



류한욱·강중구^a·정슬기

전북대학교 의학전문대학원 신경과학교실, 울산대학교의과대학 서울아산병원 신경과^a

INM in Scoliosis

Han Uk Ryu, MD, Joong Koo Kang, MD, PhD^a, Seul-Ki Jeong, MD, PhD

Department of Neurology, Chonbuk National University Medical School, Jeonju, Korea

Department of Neurology, University of Ulsan College of Medicine, Asan Medical Center Seoul, Korea^a

The purpose of intraoperative neurophysiologic monitoring (INM) in scoliosis is to prevent and minimize neurologic insult. There are several additional considerations in performing INM during scoliosis than during other spinal diseases because of different pathologic characteristics, surgical procedure and relative long duration of operation. The surgical correction of scoliosis may involve rotation of the spinal cord which may affect the corticospinal tract and result in abnormal wave changes. The surgical instrumentation like screw insertion may cause pedicle wall penetration accompanying spinal cord or nerve root injuries. The long duration of operation time can cause decrease in body temperature and "anesthetic fade" effect. These factors should be considered for appropriate interpretation of INM wave changes. In this article, we review the method and clinical application of INM in scoliosis.

Key Words: Intraoperative neurophysiologic monitoring, Scoliosis surgery, Monitoring, Intraoperative

서론

척추측만증(Scoliosis) 수술중신경계감시(Intraoperative neurophysiologic monitoring: INM)의 목적은 외과의사에게 수술 중에 신경계 손상 없이 안전하게 수술을 하고 있다는 정보를 주고, 신경계 손상이 발생한 경우 이를 감지하여 즉각적인 조치를 취하게 함으로써 수술 후 발생할 수 있는 하지 마비나 위약감과 같은 중대한 수술 후 신경계 합병증을 최소화하는 것이다. 이는 기본적으로 다른 척추나 척수 수술 중신경계감시의 원리와 동일한 방법으로 진행되며 해부학적, 신경생리적 요소를 고려하여 감시를 한다. 해부학적으로 척수의 혈관 분포를 보았을 때 전척수동맥(anterior spinal a.)은 척수의 2/3에 해당하는 앞쪽과 전외측(antero-lateral)

부위에 혈류 공급을 하며 이 부위에는 운동기능을 담당하고 있는 피질척수로가 분포하기 때문에 수술 후 사지마비 혹은 하반신 마비 등의 근력 저하가 합병증으로 발생할 수 있기 때문에 운동유발전위(motor evoked potential: MEP)가 이 부위의 기능을 감시하는데 사용이 된다. 후척수동맥(posterior spinal a.)은 척수의 등쪽 기둥(dorsal column)에 혈액을 공급하며, 이는 체성감각경로를 감시할 수 있는 체성감각유발전위(somatosensory evoked potential: 이하 SSEP)를 이용하여 감시한다. 하지만 척추측만증 수술중신경계감시를 정확하고 즉각적으로 하기 위해서는 기타 척추 및 척수 수술과 차이가 나는 병태생리학적, 수술적 특징을 이해하고 이를 수술중신경계감시에 반영하는 것이 중요하다. 척추측만증은 정면에서 응시하였을 때 척추가 옆으로 굴곡이 진 상태를 나타내지만, 추체 자체의 회전 변형과 동반되어 옆에서 관찰하여도 정상적인 만곡 상태가 아닌 3차원적인 기형상태를 이루고 있다. 척추측만증이 심한 경우에는 척수도 이런 기형에 따라 어느 정도 변형이 일어날 수 있으며, 그에 따른 피질척수로의 분포도 틀어져 있을 수 있기 때문에 이점도 수술중신경계감시에서 고려를 해야 된다. 본 논문에서는 척추측만증

Seul-Ki Jeong, MD, PhD

Department of Neurology and Research Institute of Clinical Medicine, Chonbuk National University Medical School Neurology, Chonbuk National University Hospital, Jeonju, Korea
TEL: +82-63-250-1590 FAX: +82-63-251-9363
E-mail: jeongsk@jbnu.ac.kr

에 대해 간단히 알아보고 그 수술중신경계감시의 감시 방법과 고려사항 및 특징을 설명하고자 한다.

본 론

1. 척추측만증의 정의, 종류 및 수술 방법

척추측만증은 척추가 옆으로 치우쳐 측방으로 편위 되거나 회전이 일어난 것으로 Cobb angle이 10° 이상 증가되어 있는 상태를 말한다. 여기서 Cobb angle은 척추 전장 단순 방사선 사진에서 가장 기울어져 있는 상하의 끝 척추를 택한 후, 각기 상단 및 하단에 선을 그은 뒤 이와 직각이 되는 선을 그어 서로 교차되는 각을 구하여 표시할 수 있다(Fig. 1).¹ 척추측만증은 크게 세 가지로 분류하는데, 선천성(congenital), 신경근(neuromuscular) 그리고 특발성(idiopathic)의 형태가 있다. 선천성 척추측만증은 태어날 때부터 기형이 있어 척추 뼈가 비대칭적이고 비정상적인 굴곡을 가진 상태를 말한다. 신경근 척추측만증은 이차적인 원인에 의해 발생하는 것으로 그 원인에는 뇌성 마비(cerebral palsy), 근육디스트로피(muscular dystrophy), 척수근위축증(spinal muscular dystrophy) 등이 있다. 가장 흔한 형태는 특발성 척추측만증으로 원인은 잘 불분명하며, 10세 이상의 청소년에서 주로 발생하는 것으로 되어 있다.² 특발성 척추측만증에서 수술은 성장기에 있는 환자에서 40도 이상의 만곡(curve)을 보이거나 성장이 끝난 환자에서 50도 이상의 만곡 또는 보조기 치료에도 불구하고 만곡이 진행되는 환자에서 시행한다.² 수술은 나사못(screw)이나 갈고리(hook)를 척추경(pedicle)에 삽

