

Review Article

말초신경계 질환의 수술에서 수술중신경계의 검사와 감시

이승학¹, 김완림², 구용서³, 김대열^{1*}

¹서울아산병원 울산대학교 의과대학 재활의학과

²서울아산병원 울산대학교 의과대학 정형외과

³서울아산병원 울산대학교 의과대학 신경과

Intraoperative neurophysiological testing and monitoring in surgeries for peripheral nerve disorders

Seung Hak Lee¹, Wanlim Kim², Yong Seo Koo³, Dae Yul Kim^{1*}

¹Department of Rehabilitation Medicine, Asan Medical Center, University of Ulsan, College of Medicine, Seoul, Korea

²Department of Orthopedic Surgery, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine, Seoul, Korea

³Department of Neurology, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine, Seoul, Korea

ABSTRACT

Intraoperative neurophysiological testing and monitoring has become an important neurological assessment in peripheral nerve surgery. Vital information such as localization of injury site, avoidance of unnecessary injury, and surgical decision making can be provided by intraoperative neurophysiological testing and monitoring during the surgery. It can be applied in peripheral nerve trauma, nerve entrapment, tumor biopsy or resection, fascicular biopsy, fascicular nerve transfer and other reconstruction surgeries. The choice of monitoring technique must be tailored to each patient's clinical situation and to the specific surgical types. Even though it demands additional time, labor and expense to the operation, there are many advantages to using intraoperative neurophysiological testing and monitoring in peripheral nerve surgery.

Keywords: intraoperative neurophysiological monitoring; nerve action potential; peripheral nerve disorders

서론

말초신경의 손상, 신경포획(nerve entrapment), 종양 생검 또는 절제 및 기타 재건과 관련된 수술 중에 수술중신경계 검사 및 감시는 매우 유용하다. 특히 연속성 신경중(neuromas-in-continuity)을 평가하고, 신경 압박 시에 압박의 위치 및 정도를 평가할 수 있으며, 종양 절제 중 영향을 받을 수 있는 신경 또는 인접 신경(들)에 대한 손상을 예방하는데 도움을 준다. 또한 신경속(nerve fascicle)의 생검이나 신경속 이전술(fascicular nerve transfer)과 같은 고위험 술기에서도 신경 합병증을 최소화하는 것에 유용하다. 직접적으로 말초신경을 대상으로 하는 수술이 아니더라도 인체의 여러 부위에서 이루어지는 수술이 말초신경의 손상을 가져올 수 있다. 본 종설에서는 각종 말초신경계 질환의 수술 및 말초신경이 손상될

수 있는 수술 중에 사용되는 다양한 수술중신경계 검사 및 감시 기법을 소개하고, 그 활용방안에 대해서 논의하고자 한다.

본론

1. 방법론

1) 신경활동전위(nerve action potential)의 측정

말초신경계의 질환의 수술에서 타 신경계 수술과 가장 차별화되는 방법론은 신경활동전위(nerve action potential, NAP)를 측정하는 것이다. NAP의 유무는 병변에 걸쳐 자발적인 신경 재생의 존재 여부를 신뢰되고 있고, 재현 가능하게 판단할 수 있는 근거가 되며, 근전도 검사(electromyography, EMG)에서 손상신경이 지배하는 근육에서 관찰되는 회복 조건보다 몇 달 전에 감지될 수 있다[1]. 병변에 걸쳐 NAP의 존재

Received August 6, 2020; Revised August 31, 2020; Accepted September 7, 2020

*Corresponding author: Dae Yul Kim, Department of Rehabilitation Medicine, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine, 88, Olympic-ro 43-gil, Songpa-gu, Seoul 05505, Korea

Tel: +82-2-3010-3793, Fax: +82-2-3010-6964, E-mail: dykimsmat@gmail.com

© 2020 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.

는 축삭 기능의 보존이나 의미있는 신경재생을 뜻하며, 중요한 임상적인 회복으로 간주된다. 영장류를 대상으로 한 실험 연구에 따르면 이러한 반응을 얻으려면 4,000-5,000개의 수초화된 축삭이 필요한 것으로 보고되었다[2]. 또한 NAP는 신경 손상 후 6-8주 이내에 수행할 수 있기 때문에 복합근육활동전위(compound muscle action potential, CMAP)와 같은 다른 기법보다 장점이 있다.

