

만성 발목 불안정성 환자와 대조군 간 압력중심점을 이용한 기능적 평가

연세대학교 체육교육학과¹, 세종스포츠정형외과의원², 국제올림픽위원회 한국연구센터³,
동국대학교 스포츠의학전공⁴, 연세대학교 미래융합연구원⁵

이동욱^{1,2} · 전형규^{1,3} · 김병훈^{3,4} · 이세용^{1,3,5} · 김진수²

Functional Evaluation Using Center of Pressure between Chronic Ankle Instability and Healthy Control

Dong Wook Lee^{1,2}, Hyung Gyu Jeon^{1,3}, Byung Hun Kim^{3,4}, Sae Yong Lee^{1,3,5}, Jin Su Kim²

¹Department of Physical Education, Yonsei University, Seoul, ²Sejong Sports Medicine & Performance Center, Seoul,
³International Olympic Committee Research Centre Korea, Seoul, ⁴Department of Sports Medicine, Dongguk University,
Wise Campus, Gyeongju, ⁵Institute of Convergence Science, Yonsei University, Seoul, Korea

Purpose: Mechanical and functional ankle instability or combinations of both can contribute to chronic ankle instability (CAI). Therefore, the purpose of this study was to compare the difference in (1) static and (2) dynamic balance function between patients with CAI and the controls; (3) to investigate association between balance function and CAI; and (4) to examine whether balance assessments are valuable for diagnosing CAI.

Methods: This study was conducted on 40 patients with CAI and 40 ankle healthy individuals. All participants evaluated the Cumberland Ankle Instability Tool questionnaire. Additionally, joint laxity and center of pressure (COP) during static postural control, anterior landing, and lateral landing were measured using an electronic pedobarography.

Results: CAI patients showed a larger COP area than controls when performing static postural control ($p=0.023$) and lateral landing ($p=0.002$). As a result of the receiver operation characteristic curve analysis, COP distance, area, and speed during static postural control and COP area during lateral landing showed low accuracy, indicating that they are valuable evaluations for the diagnosis of CAI.

Conclusion: Patients with CAI had poor static and dynamic postural control ability. The static posture control and the lateral landing test had diagnostic significance to evaluate the objective function of CAI.

Keywords: Center of pressure, Chronic ankle instability, Foot scan, Functional test, Pedobarography

Received: August 1, 2022 Revised: October 27, 2022 Accepted: November 3, 2022

Correspondence: Sae Yong Lee

Department of Physical Education, Yonsei University, #310 Sports Science Complex, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea

Tel: +82-2-2123-6189, Fax: +82-2-2123-8375, E-mail: syleel@yonsei.ac.kr

Copyright ©2022 The Korean Society of Sports Medicine

© 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.

서론

외측 발목 염좌(lateral ankle sprain)는 스포츠 활동에서 자주 나타나는 부상이며¹, 25개 종목에서 발생하는 모든 스포츠 부상의 7.3%를 차지한다². 외측 발목 염좌를 경험한 환자의 최대 70%가 만성 발목 불안정성(chronic ankle instability, CAI)으로 악화될 수 있고³, 운동선수의 경우 8명 중 1명이 반복적인 외측 발목 염좌를 경험한다². 초기 발목 염좌 후 발생하는 CAI는 발목관절 흔들림 에피소드, 통증, 빈번한 염좌, 발목 가동범위 감소와 같은 병리학적 증상들이 반복적으로 발생하게 된다⁴. CAI는 다양한 자가 보고 설문지를 통해 진단할 수 있으며, 환자가 경험하는 발목관절의 통증 및 기능을 객관적으로 평가하여 분류한다⁵.

CAI는 기계적 불안정성(mechanical instability)과 기능적 불안정성(functional instability), 그리고 두 가지 불안정성 형태가 복합적으로 작용한 원인으로 발생할 수 있다⁴. 기계적 발목 불안정성은 초기 염좌 후 발목의 안정성을 유지해주는 외측의 인대와 건 등 해부학적 구조물의 손상으로 인하여 발생하며, 이는 발목의 안정성을 취약하게 만든다^{6,7}. 즉, 급성 발목 염좌로 인해 외측 인대 및 종아리근(peroneus)의 힘줄이 손상을 입어 늘어나거나 파열되면 발목 내반의 범위가 증가하여 반복적인 발목 염좌 및 CAI가 발생할 수 있다.

기능적 불안정성은 고유수용성 감각과 신경근의 결손으로 발생하는 발목 불안정성 또는 재발성 발목 염좌의 주관적인 증상으로 정의한다⁸. 기계적 불안정성을 보이는 CAI 환자의 경우 기계적 불안정성뿐만 아니라 기능적 불안정성을 동반하여 복합적으로 발생할 수 있다⁶. CAI 환자들에게서 나타나는 대표적인 기능 장애는 균형 능력의 손실인데, 이는 체성감각의 장애와 운동장애로 인해 발생하며 이 두 가지 결손은 발목관절 불안정성의 원인이 될 수 있다⁴. 또한, CAI 환자들은 긴종아리근의 근력 저하와 함께 근육 활성의 느린 반응 시간을 나타내는데⁹, 이러한 요인들은 발목 염좌로 인한 조직 손상이 근신경 조절 시스템에 영향을 주므로 CAI에서 균형을 유지하는 데 소요되는 시간이 길어질 수 있다¹⁰.

