

코클리어 기저막 운동의 속도특성 해석

최갑홍 · 강세호 · 백승화* · 박상희

=Abstract=

Analysis on the Velocity Characteristics of the Basilar Membrane Motion in Cochlea

Kap-Hong Choi, Se-Ho Kang, Seung-Hwa Beack*, Sang-Hui Park

In this study, the general characteristics, and theories of cochlear concerning with hearing are examined. Also the digital method is studied in order to analyze with microcomputer on the model equation of basilar membrane in the cochlear derived from 3-dimensional rectangular block model which is studied by Boer.

The method is illustrated for the amplitude characteristics of basilar membrane wave velocity. The results obtained are as follows:

1. In the magnitude characteristics, the velocity gradually increases from the stapes, shows the maximum magnitude, and then rapidly decreases to the Helicotrema.
2. The characteristics of 3-dimensional model is located between 1- and 2-dimensional models in the velocity characteristics coefficients, magnitude characteristics, and the pattern of 2-dimensional model shows the different features from the 1-dimensional and 3-dimensional rectangular block model.
3. In the 3-dimensional rectangular block model, the characteristics of the waveform and the maximum resonant point are same whether $Z(X)$ is linear or nonlinear.

1. 서 론

코클리어 메카닉스에 관한 연구는 G. von Békésy와 Rhode 등이 전기생리학적 측정과 이를 바탕으로 한 수학적 모델링을 행한 것을 효시로 하여 여러 학자들의 관심의 대상이 되어 왔다.

코클리어 메카닉스의 수학적 모델에 관한 연구는 코클리어의 특성이 선형인지, 또는 비선형인지에 따라 학자들마다 자기 다른 모델을 사용하기도 하고, 코클리어의 기하학적 구조에 따라 1차원 모델과 2차원, 3차원 모델로 구분하여 사용하기도 한다. 또한 이들 모델의 해석도 Lien과 같이 미분 방정식으로 직접 해석하는 방법과 Allen과 같이 적분방정식으로 해석하는 방법이 있다.

본 논문에서는 여러가지 모델중에서 코클리어의 기하학적 형태에 가장 가까운 Boer의 3차원 직육면체 모델(rectangular block model)을 통해서 코클리어의 특성 고찰의 한 요소인 기저막 운동에 따른 파동의 속도

<1984. 5. 1 접수>

연세대학교 공과대학 전기공학과
Dept. of Electrical Eng., Yonsei University

*명지대학교 공과대학 전기공학과
Dept. of Electrical Eng., Myung-gi University

특성을 고찰하고, 이를 위한 디지털 해석 방법을 제시 하므로서 청각신호 처리의 연구를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 코클리어 메카니즘

(1) 청각경로

외이에 들어온 음파가 고막을 진동하여 뇌세포에 전달되기 까지의 경로는 그림 1과 같다.

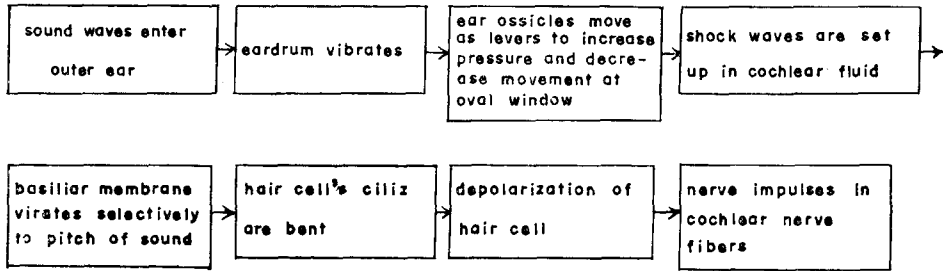


그림 1. 청각경로

Fig. 1. Auditory pathway

(2) 코클리어 메카니즘

1928년 G. von Békésy가 코클리어의 기계적 성질을 측정하고, 1960년 코클리어에서 발생한 이동파의 운동

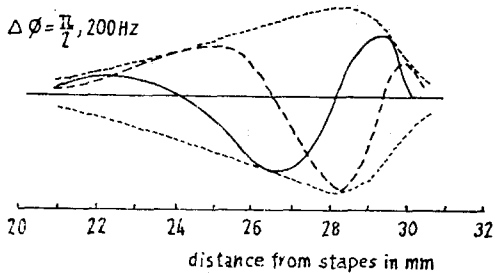


그림 2. 코클리어 이동파 패턴

Fig. 2. The cochlea traveling wave pattern

을 연구함으로써, 코클리어 메카니즘의 일반적 특성의 이론적 근거를 확립하였다. 그는 코클리어에 걸리는 압력증가에 따른 기저막의 단위길이당 체적변위를 측정함으로써 기저막의 체적탄성력(volume elasticity) 변화를 연구하여 체적변위는 스테이프스 근처에서는 작지만 헬리코트레마에 대해서는 100배 정도 증가한다는 것을 알아내었다. 그림 2는 순수 정현파 자극에 대한 코클리어 이동파 패턴을 나타낸 것으로 코클리어에서 발생한 이동파의 특성을 알 수 있다. 이 파는 스테

