

대한물리치료과학회지

Journal of Korean Physical Therapy Science
2026. 09. Vol. 33, No.3 pp. 82-92

유연성 평발에서 신경근전기자극을 병행한 짧은 발 운동 시 엄지발림근활성도와 안쪽 세로활각도

고은경

마산대학교 물리치료과

Electromyographic Activity of Abductor Hallucis Muscle and Medial Longitudinal Arch Angle during Short Foot Exercise with Neuromuscular Electrical Stimulation in Individuals with Flexible Flatfoot

Eun Kyung Koh, Ph.D., P.T.

Dept. of Physical Therapy, Masan University

Abstract

Background: The aim of this study was to find out whether doing intrinsic foot exercises together with neuromuscular electrical stimulation (NMES) would improve the activity of the abductor hallucis (Abd.H.) muscle and change the angle of the medial longitudinal arch in individuals with flexible flatfoot.

Design: Cross-Sectional Design

Methods: Thirty students with flexible flatfoot were divided into an experimental group (SFE + NMES) and a control group (SFE + sham NMES). Both groups did the same short foot exercise, but only the experimental group received real electrical stimulation. Muscle activity was measured with EMG, and arch angle was assessed using a photo-based app before and after the intervention.

Results: In the experimental group, EMG activity of Abd.H increased significantly after the intervention ($p < .05$). In the control group, the EMG muscle activity significantly decreased after the intervention ($p < .05$). The mean

changes of EMG activity of the Abd.H between groups was statistically significant ($p < .05$). However, there were no significant changes in the medial longitudinal arch angle in either group ($p > .05$).

Conclusion: Combining NMES with short foot exercise increased Abd.H muscle activity by 18%MVIC in the experimental group. Although no significant change was found in arch angle, improved muscle activation may help support foot function. This suggests that short foot exercise with NMES can be helpful to flatfoot rehabilitation.

Key words: Flexible flat foot, Medial longitudinal arch, Neuromuscular electrical stimulation

교신저자

고은경

51217 마산대학교 창의학 물리치료과

T:055-230-1351 E: koht@masan.ac.kr

I. 서론

인체의 발은 신체의 안정성과 운동성을 동시에 담당하는 주요 구조로, 발바닥의 아치는 충격 흡수와 균형 유지에 중요한 역할을 한다(Kuhn 등, 1999). 아치는 안쪽 세로아치와 가로아치로 구성되며, 이 중 안쪽 세로아치는 지면 반발력을 완화하고 체중을 분산시키며 보행 시 안정성을 제공하는 핵심 요소로 작용한다(Han 등, 2011). 발의 목말밑관절(subtalar joint; ST j.)에서의 엹침(pronation)은 목말뼈가 모음과 발바닥쪽굽힘되고, 발꿈치뼈가 가쪽번짐된 상태이며, 발의 엹침은 안쪽 세로아치가 무너져 안쪽 발이 지면과 가까워지는 것을 의미한다(Jung 등, 2011).

안쪽 세로아치의 붕괴는 평발(flat foot)의 주요 원인으로, 평발은 강직성(rigid) 평발과 유연성(flexible) 평발로 구분된다. 강직성 평발은 체중 부하 여부에 관계없이 아치가 지속적으로 무너져 있는 상태이며, 유연성 평발은 비체중 상태에서 아치가 유지되다가 체중이 실리게 되면 아치가 소실되거나 과도하게 내려가는 형태를 보인다(Kuhn 등, 1999). 평발은 단순한 족부 구조의 이상을 넘어 전신적인 기능 손상으로 이어질 수 있는 정형외과적 문제이다. 평발은 발의 엹침을 유발하며, 이는 하체 과사용으로 인한 부상에 기여할 수 있다고 하였다(Harradine과 Bevan, 2009). 평발을 가진 사람들은 무릎과 허리 통증을 겪게 된다고 하였다(Kosashvili 등, 2008). 이러한 문제를 해결하기 위해서 많은 연구에서 중재로 짧은 발 운동(short foot exercise; SFE)이 널리 활용되고 있다. 짧은 발 운동은 발허리뼈 머리를 발꿈치 쪽으로 당기는 방식으로 내재근을 활성화하고, 발가락을 구부리지 않은 상태에서 발의 안정성을 증진 시키는 운동이다. 이 운동은 발배뼈(navicular bone)의 하강(drop)을 줄이고 내재적 발 근육의 활동을 증가시킬 수 있으며 안쪽세로활이 낮아지는 것을 예방하는데 효과적이다(Namsawang 등, 2019). 짧은 발 운동이 발의 내재근을 효과적으로 활성화시킨다는 근거도 제시되고 있다. 짧은 발 운동과 발가락 오므리기 운동(toe curl exercise)을 비교한 연구에서는, 짧은 발 운동이 엄지발림근의 근전도 활성도를 유의하게 증가시키고, 안쪽세로아치 각도를 개선하는 데 더 효과적인 것으로 나타났다(Jung 등, 2011). 또한 16편의 관련 선행연구를 분석한 문헌 고찰에서는 짧은 발 운동이 아치 유지, 내재근 강화, 균형 및 보행 능력 향상에 긍정적인 효과를 보였으며, 특히 체중 부하 상태, 30도 발목 굽힘 자세, 또는 바이오포드백을 병합했을 때 더 높은 엄지발림근, 짧은엄지굽힘근, 발의 내재근의 근 활성도가 나타난다고 보고되었다(황룡 과 최영준, 2018).

