

Original Article

Open Access

하지 수술환자에게 적용한 로봇보조 보행훈련의 단기간 임상적 효과: 예비 연구

이하민 · 권중원[†]

단국대학교 보건복지대학원 임상물리치료학전공, ¹단국대학교 공공보건대학 물리치료학과

Short-Term Clinical Effects of Robot-Assisted Gait Training Applied to Patients Undergoing Lower Extremity Surgery: A Pilot Study

Ha-Min Lee, P.T, M.S. · Jung-Won Kwon, P.T, Ph.D.[†]

Department of Public Health Sciences, Graduate School, Dankook University

¹*Department of Physical Therapy, College of Health and Welfare Sciences, Dankook University*

Received: August 11, 2022 / Accepted: August 14, 2022

© 2022 Journal of Korea Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

| Abstract |

Purpose: This study aimed to investigate the effect of robot-assisted gait training on the active ranges of motion, gait abilities, and biomechanical characteristics of gait in patients who underwent lower extremity surgery, and to verify the effectiveness and clinical usefulness of robot-assisted gait training.

Methods: This study was conducted on 14 subjects who underwent lower extremity surgery. The subjects participated in robot-assisted gait training for 2 weeks. The active ranges of motion of the lower extremities were evaluated, and gait abilities were assessed using 10-m and 2-min walk tests. An STT Systems Inertial Measurement Unit was used to collect data on biomechanical characteristics during gait. Spatiotemporal parameters were used to measure cadence, step length, and velocity, and kinematic parameters were used to measure hip and knee joint movement during gait.

Results: Significant improvements in the active ranges of motion of the hip and knee joints (flexion, extension, abduction, and adduction) and in the 10-m and 2-min walk test results were observed after robot-assisted gait training ($p < 0.05$). In addition, biomechanical characteristics of gait, spatiotemporal factors (cadence, step length, and velocity), and kinematic factors (gait hip flexion-extension, internal rotation-external rotation angle, and knee joint flexion-extension) were also significantly improved ($p < 0.05$).

Conclusion: The results of this study are of clinical importance as they demonstrate that robot-assisted gait training can be used as an effective intervention method for patients who have undergone lower extremity surgery. Furthermore, the findings of this study are clinically meaningful as they expand the scope of robot-assisted gait training, which is

[†]Corresponding Author : Jung-Won Kwon (kjwonpt@hanmail.net)

currently mainly applied to patients with central nervous system conditions.

Key Words: Robot-assisted gait training, Gait ability, Total hip replacement, Total knee replacement, Lower extremity surgery, Gait rehabilitation

I. 서론

재활을 위해 사용되고 있는 로봇은 독립적인 일상 생활을 돕는 보조 로봇과 재활 및 평가에 활용되는 재활 로봇으로 크게 구분할 수 있다(Bessler et al., 2021). 하지 재활 로봇은 보행의 회복과 보행 능력의 유지를 목적으로 치료적으로 적용되고 있으며 로봇을 사용한 재활은 집중적이고 과제 특이적인 치료방법으로써 운동회복에 효과적이며(Turner et al., 2013; Calabro et al., 2016) 좁은 공간에서도 충분한 보행훈련이 가능하기 때문에 보행능력, 보행속도, 보행의 대칭성 증가 등의 기능 향상을 이끌어낸다(Aprile et al., 2019; Kamment et al., 2020). 또한 로봇 보행훈련은 팔다리의 반복적인 움직임 통해 대뇌 걸질 영역의 신경 가소성을 유발하여 (Turner et al., 2013; Koo & Hwang, 2020) 뇌졸중, 척수손상 등과 같은 중추신경계 손상환자들의 보행훈련을 위해 적용되고 있다. 로봇 보행훈련은 보행이 불가능한 환자의 손상된 팔다리를 보조하고, 안전 장치에 의해 고정되어 낙상의 위험이 낮아 공간적 제약 없이 운동이 가능하며(Yeung et al., 2017) 치료사의 신체적 부담감 또한 감소시킬 수 있는 이점을 가지고 있다. 이러한 로봇 보행의 이점은 중추신경계 손상 환자 외의 질병에도 로봇 보행 훈련을 적용할 수 있음을 나타낸다.

Koo와 Hwang은 무릎 인공관절 완전치환술을 실시한 환자에게 실시한 로봇 보행훈련이 넙다리두갈래근과 안쪽넓은근의 근활성화를 유도했다고 보고하였고(Koo & Hwang, 2020), San-Morere 등은 넙다리뼈 절단 환자에게 적용한 로봇보조 보행훈련이 6분 걷기, 보행 속도, 보행 대칭성에 효과 있다고 보고하였다(San-Morere et al., 2021). 선행 연구들과 같이 최근 로

봇 보행훈련의 영역은 신경계 질환을 넘어 근골격계 질환으로 인한 보행 재활까지 점차 확대되고 있다. 근골격계 질환은 모든 연령대에서 나타나며, 특히 고령화에 따른 엉덩관절과 무릎관절의 퇴행성 질환의 유병율은 점차 증가하고 있다. 수술적 처치 이후에도 보행 능력 감소, 균형 능력 감소, 근력 감소(Li et al., 2014; Nantel et al., 2008) 등의 기능적인 장애를 가지기 때문에 재활은 필수적인 요소이며, 보행 능력은 독립적인 기능 훈련과 일상생활을 위해 중요하다(Roos, 2003).

일반적으로 보행훈련이 지팡이나 워커 같은 보조 도구를 이용하여 이루어지나(Coulter et al., 2013), 치료실 환경에 따라 거리 및 공간적 제약이 생기는 한계가 있다. 반면에 Lang 등의 연구에서 치료사가 실시하는 보행훈련은 약 292회의 보행주기를 가지지만 로봇 보행훈련은 최소 600~1800회의 보행주기를 가진다고 보고되어 일반적인 물리치료의 한계를 개선할 수 있다(Lang et al., 2007). 특히 체중부하를 통한 운동치료가 균형능력과 보행능력 향상에 효과적으로 보고되는 데(Sherrington et al., 2004) 말단 장치형 보행 로봇은 신체가 지지되는 발판을 조절함으로써 올바른 보행 궤적을 환자에게 훈련시킬 수 있어(Aprile et al., 2019; Mehrholz & Pohl, 2012) 근골격계 환자에게 체중지지를 허용하면서 효과적으로 적용 가능하다.

