

## Review Article

# 척추 수술에서의 수술 중 신경계 감시

김준순, 박경석\*

분당서울대학교병원 서울대학교 의과대학 신경과

## Intraoperative neurophysiologic monitoring in the spine surgery

Jun-Soon Kim, Kyung Seok Park\*

Department of Neurology, Seoul National University Bundang Hospital, Seoul National University College of Medicine, Seongnam, Korea

### ABSTRACT

Intraoperative neurophysiologic monitoring (INM) has been growing up as an indispensable method to reduce the risk of the operation-related neuronal damage in various kinds of spine surgeries during the last four decades. To maximize the efficiency of INM, nowadays, many neurophysiologists continue to research the application of the novel techniques and the optimization of the existing modalities such as somatosensory evoked potentials (SSEP), motor evoked potentials (MEP), electromyography (EMG), etc. In this article, we review not only the current technique of various INM modalities using in the spine surgery but also the clinical meaning of the INM regarding the diagnostic value for the detection of neural damage during the surgery and the therapeutic value for the decrease of the postoperative neurologic deficits in the spine surgery.

**Keywords:** electromyography; spine surgery; evoked potential, motor; evoked potentials, somatosensory; intraoperative neurophysiologic monitoring

## 서론

수술중신경계감시(intraoperative neurophysiologic monitoring, INM)는 다양한 종류의 신경계 수술에서 수술 도중 발생할 수 있는 운동계, 감각계 및 기타 반사로(예, 구해면체근 반사) 손상의 위험도를 실시간으로 감시하여, 실제 신경 손상이 비가역적으로 진행되는 것을 사전에 막고자 도입이 되었고, 신경 손상 위험을 최대한 초기에 감지할 수 있도록 다양한 감시 기법의 개발 및 조건의 최적화를 위한 연구들이 꾸준히 이뤄지고 있다. 척추 수술의 경우, 상대적으로 작은 직경의 면적에 운동/감각 신경로가 밀집되어 있는 척수(spinal cord) 조직의 해부학적 특성 및 교정 수술의 경우 광범위한 레벨의 접근 및 교정이 필요하는 등, 신경계 손상 위험이 높은 경우가 많아, 수술중 신경계감시의 역할이 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 종설에서는 현재 척추 수술에서 활용되는 각종 INM 기법 및 INM이 실제 환자의 수술 중 신경계손상을 감지하고(diagnostic), 수술 후 환자의 예후를 호전시키는(therapeutic) 데 있어 얼마

나 유용한지, 현재까지 발표된 연구들의 결과들을 종합해 봄으로써, 향후 척추 수술 분야에서 INM의 역할에 대해 생각해 보고자 한다.

## 본론

### 1. 척추 수술의 수술중신경계감시에 사용되는 검사 종류 및 활용법

체성감각유발전위(somatosensory evoked potential, SSEP) 및 운동유발전위(motor evoked potential, MEP)의 경우는 뇌수술뿐 아니라, 모든 종류의 척추 수술의 INM에 기본적으로 사용되는 방법이다. 이 두 항목의 기본 생리 및 관련 해부학적 구조물, 자극 관련 인자(stimulating parameters), 수술에의 적응 등에 대해서는 지난 대한수술중신경계감시 학회 창간호에서 종설의 주세로 자세히 다뤄졌던 바[1], 이번 종설에서는 간략히 언급할 예정이며, 그 외 척추수술의 INM에서 사용되는 근전도, 척수 지도화(spinal cord mapping) 및 구해면

Received July 9, 2019; Revised August 4, 2019; Accepted August 6, 2019

\*Corresponding author: Kyung Seok Park, Department of Neurology, Seoul National University Bundang Hospital, 82, Gumi-ro 173 gil, Bundang-Gu, Seongnam 13620, Korea

Tel: +82-31-787-7466, Fax: +82-31-718-9327, E-mail: kspark@snuh.org

© 2019 Korean Society of Intraoperative Neurophysiological monitoring (KSION)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

체근반사(bulbocarvenous reflex, BCR) 감시에 대해 추가적으로 다루고자 한다.

### 1) 체성감각유발전위(somatosensory evoked potential, SSEP)

SSEP는 상하지의 말초신경에서 전기자극을 주고 말초, 척수, 겹질하구조물 및 겹질에서 파형을 기록하는 방법으로, 상지의 경우는 손목의 정중신경(median nerve)에서 출발해 팔 신경얼기(brachial plexus)를 지나 척수뒤기둥(dorsal column)으로 분포하며, 하지의 경우는 발목부위의 후경골신경(posterior tibial nerve)을 자극해 허리엉치신경얼기(lumbosacral plexus)를 통과해 척수뒤기둥으로 진입하게 된다. 이후 척수뒤기둥의 감각신경로는 연수핵(뺨기핵; cuneate nucleus 및 널판핵; gracile nucleus)에서 시냅스를 이루고 내측섬유대(medial lemniscus)에서 교차, 이후 시상핵에서 마지막 시냅스 형성 후 감각피질(sensory cortex)에 도달하게 되며, SSEP는 상기 경로를 감시하는 전기생리학적 검사법이 되겠다. 상지 SSEP는 손목에서 자극 후, 기록하는 위치에 따라 N9, N13, N20 반응 파형을 얻을 수 있고, 하지 SSEP는 발목부위 후경골신경 자극 후, 역시 기록 전극 위치에 따라 N22, N34, P45 반응 파형을 기록할 수 있다(Table 1). SSEP는 척추수술의 경우, 환자의 운동신경기능 손상 여부를 판단하는 데 있어서는 MEP보다 열등하다고 알려져 있으나[2,3], 척수뒤기둥의 감시(뒤쪽척수동맥영역; posterior spinal artery territory)에는 유용하게 활용 가능하며, 또한 척수절개술(myelotomy)의 정확한 위치화

**Table 1. Potential generator of somatosensory evoked potential (SSEP)**

Upper extremity	Potential generator	Near/far-field potential <sup>1)</sup>
Upper extremity SSEP		
N9	Brachial Plexus (near Erb's point)	Near-field
N13	Cervical spine (dorsal gray)	Near-field
P14	Caudal medial lemniscus	Far-field
N18	Medial lemniscus-Thalamus	Far-field
N20	Cerebral sensory cortex	Near-field
Lower extremity SSEP		
PF	Popliteal fossa	Near-field
N22	Lumbar spine (dorsal gray)	Near-field
N34	Medial lemniscus-thalamus	Far-field
P45	Cerebral sensory cortex	Near-field

<sup>1)</sup> Since a near-field potential is one that is obtained with the recording electrode in relatively close proximity to the signal generator, the latency/amplitude of the wave can be variable according to the location of recording electrode. Otherwise, the latency/amplitude of a far-field potential is relatively constant because a potential is generated at a distance from the recording electrode.

(localization)가 필요하거나, MEP의 기준파형이(baseline potential) 얻어지지 않는 수술 등에서는 그 역할이 매우 중요하게 된다[4-6]. 척추의 수술 부위와 관계 없이 상/하지 모두에서 SSEP를 감시하는 것이 중요한데, 그 이유는, 예를 들어 흉추수술의 경우, 하지 SSEP의 수술 중 변화가 실제 수술 과정에서의 척수손상 때문인지, 전신적으로 SSEP 파형에 영향을 끼칠 수 있는 원인(마취제 심도의 변화, 체온/혈압 강하 등)에 의한 것인지, 상지 SSEP를 대조군으로 활용함으로써 감별이 가능하기 때문이다. SSEP의 경우, 전통적으로 1970년대 이래로, 기준파형 대비 수술 중 '진폭의 50% 이상 감소, 혹은 잠복기의 10% 이상 연장'이 보편적인 경고기준으로 사용되어 왔다[7]. 하지만 잠복기 연장의 경우 '탈수초화'가 주된 병리 기전인데, 탈수초현상은 아급성-만성으로 진행되는 것으로, 수술 도중 급격히 발생하기 어려워 상대적으로 잠복기 감시의 효용이 떨어진다는 점, 그리고 수술의 종류에 따라 수술 도중 '기준파형'의 크기 자체가 자연스럽게 바뀔 수 있다는 점(예: 척추측만증 교정 수술의 약 20%에서 수술 초기 기준파형의 크기가 50% 이상 수술 도중 실제 신경로의 손상 없이 감소 가능함 [8,9]) 등에서 최근 '적응성(adaptive) 경고 기준' 사용을 권장하기 시작했다[7]. 이는 점진적인 SSEP 변화의 추세를 관찰하면서 비교적 갑자기 그 추세에서 벗어나는 경우에 경고해야 한다는 것으로, 재현성(reproducibility)이 높은 경우는 조금의 변화도 경고의 근거가 될 수 있지만, 재현성이 낮은 경우는 50% 이상 진폭이 감소하거나, 명확한 이상이 발생한 경우에만 경고하는 것을 권장하고 있다. 이 '적응성 경고 기준'을 적용하기 위해서는 수술 전체의 흐름을 파악하고, 수술의 종류 및 위치, 사용되는 마취제, 특이적으로 발생 가능한 환자 전신 생체징후의 변화 등에 대한 정보를 가진 상태에서, 추세의 변화와 국소적인 돌발적 변화를 구분 가능한 숙련된 모니터링 의사가 필요하게 된다.

