

로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서 개발

김갑순[#]

Development of a Small 6-axis Force/Moment Sensor for Robot's Finger

Gab-Soon Kim[#]

ABSTRACT

This paper describes the development of a small 6-axis force/moment sensor for robot's finger, which measures forces F_x , F_y , F_z , and moments M_x , M_y , M_z simultaneously. In order to safely grasp an unknown object using the robot's gripper, and accurately perceive the position of it in the gripper, it should measure the force in the gripping direction, the force in the gravity direction and the moments each direction, and perform the force control using the measured forces and moments. Also, it should detect the moments M_x (x-direction moment), M_y and M_z to accurately perceive the position of the object in the grippers. Thus, the robot's gripper should be composed of 6-axis force/moment sensor that can measure forces F_x , F_y , F_z , and moments M_x , M_y , M_z simultaneously. In this paper, the small 6-axis force/moment sensor for measuring forces F_x , F_y , F_z , and moments M_x , M_y , M_z simultaneously was newly modeled using several parallel-plate beams, designed, and fabricated. The characteristic test for the developed sensor was performed, and the result shows that interference errors of the developed sensor are less than 4.23%. Thus, the developed small 6-axis force/moment sensor may be used a robot's gripper.

Key Words : 6-axis force/moment sensor(6 축 힘/모멘트센서), Parallel-plate beam(병렬평판보), Rated strain(정격변형률), Interference error(상호간섭오차)

1. 서론

인공지능 로봇에 부착되는 그리퍼(gripper)를 인간의 손과 비슷하게 제작하기 위한 연구가 국내외에서 끊임없이 진행되고 있다. 인공지능 로봇이 손가락을 이용하여 미지의 물체를 안전하게 잡기 위해서는 잡는 방향의 힘과 중력방향의 힘을 동시에 측정해야 하고 이 값들을 이용하여 힘제어를 해야 한다. 그리고 물체를 잡은 이후에 일을 정확하게 수행하기 위해서는 물체의 중심이 손가락의

어느 지점에 있는지를 알아야 하고, 이것을 위해서는 모멘트 M_x , M_y , M_z 를 동시에 측정해야 한다. 그러므로 로봇의 그리퍼는 힘 F_x (x 방향의 힘), F_y , F_z 과 모멘트 M_x (x 방향의 모멘트), M_y , M_z 를 동시에 측정할 수 있는 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서로 손가락을 구성하고 이것을 조합하여 만들어져야 한다.

Kim^{1,3,4,5,6}은 크기가 약 100 mm × 100 mm × 80 mm 정도인 일반 산업용 6 축 힘/모멘트센서를 설계 및 제작하였으며, Kang²는 크기가 약 100 mm ×

[#] 접수일: 2003 년 6 월 5 일; 게재승인일: 2004 년 1 월 9 일
교신저자, ERI, 경상대학교 제어계측공학과
Email gskim@gsnu.ac.kr Tel: (055)751-5372

200 mm × 60 mm 정도인 일반 산업용 6 축 힘/모멘트센서를 설계 및 제작하였다. 이와 같은 센서는 크기가 크고 형태가 손가락 모양과 다르기 때문에 인공지능 로봇의 손가락센서로 사용하기 어렵다. 그리고 Kim⁷은 크기가 약 120 mm × 60 mm × 60 mm 정도인 로봇 손가락용 3 축 힘센서를 설계 및 제작하였다. 이 센서는 크기가 크기 때문에 2 손가락을 가진 그리퍼는 제작이 가능하나 그 이상의 손가락을 가진 그리퍼를 제작하기는 곤란하며, 또한 모멘트를 감지하지 못하는 단점을 가지고 있다.

Ceccarelli, M., et al.⁸은 물체를 잡는 방향의 힘을 측정할 수 있는 단축 힘센서를 이용하여 로봇의 손가락을 제작하였고, Castro, D., et al.⁹은 단축 힘센서를 이용하여 조오 그리퍼(Jaw gripper)를 제작하였으며, Nkgatho, S. T., et al.¹⁰은 그리퍼에 근접 센서를 부착하고 이것과 전자회로를 연결하여 지능 그리퍼(intelligent gripper)을 제작하였다. 그리고 O'Brien, D. J., et al.¹¹은 손가락에 스트레인게이지를 부착하여 물체를 잡는 방향의 힘을 측정할 수 있는 그리퍼를 제작하였다.

