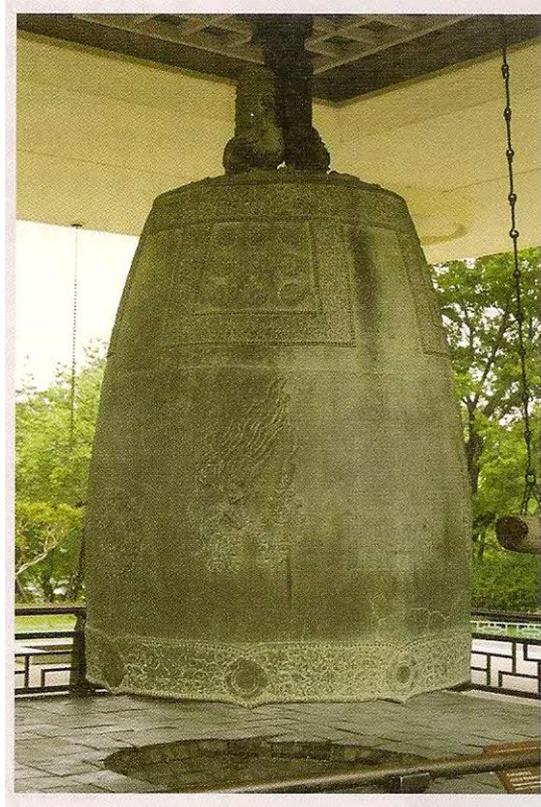


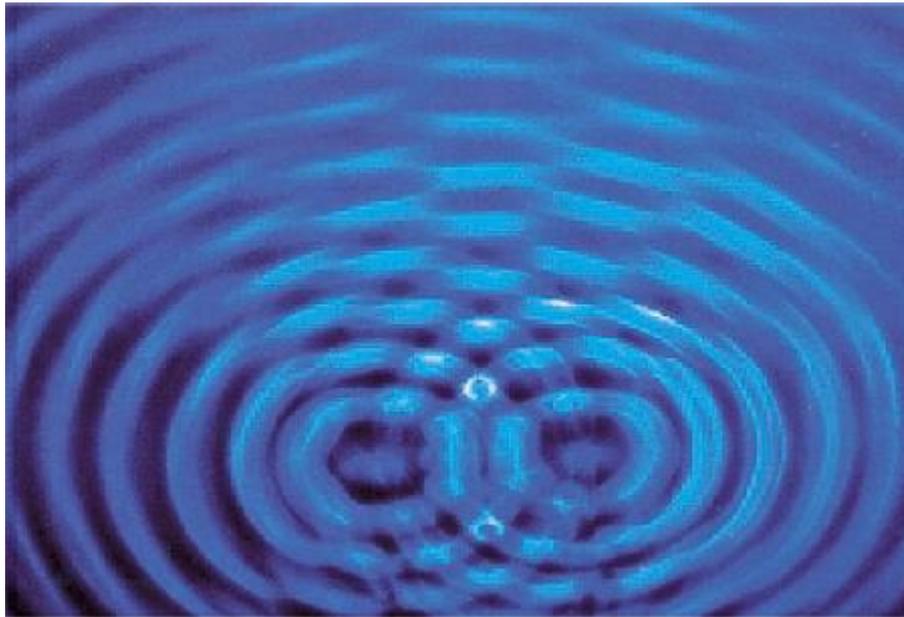
# 7장: 파동의 성질



1. 중첩과 진동모드
2. 파동의 에너지 전달
3. 도플러효과

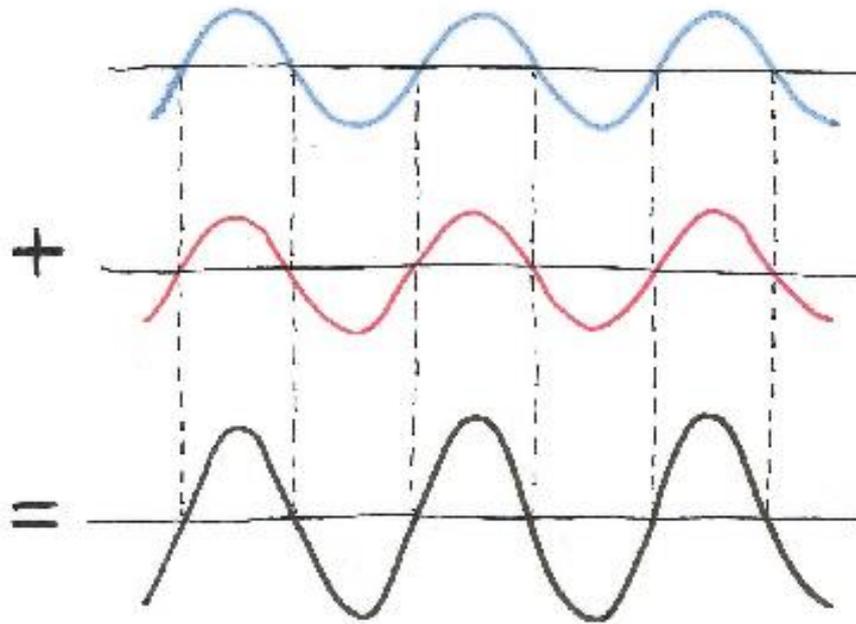
# 중첩과 진동모드

## 중첩의 원리



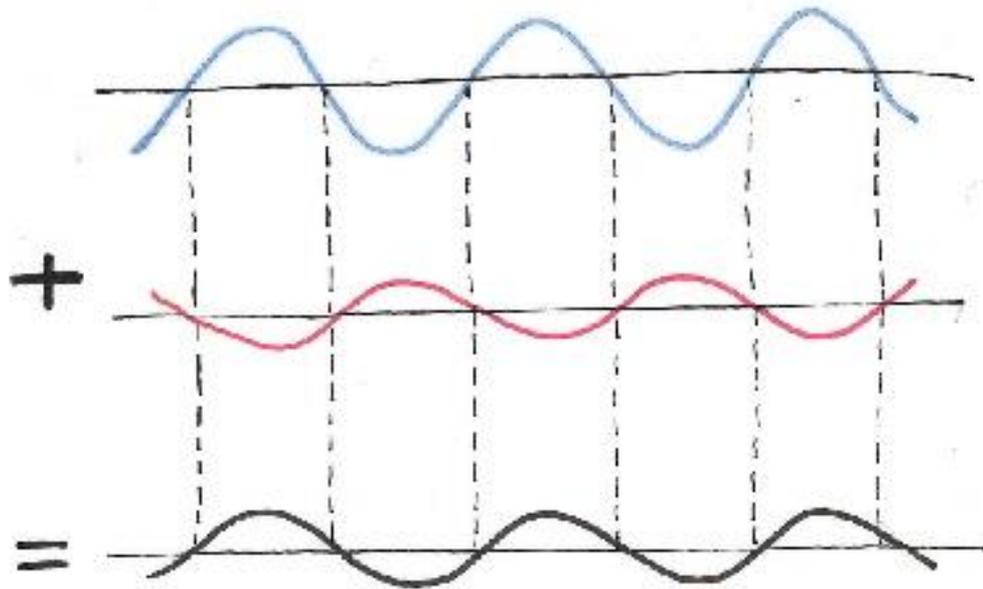
파동은 입자와 달리 두 개의 독립된 파동이 만나면 중첩된다.

# 보강간섭



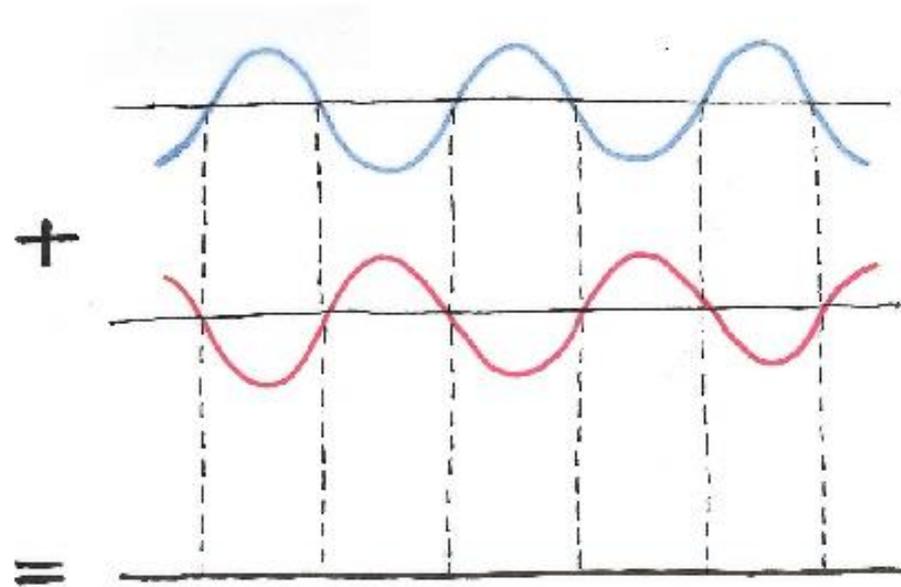
모양이 같은 파 (위상이 같은 파)가 서로 만나면  
파의 진폭이 커진다.

# 상쇄간섭



비슷하게 뒤집어진 모양의 파 (위상이 반대인 파)가 서로 만나면 파의 진폭이 줄어든다.

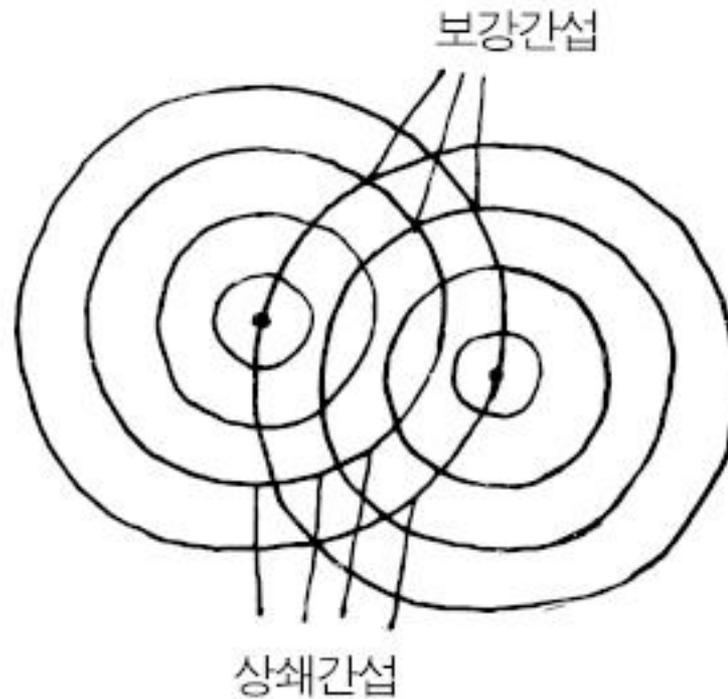
# 완전 상쇄간섭



모양이 뒤집어진 두 파의 진폭이 완전히 같은 경우  
두파가 합해지면 보이지 않는다.

# 중첩의 원리

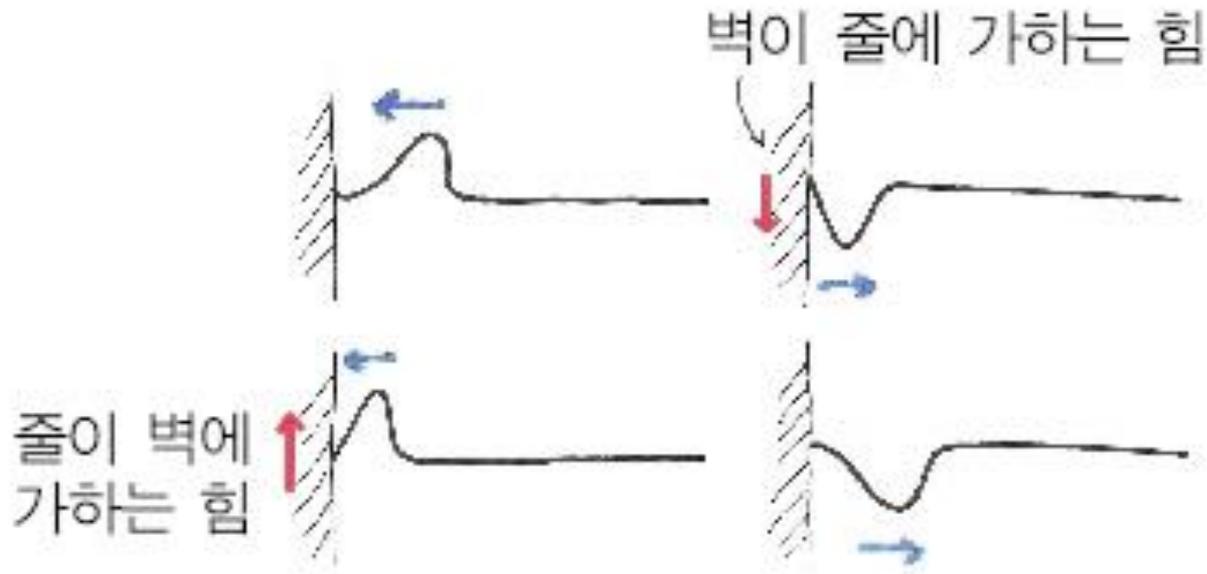
두 파동의 변위가 더해진다.



이 중첩의 원리는 파동의 가장 기본적인 성질이다.

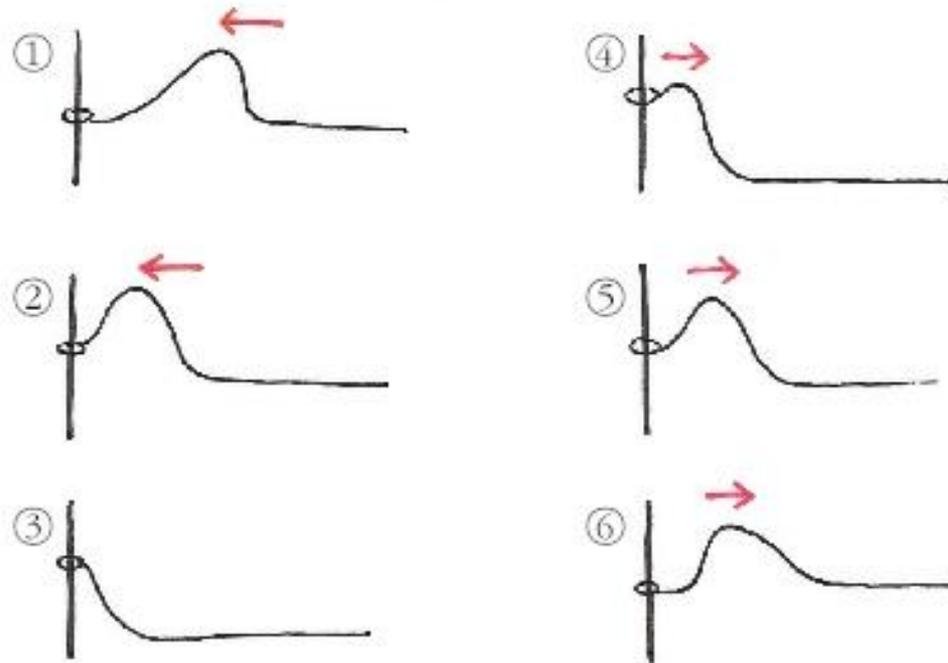
# 파동의 반사 (고정된 끈)

벽에 묶인 끈을 따라 진행하던 펄스가 벽을 만나면  
**반사파의 모양이 뒤집어진다.**



펄스가 벽에 힘을 가하고 (작용)  
 벽은 다시 펄스에 힘을 가한다 (반작용)

# 파동의 반사 (자유 끈)

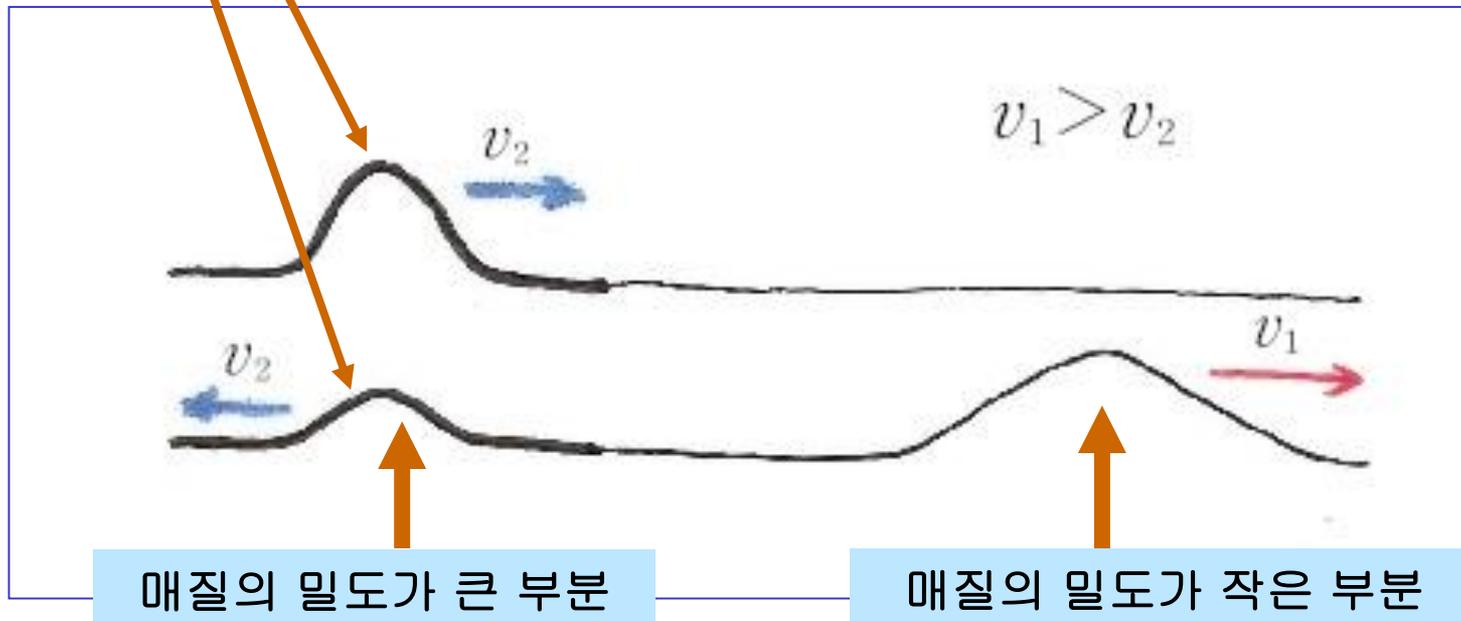


벽에서 진동할 수 있는 줄을 따라 진행되는 파는 벽에서 반사한 후에도 모양이 그대로 유지된다.

