

- 자연 현상을 통한 진동의 이해 -
- Understanding of Vibration through Natural Phenomena -

진동이란 무엇인가? What is the Vibration?

양보석 교수

부경대학교 기계공학부
지능역학연구실



진동의 정의(Definition)

- 움직일 진(振) 움직일 동(動) : 흔들리어 움직임, 떨림
- 광의적 해석 (물리학적 해석)
 - 물체의 반복적인 운동
예) 단진자 운동, 전자(electron)의 운동, 천체의 운동, 배의 rolling, 파동(wave motion) 등
 - Oscillation
- 협의적 해석 (기계공학적 해석)
 - 기계 구조물의 반복적인 운동
 - 태엽 시계, 판의 떨림, 기계 구조물 진동
 - Vibration



괘중시계의 단진자 운동



선박 운동



파동



물방울의 진동



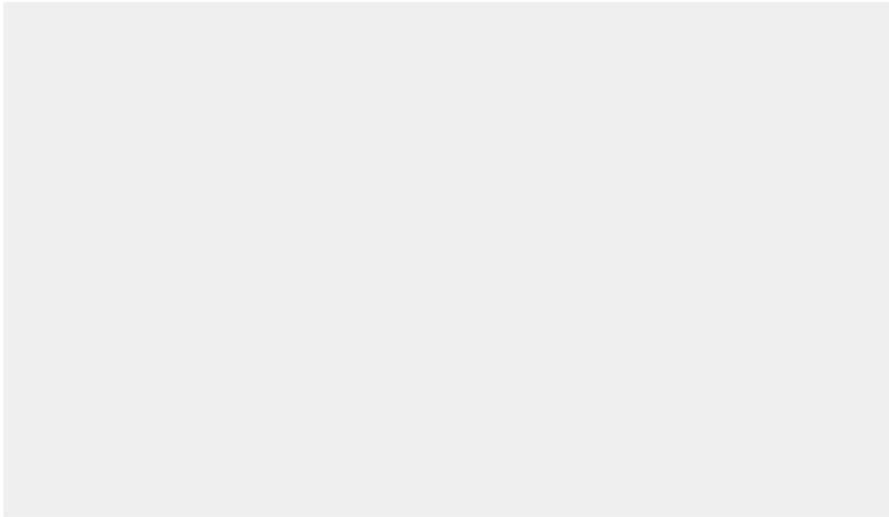
파도(해파)

우리 주변의 변화, 변동하는 현상

- 눈에 보이는 운동 : **그네, 벽시계 추와 같이 흔들림**
- 만져보지 않으면 움직임을 알 수 없는 운동 : **미세 운동**
- 고속으로 운동하고 있는 물체가 마치 정지한 듯이 보이는 운동 : **영화 필름 (16 프레임/초)**



영사기



야구장의 파도타기 용원



프라고나르의 「그네」 (The Swing, 1766)

지구상의 에너지 분포와 이동 : 기상 변화(Weather Change)

- **삼한사온(三寒四溫)**: 대기의 대순환에 의해 지구가 열적 평형을 이루며, 극동풍과 편서풍이 서로 세력이 강해졌다 약해졌다 하는 변화
- **준하주동의 4계절의 변화**
- **몬순(monsoon)**과 같은 해양풍과 대륙풍의 큰 **계절풍의 변화** :
몬순이란 대륙과 바다의 온도 차에 의해 계절에 따라서 부는 바람
- 하루 중에도 낮에는 **해풍**, 밤에는 **육풍**이 반복
- **제트 기류(jet air flow)** : 12 km 상공에서 약 100m/s의 큰 바람의 흐름으로, 지구 회전에 의해 발생. 뱀이 움직이는 것과 같이 꾸불꾸불 꾸부러져 이동하면서 적도 축에서 주어진 열을 극지방으로 운반하는 수평 대류(水平 對流)의 운동



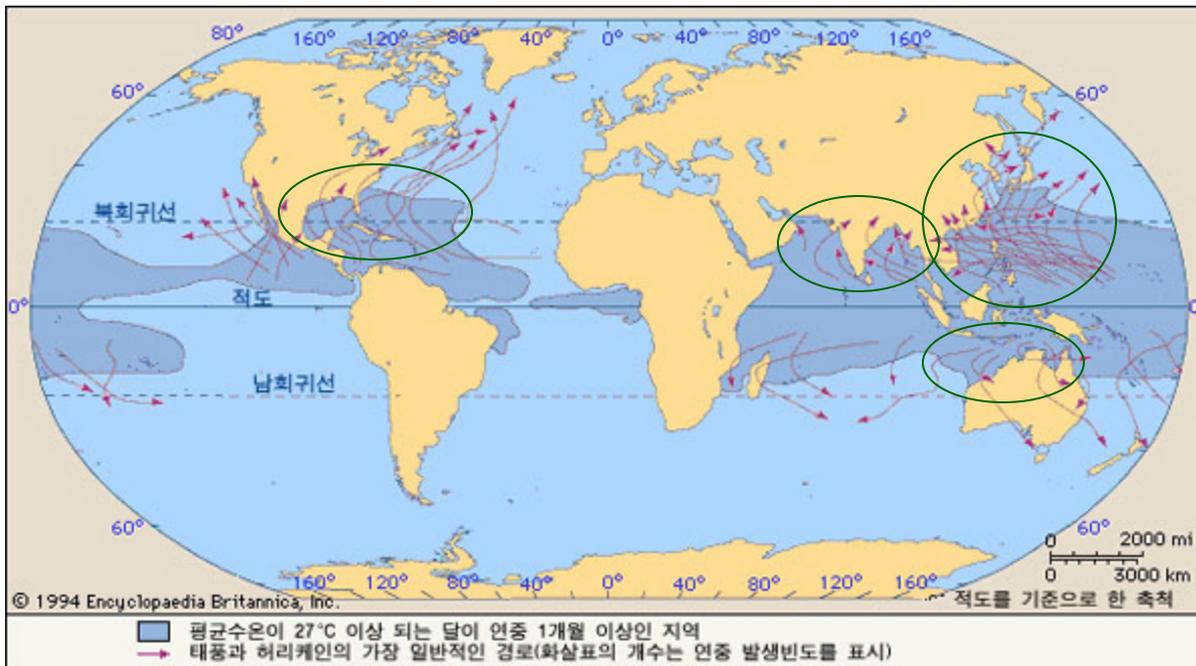
지구상의 에너지 분포와 이동 : 몬순(Monsoon)

❖ 몬순 : 계절풍(periodic wind)

