



7주차 음파

3교시 음파와 청각

맥놀이와 도플러 효과

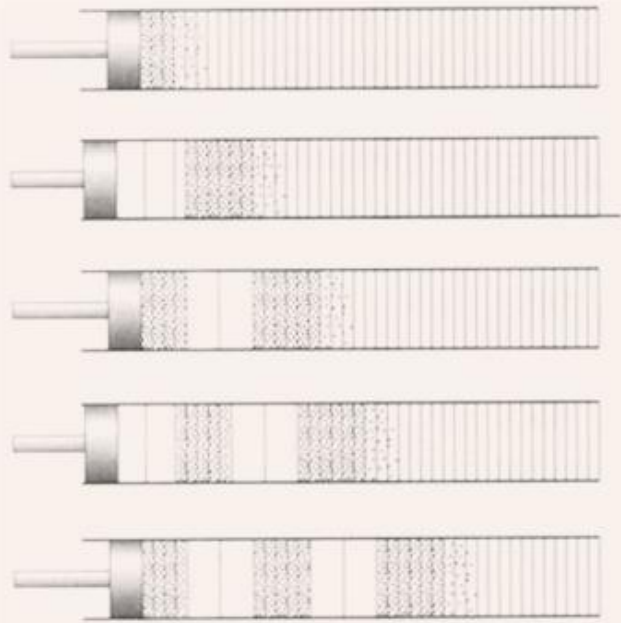
음파는 압력이 시간과 공간에 따라서 진동하면서 발생합니다.

맥놀이는 진동수가 비슷한 두 음파가 중첩할 때 생기며, 도플러 효과는 음원과 관찰자의 상대적 운동에 의해서 들리는 소리의 진동수가 변하는 현상입니다.

이번 시간에는 음파에 대해서 자세히 살펴봅니다.

1. 음파

음파는 기체, 액체, 고체의 매질을 통해서 전달됩니다. 음파는 매질에서 압력 변화에 의해서 발생합니다. 그림3과 같이 피스톤을 좌우로 진동시키면 공기 입자의 밀도(입자의 밀도가 작은 곳의 압력이 낮다) 진동이 발생하면서 음파가 전파됩니다. 즉, **압력이 시간과 공간에 따라서 변하며 전달됩니다.** 따라서 **음파를 ()** **라 부르기도** 합니다.



<그림3 - 음파의 생성과 전파>

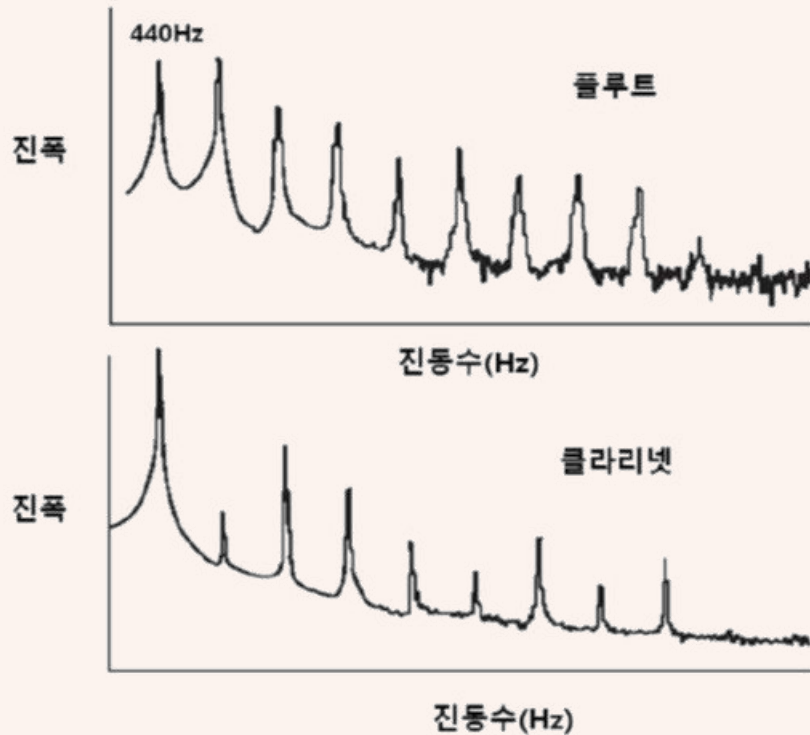
실온의 공기에서 음파의 전달 속력은,
음파의 속력 = 345m/s 입니다. 온도가 높아지면
음파의 속력은 (공기 중에서) 비례해서 커집니다.

