

힘센서를 이용한 후크형 손가락 힘 측정 장치 개발

Development of a Hook-type Finger Force Measuring System with Force Sensors

김 갑 순*
(Gab-Soon Kim^{1,*})

¹Department of Control & Instrumentation Engineering, Gyeongsang National University

Abstract: This paper presents a hook-type finger force measuring system with force sensors. The system is composed of a body, two three-axis force sensors, a hook, and so on. The two three-axis force sensors system was specially designed using FEM(Finite Element Method) and fabricated using strain-gages. The sensors measure the finger forces of both normal people and handicapped people in the system, and the forces are combined. The developed hook-type finger force measuring system can measure the pulling finger force of both normal and handicapped people. The pulling force tests of men and women were performed using the developed the system. It is thought that the developed system can be used to measure the pulling force of fingers.

Keywords: finger force, three-axis force sensor, interference error, rated output, finger rehabilitation, rehabilitating instrument, hook prehension

I. 서론

후천적으로 사고 등에 의해 손가락 환자와 같이 손가락이 마비되어 정상적으로 움직이지 못하는 사람이 급속히 증가하는 추세이다. 이들의 손가락들은 재활훈련을 통해 일부는 회복되고 재활정도를 파악하기 위한 방법중의 하나가 후크 잡아 당기기이다. 현재 병원에서 후크로 사용되는 것은 단지 플라스틱으로 만들어진 물체이고, 잡는 힘을 측정할 수 있는 장치가 내장되어 있지 않다. 그러므로 의사는 손가락으로 후크를 잡아 당길 수 있는지를 눈으로 확인하여 재활정도를 대략적으로 판단하고, 즉 후크를 어느 정도 힘으로 잡아 당기는지를 확인할 수 없어 정확하게 판단할 수 없다. 현재, 손가락 재활정도를 측정하는 장치는 논문[1,2]에서 나타난 것과 같이 후크가 아닌 두 손가락으로 눌러서 잡을 수 있는 것이 있고 이 속에 내장된 센서는 일방향 힘센서이다. 후크형 손가락 힘 측정 장치는 개발되지 않았다.

후크 잡아 당기기를 통해 환자의 손가락 재활정도를 판단하기 위해서는 4개 손가락(검지, 중지, 약지, 소지)이 잡아당기는 방향을 정확하게 알 수 없기 때문에 x, y, z의 3방향의 힘을 모두 측정해야 하고, 전체 힘 F는 x방향의 힘 F_x , y방향의 힘 F_y , z방향의 힘 F_z 등의 합력으로 계산해야 한다. 이와 같이 후크 잡아 당기기를 통해 손가락의 재활정도를 판단하기 위한 후크 잡아 당기기 힘 측정 장치는 힘 F_x , F_y , F_z 를 동시에 측정할 수 있는 3축 힘센서가 필요하다. 후크가 부착된 몸체에 내장될 수 있는 3축 힘센서는 크기가 작아야 하고, 용량이 잡는 힘을 측정할 수 있을 정도이어야 하며, 매우

가벼워야 한다. 그러나 현재 개발된 3방향의 힘을 측정할 수 있는 센서[6,7,10]는 1개의 가격이 약 수백만원 정도로 매우 비싸고, 크기 등의 모든 조건을 만족시키지 못해 후크 잡아 당기기 힘 측정 장치에 활용하기에 적합하지 않다.

따라서 본 연구에서는 손가락 환자가 어느 정도의 힘으로 후크를 잡아 당길 수 있는지를 측정할 수 있도록 3축 힘센서를 2개를 내장하여 후크형 손가락 힘 측정 장치를 개발하였다. 3축 힘센서를 새롭게 모델링하였고, 유한요소 해석(FEM: Finite Element Method)을 이용하여 3축 힘센서 2개를 설계 및 제작하였다. 또한 후크를 잡아 당기는 손가락 힘 측정 특성 실험을 실시하였다.

II. 후크 잡아당기기의 손가락 힘 측정 원리

그림 1은 후크 잡아 당기기를 위한 힘 측정 원리를 나타내고 있다. 그림 1에 나타난 것과 같이 4개의 손가락(검지, 중지, 약지, 소지)이 후크에 연결된 3축 힘센서 1과 2에 힘을 가하면, 센서 1에 힘 F_{x1} , F_{y1} , F_{z1} , 센서 2에 힘 F_{x2} , F_{y2} , F_{z2} 가 각각 감지된다. 손가락 힘(합력) F는 측정된 힘 F_{x1} , F_{y1} , F_{z1} 과 F_{x2} , F_{y2} , F_{z2} 를 식 (1)에 대입하여 계산할 수 있다.

