



Original Article

Supporting Leg and Gaze Direction in Single-Leg Postural Sway

Seok-Hyun Song*

Center for Coaching Psychology Research, Jeonbuk National University

Article Info

Received 2025. 08. 04.

Revised 2025. 10. 28.

Accepted 2025. 12. 23.

Correspondence*

Seok-Hyun Song

thdtjrgusssh@naver.com

Key Words

Postural sway, COP,
Gaze, Sample entropy

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2024S1A5B5A1602239).

This study was reconstructed based on a poster presentation at the 2025 Annual Conference of the Korean Society of Sport Psychology.

PURPOSE This study aimed to analyze the differences in center of pressure (COP) and sample entropy (SampEn) between the right and left supporting legs during a single-leg stance task involving vertically and horizontally moving visual stimuli tracking. The objective was to examine the directional processing of visual information and functional asymmetry of the feet in postural control, providing foundational data for balance training design. **METHODS** This study recruited 20 right-footed adult men (mean age = 26.84 ± 4.47 years) who scored >7 on the Waterloo Footedness Questionnaire-Revised. The participants performed a 30-second single-leg stance while tracking visual stimuli with their gaze under different directional conditions. **RESULTS** Significant differences were observed across gaze directions in all COP and SampEn variables, with the left-right condition yielding the highest values ($p < .05$). Regarding the supporting leg, a significant difference was observed only in SampEn values in the anteroposterior direction. Moreover, a significant interaction effect between gaze direction and supporting leg was noted in SampEn in the mediolateral direction. **CONCLUSIONS** These findings suggest that the right and left supporting legs use different postural control strategies. Specifically, the left supporting leg demonstrated a tendency to adopt more complex and adaptive control mechanisms under horizontal gaze shifts, indicating functional asymmetry in postural regulation.

서론

자세 조절은 제자리에서 서 있거나 움직이는 동안, 외부 자극에 반응할 때 신체 중심을 안정적으로 유지하는 능력을 의미하며(Daubney & Culham, 1999), 이는 일상생활 수행 능력과 밀접하게 관련되어 있다. 그러나 해부학적으로 볼 때, 인간의 직립 자세는 균형을 유지하기에 구조적으로 불안정한 특성을 지닌다. 신체는 질량 중심(center of mass; COM)이 높고, 기저면(base of support; BOS)이 좁은 구조를 가지고 있어, 균형을 유지하기 위해 지속적인 자세 조절이 필요하다(Aruin, 2016; Santos et al., 2010). 특히 COM을 기저면 내에 유지하기 위해서는 압력 중심(center of pressure; COP)의 정교한 기계적 상호작용도 중요하다.

인간은 시각 정보를 활용하여 다양한 동작을 수행하며, 자세 조절은 시각 정보의 영향을 받는 중요한 신체 능력이다(Szafranec et

al., 2018). 이에 따라 직립 자세 과제를 활용한 시각-자세 조절 메커니즘 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, Minamisawa et al.(2024)는 젊은 성인을 대상으로 지면반력기에서 제공되는 COP를 화면에 제시된 시각 피드백을 목표 위치에 맞추어 유지하는 과제를 제시하였다. 그 결과, 전후(anteroposterior; AP) 방향에서는 우세측(오른쪽) 다리가 비우세측(왼쪽) 다리보다 목표에 더 정확히 유지하였으나, 좌우(mediolateral; ML) 방향에서는 차이가 없었다. 이는 우세측 다리가 시각 자극에 더 잘 반응함을 시사하였다.

또한, Okayama et al.(2024)은 일반 성인을 대상으로 양안을 뜯은 상태, 우세안 눈 감음, 비우세안 눈 감음의 세 조건에서 COP와 발목 근 활성도를 비교하였다. 그 결과, COP에는 시각 조건에 따라 유의한 차이가 없었으나, 발목 근 활성도에서는 양안 시 조건보다 비우세안 눈 감음 조건에서 유의하게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 시각 인지와 자세 안정성 간에 복잡한 상호작용을 보여준다.

그리고 Raffi et al.(2017)은 시선 위치와 시각 흐름과 성별에 따른 COP를 분석한 결과, 시선 방향이 시각 흐름 방향(화면 배경의 움직임 패턴)에 대해 좌우로 변화할 때 여성에게서만 유의한 COP 흔들림이 유의하게 증가한다고 보고하였다. 이는 남녀 간의 근육량 및

(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.

생체역학적 구조 차이에 기인한 것으로 해석되며, 시선 위치와 시각 정보의 통합이 자세 조절 과정에서 중요한 역할을 한다는 점을 뒷받침한다. 이와 같은 선행연구에서는 자세 조절이 자동적 과정일지라도 인지 과제가 병행되면 그 성능이 저하될 수 있음을 강조하였다(Woollacott & Shumway-Cook, 2002).

인간의 주의 자원은 제한적이기 때문에, 인지 과제가 추가되면 자세 조절 능력이 감소할 수 있으며, 특히 안구 움직임과 같은 시각적 요소가 이중 과제 효과를 유발할 수 있다. 자세 조절은 시각, 전정, 고유수용감각 정보의 통합을 통해 이루어지며, 이 중 시각 정보는 신체와 환경의 상대적 위치를 판단하는 데 핵심적 역할을 한다(Lee & Lishman, 1975; Nashner, 1976). 예를 들어, 여자 청소년의 두 발 서기에서 한발 서기 전환 과제를 분석한 연구에서는 시각 조건(눈 뜸 vs. 눈 감음)에 따라 COP 변위와 자세 동요가 증가하고 운동 난이도에 따라 안정성이 변화한다는 연구 결과가 보고되었다(Błaszczuk et al., 2020). 이는 안구 운동이 단순한 시각 정보 전달을 넘어 전정계 및 자세 반응에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다(Guerraz & Bronstein, 2008).

흥미롭게도, 이러한 인지적 부담 가능성에도 불구하고, 일부 선행 연구에서는 고정된 시선보다 빠른 안구 움직임(saccades)이 오히려 자세 조절을 향상할 수 있음이 보고되었다. 특히 빠른 안구 움직임이나 부드러운 추적 안구 운동(smooth pursuit)과 같은 능동적인 시선 전환은 고정 시선 상태에 비해 자세 흔들림을 효과적으로 감소시키는 것으로 나타났다(Rodrigues et al., 2015). 이는 안구 운동과 자세 조절 시스템이 단순히 경쟁 관계가 아니라, 기능적으로 상호작용하며 통합적으로 작동할 가능성을 시사한다. 다시 말해, 시선 제어와 자세 조절 간의 기능적 통합이 자세 안정성 유지에 중요한 역할을 할 수 있다.

그러나 이러한 긍정적 효과는 모든 시각 추적 조건에서 일관되게 나타나지는 않는다. 부드러운 추적 안구 운동의 효과에 대해서는 여전히 논쟁의 여지가 있으며, 일부 선행연구에서는 흔들리는 배경이나 느린 속도의 추적 운동 조건에서 COP 변위가 증가하였다고 보고하였다(Thomas et al., 2016). 또한 Nakahara et al.(2022)의 연구에서도 한발 서기와 같이 불안정한 자세 조건에서는 안구 움직임의 복잡성이 증가할수록 COP 진폭과 주파수가 증가하는 경향이 관찰되었다. 이러한 상반된 결과는 부드러운 추적 안구 운동이 자세 조절에 미치는 영향과 그 기전이 과제 특성 및 자세 안정성 수준에 따라 달라질 수 있음을 보여준다. 이와 관련하여 움직이는 시각 자극을 활용한 연구들은 정적인 평가보다 실제 생활에서 요구되는 시각 추적 기반 균형 유지 능력을 더 잘 반영할 수 있다는 점을 강조한다(Redfern et al., 2001). 더욱이 COP 조절은 후두엽, 소뇌, 뇌간 등 시각-운동 통합 메커니즘과 밀접하게 연관되어 있기 때문에(Fitzpatrick et al., 1996; Jeka et al., 1997; Johansson et al., 1988), 실제 생활 속에서 유사한 시각 추적 상황은 자세 안정성 유지에 핵심적인 단서를 제공할 수 있다(Peterka, 2002).

