



소리와 파동



음악과 물리학

- 음악과 물리학은 고대부터 밀접한 관련을 맺으며 발전
- 피타고라스: 서양 음계에 대해 연구
 - “만물은 수”라는 관점에서 음계와 수에 대해 연구
 - 1 옥타브 → 음의 진동수가 1:2
 - 5번째 음 → 음의 진동수가 2:3
 - 순정율의 기본 원리를 확립함
(후에 Vincenzo Galilei가 약간 고침)



➤ 19세기 말 ~ 20세기 초에 음향학의 현대 이론이 완성됨

➤ 헬름홀쯔

➤ 레일리

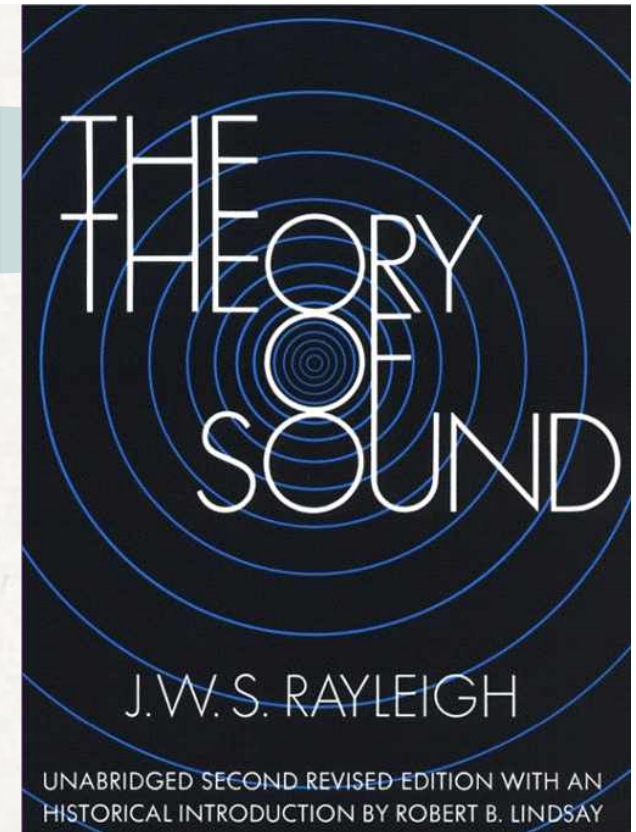
➤ 틴들

➤ 현대에도 음악과 음향학은 물리학의 주요 연구 대상

➤ Gordon Shaw(2005.5.1 사망) 모짜르트 효과를 처음으로 연구

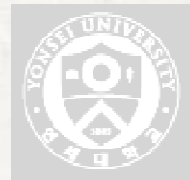
➤ 콘서트 홀의 설계: 고도의 음향학 이론이 필요하다

➤ 초음파 의료장비 연구,...



거시계에서 에너지가 전달되는 방법

- 입자가 에너지를 가지고 직접 움직여서 전달
(뉴턴의 운동방정식으로 잘 설명됨)
- 여러 입자가 협동하여 파동에 의해 전달
 - 파동도 뉴턴의 운동 방정식으로 설명이 되는가?



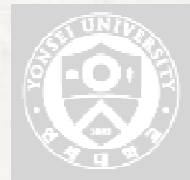
역학적 파동이란

- ▶ 파동은 여러 방향으로 동시에 에너지를 전달한다
 - ▶ 이때 각 입자들은 본래 위치에서 크게 벗어나지 않는다
- ▶ 수많은 입자가 모여있어야 한다
 - ▶ 이들이 모두 협동하여 다양한 모양으로 퍼져나간다
 - ▶ 매질이 없으면 파동이 퍼져나갈 수도 없다
(혼자서 파도타기를 할 수는 없다!)



다시 말해서 파동이란

- ▶ 입자들이 뭉뭉하게 많이 모여 물질을 이루고 있는 상황에서 에너지가 입자들의 진동에 의해 여러 곳으로 퍼져나가는 현상
 - ▶ 예: 물결파, 소리 (음파), 현악기나 북의 진동, 지진파, 쓰나미, 도미노, 파도타기 응원
 - ▶ 파동이 퍼져나갈 수 있게 모여있는 물질, 즉 파동을 매개하는 물질을 **매질**이라 한다
 - ▶ 역학적 파동에는 횡파(transverse wave)와 종파(longitudinal wave)가 있다.
- ▶ 빛도 파동인데 매질이 필요한가?
 - ▶ 뒤에서 자세히 배움



