

Guideline

수술중신경계감시 임상진료지침 2020 개정안^{†,‡}

대한수술중신경계감시학회*, 대한신경과학회, 대한재활의학회, 대한임상신경생리학회, 대한근전도 전기진단의학회

Clinical practice guideline for intraoperative neurophysiological monitoring : 2020 update

Korean Society of Intraoperative Neurophysiological Monitoring*, Korean Neurological Association, Korean Academy of Rehabilitation Medicine, Korean Society of Clinical Neurophysiology, Korean Association of EMG Electrodiagnostic Medicine

ABSTRACT

With the recent development of new devices for neurophysiological testing and advance in anesthesiology, the utility and accuracy of intraoperative neurophysiological monitoring (IONM) evolved greatly. Though the needs for IONM services had been previously limited to the large academic hospitals, recently there have been rapidly growing needs for neurophysiologists with expertise in IONM from diverse types of hospitals. The primary goal of Korean Society of Intraoperative Neurophysiological Monitoring (KSION) is to promote the development of IONM research groups and to contribute to the improvement of fellowship among members and human health through academic projects. These guidelines are based on extensive literature reviews, recruitment of expert opinions, and consensus among KSION board members. This current version of the guidelines were fully approved by the KSION, Korean Neurological Association, Korean Academy of Rehabilitation Medicine, Korean Society of Clinical Neurophysiology, and Korean Association of EMG Electrodiagnostic Medicine.

Keywords: intraoperative neurophysiological monitoring; practice guideline

서론

수술중 신경생리검사 기법을 사용하여 기능평가와 추적감시를 하는 수술중신경계감시(intraoperative neurophysiological monitoring, IONM)는 국내에 도입된 1990년대 이후 2000년대까지는 크게 확대되지 않았다. 그 후 국내의 의료보험에서 급여화가 정비되고 현재와 같은 수술중신경생리 급여 기준이 잘 만들어지게 되는 등의 보험 체계가 정립되었고, 새로운 검사 기법 개발이 이루어지면서 2010년대 들어서 국내의 IONM은 폭발적으로 증가되었다. 이러한 추세는 세계적 변화이고, 국내에서도 신경생리검사의 전문가 모임인 임상신경생리학회에서 신경생리검사 지침 개정 과정에 수술중신경계감시 부분을 새로 추가하였다. 그러나 급격히 바뀌고 있는 국내

외 의료 현황을 고려할 때 신경생리검사 지침 개발과 개정을 맞추기 보다는 보다 현실감 있는 수술중신경계감시 지침을 내는 것이 필요하게 되었다.

물론 새로운 IONM 내용에 대해서는 원저나 종설 형태의 여러 논문이 기고되고 있고, 특히 IONM 전문잡지인 수술중신경계감시학회지(Journal of Intraoperative Neurophysiology, JOIN)가 대한수술중신경계감시학회(Korean Society of Intraoperative Neurophysiological Monitoring, KSION)에서 주관하여 만든 전문지에 활발히 게재되고 있지만, 급격히 변하는 폭넓은 내용을 담기에는 부족하다.

이에 수술중신경계감시를 전문으로 하는 신경생리전문의 중심의 IONM 정도관리 테스크포스를 구성하여 최근의 국내외 상황에 맞는 새로운 지침 개정안을 내게 되었다. 본 지침

Received October 13, 2019; Revised January 30, 2020; Accepted February 23, 2020

[†]This guideline is will be published at the Journal of Intraoperative Neurophysiology (JOIN), the Annals of Clinical Neurophysiology (ACN), the Journal of Korean Association of EMG Electrodiagnostic Medicine.

[‡]This guideline is approved by the Intraoperative Neurophysiological Monitoring Quality-Control Committee of the Korean Society of Intraoperative Neurophysiological Monitoring, the Korean Neurological Association, the Korean Academy of Rehabilitation Medicine, the Korean Society of Clinical Neurophysiology, and the Korean Association of EMG Electrodiagnostic Medicine.

*Corresponding author: Korean Society of Intraoperative Neurophysiological Monitoring, Lab 4, 4th Floor, Samsung Proton Therapy Center, Samsung Medical Center, 81 Irwon-Ro Gangnam-gu, Seoul 06351, Korea

Tel: +82-2-6007-5448, E-mail: join.ksion@ksion.or.kr

© 2020 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.

에서는 IONM 수행 및 관리감독의 원칙과 그 근거, 그리고 최신의 IONM 기법의 운용을 포함한 권고사항을 제시하였다.

본론

1. 기본 원리

수술중 신경생리 추적감시 혹은 수술중신경계감시는 수술 중 신경계의 손상을 조기에 감지하거나 혹은 수술 중 손상의 위험이 높은 주요 신경의 정확한 위치를 파악하여 궁극적으로는 수술 후 신경장애의 위험성을 최소화하는 것을 그 주요 목적으로 한다. 이를 위해서 수술이 시행되는 동안 신경경로, 뇌혈류, 뇌기능 정도를 추적하여 감시(monitors)하거나 뇌 또는 신경 기능을 평가(mapping)하여 수술로 신경계 손상 또는 그 위험성을 최소화시킨다. 이를 통해 환자의 안전은 물론 환자/보호자/의료진 모두 안심하고 수술에 임할 수 있게 하고, 고난위도 수술적 치료도 시행할 수 있게 한다.

IONM은 신경계 질환 진단 방법인 신경생리검사(neurophysiologic tests)를 응용한다. 전기신경생리 방법으로 하향성 운동신경경로의 이상을 파악하는 운동유발전위(motor evoked potentials, MEP), 상향성 감각신경경로의 이상을 파악하는 체성감각유발전위(somatosensory evoked potentials, SSEP), 뇌간청각유발전위(brainstem auditory evoked potentials, BAEP), 시각유발전위(visual evoked potentials, VEP), 뇌의 자발적인 전기 신호를 기록하는 뇌파(electroencephalography, EEG) 및 말초 신경근육의 이상을 파악하는 근전도(electromyography, EMG)를 이용하며, 이 외에 신경초음파 방법으로 경두개도플러(transcranial Doppler, TCD) 검사 등을 이용하기도 한다. 이러한 방법을 환자에 맞게 선택하여 적합한 수술중 추적감시와 기능평가를 시행한다.

