보행 시 하이힐 착용에 따른 내측비복근 근섬유다발 길이 및 근활성도의 즉각적인 변화 분석

김진선[1]·이해동[2,3]

[1] 연세대학교 일반대학원 체육학과 · [2] 연세대학교 교육과학대학 체육교육과 · [3] 연세대학교 융합체육과학선도연구소

Acute Changes in Fascicle Behavior and Electromyographic Activity of the Medial Gastrocnemius during Walking with High-heel Shoes

Jin-Sun Kim[1] · Hae-Dong Lee[2,3]

[1]*Department of Physical Education, Graduate School of Yonsei University, Seoul, Korea*

[2]*Department of Physical Education, College of Sciences in Education, Yonsei University, Seoul, Korea*

[3]*The Frontier Research Institute of Convergence Sports Science, Yonsei University, Seoul, Korea*

Received 31 January 2015; Received in revised form 9 March 2015; Accepted 16 March 2015

ABSTRACT

Objective : The purpose of this study was to investigate the acute effect of high heel walking on the behavior of fascicle length and activation of the lower limb muscles.

Methods: Twelve healthy inexperienced high-heel wearers(age: 23.1±2.0 yrs, height: 162.4±4.9 cm, weight: 54.4±8.5 kg) participated in this study and performed walking in high heels(7 cm) and barefoot on treadmill with preferred speed. During the gait, the lower limb joint kinematics were obtained using a motion analysis system. In addition, the changes in fascicle length and the level of activation of the medial gastrocnemius(MG) were simultaneously monitored using a real-time ultrasound imaging technique and surface electromyography, respectively.

Results : The results of this study showed that the MG fascicle operated in significantly shorter length in high-heel walking(min 37.64±8.59 mm to max 43.99±8.66 mm) in comparison with barefoot walking(min 48.26±9.02 mm to max 53.99±8.54 mm)($p<.05$). Also, the MG fascicle underwent lengthening during high-heel walking with relatively low muscle activation while it remained isometrically during barefoot walking with relatively high muscle activation.

Conclusion : Thus, it has been verified that wearing of high heels altered the operating range of the MG fascicle length and the pattern of muscle activation, suggesting that prolonged wearing of high heels might induce structural alterations of the MG and, in turn, hinder normal functions of the MG muscle during walking.

Keywords : Human, Skeletal muscle, Muscle-tendon complex, Fascicle, Adaptation, High-heel, Gait

Ⅰ. 서 론

근-건 복합체(muscle-tendon complex, MTC) 내에서 근육과 건의 상호작용으로 인한 근길이 변화는 근육의 힘과 파워의 발현 및 에너지 효율을 결정하는 중요한 요인이다. 근육에 직렬연결 되어있는 건의 길이 변화를 통한 탄성에너지의 저장 및 방출로 인해 근육이 감당해야 하는 기계적인 일의 양이 줄어들며(Cavagna, Heglund, & Taylor, 1977; Alexander & Bennet-Clark, 1977; Roberts, Marsh, Weyand, & Taylor, 1997; Alexander, 1988, 2002; Griffith, 1991), 근-건 복합체의 상당한 길이 변화에도 불구하고 근육이 거의 등척성 수축(isometric contraction)을 하도록 함으로써 더욱 큰 힘을 발현하고 에너지를 적게 소모하게 된다(Griffiths, 1991; Roberts & Scales, 2002, 2004).

Corresponding Author : Hae-Dong Lee
Department of Physical Education, College of Sciences in Education, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 120-749 Korea
Tel : +82-2-2123-6188 / Fax : +82-2-2123-8375
E-mail : xbridge1997@yonsei.ac.kr

Copyright@ 2015 by Korean Society of Sport Biomechanics

일반적으로 근길이 변화는 인체 관절의 움직임을 측정한 운동학적(kinematic) 연구 결과를 통해 추정해왔으나, 동물 실험으로 근-건 복합체의 움직임을 직접 관찰함으로써 유연한 건과 건막(aponeurosis)으로 인해 근육의 움직임이 운동학적 연구 결과와 다르게 나타나는 것을 확인하였으며(Griffiths, 1991; Roberts, Marsh, Weyand, & Taylor, 1997; Roberts & Scales, 2002, 2004), 인체를 대상으로 초음파 영상 기법을 활용한 다수의 실험연구에서도 이 같은 사실이 증명되었다(Fukunaga, Kubo, Kawakami, Fukashiro, Kanehisa, & Maganaris, 2001; Fukunaga, Kawakami, Kubo, & Kanehisa, 2002; Ishikawa, Pakaslahti, & Komi, 2007; Lichtwark, Bougoulias, & Wilson, 2007; Lee, Han, Kim, Oh, Cho & Yoon, 2015).

