

수술 중 신경생리 추적감시

연세대학교 의과대학 재활의학교실 및 희귀난치성 신경근육병 재활연구소

박윤길

– Abstract –

Intraoperative Neurophysiological Monitoring

Park, Yoon Ghil, M.D., Ph.D.

*Department of Rehabilitation Medicine and the Rehabilitation Institute of Neuromuscular Disease,
Gangnam Severance Hospital, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea*

Intraoperative neurophysiological monitoring (IONM) is a valuable tool to prevent damage by detecting dysfunction before reaching an irreversible stage in brain, spine and other surgical procedures. This article focuses on the intraoperative application and clinical utility of somatosensory evoked potentials (SEP), motor evoked potentials (tcMEP) and triggered and spontaneous EMG.

Somatosensory evoked potential (SEP) monitoring used in several decades helped to prevent neurologic deficits. However, motor compromise can occur without SEP warning and SEP deterioration can occur without motor deficit. Intraoperative MEP monitoring in patients with spinal and cranial lesions is thought to be a valuable tool for prevention of postoperative motor deficits. In recent years, motor evoked potential recording following transcranial electrical stimulation has emerged as a reliable technique to intraoperatively assess the functional integrity of the motor pathways. Spontaneous and triggered EMG is getting widely used as a means of monitoring nerve root function during spine surgery.

Although IONM is a valuable technique that provides sensitive and specific indications of neurologic injury, it does have limitations that must be understood. The monitoring team must be well trained, be able to provide the surgeon feedback in real time, and coordinate activities with those of the surgical and anesthesia teams.

Key Words: Intraoperative neurophysiological monitoring, Somatosensory evoked potential, Motor evoked potentials, Spontaneous EMG, Triggered EMG

수술 중 신경생리 추적감시(Intraoperative Neurophysiological Monitoring, IONM)는 수술 중 신경계 손상을 방지하고자 하는 시행하는 감시방법으로 척추와 뇌수술에 주로 적용이 되었으나 최근 말초신경이

나 이비인후과 수술 등 다른 여러 분야로 확장되어 이용되고 있다. 마취분야에서 시행되는 수술 중 감시방법과 구별하기 위해서 수술중감시(Intraoperative Monitoring, IOM)보다 수술중신경생리추적감시로 표기하

Address reprint requests to **Park, Yoon Ghil, M.D., Ph.D.**

Department of Rehabilitation Medicine and the Rehabilitation Institute of Neuromuscular Disease, Gangnam Severance Hospital, Yonsei University College of Medicine, 712 Eonjuro, Gangnam-gu, Seoul 135-720, Korea

TEL: 82-2-2019-3493, FAX: 82-2-3463-7585, E-mail: drtlc@yuhs.ac

투고일: 2013년 5월 13일, 수정일: 2013년 5월 13일, 게재확정일: 2013년 5월 13일

는 것이 정확하고 건강보험요양급여에서도 이러한 명칭으로 분류하고 있으나 아직 많은 문헌에서 혼재되어 표기되고 있다.

수술중신경생리추적감시의 목적은 언급한 바와 같이 신경계 손상의 빈도와 정도를 감소시키는데 대체적으로 다음과 같이 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 수술중신경생리추적감시는 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 운동신경유발전위(motor evoked potential, MEP)이 운동신경기능감시에 이용되고 있다. 본문에서는 일반적으로 많이 이용되고 있는 SEP, MEP, EMG를 중심으로 기술하기로 한다.

1. 체성감각유발전위(SEP)

SEP는 촉각, 진동과 고유수용체 감각을 전달하는 척수 후주의 기능을 평가하는 검사로 오래 전부터 수술중신경생리추적감시 방법으로 이용되었으며 현재도 가장 널리 이용되는 검사법이다.

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.²

일반적으로 SEP의 경우 진폭이 50% 이상 지속적으로 감소된 경우나 잠시가 10% 이상 늘어난 경우를 의미 있는 변화로 간주하는데³ 이 외에도 CCT가 1 ms 이상 증가되었거나 기준치의 20% 이상 늘어난 경우와 주요 파형이 왜곡된 경우(desynchronization)에도 의미 있는 지표로 인정해야 된다는 보고도 있다.^{4,5} 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 항상 문제가 되고 있다. 또한 지속적인 실시간 검사가 가능한 장점을 가지고 있으나 Hiltbrand 등⁶의 연구에 의하면 MEP의 변화보다 평균 16

분 늦게 반응을 나타낸다고 되어 있어 신경학적 변화가 상당히 진행된 후에 감시자가 인지할 수 있는 단점도 가지고 있다.