신경근 전기자극기(NMES; neuromuscular electrical stimulation)는 약화된 근육을 직접 자극하여 수의적 수축을 유도하고 근기능을 강화시키는 보조 기기로, 내재근의 근활성도 향상에 효과적이다(Abd-Elmonem 등, 2021). 특히 엄지발림근(Abd.H)에 전기 자극을 통해 발바닥 내재근을 강화하여 보행 움직임 패턴에도 변화가 나타났으며 이것은 곧 안쪽 세로아치를 지지하는 기능이 향상되어 기능적 움직임 개선에 긍정적인 영향을 준다고 알려져 있다(Okamura 등, 2019). Shimoura 등(2020)의 연구에서 신경근전기자극을 이용한 엄지발림근의 신경근재교육은 엄지발림근의 근활성도를 증가시키고 근력을 향상시켰고 또한 엄지발가락가쪽굽힘(hallux valgus) 각도에 영향을 주었다고 하였다. 이는 신경근전기자극에 의한 엄지발림근에 수축 감각을 활성화하여 수의적 수축이 발생한다고 하였다. 그러나 유연성평발이 있는 대상자에서 신경근 전기자극과 체중부하상태에서 짧은발운동을 병행하여 근활성도변화를 연구한 논문은 미비하다. 따라서 본 연구는 유연성 평발을 가진 20대 청년들을 대상으로 짧은 발 운동과 신경근전기자극기를 병행한 중재가 내재근인 엄지발림근의 근활성도에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 연구 가설은 다음과 같다. 실험군(NMES + SFE)은 중재 전보다 중재 후의 근활성도가 증가할 것이고 발배뼈 높이에 변화가 있을 것이다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 20대의 유연성 평발을 대상으로 실시하였다. 연구 참여자는 총 30명을 모집하였고 대상자 선별 시 다음과 같은 선정기준을 만족한 대상자를 선정하였다. 1) 발뒤꿈치뼈 중심선 각도(resting calcaneal stance position: RCSP)가 5도 이상인 경우(Cho 등, 2019), 2) 발배뼈 하강 검사(ND test)에서 1cm 이상의 높이 차이가 있을 경우 사전 선별 검사를 통해 유연성 평발로 진단된 자(Cote 등, 2005; Zahran 등, 2017)로 하였다. 연구 대상자 제외 기준은 다음과 같았다. 1) 다음과 같은 하지 또는 족부에 급성 통증 또는 손상이 있는 경우(Namsawang 등, 2019), 2) 신경 또는 근골격계 질환 진단 이력이 있는 경우(Namsawang 등, 2019), 3) 신경근전기자극에 대한 의학적 금기사항이 있는 자는 대상자에서 제외하였다(Okamura 등, 2019). 본 연구의 목적에 부합하는 표본으로 간주되었으며, 최종 선정된 30명의 대상자를 실험군과 대조군에 같은 비율로 배정하기 위해 단순무작위 배정(simple randomization)을 실시하였다. 측정자 한 명이 난수표를 이용해 30명의 무작위 배정순서를 생성하여 해당 순서를 실험군(0)과 대조군(1)으로 표기하여 봉투에 봉인하였다. 대상자가 순차적으로 봉투를 개봉하여 군을 확정하였고 최종적으로 실험군 15명, 대조군 15명으로 균등하게 배정하였다. 연구 대상자에게는 실험 전 실험의 목적, 절차, 예상되는 효과 및 불편함에 대해 충분히 설명하였으며, 모든 대상자에게 자발적인 동의를 받아 서면 동의서를 받고 연구에 참여하게 하였다. 또한, 대상자 성명과 연락처 등은 개인정보보호법에 따라 비식별화 처리되었으며, 연구 종료 후 안전하게 폐기되었다.

2. 연구 설계

본 연구는 자발적 참여를 한 30명의 지원자 중 발이나 발목 부상 또는 수술 이력이 있는 자, 평발의 기준에 어긋나는 자, 근골격계 질환이 있는 자, 신경학적 질환이 있는 자, 심혈관 질환 및 심장 박동기를 사용하는 자, 심각한 피부 질환을 가진 자는 대상자에서 제외되었다(Namsawang 등, 2019). 신경근전기자극을 적용했을 때 발의 세로아치 높이와 엄지발가락의 근활성도의 변화를 알기 위한 연구로써 연구 절차는 다음과 같다(Fig.1).

3. 실험절차

연구는 총 2025년 4월 14일부터 5월 12일까지 진행되었다. 실험 시작 전 각 대상자에게 10분간의 짧은 발 운동 교육을 제공하여 측정 신뢰도를 높였다. 중재 전, 모든 대상자는 발배뼈 높이, 발뒤꿈치뼈 중심선각도(RCSP), 엄지발가락 근 근활성도에 대한 기초 평가를 하였다. 측정자 3명 중 1명은 근활성도 측정을 하였고 다른 한 명은 아치 높이를 측정하였다. 마지막 측정자는 전기자극과 짧은 발 운동을 실시하였다. 이때 전기자극을 한 측정자를 제외하고 대상자들은 신경근전기자극이 동반된 실험군과 위약군으로 구분되지 알 수 없도록 단일 블라인드(single blind) 처리하였다. 실험은 30분 동안 각 측정 별 동일한 측정자에 의해 수행되었다. 중재 전 각 대상자는 골반 너비로 서서 중립자세로 골반과 척추를 바르게 세우고 발허리뼈 머리(metatarsal head)를 뒤꿈치(heel) 쪽으로 당기도록 하여 근활성도와 안쪽 세로활각도를 5초 동안 측정하였고 2분 휴식 후 반복측정하였다(차상민 등, 2017). 모든 대상자는 동일한 환경에서 실험군에서는 20분 간 짧은 발운동 동안 신경근전기자극치료를 병행하였고, 대조군에서는 20분 간 짧은 발운동과 위약 신경근전기자극(0mA)중재를 받았다. 근활성도와 안쪽 세로활각도를 중재 전, 중재 후 측정하였다. 중재 후 즉시

실험군과 대조군 모두 엄지발가락 별립근의 근활성도를 측정하였다.

