

최대 수의적 등척성 수축력에 의한 중추신경원의 활동전위 변화

문달주, 김태열¹, 김계엽¹, 정진규, 김수현

동신대학교 대학원 물리치료학과, 동신대학교 물리치료학과¹

Changes of Action Potential of Central Neuron by Maximal Voluntary Isometric Contraction

Dal-Ju Moon, PT, MS; Tae-Youl Kim PT, PhD¹; Kye-Yoep Kim, DVM, PhD¹; Jin-Gyu Jeong, PT, PhD; Sue-hyun Kim, PT, MS

Department of Physical Therapy, Graduate School, Dongshin University; ¹Department of Physical Therapy, Dongshin University

Purpose: This study analyzed changes in spinal neuron and action potential of motor unit depending on voluntary contraction on spinal neuron adaptation. **Methods:** It selected 80 university students in their twenties and divided into experimental groups of 25% MVIC (I), 50% MVIC (II), 75% MVIC (III) and 100% MVIC (IV) depending on maximum voluntary isometric contraction (MVIC) and performed isometric exercise of plantar flexor muscle to each experimental group with given contraction for 20 times. It measured Mmax, H/Mmax, Hmax latency, V/Mmax, V wave latency before and after exercise, compared method and volume of contraction. **Results:** H/Mmax ratio showed significant difference in comparison among groups ($p < 0.01$) and there was difference in I and IV groups. V/Mmax ratio showed significant difference in comparison among experimental groups ($p < 0.05$) and there was difference in I and IV groups. When voluntary contraction level was maximum, changes were greatest. However, no significantly difference was to Mmax, H latency and V wave latency. **Conclusion:** These results suggest that amplitude changes of voluntary contraction level, spinal neuron and supra-spinal neuron had a close connection that the more contraction level, the better central activation seem to decrease highly for a short time. (*J Kor Soc Phys Ther 2006;18(3):37-45*)

Key Words : Neural adaptation, V wave, H reflex

I. 서론

신체활동이란 높은 에너지를 나타내는 여러 흥분된 근육들의 조합이며 Aagaard 등(2002)은 신

논문접수일: 2006년 3월 22일
수정접수일: 2006년 6월 8일
게재승인일: 2006년 6월 13일
교신저자: 김태열, ptcep@hanmail.net

체활동의 형태와 양은 인체 내 신경근육계의 수행능력에 현저한 영향을 준다. 또한 신체활동의 수준에 의해 신경근계의 형태학적, 기능적 특징이 바뀔 수 있는데, 이것은 신경순응(neural adaptation)의 생리학적 기전과 연결된다(Enoka, 1997).

Scaglioni 등(2002)은 운동신경원의 활성화(motor neuron activity)이 척수 내 입력뿐만 아니라 상

척수신경원을 통해서도 얻어지며 근 수축에 의한 신경순응을 기대할 수 있다고 하였다. Enoka (1997)에 의하면 신체활동의 수준에 따른 인체 내 신경근계에 신경순응이 발생하고, 이러한 변화는 여러 가지 방법으로 측정될 수 있다. 근력강화를 위한 고강도 저항훈련은 근 수축력을 최대로 증가시킬 수 있으며, 근 수축 에너지도 높일 수 있다. 따라서 효과적인 근 수축은 척수수준(spinal level)의 통합된 반사반응에서 중추명령의 영구적 순응을 유도하고 근력향상을 가져온다(Scaglioni, 2002). 그러나 Mark 등(2004)은 근력강화에 따른 신경순응의 기전이 현재 명확하지 않다하였다. 상척수순응기전(supraspinal adaptation mechanism)과 척수순응기전(spinal adaptation mechanism)은 중추운동주행(central motor drive)의 향상과 더불어 운동신경원의 흥분성 증가와 연접 전 억제(presynaptic inhibition)의 감소를 의미한다(Aagaard 등, 2002). McCrea (1996)는 수의적 운동시 상척수로부터 하행성 체계의 활동전위가 나타난다 하였으며, 이러한 반응은 하행성 운동계의 활성에 따른 연접 전 억제에 의해 항상 영향을 받고 있다. 따라서 고강도 근력강화 운동은 상척수신경원의 활성화가 반영되는 척수신경원의 활동전위인 V wave(volitional wave)와 순수 척수신경원의 활동전위인 H wave의 반응을 증가시킨다(Aagaard 등, 2002). Pensini와 Pensini와 Martin (2004)은 근 수축에 의해 증가된 V wave 반응의 크기를 측정하고, 최대 수의적 수축 시 유발된 V wave와 휴식 시 기록된 H wave 사이의 관계를 분석하였다.