CAI의 균형 능력 결핍을 검사할 때 한발 정적 균형 검사¹¹와 별 모양 균형 검사(star excursion balance test, SEBT)를 이용한 동적 균형 검사¹²를 주로 시행한다. 그중 동적 균형 능력은 정적 균형 능력보다 CAI의 움직임과 큰 관련이 있다¹². 특히, 한발 착지 동작은 도약을 포함한 스포츠의 주요 움직임 중 하나로, 기능적 발목 불안정성 환자는 한발 착지 시 안정화가 지연되는데 이는 발목 근력 부족 및 발목 인대의 고유수용성 감각 결손이 원인이 된다^{13,14}. 이와 비슷하게 정상군보다 CAI에서 발목 주위의

앞정강근(anterior tibialis), 긴종아리근, 안쪽 장딴지근(gastrocnemius) 등의 근육 활성도가 낮다는 결과가 보고되었다¹⁵. 또한 CAI와 관련된 감각운동 장애는 하지의 고유수용성 감각 손상¹⁶과 신경근 조절 손상을 포함한다¹⁷.

CAI의 정적 안정성 검사 시 압력중심점(center of pressure, COP)의 변화 등에 관한 연구가 있지만¹⁸, 동적 안정성을 평가하는 연구는 부족하고 대부분 일상생활과 동일한 난이도인 보행에 집중되어 있다. 그러나 외측 발목 염좌 손상은 역동적이고 고수준의 신체활동 시 발생하므로, 부상 발생 기전과 유사한 동작에서 균형 능력이 다른지 확인해 볼 필요가 있다(Fig. 1). 또한, SEBT 등 현장에서 활용하는 검사는 수행력 측면에서 균형 능력의 수준을 제시할 수 있으나, 동작 수행 중 나타나는 환자의 움직임 분석하기에 제한적이다. 또한, COP의 이동속도, 면적과 같은 변인은 움직임의 질(quality)을 대변할 수 있으므로 CAI 환자의 기능적 균형 능력 수준을 평가하고, 관련 변인들을 이용하여 진단적 적합성이 존재하는지 확인할 필요가 있다.

본 연구 목적은 착지 시 풋스캔을 사용하여 기계적 불안정성을 동반한 CAI 환자의 COP 특성을 확인해 봄으로써 착지 동작의 COP 변화가 진단적 가치가 있는지 알아보고자 하였다. 연구 가설은 다음과 같다: (1) 기계적 결손이 있는 CAI 환자는 정적 균형 조절 시 정상 대조군과 비교하여 COP 거리와 면적이 크고 속도는 빠를 것이다; (2) 기계적 결손이 있는 CAI 환자는 동적 균형 능력에서 정상 대조군과 비교하여 COP 거리와 면적이 크고 속도는 빠를 것이다; (3) COP 변인 중 일부는 기계적 불안정성을 동반한 CAI 발생 위험도에 영향을 미칠 것이다; (4) 정적 균형 및 착지 시 COP 거리, 면적, 속도는 기계적 불안정성을 동반한 CAI를 진단하는 도구로 적절할 것이다.

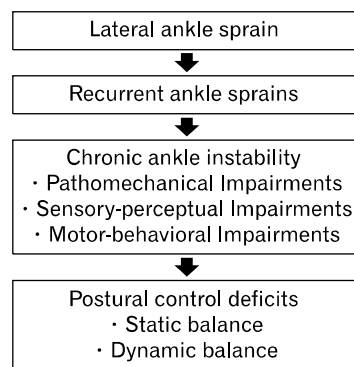


Fig. 1. Theoretical models for postural control deficits in patients with chronic ankle instability.

연구 방법

본 연구는 CAI로 서울 소재의 세종스포츠정형외과의원을 내원한 환자 대상 중 수술 전 검사를 실시한 정보를 이용한 후향적 연구이며 정상 대조군과 비교하여 CAI 환자군에서 정적 및 동적 균형 능력과 기능적 평가 결과법의 진단적 의미를 분석하였다.

1. 연구 대상

본 연구는 병원에 내원하여 CAI를 진단받은 환자 40명과 발목, 무릎 등의 부상 이력이 최소 1년 이상 없는 건강한 정상 대조군 40명을 대상으로 진행하였으며, 연구 대상자의 일반적 특성은 Table 1과 같다. CAI 환자의 선별 기준은 다음과 같다: (1) 최초 염좌 이후 2번 이상 발목 염좌가 발생한 병력이 있는 환자; (2) Cumberland Ankle Instability Tool (CAIT) 24점 미만; (3) 최소

지난 3개월간 급성 발목 염좌가 발생하지 않은 환자; (4) anterior drawer 및 talar tilt test 양성; (5) 내번 경사각(inversion tilt angle)이 8.93° 이상이거나 전방 전위(anterior translation) 부하 검사 시 8.87 mm 이상인 환자¹⁹. 골연골 결손(osteochondral lesion)이 있거나 전신 유연성(general laxity)이 있는 환자, 발목 수술 이력이나 염증성 관절염이 있는 경우 연구 대상자에서 제외하였다. 대조군의 경우 광고를 이용하여 자발적으로 연구에 참여를 희망하는 사람 중 발목 손상 이력이 없는 대상을 모집하였으며, 하지의 수술 이력이 있는 경우는 제외하였다.

2. 연구도구 및 절차

연구 대상자 전원에게 CAI 및 정상 대조군 여부를 평가 및 진단하기 위해 대상자에게 신뢰도(reliability) 및 타당도(validation)가 검증된, 한글로 번역된 CAIT 설문지를 사용하였다²⁰. 정형외과

Table 1. Demographic characteristics of the subjects

Characteristic	Total	CAI group	Control group
No. of subjects	80	40	40
Age (years)	27.5±6.7	25.6±7.0	29.4±5.9
Sex			
Male	43 (53.8)	25 (62.5)	18 (45.0)
Female	37 (46.3)	15 (37.5)	22 (55.0)
Height (cm)	170.4±9.4	173.5±8.4	167.4±9.6
Weight (kg)	66.8±13.7	69.1±12.4	64.5±14.7
Body mass index (kg/m ²)	22.8±3.1	22.9±3.0	22.7±3.2
CAIT (score)	20.1±10.6	10.1±5.1	30.0±0.0
Inversion tilt angle (°)	7.2±4.6	10.4±4.2	3.9±2.0
Anterior translation (mm)	7.5±2.0	8.4±1.6	6.5±2.0

Values are presented as number only, mean±standard deviation, or number (%).