1995년 Nuwer 등⁷은 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.^{6,8-10}

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.^{11,12}

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.¹¹ 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.¹³

tcMEP는 양극(anode) 부위에서 활성전위(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/C4인 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.¹⁴ D파는 마취에 영향을 적게 받고 대뇌 자극 빈도와 같이 일정하게 반응하는 장점이 있는 반면에 척추수술의 경우 지속적인

로 전극을 위치 시키기 어렵고 임상 양상과 다른 결과를 보이는 단점이 있다. 상하지에서 CMAP을 측정하는 것은 마취 상태, 특히 근육이완제의 영향을 많이 받게 되나 척추신경계 손상뿐만 아니라 신경근을 포함한 말초신경계까지 감시할 수 있는 장점이 있고 실제 임상 결과와 밀접한 관계가 있어서 D파 검사보다는 널리 이용되는 방법이다(Fig. 1).¹⁵

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 160 mA 보다 강하게 자극해야 파형이 유지되는 경우도 임계점으로 보고한 최근 연구도 있다.¹⁶ 그러나 척수수술의 경우 all-or-none rule을 적용하는 경우도 많다.¹⁶⁻¹⁸

MEP의 민감도와 특이도는 임계점의 기준에 따라 달라질 수 있으나 최근 연구들에 의하면 민감도는 75~100%, 특이도는 84~100%로 보고되고 있다.³ 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.

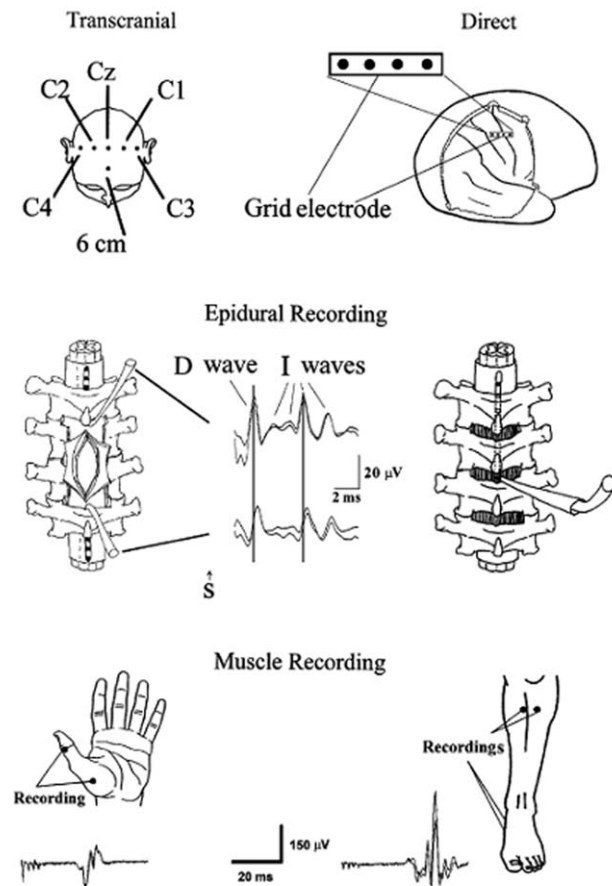


Fig. 1. Intraoperative methodology for eliciting and recording motor evoked potential from the spinal cord and limb muscles.¹⁵

MacDonald 등¹¹이 15,000건의 tcMEP의 부작용 사례를 조사해본 결과 경련(seizure)은 5건으로 드물게 나타났는데 이는 매우 짧은 시간에 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)

말초신경 자극에 의한 해당 근육의 반응을 보는 방법으로 척추수술 중 신경근의 기능을 확인하는데 쓰이게 된다. 주로 신경근과 해당근육을 1:1로 맞추어서 시행하지만 위험도가 높은 신경근의 경우 2개의 근육을 감시하기도 한다.³ 수술 중 연속해서 실시간으로 감시가 가능한 장점이 있지만 체온변화와 전기소작 등에 따른 위양성이 있기 때문에 특이도가 떨어지는 문제점이 있다.⁸

4. 유발근전도(Triggered EMG)

Pedicle 나사를 이용한 척수수술에서 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 8.0 mA 이상일 경우 99.5~99.8%에서 정확한 위치에 있다는 보고가 있다.¹⁹

