반쪽얼굴연축에 대한 미세혈관감압술에서의 수술 중 신경계 감시

주병억

순천향대학교 서울병원 순천향대학교 의과대학 신경과

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

Hemifacial spasm (HFS) is due to the vascular compression of the facial nerve at its root exit zone (REZ). Microvascular decompression (MVD) of the facial nerve near the REZ is an effective and curative treatment for HFS. In MVD for HFS, intraoperative neurophysiological monitoring (IONM) has two purposes. The first purpose is to prevent injury to neural structures such as the vestibulocochlear nerve and facial nerve during MVD surgery, which is possible through IONM of brainstem auditory evoked potentials and facial nerve electromyography (EMG). The second 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 mainly through monitoring of abnormal facial nerve EMG that is called as lateral spread response (LSR) and is also partially possible through Z-L response, facial F-wave, and facial motor evoked potentials. Through IONM mentioned above, MVD can be developed as a more safe and effective treatment for HFS.

Keywords: Hemifacial spasm, Microvascular decompression surgery, Intraoperative neurophysiological monitoring

Received: April 1, 2020

Revised: May 20, 2020

Accepted: June 11, 2020

Corresponding author:

Byung-Euk Joo
Department of Neurology,
Soonchunhyang University Seoul
Hospital, Soonchunhyang University
College of Medicine, Seoul, Republic of
Korea 59, Daesagwan-ro, Yongsna-gu,
Seoul 04401, Korea
Tel: +82-2-709-9224
Fax: +82-2-710-3098
E-mail: faithjoo17@gmail.com

서론

반쪽얼굴연축(Hemifacial spasm, HFS)은 반쪽얼굴근육이 불수의적, 간헐적 그리고 불규칙적으로 수축하는 질환으로서, 보통 눈둘레근육(orbicularis oculi muscle)에서 시작되어 점차 반쪽얼굴의 모든 근육이 불수의적으로 수축하는 질환이다.[1-4] 병리적으로, 이 질환은 뇌줄기로부터 얼굴신경(facial nerve)이 나오는 얼굴신경 기시부(Root exit zone, REZ)를 주

변의 뇌혈관이 압박하여, 얼굴신경 혹은 얼굴신경핵(facial nucleus)의 기능적 변성이 발생하여 생기는 것으로 알려져 있다 [1,4,5]. HFS의 치료는 얼굴신경과 얼굴신경을 압박하는 혈관을 분리시키는 미세혈관감압술(microvascular decompression, MVD)이 근본적인 치료법으로 알려져 있고, 이는 대략 80 %에서 100% 사이의 높은 완치율을 보인다[6,7].

HFS에 대한 MVD 중 시행되는 수술 중 신경계감시(intraoperative Neurophysiological Monitoring, IONM) 검사는 크

게 2가지의 유용성이 있다. 첫째는 IONM 검사 통해 MVD 시행 중 발생할 수 있는 신경계 손상을 막을 수 있다. 전정와우신경(vestibulocochlear nerve, CN VIII)이 얼굴신경 REZ에서 얼굴신경과 인접해 있기 때문에, HFS에 대한 MVD 중에 CN VIII이 손상될 위험이 높다. 그러므로, 뇌줄기청각유발전위(brain-stem auditory evoked potentials, BAEPs) 검사를 이용하여 수술 중 청각신경경로를 감시할 때, CN VIII 손상으로 인한 수술 후 청력 소실(postoperative hearing loss)을 막을 수 있다. 또한, 수술 중 얼굴근육의 근전도(electromyography, EMG) 검사를 통해서도, 수술 중 발생하는 얼굴신경의 손상을 감시할 수 있다. 두번째는 IONM 검사를 통해 HFS에 대한 MVD의 성공률을 높일 수 있다. HFS에서는 측면전파반응(lateral spread response, LSR)이라는 특징적인 전기생리학적 이상소견이 관찰된다. 이는 하나의 얼굴신경 분지를 자극하였을 때 그 신경에서 지배받는 근육뿐 아니라, 같은 쪽 얼굴의 다른 얼굴신경 분지로부터 지배받는 근육에서도 전기적 반응이 관찰되는 것이다. HFS에 대한 MVD 중, LSR이 소실되거나, 혹은 LSR의 진폭이 감소될 경우, 얼굴신경을 압박하던 문제의 혈관(offending vessel)에 대한 압박이 적절하게 이루어진 것을 의미한다. 그러므로, 이 LSR을 이용하여 HFS을 유발시킨 문제의 혈관을 확인하여 MVD의 정확도를 높이고, 성공률을 향상시킬 수 있다. 그 외에도 Z-L 반응(Z-L response), 얼굴신경 F 파(facial F-waves) 및 얼굴 신경 운동 유발 전위(facial motor evoked potentials) 검사 등이 HFS에 대한 MVD의 정확도 및 안정성에 기여하는 것으로 알려져 있다.

