

4 축 힘/토크 센서의 구조 설계

Design of Structure of Four-Axis Force/Torque Sensor with Parallel Step Plate Beams

이 경 준, 김 갑 순*
(Kyung-Jun Lee¹ and Gab-Soon Kim^{1,*})

¹Department of Control and Instrumentation Engineering, Gyeongsang National University

Abstract: This paper describes the design of a four-axis force/torque sensor with PSPBs (Parallel Step Plate Beams). The sensor is composed of eight PSPBs, a force/torque transmitting block, and fixing blocks. It is designed by using the FEM(Finite Element Method), and fabricated by using strain gages. The characteristic tests of the sensor are carried out, and the interference error, repeatability error, and non-linearity error are less than 2.21%, 0.03% and 0.03%. Furthermore, the structure of the four-axis force/torque sensor with PSPBs has a larger rated capacity than that of the four-axis force/torque sensor with PPBs under the same overall sensor size and the same rated output. It is thought that the developed four-axis force/torque sensor with PSPBs can be used for measuring the forces and torques in an intelligent robot, automation devices, etc.

Keywords: four-axis force/torque sensor, rated output, interference error, step plate beam

I. 서론

각종 로봇, 자동화시스템 등 자동으로 제어하는 다양한 시스템에는 여러 방향의 힘과 토크를 측정하는 경우가 많다. 이와 같이 여러 방향의 힘과 토크를 측정하는 센서를 다축 힘/토크 센서라고 하고, 이 센서는 x, y, z 방향의 힘 F_x , F_y , F_z 와 토크 T_x , T_y , T_z 중 2개 이상의 힘과 토크를 측정하는 것을 말한다. 즉, 힘 F_x , F_y 와 토크 M_z 를 측정하는 센서는 3축 힘/토크 센서이다. 손목회전 재활로봇에 사용되는 4축 힘/토크 센서는 z방향의 힘 F_z 와 x, y, z방향의 토크 T_x , T_y , T_z 를 동시에 측정할 수 있고, F_z 센서, T_x 센서, T_y 센서, T_z 센서가 한 몸체 내에 구성된다. 4축 힘/토크 센서 중 T_z 센서는 손목을 회전시키는 방향의 토크를 측정하고, F_z 센서, T_x 센서, T_y 센서는 비정상 상태 때 환자의 손을 당기거나 미는 힘과 토크를 측정한다.

이 센서는 4개의 센서가 한 몸체 내에 구성되므로 구조가 복잡하고, 설계 및 제작하는 것이 매우 어렵다. 설계시 4개 센서의 정격출력을 같게 설정하는 것이 일반적이고, 이럴 경우 각 센서의 넓은 범위의 정격용량으로 설계하는 것이 센서의 구조에 따라 불가능 한 경우가 매우 많다. 이것은 4축 힘/토크 센서의 각 센서의 감지부는 두 개 이상의 센서의 감지부와 연관이 있거나 연결되었기 때문이다. 즉, F_z 센서의 감지부와 T_x 센서 혹은 T_y 센서의 감지부는 동일한 감지부를 사용하여 스트레인게이지를 부착하여 각 센서를 제작한다. 힘 F_z 가 센서의 중심점으로부터 멀리 떨어진 지점에 가해졌을 경우에는 큰 토크 T_x 혹은 T_y 가 발생되고, 이 토크는 센서 감지부를 파괴시킬 수 있으므로 가능한 한 T_x 센서 및

T_y 센서의 정격용량이 크게 설계되는 것이 좋다.

그러므로 4축 힘/토크 센서의 구조를 모델링하는 것은 매우 중요하고, 그것에 따라 각 센서의 정격용량을 다양하게 설계할 수 있기 때문이다. 센서를 설계할 경우에는 설계변수로 정격출력(정격변형률), 센서의 전체 크기, 감지부의 두께, 길이, 폭이 사용된다. 4축 힘/토크 센서의 센서 전체 크기와 정격출력을 결정한 후 설계할 경우에는 보통 설계변수 중 길이와 폭을 고정하고 두께만을 변경해야 한다. 4축 힘/토크 센서의 전체 크기는 대부분 감지부의 길이와 폭의 크기로 결정되기 때문이다.

개발된 6축 힘/토크 센서[1-4]는 각 센서의 감지부를 쌍안경형태(binocular type)으로 모델링하고, 설계 및 제작하였다. 이와 같은 형태의 구조는 정격출력과 센서의 전체 크기를 결정한 후, 쌍안경형태로 두 개의 같은 크기의 홀을 가공하여 설계(감지부 두께만을 변경)하므로 보다 넓은 범위의 정격용량으로 설계하기가 매우 어렵다. 또한 개발된 6축 힘/토크 센서[5-11]는 평행판보(parallel plate beam) 혹은 단일판보(one plate beam)를 사용하여 모델링하고 설계하였다. 단일판보를 이용하여 설계한 경우에는 정격힘과 정격토크를 가할 때 처짐(displacement)이 크게 발생되어 로봇 및 자동화시스템에 부착하여 사용할 때 제어 등에 문제가 발생될 수 있다. 그리고 평행판보를 이용하여 설계한 경우에는 쌍안경형태의 감지부와 마찬가지로 정격출력(정격변형률), 센서의 전체 크기를 결정한 후, 감지부의 두께만을 변경(감지부의 길이와 폭은 일정)하여 설계하므로 보다 넓은 범위의 정격용량으로 설계하기가 매우 어렵다. 그러므로 이와 같은 문제점을 보완하기 위한 새로운 4축 힘/토크 센서의 구조를 고안할 필요가 있다.

