KJAB
Korean Journal of Applied Biomechanics 2026; 36(1): 30-36
http://dx.doi.org/10.5103/KJAB.2026.36.1.30
http://e-kjab.org eISSN 2093-9752
ORIGINAL

Comparison of Lower Extremity Joint Kinetics and Kinematics During Treadmill Walking Between Age Groups: SPM (Statistical Parametric Mapping) Analysis

트레드밀 보행 시 연령에 따른 하지 관절의 운동역학적 특성 비교: SPM (Statistical Parametric Mapping) 통계기법 적용

Jeong Hyun Woo[1], Seok Hyeon Joo[1], Soo Kyung Kim[1], Ki Hoon Han[1,2]

[1]Department of Physical Education, Graduate School of Pusan National University, Busan, South Korea
[2]Department of Physical Education, Pusan National University, Busan, South Korea

Received : 28 January 2026
Revised : 24 February 2026
Accepted : 24 February 2026

Corresponding Author
Ki Hoon Han
Department of Physical Education, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, South Korea
Email : happyhan@pusan.ac.kr

Objective: This study analyzed the differences in lower limb joint angles and moments between Older women group (OG) and Young women group (YG) during treadmill walking using Statistical Parametric Mapping (SPM).

Method: Fifteen healthy older women and fifteen young adult women performed treadmill walking at their preferred speed, and kinematic and kinetic data were collected using a 3D motion analysis system.

Results: The SPM statistical analysis revealed that significant differences in joint angles were found at the hip (0-100%; p=.001), knee (0-79%; p<.001, 90-100%; p=.046), and ankle (5-30%; p=.018, 92-100%; p=.045). For joint moments, significantly smaller values were observed at the hip (72-85%; p=.021), knee (2-10%; p=.037, 47-85%; p<.001), and ankle (62-91%; p=.001).

Conclusion: During treadmill walking, the OG adopted a crouch gait strategy characterized by increased lower limb flexion compared to the YG. This strategy appeared to serve as a mechanism to lower the center of mass and enhance stability. Furthermore, the OG exhibited significantly reduced knee extension moments and decreased propulsive moments at the hip and ankle joints during the stance phase.

Keywords: Elderly, Falling, Treadmill, Gait, Statistical parametric mapping

INTRODUCTION

노화는 근골격계 및 신경계의 기능 저하를 유발하는데 그 중에서도 보행 능력의 저하는 노화의 가장 대표적인 증상이다(Han & Park, 2024; Jung & Chae, 2024; Osoba, Rao, Agrawal & Lalwani, 2019). 보행 능력의 저하는 단순한 신체 기능의 약화를 넘어 일상생활 수행 능력 저하 및 낙상 위험 증가와 직결되므로 이에 대한 객관적 평가는 필수적이다(Salzman, 2010). 특히 여성 노인은 남성에 비해 근감소증 및 골다공증 유병률이 높아 보행 기능 저하에 더욱 취약하며, 낙상 발생률 또한 상대적으로 높은 것으로 보고되었다(Lee, 2024; Kim & Oh, 2024; Yi & Chang, 2014). 최근 미세먼지, 기후 변화 및

Copyright © 2026 Korean Journal of Applied Biomechanics
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 noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

접근성의 편의로 인해 노인 인구의 실내 운동 빈도가 높아지고 있으며, 특히 트레드밀을 활용한 걷기 운동이 보편화되고 있다. 그러나 일반적인 지면(Overground) 환경과는 다른 생체역학적 기전을 요구한다는 점에서 노인의 트레드밀 보행 패턴을 이해하는 것이 중요하다(Lee & Hidler, 2008). 트레드밀 운동이 노인의 건강 증진에 효과적임에도 불구하고, 기계적으로 고정된 속도와 움직이는 지지면은 노인에게 낯선 환경적 제약으로 작용할 수 있기 때문이다.