본문에서는 HFS에서 사용되는 대표적인 IONM 방법인 BAEPs, LSR을 중심으로 기술하고, 그 외 Z-L 반응, 얼굴신경 F 파 및 얼굴 신경 운동 유발 전위 검사에 대해서도 소개하겠다.

수술 중 신경계감시

뇌줄기 청각유발전위(Brainstem auditory evoked potentials)

HFS에 대해 MVD를 시행할 때, 가장 심각한 합병증은 CN VIII의 손상으로 인한 수술 후 청력 소실이다. CN VIII 손상은 MVD 중 다음과 같은 여러 가지 이유로 발생할 수 있다: 소뇌 뒤 당김(cerebellar retraction) 중 CN VIII의 당김에 의한 손상, 신경-혈관 압박 중 혈관 연축(vasospasm)으로 인한 허혈성 손상, 수술 중 기계적 혹은 열 손상, 삽입된 테플론 패드(Teflon pad)의 압박 등등[8]. MVD 중 수술 후 청력 소실 발생률은 과거 연구에서 BAEPs 이용한 IONM 검사를 시행하지 않을 경우, 7.7%에서 20%까지 보고되었다[3]. 하지만, BAEPs를 이용한 IONM 검사가 도입된 이후, 수술 후 청력 소실은 2% 이하로 크게 감소하였고, 현재는 BAEPs를 이용한 IONM은 HFS에 대한 MVD 시행시 필수적인 검사로 여겨지고 있다[6,9].

1. 검사 방법

BAEPs는 음향 신호를 생성하는 트랜스듀서에 100 msec의 전기 펄스를 전달하여 발생하는 클릭 자극에 의해 유발된다. 자극 세기는 명확한 BAEPs를 생성하기에 충분히 높게 설정해야 하지만, 청각 손상을 일으킬 정도로 높게 설정할 수 없다. 일반적으로 100 dB sound pressure level (SPL) 또는 60-70 dB hearing level (HL)의 자극세기가 이용되고, 교차반응(crossover responses)을 막기 위해 검사를 행할 때 반대측 귀에는 검사측 귀보다 30-40 dB 정도 낮은 60 dB SPL 또는 30-35 dB HL의 백색소음(white noise)을 적용한다[10]. 자극 방식은 트랜스듀서 다이어프램의 초기 움직임에 따라 응축(condensation)과 희석(rarefaction)이라는 2가지 방식이 가능한데, IONM에서는 자극 잡파를 최소화하는 것이 중요하므로 응축과 희석을 번갈아 사용하는 교대극성(alternating polarity) 자극 방식이 선호된다.

우리가 일반적으로 신경생리검사에서 사용되는 BAEPs는 한 번의 자극으로 얻어진 하나의 BAEP 파형이 아니라, 여러 번의 자극으로 얻어진 복수의 BAEP 파형을 합쳐서 얻어지는 것이다. 그렇기에, 활용 가능한 BAEPs를 얻을 때, 검사자가 조작할 수 있는 주요한 변수 2 가지가 있는데, 이는 자극빈도(stimulus rate)와 평균화횟수(averaging trials)이다. 2006년 미국임상신경생리학회(American Clinical Neurophysiology Society, ACNS)는 BAEPs 검사를 시행할 때[10], Hz 이상의 자극은 BAEPs 파형의 진폭을 감소시킬 우려가 있어서 8-10 Hz의 낮은 자극빈도를 권장했다[11,12]. 또한 ACNS에서는 해석 가능하고 재현성 있는 BAEPs를 얻기 위해, 1000-4000회의 높은 평균화 횟 수가 필요하다고 제시했다. 만일 하나의 해석가능한 BAEPs를 얻는데, 10 Hz의 자극빈도와 1000회의 평균화횟수를 적용한다면, 한번 의 BAEPs의 파형을 얻는데 100초의 시간이 소요된다. 외래검사와 같이 질환의 유무를 확인하기 위해 시행하는 검사라면, 오랜 시간이 걸려도 정확한 파형을 얻는 것이 보다 좋은 검사방법이다. 하지만, IONM에서는 수술 중 발생할 수 있는 신경손상 유무를 빨리 확인하고 이를 막아야 하기 때문에, 상대적으로 오랜 시간이 걸린다면 이는 유용한 검사방법이라고 말하기 어렵다. 해석가능한 BAEPs를 얻는데 상대적으로 오랜 시간이 걸릴 경우, 이는 신경손상 여부를 늦게 발견하여 청력 소실을 막을 수 있는 적정시기를 놓칠 가능성이 있기 때문이다(Fig. 1). 하지만, 과거와 달리 IONM 장비의 발전으로 신호-잡음 비(signal to noise ratio)가 개선되었고, 고빈도(high frequency) 자극이 가능할 뿐 아니라, 고빈도 자극시 발생하던 신호 왜곡 문제가 크게 개선되었다. 실제로, 2016년 저자를 포함한 국내 연구진은 43.9 Hz의 자극빈도와 400회의 평균화횟수를 적용하였을 때, 신뢰할 수 있는 BAEPs를 지속적으로 얻는 것이 가능한 것으로 제시하였고, 하나의 해석 가능한 BAEPs 얻는데 걸리는 시간을 10초 미만으로 단축시켰다[13]. 더 나아가, BAEPs 측정의 새

