

# 오십견 환자를 위한 견갑상완리듬 기반 어깨 재활로봇 사용 시 인체 동작 분석: 모션캡처 기반 연구

## Motion Capture-Based Analysis of Human Shoulder Movement Using a Scapulohumeral Rhythm-Based Rehabilitation Robot for Frozen Shoulder

조현범<sup>1,2</sup> · 허성문<sup>1,3</sup> · 김민수<sup>1,4</sup> · 김주완<sup>5</sup> · 김기원<sup>6,7</sup> · 박재홍<sup>†</sup>  
Hyunbum Cho<sup>1,2</sup>, Sungmoon Hur<sup>1,3</sup>, Minsoo Kim<sup>1,4</sup>, Joowan Kim<sup>5</sup>,  
Keewon Kim<sup>6,7</sup>, Jaeheung Park<sup>†</sup>

**Abstract:** This paper presents a motion capture-based evaluation of a rehabilitation robot that stabilizes the scapula during passive range of motion (PROM) exercises for individuals with frozen shoulder. The robot consists of a 5 degrees of freedom (DoF) arm unit and a 1-DoF scapular stabilization mechanism, designed to replicate scapulohumeral rhythm and suppress excessive scapular elevation. A healthy participant performed normal and frozen shoulder mimic movements while motion capture (*acromion cluster method*) and encoder data were recorded. To evaluate motion consistency, humeral elevation and scapular upward rotation were measured across repeated trials. Deviations remained within 3.73° and 4.69°, respectively, regardless of conditions. Robot joint movements did not correspond one-to-one with anatomical joint angles, instead reflecting composite upper body motion including trunk compensation. With scapular stabilization activated, compensatory shrugging was reduced and near-normal shoulder motion observed; without it, scapular motion resembled that of the frozen-shoulder mimic. These findings suggest that the robot can guide individualized PROM and support safe, consistent scapulohumeral rhythm training for shoulder rehabilitation.

**Keywords:** Frozen Shoulder, Rehabilitation Robot, Scapulohumeral Rhythm, Motion Capture

### 1. 서론

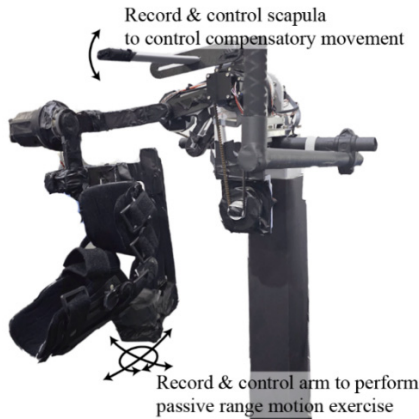
오십견(유착성관절낭염, Adhesive capsulitis)은 인구의 약 2~5%에서 발생하는 질환으로, 어깨 관절을 둘러싼 관절낭에 염증이 생기고 두꺼워지면서 어깨 통증과 움직임 제한을 유발한다<sup>1,2</sup>. 이러한 제한은 단순히 관절 가동범위(Range of motion, ROM)를 감소시킬 뿐만 아니라, 환자로 하여금 팔을 들어 올리기 어려운 상황에서 과도하게 어깨를 들썩이거나 몸통을 기울이는 등 다양한 보상 동작을 취한다<sup>3</sup>.

이러한 보상 동작은 어깨 안정성과 가동범위에 중요한 견갑상완리듬(Scapulohumeral rhythm, SHR)을 저해할 수 있으며<sup>4</sup>, 오십견 환자에서는 팔을 들어 올리는 과정에서 과도한 견갑골 움직임과 몸통 기울임이 함께 발생해 비정상적인 견갑상완리

Received : Apr. 16. 2025; Revised : May. 30. 2025; Accepted : Jul. 9. 2025

1. Graduated Student, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, Seoul, Korea (myugun, sm\_hur, minsu309@snu.ac.kr)
2. COO, Blue Robin inc, Seoul, Korea (showtiger@bluerobin.co.kr)
3. CTO, Blue Robin inc, Seoul, Korea (sm\_hur@bluerobin.co.kr)
4. Researcher, Blue Robin inc, Seoul, Korea (minsu309@bluerobin.co.kr)
5. Research Professor, Co-Corresponding author: Department of Rehabilitation Medicine, Seoul National University Hospital, Seoul, Korea (joowan@snu.ac.kr)
6. Professor, Department of Rehabilitation Medicine, Seoul National University Hospital, Seoul, Korea (keewonkimm.d@gmail.com)
7. Adjunct Professor, Seoul National University, College of Medicine, Seoul, Korea (keewonkimm.d@gmail.com)

† Professor, Corresponding author: Graduate School of Convergence Science and Technology, ASRI, AIIS, Seoul National University, Seoul, Korea and Advanced Institutes of Convergence Technology, Suwon, Korea; CEO, Blue Robin inc, Seoul, Korea (park73@bluerobin.co.kr, park73@snu.ac.kr)



[Fig. 1] Proposed rehabilitation robot developed for frozen shoulder patients, illustrating its primary features and functions

듬이 고착되기 쉽다<sup>15,7)</sup>. 운동 치료법은 이러한 비정상 동작을 교정하고 기능 회복을 돕는 효과가 있으며, 특히 재활치료사의 보조로 이루어지는 수동관절가동범위(Passive range of motion, PROM) 운동은 보상 행동을 억제하고 정상적인 SHR을 학습하는 데 유용하다<sup>8)</sup>.

그러나 전문가에게 의존해야 하므로 접근성이 떨어지는 문제가 있어, 이를 대체·보완할 재활 로봇의 필요성이 제기된다. 실제로 상지 재활 로봇에 대한 다양한 연구와 상용 제품이 개발되었지만, 대부분 오십견 환자에게 필요한 SHR 자체를 적극적으로 제어하지 못해 가동범위 향상과 리듬 회복에 한계가 있다<sup>9-12)</sup>. NTUH-II와 SRR 같은 오십견 전용 로봇도 환자 가동범위 인자나 모션캡처 활용 등 독자적 기술을 보유하나, 견갑골 안정화와 보상 행동 억제 기능은 부족하다. 결국 오십견 환자에게 핵심적인 정상 SHR 회복을 충분히 지원하지 못한다<sup>13,14)</sup>.

이러한 문제를 해결하기 위해, [Fig. 1]처럼 환자의 정상측 팔에서 SHR 데이터를 기록하고, 이를 환측에 적용하여 환자 개인의 정상 SHR 범위 내에서 가동범위운동을 수행할 수 있는 로봇을 개발하였다<sup>15)</sup>. 해당 로봇의 제어 성능 및 치료 방법 가능성은 선행 연구에서 로봇 엔코더 데이터를 기반으로 분석, 검증하였으나, 실제 인간 골격 움직임을 직접적으로 분석하지 못한 한계가 있었다.

이를 보완하고자 본 연구에서는 모션캡처 시스템을 활용하여, 견갑골을 외부에서 측정·관찰할 수 있는 Acromion Cluster Method (ACM)에 기반해 견갑골을 포함한 상지의 골격 움직임을 정량적으로 측정하였다. 이를 통해 제안한 로봇의 움직임에 따라 신체가 어떻게 반응하는지를 분석하고, 오십견 치료 접근법의 유효성을 평가함으로써, 로봇이 정상 SHR 복원에 기여할 수 있는지를 확인하고자 하였다.

실험 결과, 단순히 팔 동작만을 정상 궤적으로 유도하는 것만으로는 견갑골의 비정상적인 움직임을 충분히 보완하기 어

려웠던 반면, 견갑골을 직접 안정화할 경우 보다 정상적인 SHR을 유도할 수 있음을 확인하였다. 본 연구 결과는, 개발된 로봇이 정상적인 SHR을 유도하며 PROM 운동을 반복적으로 수행할 수 있음을 보여주었고, 이는 향후 오십견 재활 기여 가능성을 제시한다.

