

Review Article

반쪽얼굴연축에 대한 미세혈관감압술 중 수술중신경계감시의 최신 지견

주병억*

순천향대학교 서울병원 순천향대학교 의과대학 신경과

Recent update of intraoperative neurophysiological monitoring during microvascular decompression surgery for hemifacial spasm

Byung-Euk Joo*

Department of Neurology, Soonchunhyang University Seoul Hospital, Soonchunhyang University College of Medicine, Seoul, Korea

ABSTRACT

Hemifacial spasm (HFS) is due to the vascular compression of the facial nerve at its root exit zone (REZ). Microvascular decompression (MVD) for the facial nerve near the REZ is the best effective and curative treatment for HFS. In MVD for HFS, intraoperative neurophysiological monitoring (INM) has two purposes. The first purpose is the unique feature of MVD for HFS, which is to assess and optimize the effectiveness of the vascular decompression. The purpose is achieved through monitoring of abnormal facial nerve EMG that is called as lateral spread response and is also partially possible through Z-L response, facial F-wave and blink reflexes. The second purpose is to prevent postoperative hearing loss during MVD surgery, which is possible through INM of brainstem auditory evoked potentials. Through INM mentioned above, MVD can be developed as a more safe and effective treatment for HFS. Over the past 20 years, much progress has been archived in INM during MVD for HFS, and MVD can be developed as a more safe and effective treatment for HFS.

Keywords: hemifacial spasm; intraoperative neurophysiological monitoring; microvascular decompression surgery

서론

반쪽얼굴연축(hemifacial spasm, HFS)은 반쪽얼굴근육이 불수의적, 간헐적 그리고 불규칙적으로 수축하는 질환으로서, 병리적으로 얼굴신경 기시부(root exit zone, REZ)에서 뇌혈관이 뇌줄기로부터 나오는 얼굴신경(facial nerve)을 압박하여, 얼굴신경 혹은 얼굴신경핵(facial nucleus)의 기능적 변성이 발생하여 생기는 것으로 알려져 있다[1-3]. HFS의 치료는 얼굴신경을 압박하는 혈관을 확인하여 이를 분리시키는 미세혈관감압술(microvascular decompression, MVD)이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다. HFS에 대한 MVD 중 시행되는 수술중신경계감시(intraoperative neurophysiological monitoring, INM) 검사는 크게 2가지의 유용성이 있다. 첫째는 INM 검사를 통해 HFS에 대한 MVD의 성공률을 높일 수 있다는 것이다. HFS에서는 측면전파반응(lateral spread

response, LSR)이라는 특징적인 전기생리학적 이상소견이 관찰되는데, 이는 하나의 얼굴신경 분지를 자극하였을 때 그 신경에서 지배받는 근육뿐 아니라, 같은 쪽 얼굴의 다른 얼굴신경 분지로부터 지배받는 근육에서도 전기적 반응이 함께 발생하는 것이다. HFS에 대한 MVD를 시행하여, 얼굴신경을 압박하던 문제의 혈관(offending vessel)에 대한 적절한 감압이 이루어지게 되면, 처음 관찰된 LSR이 소실되거나 LSR의 진폭이 감소하게 된다. 그러므로, 이 LSR을 이용하여 HFS를 유발시킨 문제의 혈관을 확인하고, 이를 추적하므로 MVD의 정확도를 높이고, 성공률을 향상시킬 수 있다. 그 외에도 Z-L 반응(Z-L response, ZLR), 얼굴신경 F 파(facial F-waves) 및 순목 반사(blink reflex, BR) 검사 등이 HFS에 대한 MVD의 정확도 및 안정성에 기여하는 것으로 알려져 있다. 둘째는 INM 검사 통해 MVD 시행 중 발생할 수 있는 주요 신경계 손상을 막을 수 있다. 특히, 전정와우신경(vestibulocochlear nerve,

Received May 2, 2024; Revised May 28, 2024; Accepted Jun 15, 2024

*Corresponding author: Byung-Euk Joo, Department of Neurology, Soonchunhyang University Seoul Hospital, Soonchunhyang University College of Medicine, Seoul 04401, Korea

Tel: +82-2-709-9224, Fax: +82-2-710-3098, E-mail: faithjoo17@gmail.com

© 2024 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.

CN VIII)이 얼굴신경 REZ에서 얼굴신경과 인접해 있어서, HFS에 대한 MVD 중에 CN VIII의 손상으로 수술 후 청력소실(postoperative hearing loss)이 종종 발생하게 된다. 이때, 뇌줄기청각유발전위(brainstem auditory evoked potentials, BAEPs) 검사를 이용하여 수술 중 청각신경경로를 지속적으로 감시할 때, CN VIII 손상으로 인한 수술 후 청력소실(postoperative hearing loss)을 막을 수 있다. 본문에서는 HFS에서 사용되는 대표적인 INM 방법인 LSR, Z-L 반응, 얼굴신경 F 파, BR 및 BAEPs에 대해서 최근 20년간 새롭게 알려진 내용을 중심으로 소개하겠다.

