



Original Article

Sex Differences in Biomechanical Deceleration Strategies During a Side Shuffle Step

Soo-ji Han¹, Jusung Lee², Sang-Kyoon Park³, and Jongchul Park^{4*}

¹Industry Foundation, Pukyong National University

²Human Performance Laboratory, Descente Footwear R&D Center

³Motion Innovation Centre, Korea National Sport University

⁴Division of Smart Healthcare, Pukyong National University

Article Info

Received 2026.03.12.

Revised 2026.06.08.

Accepted 2026.06.16.

Correspondence*

Jongchul Park

jcpark@pknu.ac.kr

Key Words

Side shuffle step, Deceleration strategy, Sex differences, Landing strategy, Lateral movement

This research was supported by the Pukyong National University Industry-university Cooperation Foundation's 2025 Post-Doc. support project.

PURPOSE This study explored the sex differences in biomechanical characteristics during a side shuffle step deceleration maneuver. **METHODS** Participants included 12 healthy adult men and 10 healthy adult women, and all performed a side shuffle step task. Time-series data were extracted for temporal parameters (approach velocity, contact time, and deceleration time) and biomechanical variables (foot-ground angle, resultant ground reaction force, center of mass velocity, and three-dimensional joint angles and moments) during the deceleration phase. For statistical analysis, temporal variables were analyzed using the Mann-Whitney U test, and time-series biomechanical data were analyzed using an independent t-test with nonparametric statistical parametric mapping ($\alpha = .05$). **RESULTS** Women exhibited a significantly more pronounced eversion alignment across the entire phase than men ($p < .05$). Specifically, during the initial deceleration phase, women displayed higher knee extension moments ($p < .05$), whereas men exhibited higher ankle abduction moments and knee flexion moments ($p < .05$). **CONCLUSIONS** Distinct foot alignments and joint moment control strategies may manifest between sexes during the initial deceleration phase of a side shuffle step. Moreover, these findings can serve as a foundation for future studies investigating intersegmental coordination of the lower extremity and neuromuscular control mechanisms.

서론

농구와 테니스, 배드민턴 등 다양한 스포츠에서는 감속 및 방향 전환을 포함한 측면 이동(lateral movement)이 빈번하게 수행되며, 이러한 동작은 짧은 시간 내에 큰 지면반력과 높은 충격성 부하를 동반하게 된다(Donelon et al., 2020). 측면 이동 동작은 방향을 전환하기 위해 신체 질량중심(center of mass, CoM)의 운동량을 제어하기 위한 능동적인 제동 전략이 요구되며, 특히 수평 감속(horizontal deceleration)은 높은 최대 충격력(impact peak force)과 부하율

(loading rate)을 특징으로 하는 지면반력 양상을 나타내어 하지 근 골격계에 기계적 부담을 증가시킬 수 있다(Harper et al., 2022). 이러한 과도한 기계적 부하는 실제 스포츠 현장에서 발생하는 비절측성 하지 손상과 밀접하게 관련되는 것으로 알려져 있으며, 실제로 대부분의 전방십자인대(anterior cruciate ligament, ACL) 손상은 급정지, 방향 전환, 회전 등 강한 제동이 요구되는 상황에서 흔히 발생되는 것으로 보고되어 왔다(Micheo et al., 2010). 더불어, 감속 구간에서 발생하는 기계적 부하를 적절히 통제할 수 있는 신경근 조절 능력은 경기력 향상과 부상 예방의 핵심 요소로 논의되어 왔다(Harper et al., 2022). 따라서, 감속 구간 동안 나타나는 하지 관절에 대한 생체역학적 특성은 측면 이동 동작 시 발생하는 관절 부하의 기전과 움직임 제어 전략을 이해하는 데 중요한 의미를 가진다.

기존 연구들은 감속 구간에서 발생하는 부상 위험을 평가하기 위

(CC) 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.

해 주로 커팅(cutting)과 점프 후 착지(landing) 과제를 활용해 왔다. 선행연구에 따르면, 커팅과 착지 동작에서 하지 정렬, 관절 모멘트, 지면반력 및 지지 시간은 손상 관련 부하를 설명하는 주요 생체역학적 변수로 제시되어 왔다(Donelon et al., 2020; Hewett et al., 2005; Nishizawa et al., 2022; Leppänen et al., 2017). 세부적인 움직임 제어 전략을 살펴보면, 착지 동작에서 발목관절의 배측굴곡 증가는 무릎관절의 굴곡을 유도하여 지면반력을 감소시키는 것으로 나타났으며, 커팅 수행 시 발을 정중선에 가깝게 착지하도록 수정하였을 때 무릎관절 부하가 감소되는 것으로 보고되어 왔다(Donelon et al., 2020; Fong et al., 2011). 반면 토인(toe-in) 형태의 발 착지 패턴은 무릎 외전과 엉덩관절의 내전 및 내회전 각도를 증가시켜 무릎 관절의 외전 모멘트와 경골의 내회전 모멘트의 증가로 이어질 수 있음이 증명되었다(Nishizawa et al., 2022). 또한 Yu and Fernandez(2024)는 만성 발목 불안정성 집단의 커팅 동작에서 발목관절의 내반이 증가하고 엉덩관절의 신전이 감소한다고 보고하였으며, 이러한 결과는 원위부(distal)의 불안정성과 근위부(proximal)의 움직임 변화가 함께 나타날 수 있다고 주장하였다. 위의 선행연구 결과들은 감속 구간에서 나타나는 하지 관절의 부하 특성과 움직임 전략을 이해하는 데 중요한 근거를 제공한다.

그러나 커팅 및 점프 착지 과제는 반복 수행 시 높은 기계적 부하를 유발할 수 있으며, 실험 환경에서 피험자에게 신체적 부담을 증가시킬 수 있다는 주장이 제기되어 왔다(Donelon et al., 2020; Harper et al., 2022). 이러한 측면에서 최근에는 상대적으로 단순하고 통제 가능한 사이드 셔플 스텝(side shuffle step)이 기존 고강도 측면 이동 과제를 대체할 수 있는 대안적 평가 과제로 검토되었으나, 커팅 동작에 비해 ACL 손상 위험과 관련된 일부 근위부 신경근 제어 특성을 충분히 반영하지 못한다는 한계점이 제시되었다(Zaslow et al., 2016). 하지만 해당 연구는 하지관절의 각도 및 모멘트에 대한 이산형(최대 및 평균) 값을 비교한 결과이며, 비교적 짧은 시간 내에 수행되는 하지의 생체역학적 특성이 일부 대표 값들에 반영되지 못했을 가능성이 있다(Pataky, 2010).