트레드밀 보행은 지면 보행과 비교했을 때 운동학적 및 운동역학적 차이를 보인다. 선행연구에서는 트레드밀 보행 시 지면 보행에 비해 보폭이 감소하고 보행 빈도(Cadence)가 증가하며, 입각기(Stance Phase) 시간이 길어지는 경향이 있다고 보고하였다(Terrier & Dériaz, 2011). 또한 시각적 정보와 고유수용성 감각 정보의 불일치는 보행의 동적 안정성을 저하시키는 요인으로 작용한다. 일반 성인은 이러한 환경 차이에 비교적 빠르게 적응하지만 감각 통합 능력과 근력이 저하된 노인의 경우 방어적인 보행 전략을 취하거나 불안정성이 증가할 위험이 있다(Franz, Francis, Allen, O'Connor & Thelen, 2015). 따라서 노인의 트레드밀 보행 특성을 명확히 규명하는 것은 낙상 예방과 안전한 운동 처방을 위해 선행되어야 할 과제이다.

보행 주기 중 입각기는 체중을 지지하고 추진력을 생성하는 구간으로, 노인의 보행 안정성 전략이 뚜렷하게 반영되는 지점이다. 따라서 노인의 보행 특성을 심층적으로 이해하기 위해서는 입각기의 모든 구간에 걸친 정밀한 분석이 필요하다. 최대값과 같은 대푯값으로 분석하는 것은 전체 주기에서 발생하는 변화와 패턴의 차이를 포착하는 데 한계가 있다. 이러한 한계를 극복할 수 있는 Statistical Parametric Mapping (SPM) 통계 기법은 보행 주기 전체를 연속적으로 분석함으로써, 연령에 따른 보행 패턴을 정밀하게 비교할 수 있게 한다(Pataky, Vanrenterghem & Robinson, 2017; Park & Han, 2025). 따라서 본 연구는 트레드밀 보행 시 노인과 일반 성인 간 관절 각도 및 관절 모멘트의 변화를 SPM 통계 기법으로 비교·분석하고자 한다. 이를 통해 트레드밀 환경에서 두 집단 간 의미 있는 차이가 발생하는 시점과 구간을 비교하고, 노인 집단의 보행 패턴을 파악하여 노화에 따른 트레드밀 보행 전략의 특성을 규명하는 것을 목적으로 한다.

METHOD

1. 연구대상

본 연구의 대상자는 최근 1년 이내에 근골격계 상해 또는 수술 경험이 없는 여성으로 선정하였다. 65세 이상의 노인 여성 집단(Older Women Group; OG, n=15)과 20대 성인 여성 집단(Young Women Group; YG, n=15)으로 구성하였다(Table 1). 본 연구의 모든 절차는 한국체육대학교 기관생명윤리위원회(IRB)의 승인을 받았으며, 모든 대상자에게 실험 전 연구 목적과 절차에 대해 충분한 설명을 제공하였다. 본 연구의 표본 크기는 보행 분석의 정밀도와 신뢰도를 확보하기에 충분한 규모이다. 선행연구(Berner, Cockcroft, Morris & Louw, 2020)에 따르면, 하지 관절의 측정 오차가 임상적 유효 차이보다 낮음을 입증하는 과정에서 9-15명의 샘플 수로 충분한 통계적 타당성을 가짐이 보고된 바 있다.

Table 1. Participants characteristics

	Age (year)	Height (cm)	Weight (kg)
OG (n=15)	66.6±1.3	156.39±4.06	56.61±8.57
YG (n=15)	21.1±1.5	161.25±4.53	55.83±6.56

Note. OG: Older Women Group, YG: Young Women Group

2. 실험 절차

보행 동작의 운동학적 데이터를 측정하기 위해 7대의 적외선 카메라(Oqus 300, Qualisys, Sweden)를 사용하였으며, 샘플링 레이트는 100 Hz로 설정되었다. 운동역학적 변인인 지면반력 데이터는 지면반력기가 내장된 트레드밀(Bertec, USA)을 이용하여 1,000 Hz로 데이터가 수집되었다(Figure 1). 실험 중 발생할 수 있는 낙상을 방지하고 대상자의 안전을 확보하기 위해 하네스(Exofit NEX, 3M, Canada)를 착용시켰으며, 안전로프를 이용하여 천장에 고정시켰다.

