

손목굽힘운동 재활로봇을 위한 3축 힘센서 설계

김갑순*

Design of a Three-Axis Force Sensor for Wrist Bending-Exercise Rehabilitation Robot

Gab-Soon Kim*

Abstract

Most serious stroke patients have the paralysis of their wrists, and can't use of their hands freely. But their wrists can be recovered by rehabilitation exercise. Recently, professional rehabilitation therapists exercise the wrists of stroke patients in hospital. But the wrists of stroke patients have not rehabilitated, because the therapists are much less than stroke patients in number. Therefore, the wrist bending-exercise rehabilitation robot that can measure the bending force of the patients' wrists is developed. In this paper, the three-axis force sensor was designed for the wrist bending-exercise rehabilitation robot. As a test results, the interference error of the three-axis force sensor was less than 0.85%. It is thought that the sensor can be used to measure the wrist bending force of the patient.

Keywords : Three-axis force sensor, Interference error, Rated output, Wrist rehabilitation robot, Wrist bending exercise

1. 서론

국내외적으로 중증뇌졸중환자는 급속히 증가하는 추세에 있고, 이들 대부분은 손목에 마비증세가 발생하여 손을 자유롭게 사용할 수 없다. 재활병원에서는 환자들의 손목재활을 위해 전문치료가 1회 30분정도 재활훈련을 실시하고 있으나 급속히 증가하는 환자의 재활을 담당하는 전문치료사의 부족으로 인해 충분한 재활치료를 받을 수 없는 실정이다. 그러므로 안전하고 충분한 환자들의 손목재활운동을 시키기 위한 손목굽힘운동 재활로봇의 개발이 필요하다. 참고문헌[1-3]은 경중 손목환자를 위한 손목 및 팔의 재활운동을 위한 재활로봇을 개발하였고, 참고문헌[4-6]은 환자의 팔이 스스로 움직이거나 식사 등 간단한 과업을 하기 위한 힘이 미약한 환자에게 보강힘을 줄 수 있는 로봇을 개발하였다.

위에서 설명한 상지 재활로봇은 회복이 중간정도 진행된 환자 혹은 스스로 움직일 수 있는 환자가 재활운동을 할 수 있으나 거동이

어려운 중증뇌졸중환자의 손목굽힘운동을 할 수 없을 뿐만 아니라 다축힘센서가 부착되지 않아 환자의 안전에 심각한 문제가 있다. 손목굽힘운동 재활로봇의 가장 중요한 것은 손목에 안전하게 굽힘력을 주어 동작하게 하는 것이고, 이를 위해 손목굽힘력을 측정하고 이 값들을 이용하여 정확하게 제어해야 한다. 이와 같이 로봇이 동작하기 위해서는 재활로봇의 핵심부품인 3축 힘센서가 필요하다. 3축 힘센서는 x, y, z 방향의 힘, 즉 F_x , F_y , F_z 를 동시에 측정하는 센서이고, 일반적으로 센서의 크기를 작게 하기 위해 한 몸체로 구성된다. 손목굽힘운동 재활로봇에 내장되는 3축 힘센서는 크기, 정격용량, 가격 등이 적합해야 할뿐만 아니라 로봇에 부착하기 용이해야 한다. 그러나 현재 개발된 다축 힘센서[7-9]는 1개의 가격이 약 오백만원정도이고, 크기 등의 대부분의 조건이 재활로봇용으로는 적합하지 않다.

따라서 본 논문에서는 중증뇌졸중환자의 손목굽힘운동 재활로봇에 부착되어 손목의 굽힘력을 제어할 수 있는 3축 힘센서를 설계한다. 3축 힘센서를 새롭게 모델링하였고, 유한요소법(FEM analysis)을 이용하여 3축 힘센서를 설계 및 제작하였으며, 센서의 특성실험을 실시하였다.

