

소리 물리학의 기본 개념

성균관대학교 의과대학 강북삼성병원 이비인후과학교실

진 성 민

= Abstract =

The Physics of Sound

Sung Min Jin, MD

Department of Otolaryngology-Head and Neck Surgery, Kangbuk Samsung Hospital,
Sungkyunkwan University School of Medicine, Seoul, Korea

The laws of physics that govern actions of all moving bodies apply to sound. Because sound and all acoustic conditions consistently behave as described by the law of physics, we are able to predict and analyze the nature of a sound and its interaction. A fundamental understanding of the nature of the sound and terms used to describe it is essential to comprehend the language of otolaryngologists, audiologists, music acousticians, and engineers. Moreover, studying the basic physics of the sound helps one recognize complexities and potential pitfalls in measuring describing sound. We will talk about the structure of sound and its components, and we will see the various qualities of sound that make it interesting and useful to understand.

KEY WORDS : Physics · Sound.

소리(sound)는 하나의 움직이는 형태를 가지고 있기 때문에, 움직이는 물체에 적용되는 물리학적 법칙들이 모두 적용 될 수 있다. 따라서 우리는 소리의 실체에 대하여 물리학적 접근을 통하여 분석할 수 있고 그들의 상호작용에 대하여 예측하고 연구할 수 있다.

소리의 정의(Definition of Sound)

소리라는 것을 물리적 측면에서 설명한다면, 음원(sound source)으로부터 방사되는 압력파(pressure wave)가 매질(medium)내에서 전달되는 것이라 정의 할 수 있고,¹⁾ 이러한 소리가 일으키는 파동을 음파(sound wave)라 한다. 여기서 매질은 어떤 압력 등에 의해서 위치가 변화 되었을 때 가능한 빨리 자기 위치로 돌아오려는 성질을 가지고 있으며, 어떤 파동 또는 물리적 작용을 한 곳에서 다른 곳으로 옮겨 주는 매개물 역할을 하는데, 공기나 물 같은 것들이 그 예라 할 수 있다.^{1,2)} 압력파는 매질의 입자들이 진동하는 과정에서 만들어 지며 이들이 주변의 밀도보다 높아지는 과정과 낮아지는 과정이 발생하면

서 파형(waveform)을 만드는데 이를 각각 압축(compression)과 희박(rarefaction)이라 한다(Fig. 1).¹⁻⁴⁾

이와 같은 소리가 전달되는 속도는 매질의 종류와 성질에 따라 달라지지만, 우리가 주로 듣게 되는 공기 중에서 소리의 전달 속도는 대기의 온도, 기압, 습도 등에 따라서도 달라진다. 따라서 평균 기압에서 대기의 온도가 약 섭씨 15도 정도 된다면, 소리의 속도= $331/45 \text{ m/sec} + 0.6 \text{ m/s} \times \text{섭씨온도}$ 의 공식에 대입하여 약 340.45 m/sec 정도 되는 것을 알 수 있다.

음파(Sound Wave)

앞서 언급한 바와 같이 소리가 만들어 내는 파동을 음파라 하는데, 소리가 어떤 것인가에 따라 일으키는 파동의 모양이 모두 다르다. 이러한 음파는 크게 단순파(simple wave, sine wave)와 복합파(complex wave)로 나누어 볼 수 있고, 복합파는 주기성을 갖는 주기파(periodic wave)와 비주기파(aperiodic wave)로 분류 할 수 있다. 단순파는 음파의 가장 단순한 형태로서 소리굽쇠의 진동으로 만들어지는 파형이 sine wave 모양을 보이며, 복합파는 우리가 일상에서 들을 수 있는 대부분의 소리로서 주기성을 갖지 못하는 경우는 귀에 거슬리는 잡음(noise)으로 들리게 된다.⁵⁾ 이러한 음파를 이해하기 위해서는 하나의 압축과 하나의 희박으로 하나의 진동을 표현하는 단순파를 대상으로

논문접수일 : 2011년 11월 5일
책임저자 : 진성민, 110-746 서울 종로구 평동 108
성균관대학교 의과대학 강북삼성병원 이비인후과학교실
전화 : (02) 2001-2266 · 전송 : (02) 2001-2273
E-mail : strobojin@hanmail.net

그들의 구성요소, 즉 주파수(frequency), 파장(waveform), 진폭(amplitude), 위상(phase) 등에 대하여 알아보는 것이 가장 좋은 방법이다.

