

Original Article

# Biomechanical Comparison of Stair Climbing Behavior with Different Heel Heights in High-Heeled Shoes in Adult Women

Sang-ha Park<sup>1</sup>, Jong-chul Park<sup>1\*</sup>, Joong-hyun Ryu<sup>2</sup> and Jae-myung Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pukyong National University

<sup>2</sup>Aspire Academy

<sup>3</sup>Korea National Sport University

## Article Info

Received 2024. 07. 25.

Revised 2024. 09. 02.

Accepted 2024. 09. 10.

## Correspondence\*

Jong-chul Park

jcpark@pknu.ac.kr

## Key Words

Adult women, Stair climbing,  
High heels, Joint moments,  
Muscle activation

**PURPOSE** This study aimed to characterize the kinematic variables of stair climbing in adult women by analyzing the effects of varying heel heights on their climbing behavior. **METHODS** A total of 24 adult women (age:  $22.08 \pm 1.28$  years; height:  $160.43 \pm 4.30$  cm; weight:  $54.10 \pm 6.39$  kg) participated in this study. All subjects wore the same type of high heels with heights of 1 cm, 5 cm, and 7 cm while performing stair climbing on stairs measuring 18 cm in height. Ten infrared cameras (200 Hz) and ground reaction force sensors (1000 Hz) were set up on the stairs, along with an 8-channel electromyography system (1000 Hz) to analyze the maximum moments at each joint and the muscle activation during stair climbing. Data were analyzed using IBM SPSS Statistics version 27.0 (IBM., USA). All variables underwent the Shapiro-Wilk normality test, with repeated measure analysis of variance or the Friedman test applied based on the results. Post hoc tests were conducted using the LSD test or Wilcoxon signed-rank test. **RESULTS** Our study found four key findings. First, a significant decrease in maximum dorsiflexion, plantarflexion, inversion, and adduction moments of the ankle joint was observed with increasing heel height. Second, the maximum extension, adduction, and external rotation moments of the knee joint significantly decreased as heel height increased, while the maximum abduction and internal rotation moments significantly increased. Third, the maximum flexion, extension, and abduction moments of the hip joint significantly increased with higher heel heights. Fourth, muscle activity of the rectus femoris, vastus medialis, vastus lateralis, semitendinosus, and gastrocnemius decreased with increasing heel height compared to walking; however, muscle activity in the tensor fasciae latae increased. **CONCLUSIONS** The results of this study suggest that as heel height increases, the risk of injury may rise due to limited ankle use and increased moments in the knee and hip joints, potentially leading to muscle strength imbalances in adult women, particularly through the overuse of specific muscles.

## 서론

인간의 움직임에서 가장 기본이 되는 보행(Gait)의 형태는 매우 다양하지만 그중 계단 보행(Stair Gait)은 평지 보행 다음으로 빈번하

게 나타나는 동작이다. 발의 배치와 신체중심 이동 시 균형 유지 등 평지 보행보다 더 도전적인 동작으로 알려져 있으며(Silverman et al., 2014), 반복적인 수평 및 수직 운동이 동시에 나타나기 때문에 일상에서 낙상과 관련된 위험한 작업 중 하나이다(Cayless, 2001; Pickle et al., 2014; Yoon, 2008).

계단 보행 중 계단 오르기(Stair Ascent)는 평지 보행보다 더 큰 하 지관절 가동범위, 모멘트, 근력 등을 요구하며 계단을 오르거나 내릴 때, 잘못된 보행 패턴을 수행하는 경우 신경학적 또는 근골격계 손상

© 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.

에 노출될 가능성이 평지 보행보다 높게 나타난다고 보고되고 있다 (Andriacchi et al., 1980; McFadyen & Winter, 1988; Pirker & Katzenschlager, 2017; Protopapadaki et al., 2007).

이처럼 보행 패턴에 따른 손상에 대한 연구가 이루어지면서 지면과 발의 매개 역할을 하는 신발에 대한 중요성이 강조되고 있는데 신발(Shoes)은 일상생활 중 자연스럽게 다양한 형태로 나타나는 보행에서 발의 보호, 편안함, 미끄럼 방지, 충격 흡수 등과 같은 기능과 보조를 위해 활용되기 때문에 상황에 맞는 올바른 신발 선정이 매우 중요하다(Yoon et al., 2014).

하지만, 오늘날의 신발은 여러 가지 기능적 목적뿐만이 아닌 패션의 요소 중 하나로 활용된다(Wiedemeijer & Otten, 2018). American Podiatric Medical Association의 보고에 따르면 발가락보다 뒤꿈치가 높은 형태인 하이힐(High-heeled shoes)을 약 69%의 여성이 착용한 경험이 있으며, 이 중 40%가 매일 착용하는 것으로 보고되고 있다(Frey et al., 1993; Jang et al., 2009). 신발의 굽 높이가 증가는 자연스러운 움직임을 방해하거나 낙상 가능성을 증가시켜 상해의 위험이 나타날 수 있으며(Cronin, 2014; Tencer et al., 2004), 굽이 높을수록 에너지의 요구를 증가시켜 근육의 피로를 증가시킬 수 있는데(Gefen et al., 2002), 이는 연령과 무관하게 하이힐을 장기적인 착용은 하지 근육구조 및 활성화 패턴의 변화를 일으킬 수 있다(Mika et al., 2012).