2. 적응증

원칙적으로 IONM은 중추신경 및 말초신경의 손상 위험성이 있는 모든 수술에 적용이 가능하다. 그럼에도 검사의 비용 및 인력 등을 고려하여 수술후 신경손상의 가능성이 높거나 기존 연구를 통해 IONM의 효용성이 제시된 수술에 시행하는 것이 일반적이다. 수술방법이나 대상에 따라 종양과 관련된 뇌/뇌신경 수술, 심뇌혈관 수술, 뇌전증수술 등을 포함한 기능정 뇌수술, 그리고 다양한 척추/척수 수술이 이에 해당한다. 각 병원마다 신경생리전문의는 외과의사와 협의하여 대상환자와 수술을 결정하게 된다.

새로운 감시 기기와 방법의 발전으로 적응 대상이 되는 수술과 환자는 확대되고 있으며, 기관마다 현재의 상황에서 신경생리검사전문의인 신경생리전문의의 판단 하에 감시 검사 방법

을 결정하고, 감시 검사 설정을 정하고, 마취의, 집도의와 협력하며, 적응대상 수술에 IONM을 적용하는 것이 효율적이다.

3. IONM팀(team)의 구성

IONM팀의 필수 구성 인력은 신경생리전문의, 집도의, 마취의 및 임상병리사(medical technologist)이며, 정확한 IONM의 수행을 위해 위 필수 구성 인력간의 상호 긴밀한 협력이 요구된다[1].

신경생리전문의는 IONM을 하기 위한 장비, 감시법의 설정, 환자 별 감시방법의 결정, 감시수준의 결정, 판독, 그리고 감시기사의 교육을 비롯한 IONM의 수행에 필요한 전반적인 관리를 담당한다[2]. 신경생리전문의사는 신경생리전문의(supervising physician)로 수술 중에 파형을 만들 줄 알아야 하고, 형성된 파형의 변화 의미를 해석하고, 잡파(artifact)를 감소시킬 줄 알아야 하며, 임상병리사를 지도, 감독시킬 수 있어야 할 뿐 아니라, 다양한 검사기법을 통합 운영할 수 있어야 한다. 이 외에 모니터에서 관찰되는 파형 혹은 파형의 변화를 단순히 집도의에게 전달하는 데 그치지 말고, 해당 파형 혹은 파형의 변화가 가지고 있는 임상적인 의미로 해석하여 이를 집도의에게 전달할 수 있어야 한다. 따라서 신경생리전문의는 수술장 내부에서의 신경생리학뿐 아니라, 전기신경생리학의 EP, EMG, EEG, NCS와 신경초음파학의 TCD 등과 같은 개별 검사기법에 대한 전문적인 수련(full-time training)을 충분한 시간에 걸쳐 받은 전문의사여야 하며, 국내의 수련 환경을 고려 시 신경과 혹은 재활의학과 전문의가 이에 해당한다.

임상병리사는 국내법상 의료가사 등에 관한 법률에 따라 의사 또는 치과의사의 지도를 받아 각종 화학적 또는 생리학적 검사업무에 종사하는 전문직업인으로 정의되며, 수술장 내에서 신경생리검사를 직접 수행하는 역할을 담당한다.

IONM은 특정한 검사의 종류를 지칭하는 것이 아니며, EP, EMG, EEG, NCS, TCD 등과 같은 다양한 임상신경생리검사를 수술장 내에서 종합적, 복합적으로 운용하는 행위를 지칭하는 것으로 단순히 수술장의 IONM 장비를 다루고, 파형을 보고 해석하는 것만으로 IONM의 수행에 필요한 임상신경생리학의 수련을 받았다고는 판단할 수 없다.

IONM의 수행에 있어서는 집도의, 마취의, 신경생리전문의와 신경생리전문의의 지도를 받는 임상병리사의 최소 4인으로 이루어진 완전한 조직(full team) 구성이 필수이나, 일부 제한된 경우에 한하여 제한된 조직의 구성 또한 가능할 수 있을 것이다. 예를 들어 갑상선수술에서 자동화된 기계를 이용하여 되돌이 후두 신경(recurrent laryngeal nerve) 위치 확인을 위해 집도의가 간헐적 미주신경자극(vagus nerve stimulation)을 수행하고, 이를 성대의 움직임을 기록전극으로 기록한 후 EMG 신호의 발생을 소리로 변환하는 장비를 이용할 경우, 집

도의와 마취의 만으로도 검사가 가능할 것이다. 다만 이와 같이 제한된 조직에 의해 수행된 IONM은 완전한 조직에 의해 수행되는 IONM과 그 검사의 목적 혹은 정확도에 있어 분명한 차이가 있을 수밖에 없기에 두 검사 방법은 서로 동일시되어서는 안 된다. 또한 일반적인 IONM의 파형 해석은 반드시 모니터 상에서 보이는 파형에 대한 해석이 동반되어야 하므로, 경고 소리(alarm sound) 혹은 모니터 상 보이는 파형에 대한 단순 구두 전달(verbal communication)은 일반적인 IONM 파형 해석의 방법으로 권장되지 않는다.

IONM의 시행을 위한 인력구성으로 기관마다 신경생리전문가의 자격을 가지고 IONM을 시행 감독할 수 있는 신경생리전문의와 그의 지휘를 받는 신경생리 자격을 가지는 임상병리사의 구성은 필수적이며, 집도의, 마취의와 협력하며 시행하는 것을 권장한다.

4. 감독의 수준(level of supervision) 및 급여 청구

IONM의 시행에 있어 중요한 부분 중 하나는 임상신경생리 의사에 의한 관리감독의 수준이다. 이러한 관리감독의 수준은 해외의 권고사항 및 IONM 교과서에 따라 다음과 같이 요약할 수 있겠다.

