

만성 발목 불안정성 환자의 족저 피부 감각 감소가 정적 자세 제어 전략에 미치는 영향

연세대학교 체육교육학과¹, 연세스포츠과학·운동의학센터²

강태규^{1,2}·김창영^{1,2}·김병훈^{1,2}·정희성^{1,2}·이성철^{1,2}·이세용^{1,2}

Effects of Reduced Plantar Cutaneous Sensation on Static Postural the Kinematic Strategy Control in Individuals with or without Chronic Ankle Instability

Tae Kyu Kang^{1,2}, Chang Young Kim^{1,2}, Byong Hun Kim^{1,2}, Hee Seong Jeong^{1,2}, Sung Cheol Lee^{1,2}, Sae Yong Lee^{1,2}

¹Department of Physical Education, Yonsei University, Seoul, ²Yonsei Institute of Sports Science and Exercise Medicine (YISSEM), Yonsei University, Seoul, Korea

Purpose: To investigate the alteration of lower extremity movement during maintaining balance test with their eyes closed in chronic ankle instability (CAI) patients compared to healthy group with and without plantar cutaneous sensation.

Methods: Ten healthy volunteers (age, 23.40±2.22 years; height, 165.42±6.67 cm; weight, 60.93±13.42 kg) and 10 CAI patients (age, 23.90±2.56 years; height, 166.89±10.50 cm; weight, 67.43±12.96 kg), were recruited. Subjects immersed both feet in an ice water for 10 minutes and performed three trials of a single-leg stance balance test with their eyes closed while standing on a force plate for 10 seconds.

Results: CAI group showed increased knee flexion, reduced knee external rotation, and hip internal rotation compared to the healthy group from single-limb stance with eyes closed after diminished plantar cutaneous sensation. However, there was no significant interaction between group and time.

Conclusion: These findings indicate that the postural kinematic analyses revealed that individuals with CAI used different strategy of controlling their lower extremities, which alters transverse plane motion of hip and knee compared to the healthy group in order to compensate for their ankle deficits after freezing the plantar cutaneous.

Keywords: Chronic ankle instability, Plantar cutaneous sensation, Static postural control

Received: April 9, 2019 Revised: July 26, 2019 Accepted: July 29, 2019

Correspondence: Sae Yong Lee

Department of Physical Education and Yonsei Institute of Sports Science and Exercise Medicine (YISSEM), Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea

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

*This research was partially supported by the Graduate School of Yonsei University Research Scholarship Grants in 2017.

Copyright ©2019 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

자세 제어(postural control)의 역할은 크게 중력에 대한 자세 및 균형의 유지와 외부세계에 대한 지각과 행동을 위한 신체 각 분절의 위치와 기준을 설정하기 위한 프레임으로 나누어진다¹. 자세 제어 능력은 외부 환경의 변화나 위험한 상황에서 부터 신체를 보호하기 위해 매우 중요한 능력이라고 할 수 있다. 자세 제어와 관련된 선행 연구들에서는 자세 제어 능력의 저하와 발목 염좌의 발생이 연관이 있다고 하였으며², 특히 만성 발목 불안정성 환자들(chronic ankle instability [CAI])과 관련된 자세 제어 능력의 저하가 심각한 문제라고 보고 하였다³. 외측 발목 염좌는 운동 참여 시 발의 과도한 내반 움직임으로 인해 발목 외측에 외상을 입는 가장 빈번한 정형외과 상해 중 하나라고 보고 하였으며⁴, 발목 염좌의 발생은 발목 근육의 약화 뿐만 아니라 주변 신경 조직의 손상으로 인해 발목의 동작과 관련된 기능이 저하되어 재발성 발목 염좌의 위험 인자가 되어 결국엔 만성 발목 불안정성 환자로의 발전과 관련한 위험 요인이라고 하였다⁵. 만성 발목 불안정성은 첫 번째 발목 염좌 부상 후 관리 소홀, 방치 및 재활운동의 부족 등 여러 이유들로 인한 지속적인 발목 염좌의 발생으로 발목 관절을 지탱하는 인대와 신경조직들의 손상으로 통증이 만성적으로 나타나는 증상을 의미하며³, 최초 부상 후 만성 발목 불안정성 환자로 발전하는 경우는 약 31%~40%나 된다고 하였다⁶.

만성 발목 불안정성 환자들의 고유수용기감각 및 자세 제어 능력의 손실⁷은 발목의 고유수용기감각과 신경근의 손상으로 인해 자세 조절 능력이 감소되어 나타나는 현상이며, 특히 한발로 서있는 상태와 같이 고도의 균형능력을 요구하는 상황에서 더 큰 어려움을 겪는다고 보고하고 있다³. 만성 발목 불안정성 환자들의 자세 제어 능력 감소의 원인과 관련하여 발목 염좌의 발생은 발목 외측부위에 위치한 감각기관들의 손상을 유발하고 이는 구심성 정보의 손실로 이어져 감각정보의 손실이 발생하고 이에 따라 다른 보상 전략을 사용한다고 알려져 있으며, CAI 환자들은 발바닥 피부 감각으로부터 오는 구심성 정보의 활용과 발바닥 내재근의 활용, 그리고 근위부 전략 등의 활용을 통해 불안정성을 감소시키거나 자세 제어를 한다고 하였다^{8,9}. 자세 제어와 관련하여 과제의 난이도에 따라 사용하는 전략에 차이가 발생하며, 과제의 난이도가 상승될수록 발목만 관여된 움직임이 아닌 근위 분절의 사용이 증가한다고 하였다¹⁰. 또한 발목관절의 사용에 문제가 발생하거나 균형 능력의 손실이 있는 사람들이 한발로 서 있을 때, 고관절 전략과 같은 근위 보상전략을 사용하여 균형을 유지한다고 하였다¹⁰.

