

흰쥐에서 추체로 운동유발전위의 구별 및 분석 방법*

연세대학교 의과대학 신경외과학교실, 뇌연구소**

건국대학교 의과대학 신경외과학교실***

원광대학교 의과대학 정형외과학교실, 마비연구소†

박용구** · 정상섭** · 이규창** · 조 준*** · 장진우** · 김종환†

= Abstract =

Monitoring of Pyramidal Motor Evoked Potentials in the Rat

Yong Gou Park, M.D.,** Sang Sup Chung, M.D.,** Kyu Chang Lee, M.D.,**

Joon Cho, M.D.,*** Jin Woo Chang, M.D.,** Jong Hwan Kim, Ph.D.†

Department of Neurosurgery, Institute of Brain Research,** College of Medicine, Yonsei University, Seoul, Korea

Department of Neurosurgery,*** College of Medicine, Konkuk University, Seoul, Korea
Institute of Paralysis Research,† College of Medicine, Wonkwang University, Iri, Korea

Pyramidal motor evoked potential (PMEP) was recorded in rat using the specially designed stimulating electrode for preferential activation of a pyramidal cell layer of the motor cortex. The PMEPs, recorded in the upper levels of a neural axis (medulla and C7), were composed of short latency complex waves and a long latency positive wave with a large amplitude and prolonged duration. However, the PMEP recorded at the lower level of a neural axis (T8) only showed the long latency a large positive wave. Conduction velocity of the short latency wave was approximately 11.1 m/sec. Judging by the conduction velocities of these waves, it appeared that the short latency-wave complex originated from direct activation of pyramidal cells in the motor cortex (D-wave). The long latency-wave seemed to be evoked by indirect activation of the pyramidal cells (I-wave). This view was further supported by the serial depth recordings of PMEPs in the medulla as well as by the field mapping of PMEPs in the T4 spinal cord. PMEPs completely disappeared following the acute lesion of an internal capsule, indicating that these waves originated from the motor cortex rather than the brain stem nuclei such as the reticular nuclei.

KEY WORDS : Motor cortex · Stimulation · Spinal cord recording · D-wave · I-wave · Motor evoked potential · Pyramidal Tract.

서 론

뇌의 운동신경계를 자극하여 발생하는 운동유발전위(motor evoked potential)는 근간에 임상적으로 운동신경계 기능의 측정 감시 및 진단에 이용이 시도되고 있으며 동물실험에서도 척수 및 운동신경계의 기능적 연구에 많이 이용되고 있다. 그러나 그 발생과 전도과정이 자극 방법에 따라 다를 수 있다. 과거에 뇌 운동피질을 자극하면 추체로 운동유발전위

*본 연구는 연세대학교 의과대학 김명선재단 연구비로 연구되었음.

(pyramidal motor evoked potential)가 발생하며 자극 방법에 대하여는 깊이 고려하지 않았으며, 따라서 작은 동물에서 표면부착전극(surface electrode)으로 양전극자극(anodal stimulation)하여 척수에서 포착되는 파 역시 운동피질에서 발생하는 추체로 운동유발전위(pyramidal motor evoked potential)로 간주하였다.²⁾⁴⁾⁷⁾⁹⁾¹⁰⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁻¹⁹⁾²⁴⁾²⁵⁾²⁸⁻³²⁾ 그러나 설치류와 같은 동물에서는 이와 같은 방법으로는 추체로 운동유발전위가 아니라 전류전파(current spread)에 의하여 뇌간(brain stem) 핵에서 발생하는 추체외로 운동유발전위(extrapyramidal motor evoked potential)가 주로 발생된다.¹³⁾

^{22,23)} 추체외로 운동유발전위는 주로 망상체핵(reticular nucleus)에서 발생되며 그외에 전정핵(vestibular nucleus)과 적핵(red nucleus)에서도 일부 발생하는 것으로 보여진다.^{15,6)8)}
³²⁾ 이러한 사실들은 저자들의 과거 연구에서도 확인된 바 있다.¹³⁾²²⁾²³⁾ 즉 뇌피질 표면 혹은 경두개(transcranial) 전기자극으로 포착되는 운동유발전위는 추체로 운동유발전위와 추체외로 운동유발전위의 두가지가 있으며, 뇌용적이 작고 추체외로가 추체로보다 상대적으로 더 발달되어 있는 동물 즉 설치류에서는 주로 추체외로 운동유발전위가 잘 포착되고 반면에 고양이와 영장류에서는 주로 추체로 운동유발전위가 잘 얻어지는 것으로 사료된다. 그러므로 운동유발전위를 이용한 연구에서 동물 실험에서 얻어진 결과를 임상적으로 연계시켜 생각할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여는 설치류 등의 동물에서 추체로와 추체외로 운동유발전위를 구별할 수 있어야 한다. 이를 위하여는 추체로만 선택적으로 자극할 수 있는 방법이 필요하며, 추체로 운동유발전위를 선택적으로 얻을 수 있다면 추체외로 유발전위와 구별이 가능할 것으로 사료된다. 아울러 추체외로 유발전위는 발생 부위가 다양하고 전도 경로도 다양하여 파형이 자극 조건에 따라 쉽게 달라지므로^{22,23)} 실험에 응용하는 데에 문제점이 많다. 반면에 추체로 유발전위는 발생부위와 전도경로가 일정하여 이용 가치가 높을 것으로 사료된다. 추체로 운동유발전위를 선택적으로 얻기 위하여는 새로운 자극 방법이 필요하다. 과거에 이용된 단극자극(monopolar stimulation)이나 양극자극(bipolar stimulation)으로는 전류전파를 억제하기 위하여 자극 전류를 낮추면 충분히 많은 면적의 운동피질을 효과적으로 자극하지 못하였던 것으로 사료된다. 반면에 피질을 충분히 자극하기 위하여 자극 전류를 높이면 전류전파가 많아 주로 추체외로의 유발전위를 생성하였던 것으로 판단된다.^{22,23)} 전류전파를 최소한으로 줄이고 운동피질을 최대한 많이 자극하여 추체로 유발전위를 선택적으로 얻기 위하여 저자들은 새로운 자극 방법을 고안하여 다음의 실험을 하였다.

