JESK J Ergon Soc Korea 2018; 37(5): 551-562
http://dx.doi.org/10.5143/JESK.2018.37.5.551
http://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

The Effects of Prolonged Walking on Foot Morphology, Foot Motion and Ground Reaction Forces in Healthy Middle-aged Females

Sang-Kyoon Park[1], Sihyun Ryu[1], Won-Seob Hwang[1], Jungho Lee[2]

[1]Motion Innovation Center, Korea National Sport University, Seoul, 05541
[2]K2Korea, Seoul, 04796

장시간 보행이 중년여성의 발의 형태와 움직임 및 지면반력에 미치는 영향

박상균[1], 류시현[1], 황원섭[1], 이정호[2]

[1]한국체육대학교 모션이노베이션 센터
[2]케이투코리아(주)

Corresponding Author
Jungho Lee
K2Korea, Seoul, 04796
Mobile : +82-10-7276-7774
Email : leejh77@gmail.com

Received : July 10, 2018
Revised : July 30, 2018
Accepted : September 11, 2018

Copyright@2018 by Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

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 non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Objective: The purpose of this study was to investigate the changes in foot morphology and foot motion using a multi-segment foot model, and ground reaction forces during prolonged walking in healthy middle-aged females.

Background: As people have experienced improved cardiovascular and muscular-skeletal health, the popularity of prolonged walking has increased. However, only a few studies have suggested that prolonged walking may increase the risk of lower extremity joint injuries due to abnormal loading and decreased stability after muscle fatigue.

Method: Forty-two healthy middle-aged females (mean age: 45.4 ± 2.3 years, mean height: 160.7 ± 4.8cm, mean weight: 59.2 ± 6.9kg, mean foot size: 23.3 ± 0.7cm) participated in the study. The participants went through measurements of foot morphology and Q- angle before and after 40 minutes' walking. The participants were asked to walk at a speed of 1.1m/sec for 40 minutes. Foot motion and ground reaction forces were collected at three time intervals (0, 20 and 40 minutes). Changes in variables were compared at an alpha level of .05 using a paired t-test and repeated ANOVA, respectively.

Results: Arch index was decreased and Q angle was increased after 40 minutes' walking ($p < 0.05$). Increased toe out angle and attack angle of the foot at initial contact were observed as walking time progressed ($p < 0.05$). Increased flexion angles of multi-segment foot were found with increased walking time ($p < 0.05$). Finally, the participants experience greater braking force after 40 minutes' walking compared with 0 minutes and after 20 minutes ($p < 0.05$).

Conclusion: The participants experience kinematic and kinetic changes of the foot during a prolonged period of walking.

Application: The current findings suggest important biomechanical considerations when applying a walking intervention in a clinical trial to improve fitness or in developing adequate walking shoes.

Keywords: Prolonged walking, Multi-segment foot model, Muscle fatigue, Foot angle, Ground reaction forces

1. Introduction

보행을 인간 움직임의 기능적 관점에서 평가하고 이를 개선을 위한 많은 연구들이 시도되고 있다(Phinyomark et al., 2018). 연구들은 정량적 보행분석을 통해 신체건강을 증진시키고 근골격계 질환을 완화하는데 목적을 두고 있다(Hunt and Hatfield, 2017). 하지만, 보행 동작의 복잡성과 인간 움직임의 가변성으로 인해서 자료를 일반화하여 적용하는데 어려움이 존재하고 있는 실정이다.

최근의 연구에서 보행을 장시간에 걸쳐 실시했을 때 얻는 운동의 효과에 관심을 가지게 되었다(Stolwijk et al., 2010). 적당한 보행은 심혈관계 개선과 유산소 능력의 증가에 긍정적인 효과가 있다고 보고가 되고 있다(Haddock et al., 1998; Morris and Hardman, 1997). 하지만, 실제 장시간에 걸쳐 보행 시 어떠한 움직임의 변화가 관찰되는가에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 실정이다. 선행연구들은 일정 시간 내에 보행의 거리를 측정하여 현재의 건강상태나 운동 및 재활의 효과의 지표로만 활용하였다(Salbach et al., 2015; Szymczak et al., 2016). 하지의 근피로나 관절에 발생할 수 있는 하지 관절 상해에 관심을 갖지 못하고 있는 실정이다(Stolwijk et al., 2010).

대부분의 선행연구들은 마라톤과 같은 장거리 달리기에 의해 발생하는 상해의 원리를 분석하였다(Rosenbaum et al., 2016). 그 외, 매우 제한된 장거리 보행연구에서 발 부위별 족저압력의 변화를 관찰하거나 하지 근육의 피로로 인한 움직임의 변화에 관심을 갖게 되었다(Gefen, 2002; Stolwijk et al., 2010). 이러한 몇몇 선행연구를 통해서 장기간이나 장거리 보행이 하지 근골격계의 미묘한 구조적 변화와 하지관절의 움직임과 부하의 특성이 달라질 것을 예상하였다(Yoshino et al., 2004).

장시간 보행이 이루어지면 발분절은 미묘한 형태적 변화와 함께 움직임의 차이가 예상되어진다(Stolwijk et al., 2010). 특히, 발은 다분절의 특성으로 보행 시간과 거리가 증가함에 따라 발분절 간 굴곡 신전의 증가로 특정 부위에 부하가 증가할 것으로 예상된다(Nagel et al., 2008). 선행연구에서 장거리 보행 시 중족 부위에 위치한 아치의 높이가 낮아짐으로 엄지발가락 아래의 압력은 감소하고 중족과 후족으로 압력이 이동한다고 하였다. 이에, 추진 동작(roll off)에서 전족의 역할이 저하된다고 해석하였다(Headlee et al., 2008). 따라서, 보행 시 이동에 필요한 힘의 제어와 추진의 상호작용 간에 변화가 발생되고, 장시간 반복적인 보행 동작으로 인한 하지 근육의 피로가 발생될 것으로 예측된다(Yoshino et al., 2004). 이렇듯, 하지 움직임의 변화는 보행의 안정성과 효율성에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 장시간 보행이 이루어지기 전과 후의 발의 형태와 하지 정렬구조의 변화를 관찰하고자 하였다. 또한, 장기간 보행으로 인해 발분절의 움직임과 보행 동작을 발생되는 지면반력의 차이를 분석하였다. 본 연구결과를 통해서 보행과제를 통한 신체기능수준을 객관적으로 평가하거나 장시간 보행을 실시하는 임상적 연구에서 고려해야 할 중요한 방법론적 자료로 활용되기를 기대한다.