본 논문에서는 보다 넓은 범위의 정격용량으로 설계할 수 있는 평형계단판보(parallel step plate beam)를 가진 4축 힘/토크 센서의 구조를 설계하였다. 새롭게 고안한 평형계단판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 구조와 평행판보(parallel

* Corresponding Author

Manuscript received July 16, 2014 / revised September 16, 2014 / accepted October 6, 2014

이경준, 김갑순: 경상대학교 제어계측공학과, ERI
(dusqus1508@naver.com/gskim@gsnu.ac.kr)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1A2A10041417).

plate beam)를 가진 4축 힘/토크 센서의 구조를 유한요소법을 이용하여 각 센서의 정격용량 변화를 비교하였고, 평행계단평판보 평판보를 가진 4축 힘/토크 센서를 설계 및 제작하였다. 그리고 4축 힘/토크 센서의 특성실험을 실시하였다.

II. 4축 힘/토크 센서의 설계 및 제작

1. 4축 힘/토크 센서의 구조

그림 1(a)는 본 논문에서 새롭게 모델링한 평행계단평판보 (PSPB: Parallel Step Plate Beam)를 가진 4축 힘/토크 센서의 구조를 나타내고 있고, (b)는 평행평판보(PPB: Parallel Plate Beam)를 가진 4축 힘/토크 센서의 구조를 나타내고 있다. 이 센서들은 힘 F_z 와 토크 T_x, T_y, T_z 를 동시에 측정할 수 있으며, 4개의 센서 감지부가 한 몸체에 구성되었다. 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서는 중앙에 힘/토크 전달블록(F/TB)이 위치해있고, 이것을 중심으로 십자형으로 4개의 블록으로 구성되어있다. 하나의 블록은 2개의 평행계단평판보가 서로 수직으로 위치하고 있으며, 총 8개의 평행계단평판보 PSPB1~8로 구성되어있다. 외곽으로는 고정블록 F1~F8로 구성되어 있다. 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 구조는 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 구조와 대부분 일치하고, 다른 것은 십자형에 위치한 총 8개의 평행계단평판보 PSPB1~8를 대신하여 평행평판보 PPB1~8로 구성된 것이다. 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 F_z 센서는 PSPB1과 3, T_x 센서는 PSPB2와 4, T_y 센서는 PSPB1과 3, T_z 센서는 PSPB5~8이다. 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 PSPB1~4의 보의 크기는 두께 $t1-1$ 과 $t1-2$, 길이 $l1-1$ 과 $l1-2$, 폭 $b1$, PSPB5~8의 보의 크기는 두께 $t2-1$ 과 $t2-2$, 길이 $l2-1$ 과 $l2-2$, 폭 $b2$ 이다. 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 각 센서의 감지부는 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 각 센서의 감지부 위치와 같다. 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 PPB1~4의 보의 크기는 두께 $t1$, 길이 $l1$, 폭 $b1$, PPB5~8의 보의 크기는 두께 $t2$, 길이 $l2$, 폭 $b2$ 이다. PSPB1~4는 F_z 센서, T_x 센서, T_y 센서의 감지부로 공동으로 사용하기 때문에 이들 센서들의 정격용량과 정격출력이 결정되면 이들 감지부의 두께, 길이, 폭을 모두 고려하여 설계해야 한다. 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 각 센서의 감지부 크기 설계도 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 각 센서의 감지부 설계와 같다.

2. 4축 힘/토크 센서의 설계 및 제작

평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 설계변수는 PSPB1~4의 보의 크기는 두께 $t1-1$ 과 $t1-2$, 길이 $l1-1$ 과 $l1-2$, 폭 $b1$, PSPB5~8의 보의 크기는 두께 $t2-1$ 과 $t2-2$, 길이 $l2-1$ 과 $l2-2$, 폭 $b2$ 이다. 그리고 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 설계변수는 PPB1~4의 보의 크기인 두께 $t1$, 길이 $l1$, 폭 $b1$, PPB5~8의 보의 크기는 두께 $t2-1$ 과 $t2-2$, 길이 $l2-1$ 과 $l2-2$, 폭 $b2$ 이다. 그러나 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서와 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서를 비교하기 위해 센서의 전체 크기, PSPB의 보의 길이(두 개 합)와 PPB의 보의 길이, 폭을 모두 같게 하고, 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 보의 두께 $t1-1, t1-2, t2-1, t2-2$ 와 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 보의 두께 $t1, t2$ 만을 변경시켜 설계한다.

