

수술 중 신경계 감시

성균관대학교 의과대학 삼성서울병원 신경과

서 대 원

Intraoperative Neuromonitoring

Dae-Won Seo, M.D., Ph.D.

*Department of Neurology, Samsung Medical Center,
Sungkyunkwan University School of Medicine, Seoul, Korea*

Received 26 May 2008; accepted 26 May 2008.

Intraoperative neuromonitoring (INM) is well known to be useful method to reduce intraoperative complications during the surgery of nervous system lesions. Evoked potentials are most commonly used among the electrophysiological tests. Brainstem auditory evoked potentials are for detecting the problems along the auditory pathways including the eighth cranial nerve and brainstem. Somatosensory evoked potentials are applied for preventing the spinal cord lesions. The INM is affected by many factors. In order to perform an optimal INM, the confounding factors including technical, anesthetic, and individual factors should be kept well under control. INM has frequent electrophysiologic changes during the surgery and it might be helpful to keep one's eyes on which monitoring modalities are reluctant to change during each operation. The skillful monitoring and timely interpretation of electrophysiologic changes can drive the patient to be undergone surgery, even in high surgical risk group.

Key Words: Intraoperative monitoring, Brainstem auditory evoked potentials, Somatosensory evoked potentials, Electroencephalography, Electromyography, Nerve conduction study

서 론

수술 중 신경계 감시(intraoperative neuromonitoring: INM)는 신경계 수술에 이용되어 안전하게 수술을 하고 있다는 확신을 줄 수 있고, 수술 중 신경계 손상을 조기에 찾아서 수술 합병증을 줄이며, 고위험군 수술을 안전하게 할 수 있게 도움을 준다. INM의 시작은 1930년대 말 Penfield와 Jasper가 간질 수술에서 두개골을 열고 뇌파

를 기록한 것이 최초라고 볼 수 있다.¹ 그 후 디지털화된 유발전위와 뇌파를 1980년대부터 본격적으로 임상에 도입하면서 다양한 신경계 수술에 INM을 이용해 왔다. 특히 1992년 Scoliosis Research Society에서 INM을 척추 수술 동안 각성상태검사의 보조수단으로 인정하였고, 대안적 이용도 가능하다고 결정하였다.² 또한 대조군 비교연구와 증례보고로 INM의 필요성이 여러 수술에서 입증되었다.

INM의 방법으로는 뇌파검사, 유발전위검사, 근전도검사, 신경전도검사 및 경두개초음파검사(transcranial doppler: TCD)가 있고, 수술방법에 따라 적절히 조합하여 이용할 수 있다. 물론 환자 상태, 수술방법, 장비 기능 및 의사 경험을 고려하여야 한다.

INM은 수술 질환별이나 감시해야 할 신경 부위 및 경로를 중심으로 분류할 수 있다. 질환별로는 뇌혈관질환, 뇌

Address for correspondence;

Dae-Won Seo, M.D., Ph.D.

Department of Neurology, Samsung Medical Center,
Sungkyunkwan University School of Medicine

50 Irwon-dong, Gangnam-gu, Seoul, 135-710, Korea

Tel: +82-2-3410-3595 Fax: +82-2-3410-0052

E-mail: daewon3@samsung.com

Table 1. Drug effects on sensory and motor-evoked potentials

	TCD CBF	EEG Amp	SSEP		BAEP		MEP		EMG
			Lat	Amp	Lat	Amp	Lat	Amp	
General anesthetics									
Volatile anesthetics	I	I	I	D	I	N	I	D	N
Nitrous oxide	I	I	N	D	N	N	I	D	N
Barbiturate	D	I (frontal spindle)	I	D	I (high)	D	D	D	N
Propofol	D	I (frontal slowing)	I	D	I (high)	D	D	D	N
Ketamine	I	I (frontal theta)	N	I	N	N	N	N	N
Etomidate	D	I (frontal alpha)	I	D	I	D	I	N	N
Adjunctive agents									
Benzodiazepines	D	I (frontal slowing)	I	D	N	N	D	D	N
Narcotics	D	I (diffuse slowing)	I	D	N	N	N	N	N
Depolarizing	?	N	N	N	N	N	loss	loss	loss
Nondepolarizing	?	N	N	N	N	N	loss	loss	loss

I; increased, D; decreased, N; no change

종양, 기능성수술(functional surgery), 척수질환 및 기타로 나눌 수 있다(Table 1). 부위별로는 천막상부병변(supratentorial lesion), 후두와병변(posterior fossa lesion), 척수병변(spinal lesion) 및 기타로 나눈다.

여기에서는 기본적인 고려사항, 검사방법을 알아보고 부위에 따라 INM을 설명하고자 한다.

본 론

1. 수술 중 신경계 감시의 고려사항

1) 수술 중 신경계 감시의 수단

수술 중 신경계 감시란 뇌혈류 측정과 신경계 전기생리학적 방법을 이용하여 수술 중 신경계의 이상 여부를 추적 감시하는 방법이다. 뇌혈류 측정은 경두개초음파검사를 통해서 유속(flow velocity)과 색전증(embolism)을 확인한다. 뇌파검사를 통해 뇌결질의 상태를 파악할 수 있고, 뇌간청각유발전위검사로 청신경과 뇌간의 이상 여부를 알 수 있으며, 체성감각유발전위검사를 통해 척수, 결절하구조물 및 감각결절까지의 이상 여부를 확인할 수 있다. 단 시각유발전위검사는 수술 중 마취 영향으로 일정한 파형을 얻기 어렵기 때문에 이용하지 않는다. 운동유발전위검사(motor evoked potentials: MEP)는 검사실에서 사용하는 자기자극(magnetic stimulation)보다는 전기자극을 사용하여 운동신경경로의 이상을 파악할 수 있다. 근전도검사는 자발적 근전도(spontaneous EMG) 전위를 이용하여 말초 운동신경의 이상을 확인할 수 있다. 또한 운동신경의 위치 또는 기능의 유지 여부를 확인하기 위해 유발근전도

검사(triggered EMG)를 할 수 있다. 신경전도검사를 통해 수술 중 말초신경의 손상 여부를 확인할 수 있다.

2) 수술적 감시의 기술적 방법

유발전위검사에서는 자극 방법, 자극 전극 위치, 기록 채널 수, 기록 설정 방법(민감도, 기록기간, 필터설정, 평균화 수) 및 기록 전극 위치를 수술 시작 전에 결정하여야 한다. 또한 수술 전 환자 상태를 확인하고 가장 적합한 감시 방법을 선택하는 것이 필요하다. 수술장에서는 마취과 의사와 긴밀히 협조하여 마취 심도와 환자 상태의 변화를 주의 깊게 살펴야 한다. 수술 중에는 검사 방법, 감시 대상, 감시를 통해 도움을 줄 수 있는 내용 그리고 감시 한계점 등을 외과의사에게 알려주며 감시를 해야 한다. 특히 정확한 감시와 감시 중 응급대처를 위해서 감시 전문인력이 상주하는 것이 바람직하다.

