

스트레인 게이지 계측용 차동 증폭기와 A/D 변환기를 이용한 트러스 구조물의 내력 측정 장치 설계

Design of Load and Strain Measuring Equipment Using Strain Gage, Instrumental Differential Amplifier and A/D Converter in a Truss System

백태현*†, 이병희*

Tae Hyun Baik*† and Byung Hee Lee*

초 록 트러스는 교량이나 건축물 설계 등에 많이 사용되는 구조물로서 기본적인 설계요소이며, 설계자는 이러한 구조물의 원리를 완전히 이해하여 설계에 적용할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 트러스 구조물의 힘을 기본역학에서 예측되는 오차범위 이내로 실험법으로 측정할 수 있는 기구설계 방법을 제시하였다. 상용으로 제작된 재래식 변형률 측정 장치는 고가이고 복잡하므로 구조를 이해하기가 어려우므로 본 측정기구에서는 휘트스톤브리지 회로를 적용, 스트레인 게이지 및 A/D 변환기 조립하여 하중과 변형률을 쉽게 측정할 수 있도록 하였다. 제작된 기구를 이용하여 구조물에 하중을 가하여 변형률을 측정하였으며, 측정결과를 이론적으로 예측한 값과 비교하여 실용성을 입증하였다. 이 측정 기구는 저렴한 값으로 제작할 수 있으며, 크기가 작아 탁상에서 교육용 실험 및 실습 장비로 적합할 것으로 사료된다.

주요용어: 스트레인 게이지, 변형률 측정, 휘트스톤 브리지, A/D 변환기, 트러스 구조물

Abstract Trusses are found in many common structures such as bridges and buildings. The truss is a fundamental design element in engineering structures and it is important for an engineer to apply the truss design to engineering structures by understanding the mechanics of truss element. In an experimental course, the experiment serves as an example of the usefulness of the Wheatstone bridge in amplifying the output of a transducer. With the apparatus described here, it is possible to obtain experimental measurements of forces in a truss member which agree within errors to predictions from elementary mechanics. The apparatus is inexpensive, easy to operate, and suitable as either a classroom demonstration or student laboratory experiment. This device is a small table-top experiment. The conventional strain measuring device is costly and complicated - it is not simple to understand its structure. Hence, strain gage and the A/D converter are assembled to come up with a load and a strain measuring device. The device was tested for measuring the strain in a loaded specimen and the results were compared to those predicted by theory of mechanics.

Keywords: Strain Gage, Strain Measurement, Wheatstone Bridge, A/D Converter, Truss

1. 서 론

기계요소나 구조물에 하중이 작용할 때 재료를 파괴하지 않고 하중에 의한 변형을 측정하는 방법

은 기계부품이나 구조물에서 실제의 응력 상태를 나타내는 스트레인 게이지법[1-3], 광탄성법[1,4,5], 유한요소해석 프로그램[6] 등을 사용하는 수치해석 방법들이 있다.

트러스는 여러 가지 구조물의 기본이 되는 요소이다[7]. 한편으로 스트레인 게이지는 저항특성을 갖는 금속에 외력이 인가되면 금속에 변형이 발생하고 발생한 변형에 비례하여 저항이 변하는 소자이므로, 트러스 구성요소 중 하중에 의한 변형이나 내력을 측정하고자 하는 위치에 스트레인 게이지를 부착하고 트러스 구조물에 발생하는 변형을 측정하는 방법 역시 비파괴 측정의 방법으로 활용할 수 있다.

스트레인 게이지를 이용한 변형률 측정장치로 상용의 스트레인 인디케이터(strain indicator)를 사용하지만, 고가의 장비이고 측정과정에 여러 단계의 복잡한 조작을 하는 기능을 이해하기가 어려우므로 간단한 장치의 설계, 제작에 응용하기가 곤란하다.