- 겨울에는 대륙에서 대양(大洋)을 향해 불고, 여름에는 대양에서 대륙을 향해 불어, 약 **반년 주기**로 풍향이 바뀌는 바람
- 아랍어의 **계절**을 뜻하는 **마우심(mausim)**에서 유래, 중세기에 인도양의 계절풍을 향해에 이용한 아라비아인에 의해서 유럽에 전달
- 계절풍이 현저한 지역은 **극동 지역, 동남아시아, 인도**
- 계절풍은 **겨울과 여름의 대륙과 해양의 온도차**로 인해서 발생. 즉, 겨울에는 대륙과 대양이 다같이 냉각되나, 비열(比熱)이 작은 대륙의 냉각이 더 커서, 이로 인해 대륙 위의 공기가 극도로 냉각되므로 밀도가 높아지고, 이것이 퇴적하여 큰 고기압이 발생
- 최근 서남아시아에 내린 집중 호우로 인한 홍수와 산사태로 사망한 사망자수가 240여명에 달하며, 인도와 방글라데시, 네팔에서는 수백만명의 이재민이 발생
3주 이상 쏟아진 몬순 호우로 인해 매년 서남아시아 전 지역이 큰 피해 발생
- 5월과 6월 사이에 찾아오는 남서풍의 열대 몬순기후는 **우기(rainy season)**가 시작
11월과 12월은 보통 **건기(dry season)**

지구상의 에너지 분포와 이동 : 열대 저기압(Tropical Cyclone)

- 북반구와 남반구의 위도 약 5 ~ 30°의 열대 해양에서 나타나는 심한 대기 교란(Disturbance)
- 열대 저기압은 지름이 80~800km인 저기압성 회오리. 중심 부근의 바람은 해수면 근처에서 중심을 향해 약간 안쪽으로 불어 들어오는 거의 원형의 소용돌이를 형성
- 지구자전 효과로 인해 소용돌이는 남반구는 시계방향, 북반구에는 반시계방향으로 회전
- 태평양 서부: 태풍(Typhoon), 오스트레일리아 서부: 윌리 윌리(Willy Willy)
- 카리브 해와 대서양 서쪽 지역 : 허리케인(Hurricane), 인도양 : 사이클론(Cyclone)



허리케인(카트리나, 2005)

계절 변화 : 춘하추동(Four Season)

- 지구는 자전하는 지축이 **23.5도** 공전 면에 대해 기울어진 채로 **약 365.25일에 한번씩** 태양의 둘레를 **공전**(公轉)하여 다시 되돌아 오
- 이로 인해 **봄, 여름, 가을, 겨울**의 **사계**(四季)가 생기고, 만물이 변화와 성장 및 순환 과정을 겪게 됨
- 여름에는 북반구에 해가 비치는 시간이 길어지고, 겨울에는 짧아 짐
- 북위 **23.5도 이상의 북쪽** : 여름에 해가 지지 않는 **백야**(white night)라는 현상이 발생
겨울에는 반대로 하루 종일 해가 뜨지 않음(**black day**)
남위 48도 이하의 남쪽 : 겨울(동지 전후)에 백야 발생



봄



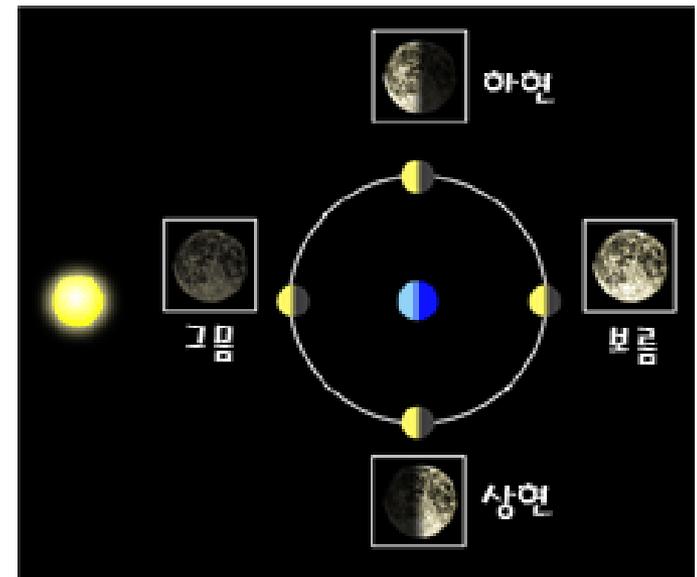
가을



겨울

달의 변화 : 밀물과 썰물(Tide)

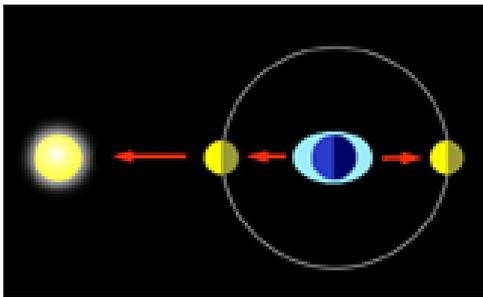
- 달은 지구를 중심으로 하여 약 29.53일에 한번씩 기울었다가(삭망), 찼다가(보름)를 되풀이하며, 이로 인해 바닷물의 밀물과 썰물이 생기며, 바다 생물의 성장과 생활에 많은 영향을 미침
- 달은 상현달, 보름달(망), 하현달, 그믐달(삭) 순으로 그 모습이 변하며, 이러한 위상 변화의 주기, 즉 1삭망월은 29일 12시간 44분
- 상현달과 하현달은 태양, 지구, 달이 직각을 이룰 때 보이는데, 상현달은 해지고 난 후, 하현달은 해 뜨기 전에 각각 남쪽 하늘에서 볼 수 있음
- 보름달은 태양, 지구, 달의 순서대로, 그믐달은 태양, 달, 지구 순으로 늘어설 때 볼 수 있음
- 만일 지구의 공전 궤도면과 달의 공전 궤도면이 일치한다면, 매달 보름에는 월식을, 그믐에는 일식을 볼 수 있을 것임
- 그러나 두 궤도면이 약 5도 정도 기울어져 있기 때문에, 두 궤도가 교차하는 보름과 그믐에만 이러한 현상을 볼 수 있음



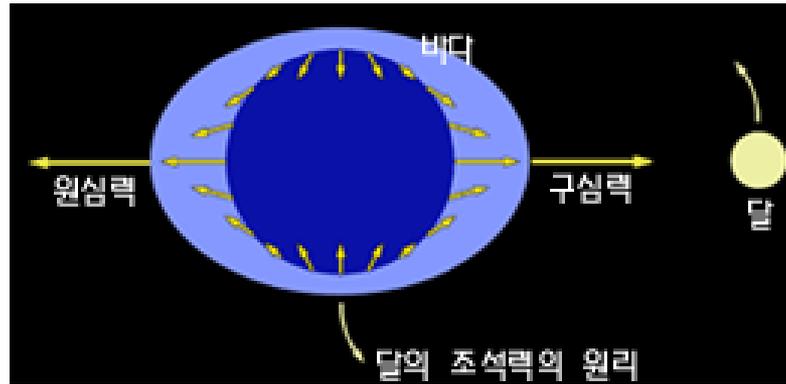
달의 위상 변화

달이 미치는 만유인력 : 조석력(Tide Force)