이프스에서 헬리코트레마를 향해 이동하고, 그 주파수는 스테이프스에서나 헬리코트레마에서 같고, 그 속도는 진폭이 증가함에 따라 점점 증가하고 최대점을 지난후 급격히 감소하며 최대점의 위치는 주파수에 따라 결정된다.

Rhode는 살아있는 Squirrel monkey에서 Mössbauer 방법을 이용하여 기저막 변위에 대한 진폭 및 위상특성을 관찰하여 최대 진폭을 나타내는 주파수 근처에서 비선형적 진동이 있음을 알아 냈다.

3. 코클리어의 기저막 운동에 대한 시뮬레이션

(1) 코클리어의 기저막 운동방정식

코클리어 메카니즘의 일반적 특성은 그림 3과 같은 2개의 채널을 가진 3차원 각형 블록 모델로 설명할 수 있다. 이 2개의 채널은 동일하고 상하 계(scala)에서 크기가 같고 극성이 반대인 압력에 의해 푸시-풀(push-pull)로 구동된다고 가정한다.

기저막은 선형으로 작동하고 청각임피던스 $Z(X)$ 에 의해서 완전히 설명되며, 코클리어 폭 중의 ϵ 만큼 만을 차지하고 있다고 생각한다. 코클리어내의 액체는 이상적인 액체로서 점성이 없으며, 압축되어 있지않고 선형으로 작용한다고 생각하면, 연속방정식으로부터 액체내의 압력 p 는 라플라스 방정식에 의해 식 (1)과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

식 (1)의 해는 코클리어 메카니즘의 일반적인 특성인 경계조건에 의해 구할 수 있다. 코클리어 창의 한쪽 끝단인 헬리코트레마에서의 경계조건은 이곳에 도달한 파의 진폭이 아주 작고 반사파가 없는 것으로 간주하면 압력이나 속도가 0으로 주어진다. 다른 한쪽인 스테이프스에서의 경계조건은 응답의 크기를 가늠하는

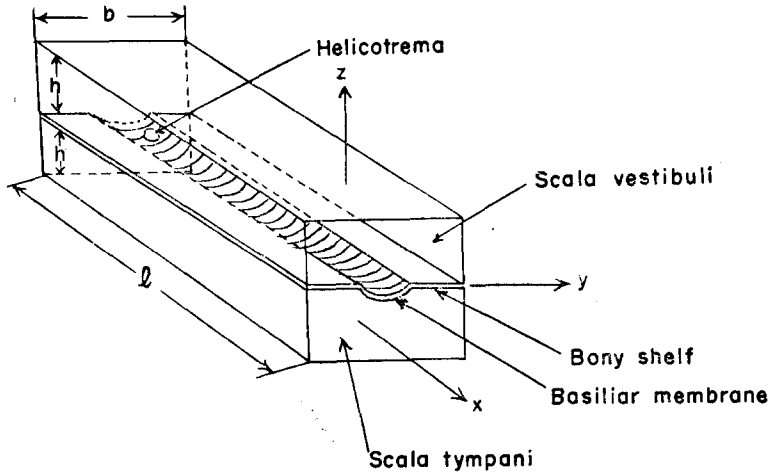


그림 3. 코클리어의 3차원 모델
Fig. 3. The 3-D model of the cochlea

속도의 크기로 주어진다. $Z=0$ 점인 기저막에서의 경계조건은 액체의 평균압력과 평균속도 및 청각임피던스의 관계로부터 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z(X)} \int_{-\infty}^{\infty} W(k) Q(k) e^{-ikx} dk \\ = ia \int_{-\infty}^{\infty} W(k) e^{-ikx} dk \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $w(k)$ 는 기저막속도 $w(k)$ 의 FT (Fourier transform)이고 $Z(X)$ 는 기저막의 임피던스이며, a 는 상수, $Q(k)$ 는 코클리어의 기하학적 모양에 관련된 함수이다. 식 (2)의 궁극적인 해는 임피던스 함수 $Z(x)$ 의 성질에 따라 결정된다. $Z(x)$ 는 코클리어 창 부분에서는 기저막이 경도에 의해 지배된다. 코클리어 내에서는 경도성분이 급속히 감소하여 결국 질량성분이 중요하게 된다. 또한 기저막이 공진을 일으키는 영역에서 $Z(x)$ 의 응답 특성을 알기 위해 $Z(x)$ 를 x 의 선형함수로 근사화 시키면 식 (3)과 같다.

