

신경근전기자극에 의한 중추신경원의 순응효과

이 정 우

(효인병원 물리치료실)

서 삼 기

(서남대학교 대학원 물리치료학과)

윤 세 원

(진주국제대학교 물리치료학과)

김 용 역·김 태 열

(동신대학교 물리치료학과)

The Effect of Central Neural Adaptation by Neuromuscular Electrical Stimulation

Lee Jeong-Woo, P.T., Ph.D.

(Dept. of Physical Therapy, Hyoin Hospital)

Seo Sam-Ki, P.T., M.P.T.

(Dept. of Physical Therapy, Graduate School of Seonam University)

Yoon Se-Won, P.T., Ph.D.

(Dept. of Physical Therapy, Jinju International University)

Kim Yong-Eok, P.T., Ph.D.·Kim Tae-Youl, P.T., Ph.D.

(Dept. of Physical Therapy, Dongshin University)

ABSTRACT

The purpose of this study was to study for the change of neural adaptation by muscle contraction force when neuromuscular electrical stimulation(NMES) was applied. Sixteen subjects(8 male, 8 female) without neuromuscular disease volunteered to participate in the study. All subjects were divided into two subgroups: control(no electrical stimulation) group, NMES(50% maximal voluntary isometric contraction) group. NMES training program was performed in the calf muscle over three times a week for 12 weeks. Before and after experiment MVIC of ankle plantar flexor was measured by use of dynamometer. H-reflex and V-wave in tibial nerve were measured. The following results were obtained;

MVIC and V/Mmax ratio were significantly increased in the electrical stimulation groups. However, H/Mmax ratio was not changed. It was closely relationship between MVIC and V/Mmax ratio. In this study, the effect of neural adaptation of central neural adaptation was found in this study. Accordingly, NMES means not only a change of muscle fiber and skeletal muscle volume but also a effect of neural adaptation of central neural drive. Also, it was found that there was closely relationship between MVIC and neural adaptation of central neural drive by NMES.

Key Words : NMES, H-reflex, V-wave, Neural adaptation

I. 서론

신경근전기자극(neuromuscular electrical stimulation)은 임상에서 근력향상을 위한 방법으로 널리 적용되고 있다. Kraemer 등(1996)은 첫 8주 훈련에서 관찰된 힘 산출(force production) 증가의 주된 원인이 신경순응 때문이며, 그 후에 관찰된 힘 산출 증가의 주된 원인은 근 횡단면적(cross section area; CSA)의 증가 때문이라고 보고

하였다. 근력강화훈련을 하는 동안 근 비대(muscle hypertrophy)는 I형 근섬유(muscle fiber)보다 II형 근섬유에서 더욱 선택적으로 일어나는데(Hakkinen 등, 2001), 골격근(skeletal muscle)에서 훈련으로 야기된 순응(adaption)은 운동의 형태와 기간, 주기, 강도에 의존한다(Adams 등, 1999). 또한 훈련에 의해서 근 횡단면적, 힘 산출 모두 증가되었을 때, 힘이 근육 횡단면적 보다 더욱 크게 증가하는 것으로 알려져 있다(Harridge 등, 1999; Hakkinen 등, 1998;

Brown 등, 1990; Fiatarone 등, 1990). 이것은 또한 골격근의 횡단면적 증가뿐만 아니라 훈련과 관련된 운동단위(motor unit)의 발화율(firing rate)과 동원(recruitment)에서의 변화에 의한 신경순응(neural adaptation)도 함께 일어났기 때문이다(Hakkinen 등, 1998). 최대 수축성 근력의 중요한 결정요소는 근육 크기와 종류 및 신경 지배이며, 최대 수축력의 증가는 근육 횡단 면적이나 부피의 증가로만 설명될 수는 없으며, 오히려 근육 크기의 증가 없이도 근섬유에 대한 신경주차가 최대 수축력을 증가시키는데 기여한다고 알려져 있다(Aagaard 등, 2002). Aagaard 등(2002)은 14주간 점진적 저항운동 후 H반사와 V파 반응이 모두 증가하였다고 보고하였는데, 운동신경원 산출(output)에서의 증가가 상척수(supraspinal)와 척수 순응기전(spinal adaptation mechanism) 모두 포함되어 있다고 하였다. Lake(1992)는 신경근전기자극에 의한 근력증가는 두 가지 기전에 의해서 일어난다고 하였는데, 고강도 부하와 적은 수의 반복에 따르는 근력강화 프로토콜을 필요로 하는, 수의적 운동에 의한 저항훈련에 의해 야기된 근력증가와 비슷한 방식의 기전과, II형 근섬유의 증가와 함께 수의적 동원 순서의 역전으로부터 야기되는 기전으로 보고하였다. 또한 신경근전기자극은 중추신경계 손상이 있는 환자에게 운동회복 증진을 위한 임상적 설정(clinical setting)으로도 사용되어지고 있으며(Kimberly 등, 2004), 장애가 있는 근육과 없는 근육 모두에 대한 신경근 기능의 향상은 주로 신경순

