

Effects of Frequency Type on Muscle Function of the Thigh during Electrical Muscle Stimulation

전기근육자극 시 주파수 차이가 대퇴 근육 기능에 미치는 영향

Woen-Sik Chae, Jae-Hu Jung

Department of Physical Education, Kyungpook National University, Daegu, South Korea

Received : 09 February 2023

Revised : 07 March 2023

Accepted : 08 March 2023

Corresponding Author

Jae-Hu Jung

Department of Physical Education, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, 41566, South Korea

Email : jjhjh81@naver.com

Objective: The purpose of this study was to investigate the effects of different frequency on of knee extensors muscle function during electrical muscle stimulation (EMS).

Method: In this research, 40 subjects who have no musculoskeletal disorder, and less than a year workout experience were recruited in order to analyze effects of EMS with different stimulus frequency. Forty subjects were randomly divided into four groups of ten subjects in each group. A EMS training program with different frequencies (without EMS [WE], EMS with frequency 30 Hz [E30], EMS with frequency 60 Hz [E60], EMS with frequency 90 Hz [E90]) was assigned to each group. Throughout eight weeks of training, test subjects were simultaneously carried out knee extension exercises such as squat, leg extension, and leg-press while using EMS with different frequency (20 min, pulse width 250 μ s, on-off ratio 1:1). Isokinetic knee extension strength, muscle activity of the rectus femoris (RF), the vastus medialis (VM), and the vastus lateralis (VL), and the median frequency of the RF, the VM, and the VL were collected and compared between pre and post training in order to find effects of applying EMS with different frequencies. For each dependent variable, a one-way ANOVA was to determine whether there were significant differences among four different conditions ($p < .05$). When a significant difference was found, post hoc analyses were performed using the contrast procedure.

Results: When compared to WE and E90, E30 causes significant increase in isokinetic knee extension strength. No significant differences were found in EMG values across different EMS conditions. However, the median frequency of the VM in E30 was significantly increased than the corresponding value for WE.

Conclusion: The results of this study showed that EMS training with 30 Hz frequency had positive effect on knee extensor. Based of the findings of the present study, EMS training with lower frequency may help the performer to focus on developing strength in knee extensor muscles.

Keywords: Electrical muscle stimulation, Frequency type, Isokinetic muscular function, EMG

INTRODUCTION

최근 건강과 운동에 대한 관심이 높아짐에 따라 스포츠 활동에 참여하는 인구가 점진적으로 늘어나고 있으며, 이에

비례하여 운동에 의해 발생하는 상해 빈도도 증가하고 있는 추세이다(Grice et al., 2014). 스포츠 상해가 발생할 수 있는 신체 부위 중, 무릎관절은 관절가동범위가 넓고 신체 하중의 대부분을 지지해야 하는 해부구조적 특성 때문에 부상이나

상해에 쉽게 노출될 수 있다(Ford et al., 2003; Lim, 2007).

무릎관절 손상의 원인으로는 물리적 충격과 같은 직접적인 원인과 운동부족이나 체중의 증가, 충분한 준비운동의 미흡 등과 같은 간접적인 원인을 들 수 있다. 특히 스포츠 활동 시 무리한 신체 동작, 잘못된 기술 습득, 숙련도 부족, 부적절한 자세 유지, 근육의 과사용 등은 무릎관절을 구성하는 건이나 인대의 악화를 초래하는 원인으로 작용하게 된다(Cho et al., 2005; Graham et al., 2000). 이러한 무릎관절의 특성상 부상을 예방하고 안전성을 유지하기 위해서 대퇴사두근을 비롯한 무릎관절 주위 근육들의 기능을 향상시키는 것이 중요하다(Kim, 2012; Cooper et al., 2005; Mir et al., 2008).

근육의 기능을 향상시키는 방법으로는 체중 부하를 이용하거나 바벨, 덤벨, 웨이트머신 등 중량기구를 저항 부하로 사용하는 저항성 운동이 있다(Chae, Lee, Kim & Jung, 2020). 일반적으로 운동 목적에 따라 근수축 형태에 따른 등장성(isometric) 운동과 등척성(isotonic) 운동을 적용하여 근력 발달 및 근기능 향상을 도모하고 있다.

