

Review Article

수술 중 신경계 감시를 위한 유발전위검사의 기초: 운동유발전위와 체성감각유발전위

구용서¹, 김대열^{2*}

¹서울아산병원 울산대학교 의과대학 신경과

²서울아산병원 울산대학교 의과대학 재활의학과

Basic principles and practices of evoked potential for intraoperative neurophysiological monitoring: motor evoked potential and somatosensory evoked potential

Yong Seo Koo¹, Dae Yul Kim^{2*}

¹Department of Neurology, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine, Seoul, Korea

²Department of Rehabilitation, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine, Seoul, Korea

ABSTRACT

Evoked potentials such as somatosensory evoked potentials (SSEP) or motor evoked potentials (MEP) are the most important and the most widely used modality in intraoperative neurophysiological monitoring. Although these two modalities measure different structures and have different clinical meaning, the aims of both modalities are the same, that is, the protection of neuronal injury during surgery. This review consists of three main parts: 1) general considerations such as safety, etiquette, and infection control, 2) SSEP, 3) MEP. Each section of SSEP and MEP includes subsections of neuroanatomy, neurophysiology, standardized methodology, interpretation and intervention, anesthetic consideration, and clinical consideration.

Keywords: evoked potential; evoked potential, motor; evoked potential, somatosensory; intraoperative neurophysiological monitoring

서론

수술중신경계감시(intraoperative neurophysiological monitoring, INM)은 수술 중 신경계 손상을 방지하기 위하여 신경생리학적인 감시를 시행하는 방법이다. 이 중에서도 운동유발전위(motor evoked potential, MEP) 및 체성감각유발전위(somatosensory evoked potential, SSEP) 검사는 대부분의 INM에서 가장 많이 쓰이고 있다.

본 종설에서는 수술 중 유발전위검사의 기본적인 원리 및 적용에 대해서 논하고자 하며, 이는 과거에도 몇몇 국내 저자들이 출판한 원고에서 이미 자세히 다뤄졌던 주제이다[1-5]. 하지만, 대한수술중신경계감시 학회의 창립하며 발간되는 창간호에 INM의 기본적인 내용을 다루는 것이 필요할 것으로 판단되어 본 주제를 다루고자 한다. 본 종설에서는 INM에 MEP 및 SSEP에 대한 소개에 중점을 맞추었고, 세계적으로 통

용되는 최근의 진료지침을 참고하여 작성하였다[6-9].

전반적인 고려사항

INM은 일반적인 유발전위검사와 다르게 수술실에서 시행되므로 환자의 안전에 대한 고려가 중요하다[10]. INM에서 사용되는 바늘전극은 좁은 면적에 많은 전류가 흘러 화상을 입는 경우가 발생할 수 있으므로 주의가 필요하다. 또한, 많은 기계가 좁은 공간에 있는 수술실 특성상 전기코드와 전선 관리가 중요한데, 잘못 위치한 전극은 잘못된 정보를 줄 뿐만 아니라, 눌리는 곳에 위치한 전극으로 욕창이 발생할 수 있으므로 정확한 전극위치를 결정하여 INM을 시행해야 한다.

INM이 금기사항이 되는 경우는 거의 없어 안전한 것으로 알려져 있다. 하지만, 뇌전증, 뇌피질 병변, 두개골의 결손, 뇌압 상승, 심장질환, 뇌내 전극, 혈관 클립, 심박 조율기 등이

Received February 4, 2019; Revised February 18, 2019; Accepted February 18, 2019

*Corresponding author: Dae Yul Kim, Department of Rehabilitation Medicine, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine, 88, Olympic-ro 43 gil, Songpa-gu, Seoul 05505, Korea

Tel: +82-2-3010-3800, Fax: +82-2-3010-6964, E-mail: dykimsmart@gmail.com

© 2019 Korean Society of Intraoperative Neurophysiological Monitoring (KSION)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있는 환자인 경우에는 주의가 필요하다. 드물지만, MEP 시행 시에 합병증이 발생하는 경우가 있는데, 혀를 깨물어서 손상이 발생하거나 기도삽관 튜브를 물어서 문제가 발생할 수가 있으므로 깨물지 않도록 하는 보호장구가 필요하다. 심한 경우에는 하악골의 골절이 유발되는 경우도 있다. 또한, MEP를 자극할 때 발생하는 움직임으로 인해서 수술에 방해가 되거나 환자의 위해를 가하는 일이 발생할 수 있으므로 항상 외과의사와 합의 하여 MEP의 자극시기를 결정해야 한다. 뇌에 가해지는 경두개 전기자극(transcranial electrical stimulation, TES)은 경련을 일으키기도 하므로 대처방법을 미리 숙지해야 한다.

수술대상이 되는 환자는 감염에 취약하기 때문에 수술방에서의 무균조작법을 반드시 숙지해야 하고, 사용하는 기계에 대한 감염관리도 철저히 해야 한다. 환자의 몸에 부착되는 전극은 소독하여 사용하며, 특히, 외과의사가 사용하는 전극은 엄격한 무균조작술을 통해 외과의사에게 전달해야 한다. 환자에 대한 감염 외에도 검사자의 감염 예방이 중요한데, INM을 시행하는 의사 및 기사는 적절한 보호장구를 착용 후 검사를 시행해야 한다. 때로는 수술용 투시조영장비 등을 사용하고 많은 방사선 조사량에 노출될 수 있으므로 필요한 경우에 보호장구를 착용해야 한다.

INM은 신경생리 전문가가 주도적으로 준비하고 판독을 하지만 수술팀, 마취과, 간호팀 및 기타 수술실 인원들과 함께 팀을 이뤄서 환자가 안전한 수술을 받을 수 있도록 노력해야 한다. 따라서, 수술실 내 다른 인원들에 대해서 항상 예의를 갖추며, 본연의 업무를 충실하게 이행하도록 노력해야 한다.

수술 전 신경생리학적인 검사를 시행하여 미리 환자에 대한 정보 및 기준치 이상을 파악하는 것이 도움이 되는 경우가 있다. 수술 전 차트 리뷰를 통해 수술에 따른 INM의 종류를 결정하고, 필요한 기계 및 물품이 부족하지 않도록 준비해야 한다. 마취가 시작되면 반드시 기준치를 최대한 잘 얻는 것이 중요하지만, 수술 및 마취 상황에 따라서 기준치를 변경해야 하는 경우가 생기므로 마취과와의 협조를 통해서 INM이 원활하게 이뤄지도록 해야 한다.

INM을 적절하게 시행하기 위해서는 상기에 기술한 바와 같은 다양한 사항을 충분히 고려해야 한다. 하지만, 가장 중요한 부분은 각자의 병원 환경에 맞춰서 임상신경생리 전문가가 정확한 지침을 숙지하고 설정한 방법으로 검사를 시행하는 것이다. 특히, MEP 및 SSEP는 거의 모든 수술에서 중요한 검사이므로 정확한 방법을 숙지하는 것은 필수적이다.

체성감각 유발전위(Somatosensory evoked potential, SSEP)

SSEP는 INM의 여러 방법 중 가장 많이 사용되는 방법 중

하나이다. 이는 감각신경계를 평가하지만, 운동신경계와 감각신경계의 위치가 근접해 있는 경우가 많아서 감각신경계만을 평가하는 것이 아니라, 운동신경계의 변화를 감지하는 데에도 사용한다. SSEP는 MEP보다 자주 측정할 수 있고, 파형도 안정적으로 얻을 수 있으며, 병변 위치에 대한 평가에도 도움을 주기 때문에 많이 사용된다.

1. 신경해부학

체성감각계는 감각종류에 따라서 분별 촉각, 고유수용성 촉각, 진동 촉각 등을 담당하는 뒤기둥(dorsal column)으로 주행하거나 통증, 온도감각 등을 담당하는 앞외측기둥(anterolateral column)으로 주행한다. SSEP는 빠르고 두꺼운 축삭을 통해 전달되는 뒤기둥을 이용한 통로로 전달되기 때문에 느리고, 전도속도가 다양한 앞외측기둥을 평가하기는 어렵다.

