauze)와 Acetone, Chlorothene 을 사용하여 닦아낸다. 수분을 포함하는 Alcohol 등의 용제(Solvent)는 사용할 수 없다. 거즈로 닦아냄에 있어, 계속 한 방향으로 밀어내듯이 닦아내야 한다. 좌우 또는 앞뒤로 방향을 바꿔 가면서 닦아서는 안된다.

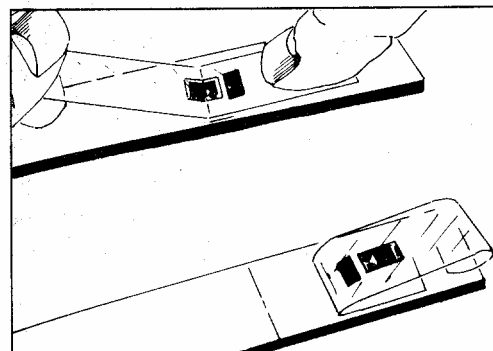


스트레인 게이지의 접착

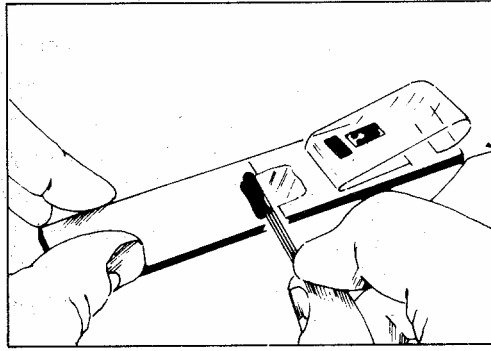
1. 사용할 스트레인 게이지의 저항값을 측정하여 이상이 없는지 확인한다.
2. 스트레인 게이지를 투명 테이프에 부착한다. 이 때 게이지의 접착면이 테이프에 부착되어서는 안 된다.
3. 이물질이 제거된 접착면에 테이프를 사용하여 스트레인 게이지를 부착한다. 이 때, 표시된 접착 위치에 정확히 정치시키도록 한다.



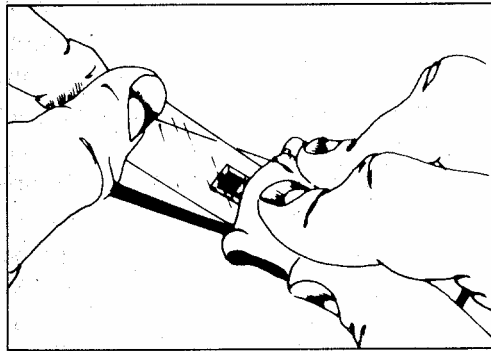
4. 테이프의 좌,우 중 한 쪽을 선택하여 들어 올린다. 이 때, 스트레인 게이지의 접착면이 떨어질 만큼만 테이프를 떼어낸다. 테이프와 부착면 사이의 각도를 30도 이하로 유지시켜, 스트레인 게이지가 손상되지 않도록 주의한다.



5. 스트레인 게이지 접착 위치에 접착제를 도포한다. 이 때, 너무 많은 양이 도포되지 않도록 주의한다.



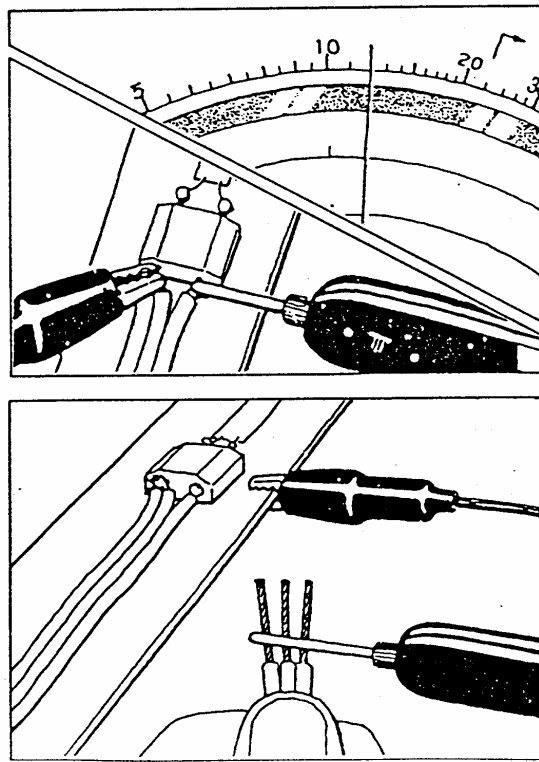
6. 테이프를 다시 원래 위치로 부착시켜 스트레인 게이지를 표시된 위치에 정착 시킨다. 정착 시킨 후에는, 엄지 손가락으로 일정시간(1 분 가량) 압력을 가하여 접착에 필요한 양 이외의 접착제가 밀려 나오도록 한다.