Fig. 1. Example of consecutive IONM of the BAEPs using a stimulation rate of 10 Hz/sec and 1000 averaging times: (A) First BAEPs showing minimal wave V change; (B) Second BAEPs showing a slight change in wave V (the latency of wave V was delayed by 0.70 msec with a minimal decrease in the amplitude); (C) Third BAEPs showing that the wave V latency was delayed by 1.44 msec and the wave V amplitude decreased by about 70%; IONM: Intraoperative neurophysiological monitoring; BAEPs: Brainstem auditory evoked potentials. Gray line: Baseline BAEPs; Black line: Obtained BAEPs.

로운 방식을 적용하였을 때, 이전 방식과 비교시에 수술 후 청력 소실을 크게 감소시킬 수 있음을 증명하였다. (4.02% vs 0.39%, $p=0.002$) (Table 1)

2. 경계 기준(Warning criteria)

BAEPs의 IONM을 사용할 때, BAEPs의 여러 파형 중 주로 파형 V이 이용된다. 이는 파형 V이 중간뇌(midbrain)에서 얻어진 파형임에도 불구하고, 다른 파형에 비해 상대적으로 진폭이 크고

Table 1. Comparison of the Protocol of BAEPs and Postoperative Hearing Loss

BAEPs	이전 방식 ^a	현재 방식 ^b	p value
자극빈도 (Stimulus rate)	26.9 Hz	43.9 Hz	
평균화횟수 (Averaging trials)	1000-2000 회	400 회	
1회 BAEPs 얻는데 걸리는 시간	약 37.1 -74.3 초	약 9.1 초	
파형 V의 경계 기준 (Warning criteria)	1 ms latency prolongation or a 50% decrease in amplitude	50% decrease in amplitude	
수술 후 청력 소실	0.0402	0.0039	0.002

^aprotocol used in our previous study (Jo KW et al. *Acta Neurochir (Wien)* 2011;153:1023-1030).^bprotocol used in our recent study (Joo BE et al. *J Neurosurg* 2016 Nov;125(5):1061-1067).

분명하며, 또한 수술 중 적용되는 마취에 대해서도 상대적으로 영향을 덜 받기 때문이다. 지난 40년간 BAEPs를 이용한 IONM 적용할 경우, MVD 중 수술 후 청력 소실을 예방할 수 있다는 분명한 증거들이 많이 있었다. 하지만, 여전히 수술 후 청력 소실을 예측하는 BAEPs의 경계 기준(Warning criteria)에 대한 합의가 이루어지지 않았다[14]. 과거, Polo 등은 파형 V의 잠복기가 0.6 msec 연장되는 것이 수술 후 청력 소실과 연관성이 높다고 제시하였다[15]. Grundy 등은 wave V의 잠복기가 1.5 msec 연장될 경우를 경계 기준으로 사용해야한다고 제시했다[16]. 반대로, Hattayama와 Møller 등은 파형 V의 잠복기 연장은 항상 파형 V의 진폭 감소와 동반되고, 수술 후 청력 소실을 보였던 환자에서 파형 V 진폭 감소가 잠복기 연장보다 보다 유의한 차이를 보였기에, 파형 V의 진폭 감소가 보다 유용한 경계 기준이라고 주장하였다[17]. 최근, Thirumala 등은 파형 V의 잠복기 연장 혹은 진폭의 감소보다는 파형 V가 일시적 혹은 영구적으로 소실된 경우가 수술 후 청력 소실과 직접적인 연관성이 있다고 보고하였다[18]. 그들은 파형 V의 잠복기 5 msec 연장 혹은 진폭의 50% 감소를 보인 환자 중 10.2%, 일시적인 파형 소실을 보인 환자는 25%, 그리고 영구적인 소실을 보인 환자들 중 60%가 청력 소실로 이어졌다고 보고하였다. 위와 같이 과거 유용한 경계 기준에 대한 많은 연구가 있음에도 불구하고, 이에 대한 공통된 기준이 부재했었다. 여전히 많은 연구자들은 경험적으로 2회 연속 BAEPs 상 파형 V의 잠복기 1msec 연장 혹은 진폭 50% 감소를 알람 기준으로 사용하였다[11,12].

