



Original Article

Postural Control in Transfemoral Amputees under Different Vision and Stance Width Conditions: A Center of Pressure Analysis

Jin-Joo Yang, Dong-Young Ahn, and Yoon Park*

Prosthetics & Orthotics Center, VHS Medical Center

Article Info

Received 2025. 10. 02.

Revised 2026. 08. 21.

Accepted 2026. 08. 31.

Correspondence*

Yoon Park

yoop.p9@gmail.com

Key Words

Transfemoral amputee, Static postural control, Visual information, Stance width, Nonlinear analysis

This research was supported by a grant of the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea (grant number : HJ22C0003)

PURPOSE This study examined the effects of visual input and stance width on static postural control in transfemoral amputees using linear and nonlinear COP measures. **METHODS** Seven male unilateral transfemoral amputees performed 30-second quiet standing under four conditions (ECN, ECW, EON, and EOW). COP variables included path length, velocity, sway area, approximate entropy (ApEn), and sample entropy (SampEn), which were analyzed with two-way repeated-measures ANOVA. **RESULTS** AP path length was significantly affected by vision ($F=12.532, p=.012$), with the highest value in ECN (76.4 ± 12.0 cm). ML path length demonstrated significant effects on vision ($F=9.773, p=.020$), stance ($F=9.991, p=.020$), and their interaction ($F=8.372, p=.028$), which also peaked in ECN (66.1 ± 15.7 cm). Sway area was influenced by stance and interaction ($F=19.679, p=.004$) and was the largest in ECN (4.8 ± 2.3 cm²). Nonlinear indices increased in AP ApEn and SampEn under visual deprivation, while ML measures showed a significant vision $\times$ stance interaction ($F=7.082, p=.037$). **CONCLUSIONS** Linear measures indicated greater instability during an eyes-closed narrow stance, whereas nonlinear measures revealed increased complexity during visual deprivation, with a non-significant vision and stance interaction trend in the ML direction. These findings suggest that both instability and complexity characterize postural regulation in amputees, underscoring the need for the integrated use of linear and nonlinear metrics in balance assessment and rehabilitation.

서론

균형 유지 및 자세 안정성은 보행, 일상생활, 낙상 예방 등 건강한 삶의 필수 요소이다. 시각, 전정, 체성감각 등 다양한 감각 정보를 통합하여 발목 전략, 고관절 전략 등 다양한 보상 메커니즘을 활용하여 균형을 유지한다(Peterka, 2002; Winter et al., 1998). 특히, 평상시에는 발목 전략이 가장 먼저 동원되며, 시각 정보 결손 상황에서도 체성감각과 전정 정보의 상호보완을 통해 자세 제어 능력을 유지한다. 자세 안정성에 영향을 미치는 요인 중 시각 정보는 자세 제어와 물체 움직임 인식에 중요한 역할을 한다(Horak, 2006).

하지만 하지 절단자(lower-limb amputee)의 경우, 무릎과 발목의 고유수용감각 및 운동 기능 상실, 신체 비대칭과 근력 저하, 의지

착용 이후에도 잔존하는 건축 의존 및 비대칭적 체중 부하로 인해 자세 조절에 근본적 한계가 존재한다(Van Velzen et al., 2006). 하지 절단자의 자세 조절 어려움은 감각통합 한계, 보상 전략의 미성숙, 그리고 낙상 위험과 밀접하게 연결된다(Ku et al., 2014). Moisan et al.(2022)의 연구에 따르면 하지 절단자 10명과 비장애인 10명을 대상으로 자세 유지 과제를 수행한 결과, 하지 절단자는 건축에 더 크게 의존하며 시각 정보가 제한된 조건에서 자세 안정성이 더 낮아지는 것으로 나타났다. 이로 인해 보행 변동성, 불안정성, 낙상위험이 크게 증가하며, 발목 전략의 부재와 건축 위주의 보상 패턴이 임상적으로 중요한 문제로 대두되고 있다.

낙상은 하지 절단자에게 특히 치명적이며, 실제로 하지 절단자의 50% 이상이 연 1회 이상의 낙상을 경험한다고 보고되었다(Miller et al., 2001). 낙상의 원인으로 단일 요인보다는 근육 약화, 감각 결손, 보조기 사용, 신체활동 저하, 평형성 결핍 등 다양한 위험요인이 복합적으로 작용하는 것으로 알려져 있다(Steinberg et al., 2019). 또한, 낙상 경험은 낙상 두려움(fear of falling)과 신체활동 위축으로 이어

(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.

저, 결과적으로 전반적 건강 악화와 삶의 질 저하로 연결된다(Miller et al., 2001).

감각결손이나 시각 정보가 제한될 경우 흔들림 크기 및 낙상 위험이 급격히 증가한다. 스탠스 너비 역시 균형 유지를 위한 변수로, 좁은 기저면에서는 자세 흔들림이 커지고 균형 유지가 더욱 어려워진다(Winter et al., 1998). 특히, 하지 절단자는 체성감각이 손실되어, 감각 재가중(sensory reweighting) 이론에 따라 시각 입력과 같은 다른 감각에 의존해야하기 때문이다.

이러한 자세조절, 정적·동적 균형 능력의 객관적 평가는 압력중심점(center of pressure, COP) 분석을 통해 가능하며, 자세 안정성, 균형 능력, 보행 전략의 정량적 분석 및 임상 예측에 널리 활용되고 있다(Ichimura et al., 2022; Ruhe et al., 2010; Schmid et al., 2005). Mancini and Horak(2010)은 다양한 COP 기반 변수가 낙상 예측 및 재활 평가에 유효한 근거가 된다고 밝혔다. 절단자를 대상으로 한 연구에서도 COP 분석의 유용성이 확인되었다. Schmid et al.(2005)은 편측 대퇴 절단자의 보행 중 COP 변위를 분석하여 건측과 의족측 사이에 시간적·공간적 비대칭이 존재함을 정량적으로 보고하였다. 이는 COP 분석이 절단자의 좌우 비대칭적 자세 및 이동 특성을 민감하게 포착할 수 있음을 보여준다.

