

정밀 3분력(F_x , F_y , M_z) 로드셀의 설계 및 변형률해석

김갑순*, 이세현**, 엄기원**

Design and Strain Analysis of Precision 3-component Load Cell

Gab-Soon Kim*, Se-Hun Rhee**, and Ki-Woan Um**

ABSTRACT

This paper describes the development of a precision 3-component load cell with plate beams which may be used for measuring forces F_x , F_y and moment M_z simultaneously in industry. We have derived equations to predict the bending strains on the surface of the beams under forces or moment. We have also determined the attachment location of strain gages of each sensor and fabricated 3-component load cell. To evaluate the rated strain and interference error of each sensor, we have carried out characteristic test of precision 3-component load cell. It reveals that the rated strain calculated from the derived equations are good agreement with the results from Finite Element Method analysis.

Key Words : 3-component load cell(3분력 로드셀), Sensing element(감지부), Force(힘), Moment(모멘트), Beam(보), Strain(변형률), Rated strain(정격변형률), Finite Element Method(유한요소법), Interference error(상호간섭오차), Interference strain(상호간섭 변형률)

기호설명

F_{Ax} : 보 A에 작용되는 x방향의 힘(N)
 F_{Ay} : 보 A에 작용되는 y방향의 힘(N)
 M_A : 보 A에 작용되는 모멘트(Nm)
 F_{Bx} : 보 B에 작용되는 x방향의 힘(N)
 F_{By} : 보 B에 작용되는 y방향의 힘(N)
 M_B : 보 B에 작용되는 모멘트(Nm)
 F_{Ey} : 보 E에 작용되는 y방향의 힘(N)
 M_E : 보 E에 작용되는 모멘트(Nm)

F_{Gy} : 보 G에 작용되는 y방향의 힘(N)
 M_G : 보 G에 작용되는 모멘트(Nm)
 F_{Ix} : 보 I에 작용되는 x방향의 힘(N)
 F_{Iy} : 보 I에 작용되는 y방향의 힘(N)
 M_I : 보 I에 작용되는 모멘트(Nm)
 F_{Ky} : 보 K에 작용되는 y방향의 힘(N)
 F_{Ly} : 보 L에 작용되는 y방향의 힘(N)
 I : 보의 극단면 2차 모멘트(mm^4)
 Z_p : 보의 극단면계수(mm^3)
 E : 보 재료의 종탄성계수

* 한국표준과학연구원 역학표준부
 ** 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과

- ϵ_{A-LF} : 보 A의 좌측면에 발생하는 변형률 ($\mu m/m$)
- ϵ_{A-RI} : 보 A의 우측면에 발생하는 변형률 ($\mu m/m$)
- ϵ_{B-LF} : 보 B의 좌측면에 발생하는 변형률 ($\mu m/m$)
- ϵ_{B-RI} : 보 B의 우측면에 발생하는 변형률 ($\mu m/m$)
- ϵ_{E-U} : 보 E의 윗면에 발생하는 변형률 ($\mu m/m$)
- ϵ_{E-L} : 보 E의 아랫면에 발생하는 변형률 ($\mu m/m$)
- ϵ_{G-U} : 보 G의 윗면에 발생하는 변형률 ($\mu m/m$)
- ϵ_{G-L} : 보 G의 아랫면에 발생하는 변형률 ($\mu m/m$)
- ϵ_{I-U} : 보 I의 윗면에 발생하는 변형률 ($\mu m/m$)
- ϵ_{I-L} : 보 I의 아랫면에 발생하는 변형률 ($\mu m/m$)
- ϵ_K : 보 K에 발생하는 변형률($\mu m/m$)
- ϵ_L : 보 L에 발생하는 변형률($\mu m/m$)

1. 서론

로봇암 및 공작기계의 고급화를 위한 힘제어, 자동차산업, 조선산업, 전자산업 등에서의 힘 및 모멘트의 측정은 여러 방향의 힘 및 모멘트를 동시에 측정할 수 있는 다분력 로드셀(multi-component load cell)를 이용한다. 다분력 로드셀은 한 몸체에 각 방향의 힘과 모멘트를 감지할 수 있는 각각의 로드셀을 조합하여 제작한다. 6분력 로드셀은 3개 방향의 힘 F_x, F_y, F_z 감지용 로드셀과 3개 방향의 모멘트 M_x, M_y, M_z 감지용 로드셀이 한 몸체로 조합된 것이다. 2분력 로드셀은 6개의 힘 혹은 모멘트 감지용 로드셀중 2개의 로드셀이 조합된 것이고 3분력 로드셀은 3개의 로드셀, 4분력 로드셀은 4개의 로드셀, 그리고 5분력 로드셀은 5개의 로드셀이 각각 조합된 것이다. 다분력 로드셀을 이용하여 힘과 모멘트를 측정할 경우에는 측정하고자 하는 힘과 모

멘트만 측정할 수 있는 다분력 로드셀을 선택하여 사용한다. 이것은 다분력 로드셀의 값이 매우 높기 때문이다. 따라서 다분력 로드셀을 제작하는 회사에서는 2분력~6분력 로드셀을 각각 설계 및 제작하여 특허등록을 한다.

