한국소음진동공학회지 제2권 제4호, pp. 243~252, 1992

소음이 인체에 미치는 영향 (I)
청감의 신비

김 정 태
(한국표준과학연구원 음향진동연구실)

1. 머 리 말

소리와 청감. 둘다 유사한 뜻을 가진 단어지만 소리(Sound)는 음압 등 객관적인 음향 관련 물리량을 나타내고 청감(Hearing)은 인체의 주관적인 느낌을 다루는 심리학·생리학적인 면을 가르킨다.

청감은 사람이 가지고 있는 다섯가지 감각(五感) 중의 하나이다. 그래서 흔히 五感 이외의 감각 기관을 통해 추상적으로 느끼는 기분을 六感이라 하는가 보다.

인체의 五感 중에서 가장 중요한 감각기관 한가지를 고른다면 무엇일까? 사람마다 견해의 차이가 있겠지만 일반적으로 청감을 최우선으로 선택하진 않을 것 같다. 속담에 "백번을 들어도 한번 본 것만 못하다(百聞이 不如一見)"는 말이 있듯이 청각보다는 시각이 훨씬 중요 할런지 모르겠다. 그러나 청감을 통해 사람답게 살아가는 지식을 듣고, 고전음악을 즐기며, 자기 주위의 언어를 흡수하는 것을 감안한다면, 청감은 인체의 어느 감각 기관 못지않게 중요한 기관이라 할 수 있다. 들을 수 있기에 언어가 존재한다고 얘기하면 역설일까.

우리의 청각기관은 20Hz에서 부터 20kHz의 소리를 듣고, 100dB 정도의 압력변화(Dynamic range)를 감지하며, 건강한 귀를 가진 사람이라면 15dB 이상의 소리를 들을 수 있다. 그러나 "귀"라는 단어 한마디로 표현되는 인체의 청각기관은 이보다 훨씬 섬세하고 정교하다. 귓바퀴, 길이 2.5cm의 귓구멍, 그리고 직경 1cm의 고막으로 이루어지는 外耳, 세개의 뼈로 구성되어 있는 中耳 및 달팽이관이 있는 內耳에서는 10^{-12}m의 공기입자가 진동하는 것을 감지하며 8×10^{-17} watt의 미약한 소리를 느낀다. 또, 대뇌의 분석을 통해 40만 가지의 소리를 듣는 순간 판별해낼 수 있는 탁월한 능력을 가지고 있다. 또한 건강한 귀는 소리를 들을 수 있을 뿐만 아니라 낮은 음을 발생시키는 능동 음향 시스템이고, 과다한 소음에 장기간 노출되어 인체의 피해가 지나치다고 판단될 때에는 內耳에 있는 센서(Hair cell)의 일부를 파괴시켜 아예 소리를 듣지 못하게 하는 자기 보호 능력도 가지고 있다. 이밖에도 주파수의 선별 능력, 100dB이 넘는 물리적인 음압변화를 60dB 폭의 신경신호로 압축시키면서도 전달하고자 하는 신호특성은 간직할 수 있는 비선형 현상등 인체의 귀가 간직하고 있는 신비로움은 아직까지도 많은 학자들이 궁금해하는 연구 대상이다.

본 글에서는 인체의 청각기관이 느낄 수 있는 물리량의 최소단위를 설명하고, 청각기관의 구조를 분석한 후 그간의 연구를 통해 밝혀져 있는 청각기관의 메카니즘과 앞으로 밝혀져야할 의문점을 간략히 소개하고자 한다.

2. 간단한 산수 : 소리의 물리량

소리는 공기 중의 압력 변화에 의해 발생되는 현상이다. 대기압에서 평형 상태에 놓여 있는 공기 입자가 주위로부터 에너지를 받게 되면 진동(Oscillation)하여 압력이 변화되며 이를 인체의 감각 기관인 귀가 민감하게 감지하게 된다.

소리의 크기를 나타내는 단위로는 음의 출력(Sound power)과 음압(Sound pressure)이 쓰인다. 출력은 음원에서 단위 시간당 발생하는 에너지 량으로서 watt라는 기본 단위를 이용하며 음원이 결정되

면 측정 위치에 무관한 일정한 값을 가진다. 음압은 이에 반해 파동방정식을 만족시키도록 형성되는 음의 분포로서 음원의 크기, 경계조건 등에 의해 영향을 받으며 위치에 따라 값이 달라진다. 음압의 단위로는 단위면적당 작용하는 힘, 즉 Pa을 사용하며 이의 표현 방법으로 SPL(Sound Pressure Level)인 데시벨(dB)을 사용하고 있다.

소음을 야기시키는 단위시간당 에너지, 즉 출력은 우리가 일반적으로 다루는 물리량에 비해 극히 작은 값이다. 가령, 성인 한사람이 소리를 지를 때의 출력은 100μW 정도로 서울 시민 1,000만 명이 동시에 커다란 함성을 지른다 해도 1kW에 불과하다.

또한 음압을 표현할 때 쓰이는 SPL은 정의에 의해

$$\mathrm{SPL} = 20 \cdot \log \frac{P}{P_{ref}}$$

이다. 여기서 P는 측정코자 하는 압력, P_{ref}는 인체가 감지할 수 있는 최저음압으로서 20μPa를 사용하고 있다. 따라서 최저 음압에 해당되는 음강도(Sound Intensity) I_{ref}는 평면파의 경우

$$I_{\mathrm{ref}} = \frac{P^2_{ref}}{\rho c}$$

이다. 여기서 ρc는 공기의 특성 임피던스로서 400 Pa.sec/m (MKS Rayleigh)이다. 이 값을 위 식에 대입하면

$$I_{\mathrm{ref}} = 1.0 \times 10^{-12}\, W/m^2$$

가 된다. 이 값이 음압의 기준값 20μPa에 대응하는 음강도 기준값이다. 따라서, 고막의 직경을 1cm로 하면 최소 가청 출력 W_{min}는

$$W_{min} \cong 8 \times 10^{-17} W$$

인 극히 미소한 값이다. 고막은 최대 음압 120dB까지 견딜수 있으므로 이때의 최대 가청출력 W_{max}는

$$W_{max} \cong 8 \times 10^{-5} W$$

이다. 따라서 성인 한 사람이 귀 가까이에서 지르는 소리에도 고막이 상하게 된다. 이와같이 우리의 고막은 작게는 $10^{-17}W$, 크게는 $10^{-5}W$ 사이의 소리를 감지한다. 인체에서 불과 80μW라는 낮은 파워에 손상되는 기관이 청각말고 또 있을까.