2. Method

2.1 Participants

본 연구에 참여한 피험자는 서울 S, K 지역 40대 여성으로, 최근 1년간 하지의 부상이 없었던 건강한 여성 42명을 대상으로 실시하였다(평균 나이: 45.4 ± 2.3 years, 평균 신장: 160.7 ± 4.8cm, 평균 체중: 59.2 ± 6.9kg, 발 크기: 23.3 ± 0.7cm). 피험자는 실험 전 해당 생명윤리위원회의 승인(ID: 369, 2015년 4월 7일 승인)을 통해 작성된 참여동의서를 작성하고 실험에 참여하였다.

2.2 Testing procedure

피험자는 먼저 장시간 보행 실시 전에 발의 형태학적 구조와 하지 정렬구조를 (Figure 1)과 같이 측정하였다. 우선, 선행연구(Ferber and Benson, 2011)를 바탕으로 자체 제작된 발 측정도구(Motion innovation center, KOREA)를 이용하여 1) 발의 길이, 2) 제 1 중족골까지의 길이, 3) 발 길이의 50% 지점에서의 발등의 높이, 4) 아치 인덱스(발 높이/ 1중족골까지 길이) (Hill et al., 2017)를 측정하였으며, 하지의 정렬구조 측정은 Q (quadriceps) angle (Park and Stefanyshyn, 2011)을 각 3회 측정하여 평균값을 산출하였다. 이때, Q-angle에 대한 측정은 슬개골 결절의 중심으로부터 슬개골 중앙(Mid Patella)까지의 연장선과 ASIS(전상장골극)으로부터 슬개골 중앙을 잇는 선 사이의 각

을 의미한다. 발의 형태와 Q-angle은 장시간 보행 실시 후에도 측정하여 발의 형태학적 변화와 하지의 정렬구조의 변화를 관찰하였다.

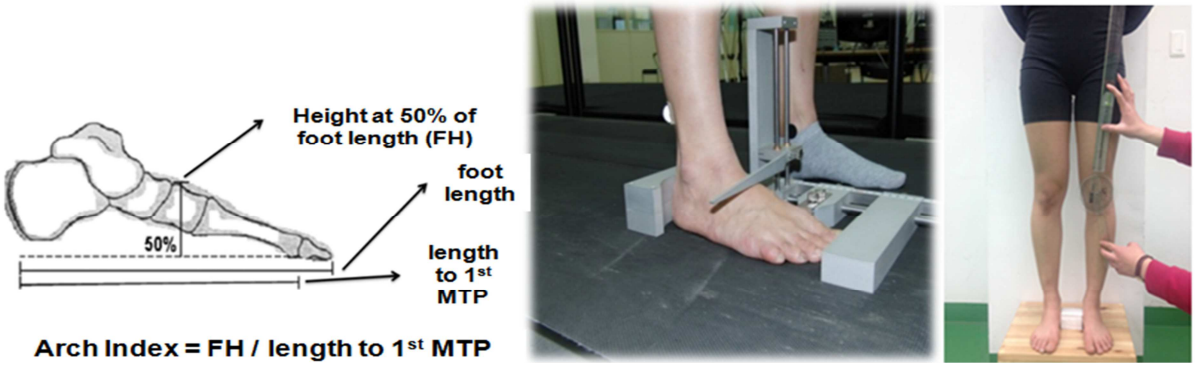


Figure 1. The measurement of arch index using a custom-made device (motion innovation center, Korea) (left and middle) and Q angle measurement (right)

장시간 보행의 기준은 북미 대학스포츠의학협회(American College of Sports Medicine, http://www.acsm.org/)에서 권장하는 일정 강도의 지속적인 신체활동을 기준으로 30분에서 60분 사이의 보행 시간으로 설정하였다. 본 연구에서는 최장 40분을 기준으로 장시간 보행을 실시하였으며, 생체역학적 변인은 1) 보행 시작 시점, 2) 20분 경과 시점, 3) 40분 경과 시점에 자료를 수집되어 산출되었다. 이때, 보행속도는 평균적인 속도인 1.1m/sec의 고정된 속도로 실시하였다.

피험자는 동일한 운동화(LS networks, KOREA)를 착용하고 지름 2cm의 반사마커 4개가 부착된 판형 크러스터(Cluster)를 양 하지 각 분절에 부착하였으며, 지면반력이 내장된 트레드밀(Bertec, USA) 위에서 기본 관절각도를 산출하기 위해 (Figure 2)와 같이 자세를 취하였다. 자연스러운 적응을 위해 5분간 위밍업을 실시한 후, 40분의 보행 중 0분과 20분, 40분 시점에 연속적인 10보(step)의 보행을 측정하여 시간에 따른 차이를 비교하였다. 피험자들의 장시간 보행 촬영은 고속 적외선 카메라(Oqus300+, Qualisys, Sweden) 8대로 실시하였다. 이때, 촬영속도는 적외선 카메라를 100Hz로 설정하고 지면반력 트레드밀은 1,000Hz로 설정하였다. 영상 자료와 지면반력 자료는 분석을 위해서 동일한 시간영역으로 동조화가 이루어졌다.