여성의 계단 보행 시 생체역학적 변인을 관찰한 선행연구는 굽 높이에 따른 최대 하지관절 각도와 가동범위의 변화로 신체의 안정화 및 균형 능력에 영향을 미쳐 보행 패턴을 변화시킬 수 있다(Shang et al., 2020)고 보고하였으며, 굽 높이가 연령 차이가 신체에 미치는 영향을 확인한 선행연구에서 높은 굽으로 인해 비효율적인 근골격계와 신경근 기능을 보완하기 위해 보폭을 변경할 수 있다고 언급하며, 관절의 퇴행성 발병 위험성을 설명하였다(Hsue & Su, 2009).

굽 높이 변화에 따른 보행 패턴을 분석한 선행연구를 살펴보면 주요 실험 도구로 사용되는 하이힐의 재질이나 형태가 고려되지 않았고, 단일 측면에서의 제한된 움직임을 관찰함으로써 근육의 움직임, 운동학·운동역학적 특성을 고려한 종합적인 관찰이 필요하다고 제안하였다(Oh & Kim, 2009). 또한, 일상생활 중 빈번하게 발생하는 하이힐 착용과 그에 따른 계단 오르기 동작에 대한 다각적인 분석이 필요하다. 이에 본 연구에서는 건강한 20대 여성을 대상으로 3가지 굽 높이(1, 5, 7cm) 변화에 따른 계단 오르기 시 생체역학적 특성과 근육의 움직임을 분석하여, 굽 높이 차이에 따른 다양한 변인을 연계하여 제시하고 굽 높이에 따른 보행 패턴의 특성 확인을 통해 신체의 각 관절에 미치는 영향을 평가하고 안정성 향상을 위한 과학적 근거를 제시하고자 하였다.

## 연구방법

### 연구대상

본 연구의 대상자는 계단 오르기 및 하이힐 보행을 수행하는데 이상이 없는 자로 발 크기(size)는 230~235mm, 최근 3개월 이내 요추 및 하지 부상(발목염좌, 근육 부상 등)이 없는 총 24명의 건강한 성인 여성을 대상으로 모집하였다. 본 연구는 P대학의 생명윤리위원회에서 심의 승인을 받았으며(승인 번호: 1041386-202202-HR-15-

02) 모든 연구 대상자들의 연구 참여 동의를 받은 후 진행하였다. 연구대상자들의 신체적인 특성은 <Table 1>과 같다.

### 실험절차

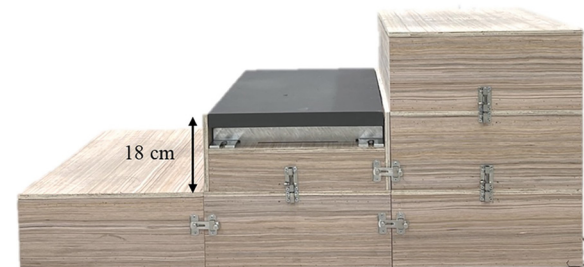
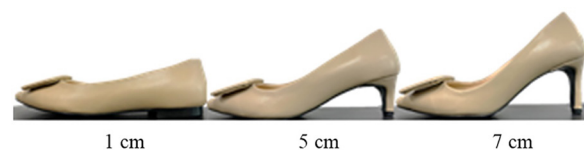
본 연구에 참여한 모든 대상자들은 하이힐 굽 높이에 따른 생체역학적 변인을 측정하기 위해 지면반력기(FP4060-08, Bertec, USA, Sampling rate: 1000Hz)가 내장된 자체 제작 계단(가로 60cm×세로 40cm×높이 18cm)과 10대의 적외선카메라(Oqus, Qualisys, Sweden, Sampling rate:200Hz), 8채널의 근전도측정기(Mini DTS, Noraxon., USA; Sampling rate: 1000Hz)를 사용하였다. 하이힐은 동일 회사의 굽 높이(1, 5, 7cm)만 다른 같은 디자인으로 선정하였으며(Hamandi & Ruken, 2019), 계단 높이는 건축물방화구조규칙 제15조(계단의 설치기준)를 참고하여 18cm로 설정하여 총 3개층 중 중간(2단)에 설치하였다(Figure 1).

모든 대상자는 준비운동 및 하이힐에 적응하기 위해 약 5분간의 적응 시간을 갖도록 하였으며, 착용 순서는 무작위로 배정하였다. 계단 오르기 속도는 대상자가 가장 편안하게 느끼는 속도를 선정하였다.

신체의 주요 관절에 Helen Hayes Marker Setting 가이드를 참고하여 반사 마커를 부착하였으며, 분석 목적에 따라 불필요한 머리와 팔 부분의 마커는 제외하였다. 세부 부착 위치는 경추 7번째 극돌기(Seventh spinous process of the cervical spine), 흉쇄관절(Sternoclavicular joint), 견봉(Acromion), 천골(Sacrum), 전상장골극(Anterior superior Iliac spine), 전하장골극(Posterior superior iliac spine), 대퇴골상과 내외측(Femur epicondyle

**Table 1.** Characteristic subjects (Mean ± SD)

Variables	Female (n=24)
Age (years)	22.08±1.28
Height (cm)	160.43±4.30
Weight (kg)	54.10±6.39
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	28.84±4.08
Foot Size (mm)	232.29±2.54



**Fig. 1.** High-heeled shoes & staircase setup

medial or lateral), 내외측(과)(Malleolus medial or lateralis), 발(Foot)의 1번째 및 5번째 중족골(Metatarsalbone) 및 수평면 뒤꿈치로 각 신체 분절 3~4개를 추가하여 총 34개의 반사 마커를 부착하였다 근전도 분석은 대퇴직근(RF), 외측광근(VL), 내측광근(VM), 전경골근(TA), 척추기립근(ES), 대퇴이두근(BF), 반건양근(ST), 내측 비복근(GM) 총 8개 근육을 선정하였으며, 양질의 신호를 얻기 위해 부착 부위를 면도기로 제모한 후 알코올 솜으로 세척 하였다. 이후 직경 22mm의 Ag/AgCl 표면 전극을 대상자 우세측에 부착하였으며, 전극 부착 부위는 SENIAM(Surface electromyography for non-invasive assessment of muscle) 가이드를 참고하였다(Figure 2).