$$Z(x) = i\beta x \quad (3)$$

여기서 β 는 상수이고 x 축의 원점은 기저막 공진이 발생하는 점에 위치한다. 식 (2)에 식 (3)을 대입함으로써 $Z(x)$ 의 선형함수에 의한 해의 일반형태는 식 (4)와 같다.

$$W(k) = \text{const.} \exp\left(-\frac{i}{A} \int_0^k Q(v) dv, k > 0\right) \quad (4)$$

여기서 $A = a\beta$ 이고, 헬리코트레마에서 반사파가 존재하지 않으므로 $k \leq 0$ 인 파형은 무시된다.

(2) 컴퓨터 시뮬레이션

청각 임피던스 $Z(x)$ 를 선형으로 대입한 식 (4)는

수치적으로 어느정도 정확하게 해석할 수 있으나, 실제 $W(k)$ 는 k 의 이산치 k_n 의 유한개의 수에 따라 평가되고 Fourier 변환도 DFT(discrete Fourier transform)에 영향을 받는다. 이것은 k 영역에서 이산 샘플링 결과로 에리레이징(aliasing) 에러를 포함한다. k 영역에서의 에리레이징 에러는 x 영역이 주기적이라고 간주함으로써 제거될 수 있다. 즉 $Z(x)$ 의 공진현상을 분리시키고 오발원도우나 헬리코트레마를 일반화 시킴으로써 공진점 $X=0$ 에서 X 축의 주기를 자유롭게 선정할 수 있다. 주기의 길이를 X_f 라고 할 때 주기성에 의해 스펙트럼 $W(k)$ 는 $k_n = 2\pi n/x_f$ 일 때 스펙트럼값 $W_n = W(k_n)$ 의 무한급수가 된다. $k = k_n$ 에서 $Q(k)$ 의 값을 Q_n 이라 하면 X 의 주기영역에서 식 (2)는 식 (5)와 같이 된다.

$$\frac{1}{Z_p(x)} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} W_n Q_n e^{-ik_n x} = ia \sum_{n=-\infty}^{\infty} W_n e^{-ik_n x} \quad (5)$$

여기서 $Z_p(X)$ 는 주기 X_f 를 갖는 임피던스의 주기함수이고 Z 변환을 취하면

$$Z_p(X') = 2i\beta (X_f/2\pi) \tan(X'/2) \quad (6)$$

이것은 임피던스가 X 영역에서는 선형이지만 X' 영역으로 변환되었을 때는 왜곡된다고 하는 것을 보여준다.

식 (6)의 임피던스를 식 (5)에 대입하면 아래와 같은 관계식을 얻는다.

$$\begin{aligned} W_n [1 + (i/2A_p) Q_n] \\ = W_{n-1} [1 - (i/2A_p) Q_{n-1}] \end{aligned} \quad (7)$$

$(A_p = a\beta(X_f/2\pi))$

이것은 순환관계식으로 모든 스펙트랄성분을 가장 낮은 첨자를 갖는 항으로 나타낼 수 있다. 또한 $n \leq 0$ 인 모든 파형을 무시했으므로 $w_1=1$ 을 갖는다고 가정하고 손실계수를 각각의 스펙트랄성분에 $\exp(-kn\sigma_0)$ 를 곱하여 최종해 $w(k)$ 는 DFT에 의해 얻어질 수 있다. 또한 $Z(x)$ 를 비선형 함수로 근사화 시키면 식 (8)과 같다.

$$Z(x) = iM_0\omega + \frac{C_2}{i\omega(x-xd)} \quad (8)$$

여기서 M_0 는 $M_{BM} + 0.7\rho h$ 이고, C_2 는 $M_0/(\alpha M_0)$ 가 된다. 이 $Z(x)$ 함수에 의하여 구한 $w(k)$ 는

$$W(k) = \frac{\text{const}}{Q(k) + M_0/2\rho} \exp(-iC_3 \int_0^k \frac{Q(u)}{Q(u) + M_0/2\rho} du) \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다.

