
신경근 전기자극의 사전적용이 위축근 기능에 미치는 영향

A Study of Pre-application of Neuromuscular Electrical Stimulation on Atrophic Muscle Function

강종호, 김용남
남부대학교 물리치료학과

Jong-Ho Kang(swithun@nambu.ac.kr), Yong-Nam Kim(kyn0231@nambu.ac.kr)

요약

본 연구의 목적은 현수 기간 중 적용한 신경근 전기자극의 사전 적용이 흰쥐 뒷다리 근육의 무게와 후지 기능에 미치는 효과를 알아보는 데 있다. 이를 위해서 25마리의 Sprague-Dawley계 흰쥐를 14일 동안 현수한 HLS군(n=5)과 14일 동안 자유롭게 사육한 WB군(n=5), 현수 기간 중 14일간 사전 전기자극을 실시한 ES14군(n=5), 현수 기간 중 11일간 사전 전기자극한 ES11군(n=5), 현수 기간 중 7일간 사전 전기자극한 ES7군(n=5)에 무작위 배치하여 실험을 진행하였다. 실험결과, HLS군과 ES7군에서 비복근의 근무게, 후지 활보장의 유의한 감소와 외향각의 유의한 증가가 관찰되었고, ES14군과 ES11군에서 비복근의 근무게와 후지 활보장, 외향각이 유의하게 유지되었음을 관찰하였다. 즉, 14일 및 11일의 사전 신경근 전기자극이 근위축 지연과 근기능 보존에 효과적임을 보여주고 있다. 이러한 결과는 근위축 예방 및 기능 유지를 위해서는 신경근 전기자극을 가능한 조기 적용해야함을 알려주고 있다.

■ 중심어 : | 신경근 전기자극 | 근위축 | 근기능 |

Abstract

The purpose of this study was to examine the effect of neuromuscular electrical stimulation(LFES) during hindlimb suspension on weight and function of rat hindlimb muscles. Sprague-Dawley rats(body weight 300-350g) were randomly assigned to five groups: a HLS(n=5) that were hindlimb suspended for 14 days, a WB(n=5) that kept as control, a ES14 that were hind limb suspended for 14days with pre-application of LFES for 14 days, ES11 that were hindlimb suspended for 14 days with pre-application of LFES for 11 days, a LFES 7 that were hindlimb suspended for 14 days with pre-application of LFES for 7 days. Gastrocnemius muscle weight, stride length were significantly decreased and toe out angle were significantly increased in HLS and ES7 groups, whereas muscle weight, stride length, toe out angle were maintained in ES14, ES11. this indicated that LFES for 14 days, LFES for 11 days could prevent muscle atrophy and retain function.

■ keyword : | Neuromuscular Electrical Stimulation | Muscle Atrophy | Muscle Function |

I. 서론

뇌졸중과 소아마비, 척수손상, 골절과 같은 신경계 및 정형계 질환에서 불용(disuse)과 활동 제한은 근육을 위축시켜 근육을 감소시키고, 일상생활의 다양한 측면에서 기능 장애를 일으킨다[1]. 즉, 일상생활에서 독립 활동을 영위하기 위해서는 적절한 근력과 근기능이 필요하다. 인체의 조직은 외부 환경 변화에 역동적으로 적응할 수 있는 능동적 구조물이다[2]. 특히 근육은 일상생활에서 발생하는 운동 부하와 체중 부하 같은 역학적 스트레스(mechanical stress)에 적응할 수 있는 능력을 가지고 있는데, 이것을 근육 가소성(muscle plasticity)이라고 한다[3]. 근육에 대한 부하 스트레스가 증가하면 비대로 적응하고 감소하면 위축으로 적응한다. 즉, 일상생활 중에 발생하는 운동 및 체중 부하와 같은 역학적 스트레스가 근육에 주어지지 않으면 근육은 위축될 수 있음을 의미하고 이어서 근력 저하와 함께 기능을 저하시켜 장애를 초래하는 원인이 될 수 있다[4]. 따라서 적절한 부하 스트레스는 일상생활의 독립 수준을 유지하는데 중요한 요소라 할 수 있으며[5], 재활에서 부하 스트레스 감소로 인한 근위축을 회복시키는 것은 삶의 질을 높여 주는데 중요한 것이다[6].

