JESK J Ergon Soc Korea 2024; 43(2): 129-141
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2024.43.2.129
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

The Analysis of Gait and Plantar Pressure Parameters for People with Stroke using Smart Insole System

Soonbeom Kim[1], Dongheon Kang[2], Jiyoung Park[3]

[1]National Rehabilitaton Center, Department of Clinical Rehabilitation Research, Seoul, 01022
[2]National Rehabilitaton Center, Department of Healthcare and Public Health Research, Seoul, 01022
[3]Wonkwang University, Department of Safety and Health, Iksan, 54538

스마트인솔 시스템을 활용한 뇌졸중 장애인의 보행 및 족압 변인 분석

김순범[1], 강동헌[2], 박지영[3]

[1]국립재활원 임상재활연구과
[2]국립재활원 건강보건연구과
[3]원광대학교 안전보건학과

Corresponding Author
Jiyoung Park
Wonkwang University, Department of Safety and Health, Iksan, 54538
Email : withji0@wku.ac.kr

Received : August 25, 2023
Revised : April 02, 2024
Accepted : April 26, 2024

Copyright@2024 by Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

Objective: The purpose of this study was to investigate the characteristics of gait in people with stroke using smart insole equipment.

Background: People with stroke have pathological gait due to extensive neurological deficits. Hemiplegic gait is the most common symptom and is characterized by abnormal trunk movements and asymmetrical gait, such as dragging. Accurate gait evaluation is very important for diagnosing and managing patients with pathological gait. There is increasing interest in assessing gait in everyday life rather than laboratory environments. A typical example is smart insole equipment.

Method: A gait evaluation was conducted using smart insole equipment for 42 people with stroke. The temporal gait and plantar pressure parameters were obtained to confirm the difference between the affected and unaffected sides when gait.

Results: In gait parameters, the unaffected side showed a high ratio of the stance phase and single support, and the affected side showed a high ratio of the swing phase. In plantar pressure, both peak pressure and mean pressure were the smallest in the toe area, and the medial area showed the highest. The difference between the affected and unaffected sides was the largest in the medial area.

Conclusion: This study successfully confirmed the asymmetric gait characteristics of people with stroke using smart insole equipment. The findings of this research have significant implications for the development of more effective rehabilitation exercise programs and strategies for promoting symmetrical walking in people with stroke.

Application: The results of this study can be used as objective data for the development of rehabilitation exercise programs and contents for symmetrical walking of people with stroke.

Keywords: Stroke, Gait, Smart insole, Plantar pressure, Biomechanics

1. Introduction

보행은 중추 및 말초(근골격)신경계의 적절한 기능에 의해 활성화되며 조정, 균형 및 동기화가 필요한 리드미컬한 주기적 운동이다(Chatzaki et al., 2021). 또한 사람들 각자의 신체적, 심리적 상태에 따라 걸음걸이 특성을 차별화하여 고유한 패턴을 만들게 된다(Horst et al., 2017). 뇌졸중 장애인에게 나타나는 편측성 보행은 가장 흔한 증상이며, 비정상적인 몸통 기울기 회전과 함께 마비측의 편측성 약화로 인한 끌림 보행과 같은 비대칭 보행이 특징이다(Beyaert et al., 2015; Calma et al., 2017; Ferraris et al., 2021; Gao, 2021; Lim et al., 2019; Moon et al., 2016; Saccani et al., 2022; Wonsetler and Bowden, 2017).

뇌졸중은 뇌에 혈액을 공급하는 혈관이 막히거나 터짐으로 인해 발생하게 된다. 뇌졸중은 광범위한 신경학적 결손을 초래하며 운동 능력에 심각한 영향을 미쳐 근력 약화, 움직임을 시작하고 제어하는데 필요한 힘을 생성하는 능력의 제한, 근 피로의 빠른 유발 등으로 인해 운동 능력에 심각한 영향을 미쳐 하지의 이동성을 손상시킨다(Chen et al., 2005; Ferraris et al., 2021; Flansbjer et al., 2006; O'Sullivan et al., 2019). 또한 뇌졸중 환자는 건강한 환자와 비교하여 보행 중 두 배의 에너지 소비를 보이며, 뇌졸중 이후 생존자의 2/3가 병적 보행이 나타난다(Hesse et al., 2003; Macko et al., 2001). 보행 능력의 저하로 인해 뇌졸중 생존자는 일상생활을 영위할 수 없으며 스스로 생계를 유지하고 간병인에게 의존하게 되어 사회 경제적 어려움을 야기한다(Solanki et al., 2020). 정확한 보행 평가는 병리학적인 보행을 보이는 환자의 진단 및 관리를 위해 임상 전문가를 지원하는 다양한 시스템에 매우 중요하다(Chatzaki et al., 2021).

보행평가 및 분석은 일반적으로 보행 측정 장비가 있는 실험실이나 물리치료실 등에서 환자가 직접 방문하여 실시한다. 임상에서 보행 분석은 종종 보행 분석의 표준기준(Gold standard)으로 활용되는 적외선 광학식 카메라 및 반사 마커를 기반으로 하는 3차원 동작분석 시스템을 사용하여 실험실에서 수행된다(Wren et al., 2020). 신체 관절에 마커를 부착하여 다양한 결과 데이터를 확인할 수 있는 3차원 동작분석과 함께 지면반력기(Force plate)를 사용하여 보행 시 압력중심(COP), 보행 추진력을 위한 힘 등도 측정할 수 있다. 하지만 초고속 카메라와 지면반력기가 설치되어 있는 실험실이나 평가실에 직접 방문을 하여 고가의 장비를 활용하기 때문에 경제적인 부담이 있을 수 있으며, 정확한 결과분석을 위해 3차원 동작분석 시스템을 다룰 수 있는 숙련된 전문가가 필요하다. 또한 보다 편리하게 보행평가를 진행할 수 있는 다양한 장비 및 시스템이 있지만, 경제적 부담이 크기 때문에 직접 구매하는데 어려움이 있다. 이와 같이 신체적 기능, 지리적 위치, 경제적 어려움 등의 이유로 주기적인 보행평가에 어려움이 있는 경우가 많이 있지만 환자의 신체 능력 및 기능에 대한 지속적인 관리를 위해 보행평가를 주기적으로 실시하는 것이 필요하다.