한편, 한발 서기는 자세 안정성을 정량적으로 측정할 수 있는 대표적인 과제로 널리 활용된다(Song et al., 2022). 이는 걷기, 장애물 넘기, 계단 오르기 등 일상적인 이동 동작과 밀접하게 관련되어 있다(Chomiak et al., 2015; Jonsson et al., 2004). 또한 걷기와 달리 기의 기반이 되는 동작이기 때문에 노화 및 손상, 신경학적 질환 등 다양한 상황에서 자세 조절 능력을 평가하는 데 유용하다(Horak et al., 2009; Springer et al., 2007). 특히, 한발 서기와 같이 지지면이

제한된 조건에서는 지지 다리의 감각 민감도와 제어 능력이 COP 조절에 중요한 영향을 미친다(Horak, 2006; Peterka, 2002). 발 우세성(foot dominance), 즉 오른발과 왼발의 차이는 고유수용감각 처리 민감성 및 운동 제어 전략에서 차이를 유발하며, 일반적으로 우세 발(차는 발)은 동작 수행, 비우세 발(지지 발)은 지지와 균형 유지에 주로 관여하는 경향이 있다(Yoshida et al., 2014).

따라서 한발 서기 과제에서 지지 다리에 따른 기능적 차이가 나타날 수 있으며, 이는 전정 기능 손상 후 보상 전략이나 수술 후 회복 과정에서도 중요한 요인으로 작용한다(Buneo & Andersen, 2006; Yoshida et al., 2014). 그러나 Schorderet et al.(2021)의 메타 분석 연구에서는 일반적인 서기 과제에서 지지 다리의 균형 수행 능력은 유의한 영향을 미치지 않는다고 보고하였다. 다만, 이 연구들은 움직이는 시각 자극 상황을 고려하지 않았으며, 자세 조절 과정에서의 신경근계 조절 특성을 보다 민감하게 포착할 수 있는 지표인 샘플 엔트로피(sample entropy)를 반영하지 않았다는 한계가 있다.

샘플 엔트로피는 시계열 데이터의 불규칙성과 복잡성을 측정하는 비선형 지표로, 자세 조절 시 주의 집중 수준과 신경근계 조절의 자동화 정도를 민감하게 반영한다(Donker et al., 2007; Roerdink et al., 2011). 이 지표는 특히 이차적 인지 과제 수행 시 증가하는 경향을 보여, 자세 유지에 투입되는 주의가 감소했음을 시사한다(Cavanaugh et al., 2007). 예를 들어, 선행연구에서는 균형 능력이 뛰어난 체조 선수는 높은 샘플 엔트로피 값을 나타내어 자동화된 자세 조절을 보이는 반면, 병리적 손상이 있는 개인은 낮은 값을 보여 더 많은 의식적 통제가 요구됨을 의미한다고 보고하였다(Roerdink et al., 2006; Stins et al., 2009).

그러나 샘플 엔트로피 값을 절대적으로 높다고 해서 좋은 자세 조절을 의미하거나, 낮다고 해서 불안정한 조절 상태로 해석해서는 안 된다. 높은 불규칙성(즉, 높은 샘플 엔트로피)은 숙련된 집단에서는 보다 유연하고 자동화된 조절 전략을 반영할 수 있으나, 다른 맥락에서는 오히려 조절 체계의 불안정성 또는 효율성 저하를 시사할 수도 있다(Borg & Laxåback, 2010). 그렇기 때문에 샘플 엔트로피의 변화는 그 방향성 자체보다, 과제 요구도, 개인의 숙련성과 다른 자세 안정성 지표들과의 상호관계 속에서 해석될 필요가 있다. 이러한 맥락에서, 샘플 엔트로피는 COP와 같은 생체역학적 지표를 보완하여 자세 조절 메커니즘의 미세한 변화를 탐지하는 데 유용하다. 특히 지지 다리에 따른 미세한 자세 조절 특성을 분석하는 데 의미 있는 지표가 될 수 있다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 20대 건강한 남성을 대상으로 연령이나 성별과 같은 교란 요인을 최소화하여 기초적인 자세 조절 특성을 우선적으로 규명하고자 하였다. 이를 통해, 한발 서기 자세에서 상하(up-down) 및 좌우(left-right) 방향의 움직이는 시각 자극을 추적하는 과제를 수행하며, 지지 다리에 따른 COP와 샘플 엔트로피의 기능적 차이와 방향 특이성 분석을 목적으로 한다. 이러한 접근은 단순한 감각-운동 통합 과제에서도 자세 조절에서의 시각 정보 처리 메커니즘이 다르게 작동할 수 있음을 보여주며, 젊은 성인의 균형 능력 평가뿐 아니라 향후 노인 및 신경계 손상 환자 대상의 감각 자극 기반 균형 훈련 프로그램 설계에 유용한 기초 자료를 제공할 것으로 기대된다.

연구방법

연구대상

본 연구는 J대학교 생명윤리위원회(IRB)의 승인(File no. 2025-04-030-001)을 받은 후 실시되었다. 연구대상자 수 산출은 지지 다리(우 세측, 비우세측)와 시선 방향(고정, 좌우, 상하)을 모두 피험자 내 요인으로 설정한 이원 반복측정 분산분석(2-way repeated-measures ANOVA)을 기준으로, G*Power 3.1 프로그램을 사용하였다. 분석 조건은 반복측정 요인 2(지지 다리) \times 3(시선 방향) 설계, 효과 크기 $f = .25$, 유의수준 $\alpha = .05$, 검정력 $(1-\beta) = .80$, 반복측정 간 상관계수 $r = .50$ 으로 설정하였다. 그 결과 필요한 최소 대상자 수는 19명으로 산출되었다. 본 연구에서는 20명의 참가자를 모집하여 분석을 수행하였으며, 실제 검정력 $(1-\beta) = .84$ 로 확인되었다.

이에 따라 본 연구에는 평균 연령 26.84 ± 4.47 세의 성인 남성 20명이 자발적으로 참여하였으며, 평균 키는 173.90 ± 4.21 cm, 평균 체중은 70.05 ± 15.60 kg이었다. 연구대상자는 사전 동의서를 작성한 후, 연구자로부터 실험 절차에 대한 설명을 듣고 과제 내용을 충분히 이해하였다. 이들은 모두 J 대학교의 대학원생 또는 학부생이며, 발 우세성은 Waterloo Footedness Questionnaire-Revised(WFQ-R)을 한국어로 번역하여 13개 문항을 제시한 후 평가하였다. 모든 참여자는 WFQ-R 점수 7점 이상을 기록하여 오른발잡이로 확인되었다(Elia et al., 1998). 실험 참여에 앞서 교정시력을 포함한 시각 기능과 신체 능력에 이상이 없는지를 확인하였으며, 이상이 없는 경우, 실험에 참여하도록 하였다.