수술중 신경계감시

1. 얼굴신경 근전도(facial nerve electromyography)

1) 측면전파반응(lateral spread response, LSR)

LSR은 HFS의 매우 특징적인 전기생리학적 이상 반응으로, 하나의 얼굴신경 분지를 자극하였을 때, 그 신경에서 지배받는 근육뿐 아니라, 같은 쪽 얼굴의 다른 얼굴신경 분지로부터 지배받는 근육에서 유발되는 파형을 말한다. HFS를 대상으로 한 기존의 연구에서 MVD 중 LSR의 소실은 offending vessel의 적절한 감압 및 수술 후 좋은 예후와 연관성이 높다고 알려져 있다[4,5]. 이런 이유로, HFS에 대한 MVD 중 LSR의 소실 혹은 진폭의 감소는 얼굴신경에 대한 offending vessel의 적절한 감압이 이루어졌음을 나타내는 지표로 사용되고 있다[5-8]. 하지만, 일부 환자들은 MVD 중 offending vessel를 감압하기 전에 이미 LSR이 소실되거나, 혹은 offending vessel를 충분히 감압 했음에도, LSR이 사라지지 않고 지속되는 경우가 있음을 보고하였고, 이런 이유로 적절한 감압이 이루어졌음을 의미하는 지표로서 LSR의 실제적인 가치에 대해 여전히 논란이 있다[5,9,10].

일반적으로 LSR을 기록할 때, 자극 전극은 눈 바깥가장자리에서 약 3 cm 떨어진 부위의 얼굴신경의 이마신경(frontal branch) 혹은 광대 신경(zygomatic branch)에 삽입한다. 자극방향은 뇌줄기를 향하며, 음극(cathode)이 양극(anode)보다 더 가깝게 위치하게 한다[1,2]. 자극의 세기는 5-25 mA로, 자극 지속시간은 0.3-0.5 msec 정도로 설정하고, 기록 전극은 입둘레근(orbicularis oris muscle) 혹은 턱끝근육(mentalis muscle)에 배치해 측정한다. 얼굴신경의 위쪽 분지(upper branch)가 아닌 아래쪽 분지(lower branch)를 자극해도 LSR이 유발될 수 있다. 이 경우 아래쪽 분지를 자극할 경우에는, 볼 신경(buccal branch) 혹은 턱 가장자리 신경(mandibular marginal branch)에 자극 전극을 두고, 이마근육(frontalis muscle) 혹은 눈둘레근육(orbicularis oculi muscle)에서 LSR 측정이 가능하다. 사람마다 얼굴 신경의 분지는 다양하게

나타나기 때문에[11,12] 해부학적 변이를 고려하여 정확하게 자극하면 LSR을 더 잘 얻을 수 있다. 한 국내 연구진은 수술 전 외래 검사실에서 LSR을 측정하여 LSR이 가장 잘 유발되는 얼굴신경 분지 위치를 확인하고, 이를 지도화(mapping)하여 INM을 시행했을 때 LSR 효율이 높아진다고 발표했다[13]. 이들은 자극 방향을 뇌줄기와 반대 방향(음극이 양극보다 더 멀리 위치)으로 시행하여, 복합근육활동전위(compound muscle action potential)를 확인하면서 얼굴신경 분지를 적절히 자극함으로써 LSR 효율을 높였다고 보고했다.

LSR을 활용한 INM은 안면신경에 대한 압박 혈관을 식별하고 충분히 감압이 되었는지를 확인하는 유용한 검사 방법이다[14]. 일부 연구자들은 LSR이 완전히 사라지지 않더라도, 감압 전보다 진폭이 감소하는 것이 좋은 예후와 연관이 있다고 보고했다[15]. 그러나 다른 연구자들은 HFS의 개선과 장기적인 예후가 MVD 중 LSR 소실과 크게 관련이 없다고 주장하며, LSR의 효용성에 대해 의문을 제기했다[16]. 이들은 MVD를 받은 72명의 HFS 환자를 분석한 결과, 40명에서 MVD 중 LSR이 소실되었으나, 퇴원 시 5명은 경미한 HFS가 지속되었고, 이 중 4명은 6개월 후에도 증상이 지속되었다고 보고했다. Thirumala 등은 MVD 중 LSR 소실이 단기적인 예후와 연관이 있지만, 일부 환자에서는 LSR이 소실되지 않아도 장기적으로 HFS가 호전될 수 있다고 주장하며, MVD 중 LSR 소실이 장기적인 예후와 크게 관련이 없다고 보고했다[17].

이러한 잔류 LSR은 HFS의 병리 기전 중 얼굴신경핵의 과항진성을 포함하는 중추성 기전의 증거로 생각된다[18,19]. MVD를 통해 얼굴신경에 대한 직접적인 압박 문제는 해결되지만, 얼굴신경핵의 변성된 과항진성이 정상화되는 데 수개월 또는 수년이 걸릴 수 있으므로, 이 기간 동안 일부 환자에서 잔류 LSR과 HFS 증상이 나타날 수 있다. 따라서 MVD 중 압박 혈관을 식별하고 충분히 감압되었는지 확인하는 지표로 LSR을 활용하는 것은 중요하지만, MVD 중 관찰되는 LSR의 변화(소실 또는 잔류)를 해석할 때 검사자와 수술 팀 간의 긴밀한 소통이 필요하며, 충분한 감압을 이루는 것이 중요하다.

