

하지 엑소스켈레톤 보행 시 스윙 및 스탠스 구간의 로드셀 기반 보조 효과 분석

김현숙*, 장미, 김우진, 조현우, 김용현, 윤대섭

한국전자통신연구원 모빌리티 UX 연구실

hyskim, rosechang, wjinkim, hwjoe, yhkeen, eyetracker@etri.re.kr

Analysis of Assistive Effects Based on Load Cell Data During Swing and Stance Phases of Lower Limb Exoskeleton-Assisted Gait

Hyunsuk Kim*, Chang Mi, Woojin Kim, Hyunwoo Joe, Yonghyun Kim, Daesub Yoon

Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

본 연구는 엑소스켈레톤을 착용하고 보행시 로드셀을 통해 측정된 하중 반응의 변화를 스윙(Swing) 및 스탠스(Stance) 구간에서 비교·분석하였다. Motor Off 및 Motor On 조건에서 각 구간의 로드셀(Load Cell) 데이터를 기반으로 평균값(Mean), 제곱평균근(RMS), 전체 하중 영역(Integral), Hilbert Envelope 등 정량적 특징값을 산출하였다. 분석 결과, Motor On 조건에서는 대부분의 실험자에게서 스윙 구간에서의 추진력 증가 및 스탠스 구간에서의 체중 지지 안정성 향상 효과가 관찰되었다. 특히, 체질량지수(BMI)가 높고 하지 근력이 낮은 사용자는 엑소스켈레톤 보조에 따른 효과가 가장 뚜렷하게 나타났으며, 반면, 하지 근력이 우수한 사용자는 Motor Off 조건에서도 안정적인 하중 지지가 가능하였으나, Motor On 조건에서는 에너지 관련 정량 지표의 증가 폭이 가장 크게 나타났다. 이러한 결과는 엑소스켈레톤 기반 보행 보조 시스템의 정량적 성능 검증뿐만 아니라, 사용자 특성에 기반한 맞춤형 제어 기술 개발에도 활용될 수 있다.

I. 서론

하지 재활 엑소스켈레톤은 다양한 응용 분야의 재활 치료에서 하지 기능 회복을 지원하는 데 중요한 역할을 하고 있다[1, 2]. 연구[3]에서는 Force Sensitive Resistor 센서를 활용하여 주요 특징을 추출하였으며, 연구[4]에서는 무릎에 부착된 로드셀 센서를 통해 웨어러블 디바이스의 성능 평가에 필요한 데이터를 분석하였다. 엑소스켈레톤 착용의 효과를 객관적으로 평가하기 위해서는, 사용자 신체적 특성에 따른 하중 반응의 차이를 정량적으로 분석할 수 있는 체계적인 연구가 필요하다.

II. 실험 방법

본 연구에서는 그림 1 과 같이 보행 동작을 보조할 수 있는 하지 엑소스켈레톤을 제작하였으며, 실험 대상자가 이를 착용한 상태에서 디바이스의 모터를 Off 및 On 한 조건으로 각각 7m 의 측정 구간을 보행하도록 하여 데이터를 수집하였다. [3, 4].

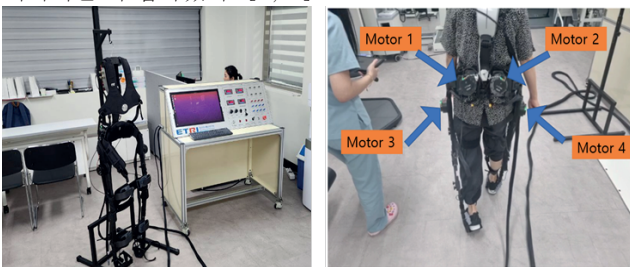


그림 1 실험 환경 및 웨어러블 로봇 착용 예시[4]

보행 시 고관절의 스윙(Swing) 및 스탠스(Stance) 구간에서 능동 보조(Motor On)와 비보조(Motor Off) 조건이 로드셀(Load Cell) 반응에 미치는 영향을, 표 1 에 제시된 신체 특성을 가진 4 명의 실험자를 대상으로 비교·분석하였다. 실험 참가자의 연령은 62 세에서 69 세 사이로, 모두 고령자에 해당한다.

USER_A 는 키가 가장 작고(BMI 23.76), 좌측 하지 근력이 가장 낮으며 굴곡력(Flexion Strength) 또한 10.8 kg 으로 비교적 낮은 수준을 보였다. 반면 USER_B 는 좌측 하지 근력 6.93 kg, 신전력(Extension Strength) 28.3 kg, 굴곡력 25.0 kg 으로, 전체 참가자 중 하지

근력이 가장 우수하였다. USER_C 는 신전력(17.0 kg)이 낮았으나 체중과 BMI 가 높았고, USER_D 는 가장 높은 BMI(27.4)를 나타냈다. 보행 속도는 USER_A 가 가장 빠르며, USER_B 가 가장 느린 속도를 기록하였다.

