

# Differences in Dynamic Postural Control Ability during Landing Single-leg Forward Jumps in Adult Women With and Without Chronic Ankle Instability

## 성인 여성의 만성 발목 불안정성 유무에 따른 한발 전방 점프 착지 시 동적 자세 조절 능력 차이 분석

Hyeongdo Jeong<sup>1,2,5</sup>, Hyungwoo Lee<sup>1,2,5</sup>, Kyoungkyu Jeon<sup>1,2,3,4,5</sup>

<sup>1</sup>Division of Sport Science, Incheon National University, Incheon, South Korea

<sup>2</sup>Department of Human Movement Science, Incheon National University, Incheon, South Korea

<sup>3</sup>Health Promotion Center, Incheon National University, Incheon, South Korea

<sup>4</sup>Sport Science Institute, Incheon National University, Incheon, South Korea

<sup>5</sup>Functional Rehabilitation Biomechanics Laboratory, Incheon National University, Incheon, South Korea

Received : 21 February 2025

Revised : 20 March 2025

Accepted : 20 March 2025

### Corresponding Author

Kyounghyu Jeon

Division of Sport Science/  
Department of Human  
Movement Science/ Health  
Promotion Center/ Functional  
Rehabilitation Biomechanics  
Laboratory/ Sport Science  
Institute, Incheon National  
University, 119 Academy-ro,  
Yeonsu-gu, Incheon, 22012,  
South Korea

Email : jeonkay@inu.ac.kr

**Objective:** The purpose of this study is to analyze the kinematic and kinetic variables of the lower limb during single-leg forward jump landing in adult women with and without chronic ankle instability (CAI) and to examine its effects on postural stability.

**Method:** Participants were classified into the CAI group (n = 17, mean age 22.18 ± 2.38 years, mean height 161.97 ± 3.66 cm, mean weight 54.30 ± 8.15 kg) and the control group (n = 17, mean age 23.24 ± 2.97 years, mean height 164.32 ± 6.07 cm, mean weight 55.29 ± 6.38 kg). Participants performed a forward jump using the non-dominant foot and landed on the dominant foot. The study measured lower limb joint angles, the center of mass (COM) and center of pressure (COP) inclination angles of the pelvis, loading rate, and leg stiffness. An independent *t*-test was used to compare postural control ability between the two groups, with the significance level set at  $\alpha < .05$ .

**Results:** Compared to the control group, the CAI group exhibited a significantly smaller hip abduction angle and a significantly greater hip internal rotation angle. The knee flexion angle was larger, and the ankle dorsiflexion and inversion angles were significantly greater in the CAI group. In terms of the COM-COP inclination angle of the pelvis, the anterior-posterior inclination angle was significantly smaller in the CAI group.

**Conclusion:** Differences were observed only in kinematic variables during movement, whereas no significant differences were found in loading rate and leg stiffness. This suggests that the two groups employ different postural control strategies to absorb the same impact forces and recover a stable posture.

**Keywords:** Chronic ankle instability, Forward jump landing, COM-COP inclination angle, Loading rate, Leg stiffness

## INTRODUCTION

일반적으로 가장 흔한 부상 중 하나인 외측 발목 염좌 (lateral ankle sprain, LAS)는 유병률 및 재발률이 높고 지속적인 증상과 자가 보고 형태의 발목 기능 저하 등의 후유증으로 인해 공중 보건 문제를 야기하며, 최대 약 40%는 만성 발목 불안정성(chronic ankle instability, CAI)으로 진행된다(Fraser et al., 2020; Hertel & Corbett, 2019). CAI는 반복적인 발목 염좌, 빈번한 흔들림(giving way)에 대한 현상과 지각 그리고 통증, 부종, 움직임의 제한, 근력 약화, 자가 보고 형태의 발목 기능 저하 등의 특징을 가지고 있다(Hertel & Corbett, 2019).

CAI의 대표적인 특성인 반복적인 염좌는 중추신경계(central nervous system, CNS)의 감각 운동(sensorimotor) 정보 통합과정의 변형을 초래하며, 이는 신경 반사 지연(delayed neural reflex), 하지 자세 제어 근육의 흥분성 감소, 엉덩 관절 주요 근육의 과도한 사용을 발생시킨다(Terada, Johnson, Kosik & Gribble, 2019; Xue et al., 2024). 이러한 결과로 감소된 고유 수용성 감각은 과도한 발목 관절의 사용으로 상대적으로 균형 조절 능력이 저하되어 관절 운동 형상학이 변화된다(Chan, Sim, Gan & Abd Razak, 2022). 이로 인해 발목 관절뿐만 아니라 다른 하지 관절에도 영향을 미쳐 전체 하지 움직임의 변화를 유발한다(Lin, Houtenbos, Lu, Mayer & Wippert, 2021). 변화된 하지 움직임 패턴은 반복적인 LAS와 흔들림(giving way)을 유발하고 결과적으로 발목 관절의 구조적 문제를 발생시켜 부상의 원인이 된다(Ardakani, Wikstrom, Minoonejad, Rajabi & Sharifnezhad, 2019; Kawahara et al., 2022; Simpson et al., 2022). 선행연구에서 점프, 착지 등의 기능적 운동 과제 중 CAI 그룹은 엉덩 관절을 더 많이 사용하는 경향을 보이고, 관상면에서의 발목 관절 운동학에서 더 큰 변동성을 보이는 것으로 보고되고 있는데(Yu, Mei, Xiang, Fernandez & Gu, 2022), 이러한 CAI의 특성은 근골격계와 신경계가 적절한 때에 정확하게 조절되어야 하는 자세 조절 능력의 저하와 관련이 있다(Hu, Feng, Li, Liao & Wang, 2024; Xue et al., 2024).