실험 도구

1. 안구 움직임 추적 장치

안구 움직임을 측정하기 위해 Eye Tracker Dikablis Glasses 3(Ergoneers, DE)를 사용하였다(Fig. 1). 이 장비는 눈의 수직 및 수평 움직임을 측정할 수 있어 실험자가 연구대상자의 실시간 시선이동을 확인하는 데 활용되었다. 본 연구에서는 양안 추적을 수행하였으며, 데이터는 60Hz의 샘플링 주파수로 수집되었다. 수집된 영상 데이터는 실시간으로 D-Lab 3.0(Ergoneers, DE)을 이용하여 확인하였다. 전처리 과정에서는 보정과 동공 추적 정확도를 면밀히 확인하였으며, 실험 수행 중 유의미한 데이터 손실이나 이상 신호는 관찰되지 않았다.



Fig. 1. Eye tracker

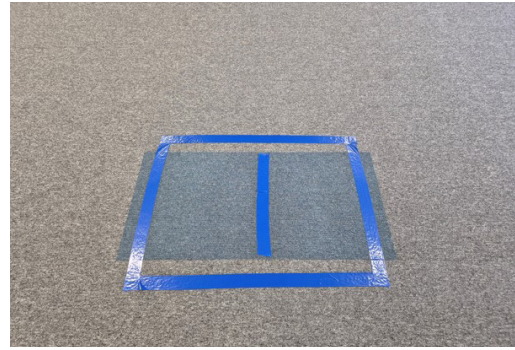


Fig. 2. Force plate

2. 지면반력기

발생하는 COP를 측정하기 위해 BMS400600(AMTI, USA) 2대를 사용하였다(Fig. 2.). 이 장비는 지면에 가해지는 수직, 전후, 좌우 방향의 힘을 정밀하게 측정할 수 있다. 본 연구에서는 동기화된 2대의 지면반력기를 통해 100Hz의 샘플링 주파수로 수집하였다.

과제

과제는 한발 서기를 30초 수행하는 동안 화면에 제시된 원을 따라 시선을 이동하도록 하였다(Fig. 3.). 본 실험의 시선 추적 과제는 연구 목적에 부합하도록 선행연구를 참고하여 프로그래밍되었다.

먼저, 시선 추적 과제는 모든 원의 크기는 시야각 3° 이내로 설정되었으며(Thomas et al., 2016), 모든 원은 연구대상자의 시선이 부드러운 추적 움직임을 보일 수 있도록 초당 60픽셀 속도로 이동하였다. 또한, 머리 회전을 최소화하고 자세 흔들림을 측정할 수 있도록 모든 원이 시각 각도 15° 이내에서 움직이도록 설정하였다(Glasauer et al., 2005; Stoffregen et al., 2006, 2007). 실험 중 시선의 높이는 모든 연구대상자에게 동일하게 적용하였으며, 개별적인 조정은 이루어지지 않았다. 단, 연구대상자가 실험을 수행하는 동안 최대



Fig. 3. Single-leg task example

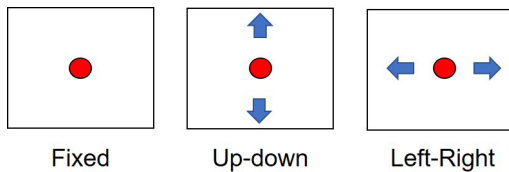


Fig. 4. Gaze-tracking task example

한 머리를 들고 허리를 꼴꼴이 편 상태를 유지하도록 하였다. 또한 과제 동안 머리는 가능한 움직이지 않도록 하였다. 자세 조절 과제는 연구대상자가 안구 움직임 추적 장치를 착용한 상태에서 2m 앞 화면에 제시된 원에 따라 시선 추적하며 30초간 한발 서기를 하는 것이다 (Jonsson et al., 2004).

구체적인 실험 절차는 다음과 같다. 실험은 대상자의 시선이 제시된 원을 정확히 추적할 수 있는지를 확인하는 과정으로 시작되었다. 연구대상자는 지면반력기 뒤에 위치한 의자에 앉아 안구 움직임 추적 장치를 착용하였고, 장치 착용이 완료되면, 연구자의 지시에 따라 머리를 고정된 상태에서 안구만을 움직여 연구자가 제시한 좌상, 우상, 우하, 좌하 네 개의 지점을 응시하는 보정 작업을 수행하였다. 연구자는 연구대상자의 시선이 모니터에 표시된 십자선과 정확히 일치하도록 조정하였다. 보정이 완료된 후, 연구대상자는 맨발(또는 얇은 양말 착용)로 두 개의 지면반력기 위에 나란히 서서 두 발로 정적인 자세를 취하였고, 이때부터 지면반력 측정이 시작되었다. 이후, 화면에 추적할 원이 제시되었으며, 연구대상자는 이를 확인한 뒤 본인이 원하는 타이밍에 한발 서기를 시작하였다. 한발 서기의 시작과 함께, 화면의 원은 고정되거나 화면의 중앙으로부터 좌우 또는 상하 방향으로 움직이도록 각 3가지 조건으로 제시되었다(Fig. 4).

과제 수행 순서는 대상자의 지지 다리에 따라 교차 설계로 구성되었다. 예를 들어, 연구대상자 A는 먼저 오른쪽 다리를 지지한 상태에서 고정, 좌우, 상하 시각 조건을 수행한 뒤, 왼쪽 다리를 지지한 상태에서 동일한 세 가지 시선 조건을 수행하였다. 연구대상자 B는 지지 다리 순서를 반대로 하여, 순서 효과 및 학습 효과를 최소화하였다. 또한, 시선 추적 과제의 제시 순서는 각 연구대상자마다 무작위로 배정되었으며, 연구대상자는 한 발을 든 상태에서 30초 동안 과제를 수행하였다. 발을 드는 순간부터 안구 움직임 추적 장치를 통해 연구자는 대상자의 시선 움직임을 실시간으로 확인하였다. 각 조건은 2회 반복되었으며, 총 12회의 한발 서기 과제가 수행되었다. 피로 누적을 방지하기 위해 각 과제 간에는 1분 이상의 충분한 휴식 시간을 제공하였으며, 모든 연구대상자는 넘어짐 없이 실험을 안전하게 완료하였다.

자료 분석

자료산출은 MATLAB 2024a(Mathworks, USA)와 MS Excel(Microsoft, USA)을 사용하였다. 데이터 수집 구간은 연구대상자가 한쪽 발을 들어 올리는 순간으로 정의하였으며, 들어 올리는 발의 지면 반력(Fz) 값이 사전 정의된 임계값 이하로 감소하는 시점을 MATLAB 코드를 통해 자동으로 식별하고, 이를 기준으로 데이터 수집 구간을 결정하였다. 모든 원 데이터를 수집한 후, 4차 버터워스 저역 필터(4th order lowpass Butterworth filter)를 사용하여 차단 주파수(cut-off frequency) 10Hz에서 필터링하였다(Borg & Laxåback, 2010). 또한, 한발 서기 동작에서 흔들림이 가장 심한 초

기와 마지막 구간 5초(Jonsson et al., 2004)를 제외하여, 모든 데이터를 동일하게 총 20초 구간의 데이터를 분석에 사용하였다.

