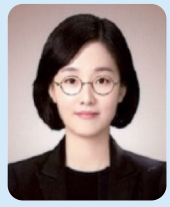
특집

소프트 웨어러블 로봇의 상지 근력 지원 적용 가능성 – 간병 업무 중심의 실증 시험 평가

장연주

- 2007. 충남대학교 생활과학대학 학사
- 2009. 충남대학교 생활과학대학 석사
- 2012. 일본 신슈대학교 생명파이버공학 박사
- 2013–현재. 한국건설생활환경시험연구원 책임연구원
- 2013–현재. 한국공업화학회 여성인재육성위원회 위원
- 2024. 한국여성과학기술단체총연합회 미래인재상



민진령

- 1998. 고신대학교 보건학과 학사
- 2003. 서울대학교 보건대학원 석사
- 2008. 서울대학교 보건대학원 박사
- 2006–2011. 서울대학교 보건환경연구소 선임연구원
- 2012–2020. 서울대학교 보건환경연구소 연구교수
- 2021–현재. 한국보훈복지의료공단 중앙보훈병원 보훈의학연구소 부장

1. 서 론

사회가 고령화되며 간병 서비스를 필요로 하는 노인인구가 크게 증가하고 있으며, 핵가족화로 인한 1인 가구와 독거노인 가구의 증가, 치매 등 노인성 질환의 증가 등으로 간호·간병 서비스를 필요로 하는 사람이 늘면서 돌봄 인력인 간병근로자(간병인, 요양보호사, 간호사, 간호조무사 등)에 대한 수요가 증가하고 있다. 요양보호사 및 간병인은 2019년 약 487천 명에서 2029년 약 691천 명으로 향후 10년간 204천 명(연평균 3.6%), 간호사는 2019년 약 259천 명에서 2029년 약 337천 명으로 향후 10년간 79천 명(연평균 2.7%), 간호조무사는 2019년 약 207천 명에서 2029년 약 269천 명으로 향후 10년간 62천 명(연평균 2.7%) 정도 증가할 것으로 전망되고 있다.

65세 이상 인구가 전체 인구에서 차지하는 비율이 7% 이상이면 고령화사회, 14% 이상이면 고령사회, 20%를 넘으면 초고령사회로 구분된다. 우리나라는 2017년 이미 고령화사회에서 고령사회로 들어섰고, 2025년 초고령사회에 이를 것으로 예측된다. OECD 가입국 중에서 한국은 고령인구가 가장 빠른 속도로 증가하고 있으며, 2040년에는 65세 이상 고령인구가 지금보다 2배 이상(2020년 807만 명에서 2040년 1,698만 명), 85세 이상 초고령 인구는 3배 이상(77만 명에서 226만 명) 증가할 것으로 예상되고 있다.

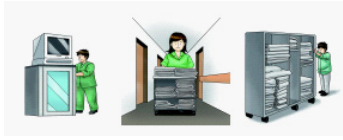
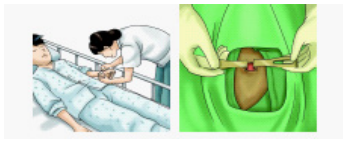
Figure 1. 간병서비스를 수행하는 간병근로자.

간병근로자의 대부분은 고령 여성으로, 94.5%는 여성이며 84.2%가 50대 이상으로 체력적으로 취약하다. 병원 근로자의 과로 부상 비율은 타 산업 분야 근로자보다 거의 두 배 높게 나타났으며, 간병근로자의 근골격계 질환 사례는 전체 사례의 5% 이상을 차지한다.

근무의 주요 형태가 환자들의 이동, 부축, 자세 변경 등의 과다한 힘, 반복 동작 및 불편한 자세로 근골격계 질환 위험에 노출되어 있어 간병근로자의 근로환경 개선이 절실히 요구되고 있으며, 신체부위별 근골격계 질환은 '허리/등' 22.9%로 가장 높고, '어깨' 20.5%, '무릎/다리' 14.9%, '목 부위' 11.7%로 허리와 어깨에 집중되어 있다.

*근골격계부담작업: 단순반복작업 또는 인체에 과도한 부담을 주는 작업으로 근골격계질환을 발생시킬 수 있는 반복성, 부자연스러운 자세, 과도한 힘 등의 유해위험 요인을 말함.

