

## 8주간의 체중을 이용한 저항운동 시 전신진동 유·무에 따른 노인 여성하지의 발바닥쪽굽힘근의 생체역학적 특성 변화

한보람<sup>1</sup> · 이대연<sup>2</sup> · 정시우<sup>1</sup> · 이해동<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 대학원 체육학과 · <sup>2</sup>강남대학교 미래인재개발대학 실버산업공학과 · <sup>3</sup>연세대학교 교육과학대학 체육교육학과

### Changes in the Biomechanical Properties of Ankle Plantarflexors Following 8-week Resistance Training with or without Whole-Body Vibration in Older Women

Bo-Ram Han<sup>1</sup> · Dae-Yeon Lee<sup>2</sup> · Si-Woo Jeong<sup>1</sup> · Hae-Dong Lee<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Physical Education, Graduate School of Yonsei University, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Department of Silver Industrial Engineering, College of Future Human Resource Development, Kangnam University, Yongin, Korea

<sup>3</sup>Department of Physical Education, College of Science in Education, Yonsei University, Seoul, Korea

Received 10 November 2014 Received in revised form 27 November 2014 Accepted 2 December 2014

#### ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the effect of resistance training with and without whole-body vibration(WBV) on the biomechanical properties of the plantarflexor in the elderly women (>60 yrs., n=35). Thirty-five volunteers were randomly assigned to a resistance training with WBV group (RVT, n=14), a resistance training without WBV (RT, n=11), and a non-training control group (CON, n=10). The RVT and the RT groups participated in the training sessions three times a week for 8 weeks, followed by a 4-week detraining period. The CON group was instructed to refrain from any type of resistance training. To assess strength and activation of the plantarflexor muscles, maximum isometric ankle plantarflexion torque and muscle activation of the triceps surae muscles were measured using dynamometry, twitch interpolation technique and electromyography at four different ankle joint angles. Also, the lower extremity function was assessed by vertical jumping. The measurements were performed prior to, 2 and 8 weeks after the training and after a 4-week detraining period. Following the 8-week training sessions, an increase in the isometric plantarflexion strength was found to be greater for the RVT compared with the RT group ( $p<.05$ ). Muscle inhibition was significantly decreased after training than before training only for the RVT ( $p<.05$ ). Following the detraining period, a decrease in isometric plantarflexors strength and a increases in muscle inhibition were significantly less in the RVT compared with the RT group. In conclusion, the exercise with WBV is a feasible training modality for the elderly and seems to have a boosting effect when used with conventional resistance training.

**Keywords :** Aging, Resistance Training, Whole-Body Vibration, Detraining, Muscle Property, Electromyography, Twitch Interpolation Technique, Muscle Inhibition, Ultrasound Imaging

#### I. 서 론

본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 기초과학 연구 프로그램과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2010-0024090).

이 논문은 2012 한국운동역학회 국제학술대회에서 발표된 논문임.  
Corresponding Author Hae-Dong Lee  
Department of Physical Education, College of Science in Education, Yonsei University, 50, Younse-ro, Seodaemun-gu, Seoul, Korea  
Tel : +82-2-2123-6188 / Fax : +82-2-2123-8375  
E-mail : xbridge1997@yonsei.ac.kr

골격근(skeletal muscle)은 노화에 따라서 그 기능이 감소하며 특히 근력 감소는 일상생활을 영위하기 위한 기초적인 동작 수행에 부정적 영향을 미친다(Cruz-Jentoft et al., 2010, Gross, Stevenson, Charette, Pyka, & Marcus, 1998; Janssen, Heymsfield, & Ross, 2002; Vincent et

al., 2002). 더 나아가 노화에 따른 근력 감소는 낙상, 골절과 같은 이차적 상해 위험성을 증가시키며(Campbell, Borrie, & Spears, 1989; Kannus, Parkkari, & Poutala, 1999; Runge, Rehfeld, & Resnick, 2000) 당뇨병, 심혈관계질환, 암, 관절염 및 골다공증 등 만성질환을 유발하여 사망률 증가에 영향을 미친다고 보고되고 있다(Ciolac, 2013; Kim et al., 2012). 따라서 여러 질병의 유병율과 관계가 깊은 노화에 따른 근력저하와 위험요인을 감소시키기 위한 지속적인 연구가 필요하다(Frontera, Hughes, Lutz, & Evans, 1991; Hughes et al., 2001; Lindle et al., 1997; Porter, Myint, Kramer, & Vandervoort, 1995).

근육감소증(sarcopenia)은 노화에 따른 근육의 질량 감소로 단순히 형태학적인 측면에서 정의되어 왔으나(Narici & Maganaris, 2006) 최근 연구에서는 이를 노화에 따른 근량 감소와 이에 동반하는 근력 감소를 아우르는 기능적인 의미로 정의하고 있다(Cruz-Jentoft et al., 2010; Morley et al., 2001). 노화에 따른 근력저하는 근량감소보다 손실이 커서(Delmonico et al., 2009), 이에 영향을 미치는 요인인 형태학적 요인과 신경학적 요인에 대하여 알아볼 필요가 있다(Morley, 2012). 형태학적으로는 근육의 내적배열구조(muscle architecture)인 Type II 섬유의 지름과 근섬유다발 길이(fascicle length), 근육의 양(volume), 근섬유배열각(pennation angle), 근육의 단면적(cross-sectional area, CSA)감소 등(Aagaard, Suetta, Caserotti, Magnusson, & Kjaer, 2010; Lexell, Taylor, & Sjostrom, 1988; Narici, Maganaris, Reeves, & Capodaglio, 2003; Young, Stokes, & Crowe, 1984)이, 신경학적으로는 최대 주동근의 활성화 감소와 길항근의 동시활성화 증가, 신경세포의 손실, 근육의 탈신경 변화와 더불어(De Serres & Enoka, 1998; Klass, Baudry, & Duchateau, 2007; Yue, Ranganathan, Siemionow, Liu, & Sahgal, 1999), 운동단위 활성률(동원률 motor unit output, 발화율 maximal motor unit firing rates)의 감소가 대표적 요인들이다(Earles, Vardaxis, & Koceja, 2001; Kamen et al., 1989; Kamen, Sison, Du, & Patten, 1995; Patten & Kamen, 2000). 특히, 신경학적 변화는 근육의 질적 능력(muscle quality)과 기능적 능력(functional capacity)에 급격한 손상을 촉진하는데(Frontera et al., 2008; Kallman, Plato, & Tobin, 1990), Hakkinen 등 (1996)은 노인의 신경전달 기능의 저하는 근육의 질적 능력 변화에 의해 발생되며, 실제로 노인의 운동신경 기능은 장년기 시절보다 50% 감소되는 것으로 알려져 있다(Tormlinson & Irving, 1977).

선행연구에서는 근육의 형태학 및 신경학적 문제들을 지연시키기 위한 방법으로 노인들에게 저항운동을 실시한 결과 운동단위의 활성율과 근량, 근력 등이 증가 되고

(Bamman et al., 2003; Ivey et al., 2000; Hakkinen & Komi, 1983; Hakkinen, Komi, & Alen, 1985; Hunter, Thompson, & Adams, 2000; Moritani & DeVries, 1979; Tracy et al., 1999) 근육의 근섬유배열각과 근 두께도 증가한다고 하였다(Suetta et al., 2008). 저항운동은 노인의 균형과 보행, 하지근력, 심혈관 저항 등을 개선하고 낙상의 위험요소를 감소시키며(American College of Sports Medicine Position Stand [ACSM], 1998; Cameron et al., 2010; Gillespie et al., 2009; Rubenstein et al., 2000; Sherrington et al., 2008; Skelton & Beyer, 2003; Skelton, Dinan, Campbell, & Rutherford, 2005), 노인의 전반적 근기능을 향상시키는 긍정적인 운동방법이지만 두개강내압(발살바 매뉴버: Valsalva maneuver)증가로 인한 고혈압, 뇌출혈과 같은 잠재적 위험과(Haykowsky, Eves, Warburton, & Findlay, 2003), 편의성과 안전성의 부족은 단점으로 지적되고 있다.

최근 들어 외부 저항을 추가하지 않고 하지의 근력과 파워, 균형능력 등을 향상시킬 수 있는 운동방법으로 전신진동운동(whole-body vibration, WBV)이 보고되고 있다. 전신진동운동은 진동판 위에서 동작을 수행 시 수직 또는 좌우 진동으로 인해 자신의 체중만을 사용하여 기계에서 발생하는 가속도를 받으며 근육의 신장성-단축성 수축이 빠르게 연속적으로 일어나게 되어 근신경계의 기능을 향상시키는 운동방법으로(Cardinale & Bosco, 2003; Delecluse, Roelants, & Verschueren, 2003; Rittweger, Schiessl, & Felsenberg, 2001) 건강한 성인(Marin, Santos-Lozano, Santin-Medeiros, Delecluse, & Garatachea, 2011; Roelants, Verschueren, Delecluse, Levin, & Stijnen, 2006)과 엘리트 선수(Delecluse, Roelants, Diels, Koninckx, & Verschueren, 2005; Ronnestad & Ellefsen, 2011), 노인(Bogaerts et al., 2009; Marin et al., 2012)을 대상으로 활발한 연구가 이루어지고 있다. 이러한 전신진동운동은 외부의 부하 없이 진동 계수 조절을 통해 강도를 증가시킬 수 있는 특징 때문에 노인들에게 안전한 점중부하 원리를 적용할 수 있는 장점을 지니고 있다(Marin et al., 2011).

정적-동적 동작을 복합적으로 사용하는 전신진동운동은 근력과 파워 같은 근육의 고유 기능뿐만 아니라(Machado, Garcia-Lopez, Gonzalez-Gallego, & Garatachea, 2010; Roelants, Delecluse, & Verschueren., 2004; Russo et al., 2003; Rees, Murphy, & Watsford., 2007, 2008; Verschueren et al., 2004), 균형감각, 수직점프와 의자에서 일어나기 등 운동수행 능력도 향상시키는 것으로 보고되고 있다(Bautmans, Van Hees, Lemper, & Mets, 2005; Bosco et al., 1999; Cardinale & Bosco, 2003; Delecluse et al., 2003; Roelants et al., 2004; Runge et al., 2000). 진동운동기기를 활용한 운동방법이 소개된 이후 긍정적인 운동효과가 지속적으로 보고되고 있으며(Nordlund &

Thorstensson, 2007), 이 운동기법은 저항운동과 비슷한 운동효과를 나타낸다고 보고되었다(Delecluse et al., 2003).

전신진동운동의 효과를 알아보고자 선행연구에서는 진동운동그룹과 대조군의 비교(Bosco et al., 1998; Cochrane, Legg, & Hooker, 2004; Delecluse et al., 2005; de Ruiter, van der Linden, van der Zijden, Hollander, & de Haan, 2003; Russo et al., 2003; Torvinen et al., 2002, 2003), 진동운동과 저항운동, 플라세보(placebo) 그룹간의 비교(Bautmans et al., 2005; Delecluse et al., 2003; Roelants et al., 2004; Verschuere et al., 2004)에서도 진동운동그룹의 효과가 큰 것으로 나타났다. 동일한 운동방법에서도 진동운동기기를 사용하였을 때 발바닥쪽굽힘근의 근력이 유의하게 증가함을 알 수 있었다(Rees et al., 2007, 2008).

그러나 이들 연구의 대부분은 전신진동운동과 다른 운동방법을 비교하거나 단순히 발현되는 힘이나 운동수행능력의 변화에 초점이 맞추어져 있고 근기능에 중요한 역할을 하는 근육의 형태학적 및 신경학적 변인들과의 관계에 대해서는 다양한 정보를 제공해 주지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 노인을 대상으로 자가체중을 이용한 전신운동기기의 효과를 근력뿐 아니라 근육 내 형태학적 변화와 근신경학적 변인들에 대해 복합적으로 분석함으로써 진동운동기기를 활용한 노인들의 운동프로그램 구성을 위한 과학적인 근거자료를 제시하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 연구 대상자

본 연구는 서울시 S구 복지관 프로그램에 참여하는 60세 이상 여성(OW: Older Women)을 대상으로 모집하였다. 그리고 서울시에 소재한 S병원에서 기초의학검사를 실시하여 피험자를 선발하였다. 기초의학검사는 키, 몸무게, 하지 관절 X-ray, 골밀도 등을 측정하였고 의사의 문진으로 과거 혹은 현재의 질병에 대하여 조사하였다. 본 연구에서

는 경증의 관절염, 당뇨, 고혈압 등으로 약을 복용하고 있지만 의사의 판단 하에 참여가 가능한 피험자는 포함시켰다. 그러나 골다공증 환자는 제외하였다. 골다공증의 여부는 골밀도 측정 시 인체의 Total BMD에서 Total T-score가 -2.5보다 낮을 경우 골다공증이라 판단하였다(Korea society for bone and mineral research [KSBMR], 2008). 본 연구의 초기에 참여한 40명의 피험자는 진동운동기기를 사용하여 저항운동을 실시한 그룹(Resistance training with Whole-body Vibration [RVT] n=15), 진동운동기기를 사용하지 않고 저항운동을 실시한 그룹(Resistance training without Whole-body Vibration [RT] n=15), 그리고 운동을 실시하지 않은 그룹(Control Group [CON] n=10)에 무작위(randomized controlled trials)로 배정하였다. 참여한 피험자들의 그룹별 신체적 특성은 <Table 1>과 같다. 실험이 시작된 이후 부득이하게 개인사유 또는 건강문제로 인하여 RVT그룹에서 1명, RT그룹에서 4명, 총 5명이 실험에서 제외되었다. 따라서 실제 본 연구에 참여한 피험자의 수는 35명으로 <Table 1>과 같다.

