

유발이음향 방사현상을 이용한 와우각 특성 해석

이 남호, 최 진영, *조 진호, 이 건일

경북대학교 공과대학 전자공학과

*경북대학교 전자공학과 및 경북대학교병원 의공학과

Analysis of Cochlear Characteristics Using Evoked Otoacoustic Emission

Nam-Ho Lee, Jin-Young Choi, *Jin-Ho Cho, Kuhn-Il Lee

Dept. of Electronics, Kyungpook National University

*Dept. of Electronics, Kyungpook National University and

Dept. of Biomedical Eng., Kyungpook University Hospital

Abstract

Evoked otoacoustic emission (e-OAE) signals are measured from adult and analyzed by computer. Stimulation and detection are repeated and averaged 1000 times for noise cancellation. e-OAE signals are analyzed on frequency domain and time domain. The frequency domain analysis reveals that frequency of stimulus and emission has linear relationship in 50 dB input sound amplitude. This result allows the cross correlation method to be applied for latency calculation. As the stimulus frequency grows higher, the latency time is shorter and the gain of emission signal becomes greater. We introduced two mathematical functions to identify these latency and gain. These results can be utilized for cochlear modeling.

I. 서 론

1978년 Kemp^[1]는 외이에서 이어폰을 통하여 자극을 주면 귀의 내부에서 자극음에 따른 방사음이 존재함을 최초로 발표하였다. 이와 같은 유발이음향 방사(evoked otoacoustic emission : e-OAE)현상에 대하여 그 후 많은 연구가 진행되었으며, 유발이음향 방사현상은 와우생리, 이명현상 및 귀의 모델화 등과 밀접한 관계를 가지고 있음이 발표되고있다 [2]-[4].

유발이음향의 발생은 외이에 자극음을 인가한 이후 내이로 부터 방사되는 방사음을 마이크로폰으로 직접 측정함으로써 그 존재를 확인할 수 있으며, 이를 이용하여 귀를 진단하는 연구가 최근 활발히 진행되고 있다[5]-[7]. 그러나 아직도 귀의 모델화에 유발이음향 현상을 효과적으로 고려치 못하고 있다.

유발이음향에서의 중요한 진단변수는 자극음을 준 시각부터 방사음이 관측될 때까지의 시간인 잠시(latency)이다. 와우각에 가하는 자극 신호의 주파수와 크기 변화에 따른 잠시와 방사파의 진폭 변화를 정확히 측정하여 이들의 상호관계를 규정하는 모델을 만들게 되면 와우각 생리 현상 및 이명현상 해석 연구에 진전을 줄 수 있다.

본 연구에서는 유발이음향 방사파의 분석을 통해 와우각의 특성을 파악하였다. 이를 위해 자극음의 주파수 변화에 따른 방사신호의 주파수가 서로 선형적 관계임^[8]을 이용한 상호상관법^[9]을 사용하여 잠시를 측정하고 이의 주파수 및 진폭 특성을 조사하였다. 이로써 자극음의 주파수가 높아질수록 잠시는 파워함수의 형태로 짧아지며 자극음에 대한 유발이음향 방사음의 크기는 주파수가 높아질수록 대수(log)함수로 증가함을 밝혀 내었다. 이 현상을 토대로 와우각 내에 시간지연요소와 이득조정요소를 도입하여 간단한 와우각 모델을 만들고, 이에 수반되는 계수들을 추정하였다. 본 논문에서 제안한 함수 형태들은 Neely 등^[10]의 와우각 임피던스 특성과 잘 일치하였다.

II. 이 론

유발이음향 방사파는 자극신호에 비하여 미약한 신호이므로

로 이를 취득하는 과정에서 잡음을 제거하기 위하여 자극을 가한후 얻어진 신호들을 평균하여 신호대 잡음비를 개선하였다. 신호를 S_k 라 하고 잡음을 N_k 라 할때 잡음이 포함된 신호 $X_k(t_i)$ 는

$$X_k(t_i) = S_k(t_i) + N_k(t_i) \quad (1)$$

이다. 이 신호를 N 번 평균하면

$$\begin{aligned} \bar{X}(t_i) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{ S_k(t_i) + N_k(t_i) \} \\ &= S(t_i) + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N N_k(t_i) \end{aligned} \quad (2)$$

로되어 신호의 크기는 변하지 않고 잡음의 크기는 $1/N$ 로 크기가 감소되어 S/N 비가 N 배 개선된다.