다분력 로드셀의 감지부로는 병렬평판(parallel plate)^(1~5) 혹은 방사평판(radial plate)^(2,3)이 많이 사용된다. 김⁽⁶⁾은 병렬평판구조를 이용하여 3분력 로드셀을 설계하였으나 여러 개의 병렬평판을 이용하였으므로 구조가 복잡하고, 소용량 즉 x와 y방향의 힘 F_x 와 F_y 가 200 N이하인 경우에는 단일 평판을 이용한 구조보다 더 얇게 가공해야 하므로 가공이 매우 어렵다. 그리고 같은 용량일 경우 단일 평판 구조보다 처짐이 크게 발생되어 고정밀 힘 및 모멘트 측정에 사용될 수 없다. 김⁽⁷⁾은 단일 평판보를 이용하여 6분력 로드셀을 설계하였으나 평판보와 고정부의 위치설계 미숙으로 이론해석에 의한 로드셀의 감지부 설계를 하지 못하고 유한요소법을 이용하여 여러 번의 시행착오를 걸쳐 로드셀을 설계하였다. 이와 같은 구조의 다분력 로드셀인 경우에는 각 방향의 힘과 모멘트가 다른 용량의 로드셀을 설계할 경우 또다시 유한요소해석법을 이용하여 여러 번의 시행착오를 걸쳐 설계해야 하는 단점을 가지고 있다. 그러므로 각 방향의 로드셀을 쉽고 정확하게 설계하기 위해서는 각 방향의 힘과 모멘트 로드셀의 감지부를 재설계해야 하고 감지부의 변형률을 계산할 수 있는 이론해석식을 유도해야 한다.

다분력 로드셀의 정밀정확도는 비직선성오차(nonlinearity), 재현도오차(repeatability), 상호간섭오차(interference error)로 평가할 수 있으나 상호간섭오차가 다른 오차들보다 수십배 혹은 수백배 크기⁽⁵⁾ 때문에 일반적으로 다분력 로드셀의 정밀정확도를 상호간섭오차만으로 평가한다. 상호간섭오차는 다분력 로드셀의 감지부 설계와 변형률해석에 의한 정확한 스트레인 게이지 부착위치 선정으로 줄일 수 있다.

본 논문에서는 김⁽⁶⁾과 김⁽⁷⁾의 단점을 보완하기 위하여 여러 개의 평판보를 이용하여 힘 F_x, F_y 및 모멘트 M_z 를 동시에 감지할 수 있는 정밀 3분력 로드셀을 설계하였다. 로드셀의 감지부들을 설계하기 위하여 힘 또는 모멘트에 의한 보들의 변형률을 계산하는 식을 유도하였고, 유도된 식들을 이용하여 정밀 3분력 로드셀의 감지부의 크기를 설계하였다. 유도된 식이 타당한지를 검증하기 위하여 감지

부에 대한 유한요소해석을 하였고, 이것으로부터 얻은 변형률을 이론해석으로 얻은 변형률과 비교하였다. 그리고 이론해석으로 얻은 변형률들을 분석하여 스트레인 게이지의 부착위치를 선정하고, 선정된 게이지들로 완전결선회로를 구성하여 정격변형률과 상호간섭오차 변형률을 계산하였다.

2. 이론해석

2.1 감지부 모델링

본 논문에서는 힘 F_x 와 F_y 및 모멘트 M_z 를 동시에 감지할 수 있도록 평판보 A~L를 수직으로 세워서 구성하여 정밀 3분력 로드셀의 감지부를 Fig. 1과 같이 모델링하였다. 힘 F_x 와 F_y 를 감지하는 로드셀의 감지부는 같은 크기의 평판보, 즉 보의 길이 l_1 , 보의 폭 b_1 , 보의 높이 h_1 이 서로 같은 보 A~H를 사각형을 이루도록 구성하였다. 그리고 모멘트 M_z 를 감지하는 로드셀의 감지부는 같은 크기의 평판보, 즉 보의 길이 l_2 , 보의 폭 b_2 , 보의 높이 h_2 가 서로 같은 보 I~L을 하중전달블록을 중심으로 십자형을 이루도록 구성하였다.

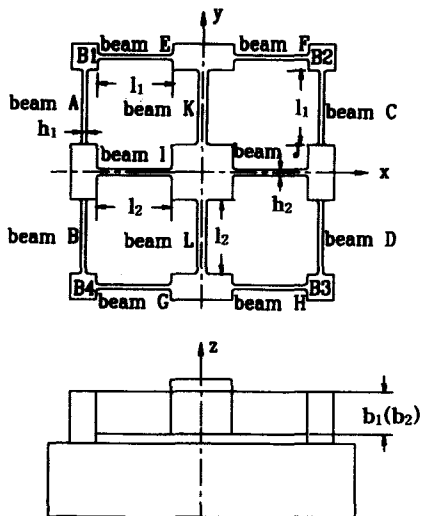


Fig. 1 Structure of sensing element for a precision 3-component load cell

보 A~D는 힘 F_x , 보 E~H는 힘 F_y , 보 I~L은 모멘트 M_z 를 감지하는 감지부이다. 그리고 블록 B1~B4는 몸체(BODY)와 각각의 보들을 고정한 것

이다. 각 감지부의 변형률을 이용하여 각 로드셀을 설계하기 때문에 감지부들의 변형률을 해석해야 한다.

2.2 이론해석

2.2.1 힘 F_y 가 가해졌을 때

본힘 F_x 를 감지하는 보는 A~D이고, F_y 를 감지하는 보는 E~H이다. Fig. 1에서 보는 것과 같이 보 A~L이 하중전달블록을 중심으로 좌우 상하 대칭으로 구성되어 있으므로 힘 F_y 가 가해졌을 때의 이론식을 유도한 후 그 결과를 힘 F_x 가 가해졌을 때에도 적용하기로 한다. Fig. 2는 힘 $F_y=P$ 가 -y방향으로 가해졌을 때 각각의 보에 발생하는 힘과 모멘트를 나타내고 있다.