Table 1. 간호 직종의 근골격계 유해위험요인 작업 유형

유형 1	인력에 의해 환자를 다루는 업무	
유형 2	인력에 의해 물건, 장비 등을 운반/취급하는 업무	
유형 3	환자의 일상생활을 돕는 업무	
유형 4	환자 대상 검사나 처치 업무	
유형 5	컴퓨터 및 사무 작업	
유형 6	기타 업무 (청소, 정리 등)	

이에 따라 간병근로자에게 일하기 쉽고 쾌적한 근로환경을 제공하고 육체적 능력을 고려한 작업부담을 경감시킴으로써 근골격계 질환을 예방하기 위해, 근력 보조를 위한 가볍고 편한 근력 보조 로봇의 필요성이 제기되고 있다. 그 중에서도 무리하게 어깨에 큰 힘을 주는 경우, 장시간 과도하게 어깨를 사용하는 경우, 부적절한 자세로 어깨에 갑자기 힘을 주는 경우, 반복적인 동작이 지나치게 오랜 시간 계속되는 경우가 많아 회전근개파열, 어깨충돌증후군과 같은 어깨 통증의 위험에 크게 노출되어 있다.

따라서 본 고에서는 소프트 웨어러블 로봇의 상지 근력 지원 적용 가능성을 평가하고자 간병업무 중심의 실증 시험 평가를 수행한 내용을 공유하고자 한다.

2. 상지 근력 지원 실증 시험 평가를 위한 간병 시나리오 도출 및 설정

2.1. 상지 근력 지원을 위한 소프트 웨어러블 로봇의 실증 시험 개요

본 연구는 상지 근력 지원을 목적으로 개발된 소프트 웨어러블 로봇의 적용 가능성과 보조 효과를 실증적으로 검토하고자 수행되었다. 실증 시험은 한국건설생활환경시험연구원(KCL)과 한국보훈복지공단 중앙보훈병원 보훈의학연구소 간 협업을 통해, 간병 현장의 실사용 조건을 반영한 시나리오 설정 및 도출, 병원 환경을 모사한 실험실 기반 평가, 실제 병원 내 실증 시험 평가의 3단계로 진행되었다. 또한 해당 실증 시험은 한국보훈복지공단 중앙보훈병원 생명윤리위원회(Institutional Review Board, IRB)의 정식 승인을 받아 수행되었으며(IRB No. BOHUN 2024-03-010-002), 모든 연구 절차는 연구 참여자의 안전 확보와 개인정보 보호를 최우선으로 고려하여 윤리적 기준에 따라 수행되었다.

2.2. 대상 병원 개요 및 협업 기반

한국보훈복지공단 중앙보훈병원은 장애를 가진 국가유공자 및 보훈가족을 대상으로 한 공공의료를 중점적으로 수행하는 특수 의료기관으로, 총 1,400여 병상, 500여 명의 간병근로자가 상시 근무하는 국내 최대 규모의 공공재활·간병 중심 의료시설 중 하나이다. 이러한 인프라는 간병 현장 중심의 로봇 기술 실증 및 적용성 평가 수행에 매우 적합한 환경을 제공하며, 향후 간병 및 재활 분야에서의 기술 도입과 수요처 확장의 가능성 측면에서 전략적 협업 거점으로서의 역할이 기대된다.

2.3. 간병 작업 유형 도출을 위한 사전 조사

간병업무 중 상지 부담이 집중되는 작업 유형을 식별하고자, 한국산업안전보건공단(KOSHA)의 기술지침 '간호직종 종사자의 근골격계 유해위험요인 평가방법(KOSHA GUIDE H-202-2018)'을 참고하여 설문지를 구성하였다. 본 설문은 중앙보훈병원에 근무 중인 간병근로자 43명을 대상으로 배포 및 구조화된 인터뷰 방식으로 실시되었으며, 이를 통해 상지에 높은 부담이 수반되는 간병 작업 유형을 정량적으로 도출하였다.

분석 결과, *Table* 1의 '작업유형 2'로 분류되는 중량물 이동 작업(예: 배식용 식판, 의료폐기물 이동 등)이 상지 근골격계에 가장 높은 부담을 유발하는 대표 작업으로 도출되었으며, 실증 평가의 대표 시나리오로 선정되었다.

2.4. 실증 시험 시나리오 및 평가 설계

'중량물 이동 작업'은 간병 업무 중 8.65 kg 수준의 중량물을 반복적으로 운반하는 고강도 작업으로, 상지에 집중적인 근력 사용이 요구되는 활동이다. 본 시험에서는 해당 작업을 대표 시나리오로 설정하고, 상지를 어깨(견관절)와 팔꿈치(주관절)로 구분하여 각 부위별 보조 효과를 비교 분석할 수 있도록 실험 설계를 진행하였다.

