



Original Article

# Does Walking with a Load Affect Asymmetry in Bilateral Lower Extremity Mechanics?

Seunghyun Hyun

Department of Kinesiology, Jeju National University

### Article Info

Received 2023. 10. 19.

Revised 2024. 03. 21.

Accepted 2024. 03. 28.

### Correspondence\*

Seunghyun Hyun

hshyun0306@jejunu.ac.kr

### Key Words

Walking, Load, Asymmetry, Dominance leg, Leg stiffness

**PURPOSE** This study sought to analyze the velocity and asymmetry between bilateral lower extremity mechanics according to the load during walking. **METHODS** A total of 14 adults with right leg dominance participated in this study (Male=7, Female=7). We respectively applied 30% of body weight load carriage on the subjects. Gait characteristics were analyzed with 3-dimensional cinematography and ground reaction force (GRF) system consisted of a center of gravity (COG) velocity, center of pressure (COP) area, leg stiffness, and GRF components. **RESULTS** Change in velocity of the maximum-minimum COG showed statistically significant in the main effect of load. The 1st anterior-posterior GRF (braking force) and vertical GRF were statistically significant in the main effects of load and bilateral lower limbs. The 2nd anterior-posterior GRF (propulsive force) was statistically significant in the main effect of load. COP area and leg stiffness exhibited statistically significant differences in the main effects of load and bilateral lower limbs. Interaction was observed in the vertical GRF, COP area. Furthermore, one-way variance analysis revealed load main effect had a greater influence on the increase in the magnitude of the vertical GRF and COP area than the asymmetry of bilateral lower limbs. **CONCLUSIONS** This study revealed the differences in asymmetry between the dominant and non-dominant lower limbs according to the load during walking. These findings may explain the differences shock attenuation and stress mechanisms between the bilateral lower limbs.

## 서론

대칭은 살아있는 유기체의 기본특성 중 하나이지만, 인체는 완전히 대칭이 아니며 형태와 기능에 약간의 차이가 존재한다(Kujanová et al., 2008). 신체의 비대칭은 동작 제어 및 신경생리학 분야의 연구주제로써 유전학, 호르몬 생산 뿐만 아니라 생체역학적 요인에 의해서도 발생한다(Helmkamp & Falk, 1990; Kujanová et al., 2008; Ruedl et al., 2012; Ryew et al., 2019; Zhou & Ugbole, 2019). 이전 연구에서 일부 생체역학 연구자들은 인간은 양측 사지가 서로 대칭적이라고 가정하여 데이터 처리 및 분석을 단순화했다(Laughlin et al., 2011; Sadeghi et al., 2000). 그러나 비대칭 보행은 병리적인 신체활동으로 간주될 수 있고, 하지 대칭의 가정은 데이

터 수집과 실험 결과에 영향을 미칠 수 있다.

병적보행이 아닌 건강한 자들에게서도 오른쪽과 왼쪽 다리 간의 기능적 차이가 보고되어 왔다(Sadeghi et al., 2000). 보행 비대칭은 이동 중 신체의 제어와 추진력의 상대적인 기여를 설명하는 기능적 작업 불일치라고 부분적으로 설명될 수 있다. 또 이족보행 동안 사지 내(interlimb) 또는 사지 간(intralimb)의 시공간적 조정이 존재하고, 여기서 사용되는 높은 수준의 정확한 조정 패턴은 시스템에 부과된 제약 조건에 따라 달라진다(Haddad et al., 2006). 즉 왼쪽다리 또는 오른쪽 다리 간의 운동학적 비대칭으로 인해 하지 중 하나가 다른 다리보다 더 많은 스트레스에 노출된다. 그리고 높은 수준의 스트레스에 지속적으로 노출되면 다리의 근골격계 조직은 과도한 사용으로 인한 부상이 발생될 수 있다(Bredeweg et al., 2013).

근골격계 장애는 머리, 다리, 팔, 목, 또는 등의 근육, 인대, 힘줄, 관절, 연골, 말초신경, 혈관 및 뼈에 영향을 미치는 부상으로 정의한다(Yao et al., 2019). 근골격계 부상의 대부분은 보행 중 안정성의 감소와 미끄러짐 관련 낙상의 결과이며, 이러한 이벤트의 대부분은

© 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.

중량을 운반하는 동안 발생되었다(Yang et al., 2022).

무거운 배낭 및 장비의 휴대는 군인, 소방관, 레저스포츠(스쿠버, 트레킹), 운동선수들의 준비운동과 고강도 운동에서 흔히 관찰된다. 그리고 대학생 인구에서 신체의 10%이상 배낭을 휴대하는 것은 일반적이다(Dames & Smith, 2016; Heuschler et al., 2010). 그러나 무거운 중량은 걷는 동안 압력의 중심(center of pressure) 진동을 더 증가시켰으며, 이 결과는 발바닥의 민감도와 자세제어를 변경시켜 작업완료의 속도와 효율성을 감소시킨다고 보고하였다(Jammes et al., 2018). 보행동안 관절의 형태 역시 변하지 않기 때문에 다양한 중량 조건에서 제어 전략의 필요성이 크게 줄어들지만(Caron et al., 2013), 중량과 다리강성 사이 간 선형성은 강성을 조절하여 지지기를 제공하는 연성 외골격에 대한 제어를 설명하는데 유용하다(Caron et al., 2015).

