

< 논 문 >

병렬판구조를 이용한 3분력 로드셀 감지부의 설계

김갑순* · 강대임* · 정수연** · 주진원***

(1997년 2월 21일 접수)

Design of Sensing Element for 3-component Load Cell Using Parallel Plate Structure

G. S. Kim, D. I. Kang, S. Y. Joung and J. W. Joo

Key Words : Multi-component Load Cell(다분력 로드셀), Sensing Element(감지부), Interference Error(상호간섭 오차), Interference Strain(상호간섭 변형률), Parallel Plate Structure(PPS : 병렬판구조)

Abstract

This paper describes the design process of a 3-component load cell with a multiple parallel plate structure which may be used to measure transverse forces and twisting moment simultaneously. Also we have derived equations to predict the bending strains on the surface of the beams in the multiple parallel plate structure under transverse force or twisting moment. It reveals that the bending strains calculated from the derived equations are in good agreement with the results from finite element analysis and experiment. Also we have evaluated the rated output and interference error of each component, which can be efficiently used to design a 3-component load cell with a multiple parallel plate structure.

기 호 설 명

- M_A, \dots, J : 보 A, \dots, J 에 작용되는 z 방향의 비틀림모멘트 성분(Nm)
- F_{Ex}, \dots, Jx : 보 E, \dots, J 에 작용되는 x 방향의 힘성분(N)
- F_{Ay}, \dots, Ly : 보 A, \dots, L 에 작용되는 y 방향의 힘성분(N)
- ϵ_A, \dots, L : 보 A, \dots, L 의 표면에 작용하는 굽힘 변형률($\mu\text{m}/\text{m}$)
- I_1 : 보 A, \dots, H 의 2차 단면계수(mm^4)
- I_2 : 보 I, \dots, L 의 2차 단면계수(mm^4)

1. 서 론

기계설비의 자동화, 공작기계의 고급화 등으로 인하여 여러 방향의 힘과 모멘트를 정확하게 측정해야 할 필요성이 날로 증가하고 있다.^(1~4) 여러 방향의 힘과 모멘트를 측정하기 위해서는 로드셀을 여러 개 조합하여 사용하여야 하나^(5,6) 공간상의 제약 및 로드셀 무게의 제약을 받는 경우에는 힘성분 및 모멘트성분을 하나의 로드셀로 측정할 수 있는 다분력 로드셀(multi-component load cell)이 필요하다.

Yabuki⁽¹⁾는 여덟 개의 병렬스프링으로 구성된 직교형 다분력 로드셀의 감지부를 고안하였으며, Hatamura⁽²⁾는 병렬평판(parallel plate)과 방사평판(radial plate)을 이용한 감지부를 고안하였다.

*회원, 한국표준과학연구원 역학연구원

** (주) 카스

***회원, 충북대학교 기계공학과

Scheinman⁽³⁾은 직교하는 4개의 탄성보(elastic beam)를 이용하여 감지부를 구성하고 보의 강성저하를 줄이기 위하여 일반 스트레인 게이지 대신 게이지상수가 큰 반도체 스트레인 게이지를 사용하였다. 그리고 링형구조의 감지부 및 플라이포트(flypot)형 감지부 등이 고안되었다. 이와 같이 이미 개발된 다분력 로드셀들은 특허에 등록되어 있을 뿐만 아니라 개당 가격이 1,000~5,000만원의 고부가가치 상품이므로 모방이나 기술이전이 매우 어려운 실정이다. 국내의 산업체에서 다분력 로드셀에 대한 수요가 증가하고 있는 추세를 감안해 볼 때 우리 고유 모델의 다분력 로드셀 감지부를 개발할 필요성이 대두된다.

다분력의 힘과 모멘트를 동시에 측정해야 하는 로드셀의 설계에서 제일 중요하게 고려해야 할 사항은 하중간의 상호간섭이다. 즉, 한 방향의 힘이 가해질 때 이것을 감지하는 로드셀의 출력값은 크게 발생되고 그 이외의 힘 또는 모멘트를 감지하는 로드셀의 출력값은 0이어야 한다. 그러나 다분력 로드셀의 구조상 그 방향의 힘이 가해지지 않았는데도 로드셀의 출력이 감지될 수 있는데 이것을 상호간섭 오차(interference error)라고 부른다. 이와 같은 상호간섭 오차는 다분력 로드셀의 정확도에 큰 영향을 미치므로 다분력 로드셀의 감지부는 상호간섭오차가 작도록 설계되어야만 한다. 따라서 정밀 다분력 로드셀을 설계하기 위해서는 감지부내의 스트레인 게이지가 부착되는 지점의 변형률과 상호간섭 변형률(interference strain)을 계산하거나 예측할 수 있어야 한다.^(2,3,7)

본 논문에서는 병렬평판구조를 여러 개 조합하여 힘 F_x , F_y 및 모멘트 M_z 를 동시에 감지할 수 있는 3분력 로드셀의 감지부를 고안하였다. 또한 힘 또는 모멘트에 의한 보들의 변형률 및 상호간섭 변형률을 계산하는 식을 유도하였으며, 유도된 식들을 이용하여 감지부의 크기를 설정하여 3분력 로드셀의 감지부를 설계하였다. 이론해석 식이 타당한지를 검증하기 위하여 감지부에 대한 유한요소해석 및 실험으로 변형률을 얻어내어 이론해석 값과 비교하였다. 또한 이론해석과 유한요소해석으로 얻은

변형률과 상호간섭 변형률들을 분석하여 스트레인 게이지의 위치를 선정하고 게이지를 조합하여 구성될 완전결선회로의 상호간섭 오차를 예측하여 계산하였다.

2. 3분력 로드셀 감지부의 구조

2.1 병렬판구조의 변형형태

병렬판구조(parallel plate structure, PPS)는 크기가 같은 두개의 보와 사각형 블록으로 구성된 것으로 단순보에 비해 변위가 작으면서 상대적으로 변형률을 크게 할 수 있으므로 다분력 로드셀의 감지부 기본구조로 많이 사용된다.⁽⁸⁾ Fig. 1은 두개의 병렬판구조와 블록으로 구성된 탄성체를 나타내고 있다. Fig. 1(a)는 좌표축과 탄성체가 변형되기 전의 형상을 나타내고 있으며, Fig. 1(b)는 $-y$ 방향의 힘 F_y 가 가해졌을 때, Fig. 1(c)는 z 방향의 모멘트 M_z 가 가해졌을 때 각각의 변형된 PPS의 모습과 예상되는 스트레인 게이지(strain gage) 부착위치를 나타내고 있다. Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 힘이 가해졌을 때는 가운데 블록이 회전없이 수직으로 처짐만 발생하므로 위쪽의 보 표면에는 가운데 블록에서 가까운 부분에 압축변형률이 먼쪽 부분에 인장변형률이 발생하며, 아래쪽 보에서는 반대의 현상을 보인다. Fig. 1(c)에서 보는 바와 같이 모멘트가 가해졌을 때에는 굽힘모멘트와 인장 혹은 압축힘이 작용하므로 가운데 블록에서 가까운 부분에 큰 인장 혹은 압축변형률이 발생하고 먼 부분에 적은 인장 혹은 압축변형률이 발생한다. 이 경우 게이지 SG1~SG4를 이용하여 힘을 감지하는 완전결선회로(full bridge circuit)를 구성하고 게이지 SG5~SG8을 이용하여 모멘트를 감지하는 완전결선회로를 구성하여 각각의 로드셀을 만들면 로드셀의 정격출력(rated output)을 최대로 할 수 있을 뿐만 아니라 상호간섭 오차를 최소화 할 수 있다. 이러한 특징을 이용하여 본 논문에서는 PPS를 기본구조로 선택하여 3분력 로드셀의 감지부를 고안하였다.

