재활로봇용 3 축 힘/토크센서 설계

Design of Three-Axis Force/Torque Sensor for Rehabilitation Robot

정재현¹, 김갑순^{1,⊠}

Jae-Hyun Jung¹ and Gab Soon Kim^{1,⊠}

Manuscript received: 2015.9.30. / Revised: 2015.12.29. / Accepted: 2016.1.20.

In this study, we described the design of a three-axis force/torque sensor for measuring the force and torque in a lower-limb rehabilitation robot. The three-axis force/torque sensor is composed of Fx force sensor, Fz force sensor and Tz torque sensor. The sensing element for Fx force sensor and Tz torque sensor is used in a two-step parallel plate beam, and that of Fz force sensor is used in a parallel plate beam. The rated loads of Fx force sensor, Tz torque sensor and Fz force sensor are 300 N, 15 N m and 100 N, respectively. The three-axis force/torque sensor was designed using the finite element method, and manufactured using strain-gauges. The three-axis force sensor was further characterized. As a result, the interference error of the three-axis force/torque sensor was < 1.24%, the repeatability error of each sensor was < 0.03%, and the non-linearity was < 0.02%.

KEYWORDS: Three-Axis force/torque sensor (3 축 힘/토크센서), Two-Step parallel plate beam (2 단평행평판보), Parallel plate beam (단일평행평판보), Interference error (상호간섭오차), Rated output (정격출력)

1. 서론

중중뇌졸중환자는 다리 중 한쪽 혹은 모두가 굳어져 정상인과 같이 원활하게 사용할 수 없게 된다. 재활전문치료사는 굳어지는 발목관절을 유 연하게 하고 근력을 향상시키기 위해 하루에 오전 과 오후 각 30분씩 재활운동을 시킨다. 재활전문 치료사가 발목재활운동을 시키는 방법은 발목을 굽힐 때에는 손으로 발가락 아래부위를 잡고 체중 을 실에 지긋이 누르고 3-6초 머무른 후 다시 펴 는 쪽으로 누르는 것을 반복한다. 이때 중요한 것 은 적당한 힘을 가하여 재활효과를 크게 하는 것 이다. 중증뇌졸중환자의 증가로 인해 재활전문치 료사가 부족할 뿐만 아니라 발목재활운동은 치료 사의 힘이 많이 소요되어 자동으로 치료사가 운동 을 시키는 것과 같은 효과를 발휘할 수 있는 발목 재활로봇이 필요하다.

개발된 발목재활로봇¹은 뇌졸중환자의 고유 신 경근 촉진을 위한 발목재활로봇을 설계 및 제작하 고, 6주간 환자를 대상으로 재활훈련을 실시한 결 과 좋은 결과를 얻었으며, 발목의 회전력을 측정 하기 위해 로봇의 발판과 본체에 토크센서를 부착 하였다. 그런데 이와 같은 방법은 발판의 회전에 따라 발판의 무게가 다르게 가해지므로 실제로 발

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering

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.

목에 토크가 가해지지 않는데도 자중에 의한 토크 값이 출력되어 실제 발목의 회전력을 측정하기 어 려운 단점을 가지고 있다. 발목재활로봇2은 햅틱기 술을 이용하여 가상보행운동을 수행할 수 있는 로 봇시스템을 설계 및 제작하였고, 정상인을 대상으 로 특성실험하였으며, 구동은 원활하게 이루어지 나 발목에 가해지는 회전력을 측정할 수 없어 전 문재활치료사가 실시하는 재활운동과 같은 효과를 얻을 수 없는 단점을 가지고 있다. 착용하는 발목 로봇³은 네 개의 액츄에이터를 이용하여 발에 착 용하여 환자가 걸을 수 있도록 도와주는 역할을 하는 것이나 발목에 가해지는 힘을 측정할 수 없 어 제어 시 안전에 문제가 되는 단점을 가지고 있 다. 발목재활로봇4은 발바닥을 고정하는 기구밑부 분에 토크센서를 부착하였고, 그 밑에 회전모터를 부착한 시스템이다. 환자의 발을 고정한 후 회전 모터를 동작시켰을 때 발목에 가해지는 힘을 측정 하는 방식으로 사람이 걷는 방향으로의 발목 굽힘 력을 측정할 수 없는 단점을 가지고 있다.

