

뇌졸중환자를 위한 직교형 4개 손가락 재활로봇 기구설계

Design of Rectangular-Type Four-Finger Rehabilitation Robot for Stroke Patient

김 현 민, 김 갑 순*
(Hyeon-Min Kim¹ and Gab-Soon Kim¹)

¹Department of Control & Instrumentation Engineering, Gyeongsang National University

Abstract: This paper describes the design of a rectangular-type four-finger rehabilitation robot for flexibility rehabilitation of stroke patients' fingers and other patient's paralyzed fingers. The four-finger rehabilitation robot is composed of a body and each finger rehabilitation robot instrument. The four-finger rehabilitation robot could exercise four fingers (forefinger, middle finger ring finger and little finger) of patient for their rehabilitation. The four-finger rehabilitation robot instruments move according to the trace which spread out the patient's fingers and then turn them inward for the fingers' flexibility, while at the same time performing the force control with the reference forces for fingers' safety, simultaneously. A control characteristic test of the developed rectangular-type four-finger rehabilitation robot was carried out, and the results confirmed that the robot could be used for the flexibility rehabilitation exercise for the fingers of normal person and patients.

Keywords: rehabilitation robot, finger rehabilitation, two-axis force sensor, rated output, interference error

I. 서론

뇌졸중환자 등의 손가락이 굳어 있는 사람들은 손가락을 움직일 수 없어 일상 생활에서 매우 불편하다. 그러므로 환자의 손가락들을 정상인의 그것들과 같이 사용할 수 있도록 회복시키기 위해서는 손가락 유연성 재활운동을 실시해야 한다. 환자의 손가락 유연성 재활운동은 작업치료사, 간호사, 가족 등이 실시할 수 있으나 반복적으로 계속해서 수행해야 하므로 많은 어려움이 있다. 그러므로 손가락의 유연성 재활운동을 위한 손가락 재활로봇이 필요하다.

사람의 손가락은 5개로 구성되어 있고, 그 중 4개 손가락(검지, 중지, 약지, 소지)의 움직이는 방향이 엄지손가락의 움직이는 방향과 다르므로 4개 손가락의 재활운동을 위한 재활로봇을 다르게 구성해야 된다. 4개 손가락 재활로봇은 뇌졸중환자에 따라 4개 손가락의 움직일 수 있는 정도가 각각 다르므로 손가락의 안전성을 위해 4개 손가락을 짓히는 힘을 제어할 수 있어야 한다. 따라서 4개 손가락 재활로봇은 유연성 재활운동을 할 때 정해진 힘 이하로 4개 손가락을 당겨서 손가락이 펴지는 위치까지 손가락 끝의 궤적을 따라 위치 제어되어야 하고, 동시에 정해진 힘 이상의 힘으로 잡아당겨지지 않도록 힘제어가 되어야 한다.

E. B. Brokaw [1]는 뇌졸중환자가 손가락으로 물체를 집을 때 스프링 힘에 의해 잡는 힘(토크)을 보조하는 역할을 하는 손(손가락) 재활시스템을 개발하였다. Y. Ren [2]은 엄지와 나머지 4개 손가락을 별도로 재활운동하는 시스템을 개발하였

으나, 엄지손가락은 완전하게 뒤로 젖히고 굽힐 수 없는 단점이 있다. L. Connelly [3]는 공기압을 이용하여 뇌졸중환자가 손가락을 펴고 구부리는 훈련을 하기 위한 공기압장갑을 개발하였다. H. Yamaura [4]는 손가락 마디와 마디를 링크 두 개와 풀리 두 개를 이용하여 삼각형 모양으로 구성하고, 풀리와 연결된 줄을 모터를 이용하여 당겼을 때, 링크의 각을 작게 하면 손가락 마디가 펴지고 반대로 작용하면 손가락이 굽혀지게 하는 방식의 재활로봇을 개발하였다. L. Dovat [5]는 각각의 손가락 끝을 줄로 묶고, 그 줄을 당겨서 손가락을 펴는 훈련을 하는 시스템으로서, 적당한 힘으로 손가락을 당기는 지의 힘을 측정하는 센서가 부착되지 않아 정확한 훈련을 할 수 없다. M. Bouzit [6]는 손가락 끝에 링을 끼워 고정하고 링에 연결되어 있는 스프링 힘을 이용하여 손가락을 굽히고 펴는 손가락 재활운동장치를 개발하였다. 논문 [1-6]에서 개발한 시스템은 손가락 재활운동을 위해서는 완전하게 뒤로 젖힐 수 있어야 하나[7], 그렇게 할 수 없는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 주먹을 쥔 상태에서 손가락을 완전히 뒤로 젖힐 수 있는 직교형 4개 손가락 재활로봇기구를 설계하였다. 매트랩(Matlab)을 이용하여 4개 손가락 재활로봇기구의 각 링크의 길이를 결정하였고, 이것을 토대로 직교형 4개 손가락 재활로봇기구를 설계 및 제작하였으며, 기구의 운동시 손가락의 안전을 위해 힘제어에 사용되는 4개 손가락 2축 힘센서를 설계 및 제작하였다.

II. 4개 손가락 재활로봇기구 설계 및 제작

1. 4개 손가락 재활로봇기구의 링크길이 설계

4개 손가락 재활로봇기구를 설계하기 위해서는 성인의 손과 4개 손가락의 크기를 알아야 하고, 이것을 기준으로 4개 손가락이 뒤로 젖혀지는 궤적을 따라 시뮬레이션 해야 하며, 각 링크의 길이를 구한다. 성인 남자 10명의 손의 크기와 4개 손가락의 크기를 측정하여 평균한 값은 표 1에 나타난 것

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received November 11, 2012 / revised February 25, 2013 / accepted March 8, 2013

김현민, 김갑순: 경상대학교 제어계측공학과, ERI
(pposab@nate.com/gskim@gsnu.ac.kr)

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2010-0087281, 2012R1A1A2A10041417).

표 1. 사람의 각 손가락의 마디 및 손의 길이.