감각신경의 자극은 말초신경에서 팔신경얼기(brachial plexus) 혹은 허리엉치신경얼기(lumbosacral plexus)를 지나가고 신경뿌리(root)를 통해 척수로 진입한다. 척수는 L1-L2 위치에서 끝나기 때문에 허리엉치신경뿌리(lumbosacral roots)는 말총(cauda equina)을 거쳐서 척수로 신호가 전달된다. 척수로 들어간 이후에는 뒤기둥을 거쳐서 연수(medulla oblongata)에 도달하게 되는데, 여기까지가 체성감각계의 일차신경세포이다. 일차신경세포의 신경세포체는 뒤뿌리신경절(dorsal root ganglion)에 위치하고 있다. 이차신경세포는 연수에 위치하고 있는데, 팔에서 오는 경우에는 뿔뿔기다발핵(nucleus cuneatus), 다리에서 오는 경우에는 얇은다발핵(nucleus gracilis)에서 연접(synapse)하여 계속 주행하게 된다. 이후에는 일반적으로 바로 속활꼴섬유(internal arcuate fiber)로 십자형으로 교차(decussation)하여 반대쪽 안쪽섬유띠(medial lemniscus)로 주행을 이어가고, 시상에서 위치한 가쪽뒤배쪽핵에 도달한다. 여기에서 삼차신경세포로 연접을 하고, 속섬유막뒤쪽다리(posterior limb of internal capsule)로 주행을 이어가고, 시상피질투사(thalamocortical projection)를 통하여 피질의 일차감각피질(primary sensory cortex)에 도달하는 것으로 주행이 마무리된다.

뇌줄기의 드문 기형으로 체성감각계의 뒤기둥 경로와 겹칠 척수로의 속활꼴섬유 및 피라미드의 교차가 일어나지 않는 경우가 있는데, 이를 비교차(nondecussation)라고 한다. 이러한 경우에는 뒤기둥 경로가 동측의 피질로 주행을 하게 된다. 이를 가장 흔하게 볼 수 있는 경우는 수평주시마비와 진행성 척추측만증이 있는 경우가 있다[11,12]. 대체로 중등 지역에 2.3%로 상당히 많다고 알려져 있으나, 북아메리카, 유럽, 일본 등 다른 곳에도 있다고 알려져 있어서 유의가 필요하다[13].

INM은 혈액학적인 문제로 영향을 받는다. 따라서, INM에 영향을 미칠 수 있는 구조물들에 대한 혈액공급의 해부학에

대한 이해가 중요하다. 앞대뇌동맥(anterior cerebral artery)은 내측 일차감각피질에 혈액을 공급하고, 중간대뇌동맥(middle cerebral artery)은 외측 일차감각피질에 혈액을 공급한다. 감각에 대한 호먼큐러스(homunculus)에서 내측 일차감각피질인 경우에는 몸통과 다리, 외측 일차감각피질인 경우에는 팔 및 얼굴 등을 담당하게 되므로 혈액공급의 이상 부위에 따라 INM에서 나타나는 이상이 다른 영역에서 나타난다. 중간대뇌동맥 및 앞맥락동맥(anterior choroidal artery)에서 나오는 렌즈핵선조체동맥(lenticulostriate artery)은 시상피질투사를 공급하는데, 이 부위에서는 팔과 다리의 위치가 가깝기 때문에 이 부위의 이상은 상하지 SSEP 모두 영향을 미친다. 뒤쪽대뇌동맥(posterior cerebral artery)은 시상의 혈액을 공급한다. 뇌바닥동맥(basilar artery) 및 척추동맥(vertebral artery)의 분지는 속섬유막에 혈액을 공급하고 있다. 양측 뒤쪽척수동맥(posterior spinal artery)은 척수에서 뒤기둥 및 바깥쪽 뒤뿔(posterior horn) 영역을 담당하고 있고, 앞척수동맥(anterior spinal artery)은 앞뿔(anterior horn)과 피질척수로(corticospinal tract)를 담당한다. 이 척수 동맥들은 경부(cervical), 대동맥(aorta), 엉덩뼈동맥(iliac artery) 등에서 기인하는 뿌리동맥(radicular artery)과 연결을 이룬다. 자동조절기전(auto-regulation)은 혈류량, 대사(metabolism) 속도, 뇌압 등 다양한 변수에 의해서 영향을 받으므로 INM의 변화를 판단할 때 이러한 영향에 대한 고려가 필요하다.

2. 신경생리학

신경해부학 구조물의 이상은 신경생리학적 방법을 통해 평가할 수 있다. 말초신경에 문턱값 이상의 전기자극을 주면 신경세포에서 활동전위가 발생하여 말초신경세포의 축삭을 따라서 전도가 된다. 이렇게 발생한 활동전위는 전기적인 변화를 일으키기 때문에 기록전극을 사용하여 이러한 변화를 기록한다. 기록전극에서의 전위변화는 원위부전위(far-field potential)와 근접부전위(near-field potential)로 나눈다. 근접부전위는 기록전극이 바로 근접한 곳의 전위의 변화를 기록하므로 전위발생부위와 기록전극의 거리에 따라 진폭 및 잠복기에 변한다. 반면, 원위부전위는 기록전극과 전위발생부위의 거리가 멀어 전체적인 전기장의 변화만을 기록한다. 따라서, 기록전극과 전위발생부위의 거리가 진폭 및 잠복기에 미치는 영향이 적다. SSEP 측정을 하기 위해서는 말초신경에서 최대상(supramaximal)의 전기자극을 준다. SSEP에서는 '중추 증폭'이 일어난다. '중추증폭'이란 말초신경의 변화를 최대로 일으키는 자극의 문턱값이 중추신경의 변화를 최대로 일으키는 자극의 문턱값보다 높다는 것을 의미한다[14,15]. 즉, 말초신경의 변화가 최대로 일어나기 전에 중추신경의 변화는 최대

로 일어난다. 따라서, 일부의 말초신경의 손상이 있다고 하더라도 SSEP는 측정이 잘 될 수 있다. 말초신경자극은 주로 팔이나 다리의 원위부에서 시행하게 되는데, 이 때 팔오금 혹은 다리오금에서 말초신경축삭으로 지나가는 근접부 전위를 기록할 수 있고, 팔에서는 일반적으로 팔신경얼기로 지나가는 신경전도를 에르브점(Erb's point)에서 기록한다. 이후에는 척수로 주행하는 근접부 전위를 기록한다. 일반적으로는 상지 SSEP는 C5에서 N13을 기록하고, 하지 SSEP는 T12에서 N22를 기록한다. 연수에서 일차신경세포에서 이차신경세포로 연결하는데, 원위부전위를 이용하여 이를 기록한다. 원위부전위는 두피에서는 다른 위치라도 비슷한 전위를 가지게 된다. 따라서, 두피에서 기록된 전극으로만 구성을 하면 전위차가 적어서 파형이 잘 형성되지 않으므로 두부 외에 부착된 전극과 두피전극을 사용하여 기록한다. 일차감각피질은 안정적인 양극성 전기장을 띠고, 이를 통해 근접부전위인 피질 SSEP를 기록한다. 경막하전극으로 기록하는 경우에는 중심고랑(central sulcus) 뒤에서는 N20, 앞에서는 P20이 기록이 되어 위상역전(phase reversal)을 확인할 수 있다. 하지 SSEP는 뇌피질 안쪽에서 P37이 기록되는데, 피질이 안쪽으로 위치하기 때문에 자극 동측에서 기록되는 경우가 많다[16-18].

3. 측정방법

수술 중 SSEP를 기록하기 위해서는 표면전극이나 바늘전극을 사용한다. 표면전극은 수술 전에 미리 부착하므로 수술방에서의 준비시간을 줄일 수 있다. 또한, SSEP를 초반에 기록하고 최적화하는 장점이 있다. 하지만, 이를 부착 또는 제거할 때 사용하는 콜로이돈 및 아세톤 등은 화재에 취약하므로 주의가 필요하다. 바늘전극은 수술방에서 삽입이 용이하다. 단점으로는 감염, 출혈의 부작용이 있고, 부착면적이 작아서 단위면적당 전류가 많이 흐르므로 화상을 일으킬 수도 있다.

