

에어셀을 이용한 손목 재활훈련 장치

이영진 · 정유진 · 구교인 · 지영준

울산대학교 전기공학부

Wrist Rehabilitation Training Device Using Pneumatic Inflation and Deflation of Air Cells

Youngjin Lee, Yujin Jeong, Kyo-in Koo and Youngjoon Chee

School of Electrical Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

(Manuscript received 12 January 2015; revised 3 March 2015; accepted 30 March 2015)

Abstract: In this paper, we propose a wrist rehabilitation training device using pneumatic inflation and deflation of air cells. By alternating inflation and deflation of upper and lower air cells, the device makes the flexion and extensional movement for wrist rehabilitation. With the angular displacement sensor, it measures the flexion-extension angle of the wrist during the training and the bending angle is used for the automatic control of the device. Using the sensor output, the regression equation was obtained to measure the bending angle of the wrist from a wrist rehabilitation training device. The measurement error of the device was evaluated by comparing the measurement output with the angle from the photograph. The measurement error of wrist bending angle between the sensor and photo was 3.2° in average. With additional test and improvement, the pneumatic wrist rehabilitation training device might be used for rehabilitation training.

Key words: Rehabilitation, Wrist, Pneumatic, Flexion, Angle

1. 서 론

급속한 고령화 사회로의 진입에 따라 뇌졸중의 발생이 증가하고 있다[1]. 뇌졸중 환자의 대부분은 불완전하게 회복되어 다양한 증상을 동반하게 되는데 대표적인 증상으로 편측 마비를 들 수 있다. 마비된 신체 부위를 그냥 두게 되면 근육이나 관절이 굳어지는 경직과 운동 기능 장애가 초래될 수 있다[2]. 반복적인 재활훈련을 통해 손상된 운동 기능을 부분적으로라도 회복시킬 수 있는 경우가 많다[3].

대부분의 재활훈련은 치료사의 도움을 받는 물리치료, 작업치료로 진행된다. 이 방식은 환자 개인에 맞는 훈련을 제

공할 수 있지만 치료사의 많은 노동력이 요구된다. 이를 보완하기 위해 수동적 관절 운동기기(continuous passive motion, CPM) 또는 로봇 방식의 재활훈련기기를 이용한 재활훈련이 도입되어 치료사를 보조하거나 대체하고 있다[4-5].

재활훈련기기를 사용하면 환자가 언제든지 독립적으로 재활훈련이 가능하고 개인에 맞는 치료 강도, 횟수 등을 조절할 수 있다[6-7]. 훈련의 효과를 데이터로 기록하여 활용함으로써 최적화된 훈련이 가능하고 치료 효과를 정량화할 수 있다. 기기를 이용한 재활훈련의 효과에 대한 연구에 따르면, 치료사에 의한 훈련과 비교하여 유사하거나 더 나은 효과를 보인다고 알려져 있다[4,8-9].

상지 재활을 위한 초기의 재활훈련기기는 팔 재활과 관련된 기기가 주를 이루었다. 이후에는 팔과 손을 같이 재활하거나 손(손목)만을 재활하는 기기가 개발되었다. 상품화된 상지 재활훈련기기에는 MIT-MANUS[10], Armeo[11], Kinetec Maestra Hand & Wrist CPM[12] 등이 있다. MIT-MANUS에서는 두 개의 자유도를 가지고 있어 어깨와 팔꿈

Corresponding Author : Youngjoon Chee
Dept. of Biomedical Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan, Korea
TEL: +82-52-259-1305 / FAX: +82-52-259-1306
E-mail: yjchee@ulsan.ac.kr

본 연구는 한국연구재단(NRF-2013R1A1A4A01006381)의 지원을 받아 수행되었음.

치 관절을 움직임을 통해 팔의 재활훈련이 가능하다. Armeo에서는 여섯 개의 자유도를 가지고 있어 상지의 자연스러운 움직임을 통해 상지의 재활이 가능하고 센서를 통해 환자의 동작을 인지하고 화면으로 상지의 움직임을 확인할 수 있다. Kinetec Maestra Hand & Wrist CPM에서는 기기에 손/손목의 부착한 방향에 따라 손목의 굽힘(flexion)과 펴기(extension), 내전(adduction)과 외전(abduction) 그리고 팔의 회내(pronation)와 회외(supination) 동작이 가능하다.