COP는 보행 중 초기 접촉 시 발은 정상적인 보행과 자세에 필요한 하중 분포와 함께 체중을 지탱하고 유지한 후 비례적으로 분산시킨다(Xiang et al., 2020). 이에 지지기 동안 생성되는 좌우, 전후 방향에 대한 COP 가변성은 발 기능 및 병리, 그리고 안정성을 평가하는데 유용한 정보를 제공할 수 있다. 진자와 스프링모델을 응용한 다리강성은 걷거나 달리기 동안 하지 전체의 동적특성을 평가하는데 적합한 척도이다(Akl et al., 2020). 인간은 걷는 동안 반복적인 충격력을 받게 되며 하지의 뻣뻣한 정도에 따라 강성의 수치가 변화하게 된다. 최대수직지면반력과 COP 최대 값은 초기 접지 후 대략 10~50 ms 동안의 짧은 시간 동안 신체 일부의 관성변화로 인해 발생된다(Hyun et al., 2014, 2016). 충격력은 수직지면반력의 최대 값으로 명확하게 확인 될 수 있고, 다리길이 변화율과 함께 다리강성 수치에 큰 영향을 미친다. 충격력의 생성과 감소, 안정성의 척도는 다양한 스트레스 생성과 부상의 원인, 그리고 운동의 성능변화에 대한 잠재적인 역할이 분명하기 때문에 이 변인들은 하지역학을 평가하는데 중요한 평가 지표이며, 양측 하지 간의 비대칭성을 정량화 및 서로 비교 설명할 수 있다.

인간 뇌의 두 반구 사이의 기능차이는 사지 우세의 원인중하나이다(Gabbard & Hart, 1996). 주로 사용하는 다리는 운동에 선호되고, 다른 쪽 다리는 수행되는 동작을 안정화하고 보완하는데 사용한다고 보고하고 있다(Sadeghi et al., 2000). 따라서 중량이 증가된 상태에서 보행 동안 우세의 운동력 뿐만 아니라 반대쪽 사지를 사용할 때의 특징도 고려해야 하며, 이는 성공과 목표설정에 중요하다. 따라서 보행 동안 근골격계 장애 및 낙상 예방 전략을 개발하고 평가하기 위해서는 보행 특성을 더 잘 이해할 필요가 있다. 그리고 일상생활과 스포츠활동에서 흔히 관찰되는 중량운반 동안 양측 하지역학 간의 비대칭 특징에 대한 정보는 중요하지만, 어떤 차이가 발생되는지 아직 이해할 수 없다.

중량 운반 관련 연구의 한계는 양측이 아닌 한쪽에 대한 하지역학만을 평가해 양측 다리 간 유사한 특성으로 정량화 하였고, 단순한 보행 변수, 또는 1차적인 운동학-운동역학 변인들을 통해 해석해왔다. 그리고 보행 동안 신체가 중량에 의한 관성에 적응하는 과정에 대해 알려진 정보 역시 부족하다. 이에 중량운반에 대한 유용한 정보를 제공하고 더 나은 생체역학적 이해를 위해 새로운 접근 방식으로 보행 역학을 평가할 필요가 있다. 따라서 이 연구의 목적은 평지 보행 동안 중량의 증가가 이동속도와 양측 하지역학 간의 비대칭성을 어떻게 변경시키는지 테스트하기 위한 것이다. 보행 운동학에서 관성 조작 직후 속도의 변화는 새로운 기계적 제약 조건의 요구사항을

충족하도록 변경되어야 한다. 본 연구자는 체중 외 추가된 중량이 하지 관성의 특성을 갑작스럽고 비대칭적인 변경과 함께 발생할 수 있는 보행 패턴의 시간 변화에 관심을 가졌다. 이 연구는 무중량 상태에서 양측 다리 간의 하지역학 비대칭성이 중량증가에 따라 선형적인 관계가 나타날 것이라 가정하였다.

## 연구방법

### 연구대상

연구대상자는 성인 남녀 총 20명이 지원하였으나, 자료 일관성을 위해 우측다리가 우성(dominance)인 자 14명이 이 연구에 참여하였다(Male=7, Female=7: Total average age, 24.71±2.84 yrs, Total average heights, 1.71±0.09 m, Total average weights, 71.94±11.19 kg). 이 연구의 대상자 선정은 이전의 비대칭 연구의 피험자 수와 우성하지의 일관성 여부를 충족하였다(Shorter et al., 2008). 또 이들은 실험에 참여하기 전 개인체중의 30% 중량을 운반할 수 있는 자들이었으며, 최근 1년 이내에 외측발목염좌 및 하지에 대한 외과적 수술 경험이 없는 자들이었다. 모든 피험자들에게 연구의 목적 및 내용, 실험일정을 설명한 후 자발적으로 참여의사를 밝힌 개인에게 동의서를 제공받았다.