### 2) 운동유발전위(motor evoked potential, MEP)

#### (1) 근육 MEP(muscle MEP)

척추 수술에서의 근육 MEP 감시는 경두개전기자극(Transcranial electrical stimulation, TES) 후 말초 근육에서 복합운동화 동전위를 기록하는 것으로, 운동신경로(피질척수로)를 감시하고자 하는 목적이다. 국제 10-20 뇌파 체계(10-20 system)에서 C3 및 C4를 자극하면 양극(anode)의 반대쪽 팔/다리의 MEP를 기록할 수 있는데, C3/C4 자극은 깊은 위치까지 자극이 전달되며, C1/C2를 사용하게 되면 자극 깊이가 얕아지게 된다[10]. 상부운동신경세포인 피라미드 세포의 흥분 신호를 척수 레벨에서 직접 기록하는 D-파형(D-wave)과 달리 근육 MEP는 하부운동신경세포로의 연결(synapse)을 거치고, 신경 근접합부도 통과해서 기록되는 파형이므로, 역치를 넘기 위해

서 다중자극(multipulse)이 기본적으로 필요하게 되며, 척수에서 다양한 사이신경세포(interneuron)의 영향으로 하부운동신경세포의 흥분성(excitability)에 민감하게 반응할 수밖에 없다. 이런 특성으로 '자극간 변이성(inter-trial variability)'이 큰 특징을 가지게 되며, 척수내종양수술의 경우, 직접적인 피질척수로의 손상 없이 주변부의 하부운동신경세포의 흥분성에 영향을 미치는 부위의 이상으로 근육 MEP가 소실되는 경우가 가능한데, 이 경우는 근위약이 없거나, 있더라도 일시적인 경우가 많다[10].

MEP를 기록하는 근육을 선택함에 있어서는 수술 부위와 관계 없이, 기본적으로 상하지 양측 근육이 모두 선택되어야 하며, 일반적으로 많은 기관에서 상지의 경우는 짧은엄지벌림근(abductor pollicis brevis, APB), 새끼벌림근(abductor digiti minimi, ADM), 하지의 경우는 앞정강근(tibialis anterior, TA), 엄지벌림근(abductor hallucis, AH)을 기록근육으로 사용하며, 그 외 수술 레벨에 따라 삼각근(deltoid, Del), 가쪽넓은근(vastus lateralis, Val) 등의 기타 근육들이 추가로 선택되기도 한다. 하지의 경우, TA와 AH 근육은 가능하면 두 근육 모두 사용하기를 권고하며, 그 이유는 TA, AH 근육이 운동신경로 손상 여부를 감지하는 데 다른 패턴을 가져 상호보완적으로 활용될 수 있기 때문인데, 최근 발표된 연구에서, 척수 운동신경의 손상 감지에 있어 TA 근육이 AH 근육에 비해 높은 민감도를 가지는 반면, AH 근육이 소실되었던 MEP의 회복에 있어서는 TA 근육에 비해 높은 민감도를 보이면서 수술 후 운동기능 결손에 대해 높은 양성예측율을 가짐이 밝혀졌다[11]. 그 외 MEP 감시를 이용함에 있어 한 가지 더 고려해야 할 사항은, 기본 파형(baseline potential)이 제대로 기록되는지 여부이다. 수술 중 신경계 손상을 감지하기 위한 전제 조건은 비교 가능한 기준파형이 있어야 한다는 것이므로, 수술 시작 시에 기본 파형을 얻을 수 없게 되면, 모니터링의 활용도가 떨어지게 된다. 과거에 환자의 연령이나 수술 전 근력이 척추수술의 MEP 기본파형의 생성에 영향을 미칠 수 있다는 결과들이 발표된 적 있으나[12], 적은 수의 환자들을 대상으로 제한된 임상지표를 이용한 연구들이었다. 최근 본 연구그룹이 345명의 척추수술 환자를 대상으로, 수술 부위에 따른 MEP 기본파형 기록 실패의 위험인자를 분석한 결과, 경추 부위 수술의 경우는 수술 전 근력 저하(MRC Gr III 이하) 및 척수 MRI T2-강조영상에서의 신호증가가 유의미하게 MEP 기본파형의 생성 실패와 연관성을 보였고, 흉추 부위 수술에서는 수술 전 근력 저하(위와 동일) 및 남자 성별이 MEP 기본파형 생성 실패의 유의미한 위험인자로 밝혀졌다[13]. 환자의 수술 전 평가(임상 관련 인자 및 영상 분석)를 통해 MEP 기본파형을 얻음에 있어 제한적일 것이라 예상되는 경우는 여러 종류의 근육에서 기록을 준비하거나, MEP 파형 생성을 강화할 수 있다고 밝혀진 말

초신경의 강직(tetanic) 자극 등의 보조 자극 요법을 준비하는 것도 하나의 방법일 것이다[14].

MEP의 경고 기준에 대해서는 크게 일정 비율 이상의 파형 진폭 감소, 파형 소실, 혹은 파형 형성에 필요한 자극 문턱값(threshold)의 증가 여부 등으로 평가하게 된다. 진폭감소의 경우, 기준치 대비 50% 이상 감소, 80% 이상 감소 등 다양한 기준들이 이용되고 있으며[15,16], 파형 소실의 경고 기준보다 높은 민감도를 가지는 장점이 있으나, 앞에서 언급했던 '자극간 변이성(inter-trial variability)'이 높은 MEP의 특성 상[17], 병적인 감소와 무작위적인 변화의 감별이 쉽지 않은 단점이 있다. 자극 문턱값 증가 기준은 초기 설정한 문턱값이 100 V 이상 상승하는 경우로, MEP 진폭 감소나 파형 소실에 선행하는 민감한 기준이나, 실제로 널리 사용되지는 않고 있다[18]. 파형 소실 경고 기준의 경우, 다른 두 방법에 대해 상대적으로 민감도는 떨어지더라도[19,20], 자극간 변이성의 문제를 극복할 수 있고, 위양성률을 낮출 수 있다는 장점이 있다. 또한 수술 후 장기적인 운동기능의 예후와 관련해서는 진폭감소 기준의 적용 시와 비슷한 민감도를 보임이 밝혀져[21], 최근 MEP 경고 기준에 있어서는 가장 포괄적으로 적용되는 기준법이 되겠다[18].

## (2) D-파형(D-wave)

D-파형의 경우도 지난 호 종설에서 다뤄진 내용이다. 경두개(transcranial)로 단일펄스(single-pulse)로 자극된 신호를 직접 척수의 경막외(epidural)에 위치시킨 기록전극을 통해 척수 레벨에서 직접 파형을 기록하는 방법으로, 근육 MEP에 비해 마취제 및 신경근육차단제에 상대적으로 영향을 덜 받고, 안정적으로 환자의 움직임을 유발하지 않은 채, 지속적으로 모니터링이 가능하다는 장점이 있다[22,23]. 하지만, 척수레벨에서 기록파형을 얻는 방법이기 때문에, 흉추 10-11번 상방에서만 기록이 가능하고, 척수의 가운데(mid-line)에서 기록되므로, 좌우 구분이 되지 않아, D-파형의 감소가 있을 경우 어느 쪽 피질척수로의 손상에 의한 감소인지를 알 수 없으며, 척추측만증 같은 기형 교정 수술에서는 높은 위양성(27%; 척추각도가 교정되면서 피질척수로의 3차원 위치도 바뀌어지기 때문에, 적절한 기록이 어려워질 것으로 추정됨) 및 신경뿌리 감시는 불가능하다는 단점 등이 있어 잘 사용되지 않는 측면도 있다[24].

D-파형 감시가 가장 유용하게 쓰이는 분야가 척수내종양(intramedullary spinal cord tumor) 수술인데, 일반적으로 50% 이상의 진폭의 감소를 경고 기준으로 이용하며[23], 근육 MEP보다 장기적인 환자의 운동기능을 예측하는데 정확하다는 보고들이 나와[23,25], 현재는 척수내종양 수술에서는 해당 병원에서 사용 가능하다면, 근육 MEP와 더불어 D-파형 감시



검사도 같이 시행하는 것이 강하게 권고되고 있다[22].

