

ABR에서 반복회수 설정에 의한 전력선 잡음의 제거

안주현^{1,2} · 김수찬^{1,2} · 남기창^{1,2} · 심운주³ · 김희남³ · 송철규⁴ · 김덕원²

¹연세대학교 생체공학 협동과정, ²연세대학교 의과대학 의학공학교실

³연세대학교 의과대학 이비인후과학교실, ⁴전북대학교 공과대학 생체공학과

(2001년 1월 26일 접수, 2001년 4월 11일 채택)

Power Line Noise Reductions in ABR by Properly Chosen Iteration Numbers

J.H. Ahn^{1,2}, S.C. Kim^{1,2}, K.C. Nam^{1,2}, Y.J. Shim³, H.N. Kim³, C.G. Song⁴, D.W. Kim²

¹Graduate Program in Biomedical Engineering, Yonsei University

²Department of Medical Engineering, College of Medicine, Yonsei University

³Department of Otorhinolaryngology, College of Medicine, Yonsei University

⁴Department of Bionics, College of Engineering, Chonbuk National University

(Received January 26, 2001. Accepted April 11, 2001)

요약: 객관적 청력 검사의 한 방법인 ABR(auditory brainstem response)은 청각 자극(auditory stimulation)에 대한 유발전위(evoked potential)를 측정하는 것으로서, 이는 신호 대 잡음비(SNR)가 매우 작아서 일반적으로 측정된 유발반응을 평균(ensemble average)을 취하여 반응 전위를 얻는다. 본 논문에서는 이 잡음들 중 ABR 반응에 중요한 영향을 미치는 전력선 잡음을 제거하는 방법으로 청각 자극 반복 회수의 영향을 밝혀 보고자 하였다. 이를 위하여, 전력선 잡음을 60 Hz의 주파수를 갖는 정현파 신호로 모델링을 하고, 평균을 취할 때 전력선 잡음의 에너지가 주기적으로 0이 되는 지점이 있음을 모의 실험을 통해서 확인하였다. 또한, 실제로 ABR 시스템을 구성하여 전력선에 의해 유발되는 60 Hz 신호를 적용하였을 때, 평균을 취한 신호의 에너지가 최소가 되는 주기가 제안한 주기와 일치함을 검증하였다. 전력선 잡음의 에너지가 0이 되는 주기는 전력선 잡음의 주파수와 자극 빈도의 관계에 의해서 결정되므로, ABR 측정에서 적용하는 각 자극 빈도에 해당하는 주기에 따른 반복회수를 적용함으로써, 전력선 잡음을 줄일 수 있으며, 보다 더 신뢰성 있는 ABR을 얻을 수 있다.

Abstract: ABR(auditory brainstem response) is one of the audiometry which measures objective hearing threshold level by acquiring electric evoked potentials emanated from auditory nerve system responding to an auditory stimulation. However, the obtained potentials which are largely interfered by power line noise, have extremely low SNR, thus ensemble average algorithm is generally used. The purpose of this study was to investigate the effect of iteration number in ensemble average on the reduction of the power line noise. The power line noise was modeled to be a 60 Hz sinusoidal signal and the energy of the modeled signal was calculated when it was averaged. It was verified by simulation that the energy had the periodic zero points for each stimulation rate, and 60 Hz signal induced by the power line was applied to the developed ABR system to confirm that the period of zero energy point was the same with that of the simulation. By the properly selected iteration number, power line noise could be reduced and more reliable ABR could be acquired.

Key words: ABR, 60 Hz power line noise, Iteration number, Stimulation rate, Evoked potentials, Audiometry

서 론

본 연구는 1999년 산업자원부 산업기반기술사업(spin-off 과제)으로 수행되었음.

통신저자: 김덕원 (120-752) 서울시 서대문구 신촌동 134
연세대학교 의과대학 의학공학교실
Tel. (02)361-5402 Fax. (02)364-1572
E-mail. kdw@yumc.yonsei.ac.kr

객관적 청력 검사의 한 방법인 ABR(auditory brainstem response)은 청각 자극(auditory stimulation)에 동기 되어 나타나는 유발전위(evoked potential)를 측정하는 것으로, 자발적인 반응을 얻기 힘든 피검사자의 청력 상태를 객관적으로 검사할 수 있을 뿐 아니라, 피검사자의 청각 역치(hearing

threshold level)를 정량화 할 수 있고, 표준 순음 청력 검사에서 보다 더 많은 진단 정보를 얻을 수 있다[1,2]. ABR의 신호대 잡음비(SNR)는 0.05에서 0.5사이로 매우 작으므로 일반적으로 앙상블 평균법(ensemble average)을 취하는 방법을 사용하여 신호를 얻는다[3,4]. 이 때 ABR에 영향을 미치는 잡음들 가운데 전력선 잡음을 제거하는 방법으로서 앙상블평균법을 위한 반복 회수(iteration number)의 적절한 값을 도출하고, 이를 검증하는 것이 본 논문의 목적이다.