1. 주파수(Frequency)와 피치(pitch)

주파수는 주기파에서 반복적으로 관찰되는 한 단위의 패턴이 일정한 시간 내에 얼마나 반복되는 가를 나타내는 것이다.^{1,5)} 보통 알파벳 소문자 f로 표시하며, 단위는 hertz(Hz) 또는 cycle per sec(cps)를 쓴다. 따라서 1 Hz라 함은 1초에 반복적으로 관찰되는 한 단위의 패턴이 1번 있음을 의미한다. 피치는 어떤 주파수의 음을 듣고 어떻게 느끼는가를 표현하는 단어이다. 따라서 주파수가 클수록 피치는 높다고 표현한다. 주파수에 대한 척도를 알아보는 방법으로 옥타브(octave)가 있다.^{1,6,7)} 이것은 2를 밑(base)로 하는 로그 척도로 표현 된다고 할 수 있는데, 음악에서 한 옥타브가 증가할 때 주파수는 두 배로 증가되어 척도 된다. 즉 500 Hz의 주파수를 갖는 음이 한 옥타브 올라가면 1,000 Hz가 되고, 또한 옥타브 올라가면 2,000 Hz가 되는 식이다. 이는 배음계(harmonic series)로부터 산출된 것으로 생각된다.

2. 파장(Wavelength)과 주기(period)

파장과 주기는 비슷한 개념으로 받아들여 질 수 있는데, 단 순파를 놓고 볼 때 파장은 거리 또는 길이의 개념으로써 하나의 진동에서 한 점으로부터 다음 진동에서 동일한 지점까지의 거리를 의미하며 그리스 문자 λ로 표시한다(Fig. 2). 반면 주기라 함은 시간의 개념으로써 하나의 완전한 진동을 완성시키

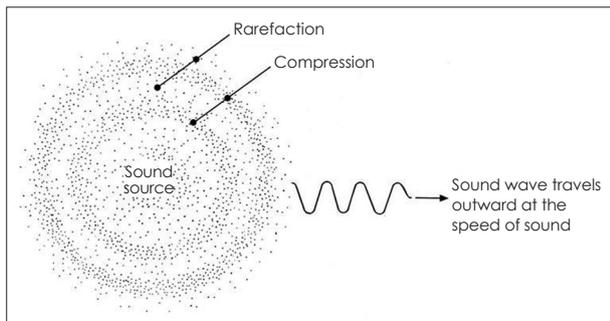


Fig. 1. Propagation of sound waves (Based on Perkijis and Kent 1986).

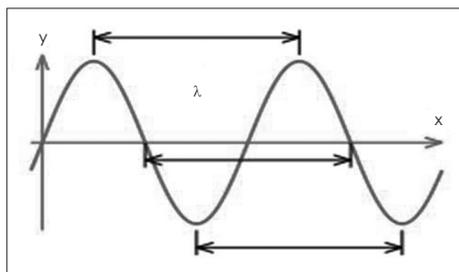


Fig. 2. Sine wave : wavelength (λ).

는데 걸리는 시간을 의미하며 알파벳 대문자 T로 표시한다.^{1,5)} 이들은 주파수와는 반비례의 관계에 있으며, 수식으로 예를 들어 보면, 600 Hz의 주파수를 갖는 음파가 300 m/sec 속도를 가지고 있는 경우 파장은 0.5 m/cycle, 주기는 1/600초이다.

3. 진폭(Amplitude), 음압(sound pressure), 강도(intensity)

진폭은 물리학적 측면에서 보면 매질의 입자가 정지상태에서 이동한 양이라 할 수 있고, 그래프로 표현되는 파형에서는 그 파의 높이를 나타낸다(Fig. 3). 측정단위는 데시벨(dB)을 사용하며 진폭이 크면 그만큼 소란스러운 소리라 할 수 있다. 그런데 소리에서 진폭이라 함은 음압을 말하는 것인데, 이는 공기분자가 진동에 의해 인접 공기분자를 미는 힘을 의미하고 측정단위는 파스칼(Pa)이다.

그렇지만 우리는 음압 자체보다는 음압의 전파에 더 관심이 있는데, 파동의 방향을 따라 전달된 힘을 강도라 하고, Watt/m²의 단위를 사용하고 강도는 음압의 제곱에 비례하는 관계를 가지고 있다. 그리고 사람이 들을 수 있는 가장 작은 소리의 강도는 10⁻¹⁶ watt/cm²인데, 이를 음압으로 환산하면 20 μPa이다. 이 값이 절대가청임계값(absolute sound threshold)이다.

강도는 진폭과 유관해서 진폭이 크면 강도도 크다고 할 수 있다. 비록 진폭이 음파의 진동에서 보이는 실제적인 속성이라는 하지만, 우리가 듣는 소리의 에너지는 강도(intensity, pressure amount)에 의해서 더 분명하게 측정되고 표현된다.