본 논문은 다음과 같은 순서로 구성된다. 먼저 2장에서 본 연구에서 이용되는 개발된 로봇의 하드웨어 구조와 핵심 요소를 간략하게 설명한다. 3장에서는 모션캡처 시스템을 이용한 실험 방법과 이를 통해 얻은 결과를 제시하고, 측정된 인체 동작 분석을 통해 로봇의 유효성을 검증한다. 마지막으로 4장에서는 본 연구의 결론을 도출하고 향후 연구 방향을 제안한다.

## 2. 오십견 재활 로봇 개요

### 2.1 어깨 재활 로봇의 목표와 기능

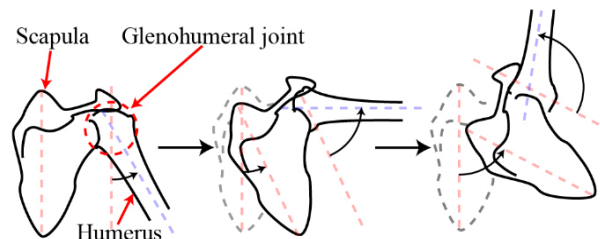
본 연구에서 제안한 어깨 재활 로봇은 오십견 환자의 PROM 운동 중 나타나는 보상 행동을 억제하고, 정상적인 SHR을 유도하는 것을 주요 목표로 한다. 이를 위해 환자의 정상측 어깨 움직임을 먼저 기록하고, 이를 환측 어깨 운동의 가이드 모션으로 적용함으로써 정상적인 움직임 패턴을 학습 및 유지할 수 있도록 설계하였다.

어깨는 상완골과 견갑골(Scapula)로 이루어진 볼-소켓 구조로 넓은 가동범위를 가지지만, 안정성을 유지하기 위해 상완골과 견갑골이 협응하는 SHR이 필수적이다 [Fig. 2]. 일반적으로 2:1 비율로 설명되지만, 실제로는 비선형적이고 개인차가 크며, 다양한 근육의 활성화를 포함하는 능동적인 움직임이다<sup>16)</sup>.

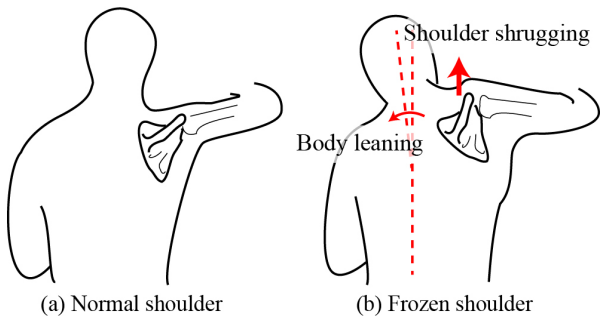
한편, 오십견 환자는 관절 기능의 제한으로 인해 [Fig. 3]과 같이 팔을 들어 올릴 때 몸통(Trunk)을 기울이거나 견갑골을 과도하게 들어 올리는 보상 행동을 자주 보이며, 이는 비정상적인 움직임 패턴을 고착화하고 2차 질환으로 이어질 수 있다<sup>17,18)</sup>.

이를 해결하기 위해 본 로봇은 다음과 같은 구조로 설계되었다.

1. 팔의 PROM 동작 기록 및 재현: 별림, 굽힘, 외회전 동작을 수행하고 기록·재현할 수 있도록 5자유도 제어부 구성.



[Fig. 2] Shoulder anatomy and scapulohumeral rhythm. As the humerus elevates, the scapula undergoes upward rotation



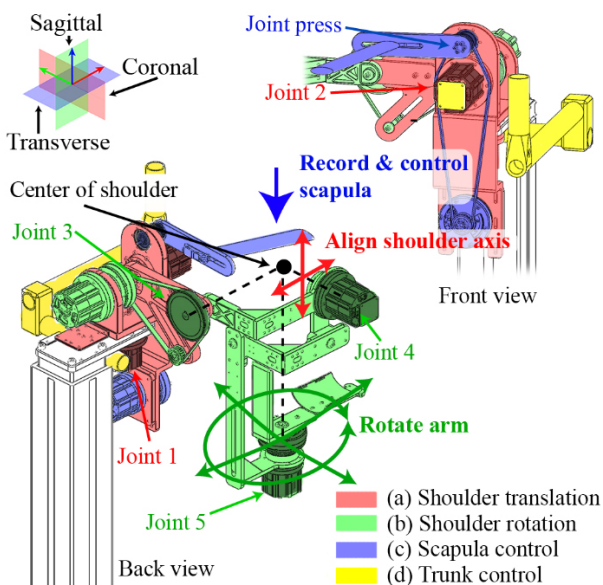
[Fig. 3] Compensatory movements exhibited by frozen shoulder patients during shoulder abduction, arising from limited range of motion

2. 견갑골 움직임 제어: 견갑골의 움직임을 측정·억제하기 위한 1자유도 견갑 제어부 탑재.
3. 몸통 보상 억제: 몸통의 기울임이나 회전을 제한하는 강체 구조물 포함.

이러한 구조를 통해 정상적인 SHR을 유지하며 PROM 운동을 수행할 수 있는 로봇 시스템을 구현하였다. 다음 장에서는 이 로봇의 하드웨어 및 제어 방법을 설명한다.

## 2.2 로봇의 개요

본 연구에 활용된 어깨 재활 로봇은 [Fig. 4]와 같이 크게 팔 제어부와 견갑 제어부로 구성된다. 팔 제어부는 2자유도의 어깨 이동부와 3자유도의 회전부로 이루어지며, 벌림(abduction),



[Fig. 4] Overview of the robot's configuration and its primary functional components

[Table 1] Mapping between robot joints and corresponding shoulder motions

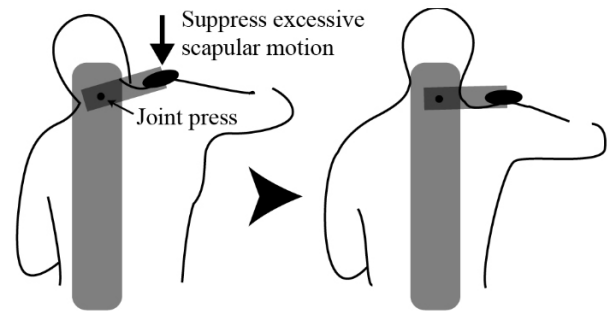
Joint	Targeted shoulder movement
Press	Scapular elevation / upward rotation with direct contact
1	Scapular protraction / retraction
2	Scapular elevation / upward rotation with gravity /friction compensation
3	Abduction / adduction
4	Flexion / extension
5	External / internal rotation

굽힘(flexion), 외회전(external rotation) 등 어깨의 다섯 가지 주요 움직임을 구현한다. 팔꿈치를 90도로 굽힌 자세를 기본으로 설계하여, 모터 축과 실제 어깨 회전축을 정렬하고 각 관절이 독립적으로 작동할 수 있도록 하였다. 몸통의 보상 행동은 고정된 구조물을 통해 회전 및 기울어짐을 물리적으로 제한하여 억제하였다. 각 조인트와 대응하는 어깨의 움직임은 [Table 1]과 같다.

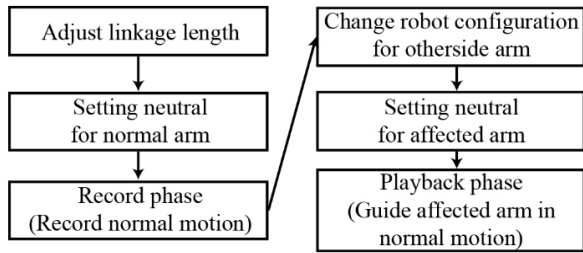
특히 본 기구의 가장 두드러진 특징은 견갑 제어부로, 이는 오십견 환자에서 자주 나타나는 보상성 견갑골 상승(shrugging)을 억제하기 위한 목적으로 설계되었다.