취득된 유발이음향 방사신호에서 자극신호와 방사신호를 분리하여 $x(n)$ 과 $y(n)$ 이라고하고 이 두개의 신호의 상호상관을 구한 함수 $R_{xy}(k)$ 는

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) y(n-k) \quad (3)$$

이다. 이는 자극신호와 방사신호의 상호상관성이 k 에서 최초의 첨두치로 나타나므로 이 식을 이용하여 잡음을 계산한다.

실험을 통하여 얻어진 방사신호를 관찰해보면 방사파는 자극신호를 가한 후 일정시간이 지연된 다음 진폭이 감쇠된 상태로 나타나며, 입력 주파수에 따른 출력 주파수 특성은 선형적인 특성을 갖는다. 이러한 특성을 이용하여 와우각을 이득조정요소 및 시간지연요소를 갖는 그림 1과 같은 간단한 모델로 표현할 수 있다.

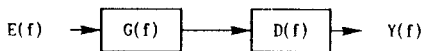


그림 1. 유발이음향 방사현상을 이용한 와우각 구성도

Fig. 1. Block diagram for cochlea using e-OAE phenomenon.

그림 1에서 출력 $Y(f)$ 는

$$Y(f) = G(f) \cdot D(f) \cdot E(f) \quad (4)$$

이다. 여기서 $D(f)$ 는 시간조정요소이고, $G(f)$ 는 이득조정요소이며, $E(f)$ 는 입력이다. 실험으로 얻어진 자료들을 종합한 결과 이득조정요소는 대수함수로 두며, 시간지연요소는 파워함수로 두는것이 가장 적합함을 관찰할 수 있었다.

본 논문에서는 이득조정 및 시간지연 함수를 각각

$$G(f) = A \cdot \log(f + b) \quad (5)$$

$$D(f) = U \cdot f^{-v} \quad (6)$$

로 제안한다. 여기서 A 및 b 는 이득조정 계수들 이며, U 및 v 는 지연조정 계수들로서 각기 측정을 통해 결정되도록 하였다. 유발이음향 방사현상에서 입력된 자극 주파수가 변화함에 따라 방사음의 잡시 및 이득이 변화함은 와우각 내에서 방사파를 발생시키는 위치에 그 원인이 있는 것으로 알려져있다[11]. 따라서 이미 보고된 바 있는 Neely 등[10]의 와우각 모델에서의 임피던스를 시뮬레이션 함으로써 본 논문에서 언급한 시간지연요소 및 이득조정요소를 설명하고자 한다. 본 시뮬레이션에서 사용한 모델의 임피던스는

$$Z_p(f) = (g/b) [Z_1(f) + Z_2(f) \{Z_3(f) - rZ_4(f)\} / \{Z_2(f) + Z_3(f)\}] \quad (7)$$

와 같다. 여기서

$$Z_1(f) = K_1 / j2\pi f + C_1 + j2\pi f M_1 \quad \text{: 코르티기관관의 임피던스}$$

$$Z_2(f) = K_2 / j2\pi f + C_2 + j2\pi f M_2 \quad \text{: 피개막의 임피던스}$$

$$Z_3(f) = K_3 / j2\pi f + C_3 \quad \text{: 코르티기관관과 피개막의 상호임피던스}$$

$$Z_4(f) = K_4 / j2\pi f + C_4 \quad \text{: 와우각압력과 기저막변위간의 임피던스}$$

- r : 능동소자 이득
- K : 탄성 요소
- C : 손실 요소
- M : 질량 요소

이다. 즉 이 $Z_p(f)$ 는 주파수의 함수로서 주파수가 높아질수록 기저막의 임피던스가 최소가 되는 위치는 등골(stapes)로부터 가까운 곳이 되는 특성을 갖는다. 이는 자극음이 고주파쪽으로 갈수록 방사파의 발생위치가 등골에서 가까워지기 때문에 저주파음보다 방사파의 통과경로가 짧아지는 것 때문으로 설명된다. 이 때문에 측정된 잠시의 시간이 줄어들게 되며, 이는 식 5가 나타내는 경향과 일치된다. 또한 경로가 짧기 때문에 감쇄도 작아지므로 식 6이 나타내는 경향과도 일치된다.