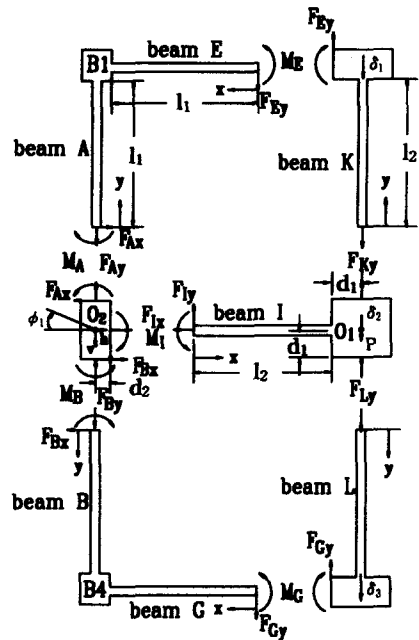


Fig. 2 Free body diagram of plate beams for a precision 3-component load cell under the force F_y

힘 P 가 가해지는 중심선을 기준으로 좌우 대칭이므로 좌측의 보들을 이용하여 이론식을 유도한 후 그 결과를 우측의 보에 적용하기로 한다. Fig. 2와 같이 힘 P 가 가해졌을 때 하중전달블록이 δ_2 ,

보 E와 G의 우측 블록이 각각 δ_1 과 δ_3 만큼 하중이 가해지는 방향으로 처지게 되고, 보 A, B, I 사이의 블록이 ϕ_1 만큼 회전하게 된다.

하중전달블록과 보 A, B, I 사이의 블록에서의 힘과 모멘트 평형조건으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$2F_{Ky} + 2F_{ly} = P \quad (1)$$

$$-F_{Ax} + F_{lx} + F_{Bx} = 0 \quad (2)$$

$$F_{Ay} + F_{By} - F_{ly} = 0 \quad (3)$$

$$M_I - M_A - M_B + d_2F_{ly} - d_1F_{Ax} - d_1F_{Bx} = 0 \quad (4)$$

각각의 보에 발생하는 힘과 모멘트식을 유도하여 식 (2)에 대입하면 보 A, B, I 사이의 블록의 수평변위, h는 0이고, 또한 이것들을 식 (1), (3), (4)에 대입하면 미지수 δ_2 (하중전달블록의 수직변위), v(A, B, I 사이의 블록의 수직변위)와 ϕ_1 (A, B, I 사이의 블록의 회전각)을 갖는 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$k_{11}\delta_2 + k_{12}v + k_{13}\phi_1 = P \quad (5)$$

$$k_{14}\delta_2 + k_{15}v + k_{16}\phi_1 = 0 \quad (6)$$

$$k_{17}\delta_2 + k_{18}v + k_{19}\phi_1 = 0 \quad (7)$$

여기서 $k_{11} \sim k_{19}$ 는 상수이고 그것들의 식은 (8)과 같다.

$$k_{11} = \frac{2A_2E}{l_2} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{A_2l_1^3}{24I_1l_2}\right)} + \frac{24EI_2}{l_2^3}$$

$$k_{12} = -\frac{24EI_2}{l_2^3}, \quad k_{13} = -\frac{24EI_2}{l_2^3} \left(d_2 + \frac{l_2}{2}\right)$$

$$k_{14} = -\frac{12EI_2}{l_2^3}, \quad k_{15} = \frac{2A_1E}{l_1} + \frac{12EI_2}{l_2^3}$$

$$k_{16} = \frac{12EI_2}{l_2^3} \left(d_2 + \frac{l_2}{2}\right)$$

$$k_{17} = \frac{6EI_2}{l_2^3} (2d_2 + l_2) \quad (8)$$

$$k_{18} = -\frac{6EI_2}{l_2^3} (2d_2 + l_2)$$

$$k_{19} = -\frac{12EI_2}{l_2^3} \left(d_2^2 + d_2l_2 + \frac{l_2^2}{3}\right) - \frac{12EI_1}{l_1^3} \left(d_1^2 + d_1l_1 + \frac{l_1^2}{3}\right)$$

각 보의 표면에 발생하는 변형률은 굽힘모멘트에 의한 굽힘변형률과 인장 또는 압축에 의한 변형률을 중첩함으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{E-U} = -\epsilon_{E-L} = \epsilon_{G-U} = -\epsilon_{G-L} \quad (9)$$

$$= \frac{A_2h_1\delta_2}{8I_1l_2} \times \frac{1}{1 + \frac{A_2l_1^3}{24I_1l_2}} (l_2 - 2x)$$

$$\epsilon_{I-U,L} = \frac{6h_2}{l_2^3} \left[\left\{ \frac{\delta_2}{2} - \frac{v}{2} - \left(\frac{d_2}{2} + \frac{l_2}{3} \right) \phi_1 \right\} l_2 - \left\{ \delta_2 - v - \left(d_2 + \frac{l_2}{2} \right) \phi_1 \right\} x \right] \quad (10)$$

$$\epsilon_{A-LF} = -\frac{6h_1}{l_1^3} \left[\left\{ \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi_1 \right\} l_1 - \left\{ \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi_1 \right\} x \right] + \frac{v}{l_1} \quad (11)$$

$$\epsilon_{A-RI} = \frac{6h_1}{l_1^3} \left[\left\{ \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi_1 \right\} l_1 - \left\{ \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi_1 \right\} x \right] + \frac{v}{l_1} \quad (12)$$

$$\epsilon_{B-LF} = \frac{6h_1}{l_1^3} \left[\left\{ \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi_1 \right\} l_1 - \left\{ \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi_1 \right\} x \right] - \frac{v}{l_1} \quad (13)$$

$$\epsilon_{B-RI} = -\frac{6h_1}{l_1^3} \left[\left\{ \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi_1 \right\} l_1 - \left\{ \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi_1 \right\} x \right] - \frac{v}{l_1} \quad (14)$$

$$\epsilon_K = -\epsilon_L = \frac{\delta_2}{l_2 \left(1 + \frac{A_2l_1^3}{24I_1l_2} \right)} \quad (15)$$

식 (5)~(7)의 연립방정식의 해 δ_2 , v, ϕ_1 을

구하여 식 (9)~(15)에 대입하면 힘 F_y 가 가해졌을 때 각 보에 발생하는 변형률을 구할 수 있다. 식 (9)는 힘 F_y 감지용 감지부의 정격변형률을 계산할 때 사용되고, 식 (10)~(15)는 상호간섭변형률을 계산하는데 사용된다.

