

Review Article

천막상부종양수술에서 수술중신경계감시의 유용성

백설희*

고려대학교 안암병원 신경과

Usefulness of intraoperative neurophysiological monitoring for supratentorial brain tumor surgery

Seol-Hee Baek*

Department of Neurology, Korea University Anam Hospital, Seoul, Korea

ABSTRACT

The goals of the supratentorial brain tumor surgery are the maximum resection of the brain tumor lesion and the minimum risk of neurological complication. Intraoperative neurophysiological monitoring (IONM) is a useful tool for the early detection of possible neurologic deterioration and the prevention of postoperative neurological complications. Multimodal IONM, including somatosensory evoked potentials (SSEP), motor evoked potentials, and visual evoked potentials, could be used in supratentorial brain tumor surgery. Brain mapping, especially the motor cortex and corticospinal tract, could be done by using SSEP and direct cortical and subcortical stimulation. In this review, we discuss IONM modalities and the efficacy of IONM for supratentorial brain tumor surgery.

Keywords: intraoperative neurophysiological monitoring; evoked potentials, somatosensory; evoked potentials, motor; brain mapping; evoked potentials, visual

서론

성인에서 발생하는 뇌 및 중추신경계의 종양(tumor)은 수막(meninx)에서 발생하는 양성종양인 경우가 많으나, 악성종양의 약 60%는 전두엽, 측두엽, 두정엽 및 후두엽 등 대뇌부위에서 발생한다[1]. 성인에서 발생하는 일차뇌종양(primary brain tumor)은 교세포(glia cell) 기원이 가장 많으며, 교모세포종(glioblastoma)의 경우 가능한 최대 절제를 하는 것이 권고된다[2]. 뇌종양 수술 시 목표는 최대한 많은 종양 조직을 절제하면서 기능적인 부분은 보존하는 것이다. 대뇌에서 기능적으로 중요한 영역을 중요기능영역(eloquent area)이라고 한다. 대표적으로 운동과 연관된 일차운동피질(primary motor cortex), 감각을 담당하는 일차체성감각피질(primary somatosensory cortex), 언어와 말하기 기능에 연관된 좌측 전두엽과 측두엽, 시각 기능과 연관된 후두엽 등이 있다. 따라서 종양의 위치에 따라 손상되는 기능이 다르며, 수술 시에는 이들의 기능을 최대한 보존하면서 종양을 최대한 절제하기 위

해 수술중신경계감시(intraoperative neurophysiological monitoring, IONM)가 유용하게 활용될 수 있다. 본 종설에서는 천막상부뇌종양(supratentorial brain tumor) 수술 시 활용되는 IONM의 검사법 및 유용성에 대해 살펴보고자 한다.

본론

1. 체성감각유발전위(somatosensory evoked potential, SSEP)

체성감각유발전위(SSEP)는 IONM에서 중요한 검사 중 하나로 등쪽기둥-안쪽섬유띠(dorsal column-medial lemniscus pathway)의 기능을 평가할 수 있는 검사이다. 등쪽기둥-안쪽섬유띠는 촉각, 진동감각 및 고유감각의 전달 통로로, 피부나 관절에서 전달된 감각신호들이 말초신경, 등뿌리신경절(dorsal root ganglion), 척수를 따라 이동하여 숨뇌(medulla)에 도달하며, 이후 교차(decussation)하여 반대측 안쪽섬유띠를 따라 시상(thalamus)의 후외측복측핵(ventral postero-

Received Dec 14, 2023; Accepted Dec 30, 2023

*Corresponding author: Seol-Hee Baek, Department of Neurology, Korea University Anam Hospital, Seoul 02841, Korea

Tel: +82-2-2199-3826, Fax: +82-2-926-5347, E-mail: virgo0906@korea.ac.kr

© 2023 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.