3) 수술 중 신경계 감시에서의 마취

수술 중 집중감시를 할 때 적절한 마취를 유지하는 것은 필수적이다. 뇌혈류검사는 마취에 민감하게 영향 받지 않지만 전기신경생리학적검사는 대부분 마취의 영향을 받는다. 표 1에 일반적으로 사용하는 마취제에 대해 요약하였다. BAEP와 SSEP같은 감각유발전위(sensory evoked potentials: SEPs)는 흡입마취제 영향을 쉽게 받을 수 있고, EMG는 근이완제에 영향을 받을 수 있다. 예를 들면 척추수술에서 SEPs 집중감시를 하는데 흡입마취제를 과량으로 유지할 경우 신경계의 이상 없이도 파형의 변화(진폭의 감소와 잠복기의 연장)가 일어나고, EMG 집중감시

를 하는데 근이완제를 많이 쓰면 근전도 반응이 나타나지 않아 큰 혼동을 초래할 수 있다. 따라서 가능한 한 마취를 낮고 일정하게 유지하면서 좋은 파형을 얻을 수 있어야 한다. 일반적으로 흡입마취제의 농도는 MAC을 0.5~0.7 정도로 유지한다. EMG와 복합운동활동전위(compound motor action potentials: CMAP)를 기록하는 MEP는 신경근접합부의 전달과정이 필요하므로 근육신경차단제(neuromuscular blocker)를 가능한 한 사용하지 않는 것이 필요하다. 필요 시 train-of-four (TOF)를 적어도 2 이상으로 유지해야 적절한 EMG 감시를 할 수 있다. 또한 케타민은 MEP 반응 역치를 낮추지만 벤조디아제핀, 에토미데이트, 바비투레이트, 고용량 프로로폴은 MEP 반응을 감소시킨다. 실제로 전체정맥마취(total intravenous anesthesia: TIVA)를 하여 대뇌결질의 영향을 최소화한 경우에는 MEP 감시를 400 V의 반복자극을 주어 92%에서 성공할 수 있었다.³

또한 체온과 혈압을 일정하게 유지해야 좋은 집중감시를 할 수 있다. 체온이 35°C 이하면 EEG 감시에서 점차적으로 서파가 증가하고 진폭이 감소한다. SSEP 감시에서는 중심체온이 1°C씩 감소함에 따라 진폭이 7% 감소하고 잠복기는 3% 증가한다. 혈압 저하 역시 EEG 감시에서 서파 증가와 진폭의 감소를 나타낼 수 있다. 평균동맥압이 60 mmHg 이하로 되면 SSEP 파형은 소실된다. PaO₂가 50~60 mmHg 미만일 경우 초기에는 뇌파가 활성화되고 그 후 서파가 나타나며 더욱 감소할 경우 결국에는 뇌세포의 전기활동이 기록되지 않는다(electrical cerebral silence). PaCO₂의 감소는 뇌파상 서파를 나타내고 PaCO₂의 증가는 뇌파 진동수의 증가를 일으키며 더욱 증가하면 뇌파 진동수와 진폭 모두 감소하게 된다.

수술 중 집중감시에서 마취와 관련하여 주의할 점은 다음과 같다. 첫째 수술 중 중요한 시기에는 마취를 일정하게 유지한다. 둘째, 뇌파상 빠른 파형의 증가는 낮은 마취농도, 바비투레이트 약제 및 아산화질소와 관련 있다. 셋째, 허혈 위험이 증가되는 상태에서는 아편양제제나, 과량의 바비투레이트제제, 벤조디아제핀제제의 사용을 금하는 것이 좋다. 넷째, 마취제에 취약한 파형을 항상 고려하면서 감시를 한다. 다섯째, MEP 또는 EMG상의 파형 소실 시에는 벤조디아제핀 및 신경근차단제의 사용을 확인하고, TOF로 평가한다.

2. 수술 중 신경계 집중감시의 방법

수술 부위와 환자 상태에 따라 다양한 방법을 이용하는 데, 예를 들면 소뇌뇌교각 종양 수술에 청각유발전위, 안

면근육 근전도 및 신경전도 등을 복합적으로(multi-modality) 기록한다. 이러한 복합구성으로 EEG, EP, EMG, NCS 및 TCD를 적절하게 이용한다. 각각의 검사는 일반검사실에서 사용하는 방법을 수술 중 감시하는 데 적절하게 설정을 변경하여 이용한다. EEG는 두피뇌파를 이용할 수도 있지만, 두개골을 열고 결질하에서 기록하는 결질뇌파(electrocorticography: ECoG)를 이용할 수 있다. EP는 감각유발전위 중에 청각유발전위, 체성감각유발전위를 이용하고, 운동유발전위로는 경두개 전기자극에 의한 경두개운동유발전위(transcranial motor evoked potentials: TcrMEP)가 있다. EMG는 검사실의 안정상태 EMG와 같은 자발적 근전도(sponatenous EMG)와 수술장에서 노출된 말초운동신경을 자극하여 기록하는 유발적 근전도(triggered EMG)를 이용한다. NCS는 검사실과 같이 말초신경 근위부 자극 후 해당 근육에서 CMAP를 기록할 수 있고 청신경과 같은 감각신경은 수술로 노출된 감각신경 위에서 CNAP (compound nerve action potentials: CNAP)를 기록할 수 있다. 각각에 대해서 자세히 살펴보면 다음과 같다.

1) 뇌파검사

뇌파검사를 할 때는 좌우측 반구 앞쪽과 뒤쪽을 포함하는 4채널 이상의 differential montage로 F3-C3, C3-P3, F4-C4, C4-P4를 사용하는 것이 좌-우 전-후 뇌 기능을 비교할 수 있어 좋다. Band pass는 0.5~30 Hz로 하고 기록하는 단위는 30초로 압축할 수 있다.¹⁴ 디지털뇌파검사는 compressed spectral array를 이용할 수도 있다. 기술적으로 고려해야 될 점은 다음과 같다. (1) 기록전극의 안정성(수술 전에 콜로디온으로 붙이거나 수술직전 피하전극을 이용), (2) 적당한 기록전극 수(적어도 4개 이상), (3) 적당한 채널 수(적어도 4개 이상의 채널을 사용하며 16채널 정도가 좋다), (4) 적당한 민감도, 필터, 용지속도, 접지가 필요하다. 대뇌결질에서 파형의 형성이 변화되는 과정은 빠른 파형이 점차 소실되며 진폭이 감소하고, 서파가 나타나기 시작하며, 점점 진행하면 평탄하게 된다. 일반적으로 진폭의 50% 이상의 감소, 서파의 증가를 뇌파의 이상 기준으로 한다. 또한 뇌파 기록 중 발생하는 잡파(artifacts)가 문제가 되는데 환자에서 유래되는 잡파로는 심전도, 근전도, 안구운동 및 순목잡파가 있고, 외부에서 유래되는 잡파로 60 Hz 소음, 전기소작 간섭, 움직임 잡파, 전극 튀김 및 흔들림, 교류저항의 증가가 있으며, 이 중 높은 교류저항에 의한 잡파가 가장 흔하여 교류저항을 적어도 5 K Ω 이하로 유지하는 것이 매우 중요하다. 잡파

Table 2. Anatomic generators of brainstem auditory evoked potentials

Wave	Generator	Functional indication
I	Auditory nerve	Cochlea and VIII nerve intact
II	Cochlear nucleus	Stimulus received; relayed to contralateral nucleus
III	Pons	Signal received from ipsi- and contralateral nucleus
V	Mesencephalon	Signal received from ipsi- and contralateral pons
I-III latency		Cochlea and nerve function
III-V latency		Brainstem function

Table 3. Components and generators in SEP

Components		Mechanism	Generator
median SEP	posterior tibial		
SEP			
EP	PP	propagation	peripheral
N13	LP	Stationary	cord
P14	P31	far-field	lemiscus
N18	N34	far-field	thalamus
N20	P37	near-field	primary somatosensory area