전력선 잡음의 영향을 최소화하기 위하여 기본적으로 시스템을 전기적으로 차폐하고, 전기적 무 반향실에서 측정을 하나, ABR의 유발전위는 수 μV 이내의 작은 신호 크기를 가지므로 전력선 잡음의 상대적인 영향을 완전히 차단할 수 없는 경우가 생길 수 있다. 또한, 유발전위의 주파수 대역이 30 ~ 3000 Hz이므로, 측정되어야 하는 유발전위 신호의 손실과 위상의 왜곡을 피하기 위해서 일반적으로 60 Hz notch filter를 사용하지 않는다[1,2]. 전력선 잡음의 영향을 줄이는 다른 방법으로는, 전력선 잡음의 주파수를 나누어 정수가 되는 자극 빈도(stimulation rate)의 선택을 피하여 전력선 잡음이 자극신호와 동기가 맞아 유발전위 신호로 남지 않게 한다[1,2]. 그러나, 이외의 자극 빈도에서의 반복 회수와 전력선 잡음과의 관계는 정확하게 규명되어 있지 않다.

M회 자극을 반복하여 앙상블 평균법을 취했을 때 일반적으로 나타나는 SNR과 반복 회수의 관계는 식 (1)과 같다[1,2].

$$SNR_{avg} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \cdot M \quad (1)$$

여기서 σ_s^2 는 유발전위 신호의 에너지이며, σ_n^2 는 잡음의 에너지이다. 이 때 잡음은 random signal을 나타내는 것으로 유발전위 외에 측정되는 잡음은 청각 자극과 동기가 맞지 않아 반복 회수(iteration number)가 증가 함에 따라 그 에너지가 반복 회수에 비례하여 줄어 든다. 그러나, 전력선 잡음은 일정한 주파수를 가지고 있는 신호이므로 식 (1)과 같이 random 신호로 볼 수 없다. 본 논문에서는 전력선 잡음의 주파수와 자극 빈도의 관계에 의하여, 전력선 잡음의 에너지가 0이 되는 주기가 존재함을 밝히며, 이를 실험을 통해서 검증하였다.

방 법

1. 앙상블 평균법에서의 전력선 신호의 모델링

전력선 잡음은 60 Hz의 주파수를 갖는 정현파이고, AD 변환된 신호는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S(n) = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_o / f_s \cdot n + \Psi) \quad (2)$$

의공학회지 : 제22권, 제3호, 2001

$$f_o = 60$$

Ψ : phase constant

f_s : sampling rate

where, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

ABR에서는 신호를 자극 주기(stimulation period)에 따라 일정 크기의 윈도우를 취하여 이들의 평균을 구하는 알고리즘을 사용한다. 위에서 모델링 한 전력선 잡음 신호에 대한 앙상블 평균법을 적용한 신호를 알아보면, K번 반복 후 K번째에서 얻어진 한 윈도우 내의 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_K(n) = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_o((1/f_s) \cdot n + (1/f_i) \cdot K) + \Psi) \quad (3)$$

f_i : stimulation rate

K : iteration number (= 0, 1, 2, ...)

n : positive integer ($0 \leq n \leq t_w \cdot f_s - 1$)

where, t_w : window size

식 (3)에서 윈도우의 크기 t_w 는 $(0, (1/f_s) \cdot (f_s/f_i) = t_i)$ 의 범위를 가지며, 이는 ABR 측정 시 신호를 관찰하는 윈도우의 크기를 나타낸다.

전력선 잡음이 K번 반복되었을 때 평균이 된 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_{sK}(n) &= \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \sin(2 \cdot \pi \cdot f_o((1/f_s) \cdot n + (1/f_i) \cdot k) + \psi) \\ &= \sin(2 \cdot \pi \cdot f_o/f_s \cdot n) \cdot \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \cos(2 \cdot \pi \cdot f_o/f_i \cdot k + \psi) \\ &\quad + \cos(2 \cdot \pi \cdot f_o/f_s \cdot n) \cdot \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \sin(2 \cdot \pi \cdot f_o/f_i \cdot k + \psi) \quad (4) \end{aligned}$$

식 (4)에서 전력선 잡음 신호 주파수(f_o)와 자극 빈도(f_i)의 비를 정수와 소수로 나누어 생각할 수 있고, 식 (5)에서와 같이 정수부에는 $2 \cdot \pi$ 를 곱해 정현파에서 소수부만을 고려하면 된다.