7. 접착제가 완전 경화될 때 까지 안정시키도록 한다. 경화에 필요한 시간은 사용 접착제의 사용 설명서를 참조한다.

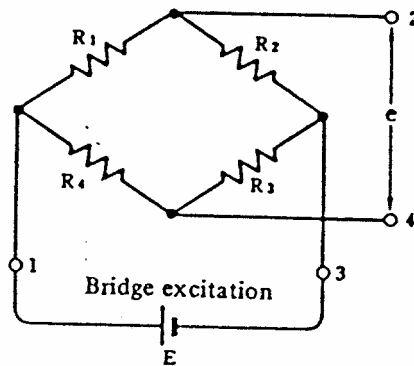
스트레인 게이지 접착 후 처리

1. 조심스럽게 스트레인 게이지 위의 투명 테이프에 떼어낸다. 이 때 게이지가 함께 떨어져 나오지 않는다면, 1 차적인 접착에 성공한 것이다.
2. 테스터 기를 사용하여 스트레인 게이지의 저항값에 이상이 없는지 확인한다. 이때, 스트레인 게이지와 측정 대상간의 전기 절연에 이상이 없는가도 함께 확인한다.



3. 코팅제(Coating Agent)를 사용하여 접착된 스트레인 게이지를 보호한다. 코팅제로는 Rubber putty-type 이나 Urethane 용액 등을 사용한다.

➤ Strain Gauge Bridge Circuitry

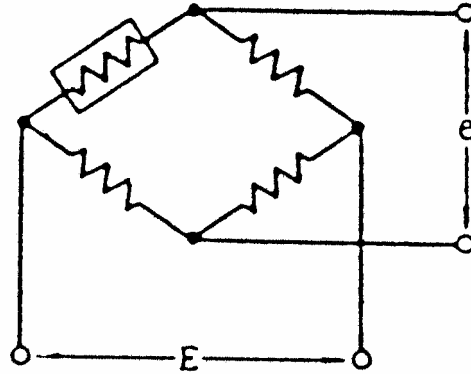


위 그림은 스트레인 게이지 Wheatstone 브릿지(bridge)를 나타낸 것이다. 이 브릿지에 스트레인 게이지를 부착하는 방법에 따라, Quarter Bridge, Half Bridge, Full Bridge 로 분류되게 된다. 식 (2)는 브릿지 회로에 부착된 저항값의 변화에 따른 측정 전압과 고정 부가 전압 사이의 관계를 나타내는 식이다. 이 식으로 부터, 각 브릿지 회로의 적용 방법이 결정되게 된다.

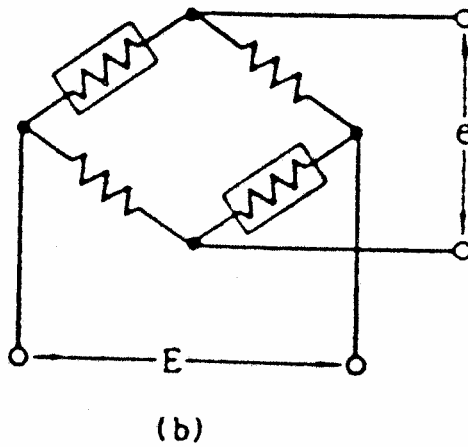
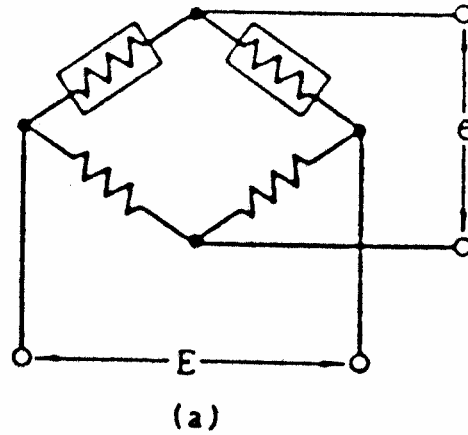
$$e = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) E \quad (1)$$

