

# 넓은 범위의 힘/모멘트비를 갖는 3 분력 힘/모멘트 센서 설계

김갑순\*

## Design of 3-component Force/Moment Sensor with Force/Moment Ratio of Wide Range

Gab-Soon Kim\*

### ABSTRACT

This paper describes the design of 3-component force/moment sensor with the force and moment ratio of wide range. It can measure the x-direction force  $F_x$ , y-direction force  $F_y$  and z-direction moment  $M_z$  simultaneously. In order to accurately measure forces and moment using 3-component force/moment sensor, it should get suitable force and moment ratio(the ratio of force  $F_x=200$  N and moment  $M_z=20$  Nm is ten to one), and small interference error. In this paper, In order to design the 3-component force/moment sensor with the force and moment ratio of wide range, the procedures are performed as follows : 1) the derivation of the equations to predict the bending strains on the surfaces of the plate-beams under the forces or the moments, 2) the determination of the sizes of the sensing elements of the force/moment sensor by using the derived equations, 3) the Finite Element Method(FEM) analysis and the characteristic test for confirming the strains from the theory analysis, 4) the selection of the attachment locations of the strain gages of each sensor, 5) the analysis of the rated strain and the interference error at the attachment location of strain gages. It reveals that the rated strains calculated from the derived equations make a good agreement with the results from the Finite Element Method analysis and the characteristic test.

**Key Words** : 3-component force/moment sensor(3 분력 힘/모멘트 센서), Parallel plate beam (병렬평판보), Rated strain(정격변형률), Interference error(상호간섭오차), Strain gage(스트레인게이지)

### 기호설명

$F_{F_{yy}}$  : 힘  $F_y$  에 의해 발생하는 y 방향의 힘  
 $M_{F_{xz}}$  : 힘  $F_y$  에 의해 발생하는 z 방향의 모멘트  
 $M_x$  : 평판보 입의 지점(x)에서의 모멘트  
 $F_{M_{zx}}$  : 모멘트  $M_z$  에 의해 발생하는 x 방향의 힘  
 $F_{M_{zy}}$  : 모멘트  $M_z$  에 의해 발생하는 y 방향의 힘  
 $M_{M_{zz}}$  : 모멘트  $M_z$  에 의해 발생하는 z 방향의 모멘트  
 $\epsilon_{F_y-U}$  : 힘  $F_y$  에 의해 발생하는 평판보 윗면의 변형률  
 $\epsilon_{F_y-L}$  : 힘  $F_y$  에 의해 발생하는 평판보 아래면의

### 변형률

$\epsilon_{M_z-U}$  : 모멘트  $M_z$  에 의해 발생하는 평판보 윗면의 변형률  
 $\epsilon_{M_z-L}$  : 모멘트  $M_z$  에 의해 발생하는 평판보 아래면의 변형률  
 $A$  : 평판보의 단면적  
 $E$  : 평판보 재료의 종탄성계수  
 $d_1$  : 십자형블록의 x 방향의 크기  
 $d_2$  : 십자형블록의 y 방향의 크기  
 $I$  : 평판보의 단면계수  
 $Z_p$  : 평판보의 극단면계수

\*경상대학교 전기전자공학부 제어계측공학과, 생산기술연구소

## 1. 서론

로봇산업, 공작기계산업, 자동차산업, 조선산업, 전자산업 등에서의 힘(force) 및 모멘트(moment)의 측정은 여러 방향의 힘 및 모멘트를 동시에 측정할 수 있는 다분력 힘/모멘트 센서(multi-component force/moment sensor)를 이용한다.(1~4) 이 센서를 이용하여 힘과 모멘트를 측정할 경우에는 센서가 고가이기 때문에 측정하고자 하는 힘과 모멘트 성분만 측정할 수 있는 다분력 힘/모멘트 센서를 선택하여 사용한다.

다분력 힘/모멘트 센서를 설계하기 위하여 고려할 사항은 첫째, 측정하고자 하는 최대 힘과 모멘트를 고려한 센서의 용량과 힘/모멘트 비, 둘째, 센서의 정밀정확도를 나타내는 상호간섭오차(interference error), 셋째, 센서의 고유진동수, 마지막으로 센서의 감도이다.

