

## 휘트스톤 브리지 회로의 원리에 대한 이해

최병희<sup>1)</sup>\*, 류창하<sup>1)</sup>

### Understanding the Principles of Wheatstone Bridge Circuit

Byung-Hee Choi, Chang-Ha Ryu

**Abstract** The Wheatstone bridge is an important electrical circuit that is widely used to measure extremely small resistance changes in strain gages. The strain gages are attached to the structure or specimen whose deformation is to be detected. The Wheatstone bridge finds one of its major applications in the areas of static and dynamic strength tests for various engineering materials. In the split Hopkinson pressure bar (SHPB) system, for example, the bridge circuit is required to measure the dynamic strains of the incident and transmitted bars along which the stress wave propagates. In this article, the principles of the Wheatstone bridge circuit are in detail explained for easy reference during laboratory experiments associated with rock dynamics. Especially, the circuit arrangements of the quarter, half, and full bridges are presented with their basic uses.

**Key words** Wheatstone bridge circuit, Strain gage, Strength test, SHPB system, Stress wave

**초 록** 휘트스톤 브리지(Wheatstone bridge)는 변형률 게이지의 극도로 작은 저항 변화를 측정하는 데 널리 사용되는 중요한 전기회로의 하나이다. 변형률 게이지는 변형을 측정하고자 하는 구조물이나 시편에 부착한다. 휘트스톤 브리지는 다양한 공학재료에 대한 정적 혹은 동적 강도를 시험하는 분야에서 많이 사용되고 있다. 일례로, 스플릿 홉킨슨 압력봉(split Hopkinson pressure bar) 시스템에서 브리지 회로는 응력파가 전파되는 입사봉과 전달봉의 동적 변형률을 측정하는 데 필수적으로 사용된다. 본고에서는 암석동역학과 연관된 실험실 실험에서 쉽게 참고할 수 있도록 휘트스톤 브리지 회로의 원리를 상세히 설명하였다. 특히, 쿼터(quarter), 하프(half) 및 풀(full) 브리지의 회로배열을 그 기본적인 용도와 함께 자세히 소개하였다.

**핵심어** 휘트스톤 브리지 회로, 변형률 게이지, 강도시험, SHPB 시스템, 응력파

### 1. 서 언

Wheatstone(1843)에 의해 제안된 소위 휘트스톤 브리지 회로(Wheatstone bridge circuit)는 극도로 작은 저항 변화를 정확하게 측정해야 하는 곳에 적용할 수 있다(Khan and Wang, 2001). 하지만 이 브리지가 가장 많이 사용되는 곳은 변형률, 온도, 압력과 같은 물리량을 측정하는 변환기와 관련된 자동화 회로이다

(Floyd and Buchla, 2013). 변환기(transducer)란 어떤 물리량의 변화를 감지하여 저항의 변화와 같은 전기량으로 바꾸어주는 장치를 말한다.

휘트스톤 브리지는 정적 혹은 동적 응용에서 변형률 게이지의 출력을 기록하는 용도로 많이 사용되고 있다. 암석 및 발파 분야의 경우, 암석의 정적강도 시험장치에 사용되는 것은 물론이고, 암석의 동적파괴 특성을 측정하는 스플릿 홉킨슨 압력봉(split Hopkinson pressure bar) 시험장치에서 입력봉과 출력봉의 변형률을 측정하는 데에도 사용된다.

본고에서는 Khan 및 Wang(2001)의 측정과 해석에 관한 책을 토대로 암석의 정적 혹은 동적 시험에서 암석의 변형률을 정밀하게 측정하는 데 많이 사용되고

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 책임연구원

\* 교신저자 : bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2017년 6월 19일

심사 완료일 : 2017년 6월 23일

게재 승인일 : 2017년 6월 26일

있는 휘트스톤 브리지의 작동원리를 상세하게 고찰함으로써 동 분야에 관심 있는 실무자들의 이해를 돕고자 하였다.