1. COP & 샘플 엔트로피

COP 측정 시의 신호가 얼마나 복잡하고 다양한 패턴을 갖는지 수치화할 수 있는 샘플 엔트로피를 측정하였다(Yentes & Raffalt, 2021). 샘플 엔트로피는 COP 데이터를 활용하여 계산하였다. 계산 방법은 기록된 COP 궤적이 상수 샘플링 주파수(F_s)로 샘플링된 N 개의 데이터 포인트를 포함하고 있다고 가정한다. 총 신호 지속 시간 T 는 n/F_s 로 정의되며, 단위는 초이다. 각 시간 n/F_s 에서 COP 좌표를 계산하였으며, ML 및 AP 방향에서의 중심 이동은 각각 <Eq. 1>과 <Eq. 2>로 나타낸다(Quijoux et al., 2021).

$$X_n = ML_n - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ML_i \quad \cdots \text{Eq. 1.}$$

$$Y_n = AP_n - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i \quad \cdots \text{Eq. 2.}$$

수집된 COP 데이터를 샘플 엔트로피로 계산하기 위해 <Eq. 3>를 적용하였다.

$$\text{SampEn}(m, r, N) = -\ln \left(\frac{A^m(r)}{B^m(r)} \right) \quad \cdots \text{Eq. 3.}$$

여기서 B^m 과 A^m 은 길이 $m+1$ 의 <Eq. 4, 5>와 같이 정의된다.

$$B^m = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r) \quad \cdots \text{Eq. 4.}$$

$$A^m = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} A_i^m(r) \quad \cdots \text{Eq. 5.}$$

샘플 엔트로피는 시간에 따른 COP 변동성을 정량화하는 데 사용되며, 특정 길이의 데이터 시퀀스가 추가적인 데이터 포인트가 포함되었을 때 유사성을 유지할 확률의 자연로그 값의 음수(-ln)로 정의된다(Richman & Moorman, 2000; Estrada et al., 2017).

본 연구에서는 MATLAB2024a(MathWorks, USA)를 활용하여 AP와 ML에서의 샘플 엔트로피를 계산하였다(Borg & Laxåback, 2010). 여기서 m 은 비교할 데이터 시퀀스의 길이, r 은 유사성 임계값, N 은 전체 데이터 길이를 의미하며, A^m 은 길이 $m+1$ 인 시퀀스가 일치할 확률, B^m 은 m 인 시퀀스가 일치할 확률을 나타낸다. COP 데이터를 필터링한 후 샘플 엔트로피를 계산하고, 필터링이 결과에 미치는 영향을 평가하기 위해 필터링되지 않은 원본 COP 데이터에서도 동일한 분석을 수행하였다. 그 결과, 필터링 여부에 따라 절댓값 차이는 있었지만, 조건 간 비교에서 나타난 경향성은 일관되었다.

통계 처리

통계분석은 SPSS Statistics 26.0(IBM Corp., USA)을 사용하였다. 지지 다리(우세측 vs. 비우세측)와 시선 이동 방향(고정 vs. 상하 vs. 좌우)을 독립변인으로 COP와 샘플 엔트로피를 반복측정에 의한 이

원분산분석(two-way ANOVA with repeated measure)을 실시하였다. 구형성 가정이 검증되지 않을 경우에는 Greenhouse-Geisser 수정을 적용하였고, 각 요인별 주 효과가 있을 경우에는 Bonferroni의 사후 검정을 실시하였다. 통계적 유의수준은 .05로 설정하였다.

연구결과

COP ML

COP ML(Fig. 5, 왼쪽)의 경우 지지 다리에 따른 주효과가 유의한 차이가 나타나지 않았다 [$F(1, 19) = 1.678, p = .211, \eta_p^2 = .081$]. 반면, 시선 방향 따른 주효과는 유의하게 나타났다 [$F(1.433, 27.230) = 35.184, p < .001, \eta_p^2 = .649$]. 구체적으로 사후 검정 결과, 시선 좌우 조건에서 고정($p < .001, 95\% \text{ CI} [.070, .168]$) 및 상하 조건($p < .001, 95\% \text{ CI} [.098, .152]$)보다 COP ML이 유의하게 높은 것으로 나타났다. 반면, 시선 고정과 상하 조건 간에는 유의한 차이가 나타나지 않았다($p = 1.000$). 또한 지지 다리와 시선 방향 간 상호작용 효과는 유의하지 않았다 [$F(2, 38) = 2.766, p = .076, \eta_p^2 = .127$].

COP AP

COP AP(Fig. 5, 오른쪽)의 경우에서도 지지 다리에 따른 주효과가 유의한 차이가 나타나지 않았다 [$F(1, 19) = 2.555, p = .126, \eta_p^2 = .119$]. 또한 시선 방향에서도 주효과는 유의하게 나타났다 [$F(1.182, 22.457) = 15.289, p < .001, \eta_p^2 = .446$]. 구체적으로 사후 검정 결과, 시선 좌우 조건에서 고정($p = .002, 95\% \text{ CI} [.072, .343]$) 및 상하 조건($p = .002, 95\% \text{ CI} [.057, .262]$)보다 COP AP가 유의하게 높은 것으로 나타났다. 반면, 시선 고정과 상하 조건 간에는 유의한 차이가 나타나지 않았다($p = .097$). 지지 다리와 시선 방향 간 상호작용 효과에서도 유의한 차이가 나타나지 않았다 [$F(1.372, 26.066) = 2.402, p = .125, \eta_p^2 = .112$].

Sample entropy ML

샘플 엔트로피 ML(Fig. 6, 왼쪽)은 지지 다리에 따른 주효과가 통계적으로 유의하지 않았다 [$F(1, 19) = .122, p = .730, \eta_p^2 = .006$]. 시선 방향에 따른 주효과는 유의하게 나타났다 [$F(2, 38) = 4.385, p = .019, \eta_p^2 = .188$]. 사후 검정 결과, 시선 좌우 조건은 시선 고정 조건보다 유의하게 높은 샘플 엔트로피 값을 나타냈다($p = .037, 95\% \text{ CI} [.001, .038]$) 그러나 고정과 상하($p = .417$), 상하와 좌우($p = .402$) 간에는 차이가 없었다. 지지 다리와 시선 추적 과제 간 상호작용 효과는 유의하게 나타났다 [$F(2, 38) = 5.352, p = .009, \eta_p^2 = .220$]. 사후 검정 결과, 비우세측인 왼쪽 지지 다리에서는 시선 방향이 좌우 조건에서 시선 고정($p = .001, 95\% \text{ CI} [.012, .052]$) 및 상하($p = .007, 95\% \text{ CI} [.005, .037]$) 조건보다 높은 샘플 엔트로피를 보였고, 고정 및 상하 간에는 유의한 차이가 나타나지 않았다($p = .150$). 우세측인 오른쪽 지지 다리에서는 고정과 상하($p = .927$), 고정과 좌우($p = 1.000$), 상하와 좌우($p = 1.000$)간 모두에서 유의한 차이가 나타나지 않았다.