실험에 참여하기 전에 모든 피험자들은 실험의 목적과 방법 및 절차에 대해 충분히 숙지하고, 참여 동의서에 자발적으로 서명하였다.

### 2. 실험 절차

본 연구에 참여한 대상자들을 운동 전(pre), 운동을 시작하고 초기의 변화를 확인하기 위해서 2주 후(P<sub>2</sub>), 운동이 끝나는 8주 후(P<sub>8</sub>)에 측정하였다. 그리고 운동기간 종료 후 4주의 운동중단(detaining) 기간이 후(P<sub>de-T</sub>)에 재측정을 실시하였다(Figure 1).

모든 대상자들은 네 개의 발목각도에서 발바닥쪽굽힘으로 등척성 수축 시 토크 값(torque)과 안정시 연축수축력(resting twitch torque [RTT]), 근활성 억제율(muscle Inhibition [MI]), 근활성도(root mean square [RMS])를 측정하였으며, 기능적 변화를 알아보기 위해 최대근력발현 속도(rate

Table 1. Subject characteristics

(mean±SD)

Parameter	RVT	RT	CON	p-value
	n=14	n=11	n=10	
Age (year)	65.9±3.3	68.5±5.4	67.3±2.7	.30
Weight (kg)	56.6±8.2	58.5±7.7	56.5±7.2	.78
Height (cm)	152.9±4.4	153.2±5.9	154.4±5.2	.77
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	24.4±2.9	25.2±2.8	23.8±2.9	.62
Total BMD (g/cm <sup>2</sup> )	1.08±0.09	1.03±0.10	1.01±0.07	.11
T-score (g/cm <sup>2</sup> )	-0.27±1.16	-0.85±1.29	-1.13±0.86	.11

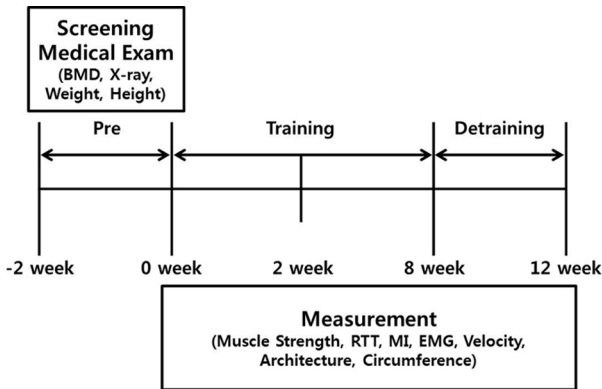


Figure 1. Experimental design

of force development [RFD])와 수직점프(vertical jump [VJ])를 측정하였다. 또한 실시간 초음파 영상기법을 활용하여 발바닥쪽굽힘근의 내적배열구조(muscle architecture) 변화를 살펴보기 위해 근섬유다발 길이(fascicle length [FL]), 근섬유배열각(pennation angle [PA]), 근 두께(muscle thickness [MT])를 측정하였다.

3. 운동 프로그램

8주간의 근력운동 프로그램은 선행연구를 참고하여 발바닥쪽굽힘근의 근력을 강화할 수 있는 자세를 선정하여 프로그램을 구성하였다(Cochrane, Loram, Stannard, & Rittweger, 2009). <Figure 2>와 같이 RVT는 (A) 눈뜨고 서기와 눈 감고 서기(open & close eyes standing), (B) 양발 뒤꿈치 올리기(Calf raise), (C) 무릎 굴곡과 신전 운동(squat), (D) 무릎 굴곡 시 뒤꿈치 올리기(squat & calf raise), (E) 무릎 굴곡 시 상체 틀기(torso twist), (F) 한발 뒤꿈치 올리기(one-leg calf raise)로 구성된 저항 운동을 주3회 진동운동기기(TT2590P, Turbosonic Korea, Seoul, Korea)를 사용하여 수행하였다.

운동 강도는 <Table 2>와 같이 운동반복 횟수는 동적동작 10-14회, 정적동작 30-60초로 설정하였으며, 이 동작을

Table 2. The vibration intensity modulation protocol for the resistance training with whole-body vibration group (RVT) throughout the 8-week training period

Period (Week)	1	2	3	4	5	6	7	8
Frequency (Hz)	35	35	35	35	40	40	40	40
Volume	40	40	40	40	40	40	50	50
Acceleration (g)	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	3	3
Sets	2	2	3	3	2	3	2	3
Dynamic Times	10	10	10	10	12	12	14	14
Static Seconds	30	30	40	40	50	50	60	60
Static Seconds (After dynamic)	10	10	10	10	12	12	14	14

2-3세트로 실시하였다. 진동운동기기의 진동수(frequency)는 35-40 Hz, 크기는 40-50 Volume으로 범위를 설정하였다. RT그룹은 RVT그룹과 동일한 운동프로그램으로 진동운동기기를 사용하지 않고 지면에서 수행하였다. 운동시간은 준비운동 5-10분, 본 운동 20-30분, 정리운동 5-10분으로 하였다. CON은 참여기간동안에 평상시 생활패턴만을 유지하도록 지시하였다.

4. 측정 및 분석

측정에 들어가기 전 피험자들의 건강상태를 확인하였고, 준비운동으로 트레드밀에서 10분 동안 피험자들의 선호 속도로 보행을 실시하였다. 측정프로토콜에 대한 거부감을 해소시키고 발바닥쪽굽힘근의 최대 근력을 측정하기 위해 최소 2-3번 연습을 실시하여 익숙해지도록 하였다. 내적배열구조와 수직점프를 제외한 모든 측정 변인은 발목의 관절가동범위를 고려하여 네 개의 발목각도(발등쪽굽힘 -10°, 발바닥쪽굽힘 0, 10, 30°: 발바닥과 하퇴가 수직을 이룬 각도를 0°로 정의)에서 측정하였으며, 네 개의 발목각도의 값을 평균으로 산출하였다.



Figure 2. Exercise protocol (A: open & close eyes standing, B: Calf raise, C: squat, D: squat & calf raise, E: torso twist, F: one-leg calf raise)

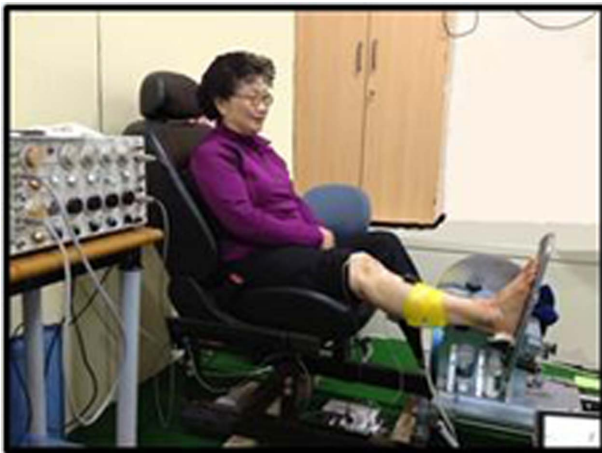


Figure 3. Experimental settings for measuring the torque-angle relationship and muscle activation.

### 1) 최대 등척성 근력

발바닥쪽굽힘근의 근력측정을 위하여 로드셀(Loadcell SBS-500L, CAS PASS Y.I.M, Korea)을 부착한 자체 제작한 등척성 근력측정 장비를 사용하였다. 등척성 근력측정 장비 의자에 착석 시 상체는 직립자세로 등받이에 밀착하고 무릎각도는 최대신전 상태를 유지하도록 하였으며 오른발을 등척성 근력측정 장비의 회전발판에 올린 후 탄성이 없는 벨크로피를 사용하여 고정하였다. 네 가지 발목 각도를 피험자 간 무작위로 순서를 선정하여 최대 등척성 발바닥쪽굽힘력을 측정하였다(Figure 3). 토크값은 힘을 뺀 상태에서 발목 각도별로 나타나는 값을 수동적토크(passive torque [PA]), 최대 등척성 토크를 능동적토크(active torque [AT]), 둘의 합을 총 토크(total torque [TT])로 정의하였다.

최대 등척성 수축을 수행하는 동안 근활성 억제율과 근활성도 측정을 동시에 수집하였다. 근력측정기의 로드셀과 근전도, 전기자극기의 신호는 BNC interface (BNC2110, National Instrument, USA)를 통해 A/D 변환기로 동기화하였고, 자체 제작한 다채널 신호수집 프로그램(LabView 8.5, National Instrument, USA)을 이용하여 개인용 컴퓨터에 저장하였다. 저장된 신호에서 최대 등척성 발바닥쪽 굽힘력은 <Figure 4>에 나타낸 바와 같이 최대 토크가 발현된 지점을 찾아 측정하였다.

### 2) 근활성도

근활성화 측정을 위하여 무선 표면근전도(Delsys Trigno Wireless System, Delsys, USA) 사용하였다. 전극은 안쪽·가쪽 장딴지근(medial and lateral gastrocnemius [MG & LG])과 가자미근(soleus [SOL]), 앞정강근(tibialis anterior [TA])의 근복(muscle belly)에 부착하였다. 피부저

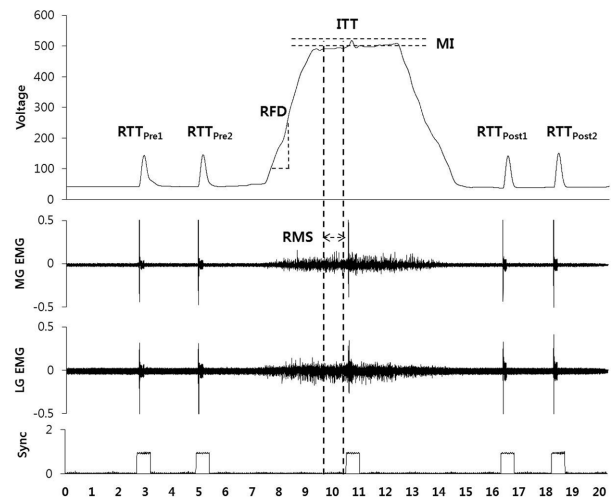


Figure 4. Maximum voluntary isometric contraction and electromyograms. The plantar flexion torque during a maximum isometric contraction with the pre (RTTPre) and post (RTTPost) resting and interpolated twitch torques are shown at the top panel. The EMGs of the medial (MG) and lateral (LG) gastrocnemius are shown in the two middle panels

항을 최소화하기 위해 전극 부착 위치의 체모를 완전히 제거하고 알코올솜으로 깨끗이 닦아 전극의 접착성을 높이고 측정에 영향을 미칠 수 있는 요소를 최소화하였다. 근전도 신호의 차단 주파수(band width)는 20-450 Hz사이로 설정하였으며, 전극의 공통 성분 제거 비(CMRR)는 110 dB로 설정하였다. 증폭된 아날로그 근전도 신호는 2000 Hz로 수집하였다.

근전도 데이터는 최대 등척성 수축 시 중간에 단일수축 간입이 주어지는 시점을 기준으로 최대 등척성 수축이 발생한 500 ms의 구간을 분석하였다. 필터링 된 데이터는 전파정류(full wave rectification)과정을 수행한 다음, 이동 윈도우의 길이(window length)를 500 ms 구간에서 RMS값을 분석하였다. 네 개의 각도에서 측정된 데이터를 평균으로 산출하였다. 상대적 증감 비교를 위해서는 Pre값을 100%로 설정하여 P<sub>2</sub>, P<sub>8</sub>, P<sub>de-T</sub>에 측정된 데이터를  $RMS_{Post}/RMS_{Pre} \times 100(\%)$ 로 표준화하여 비교 분석하였다.

### 3) 근활성 억제율

근활성 억제율을 측정하기 위하여 단일수축간입법(Interpolated twitch technique; Merton, 1954)을 사용하였다. 전기근수축유도기시스템(S88 electrical stimulator with SIU-5 & Constant current unit, Grass Technology, USA)을 사용하여 전기자극 시 단일수축을 유도하기 위해 전극의 양극(anode)은 슬개골 위쪽 대퇴에 부착하였고 음극



(cathode)은 슬와 뒤쪽에서 후 정강신경(posterior tibial nerve)의 최대 반응점을 찾아 부착하였다. 단일과 전기자극(singlet stimulation)으로 최대 반응점을 찾은 후에 이중과 전기자극(doublet stimulation)으로 전환하여 초최대 단일수축(supramaximal twitch contraction)을 유발할 때 발현되는 발바닥쪽굽힘력을 측정하였다.