다분력 힘/모멘트센서의 최대 용량은 사용목적에 따라 힘  $F_x=F_y=F_z=200$  N 과 모멘트  $M_x=M_y=M_z=10$  Nm, 힘  $F_x=F_y=F_z=200$  N 과 모멘트  $M_x=M_y=M_z=20$  Nm, 힘  $F_x=F_y=F_z=200$  N 과 모멘트가  $M_x=M_y=M_z=40$  Nm 로 다르다. 이것을 힘과 모멘트비라 하고 위의 예를 힘/모멘트비 20:1, 10:1, 5:1 라 한다. 상호간섭오차란 한 방향의 힘 혹은 모멘트를 가했을 경우 그 방향의 센서에서만 가해진 힘 혹은 모멘트에 상응하는 값이 출력되어야 하고 다른 방향의 힘 혹은 모멘트 센서에서는 모두 출력값이 없어야 하지만 다분력 힘/모멘트 센서가 한 몸체로 설계되는 관계로 3~15 % 혹은 그 이상의 값이 출력되는 것을 말한다. 상호간섭오차는 다분력 힘/모멘트 센서의 정밀정확도는 나타낸다. 힘/모멘트 센서는 동적상태에서 자주 사용되므로 센서의 감지부와 가해지는 힘 혹은 모멘트로 계산되는 고유진동수가 커야 센서의 응답속도가 빠르므로 정확한 값을 측정할 수 있다.

Hatamura(5), Ono(6), 김(7,8) 등이 개발한 다분력 힘/모멘트 센서는 감지부의 구조상 힘과 모멘트 비를 다양하게 설계할 수 없을 뿐만 아니라 센서의 고유진동수를 고려한 설계를 하지 않았으므로 각종 산업에서 여러 방향의 힘과 모멘트를 안전하고 정확하게 측정하기 어렵다. 다분력 힘/모멘트 센서는 감지부의 모델에 따라 힘과 모멘트의 비를 다양하게, 센서의 고유진동수를 크게, 상호간섭오차를 매우 작게 설계할 수 있다.

본 논문에서는 한 몸체에 4 개의 병렬평판보(parallel plate beam)를 이용하여 넓은 범위의 힘  $F_x$ ,  $F_y$  와 모멘트  $M_z$  의 비를 가질 수 있고, 이 3 분력을 동시에 측정할 수 있는 3 분력 힘/모멘트 센서를 설계 하였다. 힘/모멘트 센서의 감지부들을 설계하기 위하여 힘 또는 모멘트에 의한 보들의 변형률을 계산하는 식을 유도하였고, 유도된 식들을 이용하여 3 분력 힘/모멘트 센서의 감지부의 크기를 설계 및 제작하였다. 유도된 식이 타당한지를 검증하기 위하여 감지부에 대한 유한요소해석 및 센서의 특성시험을 실시 하였다.

## 2. 센서 설계

### 2.1 모델링

Fig. 1 은 힘  $F_x$  와  $F_y$  및 모멘트  $M_z$  를 동시에 측정할 수 있는 힘/모멘트 센서의 모델링을 나타내고 있다.