이처럼 과제의 난이도가 어려워지면 균형 보상을 위하여 발목의 의존도를 감소시키고 근위부 고관절 전략의 사용을 증가하는 결과를 일으킬 수 있다고 보고하고 있다.

발바닥 피부 기계 수용체는 지지하는 표면과 직접적인 상호작용을 통해 자세 제어의 유지에 매우 중요한 역할을 담당하며¹¹, 중추신경계에 감각정보를 제공하는 주요 기관으로 신체의 이동, 발바닥 감각정보, 압력분포 및 관절의 부하 등의 정보를 제공한다고 하였다¹². 최근 연구에서 CAI를 가진 사람들의 발바닥 피부 감각 수용체의 임계값이 증가했고 이러한 결함은 자세 제어와 상관관계가 있다는 것을 보여주었다. 따라서 CAI를 가진 사람은 부상 당하지 않은 대조군에 비해 발바닥에 있는 감각 기능의 저하가 있을 수 있다고 보고 하였다¹³. 발바닥 피부감각 저하 시 발바닥 감각 수용기의 감소된 정보는 자세조절에 부정적인 영향을 주며, 감소된 정보를 보상받기 위해 근건 수용기와 같은 기관의 정보에 더욱 의존하게 된다고 하였다¹⁴. 이처럼 발바닥 피부 수용체가 자세 조절의 유지에 실질적으로 기여한다고 제안되었지만, 그 역할의 정도는 불분명하다고 볼 수 있다^{15,16}. 앞서 언급하였듯이 신체의 움직임 수행에 있어 큰 간섭을 줄 수 있는 발목관절의 근육 약화 또는 관절가동범위 제한은 이를 해결하기 위한 원위부의 움직임의 증가로 이어져 엉덩이와 몸통의 움직임이 크게 발생시킬 수 있다고 하였다¹⁷. 또한 Tropp과 Odenrick의 연구¹⁸에 따르면 손상된 발목을 가진 사람들의 경우 한발로 자세 제어에 어려움이 있을 때 엉덩이 전략을 사용한다고 하였는데, 이는 무릎과 엉덩이 관절의 움직임이 증가하고 상체를 앞부분으로 기울이는 것과 같이 근위부 움직임의 증가를 이용한 자세조절 전략을 확인할 수 있다고 하였다. 즉, 과제의 난이도에 따라 자세 제어의 불안정성을 보상하기 위해 발목보다 근위 쪽(무릎, 엉덩이)의 움직임을 통해 과제를 수행한다는 것을 알 수 있다^{10,19}. 이와 같이 자세 제어 및 균형능력은 발바닥 피부 감각 수용기, 발목에 위치한 관절 수용기와 같은 감각기능들의 역할이 중요하고 많은 영향을 끼친다는 것을 관련 선행 연구들을 통해 알 수 있었다. 하지만 여러 연구에서는 한발 서기 동작과 같은 자세 제어 능력 측정에서 발바닥 압력의 이동과 속도 그리고 움직임의 차이를 확인하는 연구들이 대부분이었다. 따라서 본 연구에서는 자세 제어능력을 측정하기 위한 한발 서기 동작 수행 동안 하지 움직임의 운동학적 분석을 통해 어떠한 보상 작용이 일어나는지 확인하는데 그 목적이 있으며, 본 연구의 가설은 손상된 발목을 가진 대상자들이 발바닥 감각기능이 저하되었을 때 고관절 전략의 움직임이 증가할 것이라고 설정하였다.

연구 방법

1. 연구 대상자

본 연구에서는 만성 발목 불안정 환자군(CAI)과 발목에 이상이 없는 정상군(healthy)으로 나누어 선발하였다. 대상자 수는 선행논문¹³의 연구 결과를 사용하여 효과 크기를 산출하였으며 $1-\beta$ 값은 0.8, 유의수준 α 값은 0.05를, G-power 프로그램에서 계산되어진 표본수는 총 20명의 대상으로 선정하였다. CAI군 선별 기준으로는 만성 발목 불안정성의 조건에 해당하는 국제 발목 컨소시움(International Ankle Consortium)에서 승인한 선별 기준 방법에 의거하였다²⁰. 과거에 최소 한번 이상의 발목 염좌 부상을 당한 경험이 있고 최근 3개월 안에 발목이 흔들리는 증상을 최소 2번 이상 경험했을 뿐만 아니라 설문지의 준거 점수(cut-off score)에 의해 그룹을 선별하였다. 국제 발목 컨소시움 재정 상태표(Position Statement of International Ankle Consortium)에서 발목 불안정성의 포함기준은 Ankle Instability Instrument의 설문지에서 1번 문항의 발목 염좌 경험이 있는 대상자 중 나머지 10문항에서 최소 4개 이상 경험을 하거나 불안정한 느낌을 받은 사람²⁰, Foot and Ankle Disability Index (FADI) 설문지를 사용하여 분류하였으며, 점수가 90% 이하이거나, FADI Sport Surveys에서 75% 이하의 점수일 때 CAI 환자로 분류하였다²¹. 모든 피험자는 최근 6개월 안에 하지 수술 경력이 없는 사람들을 선별하였으며, 족궁의 높이에 의해 감각 정보의 차이가 발생할 수 있으므로 이에 대한 제한점을 없애기 위해 Navicular Drop Test를 통해 고족과 저족은 실험 대상자에서 제외 시켜 정상적인 족궁을 가진 대상자만을 선정하였다. 피험자 두 군 간의 차이를 보기 위해 Mann-Whitney test를 하여 검정한 결과 나이, 몸무게, 키 모두 차이가 나타나지 않았다(Table 1).

