

뇌간유발반응

동아대학교 의과대학 이비인후과학교실
김리석·허승덕

Auditory Brainstem Response

Lee-Suk Kim, M.D., Seung-Deok Heo

Department of Otolaryngology H&N Surgery, College of Medicine, Dong-A University

I. 서 론

- II. 정상 파형과 전위의 기원
- III. 파형에 영향을 미치는 요인
 - 1. 피검자
 - 2. 자극
 - 3. 기록
 - 4. 검사자

IV. 검사 방법

- 1. 전처치
- 2. 자극 및 기록 조건
- 3. 전위의 기록

V. 임상적용

- 1. 청각평가
- 2. 이신경과학적 진단
- 3. 신생아 선별검사
- 4. 중환자 감시
- 5. 술중 감시
- 6. 전기 자극 뇌간유발반응

I. 서 론

신체의 유발반응은 한 개 또는 수 개의 일관된 정점 (peak)을 갖는 파형으로 기록되는데 감각기관에 따라 청각유발반응 (Auditory Evoked Potential; AEP)과 시각유발반응 (Visual Evoked Potential) 그리고 체성감각유발반응 (Somatosensory Evoked Potential)이 있으며, 이외에도 후각, 미각 등을 자극해서 유발반응을 기록할 수 있다.

청각유발반응은 음자극 후, 내이, 청신경 및 뇌간핵 등의 청각전달로에서 발생하는 수 μV 의 진폭을 갖는 약 25~30개 정도의 정점으로 나타난다. 이들 유발반응은 그 잠복시간에 따라 초기반응 (early response; 0~10 ms), 중간반응 (middle response; 10~50 ms) 그리고 후기반응 (late response; 50~300 ms)으로 분류하는데, 이에는 전기와우반응 (Electrocochleography; ECoG), 뇌간유발반응 (Auditory Brainstem Response; ABR), 청성중간반응 (Audi-

KEY WORDS : Auditory brainstem response

tory Middle Latency Response; MLR), 40Hz 반응 (40Hz response), 청성후기반응 (Auditory Long Latency Response; LLR) 그리고 P300 등이 있다. 뇌간유발반응은 청성중간반응과 청성후기반응에 비하여 마취, 수면 등에 영향을 받지 않고 비침습적이어서 임상에서 널리 이용되며, 음자극 후 1~10 ms에 나타나는 5~7개의 전위를 기록한 것으로 잠복시간이 1~5 ms로 짧은 전기와우반응과 함께 초기반응에 속한다.

뇌간유발반응은 1967년 Sohmer와 Feinmeser가 사람의 이개에 부착한 전극을 통해 처음으로 기록하였으나 이를 ECoG로 보고하였다²⁷⁾. 그 후 1970년 Jewett가 동물에서²⁸⁾, 같은 해 Jewett, Romano 그리고 Williston이 사람에서 각각 뇌간유발반응을 기록하였다²⁹⁾. 1971년 Jewett와 Williston이 두피상에서 기록된 전위라 하여 이를 원위기록 (far-field recording) 이라 하고 파형의 각 정점들을 로마 숫자 (I~VII) 로 표기하였다²⁴⁾.

1974년 Hecox와 Galambos가 신생아와 소아에서 반응을 기록하였으며³⁰⁾ 1975년 Starr, 1977년 Selters와 Brackmann, 같은 해 Stockard와 Rossiter 등이 후미로성 병변 진단에 적용하였다^{30,41,42)}. 1977년 Arlinger, 1978년 Jerger와

Maudlin에 의하여 골도수화기를 통한 음자극으로³²⁾, 1979년 Chouard, 1986년 Honert 등에 의하여 전기자극으로 뇌간유발반응을 기록하였다⁴⁸⁾. 1979년 "auditory responses from the brainstem."을 주제로 열린 미·일 세미나에서 Davis는 종래 BERA, BAEP, BSER 등으로 사용되던 뇌간유발반응 용어를 "ABR"로 공식화한 계기를 마련하였다⁸⁾.

II. 정상 파형과 전위의 기원

음자극 후 10 ms 이내에 기록되는 뇌간유발반응의 각 파를 차례로 로마자로 표기한다. 이 파들 중에서 I, III, V 파는 잘 나타나지만 II, IV 파는 잘 나타나지 않을 때가 많으며 이들 중 V 파가 가장 크고 안정적으로 기록된다 (Fig. 1).

정상 파형의 유형으로는 첫째, 가장 흔히 볼 수 있는 것으로 I 파부터 V 파까지 파의 윤곽이 뚜렷한 유형, 둘째, IV 파와 V 파가 하나로 나타나 V 파 잠복시간이 짧아진 유형, 셋째, IV 파와 V 파 사이에 작은 negative peak이 있으면서 IV 파의 진폭이 V 파보다 작게 나타나는 유형, 넷째, IV 파가 V 파의 앞쪽 shoulder로 판

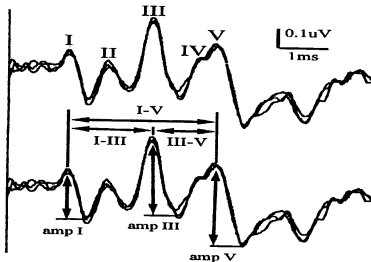


Fig. 1. Normal ABR recording. Latency values are determined for the peaks of the waves I, II, III, IV and V (top). Peaks are determined interpeak latency and amplitude(lower).

Table 1. Adult normative ABR latency data.

ABR component	Antonelli 등*		Schwartz 등**	
	mean(msec)	SD	mean(msec)	SD
I	1.54	0.08	1.54	0.10
II	2.67	0.13		
III	3.73	0.10	3.70	0.15
IV	4.81	0.10		
V	5.52	0.05	5.60	0.19
I - III	2.19	0.18	2.20	0.16
III - V	1.79	0.25	1.84	0.17
I - V	3.98	0.23	4.04	0.18

Note. Measurement parameters: *100 μ s click, alternating, 11/sec, 100dB peSPL, TDH-39 head-phone, 200~2000Hz. **100 μ s click, rarefaction and condensation combined, 80dB nHL, ER-3A insertion phone, 100~1500Hz (from Antonelli et al, 1987²¹, Schwartz et al, 1989²⁸).

Table 2. ABR Latency Values as a function of intensity level in children ages 3 months to 3 years.

Age in months (N)	Latency(msec)				
	Wave I	Wave V			
	80dB	80dB	60dB	40dB	20dB
3-6(79)					
Mean	1.59	6.25	6.73	7.43	8.72
SD	0.17	0.32	0.33	0.36	0.53
9-12(88)					
Mean	1.59	5.90	6.31	7.05	8.31
SD	0.18	0.27	0.29	0.37	0.54
15-18(48)					
Mean	1.58	5.84	6.24	7.00	8.33
SD	0.14	0.27	0.24	0.38	0.61
21-24(23)					
Mean	1.57	5.71	6.14	6.79	8.05
SD	0.17	0.26	0.29	0.33	0.58
33-36(21)					
Mean	1.56	5.68	6.06	6.82	8.10
SD	0.15	0.27	0.31	0.38	0.68

Note. Measurement parameters : 100 μ s click, 13/sec, 0dB nHL=30dB peSPL, DT-48 head-phone, 100~3000Hz; N=number of infants (from Gorge et al, 1989¹⁰)

찰되는 유형. 다섯째, V 파가 IV 파의 뒤쪽 shoulder로 관찰되는 유형. 여섯째, IV 파와 V 파 사이에 작은 negative peak이 있고 두 파의 진폭이 비슷한 유형이 있다⁶⁾.
 뇌간유발반응의 파형 분석으로 각 파의 잠복시간 (ms)과 진폭 (μ V) 그리고 I-III, III-V, I-V 파간 잠복시간 등을 구하여 진단에 적용하며, 정상치는 자극 및 기록조건, 장비,

피검자 등에 의해 달라질 수 있으므로 검사실마다 독자적인 정상치를 구해야 한다. 1987년 Antonelli 등과 1989년 Schwartz 등의 성인 정상치 (Table 1)^{2,30)}와 1989년 Gorga 등의 유소아 정상치 (Table 2)⁴⁾를 소개한다.