Table 1. Results of the lengths of each finger's knuckles and hand.

knuckle	Fingers	Fore finger	Middle finger	Ring finger	Little finger
First knuckle		24	27	28	24
Second knuckle		29	34	32	20
Third knuckle		48	53	45	43
Finger length		101	114	105	87
Hand length		182	192	175	153

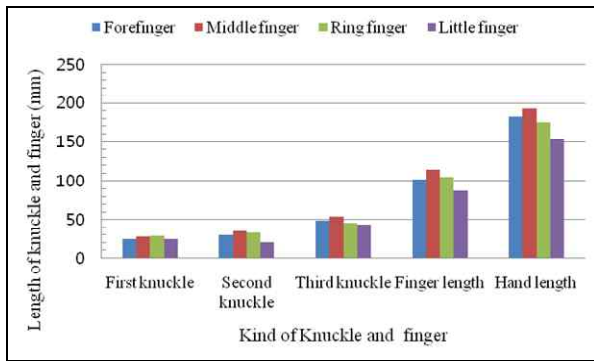


그림 1. 손가락의 마디와 손의 길이.

Fig. 1. Graph of the length of finger's knuckle and hand.

과 같이 검지가 101 mm, 중지가 114 mm, 약지가 105 mm, 소지가 87 mm이었고, 각 손가락의 마디의 길이는 표 1과 그림 1에 나타난 것과 같으며, 4개 손가락을 일직 선으로 편 상태에서 뒤로 젖혀지는 각도는 각각 약 85°이었다. 첫 번째 마디(first knuckle)는 손가락 끝의 마디이다. 이 측정값들은 4개 손가락 재활로봇기구를 설계하기 위해 시뮬레이션하는데 사용된다.

그림 2는 손가락 재활로봇기구의 개략도를 나타내고 있고, 그림 3은 각 링크의 운동을 시뮬레이션하기 위한 4개 손가락 재활로봇기구의 링크 개략도를 나타내고 있다. 4개 손가락 재활로봇기구는 모두 같은 형식이므로 길이가 가장 긴 중지 재활로봇기구의 원리만을 설명하기로 한다. 재활로봇기구의 운동은 우선 손지지대(hand support)에 손을 고정시키고 손가락 링크(l_6)의 링에 손가락의 첫번째 마디를 고정시킨다. 전후 재활운동기구(l_1)와 상하재활운동기구(l_2)를 동작시켜 2축 힘센서가 부착된 힘전달링크(l_3+l_4)와 손가락 링크(l_6)가 연결되는 힌지부분이 각 손가락의 궤적을 그리면서 운동한다. 힘전달링크(l_3+l_4)가 회전할 때 링크길이 l_3 부분에 연결되어 있는 좌우이동 지지대(l_5 , moving support)는 링크길이 l_3 의 길이 변화에 의해 엘엠가이드(LM guide)를 타고 좌우로 미소하게 이동된다.

4개 손가락 재활로봇기구는 그림 3에서 나타난 것과 같이 링크 1~6(Link 1~6)으로 구성되어 있고, 각 링크의 길이는 $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ 이며, 링크2와 링크3의 사잇각을 θ_1 라 한다. 기구학 및 역기구학 해석식을 유도하기 위해 링크의 움직임과 연결 방법을 설명하면 다음과 같다. 링크3과 링크4는 한 몸체이고, 링크3과 링크4에 링크2, 링크5, 링크6이 각각 회전관절로 연결되었으며, 링크1은 수평으로, 링크2는 수직으로 각각 이동한다. 그리고 링크5는 링크3의 회전에 따라 링크 위를 수평으로 미소하게 좌우로 이동한다. 시뮬레이션에서 링크4와 링

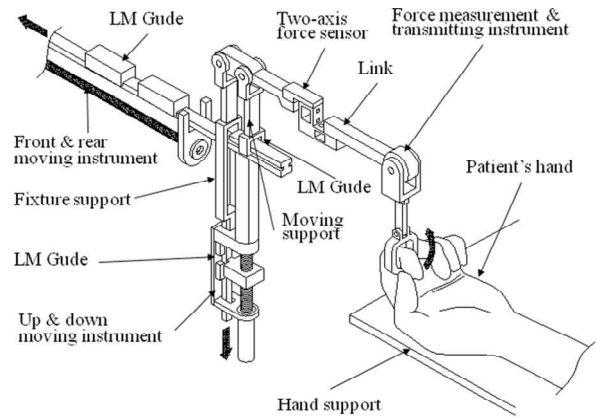


그림 2. 손가락 재활로봇기구의 개략도.

Fig. 2. Schematic diagram of four-finger rehabilitation robot instrument.

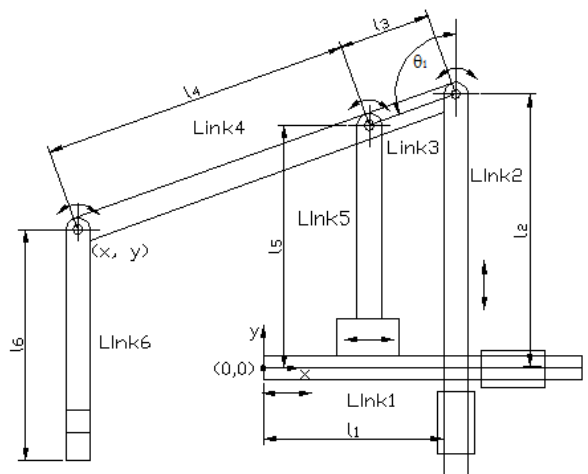


그림 3. 4개 손가락 재활로봇기구의 링크의 개략도.

Fig. 3. Schematic diagram of links of four-finger rehabilitation robot instrument.