본 연구의 피험자는 신경계 및 근골격계 질환이 없는 건강한 성인으로 구성되었으며, 보행 시 유의미한 좌우 비대칭성이 나타나지 않는다는 전제하에 우측 하지 데이터를 수집하였다. 연구 대상자는 실험용 타이즈와 개인 운동화를 착용한 후, 골반 및 우측 하지에 총 14개의 반사 마커가 부착되었다. 트레드밀 보행 속도는 대상자가 가장 편안함을 느끼는 선호

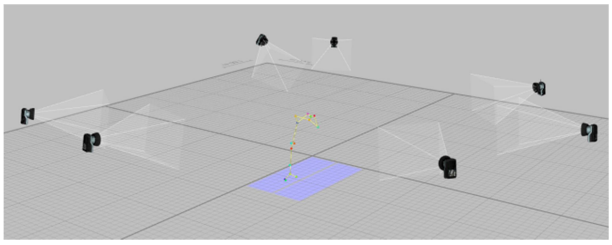

Figure 1. Overview of the motion capture system and treadmill configuration.

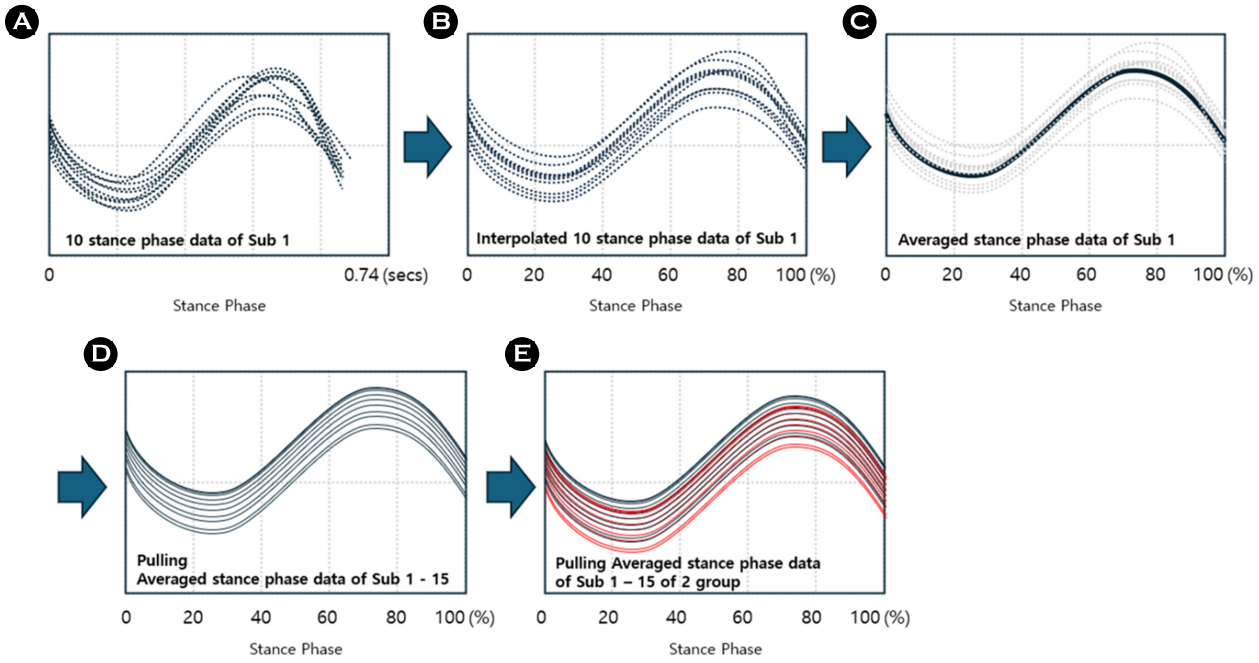

Figure 2. Data processing workflow for Statistical Parametric Mapping (SPM) analysis during stance phase. Variable raw data points per stance phase (A), Interpolated 101-point datasets (0-100%) (B), Averaging interpolated strides (C), Data pooling of all subjects of the group (D), Repeat procedure for the other group and pool datasets for both groups (E).

보행 속도(Preferred Speed)로 설정하였으며 이를 위해 트레드밀 속도를 점진적으로 증가 및 감소시키며 대상자가 선택한 속도를 최종 실험 속도로 결정하였다. 트레드밀 보행 적응에 대한 개인차를 최소화하기 위해 전 피험자에게 적어도 5분 이상의 적응 시간을 동일하게 제공하였다(Meyer et al., 2019). 이후 결정된 속도로 4분간 보행을 유지하게 하였으며, 마지막 1분간 수집된 데이터 중 연속적인 10걸음의 입각기 구간을 추출하여 분석에 사용하였다.

