

Effects of Different Frequency on Muscle Function of the Thigh in Patients with Degenerative Knee Arthritis during the Functional Electrical Stimulation

FES 치료 시 자극 주파수 차이가 퇴행성 슬관절염 환자의 대퇴근 기능에 미치는 영향

Woen-Sik Chae, Jae-Hu Jung

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

Received : 11 December 2022

Revised : 29 December 2022

Accepted : 29 December 2022

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 muscle function of the thigh in patients with degenerative knee arthritis during the functional electrical stimulation (FES).

Method: For this study, 16 male participants over 65 who patients with degenerative knee arthritis were recruited as research participants. In this research, isokinetic muscular function, EMG, and joint position sensation were performed after FES treatment was applied for three conditions (FES 20, FES 50, and Without FES). For each dependent variable, one-way ANOVA with repeated measures was to determine whether there were significant differences among three different conditions ($p < .05$). When a significant difference was found, post hoc analyses were performed by using the contrast procedure.

Results: When compared to FES 50 and without FES, FES 20 causes significant increase in isometric knee extension strength. No significant differences were found in EMG values across different EMS conditions.

Conclusion: The present study examined isokinetic muscular function, EMG, and joint position sensation in order to investigate the effects of different frequency muscle function of knee extensors during the functional electrical stimulation. The results of this study showed that FES with 20 Hz frequency had positive effect on knee extensor. Based on the findings of the present study, FES with lower frequency may help the performer to focus on developing strength in knee extensor muscles.

Keywords: Functional electrical stimulation, Frequency, Degenerative knee arthritis, Muscle function

INTRODUCTION

노년층에서 발생할 수 있는 만성 질환 중 퇴행성 관절염은 통증과 기능장애를 유발시켜, 노인들의 삶의 질을 크게 떨어뜨린다. 우리나라 65세 이상 인구 중 53%가 퇴행성 관절염 증상을 가지고 있으며, 이중 82.6%가 무릎관절에서 발생된다. 일반적으로 퇴행성 슬관절염은 관절 연골의 신진대사가 감소되어, 관절 연골에 균열과 파열이 생김으로써 시작된다(Syed & Davis, 2000). 이러한 관절의 퇴행성 변화는 통증을 유발시켜 신체 활동에 제한을 가져오며, 증상이 심한 경우에는 휴식 시에도 통증이 발생되어 제한된 움직임만 가능한 상태가 된다(Manetta, Franz, Moon, Perell & Fang, 2002). 퇴행성 슬관절염은 노화에 따른 골격근 기능 저하 및 근력 감소가 직접적인 발병 원인으로, 무릎관절 주위의 구조적인 변화와 근위축 및 근력 불균형 상태가 유발된다. 따라서 보행능력, 순발력, 균형감각 등이 저하되고, 낙상과 같은 부

상 위험 증가, 대퇴사두근 단면적 감소, 관절 경직 및 관절가동범위 제한 등이 동반된다(Dekker, Aufdemkampe & Winckers, 1993; Mcalindon, Cooper, Kirwan & Dieppe, 1993; Mizner, Petterson & Snyder-Mackler, 2005; Robon, Perell, Fang & Guerro, 2000; Stevens, Mizner & Snyder-Mackler, 2003). 이처럼 퇴행성 슬관절염 환자들의 기능 장애를 완화하기 위해서는 대퇴사두근을 비롯한 무릎관절 주위 근육들의 근력과 근기능을 향상시켜야 한다(Cooper, Taylor & Feller, 2005; Mir, Hadian, Talebian & Nasser, 2008).