최대 발바닥쪽굽힘력 발현 전과 후, 안정시에 이중과 전기자극을 주어 안정시 RTT를 2회 측정하였고, 최대 발바닥쪽굽힘력 발현 시 이중과 전기자극을 주어 단일수축간입토크(interpolated twitch torque [ITT])를 1회 측정하였다. 전기자극의 상승효과(potential effect)를 고려하여 안정시에 전기자극을 총 4회 측정하였고, 2회의 RTT<sub>Post</sub> 값을 분석하였다. 근활성 억제율은 최대 등척성 수축시 측정된 ITT와 안정시에 측정된 RTT값을 다음 공식(Merton, 1954)에 대입하여 계산하였다.

$$RTT_{\text{mean}} = RTT_{\text{Post1}} + RTT_{\text{Post2}}/2 \quad (1)$$

$$MI = ITT/RTT_{\text{mean}} \times 100 \quad (2)$$

#### 4) 근육의 내적배열구조

모든 피험자들은 침대에 엎드린 안정시 상태에서 무릎 관절 위치의 비골두(head of fibula)에서 발목관절의 가쪽 복사뼈(lateral malleolus)까지의 길이와 하지 길이의 근위 30% 지점의 둘레를 측정하였다. 그리고 실시간 초음파 장비(Aloka, Japan)와 프로브(MHz UST-5712 linear-array probe, Aloka, Japan)를 이용하여 MG와 LG의 시상면과 수평면에서 근복 위치를 찾아 이미지로 수집하였다. 최대 등척성 수축시 발바닥쪽굽힘근의 수축을 시각적으로 확인하기 위해 프로브를 가쪽갈래장딴지근과 아킬레스건 연결 부위에 부착하여 동영상(30 Hz)으로 촬영하였다.

안정시 상태에서 수집된 초음파 이미지는 ImageJ (NIH, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij>) 측정 프로그램을 사용하여 <Figure 4>와 같이 안쪽·가쪽장딴지근과 가자미근의 심부 건막(deep aponeurosis)과 표면건막(superficial aponeurosis) 사이의 근섬유다발 길이(FL), 근섬유배열각(PA), 근 두께(MT)를 분석하였다.

#### 5) 최대근력발현 속도(rate of force development [RFD])

발바닥쪽굽힘근의 최대근력발현 속도를 측정하기 위해 실험세팅은 최대 등척성 근력과 동일하게 진행하였다. 피험자에게 안정 시 상태를 유지하라고 지시하고 실험자가 갑자기 신호를 주면 최대 빠른 속도로 발바닥쪽굽힘방향으로 수축을 실시하였다. RFD는 모든 피험자의 힘 발현 시 초기 50 V(voltage [V<sub>Pre</sub>])가 되었을 때를 시점으로 500 ms 후(V<sub>Post</sub>)의 값을 가지고 아래와 같은 공식으로 속도를 계산하였다.

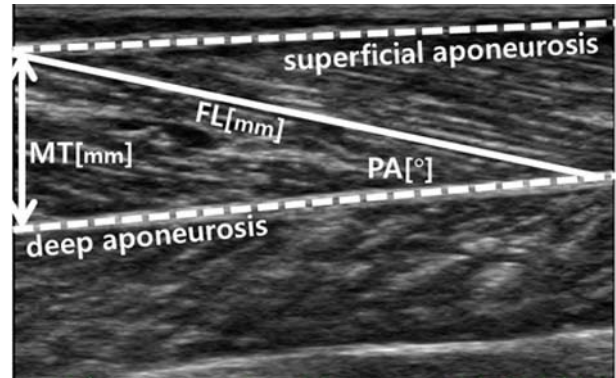


Figure 5. Analysis of muscle architecture variables using an ultrasounds imaging technique (MT: muscle thickness; FL: fascicle length; PA: pennation angle)

$$RFD = V_{\text{Post}} - V_{\text{Pre}}/500 \text{ ms} \quad (3)$$

#### 6) 수직점프

하지의 운동기능을 측정하기 위하여 지면반력기기(ORG-6, ATMI, USA)위에서 양팔을 고관절 위치에 고정하여 성공적인 점프 총 3회를 2000 Hz로 수집하였다. 점프를 실시하였을 때 지면에서 발이 떨어지는 순간부터 착지하는 순간의 체공시간(t)을 측정하였다. 그 후 체공시간을 사용하여 점프높이(h)를  $h = gt^2/8 \text{ cm}$  ( $g = 9.81$ )로 분석하였다(Di Gimini, Tihanyi, Safar, & Scrimaglio, 2009).

#### 5. 통계 분석

진동운동기기를 사용한 RVT그룹과 사용하지 않은 RT그룹간에 8주간의 운동 및 4주간의 운동중단 시 발바닥쪽굽힘근의 변화에 대하여 알아보고자 하였다. 측정된 모든 변인은 평균(M) 및 표준편차(SD)로 산출하였다. 8주간의 운동기간 동안에 발바닥쪽굽힘근의 역학적(PT, AT, TT, RTT), 근신경학적(MI, RMS), 형태학적(PA, FL, MT), 그리고 기능적(VJ, RFD)등의 변인을 그룹간(RVT, RT, CON)과 운동기간동안(운동 전[pre], 2주후[P<sub>2</sub>], 8주후[P<sub>8</sub>])의 상호작용을 알아보기 위해 이원반복변량 분산분석(two-way ANOVA with repeated measures, 3 groups × 3 training time)을 실시하였다. 사후 검정으로 그룹간 또는 시기간의 차이를 알아보기 위해 일원분산분석(one-way ANOVA)과 독립표본 t-검정(independent t-test)을 실시하였다. 그리고 그룹간 운동중단 4주후(P<sub>de-T</sub>)의 변화량을 비교 분석하기 위해 독립표본 t-검정을 실시하였다. 위와 같이 수집된 자료는 SPSS 21 (IBM, USA) 통계프로그램을 이용하였으며, 유의 수준은  $p < .05$ 로 설정하였다.

### III. 결 과

8주간의 운동 및 4주간의 운동중단 시 발바닥쪽굽힘근의 기능 변화를 알아보기 위해 최대 등척성 발바닥쪽굽힘을 실시하였고, 본 연구의 변인인 근력(TT, AT, PA)과 RTT, MI, RMS, 내적배열구조(PA, FL, MT), RFD, VJ 등이 그룹과 측정시기(Pre, P<sub>2</sub>, P<sub>8</sub>, P<sub>de-T</sub>)간에 어떠한 변화를 나타내는 지 분석하였다.

#### 1. 역학적 특성(근력)

최대 등척성 발바닥쪽굽힘력은 토크값으로 설정하여 측정하였다. 각 그룹과 측정시기의 발바닥쪽굽힘근의 최대 근력 결과는 다음과 같다(Table 3, Figure 6).

##### 1) 총 토크(Total torque [TT])

총 토크는 수동적토크와 능동적토크의 합으로 정의하였다. 그룹과 측정시기간의 상호작용 효과가 통계적으로 유의하게 나타났다(F[4,64]=11.984, *p*=.000). 시기에 따라 RVT그룹의 총토크는 점차 증가하였으며(Pre<P<sub>2</sub>, *p*<.001, Pre<P<sub>8</sub>, *p*<.000, P<sub>2</sub><P<sub>8</sub>, *p*<.000) RT그룹도 운동전보다 운동후에 증가하였으나(Pre<P<sub>2</sub>, *p*<.016, Pre<P<sub>8</sub>, *p*<.030), 운동 2주후와 8주후에는 유의하게 증가하지 않았다(P<sub>2</sub><P<sub>8</sub>, *p*<1.000). CON그룹은 Pre보다 P<sub>8</sub>에 측정된 값이 감소하였

으나 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다(*p*<.368). RVT그룹과 RT그룹을 각 측정시기간 비교해본 결과 Pre (RVT>RT, *p*<.841)와 P<sub>2</sub> (RVT>RT, *p*<.690)에서는 유의한 차이가 나타나지 않았으나, P<sub>8</sub>에서는 유의한 차이가 나타났다(RVT>RT, *p*<.045). 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 비교한 결과 RVT그룹보다 RT그룹의 감소량이 높은 것으로 나타났다(RVT<RT, *p*<.000).

##### 2) 능동적토크(Active torque [AT])

능동적토크는 최대 등척성 발바닥쪽굽힘력을 측정한 토크값이다. 그룹과 시기 간의 상호작용 효과가 유의하게 나타났다(F4,64=11.035, *p*=.000). 운동기간 동안에 RVT그룹은 각 시기 사이에서는 유의한 차이가 나타나지 않았으나 (Pre<P<sub>2</sub>, *p*=.098, P<sub>2</sub><P<sub>8</sub>, *p*=.318), 운동전과 8주후에는 유의한 차이가 나타났다(Pre<P<sub>8</sub>, *p*=.001). RT그룹에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다(Pre<P<sub>2</sub>, *p*=.385, Pre<P<sub>8</sub>, *p*=.436, P<sub>2</sub><P<sub>8</sub>, *p*=1.000). CON그룹은 운동전과 8주후에 유의한 차이가 나타나지 않았다(Pre>P<sub>8</sub>, *p*=.422). 운동기간 동안 RVT그룹과 RT그룹간에 Pre (RVT<RT, *p*=.845)와 P<sub>2</sub> (RVT>RT, *p*=.647)에서는 유의한 차이가 나타나지 않았으나, 8주후에는 유의한 차이가 나타났다(RVT>RT, *p*=.041). 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 비교한 결과 RVT보다 RT가 감소량이 높은 것으로 나타났다 (RVT<RT, *p*=.001).

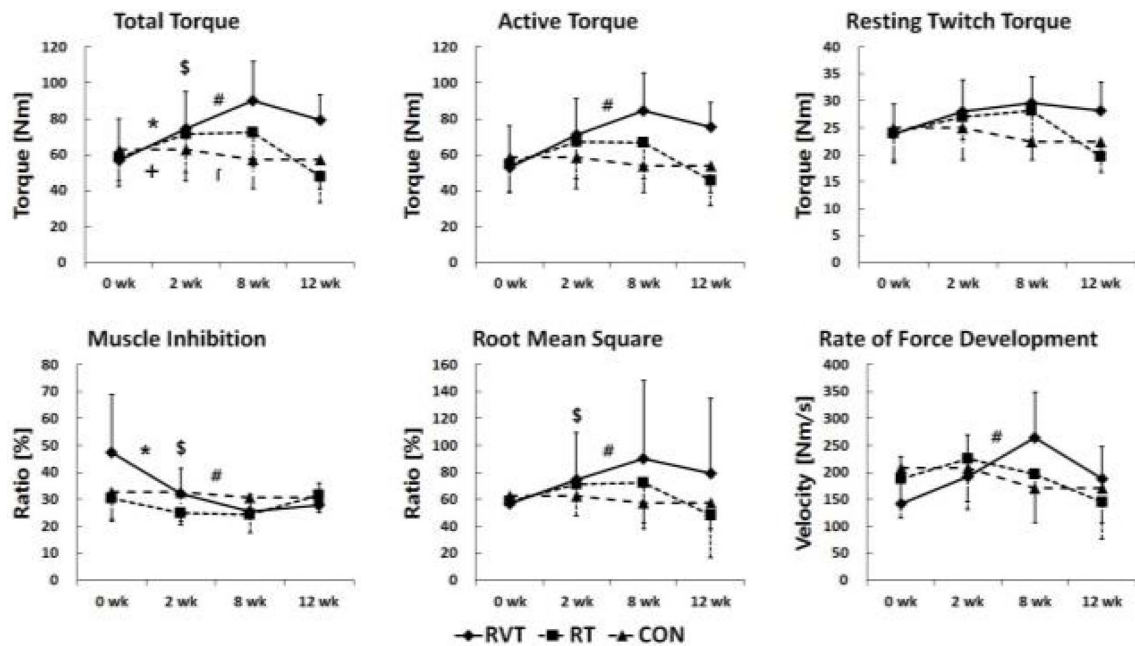


Figure 6. Changes in total and active ankle plantarflexion torques, resting twitch torque (RTT), muscle inhibition (MI), relative RMS of plantarflexors EMGs and rate of force development throughout the 8-week training and 4-week detraining periods in the RVT, RT, and CON groups (RVT, \*: Pre vs P<sub>2</sub>, #: Pre vs P<sub>8</sub>, \$: P<sub>2</sub> vs P<sub>8</sub>, RT, +: Pre vs P<sub>2</sub>, ∩: P<sub>2</sub> vs P<sub>8</sub>, *p*<.05)

