KJSB
Korean Journal of Sport Biomechanics 2021; 31(2): 95-103
http://dx.doi.org/10.5103/KJSB.2021.31.2.95
http://e-kjsb.org eISSN 2093-9752

ORIGINAL

Differences in Spatiotemporal Gait Parameters and Lower Extremity Function and Pain in Accordance with Foot Morphological Characteristics

발의 형태학적 특성에 따른 시공간 보행 변인과 하지의 기능 및 통증 차이

Hyung Gyu Jeon[1,2], Inje Lee[1,2], Sae Yong Lee[1,2,3], Sunghe Ha[2,4]

[1]Department of Physical Education, Yonsei University, Seoul, South Korea
[2]International Olympic Committee Research Centre KOREA, Yonsei University, Seoul, South Korea
[3]Institute of Convergence Science, Yonsei University, Seoul, South Korea
[4]Department of Clinical Research on Rehabilitation, National Rehabilitation Center, Seoul, South Korea

Received : 29 January 2021
Revised : 17 March 2021
Accepted : 29 March 2021

Corresponding Author
Sunghe Ha
Department of Clinical Research on Rehabilitation, National Rehabilitation Center, 58 Samgaksan-ro, Gangbuk-gu, Seoul, 01022, South Korea
Tel : +82-2-901-1348
Fax : +82-2-901-1920
Email : hasunghe7@gmail.com

Objective: The aim of this study was to investigate the differences in spatiotemporal gait performance, function, and pain of lower-extremity according to foot morphological characteristics.

Method: This case-control study recruited 42 adults and they were classified into 3 groups according to foot morphology using navicular-drop test: pronated (≥ 10 mm), normal (5~9 mm), and supinated (≤ 4 mm) feet. Spatiotemporal gait analysis and questionnaires including Foot and Ankle Ability Measure activities of daily living / Sports, Western Ontario and McMasters Universities Osteoarthritis Index, Lower Extremity Functional Scale, International Physical Activity Questionnaire, and Tegner activity score were conducted. One-way analysis of variance was used for statistical analysis.

Results: The pronated feet group showed longer loading response and double limb support in both feet and increased pre-swing phase in non-dominant feet. The supinated feet group demonstrated a longer swing phase in non-dominant feet and single limb support in dominant feet. However, there was no significant group difference in function and pain of knee joint and lower-extremity between groups.

Conclusion: Our results indicated that abnormal spatiotemporal gait performance according to foot morphology. Although there was no difference in lower extremity dysfunction and pain according to the difference in foot morphology, they have the possibility of symptom occurs as a result of continuous participation in activities of daily living and sports. Therefore, individuals with pronated or supinated foot should be supplemented by utilizing an orthosis or training to restore normal gait performance.

Keywords: Walking, Overuse injury, Navicular drop, Medial longitudinal arch, Patient-oriented outcome

INTRODUCTION

발은 보행 시 지면과 접촉하는 유일한 분절로서 형태에 따라 하지에 전이되는 부하의 크기 및 방향을 변화시키며, 비정상적 발의 형태에 따라 변화된 운동역학적 요인들은 관절 내 기능부전 및 통증 발생에 영향을 미칠 수 있다(Iijima et al., 2017; Razeghi & Batt, 2002). 발은 구조적 강도에 따라서 충격 흡수 능력 및 이동운동기술의 차이가 나타나기 때문에(Eizentals, Katashev, Oks Pavare & Balčūna, 2019; Prachgosin, Chong, Leelasamran, Smithmaitrie & Chatpun, 2015), 체중 부하 여부에 따른 안쪽세로활(medial longitudinal arch)의 높이 차이를 기준으로 엎침발(pronated feet), 정상발(normal feet), 뒤침발(supinated feet) 형태로 구분되어 연구되고 있다(Cote, Brunet, Gansneder & Shultz, 2005).

엎침발은 과도하게 유연하여 안쪽세로활의 높이가 감소한 상태이며 조직의 긴장을 증가시켜 보행 및 달리기 관련 상해를 유발시키는 원인 중 하나로 보고되는 반면, 뒤침발은 단단한 안쪽세로활로 인해 엎침의 감소 및 충격 흡수 능력이 부족하여 몸쪽(proximal) 관절로 전달되는 부하를 증가시킬 수 있다(Eggold, 1981; Kim, Park & Kim, 1999; Kogler, Solomonidis & Paul, 1995; Lee, Hertel & Lee, 2010; Rachmawati et al., 2016). 인체는 역학적 사슬로 연결되어 있기 때문에 동적 움직

Copyright © 2021 Korean Journal of Sport Biomechanics
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 noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

임 동안 발의 활 변형은 발목관절의 엎침 및 뒤침 동작뿐만 아니라 정강뼈의 회전 움직임에 관여하고(Nigg, Cole & Nachbauer, 1993), 이러한 하퇴(lower leg)의 관절연결(joint coupling)은 무릎 및 엉덩관절의 운동학에 영향을 미친다(Souza, Pinto, Trede, Kirkwood & Fonseca, 2010). 따라서 발의 형태는 하지의 생체 역학적 움직임을 변화시키므로(Donatelli et al., 1999; Sanchis-Sales, Sancho-Bru, Roda-Sales & Pascual-Huerta, 2018), 변형된 운동수행력 및 움직임 패턴은 비정상적 부하의 누적을 야기함으로써 하지의 부상 위험 요인(risk factor)으로 작용할 수 있다(Neal et al., 2014).

보행은 인간의 이동운동기술 중 대표적인 움직임으로서 과사용 부상 연구에서 분석되는 주요 과제이다(Bramah, Preece, Gill & Herrington, 2018; Springer, Gottlieb & Lozin, 2016). 보행 시 발/발목 복합체의 구조와 기능은 신체를 이동시키고 충격을 전달 및 흡수하는데 중요한 역할을 담당하기 때문에, 발의 비정상적 구조 또는 기능 저하는 하지로 전달되는 부하량 및 부하율(loading rate)의 증가를 야기할 수 있다(Wikstrom, Song, Migel & Hass, 2020; Williams, Davis, Scholz, Hamill & Buchanan, 2004). 한 선행연구에서는 발바닥근막염(plantar fasciitis), 엉덩정강인대 증후군(iliotibial band syndrome), 안쪽정강이 스트레스 증후군(medial tibialis stress syndrome), 무릎넙다리 통증증후군(patello-femoral pain syndrome), 아킬레스힘줄염(achilles tendinitis)과 같은 과사용 부상 집단이 보행 시 건강한 대조군과는 다른 발목, 무릎, 엉덩관절 및 체간의 움직임 패턴을 구사하는 것으로 보고하였다(Bramah et al., 2018). 따라서 발의 비정상적 형태로 인해 실질적으로 보행 이동운동기술의 수행 능력이 변화되는지 관찰할 필요가 있다.

