



박진석

한양대학교병원 신경과

Intraoperative neurophysiologic monitoring: motor evoked potential

Jinseok Park, MD, PhD

Department of Neurology, Hanyang University Hospital, Seoul, Korea

The development of intraoperative neurophysiologic monitoring (IONM) have been progressed to reduce and manage potential injury to nervous system during surgery or procedure. Among various IONM modalities, motor evoked potential (MEP) were most widely used to monitor motor system during surgery. Herein, we review the basic principles, methods of stimulation/recording, and warning criteria of MEP in IONM.

Key Words: Intraoperative neurophysiologic monitoring; Motor evoked potential

서론

수술중신경계감시(intraoperative neurophysiological monitoring, IONM)는 수술 중 신경계 손상을 최소화하기 위해 시행하는 신경생리학적 감시 방법으로, 척추, 뇌수술을 포함한 다양한 분야에서 활용되고 있다. IONM을 통하여 수술 중 뇌, 척추 등 신경계에서 일어나는 변화를 감지하여, 마취 상태에서 추가적인 신경계 손상을 막을 수 있고, 더 나아가 수술 합병증으로 인한 비용 손실을 감소시키는데 도움을 받을 수 있게 되었다. 또한 수술 중 신경계 손상 여부를 확인하여 수술 진행 여부를 결정하며, 신경구조물을 확인하여 최소침습수술(minimally invasive surgery)을 가능하게 한다.^{1,2,3}

본 중설에서는 IONM에서 가장 많이 사용되고 있으며, 운동신경계를 감시할 수 있는 방법인 운동유발전위(motor Evoked Potential, MEP)에 대해 서술하려 한다.

본론

운동신경계의 감시에서 신경학적 손상을 감지하기 위해서 운동신경계의 해부학적인 구조를 이해하는 것이 중요하다. 대뇌의 운동 피질(motor cortex)에서 시작된 대부분의 축삭(axon)은 뇌신경계(cranial nerve system)를 담당하는 피질연수로(corticobulbar tract)와 척수를 따라 진행되는 피질척수로(corticospinal tract)로 연결된다. 운동신경의 축삭은 척수의 앞뿔(anterior horn of spinal cord)에서 이차운동신경세포(second-order motor neuron)와 연결을 한다. 대부분의 축삭은 맞은편으로 교차를 하게 되고, 약 10%의 섬유는 교차를 하지 않고 같은편으로 진행한다. 상위운동신경(upper motor neuron)의 축삭은 직접 연결되거나, 사이신경세포(interneuron)를 통하여 하위운동신경(lower motor neuron)인 알파운동신경(alpha motor neuron)과 연결된다. 이차운동신경세포의 축삭은 뇌신경계로 연결되고, 척수의 경우는 앞뿌리(anterior root)를 거쳐 상지/다리 신경열기(plexus)로 진행한다. 이후 축삭을 통한 신호는 신경근접합부(neuromuscular junction)를 거쳐 근육으로 전달된다. 수술에서 사용되는 신경근차단제(neuromuscular blocker)는 신경근접합부에 작용한다. 운동신경계의 전반적인 이해는 IONM에서 매우 중요하며, 운동 피질부터 근육 사이의 어느 한 부위에 문제가 생긴다면 신경학적 손상

Jinseok Park, MD, PhD

Department of Neurology, Hanyang University Hospital, 222-1

Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, 04763, Korea

Tel: +82-2-2290-8367 Fax: +82-2-2296-8370

E-mail: jinseok.park0@gmail.com

을 초래할 수 있다.