경상대학교 제어계측공학과(Department of Control & Instrumentation Engineering, ERI, Gyeongsang National University)
405-504, Gyeongsang National University, 501 Jinju-daero, Jinju 660-701, Korea

*Corresponding author: gskim@gsnu.ac.kr

(Received : Nov. 26, 2012, Revised : Jan. 8, 2013, Accepted : Jan. 15, 2013)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 3축 힘센서 설계 및 제작

2.1 손목굽힘력 측정원리

Fig. 1은 손목굽힘운동 재활로봇의 굽힘력 측정원리를 나타내고 있고, Fig. 1의 (a)는 손목굽힘운동 재활로봇의 개략도를 나타내고 있으며, (b)는 손목굽힘력 측정을 위한 3축 힘센서를 나타내고 있다. 손목굽힘운동 재활로봇의 구성은 손고정블록(hand fixing block), 팔고정블록(arm fixing block), 로봇고정구(robot fixture), 손목굽힘모터(motor), 3축 힘센서(three-axis force sensor) 등으로 구성된다. 손목굽힘운동 재활로봇을 이용한 손목굽힘운동은 환자의 왼손을 손바닥이 지면과 수직으로 세워 손고정블록에 접착천(velcro)을 이용하여 고정한다. 팔을 팔고정블록에 접착천을 이용하여 고정한다. 그리고 손목굽힘모터를 동작시켜 손목을 안쪽과 바깥쪽으로 반복하여 회전시키고, 이때 손목에 가해지는 힘을 3축 힘센서를 이용하여 측정하며, 측정결과를 이용하여 설정된 힘까지만 회전력을 손목에 가할 수 있도록 제어한다. 3축 힘센서는 x, y, z 방향의 각 힘 F_x , F_y , F_z 를 동시에 측정하는 센서이고, 손목을 안전하게 굽힘운동을 시킬 수 있는 핵심부품으로 매우 중요하다. 3축 힘센서를 사용한 것은 손목에 힘을 가하면 가하는 힘의 방향은 x, y, z 중 어느 한 방향으로만 작용되지 않고 임의의 방향으로 작용되기 때문에 3개 방향의 힘을 모두 측정한 후 그 결과들을 이용하여 합력을 계산해야 한다.

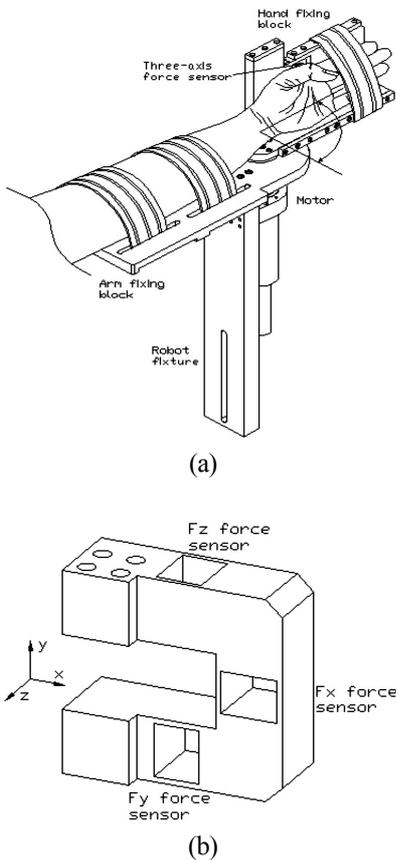


Fig. 1. Force measuring principle for wrist bending-exercise rehabilitation robot; (a) Schematic diagram of robot and (b) three-axis force sensor.

손목에 굽힘 힘이 가해지면 Fig. 1 (b)의 3축 힘센서에 힘 F_x , F_y , F_z 가 감지되고, 손목에 가해지는힘(합력) F 는 측정된 각 방향의 힘 F_x , F_y , F_z 를 식 (1)에 대입하여 계산할 수 있다.

$$F = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2} \quad (1)$$

로봇의 본체는 추후에 설계 및 제작할 예정이고, 본 논문에서는 손목을 굽힐 때 힘을 측정하고 제어하는데 필요한 핵심부품인 3축 힘센서를 설계 및 제작하고자 한다.

