

운동장애질환의 신경생리학적 검사

연세대학교 의과대학 신경외과학교실, BK21의과학사업단, 뇌연구소

정현호 · 강정한 · 강동완 · 장진우

Neurophysiological Recording for Movement Disorder

Hyun Ho Jung, MD, Jeong Han Kang, MD, Dong Wan Kang, MD, Jin Woo Chang, MD, PhD

Department of Neurosurgery, Brain Korea 21 Project for Medical Science & Brain Research Institute, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

Although imaging modalities, such as ventriculography, CT and MRI, are getting more developed, electrophysiological mapping for the implantation of deep brain stimulation for the treatment of movement disorder is widely selected surgical technique to refine the target selection and to get the best results with less side effects. This review discusses the technique of mapping and electrophysiological findings of subthalamic nucleus (STN), globus pallidus internus (GPI), and ventralis intermedius (Vim) during the records using microelectrode or semimicroelectrode, microstimulation, and macrostimulation testing.

KEY WORDS: Neurophysiological recording · Movement disorder.

서론

운동장애질환의 치료에 사용되는 파괴수술 혹은 심부뇌 자극술은 기저핵-시상-피질 운동회로(basal ganglia-thalamo-cortical motor circuit)의 손상된 회로를 복원시킴으로써 환자의 이상 운동 증상을 제거하고 원래의 정상적인 운동반응으로 회복시키고자 하는 수술방법이다. 1990년 DeLong 등이 주장한 이 회로는 운동행태(motor behavior)를 조절하는데 가장 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾

그러나, 이러한 모델에 의한 운동장애질환의 설명은 아직 많은 문제점을 가지고 있다. 즉 기저핵-시상-피질 운동회로에서의 평균 discharge rate의 변화만으로는 파킨슨병의 모든 증상이나 내측 담창구 파괴술의 모든 효과를 충분히 설명할 수 없다. 또한 내측 담창구 파괴술 후 레보도파로 인한 이상운동증(dyskinesia)이 호전되는 이유도 불분명하며 심부뇌자극술의 효과 역시 아직 이론적으로 정

확한 기전을 설명하지 못한 실정이다.⁴⁾⁵⁾⁹⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁷⁾²⁰⁾²³⁾ 따라서 단순한 평균 discharge rate보다 활동전위의 발생 형태의 변화가 중요하며, 여기에 대한 정확한 이해가 있어야 각종 운동장애질환에서의 기저핵-시상-피질 회로의 역할을 정확히 밝힐 수 있을 것이다. 또한 운동장애질환에서 기저핵에서 각뇌교핵으로 가는 연결도 매우 중요하며 내측 담창구 파괴술시 내측 담창구에서 각뇌교핵으로 가는 회로가 차단되는 사실로 보아 내측 담창구 파괴술에 의한 치료 효과의 일부는 뇌간으로의 하행성회로의 차단을 통해 나타나는 것으로 생각되며 실제적으로 파킨슨병의 기전의 설명에 각뇌교핵의 역할이 점차 중요하게 인식되어 있다. 하지만 아직도 각뇌교핵의 기능과 역할에 대해서 많은 부분이 밝혀지지 못한 실정이다.⁵⁾⁹⁾¹³⁾

따라서 이에 대한 신경생리학적 검사는 단순히 정확한 수술 위치의 선정만이 아니라 질환의 병리기전을 밝히는데 필수적인 검사라 판단된다. 그러나 최근 가장 활발히 이용되고 있는 시상하핵 심부뇌자극술의 경우에도 시술기관의 신경생리검사결과가 상호 일치하지 않는 등 아직도 해결해야 할 문제가 산적하여 있다. Fig. 1은 장진우 등에 의하여 발표된 기저핵-시상-피질 운동회로의 모식도로 일부 수정된 신경회로를 보여주고 있다.

Address for correspondence: Jin Woo Chang, MD, PhD, Department of Neurosurgery, Brain Korea 21 Project for Medical Science & Brain Research Institute, Yonsei University College of Medicine, 134 Shinchon-dong, Seodaemoon-gu, Seoul 120-752, Korea
Tel: +82-2-228-2150, Fax: +82-2-393-9979
E-mail: jchang@yumc.yonsei.ac.kr

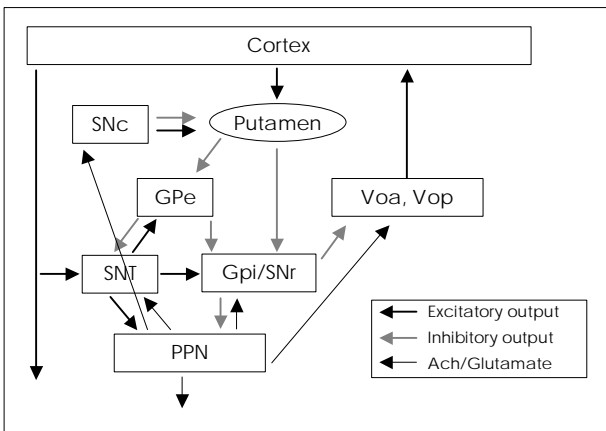


Fig. 1. Description of a network of basal ganglia-thalamocortical loops. SNc : substantia nigra pars compacta, GPe : globus pallidus externa, Gpi : globus pallidus interna, PPN : pedunculo-pontine nucleus, STN : subthalamus, Voa : ventralis oralis anterior nucleus of thalamus, Vop : ventralis oralis posterior of thalamus.

