최대 한발짝길이를 설정한 착용형 로봇보조보행훈련이 뇌졸중 환자의 호흡능력, 균형 및 보행에 미치는 영향

박주호, PT, MS[1], 최유식, PT, PhD[2], 임우석, PT, MS[3], 지문환, PT, BS[4], 이주영, MD, PhD[*5]
[1,2,3,4,*5]서울특별시 서남병원 재활의학과

Effects of Wearable Robot-assisted Gait Training with Maximum Step Length on Respiratory Function, Balance and Gait in Stroke Patients

Ju-Ho Park, PT, MS[1], Yu-Sik Choi, PT, PhD[2], Woo-Suk Lim, PT, MS[3], Mun-Hwan Ji, PT, BS[4], Ju-Young Lee, MD, PhD[*5]
[1,2,3,4,*5]*Dept. of Physical Medicine & Rehabilitation, Seoul Metropolitan Seonam Hospital, Republic of Korea*

Purpose This study aimed to investigate the impact of wearable robot-assisted gait training with maximum step length on improving the respiratory function, balance and gait in hemiplegia with CVA (stroke) patients. ***Methods*** 36 participants were consisted of patients who had experienced a stroke within the past year and agreed to participate in this study. The study group (n_1 = 18), in addition to receiving standard neurological treatment, underwent wearable robot-assisted gait training with maximum step length. The intervention was conducted for four weeks, three times a week, 30 minutes per day. The control group (n_2 = 18) received treadmill gait training with traditional neurological treatment. Both groups were evaluated using the forced vital capacity (FVC), forced expiratory volume in one second (FEV_1), postural stability test (PST), berg balance scale (BBS), trunk impairment scale (TIS), timed up & go test (TUG) and 10 meter walk test (10MWT) pre and post the intervention. ***Results*** The results showed a significant improvement in FEV_1/FVC(%), TIS, TUG, 10MWT in the study group. ***Conclusion*** Based on the study's findings, wearable robot-assisted gait training with maximum step length can be considered effective in enhancing the respiratory function, balance and gait in stroke patients.

Key words Balance, Gait, Respiratory function, Stroke, Wearable robot-assisted gait training with maximum step length

Corresponding author Ju-Young Lee (pinklee1028@seoulsnh.or.kr)

Received date 29 April 2025
Revised date 28 May 2025
Accept date 29 May 2025

I. 서 론

로봇보조보행훈련은 1994년 Lokomat의 개발을 계기로 시작되었으며, 이후 다양한 보행보조로봇들이 개발되었다.[1)] 이들 로봇은 크게 고정형 보행보조로봇(Lokomat, LOPES, ALEX),[2)] 말단효과기 착용로봇(Gait Trainer, Haptic Walker),[3)] 착용형 보행보조로봇(ReWalk, Ekso, Indego)[4)]으로 분류할 수 있다. 초기 연구에서는 주로 척수손상환자를 대상으로 보행보조로봇의 효과를 평가하는 연구가 많았으나,[5,6)] 최근에는 뇌졸중 환자의 재활 효과를 극대화하기 위해 보행보조로봇의 활용이 증가하고 있다.[7)] 일반적으로 뇌졸중 환자는 마비쪽의 감각저하, 근력 약화, 관절가동범위 제한 등으로 인해 보행 시 비대칭성을 보이는데, 로봇보조보행장치는 이러한 비대칭 보행 패턴을 기계적으로 교정하고 반복적인 대칭 보행 학습을 유도할 수 있다는 장점이 있다.[8)]

뇌졸중 환자는 호흡근 약화, 근긴장도 변화, 가슴우리 확장 감소 등의 신체적 변화를 경험하며, 이는 호흡기능 저하와 함께 균형 및 보행 능력에도 영향을 미칠 수 있다9). 특히, 뇌졸중 후 마비쪽 근육의 구축과 가슴우리 경직은 가슴우리의 생역학적 기능을 제한하여 자세안정성과 호흡기능 저하를 초래할 수 있다.[10)] 이에 따라 뇌졸중 환자의 최대 산소 섭취량(VO2 peak)은 동일 연령대 건강한 성인의 60%에 불과하며,[11)] 유산소능력과 운동능력이 감소하는 경향을 보인다.[12)]

로봇보조보행훈련은 독립적인 보행이 어려운 환자들에게 안전한 환경에서 지속적인 유산소운동을 제공할 수 있으며, 뇌졸중 초기 단계에도 적용 가능하여 호흡능력 향상에 기여할 수 있다.[13)] 또한, 보행 시 신체정렬유지가 균형 및 보행 능력

http:dx.doi.org/10.17817/JCMSH.2025.29.2.7

에 중요한 영향을 미치는 만큼 몸통과 골반움직임이 몸통안정화와 밀접하게 연관된다.[14] 로봇보조보행훈련이 몸통정렬을 보조함으로써 보행안정성을 향상시킬 수 있다는 점도 주목할 필요가 있다.[15]

특히, 보행하는 동안 골반움직임은 보행속도와 밀접한 관련이 있으며, 기능적 다리길이와 한발짝길이(step length)를 조절하는 데 중요한 역할을 한다.[16] 뇌졸중 환자는 병리적 보행패턴으로 인해 골반움직임이 감소하고, 이로 인해 한발짝길이(step length) 및 한걸음길이(stride length)의 감소가 나타날 수 있다.[17] 이러한 변화는 몸통안정화근의 약화로 이어질 수 있으며, 균형 및 보행능력 저하를 초래할 수 있다.[14,15] 따라서 로봇보조보행훈련이 골반움직임과 한발짝길이에 미치는 영향을 평가하는 것은 뇌졸중 환자의 균형 및 보행 개선을 위한 임상적 접근을 확립하는 데 중요한 요소가 될 수 있다.

최근 연구에서는 환자의 기능 수준에 따라 로봇보조보행훈련 프로그램을 적용하는 연구가 이루어지고 있으나,[18] 환자의 개별적인 신체 특성을 고려한 로봇보행훈련 전략에 대한 연구는 여전히 부족한 실정이다.[19] 이에 본 연구에서는 환자의 허벅지 길이와 종아리 길에 따라 최대 한발짝길이를 설정하여 로봇보조보행훈련을 실시하고, 중재 전후의 호흡기능, 균형, 보행 능력 변화를 분석하고자 한다. 그리고 로봇보조보행훈련이 뇌졸중 환자의 기능적 회복 과정에서 가지는 의미를 보다 명확히 평가하고, 임상적 활용 가능성을 탐색하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상 및 연구기간