지금까지 개발된 발목재활로봇을 이용하여 환 자의 발목재활운동을 실시할 경우 다축 힘/토크센 서가 부착되지 않아 힘제어를 실시할 수 없어 재 활전문치료사가 운동을 시키는 것과 같은 효과를 올릴 수 없을 뿐만 아니라 운동시 통증 등이 발생 하여 로봇을 안전하게 정지하고 원위치로 복귀할 수 없다. 그러므로 다축 힘/토크센서가 부착된 발 목재활로봇의 개발이 필요하다. 발목재활로봇에 부착되는 다축 힘/토크센서는 발바닥이 누르는 힘 (Fx)을 감지하는 힘센서, 발바닥의 옆쪽으로 가해 지는 힘 (Fz)을 측정하는 힘센서, 발바닥의 좌우측 의 회전력 (Tz)을 측정하는 토크센서 등 3축 힘/토 크센서가 필요하다.

지금까지 개발된 다축 힘/토크센서⁵⁻¹⁴는 감지부 로 단일보 (Beam) 혹은 평행평판보 (Parallel Plate Beam)가 사용되었다. 이들 감지부는 하나의 보를 2개 센서 (힘센서와 토크센서)를 위한 감지부로 사 용될 경우에는 힘센서의 정격용량과 정격출력을 맞추어 설계하면, 토크센서의 정격출력을 맞추기 가 매우 어렵다. 왜냐하면 다축 힘/토크를 설계할 경우에는 각 힘센서와 토크센서의 정격용량은 사 용하는 것과 같이 용도에 따라 결정하고, 정격출 력은 모두 같도록 결정하기 때문에 설계변수 (보 의 길이, 보의 폭, 보의 두께) 중 먼저 보의 길이 와 폭을 결정하고 보의 두께를 변경하면서 각 센 서의 정격중량에 따른 정격출력이 되도록 설계하 기 때문이다. 그러므로 하나의 보를 2개 센서의 감지부로 사용할 경우에는 보의 폭에 단을 두어 2 개의 두께를 변경시키면 센서 설계에서 정격출력 을 맞추는데 유리할 것으로 생각된다.

따라서 본 논문에서는 2단평행평판보와 단일평 행평판보를 이용하여 발목재활로봇의 발목힘측정 용 3축 힘/토크센서를 설계하였다. 3축 힘/토크센서 의 Fx 힘센서와 Tz 토크센서의 감지부는 2단평판 보를 사용하여 설계하였고, Fz 힘센서의 감지부는 단일평판보를 사용하여 설계하였으며, 유한요소법 을 이용하여 각 보의 크기가 결정하였다. 그리고 스트레인게이지를 부착하고 휘스톤브리지를 구성 하여 각 센서를 제작하였고, 제작된 3축 힘/토크센 서의 특성실험을 실시하였다.

2.3 축 힘/토크센서의 설계

2.1 재활로봇에 부착된 3 축 힘/토크센서

재활보봇을 이용한 발목재활운동 시 전문 치료 사가 환자의 발목재활운동을 시키는 것과 같은 효 과를 얻기 위해서는 발목을 시계방향과 반시계방 향으로 회전시킬 때 힘제어를 실시해야 하고 이를 위해서는 힘센서가 포함되 발목재활 로봇이 필요 하다. Fig. 1은 3축 힘/토크센서가 부착된 발목재활 로봇의 원리를 나타내고 있다. 재활로봇은 발지지 블록 (Foot Support Block), 3축 힘/토크센서 (Three-Axis Force/Torque Sensor), 발고정구 (Foot Fixture), 접착천 (Velcro), 회전모터 (Rotation Motor) 등으로 구성된다.

