

불안정한 자세에서 하지에 인가한 진동자극이 자세 안정성 개선에 미치는 영향

은혜인¹, 유미², 김동욱³, 권대규^{3,4}, 김남균³

¹전북대학교 대학원 헬스케어공학과, ²전북대학교 대학원 의용생체공학과

³전북대학교 공과대학 바이오메디컬공학부, ⁴전북대학교 실버공학연구소

(Received May 22, 2007. Accepted August 28, 2007)

The Effect of Human Lower Limb Vibration on Postural Stability during Unstable Posture

H. I. Eun¹, M. Yu², D. W. Kim³, T. K. Kwon^{3,4}, N. G. Kim³

¹Dept. of Healthcare Engineering, Graduate School, Chonbuk National Univ.

²Dept. of Biomedical Engineering, Graduate School, Chonbuk National Univ.

³Division of Biomedical Engineering, Collage of Engineering, Chonbuk National Univ.

⁴Bioengineering Research Center for the Aged, Chonbuk National Univ.

Abstract

We studied the effect of vibratory stimulations of different leg muscles, tibialis anterior(TA) and triceps surae(TS), and plantar zones in ten healthy subjects during 1) quiet standing, 2) forward lean of body, 3) backward lean of body, 4) right lean of body, and 5) left lean of body. The experiments were performed on the force platform. The effect of vibration were measured by monitoring the area of COP(Center of pressure) sway. The subjects wore a vibratory stimulation system on foot and ankles and were given the instruction not to resist against the applied perturbations. The results show that all vibratory stimulations to lower limb muscles and plantar zones reduced the COP sway area. This reduction of the COP sway area occurred also in partial vibratory stimulations during quiet standing. In forward lean of body, vibratory stimulations to TA reduced the COP sway area. During backward lean of body, vibratory stimulations to TS reduced the COP sway area. When the subject was tilted right, vibratory stimulations to left plantar zone reduced the COP sway area. During left lean of body, vibratory stimulations to right plantar zone reduced the COP sway area. Thus, the influence of vibratory stimulations to leg muscle and plantar zones differed significantly depending on the lean of body. We suggest that the vibration stimuli from leg muscles and plantar zones could be selectively used to help maintaining postural balance stable.

Key words : postural adjustment, postural stability, balance, muscle vibration

1. 서론

일상 생활에서 다양한 움직임을 수행하기 위해서 자세 안정성과 조절능력은 필수적이다. 자세는 다양한 신체 부위의 상대적인 위치 또는 공간에서의 신체 부위의 위치를 말한다[1]. 자세조절은 공간에서 두 가지의 목적인 안정성과 방향성을 위한 신

체 자세를 조절하는 것을 말하며[2], 직립자세 또는 움직임동안 기저면에서 신체의 무게 중심을 유지하는 능력을 말한다[3]. 이는 신체에 적용되는 모든 힘이 균형을 이루어 신체가 원하는 위치로 있게 하거나 균형을 잃지 않고 원하는 운동을 가능하게 하는 자세 평형을 유지하는데 중요한 역할을 한다. 인간의 운동수행은 복잡한 요소들이 관여한다. 골프, 테니스, 스키 등과 같은 운동을 하기 위해서는 시선을 고정시키고 신체부위의 상대적인 위치를 기초로 하여 중력장 안에서 균형을 유지해야만 원하는 움직임을 성공적으로 수행할 수 있다. 이를 위해서는 과제나 환경적인 요구에 따라 운동과 자세조절의 협응이 이루어져야 하므로 자세조절은 기능적인 운동수행에 있어서 매우 중요한 역할을 한다[4]. 인간이 자세를 조절

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부, 교육인적자원부)의 재원으로 한국과학재단(No. R01-2007-000-20926-0)과 한국학술진흥재단(지방연구중심대학육성사업 / 헬스케어기술 개발사업단)의 지원을 받아 수행된 연구임.
Corresponding Author : 김동욱
(561-756) 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14,
전북대학교 공과대학 바이오메디컬공학부
Tel : 063-270-4060 / Fax : 063-270-2247
E-mail : biomed@chonbuk.ac.kr

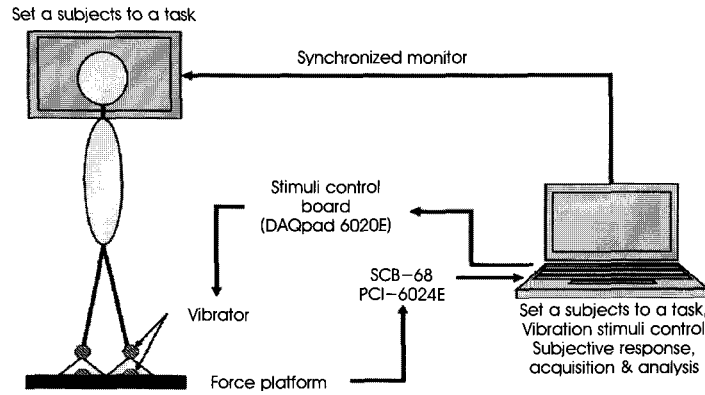


그림 1. 진동자극 인가 시 피험자의 신체동요를 측정하기 위한 실험장치
 Fig. 1. The experimental setup for measurement of body sway during applied vibratory stimulations