Table 1. Physical characteristics of subjects

Variable	CAI (N=10)	Healthy (N=10)
Male:female	5:5	5:5
Age (yr)	23.90±2.56	23.40±2.22
Weight (kg)	67.43±12.96	60.93±13.42
Height (cm)	166.89±10.50	165.42±6.67

Values are presented as mean±standard deviation.
CAI: chronic ankle instability.

2. 실험 장비 및 절차

본 연구에서는 동일한 피험자에 대해 눈 감고 10초간 한발서기 과제를 발바닥 감각 저하시키기 전(pre)과 후(post)로 나누어 비교하였으며, 운동학적 데이터를 수집하였다. 이 때 피험자의 자세는 움직이지 않는 상태에서 양손을 가슴 위에 교차해서 두고, 이전에 설립된 연구 방법에 따라 한발서기 시 지면을 지지하지 않는 발의 무릎은 45°, 엉덩이는 30° 정도 구부린 자세를 유지하도록 하였다²².

촉각 감퇴를 유발하기 위하여 아이스 욕조에 피험자 양 발의 피부 표면을 10분간 담갔다^{23,24}. 10분간 발을 담근 후 Semmes-Weinstein monofilaments (North Coast Medical, San Jose, CA, USA)를 이용하여 감각을 측정하였다. 본 연구에서는 20개의 서로 다른 강도의 모노필라멘트를 사용하였으며, 각각의 모노 필라멘트의 숫자는 그 힘의 크기를 나타내며 힘의 크기 구분은 \log_{10} ($10 \times$ 힘[mg])으로 계산하였다. 선행연구에서의 감각평가 단계를 수행하여 평균값을 계산하여 감각 수준을 평가하였다²⁵. 선행연구의 제한점이 실험 중 지속적인 얼음 처치를 하지 못하여 감각 회복을 통제하지 못하였던 것이었으므로 이번 연구에서는 3분이 지나면 1분간 얼음물에 담근 후 다시 실험을 재개하였다. 얼음 처치 후 모노필라멘트를 사용하여 발바닥 감각 측정 한 후 눈 감고 10초간 한발서기 과제를 3회 실시하여 데이터를 수집하였으며 10초간 자세를 유지하지 못할 시 다시 측정하였다.

3. 데이터 수집 및 분석

본 연구에서는 눈감고 10초간 한발서기 과제에서 운동학적 변인을 알아보기 위해 8대의 적외선 카메라(Vicon MX-F20; Oxford Metric Ltd., Oxford, UK)를 사용하여 동작 분석 자료를 수집하였으며, 영상 데이터는 200 Hz로 수집하였다. 마커셋은 lower-body plug-in-gait marker set (Fig. 1)를 사용하였다. 자세 제어 시 엉덩관절, 무릎관절, 발목관절 각도(°)의 운동학적 변인들을 시상면, 관상면, 수평면에서 분석하였다.

4. 통계 분석

본 연구의 통계 처리는 IBM SPSS ver. 24.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 이용하였고, 발바닥 얼음 처치 전과 후의 감각 차이를 확인하기 위해 일원배치 분산분석을 사용하였다. 독립변수로는 발목 불안정이 있는 그룹과 없는 그룹(CAI, healthy)과 두 가지 실험조건(얼음 처치 전, 후)의 자세제어의 차이를 분석하기 위해 혼합변량분석을 사용하였다. 상호