본 연구는 2025년 2월 10일부터 3월 31일까지 S병원 입원하여 재활치료를 받는 환자를 대상으로 진행하였다. 용인대학교 기관생명윤리위원회(Institutional review board; IRB)의 승인을 받은 후에 연구(승인번호: 2503-HR-371-2)를 진행하였다. 연구대상자 수 선정을 위해 선행연구의 데이터를 토대로 G-power 3.1. program(G-power software 3.1.9.2, Heinrich Heine University Düsseldorf, Germany)을 사용하여 연구대상자 36명을 산출하였으며,[19] 연구대상자 선정기준에 부합하는 연구군 18명과 대조군 18명으로 무작위 배정하여 분류하였다. 모든 연구대상자 연구동의서를 받은 후, 연구를 진행하였으며, 연구대상자 선정기준은 1) 뇌졸중 진단을 받은 자, 2) 한국형 간이정신상태검사(K-MMSE)에서 24점인 자, 3) FAC(Functional Ambulation Category) 2점 이상인 자,[20] 4) 신장이 155cm-185cm 또는 체중 100kg 이하에 해당하는 자,[21] 제외기준은 1) 개방성 피부질환이 있는 자, 2) MAS(Modified Ashworth Scale)가 3등급 이상인 자,[21] 3) 다리에 심한 관절구축이 있는 자는 제외하였다.

2. 연구방법 및 절차

본 연구는 선정기준에 따라 33명을 대상으로 선정하였으나 탈락율 10%을 고려하여 2명을 추가하였다. 총 36명의 환자를 마이크로소프트 엑셀프로그램(Microsoft Excel version 16.0, Microsoft Corp, USA)을 이용하여 연구군과 대조군으로 각각 18명씩 무작위 배정하여 분류하였다. 연구대상자의 일반적 특성을 조사한 후, 중추신경계발달치료와 로봇보조보행훈련을 시행한 연구군과 중추신경계발달치료와 트레드밀보행훈련을 시행한 대조군으로 나누어 중재를 실시하였다. 중재기간은 총 8주이며, 로봇보조보행훈련과 트레드밀보행훈련은 주 3회 30분, 중추신경계발달치료는 주 5회 30분 적용하였다(Figure 1).

3. 중재방법

(1) 최대 한발짝길이를 설정한 착용형 로봇보조보행훈련

연구군은 착용형 보행보조로봇 (EA2 Pro, Cosmo-Robotics Corp., Korea)을 사용하여 보행훈련을 시행하였다(Figure 2A). 착용형 로봇보조보행훈련 시스템은 신체를 안전하게 고정하여 올바른 움직임을 유도하는 로봇본체, 체중지지를 보조해주고 낙상을 예방해주는 서스펜션, 실시간으로 훈련내용과 보행모드 설정이 가능한 태블릿 PC로 구성되어 있다. 훈련은 다음과 같이 진행되었다. 먼저 줄 자를 이용하여 사용자의 종아리와 허벅지 길이를 측정하였고(Figure 2B), 이에 따라 로봇본체 길이조정 및 시스템에 입력하여 설정하였다. 대상자가 편안한 복장과 신발을 착용한 상태에서 로봇본체에 앉도록 하였고, 독립적으로 이동이 어려운 경우에는 1명의 보조자가 이동하는 것을 도와주었다. 로봇본체가 각 신체정렬에 맞게 스트렙으로 고정하고 로봇본체와 서스펜션(suspension)은 안전벨트로 연결하여 안정성을 확보했다. 착용한 대상자가 안전하게 일어날 수 있도록 태블릿 PC를 이용하여 보행시작 전 올바르게 선 자세를 유지하도록 하였다. 보행 훈련 방법으로 제자리 보행, 일반보행이 있으며, 수동형 한걸음모드(passive one-step mode), 수동형 지속모드(passive continuous mode), 능동형모드(active mode) 중에서 환자에게 적절한 모드를 선택하였다. 그리고 환자의 종아리와 허벅지 길이에 따라 최대 한발짝길이(maximum step length)를 계산하여 훈련을 시행하였다. 최대 한발짝길이는 한쪽 발을 고정한 상태에서 반대편 발을 최대한 앞으로 내딛을 수 있는 거리로 정의되며, Winter(2009)는 일반적인 보행 시, 한발짝길이(step length)가 다리 길이의 약 57%에 달한다고 제시하였다.[22] 그러나 최대 한발짝길이는 동적보행이 아닌 정적인 자세에서 나타나므로, 일반적인 보행 시의 한발짝길이보다 약 10~15%