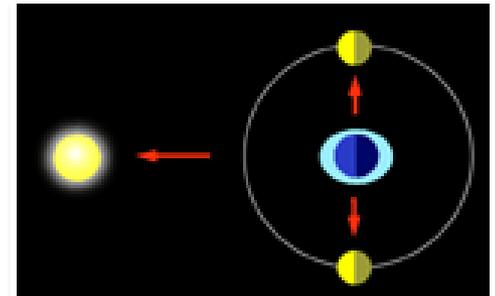
- **조석 현상** : 바닷가에서 바닷물 높이가 하루에 2회 수 m 높아졌다 낮아졌다 하는 현상
- **힘의 근원**은 달이 지구에 미치는 **인력**
- **태양**의 인력 역시 조석 현상에 영향을 비치지만, 달에 비해 매우 먼 거리에 위치하고 있기 때문에 그 힘은 상대적으로 작음 (**인력은 두 물체 사이 거리의 제곱에 반비례**)
- 조석 현상으로 인한 **해저 면과 해수의 마찰**은 **지구 자전의 에너지를 감소**시킴
- 따라서 **하루의 길이**는 현재 **100년에 약 0.002초의 비율로 증가**, 과거의 지구 자전속도는 현재보다 빨라서, 약 1억 년 전의 1년은 400일이었다고 함



사리 : 달과 태양의 조석력이 합쳐져 조수 간만의 차가 큼



조석력의 발생 원리



조금: 달과 태양의 조석력이 서로 상쇄하여 조수 간만차가 적음

지구상의 에너지 분포와 이동 : 공기흐름 변화

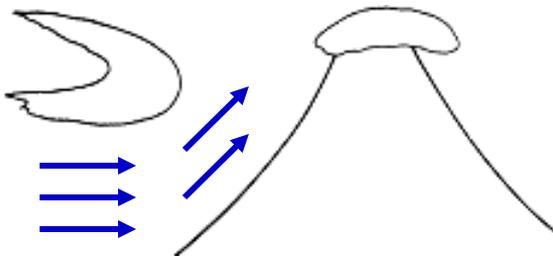
- **삿갓 구름**(bamboo hat cloud)

한라산과 같이 하나의 봉우리를 가진 높은 산에는 상공의 바람이 높은 산에 부딪혀서 상승하고, 습도가 높을 때 구름이 발생

- **곶감 구름**(dried persimmons cloud)

상하 방향으로의 바람의 변동 흐름에 의해 산의 앞뒤에 **곶감 구름**(렌즈 구름의 일종)이 보이거나 산에서 멀리 떨어진 곳에 **렌즈 구름**이 나타남

이들과 같이 바람이 산에 부딪히면 **공기흐름이 흐트러지고**, 상하방향의 움직임에 의해 **압력 변동**이나 공기 중의 **수분 변화**가 발생하여 구름이 발생



곶감 구름

삿갓 구름



환경 진동(Environmental Vibration)

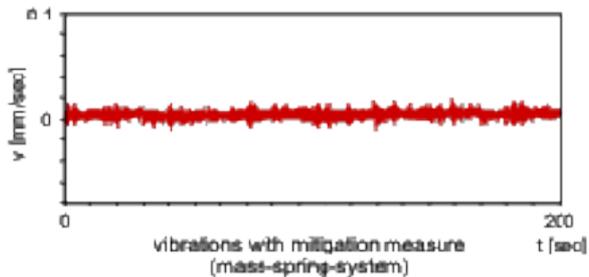
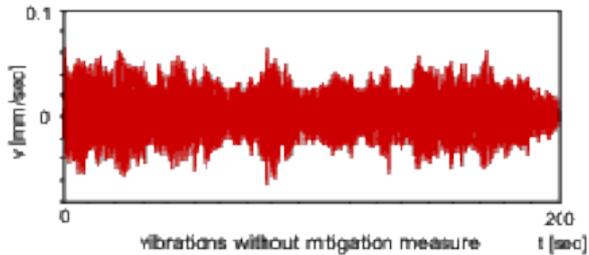
♣ 진동원(sources)

- 지진과 같은 자연적인 원인에 의해 진동 발생(ground-borne vibration)
- 환경에 영향을 미칠 수 있는 인위적인 진동원에 의해 진동 발생

♣ 진동에 의한 피해

- 건물 손상, 사람의 진동 피폭

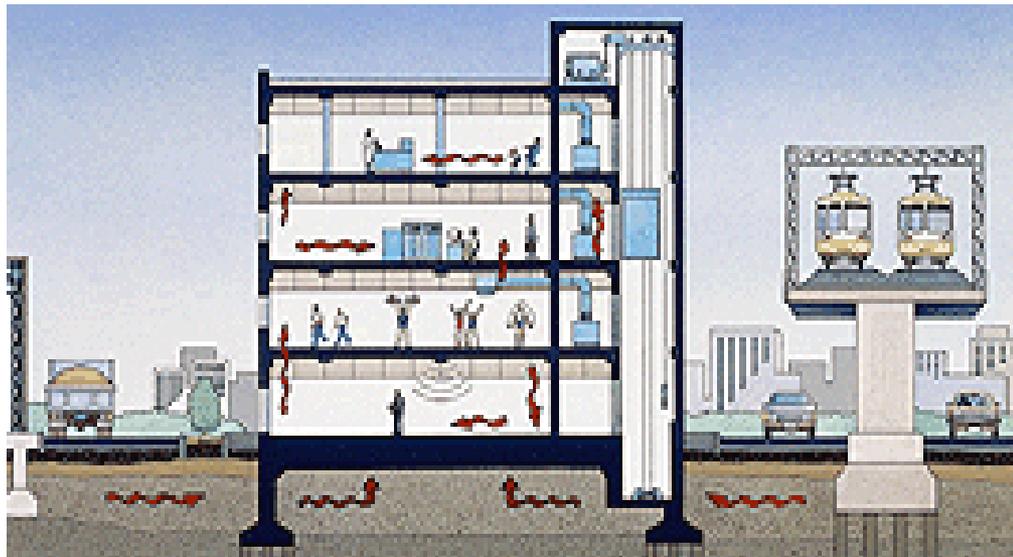
- Piling operations
- Road traffic
- Railways
- Blasting
- Rotating machinery
- Drop forging



Railway Environmental Vibration

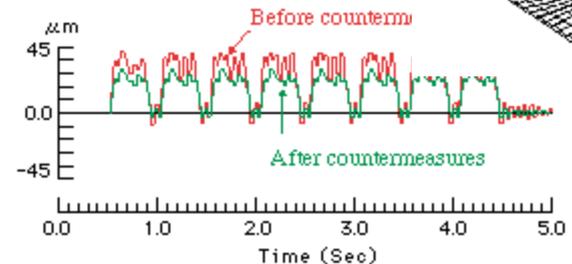
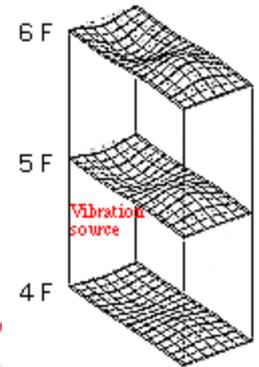
인위적 진동원의 예 (www.acousticassociates.co.uk)