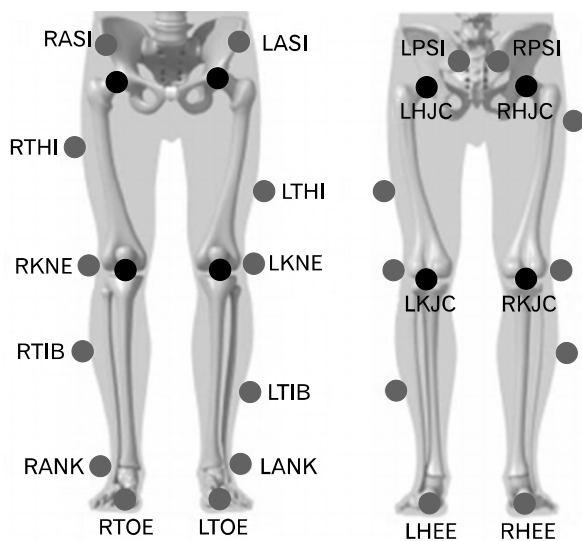


Fig. 1. Lower-body plug-in-gait marker set. RASI: right anterior superior iliac spine, LASI: left anterior superior iliac spine, RTHI: right thigh, LTHI: left thigh, RKNE: right knee, LKNE: left knee, RTIB: right tibia, LTIB: left tibia, RANK: right ankle, LANK: left ankle, RTOE: right toe, LTOE: left toe, LPSI: left posterior superior iliac spine, RPSI: right posterior superior iliac spine, LHEE: left heel, RHEE: right heel.

작용이 나왔을 경우 Duncan's test로 사후검증을 실시하였다. 모든 통계치의 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였다. 두 군과 발바닥 감각의 차이에 따른 자세 제어의 전체적인 패턴을 보기 위해 앙상블 커브 분석을 하였다. 이 때 Confidence Interval은 0.05 수준에서 계산하였다.

결 과

1. 발바닥 피부 감각 감소의 결과

발바닥을 얼음물(2°C)에 10분간 담그기 전·후를 비교한 결과 얼음 처치 전, 후(mean, 3.23 ± 0.25 vs. 3.89 ± 0.25 , $p < 0.001$)로 통계적으로 유의한 차이가 나타났다. 10분간 얼음 처치 후 3분 뒤 1분간 발바닥 얼음 처치 후와 얼음 처치 전(mean, 4.00 ± 0.34 vs. 3.23 ± 0.25 , $p < 0.001$)에서도 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며, 10분간 얼음 처치 후와 3분 뒤 1분간 발바닥 얼음 처치 후에는 통계적인 차이가 나타나지 않았다(Fig. 2).

2. 눈감고 한발서기 과제 시 운동학적 변인 결과

시각 차단 후 한발 서기(주 사용 발) 과제를 10초간 3번 반복 수행 후 운동학적 변인들의 평균 값을 비교 분석하였다

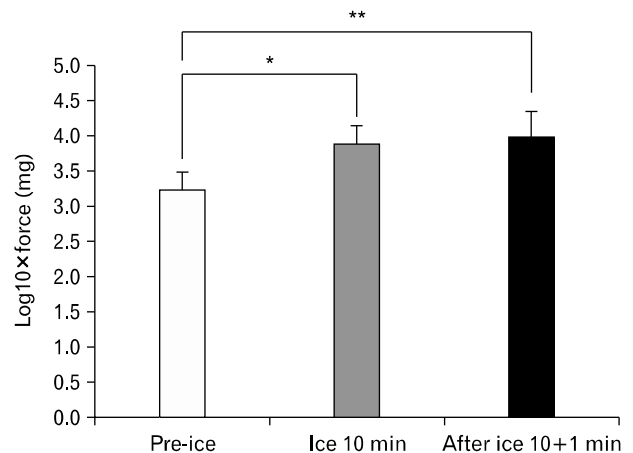


Fig. 2. Semmes-Weinstein monofilaments results. * $p < 0.001$: significant difference between pre-ice and ice 10 minutes; ** $p < 0.001$: significant difference between pre-ice and after ice 10+1 minutes.

(Table 2). 얼음을 통한 발바닥 탈감각화 처치 전·후 두 군 간 한발 서기 시 운동학적 변인들에서 상호 작용은 발견되지 않았지만 발바닥 탈감각화 후 두 군 간의 주 효과에서 무릎관절의 시상면에서는 CAI군이 굴곡값(mean: CAI, $1.80^{\circ} \pm 2.98^{\circ}$; healthy, $-4.64^{\circ} \pm 10.72^{\circ}$)이 크고, 수평면에서는 CAI군이 안쪽 돌림(내회전)값(mean: CAI, $-2.98^{\circ} \pm 19.56^{\circ}$; healthy, $28.16^{\circ} \pm 15.62^{\circ}$) 각도가 큰 것을 보여주었고 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며, 엉덩관절 수평면에서는 healthy 군에서 안쪽 돌림 각도 값(mean: CAI, $-5.15^{\circ} \pm 8.46^{\circ}$; healthy, $-18.96^{\circ} \pm 17.09^{\circ}$)이 더 컸으며 통계적으로 유의한 차이가 나타났(Table 2). 하지만 발바닥 탈감각 전에는 주효과에서 차이가 나타나지 않았다.

3. 한발 서기 시 하지 관절 운동학적 변인의 앙상블 커브

두 그룹 간 한발 서기 시 얼음 처치 전에는 차이가 발생하지 않았지만 얼음 처치 후 10초 동안 한발 서기 과제 시작부터 종료 시까지 healthy 군이 수평면에서의 움직임인 무릎 가쪽 돌림의 각도와 엉덩관절의 안쪽 돌림의 각도가 CAI군보다 큰 것을 볼 수 있었다(Fig. 3).

