

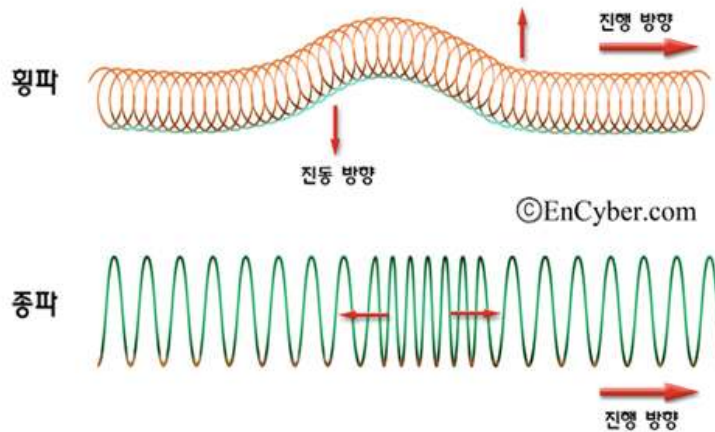
## 4. Sound Waves and Sine Waves

John Pierce

### 4.1 Sound and Sine Waves

#### 4.1.1 파의 진동

- 진동 : 단일 물체의 한 끝부분의 빠른 전후 운동 (예: 소리굽쇠)
- 파 : 돌을 수면에 연속적으로 던졌을 때 일어나는 동그란 물결처럼, 진동하는 음원으로부터 모든 방향으로 퍼져나가는 파동
- Longitudinal Wave (종파) : 파의 진동 방향과 파의 진행 방향이 일치하는 파  
예) 공기 중의 음(음파)
- Transverse Wave (횡파) : 파의 진동방향과 파의 진행 방향이 수직으로 직교하는 파  
예) 전파, 광파, X선



[그림 1] 횡파(위)와 종파(아래)

#### 4.1.2 음의 속도

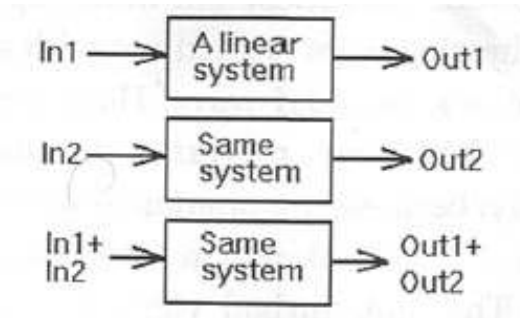
- 섭씨 20도에서 1초당 344m/s으로 진행
  - 1km 진행에 약 3초 소요
- 음속은 기온에 따라 변함
- 섭씨 1도 증가마다 0.6m/s 증가
- Sound : 헬륨에서 공기보다 3배 빠르게 진행
  - 종파는 고체나 그 밖의 다른 매질에서 더욱 빨리 진행

## 4.2 Linear Systems

- 사인파는 사실상 수학적으로 Linear System(선형)으로 묘사 가능

### 4.2.1 Linear System

- Sound Wave in air (linear for musical intensities)
- A Vibrating string (Linear for small amplitudes)
- A Vibrating chime or bell (ordinarily linear)
  
- The bones of the middle ear (linear for small change in level)

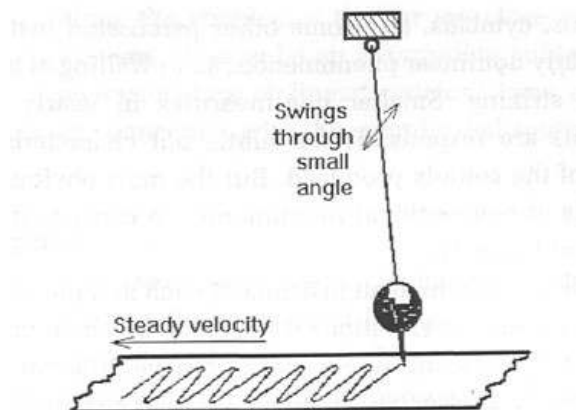


[그림 2] Linear System

- A system is linear if the output due to two overlapping inputs is the sum of the outputs to each input separately
  