입하고 강봉(rod)을 이용한 분절간 고정술을 시행한다. 여기서 뒤척수융합술(posterior spinal fusion)의 방법으로 나사못 척수줄기 나사못(screw)을 사용하는 것이 갈고리(hook)를 사용하는 것보다 신경계 합병증 없이 교정이 더 잘되며 폐기능도 더 향상된 것으로 보고되었다.³ 그러나 척추측만증 수술은 주로 여러 범위에 걸쳐 척추를 수술하고 틀어진 만곡을 교정하기 때문에 다양한 기전에 의하여 척수의 손상을 입을 수 있다. 그 예로, 전척수동맥을 건드려 척수 허혈이나 경색이 올 수 있고, 척수가 압박(compression)을 받거나 긴장도(stretching)가 증가하여 직접적인 충격을 받을 수 있다. 또 척추경에 나사못을 삽입하면서 틈새가 발생하여 척수나 신경뿌리에 손상을 줄 수도 있다.⁴ 이러한 신경계 손상과 합병증을 예방하기 위하여 척추측만증 수술중신경계 감시를 다음과 같이 시행한다.

2. 수술중신경계감시 방법

1) 체성감각유발전위(SSEP)

SSEP은 가장 널리 쓰이는 수술중신경계감시 방법으로 척수뿐만 아니라 뇌, 말초 신경 기능과 관련된 수술을 진행할 때도 사용된다. 감시하고자 하는 부위의 기능을 평가하기 위해서 수술하는 부위보다 원위부의 말초 신경에서 자극을 주어, 자극 후 기록은 위험이 있는 관심 부위의 원위부와 근위부에서 동시에 실시한다. 이 이유는 관심 부위의 근위부에서 기록은 기능의 손상을 감시할 수 있으며, 원위부에서 기록은 적절한 자극이 주어지는지 확인할 수 있다.

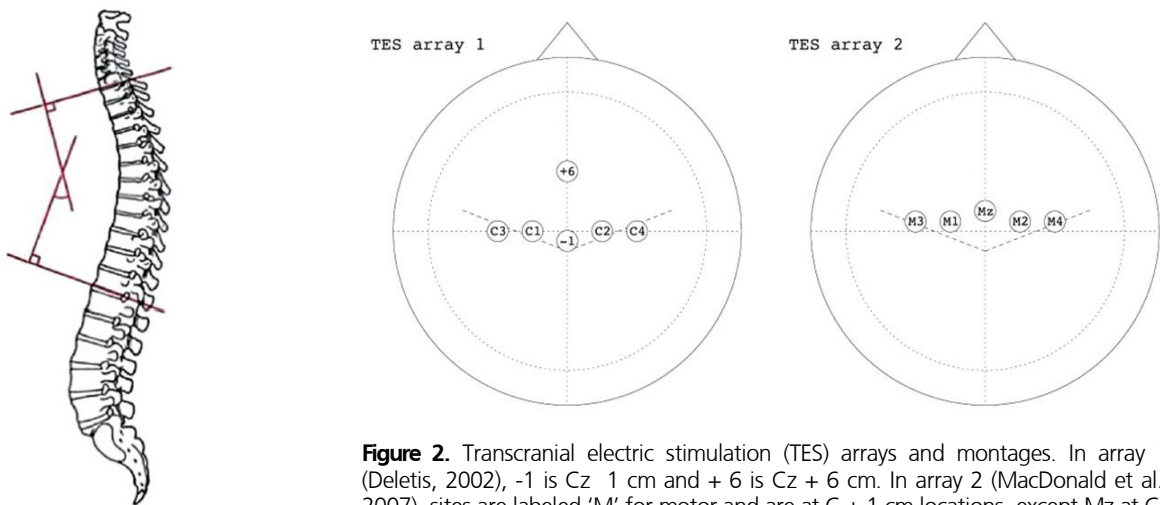


Figure 2. Transcranial electric stimulation (TES) arrays and montages. In array 1 (Deletis, 2002), -1 is Cz - 1 cm and + 6 is Cz + 6 cm. In array 2 (MacDonald et al., 2007), sites are labeled 'M' for motor and are at C + 1 cm locations, except Mz at Cz + 2 cm to make room for Cz SEP recording.²⁰

Figure 1. Cobb's angle¹

SSEP는 상지 또는 하지의 말초신경에 전기 자극을 주고 한군데 이상에서 기록을 하여 말초, 척수, 결절하구조물 및 결절과형을 얻는다. 상지 SSEP에서는 손목에서 정중신경이나 척골신경을 자극하고 하지 SSEP는 발목에서 후경골신경을 자극하면서 파형을 얻는다. SSEP를 일으키는 원발 매개체(generator origin)는 상지의 경우 말초 신경과 팔신경얼기(brachial plexus)를 지나 척수의 등쪽 기둥(dorsal column)을 따라 분포하고 하지는 말초 신경과 허리엉치신경얼기(lumbosacral plexus)를 거쳐서 등쪽 척수에 분포하는 것으로 되어있다.^{5,6} 이후 연수핵(medullary nucleus: cuneate and gracilis nucleus)에서 시냅스를 이루고 내측섬유대(medial lemniscus)에서 교차하여 시상핵(thalamic nucleus)에서 다시 시냅스 형성 후 감각운동피질(sensorimotor cortex)에 도달한다.