하지 수술환자에게 있어서 조기 보행 재활은 일상 생활과 사회적 복귀에 중요하다. 따라서 본 연구의 목적은 급성기 하지 수술환자에게 로봇보조 보행훈련을 적용하여 능동 관절운동범위와 보행능력, 보행의 생체역학적 특성인 시공간적 요소 및 운동학적 요소에 미치는 영향을 연구하여 임상적 효과를 검증하고자 한다.

II. 연구 방법

Dankook University—2020-08-011-002).

1. 연구 대상

본 연구는 D대학교 의과대학 부속병원에서 근골격계 하지 질환을 진단받고, 수술적 처치를 실시한 환자를 대상으로 진행하였다. 대상자의 선정기준은 다음과 같다: (1) 수술 후 체중부하가 가능한 자 (2) 한국형간이 정신 상태 판별 점수가 24점 이상으로 인지적 결함이 없는 자 (3) 보행 보조기구 사용 유무에 관계없이 10m 이상 보행이 가능한 자. 중추 신경계 손상 자 및 시각, 안뜰 감각 질환으로 균형 유지에 어려움이 있는 경우는 대상에서 제외되었다. 연구 대상자는 실험 전 본 연구에 대한 목적과 로봇보조 보행훈련에 대한 설명을 듣고, 자발적으로 연구동의서를 작성한 후 연구에 참여하였다. 연구 대상자는 엉덩 인공관절 부분치환술 환자 6명, 엉덩 인공관절 완전치환술 환자 1명, 목쪽 넓다리뼈머리 뼈수정술 환자 3명, 무릎 인공관절 완전치환술 환자 4명으로 총 14명이 모집되었다 (Table 1). 본 연구는 단국대학교의 연구 윤리위원회의 승인을 받아 수행하였다(Institutional Review Board of

2. 측정방법 및 도구

1) 능동 관절운동범위 검사

로봇보조 보행훈련 전, 후 엉덩관절과 무릎관절의 능동 관절운동범위를 측정하기 위해 관절각도기 (model 3278, Kristeel, Germa)를 사용하였다. 대상자는 측정을 위해 중립자세에서 시작하여 엉덩관절의 굽힘, 펴, 벌림, 모음과 무릎관절의 굽힘, 펴를 능동적으로 수행하였고 신뢰도와 정확도를 위해 숙련된 1명의 물리치료가 측정하였다. 대상자는 동작 수행 시 통증이 느껴지거나 관절운동범위가 제한되는 지점에서 동작을 멈추도록 지시받았으며 보상작용을 방지하기 위해 숙련된 물리치료가 해부학적 고정점을 제공하였다. 측정방법은 Norkin과 White의 측정 절차에 따라 실시되었고(Norkin & White, 2003), 총 3번 측정 후 평균 값을 사용하였다.

2) 보행능력 평가

대상자의 보행능력 평가를 위해 10m 걷기 검사 (10m walk test)와 2분 걷기 검사(2min walk test)를 사용하였다. 10m 걷기 검사는 직선 거리를 14m로 설정하였으며 가속 구간과 감속 구간인 시작과 끝 부분의 2m는 측정에서 제외하였다. 대상자가 10m 구간을 보행하는 데 걸리는 시간을 측정하였으며 보행 시 대상자가 안정감을 느끼는 속도로 측정하였다. 2분 걷기 검사는 일반적으로 많이 사용되는 6분 걷기 검사의 대안으로 사용되며 고령자 및 소아에게 사용 가능하다고 보고된다(Witherspoon et al., 2019). 대상자는 2분 동안 10m 떨어진 두 개의 지점 사이를 편한 속도로 걸었으며 걷는 동안 속도를 늦추거나 쉬는 것이 가능하였다. 출발 신호에 맞춰 보행을 시작하였고, 멈추라는 신호가 있을 시 보행을 중단하였다. 모든 측정 시 검사자는 환자의 안전을 위해 도움을 줄 수 있도록 하였다. 각 측정 사이에는 1분간의 휴식 시간을 가졌으

Table 1. General information of subjects

Variables	Subjects (n, %)
Sex	
Male	2 (14.28)
Female	12 (85.72)
Diagnosis	
Intertrochanteric Fracture	7 (50.00)
Femur Neck Fracture	2 (14.29)
Hip AVN	1 (7.14)
Both Knee Degenerative Arthritis	4 (28.57)
Type of operation	
Hemiarthroplasty	6 (42.86)
CRIF c TFNA	3 (21.43)
Total Hip Replacement Arthroplasty	1 (7.14)
Total Knee Replacement Arthroplasty	4 (28.57)

AVN: avascular necrosis; CRIF: closed reduction and internal fixation; TFNA: trochanteric fixation nail advanced

며 3회 측정 후 평균 값을 사용하였다.

3) 관성측정장치를 통한 보행의 생체역학적 특성 평가

관성측정장치(inertial measurement unit, IMU)를 사용하여 대상자의 보행 시 시공간적 요소(spatio-temporal parameters) 및 운동학적 요소(kinematic parameters)를 측정하였다. 관성측정장치는 실험실이나 일반 환경에서 관절의 움직임을 분석하는 데 사용되는 비침습적이고 검증된 검사 방법이며(Majumder et al., 2018), 본 연구에서는 STT-IWS sensor (STT System, San Sebastian, Spain)를 사용하였으며 보행 분석 시 사용된 센서는 무선 네트워크를 통해 컴퓨터에 연결되어 자료를 수집하였다. 센서는 3축의 가속도계(accelerometers), 자력계(magnetometers), 자이로스코프(gyroscope)로 이루어져 있으며 Helen Hayes 마커 부착지에 기반하여 신체 질량중심점, 양쪽 허벅지(무릎 위 3cm)의 앞쪽, 양쪽 정강이(발목 위 3cm)의 앞쪽 표면, 양쪽 발목관절 앞쪽 표면에 총 7개 부착하였다.