응으로 기인한 것으로 여겨져 오고 있다(Gondin 등, 2006b). 또한 전기자극은 전기자극을 적용하는 해당 감각피질의 수용영역(receptive field)의 크기를 확대시킨다는 것이 동물실험에서 밝혀졌으며(Recanzone 등, 1990), Kaelin-Lang(2002)은 피부 감각신경을 2시간동안 반복자극한 결과 해당부위를 지배하는 근육에서 운동유발전위가 증가하였다고 보고하여, 이러한 현상에 대뇌감각피질이 관여하는 것으로 알려졌다(Kaas, 1983). 그러나 신경근전기자극에 의한 신경순응이 척수 운동신경원 흥분성 및 원심성 신경주차(efferent neural drive)에서 모두 일어나는지에 대해서는 아직 확실하게 알려지지 않았다. 따라서 본 연구의 목적은 신경근전기자극을 통한 신경근 훈련이 척수 운동신경원 흥분성 및 원심성 신경주차의 신경순응에 미치는 영향을 연구하는 것이다.

II. 연구방법

1. 대상자

대상자는 신경근계질환이 없는 정상성인 16명을 대상으로 하였다(Table 1). 대상자의 조건으로는 최근 6개월 이내에 체계적인 운동을 하지 않았으며, 약물을 복용하지 않은 사람으로 한정하여 본 연구에 대한 충분한 설명을 한 후 실험을 실시하였다.

Table 1. Characteristics of the subjects

	Control(n=8)	NMES(n=8)	Total(n=16)
Age(years)	22.50±1.69	22.50± 1.85	22.50± 1.71
Weight(kg)	69.38±8.44	52.81± 5.17	58.03±11.35
Height(cm)	167.38±9.13	172.13±10.11	169.75± 9.62

All value are showed mean±SD.

2. 실험 방법

1) 최대 수의적 등척성 수축력 측정

대상자를 측정 테이블에 다리를 뻗고 앉게 한 후 측정하였다. 대상자의 다리 무릎 아래에 받침대를 놓은 후 발바닥에 dynamometer를 대고 발목 저축굴곡근의 최대 수의적 등척성 수축을 하도록 하였다. dynamometer는 테이블에 단단히 고정시킨 틀에 연결시켜 정확한 측정이 되도록 하였다. 측정은 3번 한 후에 이것의 평균값으로 결정하였는데, 각 측정 사이에는 충분한 휴식을 주어 근피로에 의한 근력저하를 예방하였다.

2) 전기자극

최대 수의적 등척성 수축력 측정할 때의 자세와 동일한 자세에서 전기자극을 실시하였다. 전기자극기는 2,500 Hz의 러시안 전류가 발생하는 전기자극기(Enraf Nonius, Myomed 932, Netherlands)로, 주파수 34 bps, 경사증감(ramp up and down) 시간 각각 1초, 유지시간 8초로 하였으며, 통전시간 10초, 단전시간 40초, 자극시간 15분으로 구성하였다. 전극은 6×8 cm² 크기의 탄소-실

리콘 고무전극을 사용하였으며, 좌측 비복근 위에 이극배치(bipolar placement)로 부착하였다. 자극 강도는 동력계로 50% 최대 수의적 등척성 수축을 유발시키는 전류강도를 측정하여 적용하였고, 실험 4주 및 8주 후에 재 측정하여 적용하였다. 전기자극은 1주에 3회, 총 12주 간 적용하였으며, 모든 측정은 3번 측정하여 얻은 평균값을 사용하였고, 반복 측정할 때는 근 피로를 방지하기 위해서 충분한 휴식을 한 후에 실시하였다.