최근 보행평가에 있어 실험실 환경이 아닌 일상생활 속에서 보행평가를 하고 보다 쉽게 보행 변수를 실시간으로 확인하는 기술에 대한 관심이 증가되고 있다. 웨어러블 디바이스 장비를 활용하는 기술로 스마트 워치, 스마트 인솔 등이 대표적이다. 그 중 스마트 인솔 장비는 스마트 보행(Smart gait) 장비 중 하나로, 인공지능(AI)를 활용한 통합 인간 보행 데이터 분석 시스템을 일컫는다(Harris et al., 2022). 스마트 인솔은 족압 측정 데이터를 획득하여 보행 정보(보행주기 시간, 유각기, 입각기, 압력중심, 속도 등)를 계산할 수 있는 웨어러블 장치 중 하나이다(Lin et al., 2016). 스마트 인솔은 발의 생체역학적 정보를 제공하며(Khandakar et al., 2022), 실시간 데이터 계산을 통해 재활의학, 스포츠 부상 감지, 선수 훈련 등에 잠재적으로 활용할 수 있다(Tao et al., 2020).

이처럼 다양한 보행 분석 장비 및 방법을 통해 뇌졸중 장애인의 보행에 관한 연구는 지속적으로 이루어지고 있다. Nagano et al. (2022)은 3차원 동작분석 시스템인 Optotrak 시스템을 사용하여 뇌졸중 및 노인을 대상으로 트레드밀 걷기 동안 MFC (Minimum foot clearance) 특성에 관한 연구를 하였다. Sanghan et al. (2021)은 Pedar 시스템을 사용하여 10명의 뇌졸중 환자를 대상으로 마비측과 비마비측의 시간적 보행 변수 및 족압 분석에 관한 연구를 하였다. Cho and Kim (2021)은 VICON 시스템을 사용하여 만성 뇌졸중 환자를 대상으로 보행 시 나타나는 하지 관절의 운동학적 변인에 대한 연구를 진행하였다.

족압 측정 및 분석을 위해 Pedar-X (Novel GmbH, Munich, Germany) 또는 GAITRite (CIR Systems Inc., Clifton, NJ, USA) 시스템을 사용하였다. 가장 많이 사용되는 족압 분석기인 Pedar-X 시스템의 경우 PC와 연결되어 데이터 측정을 할 수 있도록 송·수신기를 허리 차고, 인솔과 케이블을 연결하여 몸에 고정하여 사용하는 번거로움이 있었으며, 피험자에게 불편감이 있었다. GAITRite 시스템의 경우 매트의 길이 제한 등으로 측정 장비를 사용하는데 있어 불편함이 있었다. 반면에 스마트 인솔은 기존에 사용하던 장비와 다르게 경제적 부담이 적은 장비로 누구나 쉽게 일상생활에서 지속적으로 보행 변수의 측정 및 평가를 통해 보행 문제점을 확인할 수 있다. 이전 연구를 통해 스마트 인솔을 사용하여 시간적 보행 변수 및 힘 관련 보행 변수를 포함한 다양한 변수 측정이 가능한 것을 알 수 있다

(Chen et al., 2018; Chen et al., 2019). 스마트 인솔의 경우 완전 무선 형식으로 신발 속에 깔창과 같이 삽입하여 사용하는 편리성과 보행주로 길이의 제한이 없고 스마트폰, 태블릿PC 연결을 통해 실시간으로 데이터를 확인할 수 있다. 그렇기 때문에 최근 많은 관심이 증가되고 있지만 활성화가 되어있지 않다. 또한 뇌졸중 장애인을 대상으로 스마트 인솔 장비를 통한 보행 특성 분석에 관한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 스마트 인솔 장비를 사용하여 뇌졸중 장애인의 비대칭적인 보행 패턴을 지닌 뇌졸중 장애인의 시간적 보행 변수 및 족압 변수의 특성을 파악하고자 하며, 스마트 인솔을 사용하여 뇌졸중 조기 진단 및 예측을 할 수 있는 정량적 자료를 확인하고자 한다. 그리고 보다 효과적이고 체계적인 뇌졸중 장애인의 보행장애 개선을 위해 임상의, 물리치료사 또는 재활 프로그램 개발자 등에게 객관적 자료를 제공하고자 한다.

2. Method

2.1 Participants

본 연구의 참여자는 서울시 소재의 재활병원과 지역사회 내 복지관에서 모집한 편마비 뇌졸중 장애인 42명이다. 연구에 참여하기 전 연구 목적과 실험방법에 대한 충분한 설명 후 자발적인 동의를 한 자에 한하여 진행하였다. 참여자 선정기준은 다음과 같다; 1) 뇌출혈 또는 뇌경색 진단을 받았으며, 6개월 이상이 된 자, 2) 좌측 또는 우측으로 병변이 국한되는 편마비가 있는 자, 3) 지팡이 또는 보호자의 도움 없이 10m 이상 단독 보행이 가능한 자를 기준으로 하였다. 본 연구의 참여자 제외 기준은 다음과 같다; 1) 하지 관절의 구축 또는 경직 정도가 심해 검사 수행에 제한이 있는 자, 2) 정형외과적 문제로 인해 보행에 어려움이 있는 자, 3) 기타 다른 심폐질환 또는 근골격계 질환 및 손상으로 인해 검사를 수행할 수 없는 자를 기준으로 하였다. 본 연구에 참여한 대상자들의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of participants

Stroke (n=42)	Mean ± SD
Age (year)	61.24±11.46
Height (cm)	164.19±6.85
Weight (kg)	68.56±11.95
BMI (kg/m^2)	25.00±3.21
Skeletal muscular mass (kg)	28.06±5.05
Since stroke (year)	10.39±6.87
Gender (Male/Female)	34 / 8
Disease name (Hemorrhage / Infarction)	30 / 12
Paretic Side (Left / Right)	22 / 20

2.2 Measurement equipment

본 연구에서 사용된 스마트 인솔(Neurogait insole, Salted Co., Ltd, South Korea)은 신발 깔창 형태의 센서로 신발 속에 깔창처럼 삽입하여 사용하는 블루투스 기반 무선 측정 장비이다. 4개의 힘 감지 저항(FSR; Force Sensing Resistor) 센서가 장착되어 있어 족압, 보행패턴, 체중 이동 등 측정이 가능하다. 스마트 인솔 장비는 신발 속에 삽입하여 사용하고 리튬 배터리가 장착되어 있어 충전 방식의 센서로 공간적 제약없이 어디서나 측정이 가능하다. 또한 IMU 센서가 탑재되어 있어 X, Y, Z 축의 보행 값 계산 및 알고리즘 기반으로 데이터 산출을 할 수 있다.

