

다자유도 탄소섬유판 힘/토크 센서 개발

Development of Multi-Degree of Freedom Carbon Fiber Plate Force/Torque Sensor

이동혁^{1,✉}, 김민규¹, 조남규²

Dong Hyeok Lee^{1,✉}, Min Gyu Kim¹ and Nahm Gyoo Cho²

¹ 한양대학교 대학원 기계설계·메카트로닉스공학과 (Department of Mechanical Design and Mechatronics, Graduate School of Hanyang Univ.)

² 한양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.)

✉ Corresponding author: hyoek@hanyang.ac.kr, Tel: 031-436-8111

Manuscript received: 2011.9.14 / Revised: 2011.9.27 / Accepted: 2011.10.11

A force/torque sensor using carbon fiber plate was designed and developed to make the sensor be able to measure a wide range of multi degree of force and torque. Using carbon fiber plate of 0.3 mm thickness, the sensor was designed and developed, which has a μN level order of resolution and about 0.01 N ~ 390 N of wide measurement range. The elastic deformation part has a tripod plate structure and strain gauges are attached on the part to detect the force/torque. The coefficient of determination for the sensor is over 0.955 by the calibration experiment so that the linearity of the sensor is confirmed to be good. Also, experiments on applying 0.005 ~ 40 kg (0.05 ~ 390 N) to each axis were implemented and the sensor is proved to be safe under a high load. Finally, to verify the function calculating the direction of load vector, the directions of various load vectors which have the same magnitude but different directions and the directions of the calculated load vectors are compared and analyzed to accord well.

Key Words: Force/Torque Sensor (힘/토크 센서), Carbon Fiber (탄소 섬유), Prepreg (프리프레그), Coordinate Measuring Machine (CMM) Touch Probe (3 차원 측정기 터치프로브)

기호설명

S = output signal of the straingage

F = force vector

K_{force} = sensitivity matrix

1. 서론

힘센서는 중공업, 조선, 자동차, 로봇, 공작기계 산업에서 다양한 형태로 사용되고 있다. 최근에 들어서는 햅틱인터페이스(Haptic Interface)의 발달로 인해 적용분야가 더욱 넓어지고 있으며, 의료분야의 최소침습수술(MIS, Minimal Invasive Surgery)에 사용되는 다빈치 로봇에도 적용되고 있다.^{1,2} 정밀

측정분야에서는 3 차원 측정기(CMM, Coordinate Measuring Machine)의 터치트리거를 대신할 다자유도 힘센서를 이용한 터치프로브가 개발되어, 터치프로브의 실제 접촉점을 산출하여 측정오차를 줄이기 위한 연구도 진행되고 있다.³ 다양한 분야에서 수요가 늘어남에 따라, 고기능, 고성능화, 다자유도화 힘센서의 요구가 증대하고 있으며, 그에 따른 다양한 특성을 지닌 기술 개발이 요구되고 있다.

다양한 분야에 힘센서를 적용하기 위해 스트레인게이지(Strain gauge), 압저항(Piezoresistor), 압전필름(PVDF, Polyvinylidene fluoride), 광섬유(Optical fiber) 등의 변환기의 적용에 관한 연구와 탄성변형부의 구조설계 및 변형률 해석에 관한 연구가 진

행되었다.⁴ 그러나 탄성변형부의 재질에 관한 연구는 미비하여, 알루미늄 또는 강과 같은 금속재료를 주로 사용하고 있다. 금속재료를 탄성변형부로 활용하면, 인장강도에 비해 항복강도가 매우 작기 때문에 힘센서의 측정범위가 제한적이다. 그래서 적용될 힘의 크기를 고려하여 탄성변형부의 재질 및 치수를 설계하여야 하고, 매우 다양한 용량의 힘센서가 설계/제작되고 있다. 그 뿐만 아니라 정밀 힘센서의 경우 작은 충격이나 정격용량을 초과하는 힘이 가해지는 경우 매우 취약하다.

본 연구는 위와 같은 문제점을 해결하기 위해, 기존의 힘센서에 활용되는 변환기를 최대한 활용 가능하고 고정밀의 미세 힘에 대해 측정이 가능하면서 넓은 측정영역을 가지는 다자유도 힘센서의 개발을 목적으로 탄소섬유판(Carbon fiber plate)을 탄성변형부로 활용하여 설계/제작하였다.