V wave를 정의하면 근전도(electromyography)에서 발생된 유발전위의 역방향 파가 수의적 근 수축 시 주행하는 정 방향성 신경원 흥분파와 충돌하여 양쪽전위가 운동축삭들 내에 소실된다. 이때에 척수 전각세포에 남아있는 정방향성 α -운동신경원의 활성전위가 나타나는 것을 의미한다(McCrea, 1996; Pensini와 Martin, 2004). V wave는 개재신경원(interneuron)인 Renshaw cell 억제이기도 하며, 수의적 수축으로 얻어질 수 있고(Hopkins 등, 1993), 전기자극을 최대 강도로 증

가시켜 H wave가 소멸되는 시점에서 최대 수의적 근 수축 시 나타난다(Pensini와 Martin, 2004). 이는 중추인자가 변형된 수축력과 조합하여 운동주행을 조절을 하는 것이다(Vollestad, 1997). 즉, V wave는 연접 전 억제에 의해서 영향을 받으며, 근 수축 시 하행성 운동주행의 전위에 의하여 나타난다(Scaglioni 등, 2002). 수축 강도에 따라 V wave의 활동전위는 변하며 지속적인 저항훈련이 V wave의 활동에 영향을 주어 상척수신경원의 적응기전에 영향을 준다는 보고가 있다(Aagaard 등, 2002; Pensini와 Martin, 2004).

수의적 수축 시 V wave가 대상자에 따라 다르게 나타나는 이유는 각기 발달된 활성수준이 다르기 때문이다. V wave 반응은 수의적 수축 시 하행성 운동주행과 구심성 Ia 척수회로의 흥분성을 조절하는 상척수신경원의 흥분성 연구에 활용될 수 있다.

H reflex는 1918년 Hoffmann에 의해 처음 기술되었으며, 근육에 기원하는 Ia 구심성 감각 신경을 자극하여 전달된 전위가 척수의 후각에서 단 연접을 통해 α -운동신경으로 전달되어 기록되는 복합 활동전위이다(Scaglioni 등, 2002; Ho와 Waite, 2002). H wave는 후 경골신경에 전기적 자극을 하여 유발시키며(Sakamoto 등, 2004), 척수를 통해 연결되는 단 연접반사와 빠른 건반사의 전기적 신호이다(Stephen 등, 2002). 이 반사는 중추를 통한 단 연접반사로서 말초의 감각신경과 운동신경에 기능적으로 중요한 정보를 제공한다(Kenneth 등, 1998). 즉, 단 연접으로 구성된 구심성 Ia섬유로부터 척수의 α -운동신경원까지의 주행 경로를 측정하는 것이다(Simonsen, 1999). H wave는 최대 하 전기자극에 의해 나타나며, 소연접과 연접 전 억제에 의해 반사반응이 조절된다(Stephen 등, 2002). 이는 구심성 Ia 근 방추와 운동신경원사이의 중추연접의 흥분성 변화이기 때문이다(Mary와 Brian, 2001). 반사운동조절의 전달과 통합장소로서 척수의 개재신경원들은 운동신경원 집단들의 수의적 운동명령을 보내고 받는다(McCrea, 1996).

근 수축에 의한 신경순응과 관련된 지금까지의

연구는 주로 표면 근전도와 H reflex의 변화를 분석하는 방법을 이용하였다(Lavoie 등, 1997; Stephen 등, 2002). 또한 상척수신경원의 반응을 측정하기 위해서 체성감각유발전위(somatosensory evoked potential)와 운동유발전위(motor evoked potential) 등을 이용하였다(Nozaki 등, 2003; Lentz와 Nielsen, 2002; Siemionow 등, 2004; Vrana 등, 2005). 최근 들어 상척수신경원의 영향이 반영되는 척수신경원의 활동전위인 V wave 측정방법이 소개되어 점차 관심이 높아지고 있다. V wave는 전기자극과 함께 운동피질의 활성화에 의한 자발적 활동전위가 반영된 복합반응이기 때문에 상척수신경원의 신경순응에 대한 수의적 반영으로 이해할 수 있는데 착안하여 수의적 수축에 의한 저항운동의 신경순응에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 전기생리학적 측정방법을 이용하여 수의적 수축에 의한 수축 전·후의 중추신경원의 활동

전위의 변화를 분석하여 수축력에 따른 신경순응의 전·후 차이를 알아보려고 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 수의적 근 수축에 의한 중추신경원의 활동전위 변화에 따른 순응현상을 알아보기 위한 것으로서 20대 건강한 남자 대학생 40명을 대상으로 하였다. 대상자들은 실험에 영향을 줄만한 신경계 및 근골격계 병력과 기능장애가 없는 자로 본 연구에 동의하여 자발적으로 참여하였다. 실험군은 최대 수의적 수축(maximum voluntary isometric contraction; MVIC) 수준에 따라 구분하였다(표 1).