한편, 최소음압에 해당되는 공기 입자의 진동 변위는 음압이 평면파에 의해 발생된다고 가정할 때

$$V = \frac{P}{\rho c}$$

를 만족시켜야 하므로 공기 입자의 운동 속도 $V = 5.0 \times 10^{-8} \frac{m}{\mathrm{sec}}$ 가 된다.

공기입자의 변위를 계산하기 위해서는 속도 V를 $2\pi f$(여기서 f는 주파수)로 나누어야 한다. 인체가 최저 감도(20μPa)를 느끼는 주파수는 귀의 1차 고유 진동수에 해당된다. 外耳는 한쪽 끝이 막혀있는 기주관의 경우에 해당되므로 1차 고유 진동수는 파장 λ가

$$\lambda/4 = L$$

일 때이다. 여기서 L은 귓구멍 길이를 나타낸다.

따라서 外耳를 2.5cm로 보면 파장은 10cm가 된다. 음속을 340m/sec로 보고 1차 고유 진동수 f를 계산하면

$$f = 3.4\,\mathrm{kHz}$$

가 된다.

인체의 귀가 3kHz~4kHz주파수대역에서 가장 민감한 이유는 귓구멍의 길이 때문임을 알 수 있다.

따라서 공기 입자의 운동변위 d는

$$d = \frac{V}{2\pi f}$$

부터 2.3×10^{-12}m의 미소한 크기를 가진다. 현존하는 기술로 3kHz에서 10^{-12}단위를 측정하는 방법은 없으나 인체의 고막은 수소분자보다 작은 진폭을 감지한다. 참고로 국제표준기구(ISO)에서 정의하는 변위나 속도, 가속도 및 소음의 기준값(Reference value)는 표 1과 같으며 dB값이 음(Negative)이 되지 않도록, 물리적으로 측정가능한 값보다 작은 크기를 사용하고 있다.

이와같이, 소리를 만드는 에너지나 공기 입자의 이동변위는 미소한데 비해 귀가 지나치게 예민하기 때문에, 인체는 미소한 압력

표 1 국제표준기구(ISO)에서 정한 기본단위

물 리 량	단 위	기 준 값	비 고
변 위	m	1.0×10^{-12}	
속 도	m/sec	1.0×10^{-9}	
가 속 도	m/sec^2	1.0×10^{-6}	
소 음	Pa	20.0×10^{-6}	한국 : 1.0×10^{-5}

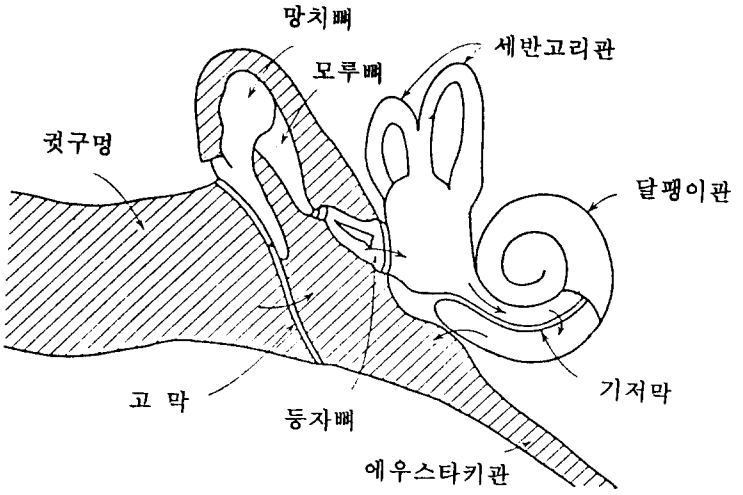


그림 1 귀의 단면: 外耳, 中耳 및 內耳로 구성되어 있다.

변화를 감지할 수 있게 되어 소음이 문제시 되는 것이다.

3. 청각기관의 구조

인체의 귀는 外耳, 中耳 및 內耳로 구성되어 있으며 부피는 16cm³이다. 그림 1은 귀의 단면을 보여주고 있으며 빗금친 곳은 공기로 채워져 있다. 外耳, 中耳 및 內耳의 설명은 다음과 같다.

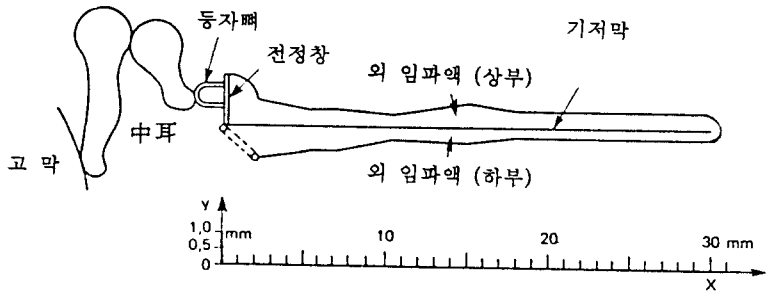
3.1 外耳

귓바퀴, 귓구멍과 고막을 포함한 外耳는 소리를 모아서 얇고 투명한 고막을 진동시키는 역할을 한다. 깊이 2.5cm의 귓구멍에서는 고유진동수에 해당되는 2kHz~5kHz 주파수대역의 소리를 약 10배로 증폭시킨다.

3.2 中耳

中耳는 3개의 미소한 뼈(망치뼈, 모루뼈, 등자뼈)로 이루어져 있으며 당이정 한알만 하다. 中耳뼈의 역할은 임피던스의 변화를 최소화 (Impedance matching)시켜서 귀에 들어오는 소리를 반사없이 內耳에 전달하는 것이다. 만일, 中耳의 공간이 없어서 고막이 內耳에 직접 연결되어 있다면 고막의 바깥면은 공기에, 안쪽면은 액체로 채워져 있는 內耳에 접하게 되므로 두 매질간의 임피던스가 크게 달라져서 (Impedance mismatching) 바깥쪽의 음압 변동이 內耳에 비효율적으로 전달된다. 실제로 中耳에 염증이 생겨 액체로 채워지면 난청이 된다.