대상자들이 10m를 걷는 동안의 데이터가 수집되었고, 본 연구에서 첫번째와 마지막 걸음을 제외한 나머지 걸음의 시공간적 요소 및 운동학적 요소를 측정하였다. 시공간적 요소로는 대상자들의 분속 수, 한 걸음 길이와 보행 속도를 측정하였고 운동학적 요소로는 보행 주기 동안 대상자의 골반 앞-뒤 기울임, 좌-우 기울임, 돌림 각도와 엉덩관절 및 무릎관절의 굽힘-펴, 벌림-모음, 안쪽돌림-가쪽돌림 각도를 측정하였다.

자료처리를 위해 I-sen software version 3.8 (STT System, San Sebastian, Spain)을 사용하여 대상자들의 보행 자료를 편집 및 디지털화하고 보행의 시공간적 및 운동학적 요소를 수집하였다. 사용된 센서의 샘플링 속도는 100Hz로 설정하였고 발생된 노이즈를 줄이기 위해 저역 통과 필터(low pass filter)를 사용하여 처리하였으며 차단 주파수는 12Hz로 설정하였다. 대상자의 보행주기 동안 수집된 양의 피크 값과 음의 피크 값을 평균 낸 후 Matlab (R2011a)을 사용하여 계산된 평균 음의 피크 값에서 평균 양의 피크 값을 빼서

골반 및 엉덩관절, 무릎관절의 운동학적 변수를 계산하였다. 관성측정장치를 통해 수집된 각 운동면에서의 최대 움직임 각도에서 최소 움직임 각도를 뺀 값을 계산하여 보행 시 각 관절의 운동 범위를 구하였다.

3. 실험 절차

대상자는 수술 직후 2~3일간의 침상 안정기를 가지고 정형외과 주치의의 판단 하에 운동치료를 시작하였다. 로봇보조 보행훈련을 실시하기 전 대상자들의 보행훈련 시점을 설정하기 위해 일반적인 중재가 진행되었다. 대상자의 신체 능력에 따라 3~5일 동안 중재가 진행되었으며 기립성 저혈압을 방지하기 위해 기립 경사 침대 운동과 치료사 보조 하에 앉기 운동을 실시하였으며 경사 침대에서 60도 이상 각도로 15분 이상 어지럼증 없이 서기와 독립적 앉은 자세 유지를 목표로 진행되었다. 관절운동범위 확보를 위해 수술 직후 3~5일 동안 손상측 관절에 30분 동안 지속성 수동 운동장치(continuous passive motion, CPM)를 사용하여 관절운동을 실시하였다. 로봇보조 보행훈련 참여를 위한 운동을 통하여 엉덩관절 수술환자의 엉덩관절의 굽힘 가동범위를 90-100도, 무릎관절 수술환자의 무릎관절 굽힘 가동범위를 70-90도로 확보하여 휠체어 앉기가 가능하고 2분 이상의 서기와 보조도구를 이용하여 10m 이상 보행이 가능해진 후 로봇보조 보행훈련에 참여하였다.

본 연구에 사용된 보행 로봇은 말단장치형 로봇(gait-assisted robot, RehaTech, Korea)으로 Figure 1과 같다. 연구 대상자들은 주 5회, 2주 동안 하루 30분씩 로봇보조 보행훈련에 참가하였다. 보행 훈련 시 관성측정장치를 통해 수집된 대상자의 보행 패턴을 바탕으로 보행 속도와 훈련 난이도가 설정되었다. 장비 착용 시 로봇보조 보행훈련 전문가에 의해 기구의 탑승 및 하차가 이루어졌으며, 훈련 시 숙련된 물리치료사의 감독하에 운동이 진행되었으며 훈련 중 대상자들이 어지럽거나 피로감을 느낄 시 즉시 훈련을 중단하고 휴식을 취하였다.



Fig. 1. Robot-assisted gait training equipment.

4. 자료 분석

본 연구에서 수집된 자료의 통계학적 분석을 위해 SPSS Statistics for Windows version 23.0 (SPSS Inc., IBM, USA)을 이용하였다. 대상자들의 정규분포를 확인하기 위해 Shapiro-Wilk 검정을 사용하였고, 검정 결과 정규성을 만족하지 못하여 비모수 검정인 윌콕슨 부호순위 검정(Wilcoxon signed-rank test)를 사용하여 하지 수술 환자의 로봇보조 보행훈련의 전, 후 비교를 하였으며 모든 통계학적 유의 수준 α 는 0.05로 설정하였다.

III. 연구 결과

1. 연구 대상자의 일반적인 특성

본 연구 대상자의 일반적 특성은 Table 2와 같다. 평균 연령은 77.86 ± 5.80 세, 체중 53.78 ± 6.65 kg, 키 156.23 ± 8.31 cm, 한국형 간이정신상태검사 점수는 27.86 ± 1.09 점이다.

2. 로봇보조 보행 훈련 전-후 능동 관절운동범위의 비교

로봇보조 보행훈련 후 대상자들의 엉덩관절과 무릎관절의 능동 관절운동범위 변화는 Table 3과 같다. 엉덩관절 굽힘, 폼, 벌림, 모음 각도 모두 운동 후 유의한 차이를 보였으며 ($p < 0.05$), 무릎관절 굽힘, 폼 각도도 운동 후 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$)

Table 2. General characteristics of subjects

Variables	Mean \pm SD
Age (year)	77.86 \pm 5.80
Weight (kg)	53.78 \pm 6.65
Height (cm)	156.23 \pm 8.31
K-MMSE (score)	27.86 \pm 1.09

Values represent mean \pm standard deviation, K-MMSE: korea-mini mental status examination

Table 3. Comparison of hip & knee joints active range of motion before and after robot-assisted gait training