오십견 환자의 경우 팔의 가동이 제한될 때, 제한된 상완의 상승을 견갑골의 과도한 상방회전으로 대체하려는 습관적 움직임이 자주 나타난다<sup>5-7)</sup>. 본 로봇은 이러한 임상적 특성에 착안하여, 팔이 상승할 때 견갑골이 지속적으로 동반 상승한다는 전제를 바탕으로 설계 및 제어 전략을 구성하였다.

견봉(acromion)에 약 10N의 하중을 가하는 Joint press는 기록 단계에서 힘 제어(force control) 방식을 통해 견갑골의 상방 움직임을 추적하고, 재생 단계에서는 위치 제어(position control) 기반의 리미터(limiter)로 작동하여 [Fig. 5]와 같이 과도한 견갑골 상승을 물리적으로 억제한다. 이러한 기계적 접촉 기반 제어는 기구와 견갑골간 직접 고정하지 않고도 보상 동작을 억제하여, 정상적인 SHR 학습을 가능하게 한다.



[Fig. 5] Effect of scapular suppression. Comparison of shoulder shrugging with and without the suppression(limiter) mechanism in frozen shoulder patients



[Fig. 6] The step-by-step usage procedure of the rehabilitation robot

로봇의 사용 시퀀스는 [Fig. 6]과 같이 기록(Recording)과 재생(Playback) 단계로 구성된다. 기록 단계에서는 통증이 없는 정상 측 팔의 벌림, 굽힘, 외회전 동작을 천천히 수행하며 궤적을 저장한다. 이때 어깨 이동부는 Joint 2에서 중력 보상을 통해 어깨의 상승을, Joint 1에서는 사용자의 힘에 따라 자연스럽게 움직이되 기본 자세로 기구가 돌아올 수 있도록  $K_p = 100$ 의 스프링 상수를 적용하여 어깨의 전인/후인 움직임을 추종하였다.

재생 단계에서는 저장된 궤적을 환측 팔에 거울 대칭 형태로 적용하여 PROM 운동을 수행하며, 이 과정에서 보상 행동을 억제하여 SHR의 회복을 유도한다. 환자는 통증이나 가동 범위에 따라 각도를 점진적으로 조절할 수 있으며, 사용자 버튼을 통해 불편감이 발생할 경우 로봇을 즉시 정지할 수 있도록 설계하였다. PROM 운동 수행에는 일정 수준의 저항이 요구되므로, 이에 적절한 토크 설정을 위해 환자대상의 데이터의 측정 및 분석이 필요하다. 이에 따라 현재 연구 단계에서는 모터의 한계 토크를 명확히 설정하지 않았다. 대신, 예기치 않은 위험 상황에 대비하여 외부에서 모터의 타겟 토크를 0으로 설정하는 소프트웨어 기반 정지 기능과, 전류를 직접 차단하는 긴급 정지 스위치(emergency switch)를 포함한 이중 안전장치를 마련하였다. 전체적인 설계와 제어 알고리즘은 기존 연구를 기반으로 하였으며, 디자인 결정, 하드웨어 구성, 제어 및 모션 플래닝에 관한 상세한 내용은 선행 연구를 참고하기 바란다<sup>[15]</sup>.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 개요

실험은 모션캡처를 활용하여, 어깨 재활 로봇 사용 시 실제 이용자의 팔과 견갑골이 어떻게 움직이는지를 정량적으로 관찰하고, 로봇이 보상 행동, 특히 과도한 견갑골 상방회전을 효과적으로 억제하여 정상적인 SHR에 근접한 움직임을 유도하는지 평가하였다. 이를 위해, 오십견 모방 상황과 정상 움직임 상황에서 다양한 로봇 제어 조건하에서의 실험 결과를 각각 비교하여, 로봇의 견갑 제어부가 실제로 보상 행동 억제에 기여하는지 확인하였다.

#### 3.2 실험 방법

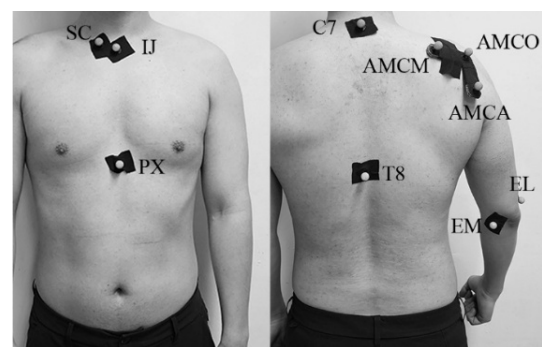
##### 3.2.1 실험 세팅 및 데이터 처리

실험에서 모션캡처를 통해 팔과 견갑골의 움직임을 측정하고, 이를 International Society of Biomechanics(ISB) 기준으로 실제 골격의 동작을 분석하였다<sup>[19]</sup>. 동시에 로봇 엔코더 값을 확보하여, 로봇이 동작을 수행할 때 실제 사용자의 움직임이 어떻게 나타나는지를 함께 관찰하였다.

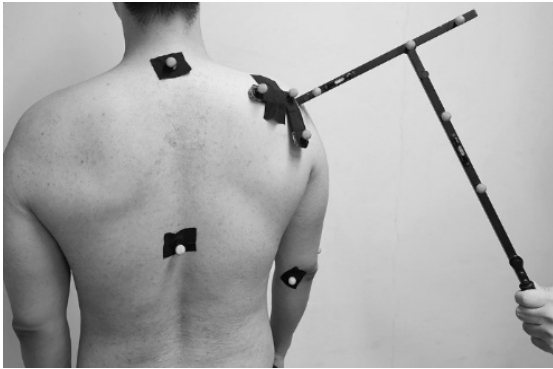
실험은 기관생명윤리위원회(IRB No. 2412/004-010)의 승인을 받은 뒤 서면 동의를 거쳐 진행하였으며, 어깨 질환이나 통증이 없는 35세 성인 남성(신장 184.5cm, 체중 85.2kg) 1인을 대상으로 하였다. 정확한 측정을 위해 상의를 탈의한 상태에서 Martin (2015)의 Acromion cluster method(ACM) 가이드라인을 참고하여 다음과 같은 위치에 [Fig. 7]과 같이 마커를 부착하였다<sup>[20]</sup>.

1. 몸통(Trunk): Sternal notch (IJ), Xiphoid process (PX), 경추 7번(C7), 흉추 8번(T8), Sternoclavicular joint (SC) 지점에 각각 부착하였다.
2. 견갑골: 등 뒤에서 피부 아래로 미끄러지듯 움직이는 견갑골의 특성을 고려하여, ACM을 적용하였다. 먼저 마커 클러스터를 구성하는 가로세로 약 7cm의 L자 플레이트 위에 마커 세 개(AMCO, AMCA, AMCM)를 배치하였다. AMCO는 견봉과 견갑극이 만나는 지점에 위치하도록 플레이트를 대상자에게 붙인다. 이때 AMCM은 견갑극을 따라 몸 안쪽을 향하도록 한다. 단, 기존 문헌에서 AMCA는 위쪽으로 향하게 하는 것과 달리, 본 연구에서는 견갑 제어에 견봉을 이용하는 만큼 구조적 간섭을 줄이기 위해 아래 방향으로 부착하였다.
3. 상완: 팔꿈치 내측(EM)과 외측(EL)에 각각 마커를 부착하여, 팔의 회전축과 움직임을 추정하도록 하였다.