IONM의 수행에 있어 임상신경생리전문의인 신경생리전문의에 의한 임상병리사에 대한 감독(supervision)은 그 시행 목적과 수행 방법에 따라 3가지 방식 즉 직접적, 개인적, 일반적 감독으로 구분된다. 첫 번째는 직접적 감독(direct supervision)으로 대부분의 수술중신경생리추적감시(intraoperative neurophysiologic monitoring)의 수행에 사용되며, 현재 국내 건강보험요양급여 비용 체계 상의 수술중 신경생리추적감시가 이에 해당한다. 직접적 감독의 수행에 있어 신경생리전문의는 집도의나 임상병리사의 필요에 수반 내 접근 가능한(available nearby) 위치에서 감시의 감독을 시행하거나 온라인 실시간(on-line real-time)으로 감시를 감독하며, 필요 시 과거의 결과를 검토할 수 있으면서 감독할 수 있다. 최근 통신 및 기기의 발달로 온라인 실시간 직접감독 수준이 더욱 발전할 가능성이 높아졌다. 이는 현재 국내에서 수행되는 대부분의 뇌와 척추, 척수, 그리고 혈관 수술에서 시행하는 대부분의 IONM에 해당하며, 검사실에서 시행하는 관례적인 검사(routine test, 예를 들면 MEP와 SSEP 등)를 지속적으로 반복하여 그 파형의 변화를 추적 관찰하는 방법으로 검사 결과가 객관적인 수치 혹은 파형의 변화로 표시되는 것이 일반적이다. 대부분의 교과서와 국내외의 권고사항에서는 이러한 형태의 신경생리감시의 시행을 위해 신경생리전문의가 반드시 수술 장 내에 지속적으로 상주할 필요는 없으며, 수술 장 근처(대개 수술이 이루어지는 건물 내 또는 근처)에서 유선통신(랜선이나 광케이블) 또는 무선통신을 통해 실시간 추적감시(real

time monitoring)를 하다가 주요 파형 변화가 발생했을 때 의료기사를 즉시 관리 감독하며, 이에 대한 판단과 해석을 하며 필요할 경우, 수술 장에 들어가 확인할 수 있는 정도로도 충분하다고 권고하고 있다(direct supervision)[3-7]. 가장 최근에 개정된 미국신경과학회의 보험청구 기준에 따르면 관리 감독은 수술장이나 혹은 수술장 밖에서 실시간으로 이루어진다고 기술되어 있기도 하다(supervision is performed either in the operating room or by real time connection outside the operating room)[8]. 두 번째는 개인적 감독(personal supervision)으로 뇌기능 기능평가(brain mapping)를 포함하는 보다 넓은 의미의 수술중신경생리검사(intraoperative neurophysiologic testing)를 시행할 때 사용된다. 주로 뇌종양 수술 혹은 뇌전증 수술에서 행해지는 대뇌의 언어영역이나 운동 영역 위치의 파악과 같이 전문적이고 높은 수준의 지식과 경험이 요구되는 뇌자극과 함께 뇌기능을 평가하는 검사가 이에 해당한다. 이러한 수술중신경생리검사(intraoperative neurophysiologic testing)의 시행을 할 때는 신경생리전문의가 해당 수술장 내에서 임상병리사에 대한 개인적 감독 하에 검사의 시행을 주도하도록 권고된다[3-5]. 다만 이러한 개인적 감독이 필요한 수술중신경생리검사의 수행은 검사의 수행 전에 검사의 수행 여부/방법/해석 기준 등에 대해 집도의와 신경생리전문의의 충분한 소통 및 협조가 있어야 할 것이다. 아직 국내의 건강보험요양급여 비용 체계 상 이 개인적 감독을 필요로 하는 수술중신경생리검사에 대한 수가는 등재되어 있지 않다. 마지막 세 번째로는 일반적 감독(general supervision)으로 다른 감독 방법과 같이 신경생리전문의의 전반적 관리 감독하에 시행되지만, 직접적인 실시간 또는 접근가능 방식의 감독을 하지 않아도 되는 수술에서 시행하는 감독 방식이다. 미국의 경우, 일부 IONM 검사에 한하여 이러한 일반 관리감독을 수행하기도 하는 것으로 보인다[8].

IONM은 수술 및 마취와 동일한 공간에서 동일한 시간대에 이루어지나, 엄밀히 구별되는 별개의 행위이다. 따라서 미국과 같은 해외에서는 수술을 집도하는 집도의/마취의는 수술 수가를 신청하였기에 동 시간에 IONM을 청구할 수 없다고 규정하고 있다(may not be reported by the surgeon or anesthesiologist performing an operative procedure, since it is included in the global package if they serve as the IOM supervising physician)[8].

집도의/마취의가 수술/마취와 동시에 IONM을 청구할 수 없듯이 신경생리전문의인 임상신경생리 의사 또한 외래 진료와 동시간 대에 직접적 감독의 IONM 업무를 수행하는 것은 바람직하지 않겠다. 따라서 임상신경생리 의사가 신경과 혹은 재활 의학과 외래 진료를 겸하는 국내의 실정을 고려할 때 가급적

기관당 2명 이상의 임상신경생리전문의를 확보하여 안정된 IONM을 수행을 하는 것을 권고한다. 또한 환자와 수술에 적합한 감시의 감독 수준(level of supervision)을 유지하며, IONM을 수행하는 것을 권고한다.

5. 검사 전 유의사항

1) 검사의 안전성

IONM을 위해 사용하는 전기 자극은 직사각형 자극(rectangular stimuli) 펄스(pulse)를 사용하는데 전달되는 부하(charge; Q; mC)는 펄스의 크기인 전류(current; I; mA)와 펄스의 기간(duration; D; msec)에 의해서 $Q = I \times D$ 로 정해진다. 이러한 부하는 자극과 신경손상과의 가장 중요한 수치이다. 이때 전달되는 에너지(energy; E; mJ)는 저항(resistance; R; kohm)과 관련되며, $E = I^2 \times D \times R \times 0.0001$ 로 정해진다. 안전한 전류강도와 기간은 반비례하며, D는 0.02 부터 1 msec까지 정해진다. 펄스 기간이 짧을수록 역치 전류는 급격히 떨어지고, 역치 부하는 비례해서 감소하고, 역치 에너지도 떨어져, 기간과 전류의 강도를 역치 이하로 설정하고 자극하는 것이 중요하다. 현재 시판되는 기기들은 이러한 안전성을 고려하여 지나친 자극을 줄 수 없게 설정되어 있지만, 이에 대한 환자와 상황에 따른 자극을 고려하여 자극해야 한다.

MEP는 일반적으로 두개골을 통해 대뇌에 강력한 전기 자극을 유발하는 경두개전기운동유발전위(transcranial electric motor evoked potential, TCE-MEP) 방식을 사용한다. 이는 드물지만 1/3,000 정도의 빈도로 환자들에게 경련(seizure)을 유발할 수 있으며, 전기 자극에 의해 유발되는 구개근육의 수축으로 혀나 턱의 손상이 있을 수 있다. 또한 심장 박동기나 기타의 생체 내 기구를 가지고 있는 경우도 경두개전기운동유발전위의 상대적인 금기(relative contraindication)에 해당한다[9]. 다만 경두개전기운동유발전위는 전기자극의 강도가 세질수록 심부뇌조직(deeper brain structure)까지 자극하는 특성을 가지고 있다[10]. 따라서 대뇌 피질의 작은 신경 손상을 감지할 필요가 있는 수술에서는 자극의 강도를 최소한으로 하거나 혹은 직접뇌피질 자극(direct cortical stimulation)을 통해 유발된 MEP 신호를 사용하는 것을 고려해 볼 수 있겠다.