또한 스마트 인솔의 경우 추가 케이블이 없는 완전 무선 측정 장비로 착용 및 준비하는데 번거로움이 없어 짧은 착용시간이 짧고, 피험자가 느끼는 불편감이 없는 장비이다. 사용자의 발 사이즈에 맞는 인솔을 선택하기 위하여 총 5가지 사이즈(230~300mm)의 인솔을 활용할 수 있지만 스마트 인솔의 경우 압력 센서의 개수가 작고 센서 위치에만 압력 측정이 가능하다는 약점이 있다. 또한 전용 앱(NEUROGAIT)을 사용하여 보행 측정 시 영상이 녹화되어 실제 보행을 같이 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용된 스마트 인솔 장비의 측정자 간 신뢰도는 ICC=.77~.83로 높은 신뢰도를 보였으며, 측정자 내 신뢰도는 모든 발 유형에서 ICC=.84~.94를 보였다(Choi et al., 2021). 스마트 인솔 장비의 모습과 압력 센서의 위치는 Figure 1과 같다.

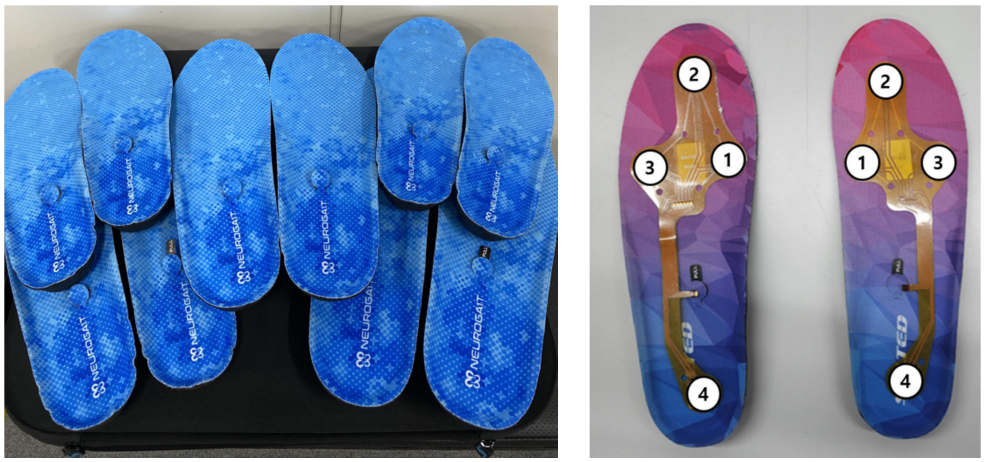

Figure 1. Smart insole (SALTED) equipment (left) and pressure sensor location (right)

2.3 Experimental design

본 연구는 스마트 인솔 장비를 활용하여 편마비 뇌졸중 장애인의 보행 시 시간적 보행 변수(Temporal gait parameters)와 족압 변수(Plantar pressure)의 비대칭성을 확인하고자 측정된 모든 변수는 마비측과 비마비측으로 구분하여 측정하였다. 스마트 인솔 장비를 활용하여 본 연구에서 측정된 변인은 Table 2와 같다. 시간적 보행 변수에는 Figure 2와 같이 입각기(Stance phase), 유각기(Swing phase), 한발지지기(Single support), 두발지지기(Double support)를 측정하였으며, 보행주기 시간에 따른 비율(%)로 제시하였다. 또한 스마트 인솔에 장착되어 있는 4개의 압력 센서로 보행 시 최대 압력(Peak pressure)과 평균 압력(Mean pressure)을 측정하였다. 본 연구에서는 4개의 센서 위치를 다음과 같이 Sensor 1은 내측영역(Medial), Sensor 2는 발가락 영역(Toe), Sensor 3은 외측영역(Lateral), Sensor 4는 뒤꿈치영역(Heel)로 정의하였다. 본 연구에서 사용된 스마트 인솔 장비의 샘플링 주파수는 30Hz로 설정하여 데이터를 수집하였다.

Table 2. Temporal gait parameters and plantar pressure parameters

Independent variables	Parameters (unit)
Temporal gait parameters	Stance phase (%gait cycle)
	Swing phase (%gait cycle)
	Single support (%gait cycle)
	Double support (%gait cycle)
Plantar pressure parameter	Peak pressure (kPa)
	Mean pressure (kPa)

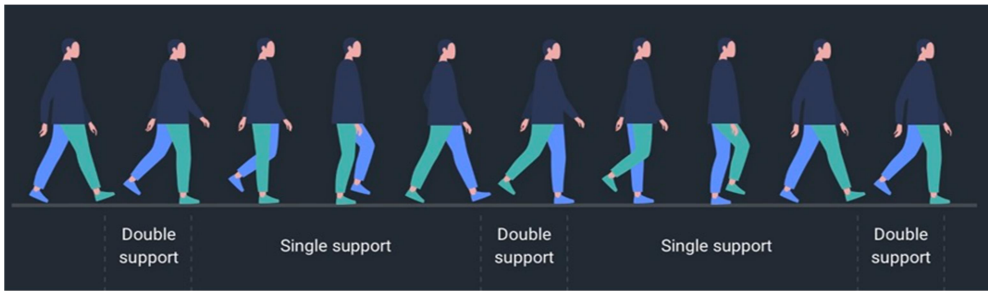

Figure 2. Define of temporal gait parameters

2.4 Experimental procedures

본 연구는 편마비 뇌졸중 장애인의 보행 시 마비측과 비마비측의 보행 및 족압 변수의 특성 비교를 위해 스마트 인솔 장비를 사용하였다. 족압 변수를 정확하게 수집하고자 지면이 평평한 실험실 내에서 측정하였다. 또한 족압 측정 시 신발의 다양한 형태와 모양, 기능에 따라 데이터 오차가 생길 수 있기 때문에 준비된 실내용 신발(Slaneger, SL-299)을 모든 피험자가 동일하게 착용하도록 하였다. 신발의 기존 깔창을 제거하고 본 연구에 사용된 스마트 인솔(SALTED)을 삽입하였다. 족압 측정 시 무게의 영향을 받을 수 있기 때문에 각각 피험자 모두 마비측과 비마비측을 약 3초씩 번갈아 한 발 서기 자세로 영점 조절을 실시하였다. 영점 조절 후 6m 주로를 왕복으로 걷게 하였다. 평소 걷는 속도로 3회 왕복 실시하였으며, 총 6개의 보행 데이터를 획득하였다. 스마트 인솔 장비를 사용하여 측정된 데이터는 전용 앱(NEUROGAIT, 1.01.17, Salted Co., Ltd)을 사용하여 수집하였다.