뇌간유발반응의 각 파는 와우 이후의 청각 전달로에서 발생한 전위로 그 발생 기원에 대해서는 많은 연구와 논란이 있어 왔다. 1972년 Lev와 Sohmer 등은 I 파를 청신경 (auditory nerve), II 파를 청신경핵 (cochlear nucleus), III 파를 상올리브핵 (superior olivary complex), IV 파를 외측 음대 (lateral lemniscus), 그리고 V 파를 하구 (inferior colliculus)에서 기원되는 것으로 보고하였다²⁵⁾. 반면에 1982년 Møller는 I 파가 distal eighth nerve, II 파가 proximal eighth nerve, III 파가 cochlear nucleus, trapezoid body, IV 파가 superior olivary complex, 그리고 V 파가 lateral lemniscus termination in inferior colliculus에서 기원되는 것으로 보고하였다³⁰⁾.

III. 파형에 영향을 미치는 요인

1. 피검자

1) 연령

출생 직후 신생아의 뇌간유발반응에서는 I, III, V 파 정도만 기록되고 I-V 파간 잠복시간이 어른보다 약 0.8~1 ms 정도 길게 나타난다. 이는 주로 V 파의 잠복시간이 길어져서 나타나는 것으로 성장함에 따라 I-V 파간 잠복시간 즉, 중추성전도가 단축된다. 반면에 I 파의 잠복시간 즉, 말초성 전도는 생후 6주경에 성인 수준에 이르며, 이후의 파의 잠복시간은 생후 18개월에서 2세 정도 되면 정상 성인 파 같아진다¹⁹⁾(Fig. 2).

25세 이후부터는 잠복시간이 조금씩 길어져서 55세 정도가 되면 약 0.2 ms 정도 길어지게 되는데²⁰⁾ 이 변화는 남자보다 여자에서 크다.

2) 성별

성별에 따른 뇌간유발반응의 차이는 신생

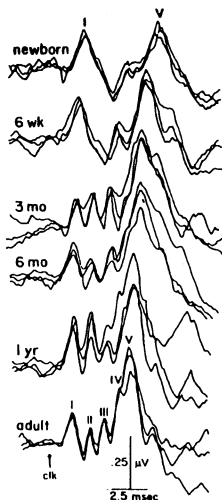


Fig. 2. ABR waveforms recorded at various ages from a normal infant and from an adult. Note slight decrease in wave I latency and marked decrease in latency of waves III and V (from Salamy & McKean, 1976³¹⁾).

아에서 소아기에 이르는 동안에는 명확하지 않다. 성인의 경우 여자가 남자보다 III-V, I-V 파간 잠복시간은 0.12~0.3 ms 정도 짧고, III, IV, V 파 진폭은 약간 높다. 이러한 차이가 생기는 원인으로서는 여자의 고유역 청력이 남자보다 좋고, 체온이 높으며, 두개골과 뇌의 크기가 작으며, 생리학적·생화학적 차이로 인한 신경전달의 영향, 생리 주기 동안의 호르몬 변화 등에 의한 것으로 본다⁴⁰⁾.

3) 체온

정상 체온 (37°C)을 기준으로 36°C 이하로 낮

아지면 Corti 기관의 Hensen's 세포에서의 전위가 감소되고, 기저막에서 traveling wave의 전도시간이 증가되며, 시냅스 전달이 지연되고 축삭의 전도 속도가 감소된다. 따라서 청신경 활동전위의 진폭은 작아지고, I-V 파간 잠복시간이 1°C 내려갈 때마다 약 0.2 ms씩 길어진다⁴³⁾. 체온이 14~20°C 이하가 되면 뇌간유발 반응은 나타나지 않는다³⁹⁾.

38°C 이상으로 높아지는 경우는 I-V 파간 잠복시간은 1°C 상승함에 따라 약 0.15 ms 정도씩 짧아진다⁴³⁾.

4) 긴장 및 각성 상태

목과 턱 주위의 근육을 긴장하거나 움직여서 생기는 근전위는 유발전위의 주된 잡파의 원인이 되며 파형을 얻을 수 없게 될 수도 있다. 반면에 주의집중 여부, 수면, 혼수, 마취 등은 뇌간유발반응에 큰 영향을 주지 않는다. 따라서 피검자는 자연수면을 취하는 것처럼 편안하고도 자연스러운 상태에서 검사를 받을 수 있다.

5) 약물

Aminoglycoside, 이노제 등의 이독성 약물은

대부분 와우의 유모세포를 손상시켜 청력손실을 야기하며 뇌간유발반응에서는 III, V 파의 잠복시간을 연장시켜 I-III, I-V 파간 잠복시간이 길어지지만 III-V 파간 잠복시간에는 영향을 주지 않는다⁴³⁾. 그러나 협조가 곤란한 유소아 검사에서 수면제로 널리 사용되고 있는 chloral hydrate는 파형에 영향을 주지 않는다²⁷⁾.

2. 자극

1) 자극음

자극음의 종류에는 click, filtered click, tone pip, tone burst, logon 등이 있다. 이 중 click 음은 tone pip이나 tone burst와는 달리 주파수 특성은 없지만, 생성시간과 지속시간이 짧고 주로 1000~4000Hz의 고음역 주파수대를 가지고 있어 청신경 뉴우론들을 동시에 효과적으로 흥분시킬 수 있으므로 임상적으로 널리 사용되고 있다.

2) 지속시간

자극음의 지속시간(duration)은 음이 '0'에서 원하는 크기로 도달되기까지의 생성시간

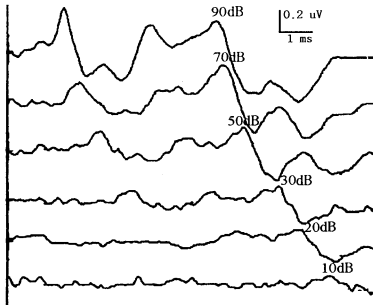


Fig. 3. Latency-intensity function in a normal-hearing subject. As intensity is increased, amplitude increases and latency decreases.

(rise time), 원하는 크기의 소리가 일정하게 유지되는 자극유지시간 (plateau time), 그리고 다시 소리가 '0'으로 변하는 소멸시간 (fall time)을 모두 합한 시간이다.

많이 사용되고 있는 click음은 지속시간이 20~400 μ s 범위 이상을 벗어나지 않고, 이 시간 범위 안에서는 지속시간을 달리해도 잠복 시간에 크게 영향을 주지 않는다.

1984년 Gorga 등은 2 kHz tone burst의 지속시간을 변화시켰을 때 잠복시간이 변화되지 않는다고 하였으며³⁰, 1984년 Beattie와 Boyd는 click의 지속시간을 25, 50, 100, 200, 400 μ s로 달리하여 I, III, V파의 잠복시간을 관찰하여 25~100 μ s 범위에서는 변화되지 않으나 100~200 μ s 범위에서는 0.1 ms, 200~400 μ s 범위에서는 0.2 ms 연장된다고 했다⁹. 그러나 자극음의 생성시간 (rise time)을 길게 하면 뉴우론의 흥분과 traveling wave의 전도시간 연장 등으로 인하여 I 파를 관찰할 수 없다.

3) 음강도

가장 흔하게 사용되는 단위는 dB nHL이며, 0dB nHL은 10~15명의 성인 정상 청력자에게 10~20/sec의 click음을 주고 구한 최소가청역치이며 (대개 0dB nHL=28.28dB peak SPL), 자극빈도가 많아지면 역치는 상승된다. 뇌간유발반응에서 자극음 강도를 높이면 잠복시간은 짧아지고 진폭은 커지는데, 약 90dB nHL 이상에 이르면 포화되어 변하지 않는다 (Fig. 3).