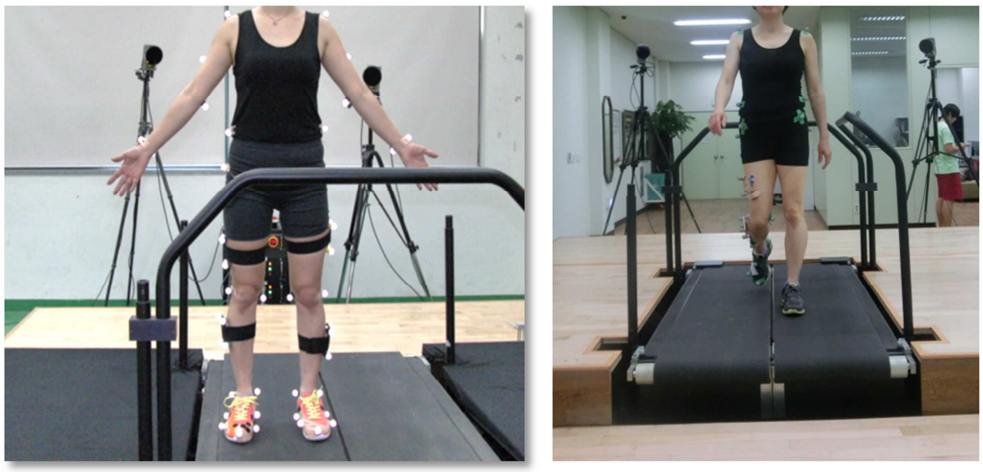


Figure 2. Neutral standing trial of the subject with marker sets on an instrumented treadmill (left) and walking trial (right)

2.3 Data processing

영상자료와 지면반력 자료는 획득 과정에서 생긴 오차(noise)를 제거하기 위하여 Butterworth 2th order low-pass filter로 smoothing 하였다. 차단 주파수(cut-off frequency) 결정은 FFT (Fast Fourier Transform) 분석을 실시하고 주파수로 전환된 신호에 대해 PSD (Power Spectral Density)를 계산하여 누적된 PSD의 99.9% 수준을 각 신호 특성의 대표적인 것으로 간주하여 결정하였다.

2.4 Variables of interest

2.4.1 Foot angle at initial contact

(Figure 3 (left))과 같이 착지하는 순간 진행방향을 기준으로 전체 발분절(신발)이 벌어진 각도(Toe out angle)와 시상면에서 지면과 발분절이 이루는 각도(foot attack angle)을 산출하였다.

2.4.2 Flexion angle using multi-segment foot model

장시간 보행 시 발의 굴곡 신전각을 분석하기 위해 (Figure 3 (right))과 같이 다분절 시스템(Scott and Winter, 1991)으로 발의 해부학적 경계선에 맞추어 신발의 Toe box 부분인 전족, 중간 부분인 중족, 발목 밑에서 뒤꿈치 부분인 후족으로 정의하였다. 각각의 분절로 정의된 발의 각도는 +방향이 배측굴곡(dorsi-flexion), -방향이 저측굴곡(plantar-flexion)으로 설정하여 산출하였다.

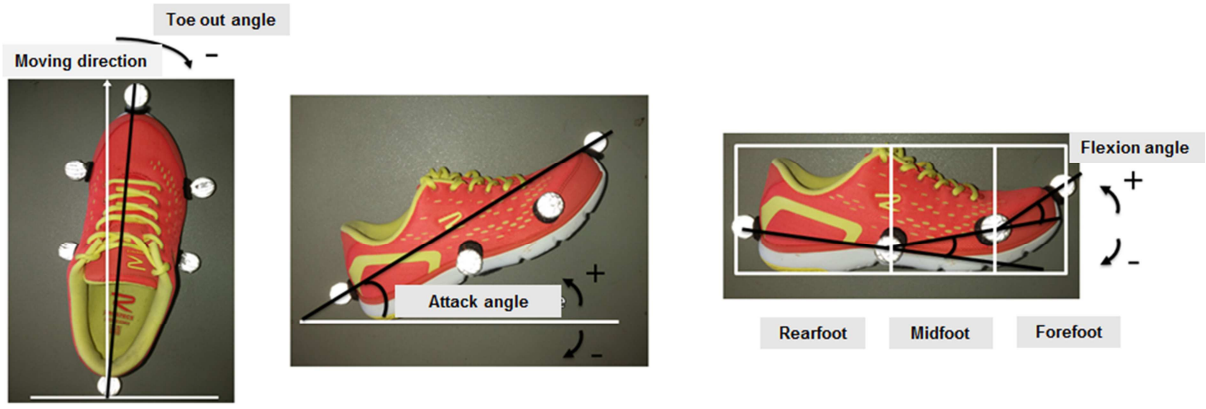


Figure 3. The definitions of foot angle (toe out, attack angle of the shoe and shoe flexion)

2.4.3 3-dimensional ankle angle

장시간 보행에 따른 발목관절의 움직임을 관찰하기 위해서 3차원 분절각(Cole et al., 1993)이 산출되었으며, 이때 각 정의는 경골에 대한 발분절의 굴곡/신전(dorsi/plantar flexion), 내전/외전(adduction/abduction), 내번/외번(inversion/eversion)으로 정의하였다.

2.4.4 Ground Reaction Forces: GRF

장시간 보행에 따른 지지 구간에서 발생하는 수직(vertical GRF), 전후(anterior/posterior GRF), 좌우(medial/lateral GRF) 지면반력의 최대 크기를 비교하였으며, 이때, 지면반력은 피험자의 체중(Body Weight, BW)으로 표준화하였다.

2.5 Analyzed phases

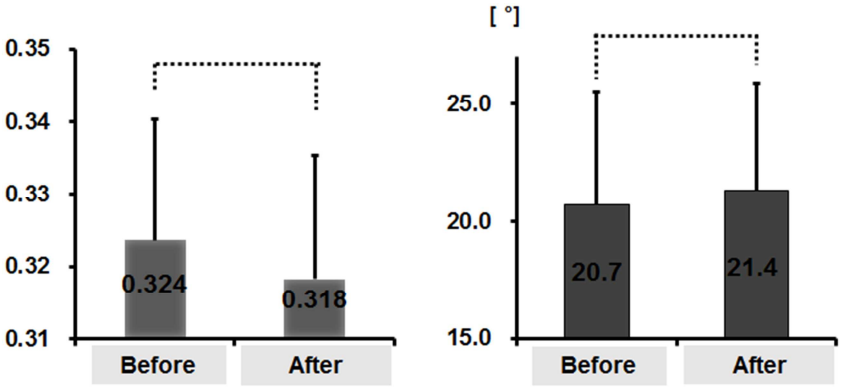
분석 구간은 보행의 지지 구간을 기준으로 각 시점(E1: right heel contact, E2: left toe off, E3: left heel contact and E4: right toe off)이 설정되었다.