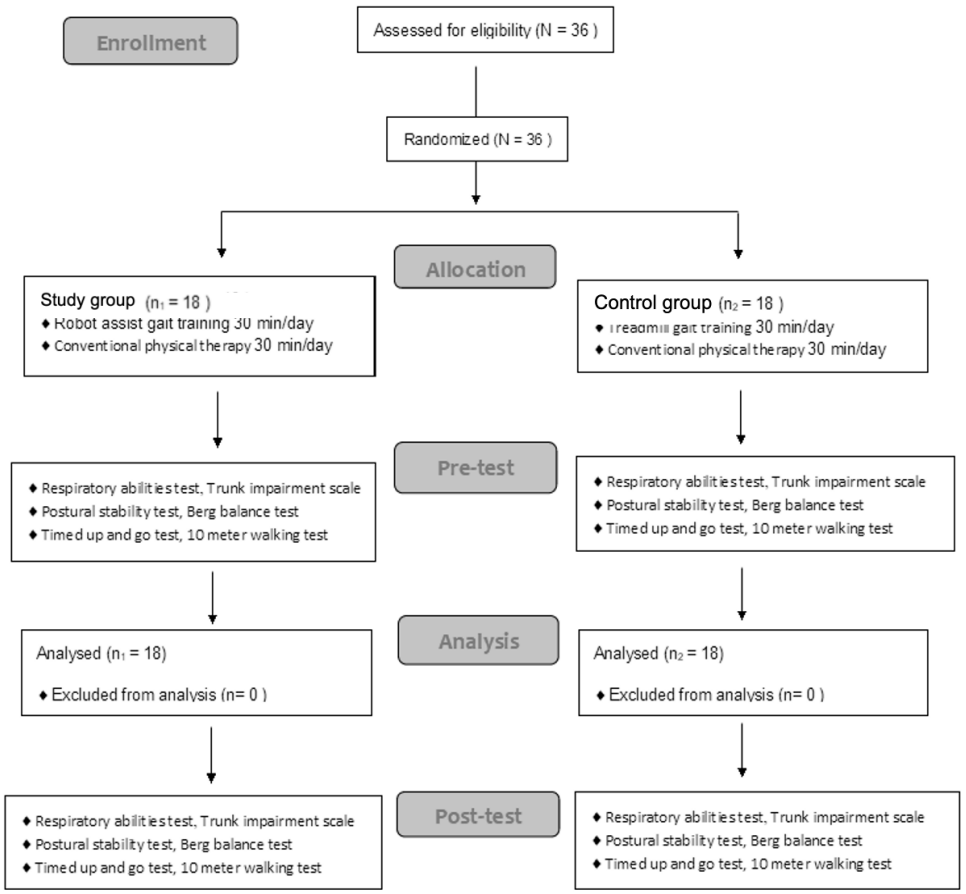
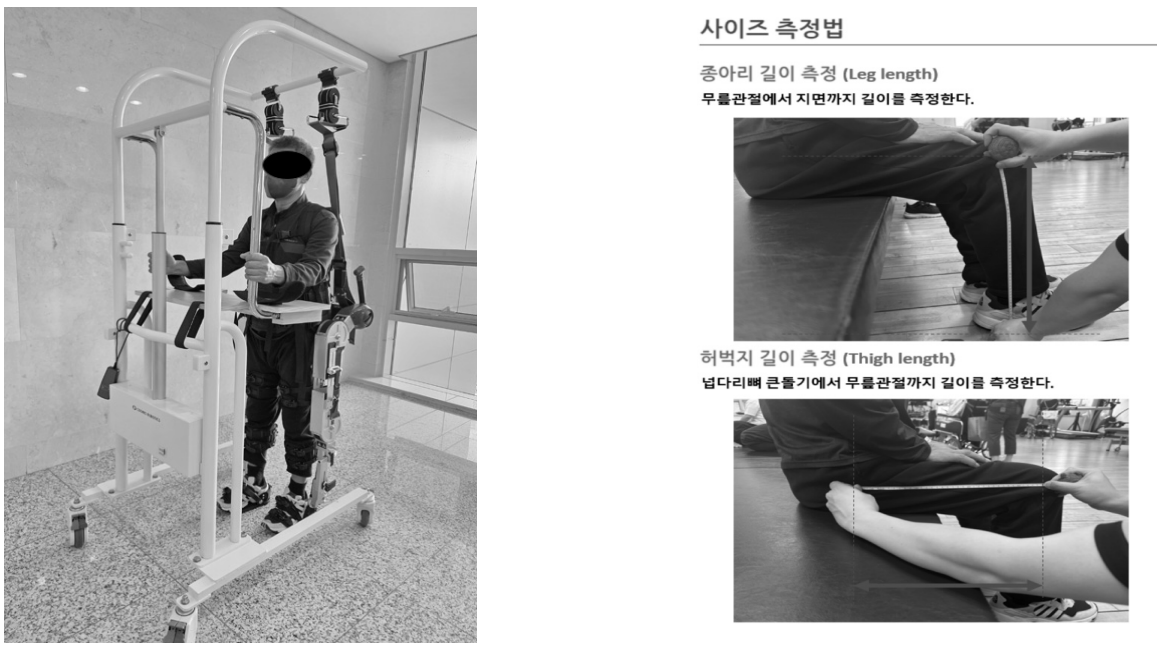


Figure 1. Study flow chart



(A) (B)

Figure 2. Wearable robot-assisted gait training with maximum step length

Figure 3. Treadmill gait training with harness

Figure 4. Portable spirometer for Respiratory function test

짧은 거리로 측정되는 경향이 있다.[23] 이에 따라 최대 한발짝 길이를 계산한 공식은 아래와 같다.

Maximum step length (cm)
= 0.49 Leg length (cm) + Thigh length (cm)

(2) 트레드밀보행훈련

전동식정형용운동장치(AP2010-2, Apsun, Koera)에서 보행훈련을 실시하였다. 트레드밀 속도는 자기선호 속도로 보행훈련을 하였으며, 일정한 속도를 30분 치료시간 동안 유지하였다. 훈련 중 어지럽거나 갑작스런 사고를 대비하여 하네스 장비를 연결하여 착용하도록 하였고(Figure 3), 1회 30분, 주 3일, 8주간 실시하였다.

(3) 중추신경계발달치료

연구군과 대조군은 각각 중추신경계발달재활치료(Neurodevelopment Treatment, NDT)를 주 5회, 1회 30분씩 8주 동안 실시하였다. 보바스치료, 고유수용성신경근촉진법, 중추신경계발달재활치료 자격을 갖춘 5년 차 이상의 물리치료사가 보행훈련을 포함한 관절가동범위운동, 근력강화운동, 균형운동 등의 프로그램을 대상자의 기능적 수준에 맞게 1:1로 시행하였다.

4. 측정도구

(1) 호흡능력(Respiratory function)

호흡능력은 환자가 편안하게 의자에 앉아, 손은 뺨에 대고 팔꿈치는 무릎에 올린 자세에서 측정되었다. 검사자의 지시에 따라, 대상자들은 앞쪽으로 몸을 기울인 앉은 자세를 유지한 채, 휴대용폐활량계(One flow FVC Spirometer, Clement Clarke International Ltd., England)(Figure 4)에 흡기 및 호기를 할 수 있도록 지시받았다. 총 3회의 측정이 이루어졌으며, 각 측정 사이에는 30초간의 휴식 시간이 제공되었다 강제폐활량(Forced volume capacity, FVC)과 1초 내 강제호기량(forced expiratory volume in 1 second, FEV1)을 측정, FEV1/FVC 비율을 계산하여 호흡능력을 평가하였다.[24]

(2) 자세균형지수(Postural stability index)

미국 BIODEX 사의 균형능력측정기(Balance system SD, Biodex Medical Systems, U.S.A)는 정적, 동적 평형성 훈련 및 평가를 위한 장치로 피드백용 화면 응시장치(display console)와 센서가 부착된 60cm 지름의 네모난 발판(foot plate)으로 구성되어 있다. 평가 시 대상자의 전반적인 앞·뒤, 오른쪽·왼쪽 방향으로 균형능력에 대한 정량화된 데이터를 획득할 수 있다(Figure 5). 이 측정 장비의 재검사 신뢰도는

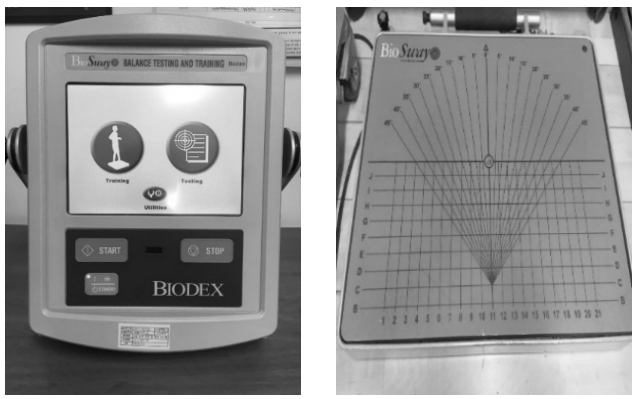


Figure 5. Biodex medical systems

0.95, 검사자간 신뢰도는 0.81이다.[25] 균형능력이 좋을수록 자세균형지수는 낮게 나타난다.