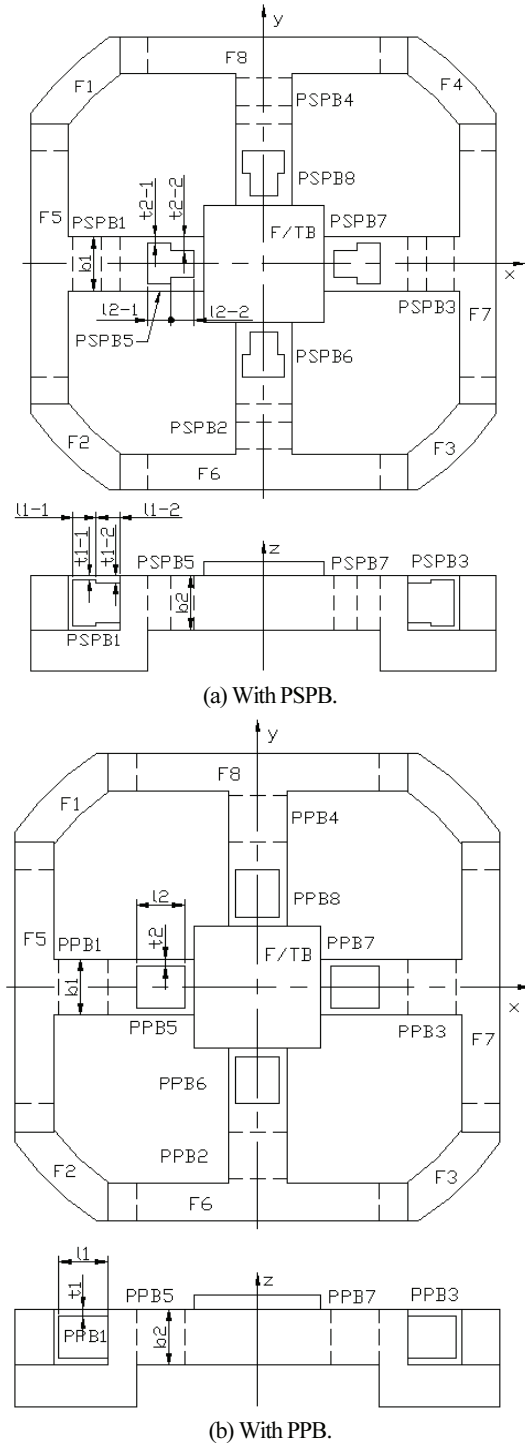


그림 1. 4축 힘/토크 센서의 구조.
Fig. 1. Structure of four-axis force/torque sensor.

각 센서는 4개의 스트레인게이지로 휘스톤브리지를 구성한다[1-11]. 정격변형률은 정격 하중이 가해질 때 휘스톤브리지에서 출력되는 총 변형률을 의미하고 이것의 값은 다음과 같은 식으로부터 계산된다.

$$\epsilon = \epsilon_{T1} - \epsilon_{C1} + \epsilon_{T2} - \epsilon_{C2} \tag{1}$$

여기서 ϵ 은 휘스톤브리지의 총 변형률, ϵ_{T1} 은 인장 스트레인게이지 T_1 의 변형률, ϵ_{C1} 은 압축 스트레인게이지 C_1 의 변형

를, ϵ_{T2} 은 인장 스트레인게이지 T_2 의 변형률, ϵ_{C2} 은 압축 스트레인게이지 C_2 의 변형률이다.

정격출력은 정격하중을 가했을 때 입력전압과 출력전압의 비로 나타내며, 다음과 같은 식에 의해 계산될 수 있다[1-11].

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{4} K \epsilon \quad (2)$$

여기서 E_i 는 휘스톤브리지의 입력전압, E_o 는 휘스톤브리지의 출력전압, K 는 스트레인게이지의 상수(약 2.03), ϵ 는 식 (1)로부터 얻은 총 변형률이다.

평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서를 설계하기 위한 설계변수의 정격출력은 약 0.5 mV/V, 정격용량은 Fz 센서가 300 N, Tx 센서와 Ty 센서가 모두 15.0Nm, Tz 센서가 30.0Nm, 센서의 크기가 100×100×24 mm, 스트레인게이지의 부착위치는 보의 길이 방향으로 1.5 mm, 폭 방향으로 1/2, 스트레인게이지 부착위치에서의 총 정격변형률은 약 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 로 결정하였다. 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 각 감지부의 크기를 결정하기 위해 ANSYS 소프트웨어를 이용하여 설계하였다. 유한요소해석을 위해 소프트웨어에 입력한 재료상수는 제작할 센서의 재질이 알루미늄이므로 종단성계수가 210 GPa, 프와송의비가 0.3이며, 8절점 6면체 블록을 선택하였다.