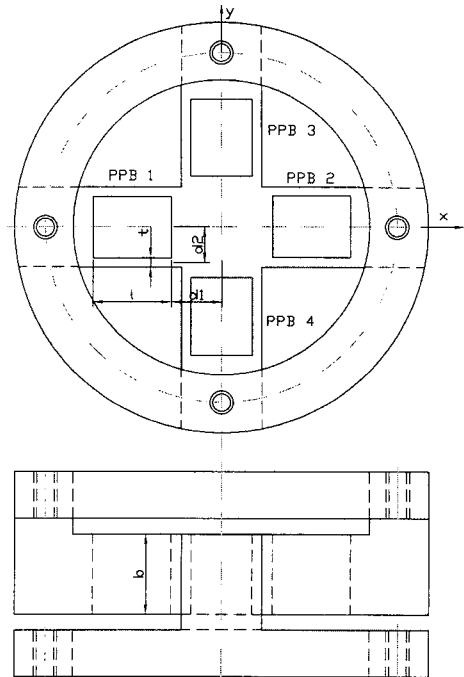


Fig. 1 Structure of sensing element for a 3-component force/moment sensor

Fig.1 에서 보는 것과 같이 센서의 구조는 십자

형으로 구성된 4 개의 병렬평판보(parallel plate beam : PPB), 고정링, 하중전달링으로 구성되었다. 4 개의 병렬평판보중 PPB 1 과 PPB 2 는 힘  $F_y$ , PPB 3 과 PPB 4 는 힘  $F_x$ , PPB 1, PPB 2, PPB 3, PPB 4 는 모멘트를 감지할 수 있는 것이고, 높이  $b$  인 십자형 블록에 높이  $b$ , 두께  $t$ , 길이  $l$  인 평판보 2 개가 1 개의 병렬평판보를 구성하도록 설계되었으며, 4 개의 평판보의 크기는 모두 같다. 그리고 병렬평판보는 상하, 좌우 대칭으로 구성하였다. 고정링은 센서의 밑에 위치하였으며 앞뒤방향의 2 개의 병렬평판보(PPB 3, PPB 4)의 양 끝단과 고정되어 있으며, 하중전달링은 좌우방향의 2 개의 병렬평판보(PPB 1, PPB 2)의 양 끝단과 고정되어 있다. 이와 같이 십자형으로 구성된 4 개의 병렬평판보의 아래쪽에는 고정링, 위쪽에는 하중전달링에 고정되어 있으므로 병렬평판보로 구성되는 힘  $F_x$ ,  $F_y$ , 모멘트  $M_z$  센서에 각각의 힘과 모멘트를 전달할 수 있다.

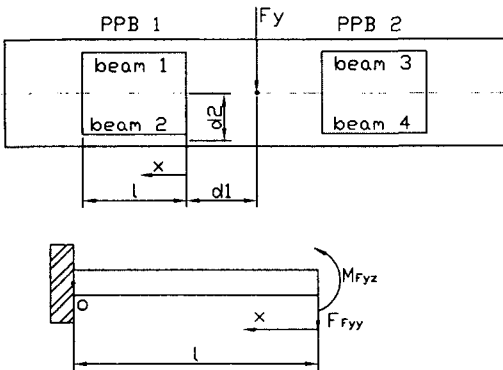


Fig. 2 Free body diagram of plate beams for a 3-component force/moment sensor under the force  $F_y$

## 2.2 이론해석

### 2.2.1 힘 $F_y$ 가 가해졌을 때

Fig. 2 는 PPB 1 과 PPB 2 의 중앙에 힘  $F_y$  가 가해졌을 때 각각의 평판보의 변형률을 해석하기 위한 개략도를 나타내고 있다. PPB 1 과 PPB 2 은 힘  $F_y$  가 가해지는 방향의 중심축을 기준으로 대칭이고, PPB 1 을 구성하는 평판보 1 (beam 1) 과 평판보 2 (beam 2) 는 수평중심축을 기준으로 대칭이며, 또한 PPB 2 을 구성하는 평판보 3 (beam 3) 과 평판보 4 (beam 4) 는 수평중심축을 기준으로 대칭이다. 따

라서 평판보 1 을 변형률해석한 이론식을 평판보 2, 평판보 3, 평판보 4 에 적용할 수 있다. 그리고 힘  $F_y$  가 가해졌을 때의 이론식을 힘  $F_x$  가 가해졌을 때에도 그대로 적용할 수 있다.

임의 점  $x$  에서의 모멘트  $M_x$  는 식 (1) 과 같이 쓸 수 있다.

$$M_x = \frac{F_y}{4} \left(x - \frac{l}{2}\right) \quad (1)$$

평판보 1 의 윗면과 아래면에서의 변형률을 계산하는 식은 변형률식  $\epsilon = M_x / EZ_p$  에 식 (1) 을 대입하여 유도할 수 있으며, 유도한 식은 식 (2-a) 와 (2-b) 와 같다.

$$\epsilon_{F_y-U} = \frac{F_y}{4EZ_p} \left(x - \frac{l}{2}\right) \quad (2-a)$$

$$\epsilon_{F_y-L} = \frac{F_y}{4EZ_p} \left(\frac{l}{2} - x\right) \quad (2-b)$$

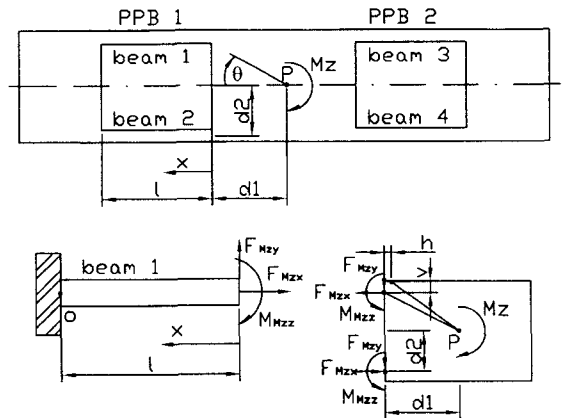


Fig. 3 Free body diagram of plate beams for a 3-component force/moment sensor under the moment  $M_z$