이와 같은 그리퍼는 여러방향의 힘과 모멘트를 동시에 측정할 수 없기 때문에 미지의 물체를 떨어트리거나 파손되지 않도록 정확하게 잡을 수 없을 뿐만 아니라 미지의 물체가 손가락의 어느 위치에 있는지 정확하게 알 수 없다.

로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서를 이용하여 정확한 힘/모멘트를 측정하기 위해서는 센서의 상호간섭오차(interference error)가 작아야 한다.^{1-7,12} 소형 6 축 힘/모멘트센서는 소형이므로 센서 전체 크기에 제약을 받고, 상호간섭오차를 이론적으로 계산한 결과가 0 이어야 하므로 센서 감지부의 모델링이 매우 중요하다.

본 논문에서는 로봇의 그리퍼를 구성하기 위한 힘 F_x, F_y, F_z 과 모멘트 M_x, M_y, M_z 를 동시에 감지할 수 있고 크기가 가로와 세로가 각각 35 mm, 높이가 85 mm 인 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서를 개발하였다. 이 센서는 병렬평판보(PPB : parallel- plate beam) 6 개로 구성되는 단일 몸체로 새롭게 모델링되었고, 힘/모멘트센서의 감지부들을 설계하기 위하여 힘과 모멘트에 의한 보들의 변형률을 계산하는 식을 유도하였다. 유도된 식들을 이용하여 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서의 감지부의 크기를 설계하였으며, 스트레인게이지를 부착하여 센서를 제작하였다. 그리고

제작된 센서의 특성평가를 실시하였다.

2. 센서설계

2.1 센서 감지부의 모델링

Fig. 1 은 힘 F_x, F_y, F_z 와 모멘트 M_x, M_y, M_z 를 동시에 감지할 수 있도록 새롭게 모델링한 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서를 나타내고 있다. 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서의 하부 감지부는 2 개의 병렬평판보(parallel-plate beam : PPB)로 구성되어 힘 F_x, F_y 와 모멘트 M_z 를 동시에 감지할 수 있으며, 상부 감지부는 4 개의 병렬평판보로 구성되어 힘 F_z 와 모멘트 M_x, M_y 를 감지할 수 있다. 상부와 하부 감지부의 고정부를 나사로 고정하여 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서를 구성한다.

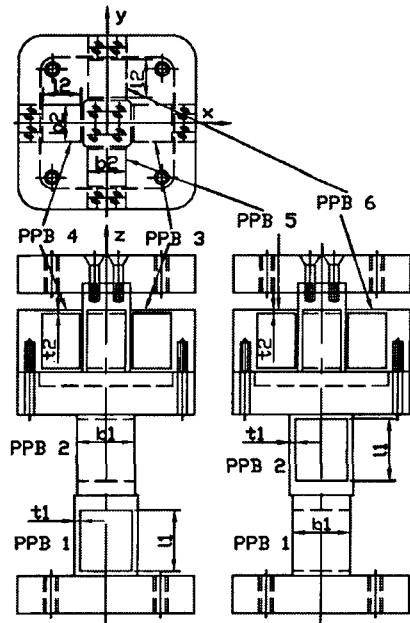


Fig. 1 New sensing element of a small 6-axis force /moment sensor for robot' s finger

6 개의 PPB 들중 PPB 1 은 힘 F_x 와 모멘트 M_z , PPB 2 는 F_y , PPB 3 과 PPB 4 는 힘 F_z 와 모멘트 M_y , PPB 5 와 PPB 6 은 모멘트 M_x 를 감지하는 병렬평판보이다. PPB 1 과 PPB 2 는 폭 b_1 , 두께 t_1 , 길이 l_1 인 평판보 2 개로, PPB 3, PPB 4, PPB 5, PPB 6

은 폭 b_2 , 두께 t_2 , 길이 l_2 인 평판보 2 개로 각각 구성되었다.

Fig. 1 에서 보는 것과 같이 PPB 1~6 은 x, y, z 축을 기준으로 좌우 혹은 상하대칭이 되도록 모델링 되었다. 외부로부터 가해지는 3 개의 힘과 3 개의 모멘트는 센서의 상부와 하부의 블록을 통하여 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서에 전달된다. 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서를 설계하기 위해서는 센서감지부의 이론해석이 필요하다.

2.2 센서의 이론해석

2.2.1 힘 F_x 혹은 F_y 가 가해졌을 때

Fig. 2 는 PPB 1 의 블록 O_2 중앙에 힘 F_x 가 가해졌을 때 각 평판보의 변형률을 해석하기 위한 개략도를 나타내고 있다. PPB 1 은 수평축을 기준으로 대칭이고, 이것은 평판보 1 (beam 1)로 구성되었으며, 이것들의 크기가 같다. 따라서 평판보 1 을 변형률해석한 이론식을 평판보 2 에 적용할 수 있다.

