대한임상신경생리학회지 3(2):187~191, 2003 ISSN 1229-6414

무지근육에서 상상의 운동과 연관된 촉진과 억제에 관한 운동 유발 전위 검사

원광대학교 의과대학 군포병원 신경과학교실, 연세대학교 원주의과대학 신경과학교실*

양현덕 · 손일홍 · 석승한 · 이성수 *

Motor Evoked Potentials Study of the Facilitation and Reciprocal Inhibition Induced by Motor Imagination in the Thumb Muscles

Hyun Duk Yang, M.D., Il Hong Son, M.D., Seung Han Suk, M.D., Sung Soo Lee, M.D.*

Department of Neurology, Wonkwang University Gunpo Medical Center, College of Medicine, Wonkwang University
*Department of Neurology, Wonju College of Medicine, Yonsei University **

Purpose: MEPs elicited by transmagnetic stimulations of the motor cortex are facilitated by voluntary muscle contraction. We evaluated the effects of the imagination of the movements on latencies of MEPs and reciprocal inhibition by using transmagnetic stimulations.

Methods: Twenty two healthy volunteers(eight men and fourteen women) were studied. TMSs were delivered at rest and during imagining abducting or adducting right thumb. A stimulator with a round coil and a fixed intensity of 80% of maximum was used to evoke MEPs. MEPs were evoked by magnetic stimulations over the scalp and cervical spine(C7-T1), and central motor conduction times(CMCT) were calculated by subtracting the latency of compound muscle action potentials(CMAPs) obtained by stimulating over the cervical spine from that obtained by stimulating over the scalp. The motor evoked potentials were recorded from right abductor pollicis brevis muscle(APB) and adductor pollicis muscle(AP) simultaneously.

Results: Imagination of abduction resulted in a shortened latency of the CMAPs in APB, and a prolonged latency in AP. Imagination of adduction resulted in a shortened latency in AP, and a prolonged latency in APB. But the imagination caused no significant change in the latency of CMAPs elicited by stimulation over cervical spine. Therefore, the changes of the CMCTs account for these latency changes with imagination of movement. With the imagination of abduction, there are significant reduction of the CMCT's in APB(10.8%) and prolongation in AP(5.8%). On the other hand, with the imagination of adduction, prolongation of the CMCT's in APB(7.3%) and reduction in AP(5.9%) were observed.

Conclusion: These findings indicate that imagination of muscle contraction increases the excitability of the human corticospinal system. Reciprocal inhibition may be accountable for the prolonged latency in the antagonist muscle.

Key Words: Motor imagination, Reciprocal inhibition, Transcranial magnetic stimulation, Central motor conduction time

서 론

대뇌운동영역에 경두개자기자극을 하는 것은 비침습적이며 운동기능을 평가하는 데 유용한 기법이다. 경두개자기자극으로 운동유발전위를 얻을 수 있으며 표면전극을 이용하여 손이나 전완부의 근육에서 기록할 수 있다. 목표근육을 약간 수축시킬 때 경두개자기자극에 의한 운동유발전위의 잠복기가 줄어들고 진폭이 커진다는 것은 이미 잘 알려진 사실이며 촉진방법으로 널리 이용되고 있다.[1-3]

촉진현상은 이완된 근육에서 수의적인 운동 직전에 경두개자기자극을 함으로서도 나타난다.[3] 경두개자기자극에 의하여 얻어지는 운동유발전위에 대하여 운동의 상상이 미치는 영향은 수의적인 근육의 수축에서 나타나는 것보다는 작지만 유사한 촉진효과를 보인다.[4-5] 또한, 전완부의

Address for correspondence
Sung-Soo Lee, M.D.
Department of Neurology, Wonju College of Medicine,
Yonsei University, Ilsan-dong
162. Wonju. Gangwon-do, 220-701, Korea
Tel : +82-33-741-1250 Fax : +82-33-748-1752
E-mail : sungslee@wonju.yonsei.ac.kr