### 2.2.2 모멘트 $M_z$ 가 가해졌을 때

Fig. 3 은 PPB 1 과 PPB 2 의 중앙에 모멘트  $M_z$  가 가해졌을 때 각각의 평판보의 변형률을 해석하기 위한 개략도를 나타내고 있다. PPB 1 과 PPB 2 는  $y$  축을 기준으로 좌우대칭이고, PPB 1 을 구성하는 평판보 1 (beam 1) 과 평판보 2 (beam 2) 는 수평중심축을 기준으로 대칭이며, 또한 PPB 2 을 구성하

는 평판보 3(beam 3)과 평판보 4(beam 4)는 수평 중심축을 기준으로 대칭이다. 따라서 평판보 1를 변형률해석한 이론식을 평판보 2, 평판보 3, 평판보 4에 적용할 수 있다. 그리고 이식들을 PPB 3과 PPB 4에 그대로 적용할 수 있다.

X=0에서 수직처짐식과 회전각 식을 이용하여 힘과 모멘트식  $F_{Mxz}$ ,  $F_{My}$ ,  $M_{Mzz}$ 를 유도하고, 블록의 중심 P점에서의 모멘트 평형조건  $\sum Mp=0$  으로부터 블록의 중심점 P의 회전각  $\theta$ 을 유도하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = \frac{M_z/4}{\frac{12EI}{l^2} \left( d_1 + \frac{l}{3} + \frac{d_1^2}{l} \right) + \frac{AE d_2^2}{l}} \quad (3)$$

평판보 1의 윗면과 아래면의 변형률을 중첩의 원리를 이용하여 유도하면 식 (4-a)와 (4-b)로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{Mz-U} = \left[ \frac{6t}{l^3} \left( \frac{d_1 l}{2} + \frac{l^2}{3} - (d_1 + \frac{l}{2})x \right) + \frac{d_2}{l} \right] \theta \quad (4-a)$$

$$\epsilon_{Mz-L} = - \left[ \frac{6t}{l^3} \left( \frac{d_1 l}{2} + \frac{l^2}{3} - (d_1 + \frac{l}{2})x \right) + \frac{d_2}{l} \right] \theta \quad (4-b)$$

### 2.2.3 센서의 고유진동수

다분력 힘/모멘트 센서는 동적인 상태에서 자주 사용하므로 센서의 고유진동수를 계산하여 센서 감지부를 설계 해야 한다. 힘 Fx 혹은 Fy가 가해질 때의 강성도  $k_F$ 는 식  $k_F = F_y / \delta$  ( $\delta$ : 처짐)에 식 (2-a)를 대입하면 식 (5)와 같다.

$$k_F = \frac{48EI}{l^3} \quad (5)$$

모멘트 Mz가 가해질 때의 강성도  $k_M$ 는 식  $k_M = M_z / \theta$  ( $\theta$ : 회전각)에 식 (4-a)를 대입하면 식 (6)와 같다.

$$k_M = \frac{48EI}{l^2} \left( d_1 + \frac{l}{3} + \frac{d_1^2}{l} \right) + \frac{4AE d_2^2}{l} \quad (6)$$

힘 Fx, Fy, 모멘트 Mz가 가해질 때 센서의 고유진동수를 계산하는 식은 식 (7)과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

여기서 m은 힘 Fx, Fy, 모멘트 Mz를 질량값으로 환산한 값이며, k는 힘 혹은 모멘트 센서의 강성도이다.

### 2.3 감지부의 설계

3분력 힘/모멘트 센서는 정격의 힘 Fx, Fy, 모멘트 Mz가 가해졌을 때 각 센서의 완전전선회로(full bridge circuit)에 출력되는 변형률이 서로 비슷하도록 설계되어야 한다. 센서 감지부의 설계변수는 정격용량, 정격변형률, 보의 폭 b, 보의 길이 l, 보의 높이 t, 십자형블록의 크기  $d_1, d_2$  센서의 고유진동수이다. 3분력 힘/모멘트 센서의 힘과 모멘트의 비를 다양하게 설계할 수 있는지를 확인하기 위하여 힘 Fx, Fy의 용량을 변화시키지 않고, 모멘트 Mz의 용량만 변화시켜 3가지 종류의 센서를 설계하였다.