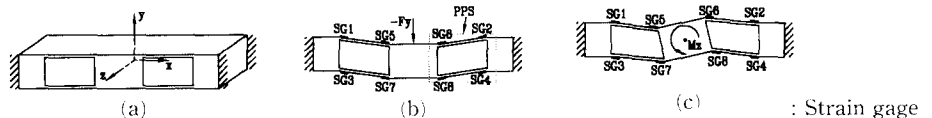


Fig. 1 Basic structures and deformation shapes of the parallel plate structure (PPS)

2.2 3분력 로드셀의 감지부 구조

3분력 로드셀의 감지부는 PPS 여러 개를 Fig. 2와 같이 조합하여 x, y방향의 힘 F_x , F_y 및 z방향의 비틀림모멘트 M_z 를 동시에 측정할 수 있도록 설계하였다. 힘 F_x 가 가해졌을 때에는 PPS1~4가 힘 F_y 가 가해졌을 때에는 PPS5~8이 Fig. 1(b)와 같이 변형되도록 PPS들을 조합하였으며, 비틀림

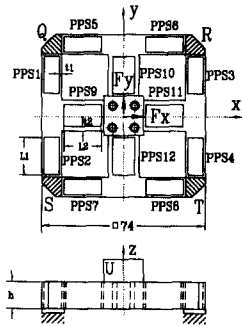


Fig. 2 Structure of sensing element for 3-component load cell

모멘트 M_z 가 가해졌을 때에는 PPS9~12가 Fig. 1(c)와 같이 변형되도록 PPS들을 조합하였다. 스트레인 게이지 보호용케이스를 쉽게 조립할 수 있도록 12개의 PPS들은 원통을 틀(frame)로 하는 베이스구조와 한 몸체를 이루도록 설계하였다. Fig. 2의 Q, R, S, T 블록은 감지부와 몸체와의 고정부를 나타낸다.

변형률해석시 편리를 위하여 PPS1~8의 보의 두께(t_1), 보의 폭(h), 보의 길이(L_1)를 각각 같도록 하였고, 또한 PPS9~12의 보의 두께(t_2), 보의 폭(h), 보의 길이(L_2)를 각각 같도록 하여 전체 구조를 상하좌우가 대칭이 되도록 하였다.

3. 감지부의 변형을 해석

PPS를 구성하는 보들의 변형을 해석은 유한요소법, 수치해석법 등을 이용할 수 있으나 이 경우 기하학적인 요소들과 변형률과의 관계를 직접 알 수 없으므로 보의 크기 설계를 위해서는 이론적인 관계식을 유도하여야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 계산의 편의를 위하여 2차원 문제로 가정하여 해석하였고, 힘 F_x 와 F_y 가 가해질 때는 같은 변형거동을 보일 것이므로 횡하중 힘 F_y 와 비틀림모멘트 M_z 가 가해졌을 때 스트레인 게이지의 부착이 예상되는 보표면에 대한 변형률식을 각각 유도하였다.

3.1 힘에 의한 변형을 해석

Fig. 3은 y방향으로 힘 $-P$ 가 가해졌을 때 PPS의 구성요소인 보와 블록이 연결되어 있는 지점에 내부적으로 작용하는 힘성분과 모멘트성분을 나타내고 있다. 블록 1, 블록 2, 블록 3은 PPS 구조의 대칭조건에 의해 y방향의 강체변위 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 만이 존재하는 것으로 하였다. 블록 4는 보 I, J에 의해 전달된 힘에 의해 x, y방향 및 회전변위가 예상되며, 이때의 강체변위를 각각 u_1, v_1, ϕ_1 로 나타내었다. 변위성분들중 δ_1, δ_3 가 식 전개 도중에 소거되므로 각 보의 힘과 모멘트는 $\delta_2, u_1, v_1, \phi_1$ 의 함수로 표현된다.

보 A, B, K의 경우 블록 1이 y방향으로 변위 1의 처짐이 발생하고 x방향의 변위와 회전변위는 발생하지 않는다는 조건과 보 A, B의 굽힘모멘트-처짐식, 보 K의 인장력-변위관계식을 이용하고 블록 1의 힘 평형조건 $\sum F_y=0$ 을 고려하면 내부적으로 작용하는 각 보들의 힘 및 모멘트는 식 (1)과

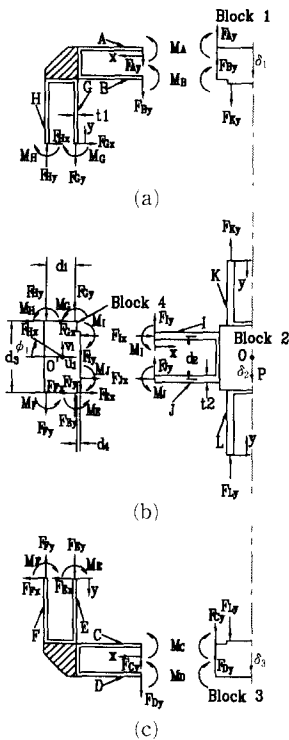


Fig. 3 Free body diagrams of multiple parallel plate structure for 3-component load cell under the transverse force F_y

같이 δ_2 의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} F_{Ay} &= F_{By} = \frac{t_2 h E}{2L_3} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{t_2 h L_1^2}{24I_1 L_2}\right)} \delta_2 \\ M_A &= M_B = \frac{t_2 h E L_1}{4L_2} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{t_2 h L_1^3}{24I_1 L_2}\right)} \delta_2 \\ F_{Ky} &= \frac{t_2 h E}{L_2} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{t_2 h L_1^3}{24I_1 L_2}\right)} \delta_2 \end{aligned} \quad (1)$$

같은 방법으로 보 C, D, L의 경우, 보 K와 L의 크기가 같으므로 보 K의 인장변위와 보 L의 압축변위의 절대값이 같다고 가정하면 $F_{Ay} = F_{By} = F_{Cy} = F_{Dy}$, $M_A = M_B = M_C = M_D$, $F_{Ly} = -F_{Ky}$ 의 관계가 얻어진다.

보 I, J의 경우, 블록 4의 중심점 O'가 x, y방향의 변위 및 회전변위 u_1, v_1, ϕ_1 로 이동하였다고 가정할 수 있다. 블록 4와 연결되는 각 보들의 중립축과 만나는 점들의 x 및 y방향의 변위를 기하학적인 관계식을 이용하여 u_1, v_1, ϕ_1 의 함수로 구한 식과 각 보의 굽힘모멘트에 의한 처짐식, 인장 및 압축에 의한 변위관계식을 이용하여 보 I, J의 끝단에 내부적으로 작용하는 힘과 모멘트를 구하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} F_{Iy} &= F_{Jy} \\ &= \frac{12EI_2}{L_2^3} \left\{ \delta_2 - v_1 - \left(\frac{d_1}{2} + \frac{t_1}{2} + d_4 + \frac{L_2}{2} \right) \phi_1 \right\} \\ F_{Ix} &= \frac{t_2 h E}{L_2} \left(u_1 + \frac{d_2}{2} \phi_1 \right) \\ F_{Jx} &= \frac{t_2 h E}{L_2} \left(-u_1 + \frac{d_2}{2} \phi_1 \right) \\ M_I &= M_J \\ &= \frac{12EI_2}{L_2^2} \left\{ \frac{\delta_2}{2} - \frac{v_1}{2} - \left(\frac{d_1}{4} + \frac{t_1}{4} + \frac{d_4}{2} + \frac{L_2}{3} \right) \phi_1 \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