lateral nucleus)을 거쳐 일차체성감각피질(primary somatosensory cortex)에 도달한다. SSEP의 자극부위는 상지에서 정중신경(median nerve)이나 척골신경(ulnar nerve)을 자극하고, 하지는 후경골신경(posterior tibial nerve)이나 비골신경(peroneal nerve)을 자극한다. 자극은 직사각형모양의 0.2-0.3 ms 정전류펄스(constant-current pulse)를 주며, 감각 역치의 3배 또는 운동역치의 2배 강도의 최대초과자극강도(supramaximal intensity)를 준다[3]. 자극빈도는 주로 4.7 또는 5.1 Hz로 자극하며, 50 또는 60 Hz 잡파(artifact)를 피하기 위해 50 또는 60의 인수로 자극하지 않는다[3]. SSEP의 기록전극은 국제 10-10체계의 중심(central)과 두정엽 영역 중심에 위치한 CPz, CP3, CP4에 위치하며, 말초신경의 자극 방향에 따라 CP3와 CP4는 동측(CPi) 또는 반대측(CPc)으로 기록한다[3]. 상지SEP의 기록전극은 CPc-CPi, CPc-Fz, 또는 CPc-CPz를 주로 이용하며, 하지SEP는 CPz-Fpz, CPz-Fz, 또는 CPz-CPc 등 전극을 이용한다. SSEP는 아산화질소(nitrous oxide)와 같은 흡입마취제의 영향을 받으며, 흡입마취제의 농도에 따라 잠복기가 연장되고 진폭이 감소하는 양상을 보인다[4,5]. 프로포폴(propofol), 레미펜타닐(remifentanyl) 등을 이용한 완전정맥마취(total intravenous anesthesia, TIVA)가 추천된다[6-8]. SSEP는 근이완제의 영향은 받지 않는다.

IONM에서 SSEP의 경고기준은 일반적으로 파형의 진폭이 50% 이상 감소하거나 파형의 잠복기가 10% 이상 지연된 경우이다[3]. 최근에는 파형의 재현성을 고려하여 파형의 유의미한 변화 여부를 판정하기도 한다. 2019년 가이드라인에서는 재현성이 높은 경우(변화가 20% 미만)는 30% 이상 진폭의 감소도 유의미한 변화일 수 있으며, 재현성이 없는 경우(변화가 50% 초과)는 파형의 소실을 유의미한 변화로 간주하자고 제시하였다[3].

천막상부중양수술에서 SSEP는 중심고랑(central sulcus)을 구별하는데 유용하게 활용된다. 롤란딕이랑(Rolandic gyrus) 주변을 수술하는 경우, SSEP의 위상반전(phase reversal)을 이용하여 중심고랑을 확인할 수 있다. 그리드 전극(grid electrode)이나 스트립 전극(strip electrode)을 중심고랑으로 생각되는 부분에 위치시키고, 말초신경을 자극한 후 SEP파형의 위상전위가 일어나는 부위를 확인한다[9]. Cedzich 등은 99명 중 98명에서 SSEP 검사를 시행하였고, 91%에서 위상반전을 확인하였으며, 9%에서는 N20 또는 P20 파형이 소실되는 소견이 관찰되었다[9]. Romströck 등은 230명의 환자를 대상으로 SSEP의 위상반전을 이용하여 중심고랑을 확인한 결과, 92%에서 성공적으로 중심고랑을 확인할 수 있었다[10]. 하지만, 종양의 위치가 중심고랑에 크게 있거나 후중심이랑(postcentral gyrus)에 있는 경우에는 약 85%만

위상반전이 확인되어 상대적으로 낮은 성공율을 보였다[10].

2. 운동유발전위(motor evoked potential, MEP)

운동유발전위(MEP)는 수술 중 운동신경계를 감시할 수 있는 검사이다. MEP는 전기자극 또는 자기장자극을 할 수 있으나 IONM에서는 전기자극을 하는 것이 더 효과적으로 자극할 수 있다. 또한 두개뼈를 경유하여 자극하는 경두개자극과 대뇌에 직접 자극하는 방법이 있으며 직접 자극하는 검사 시에는 직접피질자극(direct cortical stimulation)과 피질하자극(subcortical stimulation)으로 구별할 수 있다.