## 2. 휘트스톤 브리지의 작동원리

### 2.1 휘트스톤 브리지

휘트스톤 브리지는 다양한 형태로 구성될 수 있으나 통상 그림 1(a)에 보인 전기회로를 기본으로 한다. 이 그림에서  $R_1, R_2, R_3, R_4$ 는 저항이며,  $V$ 는 일정한 크기의 인가전압,  $E$ 는 절점 B와 D 사이에 걸리는 전압으로서 브리지 회로의 출력전압이다.

그림 1(a)의 브리지 회로는 얼핏 보면 복잡해 보이기 때문에 이를 좀 더 쉽게 이해할 수 있도록 모양을 바꾸어 그림 1(b)에 등가회로(equivalent circuit)로 표시하였다. 이제 그림 1(b)를 보면 브리지 출력전압  $E$ 가 보다 쉽게 이해된다.

### 2.2 작동원리

본 절에서는 앞에서 정의한 휘트스톤 브리지 회로가 어떻게 작동하는지 그 원리를 자세히 살펴본다.

그림 1(b)에서 절점 A와 B 사이에 걸리는 전압  $V_{AB}$ 와 절점 A와 D 사이에 걸리는 전압  $V_{AD}$ 는 전압 분배 법칙\_voltage distribution law에 의하면 다음과 같다.

$$V_{AB} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V \tag{1}$$

$$V_{AD} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V \tag{2}$$

그러면 절점 B와 D 사이에 걸리는 브리지 출력전압  $E$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} E &= V_{AB} - V_{AD} \\ &= \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V \end{aligned} \tag{3}$$

휘트스톤 브리지는 회로를 구성하여 실험에 들어가

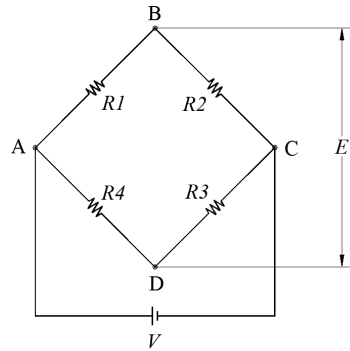
기 전에 브리지를 평형상태로 만들어 초기화한다. 이를 위해, 식 (3)을 참고하여  $R_1, R_2, R_3, R_4$ 의 서로 마주보는 4개의 저항값 사이에 다음의 관계가 성립되도록 각 저항기(resistor)의 용량을 선택한다.

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \tag{4}$$

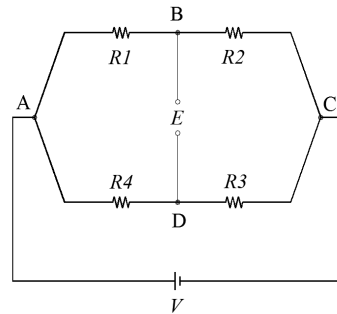
그러면 식 (4)에 따라 브리지는 초기 평형상태를 이루며, 이 초기 출력전압은 식 (3)에 의해  $E_0 = 0$ 이 된다.

브리지가 초기화 된 상태에서 실험을 시작하면, 저항기  $R_1, R_2, R_3, R_4$ 의 저항값이 각각  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$  만큼씩 소량으로 변할 것이고, 이때의 브리지의 출력전압  $\Delta E = E - E_0 = E$ 는 식 (3)에 따라 다음과 같이 될 것이다.

$$\Delta E = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} V \tag{5}$$



(a) 브리지 회로



(b) 등가회로

그림 1. 휘트스톤 브리지.

초기조건으로 설정한 관계식 (4)를 식 (5)에 대입하면 출력전압  $\Delta E$ 는 다음 식으로 변환된다.

$$\Delta E = V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (6)$$

단, 식 (6)의 유도과정에서는,  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ 의 미소량들 간의 곱의 항은 그 크기가 극히 작으므로 수식에서 모두 제거하였고, 분모의 경우에는 이런 미소량이 하나라도 들어간 항은 여타의 항에 비해 그 크기가 매우 작으므로 모두 무시하였다. 하지만 변형률의 크기가 5% 이상이 되는 경우에는 이들을 계산에 포함시켜야 한다(Khan and Wang, 2001). 한편, 식 (5)에서 식 (6)으로의 변환과정은 어렵지는 않으나 다소 번거로우므로 부록에 그 유도과정을 자세히 기술하여 두었다.