굴곡과 신전을 상상하는 동안 상반억제 현상이 나타남은 경두개자기자극과 H반사기법을 이용하여 확인할 수 있다.[5]

수의적인 근수축에 의한 촉진현상의 정확한 기전은 아직 자세히 알려지지는 않았지만 척수와 피질 수준에서 일어나리라 추측된다.[1,2,6] 수의적인 운동의 개시 전에 나타나는 촉진현상은 피질신경원의 흥분도가 증가되어 있음을 반영한다. γ-Ia 경로가 운동을 상상하는 동안 나타나는 촉진현상에 관여할 것으로 추측된다.

피질척수로와 같은 하행계가 주동근과 길항근에 미치는 효과를 순촉진, 동반촉진, 상반억제의 세 가지로 분류할 수 있다.[7] 이 세가지 효과 중, 내수지근과 같이 섬세한 운동을 필요로 하는 경우에는 상반억제가 중요한 역할을 할 것으로 추측된다.

본 연구에서는 운동의 상상이 수의적인 근육의 수축과 유사하게 피질척수로의 흥분도를 증가시키는 것을 확인하고 나아가 내수지근에서도 전완부에서와 같이 상반억제가 관찰되는 지를 알아보았다.

대상과 방법

1. 대 상

지원자 중에서 병력과 신경학적 검사를 통하여 피질척수로를 포함한 중추신경계 전반에 걸쳐서 이상소견이 없다고 판단되는 사람을 대상으로 검사 내용에 대한 충분한 설명을 한 후 검사를 시행하였다. 대상자는 모두 22명으로 남자 8명, 여자 14명이었으며 평균연령은 26.5세(23~33세, 표준편차: 2.7세)였다. 피검자는 모두 오른손잡이였다.

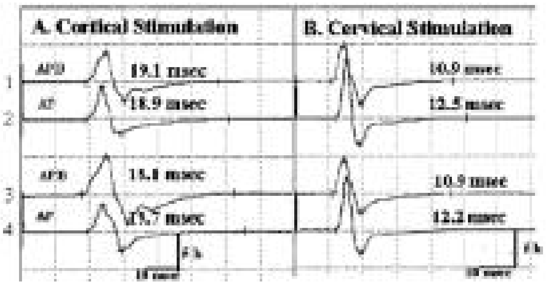

Figure 1. MEP at rest and during thinking about thumb abduction. MEP: motor evoke potentials, APB: abductor pollicis brevis muscle, AP: adductor pollicis muscle, 1 and 2: at rest, 3 and 4: thinking about thumb abduction.

2. 방 법

운동유발전위검사를 시행하기 위한 기기는 Cadwell Magnetic Stimulator MES-10 기종을 사용하였고 최대 자장의 강도는 2.0 tesla이었으며 자기 코일(magnetic coil)의 직경은 9.5 cm이었다. 근전도활성은 배건방법(tendon-belly method)을 이용하여 우측 단무지외전근과 무지내전근에서 동시에 기록하였다. 기록시 대역여파(bandpass filter)는 10 Hz에서 20 Hz사이였고 전진속도(sweep speed)는 10 msec였다. 피검자가 침대에 편하게 누워 오른손을 배위에 올려놓고 완전히 이완된 상태에서 검사를 시행하였다.

먼저 휴식 상태에서 두부를 자극하였고 다음 약 30초 동안 피검자가 자신의 우측 무지를 외전시킨다고 상상하는 동안 다시 두부자극을 시행하였으며 이러한 과정을 피검자가 무지를 내전시킨다고 상상하는 동안 반복하였다. 운동을 상상하는 동안에 근육의 수축이 없었다는 것은 침근전도를 이용하여 확인하였다. 이러한 일련의 과정을 경부자극 시에도 동일하게 반복하였다. 자기자극의 강도는 최대자장강도의 80%로 자극을 가하였다. 잠복기는 자극의 시작에서부터 운동유발전위의 최초 편향까지의 값으로 정하였다.