동작분석은 인체의 움직임을 운동학적, 운동역학적, 그리고 시공간적 변인을 통해 구체적인 수치에 근거하여 정량적으로 분석하는 방법으로써, 운동역학 분야에서 사용되는 주요 분석방법이다. 시공간적 분석은 장비의 비용 및 접근성, 제한된 실험실 환경, 마커 부착, 소요 시간 등으로 인해 발생하는 현장 제한성이 다소 낮기 때문에 보행에 어려움을 겪는 노인(Moreira, Sampaio & Kirkwood, 2015), 파킨슨병(parkinson's disease; Zago et al., 2018) 환자뿐만 아니라 무릎관절염(knee osteoarthritis; Turcot et al., 2013), 만성 발목 불안정성(chronic ankle instability; Balasukumaran, Gottlieb & Springer, 2020)과 같은 근골격계 부상 환자의 보행을 분석하기 위한 목적으로 활용되고 있어, 다양한 대상자의 보행 특성을 확인할 수 있는 장점이 있다. 또한, 보행 동작분석 연구에서는 관절 움직임과 관절 모멘트뿐만 아니라 한 보행 주기(gait cycle)에서 나타나는 실질적 움직임인 시공간적 변인을 살펴봄으로써 기능적 능력 또한 면밀히 검사할 필요가 있으나, 발의 형태학적 차이에 따른 시공간적 보행 분석을 연구가 부족한 실정이다.

근골격계의 과사용 부상(overuse injury)은 걷기나 달리기와 같이 주기(cycle)가 반복되는 동작이 주를 이루는 장거리 스포츠 종목에서 발생률이 높다(Roos et al., 2015). 또한, 과사용 부상은 신체에 전달되는 과부하로 인한 미세외상(micro-trauma)이 누적되어 점진적으로 증상이 나타나고, 하지에서 빈번하게 발생하는 특징이 있다(DiFiori et al., 2014; Outerbridge & Micheli, 1995; Roos et al., 2015). 대표적인 하지의 과사용 부상은 발바닥근막염, 엉덩정강인대 증후군, 안쪽정강이 스트레스 증후군, 그리고 무릎넙다리 통증증후군, 아킬레스힘줄염 등이 있다. 다양한 부위에서 발생하는 과사용 부상의 대표적 증상은 관절의 기능부전과 통증이며, 증상이 발생함에 따라 운동 동작이 제한되어 스포츠 참여를 어렵게 만든다(Bahr, 2009; Clarsen, Myklebust & Bahr, 2013). 인체의 움직임은 정적 구조물을 기반으로 기능하고 각 분절의 정렬에 의해 영향을 받는데(Matheson et al., 1987; Park, Park & Kim, 2010), 특히 발 분절의 구조적 및 기능적 상태에 따라 하지의 기능제한과 통증 발생 정도가 달라질 수 있다(Jeon, Jeong, Kim & Lee, 2021). 발/발목 복합체의 비정상적 형태인 엎침발과 뒤침발 또한 부상의 위험 요인으로 보고되기 때문에(Neal et al., 2014), 발의 형태학적 차이에 따른 움직임뿐만 아니라 하지의 각 관절에서 기능부전 및 통증과 같은 부상 관련 증상이 발현하는지 확인할 필요가 있다.

관절의 기능부전 및 통증 지표는 부상과 관련된 주요 지표로서 환자가 자기 보고(self-reported)하는 특성이 있기 때문에, 대상자의 현재 신체 상태를 확인하는 목적으로 폭넓게 사용되고 있다(Dingemans et al., 2017; Clement, Weir, Holland & Deehan, 2019). 따라서 선행연구는 주관적 환자중심 설문 조사를 통해 환자가 경험하는 기능부전 및 통증과 같은 증상을 수집하여 관절 상태를 평가하고, 이를 부상 발현의 기준으로서 활용하고 있다(Clarsen et al., 2013; DiFiori et al., 2014; Gribble et al., 2013; Lee, McKeon & Hertel, 2009). 그러므로 시공간적 보행 능력과 함께 기능부전 및 통증과 같은 주관적인 환자중심결과(patient-oriented outcome)를 분석한다면 대상자가 인지하는 관절 상태와 보행 능력에 대해 다양한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구의 목적은 발의 형태에 따른 보행 능력과 주관적 하지 기능 상태의 차이를 관찰하는데 있다. 본 연구의 가설은 다음과 같다: 1) 발의 형태학적 차이에 따라 주관적 기능부전 및 통증 점수의 차이가 있을 것이다; 2) 엎침발과 뒤침발 집단은 정상발 집단과 비교하여 시공간적 보행 능력의 차이가 있을 것이다.

METHODS

1. 연구 대상

본 연구의 대상자는 최초 성인 68명이 참여하였으나, 2번에 걸친 사전 검사에 따라 42명이 최종 선정되었다(β = 0.80, α = 0.05, effect size = 0.50, required sample size = 42; G*power, version 3.1.9.2, University of Kiel, Kiel, Germany; Figure 1). 연구 대상자는 발의 형태에 따라 엎침발 집단 14명, 정상발 집단 21명, 뒤침발 집단 7명으로 분류되었다(Table 1). 본 실험의 연구 대상 포함 기준(inclusion criteria)은 다음과 같다: 1) 만 19~39세의 정상 성인 남녀; 2) 보행 동작 수행이 가능한 자.

연구 참여 전 대상자의 보행 능력에 영향을 미칠 수 있는 부상 병력 및 신체 수준을 확인하였으며, 세부 제외 기준(exclusion criteria)은 다음과 같다: 1) 과거 하지 골절 및 근골격계 수술 이력을 가진 자; 2) 최근 6개월 내 근골격계 부상 경험한 자; 3) 균형능력 장애, 신경병증, 근신경계에 이상이 있는 자; 4) Tegner Activity Score (TAS) level 4(중간 정도의 노동) 미만의 신체활동 수준을 가진 자. 본 연구에서는 양 발의 형태학적 차이로 인해 발생하는 오류를 최소화하기 위해 양 발의 형태가 동일하지 않을 경우 연구 대상에서 제외하였다.

2. 연구 절차

본 연구의 대상자들은 발의 형태 측정, 설문지 작성, 보행 능력 검사

(OptoGait, Microgate, Italy)에 참여하였다(Figure 1).

