

선형예측부호화 스펙트럼을 이용한 誘發耳音聲 放射波의 潛時측정

안정일 · 최진영 · 이건일

= Abstract =

Mesurement of Evoked Otoacoustic Emission Latency Using Linear Prediction Coding Spectrum*

Jung-I1 An, Jin-Young Choi, and Kuhn-I1 Lee

An automatized latency calculation method of an e-OAE (evoked otoacoustic emission) is proposed. The e-OAE signal measured from a normal adult is averaged 1000 times to remove noises. This averaged signal is converted to digital signal and that is processed by IBM-AT computer for latency calculation. we seperate the stimulated and the emitted signal on the time domain by a modified LPC (linear prediction coding) spectrum, and the latency is calculated by cross-correlation method. By proposed latency calculation method the latency is 7.9[ms] for normal adult. The performance of the proposed method is also compared with that of the auto-correlation and cross-correlation method. The result show that the proposed method has same precision with the conventional methods and can automatically calculate latency without subjective observation.

1. 서 론

외이에 도달한 음파는 고막을 진동시키고 이 진동은 세개의 작은 뼈를 통해 와우각(cochlea)에 전달된다. 이로 인해 와우각으로 부터 방사음이 관찰

(접수 : 1991년 10월 24일)
경북대학교 공과대학 전자공학과
Dept. of Electronics, Kyungpook
National University

되는데 이를 誘發耳音響 放射(evoked otoacoustic emission : e-OAE)현상이라 한다. 1978년 Kemp^[1]가 처음 유발이음향 방사현상을 소개한 이후 많은 연구가 진행되었으며^{[2]-[4]}, 이 현상은 와우생리의 보편적인 현상의 하나임을 알게 되었다. 외이에 자극음을 준 시각부터 와우각의 방사음이 나타날 시각까지의 시간을 潛時(latency)라 하며, 이는 유발이음향 방사현상의 중요한 변수로서 귀의 모델화와 진단에 중요한 요소가 된다.

이는 기존의 청각의 유발전위(auditory evoked potential : AEP)에 의하지 않는 방법으로서 와우각에 자극을 주어 그 방사파를 직접 측정함으로써 와우각 진단에 있어서 기존의 검사방법보다 새로운 접근이며 이때 방사파가 나타나는 시간인 잠시 및 유발이음향 방사파의 유무는 진단변수이다.

경우에 따라서는 유발이음향 방사파가 자극음에 겹쳐서 나타날 때가 있으며 이 경우 이들을 정확히 구별하여 잠시를 측정하기란 쉽지않다. 1987년 Norton^[5]등은 자극음에서 유발이음향 방사음을 구별해내기 위하여 뿔셈법 및 역상승적분(deconvolution)법을 제안하였다. 전자는 이미 알고 있는 자극음에서 유발이음향 방사음을 빼는 방법이며, 후자는 시스템 전달함수의 역관계를 사용하여 자극음만을 소거함으로써 유발이음향 방사음을 얻는 방법이다. 그러나 이의 두가지 방법 모두 잠시의 시점과 종점을 구별하기 어렵고, 또한 측정기기에서의 위상지연이 오차를 유발할 수 있다. 1990년 Fukazawa^[6]는 위의 결점들을 해결하기 위하여 자극음이 포함된 유발이음향 방사신호의 자기상관성을 이용하여 구한 파형의 포락선의 두번째 극대값까지의 시간을 잠시로 측정하였다. 이의 특징은 수학적 의미가 명확하며, 측정기기에서의 위상지연은 자극신호와 유발이음향 방사신호에 대해서 같기 때문에 두 위상지연은 자기상관을 얻는 과정에서 상쇄되어 시점과 종점을 따로 정하지 않아도 된다. 즉, 자극신호에서 유발이음향 방사신호를 완전히 분리할 필요가 없다. 그러나 자기상관법에 의한 잠시의 측정은 두번째 극대값으로 잠시를 측정해야 하므로 이의 검출에 어려움이 생긴다. 이를 개선하기 위하여 같은 해 최^[7] 등은 상호상관법을 사용하여 극대점 검출이 더욱 용이한 잠시계산법을 제시하였다. 그러나 이 방법은 자극음이 끝나는 점과 유발이음향 방사음이 시작되는 점 사이의 임의의 점을 전후로 자극신호와 방사신호를 구분하여 상호상관법을 행함에 있어 두 신호의 구분을 명확히 하야 하는 문제점을 갖는다.