NAP의 기록을 위해서는 비교적 긴 길이의 신경을 충분히 노출시켜야 하므로 이를 위해 신경을 잘 박리할 필요가 있다. 최소 3-4 cm 정도의 짧은 구간에서도 NAP를 시도해볼 수 있으나, 잡파(artifact)로 인해 어려울 수 있다(Fig. 1). 우선 수술 시야에서 접근할 수 있는 기능하는 인접 신경 또는 병변에 근위부에 영향을 받은 신경에서 정상 NAP를 얻어야 한다. 기술적인 문제가 드물지 않기 때문에 정상적인 NAP 신호를 우선 얻는 것이다. 이때 외과의, 신경생리학자(neurophysiologist), 임상병리사 간에 신중한 토론이 필요하다. 이러한 정상적인 신호를 얻고 난 이후, 손상이 된 신경 부분을 평가한다. 외과의는 전극을 손상 부위로 이동시키면서 NAP 반응이 보존되는지 확인하게 되는데, 반응을 얻은 경우는 신호가 손상부위의 원위부 어디까지 나오는지 살펴봐야 한다. 또한 조금씩 전극을 이동시키며 근육의 수축도 관찰해야 한다. 이 반응을 통해서 신경이 살아날 수 있는 위치를 예측할 수 있다[3].

2) 기타 감시기법

타 신경계 수술 시에 많이 활용되는 체성감각유발전위(somatosensory evoked potentials, SEP), 운동유발전위(motor evoked potentials), EMG 또한 말초신경계질환의

수술에 동일한 원리로 활용될 수 있다. 특히 유발 EMG를 통해서 CMAP 진폭의 변화를 지속적으로 감시하면 신경 전도의 실시간 연속평가가 가능하다. CMAP의 진폭 감소는 신경 손상에 대한 정량적 정보를 제공할 수 있다. 이것은 위험에 처한 신경의 감시 역할을 할 뿐만 아니라, 또한 수술에 있어 안전한 영역과 신경손상을 예방하는 접근법에 대한 근거를 제공한다[4,5]. 체성감각유발전위의 경우 수술의 종류, 위치에 따라 감각기능을 보존하기 위해 다양한 방식으로 적용해볼 수 있다. 전기생리학적 검사는 아니지만 말초신경 종양성 질환에서 수술중 고해상도 초음파 검사(high-resolution ultrasound) 나 조영증강 초음파(contrast-enhanced ultrasound) 기법이 도입된다는 보고도 있다[6]. 따라서 전기생리검사와 타 영상검사 등을 병합하여 감시함으로써 말초신경조직을 최대한 보존하고, 그 기능을 유지할 수 있는 새로운 방법론이 향후 제시될 수 있다.

2. 질환 별 수술중신경계감시

1) 말초신경의 외상성 손상(traumatic peripheral nerve injury)

말초신경손상에서 가장 흔한 형태는 손상된 신경이 연속성(neuromas-in-continuity)을 가지고 그대로 남아있는 것이다. 병변의 심각성과 자발적 회복 가능성에 대한 판단이 매우 어려우나, 외과적 의사 결정 및 예측추정에 중요하다. 신경의 손상된 부위를 눈으로 보거나 촉진하는 것으로 신뢰도 있게 회복의 가능성, 신경 내부의 조직학적 변화를 예측할 수 없다. 이러한 상황에서 신뢰할 수 있는 수술중 평가방법은 앞서 언급한 NAP를 활용하는 것이다[7]. NAP는 단일 신경 내부의 신경속과 같은 신경의 한 부분에도 동일하게 적용될 수 있다. 손상