PPB 1 의 블록 끝 O_2 중앙에 힘 F_x 가 가해졌을 때 평판보 1 에 가해지는 힘과 모멘트, 즉 힘 F_x 에 의해 발생하는 x 방향의 힘 F_{Fxx} , 힘 F_x 에 의해 발생하는 y 방향의 모멘트 M_{Fxy} , 힘 F_x 에 의해 발생하는 z 방향의 힘 F_{Fzx} 를 구하고, 블록에서 x 방향의 힘 평형조건 $\sum F_x = 0$ 과 블록의 O 점 에서 모멘트 평형조건 $\sum M_o = 0$ 식을 각각 구하며, 이들 식들을 이용하여 블록의 회전각 ϕ 와 수직처짐 v 를 구하면 식 (1), (2)와 같다.

$$\phi = \frac{(2d_1 + l_1)F_x}{\frac{48EI_1}{l_1^2} \left(\frac{3}{2}d_1 + \frac{2}{3}l_1 \right) + \frac{4A_1Ed_2^2}{l_1}} \quad (1)$$

$$v = \frac{F_x - \frac{24EI_1}{l_1^2} \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi}{\frac{24EI_1}{l_1^2}} \quad (2)$$

평판보 임의의 점 z 에서 모멘트 M_{oz} 는 식 (3)와 같고

$$M_{oz} = F_{Fxx}z - M_{Fxy} = \frac{12EI_1z}{l_1^3} \left[v + \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi \right] - \frac{12EI_1}{l_1^2} \left[\frac{v}{2} + \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi \right] \quad (3)$$

굽힘변형률식 $\varepsilon = M_{oz} / EZ_{1P}$ 과 인장변형률식 과 압축변형률식 $\varepsilon = F / A_1E$ 을 중첩시켜 평판보의 위면의 변형률 ε_{Fx-U} 과 아랫면의 변형률 ε_{Fx-L} 식을 유도하면 식 (4-a), (4-b)와 같다.

$$\varepsilon_{Fx-U} = \frac{6t_1z}{l_1^3} \left(v + \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi \right) - \frac{6t_1}{l_1^2} \left(\frac{v}{2} + \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi \right) + \frac{d_2\phi}{l_1} \quad (4-a)$$

$$\varepsilon_{Fx-U} = -\frac{6t_1z}{l_1^3} \left(v + \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi \right) + \frac{6t_1}{l_1^2} \left(\frac{v}{2} + \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi \right) - \frac{d_2\phi}{l_1} \quad (4-b)$$

여기서 d_1 은 힘 F_x 작용점으로부터 평판보 끝점까지의 길이, d_2 는 블록의 수평중심축으로부터 평판보 두께의 중심까지의 길이이다.

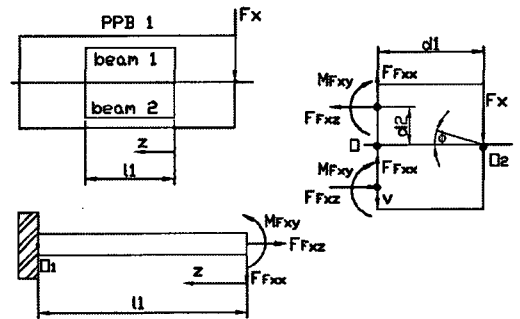


Fig. 2 Free body diagram of plate beams for a small 6-axis force/moment sensor for robot's finger under the force F_x

2.2.2 힘 F_z 가 가해졌을 때

Fig. 3 는 PPB 3 과 PPB 4 의 중앙에 힘 F_z 가 가해졌을 때 각 평판보의 변형률을 해석하기 위한 개략도를 나타내고 있다. PPB 3 과 PPB 4 는 힘 F_z

가 가해지는 방향의 중심축을 기준으로 대칭이고, PPB 3 을 구성하는 평판보 3(beam 3)과 평판보 4(beam 4)는 수평중심축을 기준으로 대칭이며, 또한 PPB 4 을 구성하는 평판보 5(beam 5)과 평판보 6(beam 6)는 수평중심축을 기준으로 대칭이다. 따라서 평판보 3 을 변형률해석한 이론식을 평판보 4, 평판보 5, 평판보 6 에 적용할 수 있다. 그리고 PPB 3 과 PPB 4, PPB 5 와 PPB 6 의 구조가 같기 때문에 PPB 3 과 PPB 4 의 이론식을 PPB 5 와 PPB 6 에도 그대로 적용할 수 있다.