근육의 위축은 단백질 합성 감소 및 파괴 증가[7], 근질량 감소[8], 근횡단 면적 감소[9], 신경근 연결부 축소[10], 혈관퇴행[11]과 같은 조직학적 퇴행으로 인하여 발생되어 근무게와 기능 감소를 유발시키게 되는데, 한번 근위축이 발생되면 정상수준까지 회복시키는데 많은 노력과 시간이 요구된다. Desaphy 등(2005)이 2주간 실험동물의 지질을 고정시켜 근위축을 유도하고 재가동(remobilization)과 체중부하를 처치하여 관찰한 결과, 위축되기 전의 근무게로 돌아가기 위해서는 고정기간의 2배인 4주가 필요하다고 하였다[12]. 이러한 사실은 사후 중재를 통한 근위축 회복보다는 사전 중재를 통한 근위축 지연이나 예방이 중요함을 말해주는 것이다.

물리치료에서 전기자극[13], 자기장자극[14], 초음파[15]와 같은 모달리티(modality)가 근위축 회복을 위하여 사용되고 있다. 특히 저빈도 전기자극은 약물과 달리 특별한 부작용을 유발하지 않고 쉽게 적용할 수 있

는 장점을 가지고 있으며, 위축근을 자극할 수 있는 충분한 자극 기간과 강도를 가지고 있어 근위축 회복에 널리 이용되고 있다[13]. 그러나 이와 같은 대부분의 관련 연구들은 사후적용에 대한 근위축 회복이나 조직학적 평가에 초점이 맞추어져 있어, 저빈도 전기자극의 사전 적용에 대한 연구와 함께 실제 기능에 어떠한 영향이 미치는지 알아보는 연구가 필요하다. 실제 근위축 회복은 영양학적 중재, 운동 치료적 중재, 약물적 중재, 역학적 중재와 같은 요소들에게 영향을 받으므로 전기자극의 효과를 알아보기 위해서는 영향 요소들을 최대한 통제해야 한다. 그러나 임상 연구 수행에는 이러한 요소들의 통제가 쉽지 않다. 따라서 실험동물을 이용하여 영향 요소를 통제하고 가능한 전기자극 요소가 실제 기능에 미치는 영향을 살펴 볼 필요가 있어, 본 연구에서는 뒷다리 위축 동물 모델을 이용하였다. 2주 동안 하퇴 삼두근의 위축을 유도하면서 저빈도 전기자극을 14일, 11일, 7일간 예방적으로 적용하고 근무게와 보행 기능에 미치는 영향을 살펴보고 저빈도 전기자극의 예방적 활용에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 실험동물의 준비

본 연구는 효창 사이언스(주)(대구, 한국)에서 구입한 생후 9주에서 10주사이의 체중 300-350g의 건강한 Sprague-Dawley계 수컷 흰쥐를 25마리를 사용하였다. 실험기간 동안에는 물과 고형사료(수퍼피드(주))를 자유롭게 먹을 수 있도록 무제한 공급하였다. 주어진 물과 고형사료 이외의 먹이는 일체 공급하지 않았다. 사육실과 실험실의 온도와 습도는 24-25°C, 습도 50-60%로 일정하게 유지하고 12시간의 광주기와 12시간의 암주기를 제공하였다. 연구에 이용된 사육장은 불투명 플라스틱 재질의 가로 260mm, 세로 400mm, 높이 600mm 크기이며, 모든 실험동물은 동일 사육장에서 사육되고 처치되어 사육 환경에 의한 영향 요인을 제한하였다.

2. 실험설계

저빈도 전기자극을 예방적으로 적용할 경우 위축 지연과 기능 보존에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 체중부하군(WB), 뒷다리 현수군(HLS), 14일 전기자극군(ES14), 11일 전기자극군(ES11), 7일 전기자극군(ES7)으로 구분하고 실험동물을 5마씩 무작위 배치하였다. 체중부하군은 사육장에서 아무런 처치를 받지 않고 14일간 자유롭게 생활하게 하였고, 뒷다리 현수군은 14일 동안 뒷다리를 현수하여 체중 부하를 제거시켜 생활하게 하였다. 14일 전기자극군은 14일간의 뒷다리 현수 처치와 동시에 전기자극을 같이 진행하였고, 11일 전기자극군은 뒷다리 현수 처치 4일 후부터 전기자극을 실시하였으며, 7일 전기자극군은 뒷다리 현수 처치 8일 후부터 전기자극을 실시하였다.

