

수술중신경생리감시 개요 및 국내 현황

Introduction of Intraoperative Neurophysiological Monitoring (IONM) and the Current Status in Korea

박윤길

연세대학교 의과대학 강남세브란스병원 재활의학과

수술중신경생리감시(Intraoperative Neurophysiological Monitoring, IONM)는 수술 중 신경계 손상을 방지하기 위한 감시방법으로 척추와 뇌수술에 주로 적용이 되었으나 최근 여러 분야로 확대되고 있으며 이러한 감시의 목적은 대체적으로 다음과 같은 세가지로 정리할 수 있다. 1)신경계 자극과 조직 손상을 감지하여 손상을 최소화하고 회복 가능하게 한다. 2)신경계 손상을 가능한 조기에 발견하여 수술 과정을 변경하거나 중단하도록 한다. 3)수술자가 신경 조직을 감지하지 못하고 있을 때 이를 확인하는 것을 도와 준다.[1] 이와 같이 수술중 신경생리감시는 신경계 손상이 가역적인 상태에 있을 때 수술자에게 알려줌으로써 영구적인 손상을 예방하는데 있다. 임상적으로는 뇌파(electroencephalogram, EEG)가 가장 먼저 이용되었고 이후 체성감각유발전위(somatosensory evoked potential, SEP), 뇌간청각유발전위(brainstem auditory evoked potential, BAEP) 및 근전도(electromyography, EMG)가 여러 영역에서 사용되었으며 최근 motor evoked potential (MEP) monitoring이 운동신경기능 감시에 이용되고 있다. 본문에서는 일반적으로 많이 이용되고 있는 SEP, MEP, EMG를 중심으로 기술하기로 한다.

아울러 우리나라 수술중신경계감시 역사와 현황을 살펴보면 언제부터 국내에서 수술중신경계감시 방법을 이용하였는지에 대한 명확한 기록은 없으나 뇌파 검사를 뇌전증 수술 등에 이용한 것은 오래 전부터 이고, 본 저자가 90년대 초 전공의 과정 중에도 뇌성마비의 하지 경직 완화 목적의 선택적 척수후근절제술(selective posterior rhizotomy)의 수술 중 유발전

위검사에 참여한 적이 있으므로 부분적인 수술중신경계감시는 오래 전부터 이루어져 왔다고 볼 수 있다. 그러나 체계적인 수술중신경계감시는 2010년 이후 건강보험 수가 체계가 개편이 되어 수술중신경계감시가 활성화 되기 시작한 후 특화된 장비 도입과 전문 인력 확충으로 주요 병원에서 수술중신경계감시 팀이 구성이 된 이후로 보는 것이 타당하다. 이에 따라 관련 학회도 창립이 되었는데 2014년 11월 1일 신경과와 재활의학과 전문의가 주축이 되어 대한수술중신경계감시연구회를 발족하게 되었고, 2017년 10월 30일 세계수술중신경생리학회 학술대회를 상기 연구회 주관으로 서울에서 개최하는 것을 계기로 2018년 대한수술중신경계감시학회로 발전하게 되었다.[2] 또한 상기 학회는 2018년에 아시아오세아니안 수술중신경생리학회를 창립하는데도 주도적인 역할을 하였으며 매년 정기적인 학술대회와 집담회를 개최하고 연 2회 학술지(Journal of Intraoperative Neurophysiology, JOIN)를 발간하고 있다.

상기 학회와는 별도로 신경외과 의사들이 주축이 되어 2013년 1월26일 설립한 대한수술중신경감시연구회는 대한정위기능신경외과학회 산하 연구회로 등록되어 있으며, 갑상선 수술을 포함한 두경부 종양 수술 중 신경 모니터링을 위해 내분비외과와 이비인후과를 중심으로 2014년 10월 18일 설립된 대한두역부종양학회 산하 한국신경모니터링연구회는 2017년 11월 11일 대한신경모니터링학회로 전환되었다.