한편, 스포츠 동작 수행 과정에서 성별에 따른 하지 관절의 움직임 패턴과 기계적 부하 특성의 차이는 주요한 분석 요소로 다루어져 왔다(Donelon et al., 2024; Sigward et al., 2012). 특히 여성은 남성보다 ACL 손상 발생률이 더 높다고 보고되어 왔으며, 이러한 차이는 해부학적·발달학적·신경근 및 생체역학적 요인으로부터 기인하는 것으로 알려져 있다(Hewett et al., 2005; Parsons et al., 2021). 실제로 동일한 측면 이동 또는 착지 과제를 수행하더라도 여성은 남성보다 더 큰 무릎 외전 또는 내전 모멘트와 무릎 외반 정렬을 보일 수 있다고 보고되었다(Carson & Ford, 2011; Sigward et al., 2012). 이러한 결과는 사이드 셔플 스텝 동작에서도 하지 관절의 생체역학적 반응 차이가 나타날 수 있음을 시사한다.

그러나 기존 연구들은 주로 커팅이나 착지 과제에서의 ACL 손상 관련 위험 요인이나 대체 과제로서의 가능성에 초점을 두어 왔으며, 사이드 셔플 스텝의 감속 과정에서 나타나는 하지 관절의 생체역학적 특성과 성별 차이를 직접적으로 비교한 연구는 제한적이다. 따라서 사이드 셔플 스텝의 감속 구간에서 나타나는 하지 관절의 운동학적·운동역학적 특성을 시간·연속적으로 규명할 필요성이 제기된다. 본 연구의 목적은 사이드 셔플 스텝 동작의 감속 구간에서 나타나는 하지 관절의 생체역학적 특성을 분석하고, 성별에 따른 움직임 패턴과 관절 부하 특성의 차이를 탐색하는 데 있다.

연구방법

연구대상

본 연구의 표본 크기는 G*Power software (Erdfelder et al., 1996)를 사용한 사전 검정력 분석(a priori power analysis)을 통해 산정하였다. 기대 효과크기는 유사 과제에서 성별 차이를 보고한 선행연구(McLean et al., 2005; Oxendale et al., 2025)를 근거로 설정하였으며, 독립표본 t 검정을 기준으로 유의수준 .05, 검정력 .80에서 효과크기 1.4에서 그룹당 최소 10명이 요구되었다. 이에 건강한 성인 남성 12명(28.10 ± 5.32 yrs., 177.40 ± 3.86 cm, 79.90 ± 7.88 kg)과 여성 10명(23.89 ± 2.52 yrs., 162.89 ± 4.26 cm, 52.44 ± 4.98 kg)을 대상으로 모집하였다. 다만 본 연구는 탐색적 성격을 지니며, 이보다 작은 효과크기의 성차는 후속 연구에서 검토될 필요가 있다.

모든 대상자는 최근 3개월 이내에 근골격계 상해 경험이 없고 측면 이동 동작을 원활하게 수행할 수 있으며, 우세측이 오른쪽인 자로 선정하였다. 또한 사이드 셔플 스텝 동작 수행 시 신발로 인한 생체역학적 차이를 제거하기 위해 동일한 조건의 신발(Le Court Advanced, le coq sportif)을 제공하였다. 본 연구는 P 대학교 생명윤리위원회의 승인을 받아 진행하였으며(2024-10-002, 2024.11.07.), 모든 대상자들은 자발적으로 동의서를 작성한 후 실험에 참여하였다.

실험도구 및 절차

본 연구를 수행하기 위해 8대의 적외선 카메라(Miquis, Qualisys, SWE; sampling rate 200Hz)와 1대의 지면반력기(9260AA6, Kistler, SWI; sampling rate 1,000Hz)를 사용하였다. 두 장비는 A/D board (Qualisys, SWE)를 활용하여 동기화하였으며, 자료 수집은 Qualisys Track Manager (Qualisys, SWE)를 사용하였다. 모든 연구 대상자는 부상 위험을 최소화하기 위해 약 5분간 준비운동을 수행하였으며, 타이즈로 환복한 뒤 12.5 mm 크기의 반사마커 30개를 (Fig. 1)과 같이 부착하였다. 사이드 셔플 스텝 동작의 시작 지점