실험대상 및 방법

1. 준비 과정

Sprague-Dawley 흰쥐(300gm)를 entobar로 전신마취후에 atropine sulfate 0.8mg/kg 근육주사하였다. 기관절개로 기관내 삽관하고 수술현미경하에서 좌측 대퇴동맥과 정맥에 삽관하였다. Pancronium 0.4ml를 정맥주사하여 충분히 근육을 이완시킨후에 인공호흡기(Model 683, Harvard Apparatus, South Natick, MA, U.S.A.)로 호흡을 일정하게 유지시키면서 호기 CO₂를 측정감시(Capnometer, model 2200, Traverse medical monitors, Saline, Michigan, U.S.A.)하였다. 혈관내 삽입된 관을 통하여 동맥 혈압 및 맥박을 측정감시하였고 필요에 따라 수액제를 간헐적으로 정맥 투여하였다. 과정중에 동물의 혈압이 너무 높아지거나 통증에 의한 움직임이 있으면 혈압을 관찰하면서 pentobarbital 0.1ml 혹은 pancronium 0.2ml를 추가로 정맥주사하며 가급적으로 전신마취제의 투여를 억제하였다. 실험동물은 정위술대(Stereotactic frame, Narishige, Scientific instrument laboratory, Setagaya-ku, Tokyo, Japan)에 고정시키고 전기담요로 항문체온을 37°~37.7°C로 유지하였다.

2. 대뇌피질 전기 자극장치

전류전파를 최소한으로 줄이고 운동피질을 최대한 많이 자극하여 추체로 유발전위를 선택적으로 얻기 위하여 다음과 같은 새로운 자극 전극을 이용하였다. 이 전극은 대뇌피질에서 유발전위를 포착하기 위하여 제작된 전극(stainless steel, NE-120, Rhodes Medical Instruments, Inc. Distributed by David Kopf Instruments, Tujunga, Calif.)을 사용하였다(Fig. 1). 즉 대뇌피질에 1.4mm 직경의 원판을 접촉시켜 양극전극으로 하고, 원판의 중심부에서는 0.2mm 두께와 3mm 길이의 절연(insulation)된 심이 돌출되어 대뇌피질에 삽입하고, 심의 끝 0.5mm를 벗겨 음극 전

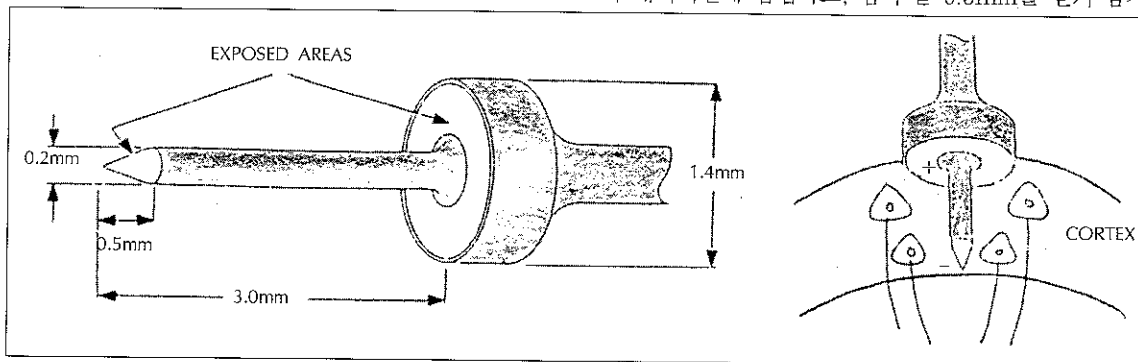


Fig. 1. Schematic drawing of an electrode used to preferentially stimulate pyramidal layer of the cerebral cortex in the rat. The pointed tip of electrode was inserted into the cerebral cortex perpendicular to the cortical surface so that the round area gently contacted the cortical surface. The round area of electrode was the anode in cortical stimulation.