기타의 자극에서 살펴보면, 뇌기능 평가를 위한 직접뇌피질자극에서도 일반적인 전기자극 강도로 10초 미만의 지속적 단일펄스 자극(continuous single pulse stimulation: Penfield method)이나 군집적 복수펄스 자극(trained multiple pulse stimulation) 방식을 선택할 수 있다. SEP는 말단의 신경을 전기 자극하는 방식으로 외래 일반 검사에서 확보된 안전성과 동일한 방식에 따라 시행하게 된다.

환자에 맞는 적합한 검사를 정하고, 검사마다 적절한 자극의 방법을 설정하며, 개별환자에 따른 자극 역치와 안전성을 고려한 자극 방식을 가하며 추적감시를 시행하는 것을 권장한다.

2) 마취의 영향

수술을 위해 사용하는 마취제는 IONM의 파형성에 지대한 영향을 미칠 수 있다. 현재 대부분의 IONM에서 가장 널리 사용되는 마취기법은 프로포폴(propofol)과 저용량의 아편제제(opioid)를 이용한 완전정맥마취(total intravenous anesthesia, TIVA)일 것이다[4]. 특히 MEP를 이용한 IONM에 있어서는 TIVA를 이용한 마취기법이 기존의 흡입마취제제를 이용한 마취기법에 비해 MEP의 생성률과 파형의 크기에 있어 탁월하게 우월한 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 TIVA를 이용한 마취에서도 정맥마취제의 농도가 지나치게 높을 경우에는 MEP 형성을 저해하고, EEG의 파형 크기를 감소시킬 수 있음을 유의해야 한다[11]. 이 외에 현재는 잘 사용되고 있지는 않으나, 케타민(ketamine)이나 소량의 에토미데이트(etomidate)는 SSEP 혹은 MEP의 파형의 크기를 증가시킬 수 있다[12].

많은 수술에서 수술전 기관내관의 삽관(endotracheal tube insertion)을 용이하게 하기 위해, 그리고 수술중 환자의 근긴장도를 감소시키기 위해 신경근이완제(neuromuscular relaxant)를 사용한다. 하지만 이런 신경근이완제는 IONM에 사용하는 MEP 혹은 EMG의 신호를 감소시키거나 심지어 없앨 수도 있으므로 MEP나 EMG와 같은 IONM 기법을 이용하는 수술에서 신경근이완제는 기관내관의 삽관 직전에 속효성제제(short acting drug)를 1회만 사용하는 것을 권한다(예, rocuronium). 또한 신경근이완제의 체내 잔류는 사연속반응(train of four)의 검사를 통해 비교적 쉽게 알 수 있다[1].

따라서 IONM 검사 전에 위와 같은 마취제의 영향을 미리 고려하여 해당 수술의 마취의사와 상의를 하는 것이 반드시 필요하다.

수술중 안전한 수술이 가능한 마취 상태를 유지하면서, 파형의 형성을 최적화할 수 있는 수준을 유지시키면서 추적감시한다. 특히 운동경로의 파악과 관련된 추적감시에서는 신경근 차단제의 사용에 주의하며, 피질에서 형성되는 파형을 파악해야 되는 추적감시에서는 흡입마취제의 사용에 주의할 것을 권고한다.

6. 장비 전극 및 기구

1) IONM 기계

비록 IONM이 신경계 질환 환자들의 진단을 위해 사용하는 신경생리검사 기법을 이용하나, 수술장 내부에서는 마취제, 다양한 기계, 집도의의 움직임, 주사제제 등의 영향이 매우 심하

며, 차폐(shielding)가 전혀 되지 않는 어려움이 있다. 따라서 일반적으로 외래 혹은 입원환자의 검사를 위해 사용하는 검사 기기보다 IONM 전용으로 고안된 장비를 사용하는 것이 일반적으로 권장된다. 해외뿐 아니라 국내에도 다양한 IONM 전용 기계가 선택 가능하므로 개별 검사실의 실정과 특성에 맞는 기계를 선택할 것을 권한다.

2) 전극

IONM의 시행에 있어 다양한 종류의 전극이 사용 가능하다. 다만 검사의 편의성 및 환자가 마취되어 있어 통증을 느낄 수 없는 특성을 고려하여 일반적으로 침전극(needle electrode)이 가장 많이 사용된다. 외래 환자의 EEG 및 SSEP 검사에 사용되는 컵전극(cup electrode)이나 표면전극(surface electrode) 또한 모두 침전극으로 대체가 가능하다. 이러한 침전극은 분리(detach)될 경우 IONM 파형성의 장애를 일으킬 뿐 아니라, IONM팀의 부상이나 감염을 일으킬 수 있으므로 침전극 삽입 후에는 해당 부위를 반창고 혹은 플라스터, 테이핑하며 고정할 것을 권한다. 특히 수술 부위에 근접한 자극의 설치가 필요할 경우 감염의 안전을 위해서 고정에 특히 주의해야 한다.

바늘 전극 이외의 다양한 형태의 전극을 사용하여 보다 적극적인 IONM을 시행할 수 있다. 이 중 최근 개발된 기관내관 부착형 표면전극(endotracheal tube attachable surface electrode)의 경우 일반적인 표면전극 혹은 침전극으로 접근이 불가능한 성대근육의 EMG 신호를 기록할 수 있어 하부뇌간(lower brainstem)이나 갑상선, 부갑상선 등의 수술로 인한 미주신경(vagus nerve) 및 되돌이후두신경(recurrent laryngeal nerve)의 손상을 조기에 발견하고, 이를 예방하는 데 유용하게 사용이 가능하겠다[13]. 피하전극의 설치가 위험한 소근육의 기록이 필요할 경우, 후크 와이어 전극(hook wire electrode)을 설치하여 보다 안전하게 기록할 수 있다. 또한, 항문의 괄약근에서 기록하거나, 뇌신경의 말단에서 복합신경 활동전위(compound nerve action potentials, CNAP)를 기록할 경우 특수하게 제작된 전극을 사용할 수 있다.