2) Z-L 반응(Z-L response, ZLR)

Z-L 반응(ZLR)은 HFS 수술 시 LSR과 함께 압박 혈관(offending vessel)을 확인하고 감압 여부를 평가하는 검사 방법이다. ZLR은 압박 혈관의 벽을 전기적으로 자극하여 유발되는 반응으로, 이는 압박 혈관이 전기 자극에 의해 얼굴신경을 자극해 발생하는 근전도 반응으로[20,21], 압박 혈관이 성공적으로 감압되면, ZLR은 즉시 사라진다.

일부 HFS 환자의 경우 LSR이 감압 전에 사라지거나, 감압 후에도 지속될 수 있다. 이러한 경우 LSR만으로는 압박 혈관을 정확히 확인하거나 감압 여부를 판단하는 데 한계가 있다.

또한, 일부 환자에서는 압박 혈관이 하나가 아니라 여러 개일 수 있다. 따라서 MVD 중 ZLR을 함께 사용하면, 압박 혈관을 더 정확하게 확인하고 감압할 수 있다. 검사방법은 기록 전극을 눈물레근, 입물레근, 턱끝근에 삽입하고, 자극 전극으로는 두개강 내 수술에서 사용되는 비침습형 동심형 전극(concentric electrode)을 사용하여, 양극 방식(bi-polar mode)으로 자극을 주어 얻을 수 있다. 얼굴신경을 감압하기 전에 자극 전극을 REZ 접촉 부위에서 5 mm 이내의 압박 혈관에 위치시키고, 전기 자극(1-2 mA, 0.2 msec)을 약 3 Hz 속도로 가한다. 이때 해당 얼굴신경 분지가 지배하는 근육에서 근전도 파형이 유발되고, 압박 혈관을 확인하고 완전히 감압할 때까지 이 작업을 반복하며, 감압이 충분히 이루어지면 ZLR은 더 이상 유발되지 않게 된다. ZLR은 LSR을 활용하기 어려운 경우에 특히 유용한 것으로 알려져 있다. Zheng 등은 LSR과 ZLR을 함께 사용할 경우, LSR 단독 사용보다 유용하다고 제안하였다 [20,21]. 또한, ZLR은 압박 혈관이 여러 개일 때, 이를 확인하는 데 특히 유용하다. 하지만 ZLR을 사용할 때는 몇 가지 주의 사항이 필요하다. ZLR은 압박 혈관을 자극하여 인접한 얼굴신경에 전기 자극이 전달되면서 발생하는 반응이므로, REZ의 병변 위치 외에도 압박 혈관과 얼굴신경이 접촉하는 부위가 있다면 ZLR이 유발될 수 있다[22]. 예를 들어, REZ 접촉 부위뿐만 아니라 압박 혈관의 말단 부위와 얼굴신경의 말단 부위가 접촉할 경우, 압박 혈관이 충분히 감압되어 LSR이 소실되더라도 ZLR은 지속될 수 있다.

2. 얼굴 신경 F 파(facial F-wave)

얼굴신경 F 파 검사는 얼굴신경을 전기적으로 자극했을 때, 자극이 뇌줄기 방향으로 전달된 후 얼굴신경핵을 거쳐 다시 얼굴신경을 통해 반대 방향으로 전달되어 발생하는 지연성 근전도 파형을 측정하는 검사이다. F 파 활동은 운동신경의 흥분성을 나타내는 지표로 알려져 있으며, 얼굴신경을 자극하면 얼굴신경핵을 포함한 얼굴신경의 흥분성을 기록할 수 있다. 실제로 HFS 환자에게 이 검사를 시행했을 때, MVD 수술 전에는 증상이 있는 쪽에서 F 파가 더 자주 유발되었고, 수술 후에는 유의미한 차이가 사라진다는 보고가 있다[23]. 얼굴신경 F 파 검사를 시행할 때는 직접적으로 유발되는 M 파와의 겹침을 방지하기 위해 기록 전극은 턱끝근(mentalis muscle)에 삽입하고, 자극 전극은 턱 가장자리 신경(mandibular marginal branch)의 말단 부위에 위치시켜 자극을 유발한다.