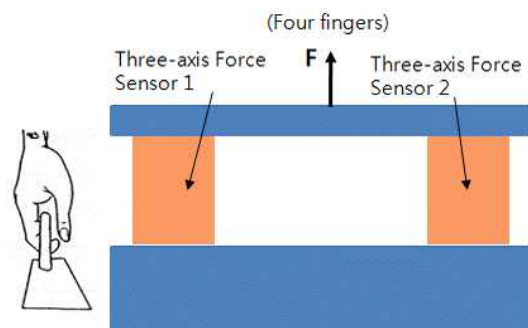


그림 1. 후크 잡아당기기 손가락 힘 측정 원리.
Fig. 1. Finger force measuring principle for pulling a hook.

* Corresponding Author
Manuscript received October 30, 2013 / revised March 31, 2014 / accepted April 1, 2014
김갑순: 경상대학교 제어계측공학과, ERI(gskim@gsnu.ac.kr)
※ 이 논문은 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2009-0087281), 2012년도(2012R1A1A2A10041417).

$$F = \sqrt{(Fx1)^2 + (Fy1)^2 + (Fz1)^2} + \sqrt{(Fx2)^2 + (Fy2)^2 + (Fz2)^2} \quad (1)$$

III. 3축 힘센서 설계 및 구조

1. 3축 힘센서의 구조

그림 2는 3축 힘센서의 구조를 나타내고 있고, 이것은 힘 Fx, Fy, Fz 를 동시에 감지할 수 있으며, 3개의 센서 감지부를 한 몸체에 포함되도록 설계하였다. 3축센서의 감지부는 3개의 평행평판보 (PPB1~3)이 수직과 수평으로 연결되었으며, PPB1 (parallel plate beam)은 힘 Fx 센서의 감지부, PPB2는 힘 Fy 센서의 감지부, PPB3는 힘 Fz 센서의 감지부이다. 각 평판보 (plate beam)의 두께 t1, t2, t3, 길이 l1, l2, l3, 폭 b1, b2, b3는 센서의 설계변수로 사용된다.

2. 유한요소법을 이용한 센서설계 및 분석

그림 3축 힘센서의 설계변수는 몸체의 크기, 각 센서의 정격 축력, 정격하중, 평행평판보 PPB1~3을 구성하는 평판보들의 크기인 폭 b1, b2, b3, 두께 t1, t2, t3, 길이 l1, l2, l3이다. 각 센서는 4개의 스트레인이게이지로 휘스톤브리지를 구성한다. 정격 변형률은 정격 하중이 가해질 때 휘스톤브리지에서 출력되는 총 변형률을 의미하고 이것의 값은 다음과 같은 식으로부터 계산된다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{C1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{C2} \quad (2)$$

여기서 ε 은 휘스톤브리지의 총 변형률, ε_{T1} 은 인장 스트레인이게이지 T_1 의 변형률, ε_{C1} 은 압축 스트레인이게이지 C_1 의 변형률, ε_{T2} 은 인장 스트레인이게이지 T_2 의 변형률, ε_{C2} 은 압축 스트레인이게이지 C_2 의 변형률이다.

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

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{4} K \varepsilon \quad (3)$$

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

3축 힘센서를 설계하기 위한 설계변수의 정격출력은 약 0.5mV/V, 정격하중은 힘 Fx, Fy, Fz 센서가 각각 100N, 센서의

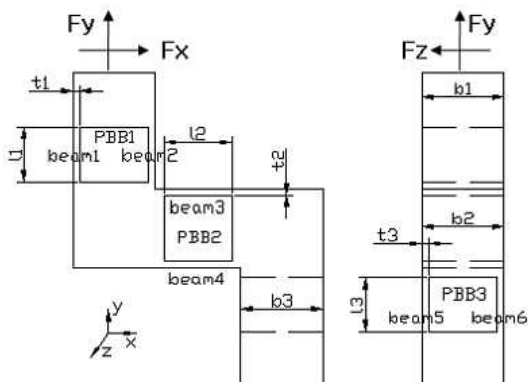


그림 2. 3축 힘센서의 구조.
Fig. 2. Structure of three-axis force sensor.

크기가 56×40×14mm, 스트레인이게이지의 부착위치가 길이 방향으로는 1.5mm, 폭 방향으로는 1/2, 정격변형률은 약 1000 um/m(각 스트레인이게이지의 부착위치 에서의 변형률 : 약 250um/m)로 결정하였다.

