

Review Article

상완신경총에 발생하는 질환의 수술에서 수술중신경계의 검사와 감시

이승학*

울산대학교 의과대학 서울아산병원 재활의학과

Intraoperative neurophysiological testing and monitoring in surgeries for the disease in brachial plexus

Seung Hak Lee*

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

ABSTRACT

The brachial plexus disease is anatomically complex. Moreover, each patient's neurological condition is highly variable and the decision-making during surgery is challenging. Thus, the surgical approach should be individualized. Sufficient evaluation, including preoperative electrophysiological study and radiological examination is essential; however, these evaluations have some limitations. Intraoperative neurophysiological monitoring is introduced in brachial plexus surgeries and offers additional benefits. This technique is not different from the intraoperative neurophysiological monitoring technique for peripheral nerve surgeries; however, special monitoring systems are required in brachial plexus surgeries. In traumatic brachial plexus injuries, differentiating the preganglionic or postganglionic lesions can provide decisive information in determining the surgical method. Although there is a lack of clinical evidence on the benefits of intraoperative neurophysiological monitoring in the surgery for brachial plexus disease, it is necessary to investigate the benefits through a well-designed prospective study based on a detailed evaluation of neurological deficits before and after surgeries.

Keywords: brachial plexus; intraoperative neurophysiologic monitoring

서론

상완 신경총에는 외상, 종양, 포착 등 다양한 질환이 발생할 수 있다. 그 중에서 수술적 치료를 고려할 경우 여러가지 이유에서 수술이 어려울 수 있다. 우선 상완 신경총은 해부학적으로 복잡하며 개개인마다 변이(variation)가 있을 수 있다. 또한 종양이나 흉터가 해부학적 구조를 뒤틀어질 수 있고, 근위부의 제한적인 신경 자원(nerve resource)과 좁은 공간 등이 수술장에서 의사결정을 제한한다[1]. 수술 전 전기생리학적 평가나 영상의학적인 평가가 도움이 될 수 있으나 특히 외상에 의한 상완신경총의 손상, 종양에서는 정확한 상태를 평가하기에 불완전한 경우가 많다. 따라서 수술 중에 직접 신경조직을 노출하고 이루어지는 수술중신경계검사 및 감시의 유용성이 매우 크다.

이러한 기법의 목적은 신경손상의 정도와 예후, 남아 있는 신경기능 등을 확인하여 수술에 활용하는 검사 혹은 매핑

(mapping)과 수술 중 인근의 신경조직에 발생할 수 있는 우발적 손상에 대한 감시(monitoring)로 나뉘볼 수 있다. 특히 외상성 상완신경총 손상에서 신경회복의 가능성을 기대할 수 없어서 신경이식술이나 전이술을 고려할 경우 전자의 측면이 중요하고, 비기능성 신경속(nerve fascicle)을 중심으로 절제를 해야 하는 종양성 질환에서는 후자의 측면이 중심이 된다. 본 종설에서는 상완신경총에서 적용될 수 있는 다양한 수술중 신경계감시의 기법들을 살펴보고, 각 질환별로 어떻게 이러한 기법들을 적용할 수 있을지 논의해 보고자 한다.

본론

1. 방법론

1) 근전도(electromyography)

유발 근전도(triggered electromyography, EMG)나 자발 근전도(free-running EMG) 기법이 다른 말초신경계질환의

Received November 13, 2021; Revised November 27, 2021; Accepted November 30, 2021

*Corresponding author: Seung Hak Lee, Department of Rehabilitation Medicine, Asan Medical Center, College of Medicine, University of Ulsan, Seoul 05505, Korea
Tel: +82-2-3010-3795, Fax: +82-2-3010-6964, E-mail: seunghak@gmail.com

© 2021 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.

수술에서 사용되는 동일한 원리로 활용된다. 한편 많은 외과의들이 수동신경자극기(hand-held nerve stimulator)를 수술장에서 사용하고 있는데 이 역시 큰 범주에서 유발 근전도 기법에 해당될 수 있다. 그러나 이러한 수동신경자극기만을 사용한 감시는 상대적으로 소극적인 수술중신경계감시라 여겨진다. 일부에서는 체성감각유발전위(somatosensory evoked potentials, SEP), 운동유발전위(motor evoked potentials, MEP)를 함께 한 경우만 공식적인 수술중신경계감시(formal intraoperative neurophysiologic monitoring)가 이루어진 것으로 간주한다[2]. 그럼에도 불구하고 자극기를 이용한 유발 근전도는 상완신경총에 시행하는 가장 기본적인 감시기법으로 여겨지고 있으며, 상완신경총의 해부학적 매핑과 연속적인 유발 EMG를 통해서 CMAP(compound muscle action potential) 진폭의 변화를 지속적으로 감시하는 것은 신경 손상에 대한 정량적 정보를 제공할 수 있어 그 임상적 유용성이 여전히 크다.

