



김 기 원

서울대병원 재활의학과

Updates in Intraoperative Neurophysiological Monitoring

Keewon Kim, MD, MS

Department of Rehabilitation Medicine, Seoul National University College of Medicine, Seoul, Korea

Recently, intraoperative neurophysiological monitoring (IONM) is gaining more attention and widening clinical application. In this lecture, the author reviews brief history, basic principles, and applications of IONM. Furthermore, recent updates in technology and physiology related to IONM will be discussed.

Key Words: Intraoperative neurophysiologic monitoring; Evoked potential; Electromyography

Introduction

1. Designation

수술 중 신경생리 감시(Intraoperative neurophysiological monitoring)는 수술 중 신경계의 온전함을 평가하는 검사법을 뜻하며, 현재 다양한 용어가 혼재되어 사용되고 있다. 흔히 국내에서는 EP (evoked potential) monitoring이라고 불리기도 하고 evoked potential이 주요한 측정 중 하나이나, 이외에도 electromyography (EMG) 및 electrocorticography (ECOG) 등 다양한 측정법이 함께 쓰이기 때문에 적절한 명칭은 아니다. 수술 중 신경생리를 평가할 수 있는 모든 다양한 방법들을 포함하기 때문에 intraoperative neurophysiology (ION), neurophysiologic intraoperative monitoring (NIOM), intraoperative monitoring (IOM), intraoperative neuromonitoring (INM) 등으로 부를 수 있다. 경우에 따라, 전기생리학 적 기술 외에 초음파 등을 이용한 수술 중 신경감시를 포함 하기도 하나, 본 강의에서는 전기생리학적 방법론에 국한하여 설명하고자 하며, intraoperative neurophysiological moni-

toring, IOM으로 표기하였다.

2. History and Backgrounds

IOM의 기원은 Penfield 등이 1937년, epilepsy 수술에서 direct cortical stimulation을 이용하여 운동 및 감각 피질의 위치를 확인한 것으로 거슬러 올라간다(Penfield, W and Boldrey, E, 1937, *Brain*). 이 방법은 여전히 이용되고 있다. 1960-1970년대, carotid endarterectomy 중 cerebral ischemia를 평가하기 위해 scalp EEG를 사용하였다. 이로써 수술 중 환자 상태를 확인하기 위해 각성(awake)을 유지할 필요가 없어졌다. 척수에서의 IOM은 1970년대 일본의 연구자들이 척수를 직접 자극하여 경막의 기록(epidural recording)을 시행하면서 발전되었다.¹ 1970년대 중반에, somatosensory evoked potential (SEP)을 적용한 기술들이 발전하기 시작하였고,² 1990 년대에 Burke 등이 비로소 경두개 전기 자극(transcranial electrical stimulation, TES)을 이용한 motor evoked potential (MEP)을 발전시켰다.³ 1980년대에 들어, auditory EP와 EMG를 이용한 뇌신경 감시 방법들이 발전되어 후두개(posterior fossa) 수술 및 microvascular decompression, 전정신경초종 수술 등에 적용되게 되었다.⁴ 이후 IOM 장비들이 상업적으로 발달하였으며, 1980년대 중반에 이르러 IOM을 임상적으로 알리기 위한 symposium들이 개최되면서 비로소 연구에서 임상으로의 적용이 시작되었다.

Keewon Kim, MD, MS

Department of Rehabilitation Medicine, Seoul National University Hospital, 101 Daehak-ro, Jongno-gu, Seoul 110-744, Korea

TEL: +82-2-2072-0744 FAX: +82-2-743-7473

E-mail: KeewonKimM.D@gmail.com

3. Terminology

1) Monitoring

IOM이 비록 명칭에 monitoring을 포함하기는 하나 IOM 과정은 크게 monitoring과 mapping으로 구분할 수 있다. Monitoring은 지속적으로 신경생리 지표를 관찰하면서 신경계의 이상 유무를 감시하는 것이다. 주로 초기값과 비교를 하면서 판단을 하게 된다.

2) Mapping

수술과 관련하여 평가하여야 할 신경 구조물을 확인(identification)하는 것이다. 주로 중요한 신경 손상을 피하거나, 염려 되는 신경의 기능 또는 손상을 확인하기 위해 필요하다. Monitoring과 mapping에 각각 해당하는 IOM의 세부 방법들은 아래에서 다루겠다.