Figure 3과 같이 영상과 함께 측정이 가능하며, 측정 후 보행 변수에 대한 결과지를 빠른 시간에 확인할 수 있다. 수집된 데이터는 Excel 프로그램(Microsoft office 365)을 사용하여 균형 상실 등으로 인한 평소와 다른 보행이 나타난 보행을 제외하여 4개의 보행을 선정하였다. 분석을 위해 선정된 4개의 보행에서 마비측과 비마비측의 보행 중간 3개의 보행 주기(Gait cycle) 동안의 시간적 보행 변수 및 평균 족압, 최대 족압 데이터를 본 연구에 사용하였다.

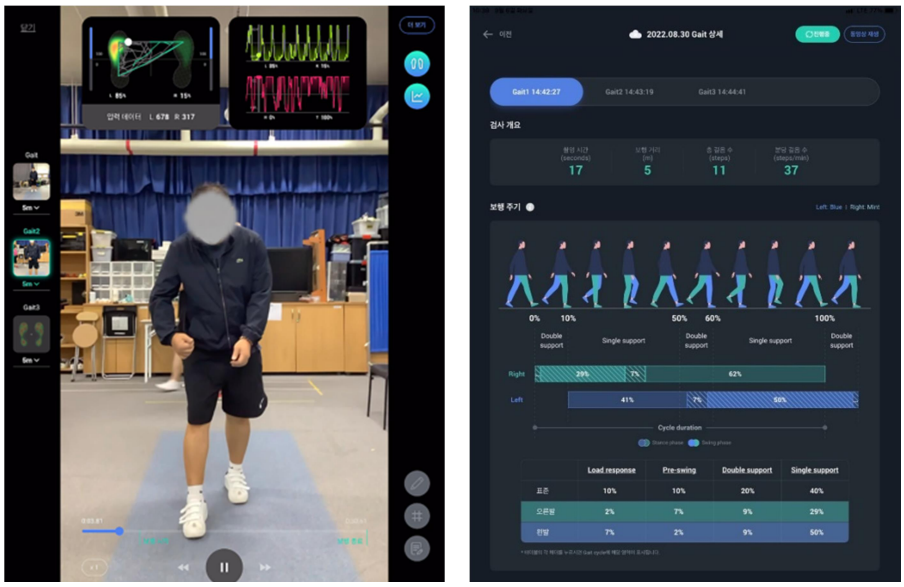

Figure 3. Smart insole (SALTED) measurement screen (left) and measurement report (right)

2.5 Statistical analysis

스마트 인솔 장비를 사용하여 수집된 편마비 뇌졸중 장애인의 보행 변수 및 족압 자료는 SPSS 프로그램(Version 21.0, IBM, Corp., Armonk, NY, USA)을 통해 분석하였다. 본 연구에 참여한 연구대상자의 일반적 특성은 기술통계를 사용하여 평균과 표준편차로 제시하였다. 측정된 마비측과 비마비측의 비교분석 전 정규성 검증을 위해 Shapiro-Wilk 검정을 실시하였다. 정규성 검정 결과 모든 변인에서 정규 분포를 만족하지 않는 것으로 나타났기 때문에(p<.05), 비모수 방법인 Willcoxon signed rank test를 실시하여 마비측과 비마비측의 보행 시 나타나는 차이를 비교하였다. 본 연구의 통계적 유의수준은 .05 미만으로 설정하였다.

3. Result

본 연구는 스마트 인솔 장비를 사용하여 편마비 뇌졸중 장애인의 보행 시 마비측과 비마비측의 보행 및 족압 변수의 특성 분석을 실시하였다. 마비측과 비마비측의 시간적 보행 변수와 영역별 족압 변수의 대한 분석 결과는 다음과 같다.

3.1 Spatiotemporal gait parameters

스마트 인솔 장비를 활용한 뇌졸중 장애인의 보행 시 마비측과 비마비측의 시간적 보행 변수를 측정하였다. 시간적 보행 변수는 보행주기에 대한 입각기(Stance phase), 유각기(Swing phase), 한발지지기(Single support), 두발지지기(Double support)의 비율을 의미하며 Table 3과 Figure 4와 같다. 마비측과 비바미측의 시간적 보행 변수의 비교분석 결과 마비측과 비마비측 각 하지의 보행 주기에 따른 입각기(Stance phase), 유각기(Swing phase), 한발지지기(Single support)에서 통계적으로 유의한 차이가 나타났다(p<.001). 입각기(Stance phase)의 결과는 마비측이 49.32±8.74%, 비마비측이 67.08±12.27%로 비마비측이 유의하게 큰 비율이 나타났다(p<.001). 유각기(Swing phase)의 결과는 마비측이 50.68±8.74%, 비마비측이 31.43±8.92%로 마비측이 유의하게 큰 비율이 나타났다(p<.001).

한발지지기(Single support)의 결과는 마비측이 31.62±8.89%, 비마비측이 48.45±9.55%로 비마비측이 유의하게 큰 비율이 나타났다(p<.001). 반면 두발지지기(Double support)의 결과는 마비측이 19.18±10.13%, 비마비측이 19.53±9.76%로 마비측과 비마비측에서 큰 차이가 없었으며, 통계적으로 유의한 차이도 나타나지 않았다. 전체적인 보행 주기에 대한 시간적 보행 변수의 결과는 비마비측은 지면에 지지하는 비율이 크게 나타났으며, 마비측은 지면에 지지하는 비율이 작고 다음 스텝을 위해 스윙(유각기)하는 비율이 크게 나타났다.

Table 3. The results of temporal gait parameters analysis on the affected and unaffected side of people with hemiplegia stroke

Temporal gait parameters	Side	Mean ± SD	Z	p
Stance phase (%)	Affected side	49.32±8.74	-4.983	<.001***
	Unaffected side	67.08±12.27		
Swing phase (%)	Affected side	50.68±8.74	-5.333	<.001***
	Unaffected side	31.43±8.92		
Single support (%)	Affected side	31.62±8.89	-4.820	<.001***
	Unaffected side	48.45±9.55		
Double support (%)	Affected side	19.18±10.13	-1.619	.105
	Unaffected side	19.53±9.76		