자세 조절 능력을 평가한 선행연구들을 살펴보면, 정적 단일 하지 자세에서 압력 중심(center of pressure, COP)의 궤적, 전후측 및 좌우측 방향의 경계시간(time to boundary), 부하율 등을 통해 충격 흡수 패턴을 분석하였다(Jeon & Park, 2021; Xue et al., 2024). 현재까지 점프 착지와 같은 동작을 통해 발목에 큰 충격 부하를 가하는 동작 과제로 LAS의 메커니즘 분석(Chan et al., 2022)과 COP 변위의 차이를 통한 안정성 평가(Nozu, Johnson, Takemura & Shields, 2021), 보행에서 안정성을 평가하기 위해 질량 중심(center of mass, COM)과 COP를 살펴본 연구 등은 상당부분 수행되었으나, 점프 착지 시 나타나는 기능적 움직임에 대해 운동학적 변인과 함께 살펴본 연구는 미비한 실정이다(MacMillan, Olivier, Viljoen, Janse

van Rensburg & Sewry, 2024).

다양한 선행연구에서 남성에 비해 여성의 CAI 유병률과 발목 염좌 발생률이 약 2배 높았고, 이는 운동선수를 대상으로 비교했을 때도 비슷한 결과가 나타났다(Doherty et al., 2014; Herzog, Kerr, Marshall & Wikstrom, 2019). 여성은 남성에 비해 해부학적으로 발의 길이가 짧기 때문에 보행 및 달리기 시 안정된 동작 수행을 위한 운동학적 움직임을 유지하기 위해 더 큰 저측 굴곡의 움직임 범위와 힘이 필요한 경향이 있다. 또한, 여성은 호르몬의 변화로 인해 인대의 인장 강도(tensile strength)의 감소, 근육의 이완(laxity) 운동 단위 동원률 및 신경근 조절 능력 감소를 초래하기 때문이다(Talia, Busuttill, Kendal & Brown, 2024).

이에 본 연구는 성인 여성을 대상으로 CAI의 유무에 따른 한발 전방 장애물 점프 착지 후 자세를 회복하는 동작에서 하지 관절의 운동학적, 운동역학적 변인과 골반의 COM과 COP의 기울기 각도를 함께 평가해 동적 자세 조절 능력을 비교 분석하고자 한다. 이를 통해 CAI를 개선하는데 필요한 재활 운동 개발에 기초적 자료를 제공하고자 한다.

## METHOD

### 1. 연구 대상

본 연구는 인천 대학교 기관생명윤리위원회(INUIRB No. 7007971-202012-003A)에 승인을 받은 후 진행되었다. 모든 연구에 앞서 대상자들에게 연구 목적과 절차에 대해 상세히 설명하고, 자발적 동의를 얻은 후 진행되었다. 대상자는 20대 성인 여성으로 CAI 그룹 17명, 정상 그룹 17명으로 총 34명을 모집하였다. CAI 그룹은 한국어판 CAIT (cumberland ankle instability tool)에서 24점 이하(Ko, Rosen & Brown, 2015), 한국어판 IdFAI (identification of functional ankle instability)에서 11점 이상의 점수를 모두 충족하는 성인 여성으로 선정하였다(Gurav, Ganu & Panhale, 2014). 정상 그룹은 위의 두 설문지를 모두 충족하지 않는 성인 여성으로 선정하였다. CAI 그룹의 경우, CAI 보유 하지와 주발의 방향은 일치하였다. 모든 대상자는 최근 6개월 이내 발목 염좌를 포함한 하지 주요 관절에 대한 부상, 질환, 질병 또는 수술이력이 있는 경우 제외하였다. 대상자 특성은 다음과 같다(Table 1).

### 2. 실험 절차

모든 대상자들은 CAI 유무에 따른 안정성 및 생체역학적 변인을 측정하기 위해 1대의 지면반력기(9260AA, Kistler, Switzerland, Sampling rate: 1,440 Hz)와 8대의 적외선카메라(6 Eagle & 2 Raptor-E camera, Motion Analysis Corp., USA,

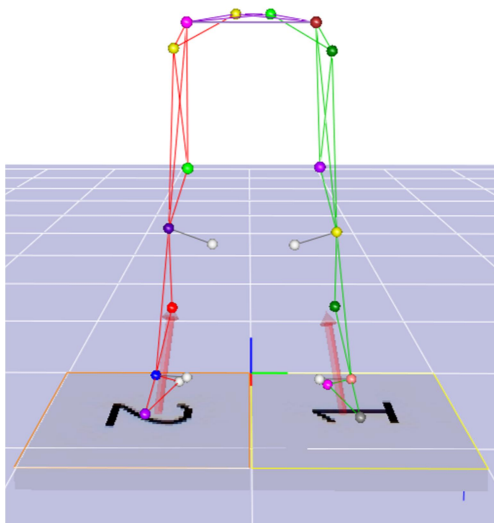
**Table 1.** Participant demographics information

	CAI	Control	<i>t</i>	<i>p</i>
Age (years)	22.18±2.38	23.24±2.97	-1.148	0.260
Height (cm)	161.97±3.66	164.32±6.07	-1.366	0.182
Mass (kg)	54.30±8.15	55.29±6.38	-0.394	0.697
CAIT	15.59±4.40	25.53±3.20	-7.528	0.0001***
IdFAI	20.29±6.15	4.41±5.12	8.179	0.0001***