3. 자료처리 및 분석방법

동작 분석을 위해 QTM 소프트웨어(Qualisys Track Manager, Qualisys, Sweden)를 사용하여 각 관절의 반사 마커 위치 좌표와 지면반력 원시 데이터(Raw Data)를 수집하였다. 수집된 데이터의 노이즈를 제거하기 위해 마커 좌표 데이터에는 차단 주파수 6 Hz를, 지면반력 데이터에는 20 Hz를 각각 설정하여 4차 저역통과 필터(4th order Butterworth Low-pass filter)를 적용하였다. 이후 Visual 3D (C-Motion, USA) 프로그램을 활용하여 시상면(Sagittal Plane)에서의 엉덩관절, 무릎관절, 발목관절의 각도 및 모멘트를 산출하였다. 관절 각도는 Cardan angle 방식을 적용하여 계산하였으며, 각 관절의 움직임 및 관절 모멘트의 방향은 굴곡(Flexion)을 양(+)의 값, 신전(Extension)을 음(–)의 값으로 정의하였다. 산출된 모든 관절 모멘트 값은 대상자의 체중(kg)으로 나누어 정규화하였다. 입각기 구간은 수직 지면반력이 10 N 이상 유지되는 구간으로 정의하였으며, 접지(Heel strike) 시점을 0%, 이지(Toe-off) 시점을 100%로 설정하였다.

본 연구에서 산출된 각 변인의 데이터 처리 흐름은 다음과 같다(Figure 2). 동일한 보행 속도 하에서도 매 걸음마다 미세하게 나타나는 보행 변동성(Gait variability)으로 인해 각 입각기 원시 데이터는 서로 다른 데이터 길이(Data length)를 가졌다(Figure 2A). 이러한 각기 다른 길이의 데이터를 동일한 위상에서 비교하기 위해, 선형 보간법(Linear interpolation)을 적용하여 모든 입각기 구간을 101개(0-100%)의 데이터로 정규화하였다(Figure 2B). 정규화된 10개의 입각기 데이터는 하나의 파형으로 평균화하였으며(Figure 2C), 통계적 비교를 위해 해당 그룹 내 모든 피험자의 평균 파형 데이터를 결합하였다(Figure 2D). 비교 대상 그룹에 대해서도 동일한 절차를 반복하여 통계 분석을 위한 최종 데이터 셋을 구축하였다(Figure 2E).

4. 통계처리

보행 속도 및 시간적 변수의 집단 간 차이를 검증하기 위

Table 2. Comparison of the gait parameters between OG and YG

	OG	YG	*t*	*p*
Gait speed (m/s)	0.77±0.13	1.04±0.17	5.223	.000*
Stance time (s)	0.72±0.09	0.74±0.07	0.566	.576

Note. OG: Older Women Group, YG: Young Women Group
*Indicates statistically significant difference between OG and YG

해 일반 독립표본 *t*-검정(Independent *t*-test)을 실시하였다. 집단 간 입각기 동안의 연속적인 하지 관절 각도 및 모멘트 변화를 비교하기 위해 Python 환경의 spm1d 라이브러리(spm1d.org)를 사용하여 1차원 SPM (1-Dimensional Statistical Parametric Mapping, SPM1d)을 실시하였다. OG와 YG 간의 보행 특성 차이를 검증하기 위해 독립표본 *t*-검정(Independent *t*-test)을 적용하였다. 가설 검정을 위한 유의 수준(Significance level)은 α=.05로 설정하였으며 랜덤 필드 이론(Random Field Theory)에 의해 계산된 임계치를 *t*-궤적이 초과하는 구간을 찾아 통계적으로 유의미한 차이가 있는 영역으로 판정하였다.