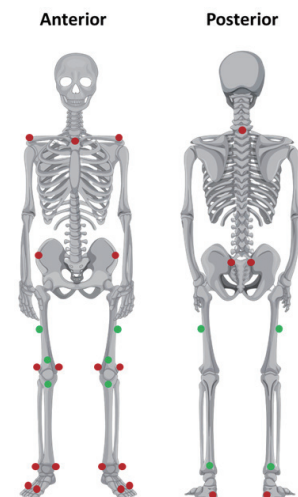


Fig. 1. Marker set

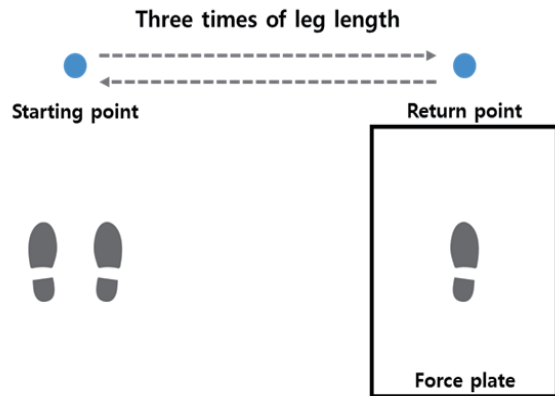


Fig. 2. Side shuffle step execution process

을 설정하기 위해 다리 길이(우세측 발뒤꿈치의 종골 마커와 ASIS 마커 사이의 수직거리)를 측정한 뒤, 지면반력기로부터 좌측으로 다리 길이의 3배만큼 떨어진 지점을 시작 지점이자 복귀 지점으로 설정하였다(Maurus et al., 2019). 사이드 셔플 스텝 동작은 <Fig. 2>와 같이 시작 지점에서 개인의 최대 노력으로 사이드 셔플 스텝 동작을 수행하여 우세측 발이 지면반력기에 착지한 후, 다시 시작 지점으로 빠르게 복귀하도록 요청하였다. 사이드 셔플 스텝은 실제 스포츠 상황에서 단순한 반복 동작으로 수행되기보다 다양한 이동 형태와 결합되어 나타나며(Rai et al., 2022), 반복적인 측정은 피로를 유발하여 측정하고자 하는 순수한 민첩성과 기술적 정확도를 저해할 수 있다(Mohr & Federolf, 2022). 이에 본 연구에서는 동작의 변동성을 최소화하고 정확한 동작 수행을 유도하기 위해, 각 시도를 반복 동작이 아닌 왕복 1회씩 독립적으로 수행하도록 하였다. 모든 피험자는 본 실험 전 3회의 연습을 수행하였으며, 시작 지점에서 출발하여 우세측 발이 지면반력기 중앙에 성공적으로 착지한 뒤 다시 시작 지점까지 최대 속도를 유지하며 복귀한 경우를 성공적인 수행으로 판단하였다. 데이터는 총 3회의 성공적인 수행에 대해 수집되었으며, 연구 대상자의 피로와 동작 적응을 최소화하기 위해 각 시도 사이에 30초의 휴식을 제공하였다.

자료처리

모든 데이터는 Visual3D software (Has-Motion, CAN)를 활용하여 분석하였다. 4차 Butterworth 저역통과 필터를 사용하여 마커 데

이터는 12 Hz, 지면반력 데이터는 100 Hz의 차단주파수로 필터링하였다(Lam et al., 2015). 이후 피험자의 정적 자세를 기준으로 몸통 및 골반, 허벅지, 정강이, 발 분절의 6 자유도 운동학 모델을 생성하였으며, Cardan의 X-Y-Z 시퀀스(sequence)를 사용하여 관절 움직임을 정량화하였다(Grood & Suntay, 1983). 이때 전역좌표계의 방향은 +X: 우측, +Y: 전방, +Z: 상측으로 설정하였다.

분석 시점을 정의하기 위해, 먼저 비우세측 발의 원위 관절 중심(midpoint between the first and fifth metatarsophalangeal joints)의 수평 가속도(horizontal acceleration)가 최소값을 나타내는 시점을 비우세측 하지의 지면 이지(left toe-off, LTO)로 정의하였다(Ast et al., 2013). 다음으로, 우세측 하지의 지면 접촉(right foot contact, RFC)과 지면 이지(right toe-off, RTO)는 수직 지면반력 값이 체중의 10%에 도달하는 시점을 기준으로 정의하였다. 해당 기준은 셔플을 포함한 방향전환 동작에서 자동 이벤트 감지 알고리즘의 타당성을 검증한 선행연구를 참고하였으며(Loewen et al., 2025), 착지 이전 지면반력 신호에 포함될 수 있는 노이즈를 배제하고 실질적인 체중 수용 시점을 포착하는 데 적합한 것으로 보고된 바 있다. 또한 RFC 부터 RTO 까지의 구간 중 우세측 하지의 무릎 굽힘이 최대가 되는 시점을 최대 무릎 굽곡 시점(maximum knee flexion, MKF)으로 정의하였다. 정의된 시점을 바탕으로, LTO 부터 RFC 까지를 접근 구간(approach phase), RFC 부터 MKF 까지를 감속 구간(deceleration phase), RFC 부터 RTO 까지를 지면 접촉 구간(contact phase)으로 설정하였다(Thomas et al., 2024).

분석변인은 이산형 데이터(discrete data)인 시간 변인(temporal variables)과 시계열 데이터(time series data)인 생체역학적 변인(biomechanical variables)으로 다음과 같이 구분하였다. 시간변인 중 접근 속도(approach velocity)는 접근 구간 동안의 평균 신체 질량중심의 수평 속도(horizontal velocity of CoM)로 산출하였으며, 지면 접촉 시간(contact time)은 지면 접촉 구간의 소요시간으로 정의하였다. 감속시간(deceleration time)은 지면 접촉 시간에 대한 감속 구간의 소요시간을 표준화하여 분석에 사용하였다.

생체역학적 변인은 감속 구간 동안의 발-지면의 관상면 각도(foot-ground angle)와 합성 지면반력(resultant GRF), 수평 신체질량중심 속도(CoM velocity), 하지관절(발목, 무릎, 엉덩관절)의 3차원 관절각(joint angles) 및 관절모멘트(joint moments)를 사용하였으며, 발-지면 각도와 3차원 관절 각도 및 모멘트의 회전 방향은 <Table 1>과 같이 정의하였다. 3차원 관절 모멘트(joint moment)는 역동역학(inverse dynamics) 방정식을 통해 산출한 후 체질량으로 정규화하였으며, 지면반력 데이터는 체중으로 정규화하였다.

Table 1. Definition of foot-ground angle and 3D joint angle and moment axis directions

Variables	Sagittal plane	Frontal plane	Transverse plane
Foot-ground angle	-	+ : inversion, - : eversion	-
Ankle joint angle & moment	+ : dorsi flexion, - : plantar flexion	+ : inversion, - : eversion	+ : adduction, - abduction
Knee joint angle & moment	+ : flexion, - : extension	+ : adduction, - abduction	+ : internal rotation, - external rotation
Hip joint angle & moment	+ : flexion, - : extension	+ : adduction, - abduction	+ : internal rotation, - external rotation

통계처리

모든 데이터는 획득한 3회의 개별 시도에 대한 평균값을 사용하였다. 집단 간 차이를 분석하기 위해 정규성(Shapiro-Wilk test)과 등분산성(Levene's test) 검정을 실시한 결과, 일부 변인에서 정규성을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이에 따라 시간 변인은 *Mann-Whitney U* test를 적용하였으며, 중앙 값(median value)과 사분위 범위(interquartile range, IQR: Q3-Q1), 효과 크기(effect size)를 제시하였다. 생체역학 변인은 1차원 비모수 통계적 파라미터 매핑(non-parametric statistical parametric mapping in one dimension, SnPM1D) 기반의 비모수 독립표본 *t* 검정(non-parametric independent *t* test)을 통해 분석하였다. 모든 통계분석은 pandas와 NumPy 및 SciPy 라이브러리를 사용하여 Python 3.12.7 (Python Software Foundation, USA) 환경에서 수행하였으며, 유의수준은 .05로 설정하였다.