그러나 인체의 귀는 다행히 고막과 內耳사이에 3개의 뼈가 공간을 차지하고 있으므로 고막의 양면이 모두 공기에 접해 있을 수 있을 뿐 아니라 고막과 中耳뼈간의 임피던스가 같아서 입사된 음은 고막 →



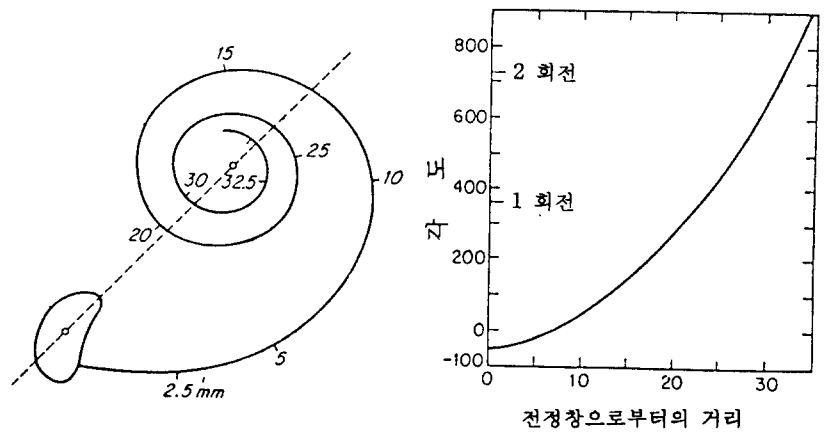


그림 2 달팽이관의 펼친 모양. 기저막을 중심으로 두바퀴 반 만큼 나선형으로 꼬여져 있다. 펼친거리는 35mm, 두께 1mm.

中耳의 뼈를 통해 손실없이 귀의 내부로 전달된다.
동시에 3개의 뼈는 지렛대 역할을 하면서 고막의 진동을 3배로 증폭시켜 內耳에 전달한다.

한편, 中耳의 뼈를 잡고 있는 근육은 고막에 손상을 끼칠 만한 높은 음압이 들어올 때에는 오히려 경직화되어 고막의 진동을 줄이는 안전장치 역할도 한다.

3.3 內耳

內耳에는 몸의 평형을 잡아 주는 세반고리관과 함께 청각 신경이 밀집되어 있는 달팽이관(Cochlea : 희랍어의 Snail에 해당)이 있다. 달팽이관은 완두콩 만한 크기로서 두바퀴반이 꼬여져 있는데 이것을 펼치면 새끼손가락 길이인 35mm가 된다. 그림 2는 나선형 달팽이관의 펼친 모양을 보여주고 있다. 달팽이관은 직경 1mm로, 내부에는 기저막을 중심으로, 한 방울도 안되는 소량의 임파액이 채워져 있다.

달팽이관의 각 단면은 다시 기저막(Basilar membrane), 피개막(Tectorial membrane)및 코르티 기관(Organ of Corti)으로 구성되어 있다. 그림 3은 달팽이관의 내부 단면을 보여주고 있다. 왼쪽 중앙의 기저막 위에는 코르티 기관이 있다. 이 부분만을 확대하면 오른쪽 그림에 보여져 있는 것과 같이 청신경이 보이고 그 위에 피개막이 놓여져 있다.

內耳는 인체의 어느 곳 보다 안전하게 단단한 측두골에 깊이 감싸여져 있다.

4. 달팽이관 : 청각기관의 핵심

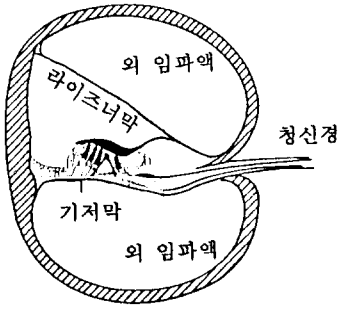
불과 완두콩 만한 크기의 달팽이관은 어떠한 원리로 소리를 감지하는 것일까?

달팽이관의 청감 현상을 이해하기 위하여 많은 학자들이 오래전부터 이에 대한 연구를 해오고 있으며 현재까지는 그 일부만 밝혀져 있다.

소리는 그림 2에 보여져 있는 것과 같이 中耳의 등자뼈를 거쳐 달팽이관의 입구에 있는 전정창(Oval window)을 자극한다. 전정창은 고막의 크기에 비해 작기때문에 등자뼈의 움직이는 진폭은 다시 20~30배 증폭되어서 그림 3에 보여져 있는 라이즈너막의 윗부분에 있는 외임파액을 통해 압력파를 발생시킨다. 그림 4는 中耳의 등자뼈를 통해 자극된 신호가 기저막 위의 임파액을 통해 에너지를 전달하고 있는 과정을 보여 주고 있다. 맨 안쪽에 도달한 압력파는 다시 기저막 아래를 채우고 있는 임파액에 연결된다. 임파액을 통과하는 파동 에너지는 불과 세포 두 층으로 이루어진 라이즈너막을 통해 내임파액에 전달되어 최종적으로는 기저막을 자극하게 된다.

한편 기저막 위에는 그림 3에 보여져 있는 것과 같이 청감을 느끼는 말초신경인 코르티 기관의 청신경 세포가 심어져 있다. 각각의 청신경 세포 상부는 100여 개로 구성되는 털(Hair)을 가지고 있고 그 위에는 피개막이 놓여져 있다. 따라서 임파액을 통해 압력파가 전달되면 기저막과 피개막 간에 전단력(Shear force)이 발생하므로 수직으로 서 있는 직경 1㎛의 털은 강성(Stiffness) 값에 따라 움직인다. 그 결과, 소리의 기계적 신호는 청신경 세포에서 전기적 신호로 바뀌진다.