시상핵 신경생리검사

시상핵의 신경생리학적 검사는 가장 고전적인 신경외과 수술 방법인 ventralis intermedius (Vim) 핵 및 ventralis oralis posterior (Vop) 시상핵 파괴술에 이용되는 검사 방법으로 현재 일반적인 파킨슨병의 수술적 치료에 적용이 되지 않는다.¹⁻³⁾⁷⁾⁸⁾ 그러나 파킨슨병 환자가 심한 안정 시 진전과 동시에 심한 운동 시 진전(kinetic tremor) 또는 체위성 진전(postural tremor) 등을 가진 경우, 또는 진전 증상 이외에 다른 증상이 없이 장기간 증상이 고정되어 있는 경우, 본태성 진전, 다발성 경화증 및 이긴장증(dystonia) 등 일부의 경우 선택적으로 Vim시상핵의 파괴술 혹은 심부뇌자극술을 고려하여 볼 수 있기 때문에 현재에도 운동장애질환의 수술에 필수적이고 중요한 검사 방법이다.

거시전극을 이용한 신경생리검사

시상핵의 파괴술 혹은 심부뇌자극술을 시행하는 경우 목표지점에 병소용 전극 혹은 심부뇌자극용 두개강내 전극을 삽입한 후 전류를 통합으로써 목표점의 위치와 주위 주요 구조물에 의한 신경생리학적 반응을 관찰함으로써 수술 시 목표지점의 근접성에 대한 확인을 하는 검사 방법이다. 거시전극을 이용한 전기자극술은 간편하기는 하나 정확성이 떨어져 반미세전극 혹은 미세전극을 이용한 검사 방법 없이 이것만으로 위치 확인을 하는 것은 바람직하지 않다고 여겨진다. 하지만 수술실 여건, 혹은 검사장비의 부

족 등으로 검사가 여의치 않은 경우 등 일부의 경우 선택적으로 시도할 수 있는 검사법이다. 일반적으로 자극은 10~500Hz의 자극에서 잘 유발되며 5Hz 이하, 1,000Hz 이상의 자극에서는 자극의 반응이 낮다.

시상핵 신경생리검사(Vim nucleus neurophysiological study)

제3뇌실의 전교련-후교련 연결선상(anterior commissure-posterior commissure line, AC-PC line)에서 Vim 시상핵의 앞뒤 경계는 이론상, 후교련으로부터 전방으로 전교련-후교련 연결선상거리의 2/12~3/12 사이에, 옆으로는 제3뇌실 벽에서부터 약 11.5mm에 위치한다. 두개강내 전극은 Vim시상핵의 장축을 따라 삽입하는 것이 좋으며, 전류가 ventral posterolateral (VPL) 시상핵으로 파급되어 반대쪽에 이상 감각증을 유발하는 것을 피하기 위하여 Vim시상핵의 뒤쪽 경계보다는 앞쪽 경계에 가깝게 위치시키는 것이 좋다. Vim 시상핵의 목표점에 가까워질수록 전기자극(60 microsecond pulse width, frequency at 130Hz, and current intensity of 0.1~10mA)으로 진전을 억제 시키는데 필요한 전류량이 감소하여 0.2~2mA의 최소 전류만이 필요하게 된다. Vim시상핵에서는 자극을 주자마자 바로 진전이 사라지며 전류를 차단하면 1~2초 내에 다시 진전이 나타난다. 자극 후 효과는 20초 이상 지속되지 않으며, 전극은 반드시 음극(cathode)으로 하여야 한다. 이곳을 지나치면 점점 필요한 전류량이 증가하며 VPL 시상핵 자극으로 인한 이상감각증 증세가 점차 증가한다.

반미세전극을 이용한 신경생리검사

반미세전극을 이용한 검사는 비교적 용이하게 수술 시 이용할 수 있는 장점이 있다. 이는 미세 전극을 이용한 single-unit discharge 측정과는 달리 전극에 인접한 신경세포 군(group)에서 발생하는 전기활동도를 함께 측정하는 것으로, multiunit activity를 기록하는 방법이다. 따라서, 신경세포의 종류에 따른 “neural noise” 진폭의 변화로 심부뇌의 각 신경핵의 경계부위를 알아낼 수 있다. 반미세전극을 이용한 검사에서 백질 부위(white matter bundle)는 신경세포가 없는 구조물이기에 대개 조용하거나 아주 작은 잡음만 관찰된다. 하지만 Vim 시상핵에서는 왕성한 전기활동도에 의한 neural noise가 관찰된다. 또한 반미세전극으로도 시상핵 부위에서 발생하는 spontaneous bursting activity와 진전에 의해 발생하는 파형을 측정할 수 있다.

반미세전극을 이용한 방법은 결과 분석이 쉽고, 기록이 잘 되는 장점이 있으나, 세포단위로 기록이 안되므로 수술의 정확도 및 연구에 어느 정도 한계가 있다.

