

어깨 통증 치료 재활로봇 개발

Development of a Rehabilitation Robot for Shoulder Pain Treatment

이정수*, 김태현, 김광기

J. S. Lee, T. H. Kim, K. G. Kim

요 약

뇌졸중 환자의 합병증 중 하나인 편마비성 견관절 통증과 유착성 관절낭염은 흔하고 불편한 합병증으로 어깨 관절 운동범위의 유지와 회복을 위한 재활 치료가 필요하다. 이를 위한 재활로봇은 견관절 중심의 움직임과 견갑상완리듬을 고려한 메커니즘으로 로봇 암의 관절이 어깨와 팔의 움직임을 자연스럽게 추종하는 것이 요구된다. 어깨 관절의 외전-내전, 내회전-외회전 동작은 어깨 재활에 효과적인 동작으로 이 동작을 스트레칭과 능동보조운동을 구현할 수 있는 어깨 치료 재활로봇을 제안하였다. 재활로봇의 로봇 암 관절은 6자유도의 외골격 타입으로, 견흉관절의 상방회전을 위한 1자유도, 관절와상완관절의 x, y, z 방향의 움직임을 위한 3자유도 등은 구동기 구동이며, 견흉관절의 내밀-뒤당김을 위한 1자유도와 팔꿈치 관절의 굽힘-펴의 1자유도는 수동 작동으로 구성된다. 로봇 암 관절의 ROM을 시뮬레이션하여 분석한 결과, 로봇 암의 모든 관절에서 기구부의 간섭 없이 어깨 관절의 외전 동작과 내회전 및 외회전 동작의 구현이 가능함을 확인하였으며, 시제품 로봇 암을 착용하고 어깨 관절의 외전-내전, 내회전-외회전 그리고 굽힘-펴 동작에 대하여 스트레칭 운동 구현을 시험한 결과 로봇 암 관절의 시뮬레이션 결과와 비슷하게 ROM의 구현이 가능함을 확인할 수 있었다. 제안한 재활로봇은 환자에게 생체역학적인 움직임이 가능한 어깨 중심의 재활치료를 제공하여 어깨 관절의 운동범위 및 상지 기능의 회복에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

ABSTRACT

One of the complications of stroke patients, hemiplegic shoulder pain and adhesive capsulitis, are common and uncomfortable complications, and rehabilitation treatment is needed to maintain and recover the range of motion (ROM) of shoulder joint motion. To this end, rehabilitation robots are a mechanism that takes into account shoulder-centered movements and scapulohumeral rhythms, and it is required that the joints of the robot arm naturally follow the movements of the shoulders and arms. Abduction-adduction, internal rotation-external rotation of shoulder joint movement are effective movement for shoulder rehabilitation, and we proposed a rehabilitation robot for shoulder pain treatment that can implement this movement for stretching and active assistive exercise. The robot arm joint of rehabilitation robot is an exoskeleton type of 6 degree of freedom (DOF), 1 DOF of upward rotation of scapulothoracic joint (ST joint), 3 DOF of x, y, and z direction movement of glenohumeral joint (GH joint), and joints of 4 DOF are motor-driven. And 1 DOF of protraction-retraction of ST joint and 1 DOF of flexion-extension of elbow joint were manually operated. As a result of simulating the ROM of the robot arm joint, it was confirmed that it is possible to implement the abduction, internal rotation-external rotation of shoulder joint without interference of robot arm joint. We tested the implementation of abduction-adduction, internal rotation-external rotation, and flexion-extension of shoulder joint with prototype robot arm by stretching mode, and found that ROM could be implemented similarly to the simulation results of the robot arm joint. The proposed rehabilitation robot is expected to provide patients with focusing of shoulder rehabilitation that enables biomechanical movement to help restore the ROM and upper limb function of the shoulder joint.

Keyword : rehabilitation robot, stroke, shoulder pain treatment, scapulohumeral rhythm, range of motion

1. 서론

뇌졸중은 뇌혈관이 막히는 뇌경색이나 파열되는 뇌출혈로 뇌 손상을 일으키는 질환으로 2019년 통계청의 사망원인 통계자료에 따르면 인구 10만 명당 42명의 사망률을 보이며 뇌졸중 환자의 수는 계속 증가하고 있으며[1], 현재 우리나라 뇌졸중 환자는 매년 10만 명 이상 발생하며 2030년에는 35만 명으로 증가할 것으로 추정하고 있다[2]. 뇌졸중은 일반적으로 신체 조정 능력, 운동 기능, 마비 및 감각 소실, 경직, 인지 및 의사소통 장애 등의 합병증이 나타나게 되며[3], 환자 대부분은 신체 한쪽의 근력이 약화되고 비정상적인 근육긴장도를 보이는 편마비가 특징적으로 나타난다[4].