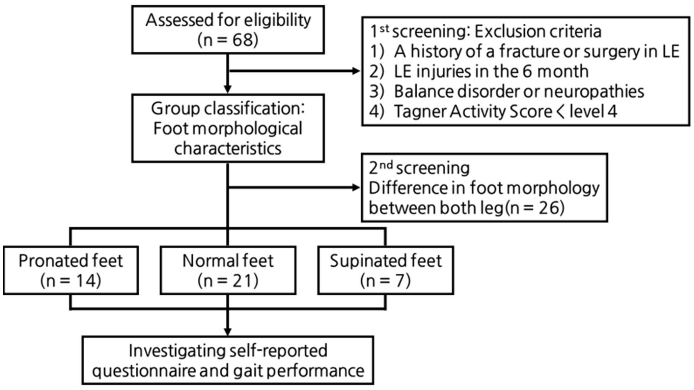

Figure 1. Procedure of the study. LE: lower-extremity

1) 발의 형태 측정

본 연구에서는 발의 형태학적 분류를 위해 발배뼈 하강(navicular drop) 높이 측정법을 사용하였다(Cote et al., 2005). 발배뼈 하강 높이 측정을 위해 높이 측정기(Mitutoyo, Kawasaki, Japan)를 이용하여 체중 부하 자세와 목말밑관절(subtalar joint) 중립 자세에서 지면으로부터

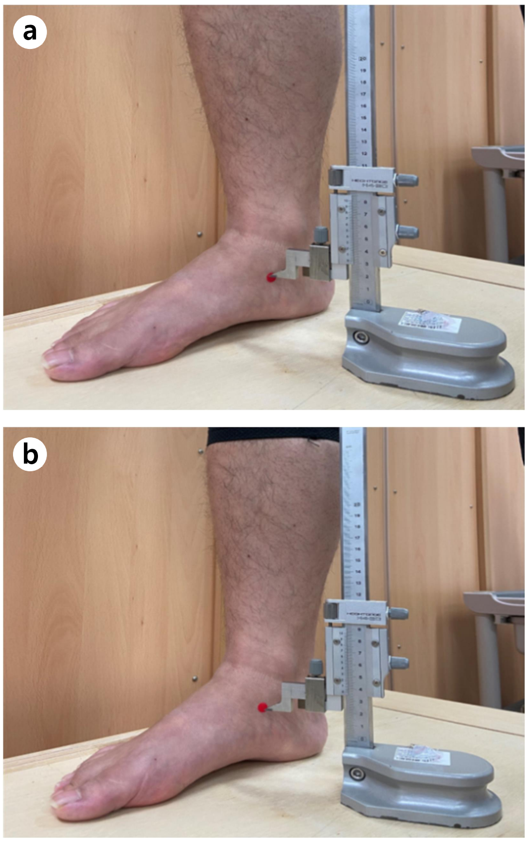

Figure 2. Navicular drop test during weight-bearing position (a) and subtalar neutral position (b).

발배뼈의 거친면까지의 거리를 측정하였다(Figure 2). 거골하관절 중립 자세는 검사자가 엄지와 검지 손가락을 이용하여 복사뼈의 내/외측면을 촉지한 후 피험자 측정발의 엎침과 뒤침 동작 시 내/외측면의 압력 정도가 동일한 상태로 정의된다(Cote et al., 2005). 발배뼈 하강 높이는 목말밑관절 중립 자세의 발배뼈 높이와 체중 부하 자세의 발배뼈 높이 차이로 정의 되었으며, 이를 이용한 발의 형태학적 분류 기준은 다음과 같다(Cote et al., 2005): 1) 엎침발(≥ 10 mm); 2) 정상발(5~9 mm); 3) 뒤침발(≤ 4 mm). 발배뼈 높이는 한 명의 검사자에 의해 3회 측정된 후 평균값이 기록되었으며, 검사자의 발배뼈 높이 측정에 대한 검사-재검사 신뢰도는 0.841의 급내상관계수(intraclass correlation coefficient)로 높은 신뢰도를 보여주었다.

2) 보행 능력 검사

연구 대상자는 보행능력 검사를 위해 개인운동화를 착용 후 10분간의 준비운동과 3회의 걷기 연습을 실시하였다. 보행 능력 검사는 선호속도로 9 m 보행로에서 실시되었다. 출발 지점에서 2 m까지는 가속구간, 7 m에서 9 m까지는 감속구간으로 설정하여 시공간 보행 자료는 가속과 감속구간을 제외한 중간 5 m 구간에서만 수집되었다. 시공간 변인 보행 변인으로서 한발짝길이(step length), 디딤기(stance phase), 흔듦기(swing phase), 한다리지지기(single limb support), 부하반응기(loading response), 전 흔듦기(preswing phase), 한발짝시간(step time), 보행속도(gait speed), 보행 주기(gait cycle), 한발짝률(cadence), 한걸음길이(stride length), 두발지지기(double limb support), 보행속도(gait speed)의 데이터가 수집되었다. 보행 능력 검사 시 샘플링율(sampling rate)은 1,000 Hz으로 설정하였다.

3) 설문지 작성

모든 연구 대상자는 신체활동량 및 신체활동 수준을 확인하기 위해 IPAQ (International Physical Activity Questionnaire) 신체활동 설문지와 TAS 설문지를 자기 보고방식으로 작성하였다. IPAQ 설문지는 격렬한 활동, 중강도 활동, 걷기 등 3가지 유형의 신체활동에 참여한 요일 수와 시간을 평가하여 신진대사 해당치(metabolic equiva- lent of tasks, METs)를 간접 산출하고, 이를 통해 주간 신체활동량을 나타낸다. TAS 설문지는 Level 0에 해당하는 '움직임이 어려운 상태'부터 Level 10에 해당하는 '국가대표 수준의 신체활동'까지 현재 몸 상태로 참여 가능한 최대 신체활동 수준을 나타낸다. 발/발목 운동 능력(Foot and Ankle Ability Measure, FAAM) 설문지는 21가지 문항의 일상생활(Activities of Daily living, ADL) 척도(총 84점)와 7가지 문항(총 24점)의 스포츠 활동(FAAM-Sport) 척도를 통해 발/발목의 운동 능력을 평가한다(Martin, Irrgang, Burdett, Conti & Van Swearingen, 2005). FAAM 설문지의 두 가지 척도 모두 높은 점수일수록 좋은 발목관절 상태를 의미하며, 본 연구에서는 총점 대비 백분율로 산출되었다. 무릎관절의 주관적 기능 및 통증 조사를 위해 24가지 문항으로 구성된 무릎관절염 지수(Western Ontario and McMasters Universities Osteoarthritis, WOMAC) 설문지를 사용하였으며(Bellamy, Buchanan, Goldsmith, Campbell & Stitt, 1988), 통증, 경직, 그리고 기능부전 등 세 가지 세부 항목에 대해 96점 만점으로 구성되어 있다. WOMAC 설문지는 점수가 높을수록 부정적