4. 데시벨(dB)과 음압수준(sound pressure level)

앞서 언급한 강도와 음압의 단위인, Watt/m²와 파스칼(Pa)은 모두 소리의 절대적인 힘을 나타내는 단위이고, 소리의 상대적인 힘 나타내는 단위가 있는데 이것이 데시벨(dB)이다. 데시벨(dB)은 인간의 청각기관이 음의 강도를 감지하는 방식을 연구한 것을 바탕으로 산출된 단위로 로그단위를 바탕으로 하고 있다. 이러한 상대적인 에너지를 산출하는 식은 dB=20log₁₀(P_a/P_b)로 표현할 수 있고, 여기서 P_a는 측정된 에너지 값, P_b는 기준이 되는 에너지 값이 된다. 이때 우리가 측정된 값을 무엇

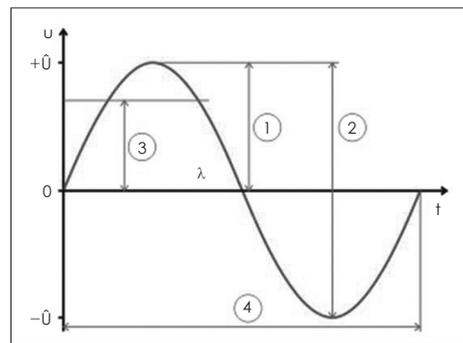


Fig. 3. Sine wave : amplitude, ① peak amplitude ② peak to peak amplitude.

과 비교하는 가에 따라 그 값이 달라질 수 있는데, 많이 쓰는 기준은 절대가청임계값(absolute sound threshold)인 20 μPa 이다. 따라서 이값을 기준으로 계산된 강도의 수준을 음압수준(sound pressure level, SPL)이라 하고, 0 dB SPL이라 함은 우리 귀가 들을 수 있는 최소한의 소리를 의미한다.⁴⁻⁶⁾

5. 위상(Phase)

위상이란 반복되는 파형의 한 주기에서 첫 시작점의 각도 또는 어느 한 순간의 위치를 말하고, 사인 곡선간의 시작점의 차이를 위상차(phase difference)라 할 수 있다. 사인 곡선은 주기적인 모습을 보이기 때문에 원과 관련하여 각도로 표현할 수 있는데, 사인곡선의 첫 번째 꼭지점은 90도의 위상을, 중간 지점은 180도의 위상을, 그리고 하나의 사인 곡선이 완성된 지점은 360도의 위상을 나타내는 지점이 된다. Fig. 4는 90도의 위상차를 보이는 두 개의 사인 곡선을 보여준다.

음파의 간섭현상(Sound Wave Interference)과 정상파(Standing Wave)

여러 개의 음파가 매질에서 전달되는 과정에서 음파들 간에 상호작용에 의하여 간섭현상이 나타날 수 있다. 예를 들어 두 개의 음파에서 압축부분이 서로 일치하거나 희박부분이 일치하는 경우 더 큰 값의 압축부분의 에너지, 또는 더 큰 희박부분의 에너지를 만드는 현상이 일어나는데 이는 결국 더 강한 진폭을 이루는 현상으로, 이를 건설적 간섭(constructive interference)이라 하고, 반대로 희박부분과 압축부분이 만나 서로의 에너지가 상쇄되는 현상을 상쇄적 간섭(destructive interference)라 한다. 그런데 만약에 주어진 매질 내에서 동일한 주파수를 갖는 두 개의 음파가 서로 마주보고 진행하여 이들이 합쳐지는 경우, 마치 진행하여 나아가는 음파가 아니라 제자리에 멈춰서 진동을 하고 있는 것과 같은 형태로 보이는 파동이 만들어지는데 이를 정상파(standing wave, stationary wave)라 한다.^{3,4)} 이러한 정상파에는 진동이 없는 부분과 진동이 가장 크게 일어나는 부분이 만들어 지는데, 이때 진동이 없이 음

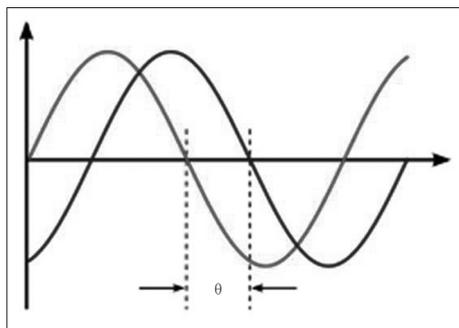


Fig. 4. Sine wave : phase difference (θ).