실험 중 부착한 마커 및 근전도 장비가 떨어지지 않도록 키네시오 테이프를 사용하여 고정하였으며, 데이터의 획득은 하이힐 높이별 성공적인 3개의 데이터를 획득하고 평균값을 분석에 사용하였다.

## 자료 처리

마커의 위치 좌표와 지면반력, 근전도 원자료(Raw Data)는 Qualisys Track Manager Software를 통해 동기화하여 획득하였다. 분석 구간은 착지 시점(Heel Strike: HS)에서 발이 떨어지는 시점(Toe Off: TO)까지의 전체 구간으로 설정하였으며, HS와 TO는 지면반력의 10N을 기준으로 설정하였다(Figure 3).

하지관절의 관상면(front plane)과 시상면(sagittal plane), 수평면(transverse plane)에서의 최대모멘트 계산을 위해 Visual3D v5.01(C-Motion, USA)를 사용하였으며, 원자료에서 발생하는 노이즈 제거를 위해 Butterworth 4th order low-pass filter cut-off frequency 15Hz를 적용하였다(Donnelly et al., 2012).

계단 오르기 전체 구간의 근활성도 분석을 위해 각 근육에 대한 기준 자발적 수축(Reference Voluntary Contraction, RVC)을 측정하였다(Kim et al., 2011). RVC 동작은 6.62m 왕복 1회를 대상자가 선호하는 속도로 자연스러운 보행을 수행하는 동안 우세발의 입각기를 기준으로 하였으며, 총 3회 평균값을 산출하여 자료 분석에 사용되었다. 수집된 기준 자발적 수축 값은 백분율(%RVC)로 정규화(Normalization)하였다. 근전도 데이터의 자료분석은 Noraxon MR3 3.14 Software를 사용하였으며 원자료를 대역통과필터(Band pass filter) 20-500Hz의 필터링 후(Nene et al., 2004) RMS(Root Mean Square)를 계산하고 RVC에 대한 백분율로 표준화하여 제시하였다.

## 통계분석

측정된 모든 자료는 SPSS ver. 27.0(IBM, SPSS Statistics, USA) 통계 프로그램을 사용하여 평균과 표준편차를 제시하였다. 굽 높이에 대한 차이를 비교하기 위해 모든 변인은 샤피로 윌크(Shapiro-Wilk)의 정규성 검정을 실시하였으며 결과에 따라 반복측정 분산분석(Repeated Measure ANOVA) 또는 프리드먼 검정(Friedman test)을 사용하였다. 사후검정을 위해 LSD 검정 또는 윌콕슨 부호 서열 검정(Wilcoxon signed-rank test)를 실시하였으며 이때 모든 통계적 유의수준은  $\alpha=.05$ 로 설정하였다.

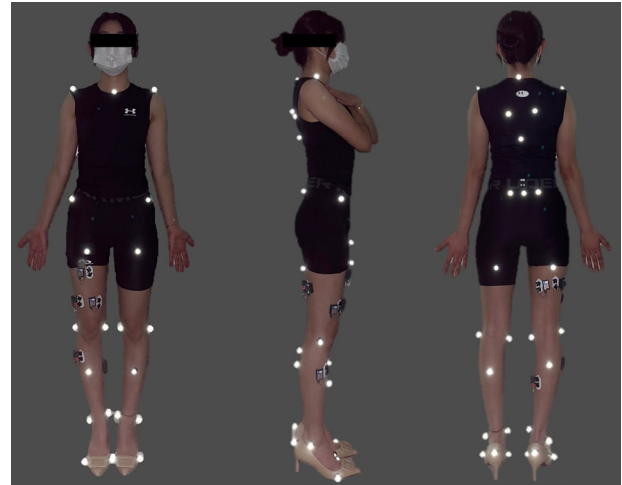


Fig. 2. Marker setting

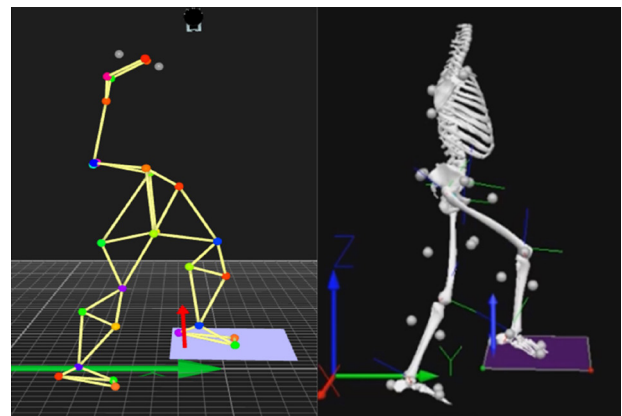


Fig. 3. QTM & Visual3D data processing

## 연구결과

### 하지관절 모멘트

하이힐 굽 높이가 변화에 따른 계단 오르기 시 하지관절 최대 모멘트를 비교한 결과는 <Table 2~4>와 같다.

발목관절의 최대 배측굴곡 모멘트( $X^2=10.750$ ,  $p=.005$ )와 족저굴곡 모멘트( $F=73.414$ ,  $p=.001$ ) 모두 유의한 차이를 나타냈다. 사후검정 결과 힐 높이가 증가할수록 배측굴곡(a>b,c), 저측굴곡(a>b,c) 모멘트 모두 감소하는 경향을 나타냈다. 또한, 최대 내반 모멘트( $F=84.138$ ,  $p=.001$ )와 내전 모멘트( $X^2=14.083$ ,  $p=.001$ )에서 통계적으로 유의한 차이를 나타냈으며, 사후검정 결과 굽 높이가 증가할수록 내반 모멘트(a>b)>c)와 내전 모멘트(a>b,c)는 감소하는 것으로 나타났다.