본 연구에서는 스트레인 게이지, 제측용 차동증폭기(IDA: instrumental differential amplifier), A/D 변환기(A/D converter)와 LED 표시장치(LED display)를 이용하여 트러스 구조물의 변형률 또는 하중의 크기를 가장 간단한 방법으로 직접 판독할 수 있는 장치를 구성하고 그 결과를 역학계산에 의한 예측값과 비교하여 장치의 유효성을 확인하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 스트레인 게이지 저항과 변형률

단면적이 A , 길이가 L 인 재료에 인장 또는 압축하중 P 가 작용될 경우, 하중에 의해 응력(stress: σ)과 변위가 발생한다. 단축응력(uni-axial stress)일 경우, 탄성한계 이내에서 응력(σ)은 변형률(ϵ)과 $\sigma = E\epsilon$ (E : 영탄성계수)의 관계로 비례한다. 이 경우 재료의 길이가 $(L + \Delta L)$ 또는 $(L - \Delta L)$ 로 늘어나거나 줄어들면 변형률(strain) ϵ 은

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

이다. 식 (1)에서 L 은 재료의 원래 길이이고, ΔL 은 작용 하중에 의해 변화된 길이에서 원래 길이를 뺀 차이 값이다.

변형률과 저항 변화량의 관계는 아래의 식 (2)와 같은 관계이며, 하중 P 에 의한 변형률이 저항변화율에 비례함을 알 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R/R}{G_f}, \quad \epsilon G_f = \frac{\Delta R}{R} \quad (2)$$

위의 식에서 R 은 평형상태 때 스트레인 게이지의 저항, ΔR 은 변형에 의한 저항의 변화량, G_f 는 게이지계수(gage factor)이다.

2.2. 휘트스톤 브리지 저항 변화율에 의한 전압 변환

재료에 하중이 작용하면 변형이 발생하고, 이에 의한 변형률은 저항 변화율에 비례한다. 스트레인 게이지를 사용하여 변형률을 측정할 경우, 대부분 측정하고자 하는 변형률에 의한 저항의 변화량은 비교적 적은 값이다. 휘트스톤 브리지(Wheatstone bridge)는 전기적 계측법에서 미소저항 측정을 위한 회로뿐만 아니라 스트레인 게이지가 가진 온도 변화의 보상도 가능하다. 휘트스톤 브리지는 저항 측정을 위하여 저항으로 구성된 회로이며 이 자체에서는 전력이 발생하지 않는다. 따라서 이 회로에 대해서는 전원과 출력을 검출하는 측정기를 필요로 한다.

Fig. 1은 휘트스톤 브리지의 기본 회로를 나타낸다.

Fig. 1에서 R_1 , R_2 , R_3 및 R_4 는 하중이 가해진 기 전 평형상태에서 스트레인 게이지의 저항값을 나타낸다. Fig. 1의 휘트스톤브리지 회로의 A-C 양단에 전원전압 V 를 인가하면 B-D 양단에서는 아래의 식과 같이 스트레인 게이지의 저항 변화율에 비례한 직류전압이 나타난다. 즉, 하중이 가해진 후 B점의 전압을 V_B , D점의 전압을 V_D 라고 하면, 브리지의 출력전압 ΔV_o 는

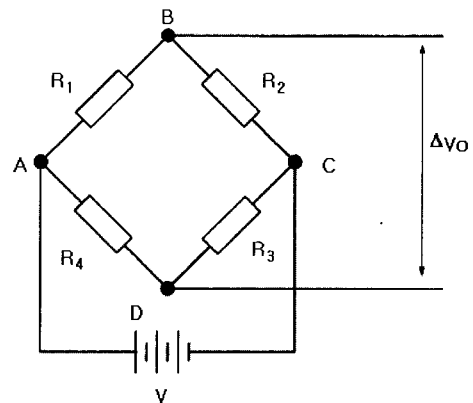


Fig. 1 Diagram for basic Wheatstone bridge

$$\begin{aligned}
 V_o &= V_B - V_D \\
 &= \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V \\
 &= \left(\frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right) V \quad (3)
 \end{aligned}$$

식(3)에서 브리지가 평형상태일 경우 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 이고, 하중에 의해 재료에 변형이 발생할 때 스트레인 게이지의 저항값이 각각 $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3$ 및 ΔR_4 만큼 변화된다. 실제로 $R \gg \Delta R$ 이므로 고차항을 생략하면 V_o 는 식 (4) 와 같이 정리될 수 있다.

$$\Delta V_o = \frac{V}{4R} (\Delta R_2 - \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_4) \quad (4)$$

2.3. 브리지 종류와 오차 요인 보상

스트레인 게이지를 이용한 브리지 종류는 브리지 네 변 중 한 변에만 액티브(active) 스트레인 게이지를 사용하는 1/4-브리지(quarter bridge), 두 변에 액티브 스트레인(active strain) 게이지를 사용하는 1/2-브리지(half bridge), 그리고 네 변 모두 액티브 스트레인 게이지를 사용하는 전브리지(full bridge)로 구분한다.