편마비 환자는 팔과 손 등 상지의 마비로 일상생활에 어려움을 보이기도 하며[5], 특히 뇌졸중 환자의 편마비성 건관절 통증과 유착성 관절낭염(capsulitis adhesion)은 흔하고 불편한 합병증 중 하나로 편마비성 건관절 통증은 편마비 환자에서 유병률이 34%에서 84%로 보고되고 있으며[6, 7], 흔히 오십견으로 불리는 유착성 관절낭염은 건관절 통증의 원인 중 50% 정도를 차지한다고 보고되는[8] 등 유착성 관절낭염을 뇌졸중 환자의 편마비성 건관절 통증의 주된 원인으로 보고하였다[9].

편마비성 건관절 통증이나 유착성 관절낭염이 있는 경우 어깨 관절의 가동범위(ROM, range of motion)가 점진적으로 감소하고 통증으로 움직임이 제한되며 또한 어깨 관절의 외전 동작뿐만 아니라 내회전과 외회전의 ROM도 감소하게 된다[10]. 적절한 재활 치료 또는 관절 운동을 하지 않으면 통증으로 움직임이 제한되어 어깨 관절의 ROM은 더 감소하게 되는 악순환이 발생하여 통증과 기능의 악화가 진행된다.

어깨 관절의 ROM 및 상지 기능의 회복을 위해

서는 재활 치료가 필요하며 조기 및 적절한 재활 치료는 그 효과를 높임으로 환자의 조기 퇴원 및 치료 비용 감소, 나아가 사회의 일원으로 조속히 복귀할 수 있도록 도움을 줄 수 있다. 상지 기능은 일상생활 동작 수행 능력과 사회 활동 등과의 연관성이 높다고 알려져 있으며[11-12], 편마비 환자의 상지 운동은 환측 상지 기능 향상에 효과적이라고 보고하고 있다[13].

보존적 재활치료 중 운동치료는 통증 감소, 운동 회복 및 기능 복귀에 목적을 두며 어깨 관절의 ROM 유지와 회복에 초점을 맞추어 능동적, 수동적 스트레칭으로 구성된다. 스트레칭은 관절의 ROM을 증가시키기 위하여 통증을 너무 유발하지 않는 범위에서 점진적 또는 단계별로 운동의 범위를 늘리는 것이 좋으며[14], 스트레칭 치료는 임상에서 유착성 관절낭염과 회전근개 손상 등 어깨 통증의 일차 치료로써 흔하게 사용되고 있다[15-16]. 스트레칭과 관절의 ROM 범위 내에서 이루어지는 관절 이동운동은 특정 관절가동범위를 지정하여 관절을 수동적으로 움직이는 연속 수동 움직임(CPM, continuous passive motion) 장치를 적용하여 연속적인 스트레칭 움직임으로 통증을 완화시킨다[17].

건강한 어깨 관절에서 외전 동작의 ROM은 0°에서 180°의 범위를 가지며 건관절 외전의 운동형상학에 있어 관절와상완관절(glenohumeral joint)의 외전이나 굴곡은 견갑골의 외전이나 굴곡의 상방회전과 함께 일어나며, 1934년 Codman은 어깨를 들어 올릴 때 상완골, 견갑골, 쇄골의 통합된 이러한 움직임을 견갑상완리듬(scapulohumeral rhythm)이라 하였다[18]. 외전 180°에서는 일반적으로 2:1의 비율로 관절와상완관절의 120° 외전과 견흉관절의 60° 상방회전이 동시에 일어나게 된다고 하나 견갑골과 상완골의 움직임을 정량화 하는 많은 연구에서는 견갑상완리듬은 2:1 비율이 아니라 각도 구간별, 성별, 연령별로 다양한 견갑상완리듬을 보고하고 있으며[19], 김재현 등(2002)의 건강한 20대 16명을 대상으로 한 연구에서는 최대 외전 상태에서의 견갑상완리듬이 3.34:1에서 5.66:1 사이였으며, 평균 3.46(±1.13):1이었음을 보고 하였다[18].

어깨 관절이나 팔의 ROM 증가를 위한 운동기구나 치료를 위한 상지 재활로봇들은 다수 존재하나 대부분 팔 전체의 움직임 회복을 목적으로 하고 있으며, 현재 병원에서 보편적으로 사용하는 CPM 장치나 Arneo Power와 같은 기존의 다자유도 건관절 재활로봇은 건관절 중심이 구축되어 ROM이 줄어들거나 의도하지 않은 힘이 가해질 우려가 있다[20-21]. 또한 대표적인 해외 말단장치 상지 재활로

접 수 일 : 2022.10.25

심사완료일 : 2022.11.26

게재확정일 : 2022.11.29

* 이정수 : 가천대학교 일반대학원 융합의과학과

의용생체공학전공(가천융합의과학원) 박사과정

jsmech@gachon.ac.kr (주저자)

김태현 : 가천대학교 의과대학 의공학교실 연구원

steveh78@naver.com (공동저자)

김광기 : 가천대학교 의공학과 교수

kimkg@gachon.ac.kr (교신저자)

※ 본 연구는 보건복지부 국립재활원 재활연구개발용역사업(R&D) 재활로봇중개연구용역(#NRCTR-EX21004)으로 수행되었습니다.