3) 운동신경원 활동전위 측정

H반사와 V파를 측정하기 위하여 진단근전도(Cadwell Laboratories Inc., Sierra II, USA)와 일회용 접착식 Ag/AgCl 전극(Tyco Healthcare, USA)을 사용하였다. 측정된 모든 활동전위의 진폭은 정점과 정점(peak to peak) 사이로 정하였다.

(1) H반사 측정

척수운동신경원의 흥분성을 반영하는 H반사는 Johnson방법(Braddom & Johnson, 1974)에 의거하여 좌측 후경골신경을 정중슬와근 주름에서 이극표면전극을 사용하였

으며, 강도를 최대하 자극(submaximal stimulation) 수준으로 하여 2초 간격으로 자극하여 측정하였다. 소인속도(sweep)는 1회당 10 msec, 기록 감응도(gain)는 100~1,000 $\mu\text{V}/\text{div}$ 의 범위에서 반응의 고도에 따라 조절했다. 전극은 정중 슬와근 주름과 내측과의 가장 근위부를 연결하는 선상을 양분하는 중심점에 활동전극, 활동전극 3 cm 위의 외측 비복근 위에 기저전극, 아킬레스건 위에 기준전극을 배치하였다. 대상자를 엎드려 누운 자세에서 무릎을 약간 굴곡 시킨 후 발목 밑에 받침대를 놓아 완전히 이완되도록 한 후 발목이 중립위치에 놓이게 하였다. 수집된 신호를 분석하여 H잠복시와 H/Mmax비를 분석하였다.

(2) V파 반응 측정

운동피질 신경원의 활성도가 반영되는 활동전위인 V파의 측정자세 및 전극배치는 H반사의 측정과 동일하였다. V파는 H반사의 측정 시 H반사가 사라지고 M파의 진폭이 최대가 될 때, 자극강도를 유지한 상태에서 대상자가 발목을 저축굴곡 방향으로 최대 수의적 수축을 할 때 자극하여 얻어진다 (Pensini와 Martin, 2004). 수집된 신호를 분석하여 V/Mmax비를 분석하였다.

3. 통계방법

본 연구의 모든 통계는 SPSS/PC12.0을 이용하여 분석하였다. 각 측정항목의 정규분포 유·무를 Kolmogrov-Smirnov 검정을 실시하였다. 분석 결과 정규분포가 인정되

어 군 간 최대 수의적 등척성 수축력 및 운동신경원 활동전위의 변화 차이에 대한 분석은 공분산분석(ANCOVA)을 실시하였다. 각 측정항목 간 상관관계는 피어슨 상관분석(Pearson's correlation)을 실시하였으며, 통계학적 유의성을 검증하기 위해 유의 수준 α 는 0.05로 설정하였다.

III. 결과

1. 최대 수의적 등척성 수축력의 변화

최대 수의적 등척성 수축력의 변화를 공분산분석한 결과 군 간 유의한 차이가 나타났다($p < 0.01$)(Fig. 1). 대조군은 실험 전 55.09 ± 21.56 kg에서 실험 후 55.05 ± 21.38 kg이었으며, 신경근전기자극군은 실험 전 55.43 ± 26.21 kg에서 실험 후 73.41 ± 28.20 kg으로 약 32% 증가하였다.

2. 운동신경원 활동전위의 변화

1) H반사 잠복시의 변화

H반사 잠복시의 변화를 공분산분석한 결과 군 간 차이는 없었다(Fig 2). 대조군은 실험 전 28.27 ± 29.59 ms에서 실험 후 29.59 ± 2.58 ms였으며, 신경근전기자극군은 실험 전 29.97 ± 2.51 ms에서 실험 후 29.04 ± 2.19 ms이었다.