SSEP는 상지에서는 정중신경(median nerve)을, 하지는 경골신경(tibial nerve)을 자극하여 시행한다. 상지에서 C8-T1 등 하부 경부에 대한 모니터링이 필요한 경우 척골신경(ulnar nerve)을 자극한다. 하지에서 경골신경 자극이 어려운 경우 비골신경(peroneal nerve)이나 무릎오금(popliteal fossa)의 경골신경을 자극할 수 있다. 전기자극은 0.2-0.3 ms의 일정한 전류가 흐르는 사각형모양의 자극을 주는데, 최대상 자극강도는 감각신경의 자극 문턱값의 3배 혹은 운동신경 자극 문턱값의 2배 정도이다. 일반적으로 반복적인 자극의 부작용은 없으나, 다리오금의 정중신경의 반복자극은 종아리앞칸 증후군(anterior tibial compartment syndrome)을 일으킬 수 있어 주의가 필요하다[6]. 60 Hz 간섭 잡파(artifact)를 줄이기 위해 자극 빈도는 60 Hz의 인수를 피한다. 일반적으로 추천되는 자극 빈도는 4.7 및 5.1 Hz 등이다.

기록전극은 임피던스를 작게 하고(<5 k Ω) 기록전선의 전선을 꼬아 잡파를 덜 일으키게 한다. 60 Hz 썬키필터는 잔상현상(ringing)을 일으키므로 가능한 사용하지 않는다. 일반적으로 두피에서의 필터는 30-300 Hz, 말초에서는 0.2-1,000 Hz를 사용한다. 표본추출율(sampling rate)은 3,000-4,000 Hz, 해상도는 16 bit 이상을 사용한다. 한 화면의 전체 시간은 상지는 50 ms, 하지는 100 ms가 되게 설정한다. 잡파가 많은 SSEP는 한번에 얻어지지 않고, 200번 이상 평균을 내야 확인된다. 하지만, 상황에 따라 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)가 좋으면 가능한 적게 자극하여 이상을 빨리 확인하여 보고하는 것이 좋다.

SNR은 기록전극의 위치에 따라 다른데, SNR이 적은 기록전극 위치는 INM을 더 효과적으로 하게 한다[11,13,19-23]. 일반적으로 상지 SSEP 기록전극의 위치는 말초부위는 'EPi-EPc' 혹은 'Epi-Fz', 척수 부위는 'C5-EPc'나 'C5-Fz', 피질하 부위는 'CPi-EPc', 피질 부위는 'CPc-Fz', 'CPc-Fpz' 혹은 'CPc-CPi' 등을 사용해 왔다. 하지만, 최근에는 말초부위는 CF(cubital fossa, 팔오금 부위), 피질 부위는 'CPc-CPz'를 사용하거나 'CPc-CPi' 혹은 'CPc-Fz' 등을 사용하도록 추천한다[6,11,13,19-24]. 일반적으로 하지 SSEP 기록전극의 위치는 말초부위는 'PF', 척수 부위는 'T12-IC', 피질하 부위는 'Fpz-C5', 피질에서는 'CPz-Fpz', 'CPz-Fpz' 혹은 'CPi-CPc' 등을 사용해 왔다. 하지만, 최근에는 말초부위는 PF(다리오금 부위), 피질 부위는 'CPz-CPc'를 사용하거나 'CPz-CPz', 'Pz-CPc', 'iCPi-CPi', 'CPc-CPc', 혹은 'Cz- Pz' 등을 사용하도록 추천한다[6,11,13,19-24]. 일부 상황에서는 다른 기록전극위치를 사용하기도 한다. 예를 들어, 비교차가 일어나는 경우에는 전극위치를 반대로 하거나, 앉은 자세에서 시행하는 후두와 수술(posterior fossa surgery)인 경우에는 중심두정엽 SSEP가 감소하므로, 하지는 'CPz-Fpz', 상지는 'CP3'이나 'CP4' 대신에 'CP5'나 'CP6' 혹은 'T3'나 'T4'의 위치를 사용하는 것을 추천한다[25,26]. 기존 SSEP 중에서 피질하 부위는 SNR이 낮고, 척수 부위는 없어도 문제가 되는 경우가 드물어서 잘 시행하지 않는다.

4. 결과해석 및 조치

INM 도중에 발생하는 SSEP 이상은 해석 시 다양한 혼란변수를 먼저 고려해야 한다. 먼저, 말초신경 이상 혹은 전반적인 문제인지를 확인하기 위해서는 말초부위의 SSEP를 확인하고, 반대쪽 SSEP도 확인을 해야 한다. 마취심도 및 마취의 변화, 혈압, 뇌두피의 부종, 저체온 등은 SSEP에 전체적으로 영향을 미칠 수 있다. 또한, 자극실패, 사지의 압박 혹은 허혈, 어깨의 잘못된 위치로 인한 팔신경얼기의 손상, 과거 다른 문제로 인한 뇌 혹은 척수 병변 등으로 인하여 국소적으로 SSEP의 이상

이 발생할 수 있다. 따라서, 이러한 것들이 의심되는 경우에는 자극문제 해결, 사지의 이상 확인, 마취변경 확인, 혈압상승 등으로 발생한 SSEP의 이상을 가능한 빨리 교정을 하고 적절한 INM이 이뤄질 수 있도록 해야 한다.

기존에는 SSEP의 50% 진폭감소 및 10% 잠복기 증가를 경고기준으로 사용하였다. 하지만, 여기에는 크게 두 가지 문제점이 있다. 첫째, 탈수초현상으로 일어나는 잠복기 증가는 수술하는 짧은 시간 동안 발생하지 않는다. 둘째, 수술 중에는 점차 기준치가 변화를 하는 경우가 일어난다. 예를 들면 척추측만증 수술 중에 약 20%의 환자에서 SSEP 기준치가 50% 이상 감소한다[13,20,21]. 적응성 경고기준(adaptive warning criteria)을 사용하면 위양성을 줄일 수 있어 추천된다[6,13,21]. 적응성 경고기준은 점차 진행하고, 전반적으로 진행되는 SSEP의 변화의 추세를 확인하면서 그 추세에서 갑자기 벗어난 이상을 확인하는 것이다. 즉, 수술 시작지점에서 시행했던 기준치에 대한 절대적인 수치로 경고하지 않고, 추세에서 확연하게 떨어진 경우에만 경고하게 된다. 재현성이 높은 경우에는 조금만 이상이 있어도 경고가 가능하지만, 재현성이 낮은 경우에는 50% 이상 진폭이 감소하거나 명확한 이상이 발생한 경우에만 경고를 한다.

INM을 시행할 때에는 경고에만 그치지 않고 임상적인 상황에 따라 필요한 조치를 시행해야 한다. 먼저, 전반적인 변화 혹은 국소적인 변화가 수술 외적인 다른 문제에 기인하였다면 이를 교정한다. 수술상황 때문에 경고가 이뤄진 경우에는 그에 상응하는 조치를 집도의에게 추천해야 한다. 따라서, INM을 시행하는 임상신경생리 전문가는 INM에 대한 충분한 수련과 경험이 있어야 해석과 조치를 할 수 있다.

5. 마취

아산화질소와 같은 흡입마취제를 사용하는 경우에는 용량에 비례하여 다중연접으로 형성되는 피질 SSEP의 파형형성이 억제된다. 따라서, INM이 필요한 수술에서의 마취는 파형억제가 적어 SNR이 높일 수 있는 프로포폴 및 아편유사제를 사용한 전혈관내마취(total intravenous anesthesia, TIVA)를 많이 사용한다. 일부 센터에서는 케타민(ketamine), 에토미데이트(etomidate) 등 다른 혈관내 약물을 사용하기도 한다. 최소마취농도가 0.5 미만으로 유지하면서 적은 양의 프로포폴을 사용하는 경우도 있다. 피질 SSEP를 제외한 피질하 및 말초 SSEP의 경우 마취에 영향을 덜 받는다.