Fig. 2는 Vim시상핵 파괴술시 시행한 반미세전극을 이용한 전기생리학적 검사 소견으로 두개골 천공 부위부터 Vim시상핵의 병소 부위까지 반미세전극이 통과하는 구조물 각 부위에서 나타나는 반응 즉 neural noise를 나타내고 있다. 즉 대뇌 백질(white matter)과 내포(internal capsule)의 경우 신경세포가 없는 부위로 신경세포에 전기활동에 의한 neural noise가 관찰되지 않으며 목표 지점인 Vim시상핵에서 신경세포의 왕성한 전기활동에 의하여 neural noise가 증가되어 있음을 관찰할 수 있다.

미세 전극을 이용한 신경생리검사

신경계영상을 이용한 정위좌표 결정

뇌 CT(Computerized tomography), MRI(Magnetic resonance imaging) 등의 영상과 Schaltenbrand 및 Bailey의 인체 뇌지도(human brain atlas)를 컴퓨터 프로그램을 이용하여 융합(image fusion) 시키면 원하는 시상핵의 좌표와 위치를 예측할 수 있다(Fig. 3).¹⁹⁾ Fig. 3은 장진우 등에 의하여 개발된 컴퓨터 프로그램을 이용하여 실제로 Schaltenbrand 및 Bailey 인체 뇌지도에 영상을 융합시켜 수술 시 좌표를 계산하는 과정의 한 장면이다.

미세전극을 이용한 신경생리검사 소견

미세전극을 이용한 방법은 최근 운동장애질환의 수술치료에 필수적으로 요구되는 방법으로 시상핵을 지나는 여러 축을 따라 세포 단위로 측정하고 분석하여 시상핵 신경세포의 전기생리학적 상태를 알아내고, 이로써 Vim 시상핵 등 병소의 정확한 경계와 진전 등 환자의 증상에 관여하는 신경세포의 범위를 알아내는 방법으로 시상핵의 검

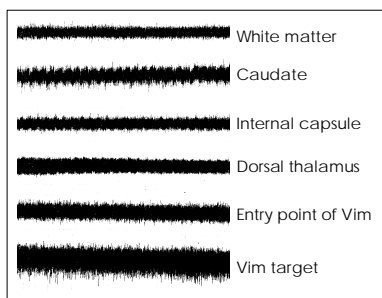


Fig. 2. An example of semi-microelectrode recording of ventralis intermedius (Vim).

사시 신경세포의 반응은 다양하게 나타난다.

즉 매우 낮은 spontaneous discharge rate를 보이는 신경세포, 좀 더 높은 spontaneous discharge rate를 보이는 신경세포 및 특징적인 “burst” 또는 “pausing” pattern을 보이는 신경세포 등 다양한 신경세포의 single unit discharge 양상이 관찰된다(Fig. 4). Fig. 4는 시상핵의 시상단면(sagittal plane) 상 각 부위의 자발성 single unit discharge의 미세전극 검사 결과를 간결히 표시한 도표이다.

Ventrocaudal(Vc) 시상핵

촉각영역(tactile area)을 담당하는 Vc 시상핵은 내측용대(medial lemniscus)의 신호가 유입되는 부위이며 높은 background noise와 큰 진폭의 신경세포 반응을 보인다. Vc시상핵에서 확인되는 신경세포의 전기활동 중 다수가 신체 특정 부위의 피부접촉, 머리카락 구부림, 가벼운 바람 등의 촉각 반응에 발생하는 single cell unit 반응을 보

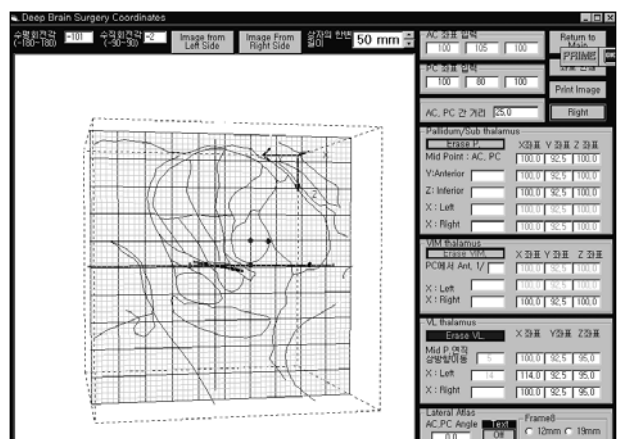


Fig. 3. Planning to get coordinates of ventralis intermedius using computer program with fusion image of Schaltenbrand and Bailey human brain atlas with MRI.

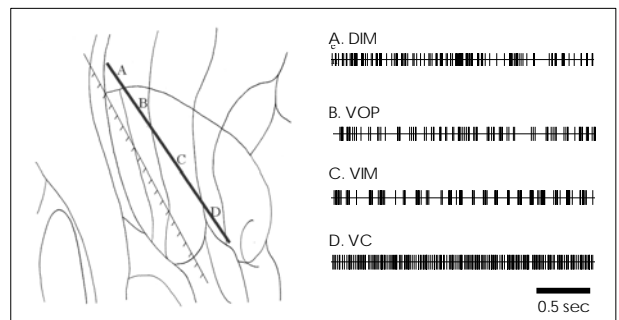


Fig. 4. Examples of characteristic patterns of spontaneous single unit discharges recorded in the thalamus. DIM : dorsalis intermedius, VOP : ventralis oralis posterior, VIM : ventralis intermedius, VC : ventralis caudalis.