발지지블록은 재활로봇의 몸체역할을 하고, 3축 힘/토크센서, 발고정구, 회전모터 등이 고정되 어 있다. 3축 힘/토크센서는 본 논문에서 설계 및 제 작한 것으로 발바닥을 누르는 힘 (발바닥과 직각 방향의 힘) Fx, 발바닥 방향의 힘 (발 끝과 뒤꿈치 방향의 힘) Fz와 발바닥의 좌측과 우측을 누르면 발생되는 토크 Tz를 측정한다. 발고정구는 발바닥 과 발목을 접착천을 이용하여 고정하고 회전모터 의 회전에 따라 발을 전후로 회전시킨다.

회전모터 (Max42, 150 W, GP42C)는 발고정구를 좌우로 회전시키면 발이 전후로 회전한다. 발목 재활로봇의 이용한 환자의 재활운동은 벨크로를 이용하여 발목 등을 고정시키고, 회전모터를 이용 하여 발목을 시계방향으로 회전시키면 발목에 가 해지는 회전력을 3축 힘센서의 Fx 힘센서가 감지 한다. 이때 힘제어는 이 회전력을 기준으로 실시





되고, 반시계방향도 시계방향 힘제어와 같은 방법 으로 실시된다. 3축 힘센서의 Fz 힘센서와 Tz 토크 센서는 재할운동시 긴급사항이 발생할 때 발에 힘 을 가하면 이들 센서가 감지하여 운동을 멈추고 처음 시작위치로 복귀하는데 사용된다.

그리고 발목재활운동이 시작될 때와 끝날 때는 발목의 시계방향과 반시계방향의 회전력을 측정 하여 재활정도를 판단하는데 사용할 수 있다.

2.23 축 힘/토크센서의 구조

Fig. 2는 본 논문에서 발목재활로봇을 위해 모 델링한 3축 힘/토크센서의 구조를 나타내고 있다. 3축 힘/토크센서는 x방향의 힘을 측정하는 Fx 힘 센서, z반향의 힘을 측정하는 Fz 힘센서, z방향의 토크를 측정하는 Tz 토크센서가 한 몸체 내에 구 성된다. 3축 힘/토크센서의 감지부는 2단평행평판 보 (PSPB: Parallel Step Plate Beam) 2개와 단일평행평 판보 (PPB: Parallel Plate Beam) 2개로 구성된다. 감 지부 PSPB1과 PSPB2는 Fx 힘센서와 Tz 토크센서 의 감지부로 사용되고, PPB1과 PPB2는 Fz 힘센서 의 감지부로 사용된다. PSPB1과 PSPB2의 크기는 길이가 11', 과 11, 폭이 b1, 두께가 t1'과 t1이고, 길이 11, 폭 b1, 두께 t1은 Tz 토크센서의 감지부로 사용되며, 길이 11', 폭 b1, 두께 t1'은 Fx 힘센서 감지부로 사용된다. 이것은 Fx 힘센서와 Tz 토크 센서의 정해진 정경용량에 따라 정격출력을 같도 록 설계하기 쉽도록 모델링한 것이다. 즉 길이와



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

두께를 각각의 센서의 용량에 따라 변경할 수 있 으므로 설계하기 용이한 장점이 있다. PPB1과 PPB2 의 감지부 크기는 길이가 12, 폭이 b2, 두께가 t2이 다. 이것들은 각 센서를 설계할 때 변수로 사용된다.

2.33 축 힘/토크센서의 설계 및 제작

3축 힘/토크센서의 설계는 각 센서의 정격출력, 정격용량, 센서의 전체 크기, 감지부 보의 폭을 결 정하고, 보의 길이와 두께를 변경하여 실시한다. 3 축 힘/토크센서의 각 센서는 4개의 스트레인게이 지로 휘스톤브리지를 구성하고, 정격변형률은 정 격용량이 가해질 때 휘스톤브리지에서 출력되는 총 변형률을 의미하며, 다음과 같은 식에 의해 계 산된다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{C1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{C2} \tag{1}$$

