



Original Article

Comparison of Foot Kinematics and Lower Limb Muscle Activity Based on Foot Type During Gait

Sabin Chun¹, Dakyung Son², Teo Yoo², Kyoungyeol Jeong², and Jongchul Park^{3*}

¹Biomechanics and Motor Behavior Laboratory, Texas Woman's University

²Department of Physical Education, Pukyong National University

³Department of Marine Sports, Pukyong National University

Article Info

Received 2025. 08. 18.

Revised 2025. 10. 30.

Accepted 2025. 12. 29.

Correspondence*

Jongchul Park

jcpark@pknu.ac.kr

Key Words

Foot type, Gait,
Foot kinematics,
Muscle activity

This work was supported by a
Research Grant of Pukyong National
University (2024).

PURPOSE Previous research has rarely examined foot segment motion and muscle activity simultaneously in relation to foot type. Therefore, this study aimed to investigate how foot type influences segmental foot kinematics and lower limb biomechanics during walking. **METHODS** Fifty-eight healthy adults were sorted into normal group (NG), pes planus group (PPG), or pes cavus group (PCG) using the Foot Posture Index, navicular drop, normalized navicular height, and normalized instep height. Furthermore, three-dimensional foot kinematics and lower limb muscle activity were recorded during 12-meter, self-paced walking using an optical motion capture system and surface electromyography. Kinematic analysis during the stance phase included measurement of joint angles and ranges of motion (ROM) for the following segments: foot relative to the shank, forefoot relative to the midfoot, lateral forefoot relative to the midfoot, medial forefoot relative to the midfoot, and hallux relative to the medial forefoot. Moreover, muscle activity analysis included the tibialis anterior, peroneus longus, and medial and lateral heads of the gastrocnemius. **RESULTS** Compared with the NG and PPG, the PCG exhibited greater ROMs in the frontal plane for the forefoot relative to the midfoot and medial forefoot relative to the midfoot. Additionally, the PPG exhibited a greater ROM in the frontal plane for the hallux relative to the medial forefoot compared with the NG. The intersegmental angles according to foot type demonstrated distinct kinematic differences between the PPG and NG in the transverse plane, specifically in the forefoot relative to the midfoot and medial forefoot relative to the midfoot relationships. However, no significant differences were observed in lower limb muscle activity during the stance phase. **CONCLUSIONS** This study provides insights into kinematic changes according to foot type during walking. Moreover, the findings of this study may deepen our understanding of the intrinsic risk factors for lower extremity injuries and tissue stress associated with variations in foot type.

서론

인간 발의 구조는 발에 하중이 가해지는 동안 후족(발꿈치) 외반과 발목뼈의 내측 이동 및 내측 회전 등과 같이 유연한 대응을 통해 다양한

지면에 대한 높은 적응성을 가진다(Ito et al., 2017). 종방향으로 형성된 아치(안쪽세로활; medial longitudinal arch, MLA)는 발에 하중이 실리는 동안 충격을 흡수하고, 힘을 압축하고 반동하여 기계적 에너지를 탄성 에너지 형태로 저장함과 동시에 방출하는 기능적 역할을 가진다(Stearne et al., 2016). 또한, 중간 입각기에서 발을 떼는 자세로 전환하는 후반 입각기 동안 발가락은 발바닥 굽힘 또는 중립 위치에서 발등 굽힘 위치로 이동하고 이때, 발바닥 근막을 활용하는 윈치 메커니즘(Winch Mechanism)을 생성한다. 입각기 후반에

(CC) This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 중족골 관절을 제한하고 발을 단단하게 만드는 원치 메커니즘의 사용은 효과적인 추진력 생성과 효율적인 에너지 사용에 이점을 가지는 것으로 알려져 있다.

그러나 발바닥의 MLA이 비정상적으로 높은 오목발(pes cavus)이나, 이와 반대로 MLA이 낮은 특징을 가진 편평발(pes planus)은 MLA가 정상적인 구조에서 벗어난 발 형태로 충격 흡수와 에너지 전환 능력의 저하, 불균형하고 기능적으로 불안정한 상태로 설명된다(Franco, 1987). 실제, 오목발을 가진 개인의 경우 충격 흡수 능력이 취약하고 최대 발바닥 압력이 다른 발에 비해 더 높아 하지 외측 손상이나, 발의 직접적인 부상에 가능성이 더 높은 것으로 보고된다(Kaufman et al., 1999; Neal et al., 2014; Williams Iii et al., 2001). 반면에, 편평발의 경우 하지의 내측과 무릎에 슬개건염 및 일 반적인 무릎 통증과 같은 연부조직 부상 가능성이 높은 것으로 보고 된다(Williams Iii et al., 2001). 이렇듯, 발 유형의 변경은 하지 손상을 초래할 수 있는 조직의 스트레스를 유발하고 내재적 위험 요소로 인식된다(Franco, 1987).