본 논문에서는, 기존의 목적에 의한 잠시측정 방법의 문제점을 개선하기 위하여, 선형예측부호화 스펙트럼을 이용하여 자동적으로 유발이음향 방사신호의 잠시를 측정하는 방법을 제안하였다. 여기

서 사용한 선형예측부호화 방법은 주파수 스펙트럼을 추정하는 기존의 선형예측부호화 방법을 변형하여 시간축의 신호를 추정하도록 한 것으로서, 이를 이용하여 자동적으로 자극신호와 방사신호를 구분할 수 있게 하였다. 잡음이 없는 유발이음향 방사신호를 얻기 위하여 청력이 정상인 성인의 1000회 가산평균 신호를 이용하였고, 이 신호를 A/D변환하여 자료를 취득한 후 IBM-AT 컴퓨터로 처리하여 잠시를 계산하였다.

2. 이 론

귀의 유발이음향 방사를 측정하기 위한 본 연구의 실험 장치의 구성은 그림 1과 같았다.

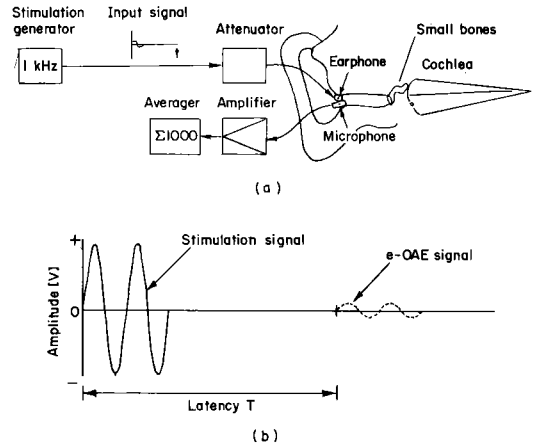


그림 1 (a) 유발이음향 방사파를 측정하기 위한 실험 장치 및 (b) 자극신호와 유발이음향 방사신호

Fig. 1 (a) The measurement setup for e-OAE detection, and (b) it's output signal

자극 발생기에서 출력된 1[kHz]의 신호의 자극음이 감쇄기를 통하여 이어폰에서 외이도에 음향신호를 발생시킨다. 이 음향신호가 와우각을 자극하고, 이에 의한 와우각에서의 방사음을 마이크로폰으로써 감지한다. 이를 증폭한 후 가산평균하여 관측한다. 정상 성인의 경우 방사파는 자극음이 시작된 후 5[ms]에서 15[ms]사이에 나타난다^[8].

유발이음향 방사현상에 의한 잠시를 측정할 경

우, 외이의 자극신호 $x(n)$ 에 대한 외우각에서의 응답신호 $y(n)$ 은

$$y(n) = H\{x(n)\} \quad (1)$$

로서 외우각을 통과한 유발이음향 방사음이다. 상호상관법을 사용하기 위해서는 $x(n)$ 과 $y(n)$ 을 정확히 구분해야 한다. 자극음과 방사음이 섞인 신호를 $f(n)\{n=0,1, \dots, N-1\}$ 이라 하고, 미약한 응답신호의 명확한 스펙트럼을 얻기 위하여 가중치를 곱한 $n^2 * f(n)$ 을 푸리에 역변환 하면

$$\begin{aligned} f(n) &= 1/N \sum_{r=0}^{N-1} Fr \exp(j2\pi rn/N) \\ &= 1/N \sum_{r=0}^{N-1} Fr (\cos 2\pi rn/N + j \sin 2\pi rn/N) \end{aligned} \quad (2)$$

$$n=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

이다. 여기서 Fr 은 주파수상의 계수로서 $r=0, 1, \dots, N-1$ 이다. 식(2)에서 실수부만 취한 신호 $s(n)$ 은

$$s(n) = 1/N \sum_{r=0}^{N-1} Fr \cos 2\pi rn/N \quad (3)$$

이다. $s(n)$ 의 추정계수 a_k 를 가진 선형모델을

$$\hat{s}(n) = \sum_{k=1}^p a_k s(n-k) \quad (4)$$

로 추정할때 p 차의 선형추정의 시스템 함수 $p(z)$ 는

$$P(z) = \sum_{k=1}^p a_k z^{-k} \quad (5)$$

이고 시스템 응답함수 $A(z)$ 는

$$A(z) = 1 + P(z) \quad (6)$$

이다. 이때 추정 오차 $e(n)$ 은

$$\begin{aligned} e(n) &= s(n) - \hat{s}(n) \\ &= s(n) - \sum_{k=1}^p a_k s(n-k) \end{aligned} \quad (7)$$