현재 노인들의 퇴행성 슬관절염을 치료하기 위한 방법으로 약물요법, 물리 치료 및 재활운동 등의 보존적 요법이 사용된다. 하지만 보존적 요법을 통한 일반적인 근력 및 근기능 향상 방법은 퇴행성 변화로 약해져 있는 무릎관절의 기능에 부정적인 영향을 미치고, 노인들의 신체 활동 기피 현상을 초래해 근육의 기능을 약화시키게 된다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위해, 퇴행성 슬관절염 환자들의 관절 조직

에 부담을 주지 않고 원하는 부위의 근력 및 근기능을 향상시키기 위한 기능적 전기 자극(functional electrical stimulation: FES)을 활용한 치료 방법이 널리 보급되고 있다. 근육의 인위적인 수축과 이완을 유도하는 FES 치료는 정상적인 신경 지배를 받고 있는 감각신경과 운동신경을 자극하여 수의적 운동보다 더 강한 근육 활동을 발생시킴으로써, 근육량 증가, 근력 및 근지구력 향상, 근위축 방지 등에 효과가 있는 것으로 밝혀졌다(Pekindil, Sarikaya, Birtane, Pekindil & Salan, 2001). 일반적으로 FES는 피부에 부착하는 패드형 전극을 이용하여 사용성이 높고, 치료 목적에 따라 특정한 여러 근육을 동시에 자극할 수 있는 장점이 있다. 따라서 FES는 저주파의 전기적 자극을 통해 인위적인 근육 수축을 유발시켜, 수의적 동작이 어려운 노인이나 퇴행성 관절염 환자들의 근육 위축을 예방하기 위한 재활의 목적으로 활용되고 있다(Lin & Yan, 2011).

FES의 임상적 효과와 관련된 선행연구를 살펴보면, FES 치료 시 근섬유의 모세혈관 증가 및 혈관 생성 촉진(Chekanov et al., 2002), 혈류량 증가(Kaplan, Czymy, Fung, Unsworth & Hirsh, 2002), 골격근의 근력 증가(Granat, Ferguson, Andrews & Delargy, 1993), 신경근 연결 부위의 운동 단위 증가(Petersen, Taylor & Gandevia, 2002; Vanderthommen et al., 2002), 손상된 중추신경의 기능 개선(Chae, Fang, Walker & Pourmehdi, 2001; Cramer, Weston, Climstein, Davis & Sutton, 2002) 등의 효과가 있다고 보고되었다. 또한 FES 치료는 하지 손상 환자의 재활 치료 측면에서 부상 부위의 통증 완화 및 근위축 감소를 위한 운동 방법으로도 권장되고 있다. 또한 하지 손상 환자의 FES 재활 운동프로그램은 대퇴사두근을 비롯한 하지 근육의 근력 회복 및 근위축 예방, 통증 완화에 도움이 된다고 밝혀졌다(Bily, Trimmel, Mödlin, Kaider & Kern, 2008; Romero, Sanford, Schroeder & Fahey, 1981; Talbot, Gaines, Ling & Metter, 2003). 골관절염 환자를 대상으로 한 FES 적용 연구에서도 외측광근 두께, 근섬유 길이, 슬관절 신전 토크의 증가와 관절통, 강직성, 근기능 제한이 감소된 것으로 나타났다(Vaz et al., 2013).

하지의 근기능이 저하된 뇌병변 환자들을 대상으로 한 연구에 따르면, EEG-EMG 신호의 동조화 현상이 특정한 주파수 영역에 집중되는 것을 확인할 수 있다(Baker, Spinks, Jackson & Lemon, 2001; Reyes, Laine, Kutch & Valero-Cuevas, 2017). 특히 15~30 Hz의 베타 밴드에 집중되어 동조화 현상이 나타나며, 이러한 현상은 뇌로부터 발생하는 전기적 신호와 이러한 신호에 의해 조절되는 근육 또한 비슷한 패턴을 보이며 수축된다는 것을 의미한다(Fisher, Zaami, Williams, Baker & Baker, 2012; Norton & Gorassini, 2006; Roopun et al., 2006). 실제 증가된 베타밴드 영역의 동조화 현상은 뇌병변 환자들의 재활 정도와 관련이 있었으며(Fisher et al., 2012; Gao, Ren, Li & Zhang, 2017), 환자들의 움직임의 장애 정도가 완화될수록 베타밴드 영역 대의 동조화 현상이 더욱 커지는 것을 알 수 있다(Fisher et al., 2012). 즉, 뇌 신호 및 근육의 수축 현상이 베타밴드 영역 대에서 더 많이 발생될수록 뇌병변에 의한 움직임의 장애 정도가 개선됨을 의미한다. 이러한 연구 결과는 최근 퇴행성 관절염 환자들의 재활에서 많이 사용되고 있는 FES의 치료 효과를 개선시키고 그 활용도를 다양화시킬 수 있는 근거로 활용될 수 있다. 특히 근위축이나 근기능이 저하된 노인들의 재활을 위한 전기 자극 치료 시 베타밴드 영역으로 설정하는 것에 대한 적절성을 간접적으로 제시하고 있다.