하기 위해서는 시각, 체성감각, 전정감각으로부터 입력된 정보가 중추신경계에서 통합되어 처리된 후 신체의 반사적 조절을 유발시키는 과정을 필요로 한다[5]. 자세 조절에 필요한 감각들은 나이가 들에 따라 약화되어 자세 조절에 관여하는 시스템에 약화된 감각 정보 또는 적절치 못한 피드백을 제공할 것이다. 이와 유사하게 근육 작동기는 자세가 불안정할 때 자세를 안정적으로 조절하기 위한 능력이 부족해질 것이다[6]. 약화된 자세 조절은 낙상의 위험을 증가시키며[7], 이러한 위험은 점차적인 신체 기능의 약화를 야기할 수도 있다. 그러므로 자세 안정성을 증진시키기 위해서는 자세 조절에 관여하는 감각을 증진시켜야 한다. 이 감각들 중 체성감각에 진동자극을 가하여 자세 안정성의 증진에 도움을 주는 효과에 대해 논의하도록 한다. 체성감각은 지지면에 관련하여 인체에 대한 위치 및 동작 정보를 중추신경계에 제공하는 역할을 한다. 자세 안정성을 증진시키기 위해 근육에 진동을 가하는 방법은 체성감각을 증진시키기 위한 연구를 하는데 널리 쓰이고 있다. 진동에 의해 유발된 자세 반응에 대한 연구는 Eklund[8]에 의해 시작되었으며, 진동자극으로 유발된 근육 활성도는 자세 안정에 영향을 미침을 밝혔다. 그 이후 연구들에서 직립 자세는 국부적인 자세 반응에 대해서는 작용하지 않으나 전체적인 자세 안정과 관련된 반응에 대해서는 작용하며, 다리, 등, 팔 근육에 진동을 가하였을 때 관찰됨을 입증하였다. 이로써 자세 안정성이 진동에 의해 유발된 반응에 영향을 미치는지에 대해서 관심을 갖아야 할 필요가 있다. Inglis[9]의 연구에서 수의적인 팔 운동동안, 길항근의 진동은 움직임과 신체 정향을 정확하게 인식하는데 중요한 역할을 수행함을 증명했다. 또한 Ivanenko[10]의 연구에서는 직립자세로 있는 피험자의 근육에 진동자극을 가하였을 때, 근육 진동은 진동된 근육, 자기수용감각 및 과제에 의존한 몇몇의 효과를 유발함을 밝혔다. 예를 들어, 기립 상태에서 정강이 근육에 진동자극을 가하면 자세가 현저히 기울어지며 자세가 고정되어 있을 때에는 고정된 방향의 반대방향으로 자세가 기울어지는 것과 같은 작각을 유발한다. 위와 같은 연구를 통해 직립자세를 유지하는 동안 진동자극에 대한 자세균형 응답의 변화를 확인하였지만, 직립 자세가 아닌 신체를 기

울여 불안정한 자세를 유도한 상태에서 진동자극을 가하였을 때, 자세 균형에 어떠한 영향을 미치는지 확인하는 것 또한 자세균형 연구를 위해 필요하다.

본 연구는 불안정한 자세에서 하지의 체성감각 수용기에 인가한 기계적인 진동자극이 자세 균형 및 자세 안정성에 어떠한 영향을 주는지 분석하였다. 이를 위해 피험자의 신체를 전, 후, 좌, 우로 기울이도록 지시하여 불안정한 자세를 유도하였으며, 이 때 체성감각 중 고유수용감각에 해당하는 좌우 전경골근(Tibialis anterior, TA), 하퇴삼두근(Triceps surae, TS)과 체성감각 중 촉각에 해당하는 오른쪽 발바닥(Right plantar zone, RP), 왼쪽 발바닥(Left plantar zone, LP)에 진동자극을 동시에 또는 각각 가하여 신체동요가 얼마나 감소되었는지를 분석하였다.

II. 진동 자극 및 자세 균형 측정 시스템

본 연구는 힘판 위에서 불안정한 자세를 유지하고 있는 피험자의 좌우 전경골근 및 하퇴삼두근과 발바닥에 진동자극을 가했을 경우 피험자의 신체 동요 반응을 분석하기 위해 그림 1과 같은 진동자극 인가 및 신체 동요도 측정 장치를 구성하였다.

A. 진동 자극 인가 장치

진동 자극 인가 장치는 피험자의 좌우 전경골근 및 하퇴삼두근

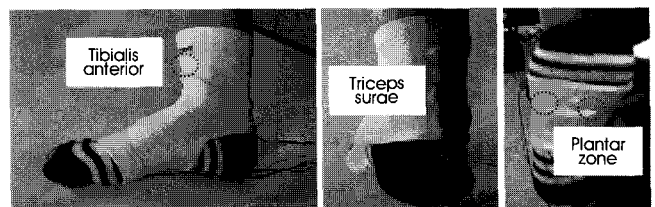


그림 2. 진동모터를 장착한 고정 밴드 및 진동자극 위치
 Fig. 2. The ankle support attached vibration motors and the position of vibration stimuli