5. 수술중감시에 영향을 주는 요소

1) 혈류량

경동맥내막절제술(carotid endarterectomy, CEA)을 시행하면서 뇌혈류량(regional cerebral blood flow, rCBF)을 측정할 결과 rCBF가 10 mL/100 g/min 미만인 경우 뇌파의 주요한 변화가 나타나고 10~18 mL/100 g/min인 경우에는 심각하지 않은 뇌파의 변화가 나타나는 것으로 관찰되어 rCBF이 15 mL/100 g/min일 때가 임계점으로 여겨지고 있다.^{20, 21}

이러한 현상은 영장류를 이용한 SEP 실험에서도 비슷한 경향을 보이는데 rCBF가 16 mL/100 g/min 이상일 경우는 파형이 유지가 되지만 12 mL/100 g/min 미만인 경우는 소실되고 14~16 mL/100 g/min에서는 급격히 진폭이 감소하는데 rCBF가 16 mL/100 g/min일 때 진폭의 50% 감소가 나타나는 것으로 관찰

되었다.^{22,23} 또한 rCBF가 15 mL/100 g/min 이하로 떨어질 때 진폭의 감소와 더불어 CCT의 연장이 나타난다.²⁴ 따라서 수술 중 출혈에 의한 저혈압에 의해 SEP의 진폭이 감소되고 잠시가 연장될 수 있음을 유의해야 한다.²⁵

2) 마취

수술중신경생리추적감시를 위해서는 propofol이나 fentanyl을 이용한 정맥내 마취가 운동신경원에 영향을 적게 주기 때문에 가장 적절한 방법이며, 흡입성 마취제는 대뇌피질의 흥분도를 억제하여 SEP의 진폭을 감소시키고 잠시를 연장시키기 때문에 적절한 감시를 할 수 없게 된다.¹⁴ 기도삽관을 포함한 마취유도 시 지속시간이 짧은 근 이완제 사용하는 것 이외에는 신경근 이완제도 사용하지 말아야 근육 MEP를 측정할 수 있다.

3) 체온

저체온은 말초신경과 중추신경의 전도속도를 떨어뜨리기 때문에 잠시를 연장시킬 수 있는데 보통 여러 가지 원인으로 수술 중에는 체온이 감소하므로 이에 따른 대비를 해야 적절한 감시가 이루어 진다.²⁵

맺음말

최근 전산장비의 발전에 의해 전기진단검사 장비도 많은 개선이 이루어졌는데 특히 수술중감시장치는 빠른 속도의 컴퓨터와 양질의 증폭기로 인해 실시간 모니터링이 가능해졌고 잡음(noise)도 적어져 예전과 같이 수술을 중단하고 감시장치를 확인하던 불편이 없어졌다. 또한 16채널 이상의 장비가 도입되면서 수술 중 전극을 교체해야 하는 문제도 사라졌다. 그럼에도 불구하고 수술실 내 여러 장비들에 의한 방해전파는 여전히 해결해야 될 과제이며 공간 부족과 이동성 문제를 해결하기 위해서는 작은 크기의 간편한 장비가 개발되어야 하겠다.

장비 외에도 전문인력의 확보는 가장 핵심적인 요소인데 현재의 수가와 인력으로는 신경과나 재활의학과 전문의가 수술실에서 계속 감시하는 것은 현실적으로 불가능하므로 잘 훈련된 전문인력이 수술실에 상주 하면서 밖에 있는 전문의와 상의하는 telemedicine monitoring이 이루어져야 원활한 수술중감시장치 활용이 이루어질 것으로 판단된다.

이와 더불어 현재는 지정된 몇몇 특정질환이나 수술법만이 수술중신경생리추적감시를 이용한 급여를 청구할 수 있는데, 적응증을 확대를 통해 빠르게 발전하는 수술기법을 안전하게 시행하게 도움으로써 환자의 건강권을 확보하는 것이 당면한 문제라고 판단된다.