특히 보행 시 초음파 영상을 분석한 연구에서 운동학적으로 족저굴곡근(plantar flexor)이 신장성 수축(eccentric contraction)을 할 것으로 추정되는 지지구간(stance phase)에 아킬레스건의 신장으로 근육은 거의 등척성 혹은 단축성 수축(concentric contraction)을 하는 것으로 나타났다(Fukunaga, Kubo, Kawakami, Fukashiro, Kanehisa, & Maganaris, 2001; Hof, Van Zandwijk, & Bobbert, 2002; Ishikawa, Komi, Grey, Lepola, & Bruggemann, 2005; Lichtwark, Bougoulias, & Wilson, 2007; Cronin, Barrett, & Carty, 2012). 이로 인해 근육이 보다 더 큰 힘을 발현할 수 있는 길이 범위 내에서 수축하며 건의 신장에 따른 탄성에너지의 저장 및 방출로 인해 에너지 소모를 최소화할 수 있다(Fukunaga, Kubo, Kawakami, Fukashiro, Kanehisa, & Maganaris, 2001).

그러나 하이힐 착용 후 보행할 경우 무릎굴곡 및 족저굴곡각이 넓어져 족저굴곡근-건 복합체의 길이가 짧아진 범위에서 수축하게 되며 무게중심이 앞쪽으로 이동하여 높은 지면반력이 발생하게 된다((Ebbeling, Hamill, & Crussemeyer, 1994; Hong, Lee, Chen, Pei, & Wu, 2005; Snow & Williams, 1994). 특정한 운동범위(working range)나 부하가 지속적으로 주어지게 되면 형태와 기능이 변화하게 되는 근과 건의 특성에 따라(De Boer, Maganaris, Seynnes, Rennie, & Narici, 2007; Magnusson, Narici, Maganaris, Kjaer, 2008), 하이힐의 장기간 착용이 내측비복근(medial gastrocnemius) 근섬유다발(fascicle) 길이 감소를 유발할 수 있다는 가정 하에 진행된 최근 연구들에서, 하이힐을 거의 착용하지 않는 대상군에 비해 장기간동안 지속적으로 하이힐을 신어온 대상군의 내측비복근 근섬유다발 길이가 더 짧고 건의 경도(stiffness)가 더 높으며(Csapo, Maganaris, Seynnes, & Narici, 2010), 보행 시 근섬유다발의 길이변화 범위(strain)가 더 큰 것으로 나타났다(Cronin, Barrett, & Carty, 2012).

그러나 앞선 연구에서는 서로 다른 대상군을 비교하였기 때문에 하이힐 착용과 근섬유다발 길이 변화 간의 인과관계가 명확하지 않으며, 하이힐 착용이 근섬유다발 길이 변화에 미치는 직접적인 영향을 알아보기 위해서는 특정한 부하 환경 및 기능에 적응되지 않은 대상자를 모집하여 하이힐 착용 유무의 효과를 검증할 필요성이 있다. 따라서 본 연구의 목적은 보행 시 하이힐 착용이 내측비복근의 길이 변화 패턴에 미치는 영향을 분석하는 것으로, 이를 확인하기 위해 하이힐 착용 경험이 없는 여성이 맨발과 하이힐 보행을 수행하는 동안 내측비복근 근섬유다발 길이의 변화와 근활성도를 실시간으로 측정하여 그 차이를 분석하였다.

Ⅱ. 연구방법

1. 연구 대상자

본 연구에서는 하지 근골격계 과거병력이 없으며, 하이힐 착용 경험이 없는 12명의 건강한 성인 여성(age 23.1±2.0 yrs; height 162.4±4.9 cm; weight 54.4±8.5 kg)을 대상으로 하였고, 이들은 실험의 목적과 방법에 대한 충분한 이해를 바탕으로 참가 동의서를 작성한 후 실험에 참여하였다.