2.2.2 모멘트 M_z 가 가해졌을 때

모멘트 M_z 를 감지하는 보는 I~L이다. Fig. 1에서 보는 것과 같이 보 A~L이 하중전달블록을 중심으로 좌측의 보 A, B, I, 우측의 보 C, D, J, 상측의 보 E, F, K, 하측의 보 G, H, L이 서로 같은 크기의 보로 구성되어 있으므로 좌측의 보 A, B, I에 대한 이론식을 유도한 후 그 결과를 다른 측면에 위치한 보들에게도 적용하기로 한다. Fig. 3은 모멘트 $M_z = \frac{T}{4}$ 가 -z방향으로 가해졌을 때 각각의 보에 발생하는 힘과 모멘트를 나타내고 있다. Fig. 3과 같이 모멘트 $M_z = \frac{T}{4}$ 가 -z방향으로 가해졌을 때 하중전달블록이 θ_2 , 보 A, B, I 사이의 블록이 ϕ_2 만큼 회전하게 된다.

하중전달블록과 보 A, B, I 사이의 블록에서의 x와 y방향의 힘과 모멘트 평형조건으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$M_I + d_2 F_{Iy} = \frac{T}{4} \quad (16)$$

$$F_{Ax} + F_{Ix} - F_{Bx} = 0 \quad (17)$$

$$F_{Iy} - F_{Ay} - F_{By} = 0 \quad (18)$$

$$M_I + M_A + M_B - (d_2 + l_2)F_{Iy} + d_1 F_{Ax} + d_1 F_{Bx} = 0 \quad (19)$$

각각의 보에 발생하는 힘과 모멘트식을 계산하여 식 (17)에 대입하면 보 A, B, I 사이의 블록의 수평변위는 0이고, 또한 이것들을 식 (16), (18), (19)에 대입하면 미지수 θ_2 (하중전달블록의 회전각), v (A, B, I 사이의 블록의 수직변위)와 ϕ_2 (A, B, I 사이의 블록의 회전각)을 갖는 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$k_{21}\theta_2 + k_{22}v + k_{23}\phi_2 = \frac{T}{4} \quad (20)$$

$$k_{24}\theta_2 + k_{25}v + k_{26}\phi_2 = 0 \quad (21)$$

$$k_{27}\theta_2 + k_{28}v + k_{29}\phi_2 = 0 \quad (22)$$

여기서 $k_{21} \sim k_{29}$ 는 상수이고 그것들의 식은 (23)과 같다.

$$\begin{aligned} k_{21} &= \frac{12EI_2}{l_2^3} (d_1^2 + d_1 l_2 + \frac{l_2^2}{3}) \\ k_{22} &= -\frac{24EI_2}{l_2^3} (d_1 + \frac{l_2}{2}) \\ k_{23} &= -\frac{24EI_2}{l_2^3} (\frac{d_2 l_2}{2} + \frac{l_2^2}{3} + d_1 d_2 + \frac{d_1 l_2}{2}) \\ k_{24} &= \frac{12EI_2}{l_2^3} (d_1 + \frac{l_2}{2}) \\ k_{25} &= -\frac{2A_1 E}{l_1} - \frac{12EI_2}{l_2^3} \\ k_{26} &= -\frac{12EI_2}{l_2^3} (d_2 + \frac{l_2}{2}) \\ k_{27} &= -\frac{12EI_2}{l_2^3} (\frac{d_1 l_2}{2} + d_1 d_2 + \frac{d_2 l_2}{2} + \frac{l_2^2}{6}) \\ k_{28} &= \frac{12EI_2}{l_2^3} (d_2 + \frac{l_2}{2}) \\ k_{29} &= \frac{12EI_2}{l_2^3} (d_2^2 + d_2 l_2 + \frac{l_2^2}{6}) \\ &\quad + \frac{24EI_1}{l_1^3} (d_1^2 + d_1 l_1 + \frac{l_1^2}{3}) \end{aligned} \quad (23)$$

각 보의 표면에 발생하는 변형률은 굽힘모멘트에 의한 굽힘변형률과 인장 또는 압축에 의한 변형률을 중첩함으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{I-U} &= \frac{6h_2}{l_2^3} \left[\left\{ \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_2}{3} \right) \theta_2 - \frac{v}{2} - \left(\frac{d_2}{2} + \frac{l_2}{3} \right) \phi_2 \right\} l_2 \right. \\ &\quad \left. - \left\{ \left(d_1 + \frac{l_2}{2} \right) \theta_2 - v - \left(d_2 + \frac{l_2}{2} \right) \phi_2 \right\} x \right] \end{aligned} \quad (24)$$

$$\epsilon_{A-LF} = \frac{6h_1}{l_1^3} \left[\left\{ \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi_2 \right\} l_1 - \left\{ \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi_2 \right\} x \right] - \frac{v}{l_1} \quad (25)$$

$$\epsilon_{A-RI} = -\frac{6h_1}{l_1^3} \left[\left\{ \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi_2 \right\} l_1 - \left\{ \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi_2 \right\} x \right] - \frac{v}{l_1} \quad (26)$$

$$\epsilon_{B-LF} = -\frac{6h_1}{l_1^3} \left[\left\{ \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi_2 \right\} l_1 - \left\{ \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi_2 \right\} x \right] + \frac{v}{l_1} \quad (27)$$

$$\epsilon_{B-RI} = \frac{6h_1}{l_1^3} \left[\left\{ \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi_2 \right\} l_1 - \left\{ \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi_2 \right\} x \right] + \frac{v}{l_1} \quad (28)$$

식 (20)~(22)의 연립방정식의 해 θ_2 , v , ϕ_2 을 구하여 식 (24)~(28)에 대입하면 모멘트 M_z 가 가해졌을 때 각 보에 발생하는 변형률을 구할 수 있다.