3. 순목 반사(blink reflex, BR)

HFS의 MVD 중 INM에서 뇌줄기 반사를 활용한 시도도 있었다. Moller와 Jannetta는 HFS 환자에서 수술 중 BR 반응을 유발시키고 이를 얼굴신경의 압박 완화 후 사라진 것을 처

음 보고하였다[2,24]. 그러나 이들의 방법론으로 유도된 전기적 반응이 얼굴신경 섬유층의 측축간 전도(the lateral axon-axonal spread)로 인한 것일 가능성도 제시되었다[25]. 2009년 Deletis 등은 마취 상태의 환자에게 상악신경에 전기 자극열을 적용하여 뇌줄기 반사의 초기 반응(R1) 구성요소를 유도하는 새로운 방법론을 보고하였다[26]. 이 연구 그룹은 또한 MVD 수술 중 BR의 수술 후 즉시 증가에 필요한 자극 강도 및/또는 자극열에서의 자극 횟수를 기록하였다. 그들은 이러한 BR의 변화가 얼굴신경의 효과적인 압박 완화 후 얼굴신경 핵의 빠른 과항진성 저하로 인한 것으로 추정하였다[27]. 최근 Choi 등은 HFS 환자 41명을 대상으로 MVD 중 BR을 INM 기술로 사용한 예후 및 예측 가치를 조사하였다[28]. 그들은 BR 모니터링 결과를 수술 후 1일, 1개월 및 6개월 후 외래진료 결과와 비교하였다. BR 모니터링에서, 지속적 및 해결된 BR을 보이는 그룹 간의 얼굴연축 해소 결과는 모든 시점에서 통계적으로 유의미하였다. 그러나 LSR을 보이는 환자 간의 비교에서는 수술 후 1일 및 1개월 후에만 통계적으로 유의미하였고, 6개월 후에는 그렇지 않았다. 또한, BR과 LSR 모니터링 간의 비교에서는 수술 후 1일 또는 1개월 후 수술 결과를 예측하는 능력에서 유의미한 차이가 없었다. 그러나 수술 후 6개월에 BR 모니터링이 LSR 모니터링보다 수술 결과를 예측하는데 더 좋은 성과를 보였다. 결론적으로 BR이 LSR보다 수술 결과를 예측하는 데 더 신뢰할 수 있는 지표일 수 있으며, 이 방법은 MVD 수술 중 얼굴신경의 적절한 압박 완화에 도움을 줄 수 있는 잠재적으로 유용한 방법일 수 있다고 제안하였다. 또한, HFS 환자에서 상악신경 자극에 의해 구체적인 근육 또는 다른 안면근 유발에 의해 전기적 반응이 나타나는 것으로 두드러질 수 있는 눈깜빡임 동기증(blink synkinesis, BS)도 관찰되었다[29,30]. Moller와 Jannetta는 안면신경 압박의 완화로 BS와 LSR이 모두 사라지는 것을 발견하였다. 그들은 HFS의 기저 병리기전이 얼굴신경핵의 과항진성과 관련될 것으로 가설을 세웠다[24]. 2019년 Hsu 등은 HFS를 위한 MVD 중 BS 모니터링의 유효성을 평가하였으며, BS가 BS, LSR 및 안면신경 MEP를 포함한 세 가지 방법론 중에서 가장 높은 감수성과 예측 값으로 나타났다고 결론지었다[31].

BR과 BS 모니터링의 잠재적 가치는 아직 완전히 밝혀지지 않았지만, 이들은 LSR의 단점을 보완할 수 있는 새로운 INM 방법론의 유망한 후보로 여겨질 수 있다. 또한, 이러한 반사 기반 방법론은 반사 아크를 구성하는 삼출신경의 추가 및 동시 모니터링을 촉진할 수도 있다.

4. 뇌줄기 청각유발전위(brainstem auditory evoked potentials, BAEPs)

1) 검사 방법의 변화(changes of methodology)

BAEPs는 일반적으로 신경생리검사에서 사용될 때, 단일 자극으로 얻어진 하나의 파형이 아니라 여러 번의 자극을 통해 얻어진 복수의 파형을 평균화하여 사용한다. 따라서 INM에서 BAEPs를 얻을 때 중요한 조작 가능한 변수는 자극빈도와 평균화 횟수이다. 미국임상신경생리학회(American Clinical Neurophysiology Society, ACNS)는 2006년에 10 Hz 이상의 높은 자극빈도가 BAEPs 파형의 왜곡이나 감소를 초래할 수 있으므로, 안정적인 파형을 얻기 위해 8-10 Hz의 낮은 자극빈도를 권장했다[32]. 또한, 해석 가능하고 재현성 있는 BAEPs를 얻기 위해서는 1,000-4,000회의 높은 평균화 횟수가 필요하다고 하였다. 이러한 ACNS의 권고에 따라, 10 Hz의 자극빈도와 1,000회의 평균화 횟수를 적용할 경우, 한 번의 해석 가능한 BAEPs를 얻는 데 100초의 시간이 소요된다. 일반적인 외래 검사실에서는 질병의 존재를 확인하기 위해 시간이 오래 걸려도 정확한 결과를 얻는 것이 중요하지만, 수술 중 발생할 수 있는 신경손상을 빨리 감지하고 예방해야 하는 INM에서는 시간이 지연될 경우 영구적인 신경손상으로 이어질 수 있다[33]. 그러나 최근의 기술 발전으로 인해 INM 장비의 신호-잡음 비율이 개선되고, 고빈도 자극 사용 시 발생할 수 있는 파형 왜곡이 줄어들었다. 예를 들어, 2016년 삼성서울병원에서는 40 Hz에서 100 Hz의 고빈도 자극을 사용하였고, 이 고빈도 자극을 사용할 때에도 파형 왜곡이 없었음을 입증하였다[33]. 또한, 삼성서울병원 연구진은 자극 빈도를 43.9 Hz로 고정하고, 평균화 횟수를 400회로 줄여서도 안정적인 파형을 얻을 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 이러한 연구 결과는 기존의 검사 방법과 다른 접근법을 제시하며, 시간 단축과 함께 BAEPs 측정의 효율성을 높이는 데 기여하였다. 최근 많은 연구진들도 자극빈도와 평균화 횟수를 조정하여 30초 이내에 해석 가능한 BAEPs를 얻는 방식을 적용하여 INM에 활용하고 있다[34].