2. 실험 절차

대상자는 모두 스판재질의 타이즈를 착용하였으며, 자신의 발 크기에 맞는 동일한 제품으로 뒷 굽 높이 7cm, 밑면 넓이 1㎠의 하이힐을 착용하였다(Figure 1). 각 대상자마다 2분간의 트레드밀 보행 적응 및 선호 속도(맨발 보행 시 2.31±0.31 km/h, 하이힐 보행 시 2.12±0.34 km/h) 확인 절차를 거친 후 맨발 보행과 하이힐 보행을 순차적으로 실시하였다.

Figure 1. High-heel shoes.

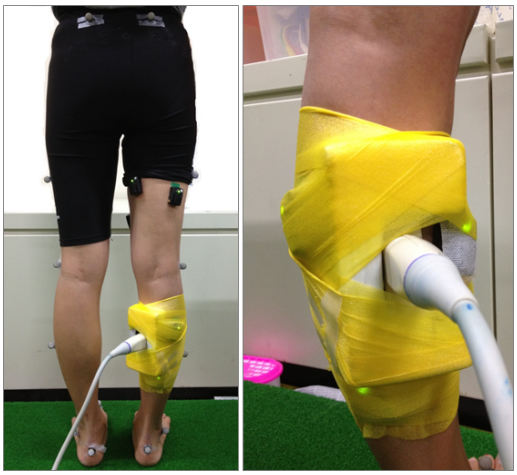

Figure 2. Reflective marker, EMG sensor and probe position. The lightweight foam fixation used for the fixation of the probe secured with an elastic bandage over the belly of MG.

3. 자료 수집 및 분석

본 실험에서는 연속하여 보행하는 동안 10 보행 주기 동안의 자료를 30 초 간격으로 2회 수집하였다.

1) 운동학적 자료

하지관절의 운동학적 자료는 8대의 적외선 카메라(Vicon MX-F20, Oxford Metric Ltd, Oxford, UK)로 구성된 3차원 동작 분석 시스템(Vicon Motion Systems, Oxford Metrics Ltd, Oxford, UK)을 사용하여 300 Hz의 빈도로 수집하였으며, <Figure 2>와 같이 14 mm의 구형 반사 마커를 대상자의 좌우 Anterior Superior Iliac Spine(ASIS), Posterior Superior Iliac Spine(PSIS), lateral mid thigh, lateral knee epicondyle, lateral mid shank, lateral malleoli, posterior calcaneus, second metatarsal head에 부착하여 시상면(sagittal plane)에서 엉덩관절, 무릎관절 및 발목관절의 굴곡/신전 각도를 수집하였다. 관절 각도는 엉덩관절과 무릎관절각을 이루는 양 분절이 180°인 0°를 기준으로 굴곡(+)/과신전(-)으로, 발목관절은 족배굴곡(+)/족저굴곡(-)으로 정의하였다.

2) 근섬유다발 길이

내측비복근의 근섬유다발 길이는 실시간 초음파 영상 장비(α10, Aloka, Japan)와 프로브(Aloka 7.5 MHz UST-5712 linear-array probe, Japan)를 사용하여 측정하였다. 프로브는 내측비복근의 중앙 지점에 부착하였으며(Figure 2), 초음파 영상은 30 Hz의 빈도로 수집하였다. 수집된 초음파 영상은 영상 측정 프로그램인 Image J(Wayne Rasband, National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA)를 이용하여 분석하였으며, <Figure 3>과 같이 표면근막(superficial aponeurosis)과 심부근막(deep aponeurosis) 사이를 연결하여 근섬유다발 길이를 측정하였다.

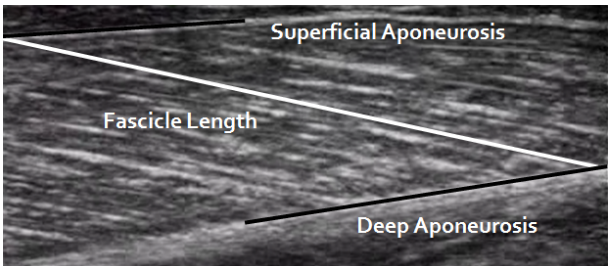

Figure 3. Ultrasound image of longitudinal section of MG. The white line shows the course of a fascicle between the SA and the DA of the MG muscle.

