



# 대한물리치료과학회지

Journal of Korean Physical Therapy Science  
2025. 06. Vol. 32, No.2 pp. 20-30

## 만성 발목 불안정성이 있는 젊은 성인의 발목 기능에 대한 경두개 직류 자극과 균형 훈련의 결합 효과: 무작위 임상시험

김찬규<sup>1</sup> · 신승우<sup>2</sup> · 김현중<sup>3</sup>

<sup>1</sup>광주보건대학교 물리치료학과 · <sup>2</sup>더나은병원 스포츠재활센터 · <sup>3</sup>광주보건대학교 시니어운동처방학과

## Effects of Combined Transcranial Direct Current Stimulation and Balance Training on Ankle Function in Young Adults with Chronic Ankle Instability: A Randomized Clinical Trial

Chan Kyu Kim<sup>1</sup>, Ph.D., P.T. · Seung Woo Shin<sup>2</sup>, M.Sc., P.T. · Hyun Joong Kim<sup>3</sup>, Ph.D., P.T.

<sup>1</sup>Dept. of Physical therapy, Gwangju Health University

<sup>2</sup>Sports Rehabilitation Center, The Better Hospital

<sup>3</sup>Dept. of Senior Exercise Prescription, Gwangju Health University

### Abstract

**Background:** This study aims to investigate the immediate effects of combining transcranial direct current stimulation (tDCS) with balance training on ankle function in college students with chronic ankle instability (CAI). Traditional interventions focus on peripheral improvements, while this study targets cortical areas to enhance balance and motor control, assessing whether simultaneous tDCS and balance training can provide immediate functional benefits.

**Design:** Single-blind, parallel-design, randomized clinical trial.

**Methods:** This study involved 30 college students from G University with chronic ankle instability (CAIT score  $\leq 24$ ), randomly assigned to a control (BBS) or experimental group (BBS plus tDCS), with 15 in each. Using a single-blind, parallel-design randomized trial, the experimental group received combined tDCS and balance training, while the control group received only balance training. The intervention included 20 minutes of 1.5 mA tDCS to the motor cortex opposite the unstable ankle. Static balance was assessed via the Biodex Balance System, and ankle dorsiflexion ROM was measured with a goniometer. Data analysis used SPSS 26.0,

with significance set at 0.05.

**Results:** Both BBS and BBS plus tDCS groups showed significant post-training increases in CAIT scores ( $p < .05$ ), with a larger effect in the BBS plus tDCS group ( $d = 1.54$ ) compared to the BBS group ( $d = 0.79$ ), though not statistically significant between groups ( $p > .05$ ). Static balance improved significantly in both groups immediately after training ( $p < .05$ ), with a greater effect in the BBS plus tDCS group both immediately ( $d = 0.80$ ) and after 24 hours ( $d = 0.86$ ), but inter-group differences were not significant ( $p > .05$ ). No significant dorsiflexion change occurred in the BBS plus tDCS group ( $p > .05$ ), while a decrease was noted in the BBS group ( $p < .05$ ).

**Conclusion:** This study suggests that combining tDCS with balance training may enhance static balance recovery in young adults with chronic ankle instability, offering potential benefits for future CAI rehabilitation.

**Key words:** balance training, chronic ankle instability, static balance, transcranial direct current stimulation

### 교신저자

김현중

광주광역시 광산구 북문대로419번길 73

T: 062-958-7598, E: hjkim@ghu.ac.kr

## I. 서론

만성 발목 불안정성(Chronic ankle instability, CAI)은 발목 인대의 반복적인 손상으로 인한 기계수용기(mechanoreceptor)의 기능 저하를 특징으로 한다. 이러한 손상은 고유수용성 감각의 저하로 이어지며(Hertel, 2008), 결과적으로 자세 조절 능력의 감소를 초래한다(McKeon과 Hertel, 2008). 자세 안정성의 결핍은 보행 패턴의 변화와 낙상 위험 증가로 이어지고(Cheung 등, 2016; Lee 등, 2019; Li 등, 2019), 일상생활에서 높은 재부상을 야기한다. 따라서 운동 감각 소실과 자세안정성 향상을 위한 최적화된 중재 방안의 개발이 재활 프로그램에서 핵심적인 과제로 대두되고 있다(Hou 등, 2022).

CAI의 병태생리학적 메커니즘은 전통적으로 고유수용감각 결손, 근력 결손, 신경근 제어 장애의 복합적 작용으로 설명되어 왔다. 그러나 최근 연구들은 기계수용기의 손실만으로는 CAI에서 관찰되는 다양한 결손을 완전히 설명할 수 없다고 제안하고 있다(Hass 등, 2010; Bryan과 Scott, 2002). 새로운 연구 패러다임은 인간의 발목 구조를 능동, 수동, 신경 하위 시스템을 포함하는 통합적 시스템으로 재정의하였으며, 특히 능동 및 하위 신경 시스템이 자세 유지와 균형 조절에 중추적 역할을 한다고 강조한다(Xiao 등, 2020).