자동 제어 기술이 사용되는 재활훈련기기에는 움직이려는 의도를 파악하기 위하여 가속도 센서(accelerometer), 힘 센서(force sensor), 휨 센서(flex sensor) 등과 함께[13], 구동 관절마다 모터를 필요로 한다. 다양한 동작을 구현하기 위해 기기의 자유도를 높이면 많은 수의 센서와 구동기가 사용되어 기기의 시스템이 복잡해지고 크기, 중량, 원가 등 모든 측면에서 실용성에 한계가 생긴다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 공압을 구동기로 사용하는 재활훈련기기의 개발이 시도되고 있다[14-16]. 공압을 이용할 경우 하나의 구동기로 다양한 동작을 구현 가능하기 때문에 시스템 구조가 간단해지고 기기가 저렴해진다. 공압은 압축공기를 만들어 사용하기 때문에 압축 공기를 만드는 데 시동시간이 필요하고 주의를 요한다. 기기의 무게를 줄여 착용감을 높이기 위해서 공압식 인공근육(artificial air muscle)을 사용한 손목 재활훈련기기가 개발되었다[14-15]. 이는 구동기로 공압식 인공근육을 사용하는 것으로 손이나 손목에 닿는 기구 방식은 기존의 모터를 사용한 손목 재활훈련기와 마찬가지로 밴드로 압박을 하거나 삽입을 하는 방식으로 되어 있다. 손과 손목에 직접 유연한 재질의 에어셀이 맞닿아 밀어주어 재활훈련이 이루어진다면 기존의 공압을 사용한 손목 재활훈련기기보다 착용감을 높여주고 위험성을 감소시킬 수 있을 것이다. 에어셀을 이용할 경우 셀 모양과 제어 방식에 따라 다양한 동작을 간단하고 경제적으로 구현할 수 있다. 최근 자바라식 에어셀을 이용한 방식이 일부 소개되었으나[16] 초기 분야라 할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 공압과 에어셀을 이용하여 환자의 손목 관절을 대상으로 재활훈련을 하는 장치를 제안한다. 위와 아래의 에어셀에 공기를 넣고 뺏을 조절하여 손목의 굴곡과 신전 운동을 일으키는 구동방식을 구현하고 손목의 굴곡과 신전 각도를 측정하는 시스템을 소개한다.

II. 에어셀을 이용한 손목 재활훈련장치의 구현

1. 시스템 설계

설계한 손목 재활훈련장치에서는 에어셀과 손이 맞닿은 상태로 반복적인 손목 운동이 가능하다. 그림 1은 손목 재활훈련장치의 시스템 구성도를 나타낸다. 에어셀은 손의 위

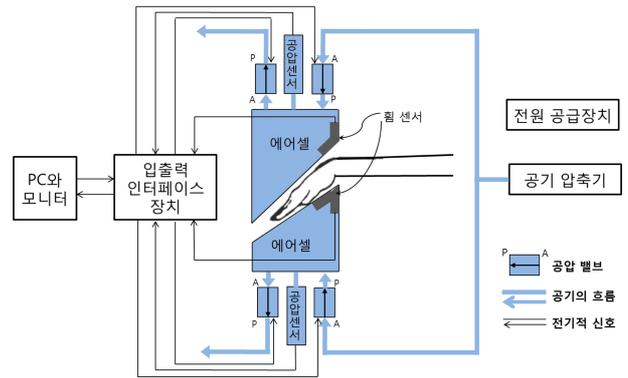


그림 1. 에어셀의 교대 수축 팽창을 이용한 손목 재활훈련장치의 구성도.
Fig. 1. Configuration of the wrist rehabilitation training device using pneumatic inflation and deflation of air cells.

와 아래에 각각 1개씩 설치되어 있다. 공압 센서는 에어셀과 연결되어 내부의 압력을 측정한다. 휨 센서의 면은 에어셀에 부착되어 접히는 각도를 측정한다. 두 센서의 출력은 입출력 인터페이스 장치(data acquisition, DAQ)로 전송된다. PC에서는 입출력 인터페이스 장치를 통해 센서의 출력을 전송받고 밸브를 개폐하는 신호를 전송한다. 공기 압축기와 연결된 밸브의 개폐를 통해 에어셀에 공기를 넣고 뺏을 조절한다.