실시간으로 기준점을 찾기 어려운 견갑골과 상완골두(GH)의 좌표는 ACM에 의거해 견봉 마커 클러스터를 기준으로 한



[Fig. 7] motion capture markers attached to the subject's body



[Fig. 8] Pre-calibration data capture using the calibration wand to locate the acromion angle (AA)



[Fig. 9] Participant in motion capture environment

상대 좌표를 통해 가상의 마커를 만들어 추정하였다. [Fig. 8]과 같이 calibration wand를 이용해, 견갑골의 주요 해부학적 지점 네 곳(견봉각(Acromion angle, AA), 견갑골 내측능선(Medial spine, TS), 견갑골 하각(Inferior angle, AI), 봉우리빗장관절(Acromioclavicular joint, AC))을 바로 선 자세에서 약 3초 내외의 짧은 시간 동안 기록하여 견갑골의 위치를 보정할 수 있는 기초 데이터를 확보했다. 이후 어깨를 고정된 상태로 팔을 0도에서 40도 사이를 들어올리면서 원을 그려 약 30초간 팔꿈치 마커(EM, EL)가 그리는 궤적을 추적하여, 그 회전 중심을 상완골두(GH)로 정의했다.

이렇게 얻은 5개 지점(AA, TS, AI, AC, GH)을 모두 AMCO의 로컬 좌표계에서 표현하기 위해, AMCO-AMCA를 X축, AMCO-AMCM을 Z축으로 설정하고 이에 대한 로컬 좌표 값을 구하였다. 이후 본실험에서는 이 로컬 좌표계와 좌표 값을 바탕으로, 시간에 따른 견갑골과 상완골두의 움직임을 연속적으로 계산함으로써 SHR과 보상 행동을 분석하는데 사용하였다.

ISB 기준에 따라 주요 신체 부위의 관절 움직임을 파악하기 위하여 각 로컬 좌표계를 기존의 마커 값들을 이용하여 [Table 2]과 같이 설정하였고 관절각을 [Table 3]에 따라 오일러각을 구한 후 이를 이용하여 각 관절의 움직임을 분류하도록 데이터 처리했다.

[Table 2] Local coordinate system for each segment. MUTHX = mid-point between IJ and CY, MLTHX = mid-point between PX and T8, AC = Acromioclavicular joint, AA = Acromion angle, AI= Inferior angle, TS = Medial spine, ELJC = elbow joint center / mid-point between EL and EM

	Origin	X	Y	Z
Thorax	IJ	$X_t = Y_t \times Z_t$	$Y_t = \frac{MUTHX - MLTHX}{\ MUTHX - MLTHX\ }$	$Z_t = \frac{IJ - C7}{\ IJ - C7\ } \times Y_t$
Clavicle	SC	$X_c = Y_c \times Z_c$	$Y_c = Z_c \times X_c$	$Z_c = \frac{AC - SC}{\ AC - SC\ }$
Scapula	AA	$X_s = \frac{AA - AI}{\ AS - AI\ } \times Z_s$	$Y_s = Z_s \times X_s$	$Z_s = \frac{AA - TS}{\ AS - TS\ }$
Humerus	GH	$X_h = Y_h \times \frac{EL - EM}{\ EL - EM\ }$	$Y_h = \frac{CH - ELJC}{\ CH - ELJC\ }$	$Z_h = X_h \times Y_h$

[Table 3] Euler angles and their corresponding movements when the values are positive

	Reference axis	1st Euler	2nd Euler	3rd Euler	Euler order
Thorax	1 <sup>st</sup> frame of Thorax	Extension	Lateral flexion rotation to right	Axial rotation to left	Z- X- Y
Clavicle	Thorax	Protraction	Depression	Axial rotation of the top backwards	Y- X- Z
Scapula	Thorax	Protraction	Downward Rotation	Posterior tilt	Y- X- Z
Humerus	Thorax	Plane of elevation	Depression	Internal rotation	Y- X- Y
Humerus	Scapula	Plane of elevation	Depression	Internal rotation	Y- X- Y

마커 데이터는 [Fig. 9]와 같이 Vicon사의 T-160 모션캡처 카메라 18대를 사용하여 100 Hz의 sample rate로 데이터를 취득하였다.

3.2.2 실험 프로토콜

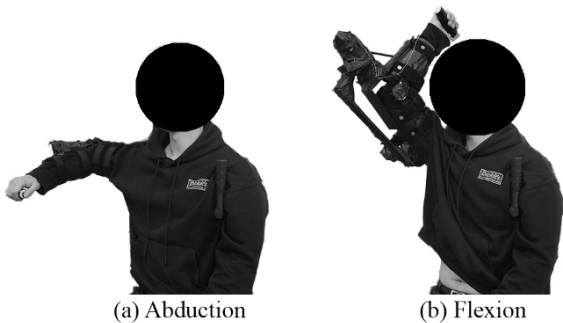
본 실험에 앞서 대상자의 벌림 굽힘의 수동가동범위를 측각기(Goniometer)를 이용하여 5회 측정하고 평균을 구해 이를 로봇에 대입하여 로봇의 정상 움직임 한계점으로 적용하였다.

모든 실험은 오른팔로 진행하였으며, 정상 팔은 준비과정에서 측정된 가동범위를 기기에 입력한 곳까지, 나머지 오십견을 모방한 실험에서는 대상자가 가동범위의 한계라고 생각하는 지점까지 팔이 상승하는 구간을 측정하였다. 실험은 아래의 네 가지 조건으로 구성하였다.

1. 정상 팔 움직임 기록: 로봇이 아무런 제약이 없는 팔을 미리 입력된 범위까지 움직임.
2. 오십견 모방 팔 움직임 기록: [Fig. 10]과 같이 몸통과 팔에 스트랩을 착용 후 이를 스트랩으로 다시 묶어 인위적으로 어깨의 가동범위가 제한된 오십견 상태를 모사한 팔의 한계범위까지 제어
3. 오십견 모방 팔에 정상 팔 움직임 재생: 1번 단계에서 기록된 정상 팔 움직임을 오십견 모방 팔에 견갑제어부의 억제 기능을 포함하여 재생.



[Fig. 10] Limiting shoulder range of motion with straps to mimic frozen shoulder conditions



[Fig. 11] The robot performing abduction and flexion

4. 오십견 모방 팔에 정상 팔 움직임을 견갑 제어 기능만 제외하여 재생: 3번과 동일하게 정상 팔 움직임을 오십견 모방 팔에 재생하지만, 이번에는 견갑 제어부의 억제 기능을 끈 상태로 재생.

실험은 각 단계에서 5회씩 수행하였고 이는 팔을 들어 올리는 [Fig. 11]과 같이 두 동작, 벌림, 굽힘에 대해서 각각 진행하였다. 엔코더와 모션캡처 데이터의 평균과 표준편차를 산출하여 주요데이터를 그래프로 나타낸 결과는 그림 [Fig. 12]~[Fig. 14]와 같다.

3.3 실험 결과 및 토론

실험 결과는 로봇 움직임에 따라 실제 사용자 팔의 움직임과 견갑골의 보상 행동 억제 기능의 유무에 따른 SHR의 변화를 분석하였다.