3) 근-건 복합체 길이

내측비복근-건 복합체의 길이 변화는 산출된 관절 각도를 아래와 같은 Grieve, Pheasant, & Cavanagh, (1978)의 근-건 복합체 길이 변화 추정식에 대입하여 추정하였다.

$$\Delta L_i = A_0 + A_1(\Theta_i) + A_2(\Theta_i)^2 \quad (1)$$

$$\Delta L = \Delta L_{ankle} + \Delta L_{knee} \quad (2)$$

ΔL_i: the length change attributable to angle(Θ_i)

Table 1. Coefficients for predicting change in muscle length (in percent segment length) from joint angle (in degrees) (Grieve et al., 1978)

	A_0	A_1	A_2
Ankle	-22.18468	+0.30141	-0.00061
Knee	6.46251	-0.07987	+0.00011

4) 근전도

근전도 자료를 수집하기 위해 무선 근전도 측정 장비(Trigno Wireless System, Delsys, Inc., Boston, MA, USA)를 사용하였으며, 내측비복근의 체모를 제거하고 알코올로 닦아낸 후 표면 전극을 부착하였다. 근전도 신호의 대역폭(bandwidth)은 20-450 Hz사이로 설정하였으며, 전극의 공통 성분 제거 비(CMRR)는 110 dB로 하였다. 근전도 신호는 1000배로 증폭하여 1500 Hz 빈도로 수집하였으며, 근육에 부착된 무선 송신기를 통하여 송신되었다. 수집된 자료는 EMG 분석 소프트웨어(EMG Works Analysis 4.0, Delsys Inc.)를 사용하여

Copyright@ 2015 by Korean Society of Sport Biomechanics

분석하였으며, 필터링 된 자료는 전파 정류(full wave rectification) 과정을 수행한 후, 이동 윈도우의 길이(window length) 50 ms, 윈도우 오버랩(window overlap) 25 ms으로 RMS(root mean square) 값을 산출하였다. 산출된 RMS 값에서 오른발 지지기의 구간별 Peak 값을 구하여 보행 과제 간 근활성 패턴을 비교하였다.

4. 구간 설정

본 연구에서는 오른발 지지기(stance phase)를 중점적으로 분석하였으며 각 동작 구간에 따른 동작 시점은 다음과 같다.

- HC : Right heel contact
- FF : Right foot flat
- MS : Mid stance
- HO : Right heel off
- TO : Right toe off

5. 통계 처리

하이힐 착용 유무에 따른 근섬유다발 길이 차이를 알아보기 위해 95% 신뢰구간(confidence interval)을 비교하였으며, 근섬유다발의 길이 변화량 및 근활성도 차이는 paired t-test를 사용하여 유의수준 α=.05 수준에서 비교하였다.

Ⅲ. 결 과

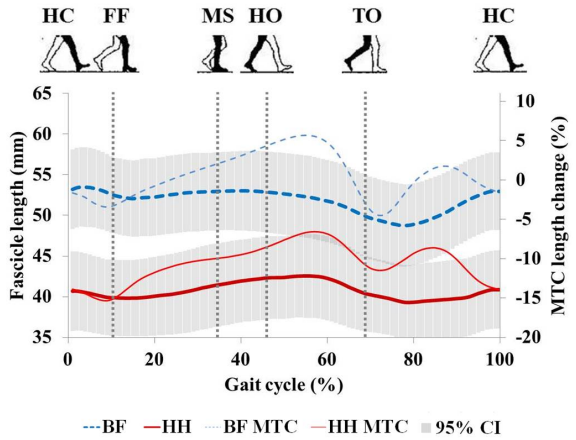

Figure 4. Average fascicle length and MTC length change across the gait cycle. HC: heel contact, FF: foot flat, MS: mid stance, HO: heel off, TO: toe off, BF: barefoot walking, HH: high heel walking, MTC: muscle-tendon complex

Table 2. The MG fascicle length change(ΔFascicle length) and muscle activation change(Δpeak EMG) during the stance phase(FF to HO).