등장성 운동은 동적 수축 운동(dynamical contraction training)으로 근육의 길이가 변화하면서 장력을 발생시키는 특성을 가진다(Rezaeimanesh & Farsanib, 2011). 등장성 운동은 원위 분절이 자유롭게 움직일 수 있는지 고정되어 있는지에 따라 개방사슬 운동(open kinetic chain exercise)과 폐쇄사슬 운동(closed kinetic chain exercise)으로 나누어진다. 등척성 운동은 정적 수축 운동(static contraction training)의 한 형태로 관절 각도나 근육의 길이 변화 없이 최대의 장력을 유발할 수 있으며, 고정된 분절 각도에서 근수축을 발생시켜 근력을 발달시키는 운동 방법이다. Yun (2009)의 연구에서는 최대근력으로 1초간 또는 최대근력의 65% 정도로 6초간 등척성 운동을 실시할 경우 근력 향상 효과가 높다고 보고하였다.

이와 더불어 최근에는 운동 효과를 극대화하기 위한 새로운 운동 방법으로 전기근육자극(electrical muscle stimulation, EMS)을 활용한 방법이 널리 보급되고 있다. 전기자극을 적용하는 기법에 따라 기능적전기자극(functional electrical stimulation), 신경근육전기자극(neuromuscular electrical stimulation, NMES), 전기근육자극(electrical muscle stimulation, EMS) 등으로 분류된다. 운동 시 EMS를 적용할 경우 근육의 인위적인 수축과 이완을 유도할 수 있으며, 정상적인 신경 지배를 받고 있는 감각신경과 운동신경을 자극시킴으로써 수의적 운동에 비해 더 큰 근육 활동을 발생시킨다고 알려져 있다. 또한 Pekindil et al. (2001)은 EMS 운동을 통해 근육량 증가, 근력 및 근지구력 향상, 근위축 방지 등의 효과를 얻을 수 있다고 보고하였다.

현재까지 알려진 EMS 운동의 다양한 장점들로 인해 근력 향상을 목표로 하는 일반인들에게 있어서 새로운 트레이닝의 한 방법으로 주목받고 있다. Park (2015)은 일반인들에게 EMS

를 적용하여 저항성 운동을 실시한 결과, 대퇴 근육의 최대 근력, 근지구력, 근활성도가 증가되었다고 하였으며, Doucet, Lam & Griffin (2012)은 근육에 EMS를 직접 적용함으로써 인체 근력과 관절가동범위 증가에 효과가 있다고 보고하였다.

최근에는 근기능 향상과 관련된 EMS 운동의 효과에 대한 긍정적인 연구 결과들이 보고됨에 따라, 운동선수들의 근력 강화 및 경기력 향상을 위한 트레이닝 도구로도 활용되고 있는 추세이며(Doucet et al., 2012; Pekindil et al., 2001), 싸이클(Theriault et al., 1996), 수영(Pichon et al., 1995), 역도(Delitto et al., 1989) 선수들에게서 하지 근력 향상의 효과가 있는 것으로 보고되었다. 또한 EMS 운동은 신경근 연결 부위의 운동 단위 증가(Petersen et al., 2002; Vanderthommen et al., 2002), 근섬유의 모세혈관 증가 및 혈관 생성 촉진(Chekanov et al., 2002), 혈류량 증가(Kaplan et al., 2002) 등의 임상적 효과에도 긍정적인 영향을 미친다고 하였다.

EMS 운동의 근기능 향상 효과에 반해 Doucet et al. (2012)은 전기적 자극에 의한 인위적 근수축이 과도한 근신경계의 피로를 유발할 수 있다고 하였으며, Mang, Lagerquist & Collins (2010)와 Stevens et al. (2004)은 100 Hz 이상의 높은 주파수를 활용한 전기자극 시 운동신경과 근육의 연결부에서 자극을 전달하는 화학물질이 쉽게 고갈되어 근육의 피로 및 통증이나 불쾌감이 유발될 수 있다고 보고하였다. 또한 Vanderthommen & Duchateau (2007)는 EMS를 적용할 경우 수의적 수축과 상반되는 근육의 동원 순서에 의해 급격한 근피로 현상이 유발될 수 있다고 보고하였다.

이처럼 EMS 운동 시 발생할 수 있는 근피로 및 통증을 최소화하기 위해서는 EMS 운동의 목적에 따라 적절한 주파수의 전기적 자극이 주어져야 할 것으로 판단되며, EMS 적용 시 발생할 수 있는 근피로 및 통증을 최소화하고 근력 향상을 극대화할 수 있는 적절한 운동 방법을 모색할 필요가 있다. 하지만 EMS 적용 시 운동 목적에 따른 자극 주파수의 설정 기준이나 적용된 자극 주파수의 차이에 따른 운동 효과를 분석한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 전기근육자극을 적용한 운동 시 근육에 주어진 주파수의 차이가 대퇴 근육 기능에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 적용 주파수 차이에 따른 EMS 운동을 8주간 실시하였으며, 운동 시작 전과 운동 종료 후 등속성 근기능 검사와 근전도 검사를 각각 측정하여 분석하였다.