봇인 InMotion, MIT-MANUS 등은 손과 손목 중심, 그리고 반복으로 인하여 뇌의 가소성을 목표에 둔 재활로봇이다. 무엇보다 편마비성 건관절 통증 및 유착성 관절낭염의 치료, 즉 어깨 통증 치료를 주목적으로 하고 있지 않다.

따라서 어깨 관절의 생체역학적인 움직임을 구현하여 뇌졸중 편마비성 건관절 통증 및 유착성 관절낭염의 통증 치료를 주목적으로 하는 상지 재활로봇이 필요하다. 효과적인 어깨 통증 치료를 위하여 어깨의 통증 치료를 주목적으로 하고 견갑상완리듬 등 생체역학적인 움직임을 고려한 기구 설계로 어깨와 팔의 자연스러운 움직임을 재현할 수 있는 어깨 치료 재활로봇을 구상 및 제안하였다.

2. 연구방법

2.1 재활로봇의 구상

어깨 통증 치료를 위한 어깨 관절 재활에 효과적인 동작과 운동 기능을 검토하기 위해 재활의학과 및 정형외과 교수, 뇌졸중 및 재활 관련 전문가, 외골격형 재활로봇 개발 업체 전문가 등의 자문회의를 진행하였다. 어깨 관절의 외전 180° 동작에서는 상완골과 견갑골의 움직임의 비율인 견갑상완리듬이 정의되는 동작이고, 유착성 관절낭염이 있는 경우 어깨 관절의 외전 동작뿐만 아니라 내회전과 외회전의 ROM이 감소하는 특징을 보여준다[10]. 따라서 뇌졸중 편마비성 건관절 통증 및 유착성 관절낭염의 통증 치료에 보다 효율적인 동작으로 어깨 관절의 외전-내전, 내회전-외회전을 목표 동작으로 정하였다.

기본 동작을 구현할 운동 기능은 두 가지로 첫째, 구동기로 작동하는 스트레칭과 둘째, 능동적 스트레칭을 구동기가 도와주는 능동보조운동이다. 스트레칭은 관절의 ROM을 증가시키기 위하여 통증을 너무 유발하지 않는 범위에서 점진적으로 운동의 범위를 늘리는 단계별 스트레칭 기능이 필요하다[22].

전통적으로 견갑상완리듬의 비율은 2:1로 알려져 있으나 많은 연구에서 어깨 외전 동작에서 각도 구간별, 성별, 연령별로 다양한 견갑상완리듬을 보고하고 있으므로[18-19], 목표 동작에 대한 건관절의 생체역학적 움직임 데이터를 얻기 위해 그림 1과 같이 모션캡처(OptiTrack 장비, 모델명 Flex 13, 제조사 Optitrack)를 이용하여 어깨 관절의 외전-내전, 내회전-외회전 동작에 대해 20~30대 연구원 남 5명, 여 5명의 각각 10회 반복 운동 데이터를 추출하

고 분석하였다. 모션캡처 marker의 위치는 관절와 상완관절과 견갑골은 각각 3개 부착 및 그 중심점, 쇄골은 1개 부착, 팔꿈치와 손목은 각각 2개 부착 및 그 중심점으로 하였다.



그림 1. OptiTrack 장비 및 marker 위치

Fig. 1. OptiTrack device and position of marker.

외전 180° 동작의 분석 결과, 다양하고 편차가 크므로 로봇 암의 메커니즘 구상을 위해 그 범위를 축소하여 남 5명의 시험 데이터만을 분석하기로 하였다. 남 5명의 외전 180° 동작의 분석 결과 그림 2와 같이 관절와상완관절은 몸 중심 방향으로 100mm(-x), 머리 방향으로 80mm(+y), 몸 앞쪽 방향으로 60mm(+z) 이동하였으며 이는 견갑상완리듬에 따른 견흉관절의 상방회전(-x, +y)과 올림(+y) 및 내림(+z) 움직임에 의한 것이다.

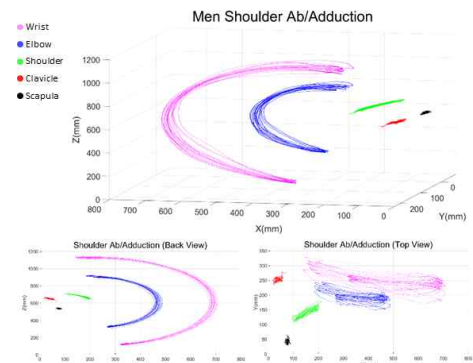


그림 2. 남 5명의 외전 180° 동작 분석

Fig. 2. Analysis of abduction 180° of 5 men.