기존의 CAI 중재 방안들은 주로 단축발 운동과 관절 가동술 등을 통한 발 내재근 강화와 말초 신경계 개선에 초점을 맞추어 왔다(McKeon과 Fourchet, 2015; McKeon 등, 2015). 그러나 만성적인 부상 상태에서는 운동 피질의 흥분성 변화가 발생하며, 이는 지속적인 기능 장애의 원인이 된다(Needle 등, 2017). CAI 환자들에서는 부상 후 운동 피질의 하행 운동 뉴런 흥분 능력이 저하되고(Ward 등, 2015), 일차 운동 피질의 흥분성 감소와 체감각 피질의 활성화 저하가 관찰된다(Needle 등, 2017). 이러한 운동 피질 흥분성의 변화는 근력과 자발적 활성화에 영향을 미치며(Lepley 등, 2014; Pietrosimone 등, 2015), 결과적으로 근력 약화와 균형 감소를 초래할 수 있다. 따라서 일차운동 피질(M1)을 표적으로 하는 치료 전략이 기능 개선과 부상 예방에 새로운 접근법을 제시할 수 있다(Xiao 등, 2020).

경두개 직류 자극(Transcranial direct current stimulation, tDCS)은 뇌 영역의 흥분성을 비침습적으로 조절할 수 있는 안전한 방법으로 주목받고 있다. tDCS는 균형 장애 환자의 균형 및 운동 신경 재활을 개선하는데 효과적이며, 1~4 mA의 저강도 전류를 양극에서 음극으로 전달하여 피질 교차 영역의 신경 활동을 조절한다(Giancattarina 등, 2024; Nitsche과 Paulus, 2001; Yitayeh과 Teshome, 2016). 특히 일차 운동 피질을 대상으로 한 연구들은 발목 근육의 피질-근육 연결성 조절을 통한 균형 개선 가능성을 제시하고 있다(Dutta과 Chugh, 2012). 이는 젊은 성인의 정적 균형(Dutta 등, 2014)과 보행 능력 향상(Kaski 등, 2012), 그리고 CAI 환자의 운동 피질 흥분성과 동적 균형 성능 개선(Kaminski 등, 2017) 등의 연구 결과로 입증되고 있다.

그러나 tDCS가 자세 조절 관련 신경 회로에 미치는 영향에 대해서는 여전히 의문이 제기되고 있으며, 대부분의 연구가 단순한 한발 또는 양발 서기 평가에 국한되어 있다는 한계가 있다(Craig 등, 2017). 또한 tDCS와 균형 훈련의 동시 적용이 미치는 즉각적 효과에 대한 연구는 매우 제한적이다. 따라서 본 연구는 균형 훈련과 tDCS의 병행이 발목 불안정성을 가진 대학생들의 발 기능에 미치는 즉각적인 효과를 검증하고, 뇌의 감각 운동 피질을 표적으로 하는 비침습적 치료 전략의 효과를 평가하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 연구참가자

본 연구는 광주 소재 G 대학교에 재학 중인 대학생을 대상으로 연구의 목적 및 실험 방법에 대하여 설명하고, CAIT(Cumberland Ankle Instability Tool)를 사용하여 24점 이하를 기록한 30명을 대상으로 모집하였다. 본 연구의 적격기준에서 선정기준은 최근 3개월 동안 발목 부상의 경험이 없는 자, 엉덩관절, 무릎관절, 발목 관절에 수술적 경험이 없는 자이며, 제외기준은 두피에 상처 또는 화상의 경험이 있는 자, 두개 내 금속 물질을 삽입된 자, 시청각에 손상이 있는 자, 신경계 및 안돌기관에 과거력 및 질환이 있는 자이다. 연구에 등록하는 참가자들에게는 헬싱키 선언의 윤리적 기준에 따른 목적과 절차에 대해 설명하였고 사전 동의서에 자발적으로 서명한 사람만 등록되었다.

### 2. 참가자 수 산출

연구 참가자 수 산출은 G\*power 소프트웨어(ver. 3.1, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Germany)를 이용하여 다음과 같은 설정을 통해 산출하였다. Cohen's d는 1.36, 두 그룹, 검정력 0.95, 유의수준 0.05로 설정했을 때 26명의 참가자로 계산되었다. 잠재적인 중도탈락을 고려하여 최종적으로 30명의 참가자가 연구에 등록되도록 하였다.

### 3. 연구설계

본 연구는 단일 눈가림(single-blind), 평행설계(parallel design), 무작위임상시험(randomized clinical trial)으로 무작위 추출을 통하여 대학생 30명을 대조군과 실험군을 각 15명씩 구분하였다. 2번의 검사(사전 및 사후검사)와 즉각적인 변화를 확인하고자 대조군인 Biodex balance system(BBS)군과 실험군인 BBS plus tDCS군이 포함되었으며, 실험군은 tDCS를 적용과 동시에 균형 훈련을 하였고, 대조군은 균형 훈련만을 진행하였다. 모든 그룹은 정적 균형 능력과 발등 굽힘 각도, CAIT를 측정하였다.

