

다이프램 감지부 구조를 갖는 소형
로드셀의 정격출력 계산에 관한 연구

권 영하*, 강 대임*, 주 진원*

(Calculation of rated output in diaphragm type
miniature load cell)

Young Ha Kwon, Dae Im Kang and Jin Won Joo

ABSTRACT

As the miniature load cells have small inner space and sensing elements of which are thin and very sensitive to manufacturing conditions, it is very difficult to predict the rated outputs and control them by using the compensation resistor. The very useful equation has been derived for calculation of theoretical rated outputs for diaphragm type miniature load cells when commercial diaphragm strain gages are used.

Four diaphragm type miniature load cells of which capacities are from 300 N to 1,000 N and outer diameters are 20 mm and 26.5 mm are manufactured. The differences between calculating results and actual ones are less than 5%. According to numerical analysis the decrease of rated outputs caused to main error is examined in existence of loading button.

1. 서론

로드셀은 산업체의 거의 모든 분야에서 응용되고 있으며 종류, 용량, 형태등이 매우 다양하며, 최근

에는 산업의 발달과 함께 높은 정확도를 유지하고 용량이 큰것을 필요하게 되었다. 설치공간의 제약 및 로드셀 자체의 무게가 측정정확도에 큰 영향을 미치는 경우에는 반드시 소형이 요구되며 항공기,

* 한국표준연구소, 힘 연구실

자동차, 타이어등의 힘 분포 측정, 인체 및 로봇의 힘 측정등에는 특히 매우 유용하게 소형 로드셀이 사용된다.

소형화된 로드셀은 기존의 일반 로드셀 기능을 유지하기 위해서 좁은 공간에 많은 양의 내용을 집약시켜야 되기 때문에 문제점들이 발생하게 된다(1).

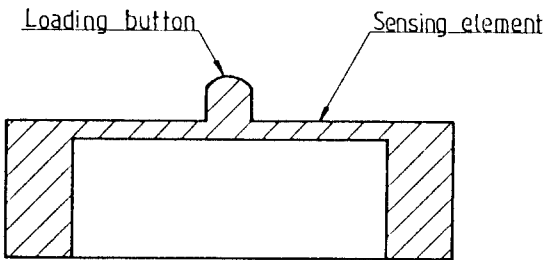


Fig. 1. Shaping of diaphragm type miniature load cell.

그림 1과 같은 소형 로드셀의 경우 정격출력(rated output)을 예상하여 감지부의 두께를 선정하는 것은 쉽지가 않다. 특히 내부공간이 좁은 다이어프램 감지부(sensing element) 구조의 소형 로드셀은 감지부가 얇은 원판이고 원판 두께에 따라 정격출력의 변화가 많이 발생하며 일반 로드셀과는 다르게 보상게이지 등을 이용하여 정격출력을 보정하는 것이 불가능하다.

본 연구에서는 일반적인 다이어프램 스트레인 게이지를 이용할 때 소형 로드셀의 정격출력을 계산하여 예측할 수 있는 유용한 식을 유도하였다. 그리고 실제 0.002%의 정밀정확도를 유지하고 있는 실하중 힘 표준기(deadweight force standard machine)를 이용한 실험값과 이론값을 비교하여 차이점을 분석하였다.

2. 이론해석과 정격출력계산

일정한 특성을 가지는 로드셀을 제작하기 위해서는 이론적인 해석을 하여야 한다. 소형 로드셀은 일반 로드셀에 비해서 크기가 매우 작기 때문에 기본적으로 설계상 많은 차이가 있다. 스트레인 게이지를 이용한 로드셀의 경우 탄성체로 이루어진 감지부의 변형을 정확히 파악하여야만 성능이 우수한 로드셀

제작이 가능하다. 그러므로 다이어프램 감지부 구조의 소형 로드셀의 이론해석을 위해서 다음과 같은 가정을 하였다.

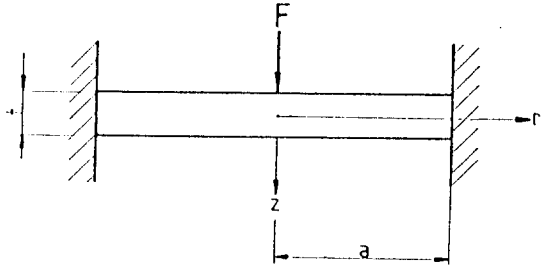


Fig. 2. Loading system with fixed edge for diaphragm type miniature load cell.