로봇 암의 관절이 어깨를 비롯한 팔의 움직임을 자연스럽게 추종하지 않으면 불편함이나 통증이 발생하게 되고 관절의 손상을 일으킬 위험도 있다. 어깨 관절이란 보통 관절와상완관절을 말하며 넓은 의미에서는 건완복합체(shoulder-arm complex)인 것으로[19], 목표 동작인 어깨 관절의 외전-내전, 외회전-내회전 동작에서 생체역학적인 움직임인 견갑상완리듬과 어깨 관절의 중심 이동을 고려하는 것은, 관절와상완관절의 x, y, z 방향의 이동을 로봇

암의 관절이 따라가는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 로봇 암의 관절이 어깨와 팔의 자연스러운 움직임을 구현하도록 메커니즘을 고려하여 로봇 암 관절의 기구설계 반영되어야 한다.

2.2 재활로봇의 설계

재활로봇의 로봇 암 관절은 외골격형의 6자유도로 그림 3과 같이 구동기로 작동하는 관절은 4자유도이며, 수동으로 작동하는 관절은 2자유도이다. 구동기 작동의 4개 관절은 브러시리스 모터(BLDC, brushless direct current motor)-엔코더-하모닉드라이브로 구성하였고 팔꿈치 바로 위에 6축 힘-토크 센서를 적용하여 능동보조운동에서 사용자의 의도 파악, 스트레칭에서 환자의 통증 및 ROM 제한에 정확도를 높이고자 하였다. 6축 힘-토크 센서는 사용자가 가하는 힘이나 토크를 측정하고 제어 프로그램의 기준값(thresholds)과 비교하여 사용자가 특정 동작을 하는지의 여부를 판단하게 된다. 또한 기준값으로 스트레칭 운동에서 환자의 관절에 가해지는 힘이나 토크 측정으로 환자의 통증 여부를 판단할 수 있는데, 관절의 구축 정도와 개개인의 차이가 있으므로 사용자에게 맞춤 설정값이 필요하다.

로봇 암 관절의 구성을 보면(그림 3), 관절와상완관절의 x, y, z 방향의 움직임을 위한 3자유도(①, ②, ③), 견흉관절의 상방회전과 로봇 암의 좌우 변환(즉, 오른쪽 팔에서 왼쪽 팔로 변환, 왼쪽 팔에서 오른쪽 팔로 변환시켜주는)을 위한 1자유도(④) 등 4자유도는 구동기 작동 관절이며, 견흉관절의 내밀-뒤당김을 위한 수동 1자유도와 팔꿈치 관절의 굽힘-펴는 수동 1자유도로 구성된다.

로봇 암 관절의 메커니즘 및 제어의 단순화, 로봇의 경량화 등을 위해 로봇 암은 오른팔과 왼팔을 겸용하여 사용할 수 있도록 설계하였다. 견갑골구동모터를 자동으로 180° 회전시키는 등의 준비과정을 거치면 오른쪽 로봇 암에서 왼쪽 로봇 암으로, 왼쪽 로봇 암에서 오른쪽 로봇 암으로 변환이 되는 메커니즘이다.

로봇 암은 리프트 컬럼 위에 장착되며, 베이스는 사각관을 용접하여 경량화하되 기계적 강도를 충분히 확보하도록 하였고, 높이 조절 기능을 갖는 캐스터를 달아 이동과 고정 쉽도록 하였다.

인체공학적인 편의를 제공하기 위해 로봇 암의 높낮이, 어깨 너비, 팔꿈치 길이는 신체 사이즈에 맞게 조절이 가능하도록 설계하였다. 한국 디자인 진흥원에서 제공하는 사이즈코리아의 인체데이터를 참고하여, 로봇 암의 높이는 리프트 컬럼을 조작하

여 반자동으로 조절할 수 있다($1000 \pm 150\text{mm}$). 또한 어깨 너비는 편측으로 최대 50mm 조절, 팔꿈치 길이는 290~360mm 조절할 수 있도록 설계하였다. 손잡이는 환자의 편마비 정도, 손의 강직 등의 상태에 따라 다양한 손잡이나 손 고정 장치를 부착할 수 있도록 하였다.

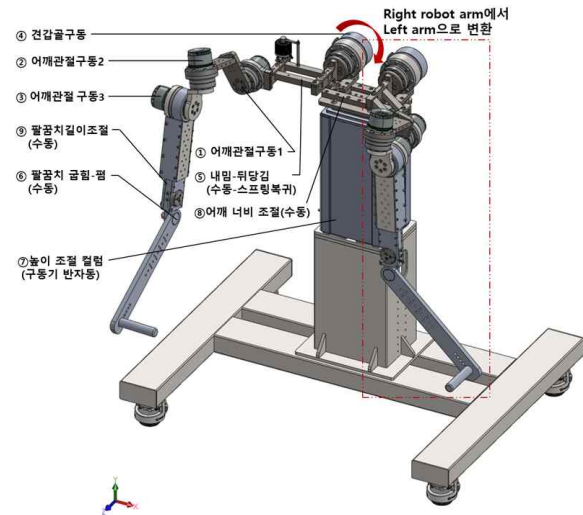


그림 3. 6자유도의 외골격형 로봇 암

Fig. 3. 6DOF of exoskeleton robot arm.