EP; Erb's potential, LP; lumbar potentials

를 제거하기 위해서는 필터를 1~30 Hz로 하는 것이 좋고, 콜로디온을 이용한 디스크-컵 전극 또는 바늘전극(needle electrode)을 이용하는 것이 좋다. 또한 증폭기를 환자에게 가깝게(전극의 길이는 짧게) 위치시켜 안테나 효과(antenna effect)를 적게 하는 것이 중요하다. 그러나 근전도 또는 전기소작(electrocautery)에 의한 잡파를 완전히 제거하기는 힘들다. 일반적으로 집중감시는 기사가 수행하며 신경과 의사는 이를 감독하고 문제가 있을 경우 확인하게 된다. 따라서 뇌파의 변화는 판독 경험이 부족한 기사에게 의존하게 되는데 이러한 뇌파 판독상의 어려움을 해결하기 위해 컴퓨터로 뇌파신호를 파워 스펙트럼으로 변환하여 히스토그램을 통해 확인하는 compressed spectral array 또는 density spectral array를 사용할 수도 있다. 허혈시는 뇌파가 낮은 스펙트럼으로 이동하는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 잡파(두극 소작자로 인한 고주파수 소음 및 전극 떨림으로 인한 저주파소음)로 인한 판독이 잘못될 수 있으므로 반드시 실제 뇌파검사 결과를 확인하는 것이 필요하다.

2) 경두개초음파

검사실에서 사용하는 머리띠를 이용해 중대뇌동맥의 혈류속도 변화와 색전에 대한 고신호(high intensity transient signal: HITS)를 확인할 수 있다. 속도의 변화를 통해 뇌혈류 감소를 외과의사에게 알려줄 수 있으며, HITS

를 통해 색전증을 알려줄 수 있다. TCD 감시는 머리띠를 이용하여 탐색자(probe)를 고정하고 중대뇌동맥의 M1 부분을 감시한다. 이 때 탐색자는 일반검사실과 같이 2 MHz이지만 그 모양이 머리띠에 고정할 수 있게 제작된 것이어야 한다. 특히 머리띠에 안정적으로 고정하는 것이 매우 중요하다. 측정 깊이는 40~50 mm 정도로 하고, 측정용적(sample volume)은 10 mm³로 한다. 이렇게 탐색자를 설치한 후 기초가 되는 혈류 속도를 측정한 후 지속적으로 혈류속도의 감소 및 증가 정도를 계산하여 뇌혈류를 파악한다. 또한 일시적 신호 변화로 10~20 msec의 짧은 기간에 주위보다 강한 신호가 나타나는지 확인하여 미세색전이 발생하는지 파악하게 된다. 이러한 신호는 적어도 100 msec 미만이고, 주위보다 3~9 dB 정도로 강하게 나타나며, 탐색자 쪽의 일정한 방향으로 나타나고, 날카로운 특유의 소리를 나타낸다. 물론 탐색자의 미끄러짐, 전기소작기 등에 의한 잡파와 감별이 필요하다. 잡파는 소리가 다소 둔탁하며, 양방향성으로 길게 나타난다. 일반적인 검사실에서 이용하는 pulsatile index는 수술 중 감시에서는 이용하지 않는다.

혈류속도의 이상 여부는 중대뇌동맥 속도가 20 cm/sec 이하로 될 때, 경동맥 내막절제술 등의 교차결찰 후 50% 이상으로 회복되지 못할 때, 수술 후 100% 이상의 증가를 나타낼 때를 기준으로 하며, 응고된 혈액, 혈소판, 죽상물질 및 지방, 공기로 인한 HITS를 이상 소견으로 볼

수 있다.

3) 청각유발전위(auditory evoked potentials)

청각유발전위는 파형이나 잠복기의 변화가 적은 10 msec 이내의 short latency AEP를 이용한다. 청각자극은 검사실의 헤드폰보다는 외이도에 삽입하는 tubal insert phone을 이용하여 수술시야에 방해되지 않게 하고, 자극의 극성은 교환전위(alternating polarity)로 하며, 수술 전 검사에서 결정된 청각자극은 약 100 dB peSPL의 click 음을 주고 반대쪽 귀에 방해음(masking sound)을 준다. 양쪽 귓볼에 설치한 A1, A2 전극을 기준전극으로 하고 두정(vertex) 부위에 설치한 Cz 전극을 활동전극으로 하여 파형을 기록하며, 파형 I, III 및 V를 감시한다.⁴ 각 파형 형성 부위는 표 2와 같다. 청각유발전위는 뇌간 종양을 포함하는 후두와(posterior fossa) 수술에 이용할 수 있다. 또한 추골기저동맥 동맥류 수술에서도 이용할 수 있다. 수술 도중 뇌간에 손상 또는 허혈 상태가 발생할 경우 파형의 진폭이 감소하고 잠복기가 증가하게 된다. 또한 소뇌-뇌교각 종양의 경우 청신경에 미치는 영향을 추적 감시할 수 있다. 파형의 진폭이 50% 이상 감소하고 절대 잠복기가 1 msec 이상 연장될 때 이상이 있는 것으로 판단하고 외과 의사에게 즉시 알려 필요한 조치를 취하게 한다.

4) 체성감각유발전위

전기자극은 주로 상지 정중신경(median nerve)과 하지 좌우측 경골후신경(posterior tibial nerve)을 이용하며, 기록은 말초, 걸질하구조물 및 걸질파형을 얻을 수 있도록 한다. 전기자극의 강도는 수술 전 검사에서 결정된 강도를 고려하여 운동 역치에서 25% 증가된 강도로 15~25 mA 정도의 자극을 주고, 자극 빈도는 5.1 Hz로 0.2 msec의 square wave pulse 자극을 가한다. 기록 전극들은 뇌파검사실에서 흔히 쓰는 9 mm 직경의 디스크형 전극을 콜로디온으로 부착할 수 있으나 수술장에서는 더욱 안정적이며 신속히 설치할 수 있는 피하전극을 사용하면 편리하다. 부착 부위는 말초, 걸질하구조물 및 걸질파형을 얻을 수 있도록 설정하고, 걸질하 및 걸질 파형을 얻기 위해 제5경추 및 중심구에서 2 cm 후방에 위치한 감각신경중추 부위(C3', Cz', C4')에서 Fpz를 참고전극으로 기록한다. 임피던스를 5 K Ω 이하로 유지해야 하며, band pass는 30~300 Hz로 하고, 기록 기간은 정중신경 SEP는 50 msec, 후경골신경 SEP는 100 msec로 하며, 평균화는 300회 이하로 한다. 주로 걸질에서 기록되는 정중신경 SEP는 반대편 걸질의 N20, 후경골신경 SEP는 중앙에서 기록되는 P40 파형의

잠복기 및 peak-to-peak 진폭을 주로 감시한다. 기록되는 파형 및 발생기전은 표 3과 같다. SSEP는 유발전위 중 가장 많이 이용하는 수술 중 집중감시 방법 중의 하나로 수술 도중 체성감각경로(dorsal columnar-medical lemniscal pathway)에 이상이 발생할 경우 진폭과 잠복기의 이상을 관찰할 수 있다. 진폭이 50% 이상 감소하거나⁵ 절대잠복기가 10% 이상 연장되면 경고를 하고, 진폭이 90% 이상 감소하고 절대잠복기가 10% 이상 연장되면 수술을 중단하고 중재술을 고려한다.