	Barefoot		High-heel		p
	Mean	SD	Mean	SD	
ΔFascicle length (gradient)	.060	.047	.136	.049	.001*
Δpeak EMG(V)	.030	.011	.016	.019	.039*

*p<.05

<Figure 4>는 맨발과 하이힐 보행 시 보행 주기(gait cycle)의 전체 구간에 대하여 내측비복근 근섬유다발 길이의 95% 신뢰구간(confidence interval)을 나타낸 그래프이다. 보행의 HC부터 HO까지 발이 지면을 딛고 있는 구간과, HC 직전의 구간에서, 맨발 보행 시와 비교하여 하이힐 보행 동안 내측비복근 근섬유다발의 길이가 유의하게 감소한 범위에서 움직이는 것으로 나타났다. 오른발이 지면에서 떨어지는 HO부터 TO까지의 구간에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다.

내측비복근 근섬유다발의 길이 변화량을 나타내기 위해 보행 시 FF부터 HO까지의 구간에서 근섬유다발의 최대 수축 시점과 최대 신장 시점까지의 기울기를 산출한 결과(Table 2), 맨발 보행보다 하이힐 보행 시에 내측비복근 근섬유다발의 길이 변화량이 두 배 가량 유의하게 크게 나타났다(.060 ± .047 vs. .136 ± .049).

보행 주기를 세분화한 구간 사이의 내측비복근 근활성도의 최대 진폭(peak EMG) 변화량을 산출하여, 맨발 보행 시 최대 진폭 구간(HO부터 TO까지)에 대한 비율로 표준화하여 살펴본

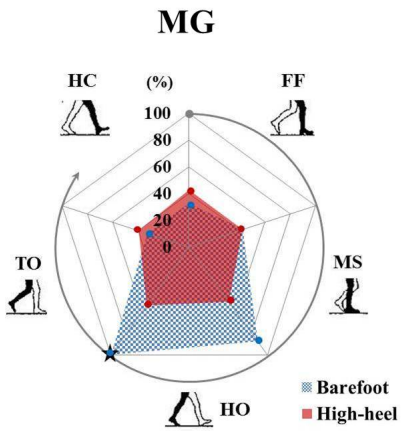

Figure 5. The peak RMS EMG value for the gait cycle for each phase(expressed as a percentage of the maximum muscle activation at barefoot walking[%] ;★). HC: heel contact, FF: foot flat, MS: mid stance, HO: heel off, TO: toe off, BF: barefoot walking

결과(Table 2, Figure 5), 근-건 복합체의 길이가 증가하는 보행 입각기의 FF부터 HO까지의 구간 사이에 맨발 보행보다 하이힐 보행 시에 내측비복근 근활성도의 최대 진폭 변화량이 유의하게 적게 나타났다(.030 ± .011 vs. .016 ± .019).

Ⅳ. 논 의

본 연구의 목적은 하이힐 착용 경험이 없는 건강한 성인 여성을 대상으로 하이힐 보행 시 즉각적으로 나타나는 내측비복근의 길이 변화 패턴 및 근육의 활성화 패턴 변화를 알아보는데 있으며, 이를 확인하기 위하여 맨발 보행과 하이힐 보행 시 하지 관절각과 내측비복근의 근섬유다발 길이 변화 및 근활성도를 실시간으로 관찰하였다. 연구 결과에서 맨발 보행 시와 비교하여 하이힐 보행 시 근-건 복합체의 길이가 증가하는 구간에 내측비복근 근섬유다발의 길이가 유의하게 짧은 길이에서 신장성 수축 패턴을 보이며, 근활성이 적게 나타났다. 이는 맨발 보행과 하이힐 보행 시 내측비복근 근섬유다발의 길이 변화 범위와 수축 패턴 및 근활성 패턴에 차이가 나타날 것이라는 예상과 일치한다.

본 연구의 주된 연구결과 중 하나는 보행의 전 구간에서 맨발인 조건에 비해 하이힐 착용 시 내측비복근 근섬유다발이 짧은 길이에서 움직이는 것이다. 근섬유다발 길이는 근육의 길이-장력 관계(force-length relationship)에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Lieber, Loren, & Friden, 1994; Narici, 1999). 따라서 맨발의 경우에 비해 하이힐을 착용할 경우 내측비복근이 근육의 길이-장력 관계에서 더 적은 힘을 발현하는 오름부분(ascending limb)의 길이 범위에서 활동한다는 점을 고려하면(Kawakami, Ichinose, & Fukunaga, 1998), 하이힐 착용이 역학적인 측면에서 상대적으로 낮은 힘 발현 잠재력을 갖는 길이 범위에 놓이는 결과를 유발한다고 볼 수 있다.

