

기둥을 이용한 다축 힘/모멘트 감지 방법에 관한 연구

신홍호* · 강대임* · 박연규* · 김종호* · 주진원** · 김옥현**

Sensing method of multi-component forces and moments using a column structure

H. H. Shin, D. I. Kang, Y. K. Park, J. H. Kim, J. W. Joo and O. H. Kim

Key Words: Column type(기둥형), Multi-component(다축), Load Cell(로드셀)

Abstract

The column-type sensing element in building and mechanical construction parts was designed as three forces and three moments sensor by attaching strain gages approximately. Compared to conventional multi-component sensor, the designed sensor can solve the problem about low stiffness and high cost.

The radius of the column was designed analytically and compared with finite element analysis. The coupling errors between components were minimized by using addition and subtraction procedure of signals. The fabricated sensor was tested by using a deadweight force standard machine and a six-component force calibration machine in Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS). The calibration showed that the multi-component force/moment sensor had coupling error less than 19.8 % between F_x and M_y components, and 9.0 % in case of other components.

기호설명

- $F_{x, y, z}$: forces of x, y and z components
- $M_{x, y, z}$: moments of x, y and z components.
- A : cross-sectional area.
- E : Young's modulus.
- S : section modulus.
- G : shear modulus.
- S1~S16 : number of strain gages.

1. 서론

기계설비의 자동화, 공작기계의 고급화, 로봇의 고정밀화 등으로 여러 방향의 힘과 모멘트를 정확하게 측정해야 할 필요성이 증가하고 있으나 비용면에서 다축 센서를 사용한다는 것은 비효율적이다. 그러므로 구조물의 일부분을 감지부로

사용하여 다축의 힘과 모멘트를 측정하는 것이 보다 경제적인 것이다.

Scheinman¹⁾은 직교하는 4개의 탄성보로 이루어진 다축 로드셀을 제작하였으나 감도가 낮은 이유로 반도체 스트레인 게이지를 사용하였다. 이러한 구조상의 단점을 극복하고자 치짐은 작으면서 큰 스트레인을 갖는 병렬평판 구조의 다축 로드셀이 Ono 등²⁾에 의해 개발되었다. 또한 Hatamura 등³⁾은 힘 성분을 측정하는 병렬평판 구조와 모멘트 성분을 측정하는 방사평판 구조가 조합된 다축 로드셀과 전체 크기가 20×20×48 mm³ 인 소형 다축 로드셀을 개발하였다. 국내의 경우 김갑순 등⁴⁾은 병렬평판 구조를 갖는 3분력 로드셀을 그리고 주진원 등⁵⁾은 변형률 분포가 완만하고 가공이 용이한 쌍안경식 6축 로드셀을 설계 제작하였다.

그러나 기존의 다축 로드셀은 감지부의 구조 설계와 다축 성분의 출력 및 상호 간섭 오차를 예상하는 것이 어렵고, 감지부의 강성이 작아 힘 센서를 부착함으로써 전체 시스템의 강성이 작아

* 한국표준과학연구원
** 충북대학교

진다는 문제를 갖는다. 또한 구조물의 일부분을 감지부로 사용하려는 목적에도 부합되지 않는다.

본 논문은 대형 구조물 부재의 형상이 기동형이라는 사실에 착안하여 기동의 변형만으로 다축의 힘 및 모멘트를 검출하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 기동형 다축 힘/모멘트 센서

2.1 설계 및 제작

Fig.1은 설계한 원기동형 다축 힘/모멘트 센서의 기본 개념을 보여주고 있으며, 이때의 성분별 스트레인 게이지의 부착 위치와 방향은 Fig.2와 같다.