하지 과사용 부상의 원인이 될 수 있는 근본적인 메커니즘을 이해하기 위해 Buldt et al.(2015)는 정상발, 오목발, 편평발 세 가지 발 유형을 가진 집단의 보행 시 발 운동학 차이를 비교하였고, 오목발 집단의 후족부는 정상발 집단과 편평발 집단에 비해 최대 외반과 외전이 더 크고, 중족부가 초기 접촉(initial contact)시점과 중간 입각기에서 최대 발등굽힘과 수평면 가동범위가 작게 나타났으며, 편평발 집단의 관상면에서 발허리의 가동범위가 정상발에 비해 더 작은 것을 확인하였다(Buldt et al., 2015). Saraswat et al.(2014)의 연구에서도 편평발을 가진 어린이 집단이 정상발을 가진 어린이 집단에 비해 후족부의 외반과 발바닥 굴곡을 특징으로 하였고, 보행 주기동안 더 작은 굴곡 가동범위를 나타냈다(Saraswat et al., 2014). 다른 연구에서는 MLA이 발의 능동적 구조(근육)에 의해 지지되므로(Okamura et al., 2020), MLA의 결손에 따른 근활성화를 조사하기 위해 정상발과 편평발 집단의 보행 시 종아리 근활성도를 비교한 결과 편평발 집단이 정상발 집단에 비해 초기접촉 시점에서 앞정강근, 40% 시점에서 긴발가락뻗근, 80% 시점에서 외측 장딴지근과 가자미근의 근활성도가 높았고, 5% 시점에서 긴종아리근과 짧은종아리근, 10% 지점에서 내측 및 외측 장딴지근과 가자미근이 더 낮은 근활성도를 나타낸다고 보고하였다(Hunt & Smith, 2004). 그러나, 발 유형과 부상에 대한 연관성은 여전히 불분명하며, 하지 통증과 부상이 잠재적으로 발의 구조적 문제에 기인한다는 점을 고려할 때 이 분야의 깊은 이해는 변경된 발 유형으로 인한 통증관리와 발 자세 교정을 위해 중요할 수 있다(Neal et al., 2014). 발 유형에 따른 생체역학적 변경에 대한 체계적 고찰 연구에서는 발 자세와 부상 간의 메커니즘을 이해하기 위해 오목발을 포함한 광범위한 발 유형에 대한 운동학적 조사의 필요성을 강조하였고(Buldt et al., 2013), 하지 운동학적 특성과 근활성도의 동시적인 생체역학적 정보가 함께 고려되었을 때, 발 유형이 전반적인 생체역학에 미치는 영향을 이해할 수 있다고 설명하였다(Buldt et al., 2015).

따라서 본 연구의 목적은 보행 시 정상발 집단(normal group, NG), 편평발 집단(pes planus group, PPG), 그리고 오목발 집단(pes cavus group, PCG)의 발 유형에 따라 발 운동학과 근활성도에 차이를 비교 분석하는데 있다. 이러한 연구 목적에 따라 보행 시 발 유형에 따른 발 운동학적 특성과 하지 근활성도 패턴에 차이가 있을 것이라는 가설을 설정하였다. 본 연구의 결과는 발 유형에 따른 보행

시 운동학적 특성과 근활성도 패턴을 규명함으로써, 하지 부상의 원인이 될 수 있는 근본적인 메커니즘을 이해하는 데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

연구방법

연구대상

본 연구의 대상은 20세에서 30세 사이 73명의 건강한 성인 남녀가 실험에 참여하였으며, 모든 참가자는 보행 능력에 영향을 미칠 수 있는 현재 또는 재발성 하지 부상이 없었다. 참가자의 우측 발이 두 명의 연구자에 의해 평가되었으며, 발 분류를 위해 Foot Posture Index(FPI), navicular drop test(ND), normalised navicular height(NNH), normalised instep height(NIH)가 사용되었다(Table 1). FPI, ND, NNH는 발 유형을 분류하는데 가장 널리 알려진 방법으로 선택되었고, NIH는 한국인의 발 유형을 가장 잘 분류하는 것으로 보고됨에 따라 선택되었다(Jung, 2020). 네 가지 평가유형 중 두 개의 발 분류 기준에 충족하는 경우 발 유형을 최종 분류하였다.

G*Power(v3.1.9.2, Heinrich-Heine-Universität, DEU) 소프트웨어를 사용하여, One-Way ANOVA 수행에 대한 유의수준을 0.05로 설정하고 중간(0.25)의 효과크기를 가질 때 0.44의 검정력

Table 1. Foot posture group classification based on FPI, ND, NIH, and NNH

Foot posture measurement	PCG	NG	PPG
FPI (score)	≤+1	>+1 to +7<	≥+7
ND (mm)	≤+0.5	>+0.5 to +0.9<	≥+0.9
NIH (cm)	≤+0.213	>+0.213 to +0.315<	≥+0.315
NNH (mm)	≤0.11	>0.11 to 0.25<	≥0.25

Table 2. Characteristics and foot classification by foot type

	PCG	NG	PPG	$F(p) / X^2(p)^*$
Age (years)	25.32±2.51	24.96±2.64	23.40±2.66	2.504(.091)
Weight (kg)	70.21±13.42	68.50±12.05	69.00±16.85	0.179(.914)*
Height (cm)	172.11±6.45	171.71±6.97	167.47±9.66	1.893(.160)
FPI (score)	2.36±5.28	2.70±3.02	6.73±3.21	11.247(.004)*†§
ND (mm)	0.38±0.28	0.60±0.16	0.86±0.32	21.608(.001)*‡§
NNH (mm)	0.19±0.36	0.13±0.36	-0.10±0.36	3.093(.053)
NIH (mm)	0.37±0.01	0.36±0.21	0.34±0.21	19.922(.001)*†§

* : Nonparametric test. †: Difference between NG and PPG.

‡: Difference between NG and PCG. § : Difference between PPG and PCG.

(power) 수준으로 해석할 수 있음을 확인하였다. 하지만, 11명의 참가자는 데이터 처리 과정에서 기술적 문제(maker drop out)로 제외되었으며, 4명의 참가자는 발 유형이 어느 척도에도 부합하지 않아 분석에서 제외하였다. 최종적으로 58명이 NG 24명, PCG 19명, PPG 15명으로 분류되었다. 본 연구는 본교 기관생명윤리위원회에 승인(1041386-202301-HR-9-02)을 받아 절차에 따라 수행하였으며, 자발적 참여의사를 밝힌 참가자는 실험 동의서를 작성한 뒤 실험에 참여하였다.

발 유형에 따른 인구통계학적 특성과 발 자세 분류에 대한 결과는 인체 측정에 대한 결과와 NNH를 제외한 발 자세 측정에서 유의미한 차이가 나타났다. 정상발 집단은 편평발 집단에 비해 FPI 점수가 유의하게 낮고, NIH 높이는 유의하게 높았다. 또한, 편평발 집단은 오목발 집단에 비해 FPI 점수, ND 높이가 유의하게 높고, NIH 높이는 유의하게 낮았다. 정상발 집단은 오목발 집단에 비해 ND 높이에서 유의하게 높게 나타났다.