고 찰

본 연구의 주요 결과는 시상면의 무릎굴곡과 수평면의 무릎 가쪽 돌림, 엉덩 안쪽 돌림에서 그룹 간 유의한 차이가 발생했다는 것이다. 시상면 무릎관절의 경우 발바닥의 피부감각 최소화 후 CAI군이 healthy 군에 비해 더 큰 무릎 굴곡(post: CAI,

Table 2. Single limb balance test with eyes closed

Variable	Healthy		CAI		p-value
	Pre	Post	Pre	Post	
Hip (Flex/Ext, °)	5.76±9.06	1.51±7.10	2.50±1.80	1.43±3.75	Group=0.40 Time=0.18 Group×time=0.42
Knee (Flex/Ext, °)	-4.84±6.46	-4.64±10.72	0.51±4.03	1.80±2.98*	Group=0.001* Time=0.73 Group×time=0.80
Ankle (DF/PF, °)	6.74±4.41	8.04±6.00	9.39±2.61	9.36±3.06	Group=0.15 Time=0.64 Group×time=0.62
Hip (ADD/ABD, °)	3.91±2.92	3.31±3.02	1.98±4.42	1.55±4.30	Group=0.13 Time=0.66 Group×time=0.94
Knee (Var/Val, °)	2.13±5.15	0.22±4.20	0.31±4.14	0.74±3.54	Group=0.10 Time=0.50 Group×time=1.05
Ankle (IV/EV, °)	1.57±4.37	0.96±4.70	0.59±2.63	0.64±2.77	Group=0.43 Time=0.63 Group×time=0.97
Hip (IR/ER, °)	21.21±23.40	28.16±15.62	4.55±18.55	-2.98±19.56*	Group=0.001* Time=0.96 Group×time=0.25
Knee (IR/ER, °)	-16.18±12.20	-18.96±17.09	-4.64±13.05	-5.15±8.46*	Group=0.004* Time=0.69 Group×time=0.78
Ankle (IR/ER, °)	-4.18±21.18	-4.06±22.92	0.78±14.25	-6.25±15.06	Group=0.06 Time=0.34 Group×time=0.36

Values are presented as mean±standard deviation.

CAI: chronic ankle instability, Flex: flexion, Ext: extension, DF: dorsal flexion, PF: plantar flexion, ADD: adduction, ABD: abduction, Var: varus, Val: valgus, IV: inversion, EV: eversion, IR: internal rotation, ER: external rotation.

*Group significant, at $p < 0.05$.

1.80°±2.98°; healthy, -4.64°±10.72°, $p > 0.05$) 각도로 한발 서기를 수행하는 것으로 나타났으며, 이는 CAI군의 시각 차단 및 발바닥 피부 감각 최소화로 인해 과제 수행의 난이도가 어려워짐에 따라 이에 대한 균형 보상을 위해 발목의 의존도를 감소시키고 근위부 전략의 사용정도가 증가하여 균형을 유지할 것이라는 본 연구의 가설을 뒷받침해 줄 수 있는 결과라 생각된다. 관련 선행 연구를 보면 정상적인 발목을 가진 대상에서는 엉덩관절과 발목관절의 조합을 사용하여 균형을 유지한다고 하였는데⁹ 결과에서 보면 healthy 군은 CAI군에 비해 무릎을 펴고 동작 수행을 하는 것으로 확인 되었지만 CAI군은 무릎을 굴곡 시킨 상태에서 동작을 수행하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 상대적으로 불안정한 발목 상태로 인해 무릎 사용을 증가시키기 위해 나타난 결과라고 생각되며, 동작 수행을 위한 전략은 앞서 언급한 바와 같이 동작의 난이도 증가와 함께 변화될 것이라 생각된다. CAI 환자들의 정적 균형 자세

제어를 위한 운동학적 변인의 움직임임을 본 다른 연구 결과에 따르면 불안정성에 의한 발목 사용 전략의 감소로 인한 안정성 보상을 위해 전·후방 방향의 자세 안정감을 유지하기 위한 정형화된 움직임 패턴을 사용한다고 하였고 이 방법은 동작 수행 동안 전·후방 움직임의 조절을 위해 무릎과 엉덩관절의 움직임을 통해 몸통을 앞으로 기대어 근위부적인 자세 조절 전략들을 사용한다고 알려져 있다²⁶. 본 연구의 결과 또한 이와 밀접한 연관이 있는 것이라 판단되며, CAI 환자들의 발목 근력약화, 신경근 사용 패턴 변화 및 발목 관절 위치 감각 저하에 의한 자세 제어 시 발목의 움직임보다는 근위부인 무릎의 각도 변화 전략을 통해 균형을 유지하는 것이라 생각된다.