일반적으로 SSEP 감시는 척추 및 척수와 관련된 정형외과, 혈관외과, 신경외과 수술에 사용할 수 있다. SSEP 감시를 이용하는 척수측만증 이외의 수술로는 척추손상 후 고정술, 퇴행성 척추질환 시 고정술, 상완총 손상 후 이에 대한 수술, 척수 종양, 낭종, 혈관기형, tethered cord syndrome, 감각영역의 뇌혈관질환, 동맥류, 경동맥내막 절제술, 시상종양, 척추골절의 교정술 및 대동맥 수술이 있다.

5) 운동유발전위

자극부위에 따라 두개강 위(transcranial), 척추(trans-cervical 또는 translumbar)에서 검사할 수 있으며, 대뇌 운동겉질(direct cortical), 척수(direct spinal)에서도 검사할 수 있다. 또한 자극 양상에 따라 자기(magnetic) 또는 전기(electrical)자극을 할 수 있다. 기록면에서도 척수의 경질막 밖에서 D-wave를 기록하는 경질막 밖 기록방법이 있으며, 말초신경에서 CNAP를 기록하는 neuro-genic MEP (nMEP)와 상하지 말단부 근육에서 CMAP를 기록하는 myogenic MEP (mMEP)가 있을 수 있다.

이러한 MEP 감시는 1980년대 들어 많이 이용하기 시작했는데, 초기에는 Owen 등(1991)이 개발한 경추 부위에서 전기자극을 주어 슬와(popliteal fossa)에서 기록하는 방법(transcervical electrical neurogenic motor evoked potentials: TCe nMEP)으로 척추수술에서 운동신경계를 감시하기도 했다.⁶ 그러나 요즘은 좌우측 반구의 운동영역부위를 두피에서 자극을 가하고 상지와 하지의 원위부 근육 즉 새끼벌립근(abductor digiti quinti, ADQ), 앞정강근(tibialis anterior, TA), 엄지벌립근(abductor hallucis, AH)에서 4 cm 정도 떨어진 두 바늘 전극을 삽입한 후 CMAP를 기록하는 방법(transcranial electrical myogenic MEP: Tcre mMEP)을 가장 많이 이용한다.

Tcre mMEP에서 전기자극은 좌우 중심구 주변 C1/C2 위치의 1.5~2 cm 전방에 나사형 또는 피하형 전극을 통해서 준다. 또는 Cz에 양극성 자극을 주고, C3/4에 음극성

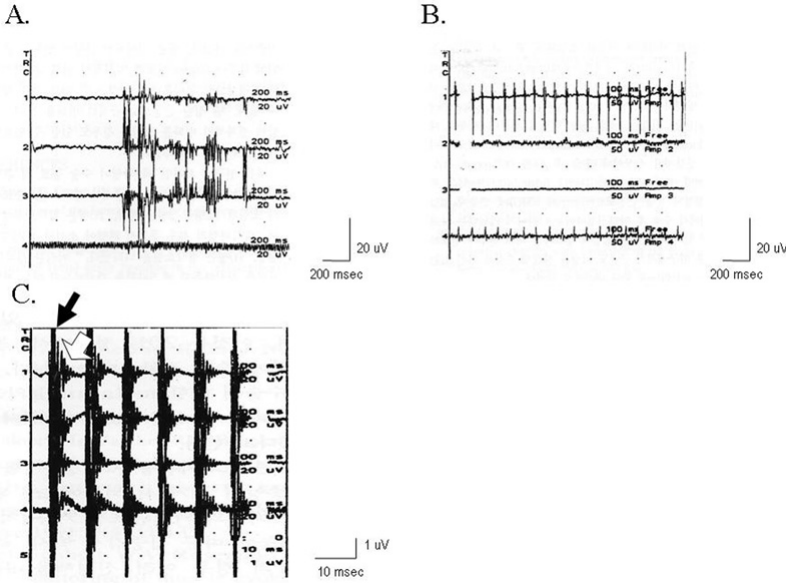


Figure 1. EMG monitoring. (A) Free-running EMG shows phasic activities in trace 1, 2, and 3. (B) Free-running EMG reveals tonic discharges in trace 1 and 4. (C) Triggered EMG demonstrates well evoked EMG activities (white arrow) after stimulation artifacts (black arrow).

자극을 준다. INM 기기에 자극기가 없으면 외부 자극기 (예, Digitimer constant-voltage stimulator)를 사용하기도 한다. 5 Hz 정도의 반복자극(repetitive stimulation)을 이용하는데, 그 이유는 경두개 자기장 자극에서 1 Hz 미만의 자극은 뇌결질의 흥분성을 억제하고 5 Hz 이상의 자극은 흥분성을 증가시키는 것으로 알려져 있어⁷ 흥분성 파형 얻기 위해서는 빠른 자극이 필요하여 5 Hz 정도의 자극을 이용한다. 따라서 5 Hz 정도의 반복적인 square-wave, monophasic, anodal, constant-current electrical pulse를 50~200 μ s의 개별펄스 기간(individual pulse duration), 2~4 msec의 자극간 간격(interpulse interval)으로 5개 자극을 연속적으로 준다. 자극 강도는 100 V에서 50 V씩 점차적으로 증가하여 최대 700~1,000 V 정도의 항전압성 자극(constant voltage)을 주면서 ADQ 또는 AH의 CMAP가 20 μ V 이상으로 기록될 수 있는 강도를 유지한다. 기록 기간은 100 msec, bandpass는 100~5,000 Hz로 한다. MEP 진폭은 peak-to-peak로 한다. 자극 강도가 증가할수록 원위부 축삭도 자극되고, 환자가 움직일 수 있으므로 가능한 한 최소의 자극강도를 사용한다. Tcre mMEP에서 이상 변화에 대한 기준으로 진폭 기준, 역치기준 및 파형기준을 생각할 수 있다. 진폭기준으로 mMEP의 진폭 50%⁸ 또는 80% 이상 감소⁹ 또는 잠복기의 10% 이상 증가를 유의한 변화로 본다. 역치기준은 좋은 파형을 얻기 위해서 100 V의 증가가 필요할 경우 이상으로 볼 수 있다. 파형기준은 사용하지 않으며, 일반적으로 역치기준을 이상으로 이용한다.¹⁰ MEP를 하는 경우는 척추 및 척수수술, 두개강내 또는 대동맥 혈관질환, 뇌중

양의 뇌실질 질환을 들 수 있다.¹¹ Direct motor cortex stimulation은 뇌종양에 흔히 이용되며, Tcre mMEP는 SSEP 감시로 운동경로의 이상을 파악하지 못하는 동맥류 수술, 정형외과 수술, 척수수술에서 사용할 수 있다.⁸ 단 와우각 임플란트(cochlear implant), 심장박동기, 두개골 뇌골절 및 절개술(craniotomy), 발작의 병력이 있을 경우는 검사하기 어렵다.¹¹ 또한 혀의 손상, 부정맥, 자극부위 두피화상, 턱 탈골, 등의 부작용이 보고되기도 했지만 1.5% 이하에서 나타난다.¹¹