같은 방법으로 보 E, F, G, H의 끝단에 내부적으로 작용하는 힘과 모멘트는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{Ey} &= F_{Gy} = \frac{t_1 h E}{L_1} \left(v_1 + \frac{d_1}{2} \phi_1 \right) \\ F_{Fy} &= F_{Hy} = \frac{t_1 h E}{L_1} \left(-v_1 + \frac{d_1}{2} \phi_1 \right) \\ F_{Ex} &= F_{Fx} = \frac{12EI_1}{L_1^3} \left\{ -u_1 + \left(\frac{d_3}{2} + \frac{L_1}{2} \right) \phi_1 \right\} \\ F_{Cx} &= F_{Hx} = \frac{12EI_1}{L_1^3} \left\{ u_1 + \left(\frac{d_3}{2} + \frac{L_1}{2} \right) \phi_1 \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_E &= M_F = \frac{12EI_1}{L_1^2} \left\{ -\frac{u_1}{2} + \left(\frac{d_3}{4} + \frac{L_1}{3} \right) \phi_1 \right\} \\ M_C &= M_H = \frac{12EI_1}{L_1^2} \left\{ \frac{u_1}{2} + \left(\frac{d_3}{4} + \frac{L_1}{3} \right) \phi_1 \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)은 강체변위 $u_1, v_1, \phi_1, \delta_2$ 4개의 함수로 표현된다. 여기서, 블록 2의 힘평형조건 $\sum F_x = 0$ 과 블록 4의 힘 및 모멘트 평형조건 $\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M_o = 0$ 에 식 (1), (2), (3)을 대입하여 정리하면 식 전제도중 u_1 이 소거되므로 식 (4)와 같이 연립방정식의 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} k_1 \delta_2 + k_2 v_1 + k_3 \phi_1 &= \frac{P}{4} \\ k_4 \delta_2 + k_5 v_1 + k_6 \phi_1 &= 0 \\ k_7 \delta_2 + k_8 v_1 + k_9 \phi_1 &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $k_i (i=1, \dots, 9)$ 는 PPS의 치수와 재료상수에 의해 계산되는 상수로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{t_2 h E}{L_2} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{t_2 h L_1^3}{24I_1 L_2}\right)} + \frac{12EI_2}{L_2^3} \\ k_2 &= -\frac{12EI_2}{L_2^3} \\ k_3 &= -\frac{12EI_2}{L_2^3} \left(\frac{d_1}{2} + \frac{t_1}{2} + d_4 + \frac{L_2}{2} \right) \\ k_4 &= -\frac{24EI_2}{L_2^3} \\ k_5 &= \frac{4t_1 h E}{L_1} + \frac{24EI_2}{L_2^3} \\ k_6 &= \frac{24EI_2}{L_2^3} \left(\frac{d_1}{2} + \frac{t_1}{2} + d_4 + \frac{L_2}{2} \right) \\ k_7 &= (d_1 + t_1 + 2d_4) \frac{12EI_2}{L_2^3} + \frac{12EI_2}{L_2^2} \\ k_8 &= -(d_1 + t_1 + 2d_4) \frac{12EI_2}{L_2^3} - \frac{12EI_2}{L_2^2} \\ k_9 &= -d_3^2 \frac{24EI_1}{L_1^3} \left(\frac{d_3}{2} + \frac{L_1}{2} \right) - \frac{d_1^2 t_1 h E}{L_1} \\ &\quad - (d_1 + t_1 + 2d_4) \frac{12EI_2}{L_2^3} \left(\frac{d_1}{2} + \frac{t_1}{2} + d_4 + \frac{L_2}{2} \right) \\ &\quad - \frac{d_2^2 t_2 h E}{2L_2} - \frac{24EI_2}{L_2^2} \left(\frac{d_1}{4} + \frac{t_1}{4} + \frac{d_4}{2} + \frac{L_2}{3} \right) \\ &\quad - \frac{48EI_1}{L_1^2 \left(\frac{d_3}{4} + \frac{L_1}{3} \right)} \end{aligned}$$

각 보의 표면에 발생하는 변형률은 굽힘모멘트에 의한 굽힘변형률과 인장 또는 압축에 의한 변형률을 중첩함으로써 식 (5), (6), (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_A = -\epsilon_B = \epsilon_C = -\epsilon_D \\ = -\frac{t_2 h t_1}{8 I_1 L_2} \times \frac{\delta_2}{\left(1 + \frac{t_2 h L_1^3}{24 I_1 L_2}\right)} (2x - L_1) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_G = -\epsilon_E \\ = \frac{3 t_1}{L_1^3} \left[\frac{d_3 \phi_1}{2} (L_1 - 2y) + \phi_1 L_1 \left(\frac{2 L_1}{3} - y \right) \right] \\ + \frac{1}{L_1} \left(v_1 + \frac{d_1}{2} \phi_1 \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_H = -\epsilon_F \\ = -\frac{3 t_1}{L_1^3} \left[\frac{d_3 \phi_1}{2} (L_1 - 2y) + \phi_1 L_1 \left(\frac{2 L_1}{3} - y \right) \right] \\ - \frac{1}{L_1} \left(-v_1 + \frac{d_1}{2} \phi_1 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_K = \epsilon_L = \frac{\delta_2}{L_2 \left(1 + \frac{t_2 h L_1^3}{24 I_1 L_2} \right)} \\ \epsilon_I = -\epsilon_J \\ = \frac{3 t_2}{L_2^3} \left[\left\{ \delta_2 - v_1 - \left(\frac{d_1}{2} + \frac{t_1}{2} + d_4 \right) \phi_1 \right\} (L_2 - 2x) \right. \\ \left. - \phi_1 L_2 \left(\frac{2 L_2}{3} - x \right) \right] - \frac{d_2 \phi_1}{2 L_2} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (4)의 연립방정식의 해 δ_2, v_1, ϕ_1 을 구하여 식 (5), (6), (7)에 대입하면 힘 F_y 가 가해졌을 때 각 보에 발생하는 변형률을 구할 수 있다. 식 (5)는 힘 F_y 가 가해졌을 때 힘 F_y 용 감지부의 변형률을 계산하는데 사용되고, 식 (6) 및 (7)은 힘 F_y 가 가해졌을 때 힘 F_x 및 모멘트 M_z 용 감지부의 상호간섭 변형률을 계산하는데 사용될 수 있다.

3.2 비틀림모멘트에 의한 변형률 해석

Fig. 4는 로드셀 감지부에 모멘트 M_z 가 작용될 때 보와 블록이 연결되는 지점에 작용하는 힘과 모멘트 성분을 나타내고 있으며 감지부의 구조가 기하학적으로 상하 및 좌우대칭이므로 1/4만 해석하였다. 블록 2는 기하학적 대칭조건에 의해 회전만 하는 것으로 가정할 수 있으며, 이 때의 회전변위를 θ 로 표시하였다. 블록 4에는 보 I, J에 의해 전달된 힘에 의해 x, y방향의 축방향 변위와 z방향의 회전변위가 발생될 것이 예상되므로 그 때의 변위들을 각각 u_2, v_2, ϕ_2 로 나타내었다. 변위성분들중 u_2 가 식 전개 도중에 소거되므로 각 보에 작용하는 힘과 모멘트는 v_2, ϕ_2, θ 의 함수로 표현될 수 있다.