# 밀도 변화와 반사파

밀도가 큰 줄에서 밀도가 작은 줄로 파가 진행하면  
반사파는 뒤집히지 않는다.

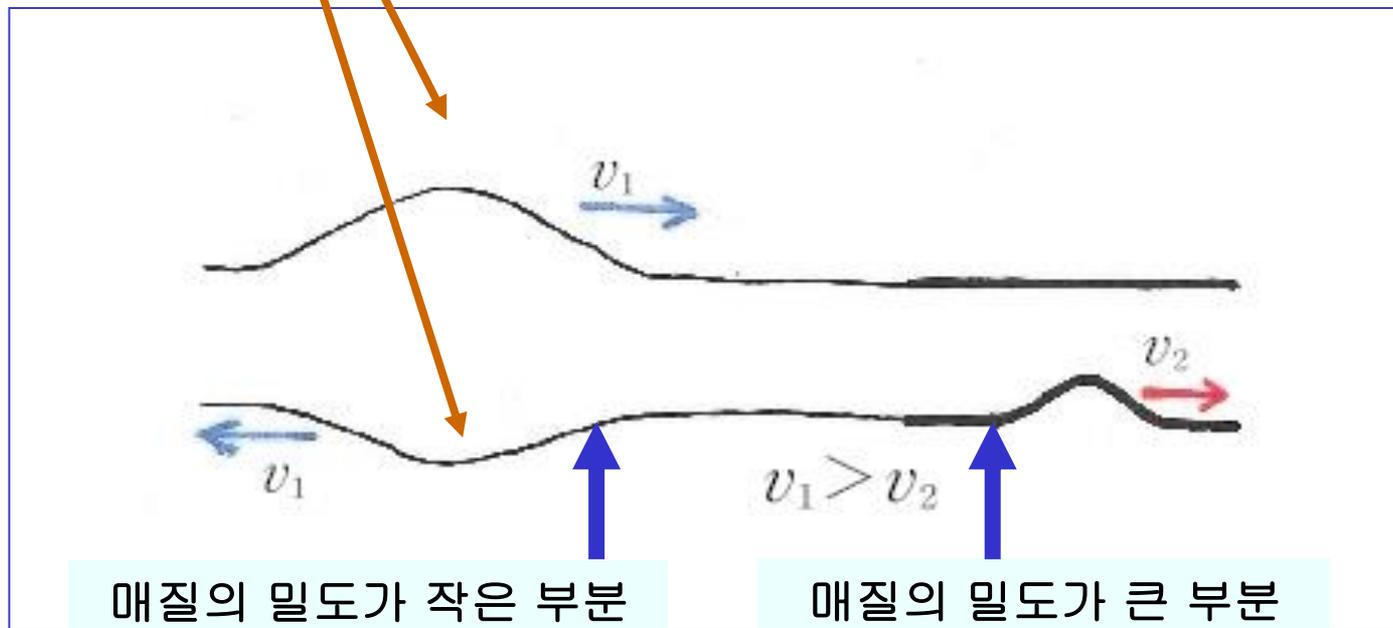
두 파의 모양이 같다



# 밀도 변화와 반사파

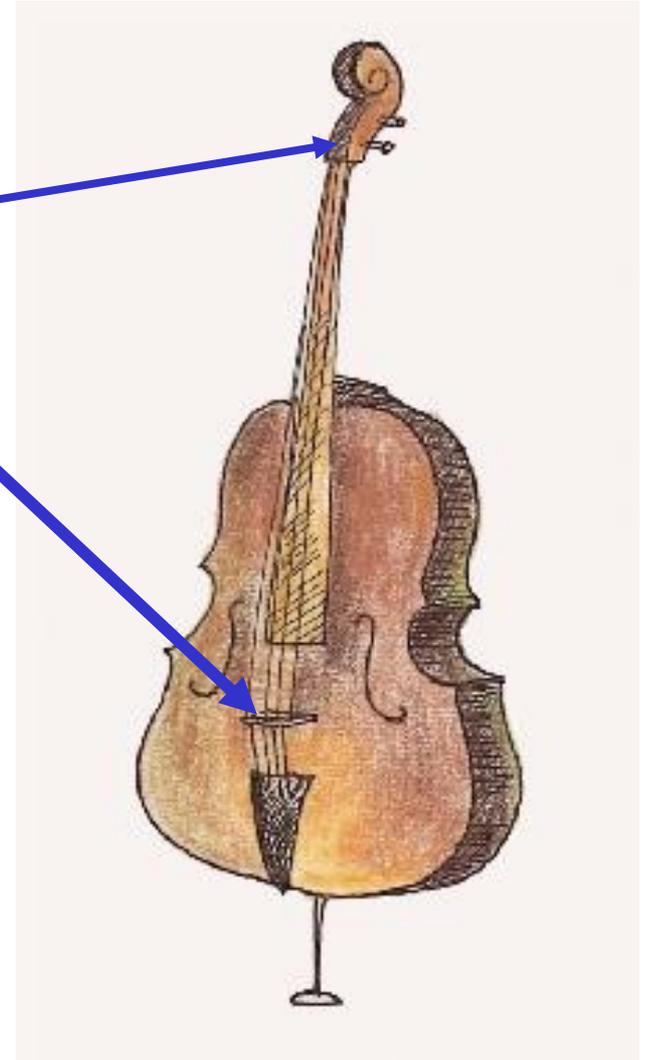
밀도가 작은 줄에서 밀도가 큰 줄로 파가 진행하면  
반사파는 뒤집어진다.

두 파의 모양이 뒤집어 진다



# 현의 진동모드

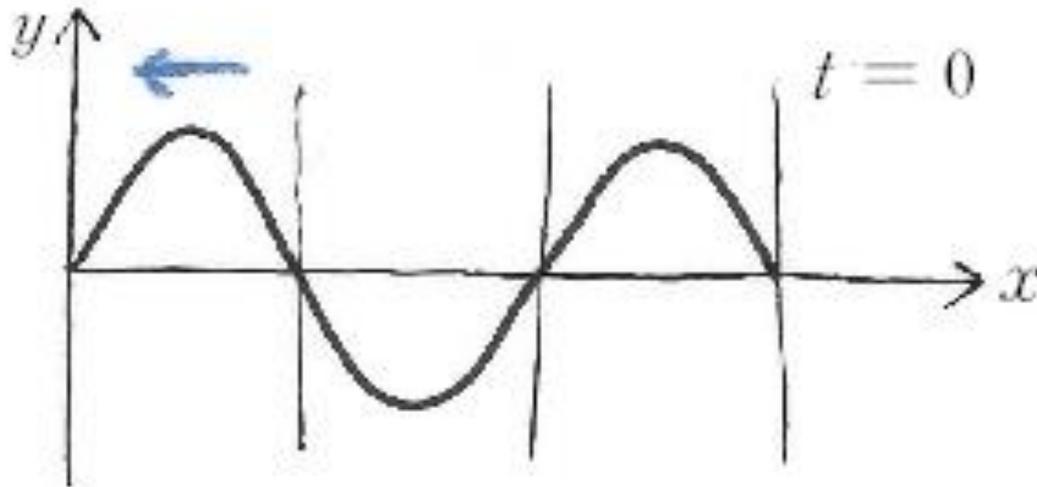
현의 양끝을 고정시킨 후 현의 양 끝점에서 입사파와 반사파가 중첩되어 생기는 진동모드를 이용한다.