평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서를 설계하기 위한 설계변수의 정격출력은 약 0.5 mV/V, 정격용량은 Fz 센서가 300 N, 센서의 크기가 100×100×24 mm, 보의 폭이 모두 12mm, 보의 전체 길이가 모두 10mm, 스트레인게이지의 부착위치는 보의 길이 방향으로 1.5 mm, 폭 방향으로 1/2, 스트레인게이지 부착위치에서의 총 정격변형률은 약 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 로 결정하였다. 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 감지부는 평행평판보가 2개의 평판보로 구성되어 있으므로 보의 길이와 폭을 결정하였을 경우에는 Tx 센서, Ty 센서는 Fz 센서의 정격용량에 맞도록 보의 두께를 변경하여 설계하고, 스트레인게이지 부착위치에서 총 정격변형률이 약 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 가 될 때 정격용량을 결정할 수 밖에 없다.

그림 2와 그림 3은 각각 평행계단평판보와 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 유한요소해석한 결과를 나타내고 있고, 힘 Fz가 가해졌을 때 변형된 모습과 토크 Tx, Ty, Tz가 각각 가해졌을 때 변형된 모습을 나타내고 있다. 모두 센서의 구조를 모델링할 때 예상했던 모습으로 변형되었다.

그림 4(a)와 (b)는 각 센서의 정격하중이 가해졌을 때 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 Fz 센서, Tx 센서 혹은 Ty 센서, Tz 센서 감지부의 변형률분포의 그래프를 각각 나타내고 있다. 각 그래프에서 변형률분포가 2개인 것은 평행계단평판보의 스트레인게이지 부착면 위가 서로 양과 음의 값으로 대칭으로 출력되기 때문이다. 각 변형률분포에서 변형률이 0 $\mu\text{m}/\text{m}$ 인 지점은 Fz 센서, Tx 센서 혹은 Ty 센서, Tz 센서 각각 약 3.6mm, 3.2mm, 2.3mm 지점이었다. Fz 센서, Tx 센서 혹은 Ty 센서, Tz 센서의 변형률분포가 두께 t1-1, 길이 l1-1과 두께 t2-1, 길이 l2-1인 부분에서는 직선으로 나타났고, 두께 t1-2, 길이 l1-2과 두께 t2-2, 길이 l2-2인 부분에서는 곡선으로 나타난 것은 두께가 다른 계단평판보로 구성되어 있기 때문이다.

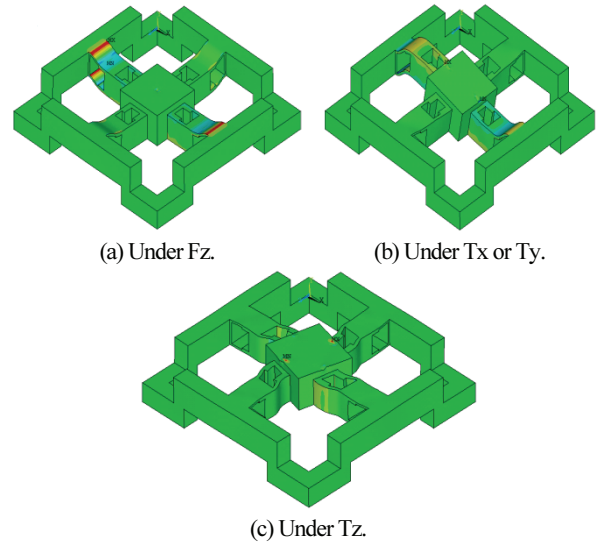


그림 2. 각 센서의 정격하중에서 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 감지부의 변형된 모습.

Fig. 2. Deformed shape of the four-axis force/torque sensor with parallel step palate beams under each rated force.

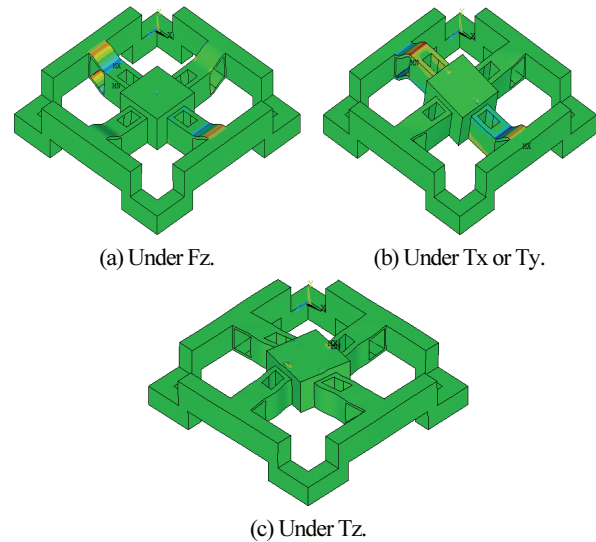
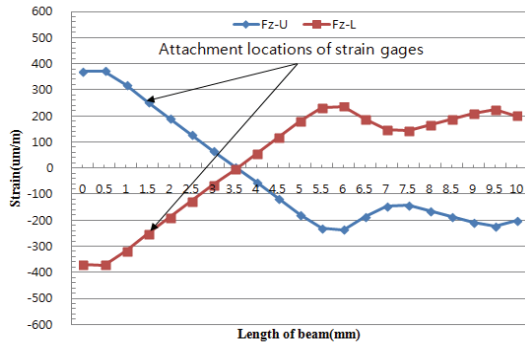