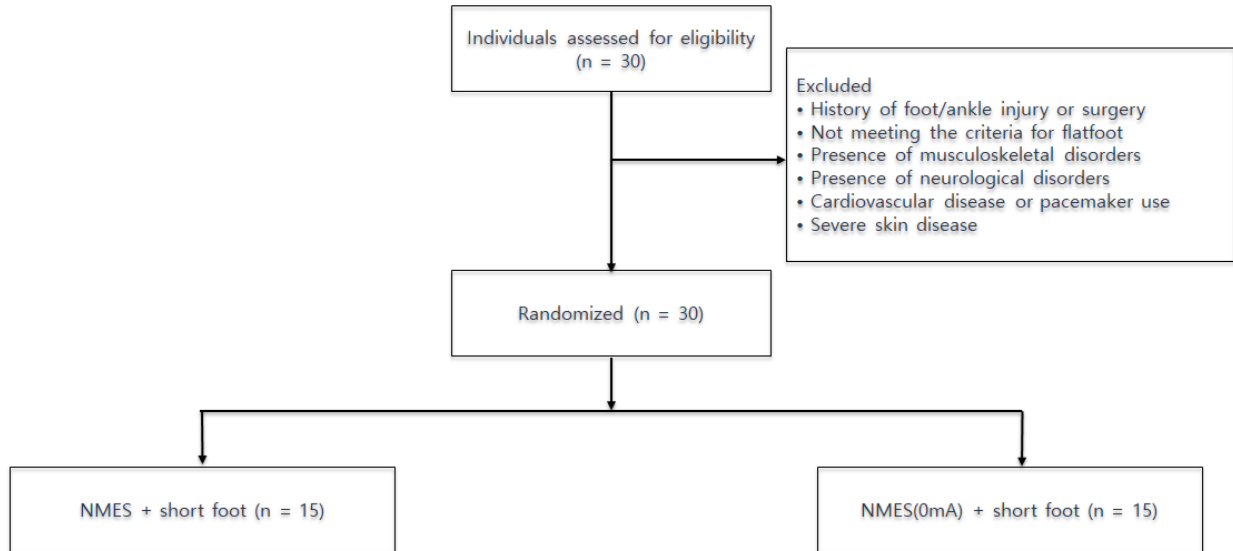


Fig 1. Study design

4. 중재방법

본 연구에는 유연성 평발을 가진 대학생 30명이 참여하였다. 대상자들은 단순 무작위 배정을 통해 두 집단으로 나뉘었다. 신경근전기자극기(CEFAR REHAB 4 PRO, Sweden)는 무게 350g, 크기는 85×135×40mm이다. 매개변수는 4개의 채널, 대칭 이상맥동파, 강도는 0mA에서 120mA 사이에서 조절 가능한 휴대용 전기자극기이다. 음극의 활성전극은 엄지발가락별립근의 근힘살(muscle belly)에 부착하고, 양극의 비 활성전극은 첫 번째 발허리뼈의 머리 뒤쪽에 부착하였다(Abd-Elmonem 등, 2021).

실험군은 짧은 발 운동(SFE) 동안 신경근전기자극기(NMES)를 적용하였고, 전기자극 주파수는 25Hz, 맥동기간 250us, 수축기간 10초, 휴식시간 20초로 적용하였고 전류강도(intensity)는 근육수축이 충분히 발생되고 통증 없이 견딜 수 있는 최대 강도로 설정하였다. 운동적용 시간은 짧은 발 운동 10초 운동 20초 휴식을 하며 총 20분 간 실시하였다.

대조군은 짧은 발 운동(SFE)과 위약 신경근전기자극(0mA)을 적용하였다. 이 때 전기자극은 전류를 0mA로 하여 수행하였다(Lee 등, 2020). 운동시간은 짧은 발 운동 10초 운동 20초 휴식을 제공하여 총 20분 간 실시하였다. 중재에 앞서 모든 참가자에게 정확한 자세 유지를 위한 사전 교육을 10분간 실시하였다. 실험군과 대조군 모두 짧은발 운동 중재 후 즉시 엄지발가락 별립근의 근활성도를 측정하였다. 대상자의 근 피로도를 줄이기 위해 각 운동 별로 1분 간 휴식을 취해주고 세 번의 측정값은 앞, 뒤 2초를 제외하고 3초 간의 평균값을 분석에 활용하였다.

5. 측정 도구 및 방법

1) 발뒤꿈치뼈 중심선 각도 (RCSP)

연구 대상자를 침상에 엎드린 자세(prone position)로 눕게 한 다음 열린 사슬 구조(open kinetic chain)에서 발뒤꿈치뼈의(calcaneus) 안쪽과 바깥쪽의 경계면을 잡아서(border), 그 사이 중앙점을 표기하였다(calcaneus bi-section). 다음으로 연구 대상자를 기립 자세를 유지 시킨 후 수직계(goniometer)를 이용하여 지면과 이루는 각도를

측정하였다(양서은, 2020).