연구 결과

시간 변인(temporal variables)

시간 변인에 대한 분석결과는 <Table 2>와 같다. 분석 결과, 접근속도와 지면 접촉 시간, 감속 시간에서는 성별에 따른 유의한 차이가 나타나지 않았다($p > .05$).

생체역학적 변인(biomechanical variables)

생체역학적 변인에 대한 분석결과는 다음과 같다. 먼저, 성별에 따른 셔플 스텝 감속 구간의 발-지면 각도는 <Fig. 3>과 같이 전 구간(0-100%)에서 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며($F: -9.35 \pm 2.46^\circ$, $M: -1.89 \pm 4.63^\circ$; $t = 4.519$, $p < .05$), 여성은 남성에 비해 더 큰 외변 방향의 발-지면 각도를 나타냈다. 반면, <Fig. 3>에 제시된 합성 지면반력과 신체 질량중심 속도, <Fig. 4>의 3차원 하지 관절 각도에서는 성별에 따른 유의한 차이가 나타나지 않았다($p > .05$).

한편 <Fig. 5>의 발목 관절 내전/외전 모멘트는 감속 구간의 약 6-20%에서 성별 간 유의한 차이가 나타났으며($F: -0.26 \pm 0.10$ Nm/kg, $M: -0.47 \pm 0.09$ Nm/kg; $t = 4.784$, $p < .05$), 해당 구간에서 남성이 여성보다 더 큰 외전 모멘트를 나타냈다. 무릎 관절의 굴곡/신전 모멘트 역시 감속 구간의 약 10-12%에서 성별 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며($F: -0.20 \pm 0.29$ Nm/kg, $M: 0.19 \pm 0.21$ Nm/kg; $t = 3.237$, $p < .05$), 여성은 신전 모멘트를, 남성은 굴곡 모멘트를 나타냈다.

논 의

본 연구는 성별에 따른 사이드 셔플 스텝의 감속 구간의 생체역학적 특성을 비교하고자 하였다. 먼저, 접근속도와 지면 접촉 시간, 감속 시간, 합성 지면반력, 신체질량중심 속도에서 유의미한 차이가 나타

Table 2. Comparison of temporal variables between males and Female during deceleration phase

Variables (unit)	Male		Female		<i>U</i>	<i>p</i>	effect size
	Median (IQR)	Mean (SD)	Median (IQR)	Mean (SD)			
approach speed (m/s)	2.03 (0.15)	2.13 (0.29)	2.01 (0.31)	2.03 (0.26)	37.500	.567	.131
contact time (sec)	0.35 (0.04)	0.36 (0.06)	0.29 (0.13)	0.32 (0.08)	56.000	.391	.206
deceleration time (% contact time)	49.36 (3.90)	48.69 (3.62)	47.42 (3.05)	46.78 (2.34)	66.000	.094	.393

* $p < .05$; IQR: interquartile range (Q3-Q1).

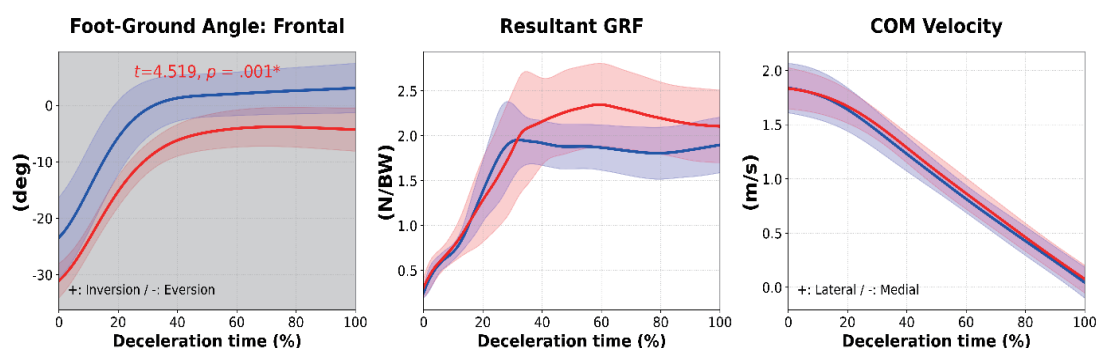


Fig. 3. Time-series changes in foot-ground angle, resultant ground reaction force, and CoM velocity during the deceleration phase (red: female $M \pm SD$; blue: male $M \pm SD$; gray: significant intervals)

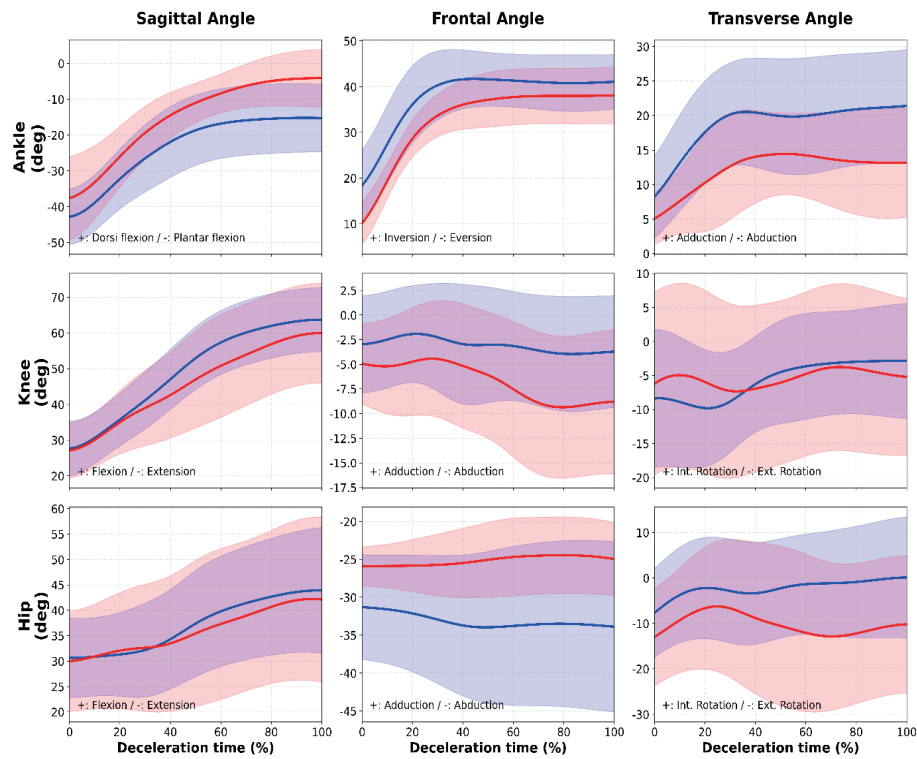


Fig. 4. Time-series changes in three-dimensional lower-extremity joint angles during the deceleration phase (red: female $M \pm SD$; blue: male $M \pm SD$; gray: significant intervals)