3) Clinical Evidence

IOM의 발전과 수술 기술의 발전이 시간적으로 꽤를 함께 하고 있고, IOM 소견의 수술 과정에서의 반영은 집도의의 판단에 최종적으로 의존하며, 무작위 눈가림 연구의 시행이 불가능하므로, IOM의 임상적 유효성에 대한 직접적인 평가는 간단하지 않다. 그러나, 최근의 메타분석 연구에서는 척수 수술(spinal surgery) 후 사지마비 또는 하지마비의 발생이 IOM 중 MEP/SEP의 변화로 예측될 수 있음을 확인하였다.⁵ 요천추부 수술에서 역시 EMG monitoring이 신경근 손상의 감지에 높은 민감도를 지남을 확인하였다(Table 1).⁶ Cervical myelopathy에 대한 cervical laminectomy 후 종종 발생하는 C5 radiculopathy의 빈도 및 중증도 역시 EMG

monitoring을 시행한 경우 낮아짐을 보고한 바 있다.^{7,8}

Techniques

1. Monitoring

1) Free running EMG

(1) 말초신경계(신경, 신경근, 전각세포) 또는 운동 뇌신경의 손상이 우려되는 수술에서는, 근육 내 전기 신호를 감시하여 신경계의 자극이나 손상을 관찰할 수 있다. 일반적으로 근육내(intramuscular) 바늘(needle) 또는 전선(wire) 전극을 근육 중심(muscle belly)에 위치시켜 전기활동을 실시간, 지속적으로 기록한다. 대상 근육은 수술의 종류에 따라 사지 근육(limb muscles)이나, 연수 근육(bulbar muscles), 또는 항문/요도 괄약근 등을 조합할 수 있다.

(2) 정상적인 근육은 종말판에서의 기록이 아니라면 외부 자극이 없이 수술 중 전기 신호를 만들어 내지 않는다. Free running EMG를 통한 감시에서 주로 관찰되는 EMG 활동은 크게 phasic discharge와 neurotonic discharge로 구분된다. Phasic discharge는 일시적으로 신경(근)에 자극이 가해져서 생기는 전기신호이고, neurotonic discharge는 신경이 당겨지거나 눌리거나 허혈성 또는 열성 손상 등이 가해져서 생기는 신호이다.^{9,10} Phasic discharge는 짧은 시간의 비동기화된 다상성 활동(short asynchronous polyphasic activity)으로 보이고 (Fig. 1A-B), neurotonic discharge는 빠르고 불규칙적인 전위신호(high-frequency irregular bursts)로 수분에서 수시간 지속될 수 있다(Fig. C-D). Neurotonic discharge는 지속적인 감시 과정에서 놓치지 말아야 하며, 발

Table 1. Sensitivity and Specificity of EMG vs. SEP Monitoring⁶

	Sensitivity	Specificity	Positive predictive value	Negative predictive value
EMG monitoring (neurotonic discharges)	100%	23.7%	0.085	1.0
SEP monitoring (>50% change in amplitude)	28.6%	94.7%	0.286	0.947

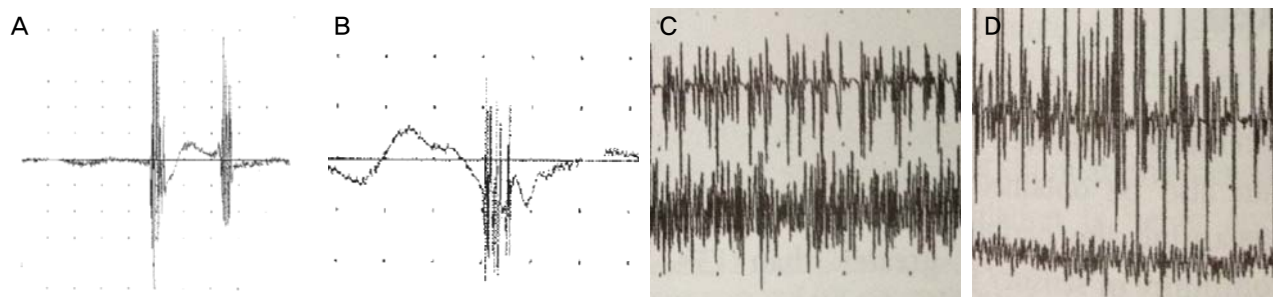


Figure 1. A-B phasic discharges. C-D neurotonic discharges.