1) 경두개자기자극[8]

대뇌운동피질을 자극하기 위해서 코일의 중심부를 좌측 전두부에 위치시키고 수부 운동피질에 국소 자기자극을 가하였고 자극기의 위치를 조금씩 변경하며 최대전위폭이 나오는 지점을 선택하고 수차례 반복하여 주동근에서 가

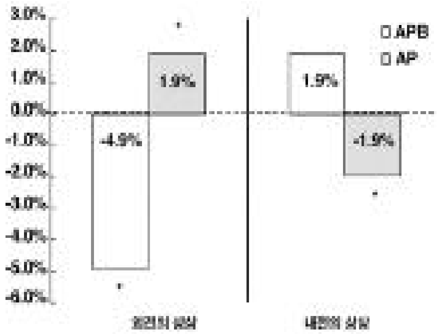

Figure 2. Latency change ratio at rest and during thinking about thumb movement.*: $p<0.05$ using Mann-Whitney U-test, %: (latencies during thinking-latencies at rest)/latencies at rest, APB: abductor pollicis brevis muscle, AP: adductor pollicis muscle.

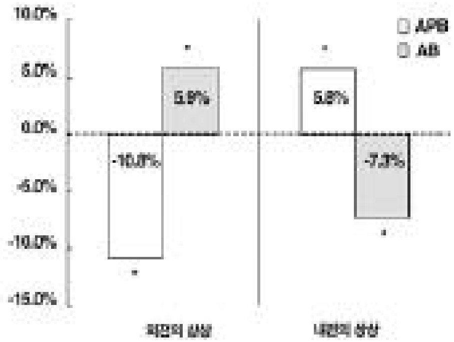

Figure 3. Central motor conduction time change ratio at rest and during thinking about thumb movement. *: $p<0.05$ using Mann-Whitney U-test, %: (CMCT during thinking - CMCT at rest)/CMCT at rest, APB: abductor pollicis brevis muscle, AP: adductor pollicis muscle.

장 짧은 잠복기를 보이는 전위파와 동시에 얻어진 길항근의 전위파를 선택하였다. 상상 동안의 잠복기에서 휴식 상태의 잠복기를 감한 값을 휴식 상태의 잠복기로 나누어 잠복기의 변화율을 구하였다.

2) 경부자기자극

경부를 자극하기 위해서는 코일의 중심부를 제 7경추부와 제 1흉추사이에 위치시키고 자기자극을 가하였다. 경두개자극시와 마찬가지 방법으로 전위파를 얻었으며 상상 동안의 잠복기에서 휴식 상태의 잠복기를 감한 값을 휴식 상태의 잠복기로 나누어 잠복기의 변화율을 구하였다.

3) 중추운동전달시간(central motor conduction time, CMCT)

경두개자극시의 잠복기(central motor latency)에서 경부자극시의 잠복기를(distal motor latency)를 감한 값으로 정하였다.

CMCT=central motor latency - distal motor latency

상상 동안의 중추전달시간에서 휴식 상태의 중추전달시간을 감한 값을 휴식 상태의 중추전달시간으로 나누어 중추전달시간의 변화율을 구하였다.

3. 통계처리

모든 결과는 평균±표준편차로 표시하였다. 통계는 SPSS 10.0 통계프로그램에서 비모수검정방법인 Mann-Whitney U-test를 이용하여 휴식 상태와 무지의 외전과 내전운동을 상상하는 동안의 잠복기를 비교하였다. 이 때 p값이 0.05미만인 경우를 유의하다고 판정하였다.

결 과

1. 경두개자기자극에 의한 운동유발전위의 잠복기(Fig. 1)

경두개자극을 하였을 때 평균 잠복기를 보면, 무지의 외전을 상상하는 동안 주동근인 단무지외전근의 잠복기는 휴식 상태의 20.4 msec에서 19.4 msec로 단축되었으며 ($p<0.05$) 길항근인 무지내전근의 잠복기는 휴식상태의 20.3 msec에서 20.7 msec로 연장($p<0.05$)되었다(Fig. 2).