맨발 보행을 수행할 경우 발바닥 전체가 지면에 닿는 시점(FF)부터 발뒤꿈치를 떼기(HO)까지의 발목관절이 족배굴곡(dorsiflexion)되고 근-건 복합체의 길이가 늘어나는 구간에서, 내측비복근 근섬유다발의 길이가 비교적 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Fukunaga, Kubo, Kawakami, Fukashiro, Kanehisa, & Maganaris (2001), Ishikawa, Komi, Grey, Lepola, & Bruggemann (2005), Lichtwark, Bougoulias, & Wilson (2007), Csapo, Maganaris, Seynnes, & Narici (2010)의 연구와 일치하는 결과를 보여주고 있다. 반면에 동일한 구간에서 맨발 보행 시와 비교하여 하이힐 보행 시 근섬유다발 길이 변화량이 두 배 가량 증가하였다(Table 2). 다시 말해서 맨발 보행에서 관찰된 등척성 수축과 달리 하이힐 보행에서는 근활성화와 더불어 근육의 길이가 늘어나는 신장성 수축 패턴이 나타났다는 것을 알 수 있다. 길이-장력 관계를 바탕으로 맨발의 조건에서는 지면을 딛고 앞으로 나아갈 때 외부에서 가해지는 부하를 감당하기에 충분한 힘을 발현할 수 있는 길이 범위에 놓여있으나, 하이힐을 착용할 경우 상대적으로 외력을 감당하기 어려운 짧은 길이에 놓이기 때문에 더 큰 힘을 발현할 수 있는 길이 범위로 신장되는 것으로 예상할 수 있다. 따라서 힘-속도 관계(force-velocity relationship) 측면에서 등척성 근수축 패턴을 보이는 맨발 보행 시에 비해 신장성 근수축 패턴을 보이는 하이힐 보행 시에 수축요소가 감당해야 할 기계적인 일의 양이 더 많이 발생하게 되는 조건에 놓일 가능성이 있다.

하이힐 착용 시 내측비복근의 활성이 감소하는 것으로 나타났으며 그 이유는 두 가지로 예측할 수 있다. 첫째로, 보행주기(gait cycle)의 발가락 떼기(toe-off) 시점에 발목 관절은 약 30°로 족저굴곡(plantarflexion)된다. 맨발의 발바닥 전체가 지면에 닿아있다면 30°를 족저굴곡 시키기에 더 많은 힘이 요구되지만 하이힐을 착용할 경우 발목관절이 족저굴곡 되어있기 때문에 발가락이 떨어지는 시점까지 더 적은 근활성이 요구될 것으로 예상할 수 있다. 둘째로, 맨발일 때보다 근육의 길이가 줄어들기 때문에 근활성이 적은 것으로 예측할 수 있다. 근육의 길이가 짧은 길이에 놓인 채로 보행을 수행할 때 근육이 더 적게 활성되는 것은 선행 연구들에 나타난 바와 일치한다(Lee, Matteliano, Medige, & Smiehorowski, 1987; Lee, Shieh, Matteliano, & Smiehorowski, 1990; Gregor, Smith, & Prilutsky, 2006; Lichtwark, & Wilson, 2006). 하이힐 착용이 장기간 지속될 경우 Csapo, Maganaris, Seynnes, & Narici (2010), Cronin, Barrett, & Carty (2012)의 장기간동안 하이힐을 착용해온 여성을 대상으로 한 연구 결과에 나타난 것과 같이 근절수가 손실되어 내측비복근 근섬유다발의 길이 감소를 야기할 수 있으며 이러한 변화에 따라 근활성도 또한 만성적으로 감소할 가능성이 있다. 이에 더하여 근섬유다발 길이의 감소는 근육의 활동 범위(operating range)를 변화시키기 때문에 길이-장력 관계에서의 근력 발현 특성 또한 만성적으로 달라질 가능성이 있다. 근육의 해부학적, 기능적 변화뿐만 아니라 앞선 연구에 나타난 바와 같이 하이힐 착용이 건에 지속적으로 높은 부하를 가중시킴으로 인해 건의 경도가 증가할 것으로 예상할 수 있다. 건의 경도 증가는 근-건 복합체를 통한 힘 전달에 있어 효율적일 수 있으나 이러한 근육과 건의 형태학적 변화는 발목관절의 가동 범위(range of motion)를 감소하게 하여 편평한 신발을 신고 걷거나 일상생활에 있어서도 불편함을

Copyright@ 2015 by Korean Society of Sport Biomechanics

느끼게 될 가능성이 있음을 예상해볼 수 있다(Ryu, 2009; Ryu, 2010; Opila, Wagner, Schiowitz, & Chen, 1988).