6. 임상적인 고려사항

SSEP는 거의 모든 수술에 적응증을 가지고 있다고 해도 과언이 아닐 정도로 많은 수술에 사용될 수 있다. 뇌, 후두와, 척수, 척추, 뇌혈관, 하행성대동맥 수술 등에서는 다음과 같은 고

려해야 할 점이 있다[6].

롤란디주위 뇌수술인 경우에는 침습적인 경막하전극 등을 이용하여 뇌지도화를 시행하기도 하는데, N20/P20의 위상역전, 일차감각피질에서 P25의 전위 진폭이 가장 큰 위치를 찾는 방법, 직접 일차운동피질을 자극하여 얻어지는 MEP 뇌지도화를 이용하여 국소화를 하는 방법 등이 있다.

뇌혈관 수술은 뇌동맥류, 동정맥 기형, 동맥내막절제술 등 다양한 수술이 있다. 혈관이상으로 SSEP 이상이 발생할 수 있는데, 클립제거 및 재위치, 견인기(retractor) 조정, 혈압 상승, 셉트수술 등 수술적인 조치를 시행해야 하는 경우가 많으므로 집도의와의 소통이 중요하다. 일반적으로 9-10분 이내의 이상은 큰 문제가 없다. 하지만, SSEP를 시행해도 감각피질의 작은 허혈은 확인이 어렵다. 또한, 이미 파열된 뇌동맥류는 INM의 해석이 어렵다.

후두와 수술은 상지 SSEP만 시행해도 되는 경우가 많다. 이상이 발생하는 기전은 압박, 견인, 허혈 등이 있을 수 있는데, SSEP의 변화는 가역적이다. 다른 기전으로는 출혈, 외상 등이 있는데, 비가역적인 SSEP의 변화를 보인다.

척추수술의 경우에는 MEP와 SSEP 모두 시행하지만 MEP가 더 중요한 역할을 한다. 하지만, 그래도 SSEP는 MEP를 측정할 수 없거나, 생략되거나 자주 시행하기 어려운 상황에서 도움이 될 수 있다. MEP만 문제가 있는 경우에는 척수 앞쪽 문제, SSEP만 이상이 있는 경우에는 뒤기둥 문제, MEP와 SSEP가 동시에 이상 소견을 보이는 경우에는 브라운세카르증 후군이나 척수 전체 이상 등을 생각해 볼 수 있다. 수술 중 일어나는 문제는 주로 압박, 견인, 허혈 등의 이상이 발생하므로 문제 발생시 이에 대한 조치가 필요하다.

척수내중양수술에서는 중앙선을 찾기 위해 지도화를 위하여 시행할 수 있다. 척수절개술을 할 때 SSEP의 감소는 수술에 중요한 소견은 아니므로 아래에 소개할 D-wave나 MEP 등을 이용해야 한다.

계류척수증후군(tethered cord syndrome) 혹은 말총증후군(cauda equina syndrome) 수술의 경우에는 경골신경 SSEP를 시행하기도 하지만, 이보다 유발식 근전도 지도(triggered electromyography mapping), 척수반사궁, 항문근육 MEP 등이 더 중요하다.

하행대동맥 수술(descending aorta surgery)에서는 MEP가 더 중요하기는 하지만, SSEP도 도움이 된다. SSEP에서는 말초 신경 SSEP를 확인하여 사지에 허혈 여부를 확인하고, 피질 SSEP에서 다양한 전반적인 이상, 대뇌허혈 및 척수 전체의 허혈을 확인한다.

운동유발전위(Motor evoked potential, MEP)

1. 신경해부학

운동피질에서 시작된 피질척수로는 척수를 거쳐서 사지 및 몸통의 근육의 움직임을 일으키는 신호를 보낸다. 운동피질은 중심앞이랑(pre-central gyrus)에 위치하고, 근육의 위치에 따라 가측은 팔, 얼굴 등이, 내측은 다리 및 발을 담당한다. 이후에 대뇌부챗살(corona radiata)를 거쳐서 속섬유막, 대뇌다리(cerebral peduncle), 뇌바닥다리뇌(basis pontis), 연수피라미드를 통해 척수까지 주행을 한다. 이 때 원위부 근육을 담당하는 신경은 연수의 아래쪽 부위에서 반대쪽으로 교차를 하여 가측 피질척수로를 통해서 주행하게 되고, 몸통 근육을 담당하는 신경은 교차하지 않고 주행하여 복측 피질척수로를 통해서 주행을 한다. 하지만, 체성감각계의 경우와 동일하게 수평주시마비와 진행성 척추측만증이 있는 경우에는 비교차가 생기는 것으로 알려져 있다. 대부분의 신경은 하위운동신경원으로 전달이 될 때 사이신경세포를 거쳐서 중간 연결을 거쳐 신호가 전달이 되고, 매우 적은 수의 신경만이 하위운동신경원과 직접적인 연결을 이룬다. 피질연수로(corticobulbar tract)는 피질척수로 근처에서 주행하는데, 피질척수로와 비슷하게 대부분 사이신경세포를 거쳐서 중간 연결을 거쳐서 운동 뇌신경세포 핵으로 주행한다. 대부분은 양측성으로 주행하지만 안면하부 및 혀를 담당하는 운동 핵은 반대쪽으로 담당한다. 다양한 사이신경세포들은 운동신경시스템의 흥분성에 영향을 미친다. 모든 운동은 최종공통경로(final common pathway)를 통하여 이뤄진다. 최종공통경로는 척수의 앞뿌리 및 운동 뇌신경세포핵에서 생성되어 근육을 지배하는 운동신경 및 축삭을 의미한다. 여기에서 기본적인 기능적인 구조인 운동단위(motor unit)는 운동신경, 축삭, 축삭이 지배하는 모든 근육세포로 구성된다. 운동신경세포의 축삭은 여럿이 모여서 운동신경 및 척수의 앞뿌리(anterior root)로 주행한다. 뇌신경세포는 두개저 부위의 구멍을 통해서 주행하고, 상지는 팔신경얼기로, 하지는 말총을 지나서 다리신경얼기로 주행한다. 신경근접합부(neuromuscular junction)는 운동신경세포가 근육세포와 연결하는 부위를 뜻한다. 이 부위에서 신경세포는 아세틸콜린(acetylcholine)을 분비하고, 근육세포의 니코틴성 아세틸콜린 수용체에서 이 신호를 감지하여 근육의 수축이 일어난다. 근육은 하나의 척수의 앞뿌리에 의해서 지배를 받지 않고, 하나의 주된 척수의 앞뿌리에서 지배를 받지만, 다른 척수의 앞뿌리를 지나는 신경에 의해서도 지배를 받을 수 있다.

체성감각계에서 설명한 것과 동일한 이유로 INM에 영향을 미칠 수 있는 구조물들에 대한 혈액공급의 해부학에 대한 이해가 중요하다. 앞대뇌동맥은 내측 운동피질에 혈액을 공급하고 중간대뇌동맥은 외측 운동피질에 혈액을 공급한다. 운동에 대한 호먼큐러스에서 내측 운동피질인 경우에는 몸통과 다리, 외측 운동피질인 경우에는 팔 및 얼굴 등을 담당하게 되므로 혈

액공급의 이상 부위에 따라 INM에서 나타나는 이상이 다른 영역에서 나타날 수 있다. 중간대뇌동맥 및 앞맥락동맥에서 나오는 렌즈핵선조체동맥은 대뇌부챗살을 공급하는데 이 부위의 이상은 상하지 MEP 모두 영향을 미친다. 뇌바닥동맥 및 척추동맥은 뇌줄기에 혈액을 공급하고 있다. 앞척수동맥은 앞뿌, 피질척수로 등을 담당한다. 이 척수 동맥들은 경부, 대동맥, 엉덩뼈동맥 등에서 기인하는 뿌리동맥과 연결을 이룬다. 자동조절기전은 혈류량, 대사 속도, 뇌압 등 다양한 변수에 의해서 영향을 받으므로 INM의 변화를 판단할 때 이러한 영향에 대한 고려가 필요하다.