METHOD

1. 연구대상자

본 연구에서는 주파수 차이에 따른 EMS 운동의 효과를 분

석하기 위해 인체 근골격계에 이상이 없는 운동 경력 1년 미만의 20대 남성 40명을 피험자로 선정하였으며, 무선탐당(randomization) 방식을 통해 EMS 미적용 집단 10명(연령 25.0 ± 2.8 yrs, 신장 178.1 ± 3.4 cm, 체중 73.9 ± 5.8 kg), EMS 주파수 30 Hz 적용 집단 10명(연령 24.3 ± 1.6 yrs, 신장 174.5 ± 4.1 cm, 체중 68.0 ± 4.5 kg), EMS 주파수 60 Hz 적용 집단 10명(연령 23.9 ± 1.1 yrs, 신장 174.1 ± 4.6 cm, 체중 70.5 ± 4.6 kg), EMS 주파수 90 Hz 적용 집단 10명(연령 23.9 ± 1.7 yrs, 신장 177.0 ± 3.7 cm, 체중 70.4 ± 4.7 kg)으로 분류하였다.

2. 실험장비

1) 전기자극 치료기

본 연구에서는 EMS 적용을 위해 전기자극 치료기(MICROSTIM2, SEJINMT, Korea)를 활용하였으며, 주파수 가용 범위는 1~99 Hz이다(Figure 1). 본 실험에서 EMS 처치는 전기자극 치료기와 연결된 2개의 전극을 대퇴직근의 근위부와 원위부에 각각 부착한 후 전기자극을 적용하였다(Gaines, Metter & Talbot, 2004).



Figure 1. Electrical muscle stimulation (MICROSTIM2, SEJINMT, Korea)

2) 등속성 근기능 검사

등속성 근기능 검사는 등속성 운동기기(Humac Norm, CSMI, USA)를 사용하여 피험자의 우측 무릎관절 신전근에 대한 최대근력, 근파워, 근지구력을 측정하였다(Figure 2). 피험자가 검사기기에 대한 생소함이나 거부감을 줄이고 최대 능력을 발휘할 수 있도록 검사에 앞서 2회의 연습을 실시하였으며, 각 측정항목 사이에는 10분의 휴식시간을 부여하였다. 무릎

관절의 굴곡 및 신전 동작 시 하지를 제외한 다른 신체 부위에 불필요한 힘이 작용하지 않도록 하기 위해 측정기기에 연결된 벨트로 피험자의 상체와 대퇴부를 고정하였다. 또한 등속성 운동기기와 무릎관절의 회전축이 서로 일치하도록 설정하였으며, 힘점이 되는 발목관절의 앞쪽에 패드가 위치하도록 길이를 조절하였다. 본 검사에서 최대근력은 60°/sec에서 5회 반복, 근파워는 180°/sec에서 5회 반복, 근지구력은 240°/sec에서 25회 반복을 실시하였으며, 이때 무릎관절의 가동범위는 90°로 설정하였다.



Figure 2. Isokinetic muscular function

3) 근전도 검사

등속성 근기능 검사 시 대퇴 근육의 근활성도를 분석하기 위해 근전도 측정기기(QEMG-8, Laxtha Inc., Korea, sampling frequency = 1,024 Hz, gain = 1,000, input impedance > 10¹² Ω, CMRR > 100 dB)를 사용하였으며, 표면전극은 우측 무릎관절의 신전근인 대퇴직근(rectus femoris, RF), 내측광근(vastus medialis, VM), 외측광근(vastus lateralis, VL)의 3개 근육에 부착하였다(Figure 3). 각각의 표면전극은 근섬유의 수축 방향과 평행하게 부착하였으며, 접지전극은 전상장골극(ASIS)에 부착하였다(U. S. Department of health and Human Service, 1993). 근전도 측정 시 피부저항을 최소화하기 위해 표면전극 부착 부위의 털을 완전히 제거하고 알코올로 닦은 후 전극을 부착하였다. 또한, 근전도 자료의 표준화(normalization) 작업을 위해 근육별 최대 수의적 정적 수축(maximum voluntary isometric contraction, MVIC)을 실제 데이터 수집 전에 실시하였다. MVIC 및 실제 근전도 자료 수집 시 샘플링 속도는 1,024 Hz로 설정하였다.