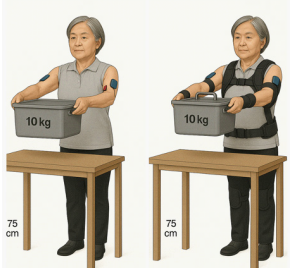
실증 시험은 ▲ 로봇 미착용 상태 ▲ 로봇 착용 – 보조기능으로 구분하여 수행되었으며, 상지 주요 근육군에 부착한 표면 근전도 센서(sEMG)를 통해 근활성도 변화 및 작업 강도 저감 효과를 정량 분석하였다. 또한 시험을 마친 피시험자에 근력 보조 효과가 있었는지에 대한 인터뷰(정성적 평가)를 수행하였다.

3. 상지 근력 지원 적용성 시험 평가

소프트 웨어러블 로봇의 상지 근력 지원 적용성에 대한 실증 시험 평가는 서울특별시 강동구에 위치한 한국보훈복지공단 중앙보훈병원에서 수행되었다. 본 시험은 동 병원에 근무 중인 실제 간병근로자를 피험자로 모집하여, 사전에 설정된 시나리오에 따라 실제 간병작업 환경을 반영한 실증 조건 하에 진행되었다.

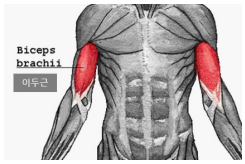
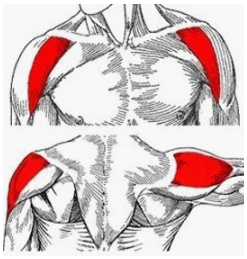
상지 근력 보조 효과의 정량적 분석을 위해, 미국 DELSYS社의 무선 표면 근전도 측정 시스템(sEMG)을 활용하여 상지를 구성하는 주요 관절인 팔꿈치(elbow)와 어깨(shoulder) 각각의 대표 근육에서 표면 근전도 변화를 비교 분석하였다. 상세 측정 설계 및 장비 구성은 다음과 같다.

Table 2. 팔꿈치와 어깨 근력 보조효과를 위한 실험 시나리오

시나리오 #01 팔꿈치	
	① 지면으로부터 약 75 cm 높이에 위치한 부하 약 10 kg(한 팔에 5 kg)를 손에 쥐고, 상박은 고정한 채 3초 동안 팔꿈치 관절만 굽혀서 부하를 들어 올림. 여기서 부하는 간병근로자의 근로환경을 고려하여 배식통으로 대체하고, 무게는 배식통 안에 물을 채워서 맞춤 ② 팔꿈치를 굽힌 상태에서 3초 동안 유지함 ③ 팔꿈치 관절을 3초 동안 펴면서 부하를 내림 ④ 팔꿈치 관절을 편 상태에서 3초간 휴식함. 위의 순서(1 cycle에 총 12초)를 5회 반복함 ※ 시험대 높이 및 부하는 피험자의 신체 조건을 고려하여 조정될 수 있음 (예: 시험대 높이 75±10 cm 부하 10±3 kg)
시나리오 #02 어깨	
	① 지면으로부터 약 115 cm 높이에 위치한 부하 약 10 kg(한 팔에 5 kg)를 손에 쥐고, 팔꿈치 관절은 약 30도로 굽힌 상태에서 어깨 관절만 3초 동안 굽혀서 부하를 코 높이까지 들어 올림. 여기서 부하는 간병근로자의 근로 환경을 고려하여 배식통으로 대체하고, 무게는 배식통 안에 물을 채워서 맞춤 ② 어깨 관절을 굽힌 상태에서 3초 동안 유지함 ③ 어깨 관절을 3초 동안 펴면서 부하를 내림 ④ 어깨 관절을 편 상태에서 3초간 휴식함. 위의 순서(1 cycle에 총 12초)를 5회 반복함 ※시험대 높이 및 부하는 피험자의 신체 조건을 고려하여 조정될 수 있음 (예 : 시험대 높이 115±10 cm, 부하 10±3 kg)

3.1. 평가 대상 관절 및 근육

Table 3. 상지 근력 보조효과 평가 대상 관절 및 근육

부위	팔꿈치	
대상 근육	상완이두근 (Biceps brachii)	
기능	팔을 구부리거나 물체를 들어올릴 때 활성화되는 주동근으로, 굴곡 동작 시 근활성도 변화를 주요 지표로 설정	
부위	어깨	
대상 근육	전면 삼각근 (Anterior deltoid)	
	측면 삼각근 (Medial deltoid)	
기능	어깨를 들어올리거나 상지를 안정적으로 고정할 때 작용하는 근육으로, 중량물 운반 시 어깨 안정성과 관련된 주요 근육으로 평가됨	