2) 체성감각유발전위(somatosensory evoked potentials, SEP), 운동유발전위(motor evoked potentials, MEP)

척추수술이나 뇌수술에서 수술중신경계감시의 가장 기본 검사인 SEP와 MEP의 경우 상완신경총 수술에서 그 활용성이 다소 떨어진다. 상기 검사 기법들은 중추신경계와 말초신경계를 모두 반영하나 주로 중추신경계의 감각, 운동 경로를 감시하는 것에 활용되고 있으며 상완 신경총은 말초 신경계에 해당되기 때문이다. 그러나 외상성 상완신경총 손상에서 신경절(ganglion) 전후 손상의 구별이 수술 중 의사결정에 큰 역할을 할 수 있다[3]. 왜냐하면 두 검사 기법은 상완신경총 근위부 신경조직의 기능을 반영할 수 있기 때문이다. 이와 관련해서는 후에 질환별 각론 중 외상성 상완신경총 손상에서 자세하게 다룰 예정이다. 비단 외상성 상완신경총 손상뿐만 아니라 종양성 질환을 포함한 여러 상완신경총 손상의 수술에서도 유발전위의 검사는 유용할 수 있다. 유발 근전도 검사의 결과를 해석할 때 추가적인 전기생리학적 지표를 제공해줄 수 있고 정상신경 기능을 반영하는 대조 정보로 활용도가 충분하기 때문에 시행할 것을 권고한다.

3) 신경활동전위(nerve action potential, NAP)의 측정

말초신경계의 질환의 수술에서 타 신경계 수술과 가장 차별화되는 방법인 신경활동전위(nerve action potential, NAP)를 상완신경총 손상 수술 중에 사용할 수 있다. NAP는 수술장에서 신경조직을 직접 노출시킨 후 병변에 걸쳐 자극을 하고 또 신호를 얻게 된다. NAP의 유무는 병변의 신경 축삭이 기능적으로 보존되어 있는지 여부를 뜻하게 되는데 동물실험에 따르면 4,000-5,000개의 수초화된 축삭이 있어야 NAP 신호를

얻을 수 있는 것으로 알려져 있다[4]. NAP는 기술적인 어려움이 있어 국내에서 활발하게 사용되지 않는 것으로 여겨지나 최근에 국내 연구진이 후신경 골간신경 증후군(posterior interosseous nerve syndrome) 환자에서 성공적으로 NAP를 수행하고 원인이 되었던 결절종(ganglion cyst)을 제거한 바 있다[5]. NAP를 잘 얻기 위해서는 노출된 신경의 길이를 3-4 cm 이상 확보하고 자극 강도를 최소한으로 줄이며 접지(ground)가 함께 들어가 있는 갈고리 모양의 3지 전극(three-pronged electrode with a built-in ground)을 사용하는 것이 추천된다[6]. 상완신경총에서는 외상성 상완신경총 손상에서 근위부 손상 시 신경절 전후 손상을 구분하는 데 일부 활용될 수 있으며 특히 연속성 신경종(neuromas-in-continuity)의 평가에 유용하다. 또한 상완신경총의 다양한 종양성 질환의 절제 시에 기능 혹은 비기능 신경속을 구분하는 데 활용될 수 있다.