$$\begin{aligned} A_{sK}(n) &= \sin(2 \cdot \pi \cdot f_o/f_s \cdot n) \cdot \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \cos(2 \cdot \pi \cdot (m_k + \alpha_k) \cdot k + \psi) \\ &\quad + \cos(2 \cdot \pi \cdot f_o/f_s \cdot n) \cdot \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \sin(2 \cdot \pi \cdot (m_k + \alpha_k) \cdot k + \psi) \\ &= \frac{1}{K} \sqrt{(M_i(K))^2 + (M_o(K))^2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_o/f_s \cdot n + \phi) \quad (5) \end{aligned}$$

where,

$m_k = \lfloor f_o/f_i \rfloor, [a]$: greatest integer not larger than a

$\alpha_k = f_o/f_i - \lfloor f_o/f_i \rfloor$: decimal part of f_o/f_i , $0 \leq \alpha_k < 1$

$M_i(K) = \sum_{k=0}^{K-1} \cos(2 \cdot \pi \cdot \alpha_k \cdot k + \psi)$

$$M_Q(K) = \sum_{k=0}^{K-1} \sin(2 \cdot \pi \cdot \alpha_k \cdot k + \psi) = \sum_{k=0}^{K-1} \cos(2 \cdot \pi \cdot \alpha_k \cdot k + \psi - \frac{\pi}{2})$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{M_Q(K)}{M_I(K)} \right)$$

식(5)에서 볼 수 있듯이 평균이 취해진 전력선 잡음은 반복 회수 K에 따라 크기와 위상에 영향을 받고 있다. 여기서 반복 회수 K에 따라 크기와 위상에 영향을 받는 신호 변조 성분을 $M_I(K)$ 와 $M_Q(K)$ 로 볼 수 있다.

전력선 잡음이 K번 반복되어 평균한 신호의 창(window) 내 에너지(E_{AS})는 다음과 같다[5].

$$E_{AS} = \lim_{M \rightarrow \infty} \left[t_s \sum_{n=0}^M \frac{1}{K} \sqrt{(M_I(K))^2 + (M_Q(K))^2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_o/f_s \cdot n + \varphi) \right]^2$$

$$= t_s \cdot \frac{1}{K^2} \cdot ((M_I(K))^2 + (M_Q(K))^2) \cdot \sum_{n=0}^M \sin^2(2 \cdot \pi \cdot f_o/f_s \cdot n + \varphi) \quad (6)$$

where,

M: positive integer ($0 \leq M \leq f_s / f_s - 1$)

K번 반복한 신호의 에너지는 K의 제곱에 반비례하여 줄어 들고 있다. 즉, 반복 회수를 많이 할수록 신호의 전력선 잡음의 영향을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 더불어 신호 변조 성분인 $M_I(K)$ 와 $M_Q(K)$ 도 신호의 에너지에 식 (6)과 같이 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이 성분이 전력선 잡음의 에너지에 미치는 영향을 다음의 두 부분으로 나누어 살펴 볼 수 있다.

II. 전력선 잡음 에너지의 부분 최소 지점 분석

연속적 시간(continuous time)에서 정의되는 정현파 신호를 한 주기동안 적분하거나 적분구간이 주기와 일치하면 식(7)과 같이 적분값은 0이 된다. 그러나 이산(discrete) 신호는 적분 구간이 주기와 정확히 일치하지 않을 수 있으므로 정현파 신

호를 적분한 값은 0이 아니라 0에 근접한 값을 갖게 된다. 따라서 정현파 성분의 합으로 표현되는 신호 변조 성분 $M_I(K)$ 와 $M_Q(K)$ 는 K에 따라 0에 근접하는 값을 갖게 되고 이를 부분 최소(local minimum)라 보았다[6].

$$S_c(\tau) = \int_0^{\tau} \cos(2\pi \cdot \alpha_k t + \phi) dt = 0 \quad (\text{if } \tau = 1/\alpha_k) \quad (7)$$

신호 변조 성분 $M_I(K)$ 와 $M_Q(K)$ 는 α_k 의 주파수를 가지는 정현파 신호를 1 Hz sampling 한 후 합한 것으로 볼 수 있고, α_k 의 값에 따라 다음의 세 가지 경우에 대해서 생각해 볼 수 있다.