### 4. 무작위화 및 눈가림

등록된 참가자들은 무작위 배정 소프트웨어(ver. 1.0, Isfahan University, Iran)를 통해 각각 1:1비율로 BBS 군과 BBS plus tDCS군에 배정되었다. 눈가림은 단일 눈가림으로 참가자들의 치료일정을 달리하여 각 군에서는 무슨 중재에 배정 받았는지 모르게 진행되었다.

### 5. 중재

본 연구에서는 정적 균형 훈련을 위해 Biodex Balance System SD(BBS, Biodex., U.S.A)를 사용하였다. BBS는 1단계부터 12단계까지의 훈련 수준을 제공하며, 숫자가 높을수록 난이도가 낮아지는 특성을 가진다. 참가자들은 맨발로 지지판 위에 서서 양팔을 가슴 위에 모은 자세를 취하였으며, 발의 위치는 개인의 무게 중심에 맞추고 양쪽 발의 각도는 10°로 설정하였다. Ibrahim(2016)의 연구를 참고하여 재구성한 훈련 프로토콜에 따라, 참가자들은 20분 동안 모니터에 표시된 커서를 중앙에 유지하는 과제를 수행하였다. 훈련은 12단계에서 시작하여 점진적으로 난이도를 높여 6단계에서 종료하였으며, 측정자의 감독 하에 진행되었다. 참가자가 중심을 잃을 경우 안전을 위해 핸들을 잡는 것을 허용하였다(Lee 등, 2010).

---

tDCS는 The Brain Driver tDCS v2.1(The Brain Driver Inc., U.S.A)을 사용하여 적용하였다. 자극 전달을 위해 지름 5cm의 원형 스펀지 전극을 사용하였으며, 모든 스펀지 패드는 0.9% 생리식염수로 충분히 적신 후 밴드로 고정하였다(김선호, 2020). 전극 배치는 CAIT 점수가 낮은 발목의 반대측 일차운동피질(M1)에 양극을, 동측 이마에 음극을 부착하였다(Flix-Díez, 2021). CAIT 점수가 동일한 경우에는 참가자의 우세측 발을 기준으로 전극을 배치하였다. tDCS는 1.5mA 강도로 20분간 적용되었으며, BBS plus tDCS 군의 참가자들은 균형 훈련과 tDCS를 동시에 실시하였다. 모든 참가자들은 tDCS 적용 전 가려움, 따끔거림, 화끈거림과 같은 일시적인 감각이 발생할 수 있음을 사전에 안내 받았으며, 심한 두통이나 피부 자극, 과도한 불편감을 호소하는 경우 즉시 자극을 중단하도록 하였다. 또한 자극 중 피로감을 호소하는 경우 적절한 휴식을 제공하였으며, 자극 후 최소 10분간 관찰하여 이상반응이 없음을 확인하였다.

## 6. 결과측정

### 1) 발목 불안정성

본 연구에서는 발목 불안정성을 알아보기 위하여 CAIT를 사용하였다. CAIT는 발목의 기능적 불안정성을 평가하기 위해 개발된 도구로(Hiller 등, 2006), 일상생활이나 스포츠 활동 중 발목의 불안정성 정도를 최초로 점수화한 것으로 9개 질문으로 구성되어 있다. 총점 30점 중 28점 이상은 정상이며, 24점 이하는 발목 불안정성이 있다고 정의한다(Donahue 등, 2011). CAIT의 민감도는 0.915, 특이도는 0.915로 높은 신뢰도와 타당도를 보여주었으며(정희성 등, 2022), 최소 임상적 중요 변화량(minimal clinically important difference)은 3점이다(Wright 등, 2016).

### 2) 균형능력

균형 능력을 측정하기 위해 균형 측정 장비인 Biodex Balance System SD(BBS, Biodex., U.S.A)를 사용하여 정적 균형을 평가하였다. 균형 훈련 때와 마찬가지로 발의 위치는 본인 무게 중심에 맞는 위치, 발의 각도는 양쪽에 10°로 적용하였다. 균형 능력 평가를 위해 6단계로 설정하였고 참가자는 움직이는 지지판 위에 맨발로 선 후, 양팔은 가슴 위에 모은 자세에서 모니터 스크린의 커서를 중심의 원에 최대한 유지하고 측정을 시작하였다. 측정은 총 3번으로 30초간 실시 후에 10초의 휴식 시간을 가졌으며 결과는 전체 균형 지수(Overall Balance Index, OBI)를 중점으로 확인하였다. BBS는 측정자 내 신뢰도와 측정자 간 신뢰도가 각각  $r=0.97$ ,  $r=0.98$ 로 균형 능력을 평가하는데 높은 신뢰도와 내적 타당도를 가지며(김장곤 등, 2016), 최소감지변화값(MDC)은 0.26으로 보고되었다(De Oliveira 등, 2019).