BAEP를 얻기 위한 표준 기록 방법은 뇌파 검사에서 사용되는 10-20 전극 배치 시스템을 따라 Cz'를 기준으로 하며, 귓바퀴 앞 또는 꼭지돌기 전극을 사용한다[35,36]. 이 전통적인 방법은 근접부위 전위로서 파형 I과 II를, 원거리 부위 전위로서 파형 III부터 V를 얻게 한다. 원거리 부위 전위 파형은 마취 중 진폭이 감소할 수 있는 반면, INM에서는 주로 파형 V를 사용한다. BAEPs의 원거리 부위 전위의 일관성과 진폭을 향상시키기 위해, Greve 등은 천막 아래 접근법으로 수술을 받은 30명의 환자(이 중 15명은 MVD 수술을 받은 환자)를 대상으로 귓바퀴 앞이나 꼭지돌기 대신 Erb의 점(EP)에 기록 전극을 배치하여 BAEPs 파형을 측정하였다[37]. 이 방법으로 기록 전극의 위치를 변경한 결과, 파형 IV와 V의 진폭이 이전 검사 방법보다 약 40%-50% 증가하였으며, 이는 수술 중 더 크고 안정된 BAEPs 파형을 얻을 수 있다는 가능성을 시사한다.

2) 경고 기준의 변화(the changes of warning criteria)

BAEPs의 INM 사용 시, 주로 파형 V가 경고 기준으로 사용된다[27,35,38,39]. 이는 다른 파형에 비해 분명하고, 파형 V가 마취의 영향을 상대적으로 덜 받기 때문이다. 그러나 MVD에서 BAEPs를 사용한 IONM은 수술 후 청력 소실을 예측하는 데 있어서 여전히 경고 기준에 대한 합의가 이루어지지 않은 상황이다[35,39,40]. 과거 연구에서는 파형 V의 잠복기가 연장되는 것이 수술 후 청력 소실과 연관이 있다는 보고가 있었다. 최근 연구에서는 파형 V의 진폭 감소가 더 유용한 경고 기준일 수 있음을 제안하기도 했다[40]. 최근, Thirumala 등은 파형 V의 잠복기 연장 혹은 진폭의 감소보다는 파형 V가 일시적 혹은 영구적으로 소실된 경우만이 수술 후 청력 소실과 연관성이 있다고 보고하였다[34]. 삼성서울병원에서 수행된 연구에서는 MVD 수술 후 청력 소실과 관련된 경고 기준을 설정하기 위해 932명의 환자를 대상으로 BAEPs를 분석하였다[41]. 이 연구에서는 파형 V의 영구적인 소실이 청력 소실을 예측하는 데 높은 특이도를 보였고, 일시적인 소실 또는 진폭 50% 이상 감소와 함께 잠복기가 연장된 경우가 부적절한 경고 기준일 수 있음을 제시하였다. 따라서, MVD 중 수술 후 청력 소실을 예방하기 위한 보다 적절한 경고 기준으로 다음과 같이 '단계적 등급'을 제안하였다:

- 관찰 징후: 파형 V의 진폭 50% 감소 없이 잠복기만 1 msec 이상 연장
- 경고 징후: 파형 V의 진폭 50% 이상 감소와 함께 잠복기 1 msec 이상 연장
- 위험 징후: 파형 V의 소실

수술 중에 관찰 징후가 나타날 경우, 이를 집도의에게 보고 하나, 경고 징후나 위험 징후가 발생할 경우에는 수술을 중단하고 진행 중인 문제를 교정하기 위한 조치를 취할 것을 권장하였다[41].

3) 파형 I의 중요성(importance of wave I)

최근 연구에서는 HFS의 MVD에서 파형 V의 진폭이 50% 이상 감소하거나 잠복기가 1 msec 이상 연장되는 경우를 경고 기준으로 삼았으나, 최근 연구에서는 파형 V의 소실이 실제로 매우 중요하다는 것이 확인되었다. HFS의 MVD를 시행할 때, 파형 V의 소실이 발생하면 일반적으로 두 가지 다른 패턴이 관찰된다: (A) 파형 I부터 모든 파형이 소실되거나, (B) 파형 I은 유지되고 파형 V만 소실되는 경우이다. 파형 I은 달팽이 구역에서 생성되기 때문에, MVD 중 달팽이 구역의 손상은 파형 I을 포함한 모든 BAEPs의 완전한 소실로 이어질 수 있다. 특히, 혈관 경련으로 인한 달팽이 구역의 허혈성 손상은 파형