① $\alpha_k = 0$ 인 경우

α_k 의 크기가 0인 경우는 식 (8)과 같이 신호 변조 성분이 반복 회수 K에 비례하게 나타나므로, 이 경우 전력선 잡음의 에너지는 반복 회수에 영향을 받지 않는다.

$$M_I(K) = \sum_{k=0}^{K-1} \cos(2 \cdot \pi \cdot \alpha_k \cdot k + \psi) = \sum_{k=0}^{K-1} \cos(0 + \psi) = K \cdot \cos(\psi)$$

$$M_Q(K) = \sum_{k=0}^{K-1} \cos(2 \cdot \pi \cdot \alpha_k \cdot k + \psi - \frac{\pi}{2}) = \sum_{k=0}^{K-1} \cos(0 + \phi) = K \cdot \cos(\psi - \frac{\pi}{2}) \quad (8)$$

② $0 < \alpha_k \leq 0.5$ 인 경우

이 경우 신호 변조 성분에서 $\cos(2 \cdot \pi \cdot \alpha_k \cdot k + \psi)$ 와 $\cos(2 \cdot \pi \cdot \alpha_k \cdot k + \psi - \pi/2)$ 는 주파수가 α_k 이고 샘플링 주파수(sampling rate)가 1 Hz인 신호로 볼 수 있다. 이 신호를 반복 회수 K까지 합산한 신호 변조 성분은 $K = \langle n \cdot (1/\alpha_k) \rangle$ ($n=1,2,3,\dots$)에서 부분 최소값이 나타난다. 즉, 반복회수 K가 $1/\alpha_k$ 의 배수에 가까운 양의 정수일 때마다 전력 잡음의 영향이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

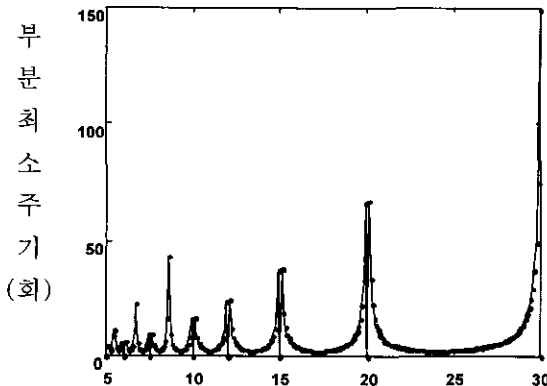


그림 1. 자극 빈도에 따른 전력선 잡음 에너지의 부분 최소 주기
Fig. 1. Periods that make the energy of power line noise local minimum for each stimulation rate

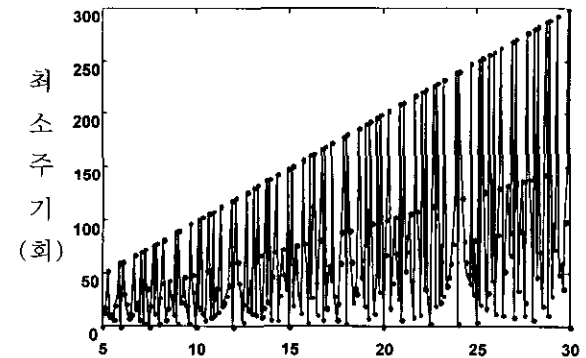


그림 2. 자극 빈도에 따른 전력선 잡음 에너지 최소 주기
Fig. 2. Periods that make the energy of power line noise minimum for each stimulation rate