3. 결과 및 고찰

3.1 로봇 암 ROM 분석

목표 동작인 어깨 관절의 외전 동작과 내회전 및 외회전 동작에서 로봇 암 관절의 ROM을 시뮬레이션하여 분석한 결과는 표 1과 같다. 시뮬레이션은 3D 설계 프로그램에서 로봇 암의 각 관절의 각도를 동작 단계별로 입력하여 단계별로 동작을 만들고 마지막으로 180° 어깨 외전 동작을 구현하고 가능한 최대 ROM을 구하였다. 견갑상완리듬이 극대화되며 견관절과 견갑골의 움직임이 크게 나타나는 외전 180° 동작에서 관절와상완관절에 해당하는 로봇 암의 ③관절의 이동량, 즉 관절와상완관절은 몸 중심 방향으로 63mm 이동, 머리 방향으로 102mm 이동, 몸 앞쪽 방향으로 77mm 이동하였다. 또한 로봇 암의 모든 관절에서 기구부의 간섭 없이 어깨 관절의 외전 동작과 내회전 및 외회전 동작의 구현이 가능함을 확인하였다. 모션캡처에서 측정한 관절와상완관절의 움직임은 다양하고 편차가 크고 정규화가 어려우므로 로봇 암의 제어 프로그램을 완성하기 위해 관절와상완관절의 x, y, z 방향의 이동량은 견갑상완리듬의 비율을 2.5:1로 설정하여 외전 동작을

표 1. 목표 동작에서 로봇 암의 ROM

Table 1. ROM of robot arm in target movement.

No.	구동 관절		6자유도 로봇 암 관절의 ROM (도)										작동 방식	관절 움직임
			로봇 암 작동 범위	-	-	-	180	75	70	90	150	60		
			로봇 암 착용 작동 범위	기본 위치	외전 시작	외전 90	외전 180	내전 45	내회전 70	외회전 90	굽힘 150	펴 30		
①	어깨 관절	구동1	-25~+18	-20	-20	-20	20	-35	0	0	-60	-10	모터-엔코더-감속기 구동 (+힘토크센서)	관절와 상완관절
②		구동2	-90~+90	0	90	90	90	-45	-80	80	0	0		
③		구동3	+10~+122	10	10	70	110	40	35	20	125	-40		
④	견갑골 구동		0~+60	0	0	~	50	25	20	20	45	0	수동 (스프링 복귀)	견흉관절의 상방회전
⑤	내밀-뒤당김		0~+50	0	0	~	max. 50	50	50	50	30	0		견흉관절
⑥	팔꿈치 관절		0~+90						85	50	0	0		굽힘-펴

구현한 것으로 이는 특정인(30대 남성, 키 176cm, 몸무게 75kg)의 비율을 타겟으로 제어 프로그램을 완성하고 이후 범위를 넓혀 다양한 비율에 대응할 수 있도록 제어 프로그램의 연구가 필요하다. 관절와상완관절의 이동량 즉 견갑상완리듬의 비율을 변경하여 대상자의 어깨 관절의 움직임과 그에 따른 이동량을 추종하도록 해야 한다.

3.2 시제품 제작 및 로봇 암 착용 결과

어깨 통증 치료 재활로봇의 시제품을 그림 4와 같이 제작하고 로봇 암을 착용한 후 어깨 관절의 외전-내전, 외회전-내회전의 기본 동작과 어깨 관절의 굽힘-펴 동작에 대하여 구동기로 작동하는 스트레칭 운동기능을 구현하였다. 스트레칭 운동 기능은 6축 힘-토크센서가 환자의 통증과 ROM을 제한하는 역할을 하게 된다. 이 운동에서의 재활 치료 시나리오는 환자의 측정된 ROM 범위까지 운동을 하고 그 다음 단계에서는 최대 운동 범위에서 ROM을 1~3°까지 증가하고 ROM의 행정 끝에서는 3~5초 정지를 하여 환자가 약간의 통증이 느껴지는 상태에서 ROM을 단계적으로 증가시키는 것이다. 즉 기존의 CPM에서 주로 이루어지는 passive 운동 기능에서 더 나아가 단계적으로 ROM을 증가시키는 것으로 6축 힘-토크센서가 환자의 통증과 ROM을 제한하는 안전장치 역할을 하게 된다. 6축 힘-토크센서의 측정값을 기준값과 비교하여 통증 유무를 판단하는 것이 이상적이지만, 관절의 구축 정도나 개개인마다 차이가 있으므로 기준값을 정하기에는 어려움이 있으므로, 환자 본인이 약간의 통증으로 느끼면 직접 말을 해서 통증이 발생한 기준을 정하는 방법으로 실험을 진행하였다.