COP 기반 지표는 크게 선형 지표와 비선형 지표로 구분되며, 이들은 자세 제어의 서로 다른 측면을 측정한다(Duarte & Sternad, 2008). Ruhe et al.(2010)은 체계적 문헌고찰을 통해 정적 과제에서 COP 지표의 검사-재검사 신뢰도를 검토하였으며, Mancini and Horak(2010)은 이러한 COP 기반 변수가 균형 결함을 변별하고 낙상 위험을 예측하는 데 임상적으로 유효함을 보고하였다. 따라서 선형 지표는 절단자의 자세 안정성 수준을 정량적으로 평가하는 일차적 척도로 활용될 수 있다. 비선형 지표는 COP 시계열의 시간적 구조, 즉 자세 조절 패턴의 규칙성과 예측 가능성을 정량화한다. Stergiou and Decker(2011)는 자세 제어 시스템의 복잡성과 유연성, 보상 전략의 다양성이 비선형 지표를 통해 정량화될 수 있음을 보고하였으며, Błażkiewicz et al.(2023)은 비선형 분석이 자세 제어 평가의 유효한 접근임을 체계적으로 검토하였다. Hlavackova et al.(2011)은 대퇴 절단자를 대상으로 비절단측의 COP가 절단측보다 낮은 표본 엔트로피(Sample Entropy, 이하 SampEn)를 보이며, 더 규칙적인 패턴을 나타내고, 이는 두 다리가 자세 조절에 동등하게 기여하지 않음을 제시하였다. 또한 Sadeghisani et al.(2016)은 하지 절단자를 대상으로 눈 뜬 조건과 눈 감은 조건에서 근사 엔트로피(Approximate Entropy, 이하 ApEn)를 분석하여 의족 종류에 따라 자세 동요의 규칙성이 달라짐을 보고하였으며, 시각 조건의 주효과가 전후 방향에서 유의하게 나타남을 확인하였다. 이는 비선형 지표가 절단자의 좌우 다리 간 기여도 차이와 감각 조건 변화에 민감하게 반응하며, 선형 지표만으로는 확인되지 않는 조절 전략의 특성을 드러낼 수 있음을 시사한다.

비선형 지표 중 ApEn은 널리 사용되어 왔으나, 자기일치(self-match)를 허용하기 때문에 데이터 길이에 따라 값이 편향될 수 있다. SampEn은 자기일치를 배제하여 데이터 길이가 상대적으로 짧은 조건에서도 일관성이 유지된다는 장점을 갖는다(Richman & Moorman, 2000). 따라서 두 지표를 병행하여 산출할 경우 자세 조절의 규칙성을 보다 안정적으로 평가할 수 있다.

Ku et al.(2014)은 하지 절단자의 정적 기립자세에서 COP 특성을 검토하여 시각 정보 유무에 따른 차이를 확인하였으나, 스탠스 너비

를 동시에 고려한 연구는 제한적이었다. 또한 선형 지표와 비선형 지표를 병행하여 분석한 연구 역시 부족한 실정이다. 선형 지표는 자세 유지의 물리적 결과를 보여주는 반면 비선형 지표는 그 과정에서 동원되는 조절 전략의 특성을 보여주므로(Duarte & Sternad, 2008; Stergiou & Decker, 2011), 두 지표를 통합적으로 해석해야 대퇴 절단자의 자세 제어 특성을 정확히 이해할 수 있다. 이러한 연구 공백은 하지 절단자의 실생활 균형 능력 개선을 위한 맞춤형 재활 전략 개발에 실질적인 한계를 야기하고 있다.

따라서 본 연구에서 하지 절단자, 특히 대퇴 절단자(transfemoral amputee)를 대상으로 시각 정보와 스탠스 너비 변화가 정적 자세 안정성에 미치는 영향을 선형 및 비선형 COP 지표를 통해 분석함으로써, 임상적 평가, 낙상 예방, 맞춤형 재활 전략 개발에 실질적인 근거를 제공하고자 한다.

연구방법

연구대상

본 연구의 피험자는 신경학적 질환이 없는 대퇴 절단자 7명(나이: 57.3 ± 13.7 yrs, 키: 172.4 ± 4.9 cm, 몸무게: 73.7 ± 10.4 kg)이 참여하였다(Table 1). 모든 피험자들은 무릎, 발 등의 의족을 착용하였으며, 실험에 참여하기 전 실험과정에 대한 설명을 하고 참여의사와 동의서(BOHUN 2022-03-021)를 받았다.

측정 항목 및 방법

본 연구에 참여한 피험자들은 정적 서기 자세에서의 균형을 분석하였으며, 균형 분석을 위해 지면반력기(Kistler, SWI; sampling rate 2,000 Hz)를 사용하여 자료를 수집하였다. 모든 피험자들은 네 가지 다른 조건에서 30초간 정적 스탠딩 자세를 수행하였다. 네 가지 조건은 (1) 눈을 감고 좁은 자세로 서기(eyes closed narrow stance, ECN), (2) 눈을 감고 넓은 자세로 서기(eyes closed wide stance, ECW), (3) 눈을 뜨고 좁은 자세로 서기(eyes opened narrow stance, EON), (4) 눈을 뜨고 넓은 자세로 서기(eyes opened wide stance, EOW)로 구성되었다(Fig. 1). COP 분석은 건측(intact limb)과 환측(prosthetic limb)을 모두 포함한 전체 신체 압력중심점(whole-body center of pressure)을 측정하였다.

본 연구에서 스탠스 너비는 피험자의 발 간격(foot width)을 의미하며, 좁은 자세(narrow stance)는 양발을 모은 상태, 넓은 자세(wide stance)는 피험자의 위앞엉덩뼈가시(anterior superior iliac spine, ASIS) 간 거리를 기준으로 스탠스 너비를 설정하였다.