코르티 기관에 있는 청신경 세포는 4줄로 되어 있다. 안쪽 1줄은 내신경 세포(Inner hair cell)로서 소리를 감지한 후, 신경신호로 바꾸어 뇌에 전달하는 역할을 담당한다. 바깥쪽 3줄의 외신경 세포(Outer hair cell)는 대뇌에서 보내는 신호를 받는 수신용 센서로서 외부의 자극에 따라 자체길이를 10%까지 변화시키는 능동적인 세



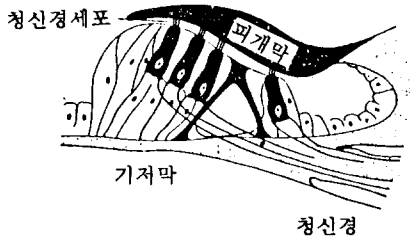


그림 3 달팽이관의 단면과 코르티 기관. 코르티 기관의 청신경 세포는 기저막과 피개막 사이에 놓여져 있다.

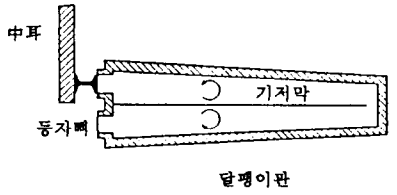


그림 4 달팽이관에서 진행하는 파동, 기저막 상하에는 임파액으로 채워져 있다.

포이다. 달팽이관 안에는 내신경 세포 4,000개, 외신경 세포 12,000개가 전체의 길이 35mm에 걸쳐 놓여져 있다.

한편, 코르티 기관은 동적 변화폭을 비선형적으로 압축(Dynamic range compression)시키는 기능도 내장하고 있어 입력되는 음강도에 따라 각각 다른 주파수 응답특성을 보여주게 된다. 포유류의 경우, 음강도가 14dB(고막 기준)일 때 신경세포의 주파수 응답 특성이 가장 민감한 것으로 알려져 있다.

사람이 나이가 들게되면 청신경 세포의 주파수 응답기능이 저하된다. 그림 5는 20세를 기준으로 하여 연령이 증가함에 따라 잃게 되는 청감특성을 보여주고 있다. 그림 5의 (a)는 남자, (b)는 여자의 청감손실 곡선이며 위에서 부터 각각 40, 50, 60, 65 및 70세를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 40대 이후에는 고주파대역 1kHz~6kHz의 청감손실, 특히 4kHz 근처의 청감손실이 심하며 여자보다는 남자의 청감손실이 크다. 이것은 대화시에 가장 많이 쓰이는 중요한 주파수 대역의 손실을 의미한다. 참고로 대화에 쓰이는 음압 및 주파수 범위는 그림 6의 중앙에 있는 실선 내부영역이 된다.

한편, 코르티 기관의 구조상 특이한 것은 이 근처에 혈관이 존재하지 않는다는 사실이다. 코르티 기관에 있는 청신경 세포는 진동을 예민하게 감지하기 때문에 모세혈관이 주위에 있으면 혈압맥동에 의한 잡음이 신호로 감지될 수 있다. 따라서 조물주는 코르티관의 신진대사를 임파액을 통해서만 이루어지도록 하였다.(모세혈관은 달팽이관 입구와 주변의 뼈까지만 연결되어 있다.)

이와같이 달팽이관은 인체가 가지고 있는 청각기관의 핵심이라 할 수 있다.

5. 기저막 : 스팩트럼 분석기

기저막은 달팽이관 안에 있는 임파액을 둘로 나누어 놓고 있는 평판형태의 막인데, 이 곳에서 소리의 주파수 분석이 수행된다.

기저막은 달팽이관의 입구에서는 폭이 좁고 팽팽하며 안으로 들어갈수록 폭이 넓어지면서 느슨한 구조를 가지고 있다. 따라서 높은 주파수의 에너지가 기저막을 가진시켰을 때에는 달팽이관 입구 쪽에서, 낮은 주파수에 대해서는 안쪽에서 기저막의 횡 방향 진폭이 최대값을

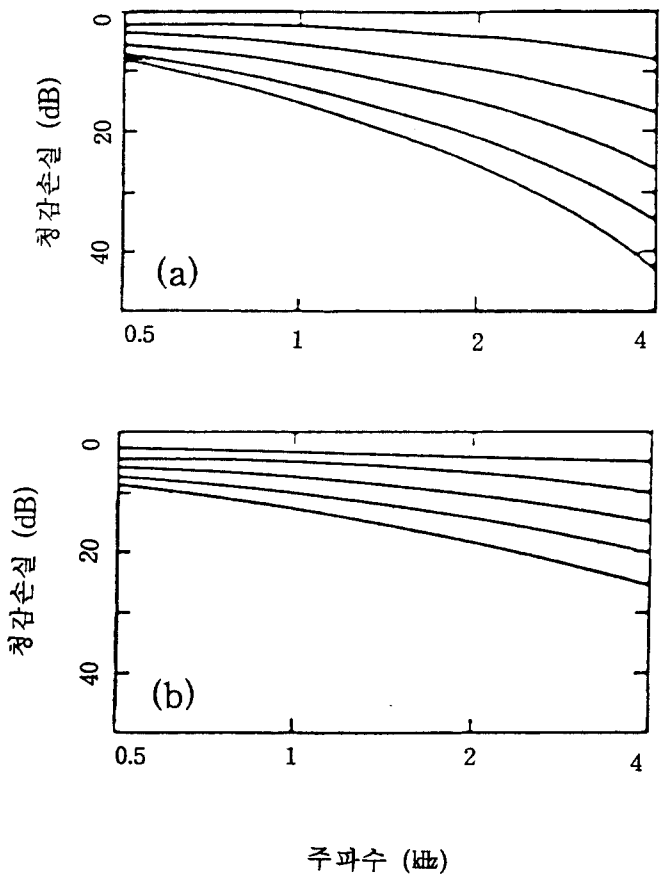


그림 5 20세를 기준으로 연령증가에 따른 청감손실. (a) 남자. (b) 여자. 곡선은 위로부터 40, 50, 60, 65 및 70세의 나이를 나타낸다.

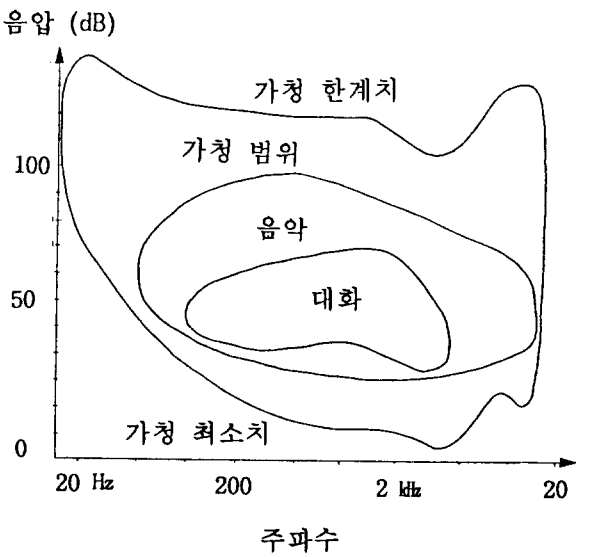


그림 6 사람이 대화시 사용하는 영역.