Table 3. Changes in mechanical, neuromuscular and functional parameters following the 8-week resistance exercise and the subsequent 4-week detraining periods

Measure	RVT						RT						CON						
	Training			De-training			Training			De-training			Training			De-training			
	Pre	P <sub>2</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>de-T</sub>	P <sub>de-T</sub>	Change rate (%)	Pre	P <sub>2</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>de-T</sub>	P <sub>de-T</sub>	Change rate (%)	Pre	P <sub>2</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>de-T</sub>	P <sub>de-T</sub>	Change rate	
PT (Nm)	8.31 ±1.50	8.05 ±1.10	9.92 ±2.69	3.92 ±1.05	3.92 ±1.05	-58.75 ±12.25	3.99 ±1.12	4.11 ±1.46	5.55 ±5.26	2.33 ±0.96	2.33 ±0.96	-42.93 ±28.25	5.81 ±2.41	5.75 ±2.25	3.46 ±2.53	3.46 ±2.53	3.46 ±2.53	3.46 ±2.53	.173
AT (Nm)	53.04 ±23.23	71.09 ±20.39	84.56 ±20.94	75.30 ±13.72	75.30 ±13.72	-9.33 ±9.47	54.66 ±15.74	67.25 ±20.63	66.70 ±19.90	45.58 ±13.91	45.58 ±13.91	-29.82 ±16.81	58.48 ±19.08	58.48 ±17.36	53.91 ±14.96	53.91 ±14.96	53.91 ±14.96	53.91 ±14.96	.000*
TT (Nm)	56.96 ±23.20	74.75 ±20.45	90.09 ±22.17	79.22 ±14.04	79.22 ±14.04	-10.36 ±9.71	58.65 ±16.52	71.36 ±21.27	72.25 ±18.99	47.90 ±14.64	47.90 ±14.64	-33.04 ±13.81	62.79 ±17.56	62.79 ±17.56	57.38 ±16.32	57.38 ±16.32	57.38 ±16.32	57.38 ±16.32	.000*
RTT (Nm)	23.80 ±5.61	27.98 ±5.93	29.65 ±4.89	28.21 ±5.29	28.21 ±5.29	-4.39 ±13.53	24.06 ±5.57	27.08 ±4.35	28.15 ±5.23	19.62 ±2.87	19.62 ±2.87	-28.98 ±11.61	24.98 ±5.93	24.98 ±5.93	22.42 ±3.45	22.42 ±3.45	22.42 ±3.45	22.42 ±3.45	.000*
MI (%)	47.45 ±21.51	32.18 ±9.47	25.58 ±6.19	27.85 ±8.15	27.85 ±8.15	11.38 ±30.54	30.45 ±7.66	24.90 ±4.54	24.37 ±6.76	31.65 ±6.61	31.65 ±6.61	33.22 ±18.70	32.77 ±10.85	32.77 ±10.85	30.60 ±4.19	30.60 ±4.19	30.60 ±4.19	30.60 ±4.19	.049*
RMS (%)	100.00 ±0.00	105.80 ±34.66	149.04 ±58.06	147.80 ±55.60	147.80 ±55.60	2.42 ±25.85	100.00 ±0.00	122.33 ±23.32	121.71 ±29.88	124.34 ±31.18	124.34 ±31.18	3.17 ±14.25	100.00 ±0.00	100.00 ±0.00	121.18 ±19.50	121.18 ±19.50	121.18 ±19.50	121.18 ±19.50	.034†
RFD (Nm/s)	141.41 ±88.36	192.39 ±77.04	264.03 ±85.03	187.62 ±60.99	187.62 ±60.99	-25.71 ±21.58	188.03 ±72.75	225.42 ±93.87	196.17 ±90.05	144.46 ±68.87	144.46 ±68.87	-14.12 ±53.16	207.54 ±61.86	207.54 ±61.86	170.16 ±64.07	170.16 ±64.07	170.16 ±64.07	170.16 ±64.07	.000*
VJ (cm)	13.46 ±2.36	13.91 ±2.52	13.74 ±2.38	13.21 ±2.05	13.21 ±2.05	-3.10 ±10.75	8.66 ±2.40	9.16 ±2.66	9.88 ±2.52	9.16 ±2.52	9.16 ±2.52	-6.96 ±11.34	12.18 ±2.43	12.18 ±2.43	11.57 ±2.13	11.57 ±2.13	11.57 ±2.13	11.57 ±2.13	.285

Note. values presented as mean±standard deviation; PT, passive torque; AT, active torque; TT, total torque; RTT, resting twitch torque; MI, muscle inhibition; RMS, root mean square; RFD, rate of force development; VJ, vertical jump.

\*Significantly RVT vs. RT De-training Change rate,  $p < 0.05$ .

†Significant 3 group×3 training time interaction,  $p < 0.05$ .



### 3) 수동적토크(Passive torque, PT)

수동적토크는 힘을 뺀 상태에서 발목 각도별로 나타나는 값이다. 그룹과 시기간의 상호작용 효과가 유의하게 나타나지 않았다( $F(4,64)=1.811$ ,  $p=.173$ ). 운동기간 동안에 RVT그룹은 운동전과 2주, 8주 후에는 유의한 차이가 나타나지 않았으나( $Pre>P_2$ ,  $p=1.000$ ,  $Pre<P_8$ ,  $p=.090$ ), 2주와 8주 후에는 유의한 차이가 나타났다( $P_2<P_8$ ,  $p=.038$ ). RT그룹에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다( $Pre<P_2$ ,  $p=1.000$ ,  $Pre<P_8$ ,  $p=.785$ ,  $P_2<P_8$ ,  $p=.903$ ). CON그룹은 운동전보다 8주 후에 감소하였으나 유의한 차이가 나타나지 않았다( $Pre>P_8$ ,  $p=.317$ ). 운동기간 동안 RVT그룹과 RT그룹은 Pre ( $RVT>RT$ ,  $p=.000$ )와  $P_2$  ( $RVT>RT$ ,  $p=.000$ ),  $P_8$  ( $RVT>RT$ ,  $p=.013$ )에서 유의한 차이가 나타났다. 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 비교한 결과 RVT그룹과 RT그룹에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다( $RVT>RT$ ,  $p=.107$ ).

### 4) 안정시 연축수축력(Resting twitch torque [RTT])

안정시 연축수축력은 힘을 뺀 상태에서 후정강신경에 이중과 전기자극을 하여 측정하였다. 그룹과 시기간의 상호작용 효과가 유의하게 나타났다( $F[4,64]=4.981$ ,  $p=.001$ ). 운동기간 동안에 RVT는 운동전과 2주, 2주와 8주에서는 유의한 차이가 나타나지 않았으나( $Pre<P_2$ ,  $p=.153$ ,  $P_2<P_8$ ,  $p=1.000$ ), 운동전과 8주 후에는 유의한 차이가 나타났다( $Pre<P_8$ ,  $p=.023$ ). RT그룹에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다( $Pre<P_2$ ,  $p=.521$ ,  $Pre<P_8$ ,  $p=.205$ ,  $P_2<P_8$ ,  $p=1.000$ ). CON그룹은 운동전과 8주 후에 유의한 차이가 나타나지 않았다( $Pre>P_8$ ,  $p=.250$ ). 운동기간동안 RVT와 RT그룹간에 Pre ( $RVT<RT$ ,  $p=.909$ )와  $P_2$  ( $RVT>RT$ ,  $p=.674$ ),  $P_8$  ( $RVT>RT$ ,  $p=.468$ )에서 모두 유의한 차이가 나타나지 않았다. 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 비교한 결과 RVT그룹보다 RT그룹의 감소량이 높은 것으로 나타났다( $RVT<RT$ ,  $p=.000$ ).

## 2. 근신경학적 특성

각 그룹과 측정시기의 발바닥쪽굽힘근의 근신경학적 특성 결과는 다음과 같다(Table 3, Figure 6).

### 1) 근활성 억제율(muscle inhibition)

근활성 억제율은 최대 등척성 발바닥쪽굽힘력을 발현 시 작용되지 않는 운동신경을 수치적으로 확인하였다. 그룹과 시기간의 상호작용 효과가 유의하게 나타났다( $F[4,64]=5.692$ ,  $p=.003$ ). 운동기간 동안에 RVT그룹에서는 운동전과 2주, 운동전과 8주에서는 유의한 차이가 나타났으며( $Pre>P_2$ ,  $p=.019$ ,  $Pre>P_8$ ,  $p=.001$ ), 2주후와 8주후에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다( $P_2<P_8$ ,  $p=.663$ ). RT그룹에서는 유의

한 차이가 나타나지 않았다( $Pre>P_2$ ,  $p=.159$ ,  $Pre>P_8$ ,  $p=.104$ ,  $P_2>P_8$ ,  $p=1.000$ ). CON그룹은 운동전과 8주 후에 유의한 차이가 나타나지 않았다( $Pre>P_8$ ,  $p=.437$ ). 운동기간동안 RVT와 RT그룹간에 Pre ( $RVT>RT$ ,  $p=.014$ )와  $P_2$  ( $RVT>RT$ ,  $p=.020$ )에서는 유의한 차이가 나타났으나,  $P_8$  ( $RVT>RT$ ,  $p=.644$ )에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 비교한 결과 RVT보다 RT가 증가량이 높은 것으로 나타났다( $RVT<RT$ ,  $p=.049$ ).

### 2) 근활성도(root mean square [RMS])

근전도로 최대 등척성 수축시 발바닥쪽굽힘근의 RMS를 측정된 결과<Table 3, Figure 6>, RMS는 그룹과 시기간의 상호작용 효과가 유의하게 나타났다( $F[4,64]=7.179$ ,  $p=.000$ ). 운동기간 동안에 RVT그룹은 운동전과 2주후, 2주후와 8주후에서는 유의한 차이가 나타나지 않았으나( $Pre<P_2$ ,  $p=.344$ ,  $P_2<P_8$ ,  $p=.087$ ), 운동전과 8주후에서는 유의한 차이가 나타났다( $Pre<P_8$ ,  $p=.001$ ). RT그룹에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다( $Pre<P_2$ ,  $p=.949$ ,  $Pre<P_8$ ,  $p=1.000$ ,  $P_2>P_8$ ,  $p=1.000$ ). CON그룹은 운동전과 8주 후에 유의한 차이가 나타났다( $Pre>P_8$ ,  $p=.030$ ). 운동기간동안 RVT와 RT그룹간에 Pre( $RVT<RT$ ,  $p=.171$ )와  $P_2$ ( $RVT<RT$ ,  $p=.344$ ),  $P_8$ ( $RVT>RT$ ,  $p=.066$ )에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 산출하여 RVT와 RT를 비교한 결과 유의한 차이가 나타나지 않았다( $RVT>RT$ ,  $p=.464$ ).

## 3. 형태학적 구조

근육의 내적배열구조를 측정하여 운동기간동안에 변화를 측정하였으며, 결과는 <Table 4>와 같이 나타났다.

### 1) 근섬유배열각(pennation angle)

LG( $F[4,64]=1.291$ ,  $p=.283$ )와 SOL( $F[4,64]=0.178$ ,  $p=.934$ )에서는 각 그룹과 측정시기간의 상호작용 효과는 통계적인 유의차가 나타나지 않았다. 또한 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 산출하여 RVT와 RT를 비교한 결과 LG ( $RVT<RT$ ,  $p=.079$ )와 SOL ( $RVT>RT$ ,  $p=.747$ )에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다.