2) 발배뼈 하강 검사 (Navicular drop test)

연구 대상자는 의자에 앉아 무릎을 90°로 굽힘하였다. 연구자는 연구 대상자의 목발밑관절(subtalar joint)을 잡고 중립 위치에 놓았다. 발배뼈거친면 (navicular tubercle)의 가장 두드러진 뼈의 위치를 확인 후 펜으로 표시하였다. 발배뼈거친면의 수직 높이를 눈금자를 통해 측정하였다. 그런 다음 연구 대상자를 두 발로 균일하게 서게 하여 체중 지지 후 발배뼈거친면의 수직 높이를 다시 측정하였다. 앉은 자세와 선 자세의 발배뼈거친면 수직 높이 차이를 3회 측정하여 평균값을 사용하였다(이동규 등, 2024; Zahran 등, 2017). 발배뼈 하강 검사의 측정자 내 급관상관계수는 ICC= 0.92-0.94이며, 측정자 간 급관상관계수는 ICC= 0.91-0.94이다(Zuil-Escobar 등, 2018).

3) 엄지벌림근 근활성도 측정

본 연구에서 대상자의 엄지벌림근 근활성도를 측정하기 위해 무선 근전도(NORAXON Ultium, U.S.A)를 이용하여 자료를 수집하였다. 피부의 유분을 제거하기 위해 전극 부착 부위는 제모를 하고 알코올 솜으로 피부 표면을 닦았다. 표면근전도 신호를 수집하기 위해 대역통과필터(band pass filter)는 20-500Hz, 표본추출률(sampling rate)은 1,000Hz로 설정하였다. 근전도 신호의 정량적 분석(quantitative analysis)을 위해 실효치값(root mean square, RMS)을 사용하였다. 표면근전도 전극의 부착위치는 전기자극기의 표면전극의 부착위치와 동일하게 적용하였고 한 개의 전극은 엄지벌림근의 근힘살에 부착하였고 다른 한 개의 전극은 첫 번째 발허리뼈 머리 뒤쪽에 부착하였다(Fig. 2). 엄지벌림근의 근활성도를 표준화하기 위해 엄지벌림근의 최대등척성수축(maximal voluntary isometric contraction; MVIC)를 측정하였다. 환자는 의자에 앉은 상태에서 하지의 열린 사슬 구조 자세에서 엄지발가락의 모음, 펴 방향으로 저항을 주고, 환자는 저항에 대항하여 발가락을 벌림시킨 후 굽힘하였다(Shimoura 등, 2020). 근 활성도는 5초 동안 3회 측정했고 처음과 마지막 부분을 제외한 3초 동안 평균 근전도 신호량을 100%MVIC로 사용하였다. 엄지벌림근의 근활성도는 위와 같이 전극을 부착하여 실효 평균값을 사용하여 %MVIC로 계산하였다.

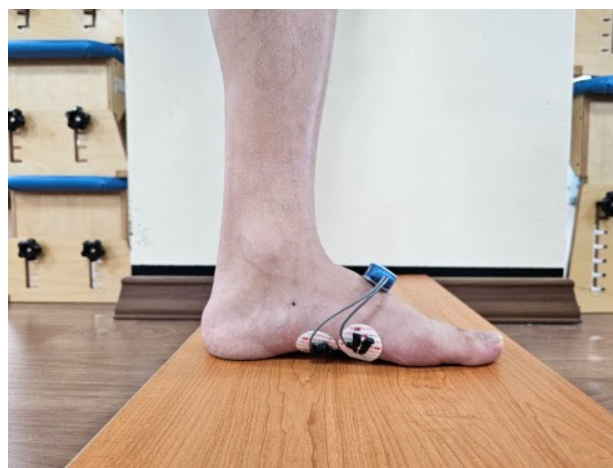


Fig 2. EMG activity of Abductor hallucis measurement

4) 각도 측정 애플리케이션(Angle meter 360)

대상자의 안쪽 세로활 각도 측정을 하기위해 발배뼈거친면, 첫 번째 발허리뼈의 머리 안쪽면, 발꿈치뼈 안쪽 부분에 펜을 사용하여 표시를 하였다. 발꿈치뼈 안쪽 부분에 마커를 찍었다. 발꿈치뼈 안쪽 부분은 남성 대상자인 경우에는 발바닥으로부터 40mm위, 발꿈치뼈 뒤쪽으로부터 35mm 지점에 표시하였고, 여자 대상자인 경우에는 발바닥으로부터 30mm 위, 발꿈치뼈 뒤쪽으로부터 30mm 지점에 표시하였다(송성인, 2024). 우세측 발의 발배뼈거친면에서 20cm 떨어진 지점에 스마트폰을 이용하여 발의 운동 전과 후를 촬영하였다. 촬영이 된 사진은 각도 측정 애플리케이션을 사용하였다. 이 애플리케이션은 측정 대상자의 사진에서 특정 지점 간의 위치를 기반으로 각도를 실시간으로 분석할 수 있으며, 측정된 데이터를 바탕으로 관절 각도를 정밀하게 측정하는 기능을 제공한다. 본 연구에서는 이 애플리케이션을 활용하여 첫 번째 발허리뼈 머리 안쪽면, 발배뼈거친면, 발꿈치뼈 안쪽 부분의 점을 연결하여 안쪽 세로활각도를 측정하였다(Jung 등, 2011) (Fig. 3).