Bridge Circuitry

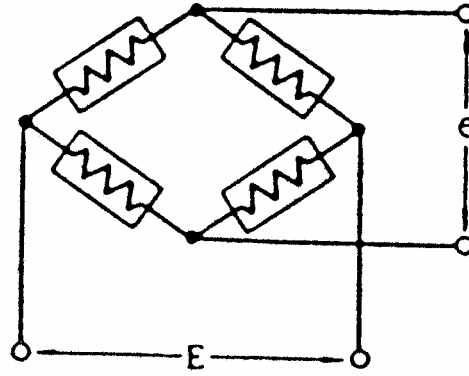
1. Quarter Bridge : 일반적인 경우의 스트레인 측정에 사용



2. Half Bridge: 온도 보정(a), 잡음 제거(a) 이나, 측정 전압 증폭(b), 에 사용



3. Full Bridge: 2.(a)와 2.(b)를 동시에 구현하는데 사용.



위 그림들에서 사가형 테두리가 그려진 저항들은, 측정에 사용된 스트레인 게이지를 나타내며, 그 외의 저항들은 브릿지 회로를 구성하기 위하여 사용된 저항을 나타낸다.

➤ Gauge Factor(Strain Sensitivity) ‘K’

일반적인 스트레인 게이지의 Gauge Factor ‘K’는 다음의 (2)과 같이 정의된다.

$$K = \frac{dR/R}{\epsilon} \approx \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (2)$$

그러나, 실제적으로 측정 대상에 스트레인 게이지가 접착된 경우, 스트레인 게이지는 길이 방향이 아닌 다른 방향에서의 스트레인 입력에 대해서도 저항값의 변화를 보이게 된다. 이 때의 저항 변화는 다음의 식 (3)과 같이 나타난다.

$$\frac{\Delta R}{R} = K_a \epsilon_a + K_t \epsilon_t + K_s \gamma_s \quad (3)$$

where, ϵ_a : Normal Strain along axial direction of Strain Gauge

ϵ_t : Normal Strain along transverse direction of Strain Gauge

γ_s : Shearing Strain

K_a : Gauge Factor(Sensitivity) of Strain Gauge to axial Strain

K_t : Gauge Factor(Sensitivity) of Strain Gauge to transverse Strain

K_s : Gauge Factor(Sensitivity) of Strain Gauge to shearing Strain

식(3)에서 알 수 있듯이, 스트레인 게이지를 통해 측정되는 저항 변화에

는 순수한 길이 방향 성분 이외의 다른 방향 성분들이 있으며, 이러한 길이 방향 이외의 성분들은 스트레인 신호 측정에 있어서의 잡음(Noise)으로 작용하게 된다. 이들 길이 방향 외의 성분들 중, 전단 변형(Shearing Strain)에 의한 영향은 일반적으로 매우 작은 것으로 간주되어 무시하고 있다.

[Example Case]

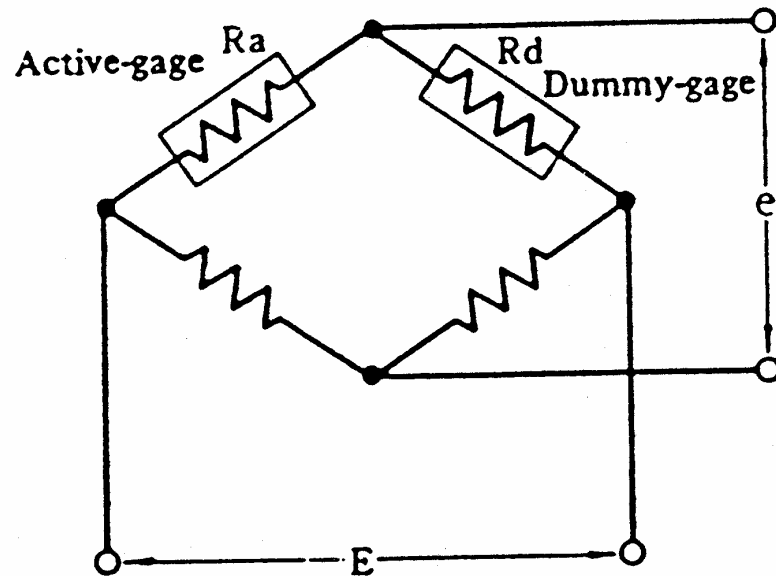
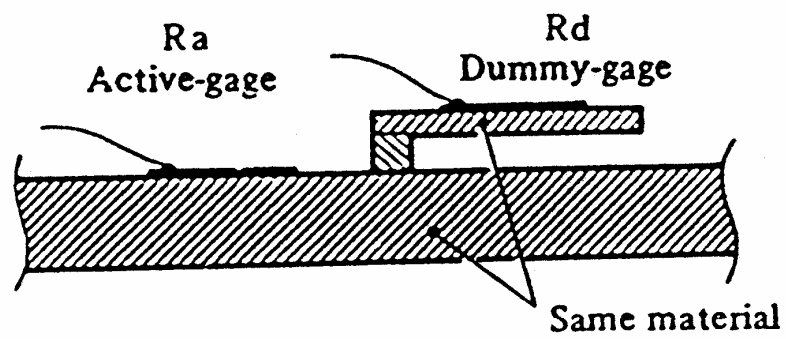
사용된 스트레인 게이지는, KYOWA 사의 ‘KFG-5-120-C1-11L1M2R’ 모델로, 그리고 측정 대상은 Steel Beam 으로 가정한다. KYOWA 에서 제공하는 스트레인 게이지의 특성표에 따르면, ‘Gauge Factor=2.11±1.0%’이며(Lead Wire 저항 포함), ‘Transverse Sensitivity: $K_t/K_a=0.4\%$ ’로 되어 있다. 이 Transverse Sensitivity 와 측정 대상이었던 Steel Beam 의 포아송비(Poisson Ratio) ‘ $\nu=0.31$ ’을 식(3)에 대입하면 다음의 식(4)와 같은 저항 변화에 대한 관계식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{\Delta R}{R} &= K_a(\epsilon_a + \frac{K_t}{K_a}\epsilon_t) \quad , \text{where } \gamma_s \approx 0 \\ &= K_a\epsilon_a(1 - \nu \frac{K_t}{K_a}) \\ &= K_a\epsilon_a(1 - 0.31 \times 0.4\% - 0.02) = K_a\epsilon_a[1 - (1.24\% - 0.03)]\end{aligned}\tag{4}$$