F_z 검출회로는 축방향 스트레인 게이지 2개와 원주방향 스트레인 게이지 2개를 갖는 완전 결선 브리지 회로로 구성하였다. 또한 기동의 길이는 끝단 효과의 영향을 무시할 수 있도록 지름의 2배로 하였다.^{6,7)} F_z 을 가하면 S1, S2는 압축을 S3, S4는 인장을 받는다. 변형률과 출력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon = \epsilon_{S1} = \epsilon_{S2} &= -\frac{F_z}{AE} \\ \epsilon_{S3} = \epsilon_{S4} &= -\nu \epsilon_{S1} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_o}{E_i}\right)_{F_z} &= \frac{(1+\nu)K\epsilon}{2 - \{(1-\nu)K\epsilon\}} \\ &\approx \frac{1.3 \times K\epsilon}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

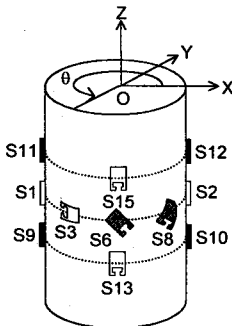


Fig.1 A schematic diagram of column-type load cell with strain gages to measure three forces and three moments.

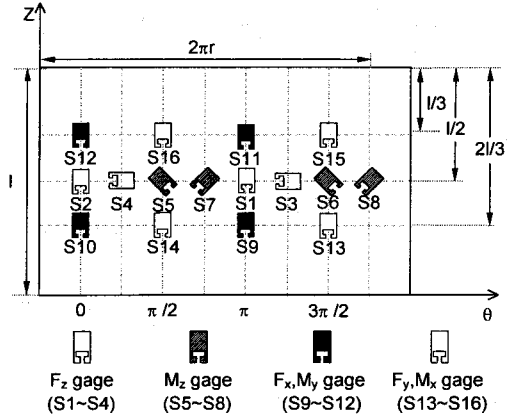


Fig.2 Position of strain gages for the measurement of forces and moments in the six-component load cell.

여기서, ϵ 은 게이지 부착위치의 변형률을, 아래 첨자는 스트레인 게이지의 번호를 나타내며 A 는 감지부의 단면적, E 는 탄성계수, ν 는 푸아송비, K 는 게이지 상수이다. 본 논문에서는 F_z 이 200 kN 가해졌을 때, 2 mV/V의 출력이 나오도록 설계하였다. 위의 두 식으로부터 감지부 치수를 반지름 14.05 mm, 길이 56.2 mm로 설계하였다.

M_z 검출회로는 축방향에 대하여 $\pm 45^\circ$ 방향으로 부착된 스트레인 게이지 4개를 갖는 완전결선 브리지 회로로 구성하였다. M_z 을 가하면 기동의 비틀림 변형으로 S5, S6은 압축을 S7, S8은 인장을 받는다. M_z 의 용량은 F_z 에 의해 설계된 감지부의 치수와 M_z 의 정격 출력에 의해 결정된다. 모두 액티브(active) 게이지로 변형률과 출력은 다음과 같다.

$$\epsilon_{S7} = -\epsilon_{S5} = \epsilon_{45^\circ} = \frac{\gamma}{2} = \frac{M_z}{2SG} \quad (3)$$

$$\left(\frac{E_o}{E_i}\right)_{M_z} = K\epsilon \quad (4)$$

여기서, γ 는 전단 변형률, S 는 단면 계수, G 는 횡탄성계수를 나타내고 있다.

F_x 및 M_y 검출회로는 축방향의 스트레인 게이지 2개를 갖는 1/2 브리지(half-bridge) 회로로 구

성하였다. F_x , M_y 를 가하면 기둥의 굽힘 변형으로 S10, S12는 압축을 S9, S11은 인장을 받는다. F_x 에 의한 변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon_{S9} = -\epsilon_{S10} = \frac{z_2 \times F_x}{SG} \quad (5)$$

$$\epsilon_{S11} = -\epsilon_{S12} = \frac{z_1 \times F_x}{SG}$$

M_y 에 의한 변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon_{S9} = \epsilon_{S11} = -\epsilon_{S10} = -\epsilon_{S12} = \frac{M_y}{SG} \quad (6)$$

F_x , M_y 에 의한 1/2 브리지 회로의 출력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_o}{E_i} \right)_{F_x} &= \left(\frac{E_o}{E_i} \right)_{M_y} \\ &= \frac{K\epsilon}{2\{1 - (K\epsilon)^2\}} \\ &\approx \frac{K\epsilon}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

위의 식(1)~(7)로부터 구한 설계하중과 정격출력 및 상호간섭 출력은 Table 1과 같다. 본 논문에서는 힘 및 모멘트 성분을 측정하기 위해 6개의 회로를 구성하였으며, $S_{cir.1}$ 에서 아래첨자 $cir.1$ 은 6개의 회로 중 1번 회로를 의미한다. $S_{cir.1}$ 과 $S_{cir.5}$ 는 F_x , M_y 검출회로이고, $S_{cir.2}$ 와 $S_{cir.4}$ 는 F_y , M_x 검출회로이며, $S_{cir.3}$ 은 F_z , $S_{cir.6}$ 는 M_z 검출회로이다.