크6의 연결지점 (x, y) 의 이동에 따라 링크1의 수평 이동거리와 링크2의 수평이동거리, 링크2와 링크3이 이루는 각 θ_1 이 변화되고, 이것에 의해 각 손가락은 펌과 구부림의 운동을 할 수 있다. 본 논문에서는 측정된 손가락의 길이의 펌과 구부림의 운동을 할 수 있는 링크1과 링크2의 길이를 결정하였을 때 링크3과4의 수평과 수직 움직이는 거리를 알기 위해 매트랩을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

시뮬레이션을 수행하기 위해, 정기구학 해석식 및 역기구학 해석식을 유도한다. 정기구학 해석식은 손가락 끝이 x방향과 y방향으로 이동시키는 변수를 x, y 라 하고, $x, y, \cos\theta_1$ 식을 그림 2로부터 기구학적으로 유도하면 식 (1)-(3)과 같이 된다.

$$x = l_1 - (l_3 + l_4) \sin \theta_1 \tag{1}$$

$$y = l_2 + (l_3 + l_4) \cos \theta_1 \tag{2}$$

$$\cos \theta_1 = (l_5 - l_2) / l_3 \tag{3}$$

위의 식 (1)-(3)을 이용하여 변수 l_1, l_2, θ_1 을 구하기 위한 역기구학 해석식을 유도하면 각각 다음과 같다.

$$l_1 = x + (l_3 + l_4) \sin \theta_1 \quad (4)$$

$$l_2 = \frac{((l_3 + l_4)l_5 - l_3y)}{l_4} \quad (5)$$

$$\theta_1 = \cos^{-1} \frac{(l_5 - l_2)}{(l_3)} \quad (6)$$

4개 손가락 중 가장 길이가 긴 중지가 뒤로 젖혀지는 궤적을 따라 움직이는 시뮬레이션은 각 손가락이 완전히 굽혀져 있는 상태(주먹을 가볍게 쥔 상태)로부터 시작하여 손가락을 일직선으로 편상태로부터 뒤쪽으로 85°까지 젖혀지는 것으로 실시하였다. 그 결과, 중지재활로봇을 위한 링크6과 링크 (3+4)의 길이는 각각 76 mm와 225 m이었다. 4개 손가락 중 가장 긴 손가락인 중지의 재활운동을 할 수 있으면 그보다 길이가 짧은 손가락은 충분히 궤적운동을 실시할 수 있으므로 각각의 4개 재활로봇의 조립배치 등을 고려하여 나머지 3개 손가락 재활로봇의 링크 6과 링크 (3+4)의 길이도 중지재활로봇의 링크길이와 같게 결정하였다.

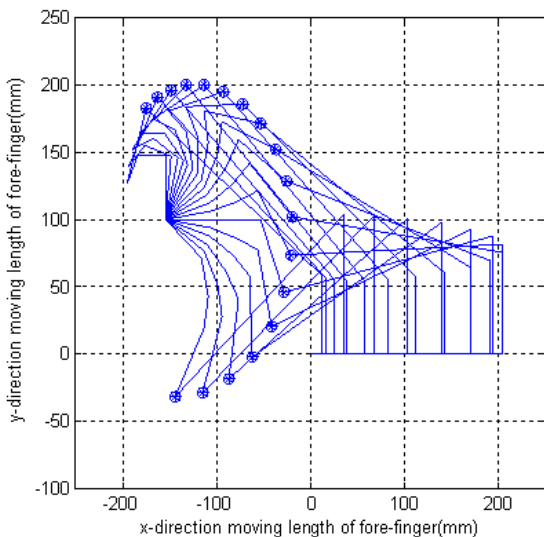
그리고 각 손가락에 따라 링크 1의 x방향으로의 총 수평이동거리양 X1과 링크 2의 y방향으로의 총 수직 이동거리양 Y1과 링크 2축을 기준으로 링크 (3+4)의 총 회전각양 Θ_1 을 표 2에 나타내었고, 그림 4(a)-(d)는 검지부터 약지까지의 각 손가락 시뮬레이션 결과를 그래프로 나타낸 것이고, 각 그래프에서 원으로 나타낸 것은 그림 3의 링크 4와 링크6의 끝이 만나는 회전관절, 즉 x,y점을 나타낸다.

각각의 손가락이 굽어있는 상태(주먹을 가볍게 쥔 상태)에서 뒤로 젖힌 상태인 85°까지 총 17등분하여 각 손가락의 첫

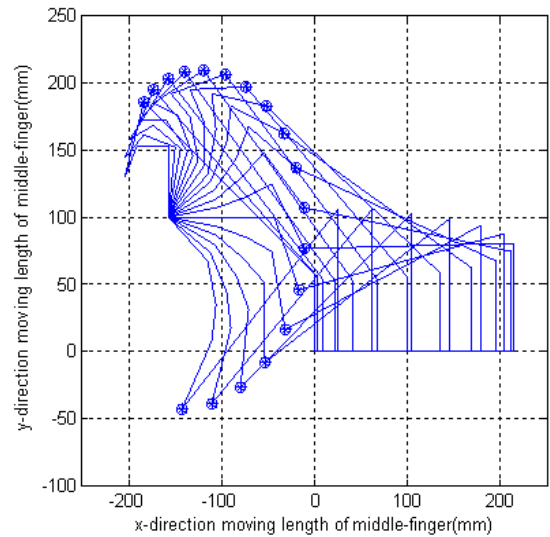
표 2. 4개 손가락 재활로봇기구의 시뮬레이션 결과.

Table 2. Results of the simulation of four-finger rehabilitation robot instrument.

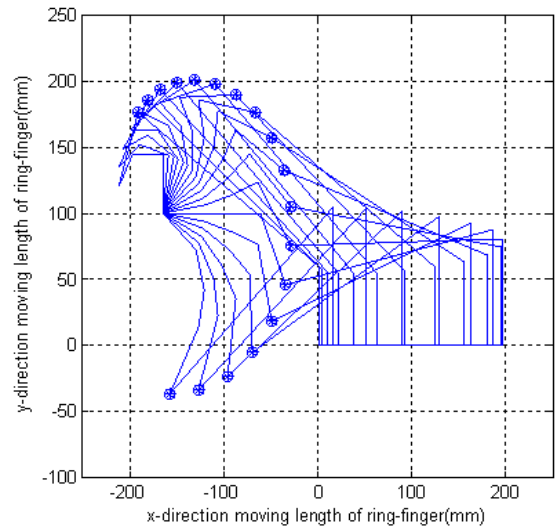
Finger	X1 (mm)	Y1 (mm)	Θ_1 (°)
Fore	192.2	50.2	77.8
Middle	213.9	54.8	86.5
Ring	195.4	51.5	80.1
Little	166.9	45.4	69.1