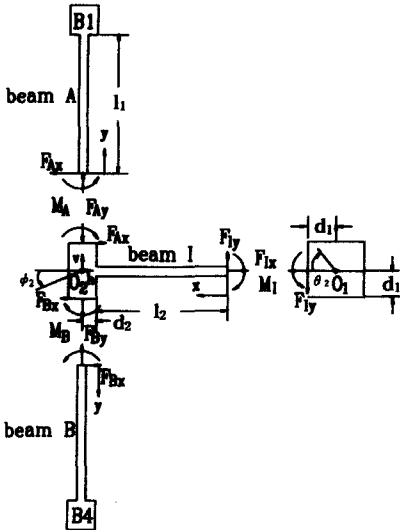


Fig. 3 Free body diagram of plate beams for a precision 3-component load cell under the moment M_z

식 (24)는 모멘트 M_z 감지용 감지부의 정격변형률을 계산할 때 사용되고, 식 (25)~(28)은 상호간섭 변형률을 계산하는데 사용된다.

3. 감지부의 설계

정밀 3분력 로드셀의 감지부는 힘 F_x , F_y , 모멘트 M_z 가 작용할 때 각 로드셀의 완전결선회로부터 출력되는 변형률들이 서로 비슷하도록 설계되어야 하며, 설계변수는 정격용량, 정격변형률, 보의 폭, 보의 길이, 보의 높이, 스트레인 게이지의 크기를 고려한 부착위치이다.^(4,5) 감지부를 설계하기 위하여 정격용량은 힘 F_x , F_y 인 경우 모두 100 N, 모멘트 M_z 인 경우 2 Nm, 정격변형률은 약 1000 μ m/m, 스트레인 게이지의 부착위치는 스트레인 게이지의 크기 4×5 (mm²)를 고려하여 보의 길이 방향으로 힘 F_x , F_y 인 경우 양끝 지점으로부터 각각 3 mm 떨어진 지점이고, 모멘트 M_z 인 경우 5 mm 떨어진 지점이며, 보의 폭방향으로는 보의 길이방향의 중심선상으로 결정하였다. 결정된 수치들을 변형률식 (9), (24)에 대입하여 계산한 결과 보의 길이는 $l_1 = l_2 = 17$ mm, 높이는 $h_1 = 1.4$ mm, $h_2 = 1.8$ mm, 폭은 $b_1 = b_2 = 14$ mm이었다. 감지부의 재질은 소용량의 로드셀 감지부로 많이 사용되는 알루미늄 2024-T351이다.

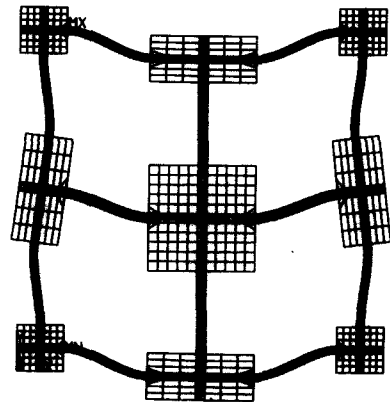


Fig. 4 Finite element mesh and deformed shape of beams for F_x , F_y , M_z load cell under the force F_x or F_y

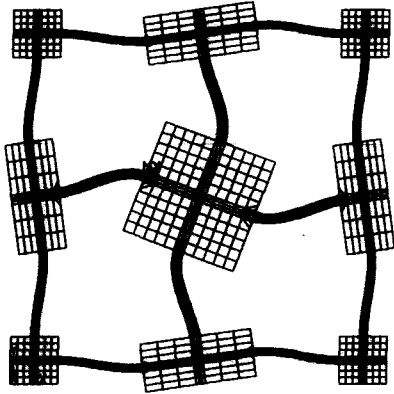


Fig. 5 Finite element mesh and deformed shape of beams for F_x , F_y , M_z load cell under the moment M_z

4. 유한요소해석

힘 F_y 와 모멘트 M_z 가 설계된 로드셀의 감지부에 작용될 때 이론해석으로 계산한 변형률이 맞는지 확인하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다.^(4,5) 유한요소해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 힘 F_y 와 모멘트 M_z 가 가해졌을 때 보의 변형률 분포를 2차원으로 계산하였다. 해석은 평면응력 상태로 가정하였고 사용한 유한요소는 4절점 4각형선형요소이다. 재료상수는 사용한 재료 알루미늄의 상수값인 종탄성계수, 70 GPa로, 프와송의 비는 0.3으로 하였다. 격자크기는 보의 길이방향으로는 0.5 mm 간격, 높이방향으로는 3등분하였다.

유한요소해석시 힘 F_y 는 힘 감지용 로드셀의 정격용량이 100 N이므로 보의 단위 폭당 힘인 7.143 N/mm를 각각 y방향으로 가했다. 모멘트 M_z 는 로드셀의 하중전달블록과 고정지그를 고정하기 위한 4개의 보울트 중심위치, 즉 하중전달블록의 중심으로부터 9.758 mm 떨어진 지점에 총 14.6399 Nmm/mm를 가했다.

Fig. 4는 힘 F_y 가 가해졌을 때 그리고 Fig. 5는 모멘트 M_z 가 가해졌을 때 로드셀 감지부의 변형형태를 확대하여 보여주고 있다. 힘이 가해졌을 때 로드셀 감지부의 변형형태는 이론해석시 가정한 것과 동일하게 좌우 대칭 형상을 보이고 있으며, 모

멘트가 가해졌을 때는 블록에 가까운 지점에서는 고정단보다 큰 변형거동을 보였다.