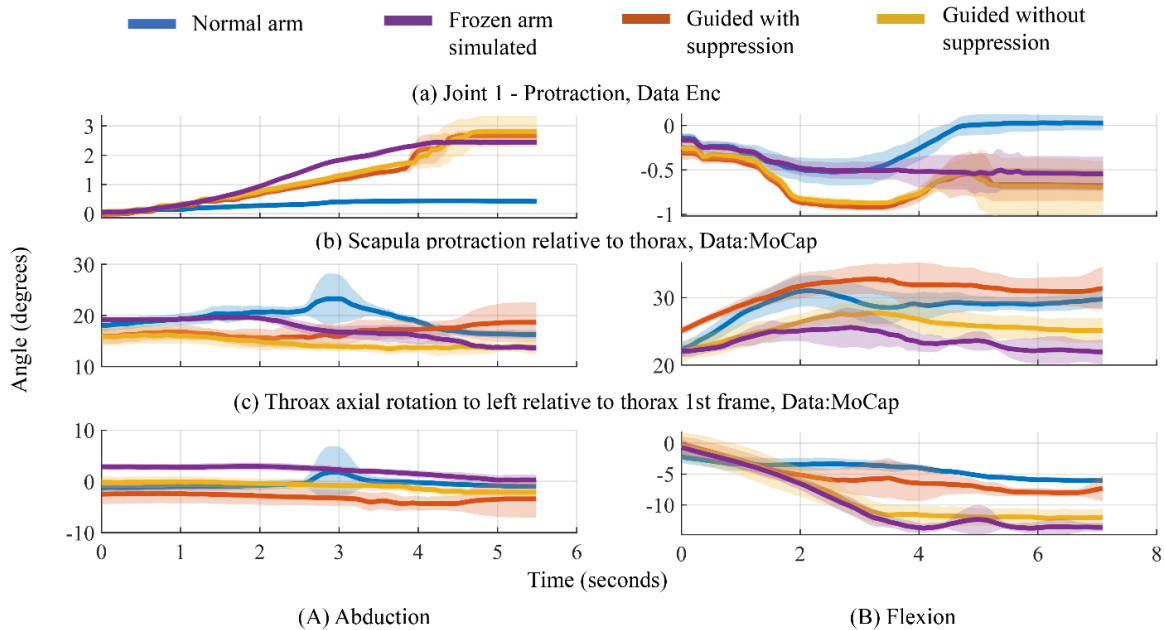
3.3.1 로봇의 움직임에 따른 신체의 움직임

로봇 움직임에 따른 사용자의 팔의 움직임은 모션캡처 데이터와 로봇 엔코더 값을 비교·분석하여, 로봇이 수행시키는 PROM 운동에 사용자가 어떻게 반응하는지 살펴보았다. 로봇은 각 관절의 특정 움직임을 구현하도록 설계되었으며, 해당 움직임과 실제 사람의 움직임 간의 상관관계를 분석하였다. 분석은 견갑의 전인/후인, 상승/하강, 그리고 팔의 상승을 중심으로 이루어졌다.

Joint 1 ([Fig. 12(a)])은 견갑골의 전인/후인([Fig. 12(b)]) 움직임을 기록, 구현하기 위한 구동축이다. 실험 데이터에 따르면, 여러 조건에서 견갑골이 모션캡처 데이터 상으로는 약 3-8도 정도 전인/후인 되는 양상을 보였음에도, Joint 1의 변위 변화는 크게 드러나지 않거나 오히려 반대로 회전하는 결과를 보였다. 이는 사람의 몸이 강체가 아니다 보니 몸통이 완전하게 구속되지 않기에 몸통의 보상행동을 억제해도 오른쪽으로 회전되는 동작([Fig. 12(c)])이 나타났고 이로 인해 거시적으로 이러한 움직임이 서로 상쇄되었기 때문으로 분석된다.

다음은 견갑의 상승과 하강을 보기 위한 Joint press와 Joint 2이다 ([Fig. 13(a)], [Fig. 13(b)]). 두 관절은 각각 견갑골의 상방/하방 움직임 기록 및 제어와 어깨축의 상승/하강 모션 추적 및 구현이라는 상이한 목적을 갖지만, 결국 어깨의 위아래 움직임에 관여한다는 공통점이 있다.

Joint press ([Fig. 13(a)])는 견봉을 직접 누르는 방식으로 어느 정도 견갑골 혹은 쇄골의 상방회전([Fig. 13(c)], [Fig. 13(d)])에 맞춰 움직이는 경향을 보였다. 다만 이를 완전한 1:1 대응 관계라고 보기 어려웠다. 특히 굽힘(Flexion) 과정에서 최종적으로는 견갑골의 상방회전 혹은 쇄골의 상방회전([Fig. 13(B)-(c,d)])



[Fig. 12] Comparison of scapular protraction/retraction measured by motion capture (MoCap) and robot encoder (Enc). Despite 3-8° movement detected by MoCap, Joint 1 showed minimal or opposite displacement, likely due to compensatory trunk rotation and incomplete torso fixation. Solid lines indicate the average, and shaded areas represent the standard deviation

이 오십견 모방 팔과 정상 팔에서 비슷하게 나타났지만, Joint press의 값이 오십견 모방 팔 조건에서는 약 20-30도 상승을 보여준 것에 비해 정상 팔의 기록이 약 10도라는 낮은 값을 보여 주었다([Fig. 13(B)-(a)]). 또한, 상승 타이밍이 정상 팔에서 더 지연되게 나타났다. 이는 Joint press가 단순히 견갑의 상방회전 움직임외에 몸통의 측면 기울임([Fig. 13(e)], 몸통 높낮이 변화 등 부수적인 요인이 복합적으로 작용한 결과로 추정된다.

Joint 2 ([Fig. 13(b)])는 중력보상을 통해 팔의 움직임에 따라 어깨 중심을 자연스럽게 추종하도록 설계되었다. 그러나 실제 측정 결과, 초기 구간에서 빠르게 상승한 뒤 이를 거의 유지하는 양상이 나타났고, 이는 팔이 상승함에 따라 증가하는 견갑골 또는 쇄골 상방회전과 직접적인 연관성을 충분히 확인하지 못했다. 이러한 현상이 Joint press와 달리 명확한 상관관계를 보이지 않은 이유는, 팔을 포함한 로봇 기구 전체의 중력보상 값을 계산·적용하는 방식의 한계로 보인다.

본 시스템에서는 사용자의 팔 무게를 고려하여 중력보상을 설계하였으나, 팔은 기계처럼 독립된 강체가 아니라 인체에 부착된 연성 구조물이기 때문에 로봇 기구와의 정합성이 완전하지 않다. 특히 팔은 몸통과 연결되어 일부 하중이 신체에 분산되는 구조적 특성을 가지며, 로봇과 사용자의 팔이 rigid한 강체처럼 완전히 결합되어 있지 않기 때문에 로봇 기구의 움직임을 곧바로 팔의 움직임으로 간주하기 어렵다. 이로 인해 계산된 중력보상 토크와 견갑 움직임을 추정하기 위해 필요한 실제 토크 사이에 오차가 발생할 수 있으며, 이는 결과적으로 로봇이 의도

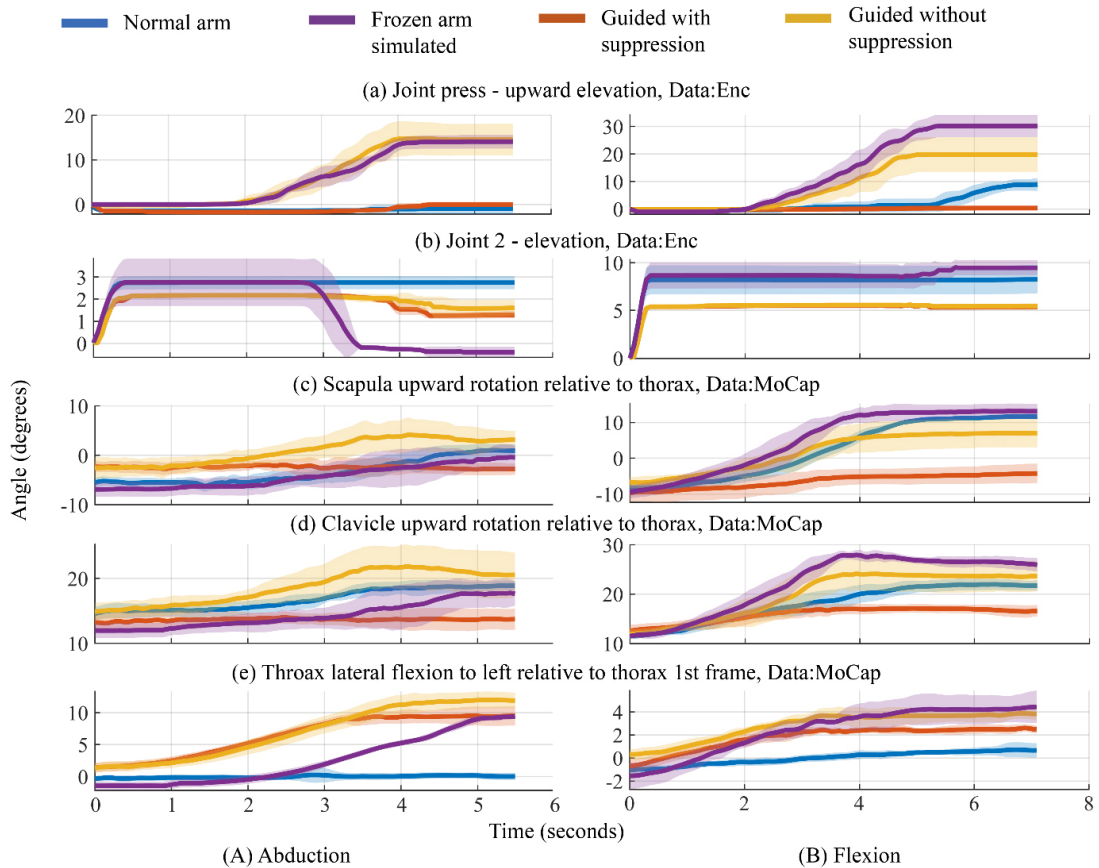
한 방식으로 상완의 상승을 정밀하게 추종하는 데 한계로 작용한다.