견되면 수술 과정에서 신경 손상을 유발하는 요소를 확인하여 제거하도록 노력해야 한다.

2) Evoked Potentials

(1) Somatosensory Evoked Potential (SEP)

감각유발전위(SEP)는 말초신경 전도, 척수후가둥(spinal cord posterior column), 뇌간의 내측섬유대(medial lemniscus)와 대뇌반구의 감각경로를 평가하는데 이용될 수 있다. 하지에서는 주로 발목 부위에서의 tibial nerve를 자극하고 상지에서는 주로 손목의 median nerve를 자극한다. 자극 빈도는 5.1Hz,¹¹ 자극 강도는 운동 역치 이상, 약 1-2 cm의 움직임이 손/발에서 나타나도록 하며, 약 1분간 100-300번 가량의 자극을 평균하여 관찰한다. 기록은 active electrode를 C1'-C2' 또는 C3'-C4'에 위치시키고, reference electrode는 Cz', Fz, CPz', Cc' 등을 주로 이용하며, 환자에 따라 가장 적절한 위치를 찾아야(scouting) 한다. 50% 이상의 amplitude 감소가 있거나, 10% 이상의 latency 증가가 있으면 이상 소견으로 판단한다.¹²

(2) Motor Evoked Potential (MEP)

운동유발전위(MEP)는 주로 transcranial electrical stimulation (TES)를 이용하여, 운동피질에서 척수의 전각세포(anterior horn cell), 말초신경을 지나 근육에 이르는 운동경로를 평가하기 위한 방법이다. 상지 자극을 위해서는 주로 C3, C4의 1 cm 앞에 anode (양극)을, Cz 또는 Cpz에 cathode (음극)를 거치시킨다. 하지 자극을 위해서는 C1-Cz, C2-Cz, C1-C2 montage를 주로 사용한다. 그러나 최근 연구에서는 하지 자극 역시 C3-C4 montage를 사용하는 것이 가장 효과적임이 발표되었다. TES에는 주로 subdermal needle elec-

trode가 많이 사용되고, surface electrode에 비해 임피던스를 줄일 수 있고, 전극을 고정시키는 시간을 줄일 수 있다. Corkscrew 형태의 subdermal needle electrode가 가장 효율적으로 이용될 수 있다. MEP 기록은 사지의 근육에서 하고, 마찬가지로 needle electrode를 선호한다. 자극은 강도를 서서히 증가시키면서 최대 1,000 V 정도까지 시도해 볼 수 있고, 펄스 시간은 및 빈도는 다양하게 조절해 볼 수 있다. MEP amplitude나 latency는 운동신경원 pool의 흥분에 따라 변이가 커서 전형적으로 반응의 유무(all-or-none)로 이상을 판단하게 되나,¹³ 수술의 종류, 병변의 위치에 따라 기준을 달리할 필요가 있다.

(3) Brainstem Auditory Evoked Potentials (BAEP)

1967년에 소개된 이후 BAEP 감시는 auditory pathway를 포함한 뇌간(brainstem)의 기능을 평가하는 도구로 널리 이용되어 왔다. 주로 wave I-V의 신호를 분석하게 되고 각각은 다음과 같이 각 구조물에 짝지어진다(Fig. 2). 주로 귀마개(earplug) 형태의 earphone으로 소리 자극을 전달하게 된다. 대개 70dB, 교환극성(alternating polarity), 20-40Hz의 자극을 사용하여 안정적인 BAEP 신호를 얻게 된다. Active electrode는 mastoid process나 귓볼에 subdermal needle을 삽입하고 reference electrode는 Cz를 흔히 이용한다. BAEP의 해석은 주로 wave I, III, V의 latency와 amplitude를 관찰하여 이루어지며, 표준 가이드라인은 없으나 wave V의 1 ms 이상 latency 지연이나,¹⁴ 50% 이상 amplitude 감소를 유의하게 판단한다.¹⁵