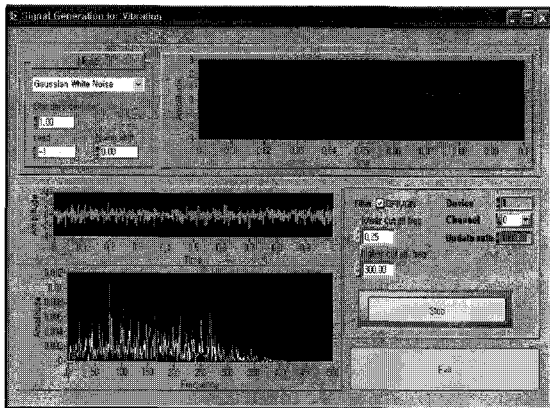


그림 3. 진동자극 인가를 위한 제어 프로그램
Fig. 3. The control program for vibration stimuli

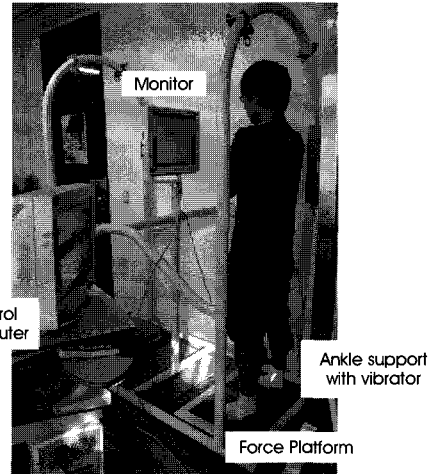


그림 4. 신체동요도 측정 시스템
Fig. 4. The system for body sway measurement

과 발바닥에 진동자극을 가하는 진동모터(JHV-10A1, JAHWA Electronics Co., Korea)를 사용하였다. 이 진동모터는 편평형으로 높이는 $3.4 \pm 0.1\text{mm}$, 지름은 $10 \pm 0.1\text{mm}$, 중량은 10g이다. 그림 2는 이 진동모터를 고정 밴드에 부착한 것으로 피험자의 좌우 전경 골근, 하퇴삼두근에 각각 1개 그리고 좌우 족궁에 각각 2개가 위치하도록 제작하였다. 모든 피험자는 족궁의 높이가 5mm 이상이었으며, 진동모터의 높이로 인한 자세 변화는 없었다. 진동 자극의 제어는 데이터 수집보드 DAQ Pad-6020E (NI Co., USA)를 연결하여 컴퓨터에서 제어명령을 인가하도록 하였으며, 제어 명령에 따라 진동자극은 백색 잡음 신호(white noise signal)로 주어진다. 제어 프로그램은 LabVIEW 소프트웨어(NI Co., USA)를 이용하여 자체 제작하였다[그림 3].

B. 신체 동요도 측정 장치

그림 4는 피험자의 신체 동요를 정량적으로 측정하기 위한 신체 동요도 측정 시스템으로 힘판 및 신체 동요도 측정 프로그램을 사

용하였다. 힘판은 네 개의 로드 셀(load cell)을 장착하였으며, 로드 셀로부터 입력된 신호를 증폭과 필터링을 거친 후 시리얼 포트를 통해서 신체 동요도를 출력한다.

III. 실험 방법

A. 실험대상

본 연구에서는 20대 성인 10명(남 : 8명, 여 : 2명, 연령 : 22~29세)을 대상으로 실험하였다. 이들은 신경학적 질병 및 전정기관의 이상이 없으며, 정상 근골격 기능을 가지고 있다. 또한 이들 모두는 이전에 본 연구와 유사한 실험에 참가한 경험이 없으며 실험 전 실험 목적을 제외한 실험절차에 대해 충분한 설명을 들었다.

B. 실험절차 및 조건

본 실험에서 피험자의 안정 자세와 불안정 자세는 5가지 영역으로 나뉜다. 안정 자세는 중심 영역이며 불안정 자세는 전, 후, 좌, 우, 좌, 우

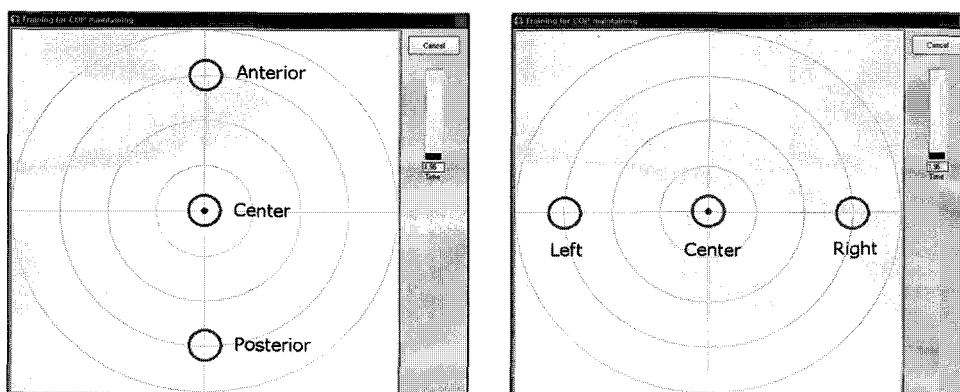


그림 5. 신체동요도 측정을 위한 안정(중심 영역) 자세와 불안정(전, 후, 좌, 우 영역) 자세
Fig. 5. Five unstable posture for body sway measurement (center, anterior, posterior, left, right area)

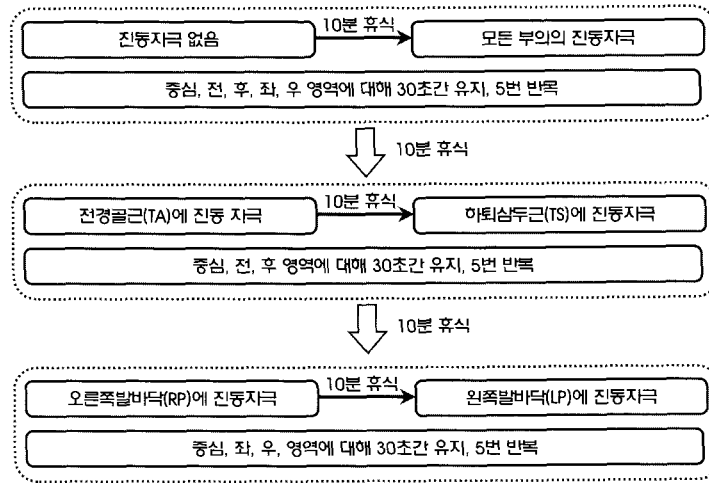


그림 6. 진동자극에 따른 실험순서
 Fig. 6. Experimental procedure according to the vibration stimuli