로봇 암을 착용하고 어깨 관절의 외전-내전의 스

트레칭 운동 구현 시험은 그림 5와 같으며, 외전은 180°까지 그리고 내전은 45°까지 가능함을 확인하였다. 또한 그림 6과 같이 내회전은 70°, 외회전은 90° 굽힘은 150°, 펴는 30°까지 ROM이 가능하였다. 구현 시험의 조건은 시험자가 아픔을 느끼거나, 어깨나 팔이 로봇 암에 끌려가거나, 로봇 암에 신체가 닿거나 닿을 가능성이 있는 경우는 제외하고 자연스러운 동작이 가능한 범위를 측정하였다.

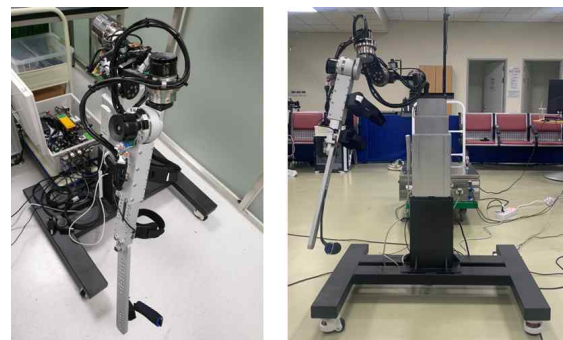


그림 4. 재활로봇 시제품

Fig. 4. Prototype of rehabilitation robot.



그림 5. 어깨 관절의 외전-내전 스트레칭 모드

Fig. 5. Shoulder joint abduction-adduction stretching.



그림 5. 계속
Fig. 5. Continue.



그림 6. 어깨 관절의 내회전-외회전, 굽힘-펴 스트레칭 모드

Fig. 6. Shoulder joint internal rotation-external rotation, flexion-extension stretching.

3.3 고찰

편마비성 건관절 통증 및 유착성 관절낭염은 뇌졸중 환자의 흔한 후유증의 하나로 ROM 회복과 통증 치료를 위해 6자유도의 로봇 암 관절로 구성된 외골격 타입의 재활로봇을 구상하였다.

유착성 관절낭염은 어깨 관절의 외전 동작뿐만 아니라 내회전과 외회전의 ROM이 감소하는 특징을 보이므로 뇌졸중 환자의 편마비성 건관절 통증 및

유착성 관절낭염에 보다 효율적인 동작으로 어깨 관절의 외전-내전, 내회전-외회전을 목표 동작으로 정하고 모션캡처를 이용하여 최종적으로 관절와상완관절의 x, y, z 방향의 이동량을 분석하였다. 이 관절에 대응하는 로봇의 3개 관절과 견흉관절의 상방회전 그리고 내밎-뒤당김 움직임을 모사하는 관절을 구성하여 로봇의 관절이 어깨 관절 중심의 이동과 견갑상완리듬 등의 건관절의 생체역학적인 움직임을 구현하여 어깨를 비롯한 팔의 움직임을 자연스럽게 추종하도록 메커니즘을 설계하였다. 즉 목표 동작을 하였을 때 인체의 관절와상완관절의 움직임을 로봇 암의 ③관절이 얼마나 자연스럽게 추종할 수 있는가에 따라 자연스러운 움직임과 효과적인 재활치료가 가능하다.

로봇 암 관절의 ROM을 시뮬레이션하여 분석한 결과, 로봇 암의 모든 관절에서 기구부의 간섭 없이 어깨 관절의 외전 동작과 내회전 및 외회전 동작의 구현이 가능함을 확인하였다. 그러나 견관절과 견갑골의 움직임이 크고 견갑상완리듬이 극대화되는 동작인 외전 180° 동작에서 모션캡처에서 분석된 관절와상완관절의 움직임과 이에 대응하는 로봇 암의 ③관절의 이동량은 차이가 발생하였는데, 그 이유는 모션캡처의 marker는 관절 위치에 해당하는 옷에 부착하였기 때문에 실제 근육과 관절의 움직임과는 차이가 발생한 것으로 예상된다. 두 번째는 로봇 암의 구동부 구동 관절은 BLDC 모터-엔코더-하모닉 드라이브로 구성되어 외전 등의 목표 동작을 구현할 경우 기구부의 간섭으로 인하여 이동량의 차이를 줄이기에는 한계가 있다.