센서 1의 용량은 힘 Fx와 Fy가 각각 200 N, 모멘트 Mz이 10 Nm (힘과 모멘트비가 20 대 1)이고, 센서 2의 용량은 힘 Fx와 Fy이 각각 200 N, 모멘트 Mz이 20 Nm (힘과 모멘트비가 10 대 1)이며, 센서 3의 용량은 힘 Fx와 Fy이 각각 200 N, 모멘트 Mz이 40 Nm (힘과 모멘트비가 5 대 1)이다. 정격변형률은 약  $1000 \mu m/m$ , 스트레인게이지의 부착위치는 스트레인게이지의 크기  $4 \times 5$  ( $mm^2$ )를 고려하여 선정하였다. 힘 Fx, Fy 센서의 게이지 부착위치는 보의 길이 방향으로 모두 보의 양끝 지점으로부터 각각 3 mm 떨어진 지점이고, 보의 폭 방향으로 보의 길이 방향의 중심선 상으로 결정하였다. 그리고 보의 길이 방향으로 보의 양끝 지점이며 보의 폭 방향으로 보의 길이 방향의 중심선 상으로 결정하였다.

설계는 먼저 길이 l을 결정하고 식 (2-a), (2-b), (4-a), (4-b)에 의해 변형률이  $250 \mu m/m$ 가 되도록 t와  $d_2$ 를 결정하였으며, 이 때  $k_F, \omega_{Fn}, k_M, \omega_{Mn}$ 을 각각 식 (7)을 이용하여 계산하였다. 길이 l은 9~17 mm 까지 1 mm 씩 변화시켰다.

Table 1 The size and natural frequency of sensor 1

L (mm)	t (mm)	k <sub>F</sub> (N/m)	ω <sub>Fn</sub> (rad/s)	d <sub>2</sub> (mm)	k <sub>M</sub> (N/m)	ω <sub>Mn</sub> (rad/s)
9	1.10	10735638	726	7.70	14012695	3707
10	1.28	12331254	778	7.10	13583236	3650
11	1.43	12918360	796	6.70	13130052	3588
12	1.56	12918360	796	6.40	12646008	3522
13	1.69	12918360	796	6.20	12440028	3493
14	1.80	12497143	783	5.98	11961697	3425
15	1.92	12331254	778	5.79	11721319	3390
16	2.02	11832363	762	5.60	11290524	3328
17	2.12	11403499	748	5.48	11051008	3292

Table 2 The size and natural frequency of sensor 2

L (mm)	t (mm)	k <sub>F</sub> (N/m)	ω <sub>Fn</sub> (rad/s)	d <sub>2</sub> (mm)	k <sub>M</sub> (N/m)	ω <sub>Mn</sub> (rad/s)
9	1.10	10735638	726	14.3	40100295	6271
10	1.28	12331254	778	13.0	35897131	5933
11	1.43	12918360	796	12.1	32530524	5648
12	1.56	12918360	796	11.6	30522968	5472
13	1.69	12918360	796	11.0	28217244	5260
14	1.80	12497143	783	10.7	26841591	5131
15	1.92	12331254	778	10.3	25375319	4988
16	2.02	11832363	762	10.0	24029250	4854
17	2.12	11403499	748	9.8	23151733	4765

Table 3 The size and natural frequency of sensor 3

l (mm)	t (mm)	k <sub>F</sub> (N/m)	ω <sub>Fn</sub> (rad/s)	d <sub>2</sub> (mm)	k <sub>M</sub> (N/m)	ω <sub>Mn</sub> (rad/s)
9	1.10	10735638	726	27.0	134337259	11478
10	1.28	12331254	778	24.0	112478251	10503
11	1.43	12918360	796	22.2	98733297	9840
12	1.56	12918360	796	20.9	88292943	9305
13	1.69	12918360	796	19.8	80012988	8858
14	1.80	12497143	783	19.0	73431981	8486
15	1.92	12331254	778	18.2	67739543	8151
16	2.02	11832363	762	17.6	62958084	7858
17	2.12	11403499	748	17.1	59149819	7616

그 결과는 센서 1, 2, 3 을 Table 1, Table 2, Table 3 에 각각 나타내었다. 길이 l 이 길어질수록 t 는 두꺼워지고, d<sub>2</sub> 는 작아졌다. 그리고 ω<sub>Fn</sub> 는 증가하다 l=12 mm 를 정점으로 다시 감소하는 경향을 보였고, ω<sub>Mn</sub> 는 감소하는 경향을 보였다.