우 영역이다. 좌우 전경골근과 하퇴삼두근에 진동자극을 가했을 때에는 중심, 전, 후 영역에 대해 실험을 수행하였으며, 좌우 발바닥에 진동자극을 가했을 때에는 중심, 좌, 우 영역에 대해 실험을 수행하였다. 안정 자세와 불안정 자세는 그림 5에 나타나 있으며 중심을 기준으로 전, 후, 좌, 우 영역에 나타난 원 안에서 피험자가 자신의 무게중심을 유지하도록 지시하였다. 인간의 자세안정성 범위(limit of stability)는 인간이 전후좌우 영역으로 넘어지지 않고 최대로 기울일 수 있는 각도를 말하며, 전후영역으로 12.5°이며, 좌우영역으로 17°이다. 본 실험을 위해 피험자들은 전후좌우영역으로 신체를 3.5° 기울여 유지하였다. 원 안에서 유지하는 30초 동안 피험자의 신체 동요도를 측정하였으며 자세유지영역을 무작위로 선택하였다.

실험 절차는 피험자가 진동모터를 장착한 고정 밴드를 착용하고 힘판 위에 선 다음 피험자의 COP(Center of pressure)를 신체 동요도 측정 프로그램 상의 중앙으로 설정한다. 설정 방법은 그림 5에 나타나 있는 중심 영역에 위치한 점을 정중앙으로 위치시키는 것이다. 그 후 피험자의 정면에 위치한 모니터를 통해 신체 동요도 측정 프로그램에서 제시하고 있는 COP의 위치 즉, 점을 안정 및 불안정을 유도하는 영역으로 옮긴다. 그 다음 피험자의 정면에 있는 모니터의 전원을 끈 상태로 30초 동안 안정 또는 불안정 자세를 진동자극 조건에 따라 유지한다. 진동자극 조건은 그림 6에 나타난 바와 같이 진동자극을 가하지 않고 유지, 모든 부위의 진동자극 즉 좌우 전경골근, 하퇴삼두근, 오른쪽 발바닥, 왼쪽 발바닥에 진동자극을 가하여 유지, 좌우 전경골근에만 진동자극을 가하여 유지, 좌우 하퇴삼두근에만 진동자극을 가하여 유지, 오른쪽 발바닥에만 진동자극을 가하여 유지, 왼쪽 발바닥에만 진동자극을 가하여 유지하였다. 실험은 6가지 진동자극 인가조건에 따라 안정 및 불안정 자세에 대해 5번 반복하여 수행하여 총 110번 동안 신체 동요도를 측정하였다. 실험 수행에 따른 하지의 피로를 감소시키기 위해 각 자극 조

건에 따른 실험 사이에 10분간의 휴식시간을 주었다.

C. 신체동요도 측정

측정 파라미터는 진동에 대한 피험자의 신체동요도 변화를 알아보기 위해 진동 및 영역조건에 따른 COP 변동 면적(COP sway area)과 COP 변동 면적을 주파수 변환하여 분석한 스펙트럼 에너지(spectrum energy)를 분석하였다.

COP 변동 면적은 피험자가 힘판에서 있는 상태에서 안정 또는 불안정 자세를 유지하는 동안 피험자의 COP가 변동하면서 누적된 면적을 뜻한다. 즉, COP 변동 면적은 피험자의 중심이 동요한 범위로써 면적 값이 크면 자세가 불안정적임을 의미하며, 이 값이 작다면 자세가 안정적임을 의미한다.

스펙트럼 에너지는 진동자극 조건에 따른 COP 변동 면적 값을 주파수 변환하고 이를 0.1~0.3Hz 대역의 저주파수(low frequency, LF), 0.3~1Hz 대역의 중간주파수(middle frequency, MF), 1~3Hz 대역의 고주파수(high frequency, HF)의 세 대역으로 나누어 각 주파수 대역에서 나타난 스펙트럼 에너지를 뜻한다. 주파수 분석방법은 자세조절 및 신체동요의 변화를 연구하기 위해 많이 사용하고 있다. Golomer[11]는 저주파수 대역은 자세 제어 시스템 중 시각 조절과 연결되며, 중간주파수 대역은 전정 및 촉각 정보에 민감하고, 고주파수 대역은 고유수용감각 조절 및 근육 활성화에 반응한다고 제안했다. Krafczyk[12]는 신체 동요의 파워 스펙트럼은 중간주파수 및 고주파수 대역에서 주파수 분포에 대한 차이를 밝혔다고 보고했다. Edit Nagy[13]는 자세균형 훈련 후 자세 조절 능력을 평가하기 위해 주파수 대역을 저주파수, 중간주파수, 고주파수 대역으로 나누어 자세 조절 능력을 분석하였다. 본 연구는 주파수 대역에 따른 분석을 통하여 피험자의 신체동요 변화를 알아보고, 각 진동자극이 자세를 안정화시키는데 효과가 있는지 알아보고자 한다.