각 실험 조건 사이에는 피로에 의한 균형의 차이를 최소화하기 위하여 최소 3분간의 휴식이 제공되었다.

Table 1. Subject characteristics (Mean $\pm$ SD)

Variables	Male (n=7)
Age (years)	57.3 $\pm$ 13.7
Height (cm)	172.4 $\pm$ 4.9

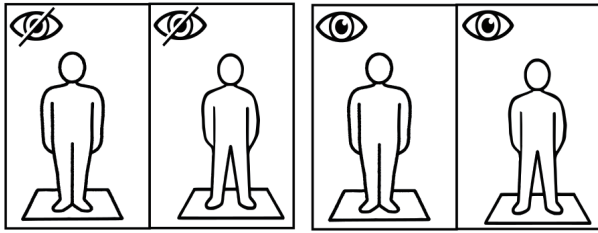


Fig. 1. Experimental conditions of quiet standing, arranged from left to right: ECN, ECW, EON, and EOW.

자료 분석

30초간 수행된 데이터 중, 초기 5초와 후기 5초를 제외한 20초 동안의 COP 값을 분석하였다. 수집된 2,000 Hz의 데이터는 100 Hz로 다운샘플링하여 <Table 2>의 수식으로 각 조건에서의 균형 변화를 AP length, ML length, AP velocity, ML velocity, sway area, AP ApEn, ML ApEn, AP SampEn, ML SampEn변인을 통하여 평가하였다. ApEn과 SampEn은 분석 전 데이터 노이즈 제거를 위하여 2차 지역 통과 버터워스 필터(cutoff frequency: 6Hz)를 적용하였으며, 엔트로피 산출을 위한 파라미터는 선행연구(Richman & Moorman, 2000)를 바탕으로 패턴길이 $m=2$, 유사성 임계값 $r=0.2 \times SD$ 로 설정하였다.

개인별 기저면(base of support) 크기 차이가 COP 지표 해석에 미치는 영향을 확인하기 위하여 스탠스 너비를 이용한 정규화(normalization)를 추가로 수행하였다. 모든 선형 분석 변인을 각 피험자의 스탠스 너비로 나눈 정규화 지표를 산출하고(좁은 스탠스 10 cm, 넓은 스탠스는 개인별 양측 전상장골극(ASIS, mean: 27.29 cm, range: 26.2~29.2 cm), 이를 참고 자료로 제시하였다(Table 3).

통계 처리

시각 정보(eyes open/closed)와 스탠스 너비 조건(wide/narrow)에 따른 차이를 분석하기 위해 본 연구의 측정된 선형분석변인과 비선형분석변인의 절대값을 사용하여 IBM SPSS Statistics 23.0 통계 프로그램으로 반복측정 이원분산분석(2-way ANOVA with repeated measure) 하였다. 또한 주효과와 상호작용 효과가 나타나는 경우, Bonferroni 방법을 사용하여 사후검정(post-hoc)을 실시하였으며, 통계적 유의 수준은 $\alpha=0.05$ 로 설정하였다.

연구결과

시각 조건, 스탠스 너비 조건에 따른 정적 자세 조절의 변화를 분석한 결과는 다음과 같다(Table 4, Fig. 2). 7명 모두 일관되게 ECN 조건에서 가장 높은 값을 보였다.

선형분석 변인

전후방향 이동거리(AP path length)는 시각의 주효과($F(1,6)=12.532, p=.012, \eta^2=.676$)가 유의하였다. 사후검정 결과, 눈을 감은

Table 2. List of variables

	Definition and equation
AP length	Total path length of the COP displacement in the anterior-posterior (AP) direction $\sum_{i=1}^{n-1} COP_{AP,i+1} - COP_{AP,i} $
ML length	Total path length of the COP displacement in the medial-lateral (ML) direction $\sum_{i=1}^{n-1} COP_{ML,i+1} - COP_{ML,i} $
AP velocity	Total AP path length of the COP divided by the trial duration (Time) $\frac{AP \leq ngth}{Time}$
ML velocity	Total ML path length of the COP divided by the trial duration (Time) $\frac{ML \leq ngth}{Time}$
Sway area	Total area covered by the COP trajectory $\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (COP_{AP,i} \times COP_{ML,i+1} - COP_{AP,i+1} \times COP_{ML,i})$
AP ApEn	Approximate entropy of the COP in the AP direction $ApEn_{AP}(m, r, N) = \Phi_{AP}^m(r) - \Phi_{AP}^{m+1}(r)$
ML ApEn	Approximate entropy of the COP in the ML direction $ApEn_{ML}(m, r, N) = \Phi_{ML}^m(r) - \Phi_{ML}^{m+1}(r)$
AP SampEn	Sample entropy of the COP in the AP direction $SampEn_{AP}(m, r, N) = -\ln \frac{A_{AP}}{B_{AP}}$
ML SampEn	Sample entropy of the COP in the ML direction $SampEn_{ML}(m, r, N) = -\ln \frac{A_{ML}}{B_{ML}}$

AP : anterior-posterior, ML : medial-lateral
COP : center of pressure

Table 3. Normalized variables

	ECN	ECW	EON	EOW
AP path length	7.65 ± 1.20	2.41 ± 0.41	5.36 ± 1.29	1.96 ± 0.56
ML path length	6.61 ± 1.58	1.62 ± 0.29	4.43 ± 0.60	1.47 ± 0.32
AP velocity	0.38 ± 0.06	0.12 ± 0.02	0.27 ± 0.06	0.10 ± 0.03
ML velocity	0.33 ± 0.08	0.08 ± 0.01	0.22 ± 0.03	0.07 ± 0.02
sway area	0.05 ± 0.02	0.00 ± 0.00	0.02 ± 0.00	0.00 ± 0.00

AP : anterior-posterior, ML : medial-lateral
ECN : eyes closed narrow stance, ECW : eyes closed wide stance, EON : eyes opened narrow stance, EOW : eyes opened wide stance

Table 4. Mean $\pm$ Standard Deviation for each condition(Mean $\pm$ SD)