다음에는 기본적인 수술중신경계감시 방법, 팀의 구성과 판독지 작성 등에 대해 간략히 기술하였으며, 이 외에도 마취의 영향, 안전성, 적응증(국내건강보험 기준) 등에 대한 기본 지식도 IONM을 시작하기 전에 필요하므로 이에 대해서는 수술중신경계감시 임상진료지침 2020 개정안을 참고하는 것이 도움이 되겠다.[3]

1. 체성감각유발전위(SEP)

SEP는 촉각, 진동과 고유수용체 감각을 전달하는 척수 후주의 기능을 평가하는 검사로 오래 전부터 수술중신경생리감시 방법으로 이용되었으며 현재도 가장 널리 이용되는 검사법으로 일반적으로 팔에서는 정중신경 또는 척골신경을, 다리에서는 경골신경 또는

비골신경을 자극한다. 두피에서 기록은 10-20 international system을 기준으로 하지 신경자극 시에는 Cz'-Fz, 상지 신경자극 시에는 C3'/C4'-Fz에서 주로 시행하며, 전기자극은 0.2~0.5 ms의 지속시간과 10~40 mA의 강도로 자극을 한다.[4]

SEP의 경우 진폭이 50% 이상 지속적으로 감소된 경우나 잠시가 10% 이상 늘어난 경우를 의미 있는 변화로 간주하는데[5] 이 외에도 CCT가 1ms 이상 증가되었거나 기준치의 20% 이상 늘어난 경우와 주요 파형이 왜곡된 경우(desynchronization)에도 의미 있는 지표로 인정해야 된다는 보고도 있다.[6, 7] 경골신경 SEP의 경우 P37/N45, 정중신경 SEP 경우에는 N20/P22 전위가 주요 지표로 이용된다.

SEP는 후주를 통과하는 감각신경로를 감시하는 것은 유용하나 척수의 운동신경통로를 감시하는 데는 한계가 있어서 위음성이 항시 문제가 되고 있다. 또한 지속적인 실기간 검사가 가능한 장점을 가지고 있으나 Hilibrand 등[8]의 연구에 의하면 MEP의 변화보다 평균 16분 늦게 반응을 나타낸다고 되어 있어 신경학적 변화가 상당히 진행된 후에 감시자가 인지할 수 있는 단점도 가지고 있다.

1995년 Nuwer 등[9]은 다기관 연구를 통해 51,263명의 척추측만증 수술중 SEP 감시는 수술 후 새로운 신경학적인 증상 발생에 대한 민감도가 92%이며 특이도가 98.9%라 하였으며, 최근 연구들은 척추수술에서 SEP의 민감도는 0-52%, 특이도는 95-100%로 보고되고 있다.[8, 10-12]

2. Transcranial motor-evoked potential (tcMEP)

앞서 언급한 바와 같이 수술 중에 SEP가 정상 범위임에도 불구하고 운동신경계의 이상이 나타날 수 있으므로 이를 감시할 수 있는 MEP가 필요하게 되었다.[13, 14]

MEP 방법 중 척수자극기법(spinal cord stimulation)은 운동신경 뿐만 아니라 감각신경도 자극하게 되고 이와 더불어 Ia 섬유를 통해 말초신경을 자극하여 다른 경로로 근육섬유수축을 일으키므로 수술 중 정확한 판단을 하기 어려운 점이 있었다.[13] 이에 비해 경두개전기자극(transcranial electrical stimulation, tcMEP)이나

경두개자기자극(transcranial magnetic stimulation, TMS)은 감각신경계의 유발전위 발생 없이 대뇌의 운동영역을 자극할 수 있는 장점이 있으며, 이중 전기자극 방법이 더 효과적이고 실용적이기 때문에 많이 이용되고 있다.[15]

tcMEP는 양극(anode) 부위에서 활성화전위(action potential)가 형성되기 때문에 일반적인 신경전도검사와 달리 항상 양극을 기준으로 하며 이를 통해 좌우 근수축 반응을 구분하는 것을 유념해야 한다. 자극위치를 표기할 때도 통상적으로 양극을 음극(cathode) 앞에 놓는데 자극 위치는 SEP와 달리 아직 표준화된 것이 없으나 C3/C4나 C1/C2 형태를 많이 사용하며, 앞서 언급한 바와 같은 이유로 해서 C3/C4 인 경우 우측 근육에서 반응을 측정하게 되고 C4/C3는 반대가 된다. 자극 강도는 0.5 ms의 지속시간과 150~700 V (15~220 mA)의 자극강도로 시행하는데 척수에서 하행성 피질척수로의 반응(D파)을 기록하는 방법과 근육에서 복합근 활동전위(compound muscle action potential, CMAP)를 기록하는 방법이 주로 사용되고 있다.

