원통형 4손가락 힘측정시스템 개발

김 갑 순[†]

Development of four-finger force measuring system of a cylindrical type

Gab-Soon Kim[†]

Abstract

Stroke patients, etc. can't use their hands because of the paralysis of their fingers, and their fingers could be recovered by rehabilitating training. In order to judge the rehabilitating extent of their fingers, the patients should grasp a cylindrical object in hospital. At present, the used object in hospital is only a cylindrical object, and can't measure the force of fingers. Therefore, doctors judge the rehabilitating extent by touching and watching at their fingers. So, the four-finger force measuring system which can measure the force of their fingers should be developed. In this paper, four-finger force measuring system with four force sensors which can measure the grasping force is developed. The force sensors are designed and fabricated, and the force measuring device is designed and manufactured by using DSP(digital signal processing). Also, the grasping force test of men is performed by using the developed four-finger force measuring system. It was confirmed that the finger average force of right hand is about 214.6 N and that of left hand is about 212.8 N.

Key Words : force sensor, finger force, finger rehabilitation, rehabilitating instrument, cylindrical object prehension

1. 서 론

전 세계적으로 뇌졸중환자 등 후천적인 사고로 손가락을 사용하지 못하는 환자가 급속히 증가하고 있는 추세이다. 이들의 손가락들은 재활훈련을 통해 회복될 수 있고, 의사가 재활정도를 파악하기 위한 하나의 방법으로 원통물체 잡기를 실시한다. 현재 병원에서 원통물체로 사용되는 것은 플라스틱 재질로 만들어진 것이고, 손가락 잡는 힘을 측정할 수 있는 장치가 내장되어 있지 않다. 따라서 의사는 손가락 환자가 원통물체를 잡을 수 있는지 눈으로 확인하여 재활정도를 대략적으로 판단하며, 원통물체를 각 손가락이 어느 정도의 힘으로 잡는지 확인할 수 없어 재활정도를 정확하게 파악할 수 없는 실정이다.

다섯 손가락으로 원통물체를 잡으면 손가락 전체의

잡는 힘을 측정하게 되어 손가락 각각의 힘을 측정할 수 없게 되고, 이로 인해 각 손가락의 재활정도를 판단할 수 없게 된다. 따라서 손가락 환자의 재활정도를 각 손가락 별로 정확하게 판단하기 위해서는 손가락 힘을 각각 측정할 필요가 있다. 그러나 현재, 손가락 재활정도를 측정하는 장치는 두 손가락으로 눌러서 잡을 수 있는 것이 발표되었을 뿐이다.^[1,2] 원통물체 잡기 손가락 힘측정을 위한 장치는 각 손가락의 힘을 측정할 수 있는 힘센서가 내장되어야 하고, 4개의 손가락 센서로부터 출력되는 측정값을 빠른 속도로 처리할 수 있는 고속 측정장치가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 환자의 각 손가락이 어느 정도의 힘으로 원통물체를 잡을 수 있는 지를 측정할 수 있는 원통형 4손가락 힘측정장치를 개발하였다. 힘센서를 원통물체에 내장될 수 있도록 새롭게 모델링하였고, 유한요소법(FEM analysis)을 이용하여 힘센서와 원통물체를 잡는 힘을 정확하게 측정할 수 있는 고속 측정장치를 설계 및 제작하였다. 또한 정상인이 원통물체를 잡을 때 각 손가락의 잡는 힘을 측정하는 실험을 실시하였다.

경상대학교 제어계측공학과(Gyeongsang National University, Department of Control & Instrumentation Engineering, ERI)

[†]Corresponding author : gskim@gsnu.ac.kr

(Received : June 09, 2010, Revised : July 12, August 3, 2010)

Accepted : August 26, 2010)

Fig. 1. Four-finger force measuring principle in a cylindrical type.

Fig. 2. Structure of force sensor.