가지게 된다. 마치 한쪽 손에 빨래줄을 잡고 갑자기 흔들었을 때(즉, 높은 주파수)에는 손목 가까이에서 최대 횡방향 진폭이 나타나고, 천천히 흔들면(낮은 주파수) 손에서 멀리 떨어져있는 곳에서 최대 횡방향 진폭이 나타나는 원리와 같다. 한편, 코르티 기관의 청신경 세포는 기저막의 횡방향 진폭이 최대인 위치에서 소리를 감지하도록 분포되어 있다. 따라서 코르티 기관을 따라 놓여져 있는 청신경 세포중 등자뼈쪽에서는 고주파의 신호를, 안으로 들어 갈수록 저주파 신호를 감지하게 된다. 기저막의 분산 현상은 그림 7에 보여져 있다. 그림에서 보이는 실선은 기저막의 횡방향 진동을 나타내는 것으로 中耳뼈에서부터 전달되어 오는 자극의 특성, 즉 소리의 스펙트럼 형상에 따라 다른 파형을 가지게 된다.

그림 8은 기저막의 입구에서부터 안쪽으로 가면서 감지하는 주파수 대역을 보여 주고 있다. 기저막은 1.3mm마다 1/3 옥타브 밴드로 신호를 분리시키는 임계 주파수폭(Critical band)을 가지고 있다. 우리가 소음 측정시 흔히 1/3 옥타브 분석을 하는 이유도 인체의 청감 특성과 부합시키기 위한 것이다.

이와같이 기저막은 여러개의 필터로 구성되어 있는 필터 조합(Filter bank)으로서, 귀에 들어오는 소리를 각각의 주파수 대역별로 동조(tuning)시키는 기계식 스펙트럼 분석장치라 할 수 있고 기저막의 동조 주파수는 안으로 들어갈수록 단위 거리당 0.25옥타브/mm의 비율로 낮아진다. 현재까지 측정되어 있는 기적막의 최소 진폭은 3Å(3.0×10^{-10}m)으로 알려져 있다.

청각기관이 조금이라도 손상되면 제일 먼저 영향을 받는 곳도 기저막이다. 즉, 임파액이 라이즈너막을 통해 뒤섞이게 되면 기저막에서 감지하는 진행파의 분산현상에 영향을 주어 기저막에서 선별해 내는 주파수 분리 기능에 문제가 된다.

한편 기저막에 분포되어 있는 필터기능을 보면 저주파와 고주파의 신호를 감지하는 특성이 각각 다르다. 그림 9는 기저막의 주파수 선별기능 중 100Hz와 300Hz의 특

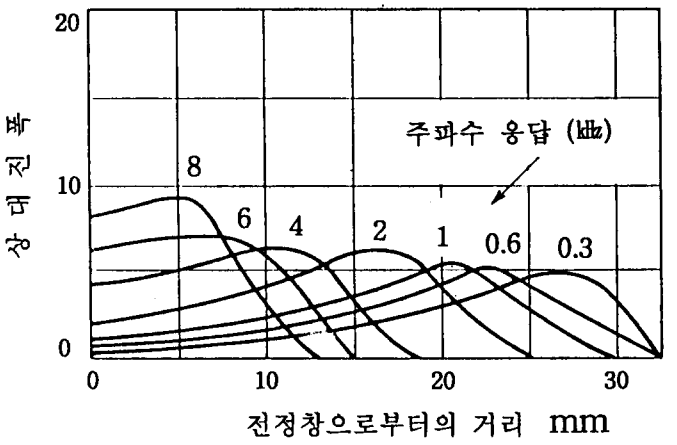


그림 8 기저막의 주파수 응답특성.

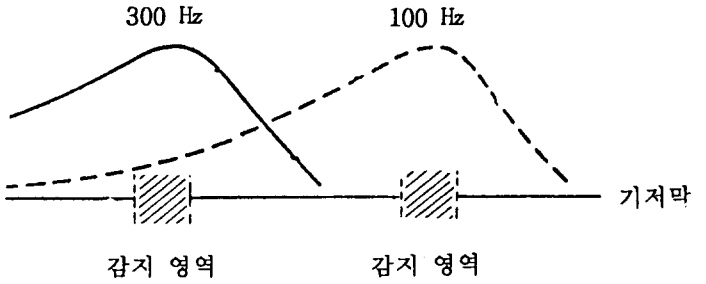


그림 9 기저막에서 나타나는 은폐효과.
저주파 신호는 고주파의 감지에 영향을 준다.

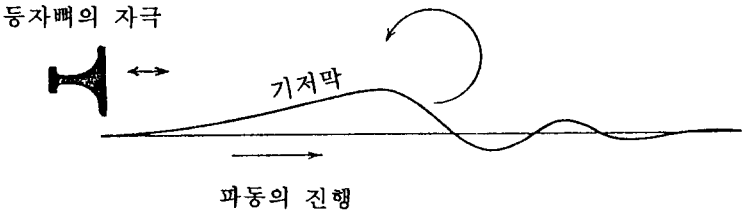


그림 7 기저막의 진동파형. 등자뼈가 자극하는 음의 주파수 성분에 따라 파형의 최대진폭 위치가 달라진다. 기저막 진폭이 최대가 되는 곳에는 청신경이 놓여져 있어 해당주파수 성분만을 감지해 낸다.