***p<.001

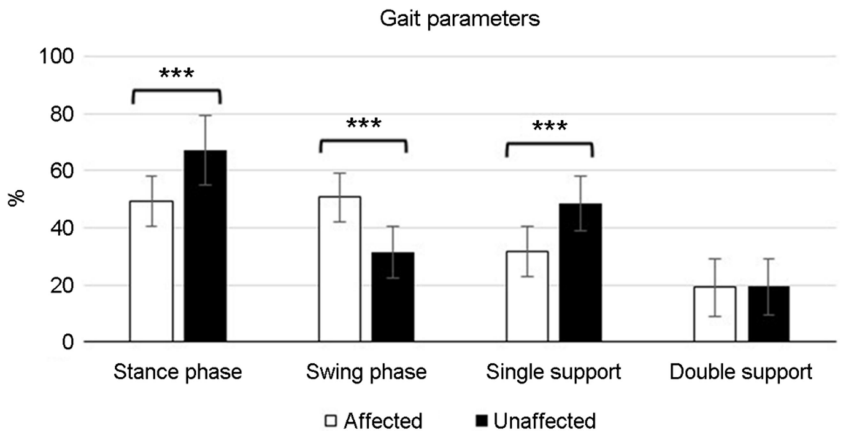

Figure 4. Gait parameters result of affected and unaffected side

3.2 Plantar pressure parameters

스마트 인솔 장비를 활용한 편마비 뇌졸중 장애인의 보행 시 각 영역에 따른 평균 및 최대 족압의 결과는 Table 4와 Figure 5와 같다. 마비측과 비마비측의 비교분석 결과 평균 및 최대 족압의 발가락영역을 의미하는 2번 영역을 제외한 모든 영역에서 통계적으로 유의한 차이가 나타났다.

Table 4. The results of temporal gait parameters analysis on the affected and unaffected side of people with hemiplegia stroke

Variable	Area	Side	Mean ± SD	Z	*p*
Mean pressure (kPa)	Medial	Affected side	7.55±7.91	-5.058	<.001***
		Unaffected side	30.88±32.89		
	Toe	Affected side	8.31±14.34	-1.057	.291
		Unaffected side	4.33±4.09		
	Lateral	Affected side	13.82±7.18	-2.144	.032*
		Unaffected side	17.00±9.07		
	Heel	Affected side	8.85±5.55	-4.908	<.001***
		Unaffected side	23.72±22.51		
Peak pressure (kPa)	Medial	Affected side	36.68±46.84	-5.195	<.001***
		Unaffected side	160.49±147.99		
	Toe	Affected side	48.01±78.76	-.694	.488
		Unaffected side	36.71±33.25		
	Lateral	Affected side	55.40±49.80	-2.432	.015*
		Unaffected side	70.67±48.13		
	Heel	Affected side	58.00±71.67	-3.832	<.001***
		Unaffected side	124.78±102.31		

*p<.05, ***p<.001

먼저 평균 족압 분석 결과는 내측영역(Medial)에서 마비측은 7.55±7.91kPa, 비마비측은 30.88±32.89kPa로 비마비측이 유의하게 크게 나타났다(p<.001). 외측영역(Lateral)에서 마비측은 13.82±7.18kPa, 비마비측은 17.00±9.07kPa로 비마비측이 유의하게 크게 나타났다(p<.05). 뒤꿈치영역(Heel)에서는 마비측이 8.85±5.55kPa, 비마비측은 23.72±22.51kPa로 비마비측이 유의하게 크게 나타났다(p<.001). 하지만 발가락영역(Toe)의 경우 마비측은 8.31±14.34kPa, 비마비측은 4.33±4.09kPa로 마비측이 상대적으로 높게 나타났지만 유의한 차이는 나타나지 않았다. 마비측과 비마비측의 평균 족압 분석 결과 발바닥의 앞쪽인 발가락영역(Toe)를 제외한 내측영역(Medial), 외측영역(Lateral), 뒤꿈치영역(Heel)에서 유의한 차이가 나타났다. 마비측에서 평균 족압은 외측영역(Lateral), 뒤꿈치영역(Heel), 발가락영역(Toe), 내측영역(Medial) 순으로 높게 나타났으며, 비마비측에서 평균 족압은 내측영역(medial), 뒤꿈치(Heel), 외측영역(Lateral), 발가락영역(Toe) 순으로 높게 나타났다. 다음으로 최대 족압 분석 결과 내측영역(Medial)에서 마비측은 36.68±46.84kPa, 비마비측은 160.49±147.99kPa로 비마비측의 유의하게 크게 나타났다(p<.001). 외측영역(Lateral)에서 마비측은 55.40±49.80kPa, 비마비측은 70.67±48.13kPa로 마비측이 유의하게 크게 나타났다(p<.05). 뒤꿈치영역(Heel)에서 마비측은 58.00±71.67kPa, 비마비측은 124.78±102.31kPa로 비마비측이 유의하게 크게 나타났다(p<.001). 하지만 발가락영역(Toe)에서 마비측은 48.01±78.76kPa, 비마비측은 36.71±33.25kPa로 마비측이 상대적으로 높게 나타났지만 유의한 차이는 나타나지 않았다. 마비측과 비마비측의 최대 족압 분석 결과 평균 족압 비교 결과와 동일하게 발바닥 앞쪽인 발가락영역(Toe)를 제외한 내측영역(Medial), 외측영역(Lateral), 뒤꿈치영역(Heel)에서 유의한 차이가 나타났다. 마비측에서 최대 족압은 뒤꿈치영역(Heel), 외측영역(Lateral), 발가락영역(Heel), 내측영역(Medial) 순으로 높게 나타났으며, 비마비측에서 최대 족압은 내측영역(Medial), 뒤꿈치영역(Heel), 외측영역(Lateral), 발가락영역(Heel) 순으로 높게 나타났다.