위에서 언급된 FES의 긍정적 효과와 상반되는 연구 결과를 살펴보

면, 전기적 자극에 의한 인위적 근수축이 과도한 근신경계의 피로를 유발할 수 있으며(Doucet, Lam & Griffin, 2012), 수의적 수축과 상반되는 근육의 동원 순서에 의해 급격한 근피로 현상이 유발될 수 있다고 밝혀졌다(Vanderthommen & Duchateau, 2007). 또한 100 Hz 이상의 높은 주파수를 활용한 전기 자극 시 운동신경과 근육의 연결부에서 자극을 전달하는 화학물질이 쉽게 고갈되어 근육의 피로, 통증 및 불쾌감이 유발될 수 있다고 하였다(Mang, Lagerquist & Collins, 2010; Stevens, Mizner & Snyder-Mackler, 2004). 따라서 FES 치료 시 발생할 수 있는 근피로 및 통증을 최소화하고 근력 및 근기능 향상을 도모하기 위해서는 적절한 전기적 자극이 주어져야 하며, FES 치료의 목적에 따라 전기 자극의 주파수 영역을 적절하게 변화시켜 적용할 필요가 있다(Doucet et al., 2012; Ogino et al., 2002). 하지만 FES 치료에 대한 기존의 연구들은 FES 적용에 따른 근위축 감소와 근력 증가와 같은 재활 효과 검증, 부상 부위의 통증 완화, 근신경계의 피로 유발에 관한 임상적 연구에 국한되어 있으며, 근기능이 저하된 퇴행성 관절염 환자를 대상으로 FES 적용 시 치료 목적에 따른 적정 주파수 영역의 설정 기준에 대해 분석한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 퇴행성 슬관절염 환자들의 FES 치료 시 근육에 주어진 주파수 대역의 차이가 무릎관절의 근기능, 대퇴근육의 활성화도, 고유수용성 감각 기능에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 주파수 대역(20 Hz의 베타밴드 영역, 50 Hz의 감마밴드 영역, FES 미적용)의 차이에 따라 30분간 FES 치료를 실시하였으며, FES 치료를 적용한 후 등속성 근기능 검사, 근전도 검사, 고유수용성감각 검사를 각각 실시하여 비교 분석하였다.

METHOD

1. 연구대상자

본 연구에서는 임상외과(정형외과, 영상의학과)에서 방사선상 퇴행성 슬관절염 진단을 받은 65세 이상 남성 16명(연령 75.1±4.5세, 신장 168.9±3.8 cm, 체중 66.3±7.5 kg)을 연구대상자로 선정하였으며, 선정 기준은 방사선 소견상 경대퇴관절(tibiofemoral joint)에 골증식이 확인되거나 1개 이상의 골극(osteophyte)이 형성되는 KL 1-2 등급(Kellgren-Lawrence grade)으로 설정하였다(Kellgren & Lawrence, 1957).

2. 실험장비

1) 기능적 전기 자극 치료기

본 연구에서는 FES 적용을 위해 기능적 전기 자극 치료기(MICROSTIM2, SEJINMT, Korea)를 활용하였으며, 주파수 가용 범위는 1~99 Hz, 펄스 지속시간의 가용 범위는 10~700 μ s이다(Figure 1).

2) 등속성 근기능 검사

등속성 근기능 검사는 등속성 운동기기(Humac Norm, CSMI, USA)를 사용하여 피험자의 우측 무릎관절에 대한 최대 정적 수축력, 최대 근력, 근지구력을 측정하였다. 본 검사에서 최대 정적 수축력은 무릎



Figure 1. Functional electrical stimulation (MICROSTIM2, SEJINMT, Korea)

관절 각도 45°에서 5초간 수축, 최대근력은 60°/sec에서 5회 반복, 근지구력은 180°/sec에서 15회 반복을 실시하였으며, 최대근력과 근지구력 측정 시 무릎관절의 가동범위는 90°로 설정하였다.