마취 상태에서는 일회 전기자극으로는 D파 외에 근육 CMAP을 형성할 수 없기 때문에 보통 4msec의 간격으로 4회 이상 연속자극을 주게 된다.[16] D파는 마취에 영향을 적게 받고 대뇌 자극 빈도와 같이 일정하게 반응하는 장점이 있는 반면에 척추수술의 경우 지속적으로 전극을 위치 시키기 어렵고 임상 양상과 다른 결과를 보이는 단점이 있다. 상하지에서 CMAP을 측정하는 것은 마취 상태, 특히 근육이완제의 영향을 많이 받게 되나 충추신경계 손상뿐만 아니라 신경근을 포함한 말초신경계까지 감지할 수 있는 장점이 있고 실제 임상결과와 밀접한 관계가 있어서 D파 검사보다는 널리 이용되는 방법이다. (Fig. 1)[17]

여러 연구자들이 SEP와 같이 MEP에서도 50% 이상의 진폭의 변화가 있을 때나 잠시가 10% 이상 연장되었을 때를 의미 있는 변화로 받아들이나, 자극 강도를 20% 이상 증가시키거나 160mA 보다 강하게 자극해야 파형이 유지되는 경우도 임계점으로 보고한 최근 연구도 있다.[18] 그러나 척추수술의 경우 MEP의 반응이 완전히 소실된 것을 기준으로 하는 all-or-none rule을 적용하는 경우도 많다. [18-20]

MEP의 민감도와 특이도는 임계점의 기준에 따라 달라질 수 있으나 최근 연구들에

의하면 민감도는 75%-100%, 특이도는 84%-100%로 보고되고 있다.[5] MEP는 SEP와 달리 지속적으로 자극을 보내어 결과를 볼 수 있는 것이 아니고 수술자가 요청할 때 시행하는 것이므로 신경손상이 이미 진행된 상태에서 결과를 확인하게 되는 경우가 발생할 수 있다.

MacDonald 등[13]이 15,000건의 tcMEP의 부작용 사례를 조사해본 결과 경련(seizure)은 5건으로 드물게 나타났는데 이는 매우 짧은 시간(0.03초 미만)에 자극이 가해지기 때문으로 해석되었다. 가장 많이 나타난 부작용은 혀와 입술의 자상으로 이를 방지하기 위해서는 구강내 장치를 사용해야 하며, 이 외에도 심장이상, 두피화상 등이 드물게 나타났다.

3. 자발 근전도(Free running EMG)

자극을 주지 않은 상태에서 말초신경 자극에 의한 해당 근육의 반응을 보는 방법으로 척추 수술 중 신경근의 기능을 확인하는데 쓰이게 된다. 주로 신경근과 해당근육을 1:1로 맞추어서 시행하지만 위험도가 높은 신경근의 경우 2개의 근육을 감시하기도 한다.[5] 수술 중 연속해서 실시간으로 감시가 가능한 장점이 있지만 체온변화와 전기소작 등에 따른 위양성이 있기 때문에 특이도가 떨어지는 문제점이 있다.[10]

4. 유발근전도(Triggered EMG)

Pedicle 나사를 이용한 척추수술에서 나사에 의한 신경근 손상이 일어날 수 있는데, 이를 방지하기 위하여 나사를 전기적으로 자극하여 복합근활동전위가 유발되는 역치를 평가하는 것이 유발근전도의 개요이다. pedicle 나사가 정확히 위치하게 되면 주위의 골조직이 전기적 신호 전달의 절연체로 작용하여 주위의 신경근을 자극하려면 자극강도가 높아지고 반대로 신경근 가까이 나사가 접근하게 되면 자극강도가 떨어지게 되는데 8.0mA 이상일 경우 99.5%-99.8%에서 정확한 위치에 있다는 보고가 있다. [21]

5. IONM 팀

IONM팀의 필수 구성 인력은 신경생리전문의, 집도의, 마취의 및 임상병리사이며, 정확한 IONM의 수행을 위해 위 필수 구성 인력간의 상호 긴밀한 협력이 요구되며 상황에 따라 제한된 조직의 구성으로도 이루어진다.

신경생리전문의는 IONM을 하기 위한 장비, 감시법의 설정, 환자 별 감시방법의 결정, 감시수준의 결정, 판독, 그리고 감시기사의 교육을 비롯한 IONM의 수행에 필요한 전반적인 관리를 담당하는데 전기진단검사 방법에 대한 전문적인 수련(full-time training)을 충분한 시간에 걸쳐 받은 전문의사여야 하므로, 국내의 수련 환경을 고려 시 신경과 혹은 재활의학과 전문의가 이에 해당한다.[3]

6. 판독

수술중신경계감시는 실시간 결과를 팀 구성원과 공유하고 특히 집도의에게 신경계 손상의 위험을 미리 알리는 것이 중요하지만, 이후 정리된 기록을 보관하는 것도 필수이다.