1) 경두개전기자극(transcranial electrical stimulation, TES)

경두개전기자극(TES)의 자극은 바늘전극(needle electrode), 코르크스크류바늘전극(corkscrew needle electrode) 또는 EEG캡전극을 이용하여 자극할 수 있다. 임피던스가 낮으면 높은 전류로 인한 조직을 손상하는데 도움이 되는데, 코르크스크류전극이 바늘전극이나 EEG캡전극에 비해 임피던스가 낮은 편이다[11]. 상지MEP의 자극전극은 국제 10-10체계에서 C1/C2 또는 C3/C4에 위치한다[11,12]. 하지MEP 자극전극의 위치는 다양하게 위치할 수 있는데, Cz/Fz 전극을 이용하는 경우 양쪽 하지 MEP를 동시에 자극할 수 있다는 장점이 있다[11]. 자극은 양극자극(anodal stimulation)이 더 효과적이다[13]. TES를 통해 피질척수도가 활성화되면 피라미드세포의 직접 활성화로 발생하는 D-파형이 발생한다. D-파형은 마취제에 민감하지 않으며, 단일자극으로 파형을 획득할 수 있지만 기록전극을 경막외(epidural) 또는 경막하(subdural) 전극을 이용하여 척수 내에 위치해야 천막상부중양 수술에서 측정하기 어렵다. 근육MEP는 사지 말단 근육에서 측정을 하며 상지는 주로 손 근육에서 측정하고, 다리는 앞정강근(tibialis anterior muscle), 엄지발가락벌림근(abductor hallucis muscle)에서 측정한다. 근육MEP를 이용하는 경우, 다중펄스 자극을 주로 이용한다. 펄스간간격(interpulse interval)은 2-4 ms이며, 한번의 train에서 3-5회 이상 펄스자극을 이용한다[11,12,14]. MEP는 D-파형은 마취제의 영향을 적게 받지만, 근육MEP는 마취제의 영향을 받는다. 특히 흡입마취제는 파형을 억제하므로 IONM에서 MEP감시를 하는 경우에는 피해야한다[15,16]. 신경근차단제(neuromuscular blockade)는 근육MEP 파형을 억제하므로 가능한 사용하지 않는 것이 좋으나 부분신경근차단제(partial neuromuscular blockade)는 적절한 감시조건 하에서 사용할 수 있다[16]. 아편유사제(opioid)나 케타민(ketamin) 등은 근육MEP에 영향이 적은 편이다[16]. 근육MEP 감시에서는 프로포폴과 아편유사제를 이용한 완전정맥마취가 권고된다[13].

근육MEP 파형이 완전히 소실된 경우는 주요 경고기준이며,

비가역적인 파형의 소실은 수술 후 영구적 또는 일시적인 마비의 강한 예측인자이다[17]. 근육MEP 파형이 50% 이상 감소한 경우도 주요 경고기준이다[17]. MEP 자극의 역치가 높아지는 경우도 주요 경고기준 중 하나이다.

2) 직접피질자극(direct cortical stimulation)

직접피질자극은 대뇌종양이 운동피질의 중요기능영역에 있는 경우, 중요기능영역의 위치를 확인하고, 종양의 절제범위를 결정하는데 도움이 된다. 직접피질자극 시에는 양극자극(anodal stimulation)을 시행하는 것이 효과적이다. 직접피질자극 방법은 2가지 자극 방법이 있는데 Penfield 방법과 Taniguchi 방법이다[18]. Penfield 방법은 1937년에 처음 소개되었고, 1991년에 IONM에 맞게 수정되었다. 두극탐색자(Bipolar probe)를 이용하여 50 또는 60 Hz의 빈도로 자극하며, 펄스너비(pulse width)는 200-1,000 μ s, 자극시간은 2-5초 정도로 자극한다[18]. Taniguchi 방법은 단극탐색자(monopolar probe)를 통해 250-500 Hz의 빈도로 자극하며, 펄스너비(pulse width)는 500 μ s, 자극시간은 20 μ s이다[18]. 두 방법 모두 자극 강도는 1 mA에서 시작하여 단계적으로 높여서 최대 20 mA 또는 후방전(after discharge)이 관찰될 때까지 증가시킨다[18]. 피질뇌파검사(electrocorticalography)를 함께 시행하여 자극 후 발생하는 후방전(after discharge) 여부 및 경련의 발생 여부를 조기에 확인하는 것이 좋다.