3) 근전도 검사

등속성 근기능 검사 시 대퇴근육의 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 대퇴직근(Rectus femoris, RF), 내측광근(Vastus Medialis, VM), 외측광근(Vastus Lateralis, VL)의 3개 부위에 부착하였다. 각각의 표면전극은 근섬유의 수축 방향과 평행되게 부착하였으며, 접지전극은 전상장골극(ASIS)에 부착하였다(U. S. Department of health and Human Service, 1993).

4) 관절위치감각 검사

본 연구에서는 등속성 운동기기(Humac Norm, CSMI, USA)를 활용하여 관절위치감각 검사를 실시하였다. 본 검사에는 피험자의 시각과 청각을 차단한 후 무릎관절의 각도를 45°로 10초간 유지시켜 피험자가 목표각에 대한 무릎관절의 위치를 인식하도록 하였다. 이후 무릎관절 굴곡 90°에서부터 움직임을 시작하여 목표각 45°를 재현하는 동작을 3회 반복 실시하였다.

3. 실험절차

모든 피험자는 실험에 들어가기 전 피로를 유발할 수 있는 강도 높은 신체 활동을 금지하였으며, 실험에 앞서 10분간 가볍게 워밍업을 실시하였다.

본 실험에서는 주파수 대역에 따른 각 조건의 실시 순서에 의한 효과를 배제하기 위해 피험자별 3가지 조건의 적용 순서를 무선허당(randomization) 방식을 통해 선정하였으며, 각각의 실험 조건 적용 간 근피로에 의한 영향을 배제하기 위해 약 48시간의 휴식시간을 제공하

였다. 전기 자극 적용은 주파수 차이에 따라 20 Hz의 베타밴드 영역(FES 20), 50 Hz의 감마밴드 영역(FES 50), FES 미적용(Without FES)의 3가지 조건으로 설정하였다. FES 치료는 전기 자극 치료기와 연결된 2개의 전극을 대퇴직근의 근위부와 원위부에 각각 부착한 후 정적인 상태에서 30분간 전기 자극을 적용하였다(Gaines, Metter & Talbot, 2004). 3가지 조건에 따른 FES 치료 적용 후 등속성 근기능 검사, 근전도 검사, 고유수용감각 검사를 실시하였다(Table 1).

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.

Table 1. FES program

	Frequency	Pulse width	On-off ratio	Electric current	Time
FES 20	20 Hz	250 μs	1:1	20 mA	30 min
FES 50	50 Hz	250 μs	1:1	20 mA	30 min
Without FES	X	X	X	X	X

4. 자료분석

1) 등속성 근기능 검사

본 연구에서는 우측 무릎관절의 신전 동작에 대한 최대 정적 수축력, 최대근력, 근지구력을 각각 분석하였다. 최대 정적 구축력은 무릎관절 각도 45°에서 5초간 수축 시 최대값, 최대근력은 부하속도 60°/sec에서 5회 반복 시 최대값, 근지구력은 부하속도 180°/sec에서 15회 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, 무릎관절의 신전 동작에 대한 근육별 평균 적분근전도 값을 산출하였다. 평균 적분근전도는 실제 무릎관절의 신전 동작 시 측정된 근전도 값을 MVIC 값으로 나눈 후 특정 구간의 평균값을 제시하였다.

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

nEMG는 %MVIC 값, EMG_{raw} 는 무릎관절 신전 동작 시 대퇴근육의 근전도 값, EMG_{max} 는 MVIC 값이다.

3) 관절위치감각 검사

본 검사에서는 무릎관절 굴곡 90°에서부터 움직임을 시작하여 목표 각인 45°를 재현하도록 하였으며, 총 3회 반복 측정을 실시하여 목표 각과 실제로 재현된 각도의 오차평균값을 산출하였다.