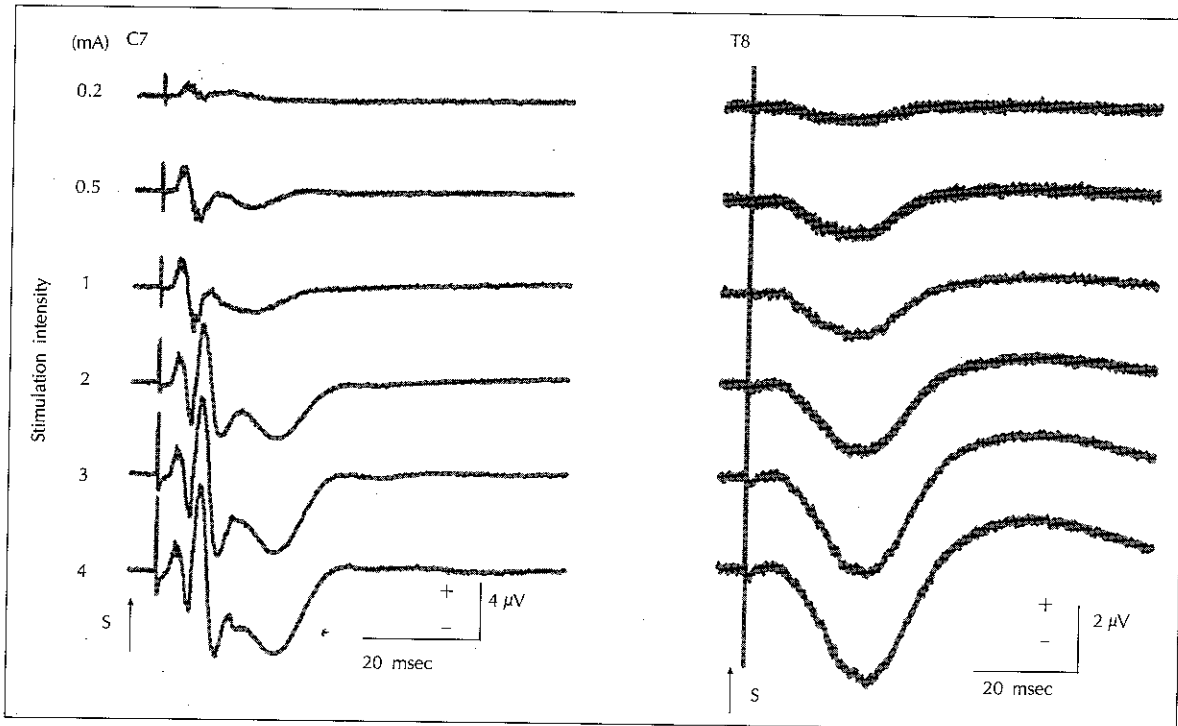


Fig. 2. Representative recordings of PMEP monitored at the two levels of the spinal cord(C7 and T8) during stimulation of hindlimb area of motor cortex using the electrode shown in fig. 1. Varying stimulus intensities ranging from 0.2 to 4 mA were used. Stimulus intensities used to evoked PMEP are shown on the left. The same convention was used for the rest of the figures. The PMEPs recorded at C7 are composed of short latency positive-negative-positive complex waves and a long latency large positive wave. However, PMEP recorded at T8 shows the only long latency positive wave.

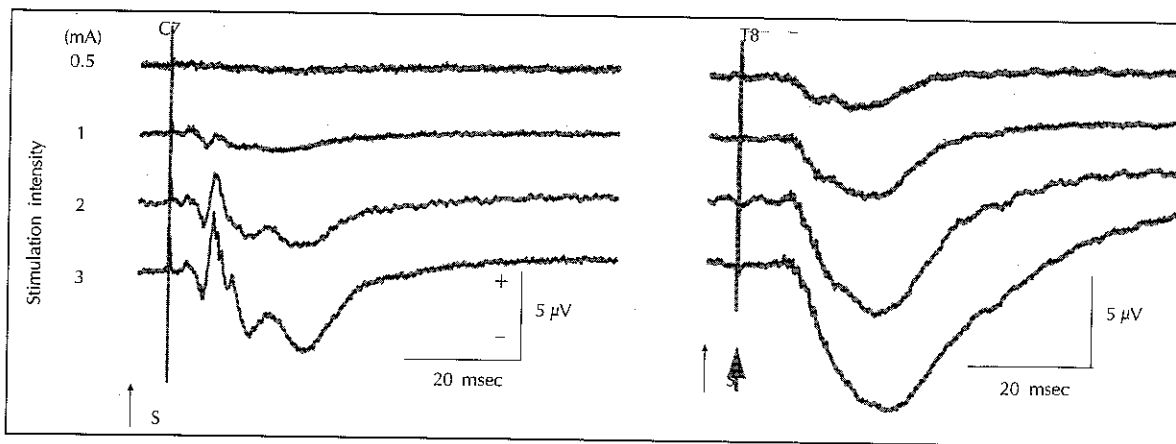


Fig. 3. The PMEP recorded in another rat showing identical features to there seen in Fig. 2.

상을 보였다. 흉수에서는 역시 초기 양음양 복합파는 포착되지 않았으며, 후기 음파는 잘 보였으며 하부로 갈수록 잠복기가 길어졌다. 각 파의 전도 속도를 정리하여 보면 Table 1, 2와 같다. 초기 양파는 11.1~12.7m/sec의 전도 속도를 보였으며, 이는 그간 보고되어 온 추체로 운동유발전위의 전도 속도와 비슷하였다. 후기 음파는 제7경수와 제8흉수간의 척수내 전도속도는 8.64m/sec으로 초기 복합파와 약간 늦은 전도 속도를 보였다. 이 전도 속도로 판단하면 운동 피질에서

연수까지는 1.62msec의 전도 시간이 필요하며, 추체세포의 분극 시간(pyramidal cell depolarization time) 1msec을 합하여도 2.62msec이면 충분하나 12.2msec의 잠복기를 보였다. 즉 자극후 연수까지 전도되는 과정에서 두개강내에서 잠복기가 약 9.58msec이 지연되었다. 이와 같은 사실들로 미루어 초기 음양 복합파는 자극후 추체로를 통하여 전도된 운동유발전위로 판단되며(D-wave), 후기 음파는 추체세포 자극후에 대뇌에서 association fiber등의 경로를 통하여

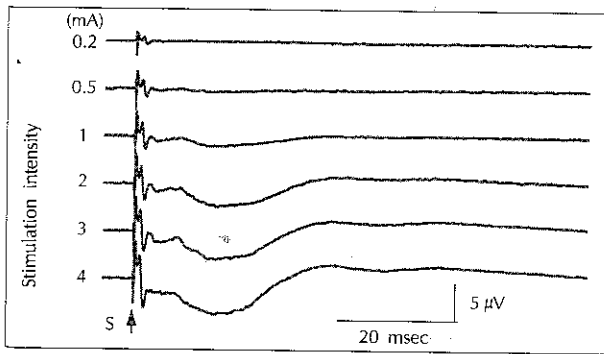


Fig. 4. PMEP was recorded in the pyramidal tract of medulla at 12.3 mm posterior to the bregma (interaural coordinate: -3.3mm). The hindlimb area of motor cortex was stimulated with varying stimulus intensities ranging from 0.2 to 4 mA. The PMEP was composed of short latency positive-negative-positive complex waves and a long latency large positive wave which was similar to the PMEP recorded at C7. However, the conduction delay between short latency wave and long latency wave was shorter in the medullary pyramid than that monitored in the C7 spinal cord.