3) 피질하자극(subcortical stimulation)

피질하자극은 피질척수로의 위치를 확인하는데 유용한 검사이다. 검사방법은 직접피질자극과 크게 다르지 않으나 피질하자극 시에는 음극자극(cathodal stimulation)을 하는 것이 효과적이다[19]. 단극탐색자와 두극탐색자를 이용하여 각각 50 Hz 단일펄스자극과 다중펄스자극(5펄스, 자극간간격 4 ms)을 시행한 경우를 비교하였을 때, 단극탐색자를 이용하여 다중펄스자극을 시행한 경우에 가장 자극 강도가 낮았으며, 단극탐색자가 다극탐색자보다 MEP파형이 더 잘 획득되는 양상을 보였다[20]. 피질하자극을 통해 자극점에서 피질척수로부터 거리를 예측할 수 있는데, 자극 강도 1 mA 당 자극점과 피질척수 사이의 거리가 1 mm 정도 떨어진 것으로 계산할 수 있다[19,21].

3. 시각유발전위(visual evoked potential, VEP)

시각유발전위(VEP)는 시각경로를 감시하는데 유용한 검사 방법이다. 시각경로는 빛이 망막을 자극하면 활성화되기 시작한다. 망막은 빛을 수용하는 광수용세포인 막대세포(rod cell)와 원뿔세포(cone cell)를 포함한 여러 개의 세포층으로 구성

되어 있으며, 빛 자극은 이들 수용체를 거쳐 시신경으로 전달되며, 이후 시신경교차(optic chiasm), 시경로(optic tract), 가쪽무릎체(lateral geniculate body), 시각부챗살(optic radiation)을 지나 후두엽의 일차시각영역(primary visual cortex)으로 전달된다[22]. VEP는 자극하는 방법에 따라 섬광(flash), 패턴 onset/offset, 패턴반전(pattern reversal)으로 구별할 수 있다[22]. 일반적으로 외래 환자에서 시행하는 검사는 패턴반전 VEP지만 IONM에서는 섬광자극 VEP를 사용한다. 과거에는 IONM중 시행하는 VEP는 재현성이 낮고 변화가 심하여 IONM에 활용하기에 제한이 있었다[23,24]. 하지만, 고강도 LED를 이용하여 섬광자극을 주는 경우, 안정적이고 재현성이 높은 VEP 파형을 획득할 수 있다는 연구결과들이 보고되었다[25,26]. Kodama 등은 LED를 이용하여 0-175 mCd 강도의 고강도 섬광자극 VEP 감시를 시행하였고, 53명의 환자(총 106개 눈)에 자극한 결과, 103개(97%)의 눈에서 안정적으로 파형을 획득하였다[25]. Sasaki 등은 100명의 환자를 대상으로 LED를 하여 500-20,000 Lx 강도의 섬광자극 VEP 감시를 시행한 결과 187개의 눈에서 안정적인 파형을 획득하였다[26]. IONM에서 VEP는 자극빈도는 약 1 Hz 빈도로 자극하며, 각 자극 기간은 10-20 msec이다[25,26]. VEP와 함께 망막전위도검사(electroretinography)를 시행하면 빛자극이 망막에 정확히 자극하였는지 확인하는데 도움이 된다. 기록전극은 international 10-20 system에 따라 위치하는데, 양측 귀 주위에 A1, A2 전극, 좌우 후두부 및 후두부 중심(Oz, O1, O2), 그리고 피질의 가운데 Cz, Fz 전극을 위치시킨다. 또다른 방법은 후두부 중앙에 MO 전극, 및 후두부 중앙을 기준으로 좌, 우 각 5 cm 간격으로 LO, RO 전극, 후두부 중앙을 기준으로 좌, 우 각 10 cm 간격으로 LT, RT 전극, 그리고 뒤통수점(inion)에서 12 cm 지점에 전두엽중앙선(midline frontal) 전극을 두는 방법도 있다. VEP는 75 ms 부근에서 형성되는 negative peak(N75)와 100 ms 근처에서 형성되는 positive peak(P100)의 peak-to-peak 진폭으로 평가를 한다. VEP 파형은 마취제의 영향을 많이 받으므로 수술중 VEP 감시를 시행할 때는 마취제 선택에 신중해야 한다. 모든 흡입 마취제는 섬광자극 VEP의 파형을 억제시키며, 아산화질소(nitrous oxide)와 다른 흡입마취제는 VEP 파형의 감소 및 소실을 초래할 수 있다[27,28]. 프로포폴(propofol)은 2-3 μ g/mL는 VEP의 진폭에 영향이 없으나 4 μ g/mL에서는 감소하기 시작한다[29]. 펜타닐(fentanyl), 레미펜타닐(remifentanyl), 프로포폴을 이용한 완전정맥마취(total intravenous anesthesia)은 VEP에 미치는 영향이 적은 편이다[30,31].