발 유형 분류

FPI 평가는 6개 항목을 사용하였고, 모든 참가자는 정면을 바라보고 양발로 편안하게 선 다음 각 항목에 맞춰 평가되었다. 후족부는 발목 뼈 머리의 축진, 외측 발목뼈 위아래의 곡선 관찰 및 발꿈치뼈의 내변/외변 정도를 통해 평가하였다. 전족부에 대한 관찰은 발목뼈-비골 관절 부위의 돌출부, 내측 종방향 아치의 일치성 및 후족부에서 전족부의 외전/내전 정도를 평가하는 것으로 구성된다(Redmond et al., 2006). 발 유형에 대한 항목에 관찰이 어렵거나 불가능한 경우(부종 등) 경우 생략 후 X로 기록하였으며, 애매한 경우 보수적인 점수(0에 가까운 점수)를 사용하였다. ND 평가를 위해 발배뼈 높이를 무릎이 지면과 직각이 될 수 있도록 앉은 상태와 선 상태에서 기록하였으며, 앉은 상태에서 수집된 발배뼈 높이와 선 상태에서 수집된 발배뼈 높이의 차를 구하여 발 유형을 분류하였다(Cote et al., 2005). NNH와 NIH는 서 있는 상태에서 기록되었으며, 발배뼈와 발배뼈와 입방뼈 사이의 중간지점에 부착한 반사마커의 수직 높이와 발꿈치뼈부터 제 1중족골 몸통의 중간지점의 직선거리의 값을 구하고 이 값으로 발배뼈 또는 발배뼈와 입방뼈 사이의 중간지점 수직 높이를 나누어 결과에 따라 발 유형을 분류하였다(Buldt et al., 2015; Jung, 2020).

생체역학 실험 절차

3차원 동작 분석을 위해 8대의 적외선 카메라(Miquis M5; Qualisys AB, SWE; sampling rate 100Hz), 1대의 지면반력측정기(Kistler 9260AA6; Kistler, CHI; sampling rate 2000Hz)가 사용되었으며, 근활성도 수집을 위해 근전도 4채널(Ultinum; Noraxon; USA; sampling rate 2000Hz)이 사용되었다. 모든 데이터는 Qualisys Track Manager(v2022.2 build 5880; Qualisys AB, SWE) 소프트웨어를 사용하여 동기화된 상태로 데이터를 수집하였다. 발의 운동학적 분석을 위해 multi segment foot model을 수정 및 보완하여 9mm크기의 반사마커 12개를 부착하였다(Fig. 1). 근활성도 수집을 위해 앞정강근(tibialis anterior), 장딴지근(gastrocnemius lateral and medial), 긴종아리근(peroneus longus) 근복에 Surface Electromyography for the Non-Invasive Assessment of Muscles(SENIAM)에 가이드라인을 참조하여 두 개의 전극(single

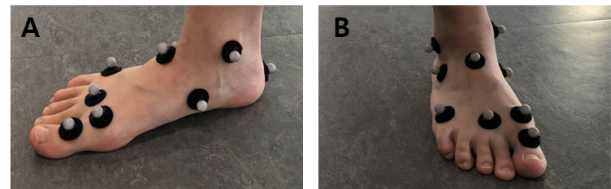


Fig. 1. Foot marker placement

electrode T246)을 부착하였으며, 잡음을 최소한으로 하기 위해 부착 전 피부 표면의 털을 제거하고 알코올 솜을 사용해 피부 표면을 정돈하였다.

모든 대상자는 12m 보행 검사를 수행하기에 앞서 지면반력기 위에서 양쪽 발의 발꿈치뼈와 두 번째 발가락 중심을 이은 선이 평행하도록 한 상태로 정적 자세 데이터를 수집하였다. 정적 데이터는 각 분절에 0도에 해당하는 지역좌표 프레임, 근활성도의 기준 수축(reference voluntary contraction; RVC), NNH 및 NIH를 정의하고 계산하는데 사용되었다. 실험 전 지면반력기에 우세측 발이 들어올 수 있도록 보행을 충분히 연습하였으며 스스로 선택한 편안한 속도로 12m의 중앙에 위치한 지면반력기에 발이 위치하는 경우 성공적인 보행으로 간주하였다(Buldt et al., 2015). 성공적인 3회의 시도가 수집되는 경우 실험을 종료하였다.

자료처리

Qualisys Track Manager(version 2022.2 build 5880; Qualisys AB)를 통해 수집된 데이터는 정적자세의 경우 1초간 데이터 사용되었고, RVC는 1초간 평균 데이터가 사용되었다. Visual3D(v5.01, C-Motion Inc., USA) 소프트웨어는 발의 운동학적 분석을 위해 사용되었다. 마커 데이터는 6Hz를 4차 지역 버티컬스 통과 필터를 사용하여 잡음을 제거하고, 각 분절을 형성하기 위해 부착된 마커를 기준으로 랜드마커를 생성하였다. 보행 주기 동안 발 분절의 운동학 계산을 위해 Buldt et al.(2015)의 연구에 따라 지역좌표계 설정하였다(Buldt et al., 2015). 관절 각도는 분절 간 상대각을 계산하였고 회전 순서는 International Sports Biomechanics(ISB) 권장 사항에 따라 Cardan의 XYZ 순서가 사용되었다. 양수 값은 발등 굽힘, 벌림 및 바깥돌림으로 정의하였고, 음수 값은 발바닥 굽힘, 모음 및 안쪽돌림으로 정의하였다. Matlab R2023b(The Mathworks, USA) 소프트웨어를 사용하여 근활성도 데이터는 50Hz와 450Hz 사이 영역을 가지는 밴드패스(band-pass) 필터를 거쳐 잡음을 제거한 후, 제곱평균제곱근(root mean square; RMS) window size 100ms를 사용하여 smoothing 하였다. 보행 시 수집된 근활성도는 앞서 측정된 기준 수축에 대한 백분율(%RVC)로 계산하여 정규화하였다. 모든 데이터는 수직 지면반력이 10N을 초과하거나 미만으로 감소하는 경우 초기접촉과 발가락 떼기를 감지하여 0-100%로 정규화하였다. 발 운동학은 발꿈치 접촉 시 각도와 최대 값 사이의 관절가동범위(range of motion; ROM)를 계산하였다.