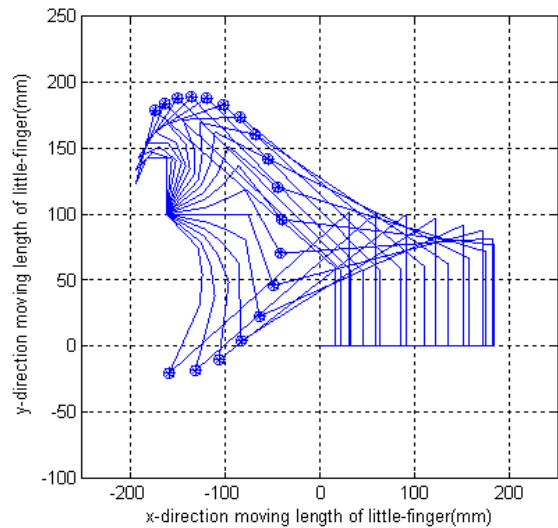
(a) Forefinger.



(b) Middle finger.



(c) Ring finger.



(d) Little finger.

그림 4. 4개 손가락 재활로봇기구의 시뮬레이션 결과.

Fig. 4. Graph of the simulation results of four-finger rehabilitation robot instrument.

번째 마디의 중간이 뒤로 젖혀지는 각도일 때, 검지를 위한 링크 1은 수평방향(x)으로 12.0 mm에서 204.3 mm 까지 총 수평이동거리양 192.2 mm, 링크 2는 수직방향(y)으로 57.7 mm에서 104.2 mm까지 총 수직이동거리양 50.2 mm, 링크 2 축(y)을 기준으로 링크 2의 회전각은 초기 56.0°부터 127.3°까지 총 회전각양 77.8°이었고, 중지, 약지, 소지도 각각 표 2에 나타난 것과 같다.

시뮬레이션 결과, 4개 손가락 재활로봇은 링크 6과 링크 (3+4)는 길이가 각각 76 mm와 225 mm가 되도록 설계해야 하고, 각 손가락을 수평과 수직방향으로 이동시키는 기구는 각 손가락의 수평이동거리(l_1 이 x방향으로 이동한 거리) X1과 수직이동거리(l_2 가 y방향으로 이동한 거리) Y1의 이동거리를 고려하여 설계해야 한다.

2. 4개 손가락 재활로봇의 설계 및 제작

그림 5는 제작한 재활로봇의 기계장치의 사진을 나타내고 있고, 이것은 검지재활로봇기구, 중지재활로봇기구, 약지재활로봇기구, 소지재활로봇기구를 하나로 조합된 것이다. 4개 손가락 재활로봇은 손지지대(몸체), 각 손가락 재활로봇기구의 상하이송기구, 전후이송기구, 힘측정/전달기구, 제어장치 등으로 구성되어 있다. 손지지대(몸체)는 환자의 왼손의 등을 접촉시켜 고정시키고, 전후이송기구가 부착되며, 속이 비어 있는 사각기둥 형상이다. 이것의 크기는 폭 220 mm, 길이 451 mm, 높이 94 mm이다. 각 손가락 재활로봇기구의 상하이송기구는 상하이송기구의 엘엠가이드 레일 위에 고정되어 있으며, 전후이송기구와 함께 4개 손가락에 가하는 힘을 발생하는 역할을 한다. 이 기구는 엘엠가이드(RSR9KM), 볼나사(MTF1202-3.7), 모터 및 기어(349380, 29:1), 고정지지대 등으로 구성되었고, 제어장치의 명령에 따라 손가락 방향과 직각방향으로 힘측정/전달기구를 최대 67mm까지 이동시킨다.

전후이송기구는 몸체에 부착되어 있고 전후이송기구의 엘엠가이드 레일 위에 힘전달기구의 지지대와 상하이송기구의 고정블록이 고정되어 있으며 상하이송기구와 함께 4개 손가락에 가하는 힘을 발생하는 역할을 한다. 이 기구는 엘엠가

이드(RSR9KM), 볼나사(MTF 1202-3.7), 모터 및 기어(349380, 19:1), 고정지지대 등으로 구성되었고, 제어장치의 명령에 따라 손가락 방향으로 힘측정 및 전달기구를 최대 300 mm까지 이동시킨다.

각 손가락 재활로봇기구의 힘측정/전달기구는 손가락 고정 링크, 손가락 운동링크, 고정지지대, 상하이동대 등으로 구성되었고, 손가락 고정링크는 환자의 손가락을 고정시키는 기구이며, 손가락 운동기구와 조인트로 연결되어 있다. 손가락 운동링크는 힘 Fx와 힘 Fy를 측정하는 2축 힘센서(각 힘센서의 정격용량: 100N)가 제작되었고, 이것으로 4개 손가락을 당기고 끄는 힘을 제어하며, 중앙에는 고정지지대와 다른 끝에는 상하이동대와 조인트로 연결되어 있다. 고정지지대는 손가락에 힘을 가할 때 손가락과 직각방향의 힘을 지지하고, 전후이송기구의 엘엠가이드에 고정되어 운동링크가 회전할 때 길이변화에 따라 미소하게 손가락 길이방향으로 이동한다. 상하이동대는 상하이송기구의 엘엠가이드에 고정되었고, 제어장치의 명령에 따라 손가락 길이방향과 직각방향으로 이동되어 운동링크의 한쪽 끝을 밀고 당김으로 손가락 운동을 시킬 수 있다. 손가락 고정링크는 운동링크의 한쪽 끝에 고정되었고, 운동링크의 회전에 따라 손가락을 직접 당기거나 끄는 역할을 하며, 환자의 4개 손가락 첫째 마디를 고정시킨다. 제어장치는 4개 손가락의 운동 시뮬레이션 결과에 따라 제작된 프로그램에 의해 손가락 전후이송기구와 상하이송기구를 동작시켜 펌과 굽힘의 운동을 반복하며, 손가락 운동링크의 2축 힘센서의 출력값을 받아 설정한 힘의 이상으로 힘이 작용되었을 경우에는 시스템이 정지한다. 4개 손가락 재활로봇을 이용한 유연성 재활운동은 굳어 있는 4개 손가락을 운동할 경우에 4개 손가락의 위치경로를 따라 펴고 구부리는 운동과정에서 설정된 힘 이상으로 손가락에 힘이 가해지면 정지한 후 다시 초기 위치인 손가락이 굽어있는 상태로 복귀한다. 이 동작을 반복하면 점점 더 손가락의 굳