표 1. 대상자의 일반적인 특성.

Group	Age(years)	Height(cm)	Weight(kg)
I (N=10) MVIC 25%	22.70±2.98	174.50±4.19	67.00±8.65
II (N=10) MVIC 50%	22.20±3.08	174.90±7.69	66.60±7.13
III(N=10) MVIC 75%	19.40±1.34	170.20±5.76	68.10±14.20
IV(N=10) MVIC 100%	22.10±3.21	171.90±4.93	61.80±15.11

모든 값은 평균±표준편차

2. 근수축유발

대상자는 실험대에 슬관절을 신전하고 앉은 자세에서 등받이를 고정하여 운동 시 밀려나지 않도록 하였으며, 최대 등척성 수축력 측정은 좌측 족관절이 중립위가 유지되게 하고 dynamometer (JLW instruments Inc., CS200 Dynamometer, USA)는 applicator를 족저면에 밀착시킨 후 실험

대의 고정장치에 고정시켰다.

대상자는 좌측 족관절의 저축굴곡근에서 최대 등척성 수축이 일어나도록 applicator를 최대한 밀도록 하여 최대 수의적 등척성 수축력을 측정하였다. 최대 수의적 등척성 수축력(MVIC)을 산출하여 이를 기준으로 25% MVIC, 50% MVIC, 75% MVIC, 100% MVIC 군으로 구분하고, 각 실험군에 설정된 MVIC로 등척성 운동을 실시하였

다.

운동방법은 MVIC를 측정할 때와 같은 조건에서 좌측 족관절의 저축굴곡근에 대한 등척성 운동을 수축시간 5초, 휴식시간 2초로 하여 20회 반복하였다(Stylianou 등, 2005; Mcloda 등, 2000).

3. 중추신경원 활동전위 측정

중추신경원 활동전위로 H wave와 V wave를 측정하기 위해 근전도기(Cadwell Laboratories Inc., CADWELL II Wedge, USA)를 사용하였다.

1) H reflex 측정

H wave의 측정을 위해 먼저 알코올(70%)로 피부를 깨끗이 닦고 습기가 없도록 건조시킨 후 전극을 부착하였다.

기록전극으로 활동전극은 슬와부 주름 중앙과 족관절 내과의 가장 근위부를 연결하는 선상을 양분하는 중심점, 기준전극은 아킬레스건, 접지전극은 활동전극에서 3 cm 위의 외측 비복근 위에 배치하였고, 기록전극은 1×1 cm 크기의 자가 부착식 일회용 전극(Medicotest A/S, Neuroline Disposable Neurology Electrodes 700 10-K, Malaysia)을 사용하였다.

기록조건은 주파수 여과범위(filter setting)가 10 Hz~10,000 Hz, 소인속도(sweep speed)는 15 msec/division, 감응도(gain)는 10 mV/division이었다. 대상자는 엎드려 누운 자세에서 슬관절을 약간 굴곡 시킨 후 족관절 밑에 받침대를 놓아 완전히 이완되도록 하고 족관절이 중립에 놓이게 하였다.

먼저 H wave를 확인하고 나서 강도를 서서히 조절하면서 Hmax와 Mmax를 구하고 두 개의 활동전위에 대한 최대 진폭비율로 H/Mmax비를 산출하였다. 전기자극은 후경골신경의 정중 슬와근 주름에서 이극전극을 사용하여 강도를 최대 하 자극(submaximal stimulation) 수준으로 하여 2초 간격으로 자극하였다.

2) V wave 측정

V wave의 측정을 위해 H wave 측정과 마찬가지로 먼저 피부를 알코올로 깨끗이 닦고 피부에 습기가 없도록 건조시킨 후 전극을 부착하였다. 기록전극의 배치와 기록조건은 H wave와 동일하며, 대상자는 엎드려 누운 자세에서 슬관절을 약간 굴곡 시킨 후 족관절 밑에 받침대를 놓아 완전히 이완되도록 한 후 족관절이 중립위치에 놓이게 하였다. 먼저 H reflex를 확인하고 나서 자극강도를 서서히 높여 H wave의 진폭이 최소화되고 M wave의 진폭이 최대화가 되는 지점에서 대상자로 하여금 족관절 저축굴곡근을 최대한 수축하도록 하여 V wave를 얻었다(Pensini와 Martin, 2004).