통계분석

발 유형에 따른 발 운동학 특성과 근활성도 차이를 비교하기 위해 SPSS Statistics(v 23.0 SPSS, IBM, USA) 소프트웨어와 Matlab

R2023b 오픈 소스 코드(www.spm1d.org, accessed on 16 May 2025) SPM1D가 사용되었다. 정규성 검정 결과에 따라 One-Way ANOVA 또는 Kruskal-Wallis test가 사용되었고, Bonferroni 조정 또는 Pairwise comparisons를 적용하여 *post-hoc*을 수행하였다. 모든 통계적 유의수준은 $\alpha=.05$ 로 설정하였다.

연구결과

운동학적 변인과 근활성도

발 유형에 따른 발 분절 가동범위 결과 관상면에서 중족부 대비 전족부, 중족부 대비 전족부의 내측, 전족부의 내측 대비 발가락에서 집단 간 유의미한 차이를 나타냈다. 중족부 대비 전족부와 중족부 대비 전족부의 내측 가동범위는 오목발 집단에서 정상발 집단과 편평발 집단에 비해 유의미하게 크게 나타났다. 전족부의 내측 대비 발가락의 가동범위는 편평발 집단에서 정상발 집단에 비해 유의미하게 크게 나타났다(Table 3).

발 유형에 따른 분절 간 각도에 대한 앙상블 그래프 결과 수평면에서 중족부 대비 전족부의 0-100% 구간, 중족부 대비 전족부의 외측 13-15% 구간, 시상면에서 중족부 대비 전족부의 외측 0-9%, 71-87% 구간, 수평면에서 중족부 대비 전족부의 내측 1-50% 구간에서 집단 간 유의미한 차이를 나타냈다. 사후검정 결과 편평발은 수평면에서 중족부 대비 전족부의 0-58%, 86-100% 구간에서 정상발 집단에 비해 더 큰 바깥돌림을 보였고, 중족부 대비 전족부 내측 0-60%, 94-100% 사이 구간에서 더 작은 안쪽돌림을 보였다. 중족부 대비 전족부의 내측과 외측에 대한 수평면과 시상면의 사후검정 결과는 유의

미한 차이를 나타내지 않았다(Fig. 2).

발 유형에 따른 근육 별 근활성도는 모든 근육에서 통계적으로 유의미한 차이를 나타내지 않았다(Fig. 3).

논 의

본 연구는 정상발, 편평발, 그리고 오목발 세 가지 발 유형에 따라 보행 시 발 운동학과 근활성도 차이를 비교 분석하였다. 그 결과 보행 시 발 유형에 따른 발 운동학적 특성에 대한 가설은 부분적으로 입증되었으나, 하지 근활성도 패턴에 차이가 있을 것이라는 가설은 지지되지 않았다. 본 연구에서 오목발은 관상면에서 편평발 또는 정상발에 비해 더 큰 중족부 대비 전족부 가동범위, 중족부 대비 전족부의 내측 가동범위를 보였다. 또한, 관상면에서 전족부의 내측 대비 발가락 가동범위는 편평발이 정상발에 비해 더 큰 가동범위를 보였다. 발 유형에 따른 분절 간 각도 차이는 수평면에서 중족부 대비 전족부, 중족부 대비 전족부의 내측에서 편평발과 정상발 사이 뚜렷한 운동학적 특성의 차이를 나타냈다. 반면에, 하지 근활성도는 모든 근육에서 세 집단 간 차이를 보이지 않았다.

3차원 동작분석이 체중을 지지한 상태를 기준으로 동적 움직임의 운동학을 분석한다는 것을 고려할 때, 본 연구에서 기준으로 정의되는 자세는 발의 중립적 자세가 아니라는 점을 이해하고 결과를 해석할 필요가 있다. 본 연구에서 오목발은 관상면에서 정상발과 편평발에 비해 중족부 대비 전족부, 중족부 대비 전족부의 내측 가동범위가 더 큰 것으로 확인되었다. 오목발은 MLA가 비정상적으로 높은 발 형태이며, 본 연구에서 기준자세로 설명되는 정적자세에서 발배뼈의 무너짐 정도가 다른 발 유형에 비해 상대적으로 작다. 하지만, 이러

Table 3. Result of Mean(M), Standard deviation(SD), Median, and Quartile deviation(Q) of ROM according to foot type and segment relationships during the stance phase

Segment relationship	Plane	PCG		NG		PPG		$F(p)/X^2(p)^*$
		M±SD	Median(Q)	M±SD	Median(Q)	M±SD	Median(Q)	
Foot relative to the shank	Sagittal	17.57±3.76	16.66(2.70)	16.46±3.30	17.44(2.77)	16.75±3.79	17.53(3.13)	0.531(.591)
	Frontal	11.20±3.37	10.40(1.94)	10.58±2.69	11.13(1.70)	10.36±3.08	11.17(2.36)	0.369(.693)
	Transverse	6.69±2.15	6.59(1.08)	6.29±1.83	5.31(0.80)	5.20±1.49	6.65(1.49)	2.807(.069)
Forefoot relative to the midfoot	Sagittal	8.55±1.91	7.45(1.01)	7.84±2.04	8.32(1.66)	9.09±2.32	8.12(1.58)	1.735(.186)
	Frontal	3.48±1.11	2.79(0.69)	2.84±0.93	2.39(0.61)	2.44±0.81	3.56(0.78)	5.091(.009) ^{‡§}
	Transverse	1.63±1.94	1.17(0.82)	1.80±1.95	0.96(1.55)	2.18±2.44	1.00(0.73)	0.528(.768)*
Lateral forefoot relative to the midfoot	Sagittal	9.13±1.63	8.37(0.76)	8.61±2.03	9.27(1.39)	9.46±2.23	9.09(1.42)	2.143(.343)*
	Frontal	6.22±1.46	5.43(1.12)	5.62±1.31	5.13(0.87)	5.32±1.39	5.99(1.01)	1.927(.155)
	Transverse	1.99±2.15	1.81(0.93)	2.24±1.97	2.24(1.65)	2.82±2.36	0.97(1.08)	1.388(.499)*
Medial forefoot relative to the midfoot	Sagittal	8.59±2.19	7.18(1.04)	8.00±2.19	8.32(1.59)	9.12±2.18	8.82(1.38)	3.410(.182)*
	Frontal	2.66±1.18	1.96(0.68)	2.05±0.87	1.57(0.39)	1.53±0.67	2.57(0.90)	6.160(.004) ^{‡§}
	Transverse	0.86±0.85	0.64(0.88)	1.08±1.34	0.31(0.34)	0.85±1.39	0.49(0.47)	0.751(.687)*
Hallux relative to the medial forefoot	Sagittal	24.59±8.29	26.80(6.53)	26.70±9.05	29.55(1.68)	28.40±5.45	25.65(4.47)	2.797(.247)*
	Frontal	5.75±3.37	4.24(1.45)	4.73±3.45	6.78(2.00)	7.98±3.66	4.58(2.77)	7.117(.028)* [†]
	Transverse	4.23±3.49	2.50(1.25)	2.49±1.71	1.54(0.94)	1.94±1.26	3.15(1.84)	5.504(.064)*