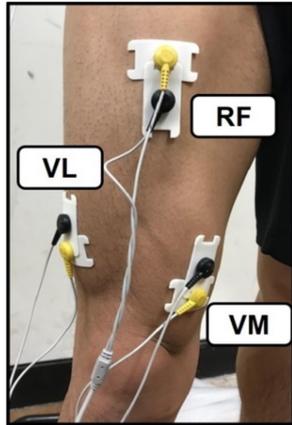


Figure 3. Electrode placements

3. 실험절차

모든 피험자는 실험에 들어가기 전 피로를 유발할 수 있는 강도 높은 신체 활동을 금지하였으며, 실험에 앞서 10분간 가볍게 워밍업을 실시하였다. 본 실험에서는 전기자극 치료기 (MICROSTIM2, SEJINMT, Korea)를 활용하여 베타밴드 영역과 감마밴드 영역을 기준으로 주파수 차이에 따른 EMS 미적용 (without EMS, WE), EMS 주파수 30 Hz 적용(EMS with frequency 30 Hz, E30), EMS 주파수 60 Hz 적용(EMS with frequency 60 Hz, E60), EMS 주파수 90 Hz 적용(EMS with frequency 90 Hz, E90)의 4개 집단을 분류하였다(Baker, Spinks, Jackson & Lemon, 2001; Reyes, Laine, Kutch & Valero-Cuevas, 2017).

적용 주파수 차이에 따른 집단별 피험자를 대상으로 8주간 대퇴 근육에 대한 EMS 처치(20 min, pulse width 250 μ s, on-off ratio 1:1)와 스쿼트, 레그프레스, 레그익스텐션 운동(3 days/week, 50~60% 1RM, 3 sets, 15 raps, rest period 60~90 sec)을 동시에 실시하였으며, 운동프로그램 구성 시 무릎관절 신전근을 주동근으로 하는 대표적인 저항 운동을 선정하였다

Table 1. EMS program

Groups	Exercise	Frequency	Pulse width	On-off ratio	Time
WE	○	X	X	X	X
E30	○	30 Hz	250 μ s	1:1	20 min
E60	○	60 Hz	250 μ s	1:1	20 min
E90	○	90 Hz	250 μ s	1:1	20 min

WE (without EMS), E30 (EMS with frequency 30 Hz), E60 (EMS with frequency 60 Hz), E90 (EMS with frequency 90 Hz)

(Table 1). EMS 운동 효과를 검증하기 위해 8주간의 운동 시작 전과 운동 종료 후 각각 등속성 근기능 검사와 근전도 검사를 실시하였다. 이를 통해 등속성 수축 시 무릎관절 신전근의 최대근력, 근파워, 근활성도, 중앙주파수 값에 대한 증가율을 산출하였다.

4. 자료분석

1) 등속성 근기능 검사

본 연구에서는 등속성 운동기기(Humac Norm, CSMI, USA)를 사용하여 우측 무릎관절의 신전 동작에 대한 최대근력, 근파워, 근지구력을 각각 분석하였다. 최대근력은 부하속도 60°/sec에서 5회 반복 시 최대값, 근파워는 부하속도 180°/sec에서 5회 반복 시 최대값을 활용하였다. 또한 근지구력은 240°/sec에서 25회 반복 시 전체 일량을 평가 지표로 활용하였다.

2) 근전도 검사

근전도 자료는 350 Hz의 저역 통과 필터링과 10 Hz의 고역 통과 필터링을 실시한 후 전파 정류 처리하였다. 이후 아래의 공식과 같이 MVIC 값을 사용하여 표준화하였으며, 대퇴근, 내측광근, 외측광근에 대한 평균 적분근전도 값을 산출하였다. 평균 적분근전도는 실제 무릎관절의 신전 동작 시 측정된 근전도 값을 MVIC 값으로 나눈 후 특정 구간의 평균 값을 제시하였다.

$$nEMG = \frac{EMG_{raw}}{EMG_{max}} \times 100$$

nEMG는 %MVIC 값, EMG_{raw} 는 무릎관절 신전근의 근전도 값, EMG_{max} 는 MVIC 값이다.