지표면을 따라 전달되는 운동 : 환경 진동

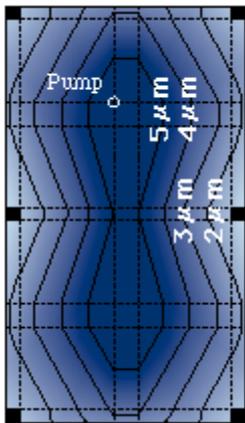


Environmental Vibration의 전달 경로

5층에서 도보에 의한 진동이 상, 하층에 충격을 가하여 진동 발생

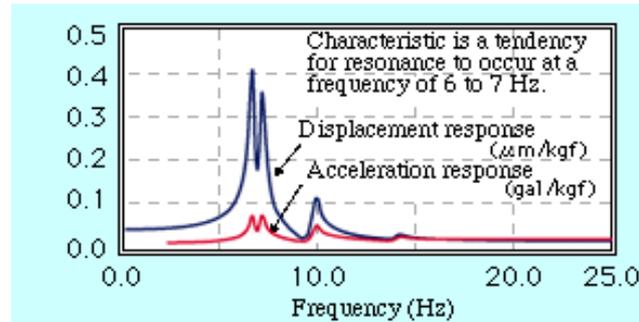


Column

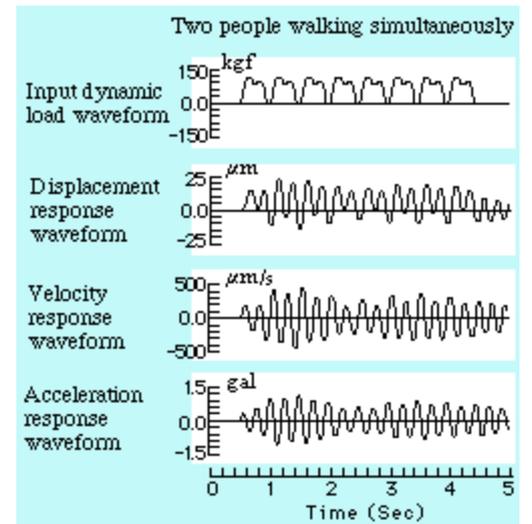


바닥에 설치된 펌프 진동에 의한 진동 변위 등고선

Vibrations are also transmitted to the adjoining slab.

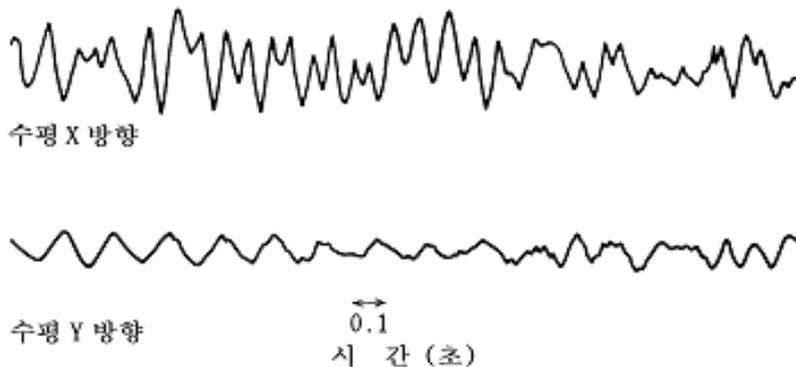


바닥(floor) 진동 특성 예
www.takenaka.co.jp

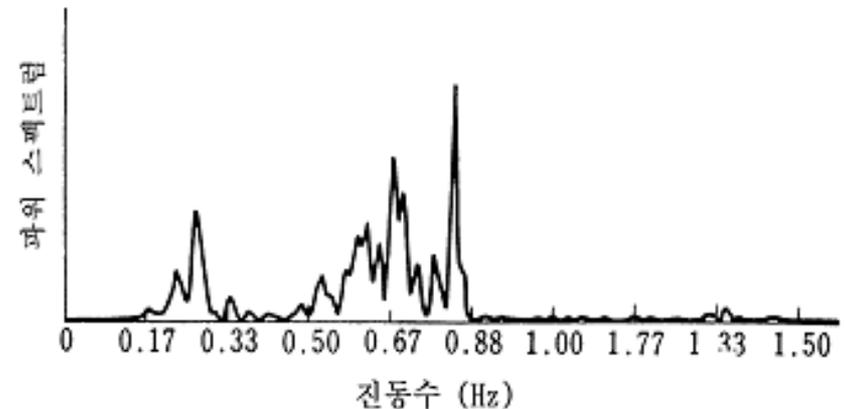


지표면을 따라 전달되는 운동 : 상시 미세 진동

- 우리들은 지구의 지표면에서 생활하고 있고, **지표면에는 항상 작은 진동이 전달**
- 장소에 따라 크기는 다르지만, **0.1 ~ 100 μ m** 정도로 **불규칙한(random) 파형의 진동 발생**
- **진동 주기는 0.05 ~ 2초** 정도로 상시 미세 진동(常時 微細振動)은 **방향에 따라 변화**
특히 수직방향과 수평방향에서는 지면의 특성에 따라 상당히 다른 진동으로 됨
- **발생 원인** : **자연 현상**으로서 바람, 비, 강의 흐름, 화산 활동 등
인공 현상으로서 기계 진동, 자동차, 기차 등의 교통 진동, 건설 공사장의 진동 등
- 상시 미세 진동이 특히 문제되는 경우 : 전자 현미경과 같은 **정밀기계** 및 **반도체 제조장비**
와 같이 초미세 가공을 할 때. 철도 선로에 가까이 있는 건물에 설치된 **전자 현미경**
- 이런 곳에는 미세 진동을 억제, 즉 제진(除振)하기 위해 큰 **방진설비(防振設備)**가 필요