* : Nonparametric test. [†]: Difference between NG and PPG. [‡]: Difference between NG and PCG. [§]: Difference between PPG and PCG.

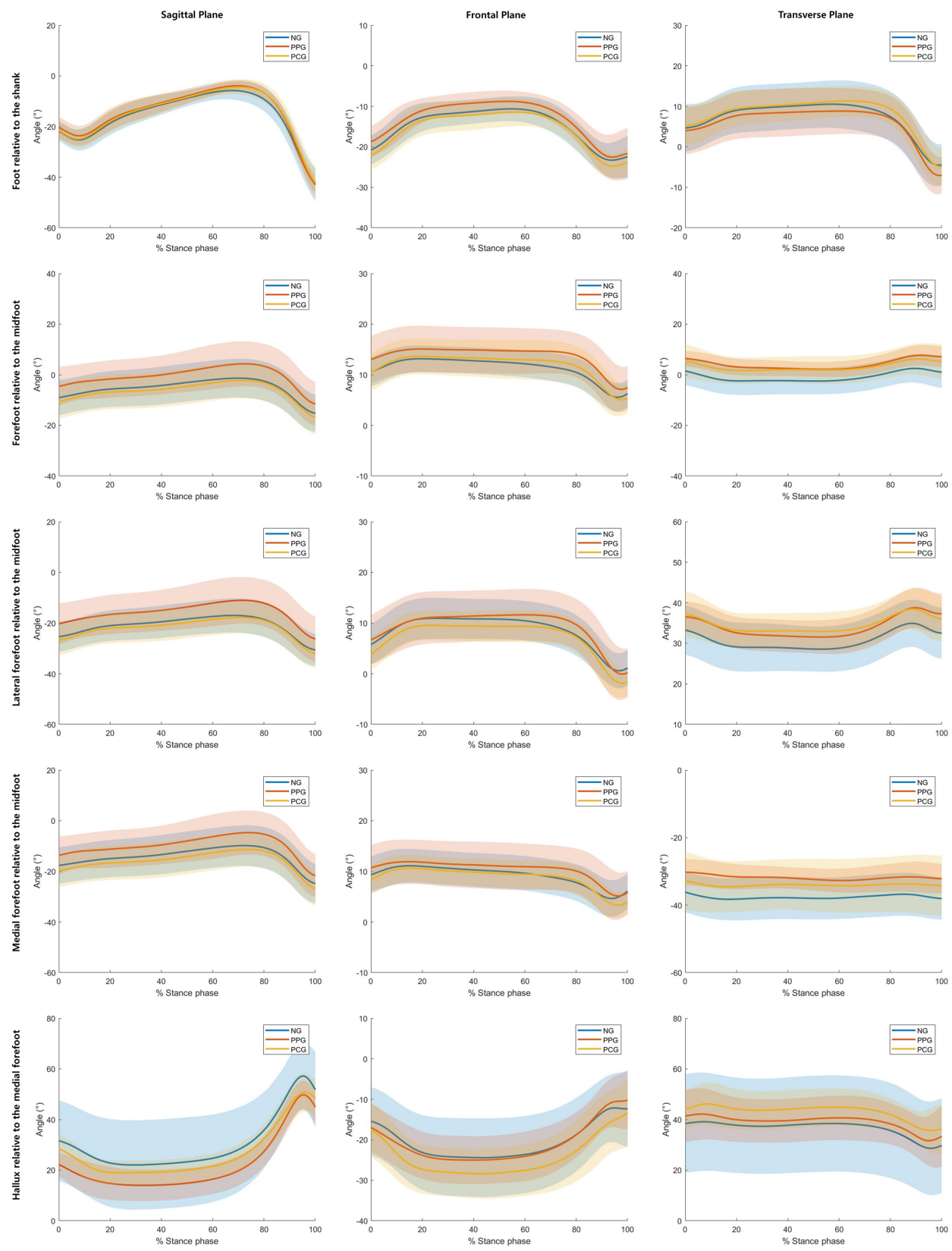


Fig. 2. Ensemble graphs of segmental foot angles by foot type during stance phase