CAI: chronic ankle instability, CAIT: Cumberland Ankle Instability Tool.

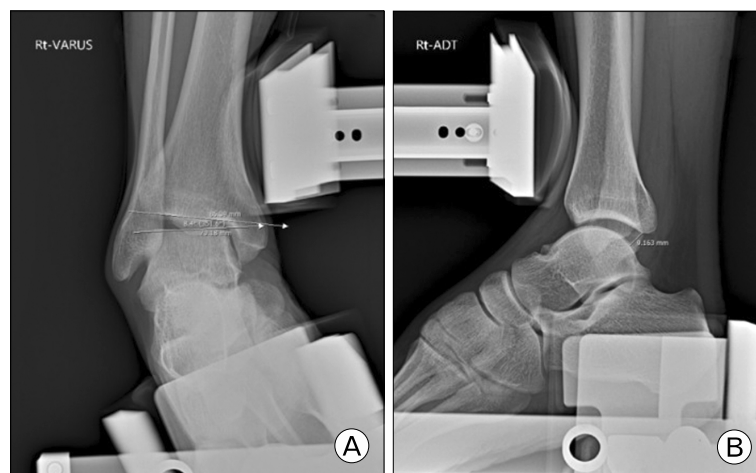


Fig. 2. Radiography for stress view. (A) Inversion tilt angle and (B) anterior translation.

전문가가 이학적 검사를 실시한 후 정적 부하검사(스트레스 방사선 촬영)를 진행하여 기계적 결손 여부를 판단하였다. 연구 대상자는 트레드밀에서 5분간 걷게 하여 준비운동을 실시한 후 정적 및 동적 균형 능력 검사를 하였다.

1) 정적 부하 검사

발목의 기계적 불안정성의 평가는 부하 검사기(Telometer, Daiseung Medics, Seoul, Korea)를 이용하여 측정하였고 발목 내번 경사각 검사는 정강뼈를 20° 가량 안쪽돌림 하여 고정된 상태(mortice view)로 15 daN의 부하를 내변하면서 촬영하였다²¹. 단위는 도(degree, °)로 측정하였고 PACS View 프로그램(Viewrex3, Techheim, Seoul, Korea)을 이용하여 먼쪽 정강뼈 관절면과 목말뼈의 위 관절면(talar dome) 각을 측정하였다(Fig. 2A)²². 발목 앞쪽 이동 검사는 정강뼈 뒤쪽에서 15 daN의 부하를 주어서 측면 방사선 촬영(lateral view)을 하였다. 단위는 mm로 측정하였고 정강뼈 후방 가장자리(lip)의 관절면에서 목말뼈 후방 부분 관절면까지의 수직 거리를 측정하였다(Fig. 2B)²².

2) 정적 균형 능력 검사

발목 기능적 검사 중 정적 균형 능력을 보는 검사는 RS scan system (1.0 m Entry, 1,068×418 mm; Rs Scan, Beringen, Belgium)을 사용하여 최대 200 Hz의 스캔 속도로 8,192개의 센서가 분석을 제공한다. 풋스캔을 사용하여 한발 서기 동작을 시행하여 20초간 측정하였다¹⁶. 측정은 맨발로 진행하고 정상 측 발부터 한발 서기 동작 측정을 하였다. 측정 시 연구 대상자는 측정하지 않는 측의 무릎관절(knee joint)은 90°로 굴곡한 후, 손은 허리에 위치시켰다. 정적 균형 능력 검사는 COP 이동 거리(traveled distance, mm), 타원 면적(ellipse area, mm²), 이동 속도(speed, mm/sec) 변인을

측정하였다.

3) 동적 균형 능력 검사

동적 균형 능력은 착지 동작을 통해 측정하였으며, 풋스캔에서 5 cm 뒤에 위치한 20 cm 높이의 스텝 박스를 이용하였다²³. 전방(posterior to anterior) 착지(Fig. 3A)와 측면(medial to lateral) 착지 동작(Fig. 3B)을 측정하였다. 착지 직후부터 3초간 측정하였고, 측정 전 2회의 연습을 시행하였다. 동적 균형 능력 검사는 두 방향의 착지 동작 시 COP 이동 거리, 타원 면적, 이동 속도 변인을 측정하였다(Fig. 4).

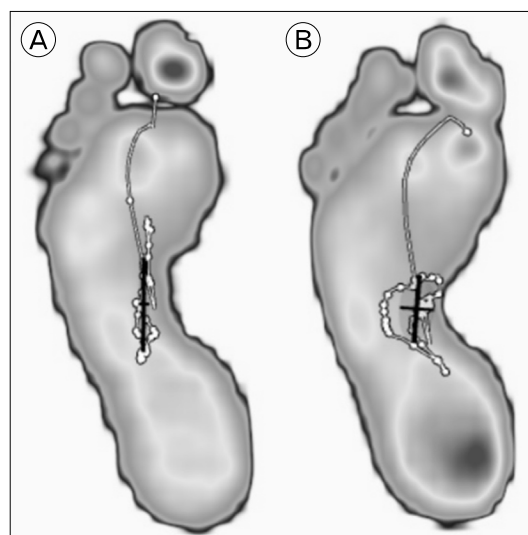


Fig. 4. Center of pressure path in electronic pedobarography. (A) Posterior to anterior landing and (B) medial to lateral landing.