Table 1. Demographic characteristics of the subjects

	Pronated feet (n = 14)	Normal feet (n = 21)	Supinated feet (n = 7)	*F*	*p*
Sex (M:F)	11:3	14:7	6:1		
Age (yrs)	27.29±4.01	27.33±5.18	24.71±5.68	0.819	0.448
Height (cm)	175.88±8.18	173.33±8.34	175.97±4.72	0.568	0.571
Body mass (kg)	75.91±14.26	72.9±16.58	71.0±10.91	0.2391	0.749
D navicular drop (cm)	1.16±0.11	0.69±0.14	0.32±0.07	122.727	< 0.001*
ND navicular drop (cm)	1.24±0.25	0.65±0.15	0.26±0.13	78.287	< 0.001*
IPAQ (METs-minutes/week)	3823.71±2158.68	2516.67±2716.76	4968±2611.82	2.821	0.072
Tegner activity score (level)	7.79±1.48	6.76±1.55	7.71±1.70	2.193	0.125

Mean ± standard deviation
*$p < 0.001$
D, dominant; F: female; IPAQ, International Physical Activity Questionnaires; M: male; METs, Metabolic equivalents of tasks; ND, non-dominant

관절 상태를 나타낸다. 하지의 전반적 기능을 확인하기 위해 하지 기능 평가(Lower Extremity Function Scale, LEFS) 설문지를 이용하였다(Binkley, Stratford, Lott & Riddle, 1999). LEFS 조사지는 일상생활과 가벼운 스포츠 활동 중 나타나는 증상을 평가하기 위해 20문항으로 구성되어 있으며, 총 80점 만점으로 계산된다. 본 실험에서는 선행연구를 통해 한글로 번역이 완료되고, 신뢰도 및 타당도가 검증된 설문지를 사용하였다(Ha, 2015; Kim et al., 2008; Lee, Jung, Seo & Chung, 2011; Oh, Yang, Kim & Kang, 2007).

3. 통계 분석

본 연구에서 엎침발, 정상발, 뒤침발 집단 간 기능부전 및 통증 설문 점수와 보행의 시공간 변인의 차이를 분석하기 위해 일원배치 분산분석이 실시되었으며, 사후분석으로 Bonferroni 검정을 사용하였다. 통계 분석을 위해 SPSS 25.0 (IBM, USA)을 사용하였고, 통계적 유의수준은 $\alpha = 0.05$로 설정하였다.

RESULTS

1. 연구 참여자 특성

세 집단의 연구 참여자 모두 평균 주당 2500 METs 이상의 신체활동량을 가졌으며, 집단 간 유의한 차이는 나타나지 않았다($p > 0.05$). TAS 설문지 분석 결과, 모든 연구 참여자는 평균 level 6-7로 나타나 레크레이션 활동 및 격렬한 운동에 참여 가능한 신체활동 수준을 가진 것으로 확인되었으며, 집단 간 차이는 나타나지 않았다($p > 0.05$; Table 1).

2. 발목 형태학적 특성에 따른 주발의 시공간적 보행 특성 차이

주발의 시공간적 보행 특성 분석 결과 한다리지지기 변인에서 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며($p = 0.011$), 사후분석 결과 뒤침발 집단(SF)이 정상발 집단(NF; $p = 0.012$)과 엎침발 집단(PF; $p = 0.022$)보다 더욱 긴 한다리지지기를 보였다. 부하반응기 변인에서 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며($p = 0.007$), 사후분석 결과 엎침발 집단(PF; $p = 0.007$)과 정상발 집단(NF; $p = 0.016$)이 뒤침발 집단(SF)보다 더욱 긴 부하반응기를 보였다. 주발의 한발짝길이, 디딤기, 흔듦기, 전 흔듦기, 한발짝시간, 보행속도 변인은 집단 간 차이가 나타지 않았다($p > 0.05$; Table 2).

3. 발목 형태학적 특성에 따른 비 주발의 시공간적 보행 특성 차이

비 주발의 시공간적 보행 특성 분석 결과 흔듦기 변인에서 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며($p = 0.032$), 사후분석 결과 뒤침발 집단(SF)이 엎침발 집단(PF)보다 더욱 긴 흔듦기를 보였다($p = 0.032$). 부하반응기 변인에서 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며($p = 0.048$), 사후분석 결과 엎침발 집단(PF)이 뒤침발 집단(SF)보다 더욱 긴 부하반응기를 보였다($p = 0.048$). 전 흔듦기 변인에서 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며($p = 0.017$), 사후분석 결과 엎침발 집단(PF; $p = 0.022$)과 정상발 집단(NF; $p = 0.028$)이 뒤침발집단(SF) 보다 더욱 긴 전 흔듦기를 보였다. 비 주발의 한발짝길이, 디딤기, 한다리지지기, 한발짝시간, 보행속도 변인은 집단 간 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$; Table 2).

4. 발의 형태학적 특성에 따른 시공간적 보행 기능 차이

시공간적 보행 기능 특성 차이 결과 두발 지지기 변인에서 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며($p = 0.017$), 사후분석 결과 엎침발 집단(PF; $p = 0.019$)과 정상발 집단(NF; $p = 0.033$)이 뒤침발 집단(SF)보다 더욱 긴 두발 지지기를 보였다(Table 3). 보행 주기, 한발짝률, 한걸음길이, 보행속도 변인은 발의 형태학적 특성에 따른 집단 간 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$).

Table 2. Differences in gait parameter according to foot morphological characteristics

	Side	Pronated feet	Normal feet	Supinated feet	F	p	Post hoc
Step length (cm)	D	72.8±5.45	70.02±7.27	74.98±5.6	1.807	0.178	
	ND	73.26±5.87	72.0±6.58	75.7±6.22	0.921	0.407	
Stance phase (%)	D	64.91±0.82	63.62±4.22	62.8±1.86	1.948	0.156	
	ND	64.81±0.73	63.99±3.15	62.57±2.26	1.228	0.304	
Swing phase (%)	D	36.53±3.5	35.45±2.11	37.19±1.87	1.423	0.253	
	ND	35.18±0.76	35.58±2.12	37.43±2.26	3.782	0.032*	SF>PF
Single limb support (%)	D	35.21±0.75	35.15±2.1	37.59±2.39	5.126	0.011*	SF>NF, PF
	ND	35.95±2.54	35.35±2.32	37.28±1.92	1.791	0.180	
Loading response (%)	D	14.85±0.78	14.48±1.92	12.34±2.09	5.709	0.007**	NF, PF>SF
	ND	14.63±0.74	14.23±1.86	12.72±2.16	3.289	0.048*	PF>SF
Pre swing phase (%)	D	14.79±0.73	14.6±1.94	12.96±2.07	3.142	0.054	
	ND	15.02±0.91	14.81±2.13	12.67±1.99	4.550	0.017*	NF, PF>SF
Step time (sec)	D	0.54±0.03	0.54±0.05	0.52±0.02	0.560	0.576	
	ND	0.55±0.03	0.54±0.04	0.52±0.02	1.228	0.304	
Gait speed (min/sec)	D	1.35±0.14	1.34±0.21	1.41±0.18	0.345	0.710	
	ND	1.35±0.13	1.34±0.17	1.47±0.14	2.171	0.128	