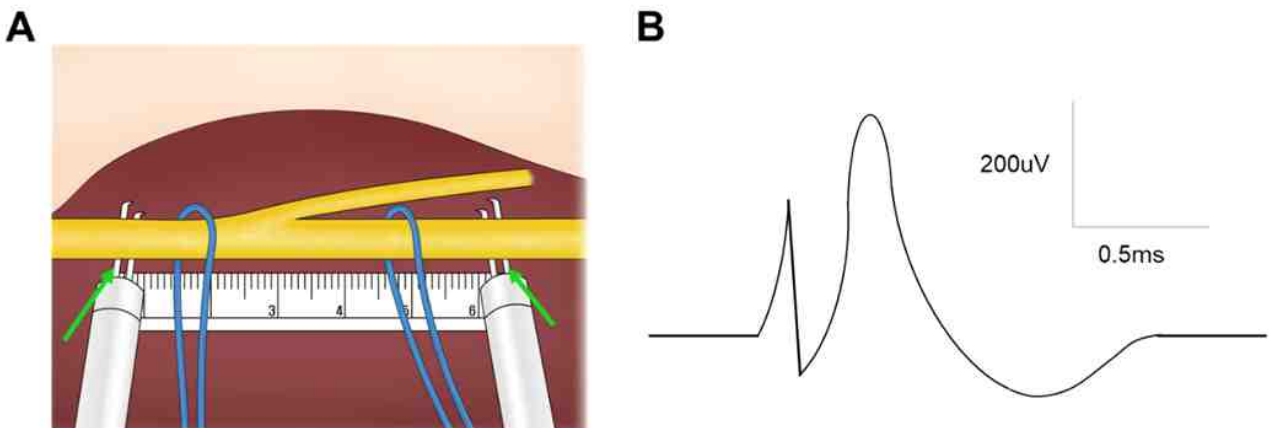


Fig. 1. Nerve action potential (NAP) recording in a peripheral nerve segment. A schematic diagram (A) shows that circumferential mobilization of nerve segment to obtain NAP. Electrical stimulation and pick-up electrodes (green arrows) are more than 4 cm apart. NAP Recordings should be first obtained on functioning, neighboring nerve segments. Because normal NAP (B) allows electrophysiologist to check the monitoring system, as technical problems are common.

이 신경의 전체 단면을 균일하게 포함하지 않을 수 있으며, 이런 상황에서는 내부 신경박리술(neurolysis)을 수행한 다음 각기 다른 신경속에 대한 NAP 기록을 수행할 수 있다. 이것을 통해 일부의 신경기능을 보존하고 기능하지 않는 부분을 절제, 재구성하는 "분할 복구(split repair)"를 시도할 수 있다[8]. 병변에 걸쳐 발생하는 NAP 기록을 기반으로 한 신경박리술은 90%의 사례에서 좋은 기능 회복을 가져왔다. 이러한 결과는 상지와 하지에 있는 다양한 다른 신경에서 재현되었다[7]. 반면 NAP가 병변을 걸쳐 나타나지 않으면 수년 동안 임상적 회복이 나타나지 않는 것을 시사한다. NAP가 없는 병변의 절제 및 재건 시 조직학적 분석을 했을 때 가장 심각한 신경손상인 "신경잘림(Neurotmesis)" 수준의 손상과 관련되어 있음이 확인되었다[9]. NAP가 나오는 경우, 외과의는 신경박리술을 고려할 수 있고, 나오지 않는 경우는 신경이식술이나(nerve graft), 신경복원술(nerve repair)이나 신경전이술(nerve transfer)과 같은 다른 신경 재건 수단을 고려할 수 있다. 이 간단한 알고리즘을 기반으로 외과의는 예측 가능한 결과를 얻을 수 있다. 반대로, 신경 재생을 위한 중요한 기간이 지나가고 커져 있는 손상신경에서 NAP가 나오지 않는 경우 신경박리술을 수행해서는 안 된다[10]. 또한 NAP가 나오는 연속성 신경 종에서 흉터가 생긴 외양만으로 신경이식술을 수행해서는 안 된다.

외상으로 인해 신경절단(nerve transection) 여러가지 기법을 통해서 초기 신경복원 중에 절단된 신경 말단의 기능을 평가할 수 있다. 일반적으로 적용되는 방법은 근위부와 원위부 끝을 정렬시에 외피 신경혈관 정렬법, 육안 신경속 정렬 또는 신경속 배열 활용법 등이다[11]. 다른 방법으로 아세틸콜린가수분해효소(acetylcholinesterase)와 탄산무수화효소(carbonic anhydrase) 마커를 사용하여 조직 화학적 염색을 통해 운동 및 감각 축삭을 구분할 수 있다[12]. 급성 신경 손상에서 깨어있는 상태의 환자를 대상으로 환자의 신경절단의 근위부 말단의 신경속 자극을 통해 감각이상을 유도해 매핑을 할 수 있다. 원위 말단의 운동 신경속은 절단 후 3-4일까지도 전기자극을 통하여 근육 연축을 일으킬 수 있고 이를 통해 매핑이 가능하다[13].

2) 종양성 질환(tumors)

말초신경에 발생하는 종양 절제에도 NAP를 사용할 수 있다. 신경초 종양(nerve sheath tumor)에서 개별 신경속의 NAP를 종양을 걸쳐서 측정했을 때, 신호가 나오지 않으면 그 신경속은 다른 신경속에 비하여 기능적이지 않음을 시사한다. 또한 신경 자극을 통해서 얻을 수 있는 유발 근전도(evoked electromyography)를 함께 사용하면 원발성(양성 또는 악성) 또는 전이성 말초 신경 종양의 절제 중에 중요한 운동 기능