3축 힘센서의 각 감지부의 크기를 결정하기 위해 ANSYS 소프트웨어를 이용하였다. 유한요소해석을 위해 소프트웨어에 입력한 재료상수는 제작할 센서의 재질이 알루미늄 이므로 종탄성계수가 70GPa, 프와송의비가 0.3이며, 8절점 6면체 블록을 선택하였다. 격자(mesh) 크기는 해석하고자 하는 평행 평판보를 길이방향으로는 0.5mm, 두께방향으로는 4등분, 폭 방향으로는 8등분하였다.

그림 3(a)는 3축 힘센서를 유한요소법으로 해석하기 위해 격자를 나눈 모습을 나타내고 있고, 그림 3(b)는 힘 Fx, (c)는 힘 Fy, (d)는 힘 Fz가 가해졌을 때의 센서 감지부의 변형된 모습을 나타내고 있으며, 이 변형된 형태는 센서의 구조를 모델링할 때 예상했던 것과 같이 나타났다.

그림 4(a)는 정격힘 Fx 가 가해졌을 때 각 센서의 감지부인 beam1과 2에 발생하는 변형률분포를 나타내고 있다. 보 1의 윗면과 아랫면의 변형률의 크기는 같고 부호는 반대이며, 변형률이 0인 지점은 6.0mm 부근이다. (b)는 정격힘 Fy 가 가해졌을 때 각 센서의 감지부인 beam3과 4에 발생하는 변형률

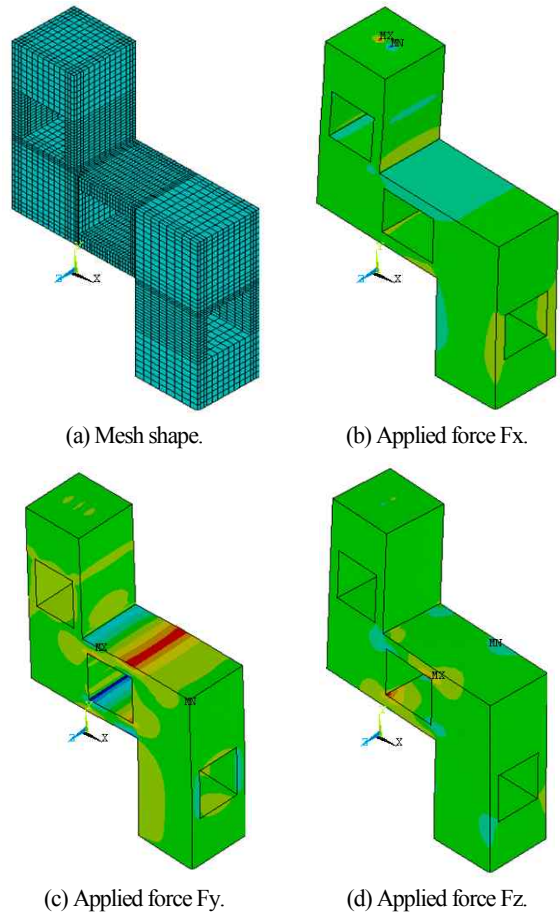
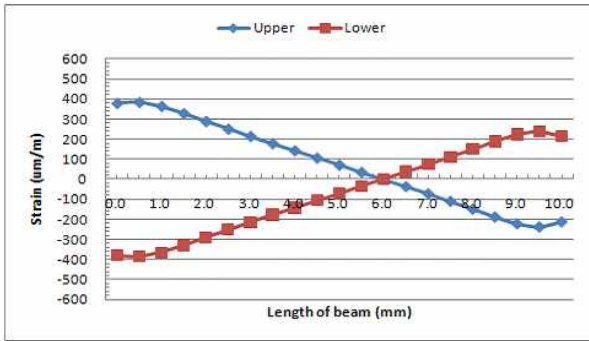
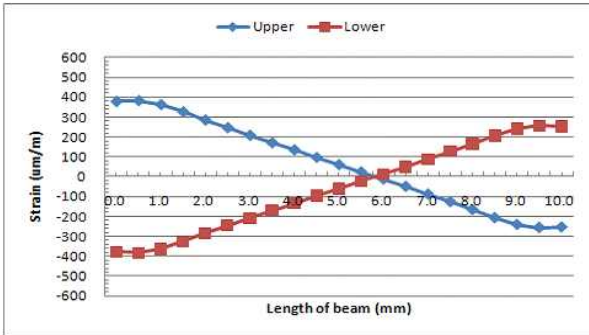


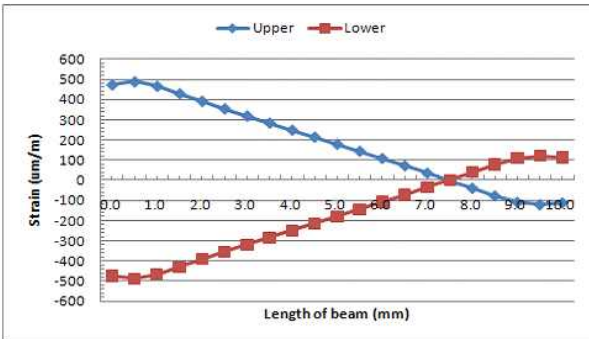
그림 3. 각 센서의 정격힘이 가해졌을 때의 감지부의 변형된 모습.
Fig. 3. Deformed shape of the sensing element of each sensor under each rated force.



