

Hearing Threshold Prediction Using Auditory Brainstem Response and Auditory Steady-State Response in Infants and Young Children

Lee-Suk Kim and Sung-Wook Jeong

Department of Otolaryngology-Head and Neck Surgery, College of Medicine, Dong-A University, Busan, Korea

청성뇌간반응과 청성지속반응을 이용한 영유아의 청력역치 예측

김 리 석 · 정 성 욱

동아대학교 의과대학 이비인후과학교실

Between one and three of every 1,000 neonates have sensorineural hearing loss (SNHL). It is of utmost importance to minimize the duration of auditory deprivation between the onset of bilateral deafness and intervention using hearing devices such as hearing aids and cochlear implants for achieving the best speech perception ability. To fit amplification accurately for children with SNHL, hearing thresholds for frequencies in the range of human communication should be evaluated. However, infants and young children are difficult to test using conventional behavioral tests, and hearing thresholds of them can be predicted using auditory brainstem response (ABR) and auditory steady-state response (ASSR). ABR is best evoked by applying a click stimulus, which allows an estimate over a broad range of high frequencies. ABR elicited by tone burst stimulus provides frequency-specific audiometric information. However, it can be difficult to record and observe at near-threshold levels, especially at lower frequencies. ABR thresholds for click and tone burst stimuli are highly correlated with behavioral thresholds, and often give an idea of the shape of an audiogram. ASSR is an auditory evoked potential, elicited with modulated tones. It provides frequency-specific hearing thresholds across the audiometric frequencies, which are well correlated with behavioral thresholds. However, the accuracy of threshold prediction decreases directly with the decrease of degree of hearing loss, and hearing thresholds cannot be predicted for auditory neuropathy. ASSR is most useful for estimating auditory thresholds for patients with no evidence of auditory neuropathy by the click ABR and OAEs, and who have an ABR only at high intensities or no ABR at a maximum stimulus level. Even if hearing thresholds are predicted through ABR and ASSR, behavioral testing including behavioral observation audiometry, visual reinforcement audiometry, or play audiometry should be employed repeatedly to verify the predicted thresholds, because the thresholds of ABR and ASSR are not true measure of hearing acuity but just responses generated at the brainstem.

Korean J Otorhinolaryngol-Head Neck Surg 2011;54:592-602

Key Words Auditory brainstem response · Auditory steady-state response · Infant · Child.

Received June 21, 2011

Accepted July 15, 2011

Address for correspondence

Lee-Suk Kim, MD, PhD

Department of Otolaryngology-

Head and Neck Surgery,

College of Medicine,

Dong-A University,

1 Dongdaesin-dong 3-ga, Seo-gu,

Busan 602-715, Korea

Tel +82-51-240-5428

Fax +82-51-253-0712

E-mail klsolkor@chol.com

서 론

신생아 1,000명 중 약 1~3명은 영구적인 난청을 가지고 태어난다.¹⁾ 난청으로 인한 말인지력의 저하는 말산출 능력과 의

사소통 능력의 저하를 초래하고, 이는 이후에 학업과 직업 등을 포함한 다양한 사회적 활동에 큰 장애를 초래할 수 있다. 반면 난청을 가지고 태어나더라도 난청이 조기에 진단되어 조기에 치료가 시작될 경우 정상에 가까운 말언어 능력을 습득

할 수 있다. 이를 위해서는 모든 신생아를 대상으로 신생아청각선별검사(universal newborn hearing screening, UNHS)를 시행하고, 선별검사를 통과하지 못한 경우 생후 3개월 이내에 난청 정밀진단 검사(diagnostic hearing test)를 시행하여 난청을 확진해야 한다. 난청이 확진된 경우 생후 6개월 이내에 보청기를 장착하고 청각재활치료를 시작해야 하며, 고도 이상의 감각신경성난청으로 보청기를 이용한 재활치료에도 말·언어 능력의 진전이 부족한 경우에는 생후 2세 이전에 인공와우이식을 시행해야 한다.

이와 같은 일련의 난청 재활 과정에 있어서 가장 중요한 출발점은 정확한 청력역치의 측정이다. 영유아의 청력역치를 측정하기 위해서 행동관찰 청력검사(출생~6개월), 시각강화 청력검사(6~36개월), 그리고 유혀 청력검사(36개월 이후)와 같은 행동반응 청력검사를 시행할 수 있다. 하지만 이러한 행동반응 청력검사는 아동이 검사에 집중하고 소리에 대해 적절히 반응해야 하기 때문에, 실제 검사를 실시하기 어렵고 검사

결과도 전적으로 신뢰할 수 없는 경우가 많다.

이와 같이 행동반응 청력검사를 적절히 수행하지 못하는 영유아의 청력을 객관적으로 측정하기 위한 방법으로 전기생리학적 검사(electrophysiologic measure)가 이용될 수 있다. 이 중 청성뇌간반응(auditory brainstem response)과 청성지속반응(auditory steady-state response)의 역치는 실제 청력역치와 상관관계가 높기 때문에 영유아의 청력역치를 예측하는데 널리 이용되고 있다(Fig. 1). 본고에서는 청성뇌간반응과 청성지속반응을 이용한 영유아의 청력역치 예측에 대해 알아보고자 한다.

청성뇌간반응을 이용한 청력역치의 예측

소리 자극은 청신경 말단에서 활동 전위(action potential)를 유발하며, 이 활동 전위가 대뇌청각피질(auditory cortex)까지 전달되어 소리를 인지하게 된다. 이러한 일련의 활동 전위