2.2 유한요소해석

하중을 가하기 위해서는 볼트 체결이 필요하므로 윗면과 아랫면을 plate로 하고, 기둥과 plate 사이는 응력 집중 완화를 위해 라운딩 처리하였다. 이와 같은 형상의 수정으로 인한 변형률의 변화를 예측하고, 다축의 힘이 동시에 가해졌을 때의 감지부의 안전성을 검토하기 위해서 유한요소 해석을 수행하였다. 기둥형 다축 힘/모멘트 센서의

Table 1 Sensing output voltage and coupling output voltage for column-type load cell.

Load	Output strain (mV/V)					
	$S_{cir.1}$	$S_{cir.2}$	$S_{cir.3}$	$S_{cir.4}$	$S_{cir.5}$	$S_{cir.6}$
F_x (12.2 kN)	1	0	0	0	0.5	0
F_y (12.2 kN)	0	1	0	0.5	0	0
F_z (200 kN)	0	0	2	0	0	0
$-M_x$ (456.95 Nm)	0	1	0	1	0	0
M_y (456.95 Nm)	1	0	0	0	1	0
M_z (696.31 Nm)	0	0	0	0	0	2

감지부는 SNCM 8종으로 설계하였다. 재료 상수는 종탄성계수 210 GPa, 푸아송비 0.3으로 하였으며, 해석은 상용 유한요소 프로그램 ANSYS ver.5.6을 사용하였다. 해석은 8절점 3자유도를 갖는 3차원 요소를 사용하였다. 격자의 형상은 Fig.3과 같다. 해석 과정에서 요소의 개수는 8496개이고, 절점의 개수는 9481개였으며, 경계 조건으로는 로드셀의 바닥면의 절점을 x, y, z, 방향으로 모두 구속하였다. 기둥형 감지부 및 용량의 설계에 있어서는 다축의 힘이 동시에 가해졌을 때의 안정성을 검토하기 위해 볼트가 조립될 위치의 4개의 절점에 하중을 가하여 등가 응력 (Von-Mises stress)을 확인하였다. 설계 하중을 유한요소해석에서 동시에 가한 결과 응력이 집중되는 부분의 등가 응력이 1526 MPa로 허용 응력보다 크게 나왔다. 그러므로 안전율을 고려하여 F_x ,

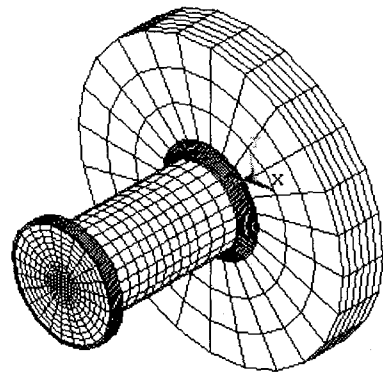


Fig.3 Finite element mesh of sensing element.

F_y 는 3 kN, F_z 은 50 kN, 모멘트는 45 N·m로 용량을 수정하였다.

2.3 상호간섭오차 해결 방법

기동형 감지부를 갖는 힘/모멘트 센서는 축방향의 변형만으로 다축의 성분을 감지하므로 스트레인 게이지 S9, S10으로 구성된 1번 회로(Cir.1)와 S11, S12로 구성된 5번 회로(Cir.5)에서는 F_x , M_y 성분이 함께 출력된다. 만약 이러한 힘과 모멘트 성분의 간섭을 분리하지 못한다면 이 값은 그대로 다축 로드셀의 오차 요인이 될 것이다. 그러나 식(5), (6)을 이용하여 힘과 모멘트 성분의 상호간섭을 제거할 수 있다. F_x 만을 가할 경우 1번 회로의 출력은 5번 회로의 2배가 되고, M_y 만을 가할 경우 두 회로의 출력은 동일하다. Fig.4와 같은 조건에서 출력은 다음과 같이 유도될 수 있다. 두 회로간의 거리비가 다음과 같을 경우 1번, 5번 회로에서 힘에 의한 출력과 모멘트에 의한 출력은 식(9), (10)과 같다.