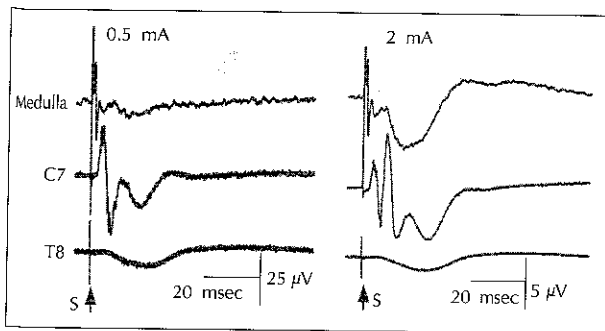


Fig. 5. Comparison of PMEPs recorded at three different levels of the spinal cord.

2차 혹은 3차 이상의 신경근연접(synapse)를 거친후에 전도되어 내려온 전위 (I-wave)로 판단된다²⁾.

2. 운동피질의 자극부위(앞발부위 및 뒷발부위)에 따른 파형의 변화

제7경수에서 척수내 장전위를 단극 기록하면서 운동피질의 자극부위(앞발부위 및 뒷발부위)에 따른 파형의 변화를 관찰하였다. 초기 복합파는 뒷발부 자극시에는 잘 포착되었

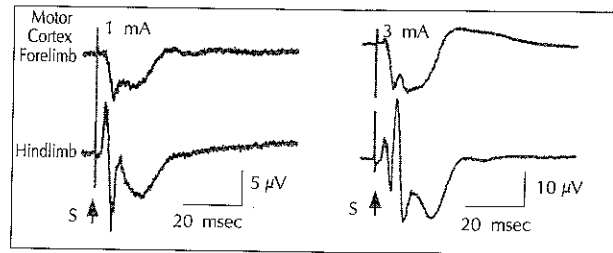


Fig. 6. PMEPs produced by stimulating the forelimb and the hindlimb areas of a motor cortex are compared. Two different stimulus intensities were used. Note the different amplitude scales.

Table 1. Conduction velocity of short latency positive-negative-

	Estimated distance (mm)	Latency of 1st positive peak (msec)	Conduction velocity (m/sec)
Cortex - Pyramid	14	1.1	12.7
Coretx - C7	42	3.8	11.1

으나, 앞발부 자극시에는 현저히 크기가 적었으며, 후기 큰 음파는 뒷발부 자극시와 파형은 비슷하였으나 잠복기가 짧았다(Fig. 6). 앞발부위 자극시에 초기 복합파가 제7경수에서 잘 포착되지 않는 것은, 뒷발부위 자극에서 제8흉수에서 잘 포착되지 않는 것과 같은 현상으로, 앞발로 가는 추체로의 신경섬유는 제7경수 상부에서 대부분이 끝나고, 뒷 발로 가는 신경섬유 역시 제8흉수 아래에서는 상당히 적어지기 때문에 사료된다. 또한 흰쥐에서 앞발보다 뒷발이 더 발달되어 있는 점을 고려하여 보면, 초기 복합파는 주로 뒷발부 자극에서 형성된 추체로 유발전위이며, 후기 음파는 자극 부위와 관계가 적은 것으로 사료된다.

3. 연수 및 제4흉수에서 기록한 운동 유발전위의 위치별 장전위

상기 Fig. 4의 흰쥐에서 1.5 mA로 뒷발부위의 운동 피질을 자극하면서 기록 전극을 이동시키면서 연수내의 각 부위에서 Fig. 7과 같이 장전위를 기록하였다. 초기 복합파는 추체로가 위치한 부위에서 가장 크게 포착되면서 1~2mm 후방에서 소실되었다. 후기 음파 역시 기록 위치가 추체로에서

Table 2. Conduction velocity of long latency negative wave

	Estimated distance (mm)	Latency of negative peak (msec)	Conduction velocity (m/sec)	CT by* SCCV (msec)	Latency delay (msec)
Cortex - Pyramid	14	12.2	1.15	1.62	10.58
Coretx - C7	42	16.7	2.51	4.86	11.84
Cortex - T8	70.5	20.0	3.53	8.16	11.84
C7 - T8	28.5	3.3	8.64	-	-

*Conduction time was estimated by dividing conduction distance by conduction velocity obtained between C7 and T8

떨어지면서 파의 극(polarity)이 바뀌면서 크기가 적어지는 것을 볼 수 있었다. 즉 초기 복합파 및 후기 음파 모두 추체로 선택적으로 전도되는 것으로 추측된다.

다른 쥐에서 제4흉수내에서 위치별로 장전위를 기록하여 본 결과는 Fig. 8과 같다. 초기 복합파 및 후기 음파 모두 추체로에서 선택적으로 기록되었다.