반대로, 내전을 상상할 때는 주동근인 무지내전근의 잠복기는 19.9 msec로 짧아졌으나 통계학적인 유의성은 없었으며, 반면에 길항근인 단무지외전근의 잠복기는 20.8msec로($p<0.05$) 길어졌다(Fig. 2).

2. 경부자기자극에 의한 운동유발전위의 잠복기

경부자극을 시행하였을 때는 외전이나 내전을 상상하는 동안 통계학적으로 의미있는 평균 잠복기의 변화는 관찰되지 않았다(Table 1, 2).

3. 중추운동전달시간

중추운동전달시간은 외전을 상상하는 동안 주동근의 CMCT은 휴식상태의 8.8 msec에서 7.9 msec로 단축되었으며($p<0.05$) 길항근의 CMCT은 휴식상태의 8.3 msec에서 8.8 msec로 연장되었다($p<0.05$)(Fig. 3).

내전을 상상할 때도 마찬가지로 주동근의 경우 7.7 msec로(7.3%) 짧아졌으나($p<0.05$), 길항근에서는 9.3 msec로(5.8%) 길어졌다($p<0.05$)(Fig. 3).

고 찰

피질 혹은 척수를 전기나 자기 자극한 이후 근육에서 기록한 복합근육활동전위(compound muscle action potential, CMAP)를 운동유발전위(motor evoked potential, MEP)라고 한다. 말초신경에서 자극 후에 기록한 CMAP의 전위, 형태, 잠복기는 일정하지만 이와 달리 피질에서 자극 후 근육에서 기록한 MEP는 다양한 형태를 보이며 이것은 대뇌 피질과 척수내의 신경세포체의 다양한 흥분성을 반영한다. 그러므로 가장 짧은 잠복기를 얻기 위해서는 여러 차례의 MEP기록이 필요하다. 중추

Table 2. MEP latencies at rest and during thinking about thumb adduction on cervical stimulation

Recording site	MEP latency(msec)		Change ratio(%)*
	At rest	Thinking adduction	
abductor pollicis brevis muscle	11.5±0.8	11.5±0.7	-1.0±2.7
adductor pollicis muscle	12.0±1.0	12.2±0.9	2.3±5.8

*(latencies during thinking - latencies at rest)/latencies at rest

Table 1. MEP latencies at rest and during thinking about thumb abduction on cervical stimulation

Recording site	MEP latency(msec)		Change ratio(%)*
	At rest	Thinking abduction	
abductor pollicis brevis muscle	11.5±0.8	11.5±0.9	-0.5±2.4
adductor pollicis muscle	12.0±1.0	11.9±0.9	-0.6±3.1

*(latencies during thinking - latencies at rest)/latencies at rest

전도시간(central motor conduction time, CMCT)은 피질자극과 경추 또는 요추 자극 사이의 잠복기의 차이이며 현재 임상적으로 사용되는 자기자극검사의 가장 중요한 척도이다.

수의적인 근수축 상태에서 인간의 피질척수로의 흥분성이 증가하여 운동유발전위의 잠복기는 짧아지고 진폭이 커진다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다.[1,2] 휴식 상태와 비교하여 수축된 근육에 피질자극을 시행하면 다음의 세 가지 변화가 생긴다. 첫째, 수의적인 수축은 복합근육활동전위를 역치 강도를 낮추고 둘째, 주어진 자극 강도하에서 휴식 상태보다 수축된 상태에서 보다 큰 반응을 보이며 셋째, 휴식 상태보다 수축된 상태에서 반응의 잠복기가 짧아진다. 이런 일련의 촉진현상(facilitation)에 대한 가설로 척수의 과흥분성과 피질 운동 뉴우론의 과흥분성이 제기되었다. 경두개자기자극의 결과 얻어진 운동유발전위의 진폭과 역치는 잠복기와는 달리 정상인에서 매우 넓은 범위를 보인다.[9]