인다. 특히 전후방 혹은 후 복부 방향으로는 수 mm에 걸쳐서 유사한 감각반응을 나타내지만 내측 외측부위로는 내측에서 외측으로 입술, 얼굴, 손, 팔, 다리 등의 전형적인 homunculus를 형성한다. 이러한 촉각반응은 미세전극을 이용한 미세자극에 의하여서도 동일한 반응을 얻을 수 있다.

Ventralis intermedius (Vim) 시상핵

촉각영역과는 달리 수동적 관절운동, deep pressure, squeezing등에 반응하는 신경세포가 주로 존재한다. 이들도 Vc시상핵과 유사한 homunculus를 이루나 그 배열은 덜 정확하다. 이러한 반응을 나타내는 신경세포를 kinesthetic cell이라 칭하며 주로 Vim 시상핵에 위치한다(Fig. 5).

Ventralis oralis posterior (Vop) 시상핵과 ventralis oralis anterior (Voa) 시상핵

Vim 시상핵의 바로 앞에 위치하는 Vop, Voa 시상핵에서는 반대측 관절의 자발적 운동에 반응하는 신경세포가 관찰되며 이것을 voluntary cell이라 칭한다.²¹⁾²²⁾ 이러한 세포의 일부는 동일한 부위의 수동적 관절운동에도 반응을 하여 이것을 combined cell이라 칭한다(Fig. 6).

진전과 관련된 신경세포 (Tremor cell)

진전이 동반된 파킨슨병, 혹은 본태성 진전 환자의 경우 환자의 진전과 동일한 빈도의 single cell discharge를 흔히 Vim, Vop 시상핵 등에서 관찰할 수 있다. 이러한 신경세포를 tremor cell 혹은 tremor related cell등으로 칭하

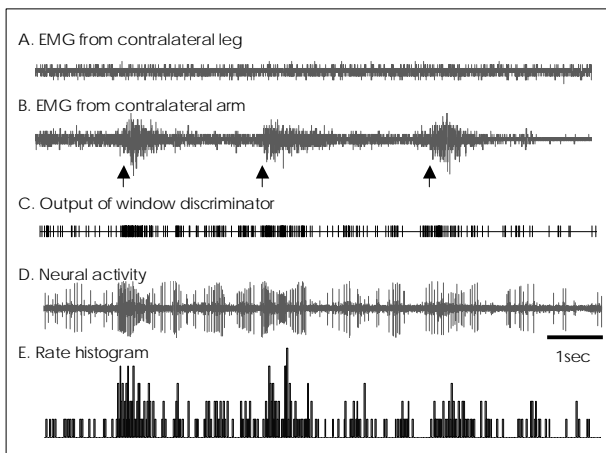


Fig. 5. Example of a kinesthetic cell. The arrows on line B shows EMG records during passive movements of contralateral arm. At the same time, in line D, increased firing rate is recorded synchronously during the movement.

며 이것의 기전에 대하여서는 아직도 명확히 밝혀져 있지 않다.⁷⁾¹⁴⁾ 현재 추정하는 것은 시상핵, 뇌 기저핵 등의 central oscillator와 peripheral proprioceptive feedback등의 multiple independent oscillator가 진전의 발생에 관여하는 것으로 추정되고 있다(Fig. 7).

내측 담창구 신경생리검사

내측 담창구의 파괴술 혹은 심부뇌자극술의 이상적인 목표지점은 Schaltenbrand 및 Bailey의 인체 뇌지도의 외측면 20mm, 내측 담창구의 하단면 아래의 시삭(optic tract)의 상단면(superior border)에 위치한다.¹⁹⁾ 일반적인 내측 담창구의 수술 목표 지점의 위치는 전교련-후교련 연

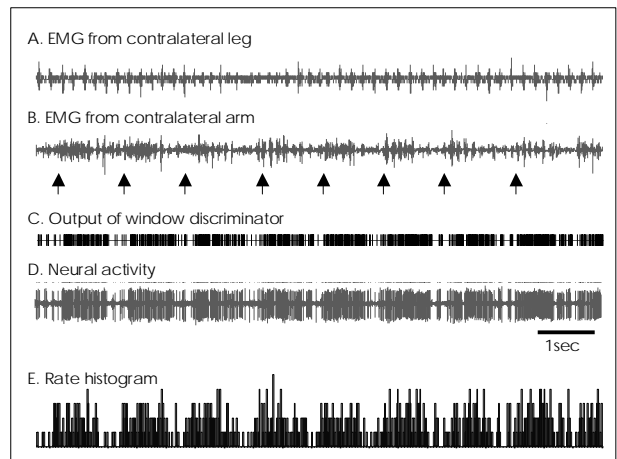


Fig. 6. Example of a voluntary cell, responding at voluntary movement of contralateral wrist during microelectrode recording in ventralis oralis posterior (Vop).