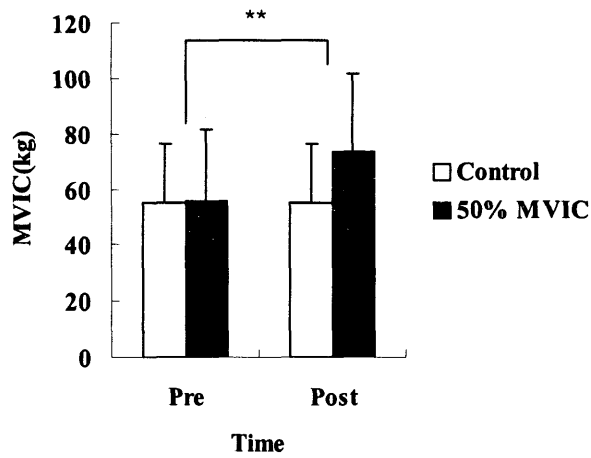


Fig. 1. Comparison of MVIC before and after experiment between groups. Values are mean±S.D. Significantly different between groups. ** p<0.01

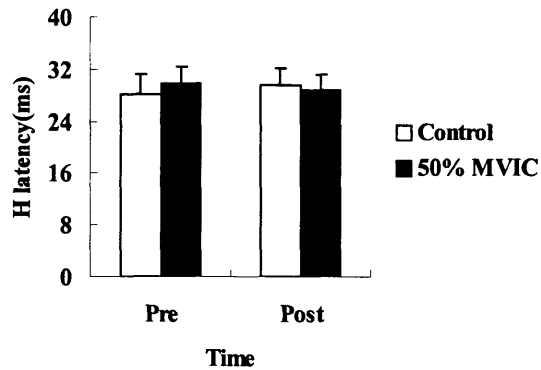


Fig. 2. Comparison of H latency before and after experiment between groups. Values are mean±S.D. No significantly different between groups.

2) H/Mmax 비의 변화

H/Mmax 비의 변화를 공분산분석한 결과 군 간 차이는 없었다(Fig. 3). 대조군은

실험 전 $0.44 \pm 0.14\%$ 에서 실험 후 $0.44 \pm 0.16\%$ 였으며, 신경근전기자극군은 실험 전 $0.39 \pm 0.08\%$ 에서 실험 후 $0.36 \pm 0.08\%$ 였다.

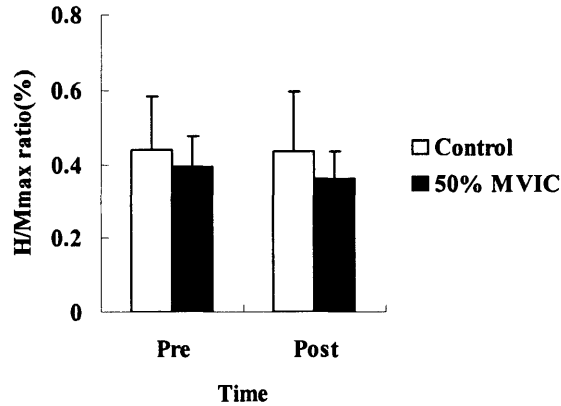


Fig. 3. Comparison of H/Mmax ratio before and after experiment between groups. Values are mean±S.D. No significantly different between groups.

3) V/Mmax 비의 변화

V/Mmax 비의 변화를 공분산분석한 결과 군 간 유의한 차이가 나타났다 ($p < 0.01$)(Fig. 4). 대조군은 실험 전

$0.24 \pm 0.09\%$ 에서 실험 후 $0.19 \pm 0.05\%$ 였으며, 신경근전기자극군은 실험 전 $0.23 \pm 0.06\%$ 에서 실험 후 $0.34 \pm 0.13\%$ 로 약 55% 증가되었다.

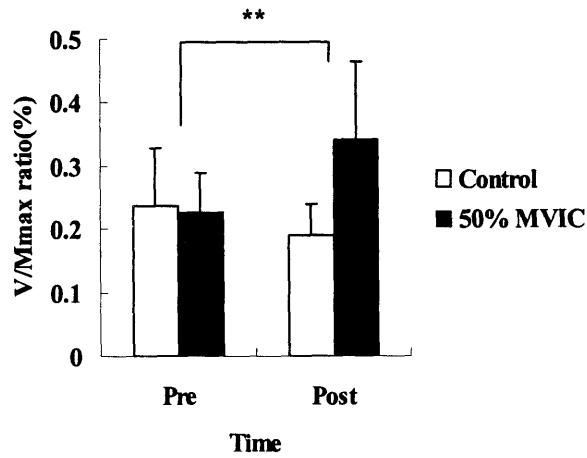


Fig. 4. Comparison of V/Mmax ratio before and after experiment between groups. Values are mean±S.D. Significantly different between groups. **p<0.01

3. 각 측정항목 간 상관관계

각 측정항목 간 상관관계는 다음과 같다 (Table 2). 최대 수의적 등척성 수축력과

V/Mmax 비 사이에서만 유의한 양의 상관 관계를 나타내었다(p<0.01).