또 스트레인 게이지를 이용한 브리지에서 나타날 수 있는 오차의 종류로는 각 변의 저항값 온도특성의 차이에 의해 발생하는 오차와 긴 리드선(lead wire)에 의해 아래의 식 (5)와 같은 크기로 발생하는 오차(e)가 있다[8].

$$e = \frac{1}{1 + 2R_L/R} \quad (5)$$

식 (5)에서 R_L 은 리드선의 저항값이다. 네 변 모두 액티브 스트레인 게이지를 사용하는 전브리지로 구성하면 이러한 리드선에 의한 오차와 온도특성에 의한 오차를 보상할 수 있으므로 본 연구에서는 Fig 2와 같이 스트레인 게이지를 시편에

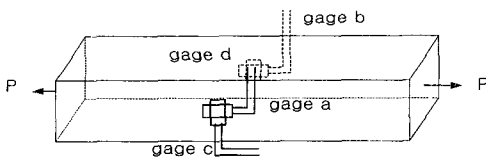


Fig. 2 Locations of 4 strain gages attached to the specimen

부착하고 전 푸와송 브리지(full Poisson bridge)를 구성하였다.

시편의 푸와송비(Poisson's ratio)를 μ 라 하면, 길이방향(axial direction)의 변형률은 $\epsilon_a = \epsilon$, 가로(transverse) 방향의 변형률은 $\epsilon_t = -\mu\epsilon$ 이므로 식 (2)로부터 Fig. 2의 스트레인 게이지 a, b와 c, d에 대해서는 각각 아래의 식 (6)과 (7)로 정리된다.

$$\frac{\Delta R_a}{R_a} = \frac{\Delta R_b}{R_b} = \epsilon G_f \quad (6)$$

$$\frac{\Delta R_c}{R_c} = \frac{\Delta R_d}{R_d} = -\mu\epsilon G_f \quad (7)$$

식 (6)과 (7)을 식 (4)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned}
 \Delta V_o &= \frac{V}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \\
 &= \frac{V}{2} (1 + \mu) \epsilon G_f \quad (8)
 \end{aligned}$$

이고, 금속재료에 따라 푸와송비(Poisson's ratio: μ)가 일정하고 사용하는 스트레인 게이지의 게이지계수(G_f)가 결정되므로 식 (8)에서 브리지의 출력전압 ΔV_o 는 변형률(strain) ϵ 에 정비례함을 알 수 있다. 위의 관계로부터 전 푸와송브리지 감도를 S_F 라고 하면 식 (9)로 정리된다.

$$S_F = \frac{\Delta V_o}{\epsilon} = \frac{V}{2} (1 + \mu) G_f \quad (9)$$

2.4. 표시값의 변환

단축하중을 받는 부재의 응력(σ)과 변형률(ϵ)의 관계로부터 훅크의 법칙(Hook's law)이 적용되며 다음 식과 같다.

$$\sigma = E\epsilon = \frac{4}{G_f} V_o \quad (10)$$

또한, 하중(P)과 응력(σ)의 관계로부터

$$P = \sigma A = \frac{4}{G_f} A V_o \quad (11)$$

가 되므로 회로에서 증폭기의 이득을 조절하면 하중 또는 변형률을 직접 관측할 수 있다. 식 (11)에서 A 는 부재 또는 시편의 단면적이다.

2.5. 트러스 구조 해석

Fig. 3은 트러스 구조물의 각 요소가 정적 평형 상태를 나타낸다. 조인트 ①에 힘 F 가 작용되고, 조인트 ③은 고정점이며 ②점은 핀힌지로 하중에 의해 x 방향으로 슬라이딩하는 구조이다. 트러스 각도가 $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$ 일 경우, 각 조인트에 대한 자유물체도로부터 다음 관계식을 얻을 수 있다.