재활로봇 시제품의 로봇 암을 착용하고 어깨 관절의 외전-내전, 내회전-외회전 그리고 굽힘-펴 동작에 대하여 스트레칭 운동 구현을 시험한 결과 로봇 암 관절의 시뮬레이션 결과와 비슷하게 ROM의 구현이 가능하였다. 내전과 펴 동작에서는 관절이 움직이기 위한 공간 확보 문제로 로봇 암의 작동 ROM 미만의 결과 값을 보여주었다. 각 동작의 기본 위치에 대한 명확한 정의가 필요하고 실제적으로 효과적인 ROM 구간을 찾아 재활 치료 시나리오에 반영하는 것이 필요하다. 또한 견갑상완리듬은 전통적으로 2:1 비율로 알려져 있으나 어깨 외전 동작에서 각도 구간별, 성별, 연령별로 다양한 견갑상완리듬을 보고되고 있으므로 사람마다 제 각각인 견갑상완리듬을 파악하고 로봇 암 관절이 사람의 어깨와 팔의 움직임을 자연스럽게 따라갈 수 있도록 제어의 고도화가 필요하다. 본 연구에서는 특정인의 비율인 2.5:1에 맞게 움직임을 제어 및 조작하여 아직은 여러 사람에게 적용하기에는 무리가 있

을 수 있다.

연구에서 제안한 어깨 통증 치료 재활로봇은 기존 CPM 장치나 Armeo Power와 같은 기존의 다자유도 건관절 재활로봇에서 부족한 어깨 관절 중심의 이동과 건갑상완리듬 등의 건관절의 생체역학적인 움직임을 구현하여 어깨 통증 치료와 어깨 관절의 ROM 회복을 주목적으로 하고 있다. 따라서 환자에게 생체역학적인 움직임이 가능한 어깨 중심의 재활치료를 제공하여 건관절의 ROM 및 상지 기능의 회복 등 재활의 효과를 높이고 환자의 조기 퇴원 및 치료 비용 감소, 나아가 사회의 일원으로 조속히 복귀할 수 있도록 도움을 줄 것으로 기대한다.

또한 로봇 암 관절의 메커니즘 및 제어의 단순화, 로봇의 경량화 등을 위해 로봇 암은 오른팔과 왼팔을 겸용하여 사용할 수 있도록 설계하였기 때문에 향후 사업화를 통하여 보급형 재활로봇으로 중소형 병원의 도입도 기대할 수 있다.

4. 결론

뇌졸중 환자의 편마비성 건관절 통증 및 유착성 관절낭염의 ROM 회복 및 통증 치료를 위한 재활로봇은 건관절 중심의 움직임과 건갑상완리듬 등 어깨 관절과 팔의 생체역학적 움직임을 고려한 메커니즘이 필요하다. 어깨 통증 치료를 위하여 어깨 관절의 외전-내전, 내회전-외회전 동작을 자연스럽게 추종하며 스트레칭과 능동보조운동을 구현할 수 있는 어깨 치료 재활로봇을 제안하였다. 제안한 재활로봇은 환자에게 적절한 재활 치료를 제공하여 건관절의 운동범위 및 상지 기능의 회복에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [1] 2019 Cause of Death Statistics, http://kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/1/6/2/index.board?bmode=read&bSeq=&aSeq=385219&pageNo=1&rowNum=10&navCount=10&currPg=&searchInfo=&searchTarget=title&sTxt=, [accessed: 01-10-2022].
- [2] M. J. Kim and H. M. Park, "Relationships of Activities of Daily Living and Body Image with Quality of Life in Stroke Patients: Mediating Effects of Interpersonal Relations," *Journal of Muscle and Joint Health*, vol. 28, no. 2, pp. 183-191, 2021.
- [3] K. B. Lee, S. H. Lim, K. H. Kim, K. J. Kim, Y. R. Kim, W. N. Chang, et al., "Six-month functional recovery of stroke patients: A multitime-point study," *International Journal of Rehabilitation Research*, vol. 38, no. 2, pp. 173-180, 2015.
- [4] F. R. Horak, "Clinical assessment of balance disorders," *Gait & posture*, vol. 6, pp. 79-84, 1997.
- [5] H. S. Kwak, L. Mercier, T. Audet, and R. Hebert, "Impact of motor, cognitive, and perceptual disorders on ability to perform activities of daily living after stroke," *Stroke*, vol. 32, pp. 2602-2608, 2001.
- [6] A. W. Dromerick and M. J. Reding, "Medical and neurological complications during stroke rehabilitation," *Stroke* vol. 25, pp. 358-361, 1994.
- [7] P. Wanklyn, A. Forster, J. Young, "Hemiplegic shoulder pain(HSP): natural history and investigation of associated features," *Disabil Rehabil*, vol. 18, pp. 497-501, 1996.
- [8] S. F. Lo, S. Y. Chen, H. C. Lin, W. F. Jim, N. H. Meng, and M. J. Kao, "Arthrographic and clinical findings in patients with hemiplegic shoulder pain," *Arch Phys Med Rehabil*, vol. 84, pp. 1786-1791, 2003.
- [9] T. S. Yoon, D. H. Kim, J. W. Park, B. S. Kwon, K. H. Ryu, H. J. Lee, et al., "Causes of the Hemiplegic Shoulder Pain," *Annals of Rehabilitation Medicine*, vol. 34, no. 2, pp. 158-162, 2010.
- [10] M. K. Jung, "A Case Study of a 53-year-old Female Patient with Frozen Shoulder for Effect of Scapular Stabilizing Exercise on Shoulder Pain, Active Range of Motion and Position of Shoulder Blade," *Journal of Korean academy of orthopaedic manual therapy*, vol. 18, no. 1, pp. 83-86, 2012.
- [11] A. W. Dromerick, C. E. Lang, R. Birkenmeier, M. G. Hahn, S. A. Sahrman, and D. F. Edwards, "Relationships between upperlimb functional limitation and self-reported disability 3 months after stroke," *J Rehabil Res Dev.*, vol. 43, pp. 401-408, 2006.
- [12] D. S. Nichols-Larsen, P. C. Clark, A. Zeringue, A. Greenspan, and S. Blanton, "Factors influencing stroke survivors' quality of life during subacute recovery," *Stroke*, vol. 36, pp. 1480-1484, 2005.
- [13] K. S. Kim, S. W. Lee, M. A. Choe, M. S. Yi,