### 3) 관절가동범위

발목관절의 관절가동범위(Range of Motion, ROM)는 바로 누운 자세에서 고니오미터(Goniometer, OPTP, USA)를 이용하여 발목의 발등 굽힘을 측정하였다. 측정 시 고니오미터의 축은 가쪽 복사뼈의 중심에 위치시키고, 고정팔은 종아리뼈 머리를 향하게 하였으며, 움직임팔은 5번째 발허리뼈를 따라 정렬하였다(Norkin & White, 2016). 중립상태에서 측정을 시작하고, 엉덩관절과 무릎관절의 보상작용 없이 순수한 발목관절의 각도(°)를 측정하였으며, 총 3회 측정하여 평균값을 사용하였다(홍완성과 김기원, 2011). 발목관절 발등굽힘의 최소 감지 변화량(minimal detectable change)은 5.5°이다(Konor 등, 2012).

## 7. 자료분석

본 연구에서 얻어진 결과는 IBM SPSS Statics 25.0 통계프로그램을 이용하여 결과값은 평균값으로 나타내었다. 참가자들의 일반적 특성은 기술통계를 이용하였다. 동질성 검정은 연속형 변수의 경우에서 독립t검정, 범주형 변수에서는 카이제곱검정을 이용하였다. 군간 변화량에 대한 차이는 독립t검정을 통해 분석되었고 군내 전과 후 비교는 대응t검

정을 통해 분석하였다. 모든 통계학적 유의확률은  $p<0.05$ 로 설정하였다.

### III. 연구결과

#### 1. 연구참가자들의 일반적 특성

Table 1. General characteristics ( $N=30$ )

|                | BBS plus tDCS ( $n=15$ ) | BBS ( $n=15$ )     |
|----------------|--------------------------|--------------------|
| Age (year)     | 23.47 $\pm$ 2.53         | 23.47 $\pm$ 3.09   |
| Height (cm)    | 168.47 $\pm$ 10.51       | 164.80 $\pm$ 5.47  |
| Weight (kg)    | 65.27 $\pm$ 14.13        | 70.67 $\pm$ 19.38  |
| Foot size (cm) | 250.33 $\pm$ 17.57       | 249.67 $\pm$ 13.16 |

The values are presented mean $\pm$ standard deviation.

본 연구에는 총 34명의 잠재적 참가자가 모집되었으며, 이 중 선정기준을 충족한 30명이 최종 연구대상자로 등록되었다. 등록된 30명의 참가자 모두 중도탈락 없이 실험을 완료하였다. 연구대상자의 일반적 특성은 군간 통계적으로 유의한 차이가 없었다( $p>0.05$ )(Table 1).

#### 2. 운동 방법에 따른 CAIT의 전·후 변화

운동 방법에 따른 CAIT의 전·후의 변화는 다음과 같다(Table 2). BBS군과 BBS plus tDCS군의 CAIT는 훈련 직후 유의하게 증가하였고( $p<0.05$ ), BBS plus tDCS군( $d=1.54$ )이 BBS군( $d=0.79$ )보다 높은 효과크기를 나타냈으나 그룹 간 차이는 통계적으로 유의한 차이가 없었다( $p>0.05$ ).

#### 3. 운동 방법에 따른 정적 균형의 전·후 변화

운동 방법에 따른 정적 균형의 변화는 다음과 같다(Table 2). BBS군과 BBS plus tDCS군의 정적균형 점수는 훈련 직후 유의하게 증가하였고( $p<0.05$ ), BBS plus tDCS군( $d=0.80$ )이 BBS군( $d=0.63$ )보다 높은 효과크기를 나타냈다. 24 시간 후 지속 효과 역시 BBS plus tDCS군( $d=0.86$ )이 BBS군( $d=0.64$ )보다 높은 효과크기를 나타냈으나 그룹 간 차이는 통계적으로 유의한 차이가 없었다( $p>0.05$ ).

#### 4. 운동 방법에 따른 발등 굽힘 각도의 전·후 변화

운동 방법에 따른 발등 굽힘 각도의 전·후의 변화는 다음과 같다(Table 2). BBS군과 BBS plus tDCS군의 발등 굽힘 각도는 훈련 직후 BBS plus tDCS군에서 유의미한 차이가 없었고( $p>0.05$ ), BBS군에서는 감소하였다( $p<0.05$ ). 24시간 후 지속 효과 역시 BBS군( $d=0.97$ )에서 높은 효과크기를 나타냈다. 그룹 간 차이는 통계적으로 유의한 차이가 없었다( $p>0.05$ ).