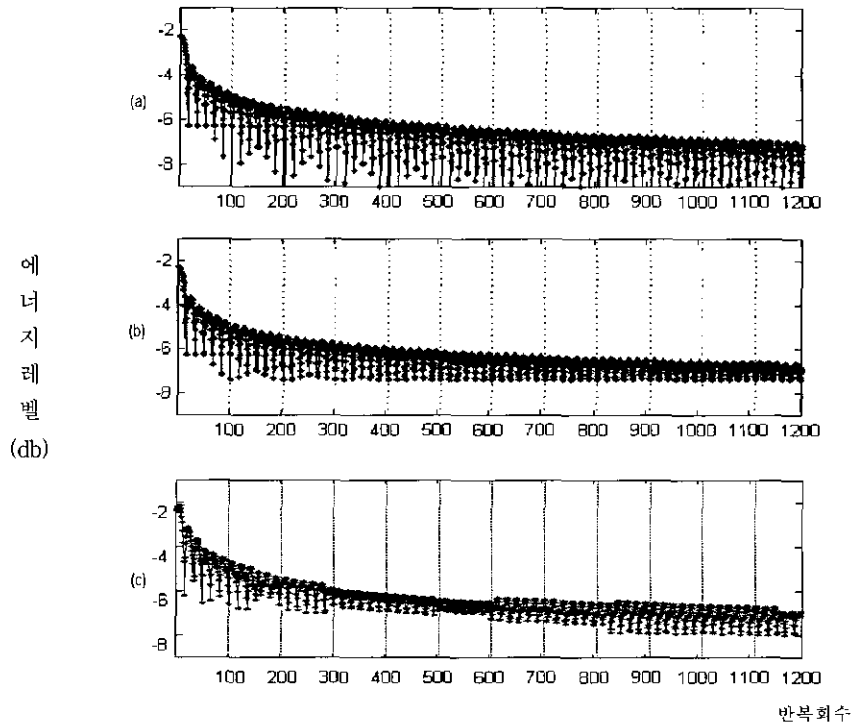


그림 3. 자극빈도 10.1 Hz 일 때의 에너지 변화 전체 ((a) 컴퓨터 모의실험, (b) 60 Hz 정현파 측정 실험, (c) 실제 전력선 잡음 측정 실험)
 Fig. 3. Energy of power line noise at stimulation rate 10.1 Hz, iteration 1200 times
 (a) computer simulation (b) measurement of 60Hz sinusoidal waves (c) measurement of the actual power line noise

③ $0.5 < \alpha_k < 1$ 인 경우

α_k 를 신호의 주파수라고 볼 수 있고, 이를 1 Hz로 샘플링 한 신호를 진폭 변조라고 보았다. 그러나, α_k 가 0.5~1 사이의 값을 갖는 경우에는 앨리어징(aliasing) 이 일어난다고 볼 수 있다. 이 경우의 α_k 의 값은 $1 - \alpha_k$ 로 하여 계산을 하면 되고, 신호 변조 성분 $M_I(K)$ 와 $M_Q(K)$ 는 반복 회수 K 가 $K = \langle n \cdot (1/(1 - \alpha_k)) \rangle$ ($n=1,2,3,\dots$) 일 때 부분 최소값이 나타난다.

α_k 값의 범위에 따라 신호 변조 성분의 부분 최소값이 나타나는 반복 회수 K 의 주기를 살펴 보았고, 부분 최소값을 갖는 반복 회수 K 의 주기 (λ_{local_min}) 를 정리하면 식 (9) 와 같다.

$$\lambda_{local_min} = \begin{cases} \infty & (\alpha_k = 0) \\ \langle n \cdot (1/\alpha_k) \rangle & (0 < \alpha_k \leq 0.5) \\ \langle n \cdot (1/(1 - \alpha_k)) \rangle & (0.5 < \alpha_k < 1) \end{cases}$$

where, $n=1,2,3,\dots$ (9)

신호 변조 성분은 반복 회수에 따라 신호의 크기에 영향을 미치고 있고, 이는 신호의 에너지를 살펴 봄으로써 알 수 있다.

신호 변조 성분 $M_I(K)$ 와 $M_Q(K)$ 은 식 (9) 에서 얻은 K 값을 주기로 부분 최소값을 갖고, 이는 신호 변조 성분의 위상과 무관하다. 즉 $M_I(K)$ 와 $M_Q(K)$ 는 동일한 K 값에서 에너지의 부분 최소값이 나타난다. 전력선 잡음의 에너지는 식 (10) 에서 볼 수 있듯이 식 (9) 로 부터 얻은 K 값을 주기로 부분 최소값을 갖는다.

$$E_{in} = t_s \cdot \frac{1}{K_i^2} \cdot ((M_I(K_i))^2 + (M_Q(K_i))^2) \cdot \sum_{n=0}^M \sin^2(2 \cdot \pi \cdot f_o/f_s \cdot n + \phi_i)$$

\Rightarrow 부분적인 최소값이 되는 에너지 (local minimum) (10)

그림 1은 5 Hz에서 30 Hz까지의 자극 빈도에 해당하는 전력선 잡음 에너지의 부분 최소가 되는 반복회수의 주기를 나타낸 것이다.

III. 전력선 잡음 에너지 최소 지점 분석

신호 변조 성분 $M_I(K)$ 와 $M_Q(K)$ 의 주기는 다음과 같은 방법으로 찾는다. α_k 가 $0 < \alpha_k \leq 0.5$ 인 경우 $M_I(K)$ 와 $M_Q(K)$ 의 주기를 $1/\alpha_k$ 라고 보면, 이 신호는 $1/\alpha_k$ 의 주기를 가지고 반복이 되며, 샘플링 또한 1의 주기를 가지고 반복이 된다. 이 두 성분의 공통된 주기는 $1/\alpha_k$ 의 배수와 1의 배수가 만나는 점으로 구할 수 있다. 이를 구하기 위해서 $1/\alpha_k$ 의 배수의 소