2.2 3축 힘센서의 구조

Fig. 2는 3축 힘센서의 구조를 나타내고 있고, 이것은 힘 F_x , F_y , F_z 를 동시에 측정할 수 있으며, 3개의 센서 감지부가 한 몸체에 구성되었다. 3축 힘센서의 감지부는 3개의 평행판보(PPB1~3)가 수직과 수평으로 놓여 “ㄷ”자 형태로 연결되었으며, PPB1 (Parallel Plate Beam)은 힘 F_x 센서의 감지부, PPB2는 힘 F_y 센서의 감지부, PPB3는 힘 F_z 센서의 감지부이다. 평행판보는 2개의 평판보의 양끝이 평행으로 양쪽의 블록에 부착되어있는 형태, 즉 사각빔에 사각홀이 뚫려있는 형태이다. PPB1은 M1블록과 M2블록 사이에 부착되었고, PPB2는 고정블록 F1과 M1블록 사이에 부착되어 있으며, PPB3는 힘전달블록 F2와 M2블록 사이에 부착되어 있다. 각 평판보(plate beam)의 두께 t_1 , t_2 , t_3 , 길이 l_1 , l_2 , l_3 , 폭 b_1 , b_2 , b_3 는 센서의 설계변수로 사용된다. 힘측정 방법은 좌측 상부블록을 고정하고 우측 상부블록에 Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 힘을 가하면 F_x 센서, F_y 센서, F_z 센서에서 힘을 감지한다.

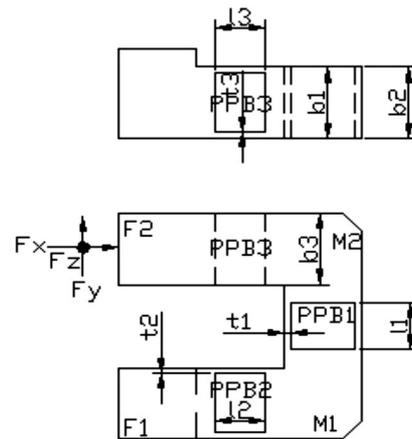


Fig. 2. Structure of three-axis force sensor.

2.3 유한요소법을 이용한 센서설계 및 분석

3축 힘센서의 설계변수는 몸체의 크기, 각 센서의 정격축력, 정격하중, 평행판보 PPB1~3을 구성하는 평판보들의 크기인 폭 b_1 ,

b2, b3, 두께 t1, t2, t3, 길이 l1, l2, l3이다. 센서의 설계과정은 선계변수 중 몸체의 크기, 각 센서의 정격축력, 정격하중 등을 결정하여 유한요소법에 적용하여 평판보들의 크기인 폭 b1, b2, b3, 두께 t1, t2, t3, 길이 l1, l2, l3를 결정하는 것이다.

각 센서는 4개의 스트레인이게이지로 휘스톤브리지를 구성한다. 정격변형률은 정격 하중이 가해질 때 휘스톤브리지에서 출력되는 총 변형률을 의미하고 이것의 값은 다음과 같은 식으로부터 계산된다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{T_1} - \varepsilon_{C_1} + \varepsilon_{T_2} - \varepsilon_{C_2} \tag{2}$$

여기서 ε 은 휘스톤브리지의 총 변형률, ε_{T_1} 은 인장 스트레인이게이지 T_1 의 변형률, ε_{C_1} 은 압축 스트레인이게이지 C_1 의 변형률, ε_{T_2} 은 인장 스트레인이게이지 T_2 의 변형률, ε_{C_2} 은 압축 스트레인이게이지의 변형률이다.

정격출력은 정격하중을 가했을 때 입력전압과 출력전압의 비로 나타내며, 다음과 같은 식에 의해 계산될 수 있다.

