

## 선호보행속도 및 체질량지수에 따른 족저압 분포 및 보행 비대칭성

배영윤<sup>1)</sup> · 최지영<sup>2)</sup> · 최희은<sup>1),2)†</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 의류학과

<sup>2)</sup>서울대학교 생활과학연구소

### Plantar Pressure Distribution and Asymmetry According to Preferred Walking Speed and Body Mass Index

Young Yoon Bae<sup>1)</sup>, Jiyoung Choi<sup>2)</sup>, and Hee Eun Choi<sup>1),2)†</sup>

<sup>1)</sup>Department of Fashion and Textiles, Seoul National University, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Research Institute of Human Ecology, Seoul National University, Republic of Korea

**Abstract:** Plantar pressure and asymmetry are crucial for foot health, especially in diabetic individuals at risk for diabetic foot ulcers (DFU). This study examined the effect of preferred walking speed (PWS) and body mass index (BMI) on regional plantar pressure and gait asymmetry in middle-aged diabetic men. Fifteen diabetic men (50–69 years) were grouped by PWS (slow, medium, fast) and BMI (normal = 18.5–22.9 kg/m<sup>2</sup>; pre-obesity = 23.0–24.9 kg/m<sup>2</sup>; obesity = ≥25.0 kg/m<sup>2</sup>). Participants' average plantar pressure (APP), maximum plantar pressure (MPP) (total foot, forefoot, mid-foot, and rearfoot), asymmetry index, and plantar pressure difference were measured using a treadmill, while they walked at their PWS. Faster PWS was correlated with increased APP and MPP, primarily in the forefoot. The slower PWS groups showed greater overall APP asymmetry, whereas the faster PWS groups, despite better overall APP symmetry, exhibited increased MPP asymmetry in the midfoot and the highest in the rearfoot. Higher BMI was associated with increased plantar pressure asymmetry. Notably, the pre-obesity group, displayed the highest median MPP asymmetry across all foot regions. The rearfoot consistently demonstrated high pressure and MPP asymmetry. Both PWS and BMI significantly influenced plantar pressure and asymmetry in middle-aged men with diabetes, with distinct regional effects. These findings highlight that individualized gait assessment and customized footwear are required to redistribute pressure and manage asymmetry based on PWS and BMI, which are crucial for DFU risk alleviation.

**Keyword:** gait analysis(보행 분석), plantar pressure(족저압), asymmetry(비대칭성), preferred walking speed(선호보행속도), body mass index(체질량지수)

## 1. 서 론

보행 시 족저압 분포와 좌우 비대칭성은 신체의 균형 유지, 에너지 효율성 확보, 그리고 근골격계 질환 예방에 중요한 역할을 한다(Pol et al., 2021). 족저압의 이상 분포나 비대칭성은 낙상 위험 증가, 하지 부상, 만성적인 보행 기능 저하로 이어질 수 있으며, 특히 당뇨병 환자 등 고위험군에서는 당뇨병성 족부 궤양(diabetic foot ulcer, DFU)을 초래하기 때문이다.(Menz et al., 2003). DFU는 당뇨병 환자에게 발생하는 주요 만성 합병증 중 하나로, 적절한 조기 대응이 이루어지지 않

면 감염, 조직 괴사, 하지 절단 등 심각한 결과로 이어질 수 있다(Boulton et al., 2005; Zhang et al., 2017). 발바닥의 국소 부위에 반복적으로 높은 족저압이 가해지면 DFU 발생 확률이 높아지는데, 특히 당뇨병성 말초신경병증으로 인해 압력 자극을 제때 감지하지 못하는 상태에서 보행이 지속되면 조직 손상이 누적되어 궤양으로 발전할 위험이 높다(Murray et al., 1996). DFU는 치료가 어렵고 재발률이 매우 높으며, 환자에게 심리적 부담과 함께 의료비 지출 증가 및 삶의 질 저하를 초래하는 대표적인 고위험 합병증으로 보고되고 있다(Armstrong et al., 2017). 따라서 DFU가 발생하지 않도록 예방하는 노력이 중요하며, 발병 초기부터 증상이 악화되지 않도록 세심한 관리가 요구된다. 이에 족저압 특성과 보행의 정량적 분석은 임상적, 재활적 측면에서는 물론, DFU 예방 기능성 풋웨어(functional footwear for diabetic foot ulcer prevention, FF-DUP) 설계 관점에서도 중요한 연구 주제가 되어왔다.

DFU 예방의 핵심은 보행 중 발바닥에 가해지는 최대 압력을 완화하고, 국소 부위에 최대 압력이 집중되지 않도록 족저

†Corresponding author: Hee Eun Choi

Tel. +82-2-880-6871

E-mail: heeun.choi@snu.ac.kr

©2025 The Korean Fashion and Textile Research Journal(KFTRJ). This is an open access journal. Articles are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

면 전반에 압력을 균등하게 분산하는 것이다(Cavanagh & Bus, 2011). 보행은 매우 개인화된 움직임이며, 개인의 보행속도(walking speed), 보폭(stride length), 케이던스(cadence) 등과 같은 파라미터는 키와 체중을 포함하는 개인의 신체 조건과 체력, 보행 습관, 하체 근력 및 균형 능력에 따라 달라지고 족저압 분포에도 직접적인 영향을 미친다(Fusca et al., 2018; Lai et al., 2008; Mickle et al., 2006). 이 중에서 보행속도와 체질량지수(body mass index, BMI)는 족저압 분포에 직접적인 영향을 미치는 주요 변수로 보고된다.

보행속도는 족저압과의 관계에서 가장 직관적이고 핵심적인 변수 중 하나다. 보행속도가 증가하면 일반적으로 전족부에 압력이 집중되는 경향이 있고, 속도가 느릴수록 보행 불안정성이 증가하며 후족부 중심으로 하중 분포가 나타날 수 있다(Browning & Kram, 2007; Chung & Wang, 2010). 특히 개인의 선호보행속도(preferred walking speed, PWS)는 개인의 체력 및 일상적 보행 습관을 반영하는 지표로서 정량적인 보행 분석에서 유용한 기준이 된다(Rose & Gamble, 2006). PWS는 연구참여자가 자발적으로 자신이 선택한 보행속도를 의미하는 것으로 일상 활동에서 걸을 때 자연스럽게 발현되는 속도이다(Fernández Menéndez et al., 2019). 가장 자연스럽게 안정감 있게 걸을 수 있기 때문에 특정 속도로 걷게 하는 것보다 보행 시 족저압 패턴의 실제 변화를 더 잘 반영한다는 연구 결과도 있다(Roggio et al., 2024). 기존의 기능성 풋웨어 평가를 위한 보행 특성 분석 연구들은 대부분 일정한 보행속도 조건에서 진행되기 때문에, 연구참여자가 개인의 보행 특성 차이가 충분히 반영되지 못하는 경우가 많다(Patry et al., 2013). 특히 중장년층, 고령층, 당뇨병 환자 등 보행 기능이 저하된 건강 취약집단(health vulnerable population)은 이러한 일정한 조건에서 보행 평가를 수행하기 어렵고, 신뢰성 있는 데이터를 확보하기도 제한적이다(Chesnin et al., 2000). 따라서 실제 사용자의 보행 특성을 반영할 수 있는 실험 설계가 필요하다.