$$\text{음파의 속력} = (331 + 0.6T)\text{m/s}$$

여기서 T는 공기의 온도이며, 단위는 °C이다.

2. 소리의 스펙트럼

✎ 악기나 사람의 소리는 여러 진동수의 음이 섞여 있다.

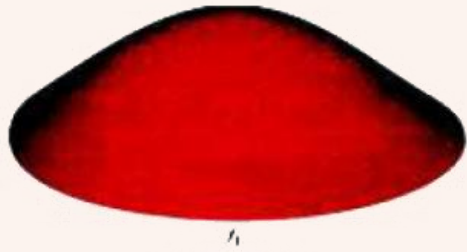


소리를 분해하여 어떤 주파수들이 섞여 있는지 알아내는 방법이 **푸리에 변환(Fourier transformation)**이다. 그림은 플루트와 클라리넷에서 나는 소리를 푸리에 변환하여 소리의 스펙트럼(spectrum)을 본 것이다. 플루트는 기본진동수 440Hz의 배수에 해당하는 화음들이 섞여 있다.

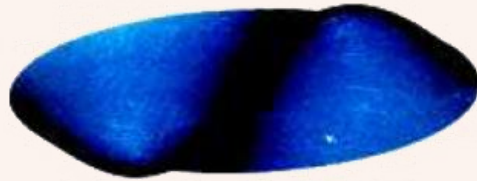
다른 주파수의 소리는 거의 나지 않는다. 화음들의 진폭도 서로 다른데 귀로 들을 때 진폭의 차이가 소리의 에너지에 비례하기 때문에 다른 음색을 느끼게 된다.

절대 음감을 가지고 있는 사람은 악기의 진동수들을 구별할 수 있다.