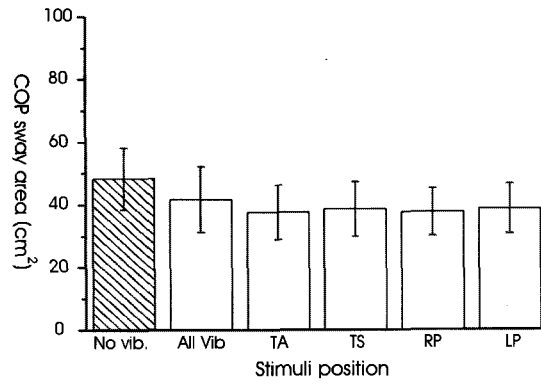


그림 7. 중심 영역(직립상태)에서 6가지 진동자극에 대한 체중심 동요 면적
 Fig. 7. COP sway area according to six vibratory stimulation on center zone

IV. 실험 결과 및 고찰

전경골근 및 하퇴삼두근과 발바닥의 진동자극 즉, 체성감각 수용기에 인가한 진동자극이 인간의 신체동요에 어떠한 영향을 미치는지 연구하기 위하여 피험자로 하여금 신체동요 측정 프로그램에 제시된 안정 및 불안정 자세에서 유지시키는 동시에 진동자극을 가하여 실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 진동자극에 대한 COP 변동 면적과 각각의 주파수 대역에서 나타나는 스펙트럼 에너지를 알아보았다. 실험데이터는 SPSS 12.0을 이용하여 COP 변동 면적은 일원분산분석(one-way ANOVA)을, 스펙트럼 에너지는 쌍체비교(paired t-test)를 실시하여 결과 값의 유의성을 획득하였다.

A. 중심영역에서 진동자극에 따른 신체동요 변화

그림 7은 중심영역(직립상태)에서 6가지 진동자극 즉, 진동자극을 가하지 않았을 때, 모든 부위에 진동자극을 가하였을 때, 좌우

전경골근(TA), 하퇴삼두근(TS), 오른쪽발바닥(RP), 왼쪽발바닥(LP) 각각에 진동자극을 가하였을 때 나타난 COP 변동 면적이다. COP 변동 면적은 진동자극을 가하지 않았을 때 48.25cm²로 가장 크게 나타났으며, 모든 부위에 진동자극을 가하였을 때 41.58cm²로 진동자극을 가하지 않았을 때보다 COP 변동 면적이 작게 나타났다. TA, TS, RP, LP에 자극을 가했을 때에는 38.50cm² ~ 37.46cm²로 각각의 부위에 자극을 가했을 경우가 가장 작게 나타났다. 신체동요가 적게 나타날 경우 신체동요가 크게 나타날 때보다 피험자의 무게중심이 동요한 범위가 작으므로 COP 변동 면적 또한 작게 나타나게 된다. 진동자극을 가하지 않았을 때보다 진동자극을 가할 경우 피험자의 COP 변동 면적이 작게 나타나(p<0.05) 피험자의 자세가 좀 더 안정적임을 확인하였다. 이는 체성감각 즉, 전경골근과 하퇴삼두근에 위치한 고유수용감각과 좌우 발바닥에 위치한 촉각이 진동자극에 반응하여 자세 조절에 관한 정보가 피드백 됨으로써 신체 동요가 감소하게 된다. 진동

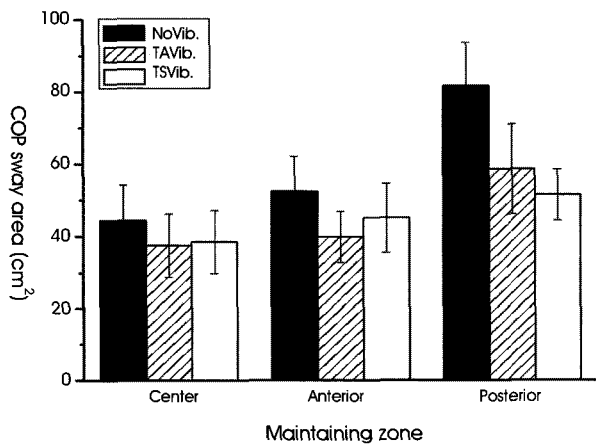


그림 8. 전후방 불안정 자세에서 진동자극에 대한 체중심 동요 면적
 Fig. 8. COP sway area according to vibration stimuli on three area

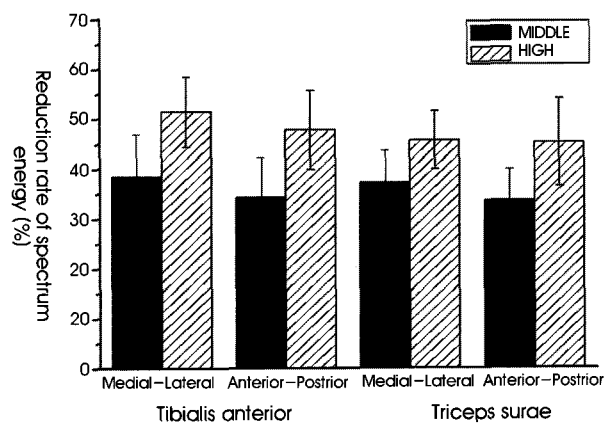


그림 9. 진동자극을 전경골근 또는 하퇴삼두근에 가했을 때 각각의 주파수 대역에서 보이는 spectral energy 감소율
 Fig. 9. Reduction rate of spectral energy at frequency bands during vibration stimuli on tibialis anterior(TA) or triceps surae(TS)