(3) 버그균형척도(Berg balance scale)

버그균형척도는 총 14개의 항목으로 구성되어 있으며, 최저 0점부터 최고 4점, 총 56점이다. 각 항목에는 치료사의 지시에 따른 기능적 움직임을 통한 수행 능력을 평가하는 것이며, 총 점수가 높을수록 균형능력이 좋다고 볼 수 있다. 0~20점은 휠체어, 21~40점은 보조가 필요한 상태의 보행, 41~56점은 독립적 보행이 가능한 점수라 할 수 있다(24). 이 검사의 측정자 내 신뢰도는 r=.99이며, 측정자 간 신뢰도는 r=.98이다.[17]

(4) 몸통손상척도(Trunk impairment scale)

몸통손상척도는 뇌졸중환자의 앉은 자세에서의 정적 및 동적 균형과 몸통의 선택적 움직임을 평가하는 도구이다. 몸통손상척도는 정적앉기균형, 동적앉기균형, 그리고 협응력 등 3개의 하위척도로 구성되어 있다. 검사자 간 검사-재검사 급내상관계수는 ICC=.85 그리고 ICC=.96-.99이다.[27]

(5) 일어나걷기검사(Timed up and go test)

일어나걷기검사는 보행과 균형능력을 동시에 측정할 수 있는 검사방법이다. 46cm 높이의 팔걸이가 있는 의자에 앉은 자세에서 출발 신호가 함께 일어나 3m 거리를 걸어 반환점을 되돌아와 의자에 다시 앉게 되는데 까지 소요된 시간을 측정하였다. 총 3회 실시하여 평균 시간을 계산하였다. 정상적인 균형감각을 가진 성인은 10초 이하, 노인은 11~20초, 기능적인 운동손상으로 인한 낙상 위험도가 높은 환자의 경우 20초 이상의 시간이 소요된다. 이 검사의 측정자 내 신뢰도는 r=.99이며, 측정자 간 신뢰도는 r=.98이다.[28]

(6) 10미터보행검사(10 Meter walking test)

10미터 길이를 측정한 후, 출발점과 끝지점을 표시하였다. 보행검사 시작 시 가속하는 구간과 감속하는 구간의 거리를 각각 2미터씩하여, 이 구간을 제외한 6미터에서 보행시간을 측정하였다.[29] 총 3회 실시하여 평균 시간을 계산하였다. 10미터보행검사의 측정자 내 신뢰도는 r=.95, 측정자 간 신뢰도는 r=.90이다.[30]

5. 통계분석

수집된 자료는 통계프로그램(SPSS version 27.0 for window software, SPSS Inc, Chicago)을 이용하여 처리하였다. 연구군과 대조군의 동질성 검정은 카이제곱검정(chi-square test)과 독립표본 t-검정(independent t-test)을 사용하였으며, 샤피로-윌크 검정(Shapiro-Wilk test)을 이용하여 정규성 검정을 실시하였다. 본 연구에서 호흡, 균형, 보행능력을 실험 전후 측정하였으며, 그룹 내 실험 전후 차이를 알아보기 위해 대응 대응표본 t-검정(paired t-test), 그룹 간 비교를 위해 독립표본 t-검정(independent t-test)을 사용하였다. 각 항목의 측정 결과값은 평균과 표준편차로 제시하였고, 통계적 유의수준은 α=.05로 하였다.

III. 연구결과

1. 연구대상자 동질성 검정 (Demographic and baseline characteristics)

본 연구의 선정기준에 적합한 대상자를 모집하여 총 36명을 대상으로 진행하였다. 연구군에서 성별은 남자10명, 여자 8명이었고, 대조군에서는 남자 13명, 여자 5명이었다. 평균 연령은 연구군 64.61세, 대조군에서 56.83세이었고, 키는 연구군 165.33cm, 대조군에서 168.44cm이었으며, 평균 체중은 연구군 64.70kg, 대조군 68.85kg이었다. 마비부위는 연구군에서 오른쪽 7명, 왼쪽 9명, 양쪽 2명, 대조군에서 오른쪽 12명, 왼쪽 3명, 양쪽 3명이었다. 평균 유병기간은 연구군에서 17.89개월, 대조군에서 20.56개월이었다. 연구군과 대조군 대상자의 기초평가로 한국형 간이정신상태검사와 한국형 수정판 바델지수, 기능적훈련평가를 비교하였다. MMSE 점수는 연구군에서 24.17점, 대조군에서 28.44점, 한국형 수정판 바델지수는 연구군에서 69.00점, 대조군에서 76.56점, 기능적훈련평가는 연구군에서 2.39점, 대조군에서 3.44점으로 집단 간 통계적으로 유의한 차이는 없었다(Table 1).

2. 로봇보조보행훈련 설정 (Wearable robot-assisted gait training settings)

연구군에 배정된 대상자의 로봇보조보행훈련 설정값은 아래와 같다. 종아리길이(Leg length), 허벅지길이(Thigh length)를 입력 후, 다리 길이에 따른 최대 한발짝길이를 계산하여 설정하였다.[22,23] 이외 값은 저항 없이, 스텝높이(Step height), 스텝시간(Step time), 보행텀, 모두 동일하게 설정하였다. 단, 환자의 보행능력에 따라 보행모드(Gait mode)는 수동형 한걸음모드(passive one-step mode), 수동형 지속모드(passive continuous mode), 능동형모드(active mode)로 설정하였다(Table 2).

3. 측정결과 (Outcome measures)

(1) 호흡능력 비교

호흡능력의 결과값은 다음과 같다. 균형지수는 로봇보조보행훈련을 받은 연구군에서 노력성폐활량(p<.001), 1초간 노력성

Table 1. Clinical characteristics of the patients in both groups (N=36)

Variables	Study group (n_1=18)	Control group (n_2=18)	x^2/t	*p*
Gender(male/female)	10 / 8	13 / 5	0.48[a]	0.49
Paretic side(Rt/Lt/Quad)	7 / 9 / 2	12 / 3 / 3	4.52	0.11
Age(year)	64.61±13.32	56.83±14.29	1.69[b]	0.63
Height(cm)	165.33±8.30	168.44±9.44	1.05	0.62
Weight(kg)	64.70±9.54	68.85±20.17	0.79	0.09
Duration(month)	19.89±14.39	20.56±8.82	0.17	0.56
MMSE	26.17±6.08	28.44±2.48	1.47	0.32
K-MBI	69.00±15.12	76.56±11.76	1.67	0.18
FAC	3.39±0.61	3.44±0.98	0.18	0.42

Values are presented as mean ± standard deviation. MMSE, Mini-Mental State Examination, K-MBI, Korean-modified Barthel index; FAC, Functional Ambulatory Category.
[a]chi-square test, [b]independent t-test