본 연구에서는 4 개의 모터 중 왼쪽 고관절(Left Hip Joint)에 장착된 모터의 영향을 중심으로 분석을 수행하였다. 실험자별 보행 데이터는 해당 모터의 영향을 받는 왼쪽 고관절 각도와, 그 부위에 부착된 로드셀 센서를 통해 측정된 하중 값을 기반으로 활용하였다. 고관절 각도는 정수 단위로 반올림한 후, 각 각도별 평균 로드셀 값을 산출하여 분석에 사용하였다.

표 1 실험자 신체 특성 데이터

Category	USER_A	USER_B	USER_C	USER_D
Age	69	62	69	67
Height (cm)	145.2	160.8	153	147
Weight (kg)	50.1	53.2	57.8	59.2
BMI	23.76	20.57	24.69	27.4
Left Leg Muscles	4.86	6.93	5.36	4.9
Lower Limb Extension (kg)	31.1	28.3	17	18
Lower Limb Flexion (kg)	10.8	25	18.1	10.5
Average Walking Speed (7m)	3.53 sec	4.24 sec	3.83 sec	4.03 sec

III. 분석 결과

Motor 상태에 따라 스윙 및 스탠스 구간을 각각 구분한 후, 표 2 와 표 3 에 제시된 바와 같이 평균값(Mean), 제곱평균근(Root Mean Square, RMS), 전체 하중 영역(Integral), Hilbert Envelope 의 평균값 등 주요 정량적 특징값을 산출하여 분석하였다.

USER_A 는 좌측 하지 근력이 상대적으로 낮았으나, 빠른 보행 속도(3.53 초)와 우수한 고관절 신전력(31.1 kg), 유연성을 가진 실험자이다. 스윙 및 스탠스 구간 모두에서 Motor On 조건 시 로드셀 하중 지표가 소폭 증가하였다. 스윙 구간에서는 RMS(0.57→0.63), Hilbert Envelope 평균값(0.58→0.65)의 상승이 관찰되었고,

스탠스 구간에서는 하중 관련 지표의 변화는 미미했으나 전반적으로 안정적인 반응 양상을 보였다. 빠른 보행 속도와 유연한 관절 특성으로 인해 보조 효과는 크게 나타나지 않았으나, 하중 유지 측면에서는 일정 수준의 안정성 향상이 확인되었다.

USER_B 는 좌하지 근력, 신전력, 굴곡력이 가장 높고, 보행 속도는 4.24 초로 비교적 느린 편에 속했다. 스윙 구간에서는 Integral 이 0.42 에서 0.86 으로 0.44 증가하며, 높은 근력 조건에서도 Motor On 시 에너지 소비가 뚜렷하게 증가하는 양상이 나타났다. 또한 RMS(0.58→0.65), Hilbert(0.58→0.65)도 상승하였다. 스탠스 구간에서도 Integral 은 0.24 에서 0.42 로, RMS(0.57→0.63), Hilbert(0.57→0.63)가 모두 증가하였다. Motor Off 조건에서도 하중 분포는 안정적으로 유지되었으며, Motor On 조건에서는 정량 지표의 변화 폭이 크게 나타나 보조에 따른 에너지 증가 반응이 두드러졌다. 이는 높은 근력과 관절 가동 범위를 가진 사용자에게도 Motor 보조가 효과적으로 작용함을 시사한다.

표 2 스윙 (Swing) 구간의 통계분석 결과

Features	USER_A		USER_B		USER_C		USER_D	
Motor Status	Off	On	Off	On	Off	On	Off	On
Mean	0.49	0.56	0.54	0.62	0.48	0.44	0.44	0.56
Integral	0.93	0.91	0.42	0.86	1.25	1.11	1.31	1.24
RMS	0.57	0.63	0.58	0.65	0.55	0.52	0.5	0.59
Hilbert	0.58	0.65	0.58	0.65	0.56	0.53	0.51	0.59

표 3 스탠스 (Stance) 구간의 통계분석 결과

Features	USER_A		USER_B		USER_C		USER_D	
Motor Status	Off	On	Off	On	Off	On	Off	On
Mean	0.54	0.53	0.53	0.59	0.46	0.44	0.4	0.56
Integral	0.98	0.7	0.24	0.42	1.09	1.1	0.95	1.27
RMS	0.6	0.6	0.57	0.63	0.52	0.51	0.45	0.58
Hilbert	0.61	0.61	0.57	0.63	0.53	0.52	0.47	0.59

USER_C 는 좌하지 근력 5.36 kg, 굴곡력 18.1 kg, 신전력 17.0 kg, 보행 속도 3.83 초로 중간 수준의 하지 근력과 평균적인 보행 성능을 보였다. 관절 가동 범위는 제한적이었다. 스윙 구간에서는 대부분의 하중 기반 지표가 Motor On 조건에서 소폭 감소하였고, 스탠스 구간에서는 Motor On/Off 조건 간 수치 차이가 거의 없었다. 전반적으로 안정적인 반응 양상을 보였으나, 관절 유연성의 제한이 보조 효과를 저해한 요소로 작용했을 가능성이 있다.