REFERENCES

1. Daube JR: Intraoperative monitoring reduces complications and is therefore useful. *Muscle Nerve* 1999; 22: 1151-1153.
2. 손민균: Spinal Operative Monitoring. 2009년 대한재활의학회 추계학술대회, 서울: 대한재활의학회 2009, pp92-97.
3. Lall RR, Lall RR, Hauptman JS, Munoz C, Cybulski GR, Koski T, et al: Intraoperative neurophysiological monitoring in spine surgery: indications, efficacy, and role of the preoperative checklist. *Neurosurg Focus* 2012; 33: E10.
4. Florence G, Guerit JM, Gueguen B: Electroencephalography (EEG) and somatosensory evoked potentials (SEP) to prevent cerebral ischaemia in the operating room. *Neurophysiol Clin* 2004; 34: 17-32.
5. Guerit JM, Witdoeck C, de Tourchaninoff M, Ghariani S, Matta A, Dion R, et al: Somatosensory evoked potential monitoring in carotid surgery. I. Relationships between qualitative SEP alterations and intraoperative events. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1997; 104: 459-469.
6. Hilibrand AS, Schwartz DM, Sethuraman V, Vaccaro AR, Albert TJ: Comparison of transcranial electric motor and somatosensory evoked potential monitoring during cervical spine surgery. *The Journal of bone and joint surgery American volume* 2004; 86-A: 1248-1253.
7. Staudt LA, Nuwer MR, Peacock WJ: Intraoperative monitoring during selective posterior rhizotomy: technique and patient outcome. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995; 97: 296-309.
8. 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 (Phila Pa 1976)* 2004; 29: 677-684.
9. Kelleher MO, Tan G, Sarjeant R, Fehlings MG: Predictive value of intraoperative neurophysiological monitoring during cervical spine surgery: a prospective analysis of 1055 consecutive patients. *J Neurosurg Spine* 2008; 8: 215-221.
10. Park P, Wang AC, Sangala JR, Kim SM, Hervey-Jumper S, Than KD, et al: Impact of multimodal intraoperative monitoring during correction of symptomatic cervical or cervicothoracic kyphosis. *J Neurosurg Spine* 2011; 14: 99-105.
11. MacDonald DB: Safety of intraoperative transcranial electrical stimulation motor evoked potential monitoring. *J Clin Neurophysiol* 2002; 19: 416-429.

12. Meylaerts SA, De Haan P, Kalkman CJ, Lips J, De Mol BA, Jacobs MJ: 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: 1038-1045.
13. 박윤길: 뇌수술 중 신경생리감시. 2009 대한재활의학회 추계학술대회, 서울: 대한재활의학회, 2009, pp98-102.
14. Macdonald DB: Intraoperative motor evoked potential monitoring: overview and update. *J Clin Monit Comput* 2006; 20: 347-377.
15. 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: 248-264.
16. Krammer MJ, Wolf S, Schul DB, Gerstner W, Lumenta CB: 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: 48-55.
17. Sala F, Lanteri P, Bricolo A: Motor evoked potential monitoring for spinal cord and brain stem surgery. *Advances and technical standards in neurosurgery* 2004; 29: 133-169.
18. 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: 982-993; discussion 982-993.
19. Raynor BL, Lenke LG, Bridwell KH, Taylor BA, Padberg AM: Correlation between low triggered electromyographic thresholds and lumbar pedicle screw malposition: analysis of 4857 screws. *Spine (Phila Pa 1976)* 2007; 32: 2673-2678.
20. Sundt TM, Jr., Sharbrough FW, Anderson RE, Michenfelder JD: Cerebral blood flow measurements and electroencephalograms during carotid endarterectomy. *J Neurosurg* 1974; 41: 310-320.
21. Sundt TM, Jr., Sharbrough FW, Piepgras DG, Kearns TP, Messick JM, Jr., O'Fallon WM: Correlation of cerebral blood flow and electroencephalographic changes during carotid endarterectomy: with results of surgery and hemodynamics of cerebral ischemia. *Mayo Clin Proc* 1981; 56: 533-543.
22. Branston NM, Strong AJ, Symon L: Extracellular potassium activity, evoked potential and tissue blood flow. Relationships during progressive ischaemia in baboon cerebral cortex. *J Neurol Sci* 1977; 32: 305-321.
23. Branston NM, Symon L, Crockard HA, Pasztor E: Relationship between the cortical evoked potential and local cortical blood flow following acute middle cerebral artery occlusion in the baboon. *Exp Neurol* 1974; 45: 195-208.
24. Lesnick JE, Michele JJ, Simeone FA, DeFeo S, Welsh FA: Alteration of somatosensory evoked potentials in response to global ischemia. *J Neurosurg* 1984; 60: 490-494.
25. Lopez JR: The use of evoked potentials in intraoperative neurophysiologic monitoring. *Phys Med Rehabil Clin N Am* 2004; 15: 63-84.