2. 시스템 개발

시스템은 기구부, 입출력 인터페이스 장치(DAQ), PC와 모니터, 공기 압축기(air compressor), 전원공급장치(power supply)로 구성되어 있다.

기구부는 사용자가 앉은 자세로 팔을 받침대에 올려놓고 손을 에어셀 사이에 넣을 수 있는 구조로 제작되었다(그림 2). 시제품의 주요 프레임(frame)은 나무로 제작하였고 한쪽 면은 손목 재활 과정을 보기 위해 투명한 아크릴로 제작하였다. 에어셀은 폴리염화비닐(PVC)을 사용하여 사다리꼴 모양으로 손의 위와 아래에 대칭적으로 배치하였다(그림 1). 기구부의 위와 아래에 공간을 두어 에어셀 내 공기압을 측정하기 위한 공기압 센서(33A-015G-2210, 나도센텍, 한국)와 에어셀에 공기를 넣고 빼기 위한 공기압 밸브, 장치의 구동에 필요한 전자회로 및 공기배관을 설치하였다. 에어셀이 접히는 각도를 측정하기 위해 휨 센서(SEN-08606, Spectra symbol, 미국)를 에어셀에 부착하였다.

입출력 인터페이스 장치(NI-USB-6221, National instrument, 미국)에서는 기구부에 장착된 센서의 출력을 전송 받고, 공기압 밸브에 신호를 전송하여 밸브의 개폐를 조절한다. PC에서는 LabVIEW(LabVIEW 2012, National Instrument, 미국)를 사용하여 장치 시스템을 제어하고 시스템 상태를 모니터에 나타낸다. 구동기로 공기 압축기(에어

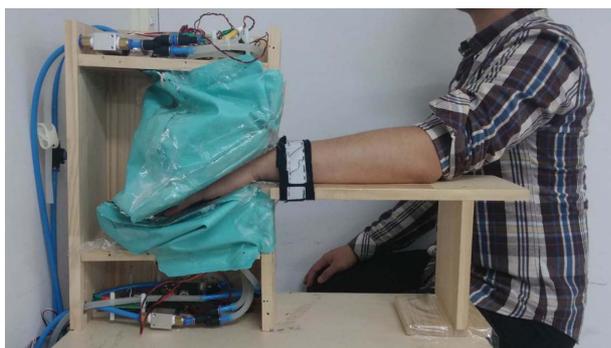


그림 2. 에어셀을 이용한 손목 재활훈련장치를 구현한 모습과 이를 활용한 실험 장면.
 Fig. 2. The wrist rehabilitation training device and experimental setup.

메이커 T5, 에어공작소, 한국)를 사용하여 에어셀에 공기를 공급한다.

수동 모드와 자동 모드를 구현하였다. 수동 모드에서는 밸브의 개폐를 모니터에 표시된 제어화면의 각각의 버튼으로 조절한다. 이를 통해 에어셀에 공기를 넣고 뺀다. 이 방식은 센서의 측정과 밸브의 동작을 확인하는데 사용된다. 자동 모드에서는 밸브의 개폐를 버튼이 아닌 센서의 출력을 기준으로 각도를 측정하여 미리 설정된 각도 범위에서 굴곡과 신전을 반복한다. 손목 재활훈련에 적용을 위하여 반복 횟수를 직접 입력 할 수 있도록 하였다.

재활 훈련을 하는 동안 모니터의 제어 및 상태 표시 화면에는 밸브의 상태, 손목 구부림 각도 그래프를 표시한다(그림 3). 비상 버튼이 있어 이를 누를 시 에어셀에 공기를 넣기 위

한 밸브는 닫히게 되고 공기를 빼기 위한 밸브는 열리게 된다. 이 기능은 기기 오작동이나 가타 문제로 훈련을 정지하고자 할 때 사용할 수 있도록 구현하였다.