2. 탄소섬유판 힘/토크 센서 설계 및 제작

2.1 탄소섬유판 힘/토크 센서 설계

탄소섬유(Carbon fiber)는 탄소원자 결정구조를 이용한 고강도 섬유로 복합재료 생산에 가장 많이 이용되고 있는 강화섬유이다. 탄소섬유는 탄소와 섬유의 성질을 동시에 겸비한 다양한 특징을 나타내는데, 간단하게 요약하면 비탄성률, 비강도, 내열성, 내식성, 전도성, 진동 감쇠성 및 마모특성이 우수하고, 생체 적합성(biocompatibility)이 좋아서 의료 장비에 적합한 재료이다. 이러한 탄소섬유 원사를 직조한 탄소직물(Carbon fabric)을 에폭시 수지에 함침시켜 탄소섬유 프리프레그(Carbon fiber prepreg)를 만드는데, 이는 플라스틱보다 월등히 가벼우면서 강철보다 현저히 강한 물성을 가져서 스포츠 레저용, 산업용 및 건축 보강재로 많이 사용되고 있는데, 이를 흔히 탄소섬유판(Carbon fiber plate)라 부른다.⁵

Fig. 1 과 Table 1 에 나타난 것과 같이, 탄소섬유판의 경우 항복강도가 없는 것이 특징이다.^{6,7} 즉, 탄소섬유판의 경우 인장강도까지 탄성변형구간이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 넓은 탄성변형구간을 최대한 활용할 수 있도록, 힘/토크 센서의 탄성변형부의 재료로 탄소섬유 프리프레그를 적용하여 설계/제작하였다.

탄소섬유 프리프레그는 탄소직물을 여러 겹 적층시키기 때문에 대부분 박판형태로 제작이 되고,

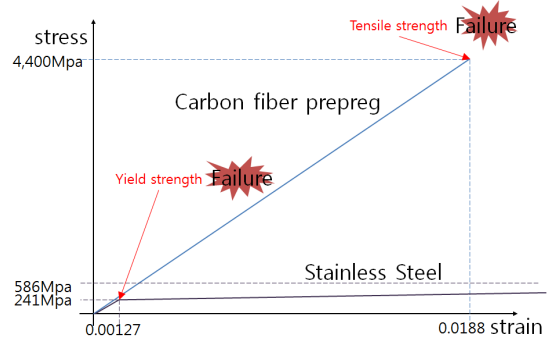


Fig. 1 The strain-stress curve of carbon fiber prepreg and stainless steel

Table 1 Mechanical properties for materials

Material	Aluminum (2024)	Stainless steel (304)	Caron fiber prepreg (3K, woven)
Young's modulus	71 GPa	189.6 GPa	240 GPa
Yield strength	76 MPa	241 MPa	-
Tensile strength	0.179 GPa	0.586 GPa	4.4 GPa

탄소직물의 결방향으로 많은 하중을 견딜 수 있는 특징이 있다. 위와 같은 특징으로 인해, 탄소섬유 프리프레그를 기존의 힘/토크 센서의 탄성변형부 형태¹⁻³로 가공하기에는 어려움이 있다. 그래서 박판의 탄성변형부를 활용할 수 있도록 Fig. 2 와 같은 구조의 힘/토크 센서를 개발하였다. 측정하고자 하는 힘/토크가 가해지는 체결부에 팁을 설치하였고, 스프링 고정부(Spring holder)와 팁 고정부(Tip holder)는 서로 일정한 간격을 두고 떨어져 있는 구조로 설계되었다. 그리고 탄성변형부는 일반적인 사각다리 구조(Maltese cross structure)보다 작용되는 힘의 방향에 따라 발생하는 측정력의 편심현상과 탄성분형부의 변형을 검출하기 위한 변환기의 개수를 감소시킬 수 있는 삼각다리 구조(Tripod structure)로 Fig. 3 과 같이 설계하였다.^{8,9}

탄소섬유판을 이용한 힘/토크 센서의 가능성을 평가하기 위한 본 논문에서는, 삼각다리 구조 탄성변형부는 두께 0.3 mm 탄소섬유판(3k, woven)을 이용하였고, 변형률을 검출할 스트레인지어의 크기와 제작의 용이성을 고려하여 Table 2 에 보이는 것과 같이 설계하였다.