자극을 가했을 경우를 살펴보면, 모든 부위에 진동자극을 가했을 때보다 부위별로 진동자극을 가했을 때 COP 변동 면적이 적게 나타났다($p_{TA}=0.044$, $p_{TS}=0.016$, $p_{RP}=0.033$, $p_{LP}=0.034$). 이는 진동자극을 부위별로 가했을 때 피험자의 자세가 좀 더 안정적으로 유지됨을 의미하며, 모든 부위의 자극보다는 부위별 자극이 자세 안정성 유지에 좀 더 효과적임을 의미한다. Kavounoudias [14]의 연구에 의하면 고유수용감각 또는 촉각에 자극을 가했을 경우 이에 대한 반응특성은 다르며, 두 감각을 동시에 자극을 가했을 경우 개별적으로 가했을 때 나타난 반응특성이 상쇄되어 나타남을 밝혔다. 이를 통해 본 연구에서 인가한 자극 조건에서 모든 부위에 진동자극을 가한 경우 부위별로 진동자극을 가했을 때 나타나는 반응 특성이 상쇄되어 COP 변동 면적이 크게 나타나게 됨을 알 수 있다($p < 0.05$). 촉각 및 고유수용감각 입력은 자세 균형을 조절하기 위해 방향성 범칙에 따라 동시에 처리된다. 신체 기울임의 방향 및 진폭은 발바닥과 발목의 근육에 적용된 진동자극에 의존한다. 발바닥과 발목 근육의 동시 진동에 의한 자세 반응은 발바닥에 가해지는 압력 사이에서 상대적인 분포에 대해 중추신경계가 수직적 위치에 관한 신체 위치를 효과적으로 나타낼 수 있음을 의미한다[14].

B. 불안정 자세에서 진동자극에 따른 신체동요 변화

그림 8은 중심, 전, 후 영역으로 자세를 유지하는 동안 진동자극을 가하지 않았을 때, 전경골근(TA)과 하퇴삼두근(TS)에 각각 부분자극을 가했을 때의 COP 변동 면적을 나타낸 그래프이다. 중심(center) 영역으로 자세균형을 유지하는 동안 COP 변동 면적은 진동자극을 가하지 않았을 때보다 전경골근 또는 하퇴삼두근에 진동자극을 가했을 때 작게 나타났다. 전방(anterior) 영역으로 자세를 유지하는 동안 COP 변동 면적은 진동자극을 가하지 않았을 때보다 전경골근 또는 하퇴삼두근에 진동자극을 가했을 때 작게 나타났다

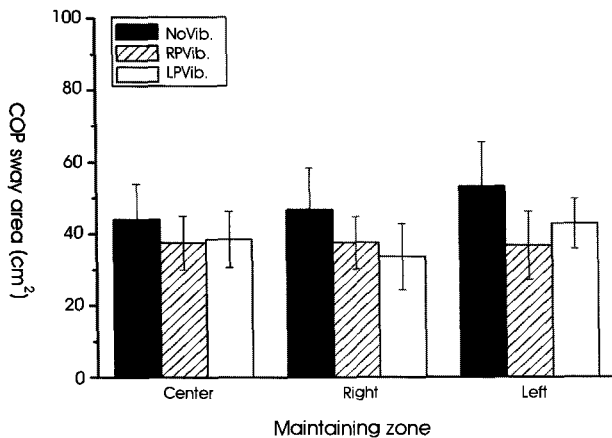


그림 10. 좌우 불안정자세에서 진동자극에 대한 체중심 동요 면적
Fig. 10. COP sway area according to vibration stimuli on three area

으며, 하퇴삼두근에 자극을 가했을 때보다 전경골근에 자극을 가했을 때 작게 나타났다($p_{anterior}=0.022$). 전경골근에 진동자극을 가했을 경우, 진동자극에 의해 전경골근에 위치한 근방추가 반응하여 근육 수축을 유발하게 되어 신체가 앞으로 기울게 된다[10]. 전 영역으로 기울인 상태에서 전경골근에 진동자극을 가한 경우, 진동자극이 피험자의 불안정 자세를 안정적으로 유지하는데 도움을 준다. 후방(posterior) 영역으로 자세를 유지하는 동안 COP 변동 면적은 진동자극을 가하지 않았을 때보다 전경골근 또는 하퇴삼두근에 진동자극을 가했을 때 작게 나타났으며, 전경골근에 자극을 가했을 때보다 하퇴삼두근에 자극을 가했을 때 작게 나타났다($p_{posterior}=0.000$). 하퇴삼두근에 진동자극을 가했을 경우, 진동자극에 의해 하퇴삼두근에 위치한 근방추가 반응하여 근육 수축을 유발하게 되어 신체가 뒤로 기울게 된다[10]. 전 영역으로 기울인 상태에서 하퇴삼두근에 진동자극을 가한 경우, 진동자극이 피험자의 불안정 자세를 안정적으로 유지하는데 도움을 준다.

그림 9는 진동자극을 가하지 않았을 때와 비교해서 전경골근 또는 하퇴삼두근에 진동자극을 가했을 때 COP 변위 값을 주파수 변환하고 이를 중간 주파수 대역과 고주파수 대역으로 나누어 각 주파수 대역에서 보이는 스펙트럼 에너지의 감소율을 나타낸 그래프이다. 스펙트럼 에너지의 감소율은 전경골근 또는 하퇴삼두근에 진동자극을 가했을 때 고주파수 대역에서 제일 높게 나타났다($p_{TA(M-L)}=0.008$, $p_{TA(A-P)}=0.000$, $p_{TS(M-L)}=0.003$, $p_{TS(A-P)}=0.021$). 이를 통해 진동에 의한 전경골근 또는 하퇴삼두근의 자극은 고유수용감각에 영향을 줄을 확인하였다. 촉각의 영향과 관련되어 있는 중간주파수 대역 또한 약 35%의 감소율을 보이는데 이는 피험자의 신체동요를 측정하는 동안 피험자의 정면에 위치한 모니터의 전원을 끄고 측정하여 피험자는 자세를 조정하기 위한 감각들 중 시각정보를 받지 못하기 때문에 발바닥에 의한 촉각에서 보상해주는 것으로 생각된다.