2. 뒷다리 현수 모델

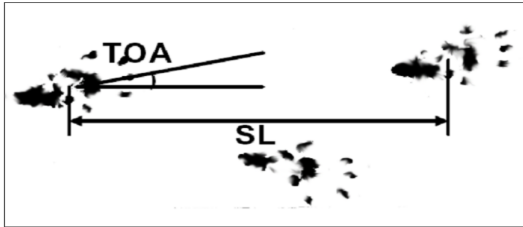
불용(disuse), 비활동(inactivity), 무부하(unloading)와 같은 부하 스트레스 제한이 하지 근육 조직에 미치는 영향을 관찰하는데 보편적으로 이용되고 있는 방법으로 뒷다리 현수 모델(hindlimb suspension model)이 있다[16]. 뒷다리 현수 모델은 실험동물의 꼬리를 현수고리에 연결하여, 뒷다리가 바닥에 닿지 않도록 하는 모델이다. 원활한 현수를 위하여 불투명 플라스틱 재질로 260×400×600mm 크기의 현수 전용 사육장을 제작하였다. 바닥으로부터 수직으로 500mm 높이에 현수봉을 설치하여 현수고리를 연결하였으며, 현수고리는 현수봉 내에서 자유롭게 이동이 가능하다. 안전한 현수를 위하여 림퐁(바이엘코리아(주))과 염산 케타민(유한양행(주))을 1:1로 혼합한 마취제를 복강 주사하여 실험동물을 전신 마취하였다. 마취가 확인되면 의료용 테이프를 이용해 꼬리를 현수고리에 부착하고, 현수고리를 현수봉에 매달아 뒷다리 족부가 바닥에 닿지 않도록 하였다. 또한 마취가 끝나면 실험동물이 현수봉에서 앞다리를 이용하여 자유롭게 이동하여 사료와 식수에 접근 가능한지 확인하였다. 14일의 현수기간동안 실험동물의 건강상태와 현수상태를 수시로 확인하여, 필요시 즉시 조치를 취하여 안정성을 유지하였다. 그리고 마취영향을 통제하기 위해서 체중부하집단과 현수집단, 전기자극집단 모두에게 동일하게 마취 처치를 실시하였다.

4. 전기자극 방법

실험에 이용된 기기는 저주파 전기자극기(STN-100, 스트라텍(주), 한국)로 저주파 전영역과 자극 강도, 자극 시간을 자유롭게 선택하여 제공할 수 있는 기기이다. 실험동물에 대한 전기자극은 매일 동일한 시간대에 실시하여 적용시간에 따른 차이를 통제하였다. 뒷다리 우측 하퇴삼두근에 전기자극을 하기 위하여 지름 2.5mm의 원형도자를 브라켓에 고정시켜 사용하였다. 안전한 전기자극을 실시하기 위하여 림퐁과 염산케타민을 1:1로 제조한 혼합마취제로 전신마취 하여 실시하였다. 사용한 전기자극 파라미터는 펄스폭 1ms의 비대칭 이상성 맥동파(asymmetric biphasic pulse wave)로 16Hz 주파수로 1일 1회, 15분씩 자극하였다. 자극 강도는 가시 수축이 보이기 직전의 최소강도를 사용하였고, 전기자극동안 족관절을 중립위로 위치시켜 근육이 단축되거나 신장되지 않도록 하여 근수축이나 근신장의 영향을 통제하였다[13]. 마찬가지로 전기자극기간동안 모든 실험동물에게 동일한 전신마취를 실시하여 마취로 인한 영향도 통제하였다.

5. 기능 평가

근기능을 평가하기 위해서, 실험동물의 근기능 측정에 신뢰성을 확보하고 있는 족적 분석법(foot print analysis)을 실시하였다[17]. 1000mm×70mm×100mm 크기의 빛이 들어올 수 있는 통로바닥에 흰색 종이를 깔고 통로 끝에는 빛이 차단되는 암실을 연결하여, 실험동물이 어두운 곳으로 찾아 가려는 행동을 이용한 도구이다. 실험동물의 족저면에 검정색 잉크를 묻히고 통로에 진입시키면 암실 방향으로 찾아 들어가면서 흰색 종이에 족적이 남게 된다. 족적 분석은 3회씩 반복하여 그 평균값을 사용하였다. 족적은 활보장(stride length)과 보행 방향에 대한 외향각(toe out angle)을 측정하였다. 활보장은 양쪽 족적의 중심점사이의 거리이며 외향각은 중심점에서 세 번째 발가락 중족지 관절을 연결한 선과 보행방향선이 만나는 각도이다[그림 1]. 보행 조건이 나빠지면 활보장이 감소하고 외향각이 증가하게 되므로 근기능을 확인시켜 줄 수 있다.