이다. 이의 자승오차평균(mean-squared error) E 는

$$\begin{aligned} E &= \sum_n e^2(n) \\ &= \sum_n [s(n) - \sum_{k=1}^p a_k s(n-k)]^2 \end{aligned}$$

$$= \sum_n \left[\sum_{k=0}^p a_k s(n-k) \right]^2 \quad (8)$$

와 같으며

$$\partial E / \partial a_k = 0 \quad (9)$$

즉,

$$\sum_{k=1}^p a_k R(|i-k|) = R(i) \quad (10)$$

를 만족하는 최적의 a_k 를 구한다. 여기서 $i=1, 2, \dots, p$ 이며,

$$\begin{aligned} R(|i-k|) &= \sum_n s(n-i) s(n-k) \\ &= \sum_n s(n) s(n+|i-k|) \end{aligned} \quad (11)$$

이다. 식(10)에서 a_k 는 Durbin 알고리즘을 이용하여 구할 수 있으며 이는 다음과 같다. 자승오차평균의 초기화는

$$E^{(0)} = R^{(0)} \quad (12)$$

로 하며, 반사계수 k_i 는

$$k_i = [R(i) - \sum_{j=1}^{i-1} a_j^{(i-1)} R(i-j)] / E^{(i-1)} \quad (13)$$

와 같다. 여기서 $i=1, 2, \dots, p$ 이다. i 차의 계수 $a_i^{(i)}$ 는

$$a_i^{(i)} = k_i \quad (14)$$

이다. 여기서

$$a_j^{(i)} = a_j^{(i-1)} - k_i a_{i-j}^{(i-1)} \quad (15)$$

이고 $j=1, 2, \dots, i-1$ 이다. 자승오차평균 $E^{(i)}$ 는

$$E^{(i)} = (1 - k_i^2) E^{(i-1)} \quad (16)$$

이다. 식(13)에서 식(15)까지에서의 선형예측부호화 계수는

$$a_j = a_j^{(p)} \quad (17)$$

을 만족한다. 이와같이 구한값으로부터 선형예측부호화 스펙트럼 $S(z)$ 는, p 차의 자승오차평균이 Ree 이므로,

$$S(z) = Ree / |A(z)|^2 \quad (18)$$

이다. 이 스펙트럼을 통해서 기울기가 음에서 양으로 바뀌는 점을 전후로 자극신호와 응답신호를 구분할 수 있다. 구분된 자극신호와 응답신호의 상호상관함수 $R_{xy}(n)$ 은

$$R_{xy}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(n+k) y(n) \quad (19)$$

로서, $R_{xy}(n)$ 값이 극대가 되는 값까지를 측정하여 잠시를 구할 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서 사용한 잠시측정 시스템은 그림2와 같다. 자극과 동시에 방사음을 수신할 수 있도록 이어폰의 개구 부위를 이등분하고 수신용 음향통로 아래 부위에 초소형 마이크로폰소자(Eu-08)를 부착하여 보청기형의 이어폰·마이크로폰을 제작하여 사용하였다. 자극음은 주파수가 1000[Hz], 크기가 50[dB]인 버스트 음(tone burst)을 사용하였다. 이를 외이도에 인가한 다음 와우각에서의 방사음을 수신하였다. 자극 및 수신 과정을 1000회 반복하였으며, 수신신호의 가산 평균값을 A/D 변환보드(DT 2821)를 이용하여 12[kHz]로 샘플링한 후 이로부터 IBM-AT 컴퓨터로 선형예측부호화 스펙트럼을 구하고 상호상관법으로 잠시를 계산하였다.

본 선형예측부호화 스펙트럼을 이용하여 자극음이 포함된 유발이음향 방사신호로부터 잠시를 측정하였으며, 이의 결과와 기존의 자기상관법과 상호상관법을 이용한 결과를 비교 검토하였다. 마이크로폰으로부터 얻어진 신호를 1000회 가산평균하여 얻은 신호는 그림 3과 같았다. 이 신호를 A/

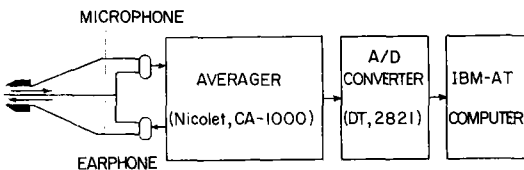


그림 2 유발이음향 방사 측정 및 처리 시스템 블록도

Fig. 2. Block diagram of e-OAE measurement and processing system

D 변환하여 표본값 n 의 자승을 곱하여 얻은 가중된 유발이음향 방사신호와 이로부터 얻은 선형예측부호화 스펙트럼은 그림 4와 같았다. 이 선형예측부호화 스펙트럼에서 기울기가 음에서 양으로 변하는 시각 P 를 이용하여 자동화 알고리즘으로써 자극신호와 방사신호를 분리한 후 상호상관법을 행하여 얻은 결과는 그림 5와 같았다. 여기서 최대 극대값까지의 시간 T 가 잠시이다. 본 실험에서 T 는 7.9[ms]였다.