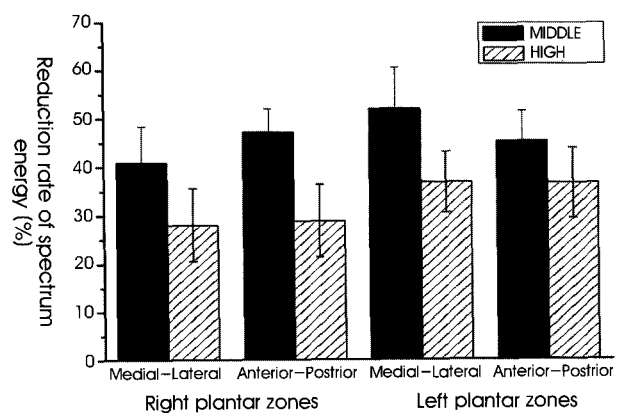


그림 11. 진동자극을 오른쪽 또는 왼쪽 발바닥에 가했을 때 각 주파수 대역에서 보이는 spectral energy 감소율
Fig. 11. Reduction rate of spectral energy at frequency bands during vibration stimuli on right plantar zones or left plantar zones

그림 10은 중심, 좌, 우 영역에서 자세를 유지하는 동안 진동 자극을 가하지 않았을 때, 오른쪽발바닥(RP)과 왼쪽발바닥(LP)에 각각 부분 자극을 가했을 때의 COP 변동 면적을 나타낸 그래프이다. 중심 영역에서 자세균형을 유지하는 동안 COP 변동 면적은 진동자극을 가하지 않았을 때보다 오른쪽 또는 왼쪽발바닥에 진동자극을 가했을 때 작게 나타났다. 우(right) 영역으로 자세를 유지하는 동안 COP 변동 면적은 진동자극을 가하지 않았을 때보다 오른쪽 또는 왼쪽 발바닥에 진동자극을 가했을 때 작게 나타났으며, 오른쪽 발바닥에 자극을 가했을 때보다 왼쪽 발바닥에 자극을 가했을 때 작게 나타났다($p_{right}=0.000$). 왼쪽 발바닥에 진동자극을 가했을 경우, 왼쪽 발바닥에 위치한 파치니 소체(pacinian corpuscle)가 진동자극에 의해 반응하게 된다. 손바닥 또는 발바닥의 진피에 위치한 파치니 소체는 신전근이 밀어내는 반사(extensor thrust reflex)를 담당한다. 파치니 소체의 감각 섬유는 사지 신전근의 운동신경과 연결하기 때문에, 이러한 근육의 수축과 사지의 신전을 촉진한다[15]. 파치니 소체는 높은 주파수의 반복되는 촉각에 반응하는 고주파성 진동감각을 수용하며[16], 발바닥에 약하고 넓은 자극을 주게 되면 다리를 펴게 되는 착지반사(placing reflex)를 일으킨다[17]. 왼쪽 발바닥에 진동자극을 가했을 경우, 파치니 소체가 반응하여 착지반사를 유발하게 되어 왼쪽 다리가 신전됨에 따라 신체가 왼쪽으로 기울게 된다. 우 영역으로 기울인 상태에서 왼쪽 발바닥에 진동자극을 가한 경우, 진동자극이 피험자의 불안정 자세를 안정적으로 유지하는데 도움을 준다. 좌(left) 영역으로 자세를 유지하는 동안 COP 변동 면적은 진동자극을 가하지 않았을 때보다 오른쪽 또는 왼쪽 발바닥에 진동자극을 가하였을 때 작게 나타났으며, 왼쪽 발바닥에 자극을 가했을 때보다 오른쪽 발바닥에 자극을 가했을 때 작게 나타났다($p_{left}=0.047$). 오른쪽 발바닥에 진동자극을 가했을 경우, 파치니 소체가 반응하여 착지반사를 유발하게 되어 오른쪽 다리가 신전됨에 따라 신체가 왼쪽으로 기울게 된다. 좌 영역으로 기울인 상태에서 오른쪽 발바닥에 진동자극을 가한 경우, 진동자극이 피험자의 불안정 자세를 안정적으로 유지하는데 도움을 준다.

그림 11은 진동자극을 가하지 않았을 때와 비교해서 오른쪽 또는 왼쪽 발바닥에 진동자극을 가했을 때 COP 변위 값을 주파수 변환하고 이를 중간주파수 대역과 고주파수 대역으로 나누어 각 주파수 대역에서 보이는 스펙트럼 에너지의 감소율을 나타낸 그래프이다. 스펙트럼 에너지의 감소율은 오른쪽 또는 왼쪽 발바닥에 진동자극을 가했을 때 중간주파수 대역에서 제일 높게 나타났다($p_{RP}(M-L)=0.000$, $p_{RP}(A-P)=0.000$, $p_{LP}(M-L)=0.014$, $p_{LP}(A-P)=0.012$). 이를 통해 진동에 의한 오른쪽 또는 왼쪽 발바닥의 자극은 촉각에 영향을 줄을 확인하였다. 고유수용감각의 영향과 관련되어 있는 고주파수 대역 또한 약 32%의 감소율을 보이는데 이는 피험자의 신체동요를 측정하는 동안 피험자의 정면에 위치한 모니터의 전원을 끄고 측정하여 피험자는 자세를 조정하기 위한 감각들 중 시각정보를 받지 못하기 때문에 근육에 의한 고유수용감각에서 보상해주는 것으로 사료된다.