	Right				Left			
	Pre-test	Post-test	Z	p	Pre-test	Post-test	Z	p
Hip Flexion (°)	100.21 ± 11.68	111.07 ± 5.03	-3.206	0.001*	106.78 ± 8.81	113.28 ± 4.43	-3.209	0.001*
Hip Extension (°)	4.14 ± 2.35	5.50 ± 1.43	-3.305	0.001*	5.78 ± 1.67	6.17 ± 1.43	-2.356	0.018*
Hip Abduction (°)	27.35 ± 6.75	32.57 ± 5.24	-3.302	0.001*	31.14 ± 5.71	35.00 ± 4.88	-3.315	0.001*
Hip Adduction (°)	17.07 ± 5.71	20.00 ± 4.83	-3.314	0.001*	20.21 ± 4.23	21.57 ± 4.24	-2.537	0.011*
Knee Flexion (°)	107.78	120.86	-3.182	0.001*	111.93	122.43	-3.086	0.002*

	Right				Left			
	Pre-test	Post-test	Z	p	Pre-test	Post-test	Z	p
	±17.59	±8.99			±18.66	±9.20		
Knee Extension (°)	-2.50	-0.57	-2.384	0.017*	-2.14	-0.50	-2.264	0.024*
	±2.76	±0.85			±2.87	±0.94		

Values represent mean ± standard deviation, *p<0.05

Table 4. Comparison difference of 10m walk test, 2min walk test and spatio-temporal parameter during gait before and after robot-assisted gait training

	Pre-test	Post-test	Z	p
10m walk test (s)	32.07±8.66	21.56±7.55	-3.296	0.001*
2minute walk test (m)	27.18±9.81	39.56±9.39	-3.296	0.001*
Cadence (steps/min)	46.29±11.46	66.65±11.75	-3.233	0.001*
Step length (m)	0.36±0.13	0.51±0.14	-3.183	0.001*
Velocity (m/s)	0.29±0.12	0.49±0.16	-3.300	0.001*

Values represent mean ± standard deviation, *p<0.05

3. 로봇보조 보행훈련 전-후 보행능력의 비교

로봇보조 보행훈련 후 대상자들의 10m 걷기 검사와 2분 걷기 검사 결과는 Table 4와 같다. 10m 걷기 검사는 운동 후 유의하게 감소하였으며(p<0.05), 2분 걷기 검사는 운동 후 유의하게 증가하였다(p<0.05).

4. 로봇보조 보행 훈련 전 -후 보행의 생체역학적 변수 비교

로봇보조 보행훈련 전-후 대상자들의 보행 시 시공간적요소의 변화는 Table 4와 같으며 분속 수, 한 걸음 길이, 보행속도 모두 유의하게 증가하였다(p<0.05).

로봇보조 보행훈련 전-후 대상자들의 보행 시 운동학적 요소의 변화는 Table 5와 같다. 운동학적 요소에서 보행 시 골반의 움직임은 유의한 차이를 보이지 않았으며(p>0.05), 엉덩관절의 굽힘-펴 운동 각도와, 벌림-모음 각도에서는 통계적으로 유의한 차이를 보였고(p<0.05) 안쪽돌림-가쪽돌림 각도에서는 유의한 차이를 보이지 않았다(p>0.05) 무릎관절의 굽힘-펴 각도와 오른쪽 무릎관절의 벌림-모음 각도에서는 유의한 차이를 보였고(p<0.05), 안쪽돌림-가쪽 돌림 각도와

왼쪽 무릎관절의 벌림-모음 각도에서는 유의한 차이를 보이지 않았다(p>0.05).

IV. 고 찰

엉덩관절 및 무릎관절을 포함한 하지 수술환자들은 수술 직후 관절운동범위의 제한, 통증, 근육 약화 등의 문제로 움직임에 제한을 가지고(Jette et al., 2020; Ewen et al., 2012), 이러한 제한으로 보행 속도의 감소, 한 걸음 길이의 감소, 손상 측 체중 지지의 제한으로 인한 보행의 비대칭성 증가, 신경근 조절능력의 감소 등으로 인한 보행 장애를 가진다(Ewen et al., 2012; Stevens et al., 2004). 보행 기능의 개선은 신체 활동과 관련 있고 이는 삶의 질과 사회참여에 영향을 주기 때문에(Jette et al., 2020; Arnold et al., 2015) 하지 수술 환자에게 보행 재활은 필수적이다. 따라서 본 연구는 기존의 신경계 손상 환자의 보행 재활에 주로 적용하던 로봇보조 보행훈련을 급성기 하지 수술환자에게 적용하여 임상적 효과를 알아보고자 하였다.

본 연구에서는 2주간의 로봇보조 보행훈련 후 대상자의 엉덩관절의 굽힘-펴, 벌림-모음과 무릎관절의 굽

Table 5. Comparison of kinematic parameters in the pelvic, hip and knee joints during gait before and after robot-assisted gait training

	Pre-test		Post-test		Z	p		
Pelvic tilt (°)	19.90±6.36		20.01±6.06		-0.140	0.889		
Pelvic obliquity (°)	9.86±3.06		8.76±2.58		-0.804	0.421		
Pelvic rotation (°)	26.03±9.81		24.62±5.43		-0.251	0.802		
	Right				Left			
	Pre-test	Post-test	Z	p	Pre-test	Post-test	Z	p
Hip Flexion-Extension (°)	33.45 ±5.32	40.91 ±5.14	-2.731	0.006*	38.22 ±7.00	45.67 ±5.95	-2.794	0.005*
Hip Abduction-Adduction (°)	13.69 ±3.17	15.41 ±3.52	-1.446	0.148	13.76 ±3.09	15.19 ±3.34	-1.783	0.075
Hip Int.Rot-Ext.Rot (°)	19.85 ±4.73	22.70 ±3.58	-2.419	0.016*	20.23 ±6.13	24.58 ±6.25	-3.234	0.001*
Knee Flexion-Extension (°)	33.45 ±5.32	40.91 ±5.14	-2.731	0.006*	38.22 ±7.00	45.67 ±5.95	-2.794	0.005*
Knee Abduction-Adduction (°)	13.69 ±3.17	15.41 ±3.52	-1.446	0.148	13.76 ±3.09	15.19 ±3.34	-1.783	0.075
Knee Int.Rot-Ext.Rot (°)	19.85 ±4.73	22.70 ±3.58	-2.419	0.016*	20.23 ±6.13	24.58 ±6.25	-3.234	0.001*