Values are mean ± SD. Significant between-group differences at \*\*\* $p < 0.001$

Abbreviations: CAI, chronic ankle instability; CAIT, Cumberland ankle instability tool; IDFAI, identification of functional ankle instability

Sampling rate: 120 frames/sec)를 사용하였다. 반사 마커는 Helen Hayes markers set을 참고하여 양측 하지 주요 관절을 중심으로 전상장골극(anterior superior iliac spine), 후상장골극 (posterior superior iliac spine), 대전자(greater trochanter), 대퇴(femur), 내외측 대퇴상과(medial and lateral epicondyle of femur), 하퇴(tibia), 내외측 복사뼈(medial and lateralis of malleolus), 두 번째 중족골(2<sup>nd</sup> metatarsal), 종골 결절(calcaneal tuberosity)에 총 22개 반사 마커를 부착하였다(Kadaba et al., 1989) (Figure 1).

**Figure 1.** Modified Helen Hayes Marker Set

모든 대상자들은 측정 전 30분의 준비운동을 실시하고 일상생활에서 나타나는 전방 움직임 후 안정된 자세를 회복하는 동작을 만들어 내기 위해 전방 장애물 한발 점프를 수행하였다(Sell, 2012). 대상자는 지면반력기 중앙으로부터 신장

의 40% 거리에서 점프 동작을 수행했으며, 대상자와 대상자 사이의 중간 지점에 30 cm의 허들을 설치하였다(Heebner et al., 2017; Sell, 2012). 대상자는 비주발로 점프하여 장애물을 넘고 주발로 착지하였고, 착지 후 정적 상태의 자세 회복 및 유지를 위해 착지 후 주발이 완전히 지면에 닿아 있는 상태로 10초간 유지했다. 총 3번의 성공적인 동작을 수행을 통해 수집한 데이터의 평균을 분석에 사용하였다.

### 3. 데이터 처리

반사 마커 위치좌표 및 지면 반력 원자료(raw data)는 아날로그-디지털 컨버터(A/D converter, NI USB-6218, National Instruments, Hungary)를 통해 동기화하였다. 동작 중 수집된 마커 위치좌표는 저역 통과 필터링(Butterworth Low-Pass filtering 10 Hz)을 적용하고 오차 범위는 0.3 mm 이내로 설정하여 노이즈를 제거하였다. 점프 착지 후 초기 접촉 시점, 최대 수직 지면 반력 시점에서 분석을 하였으며, 초기 접촉 시점의 경우 수직 지면 반력 값이 10 N을 초과한 시점으로 정의하였다. 하지 관절의 시상면, 관상면, 수평면에서의 운동학적 데이터와 안정성 변인 계산을 위해 Visual 3D software (C-Motion, USA)를 사용하였다. 운동학적 데이터의 경우, 시상면에서의 굴곡과 저축 굴곡 각도, 관상면에서의 외전, 외반, 내반 각도, 그리고 수평면에서의 내회전 각도를 양의 값으로 정의하였다.

골반의 COM-COP 기울기 각도는 압력 중심 위치좌표에 고정된 수직선과 골반의 질량 중심과 압력 중심 위치좌표를 연결한 선 사이의 기울기 각도로 정의하였다. 부하율은 피험자가 한발 장애물 점프 중 발생한 최대 수직 지면 반력 값을 초기 접촉 시점부터 최대 수직 지면 반력 값이 발생한 시점까지 도달한 시간으로 나누어 계산하였다(Bauer, Fuchs, Smith & Snow, 2001). 부하율은 착지 시 발생한 충격력이 신체에 전달될 때 나타나는 속도이며, 높은 부하율은 각 하지 관절에

과도한 부하를 발생시켜 부상 발생에 기여한다. 하지 강성은 최대 수직 지면 반력 값에 도달하는 시점까지의 골반 질량 중심의 수직 변위 변화 비율을 산출했다. 하지 강성 값이 높을수록 최대 수직 지면 반력 값에 도달하는 시점까지 골반의 수직 변위가 적게 움직인 것이며, 이는 착지 시 하지 관절의 움직임이 경직된 패턴을 나타낸 것을 의미한다.

#### 4. 통계 처리

계산된 모든 변인은 SPSS ver. 28.0 (IBM, USA) 통계 프로그램을 사용하여 모든 변인의 평균과 표준편차를 산출하였다.

모든 변인에 대해 정규성 검정(Shapiro-Wilk test)을 실시하였으며, 시점 별 운동학적 및 운동역학적 변인의 차이를 검정하기 위해 독립 표본 *t*-검정(Independent *t*-test)을 사용하였다. 모든 통계적 유의 수준은  $\alpha < .05$ 로 설정하였다.

## RESULTS

### 1. 엉덩 관절 각도

엉덩 관절의 운동학적 변인 결과, 굴곡 각도는 그룹 간 유의한 차이는 나타나지 않았다. 엉덩 관절의 외전 각도는 IC

**Table 2.** Hip kinematic variables (°)

Time	Kinematic variable	CAI	Control	<i>t</i>	<i>p</i>
IC	Flexion	35.64±7.50	34.58±8.02	0.399	0.693
	Abduction	5.19±3.96	8.27±3.29	-2.461	0.019*
	Internal rotation	0.64±8.52	-6.89±8.14	2.635	0.013*
Peak vGRF	Flexion	37.98±7.52	35.64±7.82	0.889	0.381
	Abduction	3.90±4.25	7.86±3.95	-2.809	0.008**
	Internal rotation	-1.60±8.89	-8.30±6.48	2.511	0.017*
MKF	Flexion	46.88±7.94	44.49±8.19	0.864	0.394
	Abduction	-3.62±4.58	-1.33±6.00	-1.252	0.220
	Internal rotation	-5.31±7.70	-9.14±6.80	1.540	0.133