$$\beta = \frac{z_2}{z_1} \quad (8)$$

$$(S_{F_x})_{cir.1} = \beta \times (S_{F_x})_{cir.5} \quad (9)$$

$$(S_{M_y})_{cir.1} = (S_{M_y})_{cir.5} \quad (10)$$

여기서 $(S_{F_x})_{cir.1}$ 은 F_x 를 가했을 때 1번 회로에서의 출력을 의미한다. 위의 식(9), (10)으로부터 다음과 같이 F_x 에 의한 출력과 M_y 에 의한 출력을 분리할 수 있다.

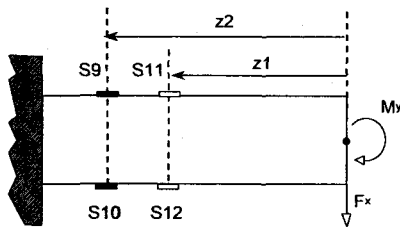


Fig.4 Process for eliminating coupling errors.

$$S_{F_x} = \frac{\beta}{\beta-1} (S_{cir.1} - S_{cir.5}) \quad (11)$$

$$S_{M_y} = \frac{\beta \times S_{cir.5} - S_{cir.1}}{\beta-1} \quad (12)$$

2.4 제작 및 특성 시험

설계된 기동형 감지부를 갖는 다축 힘/모멘트 센서는 Fig.5와 같이 한 몸체로 가공하였고, 로드셀 지지부와 힘이 가해질 부분은 볼트로 연결할 수 있도록 하였다. 스트레인 게이지가 부착될 표면은 정밀 다듬질을 하여 공차를 ± 0.02 mm로 하여 가공하였다. 제작된 로드셀의 반경은 14.05 mm이고 길이는 56.2 mm이었다. 스트레인 게이지 16개를 부착하여 2개의 완전 결선 회로와 4개의 1/2 회로를 구성하였다. 부착된 스트레인 게이지는 길이 1.57 mm, 게이지 폭 1.57 mm, 전체 길이 4.8 mm, 전체 폭 3.1 mm이고 게이지 상수는 2.12인 센서용 게이지 MM-N2A-06-SO71P-350을 사용하였다.

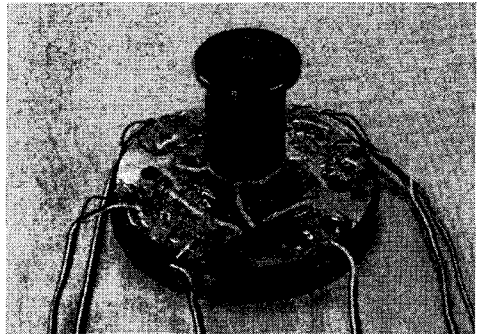


Fig.5 Photograph of the column type multi-components load cell.

3. 결과 및 토의

특성 시험을 통해 각 하중 성분에 대한 비직선도 오차, 재현도 오차, 히스테리시스 오차, 정격 출력 및 상호간섭 오차를 평가하였다.

Table 2는 기동형 감지부를 갖는 다축 힘/모멘트 센서의 회로별 출력을 나타내고 있다. 데이터를 통하여 성분별 상호간섭이 있음을 확인할 수 있다. Fig.6은 각 성분별 정격 출력을 기준으로 했을 경우의 상호 간섭 오차의 비율을 보여주고

있다. F_x , F_y 성분의 상호간섭 오차가 큰 것은 F_z 이 실하중 힘표준기에 의한 중력 방향의 하중을 가하는 반면, F_x , F_y 는 이러한 중력 방향의 힘을 지그를 사용하여 축과 수직인 힘으로 변환시키는데, 이 과정에서 오차를 포함하기 때문인 것으로 보인다.