대뇌 피질이나 척수에 접촉하여 전위를 기록해야 할 경우, 경막하전극(subdural electrode)이나 경막외전극(epidural electrode)을 사용할 수 있다.

7. 방법

1) 준비

- IONM팀은 환자의 진단, 수술의 종류, 그리고 수술 전 신경학적 상태에 대한 사전 정보를 숙지하여야 한다.
- 임상신경생리의사는 수술집도의 및 마취의사와 필요한 IONM 검사법(modality) 및 효율적인 IONM을 위한

마취법에 대해 각각 협의해야 한다. 이러한 검사법 및 마취법에 대한 협의는 매 수술 전에 하거나 혹은 특정 진단/수술에 대해 미리 공통의 협의를 도출해 놓아도 무방하다. 도출된 협의는 임상병리사에게 잘 전달이 되어야 한다.

- 환자가 입실하여 마취가 완료될 때까지 IONM팀은 환자의 신원을 확인 후 IONM 기록에 입력한다.
- 환자의 마취가 완료되면 환자에게 전극을 설치하여 고정하고, 환자의 수술 자세를 잡은 후 고정을 풀고 설치된 전극을 IONM 기계와 연결한다.
- 모든 전극의 연결이 완료된 후 임피던스 검사를 시행한 후 일차 기준파형(baseline wave)을 측정하며, 이러한 일차 기준파형의 측정은 마취의 정도와 기기의 정상 작동 여부에 대한 정보를 제공해 줄 수 있다.

2) 전극, 센서 부착

- 경두개전기운동유발전위의 자극을 위한 전극으로는 침전극 혹은 드물게 코르크스크류(cork screw) 형태의 전극이 사용 가능하며, 이 중 침전극이 가장 일반적으로 사용된다. 자극 전극은 MEP를 주로 기록하고자 하는 근육의 위치에 따라 Cz, C3/C4, 혹은 C1/C2 등에 설치 가능하다. 전기자극의 강도가 비교적 약한 경우에는 자극 전극의 위치가 내측(예, Cz)에 가까울수록 다리의 근육에서 MEP의 기록이 더 용이하며, 외측(예, C3/C4)에 더 가까울수록 팔의 근육에서 MEP의 기록이 더 용이하다는 주장들이 있다[14]. 다만 자극 전극의 위치가 외측으로 지나치게 치우치게 될 경우 구강근육의 수축으로 인한 혀나 턱의 부상이 있으므로 주의를 요한다.
- SSEP, BAEP, VEP, EMG의 전극: 신경계환자의 진단을 위한 검사와 기본적으로 동일하다.
- EEG, TCD의 기록은 검사실 기록과 같은 방식으로 기록한다. EEG는 두피전극을 사용할 경우는 바늘 전극을 국제 10-20계와 일치한 부위에 전극을 설치하며 기록하고, ECoG를 기록할 경우 경막하 전극을 사용하여 기록한다. TCD는 2 MHz의 탐식자(probe)를 중뇌동맥의 혈류를 측정할 수 있는 부위에 설치하고 기록한다.

3) 자극(stimulation)

- 경두개전기운동유발전위의 자극은 두피에 설치된 전극을 통해 5-7회의 짧은 연속 전기자극(short train of 5-7 electrical pulse)을 이용한다. 이러한 연속 전기자극은 비교적 적은 강도의 전기자극으로 알파운동신경원(alpha-motor neuron)을 흥분 역치(firing thresh-

hold)에 도달하게 하며, 적정 수준의 마취 하에서 환자
에게 MEP를 유발시킬 수 있게 한다[15].

- b. SSEP, BAEP, VEP의 자극: 신경계환자들의 검사실 진단
을 위한 검사 방법과 동일하다. 단, SSEP의 경우 검사실
의 막대형 자극기보다는 경막하전극을 손목과 발목에 행
당신경 근접부에 설치하여 자극한다. BAEP의 경우는 클
락음을 사용하며, 헤드폰 대신 관 형태의 귀내삽입전극
(tubal insert phone)을 삽입한다. VEP의 경우는 광자
극을 위해 플래쉬 빛을 이용할 수 있지만, 고정 헤어밴드
가 필요없고 설치가 편리하며 작고 밝은 자극을 줄 수 있
는 LED 자극을 사용하며 수술할 수 있다.
- c. 말초신경의 자극하며 근육에서 CMAP를 기록하는 방식
은 신경계 질환 환자들의 진단을 위한 검사실의 검사와
달리 주로 수술장에서 말초신경이 노출된 상태에서 뇌신
경 혹은 신경 뿌리에 대한 전기 자극을 이용한다.
- d. 전기자극 방식에서 이극성 자극으로 국소적인 자극을 유
발할 수도 있고, 단극성 자극으로 보다 광범위한 자극을
줄 수도 있다. 또한 자극의 종류로 근접 부위에 정확히
자극을 할 수 있는 항전류성(constant current) 자극을
줄 수도 있고, 항전압성(constant voltage) 자극을 줄
수도 있다.
- e. 수술과 감시방법에 따라 환자마다 적절한 자극 종류, 방
식을 선택하여 정확한 자극을 가하며 반응을 확인하는
것이 중요하다.

4) 기록(recording)

(1) 기준파형(baseline)의 기록

환자들의 진단을 위한 신경생리검사는 연령 혹은 신장 등에
따른 정상인의 검사수치에 비교하여 그 이상 유무를 판단한다.
IONM은 이러한 진단을 위한 신경생리검사와 달리 개개인의
정상수치보다는 주요 수술행위(main operating procedure)
이전에 기록한 기준 파형과의 비교를 통해 주요 수술행위로 유
발된 신경계 기능의 변화를 판단하게 된다.

IONM 파형은 마취제의 영향, 환자의 전신상태, 그리고 기
기의 이상 유무에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서 IONM의
기준 파형은 환자가 마취된 상태에서 TIVA에 사용된 정맥마
취제의 주입 속도가 일정해지고, 신경근육차단제의 영향이 없
으며, 또한 환자의 심박수, 체온, 기타 전해질의 장애
등이 없는 상태에서 기록하는 것이 가장 바람직하다. 또한 한
번의 파형기록을 기준 파형으로 삼는 것보다 반복 기록하여 재
현되는 파형을 기준 파형으로 삼는 것이 바람직하다.