각각의 트러스 부재가 z 방향으로 평형이 잘 이루어지고, 자체 무게는 무시한다면, 힘의 평형조건으로부터

조인트 ①에서

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0; F_A \cos 60^\circ - F_C = 0 \\ \Sigma F_y &= 0; R_{2y} - F_A \sin 60^\circ = 0 \end{aligned} \tag{12a}$$

조인트 ②에서

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0; R_{3x} - F_B \cos 60^\circ + F_C = 0 \\ \Sigma F_y &= 0; R_{3y} - F_B \sin 60^\circ = 0 \end{aligned} \tag{12b}$$

조인트 ③에서

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0; F_B \cos 60^\circ - F_A \cos 60^\circ = 0 \\ \Sigma F_y &= 0; F_A \sin 60^\circ + F_B \sin 60^\circ - F = 0 \end{aligned} \tag{12c}$$

위의 관계로부터 하중 F 에 의해 C 요소의 x 방향의 힘 F_C 를 식 (12a)-(12c)로부터 계산하면 식 (13)과 같다.

$$F_C = \frac{F \cos 60^\circ}{2 \sin 60^\circ} = 0.2287 F \tag{13}$$

즉, 부재 C 에서의 이론적인 수평방향 힘은 $0.2287 F$ 과 같다.

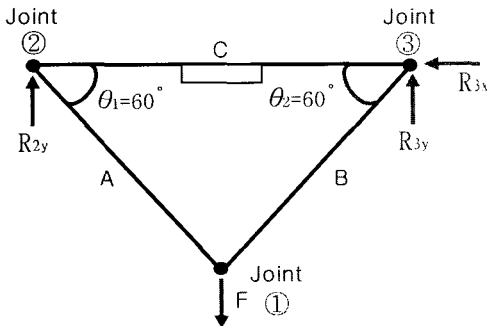


Fig. 3 Free body diagram of triangular truss system

3. 계측용 차동 증폭기(IDA)와 A/D 변환기를 이용한 하중 측정 장치

3.1. 스트레인 게이지

이 연구에 사용한 스트레인 게이지는 Measuring Instrument사의 T형 Rosette로 주요 제원은 아래의 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of strain gage used in the experiment

Description	Unit	Specification
Gage Length	mm	5
Resistance	Ω	$350.0 \pm 0.3 \%$
Gage Factor(G_f)	-	$2.13 \pm 1 \%$
Thermal Output	-	$\pm 2 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$

3.2. 계측용 차동 증폭기(IDA)

휘트스톤 브리지의 아날로그 출력전압을 디지털 멀티미터로 측정하여 식 (9)에서와 같이 $\frac{V}{2}(1+\mu)G_f$ 를 곱하면 변형률 ϵ 을 환산할 수 있다. 그러나 LED 디스플레이로 측정값을 읽어내기에는 그 값이 대단히 적기 때문에 A/D 변환기의 앞단에 이득(gain)이 높은 계측용 차동증폭기(IDA: instrumentation differential amplifier)를 이용하면 LED 디스플레이로 측정값을 직접 읽어낼 수 있다 [8,9].

보편적으로 적용하는 계측용 차동증폭기는 Fig. 4와 같이 3개의 연산증폭기(operational amplifier)로 구성된다.

Fig. 4에서 증폭기 A_1 과 A_2 는 입력저항이 모두 R_C 이고 귀환저항이 각각 R_1 과 R_2 인 비반전증폭기이고 증폭기 A_3 는 차동증폭기이다. 따라서 각

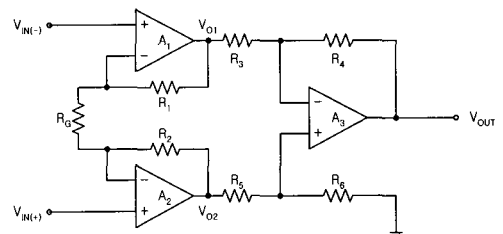


Fig. 4 Instrumentation differential amplifier circuit diagram using 3 op. amp.

증폭기의 입출력관계는 아래의 식과 같이 정리된다.