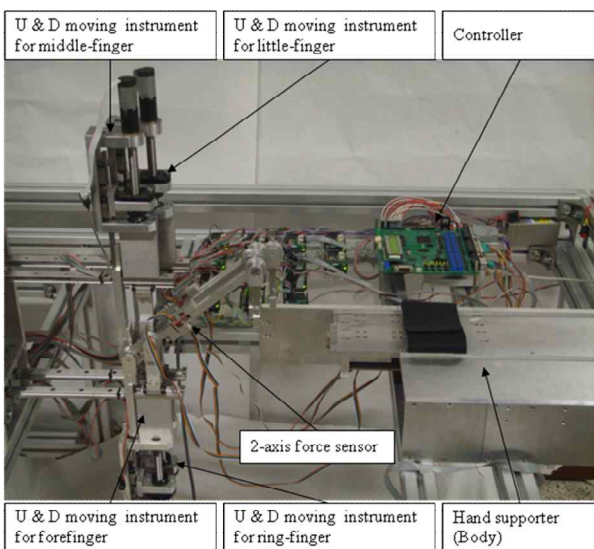


그림 5. 제작된 4개 손가락 재활로봇.
Fig. 5. Manufactured four-finger rehabilitation robot.

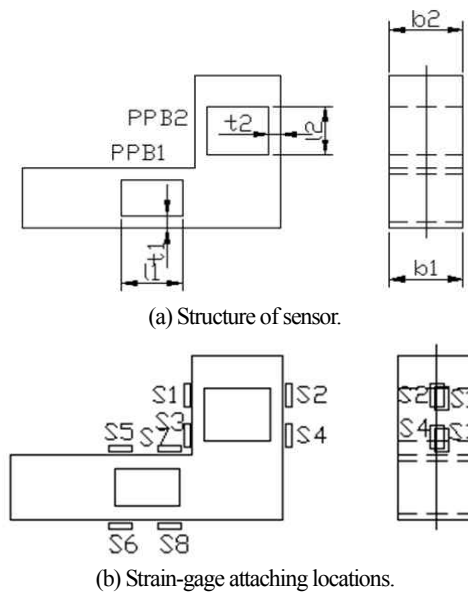


그림 6. 2축 힘센서의 구조 및 스트레인게이지 부착위치.
Fig. 6. Structure and strain-gauge attaching locations of two-axis force sensor.

은 정도가 부드러워져 많이 퍼질 수 있고 손가락의 유연성이 좋아질 수 있다. 사용된 제어장치는 12비트의 아날로그/디지털 컨버터(A/D converter)를 가지고 있고 처리속도가 150 MHz 인 DSP (Digital Signal Processor)로 제작된 것이다.

3. 4개 손가락 힘측정용 2축 힘센서의 설계 및 제작

4개 손가락 힘측정용 2축 힘센서는 각 손가락 재활로봇기구의 힘측정/전달기구에 부착되어 손가락에 가해지는 힘을 측정하는데 사용된다. 2축 힘센서는 그림 6(a)에 나타난 것과 같이 한 물체에 x방향의 힘을 측정하는 Fx센서와 y 방향의 힘을 측정하는 Fy센서로 설계하였다. 이것은 2개의 평행평판보(PPB1과 PPB2), 상부블록, 중간블록, 좌측블록으로 구성되었다. 좌측 블록을 고정하고 상부블록에 힘을 가하면 2개의 평행평판보에 힘이 전달된다. 평행평판보 PPB1은 Fy 힘센서용 감지부이고, PPB2는 Fx 힘센서용 감지부로 사용된다.

평행평판보 PPB1의 크기는 길이 l1, 두께 t1, 폭 b1이고, 평행평판보 PPB2의 크기는 길이 l2, 두께 t2, 폭 b2이다. 2축 힘센서를 설계하기 위한 설계변수의 정격출력은 약 0.5 mV/V, 각 센서의 정격하중은 각각 100 N이다. 센서의 크기가 길이 42 mm, 높이 25 mm, 폭 12 mm이고, 스트레인게이지의 부착위치가 길이 방향 으로는 평판보의 끝지점으로부터 1.5 mm지점, 폭 방향 으로는 폭의 중심선상(1/2)이고, 스트레인게이지의 부착 위치에서의 변형률은 약 250 um/m로 결정하였다. 2축 힘센서의 각 감지부의 크기를 결정하기 위해 ANSYS 소프트웨어를 이용하였다. 유한요소해석을 위해 소프트웨어에 입력한 재료상수는 제작할 센서의 재질이 알루미늄이므로 종단성계수가 70 GPa, 프와송의 비가 0.3이며, 8절점 6면체 블록을 선택하였다. 격자(mesh) 크기는 해석하고자 하는 평행평판보를 길이방향으로는 0.5 mm 간격, 두께방향으로는 4등분, 폭방향으로는 8등분하였다. 그림 7(a)는 2축 힘센서를 유한요소법으로 해석하기 위해 격자를 나눈 모습을 나타내고, 그림 7(b)와 (c)는 각각의 정격힘이 가해졌을 때의 센서 감지부의 변형된 모습을 나타내고 있으며, 모두 센서의 구조를 모델링할 때 예상했던 모습으로 변형되었다.

유한요소법을 이용하여 2축 힘센서를 설계한 결과, 평행평판보 PPB1의 길이 l1은 10 mm, 두께 t2는 2.1 mm, 폭 b2는 12 mm이었고, 평행평판보 PPB2의 길이 l2는 8 mm, 두께 t2는 1.9 mm, 폭 b2는 12 mm이었다. 유한요소해석 결과를 토대로 2축 힘센서의 스트레인게이지 부착위치를 결정하였으며, 그것을 그림 6(b)에 나타내고 있다.