### 실험절차

실험을 실시하기 전, 모든 대상자는 볼키테스트와 스텝업 테스트를 진행하였다(Hoffman & Payne, 1995). 볼키테스트는 각 대상자에게 아무런 피드백을 주지 않은 상태에서 공을 차는 첫번째 다리이며, 스텝업테스트는 벤치를 밟는데 처음 사용되는 다리이다. 일반적으로 양측 사지 간의 우세(dominance)라는 표현은 인간 두뇌의 두개 반구가 기능적으로 서로 다르다는 개념과 관련이 있다(Nachshon et al., 1983). 사지 선호도와 측면성은 자발적인 운동행위에서 한쪽 사지의 우선적인 사용을 표현하는 데에도 사용되어왔다(DeVita et al., 1991; Engsborg et al., 1991) 이에 모든 대상자들에게 두가지 테스트를 실시한 결과 모두 오른쪽 다리를 사용하였으며, 이 연구에서는 우측 다리(dominant lower limb)를 우세다리로, 반대측인 왼쪽 다리는 비우세(non-dominant lower limb)다리로 정의하였다.

보행 운동학과 역학에 대한 기계적 결정 요인을 식별하기 위

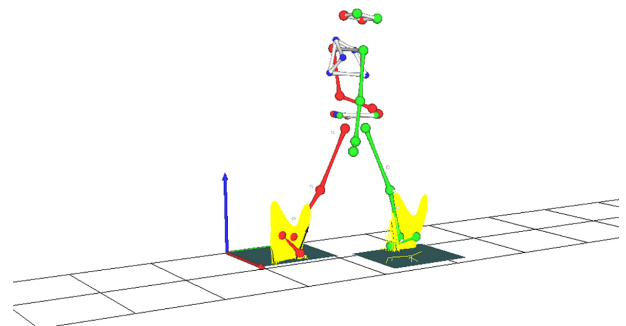


Fig. 1. Experiment field and walking modeling

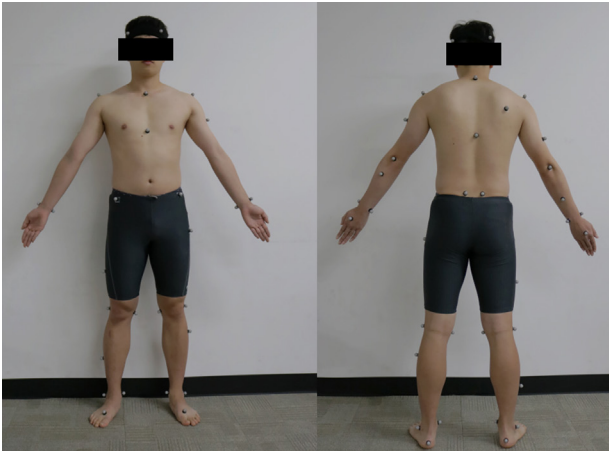


Fig. 2. Marker attachment points

해 중량은 체중의 30% 조건으로 설정하였고(Caron et al., 2015; Jammes et al., 2018; Silder et al., 2013), 피험자들이 중량에 반응하여 스스로 선택한 속도를 조정하도록 선호속도 보행을 유도하였으며(Majumdar et al., 2010), 이 연구에서 선호속도는 1.41m/s (무중량)으로 나타났다. 보행 주로는 시작점부터 종료지점까지 25m였으며, 충분한 예행연습 후 실시하였다(Figure 1). 조끼를 상체에 착용하고 각 대상자별 체중변화에 따라 중량은 %로 변경 및 적용시켰다. 전신의 무게중심 속도를 계산하기 위해 반사 마커는 head (3 markers), trunk (4 markers), upper extremities (14 markers), 그리고 lower extremities (22 markers) 각 대상자들에게 부착되었다(Figure 2).

보행 동작의 분석은 총 12대의 적외선 카메라를 사용하였으며, 각 카메라의 샘플링 율은 100 Hz로 설정하였다. 카메라의 데이터는 동작분석 통합시스템(Vicon MX Giganet)을 통해 디지털 신호로 전환되어 소프트웨어(Nexus, Vicon Motion System Ltd., UK)로 저장된다. 디지털 타이밍 오차와 노이즈를 제거하기 위해 2차 저역통과 필터(Low pass filter)를 사용하였으며, 지면반력기(AMTI-OR-7, Advanced Mechanical Technology Inc., Watertown, MA, USA)는 25 m 보행 주로의 중간 지점에 2대를 설치하여 편안한 선호속도 보행을 수행할 수 있도록 유도하였다. 이때 지면반력 데이터는 샘플링 율을 1,000 Hz였으며, 신발착용이 보행 안정성과 가변성에 차이를 발생시킨다는 연구를 참고해 맨발로 실시하였다(Hollander et al., 2022).

## 데이터 처리

### 1. 무게중심의 이동속도

Y축에 대한 최대-최소 이동속도를 산출하였다. 분석구간은 양측 하지 별 초기입각기(initial contact)부터 밀기 후 발앞꿈치가 지면에서 떨어지는 순간(take-off)까지이며, 각 발의 지지기 구간이다.