2. 원통물체를 잡는 개별 손가락 힘측정 원리

Fig. 1은 원통물체를 잡는 4개의 손가락 힘측정원리를 나타내고 있다. 각각의 손가락이 원통물체 안에 위치한 4개의 힘센서에 힘을 가하면 센서는 검지 힘(F2), 중지 힘(F3), 약지 힘(F4), 소지 힘(F5)이 감지된다.

3. 원통형 4손가락 힘측정장치 개발

3.1. 힘센서의 구조

Fig. 2는 손가락으로 누르는 힘을 감지하는 힘센서의 구조이다. 하나의 평행평판보(parallel plate beam)와 두 개의 고정블록으로 구성되어 있으며, 좌측의 고정블록

은 손가락의 누름판에 고정되고 우측의 고정판은 원통물체의 내부에 고정된다. 평행평판보를 구성하는 보의 크기는 두께 t , 길이 l , 폭 b 이고, 이것은 설계변수로 사용된다. 새롭게 센서를 설계하고 제작하는 것은 원하는 크기의 원통물체에 내장하기 위한 형상, 크기, 각 손가락의 힘을 고려한 정격하중 때문이다.

3.2. 유한요소법을 이용한 힘센서의 설계 및 분석

힘센서의 설계변수는 몸체의 크기, 각 센서의 정격출력, 정격하중, 평행평판보를 구성하는 보들의 크기는 폭 b , 두께 t , 길이 l 이다. 힘센서는 4개의 스트레인게이지로 휘스톤브리지를 구성한다. 정격변형률은 정격하중이 가해질 때 휘스톤브리지에서 출력되는 총 변형률을 의미하고 이것의 값은 다음과 같은 식으로부터 계산된다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{C1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{C2} \quad (1)$$

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

정격출력은 식 (2)에 의해 계산될 수 있다.

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

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

힘센서를 설계하기 위한 설계변수의 정격출력은 약 1.0 mV/V, 정격하중은 100 N, 센서의 크기가 각각 32 mm × 18 mm, 스트레인게이지의 부착위치가 빔의 길이 방향으로 1.5 mm, 폭 방향으로 1/2, 스트레인게이지의 부착위치에서의 정격변형률은 약 2000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 로 결정하였다. 힘센서의 감지부의 크기를 결정하기 위해 소프트웨어(ANSYS 5.2, 미국)를 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 4등분, 폭방향으로는 8등분하였다. Fig. 3은 힘센서를 유한요소법으로 해석하기 위해 격자로 나눈 모습을 나타내고 있다. Fig. 4는 정격힘이 가해졌을 때의 센서 감지부의 변형된 모습을 나타내고 있으며, 이것은 센서의 구조를 모델링할 때 예상했던 모습으로 변형되었다.

Fig. 5는 정격힘이 작용하였을 때 평행평판보의 변형

Fig. 3. Mesh shape for FEM analysis.

Fig. 4. Deformed shape under rated force.

Fig. 5. Strain distribution on beam under rated force.

률분포를 나타낸 것이다. 변형률이 0인 지점은 5.6 mm 부근이고, 빔의 끝 부근에서 변형률이 감소한 것은 끝 효과 때문이다. 유한요소법을 이용하여 힘센서의 스트레인게이지 부착위치에서의 변형률은 T1은 580 um/m, C1은 -580 um/m, T2는 422 um/m, C2는 -422 um/m 이었고, 이것들을 식 (1)에 대입하여 계산한 정격변형

Fig. 6. Attachment locations of strain gages on sensing element of force sensor.

Fig. 7. Manufactured force sensor.

률은 2004 um/m이었다. 센서의 정격변형률은 설계변수로 결정한 정격변형률 2000 um/m 과 비교하면, 오차는 0.2 %로 매우 작았다. 유한요소법을 이용하여 힘센서를 설계한 결과, 센서의 크기는 평판보의 길이 1이 10 mm이었고, 두께 t 가 1.5 mm이었다. 유한요소해석 결과를 토대로 힘센서의 스트레인게이지 부착위치를 결정하였으며, 그것을 Fig. 6에 나타내고 있다. 스트레인게이지의 정확한 부착위치는 빔의 길이방향으로는 1.5 mm이고, 폭방향으로는 중심선상이다.