이제, 저항비(resistance ratio)  $m = R_2/R_1$ 을 도입하면 식 (6)의 브리지 출력전압  $\Delta E$ 는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\Delta E = V \frac{m}{(1+m)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (7)$$

식 (7)은 휘트스톤 브리지를 이용한 변형률의 측정에서 지배방정식의 역할을 하는 매우 중요한 식이다.

모든 센서에는 고유의 감도(sensitivity)가 있다. 휘트스톤 브리지로 변형률을 측정할 때, 브리지의 감도는 “단위 변형률에 대해 브리지가 출력하는 전압의 크기”를 말한다. 즉, 휘트스톤 브리지의 감도  $S_W$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$S_W = \frac{\Delta E}{\epsilon} = \frac{V}{\epsilon} \frac{m}{(1+m)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (8)$$

식 (8)에서  $\epsilon$ 은 변형률을 표시한다.

### 2.3 종류

그림 1의 휘트스톤 브리지를 사용하여 변형률을 측

정할 때, 저항기  $R_1, R_2, R_3, R_4$ 가 차지하고 있는 총 4개의 분지(branch) 가운데 몇 개의 분지에 변형률 게이지(일종의 저항기)를 부착하느냐에 따라 브리지의 배열이 달라지며, 이렇게 변형률 게이지로 대체된 저항을 능동저항(active resistance)이라 한다.

휘트스톤 브리지에서는 이런 능동저항, 곧 능동 변형률 게이지(active strain gage)가 부착된 분지의 수에 따라 브리지의 종류를 구분한다. 따라서 능동 게이지가 붙은 분지의 수가 1개, 2개, 4개일 때를 각각 쿼터 브리지(quarter bridge), 하프 브리지(half bridge), 풀 브리지(full bridge)라 부른다.

### 3. 쿼터 브리지

#### 3.1 온도 영향을 고려하지 않는 경우

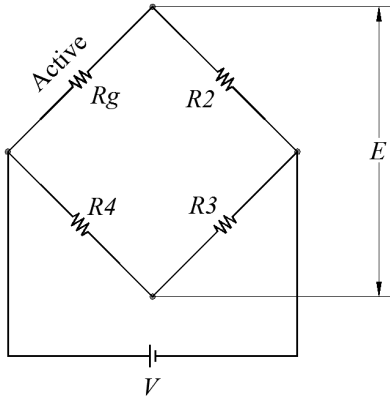
그림 2(a)의 휘트스톤 브리지는 총 4개의 분지 가운데 능동 변형률 게이지가 붙은 분지가 1개이므로 쿼터 브리지(quarter bridge)이다. 이런 쿼터 브리지에서 능동 변형률 게이지의 저항을  $R_g$ 라 하면 이 저항기 한 개를 시편에 부착하여 변형률을 측정하는 것이다. 다만, 이 시험에서는 온도 등의 영향에 의한 변형은 없다고 가정한다.

앞의 휘트스톤 브리지에 대한 지배방정식 (7)을 이용하면 쿼터 브리지를 사용할 때의 시편의 변형률을 계산하는 공식을 다음과 같이 유도할 수 있다. 먼저, 쿼터 브리지를 그림 2(a)와 같이 구성하였다고 가정하자. 그러면 능동게이지는  $R_g$  뿐이므로 식 (7)에서  $R_1 = R_g$ 를 대입하고,  $\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$ 으로 놓으면 쿼터 브리지 회로의 출력전압  $\Delta E$ 는 다음과 같이 된다.

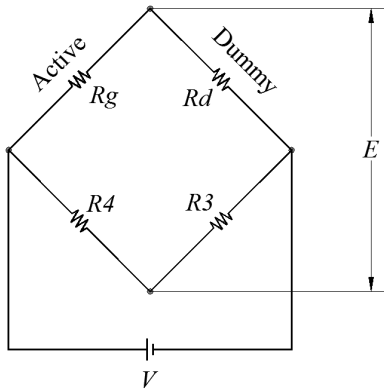
$$\Delta E = \frac{m V}{(1+m)^2} \left( \frac{\Delta R_g}{R_g} \right) \quad (9)$$

식 (9)에서 저항비  $m = R_2/R_g$ 이다.