III. 실험방법 및 결과고찰

유발이음향 방사파의 측정을 위하여 청력이 정상인 성인을 대상으로 마이크로폰 및 이어폰을 외이에 삽입하여 이어폰에 버스트 음(tone burst)을 인가하였다. 귀의 유발이음향 방사파를 측정하기 위한 실험장치의 구성은 그림 2와 같았다. 자극발생기에서 출력된 자극신호는 감쇄기를 통하여 이어폰에서 외이도에 음향신호를 발생시킨다. 이 음향신호가 와우각을 자극하고 이에 의한 와우각에서의 미약한 방사파를 감도가 -60dB인 마이크로폰(Eu-08)으로써 전기적 신호로 변환시킨 후 증폭기로 증폭하고 대역통과기를 통과한 신호를 가산평균함으로써 임의잡음(random noise)이 감소된 유발이음향 방사파를 얻을 수 있다.

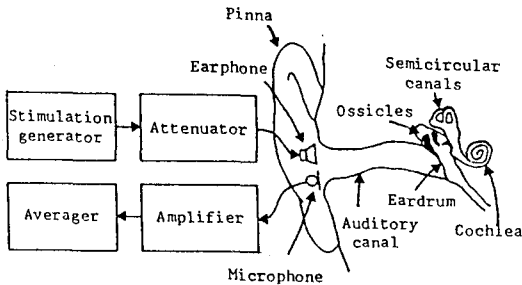


그림 2. 자극에 대한 유발이음향 방사파를 측정하기 위한 실험장치

Fig. 2. The schematic representation of the experiment to detect the e-OAE for transient stimulation.

그림 3은 유발이음향 방사파 측정 및 처리 시스템을 나타낸 것이다. 자극과 동시에 방사파를 수신할 수 있도록 이어폰의 개구 부위를 이등분하고 수신용 음향통로 아래 부위에 초소형 마이크로폰 소자(Eu-08)를 부착하여 보청기형의 이

어폰 마이크로폰을 제작하여 사용하였다.

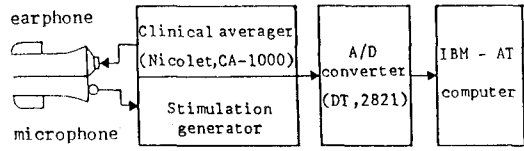


그림 3. 유발이음향 방사파 측정 및 처리 시스템 블럭도
Fig. 3. The block diagram of e-OAE measurement and processing system.

자극음으로는 크기가 50[dB]인 버스트 음(tone burst)을 외이도에 인가한 다음 와우각으로부터 방사파를 수신하는 자극 및 수신 과정은 1000회 반복하여 이를 가산평균 함으로써 잡음을 제거한 유발이음향 방사파를 취득하였다. 이때 자극 주파수는 800[Hz]에서 3500[Hz]까지 각 단계별로 가변하여 유발이음향 방사파를 얻었으며 얻어진 자료를 A/D변환보드(DT 2821)를 이용하여 12[kHz]로 샘플링한 후 컴퓨터상에서 상호상관법을 이용하여 잠시를 계산하였다.

그림 4의 (a)는 자극신호의 주파수가 1600[Hz]일 경우 자극음의 파형이며, 그림 4의 (b)는 이때의 방사음의 파워 스펙트럼 밀도를 나타낸 것이다. 그림 4의 (b)에서 저주파 성분은 방사음의 기저선의 변화에 의한 것이다. 그림 4의 (b) 및 (c)로부터 자극음과 방사음은 유사한 주파수 성분을