5. 통계처리

본 연구에서는 퇴행성 관절염 환자들의 FES 치료 시 주파수 대역의 차이에 따른 무릎관절의 근기능, 근활성도, 고유수용성각각 기능의 통계적 유의차를 검증하기 위해 통계프로그램 SPSS 25.0을 이용하여 반복 측정을 통한 일원분산분석(one-way analysis of variance with repeated measures)을 실시하였으며, 통계적 유의차가 발생하였을 시 사후검정은 contrast를 사용하였다. 이때 유의성 수준은 $p < .05$ 로 설정하였다.

RESULTS

1. 등속성 근기능 검사

등속성 근기능 검사 시 무릎관절 신전근의 최대 정적 수축력은 베타밴드 적용 조건(FES 20)이 감마밴드 적용 조건(FES 50), FES 미적용 조건(Without FES)에 비해 통계적으로 유의하게 증가한 것으로 나타났다. 하지만 최대근력, 근지구력 측정 결과에서는 주파수 대역 차이에 따른 3가지 적용 조건 간 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다 (Table 2).

Table 2. Maximum isometric contraction, muscular strength, and muscular endurance during the knee extension (Nm/BW)

	FES 20	FES 50	Without FES
Maximum isometric contraction	191.2±21.7*#	171.3±18.1*	171.1±22.3#
Muscular strength	160.8±31.1	158.5±21.4	169.8±28.6
Muscular endurance	1311.9±283.2	1334.4±246.7	1307.1±355.3

Note. *significant difference between FES 20 and FES 50
#significant difference between FES 20 and Without FES

2. 근전도 검사

등속성 근기능 검사의 최대근력 및 근지구력 측정 시 대퇴직근, 내측광근, 외측광근의 활성도에서는 주파수 대역 차이에 따른 3가지 적용 조건 간 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다 (Table 3, Table 4).

Table 3. Average IEMG during the isokinetic muscular strength (%MVIC)

	FES 20	FES 50	Without FES
RF	85.1±20.1	82.6±19.8	87.2±20.9
VM	74.6±17.3	69.8±17.9	70.9±19.6
VL	63.2±18.0	65.1±16.5	67.6±16.3

Table 4. Average IEMG during the isokinetic muscular endurance (%MVIC)

	FES 20	FES 50	Without FES
RF	52.8±15.5	50.5±16.0	51.0±13.9
VM	55.1±12.1	54.6±13.2	52.9±14.4
VL	48.1±10.8	50.8±11.9	49.2±13.1

3. 관절위치감각 검사

무릎관절에 대한 관절위치감각 검사에서는 주파수 대역 차이에 따른 3가지 적용 조건 간 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다 (Table 5).

Table 5. Joint position sensation (deg)

	FES 20	FES 50	Without FES
Joint position sensation	12.0±4.6	13.6±4.7	11.8±3.7

DISCUSSION

본 연구에서는 퇴행성 슬관절염 환자들의 FES 치료 시 주파수 대역의 차이에 따른 치료 효과를 검증하기 위해 피험자별 20 Hz의 베타밴드 영역, 50 Hz의 감마밴드 영역, FES 미적용의 3가지 조건 적용 후 등속성 근기능 검사, 근전도 검사, 고유수용성각각 검사를 실시하였으며, 각각의 측정 결과를 비교 분석하였다.

본 연구에서 FES 치료 효과 검증을 위해 각 조건별 측정 결과를 산출하여 비교 분석한 결과, 무릎관절 신전근에 대한 최대 정적 수축력에서 베타밴드 적용 조건이 감마밴드 적용 조건, FES 미적용 조건에 비해 통계적으로 유의하게 증가한 것으로 나타났다. 하지만 최대근력, 근지구력, 근활성도, 관절위치감각 측정 결과에서는 주파수 대역 차이에 따른 3가지 적용 조건간 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다.