(4) Bulbocavernosus reflex (BCR)

구해면체 반사(BCR)는 polysynaptic reflex로 S2-S4 level

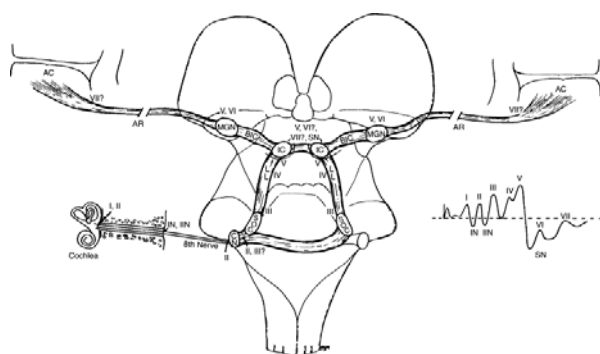


Figure 2. The anatomy of the ascending auditory pathways and proposed generators of waves I to V of the brainstem auditory evoked potentials.¹⁸

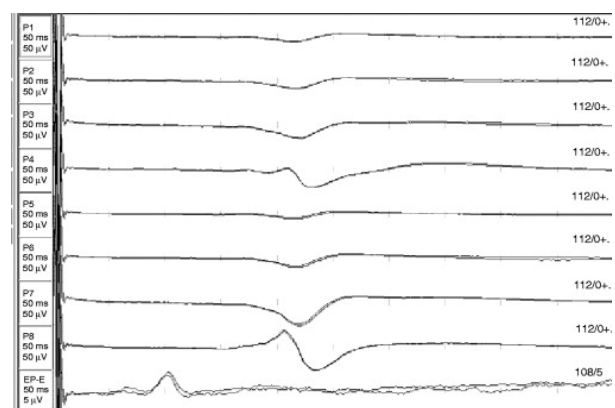


Figure 3. Median SEP phase reversal.

의 감각 및 운동 신경 경로를 평가할 수 있는 유용한 방법이다. 남성의 경우 penis에 surface electrode를 부착하고, 여성의 경우 clitoris 부위와 labia majora에 전극을 부착하여 자극한다. 기록 전극은 흔히 외항문괄약근(external anal sphincter)에 needle electrode를 삽입하게 되나,¹⁶ 경우에 따라 bulbocavernosus에 전극을 삽입하는 것이 필요할 경우도 있다. 자극은 duration 0.5 ms, intensity 40 mA, 2-5 train, inter-stimulus 3 ms로 자극하여 반복적인 반응을 얻을 수 있으나, 다양하게 자극 인자를 바꾸어 가면서 환자마다 최적의 자극법을 찾아낼 수 있다.¹⁷

1. Mapping

1) Triggered EMG

Free running EMG와 마찬가지로 사지근육이나 연수근육 등 다양하게 적용될 수 있으며 수술시야 내의 신경 구조물의 기능을 확인할 수 있다. 척추 수술에서는 수술 시야의 구조물이 신경근이 맞는지 또는 맞다면 어느 신경근 level에 해당하는지 각 myotome에서 EMG 신호를 읽음으로써 확인할 수 있고, 청신경초종 수술 등에서는 안면신경을 확인하여 보존할 수 있다.

2) Direct cortical stimulation

Direct cortical stimulation은 주로 대뇌피질을 직접 자극하여 운동 피질의 위치를 확인하고, 운동경로 기능을 평가하는 방법이지만, 운동 피질 외에도 다양한 감각, 언어, 시각 피질 등 eloquent area를 확인하는 데에도 이용된다. Epilepsy에서는 epileptogenic zone 또는 irritative zone을 확인하는 데에 도움을 받을 수 있다. Seizure semiology를 재현하거나 after-discharge의 역치를 확인하여 epileptogenic zone을 추정할 수 있다. 상황에 따라 probe, grid, strip electrode 모두 자극에 사용될 수 있으며 수술장 내에서나 밖에 서나 이용될 수 있다. 전형적인 자극은 constant-current, bipolar, square-wave pulse로 약 50 Hz frequency, 0.5 ms duration으로 자극한다. 1-2 mA에서 최대 10-15 mA까지 서서히 증가시키고 after-discharge의 역치에 의해 강도가 제한된다.