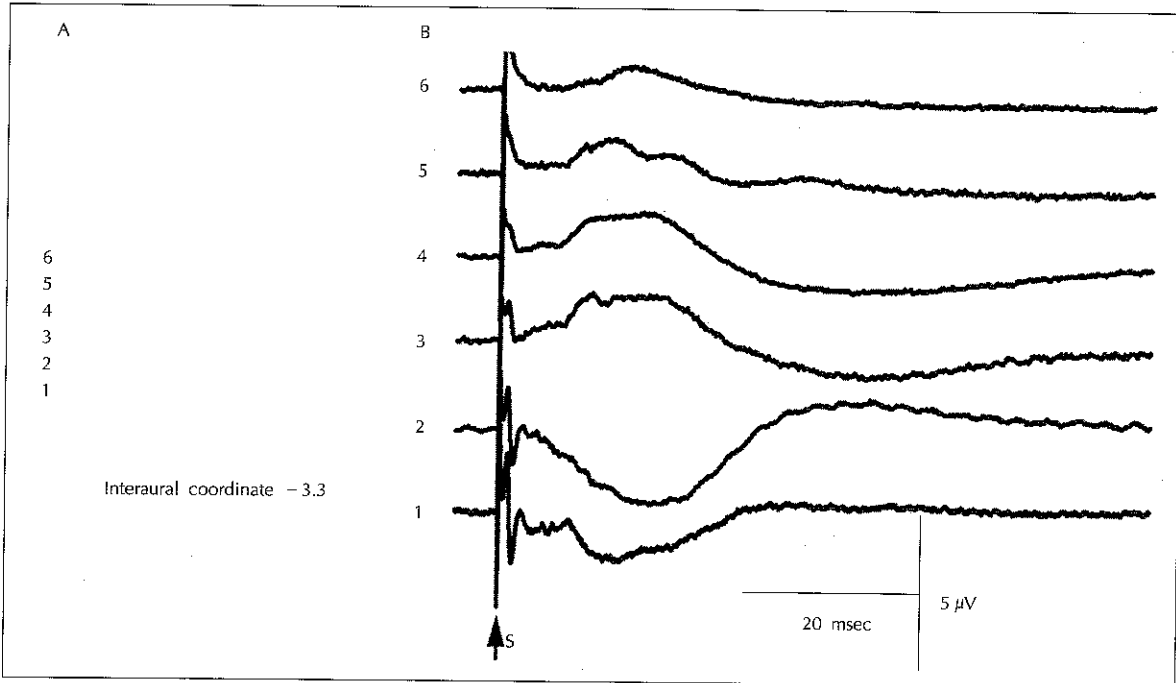


Fig. 7. PMEPs were monitored in the medulla(interaural coordinate : -3.3) using a tungsten microelectrode by gradually advancing the recording electrode toward the pyramidal tract as shown in A. The largest amplitude of PMEP was monitored when the tip of the recording electrode was in the pyramidal tract(trace 1, B). The motor cortex was stimulated by a single square pulse of 1.5 mA amplitude with 0.1 msec duration.

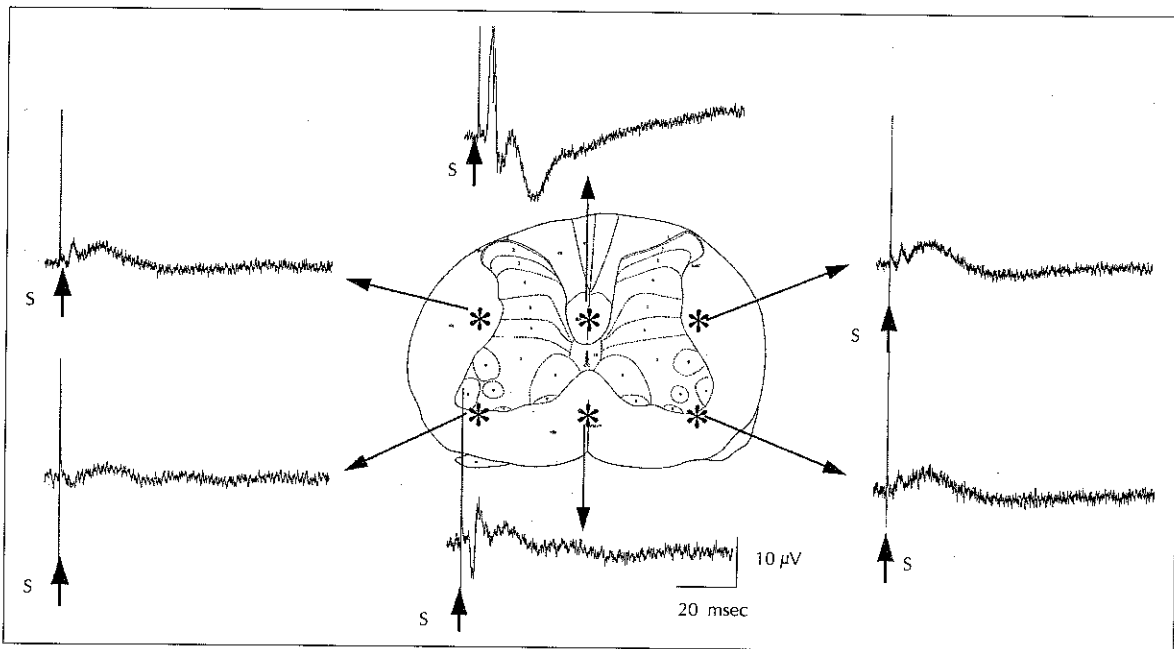


Fig. 8. To find the pathways of PMEP in the spinal cord, intracord monitoring of field potential was made, using a tungsten microelectrode. Asterisks(*) indicate the locations where the recording was made. Each arrow points to the trace of field potential recorded at that point.