6) 근전도검사

상하지 근육과 뇌신경에 의해 지배를 받는 근육들에서 EMG 감시를 한다. 수술 중 신경손상에 의하여 발생하는 운동단위전위(motor unit potentials: MUP)를 기록하는 방법(spontaneous EMG monitoring, Figure 1A, 1B)과 직접 신경근을 전기자극하여 신경에 이상이 없는지 확인하는 방법(triggered EMG monitoring, Figure 1C)이 있다. 일반적인 EMG 반응은 해당근육의 1~2% 정도의 근섬유의 반응만을 기록한다. 예를 들면 TA에는 270,000개의 근섬유가 있는데 그 중 18~34개의 근섬유에서 발생하는 파형을 기록하게 된다.¹² Band pass로는 10~3 KHz를 이용하며, 민감도는 100~50 mV/div로 한다. 자발적 EMG의 경우 일시적 위상성 변화(phasic activity)와 지속적 긴장성 변화(tonic activity)가 있을 수 있다. 위상성 변화는 burst로 나타나는데 신경근을 건드리거나, 당기거나, 액체 관류(fluid irrigation) 시 관찰되며, short asynchronous polyphasic wave 형태를 나타낸다(Fig. 1). 수술방

Table 4. Nerve roots and muscles most commonly used during EMG monitoring

Nerve		Muscle
Brainstem		
Cranial nerves	CN III, IV, VI	Ocular muscles
	CN V	Masseter
	CN VII	Obicularis oculi, oris, mentalis, temporalis
	CN IX	Pharyngeal muscles
	CN X	Vocal cords
	CN XI	Trapezius, sternocleidomastoid
	CN XII	Tongue
Spinal cord		
Cervical	C2-4	Trapezoids, sternocleidomastoid
	C5, 6	Biceps, deltoid
	C6, 7	Flexor carpi radialis
Thoracic	C8-T1	Adductor pollicis
	T2-6	Specific intercostals
	T5-12	Specific area rectus abdominus
Lumbar	L2	Adductor longus
	L2-4	Vastus medialis
Sacral	L4-S1	Tibialis anterior
	L5-S1	Peroneus longus
	S1-2	Gastrocnemius
	S2-4	Anal sphincter

Table 5. Disease categories in monitoring

Category	Disease
Vascular disease	carotid stenosis, cerebral aneurysm, aortic aneurysm
Oncology	brain, brainstem, cerebellopontine angle tumor
Functional surgery	epilepsy, hemifacial spasm, spastic paraparesis
Spinal disease	scoliosis, degenerative disease, tumor

법을 바꾸면 위상성 변화는 바로 회복될 수 있고, 신경손상과는 무관하다. 긴장성 변화는 수 분 또는 수시간 지속되는 연속적인 일련의 synchronous activity로 신경근이 견인기(retractor)에 의해서 심하게 신전되거나 압박될 때 또는 신경근의 손상에 의해서 나타나므로 신속한 조치가 필요하고 운동기능의 손상이나 수술 후 통증을 일으킬 수 있다. 이러한 변화는 파형은 물론 스피커를 통한 소리로 구분할 수 있으며 위상성 변화는 불규칙적인 고음으로 나타나지만 긴장성 변화는 규칙적으로 반복되는 저음이 들리므로 쉽게 감별할 수 있다. 유발적 EMG의 정상 반응은 고진폭의 파형이 나타나지만 마취 심도가 깊어짐에 따라 점차 감소할 수 있어서 비탈분극성 근육이완제(nondepolarizing muscle relaxant; rocuronium, vecuronium, atracurium)의 사용에 주의해야 한다.

수술에 따라 전기자극을 항전압성(constant voltage) 또는 항전류성(constant current)으로 할지, 단극성(mono-polar) 또는 양극성(bipolar) 자극을 할 지 결정한다. 예를 들면 전정신경종 수술에서 안면신경을 자극할 때 항전압성 1~2 V 단극성 자극을 사용한다.

기록전극을 설치하는 근육은 제3,4,6뇌신경의 지배를 받는 외안근, 제5뇌신경[관자근(temporalis), 깨물근(masseter)], 제7뇌신경[이마근(frontalis), 눈둘레근(orbicularis oculi), 입둘레근(orbicularis oris), 턱끝근(mentalis)], 제9뇌신경[연구개 근육(soft palate muscle)], 제10뇌신경[성대 근육(vocal cord muscle)], 제11뇌신경[흉쇄유돌근(sternocleidomastoid muscle), 등세모근(trapezius)], 제12뇌신경[혀(tongue)]이 지배하는 근육을 적절히 이용한다. 상지근으로 가시위근(supraspinatus), 어

깨세모근(deltoid), 위팔두갈래근(biceps brachii), 위팔 세갈래근(triceps brachii), 요골쪽손목굽힘근(flexor carpi radialis), 짧은엄지벌림근(abductor pollicis brevis), 새끼벌림근(abductor digiti quinti) 등을 이용하고, 하지근으로 안쪽넓은근(vastus medialis), 앞정강근(tibialis anterior), 안쪽장딴지근(medial gastrocnemius) 등을 이용한다. 척수의 신경근과 감시하는 근육은 표 4와 같다.

기록전극은 피하전극을 이용하여 기준기록전극(reference recording; cathode)은 피하에 위치시키고 4 cm 떨어진 부위에 활성기록전극(active recording; anode)을 위치시킨다. 전정신경종 수술 중에 수술시야에서 보이지 않는 종양 주위에 안면신경의 위치를 확인하기 위하여 triggered EMG를 하여 안면신경 위치를 확인한다. 또한 종양을 절제하면서 triggered EMG를 동시에 함으로써 수술 후 안면마비 발생을 줄일 수 있다. 척수고정술(instrumentation)을 하는 경우에 하지근육에서 spontaneous EMG를 할 수 있다. 만일 pedicle screw가 신경근에 손상을 주면 수술 후 신경근 병변이 발생할 수 있으므로 triggered EMG (pedicle screw를 직접 전기자극)를 하여 하지근육의 EMG activity를 확인한다. 상하지 근육에서 Triggered EMG 활성이 없으면 pedicle screw가 안전하게 위치하고 있다고 볼 수 있다. 또한 강직성 뇌성마비 환자에서 강직을 교정하기 위하여 선택적 후근 절제수술(selective posterior rhizotomy)을 하기 위하여 후근(dorsal root)에 전기자극하여 하지에서 관찰된 EMG activity가 자극한 쪽의 반대편 하지 근육까지 나타난다거나 동측의 두 척수수준(spinal cord level) 이상 떨어진 근육에서도 관찰되는 신경소근(dorsal rootlet)을 절제하게 된다.¹³

7) 기타 검사

일반적으로 필요에 따라 신경전도검사도 할 수 있다. 특히 전정신경종양은 청신경 손상을 막기 위해서 청각자극을 하고 근위부 청신경에서 특수한 전극을 이용해서 CNAP를 기록할 수 있다. 안면신경연축(hemifacial spasm)에 대한 안면신경과 전하부소뇌동맥 또는 상부소뇌동맥의 미세혈관감압술(microvascular decompression; MVD)을 할 경우 검사실의 순목반사검사와 같이 안면신경 분지를 자극하고 안면근육에서 CMAP를 기록하는 방법을 사용할 수 있다.

3. 수술 중 신경계 감시의 응용

흔히 사용되고 있는 수술과 그 때 사용되는 신경계 집중

감시방법을 간단히 설명하면 다음과 같다(Table 5).

1) 혈관수술

뇌동맥류, 경동맥, 대동맥, 심장수술에서 INM을 할 수 있다. 환자의 상태에 맞게 INM을 결정할 수 있는데, 경동맥과 심장수술의 경우는 EEG와 TCD 감시에 중점을 두고, 대동맥수술에서는 MEP와 SEP 감시에 중점을 둔다.