최대 수의적 등척성 수축력과 H잠복시 및 H/Mmax 비와는 상관관계가 없었다.

Table 2. The relationship between measure items

	MVIC	H latency	H/Mmax ratio	V/Mmax ratio
MVIC	-	-0.693	0.467	0.874**
H latency		-	-0.259	-0.521
H/Mmax ratio			-	0.620
V/Mmax ratio				-

Pearson correlation coefficients r and p values.

**P<0.01

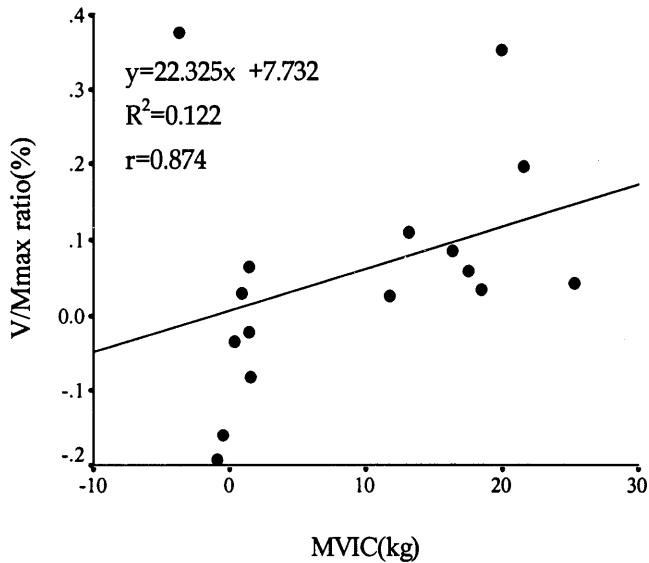


Fig. 5. Relationships between MVIC and V/Mmax ratio in the NMES group.

IV. 고찰

신경근전기자극은 중추신경계 손상이 있는 환자에게는 운동회복 증진을 위해서, 정상인에게는 근력증진을 위해서 널리 사용되고 있다. 장애가 있는 근육과 없는 근육 모두에 대한 신경근 기능의 향상은 주로 신경순응으로 기인한 것으로 여겨져 오고 있다 (Gondin 등, 2006b). 그러나 근력증가 후 신경근 기능의 변화에 대한 많은 연구들이 진행되어 오고 있지만, 이전의 연구들은 아직 전기자극에 의한 신경순응을 명확히 설명하지 못하였으며, 더구나 이에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 이 연구는 정상성

인 16명을 대상으로, 각각 8명씩 전기자극을 하지 않은 대조군과 신경근전기자극 군으로 나누어 배치하고, 주 3회로 총 12주 동안 전기자극을 실시하여 신경근전기자극이 신경순응에 미치는 효과를 알아보기 위하여 연구를 실시하였다.

이 연구에서 최대 수의적 등척성 수축력의 변화는 군 간 유의한 차이를 나타내었다. 신경근전기자극 군에서 최대 수의적 등척성 수축력은 약 32% 증가되었다.

이러한 연구결과와 비슷한 연구로, Gondin 등(2006b)은 저축굴곡근에 5주간 60% 최대 수의적 등척성 수축 수준으로 신경근전기자극 후 근력이 22% 향상되었다고 보고하여, 자극기간과 전기자극에 의한 근

수축력 수준에 차이는 있었지만, 대략 50% 최대 수의적 등척성 수축 이상에서 근력증가가 현저히 일어나는 것으로 생각된다.

운동신경원 활동전위에서 H/Mmax비는 전기자극군 모두에서 약간 감소한 경향이 나타났으나 군 간 유의한 차이가 나타나지 않았고, V/Mmax비에서만 대조군에 비해 신경근전기자극군이 유의한 증가를 나타내었다. H반사의 잠복시는 군 간 차이가 없었다.