(2) 경두개전기근육운동유발전위의 기록

근육에서 전위를 기록하는 경우가 가장 일반이며, 이를 세

분하여 경두개전기근육운동유발전위(transcranial electric
muscle motor evoked potential, TCE-mMEP)라고 하
기도 한다. TCE-mMEP는 기록 전극의 설치가 간편한 장점이
있는 반면, MEP의 시행 때마다 파형의 변동(intertribal
variability)이 비교적 크다는 단점이 있다[16]. 해외의 일부
연구자들은 이러한 경두개전기근육운동유발전위의 단점을 극
복하고자 MEP를 직접 척수(spinal cord)에서 기록하는
D-wave 기법을 개발하기도 하였으며, 척수내종양(intrame-
dullary tumor)의 수술에서는 TCE-mMEP보다 D-wave가
신경손상을 더욱 정확하게 진단한다고 주장하기도 한다. 다만
이러한 D-wave의 유용성에 대한 연구는 비교적 소규모의 환
자를 대상으로 시행한 일부 연구집단의 결과에 따른 것으로,
향후 보다 대규모의 전향적 연구 결과가 필요할 것으로 보인다
[17]. D-wave의 측정을 위해서는 경막외나 경막하 공간에서
직접 척수의 신호를 기록할 수 있는 특수 제작된 카테터전극
(catheter electrode)이 필요하다.

(3) SSEP, BAEP, VEP, EMG의 기록

기본적으로 신경계 환자의 진단을 위한 검사법과 동일한 전
위를 기록한다.

(4) EEG, TCD의 기록

기본적인 뇌파의 파형과 뇌혈류의 파형을 기록한다.

8. 결과의 해석 및 문서화

1) 수술 중 신경손상의 가능성을 시사하는 IONM상의 경보 신호(alarm sign)가 관찰될 경우

임상신경생리학의사와 의료기사는 최대한 빨리 기기이상,
마취제농도의 변화, 환자의 전신상태(혈압, 체온, 산소포화도,
전해질 농도 등) 변화, 혹은 기타의 잡파(artifact)의 영향이 있
는지를 파악하고, 이러한 영향이 없는 경우 수술 집도의에게
수술 중 신경손상의 가능성이 있음을 알려주어야 한다.

2) 경보의 기준(criteria for alarm)

(1) EEG

뇌파로 혈류 변화를 확인하기 위해서는 혈류변화와 파형
의 변화 관계로 속파의 감소, 서파의 증가, 진폭의 감소, 그
리고 돌발억제(burst-suppression), 최종 평탄뇌파(flat
EEG) 순으로 뇌파의 변화를 볼 수 있다. 이때 서파의 진폭이
50% 이상 감소하면 이상 수준으로 판단한다. 물론 뇌전증파
(epileptiform discharges)를 확인하기 위한 피질뇌파
(ECoG)를 시행할 경우 뇌전증파 관찰로 이상 부위를 확인할
수 있다.

(2) 경두개전기근육전기운동유발전위(TCE-mMEP)

근육에서 기록하는 경두개전기운동유발전위는 매회의 자극에 의해 유발되는 파형의 크기 변화가 비교적 크다(high intertribal variability). 따라서 그 정확한 경보의 기준에 많은 논란이 있다.

척추 및 척추 수술의 경우 파형의 완전 소실(absence of MEP)이 신경 손상의 가능성을 가장 특이적(specific)하게 예측할 수 있는 지표로 알려져 있다. 다만 완전한 파형의 소실이 아니더라도 MEP파형 크기의 감소(50%, 70%, 또는 80%)의 경우도 소수의 환자들에서는 대개 비교적 경미한 수술 후 마비(postoperative motor deficit)가 발생할 수 있으므로 주의가 필요하다[18].

뇌수술의 경우, 파형의 완전 소실이 아닌 파형 크기의 감소만으로도 수술 후 마비가 발생하는 경우가 비교적 빈번한 것으로 알려져 있으며, 일부 연구자들은 뇌수술에서는 MEP의 진폭이 50% 이상 감소하는 경우에도 수술 중 신경손상의 가능성이 높을 것으로 간주하기도 한다[19].

이외 MEP의 정확도는 MEP를 기록하는 근육의 종류에 영향을 받을 수 있으며, 많은 숫자의 피질척수로 섬유(corticospinal fiber)에 의해 조절되는 근육들(다리의 경우 abductor hallucis)에서 기록한 MEP는 검사의 특이도(specificity)가 높고 적은 숫자의 피질척수로 섬유에 의해 조절되는 근육들(tibialis anterior)의 경우 검사의 민감도(sensitivity)가 높을 수 있어 이러한 특성에 대한 고려가 필요하다[20].

이와 같은 논란(debate)에서도 알 수 있듯이 아직까지 MEP의 경우 민감도와 특이도가 모두 완전한 경보기준은 없어 보인다. 따라서 기존의 연구들을 바탕으로 개별 검사실에 적합한 기준을 설정하는 것이 필요하다.

다만 민감도를 높이는 경보 기준은 필연적으로 검사의 특이도를 떨어뜨릴 수 밖에 없음을 명심해야 할 것이다.

(3) SSEP

일반적으로 잠복기(latency)가 10% 이상 연장되거나 진폭(amplitude)이 50% 이상 감소할 경우 수술중 신경계 손상의 위험이 높은 것으로 간주한다.

(4) BAEP

Wave V의 잠복기가 1 msec 이상 연장되거나, 진폭이 50% 이상 감소된 경우, 수술중신경계손상의 위험이 높은 것으로 간주하는 것이 일반적이다.

다만 일부 연구자들의 경우 소뇌교각종양(cerebellopontine angle tumor) 이외의 수술의 경우에는 오직 wave V의 완전한 소실만이 수술중신경계손상의 위험이 높은 것으로 간주하여야 한다는 주장을 하기도 하여 향후 추가 연구가 필요하

겠다[21].

(5) VEP

일반적인 VEP 파형인 100 msec에서 형성되는 P100 파형의 진폭을 확인하며, 진폭이 50% 이상 감소할 경우 신경계의 손상이 높은 것으로 판단한다. 파형의 형성 확인을 위해 전기망막검사(electroretinography)를 같이 시행하면서 확인하기도 한다. 시교차 전의 병변을 확인하기 위해서 사용하기 좋으며, 아직 시교차 후의 병변에 대해서는 추가적인 연구가 진행 중이다.

