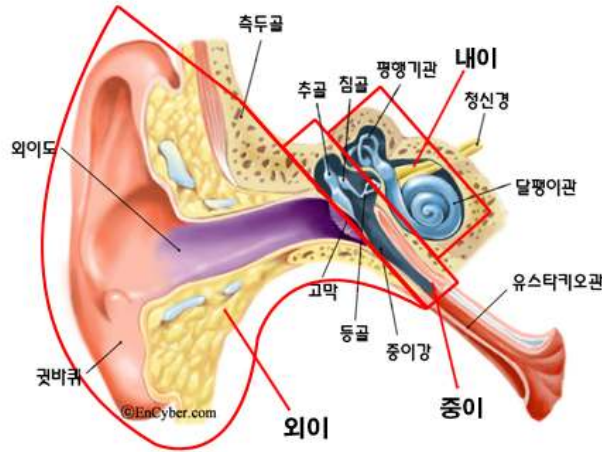


1. The Ear and How It Works

Max Mathews

1.1 Structure of the Ear



[그림 1] 귀의 구조

- 고막의 진동이 청소골로 전해져 난원창을 때리면 달팽이관의 림프에 파동이 유발되어 기저막을 움직이게 되고, 기저막의 진동이 유모세포의 털을 자극하게 되면 털이 구부러지면서 세포에 수용기 전위를 유발하게 되는 것이 대뇌에서 소리를 인식

외이	·귓바퀴 (Pinnae) - 소리를 수집 - 방향성을 가진 필터로 작용
	·이도(Ear canal) - 내이로 소리를 전달함
중이	·고막(Eardrum) - 외이로부터 전해진 압력을 기계적 진동으로 전환
	·청소골(Ossicles) - 3개의 뼈로 이루어짐 : 추골(Hammer or Malleus), 침골(Anvil or Incus), 등골(Stirrup or Stapes) - 고막의 진동을 증폭시킴
내이	·난원창 (Oval window) : 등골의 진동을 달팽이관에 전달 - 압력변환 일으킴
	·달팽이관(cochlea) : 물리적 에너지를 전기적 에너지로 전환
	·반고리관(Semicircular canal, 세반고리관) : 평형감각에 관계

[표 1] 귀의 구조와 역할

- 청각구조의 반응순서
 - ① 귓바퀴에서 음파 수집
 - ② 파이프 공진기(2-5Khz) 역할을 하는 외이도를 통해 전달
 - ③ 고막이 압력을 받아 기계적 진동 일으킴
 - ④ 에너지를 청소골에서 증폭
 - ⑤ 난원창에 맞선 중이의 등골의 진동이 내이의 달팽이관 압력 변화시킴
 - ⑥ 달팽이관이 기계적 자극으로 두개골 밑의 세포를 자극
 - ⑦ 피질기관의 모공세포에서 청신경을 통해 뇌로 전기적 자극 전달

1.2 음향적 음영과 필터

- 어깨는 소리를 컷바퀴로 반사시킴
- 머리는 acoustical shadow를 야기
 - 머리에 의해 생기는 shadowing은 소리의 좌·우를 결정하는 중요한 단서
 - 특히 높은 주파수 영역대가 이를 판단하는데 중요함
 - 20-30ms의 소리 전달차가 있을 경우 사운드 소스의 각도 변화를 인지하는데 중요한 단서가 됨
- 컷바퀴의 회선에 의해 주파수 특성이 바뀜
- 어깨, 머리, 이도 등의 크기에 따른 주파수 특성의 관계

Musical Pitch	Frequency(HZ)	Wavelength(IN.)
A2	110	123
A3	220	62
A4	440	31
A5	880	15
A6	1760	7.7
A7	3520	3.8
A8	7040	1.9

[표 2] 피치와 주파수에 따른 파장의 길이

- 어깨(약 6 inch, 15.25cm)는 A5와 A6사이에 머리(약 8inch, 20.32cm)는 A6 위, 컷바퀴(약 2inch, 5.08cm)는 A8위에 영향을 미침
- 귀의 윗부분을 접으면 소리의 위치 식별이 어려워짐
- 헤드폰을 사용할 경우 소리가 머리 외부의 어떤 지점으로부터 출발하였는가에 대한 정보 부재
 - 더미 헤드(dummy head) 사용시 음원의 각도 지각 가능
- 이도의 길이는 1인치를 조금 넘고 지름은 1/4인치 정도 됨
- 이도의 크기를 고려하면 3,000hz 주변에서 가장 커짐. 즉 귀의 가장 민감한 대역은 3,000Hz 주변