$V_{IN(+)}=0$ 일 때

$$\begin{aligned} V_{O1} &= V_{IN(-)} \left(\frac{R_1 + R_G}{R_G} \right) \\ V_{O2} &= V_{IN(-)} \left(\frac{R_2}{R_G} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

$V_{IN(-)}=0$ 일 때

$$\begin{aligned} V_{O1} &= V_{IN(+)} \left(\frac{R_1}{R_G} \right) \\ V_{O2} &= V_{IN(+)} \left(\frac{R_2 + R_G}{R_G} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

이므로 식 (14)와 (15)에서

$$\begin{aligned} V_{O1} &= V_{IN(-)} \left(\frac{R_1 + R_G}{R_G} \right) - V_{IN(+)} \left(\frac{R_1}{R_G} \right) \\ V_{O2} &= V_{IN(+)} \left(\frac{R_2 + R_G}{R_G} \right) - V_{IN(-)} \left(\frac{R_2}{R_G} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

이고 계측용 차동증폭기의 최종 출력전압 V_{out} 은

$$V_{out} = -\frac{R_4}{R_3} V_{O1} + \left(\frac{R_6}{R_5 + R_6} \right) \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) V_{O2} \quad (17)$$

이다. 식 (16)과 (17)에서 $R_1 = R_2$, $R_3 = R_5$ 그리고 $R_4 = R_6$ 로 정하면

$$V_{out} = \frac{R_4}{R_3} (V_{O2} - V_{O1}) \quad (18)$$

이 된다. 그리고, 식 (14)를 식(18)에 대입하여 정리하면 아래의 식 (19)와 같이 각 증폭기의 외부에 접속한 저항만으로 이득이 결정되는 계측용 차동증폭기가 된다. 즉,

$$V_{out} = \frac{R_4}{R_3} \left(\frac{2R_1}{R_G} + 1 \right) (V_{IN(+)} - V_{IN(-)}) \quad (19)$$

이 된다. 이 연구에서 사용한 Analog Devices사의 계측용 차동증폭기 부품번호 AD620에서 $R_3 = R_4$ 이고 $R_1 = 24.7k\Omega$ 이므로 출력전압은 다음 식과 같다.

$$V_{out} = \left(\frac{49400}{R_G} + 1 \right) (V_{IN(+)} - V_{IN(-)}) \quad (20)$$

실제 회로구성에서는 $47\Omega < R_G < 5047\Omega$ 의 범위에서 가변될 수 있도록 설계하여, 이득이 $10.8\Omega < R_G < 1050\Omega$ 범위가 되도록 조정하였다.

3.3. A/D 변환기

차동증폭기에서 증폭된 아날로그 전압을 LED 디스플레이에 표시하기 위해 Intersil사의 $3\frac{1}{2}$ 디지털 A/D 변환기인 IC L7107을 이용하고, 최대눈금편위는 ± 199 mV로 설정하였다[10,11].

3.4 휘트스톤 브리지 출력의 0점 조절

휘트스톤 브리지에 하중이 인가되지 않는 평형상태에서 출력전압이 정확히 $\Delta V_0 = 0$ 이 되어야 한다. 그러나 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 가 모두 350.0 Ω 의 조건을 정확히 만족하지 못할 경우에는 하중이 인가되지 않은 상태에서도 브리지의 불평형에 의한 미소전압이 출력되어 계측오차가 발생할 수 있다. 특히 브리지의 출력전압이 인가된 하중 또는 변형률과 정확히 비례하지 않은 결과가 나타나기 때문에 평형상태에서 0점 조절은 장치의 유효성을 검증하는데 중요한 사항이 된다.

1/4 브리지나 1/2 브리지의 경우 스트레인 게이지에 병렬 또는 직렬저항을 접속하여 0점 조절을 하는 방법이 있다. 본 연구에서는 전 브리지(full bridge) 방식인 Fig 5와 같이 회로를 구성하고, 가변저항을 이용하여 브리지의 각 변에 흐르는 전류량의 크기를 조절하는 방법으로 평형상태때 브리지의 출력전압이 0이 되도록 구성하였다.

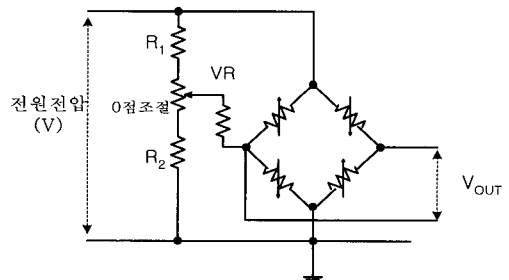


Fig. 5 Diagram of null balance circuit for full bridge

3.5. 변형률 측정 장치의 블록 다이어그램

위에서 기술된 내용을 종합하여 스트레인 게이지, 전 푸와송 브리지(full Poisson bridge), 계측용 차동증폭기(IDA) 및 A/D 변환기를 이용한 변형률 측정장치의 블록 다이어그램을 Fig. 6과 같이 구성하였다.