### 2. 지면반력 변인

지지기 동안 좌우 지면반력의 가변성은 신발의 형태, 재질, 맨발, 발의 형태에 따라 매우 큰 차이를 보인다(Barrons & Heise, 2020). 이에 본 연구에서는 전후 지면반력과 수직지면반력을 분석하였다.

전후 지면반력은 지지기 동안 제동력과 추진력을 분석하였으며, 수직지면반력은 최대 값을 산출하였다. 이 수치들(N)은 체중(body weight $\times$ acceleration of gravity)으로 나누어 표준화하였다(N/BW).

### 3. 압력중심의 면적

지지기 동안 발바닥에서 생성된 좌우-전후방향에 대한 COP의 최대-최소 변위 값을 적분하였다(Hyun et al., 2014).

### 4. 다리강성

다리강성은 무차원으로 정량화하였다(Silder et al., 2015). <수식 1>에서  $F_{max}$ 는 지지기 동안 생성된 최대수직지면반력이며 각 대상자의 체중으로 나누어 표준화한 값이다.  $l_o$ 는 착지 동안 다리길이의 변화율을 표준화 한 값이며,  $l_{min}$ 은 최소 다리길이이다. 다리길이는 압력의 중심(center of pressure)에서 (Bullimore & Burn, 2006) 골반의 중심(center of pelvis)점 (Plagenhoef et al., 1983)까지 3차원으로 계산된 변위이다.

$$Stiffness = \frac{F_{max}}{(l_o - l_{min}) - l_o}$$

Formula 1. Leg stiffness

## 통계 처리

산출된 모든 변인들은 PASW 21.0 program(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용해 평균과 표준편차를 산출하였다. 보행 동안 분석 변인들에 대해 이원변량분석으로 양측하지(우세, 비우세)와 중량(No load, 30%)의 효과를 규명하였으며, 상호작용효과를 일원변량분석을 통해 해석하였다. 모든 통계적 유의수준은  $\alpha=.05$ 로 설정하였다.

## 연구결과

### 무게중심의 속도변화

보행 동안 양측 하지와 중량에 따른 무게중심의 속도변화는 <Table 1>과 같다. 중량의 주효과는 30%중량이 무중량 보행 보다 최대 ( $p<.001$ ) 및 최소( $p<.05$ ) 이동속도에서 더 감소된 속도를 보였으며, 통계적으로 유의하였다. 양측 하지 간 주효과, 그리고 두 주효과 간 상호작용효과는 서로 없는 것으로 나타났다( $p>.05$ ).

### 지면반력 변인들의 변화

보행 동안 양측하지와 중량에 따른 지면반력 변인들의 결과는 <Table 2>와 같다. 중량의 주효과는 30%중량이 무중량 보행 보다 첫 번째 전-후지면반력(제동력)( $p<.001$ )과 두 번째 전-후지면반력(추진력)( $p<.001$ )에서 더 큰 수치를 보였으며, 통계적으로 유의하였다. 제동력에서 양측 하지 간 주효과는 우세다리가 비우세 다리보다 더 큰 형태를 보였으며, 통계적으로 유의하였다( $p<.05$ ). 반

**Table 1.** Results of Kinematic variables during walking with a load

(Mean±SD, Unit: m/sec)

Section	Bilateral(B)	Load(L)		Total average	Sourec	F	p
		0%(No load)	30% of body weights				
Max. velocity of COG	Right	1.66±0.14	1.52±0.12	1.59±0.15	L	18.222	.000***
	Left	1.68±0.13	1.54±0.12	1.61±0.14	B	0.332	.567
	Total average	1.67±0.13	1.53±0.12	1.6±0.14	L×B	0.001	.982
Min. velocity of COG	Right	1.26±0.11	1.20±0.11	1.23±0.11	L	4.615	.036*
	Left	1.28±0.12	1.21±0.11	1.24±0.12	B	0.197	.659
	Total average	1.27±0.12	1.20±0.11	1.24±0.11	L×B	0.006	.940

\*\*\* $p < .001$ , \* $p < .05$ **Table 2.** Results of ground reaction force variables on the lower extremities during walking with a load

(Mean±SD)

Section	Bilateral(B)	Load(L)		Total average	Sourec	F	p
		0%(No load)	30% of body weights				
1 <sup>st</sup> anterior-posterior GRF (N/BW)	Right leg	-0.24±0.04	-0.33±0.03	-0.28±0.06	L	72.227	.001***
	Left leg	-0.21±0.05	-0.31±0.04	-0.26±0.07	B	4.259	.044*
	Total average	-0.23±0.05	-0.32±0.04	-0.27±0.06	L×B	0.349	.557
2 <sup>nd</sup> anterior-posterior GRF (N/BW)	Right leg	0.27±0.03	0.37±0.04	0.32±0.06	L	86.876	.001***
	Left leg	0.28±0.04	0.35±0.04	0.31±0.05	B	0.006	.094
	Total average	0.27±0.03	0.36±0.04	0.32±0.06	L×B	1.459	.233
Peak Vertical GRF (N/BW)	Right leg	1.15±0.05	1.46±0.09	1.3±0.18	L	322.299	.001***
	Left leg	1.18±0.05	1.58±0.09	1.38±0.22	B	13.852	.001***
	Total average	1.16±0.05	1.52±0.11	1.34±0.2	L×B	4.368	.042*