Cheney 등은 피질척수계와 같은 하행계가 주동근과 길항근에 미치는 효과를 세 가지로 분류하여, 주동근만의 수축을 일으키는 경우를 순촉진(pure facilitation), 주동근과 길항근 모두에서 수축을 일으키는 경우를 동반촉진(co-facilitation), 주동근에서는 수축을 일으키고 반대로 길항근에서는 이완을 일으키는 경우를 상반억제이라고 정의하였다.[7]

이 연구에서는 경두개자기자극을 통하여 운동의 상상이 피질척수로의 흥분성에 미치는 영향과 내수지근에서 상반억제를 유발시키는지를 잠복기를 비교하여 알아보았다. 운동의 상상은 피질척수로의 흥분성을 증가시켰고 내수지근에서 상반억제를 일으켰다. 무지외전운동의 상상은 단무지외전근의 흥분성을 증가시킨 반면에 무지내전근의 억제를 가져왔으며, 반대로 무지내전운동의 상상은 무지내전근에서는 흥분성의 증가를 단무지외전근에서는 억제효과를 가져왔다. 오래 동안 주동근과 길항근 사이의 상호작용에 대한 연구가 진행되어왔지만 상반억제의 기전은 아직 확실하지는 않다.

Stephan은 양전자방출단층촬영(positron emission tomography, PET)을 이용하여 대사활성도를 측정함으로서 운동을 상상하는 동안 활성화되는 대뇌피질에 대한 연구를 하여 보조운동 영역(supplementary motor area)과 전운동영역(premotor area)이 활성화되는 것을 확인하였다.[10] 운동의 수행과는 달리 중심구에 위치한 일차 감각운동영역(primary sensorimotor area)의 활성은 나타나지는 않았다. 또한 운동을 상상하는 동안 경두개자기자극을 가함으로서 전완부근육에서 근전도의 진폭이 증가하는 것을 확인하였고, 단일신경연접성 H-반사기법을 이용하여 운동을 상상하는 동안에는 운동의 수행과는 달리 척수나 근육 수준에서 흥분성의 증가가 나타나지 않음을 확인하였다. 운동을 상상하는 동안에 척수 운동신경원의 흥분성에는 변화가 없이 피질의 활성도만이 증가함을 알 수 있다.

상반억제는 피질 수준과 척수 수준에서 일어난다. 피질에서 중추에 의해 매개되는 상반억제를 설명할 만한 기전은 억제성 피질척수세포의 활성에 의해서이다. 다른 하나의 기전은 피질의 억제성 중재신경세포의 활성이다.

척수의 억제성 중재신경세포(Ia inhibitory interneuron)가 상반억제의 주된 경로로 여겨진다. Ia 억제성 중재신경세포는 α-Ia 고리를 통하여 주동근에 의해서 간접적으로 활성화된다. Tanaka는 주동근의 α운동신경원의 흥분성과 길항근으로의 Ia 억제성 중재신경세포의 흥분성 사이에 밀접한 관계가 있음을 제시하였다.[11]

α운동신경원과 마찬가지로 γ운동신경원과 Ia 억제성 중재신경세포도 피질척수세포로부터 단일신경연접에 의한 흥분성 신호를 받는 것으로 알려져 있다. α운동신경원과 γ운동신경원이 동시에 활성화되는 것을 α-γ연계(α-γ linkage)라고 한다. α-γ연계는 Ia 억제성 중재신경세포를 촉진시킬 수 있으며,11-14 Ia 억제성 중재신경세포는피질척수로를통하여직접적으로신호를받을수있다.[11,13,14]

수의적인 근수축에서 일어나는 상반억제의 가능한 경로를 도식(Fig. 4)으로 표현하였다. 수위적인 근수축에서 일어나는 상반억제와 운동의 상상에서 일어나는 상반억제의 경로는 유사하리라 추측된다. 상반억제는 Ia 억제성 중재신경세포를 통하여 이루어지는 데, Ia 억제성 중재신경세포는 α-Ia 고리(경로 I)와 γ-Ia고리(경로 II)를 통하여 주동근으로부터 간접적으로 활성화가 되기도 하고, 피질척수로를 통하여 직접적으로 활성화가 되기도 한다(경로 III). 또한 길항근의 운동신경원은 운동피질로부터 억제성 신호를 받을 수 있다(경로 IV).