Variable	ECN	ECW	EON	EOW
AP path length (cm)	76.4 $\pm$ 12.0	65.4 $\pm$ 9.9	53.6 $\pm$ 12.8	52.9 $\pm$ 13.9
ML path length (cm)	66.1 $\pm$ 15.7	44.0 $\pm$ 7.0	44.3 $\pm$ 5.9	39.8 $\pm$ 7.7
AP velocity (cm/s)	3.8 $\pm$ 0.6	3.2 $\pm$ 0.4	2.6 $\pm$ 0.6	2.6 $\pm$ 0.6
ML velocity (cm/s)	3.3 $\pm$ 0.7	2.2 $\pm$ 0.3	2.2 $\pm$ 0.2	1.9 $\pm$ 0.3
sway area (cm ²)	4.8 $\pm$ 2.3	1.4 $\pm$ 0.9	1.7 $\pm$ 0.4	1.7 $\pm$ 1.2
AP SampEn	.183 $\pm$.061	.173 $\pm$.037	.157 $\pm$.038	.141 $\pm$.029
ML SampEn	.128 $\pm$.046	.237 $\pm$.129	.120 $\pm$.029	.113 $\pm$.044
AP ApEn	.182 $\pm$.061	.172 $\pm$.036	.156 $\pm$.038	.140 $\pm$.029
ML ApEn	.127 $\pm$.046	.236 $\pm$.129	.119 $\pm$.029	.112 $\pm$.044

AP : anterior-posterior, ML : medial-lateral, ECN : eyes closed narrow stance, ECW : eyes closed wide stance, EON : eyes opened narrow stance, EOW : eyes opened wide stance

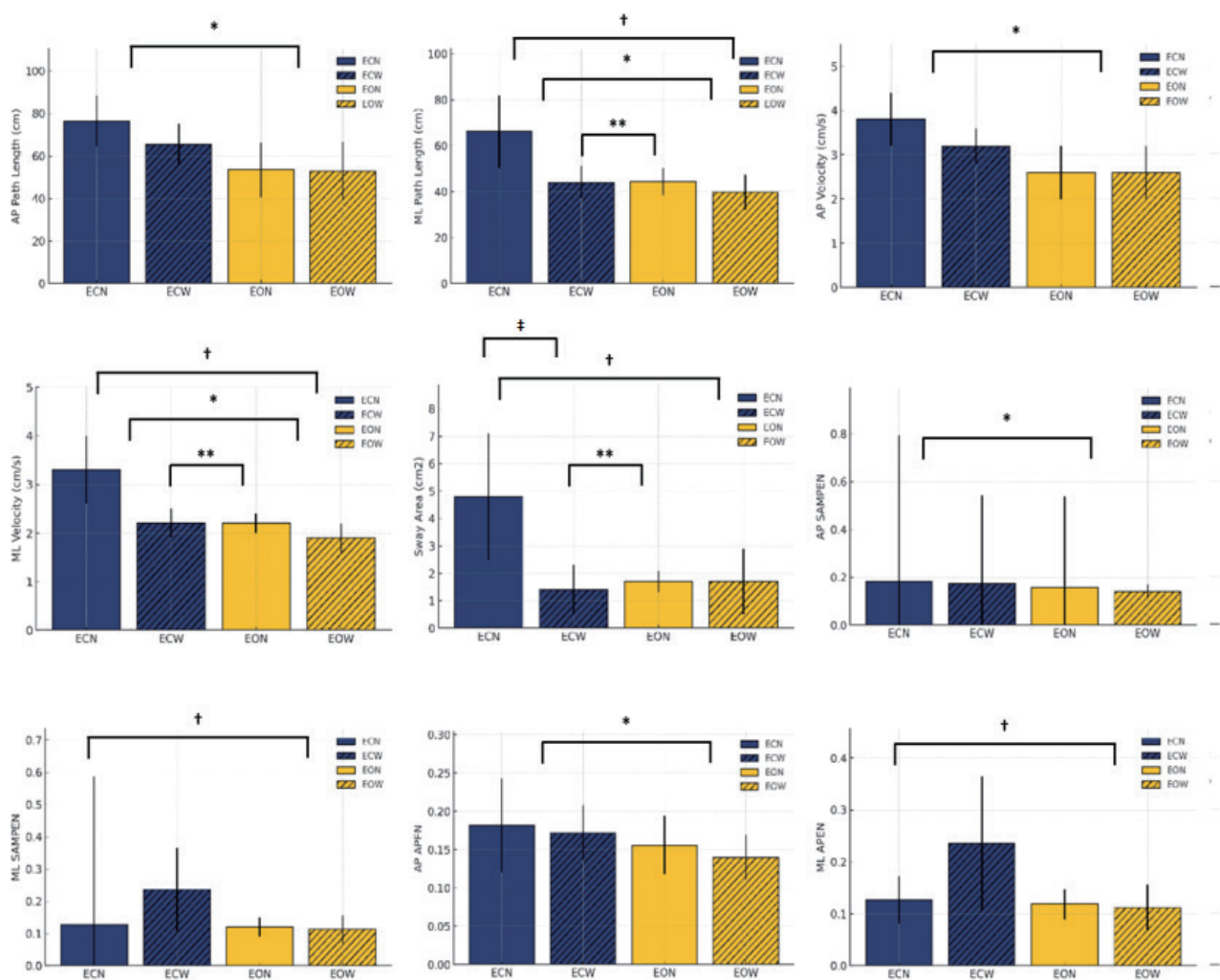


Fig. 2. Mean ($\pm$ SD) values of variables across four conditions (ECN, ECW, EON, EOW). * indicates significant main effect of vision ($p < .05$), ** indicates significant main effect of stance width ($p < .05$), † indicates significant interaction effect ($p < .05$), ‡ indicates significant pairwise difference confirmed by Bonferroni-corrected post-hoc test ($p < .05$).