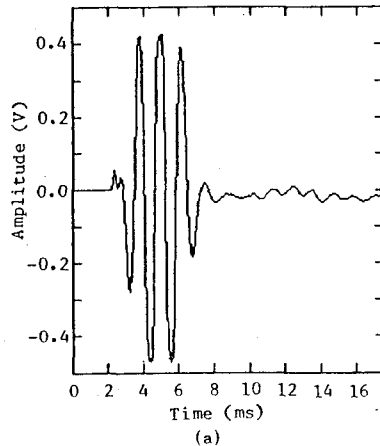
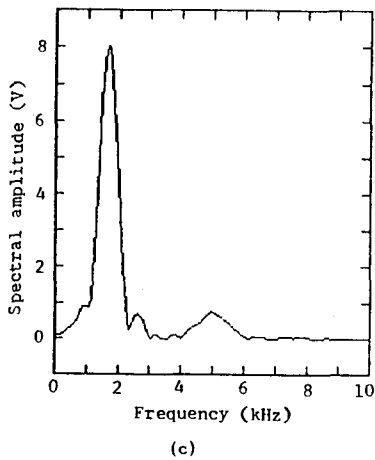
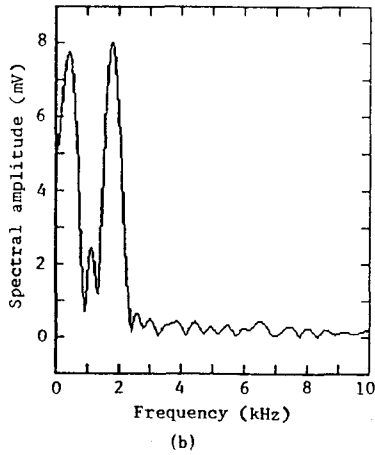


그림 4. (a) 자극신호가 1600[Hz]일 때 유발이음향 신호
(b) 자극신호의 파워 스펙트럼 밀도
(c) 방사신호의 파워 스펙트럼 밀도

Fig. 4. (a) The e-OAE signal in case of stimulus frequency, 1600[Hz]. (b) PSD of stimulus signal. (c) PSD of emitted signal.



가짐을 알 수 있다.

그림 5는 상호상관법을 이용한 결과로서 최초의 첨두치까지의 시간이 잠시를 나타내며, 이 경우 잠시가 6.2 (ms)임을 보여준다.

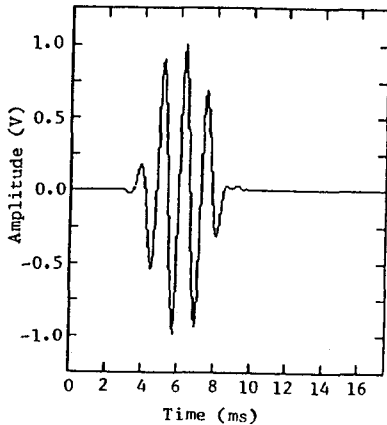


그림 5. 유발이음향 신호를 상호상관법으로 처리한 신호

Fig. 5. The cross-correlation signal of e-OAE.

자극신호와 방사신호의 주파수 관계를 보이기 위하여 자극음의 주파수를 변화시키에 따른 방사음 주파수 변화를 조사한 결과는 그림 6과 같았다. 이 그림으로부터 방사음의 주파수는 자극음의 주파수에 따라 선형적으로 변화함을 알 수 있다.

그림 7은 자극신호의 주파수 변화에 따른 잠시의 변화를 나타낸 것으로서, 이 곡선은 파워함수와 일치함을 알 수 있다. 주파수가 0.94(kHz) 및 3.47(kHz)에서 잠시는 각각 9.2(ms) 및 6(ms)로 주파수가 증가함에 따라 잠시는 짧아지고 그 사이는 파워함수의 궤적을 따르고 있다. 즉, 유발이음향 방사현상을 측정함으로써 얻어진 와우각의 특성은 주파수의 함수로서 주어지는 시간지연 요소를 가짐을 알 수 있다.

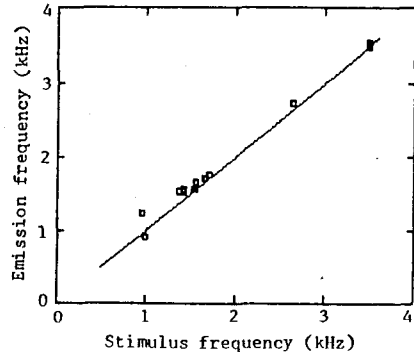


그림 6. 자극신호의 주파수 변화에 따른 방사신호의 주파수 변화

Fig. 6. Emission frequencies vs. stimulus frequency.