TOA : toe out angle
SL : stride length

그림 1. Foot print analysis

6. 근 무게 측정

럼푼과 케타민을 1:1 비율로 혼합한 마취제로 전신 마취시켜 개흉술을 실시하고, 0.9% NaCl 용액과 pH 7.4의 4% 파라포름알데히드를 관류시켜 전고정하였다. 뼈 절단기를 이용하여 뒷다리를 몸체에서 분리하고 조심스럽게 비복근건과 아킬레스건을 절단하여 비복근을 분리하였다. 이후 미세 현미경(SMZ800, Nikon, Japan)을 이용하여 불필요한 연부조직을 제거하였다. 실험동물 희생으로 채취된 샘플은 0.001g까지 측정이 가능한 초정밀 저울(GB3002, METTLER, TOLDEDO, Switzerland)을 이용하여 무게를 측정하였다.

7. 결과 처리 및 분석 방법

전기자극을 실시한 ES14군, ES11군, ES7군과 전기자극을 실시하지 않은 WB군과 HLS군 사이에 근무게와 근기능 차이가 있는지 알아보기 위하여, 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였다. 일원배치 분산분석에서 집단 간 유의한 차이가 있을 경우에는 Duncan 사후검정을 이용하여 각 집단 사이의 차이를 살펴보았다. 유의수준은 0.05로 하였다.

III. 결 과

1. 비복근 무게

체중부하군의 비복근 무게는 1.94±0.05g, 뒷다리 현수군은 1.3±0.35g으로 나타나 뒷다리 현수 처치가 근무

게를 감소시켰다. 14일 전기자극군의 비복근 무게가 1.54±0.12g, 11일 전기자극군이 1.47±0.09g로 저빈도 전기자극이 근무게 감소를 유의하게 줄여줄 수 있음을 알 수 있다. 그러나 7일 전기자극군은 1.35±0.11g으로 유의한 효과가 없었다(<math>F=50.366, p<0.05>[/math> [표 1].

표 1. 비복근의 무게의 측정결과

Group Weight	WB	HLS	ES14	ES11	ES7	p ¹⁾
Gastroc -nemius	1.94±0.05g	1.3±0.35g	1.54±0.12g	1.47±0.09g	1.35±0.11g	0.000
D ²⁾	a	c	b	b	c	

- 1) 통계적 유의성은 일원배치 분산분석으로 검정
- 2) 사후검정에 의하여 동일 문자는 집단 간 차이가 없음을 의미.

2. 기능평가

2.1 활보장 거리의 측정 결과

체중부하군의 활보장 거리는 156.47±1.95mm, 뒷다리 현수군은 145.71±5.9mm로 뒷다리 현수가 활보장 거리를 유의하게 감소시켰다. 14일 전기자극군의 활보장 거리는 152.57±3.43mm, 11일 전기자극군은 150.92±2.8mm로 저빈도 전기자극이 활보장 거리 감소를 유의하게 줄였으나 7일 전기자극군은 148.32±4.75mm로 활보장 거리 감소를 유의하게 줄이지 못했다(<math>F=6.311, p<0.05>[/math> [표 2].

표 2. 활보장 거리의 측정 결과

Group SL	WB	HLS	ES14	ES11	ES7	p ¹⁾
Gastroc -nemius	156.47±1.95mm	145.71±5.9mm	152.57±3.43mm	150.92±2.8mm	148.32±4.75mm	0.001
D ²⁾	a	c	a, b	b	b, c	

- 1) 통계적 유의성은 일원배치 분산분석으로 검정.
- 2) 사후검정에 의하여 동일 문자는 집단 간 차이가 없음을 의미

2.2 외향각 측정 결과

체중부하군의 외향각은 11.01±1.33°, 뒷다리 현수군의 외향각은 14.32±1.05°로 뒷다리 현수군의 외향각이 유의하게 증가하였다. 이는 뒷다리 현수가 성공적으로 처치되었음을 의미하는 것이다. 14일 전기자극군의 외향