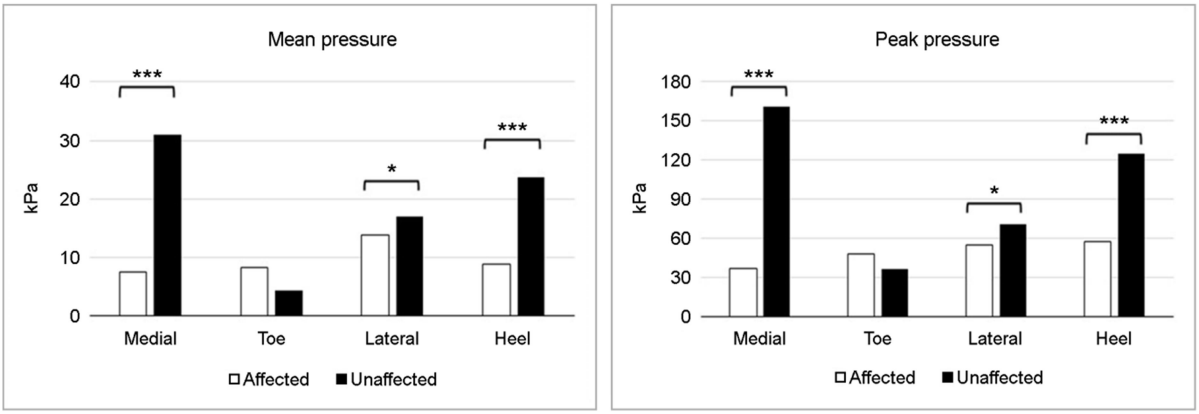

Figure 5. Plantar pressure parameters result of affected and unaffected side

4. Discussion

뇌졸중 이후 이동성 장애는 일반적이지만 심각한 의학적 합병증인 낙상이 포함된다(Schmid et al., 2010). 본 연구는 스마트 인솔 장비를 사용하여 뇌졸중 장애인의 마비측과 비마비측의 비대칭 보행 및 족압 특성을 확인할 수 있었다. 편마비 뇌졸중 장애인에게 비대칭적 보행은 가장 흔하게 나타나는 증상이다. Patterson et al. (2010)의 연구에서 마비측으로 무게 중심의 이동 및 지지하는 능력이 저하되어 비대칭적 보행 주기가 나타난다고 하였다. 또한 뇌졸중 장애인의 특징적인 보행 패턴은 마비측의 짧은 입각기(Stance phase)와 긴 유각기(Swing phase)가 있다고 보고되었다(Mauritz, 2002). 본 연구의 결과 역시 비마비측 입각기 비율이 마비측보다 크고 유각기 비율은 작게 나타나는 결과를 통해 비대칭적 보행을 확인할 수 있었다. 이는 뇌졸중 장애인을 대상으로 Pedar-X 시스템을 활용하여 시간적 보행 패턴을 분석한 연구(Kim et al., 2023)의 결과와 동일하게 나타난 것으로 보인다. 입각기과 유각기에 가장 많은 영향을 주는 것은 보행 속도이다. 뇌졸중 후 보행장애가 있는 개인의 보행 속도는 약 0.18~1.03m/s이며, 동일한 연령층의 건강한 성인의 평균 보행 속도는 1.4m/s이다(Hsu et al., 2003). 보행 속도가 감소함에 따라 입각기는 증가하며 유각기는 감소하게 된다. 편마비 뇌졸중 장애인의 경우 보행 속도의 감소와 함께 관절 운동이 감소하고 전방 추진력이 부족하기 때문에 비대칭적이고 불안정한 보행 패턴을 초래할 수 있다고 하였다(Patterson et al., 2008).

족압 평가는 발의 생체역학적 기능을 나타내는 지표로 족저 하중을 평가하기 위한 정량적 접근법이다(Giacomozzi and Vaclav, 2011). 본 연구에서 스마트 인솔 장비를 사용하여 마비측과 비마비측의 족압 변수의 비대칭성을 확인하였다. 평균 족압과 최대 족압 변수 결과 발가락영역을 제외한 모든 영역에서 비마비측이 높은 족압이 나타났다. Forghany et al. (2015)의 연구는 뇌졸중 참가자의 마비측의 족압 분포의 차이를 보고했으며, 비정상적인 족압이 제한된 기능적 이동성에 기여했다고 보고하였다. 본 연구의 최대 족압 결과를 살펴보면 마비측은 뒤꿈치영역(Heel)이, 비마비측은 내측영역(Medial)이 가장 높게 나타났으며, 마비측의 내측영역(Medial)과 비마비측의 발가락영역(Toe)이 가장 작은 최대 족압 결과가 나타났다. 평균 족압의 경우 마비측은 외측영역(Lateral), 비마비측은 내측영역(Medial)에서 가장 높게 나타났으며, 마비측의 내측영역(Medial), 비마비측의 발가락영역(Toe)에서 가장 작게 나타났다. 마비측의 내측영역(Media)보다 외측영역(Lateral)에서 족압이 높게 나타나는 것은 (Kim et al., 2023)의 연구 결과와 같이 마비측의 경우 발바닥 바깥쪽을 활용하여 보행하는 내반첨족(Talipes equinovarus)과 같은 변형된 보행을 하기 때문으로 사료된다. 또한 편마비 뇌졸중 장애인의 경우 마비측의 근력 약화, 근 경직, 불안정성 등의 후유증으로 인해 지면을 밀어내며 보행 추진력을 얻기 어렵기 때문으로 사료된다. 또한 이전 연구에서 뇌졸중 장애인은 넘어지지 않기 위해 편마비 환자의 족압 분포는 마비측의 측면으로 이동한다고 하였으며(Wang et al., 2019), 보다 안전한 안정성을 위해 신체의 무게를 비마비측 쪽으로 이동한다고 하였다(Batchelor et al., 2012). 이와 같이 본 연구의 결과 또한 족압 변수에서 마비측과 비마비측의 비대칭이 나타났으며, 족압 패턴의 경우 이전 연구와 동일한 결과가 나타난 것으로 보인다.

최근 연구에서 웨어러블 깔창 기반 센서 시스템은 고정되어 있는 지면반력기의 한계를 극복하기 위해 보행 분석 도구로 큰 잠재력을 보여주었다(Chen et al., 2022; Li et al., 2021; Subramaniam et al., 2022). 이러한 웨어러블 기술은 측정 중 개개인의 자연스러운 보행에 대한 제약 없이 실내 및 실외 환경 모두에서 매일 지속적인 보행 모니터링을 가능하게 한다(Samarentsis et al., 2022). 또한 스마트 인솔을 사용하여 비대칭 보행을 개선하는 연구가 진행되고 있다. Kim et al. (2021)은 뇌졸중 장애인을 대상으로 스마트 인솔을 이용한 청각피드백보행훈련(AFGT)을 통해 보행 변수 및 동적 균형의 개선을 확인하였다. 최근 스마트 인솔을 활용하여 편마비 뇌졸중 장애인의 재활을 위한 AR, VR과 같은 디지털 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 연구의 결과를 바탕으로 스마트 인솔 시스템을 사용하여 편마비 뇌졸중 장애인의 비대칭적 보행 개선을 위한 재활운동 프로그램 및 재활 콘텐츠 개발에 객관적 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서 사용된 스마트 인솔 장비는 4개의 압력 센서가 위치한 영역에만 족압 데이터를 획득할 수 있다. Pedar-X 시스템의 경우 인솔 전체에 99개의 압력 센서가 위치하여 전체 영역에 대한 족압 측정이 가능하며 연구 목적에 따라 인솔 영역 설정을 하여 분석할 수 있다. 뇌졸중 장애인은 마비측의 보상을 하기 위해 다양한 보행 패턴이 나타나며, 정형외과적으로 다양한 형태의 변형된 보행이 나타난다. 이와 같이 다양한 형태로 변형된 보행을 하는 뇌졸중 장애인의 경우 발바닥 전체 영역에 대한 족압 측정과 분석이 필요하다. 하지만 본 연구에서 사용된 스마트 인솔 장비의 경우 발바닥 전체 영역이 아닌 압력 센서가 위치한 영역에서만 측정이 가능하다.