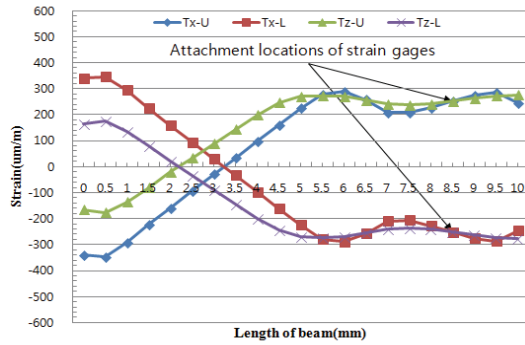
그림 3. 각 센서의 정격하중에서 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 감지부의 변형된 모습.

Fig. 3. Deformed shape of the four-axis force/torque sensor with parallel palate beams under each rated force.

그림 5(a)와 (b)는 각각 각 센서의 정격하중이 가해졌을 때 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 Fz 센서, Tx 센서 혹은 Ty 센서, Tz 센서 감지부의 변형률분포의 그래프를 각각 나타내고 있다. 각 그래프에서 변형률분포가 2개인 것은 평행계단평판보의 스트레인게이지 부착면 위가 서로 양과 음의 값으로 대칭으로 출력되기 때문이다. 각 변형률분포에서 변형률이 0 $\mu\text{m}/\text{m}$ 인 지점은 Fz 센서, Tx 센서 혹은 Ty 센서, Tz 센서 각각 약 4.8mm, 4.3mm, 2.8mm 지점이었다. 화살표로 가리킨 지점은 각 센서의 스트레인게이지 부착위치이다. 그리고 각 변형률분포에서 좌측과 우측의 끝의 변형률이 감소한 것은 유한요소 프로그램의 끝 효과 오차 때문이다.



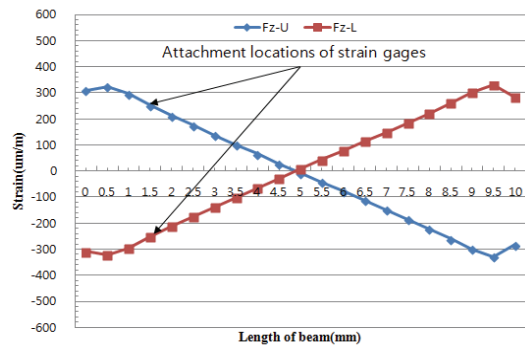
(a) Strains under rated force Fz.



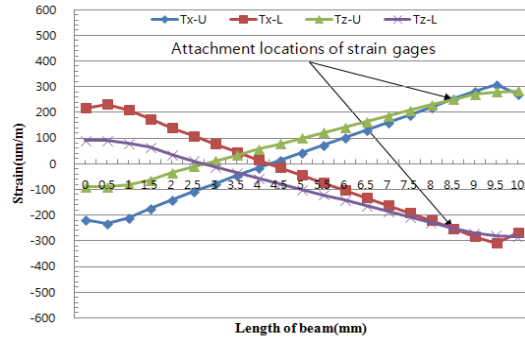
(b) Strains under rated torques Tx(Ty) and Tz.

그림 4. 각 센서의 정격하중에서 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서 감지부의 변형률분포.

Fig. 4. Strain distribution on each beam four-axis force/torque sensor with PSPB under each rated force.



(a) Strains under rated force Fz.



(b) Strains under rated torques Tx(Ty) and Tz.

그림 5. 각 센서의 정격하중에서 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서 감지부의 변형률분포.

Fig. 5. Strain distribution on each beam four-axis force/torque sensor with PPB under each rated force.

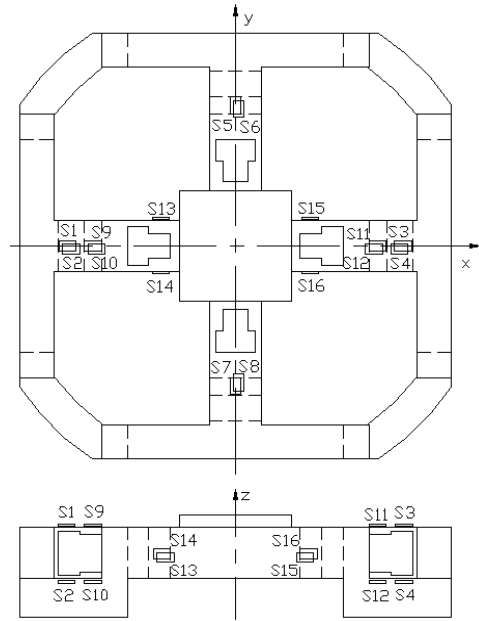


그림 6. 4축 힘/토크 센서의 각 센서 스트레인이게이지 부착위치.