각 보의 힘과 모멘트는 힘이 가해졌을 때와 같은 과정으로 구하고, 이것을 블록 2의 모멘트평형조건

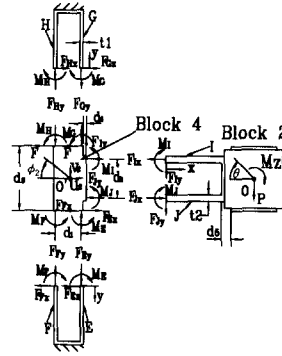


Fig. 4 Free body diagram of multiple parallel plate structure for 3-component load cell under the twisting moment M_z

$\sum M_o = 0$ 과 블록 4의 힘 및 모멘트 평형조건 $\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M_o = 0$ 에 대입하여 정리하면 식 (8)과 같이 연립방정식의 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} k_{10} \theta + k_{11} v_2 + k_{12} \phi_2 &= \frac{M_z}{4} \\ k_{13} \theta + k_{14} v_2 + k_{15} \phi_2 &= 0 \\ k_{16} \theta + k_{17} v_2 + k_{18} \phi_2 &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $k_i (i=10, \dots, 18)$ 는 PPS의 치수에 의해 계산되는 상수로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} k_{10} &= 2 \left(L_2 + d_5 + \frac{t_2}{2} \frac{d_2}{2} \right) \frac{12 E I_2}{L_2^3} \\ &\quad \times \left(\frac{L_2}{2} + d_5 + \frac{t_2}{2} + \frac{d_2}{2} \right) + \frac{d_2^2 t_2 h E}{2 L_2} \\ &\quad - \frac{12 E I_2}{L_2^2} \left(d_5 + \frac{t_2}{2} + \frac{d_2}{2} + \frac{L_2}{3} \right) \\ k_{11} &= -2 \left(L_2 + d_5 + \frac{t_2}{2} + \frac{d_2}{2} \right) \frac{12 E I_2}{L_2^3} + \frac{12 E I_2}{L_2^2} \\ k_{12} &= 2 \left(L_2 + d_5 + \frac{t_2}{2} + \frac{d_2}{2} \right) \frac{12 E I_2}{L_2^3} \\ &\quad \times \left(\frac{d_1}{2} + \frac{t_1}{2} + d_4 + \frac{L_2}{2} \right) - \frac{d_2^2 t_2 h E}{2 L_2} \\ &\quad - \frac{12 E I_2}{L_2^2} \left(\frac{3 L_2}{2} + \frac{d_1}{2} \frac{t_1}{2} + d_4 \right) \\ k_{13} &= \frac{24 E I_2}{L_2^3} \left(\frac{L_2}{2} + d_5 + \frac{t_2}{2} + \frac{d_2}{2} \right) \\ k_{14} &= -\frac{2 t_1 h E}{L_1} - \frac{12 E I_2}{L_2^3} \\ k_{15} &= \frac{12 E I_2}{L_2^3} \left(\frac{d_1}{2} + \frac{t_1}{2} + d_3 + \frac{L_2}{2} \right) \\ k_{16} &= - \left(d_1 + t_1 + 2 d_4 \right) \frac{12 E I_2}{L_2^3} \\ &\quad \times \left(\frac{L_2}{2} + d_5 + \frac{t_2}{2} + \frac{d_2}{2} \right) + \frac{d_2^2 t_2 h E}{2 L_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{12EI_2}{L_2^3}\left(d_5 + \frac{t_2}{2} + \frac{d_2}{2} + \frac{L_2}{3}\right) \\
k_{17} &= 2d_1t_1h\frac{E}{L_1} + 2(d_1 + t_1/2 + d_4) \\
& \quad \times \frac{12EI_2}{L_2^3} + \frac{12EI_2}{L_2^2} \\
k_{18} &= -d_3\frac{23EI_1}{L^3}\left(\frac{d_3}{2} + \frac{L_1}{2}\right) - \frac{d_1^2t_1hE}{L_1} \\
& \quad - \left(d_1 + \frac{t_1}{2} + d_4\right)\frac{24EI_2}{L_2^3}\left(\frac{d_1}{2} + \frac{t_1}{2} + d_4 + \frac{L_2}{2}\right) \\
& \quad - (d_3 - 2d_5 - t_2)\frac{d_2t_2hE}{2L_2} \\
& \quad - \frac{24EI_2}{L_2^3}\left(\frac{d_1}{4} + \frac{t_1}{4} + \frac{d_4}{2} + \frac{L_2}{3}\right) \\
& \quad - \frac{48EI_1}{L_1^3}\left(\frac{d_3}{4} + \frac{L_1}{3}\right)
\end{aligned}$$

각 보에 발생하는 변형률은 굽힘모멘트에 의한 변형률과 인장 또는 압축에 의한 변형률들을 중첩함으로써 식 (9), (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_I &= -\varepsilon_J \\
&= \frac{3t_2}{L_2^3}\left[\left\{\left(d_5 + \frac{t_2}{2} + \frac{t_2}{2}\right)\theta - v_2\right.\right. \\
& \quad \left.\left. - \left(\frac{d_1}{2} + \frac{t_2}{2} + d_4\right)\phi_2\right\}(2x - L_2)\right. \\
& \quad \left. + L_2\theta\left(x - \frac{L_2}{3}\right) + \phi_2L_2\left(x - \frac{2L_2}{3}\right)\right] \\
& \quad + \frac{d_2}{2L_2}(\theta - \phi_2) \quad (9)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_H &= -\varepsilon_F \\
&= -\frac{3t_1}{L_1^3}\left[\frac{d_3\phi_2}{2}(L_1 - 2y) + \phi_2L_1\left(\frac{2L_1}{3} - y\right)\right] \\
& \quad - \frac{1}{L_1}\left(v_2 + \frac{d_1}{2}\phi_2\right) \\
\varepsilon_G &= -\varepsilon_E \\
&= \frac{3t_1}{L_1^3}\left[\frac{d_3\phi_2}{2}(L_1 - 2y) + \phi_2L_1\left(\frac{2L_1}{3} - y\right)\right] \\
& \quad + \frac{1}{L_1}\left(-v_2 + \frac{d_1}{2}\phi_2\right) \quad (10)
\end{aligned}$$

식 (8)의 연립방정식의 해 θ , v_2 , ϕ_2 를 구하여 식 (9)와 (10)에 대입하면 모멘트 M_z 가 가해졌을 때 각 보의 변형률을 구할 수 있다. 식 (9)는 모멘트 M_z 가 가해졌을 때 모멘트 M_z 용 감지부의 변형률을 계산하는데 사용되고, 식 (10)은 모멘트 M_z 가 가해졌을 때 힘 F_x 및 F_y 용 감지부의 상호간섭 변형률을 계산하는데 사용될 수 있다.

3.3 감지부의 설계

식 (5) 및 (9)를 이용하면 본 논문에서 고안한 3분력 로드셀 감지부의 크기를 결정하였다. 설계하고자 하는 3분력 로드셀의 용량은 힘 F_x , F_y 가 모두 196 N이고, 모멘트 M_z 가 9.8 Nm이다. 보의 두께, 폭 및 길이중 어느 것이나 설계변수로 택할 수 있으나 스트레인 게이지의 크기 및 로드셀의 외형치수 등을 고려하여 감지부의 외곽크기를 가로와 세로를 각각 74 mm로 결정하였으며, 보의 폭과 길이를 각각 12 mm와 17 mm로 먼저 결정하였다. 스트레인 게이지의 부착위치는 보의 끝 효과를 배제하면서 감도가 높은 지점을 선택하여야 하므로 힘 감지부 보들의 스트레인 게이지의 부착지점은 보의 양끝으로부터 1.5 mm 떨어진 지점, 모멘트 감지부의 보는 시작점으로부터 13.5 mm 떨어진 지점으로 예측하여 결정하였다. 그리고 각 로드셀의 정격출력이 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 가 되도록 하기 위하여 이 지점에서의 설계변형률 값을 온도보정시 감소되는 정격출력을 고려하여 힘 감지부의 경우 270 $\mu\text{m}/\text{m}$, 모멘트 감지부의 경우 280 $\mu\text{m}/\text{m}$ 로 결정하였다. 결정한 모든 값들을 식 (5), (9)에 대입하여 보의 두께를 구한 결과 t_1 은 1.1 mm이었고, t_2 는 2 mm이었다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 힘과 모멘트를 가하기 위한 블록 U의 크기는 가로와 세로가 각각 18 mm이고, 높이는 보 폭(h)의 1/2지점으로부터 2방향으로 16 mm가 되도록 하였다. 아답터를 고정하기 위한 압나사는 로드셀의 최대용량을 고려하여 M4 크기로 4개를 가공하였으며, 그것의 중심선 사이의 간격은 10 mm(대각선 간격 14.142 mm)로 하였다. 감지부의 재질로는 소용량 로드셀 감지부로 많이 사용되는 알루미늄 2024-T351을 사용하였다.