뇌병변 환자를 대상으로 한 Fisher et al. (2012)과 Reyes et al. (2017)의 연구에서는 EEG-EMG 신호의 동조화 현상이 특정한 주파수 영역에 집중되어 나타나며, 뇌 신호 및 근육의 수축 현상이 15~30 Hz 대에서 발생될수록 움직임의 장애 정도 및 하지의 근기능이 개선된다고 보고

하였다. 이러한 현상은 뇌로부터 발생하는 전기적 신호와 이러한 신호에 의해 조절되는 근육 또한 비슷한 패턴을 보이며 수축된다는 것을 의미한다고 하였다. 이와 같이 본 연구에서도 서로 다른 주파수 대역을 적용한 3개 조건 중 15~30 Hz에 해당하는 20 Hz의 베타밴드 적용 조건에서 최대 정적 수축력이 증가된 것으로 나타나 선행연구의 결과와 유사한 양상을 보였다. 따라서 FES 적용 시 퇴행성 슬관절염 환자들의 근육 기능 향상을 통한 치료 효과를 높이기 위해서는 베타밴드 영역인 20 Hz의 주파수 설정이 적절한 것으로 판단된다.

또한 Doucet et al. (2012)은 전기적 자극에 의한 인위적 근수축이 과도한 근신경계의 피로를 유발할 수 있으며, Stevens et al. (2004)은 100 Hz 이상의 높은 주파수를 활용한 전기 자극 시 운동신경과 근육의 연결부에서 자극을 전달하는 화학물질이 쉽게 고갈되어 근육의 피로 및 통증이나 불쾌감이 유발될 수 있다고 보고하였다. Lake (1992)은 전기 자극에 의한 근수축 시, 수의적 근수축 형태와 반대 순서로 Type II에서 Type I의 순서로 근섬유 운동 단위가 동원된다고 보고하였다. 하지만 이러한 부분도 골격근 수축 방법에 따른 운동 단위의 동원 특성을 재활 치료의 목적에 따라 적절하게 활용할 경우, 근기능 향상에 더 큰 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 이처럼 FES 치료 시 발생할 수 있는 근피로 및 통증을 최소화하기 위해서는 적절한 주파수 설정을 통한 전기적 자극이 주어져야 할 것으로 판단된다.

CONCLUSION

본 연구에서는 퇴행성 슬관절염 환자들의 FES 치료 시 주파수 대역의 차이에 따른 치료 효과를 검증하기 위해 피험자별 20 Hz의 베타밴드 영역, 50 Hz의 감마밴드 영역, FES 미적용의 3가지 조건 적용 후 등속성 근기능 검사, 근전도 검사, 고유수용감각 검사를 실시하였으며, 각각의 측정 결과를 비교 분석하였다.

본 연구의 결과에서는 무릎관절 신전근에 대한 최대 정적 수축력에서 베타밴드 적용 조건이 감마밴드 적용 조건, FES 미적용 조건에 비해 통계적으로 유의하게 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 퇴행성 슬관절염 환자들의 FES 치료 시 20 Hz의 베타밴드 영역의 주파수를 적용하는 것이 대퇴근 기능 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 퇴행성 관절염 환자들의 근육 기능을 향상시키기 위해서는 FES 치료 시 베타밴드 영역인 20 Hz의 주파수를 설정하는 것이 바람직하며, 이러한 연구 결과를 통해 FES 치료의 목적과 특정 근육 강화에 적합한 적정 주파수 대역의 설정 기준을 수립할 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.

Bily, W., Trimmel, L., Mödlin, M., Kaider, A. & Kern, H. (2008). Training program and additional electric muscle stimulation for patellofemoral pain syndrome: a pilot study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 89(7), 1230-1236.

Chae, J., Fang, Z. P., Walker, M. & Pourmehdi, S. (2001). Intramuscular electromyographically controlled neuromuscular electrical stimulation for upper limb recovery in chronic hemiplegia. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 80(12), 935-941.

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.

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.

Cramer, R. M., Weston, A., Climstein, M., Davis, G. M. & Sutton, J. R. (2002). Effects of electrical stimulation-induced leg training on skeletal muscle adaptability in spinal cord injury. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 12(5), 316-322.

Dekker, J., Tola, P., Aufdemkampe, G. & Winckers, M. (1993). Negative affect, pain and disability in osteoarthritis patients: the mediating role of muscle weakness. *Behaviour Research and Therapy*, 31(2), 203-206.

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., Zaaimi, 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.

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.

Granat, M. H., Ferguson, A. C. B., Andrews, B. J. & Delargy, M. (1993). The role of functional electrical stimulation in the rehabilitation of patients with incomplete spinal cord injury-observed benefits during gait studies. *Spinal Cord*, 31(4), 207-215.