평판보 3 의 $x=0$ 지점에서 힘 F_z 에 의해 발생되는 z 방향의 힘 F_{Fzz} 를 구하고, 고정단 O_3 점에서의 모멘트 평형조건 $\sum M_{o3} = 0$ 를 이용하여 힘 F_z 에 의해 발생되는 y 방향의 모멘트 M_{Fzy} 를 구하여 이들 힘과 모멘트를 이용하여 임의 점 x 에서의 모멘트 M_{ox} 는 식 (5)과 같이 쓸 수 있다.

$$M_{ox} = \frac{F_z}{4} \left(x - \frac{l_2}{2}\right) \quad (5)$$

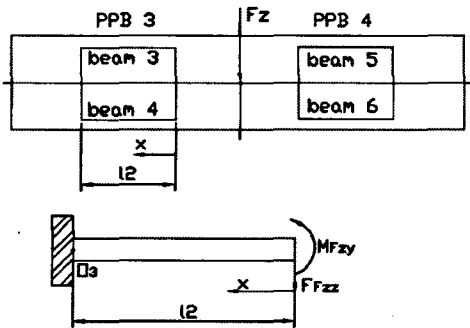


Fig. 3 Block diagram of multi-modal chatter model of a high speed machining center (Times New Roman)

변형률식 $\varepsilon = M_{oz}/EZ_{2P}$ 에 식 (5)을 대입하여 평판보 3 의 윗면의 변형률 ε_{Fz-U} 과 아래면의 변형률 ε_{Fz-L} 식을 유도하면 식 (6-a)와 (6-b)와 같다.

$$\varepsilon_{Fz-U} = \frac{F_z}{4EZ_{2P}} \left(x - \frac{l_2}{2}\right) \quad (6-a)$$

$$\varepsilon_{Fz-L} = \frac{F_z}{4EZ_{2P}} \left(\frac{l_2}{2} - x\right) \quad (6-b)$$

여기서 E 는 종탄성계수, Z_{2P} 는 극단면계수이다.

2.2.3 모멘트 $M_x=M_y$ 가 가해졌을 때

Fig. 4 는 PPB 3 과 PPB 4 의 중앙에 모멘트 M_y 가 가해졌을 때 각각의 평판보의 변형률을 해석하기 위한 개략도를 나타내고 있다. PPB 3 과 PPB 4 는 y 축을 기준으로 좌우대칭이고, PPB 3 을 구성하는 평판보 3(beam 3)과 평판보 4(beam 4)는 수평중심축을 기준으로 대칭이며, 또한 PPB 4 를 구성하는 평판보 5(beam 5)와 평판보 6(beam 6)은 수평중심축을 기준으로 대칭이다. 따라서 평판보 3 을 변형률해석한 이론식을 평판보 4, 평판보 5, 평판보 6 에 적용할 수 있다.

평판보 3 의 끝점인 $x=0$ 에서 수직처점 v 와 회전각 θ 를 이용하여 모멘트 M_y 에 의해 발생되는 x 방향의 힘 F_{Myx} , 모멘트 M_y 에 의해 발생되는 y 방향의 힘 F_{Myy} , 모멘트 M_y 에 의해 발생되는 y 방향의 모멘트 M_{Myy} 를 구하고, 이들을 블록의 중심 P 점에서의 모멘트 평형조건 $\sum M_P = 0$ 을 이용하여 식을 유도하여 대입하면 블록의 중심점 P 의 회전각 θ 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = \frac{M_y/4}{\frac{12EI_2}{l_2^2} \left(d_3 + \frac{l_2}{3} + \frac{d_3^2}{l_2}\right) + \frac{A_2Ed_4^2}{l_2}} \quad (7)$$

여기서 d_3 는 블록의 수직중심축으로부터 평판보 끝점까지의 길이, d_4 는 블록의 수평중심축으로부터 평판보 두께의 중심까지의 길이이다.