감지부를 그림 2와 같이 탄성체 원판으로 가정하고 원판주위를 고정(fixed)하며 힘이 원판 중심에 가해지도록 하였다. 이때 실제로는 하중버튼(loadng button)에 힘이 모여서 감지부에 전달되지만 전체적으로 감지부와 비교해서 하중버튼 크기가 작기 때문에 이론적인 가정에서는 이를 무시하였다. 위와같은 가정일경우 감지부 처짐은 다음과 같은 식이 된다(2).

$$\omega = \frac{Fr^2}{8\pi D} \ell_n \frac{r}{a} + \frac{F}{16\pi D} (a^2 - r^2) \dots\dots\dots (1)$$

이때 ω : 처짐, F : 가해지는 힘, a : 감지부의 반지름이며 D 는 휨 강성계수로서

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \dots\dots\dots (2)$$

로 표현된다. 이때 감지부의 두께는 t 이고 탄성계수와 프와송비는 E 와 ν 이다.

식 1로부터 탄성체 감지부의 반지름방향 변형을 ϵ_r 과 접선방향 변형을 ϵ_θ 를 구하면 다음과 같은 식으로 표현되며 그림 3과 같은 분포를 이루게 된다.

$$\epsilon_r = \frac{3F(1-\nu^2)}{2E\pi t^2} \left(\ell_n \frac{a}{r} - 1 \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{3F(1-\nu^2)}{2E\pi t^2} \ell_n \frac{a}{r} \dots\dots\dots (4)$$

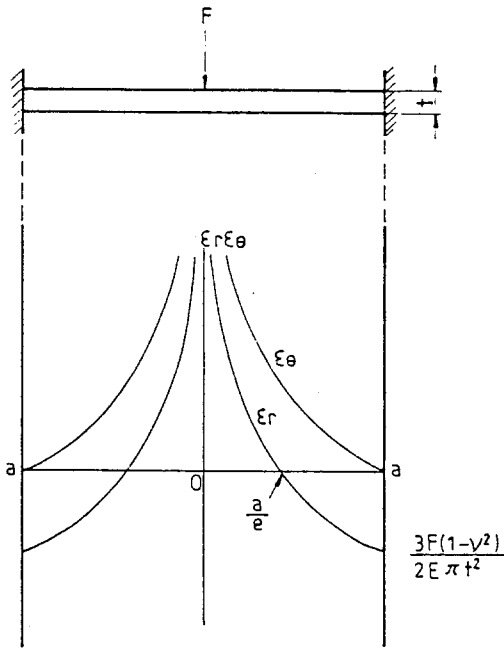


Fig. 3. Strain distribution of circular plate with fixed edge and point force on the center.

그림 3에서 보면 반지름방향 변형률과 접선방향 변형률이 원판 중심에서는 인장으로 작용하며, 원주 주변에서는 접선방향 변형률은 0이 되고 반지름방향 변형률은 압축임을 알 수가 있다.

위와같은 변형률 분포를 나타내고 있는 소형 로드셀의 감지부에서 일반 단축 스트레인 게이지를 부착하여 힘의 크기에 대응하는 변형률을 감지할 경우 로드셀의 정격출력을 예측하기가 어렵다. 그러므로 다이아프램 스트레인 게이지를 이용하는 것이 변형률 감지량이 많고 정격출력 예측이 보다 정확하며 부착이 용이하므로 가장 바람직하다.

소형 로드셀의 회로구성은 일반 로드셀의 경우와 마찬가지로 휘스톤브리지 회로로 그림 4와 같이 하였다. 다이아프램 스트레인 게이지에서 R1, R3는 원 중심 주위에서 접선방향 변형률을 감지하고, R2, R4는 원주 주변에서 반지름방향 변형률을 감지하도록 구성되어 있으므로 그림 5와 같이 회로구성을 하

게 된다.