현에서 왼쪽으로 진행되는 파의 모양

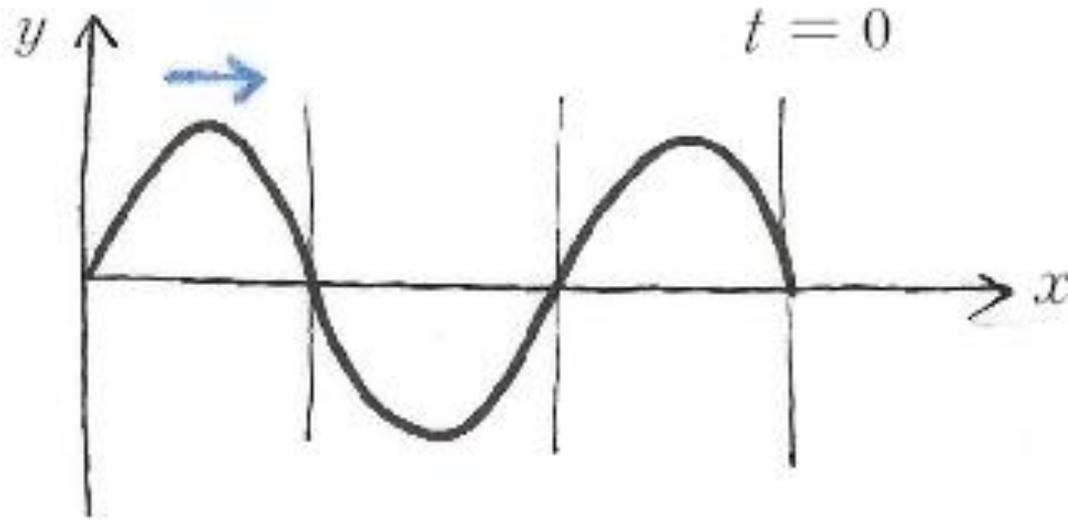
$$y_1 = A \sin(\omega t + kx)$$



$$t = 0 \quad \Rightarrow \quad y_1 = A \sin(kx)$$

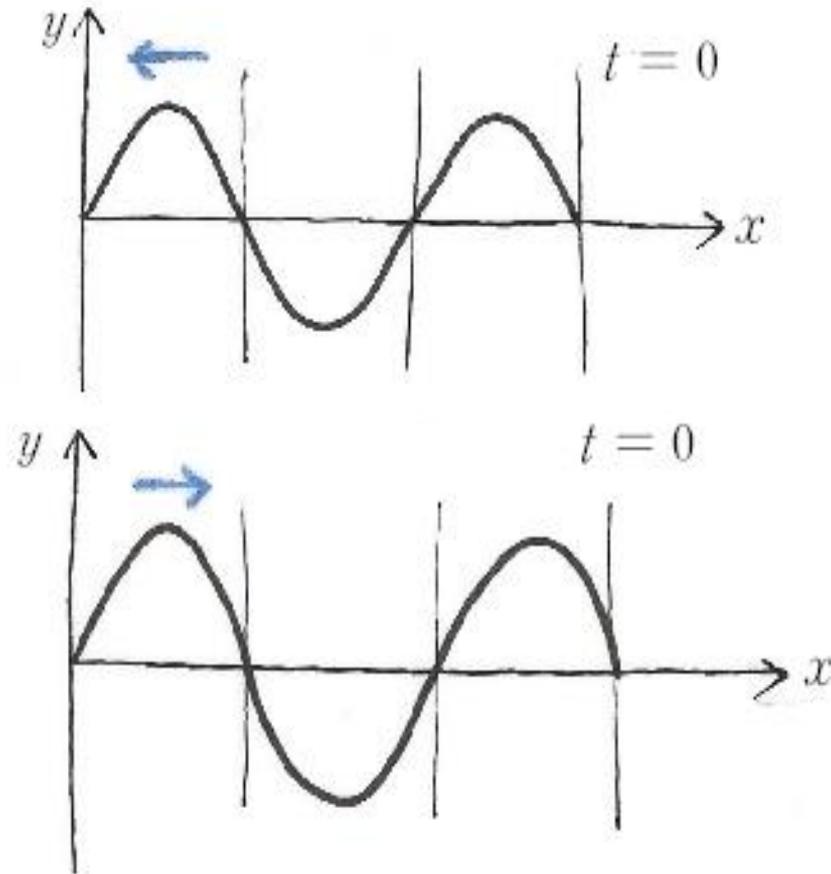
왼쪽 경계면에서 반사되는 파의 모양

$$y_1 = -A \sin(\omega t - kx)$$

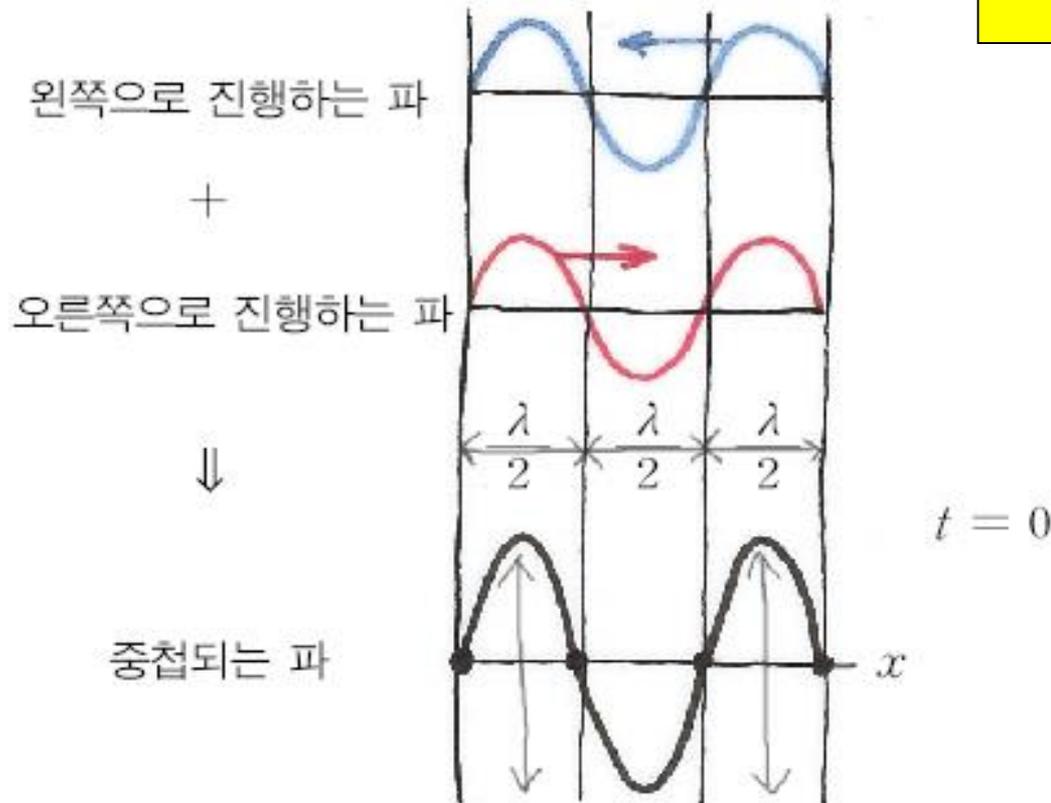


$$t = 0 \quad \Rightarrow \quad y_1 = A \sin(kx)$$

## 왼쪽 경계면에서 본 두 파의 모양



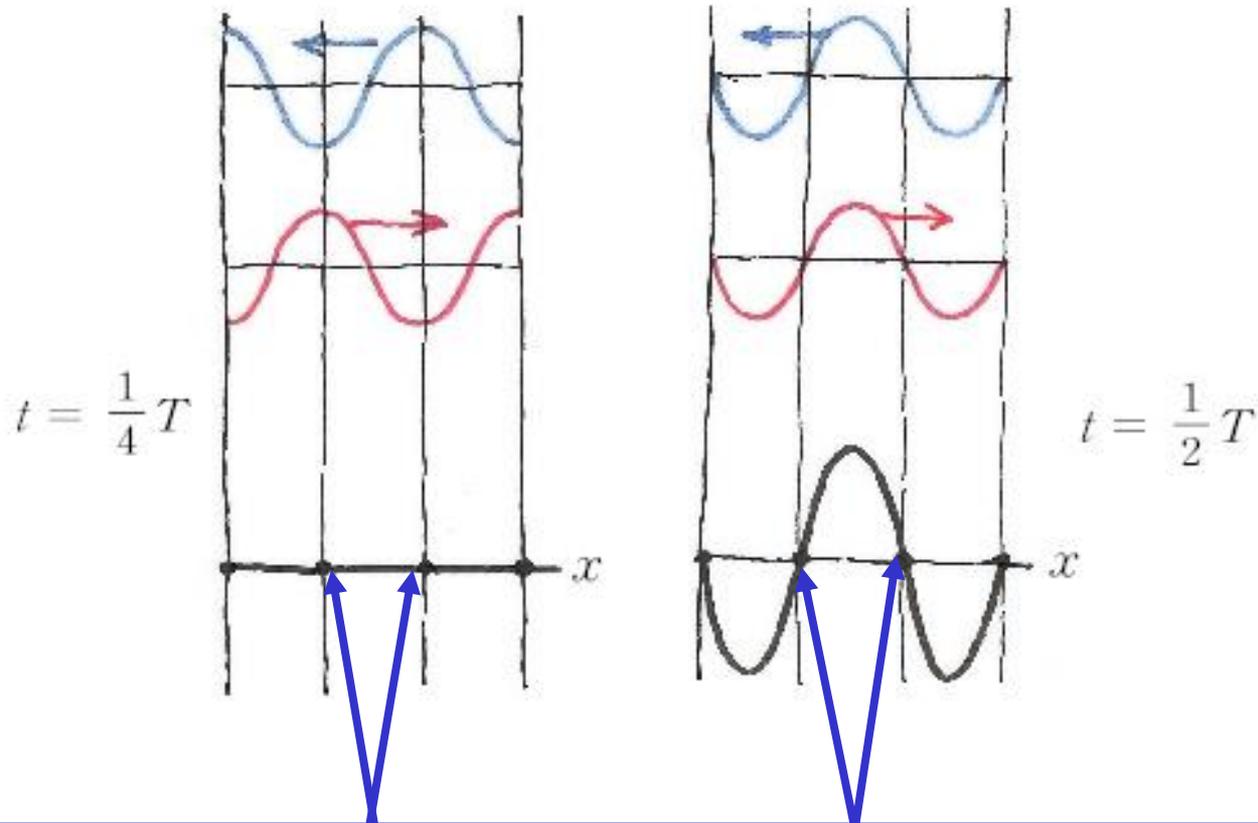
## 중첩된 파의 모양



$$y_1 = 2A \cos(\omega t) \sin(kx)$$

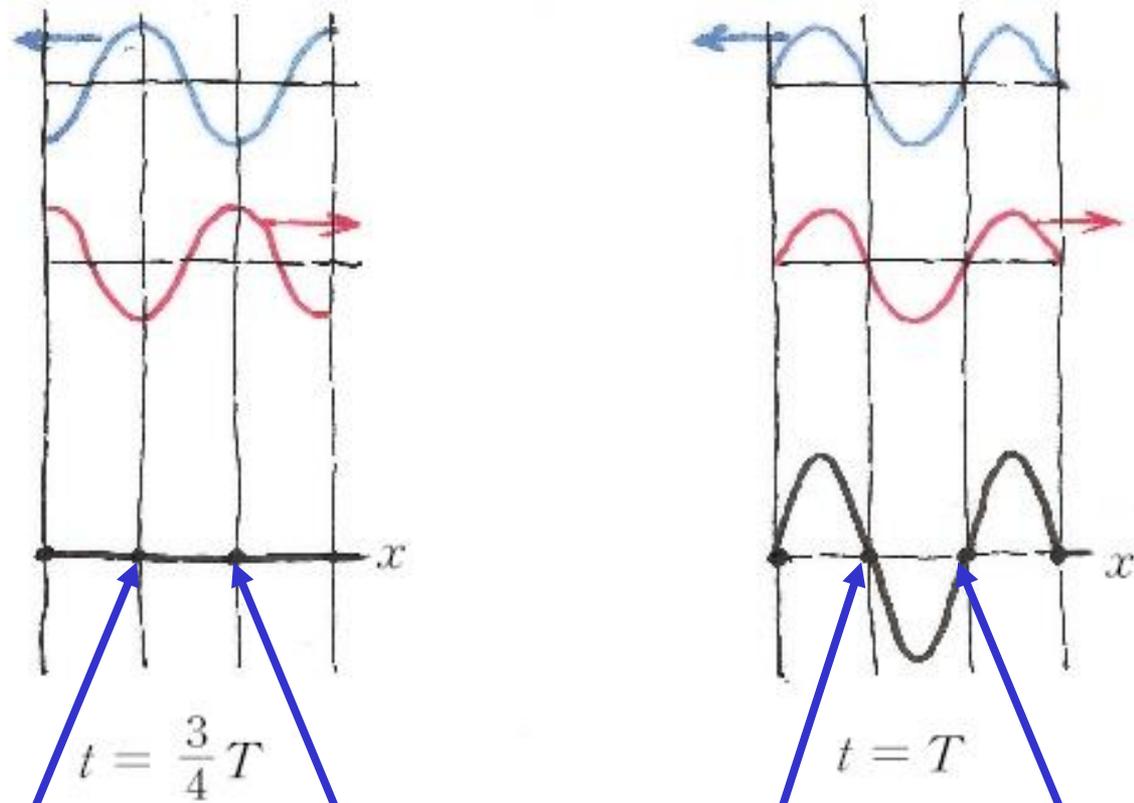
$$y_1 = 2A \sin(kx)$$

# 정지파 (정상파)의 형성



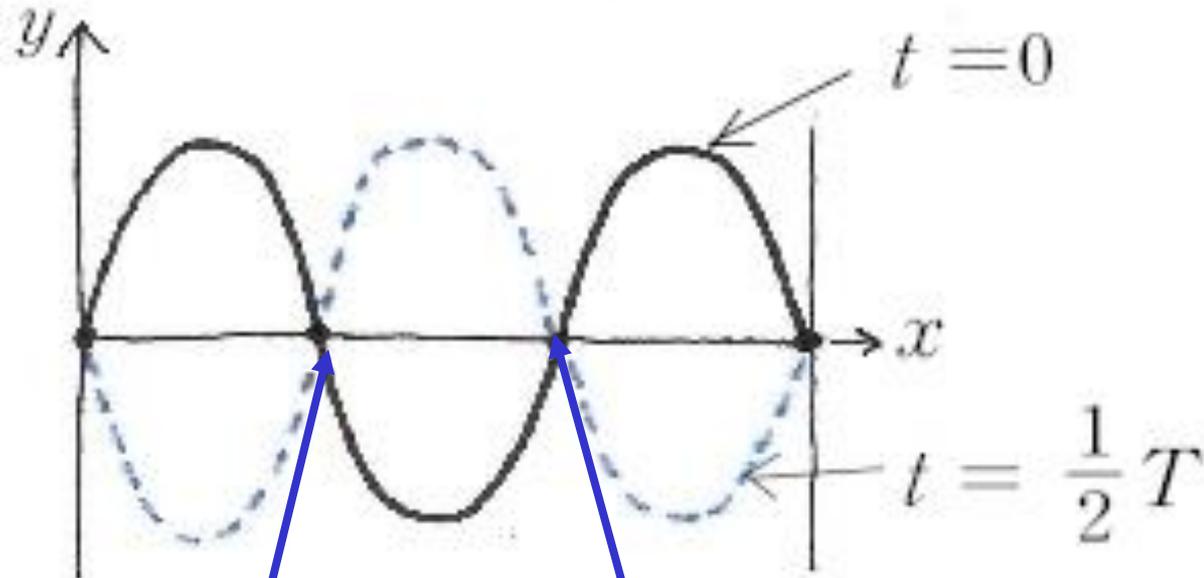
진동하지 않는 점 (마디)가 존재한다.

# 정지파



마디는 시간이 지나도 진동하지 않는다.

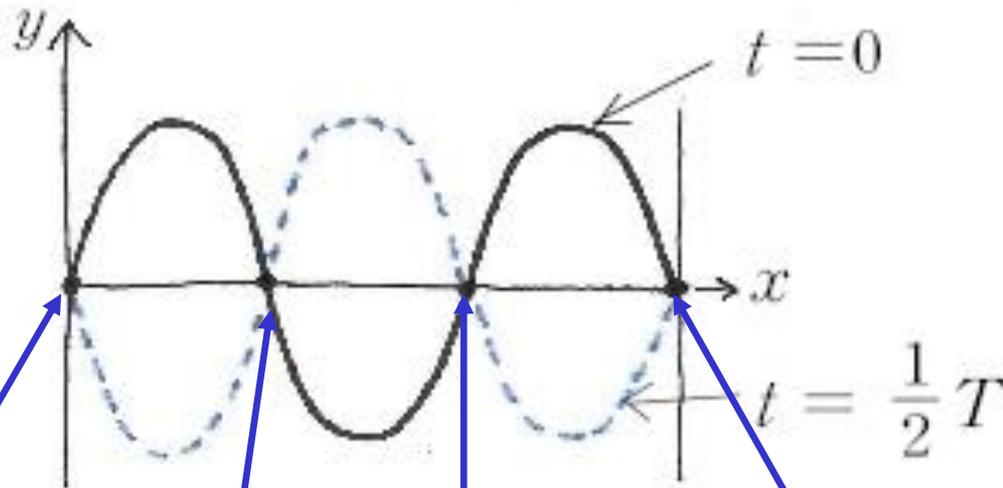
# 정지파의 마디



정지파 (정상파)의 마디는  $\sin kx=0$  이 되는 점이다.

# 마디의 위치

$$x = 0, \frac{\pi}{k}, \frac{2\pi}{k}, \frac{3\pi}{k}, \dots$$



$$x = 0$$

$$x = \frac{\lambda}{2}$$

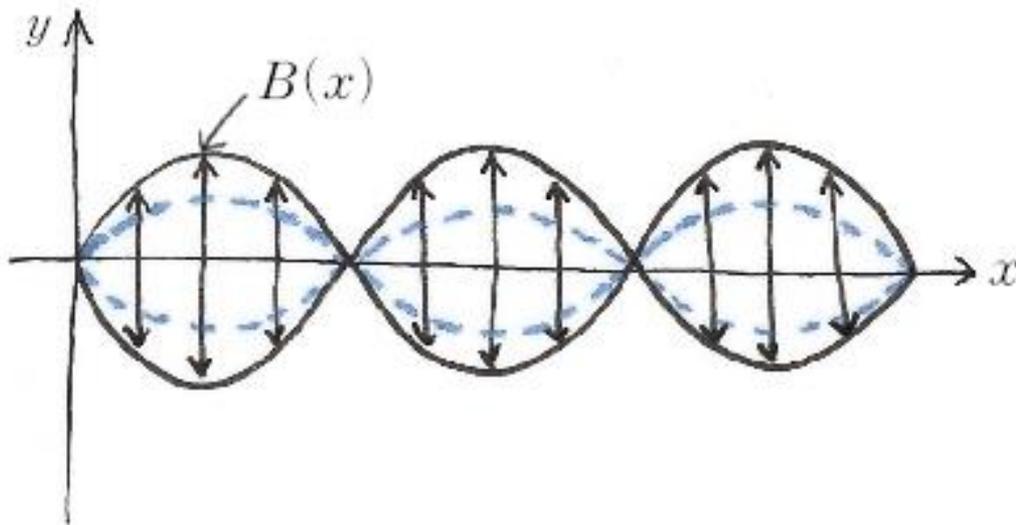
$$x = \frac{2\lambda}{2}$$

$$x = \frac{3\lambda}{2}$$

# 정지파의 진동

마디가 아닌 점은 시간에 따라 위아래로 진동한다.

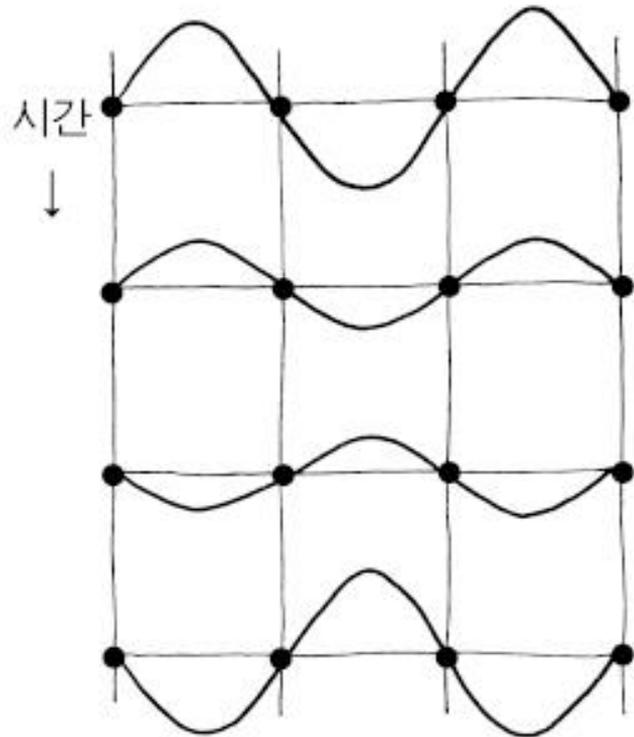
정지파 진동의 진폭 =  $2A \sin kx$   
 위치마다 다르다.



# 진행파와 정지파의 차이

진행파에는 마디가 없다.

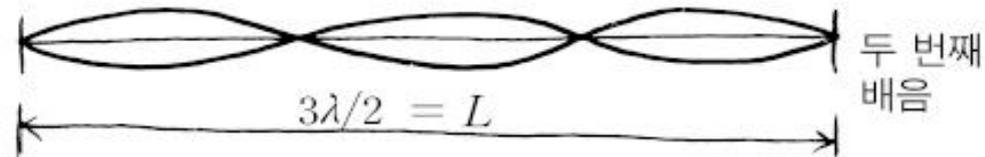
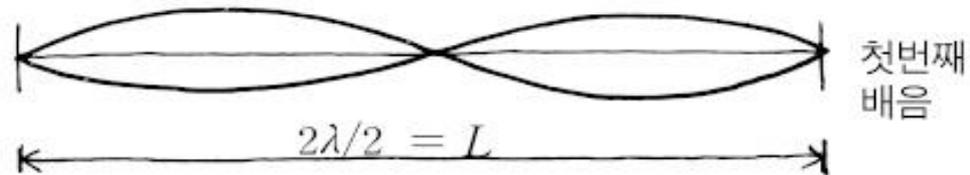
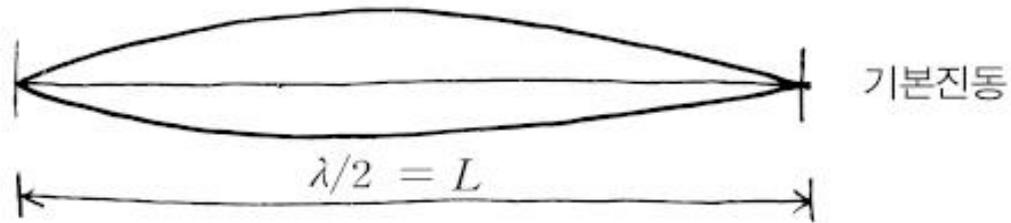
각 시각마다 찍은 정지파의 사진



정지파의 모양은  
매시각 달라져 보인다.  
그러나 마디는 항상 정지해있다.

# 현에서 생기는 진동 모드들의 파장

현의 양끝이 마디가 된다.



# 기본 진동

파장이 가장 길다.