Mean ± standard deviation
*p < 0.05, **p < 0.01
D, dominant leg; ND, non-dominant leg; NF, normal feet; PF, pronated feet; SF, supinated feet

Table 3. Differences in gait function according to foot morphological characteristics

	Pronated feet	Normal feet	Supinated feet	F	p	Post hoc
Gait cycle (sec)	1.08±0.05	1.05±0.13	1.04±0.04	0.615	0.546	
Cadence (steps/min)	110.89±4.92	109.42±26.92	115.36±4.82	0.242	0.786	
Stride length (cm)	141.47±11.99	138.61±12.11	146.54±9.65	1.229	0.304	
Double limb support (%)	29.64±1.49	29.09±3.69	25.35±4.12	4.556	0.017*	NF, PF>SF
Gait speed (min/sec)	1.35±0.13	1.36±0.19	1.47±0.14	1.425	0.253	

Mean ± standard deviation
*p < 0.05
NF, normal feet; PF, pronated feet; SF, supinated feet

Table 4. Differences in pain and function in lower extremity according to foot morphological characteristics

	Pronated feet	Normal feet	Supinated feet	F	p
FAAM-ADL (%)	96.54±5.35	95.68±6.18	97.79±4.37	0.379	0.687
FAAM-Sports (%)	94.64±6.97	89.12±15.83	98.98±2.70	2.051	0.142
WOMAC (score)	2.21±2.39	5.38±11.23	0.86±1.86	1.089	0.347
LEFS (score)	75.86±3.42	73.95±6.56	78.14±3.29	1.792	0.180

Mean ± standard deviation
ADL, activity of daily life; FAAM, foot and ankle ability measure; LEFS, Lower Extremity Functional Scale; WOMAC, Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis

5. 발목 형태학적 특성에 따른 무릎관절과 하지의 기능 및 통증 점수 차이

일상생활 시 발/발목 운동 능력(FAAM-ADL), 스포츠 활동 시 발/발목 운동 능력(FAAM-Sports), 무릎관절염 지수(WOMAC), 하지 기능(LEFS) 설문지 결과 발목의 형태학적 특성에 따른 집단 간 차이가 나타나지 않았다(p > 0.05; Table 4).

DISCUSSION

본 연구는 발의 형태학적 차이에 따른 시공간적 보행 특성 그리고 무릎관절과 하지의 주관적 기능부전 및 통증 차이를 확인하기 위해 수행되었다.

본 연구 결과는 발의 형태에 따라 보행 능력의 유의한 차이가 있음을 보여준다. 특히, 엎침발 집단(PF)의 주발과 비 주발 모두 뒤침발 집단(SF)보다 긴 부하반응기를 보였는데, 이는 이동운동기술 중 안쪽세로활의 큰 하강으로 인해 발생된 것으로 판단된다. 부하반응기는 초기 접기(initial contact) 시점을 포함하고 내딛는 다리로 체중이 이동되는 보행의 초기 구간으로 보고되는데(Kharb et al., 2011), 엎침발 집단(PF)의 경우 체중 부하 시 안쪽세로활의 큰 하강 높이로 인해 부하반응기 구간의 비율이 증가하여 긴 충격 흡수 가용 시간을 가진 것으로 판단된다. 한 선행연구는 체중 부하 시 안쪽세로활이 낮은 집단이 높은 집단보다 이동운동기술 중 작은 초기 수직 지면반력(ground reaction force)과 부하율을 가진다고 보고함으로써 발의 형태와 충격 흡수 능력 간 연관 가능성을 제시하였다(Williams, Davis, Hamill & Buchanan, 2001). 엎침발은 긴 부하반응기를 가짐으로써 충격 흡수를 위한 시간적 이점을 가질 수 있지만 뒷발(rear foot)의 가쪽번짐(eversion) 이동(excursion) 및 속도가 증가하기 때문에, 뒤침근/힘줄 조직으로 큰 부하가 전달되고 목말밑관절 내 운동학적 변화가 나타나는 등의 문제점이 발생할 수 있다(Tiberio, 1987; Williams et al., 2001). 또한, 보행 시 관절 역학을 살펴보면 무릎관절은 초기 접지 후 중간 디딤기로 진행하면서 완전히 펴하게 되는데, 이 과정에서 과도한 발의 엎침은 무릎관절의 폄동작 시 요구되는 하퇴의 바깥돌림(external rotation)에 영향을 미칠 수 있다(Tiberio, 1987). 신체는 근신경 조절 시스템을 통해 각 관절로 연결된 운동사슬을 이용하여 보행 추진력을 얻게 되는데, 힘 생성 양 및 시점의 변화는 운동수행력 감소 또는 병리학적 상태를 유발할 수 있다(Kibler, 2000; Letafatkar, Zandi, Khodayi & Vashmesara, 2013). 발/발목 복합체는 하지에서 가장 먼쪽관절로서 이동운동기술 중 지면으로부터 전달되는 에너지를 몸쪽관절로 전달시켜 분산시키는 역할을 담당하기 때문에(Novacheck, 1998), 발의 형태학적 변형은 몸쪽관절에 가해지는 부하를 증가시킴으로써 발바닥근막염, 종아리앞칸증후군, 아킬레스건염, 발목터널증후군, 발뒤꿈치 통증증후군 등과 같은 하지 부상의 위험성이 증가 할 수 있다(Eizentals et al., 2019; Letafatkar et al., 2013; Levinger et al., 2010; Neal et al., 2014). 또한, 엎침발은 안쪽 정강이 스트레스 증후군(Moen et al., 2012), 무릎넙다리 통증증후군(Tiberio, 1987), 허리통증(low back pain; Kosashvili, Fridman, Backstein, Safir & Bar Ziv, 2008)의 부상 위험 요인으로 언급되어 본 연구의 결과를 뒷받침한다.

뒤침발 집단(SF)에서 긴 한발지지기와 흔듦기, 그리고 짧은 부하반응기와 전 흔듦기가 나타났다. 이는 한발로 보행 이동을 수행하는 구간이 길어지는 것을 의미하며, 발의 형태에 따라 보행 능력의 차이가 발견된 것으로 생각된다. 일반적으로 보행은 일반적으로 62%의 디딤기와 38%의 흔듦기로 구성되며, 이 중 전 흔듦기는 두발지지기의 마지막 구간으로서 흔듦기를 준비하는 구간이다. 또한, 전 흔듦기는 신체를 앞으로 이동시키기 위한 추진력을 얻는 구간으로(Neptune, Sasaki & Kautz, 2008), 뒤침발은 이 구간이 짧았음에도 불구하고 단단한 발/발목 복합체를 통해 지면을 강하게 밀어냄으로써 실질적 보행속도의 차이가 나타나지 않았다고 판단된다. 발은 구조적 변화에 따라 지지와 추진 두 가지의 유동적 기능을 수행함으로써 보행 이동에 기여한다(Morris, 1977). 추진구간에서 힘 생성 시 발은 단단한 지렛대 역할을 담당 하는데, 뒤침은 효과적으로 지면을 밀어낼 수 있도록 발을 단단한 강체로 형성하는데 기여하기 때문에 앞서 언급한 결과가 나타났다고 보여진다(Novacheck, 1998).