BMI는 발에 가해지는 하중에 직접적인 영향을 미치는 요인으로 꼽히며 BMI가 높으면 체중에 비해 보행 시 지면에 접촉하는 발 면적이 상대적으로 작아져 족저면 특정 부위에 압력이 집중되고, 이로 인해 족저압의 절대 크기 및 비대칭성이 증가할 수 있다(Browning & Kram, 2007). BMI 증가는 당뇨병 환자의 발바닥 특정 부위에 가해지는 최고 압력(peak plantar pressure)을 상승시킨다(Sutkowska et al., 2019). 특히 체중 부하가 집중되는 중족골두(metatarsal heads)와 발뒤꿈치 부위의 압력 증가는 DFU 발생의 주요 위험 요인으로 작용한다(Fernando et al., 2016). 과체중 또는 비만인 당뇨병 환자는 정상 체중 환자에 비해 보행 중 발바닥에 가해지는 힘과 압력-시간 적분(pressure-time integral) 값이 더 높게 나타나며, 이는 곧 조직 손상의 위험 증가를 의미한다(Hills et al., 2002). 따라서 DFU 위험군에서 BMI 증가는 족저압 분포에 영향을 줄 수 있으므로 비정상적인 족저압 분포를 조기에 발견하고 DFU 발생 위험을 예측하는 데 있어 BMI 변화에 따른 보행 시 족

저압의 특성을 파악하는 것이 중요하다(Chuter et al., 2021; Fernando et al., 2016). 또한 DFU 발생 가능성이 높은 사용자를 대상으로 BMI와 족저압의 상관관계를 분석하는 것은 잠재적인 궤양 발생 부위를 예측하고, 맞춤형 신발이나 인솔(insole) 처방과 같은 예방적 중재의 효과를 극대화하는 데 필수적인 정보를 제공할 수 있다(Sutkowska et al., 2019).

PWS나 보행 특성을 기반으로 기능성 풋웨어를 평가한 연구는 극히 제한적이며, 특히 FF-DUP 설계 및 성능 검증에 이를 반영한 사례는 드물다. 대부분의 연구는 인솔 적용 전후의 압력 감소 효과에만 초점을 맞추거나, 풋웨어 자체의 소재·구조적 특성에 대한 비교 연구에 집중되어 있어 사용자 중심의 평가 체계가 뒷받침되지 않고 있다. 더욱이 좌우 족저압의 비대칭성(asymmetry), 보행 중 부위별 최대 압력 분포의 차이, 보폭 변화 등은 FF-DUP의 실제 성능을 평가하고 사용자 위험도를 판별하는 데 유의미한 정보임에도 불구하고 여전히 분석 대상으로 충분히 다루지지 않고 있다(Han et al., 2019; Pol et al., 2021; Redmond et al., 2009). 따라서 개인별 PWS와 족저압 분포의 연관성을 다각도로 분석하는 연구가 요구된다.

이에 본 연구는 당뇨병 병력을 지닌 성인 남성을 대상으로, 선호보행속도(PWS) 조건에서 보행속도와 BMI에 따른 족저압 분포 특성을 분석하고자 하였다. 참여자의 신체 조건 및 보행 특성에 따라 DFU 발생률이 높은 부위에 족저압 분포가 변화하는 양상을 파악하여 향후 FF-DUP 및 관련 제품의 맞춤형 설계 및 평가 기준 수립에 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구참여자

본 연구에는 당뇨병 진단 병력이 있는 50-69세 성인 남성 15명이 연구참여자로서 참여하였으며, 참여자는 심한 편평족, 무지외반 등의 족부 변형 또는 족부 궤양 이력이 없는 자로 제한하였다. 연구참여자의 평균 연령은  $57.7 \pm 5.8$ 세, BMI 평균은  $25.34 \pm 3.03 \text{ kg/m}^2$ , PWS 평균은  $1.87 \pm 0.75 \text{ km/h}$ 였다. BMI 기준에 따라 정상(normal group =  $18.5\text{-}22.9 \text{ kg/m}^2$ , n=5), 비만 전 단계(pre-obesity group =  $23.0\text{-}24.9 \text{ kg/m}^2$ , n=4), 비만(obesity group =  $\geq 25.0 \text{ kg/m}^2$ , n=6)으로 분류하였다. PWS에 따라 저속 그룹(slow group =  $\leq 1.5 \text{ km/h}$ , n=6), 중속 그룹(media group =  $1.6\text{-}2.4 \text{ km/h}$ , n=6), 고속 그룹(fast group =  $\geq 2.8 \text{ km/h}$ , n=3)으로 구분하였다(Table 1).

모든 참여자는 연구 목적과 절차에 대해 충분히 설명을 들은 후 자발적으로 동의서를 작성하였으며, 본 연구는 서울특별시보라매병원 의학연구윤리심의위원회(BRMIRB)의 승인을 받은 후 수행되었다(No. 30-2023-12).

### 2.2. 실험 절차

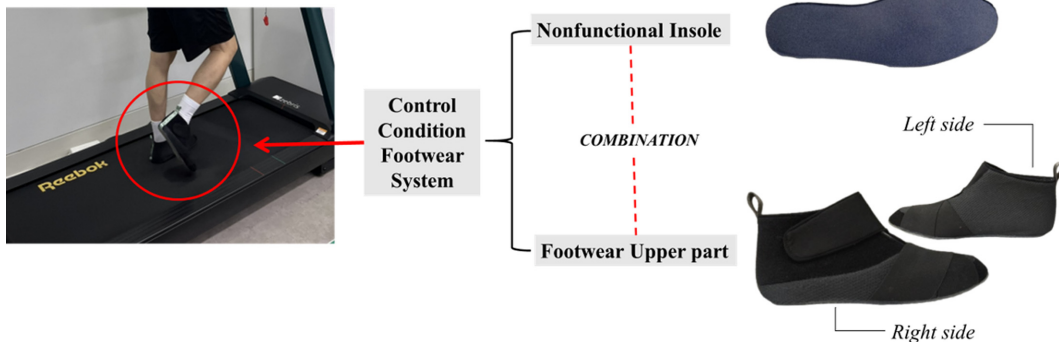
실험은 압력센서가 내장된 트레드밀(FDM-TR70; zebris Medical GmbH, Isny im Allgäu, Germany)에서 진행되었으며,

**Table 1.** PWS and BMI of participants

Participant No.	PWS(km/h)	PWS group	BMI(kg/m <sup>2</sup> )	BMI group
P01	1.8	Medium	27.58	Obesity
P02	2.0	Medium	26.06	Obesity
P03	1.3	Slow	24.71	Pre-obesity
P04	2.4	Medium	22.24	Normal
P05	2.8	Fast	31.99	Obesity
P06	1.2	Slow	27.91	Obesity
P07	1.7	Medium	29.84	Obesity
P08	3.1	Fast	24.82	Pre-obesity
P09	0.9	Slow	22.47	Normal
P10	1.5	Slow	21.32	Normal
P11	0.9	Slow	22.70	Normal
P12	2.4	Medium	26.49	Obesity
P13	1.8	Medium	24.77	Pre-obesity
P14	1.1	Slow	22.38	Normal
P15	3.1	Fast	24.88	Pre-obesity
Mean ± SD	1.87 ± 0.75		25.34 ± 3.03	

PWS group classification criteria: Slow(≤1.5 km/h) , Medium(1.6–2.4 km/h), Fast(≥2.8km/h), BMI group classification criteria: Normal (18.5–22.9 kg/m<sup>2</sup>), Pre-obesity(23.0–24.9 kg/m<sup>2</sup>), Obesity(≥25 kg/m<sup>2</sup>)

연구참여자는 기능성 요소가 배제된 Control 조건의 풋웨어를 착용하고 트레드밀 위에서 2분간 자유롭게 보행하여 자신의 PWS를 결정하였다(Fig. 1). PWS 결정을 위한 자유 보행은 임상 및 연구 환경에서 성인의 보행 지구력과 기능적 상태를 평가하는 방법으로 사용되는 2분 걷기 검사(2 minute walk test, 2MWT)를 참고하여 수행하였다(Bohannon et al., 2015). 본격적인 족저압 데이터 수집을 위한 보행 실험은 전체 보행 구간 중 노이즈로 인한 데이터 손실의 가능성을 고려하여 자신의 PWS로 3분간 걷게 하였고, 이를 3회 반복 수행하여 수집된 족부 전체(total foot)와 각 영역별(전족부, 중족부, 후족부) 좌우의 평균 및 최대 족저압 데이터를 분석에 활용하였다.