모든 변형률 게이지는 성능지표의 하나로서 “단위 변형률에 대해 게이지가 발휘하는 전기저항의 변화량”으로 정의되는 게이지 계수(gage factor)  $G_f$  값을 가지고 있다. 게이지 계수의 값은 제조사에 의해 제공되며, 다음과 같이 정의된다.



(a) 1개의 능동계이지



(b) 추가된 더미계이지

그림 2. 쿼터 브리지 (Khan and Wang, 2001).

$$G_f = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (10)$$

이제 게이지 계수  $G_f$ 에 관한 식 (10)을 출력전압  $\Delta E$ 에 관한 식 (9)에 대입하면 원하는 변형률  $\epsilon$ 을 계산하는 식을 얻는다.

$$\epsilon = \frac{(1+m)^2 \Delta E}{m V G_f} \quad (11)$$

한편, 이 쿼터 브리지의 감도  $S_W$ 는 앞의 식 (8)의 정의에 따라 다음과 같이 된다.

$$S_W = \frac{\Delta E}{\epsilon} = \frac{m V G_f}{(1+m)^2} \quad (12)$$

### 3.2 온도 영향을 고려하는 경우

쿼터 브리지의 또 다른 구성방식으로 그림 2(b)와 같이 더미 변형률 게이지(dummy strain gage)  $R_d$ 를 부착하여 사용할 수도 있다. 예를 들어, 능동게이지에 대응하여 추가로 부착한 더미게이지는 온도의 영향 등에 의해 시편에 추가적인 변형이 예상될 때 사용하는 것으로 능동게이지의 측정값 중에서 온도영향 부분을 상쇄시켜 오직 가중하중에 의한 변형률만 구하도록 하는 역할을 한다.

예를 들어, 온도의 영향을 받은 경우에는 능동게이지의 저항 변화량은 온도 영향에 의한 저항 변화량  $\Delta R_T$ 가 추가되어  $(\Delta R_g + \Delta R_T)$ 가 된다. 더미게이지는 시편에 부착한 것이 아니므로 (더미게이지는 시편과 같은 재질의 다른 조각에 붙여 시편 가까이에 둠) 그 저항의 변화량은 온도 영향에 따른  $\Delta R_T$ 만 있다. 시험에 사용하는 변형률 게이지는  $R_g = R_d$ 로 동일한 규격의 게이지를 사용한다.

따라서 식 (7)에서  $R_1 = R_g$ ,  $R_2 = R_d$ ,  $\Delta R_1 = \Delta R_g + \Delta R_T$ ,  $\Delta R_2 = \Delta R_T$ ,  $\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$ 을 대입하고,  $R_g = R_d$ 로 놓으면 온도 영향 부분( $\Delta R_T/R_g$ )은 서로 상쇄되어 없어지고 오직 주된 변형에 의한 부분인  $\Delta R_g/R_g$ 만 남게 되어 결국은 이 쿼터 브리지의 출력전압도 식 (9)의 경우와 같아진다.

## 4. 하프 브리지

### 4.1 굽힘의 영향을 고려하지 않는 경우

그림 3(a)는 환봉 모양의 시편에 축방향으로 변형률 게이지  $R_a$ 를 붙이고, 횡방향으로 변형률 게이지  $R_t$ 를 붙인 인장시험 모식도이다. 단, 이 시험에서는 봉에 순수하게 인장만 일어나고 굽힘(bending)은 일어나지 않는다고 가정한다. 이런 경우에는 그림 3(b)에 보인 바와 같이 능동게이지를 2개 ( $R_a$ 와  $R_t$ ) 쓰는 하프 브리지(half bridge)를 구축할 수 있다. 시험에 사용하는 변형률 게이지는  $R_a = R_t$ 로 동일한 규격의 게이지를 사용한다. 하프 브리지는 기본적으로 능동게이지를 2

개 붙이므로 쿼터 브리지에 비해 온도보상(상쇄) 효과가 있으며, 감도가 향상되는 효과도 있다.