뒤침발 집단(SF)은 상대적으로 긴 흔듦기를 가지고 있기 때문에, 한발로 지지하는 구간 또한 길어진다. 이러한 한발지지기는 반대 발의 흔듦기가 시작되고 다시 지면에 닿을 때까지 신체 체중을 한발로 지탱하며, 신체중심(center of mass)이 가장 높아 비교적 불안정한 보행 구간이다(Kharb et al., 2011). 이 구간에서 발은 엎침을 통해 적절한 충격을 흡수하여 이동운동기술 도중 신체를 보호하지만, 뒤침발은 단단한 안쪽세로활 형태를 가짐으로써 충격 흡수에 필요한 구조적 이점이 결여되었다고 할 수 있다. 선행연구에 따르면 뒤침발은 정상발과 엎침발에 비해 보행 중 지면과 접촉하는 면적이 좁고 발바닥 압력(plantar pressure)이 증가하기 때문에, 발의 부상과 통증이 증가하는 등 뒷침발 형태의 위험성을 제시하였다(Fernández-Seguín et al., 2014). 또한, 뒤침발은 발꿈치뼈가 안쪽번짐 형태를 띄어 보행 중 압력중심점(center of pressure; Wong, Hunt, Burns & Crosbie, 2008)이 바깥쪽으로 편위된 특성을 갖기 때문에 이동운동기술 수행 중 외측 발목 염좌(lateral ankle sprain) 부상의 위험 요소로 여겨진다(Lung, Yang & Hsieh, 2009; Morrison & Kaminski, 2007). 본 연구에서 뒤침발 집단(SF)의 긴 한발지지기는 외측 발목 염좌 발생에 보다 긴 시간 동안 노출시킴을 의미할 수 있다. 그러므로 뒤침발의 형태를 가진 대상은 변화된 보행패턴으로 인한 과사용 부상뿐만 아니라 급성 부상의 위험성이 존재하기 때문에, 하지의 운동학적 변인에 긍적적 영향을 미칠 수 있는 보행 훈련(Tate & Milner, 2010) 혹은 발 오소틱(orthotic) 착용(Lee, Kim & Lee, 2019)과 같은 중재전략을 적용하여 발의 형태학적 문제를 보완할 필요가 있을 것으로 생각된다.

설문지를 이용하여 발의 형태 차이에 따른 환자중심결과물을 분석한 결과, 세 집단 모두 동일한 신체활동량 및 신체활동 수준을 가졌으며, 무릎관절과 하지의 기능부전 및 통증 점수 또한 차이가 없는 것으로 나타났다. 본 연구 결과에서 집단 간 보행 능력의 유의한 차이에도 불구하고, 참여한 대상자가 20-30대의 건강한 젊은 성인이기 때문에, 주관적 기능부전과 통증을 경험하지 않은 것으로 생각된다. 그러나 엎침 또는 뒤침발의 문제점을 보완하지 못한 상태로 일상생활과 스포츠 활동에 장기간 참여할 경우, 발의 비정상적 형태와 이를 상쇄시키고자 하는 보상작용으로 인해 점진적으로 기능부전 및 통증과 같은 증상이 나타날 수 있다. 선행연구는 주관적 설문 조사지를 통해 연구한 결과 발/발목 복합체의 기능은 무릎관절과 하지의 기능부전 및 통증 지표와 정적 상관관계를 갖고(Jeon et al., 2021) 건강 관련 삶의 질에도 영

향을 미칠 수 있다고 보고하여(Lee, Jeon, Lee & Ha, 2020), 하지의 가장 먼쪽관절인 발/발목 복합체의 관리에 대한 중요성을 강조했다. 그러므로 젊은 성인을 대상으로 전향적 추적 조사를 실시하여 발의 비정상적 형태로 인해 하지관절의 주관적 기능부전과 통증 지표의 변화 여부, 그리고 실제로 부상 발생률의 차이가 나타나는지 확인할 필요가 있다.

본 연구에는 몇 가지 제한점이 존재한다. 첫 번째, 본 연구는 환자-대조군(case-control) 연구 디자인으로 설계되었기 때문에, 집단 간 차이의 설명이 가능하지만 명확한 인과관계를 설명할 수 없다. 두 번째, 연구 대상자 모집과정에서 최근 하지 부상을 경험한 자들을 제외하였으나, 그 이전에 발생한 부상 병력에 대한 정보가 수집되지 않았기 때문에 연구 결과를 해석하는 데 한계가 있을 수 있다. 세 번째, 표본수 계산 프로그램의 결과에 따라 본 연구에 필요한 피험자 수를 충족하였고 연구 대상자 선정 시 세부적인 연구 포함 및 제외 기준을 적용하였으나, 각 집단 간 비율이 동일하지 않은 점이 존재한다. 이러한 제한점에도 불구하고 본 연구는 발의 형태에 따른 보행 능력 차이를 제시하였기 때문에, 발 형태의 중요성을 강조하고 후속연구에 대한 방향성을 제시할 수 있는 연구가 될 것으로 생각된다.

CONCLUSION

발의 형태에 따라 엎침발, 정상발, 뒤침발 집단을 비교한 결과, 시공간적 보행 능력의 차이가 나타났으나 집단 간 무릎관절과 하지의 주관적 기능부전 및 통증 점수의 유의한 차이는 나타나지 않았다. 그러나 지속적으로 일상생활과 스포츠 활동에 참여할 경우 비정상적 보행 능력으로 인해 관절의 기능제한 및 통증이 추후에 나타날 수 있기 때문에, 증상이 나타나기 전에 예방하기 위한 적절한 중재전략이 적용되어야 할 필요가 있다. 추후 연구에서는 발의 형태학적 특성에 따른 하지의 근활성 및 패턴 차이를 확인하고, 전향적 추적 조사를 통해 실제 부상 발생률의 차이를 확인할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank Institute of Convergence Science (ICONS) and the International Olympic Committee Research Centre KOREA for Prevention of Injury and Protection Athlete Health supported by the International Olympic Committee (IOC).

REFERENCES

Bahr, R. (2009). No injuries, but plenty of pain? On the methodology for recording overuse symptoms in sports. *British Journal of Sports Medicine*, *43*(13), 966-972.

Balasukumaran, T., Gottlieb, U. & Springer, S. (2020). Spatiotemporal gait characteristics and ankle kinematics of backward walking in people with chronic ankle instability. *Scientific Reports*, *10*(1), 1-9.