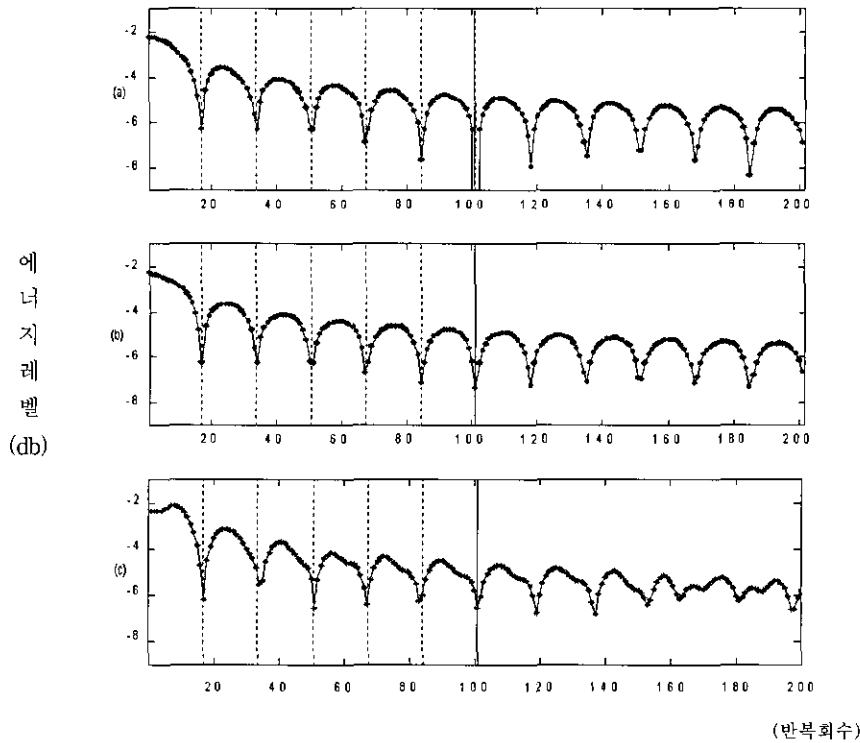


그림 4. 자극빈도 10.1 Hz 일 때의 에너지 변화 초기 ((a) 컴퓨터 모의실험, (b) 60 Hz 정현파 측정 실험, (c) 실제 전력선 잡음 측정 실험)
 Fig. 4. The early stages of Fig 3. (a) computer simulation (b) measurement of 60 Hz sinusoidal waves (c) measurement of the actual power line noise

수 자리의 수가 $1/f_s$ 보다 작은 첫 번째 $1/\alpha_k$ 의 배수 값을 구했다. 기준 값을 $1/f_s$ 로 정한 이유는 샘플링 주파수의 역수가 신호 주기를 나타내는 값을 최소단위, 즉, 신호의 해상도가 $1/f_s$ 가 되기 때문이다. 진폭 변조 성분의 주기 λ_{min} 은 다음과 같다[5].

$$\lambda_{min} = \begin{cases} \infty & (\alpha_k = 0) \\ \{n \cdot (1/\alpha_k)\} & (0 < \alpha_k \leq 0.5, 0 \leq n \cdot (1/\alpha_k) - \lfloor n \cdot (1/\alpha_k) \rfloor < 1/f_s) \\ \{n \cdot (1/(1-\alpha_k))\} & (0.5 < \alpha_k < 1, 0 \leq n \cdot (1/(1-\alpha_k)) - \lfloor n \cdot (1/(1-\alpha_k)) \rfloor < 1/f_s) \end{cases} \quad (11)$$

그림 2는 자극 빈도에 따라 전력선 잡음 에너지가 최소가 되는 반복 회수의 최소 주기 λ_{min} 을 구한 것이다.

이와 같은 방법으로 찾은 주기의 배수 값에서 신호 변조 성분은 0에 가까운 값이 되고, 이는 위상과 무관하다. 즉, $M_I(K)$ 와 $M_Q(K)$ 가 0에 가까운 값이 되어 신호의 에너지 또한 0에 가까운 최소값이 된다(식 (12)).

$$E_{\lambda} = t_s \cdot \frac{1}{\lambda_{min}^2} \cdot \left((M_I(\lambda_{min}))^2 + (M_Q(\lambda_{min}))^2 \right) \cdot \sum_{n=0}^m \sin^2(2 \cdot \pi \cdot f_s / f_s \cdot n + \varphi_p) \approx 0 \quad (12)$$

평균을 위한 반복회수 K가 식 (11)에서 찾은 신호 변조 성분 주기의 배수가 될 때 전력선 잡음의 에너지는 0에 가까운

값이 된다. 즉, 반복회수 K를 적절하게 정함으로써 전력선 잡음의 영향을 제거할 수 있다.