하지만, 부정확한 경계 기준은 매우 심각한 문제이다. 경계 기준이 부정확할 경우, 이를 확인하고 교정하기 위해 불필요하게 수술시간이 지연되고, 더 나아가 불필요한 조작으로 수술 중 합병증을 유도할 우려가 있기 때문이다. 이에 대해 국내에서 수술 후 청력 소실과 연관된 경계 기준을 확립하기 위해, 932명의 HFS 환자를 대상으로 시행된 MVD 중 기록된 BAEPs와 수술 후 청력 소실과의 연관성을 분석하였다. 그들은 해석가능한 하나의 BAEPs를 얻기 위해 43.9 Hz 자극 빈도와 400회의 평균화수를 시행하여 약 9.1초 만에 BAEPs 파형을 얻었고, 이를 적용했을 경우 총 932명의 환자 중 11 명(1.2 %)의 환자에서 수술

후 청력 소실이 관찰되었다[13]. 수술 중 BAEPs 의 최대 변화를 기준으로 분석하였을 때, 파형 V의 영구적인 소실을 보인 환자가 11명이었는데, 이중 6명(54.5%)이 수술 후 청력 소실을 보였고, 파형 V의 일시적인 소실을 보인 환자 27명 중 2명(7.4%), 그리고 파형 V의 잠복기 1msec 연장 혹은 진폭 50% 감소를 보인 환자 96명 중 2명(2.0%)의 환자가 청력 소실로 이어졌다(Table 2) [19]. 반면, 파형 V의 진폭 감소 없이 잠복기만 1 msec 이상 연장된 환자는 총 194명이었는데, 모두 수술 후 청력 소실로 이어지지 않았다. 심지어 이 중 30명의 환자는 2 msec 이상의 잠복기 연장으로 보였으나, 모든 환자가 수술 후 청력 소실로 이어지지 않았다. 그들은 MVD 중 수술 후 청력 소실을 예측하기 위한 BAEPs 경계 기준의 타당성을 계산하였고, 파형 V의 영구적인 소실은 99.4%의 높은 특이도를 보였고, 일시적인 소실은 96.7%, 진폭 50% 감소를 동반한 잠복기 1 msec 연장은 86.5%의 특이도를 보였다. 이런 연구 결과를 바탕으로, 그들은 현재 통용되고 있는 파형 V의 잠복기 1 msec 이상 연장 혹은 진폭 50% 이상 감소의 알람 기준은 수술 후 청력 소실을 예방하는데 부적절하다고 주장하였다. 그리고, 더 나아가 MVD 중 수술 후 청력 소실을 예방하기 위한 경계 기준에 대해 다음과 같은 ‘단계적 등급 (Sliding scale)’이 보다 적절하다고 제안하였다(Table 3). 1) 관찰 징후 (Observation sign): 파형 V의 진폭 50% 감소 없이 잠복기만 1 msec 이상 연장; 2) 경계 징후 (Warning sign): 파형 V의 진폭 50% 이상 감소와 함께, 잠복기 1 msec 이상 연장; 3) 위험 징후(Critical sign): 파형 V의 소실. MVD 수술 중 관찰 징후(observation sign)가 관찰될 경우, 검사자는 이를 집도의에게 바로 알리나, 집도의가 이에 반응하여 교정하기 위해 조치를 취하지 않는다. 하지만 경계 징후(Warning sign) 혹은 위험 징후(Critical sign)가 발생시에는 검사가 이를 바로 집도의에게 전달하고, 집도의는 이에 반응하여, 진행 중인 수술을 중단하고, 이를 교정하기 위해 조치를 취하는 것을 제안하였다.

Table 2. Comparison of Postoperative Hearing Loss According to the Maximal Changes of BAEPs

Groups	Maximal change of BAEPs (wave V)	Patients n (%)	Postoperative hearing loss n (%)	p value
A	No change	596 (63.9)	1 (0.1)	< 0.001
B	Only latency prolongation (≥ 1 ms)	194 (20.8)	0	
C	Only amplitude decrement ($\geq 50\%$)	8 (0.9)	0	
D	Latency prolongation (≥ 1 ms) With amplitude decrement ($\geq 50\%$)	96 (10.3)	2 (2.0)	
E	Transient loss	27 (2.9)	2 (7.4)	
F	Permanent loss	11 (1.2)	6 (54.5)	
Total		932	11 (1.2)	

Group A: no significant changes, Group B: greatest latency prolongation greater than 1 ms without amplitude reduction greater than 50%, Group C: amplitude reduction greater than 50% without greatest latency prolongation greater than 1 ms, Group D: greatest latency prolongation greater than 1.0 ms and amplitude reduction greater than 50%; Group E: transient loss of wave V; and Group F: Permanent loss of wave V.