4. 유한요소해석

설계된 모델에 대한 유한요소해석을 수행하여 앞에서 유도한 식들의 타당성을 검토하였다. 유한요소해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 힘 혹은 비틀림모멘트가 가해졌을 때 보의 변형률분포를 2차원으로 계산하였다. 해석은 평면응력상태로 가정하였고 사용한 유한요소는 4절점 4각형 선형요소이다. 재료상수는 사용한 재료 알루미늄의 상수값인 종탄성계수, 70 GPa로, 푸아송

의 비는 0.3으로 하였다. 격자크기는 보의 길이 (L_1, L_2)방향으로는 0.5 mm 간격, 높이 (t_1, t_2)방향으로는 2등분 하였다.

유한요소해석시 힘은 힘감지용 로드셀의 정격용량이 196 N이므로 보의 단위폭당 힘인 16.33 N/mm를 가했다. 로드셀이 사용될 때 힘이 4개의 볼트를 통하여 전달되므로 유한요소해석시에도 이 지점에 있는 4개의 절점에 $-y$ 방향(Fig. 5의 화살표 방향)으로 4.08 N을 각각 가하였다. 비틀림모멘트는 모멘트 감지용 로드셀의 정격용량이 9.8 Nm이므로 단위폭당 모멘트인 0.8167 Nm/mm를 가했다. 힘이 가해지는 지점에서 모멘트도 가해지므로 4개의 절점(node)에 중심으로부터 접선방향(Fig. 6의 화살표방향)으로 힘을 각각 28.87 N가하였다. 3분력 로드셀 감지부에 힘 혹은 모멘트를 가하기 위해서는 한쪽 면을 구속시켜야 하므로 4각 블록 Q, R, S, T 뒷면의 모든 절점을 x 및 y 방향으로 모두 구속시켰다.

Fig. 5는 유한요소해석 격자와 힘 $-F_y$ 가 가해졌을 때 유한요소해석으로부터 얻어진 로드셀 감지부의 변형형태를, Fig. 6은 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, 모멘트가 가해졌을 때는 축대칭 변형거동을 보이고 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 힘이 가해졌을 때에는 블록 1, 2, 3의 수직방향 강체변위가 크게 나타났다. 힘을 감지하는 보 A는 양끝단의 회전각이 0이므로 왼쪽 끝부분은 인장변형거동, 오른쪽 끝부분은 압축변형거동을 보였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 모멘트가 가해졌을 때 블록 2의 회전변위가 크게 발생되고 블록 4의 회전변위가 작게 발생되므로 보 I는 블록 2에서 가까운 부분에 큰 인장변형거동을 보이고 먼 부분에 작은 압축변형거동을 보였다.

Fig. 7은 $F_y = -196$ N이 가해졌을 때 이를 감지하는 보 A, B, C, D의 변형률분포를 나타내고 있다. 보 A와 C, B와 D는 각각 비슷한 변형률 분포를 가진다. 이론해석 결과에 의하면 $x=8.5$ mm 즉 보의 1/2 지점에서 변형률이 0이고 이 지점을 기준으로 양끝점 쪽으로 같은 절대값의 변형률을 가지고 선형으로 증가 혹은 감소하는 경향을 보인다. 유한요소해석 결과는 $x=8.2$ mm 지점에서 변형률이 0이므로 이론해석값과 거의 일치하였다.

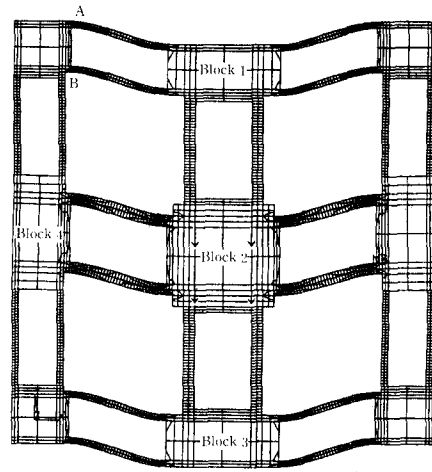


Fig. 5 Finite element mesh and deformed shape of multiple parallel plate structure under the force, $-F_y$

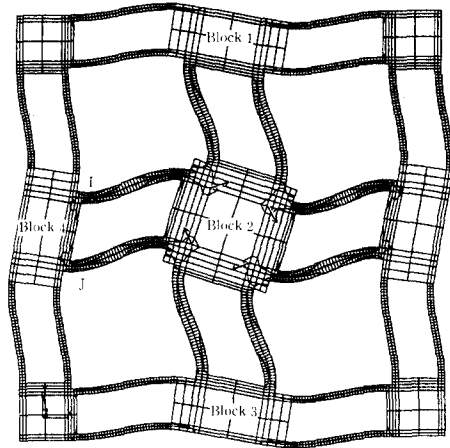


Fig. 6 Finite element mesh and deformed shape of multiple parallel plate structure under the moment, M_z

Fig. 8은 모멘트 $M_z=9.8$ Nm가 가해졌을 때 모멘트 감지부를 구성하는 보 I, J의 변형률분포를 나타내고 있다. 이론해석값과 유한요소해석값은 잘 일치하였고, 보 A, B, C, D와는 달리 $x=5.7$ mm 지점에서 변형률이 모두 0이며, 이 지점을 기준으로 양끝점 쪽으로 같은 절대값의 변형률을 가지고 선형으로 증가 혹은 감소하는 경향을 보인다. 보의 1/2지점, 즉 $x=8.5$ mm이 아닌 $x=5.7$ mm 지점에서 변형률이 0인 이유는 블록 2에 y 방향의 힘을 가했을 때 블록 4가 y 방향으로 이동함과 동시에 O'점을 중심으로 z 방향으로 회전하였기 때문으로

생각된다. Fig. 7과 8에서 보는 바와 같이 보의 양 끝점으로부터 1 mm 이내 지점을 제외한 중간부분에서 이론해석에 의한 변형률값은 유한요소해석 결과와 14.5% 이내로 일치하였으며, 보의 양끝단에서 유한요소 결과가 급격한 감소를 보이는 것은 블록과의 연결부분에서 끝효과와 수치적인 오차가 종합적으로 나타났기 때문이다.

Fig. 9는 힘 $-F_y$ 가 작용할 때 F_x 용 보 E, F, G, H에 발생하는 상호간섭 변형률(interference strain)분포를 나타내고 있으며, Fig. 10은 M_z 용 보 I, J, K, L에 발생하는 상호간섭 변형률분포를 나타내고 있다. 보 E, F, G, H인 경우보의 양끝점을 제외한 전 지점에서 이론해석 결과는 유한요소 해석 결과와 $4 \mu\text{m}/\text{m}$ 이내로 일치하고 있다. 보

E, G의 경우 상호간섭 변형률의 절대값의 최대값은 $70 \mu\text{m}/\text{m}$ 이고, 보 F, H의 경우는 $30 \mu\text{m}/\text{m}$ 이며, x축을 기준으로 보 E와 G, F와 H의 변형률 분포가 상하·대칭형상을 보이고 있다. 보 K, L인 경우 이론해석값은 절대값 $8 \mu\text{m}/\text{m}$ 으로 전 지점에서 일정하지만 유한요소해석값은 절대값의 최대값 $14 \mu\text{m}/\text{m}$ 부터 최소값 $3 \mu\text{m}/\text{m}$ 까지 선형적으로 증가 혹은 감소하는 경향을 보이며, 오차는 $6 \mu\text{m}/\text{m}$ 이내이다. 보 I와 J의 경우 상호간섭 변형률의 절대값의 최대값은 $550 \mu\text{m}/\text{m}$ 이고, 보의 양끝점을 제외한 전 지점에서 이론해석결과와 유한요소해석 결과는 $20 \mu\text{m}/\text{m}$ 이내로 일치한다.