여기서 $\varepsilon 은 휘스톤브리지의 총 변형률, <math>\varepsilon_{T1} \in$ 인장 스트레인게이지 T_1 의 변형률, $\varepsilon_{C1} \in$ 압축 스 트레인게이지 C_1 의 변형률, $\varepsilon_{T2} \in$ 인장 스트레인 게이지 T_2 의 변형률, $\varepsilon_{C2} \in$ 압축 스트레인게이지 C_1 의 변형률, $\varepsilon_{C2} \in$ 압축 스트레인게이지

각 센서의 정격출력은 각 센서의 정격용량을 가했을 때 입력전압과 출력전압의 비로 나타내며, 다음과 같은 식에 의해 계산될 수 있다.⁵⁻¹⁴

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{4} K \varepsilon \tag{2}$$



(c) Applied 100 N 01 FZ (d) Applied 15 N \parallel 01 FZ

Fig. 3 Deformed shape of the three-axis force/torque sensor

휘스톤브리지의 출력전압, *K*는 스트레인게이지의 상수 (약 2.03), ε는 식(12)로 부터 얻은 총 변형 률이다.

3축 힘/토크센서를 설계하기 위한 설계변수들 은 다음과 같이 결정하였다. 첫째, 정격출력은 이 미 개발된 다축 힘센서의 정격용량과 같이 0.50 mV/V (정격변형률 약 1000 um/m)로 결정되었다. 둘째, 발목에 가해지는 회전력을 감지하기 위한 Fx 힘센서의 정격용량은 Fig. 1과 같이 발을 고정 한 후 발바닥이 Fig. 1의 "A"의 위치에 접촉시킨 후 발바닥으로 힘을 x방향으로 가했을 때의 힘인 300 N으로 결정하였고, Fz 힘센서의 정격용량은 Fig. 1과 같이 고정하였을 때 발바닥을 위쪽 혹은 아래쪽 방향으로 (z방향) 밀었을 때 가해지는 힘인 100 N으로 결정하였으며, Tz 토크센서는 Fig. 1과 같이 고정하였을 때 발바닥의 안쪽 혹은 바깥쪽으 로 (x방향) 힘을 가했을 때 발생되는 토크인 15 N m로 결정하였다.

셋째, 3축 힘/토크센서의 전체 크기는 재활로봇 에 부착하는 것을 구려하고 각각의 센서 감지부의 크기를 고려하여 136 × 74 × 17 mm로 결정하였고, 스트레인게이지의 부착위치는 보의 길이와 스트레 인게이지의 크기를 고려하여 보의 길이 방향으로 는 1.5 mm, 폭 방향으로는 1/2로 하였다. 넷째, 스 트레인게이지 부착위치에서의 정격변형률은 이미 개발된 다축 힘센서들과 같이 약 1000 um/m, 그리 고 스트레인게이지의 크기를 고려하여 보의 길이 11=5 mm, 11'=5 mm, 즉 (11+11'=10 mm) 12=10 mm, 보 의 폭 b1=74 mm, b2=14 mm로 결정하였다. 그리고





(b) Strains under rated torques Tz (15.0 N m)



(c) Strains under rated force Fz (100 N)

Fig. 4 Strain distribution on each beam of three-axis force/torque sensor

유한요소법을 이용하여 t1,t1',t2를 결정하였다.

유한요소해석 (Finite Element Method, FEM)을 위 해 소프트웨어에 입력한 재료상수 는 제작할 센서 의 재질이 알루미늄이므로 종탄성 계수가 210 GPa, 프와송의비가 0.3이며, 8절점 6면체 블록을 선택하 였다. Fig. 3은 3축 힘/토크센서의 유한요소해석한 결과를 나타내고 있고, (a)는 3축 힘/토크센서의 격 자모습, (b)는 Fx 힘센서의 정격힘 300 N을 가했을 때 변형된 모습, (c)는 Fz 힘센서의 정격힘 100 N을 가했을 때 변형된 모습, (d)는 Tz 토크센서의 정격 토크 15 N m를 가했을 때 변형된 모습을 각각 나 타내고 있다. 이것들은 센서의 구조를 모델링할 때 예상했던 모습으로 변형되었다.