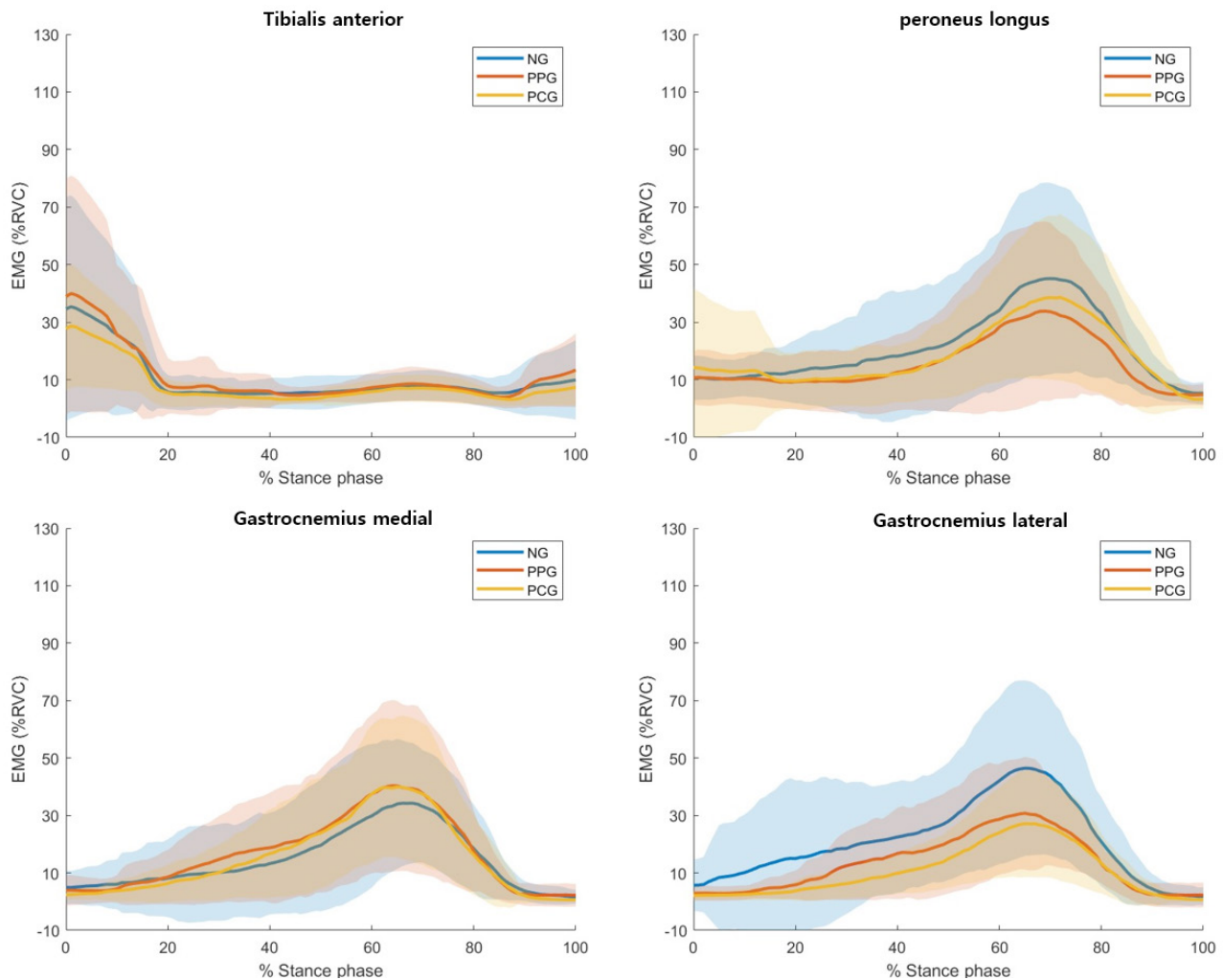


Fig. 3. Muscle activation patterns by foot type during stance phase

한 결과는 오목발 집단이 발의 강직으로 인해 충격 흡수와 추진 기능을 충족시키기 못하기 때문에 전족 가동범위를 증가시켜 보행 시 발의 유동적인 움직임과 힘 변화에 대한 보상전략을 나타냈다고 생각된다. 실제, 보행 시 지면반력은 체중에 약 1.2-1.5배 사이로 발생하는 것으로 보고된다(Chiu & Wang, 2007). 또한, 보행 시 발 유형에 따른 압력과 힘 분포를 조사한 선행연구에 따르면, 오목발 집단은 편평발 또는 정상발 집단에 비해 제1중족골에서 더 큰 최대 압력을 보인 반면 엄지발가락에서는 상대적으로 작은 힘과 압력을 특징으로 보고되었다(Buldt et al., 2018). 본 연구에서 오목발 집단은 전족부의 내측 대비 발가락의 가동범위에서 다른 집단과 유의한 차이를 보이지 않았으나, 편평발 및 정상발 집단과 대조적으로 관찰된 더 큰 가동범위는 입각기 후반에 발가락이 가지는 기능적 역할을 고려했을때, 오목발 집단이 보행 시 발가락보다 제1중족골에 의존하여 체중을 지지하고 추진력을 생성하는 경향이 있음을 시사한다.

본 연구에서 정상발은 중족부 대비 전족부에서 입각기 초반부터 중반부 그리고 후반부 입각기 전 스윙까지 수평면에서 안쪽돌림되는 반면에 편평발은 바깥돌림된 상태를 나타냈다(0-58%; 86-100%

NG-PPG). 중족부 대비 전족부의 내측(0-60%; 94-100% NG-PPG)에서도 더 작은(절대적인 범위) 안쪽돌림을 나타냈다. 이는 편평발 집단의 중족부 이동성 제한을 설명한 이전연구들을 뒷받침하는 결과이다(Buldt et al., 2015; Hunt & Smith, 2004). 편평발의 가동범위 제한은 보행 말단 자세 및 스윙 전 단계에서 발생하는 발의 조정된 외전 동작을 수행하는 능력이 상대적으로 떨어진다는 생체역학적인 이론을 뒷받침한다(Elftman, 1960). 한편, 본 연구에서 편평발은 관상면에서 정상발에 비해 전족부의 내측 대비 발가락의 더 큰 가동범위를 보였다. 이는 발가락 관상면의 운동학을 분석한 선행연구(Buldt et al., 2015; Saraswat et al., 2014)와 대조적인 결과이다. 그러나, 보행 중 발 자세가 하지 운동학에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 선행연구에서 편평발에서 발견되는 중족부와 전족부의 평면 움직임 증가에 대해 중요한 임상적 고려 사항이 될 수 있음을 언급하였다(Buldt et al., 2013). 또한, Saraswat et al. (2014)는 편평발 집단이 발목관절 가동범위 감소를 보상하기 위해, 하중이 가해질 때 중족부 관절의 가동범위를 증가시킬 수 있다고 언급하였다(Saraswat et al., 2014). 따라서, 본 연구의 결과는 스윙 전 단계에서 편평발이 외반되