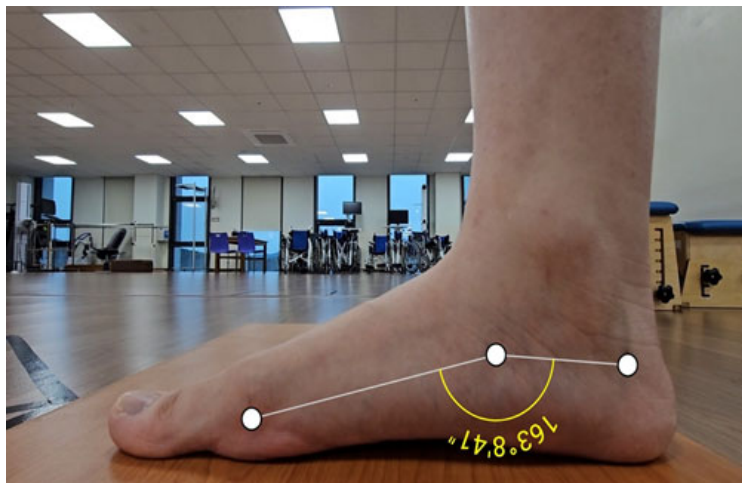


Fig 3. Medial longitudinal arch (MLA) measurement

6. 분석방법

수집된 자료는 윈도우용 SPSS ver. 26.0을 이용하여 분석하였다. 대상자의 동질성 검정을 위해 Levene's test를 이용하여 등분산 검사를 실시하였다. 종속변수가 정규분포인지 확인하기 위해 샤피로-윌크(Shapiro-wilk) 검정을 실시한 결과 근활성도와 안쪽세로활각도는 정규성이 확인되었다($p>.05$). 그룹 내 근활성도의 치료 전, 후 차이를 알아보기 위해 짝비교검정(paired t -test)을 실시하였다, 엄지벌림근 근활성도의 그룹 간 치료 전과 후의 차이값을 비교하기 위하여 샤피로-윌크(Shapiro-wilk) 검정을 실시하였고 근활성도는 정규성이 있어($p>.05$), 독립검정(independent sample t -tests)을 실시하였다. 안쪽세로활각도는 비정규성이 확인되어($p<.05$), 맨휘트니 검사(Mann-Whitney U test)를 실시하였다. 통계적 유의성을 검정하기 위한 유의수준은 $\alpha = .05$ 로 하였다.

III. 연구결과

1. 연구대상자의 일반적 특성

본 연구에 참여한 30명 중 실험군(NMES+SFE)은 15명이었고, 대조군은 15명이었다. 평균 나이는 실험군에서

24.13±2.30세, 대조군은 24.20±3.36세이며, 평균 신장은 실험군에서 173.48±7.57cm, 대조군은 170.20±8.90cm이었다. 평균 체중은 실험군에서 73.27±12.13kg, 대조군은 73.47±20.25kg이었다. 실험군의 발사이즈는 270.33±15.98mm이고, 대조군은 262.0±25.90mm이다. 발배뼈 하강검사(ND)는 실험군에서 1.12±0.14cm이고 대조군은 1.17±0.18cm이다. 발뒤꿈치뼈 중심선 각도는 실험군에서 7.53±2.30°이고, 대조군에서는 5.78±2.12°이다. 체질량지수는 실험군에서는 24.25±2.82였고 대조군에서는 24.96±4.61이었다. Levene's test를 이용하여 등분산 검사를 실시하였고, 발뒤꿈치뼈 중심선 각도를 제외한 변수들은 동질성을 만족하였다($p>.05$)〈Table 1〉.

Table 1. Homogeneity of general characteristics and dependent variables ($N=30$)

Variables	NMES+SFE ($n_1=15$)	Control ($n_2=15$)	t	p
Age(year)	24.13±2.30	24.20±3.36	.06	.95
Height(cm)	173.48±7.57	170.20±8.90	-1.08	.29
Weight(kg)	73.27±12.13	73.47±20.25	.03	.97
BMI(kg/m ²)	24.25±2.82	24.96±4.61	.51	.62
Foot Size(mm)	270.33±15.98	262.00±25.90	-1.06	.30
ND ^a	1.12±0.14	1.17±0.18	-0.92	.37
RCSP ^b	7.53±2.30	5.78±2.12	-2.17	.04

^aNavicular drop test, ^bResting Calcaneal Stance Position, ^cindependent sample t -tests

2. 신경근전기자극이 엄지벌림근 근활성도에 미치는 영향

각 집단의 엄지벌림근의 근활성도는 실험군에서 중재 전은 67.94±27.42%MVIC, 중재 후는 86.59±29.55%MVIC이었다. 대조군의 중재 전은 85.16±25.26%MVIC이었고, 중재 후는 75.03±22.48%MVIC이었다. 각 그룹에서 실험 전과 실험 후의 근 활성도에는 유의한 차이가 있었다($p<.05$)〈Table 2〉. 두 그룹 간 치료 전과 치료 후의 평균변화량(mean change; MC)은 실험군에서의 근활성도는 18.65±30.30%MVIC이었고, 대조군은 -10.13±14.46%MVIC로 두 그룹 간에 통계학적으로 유의한 차이가 있었다($p<.05$)〈Table 3〉.

3. 신경근전기자극이 안쪽세로활각도에 미치는 영향

각 집단의 안쪽세로활각도는 실험군에서 중재 전은 167.65±9.62°, 중재 후는 165.25±7.45°이었다. 대조군에서 중재 전 167.08±8.90°이었고, 중재 후 164.56±8.00°이었고, 각 그룹에서 실험 전과 실험 후의 안쪽세로활각도에는 유의한 차이가 없었다($p>.05$)〈Table 2〉. 두 그룹 간 치료 전과 후 평균변화량(MC)에도 차이가 없었다($p>.05$)〈Table 3〉.