Table 5. Results of 2-way ANOVA with repeated measure

variable	factor	$F(df)$	p	η^2	Post-Hoc
AP path length	vision	12.532(1,6)	.012*	.68	-
	stance	3.573(1,6)	.108	.37	-
	vision $\times$ stance	3.496(1,6)	.111	.37	-
ML path length	vision	9.773(1,6)	.020*	.62	-
	stance	9.991(1,6)	.020*	.63	-
	vision $\times$ stance	8.372(1,6)	.028*	.58	-
AP velocity	vision	12.532(1,6)	.012*	.68	-
	stance	3.573(1,6)	.108	.37	-
	vision $\times$ stance	3.496(1,6)	.111	.37	-
ML velocity	vision	9.773(1,6)	.020*	.62	-
	stance	9.991(1,6)	.020*	.63	-
	vision $\times$ stance	8.372(1,6)	.028*	.59	-
Sway area	vision	3.589(1,6)	.107	.37	ECN > ECW
	stance	10.214(1,6)	.019*	.63	
	vision $\times$ stance	19.679(1,6)	.004*	.77	
AP SampEn	vision	7.509(1,6)	.034*	.56	-
	stance	0.644(1,6)	.453	.10	-
	vision $\times$ stance	0.037(1,6)	.853	.01	-
ML SampEn	vision	4.376(1,6)	.081	.42	-
	stance	4.333(1,6)	.083	.42	-
	vision $\times$ stance	7.082(1,6)	.037*	.54	-
AP ApEn	vision	7.500(1,6)	.034*	.56	-
	stance	0.648(1,6)	.451	.10	-
	vision $\times$ stance	0.037(1,6)	.855	.01	-
ML ApEn	vision	4.371(1,6)	.082	.42	-
	stance	4.334(1,6)	.083	.42	-
	vision $\times$ stance	7.080(1,6)	.037*	.54	-

* $p < .05$

상태에서 눈은 뜬 상태보다 크게 나타났다.

좌우방향 이동거리(ML path length)는 시각($F=9.773$, $p=.020$), 스탠스($F=9.991$, $p=.020$), 상호작용($F=8.372$, $p=.028$) 모두에서 유의한 차이를 나타냈으며, 좁은 스탠스의 경우 넓은 스탠스보다 큰 값을 나타냈고, 눈을 감은 조건에서 뜬 조건보다 큰 값이 나타났다.

전후방향 속도(AP velocity)는 시각 정보 유무에서만 유의한 주효과가 나타났다($F(1,6)=12.532$, $p=.012$). 눈을 감은 조건에서 눈을 뜬 상태보다 유의하게 큰 값을 나타냈다.

좌우방향 속도(ML velocity)는 시각 정보 유무, 스탠스 너비, 그리고 이들 간의 상호작용에서 모두 유의한 차이를 보였다(시각: $F(1,6)=12.532$, $p=.012$; 스탠스: $F(1,6)=9.991$, $p=.020$; 상호작용: $F(1,6)=8.372$, $p=.028$).

흔들림 면적(sway Area)은 스탠스 너비의 주효과($F(1,6)=10.214$, $p=.019$, $\eta^2=.630$)와 시각 정보와 스탠스 너비(stance width) 간의 상호작용 효과($F(1,6)=19.679$, $p=.004$, $\eta^2=.766$)에서 유의한 차이를 나타냈다. 사후검정 결과, ECN 조건이 ECW 조건 보다 유의하게 크게 나타났다($p=.039$).

비선형분석 변인

전후방향 SampEn는 시각 정보 유무의 주효과에서만 유의한 차이를 보였다($F(1,6)=7.509$, $p=.034$, $\eta^2=.556$). 눈을 감은 조건이 눈을 뜬 조건보다 유의하게 크게 나타났다.

좌우방향 SampEn는 상호작용 효과($F(1,6)=7.082$, $p=.037$, $\eta^2=.541$)에서 유의미한 차이를 보였다. 사후검정 결과, ECW 조건에서 가장 높은 복잡성을 보였으나, Bonferroni 보정 후 유의하지 않았다.

전후방향 ApEn는 시각 정보 유무의 주효과에서만 유의한 차이를 보였다($F(1,6)=7.500$, $p=.034$, $\eta^2=.556$).

좌우방향 ApEn는 상호작용 효과($F(1,6)=7.080$, $p=.037$)에서 유의미한 차이를 보였다. 하지만 사후검정 결과, 유의한 차이는 나타나지 않았다.

논 의

본 연구는 시각 정보와 스텐스 너비가 대퇴 절단자의 정적 자세 조절에 미치는 영향을 선형 및 비선형 지표를 통하여 변화 추이를 확인하고자 하였다.

본 연구에서 시각 정보 차단 조건에서는 전후 및 좌우 방향 모두에서 이동거리와 속도가 유의하게 증가하였다. 이는 시각 정보의 부재에 따라 감각 통합 능력이 제한되며, 시각 정보가 제한될 때 감각 통합(sensory integration)에 기반한 보상 전략이 충분히 작동하지 못했을 가능성을 시사한다. 다만 표본 수가 적어 이 해석은 가능성 수준에서 제시한다. 시각 정보는 전정계 및 체성감각과 함께 자세 조절에 필수적인 감각이며, 하나가 결손될 경우 흔들림의 크기와 빈도가 증가하는 것은 여러 선행연구에서 보고된 바 있다(Horak, 2006; Peterka, 2002).

좁은 스텐스 상황에서는 좌우 방향의 이동거리, 속도, 흔들림 면적이 유의하게 증가하였다. 이는 좁은 기저면은 좌우 방향의 안정성 유지에 불리하며, 신체중심이 기저면 경계에 가까워질수록 자세 제어가 어려워지는 특성이 있다는 연구와 일치한다(Winter et al., 1998).