Table 2. Comparison between groups

|                |                       | BBS ( <i>n</i> =15) | tDCS plus BBS ( <i>n</i> =15) | Between-group differences <sup>‡</sup> |
|----------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------------------|
| CAIT           | Pre                   | 16.80±5.14          | 17.40±3.94                    |                                        |
|                | Immediate Change      | 20.93±5.26          | 23.87±4.42                    | 2.93(0.73, 5.13) <sup>†</sup>          |
|                | Post-Pre <sup>‡</sup> | 0.79(1.90, 6.37)**  | 1.54(3.93, 9.00)***           | 0.49(-1.20, 5.87)                      |
| Static balance | Pre                   | 1.49±1.12           | 1.39±0.78                     |                                        |
|                | Immediate Change      | 0.94±0.49           | 0.91±0.29                     | -0.03(-0.36, 0.30) <sup>†</sup>        |
|                | Post-Pre <sup>‡</sup> | 0.63(0.11, 0.99)*   | 0.80(0.20, 0.74)**            | 0.47(0.20, 0.74)                       |
|                | 24h change            | 0.95±0.41           | 0.86±0.36                     | 0.53(0.29, 0.77) <sup>†</sup>          |
| DFROM          | Post-Pre <sup>‡</sup> | 0.64(0.11, 0.97)*   | 0.86(0.29, 0.77)**            | 0.02(-0.52, 0.50)                      |
|                | Pre                   | 13.32±6.03          | 12.28±3.83                    |                                        |
|                | Immediate Change      | 9.11±1.66           | 10.69±3.22                    | 1.58(0.09, 3.07) <sup>†</sup>          |
|                | Post-Pre <sup>‡</sup> | 0.95(1.48, 6.94)**  | 0.45(-0.17, 3.35)             | 0.58(-0.17, 3.35)                      |
|                | 24h change            | 8.81±2.61           | 10.82±2.93                    | 2.01(0.50, 3.52) <sup>†</sup>          |
|                | Post-Pre <sup>‡</sup> | 0.97(1.46, 7.56)*   | 0.43(-0.71, 3.63)             | 0.58(-6.02, 0.78)                      |

The post-pre values were described as absolute values.

<sup>†</sup>Mean change(95% confidence interval), <sup>‡</sup>Cohen's d(95% confidence interval), \**p*<0.05, \*\**p*<0.01, \*\*\**p*<0.001, BBS : Biodex balance system, tDCS : Transcranial direct-current stimulation, CAIT : Cumberland Ankle Instability Tool, DFROM : Dorsiflexion Range of motion

## IV. 고 찰

만성 발목 불안정성(CAI) 환자의 감각 운동 기능 개선을 위한 중재 방법에 대한 연구는 지속적으로 발전해왔다. 선행 메타분석 연구들은 주로 균형 훈련(Jiang 등, 2022; Mollà-Casanova 등, 2021)과 근력 강화(Luan 등, 2021)와 같은 단일 중재의 효과를 조사하였으나, 이러한 전통적 접근법만으로는 CAI의 복잡한 병태생리학적 특성을 완전히 해결하기 어렵다는 인식이 증가하고 있다. 본 연구는 이러한 맥락에서 CAI가 있는 젊은 성인을 대상으로 균형 훈련과 경두개 직류 전류 자극(tDCS)을 동시 적용하여 균형능력 및 기능적 개선에 대한 즉각적 효과를 평가하였다.

본 연구의 결과는 정적 균형 능력 향상에 있어 단일 세션의 정적 균형 중재보다 tDCS를 동시 적용하였을 때 더 큰 효과를 보였으며( $d=0.86$ ), 이는 tDCS가 발목의 안정성 및 균형능력 향상에 기여할 수 있는 잠재적 중재 방법임을 시사한다. CAIT 결과에서도 두 그룹 모두 유의미한 개선을 보였으나( $p<0.05$ ), BBS plus tDCS 그룹( $d=1.54$ )이 BBS 그룹( $d=0.63$ )보다 현저히 큰 개선 효과를 나타냈다. 이러한 결과는 만성 발목 불안정성 환자들에게 tDCS가 추가적인 치료 효과를 제공할 수 있음을 입증하며, tDCS가 운동 피질의 흥분성을 조절하여 발목 관절의 고유수용성 감각과 균형 능력을 향상시킬 수 있다는 선행 연구 결과들과 일치한다(Tuna 등, 2023; Ma 등, 2020).