3.2. 측정 장비 및 분석 시스템

- 측정 장비 : Delsys Trigno Wireless EMG Sensor
- 소프트웨어 : EMGworks® Acquisition(데이터 수집) / EMGworks® Analysis(신호 처리 및 분석)
- 샘플링 주파수(sampling rate) : 2,000 Hz
- 필터 대역(bandwidth) : 20–450 Hz

본 장비는 생체신호 정밀 분석에 최적화된 고해상도 무선 EMG 시스템으로, 실시간 데이터 수집, 운동 중 측정 안정성, 잡음 제거 기능 등을 통해 정확하고 신뢰도 높은 근활성도 데이터를 제공한다. 각 실험 조건(로봇 미착용, 착용 OFF, 착용 ON)에 따라 반복 측정된 EMG 신호는 RMS(root mean square) 값 기반으로 정량화되어 근육 피로도 및 보조 효과의 유의성 검증에 활용되었다.

4. 시험 결과 및 효과 분석

4.1. sEMG를 활용한 정량적 시험평가

소프트 웨어러블 로봇의 상지 근력 보조 효과는, 보조 작업 수행 중 상지 주요 근육에서의 근전도 신호(sEMG)의 정량적 변화를 통해 평가되었다. 근력 보조 장치를 착용하지 않은 상태(non-assisted)와 착용한 상태(assisted)에서의 근전도 반응을 비교함으로써, 웨어러블 로봇의 보조 효과에 따른 근활성도 감소량을 정량적으로 분석하였다.

평가는 근전도 RMS(root mean square) 값을 기준으로 하였으며, RMS 피크값(peak RMS)과 RMS 면적값(integrated EMG area, AUC)을 각각 도출하여 보조 전/후의 근육 사용 강도 차이를 분석하였다. RMS는 근육의 전기적 활성 수준을 반영하는 지표로, 값이 클수록 근육 사용량이 많고 피로도가 높다는 것을 의미한다.

Table 4. 근전도 신호량 및 AUC 비교

항목	근전도 신호량 (Amplitude/Integral)	AUC (Area Under ROC Curve)
용도	근육 사용량 정량화	이진 분류 모델 성능 평가
값의 의미	힘의 크기, 피로도, 작업 강도 등	민감도 vs 특이도 기반 정확도 지표
단위	μV, μV·s 등	0~1 범위의 무차원
예시	로봇 보조 전후 근육 사용 비교	로봇 보조 여부 분류 정확도 측정

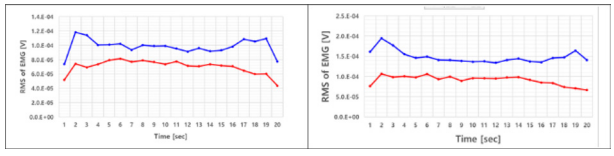


Figure 2. 좌측 및 우측 상완이두근(biceps brachii)에서 측정한 근전도(EMG) 신호의 RMS(Root Mean Square) 값(파란선 : 로봇 미보조/ 빨간선 : 로봇 보조).

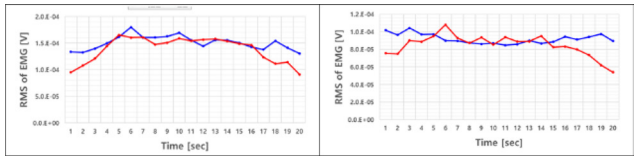


Figure 3. 좌측 및 우측 전면 삼각근(anterior deltoid)에서 측정한 근전도(EMG) 신호의 RMS(root mean square) 값(파란선 : 로봇 미보조/ 빨간선 : 로봇 보조).

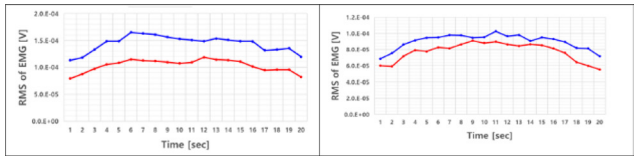


Figure 4. 좌측 및 우측 측면 삼각근(medial deltoid)에서 측정한 근전도(EMG) 신호의 RMS(root mean square) 값(파란선 : 로봇 미보조/ 빨간선 : 로봇 보조).