Table 2. Comparison of mean variables between pre and post-intervention ($N=30$)

Variables	Group	Pre	Post	t^c	p
Abd. H ^a muscle activity(%MVIC)	NMES+SFE ($n_1=15$)	67.94±27.42	86.59±29.55	2.38	.03*
	Control ($n_2=15$)	85.16±25.26	75.03±22.48	2.71	.02*
MLA ^b (°)	NMES+SFE ($n_1=15$)	167.65±9.62	165.25±7.45	1.30	.22
	Control ($n_2=15$)	167.08±8.90	164.56±8.00	1.85	.09

^aAbductor hallucis, ^bMedial longitudinal arch, ^cpaired t -test.

Table 3. Comparison of mean changes in variables between the groups ($N=30$)

Variables	NMES+SFE ($n_1=15$)	Control ($n_2=15$)	tc/Zd	p
Abd.H ^a muscle activity(%MVIC)	18.65±30.30	-10.13±14.46	3.32 ^c	<.001
MLA ^b (°)	-2.39±7.15	-2.51±5.26	-.31 ^d	.78

^aAbductor hallucis, ^bMedial longitudinal arch, ^cindependent sample t -test, ^dMann-Whitney U test.

IV. 고 찰

본 연구는 20대 유연성 평발을 대상으로 짧은 발 운동과 신경근전기자극기를 병행했을 때 엄지발림근의 근활성도 및 안쪽 세로아치 각도에 미치는 영향을 분석했다. 연구 결과, NMES+SFE를 한 실험군은 중재 이후 유의한 수준으로 엄지발림근 근활성도 증가를 보였으며($p<.05$), 반면 대조군에서는 오히려 감소하였다. 그러나 세로아치 각도에 있어서는 두 집단 모두 통계적으로 차이는 없었다($p>.05$).

엄지발림근은 내재근 중 하나로, 안쪽 세로아치의 유지에 핵심적인 기능을 담당한다(Han 등, 2011). 본 연구 결과는 약화된 내재근의 기능을 NMES를 통해 강화할 수 있다는 기존 연구들과 일치하며(Abd-Elmonem 등, 2021; Namsawang 등, 2019), 특히 짧은 발 운동 단독 적용보다 근활성도 향상에 더욱 효과적이라는 점에서 선행연구와 유사하였다. Jung 등(2011)은 짧은 발 운동이 엄지발림근 근전도 활성도를 증가시키고 세로아치 각도를 개선하는데 긍정적 효과가 있다고 하였고, 본 연구는 이러한 선행 연구를 넓히는 근거를 추가로 제공하였다. 엄지발림근의 근 활성도는 중재 전 $67.94 \pm 27.42\%$ MVIC이었고 중재 후 $86.59 \pm 29.55\%$ MVIC로 증가하였으며 통계적으로 유의하였다($p<0.05$). Shimoura 등(2020)은 신경근전기자극을 엄지발림근에 20분 적용하여 근활성도가 전기자극 후, 14.3% MVIC 증가하였고 이는 신경계자극을 통해 수의적 수축에 대한 감각을 학습하여 엄지발림근의 근활성도 증가가 있다고 하였다. 본 연구는 엄지발가락 발림근의 짧은 발운동과 병행하여 신경근전기자극을 제공하였고 따라서 근활성도의 평균변화량(MC= 18.65% MVIC)이 향상되는 효과가 있었을 것으로 사료된다.

안쪽 세로아치 각도에서는 실험군(NMES + SFE)에서 중재 전 $167.65 \pm 9.62^\circ$, 중재 후 $165.25 \pm 7.45^\circ$ 로 약 2.39° 감소하였으며, 대조군은 중재 전 $167.08 \pm 8.90^\circ$, 중재 후 $164.56 \pm 8.00^\circ$ 로 약 2.51° 감소하였다. 그러나 두 군 모두 통계적으로 유의한 변화는 나타나지 않았다($p > 0.05$). 이러한 결과는 Okamura 등(2019)의 연구에서 세로아치높이가 -0.3mm 로 유의한 차이를 보이지 않았다는 결과와 일치하며, 단기적 중재만으로는 세로아치 구조에 유의한 변화를 유도하기 어려움을 시사한다. 또한, Kim과 Kim(2016)은 짧은 발 운동과 아치 지지 인soles 각각 5주간 적용한 결과, 짧은 발 운동 군에서만 발배뼈 하강의 유의한 감소가 나타났으나 세로아치 구조의 변화는 제한적이었다고 보고한 바 있어, 본 연구의 결과와 유사한 경향을 보인다. 한편, 세로아치 각도의 변화가 통계적으로 유의하지 않았던 점은 구조적 변화가 단기간의 중재만으로는 나타나기 어렵다는 선행연구(Mulligan과 Cook, 2013)의 주장과 의견이 동일하다. 발배뼈 결절의 높이의 변화는 목말밑관절(ST j.)에서의 변화를 통해 발생한다. 목말발배관절(talonavicular joint)에서의 목말뼈가 발배뼈에 영향을 주어 발꿈치뼈와 목말뼈 사이의 목말밑관절에서 변화가 발배뼈 높이와 관련이 있다. Shimoura 등(2020)은 발 내재근에 신경근전기자극은 신경의 발화(firing) 속도를 증가시키고 서로 다른 운동 단위(motor unit)가 동원되어 근활성도가 증가와 엄지발림근의 근력이 증가되었다고 보고하였다. 본 연구에서는 두

군에서 짧은 발 운동 시 근활성도는 통계적으로 유의하게 증가하였으나, 세로아치가 통계적으로 유의하게 높아지지는 않았다. 차상민(2017) 등은 서 있는 자세에서 엄지발림근은 안쪽 세로아치를 유지하기 위해 협력근인 앞정강근을 동원시키기 때문에 주동근의 불충분한 근활성도는 앞정강근의 근활성도를 증가시킬 수 있다고 보고하였다. 따라서 목말발 배관절에 영향을 주기 위해서는 신경근전기자극을 통해 엄지발림근의 지배신경을 활성화시켜 발내재근 근활성 증가로 앞정강근의 동원률을 감소시키는 방법이 필요하다.