Values represent mean ± standard deviation, Int: internal; Ext: external; Rot: rotation, *p<0.05

힘-편의 능동 관절운동범위가 유의하게 증가되었다. Joo 등은 하지 표면적의 50% 이상에 화상을 입고 무릎 관절의 굽힘 구축이 있는 화상환자에게 적용한 12주 간의 로봇보조 보행훈련이 무릎관절의 편과 발목관절의 발바닥 굽힘 각도의 증가에 유의한 효과가 있다고 보고하였으며(Joo et al., 2020), Goto 등은 무릎 인공관절 완전치환술 환자에게 적용한 로봇보조 보행훈련이 무릎관절의 운동범위를 개선시키고 통증을 감소시켰다고 보고하였다(Goto et al., 2017). 관절운동범위의 제한은 한 걸음 길이, 분속 수, 보행 속도와 같은 보행의 시공간적 요인을 감소시킨다(Ewen et al., 2012; Bang & Shin, 2016). 본 연구에서 로봇보조 보행훈련 후 능동 관절운동범위가 증가되었고, 보행의 시공간적 요인이 함께 증가되었기 때문에 선행연구를 뒷받침하는 결과임을 알 수 있다. 이는 로봇보조 보행훈련을 통한 손상된 팔다리의 집중적인 보행훈련은 감각 운동결절영역의 활성화를 유도하고 하지의 협응력 증진과 근육의 긴장도 감소에 영향을 미쳐 제한된 하지

의 능동 관절운동범위를 개선시킨 것으로 생각된다(Calabro et al., 2016; Koo & Hwang, 2020; Joo et al., 2020). 능동 관절운동범위의 증가는 수술 후 발생하는 손상측과 비손상측의 비대칭적인 보행의 패턴을 대칭적으로 회복시킴으로 보행의 효율성을 높여(Bennett et al., 2008) 일상생활로의 빠른 회복을 돕는다.

10m 걷기 검사는 보행 속도를 측정하는 검사로 높은 신뢰도를 가지고(Oosting et al., 2016; Peters et al., 2013), 2분 걷기 검사는 지구력 및 근육의 피로도, 이동 능력 평가를 위해 사용된다(Witherspoon et al., 2019). 두 가지 검사는 보행능력에 대한 임상적 정보를 제공하며(Kim & Noh, 2006; Brooks et al., 2006) 검사 결과가 의미하는 보행 속도 및 이동능력은 재활의 필요성 및 퇴원 가능성(Peters et al., 2013), 기능 저하 및 낙상의 위험도(Brooks et al., 2006)를 예측할 수 있는 지표로 사용 가능하다. 본 연구에서 단기간의 로봇보조 보행 훈련 후 하지 수술환자의 10m 걷기 시간은 감소하였고 2분 걷기 검사 시 이동 거리는 증가하였다. Aprile

등은 아급성기 뇌졸중 환자에게 적용한 로봇보조 보행훈련이 전통적인 보행훈련보다 보행 속도와 이동거리가 증가에 효과적이라고 보고하였다(Aprile et al., 2019). Mehrholz 등은 무릎 인공관절 치환술환자에게 적용한 로봇보조 보행훈련이 10m 걷기 검사와 6분 걷기 검사 결과의 개선에 효과가 있었다고 보고하였다(Mehrholz & Pohl, 2012). 반면에 Labruyere와 Hedel은 척수손상 환자에게 적용한 근력운동이 로봇보조 보행훈련보다 보행 속도 증가에 효과적이라고 보고하였다(Labruyere & Hedel, 2014). 선행 연구들은 서로 다른 결과를 보고하였는데 이는 로봇보조 보행훈련 시 사용된 보행 로봇의 형태에 따라 다른 치료 효과가 나타남을 보여준다. 앞선 연구들은 로봇보조 보행훈련 시 말단 장치형 로봇을 사용하여 대상자에게 체중 지지를 허용하는 훈련을 실시하였고(Aprile et al., 2019; Mehrholz & Pohl, 2012), 반면 외골격형 로봇을 사용한 경우는 훈련 중 체중 지지를 허용하지 못하였기 때문에 로봇보조 보행훈련보다 근력훈련에서 보행 속도가 더 증가되었다(Labruyere & Hedel, 2014). Sherrington 등은 엉덩관절 골절환자에게 적용한 체중부하 훈련이 비체중부하 훈련보다 보행 속도, 균형 능력 증진에 효과적이며 이는 체중부하 훈련이 자세 유지를 위해 더 큰 근력을 사용하기 때문이라고 보고하였고(Sherrington et al., 2004), Jan 등은 퇴행성 무릎관절염 환자에게 적용한 체중부하 훈련이 비체중부하 훈련보다 보행 속도 개선에 효과적이며 이는 체중부하를 통한 관절의 고유수용성 감각의 증가로 보행 속도가 증가되었다고 보고하였다(Jan et al., 2009). 선행 연구들을 통해 하지 근력의 증가와 보행 속도 향상, 이동 거리 향상에 로봇보조 보행훈련이 효과적임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 말단 장치형 로봇보조 보행훈련은 하지 수술환자에게 체중 지지를 허용하면서 진행되었고 이는 말단부의 고유수용성 감각을 자극했을 것으로 사료되며 더 많은 근력과, 높은 근 활성도를 야기시켜 보행 속도 및 이동 거리의 증가가 나타났다고 생각된다.