2. 질환별 수술중신경계감시

1) 외상성 상완신경총 손상(brachial plexus injury)

상완신경총에 외상성 손상은 소아에서 출산과 관련하여 발생하는 Erb's palsy가 있으며 성인에서는 주로 어깨 부위의 강한 견인으로 인해 단힌 상태에서 일어난다[7]. 그러나 심각한 개방성 외상, 자상 등 다양한 형태의 상완신경총 손상이 발생할 수 있으며, 외과이가 선택할 수 있는 수술의 기법은 크게 신경박리술(neurolysis), 신경이식술(nerve graft), 신경복원술(nerve repair), 신경전이술(nerve transfer) 등으로 환자의 상태, 수술의 목표에 따라 선택하게 된다[8]. 이와 같이 병변과 수술의 기법이 일정하지 않기 때문에 수술 중 의사결정이 어려운 경우가 많다. 따라서 수술전에 적절한 병력 청취, 전기생리학적 검사 및 영상검사를 통해 상완 신경총에서 손상된 부위와 그 정도를 파악하고, 특히 신경절 전, 후 손상을 여부를 알아내는 것이 매우 중요하다. 그러나 이러한 모든 수술 전 평가와 검사법들은 제한점을 가지고 있어 수술중신경계감시가 더욱 중요하다. 예를 들어 C7 신경근은 여러 근육들을 지배하기 때문에 수술 전 전기생리학적 평가에서 손상이 감지되지 않을 수 있다. 실제로 수술 전에 문제가 없는 것으로 알려진 C7 신경근 중 10% 정도는 수술 중에 전기생리학적 평가를 했을 때 기능하지 않음을 밝혀낸 보고가 있다[9].

외상성 상완신경총손상의 수술에서 신경절 전 후 손상의 구분이 중요한 이유는 신경절전 신경근 손상이 있을 경우 신경이식술을 수행하여도 회복의 가능성이 없기 때문에 해당 수술법을 배제할 수 있기 때문이다. 그러나 여러가지 검사 기법을 동원하여도 그것을 구분해내기는 쉽지 않다. 경추 척추주위근(paraspinal muscle) 근전도가 이러한 구분에 도움이 되나 이것을 동원하여 상세한 전기생리학적 평가를 하고 검진을 하

여도 신경절전 손상의 진단률은 80% 정도에 머무르는 것으로 알려져 있다[10]. 영상검사의 경우 전산화단층촬영 척수강 조영술(CT Myelography)과 자기공명영상인 신경절전 신경근 박리손상(root avulsion)을 평가할 수 있는 것으로 알려져 있으나 정확도는 각각 85%와 52% 정도에 머무른다[11]. 반면 수술 중 SEP는 등쪽 신경근(dorsal root) 박리에, MEP는 배쪽 신경근(ventral root) 박리에 민감도가 모두 100%인 것으로 알려져 있다[12]. 따라서 이것을 수술 중에 구분함에 있어 SEP와 MEP의 활용이 매우 중요하고, 때론 NAP를 함께 시행하여 판단하게 된다[13-15]. 특히 MEP의 경우 기존에 근육에서 복합근활동전위(compound muscle action potential, CMAP)를 통해 판단하는 것이 아니라 경두개 자극을 하고 실제 상완신경총에서 NAP 기법을 활용해 유발전위를 얻는 방식이 일부 그룹에서 제시되었다(Fig. 1)[13]. 이론적으로 배쪽 신경근의 기능을 평가하기에 가장 좋은 방법이나 기술적인 어려움으로 흔히 사용되지는 않는다[15].

상완신경총 손상을 포함한 말초신경손상에서는 손상된 신경이 연속성 신경종 형태로 나타날 수 있다. 이러한 병변이 외상성 상완신경총 손상에서 관찰될 경우 말초신경손상에서 연속성 신경종의 수술중신경계감시의 원칙이 동일하게 적용될 수 있다. 앞서 언급한 것처럼 NAP의 활용이 특히 중요하다. 자세한 사항은 말초신경계 질환의 수술에서 수술중신경계감시의 내용을 참조하기 바란다[16].

2) 종양성 질환(tumors)

상완신경총에서 종양은 흔하지 않으며 신경초종(schwannoma)을 포함한 양성 신경초 종양(benign nerve sheath tumor)이 가장 흔하고, 악성 말초신경신경초종양(malignant