I을 포함한 모든 BAEPs의 완전한 소실을 초래할 수 있다 [36,42]. 그러나 MVD 중에 달팽이 구역이 손상되지 않은 상태에서 CN VIII의 근위부가 손상될 경우, 파형 V는 소실되지 않, 파형 I은 유지될 수 있다. 삼성서울병원에서는 HFS 환자들 중 MVD 중 파형 V 소실을 보인 36명의 환자를 대상으로 연구를 수행하였다[43]. 이 연구에서 12명(33.3%)의 환자가 파형 I을 포함한 모든 BAEPs의 완전한 소실을 경험했으며, 이들 환자들은 MVD 수술 후 청력 손실을 경험할 가능성이 더 높았다 ($p = 0.009$). 또한, 청력 손실 외에도 현기증이나 이명과 같은 다른 심각한 합병증의 발생 빈도가 유의미하게 높았다. 이 연구에서는 파형 V의 소실이 발생하는 시점을 분석하였고, 파형 V의 소실이 MVD의 주요 과정 이후에도 빈번히 발생할 수 있음을 보여주었다. 이러한 결과는 MVD 수술 중 청력 손실뿐만 아니라, 현기증, 이명 등의 심각한 합병증이 MVD의 주요 과정 이후에도 발생할 수 있음을 나타내며, HFS에 대한 MVD 수술 시 주의가 필요함을 보여준다.

4) 경고기준 발생 전 변화의 중요성(importance of prewarning sign)

최근 연구에서는 HFS의 MVD 수술 중에 파형 V의 진폭이 50% 이상 감소하거나 잠복기가 1 msec 이상 연장되는 경우를 경고 기준으로 삼았으나, 파형 V의 소실이 실질적으로 매우 중요하다는 사실이 확인되었다. HFS의 MVD 수술 중 파형 V의 소실이 발생할 때, 주로 두 가지 패턴이 관찰되는데, 첫째는 파형 I부터 연장되는 경우로 CN VIII이 뇌줄기 쪽으로 당겨질 때 발생하며, 둘째는 파형 III부터 연장되는 경우로 CN VIII이 뇌줄기에서 멀어지는 쪽으로 당겨질 때 발생하는 것이다[42]. 삼성서울병원에서는 MVD 수술 중 소뇌뒤당김을 시행할 때, 이전에 발생한 BAEPs의 변화를 조사하고 그 의미를 분석하였다[44]. HFS를 가진 환자들을 대상으로 한 MVD 수술 중에 파형 V의 진폭이 50% 이상 감소하거나 잠복기가 1 msec 이상 연장된 총 241명의 환자의 BAEPs를 분석한 결과, 소뇌뒤당김 시행 중에 파형 I의 잠복기 변화 없이 파형 III의 잠복기가 0.5 msec 이상으로 연장되는 환자가 전체 환자 중 2/3를 차지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 소뇌뒤당김 시행 시, 경고 기준 발생 전의 BAEPs 변화의 중요성을 확인하기 위해, 파형 V의 소실을 보인 환자들 중 11명에서 10명은 소뇌뒤당김 시행 시 파형 I의 잠복기 변화 없이 먼저 파형 III의 잠복기가 0.5 msec 이상으로 연장된 후 MVD 후 청력 소실을 경험한 것으로 확인되었으며, 이와 관련하여 MVD 후 청력 소실을 보인 5명의 환자들도 소뇌뒤당김 시행 시 위와 같은 BAEPs의 변화를 보여주었다. 저자들은 소뇌다리뇌각 주변의 REZ에서의 CN VIII의 수초가 상대적으로 취약하기 때문에, 소뇌뒤당김 시행 시 심각한 손상 가능성이 높다고 분석하였으며, 따라

서 MVD 중에는 파형 V뿐만 아니라 파형 I과 파형 III의 잠복기를 주의 깊게 확인하는 것이 MVD 후 청력 소실을 예방하는데 필수적이라고 제시하였다.

결론

최근 몇 년간 HFS의 MVD 수술에서는 INM 방법과 해석에서 중요한 발전이 이루어졌다. 특히, HFS의 전기생리학적 특징인 LSR에 대한 검사 방법이 개선되었으며, MVD 후에도 지속되는 잔류 LSR의 의미를 함께 평가할 수 있게 되었다. 또한, LSR 외에도 HFS의 offending vessel 확인이나 충분한 감압 여부 판단에 유용한 Z-L 반응 검사법이 개발되어 활용되고 있으며, 얼굴신경핵의 과항진성을 평가하는 얼굴신경 F파 검사와 BR의 중요성도 입증되고 있다. HFS에 대한 MVD 수술 시, CN VIII 손상으로 인한 수술 후 청력 소실은 중요한 합병증 중 하나였으나, BAEPs를 이용한 INM의 발전은 수술 후 청력 소실의 발생률을 크게 줄였다. 이러한 다양한 INM 검사 방법과 그 의미를 이해하고 적용함으로써, HFS에 대한 MVD 수술이 보다 안정적이고 효과적인 방법으로 발전할 수 있을 것이다.