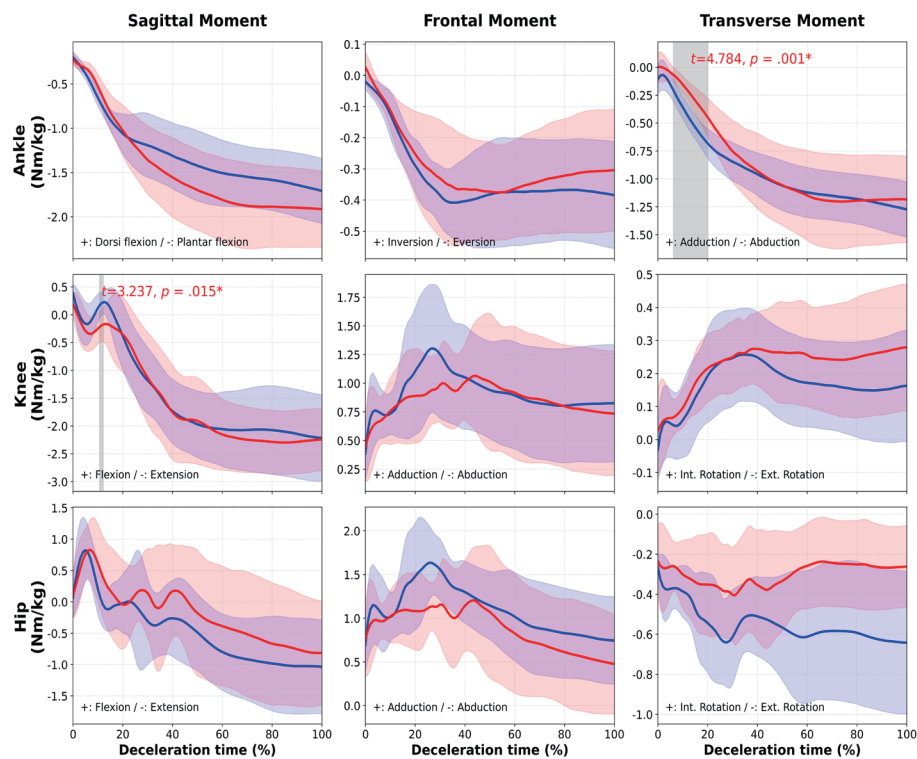


Fig. 5. Time-series changes in three-dimensional lower-extremity joint moments during the deceleration phase (red: female $M \pm SD$; blue: male $M \pm SD$; gray: significant intervals)

나지 않았으며, 이를 통해 성별 간 사이드 셔플 스텝 동작의 수행 수준 및 외적 부하의 크기가 유사함을 확인하였다. 한편, 발-지면의 관상면 각도와 발목관절의 수평면 모멘트 및 무릎관절의 시상면 모멘트에서 유의한 차이를 나타냈다.

구체적으로 여성은 남성보다 감속 구간 전반에 걸쳐 더 큰 외번을 보이며 착지하는 것으로 나타났다. 선행연구에서는 사이드스텝 커팅 시 여성이 남성보다 고관절 및 무릎의 내회전이 더 작고 무릎 외반과 발 회내각이 더 크게 나타난다고 보고하였다(McLean et al., 2004). 해당 연구가 근위 관절에서 성별 차이를 보고한 것과 달리, 본 연구에서는 모든 관절 각도에서 유의한 성별 차이가 나타나지 않았으며, 발-지면 관상면 각도에서만 차이가 확인되었다. 이러한 결과는 두 변수의 측정 기준이 다르다는 점에서 해석될 수 있다. 본 연구에서 정의한 발목관절 각도는 하퇴에 대한 발의 상대운동을 나타내는 반면, 발-지면 각도는 발 분절이 지면에 대해 놓이는 외재적 배치를 반영한다(Takabayashi et al., 2017). 따라서 근위 분절인 무릎이나 고관절의 정렬, 또는 발목관절에서의 상대 운동에 성별 차이가 나타나지 않더라도, 발 분절 자체가 지면에 적응하여 배치되는 방식에서의 차이는 발-지면 각도에서 더 민감하게 포착될 수 있다. Isherwood et al.(2021)은 여성이 남성보다 더 외번 및 외전된 발목관절 각을 나타내며 착지하는 것으로 보고하였다. 본 연구에서도 발목관절의 관상면과 수평면 각에서 통계적으로 유의하지는 않았으나 여성이 각각 더 외번 및 외전된 방향의 경향이 관찰되었으며, 그 차이는 발-지면 각도에서 뚜렷하게 나타났다. 이는 여성의 외번·외전된 발 배치가 발목관절에서의 상대운동보다 발 분절 전체의 지면에 대한 외재적 정렬로 더 분명하게 표출되었음을 시사한다. 이러한 배경에는 발 분절의 해부학적·기능적 구조의 성별 차이가 관련되었을 가능성이 있다. 선행연구에 따르면 여성은 남성보다 발의 비틀림 강성(foot torsional stiffness)이 낮고(Ezawa et al., 2024), 하중 조건에서 발의 종아치 변형이 더 크게 나타나는 등 발이 구조적으로 더 유연한 것으로 보고되어 왔다(Fukano & Fukubayashi, 2012). 또한 건강한 젊은 성인을 대상으로 한 연구에서 여성은 남성보다 회내형 발 자체의 비율이 더 높은 것으로 보고된 바 있다(Alahmari et al., 2021). 이러한 구조적 특성은 감속 시 발 분절이 지면에 대해 더 외번·외전된 정렬로 배치되도록 작용하였을 가능성이 있다.