기본진동수

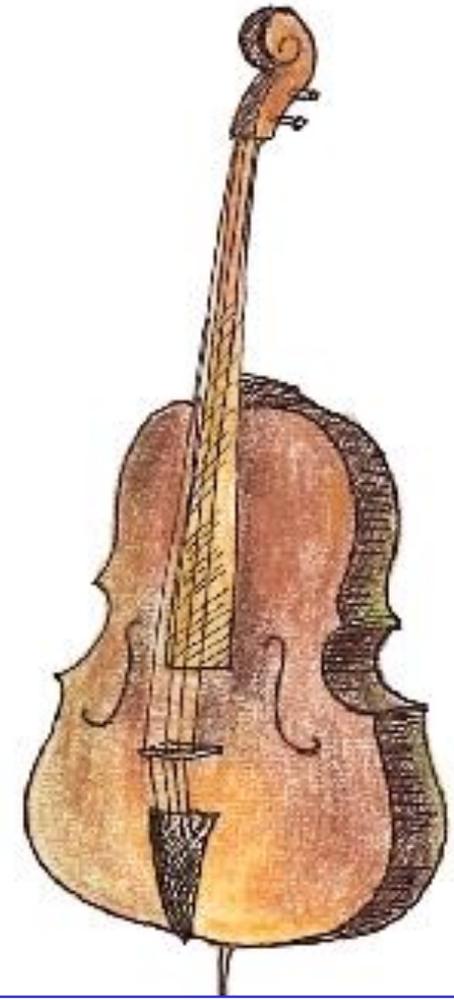
$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

# 1. 중첩과 진동모드



# 세계 최대 베이스

기네스 북에 오른 세계 최대의 베이스 현의 길이가 5m나 된다.



현의 질량 밀도는  $40\text{g/m}$  이고, 기본 진동수는  $20\text{Hz}$  이다.

이 현에 작용하고 있는 장력,  
첫 번째 배음의 진동수, 파장은 얼마인가?

## 스트라디바리우스 바이올린



300년 전 이탈리아의 바이올린  
원산지인 크레모나(Cremonese)  
의 거장 안토니오 스트라디바리  
(Antonio Stradivari)

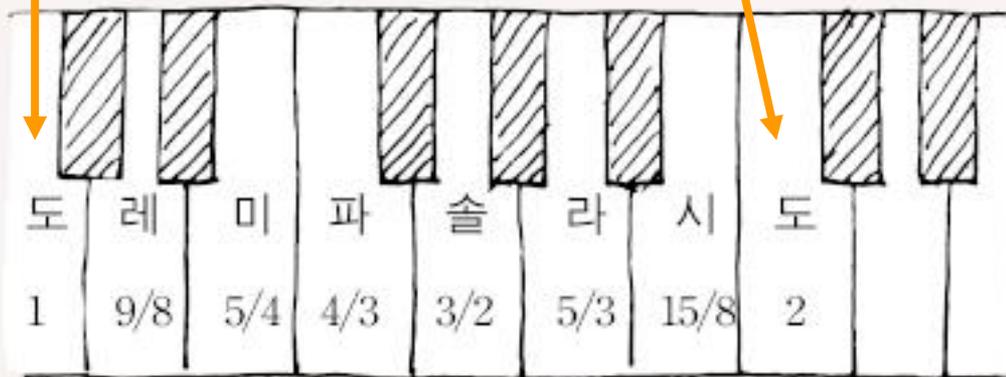
몸체를 만드는 나무 판의 일정한  
밀도가 그 비밀

단층촬영의 CT스캐너를  
사용



## 음계화 진동수

기본 C음 (262Hz)과 다음 높은 C음 (524Hz)의 진동수는 2배이  
이 음은 하모닉스로서 귀에 감미롭게 들린다.



기준음의 진동수

A = 440 Hz(라), C = 262 Hz(도)

두 음 사이에는 보통 8개의 음표 (C,D,E,F,G,A,B,C)가  
들어 있으므로 옥타브 (Octave) 라고 부른다.

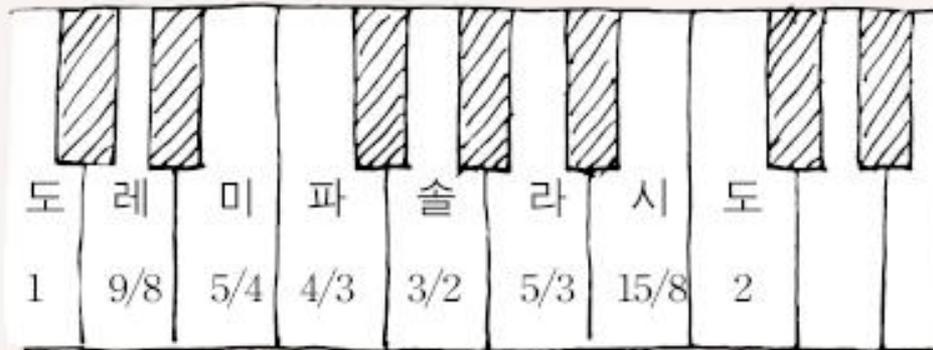
# 화음

진동수비

$$G(\text{솔}) : C(\text{도}) = 3 : 2$$

$$E(\text{미}) : C(\text{도}) = 5 : 4$$

다음 옥타브에 있는 G(솔): 기본 C = 3:1.



기준음의 진동수

$$A = 440 \text{ Hz}(\text{라}), C = 262 \text{ Hz}(\text{도})$$

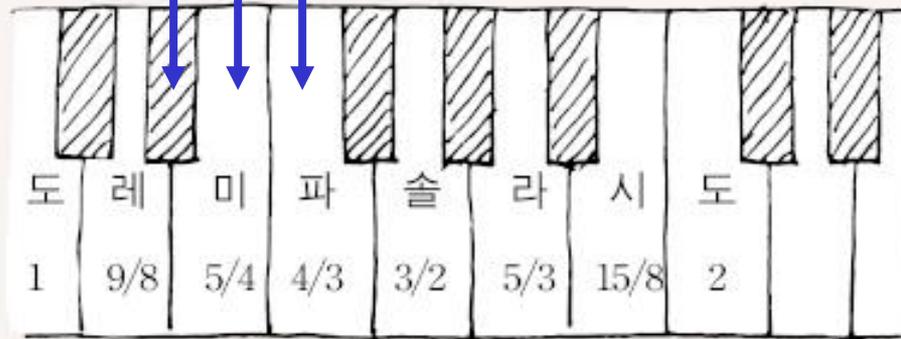
진동수 비가 정수배 (3:2, 4:3, 5:4 ...)가 될 때  
화음으로 들린다.

# 악기에 따른 진동수 차이

실제 악기마다 음의 진동수가 약간씩 다르다.

건반악기의 반음차

$$2^{1/12} f_1$$



기준음의 진동수

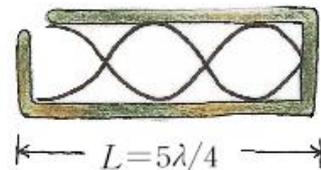
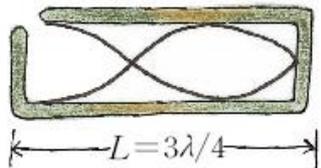
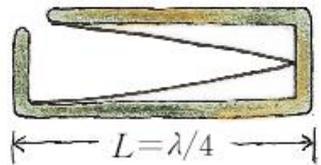
$$A = 440 \text{ Hz(라)}, C = 262 \text{ Hz(도)}$$

솔과 도의 비 =  $3/2$

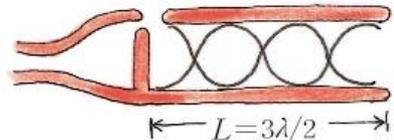
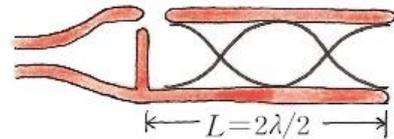
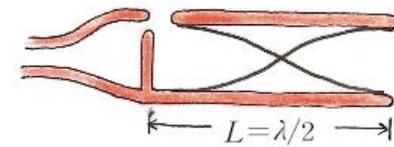
$$2^{7/12} = 1.4983 \approx 1.5$$

# 관악기 진동모드

관악기속의 공기가 떨면서 정지파가 만들어진다.



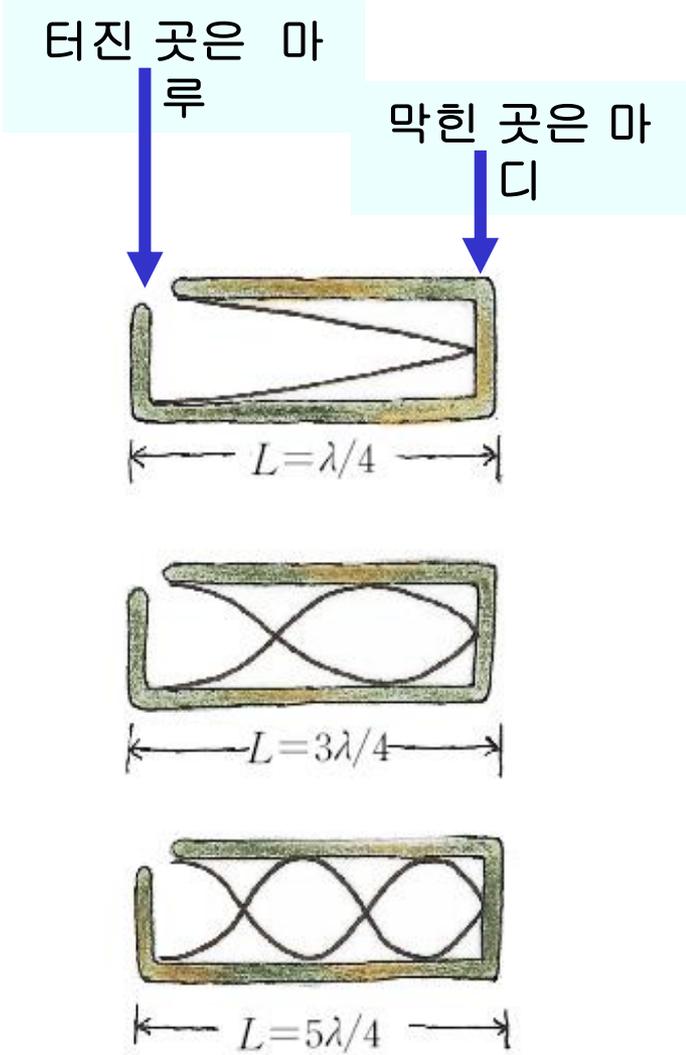
한쪽이 막힌 관



양쪽 모두 터진관

한쪽이 막힌 관

관의 막힌 곳이  
마디가 되고  
관의 터진 곳이  
마루가 된다.

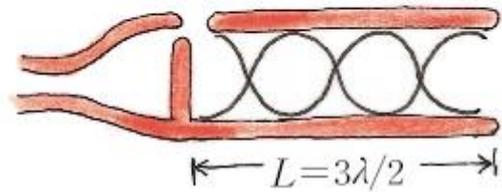
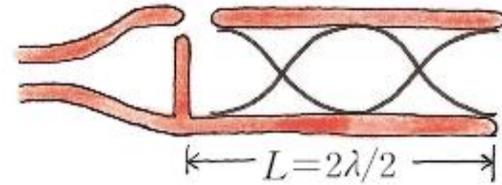
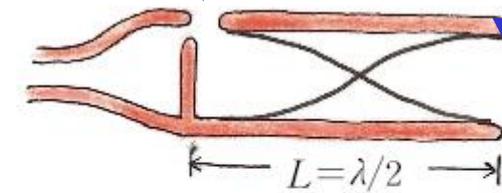


양쪽 모두가 열린 관

관의 양끝 모두가  
마루가 된다.

관의 터진 곳이 마루

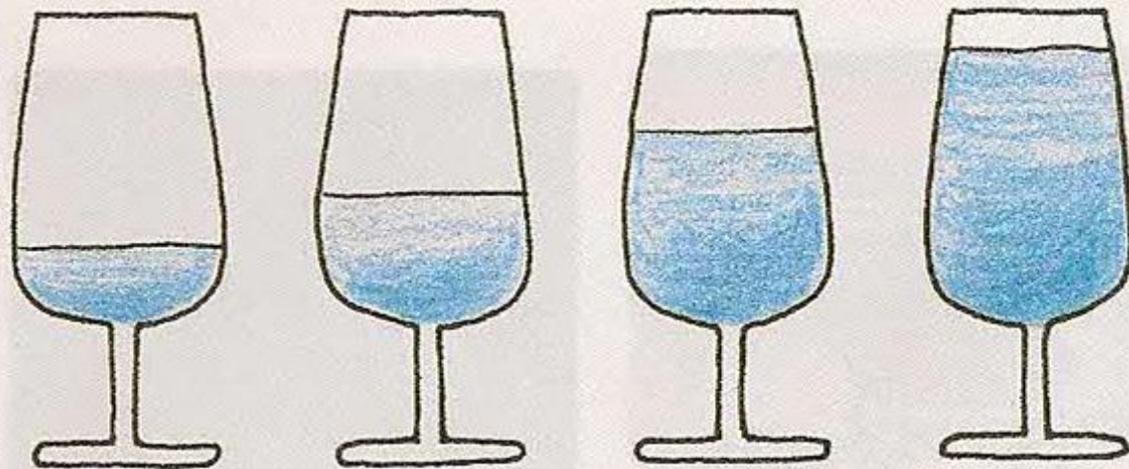
관의 터진 곳이  
마루





대금의 진동모드

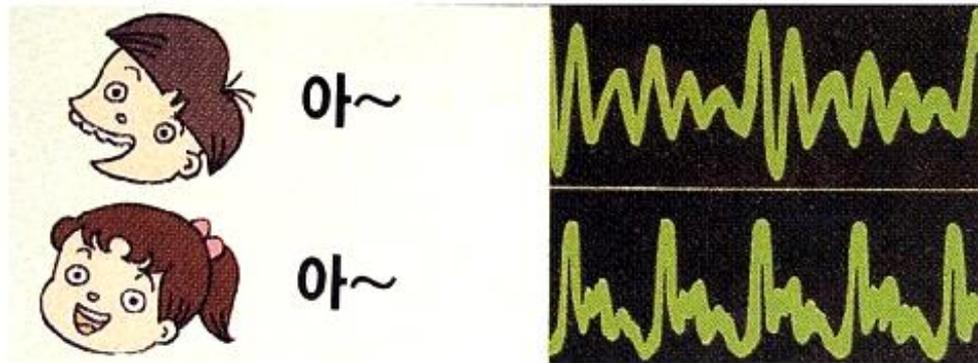
C.N.U. 2002. 3.20



칠 때는 왼쪽의 유리잔에서 높은 소리가 나고, 불 때는 오른쪽의 유리잔에서 높은 소리가 난다.

## 음색

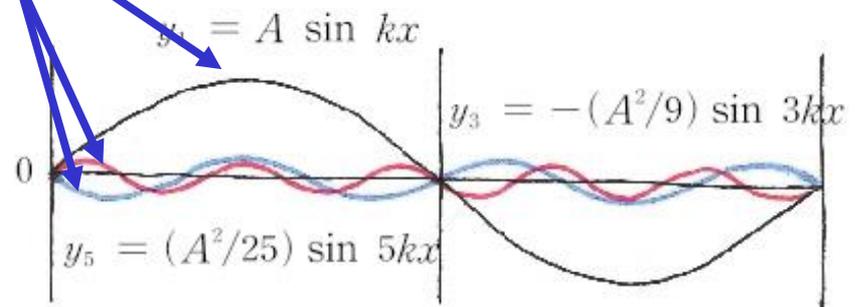
소리에는 기본 진동 뿐만이 아니라  
여러 배음이 약간씩 섞여 있다.



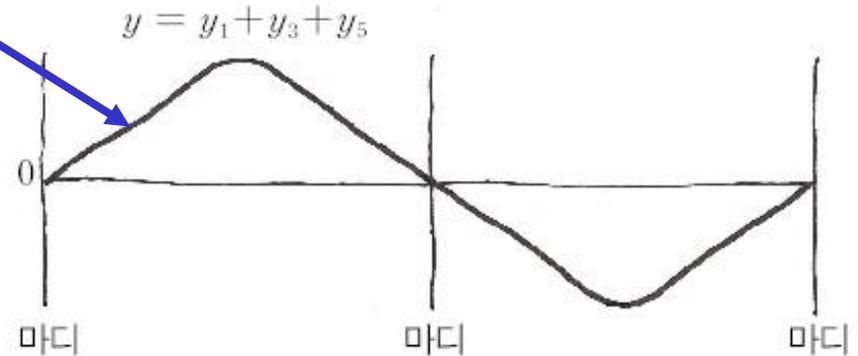
배음의 섞인 정도가 소리의 독특한 음색을 만든다.