(1) 경동맥내막절제술(carotid endarterectomy; CEA)

국내에서도 뇌졸중이 서구와 비슷한 양상으로 변화하고 있기 때문에 경동맥내막절제술이 활성화되고 있다. 수술 중 합병증은 일반적으로 유병률 1.5~16%, 사망률 0~5% 정도이다. 합병증은 크게 수술 중 또는 수술직후 뇌졸중과 관련된 합병증과 외과적 시술에 의한 수술 주변 부위의 신경계 손상으로 나누어 볼 수 있다. 일반적으로 수술 자체에 의한 국소적 신경계 손상은 매우 드물고 뇌졸중과 관련된 합병증이 많다. 수술받은 환자 중 5.5%에서 뇌졸중이 나타났는데 3.7%는 경도, 1.5%는 중증도의 뇌졸중이었고, 0.3%는 사망하였다. CEA 합병증과 관련된 원인들로는 첫째, 수술 중 색전증 또는 내경동맥 교차결찰(cross-clamping of ICA) 시 뇌허혈, 둘째, 수술직후 내경동맥 혈전성 폐쇄(thrombotic occlusion of ICA) 또는 혈류 증가로 인한 뇌출혈, 셋째, 그 외에 다른 혈관 문제(심근경색, 울혈성심부전증, 부정맥 등) 때문에 발생한 것으로 정리할 수 있겠다.

이러한 문제점을 수술 중 파악하거나 예방하기 위해 EEG, SSEP, TCD 감시를 한다. EEG는 경동맥을 교차결찰할 때 측부순환이 부족하여 경동맥에 의해 혈액을 공급받던 부위가 허혈상태가 되면 20초 이내에 뇌파에 변화가 나타난다. 이 경우 뇌졸중이 발생할 가능성이 높으므로 선트를 설치한 후 수술을 한다면 수술 중 발생할 수 있는 뇌졸중의 위험을 감소시킬 수 있다. SSEP 역시 정중신경 경로를 통해 걸질하구조물과 중대뇌동맥 부위의 이상 여부를 후경골신경 경로를 통해서 걸질하구조물과 전대뇌동맥 부위의 허혈상태를 판단할 수 있다. TCD로는 절대적인 혈류속도를 파악할 수 있음은 물론 색전의 발생을 확인할 수 있다. 또한 수술 종료 시 혈류 속도가 2배 이상 증가하는 과관류가 있을 때는 뇌출혈의 위험성이 10배 높으므로 지속적으로 수술 후에도 뇌혈류를 감시하면서 혈압을 조절하고, 항혈소판제 사용을 금지하고, 임상증세를 관찰해야 한다.

(2) 심장수술

심장수술의 사망률은 1%, 유병률은 2~55% 정도로 알려져 있다. 그러나 신경심리검사를 하면 장애를 나타내는 경우가 25~70% 정도로 나타나기도 한다. 특히 기억력, 고도의 운동기능, 주의 집중력이 감소한다고 알려져 있다. 이러한 원인으로는 저혈압에 의한 뇌혈류 감소와 뇌색전증을 고려할 수 있다. TCD 감시를 통해 혈류감소군과 정상군의 비교 연구에서는 뚜렷한 차이가 없어, 수술 중 저체온상태로 뇌대사율이 감소하여 뇌혈류 감소에 내성이 있을 수 있다. 따라서 뇌혈류 감소보다는 색전증이 주요 원인일 수 있다. 색전증은 HITS를 통해 확인할 수 있는데, 고형의 색전물질(solid emboli)이 아니더라도 200개 미만은 9%에서 신경학적 결손이 나타났지만 500개 이상은 31%, 1,000개 이상은 43%에서 신경학적 결손이 나타나 HITS 수와 신경학적 결손 정도는 좋은 상관관계를 나타낸다고 알려져 있다. 이러한 HITS는 심장과 대동맥의 조작이나 대동맥 교차결찰 중에 주로 발생하지만 알 수 없는 원인에 의해서도 30% 정도 발생한다고 한다.

(3) 대동맥수술

대동맥 동맥류 또는 박리증은 매우 위험하다. 특히 하행 대동맥을 침범하는 경우는 수술범위에 척추동맥을 포함될 수 있으므로 수술 후 척수경색으로 하지마비를 일으킬 수 있다. 이를 예방하기 위해서 SSEP와 MEP 감시를 사용할 수 있다.

2) 후두와수술

후두와의 경우는 안면신경과 청각신경의 말초신경 감시와 뇌간기능의 감시로 나눌 수 있다. 흔히 소뇌-뇌교각 종양의 경우 수술 후 청각소실은 물론 안면마비의 위험성이 높아 이에 대한 감시가 필요하며, 뇌간 병변의 경우는 뇌간 신경경로를 통한 감시가 필요하다.

(1) 전정신경종양수술

전정신경종양수술에서 BAEP와 안면신경 EMG로 추적 감시를 할 수 있다. 뇌간에 영향이 있을 경우 청각유발전위 제5파형에 이상(wave V의 1 msec 이상 절대잠복기 연장, 50% 이상 진폭 감소)이 관찰되며, 청신경에 이상이 있을 경우 제1파형부터 이상이 나타난다. 또한 안면신경이 지배하는 눈돌레근(orbicularis oculi)과 입돌레근(orbicularis oris) 등에서 EMG 기록을 하여 종양에 눌러 압박해진 안면신경이 손상을 받지 않게 할 수 있다. 종양을 절개한다거나 종양을 조금씩 절제할 때 단극자극을 하여 안면근육에서 근전도 반응이 나타나는지 확인하면서 수술을

할 수 있다. 전정신경종양수술 후 안면신경마비가 수술 중 신경계 감시를 한 군에서 현저히 감소한다고 알려져 있다.¹⁴ 미국국립보건원에서는 전정신경종 치료의 합의 보고서에서 안면신경감시가 필요하다고 발표하였다. 최근에는 청각신경 위에서 CNAP를 기록하는 방법이 도입되었다. 뇌 영상의 발달로 초기에 전정신경종을 발견할 수 있고, 이 때 안면신경은 물론 청신경까지도 보존하기 위하여 특수 기록전극을 이용하여 직접 제8뇌신경의 CNAP를 감시한다.

제4뇌실 종양의 경우 안면신경핵(facial colliculi)을 피해서 절개하기 위해 triggered EMG로 안면신경핵을 확인한 후 수술을 하며, 뇌간의 손상 정도를 SSEP와 BAEP 감시를 통해서 확인할 수 있다.

(2) 미세혈관감압술

반측안면연축(hemifacial spasm)은 전하부소뇌동맥 또는 상부소뇌동맥이 안면신경을 압박하여 발생할 수 있다. 이 때 미세혈관감압술을 하게 되는데 안면신경과 청각유발전위 감시를 통해서 안면신경과 뇌간의 손상을 막을 수 있다. 특히 안면신경의 하악분지를 자극하면 다른 안면신경분지에 의해 지배를 받는 근육에서도 수축이 일어나는 측면전파반응(lateral spread response: LSR)이 일어나는데 수술 중 특히 안면신경을 혈관에서 분리하면 즉시 LSR가 소실되는 것을 관찰할 수 있어 매우 유용하게 이용된다(Fig. 2).