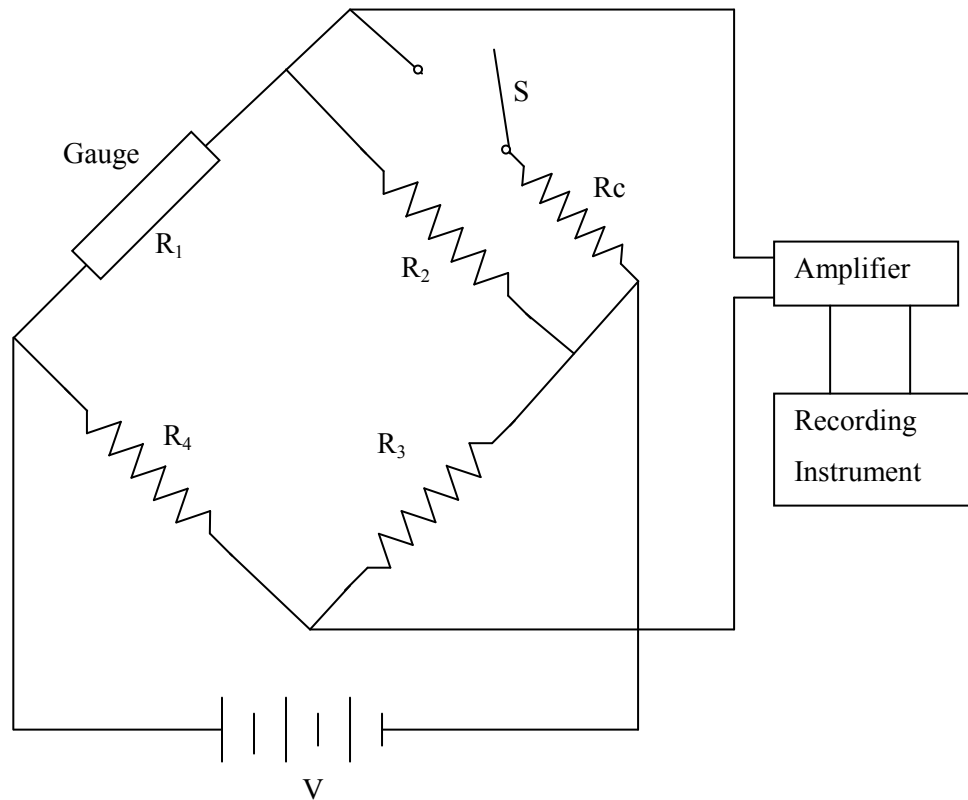
식 (4)로 부터, 측정된 스트레인이 실제값보다 0.124% 작게 측정되고 있음을 알 수 있다. 이 오차가 다른 오차 요인들에 비해 큰 값이라고는 볼 수 없으나, 보다 높은 정확도의 실험을 하는 경우에는 고려할 필요가 있음을 알 수 있다.