- non linear system instruments
  - 탐탐, 심벌 등의 타악기
  
- Linear system instruments
  - 피아노, 기타, 벨, 공 : 이 악기들의 진동은 여러 주파수들의 사인 웨이브 합으로 나타남

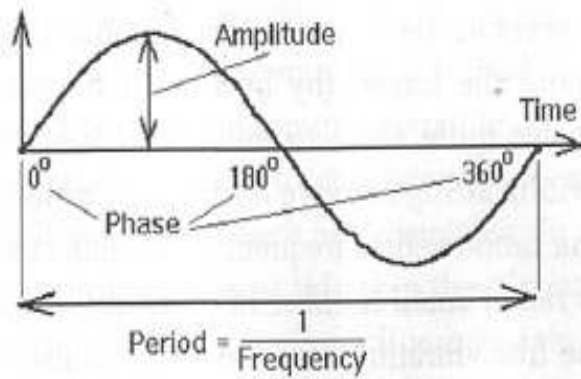
## 4.3 Sine Waves

- 사인 웨이브는 동일한 주기로 끊임없이 반복
  
- 움직임이 규칙적으로 종이에 그려짐



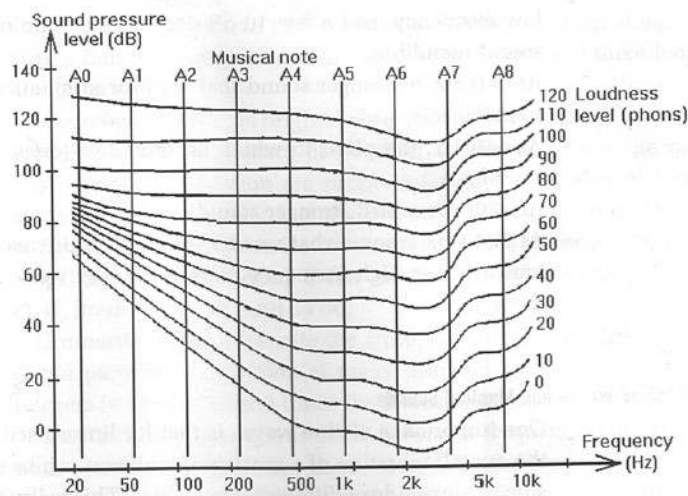
[그림 3] A swinging pendulum traces out a sine wave

- 사인 웨이브의 요소
  - i. 주기(period) : 하나의 파가 발생하여 처음의 위치까지 다시 오는 데 걸리는 시간
    - $period = 1 / frequency$
  - ii. 주파수 (frequency)
    - 1초에 진동하는 회수로 단위는 Hz를 사용함
    - 소리의 높낮이를 결정
    - 가청주파수 : 20Hz ~ 20kHz
    - 사람이 낼 수 있는 주파수 : 약 100Hz ~ 6kHz
    - 사람의 가장 민감한 청각 주파수 : 1kHz ~ 6kHz



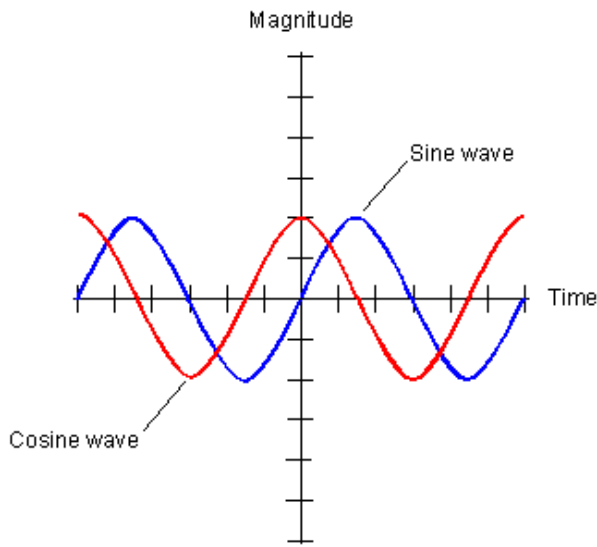
[그림 4] Sine waves are described completely by their frequency (or period), amplitude, and phase