그러나 MG의 PA는 그룹과 시기간의 상호작용 효과가 유의하게 나타났다( $F[4,64]=5.055$ ,  $p=.001$ ). 운동기간 동안에 RVT그룹은 유의한 차이가 나타나지 않았으며( $Pre<P_2$ ,  $p=.120$ ,  $Pre<P_8$ ,  $p=.316$ ,  $P_2>P_8$ ,  $p=1.000$ ), RT그룹에서도 유의한 차이가 나타나지 않았다( $Pre>P_2$ ,  $p=1.000$ ,  $Pre>P_8$ ,  $p=.399$ ,  $P_2>P_8$ ,  $p=1.000$ ). CON그룹은 운동전과 8주 후에 유의한 차이가 나타났다( $Pre>P_8$ ,  $p=.022$ ). 운동기간동안 RVT와 RT그룹간에 Pre ( $RVT=RT$ ,  $p=.140$ )와  $P_2$

Table 4. Changes in muscle architecture parameters following the 8-week resistance exercise and the subsequent 4-week detraining periods

Measure	RVT										CON														
	Training					De-training					Training					De-training									
	Pre	P <sub>2</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>de-T</sub>	Change rate (%)	Pre	P <sub>2</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>de-T</sub>	Change rate (%)	Pre	P <sub>2</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>de-T</sub>	Change rate (%)	Pre	P <sub>2</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>de-T</sub>	Change rate (%)					
PA (deg)	13.28	13.73	13.84	13.25	-3.83	13.05	11.84	13.00	13.58	6.48	12.89	12.89	14.05	14.05	.079	12.89	12.89	14.05	14.05	.283	12.89	12.89	14.05	14.05	.283
	±2.03	±2.33	±1.78	±1.93	±11.73	±3.01	±2.44	±2.46	±1.56	±16.30	±1.98	±1.98	±2.75	±2.75		±1.98	±1.98	±2.75	±2.75		±1.98	±1.98	±2.75	±2.75	
	15.97	17.70	17.32	16.02	-7.89	17.65	16.73	15.87	16.74	6.40	17.67	17.67	15.96	15.96	.028*	17.67	17.67	15.96	15.96	.001*	17.67	17.67	15.96	15.96	.028*
±2.41	±2.57	±1.24	±3.16	±14.15	±3.09	±2.52	±2.45	±2.66	±16.23	±2.35	±2.35	±2.37	±2.37		±2.35	±2.35	±2.37	±2.37		±2.35	±2.35	±2.37	±2.37		
SOL	17.88	16.99	17.33	16.05	-4.56	16.56	16.34	15.96	15.31	-0.68	17.39	17.39	17.46	17.46	.747	17.39	17.39	17.46	17.46	.934	17.39	17.39	17.46	17.46	.934
	±4.67	±3.60	±3.26	±5.10	±33.36	±4.43	±2.88	±4.29	±3.55	±23.36	±4.77	±4.77	±4.41	±4.41		±4.77	±4.77	±4.41	±4.41		±4.77	±4.77	±4.41	±4.41	
	9.98	9.18	9.48	9.28	-1.71	9.16	9.00	9.29	9.71	5.50	9.31	9.31	8.80	8.80	.107	9.31	9.31	8.80	8.80	.207	9.31	9.31	8.80	8.80	.107
±1.90	±1.33	±1.10	±1.24	±9.92	±1.43	±1.34	±1.24	±1.00	±11.56	±0.86	±0.86	±1.40	±1.40		±0.86	±0.86	±1.40	±1.40		±0.86	±0.86	±1.40	±1.40		
FL (mm)	9.56	9.59	9.61	9.70	0.72	9.10	9.03	9.06	9.53	6.56	8.70	8.70	8.88	8.88	.170	8.70	8.70	8.88	8.88	.985	8.70	8.70	8.88	8.88	.170
	±1.33	±1.01	±0.94	±1.34	±7.95	±0.80	±0.86	±1.22	±0.77	±12.61	±1.01	±1.01	±0.79	±0.79		±1.01	±1.01	±0.79	±0.79		±1.01	±1.01	±0.79	±0.79	
	7.39	7.32	7.43	6.92	-2.78	6.73	6.58	6.18	6.36	4.15	6.47	6.47	6.86	6.86	.367	6.47	6.47	6.86	6.86	.176	6.47	6.47	6.86	6.86	.367
±2.48	±2.55	±2.19	±1.11	±20.10	±1.15	±0.85	±0.89	±1.03	±16.67	±0.89	±0.89	±0.85	±0.85		±0.89	±0.89	±0.85	±0.85		±0.89	±0.89	±0.85	±0.85		
LG	2.20	2.14	2.25	3.79	59.88	2.20	2.00	2.15	2.32	9.61	2.43	2.43	2.33	2.33	.484	2.43	2.43	2.33	2.33	.026†	2.43	2.43	2.33	2.33	.484
	±0.29	±0.27	±0.26	±6.09	±232.78	±0.34	±0.22	±0.46	±0.45	±21.06	±0.59	±0.59	±0.37	±0.37		±0.59	±0.59	±0.37	±0.37		±0.59	±0.59	±0.37	±0.37	
	2.61	2.80	2.84	4.19	47.55	2.44	2.46	2.64	2.80	6.17	2.54	2.54	2.43	2.43	.514	2.54	2.54	2.43	2.43	.035†	2.54	2.54	2.43	2.43	.514
±0.35	±0.33	±0.29	±5.84	±205.72	±0.32	±0.36	±0.52	±0.64	±11.11	±0.47	±0.47	±0.29	±0.29		±0.47	±0.47	±0.29	±0.29		±0.47	±0.47	±0.29	±0.29		
SOL	2.47	2.28	2.44	3.53	39.31	1.78	1.80	1.97	2.01	2.40	1.74	1.74	1.72	1.72	.542	1.74	1.74	1.72	1.72	.045†	1.74	1.74	1.72	1.72	.542
	±0.57	±0.39	±0.46	±5.51	±196.55	±0.37	±0.28	±0.34	±0.34	±7.40	±0.25	±0.25	±0.31	±0.31		±0.25	±0.25	±0.31	±0.31		±0.25	±0.25	±0.31	±0.31	

Note. values presented as mean±standard deviation; PA, pennation angle; FL, fasciela length; MT, muscle thickness.  
 \*Significantly RVT vs. RT De-training ratio((12wk/8wk×100)-100%), p<0.05.  
 †Significant group×training time interaction, p<0.05.

(RVT>RT,  $p=.355$ ), P8 (RVT>RT,  $p=.095$ )에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 비교한 결과 RVT는 감소하였고, RT는 증가하는 것으로 나타났으며 이는 통계적으로 유의하게 나타났다 (RVT<RT,  $p=.028$ ).

## 2) 근 두께(muscle thickness)

근 두께에 대한 MG, LG, SOL의 이원변량 분석 결과, 각 그룹과 측정시기 간의 상호작용 효과를 나타냈다.

LG의 MT는 그룹과 시기간의 상호작용 효과가 유의하게 나타났다( $F[4,64]=2.970$ ,  $p=.026$ ). 운동기간 동안에 RVT그룹은 유의한 차이가 나타나지 않았으며(Pre>P<sub>2</sub>,  $p=1.000$ , Pre<P<sub>8</sub>,  $p=1.000$ , P<sub>2</sub><P<sub>8</sub>,  $p=1.000$ ), RT그룹에서도 유의한 차이가 나타나지 않았다(Pre>P<sub>2</sub>,  $p=.592$ , Pre>P<sub>8</sub>,  $p=1.000$ , P<sub>2</sub><P<sub>8</sub>,  $p=.940$ ). CON그룹은 운동전과 8주후에 유의한 차이가 나타나지 않았다(Pre>P<sub>8</sub>,  $p=.154$ ). 운동기간동안 RVT와 RT그룹간에 Pre (RVT=RT,  $p=.986$ )와 P<sub>2</sub>(RVT>RT,  $p=.167$ ), P<sub>8</sub> (RVT>RT,  $p=.511$ )에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 산출하여 RVT와 RT를 비교한 결과 유의한 차이가 나타나지 않았다(RVT>RT,  $p=.484$ ).

MG의 MT는 그룹과 시기간의 상호작용 효과가 유의하게 나타났다( $F[4,64]=3.083$ ,  $p=.035$ ). 운동기간 동안에 RVT그룹은 유의한 차이가 나타나지 않았으며(Pre<P<sub>2</sub>,  $p=.389$ , Pre<P<sub>8</sub>,  $p=.212$ , P<sub>2</sub><P<sub>8</sub>,  $p=1.000$ ), RT그룹에서도 유의한 차이가 나타나지 않았다(Pre<P<sub>2</sub>,  $p=1.000$ , Pre<P<sub>8</sub>,  $p=.825$ , P<sub>2</sub><P<sub>8</sub>,  $p=.946$ ). CON그룹은 운동전과 8주후에 유의한 차이가 나타나지 않았다(Pre>P<sub>8</sub>,  $p=.350$ ). 운동기간동안 RVT와 RT그룹간에 Pre (RVT>RT,  $p=.225$ )와 P<sub>8</sub> (RVT>RT,  $p=.227$ )에서는 유의한 차이가 나타나지 않았으나, P<sub>2</sub> (RVT>RT,  $p=.021$ )에서는 유의한 차이가 나타났다. 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 산출하여 RVT와 RT를 비교한 결과 유의한 차이가 나타나지 않았다(RVT>RT,  $p=.514$ ).

SOL의 MT는 그룹과 시기간의 상호작용 효과가 유의하게 나타났다( $F[4,64]=2.593$ ,  $p=.045$ ). 운동기간 동안에 RVT그룹은 유의한 차이가 나타나지 않았으며(Pre>P<sub>2</sub>,  $p=.897$ , Pre>P<sub>8</sub>,  $p=.399$ , P<sub>2</sub><P<sub>8</sub>,  $p=1.000$ ), RT그룹에서도 유의한 차이가 나타나지 않았다(Pre<P<sub>2</sub>,  $p=1.000$ , Pre<P<sub>8</sub>,  $p=.581$ , P<sub>2</sub><P<sub>8</sub>,  $p=.725$ ). CON그룹은 운동전과 8주후에 유의한 차이가 나타나지 않았다(Pre>P<sub>8</sub>,  $p=.876$ ). 운동기간동안 RVT와 RT그룹간에 Pre (RVT>RT,  $p=.002$ )와 P<sub>2</sub> (RVT>RT,  $p=.002$ ), P<sub>8</sub> (RVT>RT,  $p=.008$ )에서는 유의한 차이가 나타났다. 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 산출하여 RVT와 RT를 비교한 결과 유의한 차이가 나타나지 않았다(RVT>RT,  $p=.542$ ).

## 3) 근섬유다발 길이(fascicle length)

근섬유다발 길이에 대한 LG( $F[4,64]=1.523$ ,  $p=.207$ ), MG( $F[4,64]=0.062$ ,  $p=.985$ ), SOL( $F[4,64]=1.696$ ,  $p=.176$ )의 이원변량 분석 결과, 각 그룹과 측정시기 간의 상호작용 효과는 통계적으로 유의하지 않았다. 운동중단 4주 이후 운동 8주후와의 변화율을 산출하여 RVT와 RT를 비교한 결과 LG (RVT<RT,  $p=.107$ ), MG (RVT<RT,  $p=.170$ ), SOL (RVT>RT,  $p=.367$ ) 모두 유의한 차이가 나타나지 않았다.

## 4. 수행력

### 1) 최대근력발현 속도(rate of force development)

발바닥쪽굽힘력의 최대근력발현 속도를 측정하여 순발력을 수치화하였다. 각 그룹과 측정시기의 최대근력발현 속도(RFD) 결과는 다음과 같다(Table 3, Figure 6). RFD는 그룹과 시기간의 상호작용 효과가 유의하게 나타났다( $F[4,64]=7.179$ ,  $p=.000$ ). 운동기간 동안에 RVT그룹은 운동전과 2주후, 2주후와 8주후에서는 유의한 차이가 나타나지 않았으나(Pre<P<sub>2</sub>,  $p=.344$ , P<sub>2</sub><P<sub>8</sub>,  $p=.087$ ), 운동전과 8주후에서는 유의한 차이가 나타났다(Pre<P<sub>8</sub>,  $p=.001$ ). RT 그룹에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다(Pre<P<sub>2</sub>,  $p=.949$ , Pre<P<sub>8</sub>,  $p=1.000$ , P<sub>2</sub>>P<sub>8</sub>,  $p=1.000$ ). CON그룹은 운동전과 8주후에 유의한 차이가 나타났다(Pre>P<sub>8</sub>,  $p=.030$ ). 운동기간동안 RVT와 RT그룹간에 Pre (RVT<RT,  $p=.171$ )와 P<sub>2</sub> (RVT<RT,  $p=.344$ ), P<sub>8</sub> (RVT>RT,  $p=.066$ )에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 산출하여 RVT와 RT를 비교한 결과 유의한 차이가 나타나지 않았다(RVT>RT,  $p=.464$ ).

### 2) 수직점프(vertical jump)

수직점프 높이를 측정하여 발바닥쪽굽힘력의 동적수행 능력을 살펴보았다. 그룹과 시기간의 상호작용 효과에서는 통계적인 유의차가 나타나지 않았다( $F[4,64]=1.303$ ,  $p=.285$ ). 운동기간 동안에 RVT그룹에서 유의한 차이가 나타나지 않았다(Pre<P<sub>2</sub>,  $p=1.000$ , Pre<P<sub>8</sub>,  $p=1.000$ , P<sub>2</sub>>P<sub>8</sub>,  $p=1.000$ ). RT그룹에서도 유의한 차이가 나타나지 않았다(Pre<P<sub>2</sub>,  $p=1.000$ , Pre<P<sub>8</sub>,  $p=.796$ , P<sub>2</sub><P<sub>8</sub>,  $p=1.000$ ). CON그룹은 운동전과 8주후에 유의한 차이가 나타나지 않았다(Pre>P<sub>8</sub>,  $p=.610$ ). 운동기간동안 RVT와 RT그룹간에 Pre (RVT>RT,  $p=.000$ )와 P<sub>2</sub> (RVT>RT,  $p=.000$ ), P<sub>8</sub> (RVT>RT,  $p=.001$ )에서는 유의한 차이가 나타났다. 운동중단 4주후와 운동 8주후의 변화율을 산출하여 RVT와 RT를 비교한 결과 유의한 차이가 나타나지 않았다(RVT>RT,  $p=.393$ ; Table 3).