각은 $12.12 \pm 1.21^\circ$ 이고 11일 전기자극군의 외향각은 $12.77 \pm 0.98^\circ$ 로 저빈도 전기자극이 외향각 증가를 유의하게 감소시켜 주었다. 하지만 7일 전기자극군의 외향각은 $13.2 \pm 0.88^\circ$ 로 외향각 증가를 유의하게 감소시키지 못했다($F=7.464, p<0.05$) [표 3].

표 3. 외향각의 측정 결과

Group TOA	WB	HLS	ES14	ES11	ES7	p ¹⁾
Gastrocnemius	$11.01 \pm 1.33^\circ$	$14.32 \pm 1.05^\circ$	$12.12 \pm 1.21^\circ$	$12.77 \pm 0.98^\circ$	$13.2 \pm 0.88^\circ$	0.000
D ²⁾	a	c	a, b	b	b, c	

1) 통계적 유의성은 일원배치 분산분석으로 검정.
2) 사후검정에 의하여 동일 문자는 집단 간 차이가 없음을 의미

IV. 논 의

근육은 부하 스트레스의 수준에 따라 적용 할 수 있는 가소성 조직이다. 즉, 스트레스가 증가하면 근육은 비대해지고 감소하면 위축된다[3]. 스트레스 감소로 발생하는 근위축은 뇌졸중, 소아마비, 척수손상과 같은 신경계 질환과[1][18] 감염, 외상, 퇴행성 질환, 기형과 같은 정형계 질환을[19] 앓는 환자들에게 나타나는 대표적인 증상으로 근력을 감소시켜 기능 장애를 유발하는 원인 중 하나가 된다. 뿐만 아니라 신체 지질의 고정이나 운동 및 체중 부하의 치료적 제한도 근위축을 필연적으로 유발시키게 된다[20]. 따라서 근위축 개선으로 근력을 회복시키고 기능 장애를 방지하는 것은 장애를 예방하고 삶의 질을 높이는 데 중요하다고 할 수 있다.

체중 및 운동 부하와 같은 역학적 스트레스의 제한은 수 일 이내 근육을 위축시키고 제한 기간이 길어질수록 근육의 위축성 반응을 증가시킨다. 근육에 주어지는 역학적 스트레스를 제한할 경우 3일 시점에서 근무게의 12%가 감소하고[21], 7일 시점에서 25%가 감소하며[22], 2주 시점에 이르면 33%가 감소된다[12]. 4주 시점에서 40%가 감소하고 9주 시점에서 55%의 근무게가 감소될 수 있다[23]. 또한 근위축 진행과 함께 기능도 현저히 감소되는데, 7일간의 뒷다리 현수 처치는 노화 흰쥐의 활보장 거리를 21%까지 감소시킬 수 있다[24].

이러한 선행 연구들의 결과는 본 연구의 결과와 유사하였는데, 뒷다리 현수군 근무게는 정상군에 비해서 33% 감소하였고, 활보장은 7% 감소되었다. 그리고 외향각은 정상군에 비해 24% 증가되었다. 단, 본 연구에서 활보장은 경우 Brown 등(2005)의 연구 결과에 비해 감소율이 낮았는데, 이것은 노화 쥐를 이용하는데 비하여 본 연구는 9-10주령의 젊은 쥐를 사용한 차이로 생각된다.

재활분야에서 근위축 개선 노력들이 지속되어왔다. 가장 기본적인 중재는 체중부하와 운동부하를 제공하는 것이다[12]. 그러나 이러한 중재는 뇌졸중과 같은 신경계 환자 그리고 고정이 진행 중인 골절 등의 정형계 환자에게 적용하는데 방해 요인이 많아 적용하기 어렵다. 따라서 이를 대신하여 안전하면서도 쉽게 적용할 수 있는 대체 중재방법들을 마련해야 할 필요가 있다. 물리치료에서는 부작용이 거의 없고 안전하고 쉽게 적용할 수 있는 모달리티를 근위축 개선에 꾸준히 사용해왔다. 특히 저빈도 전기자극은 위축근을 자극할 수 있는 충분한 자극 기간을 가지고 있어 위축근 개선 및 기능 증진에 널리 이용되어오고 있다[25][13].