SSEP의 파형은 극성을 띄면서 나타나는데, 기록되는 위치와 잠복기를 가지고 파형을 해석할 수 있다. 상지에서 Erb 점(Erb's point)은 목빗근(sternocleidomastoid m.) 뒤쪽 가장자리에 중간 쇄골(clavicle) 상방 2 cm에 존재하며, 잠복기 9 ms의 음극 파형(N9)을 얻을 수 있다. 이후 주행 경로를 따라 잠복기 13 ms에서 C2 경추에 해당하는 반응(N13)과 20ms에서는 감각운동피질에 해당하는 반응(N20) 등을 차례로 얻을 수 있다(Table 1).⁷ 하지에서는 잠복기 22 ms에서 요추전위(N22)가 나타나며, 그 근처에서 말총(cauda equine)나 요천추열기(lumbosacral plexus)에 해당하는 반응이 기록된다.⁸ 이후 34 ms 지점에서 내측섬유대에서 시상핵에 이르는 결절하구조물 전위(N34)가 기록되며, 결절파형(P45)을 약 45 ms에서 얻을 수 있다. 하지에서는 발목부위의 후경골신

경 자극 후 슬와(popliteal fossa: PF)쪽에서 기록하고 그 방향으로척수전위인 N22, 내측섬유대에서 시상핵에 이르는 전위인 N34 그리고 감각운동피질 전위에 해당하는 P45를 얻을 수 있다(Fig 3A). 전기 자극 강도는 상지는 약 15~35 mA, 하지는 30~60 mA로 하며, 운동 역치에서 25% 증가된 강도로 유관상으로 수술에 방해되지 않을 정도의 근육 떨림을 확인할 수 있으면 좋다. 그 밖에 하지 SSEP의 주행경로가 길기 때문에 기록시간을 상지보다 조금 더 길게 가져가지만 대부분의 기록 방법 및 변수는 동일하다(Table 2).

2) 운동유발전위(Motor evoked potential: MEP)

MEP는 앞서 언급하였듯이 전척수동맥의 혈관 분포에 해당하는 척수를 감시하기 위하여 사용되는 방법이며, 여기에는 피질척수로가 포함되기 때문에 수술 후 신경학적 합병증과 가장 밀접하면서도 중요한 수술중신경계감시이다. 이는 자극과 기록하는 방법에 따라 신경운동유발전위(neurogenic MEP: nMEP), D-wave 그리고 근육운동유발전위(muscle MEP: mMEP)로 나눌 수 있다.

(1) 신경운동유발전위(Neurogenic MEP: nMEP)

nMEP는 수술 부위보다 근위부의 척추 부위에서 자극을 주고 기록은 수술 부위 아래의 말초신경에서 하는 방법이다.⁹ 이는 경추 부위에 긴 바늘전극(percutaneous needle)을 삽입하여 자극을 하고 슬와 부위의 말초 신경에서 기록하여 운동 경로(motor pathway)의 기능을 감시할 목적으로 시행하였다. 최근에 시행한 충돌연구(collision study)에 의하면 신경운동유발전위가 운동경로에 의한 반응이라기보다는 감각 경로에 의한 전위라는 증거들이 나타났기 때문에 운동경로

Table 1. Generated potentials and origin of components

Upper SEP waves	
N20 - near field potential by primary somatosensory cortex	
N18 - far field potential by medial lemniscus to thalamus	
P14 - far field potential by cuneate nucleus	
N13 - near field potential by cervical spine	
N9 (EP) - near field potential by brachial plexus	
Lower SEP waves	
P45 - near field potential by primary somatosensory cortex	
N34 - far field potential by medial lemniscus to thalamus	
P31 - far field potential by gracilis nucleus	
N22 - near field potential by lumbar spine	
PF - near field potential by popliteal fossa	

EP; Erb point, PF; popliteal fossa

Neurophysiologic intraoperative neurophysiologic monitoring 2nd
Aatif M. Husain

Table 2. SEP stimulating and recording parameters

Stimulation	Upper extremity	Lower extremity
Nerve stimulated	Median or Ulnar	Posterior tibial
Frequency (Hz)	2~5	2~5
Intensity (mA)	15~35	30~60
Duration (msec)	100~300	100~300
Number of averages	250~750	250~750
Recording		
Filter (Hz)	LFF 30	30
	HFF 1,000~3,000	1,000~3,000
Time base (msec)	40~50	75~150

HFF, high-frequency filter; LFF, low-frequency filter

Neurophysiologic intraoperative neurophysiologic monitoring 2nd
Aatif M. Husain

를 감시하는 방법으로 논란이 있다.^{10,11} 기존 문헌을 보면, 60명의 척추측만증 환자들을 대상으로 nMEP를 했을 때, 기술적인 문제(technical problems: placement of stimulus electrode, EMG artifacts)로 측정이 불가능한 경우를 제외하고는 수술후신경계 합병증 예측에 도움이 되는 것으로 보고하였다.¹² 그러나 Minahan 등은 수술 중 nMEP가 정상으로 보였던 환자 가운데 2명의 하반신마비(paraplegia) 증례를 보고하여 nMEP가 척수의 운동 경로(motor pathway)를 감시하는데, 부적절하다고 주장하였다.