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{4} K\varepsilon \tag{3}$$

여기서 E_i 는 휘스톤브리지의 입력전압, E_o 는 휘스톤브리지의 출력전압, K 는 스트레인이게이지의 상수(약 2.03), ε 는 식(2)로 부터 얻은 총 변형률이다.

3축 힘센서를 설계하기 위한 설계변수의 정격출력은 약 0.5 mV/V, 정격하중은 힘 Fx, Fy, Fz센서가 각각 100 N, 스트레인이게이지의 부착위치가 길이 방향으로는 1.5 mm, 폭 방향으로는 1/2, 스트레인이게이지 부착위치에서의 변형률은 약 250 $\mu\text{m}/\text{m}$ 로 결정하였다. 그리고 센서의 크기는 부착되는 스트레인이게이지의 크기 (3×5.2 mm)를 고려하여 평판보의 길이를 8 mm, “C”자 모양의 코너로부터 각 보의 끝까지의 길이는 스트레인이게이지 부착공간을 고려하여 3 mm, 두 개의 끝부분의 블록의 크기는 재활로봇에 부착하기 용이하도록 각 보의 끝으로부터 15 mm, 각 보의 두께는 모두 12 mm로 결정하였고, 전체의 크기는 가로, 세로, 높이가 38×38×12 mm 이다.

3축 힘센서의 각 감지부의 크기를 결정하기 위해 ANSYS 소프트웨어를 이용하였다. 유한요소해석을 위해 소프트웨어에 입력한 재료상수는 제작할 센서의 재질이 알루미늄이므로 종탄성계수가 70 GPa, 프와송의 비가 0.3이며, 8절점 6면체 블록을 선택하였다. 격자(mesh) 크기는 해석하고자 하는 평행평판보를 길이방향으로는 0.5 mm, 두께방향으로는 3등분하였다.

Fig. 3의 (a)는 유한요소해석을 위한 격자(mesh) 모습, (b)는 힘 Fx가 가해졌을 때 변형된 모습, (c)는 힘 Fy가 가해졌을 때 변형된 모습, (d)는 힘 Fz가 가해졌을 때 모습을 각각 나타내고 있으며, 모두 센서의 구조를 모델링할 때 예상했던 모습으로 변형되었다.

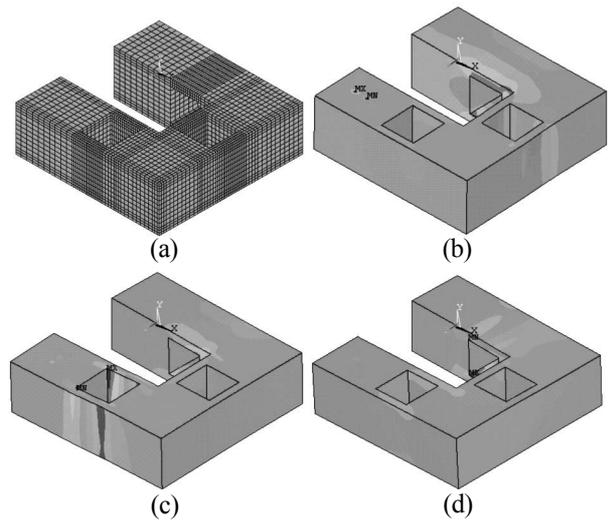


Fig. 3. Deformed shape of the sensing element of each sensor under each rated force; (a) Mesh shape, (b) Applied force Fx, (c) Applied force Fy, and (d) Applied force Fz.