을 보존하는 데 도움을 준다. 휴대용 미세 팁 단극 자극기(monopolar stimulator)를 사용하여 낮은 자극강도(예: 0.5 mA)로 종양 표면의 전기 매핑을 하면, 종양을 안전하게 제거할 수 있는 영역을 식별할 수 있다. 종양이 직접적으로 침범한 신경속은 초점 자극을 했을 때 유발 근전도 반응이 일어나지 않는다. 원위 근육에서 근전도 활동을 기록하거나 소리를 들으며 신경을 박리하는 것이 절제 경로와 절제 범위를 안내하는데 도움된다. 이러한 기술을 사용하면 외과의가 기능하는 신경 조직과 기능하지 않는 신경 조직을 구별할 수 있다(Fig. 2). 그리고 종양을 가능한 한 정상 신경속의 손상을 최소화하면서 절제할 수 있으며, 따라서 관련된 사지의 기능적 유지를 극대화할 수 있다. 또한 종양 절제동안 감각 기능을 모니터링하기 위해 체성감각유발전위(SEP)를 사용할 수도 있다[14].

가장 흔한 신경초 종양인 슈반세포종(schwannoma)의 경우, 일반적으로 비기능적 신경속으로 들어가고 나가는 작은 단일 덩어리 형태를 가진다[15]. 신경속 수준에서 슈반세포종의 절제는 종종 신경학적 결손 없이 수행될 수 있다. 비총상 신경 섬유종(nonplexiform neurofibromas)의 경우, 종양과 관련된 여러 개의 신경속이 있을 수 있다. 이 경우에도 여전히 신경학적 결손 없이 종양의 절제가 이루어질 수 있으나, 잔여 종양이 남을 수도 있다. 때로는 신경이식이 필요할 수도 있고, 시간이 지남에 따라 신경학적 결손이 줄어들 수 있다. 악성 종양이나 양성이라 하더라도 더 공격적인 종양의 경우에도(예: 신경 다발막종, perineurinoma) 수술 중 모니터링을 사용하여 생검(아래 참조) 또는 절제 중 가능한 많은 신경 구조를 보존할 수 있다. 주요 신경에 근접한 다른 종양의 경우, 수술 중 전기 자극 등을 통해 이러한 신경을 감지하고 보호할 수 있으므로 수술중 신경계 감시기법을 적극적으로 고려해야 한다.

3) 신경포착(nerve entrapment)

말초신경 포착의 정확한 부위는 임상소견, 전기진단검사 및 자기공명영상 등을 통해 추정할 수 있다. 그러나 때로는 포착의 정확한 위치를 수술 전에 결정할 수 없는 경우도 있다. 이럴 때 짧은 신경 분절에서 직접 신경신호를 얻는 것이 도움이 될 수 있다. 신경 분절의 전도속도 감소는 수술 중 확인할 수 있으며, 이는 수술 전 신경전도검사서 분명하지 않던 신경전도속도 감소가 수술 중 검사에서 명확히 나오는 경우가 있다. 이러한 검사 기법을 통해 신경 포착의 정확한 위치를 찾고, 보다 정확하고 철저한 감압술을 시행할 수 있다. 두 번째로 흔한 국소 신경병증인 팔꿈치 척골신경포착(ulnar nerve entrapment) 수술에서 이러한 방법이 사용된 예가 있다[16,17]. 흉곽 출구 증후군(thoracic outlet syndrome)에 대한 수술에서도 NAP가 시도될 수 있는데, 주로 C8 및 T1 신경근에 근위부에서 전도속도가 느려지는 것으로 보고되었다[18].