수평면에서의 움직임을 살펴보면 과제 수행 동안 healthy 군이 CAI군보다 무릎 가쪽 돌림(post: CAI, -5.15°±8.46°; healthy, -18.96°±17.09°, $p > 0.05$)과 엉덩 안쪽 돌림(post: CAI,

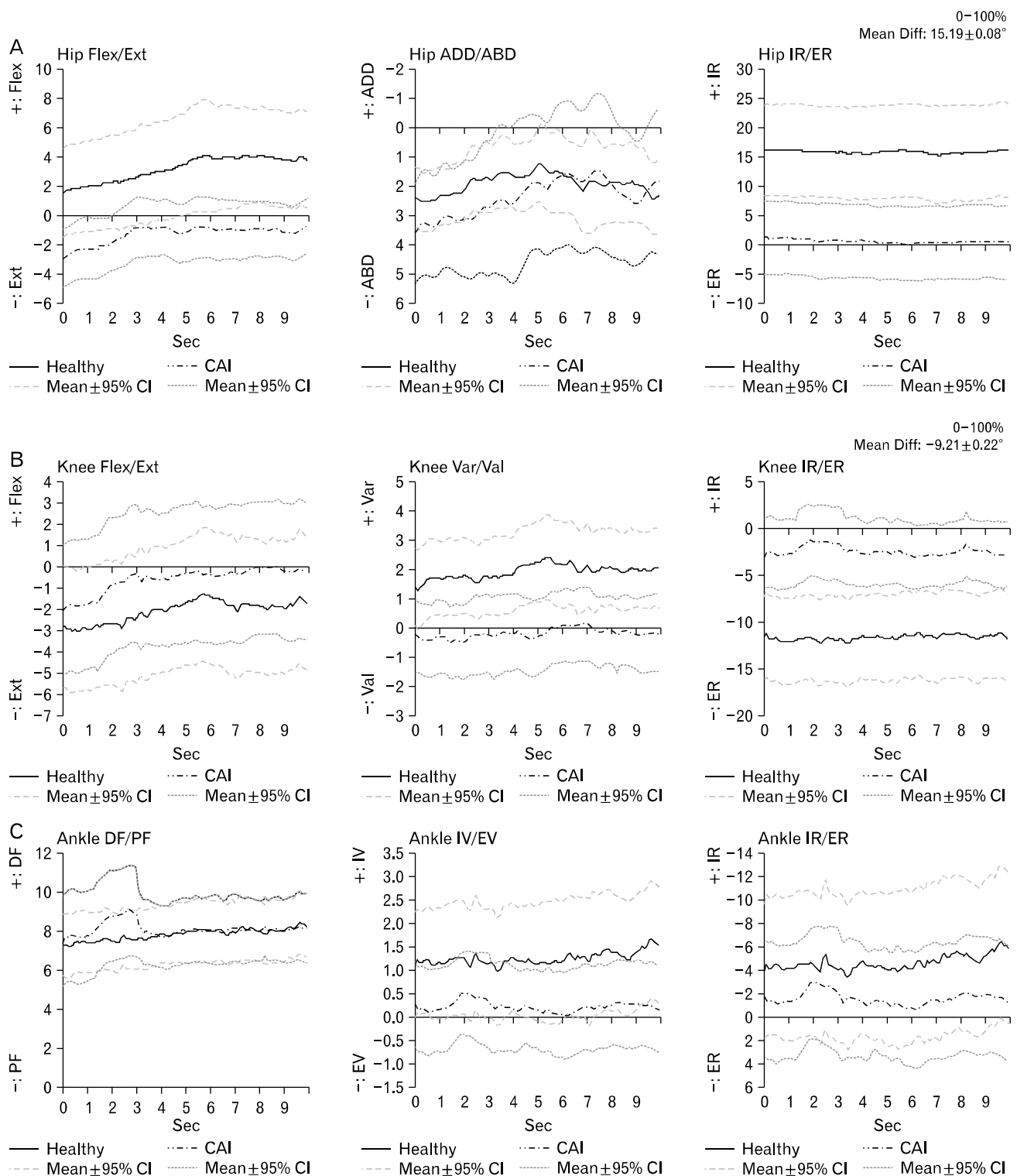


Fig. 3. Ensemble curves of the lower extremity joint during the single-leg stance test. (A) Hip flexion (Flex)/extension (Ext), hip adduction (ADD)/abduction (ABD), hip internal rotation (IR)/external rotation (ER). (B) Knee Flex/Ext, knee varus (Var)/valgus (Val), knee IR/ER. (C) Ankle dorsi flexion (DF)/plantar flexion (PF), ankle inversion (IV)/eversion (EV), ankle IR/ER. CAI: chronic ankle instability, CI: confidence interval, Diff: difference.