손목 구부림 각도를 모니터의 제어 및 상태 표시 화면에 나타내고 자동으로 손목의 운동 방향을 바꾸기 위해서는 센서의 출력으로 밸브의 개폐를 조절해야 한다. 공기압 센서는 에어셀 내 공기압에 비례하는 전압을 출력한다. 센서의 출력은 재활훈련을 하는 동안 비선형, 불규칙한 변화가 나타났고 사람들 간 차이도 있었다. 따라서 공기압을 기준으로 밸브의 개폐를 조절하기에 적합하지 않다고 판단하였다. 힘 센서는 에어셀이 접히는 각도에 따라 비례/반비례하는 전압을 출력한다. 센서의 출력은 신뢰성 있는 신호와 측정이 가능하여 밸브의 개폐를 조절하기 위한 신호로 사용하였다. 힘 센서의 출력을 사용하여 손목 구부림 각도를 모니터 화면에 표시하고 밸브의 개폐를 조절함으로써 손목 운동을 제어하는 시스템을 구현하였다. 각도를 측정하기 위한 센서의 샘플링 주파수는 10Hz로 0.1초 간격으로 각도를 화면에 표시한다.

3. 실험

힘 센서의 출력을 사용하여 손목 구부림 각도를 측정하기 위한 회귀식을 구하고 사진으로부터 구한 손목 구부림 각도와 비교하여 장치의 성능을 평가하였다. 피험자 남자 11명(연령 23.9 ± 2.1 세, 손 길이 17.4 ± 2.1 cm, 손 두께 3.7 ± 0.4 cm), 여자 5명(연령 23.0 ± 1.6 세, 손 길이 16.7 ± 0.5 cm, 손 두께 3.2 ± 0.1 cm) 총 16명이 실험에 참가하였다. 피험자들에게 연구목적과 실험방법과 순서에 대해 설명을 하고



그림 3. 손목 재활훈련장치의 제어 및 상태 표시화면.
 Fig. 3. The control and status display of the wrist rehabilitation training device.

피험자의 손을 에어셀 사이에 넣도록 한 후, 피험자의 팔을 기구부의 팔 받침대에 고정시켰다. 실험 진행자는 자동모드를 선택하고 훈련의 반복 횟수를 2회로 입력하여 장치를 동작 시켰다. 피험자가 재활훈련을 하는 동안 실험 진행자는 설치된 카메라를 사용하여 에어셀과 피험자의 손목이 나타나는 사진과 힘 센서의 출력을 동시에 수집하였다(그림 2). 사진으로부터 손목 구부림 각도를 구하기 위해 아래의 에어셀에 부착되어 있는 나무 판과 기구부의 팔 받침대가 이루는 각도를 PC 프로그램(Free Screenshot Capture, iWesoft, 미국)을 이용하여 구하였다.

피험자들을 두 그룹으로 나누어 분석하였다. 첫 번째 그룹(즉수 번째 피험자)에서 측정된 데이터는 힘 센서의 출력을 이용하여 손목 구부림 각도를 측정하기 위한 회귀식(regression equation)을 산출하는데에 사용하였다. 위와 아래의 에어셀에 부착된 각각의 힘 센서의 출력과 사진으로 구한 손목 구부림 각도(reference) 간 회귀분석을 하였다. 그 결과로 결정계수(coefficient of determination, R^2)와 회귀식을 구하였다. 회귀분석을 하기 위해 통계 프로그램 SPSS(PASW Statistics 18, SPSS Inc, 미국)을 사용하였다.

두 번째 그룹(홀수 번째 피험자)의 측정된 데이터는 장치로부터 측정된 손목 구부림 각도와 사진으로부터 구한 손목 구부림 각도를 비교하여 장치의 성능을 평가하는 분석에 사용되었다. 분석에서는 회귀분석(regression analysis)의 결과에서 높은 결정계수를 보이는 회귀식과 해당 힘 센서의 출력을 사용하여 손목 구부림 각도를 측정하였다. 측정된 각도와 사진으로부터 구한 손목 구부림 각도를 비교하여 차이(Root Mean Square Error, RMSE)를 계산하였다. Equation (1)은 두 각도를 비교하여 차이를 구하는데 사용되었다. θ 는 사진으로부터 구한 손목 구부림 각도, θ' 는 장치로부터 측정된 손목 구부림 각도, n 은 피험자의 데이터 개수를 의미한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta'_i)^2} \quad (1)$$