Sample entropy AP

지지 다리에 따른 샘플 엔트로피 AP(Fig. 6, 오른쪽)는 비우세측인 왼쪽 지지 다리가 우세측 오른쪽 지지 다리보다 통계적으로 유의하게 높은 값을 나타냈다 [$F(1, 19) = 5.281, p = .033, \eta_p^2 = .218$]. 또한 시선 방향에 따른 주효과도 유의하게 나타났다 [$F(2, 38) = 13.867, p < .001, \eta_p^2 = .422$]. 사후 검정 결과, 시선 좌우 조건은 시선 고정 조건($p < .001, 95\% \text{ CI} [.010, .028]$)과 상하 조건($p = .002, 95\% \text{ CI} [.005, .024]$),보다 유의하게 높은 샘플 엔트로피 값을 나타냈다. 그러나 고정과 상하 간에는 유의한 차이가 나타나지 않았다($p = 1.000$). 마지막으로 지지 다리와 시선 추적 과제 간 상호작용 효과는 유의한 차이가 나타나지 않았다 [$F(2, 38) = 1.779, p = .183, \eta_p^2 = .086$].

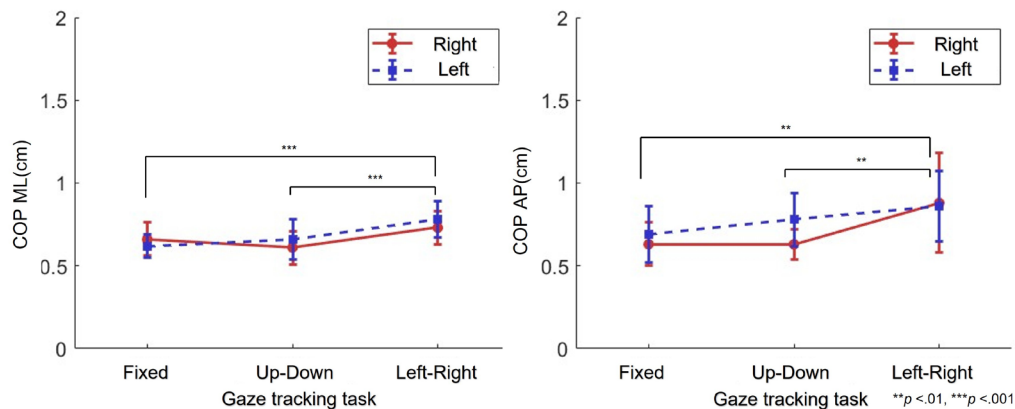


Fig. 5. COP Comparison by gaze direction and supporting leg

Note. Values are presented as mean \pm standard deviation ($n = 20$). Red and blue lines indicate right and left supporting legs, respectively. ** $p < .01$ and *** $p < .001$ indicate statistically significant differences.

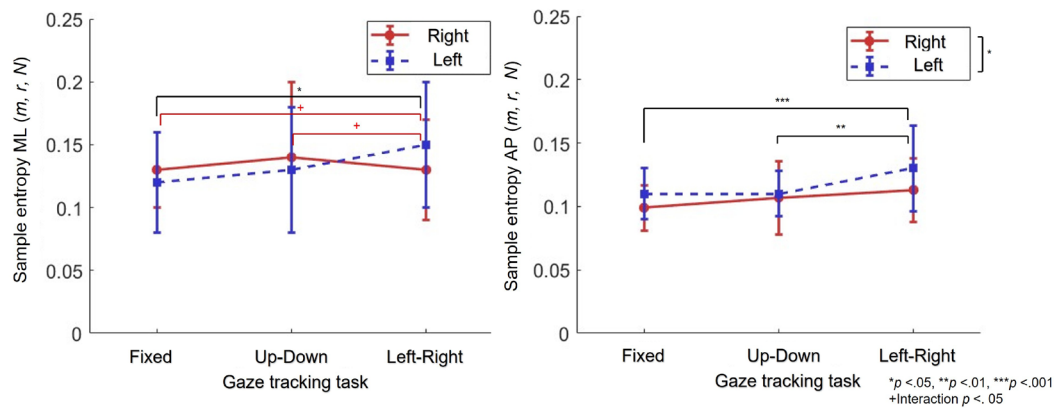


Fig. 6. Sample entropy comparison by gaze direction and supporting leg

Note. Values are presented as mean \pm standard deviation ($n = 20$).
Red and blue lines indicate right and left supporting legs, respectively.

+ $p < .05$ indicates a significant interaction effect;

* $p < .05$, ** $p < .01$, and *** $p < .001$ indicate statistically significant differences.

Table 1. COP and Sample entropy according to supporting leg

Variables	N	Leg	Fixed	UP-Down	Left-Right		<i>F</i>	<i>p</i>
COP ML (cm)	20	Right	.658±.10	.606±.10 ³⁾	.734±.10 ²⁾	Leg	1.678	<i>p</i> =.211
		Left	.621±.07 ³⁾	.662±.12 ³⁾	.784±.11 ^{1) 2)}	Gaze	35.184	<i>p</i> <.001***
						Interaction	2.766	<i>p</i> =.078
COP AP (cm)		Right	.630±.13 ³⁾	.631±.09 ³⁾	.876±.31 ^{1) 2)}	Leg	2.555	<i>p</i> =.126
		Left	.688±.17 ^{2) 3)}	.784±.16 ¹⁾	.857±.21 ¹⁾	Gaze	15.289	<i>p</i> <.001***
						Interaction	2.402	<i>p</i> =.125
SampEn ML (m, r, N)		Right	.129±.03	.141±.06	.135±.04 ^{a)}	Leg	.122	<i>p</i> =.730
		Left	.122±.04 ³⁾	.133±.05 ³⁾	.154±.05 ^{a) 1) 2)}	Gaze	4.385	<i>p</i> =.019*
						Interaction	5.352	<i>p</i> =.009*
SampEn AP (m, r, N)		Right	.099±.02	.107±.03	.113±.03	Leg	5.281	<i>p</i> =.033*
		Left	.111±.02 ³⁾	.110±.02 ³⁾	.134±.03 ^{1) 2)}	Gaze	13.867	<i>p</i> <.001***
						Interaction	1.779	<i>p</i> =.183

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

^{a)} significant main effect of supporting leg

¹⁾ significant difference from Gaze Fixed condition (Bonferroni-adjusted)

²⁾ significant difference from Gaze Up-Down condition (Bonferroni-adjusted)

³⁾ significant difference from Gaze Left-Right condition (Bonferroni-adjusted)

논 의

본 연구는 한발 서기 과제에서 고정, 상하 및 좌우 방향의 움직임은 시각 자극을 추적할 때, 지지 다리에 따른 차이에 대하여 COP와 샘플 엔트로피를 분석하였다. 본 연구는 한발 서기 자세 조절에서 시각 정보 처리의 방향성과 지지 다리의 기능적 차이를 밝히고, 향후 균형 훈련 설계에 기초 자료를 제공하는 데 목적이 있다.

분석 결과, 지지 다리에 따른 비교에서는 COP ML과 AP 모두에서 유의한 차이가 나타나지 않았다. 선행연구에 따르면, 대부분의 연구에서 일반적인 서기 과제에서는 지지 다리에 대한 차이가 균형 능력에 영향을 미치지 않는 것으로 보고되었다(Schorderet et al.,

2021). 특히 본 연구의 참가자는 평균 연령 20대의 건강한 성인 남성들이었으며, 수행한 과제 또한 평지에서의 단순한 단일 다리 중심 유지 과제였기 때문에, 지지 다리에 따른 차이가 나타나지 않았을 가능성이 더욱 크다고 볼 수 있다(Raffi et al., 2017; Schorderet et al., 2021).