(2) D 파형(D-wave)

D-wave는 두개경유(transcranial)에서 자극하여 척수의 경질막 밖(epidural)에서 직접 기록하는 방법으로 근육이완제나 마취에 영향이 거의 없기 때문에 근육운동유발전위(myogenic MEP, mMEP)보다 척수내수술(intramedullary surgery)에서 신경학적 합병증을 예측하는데 더 유용한 것으로 되어있다.^{13,14} 그러나 10번 흉추보다 아래에서 기록할 경우 충분한 피질척수로(corticospinal tract)가 부족하여 진폭이 작아지며, 편측화(lateralization)가 안되며 기록 시에 고정이 용이하지 않은 단점이 있다.^{15,16} 또한 척추측만증 교정을 통해 척수가 돌아가게 되고, 이에 경질막 밖(epidural) 기록 전극이 재배치되는 효과가 나타나서 위양성(false-positive) 결과가 많이 나타난다.¹⁶

(3) 두개경유전기 운동유발전위(transcranial electrical MEP: Tce-MEP)

근육운동유발전위는 가장 널리 사용되는 운동경로 감시 방법으로 두피에서 자극을 주고 상지와 하지의 근육에서 기록을 하는 방법이다. 주로 상지는 짧은엄지벌림근(abductor pollicis brevis m.), 새끼벌림근(abductor digiti quanti m.), 이두박근(biceps brachi m.) 등을 사용하며, 하지는 앞정간근(anterior tibialis m.), 엄지벌림근(abductor hallucis m.) 등을 이용하며 신경뿌리의 분포를 고려하여 감시 목적에 따라 적합한 근육을 선택한다(Table 3). 자극은 펄스열(pulse train) 두개강위 전기자극(transcranial electrical stimulation: TES)을 가장 널리 사용하고 있다. 전신마취하에 효과적인 근육운동유발전위(muscle motor evoked potential: mMEP)를 얻기 위해서는 펄스열로 전기 자극을 주는 것이 효과적임을 발견하였고, 3~9회의 펄스로 자극을 준다.¹⁷⁻¹⁹ 자극 방법에는 정전압(constant voltage)과 정전류(constant current)가 있으며 뇌내자극(intracranial stimulation)시에는 저항에 따

른 전류량 조절을 위하여 정전류 자극을 주로 사용하나, TES MEP에서는 정전압 방식을 가장 많이 사용한다.²⁰ 자극간 간격(interstimulus interval)은 2~4 ms 그리고 펄스 기간은(pulse duration)은 0.2~0.5 ms로 맞춘다. 자극 전극의 위치는 2013년 미국 신경생리감시협회(American Society of Neurophysiological Monitoring)에서 두 가지 배열을 제시하였는데, Deletis 가 제안한 C3, C1, C2, C4, Cz-1, Cz+6이 있고, MacDonald 등이 C+1을 M이라고 명명하여 소개한 M3, M1, Mz, M2, M4가 있다(Fig. 2).²⁰ 반구간 몽타주(inter-hemispheric montage)로 C1/C2와 C3/C4가 있고 이를 자극하여 팔과 다리 등에 MEP를 얻을 수 있다. 양극 변환(anode switching)을 통하여 좌우반구를 번갈아 가면서 자극할 수 있는데, 예를 들어 양극(anode) C1, 음극(cathode) C2로 자극을 주면 오른쪽 사지 근육에서 반응을 얻을 수 있고, 반대로 양극 C2, 음극 C1으로 자극을 주면 왼쪽 사지에서 근육 반응을 얻을 수 있다(Fig 3B).²¹ C3/C4 자극은 C1/C2 자극보다 더 전류 단락(current shunt)이 적기 때문에 보다 더 강한 반응을 얻을 수 있으나 자극에 따른 환자의 움직임이 더 심하게 나타나고, 전류 침투(current penetration)가 더 깊이 일어나기 때문에 두개내피질 허혈의 감시에는 제한이 있다.^{7,22}

3) 자발 및 유발 근전도(Spontaneous and triggered electromyography)

척수와 척수신경뿌리에서 나온 운동신경은 여러 개의 근육에 분포하기 때문에 이런 근육에 전극을 꽂아 수술중신경계감시를 할 수 있다. 자발근전도감시(spontaneous EMG)는 기록하는 근육에서 비정상적인 돌발파(burst), 증가된 신경근긴장방전(neuromyotonic discharge) 또는 갑자기 전기생리신호가 사라지는 것을 감시한다. 이는 mMEP와 함께 보조적으로 실시할 수 있으며, 척추 및 척수 수술에서 운동신

Table 3. Nerve roots and their muscle innervations

Sternocleidomastoid	C2, C3
Trapezius	C3, C4
Biceps, brachioradialis, deltoid	C5, C6
Triceps	C7, C8
Adductor pollicis brevis	C8, T1
Intercostals, abdominals, paraspinals	T6~T12
Iliopsoas, adductor longus	L2
Quadriceps, vastus lateralis	L2~L4
Tibialis anterior	L4~L5
Gastrocnemius, abductor hallucis	S1, S2
Anal spincter	S2~S4