3) 중심구 주변 병변

뇌수술 중에 중심구 위치를 확인하여 운동 및 감각영역이 손상받지 않게 하는 것은 중요하다. 실제 흔히 이용되는 방법으로는 대뇌겉질전기자극법과 유발전위법을 들 수 있다. 전기자극법은 시간이 오래 걸리고 힘들며, 환자를 깨워야 하기도 하며, 반응이 나타나지 않을 때 기능이 없다고 말하기 힘든 단점이 있다.¹⁵ 이에 반해 유발전위방법은 아주 쉽고 빨리 결과를 얻을 수 있는데, Woolsey 등은 겉질 전기자극에 반응을 나타내는 신체 부위에 따라 SSEP를 기록할 수 있었다고 보고하였다.^{16,17} 일반적으로 정중신경 SEP는 중심구를 중심으로 두피에서 12 cm 정도의 구간에서, 대뇌겉질에서는 2 cm 정도의 구간에서 상역전을 보인다(Fig. 3). 또한, 전두엽에서는 양극으로, 두정엽에서는 음극으로 관찰되어 20 msec 정도 잠복기를 갖는 파형들은 중심구를 중심으로 상역전(phase reversal: PR)을 나타낸다.¹⁸ 이러한 정중신경 SEP의 상역전은 1970년대부터 중심구를 찾는 하나의 방법으로 이용되어 왔다.¹⁹

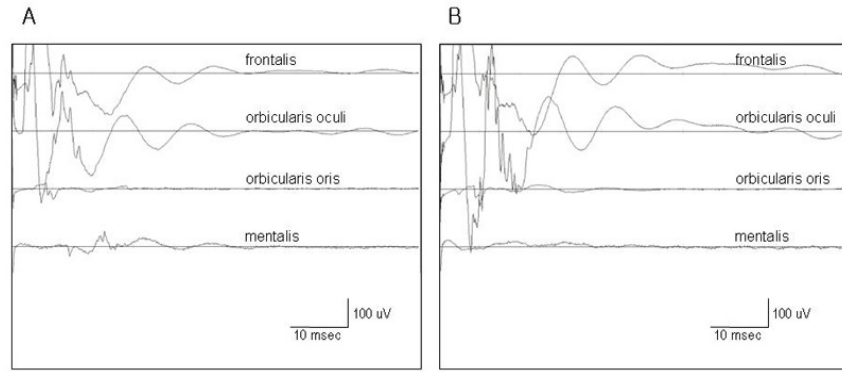


Figure 2. Lateral spread response in hemifacial spasm. (A) Baseline triggered EMG demonstrates that stimulation on zygomatic branch of facial nerve evokes EMG responses of frontalis, orbicularis oculi and mentalis. Especially the responses of mentalis indicated lateral spread response (B) After microvascular decompression of facial nerve, the lateral spread response of mentalis disappears.

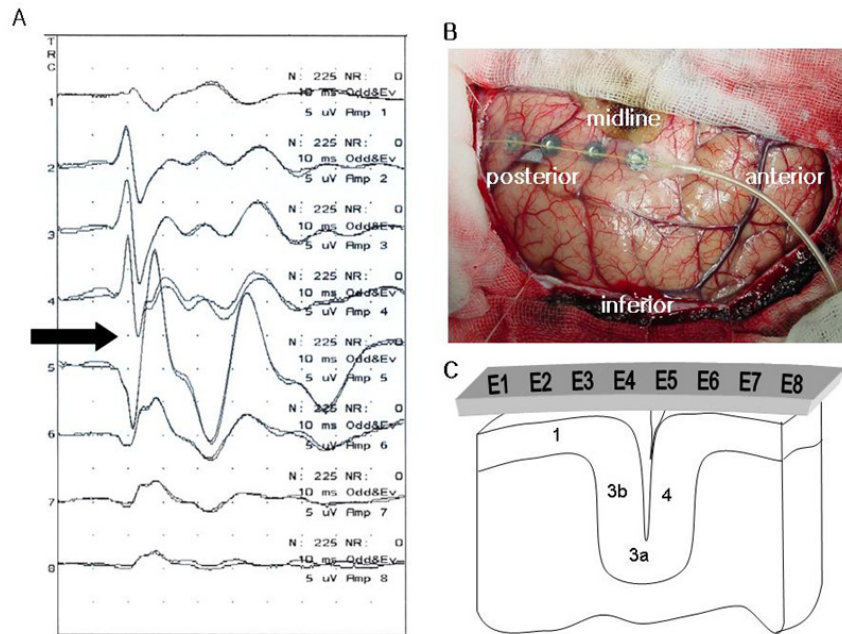


Figure 3. Localization of central sulcus. The cortical potentials are recorded on subdural electrode by median nerve stimulation. (A) Phase reversal of cortical waves between trace 4 and trace 5 is observed around 20 msec (arrow). TRC: trace, vertical scale: 5 uV, time base: 100 msec. (B) The photography shows subdural strip electrode (1×8) on the exposed cortical areas. (C) Schematic drawing shows the electrode relation to the central sulcus. There is central sulcus between electrode 4 (E4) and electrode 5 (E5). 1, 3a, 3b, 4 mean Brodmann area 1,3a, 3b, and 4.

4) 척추수술

척추종양수술에서 SSEP와 MEP를 할 수 있다. 특히 SSEP만 하면 병변이 있어도 확인하지 못하는 경우가 25% 까지 있을 수 있으므로 동시에 하는 것이 더 효과적이다.^{8,20} MEP의 변화를 50%로 볼 경우 26%까지 이상을 확인할 수 있었으며 그 중 55%는 위양성일 수 있으며, 80%

의 기준을 사용할 경우 특이도가 높아지면서 10%까지 이상이 감소되지만 2%에서는 위음성으로 나올 수 있다. 따라서 예방적 차원의 안전성을 고려한 수술의 경우는 50% 기준이 더욱 적합할 수 있다.⁸

척추수술에서 감각유발전위와 운동유발전위를 통해 신경계의 손상을 감소시킨다. 척추수술 126명 중 경우 82%

에서 SSEP과 MEP 감시를 성공적으로 할 수 있었다고 보고하였다.²⁰ 특히 최근의 경추수술에서는 SSEP보다 MEP 감시가 더욱 효과적인 것으로 보고하였다.²¹ 척추수술에서 척추고정술을 할 경우 pedicle screw를 박을 때 triggered EMG와 spontaneous EMG로 확인하여 수술로 인한 신경근 병증을 방지할 수 있게 된다. 대단위 연구에 의하면 5~6%에서 pedicle screw의 위치가 잘못될 수 있는데, pedicle screw stimulation (PSS) 방법으로 94%에서 효과적이었으며, 다른 방법인 투시요법(fluoroscopy)에 의한 63%, 촉감으로 확인한 경우 11%에 비해 월등히 좋았다.¹² PSS는 pedicle 내에서 16 mA 자극을 가할 때 정상에서 EMG 반응이 나타나는데 비해서, 5 mA에서 나타날 경우 불안정한 screw, 6 mA 이하에서 반응이 나타날 경우는 후근신경과의 접촉을 시사한다.²²

강직성뇌성마비(spastic cerebral palsy) 환자에서 강직을 교정하기 위해 선택적후근절제(selective dorsal rhizotomy)를 하는데 좌우측 하지의 근육[안쪽넓은근, 앞정강근, 넓다리뒤근육(hamstring muscle), 안쪽장딴지근]에서 기록을 하고 각 소근(rootlet)을 이극성 자극기로 자극하여 나타나는 근전도 반응을 grading하여 grade 3 이상을 나타낸 소근(rootlet)에서 신경근절개술(rhizotomy)을 하게 된다.