이를 통하여 직접 접촉을 이용한 방식은 견갑골의 세부 동작보다는 어깨 전반의 움직임을 반영하는 경향이 있었으며, 팔 무게를 포함한 로봇 기구의 중력보상만으로는 어깨 상승 움직임을 정밀하게 구현하는 데 한계가 있는 것으로 나타났다.

한편, 반복 실험 결과 견갑골의 상방회전은 ([Fig. 13(c)])은 최대 4.69° 이내의 편차 범위 내에서 비교적 일관된 움직임을 보여주었으며, 이는 해당 로봇 기반 PROM 운동이 일정 수준의 동작 반복성과 제어 정밀도를 유지할 수 있음을 시사한다.

다음으로 살펴볼 데이터는 Joint 3 또는 Joint 4 ([Fig. 14(a)], 즉 팔 상승(어깨의 벌림과 굽힘)에 직접 관여하는 로봇 관절들의 측정값이다. 여기서 주목해야 할 부분은 상완골 상승([Fig. 14(b)], [Fig. 14(c)]) 데이터와 로봇 엔코더(Joint 3 또는 Joint 4)의 관계와 둘 데이터 간의 편차이다.

실험에서 상완골의 상승은 반복 실험 간 최대 3.73도의 표준 편차 범위 내에서 유지되었으며, 일정 수준의 일관된 움직임을 보였다. 그러나 이를 로봇 관절 엔코더로 측정한 값과 비교해 보면, 수치 및 패턴 측면에서 차이가 확인되었다. 특히 오십견 모방 상황에서 이러한 차이가 더욱 두드러지는데, 이는 몸통 기울임에 따른 보상 행동이 로봇 조인트 데이터에 섞여 나타나기 때문으로 분석된다. 예컨대 벌림 동작에서는 좌우로 기울어지는([Fig. 14(A)-(e)]) 몸통 움직임이, 굽힘 동작에서는 뒤로 기울어지는([Fig. 14(B)-(d))] 동작이 추가되어, 몸통 기준 축으로 측



[Fig. 13] Comparison of scapular upward rotation and shoulder elevation from motion capture and robot data. Joint press and Joint 2 responded differently to vertical motion. Joint press followed scapular/clavicular rotation with some discrepancy due to trunk compensation, while Joint 2 showed limited correlation, likely from gravity compensation limits. Scapular upward rotation remained reproducible within a 4.69° deviation

정되는 상완골 각도와 바닥에 고정된 로봇에서 측정되는 각도 간에 편차가 발생하는 것으로 해석된다.

로봇의 움직임에 따른 사용자의 팔 움직임을 분석한 결과, 로봇의 각 관절은 사람의 개별 관절이라기보다 특정 복합적인 움직임에 대응하여 작동하는 경향이 관찰되었다. 또한, 로봇이 동작을 구현하는 과정에서, 상완골의 상승은 최대 3.73도, 견갑골의 상방회전은 최대 4.69도의 편차 범위 내에서 각각 반복 실험 간 유사한 움직임 패턴을 나타냈다. 이는 로봇 기반 PROM 운동이 특정 관절 움직임에 대해 일정 수준의 반복성과 제어 안정성을 유지할 수 있음을 보여준다.

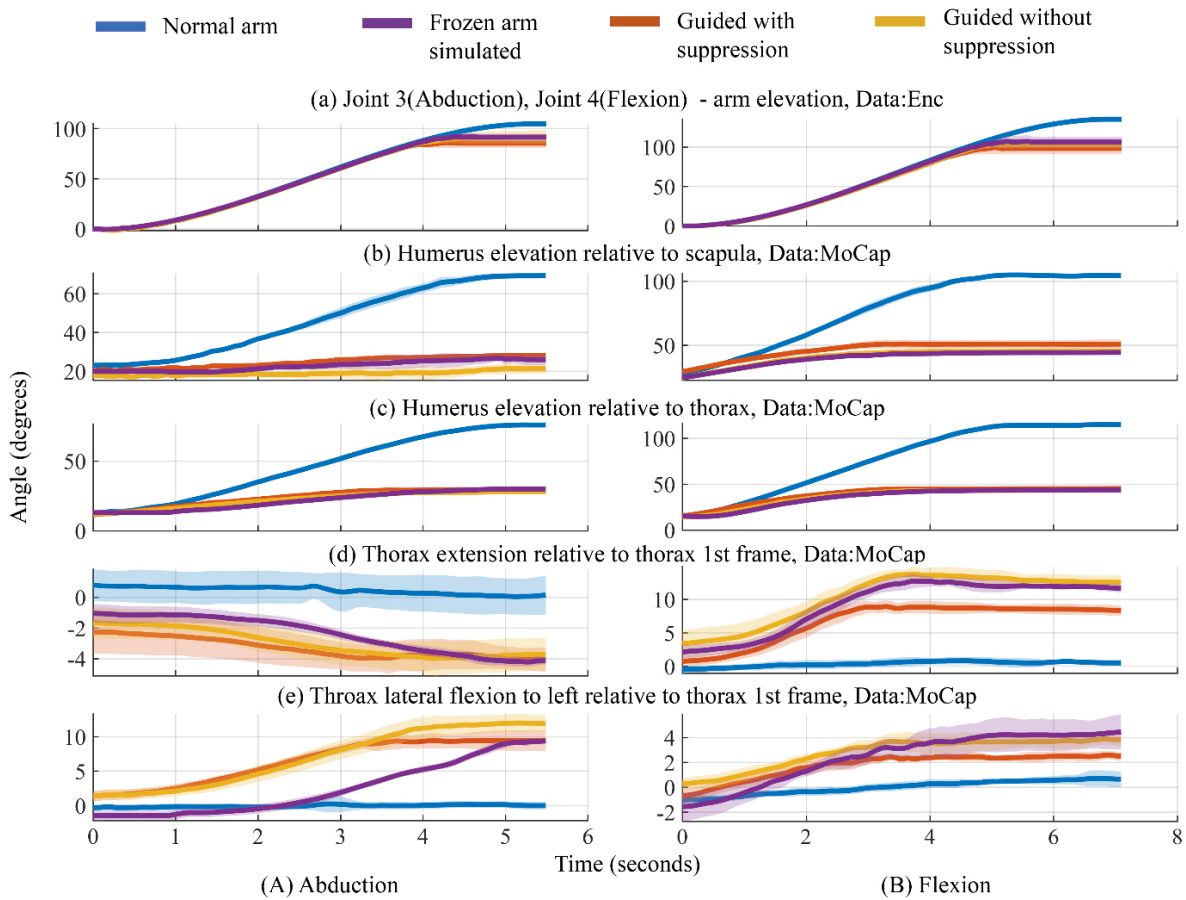
### 3.3.2 견갑골 제어 기능 평가

본 기구의 핵심 기능인 견갑 제어부의 역할 수행 여부에 따른 보상행동 억제 여부를 평가하기 위해, [Fig. 15]와 같이 모든 시행 횟수에서의 팔 각도 변화에 따른 견갑골 상방회전의 각도 변화의 평균과 표준편차를 그래프로 나타내었다. 분석의 핵심은 견갑골 억제 기능이 활성화된 조건3의 실험과 비활성화된

조건4의 실험을 비교함으로써, 기능 여부에 따라 보상행동이 억제되어 정상 SHR에 가까운 움직임을 유도할 수 있는지 확인하는 데 있다.