IONM에서 VEP의 경고기준은 VEP의 진폭이 50% 이상 감소하거나 VEP 파형이 소실된 경우이다. Sasaki 등은 N70-P100 최고점간 진폭이 50% 이상 증가 또는 감소한 경우를 유

의미한 변화로 분류하였는데, 수술 중 VEP 파형의 변화가 없었으나 수술 후 시기능의 저하를 보인 경우는 1.2%(2/169)로 확인되었다[26]. 수술 중 VEP 파형이 회복 없이 50% 이상 감소한 경우는 14개의 안구에서 관찰되었으며, 모두 수술 후에 시기능의 이상이 확인되었다[26]. Kodama 등은 N70-P100 최고점간 진폭이 50% 이상 감소한 경우를 유의미한 변화로 분류하였는데, 수술 중 VEP 파형의 변화가 없었으나 수술 후 시기능의 저하를 보인 경우는 1.1%(1/93), 회복 없이 50% 이상 파형의 변화 관찰된 경우에는 모두 수술 후 시기능의 변화가 관찰되었다(7/7)[25]. Gutzwiller 등은 20% 이상 진폭이 감소한 경우를 유의미한 변화로 분류하였는데, 62.5%(5/8)의 민감도와 83.8%의 양성예측도를 보였다[32]. Tao 등은 N75-P100 최고점간 진폭 또는 P100-N145 최고점간 진폭이 50% 이상 감소하는 경우를 유의미한 변화로 분류하였으며, N75-P100 최고점간 진폭에서 유의미한 변화는 수술 후 시기능의 이상이 발생할 오즈비(odds ratio)가 12.971(95% 신뢰구간 3.310-49.426)로 확인되었으며, P100-N145 최고점간 진폭에서 유의미한 변화는 수술 후 시기능의 이상이 발생할 오즈비가 4.828(95% 신뢰구간 1.313-17.753)으로 확인되었다[33].

결론

IONM은 수술 중 발생하는 신경계 손상을 조기에 발견하고, 수술 후 신경손상을 예방하는데 유용한 검사이다. 대뇌의 중요기능영역의 손상은 수술 후 신경학적 후유증이 발생할 위험이 높기 때문에 중요기능영역의 위치를 확인하고, 수술로 인한 손상을 최소화해야 한다. 다양한 검사방법을 이용한 IONM은 천막상부중양수술에서 대뇌의 중요기능영역을 위치를 확인하고, 수술 중 발생하는 신경손상을 조기에 발견하고 대처할 수 있게 하여 수술 후 발생 가능한 신경학적 손상을 최소화하는데 유용하게 활용될 수 있다.