어 정상적인 수행 기능이 저하됨에 따라, 그 기능을 발가락 움직임이 보상적으로 수행하고 있음을 시사한다. 실제, Buldt et al.(2018)는 편평발 집단의 엄지발가락 부위에서 정상발과 오목발 집단에 비해 높은 압력과 힘을 관찰하였다(Buldt et al., 2018). 발가락 외전은 고르지 않은 지면에 적응하기 위해 발을 외측으로 움직여 면적을 확장하는 이점을 가질 수 있고, 발의 외반과 외전으로 인해 발의 내측에 집중된 체중과 힘을 고르게 분산시키기 위한 기능적 역할을 수행할 수 있다. 그러나, 편평발 집단에서 관찰되는 보상적 움직임은 장기적으로 무지외반증과 같은 발의 변형을 유발할 수 있으므로(Moon et al., 1996), 이러한 보상 작용이 발의 구조와 기능에 미치는 영향을 규명하기 위해 장기적 추적 연구의 필요성이 강조된다.

마지막으로, 본 연구에서 흥미로운 점은 운동학에 차이가 발생했음에도 불구하고 근활성도에 차이가 발견되지 않았다는 점이다. 이는 발 유형에 따른 근활성도의 기능적 차이를 확인한 이전 선행연구와 대조되는 결과이다(Hunt & Smith, 2004). 한편, 정상발이 수동적 구조(뼈와 인대)와 능동적 구조인 근육에 의해 지지되는 것으로 설명되지만, 상대적 기여가 가장 높은 것은 수동적 구조에 해당하는 족저근막, 족저인대, 스프링인대라고 설명되므로(Angin et al., 2018), 본 연구의 결과는 체중이 발에 실리는 동안 발은 근육과 같은 외제적 기능보다 내제적 구조에 의존하여 보행을 수행했을 가능성을 시사한다. 본 연구에서 건강한 성인의 보행 시 발 유형에 따른 집단간 근활성도 차이는 발견되지 않았으나, 발목 주변 근육의 근활성도를 정량화 하였다. 이러한 결과는 입각기 동안 각 근육의 역할과 활성화 타이밍에 대한 이해를 제공할 수 있을 것이다.

본 연구는 정상발, 편평발, 그리고 오목발 세 가지 발 유형에 따라 보행 시 발 운동학과 근활성도에 차이를 비교 분석하여, 발 유형에 따른 발 운동학과 발목 주변 근육 간 관련성을 설명하고자 하였다. 하지만 본 연구는 동적 움직임을 수행하는 동안 발 유형을 고려하여 집단을 분류하지 않았으므로, 정적으로 분류된 발 유형 척도에 의해 분류된 집단들은 보행을 수행하는 동안 다른 발 유형의 특징을 나타낼 수 있다. 또한, 본 연구는 횡단적 관찰연구로 발 유형 변화가 장기적으로 발 운동학과 발 변형에 미치는 영향을 설명하기에는 제한적이다. 추후 이러한 제한점이 보완된 연구가 수행된다면 발 유형에 따른 운동학과 근육의 조절에 대한 명확한 설명 그리고, 이러한 생체역학적 특성을 고려하여 발 유형 별 하지 부상의 원인이 될 수 있는 근본적인 메커니즘을 이해하는 데에 유용한 정보를 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

결론 및 제언

본 연구는 세 가지 발 유형에 따라 보행 시 발 운동학과 하지 근활성도의 차이를 비교하여 보행 시 다른 운동학적 특성을 보인다는 것을 확인하였다. 특히, 오목발 집단은 관상면에서 중족부 대비 전족부 가동범위, 중족부 대비 전족부의 내측 가동범위가 정상발 집단에 비해 유의하게 크게 나타났고, 관상면에서 전족부 내측 대비 발가락 가동범위는 편평발이 정상발 집단에 비해 더 크게 나타났다. 또한, 수평면에서 발 분절 간 각도는 중족부 대비 전족부, 중족부 대비 전족부 내측은 편평발이 정상발 집단 사이 뚜렷한 운동학 특성의 차이를 나타냈으나, 하지 근활성도에서는 세 집단 간 유의한 차이를 보이지 않았

다. 이는 정상발 집단에 비해 편평발과 오목발 집단이 가지는 독특한 운동학적 특성 변화를 보여주며 발 유형에 따른 운동학 변화에 대한 이해를 제공한다. 발 유형에 따른 운동학적 특성 변화가 하지 손상 발생과 어떤 관련이 있는지, 발 유형을 개선하기 위해 어떤 접근이 효과적으로 사용될 수 있는지 조사하기 위한 추가 연구가 필요하다.

CONFLICT OF INTEREST

논문 작성에 있어서 어떠한 조직으로부터 재정을 포함한 일체의 지원을 받지 않았으며 논문에 영향을 미칠 수 있는 어떠한 관계도 없음을 밝힌다.

AUTHOR CONTRIBUTION

Conceptualization: Sabin Chun, Kyoungyeol Jeong & Jongchul Park, Data curation: Sabin Chun & Dakyung Son, Formal analysis: Sabin Chun & Teo Yoo, Methodology: Sabin Chun, Dakyung Son, Kyoungyeol Jeong & Jongchul Park, Projectadministration: Jongchul Park, Visualization: Sabin Chun, Writing-original draft: Sabin Chun & Dakyung Son, Writing-review & editing: Sabin Chun, Dakyung Son & Jongchul Park