Table 3. The Sliding Scale of Warning Criteria of BAEPs

Name	BAEPs change	Measures
관찰 징후(Observation sign)	Latency prolongation (≥ 1 ms) Without amplitude decrement ($\geq 50\%$)	Notification & No surgical corrective measures
경계 징후(Warning sign)	Latency prolongation (≥ 1 ms) With amplitude decrement ($\geq 50\%$)	Notification & Rapid surgical corrective measures
위험 징후(Critical sign)	Wave V loss	Notification & Rapid surgical corrective measures

얼굴신경 근전도(Facial nerve Electromyography)

1. 측면전파반응(Lateral spread response: LSR)

LSR은 하나의 얼굴신경 분지를 자극하였을 때, 그 신경에서 지배받는 근육 뿐 아니라, 같은 쪽 얼굴의 다른 얼굴신경 분지로 부터 지배받는 근육에서 유발되는 파형을 말한다. 이는 HFS의 매우 특징적인 전기생리학적 이상 반응이고, HFS를 대상으로 한 기존의 많은 연구에서 MVD 중 LSR의 소실은 offending vessel 의 적절한 감압 및 수술 후 좋은 예후와 연관성이 높다고 알려져 있다[20,21]. 이런 이유로, HFS 에 대한 MVD 중 LSR의 소실 혹은 진폭의 감소는 얼굴신경에 대한 offending vessel의 적절한 감압이 이루어졌음을 나타내는 지표로 사용되고 있다 [21-24]. 하지만, 몇몇 환자들은 MVD 중 offending vessel를 감압하기 전에 이미 LSR이 소실되거나, 혹은 offending vessel 을 충분히 감압 했음에도, LSR이 사라지지 않고 지속되는 경우가 있음을 보고하였고, 이런 이유로 적절한 감압이 이루어졌음을 의미 하는 지표로서 LSR의 실제적인 가치에 대해 여전히 논란이 있다[21,25,26].

1) 검사 방법

일반적으로 LSR을 기록할 때, 자극 전극은 눈 바깥가장자리에서 약 3 cm 떨어진 부위의 얼굴신경의 이마신경(frontal branch) 혹은 광대 신경(zygomatic branch)에 삽입하고, 자극의 방향은 뇌줄기를 향하도록 음극(Cathode)이 양극(Anode)보다 보다 근위부에 위치하게 된다[1,2]. 자극의 세기는 5-25 mA

로 설정하고, 자극 지속시간은 0.3-0.5 mec 정도로 적용되며, 기록 전극은 입둘레근(orbicularis oris muscle) 혹은 턱끝근육(mentalis muscle)에 삽입하여 측정한다. 위와 같이 얼굴신경의 위쪽 분지(upper branch)의 아닌 아래쪽 분지(lower branch)를 자극해도 LSR이 유발될 수 있는데, 아래쪽 분지를 자극할 경우에는, 볼 신경(buccal branch) 혹은 턱 가장자리 신경(mandibular marginal branch)에 자극 전극을 두고, 이마 근육(frontalis muscle) 혹은 눈둘레근육(orbicularis oculi muscle)에서 LSR 측정이 가능하다. 사람마다 얼굴 신경의 분지는 매우 다양한 것으로 알려져 있다[27,28]. 그러므로, 환자들 간의 얼굴신경 분지의 해부학적 변이를 고려하여, 얼굴신경 분지를 보다 정확하게 자극할 때, LSR 또한 보다 정확하게 얻을 수 있다. 국내의 한 연구진들은 이를 확인하기 위해, 수술 전 외래 검사실에서 LSR 측정하여 LSR이 가장 잘 유발되는 얼굴 신경 분지의 위치를 확인하여, 얼굴신경 분지를 지도화(mapping) 하였고, 이를 고려하여 IONM를 시행하였을 때, LSR의 효율이 보다 높일 수 있다고 발표하였다[29]. 또한, 그들은 자극의 방향을 뇌줄기와 멀어지는 방향(음극이 양극보다 보다 원위부)으로 시행하였는데 (Fig 2), 자극 방향을 이와 같이 반대로 시행하여 복합근육활동전위(Compound muscle action potential)를 확인하면서 얼굴신경분지를 적절하게 자극할 수 있었고, LSR의 효율 또한 높일 수 있었다고 보고하였다.

2) 임상적 적용

LSR를 이용한 IONM은 offending vessel을 확인하고, 안면

Fig. 2. A: Facial nerve mapping performed preoperatively. The locations of maximal LSR elicitation were divided into three regions: F (the direction towards the frontalis muscle, which was almost vertical with respect to the anode), O (the direction towards the orbicularis oculi muscle), and F-O (in between F and O). B: The direction of stimulation in the conventional and the new methods. In the conventional method, electrodes are placed in the temporal or zygomatic branch of the facial nerve, about 3 cm lateral to the lateral margin of the orbit, and centripetal impulses are transmitted towards the brainstem with the cathode positioned proximally (Black arrow). In contrast, electrodes were inserted intradermally with the anode located proximally over the area just anterior to the mandibular fossa and the cathode located distally in the temporal branch of the facial nerve in the new method (Red arrow). The direction of stimulation was centrifugal outwards from the brainstem. LSR: Lateral spread response, S: Stimulator.