3.3. 힘센서 제작 및 특성실험

힘센서는 Fig. 6에 나타낸 힘센서의 게이지 부착위치에 스트레인게이지(N2A-13-S1452-350, micro-measurement company사 제작, 게이지 상수 2.03, 크기 3 mm×5.2 mm)를 순간접착제(M-200)를 이용하여 부착하고 휘스톤브리지^[3-5]를 구성하여 제작하였다. 총 8개를 제작하였으며, Fig. 7은 제작된 힘센서의 실물사진이다.

제작한 힘센서의 특성실험은 다축 힘/모멘트센서 교정기^[6]를 이용하였고, 이교정기는 힘 F_x , F_y , F_z 를 각각 2000 N, 모멘트 M_x , M_y , M_z 를 모두 500 Nm를 연속적으로 발생시킬 수 있으며, 1×10^{-4} 의 상대확장불확도를 가지고 있다. 힘센서는 정격하중인 100 N을 가하

Table 1. Rated output from FEM analysis and characteristic test of force sensors

Sensor	Rated output(mV/V)		
	FEM	Exp.	Error(%)
F1_R	1.0170	1.0225	0.54
F2_R	1.0170	1.0302	1.30
F3_R	1.0170	1.0291	1.19
F4_R	1.0170	1.0295	1.23
F1_L	1.0170	1.0287	1.15
F2_L	1.0170	1.0096	-0.73
F3_L	1.0170	1.0247	0.76
F4_L	1.0170	1.0307	1.35

Table 2. Repeatability error of force sensor(F4_L)

Force (N)	Measured values(mV/V)				Rep. (%)
	Mea. 1	Mea. 2	Mea. 3	Avg.	
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
10	0.1030	0.1031	0.1031	0.1031	0.06
20	0.2061	0.2060	0.2062	0.2061	0.05
30	0.3092	0.3092	0.3093	0.3092	0.02
40	0.4123	0.4124	0.4123	0.4123	0.02
50	0.5155	0.5154	0.5156	0.5155	0.02
60	0.6184	0.6186	0.6183	0.6184	0.03
70	0.7215	0.7218	0.7214	0.7216	0.03
80	0.8244	0.8245	0.8248	0.8246	0.03
90	0.9279	0.9277	0.9275	0.9277	0.02
100	1.0309	1.0308	1.0305	1.0307	0.02

고 정격출력을 측정하였다. 실험은 총 세 번을 실시하여 평균값을 센서의 정격출력으로 결정하였다. Table 1은 8개의 힘센서의 유한요소해석과 실험결과와의 정격출력 및 오차를 나타내고 있으며, 오른쪽 4개의 힘센서를 각각 F1_R~F4_R로 왼쪽 4개의 힘센서를 각각 F1_L~F4_L로 나타내었다. 유한요소해석결과와의 정격출력은 힘센서의 정격변형률 2004 $\mu\text{m}/\text{m}$ 를 식 (2)에 대입하여 계산된 것이고, 실험에 의한 정격출력은 본 논문에서 특성실험한 결과를 나타내고 있다. 유한요소 해석결과를 기준으로 유한요소 해석결과와의 오차는 최대 1.35%이었다. 이들 오차는 스트레인게이지의 부착오차, 감지부의 가공오차, 유한요소 소프트웨어의 고유오차 등으로 생각된다. 8개 힘센서의 직선성오차와 재현성오차를 계산하기 위해 10 N부터 100 N까지 10 N 간격으로 힘을 가하고 증가순으로 3번 측정하는 실험을 실시하였다. Table 2는 힘센서(F4_L)의 측정값과 재현성오차를 나타낸 것이고, Table 3은 힘센서(F4_L)의 측정값과 비직선성오