또한 PSD (power spectral density) 분석을 통해 Time domain을 frequency domain으로 변환한 후 중앙주파수(median frequency) 값을 산출하였다. 근피로가 유발될 경우 근전도 자료의 고주파 성분은 감소하고 저주파 성분은 증가하게 된다. 따라서 등속성 근기능 검사 시 운동 시간 경과에 따른 중앙주파수 값의 변화량을 근피로의 평가 지표로 활용하였다 (Potvin & Bent, 1997).

5. 통계처리

본 연구에서는 8주간의 EMS 운동 시작 전과 운동 종료 후 측정된 종속 변인들의 증가율에 대한 통계적 유의차를

검증하기 위해 SPSS 25.0 프로그램을 사용하여 일원분산분석 (One-way ANOVA)을 실시하였으며, 집단 간 통계적 유의차가 나타날 시 사후검증은 bonferroni를 실시하였다. 이때 모든 검증의 유의성 수준은 $p < .05$ 로 설정하였다.

RESULTS

1. 등속성 근기능 검사

등속성 근기능 검사 시 무릎관절의 신전 동작에 대한 최대 근력은 E30 집단이 WE 집단과 E90 집단에 비해 통계적으로 유의하게 증가한 것으로 나타났다(Table 2). 하지만 근파위와 근지구력 측정 결과에서는 전기자극 주파수 차이에 따른 4개 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다(Table 2).

Table 2. An Increment in Isokinetic knee extension strength between pre- and post-training tests (%)

	WE	E30	E60	E90
Strength	6.8±3.0*	14.4±3.2*#	7.0±4.2	1.9±3.7#
Power	9.5±7.4	9.8±4.7	11.3±8.3	4.4±9.2
Endurance	5.7±7.9	8.4±6.3	10.4±6.2	5.1±6.2

Note. *significant difference between WE and E30
#significant difference between E30 and E90
WE (without EMS), E30 (EMS with frequency 30 Hz), E60 (EMS with frequency 60 Hz), E90 (EMS with frequency 90 Hz)

2. 근전도 검사

등속성 근기능 검사에서의 최대근력 측정 시 대퇴직근, 내측광근, 외측광근에 대한 근활성도는 전기자극 주파수 차이에 따른 4개 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타나지

Table 3. An increment in IEMG between pre-training and post-training tests (%)

	WE	E30	E60	E90
RF	1.3±2.1	1.5±1.8	1.1±2.2	1.9±2.4
VM	0.9±1.6	1.1±0.8	1.3±1.7	1.1±2.0
VL	1.0±1.9	0.7±2.2	0.9±2.0	0.5±1.4

WE (without EMS), E30 (EMS with frequency 30 Hz), E60 (EMS with frequency 60 Hz), E90 (EMS with frequency 90 Hz), RF (rectus femoris), VM (vastus medialis), VL (vastus lateralis)

않았지만, 무릎관절 신전근 중 내측광근의 중앙주파수 값은 E30 집단이 WE 집단에 비해 통계적으로 유의하게 증가한 것으로 나타났다(Table 3-4).

Table 4. An increment in Median Frequency between pre-training and post-training tests (%)

	WE	E30	E60	E90
RF	1.8±2.4	2.6±2.2	2.3±3.1	2.1±3.0
VM	2.5±1.3*	6.5±2.0*	3.4±4.2	4.1±4.5
VL	1.6±2.4	1.2±1.9	1.3±2.1	1.5±2.2

Note. *significant difference between WE and E30
WE (without EMS), E30 (EMS with frequency 30 Hz), E60 (EMS with frequency 60 Hz), E90 (EMS with frequency 90 Hz), RF (rectus femoris), VM (vastus medialis), VL (vastus lateralis)

DISCUSSION

본 연구에서는 EMS 운동 시 적용된 주파수 차이가 대퇴 근육의 등속성 근기능 및 근활성도에 미치는 영향을 분석하기 위해 주파수 차이에 따른 4개 집단(EMS 미적용[WE], EMS 주파수 30 Hz 적용[E30], EMS 주파수 60 Hz 적용[E60], EMS 주파수 90 Hz 적용[E90])을 대상으로 EMS 운동을 8주간 실시하였으며, 운동 시작 전과 운동 종료 후 등속성 근기능 검사와 근전도 검사를 실시하여 각각의 측정 결과를 분석하였다.