Fig. 11은 모멘트 M_z 가 작용할 때 보 E, F, G, H의 상호간섭 변형률분포를 나타내고 있다. 보의

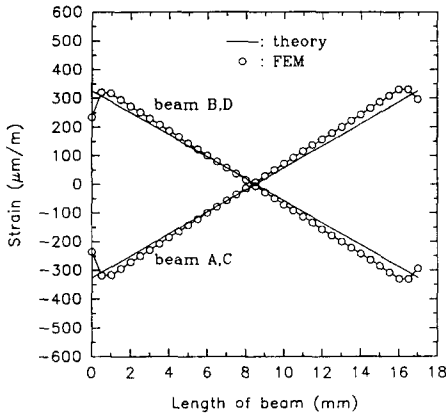


Fig. 7 The strain distribution of beam A, B, C, and D in multiple parallel plate structure under the force, $-F_y$

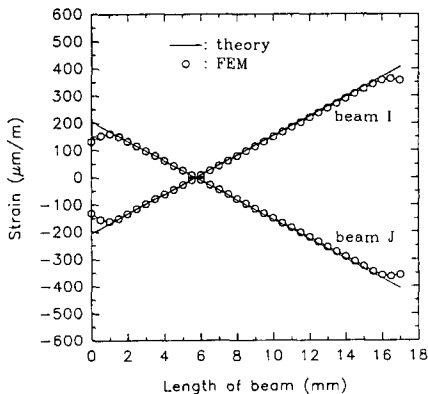


Fig. 8 The strain distribution of beam I and J in multiple parallel plate structure under the moment, M_z

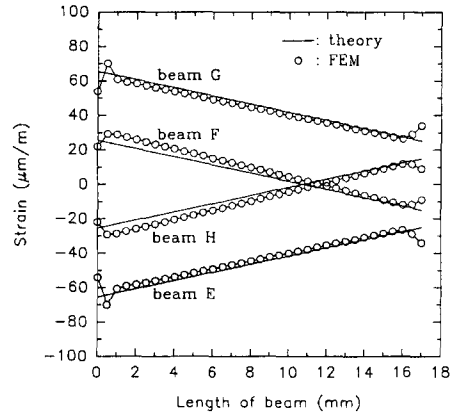


Fig. 9 The interference strain distribution of beam E, F, G, H, K, and L in multiple parallel plate structure under the force, $-F_y$

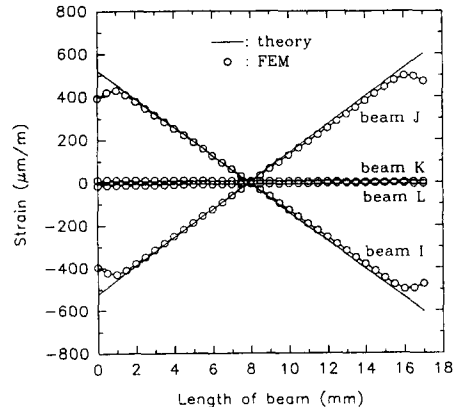


Fig. 10 The interference strain distribution of beam I, J, K and L in multiple parallel plate structure under the force, $-F_y$

양끝점을 제외한 중간부분에서 이론해석 결과와 유한요소해석결과는 $6 \mu\text{m}/\text{m}$ 이내로 일치한다. 보 E, G의 경우 상호간섭 변형률의 절대값의 최대값은 $141 \mu\text{m}/\text{m}$ 이고, 보 F, H의 경우에는 $164 \mu\text{m}/\text{m}$ 이며, x축을 기준으로 보 E와 G, F와 H의 변형률 분포가 상하·대칭형상을 보이고 있다. 그 이유는 블록 4의 y방향 처짐과 회전에 의해 x축을 기준으로 상하에 위치한 보들에 같은 크기의 힘과 모멘트가 작용되었기 때문으로 생각된다.

5. 변형률 측정실험

5.1 실험방법

이론해석식과 유한요소해석으로 계산된 변형률과 상호간섭변형률이 타당한지 확인하기 위하여 Fig. 12에 표시한 지점에 20개의 스트레인 게이지를 부

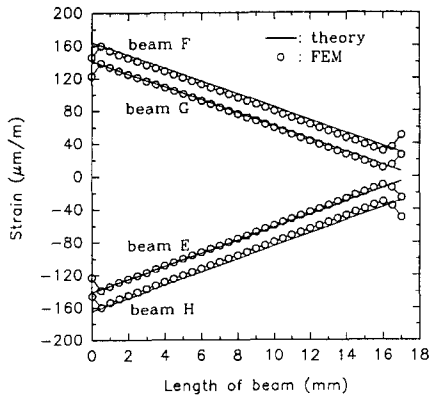


Fig. 11 The interference strain distribution of beam E, F, G and H in multiple parallel plate structure under the moment, M_z

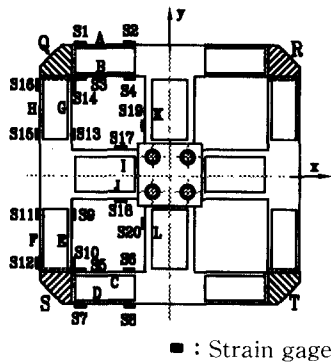


Fig. 12 Location of strain gages for strain measurement

착하여 변형률을 측정하였다. 스트레인 게이지의 위치는 스트레인 게이지의 길이와 작업을 고려하여 힘 F_x 와 F_y 감지용 감지부의 보의 경우에는 보의 양끝점으로부터 1.5 mm 인 지점이고, 모멘트 M_z 감지용 감지부의 보의 경우에는 보의 시작점으로부터 13.5 mm 이다. 스트레인 게이지는 Micro-Measurement사의 센서용 게이지인 N2A-13-T001N-350을 사용하였으며, 이 게이지의 게이지 상수는 2.08, 게이지 길이는 1.52 mm , 게이지 폭은 2.54 mm 이다. 스트레인 게이지들은 순간경화제인 Micro-Measurement사에서 제작한 M-bond 200을 사용하여 부착되었다.

3분력 로드셀 감지부의 변형률을 측정하기 위하여 힘 F_x , F_y 와 모멘트 M_z 를 동시에 가할 수 있는 실험장치를 제작하였으며, Fig. 13에 그것을 나타내었다. 제작된 로드셀을 고정시킨 다음 로드셀에 연결되어 있는 어댑터에 힘 F_x 는 베어링과 조립되어 있는 풀리와 추를 이용하여 로드셀의 최대 용량인 196 N 을 가하였고, 힘 $-F_y$ 는 추를 이용하여 중력방향으로 힘 F_x 와 같은 힘을 직접 가하였다. 모멘트 M_z 는 토크암과 추를 이용하여 9.8 Nm 를 가하였다. 스트레인 게이지로부터 출력되는 변형률은 여러 개의 채널을 동시에 측정하고 기록하는 변형률 지시계(Micro-Measurement사의 System 4000)로 측정하였다.

5.2 실험결과

Table 1은 힘 $-F_y$ 와 모멘트 M_z 가 각각 가해졌을 때 이론해석, 유한요소해석 및 실험을 통하여 얻은 스트레인 게이지 위치에서의 변형률들을 나타내고 있다. 힘 $-F_y$ 가 가해졌을 때 이론해석값은 유한요소해석값과 스트레인 게이지 부착위치 S2,

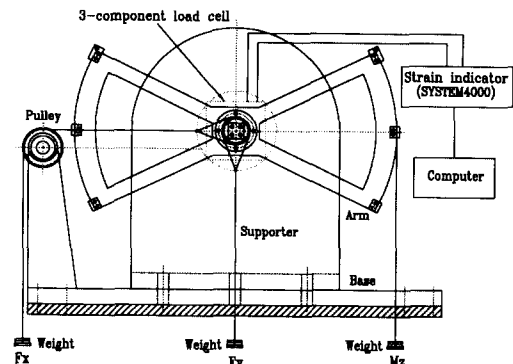


Fig. 13 Experimental set-up for 3-component load cell

S4, S6, S8 지점에서는 9.3% 이내로 일치하고, S1, S3, S5, S7 지점에서는 14.5% 이내로 일치하며, 실험값과는 스트레인 게이지 부착위치에 관계없이 8.9% 이내로 일치한다. 모멘트 Mz가 가해졌을 때 이론해석값은 유한요소해석 및 실험과 2.5% 이내로 잘 일치한다. 따라서 이론해석 식 (5)와 (9)를 이용하면 로드셀의 재질, 정격용량 및 정격출력이 결정되었을 경우 본 연구에서 고안한 로드셀 감지부의 치수 (t_1, t_2, L_1, L_2)를 결정할 수 있고 스트레인 게이지의 부착위치 선정을 비교적 정확하게 할 수 있다.