5. 변형률해석 결과 및 고찰

Fig. 6~12는 힘 $F_y=-100$ N이 하중전달블록에 가해졌을 때 각각의 힘에 발생한 변형률분포를 나타내고 있다. Fig. 6과 7은 힘 F_y 감지용 로드셀, 즉 보 E와 G의 변형률분포를 나타낸 것이다. 보 E와 G는 서로 비슷한 크기와 분포를 가지고 있으며, 이론해석값과 유한요소해석값 모두 보의 중심인 8.5 mm 지점을 기준으로 절대값 변형률을 가지고 선형으로 증가 혹은 감소한다. 보의 양끝으로부터 1 mm 지점을 제외한 전 구간에서 이론해석값과 유한요소해석값은 6% 이내로 일치하고 있으며, 보의 양끝 부근에서 유한요소해석값이 감소하는 것은 보와 강체의 연결부근에서의 끝효과와 수치적인 오차가 종합적으로 나타났기 때문이다. Fig. 8~12는 각각 보 A, B, I, K, L의 상호간섭변형률을 나타낸 것이다. Fig. 8과 9는 보 A와 B의 상호간섭오차를 나타낸 것이며, 이론해석값과 유한요소해석값은 5% 이내로 일치한다. 이론해석값과 유한요소해석값이 9.5 mm 부근에서 모두 0인 것은 본 A, B, I 사이에 위치한 블록이 회전하였기 때문이다. 이론해석값을 기준으로 유한요소해석값의 오차는 10% 이내로 일치하며, 유한요소해석값이 보의 끝지점으로 갈수록 점점 이론해석값으로부터 큰 오차를 보인다. 이것은 이론해석시에는 모든 블록을 강체로 가정하였으나 유한요소해석에서는 블록들이 미소하게 변형되기 때문에 정확한 힘이 전달되지 않았기 때문으로 생각된다. Fig. 11과 12는 보 K와 L의 상호간섭변형률을 나타낸 것이다. 이론해석값을 기준으로 유한요소값의 오차는 5 $\mu\text{m/m}$ 이내로 일치한다.

Fig. 13~15는 모멘트 $M_z=-2$ Nm가 하중전달블록에 가해졌을 때 보 I, A, B의 변형률을 나타낸 것이다. Fig. 13은 보 I의 변형률을 나타낸 것이며, 이론해석값을 기준으로 유한요소해석값의 오차는 최대 13.6%를 보인다. 이것은 하중전달블록에 모멘트를 가하였을 때 이론해석시에는 모든 블록을 강체로 가정하였으나 유한요소해석에서는 블록들이 미소하게 변형되기 때문에 정확한 힘이 전달되지 않았기 때문으로 생각된다. Fig. 14와 15는 보 A와 B의 상호간섭변형률을 나타내고 있다. 이론해석값을 기준으로 유한요소해석값의 오차는 최대 11% 이내