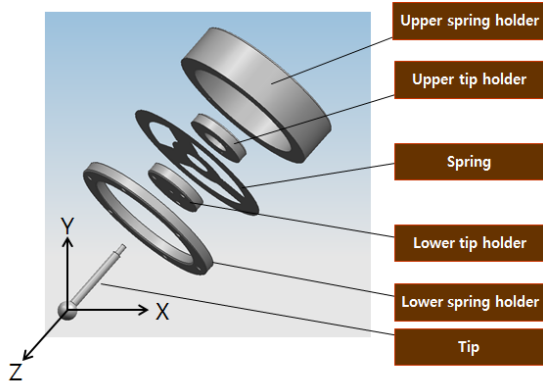


Fig. 2 Structure of the Carbon Fiber based force/torque sensor

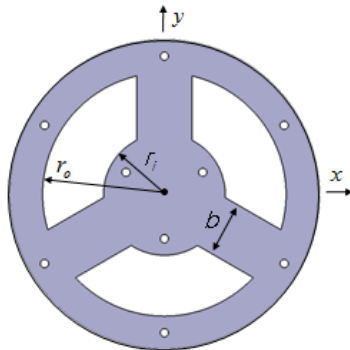


Fig. 3 Schematic of carbon fiber prepreg spring

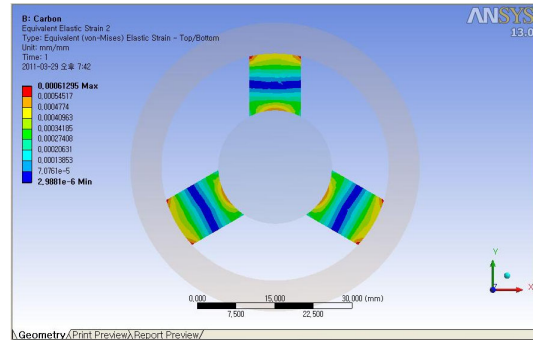
Table 2 Specification of carbon fiber prepreg spring

Spring material	Carbon fiber prepreg (3K woven plain)
r_i	11 mm
r_o	22 mm
b	10 mm
Thickness	0.3 mm

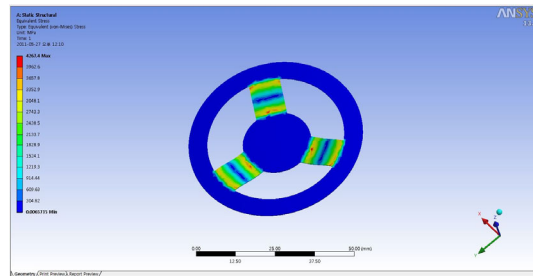
탄소섬유 프리프레그를 적용한 탄성변형부의 변형을 검출할 변환기가 부착될 위치와 개발될 탄소섬유판 힘/토크 센서의 정격용량을 추정하기 위해 ANSYS 13.0 을 이용하여, 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 4 는 설계된 힘/토크 센서에 z 축 방향으로 일정한 하중을 가했을 때의 탄성변형부에서 발생하는 변형률과 응력을 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)에서 보이는 것과 같이, 변형률이 최대인 위치가 삼각다리의 가장 바깥 부분인 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4(b)는 400 N 의 하중을 z 축

방향으로 하중을 가했을 때의 응력을 나타내고 있는데, 이때의 최대 응력이 4,267 MPa 으로 Table 1 에서 보이는 탄소섬유 프리프레그의 인장강도 4.4 GPa 보다 작은 것을 알 수 있다.



(a) strain



(b) stress

Fig. 4 Results of FEM analysis for the sensing element under force in Z-direction

또한, 같은 치수의 스테인레스 스틸의 탄성변형부에 대해서도 같은 해석을 수행하였을 때, 15 N 의 하중에 소성변형이 일어나기 시작하는 것을 확인하였다. 즉, 설계된 탄소섬유판 힘/토크 센서는 스테인레스 스틸을 이용할 때보다 약 25 배 이상 넓은 측정범위를 가질 수 있다는 것을 알 수 있다.

2.2 탄소섬유판 힘/토크 센서 제작

개발된 탄소섬유판 힘/토크 센서는 앞 절에서 설계된 치수와 스트레인게이지 부착위치를 바탕으로 Fig. 5 와 같이 제작되었다. 삼각다리의 가장 바깥 부분에 부착된 스트레인게이지(CASS AP-13-S15S-350EL)는 각 다리마다 휘스톤브리지회로로 구성되어 변형률을 전기적 신호로 검출할 수 있도록 하였고, 다른 부품들은 알루미늄(AL-7075)을 이용하여 가공되었다. 그리고 부착된 스트레인게이지는 최대 탄성변형률은 3.5 %로 탄소섬유 프리프

레그의 최대 탄성변형률의 1.9 %보다 큰 제품을 선정하여, 스트레인게이지가 파손되지 않고 탄소섬유의 변형을 안전하게 잘 검출할 수 있도록 하였다.