그러나 샘플 엔트로피 분석의 경우, 지지 다리에 따라 샘플 엔트로피 ML에서 유의한 차이가 없었으나, 샘플 엔트로피 AP에서는 통계적으로 유의한 차이가 나타났다. 샘플 엔트로피는 시간 시계열 신호의 불규칙성과 복잡성을 평가할 수 있는 비선형 동역학 지표로서, 자세 조절 시스템의 내재적 조절 특성을 더 세밀하게 반영할 수 있다(Haid & Federolf, 2018). 이러한 결과는 지지 다리에 따른 균형 능력의 차

이가 단순한 COP 차이로는 뚜렷하게 드러나지 않지만, 자세 조절의 복잡성과 불규칙성을 반영하는 샘플 엔트로피에서는 방향별로 다르게 나타날 수 있음을 시사한다.

예를 들어, Montesinos et al.(2018)은 COP의 선형 지표에서는 낙상 경험 유무에 따른 집단 차이가 뚜렷하지 않았으나, 시계열의 불규칙성을 반영하는 샘플 엔트로피 AP에서 낙상군이 비낙상군보다 큰 값을 보여, 엔트로피 지표가 자세 조절 전략의 차이가 민감하게 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 맥락으로 보았을 때, COP는 주로 흔들림의 양적 크기만을 반영하기 때문에 집단 간 차이에서 민감하게 나타나지 않았을 수 있는 반면, 비선형 지표인 엔트로피는 자세 조절 신호의 불규칙성과 복잡성을 반영하여 COP의 평균적 특성에서는 드러나지 않는 내재적 조절 전략의 차이가 드러날 수 있다. 따라서 본 연구에서 COP는 지지 다리 조건의 영향을 탐지하지 못했으나, 샘플 엔트로피 AP에서는 유의한 차이가 나타난 것은, 엔트로피가 자세 조절 시스템의 정밀한 내재적 조절 메커니즘을 더 민감하게 반영한 결과로 해석될 수 있다.

더욱이, 자세 조절에서 AP와 ML 방향의 COP 조절이 각각 발목과 엉덩이 관절에 의해 독립적으로 이루어질 수 있다(Winter et al., 1996). 본 연구의 결과는 AP 방향이 보행 및 일상 활동에서 자세 안정성 유지에 더욱 중요하다는 점을 고려할 때, AP 방향에서의 샘플 엔트로피 차이는 신경근계의 세밀한 조절 능력 차이를 반영하는 것으로 볼 수 있다(Manor et al., 2010). 반면 ML 방향에서는 구조적 지지 기반이 더 강하고 자세 변동이 상대적으로 적어 차이가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

이와 유사하게, Montesinos et al.(2018)의 연구뿐만 아니라 Workman et al.(2022)의 노인 연구에서도 AP 방향 샘플 엔트로피에서 유의한 차이가 보고되었다. 이는 AP 방향이 자세 조절의 불규칙성과 복잡성 변화를 보다 민감하게 반영하는 축임을 시사한다. 즉, AP 방향의 비선형 지표는 신경근계의 세밀한 조절 능력과 전략적 차이를 드러낼 수 있으며, 이러한 점에서 두 연구는 맥락을 같이한다고 볼 수 있다. 따라서 우세측(오른쪽) 지지 다리와 비우세측(왼쪽) 지지 다리 간 균형 수행 차이는 AP 방향에서 신경근 조절 전략이나 운동 제어 다양성의 차이로 인해 보다 민감하게 감지될 수 있다(Yentes & Raffalt, 2021).

무엇보다도 본 연구에서는 시선 방향에 따른 차이가 나타났다. 구체적으로, 좌우 시선 이동 조건에서 COP ML과 COP AP가 시선 고정 및 상하 시선 조건보다 유의하게 증가하였다. Glasauer et al.(2005)은 부드러운 안구 움직임이 자세 흔들림을 유발하며, 추적 진폭이 커질수록 흔들림도 증가한다고 보고하였다. 이는 눈을 움직이는 동안 운동 감각의 임계값이 상승하기 때문으로 해석된다. 본 연구 결과에서 시선이 좌우로 이동할 때 특히 COP 및 샘플 엔트로피 값이 유의하게 증가한 점은, 이때 시각 정보의 불안정성뿐만 아니라 신체의 자세 조절 체계가 더욱 복잡하고 어려운 상황에 직면한다는 것을 시사할 수 있다(Hansen et al., 2017).

이와 같은 맥락에서 Phu et al.(2023)의 연구에서도 고정된 시각 배경은 자세를 안정화시키는 반면, 움직이는 배경이나 시선 추적 조건에서는 자세 흔들림이 증가한다고 보고하였다. 이러한 경향은 자세 안정성 저하와 밀접하게 연관될 수 있는데, Laurens et al.(2010) 역시 고정된 시각 자극이 전후방 및 측방 흔들림을 감소시키는 반면, 움직이는 시각 자극이나 시선 추적은 자세 흔들림을 유의하게 증가시킨다고 보고하였다. 본 연구 결과에서도 좌우 시선 이동 조건에서 COP

ML과 AP가 모두 증가한 것으로 나타났다. 이는 좌우 시선 이동 조건이 다른 고정 및 상하 조건보다 상대적으로 시각적 부담이 높을 가능성이 있다.

흥미롭게도, 샘플 엔트로피 ML에서는 지지 다리와 시선 조건 간 상호작용이 나타났다. 사후 검정 결과, 비우세측(왼쪽) 지지 다리에서는 좌우 시선 조건에서 샘플 엔트로피가 고정 및 상하 시선 조건보다 유의하게 증가하였으나, 우세측(오른쪽) 지지 다리에서는 시선 조건에 따른 유의한 차이가 나타나지 않았다. 반면, COP 값에서는 지지 다리에 따른 주효과가 나타나지 않았다. 이는 비우세측 지지 다리 내에서 시각 조건 변화에 따라 자세 조절 전략이 보다 유연하게 조정되었음을 시사한다.

선행연구에 따르면, 대부분의 단순한 서기 과제에서는 COP와 관련된 양쪽 지지 다리에 대한 차이가 뚜렷하게 나타나지 않는다고 보고되었으며(Jadcak et al., 2019; Kilroy et al., 2016), 본 연구의 COP 결과 역시 이러한 보고와 일치한다. 그러나 과제의 복잡성이나 외부 자극이 증가할 경우 지지 다리에 따른 조절 특성이 달라질 수 있음이 제시되어 왔다(Wang & Fu, 2019).

예를 들어, Borg and Laxåback(2010)은 일반적인 한발 서기 과제에서는 AP 및 ML 방향에서 샘플 엔트로피 차이가 나타나지 않았으나, 외부 물리적 자극이 가해졌을 때 ML 방향의 샘플 엔트로피가 증가함을 보고하였다. 이러한 결과는 자세 조절 전략이 시각적 또는 외부 자극의 특성에 따라 민감하게 조정될 수 있음을 보여준다. 본 연구에서도 고정된 시각 조건은 자세 안정성을 유지하는 데 기여한 반면, 좌우 시선 이동과 같은 동적 시각 조건은 자세 조절에 추가적인 요구를 유발하여, 특히 비우세측 지지 다리 내에서 ML 방향의 자세 조절 복잡성이 증가한 것으로 해석될 수 있다.

결론 및 제언

본 연구는 단일 다리 자세에서 시각 자극의 방향성과 지지 다리의 차이가 자세 조절에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 이를 위해 젊고 건강한 남성을 대상으로 COP 지표와 샘플 엔트로피를 산출하여 자세 흔들림의 크기와 복잡성을 정량적으로 분석하였다.