2.6 Statistics

우선, 장시간 보행 실시 전후에 따른 발의 형태학과 하지의 정렬구조의 차이는 대응표본 t 검정(paired t-test)을 실시하였다. 보행 시간에 따른 발분절의 움직임과 지면반력의 변화는 반복측정변량분석(repeated ANOVA)를 실시하였으며, 사후검증은 Bonferroni correction을 적용하였다. 이때, 통계적 검증수준은 $\alpha = 0.05$로 설정하였다.

3. Results

우선, 보행 전후 발의 형태학적 차이는 (Figure 4)에서 나타나듯이, 장시간 보행 이후에 발 길이에 대한 발등의 높이의 비율(arch index)이 2% 가량 작아졌다. 이는, 중족 부위의 아치 높이가 낮아진 결과를 보였으며($p<0.05$), 하지의 정렬구조를 나타내는 Q-angle도 장시간 보행 이후에 0.7° 가량 증가하였다($p<0.05$).



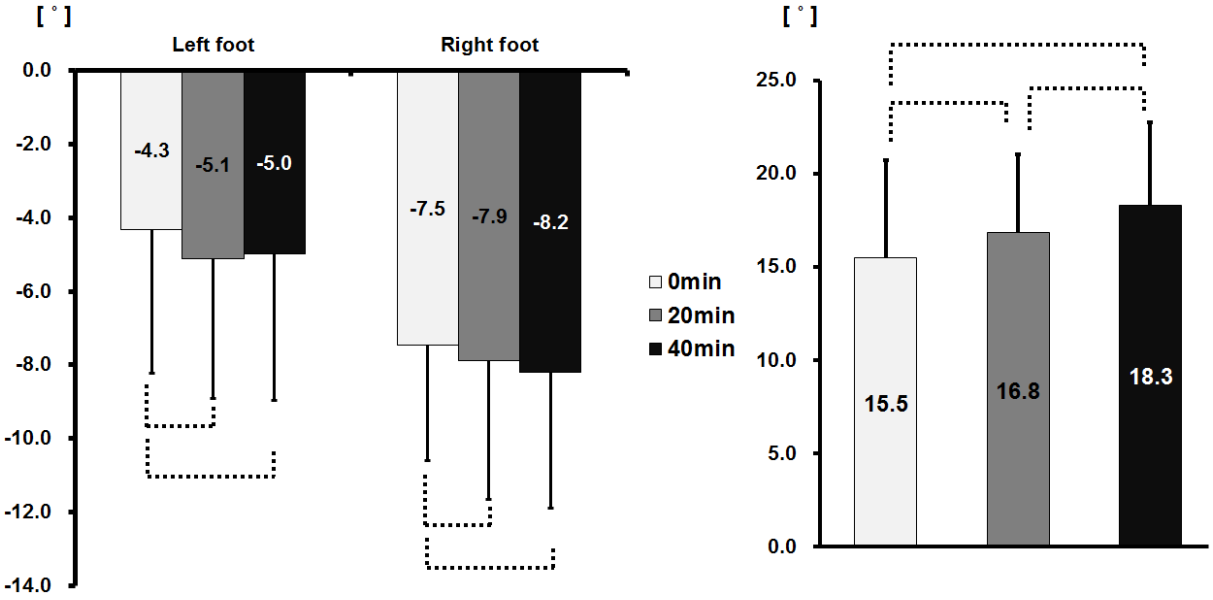
(a) Arch index (b) Q angle

Figure 4. The changes in arch index and Q angle of the subjects after 40 minutes' walking

(Figure 5)는 착지순간 발분절 각도의 차이를 비교한 그래프로, 발의 토 아웃 각도와 지면과의 착지 각도에서 통계적으로 유의한 차이가 나타났다($p<0.05$). 발의 토 아웃 각도는 보행 시간이 증가함에 따라 좌측 우측 모두 동일하게 증가하였으며, 이때 오른쪽 발의 각도가 상대적으로 크게 나타났다. 또한, 착지순간 발분절이 시상면에서 지면과 이루는 착지 각도(attack angle)는 보행 시간이 증가함에 따라 점점 커지는 수치를 나타났다.

(Table 1)은 발의 다분절 모델에서 분절 간 굴곡 신전 각도의 변화를 나타낸 결과로 분절간 굴곡각이 시간이 지남에 따라 증가하는 경향을 나타냈다($p<.05$). 각 분절 간 굴곡각의 수치가 체중이 최대한 전달되어 발이 지면에 밀착되는 순간(E3)을 제외한 착지 초기(E1, E2)와 이지 시기(E4)에 모든 분절 간의 굴곡 정도가 보행 시간이 증가함에 따라 함께 증가하였다.

(Figure 6)은 보행의 지지기동안의 지면반력의 변화를 비교한 그래프로, 수직 지면반력은 보행 시간이 증가함에 따라 변화가 없었으나 전후 지면반력은 크기에서 차이가 나타났다($p<.05$). 특히, 착지 초기에 후방으로 발생하는 제동력(braking force)에서 보행 시간이 증가함에 따라 커지는 경향(0min: 0.14 ± 0.02 BW, 20min: 0.15 ± 0.03 BW, 40min: 0.16 ± 0.03 BW: 40분 보행 후 약 14.3% 증가)이 나타났다.