4. 자료분석

모든 통계자료는 Window SPSS 10.0 프로그램으로 분석하였다. 각 측정항목의 군 간 비교는 공분산분석(ANCOVA)을 이용하였으며, 사후분석으로 본페로니(Bonferroni) 검정을 실시하였다. 통계학적인 유의성을 검증하기 위해서 유의수준은 $\alpha=0.05$ 로 하였다.

III. 결 과

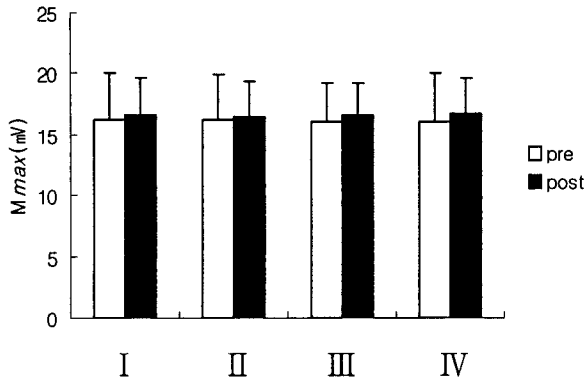
1. H reflex의 변화

1) Mmax의 변화

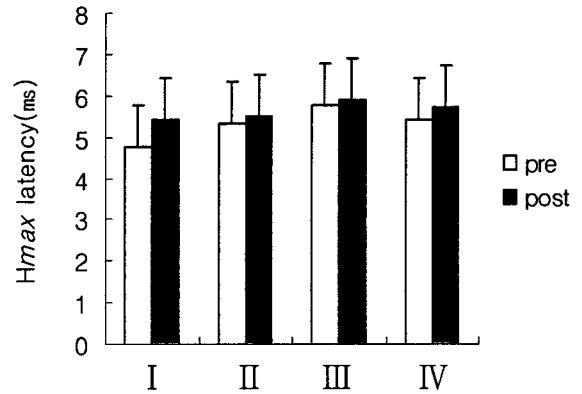
Mmax의 변화로 모든 군에서 수축 전에 비하여 수축 후에 약간 증가되었으나 군 간에 차이는 없었다(그림 1).

2) H/Mmax ratio의 변화

척수신경원 활동전위의 진폭으로 H/Mmax ratio의 변화는 100% MVIC로 수축한 IV군에 수축 전·후의 차이가 가장 컸고, 다음으로 75% MVIC로 수축한 III군순으로 나타났다. 실험군 간

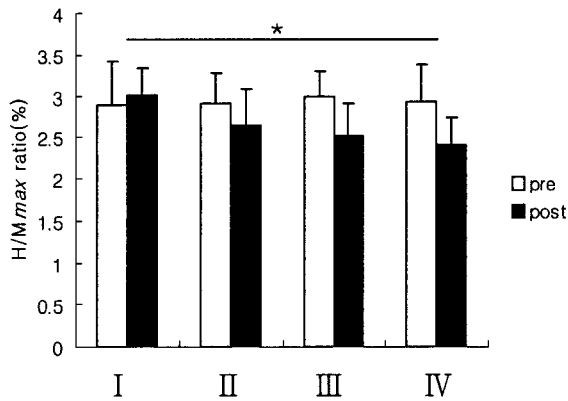


I; 25%MVIC, II; 50%MVIC, III; 75%MVIC, IV; 100%MVIC
 그림 1. 각 집단에서의 전·후의 Mmax 진폭 변화.



I; 25%MVIC, II; 50%MVIC, III; 75%MVIC, IV; 100%MVIC
 그림 3. 각 집단에서 H wave 잠복시의 전·후 변화.

의 차이를 알아보기 위하여 공분산분석을 한 결과에서 유의한 차이가 나타났으며($p < .01$), 사후검정에서 25% MVIC 수축군인 I 군과 IV 군이 차이가 있었다(그림 2).



I; 25%MVIC, II; 50%MVIC, III; 75%MVIC, IV; 100%MVIC.
 * 집단 사이의 현저한 차이
 그림 2. 각 집단에서 H/Mmax의 전·후 변화.

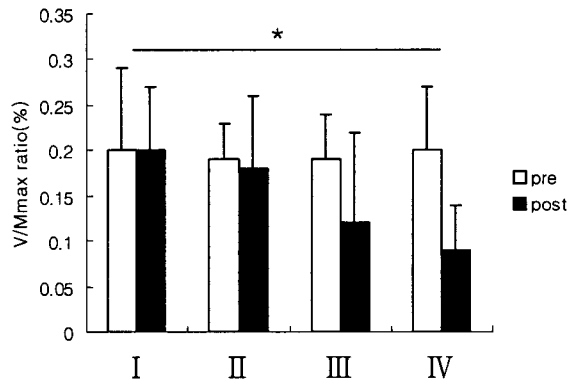
3) H wave 잠복시의 변화

H wave 잠복시의 변화로 모든 군에서 수축 전에 비하여 수축 후에 약간 증가되었으나 군 간에 차이는 없었다(그림 3).