5) 기타수술

난치성 간질에서 뇌절제 수술을 할 때 경질막하전극(subdural electrode)을 이용하여 길질뇌파술을 하여 간질간 발작파가 많이 나오는 부위(irritative zone)를 결정하는 데 도움을 준다.

4. 신경계 감시의 결과와 필요성

Nuwer 등은 다기관 연구를 통해 척추측만증 수술 후의 신경장애를 감각유발전위 감시를 통해 감소시킬 수 있다고 보고하였다.²³ 97,658건의 척추측만증 수술 중 53%인 51,263건에서 SSEP 감시를 하였으며 주요 신경학적 결손을 나타낸 경우는 비감시군에서 0.61%, 감시군에서는 0.24%로 유의한 차이가 있었다고 보고하였다. Dawson 등의 Scoliosis Research Society와 European Spinal Deformities Society에서 확인된 보고에 의하면 51,000건의 척추수술 결과를 비교할 때 전체 손상률은 0.55%였으며 SSEP 감시를 하지 않은 경우는 4%였다.²⁴

척추고정술에 대한 Owen의 발표를 보면 pedicle screw가 잘못 위치한 경우는 5.5%에서 28%를 나타낸다고 보고하였으며 EMG 감시군 185명 중 1.1%에서 신경계 합병증

이 나타난 반면 EMG 비감시군은 7.4%였다.²⁵

청신경중 수술에서 Yingling 등은 수술 후의 안면신경 마비를 House-Brackmann로 나눈 후 심한 안면 마비를 나타내는 grade V/VI는 안면신경 감시를 하지 않은 643명 중 12%인 반면, 감시를 한 441명에서는 4%로 차이가 있었다고 보고하였다.¹⁴

결 론

INM은 환자 상태와 수술 방법에 따라 다양한 검사를 이용하게 된다. 각각의 병원마다 환자 질환군과 수술방법이 다르므로 이에 맞추어 적합한 INM을 개발하여 발전시키는 것이 필요하다. 일반적으로 BAEP, SEP, MEP를 포함하고, EEG, EMG, NCS, TCD를 추가적으로 이용하여 수술 중 다양한 전기생리학적 변화를 적절히 발견하고, 정확히 해석해야 한다. 이를 위하여 마취과, 외과의사, 신경과 의사의 협력과 전문능력이 필요하다. 아직 INM의 필요성에 대해서는 좀 더 많은 비교 연구가 있어야겠지만, 환자에 따라서 어떤 수술에 어떤 INM을 해야 할지 충분히 고려한다면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

REFERENCES

1. Jasper HH. History of the early development of electroencephalography and clinical neurophysiology at the Montreal Neurological Institute: the first 25 years 1939-1964. *Can J Neurol Sci* 1991;18:533-548.
2. Scoliosis Research Society. 25th annual meeting. Minneapolis, Minnesota, September 24-27, 1991. *Spine* 1992;17:S214-330.
3. Legatt AD. Current practice of motor evoked potential monitoring: results of a survey. *J Clin Neurophysiol* 2002;19:454-460.
4. Legatt AD. Mechanisms of intraoperative brainstem auditory evoked potential changes. *J Clin Neurophysiol* 2002;19:396-408.
5. Burke D, Nuwer MR, Daube J, Fischer C, Schramm J, Yingling CD, et al. Intraoperative monitoring. The International Federation of Clinical Neurophysiology. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl* 1999;52:133-148.
6. Owen JH, Bridwell KH, Grubb R, Jenny A, Allen B, Padberg AM, et al. The clinical application of neurogenic motor evoked potentials to monitor spinal cord function during surgery. *Spine* 1991;16:S385-390.
7. Hallett M. Transcranial magnetic stimulation: a primer. *Neuron* 2007;55:187-199.
8. Weinzierl MR, Reinacher P, Gilsbach JM, Rohde V. Combined motor and somatosensory evoked potentials for intraoperative monitoring: intra- and postoperative data in a series of 69 operations. *Neurosurg Rev* 2007;30:109-116;

- discussion 116.
9. Woodforth IJ, Hicks RG, Crawford MR, Stephen JP, Burke DJ. Variability of motor-evoked potentials recorded during nitrous oxide anesthesia from the tibialis anterior muscle after transcranial electrical stimulation. *Anesth Analg* 1996;82:744-749.
 10. Langeloo DD, Journee HL, de Kleuver M, Grotenhuis JA. Criteria for transcranial electrical motor evoked potential monitoring during spinal deformity surgery A review and discussion of the literature. *Neurophysiol Clin* 2007;37:431-439.
 11. Jameson LC, Sloan TB. Monitoring of the brain and spinal cord. *Anesthesiol Clin* 2006;24:777-791.
 12. Leppanen RE, Abnm D, American Society of Neurophysiological M. Intraoperative monitoring of segmental spinal nerve root function with free-run and electrically-triggered electromyography and spinal cord function with reflexes and F-responses. A position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring. *J Clin Monit Comput* 2005; 19:437-461.
 13. Staudt LA, Nuwer MR, Peacock WJ. Intraoperative monitoring during selective posterior rhizotomy: technique and patient outcome. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995;97:296-309.
 14. Yingling CD, Gardi JN. Intraoperative monitoring of facial and cochlear nerves during acoustic neuroma surgery. *Otolaryngol Clin North Am* 1992;25:413-448.
 15. Duffau H, Capelle L, Sichez J, Faillot T, Abdenmour L, Law Koune JD, et al. Intra-operative direct electrical stimulations of the central nervous system: the Salpetriere experience with 60 patients. *Acta Neurochir (Wien)* 1999;141:1157-1167.
 16. Woolsey CN, Erickson TC, Gilson WE. Localization in somatic sensory and motor areas of human cerebral cortex as determined by direct recording of evoked potentials and electrical stimulation. *J Neurosurg* 1979;51:476-506.
 17. Woolsey CN, Erickson TC. Study of the postcentral gyrus of man by the evoked potential technique. *Trans Am Neurol Assoc* 1950;51:50-52.
 18. Allison T, McCarthy G, Wood CC, Jones SJ. Potentials evoked in human and monkey cerebral cortex by stimulation of the median nerve. A review of scalp and intracranial recordings. *Brain* 1991;114(Pt 6):2465-2503.
 19. Kombos T, Suess O, Funk T, Kern BC, Brock M. Intraoperative mapping of the motor cortex during surgery in and around the motor cortex. *Acta Neurochir (Wien)* 2000;142: 263-268.
 20. Pelosi L, Lamb J, Grevitt M, Mehdian SM, Webb JK, Blumhardt LD. Combined monitoring of motor and somatosensory evoked potentials in orthopaedic spinal surgery. *Clin Neurophysiol* 2002;113:1082-1091.
 21. Hilibrand AS, Schwartz DM, Sethuraman V, Vaccaro AR, Albert TJ. Comparison of transcranial electric motor and somatosensory evoked potential monitoring during cervical spine surgery. *J Bone Joint Surg Am* 2004;86-A:1248-1253.
 22. Danesh-Clough T, Taylor P, Hodgson B, Walton M. The use of evoked EMG in detecting misplaced thoracolumbar pedicle screws. *Spine* 2001;26:1313-1316.
 23. 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. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995;96:6-11.
 24. Dawson EG, Sherman JE, Kanim LE, Nuwer MR. Spinal cord monitoring. Results of the Scoliosis Research Society and the European Spinal Deformity Society survey. *Spine* 1991;16: S361-364.
 25. Owen JH. Intraoperative stimulation of the spinal cord for prevention of spinal cord injury. *Adv Neurol* 1993;63:271-288.