### (3) 신경 MEP(neurogenic MEP, nMEP)

신경 MEP는 1990년대 초, 마취제 등에 민감하게 영향을 받을 수 있는 경두개 근육MEP 대신 운동 기능을 평가할 수 있는 대체 수단으로 등장했으며, 수술 부위의 상방 레벨에서 경막외 자극을 주고, 말초 신경이나 수술 부위 하방 레벨의 경막외 기록 전극에서 파형을 기록하는 방법이다. 하지만 과연 신경 MEP가 진정 운동신경의 신호를 반영하는 것이냐에 대해 이후 논란이 지속되었고, 2000년에 발표된 '충돌 실험(Collision study)' 연구에서 신경 MEP는 역방향(antidromic) 척수뒤기둥(dorsal column)의 신호를 반영하는 것으로 기술되었고[26], 다른 그룹에서 INM에서 SSEP와 신경 MEP 모두 문제 없이 유지되었던 두 환자에서 실제 수술 후 감각 증상은 없이 하반신 마비가 발생한 케이스가[27] 발표되는 등, 현재는 신경 MEP를 운동 신경로를 감시하기 위한 목적으로 사용하는 것은 추천되지 않고 있다.

### 3) 근전도(electromyography, EMG)

#### (1) 자발 근전도(spontaneous EMG, free-running EMG)

자발 근전도 검사는 신경뿌리(nerve root)의 손상 여부를 평가하는데 유용한 검사로, 척추경(pedicle)에 나사못(screw)을 포함한 각종 수술기구들을 삽입하고 조절하는 과정에서 신경뿌리에 영향을 줄 수 있는 척추 수술에 널리 사용되고 있다. 특정 자극 없이 지속적으로 선택된 근육에서 이상 파형 발생 유무를 감시하게 되며, 수술의 위치(영향을 받을 수 있는 신경뿌리의 레벨)에 따라 적절한 기록근육이 선택될 수 있다. 주로 하나의 신경뿌리에 하나의 근육이 선택되는 경우가 많으나, 경추 수술의 경우 C5-마비의 위험도가 상대적으로 높아, 이 경우는 삼각근, 이두박근(Biceps brachii) 등 두 개의 근육을 기록근육으로 선택하는 경우도 많다[28]. 두 가지 형태의 발화(discharge)가 있는데, 일시적인 신경뿌리 자극에 의해 발생하는 비동기화된 다상성 파형인 위상성 발화(phasic discharge)와, 신경뿌리의 담김(traction)이나, 눌림, 허혈성 혹은 온도 손상 등이 발생할 경우에 보일 수 있는, 빠르고 불규칙적인 전위신호(bursts)인 긴장성 발화(tonic discharge)가 있다. 자발 근전도는 신경근접합부 차단제뿐 아니라, 온도변화에 민감한 경향이 있어 차가운 생리 식염수의 세척(irrigation)이나 지혈 도구의 사용 경우에 위양성 소견을 보일 수 있어, 여러 연구에서 신경뿌리 손상에 대해 민감도는 높으나, 특이도는 낮은 것으로 보고되었다[29].

#### (2) 유발 근전도(triggered EMG)

유발 근전도는 척추경 나사못(pedicle screw) 삽입의 정확

도를 평가하는 수단으로 사용된 것이 척추 수술에서의 첫 등장이라고 할 수 있다. 기본적으로 나사못이 뼈의 손상을 야기하지 않고 잘 삽입되었다면, 뼈는 절연체이기 때문에 삽입된 나사못을 직접 전기적으로 자극하여 그 신호가 인근의 신경뿌리에 전달되어 복합근육활동전위(compound muscle action potential, CMAP)을 생성시키기 위해서는 상당 수준 이상의 자극강도가 필요하게 될 것이다. 따라서 CMAP 생성에 필요한 가장 낮은 자극문턱값 전압(threshold voltage)을 측정함으로써, 척추경틈새(pedicle breach) 발생 여부를 평가할 수 있다. 이에 많은 척추기구고정술(spinal instrumentation) 및 융합(fusion) 수술에서 널리 사용되기 시작했고, 최근의 경우 최소 침습 척추 수술(minimally invasive spine surgery)이 늘어나면서 Kirschner 전선(K-wire)을 자극해 유발 근전도 검사를 하면서 나사못 경로(trajecory)의 정확도 여부를 평가하고 있다. 척추경 천공(pedicle perforation) 위험에 대한 경고 기준에 대해서는 여러 연구들이 이뤄졌지만, 아직 국제적으로 명확히 합의된 기준은 없는 상태이다. 한 연구는 4,800건의 요추 수술을 조사했을 때 문턱값이 8.0 mA 이상일 경우, 99.5%-99.8%의 확률로 나사못이 척추경 안에 잘 위치해 있다고 밝혔으나, 위양성률이 높은 점이 제한점이었고[30], 2,450건의 요추 수술을 대상으로 한 다른 연구에서는 5 mA를 문턱값으로 사용할 경우 위양성률은 낮출 수 있으나, 척추경틈새에 대한 민감도가 43.4%로 떨어짐을 보여줬다[31]. 흉추 수술에 대한 연구는 거의 없는 상태로, 677건의 흉추 수술을 조사한 한 연구에서 문턱값이 6.0 mA 이상인 경우, 100% 나사못이 척추경내에 위치했고, 6.0 mA보다 낮은 경우는 28.5% (21건 중 6건)에서 척추경틈새가 발견되어, 저자들은 6.0 mA를 경고 기준으로 제시한 바 있다[32]. 유발 근전도의 경고 기준에 대해서는 보다 많은 연구가 필요하며, 또한 실제로 발생한 척추경틈새가 수술 후 환자의 신경학적 증상과 얼마나 연관성이 있을지에 대한 연구도 필요할 것이다.

### 4) 척수 지도화(spinal cord mapping)

#### (1) 척수뒤기둥 지도화(dorsal column mapping, DCM)

뒤기둥지도화는 보편적으로 쓰이는 방법은 아니나, 척수내 종양 수술의 척수절개술(myelotomy) 과정에서 중앙선(midline)의 위치를 정확히 찾는 데 유용하게 활용될 수 있다. 척수 종양 수술에서 흔한 수술 후 합병증인(한 보고에 따르면 약 43%에서 발생[33]) '척수뒤기둥 이상증후군(Dorsal column dysfunction syndrome)'은 수술부위 하방의 저림, 위치/고유감각 소실, 실조성 보행, 이상과각각 등을 야기하는 것으로, 이는 대부분에서 척수절개술 과정에서 발생한 척수뒤기둥 손상이 원인으로 여겨지고 있다. 보통의 경우, 뒤정중고랑정맥(dorsal median sulcal vein)이 들어가는 중간선술기(midline raphe) 부분이

나, 양측 신경뿌리 진입부(entry zone)의 정가운데가 뒤정중 고랑(dorsal median sulcus)이기 때문에, 육안으로 해부학적 구조물들을 파악해 중간선을 정할 수 있으나, 종양의 위치, 크기, 부종, 신생혈관 생성 등에 의해 해부학적 위치가 왜곡되는 경우에는 육안으로 구분이 힘들거나 부적절한 척수절개술이 이뤄질 가능성이 높아진다. 척수외기동 지도화를 하는 기술에 관해서는 몇 가지 방법이 보고되어 있는데, 2002년에 발표된 연구에서는 척수외기동 부분을 자극하고, 양측 내측 복사뼈(malleolus)에서 역방향(antidromic) SSEP를 기록하는 방법을 사용했고[4], 2010년 연구에서는 양측 발목의 후경골신경을 자극하고, 척수 수술 부위에 위치시킨 소형 마이크로전극극자(8개의 평행으로 배열된 stainless steel 전선들로 구성됨)에서 SSEP 파형을 얻어 양측(좌/우) 자극에서 가장 큰 파형이 기록된 전극 번호 사이의 중간 부분을 전기생리학적 중앙선(electrophysiologic midline)으로 결정하고 수술을 진행하였다[6]. 2012년 연구의 경우는 8개의 접합부를 가지는 마이크로전극띠(strip)를 척수외기동 부분에 위치해 자극하고, 두피 전극에서 SSEP를 기록하면서 '위상역전기법(Phase-reversal technique)'을 사용해 성공적으로 척수절개술 위치를 결정하였다[5]. 실제로 척수내종양 수술의 경우, DCM기법을 이용한 11명의 환자를, 사용하지 않은 대조군 80명의 환자와 비교했을 때, 수술 후 '척수외기동 이상증후군'의 발생율이 DCM 기법을 이용한 환자군에서 낮아짐을 보여[34], 수술 전 영상 검사 및 수술장에서 육안적인 midline 구별이 명확치 않을 경우, DCM 기법을 이용하는 것이 수술 후 신경학적 후유증을 낮추는 데 도움이 될 수 있겠다.