(a) Two beams under rated force F_x .



(b) Two beams under rated force F_y .



(c) Two beams under rated force F_z .

그림 4. 각 센서의 정격힘을 가했을 때의 변형률 분포.
Fig. 4. Strain distribution on each beam under each rated force.

분포를 나타내고 있고, 변형률이 0인 지점은 5.8mm 부근이다. (c)는 정격힘 F_z 가 가해졌을 때 각 센서의 감지부인 beam5와 6에 발생하는 변형률분포를 나타내고 있고, 변형률이 0인 지점은 7.5mm 부근이다. 모든 보의 양끝에서 변형률이 감소한 것은 유한요소해석의 끝 효과 때문이다.

유한요소법을 이용하여 3축 힘센서를 설계한 결과, 센서의 크기는 평판보의 길이 l_1, l_2, l_3 는 각각 10mm이었고, 폭 b_1, b_2, b_3 는 각각 14mm 이었으며, 두께 t_1, t_2, t_3 는 각각 2.0mm 이었다. 유한요소해석 결과를 토대로 3축 힘센서의 각 센서의 스트레인지지 부착위치를 결정하였으며, 그것을 그림 5에 나타내고 있다.

스트레인지지의 부착위치는 F_x 센서가 S1~S4, F_y 센서가 S5~S8, F_z 센서가 S9~S12이다. 스트레인지지의 정확한 부착 위치는 길이방향으로는 1.5mm이고, 폭방향으로는 중심선상이다. 이 위치는 각 센서의 정격하중에서 상호간섭오차가 0%이고, 최대의 정격출력이 발생하는 지점으로 결정되었다.

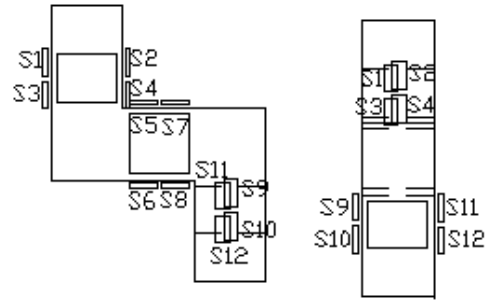


그림 5. 3축 힘센서의 스트레인지지 부착위치.

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

표 1. 3축 힘센서의 각 센서 스트레인지지 부착위치에서 FEM 해석결과 변형률.

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

Sensor	Strain ($\mu m/m$)				
	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

표 1은 유한요소법을 이용하여 3축 힘센서의 각 스트레인지지 부착위치에서의 변형률들과 식 (2)에 의해 계산된 정격 변형률들을 나타내고 있다. 모든 센서의 정격변형률은 설계 변수로 결정한 정격변형률 1000 $\mu m/m$ 이상이었고, 최대오차는 6.6%이었다. 이와 같은 오차는 설계시 가공의 가능성을 고려하여 감지부의 두께를 0.1mm 단위로 나타내었기 때문이다. 단위를 0.01mm 단위로 설계하면 매우 근접한 변형률을 얻을 수 있으나 모델링한 3축 힘센서 구조의 복잡성 때문에 0.01mm 단위로 가공할 수 없었다.

3. 3축 힘센서 제작 및 특성실험

3축 힘센서 1과 2는 그림 5에 나타난 각 센서의 게이지 부착위치에 스트레인지지 (N2A-13-S1452-350, Micro-Measurement Company사 제작, 게이지 상수 2.03, 크기 3x5.2mm)를 순간접착제(M-200)를 이용하여 부착하고 휘스톤브리지[6-8]를 구성하여 제작하였으며, 그림 6은 제작된 3축 힘센서 1과 2의 사진을 보이고 있다.



그림 6. 제작된 3축 힘센서의 1과 2.

Fig. 6. Manufactured three-axis force sensor 1 and 2.