성만을 따로 나타낸 것이다. 그림의 빗금친 구간이 해당 주파수 성분을 감지하는 인식영역이다. 그림에서 볼 수 있듯이 300Hz의 높은 주파수 소리가 기저막을 자극할때에는 저주파쪽 신호를 감지하는 구간을 방해하지 못한다. 그러나 100Hz의 낮은 주파수 신호가 기저막을 가진시키면 입구쪽도 반응하므로 높은 주파수(300Hz) 신호의 감지구간을 일부 방해한다. 즉, 입력되는 소리는 그보다 높은 주파수 대역의 소리를 은폐시키게 된다. 이것을 은폐효과(Masking effect)라 하며 소음을 제거시키는 방법중의 하나로 쓰인다. 그림 10은 1.2kHz의 협대역 음원에 의해 나타나는 은폐효과를 보여주고 있다. 가해지는 음원보다 높은 주파대역으로 갈수록 은폐시킬 수 있는 범위가 넓어지기 때문에 그림에 나타나 있는 곡선은 대칭이 되지 않고 오른쪽으로 치우쳐 나타난다. 가령 80dB, 1.2kHz의 협대역 음원을 발생시키면 소음(50dB 기준)을 1.0kHz부터 2.0kHz까지 은폐시킬 수 있다. 물론 발생음원의 강도가 높아지면 은폐시킬 수 있는 구간은 더 넓어진다.

그러나 음 강도가 비슷하고 주파수도 거의 같은 두 종류의 소리가 동시에 들어오면 신호를 감지하는 기저막이 서로 인접한 곳에 있으므로 두가지의 소리를 구별할 수 없게 된다.

6. 청각기관의 이해 : 그 동안 밝혀져 온 과정

인간 자신이 가지고 있는 감각기관에 대한 관심은 인류의 문명과 함께 시작되었다. 특히, "어떻게 보고(Vision), 어떻게 듣는가(Hearing)"에 대한 호기심은 과학발전의 출발점이었다. Newton 시대의 물리학이 광학(Optics)과 음향학(Acoustics)으로 구성되었던 것을 보아도 알 수 있다. 과연 인류는 언제서부터 듣는 현상에 관심을 두어 왔을까.

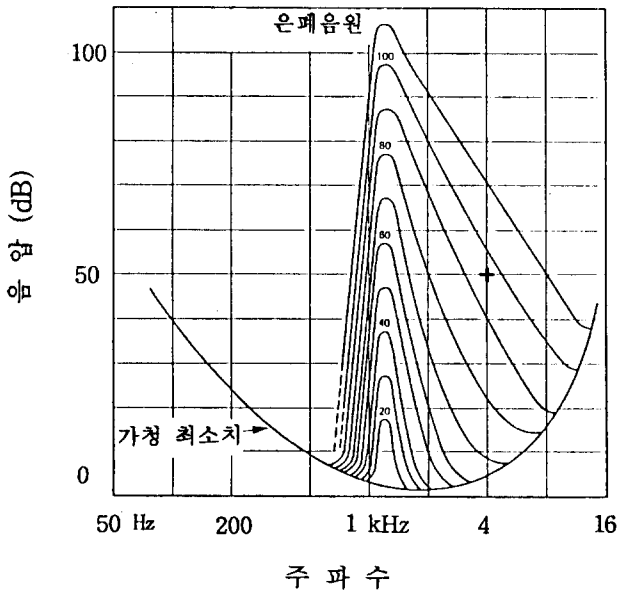


그림 10 협대역음원(주파수: 1.2kHz)이 미치는 은폐효과.

사람이 소리에 대한 관심은 멀리 기원전 6세기 피타고라스에 의해 시작되었다, 피타고라스는 공기가 진동해서 소리가 발생한다고 생각하였다. 기원전 4세기, 히포크라테스는 인체의 머리뼈가 진동하기 때문에 소리를 듣는다고 주장하였다. 귀는 단순한 공기주머니라고 알고 있었다(뼈를 통해 소리를 듣는다는 생각이 무리가 아닌 것이, 실제 사람은 소리의 일부를 머리뼈와 가슴의 울림을 통해 듣는다고 하며 특히 머리뼈를 통해서는 800Hz~1500Hz 주파수 대역의 소리가 전달된다. 한 예로, 난청환자를 위해 개발된 보청기 중에는 귓바퀴 뒤의 머리뼈를 기계적으로 가진시켜 소리를 듣게 만드는 장치도 있다).

이러한 잘못된 지식은 히포크라테스 이후 지속되어 오다가 16세기 르네상스 시대에 와서야 해부학의 연구를 통해 귀의 역할을 다소나마 이해하게 되었다. 특히 中耳의 발견은 우연한 기회에서 비롯되었다. 1543년, 한 운 좋은 해부 학자가 골격의 표본을 만들기 위해 두개골을 닦고 있을 때 귀에서 조그마한 뼈가 굴러 나왔다. 그 부근을 절개해 보니 또다른 조그만 뼈를 볼 수 있었다. 이와같이 우연하게 中耳에 있는 3개의 뼈 중 망치뼈와 모루뼈등 2개를 발견하였는데, 쌀알의 절반 크기인 등자뼈는 후에 찾아졌다.

16세기 후반에 들어와 이탈리아의 팔로피오는 달팽이관과 세반고리관의 존재를 확인하고, 사람이 소리를 듣는 것은 달팽이관 안에 있는 공기가 청신경의 끝을 자극시키기 때문이라고 설명하였다. 이때까지도 달팽이관은 공기주머니라 믿고 있었다.

달팽이관이 액체로 채워진 사실은 18세기 후반 독일 과학자에 의해 밝혀졌다. 메켈은 추운 겨울날,

귀를 포함한 두개골을 하루 동안 야외에 방치한 후, 이튿날 해부해 보니 달팽이관 안이 얼어 있었다. 2000년 이라는 긴 세월동안, 귀가 공기주머니라고 잘못알고 있던 지식이 올바르게 밝혀지는 순간이었다.

이 후, 현미경이 발명되면서 이탈리아의 해부학자 코르티는 1851년 內耳의 세부 구조를 관찰하여 기저막(Basilar membrane)과 함께 소리를 감지하는 청신경 세포를 찾아냈다. 청신경의 중추인 코르티 기관(Organ of Corti)은 그의 업적을 따서 붙인 이름이다.