Mayer et al.(2011)은 편측 하퇴 절단자를 대상으로 신규 의족 착용자가 건측(intact limb)에 약 28% 더 많은 체중을 싣는 비대칭 부하 전략을 보이며, 이러한 부하 분포 비대칭이 좌우 방향 동요와 유의한 상관을 갖는다고 보고하였다. 저자들은 체중 부하 비대칭의 증가가 좌우 동요의 확대를 통해 자세 안정성 저하로 이어진다고 해석하였다. 또한 Hlavackova et al.(2011)은 대퇴 절단자를 대상으로 비절단측에 더 큰 체중이 실리며 해당 측 압력중심의 진폭과 속도가 절단측보다 크게 나타남을 보고하였다. 본 연구의 대상은 대퇴 절단자로 Mayer et al.(2011)과 절단 수준이 다르나, 좁은 스텐스에서 좌우 흔들림 면적이 증가한 결과는 이러한 건측 편중 부하 기전과 관련되었을 가능성이 있다. 다만 본 연구는 좌우 체중 분포를 직접 측정하지 않았으므로 이 해석은 추가 검증이 필요하다.

좌우방향의 선형지표에서 시각과 스텐스 너비 간 상호작용이 유의하게 나타났다. Peterka(2002)는 한 감각 정보가 제한될 때 다른 감각의 가중치가 증가하는 감각 재가중에 대한 가능성을 시사한다. 본 연구에서 관찰된 상호작용은 이러한 감각 재가중의 가능성과 부합하는 방향이다. 다만 흔들림 면적을 제외한 변인에서는 사후검정이 유의하지 않아, 시각의 효과가 스텐스에 따라 달라지는지 혹은 스텐스 효과가 시각에 따라 달라지는지는 본 자료로 특정할 수 없다. 따라서 대규모 표본을 통한 검증이 필요한 탐색적 결과로 제시한다.

전후 방향에서는 SampEn와 ApEn가 시각 정보 유무의 주효과에서 유의하였으며, 눈을 감은 조건이 눈을 뜬 조건보다 유의하게 크게 나타났다. 이러한 엔트로피 증가는 시계열 패턴의 예측 가능성 감소를 의미한다. 이는 대퇴 절단자가 불안정성에 대응하여 다양한 조절 전략을 시도하는 적응적 유연성의 발현일 수도 있으나, 절단측의 기계적 제약으로 인한 비적응적 불규칙성의 증가로 해석될 여지도 존재한다. Stergiou and Decker(2011)는 자세 조절 시스템의 복잡성·유연성과 보상 전략의 다양성이 비선형 지표로 정량화될 수 있으며, 흔들림의 시간 구조가 비선형적 특성을 보일 때 조절 전략의 예측 불가능성이 임상적 불안정성과 연결될 수 있음을 언급하였다.

시각 차단 시 전후 방향 엔트로피가 증가한 본 연구 결과는, 지지면 넓이와 시각 조건을 조합하여 자세 제어 동역학을 분석한 Raffalt et al.(2019)의 보고와 일치한다. 이 연구는 젊은 성인과 고령자를 대

상으로 어깨너비·좁은 간격과 눈뜸·눈감음을 조합한 네 조건에서, 눈을 감은 조건에서 두 집단 모두 전후 방향의 SampEn가 증가하였음을 보고하였다. 다만 엔트로피 변화의 방향은 대상 집단과 과제 조건에 따라 달라질 수 있으므로, 본 결과의 해석에는 신중한 접근이 필요하다.

좌우 방향의 SampEn와 ApEn는 시각 정보와 스텐스 너비의 상호작용 효과가 유의하였으나, 사후검정 결과 조건 간 차이가 통계적으로 유의하지 않았다. 좌우 방향 비선형 변인의 평균과 표준편차를 비교하면 ECW 조건에서 상대적으로 큰 변동성이 관찰된다. 이는 시각이 차단된 상태에서 기저면이 넓어졌음에도 불구하고 개인 간 안정성 조절 전략이 서로 다르게 작동했을 가능성을 시사한다. Raffalt et al.(2019) 역시 좌우 방향의 엔트로피 증가가 두 집단 중 고령자에서만 관찰되었다고 보고하여, 좌우 방향의 비선형 반응이 집단 및 개인 특성에 따라 다르게 나타날 수 있음을 보여준다. 다만 본 연구의 표본 수(n=7)에서는 상호작용이 유의하더라도 개별 조건 간 사후 비교의 민감도가 제한될 수 있으므로, 이 결과는 효과의 부재라기보다 통계적 확증의 부족으로 해석하는 것이 타당하며, 향후 대규모 표본을 통한 검증이 필요하다.

흥미롭게도, 본 연구는 전후와 좌우방향에서 선형 및 비선형 지표가 상이한 패턴을 보임을 확인하였다. 전후 방향은 선형 지표와 비선형 지표 모두 시각 차단의 영향을 일관되게 보인 반면, 좌우 방향은 상호작용 효과가 관찰되었으나 흔들림 면적을 제외하면 사후검정에서 확증되지 않았다.

전후 방향의 자세 조절이 주로 발목 전략과 시각-전정 정보에 의존한다(Winter et al., 1998), Mayer et al.(2011)은 절단자의 전후 방향 압력중심 이동이 절단측 발목 근육의 제한과 관련되며, 해당 움직임이 주로 고유수용감각에 의해 조절되나 절단된 다리에서는 이것이 소실되어 의족 측 발목이 강제되고 감각이 없는 분절로 기능한다고 서술하였다. 즉 대퇴 절단자는 전후 방향에서 발목 전략을 사용하기 어렵고, 이로 인해 남은 감각인 시각에 대한 의존도가 상대적으로 높아진다. 이러한 시각 의존의 증가가 시각 차단 시 전후 방향 COP 지표가 민감하게 반응한 결과로 이어진 것으로 해석할 수 있으며, 시각 정보 차단이 주로 전후 방향 동역학에 영향을 미친다고 보고한 Raffalt et al.(2019)의 결과와도 부합한다. 반면 좌우 방향에서는 시각 유무에 따른 일관된 차이가 뚜렷하지 않았다. Rougier and Bergeau(2009)는 절단자가 절단측 하지에서 적절한 힘 반응(force reaction)을 발휘하지 못하고 체중 부하 비대칭이 존재하여 건측을 통한 보상 기전을 발달시킨다고 보고하였다. 특히 대퇴 절단군은 경골 절단군보다 절단측에서 더 큰 COP 변위를 보였으며, 이러한 자세 전략에는 건측과 절단측 간 COP 크기 차이 및 의족-절단부 접촉 면적이 관여하는 것으로 나타났다. 이는 좌우 방향 자세 조절이 감각 재가중보다 절단측의 구조적·기계적 제약에 더 크게 규정될 수 있음을 시사한다. 즉 좌우 방향에서 시각 입력의 변화가 뚜렷한 조절 변화로 이어지지 못한 것은, 이 방향의 안정성이 시각적 피드백보다 건측 중심의 비대칭 부하라는 기계적 요인에 의해 우선적으로 결정되기 때문일 가능성이 있다.