무릎관절의 최대 굴곡 모멘트는 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았지만, 최대 신전 모멘트( $F=71.890$ ,  $p=.001$ )는 유의한 차이를 나타냈으며, 사후검정 결과 힐 높이가 증가할수록 모멘트가

감소하는 경향(a>b>c)을 나타냈다. 관상면 상의 최대 내전 모멘트( $X^2=20.583, p=.001$ )와 최대 외전 모멘트( $F=6.044, p=.005$ )는 모두 유의한 차이를 나타냈으며, 사후검정 결과 굽 높이가 증가할수록 내전 모멘트는 감소하는 경향(a>b>c)이 나타났지만, 외전 모멘트는 5cm의 힐이 1, 7cm의 굽 높이가 보다 더 큰 외전 모멘트(b>a,c)를 나타내는 것으로 확인되었다. 최대 내회전 모멘트( $F=3.731, p=.031$ )와 외회전 모멘트( $X^2=26.083, p=.001$ ) 모두 통계적으로 유의한 차이를 나타냈으며, 사후검정 결과 굽 높이가 증가할수록 외회전 모멘트가 감소하는 경향(a>b>c)을 나타냈다.

**Table 2.** Maximum ankle joint moment (Unit: Nm/BW)

	Heel height			$F(p) / X^2(p)$	post hoc
	1cm <sup>a</sup>	5cm <sup>b</sup>	7cm <sup>c</sup>		
SP	+ 0.281±0.194	0.181±0.116	0.184±0.089	10.750 <sup>v</sup> (.005)	a>b,c
	- 1.411±0.178	1.245±0.253	1.046±0.173	73.414(.001)	a>b>c
FP	+ 0.638±0.159	0.453±0.163	0.363±0.142	84.138(.001)	a>b>c
	- 0.013±0.013	0.013±0.017	0.001±0.059	0.583 <sup>v</sup> (.747)	-
TP	+ 0.191±0.057	0.152±0.057	0.145±0.055	14.083 <sup>v</sup> (.001)	a>b,c
	- 0.068±0.048	0.057±0.031	0.054±0.039	1.750 <sup>v</sup> (.417)	-

SP : Sagittal plane(Dorsi-flexion +, Plantar-flexion -)  
 FP : Frontal plane(Inversion +, Eversion -)  
 TP : Transverse plane(Adduction +, Abduction -)  
<sup>v</sup> : Non parametric statistics

**Table 3.** Maximum knee joint moment (Unit: Nm/BW)

	Heel height			$F(p) / X^2(p)$	Post hoc
	1cm <sup>a</sup>	5cm <sup>b</sup>	7cm <sup>c</sup>		
SP	+ 1.408±0.219	1.343±0.251	1.360±0.201	2.469(.096)	-
	- 0.440±0.191	0.246±0.176	0.110±0.065	71.890(.001)	a>b>c
FP	+ 0.312±0.150	0.213±0.123	0.191±0.093	20.583 <sup>v</sup> (.001)	a>b,c
	- 0.374±0.232	0.429±0.204	0.491±0.173	6.004(.005)	b,c>a
TP	+ 0.242±0.074	0.267±0.066	0.278±0.084	3.731(.031)	b,c>a
	- 0.096±0.035	0.071±0.031	0.055±0.024	26.083 <sup>v</sup> (.001)	a>b>c

SP : Sagittal plane(Dorsi-flexion +, Plantar-flexion -)  
 FP : Frontal plane(Inversion +, Eversion -)  
 TP : Transverse plane(Adduction +, Abduction -)  
<sup>v</sup> : Non parametric statistics

**Table 4.** Maximum hip joint moment (Unit: Nm/BW)

	Heel height			$F(p) / X^2(p)$	Post hoc
	1cm <sup>a</sup>	5cm <sup>b</sup>	7cm <sup>c</sup>		
SP	+ 0.191±0.123	0.256±0.177	0.331±0.183	24.333 <sup>v</sup> (.001)	c>b>a
	- 0.545±0.154	-0.693±0.187	-0.751±0.208	25.446(.001)	c>b>a
FP	+ 0.149±0.056	0.147±0.071	0.163±0.079	2.250 <sup>v</sup> (.325)	-
	- 0.591±0.136	-0.664±0.151	-0.655±0.177	4.196(.033)	b,c>a
TP	+ 0.069±0.022	0.070±0.025	0.081±0.038	1.750 <sup>v</sup> (.417)	-
	- 0.264±0.094	-0.275±0.082	-0.255±0.098	1.333 <sup>v</sup> (.531)	-

SP : Sagittal plane(Dorsi-flexion +, Plantar-flexion -)  
 FP : Frontal plane(Inversion +, Eversion -)  
 TP : Transverse plane(Adduction +, Abduction -)  
<sup>v</sup> : Non parametric statistics

영덩이관절의 최대 굴곡 모멘트( $X^2=24.333, p=.001$ )와 신전 모멘트( $F=25.446, p=.001$ ) 모두 굽 높이에 따른 유의한 차이를 나타냈으며, 사후검정 결과 모두 굽 높이가 증가할수록 굴곡과 신전 모멘트의 증가 경향(c>b>a)을 나타냈다. 관상면 상 최대 내전 모멘트는 유의한 차이가 나타나지 않았지만, 외전 모멘트( $F=4.196, p=.033$ )는 유의한 차이를 나타냈으며, 사후검정 결과 5cm와 7cm가 1cm 보다 증가하는 경향(b,c>a)을 나타냈다. 수평면 상의 최대 내회전과 외회전 모멘트에서는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다.