(6) EMG

뇌신경과 신경근의 자극 등으로 인한 EMG 신호 중 임상적 의미가 있는 것은 신경 긴장성 전위(neurotonic discharges)이다. 이 신경긴장성 EMG는 일시적인 위상성 전위(phasic discharges)보다 지속적이고 반복적인 운동단위(motor unit)의 반복 신호로 나타나며, 50-200 Hz의 매우 빠른 주파수를 가진다. 위상성 전위는 신경을 건드리거나 물을 뿌리거나 같은 가벼운 자극에도 관찰되어 의미를 두지 않지만, 신경긴장성 전위는 기계적, 열성 혹은 대사성 신경의 자극 혹은 손상을 의미한다. 다만 이 신경긴장성 EMG는 수술중신경계 손상을 비교적 민감하게 예측하는 반면, 이러한 신경긴장성 EMG가 모두 수술중신경계 손상을 의미하지는 않아 해석에 유의를 요한다. 일 예로 척추수술 중 IONM 변화와 수술 후 신경계 손상의 관련성을 연구한 Gunnarsson 등의 연구에서 신경긴장성 EMG는 척추의 수술 후 마비를 예측하는 데 있어 100%의 높은 민감도(sensitivity)를 가지는 반면, 23.7%의 낮은 특이도(specificity)를 가진다고 보고하기도 하였다[22]. 또한 근전도 반응은 소리를 들으면서 개략적으로 확인할 수도 있는데, 신경위상성 전위가 강할수록 보다 고음의 반복적인 음이 들리게 된다. 다만 전술하였던 것과 같이 소리를 통한 IONM의 파형의 판단은 그 한계가 있으므로 일반적인 방법으로 권장하지는 않는다.

(7) TCD

뇌혈류를 파악하기 위해서 시행하는 TCD의 경우, 수축기 혈류 속도감소를 확인하며 이상을 확인할 수도 있지만, 색전증(emboli)에 의한 고강도의 일시적 신호(high-intensity transient signal, HITS)를 확인하며 이상을 확인할 수 있으며, 높은 음의 소리를 들으면서 이상을 평가할 수도 있다.

9. 검사 시간

현재 국내 보험급여 기준에 의하면 IONM은 검사의 종류가 한 가지일 때와 두 가지 이상일 때로 나누어 볼 수 있다. 전자는 1종으로 청구하고, 후자는 2종으로 청구한다. 또한 시간당

IONM과 관련된 시간에 따른 시각과 기간

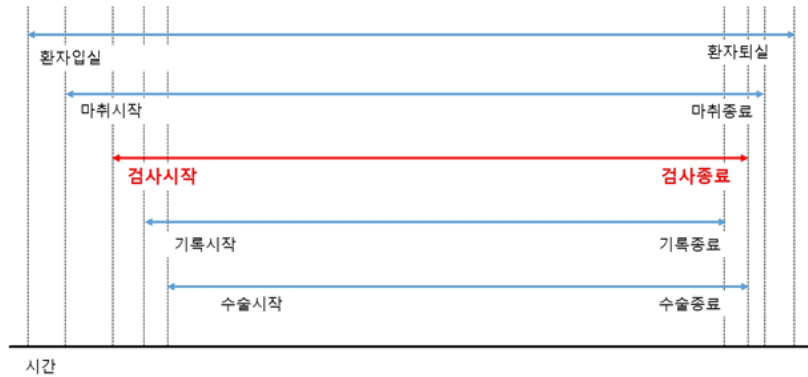


Fig. 1. Types of time periods related to intraoperative neurophysiological monitorings.

수가를 정하는 검사이기 때문에 시간을 정확히 기재하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 참고가 되는 시간은 기록시간과 검사시간이다(Fig. 1.) 기록시간은 기본 파형을 얻는 시각(기록시작)부터 마침결과(closing data)를 얻는 시각(기록종료)사이의 시간이며 검사시간은 기록시작 이전에 장비 설정, 전극설치, 및 자극기설치 등의 준비가 시작되는 시각(검사시작)부터 전극의 제거/폐기, 환자상태 확인, 및 자료의 저장 등의 IONM검사 과정이 종료되는 시각(검사종료)사이의 시간이다. 실제 IONM의 검사행위가 기록시작이전부터 시작하여 기록종료 이

후에도 이루어지는 점을 고려 시 IONM의 청구 시간 또한 검사시간을 기준으로 하는 것이 가장 합리적이다.

10. 판독

판독문에 기본 정보, 감시 방법, 감시 결과 그리고 결론을 포함해야 하고, 필요 시 추가의견을 제시할 수 있다. 기본 정보로는 날짜, 검사일, 환자 성명, 성별, 나이, 등록번호 등의 정보도 필요하지만, IONM의 특성상 수술정보로 수술명, 수술부위, 집도의, 마취 정보로 마취명, 마취농도, 마취의사, 그리고

수술중신경계감시 보고서

[환자정보] 환자명: 000 성별/나이: F/00 등록번호: 11223344
 [수술정보] 집도의: Dr. 000 진료과: NS 수술방: B11
 수술명: Microvascular decompression for hemifacial spasm (lateral SOC)
 수술전진단: HFS Rt 10YA G2>
 기타사항: Neurovascular conflicts - Offender: AICA, - Compression pattern: perforator type
 - Compression site: stem side of REZ, - CSF Type: B

[마취정보] 마취의: Dr. 000
 정맥마취제($\mu\text{g/kg/min}$): propofol: 100~140, remifentanyl: 0.05~0.09
 신경근차단제($\mu\text{g/kg/min}$): vecuronium: 0.3~0.9 (TOF: 1/4)

[감시정보] 일시: 2013.03.25 **검사시작**: 11:57 **검사종료**: 16:09
기록시작: 13:02 **기록종료**: 16:06

감시자: **Dr. 000(감독의사)**, 000(감시기사)
 방법 - 추적감시: EP (BAEP, SSEP), EMG (free running, cranial)
 BAEP 자극: 43.9Hz, 1.5 msec/div
 기록: 2채널(active: A1, A2, reference: Cz)
 SSEP 자극: 정중신경(15 mA, 0.2 msec, 5.1Hz), 후경골신경(20 mA, 0.2 msec, 5.1Hz)
 기록: 4채널(active: C3', C2', C4', Fpz)
 - 기능평가: EMG (triggered, cranial, lateral spread response)
 자극: 5~20 mA, 0.2 msec, single pulse
 기록: frontalis, oculi, oris, mentalis

[결과] - 추적감시(monitring) 청각유발전위(brainstem auditory evoked potentials)
 좌측: 수술 중 파형의 유의한 변화는 관찰되지 않음.
 우측: 수술 중 파형의 유의한 변화는 관찰되지 않음.
 체성감각유발전위(somatosensory evoked potentials) 추적감시
 정중신경 좌측: 수술 중 파형의 유의한 변화 관찰되지 않음.
 정중신경 우측: 수술 중 파형의 유의한 변화 관찰되지 않음.
 후경골신경 좌측: 수술 중 파형의 유의한 변화 관찰되지 않음.
 후경골신경 우측: 수술 중 파형의 유의한 변화 관찰되지 않음.