## (2) 척수내 운동로 지도화(intramedullary motor mapping)

척수내종양 수술 도중, 척수 운동로에 대한 직접적인 전기 자극이 비교적 안전하고, 기록 파형을 얻기가 어렵지 않다는 연구 결과 발표 이후[35], 몇 개의 연구 그룹에서 다양한 방법을 사용해 운동로 지도화를 이용해 척수내 종양을 최대한 안전하게 넓은 범위를 절제하고자 하는 시도를 발표하였다. 2001년 Deletis 그룹은 이른바 'D-파형 충돌 기법(D-wave Collision Technique)'을 이용해 운동로 지도화하는 기법을 발표했는데[36], 두피와 척수 자극을 동시에 시행, 두피 자극에서 아래로 내려오게 되는 D-파형과 척수를 직접 자극해 상방으로 올라가는 신호가 만나게 될 경우, 만약 척수에서 적절히 운동로가 자극되었다면, 같은 피질척수로를 따라 신호가 충돌한 셈이 되므로, D-파형의 진폭이 감소하게 될 거라는 이론을 바탕으로 한 방법이었고, 이 방법이 효과적으로 척수내 운동로를 감별할 수 있음이 밝혀졌다. 최근에는 Kartush 동심형 양극탐색자(concentric bipolar probe)를 이용해, 척수내 종양 근처를 직접 자극해 상하지 근육들(양측 엄지두덩근, 앞정강근, 장판

지근, 엄지벌림근)에서 근전도 파형을 기록함으로써, '고해상도(High-resolution) 운동로 지도화'를 시행하고, 환자의 운동 기능의 큰 손상 없이 척수내종양을 제거한 케이스가 발표되기도 하였다[37].

## 5) 구해면체근반사(bulbocavernous reflex, BCR) 감시

구해면체근반사 감시는 비뇨생식 반사(urogenital reflex) 회로의 전체적인 integrity를 평가할 수 있게 하며, 다시냅스성 반사회로로 S2-S4 레벨의 신경 경로를 평가할 수 있는 유용한 수단이다. 척수원뿔(conus medullaris), 말총(cauda equine), 엉치신경얼기(sacral plexus), 음부신경(pudendal nerve)을 포함한 부위의 수술에서 활용될 수 있으며, 자극용 전극을 남성의 경우는 음경(penis)에, 여성의 경우는 음핵(clitoris) 및 대음순(labia majora)에 부착하고, 외항문괄약근(external anal sphincter)에 기록전극을 삽입해 파형을 기록하게 된다. 1997년 Deletis 그룹이 다양한 종류의 척추수술 환자에서 BCR 감시를 시도해(이중 펄스, 0.5 ms duration, 20 mA intensity, inter-stimulus 3 ms), 성공적으로 파형을 얻어 수술 중 감시를 성공했다는 연구 결과가 발표된 이래[38], 모니터링에 적절한 파형을 얻는 자극 조건의 최적화에 대한 후속 연구들이 시행되었다[39]. 그 결과, 현재 보편화된 자극 관련 수치는 40 mA intensity(연구들에 따라 5-50 mA로 다양하긴 함), 500 ms duration, 3 ms inter-stimulus interval, 4-5 pulses으로 여겨지고 있다. 실제 BCR 감시 결과가 환자의 수술 후 배뇨관련 기능의 상태를 예측할 수 있는가에 대해서는 최근 연구들이 시작되었으며, 한 연구에 따르면 untethering 수술에서 BCR의 완전 소실을 경고 기준으로 삼았을 때, 수술 중 BCR의 변화가 수술 6개월 후 배뇨 기능을 예측하는 데 88.5%의 높은 특이도를 가져 BCR 감시의 유용성을 제시했으나, 소아 환자를 대상으로 한 연구였으며[40], 아직 성인을 대상으로 한 BCR의 진단적/치료적 가치에 대한 연구는 없는 상태이다.

## 2. 척추 수술에서 INM의 진단적/치료적 가치

현재 척추 수술에서 기본적으로 SSEP 및 MEP 감시는 같이 사용되며, 그 외 수술의 구체적인 대상질환 및 위치에 따라 기타 다른 종류의 감시법들을 추가하는 것을 고려하게 된다(Table 2). INM의 근본적인 목적은 수술도중 신경계 손상이 발생하는 걸 조기에 진단해 교정하고, 궁극적으로 환자의 예후를 개선시키는 것이기 때문에, 과연 INM이 다양한 종류의 척추 수술에서 실제 신경계 손상을 감지해내고(diagnostic Value; 진단적 가치), 환자의 수술 후 신경학적 상태의 개선에 영향을 미쳤는지(therapeutic or preventive Value; 치료적 가치)에 대해 과거 많은 연구들이 이뤄졌고, 본 파트에서는 해

**Table 2.** The applicable intraoperative neuromonitoring tools according to the type of spine procedures

Operation	SSEPs	MEPs(Muscle)	D-wave	EMG	Cord mapping	BCR
Deformity correction (ex. Scoliosis surgery)	++	++	± <sup>1)</sup>	++ <sup>2)</sup>	-	± <sup>3)</sup>
Decompression/fixation/vertebroplasty	++	++	-	++ <sup>2)</sup>	-	± <sup>3)</sup>
Tumorectomy (intramedullary)	++	++	++	+ <sup>4)</sup>	+ <sup>4)</sup>	± <sup>3)</sup>
Tumorectomy (extramedullary)	++	++	+ <sup>5)</sup>	+ <sup>6)</sup>		± <sup>3)</sup>
Procedures involving S2-4 cord level	++	++	-	+	-	++

<sup>1)</sup> D-wave monitoring showed a relatively high false positive rate in the deformity operation cases [24].

<sup>2)</sup> The integrity of nerve roots needs to be monitored in both types of operation [29], and in cases of instrumentation (including screw insertion), the triggered EMG can be applied [30].

<sup>3)</sup> Consider the BCR monitoring depending on the location of procedures.

<sup>4)</sup> The dorsal column mapping can be used when the anatomical localization of myelotomy is not available [34]. The motor mapping which is similar to triggered EMG regarding the basic principle, helps to preserve the function of motor tract [37].

<sup>5)</sup> D-wave monitoring could detect the neuronal damage effectively in the cases of spine tumor (intradural extramedullary type)[46].

<sup>6)</sup> The procedure could increase the risk of nerve root damage depending on the location of lesions.

SSEP: somatosensory evoked potential; MEP: motor evoked potential; D-wave: direct-wave; EMG: electromyography; BCR: bulbocavernosus reflex.

당 내용을 간략히 다뤄보고자 한다(본문에 기술된 연구를 포함해 주요 연구 결과들은 Table 3에 취합해 정리하였음).

#### 1) INM의 진단적 가치

1980-90년대 연구들은 주로 SSEP 혹은 MEP 등 한 가지 감시법을 이용해 환자의 신경학적 결손을 감지하는데 효과가 있는지를 살펴보는 연구들이 대부분이었다. 1984년에 발표된 연구에 따르면, 척추측만증 수술 환자 137명을 대상으로 SSEP 감시를 실시했을 때, 69건의 수술 중 SSEP 변화가 있었고, 잠복기 및 진폭의 지속적인 변화를 보이는 경우는 실제 수술 후 환자 신경학적 결손이 관찰됨을 보고했었다(Class III)[41]. 1989년 MEP 감시를 실시한 상위경추수술 환자 20명을 분석했던 사례연구에서는 총 6명에서 MEP의 변화가 있었고, 이 중 1명은 수술 후 신경학적 결손이 발생해 100% 민감도 및 74% 특이도를 가진다고 보고하기도 했다(Class III)[42]. 1995년 Nuwer 등이 척추측만증연구회(Scoliosis Research Society) 회원들을 대상으로 SSEP의 사용 및 그 결과에 대해 설문조사를 실시한 연구를 발표했는데, 총 51,263건의 수술에 대해 정보를 취합했고, 그 결과 음성률(true negative) 98%, 위음성률 0.13%, 양성률(true positive) 0.42%, 위양성률 1.5%로 보고되었다(Class II)[43].