이는 자극음이 이어폰을 통하여 인가된 후에 7.9

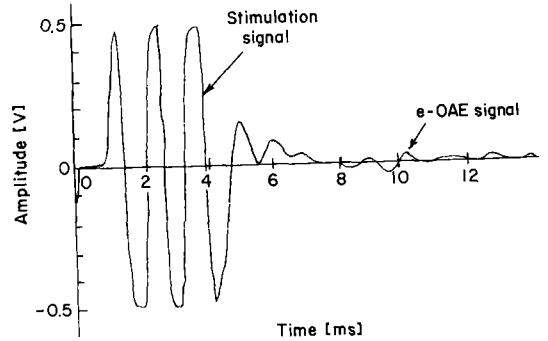


그림 3 1000회 가산 평균으로 얻은 자극음과 유발이음향 방사신호

Fig. 3 Averaged stimulation and e-OAE signal

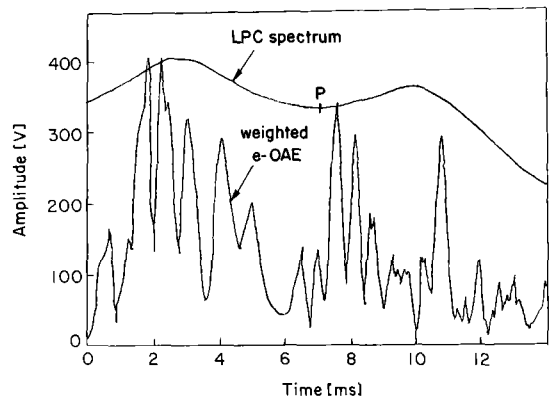


그림 4 가중시킨 유발이음향 신호와 선형예측부호화 스펙트럼

Fig. 4. Weighted e-OAE signal and its LPC spectrum

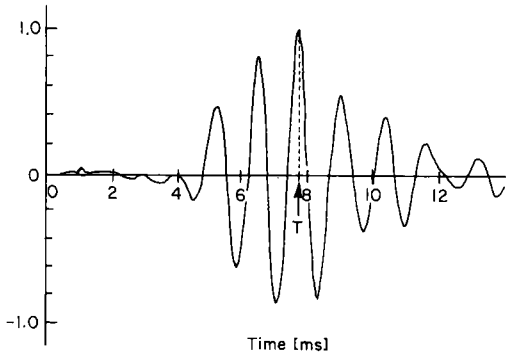


그림 5 선형예측부호화 스펙트럼으로 분리한 신호를 상호상관법으로 처리한 신호

Fig. 5. The result of cross-correlation method using LPC spectrum

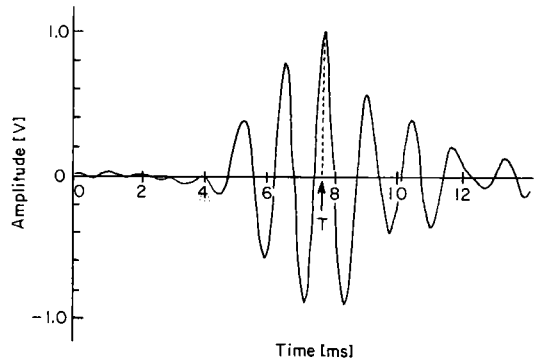


그림 7 기존의 상호상관법으로 처리하여 얻은 신호 파형

Fig. 7. The result of conventional cross-correlation method

[ms] 이후에 방사파가 관측됨을 의미하며 통상 1 [kHz]의 자극음을 인가하였을 경우에는 청력이 정상인 성인의 경우 5-15[ms]에서 방사파가 나타나므로 측정대상의 1[kHz]에서의 와우각의 기능이 정상임을 알 수 있다. 그림 6은 기존의 자기상관법에 의한 결과로서, 전체 파형의 포락선의 두번째 극대값까지의 시간 즉, 잠시를 결정하기가 매우 어렵다는 것을 알 수 있다. 그림 7은 그림 3의 신호에서 목측에 의해 자극신호와 방사신호를 구분하