제작된 3축 힘센서의 특성실험은 다축 힘/모멘트센서 교정기[9]를 이용하였고, 이교정기는 힘 F_x, F_y, F_z 를 모두 2000N, 모멘트 M_x, M_y, M_z 를 모두 500Nm를 연속적으로 발생시킬 수 있으며, 1×10^{-4} 의 상대확장 불확도를 가지고 있다. 3축 힘센서의 특성실험은 정격하중 (힘)($F_x=F_y=F_z=100N$)을 10등분한 힘, 즉 10N부터 100N까지 10N 단계로 증가순으로 가하고 총 3회 실시하였다. 그리고 이 결과를 이용하여 정격출력값, 재현도오차, 비직선성오차를 계산하였다.

표 2는 2개의 3축 힘센서의 유한요소해석과 실험결과의 정격출력 및 오차를 나타내고 있다. 유한요소 해석결과의 정격출력은 표 1의 정격변형률 ϵ 을 식 (3)에 적용하여 계산된 것이고, 실험에 의한 정격출력은 3번의 특성실험한 결과의 평균이다. 유한요소 결과를 기준으로 실험값과의 오차는 최대 8.96%이었다. 이들 오차는 스트레인게이지의 부착오차, 감지부의 가공오차, 유한요소 소프트웨어의 고유오차 등으로 생각된다. 표 3은 3축 힘센서의 각 센서의 상호간섭오차를 나타내고 있다. 3축 힘센서의 최대 상호간섭오차는 0.24%이다.

표 4는 3축 힘센서 1과 2의 각 센서의 재현도오차와 비직선성오차를 나타내고 있다. 재현도오차는 같은 힘에서 3번 측정된 최대값과 최소값의 차를 정격출력으로 나눈 후 100을 곱하여 계산하였고, 비직선성오차는 3번 측정된 값의 평균값과 가해진 각 힘에서의 비례힘의 차를 정격출력으로 나눈 후 100을 곱하여 계산하였다. 3축 힘센서 1의 최대 재현도오차와

비직선성오차는 각각 0.05% 이하이었고, 3축 힘센서 2의 그것들은 각각 0.04% 이하이었다. 이 결과는 개발된 센서의 오차 [6-8,10]와 비슷하다.

IV. 후크형 손가락 힘 측정 장치 개발

1. 후크형 손가락 힘 측정 장치 제작 및 교정

제작된 3축 힘센서 1과 2가 힘과 모멘트 측정에 사용되기 위해서는 교정되어야 한다. 고속힘 측정 장치는 마이크로 프로세서(DSP: digital signal processor), 증폭기부 (amplifier), 통신부, 전원부, 스위치부 등으로 구성되어 있다. DSP는 내장된 A/D 컨버터를 이용하여 측정된 힘과 모멘트값을 LCD에 표시함과 동시에 컴퓨터로 보내고, 증폭부는 2개의 3축 힘센서 1과 2로부터 출력되는 값을 증폭하는 역할을 하며, 통신부는 제어프로그램을 롬에 다운로드 혹은 컴퓨터와 인터페이스하는 역할을 한다.

3축 힘센서 1과 2는 고속힘 측정 장치와 연결되었고, 다축 힘/모멘트센서 교정기[9]를 이용하여 교정하였다. 교정은 다음과 같이 진행되었다. 첫째, 6개 각 센서와 연결된 고속측정기의 모든 채널의 초기값을 1500mV로 맞춘다. 초기값을 1500mV로 조절한 것은 사용한 DSP에 내장된 AD컨버터가 측정범위가 0~3000mV이고, 센서가 양의 방향과 음의 방향으로 값을 나타내기 때문이다. 둘째, 3축 힘센서에 정격하중인 $F_x=F_y=F_z=100N$ 을 각각 가한 후, 고속측정기에 2500mV이 출력되도록 조절하였다. 즉, 힘센서들은 10mV=1N이 된다.

표 2. 2개의 3축 힘센서의 각 센서 FEM 해석과 특성실험 결과.

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

Sensor	Rated output(mV/V)					
	Sensor 1			Sensor 2		
	FEM	Exp.	Error (%)	FEM	Exp.	Error (%)
F_x	0.52679	0.57399	8.96	0.52679	0.56218	6.72
F_y	0.54100	0.58638	8.39	0.54100	0.56461	4.37
F_z	0.51562	0.51291	-0.53	0.51562	0.52519	1.86

표 3. 2개의 3축 힘센서의 각 센서 상호간섭오차.