성인 정상 청력자의 V 파 잠복시간은 역시 부근에서 7.5~8.0 ms 이상을 보이며, 10~20 dB nHL 이하의 낮은 자극강도에서는 파형이 나타나지 않는다 (I, III 파의 경우는 25~35dB nHL이하). 그러나 자극강도를 올려주면 V 파의 잠복시간은 약 60dB nHL이하의 자극강도까지는 10dB nHL마다 0.5~0.6 ms 정도씩, 60~95dB nHL 범위의 자극강도에서는 10dB nHL마다 0.1~0.2 ms 정도씩 짧아지며, 최단 잠복시간은 5.5~6.0 ms 범위이다^{7,16,31}.

4) 자극 간격

자극간격 (interstimulus interval)은 처음 자극이 소멸되고 다음 자극이 시작되는 사이의

시간을 의미한다. 유발전위의 기록과 평균가산 처리시간, 그리고 흥분된 신경이 안정되기 위해서는 최소한 20 ms 정도의 자극간격이 필요하다. 만약 이보다 짧게하면 잠복시간이 연장되고 진폭이 감소되어 파형분석이 어려워지거나 파형을 관찰할 수 없게 된다.

뇌간유발반응에서 자극빈도가 20/sec이내의 자극간격이 충분한 경우에는 자극간격에 따른 파형의 변화가 미세하나, 자극빈도가 80~90/sec 정도로 자극간격이 좁아지면 진폭은 I 파가 50% 정도, V 파가 10~30% 정도 작아지고, 잠복시간은 I 파는 변화되지 않거나 약 0.23 ms 정도^{17,24,32}, V 파는 0.25~1.0 ms 정도 짧아진다^{5,49}.

5) 자극빈도

자극빈도 (stimulus rate)는 1초 동안 주어지는 자극음의 수를 말한다. 지속시간이 정해진 조건에서 자극빈도를 많게 하면 자극간격이 짧아지게 되어 뇌간유발반응의 잠복시간은 길어지고 진폭이 작아진다. 자극빈도가 10~20/sec 정도에서는 잠복시간과 진폭의 변화가 적고 안정되어 흔히 임상에서 사용되고 있다 (Fig. 4). 자극빈도를 80/sec 정도로 많게 하면 가청역치는 5dB 정도 높아진다⁴⁰.

6) 극성

극성 (acoustic polarity)은 수화기의 박막에 의해 결정된 공기압의 상태를 표현하는 것으로 압축상 (condensation or positive polarity), 희박상 (rarefaction or negative polarity), 교대상 (alternating polarity)이 있다.

압축상은 수화기 박막이 고막 쪽으로 밀려서 외이도 내부 공기압이 표준상태보다 높아진 상태이며 고막은 중이 쪽으로 밀리고 와우의 기저막은 아래 쪽으로 움직인다. 희박상은 수화기 박막이 고막 반대쪽으로 당겨져서 외이도 내부 공기압이 표준상태보다 낮게 된 상태이며 고막은 중이 바깥쪽으로 당겨지고 와우의 기저막은 위 쪽으로 움직인다. 교대상은 희박상과 압축상을 교대로 사용하므로 초기에 나타나는 자극잡음 (stimulus artifact)을 상쇄시킬 수 있어서 흔히 사용된다 (Fig. 5).

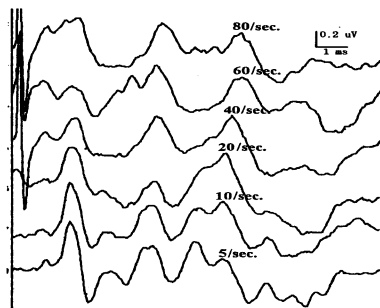


Fig. 4. Effect of stimulus rate on wave V latency of ABR recording in an adult.

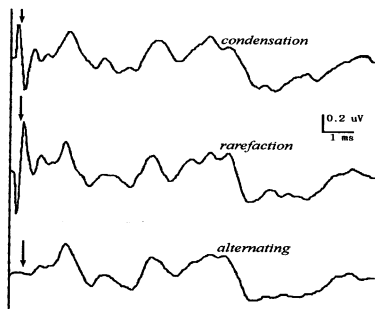


Fig. 5. Effect of click stimulus polarity on ABR(see arrow).

극성에 따른 뇌간유발반응의 잠복시간 변화는 회박상의 Click음이 압축상보다 I 파는 약 0.07 ms 정도, V 파는 0.2 ms 짧게 나타나며, III 파는 압축상에서 약간 짧게 나타난다⁴³⁾.

7) 트랜스듀서

트랜스듀서는 자극 발생장치 (stimulus generator)에서 발생된 전기에너지를 음향에너지

로 변환하여 전달하는 장치를 말한다. 트랜스듀서 종류에는 헤드폰, 삽입형 수화기 (insertion phone), 음장수화기 (loud speaker), 골도수화기 (bone vibrator) 등이 있으며, TDH-39, TDH-49 형식의 헤드폰이 널리 사용된다. TDH-49 헤드폰은 고음역이 약간 연장된 광역 스펙트럼을 보이고, TDH-39 헤드폰은 전자장

이 형성되는 단점이 있으나 전기 저항이 낮은 특성이 있다. 골도수화기에는 B-70A, B-71, B-72 등이 있으며, 2kHz 범위에서 최대출력을 보이며 모두 35~45dB HL 정도 출력할 수 있다.

헤드폰이 미끄러져 외이도 중심축으로부터 벗어나면 수화기 박막에서 생긴 자극음의 압력이 손실되어 역치가 10~15dB 높게 나타날 수 있으므로 주의해야 한다. 삼입형 수화기는 TDH 헤드폰의 미끄러짐 현상을 피할 수는 있으나 도음관(sound tube) 길이에 따른 잠복시간 손실(ER-3A 형식의 경우 0.9 ms)을 보상해 주어야 한다.

골도수화기는 일반적으로 양양돌기 부위에 대지만, 전두부에 대었을 때는 500Hz에서 15 dB, 1kHz에서 10dB, 2kHz에서 8.5dB 그리고 4kHz에서 6.5dB 정도 높은 에너지가 와우에 전달된다. 외이도를 폐쇄하면 500Hz에서 약 20 dB정도, 1kHz에서 약 10dB 정도 역치가 올라간다. 또한 검사시 파형의 왜곡이 잘 생기며 골도수화기를 대는 위치와 피부 두께, 두개골 저항 등의 영향으로 피검자간 파형이 다양하게 나타난다. 차폐는 성인에서는 항상하여야 하며, 1 세 전후는 양쪽 청력차이가 15~25dB, 신생아는 25~35dB 이상일 때 시행한다.

신생아의 골도 뇌간유발반응의 잠복시간은 와우의 성장과 관련하여 기도에 비해 I, III, V 파가 약 0.3~0.45 ms 정도 빠르게 나타난다⁵⁰⁾. 1984년 Hook과 Weber는 40명의 미숙아를 대상으로 한 연구에서 뇌간유발반응이 30dB nHL에서 골도 93%에서, 기도 73%에서 나타나는 것으로 보고했다¹⁸⁾. 성인에서 골도뇌간유발반응은 기도에서보다 0.46 ms 정도 빠르게 나타나므로 기도 잠복시간에서 0.5 ms를 빼고 비교한다²⁸⁾.

8) 차폐

차폐(masking)에는 검사 귀에 잡음을 주는 동측차폐(ipsilateral masking)와 검사 반대쪽 귀에 잡음을 주는 반대측차폐(contralateral masking)가 있다. 동측차폐는 자극음의 주파수 특성을 부여하기 위해 시행되는 derived ABR

에서 사용되며, 그 외 모든 경우에는 반대측 차폐를 하게되는데 이는 검사 반대쪽 귀로 자극음이 누설(cross over)되는 것을 막기 위한 것이다.

차폐를 하기 위해서는 “언제 해야 할 것인가?”, “어떤 잡음을 사용할 것인가?” 그리고 “어느 정도의 강도를 부하 할 것인가?”의 세 가지 사항을 고려하여야 한다.