이후 SSEP, MEP 두 가지 감시법을 동시에 사용하면서 두 방법의 감시 효율을 비교하거나, 두 가지 이상의 감시법을 같이 사용할 경우(복합 감시, multimodal INM)와 한 가지를 사용할 경우의 결과를 비교하는 연구들이 발표되기 시작했다. 전자의 경우, 대표적으로 2004년 Hilibrand 그룹에서 427명의 경추 수술 환자들을 후향적으로 분석한 연구에 따르면, 총 12명의 환자에서 수술 도중 유의미한 MEP 진폭의 감소(해당 연

구에서는 60% 이상 진폭 감소를 기준으로 했음)가 나타났고, 이 중 10명은 수술 종료 전에 MEP 진폭이 회복했고, 실제 수술 후 신경학적 결손은 없었다. 수술 종료시까지 MEP 소실이 지속되었던 나머지 2명의 환자는 수술 후 위약감이 발견되어, MEP 검사는 100%의 민감도 및 특이도를 기록했다. 반면, 수술 중 유의미한 MEP 변화를 보인 12명 중 9명은 SSEP에서 아무 변화가 없었으며, 수술 후 위약감이 발견된 2명의 환자 중 1명은 수술 중 SSEP는 정상이었고, 1명은 MEP가 소실된 후 약 30분이 지나 SSEP가 떨어지기 시작하였다. 이에 저자들은 척추 수술에서 운동신경을 감시하는 데는 MEP가 SSEP보다 우월하다는 근거를 제시하였다(Class I)[2]. 또한 다른 그룹이 발표한 연구에서는 52명의 경추척수증(cervical myelopathy) 환자들에서 SSEP와 MEP를 같이 시행했을 때, 총 6명의 환자에서 수술 중 유의미한 MEP 진폭의 감소(80% 이상 진폭 감소를 기준으로 제시)가 나타났고, 이 중 1명은 실제 수술 후 근위 약이 발생하였다. SSEP의 경우는 모든 환자에서 수술 중 특별한 변화가 없어, 이 연구에서 MEP는 100% 민감도, 90% 특이도를 가졌고, SSEP는 0% 민감도, 100% 특이도를 보였다(Class I)[3]. MEP의 경우, 양성예측률이 17%로 낮게 나왔는데(높은 가양성률), 해당 환자들의 위험인자를 분석했을 때, 체질량지수가 높거나 수술 시간이 긴 환자일수록 가양성률의 위험도가 올라감을 밝혔다[3].

2002년 Pelosi 등은 MEP/SSEP 복합 감시의 경우와 한 가지 감시법을 이용한 경우를 후향적으로 비교한 연구를 발표했고, 79명은 복합 감시를, 18명은 단독 감시(16명은 SSEP, 2명은 MEP)를 이용한 척추 수술(대부분 환자들이 척추기형 환자)을 시행했을 때, 총 16명 환자에서 수술 중 유의미한 변화(50% 이상 진폭 감소, 10% 이상 잠복기 연장)가 관찰되었고,

**Table 3. Evidentiary studies related to diagnostic/therapeutic values of the intraoperative neurophysiologic monitoring in spine surgeries**

Evidence class <sup>1)</sup>	Year	Subject number <sup>2)</sup>	Operation	Study design	Monitoring modalities	Results	Reference
Diagnostic value							
I	2015	25	Tumorectomy (Intramedullary)	Retrospective	SSEP/MEP Free-run EMG	MINM has 100% sensivity, 91% specificity, 60% PPV, and 100% NPV (using all-or-none warning criteria for MEP). 'All-or-none' criteria showed the higher accuracy than '>50% decrement of amplitude' for the prediction of long-term outcome.	[47]
III	2015	75	Cervical spine surgery	Retrospective	SSEP/MEP Free-run EMG	Five patients showed the loss of MEP during neck positioning. Four of 5 had complete recovery of MEP after repositioning, but one failed to recover resulting in the post-operative neurologic deficit.	[55]
II	2014	1,162	Deformity correction	Retrospective	MEP	The new warning criteria (>80% amplitude reduction) yields a very low false-positive rate (0.26%) and PPV of 83.3%.	[16]
II	2013	103	Spinal tumor & myelopathy	Prospective	SSEP/MEP /D-wave	D-wave was feasible in 97 cases. A stable D-wave recording correctly predicted good motor outcome in allrecordable cases. The one case which showed the increase of D-wave amplitude during the surgery revealed the improvement of post-operative motor function.	[46]
I	2012	175	Deformity correction	Retrospective	SSEP/MEP	MINM sensitivity/specificity; 92.9%/99.4%, MEP alone (warning criteria; >75% reduction of amplitude) ensitivity/specificity; 91.7%/98.8%, SSEP alone sensitivity/specificity; 50%/95.2%.	[45]
I	2007	52	Cervical myelopathy	Retrospective	SSEP/MEP	MEP (warning criteria; >80% reduction of amplitude) sensivity and specificity were 100% and 90% versus 0% and 100% for SSEP. The PPV of MEP was 17% (5 of 6 events were false positive).	[3]
I	2007	1,017	Spine surgery	Prospective	SSEP/MEP Free-run EMG	MINM sensitivity and specificity were 89% and 99% respectively with 8 false negatives. Lumbar spine decompression operations accounted for 40% of false positive cases.	[56]
III	2006	57	Laminoplasty	Prospective	MEP	No cases showed the decrement of MEP during the surgery, but 3 had post-operative C5 palsy (transient).	[57]
I	2004	427	Cervical spine surgery	Retrospective	SSEP/MEP	MEP sensitivity and specificity were 100%, while SSEP were 100% specific but only 25% sensitive.	[2]
II	2002	97	Spine surgery	Prospective	SSEP/MEP	The 16 patients revealed the significant signal change during the surgery. Six of 16 patients had new post-operative neurologic deficits while there were no deficits in cases with normal waves during the surgery.	[44]
II	1995	51,263	Spine surgery	Survey	SSEP	True negatives ratio was 98%, false negative ratio. 0.13%, true positive ratio. 0.42%, and false positive ratio. 1.5%.	[43]
III	1989	20	Cervical spine surgery	Retrospective	MEP	One new postoperative deficit was predicted by the complete loss of MEP, while 5 cases showed transient attenuation of MEP without the post-operative neurologic deficit. (sensitivity 100%; specificity 74%).	[42]
III	1984	137	Deformity correction	Retrospective	SSEP	SSEP deterioration were seen in 69 cases. The new post-operative neurologic deficits were obtained in cases of the sustained worsening of both amplitude and latency of waves.	[41]



Table 3. Continued

Evidence class <sup>1)</sup>	Year	Subject number <sup>2)</sup>	Operation	Study design	Monitoring modalities	Results	Reference
Therapeutic value							
III	1988	295 (150/145)	Thoracolumbar spine injury	Retrospective	SSEP	The of 145 (6.9%) control group had new post-operative deficits, while one of 150 (0.7%) developed a new deficit in the monitored group.	[58]
III	1993	171 (51/120)	Decompressive surgery (OPLL)	Retrospective	SSEP	No post-operative deficits occurred in the present case series with SSEP monitoring, which was superior to histrocial control groups.	[48]
III	2006	1,445	Cervical spine surgery	Retrospective	SSEP/MEP Free-run EMG	MINM detected post-operative neurologic damage in 2 patients out of 267 alerts. Eight operations were aborted d/t significant EP changes without any new deficits.	[59]
III	2006	100 (50/50)	Tumorectomy (intramedullary)	Retrospective	SSEP/MEP /D-wave	MINM group had better mean McCormick grade improvement than control group at 3-month follow-up. (+0.28 vs -0.16, p = 0.0016).	[23]
III	2010	32 articles	Spine surgery	Systematic review		Very low-level evidence; Intervention itself responding to an INM alert during surgery reduces the rate of the development of neurologic damage.	[49]
III	2012	720	Cervical spine surgery	Retrospective	N/A	Only three patients (0.4%) showed a new, transient post-operative neurological deficit. Cost savings was estimated at \$1024,754.	[51]
III	2013	12,375	Spine surgery	Retrospective	SSEP/MEP neurogenic MEP, Free-run/ Triggered EMG	Intraoperative interventions made improvement in 360 alerts out of 406. One patient revealed a new deficit compared with 14 deficits of which alerts failed to recover after intervention. (MINM reduced the risk of development of neurologic deficit from 3.1% to 0.12%)	[50]
II	2014	76 (50/26)	Tumorectomy (intramedullary)	Retrospective	SSEP/MEP	The use of INM did not change the result of the rate of gross total resection or the neurologic outcome.	[52]
II	2017	101 (41/70)	Tumorectomy (IDEM)	Retrospective	MEP, SSEP	There was no statistically significant difference in the rate of new postoperative neurologic deficit between the monitored and unmonitored group (10% vs 14%).	[53]

<sup>1)</sup> This is applied to according to 'North American Spine Soceity' standard [60].

<sup>2)</sup> The number within in parentheses indicate 'the number of patients with INM/the number of patients without INM.'  
SSEP: somatosensory evoked potentials; MEP: motor evoked potentials; INM: intraoperative neurophysiologic monitoring; MINM: multimodal intraoperative neurophysiologic monitoring; PPV: positive predictive value; NPV: negative predictive value; OPLL: ossification of posterior longitudinal ligament; N/A: not added.