(a) Toe out angle (b) Attack angle (right)

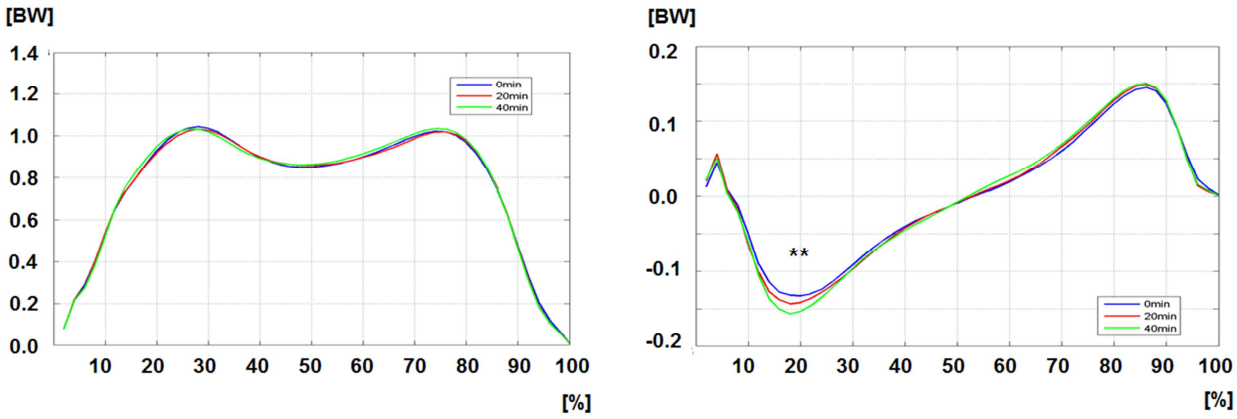
Figure 5. The differences in toe out and attack angle of the shoes between different time intervals (0, 20 and 40 minutes)

Table 1. Multi-segment foot angle (fore-foot, mid-foot and rear-foot)

	Event	0 mins	20 mins	40 mins	*F*	*p*
Fore-foot flexion angle [°] (forefoot vs. midfoot)	E1	2.1±0.76	2.6±1.56	2.8±1.95	34.772	$p<0.001$
	E2	0.3±0.88	0.9±1.41	1.3±1.73	88.526	$p<0.001$
	E3	2.1±2.22	2.1±2.12	2.2±2.26	.408	$p=.665$
	E4	7.3±1.28	8.4±1.68	8.6±1.78	138.705	$p<0.001$
Mid-foot flexion angle [°] (mid-foot vs. rear-foot)	E1	-43.7±21.25	-48.5±21.21	-52.2±24.23	36.272	$p<0.001$
	E2	-2.3±8.46	-1.3±8.06	0.8±8.32	23.659	$p<0.001$
	E3	6.4±12.85	6.2±12.94	5.5±12.27	1.117	$p=.328$
	E4	11.4±17.32	13.1±15.76	12.5±17.35	2.346	$p=.096$
Rear-foot flexion angle [°] (rear-foot vs. fore-foot)	E1	1.7±1.06	2.2±1.00	2.4±1.22	14.296	$p<0.001$
	E2	1.1±0.98	1.6±0.86	1.9±0.87	43.509	$p<0.001$
	E3	3.3±1.66	3.2±1.37	3.1±1.26	1.158	$p=.320$
	E4	4.2±1.42	5.1±1.37	5.1±1.41	60.410	$p<0.001$

E1: right heel contact, E2: left toe off, E3: left heel contact and E4: right toe off, respectively

마지막으로, (Figure 7)은 발목의 3차원 각도의 변화를 보행 시간에 따라 비교한 그래프로, 보행 시간이 증가함에 따라 발목의 가동범위가 각 방향(저측/배측굴곡, 내전/외전, 내번/외번)에서 그래프와 같이 3.3~15.3%가 증가하는 현상을 나타났다.



(a) Vertical GRF (b) Anterior-posterior GRF

Figure 6. The differences in GRF components between different time intervals (0, 20 and 40 minutes). **indicates significant difference

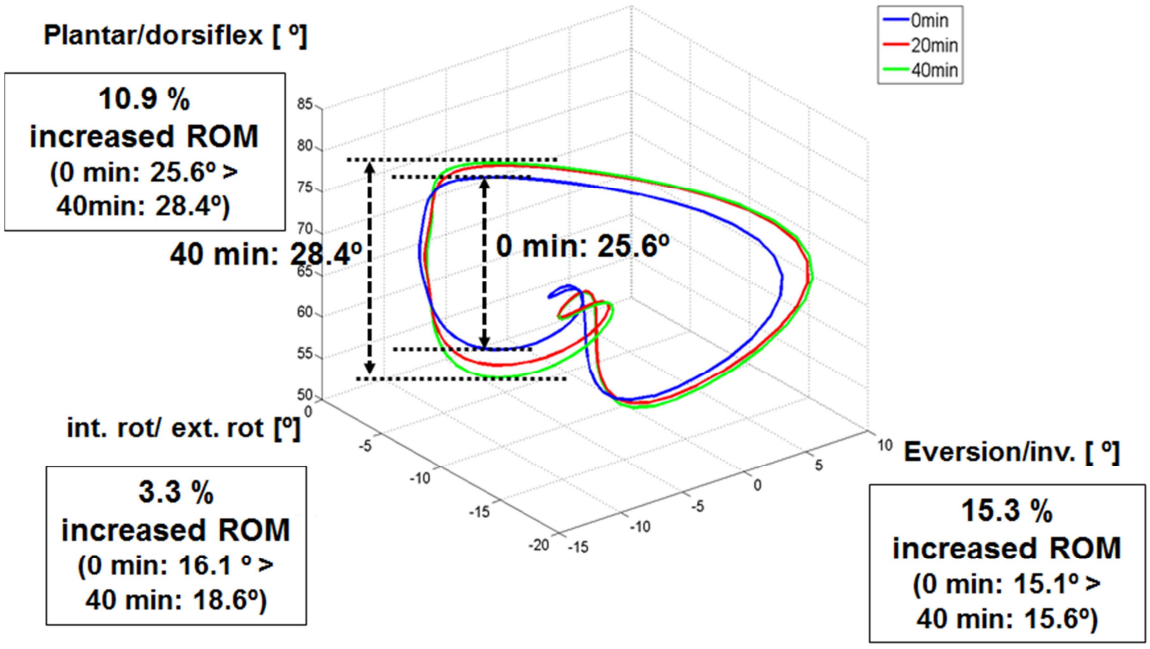


Figure 7. Averaged 3D angle graph showing the increase in overall range of motion (ROM) at ankle joint after 40 minutes' walking (blue: 0min., red: 20min. & green: 40min.)