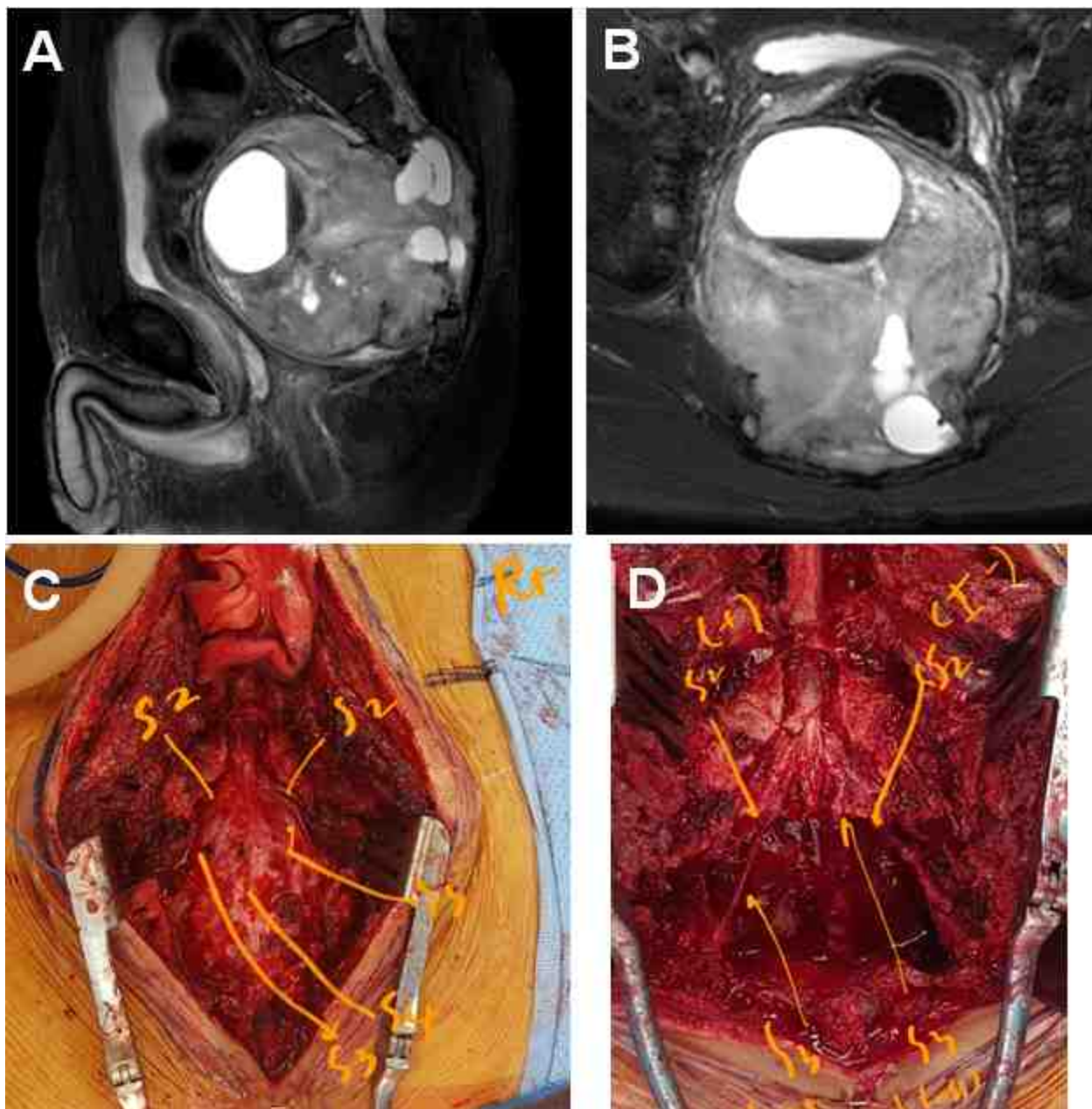


Fig. 2. 51-year-old male who underwent partial sacralectomy due to sacral schwannoma with utilization of intraoperative neurophysiologic monitoring. Pre-operative magnetic resonance imaging showed huge (size: $9.8 \times 11.1 \times 11.0$ cm) enhancing prevertebral bulging out mass formation at S3, S4 and inferior portion of S2 with internal cystic component (A, B). The patient had mild voiding and defecation problem caused by tumor compression effect without definite neurologic compromise. Somatosensory evoked potential, triggered electromyography, and bulbocavernosus reflex were used to intraoperative monitoring. During surgery, both sacral roots were exposed (C) and electrical stimulation revealed that both S4 roots and right S3 root were nonfunctioning (D). These nonfunctioning roots were sacrificed during debulking tumor mass. Post-operatively, the patient had mild voiding, defecation symptoms, however, anal tone was preserved and no definite weakness in both lower extremities.

4) 신경속 생검과 전이술(fascicular nerve biopsy and transfer)

진단 또는 치료적 목적으로 신경속을 일부를 선택하여 절제하는 경우도 있다. 이런 경우 수술중 신경계감시가 관련된 의

원성 말초신경손상(Iatrogenic peripheral nerve injury)을 더는데 도움이 된다. 특발성의 진행성 신경학적 결손을 보이는 환자에서 근위부(혼합) 신경의 신경속 생검(fascicular biopsy)은 성공적이고 안전하게 수행할 수 있다[19]. 예전에 이