Fig. 6. Attachment locations of strain gages on each sensing element of four-axis force/torque sensor.

표 1. 유한요소법으로 구한 센서 감지부의 크기.

Table 1. The sizes of sensors from the finite element method.

Four-axis F/T sensor	Thickness(mm)				Length(mm)				Width (mm)	
	t1-1	t1-2	t2-1	t2-2	l1-1	l1-2	l2-1	l2-2	b1	b2
With PSPB	0.9	1.6	1.5	3.1	6	4	5	5	12	12
Fz=300NTx=Ty=15.0Nm, Tz=40.0Nm					l=10		l=10			
With PPB	t1		t2		l1		l2		b1	b2
Fz=300NTx=Ty=8.8Nm, Tz=40.0Nm	1.05		2.61		10		10		12	12

유한요소해석 결과를 토대로 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서와 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 각 센서의 스트레인이게이지 부착위치를 결정하였으며, 그것을 그림 6에 나타내고 있다. Fz 센서의 스트레인이게이지 부착위치는 S1~S4, Tx 센서는 S5~S8, Ty 센서는 S9~S12, Tz 센서는 S13~S16이다. 스트레인이게이지의 부착위치는 길이방향으로는 1.5 mm, 폭방향으로는 중심선상이다. 이 위치는 각 센서의 정격하중에서 상호간섭오차가 0 %이고, 최대의 정격출력이 발생하는 지점으로 결정되었다.

표 1은 유한요소해석으로 얻은 4축 힘/토크 센서들의 크기를 나타내고 있다. 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서는 센서의 전체 크기를 일정하게 하기 위해 감지부의 길이(보의 전체 길이) 10mm와 폭 12mm를 결정하고, 각 센서의 정격용량이 Fz=300N, Tx=Ty=15.0Nm, Tz=40.0Nm가 되도록 두께(t1-1, t1-2, t2-1, t2-2)를 변경하여 설계할 수 있었다. 그러나 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 구조는 표 1에서 보는 것과 같이 Tx 센서, Ty 센서의 정격용량이 8.8Nm로 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 그것들보다 매우 적게 나타났다. 이것은 Fz 센서의 정격용량을 먼저 결정한 상태에서 보의 두께를 설계하였으므로 Tx 센서, Ty 센서의 정

표 2. 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 스트레인게이지 부착위치에서의 유한요소해석 결과.

Table 2. Strains from FEM analysis at each attachment location of strain-gages of each sensor of four-axis force/torque sensor with PSPB.

Sensor	Strain ($\mu m/m$)					
	T_1	C_1	T_2	C_2	Total strain	Error (%)
Fz	253	-253	253	-253	1012	1.2
Tx	252	-252	252	-252	1008	0.8
Ty	252	-252	252	-252	1008	0.8
Tz	252	-252	252	-252	1008	0.8

표 3. 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 스트레인게이지 부착위치에서의 유한요소해석 결과.

Table 3. Strains from FEM analysis at each attachment location of strain-gages of each sensor of four-axis force/torque sensor with PPB.

Sensor	Strain ($\mu m/m$)					
	T_1	C_1	T_2	C_2	Total strain	Error (%)
Fz	253	-253	253	-253	1012	1.2
Tx	252	-252	252	-252	1008	0.8
Ty	252	-252	252	-252	1008	0.8
Tz	251	-251	251	-251	1004	0.4

격용량을 조절할 수 있는 변수가 없기 때문이다. 결론적으로 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 구조는 센서의 전체 크기 100×100×24 mm, 정격출력(정격변형률) 약 0.5 mV/V, 보의 길이 10mm, 폭 12mm를 결정하고 설계할 경우, Tx 센서, Ty 센서의 정격용량은 8.8Nm부터 15.0Nm 이상으로 설계가 가능하다. 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서는 보의 길이와 폭을 결정한 경우라도 두께 t1-1, t1-2, t2-1, t2-2를 변경시킬 수 있을 뿐만 아니라 보의 길이 l1-1, l1-2, l2-1, l2-2를 전체 길이가 변하지 않은 범위내에서 약간의 변화가 가능하므로 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서보다 정격용량을 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다.

표 2와 표 3은 유한요소법을 이용하여 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서와 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 각 스트레인게이지 부착위치에서의 변형률들과 식 (1)에 의해 계산된 정격변형률들을 나타내고 있다. 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 최대오차는 1.2 %이었다. 이와 같은 오차는 설계시 가공의 가능성을 고려하여 감지부의 두께를 0.01 mm 단위로 조절하였기 때문이다.