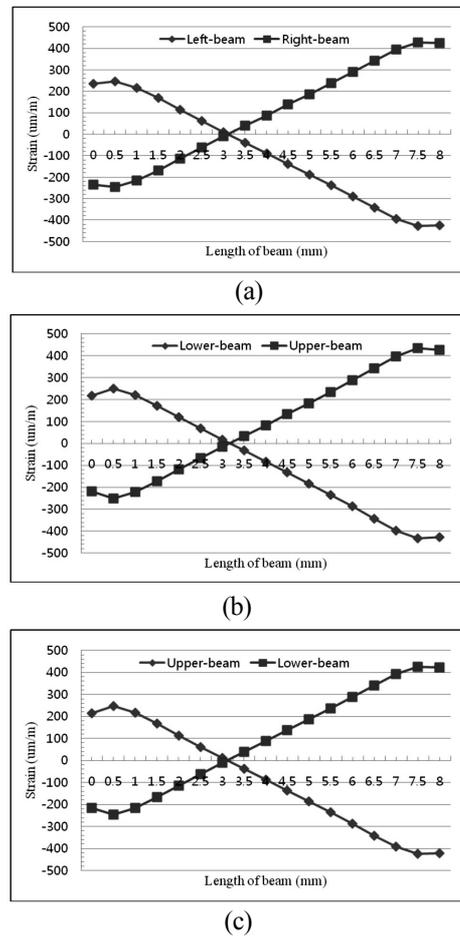


Fig. 4. Strain distribution on each beam under each rated force; (a) Two beams under rated force Fx, (b) Two beams under rated force Fy, and (c) Two beams under rated force Fz.

유한요소법을 이용하여 3축 힘센서를 설계한 결과, 센서의 크기는 평판보의 길이 l_1, l_2, l_3 를 각각 8 mm, 폭 b_1, b_2, b_3 를 각각 12 mm로 결정하였고, 두께 t_1, t_2, t_3 는 각각 1.8 mm이었다. Fig. 4의 (a)는 힘 F_x 감지부의 변형률분포의 그래프, (b)는 힘 F_y 감지부의 변형률분포의 그래프, (c)는 힘 F_z 감지부의 변형률분포의 그래프를 각각 나타내고 있다. 각 그래프에서 변형률분포가 2개인 것은 각각의 평행평판보가 2개의 평판보로 구성되었기 때문이고, 변형률이 양과 음의 값으로 나타난 것은 각 정격힘이 가해졌을 때 각 보의 외표면이 서로 반대방향으로 인장과 압축을 받기 때문이다. 각 변형률분포에서 변형률이 0 $\mu\text{m}/\text{m}$ 인 지점은 보의 약 3.1 mm 지점이고 이 지점을 기준으로 좌측과 우측의 변형률의 크기가 다른 것은 각각의 평행평판보가 외팔보 형태로 힘이 가해지기 때문이다. 그리고 각 변형률분포에서 좌측과 우측의 끝의 변형률이 감소한 것은 유한요소 프로그램의 끝효과 오차 때문이다.

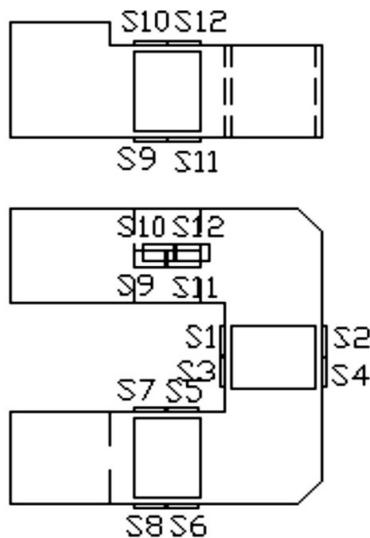


Fig. 5. Attachment locations of strain gages on each sensing element of three-axis force sensor.

유한요소해석 결과를 토대로 3축 힘센서의 각 센서의 스트레인 게이지 부착위치를 결정하였으며, 그것을 Fig. 5에 나타내고 있다. F_x 센서의 스트레인게이지의 부착위치는 S1~S4, F_y 센서의 그것은 S5~S8, F_z 센서의 그것은 S9~S12이다. 스트레인게이지의 정확한 부착위치는 길이방향으로는 1.5 mm이고, 폭방향으로는 중심선상이다. 이 위치는 각 센서의 정격하중에서 상호간섭오차가 0%이고, 최대의 정격출력이 발생하는 지점으로 결정되었다.