용수철의 진동 - 후크(Hooke)의 법칙

$$F = -kx \quad (k: \text{용수철 상수})$$

x : 용수철이 늘어난 길이

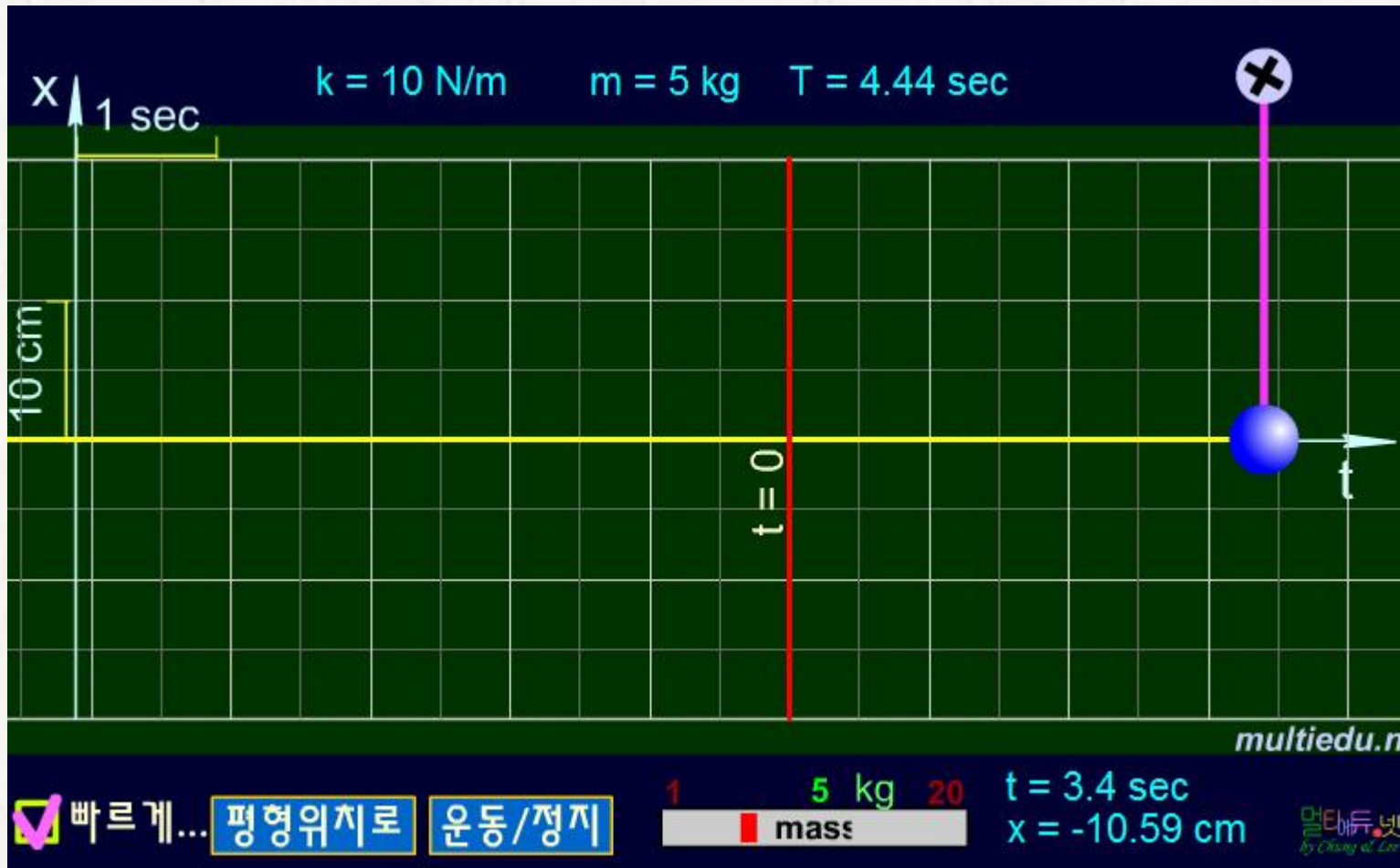
-: 힘의 방향이 늘어난 길이에 반대방향이기 때문

용수철이 늘어나면 늘어날수록 돌아가려는 힘이 더 크다

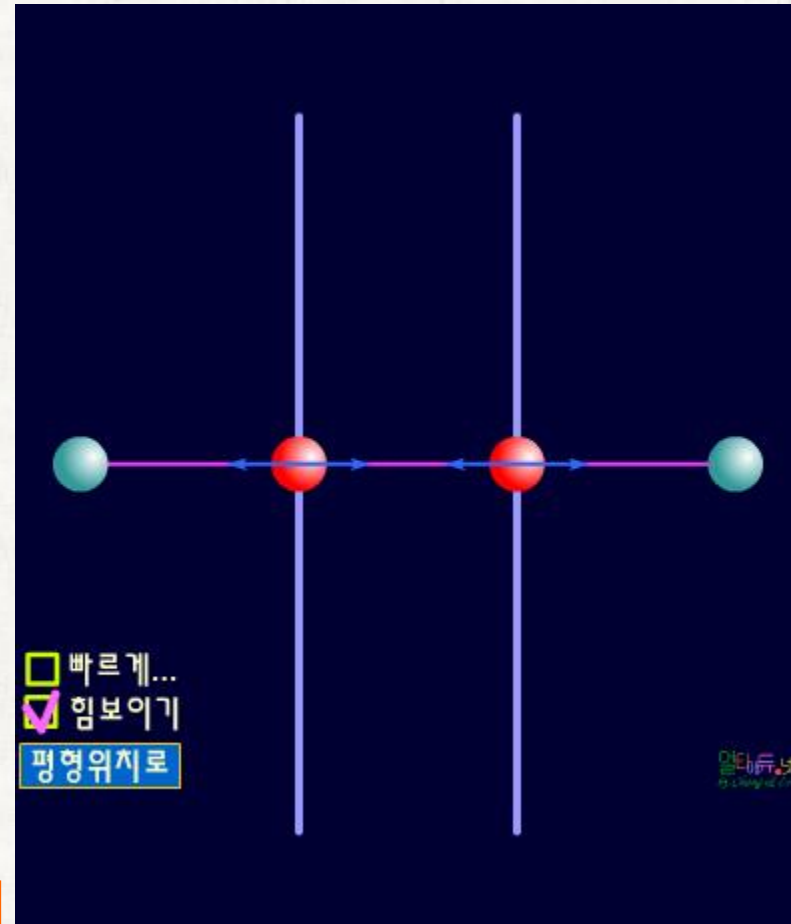
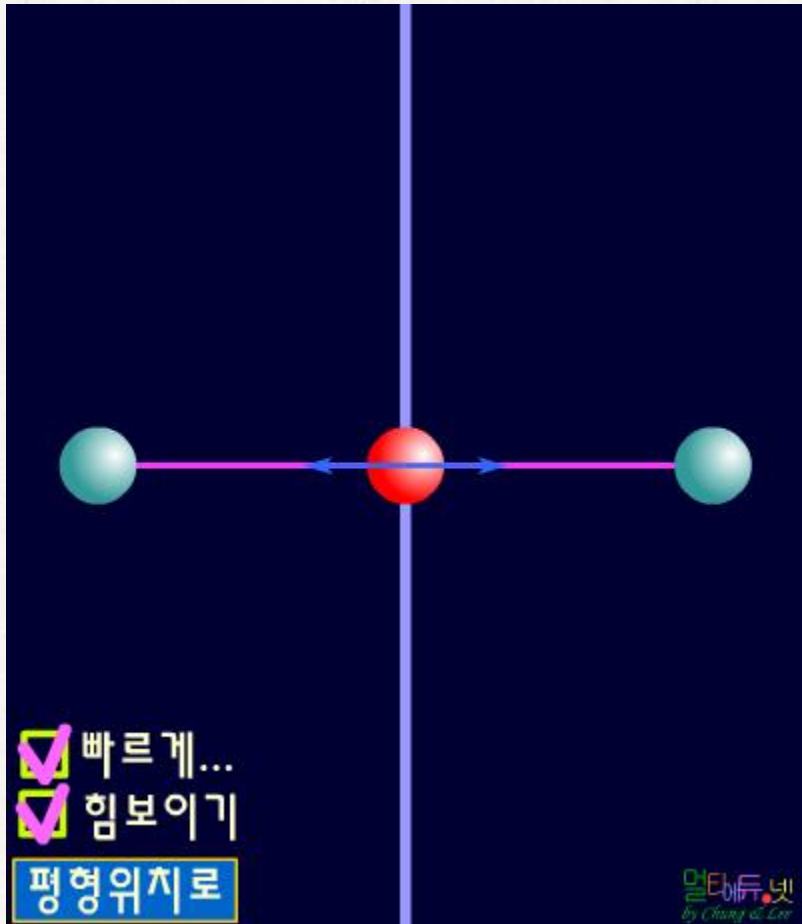
→ 즉, 힘 F 가 x 에 비례



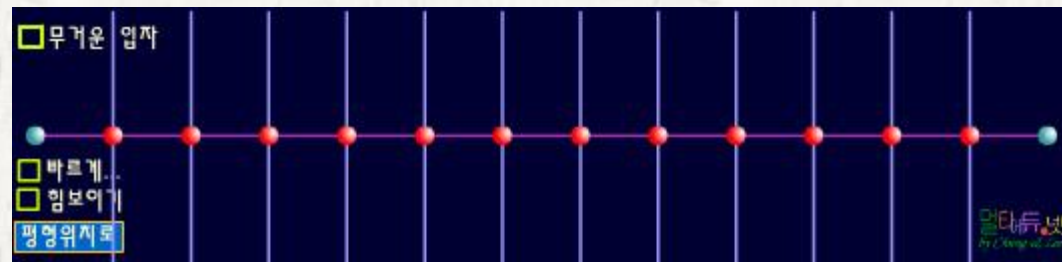
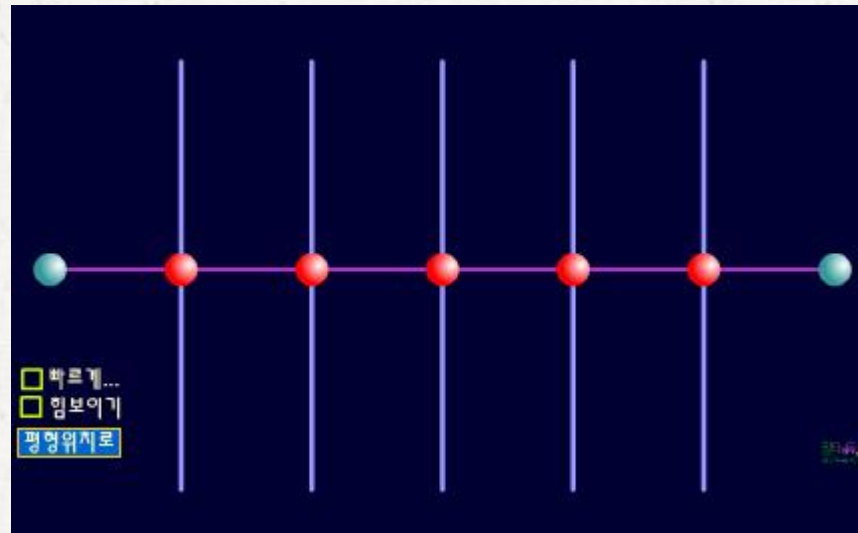
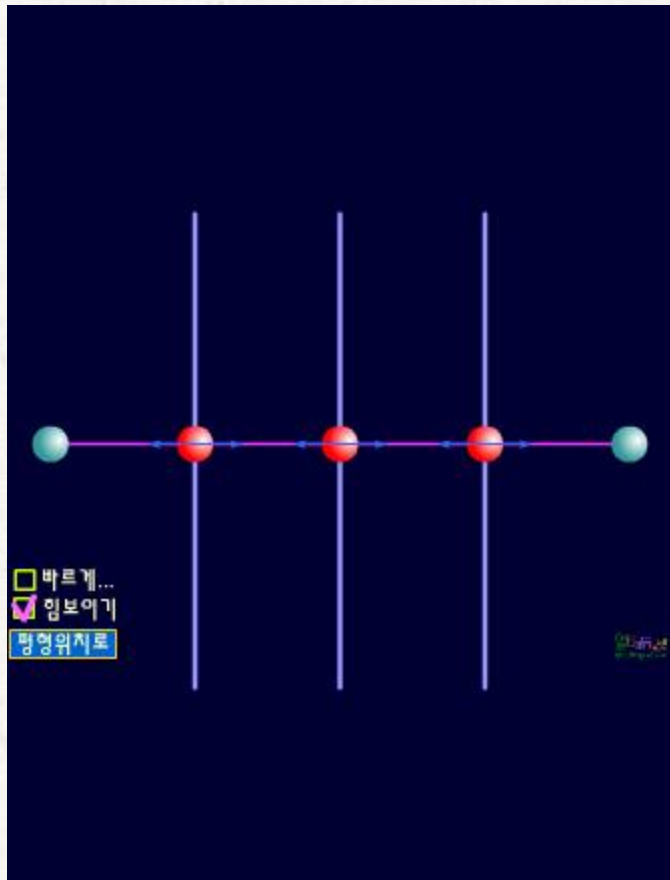
진동에 의한 파의 생성: sin 파



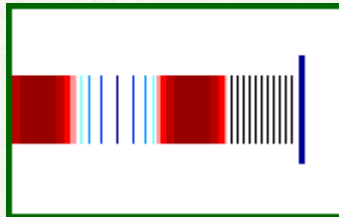
진동(파동의 예)



한 입자의 진동이 파동(횡파)으로



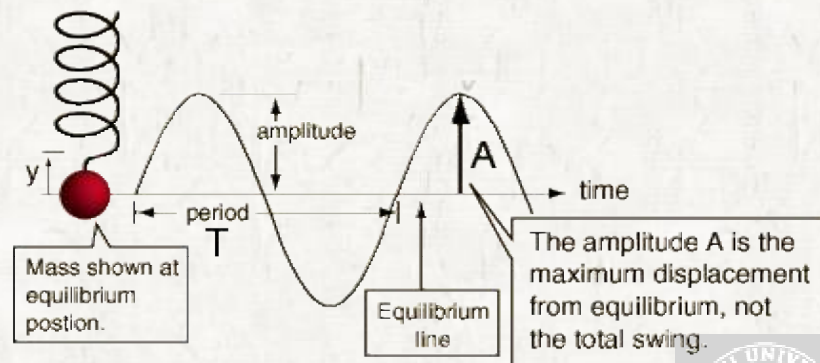
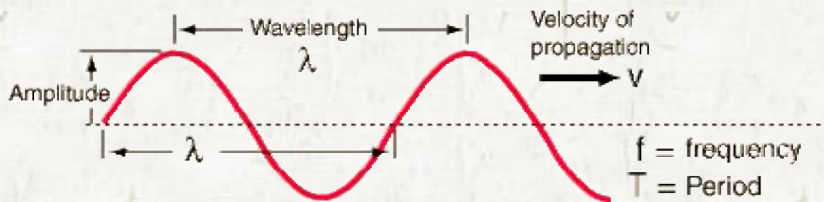
소리(종파)