peripheral nerve sheath tumors)도 발생할 수 있다. 이러한 종양성 질환의 수술 시에 수술중신경계감시의 기법은 다른 말초신경계에 발생하는 종양 절제의 원칙과 크게 다르지 않다. 유발 근전도와 NAP가 매우 중요하고 NAP의 경우 기능적 신경속과 비기능적 신경속을 구분하는 데 유용하게 활용될 수 있다[16]. 최근 국내에서도 여러 그룹에서 상완신경총 종양의 절제에 다양한 수술중신경계감시의 기법을 활용하고 있으나 [17,18] 대부분의 경우 유발 근전도 기법을 적용하는 정도에 그치고(Fig. 2) 일부에서 SEP, MEP 정도를 추가하는 것으로 생각된다. 향후에는 이러한 수술을 할 때 NAP 등의 기법을 더욱 적극적으로 활용해볼 필요가 있다. 상완신경총 종양을 포함하여 말초신경계에 발생한 양성 신경초 종양의 절제에 수술중신경계감시의 유용성을 검토한 최근의 연구에 따르면 감시를 시행한 경우 완전절제(gross total resection)가 이루어질 우도(likelihood)가 유의미하게 낮았으나, 그것이 신경학적 결손을 줄이는 것까지는 이어지지 못한 것으로 보고하였다[2]. 비록 수술중신경계감시의 임상적 유용성을 입증하지 못하였으나, 해당 연구는 수술중신경계감시의 시행을 수동신경자극기를 이용한 단순한 유발근전도 기법만 사용한 경우는 감시를 시행하지 않은 것으로 간주하였고, 유발근전도, 자발근전도, MEP, SEP를 모두 시행한 경우만 인정하는 엄격한 기준인 점을 감안해야 한다. 향후 이러한 수술에서 수술중신경계감시의 기법이 더욱 표준화하고 수술 후 세밀한 신경학적 결손의 평가가 이루어진다는 전제로 전향적 연구를 수행할 필요가 있을 것이다.

3) 신경포착(nerve entrapment)

상완신경총에서 발생하는 신경포착성 질환은 흉곽유출증후군(thoracic outlet syndrome, TOS)이 대표적이다. 흉곽유

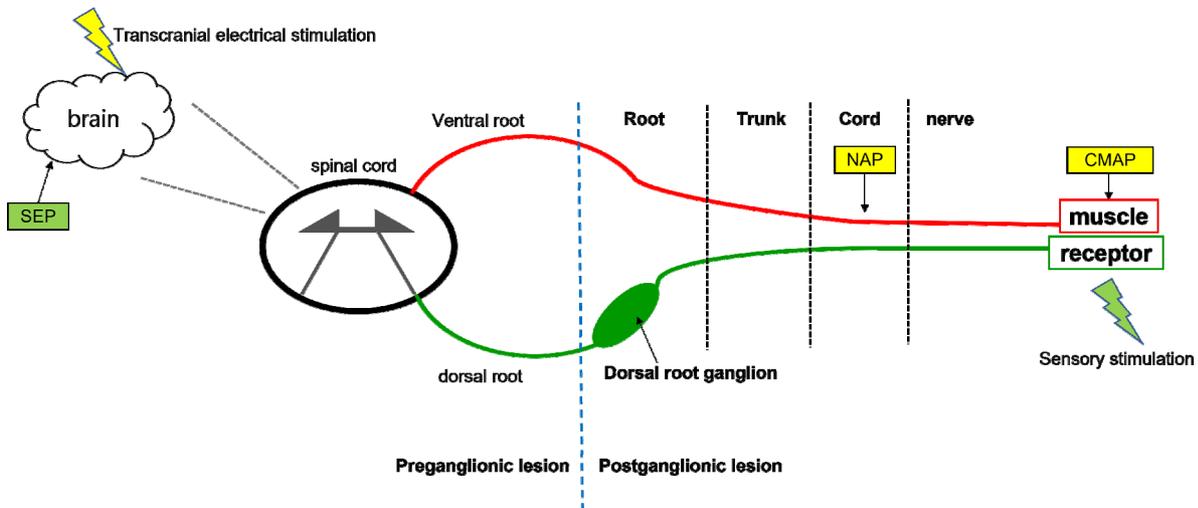


Fig. 1. Intraoperative neurophysiological testing to differentiate the preganglionic or postganglionic lesions in brachial plexus injury. SEP: somatosensory evoked potentials; NAP: nerve action potential; CMAP: compound muscle action potential.