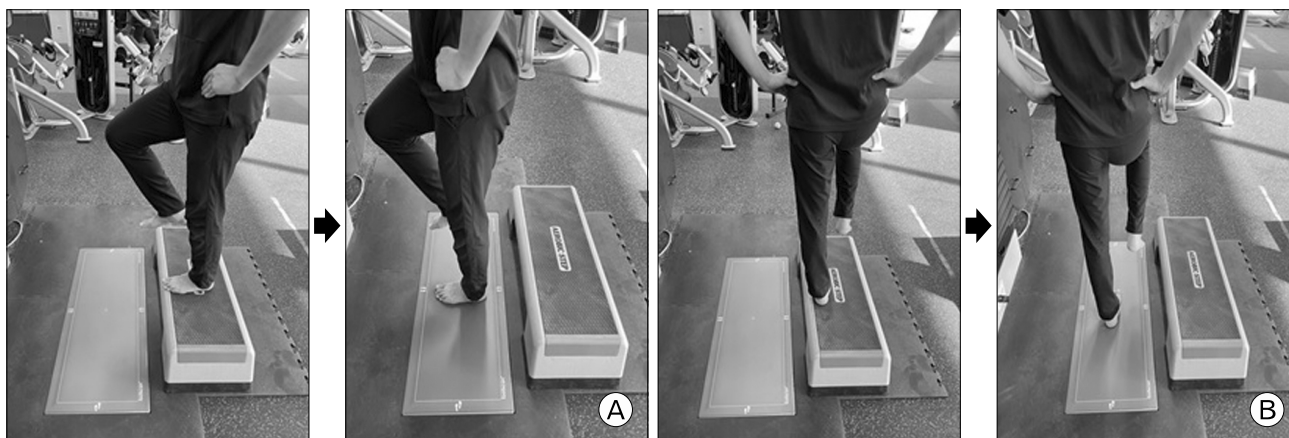


Fig. 3. Landing task for measuring center of pressure. (A) Posterior to anterior landing and (B) medial to lateral landing.

Table 2. Results of independent t-test between patients with CAI and control group

Balance parameter	Total	CAI group	Control group	t	p-value	ES
Static postural control						
COP traveled distance (mm)	389.8±206.0	433.0±225.0	346.7±177.5	1.903	0.061	0.42
COP ellipse area (mm ²)	51.4±65.9	68.3±88.0	54.5±21.8	2.360	0.023*	0.21
COP speed (mm/sec)	19.5±10.3	21.7±11.3	17.3±8.9	1.915	0.059	0.43
Posterior to anterior landing						
COP traveled distance (mm)	291.0±63.1	292.6±71.2	289.5±54.8	0.216	0.829	0.04
COP ellipse area (mm ²)	333.6±185.1	356.9±228.8	310.4±126.5	1.123	0.265	0.25
COP speed (mm/sec)	97.0±21.1	97.5±23.7	96.5±18.3	0.217	0.829	0.04
Medial to lateral landing						
COP traveled distance (mm)	303.0±68.0	309.7±70.0	296.4±66.2	0.878	0.382	0.20
COP ellipse area (mm ²)	415.0±221.2	489.1±259.8	340.9±142.6	3.162	0.002**	0.70
COP speed (mm/sec)	101.0±22.7	103.2±23.3	98.8±22.1	0.879	0.382	0.19

Values are presented as mean±standard deviation.

CAI: chronic ankle instability, COP: center of pressure, ES: effect size (calculated as Cohen's *d*).

p*<0.05, *p*<0.01.

결 과

3. 통계 분석

본 연구에서 수집된 데이터는 IBM SPSS version 26.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)과 R software version 4.0.2를 이용하여 분석하였다. CAI 환자군과 대조군 간 발목관절 기계적 불안정성, 정적 및 동적 균형 능력의 차이를 비교하기 위해 독립표본 t-검정을 실시하였다. 효과 크기(effect size, ES) 산출을 위해 Cohen's *d* 공식을 이용하였으며, 분류 기준은 다음과 같다: (1) ES>0.5 (큼, large); (2) 0.2<ES<0.5 (중간, medium); (3) ES<0.2 (작음, small). CAI 여부와 연관된 변수를 찾기 위해 먼저 각각의 변수에 대해 단변수 로지스틱 회귀분석을 시행하였다²⁴. 단변수 로지스틱 회귀분석에서 유의한 결과를 보인 변수를 대상으로 다중 로지스틱 회귀분석을 실시하여 보정된 교차비(odds ratio, OR)를 확인하였다. 발목관절 불안정성 검사와 정적 및 동적 균형 능력 검사가 CAI 진단과 연관성이 있는지 검증하기 위해 수신자 조작 특성 곡선(receiver operation characteristic curve, ROC curve) 분석을 실시하였다²⁵. ROC curve는 곡선 아래 면적(area under the curve, AUC)에 따라 진단 정확성을 분류하였으며, 0.5인 기준선보다 왼쪽 위로 곡선이 형성되어야 의미 있는 검사법이라 볼 수 있다. 분류 기준은 다음과 같다: (1) 0.9<AUC<1.0 (높음, high); (2) 0.7<AUC≤0.9 (중간, moderate); (3) 0.5<AUC≤0.7 (낮음, low). 민감도(sensitivity, Sen)와 특이도(specificity, Spe)가 높은 최적의 절단값(cut-off value, COV)을 나타냈다. 통계의 유의수준은 *p*<0.05로 설정하였다.

1. 정적 균형 조절 시 COP 비교

CAI에서 한발 서기 동작 수행 시 대조군보다 더 넓은 COP 면적을 보였으며(*t*=2.360, *p*=0.023), 중간 효과 크기를 보였다(ES, 0.21). COP 거리와 속도는 두 집단 간 유의한 차이가 없었다(*p*>0.05) (Table 2).