수의적인 근수축에서 일어나는 상반억제와는 달리 운동의 상상에서 일어나는 상반억제의 경로는 유사하지만 약간의 차이가 있다. 운동을 상상하는 경우에는 근수축과는 달리 Ia 구심성 섬유를 통한 되먹임기전이 없기 때문에, 경로 III과 경로 IV가 주로 관여할 것으로 추측된다. 주동근의 운동을 상상하는 동안 경로 III을 통하여 Ia 억제성

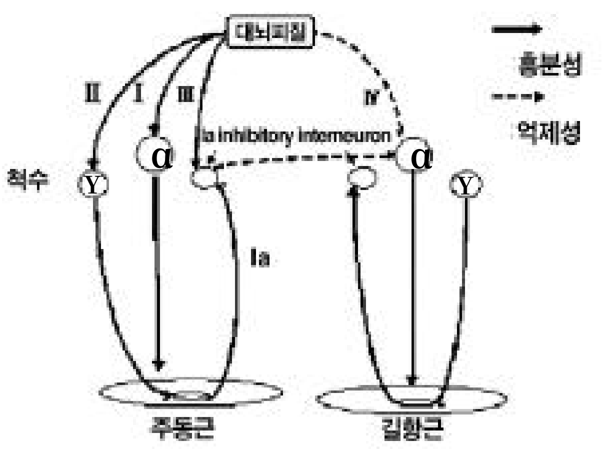

Figure 4. Schematic illustration of the proposed reciprocal inhibition pathways during voluntary contraction and thinking about movement.

중재신경세포는 피질척수로를 통하여 직접적으로 활성화된다. 억제성 신호가 운동피질로부터 길항근의 운동신경원으로 내려오게 된다(경로 IV).

영장류에서 단일신경연접성 촉진은 근위부의 근육보다는 원위부의 근육에서 두드러지게 나타난다.15 원위부 근육의 운동신경원은 강력한 촉진 신호를 받는다. 반면에 억제는 원위부 근육보다는 근위부 근육의 운동신경원에서 자주 일어나는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서는 원위부 근육에서도 촉진 효과와 마찬가지로 억제도 비슷한 정도로 일어남을 확인하였다.

운동의 상상은 운동의 수행을 향상시키고 운동의 학습 효과를 증진시킨다. 이러한 효과는 운동을 반복해서 얻어지는 것과는 달리 구심성 되먹임 기전이 없이 얻을 수 있다. 운동을 상상하는 것은 속도, 정확성, 힘, 수행의 일관성 등과 같은 운동기능의 여러 면을 향상시킨다. 이러한 효과는 말초신경이나 근골격계의 변화와 중추신경계의 기능적인 변화를 통해서 나타난다. 운동의 상상과 상반억제는 수지근육의 운동과 같은 섬세한 운동의 학습에 중요한 역할을 할 것으로 생각되며 앞으로 운동 재활영역에 응용될 수 있으리라 여겨진다. 수의적인 운동에서 길항근의 동반수축현상은 임상적으로 뇌졸중환자에서 흔히 관찰할 수 있으며 이러한 환자에서는 주동근과 길항근의 상호작용을 조절하는 기전에 장애가 있음을 알 수 있다. 뇌졸중 환자에서와 같이 이러한 조절에 장애가 있는 환자들을 통한 상반억제에 대한 연구가 이루어진다면 연관된 기전을 밝힐 수 있으리라 기대한다.