다축 힘/모멘트 센서가 동적상태에서 사용되기 위해서는 고유진동수를 크게 설계해야 한다. 따라서 Table 1~3 에서 ω<sub>Mn</sub> 는 ω<sub>Fn</sub> 보다 매우 크므로 ω<sub>Fn</sub> 이 가장 클 때와 스트레인게이지 작업을 고려하여 감지부의 크기를 선정하였다.

결정된 감지부의 크기는 센서 1, 2, 3 모두 보의 폭 b=21 mm, 보의 길이 l=13 mm, 보의 높이 t=1.69 mm, 십자형블록의 크기 d<sub>1</sub>=13 mm 이었고, 십자형블록의 크기 d<sub>2</sub> 는 각각 6.2 mm, 11.0 mm, 19.8 mm 이었다. 감지부의 재질은 소용량의 힘/모멘트 센서의 감지부로 많이 사용되는 알루미늄 2024-T351 이다.

### 3. 유한요소해석

힘 Fy 와 모멘트 Mz 가 각각 설계된 힘/모멘트 센서의 감지부에 작용될 때 이론해석으로 계산한 변형률이 맞는지 확인하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 각각 힘 Fy, 모멘트 Mz 가 가해졌을 때 보의 변형률 분포는 2 차원으로 계산하였다.

해석은 평면응력 상태로 가정하였고 사용한 유한요소는 4 결점 4 각형선형요소이다. 재료상수는 사용한 재료 알루미늄의 상수 값인 종단성계수, 70 GPa 로, 프와송의 비는 0.3 으로 하였다. 격자크기는 보의 길이 방향으로 0.5 mm 간격, 높이 방향으로 3 등분하였다.

유한요소해석을 위하여 센서 1 인 경우에는 힘 Fy 는 힘 감지용 센서의 정격용량이 200 N 이므로 보의 단위 폭당 힘인 9.5238 N/mm 를 y 방향으로 가했으며, 모멘트 Mz 는 모멘트 감지용 정격용량이 10 Nm 이므로 단위 폭 당 모멘트인 0.4762 Nm/mm 를 가했다. 센서 2 인 경우에는 힘 Fy 는 힘 감지용 센서의 정격용량이 200 N 이므로 센서 1 과 같이 가했으며, 모멘트 Mz 는 모멘트 감지용 정격용량이 20 Nm 이므로 단위 폭 당 모멘트인 0.9524 Nm/mm 를 가했다. 센서 3 인 경우에는 힘 Fy 는 힘 감지용 센서의 정격용량이 200 N 이므로 센서 1 과 같이 가했으며, 모멘트 Mz 는 모멘트 감지용 정격용량이 40 Nm 이므로 단위 폭 당 모멘트인 1.9048 Nm/mm 를 가했다.

Fig. 4 는 힘 Fy 가 가해졌을 때, Fig. 5 는 모멘트

Mz가 가해졌을 때 힘/모멘트 센서 감지부의 변형 형태를 확대하여 보여주고 있다. 힘 Fy가 가해졌을 때 힘/모멘트 센서 감지부의 변형형태는 이론 해석결과로 예측할 수 있는 것과 동일하게 좌우 대칭 형상을 보이고 있으며, 모멘트 Mz가 가해졌을 때는 십자형블록에 가까운 지점에서는 고정단보다 큰 변형거동을 보였다.

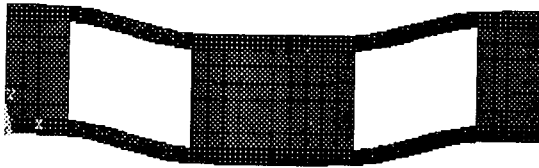


Fig. 4 Finite element mesh and deformed shape of beams for Fx, Fy, Mz force/moment sensor under the force Fx or Fy

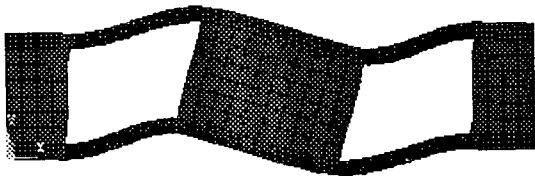


Fig. 5 Finite element mesh and deformed shape of beams for Fx, Fy, Mz force/moment sensor under the moment Mz

#### 4. 변형률해석 및 고찰

Fig. 6은 각각의 3분력 힘/모멘트 센서를 제작하기 위한 스트레인게이지 부착위치를 나타낸 것이다. 힘 Fx를 감지하는 센서의 스트레인게이지는 S1~S4, Fy인 경우에는 S5~S8, Mz인 경우에는 S9~S12로 선정하였다. 그리고 센서 1의 감지부를 실험용으로 가공하였고, 선정한 스트레인게이지 위치에 스트레인게이지(N2A-13-T001N-350)를 부착하였으며, Fig. 7과 같이 완전결선회로를 구성하여 센서 1을 제작하였다. 제작된 센서 1은 특성시험 장치로 힘 Fx=Fy=200 N과 모멘트 Mz=10 Nm를 가하여 특성시험을 하였다.