Values are mean ± SD. Significant between group differences at \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$

Abbreviations: IC, initial contact; vGRF, vertical ground reaction force; MKF, maximum knee flexion; CAI, chronic ankle instability

**Table 3.** Knee kinematic variables (°)

Time	Kinematic variable	CAI	Control	<i>t</i>	<i>p</i>
IC	Flexion	15.64±3.62	12.77±3.56	2.327	0.026*
	Valgus	2.55±2.68	0.94±2.46	1.815	0.079
	Internal rotation	-22.38±7.37	-18.04±5.30	-1.970	0.058
Peak vGRF	Flexion	28.85±6.00	24.48±5.38	2.239	0.032*
	Valgus	2.54±4.17	0.74±2.40	1.542	0.133
	Internal rotation	-13.75±8.31	-11.96±6.66	-0.693	0.493
MKF	Flexion	49.74±4.05	46.68±6.89	1.578	0.125
	Valgus	-1.43±5.86	-3.66±2.81	1.418	0.166
	Internal rotation	-3.72±5.86	-3.31±7.07	-0.187	0.853

Values are mean ± SD. Significant between-group differences at \* $p < 0.05$

Abbreviations: IC, initial contact; vGRF, vertical ground reaction force; MKF, maximum knee flexion; CAI, chronic ankle instability

(initial contact) 시점에서 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 유의하게 작았으며( $p = 0.019$ ), Peak vGRF (vertical ground reaction force) 시점에서 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 유의하게 작았지만( $p = 0.008$ ), MKF (maximum knee flexion) 시점에서는 그룹 간 유의한 차이는 나타나지 않았다. 엉덩관절의 내회전 각도는 IC 시점에서 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 유의하게 크게 나타났으며( $p = 0.013$ ), Peak vGRF 시점에서 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 유의하게 컸지만( $p = 0.017$ ), MKF 시점에서는 그룹 간 유의한 차이는 나타나지 않았다(Table 2).

## 2. 무릎 관절 각도

무릎 관절의 운동학적 변인 결과, 굴곡 각도는 IC 시점( $p = 0.026$ )과 Peak vGRF 시점( $p = 0.032$ )에서 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 유의하게 더 크게 나타났으나, MKF 시점에서는

그룹 간 유의한 차이가 나타나지 않았다. 무릎 관절의 외반 및 내회전 각도는 그룹 간 유의한 차이는 나타나지 않았다(Table 3).

## 3. 발목 관절 각도

발목 관절의 운동학적 변인 결과, 배측 굴곡 각도는 IC 시점에서 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 유의하게 크게 나타났으며( $p = 0.039$ ), Peak vGRF 시점에서 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 유의하게 컸지만( $p = 0.043$ ), MKF에서는 그룹 간 유의한 차이가 나타나지 않았다. 발목 관절의 내반 각도 결과, CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 IC 시점( $p = 0.003$ ), Peak vGRF 시점( $p = 0.011$ ) 그리고 MKF 시점에서( $p = 0.040$ ) 유의하게 크게 나타났다. 발목 관절의 내회전 각도는 그룹 간 유의한 차이는 나타나지 않았다(Table 4).

**Table 4.** Ankle kinematic variables (°)

Time	Kinematic variable	CAI	Control	<i>t</i>	<i>p</i>
IC	Dorsiflexion	-39.46±3.37	-42.10±3.79	2.148	0.039*
	Inversion	13.16±4.31	8.59±3.83	3.266	0.003**
	Internal rotation	5.92±3.77	6.21±3.99	-0.222	0.826
Peak vGRF	Dorsiflexion	-19.11±5.47	-22.73±4.49	2.110	0.043*
	Inversion	14.43±3.51	11.04±3.79	2.710	0.011*
	Internal rotation	2.67±4.97	4.83±5.83	-1.162	0.254
MKF	Dorsiflexion	0.54±3.08	-2.04±4.87	1.841	0.075
	Inversion	14.78±3.47	12.07±3.90	2.136	0.040*
	Internal rotation	-2.33±5.68	0.18±7.84	-1.068	0.294

Values are mean ± SD. Significant between-group differences at \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$

Abbreviations: IC, initial contact; vGRF, vertical ground reaction force; MKF, maximum knee flexion; CAI, chronic ankle instability

**Table 5.** COM-COP angle (°)

Time	Direction	CAI	Control	<i>t</i>	<i>p</i>
IC	AP	-10.73±2.26	-13.11±2.77	2.737	0.010*
	ML	9.61±6.74	9.47±6.11	0.062	0.951
Peak vGRF	AP	-8.10±2.18	-10.33±2.69	2.644	0.013*
	ML	10.11±6.88	9.85±6.23	0.117	0.907
MKF	AP	-5.02±1.94	-6.42±2.24	1.941	0.061
	ML	10.87±7.01	10.90±6.25	-0.015	0.988

Values are mean ± SD. Significant between-group differences at \* $p < 0.05$

Abbreviations: IC, initial contact; vGRF, vertical ground reaction force; MKF, maximum knee flexion; CAI, chronic ankle instability

Table 6. Kinetic variables

Time	CAI	Control	<i>t</i>	<i>p</i>
Loading rate (N/ms)	31.89±12.22	31.61±13.83	0.064	0.950
Leg stiffness (N/cm)	278.33±103.56	343.27±145.45	-1.500	0.143

Values are mean ± SD. Abbreviations: CAI, chronic ankle instability

#### 4. COM-COP 기울기 각도

COM-COP 기울기 각도 결과, 전후측 COM-COP 기울기 각도에서 IC 시점( $p = 0.010$ )과 Peak vGRF 시점( $p = 0.013$ )에서 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 유의하게 작았지만, MKF 시점에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 내외측 COM-COP 기울기 각도는 그룹 간 유의한 차이는 나타나지 않았다 (Table 5).