Table 2. Wearable robot-assisted gait training settings in study group (N_1=18)

	Leg length (cm)	Thigh length(cm)	MSL (cm)	Gait mode
Subject 1	43	37	39.2	Active mode
Subject 2	46	37	40.7	Passive continuous mode
Subject 3	44	40	41.2	Passive one-step mode
Subject 4	46	39	41.7	Passive one-step mode
Subject 5	45	40	41.7	Passive continuous mode
Subject 6	47	39	42.1	Active mode
Subject 7	48	43	44.6	Active mode
Subject 8	45	42	42.6	Active mode
Subject 9	47	41	43.1	Passive continuous mode
Subject 10	48	41	43.6	Passive continuous mode
Subject 11	48	43	44.6	Passive continuous mode
Subject 12	49	42	44.6	Passive one-step mode
Subject 13	50	42	45.1	Passive continuous mode
Subject 14	50	43	45.6	Active mode
Subject 15	51	45	47.0	Passive continuous mode
Subject 16	48	42	44.1	Passive one-step mode
Subject 17	49	42	44.6	Active mode
Subject 18	52	46	48.0	Passive continuous mode

MSL, Maximum Step Length

호기량(p<.001), 1초간 강제폐활량비율(p<.01)에서 유의한 증가를 보였으며, 대조군에서는 노력성폐활량(p<.001), 1초간 노력성호기량(p<.001)에서 유의한 증가를 보였다 (Figure 6A). 연구군과 대조군의 집단 간 비교에서는 1초간 강제폐활량비율(p<.05)에서 유의한 차이를 보였다(Table 3)(Figure 6B).

Table 3. Comparison between pre and post treatment mean value of respiratory function in both groups (N=36)

	Study group (n_1=18)			Control group (n_2=18)			p
	Pre	Post	Change (post-pre)	Pre	Post	Change (post-pre)	
FVC (L)	2.85±0.92	3.32±0.88	0.47±0.17***	2.89±0.87	3.25±0.90	0.36±0.19***	0.89
FEV_1 (L)	2.22±0.84	2.87±0.78	0.65±0.43***	2.30±0.90	2.67±0.88	0.37±0.27***	0.18
FEV_1/ FVC (%)	77.94±4.71	86.50±5.37	8.56±11.52**	77.72±7.80	81.61±9.41	3.89±8.58	0.02*

p<0.05*, p<0.01**, p<0.001***

Values are presented as mean ± standard deviation. FVC, forced vital capacity; FEV1, forced expiratory volume in 1 second.

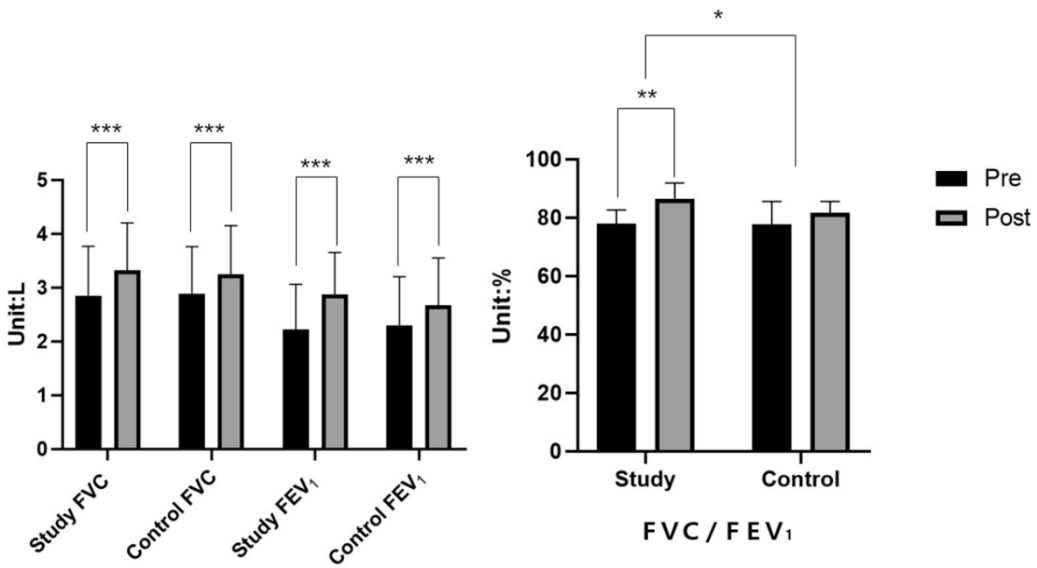


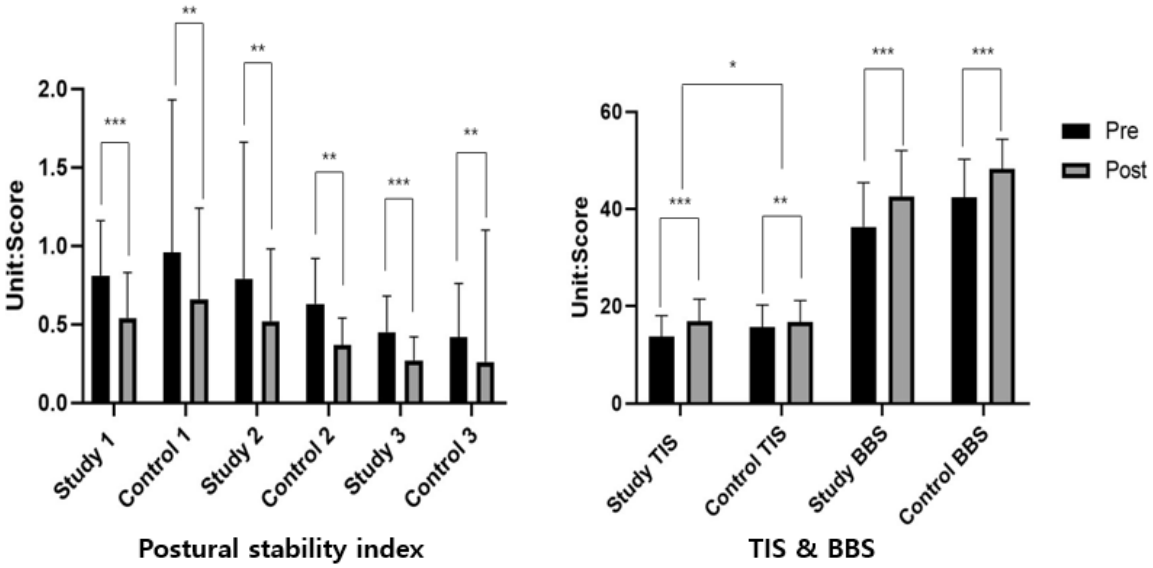
Figure 6. Comparison of respiratory function