V. 결 론

본 연구는 하이힐 착용이 내측비복근 근섬유다발의 길이 변화 패턴에 미치는 영향을 밝혀내고자 하였으며, 하이힐 착용 경험이 없는 여성을 대상으로 맨발과 하이힐 보행동안 내측비복근의 근섬유다발 길이 변화 및 근활성도를 비교하여 분석한 결과에서 차이가 나타났다.

하이힐 착용으로 인하여 보행 시 발이 지면을 딛고 있는 구간 동안에 맨발인 조건에 비해 내측비복근 근섬유다발의 길이가 상대적으로 짧은 범위에서 변화하는 것으로 나타났으며, 근-건복합체의 길이가 늘어나는 구간에서 근섬유다발이 신장성 수축 패턴을 보였다. 또한 동일한 구간에서 맨발 보행보다 하이힐 보행 시에 내측비복근 근활성도의 최대 진폭 변화량이 유의하게 적게 나타났다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 하이힐 착용이 근섬유다발의 길이 및 근활성도 변화 패턴에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 장기간동안 하이힐을 착용할 경우 만성적인 근섬유다발 길이의 감소에 영향을 미칠 수 있는 가능성을 확인하였다.

추후 근섬유다발 길이의 만성적인 적응에 대한 하이힐의 직접적인 영향을 알아보기 위해서는 장기간의 적응 기간을 포함한 연구를 진행할 필요성이 있으며, 건의 길이 변화를 동시에 측정함으로써 더욱 정밀한 연구 결과를 도출해낼 뿐만 아니라 근육과 건의 상호 작용에 대한 이해를 넓힐 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

Alexander, R. M. (1988). *Elastic mechanisms in animal movement. Cambridge University Press.*

Alexander, R. M. (2002). Tendon elasticity and muscle function. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 133(4), 1001-1011.

Alexander, R. M., & Bennet-Clark, H. (1977). Storage of elastic strain energy in muscle and other tissues. *Nature*, 265(5590), 114-117.

Cavagna, G. A., Heglund, N. C., & Taylor, C. R. (1977). Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 233(5), R243-R261.

Cronin, N. J., Barrett, R. S., & Carty, C. P. (2012). Long-term use of high-heeled shoes alters the neuromechanics of human walking. *Journal of Applied Physiology*, 112(6), 1054-1058.

Csapo, R., Maganaris, C., Seynnes, O., & Narici, M. (2010). On muscle, tendon and high heels. *The Journal of experimental biology*, 213(15), 2582-2588.

De Boer, M. D., Maganaris, C. N., Seynnes, O. R., Rennie, M. J., & Narici, M. V. (2007). Time course of muscular, neural and tendinous adaptations to 23 day unilateral lower-limb suspension in young men. *The Journal of Physiology*, 583(3), 1079-1091.

Ebbeling, C. J., Hamill, J., & Crussemeyer, J. A. (1994). Lower extremity mechanics and energy cost of walking in high-heeled shoes. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 19(4), 190-196.

Fukunaga, T., Kawakami, Y., Kubo, K., & Kanehisa, H. (2002). Muscle and tendon interaction during human movements. *Exercise and sport sciences reviews*, 30(3), 106-110.

Fukunaga, T., Kubo, K., Kawakami, Y., Fukashiro, S., Kanehisa, H., & Maganaris, C. N. (2001). In vivo behaviour of human muscle tendon during walking. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 268(1464), 229-233.

Gregor, R. J., Smith, D. W., & Prilutsky, B. I. (2006). Mechanics of slope walking in the cat: quantification of muscle load, length change, and ankle extensor EMG patterns. *Journal of Neurophysiology*, 95(3), 1397-1409.

Grieve, D. W., Pheasant, S., & Cavanagh, P. R (1978). Prediction of gastrocnemius length from knee and ankle joint posture. Biomechanics VI-A (Vol. 2, pp. 405-412): *University Park Press Baltimore*.