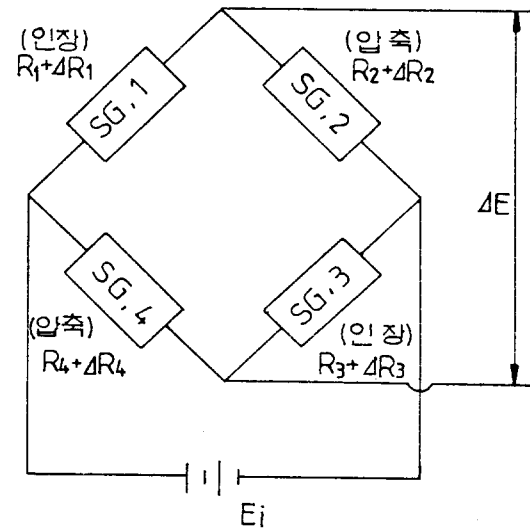


Fig. 4. Wheatstone bridge circuit.

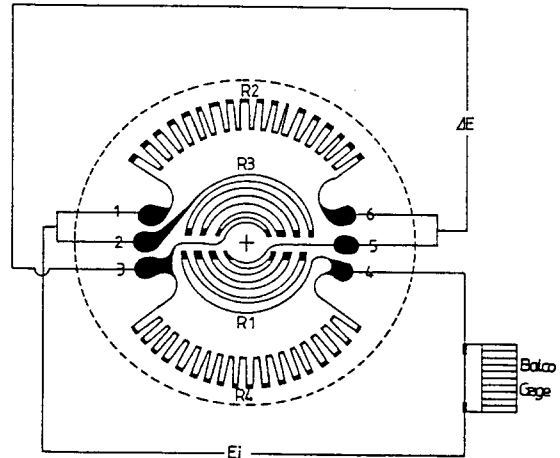


Fig. 5. Bridge circuit of diaphragm strain gage with balco gage.

그림 5와 같은 회로구성을 이루면서 원판 감지부에 부착된 다이아프램 스트레인 게이지에서 감지되는 평균 변형률과 저항과의 관계는 다음과 같다. (3, 4).

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = 2 \epsilon_\theta \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$- \frac{\Delta R_2}{R_2} = - \frac{\Delta R_4}{R_4} = 2 \epsilon_r \quad \dots\dots\dots (6)$$

$\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ 는 힘을 받아 감지부의 변형에 의한 저항변화를 나타내며 스트레인 게이지 고유상수인 게이지 상수는 2로 하였다. 그리고 정격출력 $\frac{\Delta E}{E_i}$ 은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\Delta E}{E_i} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

식(7)에 식(5)와 식(6)을 대입하게 되면 정격출력은 식(8)과 같이 두 평균 변형률의 합이 된다.

$$\frac{\Delta E}{E_i} = \epsilon_\theta + \epsilon_r \quad \dots\dots\dots (8)$$

평균 변형률은 스트레인 게이지에서 감지되는 변형률으로서 감지 격자(grid)의 넓이에서 감지되는 전체 스트레인을 감지부 넓이로 나눈값으로 그림 6에서와 같은 규격을 갖게되면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다(5).

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{c-b} \frac{3F(1-\nu^2)}{2E \pi t^2} \int_b^c \ell_n \frac{a}{r} dr \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{e-d} \frac{3F(1-\nu^2)}{2E \pi t^2} \int_a^e \left(\ell_n \frac{a}{r} - 1 \right) dr \quad \dots\dots\dots (10)$$

정격출력의 계산을 위해서 식(8)에 식(9)와 식(10)을 대입하면 $\Delta E/E_i$ 는 다음과 같은 결론을 얻게 된다.

$$\frac{\Delta E}{E_i} = \frac{3F(1-\nu^2)}{2E \pi t^2} \left[\frac{1}{c-b} \int_b^c \ell_n \frac{a}{r} dr + \frac{1}{e-d} \int_a^e \left(\ell_n \frac{a}{r} - 1 \right) dr \right] \quad \dots\dots\dots (11)$$