또한 관절 모멘트에서 성별 간 뚜렷한 차이가 확인되었다. 감속 초기 구간에서 여성은 남성보다 더 작은 발목관절 외전 모멘트를 보였고, 무릎관절에서는 남성이 굴곡 모멘트를, 여성이 신전 모멘트를 나타냈다. 이 가운데 발목관절 외전 모멘트의 차이는 여성의 착지 정렬과 관련하여 해석될 수 있다. 본 연구에서 여성은 발-지면 관상면 각도에서 유의하게 더 외번된 정렬로 지면에 접지하였다. 거골관절(subtalar joint)의 회내는 외번, 외전, 배측굴곡을 포함하는 삼면(tri-planar) 운동으로(Jastifer & Gustafson, 2014), 외번과 외전은 동일한 회내 패턴을 구성하는 요소이다. 따라서 더 외번된 발 정렬은 수평면에서의 발 외전 경향을 동반하며, 이는 수평 지면반력이 발목관절 중심에 대해 형성하는 외전 방향의 모멘트 팔(moment arm)을 감소시켰을 가능성이 있다. 이로 인해 외전 모멘트 요구가 작게 나타난 것으로 사료된다.

한편, 방향전환 동작을 다룬 선행연구에서는 수평면의 발 진행각(foot progression angle)이 무릎관절의 관상면(외반) 및 수평면(내회전) 모멘트를 결정하는 핵심 변인으로 보고되어 왔다(Donelon et al., 2020; Nishizawa et al., 2022). 그러나 본 연구에서는 발목관

절의 수평면 모멘트와 무릎관절의 시상면 모멘트에서 나타나, 차이가 발현된 운동면이 선행연구와 상이하였다. 이처럼 본 연구의 모멘트 차이가 기존 커팅 연구와 다른 운동면에서 나타난 것은, 사이드 셔플과 일반적인 커팅 과제에 역학적 요구가 서로 다르기 때문으로 볼 수 있다. 커팅 동작은 전방 접근 후 급격한 방향 전환이 이루어지므로 수평면의 발 배치 전략과 근위부의 관상면·수평면 제어 특성이 상대적으로 더 두드러지게 반영된다. 실제로 사이드 셔플과 사이드 커팅을 직접 비교한 연구에서는, 사이드 셔플이 무릎 외반 정렬의 초기 평가에는 용이하나 방향 전환 강도가 높은 커팅 동작과 달리 고관절의 외전·내회전이나 무릎 외반 모멘트와 같은 근위부 제어 특성을 충분히 유도하지는 못한다고 보고하였다(Zaslow et al., 2016). 이러한 점을 고려하면, 본 연구에서 관찰된 성별 간 관절 각도의 유사성은 과제 자체의 운동학적 변별력의 한계에서 기인했을 가능성이 있으며, 그럼에도 불구하고 관찰된 모멘트 차이는 감속 초기 구간에서 상이하게 나타난 발 착지 전략이 하지 관절의 순 관절 모멘트(net joint moment) 생성에 영향을 미친 결과로 사료된다.

한편, 무릎관절 신전 모멘트의 증가는 착지 초기 단계에서 무릎을 신전 방향으로 제어하는 요구가 상대적으로 크게 작용하였음을 의미하며, 이는 주로 대퇴사두근(quadriceps femoris)의 작용과 연관되는 것으로 보고되어 왔다(Yu et al., 2006). 반면 무릎관절 굴곡 모멘트는 햄스트링(hamstring) 및 비복근(gastrocnemius)의 구심성 작용을 반영하며, 무릎 및 발목관절에서 음의 파워(negative power)를 동반한다는 점에서 에너지 흡수 및 원심성 근활동과 관련되는 것으로 알려져 왔다(Verniba et al., 2017; Walsh et al., 2012). 이를 토대로, 여성에게서 나타난 무릎관절 신전 모멘트는 동일한 외력 조건에서도 대퇴사두근 중심의 시상면 제어 전략을 수행하는 것으로 해석되는 반면, 남성에게서 나타난 굴곡 모멘트는 후방 사슬(posterior chain) 중심의 하중 수용(load capacity) 방식과 연관되었을 것으로 생각된다. 즉 두 집단은 동일한 과제를 수행하면서도 무릎관절의 시상면 부하에 대응하는 방식이 상이한 것으로 볼 수 있으며, 이는 앞서 나타난 발 접지 정렬의 차이와 더불어 사이드 셔플 스텝의 감속 동작에서 성별에 따라 다른 움직임 전략을 사용함을 보여준다.

종합하면, 본 연구에서 성별 간 접근속도와 외적 부하의 크기는 유사하였으나, 발-지면 관상면 각도와 발목관절 수평면 모멘트, 무릎관절 시상면 모멘트에서는 차이가 나타났다. 이는 동일한 외력 조건에서도 발 분절을 지면에 정렬하는 방식과 하지 관절이 부하에 기여하는 방식이 성별에 따라 다르게 구성되었음을 보여준다. 다만 본 연구에서 관찰된 성별 차이는 선행연구에서 ACL 손상 위험과 관련하여 보고되어 온 무릎 외반이나 고관절 내회전과 같은 관상면·수평면 변인이 아니라 발 분절의 지면 정렬과 발목 및 무릎관절의 시상면·수평면의 관절 모멘트에서 나타났으며, 이러한 차이는 특정 상해 위험의 증가라기보다 사이드 셔플 스텝 감속 과정에서의 성별 간 상이한 움직임 전략을 반영하는 것으로 해석된다.

한편, 본 연구에서는 비교적 소수의 건강한 성인을 대상으로 하였기 때문에 결과를 일반화하는데 주의가 필요하며, 향후 충분한 표본을 확보한 검증이 필요하다. 또한, 발 분절을 단일 강체(rigid body)로 정의하여 전족·중족·후족부의 다분절(multi-segment) 움직임을 반영하지 못하였으며, 이로 인해 발목관절 수준의 성별 차이가 과소평가 되었을 가능성을 배제할 수 없다(Leardini et al., 2019). 아울러 근전도(electromyography)와 관절 파워(joint power)를 직접 측정하거나 분석하지 않았다는 점에서, 본 연구의 결과는 특정 근육군 중

심의 전략으로 단정하기보다 성별 간 움직임 전략 차이의 가능성으로 제한하여 해석하였다. 그럼에도 본 연구는 커팅과 구별되는 측면 이동 과제인 사이드 셔플 스텝에서 성별에 따른 초기 감속 전략을 탐색하였다는 데 의의가 있으며, 향후 근전도와 다분절 발 모델을 활용한 후속 연구를 통해 사이드 셔플 스텝의 성별 간 움직임 전략에 대한 이해를 한층 넓힐 수 있을 것으로 판단된다.