근 활성화

하이힐 굽 높이 변화에 따른 근육 활성도를 걷기 동작을 기준으로 분석한 결과는 <Table 5>와 같다.

대퇴직근(RF)과 외측광근(VL)은 굽 높이가 증가할수록 걷기 동작보다 근육의 사용이 작아졌으며, 통계적으로 유의한 차이가 나타났다( $F=3.985, p=.025; X^2=6.333, p=.042$ ). 사후검정 결과 RF, VL 모두 1cm가 7cm보다 높은 근육 활성도를 나타내는 경향(a>c)을 나타냈다. 내측광근(VM)과 전경골근(TA) 또한 통계적으로 유의한 차이를 나타냈으며( $X^2=7.583, p=.023; X^2=6.333, p=.042$ ) 사후검정 결과 VM은 1cm가 5cm 및 7cm보다 높은 근육 활성도를 나타내는 경향(a>b,c)을 나타냈으며, TA는 7cm가 1cm보다 높은 근육 활성도를 나타내는 경향(c>a)을 나타냈다. 척추기립근(ES)와 대퇴이두근(BF)은 굽 높이 변화에 따라 계단 오르기 동작 시 근육의 움직임에서 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 반건양근(ST)과 비복근(GM)은 모두 통계적으로 유의한 차이를 나타냈으며( $X^2=7.583, p=.023; X^2=18.083, p=.001$ ), 사후검정 결과 ST는 1cm가 5cm보다 높은 경향(a>c)을 나타냈고, GM은 굽 높이가 증가에 따라 높은 근육 활성도(a>b>c)를 나타냈다.

**Table 5.** Muscle activity of lower extremity (Unit: %RVC)

	Heel height			$F(p) / X^2(p)$	Post hoc
	1cm <sup>a</sup>	5cm <sup>b</sup>	7cm <sup>c</sup>		
RF	204.63±95.91	189.66±101.03	166.81±72.04	3.985(.025)	a>c
VL	236.40±101.09	212.60±81.42	199.30±66.36	6.333 <sup>v</sup> (.042)	a>c
VM	310.66±103.24	252.99±82.21	253.32±90.85	7.583 <sup>v</sup> (.023)	a>b,c
TA	74.30±21.80	72.88±22.70	84.45±23.04	6.333 <sup>v</sup> (.042)	c>a
ES	137.92±63.06	127.62±74.22	136.29±71.04	5.583 <sup>v</sup> (.061)	-
BF	91.60±35.53	96.45±36.22	103.67±46.40	2.240(.118)	-
ST	72.03±14.92	59.92±12.82	66.14±19.55	7.583 <sup>v</sup> (.023)	a>c
GM	109.27±61.32	83.81±42.95	69.01±24.14	18.083 <sup>v</sup> (.001)	a>b>c

RF: Rectus Femoris  
 VM: Vastus Medialis  
 ES: Erector Spinae  
 ST: Semitendinosus  
 VL: Vastus Lateralis  
 TA: Tibialis Anterior  
 BF: Biceps Femoris  
 GM: Gastrocnemius Medial

<sup>v</sup> : Non parametric statistics

## 논의

본 연구는 계단 오르기 동안 굽 높이에 따른 성인 여성 하지의 운동역학적 변인과 근육 활성화에 나타나는 차이와 이로 인한 보행 패턴에 대한 특성을 알아보고자 하였다.

장기적인 하이힐의 착용은 신체의 안정성에 부정적인 영향을 미쳐 올바르게 앉은 자세를 초래 또는 하지 관절의 상해 및 부상의 원인으로 작용할 수 있다(Stürmer et al., 2000). 이에 많은 연구에서 다양한 보행 시 굽 높이에 따른 하지 생체역학적 변인에 어떠한 영향을 미치는지 관찰하기 위해 많은 관점의 접근이 이루어져 왔다. 발목관절은 신체 정렬과 균형을 조절 및 유지하거나, 보행 중 지면과의 충격을 흡수하는 중요한 역할이다(Park et al., 2013). 일반적으로 높은 굽을 착용한 상태에서 평지 보행 시 발목관절은 불안정한 균형을 안정적으로 유지하기 위해 낮은 굽보다 많은 생체역학적 요구가 발생할 수 있어 이는 주변 근육의 피로를 유발하고 감각을 변화시켜 부상 위험을 증가시킬 수 있다(Foster et al., 2012)고 보고되고 있으며, 계단 오르기 시 신발 면적 및 높이에 차이를 비교 분석한 선행연구의 결과(Shang et al., 2020) 또한 굽이 높을수록 발목관절의 시상면 가동범위가 증가하고 관상면 및 수평면 가동범위는 감소하는 결과를 나타내었다. 반면, Di Sipio et al.(2018) 연구에서는 굽이 높을수록 발목관절의 시상면 가동범위가 감소하는 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 굽 높이 증가에 따라 신체를 안정적으로 유지하기 위해 발목관절의 움직임을 제어하기 위한 보상작용일 수 있다고 설명(Shang et al., 2020)된 선행연구의 언급을 기반으로 본 연구 결과 또한 발목관절의 최대 배측굴곡과 저측굴곡, 내전, 내회전 모멘트는 높은 굽에 비해 낮은 굽에서 크게 나타났는데, 이는 높은 굽에 비해 굽이 낮을수록 발목을 사용해 신체의 안정성을 유지하는 것으로 생각된다(Mackey & Robinovitch, 2006). 또한, 발목관절 주변 근육의 결과는 굽 높이가 증가함에 따라 전경골근의 근육 활성화는 증가하는 결과가 확인되었지만, 내측 비복근 근육 활성화는 감소하는 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 굽 높이가 증가하게 됨에 따라 발목이 족저굴곡이 되어 발목관절 가동범위가 제한되고, 질량중심이 전방으로 이동하는 것(Puszczalowska-Lizis et al., 2019; Stefanyshyn et al., 2000)과 관련하여 전방 쓸림을 방지하고 균형 유지를 위해 전경골근의 지속적인 활성이 나타난 결과일 수 있다고 생각된다. 또한, 내측 비복근의 결과는 굽이 높을수록 앞보다 높게 위치한 신발 굽의 구조로 인해 발뒤꿈치 들림이 무의식적으로 나타나지 않고 의도되지 않은 들림으로 인해 내측 비복근이 휴식 길이에 도달하는 것과 관련하여, 능동장력이 줄어들어 짧아진 근섬유 길이로 인해 근육의 수축이 감소한 결과일 수 있다고 생각된다(Lee et al., 1987).