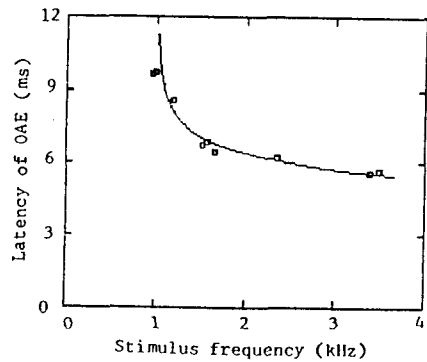


그림 7. 자극신호의 주파수 변화에 따른 잠시의 변화와 파워함수 [$G(f) = 25 * \log(f + 15)$]

Fig. 7. Latency times vs. stimulus frequency and power function. [$G(f) = 25 * \log(f + 15)$]

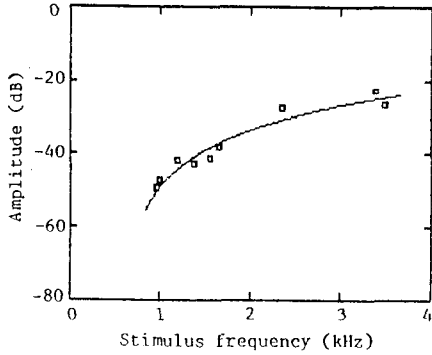


그림 8. 주파수 변화에 따른 방사신호의 이득 변화와 대수 함수 [$D(f) = 200 * f^{-0.095}$]
 Fig. 8. Gain variation of emitted signal vs. stimulus frequency and log function. [$D(f)=200*f^{-0.095}$]

자극신호의 주파수 변화에 따른 방사신호의 이득변화를 조사한 결과는 그림 8과 같았다. 이 그림에서, 주파수가 3.47(kHz) 및 0.94(kHz)에서 방사신호의 이득은 각각 -25(dB) 및 -47(dB)이고 그 사이의 궤적은 대수함수와 잘 일치하였다. 즉, 주파수 변화에 따른 방사음의 이득변화는 주파수가 증가함에 따라 이득이 증가하는 대수함수 형태의 이득요소가 존재함을 알 수 있다. 따라서 유발이음향 방사현상을 고려한 와우각 모델을 만들때 시간지연요소는 파워함수 형태로, 이득요소는 대수함수 형태로 각각 모델화 시킬 수 있다. 그래프의 데이터를 통하여 식(5)에서 사용된 이득조정요소의 계수들을 실험결과로부터 A는 25이고, b는 15임을 알 수 있었다. 즉, 식 (5)는

$$G(f) = 25 * \log(f + 15) \quad (8)$$

로 표현된다. 그리고 식 (6)의 시간지연계수 U 및 v는 각각 200 및 0.095를 얻었다. 따라서 식 (6)은

$$D(f) = 200 * f^{-0.095} \quad (9)$$

와 같다. 이 계수들은 연령 및 와우각의 정상 유무에 따라 차이가 날 것으로 판단되며, 앞으로 이에 대한 임상적인 측정과 더불어 더 연구가 필요한 것으로 사료된다.

자극주파수에 따른 와우각내의 기저막 임피던스 특성을 조사한 결과는 그림 9와 같았다. 자극주파수가 3.47(kHz) 일때 임피던스가 최소가 되는 위치는 0.94(kHz)를 자극주

파수로 한 경우보다 등골(stapes)에서 0.5(cm) 더 가까이 존재한다. 이는 음파가 기저막상에서 고주파자극일수록 등골에서 가까운 위치에서 진동하므로 잠시는 짧아지고 유발된 진동이 통과하는 길이가 짧으므로 이득은 저주파자극보다 커지게 된다는 사실을 보여주고 있다.

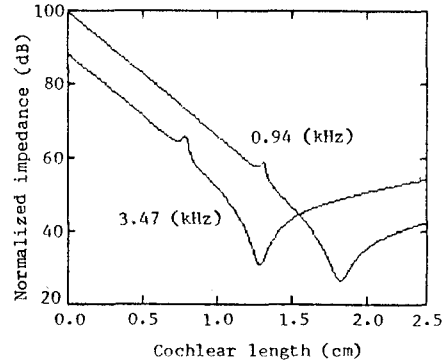


그림 9. 와우각 위치에 대한 임피던스 특성
 Fig. 9. Partition impedance as cochlear length.