Fig. 4(a)는 Fx 힘센서의 정격용량인 300 N, (b)는 Tz 토크센서의 정격용량인 15 N m, (c)는 Fz 힘센서 의 정격용량인 100 N를 가했을 때 각 센서 감지부 의 변형률분포 그래프를 각각 나타내고 있다. Fx 힘센서와 Tz 토크센서의 감지부는 2단평행평판보 이고, 이것에 2개의 힘센서를 위한 스트레인게이 지를 부착하여 각 센서를 제작한다. Fig. 4(a)는 감 지부의 두께 tl을 조절하여 Fx 힘센서의 정격하중 300 N일 때 정격출력이 약 0.5 mV/V가 되도록 설 계하였다. Fx 힘센서를 위한 스트레인 게이지의 부 착위치인 8.5 mm 부근에서는 변형률분포가 직선으 로 나타났고, 그외의 곡선으로 나타났다. 변형률이 0 um/m인 지점은 약 6.7 mm 지점이었다. Fig. 4(b)는 감지부의 두께 tl'을 조절하여 Tz 토크센서의 정격 토크 15 N m일 때 정격출력이 약 0.5 mV/V가 되도 록 설계하였다. Tz 토크센서를 위한 스트레인 게이 지의 부착위치인 1.5 mm 부근에서는 변형률분포가 직선으로 나타났고, 그외의 곡선으로 나타났다. 변 형률이 0 um/m인 지점은 약 3.3 mm지점이었다.

Fz 힘센서의 감지부는 단일평행편판보이고, 이 것에 1개의 힘센서를 위한 스트레인게이지를 부착 하여 센서를 제작한다. Fig. 4(c)는 감지부의 두께 t2 를 조절하여 Fz 힘센서의 정격하중 100 N일 때 정 격출력이 약 0.5 mV/V가 되도록 설계하였다. Fz 힘 센서를 위한 스트레인 게이지의 부착위치인 1.5 mm 부근에서는 변형률분포가 직선 으로 나타났고, 그외의 곡선으로 나타났다.

변형률이 0 um/m인 지점은 약 5.2 mm 지점이었 다. 그리고 각 변형률분포에서 좌측과 우측의 끝 의 변형률이 감소한 것은 유한요소 프로그램의 끝 효과 오차 때문이다. 본 논문에서는 Fx 힘센서와 Tz 토크센서는 하나의 감지부에 스트레인게이지 각 4개씩을 부착하여 제작해야한다. 그래서 이들 센서들을 위해 2단평행평판보를 사용함으로 Fx 힘 센서의 설계를 위해서는 보의 두께 t1을 변경시키 고, Tz 토크센서를 위해서는 두께 t1을 변경시키 고, Tz 함센서는 하나의 감지부를 단독으로 사용 하기 때문에 단일평행평판보를 사용하였고, 설계시 보의 두께 t2를 변경시켜 정격하중에 따른 정격출 력 약 0.5 mV/V 가 되도록 설계 할 수 있었다.



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

 Table 1
 The sizes of three-axis force/torque sensor from the FEM (Finite Element Method)

Three-Axis	Thickness	Length	Width
force/torque sensor	(mm)	(mm)	(mm)
Fx sensor(300 N)	t1=0.68	L11=5	b1=74
Tz sensor(15 N m)	t1'=1.28	11'=5	b1=74
Fz sensor(100 N)	T2=1.38	12=10	b2=14

유한요소해석 결과를 바탕으로 3축 힘/토크센 서의 각 센서의 스트레인게이지 부착위치를 결정 하였으며, 그것을 Fig. 5에 각각 나타내고 있다. Fx 힘센서의 스트레인게이지 부착위치는 S1-S4, Fz 힘 센서의 부착위치는 S5-S8, Tz 토크센서는 S9-S12이 다. 스트레인게이지의 부착위치는 길이방향으로가 보의 끝단으로부터 1.5 mm 떨어진 위치이고, 폭방 향으로는 중심선상이다. 이 위치는 식(1)을 이용하 여 계산한 각 센서의 정격용량에서 상호간섭오차 가 0%이고, 각 센서의 정격변형률 (정격출력)이 발생되는 지점으로 결정되었다.