III. 개발 결과

회귀분석을 한 결과 아래의 에어셀에 부착된 힘 센서의 출력과 사진으로부터 구한 손목 구부림 각도 간 결정계수가 높았다. 그림 4는 힘센서의 출력과 사진으로부터 구한 손목 구부림 각도 간 산점도와 회귀선과 함께 회귀식, 결정계수를 나타내고 있다. 따라서 아래의 에어셀에 부착된 힘 센서의 출력을 회귀식에 적용하여 손목 구부림 각도를 측정하였다(Eq. (2)). x 는 힘 센서의 출력이고, y 는 측정된 손목 구

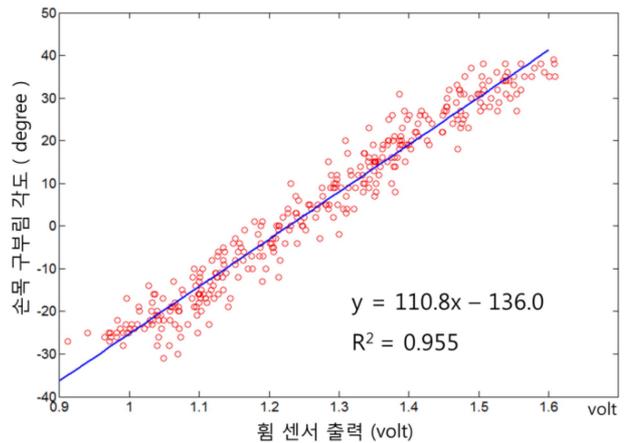


그림 4. 손목 구부림 각도(reference)와 구부림 센서 출력 사이의 회귀분석.

Fig. 4. Scatter plot with regression line of the regression analysis of wrist bending angle against the sensor output.

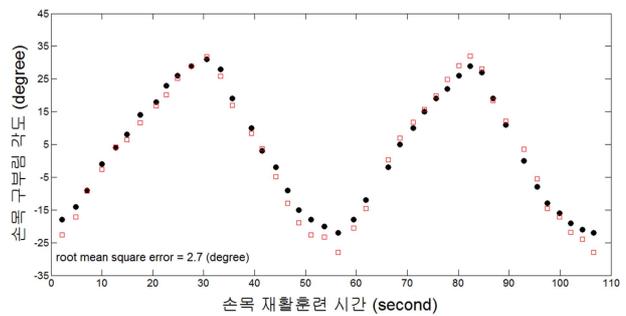


그림 5. 한 피험자의 굴곡, 신전 2회 반복 예시. (11번 피험자, ● 사진에서 측정된 손목구부림 각도, □ 센서에서 측정된 손목구부림 각도).

Fig. 5. Two cycles of flexion and extension of the wrist (subject 11, ● bending angle from photo, □ bending angle from sensor).

부림 각도를 의미한다.

$$y = 110.8x - 136.0 \quad (2)$$

장치로부터 측정된 손목 구부림 각도와 사진으로부터 구한 손목 구부림 각도를 비교하는 분석을 한 결과 차이는 $3.2 \pm 3.2^\circ$ 를 보였다. 그림 5는 사진으로부터 구한 손목 구부림 각도와 손목 재활훈련장치로 측정된 손목 구부림 각도를 비교한 결과이다. 두 각도가 서로 유사하게 변화되는 것을 알 수 있다.

제작된 장치를 이용하여 반복적인 테스트를 통해 사용자에게 손목 재활훈련을 제공할 수 있음을 확인하였다. 측정된 손목 구부림 각도는 모니터의 제어 및 상태 표시화면에 실시간으로 나타났으며, 손목의 운동 방향을 바꾸기 위한 기준으로 설정한 손목 구부림 각도의 범위에서 손목 운동이 이루어졌다.

V. 토의 및 결론

본 연구에서 제작한 손목 재활훈련장치에서는 두 개의 에어셀과 공압을 이용하여 반복적인 손목의 굴곡과 신전 운동이 가능함을 확인하였다. 힘 센서를 사용하여 재활훈련을 하는 동안 모니터에 손목 구부림 각도를 나타낼 수 있으며, 손목의 굴곡, 신전 운동이 자동으로 조절이 되고 훈련의 반복 횟수도 입력할 수 있었다. 제작된 장치를 이용하여 반복적인 테스트를 통해 사용자에게 손목 재활훈련을 제공할 수 있음을 확인하였다.