러한 환자들은 종종 진단적 가치가 떨어지는 원위부 피부신경 생검(예: 비복신경 또는 표재 비골신경)을 받았으며, 효과가 검증되지 않은 경험적 내과적 또는 외과적 치료를 받았다. 생검을 시행할 신경속의 위치는 고해상도 MRI(magnetic resonance imaging)상의 이상 신호(일반적으로 미묘함)와 임상적 검진 및 전기생리학적 검사 소견을 바탕으로 선택하게 되며, 외과적 접근성도 고려해야 한다. 기능하지 않는 신경속은 신경 자극 또는 유발 근전도 기술을 사용하여 선택하고, 적출하여 병리학적 조사를 시행한다. 종괴 병변을 제외하고 신경속 생검을 시행한 100개 이상의 증례에서 80% 이상 병리학적 진단이 확립되었고, 영구적인 합병증은 5% 미만으로 발생했다는 보고가 있다. 병리학적 진단의 종류는 염증성, 면역성 혈관염, 염증성 탈수초성 장애, 신경다발막증, 유육종증, 림프종, 전이성 선암종 등 다양하였고, 이러한 진단은 치료적 시도로 이어질 수 있었다[20]. 이러한 접근을 위해서는 말초 신경 장애, 신경계 MRI, 말초 신경 수술 및 병리학에 대한 전문가들로 구성된 팀이 필요하다.

신경 전이술(nerve transfer)을 수행할 때 신경속을 선택하기 위해서 위에 언급한 방법들과 유사한 수술중 신경계감시 기법을 사용할 수 있다. 상부(경추 5, 6번) 상완신경총 손상에서 Oberlin 술식(척골신경의 신경속 일부를 주관절 굴곡기능 회복을 위해 근피신경으로 전이하는 신경전이술)이 대표적이다[21]. 이 술식은 신경 이식(nerve graft)을 할 수 없는 전신경절 손상(preganglionic injury)뿐만 아니라, 후신경절 손상에서도 손상 후 시간이 오래 지나거나 빠른 신경재지배(reinnervation)가 필요할 경우 선택 사항이 된다. 척골신경에서 이두근 가지로 전이시킬 신경속을 선택할 때 척측 손목 굽힘근(flexor carpi ulnaris)으로 가는 신경속을 선택(다른 완관절 굴곡근이 보상할 수 있음)하고, 수부 내재근으로 가는 신경속은 보존하는 것이 바람직하다[22]. 일회용 자극기 또는 미세 단극 자극기를 사용해서 원위부 근육의 수축을 일으키고 감지할 수 있다. 또한 멸균된 경피적 EMG 바늘을 개별 척골 신경 지배 근육에 배치하여 수술에 많은 시간을 추가하지 않고도 신경속 선택에 활용할 수 있다. 이러한 유형의 신경 재건은 결과를 크게 개선했다. 이 과정은 영구적인 장애발생이 거의 없으며 안전하게 수행될 수 있다. 척골 신경 분포의 일시적 감각 이상이 흔하게 발생하나 수개월 내에 해결된다.

5) 기타 신경주위 술기에서 수술중신경계 감시

말초신경의 손상을 일으킬 수 있는 사지, 골반, 목 부위 등 모든 부위에 시행하는 술기, 수술들이 수술중 신경계 감시의 대상이 될 수 있다. 대표적으로 정형외과수술 중 개방 또는 관절절 절골, 사지 골절의 외고정술, 상완골 급속정 고정술, 다양한 관절의 관절치환술, 급성 사지 변형 교정, 비구 절골술 및

어깨 관절낭 수축술 등에 신경계 감시를 활용한 보고가 있다[23-27]. 최근에는 로봇을 이용한 근직적 전립선적출술에 음부신경(pudendal nerve) SEP와 해면체 신경(cavernous nerve) 감시도 시도되고 있다[28]. 또한 경부 절제술(neck dissection) 시 척수부신경(spinal accessory nerve monitoring)을 감시함으로써 수술 후 어깨 기능을 예측하는 연구도 보고되는[29] 등 인체의 다양한 부위에서 말초신경계의 감시가 적용될 수 있다.

결론

말초신경계질환의 수술에서 수술중신경계 감시는 상황에 따라 적절하게 적용될 때, 수술에서 중요한 뒷받침을 할 수 있다. 따라서 각 환자의 임상 상태, 특정 수술의 위험요소 등에 맞게 조정되어야 한다. 감시 기법의 선택은 수술중 신경계 감시 및 검사 목표를 충족시킬 수 있도록 이루어져야 한다. 또한 성공적인 감시를 위해서 정확한 신경신호의 기록이 중요하고, 각 기법의 특징과 한계에 대한 전문지식을 가지고 결과를 해석할 수 있어야 한다. 특히 NAP의 활용은 말초신경 수술에서 특별히 사용되는 감시기법이지만, 기술적인 어려움 등을 감안할 때 상당한 경험과 숙련도가 요구된다.