하지 수술을 받은 환자들은 체중 지지의 제한과

운동범위의 제한으로 짧은 흔들기를 가지게 되어 보행 속도와 한 걸음 길이, 분속 수의 감소를 특징적으로 가진다(Cheng & Lai, 2013; Joo et al., 2020). 이는 손상측과 비손상측의 비대칭적인 보행 양상을 만들어 비효율적인 에너지 소비, 낙상 위험도 증가 등의 문제를(Stevens et al., 2005; Bennett et al., 2008) 야기할 수 있다. 본 연구에서는 2주간의 로봇보조 보행훈련 후 하지 수술환자의 보행 속도, 한 걸음 길이, 분속 수가 모두 유의하게 증가하였다. Bang과 Shin의 연구에서 로봇보조 보행훈련이 트레드밀 보행훈련보다 만성 뇌졸중 환자의 보행 속도, 분속 수, 한 걸음 길이의 증가에 더 효과적이라고 하였으며(Bang & Shin, 2016), Sale 등이 진행한 척수손상 환자의 사례 연구에서는 착용식 로봇보조 보행훈련이 대상자의 분속 수에 유의한 증가가 있었으며 보행 속도와 한걸음 길이도 유의하지는 않았지만 증가하였다고 보고하였다(Sale et al., 2016). 이러한 보행의 시공간적 요소는 앞서 논의한 관절운동범위 증가와 연관이 있으며 시상면에서 증가된 엉덩관절의 가동성은 보폭의 증가를 유도한다는 선행 연구와 일치함을 알 수 있다(Goto et al., 2017; Bennet et al., 2006). Barthuly 등은 0.5 m/s의 보행 속도가 지역사회 보행을 수행할 수 있는 최소 속도라고 하였고(Barthuly et al., 2012), van de Port 등은 0.4 m/s 이하의 보행 속도는 가정환경 보행이 가능하고, 0.4~0.8 m/s는 약간의 제한이 있는 지역사회 보행 속도라고 보고하였다(van de Port et al., 2008). 로봇보조 보행훈련 후 대상자들의 보행 속도는 0.29 ± 0.12 m/s에서 0.49 ± 0.16 m/s로 증가하여 퇴원 후 지역사회에 참여 가능한 수준임을 알 수 있어 로봇보조 보행훈련을 통해 빠른 사회참여가 가능할 것으로 사료된다.

보행의 운동학적 요인에서, 로봇보조 보행훈련을 통해 보행주기 동안 엉덩관절의 굽힘-펴 각도와 무릎 관절의 굽힘-펴 각도가 증가되었다. Straudi 등은 다발성경화증 환자에게 적용한 로봇보조 보행훈련이 보행주기 동안 엉덩관절의 굽힘-펴 각도를 증가시켰다고 하였으며(Straudi et al., 2013), Srivastava 등은 뇌졸중 환자의 로봇보조 보행훈련이 일반적인 보행훈련보다

보행 중 최대 무릎 굽힘 각도를 증가시킨다고 하였다 (Srivastava et al., 2016). 본 연구에서 하지 수술환자에게 적용한 평지 보행훈련은 시상면에서의 움직임이 활발하게 일어나는 데 이로 인해 엉덩관절과 무릎관절의 굽힘-펴 각도의 증가에 영향을 준 것으로 생각되며 보행에서 시상면의 움직임은 흔들기 시 신체가 전진할 수 있는 힘과 추진력을 제공하기 때문에(Cheng & Lai, 2013) 큰 의미가 있다.

Foucher와 Wimmer는 엉덩 인공관절 치환술 후 최대 안쪽돌림 모멘트와 가쪽돌림 모멘트가 감소한다고 보고하였고(Foucher & Wimmer, 2012), Weidow 등은 무릎관절의 퇴행성 관절염 환자들을 대상으로 보행 분석을 실시한 결과 대조군과 비교하여 안쪽돌림 범위가 감소하였다고 보고하였다(Weidow et al., 2006). 로봇보조 보행훈련 후 보행주기 동안의 안쪽돌림-가쪽돌림 각도가 유의하게 증가하였으며 이는 보행 기능의 회복을 의미할 수 있다. 보행 시 한쪽 발이 흔들기로 넘어가는 단계에서 골반이 앞쪽으로 함께 이동하게 되고 반대측 다리는 디딤기로 체중을 지지하게 된다. 이때 디딤기 단계의 다리가 고정된 상태에서 골반의 회전이 일어나게 되어 엉덩관절은 안쪽돌림 상태가 된다(Cardoso et al., 2020; Audenaert et al., 2012). 보행 시 추진력을 위해 흔들기 다리의 엉덩관절 굽힘-펴 각도의 회복도 중요하지만 디딤기 다리의 충분한 체중지지 및 운동범위가 함께 보장되어야 가능하기 때문에 중요한 결과이다. 이러한 보행의 운동학적 요소의 개선은 로봇보조 보행훈련을 통해 집중적이고 반복적인 보행 환경이 제공되어 초기 재활 단계에서 각 관절의 움직임에 대한 정확한 정보의 입력과 조절이 가능하였기 때문에(Tuner et al., 2013; Calabro et al., 2016) 단기간의 훈련 기간에도 불구하고 하지 수술환자의 보행능력의 회복을 이끌어냈다고 사료된다.

반면에 엉덩관절과 무릎관절의 벌림-모음 각도에는 유의한 향상을 보이지 않았다. Kirkere 등은 엉덩관절의 벌림근과 모음근은 양하지 디딤기에서 단하지 디딤기로 보행이 진행되는 동안 안정성 제공에 중요한 역할을 한다고 하였다(Kirker et al., 2000). 본 연구는