굽힘변형률식 $\varepsilon = M/EZ_{2P}$ 과 인장변형률식과 압축변형률식 $\varepsilon = F/A_2E$ 을 중첩시켜 평판보 7 의 위면의 변형률 ε_{My-U} 과 아래면의 변형률 ε_{My-L} 식을 유도하면 식 (8-a), (8-b)와 같다.

$$\varepsilon_{My-U} = \left[\frac{6h}{l_2^3} \left(\frac{d_3 l_2}{2} + \frac{l_2^2}{3} - \left(d_3 + \frac{l_2}{2}\right)x \right) + \frac{d_4}{l_2} \right] \theta \quad (8-a)$$

$$\varepsilon_{My-L} = - \left[\frac{6h}{l_2^3} \left(\frac{d_3 l_2}{2} + \frac{l_2^2}{3} - \left(d_3 + \frac{l_2}{2}\right)x \right) + \frac{d_4}{l_2} \right] \theta \quad (8-b)$$

모멘트 M_x 를 감지하기 위한 PPS 5 과 PPS 6 의 평판보들은 모멘트 M_y 를 감지하기 위한 PPS 3 과 PPS 4 의 평판보들의 변형률들과 구조가 같으므로 위의 변형률식 (8-a)와 (8-b)를 이용할 수 있다.

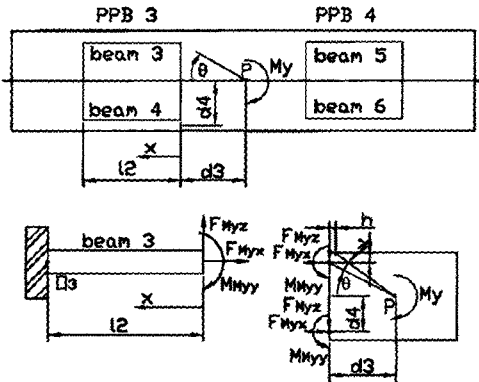


Fig. 4 Free body diagram of plate beams for a small 6-axis force/moment sensor for robot's finger under the moments M_y

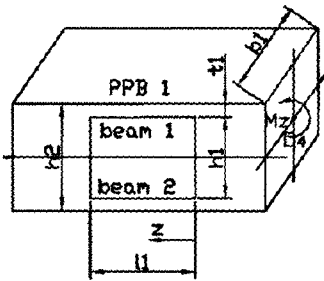


Fig. 5 Free body diagram of plate beams for a small 6-axis force/moment sensor for robot's finger under the moments M_z

2.2.4 모멘트 M_z 가 가해졌을 때

Fig. 5 는 PPB 1 의 블록 O_4 중앙에 모멘트 M_z 가 가해졌을 때 각 평판보의 변형률을 해석하기 위한 개략도를 나타내고 있다. PPB 1 은 수평축을 기준으로 대칭이고, 이것은 평판보 1 (beam 1) 과 평판보 2 로 구성되었으며, 이것들의 크기가 같다.

PPB 1 의 블록 끝 O_4 중앙에 모멘트 M_z 가 가해졌을 때 평판보 1 과 2 에서 발생하는 전단변형률은 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{6M_z}{b_1(h_2^2 - h_1^2)G} \tag{9}$$

여기서 G 는 횡탄성계수, h_2 는 PPB 1 의 높이, h_1 은 PPB 1 의 높이에서 평판보 두께의 2 배를 뺀 길이이다.

2.3 감지부의 설계

로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서는 정격힘 F_x, F_y, F_z 과 정격모멘트 M_x, M_y, M_z 를 센서에 가했을 때 각 센서의 완전결선회로(full bridge circuit)에 출력되는 변형률이 서로 비슷하도록 설계되어야 한다. 센서 감지부의 설계변수는 정격용량, 정격변형률, 보의 폭, 보의 길이, 보의 높이, 등이다.

센서의 용량은 각각의 힘센서 F_x, F_y, F_z 가 모두 20 N 이고 각각의 모멘트센서 M_x, M_y, M_z 가 1 Nm, 정격변형률은 모두 $1000 \mu m/m$ 정도, 스트레인이계이지의 부착위치는 스트레인이계이지의 크기 $3 \times 4 \text{ mm}^2$ 를 고려하여 보의 길이 방향으로는 모두 보의 양끝 지점으로부터 1.5 mm 떨어진 지점이고, 보의 폭 방향으로는 보의 길이 방향의 중심선상으로 결정하였다.

결정된 수치들을 변형률식 (4-a), (4-b), (6-a), (6-b), (8-a), (8-b), (9)에 대입하여 계산한 결과, 보의 폭 b_1 은 12 mm, b_2 는 8 mm, 보의 길이 l_1 은 13 mm, l_2 는 8 mm, 보의 높이 h_1 은 1.2 mm, h_2 는 0.73 mm 이었다. 감지부의 재질은 소용량의 힘/모멘트 센서의 감지부로 많이 사용되는 알루미늄 2024-T351 이다.