유한요소법을 이용하여 2축 힘센서의 각 스트레인 게이지 부착위치(그림 6(b))에서의 변형률들은 표 3에 나타난 것과 같고, T1은 인장스트레인게이지1의 변형률, C1는 압축스트레인 게이지1의 변형률, T2는 인장스트레인게이지2의 변형률, C2는 압축스트레인 게이지2의 변형률이다. 각 힘센서의 정격 변형률은 설계변수로 결정한 정격변형률 1000 um/m 내외이었고, 각 센서의 오차는 각각 -1.6%와 5.4%이었다. 이와 같은 오차는 설계시 가공의 가능성을 고려하여 감지부의 두께를 0.1 mm 단위로 나타내었기 때문이다. 단위를 0.01 mm 단위로 설계하면 매우 근접한 변형률을 얻을 수 있으나 모델링한 2축 힘센서 구조의 복잡성 때문에 0.01 mm 단위로 가공할 수 없기 때문이다.

표 3. 2축 힘센서의 유한요소해석결과.

Table 3. Results of FEM analysis of two-axis force.

Sensor	Strain at each strain-gage location (um/m)				Rated strain (um/m)	Error (%)
	T1	C1	T2	C2		
x-axis (PPB2)	307	-185	185	-307	1054	5.4
y-axis (PPB1)	382	-145	145	-382	984	-1.6

2축 힘센서는 그림 6(b)에 나타난 스트레인게이지 부착위치에 스트레인게이지(N2A-13-S1452-350, micro-measurement company사 제작, 게이지 상수 2.03, 크기 35.2 mm)를 순간접착제 (M-200)를 이용하여 부착하고 휘스톤브리지를 구성하여 제작하였으며, 그림 8은 제작된 2축 힘센서의 사진을 보이고 있다.

2축 힘센서의 정격출력은 식 (7)에 의해 계산할 수 있다.

$$E_o/E_i = (K \cdot \epsilon) / 4 \tag{7}$$

여기서 E_i는 휘스톤 브리지의 입력전압, E_o는 휘스톤 브리지의 출력전압, K는 스트레인게이지 상수, ε은 센서의 정격변형률이다.

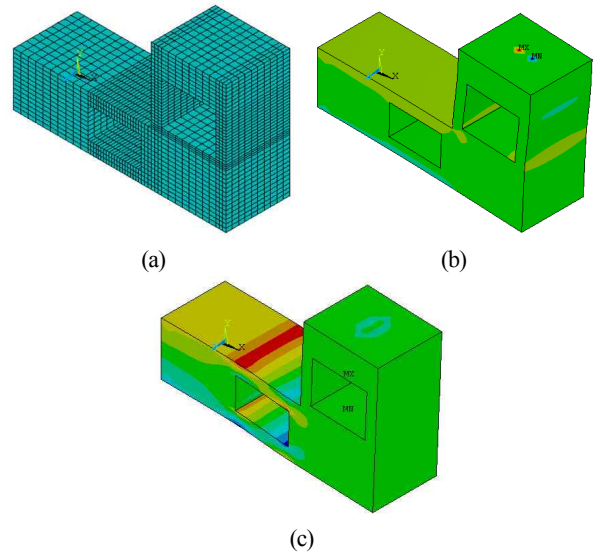


그림 7. 각 정격힘이 가해진 상태에서의 유한요소해석의 결과. Fig. 7. Mesh shape for FEM analysis and deformed shape of two-axis sensor under each rated force.

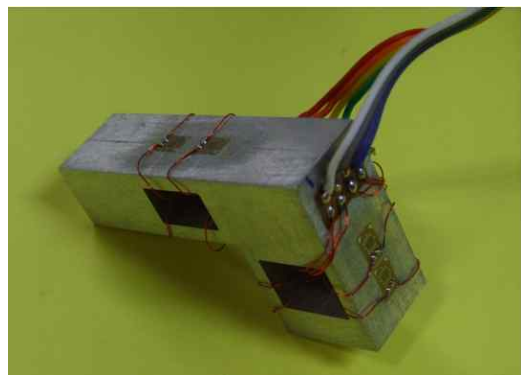


그림 8. 제작된 2축 힘센서의 사진. Fig. 8. Photograph of manufactured two-axis force sensor.

Fx 힘센서의 정격출력은 유한요소해석 결과로부터 계산한 정격변형률 984 $\mu\text{m}/\text{m}$ 와 사용한 스트레인 게이지의 상수 2.03을 식 (7)에 대입하면 0.49938 mV/V 이었고, Fy 힘센서의 정격출력은 유한요소해석 결과로부터 계산한 정격변형률 1054 $\mu\text{m}/\text{m}$ 와 사용한 스트레인게이지의 상수 2.03을 식 (1)에 대입하면 0.53491 mV/V 이었다.

4개 손가락 2축 힘센서의 정격출력을 결정하고, 비직선성 오차, 재현성오차, 상호간섭오차를 계산하기 위한 특성실험은 다축 힘/모멘트센서의 교정장치[8]를 이용하여 2축 힘센서의 Fx 힘센서와 Fy 힘센서에 10N부터 100N까지 10N단계로 증가 및 감소순으로 힘을 가하여 각각 3회씩 실시하였다. 각 힘센서의 정격출력은 100N일 때의 출력값을 평균하여 결정하였고, Fx 힘센서의 정격출력은 0.50898 mV/V 이었고 Fy 힘센서의 정격출력은 0.54821 mV/V 이었다.

Fx 힘센서의 오차는 유한요소해석 결과인 0.49938 mV/V 을 기준으로 계산한 결과, 1.92% 이내이었고, Fy 힘센서의 오차는 유한요소해석 결과인 0.53491 mV/V 을 기준으로 계산한 결과, 2.49% 이내이었다. 그리고 각 힘센서의 비직선성오차, 재현성오차, 상호간섭오차를 계산한 결과 각각 0.05%, 0.03%, 0.2%이내이었다. 이 오차는 스트레인게이지의 부착오차, 감지부의 가공오차, 유한요소 소프트웨어의 고유오차 등으로 생각된다.