Fig. 5 Prototype of carbon fiber plate force/torque sensor

3. 보정 실험

Fig. 6 에 보이는 것과 같이, 제작된 탄소섬유판 힘/토크 센서의 입출력관계를 명확히 하기 위해 분동과 회전스테이지를 이용한 보정 방법을 적용되었고, 식 (1)-(3)에 의해 보정식이 계산될 수 있다.³

힘/토크 센서에 작용하는 하중이 작은 범위에서 작용할 때, 스트레인게이지의 출력과 하중과의 관계가 선형성이 좋으면 식 (1)과 같이 테일러 급수 전개에서 1 차항까지만 제한할 수 있다.

$$\delta S = \frac{\partial S}{\partial F} \delta F = K_{force} \delta F \quad (1)$$

그리고 각각 작용하는 하중에 관하여, j 번째 스트레인게이지의 출력은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\delta S_j = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial S_j}{\partial F_i} \delta F_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

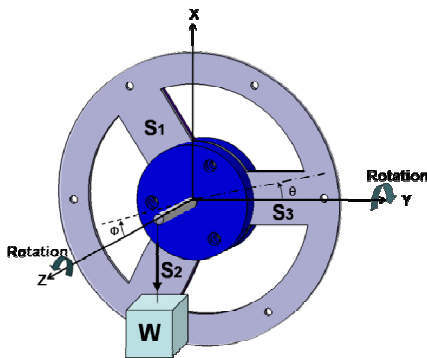


Fig. 6 Concept of force/torque calibration

여기서, i 는 직교좌표계에서 x, y, z 를 표시하고, j 는 Fig. 6 에서 보이는 것과 같이 각 다리에 부착된 스트레인게이지의 출력신호 S_j 를 나타낸다.

그러므로, 서로 직교한 x, y, z 축으로 가해지는 하중에 의한 입출력관계식은 식 (3)으로 정리할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \delta S_1 \\ \delta S_2 \\ \delta S_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_1}{\partial F_x} & \frac{\partial S_1}{\partial F_y} & \frac{\partial S_1}{\partial F_z} \\ \frac{\partial S_2}{\partial F_x} & \frac{\partial S_2}{\partial F_y} & \frac{\partial S_2}{\partial F_z} \\ \frac{\partial S_3}{\partial F_x} & \frac{\partial S_3}{\partial F_y} & \frac{\partial S_3}{\partial F_z} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta F_x \\ \delta F_y \\ \delta F_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

위와 같은 보정방법을 적용하기 위해, Fig. 7 과 같은 보정실험 장치를 구성하였다. 회전스테이지 (PI M-037.PD)를 이용하여 θ 방향 회전할 수 있게 하였고, 힘/토크 센서가 부착된 회전스테이지를 ϕ 방향으로 회전 가능한 지그에 부착하여 x, y, z 축으로 하중이 작용할 수 있도록 하였다. 보정실험장치와 4 종류의 분동을 이용하여 실험한 결과를 최소제곱법을 통한 실험결과와 회귀직선을 Fig. 8 에 나타내었다. 그리고 그 실험결과를 바탕으로 민감도 행렬(sensitivity matrix) K_{force} 를 구하면 식 (4)와 같다.

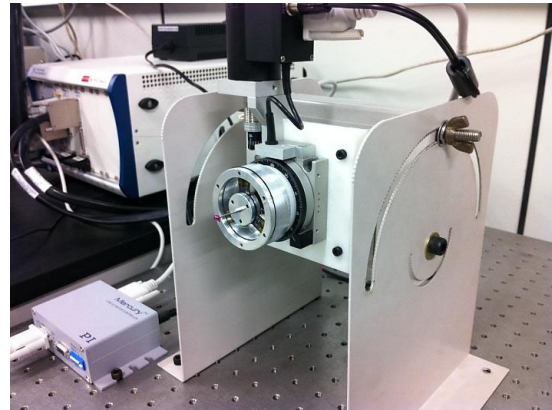


Fig. 7 Experimental setup for force/torque calibration

$$K_{force} = \begin{bmatrix} 0.371[VN^{-1}] & -2.766[VN^{-1}] & -1.837[VN^{-1}] \\ -2.925[VN^{-1}] & 5.216[VN^{-1}] & -2.444[VN^{-1}] \\ 2.887[VN^{-1}] & 4.488[VN^{-1}] & -2.216[VN^{-1}] \end{bmatrix} \quad (4)$$