급성기 환자를 대상으로 진행되었으며, 대상자의 특성을 고려하여 반복적인 평지 보행훈련이 적용되었기 때문에 시상면의 움직임에는 긍정적인 영향을 미쳤지만, 평지 보행으로는 이마면에서 일어나는 벌림-모음 움직임에는 제한이 있기 때문에 유의한 증가를 이끌어내지 못한 것으로 사료된다. Hussein 등은 뇌졸중 환자의 말단 장치형 로봇보조 보행 시 근육의 활성도를 연구하였는데 평지 보행보다 계단 보행에서 중간 볼기근의 근활성도가 유의하게 증가했다고 하였다(Hussein et al., 2008). 추후 급성기 단계를 지난 하지 수술환자에게 계단 보행훈련을 적용하여 로봇보조 보행훈련이 보행의 운동학적 요인에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 몇 가지 제한점을 가진다. 첫째, 본 연구에 참여한 표본 수가 적기 때문에 다른 연령대에 일반화하기가 어려우며 질병 특성상 여성의 표본 수가 많이 모집되었기 때문에 남성에게는 일반화하기에 어려워 추후 더 많은 수의 표본과 남성 표본에 대한 모집이 필요하다. 둘째, 급성기 하지 수술환자를 대상으로 단기간 동안 훈련이 진행되었기 때문에 보행훈련 효과의 지속성에 대한 추적연구가 진행되어야 한다. 셋째, 본 연구는 대조군없이 보행훈련의 전-후 비교만 진행되었기 때문에 로봇보조 보행훈련의 확실한 효과를 입증하기 위해 추후 대조군을 설정하여 추가적인 연구가 진행되어야 한다. 넷째, 엉덩관절과 무릎관절 수술환자가 대상자로 모집되어 발목관절이나 인대손상 같은 대상자에 대하여 조사하지 못하였기 때문에 추후 더 다양한 하지 수술환자에 대한 연구가 필요하다.

V. 결론

본 연구는 하지 수술환자를 대상으로 실시한 단기간의 말단 장치형 로봇보조 보행훈련이 대상자의 능동 관절운동범위, 보행 능력, 보행의 생체역학적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 실시하였다. 로봇보조 보행훈련 후 대상자의 엉덩관절 및 무릎관절의 능

동 관절운동범위가 유의하게 증가하였고, 10m 걷기 검사 및 2분 걷기 검사 결과 유의하게 개선되었으며 보행 속도, 한 걸음 길이, 분속 수의 증가에도 긍정적인 영향을 미쳤다. 보행주기 동안의 운동학적 요소에도 긍정적인 영향이 나타났는데 특히 시상면에서의 엉덩관절과 무릎관절의 움직임에 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 로봇보조 보행훈련은 하지 수술환자에게 효과적인 증재방법으로 활용될 수 있음을 알 수 있었으며 로봇보조 보행훈련의 영역을 확장시켰다는 점에서 임상적 의의를 가진다.

Acknowledgements

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “광역협력권산업육성사업(지역주도형R&D)” (과제번호 P0006196) 으로 수행된 연구결과입니다.

References

- Aprile I, Iacovelli C, Goffredo M, et al. Efficacy of end-effector robot-assisted gait training in subacute stroke patients: clinical and gait outcomes from a pilot bi-centre study. *NeuroRehabilitation*. 2019;45(2):201-212.
- Arnold JB, Mackintosh S, Olds TS, et al. Improvements in knee biomechanics during walking are associated with increased physical activity after total knee arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Research*. 2015;33(12):1818-1825.
- Audenaert EA, Peeters I, Vigneron L, et al. Hip morphological characteristics and range of internal rotation in femoroacetabular impingement. *The American Journal of Sports Medicine*, 2012;40(6):1329-1336.
- Bang DH, Shin WS. Effects of robot-assisted gait training on spatiotemporal gait parameters and balance in patients with chronic stroke: a randomized controlled pilot trial. *NeuroRehabilitation*. 2016;38(4):343-349.
- Barthuly AM, Bohannon RW, Gorack W. Gait speed is a responsive measure of physical performance for patients undergoing short-term rehabilitation. *Gait & Posture*. 2012;36(1):61-64.
- Bennett D, Humphreys L, O'Brien S, et al. Gait kinematics of age-stratified hip replacement patients—a large scale, long-term follow-up study. *Gait & Posture*. 2008;28(2):194-200.
- Bennett D, Ogonda L, Elliott D, et al. Comparison of gait kinematics in patients receiving minimally invasive and traditional hip replacement surgery: a prospective blinded study. *Gait & Posture*. 2006;23(3):374-382.
- Bessler J, Prange-Lasonder GB, Schaake L, et al. Safety assessment of rehabilitation robots: a review identifying safety skills and current knowledge gaps. *Frontiers in Robotics and AI*. 2021;8:602878.
- Brooks D, Davis AM, Naglie G. Validity of 3 physical performance measures in inpatient geriatric rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2006;87(1):105-110.
- Calabro RS, Cacciola A, Berte F, et al. Robotic gait rehabilitation and substitution devices in neurological disorders: where are we now? *Neurological Sciences*. 2016; 37(4):503-514.
- Cardoso TB, Ocarino JM, Fajardo CC, et al. Hip external rotation stiffness and midfoot passive mechanical resistance are associated with lower limb movement in the frontal and transverse planes during gait. *Gait & Posture*. 2020;76:305-310.
- Cheng PY, Lai PY. Comparison of exoskeleton robots and end-effector robots on training methods and gait biomechanics. *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. 2013;8102:258-266.
- Coulter CL, Scarvell JM, Neeman TM, et al. Physiotherapist-directed rehabilitation exercises in the outpatient or home setting improve strength, gait speed and cadence