Table 4. Comparison between pre and post treatment mean value of balance function in both groups (N=36)

		Study group (n1=18)			Control group (n2=18)			p
		Pre	Post	Change (post-pre)	Pre	Post	Change (post-pre)	
PST (score)	1	0.81±0.35	0.54±0.29	-0.27±0.25***	0.96±0.97	0.66±0.58	-0.30±0.49**	0.61
	2	0.79±0.87	0.52±0.46	-0.27±0.48**	0.63±0.29	0.37±0.17	-0.25±0.28**	0.66
	3	0.45±0.23	0.27±0.15	-0.18±0.13***	0.42±0.34	0.26±0.84	-0.15±0.18**	0.91
TIS (score)		13.78±4.28	16.89±4.60	3.11±1.88***	15.73±4.54	16.72±4.45	1.00±1.19**	0.03*
BBS (score)		36.33±9.10	42.61±9.40	6.28±5.07***	42.39±7.83	48.22±6.14	5.83±5.33***	0.40

p<0.05*, p<0.01**, p<0.001***

Values are presented as mean ± standard deviation. PST, postural stability index; 1, overall stability index; 2, anterior/posterior stability index; 3, medial/lateral stability index, BBS, berg balance scale; TIS, trunk impairment scale.



(A) (B)

Figure 7. Comparison of balance function

Table 5. Comparison between pre and post treatment mean value of gait function in both groups (N=36)

	Study group (n1=18)			Control group (n2=18)			*p*
	Pre	Post	Change (post-pre)	Pre	Post	Change (post-pre)	
TUG (sec)	19.63±5.84	14.96±4.05	-4.67±5.13**	17.74±9.07	15.28±8.03	-2.47±2.84**	0.03**
10MWT (sec)	15.60±9.11	12.10±7.25	-3.50±3.34***	16.42±9.52	11.12±5.39	-5.30±5.69**	0.01**

$p<0.05^{*}$, $p<0.01^{**}$, $p<0.001^{***}$

Values are presented as mean ± standard deviation. TUG, timed up and go test; 10MWT, 10 meter walking test.

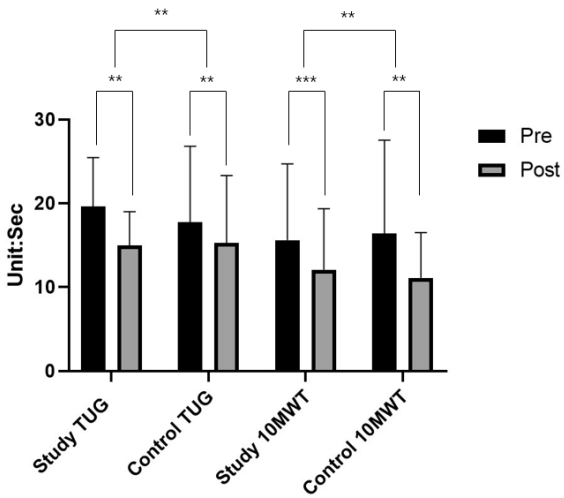


Figure 8. Comparison of gait function

(2) 균형 비교

균형의 결과값은 다음과 같다. 균형지수는 로봇보조보행훈련을 받은 연구군에서 총균형지수(p<.001), 앞뒤균형지수(p<.01), 좌우균형지수(p<.001)에서 유의한 감소를 보였으며, 대조군에서는 총균형지수(p<.01), 앞뒤균형지수(p<.01), 좌우균형지수(p<.01)에서 유의한 감소를 보였다. 집단 간 차이는 없었다(p>.05)(Figure 7A). 이외 몸통손상척도에서는 연구군(p<.001)과 대조군(p<.01) 모두 유의한 증가를 보였으며, 집단 간 유의한 차이를 보였다(p<.05). 버그균형척도에서는 연구군(p<.001)과 대조군(p<.001)에서 모두 유의한 증가를 보였으며, 집단 간 차이는 없었다(p>.05) (Table 4)(Figure 7B).

(3) 보행 비교

보행의 결과값은 다음과 같다. 일어나걷기검사의 변화는 연구군(p<.01)과 대조군(p<.01)에서 치료 중재 전후 유의한 감소를 보였으며, 집단 간 유의한 차이를 보였다(p<.01). 10미터 걷기검사의 변화는 연구군(p<.001), 대조군((p<.01)에서 유의한 감소를 보였으며, 집단 간 유의한 차이를 보였다(p<.01)(Table 5)(Figure 8).

Ⅳ. 고 찰

뇌졸중 환자는 호흡근의 약화로 인해 유산소 능력과 전반적인 운동 수행 능력이 저하되는 경향이 있다.[12] 최근에는 뇌졸중 환자의 균형과 보행을 향상시키기 위한 다양한 운동 방법으로 호흡강화운동을 병행한 몸통안정화를 통한 운동이 주목받고 있으며,[11] 로봇보조보행훈련 또한 뇌졸중 환자의 호흡능력 개선을 위한 치료 방법으로 사용되고 있다. [8] 본 연구에서는 로봇보조보행훈련이 대칭적인 최대 한발짝길이와 몸통의 정렬과 안정성에 기여함으로써 호흡 효율에 긍정적인 영향을 줄 수 있다는 점에 주목하였다.[13] 특히, 보행 능력의 향상이 호흡 기능 개선으로 이어질 수 있는 가능성을 고려하여 호흡능력을 주요 변수로 포함하였다. 이에 본 연구는 로봇보조보행훈련 시, 최대 한발짝길이 설정을 통해 뇌졸중 환자의 호흡능력 포함한 전반적인 기능적 향상을 함께 확인하고자 하였다. 연구 결과에 따라 분석한 내용은 다음과 같다.

첫째, 착용형 로봇보조보행훈련을 실시한 연구군에서 강제폐활량(FVC)와 1초 내 강제호기량(FEV_1)의 유의미한 증가가 있었다(p<0.001). Kaymaz 등(2024)은 배가로근(transverse abdominalis)의 활성화가 호흡능력과 균형 향상에 기여할 수 있다고 하였으며,[13] 본 연구에서도 로봇보조보행훈련을 통해 FVC, FEV1 의 향상 그리고 몸통손상척도(TIS)에서 유의미한 증가를 보였다(p<0.001). 몸통조절능력에 중요한 역할을 하는 배가로근은 팔과 다리의 움직임을 안정적으로 조절하는 데 기여하며, 허리 분절의 안정성을 증가시켜 몸통조절능력을 강화할 수 있다고 하였다.[14] 본 연구의 호흡능력 결과를 봤을 때, 착용형 로봇보조보행훈련을 시행한 연구군에서 중재 전후 FEV_1/FVC 비율의 유의미한 증가(p<.01)를 보였고, 트레드밀 보행훈련을 시행한 대조군과 집단 간 차이를 보였다(p<.05). 이는 착용형 로봇보조보행훈련이 가로막 호흡 시, 발생하는 배안(abdominal cavity) 압력 증가와 배가로근의 활성화를 통해, 몸통안정화에도 효과가 있음을 시사한다. 몸통안정화는 호흡능력의 향상뿐만 아니라 전반적인 신체 기능 회복에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.[31] 본 연구에서는 연구군의 몸통손상척도의 유의미한 점수 향상을 통해 몸통조절능력이 향상되었음을 확인할 수 있었다. Ivey 등(2005)은 착용형 로봇보조보행훈련이 다리 움직임을 통해 배가로근을 자극시켜 몸통안정화에 영향을 줄 수 있다고 하였으며,[32] 이를 통한 호흡능력 향상은 뇌졸중 환자의 기능적 회복과 상관관계가 있다.[11,33]