Griffiths, R. (1991). Shortening of muscle fibres during stretch of the active cat medial gastrocnemius muscle: the role of tendon compliance. *The Journal of Physiology*, 436(1), 219-236.

Hof, A. L., Van Zandwijk, J. P., & Bobbert, A. F. (2002). Mechanics of human triceps surae muscle in walking, running and jumping. *Acta Physiologica Scandinavica*, 174(1), 17-30.

Hong, W.-H., Lee, Y.-H., Chen, H.-C., Pei, Y.-C., & Wu, C.-Y. (2005). Influence of heel height and shoe insert on comfort perception and biomechanical performance of young female adults during walking. *Foot & Ankle International*, 26(12), 1042-1048.

Ishikawa, M., Komi, P. V., Grey, M. J., Lepola, V., & Bruggemann, G.-P. (2005). Muscle-tendon interaction and elastic energy usage in human walking. *Journal of Applied Physiology*, 99(2), 603-608.

Ishikawa, M., Pakaslahti, J., & Komi, P. (2007). Medial gastrocnemius muscle behavior during human running and walking. *Gait &*

Posture, 25(3), 380-384.

Kawakami, Y., Ichinose, Y., & Fukunaga, T. (1998). Architectural and functional features of human triceps surae muscles during contraction. *Journal of Applied Physiology*, 85(2), 398-404.

Lee, H. D., Han, B. R., Kim, J. S., Oh, J. H., Cho, H. Y. & Yonn, S. Y. (2015). Different Behavior in Muscle-tendon Complex and Fascicle Length of the Medial Gastrocnemius Muscle during Gait and One-legged and Two-legged Vertical Jumping. *Korean Journal of Sports Biomechanics*, 25(2), 175-182.

Lee, K., 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.

Lee, K., Shieh, J., Matteliano, A., & Smiehorowski, T. (1990). Electromyographic changes of leg muscles with heel lifts in women: therapeutic implications. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 71(1), 31-33.

Lichtwark, G. A., & Wilson, A. (2006). Interactions between the human gastrocnemius muscle and the Achilles tendon during incline, level and decline locomotion. *Journal of Experimental Biology*, 209(21), 4379-4388.

Lichtwark, G. A., Bougoulias, K., & Wilson, A. (2007). Muscle fascicle and series elastic element length changes along the length of the human gastrocnemius during walking and running. *Journal of biomechanics*, 40(1), 157-164.

Lieber, R. L., Loren, G. J., & Friden, J. (1994). In vivo measurement of human wrist extensor muscle sarcomere length changes. *Journal of Neurophysiology*, 71(3), 874-881.

Magnusson, S. P., Narici, M. V., Maganaris, C. N., & Kjaer, M. (2008). Human tendon behaviour and adaptation, in vivo. *The Journal of Physiology*, 586(1), 71-81.

Narici, M. (1999). Human skeletal muscle architecture studied in vivo by non-invasive imaging techniques: functional significance and applications. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 9(2), 97-103.

OPILA, K. A., WAGNER, S. S., SCHIOWITZ, S., & CHEN, J. (1988). Postural alignment in barefoot and high-heeled stance. *Spine*, 13(5), 542-547.

Roberts, T. J., Marsh, R. L., Weyand, P. G., & Taylor, C. R. (1997). Muscular force in running turkeys: the economy of minimizing work. *Science*, 275(5303), 1113-1115.

Roberts, T. J., & Scales, J. A. (2002). Mechanical power output during running accelerations in wild turkeys. *Journal of Experimental Biology*, 205(10), 1485-1494.

Roberts, T. J., & Scales, J. A. (2004). Adjusting muscle function to demand: joint work during acceleration in wild turkeys. *Journal of Experimental Biology*, 207(23), 4165-4174.

Ryu, J. S. (2009). The Temporal Coordination of the Lower Extremity by Increasing High-heel Height during Walking. *Korean Journal of Sports Biomechanics*, 19(3), 593-601.

Ryu, J. S. (2010). Effects of High-heeled Shoe with Different Height on the Balance during Standing and Walking. *Korean Journal of Sports Biomechanics*, 20(4), 479-486.

Snow, R. E., & Williams, K. R. (1994). High heeled shoes: their effect on center of mass position, posture, three-dimensional kinematics, rearfoot motion, and ground reaction forces. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 75(5), 568-576.

Copyright@ 2015 by Korean Society of Sport Biomechanics