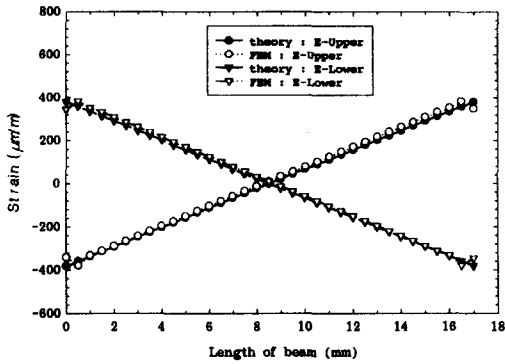


Fig. 6 Strain distribution of beam E under force F_y of -100 N

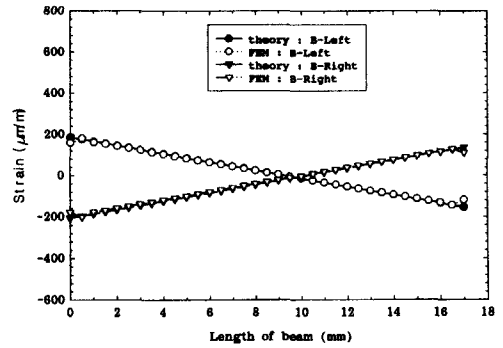


Fig. 9 Strain distribution of beam B under force F_y of -100 N

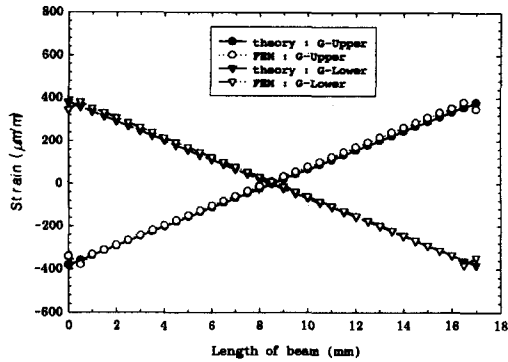


Fig. 7 Strain distribution of beam G under force F_y of -100 N

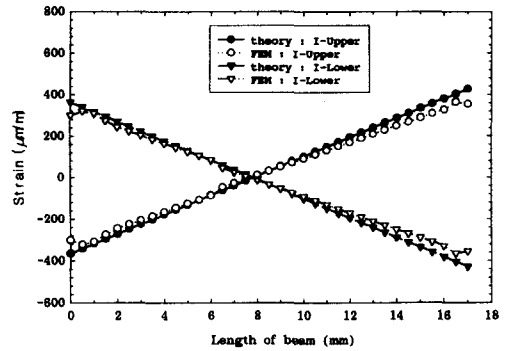


Fig. 10 Strain distribution of beam I under force F_y of -100 N

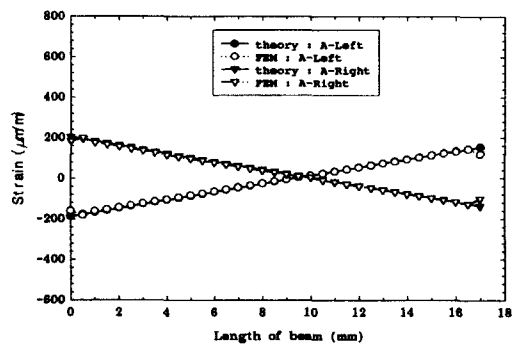


Fig. 8 Strain distribution of beam A under force F_y of -100 N

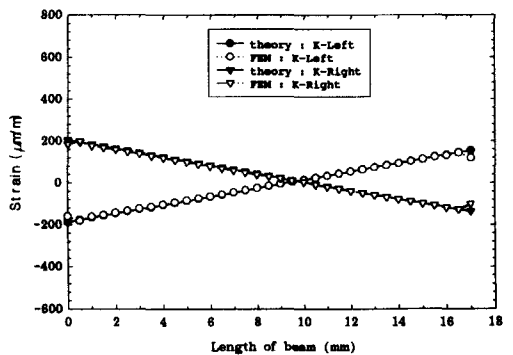


Fig. 11 Strain distribution of beam K under force F_y of -100 N

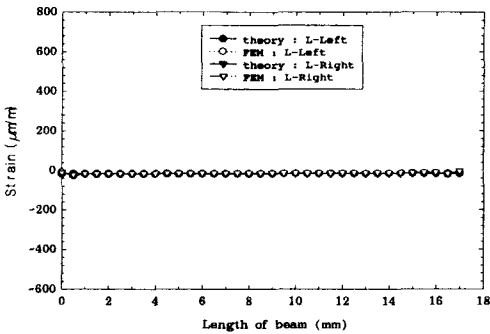


Fig. 12 Strain distribution of beam L under force F_y of -100 N

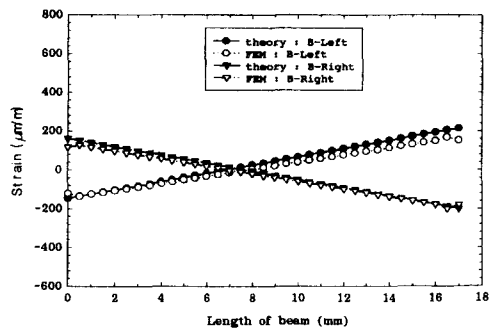


Fig. 15 Strain distribution of beam B under moment M_z of 2 Nm

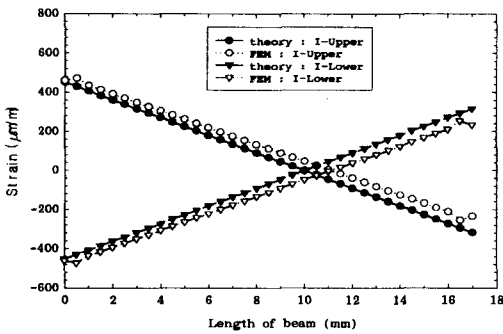


Fig. 13 Strain distribution of beam I under moment M_z of 2 Nm

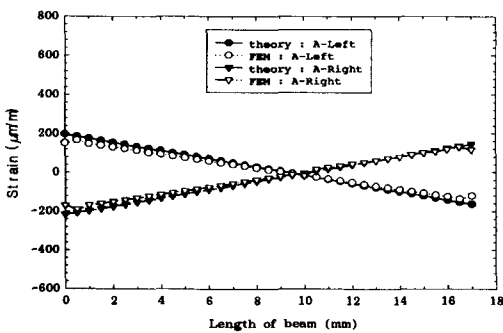


Fig. 14 Strain distribution of beam A under moment M_z of 2 Nm

로 일치한다. 이론해석값을 기준으로 유한요소값을 비교한 최대오차 13.6%는 해석프로그램이 가지고 있는 해석오차를 감안할 때 좋은 결과라고 생각된다. 따라서 본 논문에서 유도한 변형률식은 고안한 정밀 3분력 로드셀을 설계하는데 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

6. 정격변형률 및 상호간섭오차 계산

Fig. 16은 각각의 힘과 모멘트를 감지하는 스트레인 게이지를 부착할 수 있는 위치를 나타낸 것이다. 힘 F_x 를 감지하는 로드셀의 스트레인 게이지는 S_1, S_4, S_5, S_8, F_y 인 경우에는 $S_9, S_{12}, S_{13}, S_{16}$, M_z 인 경우에는 $S_{33} \sim S_{36}$ 으로 선정하였다.

각 로드셀의 스트레인 게이지 부착위치에서의 변형률과 상호간섭변형률을 이용하여 각 로드셀의 정격변형률과 상호간섭오차를 식(28)에 의해 계산하여 Table 1에 나타냈다.

$$\epsilon = \epsilon_{T1} - \epsilon_{C1} + \epsilon_{T2} - \epsilon_{C2} \quad (28)$$

여기서 ϵ 은 완전결선회로부터 계산된 변형률, ϵ_{T1} 은 인장 스트레인 게이지 T_1 의 변형률, ϵ_{T2} 은 인장 스트레인 게이지 T_2 의 변형률, ϵ_{C1} 은 압축 스트레인 게이지 C_1 의 변형률, ϵ_{C2} 은 압축 스트레인 게이지 C_2 의 변형률이다. 완전결선회로는 Fig. 17에 나타내었다.