또한 스텐스 너비 변화가 두 방향에 미치는 영향은 대칭적이지 않다. 넓은 스텐스는 좌우 기저면을 크게 확장하지만 전후 기저면은 상대적으로 덜 변화시킨다. Luo et al.(2025)은 건강 성인에서 스텐스 너비가 정적 균형에 미치는 영향이 시각 조건과 무관하게 좌우 방향에서 전후 방향보다 유의하게 컸다고 보고하였으며, Raffalt et

al.(2019) 역시 양발 스탠스 너비의 변화가 전후·좌우 방향에 따라 다르게 영향을 미친다고 결론지었다. 본 연구에서 스탠스 주효과 및 상호작용이 주로 좌우 방향 지표에서 관찰된 것은 이러한 기저면 형태 차이와 부합하는 결과로 볼 수 있다.

본 연구는 몇 가지 제한점을 가진다. 첫째, 대퇴 절단자라는 대상의 회소성으로 인해 표본 수가 제한적이었다($n=7$). 따라서 rm ANOVA의 정규성 가정을 엄격히 만족하기 어려울 수 있음을 고려하여, 결과 해석과 일반화에 주의를 기울였다. 집단 내 변화를 민감하게 관찰하기 위하여 반복측정 설계를 적용하였으며, 통계적 유의성과 함께 효과크기(예: partial η^2)를 함께 제시하여 실질적 의미를 뒷받침하였다. 그럼에도 불구하고 반복측정 분산분석의 정규성 가정을 엄격히 만족하기 어려울 수 있으며, 개별 조건 간 사후비교의 통계적 검정력이 제한적이다. 따라서 본 연구 결과는 중장년 대퇴 절단자의 정적 자세 조절 특성을 파악하기 위한 제한적·탐색적 기초자료로 해석되어야 하며, 연령·절단 수준·근력 등 개인차를 고려한 대규모 후속 연구를 통한 확장이 필요하다. 둘째, 조건당 1회 측정으로 인해 시행 간 변동성(intra-subject variability)을 완전히 통제하지 못하였다. 향후 연구에서는 각 조건에서 3회 이상 반복 측정을 통해 신뢰도를 높일 필요가 있다. 셋째, 본 연구는 전신 압력중심만을 측정하여 건축과 환측의 개별 부하 분포를 직접 확인하지 못하였다. 향후 이중 지면반력기를 이용한 좌우 부하 분포 측정이 병행된다면 본 연구에서 제시한 비대칭 부하 관련 해석을 직접 검증할 수 있을 것이다.

결론 및 제언

본 연구는 시각 정보 제공 여부와 스탠스 너비 변화가 대퇴 절단자의 정적 자세 조절에 미치는 영향을 선형 및 비선형 지표를 통해 분석하였다.

선형 지표에서는 시각 차단이 전후·좌우 방향의 이동거리와 속도를 유의하게 증가시켰고, 스탠스 너비는 좌우방향 지표와 흔들림 면적에 유의한 영향을 미쳤다. 흔들림 면적에서는 시각과 스탠스 너비의 상호작용이 유의하였으며, 사후검정 결과 눈을 감고 좁게 선 조건(ECN)이 눈을 감고 넓게 선 조건(ECW)보다 유의하게 큰 것으로 확인되었다.

비선형 지표에서는 전후 방향의 SampEn과 ApEn이 시각 차단 조건에서 유의하게 증가하였다. 좌우방향에서는 시각과 스탠스 너비의 상호작용이 유의하였으나, 사후검정 조건 간 차이는 확인되지 않았다.

이러한 결과는 선형지표와 비선형 지표가 자세 조절의 서로 다른 측면을 반영함을 보여준다. 따라서 대퇴 절단자의 자세 조절 능력을 평가하고 실효성 있는 훈련을 설계하기 위해서는 두 지표를 함께 고려하는 통합적 접근이 요구된다.

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: Jin-Joo Yang, Dong-Young Ahn, Yoon Park, Data curation: Jin-Joo Yang, Formal analysis: Jin-Joo Yang, Methodology: Jin-Joo Yang, Yoon Park, Project administration: Dong-Young Ahn, Visualization: Jin-Joo Yang, Writing-original draft: Jin-Joo Yang, Writing-review & editing: Jin-Joo Yang, Dong-Young Ahn, Yoon Park