2. 신경생리학

경두개자기자극(transcranial magnetic stimulation, TMS)은 운동신경을 자극할 수 있다. 하지만, 수술 중 환자의 정확한 자극위치를 유지하기 어렵고, 주로 I 파형의 생성으로 운동신경을 자극하여 마취에 영향을 많이 받아 사용이 어렵다. 따라서, 일반적으로 TES를 사용하여 운동신경을 평가한다. TES는 자극하는 양극(anode) 부위에서 상위운동신경원인 파라미드세포를 자극하여 D 파형을 생성하고 피질척수로 따라서 전달된다. 척수에서 기록되는 D 파형 진폭은 피질척수의 축삭의 개수와 비례하므로 허리엉치부위로 내려갈수록 진폭이 낮아져서 활용이 어렵다. 일반적으로는 D 파형이 근육 MEP를 형성하지만, 척수에 병변이 있는 병적인 경우나 18개월 미만의 유아에서는 D 파형이 관찰되지 않아도[27] 다른 통로를 통해 근육 MEP가 형성될 수 있다[7]. 근육 MEP가 형성되려면 흥분연접이후전위(postsynaptic potential)가 시간적 혹은 공간적으로 가중(temporal or spatial summation)되어 특정 역치를 넘어야 한다. 마취는 일반적으로 하위운동신경원의 흥분성을 떨어뜨리고, I 파형을 억제하므로 단일 자극만으로는 흥분연접이후전위의 가중이 역치에 도달하지 못한다. 다중자극은 반복자극으로 D 파형의 시간적 가중을 일으

킬 뿐 아니라, I 파형도 형성을 시켜 공간적 가중까지 일으켜 하위운동신경원의 역치 이상의 흥분연접이후전위를 발생시킨다. 근육 MEP는 I 파형을 포함한 다양한 사이신경세포(interneuron)와 연결하여 흥분성에 영향을 많이 받기 때문에 근육 MEP는 흥분성에 따라 다양한 진폭 및 모양을 보이게 된다. 근육 MEP는 하위운동신경원의 흥분성이 조금만 변해도 많이 감소하는 비선형적인 반응을 보여 지나치게 민감한 경우가 많다[28]. 근육 MEP가 정상적으로 관찰되는 경우에는 대부분 중추운동통로가 큰 이상이 없다[7]. 마취가 안정적인 경우에도 하위운동신경원의 흥분성이 떨어지면 근육 MEP의 진폭이 떨어지고, 근육 MEP를 유발할 수 있는 역치가 증가한다[28]. 롤란딕주위 뇌수술 및 척수내종양수술에서는 D 파형은 잘 유지가 되지만, I 파형 및 사이신경세포를 통한 흥분성 감소로 근육 MEP가 형성되지 않는다. 이런 경우에는 근육 MEP보다 D 파형 감시가 더 효과적이다. 신경근차단제(neuromuscular blocking agent)는 신경근접합부의 신호전달을 차단하여 근육 MEP를 감소 또는 소멸하게 하므로 사용에 주의해야 한다. 하나의 근육은 여러 개의 신경뿌리에 의해 지배될 수 있어서 하나의 신경뿌리에 이상이 발생해도 근육 MEP의 이상소견이 관찰되지 않기도 한다.

3. 측정방법

MEP에는 근육 MEP와 D파형 등 두 가지 종류를 많이 사용하는데, 다음과 같은 차이점이 있다(Table 1).

MEP 자극 전극은 나선형 코르크모양 전극, 침전극, 뇌파 컵 전극 등을 쓸 수 있다. 두피에서는 양극(anode) 자극을 사용하고 피질하 자극을 위해서는 음극(cathode) 자극을 사용한다. TES를 위한 전극 위치는 국제 10-20 뇌파 체계(international 10-20 system for electroencephalography)를 약간 수정한 10-10 뇌파 체계(10-10 system)로 표현한다. C3 및 C4를 사용하여 자극을 가하면(C3/C4) 양극의 반대쪽

Table 1. Differences between D-wave and muscle motor-evoked potentials (MEPs)

| | D-wave | Muscle MEPs |
|--|--|--|
| Stimulation | Single-pulse transcranial electrical stimulation | Multipulse transcranial electrical stimulation |
| Recording | Near-field potentials of spinal cord using epidural or subdural electrodes | Electromyographic activity of muscles using surface or needle electrodes |
| Averaging | May not average or may average a small number of responses up to 20 stimuli | Should not average |
| Mechanism | Travelling neuronal activation without any synapse between the stimulated cortical pyramidal neurons and D-wave recording site | Muscle activation after neuromuscular junction and multi-synaptic transmission at the anterior horn cell |
| Relationship between neuronal injury and the signal change | Linear | Non-linear |
| Variability | Stable, low variability | Unstable, high variability |

팔과 다리의 MEP를 모두 기록한다. C3/C4 자극은 움직임이 크고 깊은 위치까지 자극이 전달된다. C1/C2를 사용하면 C3/C4와 비슷하지만 움직임 정도가 약하고 자극 깊이도 얕아진다. Cz에서 1 cm 뒤쪽과 6 cm 앞쪽을 자극하면(Cz-1/Cz+6) 양쪽 다리를 자극하게 되고, C3/Cz 혹은 C4/Cz 위치를 사용하면 주로 반대쪽 얼굴과 팔에 국한되어 MEP가 형성된다.

TES의 자극세기 및 흥분도는 전류(current, I) 및 펄스 자극의 기간(D)의 곱인 전하(current, Q)로 표현한다. 에너지($E=I^2 \cdot D \cdot R \cdot 0.001$)는 열을 발생시켜 열손상을 일으키는데, 안전을 위해서 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission, IEC)에서는 에너지의 한계를 1 kJ의 저항(R)에 50 mJ 이하로 제한한다. 전기적인 안전을 위해서 전류 및 전하를 유지하면서 에너지를 최소화하는 전기시치(chronaxie) 및 기전류(rheobase)를 파악해야 한다[29]. 이는 강도-기간 연구를 통해서 알 수 있는데, 기전류는 약 50 mA, 전기시치는 약 0.2 ms이다[30,31]. 대부분 일정한 전압을 주는 자극기를 사용하지만, 전류가 중요하기 때문에 저항에 관계없이 일정한 전류를 주거나, 적어도 흐른 전류의 값 표시가 가능한 자극기를 사용하는 것이 좋다.

다중펄스 자극을 사용하는 경우에는 MEP의 문턱값을 낮춘다. 일반적으로 5개의 펄스를 사용하지만, 3개에서 8개의 펄스를 사용하기도 한다[13,28,32-34]. 펄스 간 간격(inter-stimulus/pulse interval)은 1-4 ms를 일반적으로 사용하는데, 너무 짧으면 불응기 때문에 의미가 없고, 너무 길면 시간적 가중이 되지 않는다. 안면근육 MEP에서는 자극이 안면신경을 바로 자극할 수 있기 때문에 같은 강도의 자극의 단일 펄스에서는 반응이 없고 다중 펄스에서만 MEP가 형성되는 것, 10 ms 이상의 안면근육 MEP의 잠복기가 있는 것으로 확인한다[35]. 이외에도 운동신경의 흥분도를 높여 MEP 기록을 촉진시키기 위해서 10-20 ms의 짧은 간격이나 100-1,000 ms의 긴 간격을 두고 실제 자극 전 이중 트레인 사용하거나[36,37] 반복적인 1-2 Hz의 펄스 트레인을 사용한다[7]. 그 외에도 말초 신경 자극을 통해서 촉진시킬 수 있다[36,38]. 따라서, 적절한 MEP 자극을 위해서는 짧은 시간에 높은 강도의 다중펄스자극을 주면서 자극 강도, 펄스의 개수, 펄스 간의 간격 등을 조절할 수 있는 자극기가 필요하다.