순음청력검사시 양이간 청력의 차이가 있을 때 검사 반대쪽 귀로 누설되는 음강도는 주파수마다 차이가 있으나 약 40dB 정도이다. 그러나 순음청력검사는 지속시간이 긴 자극음을 사용하는데 비해 뇌간유발반응에서 주로 사용되는 click음은 매우 짧은 지속시간을 갖는 단속음이기 때문에 성인에서의 양이감쇄(interaural attenuation)는 약 65dB 정도이다.

뇌간유발반응에서 사용하는 차폐음은 자극음의 주파수범위이거나 이보다 넓은 주파수범위를 가지는 것이 좋으며, 20~1000Hz 정도의 광역잡음(broadband noise; BBN)이 널리 사용되고 있다. 이외에 white noise나 1000Hz 이하가 배제(low cut)된 고역잡음(high pass noise) 등도 사용된다.

순음청력검사에서의 차폐는 수평법(plateau method)으로 결정된 잠음량을 주지만 감각신경성난청에서는 수평이 발견되지 않기도하여 이를 masking dilemma라고 표현하고 있다. 그러나 뇌간유발반응에서는 양이감쇄가 65dB 정도로 높아서 순음청력검사에 비하여 어려운 경우가 적다. 예를 들면, 한쪽이 농인 경우 click음의 최대자극강도가 105dB nHL이라면 105에서 양이감쇄치수 65를 뺀 값인 40에 예비잠음량(safety margin) 10을 더한 50dB nHL의 잠음량을 반대측 귀에 주게 된다.

3. 기록

1) 기록시간

기록시간(analysis time)은 음자극 후 발생한 전위를 기록하는 시간이다. 정상 성인의 경우 충분한 자극강도에서 V 파는 약 5.5~6 ms 로 관찰되지만, 난청, 역치근처의 자극강도, 신

생아, 뇌간 장애, 삼입형 수화기를 사용한 경우 등에서는 V 파의 잠복시간이 연장되기 때문에 10 ms 정도 기록해야 한다. 음자극 이전부터 기록하거나 자극빈도를 높여 줄 경우에는 2~5 ms 정도 기록을 연장해야 한다.

2) 전극

뇌간유발반응에서의 전극은 형태와 재질 등에 따라 disk형, earclip형, skin-staple형, ear-canal형, 고막형 등이 있다. 전극과 전극상자의 연결은 전자파 방해 등을 고려하여 1미터 전후의 차폐전선을 사용한다.

Disk형은 전극의 중앙에 2 mm의 구멍이 있고 외부 직경이 4~10 mm 정도인 동통형태로 널리 사용되고 있다. 전기전도성이 높은 금속 재질로 된 disk 표면에는 금, 은, 주석, 백금 등이 도포되어 있으며, 염화은(silver-chloride)이 도포된 것을 많이 사용하고 있다. Ear-clip형은 두 개의 disk형 전극에 스프링을 장치하여 이개를 물 수 있게 설계된 것으로 헤드폰을 쓰면 유양돌기에 닿아 이개뿐만 아니라 유양돌기의 전위도 기록되어 I 파의 진폭이 증강되는 장점이 있다. Skin-staple형은 심한 화상이나 피부이식환자를 위한 전극으로 접촉력이 있는 전도성 물질을 사용하는 전극이다.

Ear-canal형과 고막형은 전기와우청력검사에서 비침습적으로 사용할 수 있도록 설계된 것이나 disk형에 비하여 I 파의 진폭이 커지고 전기와우청력검사와 뇌간유발반응을 동시에 시행할 수도 있다.

전극의 부착 위치는 두정부(Central zero)를 Cz, 전두정중부(Frontal pole zero)를 Fpz, 좌우측 이개(earlobe)를 A1, A2 등으로 하는 국제전극배치법(ten-twenty international electrode system)을 기준으로 하고 있다. 부착된 전극을 전극상자(electrode box or input box)에 연결하는 방법에 따라 파형의 위상이 바뀌게 되는데 뇌간유발반응에서는 활동전극(active electrode)을 일반적으로 Cz에 연결하나 검사의 편의를 위하여 Fpz에 연결하기도 하며, 기준전극(reference electrode)은 검사측 이개(A1 또는 A2)에, 접지전극(ground electrode)은 channel 수에 따라 반대측 이개(A1 또는 A2)나 Fpz에 각각 연결한다. 이들 여러 가지 방법에 따라 잠복시간과 진폭에 차이가 생긴다(Fig. 6).

부착된 전극의 저항은 충분히 낮고 일정하게 유지하여야 하는데, 뇌간유발반응 검사장비로 20 또는 30Hz 정도의 수 μ A의 미세 전류를

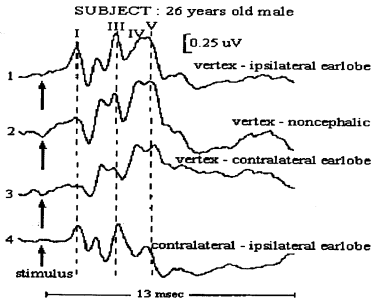


Fig. 6. ABR waveforms recorded simultaneously with the four-channel electrode array(from Hall, 1992¹⁹⁾).

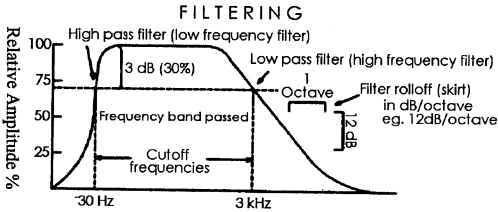


Fig. 7. Configuration of creating a band pass filter with adjustable upper and lower frequency cutoffs.

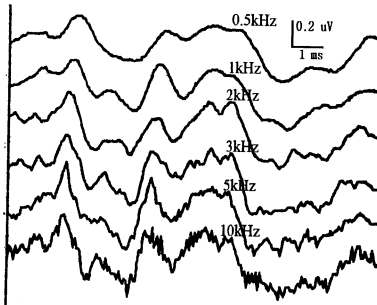


Fig. 8. Effect of altering low pass filter for ABR on normal-hearing subject. High pass filter setting is held at 100Hz(2048 averages at 80dB nHL, 100 μ s click).

홀려 자동으로 측정할 수 있다. 모든 전극의 저항은 $3K\Omega$ 이하가 적당하고 최대 $5K\Omega$ 을 넘지 않아야 하며 서로 다른 전극의 저항은 일정해야 한다. 검사 전과 검사 중 그리고 검사 후 지속적으로 측정하여 피검자의 움직임이나 전자파의 혼입 등을 감시하는 것이 바람직하다.

3) 증폭기

증폭기 (*amplifier*)는 전치증폭기 (*pre-amplifier*)와 주증폭기 (*main amplifier*)로 나누어진

다. 전치증폭기는 전극과 전극상자를 통해 들어 온 다양한 주파수와 진폭을 갖는 전위 중 일정 주파수 이하의 전위를 배제 (*high pass filter*)하고 주증폭기가 받아들일 수 있는 정도로 증폭한다. 주증폭기는 전치증폭기에서 보내 온 전위 중 일정 주파수 이상의 전위를 배제 (*low pass filter*)하고 평균가산 컴퓨터에서 충분히 처리할 수 있을 정도로 증폭하여 별도의 여과장치 (*filter*) 또는 평균가산 컴퓨터로 보낸다.

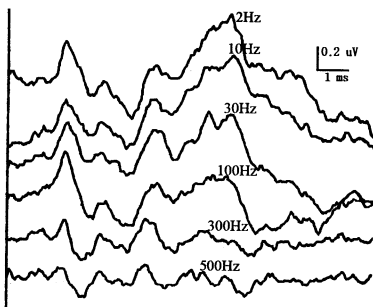


Fig. 9. Effect of altering high pass filter for ABR on normal-hearing subject. Low pass filter setting is held at 3kHz(2048 averages at 80dB nHL, 100 μ s click).

증폭기에서 증폭시키는 정도는 대개 100,000 배 정도가 사용되고 있으며 10의 배수 단위나 대수단위 (dB=log₁₀gain)로 표현한다.