- 소리: 공기 분자의 떨림에 의해 전달되는 진동
- 음속: 0도에서 331 m/s (1도 증가 → 0.6m/s 씩 증가)
- 인간이 들을 수 있는 소리의 진동수: 20 Hz ~ 16,000 Hz

진동(파동)의 중요한 성질

- 파장: 진동의 길이, λ
- 진동수: 1초간 진동하는 수, f
- 파동의 속도: 파동이 전파되는 속도, $v = f \lambda$

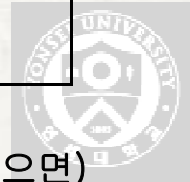


소리의 세기

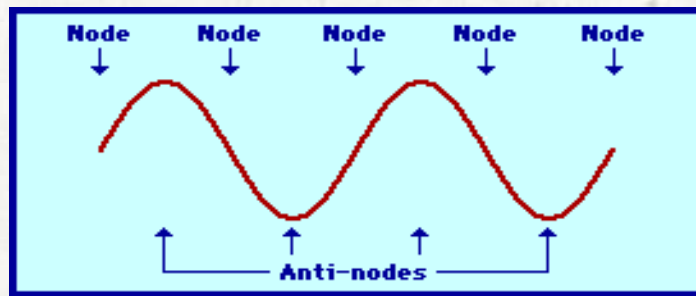
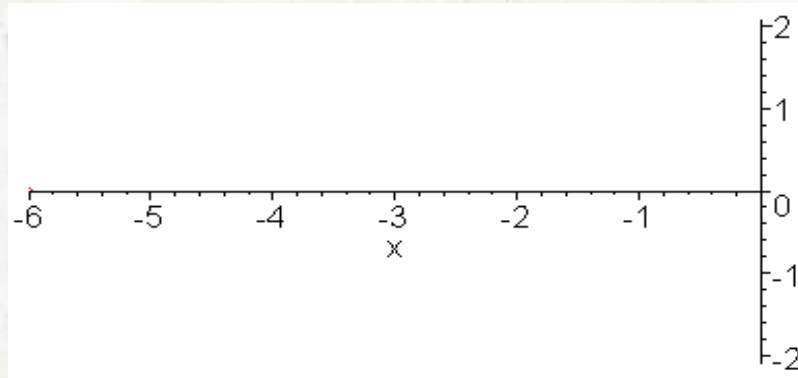
$$I_0 = 10^{-12} W / m^2 = 1 pW / m^2$$

Source	I/I_0	dB	description
	10^0	0	소리 한계
조용한 숨쉬기	10^1	10	겨우 들림
앞사귀 떨어지는	10^2	20	
속삭임	10^3	30	아주 조용함
조용한 사무실	10^5	50	조용함
대화	10^6	60	
공장내부	10^8	80	
기차역	10^{10}	100	아주 시끄러움
비행기이륙, 재즈	10^{12}	120	가청한계

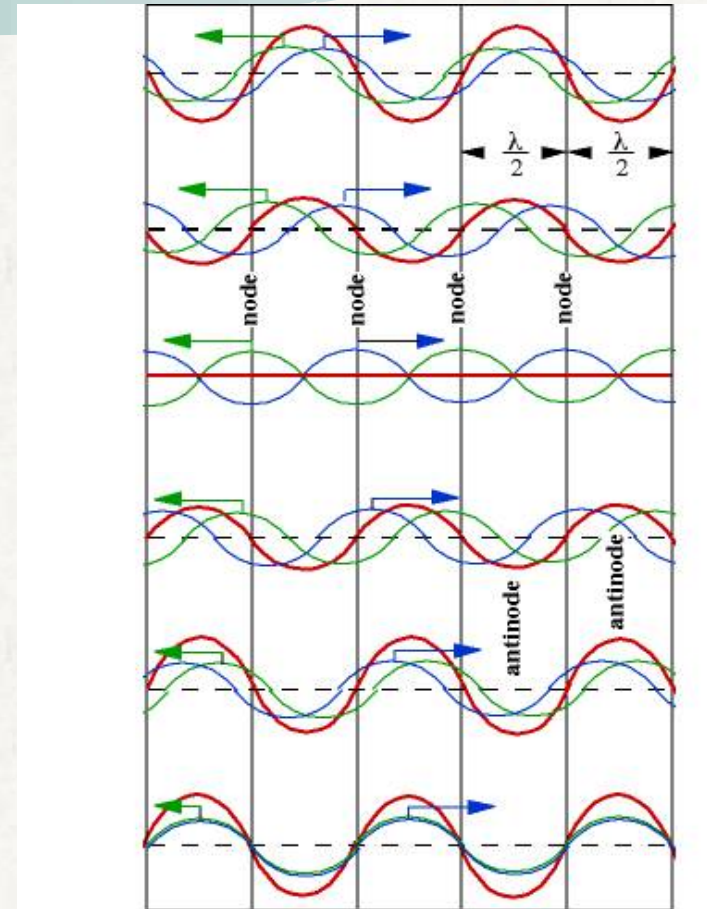
MP3 플레이어는 볼륨을 최대한 높이면 100dB 수준까지 올라간다-청각 손상 위험(15분 이상 들으면)



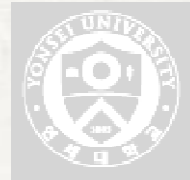
정상파 (standing waves)



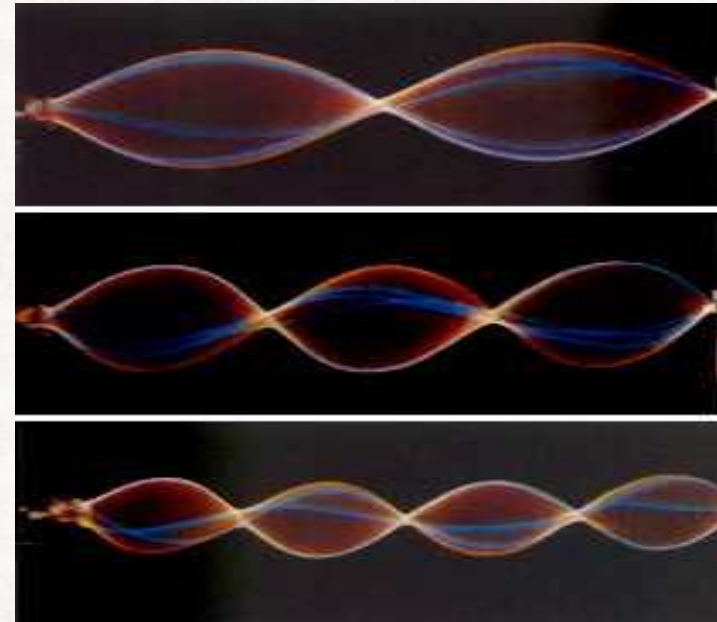
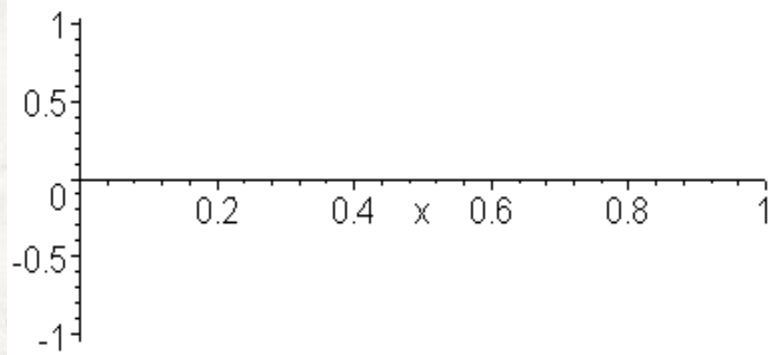
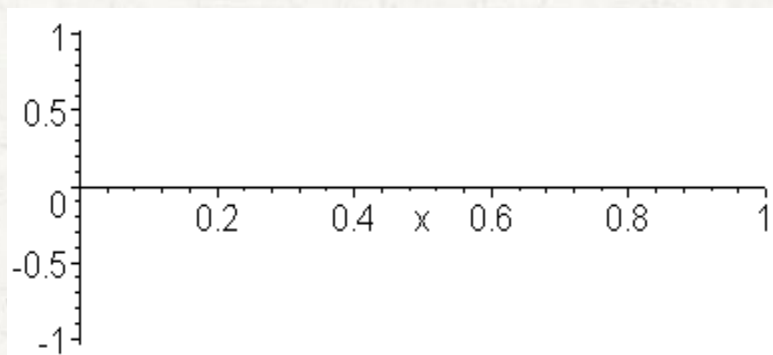
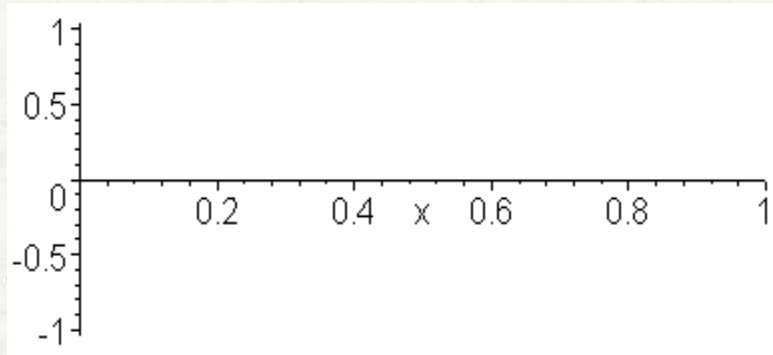
동영상



들어오는 파와 반사되는 파가 서로 합쳐져서 정상파를 만든다. 정상파에서는 서로 상쇄되어 전혀 움직이지 않는 곳도 있고 두 배가 되는 곳도 있다.