2. 동적 균형 조절 시 COP 비교

전방 착지 동작 시 COP 거리, 면적, 속도 변인에서는 집단 간 차이가 나타나지 않았다(*p*>0.05). CAI에서 측면 착지 동작 수행 시 대조군보다 더 넓은 COP 면적을 보였으며(*t*=3.162, *p*=0.002), 큰 효과 크기를 보였다(ES, 0.70) (Table 2).

3. CAI 발생 위험도 분석

CAI와 연관 있는 변수를 확인한 결과, 한발 서기 동작 시 COP 면적(*p*=0.016)과 측면 착지 동작 시 면적(*p*=0.005) 변인에서 유의한 결과가 나타났다(Table 3). 단변수 로지스틱 회귀분석에서 유의한 결과를 보인 변인들을 이용하여 다중 로지스틱 회귀분석을 수행한 결과 한발 서기 동작 시 COP 면적(adjusted OR, 1.019; 95% confidence interval [CI], 1.000–1.039; *p*=0.048)과 측면 착지 동작 시 COP 면적(adjusted OR, 1.004; 95% CI, 1.001–1.007; *p*=0.012) 변인이 CAI 진단을 위해 사용 가능한 검사로 나타났다 (Table 4).

Table 3. Summary of univariate binary logistic regression

Variable	Chronic ankle instability			
	B	SE	OR (95% CI)	p-value
During SPC				
COP traveled distance	0.002	0.001	1.002 (1.000–1.005)	0.068
COP ellipse area	0.023	0.010	1.023 (1.004–1.043)	0.016*
COP speed	0.044	0.024	1.045 (0.997–1.096)	0.066
During PAL				
COP traveled distance	0.001	0.004	1.001 (0.994–1.008)	0.827
COP ellipse area	0.001	0.001	1.001 (0.999–1.004)	0.270
COP speed	0.002	0.011	1.002 (0.982–1.024)	0.826
During MLL				
COP traveled distance	0.003	0.003	1.003 (0.996–1.010)	0.378
COP ellipse area	0.004	0.001	1.004 (1.001–1.007)	0.005**
COP speed	0.009	0.010	1.009 (0.989–1.029)	0.378

SE: standard error, OR: odds ratio, CI: confidence intervals, SPC: static postural control, COP: center of pressure, PAL: posterior to anterior landing, MLL: medial to lateral landing.

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

Table 4. Summary of multivariate binary logistic regression

COP ellipse area	Chronic ankle instability			
	B	SE	Adjusted OR (95% CI)	p-value
During SPC	0.019	0.010	1.019 (1.000–1.039)	0.048*
During MLL	0.004	0.002	1.004 (1.001–1.007)	0.012*

COP: center of pressure, SE: standard error, OR: odds ratio, CI: confidence intervals, SPC: static postural control, MLL: medial to lateral landing.

* $p < 0.05$.

4. CAI 진단적 적합성

ROC curve 분석 결과 한발 서기 동작 시 COP 거리(AUC, 0.631; $p=0.040$; COV, 253.5; Sen, 87.5%; Spe, 47.5%) (Fig. 5A), COP 면적(AUC, 0.671; $p=0.005$; COV, 40.5; Sen, 55.0%; Spe, 75.0%) (Fig. 5B), COP 속도(AUC, 0.631; $p=0.040$; COV, 12.7; Sen, 87.5%; Spe, 47.5%) (Fig. 5C) 변인은 낮은 정확도를 나타냈다. 측면 착지 동작 시 COP 면적(AUC, 0.693; $p=0.001$; COV, 302.5; Sen, 80.0%; Spe, 52.5%) 또한 낮은 정확도를 나타냈다(Fig. 5B).

고 찰

본 연구에서는 가설을 검증한 결과 다음과 같이 나타났다. 첫째, 풋스캔을 이용한 한발 서기 검사 시 CAI가 대조군보다 COP 면적이 넓은 것으로 나타나 CAI 환자의 정적 균형 능력이 저하된 것을 확인하였다. 둘째, 측면 착지 동작에서 CAI가 대조군

보다 COP 면적이 넓은 것으로 보아 동적 균형 능력이 부족한 것을 확인하였다. 셋째, 한발 서기 및 측면 착지 동작 시 COP 면적은 각각 CAI 발생 위험도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 넷째, ROC curve 분석을 통한 진단적 적합성 평가 결과 한발 서기와 측면 착지 동작은 CAI를 진단하는 검사로 사용할 수는 있으나 낮은 정확도를 나타냈다. 본 연구의 결과를 근거로 정적 균형 능력인 한발 서기 동작과 동적 균형 능력인 측면 착지 동작 시 나타나는 COP의 큰 면적을 기계적 불안정성이 있는 CAI의 특징으로 제시하고자 한다.

CAI와 대조군의 정적 균형 능력을 비교한 결과, CAI는 한발 서기 동작 시 대조군보다 더 넓은 COP 면적을 보였다. 이는 CAI가 대조군보다 신체 흔들림을 안정화하기 위해 더 많은 시간이 필요하기 때문인 것으로 판단된다¹³. CAI 환자는 고유수용성 감각 저하로 인해 신체 흔들림(sway)이 대조군보다 증가하게 된다. 본 연구의 피험자는 선행연구와 동일한 CAI 환자로 모집하였으나 주관적 기능적 불안정성뿐만 아니라 방사선 촬영을 통한 관절의 이완성까지 동반한 대상으로 실시하였기 때문에, CAI의