Table 2는 힘 Fy와 모멘트 Mz가 가해졌을 때 이론해석, 유한요소해석 및 실험을 통하여 얻은 상호간섭 변형률들을 나타내고 있다. 이론해석 값은 유한요소해석 값과 비교하면 스트레인 게이지 부착 지점의 전 위치에서 매우 잘 일치함을 보인다. 반면에 S9, S11, S13, S15, S17, S18, S19, S20 위치에서의 이론해석식으로 계산된 상호간섭 변형률은 스트레인 게이지로부터 측정된 상호간섭 변형률과 잘 일치하고 있으나 S10, S12, S14, S16 위치에서의 이론해석식으로 계산된 상호간섭 변형률은 스트레인 게이지로부터 측정된 상호간섭 변형률값과 큰 차이를 보이고 있다. 즉 PPS의 고정부인 블록 Q와 S에서 가까운 위치의 경우에는 이론해석값은 실험값과 큰 차이를 보이나 블록 1, 2, 3, 4와 같이 고정부가 아닌 움직일 수 있는 블록에 가까운 지점의 경우는 잘 일치한다. 그 이유는 이론해석시 블록 Q 및 S를 강체로 가정하였으나 실제로는 이들 블록

이 힘을 받으면 미소하게 변형되고, 이로 인해 보의 경계조건이 달라지며 이것은 보의 변형거동에 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 이론해석식 (6)과 (7)은 힘 $-F_y$ 가 작용될 때 보 E, F, G, H의 블록 4에 가까운 지점의 상호간섭 변형률과 보 I, J의 상호간섭 변형률을 비교적 정확히 계산하는데 사용될 수 있으며, 식 (10)은 모멘트 Mz가 작용될 때 보 E, F, G, H의 상호간섭 변형률을 계산하는데 사용될 수 있다. 이들 식을 이용하여 상호간섭 변형률을 예측할 수 있으므로 로드셀 설계시 상호간섭 변형률이 작도록 감지부를 설계하거나 또는 상호간섭 변형률이 서로 상쇄되도록 스트레인 게이지들로 적절히 휘스톤 브리지를 구성함으로써 로드셀의 상호간섭 오차를 효과적으로 줄일 수 있다.

6. 상호간섭 오차 평가

다분력 로드셀은 비직선성 오차(nonlinearity error), 히스테리시스 오차(hysteresis error), 재현도 오차(repeatability error) 및 상호간섭 오차로 평가한다. 그러나 상호간섭 오차가 다른 오차들보다 10배 이상 크기 때문에 다분력 로드셀의 정확도는 상호간섭오차에 의해 큰 지배를 받는다. 3분력 로드셀의 상호간섭 오차를 분석하기 위하여 이론해석 및 유한요소해석으로 얻은 변형률들을 이용하여 Fig. 14와 같이 완전결선회로를 구성하였고, 식(11)을 이용하여 예상되는 정격출력 및 상호간섭

Table 1 Strains of 3-component load cell designed

Applied load	Position of strain gage	Theory ($\mu\text{m/m}$)	FEM ($\mu\text{m/m}$)	Experiment ($\mu\text{m/m}$)
-Fy	S1	269	308	258
	S2	-269	-294	-292
	S3	-269	-308	-263
	S4	269	294	288
	S5	269	308	293
	S6	-269	-294	-261
	S7	-269	-308	-261
	S8	269	294	293
Mz	S17	280	273	274
	S18	-280	-273	-275

Table 2 Interference strains of 3-component load cell designed

Applied load	Position of strain gage	Theory ($\mu\text{m}/\text{m}$)	FEM ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Experiment ($\mu\text{m}/\text{m}$)
-Fy	S9	-62	-59	64
	S10	-29	-27	11
	S11	22	27	33
	S12	-11	-10	-33
	S13	62	59	63
	S14	29	27	-8
	S15	-22	-27	-28
	S16	11	10	27
	S17	-370	-350	-330
	S18	370	350	320
	S19	8	4	9
	S20	-8	-4	-14
Mz	S9	-129	-129	-145
	S10	-18	-14	69
	S11	152	149	-172
	S12	41	35	-60
	S13	129	129	150
	S14	18	14	-72
	S15	-152	-150	-171
	S16	-41	-35	55

오차를 계산하였다.

$$\epsilon = \epsilon_{T1} - \epsilon_{C1} + \epsilon_{T2} - \epsilon_{C2} \tag{11}$$

여기서, ϵ 는 변형률, ϵ_{T1} 과 ϵ_{T2} 는 각각의 스트레인 게이지 T_1 과 T_2 로부터 발생하는 인장변형률, ϵ_{C1} 과 ϵ_{C2} 는 각각의 스트레인 게이지 C_1 과 C_2 로부터 발생하는 압축변형률을 나타낸다.

3분력 로드셀이 좌우·상하대칭이므로 y축을 기준으로 좌측의 보들에 대해서 변형률해석한 결과들은 우측 보들에 대해서 해석한 결과들과 같다고 가정할 수 있다. 따라서 좌측 보들에 대하여 이론해석 및 유한요소해석 값들을 우측 보들에서 적용하기로 하며, 우측 보들의 스트레인 게이지의 기호는 Fig. 12의 좌측 보에 나타난 스트레인 게이지의 기호에 (')를 첨가하여 표시하였다.

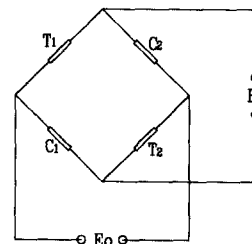


Fig. 14 Full bridge circuit

Table 3은 이론해석 및 유한요소해석으로 얻은 변형률값을 이용하여 구성한 3분력 로드셀의 완전 결선회로 및 그 때의 정격출력을 나타내고 있다. 힘 Fx는 3분력 로드셀의 구조상 Fy와 같으므로 상호간섭오차 평가에서 생략하였다. 힘 Fy 로드셀의 완전결선회로는 4개의 게이지 S1, S7, S1', S7',

게이지 S8, S2, S8', S2', 게이지 S5, S3, S5', S3', 게이지 S4, S6, S4', S6'로 구성할 수 있으나 게이지 부착시 부착오차가 크게 발생할 수 있는 게이지 S5, S3, S5', S3', 게이지 S4, S6, S4', S6'을 제외하고, 게이지 S1, S7, S1', S7', 게이지 S8, S2, S8', S2'로만 구성하였다. 게이지 S1, S7, S1', S7'로 회로로 구성한 로드셀의 정격출력은 이론해석인 경우 1076 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이었고, 유한요소해석인 경우 1232 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이었다. 게이지 S8, S2, S8', S2'로 회로 구성한 로드셀의 정격출력은 이론해석인 경우 1076 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이었고, 유한요소해석인 경우 1176 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이었다. 이와 같이 유한요소해석이 이론해석과 10%이상의 차이가 나는 것은 이론해석의 몇가지 가정이 실제와 다르고 전체 유한요소 모델의 제약 때문에 보의 두께방향을 따라서 2개의 4절점 선형요소를 사용했기 때문으로 보이며, 8절점 2차 요소를 사용하거나 두께방향으로 4개 이상의 요소를 사용할 경우 이차이름 줄일 수 있을 것이다. 모멘트 Mz 로드셀의 완전결선회로는 S17, S18, S17', S18'로 구성하였으며, 정격출력은 이론해석인 경우 1120 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이었고 유한요소해석인 경우 1092 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이었다.