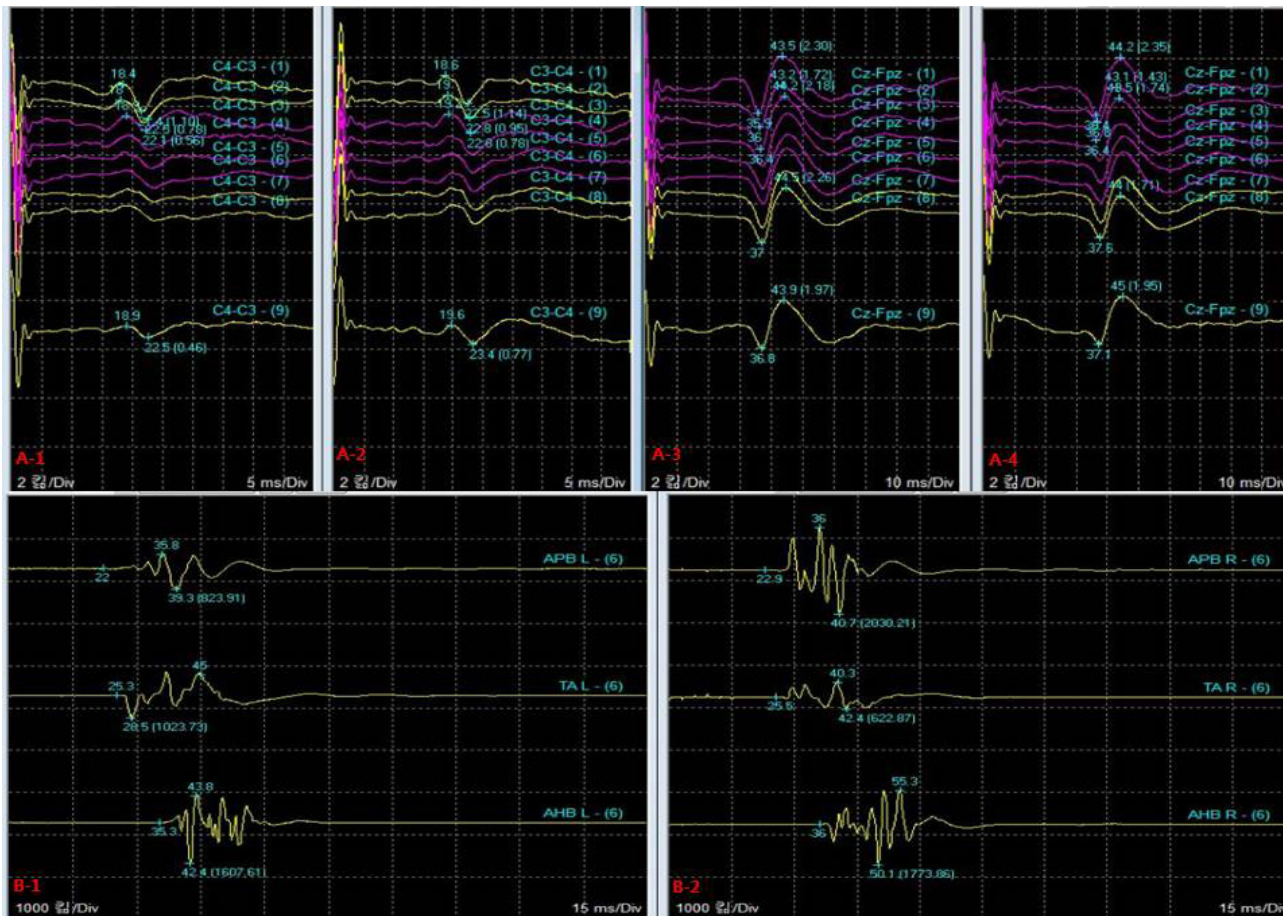


Figure 3. SEP waterfall and MEP during scoliosis surgery. Left median nerve SEP (A-1). Right median nerve SEP (A-2). Left posterior tibial nerve SEP (A-3). Right posterior tibial nerve SEP (A-4). Left MEP (B-1). Right MEP (B-2). SEP; somatosensory evoked potential, MEP; motor evoked potential, APB; abductor pollicis brevis, TA; anterior tibialis, AHB; abductor hallucis brevis

경손상을 조기에 감시하고 수술 후 합병증을 예상하는데 추가적인 도움을 줄 수 있다.²³ 자발근전도 반응에는 위상성 반응(phasic activity)과 긴장성 반응(tonic activity)이 있으며, 여러 가지 방식의 자극(눌림, 당김, 액체 관류)에 의하여 나타날 수가 있다. 비록 근전도 이상 반응이 수술 후 신경계 합병증 예상에 큰 도움은 못 주는 것으로 되어 있으나 근육 반응이 보다 지속적이고, 높은 빈도(high frequency)의 반응이 나타날수록 신경계 손상과 연관이 높은 것으로 알려져 있다.^{8,24} 유발근전도(triggered EMG)는 신경손상을 피하기 위하여 직접 자극을 주어서 이상 근전도 반응 여부와 그 역치(threshold)를 관찰하는 감시 방법으로 종양 주위에 안면신경의 위치를 확인하거나 척수고정술에서 척추줄기(pedicle)에 나사못(screw)이 잘 들어갔는지 확인할 때도 사용된다.