실험 및 결과

양상을 평균법에서는 자극 신호에 의해 동기 된 신호만을 취하기 때문에 전력선에서의 60Hz 잡음을 피하기 위해 자극빈도는 60Hz와 동기 되지 않도록 해야만 한다. 본 실험에서는 자극 빈도 10.1 Hz와 반복회수 1200회에 대하여 Matlab (Matlab ver.5.2, Mathworks, USA)을 이용한 컴퓨터 모의실험과 ABR 시스템으로 60Hz 정현파를 이용하여 측정된 실험 및 실제로 인체를 통해 유입되는 전력선 잡음에 대한 측정 실험 결과를 비교하였다. 60Hz 정현파를 이용한 실험에서는 함수 발생기(33120A, Hewlett Pakard, USA)를 사용하여 발생시킨 1V, 60Hz의 정현파를 이용하였으며, 실제 전력선 잡음에 대한 측정실험에서는 일반 실험실 환경에서 실험대상자의 (손에 붙인) Ag-AgCl 전극을 통해 유입되는 60Hz 전력선 잡음을 사용하였다.

그림 3은 자극 빈도가 10.1 Hz 일 경우 반복회수에 따른 신호에서 60Hz 성분의 에너지 변화를 관찰한 것이다. 이를 자세히 살펴보기 위해서 그림 4에서는 초기(0~200회), 그림 5에서는 말기(1000~1100회)에서의 에너지 변화를 각각 컴퓨터 모의실험(a), 60Hz 정현파 측정 실험결과(b), 그리고 실제 전력

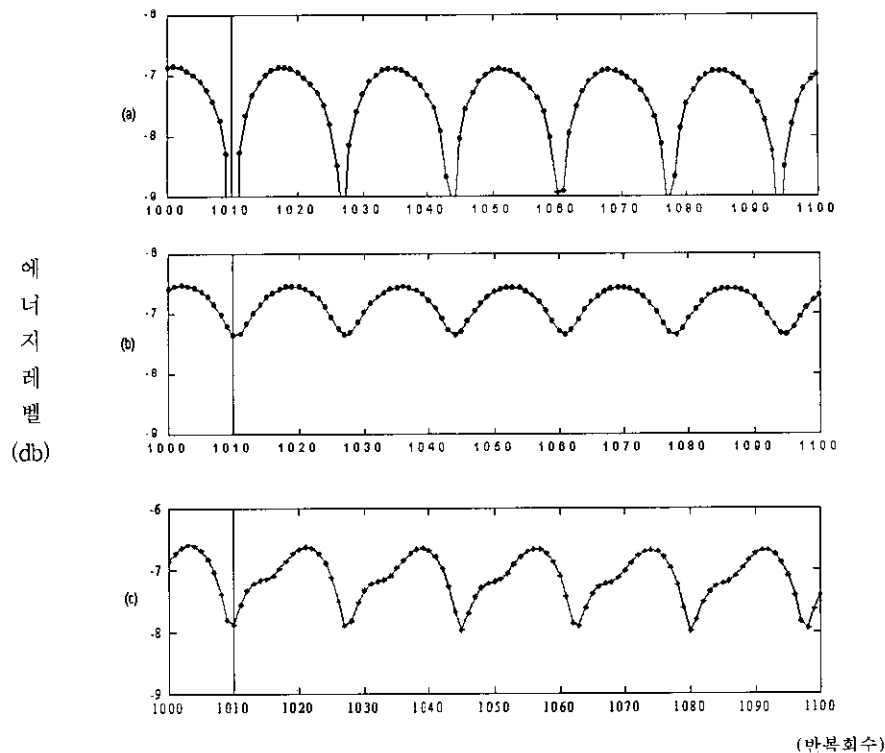


그림 5. 자극빈도 10.1 Hz 일 때의 에너지 변화 말기 ((a) 컴퓨터 모의실험, (b) 60 Hz 정현파 측정 실험, (c) 실제 전력선 잡음 측정 실험)
 Fig 5. The last stages of Fig 3. (a) computer Simulation (b) measurement of 60Hz sinusoidal waves (c) measurement of the actual power line noise

선 잡음 측정 실험결과(c)로 나타내었다. 그림 3에서 점선으로 표시된 부분은 에너지의 최소 주기에 해당하는 지점을 나타낸 것이고, 그림 4의 점선은 부분 최소 주기 지점, 실선은 최소 주기 지점을 표시한 것이다. 그림 5에서의 실선은 에너지가 최소가 되는 주기 지점을 나타낸다. 그래프에서 가로축은 반복회수(회), 세로축은 에너지(dB)를 의미한다.