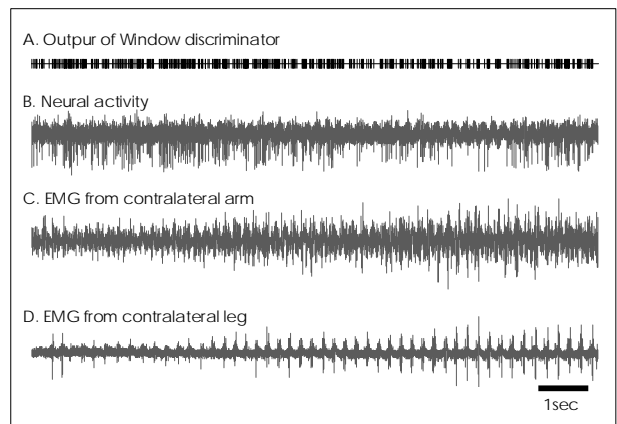


Fig. 7. Example of a tremor cell. In line C, EMG records of the contralateral arm are indicating rhythmic tremor movements. At the same time, in line B, the large unit fires in synchrony with tremor.

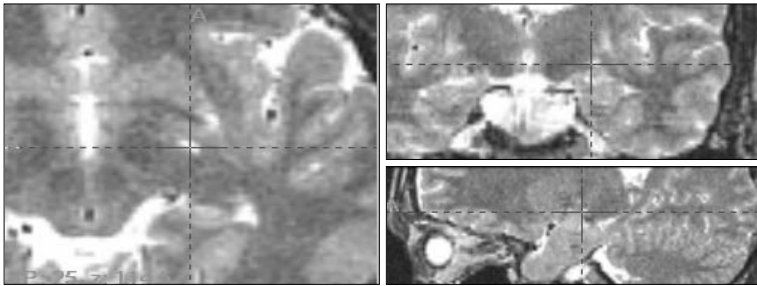


Fig. 8. MR image of surgical target of Globus pallidus interna (GPI). The optic tract is just below the target, about 2–3mm in distance.

결선의 중간 지점에서 2~3mm 전방, 2~6mm 하방, 3뇌실의 중심선에서 21~22mm 측방이다. 그러나, 뇌의 크기, 성별, 3뇌실의 모양 등에 따라 차이가 있을 수 있기 때문에 이러한 개인별 해부학적 차이를 고려하지 않고 일정한 지점을 목표점으로 정하는 것은 곤란하며, MRI상 내측 담창구의 경계와 신경생리검사결과를 비교하여 좌표를 교정하는 것이 필요하다.

거시전극을 이용한 전기 자극술

내측 담창구 수술의 경우에도 전기 자극술은 간편하기는 하나 정확성이 떨어져 미세전극을 이용한 기록 없이 이것만으로 위치 확인을 하는 것은 바람직하지 않다. 전기 자극으로 피질척수로(corticospinal tract), 시삭 등 주변 해부학적 구조물의 반응을 관찰함으로써 전극의 뇌의 위험성(vulnerability)이 있는 부위와의 근접성 여부를 확인할 수 있다. 그러나 생리적인 반응을 보기 위한 전기 자극의 정도에 대하여서는 저자에 따라 차이가 많다.¹²⁾¹⁶⁾¹⁸⁾ 일반적으로 내측 담창구 표적부의 전기 자극시 반응은 시상핵의 자극에 비해 일반적으로 높은 전류를 필요로 한다. 피질척수로의 경우 1.0mA 이상의 전류가, 시삭의 경우 0.5mA 이상의 전류가 필요하다. 만약 피질척수로의 전기 자극에 대한 반응이 이보다 낮을 때에는 전극이 피질척수로에 근접해 있는 것으로 전극의 위치를 위쪽, 앞쪽으로 이동시켜야 하며, 시삭의 전기자극에 대한 반응이 이보다 낮을 때에도 역시 전극의 위치가 시삭에 근접해 있기에 위쪽으로 목표 지점을 옮겨야 이차적인 부작용을 피할 수 있으며 MRI의 관상면(coronal plane) 영상에서 시삭의 외측 상방 경계에서 정할 수 있다(Fig. 8).

반미세 전극을 이용한 신경생리검사

내측 담창구의 반미세 전극을 이용한 검사 역시 시상핵 부위와 동일하게 비교적 용이하게 수술 시 적용할 수 있는

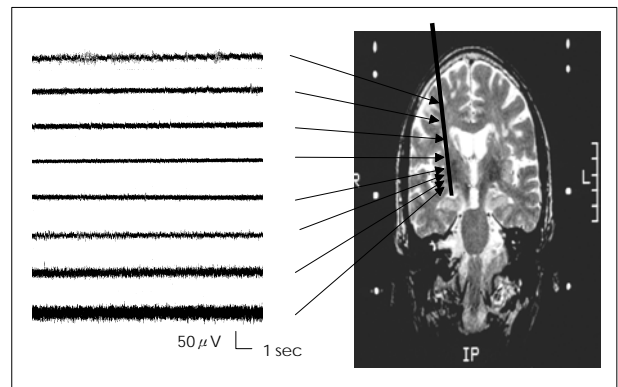


Fig. 9. An example of semi-microelectrode recording of Globus pallidus interna (GPI).