신경에 대해 offending vessel의 충분한 감압이 이루어졌는지 확인하는 유용성 검사 방법이다[30]. 일부 저자는 LSR이 완전히 사라지지 않는다 해도, LSR의 진폭이 감압 전보다 감소하는 것도 좋은 예후와 연관이 있다고 보고하였다[31]. 또한, 다른 일부 연구자들은 HFS의 호전과 연관된 장기적인 예후(long-term outcome)과 MVD 중 LSR 소실과는 연관성이 적어, LSR 효용성에 대해 의문을 제기하였다[32]. 그들은 MVD를 시행한 72명의 HFS 환자를 분석하였는데, 이 중 40명이 MVD 중 LSR이 소실되었지만, 퇴원할 때 5명은 경미한 HFS이 지속되었고, 이 중 4명은 6개월 뒤 추적시에도 증상이 지속되었다고 보고하였다. Thirumala 등도 MVD 중 LSR의 소실이 HFS의 단기적인 예후와는 연관성이 있지만, 일부 환자에서는 LSR이 소실되지 않아도 장기적으로 추적하였을 때, HFS이 호전될 수 있다고 제시하며, MVD 중 LSR 소실과 장기적인 예후와는 연관성이 적다고 보고하였다[33].

이런 잔류 LSR(residual LSR)은 HFS의 병리 기전 중 얼굴 신경핵의 과항진성(hyperexcitability)를 포함하는 중추성 기전(central mechanism)을 뒷받침하는 증거이다[4,5]. MVD를 통해 얼굴신경에 대한 offending vessel의 직접적인 압박 문제는 해결되었지만, 얼굴 신경핵의 변성된 과항진성이 정상화되는데 수 개월 혹은 수 년의 시간이 걸리므로, 그 기간 동안 일부 환자

에서 잔류 LSR이 관찰되고, HFS 증상이 관찰될 수 있는 것으로 생각된다. 그러므로, MVD 중 offending vessel을 확인하고, 충분한 감압이 이루어졌는지 알아보는 지표로 LSR를 활용하지만, MVD 중 관찰되는 LSR의 변화(소실 혹은 잔류)를 해석할 때, 검사자와 집도의 간에 긴밀하게 소통하며, 충분한 감압을 이루어 가는 것이 중요하다고 생각된다.

2. Z-L 반응(Z-L response)

Z-L 반응(ZLR)은 HFS에 MVD 수술을 할 때, LSR과 더불어 offending vessel을 확인 및 감압 여부를 확인하는 검사방법으로, 이는 offending vessel의 벽을 전기로 자극할 때 유발되는 반응이다[34,35]. ZLR은 REZ에 위치한 offending vessel의 벽을 자극하여, 인접한 얼굴신경이 함께 자극되어 유발되는 근전도 반응이기에, offending vessel의 감압이 성공적으로 이루어졌을 경우, 바로 소실된다. 앞부분에서 언급했듯이, 일부 HFS 환자에서는 LSR이 offending vessel을 감압하기 전에 소실되거나, 반대로 충분한 감압이 시행했음에도 LSR이 지속적으로 관찰될 경우가 있다. 이런 경우 LSR만 단독으로 의존할 경우 IONM를 시행할 경우 offending 확인하거나, 충분한 감압 여부를 판단하는데 한계가 있다. 또한 일부 환자는 offending vessel이 1개 아닌 2개 이상일 수 있다. 이처럼 LSR를 이용하는데

한계가 있을 경우, MVD 시 ZLR를 병합하면, offending vessel를 보다 확실하게 확인하고, 감압을 시행할 수 있게 된다.

1) 검사 방법

기록전극은 눈둘레근육, 입둘레 근육 그리고 턱끝근육에 삽입한다. 자극전극은 두개강내 수술에서 사용되는 비침습형 동심형 전극(concentric electrode)을 사용하고, 양극방식(bi-polar mode)의 자극이 가능하도록 한다. 얼굴신경에서 offending vessel을 감압하기 전에, 자극전극을 REZ의 접촉부위의 5mm 안에 해당하는 offending vessel에 위치시키고, 전기자극(1-2mA, 0.2msec)을 약 3 Hz 속도로 자극할 때, 해당 얼굴신경분지에서 지배받는 근육에서 근전도 파형이 유발된다. Offending vessel을 확인하고, 완전히 감압할 때까지, 위의 작업을 반복하고, offending vessel에 대한 충분한 감압이 이루어지면, ZLR은 더 이상 유발되지 않게 된다.

2) 임상적 적용

ZLR은 앞서 언급했듯이 LSR을 활용하기 어려울 경우 매우 유용한 검사방법이다. Zheng 등은 LSR과 ZLR를 복합해서 시행할 경우, LSR만 단독으로 사용하는 것보다 유용하다고 제안하였다. 또한, ZLR은 offending vessel이 2개 이상의 여러 개가 의심될 때, offending vessel을 확인하는데, 특히 유용하다. 그러나, ZLR은 사용할 때, 몇 가지 주의가 필요하다. ZLR은 offending vessel을 자극한 뒤, 인접한 얼굴신경으로 전기자극이 전달되어 유발되는 반응이기 때문에, REZ의 HFS 병변 위치 외에도 offending vessel과 얼굴신경의 접촉이 있다면, ZLR은 유발될 수 있다[36]. 예를 들어, REZ의 접촉부위 뿐 아니라, offending vessel의 말단 부위와 얼굴신경의 말단부위의 접촉이 있을 경우, offending vessel의 충분한 감압이 이루어지고, LSR이 소실되어도, ZLR은 사라지지 않고 지속될 수 있다.