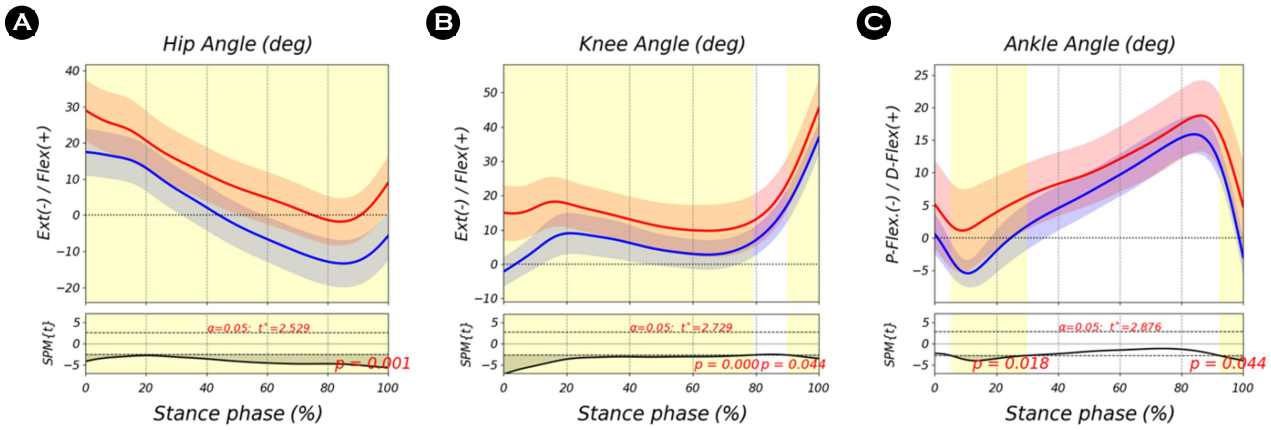

Figure 3. Top: Comparison of the joint angle patterns (hip, knee, ankle) between OG (red solid line) and YG (blue solid line) during treadmill gait; Bottom: T value line(black solid line); Yellow shaded areas indicate periods with significant differences; *p*-values: red text.

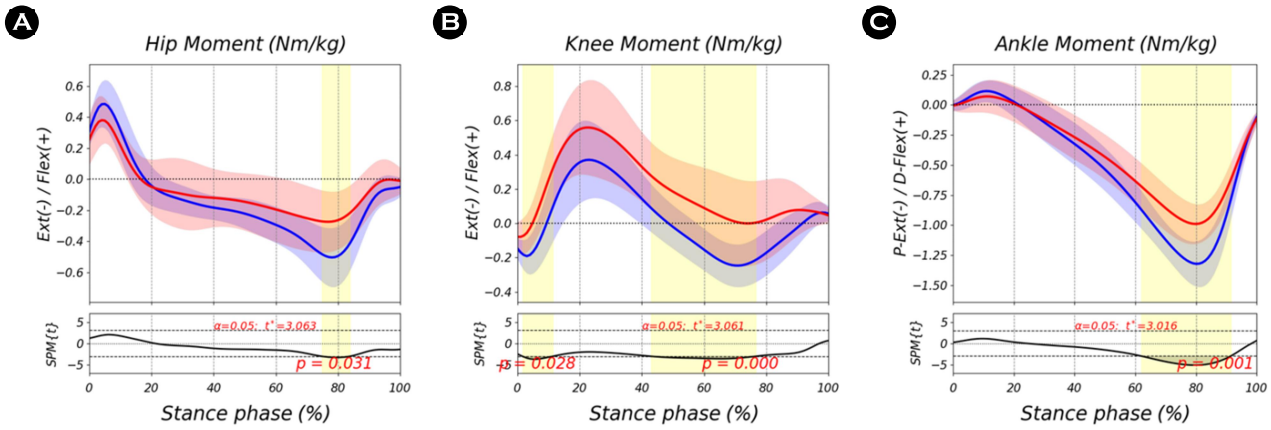

Figure 4. Top: Comparison of the joint moment patterns (hip, knee, ankle) between OG (red solid line) and YG (blue solid line) during treadmill gait; Bottom: T value line (black solid line); Yellow shaded areas indicate periods with significant differences; *p*-values: red text.

RESULTS

엉덩관절 각도는 입각기 전 구간(0-100%)에서 집단 간 유의한 차이를 보였다(p=.001). 무릎관절 각도의 경우, 0-79% 구간(p<.001)과 90-100% 구간(p=.044)에서 유의한 차이가 나타났다. 발목관절 각도는 5-30% 구간(p=.018)과 92-100% 구간(p=.044)에서 통계적으로 유의한 차이가 관찰되었다. 입각기 동안의 관절 모멘트에 대한 SPM 분석 결과, 엉덩관절 모멘트는 75-84% 구간에서 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났다(p=.031). 무릎관절 모멘트는 2-11% 구간(p=.028)과 43-77% 구간(p<.001)에서 유의한 차이를 보였다. 발목관절 모멘트의 경우, 62-91% 구간에서 두 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다(p=.001).