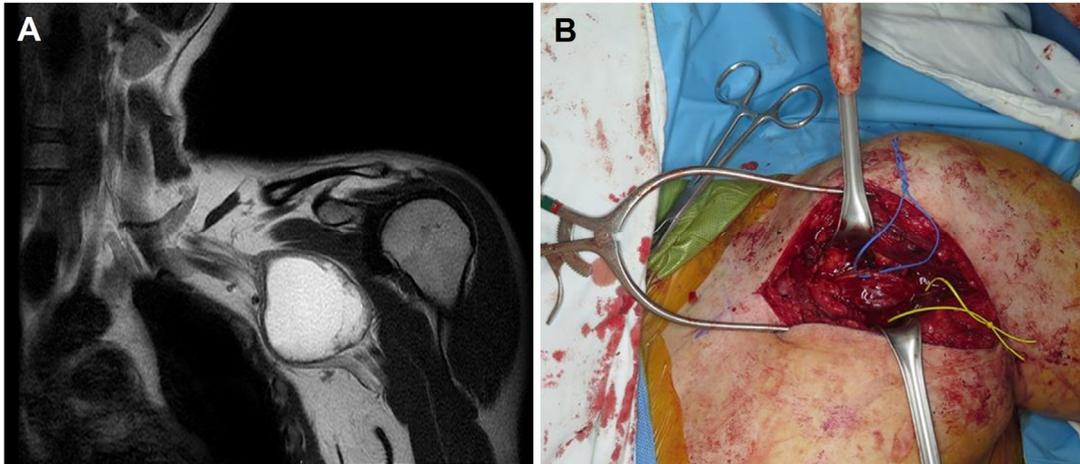


Fig. 2. A 32-year-old male patient underwent tumor resection due to a cystic mass in the left brachial plexus. Preoperative magnetic resonance imaging shows a large cystic mass at the left brachial plexus. The electrophysiologic study revealed that neural compromise is observed only in the muscles innervated by the radial nerve (A). During surgery, triggered electromyography using a hand-held stimulator was performed; however, formal intraoperative neurophysiological monitoring techniques, such as somatosensory evoked potentials and motor evoked potentials, were not performed (B). Postoperatively, the patient experienced mild wrist drop and moderate finger extensor weakness in the left upper extremity.

출증후군 중에서도 혈관성이 아닌 신경성 흉곽유출증후군 (neurogenic TOS)의 경우 주로 C8, T1 신경근과 상완신경총의 하줄기(lower trunk)를 잘 침범한다[19]. 수술중 NAP의 측정은 이러한 신경계의 이상을 잘 반영할 수 있으며 신경압박의 심각도를 결정하는 데 도움이 된다. 해당 신경근에서 하줄기로 가는 NAP의 진폭과 전도속도가 감소되는 형태로 관찰이 된다[20]. 그러나 그러한 수술중신경계감시의 정보가 포착에 대한 감압(decompression)을 변경하지 않기 때문에 일반적으로 신경성 흉곽유출증후군의 사례에서 NAP를 사용하지 않는다.

결론

상완신경총은 해부학적으로 복잡하며 환자마다 신경학적 상태가 매우 달라 수술의 기법에 개별화될 수밖에 없고 수술 중에 의사결정 또한 어렵다. 수술 전 전기생리학적 검사 및 영상학적 검사를 포함한 충분한 평가가 필수적이나 제한점이 있기 때문에 수술중신경계감시가 가지는 추가적인 이득이 존재한다. 감시기법의 측면에서는 기존의 말초신경계질환의 수술에서 수술중신경계감시의 기법과 크게 다르지 않으나 세부적으로 상완신경총에서 특수한 부분이 있다. 특히 외상성 상완신경총 손상의 경우 신경절 전 혹은 후 병변을 구분하는 것은 특이적인 감시 체계이며 수술방식을 결정함에 있어 결정적인 정보를 제공할 수 있다. 아직 체계적인 수술중신경계감시가 상완신경총 질환의 수술에 가지는 이득에 대한 임상적 근거는 부족한 실정이나, 전문가들의 많은 관심과 세밀한 신경학적 결

평가를 토대로 한 잘 설계된 전향적 연구를 통해 이를 살펴볼 필요가 있다.