본 연구의 결과, 등속성 근기능 검사 시 무릎관절 신전 동작에 대한 최대근력은 E30 집단이 WE 집단과 E90 집단에 비해 통계적으로 유의하게 증가한 것으로 나타났다. Gondin, Cozzone & Bendahan (2011)은 전기근육자극은 근위축 방지 뿐만 아니라 근력 향상 효과가 있으며, 근육에 전기자극을 적용하여 운동을 실시할 경우 일반적인 근력 운동에 비해 30~40%의 향상된 근력 강화 효과를 얻을 수 있다고 하였다. Won, Kim & Kim (2001)의 연구에서는 대퇴 근육에 전기자극을 적용할 경우 근수축 시 속근 섬유가 우선적으로 동원되며, 이에 따라 속근 섬유의 횡단면적이 증가된다고 보고하였다. 이러한 선행연구의 결과로 볼 때, 전기자극 적용에 따른 근 섬유 동원 특성으로 인해 본 연구에서의 최대근력 증가에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한 Fisher et al. (2012)은 운동신경 기능 장애 환자를 대상으로 한 연구에서 근육의 수축 현상이 15~30 Hz 대에서 발생될수록 움직임의 장애 정도 및 하지의 근기능이 개선된다고 보고하였다. 이처럼 EMS 운동 시 30 Hz의 주파수 적용이 근력 발달 및 근육 기능 향상에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

등속성 근기능 검사에서의 최대근력 측정 시 대퇴직근, 내측광근, 외측광근에 대한 근활성도는 전기자극 주파수 차이에 따른 4개 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았지만, 무릎관절 신전근 중 내측광근의 중앙주파수 값은 E30 집단이 WE 집단에 비해 통계적으로 유의하게 증가한 것으로 나타났다. 본 연구의 결과에서 중앙주파수 값의 증가는 30 Hz의 주파수를 적용하여 EMS 운동을 실시할 경우 근력 발휘 시 근육에서의 피로 발생이 감소한다는 것으로 의미하며, 이는 PSD 분석 시 근피로가 유발될 경우 중앙주파수의 고주파 성분은 감소하고 저주파 성분은 증가하기 때문이다 (Potvin & Bent, 1997).

본 연구에서의 PSD 분석을 통한 중앙주파수 값의 변화는 근육의 피로를 분석하기 위한 자료로 활용되고 있다. 수의적인 근수축이나 전기근육자극을 장시간 지속하면 근피로를 유발할 수 있으며, 골격근에 전기자극을 적용하는 동안 발생하는 피로의 정도는 수의적인 근수축에서 발생하는 것보다 훨씬 더 크다(Binder-Macleod & Snyder-Mackler, 1993).

근피로가 발생하는 원인은 생리학적 기전을 통해 설명할 수 있으며, 근육이 피로해지면 진폭은 커지지만 주파수는 감소하게 된다. 즉 근피로가 유발됨에 따라 중앙주파수 값이 감소하게 되는데 이는 젖산의 축적으로 인한 H⁺ 농도 감소로 인해 근육의 활동전위 전도 속도를 감소시키기 때문인 것으로 보고되었다(Mizrahi et al., 1997). 또한 근육을 구성하는 근섬유의 특성은 근육마다 차이가 있어 전기자극 변화에 따른 근육 반응이 다르게 나타날 수 있으며, 골격근은 트레이닝 방법과 강도에 따라 근특성이 변화되기 때문에 전기자극의 차이에 따라 근섬유의 유형이 변화될 수 있다(Alley & Thompson, 1997). 이러한 근육 특성 변화 등의 요인들에 의해 피로가 발생하는 동안 중앙주파수 값이 감소하게 된다 (Gerdle et al., 2000). 하지만 본 연구에서는 주파수 차이에 따른 8주간의 EMS 운동을 수행한 결과, 전기근육자극 시 30 Hz와 같이 상대적으로 낮은 주파수를 적용할 경우 중앙주파수 값을 증가시킴으로써 근육의 피로 감소에 효과적인 것으로 판단된다.

CONCLUSION

본 연구에서는 인체 근골격계에 이상이 없는 20대 남성 40명을 대상으로 주파수 차이에 따른 EMS 적용이 대퇴 근육의 근기능에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 적용 주파수 차이에 따른 EMS 운동을 8주간 실시하였으며, 운동 시작 전과 운동 종료 후 등속성 근기능 검사와 근전도 검사를 각각 측정하여 분석하였다.