DISCUSSION

본 연구의 목적은 트레드밀 보행이 노인 보행 전략에 미치는 영향을 규명하는 것이다. 이에 본 연구에서는 OG와 YG 간 트레드밀 보행 시 입각기 구간의 하지 관절 각도와 모멘트를 비교하고, 두 집단 간 나타나는 보행 전략의 차이를 분석하였다. 분석 결과, 하지 관절 각도의 경우 OG가 YG에 비해 전반적으로 굴곡 움직임이 큰 것으로 나타났으며 엉덩관절, 무릎관절, 발목관절 순으로 큰 차이를 보였다. 하지 모멘트의 경우 OG가 YG에 비해 초기 입각기에서는 엉덩관절과 발목관절에서 신전 모멘트가 높았으나, 전반적으로 굴곡 모멘트가 높은 것으로 나타났다.

일반 지면(Overground)과 달리 트레드밀은 움직이는 바닥면과 고정된 시각 정보 간의 불일치를 유발하여, 전정기관 및 고유수용성 감각 정보의 혼란을 초래한다. 노화가 진행될수록 자세 제어를 위해 시각 정보 의존도가 높아지는데, 이러한 감각 정보의 불일치는 평형 감각이 저하된 노인에게 낙상에 대한 불안감을 가중시키는 요인으로 작용한다(Franz et al., 2015; Lee & Hidler, 2008). 선행연구에 따르면, 노인은 불안정한 환경에서 신체 중심을 낮추어 안정성을 확보하려는 경향이 있다(Malatesta et al., 2003). 본 연구 결과 역시 선행연구와 일치하게, OG가 YG에 비해 입각기 동안 엉덩관절, 무릎관절과 발목관절의 굴곡을 유지하는 방어적인 보행 전략(Crouch Gait Strategy)을 취하는 것으로 확인되었다(Figure 3A, B).

구체적으로 무릎관절 각도를 살펴보면, OG는 입각기 초기부터 중반까지 유의하게 큰 굴곡 각도를 유지하였다. 다만, 입각기 후반인 79-89% 구간에서는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다(Figure 3B). 이는 YG가 입각기 마지막 시점에 진입 전 이지(Toe-off)를 위해 무릎을 급격히 굽히는 동작으로 전환함에 따라(Sahrmann, 2010), 굴곡 상태를 일정하게 유지하던 OG의 패턴과 일시적으로 유사해졌기 때문으로 해석된다. 또한, OG는 발목관절에서도 전반적으로 저측굴곡이 작게 나타났다(Figure 3C). 초기 입각기(5-30%)에서 나타난 발목 각도의 유의한 차이는 노인이 엉덩·무릎관절의 굴곡 자세를 유지함에 따라 발생한 보상 작용으로 사료된다. 입각기 후반(92-100%)의 차이 역시 굴곡된 움직임의 연장선상에서, 능동적인 추진력 생성보다 안정성 확보를 위해 서둘러 다음 동작을 취했기 때문으로 판단된다. 5-30% (Heel Strike)와 92-100% (Toe-off) 구간을 제외하고 유의한 차이가 없었던 것은, 연령에 관계없이 31-91% 구간에서 배측굴곡이 자연스럽게 증가하는 직립 보행의 특성 때문인 것으로 판단된다. 이러한 발목관절의 기능적 변화는 OG의 보행 속도가 YG에 비해 유의하게 낮게 나타난 결과와 직결되며(Table 2), 노인 집단이 추진력을 활용한 효율적인 보행보다 위험을 최소화하기 위한 보수적인 보행 전략을 우선적으로 채택하고 있음을 시사한다.

운동역학적 관점에서 볼 때, OG가 채택한 이러한 웅크린 자세는 안정성을 높이는 대신 효율적인 에너지 생성을 제한하는 결과를 초래하였다. 선행연구에 따르면 효율적인 보행을 위해서는 중간 입각기에서 무릎과 엉덩관절의 신전을 통해 반대쪽 발의 발가락 닿기 시 지면반력과 탄성 에너지를 생성할 수 있도록 하여야 한다(Perry & Burnfield, 2024). 그러나 본 연구에서 OG는 YG에 비해 무릎과 엉덩관절의 신전 모멘트를 생성하는 데 제한이 있었고 굴곡 움직임도 작았다(Figure 3A, 3B, 4A, 4B). 특히 무릎관절의 경우, YG는 중간 입각기(43-77%)에 신전 모멘트를 생성하여 체중을 지지할 수 있는 충분한 힘을 생성한 반면, OG는 해당 구간에서 굴곡 모멘트가 높게 나타났다(Figure 4B). 이는 효율적인 에너지 생성을 통한 정상 보행 대신 낙상 위험을 줄이기 위해 관절을 굽혀 안정성을 높이는 전략을 선택한 것으로 사료된다.