각 힘/모멘트 센서의 정격변형률과 상호간섭오차는 식(8)에 의해 계산된다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{C1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{C2} \quad (8)$$

여기서  $\varepsilon$ 은 완전결선회로로부터 계산된 변형률,  $\varepsilon_{T1}$ 은 인장 스트레인게이지 T<sub>1</sub>의 변형률,  $\varepsilon_{T2}$ 는 인장 스트레인게이지 T<sub>2</sub>의 변형률,  $\varepsilon_{C1}$ 은 압축 스트레인게이지 C<sub>1</sub>의 변형률,  $\varepsilon_{C2}$ 은 압축 스트레인게이지 C<sub>2</sub>의 변형률이다.

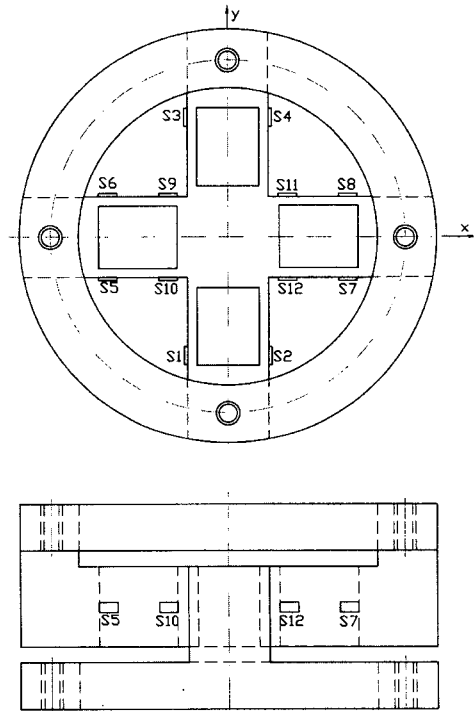


Fig. 6 Location of strain gages

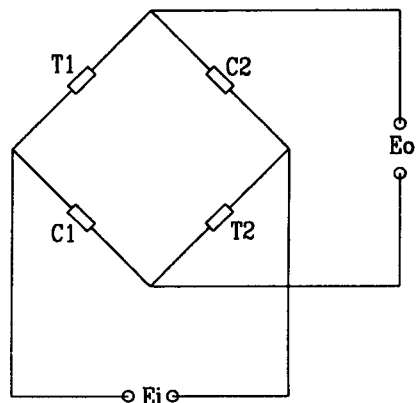


Fig. 7 Full bridge circuit

Table 4 Rated strain and interference error of each sensors

Force/moment sensor		Analysis	Rated strain ( $\mu m / m$ )	Interference error (%)
Sensor1	Fx sensor	Theory	992	0
		FEM	994	0
		Test	985	1.8
	Fy sensor	Theory	992	0
		FEM	994	0
		Test	982	0.9
	Mz sensor	Theory	1004	0
		FEM	1032	0
		Test	1021	1.7
Sensor2	Fx sensor	Theory	992	0
		FEM	996	0
	Fy sensor	Theory	992	0
		FEM	996	0
	Mz sensor	Theory	1004	0
		FEM	1004	0
Sensor3	Fx sensor	Theory	992	0
		FEM	994	0
	Fy sensor	Theory	992	0
		FEM	994	0
	Mz sensor	Theory	1004	0
		FEM	956	0