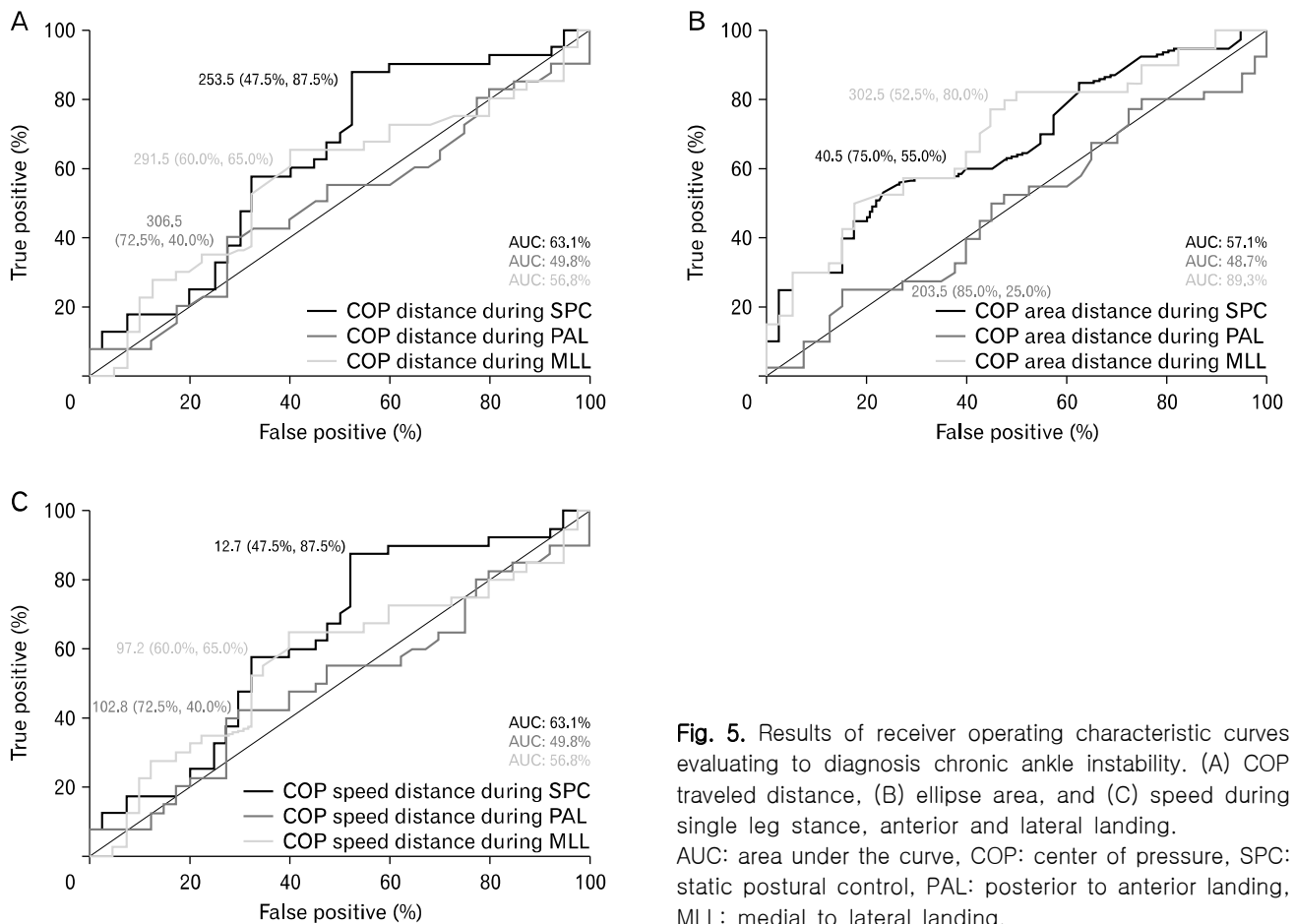


Fig. 5. Results of receiver operating characteristic curves evaluating to diagnosis chronic ankle instability. (A) COP traveled distance, (B) ellipse area, and (C) speed during single leg stance, anterior and lateral landing. AUC: area under the curve, COP: center of pressure, SPC: static postural control, PAL: posterior to anterior landing, MLL: medial to lateral landing.

동적 및 정적 균형 능력 저하가 더욱 뚜렷하게 관찰된 것으로 생각된다.

측면 착지 동작을 통한 동적 균형 검사에서는 두 집단 간 COP 면적에서 차이가 나타났다. 이는 본 연구에서 검사한 정적 및 동적 균형 검사에서 가장 큰 효과 크기를 보여($d=0.70$), CAI 환자는 정적 균형 동작보다 측면 착지 동작에서 균형 능력의 저하가 강조되었다. 측면 착지 동작은 한발 서기 동작보다 역동적인 움직임이고 부상이 빈번히 일어나는 내번 동작을 유발할 수 있기 때문에 더 큰 차이가 나타난 것으로 보인다. 또한 선행연구에서 보고한 것처럼 더 역동적인 균형 능력을 검사하기 위해 착지 후 짧은 시간 동안 균형능력을 측정하였기 때문에 동적 균형 능력에서 더 큰 저하가 나타난 것으로 생각된다. 그러나 전방 착지 동작에서는 COP의 거리, 면적, 스피드 모두 유의한 결과를 얻지 못했다. 일반적으로 앞목말종아리인대의 손상 이후 발목의 전방 전위가 발생하게 되는데, 실험적으로 구현한 전방 점프에서는 앞목말종아리인대의 불안정성이 있다고 하더라도 전방 점프 후 착지 시 뒤목말종아리인대의 안정성이 있으면 발목을 안정화할 수 있을 것이다. 이것은 착지 시 발목은 발등굽힘(dorsiflexion)