4) 필터

필터 (filter)는 여러 개의 주파수 성분 중에서 원하지 않는 주파수의 신호를 배제시키고 원하는 주파수의 신호만을 증폭기로 통과시키는 장치이다. 가전제품, X-ray view box 등에서 발생하는 잡음(60Hz 또는 불특정 주파수), 피검자의 움직임에 의한 진위(0.05~50Hz), 근전위(약 100~500Hz), 뇌파(30Hz 이하) 등 유발전위와 다른 주파수의 신호를 걸러 주어 신호대잡음비 (signal-to-noise ratio)를 개선해 준다.

필터의 특성은 고역통과 (high pass or low cut), 저역통과 (low pass or high cut), 대역통과 (band pass), 감쇄주파수 (cut-off frequency), 감쇄율 (cut-off ratio) 등으로 표현된다. 고역통과는 특정 주파수 이하의 진위를 걸러 낸 진위를 통과시키는 것을 말하며, 저역통과는 고역통과와 반대되는 개념이다. 대역통과는 특정 주파수 이하와 이상을 걸러 내고 그 사이의 주파수 대역만을 통과시키는 것을 말한다. 감쇄주파수는 필터를 통해 불필요한 주파

수를 제거하기 시작하여 전위가 최고 정점으로 부터 3dB 낮아진 점의 주파수를 말하고 감쇄율은 음계 (octave)당 진위의 감쇄정도를 dB/oct.로 표시한다 (Fig. 7).

뇌간유발반응 검사에서 고역통과 감쇄주파수는 신생아의 선별청력검사시에는 10~50Hz, 그 외의 경우에는 50~300Hz 정도로 한다. 10 Hz 이하에서는 뇌파가 혼입될 수 있고 150Hz 이상에서는 유발전위의 손실이 많다. 저역통과 감쇄주파수를 1500Hz로 사용할 경우 파형이 비교적 깨끗하게 관찰되지만 V 파의 잠복시간이 연장되는 단점이 있어서 일반적으로 3000 Hz가 사용되며 1500Hz 이하로 낮추지는 않는다 (Fig. 8~9).

5) 평균가산

두피 전극을 통해 얻어진 진위에는 뇌간유발전위보다 10배 또는 그 이상 강한 잡음이 자극과 관계없이 불규칙하게 발생되지만, 유발전위는 자극에 의해서만 일정한 진폭으로 발생된다. 따라서 자극할 때마다 평균가산시켜 주면 잡음의 진폭이 현저하게 감소하게 되며 유발전위는 일정하게 유지된다 (Fig. 10). 대체로 평균가산에 의한 잡음은 $1/\sqrt{n}$ 의 관계로 감소하며 유발전위의 진폭이 잡음의 진폭보다

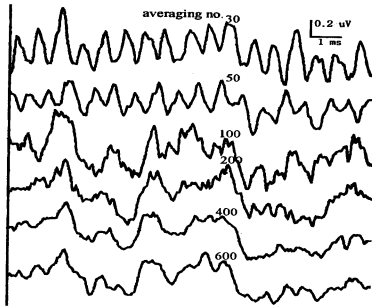


Fig. 10. Noise reduction by averaging.

Table 3. Number of samples per average suggested in several ABR laboratories (from Glasscock et al, 1987¹²⁾).

Reference	samples per average
Selters and Brackmann	1000
Mokotoff et al.	1024 to 2096
Stockard and Rossiter	2000 to 4000
Starr and Hamilton	2048
Coats and Martin	1000
Glasscock et al.	1000

4배 정도일 때 파형 관찰에 이상적어서 평균가산 처리를 위한 최소 자극횟수는 2000회 정도가 적당하다 (Table 3). 만약 피검자의 협조상태가 양호하고 검사실이 전자파 방해로부터 안정되어 있다면 512회 이상으로도 만족할 만한 파형을 관찰할 수 있으나, 역치부근에서는 평균가산 횟수를 충분히 하여야 한다.

4. 검사자

순음청력검사, 어음청력검사 등 피검자의 주관적인 응답에 의존하는 검사들에 비하여 뇌간유발반응검사는 피검자의 응답에 의존하지 않기 때문에 흔히 객관적인 청력검사라고 한

다. 그러나 기록된 파형의 분석에 있어서는 검사자의 주관이 상당히 개입될 수 있기 때문에 여기서 발생하는 오류를 피하기 위해서는 음향전달에 관한 청각 생리, 뇌간유발반응 전반에 관한 충분한 지식과 경험을 필요로 한다. 특히 청각 손상으로 생긴 변형된 파형과 자극 및 기록방법의 실수 또는 잡파의 혼입 등으로 생긴 파형의 변형 등을 구별하고 이를 대처할 수 있는 능력을 갖추고 있어야 한다.

IV. 검사 방법

검사는 그 목적에 따라 다소 다르겠으나 본 교실에서 시행하고 있는 방법을 간략하게 소개한다.

1. 전처치

뇌간유발반응검사는 어떤 검사이고, 어떻게 진행되며, 검사 중에 어떻게 협조해 주어야 할 것인가 등을 사전에 상세하게 알려주는 것이 전처치의 첫 과정이며 검사에 임하는 피검자가 마음을 준비할 수 있는 중요한 상담과정이다. 협조되지 않는 유소아는 낮잠 시간을 이용

하여 자연 수면상태에서 검사하는 방법과 ch-loral hydrate를 구강 또는 항문을 통해 주입하여 수면시킨 후 검사한다. 항문으로 주입할 경우 검사 전일 자정 이후 금식과 검사 당일 아침 배변 또는 관장을 시행하는 것이 좋다.

성인의 경우 자연 수면 또는 수면하는 것처럼 편안한 휴식의 자세를 취하게 하며 이때 경부 근육이 최대한 이완될 수 있게 한다. 필요하다면 수면 약제 (Valium®)를 사용하기도 한다.

전극 부착부위를 피부세정제 또는 알코올을 스폰지로 깨끗하게 닦고 전극을 부착하며 헤드폰을 쓰고 수 분 정도 자세를 편안히 취하게 한 후 검사를 시작한다.

2. 자극 및 기록 조건

① 트랜스듀서 : 가장 보편적인 것으로 TDH-39 헤드폰이 있으며, 자극잡음을 줄이려 하거나 신생아 일 때는 ER-3A insertion phone이 적합하다.

② 자극음 : Click

③ 지속시간 : 100 μ s

④ 극성 : 교대상

⑤ 자극빈도 : 11.3/sec

⑥ 음강도 : 절대 잠복시간과 파간 잠복시간만을 보고자 할 경우에는 90dB nHL을 사용하고 역치를 보고자 할 경우에는 90dB nHL 또는 그 이상의 강도부터 매 10dB nHL 단위로 낮추면서 검사한다. 만약 청력손실이 심하여 최대 자극음 강도범위를 주어야 할 때나, 협조가 잘 안되어 파형 분석이 어려울 때에는 같은 음강도로 두 번 기록하여 중복시켜 준다.

⑦ 차폐 : 순음청력검사가 시행되어 양이간 청력이 65dB 이상이거나 I 파가 보이지 않고 V 파의 지연이 있는 경우 반대쪽 귀에 50dB의 잡음으로 차폐한다.

⑧ 전극부착 : 한 개의 channel을 사용할 때는 활동전극을 Cz 또는 Fpz, 기준전극을 A1 (이개 또는 유양돌기), 접지는 Fpz 또는 A2에 부착하며, 두 개의 channel을 사용할 때는 활동전극을 Cz, 기준전극은 A1과 A2, 접지는

Fpz에 부착한다.

⑨ 대역통과 필터 : 100~3000 Hz

⑩ 기타 필터 : notch 필터는 off, 인공와우 이식기를 통하는 전기자극 뇌간유발반응의 경우 radio frequency 필터를 on한다.

⑪ 기록시간 : 10 ms. 단, 삼입형 수화기를 사용하는 경우 12~15 ms

⑫ 평균가산 : 최소 500회 이상.