본 장치는 최대 7 bar까지 작동할 수 있도록 설계되었으나, 일반인의 경우 약 1 bar에서 작동함을 확인하였다. 손목에 구축이 발생한 환자를 대상으로 평가해 보지는 못하였으나 손목에 구축이 발생한 경우라도 공기압축기에서 제공하는 공압으로 재활 훈련이 가능할 것으로 생각된다.

재활훈련기기는 운동 기능 장애를 가진 환자를 대상으로 하기 때문에 위험을 최소화하고 방지할 수 있는 기능이 있어야 한다. 본 연구에서 제작한 장치는 유연한 재질의 에어셀이 손을 밀어주는 형식이므로 에어셀 모양 이상으로의 변형이 일어날 확률이 낮아 전동기를 사용하는 방식보다 안전에 대한 장점이 있을 것으로 생각된다. 화면에 비상 버튼을 구현해 놓았으나 있을지 모르는 비상 상황에 대비하기 위하여 물리적인 비상 버튼이 추가될 필요가 있다[17]. 본 연구에서 제작한 장치에는 각도센서로 손목 각도를 측정하고 공압센서로 에어셀 내부의 압력을 측정할 수 있어 자동으로 위험을 감지하는 이중의 안전장치 알고리즘을 구현할 수도 있다.

제작한 장치에서는 손목의 정상운동 범위 보다 작은 굴곡 30°와 신전 30° 사이의 가동 범위로 제한이 되어 있다. 이 부분은 제작한 장치의 기구부와 에어셀의 크기로 인한 한계점이지만 제작한 장치로 환자에게 반복적인 손목의 굴곡과 신전 운동이 가능함을 확인하였기 때문에 기구부와 에어셀의 모양을 손목의 정상운동 범위 굴곡 60°, 신전 60°에 맞도록 변경할 필요가 있다. 추가적인 에어셀을 측면에 배치하여 에어셀 간의 팽창 타이밍을 조절하면 외전, 내전도 가능할 것으로 생각된다. 에어셀의 수축과 팽창시 일정한 모양으로 반복되지 않는 현상이 있었으며, 이는 자바라식과 같은 접힘 부분을 유도하는 형태로 제작하여 해결할 수 있을 것으로 생각된다. 기기 동작 시 손에 맞는 에어셀 표면에 변형이 일어나지만 기능작동에 문제를 일으키지는 않으며 오히려 사용자에게 적절한 압박감과 착용감을 제공할 수 있을 것으로 생각된다. 현재의 시제품에서는 압축공기를 준비하는 기간에는 소음이 있으나 저소음형 공기압축기를 사용하여 해결 할 수 있을 것으로 생각된다.

최근의 재활훈련기기 분야는 성능, 기능, 신뢰성 면에서

많은 발전이 있지만, 경제적 측면, 부피 및 중량 측면에서 한계가 있어 개인이 집에서 사용하기 보다는 병원에서 운영하는 방식으로 보급되고 있는 실정이다. 기기의 구동기로 공압이 사용되면 기존의 기기에 비해 저렴하게 기기를 제작할 수 있어 개인이 구매하여 시간과 장소에 구애받지 않고 재활훈련이 가능할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 마비된 관절에 움직임을 만들어 내어 재활훈련을 하도록 하기 위한 방식으로 가장 간단한 형태의 에어셀을 제작하여 손목의 굴곡, 신전 운동에 적용하는 손목 재활훈련 장치를 개발하였다. 실제로 환자 재활훈련에 적용하기 위해서는 앞서 언급한 부분의 개선이 필요하다. 이러한 개선과 함께 향후 다양한 동작을 구현할 수 있는 여러 개의 에어셀과 모양을 제작하여 손목의 굴곡과 신전 보다 복잡한 운동이 가능한 기기를 제작할 수 있을 것이다. 기기를 소형화하고 경량화하여 웨어러블이 가능한 형태로 제작할 수 있을 것이다. 환자가 운동 기능 장애를 회복하기까지는 오랜 기간이 걸리게 되기 때문에 재활훈련에 있어서 환자가 치료 기간 중에 그만두지 않기 위한 노력이 필요하다. 이를 위해 환자가 재활훈련기기를 이용하여 재활훈련을 할 경우 단순 반복 형태의 재활 훈련 프로그램이 아닌 가상현실을 접목한 시각 피드백(visual feedback) 장치가 포함된 게임 방식의 재활 훈련 시스템으로의 발전이 필요하다.