직이지 않는 부분을 마디(node)라 하고, 가장 진동이 크게 이루어진 부분을 배(antinode)라고 하며(Fig. 5) 마디와 배가 공간적으로 이동하지 않는 특징을 보인다. 이러한 정상파는 공명현상과 깊은 관계가 있는데, 파이프 오르간을 만들 때 이들의 길이를 적절하게 조절해서 건설적 간섭이 일어나 정상파를 형성할 수 있도록 하는 것이 하나의 예라 할 수 있다.

The Quarter-Wave Resonance Tube

물리학에서 이야기 하는 공명이라는 것은 진동계가 그 고유진동수와 같은 진동수를 가진 외부로부터의 힘을 주기적으로 받아 진폭이 뚜렷하게 증가하는 현상이라 정의할 수 있는데, 이러한 주파수들을 그 진동계의 또는 시스템의 공명 주파수(system's resonance frequency)라고 한다. 사람의 성도(vocal tract)도 성대로부터 만들어진 소리의 주파수들 중에 특정 주파수들에 대해서만 공명을 일으키는데, 이러한 성도의 공명주파수는 성도의 길이나 모양에 따라 달라지게 된다.

성도의 공명에 대하여 알아보기 위해서는 튜브를 모델로 튜브 내에서 음파의 간섭현상을 살펴보면 쉽게 이해 할 수 있다. 사람의 성도는 성대 쪽은 막혀 있고 입 쪽은 열려 있는 튜브의 형태를 보이므로 튜브도 그와 같은 모양인 것에서 음파의 간섭현상과 공명현상에 대하여 알아보면 된다.^{3,4,7)} Fig. 6에서, 막혀 있는 쪽에서는 성대의 떨림으로 소리를 만들어내는 음원이 위치한 부분이고, 반대편의 열린 부분은 입술이라고 가정해 보자. 음원이 시작되는 지점은 소리가 밀려나오는 압력파가 시작되는 곳이기 때문에 압축(compression) 상태이고 이것이 전달되어 튜브를 따라 진행하여 열려있는 부분(입술)까지 오면, 이 압축상태의 압력파가 갑자기 열린 공간을 만나면서 희박(rarefaction)의 상태로 변하는데, 이때 이 희박이 규모가 압축의 규

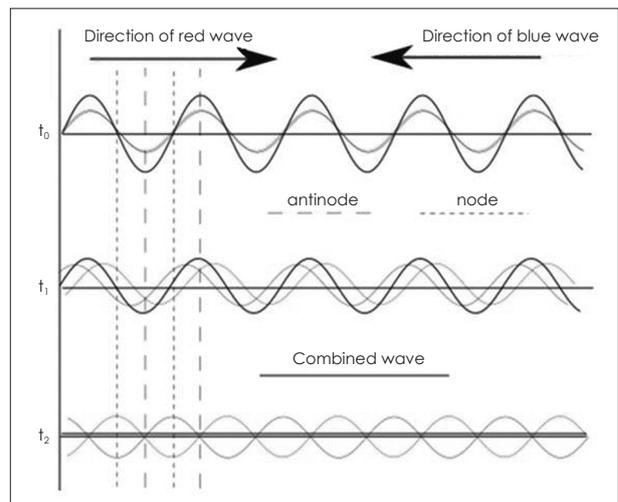


Fig. 5. Standing waves : node and antinode.

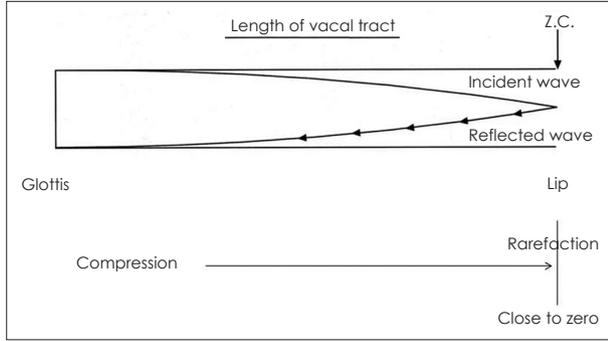


Fig. 6. Quarter wave resonance.