3) Electrocorticography (ECOG)

ECOG는 EEG와 마찬가지로 피질의 전기적 활동을 기록하나, EEG에 비해 10배의 amplitude로 기록할 수 있다. 크게

수술중(intraoperative) 기록과 수술외(extraoperative) 기록으로 구분할 수 있다. 수술외 기록은 장시간 전극을 거치시켜 두어 발작중 간질파(ictal epileptiform discharge)를 직접 확인하고, 수술중 기록은 주로 발작간 간질파(interictal epileptiform discharge, IED)를 관찰하게 된다. 일반적으로 국소 병변을 제거하는 epilepsy 수술을 계획하기 위해 epileptogenic zone을 정확하게 확인하고자 장시간 침습적 감시(invasive monitoring)를 수술 전에 시행하게 된다. 수술중 기록은 추가적 수술의 필요성을 피하고, 전극을 옮겨 가면서 관찰할 수 있다는 장점이 있으나, ictal activity를 직접 확인하지 못하고 IED를 주로 관찰하게 되며, IED가 관찰되는 irritative zone은 ictal onset zone과 정확히 일치하지 않는다는 한계가 있다.

4) Median SEP phase reversal

운동피질의 위치를 확인하기 위해 median SEP phase reversal을 이용할 수 있다. 주로 strip electrode를 감각피질과 운동피질을 포함하는 영역에 위치시키고, 반대쪽 median nerve를 자극하며 신호를 관찰한다. 운동피질에서는 P22파형이 기록되고, 감각피질에서는 N20파형이 기록되어, 파형의 상이 역전되는 위치에서 central sulcus를 확인할 수 있다(Fig. 3).

Applications

1. Tethered cord syndrome

IOM을 통해 filum terminale (종말끈)을 식별하여야 하고 주위 신경 구조물을 보존해야 한다. Triggered EMG를 통해 신경근과 filum terminale을 구분할 수 있고, free running EMG로 요천추 신경근의 손상을 감시할 수 있다.

2. Sacral spinal cord surgery

주로 lipomyelomeningocele, myelomeningocele, epidural cyst 등의 수술에서 sacral cord function 및 lumbosacral roots를 보존하기 위해 IOM을 시행한다. Monitoring으로 free running EMG, BCR, MEP를 적용할 수 있고, triggered EMG로 신경조직과 병변을 구분하는데 도움을 받을 수 있다.

3. Cerebello-pontine angle tumor

수술시야 부근에 다양한 뇌신경과 감각/운동 신경로가 지

나고, 교뇌에 뇌신경핵이 위치하기 때문에 뇌신경 기능의 감시 및 운동/감각 기능의 보존이 중요하다. Monitoring으로는 BAEP, facial muscle EMG, median SEP의 활용이 고려되어야 하고, mapping으로는 triggered EMG를 통해 facial nucleus를 확인할 수 있다.

4. Spinal cord surgery

상지 및 하지의 MEP, SEP를 시행하고, 경추 또는 요추추를 포함하는 수술에서는 free running EMG를 monitoring해야 한다. 요추 수술이라도 자세에 따라 상지의 마비가 오는 경우가 있고, 마취나 체온 등에 의한 SEP, MEP의 변화를 참조하기 위해서 상지와 하지의 EP를 함께 시행하는 것이 유리하다. Epidural electrode를 이용하여 직접 척수에서 자극하거나 기록하는 방법도 있고, 운동과 감각 신경의 구분은 어려우나 더 선명한 신호를 기록할 수 있다.

5. Epilepsy surgery

간질수술은 epileptogenic zone을 정확히 찾고, 주위의 운동피질 및 주요기능 피질(eloquent cortex)을 보존하기 위해 IOM을 이용한다. 수술 전 ECOG invasive monitoring으로 ictal epileptogenic discharge를 확인하여 간질시작부위를 특정하고, 수술 중 direct cortical stimulation을 통해 운동 및 주요기능 피질 등을 보존한다.