Table 2 Sensing output voltages of column type multi-components load cell by experiment.

Load	Output voltage ($\mu V/V$)					
	S _{cir1}	S _{cir2}	S _{cir3}	S _{cir4}	S _{cir5}	S _{cir6}
F _x	269.3	12.5	-1.7	15.3	142.3	-5.1
F _y	18.1	272.0	0.2	140.5	15.1	5.4
F _z	-10.2	8.5	421.0	7.6	-9.2	1.1
-M _x	4.3	91.7	-0.3	91.6	3.5	1.1
M _y	91.7	-0.9	-0.2	0.1	91.5	3.3
M _z	-0.2	0.4	1.0	1.0	0.8	118.6

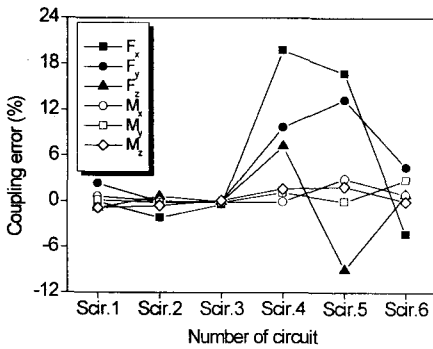


Fig.6 Coupling error of sensing output voltages of column type multi- components load cell by experiment.

4. 결론

본 논문에서는 기둥의 변형만으로 다축의 힘을 측정하기 위한 게이지의 부착위치, 조합 방법 및 연산 과정을 제시하였으며, 유한 요소 해석을 통해 등가 응력을 분석함으로써 설계 하중을 수정하였다. 이렇게 설계·제작한 기둥형 감지부를 갖는 다축 힘/모멘트 센서의 특성 평가를 수행하여 상호간섭오차를 분석하였다. 본 논문은 다음과 같은 결론을 제시하였다.

- 1) 기둥형 감지부를 갖는 로드셀에서 적당한 게이지 부착 위치와 방향, 회로의 조합 그리고 회로별 출력의 연산을 통해 다축의 힘 및 모멘트 성분의 상호 간섭을 제거할 수 있다.
- 2) 유한요소 해석을 통해 등가 응력을 구하고, 감지부의 안전성을 고려하여 용량을 설계하였다.
- 3) 특성 실험 결과 상호간섭 오차는 F_x , F_y 성분이 15~19.8 % FS 이었고, 나머지 성분은 9.2 % FS 미만이었다. 하중 전달 장치에 의한 오차를 제거하면 상호간섭 오차는 10 % 이내가 될 것으로 기대한다.
- 5) 기존의 기둥형 구조물에 스트레인 게이지를 부착하여 다축의 힘 및 모멘트를 측정 할 수 있으므로 제작비가 저렴하고, 응용 범위가 넓다. 예를 들어 대형 건축물의 안정성 평가에도 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) 강대임 등, 1994, "한·이태리 국제공동 자동차 제어용 다축 Dynamometer의 개발", 한국표준과학연구원, pp. 11~12.
- (2) Ono, K. and Hatamura, Y., 1986, "A New Design for 6-component Force/Torque Sensors," Mechanical Problems in Measuring Force and Mass, pp. 39~48.
- (3) Hatamura, Y., Matsumoto, K. and Morishita, H., 1989, "A Miniature 6-Axis Force Sensor of Multi-layer Parallel Plate Structure," Proc. Conf. IMEKO, pp. 567~582.
- (4) 김갑순, 강대임, 정수연, 주진원, 1997, "병렬 판 구조를 이용한 3분력 로드셀 감지부의 설계," 대한기계학회 논문집 A, 제 21권, 제 11호, pp. 1871~1884.
- (5) 주진원, 정수연, 김갑순, 강대임, 1996, "다꾸지방법에 의한 6축 로드셀의 설계 및 상호간섭오차 평가," 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, KSME 96F074, pp. 441~446.
- (6) The Staff of Measurements Group, 1988, "Strain Gage Based Transducers", pp.7~28.
- (7) 강대임, 1994, "BUILD-UP 기법을 이용한 힘 측정 시스템의 설계 및 응용", 박사학위논문, 한국과학기술원.