IONM에서 운동신경계는 주로 경두개자기자극(transcranial magnetic stimulation, TMS)이 아닌 경두개전기자극(transcranial electrical stimulation, TES)을 이용하여 MEP를 평가한다. 이는 TMS가 TES보다 마취에 영향을 많이 받으며, 정확한 위치를 자극하기 어렵기 때문이다.⁴ TES는 일반적인 신경전도검사와 달리 양극(anode)부위에서 활동 전위(action potential)가 생성되고 피질척수로를 따라 전해진다. 일반적으로 전기 자극의 위치는 10-20 international system을 기준으로 C3/C4 부위에 나선형 또는 피하 침 전극을 사용하여 가한다. 다만 뇌수술의 경우 수술 부위로 인하여 전극의 위치가 C1/C2 혹은 P3/P4로 변경되는 경우도 있다.⁵ 전기 자극은 항전압성(constant voltage)의 다중펄스(multi-train) 자극을 5-7회 반복하여 준다. 펄스간격(interpulse interval)은 2-4 msec으로 하고, 펄스기간(pulse duration)은 50~200 μ sec로 한다.⁶ 자극 강도는 말초근육에서 측정되는 파형이 안정적으로 측정되도록 조절하며, 이는 높은 TES로 인한 열손상이 발생하지 않는 범위에서 유지되어야 한다. 또한 너무 높은 강도의 TES는 수술 중 환자의 움직임 유발하여 수술에 영향을 미칠 수 있으므로 주의하여야 한다. MEP의 근육 반응(myogenic response)은 주로 상지에서는 짧은엄지벌림근(abductor pollicis brevis, APB), 새끼벌림근(abductor digitis quinti, ADQ)에서, 하지에서는 앞정강근(tibialis anterior, TA), 엄지벌림근(adductor hallucis, AH)에서 피하침전극을 삽입하여 기록한다. 기록 전극의 위치는 수술의 부위에 따라 달라질 수 있다.

TES에 의한 대뇌운동피질의 전기자극으로 인한 파형을 D-파형(D-wave)라 한다. D-파형은 피질척수로를 따라 전달되며, 척수에서 보다 정확히 기록된다. D-파형은 척수에서 경막외(epidural) 혹은 경막하(subdural) 전극을 거치하여 기록하기 때문에 보다 정확한 파형을 얻을 수 있고, 마취에 영향을 적게 받는 장점이 있다. 그러나 전극 부위 이하 즉, 신경말단, 신경근접합부, 그리고 근육까지의 정보를 종합하여 얻을 수는 없기 때문에 근육 MEP를 보다 널리 이용하고 있다.⁶ 또한 보형급여 등의 사정으로 D-파형을 측정하는데 사용되는 경막외/경막하 전극을 사용하는데 제약이 있을 수 있다.

IONM에서는 MEP결과를 해석하기에 앞서 신경생리검사 실패는 다른 수술실에서의 변수를 고려해야 한다. 마취제 및 신경근차단제에 의한 영향, 저체온, 수술로 인한 출혈, 저혈압, 신체 압박으로 인한 신경손상, 수술중 체위변동으

로 인한 손상, 전극 부착 이상 등의 여러 변수가 있을 수 있다. 마취제의 경우 흡입마취제(inhalation anesthetics)를 사용하는 경우 고용량에서 근육MEP의 반응을 저하시키므로 정맥마취(total intravenous anesthesia, TIVA)를 선호한다.^{6,7} 그리고 수술중 환자의 움직임을 최소화하기 위해 사용하는 신경근차단제는 높은 용량을 사용할 경우 근육MEP의 반응 및 근전도의 반응을 저해하므로, 사연속반응(train-of-four, TOF)을 이용하여 신경근차단의 정도를 조절하며, 그 반응이 2/4 이상이 되도록 한다.¹⁴ 또한 IONM에서는 수술 시작 전, 양와위상태(supine position)에서 기준치정보(baseline data)를 얻어야 하며, 이를 토대로 수술 중 손상이나 체위 변경으로 인한 손상 여부를 판단하여야 한다. 마지막으로 수술 전 환자의 상태를 파악하여야 한다. 일반적으로 환자의 근력이 MRC grade 3 미만이라면 IONM에서의 근육 MEP측정은 무의미할 수 있다.⁸ 그러므로 수술 전 환자의 근력이 MRC grade 1-2라면 수술 전 집도의에게 근육 MEP반응이 측정되지 않을 수 있다는 점을 고지하여야 한다.