참고문헌

- Blażkiewicz, M., Hadamus, A., & Borkowski, R. (2023).** Recurrence quantification analysis as a form of postural control assessment: A systematic review. *Applied Sciences*, 13(9), Article 5587.
- Duarte, M., & Sternad, D. (2008).** Complexity of human postural control in young and older adults during prolonged standing. *Experimental Brain Research*, 191(3), 265–276.
- Hlavackova, P., Franco, C., Diot, B., & Vuillerme, N. (2011).** Contribution of each leg to the control of unperturbed bipedal stance in lower limb amputees: New insights using entropy. *PLoS One*, 6(5), Article e19661.
- 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), ii7–ii11.
- Ichimura, D., Hisano, G., Murata, H., Kobayashi, T., & Hobara, H. (2022).** Centre of pressure during walking after unilateral transfemoral amputation. *Scientific Reports*, 12(1), Article 17501.
- Ku, P. X., Abu Osman, N. A., & Wan Abas, W. A. B. (2014).** Balance control in lower extremity amputees during quiet standing: A systematic review. *Gait & Posture*, 39(2), 672–682.
- Luo, W., Huang, Z., Li, H., Zhong, T., Chen, P., & Min, Y. (2025).** Regulation of static and dynamic balance in healthy young adults: Interactions between stance width and visual conditions. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, Article 1538286.
- Mancini, M., & Horak, F. B. (2010).** The relevance of clinical balance assessment tools to differentiate balance deficits. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 46(2), 239–248.
- Mayer, Á., Tihanyi, J., Bretz, K., Csende, Z., Bretz, É., & Horváth, M. (2011).** Adaptation to altered balance conditions in unilateral amputees due to atherosclerosis: a randomized controlled study. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 12(1), Article 118.
- Miller, W. C., Speechley, M., & Deathe, B. (2001).** The prevalence and risk factors of falling and fear of falling among lower extremity amputees. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 82(8), 1031–1037.
- Moisan, G., Miramand, L., Younesian, H., & Turcot, K. (2022).** Balance control deficits in individuals with a transtibial amputation with and without visual input. *Prosthetics and Orthotics International*, 46(2), 134–139.
- Peterka, R. J. (2002).** Sensorimotor integration in human postural control. *Journal of Neurophysiology*, 88(3), 1097–1118.
- Raffalt, P. C., Spedden, M. E., & Geertsens, S. S. (2019).** Dynamics of postural control during bilateral stance—Effect of support area, visual input and age. *Human Movement Science*, 67, Article 102462.
- 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.
- Rougier, P. R., & Bergeau, J. (2009).** Biomechanical analysis of postural control of persons with transtibial or transfemoral amputation. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 88(11), 896–903.
- Ruhe, A., Fejer, R., & Walker, B. (2010).** The test–retest reliability of centre of pressure measures in bipedal static task conditions—a systematic review of the literature. *Gait & Posture*, 32(4), 436–445.
- Sadeghisani, M., Karimi, M. T., & Kamali, M. (2016).** Nonlinear analysis of postural sway in subjects with below knee amputation during opened and closed eye conditions. *Journal of Orthopaedics*, 13(3), 152–156.
- Schmid, M., Beltrami, G., Zambarbieri, D., & Verni, G. (2005).** Centre of pressure displacements in trans-femoral amputees during gait. *Gait & Posture*, 21(3), 255–262.
- Steinberg, N., Gottlieb, A., Siev-Ner, I., & Plotnik, M. (2019).** Fall incidence and associated risk factors among people with a lower limb amputation during various stages of recovery—a systematic review. *Disability and Rehabilitation*, 41(15), 1778–1787.
- Stergiou, N., & Decker, L. M. (2011).** Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: Is there a connection? *Human Movement Science*, 30(5), 869–888.
- van Velzen, J. M., van Bennekom, C. A. M., Polonski, W., & Slootman, J. R., van der Woude, L. H. V., & Houdijk, H. (2006).** Physical capacity and walking ability after lower limb amputation: A systematic review. *Clinical Rehabilitation*, 20(11), 999–1016.
- Winter, D. A., Patla, A. E., Prince, F., Ishac, M., & Gielo-Perczak, K. (1998).** Stiffness control of balance in quiet standing. *Journal of Neurophysiology*, 80(3), 1211–1221.

시각 및 스탠스 너비 조건 변화에 따른 대퇴 절단자의 자세 조절 특성: 압력중심 기반 분석

양진주¹, 안동영², 박 윤^{1*}

¹중앙보훈병원 연구원

²중앙보훈병원 부장

*교신저자: 박 윤(yoon.p9@gmail.com)

[목적] 본 연구는 시각 정보와 스탠스 너비(stance width)가 대퇴 절단자의 정적 자세 조절에 미치는 영향을 선형·비선형 지표로 분석하였다.

[방법] 남자 대퇴 절단자 7명을 대상으로 눈뜨기/감기와 좁은/넓은 스탠스를 조합한 4가지 조건(ECN, ECW, EON, EOW)에서 30초간 정적 서기 과제를 수행하였다. COP 변인은 path length, velocity, sway area, ApEn, SampEn으로 산출하였으며, 반복측정 이원분산분석을 실시하였다.

[결과] AP path length는 시각 효과가 유의하였고($F=12.532$, $p=.012$), ECN에서 가장 높았다(76.4 ± 12.0 cm). ML path length는 시각($F=9.773$, $p=.020$), 스탠스($F=9.991$, $p=.020$), 상호작용 모두 유의하였으며($F=8.372$, $p=.028$), ECN에서 최대값을 보였다(66.1 ± 15.7 cm). 흔들림 면적은 스탠스와 상호작용에서 유의하였고($F=19.679$, $p=.004$), ECN에서 가장 컸다(4.8 ± 2.3 cm²). 비선형 지표는 시각 차단 시 AP SampEn·ApEn이 증가했으며, ML 방향에서 상호작용 효과가 나타났다($F=7.082$, $p=.037$).

[결론] 선형 지표는 시각 차단과 좁은 스탠스 조건에서 자세 불안정성이 증가함을 보여주었으며, 흔들림 면적에서 ECN이 ECW보다 유의하게 컸다. 비선형 지표에서는 시각 차단 시 전후 방향 SampEn과 ApEn이 유의하게 증가하였다. 좌우 방향에서는 상호작용이 유의하였으나 사후검정에서 검증되지 않았다. 따라서 대퇴 절단자의 균형 평가는 선형·비선형 지표를 함께 고려하는 통합적 접근이 필요하다.

주요어

대퇴 절단, 정적 자세 조절, 시각 정보, 스탠스 너비, 비선형 분석

※ 본 연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 보건의료기술연구개발사업 지원에 의하여 이루어진 것임 (과제고유번호: HJ22C000300).