#### 5. 운동역학적 변인

운동역학적 변인 결과, 부하율과 하지 강성에서 그룹 간 유의한 차이가 나타나지 않았다 (Table 6).

### DISCUSSION

본 연구는 성인 여성을 CAI 유무에 따라 구분하여 한발 전방 점프 착지 시 나타나는 하지 관절의 운동학적 및 운동역학적 변인, 질량 중심과 압력 중심 사이의 기울기 각도와 자세 안정성을 위한 시간 차이를 함께 비교하여 CAI가 자세 조절 안정성에 미치는 영향을 분석하고, CAI를 개선하는데 필요한 재활 운동 개발에 기초적 자료를 제공하고자 했다.

본 연구 결과, 모든 시점에서 엉덩 관절의 굴곡 각도는 그룹 간 유의한 차이가 나타나지 않았다. 본 연구에서 유의한 차이가 나지 않은 것은 다른 선행연구에서 보고한 것과 유사하게 본 연구의 장애물을 넘는 점프 과제가 드롭-랜딩과 같은 동작에 비해 충격 흡수 시 엉덩 관절의 충분한 움직임이 요구되는 수직적 높이가 부족했기 때문으로 판단된다 (Gribble & Robinson, 2009). 초기 접착 및 최대 수직 지면 반력 시점에서 엉덩 관절의 외전 각도는 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 유의하게 작았고, 엉덩 관절의 내회전 각도와 발목 관절의 내번 각도는 유의하게 크게 나타났다. 정상 그룹에서 나타난 엉덩 관절의 외전 각도의 증가는 중둔근의 효율적인 활성을 위한 적절한 길이 형성에 기여하여 착지와 같은 움직임을 안정적으로 수행할 수 있다고 밝혔다 (Pappas, Hagins, Sheikhzadeh, Nordin & Rose, 2007). 하지만 엉덩 관절의 외전 각도 감소와 내회전 각도의 증가는 경골의 외회전과 함께 무릎 관절의

외반 각도를 증가시켜 전방십자인대 손상 발생 가능성을 높이며, 이는 여성에게서 나타나는 부상 유발 착지 패턴이다 (Voskanian, 2013). 따라서, CAI 그룹의 경우 중둔근을 포함한 근위 관절 주변 근육의 효율적인 활성을 통한 착지 패턴을 형성하기 위해, 약화된 발목 관절 주변 근육의 강화가 필요한 것으로 생각된다.

LAS를 경험한 환자가 단일 하지 랜딩 시 발생하는 하중을 손상 경험이 있는 원위 관절보다 근위 관절에서 분산시키려는 전략을 사용하며 (Kim, Son, Seeley & Hopkins, 2019; Simpson et al., 2022), CAI가 있을 경우, 전방 및 랜딩 동작 시 지면 접촉 전과 착지 동작 중 엉덩 관절과 무릎 관절의 굴곡 각도를 더 크게 형성한다고 밝혔다 (Simpson et al., 2022). 본 연구에서도 IC 및 Peak vGRF 시점에서 무릎 관절의 굴곡 각도 및 발목 관절의 배측 굴곡 각도가 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 유의하게 크게 나타났으며, 전방 착지 움직임 수행 중 발생한 충격량을 분산시키기 위해 IC 및 Peak vGRF 시점에서 CAI 그룹의 발목 관절의 배측 굴곡 각도와 무릎 관절의 굴곡 각도를 더 크게 형성하여 착지한 것으로 추측된다 (Gribble & Robinson, 2009). 착지 시 더 큰 배측 굴곡 형성은 측면 인대가 손상될 가능성을 줄일 수 있기 때문에, CAI가 있는 그룹에서 발목 복합체의 보호를 위한 중추 패턴의 변화에 의한 것으로 해석할 수 있다 (Caulfield & Garrett, 2002; Han et al., 2022). 관상면 및 수평면 움직임에서는 유의한 차이가 나타나지 않았지만, 착지 시 해부학적 구조 등으로 인해 남성에게 비해 여성의 무릎 관절의 외반 각도가 더 증가하여 착지하는 패턴을 보이기 때문에 (Hewett, Myer & Ford, 2004; Pappas et al., 2007), 착지 시 무릎의 외반 각도 감소를 위한 기초적인 하지 근력 훈련이 필요하다.

IC 및 Peak vGRF 시점에서 발목 관절의 배측 굴곡 각도는 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 유의하게 크게 나타났다. 이는 착지 시 충분한 저측 굴곡 각도가 발생하지 않은 것을 의미한다. 이는 관상면 움직임으로부터 발목의 측면 인대를 보호하기 위해 거골 관절을 고정시키기 위한 전략으로 해석할 수 있다 (Simpson, Stewart, Macias, Chander & Knight, 2019). 그러나 이러한 전략은 시상면에서의 제한된 발목 관절의 움직임은 원위 관절의 충분하지 못한 충격 흡수로 인해 근위 관절의 굴곡 각도 및 근활성을 증가시키고 엉덩 관절 신전근