마지막으로 본 연구는 보행 주로가 있는 평평한 지면에서 보행 평가를 하였다. 하지만 일상생활에서는 불규칙한 지면과 다양한 외부 요인에 보행 변수에 영향을 미칠 수 있기 때문에 다양한 환경에서 보행 평가가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 본 연구에서 사용된 스마트 인솔 장비는 무선 방식 및 배터리 충전 형식의 인솔 장비로 실내 및 실외 모두 사용할 수 있어 일상생활 중에도 쉽게 보행 평가가 가능하며, 개인의 보행 변수 및 족압 데이터를 지속적으로 축적할 수 있다. 추후 일상생활 중 마주할 수 있는 다양한 외부 환경에서의 지속적인 데이터 축적을 통해 뇌졸중 장애인의 보행 변수 및 족압 변수의 특성 및 비교분석이 필요할 것으로 생각된다.

5. Conclusion

본 연구는 스마트 인솔을 사용하여 뇌졸중 장애인의 보행 시 마비측과 비마비측의 시간적 보행 변수 및 족압 변수의 특성을 파악할 수 있었다. 기존에는 고가의 인솔형 센서 또는 고정형으로 설치된 장비를 사용하여 보행 및 족압을 측정했다. 본 연구에서는 경제적 부담이 적고 공간적 제약이 없는 스마트 인솔을 사용하여 뇌졸중 장애인의 비대칭적 보행 및 족압 특성을 충분히 확인할 수 있었다. 지속적으로 스마트 인솔을 사용하여 뇌졸중 장애인의 보행장애 대한 측정과 평가가 이루어진다면 조기 진단 및 예측에 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 추후 일반적으로 자주 사용되는 족압 시스템과 함께 본 연구에서 사용된 스마트 인솔 장비를 비교하는 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한 본 연구의 결과를 바탕으로 스마트 인솔 시스템을 사용하여 뇌졸중 장애인의 보행장애 개선을 위한 재활운동 프로그램 및 재활 콘텐츠 개발에 객관적 자료와 뇌졸중 장애인의 낙상 예방 등에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

Acknowledgement

"This paper was supported by Wonkwang University in 2024".

References

Batchelor, F.A., Hill, K.D., Mackintosh, S.F., Said, C.M. and Whitehead, C.H., Effects of a multifactorial falls prevention program for people with stroke returning home after rehabilitation: a randomized controlled trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(9), 1648-1655, 2012.

Beyaert, C., Vasa, R. and Frykberg, G.E., Gait post-stroke: Pathophysiology and rehabilitation strategies. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 45(4-5), 335-355, 2015.

Calma, K.Z., Clomera, J.D.M., Marasigan, U.R., Naputo, J.J.R., Viray, A.E.S. and Cruz, A.R.D., Development of normative walking gait kinematics database for Filipinos using MS kinect V2. *2017 IEEE 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, IEEE, 2017.

Chatzaki, C., Skaramagkas, V., Tachos, N., Christodoulakis, G., Maniadi, E., Kefalopoulou, Z., Fotiadis, D.I. and Tsiknakis, M., The smart-insole dataset: Gait analysis using wearable sensors with a focus on elderly and Parkinson's patients. *Sensors*, 21(8), 2821, 2021.

Chen, D., Cai, Y. and Huang, M.C., Customizable pressure sensor array: Design and evaluation. *IEEE Sensors Journal*, 18(15), 6337-6344, 2018.

Chen, D., Cai, Y., Qian, X., Ansari, R., Xu, W., Chu, K.C. and Huang, M.C., Bring gait lab to everyday life: Gait analysis in terms of activities of daily living. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(2), 1298-1312, 2019.

Chen, G., Patten, C., Kothari, D.H. and Zajac, F.E., Gait differences between individuals with post-stroke hemiparesis and non-disabled controls at matched speeds. *Gait & Posture*, 22(1), 51-56, 2005.

Chen, J.L., Dai, Y.N., Grimaldi, N.S., Lin, J.J., Hu, B.Y., Wu, Y.F. and Gao, S., Plantar Pressure-Based Insole Gait Monitoring Techniques for Diseases Monitoring and Analysis: A Review. *Advanced Materials Technologies*, 7(1), 2100566, 2022.

Cho, J.E. and Kim, H., Ankle proprioception deficit is the strongest factor predicting balance impairment in patients with chronic stroke. *Archives of Rehabilitation Research and Clinical Translation*, 3(4), 100165, 2021.

Choi, M., Yang, S.E., Kim, M.J., Kim, J.W., Kang, K.H., Cho, H.J. and Yi, K.O., Reliability and validity of smart insole sensor for contact time during walking. *Journal of Korean Physical Education Association For Women*, 35(3), 119-129, 2021.

Ferraris, C., Cimolin, V., Vismara, L., Votta, V., Amprimo, G., Cremascoli, R., Galli, M., Nerino, R., Mauro, A. and Priano, L., Monitoring of gait parameters in post-stroke individuals: A feasibility study using rgb-d sensors. *Sensors*, 21(17), 5945, 2021.

Flansbjer, U.B., Downham, D. and Lexell, J., Knee muscle strength, gait performance, and perceived participation after stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 87(7), 974-980, 2006.

Forghany, S., Nester, C., Tyson, S., Preece, S. and Jones, R., Plantar pressure distribution in people with stroke and association

with functional consequences. *Physiotherapy*, 101, e399-e400, 2015.

Gao, D., Kinect-Based Gait Assessment Method for Hemiplegic Patients. *2021 3rd International Conference on Information Technology and Computer Communications*, 30-35, 2021.

Giacomozzi, C. and Vaclav, K., Potentialities and criticalities of plantar pressure measurements in the study of foot biomechanics: devices, methodologies and applications. *Biomechanics in Applications*, 1, 249-274, 2011.

Harris, E.J., Khoo, I.H. and Demircan, E., A survey of human gait-based artificial intelligence applications. *Frontiers in Robotics and AI*, 8, 749274, 2022.

Hesse, S., Werner, C., von Frankenberg, S. and Bardeleben, A., Treadmill training with partial body weight support after stroke. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics*, 14(1), S111-S123, 2003.