배음(Harmonics)

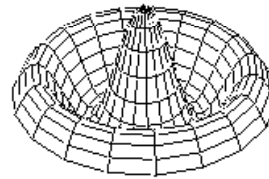
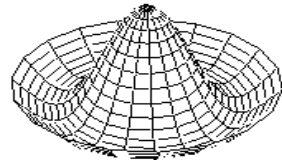
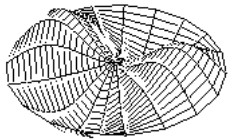
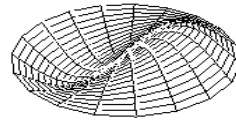
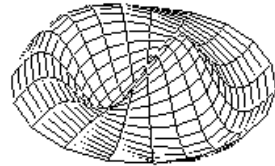
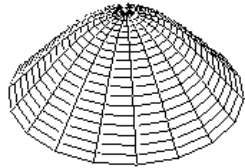


같은 길이의 끈에 대해서도
여러 종류의 정상파가 생길 수 있다.
각각은 다른 소리를 낸다.

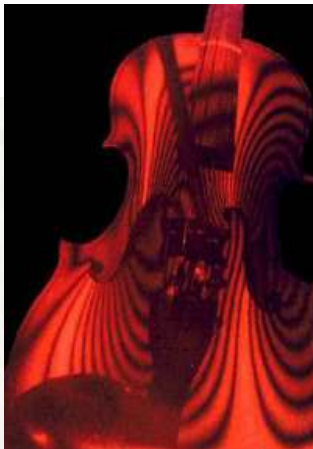
도역상
○○○



북(drum)의 정상파



동영상
영역

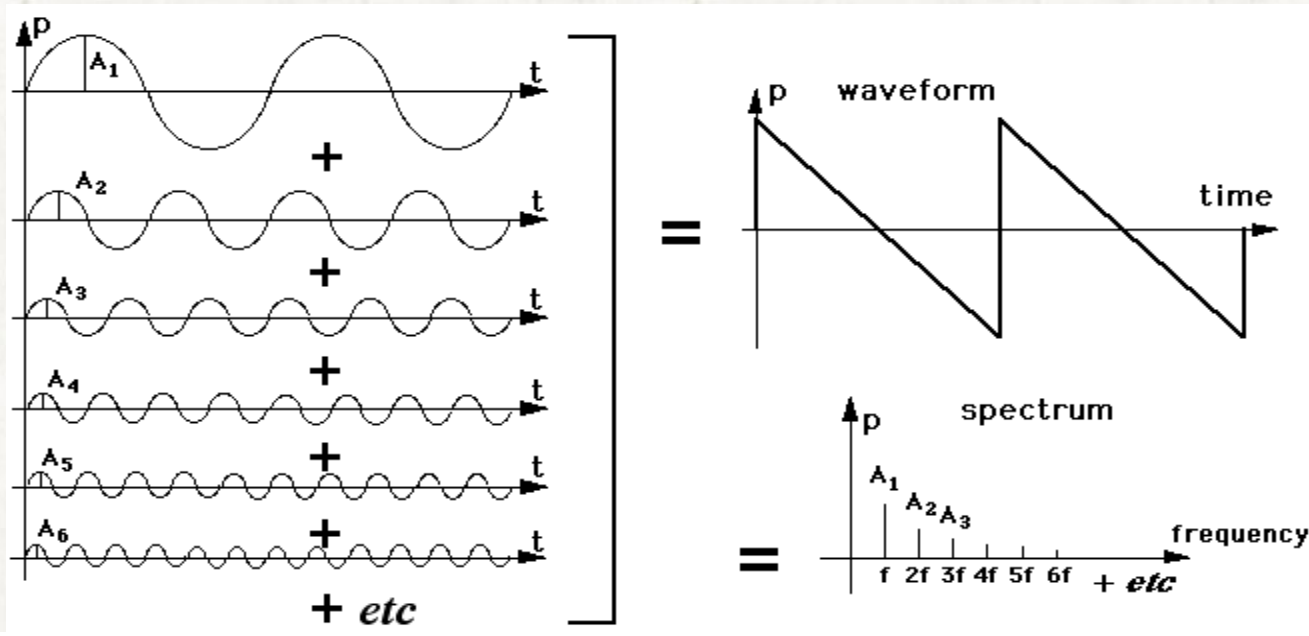


바이올린의 울림통에 형성되는 정상파



음색(tone;timbre)과 스펙트럼

배음이 어떤 세기로 합쳐지느냐에 따라 악기의 음색이 달라진다



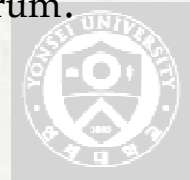
The first six harmonics of a sawtooth wave, sounded one at a time.



Sequential synthesis using the first six harmonics, then a melody using that spectrum.

인터넷으로 더 많은 음색 들어 보기
L ^ L O L M G L

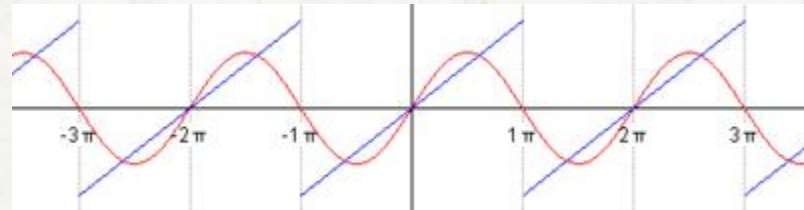
인터넷으로 파형 합성하기
L ^ O M O



Fourier 분석

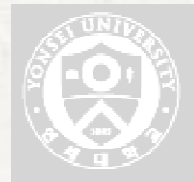
- 복잡한 소리도 Fourier 분석을 통하여 특성을 알아내거나 합성할 수 있다.

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)] \\ &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin(nx), \quad \text{for } x - \pi \notin 2\pi\mathbb{Z}. \end{aligned}$$

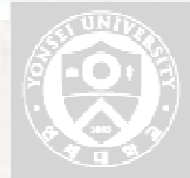
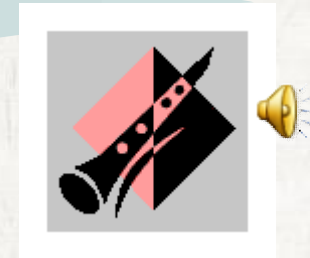
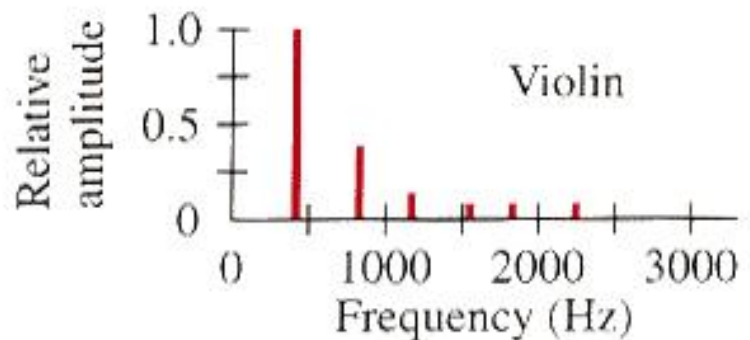
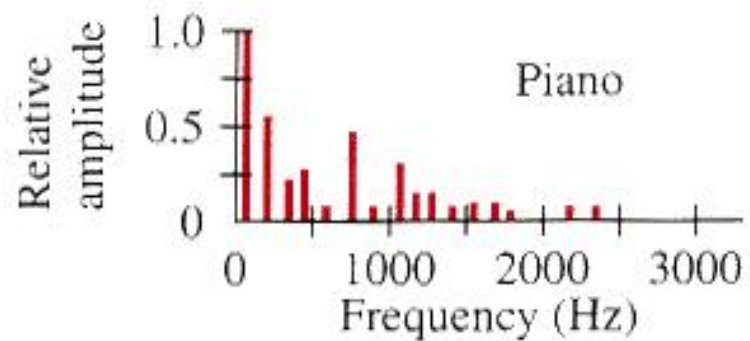
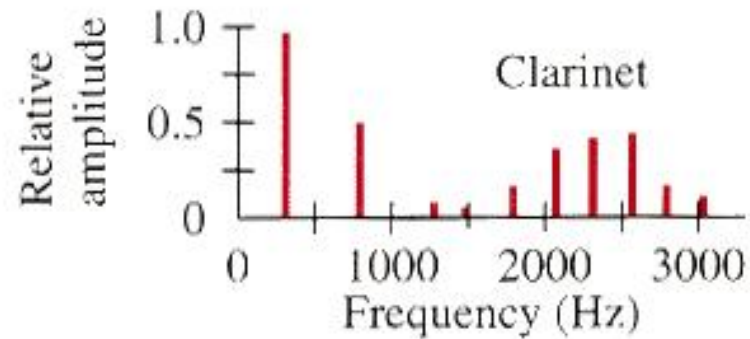