Table 1은 유한요소법을 이용하여 3축 힘센서의 각 스트레인 게이지 부착위치에서의 변형률들과 식 (2)에 의해 계산된 정격변형률들을 나타내고 있다. 모든 센서의 정격변형률은 설계변수로 결정한 정격변형률 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이상이었고, 최대오차는 2.2%이었다. 이와 같은 오차는 설계시 가공의 가능성을 고려하여 감지부의 두께를 0.1 mm 단위로 나타내었기 때문이다. 단위를 0.01 mm 단위로 설

계하면 매우 근접한 변형률을 얻을 수 있으나 모델링한 3축 힘센서 구조의 복잡성 때문에 0.01 mm 단위로 가공하기 어렵기 때문이다.

Table 1. Strains from FEM analysis at each attachment location of strain-gages of each sensor of three-axis force sensor

Sensor	Strain ($\mu\text{m}/\text{m}$)				
	T_1	C_1	T_2	C_2	ϵ
F_x	168	-168	343	-343	1022
F_y	172	-172	343	-343	1030
F_z	168	-168	341	-341	1018

2.4 3축 힘센서 제작 및 특성실험

3축 힘센서는 Fig. 5에 나타난 각 센서의 게이지부착위치에 스트레인게이지(N2A-13-S1452-350, Micro-Measurement Company사 제작, 게이지 상수 2.03, 크기 3×5.2 mm)를 부착하고 휘스톤브리지[7-9]를 구성하여 제작하였으며, Fig. 6은 제작된 3축 힘센서의 사진을 보이고 있다.

Fig. 7은 제작한 3축 힘센서를 특성실험을 위한 실험장치 및 장면을 나타내고 있다. Fig. 7의 (a)는 다축 힘센서 교정기[10]에 3축 힘센서를 고정한 실험장치를 나타내고 있고, 이 다축 힘/모멘트센서 교정기[10]는 힘 F_x, F_y, F_z 를 모두 2000 N, 모멘트 M_x, M_y, M_z 를 모두 500 Nm를 연속적으로 발생시킬 수 있으며, 1×10^{-4} 의 상대확장불확도를 가지고 있으며, 측정은 고성능측정장치(DMP40)이다. 그리고 Fig. 7의 (b)는 x방향의 힘을 가하는 모습, (c)는 y방향의 힘을 가하는 모습, (d)는 z방향의 힘을 가하는 모습을 각각 나타내고 있다. 3축 힘센서는 정격하중인 $F_x = F_y = F_z = 100\text{N}$ 을 가하고 정격출력을 측정하였고, 총 세 번을 실시하여 평균값을 각 센서의 정격출력으로 결정하였다.

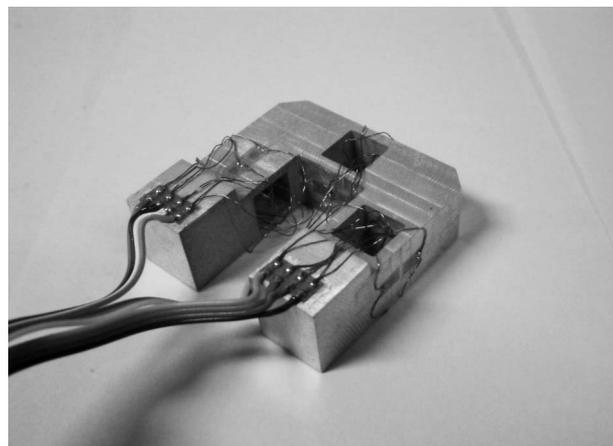


Fig. 6. Manufactured three-axis force sensor.