결론

본 연구는 사이드 셔플 스텝 감속 구간에서 성별에 따른 하지 생체역학적 특성의 차이를 탐색하고자 하였다. 연구 결과, 성별 간 외적 부하와 관절 각도는 유사하게 나타난 반면, 발 분절의 지면 정렬과 관절 모멘트 조절 방식에서는 차이가 확인되었다. 즉, 측면 이동 감속에서의 성별 차이가 전반적인 운동학적 수행보다는 발의 접지 전략과 그에 따른 관절 부하 조절 수준에서 비롯될 수 있음을 시사한다. 본 연구는 이러한 차이를 상해 위험이 아닌 움직임 전략의 관점에서 제시하였다는 점에서, 사이드 셔플 스텝 감속 동작의 성별 간 초기 전략을 이해하는 기초 자료로서 의미를 가진다. 나아가 본 연구의 결과는 향후 감속 동작에서의 하지 분절 간 협응과 신경근 조절 기전을 규명하기 위한 후속 연구의 기반으로 활용될 수 있을 것이다.

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: J. Lee, J. Park, Data curation: S. -j. Han, Formal analysis: S. -j. Han, Methodology: J. Lee, S.-K. Park, Project administration: J. Park, Visualization: S. -j. Han, Writing-original draft: S. -j. Han, Writing-review & editing: J. Lee, S.-K. Park, J. Park.

참고문헌

- Alahmari, K. A., Kakaraparthi, V. N., Reddy, R. S., Samuel, P. S., Tedla, J. S., Rengaramanujam, K., Ahmad, I., Sangadala, D. R., & Mukherjee, D. (2021). Foot posture index reference values among young adults in Saudi Arabia and their association with anthropometric determinants, balance, functional mobility, and hypermobility. *BioMed Research International*, 2021(1), 8844356.
- Ast, S., Kögel, J., Reh, J., von Lieres und Wilkau, H. C., Charalambous, L., & Irwin, G. (2013). Identification of touchdown and toe-off in turf-sport specific movements using kinematic data. *Proceedings of the 31st International Conference on Biomechanics in Sports*.
- Carson, D. W., & Ford, K. R. (2011). Sex differences in knee abduction during landing: A systematic review. *Sports Health*, 3(4), 373–382. <https://doi.org/10.1177/1941738111410180>
- Donelon, T. A., Dos'Santos, T., Pitchers, G., Brown, M., & Jones, P. A. (2020). Biomechanical determinants of knee joint loads associated with increased anterior cruciate ligament loading during cutting: A systematic review and technical framework. *Sports Medicine*, 6(53). <https://doi.org/10.1186/s40798-020-00276-5>
- Donelon, T. A., Edwards, J., Brown, M., Jones, P. A., O'Driscoll, J., & Dos'Santos, T. (2024). Differences in biomechanical determinants of ACL injury risk in change of direction tasks between males and females: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 10(29). <https://doi.org/10.1186/s40798-024-00701-z>
- Erdfelder, E., Faul, F., & Buchner, A. (1996). GPOWER: A general power analysis program. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 28(1), 1–11.
- Ezawa, Y., Nakatsugawa, T., & Maruyama, T. (2024). Foot torsional stiffness exhibits gender differences but shows no correlation with medial longitudinal arch height. *Journal of Biomechanics*, 175, 112293.
- Fong, C.-M., Blackburn, J. T., Norcross, M. F., McGrath, M., & Padua, D. A. (2011). Ankle-dorsiflexion range of motion and landing biomechanics. *Journal of Athletic Training*, 46(1), 5–10. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-46.1.5>
- Fukano, M., & Fukubayashi, T. (2012). Gender-based differences in the functional deformation of the foot longitudinal arch. *The Foot*, 22(1), 6–9.
- Grood, E. S., & Suntay, W. J. (1983). A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: Application to the knee. *Journal of Biomechanical Engineering*, 105, 136–144. [doi:10.1115/1.3138397](https://doi.org/10.1115/1.3138397)
- Harper, D. J., McBurnie, A. J., Dos'Santos, T., Eriksrud, O., Evans, M., Cohen, D. D., Rhodes, D., Carling, C., & Kiely, J. (2022). Biomechanical and neuromuscular performance requirements of horizontal deceleration: A review with implications for random intermittent multi-directional sports. *Sports Medicine*, 52(10), 2321–2354. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01693-0>
- Hewett, T. E., Myer, G. D., Ford, K. R., Heidt, R. S., Jr., Colosimo, A. J., McLean, S. G., van den Bogert, A. J., Paterno, M. V., & Succop, P. (2005). Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: A prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(4), 492–501. <https://doi.org/10.1177/0363546504269591>
- Isherwood, J., Wang, H., & Sterzing, T. (2021). Running biomechanics and running shoe perception of Chinese men and women. *Footwear Science*, 13(1), 55–67.
- Jastifer, J. R., & Gustafson, P. A. (2014). The subtalar joint: biomechanics and functional representations in the literature. *The Foot*, 24(4), 203–209.
- Lam, G. W. K., Park, E. J., Lee, K. K., & Cheung, J. T. M. (2015). Shoe collar height effect on athletic performance, ankle joint kinematics and kinetics during unanticipated maximum-effort side-cutting performance. *Journal of Sports Sciences*, 33(16), 1738–1749. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1011206>
- Leardini, A., Caravaggi, P., Theologis, T., & Stebbins, J. (2019). Multi-segment foot models and their use in clinical populations. *Gait & Posture*, 69, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.01.022>
- Leppänen, M., Pasanen, K., Kujala, U. M., Vasankari, T., Kannus, P., Äyrämö, S., Krosshaug, T., Vasankari, T., & Parkkari, J. (2017). Stiff landings are associated with increased ACL injury risk in young female basketball and floorball players. *The American Journal of Sports Medicine*, 45(2), 386–393. <https://doi.org/10.1177/0363546517692762>
- Loewen, A. M., Petric, J. K., Olander, H. L., Riesenberger, J., & Ulman, S. (2025). A comparison between manual and automated event detection for shuffle, deceleration and run cut tasks using motion capture. *Clinical Biomechanics*, 129, 106644.
- Maurus, P., Asmussen, M. J., Cigoja, S., Nigg, S. R., & Nigg, B. M. (2019). The submaximal lateral shuffle test: a reliability and sensitivity analysis. *Journal of Sports Sciences*, 37(18), 2066–2074.
- McLean, S. G., Walker, K. B., & van den Bogert, A. J. (2005). Effect of gender on lower extremity kinematics during rapid direction changes: An integrated analysis of three sports movements. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 8(4), 411–422.
- McLean, S. G., Lipfert, S. W., & Van den Bogert, A. J. (2004). Effect of gender and defensive opponent on the biomechanics of sidestep cutting. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(6), 1008–1016.
- Micheo, W., Hernández, L., & Seda, C. (2010). Evaluation, management, rehabilitation, and prevention of anterior cruciate ligament injury: Current concepts. *PM&R*, 2(10), 935–944. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2010.06.014>
- Mohr, M., & Federolf, P. (2022). Fatigue-related reductions in