# 배음의 합성

세 개 모드를 합쳐보자.

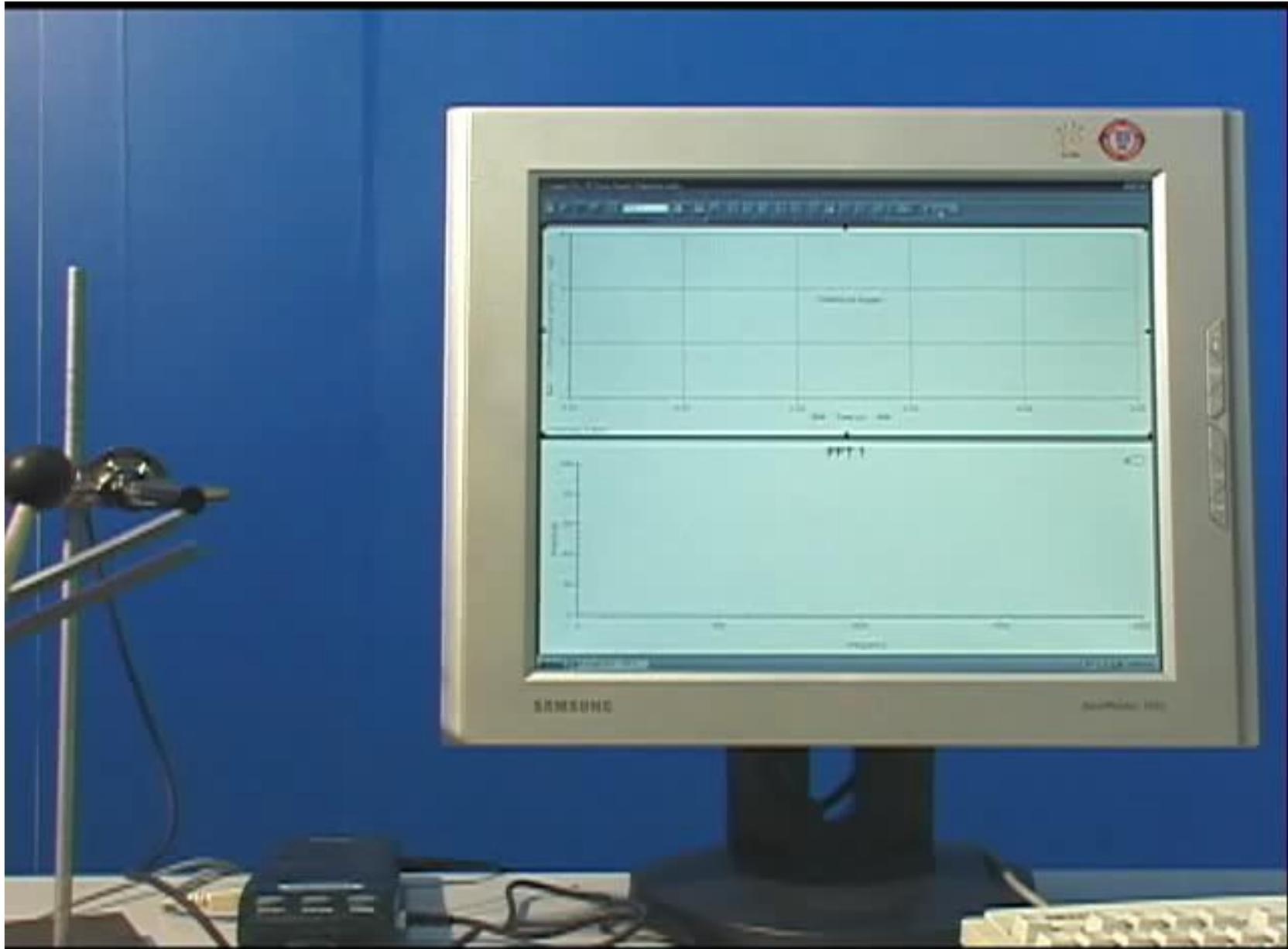


합성된 파

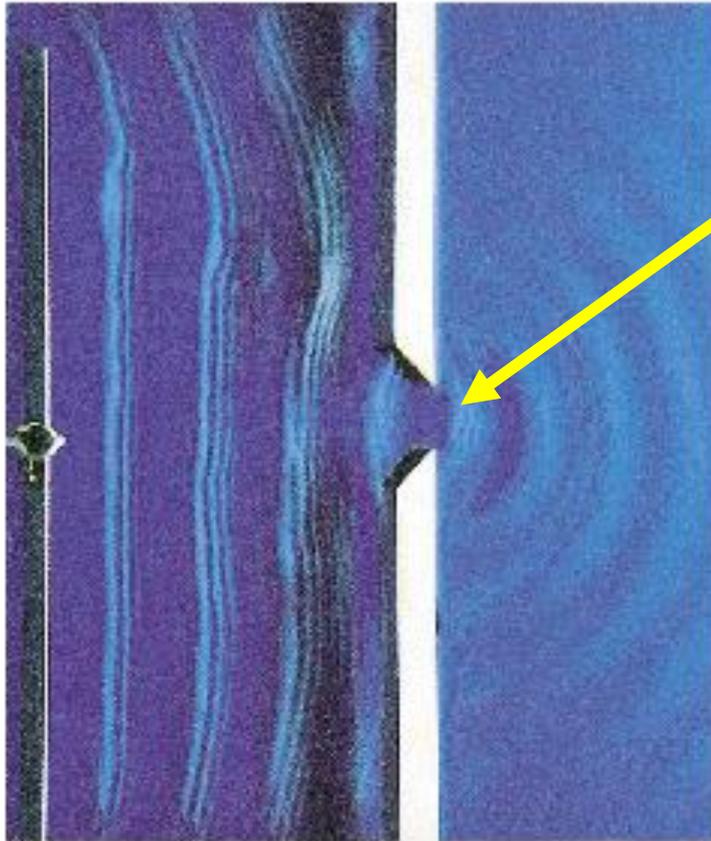


더 이상 사인파가 아니다.  
약간 변형되었다.

# 1. 중첩과 진동모드



# 파동의 회절 (에돌이)



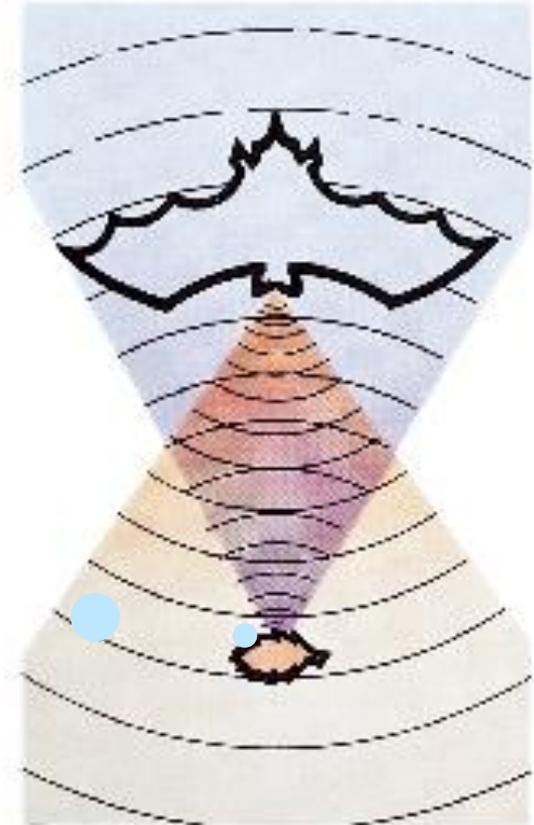
파는 장애물을 만나면  
장애물의 열린 곳을 통해 퍼져 나간다.

장애물보다 파장이 클수록  
회절이 잘 나타난다.

보이지 않는 곳에서 나는 소리를  
들을 수 있는 것은 소리파가  
돌아가기 때문이다.

# 파동의 반사

파는 장애물  
을 만나면  
반사한다.



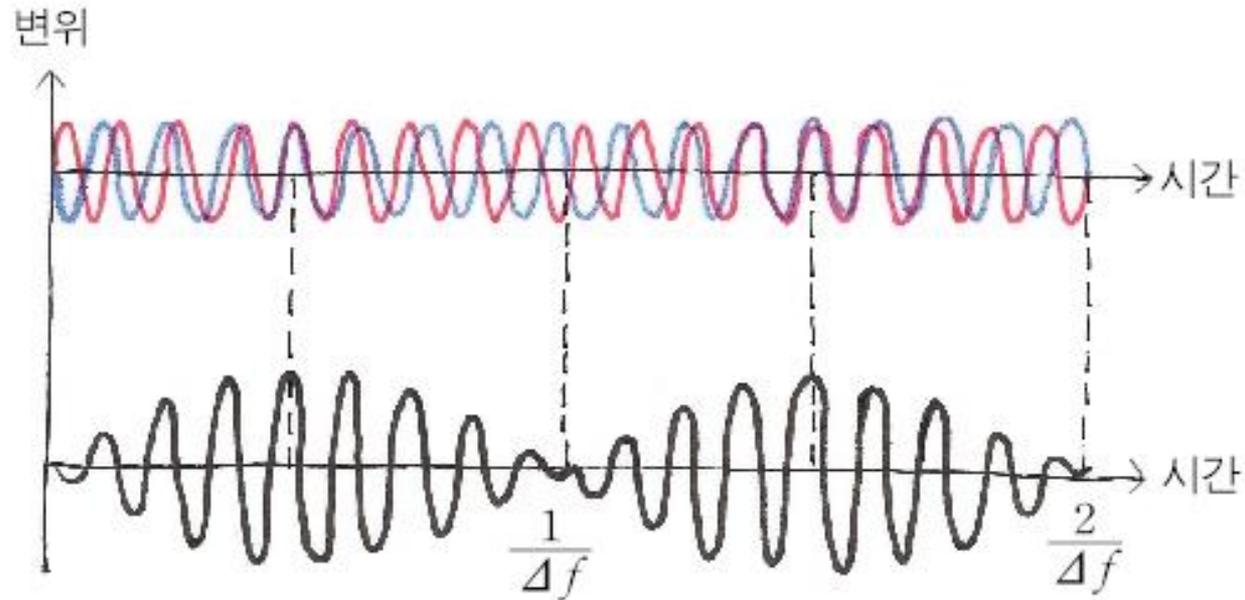
# 맥놀이

진동수가 비슷한 두 파가 중첩될 때 나타난다.  
파의 진폭이 시간에 따라 커졌다 작아졌다 한다.



신라 봉덕사의 종 (에밀레  
종)은은한 소리는  
맥놀이현상 때문이다.

# 맥놀이파의 모양



귀에 들리는 소리의 크기는 진폭의 제곱에 비례한다.  
따라서 맥놀이의 주기는 맥놀이 파 주기의 반이다.

# 1. 중첩과 진동모드



## 질문: 파장과 진동수

- ◆ 기타 G 현 (196Hz)의 길이는 65cm 이다.  
이 현에서 전파되는 줄파의 속력은 얼마인가?
- ◆ 32cm 길이의 바이올린의 현이  
라음 (A음, 440Hz)을 내도록 조율되어 있다.

현의 기본진동모드의 파장은 얼마일까?

이 때 우리가 듣는 음파의 진동수와 파장은 얼마인가?

질문: 음파의 속도와 관악기

연주자들은 악기에서 나는 소리가  
연주 공간의 온도와 습도에 따라 예민하게  
변한다고 한다.  
그 이유는 무엇일까?

## 질문: 악기의 진동수

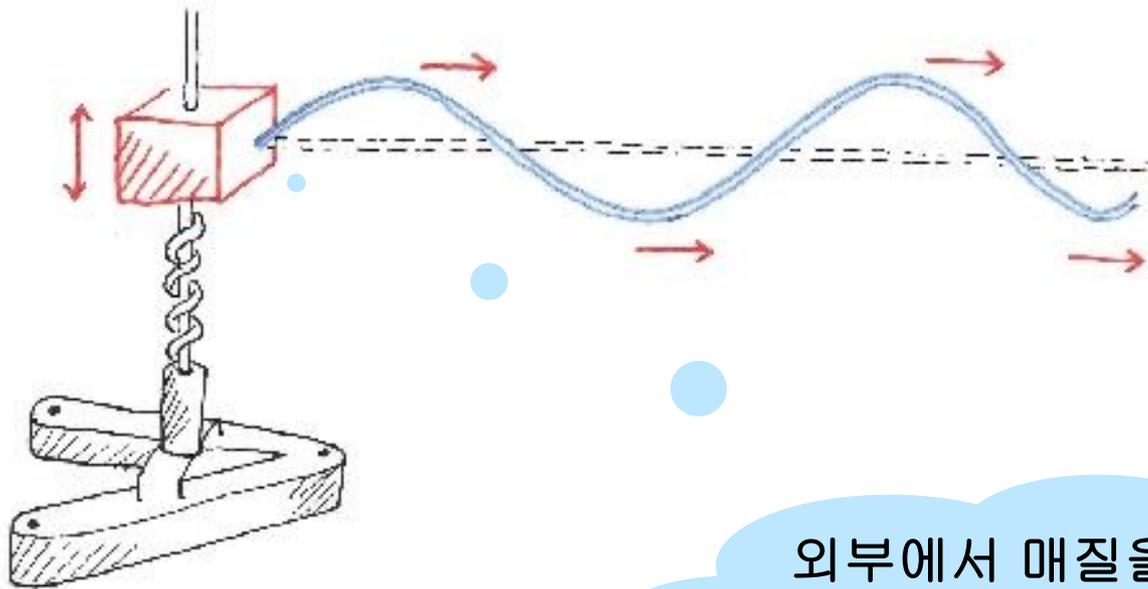
- ◆ 진동수가 264Hz와 396Hz인 두 소리는 화음을 이루는가?
- ◆ 플룻의 입을 대는 부분으로부터 끝까지의 길이가 0.66m 이다.  
이 플룻 기본진동모드의 파장과 진동수는 얼마인가?  
우리가 듣는 음파의 진동수와 파장은 얼마인가?  
현악기의 경우와 어떻게 다른가?

## 질문: 맥놀이 진동수

피아노 조율사가 피아노의 현을 조율하기 위해 440Hz의 표준음을 내는 소리굽쇠로 맥놀이를 측정하였더니 맥놀이 진동수가 5Hz였다.

이 피아노 현의 진동수는 현재 얼마인가?

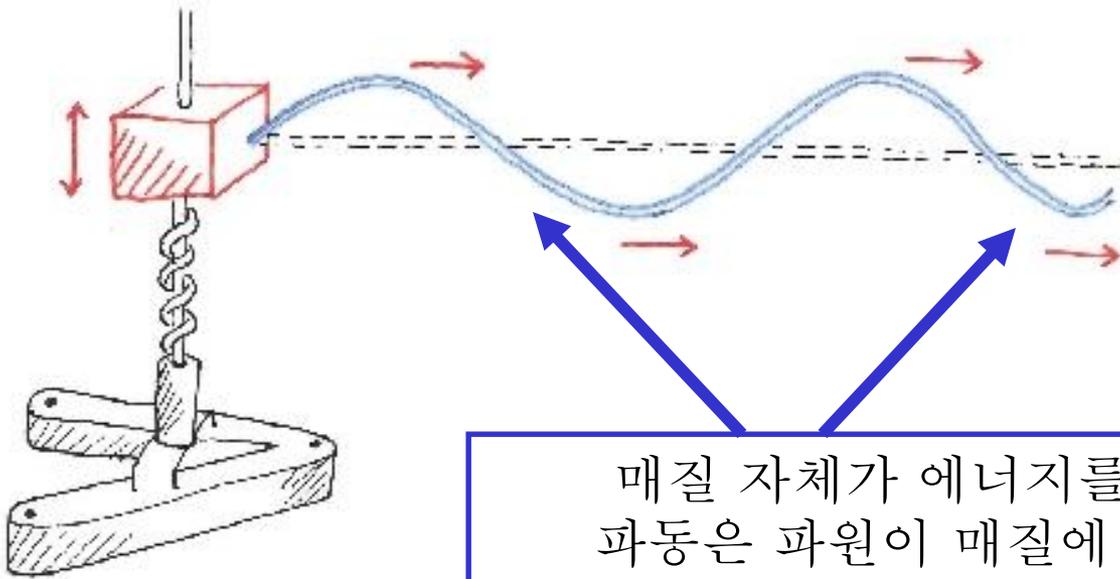
# 파동의 에너지 전달



외부에서 매질을 진동 시키면  
에너지는 매질을 통해  
파동의 형태로 전달된다.