**Fig. 1.** Control condition(nonfunctional) footwear system applied to the experiment.

### 2.3. 평가 지표

#### 2.3.1. 족저압(plantar pressure)

보행 중 수집된 압력 데이터는 전족부, 중족부, 후족부의 세 영역을 기준으로 좌·우 평균 족저압(Average Plantar Pressure, APP) 및 최대 족저압(Maximum Plantar Pressure, MPP)을 산출하였다. APP는 가장 안정적으로 보행한 3분 구간 중 50 strides (100 steps)를 추출하고, 입각기(Stance Phase: heel strike → midstance → toe-off) 구간에서 발생한 최대 압력 평균값을 산출하여 분석에 활용하였다. 이는 3회 보행 시 얻은 모든 최대 압력의 전체를 평균 낸 값으로, 전반적인 족저압 분포 경향을 확인할 수 있는 지표로 활용할 수 있다. 본 연구에서의 평균 족저압은 발바닥과 지면 접촉 부위에 위치한 모든 압력 센서에서 수집된 각각의 평균값들을 대상으로 평균을 낸 값을 지칭한다.

MPP는 입각기 구간에서 기록된 압력 중 가장 높은 값을 보인 단일 프레임의 absolute maximum pressure를 활용하였다. 이는 국소 부위의 족저압 집중이 발생한 순간의 값으로, 족부 손상 위험 부위 평가에 유용한 지표이다. 본 연구에서는 발 전체 영역과 함께 전족부, 중족부, 후족부의 3개 구간에서 가장 높은 족저압 수치를 각각 추출하여 분석에 사용하였다.

#### 2.3.2. 족저압 비대칭성(pressure asymmetry)

보행 시 족저압의 좌우 비대칭성을 평가하기 위해 두 가지 지표를 사용하였다. 첫째, 비대칭성 지수(asymmetry index, AI)는 상대적인 좌우 불균형 수준을 정량화하기 위해 양측 최대 족저압의 차이를 큰 값으로 정규화하여 산출했다(Eq. 1). 족저압의 비대칭성 지수가 5% 이하는 정상 범위, 5-10%는 경미한 비대칭, 10% 이상은 주의가 필요한 수준으로 정의하였다(Herzog et al., 1989; Sadeghi et al., 1997). 둘째, 족저압 차이(plantar pressure difference, PPD)는 좌·우 동일 부위 간 최대 압력의 절대 차이(L-R)를 산출하여(Eq. 2), 비대칭성을 직관적으로 파악하기 위해 활용하였다.

$$\text{Asymmetry index, AI(\%)} = \left| \frac{L - R}{\max(L, R)} \right| \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Plantar pressure difference, PPD(N/cm}^2\text{)} = |L-R| \quad (2)$$

### 2.4. 데이터 분석

데이터 분석은 SPSS Statistics 29.0(IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 사용하여 기술통계와 Spearman 순위상관분석을 진행하였다. PWS 및 BMI 그룹 간 족저압 비대칭성 차이는 Kruskal-Wallis 검정으로 비교하였으며, 시각화는 box-and-whisker plot 및 heatmap을 통해 자료 간 경향성과 연관성을 제시하였다. 또한, 족저압에 영향을 줄 수 있는 생리적 요인을 고려하기 위해 연구참여자의 신장, 체중, 발너비, 뒤꿈치너비, 발등높이, 발목둘레 등의 인체계측치를 함께 수집하였으나, 표본 규모의 제약으로 본 분석에서는 결과 해석의 보조 지표로만 활용하였다.

## 3. 연구결과

### 3.1. 족저압 분포 특성

연구참여자 15명의 평균 족저압(APP)은 좌측 3.44-6.24N/cm<sup>2</sup>, 우측 3.58-6.06 N/cm<sup>2</sup> 범위로 나타났으며, 각 연구참여자별 APP의 좌우 차이가 확인되었다(Table 2). 그러나 일부 참여자는 좌우 족저압의 평균값과 분산값에서 개인차가 존재하여, 당뇨병 병력이 있는 중년 남성 집단 내에서도 압력 분포의 개별적 차이를 확인할 수 있었다.

좌우 족저압 비대칭 정도를 나타내는 비대칭성 지수(AI)는 평균 4.1% 수준이었으며, P09(9.87%), P07(9.44%)에서 10%에 근접하는 높은 비대칭성이 나타났다. 반면 P11(0.04%), P02(0.27%) 등은 거의 대칭 상태를 유지하였다. 이는 보행 시 족저압의 좌우 균형이 참여자에 따라 크게 다르며, 개인별 체형 및 보행 습관 등의 생리적 요인에 기인할 수 있다는 것을 보여준다. 다만 본 연구에서는 표본수가 작아 통계적 일반화에는 제한이 있으며, 해당 지표는 후속연구의 탐색적 기준으로 해석할 필요가 있다.

최대 족저압(MPP)은 전체 족부에서 좌측 36.11 ± 9.85N/cm<sup>2</sup>, 우측 33.34 ± 8.24 N/cm<sup>2</sup>로 측정되었으며, 해부학적 구역 후족부에서 가장 높은 압력이 나타났다(Table 3). 영역별 최대 족저압 분석 결과, 전족부에서는 좌측 25.41 ± 5.27N/cm<sup>2</sup>, 우측 24.83 ± 5.01 N/cm<sup>2</sup>였으며, 중족부에서는 좌측 22.24 ± 6.01 N/cm<sup>2</sup>, 우측 23.01 ± 5.89 N/cm<sup>2</sup>였다. 후족부의 MPP는 좌측 33.87 ± 9.08 N/cm<sup>2</sup>, 우측 32.26 ± 8.50 N/cm<sup>2</sup>로 전족부 및 중족부에 비해 상대적으로 높은 압력 집중을 보였다. 이는 보행 주기 중 initial contact 시점에서의 뒤꿈치와 지면 사이의 접촉으로 인한 충격이 후족부에 집중되는 생체역학적 특성과 일치하는 결과를 보였다.