- after elective total hip replacement: a systematic review. *Journal of Physiotherapy*. 2013;59(4): 219-226.
- Ewen AM, Stewart S, St Clair Gibson A, et al. Post-operative gait analysis in total hip replacement patients-a review of current literature and meta-analysis. *Gait & Posture*. 2012;36(1):1-6.
- Foucher KC, Wimmer MA. Contralateral hip and knee gait biomechanics are unchanged by total hip replacement for unilateral hip osteoarthritis. *Gait & posture*. 2012;35(1):61-65.
- Goto K, Morishita T, Kamada S, et al. Feasibility of rehabilitation using the single-joint hybrid assistive limb to facilitate early recovery following total knee arthroplasty: a pilot study. *Assistive Technology*, 2017;29(4):197-201.
- Hussein S, Schmidt H, Volkmar M, et al. Muscle activation of stroke patients during stair climbing in robot assisted gait training. *2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*. 2008:875-880.
- Jan MH, Lin CH, Lin YF, et al. Effects of weight-bearing versus nonweight-bearing exercise on function, walking speed, and position sense in participants with knee osteoarthritis: a randomized controlled trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2009;90(6):897-904.
- Jette DU, Hunter SJ, Burkett L, et al. Physical therapist management of total knee arthroplasty. *Physical Therapy*. 2020;100(9):1603-1631.
- Joo SY, Lee SY, Cho YS, et al. Effects of robot-assisted gait training in patients with burn injury on lower extremity: a single-blind, randomized controlled trial. *Journal of Clinical Medicine*. 2020;9(9):2813.
- Kim SY, Noh JH. Management of femoral peritrochanteric fracture with proximal femoral nail. *Journal of the Korean Orthopaedic Association*. 2006;41(3): 541-546.
- Kirker SG, Jenner JR, Simpson DS, et al. Changing patterns of postural hip muscle activity during recovery from stroke. *Clinical Rehabilitation*. 2000;14(6):618-626.
- Koo KI, Hwang CH. Five-day rehabilitation of patients undergoing total knee arthroplasty using an end-effector gait robot as a neuromodulation blending for deafferentation, weight offloading and stereotyped movement: interim analysis. *PLoS One*. 2020; 15(12):e0241117.
- Labruyere R, van Hedel HJ. Strength training versus robot-assisted gait training after incomplete spinal cord injury: a randomized pilot study in patients depending on walking assistance. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*. 2014;11:4.
- Lang CE, MacDonald JR, Gnip C. Counting repetitions: an observational study of outpatient therapy for people with hemiparesis post-stroke. *Journal of Neurologic Physical Therapy*. 2007;31(1):3-10.
- Li J, Wu T, Xu Z, et al. A pilot study of post-total knee replacement gait rehabilitation using lower limbs robot-assisted training system. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*. 2014;24(2): 203-208.
- Majumder S, Mondal T, Deen MJ. A simple, low-cost and efficient gait analyzer for wearable healthcare applications. *IEEE Sensors Journal*. 2018;19(6): 2320-2329.
- Mehrholz J, Pohl M. Electromechanical-assisted gait training after stroke: a systematic review comparing end-effector and exoskeleton devices. *Journal of Rehabilitation Medicine*. 2012;44(3):193-199.
- Nantel J, Teroz N, Centomo H, et al. Postural balance during quiet standing in patients with total hip arthroplasty and surface replacement arthroplasty. *Clinical Biomechanics*. 2008;23(4):402-407.
- Norkin CC, White DJ. Measurement of joint motion: a guide to goniometry, 3th ed. Philadelphia. FA Davis. 2004.

- Oosting E, Hoogeboom TJ, Appelman-de Vries SA, et al. Preoperative prediction of inpatient recovery of function after total hip arthroplasty using performance-based tests: a prospective cohort study. *Disability and Rehabilitation*. 2016;38(13):1243-1249.
- Peters DM, Fritz SL, Krotish DE. Assessing the reliability and validity of a shorter walk test compared with the 10-Meter Walk Test for measurements of gait speed in healthy, older adults. *Journal of Geriatric Physical Therapy*. 2013;36(1):24-30.
- Roos EM. Effectiveness and practice variation of rehabilitation after joint replacement. *Current Opinion in Rheumatology*. 2003;15(2):160-162.
- Sale P, Russo EF, Russo M, et al. Effects on mobility training and de-adaptations in subjects with spinal cord injury due to a wearable robot: a preliminary report. *BMC Neurology*. 2016;16:12.
- Sanz-Morere CB, Martini E, Meoni B, et al. Robot-mediated overground gait training for transfemoral amputees with a powered bilateral hip orthosis: a pilot study. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*. 2021;18(1):111.
- Sherrington C, Lord SR, Herbert RD. A randomized controlled trial of weight-bearing versus non-weight-bearing exercise for improving physical ability after usual care for hip fracture. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2004;85(5):710-716.
- Srivastava S, Kao PC, Reisman DS, et al. Robotic assist-as-needed as an alternative to therapist-assisted gait rehabilitation. *International Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*. 2016;4(5):370.
- Stevens JE, Mizner RL, Snyder-Mackler L. Neuromuscular electrical stimulation for quadriceps muscle strengthening after bilateral total knee arthroplasty: a case series. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 2004;34(1):21-29.
- Straudi S, Benedetti MG, Venturini E, et al. Does robot-assisted gait training ameliorate gait abnormalities in multiple sclerosis? a pilot randomized-control trial. *NeuroRehabilitation*. 2013;33(4):555-563.
- Turner DL, Ramos-Murguialday A, Birbaumer N, et al. Neurophysiology of robot-mediated training and therapy: a perspective for future use in clinical populations. *Frontiers in Neurology*. 2013;4:184.
- van de Port IG, Kwakkel G, Lindeman E. Community ambulation in patients with chronic stroke: how is it related to gait speed? *Journal of Rehabilitation Medicine*. 2008;40(1):23-27.
- van Kammen K, Boonstra AM, van der Woude LHV, et al. Lokomat guided gait in hemiparetic stroke patients: the effects of training parameters on muscle activity and temporal symmetry. *Disability and Rehabilitation*. 2020;42(21):2977-2985.
- Weidow J, Tranberg R, Saari T, et al. Hip and knee joint rotations differ between patients with medial and lateral knee osteoarthritis: gait analysis of 30 patients and 15 controls. *Journal of Orthopaedic Research*. 2006;24(9):1890-1899.
- Witherspoon JW, Vasavada R, Logaraj RH, et al. Two-minute versus 6-minute walk distances during 6-minute walk test in neuromuscular disease: is the 2-minute walk test an effective alternative to a 6-minute walk test? *European Journal of Paediatric Neurology*. 2019; 23(1):165-170.
- Yeung LF, Ockenfeld C, Pang MK, et al. Design of an exoskeleton ankle robot for robot-assisted gait training of stroke patients. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. 2017;2017:211-215.