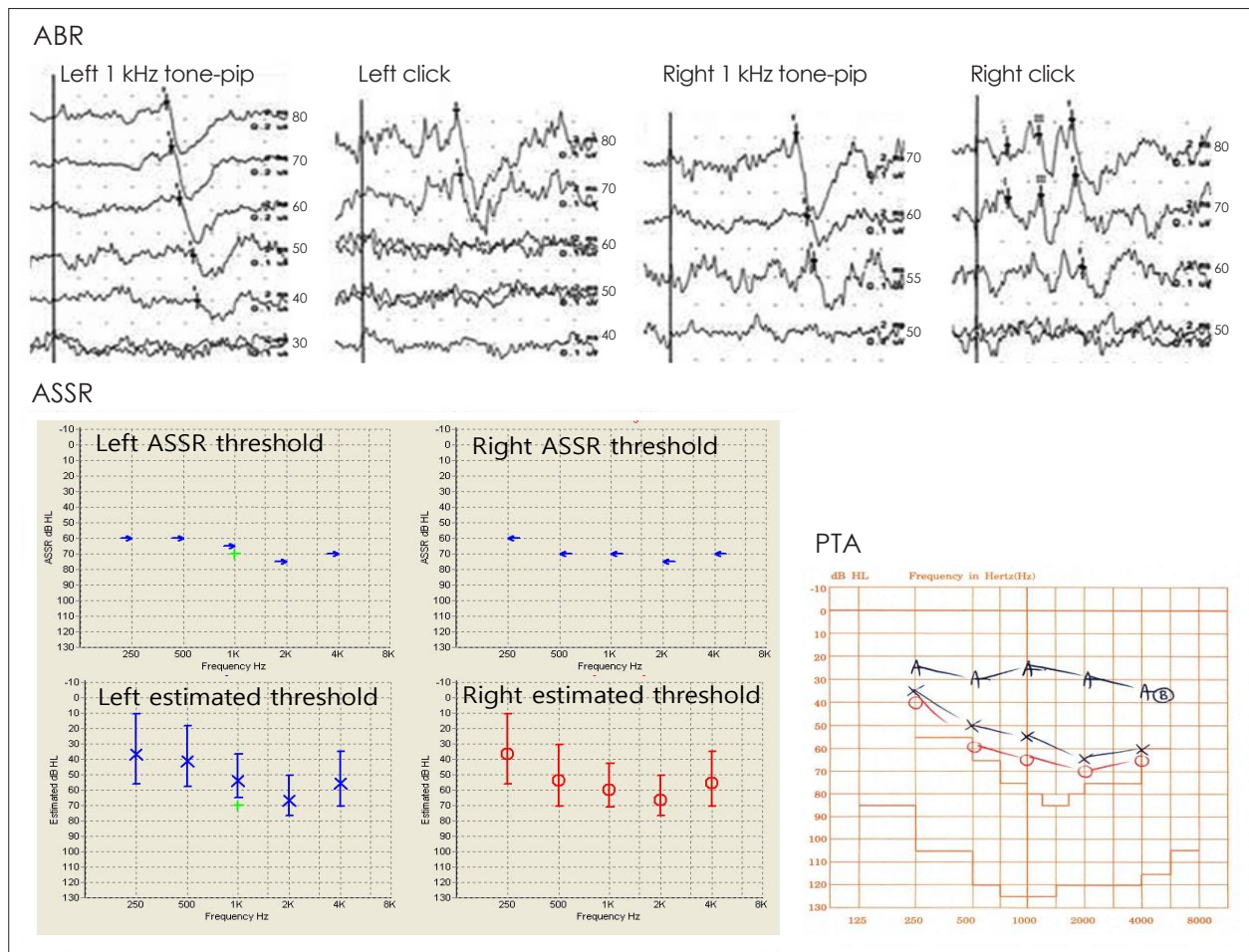


Fig. 1. The test results from a male subject with sensorineural hearing loss. Auditory brainstem response (ABR) for 1 kHz tone-pip and click obtained at 1 year 11 months of age, auditory steady-state response (ASSR) at 2 years 3 months of age, and pure tone audiometry (PTA) at 7 years 6 months of age show good agreement among the thresholds of three tests.

중 청신경에서 뇌간에 이르는 청각전달로에서 발생하는 전위를 기록한 것이 청성뇌간반응이다. 청성뇌간반응은 I파에서 V파에 이르는 5개의 양성파(peak)로 구성된다. 이 중 I, III, V파는 잘 나타나지만 II, IV파는 잘 나타나지 않는 경우가 많으며, V파가 가장 크고 안정적으로 기록된다. V파가 나타나는 최소 자극 강도, 즉 V파의 역치를 통해 피검사의 청력역치를 예측할 수 있다(Fig. 2).

자극 조건

자극음

청성뇌간반응에 이용되는 자극음에는 주파수 특이성 없이 넓은 주파수 대역을 가지는 click음과 주파수 특이성을 가지는 tone burst음이 주로 이용된다.

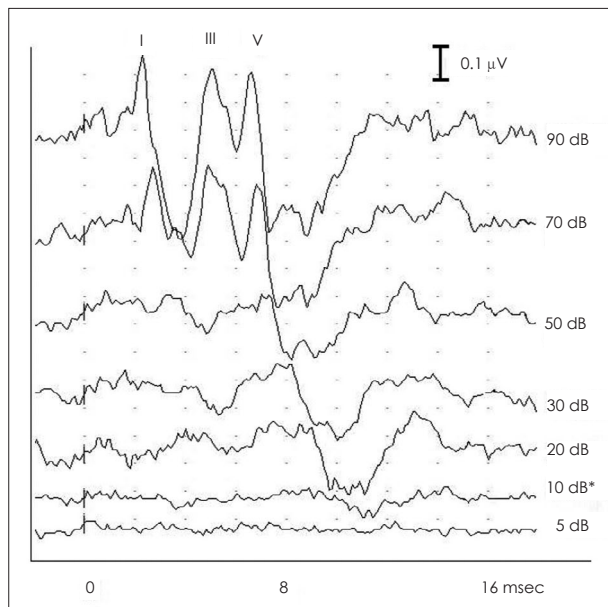


Fig. 2. Auditory brainstem response elicited using click from a 6-month-old female. The waves I, III, and V are apparent and the threshold is judged to be 10 dB nHL. The latency of each wave is decreased and the amplitude of that is increased according to the increase of stimulus intensity.

Click음

소리자극에 의해 청신경과 뇌간의 신경섬유에서 발생한 활동전위가 검사기기를 통해 기록되기 위해서는, 각 신경섬유에서 방출되는 활동전위의 정밀한 동시성(synchrony)이 필요하다. 따라서 청성뇌간반응의 기록을 위해서는 자극음의 주파수 대역이 넓고 지속시간이 짧아, 많은 수의 신경섬유를 동시에 자극하는 것이 유리하다. Click음은 지속시간이 100 μ s 로 짧고, 10 kHz 정도의 넓은 주파수 대역을 가지고 있어 청성뇌간반응을 기록하기에 가장 유리한 자극음이다. Click음은 넓은 주파수대역을 가지고 있어 와우 기저막 전체를 자극하지만, 1~4 kHz 대역에서 가장 큰 에너지를 가지고 있기 때문에 click 음에 대한 청성뇌간반응의 역치는 1~4 kHz 대역의 청력역치를 반영한다.

Tone burst음

주파수별 청력역치 측정에는 tone burst음이 이용된다. Tone burst음은 기본적으로 특정 carrier frequency를 가지고 있기 때문에 주파수 특이성을 가지게 되며, 이 carrier frequency를 특정 envelope function에 의해 변형한 자극음이다. 이러한 tone burst음이 변형에도 불구하고 주파수 특이성을 유지하기 위해서는 plateau를 1회 주기(cycle) 이상, 그리고 상승과 하강 시간 또한 1회 주기 이상을 가지는 것이 좋다. 따라서 tone burst음은 저주파수로 갈수록 자극음의 지속시간이 길어지게 되고, 지속시간이 길어지면 유발전위의 동시성이 저하되기 때문에 기록되는 파형이 명확치 않아 역치 판정이 어려워지는 단점이 있다. 또한 저주파수의 자극음은 와우의 침부 방향으로 진행되는 데 시간이 소요되므로 반응의 잠복기 또한 길어진다(Fig. 3). Tone burst음에서 plateau 없이 상승과 하강 시간만을 가지는 자극음을 tone pip음이라고 한다.

자극음의 극성

자극음의 극성(stimulus polarity)에는 압축상(condensation), 희박상(rarefaction), 그리고 교대상(alternating)이 있다.

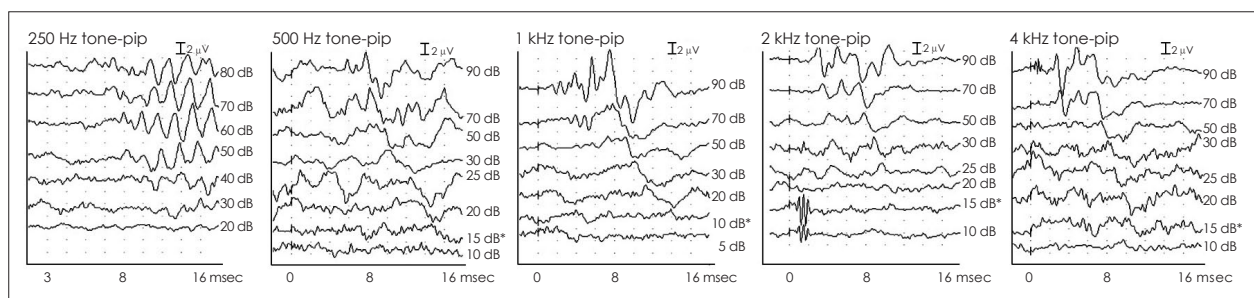


Fig. 3. Tone-pip auditory brainstem response waveforms from a female subject with normal hearing. The waveforms are ambiguous in the response evoked by low frequency tone-pip stimuli, especially 250 Hz. Asterisks indicates the thresholds at each stimuli.

압축상의 자극음은 변환기 진동판(transducer diaphragm)을 고막쪽으로 밀어 외이도의 공기분자를 압축시키고, 압축된 공기분자는 고막과 등골을 내측으로 밀어 와우 기저막이 고실계(scala tympani)쪽으로 움직이게 한다. 희박상의 자극음은 변환기 진동판을 고막 반대쪽으로 당겨 외이도의 공기분자를 희박하게 하고, 이어 고막과 등골이 외측으로 밀리면서 와우 기저막이 전정계(scala vestibuli)쪽으로 움직이게 한다. 이러한 기저막의 움직임으로 인해 유모세포에서 전위가 발생하고, 시냅스를 통해 청신경과 뇌간의 신경섬유에 활동전위가 발생한다. 희박상 자극음이 압축상 자극음에 비해 더 큰 진폭을 가지는 반응을 유발한다. 교대상 자극음은 압축상과 희박상을 교대로 사용하여, 자극잡음(stimulus artifact)을 상쇄시킬 수 있어 흔히 사용된다.