Table 2. Rated output from FEM analysis and characteristic test of each sensor of three-axis force sensor

Sensor	Rated output (mV/V)		
	FEM	Exp.	Error (%)
Fx	0.51866	0.49872	3.85
Fy	0.52273	0.52321	0.09
Fz	0.51664	0.49366	4.45

Table 3. Interference error of each sensor of three-axis force sensor

Sensor Force	Interference error (%)		
	Fx	Fy	Fz
Fx=100N	-	0.47	0.62
Fy=100N	0.85	-	0.19
Fz=100N	0.21	0.09	-

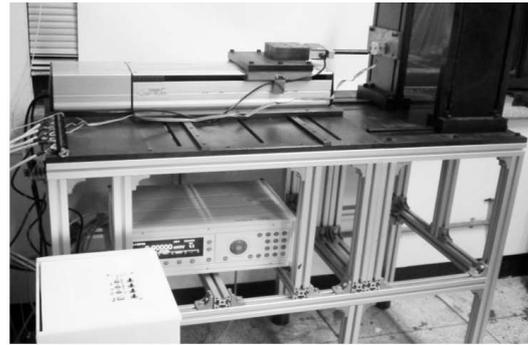
Table 4. Repeatability error and non-linearity error of the three-axis force sensor

Error (%)	Three-axis force sensor		
	Fx sensor	Fy sensor	Fz sensor
Repeatability	0.02	0.01	0.02
Non-linearity	0.02	0.01	0.01

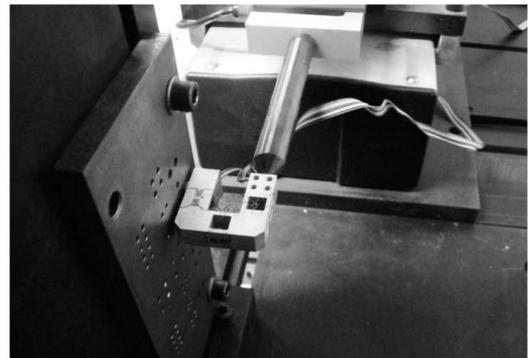
Table 2는 3축 힘센서의 유한요소해석과 실험결과의 정격출력 및 오차를 나타내고 있다. 유한요소해석 결과의 정격출력은 Table 1의 정격변형률을 식 (3)에 적용하여 계산된 것이고, 실험에 의한 정격출력은 본 논문에서 특성실험한 결과를 나타내고 있다. 유한요소 해석 결과를 기준으로 유한요소해석 결과의 오차는 최대 4.45%이었다. 이들 오차는 스트레인게이지의 부착오차, 감지부의 가공오차, 유한요소 소프트웨어의 고유오차 등으로 생각된다.

Table 3은 3축 힘센서의 각 센서의 상호간섭오차를 나타내고 있고, 상호간섭오차는 각 센서의 결정된 정격출력이 일 때 다른 센서에서 출력되는 오차를 측정된 값으로 계산된 것이며, 3축 힘센서의 최대 상호간섭오차는 0.85%이다.

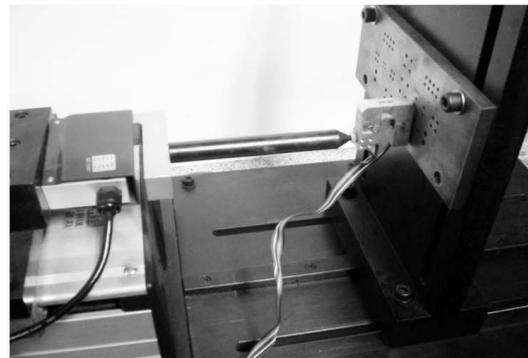
3축 힘센서의 재현도오차와 비직선성오차를 계산하기 위해 각 센서에 하중 10 N부터 10 N단위로 100 N까지 증가순과 감소순으로 가하였고, 이때 출력되는 값을 측정하였다. Table 4는 3축 힘센서의 재현도오차와 비직선성오차를 나타낸 것이고, 각 센서의 최대 재현도오차와 최대 비직선성오차는 0.02%이내이었다. 제작한 3축 힘센서의 특성실험결과 상호간섭오차, 재현성오차, 비직선성오차가 이미 판매하고 있는 다축 힘센서[7-9]의 그것과 비슷한 수준이었다. 개발한 3축 힘센서는 가격이 50만원이하로 저렴하고, 크기가 38×38×12 mm로 손목급힘운동 재활로봇용으로 적합하며, 손목