그림 3의 일축인장시험에서 시편의 변형률  $\epsilon$ 은 다음과 같이 구한다. 즉, 앞의 휘트스톤 브리지에 대한 지배방정식 (7)에서  $R_1 = R_4 = R_a$ 를 대입하고,  $\Delta R_2 = \Delta R_3 = 0$ 로 놓는다. 인장시험에서 축방향 게이지의 저항이  $\Delta R_1 = \Delta R_a$ 만큼 증가하면 횡방향 게이지의 저항은  $\Delta R_4 = -\nu\Delta R_a$ (단,  $\nu$ 는 포아송비)만큼 증가한다. 따라서 하프 브리지의 출력전압  $\Delta E$ 은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{mV}{(1+m)^2} \left( \frac{\Delta R_a}{R_a} - \frac{-\nu\Delta R_a}{R_a} \right) \\ &= \frac{(1+\nu)mV}{(1+m)^2} \left( \frac{\Delta R_a}{R_a} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

식 (10)의 게이지 계수  $G_f$ 에 대한 정의를 사용하면 식 (13)에서  $\Delta R_a/R_a = G_f\epsilon$ 이므로 구하고자 하는 변

형률  $\epsilon$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon = \frac{(1+m)^2\Delta E}{(1+\nu)mVG_f} \quad (14)$$

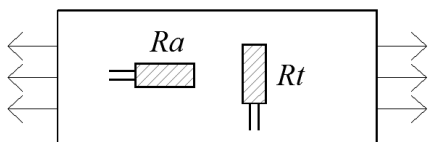
단, 식 (14)에서 저항비  $m = R_2/R_a$ 이다.

한편, 이 하프 브리지의 감도  $S_W$ 는 앞의 식 (8)의 정의에 따라 다음과 같이 된다.

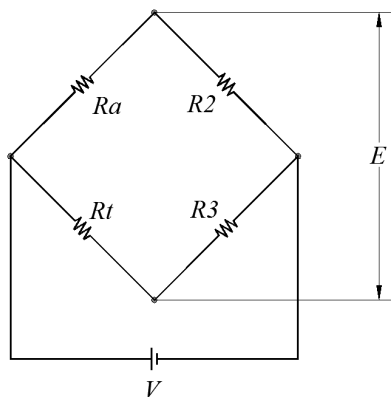
$$S_W = \frac{\Delta E}{\epsilon} = \frac{(1+\nu)mVG_f}{(1+m)^2} \quad (15)$$

#### 4.2 굽힘의 영향을 고려하는 경우

그림 4(a)는 환봉 모양의 시편에 축방향으로 변형률 게이지 A( $R_A$ )를 붙이고, 횡방향으로 변형률 게이지 B( $R_B$ )를 붙이며, 봉의 반대편에도 대칭으로 각각 변형률 게이지 C( $R_C$ ) 및 D( $R_D$ )를 붙인 실험 모식도이다. 이 인장시험에서는 봉에 축방향 인장뿐만 아니라 굽힘도 일어날 수 있다고 가정하고 있다. 이런 경우에

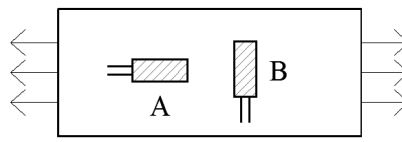


(a) 2개의 능동게이지

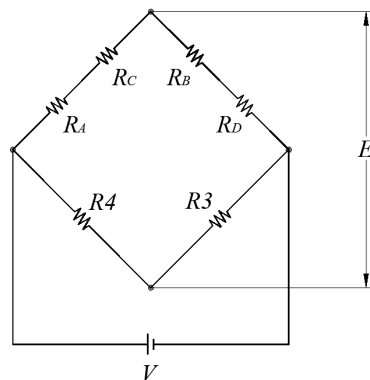


(b) 하프 브리지 회로

그림 3. 일축인장시험을 위한 하프 브리지의 구성 예1 (Khan and Wang, 2001).