CAI 환자들은 중추 신경계 변화로 인한 신경근 기능 저하, 근력 약화, 주변 근육들의 발화 시간 지연 등으로 인해 재발되는 특징을 보인다(Konradsen 등, 2000; Zech 등, 2009). 본 연구에서 관찰된 균형 훈련과 tDCS의 병행 효과는 균형 유지에 필요한 신경 회로의 향상된 활성화로 설명될 수 있다. 특히 M1에 대한 tDCS 적용은 운동 피질 뉴런의 자발적 발화율을 증가시키고, 척수 뉴런에 도달하는 하강 신경 섬유의 효율성을 향상시켜 척수 네트워크의 흥분성을 높이는 것으로 알려져 있다(Nitsche과 Paulus, 2001; Roche 등, 2011). 또한 근육 간 연결성과 피질 근육 결합의 증가(Bao 등, 2019; Tanaka 등, 2009; Muthukumaraswamy, 2011)를 통해 정적 균형 능력이 향상될 수 있다.

tDCS의 효과는 자극 강도와 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 일부 선행 연구에서 tDCS가 정적 균형 능력 향상에 영향을 미치지 않는다고 보고하였으나(Grimaldi과 Manto, 2013), 이는 주로 낮은 자극 강도( $0.05 \text{ mA/cm}^2$  미만)를 사용한 경우였다(Craig과 Dumas, 2017; Kaminski 등, 2017). 본 연구에서는  $1.5 \text{ mA}$ 의 강도로 20분 이상 지속적 자극을 제공하여 유의미한 균형 지수의 개선을 달성할 수 있었다. 이는 적절한 자극 강도와 지속 시간의 중요성을 시사한다.

관절가동범위와 관련하여, 본 연구의 운동피질 양극 자극은 발등 굽힘 각도에 유의한 영향을 미치지 않았다( $p>0.05$ ). 이는 일차 체성감각피질 영역에 음극 tDCS를 적용하여 발목 관절의 ROM 개선을 보고한 선행연구(Mizuno과 Aramaki, 2017)와는 대조적인 결과이다. 이러한 차이는 전극의 위치, 크기, 자극 밀도 등 다양한 요인에 기인할 수 있으며(Craig과 Dumas, 2017; Pohjola 등, 2017), 향후 추가적인 연구가 필요한 영역이다.

본 연구의 결과는 CAI가 단순한 말초 손상이 아닌 중앙 처리 결함과 관련된 복잡한 상태라는 관점(Suttmilller과 McCann, 2020)을 지지하며, tDCS가 이러한 중추신경계 수준의 개입을 통해 치료 효과를 나타낼 수 있음을 시사한다. 그러나 본 연구는 몇 가지 제한점을 가지고 있다. 첫째, 연구 대상이 젊고 건강한 인구로 한정되어 있어 노인이나 신경학적 질환자에 대한 일반화가 제한적이다. 둘째, tDCS 자극이 목표 영역 외 주변 뇌 부위에도 영향을 미칠 수 있는 가능성을 완전히 통제하지 못했다. 셋째, 즉각적 효과만을 측정하여 중장기적 효과를 확인하지 못했다. 이러한 제한점을 고려할 때, 향후 연구에서는 다양한 연령대와 임상적 특성을 가진 대상자들을 포함하고, 장기적인 추적 관찰을 통해 tDCS와 균형 훈련 병행의 지속적 효과를 검증할 필요가 있다. 또한 최적의 자극 매개변수(강도, 지속시간, 전극 위치 등)를 결정하기 위한 체계적인 연구가 요구된다.

## V. 결 론

본 연구는 만성 발목 불안정성이 있는 젊은 성인들의 재활에서 tDCS와 균형 훈련을 결합시킨 동시 중재가 정적 균형 회복에 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다. 이러한 결과는 향후 만성 발목 불안정성 치료에 있어 tDCS와 정적 균형 훈련의 병행이 균형 능력 향상과 발목 불안정성 감소에 잠재적인 치료적 이점을 가질 수 있음을 보여준다.

## 감사의 글

본 연구는 2024년 광주보건대학교 연구비 지원(2024007)으로 수행되었다.

## 참고문헌

- 김선호. 만성 뇌졸중 환자를 대상으로 한 일차 체성 감각 피질을 자극한 경두개 직류 전류 자극이 라이프 케어 증진을 위한 체성각각과 상지 기능에 미치는 영향. 한국엔터테인먼트산업학회논문지 2020;14(6):269-277.
- 김장곤, 이석주, 이신영 등. 일반인의 발목 관절에 키네시오 테이핑 적용이 고유감각에 미치는 영향. 대한물리치료과학회지 2016;23(1):18-23.
- 정희성, 정성훈, 이인재 등. 기능적 및 기계적 발목 불안정성 분류에 관한 설문지들의 신뢰성 및 타당도 검증. 대한스포츠의학회지 2022;40(4):226-233.
- 홍완성, 김기원. 발목관절 복합체의 가동범위 측정을 위한 중립위치와 측정방법의 신뢰도. 대한물리치료학회지 2011;23(4):45-51.
- Bao SC, Wong WW, Leung TWH et al. Cortico-muscular coherence modulated by high-definition transcranial direct current stimulation in people with chronic stroke. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng 2019;27(2):304-313. doi:10.1109/TNSRE.2018.2890001.
- Bryan L Riemann, Scott M Lephart. (2002). The sensorimotor system, part I: the physiologic basis of functional joint stability. Journal of athletic training, 37(1):71-79.
- Cheung RT, Sze LK, Mok NW et al. Intrinsic foot muscle volume in experienced runners with and without chronic plantar fasciitis. J Sci Med Sport 2016;19(9):713-715. doi:10.1016/j.jsams.2015.11.004.
- Craig CE, Dumas M. Anodal transcranial direct current stimulation shows minimal, measure-specific effects on dynamic postural control in young and older adults: A double blind, sham-controlled study. PLoS One 2017;12(1). doi:10.1371/journal.pone.0170331.
- De Oliveira Lira JL, Ugrinowitsch C, Fecchio R et al. Minimal detectable change for balance using the Biodex Balance System in patients with Parkinson disease. PM R 2020;12(3):281-287. doi:10.1002/pmrj.12216.
- Donahue M, Simon J, Docherty CL. Critical review of self-reported functional ankle instability
-