이 되고 뒤목말종아리인대는 발등굽힘 시 안정화에 기여할 수 있기 때문에²⁶, 향후 후방(anterior to posterior) 점프를 이용한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 CAI는 발목을 안정화시키기 위한 전략으로 무릎관절 및 엉덩관절(hip joint)을 착지에 이용할 수 있다. 특히 무릎관절의 경우 발목의 앞뒤, 배측굴곡, 족저굴곡(plantar flexion)의 제한이나 불안정을 보상할 수 있는 시상면에서 관절 운동이 일어나기 때문에 전방 착지 동작 시 COP의 결과가 정상군과 유사하게 나올 수 있다. Caulfield와 Garrett²⁷이 수행한 한발 착지의 운동학 관찰 연구에서는 착지 직전 CAI는 발목의 족저굴곡 각도가 정상군보다 감소하는데, 이를 무릎관절의 굽힘(flexion) 각도를 증가시켜서 보상한다고 보고하였다. 착지 시 발목, 무릎 엉덩관절을 함께 구부림으로써 하지에 전달되는 지면반력힘(ground reaction force)을 완화하는데, 이중 하나의 관절의 움직임이 부족하게 되면 인접한 다른 관절이 보상작용을 일으키게 된다. CAI의 운동학적 변경은 몸통과 하지의 착지 전략에도 영향을 미쳤을 수 있다. 운동 경험이 많거나 활동 수준이 높은 대상자의 경우 무릎관절과 엉덩관절 전략을 이용하여 발목 관절의 불안정성을 보상하여 착지하는 전략을 구현했을 가능성이

있다. 반대로 운동 경험이 부족한 환자의 경우 뻣뻣한 착지를 수행함으로써 균형 능력이 낮게 나타날 수도 있기 때문에 향후 연구에서는 운동 경험과 활동 수준이 착지 패턴과 균형 조절에 영향을 미치는지, 그리고 CAI와 상호작용하는지를 검사하는 연구가 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서 수행한 ROC curve 분석은 한발 서기 동작의 COP 거리(COV, 253.5 mm), 면적(COV, 40.5 mm²), 속도(COV, 12.7 mm/sec)와 측면 착지 동작에서는 COP 면적(COV, 302.5 mm²)만이 진단적으로 유의미한 결과를 보여주었다. 한발 서기 동작은 착지 동작에 비해 정적인 균형 능력을 측정하는 것임에도 불구하고 무릎관절을 완전히 펴고 엉덩관절의 중립 상태로 측정하여 다른 관절의 보상작용을 얻지 못하므로 발목관절의 불안정성을 보다 잘 반영한 것으로 판단된다. 한발 서기 동작에서 COP 거리와 면적, 스피드와 측면 착지 동작에서 COP 면적은 낮은 정확도를 나타내기 때문에 진단적으로 사용 시 다른 검사와 함께 사용하여야 할 것이다.

Hubbard 등²⁸은 선행연구에서 기계적 불안정성과 기능적 불안정성은 이분법적이지 않으며 두 불안정성 요소가 상호작용한다고 하였는데, 본 연구에서 보여진 결과는 이들의 주장과 일치한다고 볼 수 있다. CAI에서 나타나는 기계적 불안정성과 기능적 불안정성의 기여도를 비교하기는 어려우나, 구조적 안정성의 결여로 인해 발목관절의 움직임에 관여하는 근육과 고유수용성 감각이 더 필요할 것으로 생각된다. 따라서, 본 연구에서 보인 CAI의 감소된 정적 및 동적 균형 능력은 기계적 불안정성과 기능적 불안정성 요소가 상호작용하면서 더욱 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다. 추후 연구에서는 CAI 환자 중 기계적 불안정성과 기능적 불안정성에 따라 균형 능력이 다른지 확인하여 발목 불안정성에 대한 두 요소의 기여도를 확인할 필요가 있다.

본 연구에는 몇 가지 제한점이 있다. 첫 번째, 본 연구에서는 CAIT 설문지와 정형외과 전문의의 진단을 통해 CAI를 측정하였으나, 개인의 신체 체력 수준은 고려하지 못했다. 두 번째, 본 연구의 CAI는 모두 수술을 고려하는 환자를 대상으로 측정하였다. 따라서, 정적 및 동적 균형 능력 검사 시 추가적인 부상의 위험으로 인해 검사는 한 번씩만 수행되어, 검사 결과 내 신뢰도와 타당도를 평가할 수 없었다. 세 번째, 본 연구에서 사용된 CAIT 설문지는 타당도와 신뢰도가 검증되었으나, CAIT 설문지 외에 다른 자가 보고 설문지를 고려하지 못하였다. 따라서 추후 연구에서는 정형외과 전문의의 진단과 함께 여러 설문지를 통해 상호 보완적인 문항으로 구성할 필요가 있다.

결론적으로, CAI는 정상군보다 높은 발목관절의 이완성을 가져 발목의 기계적 불안정성을 갖는다는 것을 확인하였다. 정적

및 동적 균형 능력 검사 결과, 한발 서기 동작과 측면 착지 동작 시 CAI에서 정상군보다 COP의 넓은 면적을 보여 발목의 기능적 불안정성을 확인하였다. ROC curve 분석 결과, 한발 서기 동작과 측면 착지 동작은 CAI의 객관적 기능을 평가할 수 있는 진단적 의미를 가지고 있다. 그러므로 CAI를 진단할 때는 관절 이완성, 한발 서기, 착지 등의 검사를 통해 기계적 불안정성과 기능적 불안정성을 종합적으로 평가하고, 그 결과를 기반으로 균형 훈련, 수술 등 적용할 중재 전략을 결정하는 것이 바람직할 것이다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

ORCID

Dong Wook Lee <https://orcid.org/0000-0002-3918-6370>

Hyung Gyu Jeon <https://orcid.org/0000-0002-8782-5341>

Byung Hun Kim <https://orcid.org/0000-0001-6220-6774>

Sae Yong Lee <https://orcid.org/0000-0002-0526-3243>

Jin Su Kim <https://orcid.org/0000-0002-3954-5302>

Author Contributions

Conceptualization: DWL, BHK, JSK. Data curation, Investigation: DWL. Formal analysis: HGJ. Methodology: DWL, BHK. Project administration: SYL, JSK. Resources: JSK. Supervision: BHK, SYL, JSK. Validation, Visualization: HGJ. Writing-original draft: HGJ, BHK. Writing-review & editing: DWL, HGJ, SYL, JSK.