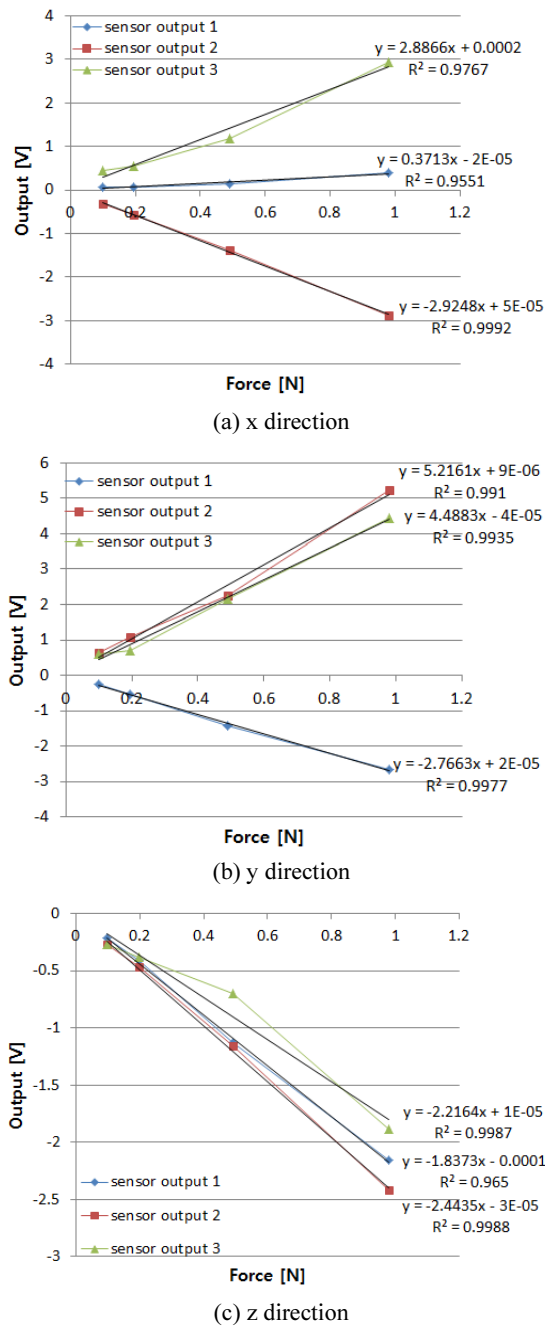


Fig. 8 Sensitivity results of the force calibration

민감도 행렬의 원소를 구하기 위한 회귀직선의 정밀도를 통계적으로 추정하기 위해 회귀직선의 결정계수 γ^2 를 산출하였다. 이는 두 변량 사이에 존재하는 상관관계를 나타내는 값으로, 0.81 이상의

값을 가지면 강한 선형성을 보인다고 볼 수 있으며, 1 에 가까울 수록 더욱 강한 상관관계를 나타낸다.¹⁰ 보정실험에서 산출된 결정계수는 모두 0.955 보다 큰 값으로 1 에 매우 가까운 값이 나타났다. 즉, 제작된 탄소섬유관 힘/토크 센서의 입력력 관계가 선형에 가깝다는 것을 알 수 있다.

4. 성능 실험 및 고찰

Fig. 9 에 힘/토크 센서의 삼각다리에 부착된 스트레인게이지에서 발생하는 잡음을 보이고 있다. 그 잡음의 표준편차는 0.27 mV 이다. 따라서, 스트레인게이지 출력의 분해능을 95 % 신뢰수준($\pm 2\sigma$) 로 정의를 하면 ± 0.57 mV 가 된다.³

식 (1)과 식 (4)에 따르면 25 mm 의 팁 길이를 가진 팁 끝에 가해지는 힘에 대한 x, y, z 축의 분해능이 $\rho_x = \pm 8 \mu\text{N}$, $\rho_y = \pm 17 \mu\text{N}$ 와 $\rho_z = \pm 0.268 \text{ mN}$ 으로 추정되었다. 팁 길이를 고려하면 힘/토크 센서의 탄성변형부에 가해지는 힘과 토크의 분력으로 변환할 수 있다. 이 연구에서 사용된 25 mm 길이의 팁을 고려하여, 센서 중심에 작용하는 힘과 토크의 분해능을 산출하면, x, y 축에 대한 토크, $\rho_{Mx} = \pm 0.200 \mu\text{Nm}$, $\rho_{My} = \pm 0.425 \mu\text{Nm}$ 와 z 축에 대한 힘 $\rho_z = \pm 0.268 \text{ mN}$ 으로 추정된다.

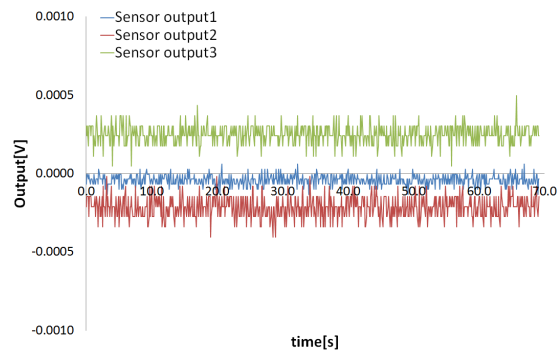


Fig. 9 Random noises induced by the strainage

Fig. 10 에는 제안된 탄소섬유관 힘/토크 센서와 본 연구팀에서 이전 연구를 통해 제안한 기존 고정밀 힘센서^{11,12} 에서 사용된 스테인레스 스틸 탄성변형부에 대해 고하중에서의 안정성을 비교하기 위해 약 5.7 kg (55.9 N)의 아령을 측정하는 사진을 보였다. 같은 두께의 스테인레스 스틸 탄성변형부와 탄소섬유 프리프레그 탄성변형부를 이용하여

동일한 실험을 진행하였다. 그 결과, 스테인레스 스틸은 탄성변형 범위를 초과하여, 소성변형이 일어나 더 이상 측정할 수 없었다. 그러나, 탄소섬유 프리프레그의 경우에는 지속적으로 측정이 가능하였다.