이 연구의 결과와 비슷한 경향을 보인 연구로, Gondin 등(2006b)은 저축굴곡근에 5주간 60% 최대 수의적 등척성 수축 수준으로 신경근전기자극 훈련을 한 실험에서, V/Mmax비는 유의하게 증가하였던 반면에 H/Mmax비는 약간 낮아지는 경향을 있었으나, 통계적으로는 유의하지 않았다고 보고하면서, 이것은 신경근전기자극 훈련 프로그램이 Ia 근방추 구심성 유입과 α 운동신경원 저장고 사이에 전도의 효용성을 변화시키지는 못하지만, V파 진폭에서의 변화가 척수나 상척수 요소 때문인지 혹은 둘다의 요소 때문인지 결정하기는 어려우나, 신경근전기자극에 의한 신경순응은 비교적 오래 지속된다고 주장하였다. Butler 등(1993)도 H반사와 V파 모두 최대 수의적 수축의 0에서 50% 사이의 범위에서 발목 저축굴곡근 우력(torque)과 선형적인 관련이 발견되었다고 보고하였으나, Fumoto 등(2002)은 H반사와 힘 수준과는 거의 관련이 없다고 설명하였다.

Aagaard 등(2002)은 이 연구와 다른 결과를 보고 하였는데 정상성인 남자를 대상으로 한 실험에서 14주 동안 하지에 저항훈련

을 한 결과, H반사 진폭과 V파의 반사 진폭 모두 유의하게 증가되었다고 하였는데, H반사는 주로 작은 운동신경원의 저장고에 의존하는 반면에 V파는 작고 큰 운동저장고 모두를 동원한다고 하여, V파 진폭의 증가는 비록 연접 전 억제제의 감소가 기여한다 할지라도 하행성 피질 척수로에서 신경주로의 향상을 의미하며, H반사 진폭의 증가는 하행성 피질 척수로에서 신경주로의 향상과 운동신경원 흥분성의 상승과 훈련으로 발생하는 시냅스 전 억제에서의 변화 때문이라고 주장하였다. 따라서 수의적 수축에 의한 훈련과 전기자극에 의한 훈련은 원심성 신경주로에 미치는 영향은 같으나 척수운동신경원 흥분성에 미치는 영향은 서로 다른 것으로 나타났다.

전기자극에 대한 중추효과를 보고한 연구로, Ridding 등(2000)은 고주파 감각 자극이 피질 연결성을 변화시킬 수 있는 능력을 가지고 있다고 주장하였다. 또한 Rushton(2003)은 기능적 전기자극이 마비된 움직임에 대한 감각효과의 자극과 피질 재구성(cortical reorganisation)을 촉진하기 위한 적절한 감각적 환경을 가능하게 할 수 있다고 하였으며, 이러한 증거로 Chae와 Yu(1999)는 편마비환자에게 전기자극에 대한 반응에서 피질 가소성이 가능한 것 같다고 보고하였다. 따라서 이러한 선행연구들과 이 연구의 결과로 볼 때, 전기자극에 의한 신경근 훈련은 척수운동신경원 흥분성에 대한 영향은 없으나, 피질 가소성 등에 의한 원심성 신경주로는 영향을 주는 것으로 생각된다.

각 측정항목 간 상관관계를 분석한 결과

최대 수의적 등척성 수축력과 V/Mmax 비에서 만 유의한 양의 상관관계를 나타내었다.

이상의 결과에서 신경근전기자극에 의한 근수축력 향상은 근육의 비대와 근섬유형의 변화뿐만 아니라 원심성 신경주로의 변화에 의한 신경순응과도 관련이 깊은 것으로 생각된다.

V. 결론

이 연구는 정상성인을 대상으로 신경근전기자극이 골격근 구조변화와 신경순응에 미치는 효과를 알아보기 위하여 정상성인을 대상으로 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 신경근전기자극 후 최대 수의적 등척성 수축력의 변화는 군 간 유의한 차이를 나타내었고($p < 0.01$), 신경근전기자극 군에서 약 32%의 근력증가가 나타났다.

2. 신경근전기자극 후 H반사의 잠복시 및 H/Mmax 비의 군 간 차이는 유의하지 않았다.

3. 신경근전기자극 후 V/Mmax 비는 군 간 유의한 차이를 나타내었다($p < 0.01$).