자극음의 강도

지속시간이 긴 순음(pure tone)의 경우 자극음의 강도를 dB HL(심리음향적 단위)과 dB SPL(물리적 단위)로 정한다. 즉 정상 청력을 가진 젊은 성인에서 각 주파수별 가청역치의 평균을 0 dB HL로 정하고, $20 \mu\text{Pa}$ (0.0002 dyne/cm^2)을 기준 음압(P_0)으로 하여 이 기준 음압에 대한 측정 음압(P_1)의 비(ratio)를 대수(logarithm)로 나타낸 것을 dB SPL($\text{dB SPL} = 20 \log P_1/P_0$)로 정한다. 1 kHz 자극음을 기준으로 볼 때 정상 청력을 가진 성인의 가청 역치인 0 dB HL은 7.5 dB SPL에 해당한다. 반면 click음이나 tone burst음과 같이 짧은 지속시간을 가지는 자극음의 단위는 dB nHL(normal HL, 심리음향적 단위)과 dB peSPL(peak equivalent SPL, 물리적 단위)로 정한다. 0 dB nHL은 10~15명의 정상 청력을 가진 성인에게 초당 10~20회의 빈도로 click음을 주고 구한 가청역치이다. Click음과 같이 지속시간이 매우 짧은 자극음의 물리적 음압은 실제로 측정하기 어렵기 때문에 오실로스코프(oscilloscope)에 나타나는 click 파형(voltage waveform)의 정점(peak)을 기준으로 하여, 이와 동일한 진폭을 가지는 순음의 음압(dB SPL)을 차용하되 dB peSPL로 표현한다. 정상 청력을 가진 성인의 가청 역치인 0 dB nHL의 물리적 강도는 약 29.9 dB peSPL에 해당한다.^{2,3)}

자극 빈도

자극 빈도는 초당 10~20회 정도가 적절하다. 자극음에 의해 흥분된 신경섬유가 안정되기 위해서는 최소한 20 ms 정도의 자극 간격이 필요한데, 자극 빈도가 많아지면 자극 간격이 짧아지기 때문에 진폭이 감소하여 파형 분석이 어려워진다.

변환기

변환기(transducer)는 검사기에서 최초 발생한 전기신호

(electrical signal)를 피검자가 들을 수 있는 음향신호(acoustic signal)로 변환하는 장치이다. 변환기에는 기도 청력 검사를 위한 supra-aural earphone, insert earphone, 그리고 골도 청력 검사를 위한 bone oscillator의 세 가지가 있으며, 임상에서는 주로 insert earphone과 bone oscillator가 이용된다(Fig. 4).

Insert earphone

Insert earphone은 변환기, 280 mm 길이의 튜브, 그리고 외이도에 삽입되는 충전마개(foam plug)로 구성된다(Fig. 4). 골전도로 인한 소리의 양이감쇄는 약 40~50 dB 정도이다. 따라서 supra-aural earphone을 사용할 경우, 자극음의 강도가 40~50 dB보다 클 때에는 차폐를 고려하여야 한다. 반면 insert earphone을 사용할 경우, 외이도에 삽입되는 충전마개가 외이도 연골부에만 접촉하기 때문에 양이감쇄의 효과가 커서 70 dB 정도의 자극음에서도 교차(crossover)가 일어나지 않는다. 따라서 insert earphone을 사용하면 청성뇌간반응 검사시 차폐가 필요한 경우가 거의 없어 검사가 편리한 장점이 있다. 또한 완충마개는 외이도 입구를 폐쇄하여 환경잡음을 약 30 dB 정도까지 줄여 주어, 평균가산 횟수를 줄이는 데 도움이 된다. 영유아의 경우 supra-aural earphone은 이개와 연골성 외이도를 눌러 외이도를 폐쇄시킴으로 인해 전음성 난청의 결과를 초래할 가능성이 있는데 반해, insert earphone은 외이도의 개방성을 안정적으로 유지해 주고, 어느 정도의 움직임에도 안정적으로 earphone의 위치를 유지해 준다.⁴⁾

Bone oscillator

골도 청력 측정이 필요한 경우 bone oscillator를 사용한다. bone oscillator는 유양돌기 혹은 전두부에 부착하여 검사할

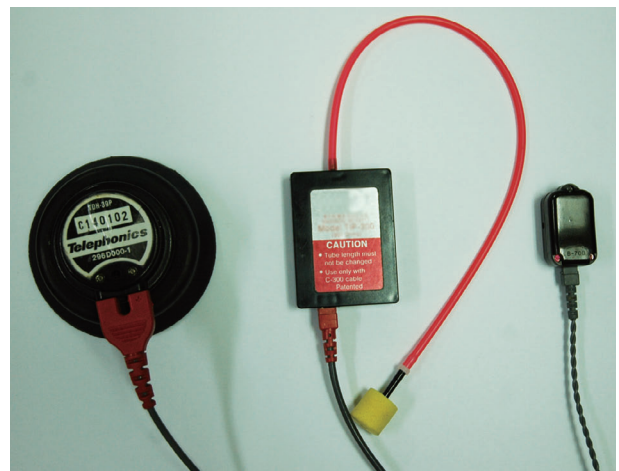


Fig. 4. The transducers for presenting acoustic signals in the measurement of auditory brainstem responses. Supra-aural earphone, insert earphone, and bone oscillator are shown from left to right.

수 있는데 임상에서는 주로 유양돌기에 부착하여 사용한다. Click음을 자극음으로 하는 경우, insert earphone을 사용하면 넓은 주파수 범위에 걸쳐 비교적 동일한 강도의 출력을 보이는 데 반해, bone oscillator의 경우 2,000 Hz에 에너지가 집중되어 있고, 최고 출력도 35 dB nHL을 넘지 못한다.⁴⁾

차 폐

Insert earphone을 사용할 경우 click음의 양감쇄는 약 65 dB 정도로 기도 청성뇌간반응 검사시 차폐가 필요한 경우는 드물다. 단, 일측성 난청에서 나쁜쪽 귀에 70 dB nHL 이상의 자극음을 가할 때, 혹은 반응의 잠복기가 비정상적이거나 I 파가 나타나지 않을 때는 교차청취의 가능성이 있으므로 차폐를 고려하여야 한다. 차폐음으로는 광대역 잡음(broad-band noise)을 사용하고, 차폐음의 크기는 50 dB nHL로 하면 거의 모든 경우에 과차폐나 저차폐의 우려 없이 안정적인 차폐가 가능하다.⁴⁾

기록 조건

기록전극은 활성전극(active electrode), 기준전극(reference electrode), 접지전극(ground electrode)으로 구성된다. 일반적으로 활성전극은 전두정중부(frontal pole zero, Fpz)나 두정부(central zero, Cz), 기준전극은 검사측 이개, 접지전극은 반대측 이개에 부착한다. 모든 전극의 저항은 3 k Ω 이하가 적당하고, 최대 5 k Ω 를 넘지않도록 한다. 기록시간(analysis time)은 V파의 최대 잠복기를 고려하여 10~15 ms 정도로 설정한다.

청성뇌간반응은 매우 약한 전위를 가지는 신경반응이기 때문에 시각적으로 확인 가능한 반응을 얻기 위해서는 증폭이 필요하며, 증폭기(amplifier)를 이용해 약 100,000배 정도로 반응을 증폭하여 기록한다. 청신경과 뇌간에서 발생하는 전기신호를 제외한 불필요한 신호들, 즉 주변 전자기기의 전위, 근전위, 뇌파 등을 배제하여 신호대 잡음비를 향상시키기 위해 필터(filter)를 사용한다. 고역통과 필터(high pass filter)는 50~300 Hz, 저역통과 필터(low pass filter)는 3,000 Hz 정도로 설정한다. 필터를 사용하더라도 불필요한 잡음을 완전히 배제할 수 없기 때문에 평균가산을 통해 주변잡음을 상쇄시킨다. 평균가산 횟수는 1,000회 이상을 추천하며 만일 잡파의 혼입이 적으면 평균가산 횟수를 줄일 수 있다.