D 파형은 외과의사가 직접 경막외전극을 삽입하거나 수술 전에 Tuohy 바늘을 이용하여 전극을 삽입하여 측정한다[39,40]. D 파형 기록을 위해서는 자극 전 10-20 ms 기준치를 두고 5-20번의 평균화를 할 수 있다. 고역 통과 필터(high-pass filter)는 0.2-2 Hz, 저역 통과 필터(low-pass filter)는 1,500-3,000 Hz를 사용한다[7].

근육 MEP는 표면, 바늘 전극 등을 사용하여 측정한다. 일반적으로 근육 MEP는 SNR이 높아서 평균화 없이 하나의 신호

만을 기록한다. 팔·다리에서 측정할 때에는 전극간 간격은 2-3 cm를 사용하지만, 안면근육 등의 뇌신경 MEP를 측정할 때에는 0.5 cm 미만의 간격을 사용하여 다른 근육으로부터 신호가 얻는 것을 피해야 한다. 양사지에서는 100 ms 기준치가 일반적이고, 고역통과필터는 10-100 Hz, 저역통과필터는 1,500-3,000 Hz를 사용하는데, 상황에 따라서 다른 필터 및 기준치를 사용할 수 있다. 근전도 기록은 팔에서는 단무지 외전근(abductor pollicis brevis, APB)을 일반적으로 사용하는데, 첫째등쪽뼈사이근(first dorsal interosseous, FDI)이나 새끼두덩근을 사용할 수 있다. 다리에서는 일반적으로 앞정강근(tibialis anterior)과 엄지발림근(abductor hallucis)을 사용하지만 다른 근육을 사용할 수도 있다.

4. 결과해석 및 조치

INM 도중에 발생하는 MEP는 해석 시 다양한 혼란변수를 먼저 고려해야 한다. 전반적인 문제인 경우는 마취, 신경근 차단제, 자동조절기전의 한계를 넘어서는 혈류량 감소를 일으키는 저혈압, 저체온, 대사이상, 자극 실패, 두개강내 공기 등이 있다. 국소적인 문제를 일으키는 경우는 사지의 허혈 혹은 압박으로 인한 말초 신경 이상, 어깨의 위치이상으로 발생한 팔 신경얼기 이상, 국소위치에만 발생하는 자동조절기전 이상으로의 국소 혈류량 감소 등이 있을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 대조를 위해서 사용할 반대쪽 MEP 및 SSEP를 시행하고, 마취, 대사이상, 저혈압 등의 전반적인 문제를 점검하며, 수술 상황에 맞춰서 해석을 해야 한다. 아래 MEP에 대한 해석은 최근에 많이 쓰이는 기준을 위주로 기술하였다[9].

D 파형은 척수내종양수술에서 경고기준으로 매우 중요하다. TES를 이용한 D파형의 경고기준으로 50% 이상의 진폭의 감소를 사용한다[41]. 직접피질자극(direct cortical stimulation, DCS)을 이용한 D 파형의 경우에는 30%-40%의 진폭감소를 사용한다[42,43]. 일부 수술에서는 D 파형에 대한 감시는 큰 의미가 없다. 하행성대동맥 수술에서는 허혈성 손상을 일으켜 척수의 회색질에 문제가 발생하는 경우가 많다. D 파형은 주로 백질에 이상이 없는 경우에는 정상적으로 나타날 수 있고, 백질이 허혈에 영향을 덜 받기 때문에 위음성이 많아 쓰기 어렵다. 척추측만증 수술에서는 척수의 위가 변하여 위양성이 많아 경막외 D 파형 측정을 하지 않는다.

근육 MEP에 대한 경고기준은 기준치의 안정성이 중요하다. 만약, 기준치를 잡을 때에도 근육 MEP가 불안정한 경우에는 이를 이용한 경고기준의 설정은 무의미하다. 근육 MEP는 크게 근육 MEP의 소실, 진폭감소, 문턱값 증가 등의 기준을 사용한다.

근육 MEP의 소실은 항상 주요 경고기준이므로 근력약화의 발생을 의미한다. 척수수술에서는 근육 MEP의 소실을 주된

경고기준으로 사용한다[9,13,20]. 이는 적절한 조치를 취하면 완전히 회복될 수 있는데, 근육 MEP의 소실기간이 30분 이내인 경우에는 대부분 호전이 되지만, 그 이상인 경우에는 근력약화가 초래되는 경우가 많다[7,9,13]. 척수수술에서는 신경의 압박 및 견인 때문에 직접적인 손상 및 허혈 등으로 인하여 주로 문제가 생긴다. 척수내종양수술은 하위운동신경원의 흥분성에 영향을 미치는 부위에 이상을 일으켜서 근육 MEP가 소실이 될 수 있다. 이러한 경우에는 피질척수로의 이상이 없어서 근력약화를 보이지 않으므로 피질척수로로 직접 측정하는 D 파형을 많이 이용한다. 따라서, 척수내종양수술을 시행할 때 근육 MEP는 소실되거나 D 파형이 남아 있는 경우에는 일시적인 근력약화를 보이는 경우가 많고, D 파형의 소실 혹은 50% 이상의 진폭감소를 보이는 경우에 영구적인 근력약화가 주로 발생한다[8].

근육 MEP의 진폭감소는 대부분의 수술 상황에서 사용이 된다[9,35,44-48]. 반면에, 근육 MEP의 잠복기 증가는 큰 의미가 없다[8,49]. 근육 MEP의 진폭감소는 피질척수로의 MEP 전도를 담당하는 축삭 개수의 감소로 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 하지만, 기준치가 안정적이지 않은 경우가 있고, 병적인 감소와 변동성으로 인한 무작위적인 변화의 감별이 어려운 경우도 많고, 다른 여러 혼란변수에 의해서 영향을 많이 받아서 위양성이 상대적으로 높다. 주로 척수수술 및 뇌, 뇌간, 안면신경 감사에서 50%의 근육 MEP 진폭감소가 사용된다[35,45-48].

근육 MEP의 문턱값 증가는 척추수술 및 정형외과적 수술, 뇌수술 등에서 사용할 수 있다[9,50]. 경고기준은 여러 근육에서 각기 설정한 문턱값이 100 V 이상 상승한 경우로, 근육 MEP의 소실이나 진폭감소에 선행한다. 이를 주로 사용하는 연구자는 위양성율이 높지 않은 민감한 방법이라고 주장하지만 아직은 널리 사용되고 있지는 않다[50].

INM을 시행할 때에는 경고에만 그치지 않고 임상적인 상황에 따라 필요한 조치를 시행해야 한다. 먼저, 전반적인 변화 혹은 국소적인 변화가 수술 외적인 다른 문제에 기인하였다면 이를 교정한다. 수술상황 때문에 경고가 이뤄진 경우에는 그에 상응하는 조치를 집도의에게 추천해야 한다. 따라서, INM을 시행하는 임상신경생리 전문가는 INM에 대한 충분한 수련과 경험이 있어야 해석과 조치를 할 수 있다.

5. 마취

마취는 D 파형에 큰 영향을 미치지 않으나, 하위운동신경원의 흥분성을 감소시키는 흡입마취제는 근육 MEP에 형성을 어렵게 한다. 신경근차단제는 D 파형에 영향을 미치지 않으나, 근육 MEP에는 많은 영향을 미친다. 부분적인 신경근차단제를 사용하는 경우에는 수술 중 움직임을 줄일 수는 있으나, 근육

MEP의 해석을 어렵게 할 수 있다. 만약, 부분적인 신경근차단을 할 때에는 지속정맥주입(continuous intravenous infusion)을 사용해야 한다. 특히, 동맥류를 결찰하거나, 척추 이상을 교정을 하고, 경추척추관협착증이나 불안정한 경추를 가진 환자에서 위치결정(positioning)을 하는 경우 등의 중요한 시기에는 마취제를 가능하면 변경하지 않아야 한다. 그렇지 않은 경우에는 D파형 및 근육 MEP가 변했을 때 마취제로 인한 변화인지 실제 신경학적 손상으로 인한 변화인지 감별이 어려워질 수 있다.