3. 전위의 기록

검사 장치의 화면상에 나타나는 파형은 유발전위가 계속 평균가산되어 나타나므로 검사 시작 직후를 제외하고는 크게 변화되지 않는다. 만약 특정 잠복시간에서 급격한 변화가 관찰되거나 화면상에서 잠파의 출현을 경고하면 검사를 중단하고 피검자의 상태를 확인하거나 전극의 저항을 다시 확인해야 한다.

V. 임상 적용

뇌간유발반응은 마취나 수면에 영향을 받지 않고 표면전극 (surface electrode)으로 기록하여 비침습적이며 미로와 후미로를 평가할 수 있는 장점이 있으나, 일반적으로 사용되는 click 음의 주파수가 1~4kHz 범위이므로 저음역에 대한 청력평가가 곤란한 점과 와우 기능에 대한 상세한 진단정보를 얻을 수 없는 점 그리고 뇌간 이후의 청각전달에 관한 정보를 얻을 수 없는 점등을 단점으로 지적할 수 있다.

1. 청각평가

뇌간유발반응은 V 파의 역치 (V 파를 뚜렷하게 관찰할 수 있는 최소 자극강도)를 통해 청력역치를 평가할 수 있어 유소아, 협조가 곤란한 피검자 및 위난청자의 청력검사에 임상적으로 널리 이용되고 있으며 난청의 유형 감별에도 도움이 된다.

뇌간유발반응의 역치 (V 파의 역치)는 청력역치보다 성인에서 5~10dB, 소아에서 10~20 dB 높게 나타난다¹⁰⁾.

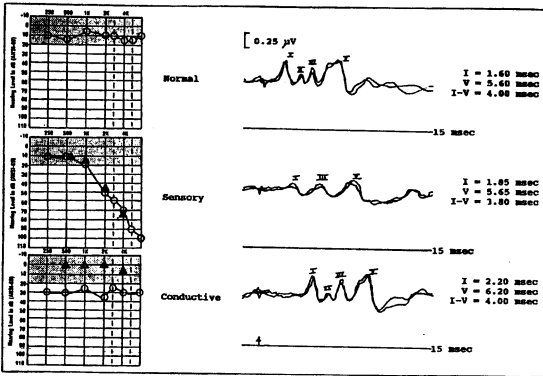


Fig. 11. Schematic examples of ABR waveforms that may be associated with normal, high frequency sensory hearing impairment and flat conductive hearing impairment. In each case, the ABR was recorded for a high intensity(85dB HL) air-conduction click stimulus(from Hall, 1992¹⁹).

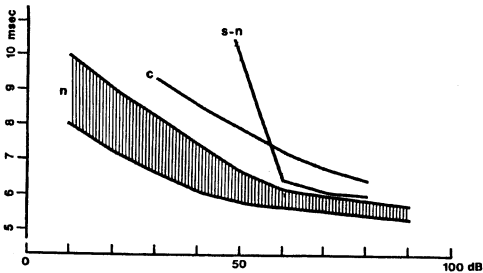


Fig. 12. Normal range of latency-intensity curves derived from ABR to click stimuli of different intensity in a group of audiotically normal adults(from Spehlmann, 1985²⁰).

난청의 유형에 따라 각기 다른 파형을 보이 보를 얻을 수 있다. 전음성 난청의 경우 내이 로의 음전도 장애로 인해 뇌간유발반응에서 자극음강도의 감소와 같은 영향을 미쳐 모든

파의 진폭이 작아지고 잠복시간은 연장되나 파간 잠복시간은 정상범위를 벗어나지 않으며, 이러한 영향은 자극강도를 충분히 높여줌으로써 상쇄된다. 감음성 난청은 유모세포 손상으로 인해 역치상 자극시 I 파의 잠복시간은 연장되나 V 파의 잠복시간은 미세한 변화를 보여 I - V 파간 잠복시간이 단축된다 (Fig. 11). 반면 역치 근처에서는 누가현상으로 인해 자극강도의 감소에 비해 V 파의 잠복시간이 현저하게 연장되어 latency-intensity function curve에서 L-shape의 특징적인 모양을 보인다 (Fig. 12). 후미로성 난청은 파형이 다양하게 나타나며, 각 파를 분간하기 어려운 경우가 많고 파간 잠복시간의 변화가 크다.

2. 이신경과확적 진단

1975년 Starr, Achor가 신경계질환의 진단에 뇌간유발반응을 이용하였으며⁴¹⁾, 1977년 Selters와 Brackmann 등은 뇌간유발반응이 청신경병변의 유용한 진단방법이라고 하였다³⁶⁾. 이후 뇌간유발반응은 소뇌교각종양 (청신경종양, 수막종 등), 연수내종양, 다발성경화증, 혼수 등의 진단에 널리 이용되고 있으며, 특히 청신경종양 진단에 90% 이상의 매우 높은 민감도를 보인다^{11,12)}. 이와같은 후미로성 병변은 뇌간유발반응의 파형, 진폭 및 잠복시간 등에 다양한 변화를 가져온다. 검사시 자극빈도를 많게 하면 파형의 잠복시간은 길어지고 각 파형의

선명도가 떨어지므로 대개 20/sec 이하로 자극한다.

뇌간유발반응의 잠복시간 변화 분석이 후미로성 병변 진단에 주로 이용되며, 1977년 Selters와 Brackmann 등 등은³⁶⁾ 후미로성 병변에 대해 아래와 같이 4가지 잠복시간 평가기준을 설명하였다.

- ① Absolute latency of wave V exceeds some clinical definition for normal limit (2.5 SD초과, 6.2 ms 이상 등)
- ② Abnormal ILD (interaural latency difference) for wave V (0.3 또는 0.4 ms 이상)
- ③ Abnormal I - V (I - III, III - V) interpeak latency
- ④ Abnormal ILD for the I - V (I - III, III - V) latency interval

각각신경성 난청이 있으면서 후미로성 병변이 의심될 경우 보다 정확한 결과관정을 위해 V 파의 잠복시간에 대한 보정이 필요하다 (Table 4).

1980년 Stockard 등은 소뇌교각종양 환자의 비정상적 뇌간유발반응을 5가지 유형으로 분류하였으며 (Fig. 13), 이는 종양의 크기, 위치, 견고성 등에 영향을 받는다고 하였다⁴²⁾.

연수내종양의 많은 경우에서 I 파는 정상적이거나 II ~ V 파가 비정상적이거나 소실되며, 다발성 경화증은 병변의 위치 및 심한 정도에 따라 다양한 양상을 보인다. 대사성 장애로 인

Table 4. Guidelines for correcting ABR wave V latency for degree of sensory hearing impairment (from Hall, 1992³⁹⁾).

Investigators, year	Guidelines
Selters & Brackmann, '77	Subtract 0.1 ms for each 10dB of hearing loss above 50dB at 4kHz
Rosenhamer, Lindstrom & Lundborg, '81	Subtract 0.1 ms for each 10dB of hearing loss above 30dB at 4kHz
Prosser & Arslan, '87	$\Delta V = L_p(90) - L_n(90 - X)$, where $L_p(90)$ is wave V latency of poorer ear at 90dB HL, $L_n(90 - X)$ is normal wave V latency, and X is the patient's pure tone hearing loss average for 2 + 4kHz

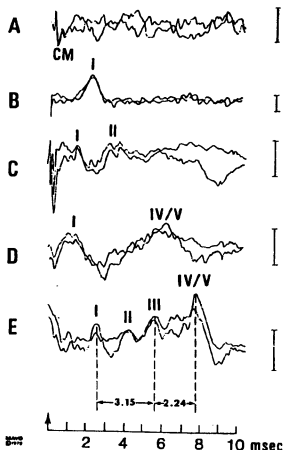


Fig. 13. Five abnormal ABR patterns in cerebellopontine angle tumor, calibration $0.1 \mu V$ (from Stockard et. al, 1980⁴³⁾).

한 혼수환자에서는 중추신경의 구조적 장애와 는 달리 정상적인 뇌간유발반응을 보인다.