Table 1은 유한요소해석으로 설계한 3축 힘/ 토 크센서의 각 센서들의 감지부 크기를 나타내고 있 다. Fx 힘센서와 Tz 토크센서는 2단평행평판보를 사용하였고, 보의 전체길이 (11+11')은 10 mm이고, 폭은 74 mm이며, 두께 t1과 t1'은 각각 0.0.68 mm 와 1.28 mm이었다. Fz 힘센서의 감지부는 단일평행 평판보를 사용하여 설계하였고, 길이는 10 mm이고, 폭은 14 mm이며, 두께는 1.38 mm이었다. 결론적으 로 2단평행평판보를 감지부를 사용함으로서 Fx 힘

axis force/torque sensor						
Sensor	\mathcal{E}_{T1}	$\boldsymbol{arepsilon}_{C1}$	\mathcal{E}_{T2}	$\boldsymbol{\varepsilon}_{\scriptscriptstyle C2}$	Total strain	Error (%)
Fx	254	-254	254	-254	1016	1.6
Tz	252	-252	252	-252	1008	0.8
Fz	253	-253	253	-253	1012	1.2

Table 2 Strains from FEM analysis at each attachment location of strain-gages of each sensor of threeaxis force/torque sensor

센서와 Tz 토크센서의 각 정격용량에 따른 정격출 력 (약 0.5 mV/V)이 맞도록 설계할 수 있었다.

Table 2는 유한요소법을 이용하여 3축 힘/토크 센서감지부의 각 스트레인게이지 부착위치에서의 변형률들과 식(1)에 의해 계산된 정격변형률들을 나타내고 있다. 3축 힘/토크센서의 변형률 최대오 차는 1.6%이었다. 이와 같은 오차는 설계시 가공 의 가능성을 고려하여 감지부의 두께를 0.01 mm 단위로 조절하였기 때문이다.

3.3 축 힘/토크센서의 제작 및 특성평가

3축 힘/토크센서는 Fig. 5에 나타낸 각 센서의 게이지부착위치에 스트레인게이지 (미국 MM사, N2A-13-S1452-350, 게이지 상수 2.03, 크기 3 × 5.2 mm)를 부착하고 휘스톤 브리지를 구성하여 제작 하였으며, Fig. 6은 제작된 3축 힘/토크센서의 사진 을 보이고 있다.

Fig. 7은 제작한 3축 힘/토크센서를 특성실험을 위한 실험장치 및 실험장면을 나타내고 있다. Fig. 7(a)는 다축 힘센서 교정기¹⁵에 3축 힘/토크센서를 고정한 실험장치를 나타내고 있고, 측정은 고성능 측정장치 (DMP40)이다. 그리고 Fig. 7(b)는 x방향의 정격힘 Fx을 가하는 모습, Fig. 7(c)는 z방향의 힘 Fz을 가하는 모습을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 7(d)는 z방향의 정격토크 Tz를 가하는 모습을 각각 나타내고 있고, 0.2 m의 암끝에 75 N의 힘을 가하 여 토크 Tz=15 N m를 발생시켰다.

3축 힘/토크센서는 정격용량인 Fx=300 N, Fz= 100 N, Tz=15.0 N m를 가하고 정격출력을 측정 하 였고, 총 세 번을 실시하여 평균값을 각 센서의 정격출력으로 결정하였다.