➤ Temperature Compensation

스트레인 게이지는 실제적인 스트레인이 발생하지 않더라도, 온도 변화에 따라 수축과 팽창을 하면서 저항 변화가 나타나게 된다. 이러한 온도 변화에 따른 스트레인 측정 오차를 보상하기 위하여, 다음의 Active Dummy Method 를 사용할 수 있다. 이 방법은 앞서 브릿지 회로에서 설명한 바 있는 Half Bridge 의 응용 사례로서, 두개의 스트레인 게이지를 사용한다. 오차 보정을 위한 Dummy-Gauge 는 기계적인 스트레인이 나타나지 않는 위치에 부착하여, 온도 변화에 따른 스트레인 만이 작용하도록 설치한다. 이렇게 하여, 두 스트레인 게이지 간의 신호가 서로 상쇄되도록 Half Bridge 를 구성하면, 온도 변화에 의한 영향을 제거할 수 있다.



➤ Strain Gauge Calibration



스트레인 게이지 브릿지(Strain Gauge Bridge)에서 측정된 전압을 스트레인 값으로 환산하기 위해서는, 측정되는 전압 신호에 대한 스트레인의 크기를 알아내는 Calibration 작업이 필요하게 된다. 이를 위해 사용되는 방법이 ‘Shunt Calibration’ 법이며, 위 그림은 그 구성도를 나타낸 것이다. ‘Shunt Calibration’ 을 위해서는, 브릿지(Bridge)를 구성하기 위해 필요한 4 개의 저항(스트레인 게이지 저항 포함)외에 추가적으로 1 개의 저항이 더 필요하게 된다. 이 추가적인 저항은 그림에서 스위치 (Switch) ‘S’에 연결된 R_c 저항을 의미한다.

위 그림의 스위치 S 를 연결하여 주면, 병렬 연결된 저항 R_c 에 의해 기존의 R_2 저항값이 변화하게 된다. 이 때 변화된 저항 값은 브릿지 회로에 있어서는 스트레인 입력이 가해진 것과 같은 효과로 나타나게 된다. 실제 기계적인 스트레인에 의한 저항 변화가 아닌, 저항의 병렬 연결에 의한 저항 변화를 입력받게 되는 것이다. 이러한 저항 변화로 인해 브릿지 회로의 평형은 깨지게 되고, 이 때 발생된 전위차가 스트레인 신호로서 Amplifier 를 통해 출력되게 된다.

저항 R_c 의 병렬 연결로 인해 저항 R_2 와 R_c 가 합해진 전체 저항 값 R_{2e}

는 다음의 식 (5)과 같이 나타난다. 그리고, 이러한 R_2e 에 의한 저항 변화율은 식(6)로 표현된다. 최종적으로 식(6)에서 계산된 저항 변화율을 식(7)의 Wheatstone Bridge 평형 방정식에 대입하면, 식(6)의 저항(스트레인) 변화로 인한 전위차 ΔE_2 값을 계산할 수 있다.

$$R_2e = \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_c}\right)^{-1} = \frac{R_2 R_c}{R_2 + R_c} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{R_2e - R_2}{R_2} = -\frac{R_2}{R_2 + R_c} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta E_2 &= V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \\ &= V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(-\frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \\ &= V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{R_2}{R_2 + R_c} \right) \quad , \text{ where } \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

만약, R_1 위치에 설치된 스트레인 게이지에 기계적 스트레인 ' ϵ '이 가해진 경우, 브릿지 회로의 전위값을 계산하면 다음의 식(8)과 같이 나타난다. 식 (8)에서 ' K '는 Gauge Factor(Strain Sensitivity)를 나타낸다.

$$\Delta E_1 = V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} (K \epsilon_c) \quad , \text{ where } \frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = 0 \quad (8)$$

여기서, 식 (7)과(8)의 $\Delta E_2 = \Delta E_1 = \Delta E$ 의 관계가 성립하는 경우, ΔE 의 전위차를 발생시키는 스트레인 값 ϵ_c 를 다음의 식(9)와 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon_c = \frac{R_2}{K(R_2 + R_c)} \quad (9)$$

그러므로, 스트레인 게이지의 Gauge Factor ' K '와 R_2 , R_c 값을 아는 경우, 식 (9)를 이용하여 스위치 S가 연결된 경우의 전위차 ΔE 에 해당하는 Calibration Strain ' ϵ_c '값을 계산해 낼 수 있다.

Reference

- [1] James W. Dally and William F. Riley 1978 *Experimental Stress Analysis*. TOKYO: McGRAW-HILL
- [2] *Strain Gauge Instruction Manual*. KYOWA

2000.7. 7 박주배