청성뇌간반응 역치를 통한 청력 역치의 예측

청성뇌간반응 역치 측정

청성뇌간반응의 역치는 V파가 나타나는 최소 강도로 정한

다. 0 dB nHL이 정상 청력을 가진 성인의 click음에 대한 가청역치이지만, 정상 청력인에서 V파는 10 dB nHL 이하에서는 기록되지 않는다. 검사실마다 검사기기, 배경소음, 전기장의 상태 등이 다르고 이에 따라 정상 청력인 V파의 역치 또한 달라질 수 있기 때문에, 각 검사실마다 정상 청력을 가진 성인을 대상으로 청성뇌간반응 검사를 시행하여 정상치에 대한 기준을 가지는 것이 필요하며 항상 일정한 검사실 환경을 유지하는 것이 중요하다.

일반적으로 청성뇌간반응 역치 강도에서 V파의 잠복시간은 7.5~8.0 ms 이상이다. 자극 강도의 증가에 따라 잠복시간은 평균 0.38 ms/10 dB 정도의 비율로 감소하는데, 60 dB nHL 이상의 강도에서는 잠복시간의 단축이 현저히 줄어든다. 75~90 dB nHL 범위의 강자극에서는 V파의 잠복시간은 5.5~6.0 ms 정도이다.⁵⁾ 잠복시간은 성별, 체온, 나이 등의 요인에 따라 다소간의 차이가 있으나, 역치에는 영향을 미치지 않는다.

시각적으로 확인 가능한 최소 진폭은 약 0.05 μ V이다. 하지만 이는 배경잡파(background noise)에 의해 크게 영향을 받기 때문에, 검사시 배경소음을 최소화하고 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 강자극에서의 V파의 진폭은 0.5 μ V 정도이고, 대개 1.0 μ V를 넘지 않는다. 자극 강도가 증가할수록 진폭도 증가하는데, 잠복기와 마찬가지로 증가 정도는 비선형적이다.⁶⁾

청성뇌간반응 역치를 통한 청력 역치의 예측

Click음과 tone burst음에 대한 청성뇌간반응 역치와 순음청력역치는 강한 상관관계를 가지고 있어 청성뇌간반응 역치를 통해 순음청력역치를 예측할 수 있다.⁷⁻⁹⁾ Sininger⁸⁾는 소아에서 click음에 대한 청성뇌간반응 역치와 평균 순음청력역치가 강한 상관관계($r=0.979$)를 가지고 있다고 하였다. Stapells 등⁹⁾도 평균연령 31개월의 아동들을 대상으로 한 연구에서, notched-noise로 차폐한 tone음을 이용한 청성뇌간반응 역치와 순음청력역치가 강한 상관관계를 가지고 있으며, 상관계수가 500 Hz에서 0.94, 2,000 Hz에서 0.95, 4,000 Hz에서 0.97로 거의 일대일에 가까운 상관관계를 보인다고 하였다. 국내 보고에서는 Kim 등¹⁰⁾이 평균연령 3세 4개월의 아동을 대상으로 한 연구에서 청성뇌간반응 역치와 순음청력역치가 강한 상관관계를 가지며, 500 Hz에서 0.98, 1 kHz에서 0.93, 2/4 kHz 평균 순음청력과 click 청성뇌간반응 역치간에는 0.92의 상관계수를 보인다고 하였다.

이와 같이 상관관계가 높다는 것은 두 가지 역치의 차이가 일정하다는 의미이다. 일반적으로 정상청력을 가진 피검자에서 청성뇌간반응 역치는 순음청력역치보다 약 10~15 dB 이내로 높게 측정된다.¹¹⁾ 하지만 이 차이는 검사 기기의 종류, 검사

실의 소음 수준, 검사자의 파형 분석 기준 등 검사실의 환경에 따라 달라질 수 있기 때문에, 각 검사실마다 청성뇌간반응 위치와 순음청력역치간의 차이값을 확립하여 실제 검사결과 해석에 적용하여야 한다.

청성지속반응을 이용한 청력역치의 예측

청성지속반응은 지속적으로 가해지는 변조음(modulated tone) 자극에 의해, 청각전달로에서 지속적으로 발생하는 전기적 신호이다.¹⁰⁾ 청성뇌간반응이 click음과 같은 짧은 지속시간을 가지는 자극음에 의해 청신경과 뇌간에서 발생하는 동기화된 활동전위를 기록하는 검사인 것과 대별된다.

청성지속반응의 발생기원(neural generator)은 자극음의 변조주파수에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다. 청성지속반응의 위상을 시간으로 환산하면 반응의 잠복기를 계산할 수 있는데, 이를 이미 발생기원이 밝혀진 다른 청각유발반응의 잠복기와 비교하여 발생기원을 추정할 수 있다. 변조주파수가 20 Hz 이하일 경우에는 일차청각피질과 연합피질이, 20~60 Hz 일 경우에는 중뇌, 시상, 일차청각피질이, 그리고 60 Hz 이상 일 때는 뇌간이 발생기원으로 추정된다. 변조주파수가 낮아지면 피검자의 각성 상태가 검사 결과에 큰 영향을 미치기 때문에, 일반적으로 청성지속반응 검사는 70 Hz 이상의 변조주파수를 사용한다. 따라서 임상에서 측정하는 청성지속반응의 기원은 뇌간이라고 볼 수 있다.¹²⁾

청성지속반응의 자극음

청성지속반응에서는 순음(pure tone)의 진폭이나 주파수를 변조(modulation)시킨 변조음(modulated tone)이 자극음으로 이용된다. 이용되는 순음의 주파수를 반송주파수(carrier frequency)라고 하고 변조의 빈도를 변조주파수(modulation frequency)라고 한다. 순음의 진폭만을 변조하는 것을 진폭변조(amplitude modulation, AM), 주파수만을 변조하는 것을 주파수변조(frequency modulation, FM), 그리고 진폭과 주파수를 동시에 변조하는 것을 혼합변조(mixed modulation)라고 하며, 가장 큰 진폭의 반응을 얻을 수 있는 혼합변조음이 주로 이용되고 있다.¹³⁾ 진폭변조의 다른 형태인 exponential modulation(AM²) 방식도 진폭의 크기를 증가시키며, 특히 500 Hz와 4 kHz 자극음에 대한 반응의 크기를 증가시킨다.

이렇게 진폭이나 주파수가 주기적으로 변조된 순음을 지속적으로 자극하는 청성지속반응은 자극음의 특성으로 인해 청성뇌간반응과 대비되는 다음의 몇 가지 특징을 가진다. 청성뇌간반응의 자극음은 지속시간이 매우 짧기 때문에 최대 자극 강도가 90~100 dB nHL 정도로 제한되어 있는 반면, 청

성지속반응에서는 음자극이 지속적이기 때문에 최대 자극 강도가 120 dB HL 이상으로 심도 난청 환자의 잔존 청력 평가에 유용하다. 청성지속반응의 자극음은 변조된 순음이므로 주파수 특이성을 가지는데, 변조음의 실제 주파수 범위는 '반송주파수-변조주파수'에서 '반송주파수+변조주파수'까지로 반송주파수에서 가장 큰 에너지를 가지고, '반송주파수±변조주파수'에서 약한 에너지를 가진다. 변조주파수는 다양하게 설정할 수 있으나, 변조주파수가 70 Hz 이하가 되면 수면 상태 등 각성수준이 떨어질 경우 파형이 잘 기록되지 않기 때문에 실제 검사에는 70 Hz 이상의 변조주파수를 사용한다. 주파수와 진폭을 함께 변조하는 혼합변조음을 사용할 경우보다 큰 진폭을 가지는 반응을 얻을 수 있는 장점이 있으나, 진폭을 변조할 경우 주파수 특이성이 저하되기 때문에 진폭변조는 20%를 넘지 않는 것이 좋다.