신경근전기자극기는 반복적인 운동 훈련 시 적용하여 운동 재학습을 촉진하는 목적으로 사용된다(Shimoura 등, 2020). Abd-Elmonem 등(2021)은 72명의 유연성 평발을 가진 아동들을 대상으로 36명의 교정운동과 신경근전기자극을 병행한 치료군과 36명의 교정운동과 위약의 신경근전기자극(sham NMES)을 적용한 대조군에 4개월 동안 일주일에 세 번씩 중재하였다. 그 결과 치료군과 대조군의 평발의 방사선 상 내측족궁 각도 뿐 만 아니라 Staheli's arch지수, 발배뼈 높이 등의 임상적인 측정변수 등에 통계학적으로 유의한 향상이 있다고 하였다. 그러나 Namsawang 등(2019)은 유연성 평발을 가진 성인들을 대상으로 18명의 짧은 발운동과 신경근전기자극을 병행한 군과 18명의 짧은 발운동과 위약의 신경근전기자극을 적용한 두 군에서 4주 동안 일주일에 3번 씩 45분 동안 적용하였다. 그 결과 엄지발림근의 근 활성도는 신경근전기자극을 적용한 군에서 통계학적으로 유의한 차이가 있었으나, 단면적과 발배뼈 높이에서는 두 군 간 통계학적인 차이는 없었다. 그러나 본 연구에서는 대조군과 실험군에서 신경근전기자극의 중재를 20분 간의 즉각적인 치료효과를 알아보려고 하였으므로 선행논문들과의 중재기간의 차이가 있었다. 또한, 두 군 모두에서 근활성도와 아치높이를 중재 후 바로 측정했다는 측정시기의 차이가 있었다. 따라서 이러한 중재기간과 중재 후 측정시기의 차이점을 고려해 볼 때 대조군과 실험군에서의 발배뼈 높이에 변화가 없었고 근활성도에서는 유의한 차이가 있었다고 고려된다. 신경근전기자극기는 충분한 강도와 적용기간에 따라 Type II유형의 속근섬유들을 활성화시키는 것이 근육 비대(hypertrophy)에 중요한 인자이다(Neumann, 2010). 또한 신경근전기자극은 일상생활 동안에 자주 활성화하지 않았던 엄지발림근을 재교육시키는 감각을 촉진하고, 전기자극과 함께 강한 엄지발림근의 수축력을 수의적으로 수축시켜 엄지발림의 움직임의 강화한다(Shimoura 등, 2020). Okamura 등(2019)은 발 내재근의 전기자극을 한 실험과 대조군으로 나누어 두 군에서 보행과 기립 시 발배뼈 높이를 측정하였다. 보행 시 실험군과 대조군에서 보행변수에 향상이 있었으나 서 있는 자세에서 발배뼈 높이는 두 군 간에 차이가 없었다. 이는 발내재근이 전기자극에 의해 강화되어 보행 변수에는 영향을 주었으나 발 아치의 구조에는 영향을 주지 못 했다고 하였다. 따라서 충분한 내재근 활성도 증가로 발배뼈 높이를 유지하기 위해서는 신경근전기 자극 시 4주 간의 중재가 필요할 수 있음을 제언한다.

그러나 본 연구는 몇 가지 제한점을 갖게 되는데 첫째, 대상자 수가 제한적이며 특정 집단으로 국한되어 있다는 점에서 결과의 외적 타당도에 제약이 있다. 둘째, 중재 기간이 단기간으로 설정되어 구조적 변화나 기능을 변화시키기에는 한계가 있었다. 셋째, 중재 동안에 보행 분석이나 족저압 측정 등과 같은 동적인 움직임 시 목말발관절의 움직임에 따른 발배뼈 높이의 효과 크기(effect size) 비교가 필요할 것으로 본다. 마지막으로 20대 대학생을 대상으로 하여 무작위배정을 할당하여 연구하였으나 다양한 연령을 대상으로 연구하지 않아 임상에 적용 시 그 효과를 일반화시킬 수는 없다. 그러므로 추후 목말발관절의 변화를 주기 위해 신경근전기자극 시 보행 동안에 목말발관절 옆침을 감소시키는 지에 대해 알아보려고 한다.

V. 결 론

평발대상자에게 발 내재근 근활성화를 위한 신경근전기자극을 엄지발림근에 적용하여 엄지발림근의 근활성도가 짧은 발 운동 시 18%MVIC 증가하였다. 그러나 발 안쪽 세로아치 각도는 감소하였으나 통계학적으로 유의한 변화는

없었다. 이는 짧은 발운동 적용 후 발배뼈 높이를 즉각적으로 변화시키지 못하는 것으로 사료된다. 본 논문의 결과 유연성 평발을 가진 대상자에게 신경근전기자극을 결합한 짧은 발 운동은 발 내재근의 활성도를 증가시켜 근활성도에 따른 근재교육에 영향을 준다. 따라서 임상에서 유연성 평발 대상자의 안쪽 세로아치를 지지하는 발 내재근 재교육을 위해서 신경근전기자극을 병행한 짧은 발 운동을 추천한다.