3. 마취제 선택과 고려사항

성공적인 수술중신경계감시를 위해서는 마취과의 협조 및 대화가 필수적이다. 마취제는 SSEP에도 영향을 미치나, 특히 MEP의 경우 신경근 차단제(neuromuscular blocking: NMB agent, e.g., rocuronium, vecuronium)나 할로젠화된 흡입마취제(e.g., isoflurane)를 사용할 경우 파형을 잃을 수도 있다.²⁵ 불가피하게 NMB 차단제를 사용해야 할 경우에는 한꺼번(bolus)에 주사하는 것보다 일정한 양으로 지속적으로 주입하는 것이 수술중신경계 감시를 원활하게 할 수 있다.⁴ 이는 2Hz로 말초운동신경을 4번 자극하는 “train of four” 자극을 통하여 1~2회의 근육 떨림(muscle twitch)이 관찰되는 정도를 유지함으로써 마취 정도를 가늠하고 조절할 수 있다.²⁵ 그러나 가장 많이 이용되는 마취 방법은 propofol과 opioid를 이용한 전신정맥마취(total intravenous anesthesia:

TIVA)이다. 이 방법은 마취제로 인한 MEP 신호의 약화가 다른 흡입마취제나 NMB 차단제보다 적기 때문에 척추측만증 수술에서도 선호된다.^{26,27} 또 한 가지 고려해야 될 사항은 “anesthetic fade” 효과인데, 이것은 desflurane/ nitrous oxide/narcotic 또는 desflurane/propofol/narcotic 마취제를 사용하여 장시간 수술을 진행할 경우 특별한 신경학적 손상이나 다른 전신상태에 변화가 없어도 기존MEP를 얻을 수 있는 역치가 올라가는 것을 말한다.²⁸

4. 경고 기준(Warning criteria) 및 임상적 적용(Clinical application)

전통적으로 신경계 손상이 의심이 될 때 하였던 방식은 직접 환자를 깨워서 신경학적 검사를 실시하는 방법이었으나, 이는 그 순간의 신경학적 상태만을 나타내며, 마취에서 깨면서 발생할 수 있는 부작용(기도삽입관 제거)과 수술시간의 연장 같은 단점이 존재한다. 따라서 현재는 MEP와 SSEP를 동시에 이용하여 수술 중 척수의 기능을 지속적으로 감시한다.

일반적으로 SSEP 감시에서 경고기준은 기준선(baseline) 값에 비교하여 진폭이 50% 이상 감소하거나 잠복기가 10% 이상 연장되는 것을 기준으로 한다.^{29,30} 흔히 잠복기의 연장은 탈수초화(demyelination)를 의미하고, 진폭의 감소는 전도차단(conduction block)이나 축삭의 손상(axonal injury)를 나타내기 때문에 수술중신경계감시에서는 진폭의 변화를 더 중요시한다.^{31,32} 척추 및 척수 수술의 MEP의 해석은 머리 수술보다 더 복잡하여 50%에서 80% 이상의 진폭 감소를 경고 신호로 보는 보고도 있고,^{33,34} 80% 이상 MEP 진폭 감소에도 위양성(false-positive)이 보고된 사례도 있다.²⁰ 단순히 자극에 대하여 MEP 반응이 있는지 없는지를 가지고 임상적인 의미를 부여하는 경우도 있다.¹⁴ 그 밖에도 MEP를 얻는 역치가 특별한 마취제나 전신상태 변화 없이 상승한 것을 운동경로 손상의 경고 신호로 보기도 한다.^{35,36}

5. 척추측만증수술에서 수술중신경계감시할 때 추가적으로 고려해야 할 것들

일반적인 척추 및 척수 수술과 달리 척추측만증수술에서 수술중신경계를 감시할 때 신경을 써야 되는 부분이 몇 가지 있다.

첫째로 척수융합술(spinal fusion)을 위하여 나사못을 많이 사용하는데, 이를 척추경(pedicle)에 삽입하면서 틈새가 발생하여 특정 신경뿌리에 손상을 줄 수 있다. 그러나 운동 신경단위는 하나의 신경이 여러 군데의 근육에 분포할 수 있

으며, 신경 열기도 복잡하게 얽혀있기 때문에 단독신경뿌리의 손상은 기본적인 SSEP나 MEP를 통해서 감시를 할 수가 없다. 이런 개별적인 신경뿌리 손상을 감시하기 위해서 피부분절(dermatomal) SSEP를 실시해야 되지만, 사람마다 피부분절 분포가 다양하고 기술적으로 파형을 얻기가 어렵기 때문에 임상에서 사용하기에는 한계가 있다.³⁷ 다른 방법으로 유발근전도기록(triggered electromyographic recordings)을 이용하여 척추측만증 수술 중 나사못(screw)을 삽입할 때 발생할 수 있는 척추경(pedicle) 틈새를 감시할 수 있다. 방법은 나사못에 직접 정전류(constant current) 자극을 주고 복직근(rectus abdominis)에서 기록하여 그 역치를 구한다.³⁸ 내측척추경에 틈새가 발생하면 유발근전도기록의 역치가 감소하게 되는데 흉추 또는 요추추뼈에서 역치가 8~15 mA에 도달하면 나사못이 신경뿌리에 근접하는 것으로 생각하고 6 mA 미만이면 척추경틈새가 있을 가능성이 높다.^{38,39} 하지만 현재 정해진 국제 기준은 없으며, 제 2~6 흉추사이에서 유발근전도기록의 신뢰도가 떨어진다는 보고⁴⁰도 있기 때문에 보다 많은 연구가 필요하다.

둘째, 강봉(rod)을 이용하여 만곡을 교정하는데, 이 때 척수도 같이 돌아가면서 영향을 받을 가능성이 높다. 실제로 다른 척추 및 척수 수술중감시와 수술 후 합병증 예측에 매우 유용한 것으로 되어 있는 D-wave의 경우, 척추측만증 수술에는 신뢰도가 떨어지는 것으로 되어 있다.¹⁶ 이는 기록 전극이 움직여서 그럴 수도 있으나, 척추측만증 교정술을 하면서 척수가 같이 영향을 받거나 피질척수로의 비정상적인 변형도 의심해 볼 수 있겠다.