근육별 EMG RMS 분석 결과, 상완이두근(biceps brachii)과 측면 삼각근(lateral deltoid)에서 가장 뚜렷한 근력 보조 효과가

Table 5. 근육 부위별 근력 보조효과

근육 부위	보조 전후 변화	해석
왼쪽 이두근 (Left Biceps Brachii)	RMS 값이 보조 착용 후 지속적으로 감소	근력 보조 효과가 뚜렷함. 로봇 착용 시 해당 부위의 근육 사용량이 명확히 줄어든 것으로 해석됨
왼쪽 전면 삼각근 (Left Anterior Deltoid)	초기에는 다소 증가하였으나, 이후 비슷한 수준 유지	혼합된 경향을 보임. 보조 효과는 제한적이며, 전체적으로는 미미한 수준으로 판단됨
왼쪽 측면 삼각근 (Left Lateral Deltoid)	보조 시 RMS가 확연히 감소	보조 효과가 확실하게 나타남. 특히 측면 삼각근의 부하 경감이 명확하게 확인됨
오른쪽 이두근 (Right Biceps Brachii)	전 구간에서 보조 착용 후 RMS 감소	지속적인 보조 효과가 나타났으며, 해당 근육의 작업 시 부담이 완화된 것으로 해석됨
오른쪽 전면 삼각근 (Right Anterior Deltoid)	보조 전후 RMS 차이가 거의 없음	보조 효과가 미미하거나 없음. 로봇 착용이 해당 부위 근육 사용량에 큰 영향을 주지 않은 것으로 판단됨
오른쪽 측면 삼각근 (Right Lateral Deltoid)	보조 시 전체적으로 RMS 감소	보조 효과가 있음. 감소 폭은 상대적으로 크지 않지만, 일정 수준의 부하 감소 확인 가능

관찰되었다. 이는 웨어러블 로봇이 팔의 굴곡 및 측면 거상 동작에서 유효하게 근력을 분산 또는 보조하고 있음을 시사한다. 반면, 일부 전면 삼각근 부위에서는 RMS 차이가 미미하거나 증가하는 양상이 나타났으며, 이는 보조 방향과 근육 기능의 불일치 혹은 피보조자의 자세 적응 차이에서 기인할 수 있다. 실제로 소프트 웨어러블 로봇과 피시험자와의 사이즈 오차로 보조 기능 부분과 피시험자의 불일치가 나타나기도 했는데 이를 보완하기 위해 차년도부터 로봇의 사이즈 다각화를 진행하고자 한다.

Figure 5는 웨어러블 로봇 착용 시 근육별 EMG(RMS) 신호 감소율을 백분율(%)로 표현한 것으로, 로봇 보조에 따른 근육 사용량 변화를 나타낸다. 측면 삼각근(lateral deltoid)에서는 –25.6%의 EMG 신호 감소율(%)을 보이며 가장 큰 감소율을 보이는 것으로 나타났다. 로봇 착용 시 팔을 드는 동작에서 어깨 부위의 현저한 근력 분산 효과가 발생한 것으로 해석할 수 있다.

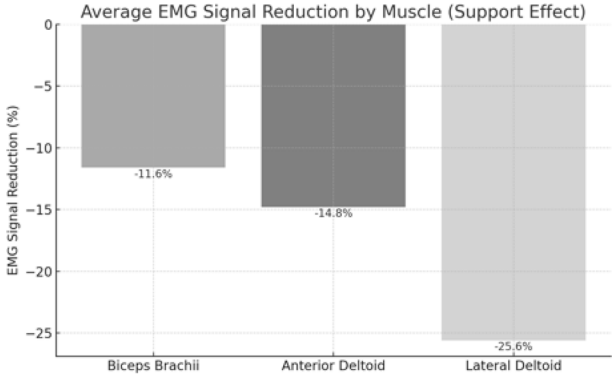


Figure 5. 근육별 측정한 근전도(EMG) 신호 감소율.

다. 또한 전면 삼각근의 경우에도 –14.8%로 들어 올림 동작 시 부하가 감소하여 로봇이 해당 방향의 근력 보조에 기여함을 나타낸다. 팔꿈치 근력 보조효과를 살펴볼 수 있는 상완이두근(Biceps Brachii)에서는 EMG 신호 감소율(%)이 –11.6%로 보조 착용 시 팔의 굴곡 동작에서 근육 사용량의 줄어듦과 일정 수준의 근력 보조 효과를 확인할 수 있었다.