4. Discussion

본 연구는 장시간 보행에 따라 발의 형태와 분절간 움직임의 변화를 관찰하고 이와 함께 지면반력의 변화를 비교하고자 하였다. 먼저, 40분 보행 후에는 발의 아치 인덱스가 감소하고 하지의 Q-angle이 증가하였다. 보행 시간이 증가함에 따라 발의 토 아웃(toe out) 각도와 지면에 대한 착지 각도(attack angle) 및 발의 전족, 중족, 후족분절 간에 굴곡 각도가 증가하는 경향이 나타났다. 또한, 보행의 착지 초기에 발생하는 제동력(braking force)의 크기가 보행 시간이 증가함에 따라 증가하였다. 이러한 결과는 장시간 보행이 발과 하지

의 형태학적 변화를 유발하고 발분절의 동적인 가동범위와 착지 초기 발에 전달되는 충격을 증가시키는 것을 의미한다.

4.1 Changes in foot morphology and lower leg alignment

장시간 보행 실시로 발의 아치 높이가 낮아짐에 따라 아치 인덱스가 작아진 것이라 판단된다. 이는 장시간 보행으로 발바닥과 지면의 반복적인 접촉은 발의 내부구조에 반복적인 부하가 축적될 것이다. 이러한 부하는 발바닥의 내측 아치에 인대와 같은 수동적 조직(plantar aponeurosis, ligaments)과 주변의 능동적 근육을 이완시키는 역할을 통해서 발의 아치 부위의 경도(stiffness)를 낮게 하는 것으로 판단된다(Headlee et al., 2008). 동일한 현상은 장시간 보행 시 하지의 주요 근육이나 인대에도 영향을 주고 대퇴와 경골의 정렬각도(Q angle)도 증가하는 것으로 나타났다. 선행연구에서는 Q-angle의 증가는 무릎에 발생하는 통증이나 상해로 이루어질 수 있다고 하였다(Cowan et al., 1996). 하지만, 현재까지 어떠한 구체적 상해의 원리에 의해서 상해 가능성이 증가하는지 명확히 보고되지 못하고 있다(Park and Stefanyshyn, 2011). 결론적으로 장시간 보행 후 Q-angle이 약간 증가한 것은 상해의 수준이 증가하기보다는 하지의 정렬구조의 약간의 변화가 있는 것으로 판단된다. 다만, 장기간 보행 시 발의 아치 인덱스와 Q angle의 증가의 정도가 실제 임상학적으로 어떠한 의미를 가질지에 대한 해석이 필요하겠다.

4.2 Changes in foot angle

선행연구들에서 장시간 보행에서 발생하는 하지 근육들의 피로 현상이 보행의 안정성과 충격을 흡수기전의 저하로 이어질 수 있다고 하였다(McLoughlin et al., 2016; Parijat and Lockhart, 2008; Wong et al., 2015). 본 연구에서 40분 간의 보행으로 발의 착지 각도(attack angle)는 약 3도 가량 증가하고 발의 외전(foot abduction)과 유사한 toe out 각도 또한 1° 내외로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 선행연구에서도 하지 근육의 피로를 증가시켜 보행을 실시할 경우 착지 시 무릎은 신전(extension) 각도가 증가되고 발목의 배측굴곡(dorsiflexion) 각도도 증가된다고 보고되었다(Parijat and Lockhart, 2008). 발의 외전이나 토 아웃 각도가 일부 증가하는 현상은 정적인 하지 정렬구조에서 Q-angle의 증가와 일부 관련성이 예상된다. 하지만, 본 연구에서는 명확한 인과관계를 설명하기 어렵다. 다만, 착지 시의 발전체가 바깥쪽으로 열린 움직임(외전 혹은 toe out positioned)의 나타나는 경우 발바닥의 바깥쪽으로 전달되는 힘이 증가하고 압력중심의 궤적이 바깥쪽(lateral direction)으로 이동할 것으로 예측된다. 그리고 발을 다분절의 모델에 적용하여 전족과 중족 및 후족의 상대적인 굴곡, 신전 각도에 대한 분석한 결과, 보행 시간이 증가할수록 상대적인 굴곡(flexion)각이 증가하는 현상이 나타났다. 이는 장시간 보행에 따른 발분절 간 가동범위가 증가하고 각 발분절이 기여의 수준의 변화로 이해될 것이다(Stolwijk et al., 2010).

4.3 Changes in Ground Reaction Forces and impact mechanism

발의 착지 각도와 발분절의 상대적인 움직임 변화로 보행 시 지면반력에도 차이가 나타날 것으로 예상되었다. 일반적으로 보행이 원활하게 이루어지기 위해서는 지면에 전달되는 힘을 효과적으로 활용하여야 한다. 발이 지면에 접촉하면, 속도에 따라 체중(body weight, BW)의 1~2배에 해당하는 수직적 힘(vertical force)이 발생한다. 또한, 체중의 약 0.1~0.2배(0.1~0.2 BW)에 해당하는 전후 지면반력(anterior-posterior force or braking-propulsive force)이 뒤꿈치가 접촉하는 시기에 제동력(braking force)으로 발생한다. 이로 인하여 이동의 속도가 감소하고 지지구간으로 전환되며, 추진력(propulsive force)에 의해 속도가 증가하는 현상이 발생한다(Winter, 1989).

장시간 보행에 따른 발바닥의 압력분포의 변화를 분석한 연구(Stolwijk et al., 2010)에서 전족 부위의 압력은 감소하고 뒷꿈치 부위(heel)의 압력이 증가한다고 하였다. 이는 장시간 보행으로 발 전체에 부하가 축적되면 구조상 후족으로 자연스럽게 부하를 증가시키는 현상이 일어나는 것으로 판단된다. 이는 전족의 구조와 물성(material property)에 비해 후족 부위에 지방 패드(fat pad)가 충격을 흡수하거나 부하를 견디기에 적합하다고 하였다(De Clercq et al., 1994; Wearing et al., 2009). 본 연구의 결과도 보행의 시간이 증가할수록 체중이 실리는 국면(weight acceptance phase)에 발생하는 제동력이 점차 증가하는 현상이 나타났다. 이때, 착지 시 발이 지면과 이루는 각도(attack angle) 또한 보다 커져서 뒷꿈치를 이용하여 충격을 받아들이는 착지형태가 나타났다. 따라서, 장시간 보행에서 신체는 자연스럽게 발의 부담을 줄이기 위해 부하를 효과적으로 재 분배하는 보상(compensation)과 적응(adaptation)의 과정을 진행되는 것으로 판단된다(Stolwijk et al., 2010).