셋째로 수술시간이 비교적 길다는 점이다. 수술 시간이 길어지면 환자의 체온이 떨어질 수 있고, 온도가 감소하면 신경 전도 속도가 느려져서 잠복기가 연장되기 때문에 온풍기 같이 기기로 적절한 체온을 유지하는 것이 중요하다.⁴¹ 또, 수술이 지연되면 장시간 마취제의 사용에 따른 “anesthetic fade” 효과로 같은 강도로 자극하여도 파형이 작아지는 현상이 나타날 수 있으며, 이는 정상적인 사람과 척수병증(myelopathy)이 있는 환자에서 각각 6.6시간과 5시간 이후에 보일 수 있다.²⁸

마지막으로 고려해야 될 사항은 수술범위가 크기 때문에 출혈이 많을 수 있고, 수혈이 자주 필요하다는 점이다. 혈색소 7g/dL 미만의 심한 빈혈은 신경 이상을 일으킬 수 있고, 10g/dL 이상되어야 안정적인 산소 공급이 조직 내로 이루어지는 것으로 알려져 있다.⁴² 다량의 출혈은 저혈압을 일으키고, 대뇌 혈류 공급에 차질을 일으켜 SEP 파형에 영향을 줄

수 있기 때문에 유의해야 하겠다.⁴³

결 론

척추측만증 수술중신경계감시는 지금까지 알려진 척추 및 척수 수술중감시와 비슷한 방법으로 실시하며, 몇 가지 다른 특징을 유념해야 한다. 수술의 과정을 이해하여 어떤 처치과정에서 파형의 변화가 일어났는지 관찰하고, 특정수술행위 이후에 파형의 변화가 나타났다면, 그 전 단계로 되돌려서 파형이 다시 돌아오는지 확인하는 것이 중요하다. 또한 수술적 행위 이외에 파형의 변화가 일어날 수 있는 요인들을 생각하고 경고 신호를 해석하는데 신중해야 한다. 아직까지 척추측만증 수술중신경계감시에서 국제적인 기준이 정립되어 있는 것은 없기 때문에 병원마다의 수술 환경과 환자의 상태를 고려하여 전기생리학적 변화를 잘 관찰하고 의미 있는 해석을 내릴 수 있도록 노력하고 연구하는 자세가 중요하겠다.

References

1. YJ Choi SY, BH Moon, JH Chung, YU Yun, KH Kim, HW Nam, CR Lee. Report for Correlation between the Measurement of Thoracic Kyphosis and the Herniation of Cervical Intervertebral Disc of Neck Pain Patients who Visit Korean Medicine Hospital. *The Journal of Korea CHUNA Manual Medicine for Spine & Nerves* 2015;10:63-74.
2. Roach JW. Adolescent idiopathic scoliosis. *Orthop Clin North Am* 1999;30:353-365, vii-viii.
3. Kim YJ, Lenke LG, Cho SK, Bridwell KH, Sides B, Blanke K. Comparative analysis of pedicle screw versus hook instrumentation in posterior spinal fusion of adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2004;29:2040-2048.
4. Mendiratta A, Emerson RG. Neurophysiologic intraoperative monitoring of scoliosis surgery. *J Clin Neurophysiol* 2009; 26:62-69.
5. Cohen AR, Young W, Ransohoff J. Intraspinal localization of the somatosensory evoked potential. *Neurosurgery* 1981;9: 157-162.
6. Macon JB, Poletti CE, Sweet WH, Ojemann RG, Zervas NT. Conducted somatosensory evoked potentials during spinal surgery. Part 2: clinical applications. *J Neurosurg* 1982;57: 354-359.
7. Toleikis JR. Intraoperative monitoring using somatosensory evoked potentials. A position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring. *J Clin Monit Comput* 2005;19:241-258.
8. Stecker MM. A review of intraoperative monitoring for spinal surgery. *Surg Neurol Int* 2012;3:S174-187.
9. Owen JH, Laschinger J, Bridwell K, Shimon S, Nielsen C, Dunlap J, et al. Sensitivity and specificity of somatosensory and neurogenic-motor evoked potentials in animals and humans. *Spine (Phila Pa 1976)* 1988;13:1111-1118.
10. Toleikis JR, Skelly JP, Carlvin AO, Burkus JK. Spinally elicited peripheral nerve responses are sensory rather than motor. *Clin Neurophysiol* 2000;111:736-742.
11. Minahan RE, Sepkuty JP, Lesser RP, Sponseller PD, Kostuik JP. Anterior spinal cord injury with preserved neurogenic 'motor' evoked potentials. *Clin Neurophysiol* 2001;112: 1442-1450.
12. Lubitz SE, Keith RW, Crawford AH. Intraoperative experience with neuromotor evoked potentials. A review of 60 consecutive cases. *Spine (Phila Pa 1976)* 1999;24:2030-2033; discussion 2033-2034.
13. Kothbauer K, Deletis V, Epstein FJ. Intraoperative spinal cord monitoring for intramedullary surgery: an essential adjunct. *Pediatr Neurosurg* 1997;26:247-254.
14. 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:e1.
15. Costa P, Peretta P, Faccani G. Relevance of intraoperative D wave in spine and spinal cord surgeries. *Eur Spine J* 2013;22:840-848.
16. 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;117:2093-2101.
17. Taniguchi M, Cedzich C, Schramm J. Modification of cortical stimulation for motor evoked potentials under general anesthesia: technical description. *Neurosurgery* 1993;32:219-226.
18. Jones SJ, Harrison R, Koh KF, Mendoza N, Crockard HA. Motor evoked potential monitoring during spinal surgery: responses of distal limb muscles to transcranial cortical stimulation with pulse trains. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1996;100:375-383.
19. Macdonald DB. Intraoperative motor evoked potential monitoring: overview and update. *J Clin Monit Comput* 2006; 20:347-377.
20. Macdonald DB, Skinner S, Shils J, Yingling C. Intraoperative motor evoked potential monitoring - a position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring. *Clin Neurophysiol* 2013;124:2291-2316.
21. Szelenyi A, Kothbauer KF, Deletis V. Transcranial electric stimulation for intraoperative motor evoked potential monitoring: Stimulation parameters and electrode montages. *Clin Neurophysiol* 2007;118:1586-1595.
22. Holdefer RN, Sadleir R, Russell MJ. Predicted current densities in the brain during transcranial electrical stimulation. *Clin Neurophysiol* 2006;117:1388-1397.
23. Skinner SA, Nagib M, Bergman TA, Maxwell RE, Msangi G. The initial use of free-running electromyography to detect