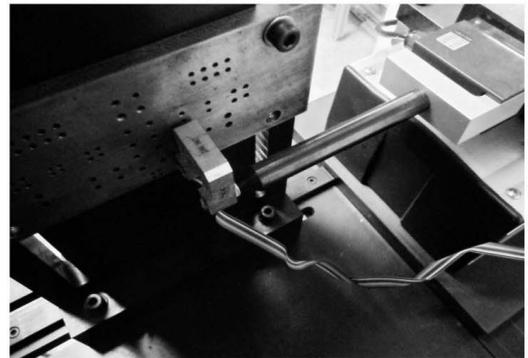
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7. Experimental setup for the characteristic test of the three-axis force sensor; (a) Experimental setup, (b) Applied force Fx, (c) Applied force Fy, and (d) Applied force Fz.

급힘운동 재활로봇이 개발완료되면 수입대체효과가 기대된다.

3. 결론

따라서 본 논문에서는 중증뇌졸중환자의 손목굽힘운동 재활로봇에 부착되어 손목굽힘력을 측정할 수 있는 3축 힘센서를 설계하였다. 제작한 3축 힘센서의 최대 상호간섭오차가 특성실험결과 0.85%임을 확인하였다. 개발한 센서는 최대 상호간섭오차가 이미 판매하고 있는 다축 힘센서[7-9]의 그것과 비슷한 수준이므로 중증뇌졸중환자의 손목굽힘운동 재활로봇에 부착하여 손목굽힘력을 측정하기에 적당할 것으로 판단된다. 추후연구로는 제작한 3축 힘센서가 부착된 중증뇌졸중환자의 손목굽힘운동 재활로봇을 개발하여 환자의 손목굽힘운동에 적용하는 것이다.

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] M. H. Rahman, M. Saad, J. P. Kenné, and P. S. Archambault, "Modeling and development of an exoskeleton robot for rehabilitation of wrist movements", *2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2010)*, pp. 25-30, 2010.
- [2] B. C. Tsai, W. W. Wang, L. C. Hsu, L. C. Fu, and J. S. Lai, "An articulated rehabilitation robot for upper limb physiotherapy and training", *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*, pp. 1470-1475, 2010.
- [3] S. Liu, Y. Xie, S. Jiang, and J. Meng, "Interactive control for the arm rehabilitation robot", *2009 International Workshop on Intelligent Systems and Applications (ISA 2009)*, pp. 1-4, 2009.
- [4] W. Huo, J. Huang, Y. W. Jun, and L. C. Wu, "Control of upper-limb power-assist exoskeleton based on motion intention recognition", *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2243-2248, 2011.
- [5] A. Umemura, Y. Saito, and K. Fujisaki, "A study on power-assisted rehabilitation robot arms operated by patient with upper limb disabilities", *2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR 2009)*, pp. 451-456, 2009.
- [6] Y. Ren, H. S. Park, and L. Q. Zhang, "Developing a whole-arm exoskeleton robot with hand opening and closing mechanism for upper limb stroke rehabilitation", *2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR 2009)*, pp. 761-765, 2009.
- [7] 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.
- [8] G. S. Kim and J. J. Park, "Development of the 6-axis force/moment sensor for an intelligent robot's gripper", *Sensor Actuat. A-Phys.*, Vol. 118, pp. 127-134, 2005.
- [9] ATI Industrial Automation, "Multi-axis force/torque sensor", *ATI Industrial Automation*, pp. 4-45, 2005.
- [10] G. S. Kim and J. W. Yoon, "Development of calibration system for multi-axis force/moment sensor and its uncertainty evaluation," *KSPE*, Vol. 24, No. 10, pp. 91-98, 2007.