Bellamy, N., Buchanan, W. W., Goldsmith, C. H., Campbell, J. & Stitt, L. W. (1988). Validation study of WOMAC: A health status instrument for measuring clinically important patient relevant outcomes to antirheumatic drug therapy in patients with osteoarthritis of the hip or knee. *The Journal of Rheumatology*, *15*(12), 1833-1840.

Binkley, J. M., Stratford, P. W., Lott, S. A. & Riddle, D. L. (1999). The Lower Extremity Functional Scale (LEFS): Scale development, measurement properties, and clinical application. North American Orthopaedic Rehabilitation Research Network. *Physical Therapy*, *79*(4), 371-383.

Bramah, C., Preece, S. J., Gill, N. & Herrington, L. (2018). Is there a pathological gait associated with common soft tissue running injuries?. *The American Journal of Sports Medicine*, *46*(12), 3023-3031.

Clarsen, B., Myklebust, G. & Bahr, R. (2013). Development and validation of a new method for the registration of overuse injuries in sports injury epidemiology: The Oslo Sports Trauma Research Centre (OSTRC) overuse injury questionnaire. *British Journal of Sports Medicine*, *47*(8), 495-502.

Clement, N. D., Weir, D. J., Holland, J. & Deehan, D. J. (2019). Is there a threshold preoperative WOMAC score that predicts patient satisfaction after total knee arthroplasty?. *The Journal of Knee Surgery*.

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), 41-46.

Dingemans, S. A., Kleipool, S. C., Mulders, M. A., Winkelhagen, J., Schep, N. W., Goslings, J. C. & Schepers, T. (2017). Normative data for the lower extremity functional scale (LEFS). *Acta Orthopaedica*, *88*(4), 422-426.

DiFiori, J. P., Benjamin, H. J., Brenner, J. S., Gregory, A., Jayanthi, N., Landry, G. L. & Luke, A. (2014). Overuse injuries and burnout in youth sports: A position statement from the American Medical Society for Sports Medicine. *British Journal of Sports Medicine*, *48*(4), 287-288.

Donatelli, R., Wooden, M., Ekedahl, S., Wilkes, J., Cooper, J. & Bush, A. (1999). Relationship between static and dynamic foot postures in professional baseball players. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, *29*(6), 316-330.

Eggold, J. F. (1981). Orthotics in the prevention of runners' overuse injuries. *The Physician and Sportsmedicine*, *9*(3), 124-131.

Eizentals, P., Katashev, A., Oks, A., Pavare, Z. & Balčūna, D. (2019). Detection of excessive pronation and supination for walking and running gait with smart socks. Proceedings of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018. Singapore: Springer.

Fernández-Seguín, L. M., Diaz Mancha, J. A., Sánchez Rodríguez, R., Escamilla Martínez, E., Gómez Martín, B. & Ramos Ortega, J. (2014). Comparison of plantar pressures and contact area between normal and cavus foot. *Gait & Posture*, *39*(2), 789-792.

Gribble, P. A., Delahunt, E., Bleakley, C., Caulfield, B., Docherty, C. L., Fourchet, F., Fong, D., Hertel, J., Hiller, C., Kaminski, T. W., McKeon, P. O., Refshauge, K. M., van der wees, P., Vincenzino, B. & Wikstrom, E. (2013). Selection criteria for patients with chronic ankle instability

in controlled research: A position statement of the International Ankle Consortium. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 43*(8), 585-591.

Ha, S. M. (2015). *Reliability & Validity of CAI Assessment Questionary: Korea Version*. Un-published Master's Thesis. Graduate School of Yonsei University.

Iijima, H., Ohi, H., Isho, T., Aoyama, T., Fukutani, N., Kaneda, E., Ohi, K., Abe, K., Kuroki, H. & Matsuda, S. (2017). Association of bilateral flat feet with knee pain and disability in patients with knee osteo-arthritis: A cross-sectional study. *Journal of Orthopaedic Research, 35*(11), 2490-2498.

Jeon, H. G., Jeong, H. S., Kim, C. Y. & Lee, S. Y. (2021). The effects of chronic ankle instability on dysfunction and pain of the knee joint and lower extremity. *The Korean Journal of Physical Education, 60*(1), 651-662.

Kharb, A., Saini, V., Jain, Y. K. & Dhiman, S. (2011). A review of gait cycle and its parameters. *IJCEM International Journal of Computational Engineering & Management, 13*, 78-83.

Kibler, W. B. (2000). Closed kinetic chain rehabilitation for sports injuries. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics, 11*(2), 369-384.

Kim, J. G., Oh, S. J., Lee, M. C., Seo, S. S., Choi, C. H. & Yoo, J. H. (2008). Cross cultural adaptation and translating the IKDC subjective form into the Korean language. *Knee Surgery and Related Research, 20*(2), 161-168.

Kim, S. J., Park, K. H. & Kim, Y. E. (1999). Functional, clinical and practical researches on the foot arch. *Korean Journal of Sport Biomechanics, 9*(1), 1-16.

Kogler, G. F., Solomonidis, S. E. & Paul, J. P. (1995). In vitro method for quantifying the effectiveness of the longitudinal arch support mechanism of a foot orthosis. *Clinical Biomechanics, 10*(5), 245-252.

Kosashvili, Y., Fridman, T., Backstein, D., Safir, O. & Bar Ziv, Y. (2008). The correlation between pes planus and anterior knee or intermittent low back pain. *Foot and Ankle International, 29*(9), 910-913.

Lee, I., Jeon, H. G., Lee, S. Y. & Ha, S. (2020). A study on health-related quality of life in retired athletes. *The Korean Journal of Physical Education, 59*(4), 381-390.

Lee, K. W., Jung, K. S., Seo, H. D. & Chung, Y. J. (2011). Reliability and validity of the korean version of lower extremity functional scale in patients with lower-extremity musculoskeletal dysfunction. *The Research Institute for Special Education & Rehabilitation Science, 50*(3), 451-467.

Lee, S. C., Kim, C. Y. & Lee, S. Y. (2019). The effects of wedge posting location of foot orthotic on running kinematics and eye-closed single leg balance of the lower extremity. *Korean Society of Sport and Leisure Studies, 77*, 477-486.

Lee, S. Y., Hertel, J. & Lee, S. C. (2010). Rearfoot eversion has indirect effects on plantar fascia tension by changing the amount of arch collapse. *The Foot, 20*(2-3), 64-70.

Lee, S. Y., McKeon, P. & Hertel, J. (2009). Does the use of orthoses improve self-reported pain and function measures in patients with plantar fasciitis? A meta-analysis. *Physical Therapy in Sport, 10*(1), 12-18.

Letafatkar, A., Zandi, S., Khodayi, M. & Vashmesara, J. B. (2013). Flat foot deformity, Q angle and knee pain are interrelated in wrestlers. *Journal of Novel Physiotherapies, 3*(2), 138.