3. 신생아 선별청력검사

난청이 있는 유소아에서 재활 및 특수교육을 조기에 실시하여 사회생활에 대비하도록 하기 위해서는 난청의 조기 발견이 무엇보다 중요하다. 뇌간유발반응검사는 신생아에서 쉽게 시행할 수 있는 객관적인 검사로 신생아선별청력검사 (newborn auditory screening)에 널리 이용되고 있다.

1982년 Joint Committee of Infant Hearing에서는 모든 신생아에서 일률적으로 검사를 시행하는 것은 권하고 있지 않지만, 난청의 가족력, 주산기 감염, 외이 기형, 체중 1,500 gm

이하 미숙아, 고빌리루빈혈증, 세균성 뇌막염, 출생시 심한 질식 등이 있는 경우 난청의 위험성이 높으므로 출생 후 3개월 이내에 뇌간유발반응을 포함한 선별청력검사를 권장하고 있다⁴⁴⁾. 1989년 ASHA는 난청의 위험군에 있는 신생아 중 약 4%에서 고도난청을 보인다고 보고하였다.

1990년 Joint Committee of Infant Hearing에서는 "PASS"의 기준을 40dB nHL이하의 자극음에 반응을 보이는 경우로 규정하고 "PASS"하지 못한 신생아는 3~6개월 후 철저한 이과학적검사를 포함한 재검사를 받아야한다 (Fig. 14)⁴⁵⁾.

검사방법은 TDH 헤드폰보다 삽입형 수화기가 착용하기 쉬우며, 고역통과 감쇄주파수를 10~50Hz로 하고, 기록시간은 12~15 ms로 길게 하며, 30~70dB nHL 범위 중에서 30dB nHL을 포함한 두 개 또는 세 개의 음강도를 검사한다.

4. 중환자 감시

1980년 이후 유발반응은 Intensive Care Unit (ICU) 환자의 감시에 널리 이용되고 있다. 이는 대부분 ICU 환자는 혼수상태이거나 매우 제한된 신체적 반응을 보여 신경학적 검사를 통한 평가가 어렵기 때문이다.

Evoked response monitoring으로 이러한 환자에서의 중추 및 말초신경의 병태생리변화를 조기에 알 수 있다. 뇌손상 환자에서 뇌간 정후와 뇌간유발반응검사의 이상소견은 서로 밀접한 연관관계가 있으며⁴⁷⁾, 특히 뇌교 혹은 하부중추신경계의 병변은 뇌간유발반응검사에 현저한 이상소견을 보인다⁴⁸⁾. 1988년 Tucker과 Hall은 급성뇌손상 환자에서 뇌간유발반응에 이상소견이 보이던 예후가 불량하다 했다⁴⁹⁾.

뇌간유발반응검사는 뇌손상 환자의 지속적인 중추 및 말초신경기능의 평가와 예후 판정에 도움을 주며 뇌사의 진단에도 이용되고 있다.

5. 술중 감시

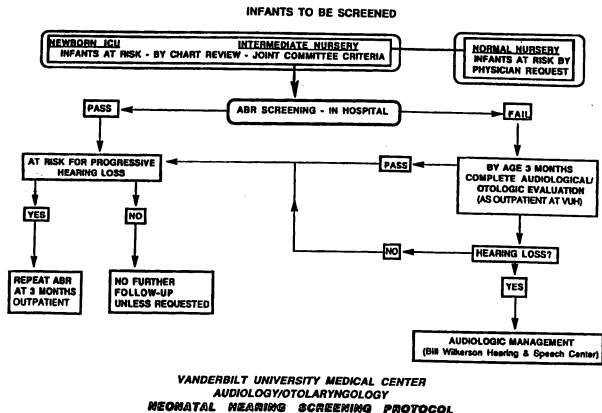


Fig. 14. Flow chart for the newborn auditory screening and follow-up program at Vanderbilt University Hospital(from Hall, 1992¹⁹⁾).

뇌간유발반응검사는 1980년대 중반 이후 소
뇌교각종양의 수술(중두개와 접근법, 후두와
접근법, 후S상정맥동 접근법), 전정신경 절제
술, 안면신경 혈관감압술 등의 이신경과적 수
술시 와우, 청신경 및 청각전달로의 기능적 보
존을 위한 감시에 이용되고 있다.

ABR monitoring으로 술중 저혈압, 저산소증,
청신경과 뇌조직의 견인이나 압박 등으로 인한
청신경 및 중추신경계의 신경생리상태 변화를
알 수 있어 조기에 적절한 조치를 취할 수 있
으므로 청력보존과 뇌손상을 최소화할 수 있
다.

V 파 잠복시간이 0.5 ms²⁶⁾, 혹은 1 ms²⁷⁾ 이상
증가시 의미있는 변화로 보았고, 1985년 Hall
은 V 파 잠복시간이 0.5 ms 이상 증가시
"Alert", 1 ms 이상 증가시 "Warning"이라 하
였으며, 그 변화의 원인을 반드시 확인해야 한
다¹⁹⁾.

6. 전기 자극 뇌간유발반응

전기자극 뇌간유발반응 (*electrically evoked
ABR; EABR*)은 음자극 대신에 전기자극을하
여 기록한 뇌간유발반응을 말한다. 전기자극은
정원창, 와우감각 등을 자극하는 방법과 인공
와우이식술 후 와우에 삽입된 전극을 통하여
자극하는 방법이 있다. 전기자극 뇌간유발 반
응의 V 파 잠복시간은 음자극을 하였을 때보다
1~2 ms 정도 짧으며, I 파는 자극음 등에
의해서 관찰하기 어려운 때가 많다. 또한 안면
신경, 전정신경 자극 등에 의한 근원성 전위가
혼입될 수 있다.

전기자극 뇌간유발반응은 임상적으로 고도
이상의 감각신경성 난청환자에서 청신경 및
청각전달로의 평가, 인공와우이식술 대상자 선
정, 시술이 결정된 난청자에게 적절한 장치의
결정, 시술 후 mapping 시의 기초자료로 이용
등의 목적으로 사용될 수 있다.

Reference

- 1) American Academy of Pediatrics Joint Committee on Infant Hearing, Position statement, *Pediatrics*, 70 : 469~497, 19 82
- 2) Antonelli, A. R., Bellotto, R., Grandori, F., Audiologic diagnosis of central eighth nerve and cochlear auditory impairment, *Audiology*, 26 : 209~226, 1987
- 3) Arlinger, S. D., Kylen, P., Bone-conducted stimulation in electrocochleography, *Acta otolaryngologica (Stockholm)*, 84 : 377~384, 1977
- 4) Beattie, R. C., Boyd, R., Effects of click duration on the latency of the early evoked response, *Journal of Speech and Hearing Research*, 27 : 70~76, 1984
- 5) Bernard, P., Alterations fo auditory evoked potentials during the course of chloroquine treatment, *Acta Otolarnologica (Stockholm)*, 99 : 387~392, 1985
- 6) Chiappa, K. H., Gladstone, K. J., Young, R. R., Brainstem auditory evoked responses: Studies of waveform variations in 50 normal human subjects, *Archives of Neurology*, 36 : 81~87, 1979
- 7) Coats, A. C., Human auditory nerve action potentials in brainstem evoked responses : Latency intensity function in detection of cochlear and retrocochlear abnormality, *Achives of Otolaryngology*, 104 : 709~717, 1978
- 8) Davis, H., United States-Japan seminar on auditory responses from the brainstem, *Laryngoscope*, 39 : 1336~1339, 19 79
- 9) Don, M., Allen, A. R., Starr, A., Effect of click rate on the latency of auditory brainstem responses in humans, *Annal of Otology, Rhinology, and Laryngology*, 86 : 186~195, 1977
- 10) Galambos, R., Hecox, K. E., Clinical applications of the auditory brain stem responses *Otolarybol. Clin. North Am.*, 11 : 709~722, 1978
- 11) Glasscock, M., Jackson, C., Josey, A., Dickins, J., Wiet R., Brainstem evoked response audiometry in clinical practice, *Laryngoscope*, 89 : 1021~1034, 1979
- 12) Glasscock III, M. E., Jackson, C. G., Josey, A. F., *The ABR Handbook : Auditory Brainstem Response*, 2nd edition, New York, Thieme Medical Publishers, Inc., 1987
- 13) Gorga, M. P., Beauchaine, K. A., Reiland, J. K., Worthington, D. W., Javel, E., Effects of stimulus duration on ABR thresholds and on behavioral thresholds, *Journal of Acoustic Society of America*, 76 : 616~619, 1984
- 14) Gorga, M. P., Kaminski, J. R., Beauchaine, K. L., et. al, Auditory brainstem responses from children three months to three years of age: II. Normal pattern of response, *Journal of Speech and Hearing Research*, 32 : 281~288, 1989
- 15) Hall, J. W. III, Tucker, D. A., The auditory brainstem response in acute brain injury, In : J. H. Owen, D. Donohoe (Ed), *Atlas of auditory evoked responses*, Orlando, FL : Grune & Stratton, 1988
- 16) Hecox, K., Galambos, R., Brain stem auditory evoked responses in human infants and adults, *Archives of Otolaryngology*, 99 : 30~33, 1974
- 17) Hyde, M. L., Stephens, S. D. G., Thornton, A. R. D., Stimulus repetition rate and the early brainstem responses, *British Journal of Audiology*, 10 : 41~50, 1976
- 18) Hook, R. G., Weber, B. A., Auditory