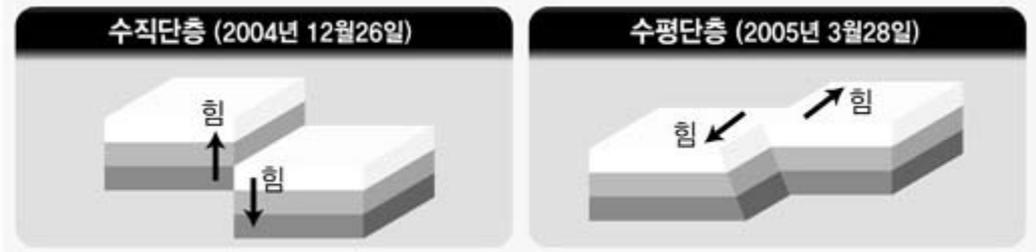
상시 미세 진동(가속도)파형의 예



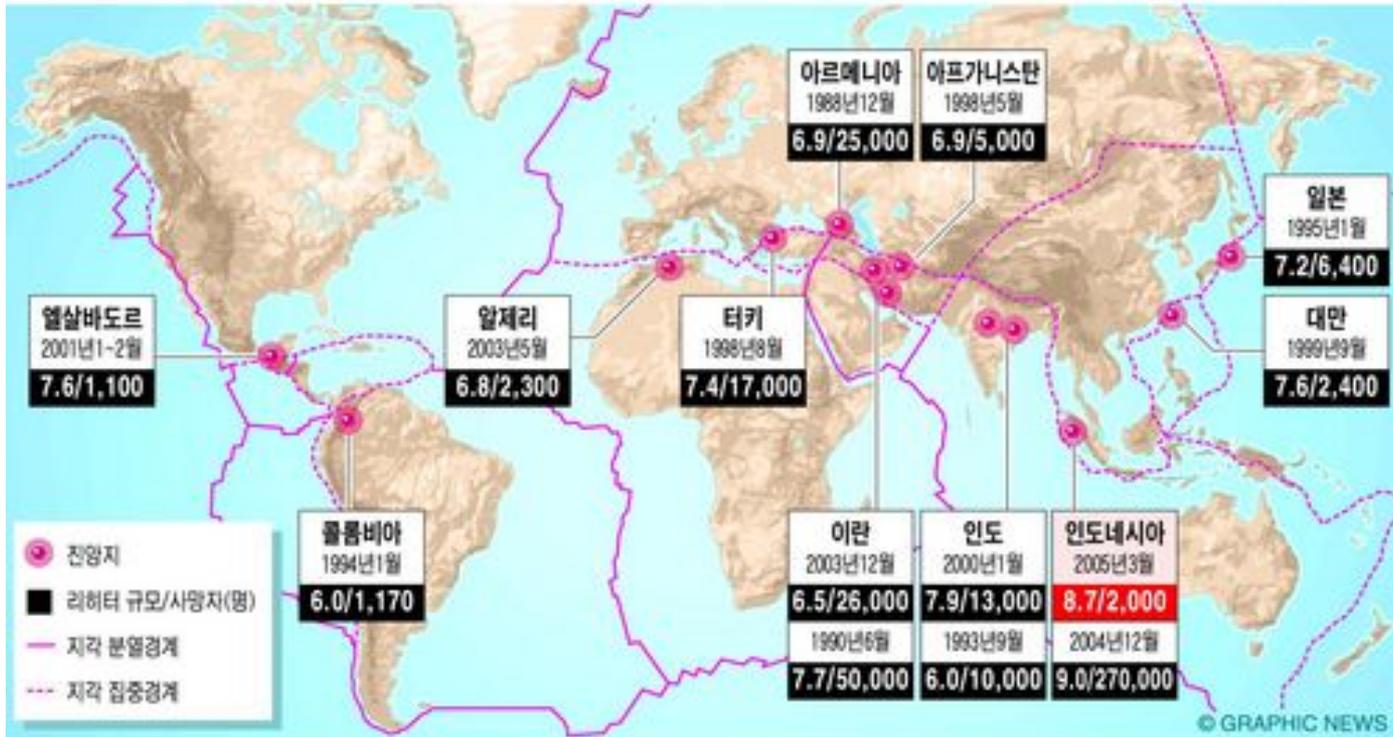
교량의 상시 미세 진동 스펙트럼 예

대지를 전파하는 에너지: 지진(Earthquake)

지각(地殼, plate)의 단층면에서 미끄럼이나 공동(空洞) 부분의 함몰 등에 의해 생기는 충격적인 변화가 파동(wave motion)으로 되어 지각을 전파하여 오는 것



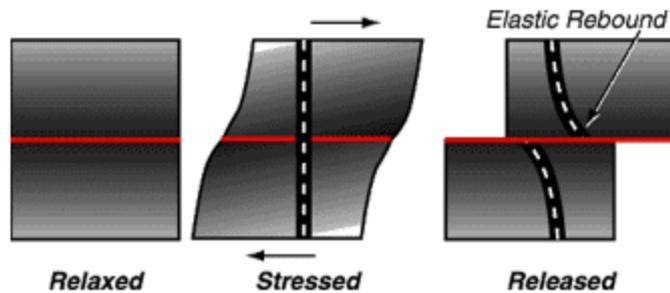
1988년 이후 세계 대형 지진



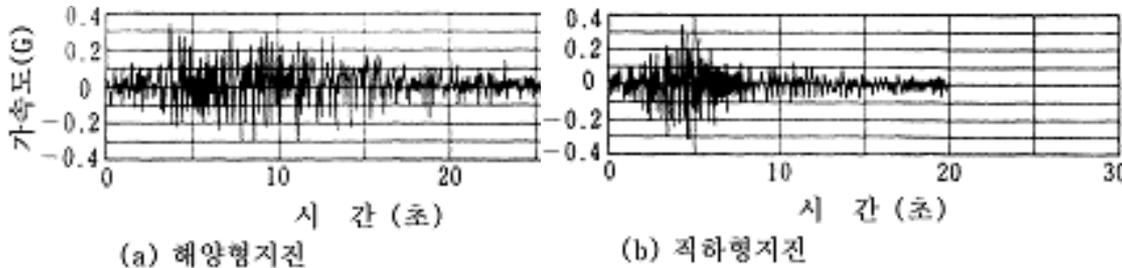
지각의 변화에 의한 대지의 진동 : 지진

❖ 지진의 종류 :

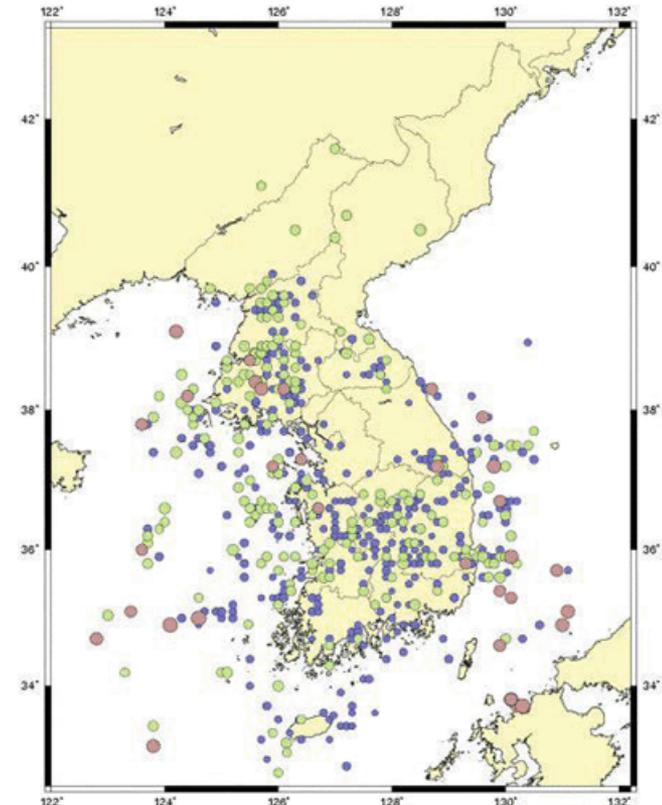
- 지구 상층부의 지각 이동으로 생기는 단층의 미끄럼에 의한 해양형(海洋型) 지진
- 지표면(지반)의 함몰이 원인이 되어 지반 상부 부근에 생기는 직하형(直下型) 지진