5개의 항을 더하여 톱니형 소리 만들기

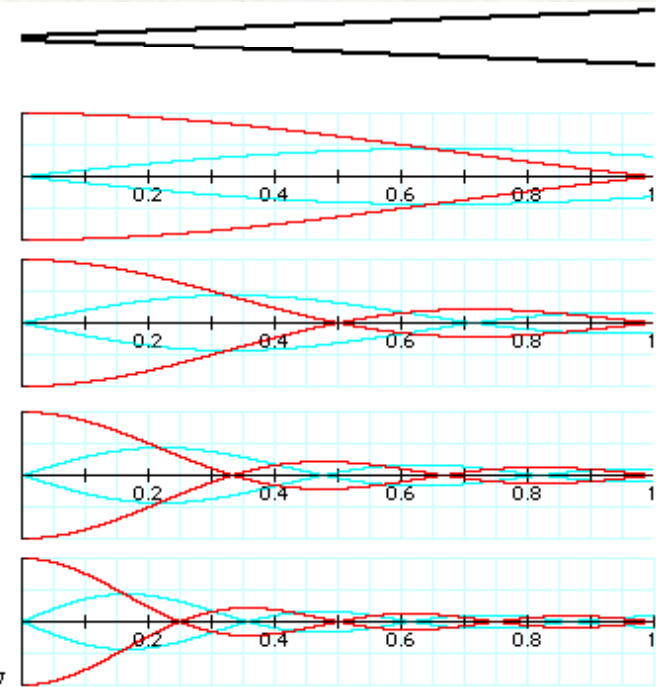
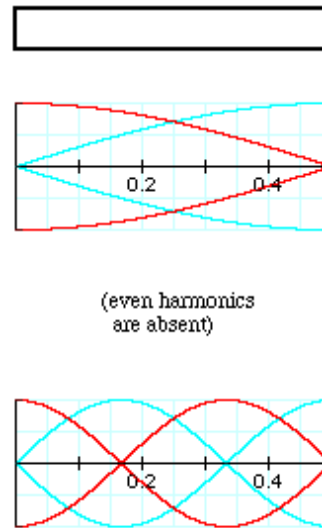
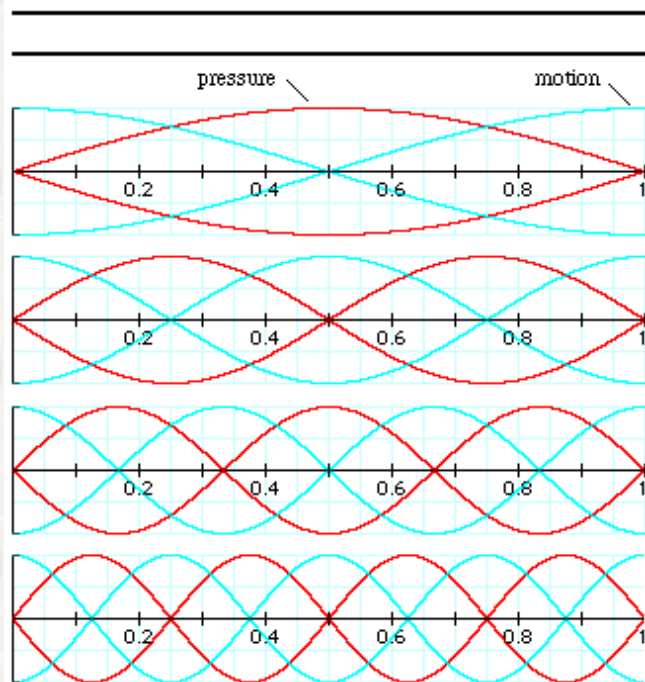
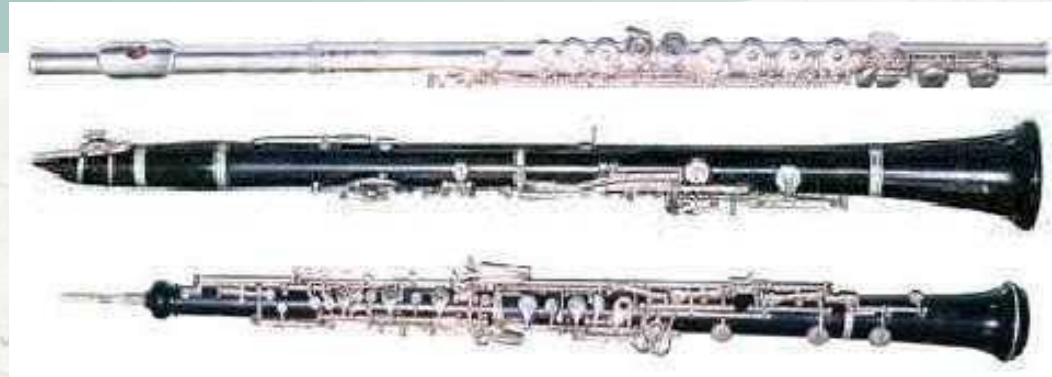
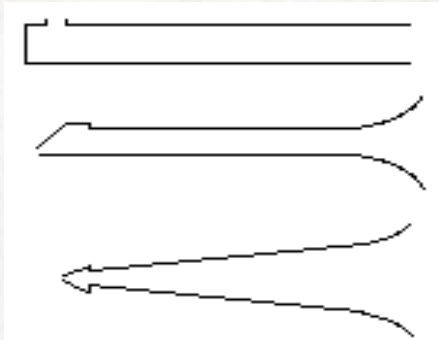
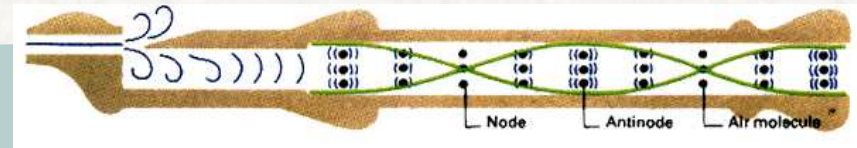
- 음성 인식 기술의 기반(예: 열려라 참깨, siri 등)




The shapes of the spectra change as the instruments play different notes.

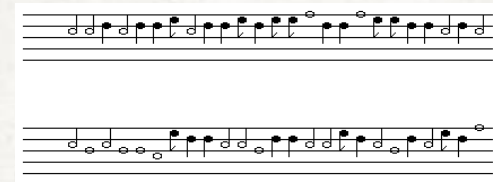


관악기



소음(noise)과 음악

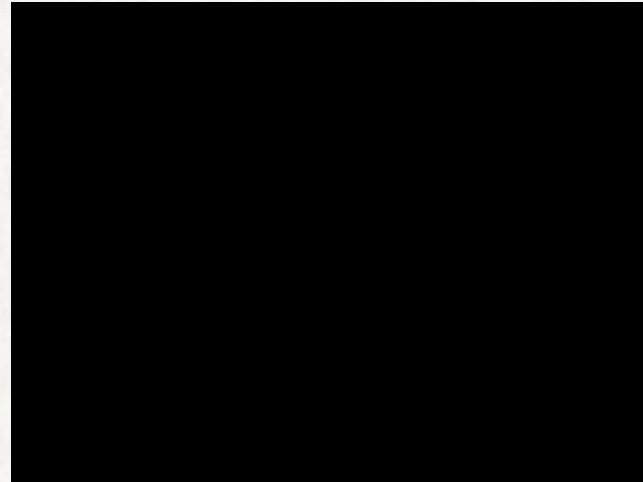
- 소음과 음악의 차이는 무엇인가?
- **답해 봅시다.**
- 듣기 좋은 음악이 있다?
 - *Voss, R. F. and Clarke, J., "1/f noise in music and speech," Nature 258 (1975), 317*
 - 분석결과 음정이 나타나는 빈도가 대체로 변화 차에 반비례한다는 사실이다. 이런 음악을 '1/f 음악'이라고 부른다. 더욱 재미있는 것은 대중적인 인기를 끄는 곡일수록 1/f에 정확히 일치한다는 것. 록음악이나 헤비메탈은 그렇지 않다.
- 1/f 관계는 놀랍게도 자연계에서 일어나는 현상과 일치한다(fractal: 나중에 자세히 다룸)
 - 예: 히말라야 산맥의 산봉우리의 높이들, 심장박동소리, 새들의 지저귐
 - **1/f noise로 만들어진 음악을 들어보자.** 



듣기 좋은 음악의 예
Orchestral Suite No.3 ('Air on the G String')



Johann Sebastian BACH
(1685-1750)



동영상
영역

Adagio ♩ = 88 J.S.Bach (1685-1750)

A musical score for the piece 'Air on the G String' by J.S. Bach. It consists of two staves of music in G major (one sharp) and common time. The first staff shows the beginning of the piece with a long note followed by a melodic line. The second staff continues the melody and includes a first ending (marked '1.') and a second ending (marked '2.').

Music Hall: acoustics



Wall and ceiling of Avery Hall (New York Lincoln Center) have irregular shape to avoid formation of standing wave.

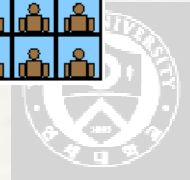
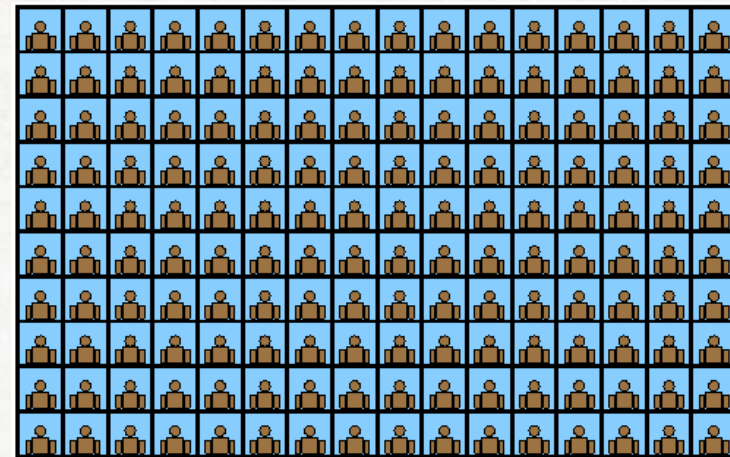
연세대에서 가장 음악소리가 잘 들리는 곳은?