Table 4는 힘 Fy 로드셀의 완전결선회로에 힘 Fx와 모멘트 Mz가 각각 가해졌을 때, 모멘트 Mz 로드셀의 완전결선회로에 힘 Fx와 Fy가 각각 가

해졌을 때의 각각의 상호간섭 오차를 나타내고 있다.

힘 Fy 로드셀의 완전결선회로의 경우, 게이지 S1, S7, S1', S7'로 회로를 구성한 로드셀의 상호간섭 변형률은 게이지 S12, S12', S16, S16'으로부터 구한 상호간섭 변형률을 식 (11)에 대입하여 계산하였으며, 게이지 S8, S2, S8', S2'로 회로를 구성한 로드셀의 상호간섭 변형률은 게이지 S11, S11', S15, S15'로부터 구한 상호간섭 변형률을 식 (11)에 대입하여 계산하였다. 마찬가지로 모멘트 Mz 로드셀의 완전결선회로의 경우, 게이지 S17, S18, S17', S18'로 회로를 구성한 로드셀의 상호간섭 변형률은 게이지 S20, S20', S19, S19'로부터 구한 상호간섭 변형률을 식 (11)에 대입하여 계산하였다. 각각의 로드셀로부터 계산한 상호간섭변형률은 모두 0이었다. 따라서 각각의 로드셀에서 상호간섭 변형률을 정격출력으로 나누어서 계산하는 상호간섭 오차도 모두 0이다. 이와 같이 본 논문에서 계산한 변형률과 상호간섭 변형률을 이용하여 적절히 스트레인 게이지의 부착위치를 선정하여 완전결선회로로 3분력 로드셀을 제작하면 상호간섭 오차를 이론적으로 0으로 할 수 있다. 그러나 실제로는 기하학적인 비대칭거동, 스트레인 게이지의 작업오차, 감지부의 가공오차 등으로 인해 상호간섭 오차

Table 3 Full bridge circuit and rated output

Load cell	Full bridge circuit		Strain ($\mu\text{m}/\text{m}$)		Rated output ($\mu\text{m}/\text{m}$)	
			Theory	FEM	Theory	FEM
Fy	T ₁	S1	269	308	1076	1232
	C ₁	S7	-269	-308		
	T ₂	S1'	269	308		
	C ₂	S7'	-269	-308		
Fy	T ₁	S8	269	294	1076	1176
	C ₁	S2	-269	-294		
	T ₂	S8'	269	294		
	C ₂	S2'	-269	-294		
Mz	T ₁	S17	280	273	1120	1092
	C ₁	S18	-280	-273		
	T ₂	S17'	280	273		
	C ₂	S18'	-280	-273		

Table 4 Interference error

Load cell	Full bridge circuit		Interference strain ($\mu\text{m}/\text{m}$) (Applied force : F_y)		Interference strain ($\mu\text{m}/\text{m}$) (Applied force : M_z)		Interference error (%)	
			Theory	FEM	Theory	FEM	Theory	FEM
F_y	T_1	S1 (S12)	-11	-10	41	-35	0	0
	C_1	S7 (S12)	-11	-10	41	-35		
	T_2	S1' (S16)	11	10	-41	35		
	C_2	S7' (S16)	11	10	-41	35		
F_y	T_1	S8 (S11)	22	27	152	150	0	0
	C_1	S2 (S11)	22	27	152	150		
	T_2	S8' (S15)	-22	-27	-152	-150		
	C_2	S2' (S15)	-22	-27	-152	-150		
			(Applied force : F_x)		(Applied force : F_y)			
M_z	T_1	S17 (S20)	-8	-4	-370	-350	0	0
	C_1	S18 (S20)	-8	-4	-370	-350		
	T_2	S17' (S19)	8	4	370	350		
	C_2	S18' (S19)	8	4	370	350		

가 발생할 수 있을 것으로 예측된다. 그러므로 설계한 3분력 로드셀을 제작한 후 6분력 힘/모멘트 교정기를 이용하여 정격출력 및 상호간섭 오차 평가를 위한 실험이 실시되어야 한다.

7. 결 론

본 논문에서는 병렬평판구조를 여러개 조합하여 힘 F_x , F_y 및 모멘트 M_z 를 동시에 감지할 수 있는 3분력 로드셀의 감지부를 고안하였고, 힘 또는 모멘트에 의한 보들의 변형률 및 상호간섭 변형률을 계산하는 식을 유도하였으며, 유도된 식들을 이용하여 감지부의 크기를 결정하여 3분력 로드셀의 감지부를 설계하였다. 이론해석식의 타당성을 검증하기 위하여 감지부를 유한요소해석 및 실험해석하여 이론해석과 비교하였다. 또한 유한요소해석과 실험으로 얻은 변형률과 상호간섭 변형률을 이용하여 적절히 스트레인 게이지의 위치를 선정하고 완전결선회로를 구성하였으며, 이로부터 상호간섭오차를 예측하여 계산하였다. 여기에서 얻어진 결론

은 다음과 같다.

(1) 본 논문에서 유도한 변형률 계산식으로부터 계산된 보의 굽힘변형률은 스트레인 게이지의 예상 부착지점에서 유한요소해석 및 실험으로 얻은 변형률과 비교적 잘 일치한다.

(2) 본 연구에서 유도된 상호간섭 변형률 계산식으로부터 계산된 상호간섭 변형률은 유한요소해석으로부터 얻어진 상호간섭 변형률 및 실험으로부터 얻어진 결과와 스트레인 게이지 부착위치 S10, S12, S14, S16을 제외한 전 부착위치에서 잘 일치한다.

(3) 설계하고자 하는 3분력 로드셀의 재질, 용량 및 출력이 결정되면 유도된 변형률식을 이용하여 본 논문에서 고안한 병렬평판구조 감지부의 치수 (t_1, t_2, L_1, L_2, h)를 결정할 수 있으며, 상호간섭 변형률식을 이용하여 상호간섭 변형률을 계산할 수 있다.

참고문헌

- (1) Yabuki, A., 1990, "Six-axis Force/Torque Sensor for Assembly Robots," *FUJITSU Sci. Tech. J.*, Vol. 26, No. 1, pp. 41~47.
- (2) Hatamura, Y., et al., 1989, "A Miniture 6 axis Force Sensor of Multilayer Parallel Plate Structure," *IMEKO*, pp. 567~582.
- (3) Yoshida, T., 1984, "6-component Force Transducer and Its Application," *IMEKO TC-3 on Measurement of Force and Mass Kobe*, Japan, pp. 11~15.
- (4) Ono, K., et. al., 1993, *A New Design for 6-component Force/Torque Sensors*, Mechanical Problems in Measuring Force and Mass, pp. 39~48.
- (5) Fristedt, K., 1993, "A Calibration Model of a Six-component Internal Wire-tunnel Balance of the Bending-beam Type," *Measurement* 11, pp. 107~118.
- (6) Ferrero, C., 1990, "The Measurement of Parasitic Components in National Force Standard Machines," *Measurement*, Vol. 8 No. 2, pp. 66~76.
- (7) B. Schimano and B. Roth, "On Force Sensing Information and Its in Controlling Manipulator," *Proc. of the 18th Industrial Symposium on Industrial Robots*, Washington, D. C., pp. 119~126.
- (8) 주진원, 김승환, 김갑순, 이경원, 1996, "VCR 주행장치의 2축 플랜지 반력 측정장치 개발," *대한기계학회논문집(A)*, 제20권, 제7호, pp. 2213~2222.