# 줄파가 전달하는 에너지

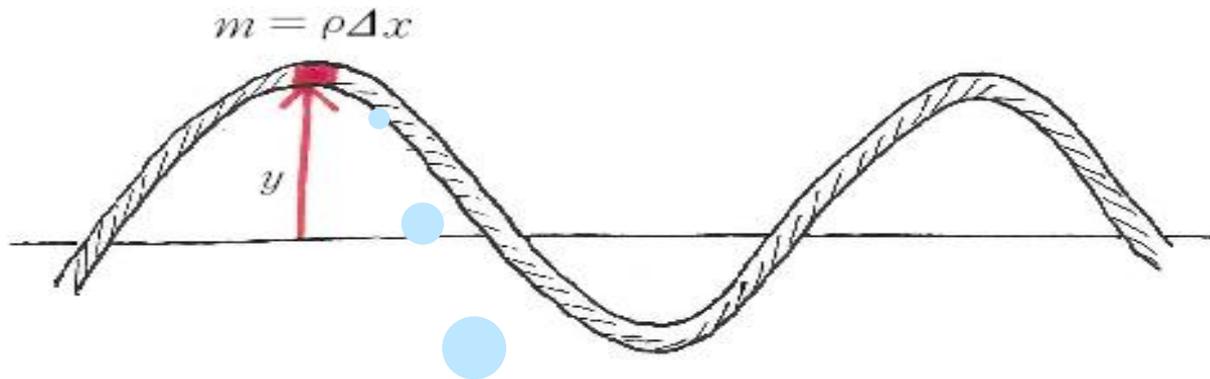
줄파를 일으키는 파원이 진동한다.  
이 진동은 줄이라는 매질을 통해 퍼져 나간다.



매질 자체가 에너지를 흡수하지 않는다면,  
파동은 파원이 매질에 공급해주는 에너지를  
그대로 전달한다.

# 매질의 파동이 간직하고 있는 에너지

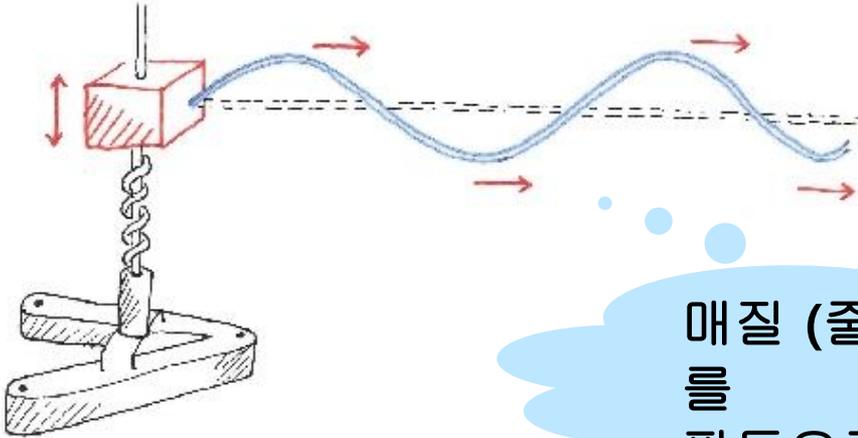
매질은 진동 운동하므로, 매질은 운동에너지를 에너지로 간직한다.



매질의 파동이 갖는 에너지는  
매질이 진동하는 **진폭의 제곱에 비례한**

$$\Delta E = \frac{1}{2} (\rho \Delta x) \omega^2 A^2$$

# 파동이 전달하는 파워



매질 (줄)은 공급 받는 에너지를  
파동으로 전파한다.

파동이 전파하는 파워 (일률)

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2$$

## 질문: 파도의 파워

10초에 1번씩 밀려오는 파도의 높이가 0.5m이고,  
파의 속도가 5m/s 이다.

단면적 1 제곱 미터인 사람이  
파도 앞에 서있을 때 받는 파워는 대강 얼마일까?

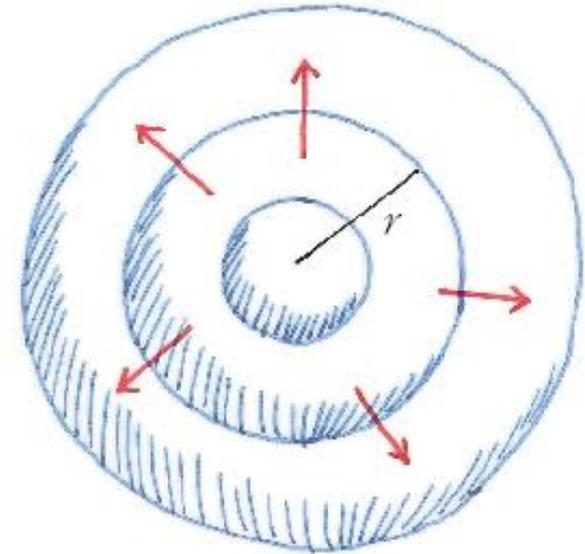


줄파로 생각하고  
파워를 계산하면

$$P = 250 \text{ Watt}$$

# 구면파

구면파는 줄파와 달리,  
파동이 사방으로 퍼져 나간다.



전공간으로 퍼져 나가는 파의 모습

구면파의 세기

= 단위 면적을 통해 전달되는 파워

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

# 소리의 크기 등급

소리의 종류	세기 등급 (dB)
겨우 들을 수 있는 소리	0
나뭇잎의 살랑거림	10
조용한 강당	25
사무실	60
정상적인 대화	60
혼잡한 교통 (3 m)	80
시끄러운 고전음악	95
시끄러운 록음악	120
제트엔진 (20 m)	130

# 소리의 크기

귀가 느끼는 소리는  
소리의 세기에 비례하지 않고 로그함수에 비례하여 커진다.

소리 크기의 등급

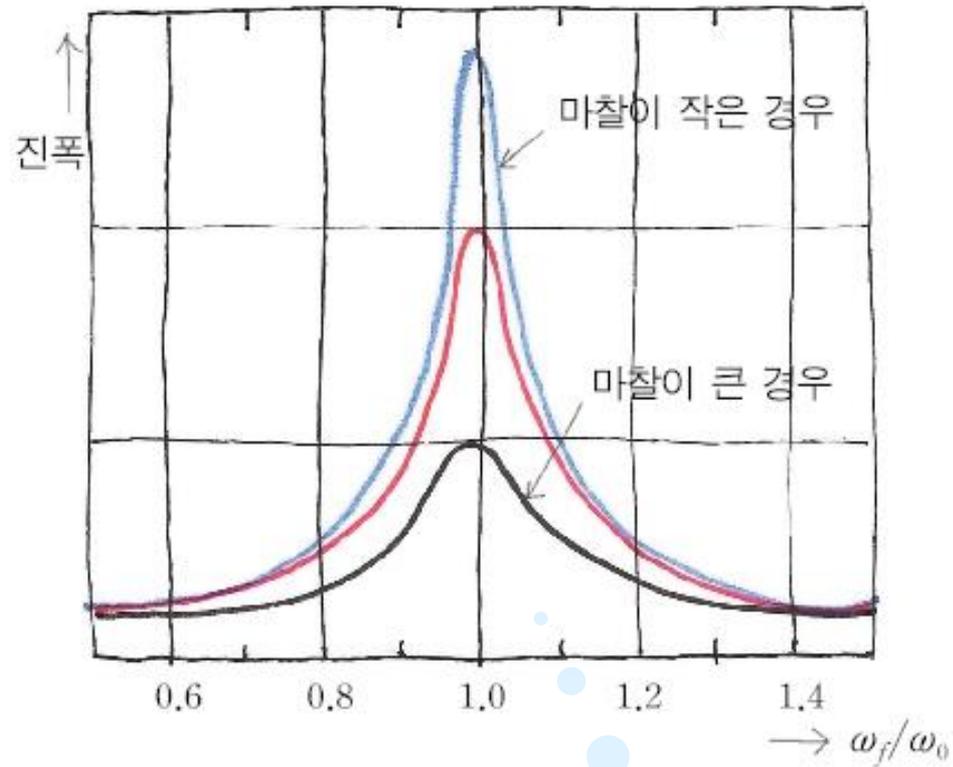
$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

(단위는 데시벨 dB)

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W / m}^2$$

(크기의 기준 : 사람이 겨우 들을 수 있는 소리의 크기)

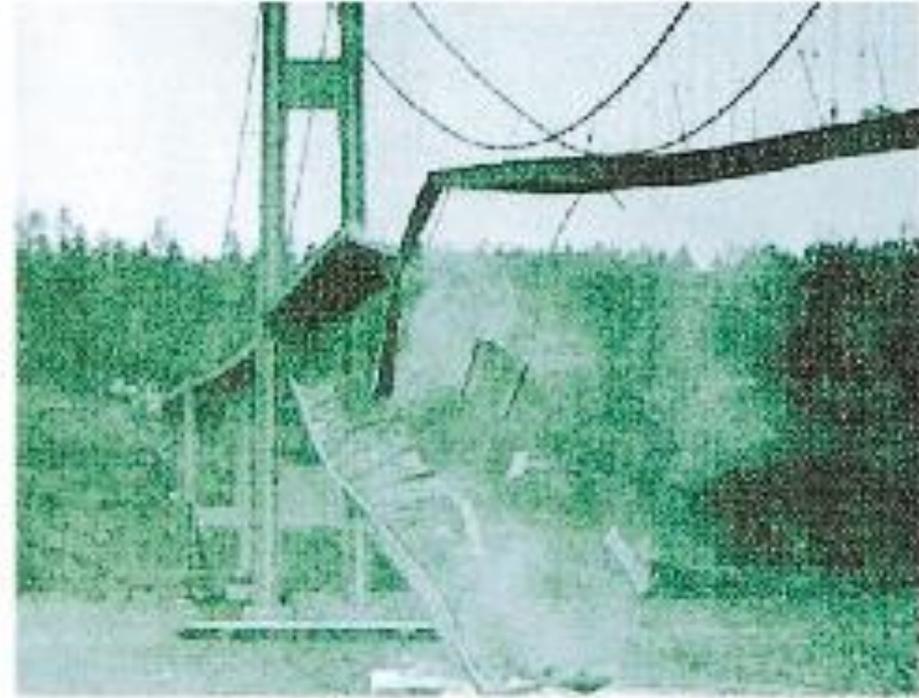
## 강제진동과 공명



물체를 고유 진동수로 진동시키면  
그 물체는 커다란 진폭을 갖게 된다.

# 공명과 에너지

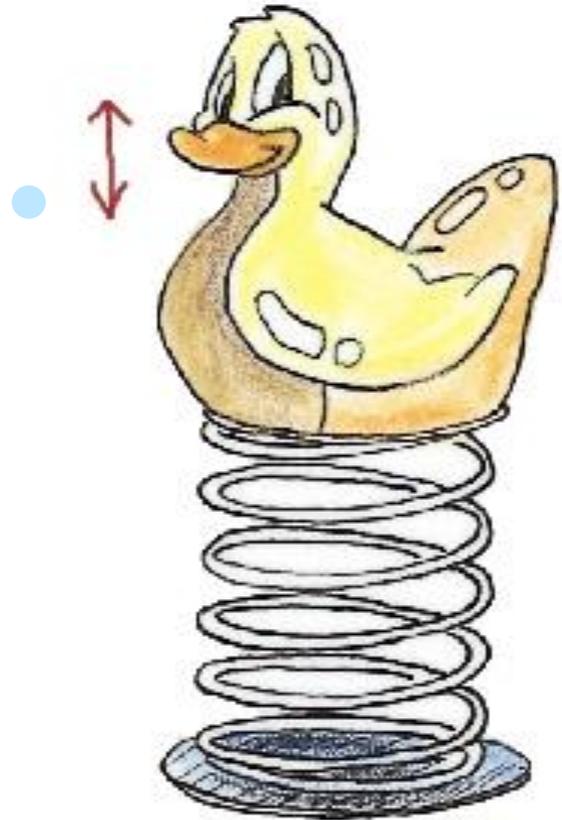
공명이 일어나면 진동하는 물체는 외부로부터 많은 에너지를 흡수한다.

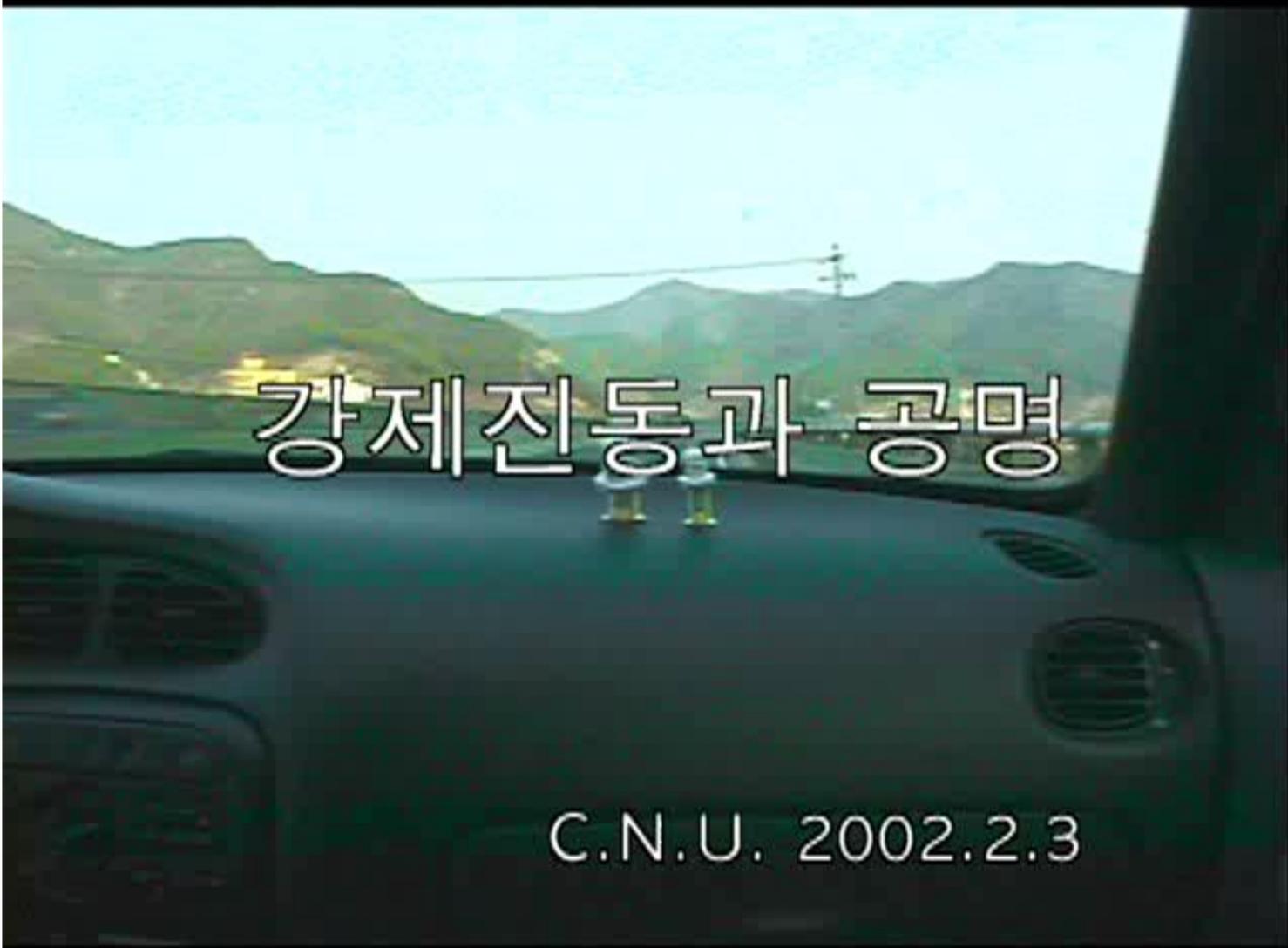


미국 타코마에 있었던 현수교의 고유진동수는 0.2 Hz 였다.  
건설된 지 4개월 된 1940년 어느 날 바람이 심하게 불자,  
이 다리는 공명에 의해 붕괴하였다.