### 3.2. 족저압 간 상관관계

#### 3.2.1. 발 전체 부위 족저압과 PWS, BMI의 관계

평균 족저압(APP)과 최대 족저압(MPP)에 대한 Spearman 비모수 상관분석 결과, 좌우 발 전체에서 매우 강한 양의 상관

**Table 2.** Average plantar pressure and asymmetry index by participant

Participants No.	Average plantar pressure(N/cm <sup>2</sup> )		AI(%)
	Left	Right	
	Mean±SD	Mean±SD	
P01	5.18 ± 6.60	4.75 ± 6.38	8.43
P02	5.09 ± 5.22	5.07 ± 4.98	0.27
P03	4.02 ± 4.47	3.98 ± 5.09	0.92
P04	4.93 ± 6.42	5.01 ± 6.63	1.59
P05	6.24 ± 7.20	6.06 ± 7.15	2.90
P06	3.80 ± 3.99	4.01 ± 4.51	5.41
P07	3.44 ± 4.08	3.80 ± 4.42	9.44
P08	6.11 ± 7.22	5.95 ± 7.00	2.67
P09	4.36 ± 4.46	3.93 ± 4.13	9.87
P10	4.44 ± 4.59	4.22 ± 4.43	4.87
P11	3.96 ± 4.15	3.96 ± 4.40	0.04
P12	4.26 ± 4.30	4.06 ± 4.32	4.71
P13	4.06 ± 4.97	4.24 ± 4.57	4.21
P14	3.54 ± 3.72	3.58 ± 3.62	0.95
P15	4.97 ± 5.96	4.84 ± 5.68	2.60

관계가 확인되었다(Table 4). 특히 좌측과 우측 평균 족저압 (APP\_L - APP\_R) 사이에  $\rho = .893(p < .001)$ 의 강한 정적 상관 관계를 보였으며, 이는 보행 시 좌우 발 사이의 하중 분포가 대체로 동기화되어 있으며 대칭성이 높다는 점을 시사한다. 좌우 최대 족저압(MPP(TF)\_L - MPP(TF)\_R) 간 상관계수도  $\rho = .804(p < .001)$ 로 유의하게 나타났으며, 이 역시 보행 시 양측 발이 유사한 압력 패턴을 나타내는 경향을 반영한다.

한편, APP와 MPP 간의 상관성도 확인되었다. 좌측 평균 족저압(APP\_L)과 최대 족저압(MPP(TF)\_L) 간에  $\rho = .743(p < .01)$ , 우측 평균 족저압(APP\_R)과 최대 족저압(MPP(TF)\_R) 간에  $\rho = .550(p < .05)$  수준의 정적 상관관계가 나타났다. 이 같은 결과는 평균적으로 보행 시 전체 족저 부하가 증가하면 최대 압력 역시 함께 증가하는 경향이 있음을 의미하며, 그 상관 강도는 좌측이 우측보다 더 높게 나타났다. 이러한 차이는 연구참여자 개개인의 보행 습관, 체중 분산 방식, 근력 또는 균형 감

**Table 3.** Maximum plantar pressure by region and foot side (N=15)

Foot region	Maximum plantar pressure(N/cm <sup>2</sup> )			
	Min.	Max.	AVG	SD
Total foot_left	24.02	55.78	36.11	9.85
Total foot_right	24.06	46.41	33.34	8.24
Forefoot_left	18.48	35.52	25.41	5.27
Forefoot_right	17.94	32.63	24.83	5.01
Midfoot_left	12.93	38.21	22.24	6.01
Midfoot_right	14.36	36.57	23.01	5.89
Rearfoot_left	21.47	50.38	33.87	9.08
Rearfoot_right	23.13	46.17	32.26	8.50

각 등의 생리적 요인에 의해 영향을 받을 수 있으며 우측 족저압의 상대적 불안정성 가능성도 배제할 수 없다.

특히 PWS와 APP 간의 상관관계는 주목할 만하다. PWS와 우측 평균 족저압(APP\_R)간의 상관계수는  $\rho = .832$  ( $p < .001$ )로 매우 강한 수준을 보였으며, 좌측(APP\_L)과도  $\rho = .704$  ( $p < .01$ )의 강한 정적 상관관계를 나타냈다. 이는 보행속도가 증가함에 따라 지면 반력도 증가한다는 사실을 반영한다. 또한 우측 발에서 더 높은 상관 강도가 나타났다는 점은 보행 시 체중 이동의 우측 편향 가능성이나, 개인의 보행 특성에 따른 발의 우세성(limb dominance) 영향이 있을 수 있음을 시사한다.

### 3.2.2. 발바닥 부위별 족저압과 PWS, BMI의 관계

족저압의 부위별 최대 압력 간 상관관계 분석 결과(Table 5), 좌우 동일 부위 간에는 전반적으로 높은 수준의 정적 상관성이 관찰되었다. 전족부 최대 압력 간의 상관계수는  $\rho = .746$  ( $p < .01$ ), 중족부는  $\rho = .761$  ( $p < .001$ ), 후족부는  $\rho = .811$  ( $p < .001$ )로 나타나, 보행 시 좌우 발의 동일 부위 간에 유사한 족저 부하 패턴이 형성되는 경향을 시사한다. 이는 참가자 개개인의 보행 리듬과 체중 분산 전략이 일관된 좌우 대응 관계를 유지하고 있다는 해석이 가능하다. 특히 후족부에서 가장 높은 상관계수가 나타났다는 점은, 보행 초기 접촉 시 발생하는 하중이 좌우 발 뒤꿈치에 고르게 전달되고 있음을 보여준다.

또한, 한쪽 발 내의 영역 간 상관관계 분석에서도 통합적인 압력 전달 패턴이 확인되었다. 특히 우측 발에서는 전족부와 중족부 간 MPP 상관계수가  $\rho = .621$  ( $p < .05$ ), 중족부와 후족부는  $\rho = .589$  ( $p < .05$ ), 전족부와 후족부는  $\rho = .829$  ( $p < .01$ )로 유의한 정적 상관성이 나타났다. 발의 세 영역(전-중-후족부) 간 최대 압력이 동반 증가 혹은 감소 경향을 확인하였으며, 이를 통해 하나의 발 내부에서 압력값이 일관되게 조절되고 있음을 있음을 보여준다.

PWS와 부위별 족저압 간의 상관관계 분석에서는 전족부 부위에서 통계적으로 유의한 양의 상관성이 확인되었다. 특히 좌측 전족부의 최대 족저압(MPP(FF)\_L)은 PWS와  $\rho = .661$  ( $p < .01$ )의 정적 상관관계를 나타냈으며, 중족부 및 후족부에서도 유사한 양의 상관 경향이 관찰되었다(Table 5). 이 결과는 보행속도가 빨라질수록 전족부에 전달되는 하중이 증가할 수

있음을 보여준다. 전족부는 보행 주기 후기에 추진력 생성을 담당하는 주요 부위로, 보행속도의 증가가 해당 부위에 더 많은 지면반력을 발생시키는 것으로 해석할 수 있다. 특히 빠른 보행 시 발끝에서의 추진 동작이 강조되므로, 이 과정에서 전족부의 최대 압력이 상승하는 생체역학적 특성이 반영된 것으로 판단된다.

반면, BMI와 부위별 족저압 간의 상관관계는 전반적으로 약한 수준으로 나타났다. 일부 발 부위에서는 낮은 수준의 정적 상관관계가 관찰되었으나, 대부분 통계적으로 유의하지 않았다. 이는 BMI가 특정 족저 부위의 최대 압력에 국소적인 영향을 주기보다는, 보행 시의 전체 압력 분포 패턴이나 좌우 대칭성 등의 변수에 간접적으로 작용할 가능성을 시사한다. 특히 발 부위별로 하중의 분포 방식이 체중 외에도 보행 습관, 발의 해부학적 구조, 근력 등 다양한 생리적 요인에 영향을 받는다는 점을 고려할 때, BMI는 족저압의 절대값보다는 부하의 분산 특성이나 보행 안정성에 더 복합적으로 작용할 수 있다.