Horst, F., Mildner, M. and Schöllhorn, W.I., One-year persistence of individual gait patterns identified in a follow-up study–A call for individualised diagnose and therapy. *Gait & Posture*, 58, 476-480, 2017.

Hsu, A.L., Tang, P.F. and Jan, M.H., Analysis of impairments influencing gait velocity and asymmetry of hemiplegic patients after mild to moderate stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 84(8), 1185-1193, 2003.

Khandakar, A., Mahmud, S., Chowdhury, M.E., Reaz, M.B.I., Kiranyaz, S., Mahbub, Z.B., Md Ali, S.H., Bakar, A.A.A., Ayari, M.A. and Alhatou, M., Design and implementation of a smart insole system to measure plantar pressure and temperature. *Sensors*, 22(19), 7599, 2022.

Kim, J., Jung, S. and Song, C., The effects of auditory feedback gait training using smart insole on stroke patients. *Brain Sciences*, 11(11), 1377, 2021.

Kim, S.B., Kang, D.H. and Park, J.Y., Analysis of a Spatiotemporal Gait Asymmetry and Plantar Pressure Patterns for People with Stroke. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 42(3), 197-208, 2023.

Li, W., Lu, W., Sha, X., Xing, H., Lou, J., Sun, H. and Zhao, Y., Wearable gait recognition systems based on MEMS pressure and inertial sensors: A review. *IEEE Sensors Journal*, 22(2), 1092-1104, 2021.

Lim, H., Kim, B. and Park, S., Prediction of lower limb kinetics and kinematics during walking by a single IMU on the lower back using machine learning. *Sensors*, 20(1), 130, 2019.

Lin, F., Wang, A., Zhuang, Y., Tomita, M.R. and Xu, W., Smart insole: A wearable sensor device for unobtrusive gait monitoring in daily life. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(6), 2281-2291, 2016.

Macko, R.F., Smith, G.V., Dobrovolny, C.L., Sorkin, J.D., Goldberg, A.P. and Silver, K.H., Treadmill training improves fitness reserve in chronic stroke patients. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 82(7), 879-884, 2001.

Mauritz, K.H., Gait training in hemiplegia. *European Journal of Neurology*, 9, 23-29, 2002.

Moon, Y., Sung, J., An, R., Hernandez, M.E. and Sosnoff, J.J., Gait variability in people with neurological disorders: A systematic

review and meta-analysis. *Human Movement Science*, 47, 197-208, 2016.

Nagano, H., Said, C.M., James, L., Sparrow, W.A. and Begg, R., Biomechanical Correlates of Falls Risk in Gait Impaired Stroke Survivors. *Frontiers in Physiology*, 376, 2022.

O'Sullivan, S.B., Schmitz, T.J. and Fulk, G., *Physical Rehabilitation*. FA Davis, 2019.

Patterson, K.K., Gage, W.H., Brooks, D., Black, S.E. and McIlroy, W.E., Evaluation of gait symmetry after stroke: a comparison of current methods and recommendations for standardization. *Gait & Posture*, 31(2), 241-246, 2010.

Patterson, K.K., Parafianowicz, I., Danells, C.J., Closson, V., Verrier, M.C., Staines, W.R., Black, S.E. and McIlroy, W.E., Gait asymmetry in community-ambulating stroke survivors. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 89(2), 304-310, 2008.

Saccani, R., Germano, S.T., dos Santos, C.D.Q., Cristina, D., Bernardon, S., Cechetti, F. and Bonetti, L.V., Changes in the kinematics of hemiparetic gait: a comparative study, *Saúde e Pesquisa*, 15(2), 1-11, 2022.

Samarentsis, A.G., Makris, G., Spinthaki, S., Christodoulakis, G., Tsiknakis, M. and Pantazis, A.K., A 3D-Printed Capacitive Smart Insole for Plantar Pressure Monitoring. *Sensors*, 22(24), 9725, 2022.

Sanghan, T., Dissaneewate, T. and Chatpun, S., Gait asymmetry and foot regional analysis on spatiotemporal characteristics in stroke patients. *2021 13th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)*, IEEE, 1-4, 2021.

Schmid, A.A., Kapoor, J.R., Dallas, M. and Bravata, D.M., Association between stroke severity and fall risk among stroke patients. *Neuroepidemiology*, 34(3), 158-162, 2010.

Solanki, D., Kumar, S., Shubha, B. and Lahiri, U., Implications of physiology-sensitive gait exercise on the lower limb electromyographic activity of hemiplegic post-stroke patients: a feasibility study in low resource settings. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, 8, 1-9, 2020.

Subramaniam, S., Majumder, S., Faisal, A.I. and Deen, M.J., Insole-based systems for health monitoring: Current solutions and research challenges. *Sensors*, 22(2), 438, 2022.

Tao, J., Dong, M., Li, L., Wang, C., Li, J., Liu, Y., Bao, R. and Pan, C., Real-time pressure mapping smart insole system based on a controllable vertical pore dielectric layer. *Microsystems & Nanoengineering*, 6(1), 62, 2020.

Wang, C., Kim, Y., Shin, H. and Min, S.D., Preliminary clinical application of textile insole sensor for hemiparetic gait pattern analysis. *Sensors*, 19(18), 3950, 2019.

Wonsetler, E.C. and Bowden, M.G., A systematic review of mechanisms of gait speed change post-stroke. Part 2: exercise capacity, muscle activation, kinetics, and kinematics. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 24(5), 394-403, 2017.

Wren, T.A., Tucker, C.A., Rethlefsen, S.A., Gorton III, G.E. and Õunpuu, S., Clinical efficacy of instrumented gait analysis: Systematic review 2020 update. *Gait & Posture*, 80, 274-279, 2020.

Author listings

Soonbeom Kim: ksb0406@naver.com
Highest degree: MS. Department of Physical Education, Soonchunhyang University
Position title: Researcher, Department of Clinical Rehabilitation Research, Korea National Rehabilitation Center
Areas of interest: Biomechanics, Gait analysis

Dongheon Kang: luxpooh@gmail.com
Highest degree: PhD, Department of Kinesiology, Kookmin University
Position title: Researcher, Department of Healthcare and Public Health Research, Korea National Rehabilitation Center
Areas of interest: Rehabilitation Sports, Adapted Physical Activity, Exercise Physiology/Prescription, Sports Medicine

Jiyoung Park: withji0@wku.ac.kr
Highest degree: PhD, Department of Industrial & Systems Engineering, Dong-guk University
Position title: Assistant Professor, Department of Safety and Health, Wonkwang University
Areas of interest: Usability, Safety, UI/UX, Service Design, Data Visualization