Table 3은 3축 힘/토크센서의 유한요소해석과 실 험결과의 정격출력 및 오차를 나타내고 있다. 유한 요소해석 결과에 의한 정격출력은 식(2)에 Table 2 의 정격변형률값들을 대입하여 계산한 결과이고,



Fig. 6 Photograph of the manufactured three-axis force/ torque sensor



(a) Experimental setup



(b) Applied rated force Fx (c) Applied rated force Fz



(d) Applied rated torque Tz

Fig. 7 Experimental setup for the characteristic test of the three-axis force/torque sensor

실험에 의한 정격출력은 각 센서의 정격하중을 가 한 후 측정한 결과이다. 유한요소해석 결과를 기준 으로 유한요소해석 결과의 오차는 최대 -2.94%이었

Sonsor	Rated outp	$E_{max}(0/)$	
Selisor	FEM	Exp.	EIIOI(70)
Fx	0.5156	0.5046	-2.13
Tz	0.5116	0.5011	-2.05
Fz	0.5136	0.4985	-2.94

Table 4 Interference error of each sensor of three-axis force/torque sensor

Sancor	Interference error(%)		
Sensor	Fx=300 N	Tz=15 N m	Fz=300 N
Fx	-	0.53	0.86
Tz	1.45	-	0.71
Fz	0.87	0.25	-

 Table 5
 Repeatability error and non-linearity error of the three-axis force/torque sensor

Sensor	Repeatability error(%)	Non-Linearity error(%)
Fx	0.02	0.02
Tz	0.03	0.02
Fz	0.03	0.02

다. 오차는 스트레인게이지의 부착오차, 감지부의 가공오차, 유한 요소 소프트웨어의 고유오차 등으 로 생각된다. Table 4는 3축 힘/토크센서의 각 센서 의 상호간섭오차를 나타내고 있다. 3축 힘/토크센 서의 최대 상호간섭 오차는 1.45%이다. 정격토크 Tz=15 N m가 가해졌을 때 Fx 힘센서의 상호간섭오 차가 0.53%인 것은 0.2 m 암의 끝에 Fx=75 N을 가 했을 때 Fx 힘센서에 0.1316 mV/V가 출력되었고, Fx=75 N을 가했을 때 Fx 힘센서의 정격출력 (0.5156 mV/V)으로부터 비례적으로 출력값을 계산 하면 0.1289 mV/V이었으며, Fx 힘센서의 편차 0.0027 mV/V를 Fx 힘센서의 정격출력으로 나누어 계산하였다.

Table 5는 3축 힘/토크센서의 각 센서의 재현도 오차와 비직선성오차를 나타낸 것이고, 그것들은 각각 0.03%과 0.02% 이내이었다. 제작한 3축 힘/토 크센서의 특성실험 결과 상호간섭오차, 재현성오 차, 비직선설오차가 이미 판매하고 있는 다축 힘 센서¹⁴의 그것과 비슷한 수준이었다.

3축 힘/토크센서는 별도의 측정장치와 연결 하 여 교정을 해야 실제로 재활로봇에서 발목에 가해



- Fig. 8 Experimental setup for the calibration of the three-axis force/torque sensor
- Table 6
 Repeatability error and non-linearity error of the three-axis force/torque sensor

Samaan	Repeatability	Non-Linearity
Sensor	error(%)	error(%)
Fx	0.04	0.03
Fz	0.04	0.03
Tz	0.03	0.03

지는 힘을 측정할 수 있다. 본 연구에서는 3축 힘/ 토크센서를 측정장치에 연결한 후 Fig. 8에서 나타 낸 갓과 같은 실험장치를 구성하여 교정을 실시하 였다. Fx 힘센서의 교정은 다축 힘센서 교정기¹⁵로 정격출력인 300 N을 가하고 출력값이 300 N이 출 력되도록 증폭률을 조절 하였고, 0 N에서 300 N까 지 30 N씩 증가하면서 힘을 가하고 측정기로 출력 값을 측정하였다. 이와 같은 과정을 3번 반복하여 실험을 실시하였고, Fz 힘센서와 Tz 토크센서도 Fx 힘센서와 같은 과정으로 교정을 실시하였다. Table 6은 교정결과로부터 계산한 3축 힘/토크센서의 각 센서의 재현도오차와 비직선성오차를 나타내고 있 다. 최대 재현도오차는 0.04% 이내이었고, 최대 비 직선성오차는 0.03% 이내이었다.