2. V wave의 변화

1) V/Mmax ratio의 변화

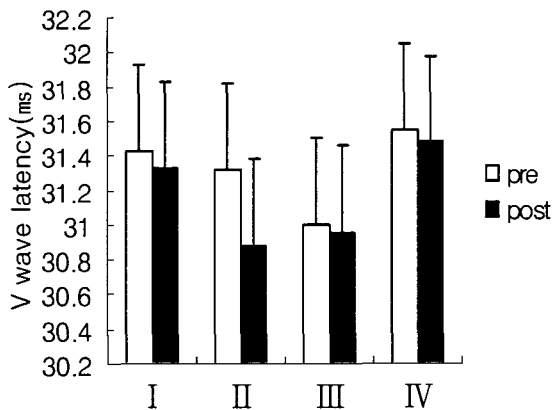
상척수 신경원의 영향에 의한 척수신경원 활동 전위의 진폭으로 V/Mmax ratio의 변화는 IV 군에서 수축 전·후의 차이가 가장 컸으며, III 군, 25% MVIC로 수축한 II 군 순으로 나타났다. 실험군 간의 차이를 알아보기 위하여 공분산분석을 한 결과에서 군 간 유의한 차이가 나타났으며($p < .05$), 사후검정에서 I 군과 IV 군이 차이가 있었다(그림 4).



I; 25%MVIC, II; 50%MVIC, III; 75%MVIC, IV; 100%MVIC
 * 집단 사이의 현저한 차이
 그림 4. 각 집단에서 V/Mmax 비율의 전·후 변화.

2) V wave 잠복시의 변화

V wave 잠복시의 변화로 모든 군에서 수축 전에 비하여 수축 후에 약간 감소되었으나 군 간에 차이는 없었다(그림 5).



I; 25%MVIC, II; 50%MVIC, III; 75%MVIC, IV; 100%MVIC
그림 5. 각 집단에서 V잠복기의 전·후 변화.

IV. 고 찰

본 연구는 수의적 근수축력에 따라 중추신경원의 활동전위의 변화를 비교하여 척수 및 상척수 수준에서 신경순응에 어떠한 영향을 주는지를 알아보고자 하였다. 대상자는 건강한 20대 성인 남성 80명이었으며, 실험군은 수의적 수축력에 따라 4개 실험군으로 구분하였다. 좌측 족관절 저축굴곡근에 대한 등척성 운동 전·후에 중추신경원의 활동전위를 측정하여 M_{max} , H/M_{max} , H wave 잠복시, V/M_{max} , V wave 잠복시를 분석하였다.

척수신경원 흥분성의 변화는 H wave의 진폭 변화를 측정하면 가능하며, H/M_{max} 비를 산출하면 가장 정확하다(Palmieri 등, 2004). H_{max} 는 척수신경원의 수를 간접적으로 표현하며 척수운동신경원의 전체적인 흥분성을 나타내고 지구력 훈련의 적합한 지표가 된다(Nicola 등, 2001).

Palmier 등(2004)은 전류강도의 점진적인 증가로 H wave를 구하고 6번에 걸쳐 측정된 H wave 중에서 가장 진폭값이 큰 것으로 선택하여 H_{max} 라 하였다. 본 연구에서 말초신경-근 구간의 흥분성을 반영하는 M_{max} 의 전·후 변화가 모든 실험군에서 크지 않아 수의적 수축력에 따른 신경근연접부의 흥분성 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 운동 전·후 H/M_{max} ratio의 변화는 100% MVIC에서 가장 크게 나타났으며, 25% MVIC와 유의한 차이가 있어 수축력에 따라 척수신경원의 흥분성이 차이가 있다는 것을 알 수 있었다. Tsuboi 등(1995)도 수의적 운동이나 전기자극에 의한 근수축이 모두 H wave의 진폭을 감소시키며, 수축력과 상관성이 있다고 하여 본 연구 비슷한 결과를 보고하였다.