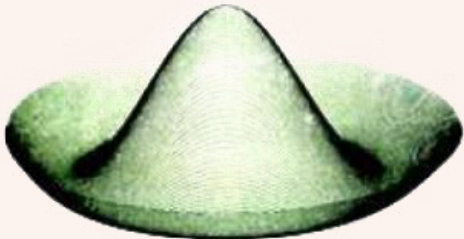
<그림 - 음파의 생성과 전파>



f_1



$1.593f_1$



$2.295f_1$



$2.917f_1$



$3.599f_1$

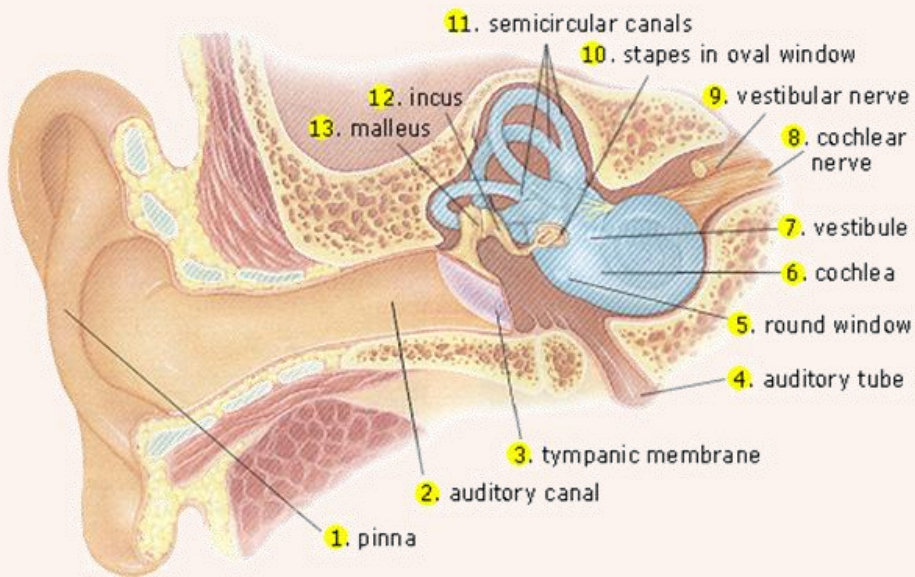


$4.230f_1$

그림은 북, 장구 등의 타악기에서 면의 진동 모습을 나타낸 것이다. 왼쪽 상단이 기본진동이다. 면진동의 화음은 기본진동의 정수배가 아니다.

면의 진동이 주변의 공기를 진동시켜서 소리를 낸다. 타악기는 현악기나 관악기와는 다른 입체적인 음색을 느낄 수 있다.

타악기의 소기를 프리에 변환하여 스펙트럼을 살펴보면 그림의 면진동에 해당하는 위치에서 강한 피크를 볼 수 있다.



- 1 pinna(귓바퀴)
- 2 auditory canal(바깥귀길, 외이도)
- 3 tympanic membrane(고막)
- 4 auditory tube
(귀인두관, 이관, 유스타키안관)
- 5 round window(달팽이창, 정원창)
- 6 cochlea(달팽이, 와우)
- 7 vestibule(안뜰, 전정)
- 8 cochlear nerve(달팽이신경, 와우신경)

- 9 vestibular nerve(안뜰신경, 전정신경)
- 10 stapes in oval window
(안뜰창에 붙어있는 등자뼈)
- 11 semicircular canals
(반고리뼈관, 반원관)
- 12 incus(모루뼈, 침골)
- 13 malleus(망치뼈, 추골)
- ★ stapes(등자뼈, 등골)
- ★ round window(달팽이창, 정원창)
- ★ oval window(안뜰창, 난원창)

<청각기관의 구성과 기능>

귀의 구분		구성	기능	물질
와이		외이도, 고막	소리를 고막에 전달	공기
중이		귓속뼈, 귀인두관	소리를 증폭	공기
내이	달팽이	코르티기관, 털세포	소리를 전기신호로 변환	액체
	정적평형(균형)	원형주머니	상하운동 감지	액체
		타원주머니	수평운동, 머리 구부림 감지	
	동적평형(회전)	반원고리뼈관	회전감지	

2. 소리의 세기

소리의 세기는 단위 시간당 단위 면적당 공간을 지나는 소리의 에너지에 의해서 결정됩니다.

음파의 세기는 () (dB)로 나타냅니다. 음파의 세기는 기준세기 (1000Hz의 소리를 귀로 들을 수 있는 한계 세기) $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 에 대해서 정의합니다. 따라서 30dB의 음파는 10dB의 소리보다 100배 강합니다. 표1은 여러 소리 세기를 나타낸 것입니다. 귀로 들을 수 있는 소리는 진동수 20Hz에서 20,000Hz 사이의 음파입니다.