서로 다른 반송주파수를 가지는 여러 자극음을 변조주파수를 서로 다르게 하여 자극하면, 각 자극음에 대한 반응을 동시에 기록할 수 있어 검사시간을 단축할 수 있다.¹⁴⁾ 이 경우 자극음간의 간섭을 피하기 위해 일측 귀에 가해지는 자극음 간에는 1옥타브 이상의 주파수 차이를 유지하고, 80 dB HL 이상의 강자극음은 사용하지 않도록 한다.

기록 조건

진폭이나 주파수가 주기적으로 변조된 순음이 지속적으로 내이를 자극하면 청각전달로에서는 자극음의 변조(modulation)에 의해 유발된 에너지가 자극음의 변조주파수와 동일한 주파수를 가지는 뇌파가 지속적으로 유발되는데 이것을 기록한 것이 청성지속반응이다. 음 자극 동안 발생한 복잡한 뇌파 중 청각전달로의 반응을 추출하는데는 fast Fourier transformation(FFT) 방식이 이용된다. 즉, 음자극 동안 time domain으로 기록된 뇌파를 FFT 방식을 통해 frequency domain으로 전환한 후 자극음의 변조주파수와 동일한 주파수를 가지는 뇌파 성분의 진폭(amplitude)과 위상(phase)을 분석하여 반응의 유무를 결정한다(Fig. 5). 반응의 유무를 결정하는 분석 방법에는 phase coherence, magnitude squared coherence(MSC), 그리고 F-test 등이 있다.¹⁴⁻¹⁸⁾ Phase coherence를 이용하는 방식은 지속적으로 기록된 반응의 위상이 통계적으로 유의하게 일치하면 반응이 있는 것으로, 위상의 일치도에 통계적 유의성이 없으면 반응이 없는 것으로 처리하는 방식이다.¹⁴⁻¹⁶⁾ 반응의 위상만을 분석하는 phase coherence 방식에 비해 MSC 방식은 위상과 진폭을 함께 분석하는 방식이다. 즉 위상이 일치하고 진폭이 클수록 MSC 값은 증가하는데, 반응의 MSC 값이 클수록 반응이 있을 확률은 높아지며 통계처리를 통해 반응의 유무가 결정된다.^{14,17)} F-test 방

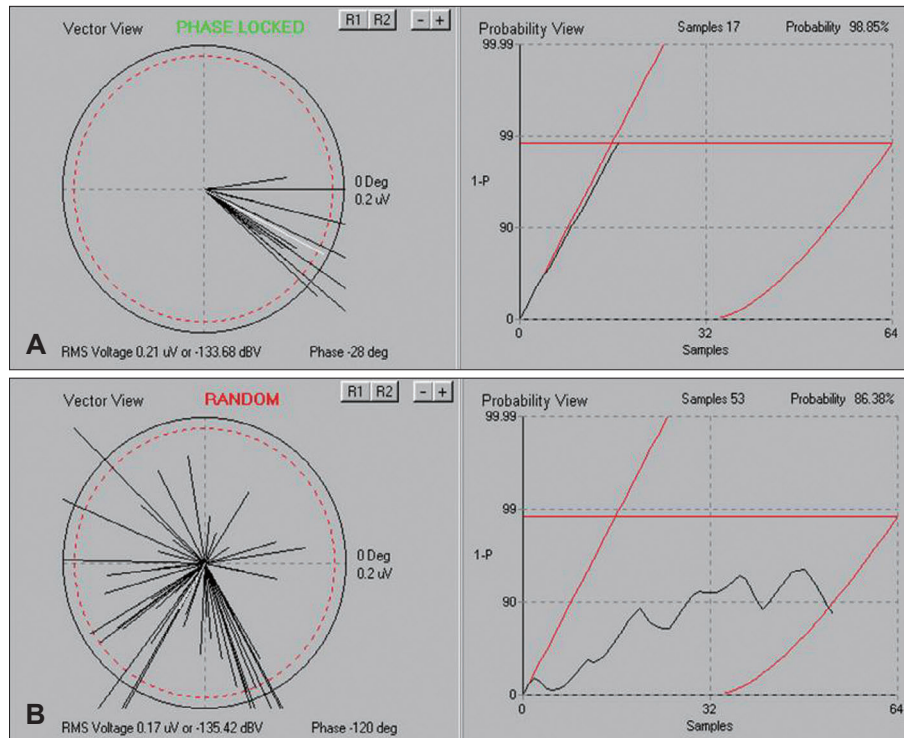


Fig. 5. Auditory steady-state response results recorded from a 3-month old male. The left panel is vector view showing the amplitude and relative phase of the spectral component equal to the modulation frequency. The right panel is probability view showing the probability that the patient's response is either phase-locked (phase coherent) or random (non-phase coherent) with the stimulus. Phase locked response (A). Random result (B).

식은 자극음의 변조주파수와 동일한 주파수를 가진 뇌파성분의 진폭이 주변 뇌파의 진폭과 통계적으로 유의한 차이가 있으면 반응이 있는 것으로 처리하는 방식이다.¹⁸⁾ 반응의 유무는 검사기기에 내장된 자동화 판정 알고리즘(automatic detection algorithm)에 의해 결정되므로 검사가 쉽고 검사자의 주관이 배제되어 객관성을 높일 수 있는 장점이 있다.

반응의 수집을 위한 전극의 부착은 청성뇌간반응에서와 유사하다. 두정부(vertex, Cz)나 높은 이마(high forehead, Fz)에 활성(active)전극을, 검사측 유양돌기에 기준(reference)전극을, 그리고 반대측 유양돌기나 전두정중부(Fpz)에 접지(ground)전극을 부착한다.

청성지속반응 역치를 통한 청력역치의 예측

청성지속반응 역치 측정

지속적인 음자극이 가해지는 동안 발생한 뇌파를 FFT 방식에 의해 frequency domain으로 전환한 다음 자극음의 변조주파수와 동일한 주파수를 가지는 뇌파 성분을 찾아 진폭과 위상을 분석한다. 현재 임상에서는 Grason Stadler/VIA-SIS사의 Audera[®]와 Bio-Logic Systems사의 MASTER[®]의 두 가지 검사기기가 주로 보급되어 있는데, Audera[®]에서는 위상의 일치 정도, 즉 phase coherence가 통계적으로 유의한 수준($p < 0.03$)에 이르면 반응이 있는 것으로 처리되며,

MASTER[®]에서는 반응의 진폭이 주변 뇌파의 진폭보다 통계적으로 유의($p < 0.05$)하게 클 경우 반응이 있는 것으로 처리된다. 반응이 나타나는 최소 자극음의 강도를 역치로 정한다.

청성지속반응 역치를 통한 청력역치의 예측

청성지속반응역치는 순음청력역치와 상관관계가 매우 높은 것으로 보고되고 있다.¹⁹⁻²²⁾ Rance 등¹⁹⁾은 변조주파수 90 Hz의 혼합변조음을 사용하여 청성지속반응을 기록한 결과, 순음청력역치와의 상관관계가 250 Hz에서는 0.96, 2,000 Hz와 4,000 Hz에서는 0.99로 높게 나타났고, 난청의 정도가 심하고 자극음의 주파수가 높을수록 두 가지 역치의 차이는 작았다고 보고하였다. Dimitrijevic 등²⁰⁾도 청성지속반응역치가 순음청력역치와 강한 상관관계($r \geq 0.85$)를 보여, 청성지속반응역치로 순음청력역치를 예측할 수 있다고 하였다. 그리고 Aoyagi 등²¹⁾과 Cone-Wesson 등¹²⁾은 동일 피검자에 대해 청성지속반응과 청성뇌간반응의 두 가지 객관적 청력검사의 역치와 순음청력역치를 비교한 결과, 두 가지 검사 역치와 순음청력역치는 높은 상관관계가 있으며, 순음청력역치를 예측하는데 있어 두 가지 검사간에 유의한 차이가 없다고 보고하였다.

이와 같이 청성지속반응은 높은 정확도를 가지고 청력역치를 예측할 수 있는 검사도구라고 할 수 있다. 청성지속반응 역치를 통해 청력역치를 예측하고자 할 때 다음의 몇 가지 사항을 고려하도록 한다.