Table 3. Non-linearity error of force sensor(F4_L)

Force (N)	Measured values(mV/V)			True-v. (mV/V)	Non-l. (%)
	Mea. 1	Mea. 2	Mea. 3		
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
10	0.1030	0.1031	0.1031	0.1031	0.00
20	0.2061	0.2060	0.2062	0.2061	0.05
30	0.3092	0.3092	0.3093	0.3092	0.03
40	0.4123	0.4124	0.4123	0.4123	0.02
50	0.5155	0.5154	0.5156	0.5154	0.04
60	0.6184	0.6186	0.6183	0.6184	0.03
70	0.7215	0.7218	0.7214	0.7215	0.04
80	0.8244	0.8245	0.8248	0.8246	0.02
90	0.9279	0.9277	0.9275	0.9276	0.03
100	1.0309	1.0308	1.0305	1.0307	0.02

Fig. 8. Block diagram of high-speed measuring device.

차를 나타낸 것이다. 재현성오차는 측정값과 평균값의 가장 큰 차를 평균값으로 나누고, 그것에 100을 곱하여 계산하였다. 그리고 비직선성오차는 측정값과 가해진 각 힘에서의 참값과의 가장 큰 차를 참값으로 나누고, 그것에 100을 곱하여 계산하였다. 8개 힘센서 각각의 직선성오차를 계산한 결과, 직선성오차는 0.05% 이내이었고, 재현성오차는 0.06% 이내이었다.

3.4. 고속측정기 설계 및 제작

Fig. 8은 DSP(digital signal processor)를 이용한 고속측정기의 블록도이고, Fig. 9는 제작된 고속측정기이다. 이것은 DSP, 증폭기부(amplifier), 통신부, 전원부, 스위치부 등으로 구성되었다. DSP는 내장된 A/D 컨버터를 이용하여 측정된 힘과 모멘트값을 LCD에 표시함과 동시에 컴퓨터로 보내고, 증폭부는 4개의 힘센서로부터 출력되는 값을 증폭하는 역할을 한다. 통

Fig. 9. Manufactured high-speed measuring device.

신부는 제어프로그램을 롬에 다운로드 혹은 컴퓨터와 인터페이스하는 역할을 한다. 그리고 전원부는 DSP와 다른 주변장치들에 전압 9 V, 5 V, 3.3 V, 1.8 V를 각각 공급하고, 스위치부는 리셋 혹은 전원을 끄는데 사용된다. 고속측정기의 동작은 4개의 손가락이 각 누름판에 힘을 가하면, 누름판과 연결되어 있는 각 손가락 힘센서가 각각의 힘을 감지하여 증폭기로 보낸다. 증폭기에서 작은 힘을 수백 배로 증폭하여 DSP로 보내지고, 이 값들은 LCD에 나타냄과 동시에 컴퓨터로 보내진다.

3.5. 원통형 4손가락 힘측정장치 및 교정

제작된 힘센서가 힘 측정에 사용되기 위해서는 교정되어야 한다. 그러므로 힘센서는 다축 힘/모멘트센서 교정기^[6]를 이용하여 교정되었다. 교정은 다음과 같이 진행되었다. 첫째, 고속측정기의 4개의 힘센서의 초기값을 1500 mV로 맞춘다. 초기값을 1500 mV로 조절한 것은 사용한 DSP에 내장된 AD컨버터의 측정범위가 0 mV~3000 mV이고, 센서가 양의 방향과 음의 방향으로 값을 나타내기 때문이다. 둘째, 힘센서에 정격하중인 100 N을 가한 후, 고속측정기에 2500 mV이 되도록 맞춘다. 즉, 힘센서들은 1 mV=0.1 N이 된다.