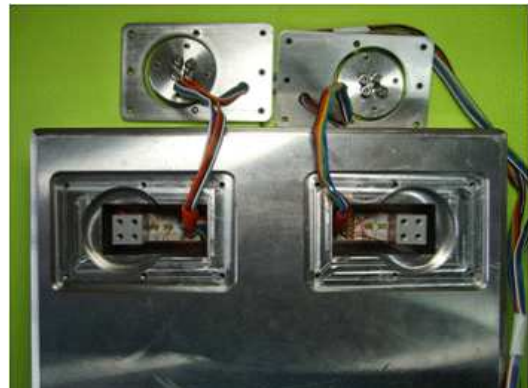
Table 3. Interference error of each sensor of two three-axis force sensors.

Sensor	Rated output(mV/V)					
	Sensor 1			Sensor 2		
	F_x	F_y	F_z	F_x	F_y	F_z
$F_x=100N$	-	0.24	0.17	-	0.16	0.15
$F_y=100N$	0.13	-	0.21	0.10	-	0.14
$F_z=100N$	0.18	0.19	-	0.19	0.11	-

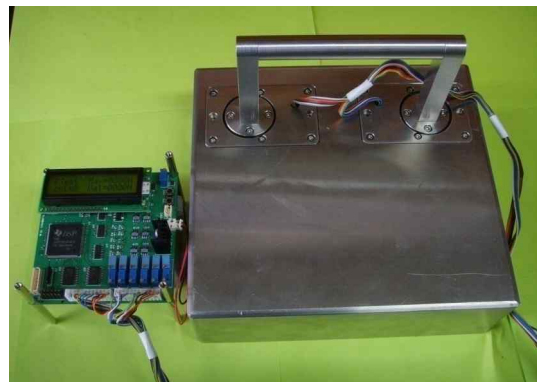
표 4. 2개의 3축 힘센서의 재현도오차와 비직선성오차.

Table 4. Repeatability error and non-linearity error of two three-axis force sensors.

R.F.(N)	Fx sensor		Fy sensor		Fz sensor	
	R.E. (%)	N.L.E. (%)	R.E. (%)	N.L.E. (%)	R.E. (%)	N.L.E. (%)
Sensor1	0.04	0.02	0.05	0.04	0.05	0.05
Sensor2	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04



(a) Shape of fixed two sensors.



(b) Manufactured system

그림 7. 제작된 3축 힘센서를 가진 후크형 손가락 힘 측정 장치. Fig. 7. Photograph of the manufactured hook-type finger force measuring system with three-axis force sensor.

그림 7은 제작된 후크형 손가락 힘 측정 장치의 사진을 나타내고 있다. 후크형 손가락 힘 측정 장치는 몸체, 3축 힘센서 1과 2, 후크, 센서 덮개 등으로 구성되어 있다. 3축 힘센서 1과 2의 한쪽 블록이 몸체 내부에 고정되었고, 다른 쪽 블록은 “C”자 형태의 후크 양끝에 각각 고정되었다. 몸체의 무게는 약 20kg, 크기는 220mm×220mm ×71mm이고, 후크의 크기는 폭이 120mm, 높이가 77mm이다. 이것은 후크를 앞과 위쪽으로 잡아 당기는 것을 고려한 것이다.

2. 후크 잡아당기기 특성실험

후크 잡아 당기기는 손가락 환자의 회복정도를 판단하기 위한 기본자료로 활용하기 위해 정상인 남녀를 기준으로 실시한다. 실제 병원에서 손가락의 재활치료를 받고 있는 사람의 재활정도를 판단하기 위한 것은 첫째, 엄지손가락을 뺀 네 손가락으로 후크를 잡아 당기는 힘의 합력으로 판단하고, 둘째, 각각의 손가락으로 후크를 잡아 당기는 힘으로 판단한다. 이를 위해서는 정상인을 대상으로 실시한 후크 잡아 당기기 손가락 힘 측정 결과가 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 우선 20대의 정상인을 남자와 여자로 구분하여 특성실험을 실시한다.

특성실험 방법은 그림 8에서 나타난 것과 같이, (a)엄지손가락을 뺀 네 손가락을 사용한 경우, (b)검지만 사용한 경우, (c)중지만 사용한 경우, (d)약지만 사용한 경우, (e)소지만 사용한 경우로 구분하였으며, (f)는 실험장치를 나타내고 있다. 실험장치는 후크 잡아당기기 손가락힘 측정 장치와 컴퓨터로 구성되어 있고, 손가락으로 후크를 잡아당기면 2개의 3축 힘센서로 힘이 전달되고 그것을 측정장치로 측정하여 LCD로 표시함과 동시에 컴퓨터로 보낸다. 측정값은 3번을 측정한 것을 평균한 것이다.