실험 결과, 모든 팔 상승 조건에서 초기 어깨 상방회전값이 약 8도 정도 차이를 보이긴 했으나, 시행 조건 3에서는 상승 한계점까지 견갑골 상방회전이 정상 팔과 유사하게 억제되는 양상이 관찰되었다. 구체적으로, 벌림([Fig. 15(a)])에서는 상방회전이 거의 일어나지 않거나 매우 작았고, 굽힘([Fig. 15(b)])에서는 팔이 약 5도쯤 상승했을 때 5도 정도의 움직임을 보였다. 반면 시행 조건 4의 경우, 팔 자체는 정상 범위로 제어했음에도 불구하고 벌림에서 약 10도, 굽힘에서 약 15도가량의 상방회전을 보여 보상 행동이 발현된 오십견 모방 팔의 움직임에 더 가깝게 나타났다.

이는 견갑골 억제 기능이 보상 행동 억제에 기여했음을 의미하며, 본 로봇이 제시한 견갑 제어 기전이 사용자를 보다 정상 SHR에 가깝게 운동시켜 2차 질환 발생 위험을 낮추고 높은 치료 효과를 기대할 수 있음을 시사한다.



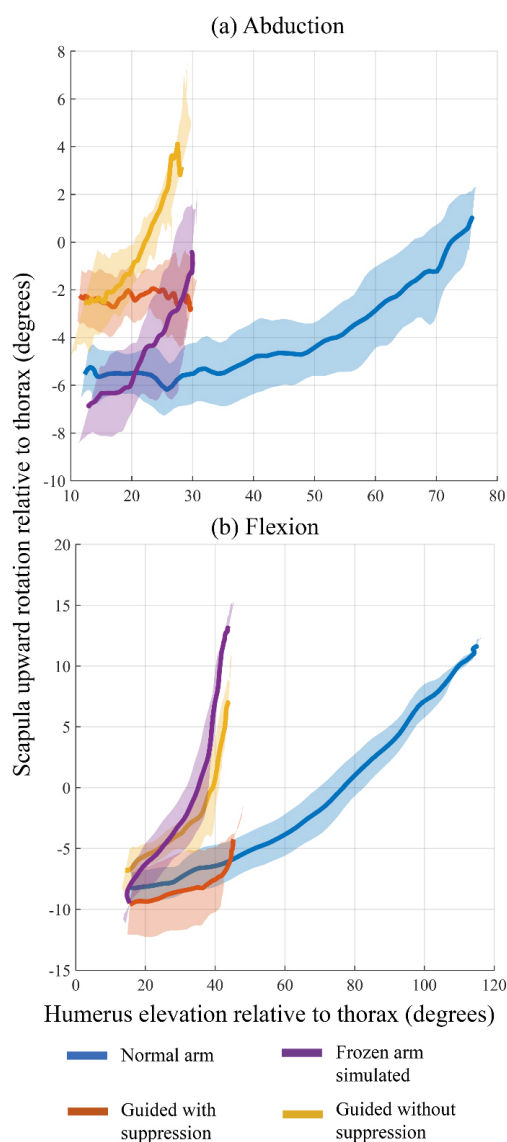
[Fig. 14] Comparison of humeral elevation from motion capture and robot encoder data. Joint 3 and Joint 4 showed discrepancies from MoCap measurements, especially in the frozen shoulder mimic condition, likely due to trunk compensation. Humeral motion remained consistent across trials (3.73°)

#### 4. 결론

본 연구는 개발된 재활 로봇의 임상 적용 가능성을 평가하기 위한 사전 단계로, 로봇 관절의 움직임과 실제 사람의 관절 움직임 간의 상관관계를 분석하고, 견갑골 안정화 기전의 유무에 따른 차이를 비교·검토하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 Acromion cluster method(ACM) 기반의 모션캡처 시스템을 활용하여 로봇 인코더 데이터와 상지 관절 움직임 간의 정량적 비교를 수행하였다. 분석 결과, 로봇 각 관절은 사람의 개별 관절 움직임에 단순히 1:1로 대응하기보다는, 보다 복잡한 움직임을 반영하는 경향을 보였다. 특히 상완골의 상승과 견갑골의 상방회전에서는 각각 최대 3.73도, 4.69도의 편차 범위 내에서 반복 실험 간 유사한 움직임 패턴을 생성하는 양상이 나타났으며, 이는 로봇이 반복적이고 일관된 PROM (Passive Range of Motion) 운동을 유도함을 시사한다. 또한, 견갑골 안정화 기전이 작동하는 경우, 사용자에게 적합한 정상 견갑상완리듬(Scapulohumeral Rhythm, SHR)에 근접한 운

동 유도가 가능함을 실험적으로 확인하였다. 이러한 결과는 로봇 기반의 직접적인 견갑골 안정화 접근이 SHR 유지에 기여할 수 있는 가능성을 제시하며, 향후 오십견 환자의 개별 특성에 최적화된 안전하고 효과적인 재활 훈련 제공에 활용될 수 있음을 시사한다.

다만, 본 실험은 건강한 일반인 단일 표본을 대상으로 수행되었으며, 물리치료가 시행하는 PROM과의 비교를 포함한 임상 환경에서의 치료 효과를 직접적으로 검증하지 못하였다는 점에서 한계가 존재한다. 또한, Joint 2의 어깨축 추종 기능은 정교함 면에서 개선의 여지가 있으며, 이는 로봇 제어 정밀도에 영향을 미칠 수 있는 요소로 판단된다. 이러한 제약을 보완하기 위해, 향후에는 로봇 제어 알고리즘의 정밀도 향상과 함께, 다양한 오십견 환자를 대상으로 한 임상 환경 기반의 장기 추적 연구가 수행되어야 할 것이다. 이를 통해 보다 효과적이고 광범위한 재활 적용 가능성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.



[Fig. 15] Scapular upward rotation relative to humeral elevation across experimental conditions. Activating scapular suppression (guided with suppression) maintained near-normal rhythm, while disabling it (guided without suppression) led to motion resembling the frozen shoulder mimic. Solid lines indicate the average; shaded areas represent the standard deviation

## References

- [1] M. J. Kelley, P. W. McClure, and B. G. Leggin, "Frozen shoulder: evidence and a proposed model guiding rehabilitation," *Journal of orthopaedic & sports physical therapy*, vol. 39, no. 2, pp. 135-148, 2009, DOI: 10.2519/jospt.2009.2916.
- [2] N. L. Millar, A. Meakins, F. Struyf, E. Willmore, A. L. Campbell, P. D. Kirwan, M. Akbar, L. Moore, J. C. Ronquillo, G. A. C. Murrell, and S. A. Rodeo, "Frozen shoulder," *Nature reviews Disease primers*, vol. 8, no.1, pp. 59, Sept., 2022, DOI: 10.1038/s41572-022-00386-2.