Fig. 10은 제작된 힘센서가 내장된 4손가락 힘측정 원통물체의 구조이다. 4개의 힘센서의 하부 고정블록은 원통물체의 내부에 감지, 중지, 약지, 소지 순으로 각각 고정되며, 힘센서의 상부 고정블록은 각각의 누름판에 고정된다. 검지와 중지의 힘센서는 10° 기울어지도록 고정하여 원통물체를 잡았을 때 각 손가락의 위치가 적합하도록 하였고, 검지의 위치와 중지의 위치간격은 24.5 mm, 중지와 약지의 위치간격은 23 mm, 약지와 소

Fig. 10. Mechanical structure of four-finger force measuring system.

(a) left hand

(b) right hand

Fig. 11. Photograph of manufactured four-finger force measuring system.

Fig. 12. Method of characteristic test.

Fig. 13. Photograph of right and left hand position on the desk.

지의 위치간격은 22 mm로 유지하여 성인손에 적합하도록 하였다. Fig. 11은 개발한 원통형 4손가락 힘측정 장치의 사진을 나타내고 있으며, (a)는 왼손용이고 (b)는 오른손용이다. 이것은 4개의 힘센서가 내장된 원통물체, 고속측정기, 컴퓨터 등으로 구성되었다. Fig. 11에서와 같이 엄지손가락은 누름판의 반대쪽에 위치하고, 나머지 4개의 손가락은 각각의 누름판에 힘을 가하면, 원통물체에 내장된 각각의 힘센서에 전달되고 그 값들은 고속측정기에 의해 측정되어 LCD에 표시됨과 동시에 컴퓨터로 보내진다.

4. 원통물체잡기 특성실험 및 고찰

원통물체 잡기 특성실험은 본 연구에서 개발한 원통형 4손가락 힘측정장치가 정상인을 대상으로 4손가락의 개별 힘측정을 실시할 수 있는지를 확인하는 것이다. Fig. 12는 원통형 4손가락 힘측정의 방법을 나타내고 있고, Fig. 13은 책상 위에서 실험하는 모습을 나타내고 있다. 재활동도는 첫째, 원통물체를 잡는 4손가락 각각의 힘으로 판단할 수 있고, 둘째, 측정되는 모든 손가락의 합력으로 판단할 수 있다. 특성실험은 우선 20대의 정상인 4명의 남자를 대상으로 실시하였고, 잡는 방법은 Fig. 12에서 나타낸 것과 같다. 측정값은 모두 4번을 측정한 후 평균한 것이다. 특성실험을 4명의 남자를 대상으로 실시한 것은 본 연구에서 개발한 원통형 4손가락 힘측정장치가 손가락의 힘측정에 활용될

Table 4. Data of characteristic test of four-finger force in right hand

Men	four-finger force of right hand(N)				Total force(N)
	F-f	F-m	F-r	F-l	Ft
A	40.5	78.3	58.8	30.5	208.0
B	52.0	98.8	71.0	34.5	256.3
C	37.3	65.3	47.0	26.8	176.3
D	63.5	82.0	51.3	21.0	217.8
Avg.	48.3	81.1	57.0	28.2	214.6

Table 5. Data of characteristic test of four-finger force in left hand

Men	four-finger force of left hand(N)				Total force(N)
	F-f	F-m	F-r	F-l	Ft
A	49.0	60.5	55.0	29.3	193.8
B	38.5	102.5	66.8	35.0	242.8
C	40.5	69.3	51.0	26.8	187.5
D	62.3	89.3	56.5	19.3	227.3
Avg.	47.6	80.4	57.3	27.6	212.8

수 있는지를 확인하기 위해서이다.