IV. 결 론

본 논문에서는 유발이음향 측정용 이어폰-마이크로폰을 제작하여 청력이 정상인 성인을 대상으로 유발이음향 방사파를 측정하였다. 측정신호에서 잡음을 제거하기 위하여 자극 및 방사파 수신을 1000회 가산평균 하였으며 이 신호를 A/D변환하여 자료를 취득한 후 IBM 컴퓨터를 이용하여 처리 및 분석하였다.

자극음의 주파수를 900에서 3500(Hz)로 변화시키면서 얻은 유발이음향 방사파의 잠시는 자극 주파수가 높을수록 짧아짐을 보였으며 주파수의 변화에 따른 잠시의 변화형태는 파워함수와 유사하였다. 자극신호의 주파수변화에 따른 방사신호의 크기는 주파수가 커질수록 이득은 상승하였으며 그 궤적은 대수함수의 형태로 나타났다. 이로써 유발이음향 방사현상에서 나타나는 와우각의 특성을 파워함수로 표현되는 시간지연요소 및 대수함수로서 표현되는 이득요소를 포함하는 모델로 나타내었다.

또한, 자극주파수에 따른 와우각내의 기저막 임피던스 특성을 관측 했다. 즉, 주파수가 높아질수록 기저막 임피던스의 최소가 되는 위치는 등골(stapes)로부터 가깝게 나타

나는 특성을 갖게된다. 이것은 자극음이 고주파쪽으로 갈수록 방사파의 발생위치가 등골에서 가까워지기 때문에 저주파음보다 방사파의 통과경로가 짧아진다는 것을 설명한다. 이 때문에 측정된 잠시의 시간이 줄어들게 되어 본 논문의 시간지연요소가 나타내는 경향과 일치되며, 또 경로가 짧기 때문에 감쇄도 작아지므로 본 논문에서 제안한 이득조정요소가 나타내는 경향과도 일치된다.

참고 문헌

- [1] D. T. Kemp, "Evidence of mechanical nonlinearity and frequency selective wave amplification in the cochlea," Arch. Otorhinolaryngol. vol. 224, pp. 37-45, 1979.
- [2] J. P. Wilson, "Evidence of a cochlea origin for acoustic reemission, threshold fine structure and tonal tinnitus," Hear. Res., vol. 2, pp. 233-252, 1980.
- [3] E. Zeicker, E. Scholoth, "Interrelation of different otoacoustical emission," J. Acoustic. Soc. Am., vol. 75, no. 4, pp. 1148-1154, 1984.
- [4] E. Zeicker, "Otoacoustic emission in a nonlinear cochlear hardware model with feedback," J. Acoustic. Soc. Am., vol. 80, no. 1, pp. 154-162, 1986.
- [5] J. B. Allen, "Cochlear modeling," IEEE ASSP MAGAZINE pp. 3-29, January 1985.
- [6] R. F. Lyon, Caver Mead, "An analog electronic cochlea," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. 36, pp. 1119-1134, 1988.
- [7] J. M. Kates, "A time-domain digital cochlear model," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 39, pp. 2573-2592, Dec. 1991.
- [8] 홍용표, 최진영, 조진호, 이견일, "Burg알고리즘을 이용한 유발이음향 방사신호의 해석," 대한전자공학회 하계학술대회 논문집, 제14권 제1호, pp. 442-446, 1991.
- [9] 최진영, 조진호, 이상훈, 이견일, "상호상관법을 이용한 가변 자극 유발이음향 방사파 잠시의 측정," 의공학회지, 제 12권 제 1호, pp. 19-22, 1991.
- [10] S. T. Neely, D. O. Kim, "A model for active elements in biomechanics," J. Acoust. Soc. Am. 79, pp. 1472-1480, 1986.
- [11] D. J. Lim, "Cochlear micromechanics in understanding otoacoustic emission," Scand. Audiol. Suppl. 25, pp. 17-24, 1986.