지각의 변형 과정



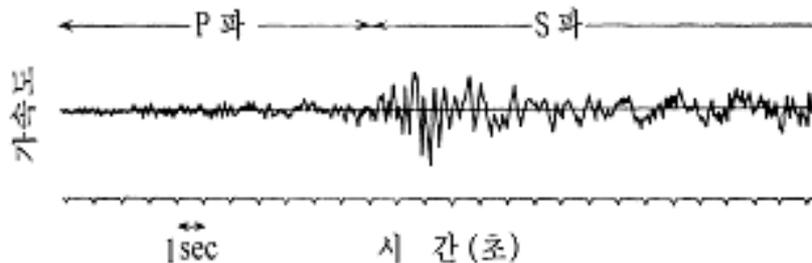
지진의 진동가속도 파형



한반도 최근 지진 기록(1978~)

대지를 전파하는 에너지 : 지진

- 보통 자주 접하는 해양형 지진은 먼저 전파 속도가 빠른 **중파(縱波)**의 밀어 올리는 것과 같은 진동(**P파**)을 느끼고, 다음에 흔들흔들하며 **수평 방향으로 흔들리는 진동 횡파(S파)**를 느끼게 됨
- 지진과 마주쳤을 때의 그 **지역**과 **장소**에 의해 지진파의 특징이 결정됨
- 해안 주위와 같이 **유연한 지반**의 지역인가, **견고한 암반 지역**인가에 의해 흔들림의 주기가 길거나 짧은 지진이 됨. 또한 이 주기의 특징에 의해 인천과 부산 사이의 먼 거리에서도 지진이 잘 전달되거나 하는 경우가 있음
- 지진을 느끼는 사람이 있는 장소가 땅 표면, 고층 빌딩 속등의 감지하는 지점 고층 빌딩에서는 **건물이 유연하기 때문에 느린 지진파의 성분이 강조되고 주기가 짧은 성분은 여과(filtering)되어 버림**



지진의 P파와 S파

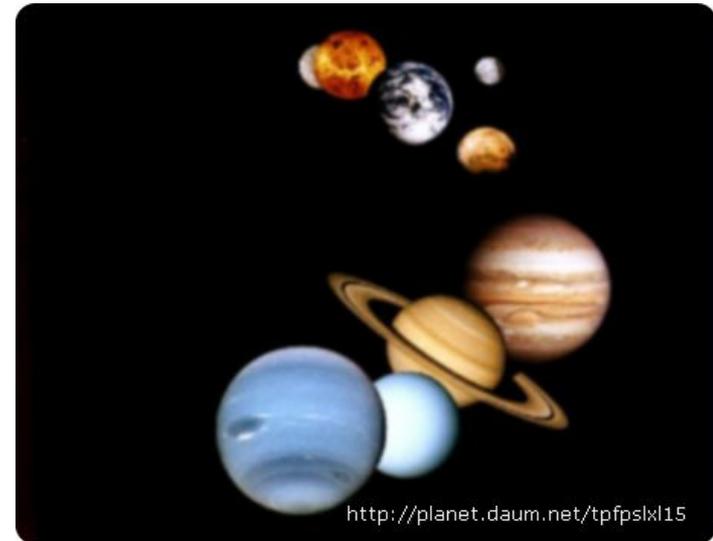


무한 별들의 세계 : 우주(Universe)

- 태양계를 그릴 때 지구를 팔알 정도 크기로 나타내면 목성은 300m 떨어진 곳에, 명왕성과 UB313은 2.4km 떨어진 곳에 깨알만 하게 그려야 함
- 태양은 은하의 중심에서 3만 광년(초속 30만km로 3만 년을 가야 하는 거리) 떨어져 돌고 있는 작은 별일 뿐
- 우리 은하에는 태양과 같은 별이 1000억 ~ 4000억 개, 우주에는 다시 이런 은하가 1400억 개 이상 있다고 함.
- 인간이 겸손할 수 밖에 없는 이유?



은하

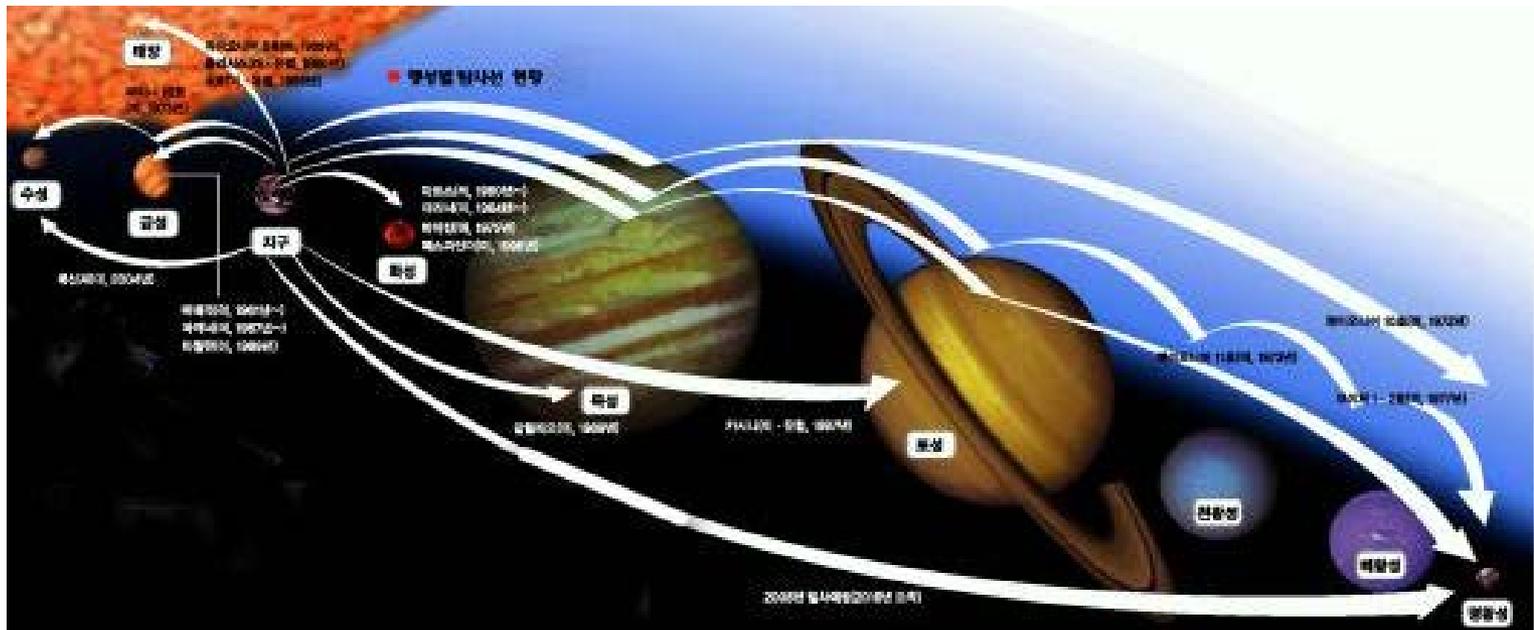


태양계

생물의 리듬과 요동: 신체 리듬(Body Rhythm)