이 중 6명이 수술 후 신경학적 결손이 발생했음을 보고했다 (Class II)[44]. 뿐만 아니라, 모든 환자들에서 복합 감시를 시행해 결과를 얻고, 추후 분석 시 복합 감시와 단독 감시의 경우 각각에 대해 진단적 가치를 평가하는 방식도 가능한데, Feng 등이 복합 감시(SSEP, MEP)와 함께 척추 기형 교정술을 받은 175명의 환자를 후향 분석한 연구에서, 총 11건의 수술 중 유의미한 변화가 발생했고, 이 중 5명의 환자에서 수술 후 신경학적 결손이 관찰되었다(1명은 영구적 결손). 이를 바탕으로 각각의 경우 수술 후 신경학적 결손에 대한 민감도/특이도를 계산했을 때, 단독 MEP 감시의 경우 91.7%/98.8%, 단독 SSEP 감시의 경우 50%/95.2%, 복합 감시의 경우 92.9%/99.4%로 보고되어, 복합감시가 MEP 혹은 SSEP 단독 감시보

다 우월하다는 결론을 제시했다(Class II)[45].

상기 연구들과 같은 과거 연구들을 근거로 모든 종류의 척추 수술에서 기본적으로 SSEP와 MEP 감시를 같이 활용하게 된 이후로는 기타 감시법(근전도, D-파형 감시 등)에 대한 활용도나 수술 대상 질환/위치 등을 조금 더 구체화시킨 환자군(homogeneous)들에 대한 연구, 혹은 변형된 경고기준(warning criteria)를 적용해 결과를 분석하는 연구들이 지금까지 활발히 이뤄지고 있는 단계이다. 예를 들어, 2013년 Costa 등이 103명의 척추 수술 환자(23; 척추내종양, 55; 척추수 외 종양, 25; 척추증)에서 MEP, SSEP와 함께 D-파형 감시를 적용했던 연구가 있는데, 총 97명의 환자에서 D-파형을(baseline) 성공적으로 얻었고, 수술 종료시까지 D-파형이 감



소하지 않고 잘 유지될 경우, 질환의 종류에 상관없이 수술 후 신경학적 상태가 매우 양호함을 보여, 이전 연구들에서 주로 척수내종양 수술에서 사용되었던 D-파형 감시법을 그 외 다른 종류의 척추 수술로 적용 범위를 넓힐 수 있음을 제시하였다(Class II)[46]. 2015년 척수내종양 환자 25명을 대상으로 MEP, SSEP, 자발근전도를 시행한 연구의 경우, 저자들은 MEP의 경고 기준을 '50% 이상의 진폭 감소' 혹은 '완전소실(All-or-None)'로 나눠 수술 후 신경학적 결손 예측률을 비교했다. '완전소실' 경고 기준을 적용했을 때, 100% 민감도, 91% 특이도, 60% 양성예측률, 그리고 100% 음성예측률을 보였고, '50% 이상 진폭 감소' 기준을 적용했을 때는 수술 후 24 시간 단기 운동 기능을 평가하는 데 특이도가 올라감을 보였다. 또한 약 72%의 환자에서 자발근전도 검사에서의 이상소견이 근육 MEP 변화보다 선행되어 나타나, 자발근전도 이상이 근육 MEP의 감소를 예측하는 기준이 될 수 있을 거라고 제안하였다(Class I)[47].

## 2) INM의 치료적 가치

앞에서 다뤄진 내용처럼, 지난 30-40년간 다양한 종류의 INM 기법이 수술 중 신경계 손상을 감지하고 진단하는 데 있어 유용하게 쓰일 수 있다는 결과들이 많이 발표되었고, 실제로 임상의들은 이로 인해 수술 후 환자의 신경학적 상태를 개선시키는 데 도움이 된다고 생각하고 있으나, 아직까지는 INM의 치료적 가치에 대해 'High-level class of evidence'가 부족한 상태이다. 많은 연구 그룹에서 치료적 가치를 살펴보고자 노력을 해왔으나, INM 분야가 가지는 특성상, 현실적으로 쉽지 않은 상황이다. 일단 진단적 가치가 증명된 상태에서, 치료적 가치를 보기 위해 동일한 종류의 척추 수술에서 INM을 시행하지 않는 환자군을 대조군으로 설정하는 것 자체가 비윤리적인 수 있는 문제가 있으며, 수술 도중 이벤트가 발생했을 때, 집도의 및 모니터링을 담당하는 의사가 취하는 후속 조치를 모두 동일하게 적용하기가 어려운 점, 그리고 실행된 후속 조치와 실제 환자의 수술 후 예후가 직접적인 연관성(correlation)이 있는가에 대한 문제 등 여러 장애물들이 있다. 위와 같은 한계로 인해, 대부분의 연구가 과거 INM이 도입되기 전에 수술을 받은 환자들(historical control)을 대조군으로 설정해 후향적으로 단순비교를 하는 디자인을 가지게 되며, 이로 인한 통계적 파워가 떨어지면서 증거 수준 'Class III'의 근거 기준에 해당하게 된다.

가장 초기 연구 중의 하나가 51명의 후종인대석회화(ossification of posterior longitudinal ligament, OPLL)로 인한 경추척수증 환자를 대상으로 한 연구로, SSEP 감시를 이용해 수술을 진행했을 때 48명의 환자는 증상의 완화를, 3명은 특별한 변화가 없음을 보였고, 이를 그 이전에 SSEP 감시 없이

수술을 진행한 120명의 대조군(과거 연구결과들 검토해서 추출한 대조군)과 비교했을 때, 환자 예후가 좋았음을 언급하면서 SSEP 감시가 경추의 OPLL 수술에서 치료적 가치를 가질 수 있다고 제시했으나, 근거능력에서는 Class III에 해당하였다[48]. 2010년에 32개의 척추수술에서의 INM의 활용에 관한 연구결과들을 종합한 'systematic review' 연구가 발표되었는데, INM의 진단적 가치는 인정했으나, 치료적 가치에 대해서는 아주 낮은('very low' level) 수준의 근거 기준을 제시했다[49]. 가장 많은 수의 환자를 대상으로 이뤄진 2013년도 연구에서는 26년간 단일기관에서 시행된 SSEP와 MEP 감시를 이용한 모든 종류의 척추수술 환자 12,375명을 분석했을 때, 386명의 환자에서 총 406건의 INM 이벤트가 발생했는데, 이중 360건은 후속조치 이후 회복되었다. 수술 종료 시까지 이상파형이 회복되지 않은 환자 중 14명은 영구적인 신경학적 결손이 남았고, 이상파형이 회복되었음에도 수술 후 신경학적 결손을 보인 환자는 한 명이 있었다. 저자들은 위 결과를 바탕으로 INM의 활용이 신경학적 결손의 위험도를 최대 3.1%에서 0.12%로 낮췄다고 분석하면서 척추 수술에 있어, 복합(multimodal) INM의 이용이 필수적임을 주장했지만, 해당 연구 대상 그룹이 위치 및 원인 질환의 종류 등에 있어 너무 이질적이고, 비교군이 없다는 점, 수술 중 이벤트 발생 이후 취해진 조치가 매우 다양했다는 점 등에서 INM의 치료적 가치를 제시하기에는 class III의 낮은 증거 수준을 가질 수밖에 없었다[50].

반면에, INM의 치료적 가치를 부정하는 연구 결과들도 발표되었는데, 2012년 Traynelis 그룹은 INM 없이 경추감압수술을 받은 720명 환자들을 분석해 그 중 오직 3명의 환자만이 수술 후 일시적인 근위약을 보였고, 지속적인 신경학적 결손을 보인 환자는 한 명도 없어, 약 백만 달러에 이르는 모니터링 비용을 절감할 수 있었고, 이를 바탕으로 INM을 무조건적으로 적용하는 것은 비용-효과(cost-effectiveness)적 측면에서 바람직하지 않다고 주장하였다(Class III)[51]. 2014년 Choi 등의 연구에 따르면, 척수내종양 환자 76명(50명: INM을 시행, 26명: INM을 시행하지 않음)을 후향적 분석하였을 때, INM의 수술 후 신경학적 결손의 발생 예측에 대한 민감도 및 특이도는 94%, 양성예측률은 89%, 음성예측률은 97%였다(75% 이상의 진폭 감소를 수술 중 유의미한 파형 변화로 정의). 하지만 다변수회귀분석 시, 두 그룹간 종양의 절제 정도나 수술 후 신경학적 상태에 유의미한 차이가 없어, 척수내종양 절제술에서 INM의 치료적 가치는 없는 것으로 기술하였다(Class II)[52]. 최근 시행된 척추의 경막내수질의 종양(수막종 및 신경초종) 절제술을 대상으로 한 후향적 연구에서는 MEP/SSEP/EMG 감시를 시행한 41명의 환자를 이전에 INM 없이 절제술을 시행한 70명의 대조군과 비교했는데, INM이 신경학

적 손상을 감지하는 데는 정확했지만, 결과적으로 양 그룹간 수술 후 신경학적 결손의 발생률의 차이는 없어, 해당 질환의 수술의 경우에서 INM이 치료적 가치를 가지지 않는다고 결론 내었다(Class II)[53].