이러한 결과는 상척수신경원으로부터 개재신경원의 Ia억제가 수의적 움직임에 의해 영향을 받기 때문으로(Perez 등, 2003; Romaniello 등, 2002; Stein, 1995; Tsuboi 등, 1995), 수축력에 따라 차이가 나타난 것도 수의적 운동이 개재신경원 Ia억제에 영향을 더 주기 때문으로 볼 수 있는데, 근육에 기원하는 Ia 구심성 감각 신경이 척수의 후각에서 단 연접을 통해 운동신경원으로 전달되는 과정에서 감소되는 것으로 본다. 그러나 신경전도와 관련된 H wave 잠복시는 전·후의 변화에 큰 차이가 없으며, 수축력에 다른 차이도 유의하지 않아 수의적 수축에 의한 척수신경원의 흥분성 변화는 활동전위의 진폭변화와 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다.

상척수신경원의 흥분성변화 연구는 V wave의 진폭 변화를 측정하면 가능하며, V/M_{max} ratio를 산출하여 분석하는 방법이 가장 정확하다. V/M_{max} ratio는 하행성 운동주행로의 활성도에 따른 α -운동신경원의 흥분빈도와 양을 나타내는 정확한 지표라 할 수 있다(Aagaard 등, 2002; Pensini와 Martin, 2004). 이는 전기자극 강도가 증가하여 H wave가 소멸되고 M_{max} 가 출현할 때 근육을 최대로 수축시켜 얻어내는 상척수신경원의 활성도가 반영된 활동전위로 몇 차례에 걸쳐 V_{max} 를 측정하고 그중에서 가장 진폭값이 큰

것으로 선택하여 기록한다. 본 연구에서 운동 전·후 V/Mmax ratio의 변화는 수의적 수축력을 최대로 하였을 때 가장 크게 나타났으며, 수의적 수축은 수축력이 증가할 수록 상척수신경원의 활동전위의 변화에 크게 영향을 주는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 V wave 반응이 하행성 운동주행로의 활성도에 의존하기 때문에 수의적 수축이 연접 전 억제에 의한 영향을 더 받는다 (Mary와 Brian, 2001; Masaki 등, 2002; Stephen 등, 2002). 따라서 수의적 수축력이 증가할수록 척수신경원의 순응과정에 상척수신경원의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다. 그러나 상척수신경원의 영향력이 반영된 상태에서의 신경전도를 의미하는 V wave 잠복시도 H wave 잠복시와 마찬가지로 크게 차이가 없는 것으로 나타나 중추운동주행에 의한 척수신경원의 흥분성 변화에서도 활동전위의 진폭변화와 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다.

V. 결론

본 연구는 수의적 수축력에 따라 중추신경원의 활동전위 정도와 차이를 비교하여 근 수축력이 신경순응에 어떠한 영향을 주는지 알아보고자 하였다.

H/Mmax ratio는 최대 수의적 수축력에서 변화가 가장 컸으며, 실험군 간의 비교에서 유의한 차이가 있었다(p<0.01). 최소 수의적 등척성 수축군인 I군과 최대 수의적 등척성 수축군이 IV군 사이에서 차이가 있었다. V/Mmax ratio도 수의적 수축력을 최대로 하였을 때 변화가 가장 컸으며, 실험군 간의 비교에서 유의한 차이가 있었다(p<0.05). 최소 수의적 등척성 수축군인 I군과 최대 수의적 등척성 수축군인 IV군 사이에서 차이가 있었다.

결론적으로 수의적 수축력과 척수신경원 및 상척수신경원의 활동전위 진폭의 변화는 밀접한 관계를 가지며, 짧은 시간동안의 운동에서는 수축력이 증가할수록 중추신경원의 흥분성 크게 감

소하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL et al. Neural adaptation to resistance training: changes in evoked V-wave and H-reflex responses. *J Appl Physiol.* 2002;92(6):2309-18.
- Aagaard P, Andersen JL, Dyhre-Poulsen P et al. A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture. *J Physiol.* 2001;534(Pt. 2):613-23.
- Avela J, Kyrolainen H, Komi PV. Altered reflex sensitivity after repeated and prolonged passive muscle stretching. *J Appl Physiol.* 1999;86(4):1283-91.
- Bishop MD, N pathare. Consideration for the Use of Surface Electromyography. *J Korean Acad Univ Trained Phys Ther* 2004, 11(4):61-70.
- Callaghan MJ, Oldham JA. Electric muscle stimulation of the quadriceps in the treatment of patellofemoral pain. *Arch Phys Med Rehabil.* 2004;85(6):956-62.
- Cauraugh JH, Summers JJ. Neural plasticity and bilateral movements: A rehabilitation approach for chronic stroke. *Prog Neurobiol.* 2005;75(5):309-20.
- Cliffer KD, Tonra JR, Carson SR et al. Consistent repeated M-and H-wave recording in the hind limb of rats. *Muscle Nerve.* 1998;21(11):1405-13.
- Courtney C, Rine RM, Kroll P. Central somatosensory changes and altered muscle synergies in subjects with anterior cruciate ligament deficiency. *Gait Posture.* 2005;22(1):69-74.
- Dongren Y, Tao L, Fengsheng H. Electroneurophysiological studies in rats of acute dimethoate. *Toxicol Lett.* 1999;107(1-3):249-54.
- Duchateau J, Balestra C, Carpentier A et al. Reflex regulation during sustained and intermittent submaximal contractions in humans. *J physiol.* 2002;541(Pt 3):959-67.
- Enoka RM. Neural adaptations with chronic physical activity. *J Biomech.* 1997;30(5):447-55.
- Ferrante S, Pedrocchi A, Ianno M et al. Functional electrical stimulation controlled by artificial neural networks: pilot experiments with simple move-