판독지에는 기본 정보, 감시 방법, 감시 결과 그리고 결론을 포함해야 하고, 필요 시 추가의견을 제시할 수 있다. 기본 정보 로는 날짜, 검사일, 환자 성명, 성별, 나이, 등록번호 등의 정보도 필요하지만, IONM의 특성상 수술정보로 수술명, 수술부위, 집도의, 마취 정보로 마취명, 마취농도, 마취의사, 그리고 IONM 팀의 정보로 임상병리사, 신경생리전문의에 대한 내용이 있어야 한다. 이 외에 급여청구의 문제를 명확히 하기 위해서 검사 일시로 감시 시간과 기록 시간을 명확히 기술하는 것이 필요하다.[3]

참고문헌

1. Daube, J.R., *Intraoperative monitoring reduces complications and is therefore useful*. Muscle Nerve, 1999. **22**(8): p. 1151-3.
2. 서대원, *우리나라 수술중신경계감시의 역사*. J Intraoper Neurophysiol, 2019. **1**(1): p. 1-8.
3. 대한수술중신경계감시학회, *수술중신경계감시 임상진료지침 2020 개정안*. J

- Intraoper Neurophysiol, 2020. **2**(1): p. 1-10.
4. 박윤길, 수술 중 신경생리 추적감시. 대한근전도전기진단의학회지, 2013. **15**(1): p. 1-5.
 5. Lall, R.R., et al., *Intraoperative neurophysiological monitoring in spine surgery: indications, efficacy, and role of the preoperative checklist*. Neurosurg Focus, 2012. **33**(5): p. E10.
 6. Florence, G., J.M. Guerit, and B. Gueguen, *Electroencephalography (EEG) and somatosensory evoked potentials (SEP) to prevent cerebral ischaemia in the operating room*. Neurophysiol Clin, 2004. **34**(1): p. 17-32.
 7. Guerit, J.M., et al., *Somatosensory evoked potential monitoring in carotid surgery. I. Relationships between qualitative SEP alterations and intraoperative events*. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1997. **104**(6): p. 459-69.
 8. Hilibrand, A.S., et al., *Comparison of transcranial electric motor and somatosensory evoked potential monitoring during cervical spine surgery*. J Bone Joint Surg Am, 2004. **86-A**(6): p. 1248-53.
 9. Staudt, L.A., M.R. Nuwer, and W.J. Peacock, *Intraoperative monitoring during selective posterior rhizotomy: technique and patient outcome*. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1995. **97**(6): p. 296-309.
 10. Gunnarsson, T., et al., *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 (Phila Pa 1976), 2004. **29**(6): p. 677-84.
 11. Kelleher, M.O., et al., *Predictive value of intraoperative neurophysiological monitoring during cervical spine surgery: a prospective analysis of 1055 consecutive patients*. J Neurosurg Spine, 2008. **8**(3): p. 215-21.
 12. Park, P., et al., *Impact of multimodal intraoperative monitoring during correction of symptomatic cervical or cervicothoracic kyphosis*. J Neurosurg Spine, 2011. **14**(1): p. 99-105.
 13. MacDonald, D.B., *Safety of intraoperative transcranial electrical stimulation motor evoked potential monitoring*. J Clin Neurophysiol, 2002. **19**(5): p. 416-29.
 14. Meylaerts, S.A., et al., *The influence of regional spinal cord hypothermia on transcranial myogenic motor-evoked potential monitoring and the efficacy of spinal cord ischemia detection*. J Thorac Cardiovasc Surg, 1999. **118**(6): p. 1038-45.
 15. 박윤길, 뇌수술 중 신경생리감시, in *2009 대한재활의학회 추계학술대회*. 2009, 대한재활의학회: 서울. p. 98-102.
 16. Macdonald, D.B., *Intraoperative motor evoked potential monitoring: overview*