4. 결과 고찰

그림 4는 기저막 속도의 진폭특성을 나타내는 그림으로 본 연구에서 제시하고 있는 디지털 방법에 의한 3차원 각형 블록 모델의 특성과의 비교결과가 제시되고 있다.

그림에서 기저막 속도의 진폭특성은 일반적으로 스테이프스에서 헬리코트레마를 향해 점진적으로 증가하다가 최대 공진을 일으킨 이후 급격히 감소하는 현상을 나타내고 있다. 모델간의 비교에서는 특성 곡선상의 최대점의 위치와 모양이 모두 다르며, 3차원 각형

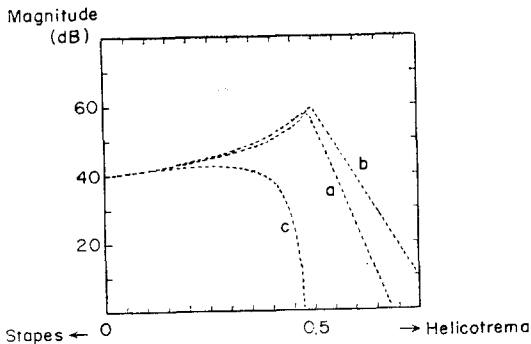


그림 4. 기저막 속도 진폭 특성
a) 3차원 각형블록모델 b) 1차원 모델 c) 2차원 모델
Fig. 4. The magnitude characteristics of basilar membrane velocity
a) 3-D model b) 1-D model c) 2-D model

블록모델의 특성곡선이 1차원과 2차원 모델의 중간에 위치하고 있다. 선행 연구에 의해 실측한 기저막 운동의 속도 특성에 가장 가까운 것은 3차원 각형 블록모델로서 기존의 1,2차원 모델보다 기하학적 구조 및 특성을 더욱 근사화하여 구한 결과로 해석할 수 있다.

그림 5는 3차원 각형 블록모델에서 코클리어의 폭에 대하여 기저막이 차지하고 있는 폭의 비 ϵ 을 0.1로부터 1까지 변화시켰을 경우의 특성곡선을 나타내고 있

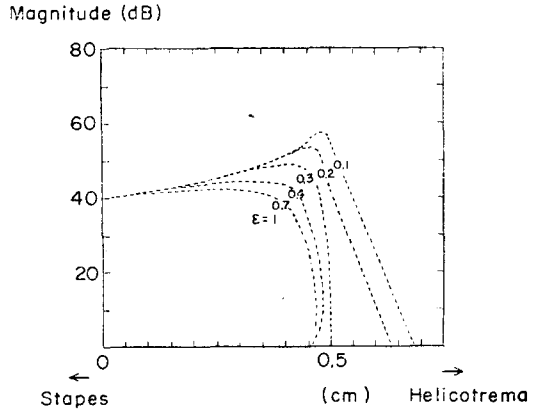


그림 5. 기저막 폭의 변화에 따른 속도 특성
Fig. 5. The velocity characteristics for each value of ϵ

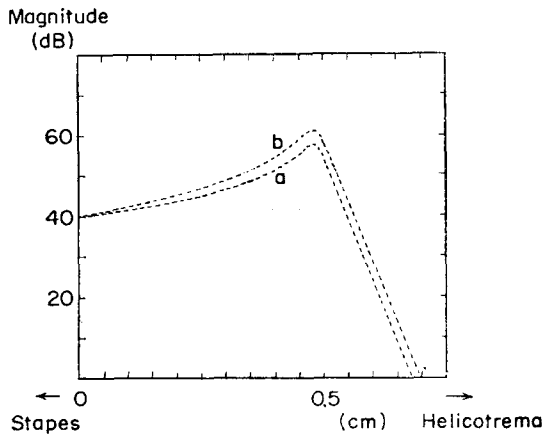


그림 6. 진폭특성 비교
a) $Z(X)$ 가 선형인 경우
b) $Z(X)$ 가 비선형인 경우
Fig. 6. The comparison of magnitude characteristics
a) $Z(X)$ is linear b) $Z(X)$ is nonlinear

다. 그림에서 ϵ 이 1에 가까워질수록 2차원 모델의 특성곡선에 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 생리학적으로 코클리어 폭에 대한 기저막의 폭의 비는 동물의 경우에 0.02에서 0.4 사이의 값을 가지며 사람인 경우는 0.1의 값을 가지고 있다. 따라서 $\epsilon=1$ 인 3차원 각형블록모델이 2차원 모델의 특성과 같게 나타나는 것은 기저막의 폭이 코클리어 폭과 같다고 가정함으로써 비롯된 것으로서 생체 측정치와는 일치하지 않음을 나타내는 것으로 해석할 수 있다.