이러한 결과는 보행속도가 족저압의 크기와 분포에 영향을 미치는 주요 변수 중 하나일 수 있음을 제안하는 동시에, BMI와 족저압 간의 관계는 보다 다변량적 접근을 통해 해석할 필요가 있음을 보여준다. 따라서 다양한 체형과 보행 특성을 가진 집단을 포함하여 이들 변수 간의 관계를 보다 정밀하게 규명할 필요가 있다.

### 3.3. PWS 및 BMI와 족저압 비대칭성

PWS, BMI, 그리고 PPD(족저압 차이)를 기반으로 산출된 족저압 비대칭성(pressure asymmetry, PA) 지표들 간의 관계를 분석한 결과(Fig. 2), PWS는 중족부 영역의 최대 족저압 비대칭성(PA\_MPP(MF))과 유의한 정적 상관관계( $\rho = .679$ ,  $p < .01$ )를 나타냈다. 이는 보행속도가 증가할수록 중족부 좌우 간 압력 분포의 불균형이 확대될 수 있음을 의미한다. 전족부 및 후족부의 비대칭성과 PWS 간에는 통계적으로 유의한 연관성이 확인되지 않았으나, 중족부가 보행속도 변화에 상대적으로 더 민감하게 반응하는 부위일 가능성을 시사한다. 중족부는 보행 시 체중이 앞쪽으로 이동하며 하중이 통과하는 경로로 기능하므로, 속도 증가에 따른 불균형 확대가 발생할 수 있다. 반면, BMI는 대부분의 족저압 비대칭성과 낮은 상관관계를 보였다. 일부 항목

**Table 4.** Spearman correlation matrix among plantar pressure variables, preferred walking speed, and body mass index

	PWS	BMI	APP_L	APP_R	MPP(TF)_L	MPP(TF)_R
PWS	1	.362	.704**	.832***	.493	.360
BMI		1	.146	.246	.036	.107
APP_L			1	.893***	.743**	.564*
APP_R				1	.650**	.550*
MPP(TF)_L					1	.804***
MPP(TF)_R						1

\* <.05, \*\* <.01, \*\*\* <.001

Abbreviation PWS: preferred walking speed, BMI: body mass index, APP\_L: average plantar pressure – left, APP\_R: average plantar pressure – right, MPP(TF)\_L: maximum plantar pressure in total foot – left, MPP(TF)\_R: maximum plantar pressure in total foot – right

**Table 5.** Correlations among MPP by foot region, PWS, and BMI

	PWS	BMI	MPP(FF)_L	MPP(FF)_R	MPP(MF)_L	MPP(MF)_R	MPP(RF)_L	MPP(RF)_R
PWS	1	.362	.661**	.301	.280	.364	.450	.371
BMI		1	.207	.011	.050	.089	.018	.139
MPP(FF)_L			1	.746**	.432	.514*	.554*	.564*
MPP(FF)_R				1	.425	.621*	.646**	.829***
MPP(MF)_L					1	.761***	.818***	.589*
MPP(MF)_R						1	.871***	.796***
MPP(RF)_L							1	.811***
MPP(RF)_R								1

\* <.05, \*\* <.01, \*\*\* <.001

Abbreviation MPP(MF)\_L : maximum plantar pressure in midfoot – left, MPP(MF)\_R: maximum plantar pressure in midfoot – right, MPP(RF)\_L: maximum plantar pressure in rearfoot – left, MPP(RF)\_R: maximum plantar pressure in rearfoot – right, PA\_APP: pressure asymmetry of average plantar pressure, PA\_MPP(TF): pressure asymmetry of maximum plantar pressure in total foot, PA\_MPP(FF): pressure asymmetry of maximum plantar pressure in forefoot, PA\_MPP(MF): pressure asymmetry of maximum plantar pressure in midfoot, PA\_MPP(RF): pressure asymmetry of maximum plantar pressure in rearfoot

(PA\_APP, PA\_MPP(TF))에서는 약한 정적 상관 경향이 관찰되었으나 통계적으로 유의하지는 않았다( $p > .05$ ). 이는 BMI가 족저압의 절대 크기에는 어느 정도 영향을 미칠 수 있으나, 좌우 간 하중 분포의 불균형, 즉 비대칭성에는 직접적인 영향을 미치지 않을 수 있다고 해석된다. 이러한 결과는 족저압의 비대칭성이 단일 생리적 요인보다는 보행 패턴, 근골격계 정렬, 근력 불균형 등 복합적인 요인의 영향을 받을 수 있음을 의미한다.

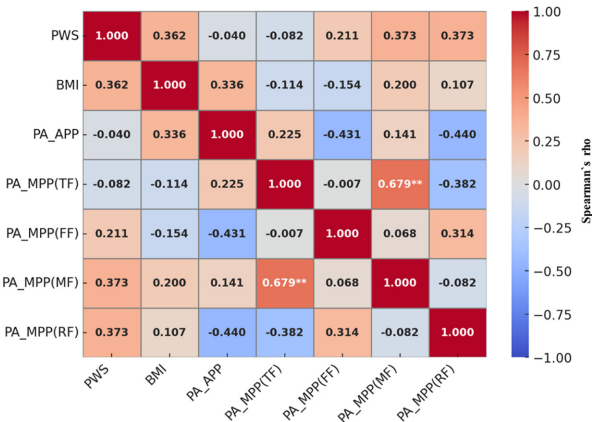
또한, 족저압 비대칭성 지표들 간 상호 연관성을 살펴보면, 중간 수준의 정적 상관관계가 일부 항목에서 확인되었다. 특히 PA\_MPP(TF)와 PA\_MPP(FF), PA\_MPP(MF) 간에는 유의한 상관성이 나타났으며, 이는 특정 부위에서의 비대칭성이 인접 부위의 균형에도 영향을 미칠 수 있는 상호작용적 구조임을 시사한다. 즉, 한 부위에서 발생한 압력 불균형이 보행 주기 전체에 영향을 미쳐 다른 부위의 압력 대칭성에도 파급 효과를 미칠 가능성이 있다.

### 3.4. PWS 그룹별 족저압 비대칭성

PWS를 기준으로 세 그룹(slow, medium, fast)으로 구분한 뒤, 족저압 비대칭성 지표 간의 차이를 비교하였다(Fig. 3). 분석 결과, 전반적으로 빠르게 보행하는 그룹일수록 족저압 비대칭성이 감소하는 경향이 관찰되었다. 평균 족저압의 비대칭성 (pressure asymmetry of average plantar pressure, PA\_APP)을 살펴보면, 저속 그룹(slow group)에서 중앙값과 범위가 모두 가장 넓게 나타났으며, 중속 그룹(medium group)은 분산이 상대적으로 컸고, 고속 그룹(fast group)에서는 가장 낮은 중앙값과 좁은 분포를 나타냈다(Fig. 3의 1-(A)). 이러한 결과는 빠른 보행을 수행하는 집단에서 좌우 평균 족저압이 좌우 균형적으로 분포할 가능성이 높아질 수 있음을 보여준다.