- 지구는 공전과 자전을 하고, 또한 달은 이 지구를 중심으로 하여 약 29.53일에 한번씩 기울었다가(삭망) 찻다가(보름)를 되풀이하는 주기성(週期性)을 지님
- 자연의 일부인 사람도 예외일 수는 없으며, 바이오 리듬(bio-rhythm)이라는 인체의 주기성도 같은 이치와 원리로 이해될 수 있음
- 특히 여성의 생리 주기가 대략 28 ~ 29일이고, 이를 월경(月經)이라 함. 바로 달의 주기 변화와 일치하며, 또한 바이오 리듬 중 감성 리듬(sensitivity rhythm)과 거의 일치하여 사람과 자연 그리고 우주가 같은 원리의 순환 속에 있음

태양계



생물의 리듬과 요동: 생물 시계(生物時計)

- **생물**은 체내에 **생물 시계(biological clock)**가 존재, **때(시간)**를 판단하는 능력 보유
- 오랜 진화 과정에서 지구의 공전과 자전, 달의 공전에 의한 **환경의 변화로부터 생물이 획득한 능력임**
- 특히 식물은 생물 활동을 지배하는 태양 빛이 중요
- 엽록소에 의한 **광합성(光合成) 작용** 등이 매일 이루어지고, 일조 시간의 길이가 **개화(開花)나 결실(結實)의 시기를 결정**
- 미모사나 자귀나무 등 콩과(科)의 식물처럼 **잎사귀를 낮에는 열고, 밤에는 닫는** 것도 있으며, 밤에만 꽃을 피우는 식물도 있음



생물의 리듬과 요동: 생물 시계(Biological Clock)

- 생물의 활동은 하루를 통하여 여러 가지 변동을 나타냄.
동물 : 주행성·야행성의 일주성(日周性), 식물 : 잎의 주야 운동(晝夜運動)
- 이러한 일주성은 주야의 변화가 없는 암실 같은 실험 조건에서도 지속되므로, 그 원인은 생물 자신의 체내에 있다고 생각됨
- 활동에 의한 피로가 휴식으로 이어지고, 휴식에 의한 활력 회복이 다시 활동을 일으킨다고 하는 식의 단순한 논리가 성립되지 않음
쥐의 경우, 전기 쇼크로 10일 정도 꼼짝 못했던 쥐가 활동을 재개할 때는, 그 활동 시각이 전기 쇼크를 가하기 이전의 활동 리듬과의 연장선 상에서 일어남을 실험적으로 확인
- 이러한 사실은 활동·휴식이라는 눈에 보이는 현상의 배후에 때를 새기는 것이 존재하는 것을 나타내고 있으며, 이것을 생물시계라고 함
- 생물 시계는 이것을 가지고 있는 생물이 알맞은 시각에 활동하는 것을 보증하는 외에도 곤충이나 식물이 어느 계절에 휴면하거나 개화하는 이른바 광주반응(光周反應: 광주성) 때의 일장 측정(日長測定)이나 새가 이동할 때의 태양 컴퍼스에도 사용
- 몸 내부의 생물시계는 24시간 주기로 반복되는 리듬을 생물학적인 낮과 밤으로 구분
성인의 평균 수면시간은 7.5 시간이나, 9시간을 자야 하는 사람과 6시간만 자도 되는 사람은 생물 시계의 밤낮 구분이 다르기 때문
(하버드대 의대 브리검 부인병원, 대니얼 애시바흐 박사)

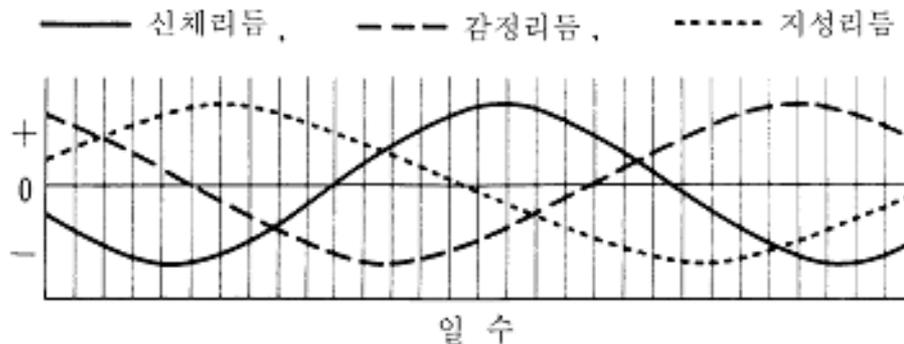


생물의 리듬과 요동: 신체 리듬(Body Rhythm)

- 동물도 밤 혹은 낮에만 활동하는 **신체리듬**을 가지고 있고, 길게는 기온이나 일조시간, 건도와 습도 등의 기후 변화에 반응하여 활발한 운동, 휴면(休眠), 휴지(休止)의 행동 변화가 나타남 (**곰의 동면** 등)
- 환경 변화에 따라, 이들의 행동이나 성장을 변화시키는 것은 **호르몬의 분비**로 신경계의 반응임
- **식물**의 경우, 신경계가 존재하지 않기 때문에, 호르몬의 분비가 성장에 있어서 특징과 억제의 변화를 지배
- **인간**의 경우도 길게는 **1개월에서 1년**, 짧게는 **1일 이하의 주기적인 특징**을 가지는 활동이 있고, 초 단위의 주기를 가진 생명 활동도 이루어짐
- 긴 주기 활동의 가장 대표적인 것은 28일에서 29일로 되풀이되는 **여성의 월경**으로, 달 주기가 영향을 미치고, 월경 시작이 오전 4시에서 6시가 많거나, 출산 시 진통이나 분만이 시작되는 시간도 월경이 생기는 것에 관계가 있는 등 일 주기도 영향을 미침
- 그 외에 **하루 중의 변화**에는 **체온**이나 **혈압 변화**, 이들에 수반되는 **지성, 감정, 식욕, 졸음**의 변화 등이 있음