6. 임상적인 고려사항

MEP는 운동신경을 직접측정하기 때문에 INM에서 매우 중요한 역할을 하는데, 해부학적 위치와 수술 목표에 따라서 시행방법을 결정해야 한다[9].

해부학적으로는 척수보다는 뇌에 대한 INM을 시행할 때 국소 이상이 나타나는 경우가 많아 상하지를 따로 관찰하는 것이 필요하다. 뇌에서는 MEP의 소실보다는 MEP의 진폭감소가 더 잘 일어난다. 특히, 피질 혹은 피질 근처에서는 근육 MEP에서 50% 이상의 진폭감소가 일어나는 경우가 많고, 깊은 피질하 병변은 근육 MEP의 소실을 일으키는 경우가 많다. 이는 대부분의 피질척수로의 축삭이 피질에서는 넓게 퍼져 있고, 척수 및 깊은 피질하 위치에서는 좁은 공간에 모여 있기 때문이다. 일반적으로 근육은 여러 신경뿌리에 의해 지배를 받으므로 근육 MEP로 하나의 신경뿌리의 손상을 알기는 어렵다. 반면, 안면신경의 경우에는 한 개의 신경으로 안면근육이 지배되기 때문에 근육 MEP의 50% 이상의 진폭감소의 경고기준을 사용한다.

수술의 목적에 따라서 경고기준을 달리 설정하기도 하는데, 그 대표적인 예는 척수내종양수술이다. 척수내종양수술의 수술적 목표는 종양의 완전 제거이고, 일시적인 근력약화는 큰 문제가 되지 않는다. 따라서, 근육 MEP의 진폭감소나 문턱값 증가와 같은 지나치게 민감한 경고기준보다는 근육 MEP의 소실의 경고기준을 사용하면서 D 파형을 확인하는 방법을 사용한다. 하행성대동맥 수술의 경우에는 동맥류의 출혈이나 대동맥박리로 인한 출혈이 사망을 일으킬 정도로 위험한 질환이기 때문에 신경학적 합병증보다 성공적인 수술적인 치료가 더 중요하다. 따라서, 근육 MEP의 진폭감소를 경고기준으로 사용을 하기도 하지만, 대부분 근육 MEP의 소실을 주요 경고기준으로 보고 수술장에서 조치를 취한다. 그 이유는 대부분 재관류를 통하여 근육 MEP가 호전이 되기 때문이다. 하지만, 척추측만증은 앞선 수술들과 다르게 근력약화를 초래하는 것은 일반적으로 용납되지 않는다. 따라서, 진폭감소 혹은 문턱값 증가 등의 민감한 경고기준을 사용한다. 하지만, 수술중단 등과 같은 큰 결정을 내리기 위해서는 여전히 근육 MEP의 소실을 사용하기도 한다.

결론

본 종설에서는 수술 중 SSEP 및 MEP를 효율적이고 정확하게 수행하기 위한 최신의 방법을 소개하였다. 물론, 이미 현장에서 가장 익숙하고 안전한 방법으로 INM을 시행하고 있는 경우, 여기에서 소개한 방법이 이를 대체할 수는 없다. INM은 수술방법과 임상적인 상황을 고려하여 정확한 방법의 검사 시행을 포함할 뿐만 아니라, 수술의 전반적인 과정을 모두 이해하여 발생하는 이상소견을 정확하게 해석하여 적절한 조치를 취하는 것까지 포함한다. 이를 위해서는 신경해부학 및 신경생리학을 충분히 이해하고, 여러 연구를 통하여 추천되는 SSEP 및 MEP 방법을 숙지하는 것이 중요하다. 임상에서 신경생리학 전문가가 수술 혹은 해부학적 위치에 맞는 방법을 각자의 병원 환경에 적용하여 수술중신경계감시 프로토콜을 설정하고, 다학제적으로 팀을 이뤄서 시행하는데 본 종설이 많은 도움이 되길 바란다.

Acknowledgements

This study was supported by short-term training scholarship program funded by the Korean Society of Clinical Neurophysiology, by grants (Grant Nos: 2018-7029 and 2018-7038) from the Asan Medical Center, Asan Institute for Life Sciences, Seoul, Republic of Korea, and by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP; Ministry of Science, ICT and Future Planning) (Grant No. 2018013748).

ORCID

Yong Seo Koo, <https://orcid.org/0000-0001-5418-2522>

Dae Yul Kim, <https://orcid.org/0000-0003-1275-1736>

References

- Kim SM, Kim SH, Seo DW, Lee KW. Intraoperative neurophysiologic monitoring: basic principles and recent update. *J Korean Med Sci.* 2013;28(9):1261-9.
- Park YG. Intraoperative neurophysiological monitoring. *J Korean EMG Electrodiagn Med.* 2013;15(1):1-5.
- Park SK, Lim SH, Park CW, Park JW, Kim DJ, Kang JH, et al. Intra-operative neurological monitoring and anesthesia. *Korean J Clin Lab Sci.* 2012;44(4):184-98.
- Park SK, Hyun SC, Lim SH, Park CW, Park JW, Kim DJ, et al. Basic techniques of intraoperative neurophysiological monitoring. *Korean J Clin Lab Sci.* 2013; 5(2):77-85.
- Seo DW. Intraoperative neuromonitoring. *Korean J Clin Neurophysiol.* 2008;10(1):1-12.
- MacDonald DB, Dong C, Quatralle R, Sala F, Skinner S, Soto F, et al. Recommendations of the international society of intraoperative neurophysiology for intraoperative somatosensory evoked potentials. *Clin Neurophysiol.* 2019;130(1):161-79.
- Macdonald DB, Skinner S, Shils J, Yingling C. Intraoperative motor evoked potential monitoring: a position statement by the American society of neurophysiological monitoring. *Clin Neurophysiol.* 2013;124(12):2291-316.
- Legatt AD, Emerson RG, Epstein CM, MacDonald DB, Deletis V, Bravo RJ, et al. ACNS guideline: transcranial electrical stimulation motor evoked potential monitoring. *J Clin Neurophysiol.* 2016; 33(1):42-50.
- MacDonald DB. Overview on criteria for MEP monitoring. *J Clin Neurophysiol.* 2017;34(1):4-11.
- Husain AM. A practical approach to neurophysiologic intraoperative monitoring. 2nd ed. New York, NY: Demos Medical; 2014. 528 p.
- MacDonald DB, Streletz LJ, Al-Zayed Z, Abdool S, Stigsby B. Intraoperative neurophysiologic discovery of uncrossed sensory and motor pathways in a patient with horizontal gaze palsy and scoliosis. *Clin Neurophysiol.* 2004;115(3):576-82.
- Vulliemoz S, Raineteau O, Jabaudon D. Reaching beyond the midline: why are human brains cross wired? *Lancet Neurol.* 2005;4(2):87-99.
- MacDonald DB, Al Zayed Z, Al Saddigi A. Four-limb muscle motor evoked potential and optimized somatosensory evoked potential monitoring with decussation assessment: results in 206 thoracolumbar spine surgeries. *Eur Spine J.* 2007;16 Suppl 2:S171-87.
- Eisen A, Purves S, Hoirsch M. Central nervous-system amplification - its potential in the diagnosis of early multiple-sclerosis. *Neurology.* 1982;32(4):359-64.