Summary

수술 중 신경생리 감시(IOM)는 수술의 부작용을 줄이고, 신경외과вра가 수술의 범위를 계획하고 파악하는 데 도움을 주며, 환자 및 보호자가 하여금 수술에 대한 두려움을 덜 수 있게 한다. IOM을 담당하는 의사는 수술의 종류에 따라 적절한 IOM을 계획하고, 수술 중 IOM 소견을 정확하게 해석하여야 하며, 집도의와 적극적으로 의사소통 하여 IOM을 통해 최상의 수술 결과를 얻을 수 있도록 노력하여야 한다.

References

- Shimoji K, Higashi H, Kano T. Epidural recording of spinal electrogram in man. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 1971;30:236-9.
- Nash CL, Jr., Lorig RA, Schatzinger LA, Brown RH. Spinal cord monitoring during operative treatment of the spine. *Clinical orthopaedics and related research* 1977;100-5.
- Burke D, Hicks R, Stephen J, Woodforth I, Crawford M. Assessment of corticospinal and somatosensory conduction simultaneously during scoliosis surgery. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 1992;85:388-96.
- Moller MB, Moller AR. Loss of auditory function in microvascular decompression for hemifacial spasm. Results in 143 consecutive cases. *Journal of neurosurgery* 1985;63:17-20.
- Nuwer MR, Emerson RG, Galloway G, et al. Evidence-based guideline update: intraoperative spinal monitoring with somatosensory and transcranial electrical motor evoked potentials: report of the Therapeutics and Technology Assessment Subcommittee of the American Academy of Neurology and the American Clinical Neurophysiology Society. *Neurology* 2012;78:585-9.
- 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;29:677-84.
- Jimenez JC, Sani S, Braverman B, Deutsch H, Ratliff JK. Palsies of the fifth cervical nerve root after cervical decompression: prevention using continuous intraoperative electromyography monitoring. *Journal of neurosurgery Spine* 2005;3:92-7.
- Fan D, Schwartz DM, Vaccaro AR, Hilibrand AS, Albert TJ. Intraoperative neurophysiologic detection of iatrogenic C5 nerve root injury during laminectomy for cervical compression myelopathy. *Spine* 2002;27:2499-502.
- Harper CM, Daube JR. Facial nerve electromyography and other cranial nerve monitoring. *Journal of clinical neurophysiology: official publication of the American Electroencephalographic Society* 1998;15:206-16.
- Crum BA, Strommen JA. Peripheral nerve stimulation and monitoring during operative procedures. *Muscle & nerve* 2007;35:159-70.
- Nuwer MR, Dawson E. Intraoperative evoked potential monitoring of the spinal cord: enhanced stability of cortical recordings. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 1984;59:318-27.
- Nuwer MR, Dawson EG, Carlson LG, Kanim LE, Sherman JE. Somatosensory evoked potential spinal cord monitoring reduces neurologic deficits after scoliosis surgery: results of a large multicenter survey. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 1995;96:6-11.
- Bose B, Sestokas AK, Schwartz DM. Neurophysiological monitoring of spinal cord function during instrumented anterior cervical fusion. *The spine journal: official journal of the North American Spine Society* 2004;4:202-7.
- Manninen PH, Patterson S, Lam AM, Gelb AW, Nantau WE. Evoked potential monitoring during posterior fossa aneurysm surgery: a comparison of two modalities. *Canadian journal of anaesthesia=Journal canadien d'anesthésie* 1994;

- 41:92-7.
15. Ramnarayan R, Mackenzie I. Brain-stem auditory evoked responses during microvascular decompression for trigeminal neuralgia: predicting post-operative hearing loss. *Neurology India* 2006;54:250-4.
 16. Khealani B, Husain AM. Neurophysiologic intraoperative monitoring during surgery for tethered cord syndrome. *Journal of clinical neurophysiology: official publication of the American Electroencephalographic Society* 2009;26:76-81.
 17. Rodi Z, Vodusek DB. Intraoperative monitoring of the bulbocavernosus reflex: the method and its problems. *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology* 2001;112:879-83.
 18. Legatt AD, Arezzo JC, Vaughan HG, Jr. The anatomic and physiologic bases of brain stem auditory evoked potentials. *Neurologic clinics* 1988;6:681-704.