Table 3 은 개발된 힘/토크 센서의 상호간섭오차를 나타내고 있고, 최대 상호간섭오차는 2.87 % 이 내이다. 이것은 상용화된 다축 힘/토크 센서의 상호간섭오차와 비슷하거나 우수한 것으로 평가된다.¹³ 이는 작용되는 힘의 방향에 따라 발생하는 측정력의 편심현상 작게 나타나는 삼각다리 구조^{8,9} 때문에 상호간섭오차가 우수하게 나타난 것으로 생각된다. 즉, 감지부의 가공 오차, 스트레인게이지의 부착오차 등을 감소시킨다면, 더 우수한 성능을 나타낼 것으로 기대된다.

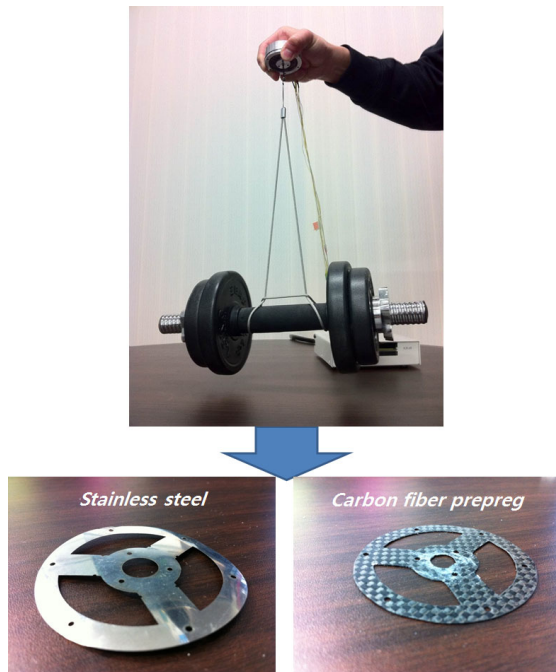


Fig. 10 Comparison between stainless steel and carbon fiber prepreg

Table 3 Interference error of each sensor

Sensor	Interference error (%)		
	Mx	My	Fz
F/M			
Mx=1.22 Nm	-	0.09	-0.41
My=1.22 Nm	0.12	-	0.34
Fz=49.00 N	2.11	2.87	-

Table 4 Comparison between the arbitrary load vectors and the calculated load vectors.

Load			Carbon fiber plate force/torque sensor		
Force (mN)	θ (°)	ϕ (°)	Force (mN)	θ (°)	ϕ (°)
513.98	0.00	0.00	521.45	-2.01	4.17
	120.00	0.00	520.14	121.02	5.25
	240.00	0.00	511.34	237.51	4.15
	60.00	30.00	521.11	58.42	27.90
	60.00	60.00	532.15	57.94	62.14
	60.00	90.00	531.61	61.02	93.13

Table 4 는 Fig. 7 에 나타난 사용한 θ 방향의 회전 스테이지와 ϕ 방향으로 회전 가능한 지그를 이용하여, 일정한 하중을 θ , ϕ 를 임의의 각도를 주었을 때 힘/토크 센서에서 측정된 측정력 Fx, Fy, Fz 의 합력을 이용하여 θ , ϕ 와 가해진 하중을 복원한 결과를 나타낸 것이다. 즉, 힘의 작용방향을 추정이 가능함을 확인하였다. 이를 이용하여, 다빈치 로봇의 끝단(end effector)에 작용하는 힘이나, CMM 터치프로브에 작용하는 실제 접촉점 추정에 활용할 수 있을 것이다. 그러나 이 실험에서, θ 에 비해 ϕ 의 오차가 큰 것은 회전 스테이지보다 제작된 지그의 가공 오차가 떨어져서 정확한 각도로 설정할 수 없기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 11 에는 개발된 힘/토크 센서의 측정범위와 정확도를 확인하기 위해 제작된 실험기구를 나타내었다. 이 실험기구는 무게추를 결합시킨 센서를 지면에 수직인 방향으로 들어올릴 수 있게 하여, z 축 방향으로 센서에 힘이 가해질 수 있게 하였다.