장점이 있다. Fig. 9는 담창구 파괴술 시행 시 반미세 전극을 이용한 전기생리학적 검사 소견으로 두개골 천공 부위부터 내측 담창구의 병소부위까지 각각의 심부 뇌부위에서 나타나는 neural noise를 보여주고 있다. 역시 목표지점인 내측 담창구에서 가장 neural noise가 증가되어 있음을 관찰할 수 있다.

미세전극을 이용한 신경생리검사

파킨슨병 환자에서 담창구를 지나는 축을 따라 미세 전극으로 기록할 때에 관찰되는 각 부위 신경세포의 전기적 활성화도 형태의 특징의 예는 Fig. 10과 같다. 대부분의 뇌 기저핵의 신경세포는 매우 낮은 spontaneous discharge rate를 보이는 것을 관찰할 수 있다. 외측 담창구의 신경세포는 좀 더 높은 spontaneous discharge rates(40~60Hz)가 관찰되며 특징적으로 “burst” 혹은 “pausing” pattern을 보인다. 내측 담창구의 신경세포는 좀더 높고, 규칙적(regular) 또는 tonic인 spontaneous discharge rates (60~80Hz)의 형태를 보인다. 외측 담창구와 내측 담창구의 각각을 둘러싸고 있는 백질면에서는 매우 규칙적인 30~40Hz의 discharge를 내는 경계 신경 세포(border cell)

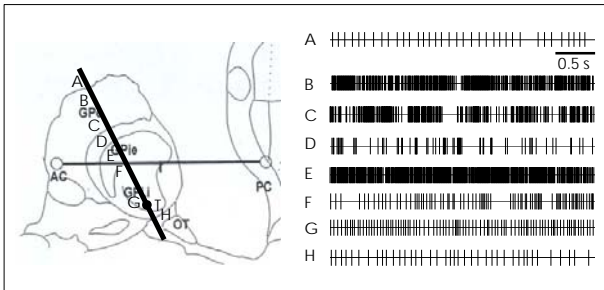


Fig. 10. Examples of characteristic patterns of spontaneous single unit discharges recorded during GPI recording. GPe : Globus pallidus externa, GPI : Globus pallidus interna, OT : optic tract, AC : anterior commissure, PC : posterior commissure, T : target.

들이 관찰되며, 기저신경세포(nucleus basalis)에서도 비슷한 양상을 보인다. 시삭은 불빛 자극에 반응하는 light-evoked axonal discharge를 통하여 위치를 확인할 수 있다. 환자의 눈에 밝은 빛을 번쩍이며 전극을 전진시키면, 내측 담창구의 하방 경계부위에서 audio monitor를 통해 고주파의 잡음이 불빛의 깜빡임과 동시에 들리게 되는데 이것이 light-evoked axonal discharge이며 쉽게 시삭의 위치를 확인할 수 있다.

그 밖에 관절의 움직임이나 deep muscle pressure가 내측 담창구의 운동 감각 세부 경계(sensorimotor subdivision)를 찾는 데 도움이 되며, 미세자극으로 내측 담창구 하방의 시삭이나 내측 담창구 후방의 피질척수로의 위치를 확인하거나, 어떤 경우에는 자극시 경직이나 무동증이 크게 호전되는 것을 관찰할 수 있다.

시상하핵 신경생리검사

파킨슨병의 병리기전에 대한 이해가 증가되면서 시상하핵의 역할에 대하여 새로운 인식이 있게 되었고, 동시에 최근 새롭게 시도되고 있는 시상하핵의 뇌심부 자극술이 시상하핵, 담창구의 타 부위 수술방법에 비하여 월등히 좋은 수술 결과를 보이고 있다. 현재 이러한 시상하핵의 수술은 신경계영상의 발전에 의하여 정확한 시상하핵 등의 구조물을 확인할 수 있고 수술 시 전기생리학적 검사방법을 이용함으로써 수술의 성적 향상과 합병증의 예방에 커다란 도움을 얻고 있다.

거시전극을 이용한 전기자극술

시상하핵 역시 수술 시 자기공명영상 소견은 수술부위

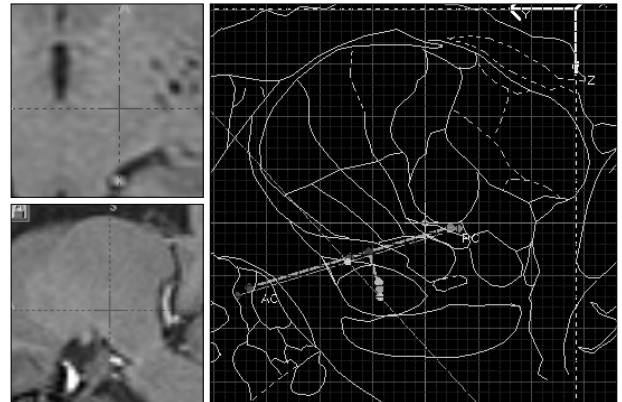


Fig. 11. Image fusion of MRI and Schaltenbrand and Bailey human brain atlas using computer program. The target, almond shaped subthalamic nucleus, is pointed with red-cross line.