결론으로, 지지 다리에 따라 COP 차이는 나타나지 않았다. 반면, 샘플 엔트로피에서는 AP 방향에서 지지 다리의 기능적 차이를 보이며 엔트로피와 같은 복잡성 수준에서 차이가 나타날 수 있음을 확인하였다. 또한 시선 이동, 특히 좌우 조건에서 COP 및 샘플 엔트로피가 모두 증가한 것은 동적 시각 자극이 안정된 시각 환경보다 자세 조절에 더 큰 부담을 줄 수 있음을 시사한다.

다만 본 연구는 젊은 남성만을 대상으로 수행되었기 때문에 연령과 성별에 따른 일반화에는 한계가 있다. 향후 연구에서는 노인, 여성, 또는 균형 장애 집단을 포함하여 지지 다리와 시각 자극의 상호작용을 다양한 인구집단에서 검증할 필요가 있다. 또한, 시각 자극의 제시 속도(°/s)가 정확히 제어되지 않아 자극 강도나 속도가 시선 이동 및 자세 조절 반응에 미치는 영향을 명확히 분리하기 어렵다. 후속 연구에서는 시각 자극 속도를 정밀하게 조절하고, 실제 걷기나 동적 운동 과제에도 분석 지표를 적용하여 보다 실생활에 근접한 결과를 도출할 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: S.-H. Song, Data curation: S.-H. Song,
Formal analysis: S.-H. Song, Methodology: S.-H. Song,
Projectadministration: S.-H. Song, Visualization: S.-H. Song,
Writing-original draft: S.-H. Song, Writing-review & editing: S.-H.
Song

참고문헌

- Aruin, A. S. (2016).** Enhancing anticipatory postural adjustments: A novel approach to balance rehabilitation. *Journal of Novel Physiotherapies*, 6(2), e144.
- Błaszczak, J. W., Fredyk, A., & Błaszczak, P. M. (2020).** Transition from double-leg to single-leg stance in the assessment of postural stability. *Journal of Biomechanics*, 110, 109982.
- Borg, F. G., & Laxåback, G. (2010).** Entropy of balance-some recent results. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 7(1), 38.
- Buneo, C. A., & Andersen, R. A. (2006).** The posterior parietal cortex: Sensorimotor interface for the planning and online control of visually guided movements. *Neuropsychologia*, 44(13), 2594-2606.
- Cavanaugh, J. T., Mercer, V. S., & Stergiou, N. (2007).** Approximate entropy detects the effect of a secondary cognitive task on postural control in healthy young adults: A methodological report. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 4, 42.
- Chomiak, T., Pereira, F. V., Clark, T. W., Cihal, A., & Hu, B. (2015).** Concurrent arm swing-stepping (CASS) can reveal gait start hesitation in Parkinson's patients with low self-efficacy and fear of falling. *Aging Clinical and Experimental Research*, 27(4), 457-463.
- Daubney, M. E., & Culham, E. G. (1999).** Lower-extremity muscle force and balance performance in adults aged 65 years and older. *Physical Therapy*, 79(12), 1177-1185.
- Donker, S. F., Roerdink, M., Greven, A. J., & Beek, P. J. (2007).** Regularity of center-of-pressure trajectories depends on the amount of attention invested in postural control. *Experimental Brain Research*, 181(1), 1-11.
- Elias, L. J., Bryden, M. P., & Bulman-Fleming, M. B. (1998).** Footedness is a better predictor than is handedness of emotional lateralization. *Neuropsychologia*, 36(1), 37-43.
- Estrada, L., Torres, A., Sarlabous, L., & Jané, R. (2017).** Influence of parameter selection in fixed sample entropy of surface diaphragm electromyography for estimating respiratory activity. *Entropy*, 19(9), 460.
- Fitzpatrick, R., Burke, D., & Gandevia, S. C. (1996).** Loop gain of reflexes controlling human standing measured with the use of postural and vestibular disturbances. *Journal of Neurophysiology*, 76(6), 3994-4008.
- Glasauer, S., Schneider, E., Jahn, K., Strupp, M., & Brandt, T. (2005).** How the eyes move the body. *Neurology*, 65(8), 1291-1293.
- Guerraz, M., & Bronstein, A. M. (2008).** Mechanisms underlying visually induced body sway. *Neuroscience Letters*, 443(1), 12-16.
- Haid, T., & Federolf, P. (2018).** Human postural control: Assessment of two alternative interpretations of center of pressure sample entropy through a principal component factorization of whole-body kinematics. *Entropy*, 20(1), 30.
- Hansen, C., Wei, Q., Shieh, J. S., Fourcade, P., Isableu, B., & Majed, L. (2017).** Sample entropy, univariate, and multivariate multi-scale entropy in comparison with classical postural sway parameters in young healthy adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 206.
- Horak, F. B. (2006).** Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age and Ageing*, 35(suppl_2), 7-11.
- Horak, F. B., Wisley, D. M., & Frank, J. (2009).** The balance evaluation systems test (BESTest) to differentiate balance deficits. *Physical Therapy*, 89(5), 484-498.
- Jadczak, L., Grygorowicz, M., Dzudziński, W., & Śliwowski, R. (2019).** Comparison of static and dynamic balance at different levels of sport competition in professional and junior elite soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 33(12), 3384-3391.
- Jeka, J. J., Schöner, G., Dijkstra, T., Ribeiro, P., & Lackner, J. R. (1997).** Coupling of fingertip somatosensory information to head and body sway. *Experimental Brain Research*, 113(3), 475-483.
- Johansson, R., Magnusson, M., & Akesson, M. (1988).** Identification of human postural dynamics. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 35(10), 858-869.
- Jonsson, E., Seiger, Å., & Hirschfeld, H. (2004).** One-leg stance in healthy young and elderly adults: A measure of postural steadiness? *Clinical Biomechanics*, 19(7), 688-694.
- Kilroy, E. A., Crabtree, O. M., Crosby, B., Parker, A., & Barfield, W. R. (2016).** The effect of single-leg stance on dancer and control group static balance. *International Journal of Exercise Science*, 9(2), 110.
- Laurens, J., Awai, L., Bockisch, C., Hegemann, S., van Hedel, H., Dietz, V., & Straumann, D. (2010).** Visual contribution to postural stability: Interaction between target fixation or tracking and static or dynamic large-field stimulus. *Gait Posture*, 31(1), 37-41.
- Lee, D. N., & Lishman, J. R. (1975).** Visual proprioceptive control of stance. *Journal of Human Movement Studies*, 1(2), 87-95.
- Manor, B., Costa, M. D., Hu, K., Newton, E., Starobinets, O., Kang, H. G., Peng, C. K., Novak, V., & Lipsitz, L. A. (2010).** Physiological complexity and system adaptability: evidence from postural control dynamics of older adults. *Journal of Applied Physiology*, 109(6), 1786-1791.
- Minamisawa, T., Chiba, N., & Suzuki, E. (2024).** Differences in left and right lower limb control strategies in coping with visual tracking tasks during bipedal standing. *Frontiers in Sports and Active Living*, 6, 1421881.
- Montesinos, L., Castaldo, R., & Pecchia, L. (2018).** On the use of approximate entropy and sample entropy with centre of pressure time-series. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 15(1), 116.
- Nakahara, H., Nawata, R., Matsuo, R., & Ohgomori, T. (2022).** Deterioration of postural control due to the increase of similarity between center of pressure and smooth-pursuit eye movements during standing on one leg. *PloS One*, 17(10), e0276119.