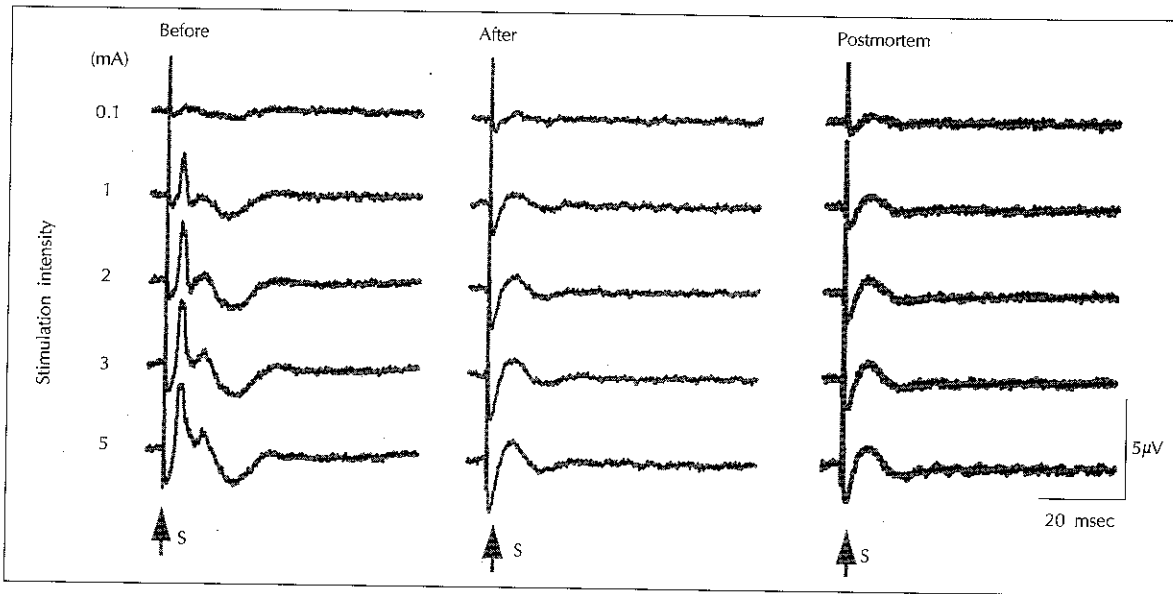


Fig. 9. PMEPs were recorded in the pyramidal tract at C7 before and after the internal capsule lesion. Hindlimb area of the motor cortex was stimulated. With the exception of stimulus artifacts, both short and long latency waves disappeared immediately after the lesion.

4. 내포(internal capsule) 절개후 파형의 변화

상기의 파들이 대뇌 피질에서 발생하는 것을 확인하고자, 운동 피질의 뒷발 부위를 자극하면서 제 7 경수내에서 장전위를 기록하면서, 운동피질의 바로 밑에서 백질(white matter)의 내포부위를 추체로의 주행 방향에 수직으로 절개하여 파형의 변화를 관찰하였다(Fig. 9). 절개후 초기음양음 복합파와 후기 음파 모두가 곧 소실되었다. 자극흔적(stimulus artifact)에 의한 파형이 유발 전위 같이 보이지만 이는 쥐가 완전히 사망한 후에 기록한 자극 흔적 파와 같아서 생체에서 유발된 전위가 아닌 것을 확인할 수 있었다.

고찰

대뇌운동피질의 전기자극으로 유발되는 유발전위는 운동 유발전위(motor evoked potential)로 알려져 왔으며, 임상 및 기초 연구에서 운동신경의 위치 파악과 신경기능의 감시 장치로 이용하기 위하여 연구되어 왔다. 운동유발전위를 확인하는 방법으로 가장 간단한 방법은 자극후 유발되는 근육 운동을 육안으로 확인하거나 근전도를 기록하는 방법이 있다. 이 방법은 임상에서 운동 피질 근처의 병소를 수술할 때 운동 피질의 위치를 확인하기 위하여 이용되며; 동물 실험에서도 이용된다. 그러나 단점으로는 마취가 깊거나 근육이완제를 사용한 경우에 잘 유발되지 않는 등, 유발이 일정하지 않고, 그 정도를 측정 비교할 수가 없다. 그러므로 운동 피질을 자극 후에 연수 혹은 척수에서 전기생리학적으로 유발 전

위를 기록하는 방법이 모색되어 왔다.

Amassian등은 고양이와 원숭이의 뇌피질내에 미세전극을 삽입하여(intracortical microstimulation) 연수(medulla)의 추체로에서 유발 전위를 기록하였다. 기록된 파는 여러개의 파들로 구성되어 있었으며, 그 이유를 D-파와 I-파로 설명하였다²⁾. 즉 D-파는 추체세포가 직접 자극되어 유발된 전위로 먼저 나타나고, I-파는 피질상호세포(cortex interneuron)의 자극에 의하여 추체 세포가 간접적으로 자극되어 D-파보다 뒤늦게 나타난다고 설명하였다. 이 이론은 아직 정설로 인정되고 있으나 아직 증명된 적은 없다. 이와 같이 유발전위의 기록을 연수에서 하게 되면 자극 부위와 기록 부위간의 거리가 가까워서 감시 장치로서 이용 가치가 적고, 척수 기능의 감시는 할 수 없다. 특히 크기가 작은 흰쥐에서는 처치 및 기록의 조작성이 불편하다. 그러므로 경수 혹은 흉수에서 기록하는 방법이 이상적이다.

Levy등은 인간에서 운동 피질을 자극하고 말초 척수신경 및 근육에서 유발 전위를 포착하고 중추신경계의 하향전도의 기능 감시 장치로서의 가치를 보고하였다. 그 후 흰쥐에서도 인간에서의 비슷한 방법으로 자극을 하여 운동유발전위를 포착하여 보고하였다¹⁵⁻¹⁹⁾. 즉 자극 양극을 운동피질에 위치하고 음극을 구강내 경구개에 위치하여 전기 자극하여 포착된 유발전위를 추체로 운동유발전위로 판단하였다. 그러나 저자들이 같은 방법으로 실험한 결과, 이 파들은 전도 속도가 50~55m/sec으로 추체로 유발전위의 전도속도(8~18m/sec, 7.6~19.2m/sec)보다 현저히 빠르고, 내포를 절개한 후에도