- iii. 진폭 (amplitude) : 소리의 크기
  - 소리의 크기는 음압변화의 비율로 표현
  - 단위 : dB
  - 사람이 편하게 들을 수 있는 소리의 범위 : 0-90dB
  - 소리의 음고에 따라 사람이 듣는 감도가 틀림
  - 예) 같은 10dB라도 500Hz에서와 2000Hz가 다르게 들림
  - 주파수별로 사람이 지각하는 음량의 단위가 필요 : phons(심리적 변수의 크기)



[그림 5] Equal Loudness curve

- iv. 위상(phase) : 신호가 0으로 시작되는 offset 타임. 보통 각도로 표현



[그림 6] sine wave와 cosine wave

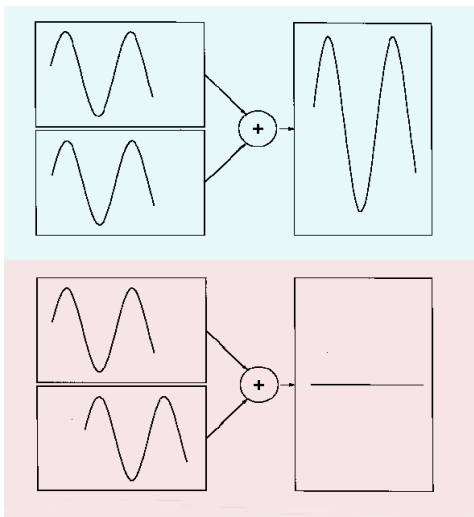


Figure 1: Perfect addition of in-phase sine waves.

Figure 2: Perfect cancellation of two sine waves offset by half a cycle.

[그림 7] in-phase and out of phase

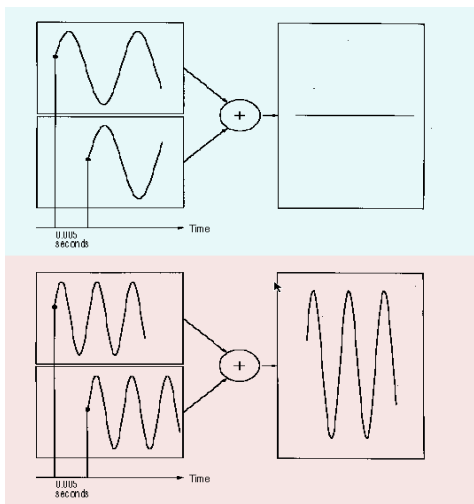
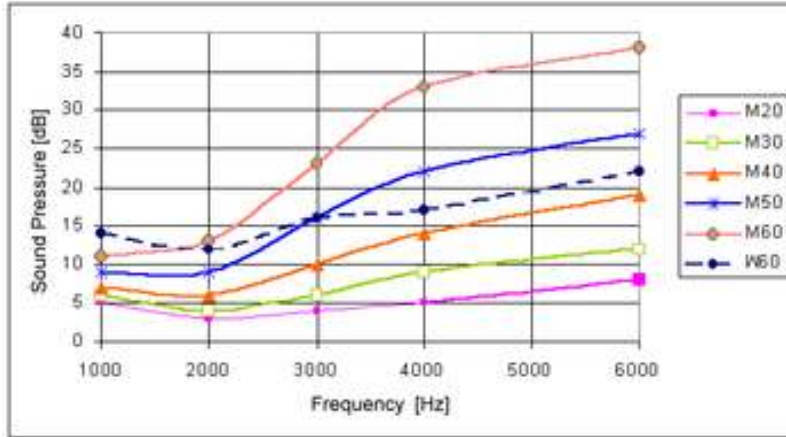


Figure 3: Perfect cancellation of a 100Hz sine wave shown as a timing difference.