Table 1에서, 정격변형률은 힘 F_x, F_y, M_z 로드

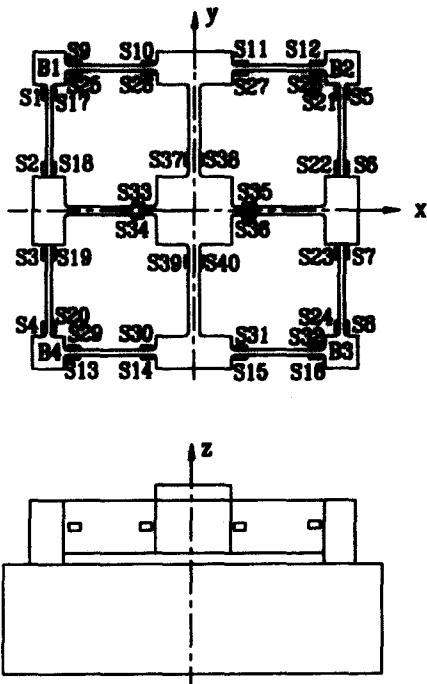


Fig. 16 Location of strain gages

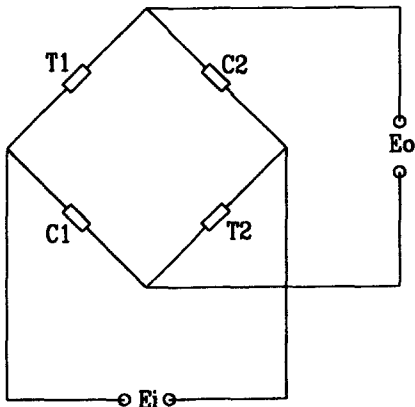


Fig. 17 Full bridge circuit

셀의 이론해석값은 $984 \mu\text{m/m}$, $984 \mu\text{m/m}$, 1044 m/m 이었고, 유한요소해석값은 $968 \mu\text{m/m}$, 968 m/m , $1052 \mu\text{m/m}$ 이었으며, 실험값은 956μ

1044 m/m , $963 \mu\text{m/m}$, $1102 \mu\text{m/m}$ 이었다. 이론해석을 기준으로 유한요소해석을 비교한 결과 정격변형률 오차는 최대 1.7% 이내 이었으며, 이론해석을 기준으로 실험값을 비교한 결과는 5.4% 이었다. 그리고 다분력 로드셀의 정밀 정확도에 큰 영향을 미치는 상호간섭 오차는 이론해석을 기준으로 유한요소해석을 비교한 경우는 모두 0% 이었으며, 이론해석을 기준으로 실험을 비교한 경우는 5.4% 이내 이었다.

따라서 본 논문에서 유도한 식 (9), (24)는 고안한 정밀 3분력 로드셀의 설계를 위한 정격변형률, 그리고 식 (10)~(15)와 식 (25)~(27)은 상호간섭 변형률을 각각 계산하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 이론해석 및 유한요소해석 모두에서 설계한 정밀 3분력 로드셀의 상호간섭 오차가 0이었으므로 로드셀을 제작하면 좋은 결과를 얻을 것으로 생각된다.

Table 1 Rated strain and interference error of each component

센서		정격변형률 ($\mu\text{m/m}$)	상호간섭오차 (%)
Fx 감지용	이론해석	984	0
	FEM	968	0
	실험	956	1.0
Fy 감지용	이론해석	984	0
	FEM	968	0
	실험	963	1.5
Mz 감지용	이론해석	1044	0
	FEM	1052	0
	실험	1102	1.7

7. 결론

본 논문에서는 정격용량이 힘 $F_x=F_y=100 \text{ N}$, 모멘트 $M_z=2 \text{ Nm}$ 인 정밀 3분력 로드셀의 감지부를 설계하고 변형률 해석하였다. 여러 개의 보들을 조합하여 힘 F_x , F_y 및 모멘트 M_z 를 동시에 감지할

수 있는 정밀 3분력 로드셀을 고안하였으며, 로드셀의 감지부들을 설계하기 위하여 힘 또는 모멘트에 의한 보들의 변형률을 계산하는 식을 유도하였다. 유도된 식들을 이용하여 정밀 3분력 로드셀 감지부의 크기를 설계하였으며, 유도된 식이 타당한지를 검증하기 위하여 감지부에 대한 유한요소해석을 하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 이론해석을 기준으로 유한요소해석값의 정격변형률오차는 최대 1.7%이내이었고, 상호간섭오차를 계산한 결과는 모두 0%이었다.

(2) 유도한 식 (9), (24)는 고안한 정밀 3분력 로드셀의 설계를 위한 정격변형률, 그리고 식 (10)~(15)와 식 (25)~(27)은 상호간섭변형률을 각각 계산하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

(3) 이론해석 및 유한요소해석 모두에서 설계한 정밀 3분력 로드셀의 상호간섭오차가 0이었으므로 로드셀을 제작하면 좋은 결과를 얻을 것으로 생각된다.

(4) 본 연구에서 설계된 3분력 로드셀은 로봇의 힘제어에 유용하게 사용될 것이다.

참고문헌

1. Yabuki, A., "Six-Axis Force/Torque Sensor for Assembly Robots," FUJTSU Sci. Tech. J., Vol. 26, No. 1, pp.41~47, 1990.
2. Hatamura, Y., et al., "A Miniature 6-axis Force Sensor of Multilayer Parallel Plate Structure," IMEKO, pp.567~582, 1989.
3. Ono, K., et. al., "A New Design for 6-component Force/Torque Sensors," Mechanical Problems in Measuring Force and Mass, pp.39~48, 1993.
4. Ferrero, C., "The measurement of parasitic components in national force standard machines," Measurement Vol.8 No.2, pp.66~76, 1990.
5. 주진원, 김승환, 김갑순, 이경원, "VCR 주행장치의 2축 플랜지 반력 측정장치 개발," 대한기계학회 논문집(A), 제20권, 제7호, pp.2213~2222, 1996.
6. 김갑순, 강대임, 정수연, 주진원, "병렬판구조를 이용한 3분력 로드셀 감지부의 설계," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제11호, pp.1871~1884,

1995.

7. 김갑순, 이세현, 엄기원, "평판보를 이용한 6분력 로드셀 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회, 제15권 제8호, pp.109~115, 1998.
8. 김갑순외 4명, "전기식 힘측정기의 표준교정절차(KASTO 97-07-104-104)," 한국측정기기 교정협회, pp.3~15, 1997.