4. 재활로봇을 이용한 유연성 재활운동 제어특성실험

뇌졸중환자의 4개 손가락의 유연성 재활운동은 굳어 있는 4개 손가락을 유연하게 하는데 목적이 있고, 이 재활운동은 4개 손가락의 이동궤도를 따라 펴고 구부리는 반복되는 운동과정에서 손가락의 굳은 정도가 점점 부드러워져 많이 펴고 구부릴 수 있다. 재활로봇을 이용한 4개 손가락 유연성 재활운동을 안전하게 실시하기 위해서는 기준힘을 설정하고, 그것을 기준으로 로봇을 제어해야 한다. 그림 9는 4개 손가락 재활로봇을 나타내고 있고, 이것을 이용하여 각 재활운동을 위한 기준힘값을 얻기 위한 특성실험을 실시하였다.

실험대상자는 뇌졸중환자가 대부분 손가락에 통증을 느낄 수 없으므로 20~30대 정상인 남성을 대상으로 실험을 실시하여 개발한 재활로봇의 기본 특성을 파악하고자 한다. 유연

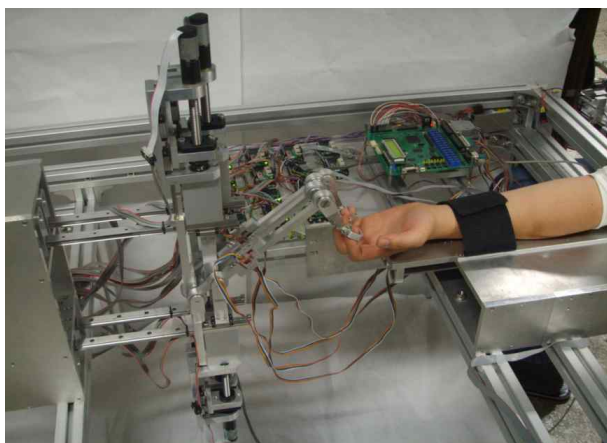


그림 9. 4개 손가락 재활운동을 위한 실험장치.
 Fig. 9. Experimental setup for characteristic test of four-finger rehabilitation exercise.

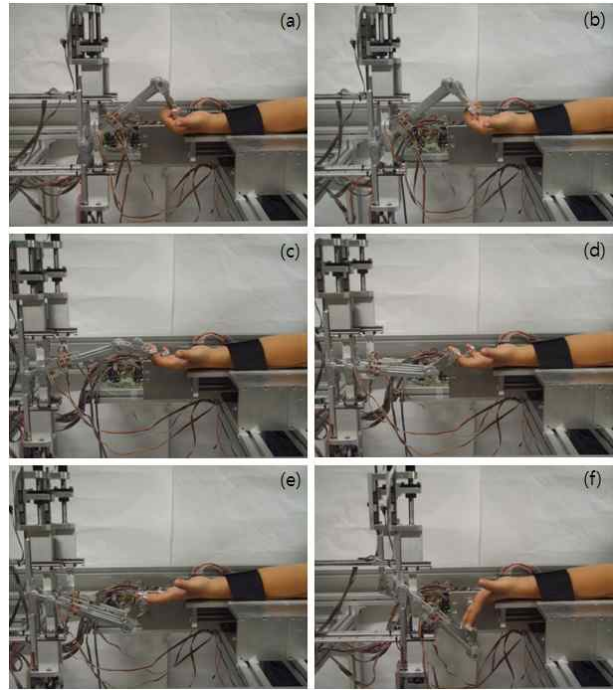


그림 10. 4개 손가락 재활로봇을 이용한 유연성운동의 특성 실험.

Fig. 10. Characteristic test for flexibility rehabilitation exercise of four fingers using four-finger rehabilitation robot.

성 재활운동을 위한 기준힘 설정값의 특성실험은 5명의 남성을 대상으로 실시하였다. 특성실험은 엄지손가락 재활로봇의 손지대에 벨크로(velcro)로 손목을 고정하고, 엄지손가락을 손가락 고정링크에 나사를 이용하여 안전하게 고정된 후 수동으로 제어장치를 제어하여 손가락에 통증이 올 때까지 손가락을 뒤로 잡아당기며, 이때 손가락 운동링크의 2축 힘센서로부터 출력되는 측정값을 읽는 순서로 실시하였다. 실험은 각 실험자를 대상으로 각각 3번씩 실시되었고, 그것을 평균하여 각 실험자의 측정값으로 나타내었으며, 5명의 실험자의 평균값은 각각 15.4N, 16.3N, 15.2N, 11.9N이었다. 따라서 유연성 재활운동을 위한 기준힘은 4개 손가락의 안전을 고려하여 각각 13.0N, 14.0N, 13.0N, 10.0N으로 결정하였다. 그림 10(a)-(d)는 4개 손가락 재활로봇을 이용한 각 손가락의 유연성 재활운동과정을 나타낸 사진이고, 이것은 4개의 각 손가락이 굽어진 상태에서 완전히 펴지는 상태까지를 나타낸 것이며, 다시 원위치로 돌아올 경우에는 사진의 역순이다. 특성실험은 4개 손가락 재활로봇의 손지대에 벨크로(velcro)로 손목을 고정하고, 각 손가락을 손가락 고정링크에 나사를 이용하여 안전하게 고정된 후 제어장치에 각 손가락의 설정된 기준힘 설정값이 2축 힘센서로 출력될 때까지 각 손가락의 위치경로(궤도)를 따라 손가락을 뒤로 잡아당기며, 이후에는 손가락 운동링크를 다시 초기위치로 돌아가게 제어한다.