참고문헌

- 송성인. 발가락 펴고 엉덩관절 벌림을 동반한 짧은 발 운동이 유연성 평발을 가진 성인의 엄지벌림근과 앞정강근 근활성도 및 안쪽세로활 각도에 미치는 영향. [석사학위논문]. 부산가톨릭대학교 일반대학원; 2024.
- 양서은. 발 형태별 한국무용 슈즈 구조에 따른 발 디딤 시 압력분포와 착용감의 차이.[석사학위논문]. 이화여자대학교 교육대학원; 2020.
- 이동규, 안덕현, 유원규 등. 아치테이핑이 유연성 평발을 가진 대상자의 Y-Balance Test와 무릎과 발목의 관절가동범위에 미치는 영향. 한국임상운동치료학회지. 2024;4(1):1-10.
- 차상민, 강민혁, 문동철 등. 근전도 바이오피드백을 이용한 쏫 풋 운동이 정적으로 선 자세 동안 발의 안쪽 세로활 유지에 미치는 영향. 한국전문물리치료학회. 2017;24(1):9-18.
- 황룡, 최영준. 쏫풋 운동이 발의 안쪽 세로활과 균형에 미치는 영향과 효율적 적용에 대한 연구. 운동생리학회지. 2018;27(4):252-259.
- 최보람. 긴발가락굽힘근 테이핑과 함께 엄지발가락 벌림 운동 시 엄지벌림근의 활성도. 대한물리치료과학회지. 2025;32(2):31-37
- 고은경. 장판지근 단축 대상자에게서 스쿼트 운동 시 인솔이 발바닥 앞/뒤 압력분포에 미치는 영향. 대한물리치료과학회지. 2024;31(3):66-77
- Abd-Elmonem AM, El-Negamy EH, Mahran MA, et al. Clinical and radiological outcomes of corrective exercises and neuromuscular electrical stimulation in children with flexible flatfeet: A randomized controlled trial. Gait Posture. 2021;88:297-303.
- Cho Y, Park JW, Nam K. The relationship between foot posture index and resting calcaneal stance position in elementary school students. Gait Posture. 2019;74:142-147.
- Chou MC, Huang JY, Hung YM, et al. Flat foot and spinal degeneration: Evidence from nationwide population-based cohort study. J Formos Med Assoc. 2021;120(10):1897-1906.
- Cote KP, Brunet ME, Gansneder BM, et al. Effects of pronated and supinated foot postures on static and dynamic postural stability. J Athl Train. 2005;40(1):41-46.
- Han JT, Koo HM, Jung JM, et al. Differences in plantar foot pressure and COP between flat and normal feet during walking. J Phys Ther Sci. 2011;23(4):683-685.
- Harradine P, Bevan L. A review of the theoretical unified approach to podiatric biomechanics in relation to foot orthoses therapy. J Am Podiatr Med Assoc. 2009;99(4):317-325.
- Jung DY, Kim MH, Koh EK, et al. A comparison in the muscle activity of the abductor hallucis and the medial longitudinal arch angle during toe curl and short foot exercise. Phys Ther Sport. 2011;12(1):30-35.
- Kim EK, Kim JS. The effects of short foot exercises and arch support insoles on improvement in the

- medial longitudinal arch and dynamic balance of flexible flatfoot patients. *J Phys Ther Sci*. 2016;28(11):3136-3139.
- Kosashvili Y, Fridman T, Backstein D, et al. The correlation between pes planus and anterior knee or intermittent low back pain. *Foot Ankle Int*. 2008;29(9):910-913.
- Kuhn DR, Shibley NJ, Austin WM, et al. Radiographic evaluation of weight-bearing orthotics and their effect on flexible pes planus. *J Manipulative Physiol Ther*. 1999;22(4):221-226.
- Lee DH, Baek CY, Yoo JY, et al. Effects of knee extensor strengthening using neuromuscular electrical stimulation (NMES) on range of motion, strength, and gait in patients with total knee arthroplasty. *J Clin Mov Sci Human*. 2020;24(2):31-37.
- Mulligan EP, Cook PG. Effect of plantar intrinsic muscle training on medial longitudinal arch morphology and dynamic function. *Man Ther*. 2013;18(5):425-430.
- Namsawang J, Eungpinichpong W, Vichiansiri R, et al. Effects of the short foot exercise with neuromuscular electrical stimulation on navicular height in flexible flatfoot in Thailand: A randomized controlled trial. *J Prev Med Public Health*. 2019;52(4):250-257.
- Neumann DA. *Kinesiology of the musculoskeletal system: foundations for physical rehabilitation*(2nd ed). St.Louis, Mosby/Elsevier.2010.
- Okamura K, Kanai S, Fukuda K, et al. The effect of additional activation of the plantar intrinsic foot muscles on foot kinematics in flat-footed subjects. *Foot*. 2019;38:19-23.
- Shimoura K, Nishida Y, Abiko S, et al. Immediate effect of neuromuscular electrical stimulation on the abductor hallucis muscle: A randomized controlled trial. *EMBOM* 2020;39(4):257-261.
- Zahran SS, Aly SM, Zaky LA. Effects of bilateral flexible flatfoot on trunk and hip muscles' torque. *IJTR*. 2017;24(1):7-14.
- Zuil-Escobar JC, Martínez-Cepa CB, Martín-Urrialde JA, et al. Medial Longitudinal Arch: Accuracy, Reliability, and Correlation Between Navicular Drop Test and Footprint Parameters. *J Manipulative Physiol Ther*. 2018;41(8):672-679.
-