소리	데시벨	세기(W/m ²)
고통의 한계	120	1
락 그룹	110	10^{-1}
기차소리	90	10^{-3}
보통의 대화	65	
속삭임	20	10^{-10}
나뭇잎의 흔들림	10	10^{-11}
들을 수 있는 한계	0	10^{-12}

$$\text{세기 I 인 음파의 데시벨 눈금} \\ (10 \text{ dB}) \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

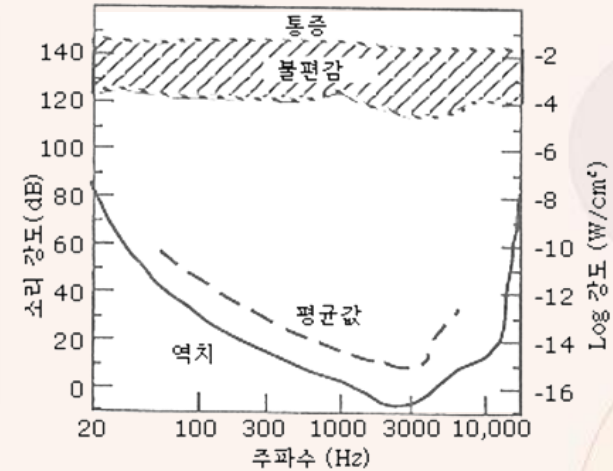
소리를 들을 때 음의 높낮이는 진동수에 의해서 결정됩니다.

소리의 세기는 진동수에 따라서 달라집니다. 진동수가 30,000Hz인 초음파는 아무리 세기가 강해도 귀로 들을 수 없습니다. 인간이 가청 주파수를 갖는 이유는 귀와 청신경 등의 해부학적인 구조 때문입니다.

소리는 여러 가지 진동수가 섞여있습니다. 소리의 스펙트럼은 진동수들의 결합을 나타내며, 인간이 심리적으로 느끼는 반응을 음질(음색)이라 합니다. 음악은 기본 진동수들을 결합하여 얻은 소리로 인간이 들었을 때 감정을 느끼게 합니다. 반면 무작위의 진동수의 혼합인 소음은 들었을 때 불편한 기분을 느끼게 합니다.

외이도(auditory canal)

- 귀는 약 3000Hz 근처에서 가장 민감
- 외이도의 길이는 약 2.5cm이고 직경은 연필의 직경 크기
- 외이는 한쪽 끝이 막힌 관으로 생각하면 공명 주파수는 약 3,300Hz ($\lambda = 10\text{cm}$)



- ✎ 주파수 3000Hz 의 청력 한계치(hearing threshold, 청각역치)에서 고막은 10^{-11}m 진동한다. (수소원자의 크기보다 작다)
- ✎ 주파수 20Hz에서 고막은 10^{-7}m 진동한다. (가시광선의 파장보다 작다)
- ✎ 160dB 이상의 소리에서 고막은 파열되며, 파열된 고막은 다시 정상적으로 치유된다.
- ✎ 귀는 20Hz에서 20,000Hz까지 1천 배 변하는 주파수를 들을 수 있지만 눈이 인지하는 빛의 주파수는 오직 두 배뿐이다.



사람이 들을 수 있는 소리 세기의 영역 - 10^{12} 배 영역
 눈으로 빛을 볼 수 있는 세기의 영역 - 100배 영역

예제 1)

뿔조개껍질을 귓가에 대면 소리가 나는 것은 무엇 때문인가?

풀이)



사람의 귀가 소리를 들을 수 있는 문턱압력은 고막을 원자 지름의 $1/10$ 정도 움직이는 압력에 해당합니다. 뿔조개껍질이 **헬름홀츠 공명기(Helmholtz resonator)** 역할을 하기 때문입니다. 주위에서 부드러운 소리가 조개 껍질 안에 들어오면 그 소리의 일부는 조개 껍질의 공명 진동수와 일치하는 소리를 가지고 있습니다. 조개 껍질을 귀에 대면 공명 진동수와 일치하는 소리가 조개 껍질 내에서 정상파를 형성하며 이렇게 증폭된 소리는 귀가 들을 수 있는 문턱 압력 이상의 압력을 갖기 때문에 귀로 소리를 들을 수 있습니다. 조개 껍질의 내부가 복잡한 구조를 가지므로 공명 진동수들이 결합한 파는 조화롭지 못합니다. 따라서 합쳐진 소리는 "백색소음"과 비슷하게 들립니다.