부상 등을 발생시킬 수 있다(Lee, Song & Shin, 2018). 정상적인 발목 관절은 착지 시 충격 흡수를 위해 시상면에서의 충분한 관절 가동 범위를 형성하며(Brown, Padua, Marshall & Guskiewicz, 2008), 초기 접촉 전 적절한 저축 굴곡 각도를 미리 형성하는 것이 중요하다. 미리 형성한 관절 가동 범위는 착지와 같은 동작에서 지면 접촉 시 최대 수직 지면 반력 시점에 도달하는 시간을 증가시키고, 결과적으로 신체에 발생하는 충격량을 효과적으로 감소시킬 수 있기 때문이다(Lee et al., 2018). 또한, 모든 시점에서 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 발목 관절에서 더 큰 내반 각도가 나타났다. 신체의 각 관절에 존재하는 동적 관절 강성(dynamic joint stiffness)은 근육, 힘줄, 근막, 인대 등 다양한 구조에 의해 결정되는데, 너무 작거나 크지 않은 적절한 강성이 존재할 때, 연조직 또는 뼈의 손상 없이 다양한 동작 수행이 가능하다(Lin, Chen & Lin, 2011). CAI는 흔들림(giving way)과 같은 특성에 의해 생체역학적 변화를 일으키고, 구조적으로는 외측 염좌의 반복에 의한 발목 관절의 내반 움직임을 제한하는 종비 인대와 같은 외측 인대의 손상 또는 약화를 발생시킨다(Ardakani et al., 2019; Doherty et al., 2015). 따라서 착지 시 발목 관절의 제어 능력 감소에 의해 내반 움직임이 증가하고, 이는 발목 관절의 주변 인대에 더 큰 하중을 발생시켜 추가적인 염좌 발생률을 증가시킨다(Delahunt, Monaghan & Caulfield, 2007).

IC 및 Peak vGRF 시점에서 CAI 그룹이 정상 그룹에 비해 전후축 COM-COP 기울기 각도가 유의하게 작았다. 점프 착지와 같은 동작 시 전방 움직임 중 발생하는 신체의 질량 중심 위치에 대응하여 하지 관절의 굴곡 각도를 형성하기 위한 하지 관절의 모멘트를 조절하여 신체의 압력 중심 위치가 결정된다(Shimokochi, Yong Lee, Shultz & Schmitz, 2009). 전방 점프 후 착지 시 발생하는 지면 반력 방향은 착지하는 발가락 뼈부터 신체의 질량 중심 방향으로 발생하며, 점프 후 착지 시 지면 반력 방향이 발목 및 무릎 관절이 이루는 선과 평행하게 발생한다. 이때, 안정된 자세 회복을 위해 각 하지 관절의 굴곡 각도를 형성해 신체의 무게 중심을 전방으로 이동시키는데, CAI 그룹은 착지 순간부터 전후축 COM-COP 기울기 각도를 수직에 가깝게 하여 착지한 것으로 보이며, IC 및 Peak vGRF 시점에서 유의하지 않지만 증가된 엉덩 관절의 굴곡 각도는 자세 회복을 위해 엉덩 관절의 신전 모멘트를 증가시킨 것으로 판단된다(Lee et al., 2018; Warrener, Tamai & Lieberman, 2021).

부하율과 하지 강성의 경우, 두 그룹 간 유의한 차이가 발생하지 않았다. 이는 그룹 간 무릎 관절과 발목 관절의 시상면 각도에서 유의한 차이가 나타났음에도 최대 수직 지면 반력 값과 최대 수직 지면 반력 값에 도달한 시간에서 차이가 발생하지 않았음을 의미한다. 전후축 COM-COP 기울기 각도는 동적 균형 능력의 주요 변인으로서 각도를 더 크게 증가

시켜 착지한 정상 그룹은 하지 관절의 시상면 움직임을 적극적으로 개입하지 않아도 전반적인 최대 수직 지면 반력을 분산시킬 수 있었던 것으로 생각된다(Choi, Sim & Mun, 2016). 신체가 상대적으로 수직에 가까운 자세로 착지한 CAI 그룹에서는 착지 시 안정된 착지를 위해 하지 관절의 각도를 더 크게 형성하였으며, 이러한 움직임 차이는 하지 관절 인대의 기계 수용체, 감각 운동 통합과정의 변화로 인해 신경근 제어 능력에 영향을 주어 나타난 것으로 생각된다(Dkhar, Kumar, Chandramohan & Jain, 2023; Richie, 2001). 정상 그룹에서는 발목 관절의 저축 굴곡 각도를 증가시켜 발생한 충격량을 적절하게 흡수한 것으로 판단되며, 이는 착지 시 각 하지 관절의 적절한 굴곡 움직임을 생성을 형성하여 효율적으로 착지한 것으로 볼 수 있다(Yu, Lin & Garrett, 2006). 또한 CAI 그룹의 무릎 관절에서 유의하지 않지만 증가된 외반 각도는 착지 시 무릎 관절에 필요한 적절한 관절 강성을 생성하지 못하고 불필요한 하지 관절의 움직임을 만들어 착지한 것으로 생각된다. 따라서 드롭-랜딩과 같은 착지 시 수직 방향으로 발생하는 지면 반력에 반응해 나타나는 착지 패턴과 비교하여(Caulfield & Garrett, 2004), 전방 점프 착지 시 후방으로 발생하는 지면 반력에 대해 두 그룹 간 하지 관절의 특정 움직임에서 유의한 차이가 나타난 것은 자세 조절을 위해 하지 관절에서 다른 착지 패턴을 보인 것으로 볼 수 있다.