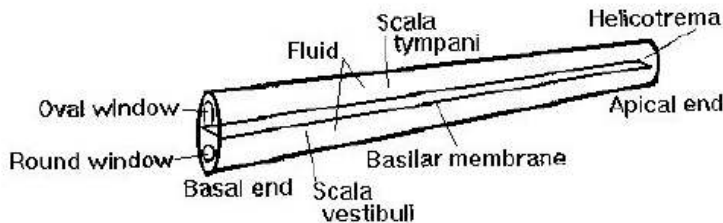
1.3 Inside the Ear



[그림 3] Dummy Head Recording

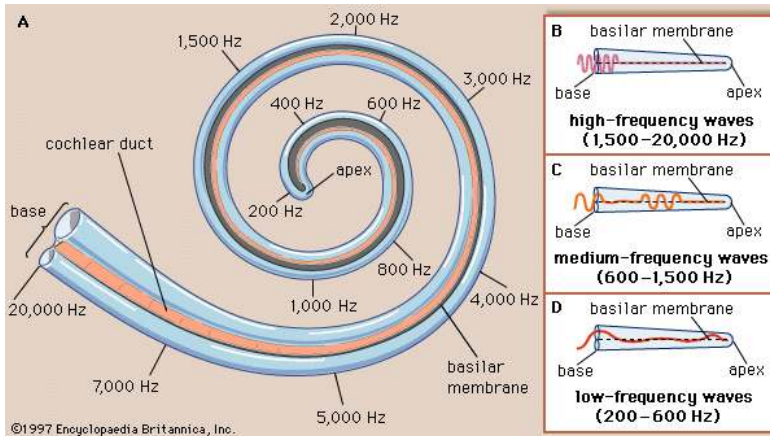
- 고막이 사운드에 응답하여 진동 후 이소골의 연결 작용에 의해 달팽이관으로 전달
- 각 뼈들의 연결 부분이 경직되면 등골근(stapedius muscle)의 수축에 의해 진동의 전달도 감소
 - 내이를 보호하기 위한 음향 조절 역할
 - 커다란 소리는 근육의 수축을 유발, 달팽이관으로 소리 전달 기능 감소
 - 이런 반사작용은 지속적인 소리에 대해서는 정상적으로 작용하지만 총성과 같이 짧고 강도가 높은 사운드로부터 보호하는 기능은 떨어짐

1.4 달팽이관의 기저막의 주파수 분석



[그림 4] 달팽이관을 펼쳐놓은 그림

- 기저막의 부위별로 각각 다른 특정 음파에 의하여 진동
 - 고주파는 기저부의 기부에서 최대의 진동을 발생시킴
 - 중주파는 기저막의 중앙 부분에서 최대의 진동을 발생시킴
 - 저주파는 기저막의 정점부분에서 최대의 진동을 발생시킴
- 기저막은 다른 주파수에 대해 그에 해당하는 다른 위치의 섬모를 자극함



[그림 5] 기저막의 주파수 분석 능력

1.5 임계 대역폭(Critical Bandwidth)

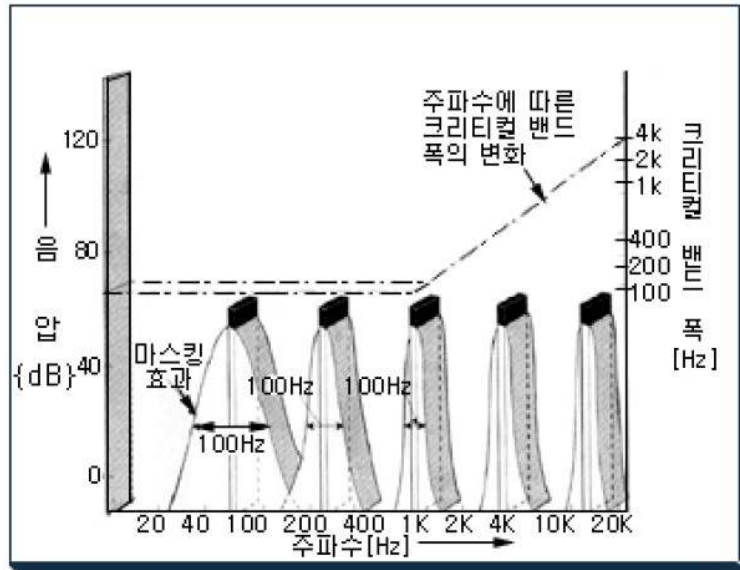
1.5.1 임계 대역

- 두 개의 사인 신호가 상호작용하는 영역 혹은 마스킹 효과가 생기는 영역을 의미
- 실험에 의하면 귀의 임계대역은 높은 주파수보다 낮은 주파수에서 훨씬 좁음

Bark Scale: 사인파에 반응하는 기저막의 위치를 24개의 대역으로 분리

Bark scale 임계대역	주파수(Hz)		
	저음	고음	폭
0	0	100	100
1	100	200	100
2	200	300	100
3	300	400	100
4	400	510	110
5	510	630	120
6	630	770	140
7	770	920	150
8	920	1080	160
9	1080	1270	170
10	1270	1480	210
11	1480	1720	240
12	1720	2000	280
13	2000	2320	320
14	2320	2700	380
15	2700	3150	450
16	3150	3700	550
17	3700	4400	700
18	4400	5300	900
19	5300	6400	1100
20	6400	7700	1300
21	7700	9500	1800
22	9800	1800	22
23	12000	15500	3500
24	15000	22050	6550

[표 3] 주파수에 따른 임계 대역폭



[그림 6] 임계 대역폭

1.5.2 Masking Effect

- 특정 소리가 다른 소리를 인지에 영향을 미치는 현상
- 음량이 큰 소리가 음량이 작은 소리를 방해
- 비슷한 주파수 대역의 소리가 서로를 방해
 - 가까운 주파수의 소리는 가릴 수 있지만 멀리 떨어져 있는 주파수의 소리는 마스킹할 수 없음
- 저음은 고음을 쉽게 마스킹 할 수 있지만 고음은 저음을 마스킹 할 수 없음

1.5.3 Beating

- 2개의 근접한 주파수의 파형이 중복되어 위상의 조합에 따른 부강 및 상쇄 간섭에 의해 두 주파수의 차에 해당하는 주파수로 진동
 - 가까이 있는 두 개의 사인파로 구성된 사운드에 대한 실험
 - 두 주파수의 차이를 조금 늘리면 바이브레이션을 느끼게 됨
 - 주파수 차이를 크게 벌리면 두 개의 독립음으로 명확하게 구분됨