INM의 치료적 가치에 대해서 향후 강한 ‘evidence class’를 가지는 연구를 진행하기 위해서는 전향적 환자/대조군 설정에 있어서의 불리함을 극복해낼 수 있는 통계 기법의 활용 및 최대한 구체적으로 구성된 동일한 프로토콜의 적용 등을 이용한 연구가 필요할 것이다.

### 3. 감시 중 이상소견 발생 시의 기본 고려 사항

INM 도중 발생하는 각종 이상 소견에 대해서는 다른 신경계수술의 경우와 비슷한 후속조치가 필요하며, 모니터링하는 의사는 적극적으로 상황을 파악하고, 수술의와 정보를 공유해야 한다. 가장 먼저, 자극의 강도를 올리며 반복 자극을 통해 재현가능한 이상소견인지 살피면서, 발생한 이벤트가 국소적인 실제 신경의 손상에 의한 것인지, 모니터링 전반에 영향을 끼칠 수 있는 외부 요인 혹은 환자 전반(systemic)의 체내 변화에 의한 것인지 생각해 봐야 한다. 단순한 기계의 오류(코드선의 탈락, 전극의 탈락 등) 및 환자 체온/혈압의 변화, 마취심도/마취제 종류의 변화, 환자 체위 등이 변했는지 등을 체크해 본다. 척추 수술 중 척추측만증 교정수술과 같은 경우, 수술 범위가 넓어지면서 수술시간이 비교적 긴 편에 속하게 되는데, 길어질수록 체온이 떨어질 수 있으며, 장시간 마취제 사용에 따라 ‘Anesthetic fade’효과 등에 의해 같은 강도의 자극에 파형 크기가 작아지는 현상이 나타날 수 있다[54]. 또한 출혈이 많아 잦은 수혈이 필요한 경우, 혈액색소의 급격한 변화에 따라 파형이 영향을 받을 수도 있기 때문에, 이에 대한 고려도 필요하다. 상기에 언급된 원인이 아닌, 수술 부위에 이뤄지는 직접적인 수술행위와 관련된 변화로 생각될 경우, 수술의와의 적극적인 대화를 통해, 교정 가능한 부분이 있는지 논의하고 (예) 따뜻한 생리식염수 세척 등), 수술을 잠시 멈추고 관찰하거나, 방금 행해진 수술 과정의 전단계로 돌아가서 파형의 회복 여부를 관찰하는 등의 과정이 필요하겠다. 이후 다른 위치로의 접근이나, 적용 중이던 수술관련기구 종류의 교체 등을 고려하게 되며, 일부 신경계 손상이 불가피할 경우(특히 종양 수술의 경우), 피해를 최소화하는 방향으로 INM이 활용되어야 할 것이다.

## 결론

수술중신경계감시가 척추 수술 분야에서 각종 감시 기법을 통해 수술의 편의 및 효율성을 높일 수 있을 뿐 아니라, 신경계 손상 여부를 조기에 발견해 수술의 안전성을 높이는데 있어 매

우 유용한 수단이 되었음은 명확한 사실이다. 이제는 기존 검사법의 효율을 높이기 위한 조건의 최적화 및 새로운 전기생리학적 기법의 도입 등에 관한 연구가 꾸준히 이뤄져야 할 것이며, 각종 감시법의 경고 기준에 있어서도 모든 종류의 척추수술에 동일한 잣대를 적용하기보다는 수술의 대상 질환 및 위치 등에 따라 세분화된 기준의 구축이 필요할 것으로 보인다. 상기 사항들에 대한 연구를 바탕으로 수술별, 검사별 최적화된 통합 가이드라인 등을 제시할 수 있다면 국내 수술중신경계감시의 수준을 한 단계 끌어올리고, 환자의 수술 후 예후 향상에 이바지할 수 있을 것이다.

## Ethical approval

This article does not require IRB/IACUC approval because there are no human and animal participants.

## Conflicts of interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## ORCID

Jun-Soon Kim, <https://orcid.org/0000-0001-7685-2793>  
Kyung Seok Park, <https://orcid.org/0000-0003-1553-5932>

## References

1. Koo YS, Kim DY. Basic principles and practices of evoked potential for intraoperative neurophysiological monitoring: motor evoked potential and somatosensory evoked potential. J Intraoper Neurophysiol. 2019;1(1): 14-24.
2. 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(6):1248-53.
3. Kim DH, Zaremski J, Kwon B, Jenis L, Woodard E, Bode R, et al. Risk factors for false positive transcranial motor evoked potential monitoring alerts during surgical treatment of cervical myelopathy. Spine (Phila pa 1976). 2007;32(26):3041-6.
4. Quinones-Hinojosa A, Gulati M, Lyon R, Gupta N, Yingling C. Spinal cord mapping as an adjunct for

- resection of intramedullary tumors: surgical technique with case illustrations. *Neurosurgery*. 2002;51(5):1199-206.
5. Simon MV, Chiappa KH, Borges LF. Phase reversal of somatosensory evoked potentials triggered by gracilis tract stimulation: case report of a new technique for neurophysiologic dorsal column mapping. *Neurosurgery*. 2012;70(3):E783-8.
  6. Yanni DS, Ulkatan S, Deletis V, Barrenechea JJ, Sen C, Perin NI. Utility of neurophysiological monitoring using dorsal column mapping in intramedullary spinal cord surgery. *J Neurosurg Spine*. 2010;12(6):623-8.
  7. MacDonald DB, Dong C, Quatralo R, Sala F, Skinner S, Soto F, et al. Recommendations of the International Society of Intraoperative Neurophysiology for intraoperative somatosensory evoked potentials. *Clin Neurophysiol*. 2019;130(1):161-79.
  8. Macdonald DB, Al Zayed Z, Al Saddigi A. Four-limb muscle motor evoked potential and optimized somatosensory evoked potential monitoring with decussation assessment: results in 206 thoracolumbar spine surgeries. *Eur Spine J*. 2007; 16 Suppl 2:S171-87.
  9. MacDonald DB, Al Zayed Z, Khoudair I, Stigsby B. Monitoring scoliosis surgery with combined multiple pulse transcranial electric motor and cortical somatosensory-evoked potentials from the lower and upper extremities. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2003; 28(2):194-203.
  10. MacDonald DB. Intraoperative motor evoked potential monitoring: overview and update. *J Clin Monit Comput*. 2006;20:347-77.
  11. Kim SM, Yang H, Park SB, Han SG, Park KW, Yoon SH, et al. Pattern-specific changes and discordant prognostic values of individual leg-muscle motor evoked potentials during spinal surgery. *Clin Neurophysiol*. 2012;123(7):1465-70.
  12. Rajshekhar V, Velayutham P, Joseph M, Babu KS. Factors predicting the feasibility of monitoring lower-limb muscle motor evoked potentials in patients undergoing excision of spinal cord tumors. *J Neurosurg Spine*. 2011;14(6):748-53.
  13. Kim JS, Jang MJ, Hyun SJ, Kim KJ, Jahng TA, Kim HJ, et al. Failure to generate baseline muscle motor evoked potentials during spine surgery: risk factors and association with the postoperative outcomes. *Clin Neurophysiol*. 2018;129(11):2276-83.
  14. Kim JS, Choi Y, Jin SH, Kim CH, Park CK, Kim SM, et al. Effect of peripheral nerve tetanic stimulation on the inter-trial variability and accuracy of transcranial motor-evoked potential in brain surgery. *Clin Neurophysiol*. 2016;127(5):2208-13.
  15. Langeloo DD, Lelivelt A, Louis Journee H, 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):1043-50.
  16. Zhuang Q, Wang S, Zhang J, Zhao H, Wang Y, Tian Y, et al. How to make the best use of intraoperative motor evoked potential monitoring? Experience in 1162 consecutive spinal deformity surgical procedures. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2014; 39(24):E1425-32.
  17. Burke D, Hicks R, Stephen J, Woodforth I, Crawford M. Trial-to-trial variability of corticospinal volleys in human subjects. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1995;97(5):231-7.
  18. MacDonald DB. Overview on criteria for MEP monitoring. *J Clin Neurophysiol*. 2017;34(1):4-11.
  19. Calancie B, Harris W, Brindle GF, Green BA, Landy HJ. Threshold-level repetitive transcranial electrical stimulation for intraoperative monitoring of central motor conduction. *J Neurosurg*. 2001;95 (2 Suppl):161-8.
  20. Muramoto A, Imagama S, Ito Z, Ando K, Tauchi R, Matsumoto T, et al. The cutoff amplitude of transcranial motor evoked potentials for transient postoperative motor deficits in intramedullary spinal cord tumor surgery. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2014;39(18):E1086-94.
  21. Kim DG, Choi YD, Jin SH, Kim CH, Lee KW, Park KS, et al. Intraoperative motor-evoked potential disappearance versus amplitude-decrement alarm criteria during cervical spinal surgery: a long-term prognosis. *J Clin Neurol*. 2017;13(1):38-46.
  22. Deletis V, Sala F. Intraoperative neurophysiological