15. Gandevia SC, Burke D. Saturation in human somatosensory pathways. *Exp Brain Res*. 1984;54(3):582-5.
16. Rossini PM, Cracco RQ, Cracco JB, House WJ. Short latency somatosensory evoked-potentials to peroneal nerve-stimulation - scalp topography and the effect of different frequency filters. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1981;52(6):540-52.
17. Cruse R, Klem G, Lesser RP, Lueders H. Paradoxical lateralization of cortical potentials-evoked by stimulation of posterior tibial nerve. *Arch Neurol*. 1982; 9(4):222-5.
18. Lesser RP, Raudzens P, Luders H, Nuwer MR, Goldie WD, Morris HH, et al. Postoperative neurological deficits may occur despite unchanged intraoperative somatosensory evoked-potentials. *Ann Neurol*. 1986; 9(1):22-5.
19. MacDonald DB. Individually optimizing posterior tibial somatosensory evoked potential P37 scalp derivations for intraoperative monitoring. *J Clin Neurophysiol*. 2001;18(4):364-71.
20. MacDonald DB, Janusz M. An approach to intraoperative neurophysiologic monitoring of thoraco-abdominal aneurysm surgery. *J Clin Neurophysiol*. 2002;19(1):43-54.
21. MacDonald DB, Al Zayed Z, Khoudeir I, Stigsby B. Monitoring scoliosis surgery with combined multiple pulse transcranial electric motor and cortical somatosensory-evoked potentials from the lower and upper extremities. *Spine*. 2003;28(2):194-203.
22. MacDonald DB, Al-Zayed Z, Stigsby B, Al-Homoud I. Median somatosensory evoked potential intraoperative monitoring: recommendations based on signal-to-noise ratio analysis. *Clin Neurophysiol*. 2009;120(2):315-28.
23. MacDonald DB, Stigsby B, Al Zayed Z. A comparison between derivation optimization and Cz'-FPz for posterior tibial P37 somatosensory evoked potential intraoperative monitoring. *Clin Neurophysiol*. 2004; 115(8):1925-30.
24. MacDonald DB, Al Zayed Z, Stigsby B. Tibial somatosensory evoked potential intraoperative monitoring: recommendations based on signal to noise ratio analysis of popliteal fossa, optimized P37, standard P37, and P31 potentials. *Clin Neurophysiol*. 2005;116(8):1858-69.
25. Watanabe E, Schramm J, Schneider W. Effect of a subdural air collection on the sensory evoked-potential during surgery in the sitting position. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol/ Evoked Potentials Section*. 1989; 74(3):194-201.
26. Wiedemayer H, Sandalcioglu IE, Regel J, Armbruster W, Schaefer H, Stolke D. Enhanced stability of somatosensory evoked potentials attained in the median nerve by using temporal electrodes for intraoperative recording in patients in the semisitting position. *J Neurosurg*. 2003;99(6):986-90.
27. Szelenyi A, de Camargo AB, Deletis V. Neurophysiological evaluation of the corticospinal tract by D-wave recordings in young children. *Child's Nerv Syst*. 2003;19(1): 30-4.
28. MacDonald DB. Intraoperative motor evoked potential monitoring: overview and update. *J Clin Monit Comput*. 2006 Oct;20(5):347-77.
29. Burke D, Bartley K, Woodforth IJ, Yakoubi A, Stephen JPH. The effects of a volatile anaesthetic on the excitability of human corticospinal axons. *BrainJN*. 2000; 123(5):992-1000.
30. Bartley K, Woodforth IJ, Stephen JPH, Burke D. Corticospinal volleys and compound muscle action potentials produced by repetitive transcranial stimulation during spinal surgery. *Clin Neurophysiol*. 2002; 13(1):78-90.
31. Szelenyi A, Kothbauer KF, Deletis V. Transcranial electric stimulation for intraoperative motor evoked potential monitoring: stimulation parameters and electrode montages. *Clin Neurophysiol*. 2007;118(7): 1586-95.
32. Calancie B, Harris W, Brindle GF, Green BA, Landy HJ. Threshold-level repetitive transcranial electrical stimulation for intraoperative monitoring of central motor conduction. *J Neurosurg*. 2001;95(2):161-8.
33. Calancie B, Harris W, Broton JG, Alexeeva N, Green BA. "Threshold-level" multipulse transcranial electrical stimulation of motor cortex for intraoperative monitoring of spinal motor tracts: description of method and comparison to somatosensory evoked potential monitoring. *J Neurosurg*. 1998;88(3):457-70.
34. Quinones-Hinojosa A, Lyon R, Zada G, Lamborn

- KR, Gupta N, Parsa AT, et al. Changes in transcranial motor evoked potentials during intramedullary spinal cord tumor resection correlate with postoperative motor function. *Neurosurgery*. 2005;56(5):982-93.
35. Dong CCJ, MacDonald DB, Akagami R, Westerberg B, AlKhani A, Kanaan I, et al. Intraoperative facial motor evoked potential monitoring with transcranial electrical stimulation during skull base surgery. *Clin Neurophysiol*. 2005;116(3):588-96.
36. Journee HL, Polak HE, De Kleuver M. Conditioning stimulation techniques for enhancement of transcranially elicited evoked motor responses. *Clin Neurophysiol*. 2007;37(6):423-30.
37. Journee HL, Polak HE, de Kleuver M, Langeloo DD, Postma AA. Improved neuromonitoring during spinal surgery using double-train transcranial electrical stimulation. *Med Biol Eng Comput*. 2004;42(1):110-3.
38. Andersson G, Ohlin A. Spatial facilitation of motor evoked responses in monitoring during spinal surgery. *Clin Neurophysiol*. 1999;110(4):720-4.
39. Boyd SG, Rothwell JC, Cowan JM, Webb PJ, Morley T, Asselman P, et al. A method of monitoring function in corticospinal pathways during scoliosis surgery with a note on motor conduction velocities. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 1986;49(3):251-7.
40. Burke D, Hicks R, Stephen J, Woodforth I, Crawford M. Assessment of corticospinal and somatosensory conduction simultaneously during scoliosis surgery. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol/Evoked Potentials Section*. 1992;85(6):388-96.
41. Sala F, Palandri G, Basso E, Lanteri P, Deletis V, Faccioli F, et al. Motor evoked potential monitoring improves outcome after surgery for intramedullary spinal cord tumors: a historical control study. *Neurosurgery*. 2006;58(6):1129-43.
42. Fujiki M, Furukawa Y, Kamida T, Anan M, Inoue R, Abe T, et al. Intraoperative corticomuscular motor evoked potentials for evaluation of motor function: a comparison with corticospinal D and I waves. *J Neurosurg*. 2006 Jan;104(1):85-92.
43. Yamamoto T, Katayama Y, Nagaoka T, Kobayashi K, Fukaya C, et al. Intraoperative monitoring of the corticospinal motor evoked potential (D-wave): clinical index for postoperative motor function and functional recovery. *Neurol Medico-Chirurgica*. 2004;44(4):170-82.
44. Langeloo DD, Lelivelt A, Journee HL, Slappendel R, de Kleuver M. Transcranial electrical motor-evoked potential monitoring during surgery for spinal deformity: a study of 145 patients. *Spine*. 2003;28(10):1043-50.
45. Neuloh G, Bogucki J, Schramm J. Intraoperative preservation of corticospinal function in the brainstem. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2009;80(4):417-22.
46. Neuloh G, Pechstein U, Cedzich C, Schramm J. Motor evoked potential monitoring with supratentorial surgery. *Neurosurgery*. 2004;54(5):1061-72.
47. Szelenyi A, Hattingen E, Weidauer S, Seifert V, Ziemann U. Intraoperative motor evoked potential alteration in intracranial tumor surgery and its relation to signal alteration in postoperative magnetic resonance imaging. *Neurosurgery*. 2010;67(2):302-13.
48. Szelenyi A, Langer D, Kothbauer K, De Camargo AB, Flamm ES, Deletis V. Monitoring of muscle motor evoked potentials during cerebral aneurysm surgery: intraoperative changes and postoperative outcome. *J Neurosurg*. 2006;105(5):675-81.
49. Deletis V, Sala F. Intraoperative neurophysiological monitoring of the spinal cord during spinal cord and spine surgery: a review focus on the corticospinal tracts. *Clin Neurophysiol*. 2008;119(2):248-64.
50. Calancie B. Intraoperative neuromonitoring and alarm criteria for judging mep responses to transcranial electric stimulation: the threshold-level method. *J Clin Neurophysiol*. 2017;34(1):12-21.