### IV. 논 의

본 연구는 전신진동운동이 여성노인의 생체역학적 근육 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 운동 기간(0, 2, 8 주)과 운동중단(12주)시기에 따른 발바닥쪽굽힘근의 근력, 신경학적, 형태학적 변인들의 변화와 수행능력의 차이를 RVT, RT, CON 세그룹으로 구분하여 비교 분석하였다. 근기능의 변화는 운동(0, 2, 8주)과 운동중단(12주) 구간으로 나누어 발바닥쪽굽힘근의 토크, RTT, MI, 근활성도, 내적 배열구조, 수직점프 등을 측정하였다.

본 연구에서 운동 8주후 발바닥쪽굽힘근의 근력을 측정 한 결과 운동 전보다 진동운동기기를 사용한 RVT그룹은 59.4%, 진동운동기기를 사용하지 않은 RT그룹은 22% 증가하였다. 따라서 진동운동기기를 활용한 저항운동이 근력 증가에 더 효과적임을 확인할 수 있었다. 또한 8주간의 운동을 중단한 후 운동지속효과를 분석하기 위하여 12주 후에 다시 측정하여 비교한 결과 RVT는 11%, RV는 32% 감소된 것으로 나타나 운동효과와 지속 측면에서도 진동운동기기를 사용하였을 때 약 3배 정도 높게 나타났다(Figure 7). 이처럼 발바닥쪽굽힘근의 근력이 전신진동운동에 큰 영향을 받는 이유는 진동발판에서 일어나는 기계적인 자극이 발을 통해 인체로 전달되기 때문이다(Rehn, Lidstrom, Skoglund, & Lindstrom, 2007). 강직성 진동반사(tonic vibration reflex)로 알려진 이 동작의 기전은 근-건복합체의 길이가 짧고 빠른 변화를 나타내고 이를 완충

시키기 위한 적응 반응이 나타나 반사적 근수축을 일으키게 됨으로써 근신경계의 기능향상이 동반된다고 알려져 있다.(Cardinale & Bosco, 2003; Eklund & Hagbarth, 1966). 선행연구에서도 전신진동운동이 노인들의 하지근력을 강화시키고 보고하였다(Bogaerts et al., 2007, 2009; Machado et al., 2010; Roelants et al., 2004; Verschueren et al., 2004). Rees, Murphy와 Watsford (2008)은 노인들을 대상으로 한 8주간의 전신진동운동이 무릎관절과 엉덩관절의 굴근력과 신근력에는 큰 영향을 미치지 않았지만 발목관절의 발바닥쪽굽힘력은 크게 증가하였다고 보고하기도 하였다. 본 연구결과 역시 진동의 영향을 받은 RVT그룹이 다른 그룹들에 비해 근력증가율이 높게 나타나 선행 연구의 결과들과 유사함을 확인할 수 있었다.

전신진동운동이 근신경 효율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 ITT 기법을 활용하여 안정시 연속수축력과 근활성 억제율을 측정하였다. RVT그룹과 RT그룹은 8주간의 운동 참여 후 안정시 연속수축력이 각각 25%와 17% 증가하는 것으로 나타났으며 RVT그룹이 8%정도 더 높은 증가율을 나타내었다. 근활성 억제율 역시 RVT와 RT그룹 모두 각각 46%와 20% 감소하는 것으로 나타났다.

운동중단후 지속효과에서도 4주후 연속수축력이 RVT는 5%, RV는 30% 감소하였고 MI는 RVT가 9%, RT가 30% 증가하는 것으로 나타나 등척성 근력과 더불어 근신경 효율 측면에서도 진동운동기기를 사용하는 것이 운동 효과와 유지 효율이 높음을 알 수 있었다. 이러한 변화는

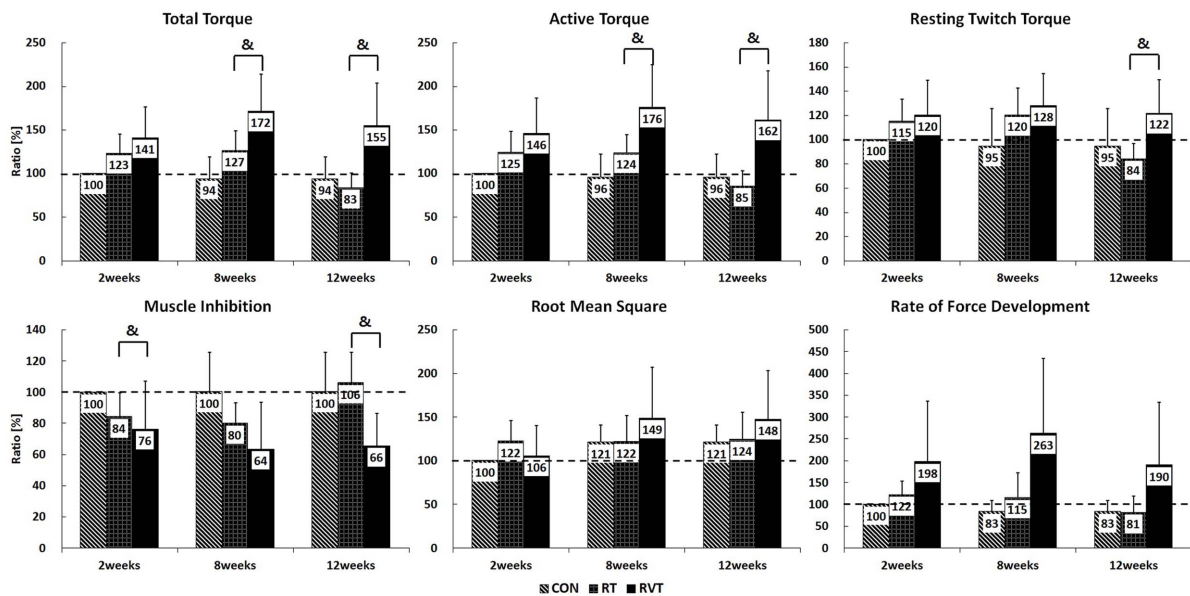


Figure 7. Changes in total and active ankle plantarflexion torques, resting twitch torque(RTT), muscle inhibition, relative RMS of plantarflexors EMGs and rate of force development throughout the 8-week training and 4-week detraining periods in the RVT, RT, and CON groups(&: RVT vs RT, p<.05)

강직성 진동 신장반사에 근거하여 척수반사(spinal reflexes)와 근활성(muscle activation)을 포함하는 신경 강화작용(neurogenic potentiation)을 통해 발생된다고 하였다(Cardinale & Bosco, 2003; Rittweger, Beller, & Felsenberg, 2000). 진동운동기기를 사용하여 저항운동과 파워운동 실시하여 비교한 결과 두그룹 모두 비슷한 근기능의 증가를 나타냈으며, 이는 근신경작용변화가 원인이 되는 것을 의미하고 있다(Bosco et al., 1998, 1999; Marin, Torres-Luque, Hernandez-Garcia, Garcia-Lopez, & Garatachea, 2011). 더불어 근방추 활성의 증가로 인한 반사반응의 유발과 근길이의 작은 변화를 빠르게 이끌어 내는 것도 중요하며(Cardinale & Bosco, 2003), 특정 질병에 걸린 근육조직이나 신경학적으로 문제가 있는 사람의 경우 근방추의 활성화는 더욱 중요한 역할을 한다.

최대 등척성 수축시 간헐적으로 전기자극을 주었을 때 노인이 젊은 성인보다 더 큰 피로 저항을 받아 RTT 값은 감소한다(Ditor & Hicks, 2000; Kent-Braun, Ng, Doyle, & Towse, 2002; Lanza, Russ, & Kent-Braun, 2004). 그러므로 운동 후 RTT 값이 증가한 것은 근신경효율의 증가와 더불어 피로 저항의 감소로 인한 결과로 생각된다. 선행연구에서 전신진동운동을 실시할 경우 초기에 근력이 향상되고, 신경 근축진현상이 나타난다고 하였다(Cardinale & Bosco, 2003; Roelants et al., 2004).

본 연구에서 운동 후 발바닥쪽굽힘근의 근활성도를 살펴 본 결과 운동 전보다 진동운동기기를 사용한 RVT그룹은 49%, 진동운동기기를 사용하지 않은 RT그룹은 22% 증가하였다. 또한 운동을 중단한 운동중단 후를 운동 후에 측정된 값과 비교 하였을 때에 RVT는 1% 감소하였고, RT는 2% 증가된 것으로 나타났다. 근활성도의 증가는 근력의 증가율과 유사하게 증가하였다. Hazell, Jakobi와 Kenno (2007)은 단기간의 전신진동운동에서 진동 강도의 증가는 하지 근활성화를 증가시킨다고 하였다. 단기간의 전신진동운동이 긍정적인 효과를 일으키는 것은 신경요인과 매우 밀접한 관련이 있다(Cardinale & Bosco, 2003; Roelants et al., 2004). 진동발판을 통해 몸속에 들어오는 자극을 근방추(muscle spindle)에 위치한 Ia 구심성 섬유(afferent fiber)를 자극하여  $\alpha$ -운동신경(motor neuron)으로 연결되어 있는 근육을 활성화 시키며, 진동에 직접적으로 영향을 받는 근육의 주위 근육들에 근방추 역시 자극을 받게 한다(Cardinale & Bosco, 2003; Roelants et al., 2004).

반면 전신진동운동이 근활성에 영향을 미치지 않는다는 보고도 있다. Machado 등 (2010)은 노인 여성을 대상으로 10주간 전신진동운동을 실시한 결과 안쪽넓은근(vastus medialis)과 넓다리두갈래근(biceps femoris)의 근비대 현상이 나타났으나, 안쪽넓은근과 넓다리두갈래근의 근활성도

에서는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다고 보고하였다. Martinez 등 (2013)은 6주간의 전신진동운동을 실시하여 발목 주요 근육의 근활성도를 살펴본 결과 운동 전, 후 비슷한 결과가 나타났다고 하였다. 일반적으로 노화가 진행됨에 따라 운동신경의 활성화가 감소하며, 특히 60세 이상이 되면 운동신경의 감소가 두드러지게 나타난다(Tomlinson & Irving, 1977). 장기간의 진동노출시간을 경험하게 되면 근신경요인의 활성화를 감소시키고, 근육의 적응 상태를 만들기도 하는 것으로 알려져 있다(Dupuis & Jansen, 1981).

전신진동운동이 근육의 고유한 형태학적 변화에 영향을 미치는지 알아보기 위하여 내적구조를 측정된 결과 근섬유배열각, 근 두께, 근섬유다발 길이 모두 유의한 차이가 나타나지 않았다. 저항운동과 관련한 선행연구에 따르면 6주간의 저항운동으로는 근 두께, 근섬유다발 길이, 근섬유배열각 모두 변화하지 않으며(Scanlon et al., 2014), 12주의 훈련은 근 두께와 근섬유배열각을 증가시키고(Reeves, Narici, & Maganaris, 2004; Suetta et al., 2008), 근섬유다발의 길이는 14주 동안의 저항훈련 실시 후 나타난다고 하였다(Reeves, Maganaris, Longo, & Narici, 2009), 본 연구 결과와 같이 형태학적인 변화가 나타나지 않은 것이 운동기간의 문제인지 노인이라는 대상의 문제인지에 대해서는 더 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

운동수행능력의 변화를 알아보기 위하여 최대근력 발현 속도와 수직점프를 측정하였다. 최대근력발현속도를 측정된 결과 진동운동기기를 사용한 RVT그룹이 운동 후 86.7% 증가하였고 운동중단 4주 후 29% 감소하였다. 최대근력발현속도는 RVT그룹에서만 증가된 것으로 나타났다. 이러한 결과는 전신진동운동이 하지근력과 파워의 증가(Bosco et al., 1999)에 효과적인 방법으로 판단된다. 그러나 수직점프를 측정된 결과 두 그룹 모두 운동 후 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 진동운동기 사용 시 수직점프를 증가시킨다는 연구(Bosco et al., 2000)와는 상반된 결과를 보였다(Bazett-Jones, Finch, & Dugan, 2008; Cormie, Deane, Triplett, & McBride, 2006; Trovinen et al., 2003). 본 연구에서는 노인을 대상으로 8주간의 전신진동운동을 실시하여 수직점프가 증가하지 않았으나, 장기간(6개월-12개월) 전신진동운동에 참여하였을 경우에는 수직점프도 증가한 것으로 나타났다(Bogaerts et al., 2007; Roelants et al., 2004; Verschuere et al., 2004). Raimundo, Gusi와 Tomas-Carus (2009)의 연구에서 8개월간의 전신진동운동을 실시하여 수직점프는 증가하였지만 무릎의 등속성 근력은 증가하지 않았는데 그 원인으로 강도의 점진적인 증가 없이 진동수만 증가하였기 때문이라고 하였다(Raimundo et al., 2009). 전신진동운동은 과중력운동의 효과로 나타나는 것으로 전신진동에



서의 과중력의 정도는 인체에 가하는 부하, 즉 운동강도를 의미하게 된다. 전신진동운동의 강도를 결정하는 요인으로 진동수, 진폭 및 진동의 세기 등을 들 수 있으며 (Nordlund & Thorstensson, 2007), 전신진동운동의 진동수와 진폭, 세기, 노출시간에 따라 인체에 미치는 영향이 다르게 나타날 것으로 판단된다(Park, Hwang, & Kim, 2008).