Reference

- [1] J.T. Low, S. Payne, and P. Roderick, "The impact of stroke on informal carers: a literature review" *Soc. Sci. Med.*, vol. 49, no. 6, pp. 711-725, 1999.
- [2] A. Shumway-Cook and M.H. Woollacott, *Motor control: theory and practical applications*: Williams & Wilkins Baltimore, 1995.
- [3] R.J. Nudo, "Remodeling of cortical motor representations after stroke: implications for recovery from brain damage" *Mol. Psychiatry*, vol. 2, no. 3, pp. 188-191, 1997.
- [4] W.H. Chang and Y. Kim, "Robot-assisted Therapy in Stroke Rehabilitation" *Journal of stroke*, vol. 15, no. 3, pp. 174-181, 2013.
- [5] A. Esquenazi and A. Packel, "Robotic-assisted gait training and restoration" *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 91, no. 11 Suppl 3, pp. S217-27; quiz S228-31, 2012.
- [6] G. Kwakkel, B.J. Kollen, and H.I. Krebs, "Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: a systematic review" *Neurorehabil. Neural Repair*, vol. 22, no. 2, pp. 111-121, 2008.
- [7] M.H. Lee, J. Son, J.Y. Kim and Y.H. Kim, "Development of an active training system for rehabilitation exercise of hemiplegic patients" *J. Biomed. Eng. Res.*, vol. 32, no. 1, pp. 1-6, 2011.
- [8] S.E. Fasoli, H.I. Krebs, M. Ferraro, N. Hogan, and B.T. Volpe, "Does shorter rehabilitation limit potential recovery poststroke?" *Neurorehabil. Neural Repair*, vol. 18, no. 2, pp. 88-94, 2004.

- [9] C.H. Hwang, J.W. Seong, and D.S. Son, "Individual finger synchronized robot-assisted hand rehabilitation in subacute to chronic stroke: a prospective randomized clinical trial of efficacy" *Clin. Rehabil.*, vol. 26, no. 8, pp. 696-704, 2012.
- [10] H.I. Krebs, N. Hogan, M.L. Aisen, and B.T. Volpe, "Robot-aided neurorehabilitation" *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 1, pp. 75-87, 1998.
- [11] D. Gijbels, I. Lamers, L. Kerkhofs, G. Alders, E. Knippenberg, and P. Feys, "The Armeo Spring as training tool to improve upper limb functionality in multiple sclerosis: a pilot study" *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 8, no. 5, pp. 1-8, 2011.
- [12] Maestra Hand and Wrist CPM, Thera Tech Equipment. [Online]. Available: <http://theratechequip.com/products/kinetec-maestra-hand-wrist-cpm/>
- [13] P. Heo, G.M. Gu, S. Lee, K. Rhee, and J. Kim, "Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering" *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 5, pp. 807-824, 2012.
- [14] Y.M. Kim, I. Moon, "DULEX, A Wearable Hand Rehabilitation Device for Stroke Survivals" *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 16, no. 10, pp. 919-926, 2010.
- [15] E. Koeneman, R. Schultz, S. Wolf, D. Herring, and J. Koeneman, "A pneumatic muscle hand therapy device," in *Proc. 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. San Francisco, USA, Sep. 2004. pp. 2711-2713.
- [16] S. Kang, S. Chen, G.H. Kim, K. Kim, S. Back, H. Shin, G. Jo, M. Hwang, and H. Choi, "Continuous passive motion(CPM) devices using air pressure system," in *Proc. 2014 Bio-Medical System and Smart-Care Conference*, Jeongseon, Korea, Feb, 2014, pp. 83-86.
- [17] J. Won, H. Sim and C. Han, "A development of rehabilitation system for upper limb using robot manipulator" *J. Biomed. Eng. Res.*, vol. 24. no. 4, pp. 309-318, 2003.