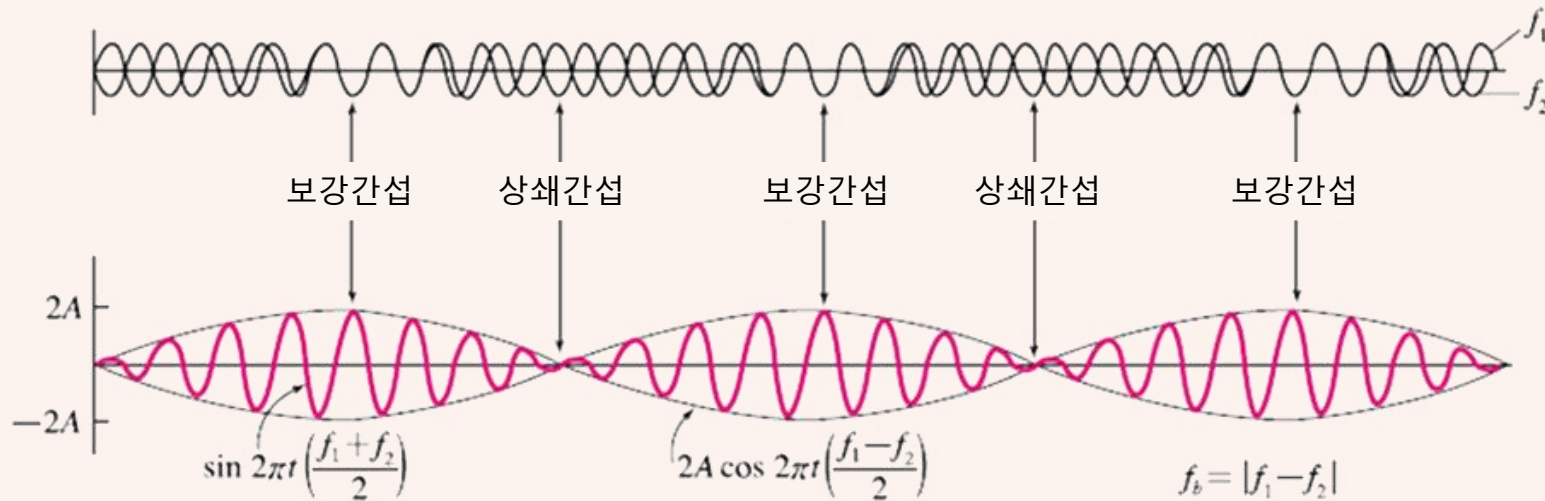
※ 백색소음

모든 진동수들이 같은 세기로 혼합되어 있는 소음을 뜻합니다. 일상적인 소음이 이에 속합니다. 백색소음을 프리에 변환해 보면 스펙트럼이 모든 진동수에 대해서 일정하게 나옵니다.

3. 맥놀이와 도플러 효과

맥놀이

진동수가 거의 비슷한 두 음파를 듣고 있으면 맥놀이(beat)가 발생합니다.
아래 그림과 같이 합성음이 커졌다 작아졌다 합니다.



$$y = y_1 + y_2 = A \sin(2\pi f_1 t) + A \sin(2\pi f_2 t)$$

$$= \underbrace{\left[2A \cos \left\{ 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t \right\} \right]}_{\text{진폭}} \sin \left\{ 2\pi \left(\frac{f_1 + f_2}{2} \right) t \right\}$$