- and update. J Clin Monit Comput, 2006. **20**(5): p. 347-77.
17. Deletis, V. and F. Sala, *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): p. 248-64.
 18. Krammer, M.J., et al., *Significance of intraoperative motor function monitoring using transcranial electrical motor evoked potentials (MEP) in patients with spinal and cranial lesions near the motor pathways*. Br J Neurosurg, 2009. **23**(1): p. 48-55.
 19. Sala, F., P. Lanteri, and A. Bricolo, *Motor evoked potential monitoring for spinal cord and brain stem surgery*. Adv Tech Stand Neurosurg, 2004. **29**: p. 133-69.
 20. Quinones-Hinojosa, A., et al., *Changes in transcranial motor evoked potentials during intramedullary spinal cord tumor resection correlate with postoperative motor function*. Neurosurgery, 2005. **56**(5): p. 982-93; discussion 982-93.
 21. Raynor, B.L., et al., *Correlation between low triggered electromyographic thresholds and lumbar pedicle screw malposition: analysis of 4857 screws*. Spine (Phila Pa 1976), 2007. **32**(24): p. 2673-8.

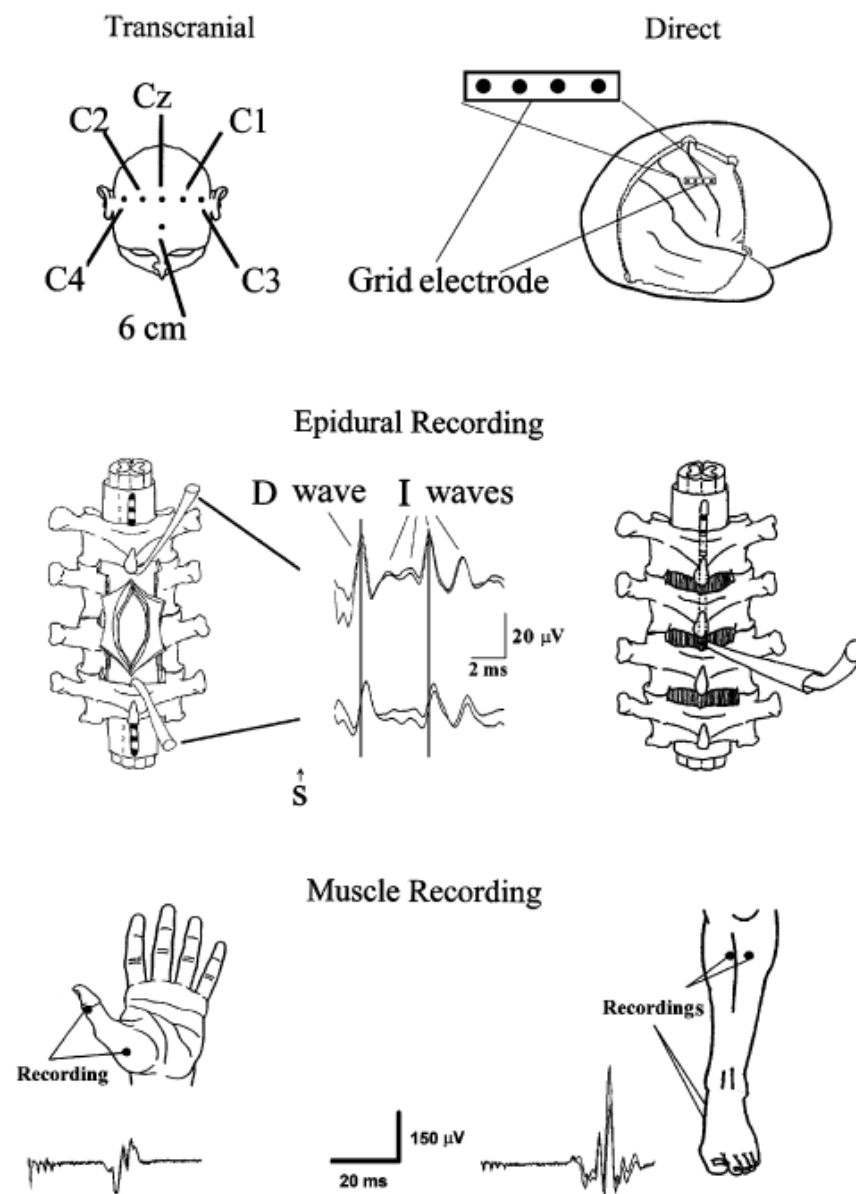


Fig. 1. Intraoperative methodology for eliciting and recording motor evoked potential from the spinal cord and limb muscles.[17]