(C) (D)  
(a) 4개의 능동게이지



(b) 하프 브리지 회로

그림 4. 일축인장시험을 위한 하프 브리지의 구성 예2 (Khan and Wang, 2001).

는 굽힘에 의한 변형률이 상쇄될 수 있도록 그림 4(b)에 보인 바와 같이 브리지의 두 분지에 능동게이지를 2개씩 쓰는 하프 브리지를 구성한다. 이 시험에서는 변형률 게이지의 저항값이  $R_A = R_B = R_C = R_D$ 로 모두 동일한 게이지를 사용한다. 하프 브리지는 기본적으로 능동게이지가 2개 이상 붙으므로 쿼터 브리지에 비해 온도보상(상쇄) 효과가 있으며, 감도가 향상되는 효과도 있다.

그림 4의 일축인장시험에서 시편의 변형률  $\epsilon$ 은 다음과 같이 구한다. 즉, 앞의 휘트스톤 브리지에 대한 지배방정식 (7)에서  $R_1 = R_A + R_C$ 와  $R_2 = R_B + R_D$ 를 대입하고,  $\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$ 로 놓는다. 또한,  $\Delta R_1 = \Delta R_A + \Delta R_C$  및  $\Delta R_2 = \Delta R_B + \Delta R_D$ 를 대입하면 이 하프 브리지의 출력전압  $\Delta E$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{mV}{(1+m)^2} \left( \frac{\Delta R_A + \Delta R_C}{R_A + R_C} - \frac{\Delta R_B + \Delta R_D}{R_B + R_D} \right) \\ &= \frac{mV}{(1+m)^2} \left( \frac{2\Delta R_A}{2R_A} - \frac{2\Delta R_B}{2R_B} \right) \end{aligned} \quad (16a)$$

굽힘에 의한 변형률의 경우, 게이지 A에 인장이 걸린다면 반대편에 있는 게이지 C에는 압축이 걸리므로 이들은 서로 상쇄된다. 그리고 게이지 B는 횡방향으로 설치되어 있으므로 앞에서와 마찬가지로, 게이지 A에  $\Delta R_A$ 의 저항변화가 생기면 게이지 B에는  $\Delta R_B = -\nu\Delta R_A$ 의 저항변화가 생기므로 이들을 위 식 (16a)에 대입하고,  $R_B = R_A$ 를 이용하면 하프 브리지의 출력전압  $\Delta E$ 는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{mV}{(1+m)^2} \left( \frac{\Delta R_A}{R_A} - \frac{-\nu\Delta R_A}{R_A} \right) \\ &= \frac{(1+\nu)mV}{(1+m)^2} \left( \frac{\Delta R_A}{R_A} \right) \end{aligned} \quad (16b)$$

그런데 이 브리지의 경우, 저항비  $m = (R_B + R_D)/(R_A + R_C) = 1$ 이므로 이 값을 식 (16b)에 대입하면 최종적으로 이 하프 브리지의 출력전압  $\Delta E$ 는 다음과 같이 된다.

$$\Delta E = \frac{(1+\nu)V}{4} \left( \frac{\Delta R_A}{R_A} \right) \quad (16c)$$

식 (10)의 게이지 계수  $G_f$ 에 대한 정의를 사용하면 식 (16c)에서  $\Delta R_A/R_A = G_f\epsilon$ 이므로 구하고자 하는 변형률  $\epsilon$ 은 다음과 같이 계산된다.

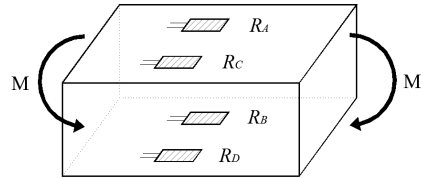
$$\epsilon = \frac{4\Delta E}{(1+\nu)VG_f} \quad (17)$$

한편, 이 하프 브리지의 감도  $S_W$ 는 앞의 식 (8)의 정의에 따라 다음과 같이 된다.