III. 4축 힘/토크 센서의 제작 및 특성평가

평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서는 그림 6(a)에 나타난 각 센서의 게이지부착위치에 스트레인게이지(N2A-13-S1452-350, 게이지 상수 2.03, 크기 3×5.2 mm)를 부착하고 휘스톤 브리지를 구성하여 제작하였으며, 그림 7은 제작된 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 사진을 보이고 있다.

그림 8은 제작한 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서를 특성실험을 위한 실험장치 및 실험장면을 나타내고 있다. 그림 8(a)는 다축 힘/토크 센서 고정기[13]에 4축 힘/토크 센서를 고정한 실험장치를 나타내고 있고, 측정은 고성능측정

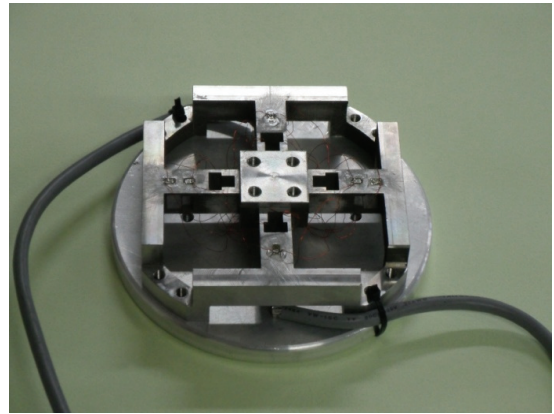
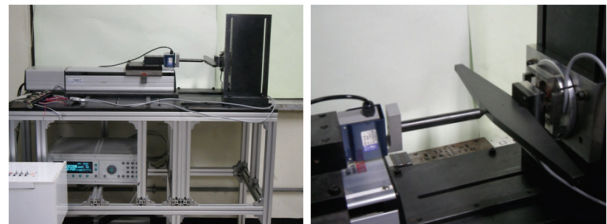


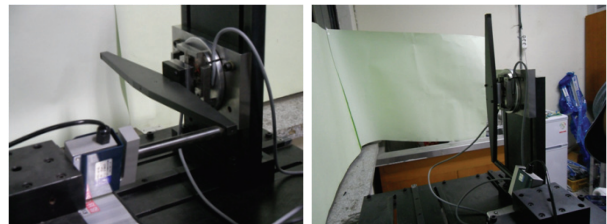
그림 7. 제작된 4축 힘/토크 센서.

Fig. 7. Manufactured four-axis force/torque sensor with PSPB.



(a) Experimental setup.

(b) Applied force Fz.



(c) Applied torque Tx or Ty.

(d) Applied torque Tz.

그림 8. 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 특성실험을 위한 실험장치.

Fig. 8. Experimental setup for the characteristic test of the four-axis force/torque sensor with PSPB.

장치(DMP40)이다. 그리고 그림 8(b)는 z방향의 힘을 가하는 모습, (c)는 x방향 혹은 y방향의 토크, (d)는 z방향의 토크를 가하는 모습을 각각 나타내고 있다. 4축 힘/토크 센서는 정격하중인 Fz=300 N, Tx=Ty=15.0Nm, Tz=40.0Nm을 가하고 정격출력을 측정 하였고, 총 세 번을 실시하여 평균값을 각 센서의 정격출력으로 결정하였다. 상호간섭오차는 센서의 정격힘 혹은 토크를 가할 때, 가하지 않은 힘센서 혹은 토크 센서로부터 발생하는 오차이다.

표 4는 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 유한요소해석과 실험결과의 정격출력 및 오차를 나타내고 있다. 유한요소해석 결과의 정격출력은 표 2의 정격변형률을 식 (2)에 적용하여 계산된 것이고, 실험에 의한 정격출력은 본 논문에서 특성실험한 결과를 나타내고 있다. 유한요소해석 결과를 기준으로 유한요소해석 결과의 오차는 최대 2.78 %이었다. 이들 오차는 스트레인게이지의 부착오차, 감지부의 가공오차, 유한 요소 소프트웨어의 고유오차 등으로 생각된다. 표 5는 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 각 센서의

표 4. 유한요소해석과 특성실험결과의 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서 각 센서의 정격출력.

Table 4. Rated output from FEM analysis and characteristic test of each sensor of four-axis force/torque sensor with PSPB.

Sensor	Rated output (mV/V)		Error(%)
	FEM	Exp.	
Fz	0.5136	0.5209	1.42
Tx	0.5116	0.5258	2.78
Ty	0.5116	0.5249	2.60
Tz	0.5116	0.5212	1.88

표 5. 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 상호간섭 오차.

Table 5. Interference error of each sensor of four-axis force/torque sensor with PSPB.