파형이 남아 있는 등의 추체로 유발전위로 생각할 수 없는 소견들을 보였다. Zappulla등도 같은 현상을 관찰하고 이는 추체로 유발전위가 아님을 시사하였다.¹⁾²⁶⁾³²⁾ 저자는 이와 같은 자극방법으로 척수내 장전위를 위치별로 기록한 결과, 유발된 전위는 주로 척수의 복측주(ventral column)을 통하여 전도되는 것을 확인하였다. 아울러척수를 부분적으로 절개하면서 그 하부 척수에서 기록한 결과, 추체로를 포함한 배측주(dorsal column) 혹은 측주(lateral column)를 절개하여서는 파형의 변화가 거의 없고, 복측주를 절개하면 소실되는 소견을 확인하여, 이 유발전위는 주로 복측주에 위치한 추체외로를 통하여 전도됨을 확인하였다. 또한 내포(internal capsule), 중뇌, 및 뇌교(pons)를 단계적으로 절개하여 본 결과 중뇌 절개후에도 파형의 변화가 없었으며, 뇌교 절개 후에 비로서 소실되는 현상을 관찰하였으며, 이러한 소견으로 미루어 이 유발전위는 중뇌와 뇌교사이의 망상핵과 적핵에서 주로 발생한 것으로 추정하였다. 즉 자극 양극과 음극이 뇌간을 중심으로 떨어져 위치한 상태에서는 주로 뇌간이 자극되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 추체외로 운동유발전위는 발생 부위와 전도 경로도 다양하여 파형이 자극 및 기록 조건에 따라 쉽게 달라지므로²⁾¹⁾²²⁾ 감시장치로 이용하기 어렵다.

저자는 0.5mm 은구(silver ball)로 양전극과 음전극을 운동 피질의 앞뒤 및 양측에 각각 두고 양극자극을 시도하였으나, 적은 자극 강도로는 흉수에서 파형이 포착되지 않고, 자극 강도를 높이면 추체외로 유발전위가 포착되는 것을 관찰하였다. 이는 흰쥐에서는 뇌의 용적이 너무 적기 때문에 자극 전류의 전파가 쉽기 때문인 것으로 생각된다. 또한 적은 용량의 자극으로는 너무 국소적으로 자극되기 때문에 유발 전위가 너무 작거나, 자극 부위와 기록 부위가 일치하지 않아서 포착하기 어렵기 때문인 것으로 사료된다. 즉 척수에서 유발 전위를 기록하기 위하여는 좀 더 많은 추체 세포가 동시에 자극되어야 하며, 선택적으로 추체세포만을 다량으로 자극하는 방법이 필요하다.

Ryder등은 0.5mm 크기의 스테인레스철 전극을 3mm 간격으로 흰쥐의 운동피질에 위치하여 양극 자극하여 제 13 흉수 위치에서 경막외에서 기록하여 유발전위를 포착하고 이를 추체로 운동유발전위라 하였다.²⁶⁾³²⁾ 이와 같은 자극으로 포착된 파는 자극 후 150sec 정도의 매우 긴 기간동안 점차 크기가 적어지는 연속적인 파도형을 보였다. 또한 Shiao등은 같은 방법으로 기록하면서 척수 손상을 준후 추체외로 운동유발전위와 비교한 결과 추체로 유발전위가 더 쉽게 소실된다고 보고하였다. 이는 저자들이 얻은 파형과는 성격이 매우 다르며, 또한 제 8 흉수 이하에서는 1개의 큰 음파만을 보였던 결과와 매우 다르다.

저자들이 포착한 추체로 운동유발전위의 과거에 Amassian이 포착하였던 파형을 비교하여 보면 그 양상이 비슷하다. 그러나 Amassian이 I-파라 지칭한 파는 여러개의 파로 구성되어 있으나 본 연구에서는 하나의 큰 음파로 보였다. 이는 기록 방법의 차이에서 기인하였을 것으로 판단된다. Amassian은 자극후 유발된 파를 한번에 기록하였고(single sweep recording), 저자들은 100~300회 평균을 하였기 때문에 감복기가 불규칙한 여러개의 I-파가 하나의 큰 파로 평균된 것으로 추측된다. 즉 저자들이 관찰한 초기 복합파는 D-파, 후기 큰 음파는 여러개의 I-파가 합쳐진 파로 사료된다.

저자들의 자극 방법을 이용하면 실험이 용이한 흰쥐에서도 추체로 유발전위에 대한 연구가 더 쉽게 이루어 질 수 있을 것으로 생각되며 D-파와 I-파에 대하여 좀 더 심도있게 연구될 수 있을 것으로 생각된다. 아울러 인체에서의 추체로 유발전위와 연계된 연구도 가능할 것으로 사료된다.

결 론

자극 전류의 전파를 최소한으로 줄이면서 많은 추체세포를 자극하기 위한 목적으로 새로운 자극 전극을 이용하여 운동유발전위를 기록하여 본 결과, 과거에 Amassian등이 보고한 추체로 유발전위와 유사한 파를 척수에서 기록할 수 있었으며, 여러가지의 검증을 통하여 추체로에서 발생한 유발전위임을 확인하였다.

- 논문접수일 : 1995년 6월 19일
- 심사통과일 : 1996년 7월 10일

References

- 1) Adamson J, Zappulla RA, Fraser A, et al : *Effects of selective spinal cord lesions on the spinal motor evoked potential (MEP) in the rat. Electroenceph Clin Neurophysiol* 74 : 469-480, 1989
- 2) Amassian VE, Stewart M, Quirk GJ, et al : *Physiological basis of motor effects of a transient stimulus to cerebral cortex. Neurosurgery* 20 : 74-93, 1987
- 3) Bannister CM, Porter R : *Effects of limited direct stimulation of the medullary pyramidal tract on spinal motoneurons in rat. Exp Neurol* 17 : 265-275, 1967
- 4) Elger CE, Speckman EJ, Caspers H, et al : *Corticospinal connections in the rat. 1. Monosynaptic and polysynaptic responses of cervical motoneurons to epicortical stimulation. Exp Brain Res* 28 : 385-404, 1977
- 5) Fehlings MG, Tator CH, Linden RD : *The relationships among the severity of spinal cord injury, motor and somatosensory evoked potentials and spinal cord blood flow. Elec-*