# 인형과 강제진동

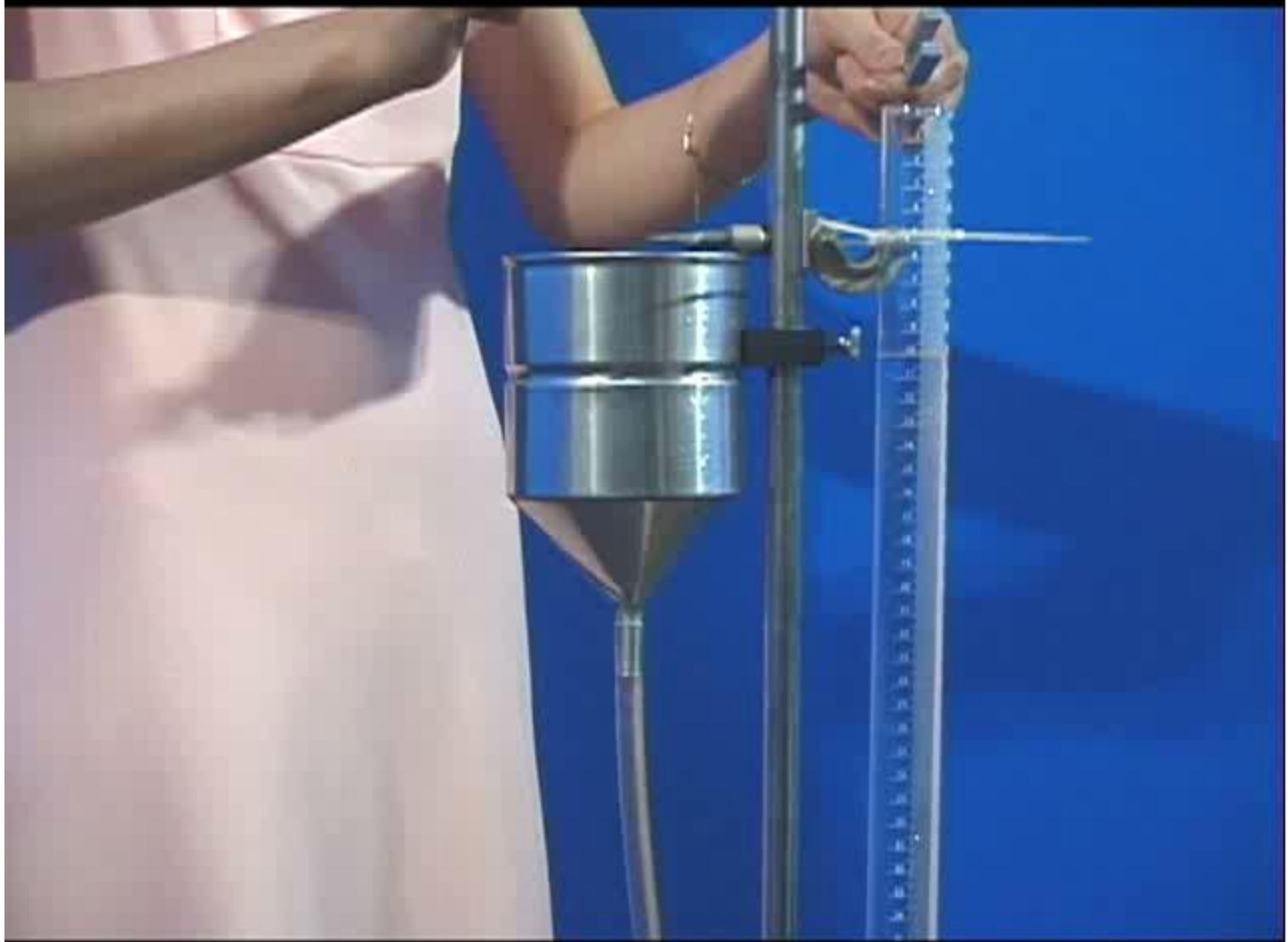
자동차 안에 놓인  
용수철 인형  
도로 상태에 따라  
공명이 일어나는  
경우에만 아래위  
로 진동한다.





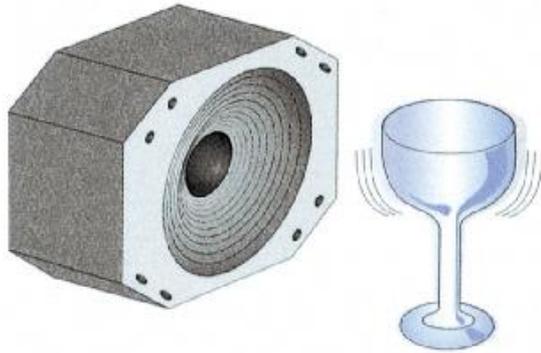
# 강제진동과 공명

C.N.U. 2002.2.3

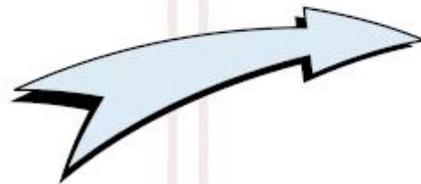


# 소리로 와인 잔 깨기

스피커에서 나오는 음파로 음파로 잔을 깰 수 있다.



와인잔에 음파를 보낸다.



깨어지는 와인잔

와인 잔의 **고유 진동수** (진동 모드)를 내는 음파가 필요하다.

### 질문: 파동의 중첩과 에너지

파동의 에너지는 진폭의 제곱에 비례한다.  
그런데 파의 중첩이 일어나면,  
파가 일시적으로 없어지거나 파의 진폭이 커진다.  
그러면, 파동의 에너지는 보존되지 않는 것인가?

질문: 소리의 크기 등급

연주회장에서 내는 피아노의 출력이  $0.4\text{W}$  이다.

10m 떨어진 객석에서 듣는 소리 세기의 등급은 얼마일까?

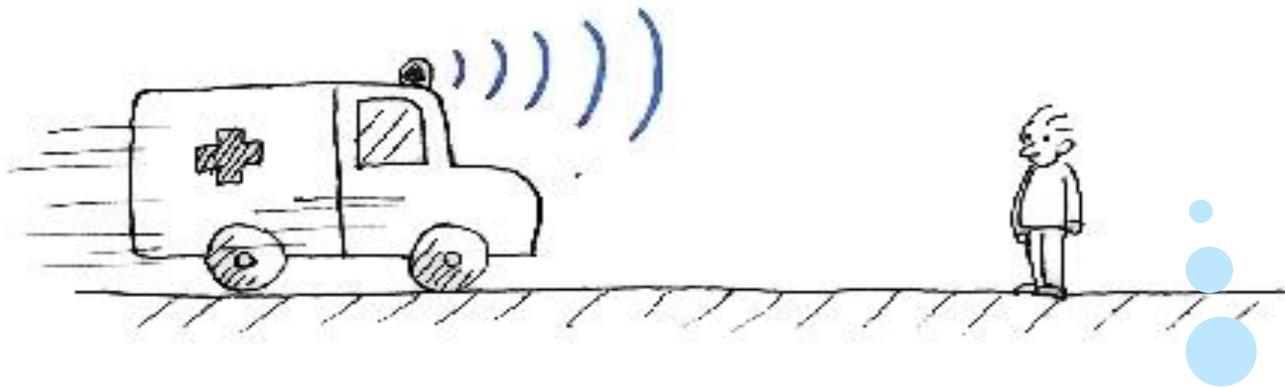
## 질문: 공명

자동차 운전석 앞에 부착한 용수철 인형 (200g)이  
2cm 만큼 수축된 상태로 놓여있다.

자동차가 움직이기 시작하여 요철이 심한 길을 달릴 때  
인형이 최대로 진동하면  
이때 자동차를 통해 전달되는 진동수는 얼마일까?

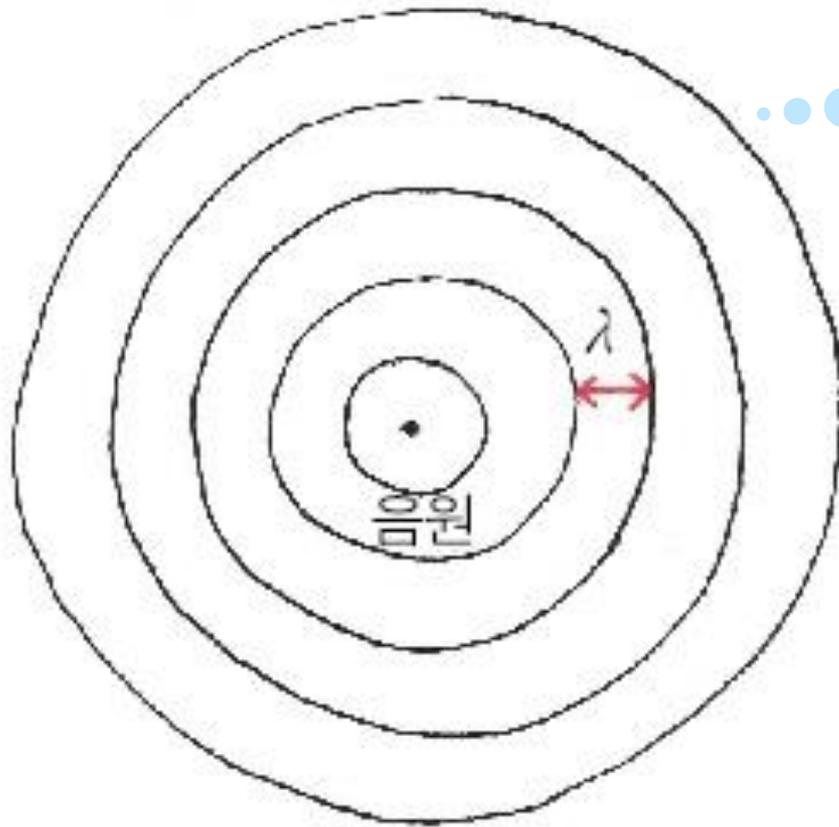
# 도플러 효과

음원이 움직이거나 관찰자가 움직이면  
파동의 진동수가 달라진다.



구급차가 다가오면 신호음  
소리가 높아진다.  
그러나 옆을 지나가는 순  
간  
소리가 급격히 낮아진다.

# 구급차가 정지해 있을 때

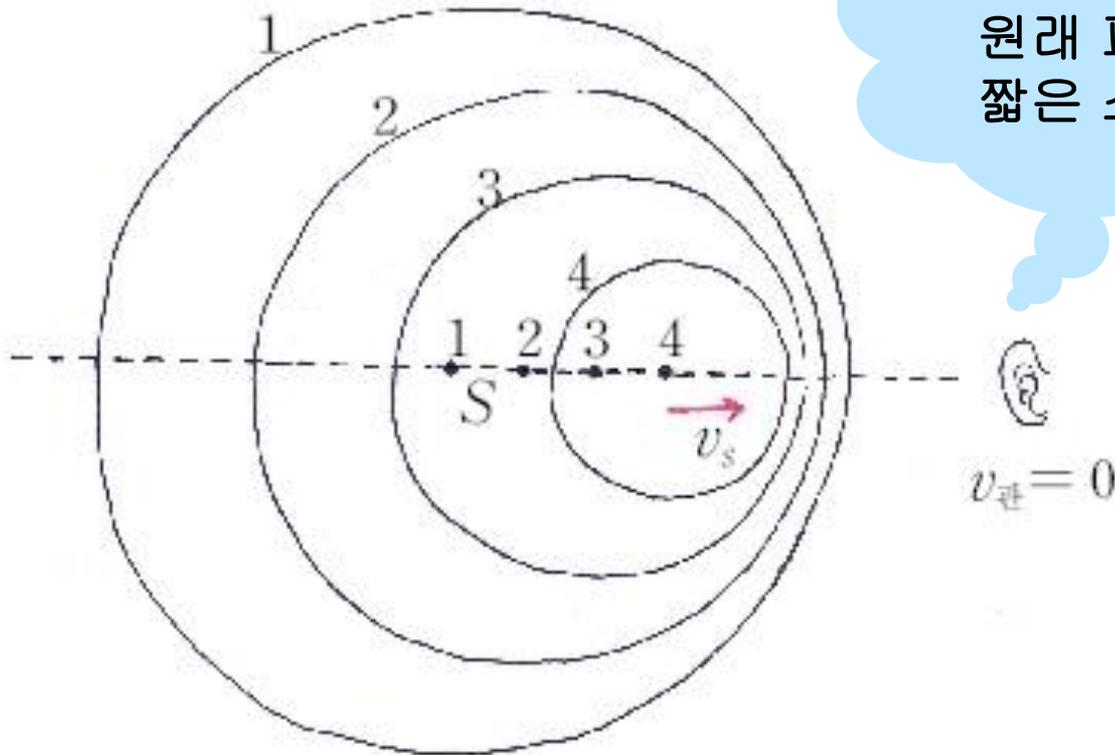


신호음 (음파)이  
사방으로 퍼져 나간  
다.

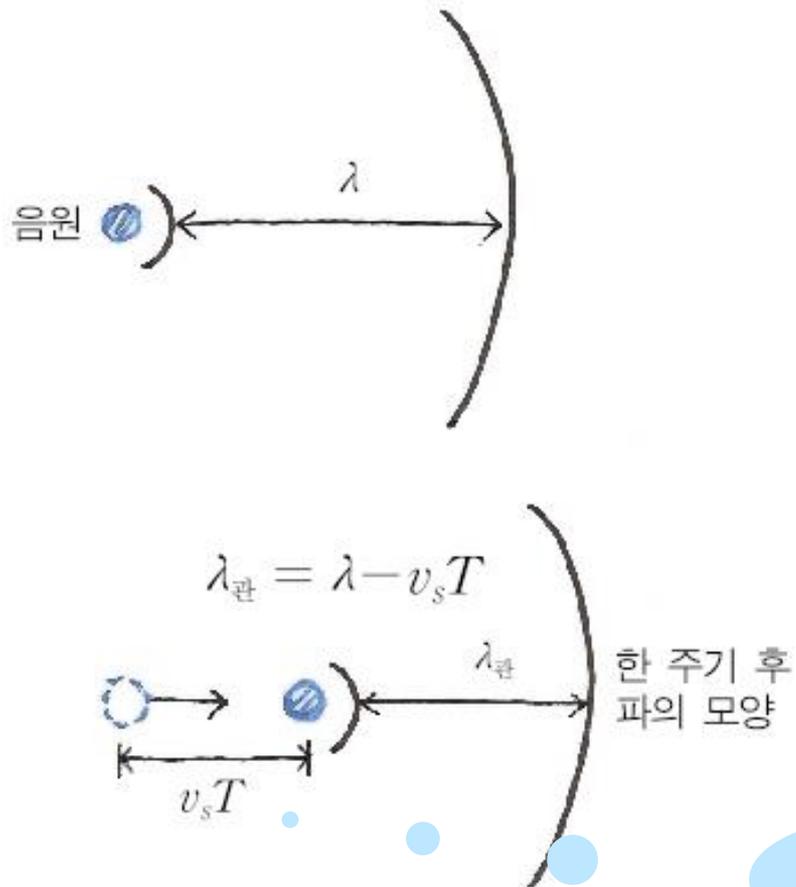
관찰자

## 구급차가 다가올 때

구급차가 다가오면  
 관찰자는  
 원래 파장보다  
 짧은 소리를 듣는다.

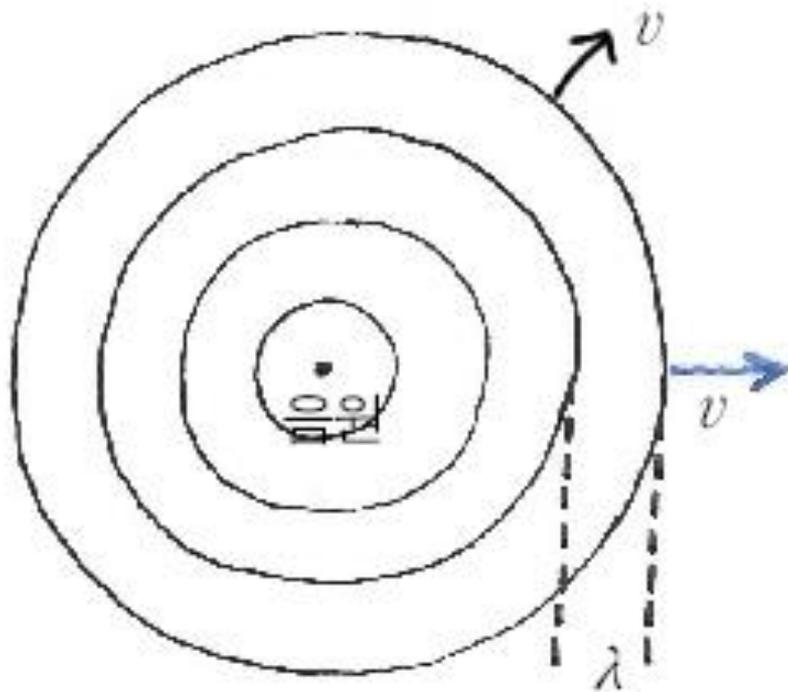


# 짧아진 파장



$vT$  만큼  
짧은 파장으로 보인다.