수술 중 신경손상 유무를 판단하는 근육MEP의 경고 기준(warning criteria)은 주로 파형의 소실 혹은 진폭의 감소를 사용한다. 물론 언급했듯이 안정적인 기준치정보가 설정되어 있어야 비교가 가능하므로, 안정적인 근육MEP를 얻을 수 있도록 마취의 정도, 신경근차단제의 사용 등을 고려해야 한다. 근육 MEP의 파형 소실은 가장 중요한 경고 기준이며, 수술 중 신경계의 손상을 의미한다. 근육 MEP의 진폭 감소 또한 중요한 기준이다. 50%의 진폭 감소를 기준으로 할 경우 잦은 위양성경고(false positive alarm)로 인하여 불필요한 수술 중단이 일어날 수 있다. 이런 위양성경고를 피하기 위해 80%의 진폭 감소가 경고 기준으로 제시되었고, 높은 민감도와 특이도를 보였다. 그러나 여전히 6.9%에서 위양성반응을 나타냈다.⁹ 일반적으로 50%의 진폭 감소가 대부분의 수술에서 경고 기준으로 사용된다.^{10,11} 추가적으로 100V이상의 근육 MEP 문턱값(threshold)의 증가도 경고기준으로 제시되고 있다.¹¹ IONM중 근육 MEP의 변화가 경고 기준에 부합하였을 경우에는 즉시 집도의에게 알리고, 근육 MEP의 변화가 수술 과정에 기인한 것인지 수술 외적인 문제에 의한 것인지 파악하여야 한다. 이를 위하여 IONM 과정에서 신경생리학적 변화뿐만 아니라 수술의 전반적인 상황을 파악하고 있어야 한다.

결론

짧은 역사에도 불구하고 IONM은 수술 중 신경계 손상을 감지하고 대처할 목적으로 널리 사용되고 있다. IONM은 중추신경계 수술로 인한 신경학적 손상을 최소화하기 위한 도구인 동시에 수술 중 발생할 수 있는 돌발상황으로부터 의료를 보호하는 역할을 하고 있어 점차 신경계수술에서 필수적이 되어가고 있다. 본 종설에서는 운동신경계를 감시하기 위한 방법으로서 MEP만을 다루었지만, 실제 IONM에서는 감각신경계를 감시하는 체성감각유발전위(somatosensory evoked potential, SSEP)를 함께 사용하여 정확도를 높인다. IONM 과정에서 발생한 이상을 정확히 판단하고 집도의에게 조언을 하기 위해서는 수술의 전 과정을 이해하고 있어야 하며, 각 병원에 적합한 프로토콜을 설정해야 한다. 이 과정에서 본 종설이 조금이나마 도움이 되었으면 한다.

References

1. Kim SM, Kim SH, Seo DW, Lee KW. Intraoperative neurophysiologic monitoring: Basic principles and recent update. *J Korean Med Sci*. 2013;28(9):1261-1269.
2. Koo YS, Kim DY. Basic principles and practices of evoked potential for intraoperative neurophysiological monitoring: motor evoked potential and somatosensory evoked potential. *J Intraoperative Neurophysiol*. 2019;1(1):14-24.
3. Garces J, Franklin Berry J, Valle-Giler EP, Sulaiman WAR. Intraoperative neurophysiological monitoring for minimally invasive 1- and 2-level transforaminal lumbar interbody fusion: Does it improve patient outcome? *Ochsner J*. 2014;14(1):57-61.
4. Sloan TB, Heyer EJ. Anesthesia for intraoperative neurophysiologic monitoring of the spinal cord. *J Clin Neurophysiol*. 2002;19(5):430-443.
5. Park S, Hyun S, Lim S, et al. Basic Techniques of Intraoperative Neurophysiological Monitoring. 2013;45(2):77-85.
6. Legatt AD, Emerson RG, Epstein CM, et al. ACNS Guideline: Transcranial Electrical Stimulation Motor Evoked Potential Monitoring. *J Clin Neurophysiol*. 2016;33(1):42-50.
7. MacDonald DB. Overview on criteria for MEP monitoring. *J Clin Neurophysiol*. 2017;34(1):4-11.
8. Lee JM, Kim DH, Kim HS, Choi BK, Han IH. The Applicability of Intraoperative Neuromonitoring in Patients with Preoperative Motor Weakness during Spine Surgery. *Korean J Spine*. 2016;13(1):9.
9. Langeloo DD, Lelivelt A, Journée HL, Slappendel R, De Kleuver M. Transcranial electrical motor-evoked potential monitoring during surgery for spinal deformity: A study of 145 patients. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2003;28(10):1043-1050.
10. 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.
11. MacDonald DB. Motor evoked potential warning criteria. *J Clin Neurophysiol*. 2017;34(1):1-3.