4.2. 인터뷰 방식을 통한 정성적 사용자 경험 평가

본 연구에서는 소프트 웨어러블 로봇의 상지 근력 보조 효과에 대한 정성적 사용자 경험 평가를 병행하여 수행하였다. 연구 대상자는 실제 간병 업무를 수행 중인 근로자로, 실험 동작 이후 착용 편의성, 기능성, 안정성에 대해 인터뷰 방식으로 의견을 수렴하였다.

착용편의성(comfort) 면에서 대부분의 참여자들은 로봇 착용 시 무게 부담이 크지 않고 신축성이 우수하다고 평가하였다. 다만, 간병 업무 특성상 상지를 넓게 움직이는 동작이 많아 현재 수준 이상의 신축성 확보가 필요할 수 있다는 의견이 제기되었다. 특히 팔을 크게 벌리는 동작 또는 고개 위로 팔을 들어올리는 동작에서 로봇의 유연성이 제한될 우려가 일부 존재하였다.

조작 및 기능성(functionality)면에서 전 참여자가 공통적으로, 로봇 착용 후 물체를 들어 올릴 때 “힘이 덜 들었다”는 주관적 근력 보조 체감을 보고하였다. 그러나 소수의 응답자는 배식통 등 비교적 무게 중심이 높은 물체를 들어올릴 때, 로봇의 부속품이 흘러내리는 느낌을 경험하였으며, 이로 인해 오히려 물건을 놓칠 우려로 더 많은 힘을 주게 되었다는 불편함을 호소하여 이는 차년도 개발 시 착용자의 동작 범위, 기기의 밀착 안정

성 등 세부 구조 개선의 필요성을 시사한다.

착용 안전성(safety)면에서 대부분의 연구대상자는 로봇 외관이 일반 의류(잠바 등)와 유사한 형태를 띠고 있어, 착용 시 신체 손상 위험은 낮다고 평가하였다. 그러나 간병 작업이 물기, 좁은 공간, 급박한 환경 등에서 수행되는 경우가 많아, 로봇에 부착된 기기 부품이 떨어지거나 손상될 수 있다는 우려가 일부 제기되었다. 이를 고려하여 생활 방수 기능, 충격 보호 설계, 탈부착 보완 등 안전성 강화를 위한 기술적 보완이 필요하다는 의견이 도출되었다.

5. 시사점

본 연구 결과는 실제 간병업무 시나리오에 기반한 상지 근력 보조 기술의 적용 가능성을 실증적으로 확인하였다는 점에서 의의가 크며, 간병근로자의 근골격계 부담을 줄이기 위한 보조 로봇 기술의 현장 적용성을 뒷받침한다. 참여자들은 전반적으로 소프트 웨어러블 로봇의 착용 경험에 긍정적 반응을 보였으며, 특히 근력 경감 효과에 대한 체감 수준이 높았다.

특히 근전도 기반 정량 평가 방법을 통해 사용자의 생리적 반응을 객관적으로 측정함으로써, 향후 웨어러블 로봇의 실사용자 중심 설계(user-centered design)와 현장 실증 기반 개선 방향 설정에 유용한 근거 자료로 활용될 수 있다는 유의미한 시사점을 제공한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 로봇산업핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다 (과제번호 20022804, 과제고유번호 2410003860).

참고문헌

1. 한국산업안전보건공단, (KOSHA GUIDE H-202-2018), 간호직종 종사자의 근골격계 유해위험요인 평가방법에 대한 기술지침 2018.12.
2. Hirohito T. et al., Development of a Non-Exoskeletal Structure for a Robotic Suit, 2014 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics(BioRob).
3. Xia Zhang et al., “Synchronization-based trajectory generation method for a robotic suit using neural oscillators for hip joint support in walking”, *Mechatronics*, 2012, **22**, 33-44.
4. Yi Li et al., “Lightweight, Soft Variable Stiffness Gel Spats for Walking Assistance”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015, **12**, 175.
5. Lee KJ et al., “Effect of Wearable Exoskeleton Robots on Muscle Activation and Gait Parameters on a Treadmill: A Randomized Controlled Trial”, *Healthcare*, 2025, **22**, 13.
6. Evaluation of Upper Limb Muscle Activation Using Musculoskeletal Modeling and EMG Analysis, *Applied Bionics and Biomechanics*, 2022, 8908061.
7. Zhangding Li, “Muscle Fatigue Identification and Prediction in Motion Using EMG Signal Analysis”, *Wearable Electronics*, 2025, **2**, 62-68.