- early motor tract injury during resection of intramedullary spinal cord lesions. *Neurosurgery* 2005;56:299-314; discussion 299-314.
24. Romstock J, Strauss C, Fahlbusch R. Continuous electromyography monitoring of motor cranial nerves during cerebellopontine angle surgery. *J Neurosurg* 2000;93:586-593.
 25. Sloan TB, Heyer EJ. Anesthesia for intraoperative neurophysiologic monitoring of the spinal cord. *J Clin Neurophysiol* 2002;19:430-443.
 26. Pechstein U, Nadstawek J, Zentner J, Schramm J. Isoflurane plus nitrous oxide versus propofol for recording of motor evoked potentials after high frequency repetitive electrical stimulation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1998;108:175-181.
 27. Scheufler KM, Zentner J. Total intravenous anesthesia for intraoperative monitoring of the motor pathways: an integral view combining clinical and experimental data. *J Neurosurg* 2002;96:571-579.
 28. Lyon R, Feiner J, Lieberman JA. Progressive suppression of motor evoked potentials during general anesthesia: the phenomenon of "anesthetic fade". *J Neurosurg Anesthesiol* 2005;17:13-19.
 29. Brown RH, Nash CL, Jr., Berilla JA, Amaddio MD. Cortical evoked potential monitoring. A system for intraoperative monitoring of spinal cord function. *Spine (Phila Pa 1976)* 1984;9:256-261.
 30. York DH, Chabot RJ, Gaines RW. Response variability of somatosensory evoked potentials during scoliosis surgery. *Spine (Phila Pa 1976)* 1987;12:864-876.
 31. Forbes HJ, Allen PW, Waller CS, Jones SJ, Edgar MA, Webb PJ, et al. Spinal cord monitoring in scoliosis surgery. Experience with 1168 cases. *J Bone Joint Surg Br* 1991;73:487-491.
 32. O'Brien MF, Lenke LG, Bridwell KH, Padberg A, Stokes M. Evoked potential monitoring of the upper extremities during thoracic and lumbar spinal deformity surgery: a prospective study. *J Spinal Disord* 1994;7:277-284.
 33. Jacobs MJ, Meylaerts SA, de Haan P, de Mol BA, Kalkman CJ. Strategies to prevent neurologic deficit based on motor-evoked potentials in type I and II thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg* 1999;29:48-57; discussion 57-49.
 34. Pelosi L, Stevenson M, Hobbs GJ, Jardine A, Webb JK. Intraoperative motor evoked potentials to transcranial electrical stimulation during two anaesthetic regimens. *Clin Neurophysiol* 2001;112:1076-1087.
 35. 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;95:161-168.
 36. Calancie B, Harris W, Broton JG, Alexeeva N, Green BA. "Threshold-level" multipulse transcranial electrical stimulation of motor cortex for intraoperative monitoring of spinal motor tracts: description of method and comparison to somatosensory evoked potential monitoring. *J Neurosurg* 1998;88:457-470.
 37. Katifi HA, Sedgwick EM. Evaluation of the dermatomal somatosensory evoked potential in the diagnosis of lumbosacral root compression. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1987;50:1204-1210.
 38. 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;27:2030-2035.
 39. Glassman SD, Dimar JR, Puno RM, Johnson JR, Shields CB, Linden RD. A prospective analysis of intraoperative electromyographic monitoring of pedicle screw placement with computed tomographic scan confirmation. *Spine (Phila Pa 1976)* 1995;20:1375-1379.
 40. Samdani AF, Tantor M, Cahill PJ, Ranade A, Koch S, Clements DH, et al. Triggered electromyography for placement of thoracic pedicle screws: is it reliable? *Eur Spine J* 2011;20:869-874.
 41. Sloan TB. *Textbook of Neuroanesthesia with Neurosurgical and Neuroscience Perspectives*. New York, NY, 1997.
 42. Nagao S, Roccaforte P, Moody RA. The effects of isovolemic hemodilution and reinfusion of packed erythrocytes on somatosensory and visual evoked potentials. *J Surg Res* 1978;25:530-537.
 43. Dolan EJ, Transfeldt EE, Tator CH, Simmons EH, Hughes KF. The effect of spinal distraction on regional spinal cord blood flow in cats. *J Neurosurg* 1980;53:756-764.