둘째, 본 연구에서 착용형 로봇보조보행훈련을 시행한 연구군에서 총균형지수(p<.001), 앞뒤균형지수(p<.01), 좌우균형지수(p<.001)에서 중재 전후 유의미한 감소를 보였다. 앞뒤균형지수의 감소는 폄근과 엉덩관절 주변 근육의 활성화 증가를 나타내며, 좌우균형지수의 감소는 엉덩관절 모음근과 벌림근의 적절한 조절이 이루어졌음을 의미한다.[25] 본 연구의 결과, 총균형지수의 감소가 몸통안정화에 중요한 요소로 작용하였으며, 엉덩관절 폄근과 모음근, 벌림근의 적절한 조절이 골반움직임에 기여했음을 알 수 있다. Inman 등(1984)은 양쪽 다리의 체중부하 동안 엉덩관절 모음근과 벌림근의 수축이 적절한 균형을 이룰 때, 골반이 대칭적인 위치에서 고정되어 안정성이 유지될 수 있다고 하였다.[16] 특히, 엉덩관절 모음근의 수축은 배근육과 골반바닥근의 수축을 촉진하고, 배안 압력을 조절한다.[22] 그러므로 로봇보조보행훈련은 엉덩관절 모음근과 배근육의 상호작용을 통해 뇌졸중 환자의 몸통안정성을 제공할 수 있고, 균형능력을 향상시킬 수 있다.[34,35,36]

셋째, 본 연구에서는 연구군에서 일어나걷기검사(p<0.01)와 10미터보행검사(p<0.001)에서 유의미한 감소를 확인할 수 있었다. 선행연구에서도 로봇보조보행훈련을 통해서 보행능력의 향상을 보고한 연구 결과가 많았다.[7,8] 본 연구의 특징은 최대 한발짝길이를 설정하여 뇌졸중 환자의 마비쪽과 비마비쪽의 대칭적인 보행 훈련이 가능하도록 한 점이다. 이를 통한 이동거리의 증가가 보행속도와 관련이 있는 것으로 생각된다. Hess 등(2010)은 한발짝길이의 증가는 골반움직임을 활성화시킬 수 있다고 하였으며,[23] 몸통안정화에 영향을 미칠 수 있다. 그리고 증가된 한발짝길이는 걸음수(cadence)를 감소시키고 이동거리를 향상시킨다. Schwartz 등(2009)의 연구에

따르면, 걸음수와 몸통 회전은 음의 상관관계에 있으며 (r=.169, p< 0.05), 걸음수가 감소할수록 몸통 회전 범위가 증가한다고 하였다.[34] 그리고 많은 걸음수에서는 발 위치 조절 메커니즘(foot placement mechanism)이 더 많이 사용되는 반면, 낮은 걸음수에서는 측면 발목 메커니즘(lateral ankle mechanism)이 더 많이 사용된다.[37] Titus 등(2018)은 걸음수의 감소가 한발짝길이의 증가와 보행속도 향상, 그리고 몸통과 골반의 상호 회전을 증가시키는 경향이 있다고 하였다.[38,39] 그러므로 최대 한발짝길이를 설정한 착용형 로봇보조보행훈련은 몸통안정화를 통해 골반움직임을 향상시킬 수 있고, 걸음수 감소를 통한 발목 메커니즘을 통해 보행에 긍정적인 영향을 줄 수 있다.

본 연구의 제한점으로는 첫째, 본 연구는 단일 의료기관에서 시행되었으며 연구대상자의 수가 36명으로 모든 뇌졸중 환자를 대상으로 일반화하는 데는 어려움이 있다는 것이다. 둘째, 보행 대칭성에 대한 구체적인 수치 변화를 직접적으로 분석하지 못한 한계가 있다. 향후 연구에서는 로봇보조보행훈련을 통해 나타나는 보행의 대칭성 변화 여부를 검증하기 위하여, 보행분석 장비를 활용한 정량적 평가가 필요할 것이다. 특히, 최대 한발짝길이를 대칭적으로 설정한 본 훈련 방식이 실제 보행 균형성 및 기능적 보행능력 향상에 어떻게 기여하는지를 명확히 규명할 필요가 있다. 셋째, 본 연구의 결과, 최대 한발짝길이 설정을 통한 몸통안정화가 골반움직임을 증가시킬 수 있음을 시사하지만, 골반움직임을 직접적으로 측정하지 못했다는 것이 제한점이다. 따라서 차후 연구에서는 몸통과 골반 회전 움직임에 대한 운동형상학적 분석이 필요하다고 생각한다.

그럼에도 본 연구의 결과를 통해, 최대 한발짝길이를 설정한 착용형 로봇보조보행훈련이 뇌졸중 환자의 호흡능력, 균형, 보행에 긍정적인 영향을 미칠 가능성이 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 로봇보조보행훈련의 새로운 접근법을 제시하는 데 기여할 수 있으며, 보다 효율적인 임상적 적용을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