이론적으로 기존에 알려진 말초신경의 외상성 손상, 종양성 질환과 같은 수술 외에 말초신경이 손상될 수 있는 모든 수술이 신경계 감시의 대상이 될 수 있다. 따라서 외과의와 신경생리학자는 지금까지의 감시기법을 벗어나 다양한 해부학적 부위에 대한 새로운 신경계감시 기법을 고민해야한다. 이를 통해 수술 및 시술에서 발생할 수 있는 의원성 말초신경손상을 최소화 하고 환자의 삶의 질을 보존할 수 있을 것이다. 또한 초음파와 같은 비신경생리학적 검사의 정보를 수술중 신경계감시에도 함께 활용하는 등, 신경계감시의 질과 유용성을 높이는 새로운 방식에 대해 연구가 필요하다.

많은 이점에도 불구하고 말초신경계 질환의 수술에서 수술중 신경계감시는 노동집약적이며 시간, 비용, 장비의 투입과 같은 일반적인 단점을 가지고 있다. 수술중 신경계감시가 의원성 신경손상을 감소시키는 데 유용하다는 보고도 있으나[30] 이에 대한 반론도 제시되고 있다[31,32]. 따라서 감시 기법의 고도화와 함께 잠재적인 이점을 증명하기 위한 대규모의 전향적 연구가 이루어져야 한다.

Conflicts of interest

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

Ethical approval

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

ORCID

Seung Hak Lee, <https://orcid.org/0000-0002-3017-8497>

Wanlim Kim, <https://orcid.org/0000-0003-1544-7211>

Yong Seo Koo, <https://orcid.org/0000-0001-5418-2522>

Dae Yul Kim, <https://orcid.org/0000-0003-1275-1736>

References

1. Robert EG, Happel LT, Kline DG. Intraoperative nerve action potential recordings: technical considerations, problems, and pitfalls. *Neurosurgery*. 2009;65(suppl 4):A97-104.
2. Kline DG, Hackett ER, May PR. Evaluation of nerve injuries by evoked potentials and electromyography. *J Neurosurg*. 1969;31(2):128-36.
3. Tiel RL, Happel LT, Kline DG. Nerve action potential recording method and equipment. *Neurosurgery*. 1996;39(1):103-9.
4. Ljung P, Ahlmann S, Knutson K, Rosén I, Rydholm U. Intraoperative monitoring of ulnar nerve function during replacement of the rheumatoid elbow via the lateral approach. *Acta Orthop Scand*. 1995;66(2):132-6.
5. Katz K, Attias J, Weigl D, Cizger A, Bar-On E. Monitoring of the sciatic nerve during hamstring lengthening by evoked EMG. *J Bone Joint Surg Br*. 2004;86(7):1059-61.
6. Pedro MT, Antoniadis G, Scheuerle A, Pham M, Wirtz CR, Koenig RW. Intraoperative high-resolution ultrasound and contrast-enhanced ultrasound of peripheral nerve tumors and tumorlike lesions. *Neurosurg Focus*. 2015;39(3):E5.
7. Kline DG, Hudson A. Nerve injuries: operative results for major nerve injuries, entrapments, and tumors. Philadelphia, PA: W.B. Saunders; 1995.
8. Williams HB, Terzis JK. Single fascicular recordings: an intraoperative diagnostic tool for the management of peripheral nerve lesions. *Plast Reconstr Surg*. 1976;57(5):562-9.
9. Jagoda AS, Bazarian JJ, Bruns JJ, Cantrill S V, Gean AD, Howard PK, et al. Clinical policy: neuroimaging and decisionmaking in adult mild traumatic brain injury in the acute setting. *J Emerg Nurs*. 2009;35(2):e5-e40.
10. Oberle JW, Antoniadis G, Rath SA, Richter HP. Value of nerve action potentials in the surgical management of traumatic nerve lesions. *Neurosurgery*. 1997;41(6):1337-43.
11. Jabaley ME, Wallace WH, Heckler FR. Internal topography of major nerves of the forearm and hand: a current view. *J Hand Surg Am*. 1980;5(1):1-18.
12. Lang DH, Lister GD, Jevans AW. Histological and biochemical aids to nerve repair. In: Gelberman RH, editor. *Operative nerve repair and reconstruction*. Philadelphia, PA: Lippincott; 1991. p. 259-71.
13. Jabaley M. Electrical nerve stimulation in the awake patient. In: Gelberman RE, editor. *Operative nerve repair and reconstruction*. Philadelphia, PA: Lippincott; 1991. p. 241-257.
14. Kwok K, Slimp JC, Born DE, Goodkin R, Kliot M. Evaluation and management of benign peripheral nerve tumors and masses. In: Mitchel SB, Michael DP, editors. *Textbook of neuro-oncology*. Philadelphia, PA: W.B. Saunders; 2005. p. 535-63.
15. Li X, Zhong G, Xu X, Wang K, Zhu Y, Qi X, et al. Surgical strategies for peripheral nerve schwannoma based on the intraoperative neurophysiological monitoring. *Laparosc Endosc Robot Surg*. 2019;2(3):65-9.
16. Oberle JW, Rath SA, Richter HP. Intraoperative electrically evoked nerve action potentials in ulnar entrapment syndrome. *Zentralbl Neurochir*. 1994;55(2):102-9.
17. Kim DH, Han K, Tiel RL, Murovic JA, Kline DG. Surgical outcomes of 654 ulnar nerve lesions. *J Neurosurg*. 2003;98(5):993-1004.
18. Tender GC, Thomas AJ, Thomas N, Kline DG. Gilliatt-sumner hand revisited: a 25-year experience. *Neurosurgery*. 2004;55(4):883-90.
19. Dyck P, Amrami K, Spinner R, Klein C, Engelstad J. Fascicular biopsy of proximal nerves in selected cases with MRI abnormality is diagnostically infor-