보행 시 무릎관절 모멘트의 패턴은 입각기 초반에 신전 근육을 사용한 후, 중간 입각기에서 초기 체중을 전달할 때 에너지 흡수로 인한 무릎관절의 굴곡이 나타나는 것으로 확인된다(Kim et al., 2000). 본 연구의 계단 보행 시 굽 높이가 증가에 따라 무릎관절의 최대굴곡 모멘트가 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 충격을 완화시키기 위해 무릎관절의 굴곡이 적절한 시점에 나타나지 않은 것으로 판단된다(Zabala et al., 2013). 실제, 굽 높이에 따른 보행 패턴 차이를 설명한 연구(Simonsen et al., 2012)에서 굽 높이의 증가는 보행 패턴을 변화시키고 적절한 움직임을 방해하는 요인으로 설명된다(Chien et al., 2013). 본 연구에서 관찰된 대퇴사두근과 반건양근의 결과는 굽 높이가 증가할수록 감소하는 결과를 나타내었

데, 이는 증가한 굽 높이가 계단 보행 시 무릎관절 주변 근육의 신경근 조절을 변화시켰다고 생각할 수 있다(Zabala et al., 2013). 한편, 본 연구에서 무릎관절의 최대 외전 및 내회전 모멘트 증가는 하이힐을 착용하고 보행하는 경우 관상면 및 수평면의 움직임 증가를 확인한 선행연구(Hsue & Su, 2009)와 관련이 있다고 생각된다.

고관절 및 몸통관절은 신체 중심부에 위치하기 때문에 특정 원인으로 인한 영향이 가해진다면 하지 전체 정렬에 문제가 나타날 수 있다(Neumann, 2010). 만약 고관절 기능이 정상적으로 나타나지 않는다면 보행속도, 보폭, 전후 고관절 가동범위 등과 같이 일반적인 보행에 도달하지 못하는 것으로 나타낸다(Bahadori et al., 2022). 특히, 굽 높이나 신발의 형태는 보행 패턴과 관련된 운동학적 변인에 영향을 미치는 것으로 확인된다(Shang et al., 2020). 본 연구에서 고관절의 최대 외전 모멘트는 낮은 굽보다 높은 굽에서 크게 나타났는데 이러한 결과는 계단 오르기 시 하지의 외전근 및 내외측 회전근이 요구되는 것(Hsue & Su, 2009)과 고관절의 안정성 및 무릎에 과도한 부하를 방지하기 위해 나타났다고 생각된다(Chien et al., 2013).

## 결론 및 제언

본 연구는 성인 여성을 대상으로 계단 오르기 시 하이힐 높이 따른 운동역학적 차이를 규명하는데 목적이 있었다. 연구결과를 종합해 볼 때, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 굽 높이가 증가함에 따라 발목관절의 최대 배측·저측·내반·내전 모멘트의 유의한 감소가 나타났다. 둘째, 무릎관절의 최대 신전·내전·외회전 모멘트는 굽 높이 증가에 따라 유의한 감소가 나타났으며, 최대 외전·내회전 모멘트는 유의한 증가가 나타났다. 셋째, 엉덩이관절의 최대 굴곡·신전·외전 모멘트는 굽 높이 증가에 따라 유의한 증가가 나타났다. 넷째, 대퇴직근, 내외측 광근, 반건양근, 비복근은 굽 높이 증가에 따라 걷기 동작에 비해 작은 근 활성을 나타냈지만 전경골근은 큰 근 활성을 나타냈다.

결론적으로 본 연구 결과를 통해 하이힐 굽 높이 변화에 따라 운동역학적 변인에 차이가 있는 것으로 보이며, 굽 높이가 높아지면서 발목의 사용이 제한되면서 무릎과 엉덩이 관절의 움직임 증가에 따른 부상 위험성이 확인되었다. 향후 다양한 형태 신발과 계단 높이 차이에 따른 효과 차이 등의 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 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: Jong-chul Park, Joong-hyun Ryu, Data curation: Sang-ha Park, Jong-chul Park, Formal analysis: Jong-chul Park, Jae-myung Park, Methodology: Sang-ha Park, Project administration: Jong-chul Park, Joong-hyun Ryu, Visualization: Sang-ha Park, Writing-original draft: Sang-ha Park, Jong-chul Park, Writing-review & editing: Jong-chul Park, Jae-myung Park