USER_D 는 참가자 중 가장 높은 BMI(27.4)와 가장 낮은 하지 근력(4.9 kg)을 보였으며, 보행 속도는 4.03 초로 비교적 느리고 고관절 가동성도 제한적이었다. 그럼에도 불구하고, 스윙 구간에서 평균값(+0.12), RMS(+0.09), Hilbert(+0.08)의 증가가 확인되었으며, 스탠스 구간에서도 Mean(+0.16), Integral(+0.32), RMS(+0.13), Hilbert(+0.12)의 뚜렷한 상승이 나타났다. 이러한 결과는 낮은 하지 근력과 높은 체중(BMI)의 조합이 엑소스켈레톤 보조 효과를 극대화하는 데 유리하게 작용할 수 있음을 시사한다.

표 4 실험자 별 Motor On 고관절 각도 변화 범위

Angle Range (°)	USER_A	USER_B	USER_C	USER_D
Swing	+7.2°	+14.8°	+6.5°	+10.1°
Stance	+5.1°	+12.3°	+3.2°	+9.6°

표 4 는 엑소스켈레톤 착용 후 Motor On 조건에서 측정된 왼쪽 고관절의 각도 변화 범위를 나타낸다. USER_B 는 신전력과 굴곡력이 모두 우수한 실험자로, 스윙 구간과 스탠스 구간에서 각각 +14.8°, +12.3°의 가장 큰 각도 증가를 보였다. 반면 USER_C 는 신전력과 굴곡력이 상대적으로 낮은 편이며, 이에 따라 각도 변화 폭이 가장 작았다.

이는 로드셀 반응뿐만 아니라 보행 동작의 활발성 측면에서도 뚜렷한 차이를 유도하였다. 이러한 각도 증가 양상은 실험자의 신체 특성과 밀접한 관련이 있으며, 특히 하지 근력과 우수한 관절 가동성이 엑소스켈레톤 시스템과의 상호작용에서 긍정적인 시너지 효과를 형성하는 것으로 해석된다. 따라서 엑소스켈레톤 보조는 하지 관절의 운동성 향상에 기여할 수 있으므로 향후 재활 및 보조 목적의 엑소스켈레톤 설계에 고려되어야 할 주요 요소임을 시사한다.

IV. 결론

본 연구에 참여한 실험자들의 신체 특성을 기반으로, 스윙 및 스탠스 구간에서 측정된 로드셀 하중 반응을 비교한 결과, 엑소스켈레톤 보조 효과는 사용자 개별의 신체 조건에 따라 상이하게 나타나는 경향이 확인되었다. 특히 하지 근력, 고관절 굴곡력 및 신전력, 고관절의 가동 범위(Range of Motion)와 같은 신체적 특성은 로드셀 하중 반응의 정량적 지표에 유의미한 영향을 미치는 주요 요인으로 나타났으며, 이는 엑소스켈레톤 보조 효과의 주요 결정 변수로 작용함을 시사한다.

이러한 결과는 엑소스켈레톤이 재활 목적의 보행 보조 수단으로 활용될 수 있음을 실험적으로 뒷받침하며, 보조 효과가 사용자 신체 특성에 따라 다르게 나타날 수 있음을 보여준다. 이는 향후 개인 맞춤형 제어 알고리즘 설계에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다. 따라서 본 연구는 엑소스켈레톤 보행 보조 시스템의 정량적 성능 검증은 물론, 사용자 맞춤형 스마트 엑소스켈레톤 설계를 위한 실험적 근거로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. 2022-0-00501, "웨어러블 디바이스 성능평가 기술 개발").

참 고 문 헌

[1] J. Zhou, S. Yang, Q. Xue. Lower limb rehabilitation exoskeleton robot: A review. *Advances in Mechanical Engineering*. (2021) 13(4).
[2] S. Qiu, Z. Pei, C. Wang. et al. Systematic Review on Wearable Lower Extremity Robotic Exoskeletons for Assisted Locomotion. *J Bionic Eng* (2023) 20.
[3] 김현숙 외 5 인, “FSR 정보를 이용한 하지 웨어러블 디바이스 성능 평가에 대한 연구”, 대한전자공학회 학술 심포지움, 2023.
[4] 김현숙 외 5 인, “Load Cell 데이터를 이용한 하지 웨어러블 디바이스의 보행 성능 평가”, 통신학회 하계학술대회, 2024.