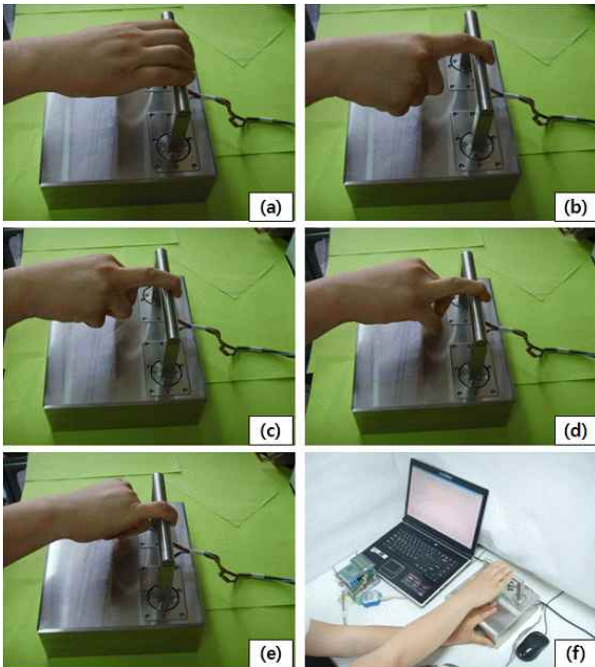
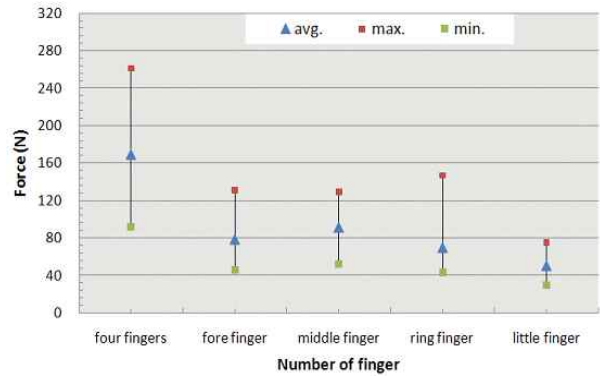
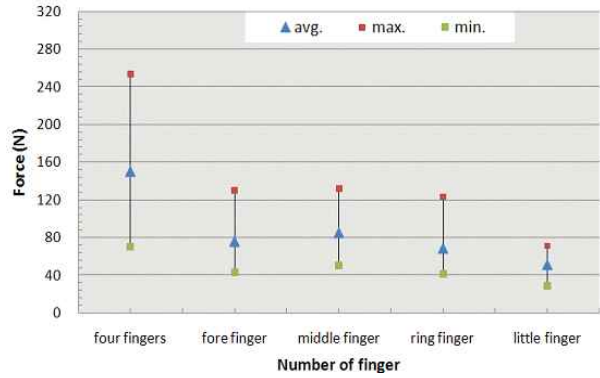


그림 8. 후크형 손가락 힘 측정 장치의 특성실험.
 Fig. 8. Characteristic test of hook pulling. (a) all finger, (b) fore-finger, (c) middle finger, (d) ring finger, (e) little finger, (f) experimental equipment.



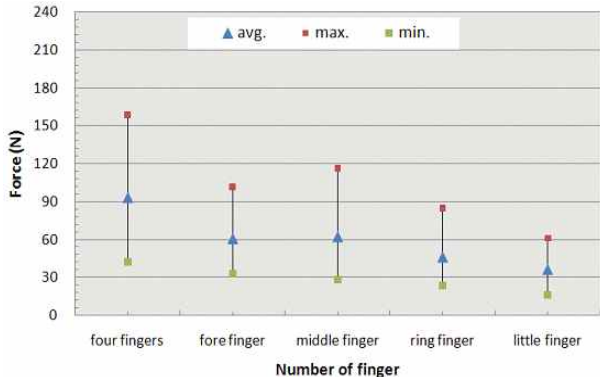
(a) Fingers of right hand.



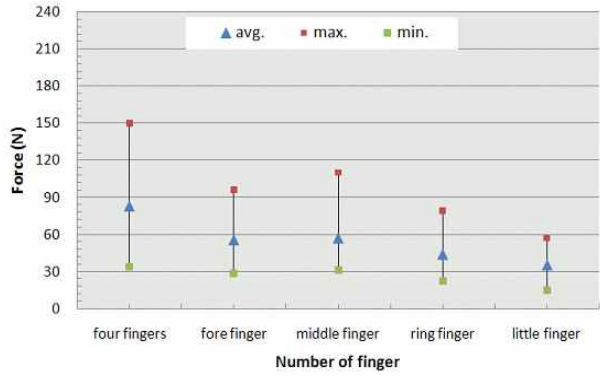
(b) Fingers of left hand.