추진력이 요구되는 입각기 후반부에서도 이러한 비효율적 전략은 지속되었다. 정상 보행에서 대둔근은 입각기 말기에 고관절을 신전시켜 신체를 전방으로 밀어주며, 비복근은 발가락 밀기 전 강력한 수축으로 아킬레스건 장력을 형성해 추진력을 만든다(Neumann, 2010; Sahrmann, 2010). 하지만 OG는 YG에 비해 엉덩관절 신전 모멘트(75-84%)와 발목관절 저측굴곡 모멘트(62-91%)가 유의하게 감소하였다(Figure 4A, C). 이는 노화로 인한 감각 민감도 저하와 낙상 불안이 결합되어, OG가 능동적으로 지면을 차고 나가기보다는 트레드밀 벨트의 후방 이동에 수동적으로 의존하여 다리를 뒤로 보내는 경향을 보였기 때문으로 사료된다(Franz et al., 2015; Lee & Hidler, 2008). 결국 트레드밀 환경에서 노인은 효율적인 에너지 생성을 통한 추진력 확보보다는, 신체 중심을 낮추고 관절을 굽히는 방어적 전략을 통해 보행 안정성을 확보하는 데 주력하는 것으로 나타났다. 실제 OG는 YG에 비해 전반적으로 굴곡된 자세를 유지하였으며, 보행 속도 또한 약 24% 느

리게 나타났다(Table 2). 이러한 결과는 단순한 노화에 따른 근력 약화의 영향일 가능성을 배제할 수 없으나, 지면 보행과는 상이한 트레드밀의 특수한 물리적 환경에 적응하는 과정에서 나타난 방어적인 보행 전략일 가능성도 시사하는 것으로 사료된다.

한편, 본 연구에서 관찰된 집단 간 역학적 차이는 상당 부분 두 집단 간 보행 속도의 차이에 기인했을 가능성을 배제하기 어렵다. 이는 보행 연구에서 지속적으로 제기되는 근본적인 방법론적 딜레마로, 속도를 인위적으로 통제할 경우 노인 특유의 자연스러운 보행 전략을 포착하는 데 제약이 따르기 때문이다. 본 연구는 참가자 개별의 실제적인 보행 특성을 보존하기 위해 선호 속도를 채택하였으나, 이로 인해 관찰된 변화가 순수한 '연령'의 효과인지 혹은 단순히 '속도 차이'로 의한 결과인지를 완벽히 분리해 내기에는 한계가 있다. 보행 속도의 변화는 관절 역학의 변동을 동반할 수밖에 없기 때문이다. 따라서 향후 연구에서는 속도를 고정시킨 통제 조건과 각자의 선호 속도 조건을 직접 비교함으로써, 노화와 속도가 보행 전략 변형에 미치는 독립적인 영향력을 보다 정밀하게 검증해야 할 것이다.

비록 본 연구에서 근전도를 통한 직접적인 근활성도 분석은 수행되지 않았으나, 본 연구의 결과는 노인의 트레드밀 보행이 지면 보행과는 다른 패턴으로 학습될 가능성과 비효율적인 근육 사용을 시사한다. 따라서 추후 연구에서는 트레드밀 훈련 시 상지 움직임의 영향을 고려하고, 근전도 분석을 병행하여 노인의 보행 패턴과 근육 활성 시퀀스 간의 관계를 보다 심층적으로 규명할 필요가 있다.