- measures. *Foot Ankle Int* 2011;32(12):1140–1146.
- Dutta A, Chugh S. Effect of transcranial direct current stimulation on cortico-muscular coherence and standing postural steadiness. *The 2nd IASTED International Conference on Assistive Technologies* 2012:643–646.
- Dutta A, Chugh S, Banerjee A et al. Point-of-care-testing of standing posture with Wii balance board and Microsoft Kinect during transcranial direct current stimulation: a feasibility study. *NeuroRehabilitation* 2014;34(4):789–798. doi:10.3233/NRE-141077.
- Flix-Díez L, Delicado-Miralles M, Gurdíel-Álvarez F et al. Reversed polarity bi-tDCS over M1 during a five days motor task training did not influence motor learning: a triple-blind clinical trial. *Brain Sci* 2021;11(6):691.
- Giancattarina M, Grandperrin Y, Nicolier M et al. Acute effect of transcranial direct current stimulation (tDCS) on postural control of trained athletes: A randomized controlled trial. *PLoS One* 2024;19(1). doi:10.1371/journal.pone.0286443.
- Grimaldi G, Manto M. Anodal transcranial direct current stimulation (tDCS) decreases the amplitudes of long-latency stretch reflexes in cerebellar ataxia. *Ann Biomed Eng* 2013;41:2437–2447.
- Hass CJ, Bishop MD, Doidge D et al. Chronic ankle instability alters central organization of movement. *Am J Sports Med* 2010;38(4):829–834. doi:10.1177/0363546509351562.
- Hertel J. Sensorimotor deficits with ankle sprains and chronic ankle instability. *Clin Sports Med* 2008;27(3):353–vii. doi:10.1016/j.csm.2008.03.006.
- Hiller CE, Refshauge KM, Bundy AC et al. The Cumberland ankle instability tool: a report of validity and reliability testing. *Arch Phys Med Rehabil* 2006;87(9):1235–1241.
- Hou J, Nitsche MA, Yi L et al. Effects of transcranial direct current stimulation over the primary motor cortex in improving postural stability in healthy young adults. *Biology (Basel)* 2022;11(9):1370. doi:10.3390/biology11091370.
- Ibrahim MS, Mattar AG, Elhafez SM. Efficacy of virtual reality-based balance training versus the Biodex balance system training on the body balance of adults. *J Phys Ther Sci* 2016;28(1):20–26. doi:10.1589/jpts.28.20.
- Jang C, Huang DB, Li XM et al. Effects of balance training on dynamic postural stability in patients with chronic ankle instability: systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *J Sports Med Phys Fitness* 2022;62(12):1707–1715.
- Kaminski E, Hoff M, Rjosk V et al. Anodal transcranial direct current stimulation does not facilitate dynamic balance task learning in healthy old adults. *Front Hum Neurosci* 2017;11:16. doi:10.3389/fnhum.2017.00016.
- Kaski D, Quadir S, Patel M et al. Enhanced locomotor adaptation aftereffect in the "broken escalator" phenomenon using anodal tDCS. *J Neurophysiol* 2012;107(9):2493–2505. doi:10.1152/jn.00223.2011.
- Konor MM, Morton S, Eckerson JM et al. Reliability of three measures of ankle dorsiflexion range of motion. *Int J Sports Phys Ther* 2012;7(3):279–287.
-