Sensor	Interference error (%)			
	Fz	Tx	Ty	Tz
Fz=300 N	-	1.83	1.08	0.10
Tx=15 Nm	0.19	-	0.21	0.32
Ty=15 Nm	2.21	0.26	-	0.67
Tz=30 Nm	0.24	0.43	0.28	-

표 6. 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 재현성오차와 비직선성오차.

Table 6. Repeatability error and non-linearity error of the four-axis force/torque sensor with PSPB.

Error (%)	Four-axis force/torque sensor			
	Fz	Tx	Ty	Tz
Repeatability	0.02	0.02	0.03	0.02
Non-linearity	0.02	0.03	0.03	0.03

상호간섭오차를 나타내고 있다. 4축 힘/토크 센서의 최대 상호간섭 오차는 2.21 %이다. 표 6은 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 재현도오차와 비직선성오차를 나타낸 것이고, 각 센서의 최대 재현도오차와 최대 비직선성오차는 0.03 % 이내이었다. 제작한 4축 힘/토크 센서의 특성실험 결과 상호간섭오차, 재현성오차, 비직선성오차가 이미 판매하고 있는 다축 힘센서[11]의 그것과 비슷한 수준이었다.

IV. 결론

본 논문에서는 보다 넓은 범위로 정격용량을 쉽게 설계할 수 있는 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 구조를 설계하였다. 새롭게 고안한 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 구조가 평행평판보를 가진 4축 힘/토크 센서를 구조보다 센서의 전체 크기와 정격출력(정격변형률)이 같을 경우, 보다 넓은 범위의 정격용량으로 설계가 용이한 구조임을 확인하였다. 제작한 평행계단평판보를 가진 4축 힘/토크 센서의 최대 상호간섭오차가 특성실험결과 2.21 %이었고, 최대 재현도오차와 최대 비직선성오차는 0.03 % 이내이었으며, 이 결과는 이미 판매하고 있는 다축 힘센서의 그것과 비슷한 수준이므로 손목재활로봇 뿐만 아니라 의료용로봇, 산업용로봇, 등 각종 산업에서 여러 방향의 힘과 토크를 측정하는데 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] C. G. Kang, "Performance improvement of a 6-axis force-torque sensor via novel electronics and cross-shaped double-hole structure," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 469-476, Sep. 2005.
- [2] B. Wu and P. Cai, "Decoupling analysis of a sliding structure six-axis force/torque sensor," *Measurement Science Review*, vol. 13, no. 4, 2013.
- [3] D. I. Kang, G. S. Kim, S. Y. Jeoung, and J. W. Joo, "Design and evaluation of binocular type six-component load cell by using experimental technique," *Trans. Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 21, pp. 1921-1930, 1997.
- [4] D. Diddens, D. Reynaerts, and H. V. Brussel, "Design of a ring-shaped three-axis micro force/torque sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 46, no. 1-3, pp. 225-232, 1995.
- [5] K. Nagai, Y. Ito, M. Yazaki, K. Higuchi, and S. Abe, "Development of a small six-component force/torque sensor based on the double-cross structure," *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 22, no. 3, pp. 361-369, 2004.
- [6] A. Song, J. Wu, G. Qin, and W. Huang, "A novel self-decoupled four degree-of-freedom wrist force/torque sensor," *Measurement*, vol. 40, no. 9-10, pp. 883-891, 2007.
- [7] H. M. Kim, J. W. Yoon, and G. S. Kim, "Development of a six-axis force/moment sensor for a spherical-type finger force measuring system," *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 96-104, 2012.
- [8] G. S. Kim, "Development of a six-axis force/moment sensor with rectangular taper beams for an intelligent robot," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 419-428, 2007.
- [9] J. J. Park and G. S. Kim, "Development of the 6-axis force/moment sensor for an intelligent robot's gripper," *Sensors and Actuators A*, vol. 118, pp. 127-134, 2005.
- [10] S. Liu and H. L. Tzo, "A novel six-component force sensor of good measurement isotropy and sensitivities," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 100, no. 2-3, pp. 223-230, 2002.
- [11] G. S. Kim, H. J. Shin, and J. W. Yoon, "Development of 6-axis force/moment sensor for a humanoid robot's intelligent robot," *Sensors and Actuators A*, vol. 141, no. 2, pp. 276-281, 2008.
- [12] ATI Industrial Automation, "Multi-axis force/torque sensor," *ATI Industrial Automation*, pp. 4-45, 2005.
- [13] G. S. Kim and J. W. Yoon, "Development of calibration system for multi-axis force/moment sensor and its uncertainty evaluation," *Korean Society Precision Engineering*, vol. 24, no. 10, pp. 91-98, 2007.

이 경 준

2014년 경상대학교 제어계측공학과(공학사). 2014년 경상대학교 로봇공학전공(공학석사과정). 관심분야는 재활로봇, 지능로봇, 서비스로봇, 자동화장치.



김 갑 순

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제17권 제5호 참조