최대 족저압 비대칭성(PA\_MPP)은 발바닥 전체(total foot, TF) 및 전족부(forefoot, FF), 중족부(midfoot, MF), 후족부(rearfoot, RF)로 나누어 분석하였다. 고속 보행 그룹에서는 전체 발과 중족부의 최대 족저압 비대칭성이 상대적으로 낮은 수준으로 나타났으며, 이는 평균 족저압 결과와 유사한 경향을 보였다. 다만, 이는 빠른 보행이 전체 족저압의 대칭성에 영향을 미칠 수 있다고 해석될 수 있으나, 표본 수가 제한적이므로 일반화에는 신중한 접근이 필요하다.

발 부위별로 살펴보면, 모든 그룹에서 전족부의 최대 족저압 비대칭성 중앙값이 가장 낮게 나타났으며, 이는 해당 부위가 비교적 좌우 압력 분포의 균형을 유지하는 경향이 있음을 시사한다. 반면, 후족부에서는 모든 그룹에서 비대칭성 분포가 가장 넓었으며, 특히 고속 그룹에서 그 범위가 가장 크고 중앙값 또한 높게 나타났다. 이는 빠른 보행 시 초기 착지(heel strike) 단계에서 발생하는 충격이 좌우 간에 비대칭적으로 작용할 가능성이 있으며, 연구참여자 개인별 보행 습관이나 착지 시 발의 정렬 상태가 비대칭성에 영향을 줄 수 있다고 생각된다. 즉, 보행속도가 족저압의 좌우 분포에 영향을 미칠 수 있으며, 특



**Fig. 2.** Heatmap of correlations between PWS, BMI, and plantar pressure asymmetry. (\*\*<.01)

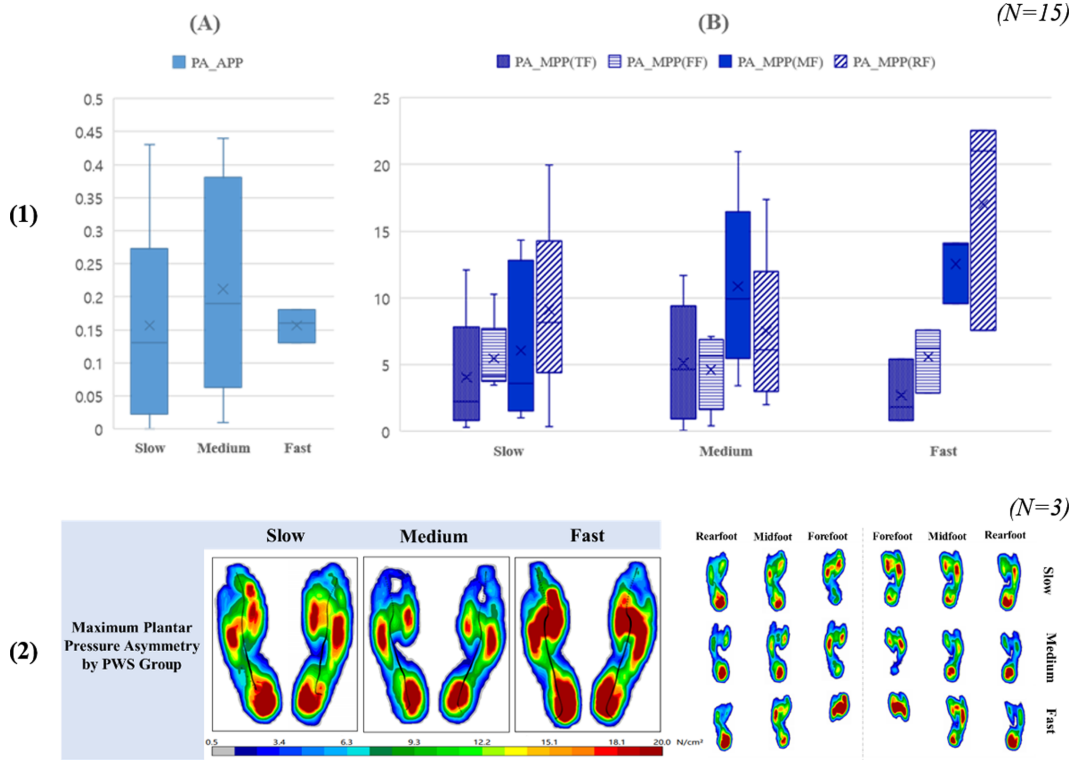


Fig. 3. Comparison of plantar pressure asymmetry by PWS groups.

히 지속 보행자는 압력 분산의 좌우 균형을 유지하는 데 더 큰 어려움을 겪을 가능성이 있음을 보여준다.

### 3.5. BMI 그룹별 족저압 비대칭성

BMI에 따라 세 그룹(normal, pre-obesity, obesity)으로 분류한 후 족저압 비대칭성을 비교한 결과, 전반적으로 BMI가 증가할수록 평균 및 최대 족저압의 비대칭성이 확대되는 경향이 관찰되었다(Fig. 4). 평균 족저압의 비대칭성(PA\_APP)의 중앙값은 obesity 그룹에서 가장 높았으며, normal 그룹과 및 obesity 그룹이 넓은 분포를 나타냈다(Fig. 4의 1-(A)). 이는 선행연구(Shen et al., 2024)와 같이 BMI 상승과 함께 좌우 평균 족저압 간 불균형이 증가할 가능성이 존재하지만, 본 연구는 탐색적 실험 연구로서 신중한 해석을 위해 더 많은 표본집단을 대상으로 한 후속연구의 필요성을 확인하였다.

BMI 그룹간 최대 족저압 비대칭성(PA\_MPP)은 발바닥 전체 및 세 영역으로 세분화하여 분석하였다. 발바닥 전체(PA\_MPP(TF)), 전족부(PA\_MPP(FF)), 중족부(PA\_MPP(MF)), 후족부(PA\_MPP(RF)) 등 모든 영역에서 pre-obesity 그룹이 가장 높은 중앙값을 나타냈다. 이러한 결과는 BMI 증가가 초기 단계에서 족저압 비대칭성에 보다 민감하게 영향을 줄 수 있으나, Obesity 그룹보다 더 높은 값이 관찰된 점을 고려하면, 단순히 BMI의 선형 효과만으로는 설명하기 어렵다. 특히 후족부에 집중되는 하중의 좌우 불균형이 BMI 상태에 따라 두드러질 수 있음을 주목할 필요가 있다. BMI 그룹 간의 표본 수가 균등하

지 않았고, pre-obesity 그룹 참여자 수가 제한적이므로 일반화에 제약이 따른다. 그럼에도 결과는 체중 증가가 족저압의 절대 크기 뿐만 아니라 분포의 균형에도 영향을 미칠 수 있다는 가능성을 제시한다. 특히 중족부와 후족부 부위에서 그 영향이 상대적으로 두드러지는 것으로 나타났으며, 이는 비만 또는 과체중인 보행자의 족저압 불균형을 완화하기 위한 개입 가능성을 뒷받침한다고 볼 수 있다.

한편, pre-obesity 그룹에서 관찰된 높은 비대칭성은 체형 변화의 이행기적 특성과 연관되었을 가능성이 있다. 과체중 단계에서 이미 동적 족저압 분포 특성이 달라지고(Khalaf et al., 2022), 족부 정렬(foot posture) 변화가 보행 시 족저압 패턴에 체계적으로 영향을 미칠 수 있어(Buldt et al., 2018) 좌우 부담의 불균형이 일시적으로 증폭될 여지가 있다. 이러한 가능성을 확인하기 위해서는 체성분과 족부 형태(예: 아치 높이, 후족부 정렬 등) 등의 지표를 함께 계량화한 심화 분석이 필요하며, 향후 연구에서는 해당 변수를 측정하여 해석에 반영하는 것이 바람직하다.