4.4 Biomechanical interpretation of prolonged walking

Gefen (2002)은 트레드밀 위에서 빠른 속도(8km/h)로 10분 간의 강도 높은 보행을 실시하여 발바닥의 부위별 압력의 수준과 압력중심점 궤적의 변화를 관찰하였다. 그 결과, 흥미롭게도 착지 시 발바닥의 후족의 외측부근으로 압력이 증가하고 압력중심점의 궤적 또한, 외측 방향으로 이동하는 것으로 나타났다. 본 연구에서도 보행 시간이 증가할수록 착지 시 발분절이 외전(toe out)된 자세가 나타남에 따라 후족 부위 측면에서 지면에서 발생하는 부하를 받아드릴 것으로 예측된다. 이는 장기간 보행으로 하지의 말단(distal) 부분에 위치한 발목의 내번근(invertors: tibialis anterior/posterior, flexor digitorum, hallucis)과 외번근(evertors: peroneus longus, lateral gastrocnemius)에 해당하는 근육군의 피로에 결과로 해석된다(Gefen et al., 2002). 장시간 보행 시 발분절을 중심으로 근육군의 피로가 발생하면 발분절의 불안정성이 증가할 수 있다고 하였다(Stacoff et al., 1996). 또한, 발이나 발목에 특정 부위에 반복적 부하가 축적되며 물리적 피로(mechanical stress)에 의한 일정 시점에서 생리학적 한계치(physiological limit)에 도달할 수 있을 것이다(Grimston and Zernicke, 1993). 하지만, 본 연구에서는 설정된 40분의 보행 시간에서는 하지 근육의 피로 유무와 이로 인한 발분절의 움직임과 부하 기전에 변화의 연관성을 규명할 수 없었다.

4.5 limitations and future direction

장시간 보행은 하지의 근피로를 발생하여 움직임의 불안전성이 증가하고 이로 인해 하지 관절상해의 위험이 커질 수도 있겠다. 다른 한편으로는 보행 시간의 증가는 반복적으로 축적되는 부하에 대한 자연스러운 인체의 적응 과정으로 움직임을 보다 방어적이며 효율적으로 유도하는 과정으로 이해할 수 있겠다. 하지만, 본 연구결과를 통해서는 장기간 보행이 긍정적 혹은 부정적 영향을 판단하기는 명확하지 않았다.

다만, 본 연구는 장시간 보행에 따라 발분절의 변화된 움직임과 지면반력 중 제동력의 증가를 관찰하였다. 이러한 변화가 하지 근육들의 피로에 의한 보상작용으로 예상된다. 하지만, 실제 근활성도의 수준의 변화나 근피로도를 측정하지 못하여 명확한 인과관계를 설명하는 데는 제한적이다. 또한, 보행 시 발분절에서 분절의 기여도를 정확히 이해하기 위해서는 발부위 별 압력의 수준이나 관절 파워(joint power)나 일(net joint work)이 분석되어야 할 것이다. 본 연구에서는 피험자가 트레드밀 위에서의 보행이 약간의 적응 시간에도 불구하고 실제 지상에서 실시되는 보행과 다른 차이들이 발생할 수 있다. 하지만, 본 연구는 일반 보행과 트레드밀 보행에서 발생되는 변인들의 차이는 크지 않다는 근거를 참고하였다(Firminger et al., 2018). 본 연구에서는 트레드밀 보행의 원활한 실험 통제와 자료수집의 편의성 측면이 고려되었다(Kram et al., 1998). 마지막으로 본 연구는 여성 피험자를 대상으로 실험이 이루어졌다. 장기간 보행 시 성별에 따른 다른 생체역학적 변화가 예상되어 관련된 후속연구도 요구되어진다.

5. Conclusion

본 연구는 장시간 보행에 따른 생체역학적 변화를 분석하기 위한 목적의 유일한 연구라는 측면에서 의미를 찾을 수 있겠다. 보행을 통한 건강을 향상시키기 위한 측면과 장시간에 보행에서 발생할 수 있는 상해의 기전을 이해하는 측면에서 연구의 활용가치가 기대된다. 현장의 근골격계 질환 임상전문가나 보행화를 개발하는 연구자들에게 장시간 보행 시 움직임과 부하적응의 특성의 이해를 돕고자 한다.

결론적으로, 장시간 보행 시 발의 아치의 높이가 낮아지고 착지 시 후족의 역할이 보다 중요하게 나타났다. 이를 통해서 지지국면에서의 신체를 이동시키기 위한 힘의 이용과 반복적 부하에 대처하는 발의 생체역학적 역할의 변화를 이해할 수 있었다. 차후의 연구에서는 근활성도 및 운동역학적(kinetics) 변인들을 추가하여 장시간 보행 시 발생하는 피로와 적응에 대한 분석이 요구되어진다.

Acknowledgements

본 연구는 LS Networks (Korea)의 지원으로 수행되었습니다.
This study was supported by LS networks (Korea).

References

Cole, G.K., Nigg, B.M., Ronsky, J.L. and Yeadon, M.R., Application of the joint coordinate system to three-dimensional joint attitude and movement representation: a standardization proposal. *Journal of Biomedical Engineering*, 115(4A), 344-349, 1993.

Cowan, D.N., Jones, B.H., Frykman, P.N., Polly, D.W., Jr., Harman, E.A., Rosenstein, R.M. and Rosenstein, M.T., Lower limb morphology and risk of overuse injury among male infantry trainees. *Medicine & Science in Sports & Exercise,* 28(8), 945-952, 1996.

De Clercq, D., Aerts, P. and Kunnen, M., The mechanical characteristics of the human heel pad during foot strike in running: an in vivo cineradiographic study. *Journal of Biomechanics*, 27(10), 1213-1222, 1994.

Ferber, R. and Benson, B., Changes in multi-segment foot biomechanics with a heat-mouldable semi-custom foot orthotic device. *Journal of Foot and Ankle Research*, 4(1), 18, 2011.

Firminger, C.R., Vernillo, G., Savoldelli, A., Stefanyshyn, D.J., Millet, G.Y. and Edwards, W.B., Joint kinematics and ground reaction forces in overground versus treadmill graded running. *Gait and Posture*, 63, 109-113, 2018.