## 참고문헌

- Andriacchi, T. P., Andersson, G. B., Fermier, R. W., Stern, D., & Galante, J. O. (1980). A study of lower-limb mechanics during stair-climbing. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 62(5), 749-757.
- Bahadori, S., Middleton, R. G., & Wainwright, T. W. (2022). Using gait analysis to evaluate hip replacement outcomes—Its current use, and proposed future importance: A narrative review. *Healthcare*, 10(10), 2018.
- Cayless, S. M. (2001). Slip, trip and fall accidents: Relationship to building features and use of coroners' reports in ascribing cause. *Applied Ergonomics*, 32(2), 155-162.
- Chien, H.-L., Lu, T.-W., & Liu, M.-W. (2013). Control of the motion of the body's center of mass in relation to the center of pressure during high-heeled gait. *Gait & Posture*, 38(3), 391-396.
- Cronin, N. J. (2014). The effects of high heeled shoes on female gait: A review. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 24(2), 258-263.
- Di Sipio, E., Piccinini, G., Pecchioli, C., Germanotta, M., Iacovelli, C., Simbolotti, C., ... & Padua, L. (2018). Walking variations in healthy women wearing high-heeled shoes: Shoe size and heel height effects. *Gait & Posture*, 63, 195-201.
- Donnelly, C. J., Lloyd, D. G., Elliott, B. C., & Reinbolt, J. A. (2012). Optimizing whole-body kinematics to minimize valgus knee loading during sidestepping: implications for ACL injury risk. *Journal of biomechanics*, 45(8), 1491-1497.
- Foster, A., Blanchette, M. G., Chou, Y.-C., & Powers, C. M. (2012). The influence of heel height on frontal plane ankle biomechanics: Implications for lateral ankle sprains. *Foot & Ankle International*, 33(1), 64-69.
- Frey, C., Thompson, F., Smith, J., Sanders, M., & Horstman, H. (1993). American orthopaedic foot and ankle society women's shoe survey. *Foot & Ankle*, 14(2), 78-81.
- Gefen, A., Megido-Ravid, M., Itzchak, Y., & Arcan, M. (2002). Analysis of muscular fatigue and foot stability during high-heeled gait. *Gait & Posture*, 15(1), 56-63.
- Hamandi, S. J., & Ruken, D. M. (2019). Biomechanical study with kinematic and kinetic descriptions of the effect of high-heeled shoes in healthy adult females based on gait analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671, 012063.
- Hsue, B.-J., & Su, F.-C. (2009). Kinematics and kinetics of the lower extremities of young and elder women during stairs ascent while wearing low and high-heeled shoes. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(6), 1071-1078.
- Jang, I.-Y., Kang, D.-H., Jeon, J.-K., Jun, H.-J., & Lee, J.-H. (2016). The effects of shoe heel height and gait velocity on position sense of the knee joint and balance. *The Journal of Physical Therapy Science*, 28(9), 2482-2485.
- Kim, M. H., Yi, C. H., Yoo, W. G., & Choi, B. R. (2011). EMG and kinematics analysis of the trunk and lower extremity during the sit-to-stand task while wearing shoes with different heel heights in healthy young women. *Human Movement Science*, 30(3), 596-605.
- Kim, R. B., Lee, S. C., & Jin, Y. W. (2000). Influence of walking speed on kinetics of joints of lower limbs. *The Korean Journal of Physical Education*, 39(4), 675-687.
- Lee, K. H., Matteliano, A., Medige, J., & Smiehorowski, T. (1987). Electromyographic changes of leg muscles with heel lift: Therapeutic implications. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 68(5 Pt 1), 298-301.
- Mackey, D. C., & Robinovitch, S. N. (2006). Mechanisms underlying age-related differences in ability to recover balance with the ankle strategy. *Gait & Posture*, 23(1), 59-68.
- McFadyen, B. J., & Winter, D. A. (1988). An integrated biomechanical analysis of normal stair ascent and descent. *Journal of Biomechanics*, 21(9), 733-744.
- Mika, A., Oleksy, L., Mika, P., Marchewka, A., & Clark, B. C. (2012). The influence of heel height on lower extremity kinematics and leg muscle activity during gait in young and middle-aged women. *Gait & Posture*, 35(4), 677-680.
- Nene, A., Byrne, C., & Hermens, H. (2004). Is rectus femoris really a part of quadriceps?: Assessment of rectus femoris function during gait in able-bodied adults. *Gait & posture*, 20(1), 1-13.
- Neumann, D. A. (2010). Kinesiology of the hip: A focus on muscular actions. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 40(2), 82-94.
- Oh, D., & Kim, S. (2009). Effect of shoe heel height on vastus medialis and vastus lateralis electromyographic activity during stair ascending and descending. *Physical Therapy Korea*, 16(3), 24-31.
- Park, Y. H., Kim, Y. M., & Lee, B. H. (2013). An ankle proprioceptive control program improves balance, gait ability of chronic stroke patients. *Journal of physical therapy science*, 25(10), 1321-1324.
- Pickle, N. T., Wilken, J. M., Aldridge, J. M., Neptune, R. R., & Silverman, A. K. (2014). Whole-body angular momentum during stair walking using passive and powered lower-limb prostheses. *Journal of Biomechanics*, 47(13), 3380-3389.
- Pirker, W., & Katzenschlager, R. (2017). Gait disorders in adults and the elderly. *Wiener Klinische Wochenschrift*, 129(3-4), 81-95.
- Protopapadaki, A., Drechsler, W. I., Cramp, M. C., Coutts, F. J., & Scott, O. M. (2007). Hip, knee, ankle kinematics and kinetics during stair ascent and descent in healthy young individuals. *Clinical Biomechanics*, 22(2), 203-210.
- Puszczalowska-Lizis, E., Dąbrowiecki, D., Jandziś, S., & Żak, M. (2019). Foot deformities in women are associated with wearing high-heeled shoes. *Medical Science Monitor*, 25, 7746-7754.
- Shang, J., Chen, L., Zhang, S., Zhang, C., Huang, J., Wang, X., ... & Ma, X. (2020). Influence of high-heeled shoe parameters on biomechanical performance of young female adults during stair