참고문헌

- Angin, S., Mickle, K. J., & Nester, C. J. (2018). Contributions of foot muscles and plantar fascia morphology to foot posture. *Gait & Posture*, 61, 238-242.
- Buldt, A. K., Forghany, S., Landorf, K. B., Levinger, P., Murley, G. S., & Menz, H. B. (2018). Foot posture is associated with plantar pressure during gait: A comparison of normal, planus and cavus feet. *Gait & Posture*, 62, 235-240.
- Buldt, A. K., Levinger, P., Murley, G. S., Menz, H. B., Nester, C. J., & Landorf, K. B. (2015). Foot posture is associated with kinematics of the foot during gait: A comparison of normal, planus and cavus feet. *Gait & Posture*, 42(1), 42-48.
- Buldt, A. K., Murley, G. S., Butterworth, P., Levinger, P., Menz, H. B., & Landorf, K. B. (2013). The relationship between foot posture and lower limb kinematics during walking: A systematic review. *Gait & Posture*, 38(3), 363-372.
- Chiu, M., & Wang, M. (2007). The effect of gait speed and gender on perceived exertion, muscle activity, joint motion of lower extremity, ground reaction force and heart rate during normal walking. *Gait & Posture*, 25(3), 385-392.
- Cote, K. P., Brunet, M. E., Gansneder, B. M., & Shultz, S. J. (2005). Effects of pronated and supinated foot postures on static and dynamic postural stability. *Journal of Athletic Training*, 40(1), 41.
- Elftman, H. (1960). The transverse tarsal joint and its control. *Clinical Orthopaedics and Related Research*[®], 16, 41-46.
- Franco, A. H. (1987). Pes cavus and pes planus: Analyses and treatment. *Physical Therapy*, 67(5), 688-694.
- Hunt, A. E., & Smith, R. M. (2004). Mechanics and control of the flat versus normal foot during the stance phase of walking. *Clinical Biomechanics*, 19(4), 391-397.
- Ito, K., Hosoda, K., Shimizu, M., Ikemoto, S., Nagura, T., Seki, H., Kitashiro, M., Imanishi, N., Aiso, S., Jinzaki, M., & Ogihara, N. (2017). Three-dimensional innate mobility of the human foot bones under axial loading using biplane X-ray fluoroscopy. *Royal Society Open Science*, 4(10), 171086.
- Jung, D. (2020). Analysis of foot type in Korean young adults based on normalized arch height. *Physical Therapy Korea*, 27(3), 199-205.
- Kaufman, K. R., Brodine, S. K., Shaffer, R. A., Johnson, C. W., & Cullison, T. R. (1999). The effect of foot structure and range of motion on musculoskeletal overuse injuries. *The American Journal of Sports Medicine*, 27(5), 585-593.
- Moon, J. H., Lee, H. S., Jung, K. I., & Park, J. H. (1996). Foot pressure distribution in normal subjects and patients with hallux valgus and pes planus. *Journal of Korean Academy of Rehabilitation Medicine*, 20(3), 778-786.
- Neal, B. S., Griffiths, I. B., Dowling, G. J., Murley, G. S., Munteanu, S. E., Franettovich Smith, M. M., Collins, N. J., & Barton, C. J. (2014). Foot posture as a risk factor for lower limb overuse injury: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Foot and Ankle Research*, 7, 55.
- Okamura, K., Fukuda, K., Oki, S., Ono, T., Tanaka, S., & Kanai, S. (2020). Effects of plantar intrinsic foot muscle strengthening exercise on static and dynamic foot kinematics: A pilot randomized controlled single-blind trial in individuals with pes planus. *Gait & Posture*, 75, 40-45.
- Redmond, A. C., Crosbie, J., & Ouvrier, R. A. (2006). Development and validation of a novel rating system for scoring standing foot posture: *The foot posture index*. *Clinical Biomechanics*, 21(1), 89-98.
- Saraswat, P., MacWilliams, B. A., Davis, R. B., & D'Astous, J. L. (2014). Kinematics and kinetics of normal and planovalgus feet during walking. *Gait & Posture*, 39(1), 339-345.
- Stearne, S. M., McDonald, K. A., Alderson, J. A., North, I., Oxnard, C. E., & Rubenson, J. (2016). The foot's arch and the energetics of human locomotion. *Scientific Reports*, 6(1), 19403.
- Williams Iii, D. S., McClay, I. S., & Hamill, J. (2001). Arch structure and injury patterns in runners. *Clinical Biomechanics*, 16(4), 341-347.

보행 시 발 유형에 따른 발 운동학적 특성과 하지 근활성도 비교

천사빈¹, 손다경², 유태오³, 정경열², 박종철^{4*}

¹텍사스여자대학교 생체역학·운동행동 연구실, 박사후연구원

²국립부경대학교 체육학과, 박사과정

³국립부경대학교 체육학과, 석사과정

⁴국립부경대학교 해양스포츠학과, 부교수

*교신저자: 박종철(jcpark@pknu.ac.kr)

[목적] 본 연구의 목적은 보행 시 발 유형에 따른 발 운동학적 특성과 하지 근활성도를 비교 분석하는데 있었다.

[방법] 건강한 성인 58명을 모집하여 발 자세 지수, 주상골 하강, 정규화된 주상골 높이, 정규화된 발등 높이를 기준으로 정상발, 편평발, 오목발로 분류하였다. 모든 대상자는 12m의 거리를 편안한 속도로 보행하는 동안 모션 캡처 시스템과 표면 근전도를 통해 발 운동학적 특성과 하지 근활성도를 측정하였다. 운동학적 분석에는 입각기 동안 발 분절 간 각도와 가동범위가 포함되었으며, 근활성도 분석에는 앞정강근, 장딴지근, 긴종아리근이 포함되었다.

[결과] 오목발은 관상면에서 편평발 또는 정상발에 비해 더 큰 중족부 대비 전족부 가동범위, 중족부 대비 전족부 내측 가동범위를 보였다. 또한, 편평발은 관상면에서 전족부 내측 대비 발가락 가동범위가 정상발에 비해 크게 나타났다. 발 유형에 따른 분절 간 각도는 수평면에서 중족부 대비 전족부, 중족부 대비 전족부 내측에서 편평발과 정상발 사이 뚜렷한 운동학 특성의 차이를 나타냈다. 하지 근활성도에서는 모든 근육에서 세 집단 간 차이를 보이지 않았다.

[결론] 본 연구는 보행 중 발 유형에 따른 운동학 변화에 대한 이해를 제공한다. 특히, 본 연구의 결과는 발 유형 변화로 인해 발생하는 하지 손상 및 조직 스트레스의 내재적 위험 요소를 설명하기 위한 유용한 통찰력을 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어

발 유형, 보행, 발 운동학, 근활성도

※ 이 논문은 국립부경대학교 자율창의기술연구비(2024년)에 의하여 연구되었음.