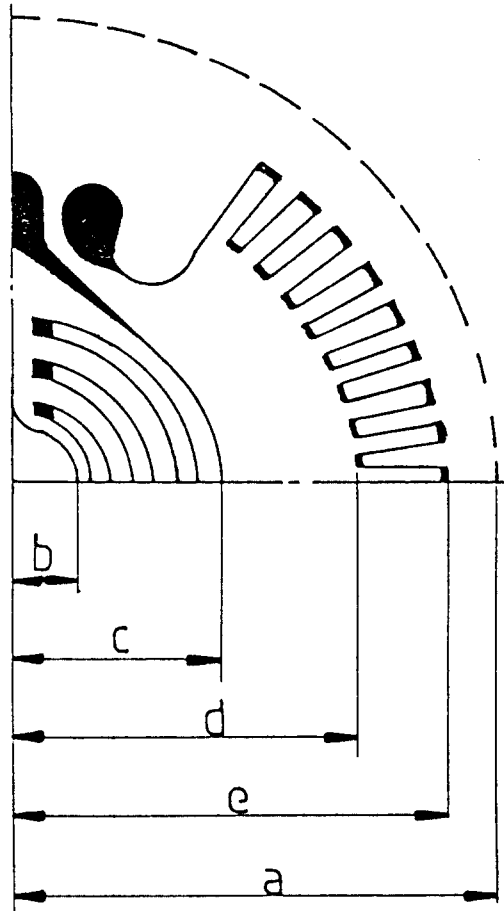


Fig. 6. Dimensions of diaphragm strain gage.

식(11)과 같이 유도된 식은 상용 다이아프램 스트레인 게이지를 이용하여 다이아프램 감지부 구조의 소형 로드셀을 설계하는데 매우 유용하게 이용할 수가 있다.

3. 실험결과

앞에서 유도한 식(11)을 이용하여 소형 로드셀을 제작하였다. 그림 7과 같이 제작된 소형 로드셀은 한국표준연구소에서 힘 표준으로 사용하고 있는 정

확도 0.002%의 5 kN 용량의 실하중 힘 표준기를 이용하여 정격출력을 확인하였다.

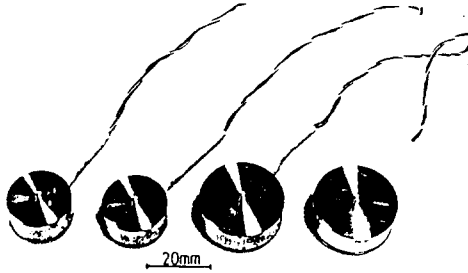


Fig. 7. Photograph of diaphragm type miniature load cells.

소형 로드셀은 내부공간이 좁으므로 전기저항에 의한 열발생을 방지하기 위해서 정격출력을 1.5 mV/V가 되도록 설계하였다. 소형 로드셀의 외부 지름을 20 mm와 26.5 mm의 두가지로 하였으며 용량은 300 N, 500 N, 1,000 N으로 설계하였다.

감지부의 지름은 다이어프램 스트레인 게이지의 크기를 기준으로 하였으며, 사용된 다이어프램 스트레인 게이지는 Micro Measurement group 회사의 683JB와 455JB 두가지 종류를 사용하였다. 소형 로드셀의 제작에 사용된 재료는 석출 경화형 630 스테인레스강으로서 부식을 방지하고 가공성이 좋은 장점을 가지고 있다.

스트레인 게이지의 규격, 재료의 성질, 소형 로드셀 내부 반지름, 소형 로드셀의 정격하중, 원하는 정격출력(1.5 mV/V)을 식(11)에 대입하여 감지부 두께 t 를 계산하였다. 표(1)은 4개의 소형로드셀을 제작 실험한 결과이다. 표(1)에서 계산된 두께는 이론적으로 유도된 식으로부터 소형 로드셀 가공전의 이상적인 두께이며, 실제 두께는 가공오차가 포함된 가공후의 측정두께로 나타내고 있다.

한편 실제 정격출력은 제작 완료된 소형 로드셀에 실하중 힘 표준기를 이용 정격하중을 가했을 때 나타난 값이다. 이론적인 정격출력은 실제 측정두께를 식(11)에 대입하여 이론식에 의해서 계산될 수 있는 값이다. 그러므로 실제로 측정된 정격출력과 이론적인 정격출력의 차이를 오차(%)로 나타내었다.

4개의 소형 로드셀의 실험결과 이론값과 측정된

값의 오차가 -0.89%에서 -4.93%로 나타났다. 그리고 4개의 값 모두 실제 정격출력이 이론값보다 작은 것을 알 수가 있다.

Table 1. Rated outputs and errors of four diaphragm type miniature load cells

	DFHC S/N	1	2	3	4
• Outer Diameter (mm)		20	20	26.5	20
• Capacities (N)		300	500	500	1000
• Calculation thickness (mm)		0.99	1.27	1.26	1.90
• Actual thickness (mm)		1.00	1.28	1.33	1.90
• Actual rated outputs (mV/V)		1.270	1.335	1.254	1.173
• Theoretical Rated Outputs (mV/V)		1.322	1.347	1.319	1.210
Error (%)		-3.93	-0.89	-4.93	-3.06

4. 고찰

실제로 다이어프램 감지부 구조의 소형 로드셀을 제작하고 실하중 힘 표준기를 이용하여 정격하중을 가하면서 정격출력을 측정하였다. 이론식에 의한 값과 실제값의 차이인 약 5%이내 오차요인을 다음과 같이 원인을 분석하였다.