그림 9. 후크형 손가락 힘 측정 장치의 남자 특성실험.

Fig. 9. Characteristic test of hook pulling of men.



(a) Fingers of right hand.



(b) Fingers of left hand.

그림 10. 후크형 손가락 힘 측정 장치의 여자 특성실험.

Fig. 10. Characteristic test of hook pulling of women.

그림 9는 성인남자 30명의 오른손과 왼손의 후크 잡아 당기기 손가락 힘 측정 결과를 나타내고 있다. 그림 8의 실험 방법 (a) 네 손가락을 이용한 경우에는 오른손과 왼손의 평균값은 각각 169N과 150N, 최대값은 261N과 254N, 최소값은 92N과 70N이고, 검지, 중지, 약지, 소지의 그것들은 그래프에서 나타낸 것과 같다.

그림 10은 성인여자 30명의 오른손과 왼손의 후크 잡아 당기기 손가락 힘 측정 결과를 나타내고 있다. 네 손가락을 이용한 경우에는 오른손과 왼손의 평균값은 각각 93N과 83N, 최대값은 159N과 150N, 최소값은 42N과 34N이고, 검지, 중지, 약지, 소지의 그것들은 그래프에서 나타낸 것과 같다. 네 손가락의 힘은 남자가 여자보다 오른손과 왼손이 각각 76N과 67N크게 나타났으며, 검지, 중지, 약지, 소지는 각각 19N과 20 N, 30 N과 28 N, 24 N과 25 N, 15 N과 16 N 크게 나타났다. 남자와 여자의 오른손과 왼손 모두 평균값이 중지가 가장 크고, 소지가 가장 작은 것으로 나타났다. 그림 9와 10을 환자에 적용할 경우에는 환자의 손가락 힘을 측정할 값이 최소값과 최대값의 범위 내에 있으면 정상에 가깝게 재할되었다고 판단할 수 있을 것으로 생각된다.

V. 결론

본 논문에서는 정상인과 손가락 환자 등의 손가락 잡아 당기기 힘 측정을 위한 후크형 손가락 힘 측정 장치를 개발하였다. 제작한 3축 힘센서의 상호간섭오차는 0.24%이었고, 이것은 이미 판매하고 있는 3축 힘센서[10]의 그것과 비슷한 수준이므로 후크 잡아당기기 힘 측정 장치에 활용하기 적당하였다. 후크 잡아 당기기 특성실험 결과, 본 논문에서 개발한 후크형 손가락 힘 측정 장치는 정상인의 손가락 후크 잡아당기기 힘 측정을 정확하게 수행할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 개발한 후크형 손가락 힘 측정 장치는 재활중인 손가락 환자의 후크 잡아 당기기 손가락 힘을 측정하여 재활정도를 판단하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 추후 연구는 개발한 후크형 손가락 힘 측정 장치를 환자에게 적용시키는 것이다.

REFERENCES

- [1] J. W. Lee and K. Rim, "Measurement of finger joint angles and maximum finger forces during cylinder grip activity," *Journal of Biomedical Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 152-162, 1991.
- [2] S. Olandersson, H. Lundqvist, M. Bengtsson, M. Lundahl, A. J. Baerveldt, and M. Hilliges, "Finger-force measurement-device for hand rehabilitation," *Proc. of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 135-138, 2005.
- [3] N. K. Fowler and A. C. Nicol, "A force transducer to measure individual finger loads during activities of daily living," *Journal of Biomechanics*, vol. 32, no. 7, pp. 721-725, 1999.
- [4] H. M. Kim, J. W. Yoon, H. S. Shin, and G. S. Kim, "Development of cylindrical-type finger force measuring system using force sensors and its characteristics evaluation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 27, pp. 513-522, 2012.
- [5] G. S. Kim, H. M. Kim, J. W. Yoon, and H. S. Shin, "Development of cylindrical type finger-force measuring systems for measuring grasping finger-force of human," *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1734-1739, Dec. 14-18, 2010, Tianjin, China.
- [6] G. S. Kim and J. J. Park, "Development of the 6-axis force/moment sensor for an intelligent robot's gripper," *Sensors and Actuators*, vol. 118, pp. 127-134, 2005.
- [7] 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.
- [8] G. S. Kim and J. W. Yoon, "Development of 6-axis force/moment sensor for robot's intelligent foot," *KSPE*, vol. 24, no. 7, pp. 90-97, 2007.
- [9] 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.
- [10] ATI Industrial Automation, "Multi-axis force/torque sensor," ATI Industrial Automation, pp. 4-45, 2005.

김갑순

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제16권 제9호 참조.