Figure 4: Perfect addition of a 200Hz sine wave offset by the same amount.

[그림 8] phase cancellation and addition

- 최저 가청한계 (Threshold of Audibility)
  - 소리의 크기를 서서히 감소 시켰을 때 최초로 들리지 않는 주파수별 크기
  - 사람의 귀 : 3-5kHz에서 민감한 반응을 나타내며 저주파수 소리에는 둔감 함



[그림 9] Thresholds of hearing for male(M) and female(W) subjects between the ages of 20 and 60

#### 4.4 Sine Wave and Musical Sounds

- 모든 악기의 소리는 여러 주파수들의 사인웨이브의 합
- Wavelength : fundamental의 웨이브 길이보다 하모닉스의 웨이브 길이가 짧음
  - A0(27.5Hz) : 41feet(12.5m)
  - A7(3525Hz) : 0.32feet(0.1m)

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

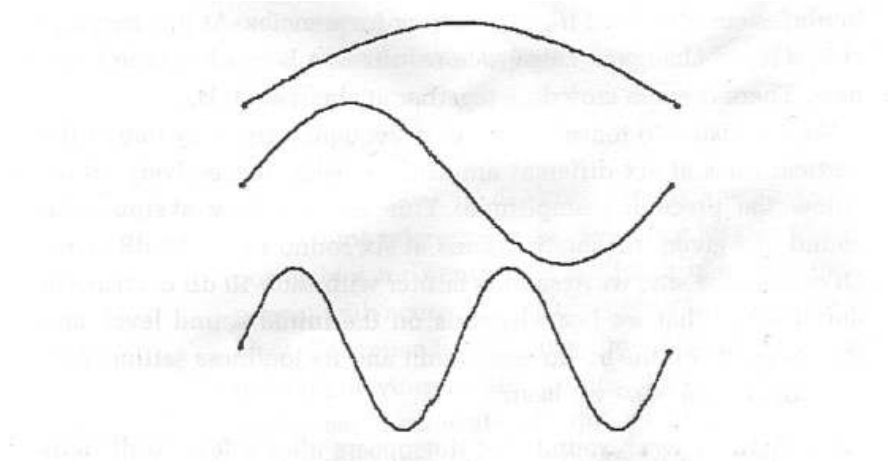
[표 1] Musical notes, frequency and wavelength

- Harmonics
  - 파이프오르간, 클라리넷 : 홀수 배음만 지님
  - 여러개의 하모닉스가 존재하지만 *pitch frequency*만 들림
  - 하모닉스간의 음량에 따라 음색의 특색이 달라짐

## 4.5 Fourier Analysis

### 4.5.1 Fourier analysis

- 거의 모든 악기는 주기성을 지닌 소리
- Fourier Series : 주기적인 신호(함수(t))는 기본 주파수  $1/T$ 에 대한 정수배의 주파수 성분으로 분해 할 수 있다는 이론
- input sequence  $\rightarrow$  system(filtering)  $\rightarrow$  output sequence

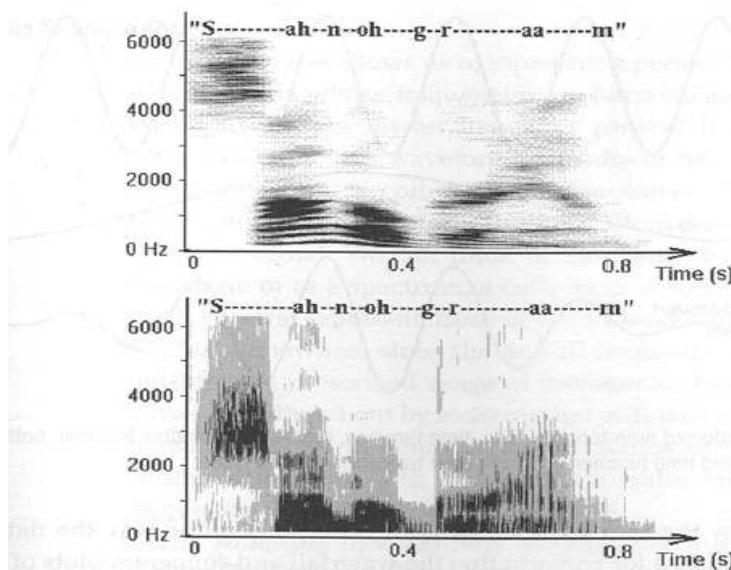


[그림 10] Representation of a sawtooth wave as the sum of one, two, and three sinusoids