4. 신경근전기자극 후 최대 수의적 등척성 수축력과 V/Mmax 비는 유의한 양의

상관관계를 나타내었다($p < 0.01$).

이상의 결과로 볼 때 신경근전기자극에 의한 근수축력 향상은 중추신경 주로의 순응에 의한 변화가 있는 것으로 나타났다. 따라서 근력증가가 근육의 횡단면적 및 근섬유형의 변화뿐만 아니라 신경순응과도 밀접한 관련성을 가지는 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. *Journal of Applied Physiology.* 92;2309-2318, 2002.
- Adams K., O'Shea P., & O'Shea K. : Aging: its effects on strength power, flexibility, and bone density. *National Strength and Conditioning Association.* 21;65-77, 1999.
- Braddom RL. & Johnson EW. : Standardization of H reflex and diagnostic use in S1 radiculopathy. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation.* 55;161-166, 1974.
- Brown AB., McCartney N. & Sale DG. : Positive adaptations to weight-lifting training in the elderly. *Journal of Applied Physiology.* 69;1725-1733, 1990.
- Butler AJ., Yue G. & Darling WG. : Variations in soleus H-reflex as a

- function of plantarflexion torque in man. *Brain Research*. 95-104, 1993.
- Chae J. & Yu D. : Neuromuscular stimulation for motor relearning in hemiplegia. *Critical Reviews in Physical and Rehabilitation Medicine*. 11;279-97, 1999.
- Fiatarone MA., Marks EC., Ryan ND. et al. : High-intensity strength training in nonagenarians: effects on skeletal muscle. *The Journal of the American Medical Association*. 263;3029-3034, 1990.
- Fumoto M., Komiyama T., & Nishihira Y. : Soleus H-reflex dynamics during fast plantarflexion in humans. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 12;367-374, 2002.
- Gondin J., Duclay J., & Martin A. : Neural drive preservation after detraining following neuromuscular electrical stimulation training. *Neuroscience Letters*. 409;210-214, 2006.
- Hakkinen K., Kallinen M., Izquierdo M. et al. : Changes in agonist- antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle- aged and older people. *Journal of Applied Physiology*. 84;1341-1349, 1998.
- Hakkinen K., Pakarinen A., & Kraemer WJ. : Selective muscle hypertrophy, change in EMG and force, and serum hormones during strength training in old women. *Journal of Applied Physiology*. 91;569-580, 2001.
- Harridge SD., Kryger A. & Stensgaard A. : Knee extensor strength, activation, and size in very elderly people following strength training. *Muscle and Nerve*. 22;831-839, 1999.
- Kaas JH. : What, if anything, is SI? Organization of first somatosensory area of cortex. *Physiological Reviews*. 63;206-231, 1983.
- Kaelin-Lang A., Luft AR., Savaki L. et al. : Modulation of human corticomotor excitability by somatosensory input. *The Journal of Physiology*. 540;623-633, 2002.
- Kimberley TJ., Lewis SM., Auerbach EJ. et al. : Electrical stimulation driving functional improvements and cortical changes in subjects with stroke. *Experimental Brain Research*. 154;450-460, 2004.
- Kraemer WJ., Fleck SJ. & Evans WJ. : Strength and power training: Physiological mechanisms of adaptation. *Exercise and Sports Science Reviews*. 24;363-397, 1996.
- Lake DA. : Neuromuscular electrical stimulation: An overview and its application in the treatment of sports injuries. *Sports Medicine*. 13(5);320-36, 1992.
- Pensini M. & Martin A. : Effect of voluntary contraction intensity on the H-reflex and V-wave response. *Neuroscience Letters*. 367;369-374, 2004.
- Recanzone GH., Allard TT., Jenkins WM.

et al. : Receptive-field changes induced by peripheral nerve stimulation in SI of adult cats. *Journal of Neurophysiology*. 5;1213-1225, 1990.

Ridding M., Brouwer B., Miles T. et al. : Changes in muscle responses to stimulation of the motor cortex induced

by peripheral nerve stimulation in human subjects. *Experimental Brain Research*. 131;135-43, 2000.

Rushton DN. : Functional electrical stimulation and rehabilitation-an hypothesis. *Medical Engineering and Physics*. 25;75-78, 2003.