예: 파동의 전달



동영상
이동



진동이 심해지면 1-와인 잔 깨기

KBS2 스펀지 2006년 3월 11일(토)



동영상
응응응

3시간 40분만에 성공하는 동영상



동영상
응응응

느린 화면으로 보기



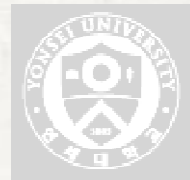
진동이 심해지면 2

- 1940년 11월 미국 워싱턴 주의 Tacoma Narrows Bridge 가 주기적인 바람에 의해 **공명**을 일으켜 파괴되는 모습 (**실제 상황**)
- 바람에 의해 진동이 심해지자 다리가 파괴될 것으로 미리 예측하고 대기하다가 촬영하였음



동영상

이런 재난을 피하려면 다리를 설계할 때 뉴턴 방정식 $F=ma$ 를 미리 풀어봐서 이런 일이 일어나지 않는다는 것을 확인해야 한다. (→ 일반 물리를 열심히 하여야 한다)



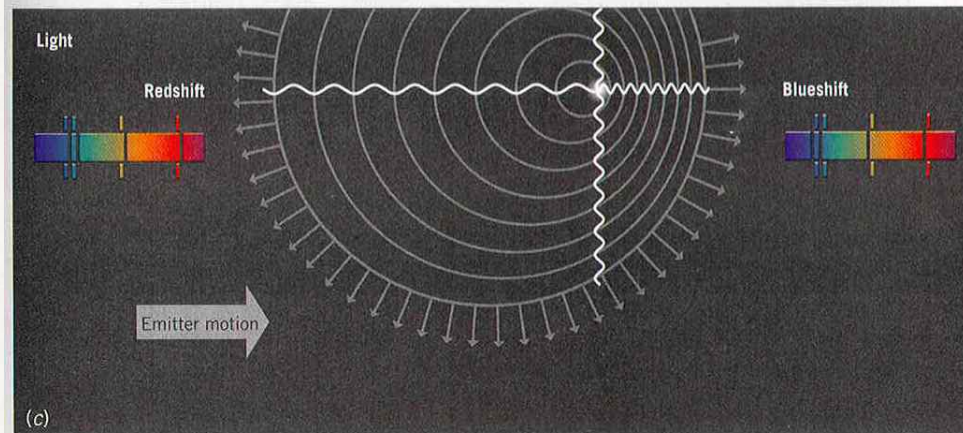
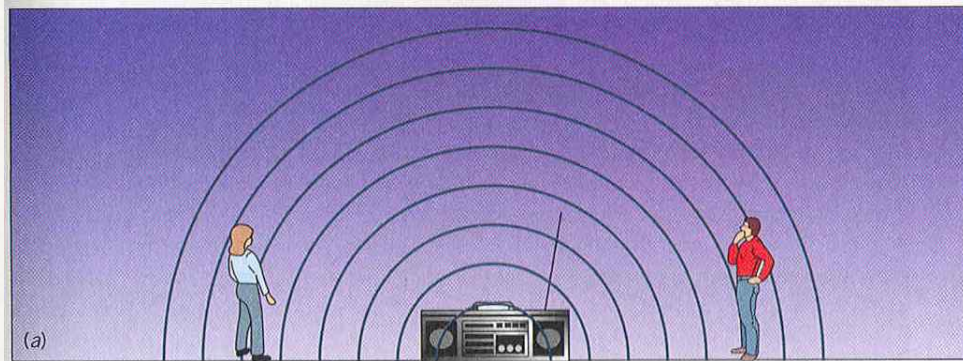
진동이 심해지면 3



너무 끔찍해서 동영상을 붙이지 않음



도플러 효과(Doppler effect in wave)



If the source of wave moves, the wave length of the moving source will appear shorter or longer depending on the direction of the motion.

→ 스피드 건의 원리

→ 야구공 속도 재기

→ 차량속도 위반 단속

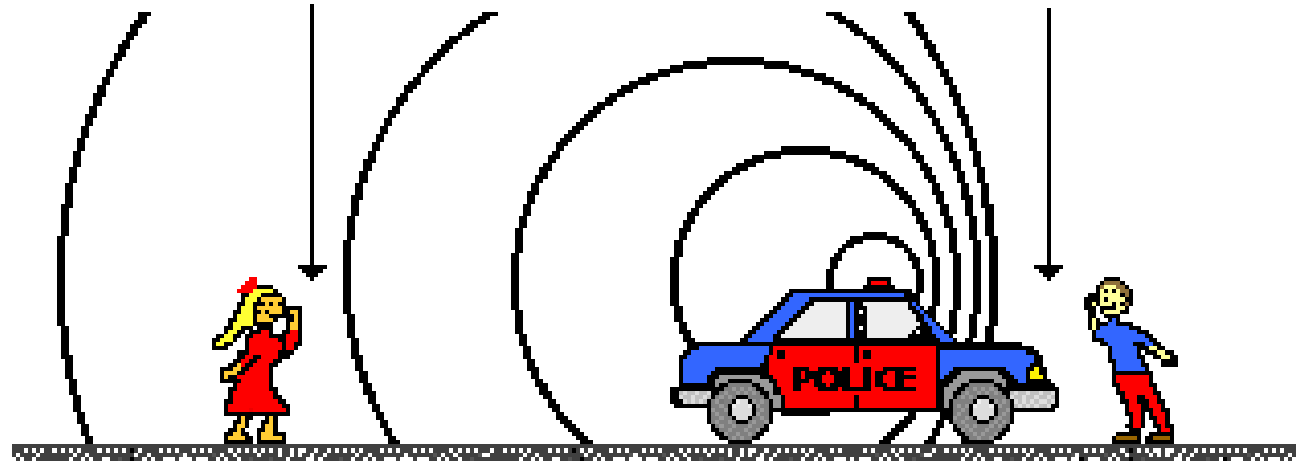


Doppler 효과의 원리

The Doppler Effect for a Moving Sound Source

Long Wavelength
Low Frequency

Small Wavelength
High Frequency



▶ 역도플러 효과 (Reverse Doppler Effect of Sound)

- ▶ 보통의 Doppler 효과: 앰블런스가 가까이 오면 높은 소리가 들리다가 멀어지면 낮은 음이 들린다 (상식임).
- ▶ 질문: 반대도 가능할까?—소리: 앰블런스가 가까이 오면 낮은 소리가 들리다가 멀어지면 높은 음이 들린다?
- ▶ 답: 메타물질 내에서는 가능함 (김철구, 이삼현 교수 연구팀 세계 최초로 실험 성공, Physics World (2009. 2. 3. headline news로 보도))

<http://physicsworld.com/cws/article/news/37622>

“Doppler effect reversed by metamaterial”

Feb 3, 2009–Physics World



nature.com

newsblog

News brings you breaking news from the world of science

« [‘Human Terrain’ contractor pleads guilty to manslaughter](#) | [Main](#) | [Dark days dog Dow](#) »

Naw-nee, Naw-nee: reverse Doppler alert - February 04, 2009 [Bookmark in Connotea](#)

Physicists report [[ArXiv](#)] they've made a metamaterial that reverses the [Doppler effect](#) for sound - so that you'd hear sirens rising in pitch as they race away from you.

Metamaterials are structures whose unusual properties - such as controlling light or sound waves - depend on how their parts are arranged, rather than on the atoms they are made of. So-called '[invisibility cloaks](#)' which hide objects from light by bending electromagnetic waves are the most famous examples. Chul Koo Kim, of Yonsei University, Korea, and colleagues have now created a practical acoustic metamaterial, a thin tube which manipulates sound. So far, though, it affects only sound waves traveling in effectively one dimension - that is, inside the tube.



The tube is segmented by tensioned elastic membranes, and punctured with side holes. The researchers placed a sound detector inside this tube and linked it to a loudspeaker. When they moved a sound source along the outside of the tube - approaching, passing, and receding from the detector - the acoustic vibrations set up inside the tube propagate with negative [phase velocity](#), creating a tone-shift from low to high pitch.

[Kim tells Physics World](#) that the invention is a stepping stone to an acoustic cloak which could hide objects from sound waves. Acoustic superlenses - which could achieve subwavelength resolution in ultrasonic imaging - are also an option.

Physicists have [generated an inverse Doppler sound effect before](#), but by using a nifty electronic setup combining electromagnetic pulses and radiofrequency shock waves.

The key to this more practical acoustic magic flute was making an air column which displays both negative modulus (elasticity) and negative density as sound waves propagate through it. (This is the equivalent, in acoustic terms, of the negative refractive index required for a material to bend back electromagnetic waves).

Each concept has been demonstrated separately before but Kim's team put them together: air moving in and out through the side holes affects the density of the tube's air column, while the tension of the internal membranes affects its elasticity.

The researchers have still to move into 2D and 3D, and their current device relies heavily on absorbers at each end of the tube to prevent soundwave reflections, Kim told *Physics World*. Which means we'll be waiting for the naw-nee siren for a while yet.

Image: The acoustic metamaterial from Chul Koo Kim/Physics World



동아일보 2009-02-20

'음향 투명망토' 씌우면 ... "잠수함이 사라진다!"



▶ 레고 블록을 조립하듯 음향 메타물질을 결합해 2차원으로 만들어 잠수함에 덮어 씌우면 음파를 봐도 그대로 통과하는 '투명 잠수함'을 만들 수 있다.
사진 제공 연세대 김철구 교수



'음향 투명망토'를 만들 수 있는 메타물질을 세계 최초로 개발한 연세대 물리학과 김철구 교수(오른쪽에서 두 번째)와 연구팀, 사진 제공 연세대 김철구 교수





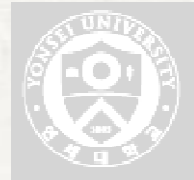
"투명잠수함 개발 가능하다"

(부산=연합뉴스) 조정호 기자 = 연세대 물리학과 이삼현 교수가 23일 부산 벡스코에서 열린 제5회 부산국제조선해양대제전 무기체계 세미나에서 '메타물질 개발현황'에 관한 연구논문에 대해 설명하고 있다. 이 교수는 이날 세미나에서 수중음파탐지기에 잡히지 않는 '투명 잠수함' 개발의 가능성에 대해 설명했다.



어떤 물질에서 그런 효과들이 나타나는가? 인공물질 - 메타물질 (metamaterial)

- 자연계에 존재하는 물질이 아닌 인공물질-메타물질 (metamaterial)에서 나타난다.
- 메타물질이란? - 새로운 물리적 성질을 갖는 인공적 물질
- *Metamaterial*: *Artificial* material with effective *physical* properties not found in constituent materials and not readily observed in nature.