얼굴신경 F 파(Facial F-wave)

얼굴신경 F 파 검사는 얼굴 신경을 전기자극 했을 때, 뇌줄기 방향으로 전달된 자극이 얼굴신경핵까지 전달된 후, 다시 반대 방향으로 얼굴신경으로 통해 전달되어 발생하는 지연성 근전도 파형이다. F 파 활동은 운동신경의 흥분성을 나타내는 지표로 알려져 있고[37], 얼굴신경을 자극하였을 때는 얼굴신경핵으로 포함하여 얼굴신경의 흥분성을 기록할 수 있는 것으로 알려져 있다. 실제 HFS 환자에는 얼굴신경 F 파 검사 시행할 때, MVD 시행 전에는 증상이 있는 쪽에서 증상이 없는 쪽보다 F파가 더 자주 유발되었고, MVD 시행 후 유의한 차이를 사라지는 것이 보고되었다[38]. 얼굴신경 F파 검사를 시행할 때는 직접적으로 유발되는 M파와 겹침을 방지하기 위해, 기록전극은 턱끝근육(mentalis muscle)에 삽입하고, 자극 전극은 턱 가장자리 신경

(mandibular marginal branch)의 말단 부위에 위치시켜 유발한다.

얼굴운동 유발전위(Facial motor evoked potentials: Facial MEP)

흔히 시행되지만, 경두개 전기자극(transcranial electric stimulation)을 통해 얻어진 얼굴운동유발전위(facial MEP)을 이용하여 MVD 중 HFS의 얼굴신경핵의 기능적 속성을 측정할 수 있다. HFS 환자에서 얼굴신경핵의 과항진성으로 인해 경두개 전기자극을 시행할 때, 병변측에서 facial MEP의 진폭과 지속시간이 비병변측과 비교시 항진되어 있고, facial MEP를 유발하기 위해 역치(threshold) 또한 감소되어 있다고 보고 되었다[39,40]. 또한, MVD를 통해 offending vessel의 감압을 시행한 경우, facial MEP의 진폭 및 지속시간이 유의하게 감소된다고 보고 되었다.

결론

HFS에 대해 MVD 시행할 때, CN VIII의 손상으로 인한 수술 후 청력 소실은 가장 심각한 합병증 중 하나였으나, BAEPs를 이용한 IONM으로 발생률을 크게 감소하게 되었다. IONM에 대한 경험과 지식이 증가하면서, 과거에 비해 수술 후 청력 소실을 보다 감소시키기 위한 BAEPs의 검사방법 및 경계기준 등에 많은 변화가 있어 왔다. 또한, HFS의 특징적인 전기생리학적 반응인 LSR에 대해서도 검사 방법의 변화가 있었고, MVD 시행 후에도 지속되는 잔류 LSR의 의미에 대해서도 HFS의 병리기전과 함께 많은 진보가 이루어졌다. 또한, LSR 뿐만 아니라, HFS의 offending vessel을 확인하거나 충분한 감압 여부 판단에 활용할 수 있는 Z-L 반응이라는 검사방법이 개발되어 활용되고 있고, 얼굴신경핵의 과항진성을 평가할 수 있는 얼굴신경 F파 검사와 얼굴운동유발전위의 유용성 또한 입증되어 활용되고 있다. 이처럼 다양한 IONM 검사방법과 의미에 대한 지식과 이해를 통해, HFS에 MVD 수술은 보다 안정하고, 효과적인 수술방법으로 발전해갈 수 있을 것이다.