## 4. 결 론

본 연구는 당뇨병 진단 병력이 있는 50-69세 남성을 대상으로 PWS와 BMI가 족저압 분포 및 보행 비대칭성에 미치는 영향을 분석하였다. 이로써 DFU 예방을 위한 기능성 풋웨어 설계 시 고려되어야 할 생체역학적 요소들을 탐색적으로 확인하

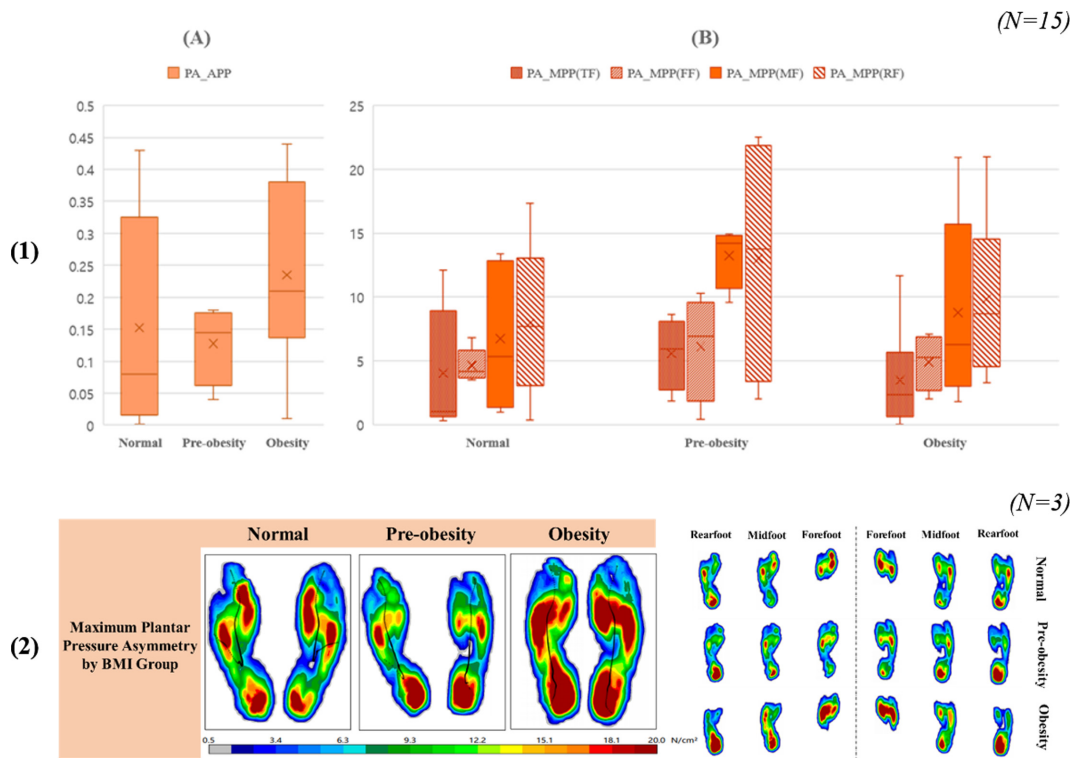


Fig. 4. Comparison of plantar pressure asymmetry by BMI group.

고, 보행 특성 기반의 맞춤형 평가 기준 개발을 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

분석 결과, PWS와 족저압 비대칭성 간에는 족부 부위에 따라 상이한 양상이 나타났다. 전체 평균 족저압 비대칭성의 경우, 보행속도 그룹 간 유의한 차이는 관찰되지 않았으나, 중족부의 최대 족저압 비대칭성은 PWS의 증가에 따라 통계적으로 유의한 증가 경향을 보였다. 특히 고속 보행군에서는 후족부의 최대 족저압 비대칭성이 가장 높게 나타나, 빠른 보행 시 초기 접지 단계에서 좌우 간 압력 분포의 불균형이 심화될 수 있음을 시사한다. 반면, 저속 보행군은 평균 족저압이 전반적으로 높게 나타나, 보행 안정성이 저하될 가능성을 보여준다.

BMI 그룹 간 비교에서는 pre-obesity 그룹에서 전반적으로 가장 높은 족저압 비대칭성을 보였으며, 특히 후족부와 중족부에서 그 경향이 두드러졌다. 이는 체중 증가가 족부 부하의 좌우 균형에 영향을 미칠 수 있으며, 특히 BMI가 상승하는 초기 단계에서 이러한 불균형이 더욱 민감하게 나타날 수 있음을 시사한다. 다만, 본 연구의 pre-obesity 그룹은 소표본 구성으로 해석에 주의가 필요하기 때문에 해당 경향이 통계적 일반성을 확보하기 위해서는 후속 연구가 요구된다.

이상의 결과는 보행 안정성 유지에 있어 후족부의 충격량뿐 아니라, 전·중족부의 좌우 압력 균형 확보가 함께 고려되어야 함을 시사한다. 또한 족저압 비대칭성에 영향을 미치는 요인으로 PWS, BMI 외에도 개인의 보행 패턴, 발의 해부학적 구조,

근력 불균형 등의 요인들이 복합적으로 작용할 수 있음을 염두에 둘 필요가 있다. 따라서 기능성 풋웨어를 개발할 때에는 단순한 압력 분산 기능을 넘어서, 착용자의 보행 특성과 체형에 따라 최적화된 압력 균형 제어 기능이 포함되어야 한다.

본 연구는 당뇨병 고위험군을 위한 맞춤형 풋웨어 설계에 있어 PWS와 BMI를 반영한 평가 기준의 타당성을 탐색한 예비 연구로서 의의를 지닌다. 특히 보행속도가 느린 사용자에게는 압력 분포의 안정성과 비대칭성 제어가 중요하며, 빠른 보행자에게는 후족부 착지 충격의 완화, BMI가 높은 사용자에게는 중족부와 후족부 압력 균형 제어가 보다 강조되어야 할 주요 설계 요인임을 시사한다. 이러한 분석 결과는 향후 족부 질환 예방을 위한 보행 기반 보조기기 및 기능성 풋웨어의 정량적 설계 지침으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 본 연구는 탐색적 목적으로 50-60대 남성 중심의 소규모 대상자를 기반으로 수행되었고, BMI·PWS 그룹의 분포가 균형적이지 않다는 한계를 가진다. 따라서 결과의 해석과 일반화에는 주의가 필요하다. 향후 연구에서는 다양한 인구 집단과 실제 사용 시나리오를 반영한 확장 설계 연구가 요구된다.