3. 변형률해석 및 센서제작

Fig. 6 는로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서를 제작하기 위한 스트레인이계이지 부착위치를 나타낸 것이다. 힘 F_x 를 감지하는 센서의 스트레인이계이지는 S1~S4, F_y 인 경우에는 S5~S8, F_z 인 경우에는 S9~S12, M_x 인 경우에는 S13~S16, M_y 인 경우에는 S17~S20, M_z 인 경우에는 S21~S24 로 선정하였다.

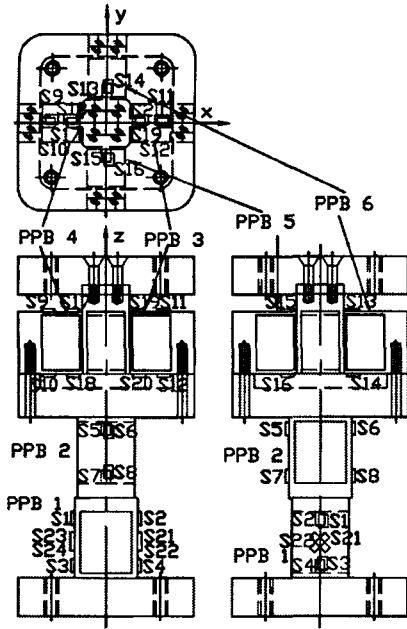


Fig. 6 Locations of strain gages

센서는 휘스톤브리지회로를 구성하여 제작된다. 따라서 휘스톤브리지회로를 구성한 상태에서 각 센서의 정격변형률이 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 정도가 되고 상호간섭오차가 0 이 되도록 유도한 변형률식 (4-a), (4-b), (6-a), (6-b), (8-a), (8-b), (9)를 이용하여 설계하였다. 각 힘/모멘트센서의 정격변형률과 상호간섭오차는 스트레인게이지의 부착위치에서의 변형률을 식 (10)에 의해 계산될 수 있다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{C1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{C2} \quad (10)$$

여기서 ε 은 휘스톤브리지회로로부터 계산된 변형률, ε_{T1} 은 인장 스트레인게이지 T_1 의 변형률, ε_{T2} 는 인장 스트레인게이지 T_2 의 변형률, ε_{C1} 은 압축 스트레인게이지 C_1 의 변형률, ε_{C2} 은 압축 스트레인게이지 C_2 의 변형률이다.

Table 1 은 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트 센서의 정격변형률과 상호간섭오차를 나타내었다. 이론해석에 의한 정격변형률은 F_x 센서, F_y 센서, F_z 센서, M_x 센서, M_y 센서는 모두 1002 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이었고, M_z 센서는 1004 이었으며, 모든 센서의 상호간섭오차는 모두 0 이었다. 각 센서의 정격출력은 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 근처로 매우 정확하게 설계되었으며,

모든 센서의 상호간섭오차가 0 인 것은 완전결선 회로의 결선을 고려하여 스트레인게이지의 부착위치를 결정하였으며, 게이지의 부착을 게이지의 중심선과 평판보의 중심선이 일치하도록 하였기 때문이다.

로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서는 Fig. 6 에 나타낸 스트레인게이지의 부착위치에 순간접촉제(M-bond 200)를 이용하여 스트레인게이지(N2A-13-T001N-350)를 부착하였으며, 휘스톤브리지회로를 구성하여 제작하였다.

Table 1 Rated strain and interference error of each sensor

		Rated strain and interference error ($\mu\text{m}/\text{m}$)					
Sensor		F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
F/M	$F_x=20\text{ N}$	1002	0	0	0	0	0
	$F_y=20\text{ N}$	0	1002	0	0	0	0
	$F_z=20\text{ N}$	0	0	1002	0	0	0
	$M_x=1\text{ Nm}$	0	0	0	1002	0	0
	$M_y=1\text{ Nm}$	0	0	0	0	1002	0
	$M_z=1\text{ Nm}$	0	0	0	0	0	1004