Gefen, A., Biomechanical analysis of fatigue-related foot injury mechanisms in athletes and recruits during intensive marching. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 40(3), 302-310, 2002.

Gefen, A., Megido-Ravid, M., Itzchak, Y. and Arcan, M., Analysis of muscular fatigue and foot stability during high-heeled gait. *Gait and Posture*, 15(1), 56-63, 2002.

Grimston, S.K. and Zernicke, R.F., Exercise-related stress responses in bone. *Journal of Applied Biomechanics*, 9(1), 2-14, 1993.

Haddock, B.L., Hopp, H.P., Mason, J.J., Blix, G. and Blair, S.N., Cardiorespiratory fitness and cardiovascular disease risk factors in postmenopausal women. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30(6), 893-898, 1998.

Headlee, D.L., Leonard, J.L., Hart, J.M., Ingersoll, C.D. and Hertel, J., Fatigue of the plantar intrinsic foot muscles increases navicular drop. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 18(3), 420-425, 2008. doi: 10.1016/j.jelekin.2006.11.004

Hill, M., Naemi, R., Branthwaite, H. and Chockalingam, N., The relationship between arch height and foot length: Implications for size grading. *Applied Ergonomics*, 59(Pt A), 243-250, 2017.

Hunt, M.A. and Hatfield, G.L., Ankle and knee biomechanics during normal walking following ankle plantarflexor fatigue. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 35, 24-29, 2017.

Kram, R., Griffin, T.M., Donelan, J.M. and Chang, Y.H., Force treadmill for measuring vertical and horizontal ground reaction forces. *Journal of Applied Physiology, (1985)*, 85(2), 764-769, 1998.

McLoughlin, J.V., Barr, C.J., Patritti, B., Crotty, M., Lord, S.R. and Sturnieks, D.L., Fatigue induced changes to kinematic and kinetic gait parameters following six minutes of walking in people with multiple sclerosis. *Disability and Rehabilitation*, 38(6), 535-543, 2016. doi: 10.3109/09638288.2015.1047969

Morris, J.N. and Hardman, A.E., Walking to health (vol 23, pg 306, 1997). *Sports Medicine*, 24(2), 96-96, 1997.

Nagel, A., Fernholz, F., Kibele, C. and Rosenbaum, D., Long distance running increases plantar pressures beneath the metatarsal heads: a barefoot walking investigation of 200 marathon runners. *Gait & Posture*, 27(1), 152-155, 2008.

Parijat, P. and Lockhart, T.E., Effects of quadriceps fatigue on the biomechanics of gait and slip propensity. *Gait & Posture*, 28(4), 568-573, 2008.

Park, S.K. and Stefanyshyn, D.J., Greater Q angle may not be a risk factor of patellofemoral pain syndrome. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 26(4), 392-396, 2011.

Phinyomark, A., Petri, G., Ibanez-Marcelo, E., Osis, S.T. and Ferber, R., Analysis of Big Data in Gait Biomechanics: Current Trends and Future Directions. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 38(2), 244-260, 2018.

Rosenbaum, D., Engl, T. and Nagel, A., Effects of a fatiguing long-distance run on plantar loading during barefoot walking and shod running. *Footwear Science*, 8(3), 129-137, 2016.

Salbach, N.M., O'Brien, K.K., Brooks, D., Irvin, E., Martino, R., Takhar, P., Chan, S. and Howe, J.A., Reference values for standardized tests of walking speed and distance: a systematic review. *Gait and Posture*, 41(2), 341-360, 2015.

Scott, S.H. and Winter, D.A., Talocrural and talocalcaneal joint kinematics and kinetics during the stance phase of walking. *Journal of Biomechanics*, 24(8), 743-752, 1991.

Stacoff, A., Steger, J., Stussi, E. and Reinschmidt, C., Lateral stability in sideward cutting movements. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 28(3), 350-358, 1996.

Stolwijk, N.M., Duysens, J., Louwerens, J.W. and Keijsers, N.L., Plantar pressure changes after long-distance walking. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(12), 2264-2272, 2010.

Szymczak, M., Oszkinis, G. and Majchrzycki, M., The Impact of Walking Exercises and Resistance Training upon the Walking Distance in Patients with Chronic Lower Limb Ischaemia. *BioMed Research International*, 1, 1-8, (ID: 7515238), 2016.

Wearing, S.C., Smeathers, J.E., Yates, B., Urry, S.R. and Dubois, P., Bulk compressive properties of the heel fat pad during walking: a pilot investigation in plantar heel pain. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 24(4), 397-402, 2009.

Winter, D.A., Biomechanics of normal and pathological gait: implications for understanding human locomotor control. *Journal of Motor Behavior*, 21(4), 337-355, 1989.

Wong, D.W., Lam, W.K., Yeung, L.F. and Lee, W.C., Does long-distance walking improve or deteriorate walking stability of transtibial amputees? *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 30(8), 867-873, 2015.

Yoshino, K., Motoshige, T., Araki, T. and Matsuoka, K., Effect of prolonged free-walking fatigue on gait and physiological rhythm. *Journal of Biomechanics*, 37(8), 1271-1280, 2004.

Author listings

Sang Kyoon Park: spark@knsu.ac.kr
Highest degree: Ph. D
Position title: Associate Professor, Department of Physical Education, College of Sport Science of Korea National Sport University
Areas of interest: Footwear Biomechanics, Human locomotion

Sihyun Ryu: hope222ysh@knsu.ac.kr
Highest degree: Ph. D
Position title: Lecturer and Researcher, Department of Physical Education, College of Sport Science of Korea National Sport University
Areas of interest: Sports Biomechanics, Taekwondo

Won-Seob Hwang: wsks4865@hanmail.net
Highest degree: MSc
Position title: Researcher, Department of Physical Education, Graduate School of Korea National Sport University
Areas of interest: Sports Biomechanics

Jungho Lee: leejh77@gmail.com
Highest degree: Ph. D
Position title: Team Leader, Shoe Research Team, K2Korea
Areas of interest: Biomechanics, Footwear Development, Design, Innovation, Technology