\*\*\* $p < .001$ , \* $p < .05$ **Table 3.** Results of COP area and leg stiffness on the lower extremities during walking with a load

(Mean±SD)

Section	Bilateral(B)	Load(L)		Total average	Sourec	F	p
		0%(No load)	30% of body weights				
Center of pressure area (cm <sup>2</sup> )	Right leg	43.15±9.81	87.47±26.43	65.31±29.87	L	51.798	.001***
	Left leg	68.25±13.53	90.65±15.02	79.45±18.08	B	9.308	.004**
	Total average	55.7±17.26	89.06±21.16	72.38±25.48	L×B	5.592	.022*
Dimensionless leg stiffness	Right leg	12.75±3.71	21.41±4.99	17.08±6.17	L	41.306	.001***
	Left leg	16.57±4.04	23.63±5.37	20.1±5.89	B	6.094	.017*
	Total average	14.66±4.27	22.52±5.21	18.59±6.17	L×B	0.428	.516

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

면 추진력에서 양측하지 간 주효과와 두 주효과 간의 상호작용효과는 없는 것으로 나타났다( $p > .05$ ). 최대수직지면반력에서 중량의 주효과는 무중량 보다 30%중량 보행이 더 큰 형태를 보였으며, 통계적으로 유의하였다( $p < .001$ ). 또한 양측하지 간 주효과는 비우세 다리가 우세다리보다 더 큰 형태를 나타냈으며, 통계적으로 유의하였다( $p < .001$ ). 수직지면반력의 두 주효과 간 상호작용이 나타나 일변량분석으로 해석한 결과, 양측하지의 비대칭보다 중량의 변화(30%)가 수직지면반력 생성에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다

(F=113.506,  $p < .001$ ).

#### 압력중심의 면적과 다리강성의 변화

보행 동안 양측하지와 중량에 따른 압력중심의 면적과 다리강성의 결과는 <Table 3>과 같다. 압력중심 면적에 대한 중량의 주효과는 30%중량이 무중량 보행 보다 더 증가된 형태를 보였으며, 통계적으로 유의하였다( $p < .001$ ). 양측하지 간 주효과는 비우세 다리가 우세

다리보다 압력중심의 면적이 더 증가된 형태를 보였으며, 통계적으로 유의하였다( $p < .05$ ). 두 주효과 간 상호작용이 나타나 일변변량 분석으로 해석한 결과, 양측하지의 비대칭보다 중량의 변화(30%)가 압력중심의 면적에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다( $F=32.396$ ,  $p < .001$ ).

다리강성에 대한 중량의 주효과는 30%중량이 무중량 보행 보다 더 증가된 형태를 보였으며, 통계적으로 유의하였다( $p < .001$ ). 양측 하지 간 주효과는 비우세 다리가 우세다리보다 더 큰 형태를 보였으며, 통계적으로 유의하였다( $p < .05$ ). 두 주효과 간 상호작용효과는 없는 것으로 나타났다.

## 논의

이동의 목적은 중력 상황에서 체중을 지지하며 신체를 전방으로 추진시키는 것이다. 이 연구결과에 의하면 건강한 성인들에게서도 보행 수행 중 추진력과 제어의 상대적인 기여가 설명될 수 있는 양측 간 하지의 기능적 작업은 무중량 조건에서도 서로 대칭이 아니라는 것이 밝혀졌다. 따라서 본 연구자는 보행 동안 양측 하지 간의 지지 구간에서 속도 비대칭성은 중량변화에 따라 반비례 또는 비례적인 선형 관계가 나타날 것이라 가정하였지만 큰 차이는 없었으며 연구가설은 기각되었다. 그러나 중량의 적용은 무중량과 비교해 체중의 30% 중량 조건에서 최대-최소 신체중심의 속도 변화는 감소되는 특징을 보였다.

이 발견은 인간이 운반하는 중량의 효과를 상쇄시키기 위한 적응 현상이며(Majumdar et al., 2010), 양측 하지 간의 비대칭적인 운동역학적 특징은 일정한 신체중심의 속도와 관성을 유지시키기 위한 메커니즘의 차이로 설명될 수 있다. 이동 중 증가된 중량의 효과를 상쇄시키고 신체중심의 속도를 조절하기 위해 우세다리는 지면 반력의 제동/추진력 구성 요소에 더 큰 힘을 사용하는 반면, 비우세 다리는 수직지면반력 생성에 더 큰 관여가 있었다. 일부 연구자들은 양측 간 차이가 일관된 작업 불일치로 정의하였으며, 기능적 비대칭의 한 형태를 나타낸다고 제안해왔다(Gao et al., 2022; Seeley et al., 2008). 위 이론들에 따르면 비우세 하지가 보행 중 지지(무계중심의 상향가속)에 더 많이 기여하는 반면, 우세 다리는 걷는 동안 추진과 제어(전-후방 가속)에 더 많은 기여를 한다고 보고하고 있는데, 이 연구결과가 위 근거를 뒷받침해준다.