근위축 회복을 위한 전기자극의 주파수와 자극시간은 다양하게 선택될 수 있으나 위축 형태와 주파수에 따라 조건을 달리해야 할 필요가 있다. Dupont 등(2003)은 테트로 독신 유발 위축근에 2pps와 10pps의 전기자극을 중재한 결과, 10pps보다 2pps가 근무게 감소를 예방하는데 더 효과적이라고 하였다[26]. 그러나 본 연구에서는 선행 연구보다 높은 16Hz의 전기자극을 사용하여 근무게 감소의 지연과 기능 유지 결과를 얻어 내었는데, 근위축 유발 모델에 따른 차이로 생각된다. 즉, 본 연구는 체중 부하를 제거하여 위축을 유발시킨 모델을 사용하였고, 전기자극에 있어서 자극 기간이 2pps보다 짧아도 위축근 자극이 가능하나 선행연구에서는 테트로 독신을 사용한 신경과피 모델로 더 긴 자극 기간이 필요했기 때문으로 생각된다. 따라서 뒷다리 현수 처치로 인한 불용 모델의 근위축 지연효과와 근기능 보존효과는 는 16Hz의 전기자극으로 가능함을 알 수 있다.

위축근 개선은 좀 더 높은 주파수와 고강도 전기자극에서도 가능하다. Qin 등(1997)은 본 연구에서 사용한

16Hz 주파수와 15분의 자극시간 보다 높은 50Hz의 주파수와 30분의 자극시간, 15-25mA의 높은 자극 강도를 위축근에 적용하여 근무게 지연효과를 관찰하였다[27]. 이 연구결과는 16Hz의 낮은 주파수를 사용한 본 연구의 결과와 부합하는 것이다. 그러나 주파수가 증가하게 되면 자극 기간이 짧아지게 되므로 자극강도와 자극시간을 높여주어야 적절한 자극효과를 얻을 수 있다. 그러므로 전기자극 대상자에게 통증과 불쾌감을 유발시키지 않도록 자극 기간이 긴 전기자극을 선택해야 할 필요가 있을 것이다. 본 연구에서 16Hz의 저빈도 주파수를 선택할 경우 고빈도 주파수의 전기자극보다 자극시간과 자극강도를 줄일 수 있었는데, 주파수와 파형은 달라도 2mA로 근위축 지연이 가능하다는 선행연구와 유사한 결과이다[28].

14일의 현수 중에 14일 및 11일간 전기자극을 조기 중재한 경우 근무게 감소 지연과 활보장 거리의 유지, 외향각 증가의 감소에 유의한 효과가 있는 것으로 나타났다. 7일 동안 전기자극을 실시한 실험군에서는 근무게 및 활보장 거리, 외향각에 유의한 효과가 없었다. 이 결과는 근위축이 진행되고 난 뒤에 전기자극 하는 것은 비효과적이므로 가능한 근위축이 진행되기 전, 조기에 전기자극하는 것이 효과적임을 보여주고 있다. 14일과 11일 동안 16Hz의 전기자극을 진행할 경우 활보장 거리의 감소와 외향각 증가의 감소로 하지 기능이 뒷다리 현수군보다 좋은 것은 근무게 증가와 함께 근력 보존의 영향으로 얻어진 결과로 생각할 수 있다[29].

V. 결론

16Hz의 저빈도 전기자극이 뒷다리 현수 치료로 위축이 진행되고 있는 흰쥐 뒷다리에 미치는 영향을 알아보기 위하여 체중부하군, 뒷다리 현수군, 14일 전기자극군, 11일 전기자극군, 7일 전기자극군으로 나누어 근무게와 기능을 관찰하였다. 연구 결과에 의하면 2주간의 뒷다리 현수 처치는 근무게를 유의하게 감소시키고 활보장 거리 감소와 외향각을 유의하게 증가시켰다. 14일 전기자극군과 11일 전기자극군은 근무게 감소와 활보

장 거리의 감소, 외향각 증가를 유의하게 감소시킬 수 있었다. 그러나 7일 전기자극군은 유의하게 감소시키지 못했다. 이와 같은 결과는 저빈도 전기자극이 근위축을 예방과 기능을 유지하는데 도움을 줄 수 있지만, 가능한 조기에 적용할 경우 효과적임을 보여주고 있다.