- 기능평가(mapping)
 유발근전도(lateral spread response)
 광대뼈분지: 자극역치 10 mA, 반응기록 9.33ms, 111.8 μV CMAP, 17 mA 자극 안면근 LSR 관찰됨.
 볼분지: 자극역치는 11 mA, 반응기록은 9.83 ms, 79.42 μV CMAP, 19 mA 자극 안면근 LSR 관찰됨.
 월관박리후 LSR 사라짐

[의견] 수술 중 신경계 감시검사에서 유의한 변화 관찰되지 않음.

Fig. 2. An example of IONM report forms including information (patient, surgery, anesthetics, monitoring team), results, conclusion and comments.

IONM팀의 정보로 임상병리사, 신경생리전문의에 대한 정보가 있어야 한다. 이 외에 급여청구의 문제를 명확히 하기 위해서 검사 일시로 감시시간과 기록시간을 명확히 기술하는 것이 권장된다(Fig. 2).

정리

아직 임상적인 근거의 부족함에도 가능한 현재의 상황에서 권고를 제시하여 도움이 될 수 있는 사항을 기술하였다. 기본적인 원리, 적응증, IONM팀의 구성, 감독의 수준, 검사 전 유의사항, 그리고 전극과 기구를 포함한 장비를 설명하였고, 감시의 방법, 감시 결과의 해석과 문서화, 검사시간의 정리, 마지막으로 판독방법에 대하여 현재의 상황과 지침을 같이 제시하였다. 특히 국내 급여 등과 관련되면서 개념 정리가 필요한 감독의 수준, 검사 시간, 판독 방법에 대해서 보다 자세히 언급하였다.

Conflicts of interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

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.
- American Association of Neuromuscular & Electrodiagnostic Medicine [AANEM]. AANEM Position Statement: the role of the intraoperative monitoring team. Rochester, MN: AANEM; 2008.
- Department of Health and Human Services. Physician supervision of diagnostic tests [Internet]. Baltimore, MD: Health Care Financing Administration; 2001 [cited 2020 Mar 31]. Available from: <https://www.cms.gov/Regulations-and-Guidance/Guidance/Transmittals/downloads/B0128.pdf>
- Nuwer MR. Intraoperative monitoring of neural function. Amsterdam: Elsevier; 2008.
- Nuwer JM, Nuwer MR. Neurophysiologic surgical monitoring staffing patterns in the USA. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1997;103(6):616-20.
- Greiner A, Mess WH, Schmidli J, Debus ES, Grommes J, Dick F, et al. Cyber medicine enables remote neuromonitoring during aortic surgery. *J Vasc Surg*. 2012;55(5):1227-33.
- Emerson RG. Remote monitoring. In: Husain A, editor. *A practical approach to neurophysiologic intraoperative monitoring*. New York: Demos; 2008. p. 45-54.
- American Academy of Neurology [AAN]. Principles of coding for intraoperative neurophysiologic monitoring (IOM) and testing [Internet]. Minneapolis, MN: AAN; 2018 [cited 2020 Mar 31]. Available from: https://www.aan.com/siteassets/home-page/tools-and-resources/practicing-neurologist--administrator/s/billing-and-coding/model-coverage-policies/18iommodelpolicy_tr.pdf
- MacDonald D. Safety of intraoperative transcranial electrical stimulation motor evoked potential monitoring. *J Clin Neurophysiol*. 2002;19(5):416-29.
- Rothwell J, Burke D, Hicks R, Stephen J, Woodforth I, Crawford M. Transcranial electrical stimulation of the motor cortex in man: further evidence for the site of activation. *J Physiol*. 1994;481(1):243-50.
- Scheufler KM, Zentner J. Total intravenous anesthesia for intraoperative monitoring of the motor pathways: an integral view combining clinical and experimental data. *J Neurosurg*. 2002;96(3):571-9.
- Kochs E, Treede RD, Schulte AEJ. Increase in somatosensory evoked potentials during anesthesia induction with etomidate. *Anaesthesist*. 1986;35(6):359-64.
- Randolph GW, Dralle H, Abdullah H, Barczynski M, Bellantone R, Brauckhoff M, et al. Electrophysiologic recurrent laryngeal nerve monitoring during thyroid and parathyroid surgery: international standards guideline statement. *Laryngoscope*. 2011; 121(S1):1-16.
- Szelényi 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.
- 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.

16. Burke D, Hicks R, Stephen J, Woodforth I, Crawford M. Trial-to-trial variability of corticospinal volleys in human subjects. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1995;97(5):231-7.
17. Kothbauer KF, Deletis V, Epstein FJ. Motor-evoked potential monitoring for intramedullary spinal cord tumor surgery: correlation of clinical and neurophysiological data in a series of 100 consecutive procedures. *Neurosurg Focus.* 1998;4(5):e1.
18. Sakaki K, Kawabata S, Ukegawa D, Hirai T, Ishii S, Tomori M, et al. Warning thresholds on the basis of origin of amplitude changes in transcranial electrical motor-evoked potential monitoring for cervical compression myelopathy. *Spine.* 2012;37(15):E913-21.
19. Szelényi 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.
20. Kim SM, Yang H, Park SB, Han SG, Park KW, Yoon SH, et al. Pattern-specific changes and discordant prognostic values of individual leg-muscle motor evoked potentials during spinal surgery. *Clin Neurophysiol.* 2012;123(7):1465-70.
21. James ML, Husain AM. Brainstem auditory evoked potential monitoring When is change in wave V significant?. *Neurology.* 2005;65(10):1551-5.
22. Gunnarsson T, Krassioukov AV, Sarjeant R, Fehlings MG. Real-time continuous intraoperative electromyographic and somatosensory evoked potential recordings in spinal surgery: correlation of clinical and electrophysiologic findings in a prospective, consecutive series of 213 cases. *Spine.* 2004;29(6): 677-84.