$-2.98^{\circ} \pm 19.56^{\circ}$; healthy, $28.16^{\circ} \pm 15.62^{\circ}$, $p > 0.05$) 움직임이 더 많이 발생하는 것으로 나타났다(Table 2). 앙상블커브로 밸런스 패턴을 분석한 결과 발바닥 감각 저하 후 healthy 군에서 무릎 가쪽 돌림(mean difference, $-9.21^{\circ} \pm 0.22^{\circ}$)의 각도와 엉덩관절의 안쪽 돌림(mean difference, $15.19^{\circ} \pm 0.08^{\circ}$)의 각도가 큰 것을 보여주었다. 이러한 결과는 healthy 군에서 한발서기 과제 수행 시에 무릎이 과신전 됨으로써 무릎 나사잡김(screw home movement [SHM]) 현상이 발생하게 되어 정강뼈 가쪽 돌림과 넓다리뼈 안쪽 돌림의 움직임이 발생한 결과라고 생각되며, 관련 선행연구에서도 해부학적으로 넓다리뼈 안쪽 관절용기(medial condyle)가 가쪽 관절용기(lateral condyle)보다 1/2인치 가 더 길어 무릎이 완전히 신전되었을 때 무릎 SHM 현상에 의해 넓다리뼈 안쪽 돌림의 움직임이 발생하여 관절이 잠김 메커니즘에 의해 무릎의 안정화가 발생 된다고 하였고²⁷, 또 다른 동적 움직임의^{28,29} 관련 연구에서는 SHM 현상이 보행 시 부하반응기 구간에서 움직임이 일어나는 것은 다음 동작인 중간디딤기와 말기디딤기 단계 동안 안정성을 제공하는 중요한 메커니즘이라고 하였다. 따라서 CAI 환자들의 잦은 발목 부상으로 인한 발목 주변의 신경조직의 손상과 기계적 감각수용기의 결핍에 의한 정상적인 발목 움직임을 하지 못해 한발서기 과제 시 무릎 SHM 현상을 하지 못하여 안정적인 자세를 유지하지 못하고 근위부 움직임의 보상으로 자세를 유지한다고 생각되며, CAI군보다 상대적으로 안정성을 가진 발목상태인 healthy 군이 동작을 수행하는 동안 발목의 사용의 증가로 인해 무릎을 펴고 동작을 수행한 결과라 생각되는데 이는 동작 수행 전략에 있어 무릎을 펴고 동작 수행을 하면 무릎의 사용이 감소되고 발목의 사용이 증가되는데 앞서 언급한 선행연구의 결과³⁰에 비춰 한 부위의 불안정성을 보상하기 위한 근위부 관절의 사용 증가라는 내용을 뒷받침 할 수 있는 연구 결과임과 동시에 과제 수행에 있어 각 관절의 상태와 불안정성의 여부에 따라 동작 수행의 전략이 달라진다는 것을 의미하는 중요한 결과라고 생각된다.

발바닥 감각 저하에 따른 균형과 관련된 선행연구의 결과에 따르면 균형 유지 시 자세의 흔들림은 크게 증가하지 않았지만 상대적으로 근위부 사용 전략이 증가하였다고 보고되었다³⁰. 본 연구의 결과도 동일하게 발바닥 감각 저하 후 두 그룹간의 차이가 무릎과 엉덩 관절에서 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 결과는 피험자들이 균형을 유지하기 위한 제어와 관련하여 발바닥의 감각이 깊은 연관이 있다고 볼 수 있다. 발바닥 감각 저하로 인한 체성감각 피드백의 저하는 발목을 이용한 균형능력에 제한을 줄 수 있다고 볼 수

있으며, 발 및 발목의 구심성 감각능력이 자세 제어 전략의 유용성을 결정하는 데 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다³⁰. CAI 환자들 발바닥 감각기능과 발목 기능의 저하로 인해 지면을 통한 압력의 중심 변화를 감지하지 못해 자세유지 능력에 저하가 발생한다고 생각되며¹³, CAI 환자들의 경우 반복적인 염좌, 발목 기능의 저하 및 근력저하로 인해 불안정성 상황이 지속되어 효과적인 발목전략을 사용할 수 없는 상황으로 인해 이에 대한 보상 또는 대체를 하기 위한 방법으로 무릎관절과 고관절 전략을 사용하여 균형을 잡는 근위부 전략을 사용했을 것이라고 생각된다³⁰.

시각차단 및 발바닥 감각 저하 후 한발서기 과제 시 CAI군과 healthy 군 간 시상면, 관상면, 수평면 3차원에서 운동학적 변인들을 분석결과 두 그룹 간 자세 제어 전략의 차이를 확인할 수 있었다. CAI군이 무릎 굴곡 각도가 healthy 군과 비교하여 상대적으로 무릎이 굴곡된 상태로 과제를 수행하는 것으로 나타나 발목 불안정성으로 인한 근위부의 전략을 사용하고 있는 것을 확인할 수 있었으며, healthy 군에서는 정강뼈 가쪽 돌림과 넓다리뼈 안쪽 돌림의 움직임이 발생하면서 관절 잠김 메커니즘으로 의해 무릎 안정화가 되는 현상을 보여주었다. 이러한 결과로 보아 CAI 환자들의 잦은 발목 부상으로 인한 발목 기능이 저하되어 발목의 움직임이 아닌 근위부의 움직임을 통한 보상 작용을 이용해 동작을 수행하는데 비해 healthy 군은 상대적으로 안정적인 발목 상태로 인해 근위부 전략이 아닌 원위부 전략, 즉 발목의 사용이 CAI군에 비해 크게 사용하여 동작수행을 한 것으로 생각된다. 본 연구에 이은 후속 연구로는 CAI군과 healthy 군의 한발 서기 과제 동안 하지 근육 사용 패턴을 비교 분석하여 자세 제어 수행 동안 두 그룹 간 어떠한 차이가 있는지 알아보는 연구가 필요하다고 생각된다.