노인에게 있어 전신진동운동은 안전성 확보와 더불어 흥미, 효과 모든 측면에서 긍정적인 좋은 운동방법이라 할 수 있다. 본 연구의 결과에서도 근력과 근신경의 활성 측면에서 그 효과가 탁월하며, 특히 운동을 중단한 후에도 운동지속효과가 높아 효율성도 높은 것으로 확인되었다.

향후 본 연구와 관련하여 근육의 형태학적 특성과 수행 능력의 변화에 대해서는 노인이라는 대상 자체의 특성을 기반으로 하여 조금 더 다각적이고 심도 있는 접근이 필요해 보이며, 구체적인 운동프로그램을 구성하고 그 효과를 검증하는 연구도 후속적으로 진행되어야 할 것이다.

## V. 결 론

본 연구는 진동운동기기 사용 유·무에 따른 두 개의 운동집단과 대조군으로 구분하여 역학적, 근신경학적, 형태학적, 기능적 요인을 비교·분석하였다. 이를 위하여 8주간의 운동기간과 4주간의 운동중단 시기별로 발바닥쪽굽 힘근의 근력, 안정시 연속수축력, 근활성 억제율, 근활성도, 최대근력발현 속도, 수직점프, 근섬유다발 길이, 근섬유배열 각, 근 두께 등을 측정하여 분석하였고 진동운동기기 사용 유·무에 따른 집단간의 변화를 규명하고자 하였다. 그 결과를 토대로 다음과 같은 결론에 도달하였다.

첫째, 8주간의 전신진동운동 후 동일한 운동프로그램으로 지면에서 운동한 그룹보다 근력과 안정시 연속수축력은 더 증가하였으며, 운동중단 후에도 근력유지 효과가 더 큰 것으로 나타났다.

둘째, 8주간의 전신진동운동 후 동일한 운동프로그램으로 지면에서 운동한 그룹보다 근활성 억제율이 감소하였으며, 운동중단 후에도 근신경 효율이 더 오래 유지되는 것으로 나타났다.

셋째, 8주간의 전신진동운동 후 형태학적 변화는 유의하게 나타나지 않았다.

넷째, 8주간의 전신진동운동 후 기능학적으로 최대근력 발현 속도는 증가하였으며, 동일한 운동프로그램으로 지면에서 운동한 그룹에서는 통계적으로 유의한 변화가 나타나지 않았다.

## 참고문헌

Aagaard, P., Suetta, C., Caserotti, P., Magnusson, S. P., & Kjaer, M.

(2010). Role of the nervous system in sarcopenia and muscle atrophy with aging: strength training as a countermeasure. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(1), 49-64.

American College of Sports Medicine Position Stand. (1998). Exercise and physical activity for older adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(6), 992-1008.

Bamman, M. M., Hill, V. J., Adams, G. R., Haddad, F., Wetzstein, C. J., Gower, B. A., Ahmed, A., & Hunter, G. R. (2003). Gender differences in resistance-training-induced myofiber hypertrophy among older adults. *The Journals of Gerontology: Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 58(2), 108-116.

Bautmans, I., Van Hees, E., Lemper, J. C., & Mets, T. (2005). The feasibility of whole body vibration in institutionalised elderly persons and its influence on muscle performance, balance and mobility: a randomised controlled trial. *BMC Geriatrics*, 5, 17.

Bazett-Jones, D. M., Finch, H. W., & Dugan, E. L. (2008). Comparing the effects of various whole-body vibration accelerations on counter-movement jump performance. *Journal of Sports Science and Medicine*, 7(1), 144-150.

Bogaerts, A. C. G., Delecluse, C., Claessens, A. L., Troosters, T., Boonen, S., & Verschueren, S. M. P. (2009). Effects of whole body vibration training on cardiorespiratory fitness and muscle strength in older individuals (a 1-year randomised controlled trial). *Age and Ageing*, 38(4), 448-454.

Bogaerts, A., Delecluse, C., Claessens, A. L., Coudyzer, W., Boonen, S., & Verschueren, S. M. P. (2007). Impact of whole-body vibration training versus fitness training on muscle strength and muscle mass in older men: a 1-year randomized controlled trial. *The Journals of Gerontology: Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 62(6), 630-635.

Bosco, C., Cardinale, M., Tsarpela, O., Colli, R., Tihanyi, J., von Duvillard, S. P., & Viru, A. (1998). The influence of whole body vibration on jumping performance. *Biology of Sport*, 15(3), 157-164.

Bosco, C., Colli, R., Introini, E., Cardinale, M., Tsarpela, O., Madella, A., Tihanyi, J., & Viru, A. (1999). Adaptive responses of human skeletal muscle to vibration exposure. *Clinical Physiology*, 19(2), 183-187.

Bosco, C., Iacovelli, M., Tsarpela, O., Cardinale, M., Bonifazi, M., Tihanyi, J., Viru, M., De Lorenzo, A., & Viru, A. (2000). Hormonal responses to whole-body vibration in men. *European journal of applied physiology*, 81(6), 449-454.

Cameron, I. D., Murray, G. R., Gillespie, L. D., Robertson, M. C., Hill, K. D., Cumming, R. G., & Kerse, N. (2010). Interventions for preventing falls in older people in nursing care facilities and hospitals. *The Cochrane database of systematic reviews*, 1, 1-78.

Campbell, A. J., Borrie, M. J., & Spears, G. F. (1989). Risk factors for falls in a community-based prospective study of people 70 years and older. *The journals of gerontology: Series A, Biological sciences and medical sciences*, 44(4), M112-117.

Cardinale, M., & Bosco, C. (2003). The use of vibration as an exercise intervention. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 31(1), 3-7.

- Ciolac, E. G. (2013). Exercise training as a preventive tool for age-related disorders: a brief review. *Clinics*, 68(5), 710-717.
- Cochrane, D. J., Legg, S. J., & Hooker, M. J. (2004). The short-term effect of whole-body vibration training on vertical jump, sprint, and agility performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(4), 828-832.
- Cochrane, D. J., Loram, I. D., Stannard, S. R., & Rittweger, J. (2009). Changes in joint angle, muscle-tendon complex length, muscle contractile tissue displacement, and modulation of EMG activity during acute whole-body vibration. *Muscle Nerve*, 40(3), 420-429.
- Cornie, P., Deane, R. S., Triplett, N. T., & McBride, J. M. (2006). Acute effects of whole-body vibration on muscle activity, strength, and power. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(2), 257-261.
- Cruz-Jentoft, A. J., Baeyens, J. P., Bauer, J. M., Boirie, Y., Cederholm, T., Landi, F., Martin, F. C., Michel, J. P., Rolland, Y., Schneider, S. M., Topinkova, E., Vandewoude, M., & Zamboni, M. (2010). Sarcopenia: European consensus on definition and diagnosis: Report of the European working group on sarcopenia in older people. *Age and Ageing*, 39(4), 412-423.
- de Ruiter, C. J., van der Linden, R. M., van der Zijden, M. J., Hollander, A. P., & de Haan, A. (2003). Short-term effects of whole-body vibration on maximal voluntary isometric knee extensor force and rate of force rise. *European Journal of Applied Physiology*, 88(4-5), 472-475.
- De Serres, S. J., & Enoka, R. M. (1998). Older adults can maximally activate the biceps brachii muscle by voluntary command. *Journal of Applied Physiology*, 84(1), 284-291.
- Delecluse, C., Roelants, M., Diels, R., Koninckx, E., & Verschueren, S. (2005). Effects of whole body vibration training on muscle strength and sprint performance in sprint-trained athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 26(8), 662-668.
- Delecluse, C., Roelants, M., & Verschueren, S. (2003). Strength increase after whole-body vibration compared with resistance training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(6), 1033-1041.
- Delmonico, M. J., Harris, T. B., Visser, M., Park, S. W., Conroy, M. B., Velasquez-Mieyer, P., Boudreau, R., Manini, T. M., Nevitt, M., Newman, A. B., & Goodpaster, B. H. (2009). Longitudinal study of muscle strength, quality, and adipose tissue infiltration. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 90(6), 1579-1585.
- Di Giminiani, R., Tihanyi, J., Safar, S., & Scrimaglio, R. (2009). The effects of vibration on explosive and reactive strength when applying individualized vibration frequencies. *Journal of Sports Sciences*, 27(2), 169-177.
- Ditor, D. S., & Hicks, A. L. (2000). The effect of age and gender on the relative fatigability of the human adductor pollicis muscle. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 78(10), 781-790.
- Dupuis, H., & Jansen, G. (1981). Immediate effects of vibration transmitted to the hand. *Studies in Environmental Science* 13, 76-86.
- Earles, D., Vardaxis, V., & Kocaja, D. (2001). Regulation of motor output between young and elderly subjects. *Clinical Neurophysiology*, 112(7), 1273-1279.
- Eklund, G., & Hagbarth, K. E. (1966). Normal variability of tonic vibration reflexes in man. *Experimental Neurology*, 16(1), 80-92.
- Frontera, W. R., Hughes, V. A., Lutz, K. J., & Evans, W. J. (1991). A cross-sectional study of muscle strength and mass in 45- to 78-yr-old men and women. *Journal of Applied Physiology*, 71(2), 644-650.
- Frontera, W. R., Reid, K. F., Phillips, E. M., Krivickas, L. S., Hughes, V. A., Roubenoff, R., & Fielding, R. A. (2008). Muscle fiber size and function in elderly humans: a longitudinal study. *Journal of Applied Physiology*, 105(2), 637-642.
- Gillespie, L. D., Robertson, M. C., Gillespie, W. J., Lamb, S. E., Gates, S., Cumming, R. G., & Rowe, B. H. (2009). Interventions for preventing falls in older people living in the community. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2, 1-225.
- Gross, M. M., Stevenson, P. J., Charette, S. L., Pyka, G., & Marcus, R. (1998). Effect of muscle strength and movement speed on the biomechanics of rising from a chair in healthy elderly and young women. *Gait and Posture*, 8(3), 175-185.
- Hakkinen, K., Kallinen, M., Linnamo, V., Pastinen, U. M., Newton, R. U., & Kraemer, W. J. (1996). Neuromuscular adaptations during bilateral versus unilateral strength training in middle-aged and elderly men and women. *Acta Physiologica Scandinavica*, 158(1), 77-88.
- Hakkinen, K., & Komi, P. V. (1983). Changes in neuromuscular performance in voluntary and reflex contraction during strength training in man. *International Journal of Sports Medicine*, 4(4), 282-288.
- Hakkinen, K., Komi, P. V., & Alen, M. (1985). Effect of explosive type strength training on isometric force- and relaxation-time, electromyographic and muscle fibre characteristics of leg extensor muscles. *Acta Physiologica Scandinavica*, 125(4), 587-600.
- Haykowsky, M. J., Eves, N. D., Warburton, D. E. R., & Findlay, M. J. (2003). Resistance exercise, the valsalva maneuver, and cerebrovascular transmural pressure. *Medicine and Science in Sports And Exercise*, 35(1), 65-68.
- Hazell, T. J., Jakobi, J. M., & Kenno, K. A. (2007). The effects of whole-body vibration on upper- and lower-body EMG during static and dynamic contractions. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 32(6), 1156-1163.
- Hughes, V. A., Frontera, W. R., Wood, M., Evans, W. J., Dallal, G. E., Roubenoff, R., & Fiatarone Singh, M. A. (2001). Longitudinal muscle strength changes in older adults: influence of muscle mass, physical activity, and health. *The Journals of Gerontology: Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 56(5), B209-217.
- Hunter, S. K., Thompson, M. W., & Adams, R. D. (2000). Relationships among age-associated strength changes and physical activity level, limb dominance, and muscle group in women. *The Journals of Gerontology: Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 55(6), B264-273.
- Ivey, F. M., Tracy, B. L., Lemmer, J. T., NessAiver, M., Metter, E. J., Fozard, J. L., & Hurley, B. F. (2000). Effects of strength training and detraining on muscle quality: age and gender