또한 ‘당뇨병성 족부 궤양 예방’과 같은 특정 목적을 위한 기능성 풋웨어 설계 변수를 탐색하고, 해당 설계 변수를 근거로 개발된 풋웨어의 활용성을 함께 검증한다면 보다 실효성 높은 족부 건강 관리 전략 수립에 기여할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 융·복합 연구과제 지원사업(350-20220066)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## References

- Armstrong, D. G., Boulton, A. J., & Bus, S. A. (2017). Diabetic foot ulcers and their recurrence. *New England Journal of Medicine*, 376(24), 2367-2375. doi: 10.1056/NEJMra1615439
- Bohannon, R. W., Wang, Y. C., & Gershon, R. C. (2015). Two-minute walk test performance by adults 18 to 85 years: normative values, reliability, and responsiveness. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 96(3), 472-477. doi:10.1016/j.apmr.2014.10.006
- Boulton, A. J., Vileikyte, L., Ragnarson-Tennvall, G., & Apelqvist, J. (2005). The global burden of diabetic foot disease. *The Lancet*, 366(9498), 1719-1724. doi:10.1016/S0140-6736(05)67698-2
- Browning, R. C., & Kram, R. (2007). Effects of obesity on the biomechanics of walking at different speeds. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(9), 1632-1641. doi: 10.1249/mss.0b013e318076b54b
- 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. doi:10.1016/j.gaitpost.2018.03.005
- Cavanagh, P. R., & Bus, S. A. (2011). Off-loading the diabetic foot for ulcer prevention and healing. *Plastic and reconstructive surgery*, 127, 248S-256S. doi: 10.1097/PRS.0b013e3182024864
- Chesnin, K. J., Selby-Silverstein, L., & Besser, M. P. (2000). Comparison of an in-shoe pressure measurement device to a force plate: concurrent validity of center of pressure measurements. *Gait & posture*, 12(2), 128-133. doi:10.1016/S0966-6362(00)00071-0
- Chung, M. J., & Wang, M. J. J. (2010). The change of gait parameters during walking at different percentage of preferred walking speed for healthy adults aged 20-60 years. *Gait & posture*, 31(1), 131-135. doi:10.1016/j.gaitpost.2009.09.013
- Chuter, V. H., Spink, M. J., David, M., Lanting, S., & Searle, A. (2021). Clinical foot measurements as a proxy for plantar pressure testing in people with diabetes. *Journal of foot and ankle research*, 14(1), 56. doi:10.1186/s13047-021-00494-4
- Fernández Menéndez, A., Saubade, M., Hans, D., Millet, G. P., & Malatesta, D. (2019). The determinants of the preferred walking speed in individuals with obesity. *Obesity facts*, 12(5), 543-553. doi:10.1159/000501968
- Fernando, M. E., Crowther, R. G., Lazzarini, P. A., Sangla, K. S., Wearing, S., Buttner, P., & Gollidge, J. (2016). Plantar pressures are higher in cases with diabetic foot ulcers compared to controls despite a longer stance phase duration. *BMC endocrine disorders*, 16(1), 51. doi:10.1186/s12902-016-0131-9
- Fusca, M., Negrini, F., Perego, P., Magoni, L., Molteni, F., & Andreoni, G. (2018). Validation of a wearable IMU system for gait analysis: Protocol and application to a new system. *Applied Sciences*, 8(7), 1167. doi:10.3390/app8071167
- Han, S. H., Kim, C. O., Kim, K. J., Jeon, J., Chang, H., Kim, E. S., & Park, H. (2019). Quantitative analysis of the bilateral coordination and gait asymmetry using inertial measurement unit-based gait analysis. *PLoS One*, 14(10), e0222913. doi:10.1371/journal.pone.0222913
- Herzog, W. A. L. T. E. R., Nigg, B. M., Read, L. J., & Olsson, E. W. A. (1989). Asymmetries in ground reaction force patterns in normal human gait. *Med Sci Sports Exerc*, 21(1), 110-114. doi: 10.1249/00005768-198902000-00020
- Hills, A. P., Hennig, E. M., Byrne, N. M., & Steele, J. R. (2002). The biomechanics of adiposity—structural and functional limitations of obesity and implications for movement. *Obesity Reviews*, 3(1), 35-43. doi:10.1046/j.1467-789X.2002.00054.x
- Khalaf, K., Mohan, D. M., Al Hindi, M., Khandoker, A. H., & Jelinek, H. F. (2022). Plantar pressure alterations associated with increased BMI in young adults. *Gait & Posture*, 98, 255-260. doi:10.1016/j.gaitpost.2022.09.071
- Lai, P. P., Leung, A. K., Li, A. N., & Zhang, M. (2008). Three-dimensional gait analysis of obese adults. *Clinical biomechanics*, 23, S2-S6. doi:10.1016/j.clinbiomech.2008.02.004
- Menz, H. B., Lord, S. R., & Fitzpatrick, R. C. (2003). Age-related differences in walking stability. *Age and ageing*, 32(2), 137-142. doi:10.1093/ageing/32.2.137
- Mickle, K. J., Steele, J. R., & Munro, B. J. (2006). The feet of overweight and obese young children: are they flat or fat?. *Obesity*, 14(11), 1949-1953. doi:10.1038/oby.2006.227
- Murray, H. J., Young, M. J., Hollis, S., & Boulton, A. J. (1996). The association between callus formation, high pressures and neuropathy in diabetic foot ulceration. *Diabetic Medicine*, 13(11), 979-982. doi:10.1002/(SICI)1096-9136(199611)13:11<979::AID-DIA267>3.0.CO;2-A
- Patry, J., Belley, R., Côté, M., & Chateau-Degat, M. L. (2013). Plantar pressures, plantar forces, and their influence on the pathogenesis of diabetic foot ulcers: A review. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 103(4), 322-332. doi:10.7547/1030322
- Pol, F., Baharlouei, H., Taheri, A., Menz, H. B., & Forghany, S. (2021). Foot and ankle biomechanics during walking in older adults: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Gait & posture*, 89, 14-24. doi:10.1016/j.gaitpost.2021.06.018
- Redmond, A. C., Landorf, K. B., & Keenan, A. M. (2009). Contoured, prefabricated foot orthoses demonstrate comparable mechanical properties to contoured, customised foot orthoses: A plantar pressure study. *Journal of Foot and Ankle Research*, 2(1), 20. doi:10.1186/1757-1146-2-20
- Roggio, F., Trovato, B., Sortino, M., Vecchio, M., & Musumeci, G. (2024). Self-selected speed provides more accurate human gait kinematics and spatiotemporal parameters than overground simulated speed on a treadmill: A cross-sectional study. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 16(1), 226. doi: 10.1186/s13102-024-01011-3
- Rose, J., & Gamble, J. G. (2006). *Human walking / edited by Jessica Rose, James G Gamble.* (3<sup>rd</sup> ed.).
- Sadeghi, H., Allard, P., & Duhaime, M. (1997). Functional gait asymmetry in able-bodied subjects. *Human movement science*, 16(2-3), 243-258. doi: 10.1016/S0167-9457(96)00054-1
- Shen, J., Liu, J., Liang, F., Liu, X., & Zhang, M. (2024). Prevalence of flatfoot and analysis of plantar pressure distribution in adolescents based on body mass index: A regional study. *Journal of Orthopaedic*

*Surgery and Research*, 19(1), 864. doi:10.1186/s13018-024-05365-9  
Sutkowska, E., Sutkowski, K., Sokołowski, M., Franek, E., & Dragan Sr, S. (2019). Distribution of the highest plantar pressure regions in patients with diabetes and its association with peripheral neuropathy, gender, age, and BMI: One centre study. *Journal of Diabetes Research*, 2019(1), 7395769. doi: 10.1155/2019/7395769  
Zhang, P., Lu, J., Jing, Y., Tang, S., Zhu, D., & Bi, Y. (2017). Global

epidemiology of diabetic foot ulceration: A systematic review and meta-analysis. *Annals of Medicine*, 49(2), 106-116. doi:10.1080/07853890.2016.1231932

(Received June 11, 2025; 1st July 2, 2025;  
2nd Revised August 1, 2025; 3rd Revised August 22, 2025;  
Accepted August 28, 2025)