Conflict of Interest

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

ORCID

Tae Kyu Kang <https://orcid.org/0000-0002-7274-0476>
 Chang Young Kim <https://orcid.org/0000-0003-2946-061X>
 Byong Hun Kim <https://orcid.org/0000-0001-6220-6774>
 Hee Seong Jeong <https://orcid.org/0000-0001-8318-7322>

Sung Cheol Lee <https://orcid.org/0000-0002-7424-7036>

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

References

1. Massion J. Postural control system. *Curr Opin Neurobiol* 1994;4:877-87.
2. McGuine TA, Greene JJ, Best T, Levenson G. Balance as a predictor of ankle injuries in high school basketball players. *Clin J Sport Med* 2000;10:239-44.
3. Hertel J. Functional anatomy, pathomechanics, and pathophysiology of lateral ankle instability. *J Athl Train* 2002;37:364-75.
4. Holmer P, Sondergaard L, Konradsen L, Nielsen PT, Jorgensen LN. Epidemiology of sprains in the lateral ankle and foot. *Foot Ankle Int* 1994;15:72-4.
5. Drewes LK, McKeon PO, Kerrigan DC, Hertel J. Dorsiflexion deficit during jogging with chronic ankle instability. *J Sci Med Sport* 2009;12:685-7.
6. Freeman MA. Instability of the foot after injuries to the lateral ligament of the ankle. *J Bone Joint Surg Br* 1965;47:669-77.
7. McKeon PO, Hertel J. Spatiotemporal postural control deficits are present in those with chronic ankle instability. *BMC Musculoskelet Disord* 2008;9:76.
8. McKeon PO, Hertel J, Bramble D, Davis I. The foot core system: a new paradigm for understanding intrinsic foot muscle function. *Br J Sports Med* 2015;49:290.
9. Horak FB, Nashner LM. Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *J Neurophysiol* 1986;55:1369-81.
10. Chua MC, Hyngstrom AS, Ng AV, Schmit BD. Movement strategies for maintaining standing balance during arm tracking in people with multiple sclerosis. *J Neurophysiol* 2014;112:1656-66.
11. Meyer PF, Oddsson LI, De Luca CJ. The role of plantar cutaneous sensation in unperturbed stance. *Exp Brain Res* 2004;156:505-12.
12. Nurse MA, Nigg BM. The effect of changes in foot sensation on plantar pressure and muscle activity. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2001;16:719-27.
13. Powell MR, Powden CJ, Houston MN, Hoch MC. Plantar cutaneous sensitivity and balance in individuals with and without chronic ankle instability. *Clin J Sport Med* 2014;24:490-6.
14. McKeon PO, Hertel J. Plantar hypoesthesia alters time-to-boundary measures of postural control. *Somatosens Mot Res* 2007;24:171-7.
15. Magnusson M, Enbom H, Johansson R, Pyykko I. Significance of pressor input from the human feet in anterior-posterior postural control: the effect of hypothermia on vibration-induced body-sway. *Acta Otolaryngol* 1990;110:182-8.
16. Roll R, Kavounoudias A, Roll JP. Cutaneous afferents from human plantar sole contribute to body posture awareness. *Neuroreport* 2002;13:1957-61.
17. Horak FB. Clinical measurement of postural control in adults. *Phys Ther* 1987;67:1881-5.
18. Tropp H, Odenrick P. Postural control in single-limb stance. *J Orthop Res* 1988;6:833-9.
19. Diener HC, Dichgans J, Bootz F, Bacher M. Early stabilization of human posture after a sudden disturbance: influence of rate and amplitude of displacement. *Exp Brain Res* 1984;56:126-34.
20. Gribble PA, Delahunt E, Bleakley C, et al. Selection criteria for patients with chronic ankle instability in controlled research: a position statement of the International Ankle Consortium. *Br J Sports Med* 2014;48:1014-8.
21. Hale SA, Hertel J. Reliability and sensitivity of the foot and ankle disability index in subjects with chronic ankle instability. *J Athl Train* 2005;40:35-40.
22. Hertel J, Buckley WE, Denegar CR. Serial testing of postural control after acute lateral ankle sprain. *J Athl Train* 2001;36:363-8.
23. Eils E, Nolte S, Tewes M, Thorwesten L, Volker K, Rosenbaum D. Modified pressure distribution patterns in walking following reduction of plantar sensation. *J Biomech* 2002;35:1307-13.
24. Eils E, Behrens S, Mers O, Thorwesten L, Volker K, Rosenbaum D. Reduced plantar sensation causes a cautious walking pattern. *Gait Posture* 2004;20:54-60.
25. Dyck PJ, O'Brien PC, Kosanke JL, Gillen DA, Karnes JL. A 4, 2, and 1 stepping algorithm for quick and accurate estimation of cutaneous sensation threshold. *Neurology* 1993;43:1508-12.
26. 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.
27. Hallen LG, Lindahl O. The "screw-home" movement in the knee-joint. *Acta Orthop Scand* 1966;37:97-106.
28. Kozanek M, Hosseini A, Liu F, et al. Tibiofemoral kinematics and condylar motion during the stance phase of gait. *J*

Biomech 2009;42:1877-84.

29. Hill PF, Vedi V, Williams A, Iwaki H, Pinskerova V, Freeman MA. Tibiofemoral movement 2: the loaded and unloaded living knee studied by MRI. J Bone Joint Surg Br 2000;82:1196-8.
30. Horak FB, Nashner LM, Diener HC. Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. Exp Brain Res 1990;82:167-77.