비우세-우세다리의 서로 다른 특징은 체중의 30% 중량조건에서 더 선형적인 증가 관계를 보여주었다. 그러나 Silder et al.(2013)의 관찰과 유사하게 표준화된 전-후, 수직지면반력의 증가는 적용된 중량(%)보다 작게 나타났다(체중에 30%중량이 가해진 수치보다 적음). 뉴턴 역학에 근거하면 지지기 동안 지면반력의 시간적분은 발의 접촉시간과 운반하는 중량 및 체중을 곱한 총 합수이다(Deffeyes & Peters, 2021). 본 연구에서 신체중심의 이동속도가 감소되는 것은 발이 지지기 구간에서 접촉 시간이 더 지연되는 것을 의미하기 때문에 전-후, 수직지면반력은 추가된 중량보다 더 적게 증가될 수 있다는 것을 설명해준다. 그리고 이 메커니즘은 중량증가에 따라 양측 하지역학 간의 차이도 변경시켰지만 양측 하지 간 신체중심의 속도 일관성에 기여하는 것이며, 최소 신체중심의 속도 변화에서 이러한 특징은 더 명확하게 확인되었다.

보행 중 주로 사용되지 않는 비우세 다리가 무계중심의 상향가속

에 더 많은 기여를 관여할 뿐만 아니라, 보행 중 지지 및 안정성 기능을 위해 주로 사용된다(Gao et al., 2022; Seeley et al., 2008). 본 연구에서 확인할 수 있듯이 비우세 다리는 30% 중량 보행에서 더 증가된 최대수직지면반력으로 인해 다리의 경직성과 함께 압력의 중심(center of pressure/ COP) 면적을 더 증가시켰다. 따라서 30% 중량 보행에서 비우세 다리는 우세다리의 추진력을 위한 잠재적인 에너지 축적을 위해 다리강성과 COP 범위를 증가시켜 자세안정성에 기여하고 있음을 시사한다.

그러나 상호작용효과에서 나타난 중량의 주효과는 양측 비대칭성의 주효과 보다 더 큰 충격력과 함께 COP 면적을 더 증가시켜 자세안정성을 위한 많은 노력이 요구되는 특징이 관찰되었다. 보행 시 좌우 하지 간 발바닥 압력 사이에 대한 과도한 차이의 비대칭성은 발바닥 손상 위험을 증가시키고(Wafai et al., 2015), 하지관절에 과도한 부하를 초래할 수 있다(Gao et al., 2022). 다르게 설명하면, 보행 동안 양측 하지 간의 비대칭적인 특성 보다 중량의 적용이 보행 역학에 더 큰 영향을 준다는 것을 의미한다. 이 연구결과는 인간이 가지고 있는 보행의 비대칭 특징은 자연스러운 것이지만, 중량의 휴대가 보행 역학을 변경시키고, 큰 스트레스를 유발시킬 수 있는 근거가 될 수 있음을 설명해준다.

이 연구의 한계는 체간의 전방과 후방에 적용된 중량이 포함된다. 참가 대상자들은 불편함 없이 보행할 수 있었지만, 중량의 휴대위치 변화에 따라 보행 특성에 다양한 영향을 미칠 수 있다(Lehnen et al., 2017). 그러나 실험 방법론 관점에서 체간-중량 모델링(%)은 양측 하지 간 하지역학에 대한 비대칭성을 비교하기 위한 적절한 방법이었으며, 추후 중량과 휴대위치 변화에 대한 다양한 연구에 쉽게 비교분석 될 수 있는 근거를 제공해준다.

## 결론 및 제언

보행 중 하지의 대칭적 행동은 주로 데이터 수집과 분석의 단순화를 위해 가정되는 반면, 보행 비대칭은 사지 간의 자연스러운 기능적 차이를 반영해야 한다. 이 연구에서 발견된 하지역학의 기능적 차이는 병적 또는 장애 등의 이상으로 인한 결과가 아니라 신체의 추진과 자세제어 성능에 대한 각 사지의 기여와 관련이 있음을 시사한다. 결론적으로 이 연구는 보행 동안 중량(체중의 30%)이 추가되더라도 목적 달성을 위한 행동은 우세다리에서 수행하고 자세제어는 반대쪽 다리에 의해 수행된다는 것을 설명해준다. 보행 역학과 하중의 특성을 더 잘 이해하면 선수와 정상 보행인 뿐만 아니라 병적 보행 그룹의 특정 척추, 사지 구조에 발생할 수 있는 퇴행성 변화를 예방하고 교정하기 위한 절차를 계획하는데 도움이 될수 있음을 시사한다. 추후 보행 효율성과 부상메커니즘에 대한 정보를 축적시키기 위해 다양한 연령과 중량의 적용이 필요하고 보행매개변수들 간의 관계를 고려할 필요가 있다.