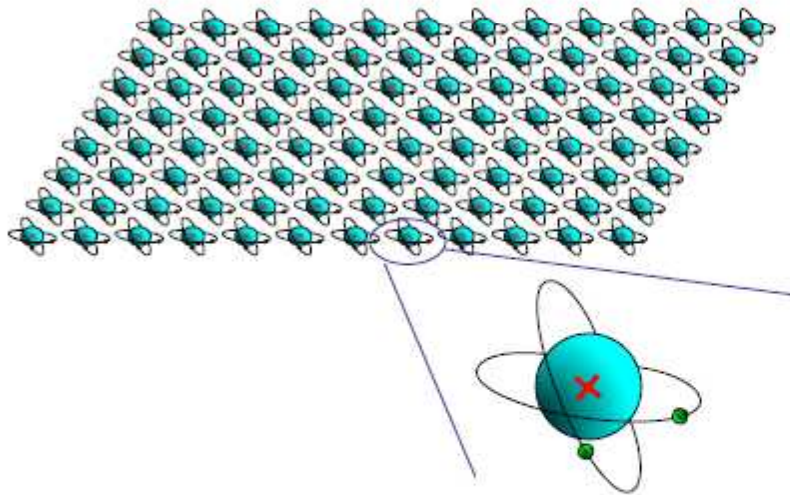
Definition (Shalaev, 2007):

What is a metamaterial?

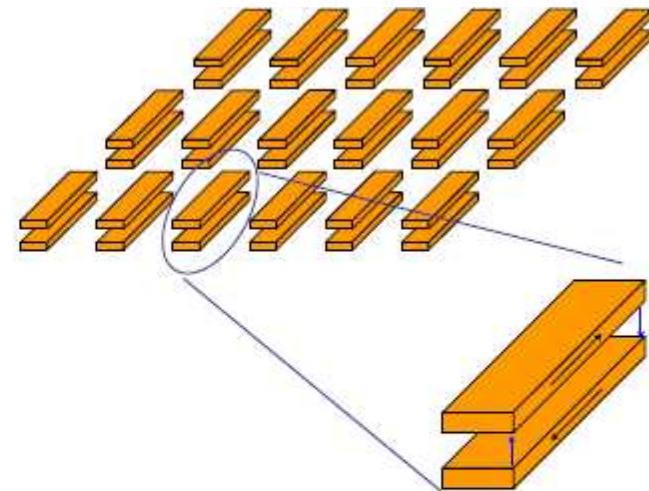
Shalaev, Oct. 22, 2007

Metamaterial is an arrangement of artificial structural elements, designed to achieve advantageous and unusual electromagnetic properties. ---Metamorphose

$\mu\epsilon\tau\alpha$ = **meta** = **beyond (Greek)**

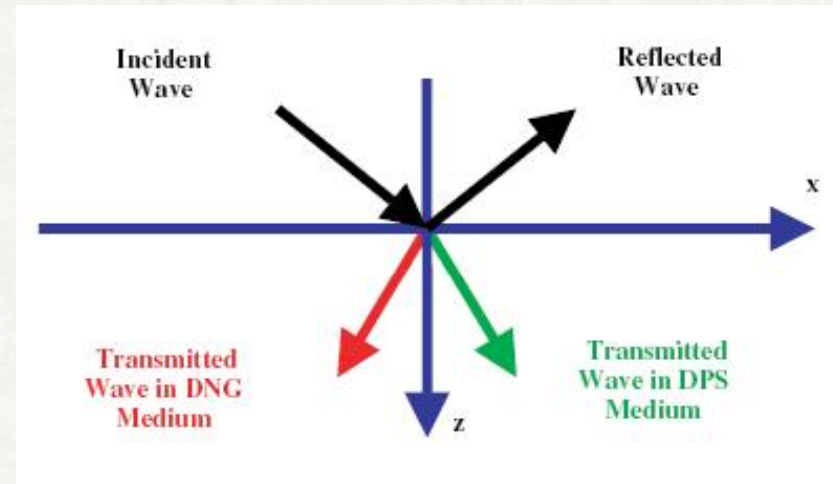
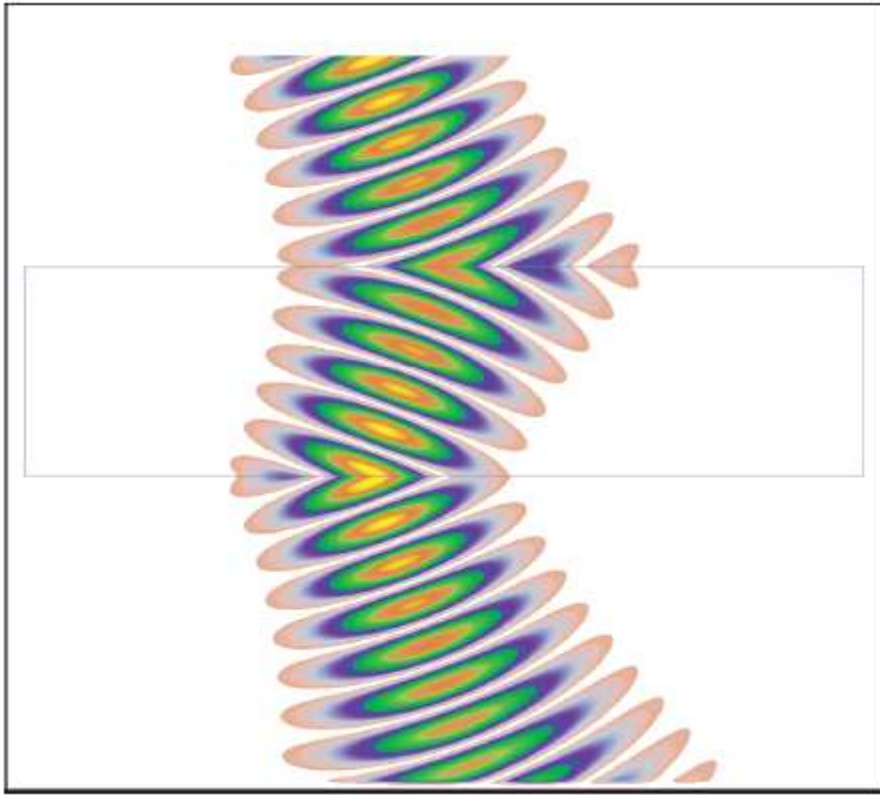


A natural material with its atoms

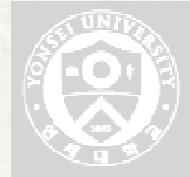


A metamaterial with artificially structured "atoms"

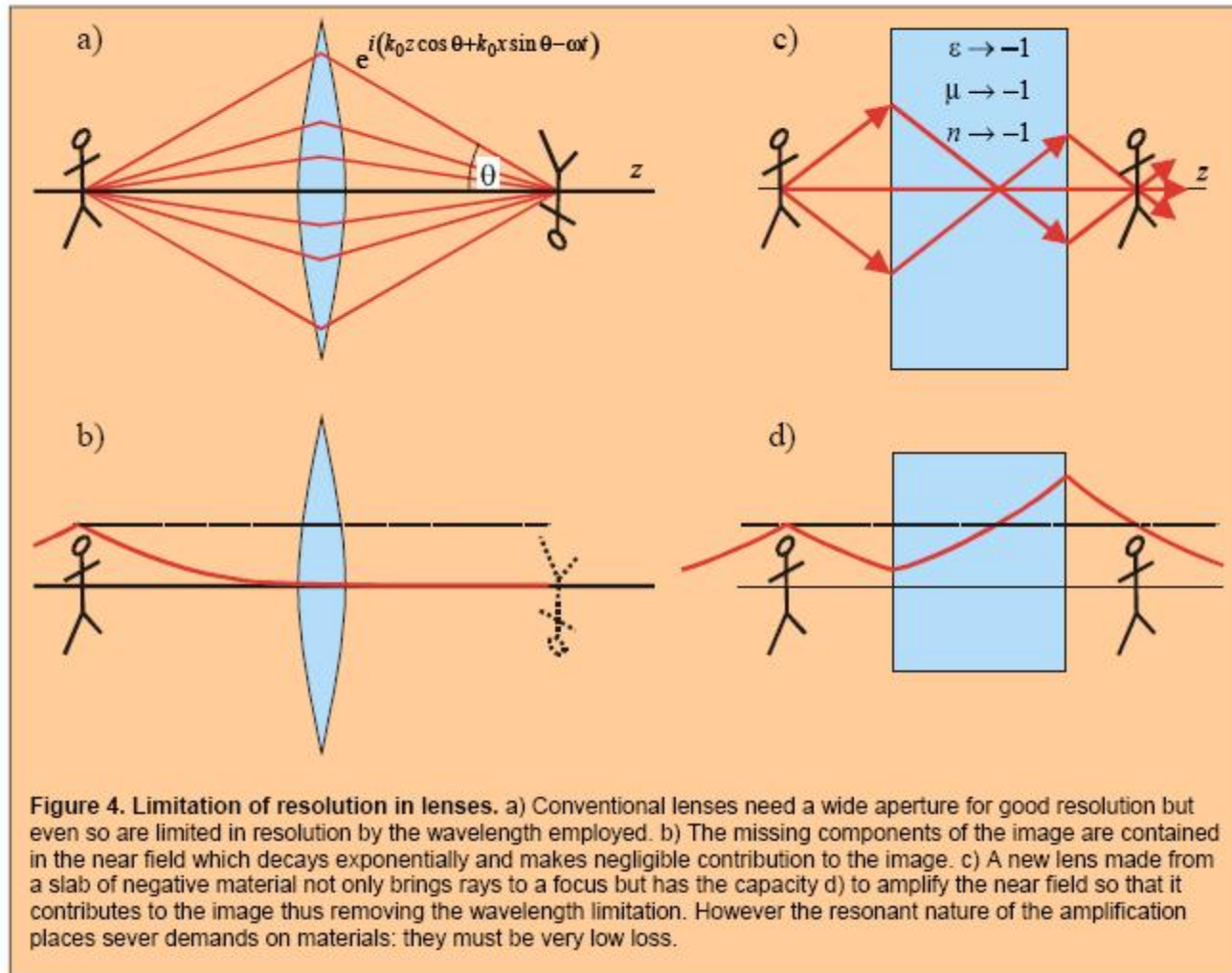
메타물질의 이상한 성질들(1)