- monitoring of the spinal cord during spinal cord and spine surgery: a review focus on the cortico-spinal tracts. *Clin Neurophysiol.* 2008;119(2):248-64.
23. Sala F, Palandri G, Basso E, Lanteri P, Deletis V, Faccioli F, et al. Motor evoked potential monitoring improves outcome after surgery for intramedullary spinal cord tumors: a historical control study. *Neurosurgery.* 2006;58(6):1129-43.
  24. Ulkatan S, Neuwirth M, Bitan F, Minardi C, Kokoszka A, Deletis V. Monitoring of scoliosis surgery with epidurally recorded motor evoked potentials (D wave) revealed false results. *Clin Neurophysiol.* 2006;117(9):2093-101.
  25. Kothbauer KF, Deletis V, Epstein FJ. Motor-evoked potential monitoring for intramedullary spinal cord tumor surgery: correlation of clinical and neurophysiological data in a series of 100 consecutive procedures. *Neurosurg Focus.* 1998;4(5):e1.
  26. Toleikis JR, Skelly JP, Carlvn AO, Burkus JK. Spinally elicited peripheral nerve responses are sensory rather than motor. *Clin Neurophysiol.* 2000;111(4):736-42.
  27. Minahan RE, Sepkuty JP, Lesser RP, Sponseller PD, Kostuik JP. Anterior spinal cord injury with preserved neurogenic 'motor' evoked potentials. *Clin Neurophysiol.* 2001;112(8):1442-50.
  28. Bose B, Sestokas AK, Schwartz DM. Neurophysiological detection of iatrogenic C-5 nerve deficit during anterior cervical spinal surgery. *J Neurosurg Spine.* 2007;6(5):381-5.
  29. 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(6):677-84.
  30. 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(24):2673-8.
  31. Parker SL, Amin AG, Farber SH, McGirt MJ, Sciubba DM, Wolinsky JP, et al. Ability of electromyographic monitoring to determine the presence of malpositioned pedicle screws in the lumbosacral spine: analysis of 2450 consecutively placed screws. *J Neurosurg Spine.* 2011;15(2):130-5.
  32. Raynor BL, Lenke LG, Kim Y, Hanson DS, Wilson-Holden TJ, Bridwell KH, et al. Can triggered electromyograph thresholds predict safe thoracic pedicle screw placement? *Spine (Phila Pa 1976).* 2002;27(18):2030-5.
  33. Manzano G, Green BA, Vanni S, Levi AD. Contemporary management of adult intramedullary spinal tumors-pathology and neurological outcomes related to surgical resection. *Spinal Cord.* 2008;46(8):540-6.
  34. Mehta AI, Mohrhaus CA, Husain AM, Karikari IO, Hughes B, Hodges T, et al. Dorsal column mapping for intramedullary spinal cord tumor resection decreases dorsal column dysfunction. *J Spinal Disord Tech.* 2012;25(4):205-9.
  35. Duffau H, Capelle L, Sichez J. Direct spinal cord electrical stimulations during surgery of intramedullary tumoral and vascular lesions. *Stereotact Funct Neurosurg.* 1998;71(4):180-9.
  36. Deletis V, Bueno De Camargo A. Interventional neurophysiological mapping during spinal cord procedures. *Stereotact Funct Neurosurgery.* 2001;77(1-4):25-8.
  37. Gandhi R, Curtis CM, Cohen-Gadol AA. High-resolution direct microstimulation mapping of spinal cord motor pathways during resection of an intramedullary tumor. *J Neurosurg Spine.* 2015;22(2):205-10.
  38. Deletis V, Vodusek DB. Intraoperative recording of the bulbocavernosus reflex. *Neurosurgery.* 1997;40(1):88-92.
  39. Rodi Z, Vodusek DB. Intraoperative monitoring of the bulbocavernosus reflex: the method and its problems. *Clin Neurophysiol.* 2001;112(5):879-83.
  40. Cha S, Wang KC, Park K, Shin HI, Lee JY, Chong S, et al. Predictive value of intraoperative bulbocavernosus reflex during untethering surgery for postoperative voiding function. *Clin Neurophysiol.* 2018;



- 129(12):2594-601.
41. Wilber RG, Thompson GH, Shaffer JW, Brown RH, Nash CL. Postoperative neurological deficits in segmental spinal instrumentation. A study using spinal cord monitoring. *J Bone Joint surg Am*. 1984;66(8):1178-87.
  42. Kitagawa H, Itoh T, Takano H, Takakuwa K, Yamamoto N, Yamada H, et al. Motor evoked potential monitoring during upper cervical spine surgery. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1989;14(10):1078-83.
  43. 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 multi-center survey. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1995;96(1):6-11.
  44. 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(1):1082-91.
  45. Feng B, Qiu G, Shen J, Zhang J, Tian Y, Li S, et al. Impact of multimodal intraoperative monitoring during surgery for spine deformity and potential risk factors for neurological monitoring changes. *J Spinal Disord Tech*. 2012;25(4):E108-14.
  46. Costa P, Peretta P, Faccani G. Relevance of intraoperative D wave in spine and spinal cord surgeries. *Eur Spine J*. 2013;22(4):840-8.
  47. Jin SH, Chung CK, Kim CH, Choi YD, Kwak G, Kim BE. Multimodal intraoperative monitoring during intramedullary spinal cord tumor surgery. *Acta Neurochir (Wien)*. 2015;157(12):2149-55.
  48. Epstein N. The surgical management of ossification of the posterior longitudinal ligament in 51 patients. *J Spinal Disord*. 1993;6(5):432-54.
  49. Fehlings MG, Brodke DS, Norvell DC, Dettori JR. The evidence for intraoperative neurophysiological monitoring in spine surgery: does it make a difference? *Spine (Phila Pa 1976)*. 2010;35(9 Suppl):S37-S46.
  50. Raynor BL, Bright JD, Lenke LG, Rahman RK, Bridwell KH, Riew KD, et al. Significant change or loss of intraoperative monitoring data: a 25-year experience in 12,375 spinal surgeries. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2013;38(2):E101-8.
  51. Traynelis VC, Abode-Iyamah KO, Leick KM, Bender SM, Greenlee JD. Cervical decompression and reconstruction without intraoperative neurophysiological monitoring. *J Neurosurgery Spine*. 2012;16(2):107-13.
  52. Choi I, Hyun SJ, Kang JK, Rhim SC. Combined muscle motor and somatosensory evoked potentials for intramedullary spinal cord tumour surgery. *Yonsei Med J*. 2014;55(4):1063-71.
  53. Harel R, Schleifer D, Appel S, Attia M, Cohen ZR, Knoller N. Spinal intradural extramedullary tumors: the value of intraoperative neurophysiologic monitoring on surgical outcome. *Neurosurg Rev*. 2017;40(4):613-9.
  54. Lyon R, Feiner J, Lieberman JA. Progressive suppression of motor evoked potentials during general anesthesia: the phenomenon of "anesthetic fade". *J Neurosurg Anesthesiol*. 2005;17(1):13-9.
  55. Plata Bello J, Perez-Lorensu PJ, Roldan-Delgado H, Brage L, Rocha V, Hernandez-Hernandez V, et al. Role of multimodal intraoperative neurophysiological monitoring during positioning of patient prior to cervical spine surgery. *Clin Neurophysiol*. 2015;126(6):1264-70.
  56. Sutter M, Eggspuehler A, Grob D, Jeszenszky D, Benini A, Porchet F, et al. The diagnostic value of multimodal intraoperative monitoring (MIOM) during spine surgery: a prospective study of 1,017 patients. *Eur Spine J*. 2007;16 Suppl 2:S162-70.
  57. Tanaka N, Nakanishi K, Fujiwara Y, Kamei N, Ochi M. Postoperative segmental C5 palsy after cervical laminoplasty may occur without intraoperative nerve injury: a prospective study with transcranial electric motor-evoked potentials. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2006;31(26):3013-7.
  58. Meyer PR, Cotler HB, Gireesan GT. Operative neurological complications resulting from thoracic and lumbar spine internal fixation. *Clin Orthop Relat Res*. 1988;(237):125-31.
  59. Lee JY, Hilibrand AS, Lim MR, Zavatsky J, Zeiller S,

- Schwartz DM, et al. Characterization of neurophysiologic alerts during anterior cervical spine surgery. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2006;31(17):1916-22.
60. North American Spine Society. Diagnosis and treatment of degenerative lumbar spinal stenosis: evidence-based clinical guidelines for multidisciplinary spine care [Internet]. Burr Ridge, IL: North American Spine Society; 2011 [cited 2019 June 13]. Available from: <http://content.guidelinecentral.com/guideline/get/pdf/4230>