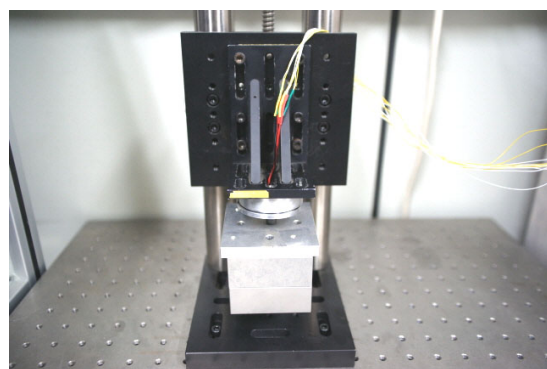


Fig. 11 A test for wide measurement range of the carbon fiber plate force/torque sensor

Table 5 Test for errors of the carbon fiber plate force/torque sensor with various standard masses

Test	Mass (kg)	Force(N) or Torque(Nm)	Carbon fiber plate force / torque sensor	
			Output (N)	Accuracy (%)
Mx (Nm)	0.00501	0.00123	0.00118	4.06
	0.05203	0.01275	0.01248	2.09
	0.23201	0.05684	0.05486	3.48
	0.51502	0.12617	0.12478	1.10
	1.002	0.245	0.243	1.13
	5.004	1.226	1.187	3.18
	10.002	2.450	2.479	1.17
	20.002	4.900	4.953	1.08
	40.002	9.800	9.861	0.63
My (Nm)	0.00501	0.00123	0.00120	2.23
	0.05203	0.01275	0.01255	1.58
	0.23201	0.05684	0.05493	3.36
	0.51502	0.12617	0.12437	1.43
	1.002	0.245	0.244	0.67
	5.004	1.226	1.239	1.06
	10.002	2.450	2.504	2.18
	20.002	4.900	4.998	1.99
	40.002	9.800	9.850	0.51
Fz (N)	0.00501	0.04910	0.04710	4.06
	0.05203	0.50986	0.48610	4.66
	0.23201	2.27357	2.20270	3.12
	0.51502	5.04691	4.87500	3.41
	1.002	9.819	9.457	3.69
	5.004	49.036	47.156	3.84
	10.002	98.014	94.196	3.90
	20.002	196.008	193.479	1.29
	40.002	391.997	390.164	0.47

그리고 센서를 90 도 회전할 수 있도록 하여, x, y 축에 대한 토크가 가해질 수 있도록 하였다.

Table 5 는 9 종류의 무게추를 Fig. 11 에 보인 실험기구에 적용하여, 개발된 힘/토크 센서의 측정범위와 정확도를 나타내었다. 0.005 ~ 0.515 kg 의 분동은 센서와 결합이 가능하도록 자체 제작되었으며, 1 ~ 40 kg 의 분동은 M1 급이 사용되었고, 각 무게별로 10 번씩 측정된 평균값을 나타내었다. 그 결과, x 축과 y 축에 대한 토크 Mx, My 는 팁길이 25 mm 를 기준으로 약 0.001 ~ 9.8 Nm 의 측정범위를

가지고, z 축에 대한 힘 Fz 의 측정범위는 약 0.05 ~ 390 N 인 것을 실험으로 확인하였다. 이는 상용화된 3 축 힘/토크 센서¹⁴에 비해 측정범위가 최대 8 배 이상 크고, 분해능은 유사하거나 우수한 것으로 평가된다.

그리고 정확도는 전체 측정범위에 대해 최대 4.66 %로 나타났는데, 상용화된 다축 힘/토크 센서¹⁴는 최대 1.0 %로 개발된 힘/토크 센서가 정확도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 보정기구 및 힘/토크 성능 실험기구의 가공 및 조립오차 등에 의한 것으로 생각된다.