- Nashner, L. M. (1976). Adapting reflexes controlling the human posture. *Experimental Brain Research*, 26(1), 59-72.
- Okayama, Y., Mackawa, M., & Daikuya, S. (2024). Postural control strategies with alterations in visual input conditions in a standing position. *European Journal of Applied Physiology*, 125(3), 1-8.
- Peterka, R. J. (2002). Sensorimotor integration in human postural control. *Journal of Neurophysiology*, 88(3), 1097-1118.
- Phu, S., Persiani, M., Tan, B., Brodie, M., Gandevia, S., Sturnieks, D. L., & Lord, S. R. (2023). The effects of optic flow on postural stability: Influence of age and fall risk. *Experimental Gerontology*, 175, 112146.
- Quijoux, F., Nicolaï, A., Chairi, I., Bargiotas, I., Ricard, D., Yelnik, A., Oudre, L., Bertin-Hugault, F., Vidal, P. P., Vayatis, N., Buffat, S., & Audiffren, J. (2021). A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: Algorithms and open-access code. *Physiological Reports*, 9(22), e15067.
- Raffi, M., Piras, A., Persiani, M., Perazzolo, M., & Squatrito, S. (2017). Angle of gaze and optic flow direction modulate body sway. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 35, 61-68.
- Redfern, M. S., Yardley, L., & Bronstein, A. M. (2001). Visual influences on balance. *Journal of Anxiety Disorders*, 15(1-2), 81-94.
- Richman, J. S., & Moorman, J. R. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology-heart and Circulatory Physiology*, 278(6), H2039-H2049.
- Rodrigues, S. T., Polastri, P. F., Carvalho, J. C., Barela, J. A., Moraes, R., & Barbieri, F. A. (2015). Saccadic and smooth pursuit eye movements attenuate postural sway similarly. *Neuroscience Letters*, 584, 292-295.
- Roerdink, M., De Haart, M., Daffertshofer, A., Donker, S. F., Geurts, A. C. H., & Beek, P. J. (2006). Dynamical structure of center-of-pressure trajectories in patients recovering from stroke. *Experimental Brain Research*, 174, 256-269.
- Roerdink, M., Hlavackova, P., & Vuillerme, N. (2011). Center-of-pressure regularity as a marker for attentional investment in postural control: A comparison between sitting and standing postures. *Human Movement Science*, 30(2), 203-212.
- Santos, M. J., Kanekar, N., & Aruin, A. S. (2010). The role of anticipatory postural adjustments in compensatory control of posture: 2. Biomechanical analysis. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20(3), 398-405.
- Schorderet, C., Hilfiker, R., & Allet, L. (2021). The role of the dominant leg while assessing balance performance. A systematic review and meta-analysis. *Gait & Posture*, 84, 66-78.
- Song, Y. H., Cho, S. N., & Nam, S. M. (2022). Asymmetric influence of dual-task interference on anticipatory postural adjustments in one-leg stance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), 11289.
- Springer, B. A., Marin, R., Cyhan, T., Roberts, H., & Gill, N. W. (2007). Normative values for the unipedal stance test with eyes open and closed. *Journal of Geriatric Physical Therapy*, 30(1), 8-15.
- Stins, J. F., Michielsens, M. E., Roerdink, M., & Beek, P. J. (2009). Sway regularity reflects attentional involvement in postural control: Effects of expertise, vision and cognition. *Gait & Posture*, 30(1), 106-109.
- Stoffregen, T. A., Bardy, B. G., Bonnet, C. T., & Pagulayan, R. J. (2006). Postural stabilization of visually guided eye movements. *Ecological Psychology*, 18(3), 191-222.
- Stoffregen, T. A., Hove, P., Bardy, B. G., Riley, M., & Bonnet, C. T. (2007). Postural stabilization of perceptual but not cognitive performance. *Journal of Motor Behavior*, 39(2), 126-138.
- Szafraniec, R., Barańska, J., & Kuczyński, M. (2018). Acute effects of core stability exercises on balance control. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 20(3), 145-151.
- Thomas, N. M., Bampouras, T. M., Donovan, T., & Dewhurst, S. (2016). Eye movements affect postural control in young and older females. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 8, 216.
- Wang, J., & Fu, W. (2019). Asymmetry between the dominant and non-dominant legs in the lower limb biomechanics during single-leg landings in females. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(5), 1687814019849794.
- Winter, D. A., Prince, F., Frank, J. S., Powell, C., & Zabjek, K. F. (1996). Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance. *Journal of Neurophysiology*, 75(6), 2334-2343.
- Woollacott, M., & Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait: A review of an emerging area of research. *Gait & Posture*, 16(1), 1-14.
- Workman, C. D., Sosnoff, J. J., & Rudroff, T. (2022). Sample entropy discriminates balance performance of older cannabis users from non-users. *Clinical Biomechanics*, 93, 105593.
- Yentes, J. M., & Raffalt, P. C. (2021). Entropy analysis in gait research: Methodological considerations and recommendations. *Annals of Biomedical Engineering*, 49(3), 979-990.
- Yoshida, T., Ikemiyagi, F., Ikemiyagi, Y., Tanaka, T., Yamamoto, M., & Suzuki, M. (2014). The dominant foot affects the postural control mechanism: examination by body tracking test. *Acta Otolaryngologica*, 134(11), 1146-1150.

한발 서기 자세 흔들림에 대한 지지 다리와 시선 방향의 영향

송석현*

전북대학교 심리코칭연구소

*교신저자: 송석현(thdtjrgusssh@naver.com)

[목적] 본 연구는 한발 서기 과제에서 상하 및 좌우 방향의 움직이는 시각 자극을 추적할 때, 양쪽 지지 다리 간의 COP와 샘플 엔트로피를 분석하고자 하였다. 이 연구는 한발 서기 자세 제어에서 시각 정보 처리의 방향성과 지지 다리의 기능적 차이를 밝히고, 향후 균형 훈련 설계에 기초 자료를 제공하는 데 목적이 있다.

[방법] 우세발 선회도 검사(WFQ-R)에서 7점 이상을 기록한 오른발잡이 성인 남성 20명(평균 연령 26.84 ± 4.47 세)이 실험에 참여하였으며, 30초간 시선을 이동하며 한발 서기를 수행하였다.

[결과] 시선 방향에 따라 COP와 샘플 엔트로피 모두 유의한 차이가 나타났고, 좌우 조건에서 가장 높은 값을 보였다($p < .05$). 지지 다리에 따라서는 샘플 엔트로피 AP에서만 유의한 차이가 있었으며, 샘플 엔트로피 ML에서는 지지 다리와 시선 방향 간의 상호작용이 나타났다.

[결론] 본 연구의 결과는 양쪽 지지 다리가 서로 다른 자세 조절 전략을 사용하고 있으며, 특히 왼쪽 지지 다리는 시선이 좌우로 움직이는 조건에서 더 복잡하고 유연한 자세 조절 전략을 통해 균형을 유지하려는 특징이 나타났다.

주요어

자세 조절, 압력 중심, 시선, 샘플 엔트로피

※ 이 논문은 2024년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2024S1A5B5A16022239).

※ 이 논문은 2025년 한국스포츠심리학회 연차학술대회에서 발표한 포스터 내용을 바탕으로 재구성한 것임.