- ments are promising for rehabilitation applications. *Funct Neurol.* 2004;19(4):243-52.
- Fumoto M, Komiyama T, Nishihira Y. Soleus H-reflex dynamics during fast plantarflexion in humans. *J Electromyogr Kinesiol.* 2002;12(5):367-74.
- Garrett M, Caulfield B. Increased H(max):M(max) ratio in community walkers poststroke without increase in ankle plantarflexion during walking. *Arch Phys Med Rehabil.* 2001;82(8):1066-72.
- Gazzoni M, Farina D, Merletti R. A new method for the extraction and classification of single motor unit action potentials from surface EMG signals. *J Neurosci Methods.* 2004;136(2):165-77.
- Glanz M, Klawansky S, Stason W et al. Functional electrostimulation in poststroke rehabilitation: A meta-analysis of the randomized controlled trials. *Arch Phys Med Rehabil.* 1996;77(6):549-53.
- Holtermann A, Roeleveld K, Karlsson JS. Inhomogeneities in muscle activation reveal motor unit recruitment. *J Electromyogr Kinesiol.* 2005;15(2):131-7.
- Hopkins JT, Ingersoll CD, Edwards JE et al. Changes in soleus motoneuron pool excitability after artificial knee joint effusion. *Arch Phys Med Rehabil.* 2000;81(9):1199-203.
- Ho SM, Waite PM. Effects of different anesthetics on the paired-pulse depression of the H reflex in adult rat. *Exp Neurol.* 2002;177(2):494-502.
- Kenneth D. Cliffer, James R. Tonra, Susan R. Carson, Ba et al. Consistent Repeated M-and H-wave recording in the hind limb of Rats. *Muscle Nerve* 1998;21: 1405-1413.
- Lentz M, Nielsen JF. Post-exercise facilitation and depression of M wave and motor evoked potentials in healthy subjects. *Clinical Neurophysiology* 2002;113:1092-1098.
- Lambertz D, Goubel F, Kaspranski R et al. Influence of long-term spaceflight on neuromechanical properties of muscles in humans. *J Appl Physiol.* 2003;94(2):490-8.
- Lavoie BA, Devanne H, Capaday C. Differential control of reciprocal inhibition during walking versus postural and voluntary motor tasks in humans. *J Neurophysiol.* 1997;78(1):429-38.
- Lentz M, Nielsen JF. Post-exercise facilitation and depression of M wave and motor evoked potentials in healthy subjects. *Clin Neurophysiol.* 2002; 113(7):1092-8.
- Levin O, Mizrahi J, Gornish M et al. Muscle strength and geometrical changes in a paralysed muscle following FES. *Hong Kong Physiotherapy Journal* 2000;18(1):3-11.
- Maffiuletti NA, Martin A, Babault N et al. Electrical and mechanical H(max)-to-M(max) ratio in power- and endurance-trained athletes. *J Appl Physiol.* 2001;90(1):3-9.
- Maria B, Elena P. Increase in the releasable pool of synaptic vesicle underlies facilitation. *Neurocomputing.* 2004;58-60:496-76.
- Mark DB, Neeti P. Consideration for the Use of Surface Electromyography. *KAUTPT* 2004, 11(4):61-70.
- Mary Garrett and Brian Caulfield : Increased Hmax: Mmax ratio in community walkers poststroke without increase in ankle plantarflexion during walking. *Arch Phys Med Rehabil* 2001;82:1066-72.
- Masaki F, Tomoyoshi K, Yoshiaki N. Soleus H-reflex dynamics during fast plantarflexion in human. *J Electromyogr Kinesiol.* 2002;12:367-74.
- McCrea DA. Supraspinal and segmental interactions. *Can J Physiol Pharmacol.* 1996;74(4):513-7.
- McLoda TA, Carmack JA. Optimal burst duration during a facilitated quadriceps femoris contraction. *J Athl Train.* 2000;35(2):145-150.
- Naomi CC, William KD. Surface EMG as a fatigue indicator during FES-induced isometric muscle contractions. *J Electromyogr Kinesiol.* 1997;7:27-37.
- Nicola AM, Alain M, Nicolas B et al. Electrical and mechanical Hmax-to-Mmax ratio in power- and eduranced-trained athletes. *J appl Physiol.* 2001; 90:3-9.
- Nozaki D, Kawashima N, Aramaki Y et al. Sustained muscle contractions maintained by autonomous neuronal activity within the human spinal cord. *J Neurophysiol.* 2003;90(4):2090-7.
- Ollivier K, Portero P, Maisetti O et al. Repeatability of surface EMG parameters at various isometric contraction levels and during fatigue using bipolar and laplacian electrode configurations. *J Electromyogr Kinesiol.* 2005;15(5):466-73.
- Palmieri RM, Ingersoll CD, Hoffman MA. The Hoffmann reflex: Methodologic considerations and applications for use in sports medicine and athletic training research. *J Athl Train.* 2004;