또한, 개발된 힘/토크 센서의 오차가 발생한 것은 알고 있는 힘을 가할 수 있는 기구가 아닌 무게추를 이용한 중력을 이용하여 힘을 발생시킨 방법과 그로 인한 무게추의 진자 운동 때문인 것으로 생각된다. 보정방법도 마찬가지로 표준분동을 이용하였지만, 진동으로 인해 민감도 행렬의 상수가 정확하게 산출되지 못 했을 것이라 생각된다. 즉, 개발된 힘/토크 센서의 정확하고 정밀한 보정과 평가를 위해서는 힘과 토크를 작용하는 방법의 개선이 필요하다. 그리고 카본섬유판의 변형률을 검출할 수 있는 광섬유 방식, 압저항, 압전필름 등 다양한 변환기를 적용하는 연구도 요구된다. 추가적으로 개발된 힘/토크 센서의 성능 평가와 불확도 분석을 통한 신뢰성 평가 등의 연구가 진행되어야 할 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 넓은 측정범위와 다자유도의 힘과 토크를 측정할 수 있는 힘/토크 센서를 개발하기 위해 탄소섬유판을 적용하여, μ N 단위의 고정밀 분해능을 가지면서 약 0.05 N ~ 390 N 의 넓은 측정범위를 가지는 다자유도 힘/토크 센서를 설계 및 제작하였다. 보정실험을 통해 결정계수가 0.955 이상으로 선형성이 매우 우수한 것을 확인하였다. 또한 약 5.7 kg (55.9 N)의 물체를 측정하는 실험을 통해 스테인레스 스틸과 탄소섬유판 탄성변형부의 파손 여부를 비교하였다. 그리고 제안된 힘/토크 센서의 넓은 측정범위를 확인하기 위해 각 축에 대해 0.005 ~ 40 kg (0.05 ~ 390 N)의 하중을 가해서, 0.3 mm 의 탄소섬유판이 고하중에도 안전하게 지속적으로 측정가능 함을 확인하였다. 이는 비슷한 크기의 상용화된 힘/토크 센서¹⁴에 비해 비슷하거나 우수한 분해능으로 최대 8 배 이상 넓은 측정

범위를 측정가능 것을 확인하였다. 본 연구를 바탕으로 탄성변형부인 탄소섬유판의 두께 및 형상 변형에 따라 정밀 소형 힘센서 뿐 만 아니라 대용량의 힘센서까지도 널리 적용될 수 있을 것이라 생각된다.

추후 연구는 개발된 탄소섬유판 힘/토크 센서에 대한 정밀한 성능평가와 탄소섬유판을 이용한 6 축 힘/토크 센서 개발과 3 차원 측정기의 터치트리거에 적용하는 것이다.

참고문헌

1. Kuebler, B., Seibold, U. and Hirzinger, G., "Development of Actuated and Sensor Integrated Forceps for Minimally Invasive Robotics Surgery," *Int. J. Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, Vol. 1, No. 3, pp. 96-107, 2005.
2. Kuebler, B., Seibold, U. and Hirzinger, G., "Prototype of Instrument for Minimally Invasive Surgery with 6-Axis Force Sensing Capability," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 406-501, 2005.
3. Park, J. J., Kwon, K. H. and Cho, N. G., "Development of a Coordinate Measuring Machine(CMM) Touch Probe using a Multi-axis Force Sensor," *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, No. 9, pp. 2380-2386, 2006.
4. Pack, B. H. and Cho, N. G., "Development of 3-DOF Precision Force Sensor Using PVDF Film," *Department of Mechanical Design and Mechatronics, Master of Science, Hanyang University*, 2010.
5. Lee, D. H. and Cho, N. G., "3-Degree of Freedom Carbon Fiber Plate Force Sensor," *Proceedings of KSPE Spring Conference*, pp. 1089-1090, 2011.
6. Hochard, C., Payan, J. and Bordreuil, C., "A progressive first ply failure model for woven ply CFRP laminates under static and fatigue loads," *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, No. 10, pp. 1270-1276, 2006.
7. Ernst, G., Vogler, M., Huhne, C. and Rolfes, R., "Multiscale progressive failure analysis of textile composites," *Composites Science and Technology* Vol. 70, No. 1, pp. 61-72, 2010.
8. Cho, N. G., "Coordinate measuring machine probe using force sensor," *IUCF-HYU*, No. 0961479, 2010.
9. Lee, D. H. and Cho, N. G., "Device for sensing force," *IUCF-HYU*, No.10-2011-0053063, 2011.
10. Milton, J. S. and Arnold, J. C., "Introduction to Probability and Statistics: Principles and Applications for Engineering and the Computing Sciences," *McGraw-Hill*, pp. 424-426, 2003.
11. Lee, M. H., Park, B. H., Kwon, J. H. and Cho, N. G., "3-DOF Precision Force Sensor Using PVDF film," *Proceedings of KSPE Autumn Conference*, pp. 709-710, 2010.
12. Lee, D. H., Lee, S. H. and Cho, N. G., "Attitude Error Compensation Method for 3-Degree of Freedom," *Proceedings of KSPE Autumn Conference*, pp. 711-712, 2010.
13. Kim, K. S., "Development of 6-axis Force/moment Sensor for Humanoid Robot's Head Reacting to a External Force," *Journal of the KSPE*, Vol. 26, No. 12, pp. 78-84, 2009.
14. ATI Industrial Automation, "Multi-Axis Force/Torque Sensor," *ATI Industrial Automation*, pp. 4-45, 2005.