References

1. Gassert R, Dietz V. Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: a neurophysiological perspective. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2018;15(1):46.
2. Colombo G, Joerg M, Schreier R, et al. Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis. Journal of Rehabilitation Research and Development. 2000;37(6):693-700.
3. Hesse S, Uhlenbrock D. A mechanized gait trainer for restoration of gait. Journal of Rehabilitation Research and Development. 2000;37(6):701-8.
4. Esquenazi A, Talaty M, Packel A, et al. The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury. American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation. 2012;91(11).
5. Kim TY, Oh SJ. The Effect of Robot-Assisted Gait Training on Proprioception, Balance, and Walking Ability in Stroke Patients. Journal of Clinical Movement Science in Human. 2024;28(3):27-34.
6. Lajeunesse V, Vincent C, Careau E, et al. Exoskeletons' design and usefulness evidence according to a systematic review of lower limb exoskeletons used for functional mobility by people with spinal cord injury. Disability and Rehabilitation: Assistive Technology. 2015;4:1-13.
7. Yang BI, Jeong JW, Kim YH, et al. Effect of Lower Extremity Robotic Therapy Combined with 5 Hz High Frequency Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on BBS, TUG and 10 Walk in Stroke Patients. Journal of Clinical Movement Science in Human. 2024;28(1):13-20.
8. Rodríguez-Fernández A, Lobo-Prat J, Font-Llagunes JM. Systematic review on wearable lower-limb exoskeletons for gait training in neuromuscular impairments. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2021;18(1):22.
9. Lanini B, Bianchi R, Romagnoli I, et al. Chest wall kinematics in patients with hemiplegia. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. 2003;168(1):109-13.
10. Pizzi A, Carlucci G, Falsini C, et al. Application of a volar static splint in poststroke spasticity of the upper limb. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 2005;86(9):1855-9.
11. Mackay-Lyons MJ, Makrides L. Exercise capacity early after stroke. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 2002;83(12):1697-702.
12. Cheng YH, Wei L, Chan WP, et al. Effects of protein supplementation on aerobic training-induced gains in cardiopulmonary fitness, muscle mass, and functional performance in chronic stroke: A randomized controlled pilot study. Clinical nutrition (Edinburgh, Scotland). 2020;39(9):2743-50.

13. Chang WH, Kim MS, Huh JP, et al. Effects of robot-assisted gait training on cardiopulmonary fitness in subacute stroke patients: a randomized controlled study. Neurorehabilitation and Neural Repair. 2012; 26(4):318-24.
14. Akkurt L, Yağcıoğlu GA, Aksoy CC, et al. The effect of trunk control on sitting balance and upper extremity functions in patients with subacute stroke. Neurological Sciences. 2024;45(12):5807-12.
15. Kaymaz EP, Geler Külcü D, Mesci N. Effects of trunk stabilization exercises on balance, functionality and abdominal muscle thickness in hemiplegic patients. Turkish Journal of Physical Medicine and Rehabilitation. 2024;70(1):61-72.
16. Inman VT, Ralston HJ, Todd F, et al. Human walking [Internet]. Williams & Wilkins; 1981. Available at: https://books.google.co.kr/books?id=HNNqAAAAMAAJ.
17. Beninato M, Portney LG, Sullivan PE. Using the international classification of functioning, disability and health as a framework to examine the association between falls and clinical assessment tools in people with stroke. Physical Therapy. 2009;89(8):816-25.
18. Lamberti N, Manfredini F, Lissom LO, et al. Beneficial effects of robot-assisted gait training on functional recovery in women after stroke: A Cohort Study. Medicina. 2021;57(11).
19. Lee SY, Choi YS, Kim MH, et al. Effects of robot-assisted walking training on balance, motor function, and ADL depending on severity levels in stroke patients. Technology and Health Care. 2024;32(5):3293-307.
20. Jayaraman A, O'Brien MK, Madhavan S, et al. Stride management assist exoskeleton vs functional gait training in stroke: A randomized trial. Neurology. 2019;92(3):e263-73.
21. Yoo HJ, Bae CR, Jeong H, et al. Clinical efficacy of overground powered exoskeleton for gait training in patients with subacute stroke: A randomized controlled pilot trial. Medicine (Baltimore). 2023;102(4):e32761.
22. Winter DA. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. 4th ed. Hoboken: Wiley; 2009.
23. Hess RJ, Brach JS, Piva SR, et al. Walking skill can be assessed in older adults: validity of the Figure-of-8 Walk Test. Physical Therapy. 2010;90(1):89-99.
24. Lim WS, Moon IY, Sung WK, et al. The effect of scapula supporting pillow on pulmonary function and postural changes in individuals with thoracic kyphosis. The Journal of Korean Physical Therapy. 2024;31(3): 198-204.
25. Cachupe WJC, Shifflett B, Kahanov L, et al. Reliability of biodex balance system measures. Measurement in Physical Education and Exercise Science. 2001;5(2): 97-108.
26. Choi HS, Kim HJ. The effect of berg balance scale evaluating frequency for dynamic balance and walking speed of patients with stroke. The Journal of Korean Physical Therapy. 2012;19(4):7-15.
27. Ko JY, You YY. Reliability and responsiveness of the korean version of the trunk impairment scale for stroke patients. The Journal of Korean Physical Therapy. 2015;27(4):175-82.
28. Podsiadlo D, Richardson S. The timed "Up & Go": a test of basic functional mobility for frail elderly persons. Journal of the American Geriatrics Society. 1991;39(2):142-8.
29. Tilson JK, Sullivan KJ, Cen SY, et al. Meaningful gait speed improvement during the first 60 days poststroke: minimal clinically important difference. Physical therapy. 90(2):196-208.
30. Mehrholz J, Wagner K, Rutte K, et al. Predictive validity and responsiveness of the functional ambulation category in hemiparetic patients after stroke. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 2007;88(10): 1314-9.
31. Liu YT, Liu XX, Liu YQ, et al. Effects of respiratory muscle training on post-stroke rehabilitation: A systematic review and meta-analysis. World Journal of Clinical Cases. 2024;12(20):4289-300.
32. Ivey FM, Macko RF, Ryan AS, et al. Cardiovascular health and fitness after stroke. Topics in Stroke Rehabilitation. 2005;12(1):1-16.
33. Tang A, Sibley KM, Thomas SG, et al. Effects of an aerobic exercise program on aerobic capacity, spatiotemporal gait parameters, and functional capacity in subacute stroke. Neurorehabilitation and Neural Repair. 2009;23(4):398-406.
34. Schwartz I, Sajin A, Fisher I, et al. The effectiveness of locomotor therapy using robotic-assisted gait training in subacute stroke patients: a randomized

controlled trial. Physical Medicine & Rehabilitation Journal. 2009;1(6):516-23.
35. Mayr A, Kofler M, Quirbach E, et al. Prospective, blinded, randomized crossover study of gait rehabilitation in stroke patients using the Lokomat gait orthosis. Neurorehabilitation and Neural Repair. 2007;21(4):307-14.
36. Zhai M, Huang Y, Zhou S, et al. Effects of age-related changes in trunk and lower limb range of motion on gait. BMC Musculoskelet Disord. 2023;24(1):234.
37. Fettrow T, Reimann H, Grenet D, et al. Walking cadence affects the recruitment of the medial-lateral balance mechanisms. Frontiers in Sports and Active Living. 2019;1:40.
38. Titus AW, Hillier S, Louw QA, et al. An analysis of trunk kinematics and gait parameters in people with stroke. African Journal of Disability. 2018;7:310.
39. Miscusi M, Serrao M, Ricciardi L, et al. Gait analysis, trunk movements, and electromyographic patterns after minimally invasive spine surgery for lumbar instability: An observational prospective study. World Neurosurgery. 2024;21:100262.