검사실 별 기준의 설정

청성지속반응 검사기기를 제작한 제조사마다 정상 청력군과 난청 환자군을 대상으로 청성지속반응 검사와 순음청력검사를 시행하여 두 검사 위치 간 차이값을 주파수별, 그리고 난청 정도별로 구하여 검사기기에 내장하고 있다. 따라서 청성지속반응의 역치가 정해지면 순음청력역치의 예측값이 자동으로 출력된다. 실제로 Audera[®] 청성지속반응 검사기기의 경우 기존의 다양한 연구 결과를 토대로 각 주파수별로 설정된 회귀식(regression formula)에 의해 청력역치의 추정치와 오차범위가 함께 표시된 청력도(audiogram)를 제공한다. MASTER[®] 검사기기에서는 청성지속반응의 역치에서 일률적으로 10 dB을 뺀 수치를 청력역치의 예측치로 제시한다.

청성지속반응의 역치와 청력역치 간의 차이는 각 검사실의 환경에 따라 달라질 수 있으므로 검사기기에서 자동으로 출력되는 예측치에 전적으로 의존하기보다는 각 검사실마다 청성지속반응 역치와 순음청력역치의 차이에 대한 자체적인 기준을 설정할 필요가 있다.

정상 청력을 가진 피검자의 청성지속반응

청성지속반응 역치와 순음청력역치는 대체적으로 전주파수에 걸쳐 강한 상관관계를 가진다. 하지만 청력이 정상에 가까울수록 청성지속반응 역치와 순음청력역치의 차이가 커지고, 순음청력역치와의 상관관계가 약해지는 경향이 있다.^{19,22-25} 특히 청력이 정상인 경우 청성지속반응의 역치는 50~60 dB HL까지 나타날 수 있어, 정상 청력과 보청기 처방이 필요한 정도 혹은 중등도 난청을 일관되게 구별해내지 못하는 단점을 가진다고 할 수 있다.^{26,27} 따라서 청성지속반응 검사에서 60 dB HL 이하의 역치를 보일 경우 청력역치 예측에 대한

판단을 유보하는 것이 좋다(Fig. 6).

고도 감각신경성난청 환자의 청성지속반응

난청의 정도가 심할수록 청성지속반응 역치와 순음청력역치 간의 상관관계는 더 강해지고 두 역치의 차이는 작아진다. 따라서 고도 혹은 심도 난청 환자에 있어 청성지속반응은 신뢰할 수 있는 청력역치의 예측치를 제공한다고 할 수 있다. 또한 청성지속반응의 자극음은 출력 한계가 120 dB HL 이상으로 매우 높기 때문에, 청성뇌간반응에서 최고 강도 자극음(90~100 dB nHL)에도 반응이 없는 심도 난청 환자의 경우, 청성지속반응에서는 잔존 청력을 확인할 수 있는 장점이 있다(Fig. 7).

청각신경병증

청각신경병증을 가진 경우, 청성뇌간반응은 나타나지 않거나 매우 비정상적인 파형을 보이는 데 비해, 청성지속반응은 정상적으로 나타날 수 있다(Fig. 8). 청각신경병증 환자에서 청성지속반응이 나타나는 경우에는 70 dB HL 이상의 강자극에서 나타나는데, 이는 신경반응이 아닌 cochlear microphonic이거나 artifact에 의한 반응으로 볼 수 있다(Sininger YS, personal communication with permission, April 30, 2009). 청성지속반응으로는 청각신경병증을 진단할 수 없고, 실제 청력 역치와 상관관계가 매우 약해 역치 측정의 의의도 없다.²⁷⁻²⁹

골도 청력의 측정

골도 자극에 대한 청성지속반응의 측정도 가능하며, 정상 청력을 가진 소아에서 골도 청성지속반응의 역치는 평균 20 dB HL 정도이다. 하지만 40 dB HL 이상 강도의 골도 자극

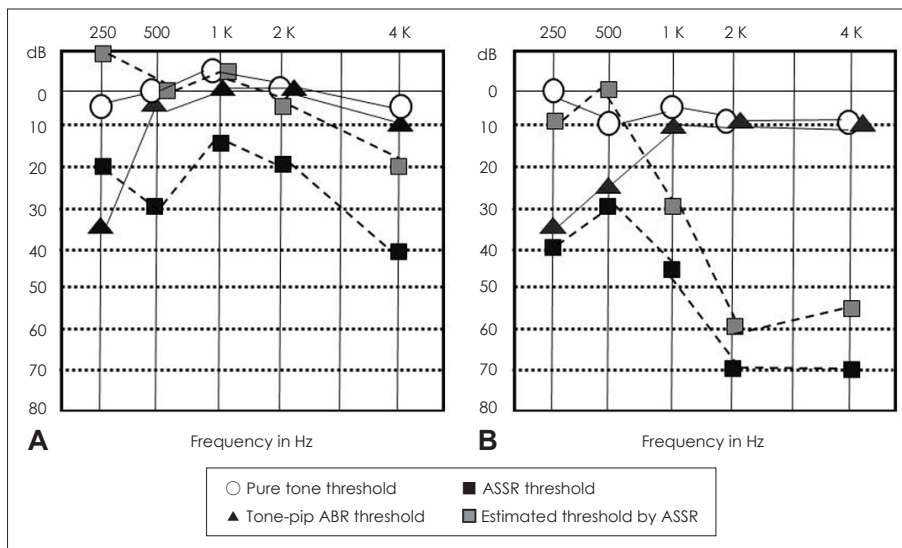


Fig. 6. Comparison of pure tone thresholds with the thresholds of auditory brainstem response (ABR) and auditory steady-state response (ASSR) in two subjects with normal hearing acuity. Estimated thresholds are the predicted hearing thresholds based on ASSR thresholds. A 20-year-old female shows good agreement among thresholds of three hearing tests (A). In a 28-year-old female, pure tone thresholds are in good agreement with ABR thresholds. However, ASSR thresholds and estimated thresholds are much higher than pure tone thresholds (B).

음에서는 artifact에 의한 반응이 나타날 수 있어 주의해야 한다.^{20,30)} 이는 위신호(aliasing phenomenon)이거나 전정유발근전위(vestibular evoked myogenic potential)에 의한 반응으로 추정된다. 따라서 청성지속반응을 이용하여 골도 청력을 측정하고자 할 때는 낮은 강도의 자극음에 국한하여 사용할 수 있으며, 40 dB HL 이상의 강도에서 역치가 측정되는 경우 위반응(spurious response)의 가능성을 고려해야 한다.

행동반응 청력검사를 통한 역치 검증

청성뇌간반응과 청성지속반응을 통해 피검자의 청력역치를 예측할 수 있다. 하지만 청성지속반응과 청성뇌간반응 검사는 소리자극에 의해 단지 뇌간에서 발생하는 활동 전위를 기록

한 것에 불과하기 때문에, 이 검사들의 역치를 대뇌청각피질에서 최종적으로 결정되는 청력역치로 해석해서는 안 된다. 실제로 소리를 전혀 인지하지 못하는 무뇌증 환자에서도 정상 파형과 정상 역치를 가지는 청성뇌간반응이 기록될 수 있다.¹¹⁾

따라서 청성뇌간반응과 청성지속반응을 통해 청력역치를 예측한 경우에도, 행동반응 청력검사를 시행하여 피검자의 청력역치를 검증하는 노력이 필요하다. 비록 영유아에서는 시행하기 어려울 수 있으나, 숙련된 검사자에 의한 반복 측정으로 신뢰할 수 있는 청력역치를 얻을 수 있다.³¹⁾ 피검자가 어려서 순음청력검사를 시행하기 어려운 경우에는 행동관찰 청력검사(출생~6개월), 시각강화 청력검사(6~36개월), 그리고 유희 청력검사(36개월 이후)를 시행할 수 있다.