본 연구의 결과, 등속성 근기능 검사 시 무릎관절 신전 동작에 대한 최대근력은 E30 집단이 WE 집단과 E90 집단에

비해 통계적으로 유의하게 증가한 것으로 나타났다. 등속성 근기능 검사에서의 최대근력 측정 시 무릎관절 신전근 중 내측광근의 중앙주파수 값은 E30 집단이 WE 집단에 비해 통계적으로 유의하게 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 EMS 운동 시 30 Hz의 주파수 적용이 근육 기능 향상에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미하며, 30 Hz와 같이 비교적 낮은 주파수의 전기자극이 대퇴 근육 발달 및 근피로 감소에 효과적인 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 EMS 운동의 목적과 특정 근육 강화에 가장 적합한 자극 주파수의 설정 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단되며, 무릎관절 및 대퇴 근육의 기능을 정상적으로 유지하거나 강화시키기 위한 효과적인 EMS 운동프로그램을 제공하고자 한다. 또한 차후 관절 및 근육의 기능 향상 측면에서 최적화된 EMS 운동기기 개발에 본 연구의 결과가 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2018S1A5A2A01038478).

REFERENCES

- Alley, K. A. & Thompson, L. V. (1997). Influence of simulated bed rest and intermittent weight bearing on single skeletal muscle fiber function in aged rats. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 78(1), 19-25.
- Baker, S. N., Spinks, R., Jackson, A. & Lemon, R. N. (2001). Synchronization in monkey motor cortex during a precision grip task. I. Task-dependent modulation in single-unit synchrony. *Journal of Neurophysiology*, 85(2), 869-885.
- Binder-Macleod, S. A. & Snyder-Mackler, L. (1993). Muscle fatigue: clinical implications for fatigue assessment and neuromuscular electrical stimulation. *Physical Therapy*, 73(12), 902-910.
- Chae, W. S., Lee, H. A., Kim, J. G. & Jung, J. H. (2020). Effects of applying EMS on femoral musculoskeletal system according to different types of muscular contraction. *Journal of Coaching Development*, 22(2), 178-185.
- Chekanov, V., Rayel, R., Krum, D., Alwan, I., Hare, J., Bajwa, T. & Akhtare, M. (2002). Electrical stimulation promotes angiogenesis in a rabbit hind-limb ischemia model. *Vascular and Endovascular Surgery*, 36(5), 357-366.
- Cho, W. S., Kim, M. Y., Lee, K. C., Junh, H. & Lee, W. L. (2005).