- brainstem responses of premature infants to bone-conducted stimuli : A Feasibility study, *Ear and Hearing*, 5 : 42~46, 1984
- 19) James W. Hall III, J. W., *Handbook of Auditory Evoked Responses*, Needham Heights, Allyn and Bacon, 1992
- 20) Jerger, J., Hall III, Effects of age and sex on auditory brainstem response, *Archives of Otolaryngology*, 106 : 387~391, 1980
- 21) Jerger, J. F., Maudlin, L., Prediction of sensorineural hearing level from the brainstem evoked response, *Archives of Otolaryngology*, 104 : 456~461, 1978
- 22) Jewett, D. L., Volume-conducted potentials in response to auditory stimuli as detected by averaging in the cat, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 28 : 609~618, 1970
- 23) Jewett, D. L., Romano, M. L. and Williston, J. S., Human evoked potentials : Possible brainstem components detected on the scalp, *Science*, 167 : 1517~1518, 1970
- 24) Jewett, D. L., Williston, J. S., Auditory evoked far fields averaged from the scalp of humans, *Brain*, 4 : 681~696, 1971
- 25) Lev, A., Sohmer, H., Sources of averaged neural responses recorded in animal and human subjects during cochlear audiometry, *Archives Klin Exp Ohren Nasen Keholphheid*, 201 : 79~90, 1972
- 26) Little, J. R., Lesser, R. P., Furlan, A. J., Brain stem auditory evoked potentials in posterior circulation surgery, *Neurosurgery*, 12 : 496~502, 1983
- 27) Manninen, P., Lam, A. M., Nicholas, J. F., The effect of isoflurane-nitrous oxide anesthesia on brainstem auditory evoked potentials in humans, *Anesthesia and Analgesia*, 64 : 43~47, 1985
- 28) Maudlin, L., Jerger, J., Auditory brainstem evoked response to bone conducted signal, *Archives of Otolaryngology*, 105 : 656~661, 1979
- 29) Mokotoff, B., Schulman-Galambos, C., Galambos, R., Brainstem auditory evoked responses in children., *Archives of Otolaryngology*, 103 : 38~43, 1977
- 30) Mller, A. R., Jannetta, P., Mller, M. B., Intracranially recorded auditory nerve response in man, *Archives of Otolaryngology*, 108 : 77~82, 1982
- 31) Picton, T. W., Woods, D. L., Baribeau-Braun, J., Healey, T. M. G., Evoked potential audiometry, *The Journal of Otolaryngology (Toronto)*, 6 : 90~119, 1977
- 32) Pratt, H., Sohmer, H., Intensity and rate function of cochlear and brainstem evoked responses to click stimuli in man, *Archives of Otorhinolaryngology*, 212 : 85~92, 1976
- 33) Rosenblum, S. M., Ruth, R. A., Gal, T. J., Brainstem auditory potential monitoring during profound hypothermia and circulatory arrest, *Annals of Otolaryngology, and Laryngology*, 94 : 281~283, 1985
- 34) Salamy, A., McKean, C. M., Postnatal development of human brain stem potentials during the first year of life, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 41 : 418~426, 1976
- 35) Schulman-Galambo, C., Galambo, R., Brainstem auditory evoked responses in premature infants, *Journal of speech and hearing research*, 18 : 456~465, 1975
- 36) Selters W., Brackmann D., Acoustic tumor detection with brainstem electric response audiometry, *Arch Otolaryngol*,

- 103 : 181~187, 1977
- 37) Sohmer, H. & Feinmesser, M., Cochlear action potentials recorded from the external ear in man, *Annals of Otolology, Rhinology, and Laryngology*, 76 : 427~435, 1976
- 38) Schwartz, D. M., Pratt, R. E., Jr., Schwartz, J. A., Auditory brain stem responses in preterm infants: Evidence of peripheral maturity, *Ear and Hearing*, 10 : 14~22, 1989
- 39) Spehlmann, R., *Evoked Potential Primer*, Stoneham, MA, Butterworth Publishers, 1985
- 40) Stapell, D. R., Pictou, T. W., Smith, A. D., Normal hearing threshold for clicks, *Journal of the Acoustic Society of America*, 72 : 4~79, 1982
- 41) Starr, A., Achor, L. J., Auditory brainstem responses in neurological disease, *Archives of Neurology*, 32 : 761~768, 1975
- 42) Stockard, J. J., Rossiter, V. S., Clinical and pathologic correlates of brain stem auditory response abnormalities, *Neurology*, 27 : 316~325, 1977
- 43) Stockard, J. J., Stockard, J. E., Sharbrough, F. W., Brainstem auditory evoked potentials in neurology : Methodology, interpretation, clinical application, In : *Electrodiagnosis in clinical neurology*, ed. Aminoff, M. J., New York, Churchill Livingstone : 370~413, 1980
- 44) Stockard, J. J., Stockard, J. E., Sharbrough, F. W., Nonpathologic factors influencing brainstem auditory evoked potentials, *American Journal of EEG Technology*, 18 : 177~209, 1978
- 45) Stockard, J. J., Stockard, J. E., Westmoreland, B. F., Corfits, J. L., Brainstem auditory-evoked responses : Normal variation as a function of stimulus and subject characteristics, *Archives of Neurology*, 36 : 823~831, 1979
- 46) Tsubokawa, T., Nichimoto, H., Yamamoto, T., et al., Assessment of brainstem damage by the auditory brainstem response in acute severe brain injury, *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 43 : 1005~1011, 1980
- 47) Uziel, A., Benezech, J., Auditory brainstem response in comatos patients : Relationships with brainstem responses and level of coma, *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 45 : 515~524, 1979
- 48) van den Honert, C., Stypulkowski, P. H., Characterization of the electrically evoked auditory brainstem response (ABR) in cats and humans, *Hearing Research*, 21 : 109~126, 1986
- 49) Yagi, T., Kaga, K., The effect of the click repetition rate on the latency of the auditory evoked brainstem response and its clinical use for a neurological diagnosis, *Archives of Otolaryngology*, 222 : 91~97, 1979
- 50) Yamada, O., Kodera, K., Yagi, T., Cochlear processes affecting wave V latency of the auditory evoked brainstem response : A study of patients with sensory hearing loss, *Scandinavian Audiology*, 8 : 67~70, 1979
- 51) Yang, E. Y., Rupert, A. L., Moushegian, G., A developmental study of bone conduction auditory brain stem response in infants, *Ear and Hearing*, 8 : 244~251, 1987