Ethical approval

Not applicable.

Conflicts of interest

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

ORCID

Byung-Euk Joo, <https://orcid.org/0000-0003-3566-1194>

References

1. Nielsen VK. Pathophysiology of hemifacial spasm: I. Ephaptic transmission and ectopic excitation. *Neurology*. 1984;34(4):418-26.
2. Møller AR, Jannetta PJ. Hemifacial spasm: results of electrophysiologic recording during microvascular decompression operations. *Neurology*. 1985;35(7):969-74.
3. Wilkins RH. Hemifacial spasm: a review. *Surg Neurol*. 1991;36(4):251-77.

4. Kong DS, Park K, Shin BG, Lee JA, Eum DO. Prognostic value of the lateral spread response for intraoperative electromyography monitoring of the facial musculature during microvascular decompression for hemifacial spasm. *J Neurosurg.* 2007;106(3):384-7.
5. Kim CH, Kong DS, Lee JA, Park K. The potential value of the disappearance of the lateral spread response during microvascular decompression for predicting the clinical outcome of hemifacial spasms: a prospective study. *Neurosurgery.* 2010;67(6):1581-7.
6. Huang BR, Chang CN, Hsu JC. Intraoperative electrophysiological monitoring in microvascular decompression for hemifacial spasm. *J Clin Neurosci.* 2009;16(2):209-13.
7. Sekula RF Jr, Bhatia S, Frederickson AM, Jannetta PJ, Quigley MR, Small GA, et al. Utility of intraoperative electromyography in microvascular decompression for hemifacial spasm: a meta-analysis. *Neurosurg Focus.* 2009;27(4):E10.
8. Thirumala PD, Shah AC, Nikonow TN, Habeych ME, Balzer JR, Crammond DJ, et al. Microvascular decompression for hemifacial spasm: evaluating outcome prognosticators including the value of intraoperative lateral spread response monitoring and clinical characteristics in 293 patients. *J Clin Neurophysiol.* 2011;28(1):56-66.
9. Tobishima H, Hatayama T, Ohkuma H. Relation between the persistence of an abnormal muscle response and the long-term clinical course after microvascular decompression for hemifacial spasm. *Neurol Med Chir.* 2014;54(6):474-82.
10. Hatem J, Sindou M, Vial C. Intraoperative monitoring of facial EMG responses during microvascular decompression for hemifacial spasm. Prognostic value for long-term outcome: a study in a 33-patient series. *Br J Neurosurg.* 2001;15(6):496-9.
11. Katz AD, Catalano P. The clinical significance of the various anastomotic branches of the facial nerve. Report of 100 patients. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg.* 1987;113(9):959-62.
12. Kopuz C, Turgut S, Yavuz S, Ilgi S. Distribution of facial nerve in parotid gland: analysis of 50 cases. *Okajimas Folia Anat Jpn.* 1994;70(6):295-9.
13. Lee S, Park SK, Lee JA, Joo BE, Kong DS, Seo DW, et al. A new method for monitoring abnormal muscle response in hemifacial spasm: a prospective study. *Clin Neurophysiol.* 2018;129(7):1490-5.
14. Mooij JJ, Mustafa MK, van Weerden TW. Hemifacial spasm: intraoperative electromyographic monitoring as a guide for microvascular decompression. *Neurosurgery.* 2001;49(6):1365-70.
15. Shin JC, Chung UH, Kim YC, Park CI. Prospective study of microvascular decompression in hemifacial spasm. *Neurosurgery.* 1997;40(4):730-4.
16. Joo WI, Lee KJ, Park HK, Chough CK, Rha HK. Prognostic value of intra-operative lateral spread response monitoring during microvascular decompression in patients with hemifacial spasm. *J Clin Neurosci.* 2008;15(12):1335-9.
17. Thirumala PD, Wang X, Shah A, Habeych M, Crammond D, Balzer JR, et al. Clinical impact of residual lateral spread response after adequate microvascular decompression for hemifacial spasm: a retrospective analysis. *Br J Neurosurg.* 2015;29(6):818-22.
18. Møller AR. Vascular compression of cranial nerves: II: pathophysiology. *Neurol Res.* 1999;21(5):439-43.
19. Møller AR, Jannetta PJ. Microvascular decompression in hemifacial spasm: intraoperative electrophysiological observations. *Neurosurgery.* 1985;16(5):612-8.
20. Yang M, Zheng X, Ying T, Zhu J, Zhang W, Yang X, et al. Combined intraoperative monitoring of abnormal muscle response and Z-L response for hemifacial spasm with tandem compression type. *Acta Neurochir.* 2014;156(6):1161-6.
21. Zheng X, Hong W, Tang Y, Ying T, Wu Z, Shang M, et al. Discovery of a new waveform for intraoperative monitoring of hemifacial spasms. *Acta Neurochir.* 2012;154(5):799-805.
22. Son BC, Ko HC, Choi JG. Intraoperative monitoring of Z-L response (ZLR) and abnormal muscle response (AMR) during microvascular decompression for hemifacial spasm. Interpreting the role of ZLR. *Acta Neurochir.* 2018;160(5):963-70.
23. Ishikawa M, Ohira T, Namiki J, Kobayashi M, Takase M, Kawase T, et al. Electrophysiological investigation of hemifacial spasm after microvascular decompression: F waves of the facial muscles,