결 론

건강한 젊은 사람을 대상으로 경두개자기자극을 통하여 운동의 상상이 내수지근에서 상반억제를 유발시키는지를 운동유발 전위의 잠복기를 비교하여 알아보았다. 운동의 상상은 내수지근에서 주동근과 길항근 사이에서 상반억제를 일으켰다. 무지외전운동의 상상은 단무지외전근의 흥분성을 증가시킨 반면에 무지내전근의 억제를 가져왔으며, 반대로 무지내전운동의 상상은 무지내전근에서는 흥분성의 증가를 단무지외전근에서는 억제효과를 가져왔다. 운동의 상상과 상반억제는 수지근육의 운동과 같은 섬세한 운동의 학습에 중요한 역할을 할 것으로 추측되며 앞으로 운동 재활영역에 응용될 수 있으리라 예상한다.

REFERENCES

1. Day BL, Rothwell JC, Thomson PD, Dick JP, Cowan JM, A., Berardelli A, Mareden CD. Motor cortex stimulation in intact man. 2. Multiple descending *volleys*. *Brain* 1987;110:1191-1209.
2. Hess CW, Mills KR, Murray NM. Responses in small hand muscles from magnetic stimulation of the human brain. *J Physiol* 1987;388:397-419.
3. Rossini PM, Zarola F, Stalberg E, Caramia M. Pre-movement facilitation of motor-evoked potentials in man during transcranial stimulation of the central motor pathways. *Brain Res* 1988;458:20-30.
4. Izumi S, Findley TW, Ikai T, Andrew J, Daum M, Chino N. Facilitation effect of thinking about movement on motor-evoked potentials to transcranial magnetic stimulation of the brain. *Am J Phys Med Rehabil* 1995;74;207-213.
5. Ikai T, Findley TW, Izumi S, Hanayama K, Kim H, Daum MC, Andrews JF, Diamond BJ. Reciprocal inhibition in the forearm during voluntary contraction and thinking about movement. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1996;36:295-304.
6. Thompson PD, Day BL, Rothwell JC, Dressler D, Maertens de Noordhout A, Marsden CD. Further observation on the facilitation of muscle responses to cortical stimulation by voluntary contraction. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1991;81:397-402.
7. Cheney PD, Fetz EE, Mewes K. Neural mechanisms underlying corticospinal and rubrospinal control of limb movements. *Prog Brain Res* 1991;87:213-252.
8. Oh SJ. Magnetic and high-voltage/low impedance electrical stimulation tests. In: Oh SJ,. *Clinical Electromyography*. 2nd ed. Baltimore: Williams & Wilkins. 1993;406-446.
9. 최재철, 박민규, 박건우, 이대희. 파킨슨병 환자에서 경두개자기자극. *대한신경과학회지* 1999;17:352-358.
10. Stephan KM, Frackowiak RS. Motor imagery--anatomical representation and electrophysiological characteristics. *Neurochem Res* 1996;21:1105-1116.
11. Tanaka R. Reciprocal Ia inhibition and voluntary movements in man. *Prog Brain Res* 1976;44:291-302.
12. Hongo T, Jankowska E, Lundburg A. The rubrospinal tract. II. Facilitation of interneuronal transmission in reflex paths on motoneurones. *Exp Brain Res* 1969;7:365-391.
13. Jankowska E, Padel Y, Tanka R. Disynaptic inhibition of spinal motoneurons from the motor cortex in the monkey. *J Physiol* 1976;258:467-487.
14. Shindo M, Harayama H, Kondo K, Yanagisawa N, Tanaka R. Changes in reciprocal Ia inhibition during voluntary contraction in man. *Exp Brain Res* 1984;53:400-408.
15. Lemon RN, Mantel GW, Muir RB. Corticospinal facilitation of hand muscles during voluntary movement in the conscious monkey. *J Physiol* 1986;381: 497-527.