4. 실험

4.1. 시험편 형상

이 실험에서 트러스 시스템의 구성요소 중 변형

률을 측정하기 위해 스트레인 게이지가 부착된 부재 시험편의 형상은 Fig. 7과 같다. 시험편의 재질은 알루미늄이며, 두께는 3.175 mm이다.

4.2 실험 및 결과

실험은 Fig. 8과 같은 트러스장치에 시험편을 고정시키고 여러 하중에 따른 시험 하중(Fig. 3에서 부재 C의 내력 F_C)의 표시 값을 제작된 내력측정 지시계로 힘을 측정하였다.

측정된 결과는 Table 2에 나타냈다. Table 2에서 F_C 는 식 (13)에 의해 계산된 값이며 F_{JC} 는 본 연구에서 제작한 트러스시스템과 지시계로 측정된 값

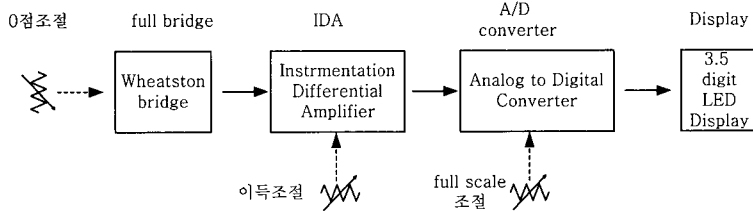


Fig. 6 Block diagram of load and strain measuring equipment using full bridge, IDA and A/D converter

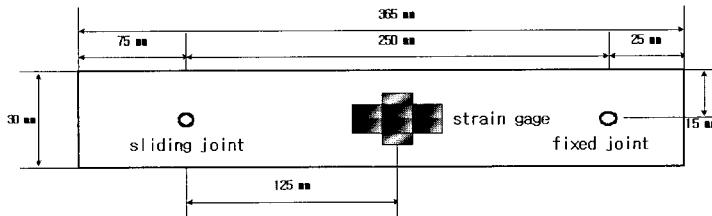
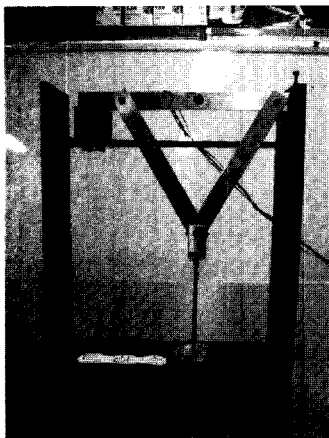
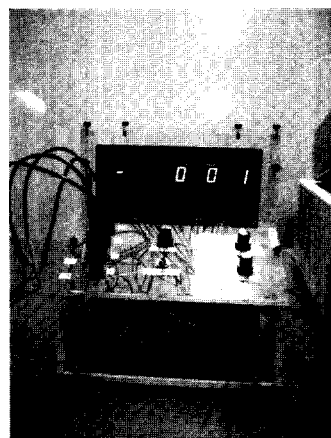


Fig. 7 Geometries of specimen and locations of strain gages



(a) Truss system



(b) Load indicator

Fig. 8 Load measuring instrument

Table 2 Measurements and applied load

하중(kgf)	F_C (kgf)	F_{IC} (kgf)			
		Exp.1	오차%	Exp.2	오차%
1.0	0.2287	0.23	0.57	0.21	-8.18
2.0	0.4574	0.44	-3.80	0.43	-5.99
3.0	0.6861	0.69	0.57	0.67	-2.35
4.0	0.9148	0.90	-1.62	0.91	-0.52
5.0	1.1435	1.06	-7.30	1.11	-2.93
6.0	1.3722	1.31	-4.53	1.28	-6.72
7.0	1.6009	1.58	-1.31	1.58	-1.31
8.0	1.8296	1.79	-2.16	1.81	-1.07

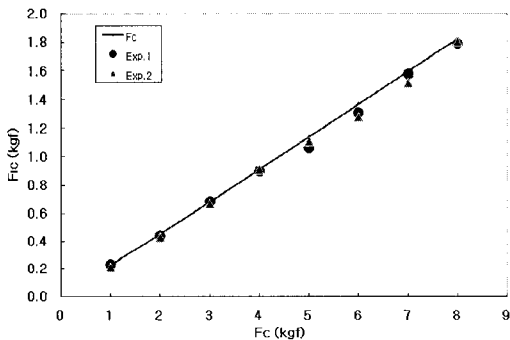


Fig. 9 Comparison of results obtained by load measuring instrument

들이다. 상대오차(%)는 F_C 와 F_{IC} 의 값들로부터 $(F_{IC} - F_C) / F_C \times 100(\%)$ 로 계산한 값들이다.