그림 5은 청각 임피던스 함수 $Z(x)$ 가 선형인 경우 (a)와 비선형인 경우 (b)의 3차원 각형블록모델에서의 기저막 운동의 파동속도특성을 비교한 것이다.

이 그림에서 특성곡선의 크기는 다소 다르나 형태와 최고점의 위치는 모두 같은 것을 알 수 있다. 이것은 보통 선형연구자들의 연구에서 청각 임피던스를 선형으로 놓기도 하고 비선형으로 놓고 고찰하기도 하는데 선형이나 비선형에 거의 관계없는 것을 나타내 준다.

5. 결 론

본 논문에서는 Boer가 제시한 3차원 각형블록모델에서 유도한 코클리어 기저막 운동방정식을 마이크로 컴퓨터에 의해 해석할 수 있도록 디지털 해석 방법을 제시하고, 기저막 속도의 진폭특성을 고찰하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 기저막 속도의 진폭특성에서는 코클리어의 스테이프스로부터 헬리코트레마를 향하여 점차적으로 증가하다가 공진을 일으켜 최대점이 나타나며, 최대점 이후로는 급격히 감소한다.

2. 모델간의 특성비교에서는 속도특성계수와 진폭특성에서 모두 3차원 각형블록모델이 1차원 모델과 2차원 모델의 중간에 위치하며, 1차원 모델과 3차원 모델은 거의 같은 패턴을 보여주고 있으나, 2차원 모델은 매우 다른 패턴을 보여주고 있다.

3. 3차원 각형블록모델에서 $Z(x)$ 를 선형으로 해석하는 경우와 비선형으로 해석하는 경우에 파형의 형태와 공진을 일으키는 최고점의 위치가 같다.

참 고 문 헌

1) Békésy, G. Von: "Experiments in hearing." McGraw-Hill, New York, pp.403~429, 1960.
 2) Allen, J.B.: "Two-dimensional cochlear fluid model: new results, J. Acoust. Soc. Am. 61,

pp.110~119, 1977.
 3) Allen, J.B.: "Cochlear macromechanics-a mechanism for transforming mechanical to neural tuning within the cochlea," J. Acoust. Soc. Am. 62, pp.930~939, 1977.
 4) Sondhi, M.M.: "Method for computing motion in a two dimensional cochlear model, J. Acoust. Soc. Am. 66, pp.1468~1477, 1978.
 5) Allen, J. B, and Sondhi, M.M.: "Cochlear macromechanics-time domain solutions," J. Acoust. Soc. Am. 66, pp.123~132, 1979.
 6) de Boer, E.: "Short waves in three-dimensional cochlea models: Solution for A 'BLOCK' MODEL," Hearing Research 4, pp.53~77, 1981.
 7) Keidel, W.D. et al.: "The Physiological basis of hearing: A Review," Thieme-Stratton Inc, New York, 1983.
 8) Lien. M.: "A mathematical model of the mechanics of the cochlea." PhD dissertation (Seven Inst, of Wash. Univ, St Louis, MO, J.R. Cox advisor) unpublished.
 9) Viegrevver. M.A.: Quantitative model analysis of basilar membrane motion, psychophysical, physiological and behavioural studies in hearing." Delft University press, pp.96, 1980.
 10) Zwislocki. J.J.: "Theory of cochlear mechanics," Hearing Research, Institute for Sensory Research, Syracuse University Syracuse, New York 1320, pp.16, 1679~1680, 1980.
 11) Rhode. W.S.: "Observation of the vibration of the basilar membrane in squirrel monkeys using the Mössbauer technique." J. Acoust. Soc. Am. 49, pp.1218~1231, 1971.
 12) Hall. J.L.: "Two-tone suppression in a nonlinear model of the basilar membrane," J. Acoust. Soc. Am. 61, pp.802~810, 1977.
 13) Rhode. W.S.: "Cochlear partition vibration-recent view." J. Acoust. Soc. Am. 67, pp.1696~1703, 1980.
 14) Taber. L.A, and Steele. C.R.: "Cochlear model including three-dimensional fluid and four modes of partition flexibility." J. Acoust. Soc. Am. 70, pp.426~436, 1981.