- movement smoothness during a lateral shuffle and side-cutting movement. *European Journal of Sport Science*, 22(10), 1522–1531.
- Nishizawa, K., Hashimoto, T., Hakukawa, S., Nagura, T., Otani, T., & Harato, K. (2022). Effects of foot progression angle on kinematics and kinetics of a cutting movement. *Journal of Experimental Orthopaedics*, 9(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40634-022-00447-1>
- Oxendale, C. L., Highton, J., Twist, C., & Smith, G. (2025). The effect of exercise-induced muscle damage on lower limb side cut biomechanics and task achievement in male and female team sport athletes. *European Journal of Sport Science*, 25(9). <https://doi.org/10.1002/ejsc.70051>
- Parsons, J. L., Coen, S. E., & Bekker, S. (2021). Anterior cruciate ligament injury: Towards a gendered environmental approach. *British Journal of Sports Medicine*, 55(17), 984–990. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-103173>
- Pataky, T. C. (2010). Generalized n-dimensional biomechanical field analysis using statistical parametric mapping. *Journal of Biomechanics*, 43(10), 1976–1982. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.03.008>
- Rai, V., Sharma, A., Boe, D., Preechayasomboon, P., & Rombokas, E. (2022). Continuous and unified modeling of joint kinematics for multiple activities. *IEEE Access*, 10, 47509–47523.
- Sigward, S. M., Pollard, C. D., Havens, K. L., & Powers, C. M. (2012). Influence of sex and maturation on knee mechanics during side-step cutting. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(8), 1497–1503. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31824e5c7e>
- Takabayashi, T., Edama, M., Nakamura, E., Yokoyama, E., Kanaya, C., Kubo, M., & Inai, T. (2017). Coordination among the rearfoot, midfoot, and forefoot during walking. *Journal of Foot and Ankle Research*, 10(42). <https://doi.org/10.1186/s13047-017-0224-3>
- Thomas, C., Dos'Santos, T., Comfort, P., & Jones, P. A. (2024). Male and female soccer players exhibit different knee joint mechanics during pre-planned change of direction. *Sports Biomechanics*, 23(1), 118–131. <https://doi.org/10.1080/14763141.2020.1830160>
- Walsh, M., Boling, M. C., McGrath, M., Blackburn, J. T., & Padua, D. A. (2012). Lower extremity muscle activation and knee flexion during a jump-landing task. *Journal of Athletic Training*, 47(4), 406–413. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-47.4.17>
- Verniba, D., Vescovi, J. D., Hood, D. A., & Gage, W. H. (2017). The analysis of knee joint loading during drop landing from different heights and under different instruction sets in healthy males. *Sports Medicine*, 3(6). <https://doi.org/10.1186/s40798-016-0072-x>
- Yu, B., Lin, C.-F., & Garrett, W. E. (2006). Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task. *Clinical Biomechanics*, 21(3), 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.11.003>
- Yu, P., & Fernandez, J. (2024). Alterations in lower limb biomechanical characteristics during the cutting manoeuvre in chronic ankle instability population and copers. *Physical Activity and Health*, 8, 148–156. <https://doi.org/10.5334/paah.380>
- Zaslow, T. L., Pace, J. L., Mueske, N. M., Chua, M. C., Katzel, M. J., Dennis, S. W., & Wren, T. A. L. (2016). Comparison of lateral shuffle and side-step cutting in young recreational athletes. *Gait & Posture*, 44, 189–193. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.12.019>

사이드 셔플 스텝 수행 시 성별에 따른 생체역학적 감속 전략의 차이

한수지¹, 이주성², 박상균³, 박종철^{4*}

¹국립부경대학교 산학협력단, 연구교수

²대상트 신발 R&D 센터, 팀장

³한국체육대학교 모션이노베이션 센터, 교수

⁴국립부경대학교 스마트헬스케어학부, 교수

*교신저자: 박종철(jcpark@pknu.ac.kr)

[목적] 본 연구는 사이드 셔플 스텝 감속 동작에서 성별에 따른 생체역학적 특성의 차이를 규명하고자 하였다.

[방법] 건강한 성인 남성 12명과 여성 10명을 대상으로 선정하였으며, 모든 대상자는 사이드 셔플 스텝 동작을 수행하였다. 분석 변인은 시간 변인(접근속도, 지면 접촉시간, 감속시간)과 감속 구간에서의 생체역학적 변인(발-지면 각도, 합성 지면반력, 신체질량중심 속도, 3차원 관절 각도 및 모멘트)의 시계열 데이터를 산출하였다. 통계분석을 위해 시간 변수는 *Mann-Whitney U* 검정을 실시하였으며, 생체역학적 변수의 시계열 데이터는 통계적 파라미터 매핑을 사용하여 비모수 독립 t 검정을 수행하였다($\alpha = .05$).

[결과] 여성은 남성에 비해 전 구간에서 더 뚜렷한 외반 정렬을 보였으며($p < .05$), 특히 감속 초기 단계에서 더 높은 무릎 관절 신전 모멘트를 나타낸 반면($p < .05$), 남성은 동일 구간에서 더 높은 발목관절 외전 모멘트와 무릎관절 굴곡 모멘트를 나타냈다($p < .05$).

[결론] 본 연구의 결과는 성별에 따라 사이드 셔플 스텝 초기 감속 과정에서 발의 정렬 차이와 관절모멘트 조절 방식이 다르게 나타날 수 있음을 보여준다.

주요어

사이드 셔플 스텝, 감속 전략, 성별 차이, 착지 전략, 측면 이동

※ 이 논문은 2025학년도 국립부경대학교 산학협력단 Post-Doc. 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임.