- blink reflexes, and abnormal muscle responses. *J Neurosurg.* 1997;86(4):654-61.
24. Møller AR, Jannetta PJ. Physiological abnormalities in hemifacial spasm studied during microvascular decompression operations. *Exp Neurol.* 1986;93(3):584-600.
 25. Montero J, Junyent J, Calopa M, Povedano M, Valls-Sole J. Electrophysiological study of ephaptic axono-axonal responses in hemifacial spasm. *Muscle Nerve.* 2007;35(2):184-8.
 26. Deletis V, Urriza J, Ulkatan S, Fernandez-Conejero I, Lesser J, Misita D. The feasibility of recording blink reflexes under general anesthesia. *Muscle Nerve.* 2009;39(5):642-6.
 27. Fernandez-Conejero I, Ulkatan S, Sen C, Deletis V. Intra-operative neurophysiology during microvascular decompression for hemifacial spasm. *Clin Neurophysiol.* 2012;123(1):78-83.
 28. Choi J, Yang S, Kim JS, Han JH, Park KS. Predictive value of intraoperative blink reflex monitoring for surgical outcome during microvascular decompression for hemifacial spasm. *Clin Neurophysiol.* 2020;131(9):2268-75.
 29. Auger RG. Hemifacial spasm: clinical and electrophysiologic observations. *Neurology.* 1979;29(9 Pt 1):1261-72.
 30. Nielsen VK. Pathophysiology of hemifacial spasm: II. Lateral spread of the supraorbital nerve reflex. *Neurology.* 1984;34(4):427-31.
 31. Hsu PC, Yang TF, Hsu SPC, Yen YS, Lin CF, Tsai YY, et al. Blink synkinesis monitoring during microvascular decompression for hemifacial spasm. *J Chin Med Assoc.* 2019;82(6):519-23.
 32. American Clinical Neurophysiology Society. Guideline 9C: guidelines on short-latency auditory evoked potentials. *J Clin Neurophysiol.* 2006;23(2):157-67.
 33. Joo BE, Park SK, Cho KR, Kong DS, Seo DW, Park K. Real-time intraoperative monitoring of brainstem auditory evoked potentials during microvascular decompression for hemifacial spasm. *J Neurosurg.* 2016;125(5):1061-7.
 34. Thirumala PD, Carnovale G, Habeych ME, Crammond DJ, Balzer JR. Diagnostic accuracy of brainstem auditory evoked potentials during microvascular decompression. *Neurology.* 2014;83(19):1747-52.
 35. Grundy BL, Jannetta PJ, Procopio PT, Lina A, Boston JR, Doyle E. Intraoperative monitoring of brain-stem auditory evoked potentials. *J Neurosurg.* 1982;57(5):674-81.
 36. Legatt AD. Electrophysiologic auditory tests. *Handb Clin Neurol.* 2015;129:289-311.
 37. Greve T, Beyer F, Szelenyi A. Intraoperative Erb's Point-Vertex recording increases brainstem auditory evoked potential wave V amplitude. *Clin Neurophysiol.* 2020;131(2):420-4.
 38. Little JR, Lesser RP, Lueders H, Furlan AJ. Brain stem auditory evoked potentials in posterior circulation surgery. *Neurosurgery.* 1983;12(5):496-502.
 39. Polo G, Fischer C, Sindou MP, Marneffe V. Brainstem auditory evoked potential monitoring during microvascular decompression for hemifacial spasm: intraoperative brainstem auditory evoked potential changes and warning values to prevent hearing loss--prospective study in a consecutive series of 84 patients. *Neurosurgery.* 2004;54(1):97-104.
 40. Hatayama T, Møller AR. Correlation between latency and amplitude of peak V in the brainstem auditory evoked potentials: intraoperative recordings in microvascular decompression operations. *Acta Neurochir.* 1998;140(7):681-7.
 41. Park SK, Joo BE, Lee S, Lee JA, Hwang JH, Kong DS, et al. The critical warning sign of real-time brainstem auditory evoked potentials during microvascular decompression for hemifacial spasm. *Clin Neurophysiol.* 2018;129(5):1097-102.
 42. Legatt AD. Mechanisms of intraoperative brainstem auditory evoked potential changes. *J Clin Neurophysiol.* 2002;19(5):396-408.
 43. Joo BE, Park SK, Lee MH, Lee S, Lee JA, Park K. Significance of wave I loss of brainstem auditory evoked potentials during microvascular decompression surgery for hemifacial spasm. *Clin Neurophysiol.* 2020;131(4):809-15.
 44. Park SK, Joo BE, Kwon J, Kim M, Lee S, Lee JA, et al. A prewarning sign for hearing loss by brainstem auditory evoked potentials during microvascular decompression surgery for hemifacial spasm. *Clin Neurophysiol.* 2021;132(2):358-64.