- troenceph Clin Neurophysiol 74 : 241-259, 1989
- 6) Fehlings MG, Tator CH, Linden RD : *Origin of motor evoked potentials in the rat. Neurosurgery* 24 : 299-300, 1989
 - 7) Fehlings MG, Tator CH, Linden RD, et al : *Motor evoked potentials recorded from normal and spinal cord-injured rats. Neurosurgery* 20 : 125-130, 1987
 - 8) Fehlings MG, Tator CH, Linden RD, et al : *Motor and somatosensory evoked potentials recorded from the rat. Electroenceph Clin Neurophysiol* 69 : 65-78, 1988
 - 9) Geddes LA : *Optimal stimulus duration for extracranial cortical stimulation. Neurosurgery* 20 : 94-99, 1987
 - 10) Gorman ALF : *Differential patterns of activation of the pyramidal system elicited by surface anodal and cathodal cortical stimulation. J Neurophysiol* 29 : 547-564, 1966
 - 11) Haggishi SH, Green KD, Oro JJ, et al : *Depressive effect of isoflurane anesthesia on motor evoked potentials. Neurosurgery* 26 : 993-997, 1990
 - 12) Kaneko M, Fukamachi A, Sasaki H, et al : *Intraoperative monitoring of the motor function : Experimental and clinical study. Acta Neurochiur(Suppl)* 42 : 18-21, 1988
 - 13) Kim JH, Park YG, Cheon JS, et al : *Cerebellar evoked potentials and motor evoked potentials in the spinal cord of rats. Electroenceph Clin Neurophysiol(Suppl)* 43 : 135-146, 1991
 - 14) Konrad PE, Tacker WA, Levy WJ, et al : *Motor evoked potentials in the dogs : Effects of global ischemia in spinal cord and peripheral nerve signals. Neurosurgery* 20 : 117-124, 1987
 - 15) Levy WJ : *Clinical experience with motor and cerebellar evoked potential monitoring. Neurosurgery* 20 : 169-182, 1987
 - 16) Levy WJ, McCafferey M, Hagichi S : *Motor evoked potential as a predictor of recovery in chronic spinal cord injury. Neurosurgery* 20 : 138-142, 1987
 - 17) Levy WJ, McCafferey M, York DH : *The motor evoked potential in acute spinal cord injury. Neurosurgery* 19 : 9-20, 1986
 - 18) Levy WJ, McCafferey M, York DH, et al : *Nonpyramidal motor activation produced by cerebellar stimulation in the cat. Neurosurgery* 19 : 163-177, 1986
 - 19) Levy WJ, McCafferey M, York DH, et al : *Motor evoked potentials from transcranial stimulation of the motor cortex in cats. Neurosurgery* 15 : 214-227, 1984
 - 20) McComas AJ, Wilson P : *An investigation of pyramidal tract cells in the somatosensory cortex of the rat. J Physiol* 194 : 271-288, 1968
 - 21) Mediratta NK, Nicoll JAR : *Conduction velocities of corticospinal axons in the rat studied by recording cortical antidromic responses. J Physiol* 336 : 545-561, 1983
 - 22) 박용구 · 정상섭 · 김종환 : *흰쥐에서 운동유발전위의 특성 및 발생. 대한신경외과학회지* 20(9) : 737-751, 1991
 - 23) 박용구 · 정상섭 · 김종환 : *흰쥐의 척수에서 운동유발전위의 전도 경로. 대한신경외과학회지* 20(9) : 753-761, 1991
 - 24) Patil AA, Nagaraj MP, Mehta R : *Cortically evoked motor action potential in spinal cord injury research. Neurosurgery* 16 : 474-476, 1985
 - 25) Patton HD, Amassian VE : *Single multiple unit analysis of cortical stage of pyramidal tract activation. J Neurophysiol* 17 : 345-357, 1954
 - 26) Ryder J, Zappulla R, Nieves J : *Motor evoked potentials elicited from pyramidal stimulation and recorded from the spinal cord in the rat. Neurosurgery* 28 : 550-8, 1991
 - 27) Shiau JS, Zappulla RA, Nieves J : *The effect of graded spinal cord injury on the extrapyramidal and pyramidal motor evoked potentials of the rat. Neurosurgery* 30 : 76-84, 1992
 - 28) Simpson RK, Baskin DS : *Corticomotor evoked potentials in acute and chronic blunt spinal cord injury in the rat : Correlation with neurological outcome and histological damage. Neurosurgery* 20 : 131-137, 1987
 - 29) Stewart M, Quirk GJ, Amassian VE : *Corticospinal responses to electrical stimulation of motor cortex in the rat. Brain Research* 508 : 341-344, 1990
 - 30) Tsubokawa T : *Clinical significance of the centrifugal evoked potentials to cortical surface or scalp stimulation for evaluation of motor function during the surgery. Proceedings of the 5th annual meeting of the Japanese Congress of Neurological Surgeons. Japan Upjohn, Tokyo, pp111-122, 1986*
 - 31) York DH : *Review of descending motor pathways involved with transcranial stimulation. Neurosurgery* 20 : 70-73, 1987
 - 32) Zappular RA, Hollis P, Ryder J, et al : *Noncortical origins of the spinal motor evoked potential in rats. Neurosurgery* 22 : 846-852, 1988
 - 33) Zentner J, Ebner A : *Nitrous oxide supresses the electromyographic response evoked by electrical stimulation of the motor cortex. Neurosurgery* 24 : 60-62, 1989
 - 34) Zentner J, Kiss I, Ebner A : *Influence of anesthetics -Nitrous oxide on particular- on electromyographic response evoked by transcranial electrical stimulation of the cortex. Neurosurgery* 24 : 253-256, 1989