고, 그 두신호의 상호상관을 행하여 얻은 결과로서, 여기서도 잠시가 7.9[ms]였다. 이 방법에서도 그림 5에서와 같이 잠시를 신호의 최대 극대값으로써 쉽게 결정할 수 있으나 이 방법은 측정 과정에서 목측이 들어가야 하므로 자동화에 이용될 수 없는 것이다. 본 측정 실험을 통하여 논문에서 제안한 선형예측부호화 잠시측정 방법은 잠시를 목측에 의하지 아니하고 컴퓨터에 의해 자동적으로 측정할 수 있으며, 그 정확도도 기존의 상호상관을 이용한 방법과 동일하였음을 확인하였다.

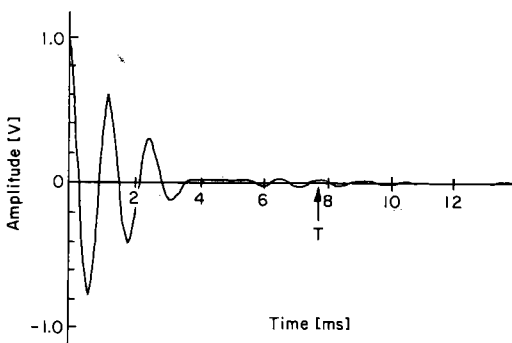


그림 6 기존의 자기상관법으로 처리하여 얻은 신호 파형

Fig. 6. The result of conventional autocorrelation method

4. 결 론

본 논문에서는, 기존의 목측에 의한 잠시측정 방법의 문제점을 개선하기 위하여, 선형예측부호화 스펙트럼을 이용하여 자동적으로 유발이음향 방사파의 잠시를 측정하는 방법을 제안하였다. 여기서 사용한 선형예측부호화 방법은 주파수 스펙트럼을 추정하는 기존의 선형예측부호화 방법을 변형하여 시간축의 신호를 추정하도록 한 것으로서, 이를 이용하여 자동적으로 자극신호와 방사신호를 구별할 수 있게 하였다. 잠음이 없는 유발이음향 방사신호를 얻기 위하여 청력이 정상인 성인의 1000회 가산평균 신호를 이용하였고, 이 신호를 A/D변환하여 자료를 취득한 후 IBM-AT 컴퓨터로 처리하여

잠시를 계산하였다. 1[kHz]의 자극음을 인가한 후 유발이음향 방사파까지의 시간인 잠시를 제안한 방법으로 계산한 결과 7.9[ms]로 나타났으며 이 결과는 측정대상의 와우각 기능이 1[kHz]의 주파수에서는 기능이 정상으로 인정된다고 볼 수 있다. 본 논문에서 제안한 잠시측정 방법은 잠시를 목적에 의하지 아니하고 컴퓨터에 의해 자동적으로 구할 수 있으며, 그 정확도는 기존의 방법과 다를 없었다.

참 고 문 헌

- 1) D. Kemp, "Stimulated acoustic emission from within the human auditory system," J. Acoust. Soc. Am., vol. 64, no. 5, pp. 1386-1391, 1987.
- 2) J. Wilson, "Evidence for a cochlea origin for acoustic reemission, threshold fine structure and tonal tinnitus," Hear. Res., vol. 2, pp. 233-252, 1980.
- 3) E. Zeicker and E. Scholoth, "Interrelation of different otoacoustical emissions," J. Acoust. Soc. Am., vol. 75, no. 4, pp. 1148-1154, 1984.
- 4) E. Zeicker, "Otoacoustic emission in a nonlinear cochlear hardware model with feedback," J. Acoust. Soc. Am., vol. 80, no. 1, pp. 154-162, 1986
- 5) S. Norton and S. Neely, "Tone-burst-evoked otoacoustic emission from normal-hearing subjects," J. Acoustic. Soc. Am., vol. 1, no. 6, pp. 1860-1872, 1987.
- 6) T. Fukazawa, "On latency of evoked otoacoustic emission," Audiology Japan, vol. 33, pp. 151-155, 1990.
- 7) 최진영, 조진호, 이상훈, 이견일, "상호상관법을 이용한 유발이음향 방사파 잠시의 측정," 대한의용생체공학 추계학술대회 논문집, pp. 99-102, 1990.
- 8) D.Kemp, "Evidence of Mechanical Nonlinearity and Frequency Selective Wave Amplification in the Cochlea," Arch., vol. 224, pp. 37-45, 1979.