Levinger, P., Murley, G. S., Barton, C. J., Cotchett, M. P., McSweeney, S. R. & Menz, H. B. (2010). A comparison of foot kinematics in people with normal- and flat-arched feet using the Oxford Foot Model. *Gait & Posture, 32*(4), 519-523.

Lung, C. W., Yang, S. W. & Hsieh, L. F. (2009). Is the arch index mean-ingful. *Korean Journal of Sport Biomechanics, 19*(2), 187-196.

Martin, R. L., Irrgang, J. J., Burdett, R. G., Conti, S. F. & Van Swearingen, J. M. (2005). Evidence of validity for the Foot and Ankle Ability Measure (FAAM). *Foot & Ankle International, 26*(11), 968-983.

Matheson, G. O., Clement, D. B., McKenzie, D. C., Taunton, J. E., Lloyd-Smith, D. R. & MacIntyre, J. G. (1987). Stress fractures in athletes. A study of 320 cases. *American Journal of Sports Medicine, 15*(1), 46-58.

Moen, M. H., Bongers, T., Bakker, E. W., Zimmermann, W. O., Weir, A., Tol, J. L. & Backx, F. J. (2012). Risk factors and prognostic indicators for medial tibial stress syndrome. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 22*(1), 34-39.

Moreira, B. S., Sampaio, R. F. & Kirkwood, R. N. (2015). Spatiotemporal gait parameters and recurrent falls in community-dwelling elderly women: A prospective study. *Brazilian Journal of Physical Therapy, 19*(1), 61-69.

Morris, J. M. (1977). Biomechanics of the foot and ankle. *Clinical Ortho-paedics and Related Research*, (122), 10-17.

Morrison, K. E. & Kaminski, T. W. (2007). Foot characteristics in asso-ciation with inversion ankle injury. *Journal of Athletic Training, 42*(1), 135-142.

Neal, B. S., Griffiths, I. B., Dowling, G. J., Murley, G. S., Munteanu, S. E., Smith, M. M. F., 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*(1), 55.

Neptune, R. R., Sasaki, K. & Kautz, S. A. (2008). The effect of walking speed on muscle function and mechanical energetics. *Gait & Posture, 28*(1), 135-143.

Nigg, B. M., Cole, G. K. & Nachbauer, W. (1993). Effects of arch height of the foot on angular motion of the lower extremities in running. *Journal of Biomechanics, 26*(8), 909-916.

Novacheck, T. F. (1998). The biomechanics of running. *Gait & Posture, 7*(1), 77-95.

Oh, J. Y., Yang, Y. J., Kim, B. S. & Kang, J. H. (2007). Validity and reliability of Korean version of International Physical Activity Questionnaire (IPAQ) short form. *Korean Journal of Family Medicine, 28*(7), 532-541.

Outerbridge, R. A. & Micheli, L. J. (1995). Overuse injuries in the young

athlete. *Clinics in Sports Medicine*, *14*(3), 503-516.

Park, S. B., Park, J. Y. & Kim, K. H. (2010). Biomechanical analysis of arch support devices on normal and low arch. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *20*(1), 91-99.

Prachgosin, T., Chong, D. Y., Leelasamran, W., Smithmaitrie, P. & Chatpun, S. (2015). Medial longitudinal arch biomechanics evaluation during gait in subjects with flexible flatfoot. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, *17*(4), 121-130.

Rachmawati, M. R., Tulaar, A. B. M., Immanuel, S., Purba, A., Mansyur, M., Haryadi, R. D., Hadisoebroto, I., Husni, A. & Ibrahim, N. (2016). Correcting of pronated feet reduce skeletal muscle injury in young women with biomechanical abnormalities. *Anatomy & Cell Biology*, *49*(1), 15-20.

Razeghi, M. & Batt, M. E. (2002). Foot type classification: A critical review of current methods. *Gait & Posture*, *15*(3), 282-291.

Roos, K. G., Marshall, S. W., Kerr, Z. Y., Golightly, Y. M., Kucera, K. L., Myers, J. B., Rosamond, W. D. & Comstock, R. D. (2015). Epidemiology of overuse injuries in collegiate and high school athletics in the United States. *The American Journal of Sports Medicine*, *43*(7), 1790-1797.

Sanchis-Sales, E., Sancho-Bru, J. L., Roda-Sales, A. & Pascual-Huerta, J. (2018). Effect of static foot posture on the dynamic stiffness of foot joints during walking. *Gait & Posture*, *62*, 241-246.

Souza, T. R., Pinto, R. Z., Trede, R. G., Kirkwood, R. N. & Fonseca, S. T. (2010). Temporal couplings between rearfoot-shank complex and hip joint during walking. *Clinical Biomechanics*, *25*(7), 745-748.

Springer, S., Gottlieb, U. & Lozin, M. (2016). Spatiotemporal gait parameters as predictors of lower-limb overuse injuries in military training. *The Scientific World Journal*, *2016*.

Tate, J. J. & Milner, C. E. (2010). Real-time kinematic, temporospatial, and kinetic biofeedback during gait retraining in patients: A systematic review. *Physical Therapy*, *90*(8), 1123-1134.

Tiberio, D. (1987). The effect of excessive subtalar joint pronation on patellofemoral mechanics: A theoretical model. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, *9*(4), 160-165.

Turcot, K., Armand, S., Lübbeke, A., Fritschy, D., Hoffmeyer, P. & Suvà, D. (2013). Does knee alignment influence gait in patients with severe knee osteoarthritis?. *Clinical Biomechanics*, *28*(1), 34-39.

Wikstrom, E. A., Song, K., Migel, K. & Hass, C. J. (2020). Altered vertical ground reaction force components while walking in individuals with chronic ankle instability. *International Journal of Athletic Therapy & Training*, *25*(1), 27-30.

Williams, D. S. III, Davis, I. M., Scholz, J. P., Hamill, J. & Buchanan, T. S. (2004). High-arched runners exhibit increased leg stiffness compared to low-arched runners. *Gait & Posture*, *19*(3), 263-269.

Williams, D. S. III, Davis, I. M., Hamill, J. & Buchanan, T. S. (2001). Lower extremity kinematic and kinetic differences in runners with high and low arches. *Journal of Applied Biomechanics*, *17*(2), 153-163.

Wong, L., Hunt, A., Burns, J. & Crosbie, J. (2008). Effect of foot morphology on center-of-pressure excursion during barefoot walking. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, *98*(2), 112-117.

Zago, M., Sforza, C., Pacifici, I., Cimolin, V., Camerota, F., Celletti, C., Condoluci, C., De Pandis, M. F. & Galli, M. (2018). Gait evaluation using inertial measurement units in subjects with Parkinson's disease. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *42*, 44-48.