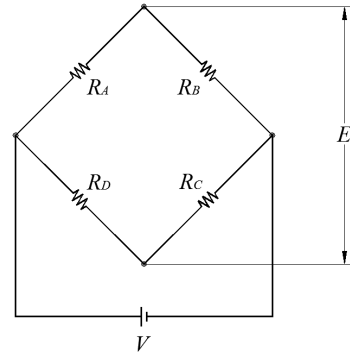
$$S_W = \frac{\Delta E}{\epsilon} = \frac{(1+\nu)VG_f}{4} \quad (18)$$

## 5. 풀 브리지

그림 5(a)는 각봉 모양의 시편의 윗면과 아랫면에 각각 2개씩의 변형률 게이지를 붙이고 순수굽힘 시험



(a) 4개의 능동게이지



(b) 풀 브리지 회로

그림 5. 굽힘시험을 위한 풀 브리지의 구성 (Khan and Wang, 2001).

을 실시하여 굽힘변형률\_bending strain을 측정하는 실험 모식도이다. 이런 방식의 브리지 회로는 로드셀(load cell)에 많이 사용된다. 이 실험을 위한 브리지의 구성은 그림 5(b)와 같이 각 분지별로 하나씩의 능동게이지를 사용하는 풀 브리지(full bridge)이다. 풀 브리지는 회로의 효율이 가장 좋은 브리지이며, 4개의 게이지를 동시에 사용하므로 온도 보상(상쇄)은 자동으로 이루어진다. 감도도 쿼터 브리지에 비해 2배까지 좋아질 수 있다(Khan and Wang, 2001). 시험에 사용하는 변형률 게이지는 저항값이  $R_A = R_B = R_C = R_D = R$ 로 모두 동일한 게이지를 사용한다.

그림 5의 굽힘시험에서 시편의 굽힘변형률(수직변형률)  $\epsilon$ 은 다음과 같이 구한다. 즉, 시편의 상부에 설치한 두 게이지는 인장 변형하고, 하부에 설치한 두 게이지는 압축 변형하므로 앞의 휘트스톤 브리지에 대한 지배방정식 (7)에서  $\Delta R_1 = \Delta R_3 = +\Delta R$ 로,  $\Delta R_2 = \Delta R_4 = -\Delta R$ 로 설정하고,  $R_1, R_2, R_3, R_4$ 는 모두  $R$ 로 놓는다. 그러면 이 풀 브리지의 출력전압  $\Delta E$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{mV}{(1+m)^2} \left( \frac{\Delta R}{R} - \frac{-\Delta R}{R} + \frac{\Delta R}{R} - \frac{-\Delta R}{R} \right) \\ &= \frac{mV}{(1+m)^2} \left( \frac{4\Delta R}{R} \right) \end{aligned} \quad (19a)$$

그런데 이 브리지의 경우, 저항비  $m = R_B/R_A = R/R = 1$ 이므로 이 값을 식 (19a)에 대입하면 이 풀 브리지의 출력전압  $\Delta E$ 는 다음과 같이 된다.

$$\Delta E = V \left( \frac{\Delta R}{R} \right) \quad (19b)$$

식 (10)의 게이지 계수  $G_f$ 에 대한 정의를 사용하면 식 (19b)에서  $\Delta R/R = G_f \epsilon$ 이므로 구하고자 하는 변형률  $\epsilon$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon = \frac{\Delta E}{VG_f} \quad (20)$$

한편, 이 풀 브리지의 감도  $S_W$ 는 앞의 식 (8)의 정

의에 따라 다음과 같이 된다.

$$S_W = \frac{\Delta E}{\epsilon} = VG_f \quad (21)$$

#### 4. 결 언

휘트스톤 브리지는 공학재료에 대한 정적 혹은 동적 시험에서 변형률 게이지의 출력을 기록하는 용도로 많이 사용되고 있다. 특히, 암석 및 발파 분야에서 암석의 정적시험에 많이 사용되는 것은 물론이고, 동적파괴 특성을 측정하는 SHPB 시험장치에서도 입력봉과 출력봉의 변형률을 측정하는 용도로 많이 사용된다. 본고에서는 이처럼 암석의 정적 혹은 동적 시험에서 암석의 변형률을 정밀하게 측정하는 데 많이 사용되는 휘트스톤 브리지의 작동원리를 자세히 살펴보고, 쿼터, 하프 및 풀 브리지의 구성과 특징, 출력전압, 변형률 및 감도 계산식의 유도과정 등을 상술함으로써 동 분야에 관심 있는 실무자들이 쉽게 참고할 수 있도록 하였다.