1) 온도 보상게이지에 의한 정격출력 저하

로드셀에 부착된 스트레인 게이지에 전류가 흐르게 되면 저항에 의해서 온도가 상승하게 되고 상승된 온도는 로드셀의 특성에 영향을 미치게 된다(6).

그러므로 보통 상승된 온도를 보상해주기 위해서 발코 (Balco) 게이지를 회로와 함께 부착시킨다(7). 소형 로드셀의 회로에는 30 Ω 의 저항을 갖는 발코 게이지를 연결하였다. 그림 5와 같은 회로내의 스트레인 게이지 저항은 350 Ω 이므로 10V의 전압을 걸어주게 되면 30 Ω 의 발코게이지에 의해서 이론적으로 0.1382 mV/V의 출력저하가 일어난다.

표1의 이론적인 정격출력은 식에 의해서 계산된 값으로부터 0.1382 mV/V를 뺀 값이다.

2) 하중버튼 (loading button)

소형 로드셀의 정격출력을 예측할 수 있는 식(11)을 유도하기 위해서 감지부의 중앙에 집중하중이 가해지고 원판 주위를 고정 (fixed) 하는 것으로 가정하였다. 그러나 실제로는 하중버튼 (loading button)

에 하중이 가해져서 힘이 전달되므로 예상되는 값과 실제값의 차이가 있을 것이다. 이와같은 차이는 표1의 오차요인의 대부분을 차지할 것으로 판단된다.

오차요인을 정량적으로 분석하기 위해서 유한요소법을 사용하였다. 그림 8과 같이 메시를 구성하였으며 하중버튼과 스트레인 게이지를 함께 넣어서 계산하였다.

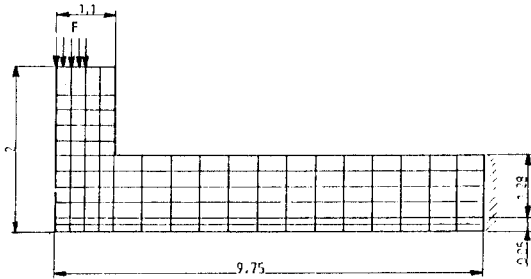


Fig. 8. Finite element mesh for circular plate. Dimensions in mm.

원판의 중앙에 힘이 가해지므로 축대칭으로 가정하였으며 스트레인 게이지와 스테인레스강의 탄성계수를 각각 $0.37 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 과 $20 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 으로 하고 프와송비는 0.3으로 계산하였다. 표2는 계산된 변형률값을 나타내고 있다.

변형률을 계산할때 다음과 같이 3가지 조건으로 나누었다. 첫째는 실제 감지부와 같이 하중버튼과 스트레인 게이지가 부착된 상태에서의 감지부의 변형률 분포, 두번째는 하중버튼이 없다고 가정하고 스트레인 게이지만이 부착되어 있을 때의 변형률 분포, 그리고 세번째는 식(11)을 유도할때 가정과 같은 조건에서의 변형률 분포이다.

그림 9는 계산된 값중에서 첫째 조건과 세번째 조건과의 차이를 %로 나타낸 것이다.

그림 (5)에서 r/a 값이 0.5와 0.6에서는 스트레인 게이지가 변형률을 감지하지 않은 부분이기에 생략하였다. 그리고 하중버튼 주위에서는 스트레인 게이지가 접선방향 변형률을 감지하며 원주 주변에는 반경방향 변형률을 감지하므로 두부분으로 구분하여 표시하였다.

그림 9에서와 같이 하중버튼의 영향은 원의 중심

Table 2. Strain distribution ($\mu\text{mm/mm}$) in numerical analysis.