- Konradsen L, Magnusson P. Increased inversion angle replication error in functional ankle instability. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2000;8:246–251.
- Lee BH, Kim CK, Lee HS. The effects of kinesio taping applied to regions on balance index. *J Coaching Dev* 2010;12(4):99–104.
- Lee E, Cho J, Lee S. Short-foot exercise promotes quantitative somatosensory function in ankle instability: a randomized controlled trial. *Med Sci Monit* 2019;25:618–626. doi:10.12659/MSM.912785.
- Lepley AS, Ericksen HM, Sohn DH et al. Contributions of neural excitability and voluntary activation to quadriceps muscle strength following anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee* 2014;21(3):736–742.
- Li M, Tian S, Sun L et al. Gait analysis for post-stroke hemiparetic patient by multi-features fusion method. *Sensors* 2019;19(7):1737.
- Luan L, Adams R, Witchalls J et al. Does strength training for chronic ankle instability improve balance and patient-reported outcomes by clinically detectable amounts? A systematic review and meta-analysis. *Phys Ther* 2021;101(7).
- Ma Y, Yin K, Zhuang W et al. Effects of combining high-definition transcranial direct current stimulation with short-foot exercise on chronic ankle instability: A pilot randomized and double-blinded study. *Brain Sci* 2020;10(10):749.
- McKeon PO, Fourchet F. Freeing the foot: integrating the foot core system into rehabilitation for lower extremity injuries. *Clin Sports Med* 2015;34(2):347–361. doi:10.1016/j.csm.2014.12.002.
- 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(3):293–304. doi:10.4085/1062-6050-43.3.293.
- McKeon PO, Hertel J, Bramble D et al. The foot core system: a new paradigm for understanding intrinsic foot muscle function. *Br J Sports Med* 2015;49(5):290. doi:10.1136/bjsports-2013-092690.
- Mizuno T, Aramaki Y. Cathodal transcranial direct current stimulation over the Cz increases joint flexibility. *Neurosci Res* 2017;114:55–61. doi:10.1016/j.neures.2016.08.004.
- Mollà-Casanova S, Inglés M, Serra-Añó P. Effects of balance training on functionality, ankle instability, and dynamic balance outcomes in people with chronic ankle instability: Systematic review and meta-analysis. *Clin Rehabil* 2021;35(12):1694–1709.
- Muthukumaraswamy SD. Temporal dynamics of primary motor cortex gamma oscillation amplitude and piper corticomuscular coherence changes during motor control. *Exp Brain Res* 2011;212(4):623–633. doi:10.1007/s00221-011-2775-z.
- Needle AR, Lepley AS, Grooms DR. Central nervous system adaptation after ligamentous injury: a summary of theories, evidence, and clinical interpretation. *Sports Med* 2017;47(7):1271–1288. doi:10.1007/s40279-016-0666-y.
- Nitsche MA, Paulus W. Sustained excitability elevations induced by transcranial DC motor cortex stimulation in humans. *Neurology* 2001;57(10):1899–1901. doi:10.1212/wnl.57.10.1899.
-

- Norkin CC, White DJ. Measurement of Joint Motion: A Guide to Goniometry. 5th ed. F.A. Davis Company; 2016.
- Pietrosimone BG, Lepley AS, Ericksen HM et al. Neural excitability alterations after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Athl Train* 2015;50(6):665-674. doi:10.4085/1062-6050-50.1.11.
- Pohjola H, Kotilainen T, Lehto SM. Using transcranial direct current stimulation to enhance performance in balance tasks. *Clin Neurophysiol* 2017;128:501-502.
- Roche N, Lackmy A, Achache V et al. Effects of anodal transcranial direct current stimulation over the leg motor area on lumbar spinal network excitability in healthy subjects. *J Physiol* 2011;589(Pt 11):2813-2826. doi:10.1113/jphysiol.2011.205161.
- Suttmiller AM, McCann RS. Neural excitability of lower extremity musculature in individuals with and without chronic ankle instability: A systematic review and meta-analysis. *J Electromyogr Kinesiol* 2020;53:102436.
- Tanaka S, Hanakawa T, Honda M et al. Enhancement of pinch force in the lower leg by anodal transcranial direct current stimulation. *Exp Brain Res* 2009;196(3):459-465. doi:10.1007/s00221-009-1863-9.
- Tuna Erdoğan E, Kır C, Beycan E et al. Acute effect of single-session cerebellar anodal transcranial direct current stimulation on static and dynamic balance in healthy volunteers. *Brain Sci* 2023;13(7):1107.
- Ward S, Pearce AJ, Pietrosimone B et al. Neuromuscular deficits after peripheral joint injury: a neurophysiological hypothesis. *Muscle Nerve* 2015;51(3):327-332. doi:10.1002/mus.24463.
- Wright CJ, Linens SW, Cain MS. A randomized controlled trial comparing rehabilitation efficacy in chronic ankle instability. *J Sport Rehabil* 2016;26(4):238-249.
- Xiao S, Wang B, Zhang X et al. Acute effects of high-definition transcranial direct current stimulation on foot muscle strength, passive ankle kinesthesia, and static balance: A pilot study. *Brain Sci* 2020;10(4):246.
- Yitayeh A, Teshome A. The effectiveness of physiotherapy treatment on balance dysfunction and postural instability in persons with Parkinson's disease: a systematic review and meta-analysis. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 2016;8:17. doi:10.1186/s13102-016-0042-0.
- Zech A, Hübscher M, Vogt L et al. Neuromuscular training for rehabilitation of sports injuries: a systematic review. *Med Sci Sports Exerc* 2009;41(10):1831-1841.
-