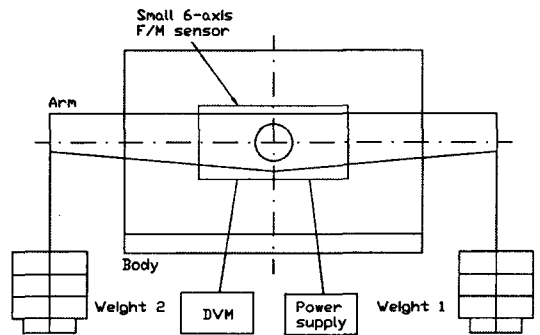


Fig. 7 Experimental set up for sensor

4. 결과 및 고찰

Fig. 7 은 6 축 로봇손가락 힘/모멘트센서 (불확도 0.1 %)의 특성실험을 위한 시험장치를 나타내고 있으며, 암(arm), 추(weight), 몸체(body), 디지털 멀티미터(digital multimeter, ADCANTEST, R6552), 파워서플라이(power supply, UNICORN, UP-100DT)로

구성되었다. 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트 센서의 특성실험은 Fig. 7 에 나타낸 특성실험장치를 이용하여 힘 F_x, F_y, F_z 를 각각 20 N, 모멘트 M_x, M_y, M_z 를 각각 1 Nm 를 센서에 가하여 각각 3 회씩 실시하였으며, 그 값들을 평균하였다. 이론식과 특성시험에 의한 정격출력의 단위를 같게 하기 위하여 특성실험에 의한 각 센서의 정격출력의 단위가 mV/V 이므로 이론식에 의한 정격변형률 ($\mu m/m$)을 정격출력(mV/V)으로 바꾸어야 한다. 정격변형률을 정격출력으로 바꾸는 식은 다음과 같다.

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{4} K \varepsilon \quad (11)$$

여기서, E_i 는 완전결선회로의 입력전압(V), E_o 는 완전결선회로의 출력전압(V), K 는 스트레인 게이지 상수이고, 사용된 스트레인게이지의 게이지상수는 2.03, ε 는 각 센서의 정격변형률($\mu m/m$)이다.

Table 2 Rated strain in theory and characteristic test

Sensor	Analysis	Rated strain (mV/V)	Error(%)
Fx sensor	Theory	0.5085	9.7
	Test	0.5576	
Fy sensor	Theory	0.5085	4.4
	Test	0.5307	
Fz sensor	Theory	0.5085	6.2
	Test	0.5401	
Mx sensor	Theory	0.5085	9.8
	Test	0.4587	
My sensor	Theory	0.5085	9.6
	Test	0.4596	
Mz sensor	Theory	0.5095	8.7
	Test	0.4652	

Table 1 의 각 센서의 정격변형률($\mu m/m$)을 식 (11)에 대입하여 정격출력(mV/V)으로 변환하였다. Table 2 는 유도된 이론식과 특성시험에 의한 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서의 정격출력을 나타내었다. 이론식에 의한 정격출력을 기준으로 실험에 의한 정격출력을 비교한결과, 4.4 % ~ 9.7 %

의 오차를 보였다. 이와 같이 오차가 발생된 것은 센서의 가공오차와 스트레인게이지의 부착오차 때문인 것으로 생각된다. 이와 같은 결과를 볼 때, 본 논문에서 유도한 식 (4-a), (4-b), (6-a), (6-b), (8-a), (8-b), (9)는 고안한 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서의 설계를 위한 정격변형률을 계산하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

Table 3 은 상호간섭오차를 나타내고 있다. Fx 센서의 가장 큰 상호간섭오차는 $M_y=1$ Nm 을 가했을 때 2.04 %, Fy 센서는 $M_x=1$ Nm 를 가했을 때 -2.05 %, Fz 센서는 $M_y=1$ Nm 를 가했을 때 -1.13 %, Mx 센서는 $F_y=20$ N 를 가했을 때 3.35 %, My 센서는 $F_z=20$ N 를 가했을 때 -4.23 %, Mz 센서는 $F_x=20$ N 를 가했을 때 -0.56 %이었다.

Table 3 Interference error in characteristic test

Sensor F/M	Rated strain ($\mu m/m$) and Interference error (%)					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Fx=20 N	-	-1.02	0.78	-0.68	4.10	-0.56
Fy=20 N	-0.05	-	0.50	3.35	0.79	0.26
Fz=20 N	-1.27	-0.77	-	2.25	-4.23	0.13
Mx=1 Nm	-0.13	-2.05	0.41	-	0.35	-0.02
My=1 Nm	2.04	-0.49	-1.13	0.57	-	0.32
Mz=1 Nm	0.25	-0.58	-0.09	-0.75	2.21	-

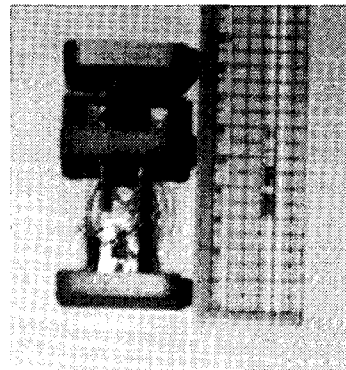


Fig. 8 Fabricated small 6-axis force/moment sensor for robot's finger

그러므로 개발한 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서의 최대상호간섭오차는 4.5 %이내이다.