References

1. Doherty C, Delahunt E, Caulfield B, Hertel J, Ryan J, Bleakley C. The incidence and prevalence of ankle sprain injury: a systematic review and meta-analysis of prospective epidemiological studies. *Sports Med* 2014;44:123-40.
2. Roos KG, Kerr ZY, Mauntel TC, Djoko A, Dompier TP, Wikstrom EA. The epidemiology of lateral ligament complex ankle sprains in National Collegiate Athletic Association sports. *Am J Sports Med* 2017;45:201-209.
3. Gribble PA, Delahunt E, Bleakley CM, et al. Selection

- criteria for patients with chronic ankle instability in controlled research: a position statement of the International Ankle Consortium. *J Athl Train* 2014;49:121-7.
4. Hertel J, Corbett RO. An updated model of chronic ankle instability. *J Athl Train* 2019;54:572-88.
5. Hiller CE, Refshauge KM, Bundy AC, Herbert RD, Kilbreath SL. The Cumberland ankle instability tool: a report of validity and reliability testing. *Arch Phys Med Rehabil* 2006;87:1235-41.
6. Hertel J. Functional anatomy, pathomechanics, and pathophysiology of lateral ankle instability. *J Athl Train* 2002;37:364-75.
7. Li L, Gollhofer A, Lohrer H, Dorn-Lange N, Bonsignore G, Gehring D. Function of ankle ligaments for subtalar and talocrural joint stability during an inversion movement: an in vitro study. *J Foot Ankle Res* 2019;12:16.
8. Tropp H. Commentary: functional ankle instability revisited. *J Athl Train* 2002;37:512-5.
9. Thompson C, Schabrun S, Romero R, Bialocerkowski A, van Dieen J, Marshall P. Factors contributing to chronic ankle instability: a systematic review and meta-analysis of systematic reviews. *Sports Med* 2018;48:189-205.
10. Kim KM, Ingersoll CD, Hertel J. Altered postural modulation of Hoffmann reflex in the soleus and fibularis longus associated with chronic ankle instability. *J Electromyogr Kinesiol* 2012;22:997-1002.
11. McKeon PO, Hertel J. Systematic review of postural control and lateral ankle instability, part I: can deficits be detected with instrumented testing. *J Athl Train* 2008;43:293-304.
12. Gribble PA, Hertel J, Plisky P. Using the Star Excursion Balance Test to assess dynamic postural-control deficits and outcomes in lower extremity injury: a literature and systematic review. *J Athl Train* 2012;47:339-57.
13. Ross SE, Guskiewicz KM. Examination of static and dynamic postural stability in individuals with functionally stable and unstable ankles. *Clin J Sport Med* 2004;14:332-8.
14. Ross SE, Guskiewicz KM, Yu B. Single-leg jump-landing stabilization times in subjects with functionally unstable ankles. *J Athl Train* 2005;40:298-304.
15. Son SJ, Kim H, Seeley MK, Hopkins JT. Movement strategies among groups of chronic ankle instability, copers, and controls. *Med Sci Sports Exerc* 2017;49:1649-61.
16. Docherty CL, Arnold BL, Zinder SM, Granata K, Gansneder BM. Relationship between two proprioceptive measures and stiffness at the ankle. *J Electromyogr Kinesiol* 2004;14:317-24.
17. Terrier R, Rose-Dulcina K, Toschi B, Forestier N. Impaired control of weight bearing ankle inversion in subjects with chronic ankle instability. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2014;29:439-43.
18. Park ES, Seo SG, Lee HS. Correlation between chronic ankle instability and center of pressure using pedobarograph. *J Korean Foot Ankle Soc* 2020;24:14-8.
19. Lee KT, Lee YK, Choi BO. Results in stress test in the ankle stability of young men in Korea. *J Korean Foot Ankle Soc* 2008;12:36-40.
20. Ko J, Rosen AB, Brown CN. Cross-cultural adaptation and validation of the Korean version of the Cumberland Ankle Instability Tool. *Int J Sports Phys Ther* 2015;10:1007-14.
21. Attarian DE, McCrackin HJ, DeVito DP, McElhaney JH, Garrett WE Jr. Biomechanical characteristics of human ankle ligaments. *Foot Ankle* 1985;6:54-8.
22. Karlsson J, Bergsten T, Lansinger O, Peterson L. Reconstruction of the lateral ligaments of the ankle for chronic lateral instability. *J Bone Joint Surg Am* 1988;70:581-8.
23. Franz DP, Huurnink A, de Boode VA, Kingma I, van Dieën JH. Time series of ground reaction forces following a single leg drop jump landing in elite youth soccer players consist of four distinct phases. *Gait Posture* 2016;50:137-44.
24. Tripepi G, Jager KJ, Dekker FW, Zoccali C. Linear and logistic regression analysis. *Kidney Int* 2008;73: 806-10.
25. Mandrekar JN. Receiver operating characteristic curve in diagnostic test assessment. *J Thorac Oncol* 2010;5:1315-6.
26. Ozeki S, Kitaoka H, Uchiyama E, Luo ZP, Kaufman K, An KN. Ankle ligament tensile forces at the end points of passive circumferential rotating motion of the ankle and subtalar joint complex. *Foot Ankle Int* 2006;27:965-9.
27. Caulfield BM, Garrett M. Functional instability of the ankle: differences in patterns of ankle and knee movement prior to and post landing in a single leg jump. *Int J Sports Med* 2002;23:64-8.
28. Hubbard TJ, Kramer LC, Denegar CR, Hertel J. Correlations among multiple measures of functional and mechanical instability in subjects with chronic ankle instability. *J Athl Train* 2007;42:361-6.