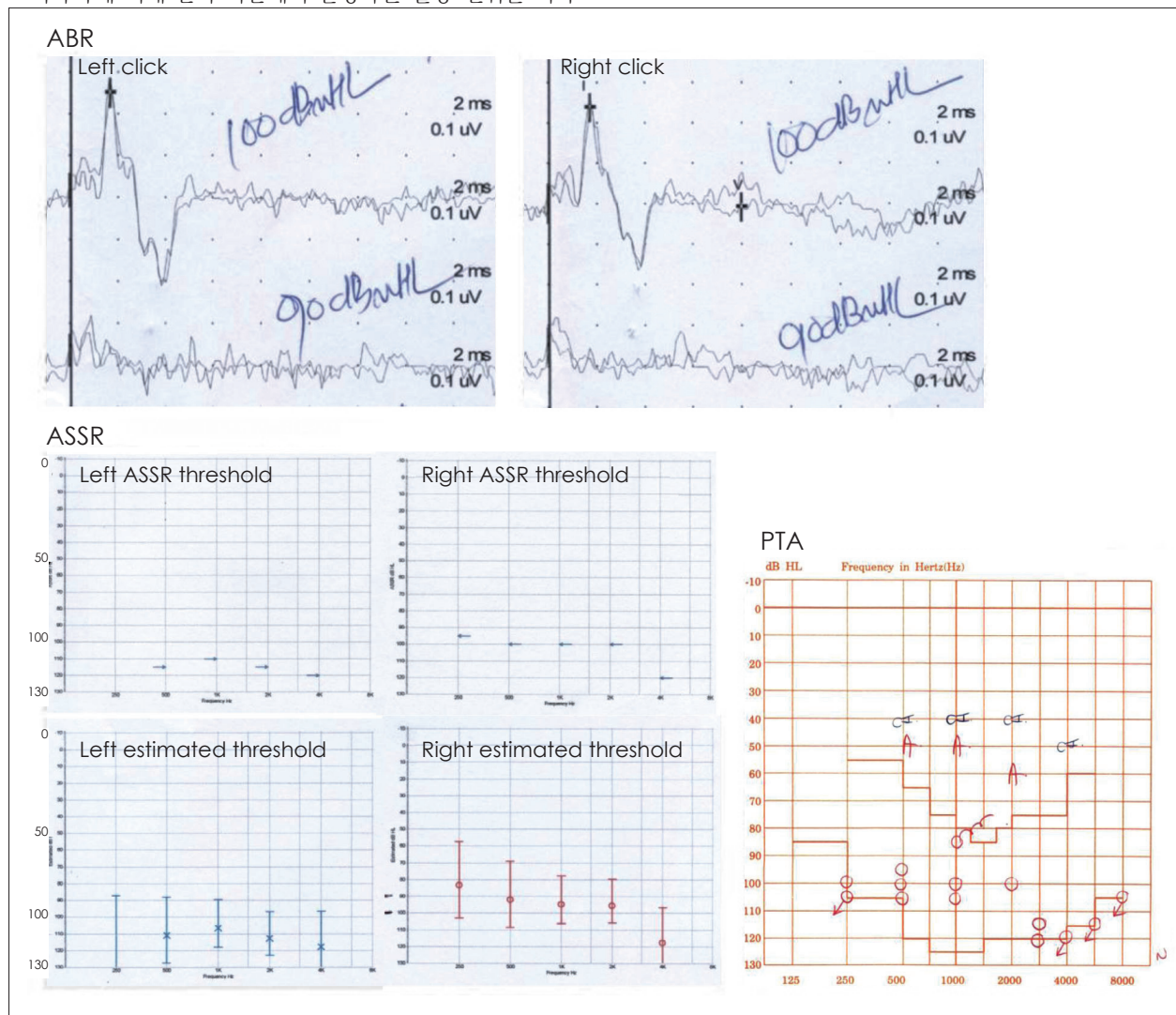


Fig. 7. The test results from a male subjects with profound sensorineural hearing loss. Auditory brainstem response (ABR) obtained at 5 months of age showed no response at maximum intensity stimuli for both ears. However, auditory steady-state response (ASSR) obtained at 1 year 4 months of age demonstrated thresholds at about 115 dB HL for left ear and 100 dB HL for right ear. He received cochlear implantation for left ear at the age of 1 year 6 months. Pure tone audiometry (PTA) obtained at 3 year 6 months of age showed good agreement between ASSR thresholds and pure tone thresholds.

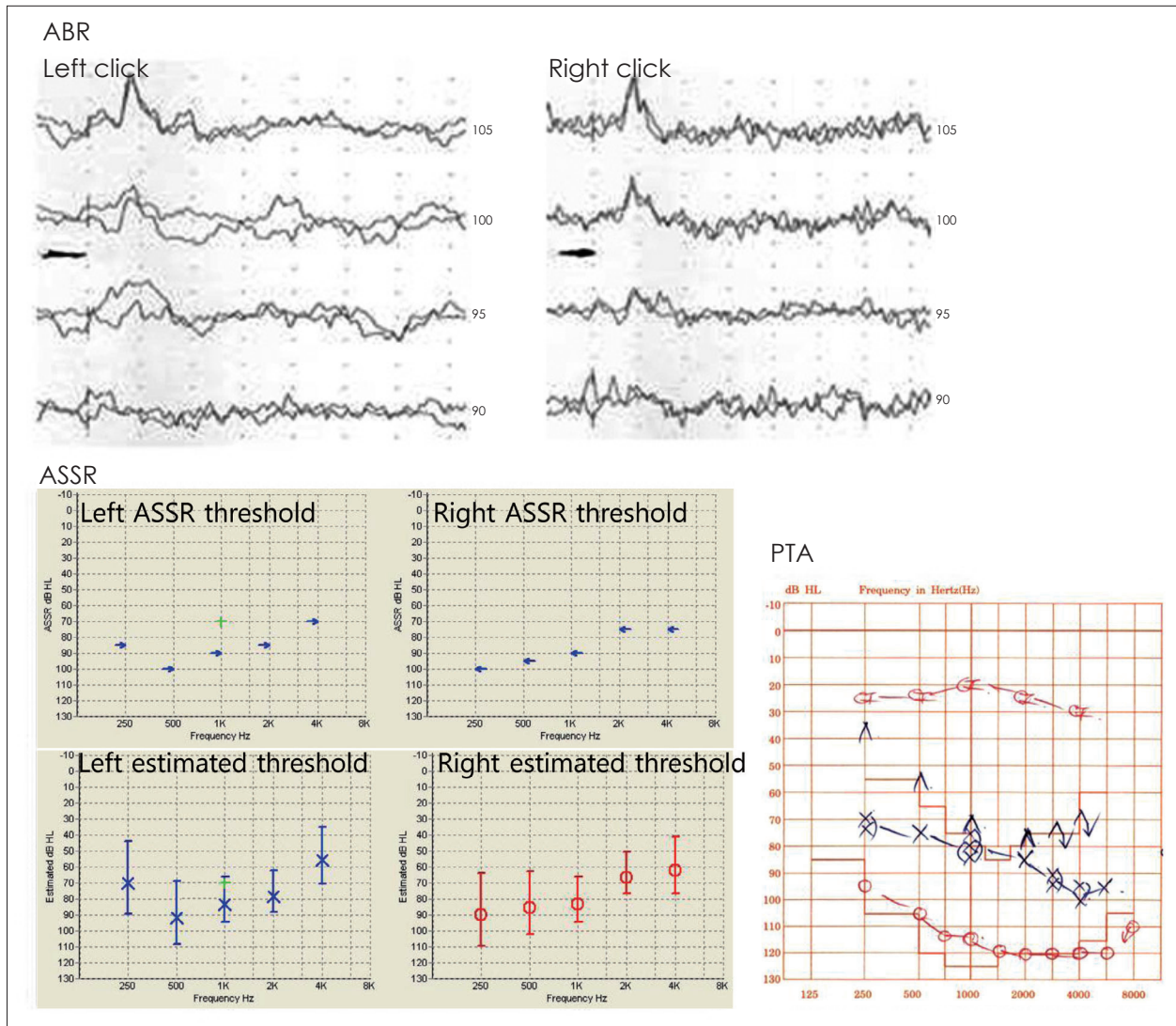


Fig. 8. The tests results from a 7-months-old male subject with auditory neuropathy. Auditory brainstem response (ABR) showed no response at maximum intensity click stimuli. However, auditory steady-state response (ASSR) could be recorded at the stimuli of 70-100 dB HL. He received cochlear implantation for right ear at the age of 2 years 9 months. Pure tone audiometry (PTA) showed no agreement between ASSR thresholds and pure tone thresholds of left ear.