참고 문헌

- [1] L. Jorgensen, N. J. Crabtree, J. Reeve and B. K. Jacobsen, "Ambulatory level and asymmetrical weight bearing after stroke affects bone loss in the upper and lower part of the femoral neck differently: bone adaptation after decreased mechanical loading," *Bone*, Vol.27, pp.701-707, 2000.
- [2] N. Pace, "Weightlessness: a matter of gravity," *New England Journal of Medicine*, Vol.297, pp.32-37, 1977.
- [3] K. M. Baldwin and F. Haddad, "Skeletal Muscle Plasticity. Cellular and Molecular Responses to Altered Physical Activity Paradigms," *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, Vol.81, pp.40-51, 2000.
- [4] F. R. Mulder, K. H. Gerrits, B. U. Kleine, J. Rittweger, D. Felsenberg, A. de Haan, and D. F. Stegeman, "High-density surface EMG study on the time course of central nervous and peripheral neuromuscular changes during 8 weeks of bed rest with or without resistive vibration exercise," *J. Electromyogr. Kinesiol.*, Vol.19, No.2, pp.208-218, 2009.
- [5] R. L. Dunstan and C. H. Turner, "Mechanotransduction and the functional response of bone to mechanical strain," *Calcif. Tissue Int.*, Vol.57, No.5, pp.344-358, 1995.
- [6] G. S. Lynch, J. D. Schertzer, and J. G. Ryall, "Therapeutic approaches for muscle wasting disorders," *Pharmacology & Therapeutics*,

- Vol.113, No.3, pp.461-487, 2007.
- [7] D. Paddon-Jones, M. Sheffield-Moore, M. G. Cree, S. J. Hewlings, A. Aarsland, R. R. Wolfe and A. A Ferrando, "Atrophy and impaired muscle protein synthesis during prolonged inactivity and stress," *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, Vol.91, No.12, pp.4836-4841, 2006.
- [8] H. Zemkova, J. Teisinger, R. R. Almon, R. Vejsada, P. Hnik, and F. Vyskocil, "Immobilization atrophy and membrane properties in rat skeletal muscle fibers," *Pflugers Arch.*, Vol.416, No.1-2, pp.126-129, 1990.
- [9] D. Roberts and D. J. Smith, "Biochemical aspects of peripheral muscle fatigue," *Sports Med.*, Vol.7, pp.125-138, 1989.
- [10] H. W. Meredith and R. D. Michael, "The neuromuscular junction: anatomical features and adaptation to various forms of increased, or decreased neuromuscular activity," *Int. J. Neurosci.*, Vol.115, No.6, pp.803-828, 2005.
- [11] Y. Kano, S. Shimegi, H. Takahashi, K. Masuda, and S. Katsuta, "Changes in capillary luminal diameter in rat soleus muscle after hind-limb suspension," *Acta. Physiol. Scand.*, Vol.169, pp.271-276, 2000.
- [12] J. F. Desaphy, S. Pierno, A. Liantonio, A. De Luca, M. P. Didonna, A. Frigeri, G. P. Nicchia, M. Svelto, C. Camerino, A. Zallone, and D. C. Camerino, "Recovery of the soleus muscle after short- and long-term disuse induced by hindlimb unloading: effects on the electrical properties and myosin heavy chain profile," *Neurobiol. Dis.*, Vol.18, No.2, pp.356-365, 2005.
- [13] 남기원, 신경근전기자극과 수중운동이 흰쥐 위축근 신경근연접부의 연접재형성에 미치는 영향, 대구대학교 대학원 박사학위 논문, 2003.
- [14] Y. Shimada, T. Sakuraba, T. Matsunaga, A. Misawa, M. Kawatani, and E. Itoi, "Effects of therapeutic magnetic stimulation on acute muscle atrophy in rats after hindlimb suspension," *Biomed. Res.*, Vol.27, No.1, pp.23-27, 2006.
- [15] C. D. Markert, M. A. Merrick, T. E. Kirby and S. T. Devor, "Nonthermal ultrasound and exercise in skeletal muscle regeneration," *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, Vol.86, No.7, pp.1304-1310, 2005.
- [16] J. E. Hurst and R. H. Fitts, "Hindlimb unloading-induced muscle atrophy and loss of function: protective effect of isometric exercise," *J. Appl. Physiol.* Vol.95, pp.1405-1417, 2003.
- [17] G. A. S. Metz, M. E. Schwab, and H. Welzl, "The effects of acute and chronic stress on motor and sensory performance in male Lewisrats," *Physiology & Behavior*, Vol.72, pp.29-35, 2001.
- [18] M. Dauty, V. B. Perrouin, Y. Maugars, C. Dubois and J. F. Mathe, "Supralesional and sublesional bone mineral density in spinal cord-injured patients," *Bone*, Vol.27, pp.305-309, 2000.
- [19] V. Valderrabano, V. von Tscherner, B. M. Nigg, B. Hintermann, B. Goepfert, T. S. Fung, C. B. Frank and W. Herzog, "Lowerleg muscle atrophy in ankle osteoarthritis," *J. Orthop. Res.* Vol.24, No.12, pp.2159-2169, 2006.
- [20] Y. Kazunori and H. Kozaburo, "Changes in biomechanical properties of tendons and ligaments from joint disuse," *Osteoarthritis and Cartilage*, Vol.7, pp.122-129, 1999.
- [21] B. J. Krawiec, R. A. Frost, T. C. Vary, L. S. Jefferson, and C. H. Lang, "Hindlimb casting decreases muscle mass in part by proteasome-dependent proteolysis but independent of protein synthesis," *Am. J.*