그림 11의 4개 손가락 재활로봇을 이용한 각 손가락의 유연성 재활운동과정 중 각 손가락에 힘을 주지 않은 상태 (각 손가락을 힘을 주지 않고 자연스럽게 놓은 상태)에서 각 손가락에 가해지는 힘을 2축 힘센서를 이용하여 측정된 결과이다. 검지, 중지, 약지의 각 2축 힘센서 출력값은 손가락을

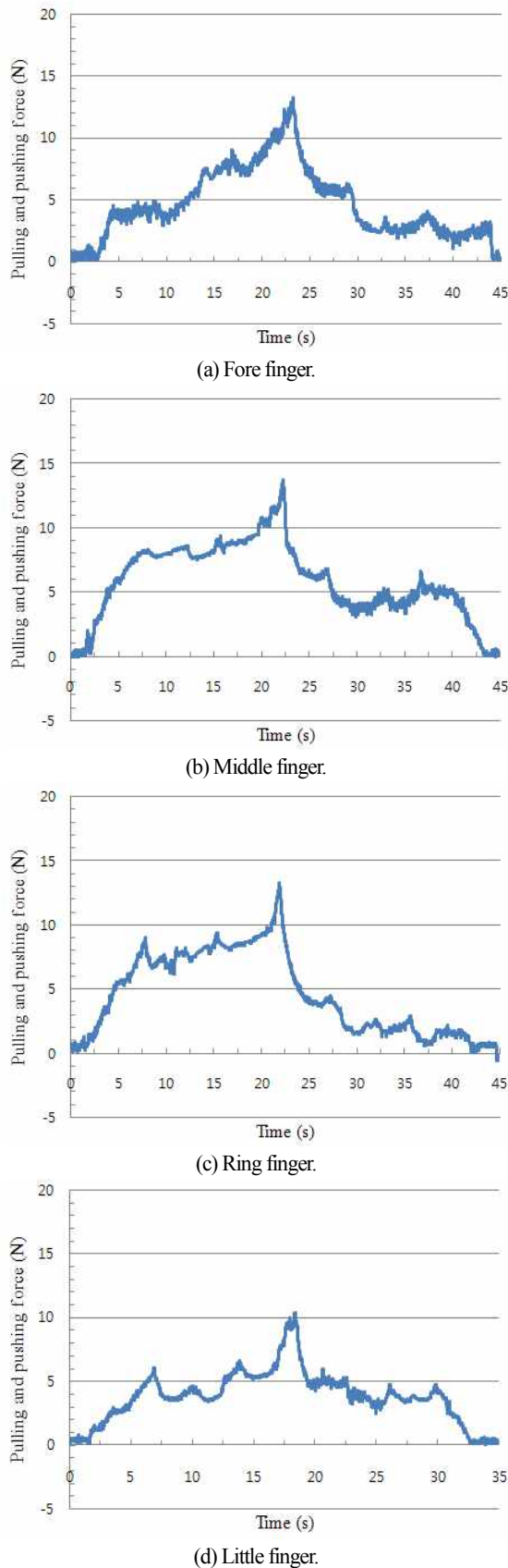


그림 11. 4개 손가락 재활로봇을 이용한 유연성운동의 결과 그래프.

Fig. 11. Results graphs of flexibility rehabilitation exercises using four-finger rehabilitation robot.

뒤로 젖힐 때는 시작 후 22초까지 각각의 0N에서 각 손가락의 설정값까지 증가하고, 그 이후로는 감소하여 44초 부근에서 0N으로 감소하였다. 소지의 각 2축 힘센서의 출력값은 3개의 손가락과 비슷한 경향을 보이고 있으나 17초에 설정값까지 도달함을 알 수 있다. 이것은 4개 손가락 재활로봇의 각 손가락의 기구가 각 손가락 유연성 재활운동을 수행할 때 각 손가락의 안전을 위해 설정한 설정값까지 손가락을 뒤로 젖히고, 그 이후에는 원상태로 복귀하는 동작을 안전하게 수행할 수 있음을 나타낸 것이다.

III. 결론

본 논문에서는 뇌졸중환자의 4개 손가락 유연성 재활운동을 실시할 수 있는 4개 손가락 재활로봇을 개발하였다. 4개 손가락의 재활로봇기구가 안전하게 동작됨을 확인하였고, 제작한 2축 힘센서는 손가락에 가해지는 힘을 안전하게 측정됨을 확인하였으며, 고속제어장치는 4개 손가락 재활로봇을 안전하게 제어함을 확인하였다. 4개 손가락 유연성 재활운동에 관한 특성실험을 20대 대학생 남성을 대상으로 실시한 결과, 4개 손가락 재활로봇은 4개 손가락에 힘을 주지 않은 상태에서 손가락을 뒤로 젖히고 굽히는 동작을 안전하게 수행할 수 있음을 확인하였다.

따라서 본 논문에서 개발한 4개 손가락 재활로봇은 뇌졸중환자의 4개 손가락의 유연성 재활운동을 실시할 수 있을 것으로 생각되고, 추후 연구는 뇌졸중환자의 4개 손가락 재활을 위한 특성실험을 실시하는 것이다.

참고문헌

- [1] E. B. Brokaw, R. J. Holley, and P. S. Lum, "Hand spring operated movement enhancer (HandSOME) device for hand rehabilitation after stroke," *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE*, pp. 5867-5870, 2010.
- [2] 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," *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on*, pp. 761-765, 2009.
- [3] L. Connelly, Y. Jia, M. L. Toro, M. E. Stoykov, R. V. Kenyon, and D. G. Kamper, "A pneumatic glove and immersive virtual reality environment for hand rehabilitative training after stroke," *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 5, pp. 551-559, 2010.
- [4] H. Yamaura, K. Matsushita, R. Kato, and H. Yokoi, "Development of hand rehabilitation system for paralysis patient - universal design using wire-driven mechanism -," *Engineering in Medicine and Biology Society, 2009. EMBC 2009. Annual International Conference of the IEEE*, pp. 7122-7125, 2009.
- [5] L. Dovat, O. Lamercy, R. Gassert, T. Maeder, T. Milner, T. C. Leong, and E. Burdet, "HandCARE: A cable-actuated rehabilitation system to train hand function after stroke," *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 16, no. 6, pp. 582-591, 2008.
- [6] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu, and R. Boian, "The Rutgers master II - new design force-feedback glove," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 7, no. 2, 2002.

- [7] S. I. Jeon, "Encyclopedia of stroke," *Minjung Publishing Company*, pp. 119-124, 1999.
- [8] 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.

김 현 민

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제16권 제9호 참조.

김 갑 순

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제16권 제9호 참조.