계산 결과, 자극 빈도가 10.1 Hz일 경우 전력선 잡음의 에너지가 부분적으로 최소가 되는 지점은 16.83의 정수배에 가까운 정수이며, 최소 지점은 반복회수 101을 주기로 갖는다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 최소주기의 10배가 되는 지점인 1010에서는 모의실험에서와 같이 -9 dB이하로 떨어지나 반복회수가 최소주기의 정수배가 되지 않는 1020지점에서는 이보다 전력선 잡음에 의한 60 Hz 에너지가 1 dB 이상 크다. 이를 통해서 모델링에서 도출한 결과와 모의 실험, 실제 실험 결과가 일치함을 알 수 있었다. 그러나, 그림 5에서 볼 수 있듯이 실제 측정 결과에서 최소 주기일 때 에너지의 최소값은 -9 dB이하로 떨어지지 않고, -8 dB 정도로만 떨어진 것을 볼 수 있다. 이는 측정을 위해 사용한 DAQ board (PCI-MIO-16E-4, National Instrument) A/D 변화기의 전압 해상도(4.88 mV)에 의해 영향을 받기 때문이다.

결 론

본 논문에서는 ABR에서 자극 빈도와 전력선 잡음의 주파수와의 관계를 이용하여 각 자극 빈도마다 전력선 잡음의 에너지가 최소가 되는 주기를 신호의 모델링을 통해서 도출하였고, 이를 컴퓨터 모의실험과 ABR 시스템으로 60 Hz 정현파를 이용하여 측정한 실험 및 실제 인체를 통해 유입된 전력선 잡음에 대한 측정 실험으로 확인하였다. ABR 측정 시, 설정하는 인자 중 반복회수는 일반적으로 1000회에서 2000회를 행하나 이에 대한 정확한 지침은 없다. 본 논문에서 제안한 방법에 의해 각 자극빈도에 따라 전력선 잡음의 에너지가 최소가 되는 주기에 맞는 반복 회수를 정한다면, 보다 효과적이고 신뢰도 높은 있는 ABR을 얻을 수 있을 것이다.

신호에서의 전력선 잡음을 제거하기 위해 아날로그 노치 필터를 사용하게 되면 30~3000 Hz 대역을 갖는 유발전위 신호의 60 Hz 성분이 제거 될 뿐만 아니라 그 주변 대역의 신호 왜곡을 초래한다. 디지털 필터의 경우 아날로그 필터보다 신호와 위상의 왜곡을 줄일 수는 있어 효과적이기는 하나 유발전위 신호의 60 Hz 성분은 여전히 제거될 수 밖에 없으며, 이를 구현하기 위해 차수가 높은 FIR 필터를 사용해야 되어 계산 시간과 높은 시스템 사양이 요구된다. 이러한 이유로 상용화 되어 있는 ABR 시스템에 일반적으로 쓰이지 않으며, 일부 디지털 필터 기능이 있는 제품에서는 데이터 후처리 기능만 한다

[2].

반면, 본 논문에서 제안한 방법에 의하면 앙상블 평균을 취하는 반복 회수의 설정만으로 유발전위 신호에는 왜곡을 주지 않고 전력선 잡음을 줄일 수 있으므로, 전력선 잡음에 의한 60 Hz 성분만을 감소시킬 수 있다. 제안된 방법은 ABR에서 시스템의 부가적인 추가 없이 간편하게 활용할 수 있을 것으로 기대되나, 기존의 시스템에 적용하기 전에 청각 자극을 가하는 타이밍의 정확성에 대한 검증이 있어야 한다. 본 연구에서 제시한 방법은 정확한 자극 주기가 요구되기 때문에 자극 빈도가 명시한 수치와 정확하게 일치하지 않는 시스템에서는 전력선 잡음의 에너지 최소 지점이 제안한 주기와 맞지 않게 된다.

본 방법은 청각 유발전위 측정 중 ABR을 중심으로 알아 보았지만, 일반적으로 평균 알고리즘을 사용하고 있는 EcochG (electrocochleography), AMLR (auditory middle-latency response), ALR (auditory late response) 등 다른 유발전위 측정에서도 제안한 방법을 그대로 적용할 수 있다. 또한, 전력선 잡음 이외에도 주위의 환경에 따른 주기적인 잡음에 대해서 본 방법의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. J.W. Hall III, "Handbook of Auditory Evoked Responses", Allyn & Bacon, 1992
2. R. Goldstein and W. M. Aldrich, "Evoked Potential Audiometry", Allyn & Bacon, 1999
3. D. G. Jamieson and E. B. Slawinski, "Recovery of auditory brainstem response by sign-bit and conventional averaging", IEEE Trans. On Biomedical Eng., Vol.35, No.5, pp. 308-315, 1988
4. A. Starr and K. Squires, "Distribution of Auditory Brainstem Potentials over the Scalp and Nasopharynx", Annals of the N.Y. Academy of Sciences, Vol.388, pp. 427-442, 1982
5. G. E. Carlson, "Signal and Linear System Analysis", John Wiley & Sons, Inc., 1998
6. 안주현, "ABR에서의 반복회수 설정에 의한 전력선 잡음의 제거", 연세대학교 석사학위논문, 2001