Physiol. Endocrinol. Metab., Vol.289, No.6, pp.969-980, 2005.

[22] L. V. Thompson, S. A. Johnson, and J. A. Shoeman, "Single soleus muscle fiber function after hindlimb unweighting in adult and aged rats," J. Appl. Physiol., Vol.84, pp.1937-1942, 1998.

[23] V. Harjola, H. Jankala, and M. Harkonen, "Myosin heavy chain mRNA and protein distribution in immobilized rat skeletal muscle are not affected by testosterone status," Acta. Physiol. Scan., Vol.169, No.4, pp.277-282, 2000.

[24] M. Brown and R. Taylor, "Prehabilitation and rehabilitation for attenuating hindlimb unweighting effects on skeletal muscle and gait in adult and old rats," Archives of physical medicine and rehabilitation, Vol.86, No.12, pp.2261-2269, 2005.

[25] 김복조, 이성기, 김명기, "발목 강화 운동과 기능적 전기 자극치료가 뇌졸중 환자의 보행기능 및 균형능력에 미치는 영향", 한국사회체육학회지, VOL.31, No.2, pp.921-931, 2007.

[26] A. C. Dupont, F. J. Richmond, and G. E. Loeb, "Effects of muscle immobilization at different lengths on tetrodotoxin-induced disuse atrophy," IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng., Vol.11, No.3, pp.209-217, 2003.

[27] L. Qin, H. J. Appell, K. M. Chan, and N. Maffulli, "Electrical stimulation prevents immobilization atrophy in skeletal muscle of rabbits," Arch. Phys. Med. Rehabil., Vol.78, No.5, pp.512-517, 1999.

[28] T. Arakawa, S. Nonaka, A. Katada, H. Shigyo, M. Adachi, and Y. Harabuchi, "Prevention of Muscle Atrophy by Functional Electrical Stimulation," Otolaryngology, Vol.133, No.2, p.107, 2005.

[29] Z. Ashley, S. Salmons, S. Boncompagni, F. Protasi, M. Russold, H. Lanmuller, W. Mayr, H. Sutherland, and J. C. Jarvis, "Effects of chronic electrical stimulation on long-term denervated muscles of the rabbit hindlimb," J. Muscle Res. Cell Motil., Vol.28, No.4-5, pp.203-207, 2007.

저 자 소 개

강 종 호(Jong-Ho Kang)

정회원



- 2004년 8월 : 대구대학교 재활과 학과(이학석사)
- 2008년 2월 : 대구대학교 재활과 학과(이학박사)
- 현재 : 남부대학교 물리치료학과 교수

<관심분야> : 재활과학

김 용 남(Yong-Nam Kim)

정회원



- 1995년 2월 : 경희대학교 병원행정학과(행정학 석사)
- 2001년 2월 : 경희대학교 병원행정학과(행정학 박사)
- 현재 : 남부대학교 물리치료학과 교수

<관심분야> : 해부학