#### 감사의 말

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요연구사업(과제코드 GP2017-016)의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Floyd, T.L. and D.M. Buchla, 2013. DC/AC Fundamentals: A systems approach, Pearson Education, Inc., pp.236-242.
2. Khan, A.S. and X. Wang, 2001. Strain measurements and stress analysis, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 56-68.
3. Wheatstone, C., 1843. An account of several new instruments and processes for determining the constants of a voltaic circuit, Philos. Trans. R. Soc. (London), 133, 303.

#### 부 록

본 부록에서는 본문의 식 (5)로부터 식 (6)을 유도

하는 과정을 상술했으므로 실무자들이 간편하게 참고할 수 있도록 하였다. 본문의 식 (5)를 편의상 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\Delta E = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} V \quad (5)$$

본문에서도 언급했듯이, 위 식을 전개한 후 미소량  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$ ,  $\Delta R_3$ ,  $\Delta R_4$  사이의 곱의 항은 그 크기가 극히 작으므로 모두 제거하고, 분모에서는 이들 중 하나라도 들어간 항까지 전부 삭제한다. 그러면 식 (5)는 다음과 같이 된다.

$$\Delta E = \left( \frac{R_1 \Delta R_3 - R_2 \Delta R_4 + R_3 \Delta R_1 - R_4 \Delta R_2}{R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_2 R_3 + R_2 R_4} \right) V \quad (A1)$$

이제, 식 (A1)의 우변 괄호 속에는 총 4개의 항목이 들어 있다. 그 중에서 첫 번째 항목을 뽑아내면 다음과 같다.

$$\frac{R_1 \Delta R_3}{R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_2 R_3 + R_2 R_4} \quad (A2)$$

본문에서 휘트스톤 브리지의 초기조건에 관한 식 (4)에 의하면  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 이므로 식 (A2)에서  $R_4 = (R_1/R_2) R_3$ 로 대체한다. 즉,

$$\frac{R_1 \Delta R_3}{R_1 R_3 + R_1 \left( \frac{R_1}{R_2} R_3 \right) + R_2 R_3 + R_2 \left( \frac{R_1}{R_2} R_3 \right)} \quad (A3)$$

식 (A3)의 분모와 분자를 공히  $R_3$ 로 나누면 다음과

같이 된다.

$$\frac{R_1}{R_1 + \frac{R_1^2}{R_2} + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_2}} \cdot \frac{\Delta R_3}{R_3} \quad (A4)$$

식 (A4)의 분모와 분자에 공히  $R_2$ 를 곱하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 R_2 + R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2} \cdot \frac{\Delta R_3}{R_3} \quad (A5)$$

완전제곱을 이용하여 식 (A5)를 다시 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot \frac{\Delta R_3}{R_3} \quad (A6)$$

식 (A6)은 본문 중의 출력전압에 관한 식 (6)의 괄호 속 세 번째 항목에 해당함을 알 수 있다.

$$\Delta E = V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (6)$$

마찬가지 방식으로, 식 (A1)의 우변 괄호 속의 두 번째, 세 번째 및 네 번째 항목에서 차례로  $R_3$ ,  $R_2$  및  $R_1$ 을 없애고 변환하면 각각 식 (6)의 우변 괄호 속의 네 번째, 첫 번째 및 두 번째 항목에 해당하는 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이와 같은 과정을 거치면 본문의 식 (5)는 식 (6)으로 완전하게 변환된다.





**최 병 희**

한국지질자원연구원 책임연구원

Tel: 042-868-3237  
E-mail: bhchoi@kigam.re.kr



**류 창 하**

한국지질자원연구원 책임연구원

Tel: 042-868-3236  
E-mail: cryu@kigam.re.kr