# 관찰자가 다가갈 때

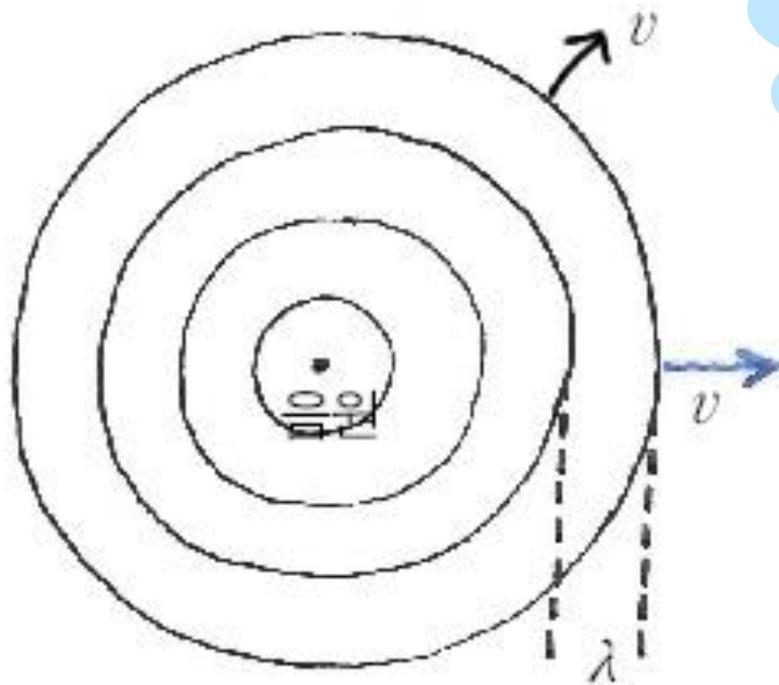


$$v_{\text{상대}} = v + v_{\text{관}}$$

관찰자가 음원 쪽으로  
다가갈 때에도  
소리는 높아진다.

# 움직이는 관찰자에게는 음속이 변한다

음원이 정지해 있으면 파장은 변하지 않는다.



그러나 관찰자가  
음원을 향해 다가가면  
음속은 상대적으로  
더 빨라진다.

관찰자  
 $v_{\text{관}}$

$$v_{\text{상대}} = v + v_{\text{관}}$$

# 비행기의 도플러 효과



비행기가 100 m/s 로 다가오며 내는 소리를 관제탑에서 들으면 얼마나 높아질까?

# 정지한 관찰자가 썬 음속

정지한 관찰자에게는 음속의 변화가 없다  
음속은 공기 (매질)이 결정한다.

매질이 고체일 때

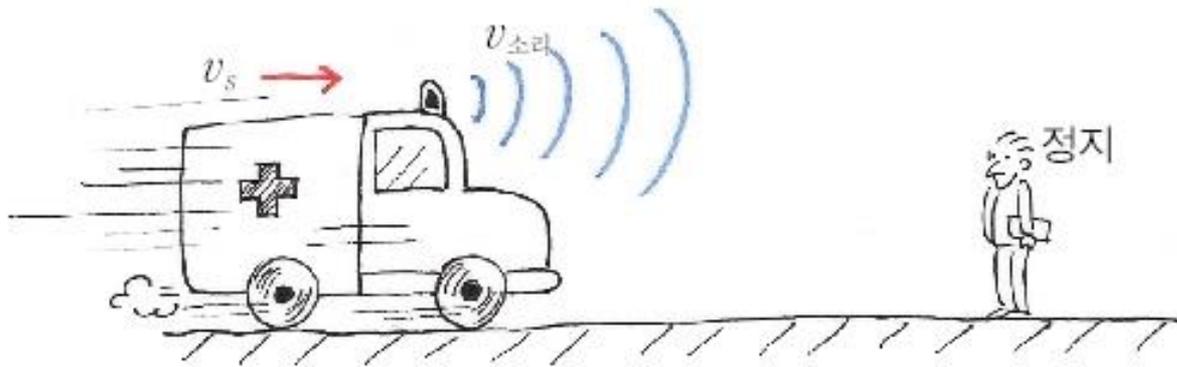
$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

매질이 유체일 때

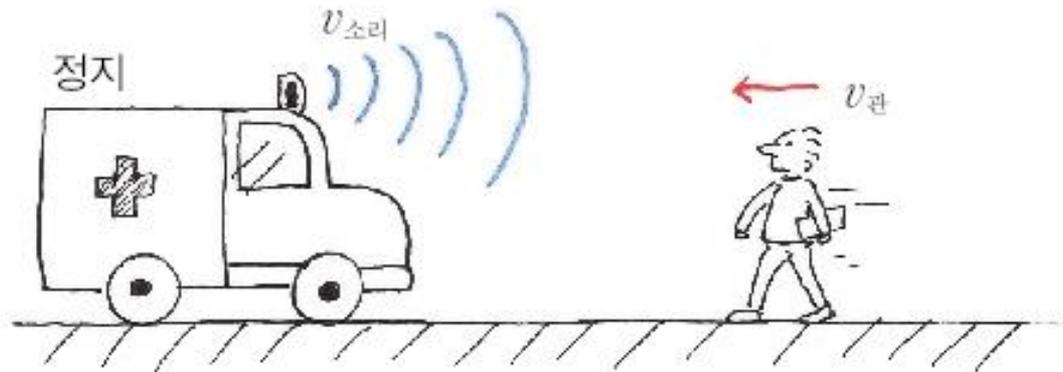
$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

# 관찰자가 본 음속의 변화

아래 두 경우는 음속이 다르다.



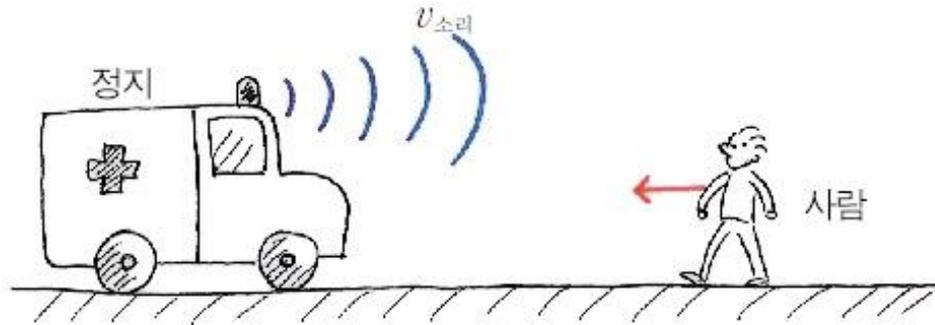
매질에 대해 정지해 있다.



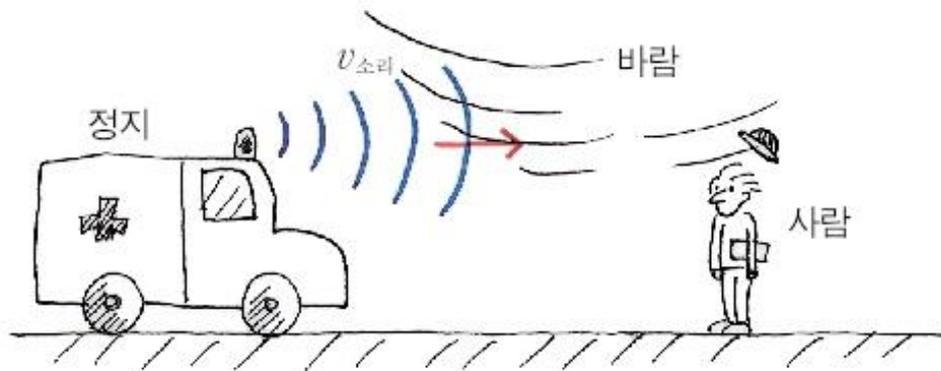
매질에 대해 움직인다.

# 상대적인 속도

아래 두 경우는 음속이 같다.



매질에 대해  
사람이 움직인다.

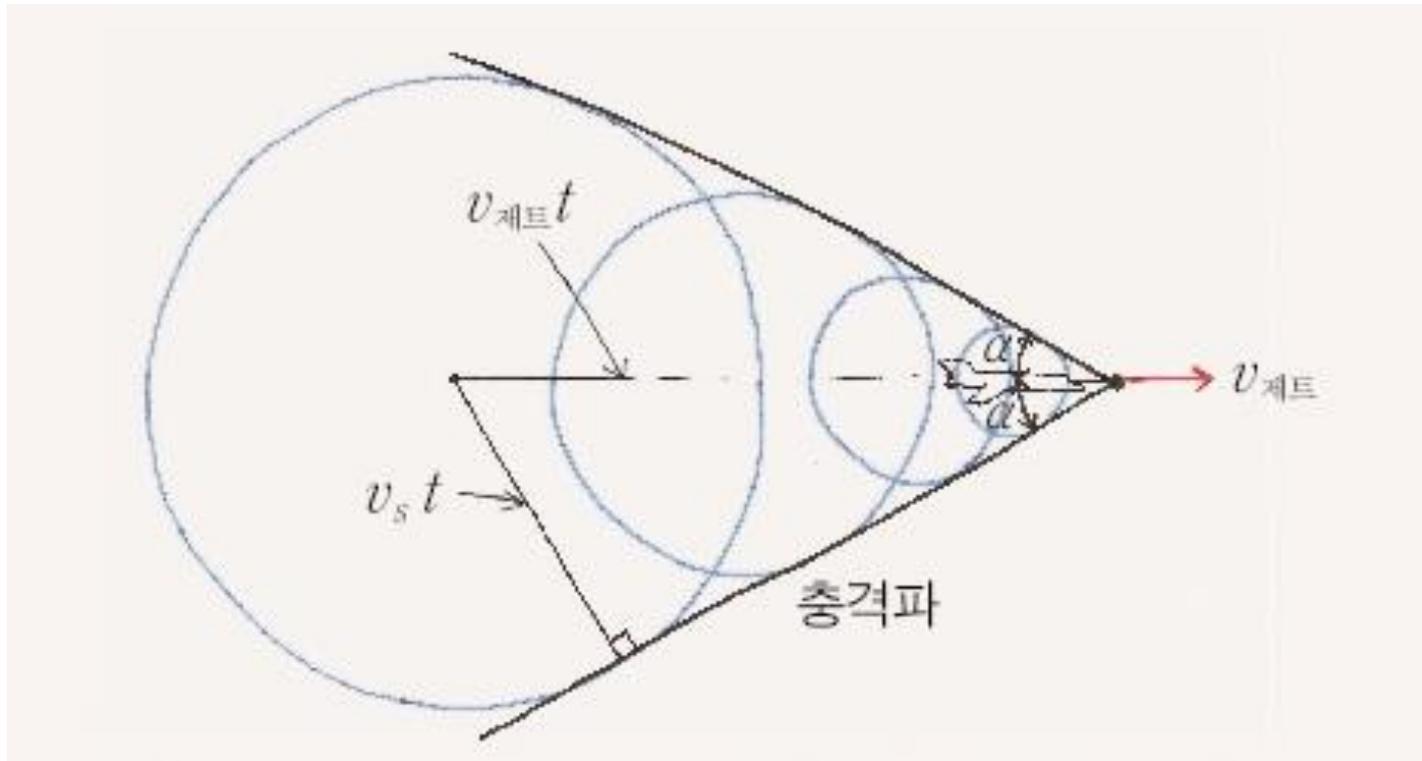


사람에 대해  
매질이 움직인다.

관찰자에게 나타나는 음파의 속력은  
매질에 대한 관찰자의 상대운동에 의해 결정된다.  
음원과 관찰자의 상대속도가 아니다.

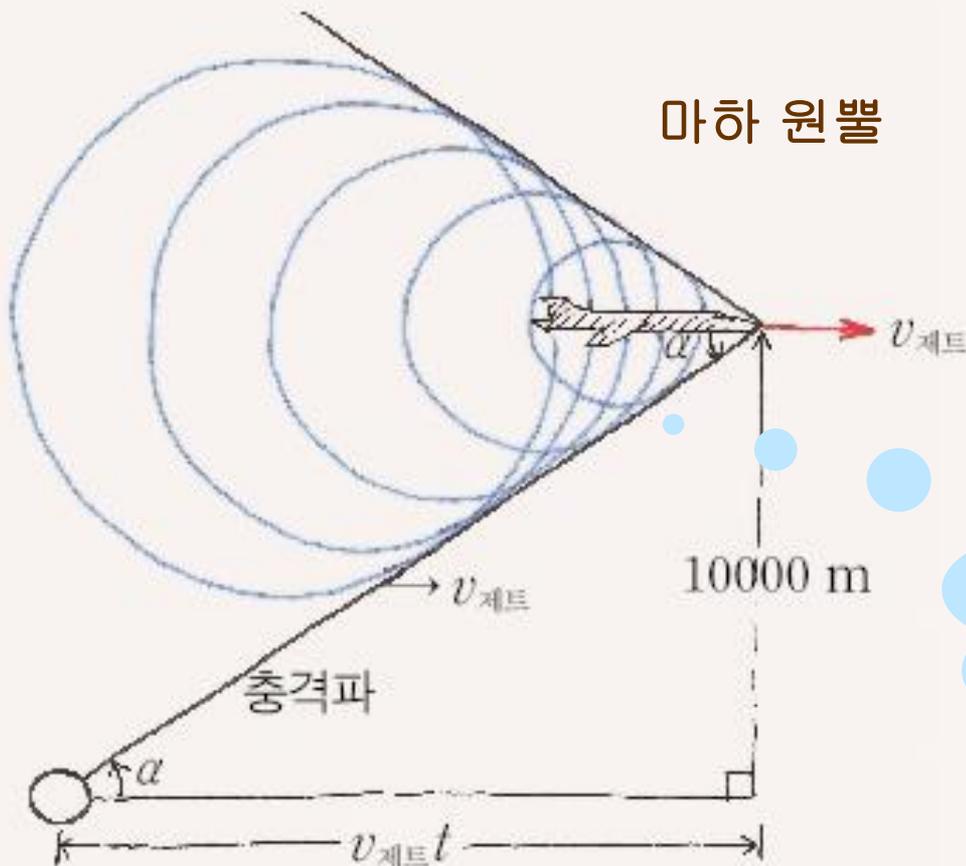
# 음원이 음속을 돌파하면

제트기가 음속 이상으로 달리면서 소리를 내면 **충격파**가 생긴다.



# 충격파

제트기가 음속이상의 속력으로 날면  
제트기는 음파가 만드는 구면파를 벗어난다.  
이 결과 원뿔 모양의 파형이 생겨난다.



이 원뿔형 충격파가  
지나가면서  
소리뿔 (충격파)를  
만든다.

## 질문: 도플러 효과

고속도로 상에서 위험표시기가 1000Hz의 소리를 내고 있다.

한 자동차가 이 위험표시기 쪽으로 시속 100km/h 로 달려가고 있다.  
이 자동차에서 듣는 소리의 진동수는 원래소리와 어떻게 다를까?

## 단원 요약

- ◆ 파의 중첩원리 : 동일 매질에서 두 개 이상의 파가 만나면, 파의 진폭은 각 파의 진폭을 더한 것이다. 이 원리에 따라 파의 진폭이 보강되거나 상쇄되는 현상이 간섭이다.
- ◆ 정지파 : 시간이 지나도 변위가 영인 마디가 있는 파이다. 서로 반대방향으로 진행하는 동일한 두 파가 중첩이 되어 생긴다.
  - 양끝이 고정된 현의 공명주파수
 
$$f = n \frac{v}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$
  - 양끝이 열린 관악기의 공명주파수
 
$$f = n \frac{v}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$
  - 한쪽만 열린 관악기 공명주파수
 
$$f = n \frac{v}{4L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

- ◆ 맥놀이 : 주파수가 비슷한 두 파가 중첩되어 파의 진폭이 커졌다 작아졌다 하는 현상이다. 맥놀이 주파수는 두 파의 주파수 차이로 계산된다.
- ◆ 소리의 세기 : 단위면적당 전달되는 음파의 평균 에너지다. 기준세기는  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 이다. 소리세기의 등급은  $\beta = 10 \log(I/I_0)$ 로 정의되고, 단위는 dB이다.
- ◆ 도플러효과 : 파원과 관찰자가 매질에 대해 움직일 때 파의 측정 주파수가 달라지는 현상이다. 음파의 경우 측정 주파수  $f'$ 은
 
$$f' = f \frac{v \pm v_d}{v \pm v_s} \text{ 이다.}$$

여기서  $v_d$ 는 관찰자의 속도,  $v_s$ 는 음원의 속도이고, 위와 아래의 부호는 각각 가까워지거나 멀어지는 경우를 나타낸다.