## CONCLUSION

본 연구는 성인 여성을 대상으로 CAI의 유무에 따른 한발 전방 장애물 점프 착지 후 자세를 회복하는 동작에서 하지 관절의 운동학적, 운동역학적 변인과 골반의 COM과 COP의 기울기 각도를 함께 평가해 동적 자세 조절 능력을 비교하여 CAI 개선이 필요한 대상에게 필요한 운동 및 훈련에 대한 기초적 자료를 제공하는 목적이 있다. 전방 점프 착지 동작 중 그룹 간 하지 관절에서 운동학적 차이가 발생하였으며, CAI 그룹에서 전후축 COM-COP 기울기 각도가 유의하게 작았으나, 부하율과 하지 강성에서 차이가 나타나지 않았다. 결론적으로 신체에 발생한 충격량을 흡수하는 자세 조절 패턴에 차이가 발생한 것으로 볼 수 있다. 향후에는 다양한 점프 높이, 형태와 각 하지 근육의 근활성도 차이를 함께 보는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Incheon National University Research Grant in 2023 (2023-0005).

## REFERENCES

- Ardakani, M. K., Wikstrom, E. A., Minoonejad, H., Rajabi, R. & Sharifnezhad, A. (2019). Hop-stabilization training and landing biomechanics in athletes with chronic ankle instability: a randomized controlled trial. *Journal of Athletic Training*, *54*(12), 1296-1303.
- Bauer, J. J., Fuchs, R. K., Smith, G. A. & Snow, C. M. (2001). Quantifying force magnitude and loading rate from drop landings that induce osteogenesis. *Journal of Applied Biomechanics*, *17*(2), 142-152.
- Brown, C., Padua, D., Marshall, S. W. & Guskiewicz, K. (2008). Individuals with mechanical ankle instability exhibit different motion patterns than those with functional ankle instability and ankle sprain copers. *Clinical Biomechanics*, *23*(6), 822-831.
- Caulfield, B. & Garrett, M. (2002). Functional instability of the ankle: differences in patterns of ankle and knee movement prior to and post landing in a single leg jump. *International Journal of Sports Medicine*, *23*(01), 64-68.
- Caulfield, B. & Garrett, M. (2004). Changes in ground reaction force during jump landing in subjects with functional instability of the ankle joint. *Clinical Biomechanics*, *19*(6), 617-621.
- Chan, L. Y. T., Sim, Y. T. N., Gan, F. K. & Abd Razak, H. R. B. (2022). Effect of chronic ankle instability on lower extremity kinematics, dynamic postural stability, and muscle activity during unilateral jump-landing tasks: a systematic review and meta-analysis. *Physical Therapy in Sport*, *55*, 176-188.
- Choi, A., Sim, T. & Mun, J. H. (2016). Improved determination of dynamic balance using the centre of mass and centre of pressure inclination variables in a complete golf swing cycle. *Journal of Sports Sciences*, *34*(10), 906-914.
- Delahunt, E., Monaghan, K. & Caulfield, B. (2007). Ankle function during hopping in subjects with functional instability of the ankle joint. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *17*(6), 641-648.
- Dkhar, W., Kumar, S., Chandramohan, R. & Jain, P. (2023). A literature review on neuromuscular control training in chronic ankle instability for the prevention of lower limb injuries. *International Journal of Science and Research*, *12*(6), 278-283.
- Doherty, C., Bleakley, C., Hertel, J., Caulfield, B., Ryan, J. & Delahunt, E. (2015). Single-leg drop landing movement strategies 6 months following first-time acute lateral ankle sprain injury. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *25*(6), 806-817.
- Doherty, C., Delahunt, E., Caulfield, B., Hertel, J., Ryan, J. & Bleakley, C. (2014). The incidence and prevalence of ankle sprain injury: a systematic review and meta-analysis of prospective epidemiological studies. *Sports Medicine*, *44*, 123-140.
- Fraser, J. J., Koldenhoven, R. M., Jaffri, A. H., Park, J. S., Saliba, S. F., Hart, J. M. & Hertel, J. (2020). Foot impairments contribute to functional limitation in individuals with ankle sprain and chronic ankle instability. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, *28*(5), 1600-1610.
- Gribble, P. A. & Robinson, R. H. (2009). Alterations in knee kinematics and dynamic stability associated with chronic ankle instability. *Journal of Athletic Training*, *44*(4), 350-355.
- Gurav, R. S., Ganu, S. S. & Panhale, V. P. (2014). Reliability of the Identification of Functional Ankle Instability (IdFAI) scale across different age groups in adults. *North American Journal of Medical Sciences*, *6*(10), 516.
- Han, S., Son, S. J., Kim, H., Lee, H., Seeley, M. & Hopkins, T. (2022). Prelanding movement strategies among chronic ankle instability, copers, and control subjects. *Sports Biomechanics*, *21*(4), 391-407.
- Heebner, N. R., Rafferty, D. M., Wohleber, M. F., Simonson, A. J., Lovalekar, M., Reinert, A. & Sell, T. C. (2017). Landing kinematics and kinetics at the knee during different landing tasks. *Journal of Athletic Training*, *52*(12), 1101-1108.
- Hertel, J. & Corbett, R. O. (2019). An updated model of chronic ankle instability. *Journal of Athletic Training*, *54*(6), 572-588.
- Herzog, M. M., Kerr, Z. Y., Marshall, S. W. & Wikstrom, E. A. (2019). Epidemiology of ankle sprains and chronic ankle instability. *Journal of Athletic Training*, *54*(6), 603-610.
- Hewett, T. E., Myer, G. D. & Ford, K. R. (2004). Decrease in neuromuscular control about the knee with maturation in female athletes. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, *86*(8), 1601-1608.
- Hu, X., Feng, T., Li, P., Liao, J. & Wang, L. (2024). Bilateral sensorimotor impairments in individuals with unilateral chronic ankle instability: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine-Open*, *10*(1), 33.
- Jeon, K. & Park, J. (2021). Biomechanical characteristic on lower extremity with or without chronic ankle instability during double leg drop landing. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *31*(2), 113-118.



- Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H., Wootten, M., Gaine, J., Gorton, G. & Cochran, G. (1989). Repeatability of kinematic, kinetic, and electromyographic data in normal adult gait. *Journal of Orthopaedic Research*, 7(6), 849-860.
- Kawahara, D., Koshino, Y., Watanabe, K., Akimoto, M., Ishida, T., Kasahara, S., Samukawa, M. & Tohyama, H. (2022). Lower limb kinematics during single leg landing in three directions in individuals with chronic ankle instability. *Physical Therapy in Sport*, 57, 71-77.
- Kim, H., Son, S. J., Seeley, M. K. & Hopkins, J. T. (2019). Altered movement strategies during jump landing/cutting in patients with chronic ankle instability. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 29(8), 1130-1140.
- Ko, J., Rosen, A. B. & Brown, C. N. (2015). Cross-cultural adaptation and validation of the Korean version of the Cumberland Ankle Instability Tool. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 10(7), 1007-1014.
- Lee, J., Song, Y. & Shin, C. S. (2018). Effect of the sagittal ankle angle at initial contact on energy dissipation in the lower extremity joints during a single-leg landing. *Gait & Posture*, 62, 99-104.
- Lin, C. F., Chen, C. Y. & Lin, C. W. (2011). Dynamic ankle control in athletes with ankle instability during sports maneuvers. *The American Journal of Sports Medicine*, 39(9), 2007-2015.
- Lin, C. I., Houtenbos, S., Lu, Y. H., Mayer, F. & Wippert, P. M. (2021). The epidemiology of chronic ankle instability with perceived ankle instability-a systematic review. *Journal of Foot and Ankle Research*, 14(1), 41.
- MacMillan, C., Olivier, B., Viljoen, C., Janse van Rensburg, D. C. & Sewry, N. (2024). The association between menstrual cycle phase, menstrual irregularities, contraceptive use and musculoskeletal injury among female athletes: a scoping review. *Sports Medicine*, 54(10), 2515-2530.
- Nozu, S., Johnson, K. A., Takemura, M. & Shields, R. K. (2021). Disrupted somatosensory input alters postural control strategies during the Star Excursion Balance Test (SEBT) in healthy people. *Gait & Posture*, 90, 141-147.
- Pappas, E., Hagins, M., Sheikhzadeh, A., Nordin, M. & Rose, D. (2007). Biomechanical differences between unilateral and bilateral landings from a jump: gender differences. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 17(4), 263-268.
- Richie, D. H., Jr. (2001). Functional instability of the ankle and the role of neuromuscular control: a comprehensive review. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, 40(4), 240-251.
- Sell, T. C. (2012). An examination, correlation, and comparison of static and dynamic measures of postural stability in healthy, physically active adults. *Physical Therapy in Sport*, 13(2), 80-86.
- Shimokochi, Y., Yong Lee, S., Shultz, S. J. & Schmitz, R. J. (2009). The relationships among sagittal-plane lower extremity moments: implications for landing strategy in anterior cruciate ligament injury prevention. *Journal of Athletic Training*, 44(1), 33-38.
- Simpson, J. D., Koldenhoven, R. M., Wilson, S. J., Stewart, E. M., Turner, A. J., Chander, H. & Knight, A. C. (2022). Lower extremity joint kinematics of a simulated lateral ankle sprain after drop landings in participants with chronic ankle instability. *Sports Biomechanics*, 21(4), 428-446.
- Simpson, J. D., Stewart, E. M., Macias, D. M., Chander, H. & Knight, A. C. (2019). Individuals with chronic ankle instability exhibit dynamic postural stability deficits and altered unilateral landing biomechanics: A systematic review. *Physical Therapy in Sport*, 37, 210-219.
- Talia, A. J., Busuttill, N. A., Kendal, A. R. & Brown, R. (2024). Gender differences in foot and ankle sporting injuries: A systematic literature review. *The Foot*, 102122.
- Terada, M., Johnson, N., Kosik, K. & Gribble, P. (2019). Quantifying brain white matter microstructure of people with lateral ankle sprain. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 51(4), 640-646.
- Voskanian, N. (2013). ACL Injury prevention in female athletes: review of the literature and practical considerations in implementing an ACL prevention program. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 8(2), 158-163.
- Warrener, A., Tamai, R. & Lieberman, D. E. (2021). The effect of trunk flexion angle on lower limb mechanics during running. *Human Movement Science*, 78, 102817.
- Xue, X. A., Wang, Y., Xu, X., Li, H., Li, Q., Na, Y., Tao, W., Yu, L., Jin, Z. & Li, H. (2024). Postural control deficits during static single-leg stance in chronic ankle instability: a systematic review and meta-analysis. *Sports Health*, 16(1), 29-37.
- Yu, B., Lin, C. F. & Garrett, E. W. (2006). Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task. *Clinical Biomechanics*, 21(3), 297-305.
- Yu, P., Mei, Q., Xiang, L., Fernandez, J. & Gu, Y. (2022). Differences in the locomotion biomechanics and dynamic postural control between individuals with chronic ankle instability and copers: a systematic review. *Sports Biomechanics*, 21(4), 531-549.