자시계로 나타난 값들과 식(13)에 의해 계산된 값들을 그래프로 나타내면 Fig. 9와 같다.

Fig. 9의 범례에서 F_C 는 부재 C (Fig. 3)의 내력을 식(13)에 의한 계산한 이론값이고, Exp. 1 및 Exp. 2는 본 연구에서 제작한 트러스하중 지시계로 측정된 두 개의 실험값들이다. 이론값 F_C 와 두 개의 실험값들을 비교해보면 실험오차 범위 이내로 비슷한 측정값을 얻을 수 있었다. 최대오차는 8.2%이다.

4. 결론

본 연구에서는 스트레인 게이지, 계측용 차동 증폭기(IDA: instrumental differential amplifier), A/D 변환기(A/D converter)와 LED 표시장치(LED display)를 이용하여 트러스 구조물의 변형을 또는

하중의 크기를 가장 간단한 방법으로 직접 판독할 수 있는 장치를 구성하고 그 결과를 역학계산에 의한 예측값과 비교하였다.

계측용 차동증폭기(IDA)의 이득을 조절하는 하중을 측정된 결과, 기초 역학에 의한 계산값과 실험오차 범위 이내로 비슷한 측정값을 얻었다. 최대 오차는 8.2%이다. 이 오차는 트러스 구조물의 자체 하중, 슬라이딩 부분의 마찰력 등에 의해 발생된 것으로 추정된다.

본 연구로부터 얻은 결과를 활용하면 트러스 구조물 부재의 내력측정 장비를 저렴한 비용으로 제작이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2008년도 군산대학교 교수장기혜의연수경비의 지원에 의하여 연구되었음. 본 연구에서 회로설계 및 하중지시계 제작은 군장대학 양민복교수의 협조로 이루어졌으며, 이에 감사드린다.

참고문헌

- [1] J. W. Dally and W. F. Riley, Experimental Stress Analysis, 3rd Ed., McGraw-Hill, Inc., pp. 164-261, (1991)
- [2] A. S. Khan and X Wang, Strain Measurements and Stress Analysis, Prentice Hall, pp. 30-93, (2001)
- [3] 한응교, 고준빈, 스트레인 게이지를 위한 계측 방법, 도서출판 인터비전, (2001)
- [4] 백태현, "정밀응력 측정을 위한 광탄성프린지 해석법", 한국정밀공학회지, 제24권, 제3호, pp. 31-39, (2007)
- [5] T. H. Baek and M. S. Kim, "Computer simulation of photoelastic fringe patterns for stress analysis," Lecture Notes in Computer Science, Issue Volume 3398/2005, Springer-Verlag, pp. 214-221, (2005)
- [6] ABAQUS/Standard, Example Problems Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, USA, <http://abaqus.com>
- [7] 백태현, 유승현, 최영의 공역, 정역학(Statics by S. D. Sheppard and B. H. Tongue), 도서

- 출판 인터뷰, pp. 467-496, (2006)
- [8] C. Kitchin and L. Counts, A Designer's Guide to Instrumental Amplifiers, 3rd ed. Analog Devices, Inc., (2006)
<http://www.analog.com>
- [9] Application Note, AN-244 : A User's Guide to IC Instrumental Amplifiers, Analog Devices, Inc., <http://www.analog.com>
- [10] D. Watson, Application Note, AN-052 : Tips for Using Single Chip $3\frac{1}{2}$ Digit A/D Converters, Intersil,
<http://www.intersil.com/converters>
- [11] Tech Note, TN 507 : Wheatstone Bridge Nonlinearity, Vishay Measurements Group.
<http://www.vishay.com/brands/measurements-group/guide/tn/tn507>