### 4.5.2 Spectrogram

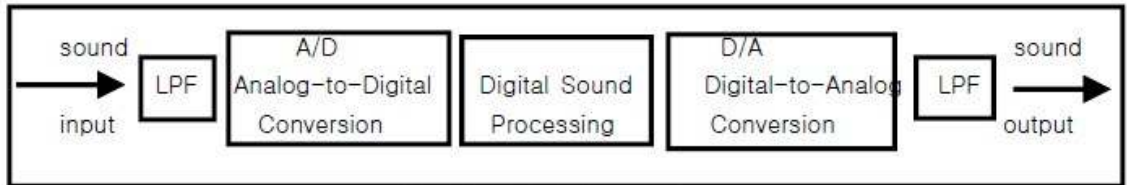
- 시간에 따른 주파수별 강도를 나타냄
- 색이 강할수록 강도가 높음을 의미
- 음성 분석에 주로 사용
- 소리의 종류에 따라 특성에 맞는 비교분석 툴을 선택

## 4.6 The Sampling Theorem



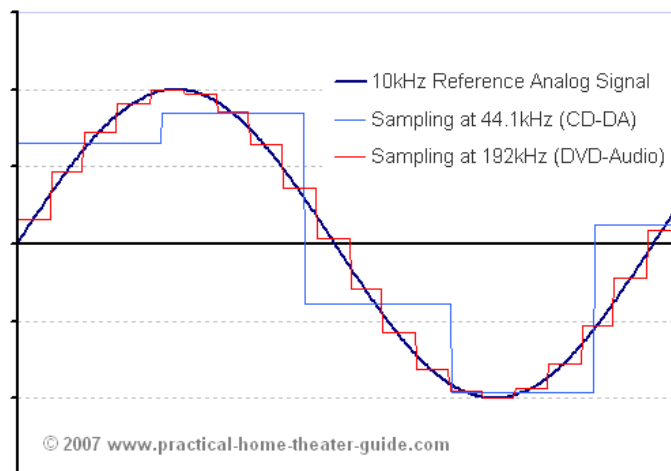
[그림 12] Spectrogram in which amplitude or intensity is represented by degree of darkness

- 디지털 오디오의 기본 원리
  - 아날로그 신호가 입력되면 사람이 들을 수 있는 신호 외는 필터로 제거하고 샘플러에 보내짐
  - 샘플러는 일정 시간마다 소리 신호의 값을 읽음
  - 읽혀진 신호는 숫자로 된 디지털 신호를 디지털-아날로그 변환기를 통해 귀로 들을 수 있는 아날로그 신호로 변함
  - 변환된 아날로그 신호를 LPF를 사용하여 원 아날로그 신호와 비슷하게 만듦



[그림 13] 디지털 오디오의 기본 원리

- 디지털 변환
- sampling
  - 아날로그 신호를 입력하면 샘플러는 일정한 시간 간격으로 입력 값을 읽음
  - 신호를 데이터로 표시
  - pulse 하나하나의 간격 : 샘플링 간격  $T_s = 1/f_s$ (sampling frequency)
- Bandwidth
  - 신호의 주파수 성분을 분석 할 때 최저주파수와 최고주파수의 차이를 의미
  - 최저주파수를 0Hz로 간주 할 경우 최고주파수를 뜻하기도 함
  - 전화통화의 대화형음성 최고주파수 : 3400hz(음성 대역폭)



[그림 14] Sampling DVD vs CD audio