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: 418-426

2. Moller AR, Jannetta PJ: Hemifacial spasm: results of electrophysiologic recording during microvascular decompression operations. *Neurology* 1985; 35: 969-974
3. Wilkins RH: Hemifacial spasm: a review. *Surg Neurol* 1991; 36: 251-277
4. Moller AR: Vascular compression of cranial nerves: II: pathophysiology. *Neurol Res* 1999; 21: 439-443
5. Moller AR, Jannetta PJ: Microvascular decompression in hemifacial spasm: intraoperative electrophysiological observations. *Neurosurgery* 1985; 16: 612-618
6. Barker FG, Jannetta PJ, Bissonette DJ, Shields PT, Larkins MV, Jho HD: Microvascular decompression for hemifacial spasm. *J Neurosurg* 1995; 82: 201-210
7. Sindou M, Mercier P: Microvascular decompression for hemifacial spasm: Surgical techniques and intraoperative monitoring. *Neurochirurgie* 2018; 64: 133-143
8. Legatt AD: Mechanisms of intraoperative brainstem auditory evoked potential changes. *J Clin Neurophysiol* 2002; 19: 396-408.
9. Acevedo JC, Sindou M, Fischer C, Vial C: Microvascular decompression for the treatment of hemifacial spasm. Retrospective study of a consecutive series of 75 operated patients--electrophysiologic and anatomical surgical analysis. *Stereotact Funct Neurosurg* 1997; 68: 260-265
10. Legatt AD: Electrophysiology of Cranial Nerve Testing: Auditory Nerve. *J Clin Neurophysiol* 2018; 35: 25-38
11. American Clinical Neurophysiology S: Guideline 9C: Guidelines on short-latency auditory evoked potentials. *J Clin Neurophysiol* 2006; 23: 157-167
12. Martin WH, Stecker MM: ASNM position statement: intraoperative monitoring of auditory evoked potentials. *J Clin Monit Comput* 2008; 22: 75-85
13. 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: 1061-1067
14. James ML, Husain AM: Brainstem auditory evoked potential monitoring: when is change in wave V significant? *Neurology* 2005; 65: 1551-1555
15. 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: 97-104; discussion 104
16. Grundy BL, Jannetta PJ, Procopio PT, Lina A, Boston JR, Doyle E: Intraoperative monitoring of brain-stem auditory evoked potentials. *J Neurosurg* 1982; 57: 674-681
17. Hatayama T, Moller AR: Correlation between latency and amplitude of peak V in the brainstem auditory evoked potentials: intraoperative recordings in microvascular decompression operations. *Acta Neurochir (Wien)* 1998; 140: 681-687
18. Thirumala PD, Carnovale G, Habeych ME, Crammond DJ, Balzer JR: Diagnostic accuracy of brainstem auditory evoked potentials during microvascular decompression. *Neurology* 2014; 83: 1747-1752
19. Park SK, Joo BE, Lee S, et al: The critical warning sign of real-time brainstem auditory evoked potentials during microvascular decompression for hemifacial spasm. *Clin Neurophysiol* 2018; 129: 1097-1102
20. 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: 384-387
21. Kim CH, Kong DS, Lee JA, Kwan P: 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: 1581-1587; discussion 1587
22. Huang BR, Chang CN, Hsu JC: Intraoperative electrophysiological monitoring in microvascular decompression for hemifacial spasm. *J Clin Neurosci* 2009; 16: 209-213
23. Sekula RF, Bhatia S, Frederickson AM, et al: Utility of intraoperative electromyography in microvascular decompression for hemifacial spasm: a meta-analysis. *Neurosurg Focus* 2009; 27: E10
24. Thirumala PD, Shah AC, Nikonow TN, 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: 56-66
25. 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 (Tokyo)* 2014; 54: 474-482
26. 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: 496-499
27. Katz AD, Catalano P: The clinical significance of the various anastomatic branches of the facial nerve. Report of 100 patients. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 1987; 113: 959-962
28. 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: 295-299
29. Lee S, Park SK, Lee JA, et al: A new method for monitoring abnor-

- mal muscle response in hemifacial spasm: A prospective study. *Clin Neurophysiol* 2018; 129: 1490-1495
30. Mooij JJ, Mustafa MK, van Weerden TW: Hemifacial spasm: intraoperative electromyographic monitoring as a guide for microvascular decompression. *Neurosurgery* 2001; 49: 1365-1370. discussion 1370
 31. Shin JC, Chung UH, Kim YC, Park CI: Prospective study of microvascular decompression in hemifacial spasm. *Neurosurgery* 1997; 40: 730-734. discussion 734
 32. 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: 1335-1339
 33. Thirumala PD, Wang X, Shah A, et al: Clinical impact of residual lateral spread response after adequate microvascular decompression for hemifacial spasm: A retrospective analysis. *Br J Neurosurg* 2015; 29: 818-822
 34. Yang M, Zheng X, Ying T, et al: Combined intraoperative monitoring of abnormal muscle response and Z-L response for hemifacial spasm with tandem compression type. *Acta Neurochir (Wien)* 2014; 156: 1161-1166. discussion 1166
 35. Zheng X, Hong W, Tang Y, et al: Discovery of a new waveform for intraoperative monitoring of hemifacial spasms. *Acta Neurochir (Wien)* 2012; 154: 799-805
 36. 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 (Wien)* 2018; 160: 963-970
 37. Kimura J: Current understanding of F-wave physiology in the clinical domain. *Suppl Clin Neurophysiol* 2006; 59: 299-303
 38. Ishikawa M, Ohira T, Namiki J, 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: 654-661
 39. Wilkinson MF, Kaufmann AM: Facial Motor Neuron Excitability in Hemifacial Spasm: A Facial MEP Study. *Can J Neurol Sci* 2014; 41: 239-245
 40. Wilkinson MF, Kaufmann AM: Monitoring of facial muscle motor evoked potentials during microvascular decompression for hemifacial spasm: evidence of changes in motor neuron excitability. *J Neurosurg* 2005; 103: 64-69