- comparisons. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 55(3), B152-157.
- Janssen, I., Heymsfield, S. B., & Ross, R. (2002). Low relative skeletal muscle mass (sarcopenia) in older persons is associated with functional impairment and physical disability. *Journal of the American Geriatrics Society*, 50(5), 889-896.
- Kallman, D. A., Plato, C. C., & Tobin, J. D. (1990). The role of muscle loss in the age-related decline of grip strength: cross-sectional and longitudinal perspectives. *Journal of Gerontology*, 45(3), M82-88.
- Kamen, G., & De Luca, C. J. (1989). Unusual motor unit firing behavior in older adults. *Brain Research*, 482(1), 136-140.
- Kamen, G., Sison, S. V., Du, C. C., & Patten, C. (1995). Motor unit discharge behavior in older adults during maximal-effort contractions. *Journal of Applied Physiology*, 79(6), 1908-1913.
- Kannus, P., Parkkari, J., & Poutala, J. (1999). Comparison of force attenuation properties of four different hip protectors under simulated falling conditions in the elderly: an in vitro biomechanical study. *Bone*, 25(2), 229-235.
- Kent-Braun, J. A., Ng, A. V., Doyle, J. W., & Towse, T. F. (2002). Human skeletal muscle responses vary with age and gender during fatigue due to incremental isometric exercise. *Journal of Applied Physiology*, 93(5), 1813-1823.
- Kim, K. E., Jang, S. N., Lim, S., Park, Y. J., Paik, N. J., Kim, K. W., Jang, H. C., & Lim, J. Y. (2012). Relationship between muscle mass and physical performance: is it the same in older adults with weak muscle strength?. *Age and Ageing*, 41(6), 799-803.
- Klass, M., Baudry, S., & Duchateau, J. (2007). Voluntary activation during maximal contraction with advancing age: a brief review. *European Journal of Applied Physiology*, 100(5), 543-551.
- Korea Society for Bone and Mineral Research. (2008). Physician's guideline for osteoporosis. *Korea Society for Bone and Mineral Research*, 28-30.
- Lanza, I. R., Russ, D. W., & Kent-Braun, J. A. (2004). Age-related enhancement of fatigue resistance is evident in men during both isometric and dynamic tasks. *Journal of Applied Physiology*, 97(3), 967-975.
- Lexell, J., Taylor, C. C., & Sjostrom, M. (1988). What is the cause of the ageing atrophy? Total number, size and proportion of different fiber types studied in whole vastus lateralis muscle from 15- to 83-year-old men. *Journal of the Neurological Sciences*, 84, 275-294.
- Lindle, R. S., Metter, E. J., Lynch, N. A., Fleg, J. L., Fozard, J. L., Tobin, J., Roy, T. A., & Hurley, B. F. (1997). Age and gender comparisons of muscle strength in 654 women and men aged 20-93 yr. *Journal of Applied Physiology*, 83(5), 1581-1587.
- Machado, A., Garcia-Lopez, D., Gonzalez-Gallego, J., & Garatachea, N. (2010). Whole-body vibration training increases muscle strength and mass in older women: a randomized-controlled trial. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 20(2), 200-207.
- Marin, P. J., Herrero, A. J., Garcia-Lopez, D., Rhea, M. R., Lopez-Chicharro, J., Gonzalez-Gallego, J., & Garatachea, N. (2012). Acute effects of whole-body vibration on neuromuscular responses in older individuals: implications for prescription of vibratory stimulation. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(1), 232-239.
- Marin, P. J., Martin-Lopez, A., Vicente-Campos, D., Angulo-Carrere, M., Garcia-Pastor, T., Garatachea, N., & Chicharro, J. L. (2011). Effects of vibration training and detraining on balance and muscle strength in older adults. *Journal of Sports Science & Medicine*, 10(3), 559-564.
- Marin, P. J., Santos-Lozano, A., Santin-Medeiros, F., Delecluse, C., & Garatachea, N. (2011). A comparison of training intensity between whole-body vibration and conventional squat exercise. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 21(4), 616-621.
- Marin, P. J., Torres-Luque, G., Hernandez-Garcia, R., Garcia-Lopez, D., & Garatachea, N. (2011). Effects of different vibration exercises on bench press. *International Journal of Sports Medicine*, 32(10), 743-748.
- Martinez, F., Rubio, J. A., Ramos, D. J., Esteban, P., Mendizabal, S., & Jimenez, F. (2013). Effects of 6-week whole body vibration training on the reflex response of the ankle muscles: a randomized controlled trial. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 8(1), 15-24.
- Merton, P. A. (1954). Voluntary strength and fatigue. *The Journal of Physiology*, 123(3), 553-564.
- Morley, J. E. (2012). Sarcopenia in the elderly. *Family Practice*, 29, i44-i48.
- Morley, P., Whitfield, J. F., Willick, G. E., Ross, V., MacLean, S., Barbier, J. R., Isaacs, R. J., & Andreassen, T. T. (2001). The effect of monocyclic and bicyclic analogs of human parathyroid hormone (hPTH)-(1-31)NH<sub>2</sub> on bone formation and mechanical strength in ovariectomized rats. *Calcified Tissue International*, 68(2), 95-101.
- Moritani, T., & deVries, H. A. (1979). Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *American Journal of Physical Medicine*, 58(3), 115-130.
- Narici, M. V., & Maganaris, C. N. (2006). Adaptability of elderly human muscles and tendons to increased loading. *Journal of Anatomy*, 208(4), 433-443.
- Narici, M. V., Maganaris, C. N., Reeves, N. D., & Capodaglio, P. (2003). Effect of aging on human muscle architecture. *Journal of Applied Physiology*, 95(6), 2229-2234.
- Nordlund, M. M., & Thorstensson, A. (2007). Strength training effects of whole-body vibration?. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 17(1), 12-17.
- Park, D. H., Hwang, J. H., & Kim, K. H. (2008). Changes of metabolic and physiological to vibration frequency during whole-body vibration exercise. *Journal of Korean Physical Education Association for Girls and Women*, 22(1), 39-52.
- Patten, C., & Kamen, G. (2000). Adaptations in motor unit discharge activity with force control training in young and older human adults. *European Journal of Applied Physiology*, 83(2-3), 128-143.
- Porter, M. M., Myint, A., Kramer, J. F., & Vandervoort, A. A. (1995). Concentric and eccentric knee extension strength in older and younger men and women. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 20(4), 429-439.
- Raimundo, A. M., Gusi, N., & Tomas-Carus, P. (2009). Fitness efficacy of vibratory exercise compared to walking in post-

- menopausal women. *European Journal of Applied Physiology*, 106(5), 741-748.
- Rees, S., Murphy, A., & Watsford, M. (2007). Effects of vibration exercise on muscle performance and mobility in an older population. *Journal of Aging and Physical Activity*, 15(4), 367-381.
- Rees, S. S., Murphy, A. J., & Watsford, M. L. (2008). Effects of whole-body vibration exercise on lower-extremity muscle strength and power in an older population: a randomized clinical trial. *Physical Therapy*, 88(4), 462-470.
- Reeves, N. D., Maganaris, C. N., Longo, S., & Narici, M. V. (2009). Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance training in older humans. *Experimental Physiology*, 94(7), 825-833.
- Reeves, N. D., Narici, M. V., & Maganaris, C. N. (2004). In vivo human muscle structure and function: adaptations to resistance training in old age. *Experimental Physiology*, 89(6), 675-689.
- Rehn, B., Lidstrom, J., Skoglund, J., & Lindstrom, B. (2007). Effects on leg muscular performance from whole-body vibration exercise: a systematic review. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 17(1), 2-11.
- Rittweger, J., Beller, G., & Felsenberg, D. (2000). Acute physiological effects of exhaustive whole-body vibration exercise in man. *Clinical Physiology*, 20(2), 134-142.
- Rittweger, J., Schiessl, H., & Felsenberg, D. (2001). Oxygen uptake during whole-body vibration exercise: comparison with squatting as a slow voluntary movement. *European Journal of Applied Physiology*, 86(2), 169-173.
- Roelants, M., Delecluse, C., & Verschueren, S. M. (2004). Whole-body-vibration training increases knee-extension strength and speed of movement in older women. *Journal of the American Geriatrics Society*, 52(6), 901-908.
- Roelants, M., Verschueren, S. M., Delecluse, C., Levin, O., & Stijnen, V. (2006). Whole-body-vibration-induced increase in leg muscle activity during different squat exercises. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(1), 124-129.
- Rønnestad, B. R., & Ellefsen, S. (2011). The effects of adding different whole-body vibration frequencies to preconditioning exercise on subsequent sprint performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(12), 3306-3310.
- Rubenstein, L. Z., Josephson, K. R., Trueblood, P. R., Loy, S., Harker, J. O., Pietruszka, F. M., & Robbins, A. S. (2000). Effects of a group exercise program on strength, mobility, and falls among fall-prone elderly men. *The journals of gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 55(6), M317-321.
- Runge, M., Rehfeld, G., & Resnick, E. (2000). Balance training and exercise in geriatric patients. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, 1(1), 61-65.
- Russo, C. R., Lauretani, F., Bandinelli, S., Bartali, B., Cavazzini, C., Guralnik, J. M., & Ferrucci, L. (2003). High-frequency vibration training increases muscle power in postmenopausal women. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 84(12), 1854-1857.
- Scanlon, T. C., Fragala, M. S., Stout, J. R., Emerson, N. S., Beyer, K. S., Oliveira, L. P., & Hoffman, J. R. (2014). Muscle architecture and strength: adaptations to short-term resistance training in older adults. *Muscle Nerve*, 49(4), 584-592.
- Sherrington, C., Whitney, J. C., Lord, S. R., Herbert, R. D., Cumming, R. G., & Close, J. C. (2008). Effective exercise for the prevention of falls: a systematic review and meta-analysis. *Journal of the American Geriatrics Society*, 56(12), 2234-2243.
- Skelton, D. A., & Beyer, N. (2003). Exercise and injury prevention in older people. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 13(1), 77-85.
- Skelton, D., Dinan, S., Campbell, M., & Rutherford, O. (2005). Tailored group exercise (Falls Management Exercise - FaME) reduces falls in community-dwelling older frequent fallers (an RCT). *Age and Ageing*, 34(6), 636-639.
- Suetta, C., Andersen, J. L., Dalgas, U., Berget, J., Koskinen, S., Aagaard, P., Magnusson, S. P., & Kjaer, M. (2008). Resistance training induces qualitative changes in muscle morphology, muscle architecture, and muscle function in elderly postoperative patients. *Journal of Applied Physiology*, 105(1), 180-186.
- Tomlinson, B. E., & Irving, D. (1977). The numbers of limb motor neurons in the human lumbosacral cord throughout life. *Journal of the Neurological Sciences*, 34(2), 213-219.
- Torvinen, S., Kannus, P., Sievanen, H., Jarvinen, T. A., Pasanen, M., Kontulainen, S., Jarvinen, T. L., Javinen, M., Oja, P., & Vuori, I. (2002). Effect of four-month vertical whole body vibration on performance and balance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(9), 1523-1528.
- Torvinen, S., Kannus, P., Sievanen, H., Jarvinen, T. A., Pasanen, M., Kontulainen, S., Nenonen, A., Jarvinen, T. L., Paakkala, T., Jarvinen, M., & Vuori, I. (2003). Effect of 8-month vertical whole body vibration on bone, muscle performance, and body balance: a randomized controlled study. *Journal of Bone and Mineral Research*, 18(5), 876-884.
- Tracy, B. L., Ivey, F. M., Hurlbut, D., Martel, G. F., Lemmer, J. T., Siegel, E. L., Metter, E. J., Fozard, J. L., Fleg, J. L., & Hurlley, B. F. (1999). Muscle quality. II. Effects of strength training in 65- to 75-year-old men and women. *Journal of Applied Physiology*, 86(1), 195-201.
- Verschueren, S. M., Roelants, M., Delecluse, C., Swinnen, S., Vanderschueren, D., & Boonen, S. (2004). Effect of 6-month whole body vibration training on hip density, muscle strength, and postural control in postmenopausal women: a randomized controlled pilot study. *Journal of Bone and Mineral Research*, 19(3), 352-359.
- Vincent, K. R., Braith, R. W., Feldman, R. A., Magyari, P. M., Cutler, R. B., Persin, S. A., Lennon, S. L., Gabr, A. H., & Lowenthal, D. T. (2002). Resistance exercise and physical performance in adults aged 60 to 83. *Journal of the American Geriatrics Society*, 50(6), 1100-1107.
- Young, A., Stokes, M., & Crowe, M. (1984). Size and strength of the quadriceps muscles of old and young women. *European Journal of Clinical Investigation*, 14(4), 282-287.
- Yue, G. H., Ranganathan, V. K., Siemionow, V., Liu, J. Z., & Sahgal, V. (1999). Older adults exhibit a reduced ability to fully activate their biceps brachii muscle. *The journals of gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 54(5), M249-253.