CONCLUSION

본 연구의 분석 결과, 입각기 동안 관찰된 OG의 보행 패턴은 YG에 비해 하지 관절의 굴곡을 증가시키는 방어적인 보행 전략(Crouch Gait Strategy)을 채택하여 신체 중심을 낮추고 보행 안정성을 확보하려는 움직임을 보였다. 또한 OG는 입각기 주요 구간에서 무릎의 신전 모멘트와 엉덩 및 발목관절의 신전 모멘트가 유의하게 감소하였는데, 이는 노화로 인한 근기능 저하와 낙상 회피를 위한 방어적 기전이 에너지 효율성보다 우선시된 결과로 해석된다. 비록 이러한 전략의 차이가 두 집단 간 보행 속도의 차이에 일부 기인했을 가능성이 존재하나, 본 연구의 결과는 노인이 트레드밀 환경에서 안정성 중심의 보수적인 보행 보정을 수행하고 있음을 시사한다. 결과적으로 트레드밀의 감각 정보 불일치 환경은 노인에게 낙상 불안을 가중시켜 보수적인 보행 전략을 유도하므로 이러한 환경적 특성을 고려한 보행 재활 프로그램 개발의 기초 자료로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University.

REFERENCES

Berner, K., Cockcroft, J., Morris, L. D. & Louw, Q. (2020). Concurrent validity and within-session reliability of gait kinematics measured using an inertial motion capture system with repeated calibration. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, *24*(4), 251-260.

Franz, J. R., Francis, C. A., Allen, M. S., O'Connor, S. M. & Thelen, D. G. (2015). Advanced age brings a greater reliance on visual feedback to maintain balance during walking. *Human Movement Science*, *40*, 381-392.

Han, S. J. & Park, S. K. (2024). Differences in gait stability between young and middle-aged adults during treadmill walking with rhythmic auditory stimulation and time variation. *Korean Journal of Applied Biomechanics*, *34*(4), 185-196.

Jung, J. H. & Chae, W. S. (2024). Effects of functional electrical stimulation on muscle function and gait ability. *Korean Journal of Applied Biomechanics*, *34*(3), 125-132.

Kim, D. Y. & Oh, K. W. (2024). Prevalence of sarcopenia in the Republic of Korea. *Public Health Weekly Report*, *17*(24), 1055-1067.

Lee, D. Y. (2024). Sex-specific prevalence and related factors of osteoporosis in Korean older adults. *Korean Journal of Neuromuscular Rehabilitation*, *14*(3), 144-156.

Lee, S. J. & Hidler, J. (2008). Biomechanics of overground vs. treadmill walking in healthy individuals. *Journal of Applied Physiology*, *104*(3), 747-755.

Malatesta, D., Simar, D., Dauvilliers, Y., Candau, R., Borrani, F., Préfaut, C. & Caillaud, C. (2003). Energy cost of walking and gait instability in healthy 65-and 80-yr-olds. *Journal of Applied Physiology*, *95*(6), 2248-2256.

Meyer, C., Killeen, T., Easthope, C. S., Curt, A., Bolliger, M., Linnebank, M., Zörner, B. & Filli, L. (2019). Familiarization with treadmill walking: How much is enough? *Scientific Reports*, *9*(1), 5232.

Neumann, D. A. (2010). Kinesiology of the hip: A focus on muscular actions. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, *40*(2), 82-94.

Osoba, M. Y., Rao, A. K., Agrawal, S. K. & Lalwani, A. K. (2019).

Balance and gait in the elderly: A contemporary review. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*, *4*(1), 143-153.

Park, J. & Han, K. (2025). Quantifying gait asymmetry in stroke patients: A statistical parametric mapping (SPM) approach. *Medical Science Monitor*, 31, e946754.

Pataky, T. C., Vanrenterghem, J. & Robinson, M. (2017). Statistical parametric mapping (SPM): Theory, software, and future directions. *Proceedings of the International Society of Biomechanics*, 23-27.

Perry, J. & Burnfield, J. (2024). *Gait analysis: Normal and pathological function*. CRC Press.

Sahrmann, S. (2010). *Movement system impairment syndromes of the extremities, cervical and thoracic spines*. Elsevier Health Sciences.

Salzman, B. (2010). Gait and balance disorders in older adults. *American Family Physician*, *82*(1), 61-68.

Terrier, P. & Dériaz, O. (2011). Kinematic variability, fractal dynamics and local dynamic stability of treadmill walking. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, *8*(1), 12.

Yi, J. H. & Chang, J. K. (2014). The comparative analysis of gait safety between elderly female and adult female. *Korean Journal of Applied Biomechanics*, *24*(3), 249-258.