## 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: Seunghyun Hyun, Data curation: Seunghyun Hyun, Formal analysis: Seunghyun Hyun, Methodology: Seunghyun Hyun, Visualization: Seunghyun Hyun, Writing-original draft: Seunghyun Hyun, Writing-review&editing

## 참고문헌

- Akl, A.-R., Baca, A., Richards, J., & Conceição, F. (2020). Leg and lower limb dynamic joint stiffness during different walking speeds in healthy adults. *Gait & Posture*, 82, 294-300.
- Barrons, Z. B., & Heise, G. D. (2020). The impact of shod vs unshod walking on center of pressure variability. *Gait & Posture*, 81, 116-119.
- Bredeweg, S. W., Buist, I., & Kluitenberg, B. (2013). Differences in kinetic asymmetry between injured and noninjured novice runners: A prospective cohort study. *Gait & Posture*, 38(4), 847-852.
- Bullimore, S. R., & Burn, J. F. (2006). Consequences of forward translation of the point of force application for the mechanics of running. *Journal of Theoretical Biology*, 238(1), 211-219.
- Caron, R. R., Lewis, C. L., Saltzman, E., Wagenaar, R. C., & Holt, K. G. (2015). Musculoskeletal stiffness changes linearly in response to increasing load during walking gait. *Journal of Biomechanics*, 48(6), 1165-1171.
- Caron, R. R., Wagenaar, R. C., Lewis, C. L., Saltzman, E., & Holt, K. G. (2013). Center of mass trajectory and orientation to ankle and knee in sagittal plane is maintained with forward lean when backpack load changes during treadmill walking. *Journal of Biomechanics*, 46(1), 70-76.
- Dames, K. D., & Smith, J. D. (2016). Effects of load carriage and footwear on lower extremity kinetics and kinematics during overground walking. *Gait & Posture*, 50, 207-211.
- Deffeyes, J. E., & Peters, D. M. (2021). Time-integrated propulsive and braking impulses do not depend on walking speed. *Gait & Posture*, 88, 258-263.
- DeVita, P., Hong, D., & Hamill, J. (1991). Effects of asymmetric load carrying on the biomechanics of walking. *Journal of Biomechanics*, 24(12), 1119-1129.
- Engsberg, J. R., Lee, A. G., Patterson, J. L., & Harder, J. A. (1991). External loading comparisons between able-bodied and below-knee-amputee children during walking. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 72(9), 657-661.
- Gabbard, C., & Hart, S. (1996). A question of foot dominance. *The Journal of General Psychology*, 123(4), 289-296.
- Gao, Z., Mei, Q., Xiang, L., Baker, J. S., Fernandez, J., & Gu, Y. (2022). Effects of limb dominance on the symmetrical distribution of plantar loading during walking and running. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 236(1), 17-23.
- Haddad, J. M., van Emmerik, R. E. A., Whittlesey, S. N., & Hamill, J. (2006). Adaptations in interlimb and intralimb coordination to asymmetrical loading in human walking. *Gait & Posture*, 23(4), 429-434.
- Helmkamp, R. C., & Falk, D. (1990). Age- and sex- associated variations in the directional asymmetry of rhesus macaque forelimb bones. *American Journal of Biological Anthropology*, 83(2), 211-218.
- Heuscher, Z., Gilkey, D. P., Peel, J. L., & Kennedy, C. A. (2010). The association of self-reported backpack use and backpack weight with low back pain among college students. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 33(6), 432-437.
- Hoffman, M., & Payne, V. G. (1995). The effects of proprioceptive ankle disk training on healthy subjects. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 21(2), 90-93.
- Hollander, K., Petersen, E., Zech, A., & Hamacher, D. (2022). Effects of barefoot vs. shod walking during indoor and outdoor conditions in younger and older adults. *Gait & Posture*, 95, 284-291.
- Hyun, S.-H., Kim, Y.-P., & Ryew, C.-C. (2016). Effect on the parameters of the high-heel shoe and transfer time of ground reaction force during level walking. *Journal of Exercise Rehabilitation*, 12(5), 451-455.
- Hyun, S.-H., Lee, A.-R., & Ryew, C.-C. (2014). Analysis of the ground reaction force parameters according to the change of position and weights of bag during downward stairs between dominant and non-dominant in upper & lower limbs. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 24(1), 43-50.
- Jammes, Y., Ferrand, E., Fraud, C., Boussuges, A., & Weber, J. P. (2018). Adding body load modifies the vibratory sensation of the foot sole and affects the postural control. *Military Medical Research*, 5, 28.
- Kujanová, M., Bigoni, L., Velemínská, J., & Velemínský, P. (2008). Limb bones asymmetry and stress in medieval and recent populations of Central Europe. *International Journal of Osteoarchaeology*, 18(5), 476-491.
- Laughlin, W. A., Weinhandl, J. T., Kernozek, T. W., Cobb, S. C., Keenan, K. G., & O'Connor, K. M. (2011). The effects of single-leg landing technique on ACL loading. *Journal of Biomechanics*, 44(10), 1845-1851.
- Lehnen, G. C., Magnani, R. M., de Sá e Souza, G. S., Rodrigues, F. B., de Oliveira Andrade, A., & Vieira, M. F. (2017). Effects of backpack loads and positions on the variability of gait spatiotemporal parameters in young adults. *Research on Biomedical Engineering*, 33(4), 277-284.
- Majumdar, D., Pal, M. S., & Majumdar, D. (2010). Effects of military load carriage on kinematics of gait. *Ergonomics*, 53(6), 782-791.
- Nachshon, I., Denno, D., & Aurand, S. (1983). Lateral preferences of hand, eye and foot: relation to cerebral dominance. *International Journal of Neuroscience*, 18(1-2), 1-9.
- Plagenhoef, S., Evans, F. G., & Abdelnour, T. (1983). Anatomical data for analyzing human motion. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 54(2), 169-178.
- Ruedl, G., Webhofer, M., Helle, K., Strobl, M., Schranz, A., Fink, C., ... & Burtcher, M. (2012). Leg dominance is a risk factor for noncontact anterior cruciate ligament injuries in female recreational skiers. *The American Journal of Sports Medicine*,