달팽이관이 있는 기저막이 위치에 따라 선택적으로 주파수를 감지한다는 이론은 19세기 후반 독일 헬름홀쯔에 의해 확립되었다. Kirchhoff-Helmholtz 방정식의 주인공이기도 한 그는 기저막 폭의 길이에 따라 공진 주파수가 결정된다고 주장하였다. 즉, 달팽이관에 있는 기저막은 입구에서는 좁고 안으로 들어갈수록 넓어지므로 입구 쪽에서는 높은 음을, 안쪽에서는 낮은 음을 감지한다는 공진이론(Place theory)을 발표하였다. Helmholtz의 공진 이론이 오늘날 옳은 것은 아니나, 기저막이 여러 개의 필터로 이루어져 있어서 특정 위치에서 선택적으로 주파수를 분석 한다는 개념이 정립되었다.

20세기 중반에 들어와 청각 메카니즘의 올바른 이해는 헝가리의 전자공학자 Bekesy에 의해 밝혀졌다. Bekesy는 Helmholtz 이론의 모순점을 보완하여 자신이 제작한 정교한 기구와 전자장치를 통해 압력파가 기저막을 자극하면 파동이 발생하며 그 파동의 진폭이 가장 높은 곳에서 소리를 감지한다는 진행파 이론(Traveling wave theory)을 발표하고 실험을 통해 입증하였다. 즉, 달팽이관의 입구에서는 기저막의 폭이 좁고 장력이 커서 팽팽히 당겨져 있고, 안으로 들어갈수록 폭이 넓어지면서 장력이 작다. 따라서 낮은 음의 주파수가 기저막을 자극했을 때에는 파동진폭의 최대치가 안쪽에서 나타나고, 높은 음의 주파수가 자극할 때에는 달팽이관 입구쪽에서 최대진폭이 나타남을 관찰하였다. 그러므로 안쪽에 있는 청신경 세포는 저주파 성분을, 입구쪽에서는 고주파 성분을 감지한다고 설명하였다. Bekesy는 이 실험의 결과로 1961년 노벨 생리학·의학상을 받았으며 이는 현재까지 청각기관 연구에 대한 唯一無二한 노벨상 수상이기도 하다.

7. 청감의 신비 : 남아 있는 의문점

Bekesy 이후 많은 생리학, 음향학 관련 학자들이 소리를 전기적 신호로 바꾸는 과정, 대뇌에서의 신호 처리와 분석 방법, 그리고 소리의 의미를 선택적으로 받아들이는 스크린 능력(예:한 밤중에도 아기의 낮은 울음소리에 잠이 깨는 어머니)등 청각기관의 탁월한 기능을 이해하려고 노력하고 있으며, 수많은 미결 사항이 해답을 기다리고 있다. 특히 외국의 학술대회에 참석해 보면, 대가로 알려져 있는 유명한 학자들이 노년에 접어들면서 청감 연구쪽으로 분야를 바꾸어 흥미로운 결과를 발표하는 것을 종종 볼 수 있다. 청감의 신비로운 현상 중 공학분야와 관련하여 연구되고 있는 몇가지 사항을 기술하면 다음과 같다.

7.1 달팽이관에 대한 모델링

內耳의 복잡한 청감현상을 이해하기 위해서는 먼저 달팽이관에 대한 수학적 모델링을 작성하고 이에 대한 시뮬레이션이 수행되어야 한다. 컴퓨터를 통해 수치해석 능력이 발전되면서 달팽이관에 대한 모델링 기법은 청각기관의 연구 중에서 가장 활발한 분야이다.

모델링 과정에서 아직까지 해결되지 않은 두가지 문제는 청신경에서 특정 주파수 소리만을 선별하는 능력과 비선형 신호처리 과정에 대한 이해이다.

첫번째의 주파수 선별기능은 "어떻게 달팽이관 안에 있는 수많은 청신경들이, 놓여져 있는 위치에 따라 고유의 특정 주파수 대역만을 감지하는가? 또, 동시에 대단히 좁은 밴드폭의 신호만을 통과시키는 협대역 통과필터(Narrow band pass filter)로서 기능을 어떻게 할 수 있는가?"에 대한 의문이다. 기저막이 횡방향으로 진동하여 주파수 대역을 동조시킨다고 알고 있지만, 보다 구체적으로 이러한 기계적인 동조가 어떻게 이루어지는지는 아직 밝혀져 있지 않다. 불과 35mm 길이에서 20Hz~20kHz인 가청주파수 대역 전범위를 동조시키는 물리적 변수값을 과연 구할 수 있을지 의문스럽다.

두번째는 달팽이관의 비선형 특성에 대한 모델링이다. 달팽이관에서는 100dB 정도의 대단히 폭넓은 동적변위를 가지고 물리적인 음압을 감지한 후 신호를 압축시켜서 청신경에 보내고 있다. 과학자들은 청신경 세포에서 감지할 수 있는 동적 변위를 60dB 수준으로 예측하고 있다. 과연 달팽이관은 어떠한 방법으로 입력되는 신호를 정보의 손실 없이 비선형적으로 처리하는지 그 이유를 아직 설명하지 못하고 있다.

현재는 모델링의 시작단계이기 때문에 실제의 비선형모델 대신에 선형 모델로 단순화시켜서 물리적 변수 값을 찾아가고 있다. 기본적

인 선형모델의 형태는 그림 11에 보여져 있다. 그림에서 Mb는 코르티 기관의 질량, Mt는 피개막의 질량을 나타내며 Mb와 Mt는 스프링과 댐퍼 Kc와 Rc를 통해 연결되어 있다. Mb와 Mt는 다시 각각 Kb, Rb 및 Kt, Rt를 통해 외부와 연결된다. 선형모델로서 많이 쓰이는 방식은 CAM(Cochlear amplifier model)과 RTMM(Resonant tectorial membrane model)이 있으며 두 가지 모델링의 차이점은 주파수 동조방법이다.

향후, 주파수 동조특성과 비선형 압축기능을 모델링하게 되면 소리를 느끼고 분석하는 우리의 탁월한 청각기관을 보다 논리적으로 이해할 것으로 예견된다. 청각기관의 모델링이 이루어지면 청각장애자 문제에 효과적으로 접근할 수 있을 것이다.

7.2 귀에서 방출되는 소리 (Otoacoustic Emission)

건강한 귀는 소리를 들을 뿐만 아니라 낮은 음압의 소리를 발생시킨다. 즉, 달팽이관 안에서 소리를 만들어 中耳를 통해 外耳로 방출되는 현상이다. 소리가 발생되는 경우는 두가지이다.