- and E. J. Kim, "Effects of Biofeedback Exercise Training in Hemiplegic Patients after Stroke," J Korean Acad Nurs, vol. 31, no. 3, pp. 432-442, 2001.
- [14] C. I. Park and J. H. Moon, "Rehabilitation medicine," Hanmi medicine, pp. 832, 2012.
- [15] S. Noten, M. Meeus, G. Stassijns, F. Van Glabbeek, O. Verborgt, and F. Struyf, "Efficacy of Different Types of Mobilization Techniques in Patients With Primary Adhesive Capsulitis of the Shoulder: A Systematic Review," Archives of physical medicine and rehabilitation, vol. 97, pp. 815-825, 2016.
- [16] D. Celik and E. Kaya Mutlu, "Does adding mobilization to stretching improve outcomes for people with frozen shoulder? A randomized controlled clinical trial," Clinical rehabilitation, vol. 30, pp. 786-794, 2016.
- [17] U. Dundar, H. Toktas, T. Cakir, D. Evcik, and V. Kavuncu, "Continuous passive motion provides good pain control in patients with adhesive capsulitis. International journal of rehabilitation research," Internationale Zeitschrift fur Rehabilitationsforschung, Revue internationale de recherches de readaptation, vol. 32, pp. 193-198, 2009.
- [18] J. H. Kim and S. S. Bae, "Analysis of Scapulohumeral Rhythm in Scapular Plane by Digital Fluoroscopy System," The journal of Korean society of physical therapy, vol. 14, no. 3, pp. 92-105, 2002.
- [19] K. J. Kim, B. W. Kim, and D. H. Ahn, "A Study about Scapular Rhythm of Normal Persons," The journal of Korean academy of physical therapist, vol. 3, no. 4, pp. 139-145, 1996.
- [20] K. S. Lee, J. H. Park, and H. S. Park, "Design of a Robotic Device for Effective Shoulder Rehabilitation," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, vol. 41, no. 8, pp. 505-510, 2017.
- [21] R. S. Calabrò, M. Russo, A. Naro, D. Milardi, T. Balletta, A. Leo, et al., "Who May Benefit From Armeo Power Treatment? A Neurophysiological Approach to Predict Neurorehabilitation Outcomes," PM&R, vol. 8, no. 10, pp. 971-978, 2016.
- [22] I. H. Park, E. N. Lee, and S. Y. Park, "Development of a progressive exercise program for older adults with osteoarthritis," Journal of muscle and joint health, vol. 15, no. 2, pp. 155-165, 2008.



이정수(Jung-Soo Lee)

2021년 - 현재, 가천대학교 일반 대학원 융합의과학과 의용생체공학전공(가천융합의과학원) 박사과정
 2018년 - 현재, 가천대학교 의과대학 의공학교실 연구원
 2021년 인천대학교 기계공학전공(공학석사)
 2002년 홍익대학교 기계공학과 졸업(학사)

Interest: Rehabilitation robot,
 Surgical robot,
 FEA (structural, thermal), CFD



김태현(Tae-Hyeon Kim)

2020년 - 현재, 한국 폴리텍대학 정보통신공학과 학사과정
 2012년 단국대학교 역사학과 졸업(학사)

Interest: Firmware Development,
 Medical Circuit & System Design, Programming
 Microcontroller



김광기(Kwang Gi Kim)

2017 - 현재 가천대학교 교수
 2007-2017 국립암센터 과장, 책임
 2005년 2월 서울대학교 대학원 의공학과 졸업(박사)
 1998년 2월 포항공과대학교 물리학과 졸업(석사)

Interest: Medical imaging Process,
 Medical Artificial intelligence,
 Surgical Robot, Medical System Applications