4. 결론

본 논문에서는 2단평행평판보와 단일평행 평판 보를 이용하여 발목재활로봇의 발목힘측정용 3축 힘/토크센서를 설계하였다. Fx 힘센서와 Tz 토크센 서의 감지부를 하나의 2단평행평판보를 사용함으 로써, 각 센서의 정격하중에 따른 정격 출력을 약 0.5 mV/V로 마추어 설계할 수 있었다. 제작한 3축 힘/토크센서의 최대 상호간섭오차가 1.24% 이내이 었고, 최대 재현도오차와 최대 비직선성오차는 0.03% 이내이었다. 그리고 3축 힘/토크센서와 측정 기를 연결한 후 교정한 결과로부터 계산된 최대 재현도오차와 비직선성 오차는 0.04%이었다. 이 결과는 이미 판매하고 있는 다축 힘센서¹⁴의 그것 과 비슷한 수준이므로 재활로봇에 부착하여 발목 에 가해지는 힘을 측정하는데 유용하게 사용될 것 으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부 (미래창조과학부) 의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2015R1A2A2A01002952).

REFERENCES

- Zhou, Z., Zhou, Y., Wang, N., Gao, F., Wei, K., et al., "A Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Integrated Robotic Ankle-Foot System for Post Stroke Rehabilitation," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 73, pp. 111-122, 2015.
- Chisholm, K., Klumper, K., Mullins, A., and Ahmadi, M., "A Task Oriented Haptic Gait Rehabilitation Robot," Mechatronics, Vol. 24, No. 8, pp. 1083-1091, 2014.
- Jamwal, P. K., Xie, S. Q., Hussain, S., and Parsons, J. G., "An Adaptive Wearable Parallel Robot for the Treatment of Ankle Injuries," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 19, No. 1, pp. 64-75, 2014.
- Saglia, J. A., Tsagarakis, N. G., Dai, J. S., and Caldwell, D. G., "Control Strategies for Patient-Assisted Training Using the Ankle Rehabilitation Robot (ARBOT)," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 18, No. 6, pp. 1799-1808, 2013.
- Wu, B. and Cai, P., "Decoupling Analysis of a Sliding Structure Six-Axis Force/Torque Sensor," Measurement Science Review, Vol. 13, No. 4, pp. 187-193, 2013.
- Nagai, K., Ito, Y., Yazaki, M., Higuchi, K., and Abe, S., "Development of a Small Six-Component Force/Torque Sensor Based on the Double-Cross Structure," Journal-Robotics Society of Japan, Vol. 22, No. 3, pp. 81-89, 2004.

- Song, A., Wu, J., Qin, G., and Huang, W., "A Novel Self-Decoupled Four Degree-of-Freedom Wrist Force/Torque Sensor," Measurement, Vol. 40, No. 9, pp. 883-891, 2007.
- Kim, H.-M., Yoon, J., and Kim, G.-S., "Development of a Six-Axis Force/Moment Sensor for a Spherical-Type Finger Force Measuring System," IET Science, Measurement & Technology, Vol. 6, No. 2, pp. 96-104, 2012.
- Kim, G., "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.
- Park, J.-J. and Kim, G.-S., "Development of the 6-Axis Force/Moment Sensor for an Intelligent Robot's Gripper," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 118, No. 1, pp. 127-134, 2005.
- Liu, S. A. and Tzo, H. L., "A Novel Six-Component Force Sensor of Good Measurement Isotropy and Sensitivities," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 100, No. 2, pp. 223-230, 2002.
- Kim, G, "Development of 6-Axis Force/Moment Sensor for a Humanoid Robot's Foot," IET Science, Measurement & Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 122-133, 2008.
- Lee, K. and Kim, G., "Design of Structure of Four-Axis Force/Torque Sensor with Parallel Step Plate Beams," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 20, No. 11, pp. 1147-1152, 2014.
- ATI Industrial Automation, "Multi-Axis Forcre/ Torque Sensor," 2014.
- Kim, G-S. and Yoon, J.-W., "Development of Calibration System for Multi-Axis Force/Moment Sensor and Its Uncertainty Evaluation," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 24, No. 10, pp. 91-98, 2007.