Ethical approval

Not applicable.

Conflicts of interest

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

ORCID

Seol-Hee Baek, <https://orcid.org/0000-0002-3656-1833>

References

1. Gould J. Breaking down the epidemiology of brain cancer. *Nature*. 2018;561(7724):S40-1.
2. van den Bent MJ, Geurts M, French PJ, Smits M, Capper D, Bromberg JEC, et al. Primary brain tumours in adults. *Lancet*. 2023;402(10412):1564-79.
3. MacDonald DB, Dong C, Quatralle 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.
4. Peterson DO, Drummond JC, Todd MM. Effects of halothane, enflurane, isoflurane, and nitrous oxide on somatosensory evoked potentials in humans. *Anesthesiology*. 1986;65(1):35-40.
5. Pathak KS, Amaddio MD, Scoles PV, Shaffer JW, Mackay W. Effects of halothane, enflurane, and isoflurane in nitrous oxide on multilevel somatosensory evoked potentials. *Anesthesiology*. 1989;70(2):207-12.
6. Liu EHC, Wong HK, Chia CP, Lim HJ, Chen ZY, Lee TL. Effects of isoflurane and propofol on cortical somatosensory evoked potentials during comparable depth of anaesthesia as guided by bispectral index. *Br J Anaesth*. 2005;94(2):193-7.
7. Boisseau N, Madany M, Staccini P, Armando G, Martin F, Grimaud D, et al. Comparison of the effects of sevoflurane and propofol on cortical somatosensory evoked potentials. *Br J Anaesth*. 2002;88(6):785-9.
8. Fung NY, Hu Y, Irwin MG, Chow BFM, Yuen MY. Comparison between sevoflurane/remifentanyl and propofol/remifentanyl anaesthesia in providing conditions for somatosensory evoked potential monitoring during scoliosis corrective surgery. *Anaesth Intensive Care*. 2008;36(6):779-85.
9. Cedzich C, Taniguchi M, Schäfer S, Schramm J. Somatosensory evoked potential phase reversal and direct motor cortex stimulation during surgery in and around the central region. *Neurosurgery*. 1996;38(5):962-70.
10. Romstöck J, Fahlbusch R, Ganslandt O, Nimsky C,