음의 굴절율(빛이 반대로 한다)



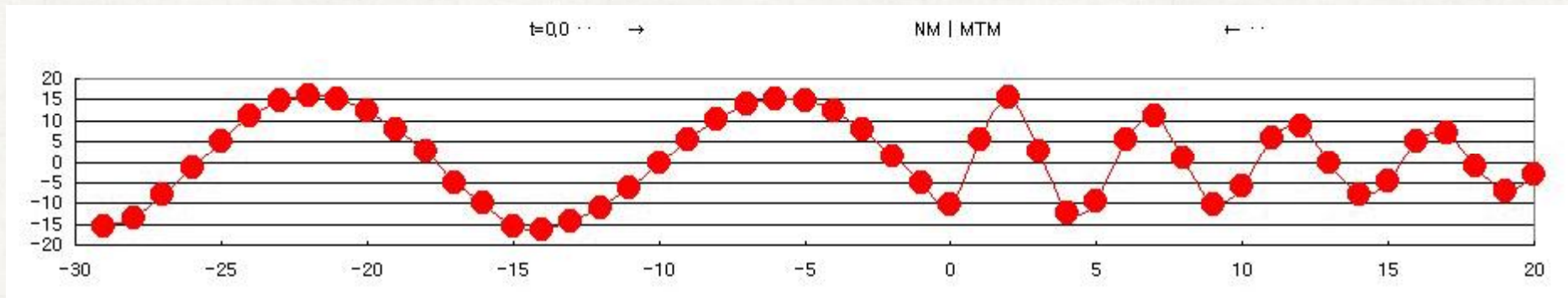
메타물질의 이상한 성질들(2)



파장보다 작은 물체 보기(superlensing)

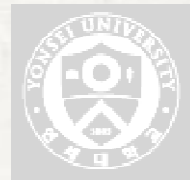


메타물질의 이상한 성질들(3)

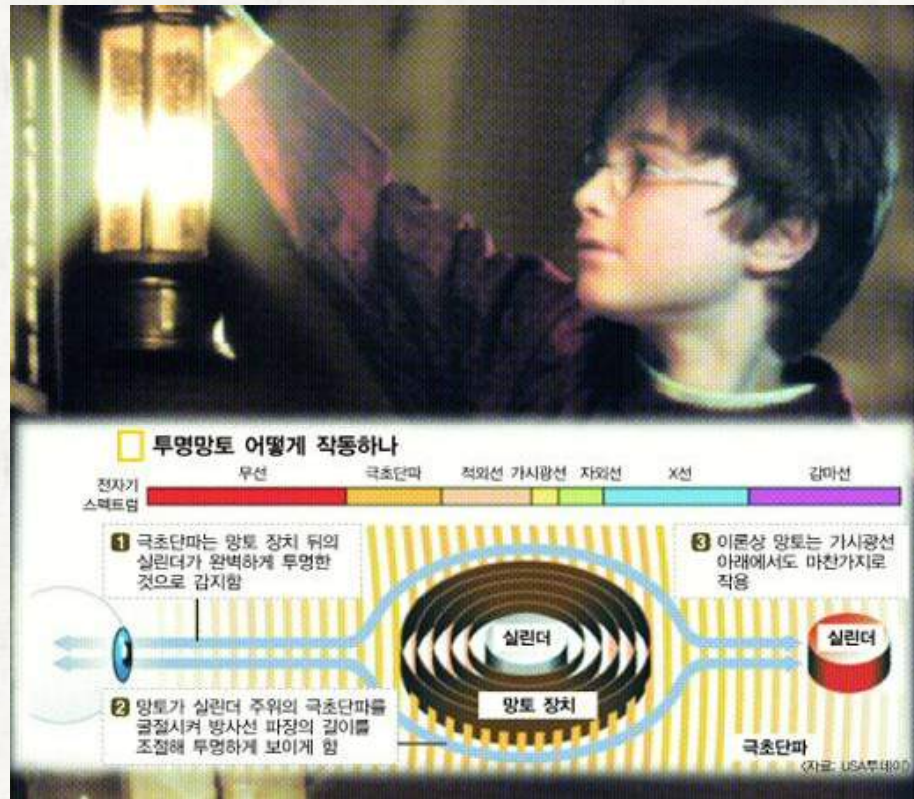


에너지 전파 방향과 파동의 전파 방향이 반대이다.

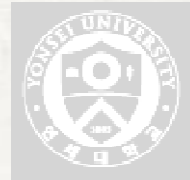
이 성질 때문에 역도플러 효과가 나타난다.



메타물질의 이상한 성질들(4)

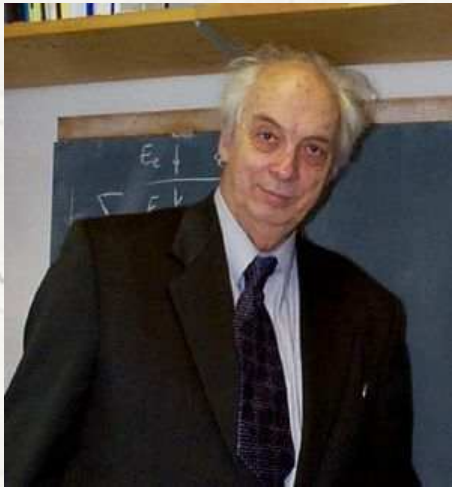


투명망토를 만들 수 있다.



메타물질의 역사

- 전자파 메타물질



- **Theory:** - V. G. Veselago *Soviet Physics Uspekhi* 10 (4), 509-514 (1968)

- J. B. Pendry et al. *Phys. Rev. Lett.* 76, 4773 (1996)

- J. B. Pendry et al. *IEEE Trans. Micr. Theort Tech.* 47, 2075 (1999)



- **Superlensing:** - J. B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966 (2000)



메타물질의 역사

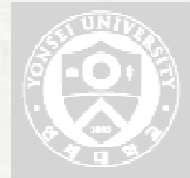
- 음향 메타물질



S. H. Lee et al, *Phys. Lett. A*, 37, 4464 (2009).

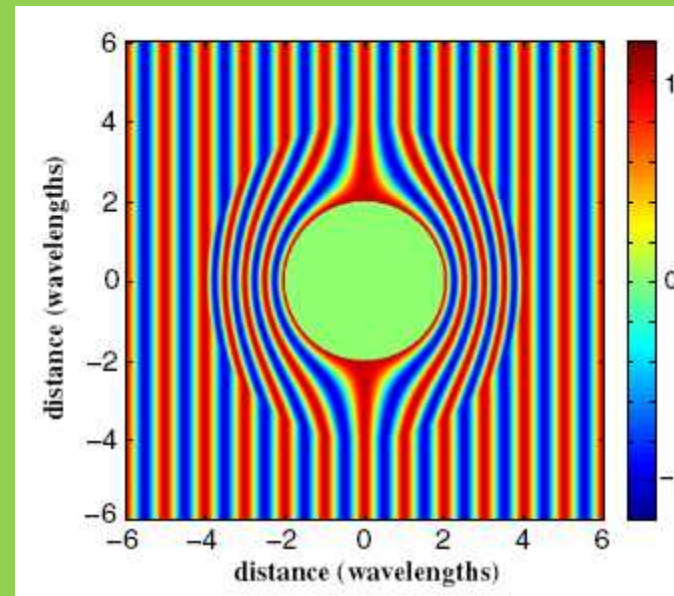
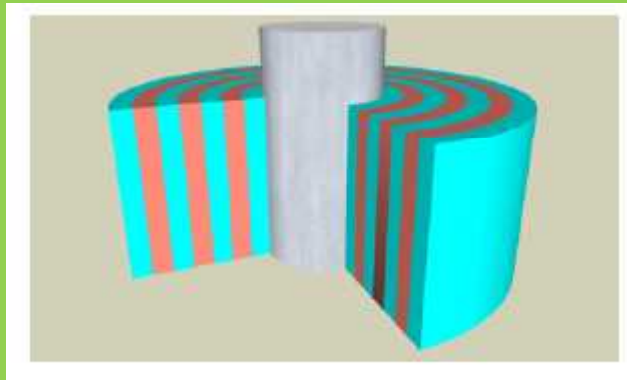
S. H. Lee et al, *J. Physics: Condens. Matter*, 21, 175704 (2009).

S. H. Lee et al, *Phys. Rev. Lett.* 104, 054301 (2010).



음향 메타물질로 무엇을 할 수 있나?(1)

- 음향 투명 물질을 만들 수 있다.



음향 메타물질로 무엇을 할 수 있나?(2)

- 선명한 초음파 영상을 만들 수 있다?
 - 현재는 파장보다 작은 영상은 볼 수 없다(상이 희미한 이유는 파장보다 작은 것은 볼 수 없기 때문).
 - 음향 메타 물질을 렌즈로 사용하면 파장보다 작은 물체를 볼 수 있다.
- 벽을 투과해서 소리를 들을 수 있다.
- Acoustic Fiber를 발전시킬 수 있다.
- 상상하기도 어려운 새로운 물질과 현상을 만들 수 있다.





여운 / 박목월

산은 산이냥 의연하고
 강은 흘러 끝이 없다
 대밭에 별빛 초가삼간
 이슬 젖은 돌다리 목과수 그늘
 하늘 밖 달빛에 바람은 자고
 대밭에 그윽한 바람 소리