첫번째는 외부의 자극이 전혀 없는 상태에서 순수히 독자적으로 소리를 만드는 경우로 자생방출(Spontaneous Emission)이라 한다. 자생방출시에는 작은 소리가 지속적으로 발생된다. 통계에 의하면 정상적인 청각기관을 가진 사람의 50%가 소리를 자생방출 시킨다고 보고 되어 있다.

두번째 경우는 외부의 자극에 의한 자극방출(Evoked Emission)현상이다. 外耳에 짧은 순음(Tone)을 주거나 충격음(Click sound)등 자극을 가하면 달팽이관에서 메아리(Echoes)가 생겨 수 초 후 소리가 발생된다. 정상적인 귀는 100 % 자극방출 기능을 가지고 있다. 그러나 외신경 세포의 손상으로 난청이 된 사람은 자극방출 기능이 없다. 따라서 자극방출 현상은 외신경 세포와 관련이 있을 것으로 추측하고 있다.

한편, 자극방출 현상은 난청여부를 객관적으로 판단하는 기준으로 사용되고 있다. 특히 유아나 어린이와 같이 소리를 들어도 자신의 의견을 표현하지 못하는 경우에 유용하게 쓰인다.

자생방출과 자극방출의 원인은 아직 규명되지 않고 있다.

7.3 능동제어 기구

지나친 소음에 장시간 노출되면 인체는 정신적으로 피곤할 뿐 아니라 소화불량·내분비계의 이상 등 신체에 여러 가지 부정적인 영향을 미친다. 인체의 피해가 지나치게 되면 우리의 청각기관은 소음 피해를 많이 입는 주파수 대역의 청신경 세포를 아예 제거 시킨다. 이와 같이 인체의 청각기관은 능동적으로 자기 보호 능력을 가지고 있으며, 아직까지는 외부 청신경 세포가 대뇌의 지시에 따라 유모털의 길이를 제어하고 있다는 사실까지만 알려져 있다.

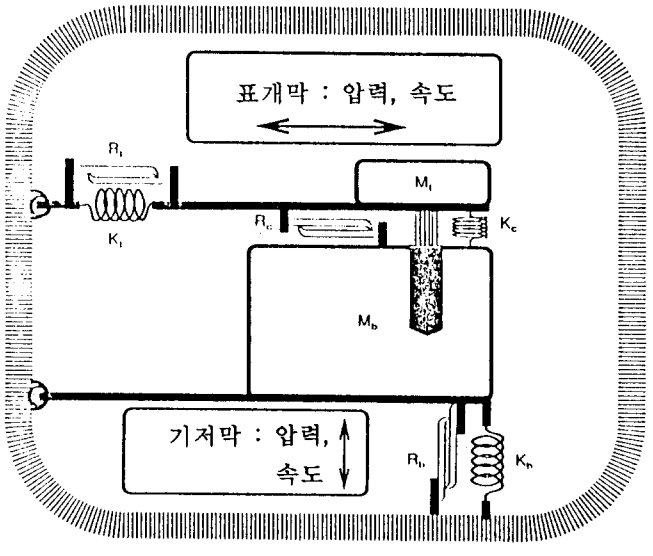


그림 11 달팽이관에 대한 선형 모델링의 예.

8. 맺 음 말

인체의 귀는 물리적인 크기에 비해 탁월한 능력을 가지고 있는 감각기관이다. 귓바퀴에 모여진 미소한 압력변동은 4cm의 길이에 놓여져 있는 귓구멍, 中耳 및 內耳를 통해 작게는 수백 배, 크게는 1,000배까지 기계적으로 증폭시킨다. 불과 완두콩 만한 크기의 달팽이관에서는 소리의 스펙트럼을 순간적으로 분석 처리하며, 비선형적으로 신호를 압축시키는 응답특성을 가지고 있다. 또, 수많은 청신경 세포가 내재되어 있어, 들은 소리를 대뇌에서 이용할 수 있는 신경 신호로 변환시켜 준다.

귀가 가지고 있는 신비로운 능력 중에서 우리가 알고 있는 지식은 극히 일부에 머무르고 있으며 아직도 많은 의문점이 해답을 기다리고 있다. 국내에서도 하루빨리 공학과

의학 분야가 협력하여 우리가 모르고 있는 청감의 신비를 규명하고 소음이 인체에 미치는 영향에 대한 한국판 연구 결과가 축적될 수 있기를 기대한다.

끝으로 소음에 대한 기본상식 몇 마디를 정리하며서 이 글을 맺는다.

- 정상적인 귀는 15 dB의 소리(Tone)를 듣는다.
- 82 dB의 소리를 듣지 못하면 난청이다.
- 소리가 5 dB변화하면 인체의 귀는 확실한 차이를 느낀다. 10 dB 증가하면 소리가 2배 커졌다고 느낀다. 3 dB의 변화는 단지 무엇인가 달라졌음을 느끼는 정도이다. 따라서, 소음대책이 효과적이기 위해서는 최소 5 dB이상을 저감시켜야 한다.
- 소리가 잘 들리지 않을 때에 우리는 한 손을 귓바퀴로 가져가 소리를 모은다. 과연, 효과가 있을까.

  정답 : 6 dB 증가시킴으로 효과 있음.

참 고 문 헌

(1) Bekesy, G., 1960, "Experiments in Hearing," McGraw-Hill.

(2) Stevens, S.S and Warshofsky, F., 1978, Sound and Hearing", Time-LIfe Books, Inc.

(3) Newby, H.A., 1964, Audiology, Appleton-Century-Crofts, N.Y.

(4) Allen, J.B. and Neely, S. T., 1992, "Micromechanical Models of the Cochlea", pp. 40~46, Physics Today.

(5) The World around Us, Encyclopaedia Britannica, Inc. (1984).

(6) Chaffin, D.B. and Anderson G.B.J, 1984, "Occupational Biomechanics", John Wiley and Sons, Inc.

(7) Hassel, J.R. and Zaveri, K., 1979, "Noise Measurement", BK.

(8) Flock, A., "Active 「noise」 in the Hearing Organ-An Auditory Sensitivity", pp. 13~16, Inter-Noise 90.

(9) Henderson, D., etc.(editors), Effects of Noise on Hearing, Raven Press, NY. (1976)