이와 같이 상호간섭오차가 발생하는 것은 센서의 가공오차와 스트레인게이지의 부착오차, 특히 측정시 소형 센서에서 발생하는 흔들림오차, 등 때문인 것으로 생각된다. 본 논문에서 개발한 센서의 특징은 상호간섭오차가 상용화된 힘 $F_x=F_y=F_z=100$ N 이상과 모멘트 $M_x=M_y=M_z=10$ Nm 이상 용량인 센서의 상호간섭오차 3 %보다 약 1.5 % 정도 크나 각 센서의 힘 2 N, 모멘트 2 Nm 용량인 소형센서인 Yabuki A¹²의 6 축 힘/모멘트센서의 14 %보다 매우 우수하고, 또한 센서의 크기가 가로와 세로 각각 35 mm, 높이 85 mm로 서론에 나타낸 기존의 센서들보다 매우 작은 것이다. Fig. 8 는 본 논문에서 개발한 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서의 사진을 나타내고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 로봇의 그리퍼를 구성하기 위한 힘 F_x, F_y, F_z 과 모멘트 M_x, M_y, M_z 를 동시에 감지할 수 있는 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서를 새로운 구조로 모델링하여 개발하였다.

개발한 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서는 이론식에 의한 정격출력을 기준으로 실험에 의한 정격출력을 비교한 최대오차가 9.7 %이었고, 최대상호간섭오차가 4.5 % 이하이었다. 그러므로 본 논문에서 유도한 식 (4-a), (4-b), (6-a), (6-b), (8-a), (8-b), (9)는 고안한 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서의 설계를 위한 정격변형을 계산하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각되며, 상호간섭오차도 우수하게 평가되어 개발한 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서는 미지물체를 안전하게 잡을 수 있는 인공지능 로봇의 그리퍼 제작에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

추후 연구는 본 논문에서 개발한 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서를 이용하여 인공지능 로봇의 손을 구성하고 이를 이용하여 미지물체를 잡는 실험을 실시하는 것이다.

참고문헌

1. Kim, G. S., et. Al., "Design of sensing element for 3-component load cell using parallel plate structure," KSME, Vol. 21, No. 11, pp. 1871~1884, 1997.
2. Kang, D. I., et. Al., "Design and evaluation of

- binocular type six-component load cell by using experimental technique," KSME, Vol. 21, No. 11, pp. 1921~1930, 1997.
3. Kim, G. S., et. Al., "Development of 6-component load cell using plate beams," KSPE, Vol. 15, No. 8, pp. 109~116, 1998.
4. Kim, G. S., et al., "Design and fabrication of a three-component force/moment sensor using plate-beam," Meas. Sci. Technol., Vol.10, pp. 295 ~ 301, 1999.
5. Kim, G. S., et al., "Design and fabrication of a six-component force/moment sensor," Sensors and Actuators, Vol.77, pp. 209 ~ 220, 1999.
6. Kim, G. S., "Design of 3-component sensor with force/moment ratio of wide range," KSPE, Vol. 18, No. 2, pp. 214~221, 2001.
7. Kim, G. S., "Design of a robot's hand with two 3-axis force sensor for grasping an unknown object," KSPE, Vol. 4, No. 3, pp. 12~19, 2003.
8. Ceccarelli, M., et al., "Grasp Forces in Two-finger: Modeling and Measuring," Proceedings of 5th International Workshop on Robotics in Alpe Adria-Danube Region, pp.321~326, 1996.
9. Castro, D., et al. "Tactile Force Control Feedback in Parallel Jaw Gripper," Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 3, V. 3, pp.884~888, 1997.
10. Nkgatho, S. T., et al., "intelligent Gripper using Low Cost Industrial," Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 2, V. 2, pp.415~419, 1998.
11. Obrien, D. J., et al., "Force Explicit Slip Sensing for the Amadeus underwater Gripper," International Journal of Systems Science, Vol. 29 No. 5, pp. 471~483, 1998.
12. Yabuki, A., "Six-Axis Force/Torque Sensor for Assembly Robots," FUJTSU Science Technology, Vol. 26 No. 1, pp. 41~47, 1990.