V. 결론

전경골근 및 하퇴삼두근과 발바닥의 진동자극 즉, 체성감각 수용기에 인가한 진동자극이 인간의 신체동요에 어떠한 영향을 미치는지 연구하기 위하여 피험자로 하여금 신체동요도 측정 프로그램에 제시된 안정 및 불안정 자세에서 유지시키는 동시에 진동자극을 가하여 실험을 수행하고 피험자로 하여금 신체동요도를 측정하여 진동자극이 자세안정성에 미치는 영향을 알아보고 다음과 같은 결론을 얻었다.

안정자세에서 진동자극에 따른 신체동요도의 변화는 진동자극을 가하지 않았을 때보다 진동자극을 가했을 때 자세를 좀 더 안정적으로 유지하였으며, 전체자극보다 부분적으로 진동자극을 가했을 때 자세가 좀 더 안정적으로 유지하였다.

전후방 불안정 자세에 대해 전경골근 및 하퇴삼두근에 진동자극을 가했을 때의 영향을 살펴보면, 전경골근의 진동자극은 전방 불안정 자세를 안정적으로 유지하는데 효과가 있으며, 하퇴삼두근의 진동자극은 후방 불안정 자세를 안정적으로 유지하는데 효과가 있음을 알 수 있었다.

좌우 불안정 자세에 대해 왼쪽 발바닥 및 오른쪽 발바닥에 진동자극을 가했을 때의 영향을 살펴보면, 왼쪽 발바닥의 진동자극은 우방 불안정 자세를 안정적으로 유지하는데 효과가 있으며, 오른쪽 발바닥의 진동자극은 좌방 불안정 자세를 안정적으로 유지하는데 효과가 있음을 알 수 있었다.

전경골근 또는 하퇴삼두근에 가한 진동자극은 근방추의 고유수용감각을 자극하여 근수축을 유발함으로써 불안정한 자세를 안정적으로 유지시키며, 오른쪽 또는 왼쪽 발바닥에 가한 진동자극은 파치니 소체의 촉각을 자극하여 착지반사를 유발함으로써 불안정한 자세를 안정적으로 유지시킨다.

참고문헌

- [1] K. Pirjo, K. Fysiatrian, *Body Movements during Postural Stabilization Measurements with a Motion Analysis System*, Dissertation, Department of Physical Medicine and Rehabilitation, University Hospital of Oulu, 2002.
- [2] D. H. Jeong, H. C. Kwon, "A study on control of posture and balance," *The Journal of Korean Society of Physical Therapy*, vol. 11, pp. 23-36, 1999.
- [3] W. W. Spirduso, "Physical dimensions of aging," *Human kinetics*, Champaign IL., 1995.
- [4] H. C. Jung, "The Coordination of postural control and movement," *Korea Coaching Development Center*, vol. 7, pp. 111 - 118, 2005.
- [5] C. Ghez, Posture. In : ER. Kandel, JH. Schwartz, TM. Jessell eds. *Postural of neural science*, Third Edition, New York, Elsevier, 1991, pp. 596 - 602.
- [6] R. S. Mazzeo, P. Cavanagh, W. J. Evans, M. Fiatarone, J. Hagberg, E. McAuley, J. Startzell, "ACSM position stand on exercise and physical activity for older adults," *Medical &*

- Science in Sports & Exercises*, vol. 30, pp. 992 - 1008, 1998.
- [7] S. R. Lord, J. A. Ward, P. Williams, K. Anstey, "Physiological factors associated with falls in older community-dwelling women," *Journal of the American Geriatrics Society*, vol. 42, pp. 1110 - 1117, 1994.
- [8] G. Eklund, "General features of vibration- induced effects on balance," *Upsala Journal of Medical Sciences*, vol. 77, pp. 112 - 124, 1972.
- [9] J. T. Inglis, J. S. Frank, B. Inglis, "The effect of muscle vibration on human position sense during movements controlled by lengthening muscle contraction," *Experimental Brain Research*, vol. 84, pp. 631 - 634, 1991.
- [10] Y. P. Ivanenko, R. Grasso, F. Lacquaniti, "Effect of gaze on postural responses to neck proprioceptive and vestibular stimulation in humans," *The Journal of Physiology*, vol. 519, pp. 301 - 314, 1999.
- [11] E. Golomer, J. Cremieux, P. Dupui, B. Isableu, T. Ohlmann, "Visual contribution to self-induced body sway frequencies and visual perception of male professional dancers," *Neuroscience Letters*, vol. 267, pp. 189 - 192, 1999.
- [12] S. Krafczyk, V. Schlamp, M. Dietrich, P. Haberhauer, T. Brandt, "Increased body sway at 3.5 - 8 Hz in patients with phobic postural vertigo," *Neuroscience Letters*, vol. 259, pp. 149 - 152, 1999.
- [13] E. Nagy, K. Toth, G. Janositz, G. Kovacs, A. Feher-Kiss, L. Angyan, G. Horvath, "Postural control in athletes participating in an ironman triathlon," *European Journal of Applied Physiology*, vol. 92, pp. 407 - 413, 2004.
- [14] A. Kavounoudias, R. Roll, J. P. Roll, "Foot sole and ankle muscle inputs contribute jointly to human erect posture regulation," *Journal of Physiology*, vol. 532, pp. 869 - 878, 2001.
- [15] R. Irvin, D. Iversen, S. Roy, *Sports Medicine: Prevention, Assessment, Management & Rehabilitation of Athletic Injuries*, Benjamin Cummings, 1998.
- [16] W. T. Lee, K. A. Park, *Medical Neuroanatomy*, Korean Medical Book, 1996.
- [17] S. J. Kim, *Motor Learning and Control*, Dea Han Media, 2000.