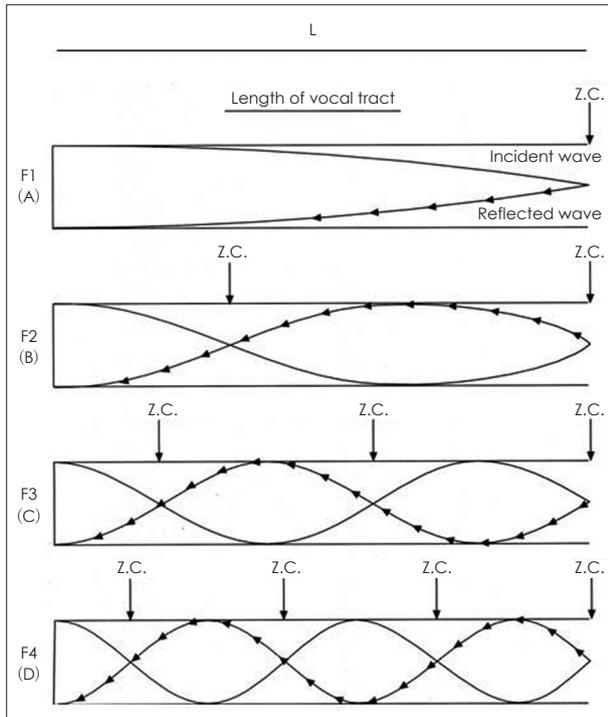


Fig. 7. Quarter wave resonance tube & formants. Z.C. : zero crossing.

모와 거의 비슷한 크기가 되면서 압력파의 압력이 거의 0에 가까워져서 열린 공간으로는 압력파가 거의 진행해 나가지 못하는 현상이 생긴다. 즉 입술근처는 압력이 거의 0이 되고 압축도 희박도 아닌 상태로 된다. 그런데 음파의 진행에 있어서 매 질 내에서 그 음향학적 저항이 갑작스럽게 변화되는 상황에서는 반사파를 만드는 현상이 발생하는데,⁴⁾ 이 경우도 동일한 현

상이 일어나서 반사파가 음원이 있는 부분으로 진행하게 된다. 이와 같은 과정이 한번의 왕복 과정을 되풀이 되며, 음원으로 만들어지는 파형들은 이런 왕복과정을 되풀이 하게 된다.⁴⁾ 이 과정에서 정상파가 만들어지는데, 막혀있는 부분(음원 부분)은 두 개의 파가 합쳐지면서 압력이 두 배가 되고, 열려있는 부분은 두 개의 파가 서로 상쇄되면서 압력이 0이 된다.

Fig. 7을 보면, (A)는 에너지가 0이 되는 Z.C.(zero crossing)이 열린 부분에서 처음 만들어지고 이때 닫힌 부분에 에너지는 약 두 배가 되는 파형인데, 가장 낮은 음형대가 만들어지는 파의 파장은 튜브길이의 4배 인 경우를 나타낸다. 즉 튜브의 길이가 파장의 1/4일 때 가장 낮은 음형대가 형성된다는 것이다. Fig. 7의 (B)에서는 튜브의 길이가 파장의 3/4일 때 두 번째 음형대가 만들어지는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 7의 (C)에서는 튜브의 길이가 파장의 5/4일 때 세 번째 음형대가 만들어지는 것을 알 수 있다. 그래서 이러한 과정을 몇 가지 수식의 연산과정을 거쳐 한쪽이 막히고 한쪽은 열려있는 튜브에서 음형대 주파수를 구하는 식을, $F_n = (2n-1)(c/4L)$, [F : formant frequency of open-closed tube, n : any positive integer, c : speed of sound, L : length of tube]로 표현 할 수 있다. 따라서 이렇게 한쪽이 막히고 한쪽은 열려있는 공명튜브를 quarter-wave resonance tube라고 하고,^{3,4)} 사람의 성도가 이와 유사한 형태의 공명현상이 이루어짐을 알 수 있다.

중심 단어 : 소리 · 음파 · 물리학.

REFERENCES

- 1) Sataloff RT. *Voice science*. San Diego, CA: Plural publishing;2005. p.1-12.
- 2) Kent RD, Read C. *The acoustic analysis of speech*. 2nd ed. Canada: Thomson learning;2002. p.17-52.
- 3) Ware C. *Basics of vocal pedagogy*. USA: McGraw hill company; 1998. p.127-40.
- 4) Titze IR. *Principle of Voice Production*, 2nd ed. New Jersey: Prentice hall;2000.
- 5) 신지영. 말소리의 이해. 제2판. 서울: 한국문화사;2001. p.125-62.
- 6) Baken RJ, Orlikoff RF. *Clinical measurement of speech and voice*. 2nd ed. USA: Singular publishing group;2000.
- 7) Sundberg J. *Vocal tract resonance*. In Sataloff RT. *The Professional Voice: The Science and Art of Clinical Care*. 2nd ed. New York: Raven Press;1991.