- Strauss C. Localisation of the sensorimotor cortex during surgery for brain tumours: feasibility and waveform patterns of somatosensory evoked potentials. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2002;72(2):221-9.
11. Legatt AD, Emerson RG, Epstein CM, MacDonald DB, Deletis V, Bravo RJ, et al. ACNS guideline: transcranial electrical stimulation motor evoked potential monitoring. *J Clin Neurophysiol*. 2016;33(1):42-50.
 12. Szelényi A, Kothbauer KF, Deletis V. Transcranial electric stimulation for intraoperative motor evoked potential monitoring: stimulation parameters and electrode montages. *Clin Neurophysiol*. 2007;118(7):1586-95.
 13. 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(12):2291-316.
 14. Joksimovic B, Szelényi A, Seifert V, Damjanovic A, Damjanovic A, Rasulic L. Transcranial electric stimulation for intraoperative motor evoked potential monitoring: dependence of required stimulation current on interstimulus interval value. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg*. 2015;76(3):190-8.
 15. Wang AC, Than KD, Etame AB, La Marca F, Park P. Impact of anesthesia on transcranial electric motor evoked potential monitoring during spine surgery: a review of the literature. *J Neurosurg*. 2009;27(4):E7.
 16. Lotto ML, Banoub M, Schubert A. Effects of anesthetic agents and physiologic changes on intraoperative motor evoked potentials. *J Neurosurg Anesthesiol*. 2004;16(1):32-42.
 17. MacDonald DB. Overview on criteria for MEP monitoring. *J Clin Neurophysiol*. 2017;34(1):4-11.
 18. Jahangiri FR, Liang M, Kabir SS, Khowash O. Motor mapping of the brain: Taniguchi versus Penfield method. *Cureus*. 2022;14(5):e24901.
 19. Shiban E, Krieg SM, Haller B, Buchmann N, Obermueller T, Boeckh-Behrens T, et al. Intraoperative subcortical motor evoked potential stimulation: how close is the corticospinal tract? *J Neurosurg*. 2015;123(3):711-20.
 20. Szelényi A, Senft C, Jardan M, Forster MT, Franz K, Seifert V, et al. Intra-operative subcortical electrical stimulation: a comparison of two methods. *Clin Neurophysiol*. 2011;122(7):1470-5.
 21. Maesawa S, Fujii M, Nakahara N, Watanabe T, Wakabayashi T, Yoshida J. Intraoperative tractography and motor evoked potential (MEP) monitoring in surgery for gliomas around the corticospinal tract. *World Neurosurg*. 2010;74(1):153-61.
 22. Hariharan P, Balzer JR, Anetakis K, Crammond DJ, Thirumala PD. Electrophysiology of olfactory and optic nerve in outpatient and intraoperative settings. *J Clin Neurophysiol*. 2018;35(1):3-10.
 23. Cedzich C, Schramm J, Fahlbusch R. Are flash-evoked visual potentials useful for intraoperative monitoring of visual pathway function? *Neurosurgery*. 1987;21(5):709-15.
 24. Fisher RS, Raudzens P, Nunemacher M. Efficacy of intraoperative neurophysiological monitoring. *J Clin Neurophysiol*. 1995;12(1):97-109.
 25. Kodama K, Goto T, Sato A, Sakai K, Tanaka Y, Hongo K. Standard and limitation of intraoperative monitoring of the visual evoked potential. *Acta Neurochir*. 2010;152(4):643-8.
 26. Sasaki T, Itakura T, Suzuki K, Kasuya H, Munakata R, Muramatsu H, et al. Intraoperative monitoring of visual evoked potential: introduction of a clinically useful method. *J Neurosurg*. 2010;112(2):273-84.
 27. Sebel PS, Flynn PJ, Ingram DA. Effect of nitrous oxide on visual, auditory and somatosensory evoked potentials. *Br J Anaesth*. 1984;56(12):1403-7.
 28. Sebel PS, Ingram DA, Flynn PJ, Rutherford CF, Rogers H. Evoked potentials during isoflurane anaesthesia. *Br J Anaesth*. 1986;58(6):580-5.
 29. Tanaka R, Tanaka S, Ichino T, Ishida T, Fuseya S, Kawamata M. Differential effects of sevoflurane and propofol on an electroretinogram and visual evoked potentials. *J Anesth*. 2020;34(2):298-302.
 30. Wiedemayer H, Fauser B, Armbruster W, Gasser T, Stolke D. Visual evoked potentials for intraoperative neurophysiologic monitoring using total intravenous anesthesia. *J Neurosurg Anesthesiol*. 2003;15(1):19-24.
 31. Yamada S, Hayamizu K, Akiyama Y, Kimura Y,

- Hashimoto S, Mikuni N, et al. Effect of remimazolam on intraoperative neurophysiology monitoring of visual-evoked potential: a case series. *J Anesth.* 2023;37(2):311-4.
32. Gutzwiller EM, Cabrilo I, Radovanovic I, Schaller K, Boëx C. Intraoperative monitoring with visual evoked potentials for brain surgeries. *J Neurosurg.* 2018;130(2):654-60.
33. Tao X, Fan X, Gui S, Liu J, Yang X, Li K, et al. Efficacy of intraoperative visual evoked potential amplitude reduction in predicting visual outcome after extended endoscopic endonasal resection of craniopharyngiomas. *J Neurosurg.* 2023. Forthcoming. <https://doi.org/10.3171/2023.9.JNS23457>