- 39(3):268-77.
- Pavesi G, Cattaneo L, Tinchelli S. Masseteric repetitive nerve stimulation in the diagnosis of myasthenia gravis. *Clin Neurophysiol.* 2001;112(6):1064-9.
- Pensini M and Martin A. Effect of voluntary contraction intensity on the H-reflex and V-wave response. *Neurosci Lett.* 2004;367(3):369-74.
- Perez MA, Field-Fote EC, Floeter MK. Patterned sensory stimulation induces plasticity in reciprocal Ia inhibition in humans. *J Neurosci.* 2003;23(6):2014-8.
- Palmieri RM, Ingersoll CD, Hoffman MA. The hoffmann reflex: Methodologic considerations and applications for use in sports medicine and athletic training research. *Journal of Athletic Trainers* 2004;39(3):248-77.
- Romaniello A, Valls-Sole J, Iannetti GD et al. Nociceptive quality of the laser-evoked blink reflex in humans. *J Neurophysiol.* 2002;87(3):1386-94.
- Sakamoto M, Nakajima T, Wasaka T et al. Load- and cadence-dependent modulation of somatosensory evoked potentials and soleus H-reflexes during active leg pedaling in humans. *Brain Res.* 2004;1029(2):272-85.
- Scaglioni G, Ferri A, Minetti A E et al. Plantar flexor activation capacity and H reflex in older adults: adaptations to strength training. *J Appl Physiol* 2002;92:2292-302.
- Stein RB. Presynaptic inhibition in humans. *Prog Neurobiol.* 1995;47(6):533-44.
- Stephen G, Ferri A, Minetti AE et al. Plantar flexor activation capacity and H reflex in older adults: adaptations to strength training. *J Appl Physiol.* 2002;92(6):2292-302.
- Schillings ML, Kalkman JS, van der Werf SP et al. Diminished central activation during maximal voluntary contraction in chronic fatigue syndrome. *Clin Neurophysiol.* 2004;115(11):2518-24.
- Siemionow V, Fang Y, Calabrese L et al. Alter central nervous system signal during motor performance in chronic fatigue syndrome. *Clin Neurophysiol.* 2004;115(10):2372-81.
- Simonsen EB, Dyhre-Poulsen P. Amplitude of the human soleus H reflex during walking and running. *J Physiol.* 1999;515(Pt 3):929-39.
- Stylianou AP, Luchies CW, Lerner DE et al. The use of correlation integrals in the study of localized muscle fatigue of elbow flexors during maximal efforts. *J Electromyogr Kinesiol.* 2005;15(5):437-43.
- Thomas CK, del Valle A. The role of motor unit rate modulation versus recruitment in repeated sub-maximal voluntary contractions performed by control and spinal cord injured subjects. *J Electromyogr Kinesiol.* 2001;11(3):217-29.
- Tsuboi T, Sato T, Egawa K et al. The effect of fatigue caused by electrical induction or voluntary contraction on Ia inhibition in human soleus muscle. *Neurosci Lett.* 1995;197(1):72-4.
- Vollestad NK. Measurement of human muscle fatigue. *J Neurosci Methods.* 1997;74(2):219-27.
- Vrana J, Polacek H, Stancak A. Somatosensory-evoked potentials are influenced differently by isometric muscle contraction of stimulated and non-stimulated hand in humans. *Neurosci Lett.* 2005;386(3):170-5.
- Ward AR, Shkuratova N. Russian electrical stimulation: The early experiments. *Phys Ther.* 2002;82(10):1019-30.