결론

난청을 가진 영유아를 위한 청각재활의 시작은 회화 음역에 걸친 주파수별 청력역치의 측정이며 이를 위해 청성뇌간반응과 청성지속반응이 주로 이용된다. 청성뇌간반응에 이용되는 자극음은 주파수 특이성은 다소 부족하지만, click음과 몇 개 주파수의 tone burst음을 이용한 청성뇌간반응 검사를 통해 전체적인 청력도(audimetric configuration)를 안정적으로 얻을 수 있다. 다만 역치의 판정에 검사자의 주관이 개입되고 저 주파수 tone burst음에 대한 반응은 역치 판독이 어려울 수 있으며, 자극음의 최대 강도가 90~100 dB nHL 이하로 제한되

어 있는 단점이 있다. 청성지속반응은 주파수 특이성이 높고 자극음의 최대 강도가 120 dB HL 이상으로 심도 난청 환자의 청력역치 측정이 용이하며 모든 검사과정이 자동화되어 있다는 장점이 있다. 하지만 청력이 정상에 가까울수록 역치의 정확도가 떨어지고, 청각신경병증을 고도 감각신경성난청으로 오진할 가능성이 있다.

영유아의 주파수별 청력역치를 예측하고자 할 때에는 이러한 두 가지 검사의 장단점을 잘 파악하여 상호보완적으로 적용하여야 한다. 즉, click음과 tone burst음을 이용한 청성뇌간반응을 먼저 시행하여 청력 역치를 구하고, 주파수별 청력 역치의 재확인이나 심도 난청환자의 잔존 청력 평가 등 추가적인 정보가 필요한 경우 청성지속반응을 시행하는 것이

오류 없이 영유아의 청력역치를 예측할 수 있는 방안으로 사료된다.

Acknowledgments

This work was supported by the Dong-A University research fund.

REFERENCES

- Erenberg A, Lemons J, Sia C, Trunkel D, Ziring P. Newborn and infant hearing loss: detection and intervention. American Academy of Pediatrics. Task Force on Newborn and Infant Hearing, 1998-1999. Pediatrics 1999;103(2):527-30.
- Burkard R. Sound pressure level measurement and spectral analysis of brief acoustic transients. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1984;57(1):83-91.
- Stapells DR, Picton TW, Smith AD. Normal hearing thresholds for clicks. J Acoust Soc Am 1982;72(1):74-9.
- Hall JW 3rd. Introduction to Auditory Evoked Response Measurement. In: Dragin SD. editor. New handbook of Auditory evoked responses. 1st ed. Florida, USA: Pearson Education;2006. p.58-108.
- Gorga MP, Worthington DW, Reiland JK, Beauchaine KA, Goldgar DE. Some comparisons between auditory brain stem response thresholds, latencies, and the pure-tone audiogram. Ear Hear 1985; 6(2):105-12.
- Hecox K, Galambos R. Brain stem auditory evoked responses in human infants and adults. Arch Otolaryngol 1974;99(1):30-3.
- Stapells DR, Picton TW, Durieux-Smith A, Edwards CG, Moran LM. Thresholds for short-latency auditory-evoked potentials to tones in notched noise in normal-hearing and hearing-impaired subjects. Audiology 1990;29(5):262-74.
- Sininger YS. Auditory brain stem response for objective measures of hearing. Ear Hear 1993;14(1):23-30.
- Stapells DR, Gravel JS, Martin BA. Thresholds for auditory brain stem responses to tones in notched noise from infants and young children with normal hearing or sensorineural hearing loss. Ear Hear 1995;16(4):361-71.
- Kim LS, Jeong SW, Heo SD, Hwang CH. Comparison of auditory brainstem response and auditory steady-state response thresholds in infants and young children. Korean J Otolaryngol-Head Neck Surg 2004;47(4):304-10.
- Brown CJ. Electrophysiologic assessment of hearing. In: Cummings CW, Flint PW, Harker LA, et al., editors. Cummings Otolaryngology-Head & Neck Surgery. 4th ed. USA: Elsevier Mosby Inc;2005. p.3466-82.
- Cone-Wesson B, Dowell RC, Tomlin D, Rance G, Ming WJ. The auditory steady-state response: comparisons with the auditory brainstem response. J Am Acad Audiol 2002;13(4):173-87; quiz 225-6.
- Cohen LT, Rickards FW, Clark GM. A comparison of steady-state evoked potentials to modulated tones in awake and sleeping humans. J Acoust Soc Am 1991;90(5):2467-79.
- Champlin CA. Method for detecting auditory steady-state potentials recorded from humans. Hear Res 1992;58(1):63-9.
- Fridman J, Zappulla R, Bergelson M, Greenblatt E, Malis L, Morrell F, et al. Application of phase spectral analysis for brain stem auditory evoked potential detection in normal subjects and patients with posterior fossa tumors. Audiology 1984;23(1):99-113.
- Stapells DR, Makeig S, Galambos R. Auditory steady-state responses: threshold prediction using phase coherence. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1987;67(3):260-70.
- Dobie RA, Wilson MJ. Analysis of auditory evoked potentials by magnitude-squared coherence. Ear Hear 1989;10(1):2-13.
- John MS, Picton TW. Human auditory steady-state responses to amplitude-modulated tones: phase and latency measurements. Hear Res 2000;141(1-2):57-79.
- Rance G, Rickards FW, Cohen LT, De Vidi S, Clark GM. The automated prediction of hearing thresholds in sleeping subjects using auditory steady-state evoked potentials. Ear Hear 1995;16(5):499-507.
- Dimitrijevic A, John MS, Van Roon P, Purcell DW, Adamonis J, Ostroff J, et al. Estimating the audiogram using multiple auditory steady-state responses. J Am Acad Audiol 2002;13(4):205-24.
- Aoyagi M, Suzuki Y, Yokota M, Furuse H, Watanabe T, Ito T. Reliability of 80-Hz amplitude-modulation-following response detected by phase coherence. Audiol Neurotol 1999;4(1):28-37.
- Cone-Wesson B, Rickards F, Poulis C, Parker J, Tan L, Pollard J. The auditory steady-state response: clinical observations and applications in infants and children. J Am Acad Audiol 2002;13(5):270-82.
- Lins OG, Picton TW, Boucher BL, Durieux-Smith A, Champagne SC, Moran LM, et al. Frequency-specific audiometry using steady-state responses. Ear Hear 1996;17(2):81-96.
- Perez-Abalo MC, Savio G, Torres A, Martin V, Rodríguez E, Galán L. Steady state responses to multiple amplitude-modulated tones: an optimized method to test frequency-specific thresholds in hearing-impaired children and normal-hearing subjects. Ear Hear 2001;22(3):200-11.
- Rance G, Rickards F. Prediction of hearing threshold in infants using auditory steady-state evoked potentials. J Am Acad Audiol 2002; 13(5):236-45.
- John MS, Brown DK, Muir PJ, Picton TW. Recording auditory steady-state responses in young infants. Ear Hear 2004;25(6):539-53.
- Rance G, Roper R, Symons L, Moody LJ, Poulis C, Dourlay M, et al. Hearing threshold estimation in infants using auditory steady-state responses. J Am Acad Audiol 2005;16(5):291-300.
- Rance G, Beer DE, Cone-Wesson B, Shepherd RK, Dowell RC, King AM, et al. Clinical findings for a group of infants and young children with auditory neuropathy. Ear Hear 1999;20(3):238-52.
- Rance G, Dowell RC, Rickards FW, Beer DE, Clark GM. Steady-state evoked potential and behavioral hearing thresholds in a group of children with absent click-evoked auditory brain stem response. Ear Hear 1998;19(1):48-61.
- Small SA, Stapells DR. Multiple auditory steady-state responses to bone-conduction stimuli in adults with normal hearing. J Am Acad Audiol 2005;16(3):172-83.
- Kim LS, Jeong SW, Lee YM, Kim JS. Cochlear implantation in children. Auris Nasus Larynx 2010;37(1):6-17.