Table 4와 5는 각각 오른 손 4손가락과 왼손 4손가락의 원통물체 잡기 특성실험한 결과를 나타내고 있으며, F-f, F-m, F-r, F-l은 각각 검지, 중지, 약지, 소지이고 Ft는 4손가락의 힘을 합한 합력을 나타낸다. Table 4에 나타낸 것과 같이 오른손 검지의 힘은 약 48.3 N, 중지는 약 81.1 N, 약지는 약 57.0 N, 소지는 약 28.2 N 이었고, 합력은 214.6 N이었다. Table 5에 나타낸 것과 같이 왼손 검지의 힘은 약 47.6 N, 중지는 약 80.4 N, 약지는 약 57.3 N, 소지는 약 27.6 N이었고, 합력은 약 212.8 N이었다. Table 4와 5에 나타낸 것과 같이 원통물체를 잡았을 때 오른손과 왼손 손가락의 힘의 크기 순서는 중지, 약지, 검지, 소지 순이다. 그리고 실험한 사람 별로 각 손가락의 힘과 합력이 차이가 있는 것은 사람의 원통물체 잡는 힘의 차이 때문이다. 정확한 데이터를 얻기 위해서는 연령대 별로 남자와 여자로 구분하여 많은 사람의 특성실험이 필요하다.

5. 결 론

본 논문에서는 정상인과 뇌졸중 환자 등의 손가락 힘측정을 위한 원통물체를 잡는 원통형 4손가락 힘측정장치를 개발하였다. 개발한 힘센서의 직선성오차는

0.05 % 이내이었고 재현성오차는 0.06 % 이내이었으므로 손가락 힘측정에 활용할 수 있음을 확인하였다. 개발한 원통형 4손가락 힘측정장치가 성인의 손가락 힘측정에 적합함을 확인하였고, 또한 개발한 원통형 4손가락 힘측정장치가 성인의 왼손과 오른손의 각 손가락의 힘과 합력을 측정하기에 적합함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 개발한 원통형 4손가락 힘측정장치는 정상인의 원통물체 잡기 힘측정을 할 수 있을 뿐만 아니라 뇌졸중 환자 등 재활중인 환자의 원통물체 잡기 힘측정을 함으로서 재활정도를 판단하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

추후 연구는 남녀 연령대별 정상인의 원통물체 잡기 손가락 힘측정 DB를 구축하고 뇌졸중 환자 등 손가락 재활을 받고 있는 사람들의 손가락 힘측정에 4손가락 힘측정장치의 환자적용 가능성을 확인하는 것이다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구임 (No. 2009-0087281)

참고 문헌

- [1] S. Olandersson, H. Lundqvist, M. Bengtsson, M. Lundahl, A. J. Baerveldt, and M. Hilliges, "Finger-force measurement-device for rehabilitation", *roceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Chicago, IL, USA, 2005.
- [2] S. Li, F. Danion, M. L. Latash, J. M. Li, and V. M. Zatsiorsky, "Bilateral deficit and symmetry in finger force production during two-hand multifinger tasks", *Exp Brain Res.*, vol. 141, pp. 530-540, 2001.
- [3] 김갑순, "3축 힘센서를 이용한 지능형 그리퍼 개발", *한국정밀공학회지*, 제24권, 제3호, pp. 47-54, 2007.
- [4] 김갑순, 신희준, "인간형 로봇을 위한 6축 힘/모멘트 센서 개발", *센서학회지*, 제16권, 제3호, pp. 211-219, 2007.
- [5] 김갑순, "로봇의 지능형 손을 위한 3축 손가락 힘센서 개발", *센서학회지*, 제15권, 제6호, pp. 411-416, 2006.
- [6] 김갑순, 윤정원, "다축 힘/모멘트센서 교정기의 개발 및 그의 불확도 평가", *한국정밀공학회지*, 제24권, 제10호, pp. 91-98, 2007.

김 갑 순

- 1999년 8월 한양대학교 정밀기계공학과 (공학박사)
- 1990년 2월~2000년 2월 한구표준과학연구원 선임연구원
- 2003년 7월~2004년 7월 일본주꾸바대학교 인공지능로봇연구실 교환교수
- 2000년 3월~현재 경상대학교 제어계측공학과 부교수
- 주관심분야: 다축 힘/모멘트센서 및 응용, 인간형 및 서비스 로봇, 이동로봇 지능제어, 자동이동선박 제어