- mative. *J Peripher Nerv Syst.* 2003;8.
20. Wang H, Spinner RJ. Intraoperative testing and monitoring during peripheral nerve surgery. In: Nuwer MR, editor. *Intraoperative monitoring of neural function.* Amsterdam: Elsevier; 2008. p. 764-73.
 21. Noaman HH, Shiha AE, Bahm J. Oberlin's ulnar nerve transfer to the biceps motor nerve in obstetric brachial plexus palsy: indications, and good and bad results. *Microsurgery.* 2004;24(3):182-7.
 22. Liverneaux PA, Diaz LC, Beaulieu JY, Durand S, Oberlin C. Preliminary results of double nerve transfer to restore elbow flexion in upper type brachial plexus palsies. *Plast Reconstr Surg.* 2006;117(3):915-9.
 23. Sutherland CJ, Miller DH, Owen JH. Use of spontaneous electromyography during revision and complex total hip arthroplasty. *J Arthroplasty.* 1996;11(2):206-9.
 24. Makarov MR, Samchukov ML, Birch JG, Johnston CE, Delgado MR, Rampy PL, et al. Acute deformity correction of lower extremities under SSEP-monitoring control. *J Pediatr Orthop.* 2003;23(4):470-7.
 25. Mills WJ, Chapman JR, Robinson LR, Slimp JC. Somatosensory evoked potential monitoring during closed humeral nailing: a preliminary report. *J Orthop Trauma.* 2000;14(3):167-70.
 26. Brown DM, McGinnis WC, Mesghali H. Neurophysiologic intraoperative monitoring during revision total hip arthroplasty. *J Bone Joint Surg.* 2002;84-suppl_2:S56-61.
 27. Esmail AN, Getz CL, Schwartz DM, Wierzbowski L, Ramsey ML, Williams GR. Axillary nerve monitoring during arthroscopic shoulder stabilization. *Arthroscopy.* 2005;21(6):665-71.
 28. Song WH, Park JH, Tae BS, Kim SM, Hur M, Seo JH, et al. Establishment of novel intraoperative monitoring and mapping method for the cavernous nerve during robot-assisted radical prostatectomy: results of the phase I/II, first-in-human, feasibility study. *Eur Urol.* 2020;78(2):221-8.
 29. Birinci Y, Genc A, Ecevit MC, Erdag TK, Guneri EA, Oztura I, et al. Spinal accessory nerve monitoring and clinical outcome results of nerve-sparing neck dissections. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2014;151(2):253-9.
 30. Baumgaertner MR, Wegner D, Booke J. SSEP monitoring during pelvic and acetabular fracture surgery. *J Orthop Trauma.* 1994;8(2):127-33.
 31. Middlebrooks ES, Sims SH, Kellam JF, Bosse MJ. Incidence of sciatic nerve injury in operatively treated acetabular fractures without somatosensory evoked potential monitoring. *J Orthop Trauma.* 1997;11(5):327-9.
 32. Haidukewych GJ, Scaduto J, Herscovici D, Sanders RW, DiPasquale T. Iatrogenic nerve injury in acetabular fracture surgery: a comparison of monitored and unmonitored procedures. *J Orthop Trauma.* 2002;16(5):297-301.