Ethical approval

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

Conflicts of interest

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

ORCID

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

References

1. Wang H, Bishop AT, Shin AY, Spinner RJ. Intraoperative testing and monitoring during brachial plexus surgery. In: Nuwer MR, editor. Intraoperative monitoring of neural function. Amsterdam, Netherland: Elsevier; 2008. p. 720-30.
2. Wilson TJ, Hamrick F, Alzahrani S, Dibble CF, Koduri S, Pendleton C, et al. Analysis of the effect

- of intraoperative neuromonitoring during resection of benign nerve sheath tumors on gross-total resection and neurological complications. *J Neurosurg.* 2021;135(4):1231-40.
3. Turkof E, Millesi H, Turkof R, Pfundner P, Mayr N. Intraoperative electroneurodiagnostics (transcranial electrical motor evoked potentials) to evaluate the functional status of anterior spinal roots and spinal nerves during brachial plexus surgery. *Plast Reconstr Surg.* 1997;99(6):1636-41.
 4. Kline DG, Hackett ER, May PR. Evaluation of nerve injuries by evoked potentials and electromyography. *J Neurosurg.* 1969;31(2):128-36.
 5. Park D, Kim DY, Eom YS, Lee SE, Chae SB. Posterior interosseous nerve syndrome caused by a ganglion cyst and its surgical release with intraoperative neurophysiological monitoring: a case report. *Medicine.* 2021;100(8):e24702.
 6. Crum BA, Strommen JA. Intraoperative peripheral nerve stimulation and recording. In: Nuwer MR, editor. *Intraoperative monitoring of neural function.* Amsterdam, Netherland: Elsevier; 2008. p. 364-70.
 7. Rankine JJ. Adult traumatic brachial plexus injury. *Clin Radiol.* 2004;59(9):767-74.
 8. Hill JR, Lanier ST, Rolf L, James AS, Brogan DM, Dy CJ. Trends in brachial plexus surgery: characterizing contemporary practices for exploration of supraclavicular plexus. *Hand.* 2021; 15589447211014613.
 9. Kline DG, Hudson A. *Nerve injuries: operative results for major nerve injuries, entrapments, and tumors.* Philadelphia, PA: W.B. Saunders; 1995.
 10. Balakrishnan G, Kadadi BK. Clinical examination versus routine and paraspinal electromyographic studies in predicting the site of lesion in brachial plexus injury. *J Hand Surg Am.* 2004;29(1):140-3.
 11. Carvalho GA, Nikkhah G, Matthies C, Penkert G, Samii M. Diagnosis of root avulsions in traumatic brachial plexus injuries: value of computerized tomography myelography and magnetic resonance imaging. *J Neurosurg.* 1997;86(1):69-76.
 12. Oberle J, Antoniadis G, Kast E, Richter HP. Evaluation of traumatic cervical nerve root injuries by intraoperative evoked potentials. *Neurosurgery.* 2002;51(5):1182-90.
 13. Burkholder LM, Houlden DA, Midha R, Weiss E, Vennettilli M. Neurogenic motor evoked potentials: role in brachial plexus surgery. *J Neurosurg.* 2003; 98(3):607-10.
 14. Hattori Y, Doi K, Dhawan V, Ikeda K, Kaneko K, Ohi R. Choline acetyltransferase activity and evoked spinal cord potentials for diagnosis of brachial plexus injury. *J Bone Joint Surg Br.* 2004;86-B(1): 70-3.
 15. Harper CM. Preoperative and intraoperative electrophysiologic assessment of brachial plexus injuries. *Hand Clin.* 2005;21(1):39-46.
 16. Lee SH, Kim W, Koo YS, Kim DY. Intraoperative neurophysiological testing and monitoring in surgeries for peripheral nerve disorders. *J Intraoper Neurophysiol.* 2020;2(2):85-91.
 17. Lee DY, Chi JY, Seok J, Han S, Lee MH, Jeong WJ, et al. Feasibility of brachial plexus schwannoma enucleation with intraoperative neuromonitoring. *Clin Exp Otorhinolaryngol.* 2020;13(2):203-8.
 18. Jung IH, Yoon KW, Kim YJ, Lee SK. Analysis according to characteristics of 18 cases of brachial plexus tumors: a review of surgical treatment experience. *J Korean Neurosurg Soc.* 2018;61(5):625-32.
 19. Dumitru D, Amato AA, Zwarts M. *Electrodiagnostic medicine.* 2nd ed. Philadelphia, PA: Hanley & Belfus; 2002.
 20. Tender GC, Thomas AJ, Thomas N, Kline DG. Gilliatt-Sumner hand revisited: a 25-year experience. *Neurosurgery.* 2004;55(4):883-90.