	Condition	1	2	3
	r/a			
Tangential Strain	0.205	903.57	1041.80	1045.13
	0.308	728.44	782.18	784.80
	0.410	567.94	597.72	599.56
Radial Strain	0.713	- 426.14	- 443.79	- 445.13
	0.821	- 517.78	- 532.90	- 534.31
	0.923	- 613.57	- 627.33	- 629.15

- 1 : With strain gage, with loading button
- 2 : With strain gage, without loading button
- 3 : Without strain gage, without loading button

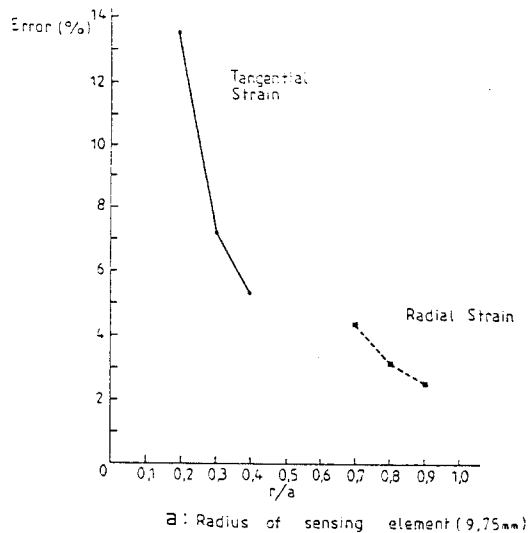


Fig. 9. Error distributions of tangential and radial strain according to the distance from the center.

부위에서 크게 나타나며 멀어질수록 감소함을 알 수 있다. 하중버튼의 영향으로 실제 변형률은 이론적인 가정값보다 항상 작게 나타나므로 정력출력의 저하를 가져오게 되며 표 1에서도 오차가 모두 정력출력 저하로 나타났다. 실제로 하중버튼에 대한 전체적인 오차는 적분되어서 나타나기 때문에 정량적인 분석은 불가능하다.

3) 스트레인 게이지 부착에 따른 오차

감지부에 스트레인 게이지가 부착되면 서로 다른 두께의 물질이 합해지며 두께의 변화가 생겨서 이론 값과 차이가 나타난다. 유한요소법의 계산을 위해서 스트레인 게이지의 두께를 0.05 mm로 하였다.

표2에서와 같이 두번째 조건의 값과 세번째 조건의 값의 차이가 약 $2 \mu\text{mm}/\text{mm}$ 으로 오차가 0.5% 이내로 영향이 매우 작은 것을 알 수가 있다. 그러나 감지부의 두께가 매우 얇고 스트레인 게이지의 탄성 계수가 크다면 영향이 한층 증가할 것이다.

5. 결론

다이아프램 감지부 구조를 갖는 소형 로드셀을 설계할 때 정격출력을 예측할 수 있는 유용한 식을 유도하였다. 식을 유도하기 위해서 여러가지 가정을 하였으며 일반 다이아프램 스트레인 게이지를 사용할 수 있도록 하였다.

제작된 소형 로드셀의 정격출력을 실하중 힘 표준기로 확인한 결과 최대 5%이내의 오차를 가지게 되었다. 그리고 수학적 방법으로 계산한 결과 오차의 대부분이 하중버튼 (loading button)의 영향으로 판단되었다. 그러므로 다이아프램 감지부 구조의 소형 로드셀의 정격출력을 예측할때 오차요인을 고려하게 되면 한층 정확한 결과를 얻게 될 것이다.

후기

본 연구는 과학기술처에서 시행한 특정연구과제 사업중 정밀계측기기 부품기술개발 과제의 일부로서

수행된 것이다. 소형 로드셀 제작에 협조해주신 한국 표준연구소 힘 연구실 김동진씨께 감사드린다.

參 考 文 獻

1. C. Rohrbach and J. Lexow, "Miniature force transducers with strain gages" Proceedings of the 10 th conference of IMEKO TC3, (1984).
2. A. C Ugural "Stress in Plates and Shells", McGraw-Hill, New York, (1981).
3. G. S. Holister, "Experimental Stress Analysis", Cambridge University Press, Cambridge (1967).
4. Measurements group, "Errors due to wheatstone bridge nonlinearity", TN-507, Measurements group technical note (1982).
5. J. W. Dally and W. F. Riley, "Experimental Stress Analysis", McGraw-Hill, New York, (1978).
6. Measurements group, "Temperature-induced apparent strain and gage factor variation in strain gages", TN-504, Measurements group technical note (1983).
7. J. Dorsey, "Homgrown Strain-gage Transducers", Experimental Mechanics, 17, 255-260, (1977).