Table 4는 3 개의 센서의 정격변형률과 상호간섭오차를 나타내었다. 센서 1의 Fx 센서와 Fy 센서의 정격변형률은 이론해석값이 모두 992  $\mu m / m$ , 유한요소해석값이 모두 994  $\mu m / m$ , 실험값이 각각 985  $\mu m / m$ 와 982  $\mu m / m$ 이었고, Mz 센서의 정격변형률은 이론해석값이 1004  $\mu m / m$ , 유한요소해석값이 1032  $\mu m / m$ , 실험값이 1021  $\mu m / m$ 이었다. 센서 2의 Fx 센서와 Fy 센서의 정격변형률은 이론해석값이 모두 992  $\mu m / m$ , 유한요소해석값이 모두 996  $\mu m / m$ 이었고, Mz 센서의 정격변형률은 이론해석값이 1004  $\mu m / m$ , 유한요소해석값이 1004  $\mu m / m$ 이었다. 센서 3의 Fx 센서와 Fy 센서의 정격변형률은 이론해석값이 모두 992  $\mu m / m$ , 유한요소해석값이 모두 994  $\mu m / m$

이었고, Mz 센서의 정격변형률은 이론해석값이 1004  $\mu m / m$ , 유한요소해석값이 956  $\mu m / m$ 이었다. 이론해석값을 기준으로 유한요소해석값을 비교한 결과 정격변형률오차는 센서 1인 경우에는 최대 2.8 %이내 이었고, 센서 2인 경우에는 0.5 %이었으며, 센서 3인 경우에는 4.8 %이내이었다. 센서 1에서 이론해석값을 기준으로 실험값을 비교한 결과 정격변형률오차는 1.7 %이하이었다.

그리고 다분력 힘/모멘트 센서의 정밀정확도에 큰 영향을 미치는 상호간섭오차는 이론해석을 기준으로 유한요소해석을 비교한 경우는 모두 0 %이었다. 센서 1의 특성실험에 의한 상호간섭오차는 1.8 %이하이었다. 센서 2와 3의 경우도 제작 후 특성실험할 경우 센서 1과 비슷한 결과일 것으로 생각된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 넓은 범위의 힘과 모멘트비를 갖는 3 분력 힘/모멘트 센서의 감지부를 설계하였다. 이론해석, 유한요소해석, 특성실험한 결과는 다음과 같다.

이론해석값을 기준으로 유한요소해석값을 비교한 결과 정격변형률오차는 센서 1인 경우에는 최대 2.8 %이내 이었고, 센서 2인 경우에는 0.5 %이었으며, 센서 3인 경우에는 4.8 %이내이었다. 센서 1에서 이론해석값을 기준으로 실험값을 비교한 결과 정격변형률오차는 1.7 %이하이었다. 그리고 다분력 힘/모멘트 센서의 정밀정확도에 큰 영향을 미치는 상호간섭오차는 이론해석을 기준으로 유한요소해석을 비교한 경우는 모두 0 %이었다. 센서 1의 특성실험에 의한 상호간섭오차는 1.8 %이하이었다.

따라서 본 논문에서 유도한 식 (2-a), (2-b), (4-a), (4-b), (7)는 힘과 모멘트의 비가 5 대 1에서 20 대 1의 넓은 범위의 힘과 모멘트비를 갖는 3 분력 힘/모멘트 센서의 설계를 위한 정격변형률 및 센서의 고유진동수를 각각 계산하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 제작된 3 분력 힘/모멘트 센서는 로봇의 힘제어 및 각종 산업에서의 여러 방향의 힘과 모멘트를 측정하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

### 참고문헌

1. Yabuki, A., "Six-Axis Force/Torque Sensor for Assembly Robots," FUJITSU Science Technology, Vol. 26 No. 1, pp. 41~47, 1990.
2. Brussel H. V., Belien H., and Thielemans H., "Force Sensing for Advanced Robot Control," North-Holland Robotics2, pp. 139~148, 1986.
3. Lee J., "Apply Force/Torque Sensors to Robotic Applications," North-Holland Robotics2, pp. 139~148, 1987.
4. NISSHO, "Multi-component load cell," NISSHO ELECTRIC WORKS CO. LTD, pp. 1~18, 1997.
5. Hatamura, Y., et al., "A Miniature 6-axis Force Sensor of Multilayer Parallel Plate Structure," IMEKO, pp. 567~582, 1989.
6. Ono, K., et. al., "A New Design for 6-component Force/Torque Sensors," Mechanical Problems in Measuring Force and Mass, pp. 39~48, 1993.
7. 김갑순, 강대임, 정수연, 주진원, "병렬판구조를 이용한 3분력 로드셀 감지부의 설계," 대한기계학회논문집(A), 제 21 권 제 11 호, pp. 1871~1884, 1995.
8. 김갑순, 이세현, 엄기원, "평판보를 이용한 6분력 로드셀 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회, 제 15 권 제 8 호, pp. 109~115, 1998.