- [3] A. F. DePalma, "Loss of scapulohumeral motion (frozen shoulder)," *Annals of Surgery*, vol. 135, no. 2, pp. 193-204, Feb., 1952, DOI: 10.1097/0000658-195202000-00005.
- [4] J.-J. Lin, Y.-T. Wu, S.-F. Wang, and S.-Y. Chen, "Trapezius muscle imbalance in individuals suffering from frozen shoulder syndrome," *Clinical Rheumatology*, vol. 24, pp. 569-575, 2005, DOI: 10.1007/s10067-005-1105-x.
- [5] D. A. Neumann, "Shoulder Complex," *Kinesiology of the Musculoskeletal System*, 3<sup>rd</sup> ed. Mosby, 2016. ch. 5, pp. 145-168, [Online], <https://shop.elsevier.com/books/kinesiology-of-the-musculoskeletal-system/neumann/978-0-323-28753-1>.
- [6] Y. Kon, N. Nishinaka, K. Gamada, H. Tsutsui, and S. A. Banks, "The influence of handheld weight on the scapulohumeral rhythm," *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, vol. 17, no. 6, pp. 943-946, Nov.-Dec., 2008, DOI: 10.1016/j.jse.2008.05.047.
- [7] W. Ben Kibler, P. M. Ludewig, P. W. McClure, L. A. Michener, K. Bak, and A. D. Sciascia, "Clinical implications of scapular dyskinesis in shoulder injury: the 2013 consensus statement from the 'scapular summit'," *British Journal of Sports Medicine*, Sept., 2013, DOI: 10.1136/bjsports-2013-092425.
- [8] A. J. Howell, A. Burchett, N. Heebner, C. Walker, A. Baunach, A. Seidt, and T. L. Uhl, "Effectiveness of scapular stabilization versus non-stabilization stretching on shoulder range of motion, a randomized clinical trial," *International Journal of Sports Physical Therapy*, vol. 17, no. 4, pp. 695-706, 2022, DOI: 10.26603/001c.34439.
- [9] J.-Y. Song, S.-H. Lee, and W.-K. Song, "NREH: Upper extremity rehabilitation robot for various exercises and data collection at home," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 18, no. 4, pp. 376-384, Nov., 2023, DOI: 10.7746/jkros.2023.18.4.376.
- [10] W.-K. Song, W.-J. Song, and J.-Y. Jung, "NREX: NRC robotic exoskeleton," *2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, Jeju, Republic of Korea, pp. 454-456, 2013, DOI: 10.1109/URAI.2013.6677309.
- [11] P. S. Lum, C. G. Burgar, M. Van der Loos, P. C. Shor, M. Majmundar, and R. Yap, "MIME robotic device for upper-limb neurorehabilitation in subacute stroke subjects: A follow-up study," *Journal of Rehabilitation Research & Development*, vol. 43, no. 5, Aug.-Sept., 2006, DOI: 10.1682/jrrd.2005.02.0044.
- [12] B. Kim and A. D. Deshpande, "An upper-body rehabilitation exoskeleton Harmony with an anatomical shoulder mechanism: Design, modeling, control, and performance evaluation," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 36, no. 4, pp. 414-435, 2017, DOI: 10.1177/0278364917706743.
- [13] C.-H. Lin, W.-M. Lien, W.-W. Wang, S.-H. Chen, C.-H. Lo, S.-Y. Lin, L.-C. Fu, and J.-S. Lai, "NTUH-II robot arm with dynamic torque gain adjustment method for frozen shoulder rehabilitation," *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, USA, pp. 3555-3560, 2014, DOI: 10.1109/IROS.2014.6943059.
- [14] U.-J. Yang and J.-Y. Kim, "Development of frozen shoulder rehabilitation robot based on motion capture data," *Transactions*

of the Korean Society of Mechanical Engineers, vol. 36, no. 9, pp. 1017-1026, Sept., 2012, DOI: 10.3795/KSME-A.2012.36.9.1017.

- [15] H. Cho, S. Hur, J. Kim, K. Kim, and J. Park, "Shoulder Range of Motion Rehabilitation Robot Incorporating Scapulohumeral Rhythm for Frozen Shoulder," *arXiv:2504.10163*, DOI: 10.48550/arXiv.2504.10163.
- [16] V. T. Inman, J. B. Saunders, and L. C. Abbott, "Observations of the function of the shoulder joint," *Clinical Orthopaedics and Related Research*, vol. 330, pp. 3-12, Sept., 1996, DOI: 10.1097/00003086-199609000-00002.
- [17] F. Fayad, A. Roby-Brami, C. Yazbeck, S. Hanneton, M.-M. Lefevre-Colau, V. Gautheron, and S. Poiraudau, M. Revel, "Three-dimensional scapular kinematics and scapulohumeral rhythm in patients with glenohumeral osteoarthritis or frozen shoulder," *Journal of Biomechanics*, vol. 41, no. 2, pp. 326-332, 2008, DOI: 10.1016/j.jbiomech.2007.09.004.

- [18] H. M. Vermeulen, M. Stokdijk, P. H. C. Eilers, C. G. M. Meskers, P. M. Rozing, and T. P. M. Vliet Vlieland, "Measurement of three-dimensional shoulder movement patterns with an electro-magnetic tracking device in patients with a frozen shoulder," *Annals of the Rheumatic Diseases*, vol. 61, no. 2, pp. 115-120, Feb., 2002, DOI: 10.1136/ard.61.2.115.
- [19] G. Wu, F. C. T. van der Helm, H. E. J. Veeger, M. Makhsous, P. Van Roy, C. Anglin, J. Nagels, A. R. Karduna, K. McQuade, X. Wang, F. W. Werner, and B. Buchholz, "ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion—Part II: shoulder, elbow, wrist and hand," *Journal of Biomechanics*, vol. 38, no. 5, pp. 981-992, May, 2005, DOI: 10.1016/j.jbiomech.2004.05.042.
- [20] M. B. Warner, P. H. Chappell, and M. J. Stokes, "Measurement of dynamic scapular kinematics using an acromion marker cluster to minimize skin movement artifact," *Journal of Visualized Experiments*, Feb., 2015, DOI: 10.3791/51717.



**조 현 범**

2014 연세대학교 기계공학과(공학사)  
2014~현재 서울대학교 융합과학기술대학원 석박통합과정

관심분야: Rehabilitation Robot, Biomimetic



**김 주 완**

2011 Tsinghua University Automation(공학사)  
2023 서울대학교 융합과학기술대학원 (공학박사)  
2023~현재 서울대학교병원 의생명연구원 연구교수

관심분야: Exoskeleton Robot, Rehabilitation Robot, Human-robot interface



**허 성 문**

2010 한양대학교 전자정보시스템학과(공학사)  
2012 과학기술연합대학원대학교 HCI 및 로봇 응용공학(공학석사)  
2016~현재 서울대학교 융합과학기술대학원 석박통합과정

관심분야: Manipulation, Haptics, Rehabilitation Robot



**김 기 원**

2002 서울대학교 의과대학 의학과  
2009 서울대학교 생물정보학 협동과정(석사)  
2012~현재 서울대학교병원 재활의학과 교수

관심분야: Rehabilitation Medicine, Musculoskeletal Rehabilitation, Electromyography, Neuromuscular Rehabilitation



**김 민 수**

2019 울산과학기술원 기계항공공학(공학사)  
2021~2022 한국로봇융합연구원 연구원  
2022~현재 서울대학교 융합과학기술대학원 석박사통합과정

관심분야: Rehabilitation Robot, Humanoid



**박 재 흥**

1995 서울대학교 항공우주학과(공학사)  
1999 서울대학교 항공우주학과(공학석사)  
2006 Stanford University Aero/Astro (공학박사)  
2009~현재 서울대학교 융합과학기술대학원 교수

관심분야: Robot-environment Interaction, Contact Force Control, Multi-contact Control, Whole-body Dynamic Control, Bio-mechanics