의 결정에 매우 중요하다. 시상하핵은 전교련-후교련 연결선 중간 1/3지점에서 하방으로 0mm에서 6mm 사이에, 정중선으로부터 측방으로 10mm에서 13mm 사이에 위치한다. 또한, 아몬드 형태로 생긴 시상하핵은 적핵(red nucleus)의 1mm에서 2mm 앞, 흑질 망상체(substantia nigra, pars reticulata)의 2mm에서 3mm 위, 약간 옆에 위치하며, 외부로는 내포에 의해, 뒤로는 유두체에 의해 경계 지워진다(Fig. 11).

거시전극을 이용한 전기자극술시 삽입된 두개강내 전극으로 시상하핵의 자극시 frozen situation에 있는 환자에서 사지의 무동증과 운동 수행 능력이 크게 호전되는 것을 관찰할 수 있다. 손목의 경직 정도가 수술 중 자극의 효과를 가장 잘 볼 수 있는 곳인데, 충분한 자극이 되면 손목의 수동적 경직의 변화로 쉽게 알 수 있다. 또한 전극의 삽입에 따른 이차적 이긴장증 등의 소견이 관찰되기도 한다.

미세전극을 이용한 신경생리검사

시상하핵의 미세 전극 기록법은 파킨슨병 환자에서 현재 널리 이용되고 있다. 일반적으로 시상하핵의 축을 따라 미세전극으로 기록할 때에 관찰되는 각 부위 신경세포의 전기적 활성화도 양상의 특징의 예는 Fig. 12와 같다. 현재까지 문헌상 수술에 도움이 되는 검사상 가장 특징적인 소견은 시상하핵과 흑질 망상체간의 neuronal discharge frequency의 차이이다. Lozano 등에 의하여 보고된 바에 의하면 시상하핵의 경우 40~50Hz, 흑질 망상체의 경우 80~120Hz로 높은 빈도를 보이기에 표적부위의 시상하핵의 위치를 확인하기가 용이하다고 하였다. 그러나 Benabid의

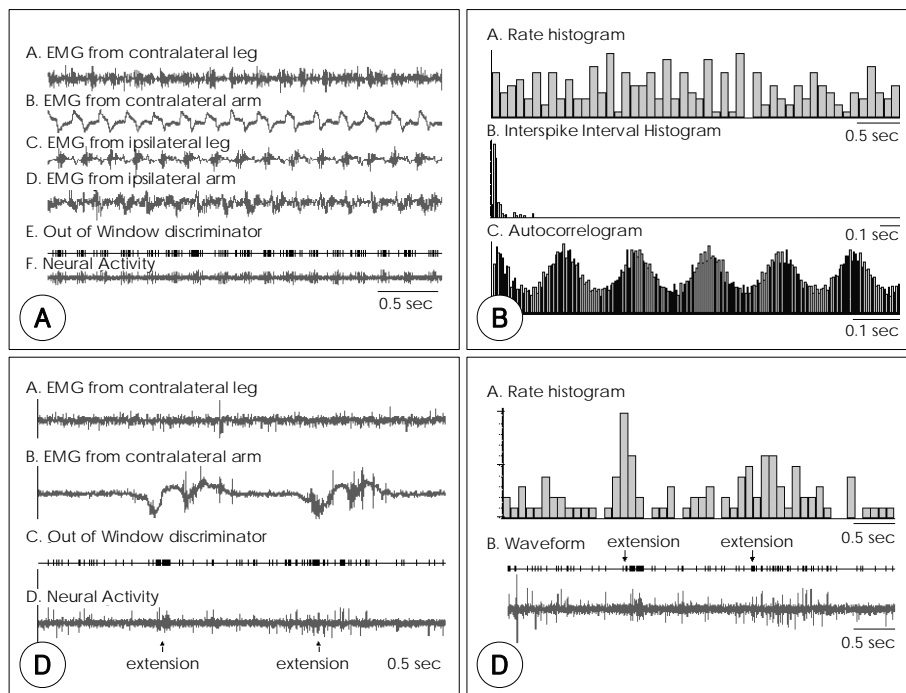


Fig. 12. A : Bursting discharges responding with tremor during subthalamic nucleus recording. B : Example of auto-correlogram of bursting discharge responding with tremor. C : Bursting discharges responding with contralateral arm flexion during movement-related neurophysiological test. D : Example of autocorrelogram of neuronal activity responding with contralateral arm flexion.

Table 1. Neuronal activity findings during deep brain stimulation of subthalamic nucleus (STN)

Target	Firing rate	Burst frequency	SP	BC (%)		Total neuron
				Op	Data	
STN	83.38 ± 9.57	2.26 ± 0.18	33	116 (76.3)	40 (26.3)	152
SN	63.35 ± 11.75	1.7 ± 0.03	9	19 (67.9)	9 (32.1)	28

STN : subthalamic nucleus, SN : substantia nigra

경우 오히려 시상하핵의 신경세포의 활성도가 흑질 망상체보다 더 높다고 보고하였다. 저자의 연구결과 Table 1에서 보면 시상하핵의 경우 오히려 약간 빈도가 높은 것을 관찰하기도 하였다.