- ascent motion. *Gait & Posture*, 81, 159-165.
- Silverman, A. K., Neptune, R. R., Sinitski, E. H., & Wilken, J. M. (2014).** Whole-body angular momentum during stair ascent and descent. *Gait & Posture*, 39(4), 1109-1114.
- Simonsen, E. B., Svendsen, M. B., Nørreslet, A., Baldvinsson, H. K., Heilskov-Hansen, T., Larsen, P. K., ... & Henriksen, M. (2012).** Walking on high heels changes muscle activity and the dynamics of human walking significantly. *Journal of Applied Biomechanics*, 28(1), 20-28.
- Stefanyshyn, D. J., Nigg, B. M., Fisher, V., O'Flynn, B., & Liu, W. (2000).** The influence of high heeled shoes on kinematics, kinetics, and muscle EMG of normal female gait. *Journal of Applied Biomechanics*, 16(3), 309-319.
- Stürmer, T., Günther, K.-P., & Brenner, H. (2000).** Obesity, overweight and patterns of osteoarthritis: The Ulm osteoarthritis study. *Journal of Clinical Epidemiology*, 53(3), 307-313.
- Tencer, A. F., Koepsell, T. D., Wolf, M. E., Frankenfeld, C. L., Buchner, D. M., Kukull, W. A., ... & Tautvydas, M. (2004).** Biomechanical properties of shoes and risk of falls in older adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, 52(11), 1840-1846.
- Wiedemeijer, M. M., & Otten, E. (2018).** Effects of high heeled shoes on gait. A review. *Gait & Posture*, 61, 423-430.
- Yoon, S.-H. (2008).** The effect of stair depth on ground reaction force parameters -Asymmetric and variability indices-. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 18(1), 169-178.
- Yoon, S.-W., Lee, J.-W., & Choi, M.-S. (2014).** Effect of shoes sole form on knee and ankle muscle activity. *Journal of the Korean Society of Physical Medicine*, 9(4), 347-354.
- Zabala, M. E., Favre, J., Scanlan, S. F., Donahue, J., & Andriacchi, T. P. (2013).** Three-dimensional knee moments of ACL reconstructed and control subjects during gait, stair ascent, and stair descent. *Journal of Biomechanics*, 46(3), 515-520.

# 성인 여성의 계단 보행 시 하이힐 굽 높이에 따른 생체역학적 비교

박상하<sup>1</sup>, 박종철<sup>2</sup>, 류중현<sup>3</sup>, 박재명<sup>4</sup>

<sup>1</sup>국립부경대학교 박사과정

<sup>2</sup>국립부경대학교 교수

<sup>3</sup>Aspire Academy Lead Biomechanist

<sup>4</sup>한국체육대학교 교수

[목적] 본 연구는 성인 여성의 계단 오르기 시 굽 높이에 따른 운동역학적 변인을 분석함으로써 동작의 특성을 확인하고자 하였다.

[방법] 근골격계 이상이 없는 총 24명의 20대 성인 여성(연령  $22.08 \pm 1.28$  years, 신장  $160.43 \pm 4.30$  cm, 체중  $54.10 \pm 6.39$  kg)을 대상으로 하였으며, 모든 대상자는 굽 높이가 1.5·7cm인 같은 종류의 하이힐을 착용한 상태로 계단(높이 18cm) 오르기 동작을 수행하였다. 10대의 적외선카메라(200Hz)와 계단 중간에 지면반력기(1000Hz)를 설치하였으며, 8채널의 근전도 측정장비(1000Hz)를 활용해 계단 오르기 시 각 관절의 최대모멘트와 근육 활성도를 분석하였다. 데이터 분석은 IBM SPSS Statistics ver. 27.0(IBM., USA)을 사용했습니다. 모든 변수는 Shapiro-Wilk's 정규성 검정 결과를 토대로 결과에 따라 반복 측정 분산분석(Repeated Measure ANOVA) 또는 프리드먼 검정(Friedman test)을 실시하였다. 사후 검정에는 LSD 검정 또는 Wilcoxon signed-rank 검정을 실시하였다.

[결과] 첫째, 굽 높이가 증가함에 따라 발목관절의 최대 배측·저측·내반·내전 모멘트의 유의한 감소가 나타났다. 둘째, 무릎관절의 최대 신전·내전·외회전 모멘트는 굽 높이 증가에 따라 유의한 감소가 나타났으며, 최대 외전·내회전 모멘트는 유의한 증가가 나타났다. 셋째, 엉덩이관절의 최대 굴곡·신전·외전 모멘트는 굽 높이 증가에 따라 유의한 증가가 나타났다. 넷째, 대퇴직근, 내외측 광근, 반건양근, 비복근은 굽 높이 증가에 따라 걷기 동작에 비해 작은 근 활성을 나타냈지만 전경골근은 큰 근 활성을 나타냈다.

[결론] 본 연구의 결과는 굽 높이가 증가함에 따라 발목의 사용은 제한되고 더 큰 무릎과 엉덩이 관절의 모멘트를 발생시킴으로써 부상의 위험성이 증가된다는 것을 시사하며, 특히 특정 근육에 대한 과사용으로 성인 여성들의 근력 불균형이 나타날 수 있는 것으로 확인된다.

## 주요어

성인 여성, 계단 보행, 하이힐, 모멘트, 근 활성