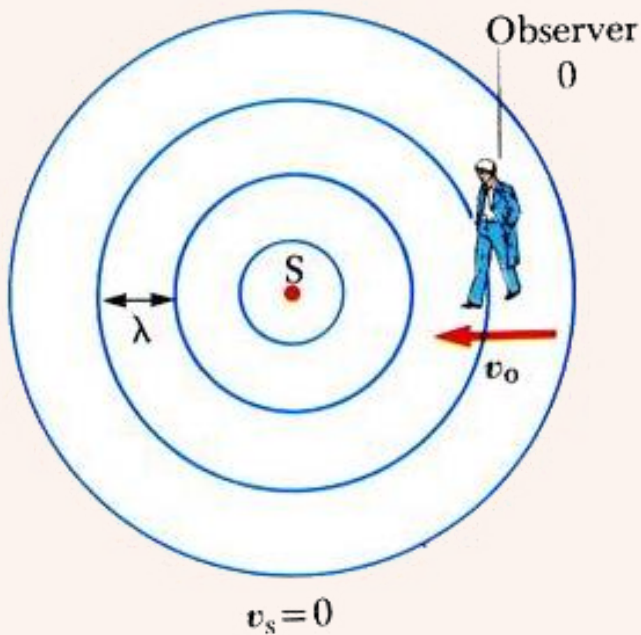
진폭

$$f_b = |f_1 - f_2| : \text{맥놀이 진동수}$$

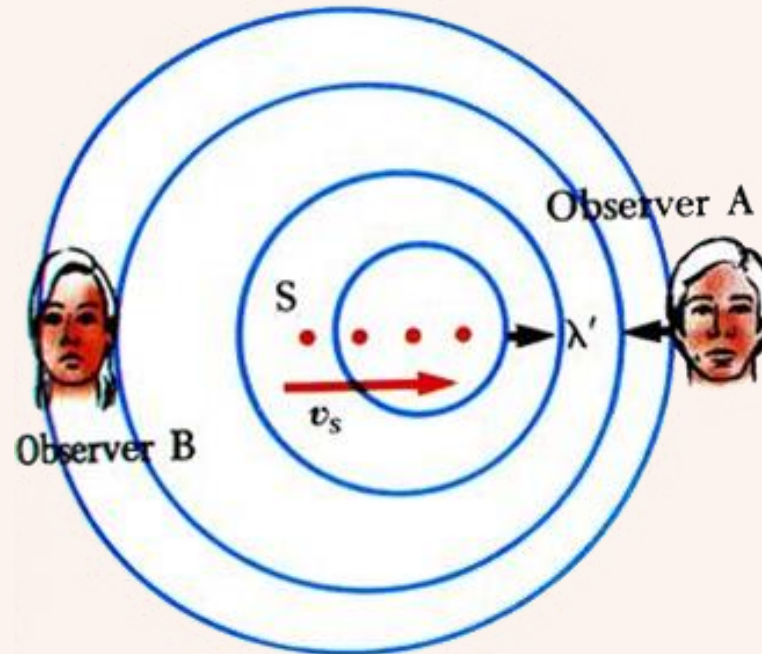
3. 맥놀이와 도플러 효과

도플러 효과

관측자와 음원이 서로 상대적으로 움직이면 들려오는 소리의 변화가 발생합니다. 이러한 현상을 **도플러 효과(Doppler effect)**라 합니다.



<음원은 정지해 있고 사람이 음원으로 접근하는 경우
→ 진동수는 커진다>



<사람은 정지해 있고 음원이 접근하거나 멀어지는 경우
→ 음원이 접근하면 진동수가 커진다>

예제 2)

경주용 자동차가 스쳐 지나가는 소리를 들어보라. 진동수가 줄어드는 굉음이 들릴 것이며, 지나쳐 가면 아무 소리도 들리지 않는다. 왜 그런가?



풀이)

바로 도플러 효과 때문입니다.

파원이 가까이 다가오면 파장이 압축되고 진동수가 증가합니다. 반대로 파원이 멀어지면 파장이 늘어나고 진동수가 감소합니다. 따라서 자동차가 다가오다 멀어지면 진동수가 높아졌다 낮아집니다.

이 때문에 경주용 자동차가 스쳐 지나갈 때 굉음을 듣게 됩니다.

지금까지 음파에 대해 알아보았습니다.