그러나 이러한 논란보다 시상하핵에서는 미세전극을 이용한 신경생리검사 중 흑질 망상체 및 기타 다른 부위에서 관찰할 수 없는 진전에 반응하는 신경세포, 수동 혹은 자발적 관절운동에 반응하는 신경세포 등이 다수 관찰되기 때문에 이들을 통하여 시상하핵의 위치를 보다 정확히 확인할 수 있다. 이러한 반응세포들은 시상하핵의 후배부에 주로 위치한다. 이외에 다양한 bursting neuron, 혹은 spontaneous discharge neuron 등이 시상하핵에서 관찰이 된다(Fig. 12).

REFERENCES

1. Benabid AL, Pollak P, Louveau A, Henry S, de Rougemont J: Combined (thalamotomy and stimulation) stereotactic surgery of the VIM thalamic nucleus for bilateral Parkinson's disease. *Appl Neurophysiol* 50:344-346, 1987

2. Benabid AL, Benazzouz A, Gao D, Pollak P, Hoffmann D, Linousin P: Chronic electrical stimulation of the ventralis intermedius nucleus of the thalamus and of other nuclei as treatment for Parkinson's disease. *Tech in Neurosurg* 5:5-30, 1999

3. Benabid AL, Krack PP, Benazzouz A, Limousin P, Koudsie A, Pollak P: Deep brain stimulation of the subthalamic nucleus for Parkinson's disease: methodologic aspects and clinical criteria. *Neurology* 55 suppl 6:S40-S44, 2000

4. Benazzouz A, Hallett M: Mechanism of action of deep brain stimulation. *Neurology* 55 suppl 6:S13-S16, 2000

5. Breit S, Bouali-Benazzouz R, Benabid AL, Benazzouz A: Unilateral lesion of the nigrostriatal pathway induces an increase of neuronal activity of the pedunculopontine nucleus, which is reversed by the lesion of the subthalamic nucleus in the rat. *Eur J Neurosci* 14:1833-42, 2001

6. Broggi G: Chronic deep brain stimulation: clinical results. in *Germano IM (ed): Neurosurgical topics. Illinois, AANS publication committee, 1998, pp168-175*

7. Chang JW: Microelectrode recording-guided bilateral subthalamic deep brain stimulation in patients with Parkinson's disease. *JKAMA* 7:19-23, 2001

8. Chang JW, Lee NW, Lee MS: Microelectrode Recording-Guided Deep Brain Stimulation in Patients with Movement Disorders (The First Trial in Korea). in *Kristy Lultas-Ilnsky and Igor A. Ilnsky (ed): Basal Ganglia and Thalamus in Health and Movement Disorders, New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, pp341-347*

9. Chang JW, Yang JS, Jeon MF, Lee BH, Chung SS: *Effect of Subthalamic Lesion with Kainic Acid on the Neuronal Activities of the Basal Ganglia of Rat Parkinsonian Models with 6-hydroxydopamine. Acta Neurochirurgica (in press)*
10. Defer GL, Widner H, Marie RM, Pemy P, Levivier M: *Core assessment Program for Surgical Interventional Therapies in Parkinson's Disease (CAPSIT-PD). Mov Disord 14:572-584, 1999*
11. DeLong MR: *Primate models of movement disorders of basal ganglia origin. Trends Neurosci 13:281-285, 1990*
12. Germano IM: *Chronic deep brain stimulation: indications and techniques. in Germano IM (ed): Neurosurgical topics. Illinois, AANS publication committee, 1998, pp159-167*
13. Hassani OK, Mouroux M, Feger J: *Increased subthalamic neuronal activity after nigral dopaminergic lesion independent of disinhibition via the globus pallidus. Neuroscience 72:105-115, 1996*
14. Hurtado JM, Gray CM, Tamas LB, Sigvardt KA: *Dynamics of tremor-related oscillations in the human globus pallidus: a single case study. Proc Natl Acad Sci 96:1674-1679, 1999*
15. Kojima J, Yamaji Y, Matsumura M, Nambu A, Inase M, Tokuno H: *Excitotoxic lesions of the pedunculopontine tegmental nucleus produce contralateral hemiparkinsonism in the monkey. Neurosci Lett 226:111-114, 1997*
16. Kumar R, Lang AE, Rodriguez-Oroz MC, Lozano AM, Limousin P, Pollak P: *Deep brain stimulation of the globus pallidus pars interna in advanced Parkinson's disease. Neurology 55 suppl 6:S34-S39, 2000*
17. Paul G, Reum T, Meissner W, Marburger A, Sohr R, Morgenstern R: *High frequency stimulation of the subthalamic nucleus influences striatal dopaminergic metabolism in native rats. Neuroreport 11:441-444, 2000*
18. Rezaei AR, Hutchison W, Lozano AM: *Chronic subthalamic nucleus stimulation for Parkinson's disease. Neurosurg Operative Atlas 8:195-207, 2000*
19. Schaltenbrand G, Bailey P (eds) : *Introduction to stereotaxis with an atlas of the human brain. Stuttgart, Thieme, 1959*
20. Starr PA, Vitek JL, Bakay RAE: *Deep brain stimulation for movement disorder. Neurosurg Clin North America 9:381-402, 1998*
21. Tamas LB, Tchong TK: *Selective thalamotomy for tremor: A new look at an old procedure. Tech in Neurosurg 5:65-72, 1999*
22. Tasker RR, Dostrovsky JO, Hutchison WD: *Microelectrode recording technology. Tech in Neurosurg 5:46-64, 1999*