- Sports injury around knee joint. *The Korea Journal of Sports Medicine*, 23(1), 24-29.
- Cooper, R. L., Taylor, N. F. & Feller, J. A. (2005). A randomised controlled trial of proprioceptive and balance training after surgical reconstruction of the anterior cruciate ligament. *Research in Sports Medicine*, 13(3), 217-230.
- Delitto, A., Brown, M., Strube, M. J., Rose, S. J. & Lehman, R. C. (1989). Electrical stimulation of quadriceps femoris in an elite weight lifter: a single subject experiment. *International Journal of Sports Medicine*, 10(03), 187-191.
- Doucet, B. M., Lam, A. & Griffin, L. (2012). Neuromuscular electrical stimulation for skeletal muscle function. *Yale Journal of Biology and Medicine*, 85(2), 201-215.
- Fisher, K. M., Zaimi, B., Williams, T. L., Baker, S. N. & Baker, M. R. (2012). Beta-band intermuscular coherence: a novel biomarker of upper motor neuron dysfunction in motor neuron disease. *Brain*, 135(9), 2849-2864.
- Ford, K. R., Myer, G. D. & Hewett, T. E. (2003). Valgus knee motion during landing in high school female and male basketball players. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(10), 1745-1750.
- Gaines, J. M., Metter, E. J. & Talbot, L. A. (2004). The effect of neuromuscular electrical stimulation on arthritis knee pain in older adults with osteoarthritis of the knee. *Applied Nursing Research*, 17(3), 201-206.
- Gerdtle, B., Karlsson, S., Crenshaw, A. G., Elert, J. & Fridén, J. (2000). The influences of muscle fibre proportions and areas upon EMG during maximal dynamic knee extensions. *European Journal of Applied Physiology*, 81(1-2), 2-10.
- Gondin, J., Cozzone, P. J. & Bendahan, D. (2011). Is high-frequency neuromuscular electrical stimulation a suitable tool for muscle performance improvement in both healthy humans and athletes?. *European Journal of Applied Physiology*, 111, 2473-2487.
- Graham, N. M., Shanahan, M. D., Barry, P., Burgert, S. & Talkhani, I. (2000). Postoperative analgesia after arthroscopic knee surgery: a randomized, prospective, double-blind study of intravenous regional analgesia versus intra-articular analgesia. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 16(1), 64-66.
- Grice, A., Kingsbury, S. R. & Conaghan, P. G. (2014). Nonelite exercise-related injuries: Participant reported frequency, management and perceptions of their consequences. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 24(2), e86-e92.
- Kaplan, R. E., Czynny, J. J., Fung, T. S., Unsworth, J. D. & Hirsh, J. (2002). Electrical foot stimulation and implications for the prevention of venous thromboembolic disease. *Thrombosis and Haemostasis*, 88(2), 200-204.
- Kim, D. K. (2012). Effect of pre-operative home-based exercise on knee strength and proprioceptive functions after anterior cruciate ligament reconstruction. *The Asian Journal of Kinesiology*, 14(1), 57-65.
- Lim, B. O. (2007). Does a knee brace decrease recurrent anterior cruciate ligament injuries? *Health & sports medicine; Official Journal of KACEP*, 9(1), 103-109.
- Mang, C. S., Lagerquist, O. & Collins, D. F. (2010). Changes in corticospinal excitability evoked by common peroneal nerve stimulation depend on stimulation frequency. *Experimental Brain Research*, 203(1), 11-20.
- Mir, S. M., Hadian, M. R., Talebian, S. & Nasser, N. (2008). Functional assessment of knee joint position sense following anterior cruciate ligament reconstruction. *British Journal of Sports Medicine*, 42(4), 300-303.
- Mizrahi, J., Levin, O., Aviram, A., Isakov, E. & Susak, Z. (1997). Muscle fatigue in interrupted stimulation: effect of partial recovery on force and EMG dynamics. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 7(1), 51-65.
- Park, J. L. (2015). *The effects of electrical muscle stimulation on the muscular function and balance ability*. Ph.D. Dissertation, Kyung Hee University.
- Pekindil, Y., Sarikaya, A., Birtane, M., Pekindil, G. & Salan, A. (2001). 99mTc-sestamibi muscle scintigraphy to assess the response to neuromuscular electrical stimulation of normal quadriceps femoris muscle. *Annals of Nuclear Medicine*, 15(4), 397-401.
- Petersen, N. T., Taylor, J. L. & Gandevia, S. C. (2002). The effect of electrical stimulation of the corticospinal tract on motor units of the human biceps brachii. *The Journal of Physiology*, 544(1), 277-284.
- Pichon, F., Chatard, J. C., Martin, A. & Cometti, G. (1995). Electrical stimulation and swimming performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 27(12), 1671-1676.
- Potvin, J. R. & Bent, L. R. (1997). A validation of techniques using surface EMG signals from dynamic contractions to quantify muscle fatigue during repetitive tasks. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 7(2), 131-139.
- Reyes, A., Laine, C. M., Kutch, J. J. & Valero-Cuevas, F. J. (2017). Beta band corticomuscular drive reflects muscle coordination strategies. *Frontiers in Computational Neuroscience*,

- 11, 17.
- Rezaeimanesh, D. & Farsani, P. A. (2011). The effect of a 6 week isotonic training period on lower body muscle EMG changes in volleyball players. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 30, 2129-2133.
- Stevens, J. E., Mizner, R. L. & Snyder-Mackler, L. (2004). Neuromuscular electrical stimulation for quadriceps muscle strengthening after bilateral total knee arthroplasty: a case series. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 34(1), 21-29.
- Therriault, R., Boulay, M. R., Therriault, G. & Simoneau, J. A. (1996). Electrical stimulation-induced changes in performance and fiber type proportion of human knee extensor muscles. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 74(4), 311-317.
- U. S. Department of Health and Human Services (1993). *Selected topics in surface electromyography for use in the occupational setting: Expert perspectives*. (DHHS Publication No. 91-100). Washington, DC: U.S. Government Printing Office.
- Vanderthommen, M. & Duchateau, J. (2007). Electrical stimulation as a modality to improve performance of the neuromuscular system. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 35(4), 180-185.
- Vanderthommen, M., Depresseux, J. C., Dauchat, L., Degueudre, C., Croisier, J. L. & Crielaard, J. M. (2002). Blood flow variation in human muscle during electrically stimulated exercise bouts. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83(7), 936-941.
- Won, K. H., Kim, C. & Kim, C. K. (2001). Effects of electromyostimulation and weight training on muscle morphology and function. *Korean Journal of Physical Education*, 40(1), 490-498.
- Yun, S. J. & Kim, J. H. (2011). The effects of peak torque and angle of peak torque on isometric training depending on degrees. *Korean Society for Wellness*, 6(2), 263-273.