40(6), 1269-1273.

- Ryew, C.-C., Lee, A.-R., & Hyun, S.-H. (2019).** Effect of muscle mass asymmetric between upper and lower limbs on the postural stability and shock attenuation during landing. *Journal of Exercise Rehabilitation, 15*(3), 488-492.
- Sadeghi, H., Allard, P., Prince, F., & Labelle, H. (2000).** Symmetry and limb dominance in able-bodied gait: A review. *Gait & Posture, 12*(1), 34-45.
- Seeley, M. K., Umberger, B. R., & Shapiro, R. (2008).** A test of the functional asymmetry hypothesis in walking. *Gait & Posture, 28*(1), 24-28.
- Shorter, K. A., Polk, J. D., Rosengren, K. S., & Hsiao-Weckler, E. T. (2008).** A new approach to detecting asymmetries in gait. *Clinical Biomechanics, 23*(4), 459-467.
- Silder, A., Besier, T., & Delp, S. L. (2015).** Running with a load increases leg stiffness. *Journal of Biomechanics, 48*(6), 1003-1008.
- Silder, A., Delp, S. L., & Besier, T. (2013).** Men and women adopt similar walking mechanics and muscle activation patterns during load carriage. *Journal of Biomechanics, 46*(14), 2522-2528.
- Wafai, L., Zayegh, A., Woulfe, J., Aziz, S. M., & Begg, R. (2015).** Identification of foot pathologies based on plantar pressure asymmetry. *Sensors, 15*(8), 20392-20408.
- Xiang, L., Mei, Q., Fernandez, J., & Gu, Y. (2020).** A biomechanical assessment of the acute hallux abduction manipulation intervention. *Gait & Posture, 76*, 210-217.
- Yang, F., Ban, R., & Yang, F. (2022).** Anterior load carriage increases the risk of falls in young adults following a slip in gait. *Safety Science, 145*, 105489.
- Yao, Y., Zhao, S., An, Z., Wang, S., Li, H., Lu, L., & Yao, S. (2019).** The associations of work style and physical exercise with the risk of work-related musculoskeletal disorders in nurses. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 32*(1), 15-24.
- Zhou, H., & Ugbolue, U. C. (2019).** Is there a relationship between strike pattern and injury during running: A review. *Physical Activity and Health, 3*(1), 127-134.



## 보행 동안 중량이 양측 하지역학의 비대칭성에 영향을 주는가?

현승현

제주대학교, 박사

[목적] 본 연구는 보행 동안 중량의 증가에 따른 이동속도와 양측 하지역학 간 비대칭성을 분석하는 것이다.

[방법] 우측다리가 우성(dominance)인 자 14명이 이 연구에 참여하였다. 각 대상자에게 중량은 체중의 30%를 적용시켰고, 3차원 영상분석기법과 지면반력시스템을 이용해 무게중심의 이동속도, 압력중심의 면적, 다리강성, 그리고 지면반력변인들을 분석하였다.

[결과] 최대-최소 무게중심의 속도변화는 중량의 주효과에서 통계적으로 유의하였다. 제동력과 수직지면반력은 중량과 양측하지의 주효과에서 통계적으로 유의하였다. 추진력은 중량의 주효과에서 통계적으로 유의하였다. 압력의 중심과 다리강성은 중량과 양측하지의 주효과에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 중량과 양측하지의 주효과 간의 상호작용효과는 최대수직지면반력과 압력중심의 면적에서 나타났으며, 중량이 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

[결론] 본 연구를 통해 보행 시 중량에 따른 우세하지와 비우세 하지 간의 비대칭성은 서로 차이가 있음을 밝혔다. 이 발견은 양측 하지 간의 충격감소 및 스트레스 메커니즘의 차이를 설명할 수 있다.

주요어

보행, 중량, 비대칭, 우세다리, 다리강성