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*, 82(2), 200-204.

- Kellgren, J. H. & Lawrence, J. (1957). Radiological assessment of osteoarthritis. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 16(4), 494-502.
- Lake, D. A. (1992). Neuromuscular electrical stimulation. *Sports Medicine*, 13(5), 320-336.
- Lin, Z. & Yan, T. (2011). Long-term effectiveness of neuromuscular electrical stimulation for promoting motor recovery of the upper extremity after stroke. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 43(6), 506-510.
- Lorentzen, J. S., Petersen, M. M., Brot, C. & Madsen, O. R. (1999). Early changes in muscle strength after total knee arthroplasty: a 6-month follow-up of 30 knees. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 70(2), 176-179.
- Maffiuletti, N. A., Zory, R., Miotti, D., Pellegrino, M. A., Jubeau, M. & Bottinelli, R. (2006). Neuromuscular adaptations to electrostimulation resistance training. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 85(2), 167-175.
- Manetta, J., Franz, L. H., Moon, C., Perell, K. L. & Fang, M. (2002). Comparison of hip and knee muscle moments in subjects with and without knee pain. *Gait & Posture*, 16(3), 249-254.
- 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.
- McAlindon, T. E., Cooper, C., Kirwan, J. R. & Dieppe, P. A. (1993). Determinants of disability in osteoarthritis of the knee. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 52(4), 258-262.
- 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.
- Mizner, R. L., Petterson, S. C. & Snyder-Mackler, L. (2005). Quadriceps strength and the time course of functional recovery after total knee arthroplasty. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 35(7), 424-436.
- Norton, J. A. & Gorassini, M. A. (2006). Changes in cortically related intermuscular coherence accompanying improvements in locomotor skills in incomplete spinal cord injury. *Journal of Neurophysiology*, 95(4), 2580-2589.
- Ogino, M., Shiba, N., Maeda, T., Iwasa, K., Tagawa, Y., Matsuo, S., Nishimura, H., Yamamoto, T., Nagata, K. & Basford, J. R. (2002). MRI quantification of muscle activity after volitional exercise and neuromuscular electrical stimulation. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 81(6), 446-451.
- 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.
- 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.
- Robon, M. J., Perell, K. L., Fang, M. & Guererro, E. (2000). The relationship between ankle plantar flexor muscle moments and knee compressive forces in subjects with and without pain. *Clinical Biomechanics*, 15(7), 522-527.
- Romero, J. A., Sanford, T. L., Schroeder, R. V. & Fahey, T. D. (1981). The effects of electrical stimulation of normal quadriceps on strength and girth. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14(3), 194-197.
- Roopun, A. K., Middleton, S. J., Cunningham, M. O., LeBeau, F. E., Bibbig, A., Whittington, M. A. & Traub, R. D. (2006). A beta2-frequency (20~30 Hz) oscillation in nonsynaptic networks of somatosensory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(42), 15646-15650.
- Stevens, J. E., Mizner, R. L. & Snyder-Mackler, L. (2003). Quadriceps strength and volitional activation before and after total knee arthroplasty for osteoarthritis. *Journal of Orthopaedic Research*, 21(5), 775-779.
- 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.
- Syed, I. Y. & Davis, B. L. (2000). Obesity and osteoarthritis of the knee: hypotheses concerning the relationship between ground reaction forces and quadriceps fatigue in long-duration walking. *Medical Hypotheses*, 54(2), 182-185.
- Talbot, L. A., Gaines, J. M., Ling, S. M. & Metter, E. J. (2003). A home-based protocol of electrical muscle stimulation for quadriceps muscle strength in older adults with osteoarthritis of the knee. *The Journal of Rheumatology*, 30(7), 1571-1578.
- U. S. Department of Health and Human Service. (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., 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.
- 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.
- Vaz, M. A., Baroni, B. M., Geremia, J. M., Lanferdini, F. J., Mayer, A., Arampatzis, A. & Herzog, W. (2013). Neuromuscular electrical stimulation (NMES) reduces structural and functional losses of quadriceps muscle and improves health status in patients with knee osteoarthritis. *Journal of Orthopaedic Research*, 31(4), 511-516.