생물의 리듬과 요동: 신체 리듬

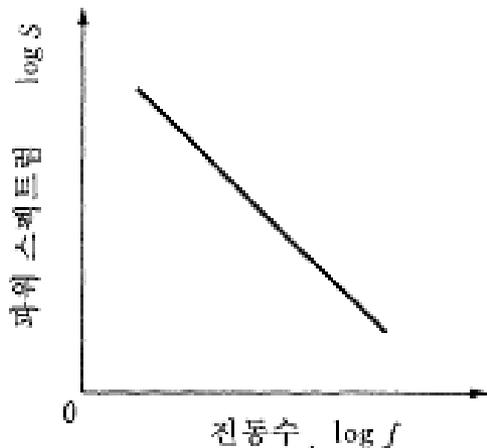
- **바이오리듬(biorhythm)** : 생체가 가지는 주기성을 분석하여 인간에 발생하는 상황을 고려한 것으로, **23일 주기 신체 리듬**, **28일 주기 감성 리듬**, **33일 주기 지성 리듬**이 있음
- **신체 리듬(남성 리듬)** : 육체적인 상태, 즉 일에의 진취, 추진력, 인내력 표시
- **감성 리듬(여성 리듬)** : 감정, 정서, 기분, 감수성, 육감, 상상력, 표현력
- **지성 리듬** : 정신력, 냉철함, 지성, 판단력, 이성, 추리, 분석력
- 이들의 리듬은 **인간이 태어나는 그 순간부터 시작하여 평생 동안 바뀌지 않음**.
그래서 상태가 좋을 때나 정체되어 있는 나쁠 때는 관찮지만, 상태의 변화가 불안정할 때는 주의가 필요하고, 통계적으로도 사고나 실패, 불행한 일이 발생된다고 보고됨.
- 19세기말 빈 대학의 심리학 교수인 **헤르만 스포보다**와 독일 의사 **빌헬름 플리스** 박사에 의해 신체 리듬과 감성 리듬의 존재와 주기가 밝혀짐
- 1920년대에 **알프레트 텔처**에 의해 지성 리듬이 발견



바이오리듬

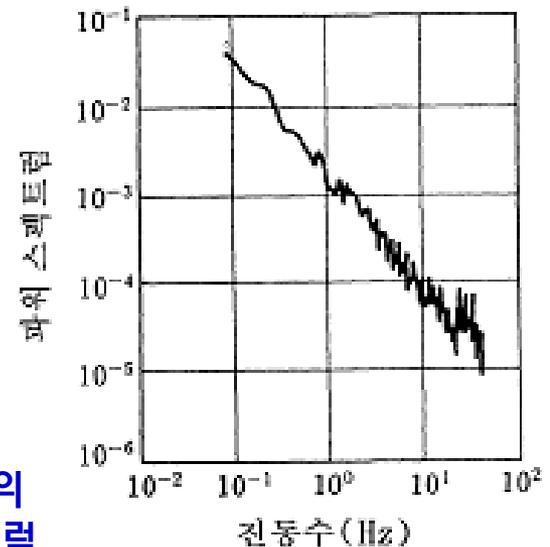
생물의 리듬과 요동: 신체 리듬

- 매우 기분 좋게 느끼는 진동 현상 :
바람에 의한 조용한 움직임, 출렁거리는 파도 소리, 졸졸 흐르는 시냇물 소리
- 이들 진동이나 음의 진동수 성분을 조사해 보면, $1/f$ 의 성분 특성을 가짐
진동수 f 는 1초 동안에 몇 번 반복운동을 하는가를 나타내는 물리적인 양
- 진동수에 따라서 그 성분의 크기, 즉 파워 스펙트럼이 감소하여 $1/f$ 진동이라 부르고,
많은 사람이 좋아하는 음악의 음향 파워의 진동수 성분도 $1/f$ 진동을 하고 있음
- 생활의 쾌적한 성능을 추구하는 가전 제품에서는 $1/f$ 진동의 물리적인 특성을 가지도록
선풍기의 회전수를 제어하거나 마사지 기구의 구동을 제어하고 거품 욕조나 에어컨,
석유 환 히터 등의 조작이나 동적 거동을 제어



$1/f$ 의 성분 분포 특성

드보르작 신세계의
파워 스펙트럼



생물의 리듬과 요동: 신체 리듬

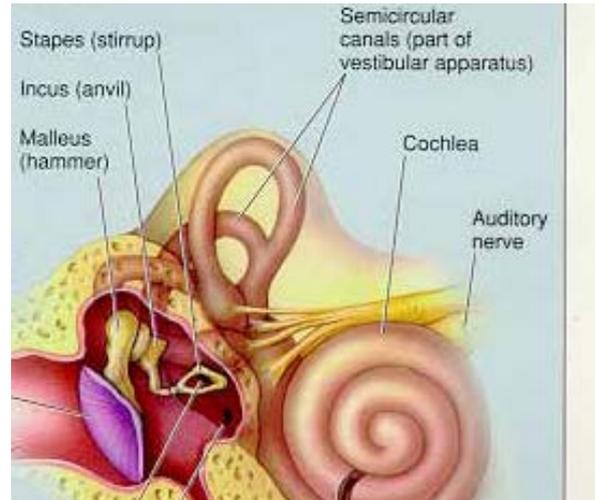
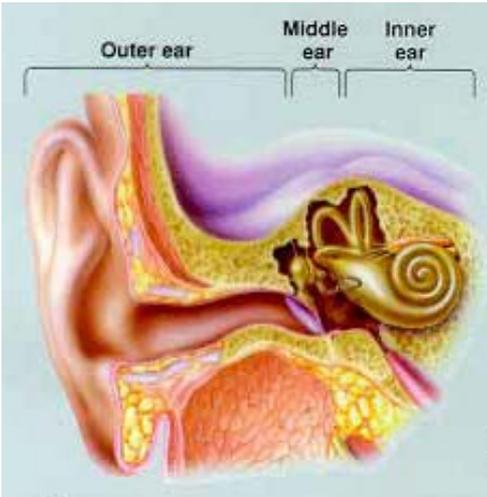
- 왜 $1/f$ 진동의 진동수 성분을 가지면 인간은 **쾌적함**을 느끼는 것일까?
이것은 아직 잘 알려지지 않았지만, 인간은 **기분 좋은 자극을 받으면 $1/f$ 진동 특성의 뇌파(腦波)**, 특히 **α 파가 발생**하거나 **심장 박동 수에 $1/f$ 진동 특성이 나타난다**고 알려짐
- 일반적으로 인간의 감각은 일정한 자극에는 점점 둔감하게 되고, 높은 진동수 성분을 많이 포함하고 급격하게 변화하는 자극에는 대단히 강하게 느끼므로, 인간은 알맞게 변화하는 $1/f$ 의 진동수 성분을 포함하는 자극에 대해 좋게 느껴지는 지도 모름
- 뇌파를 안정시키고 잠재능력을 계발시켜 각종 인지능력을 높여주는 효과
- 뇌파 중 α 파 상태를 유지시켜 **뇌세포간 정보전달을 활발**하게 해 **β 엔돌핀 분비**를 높여줌으로, 특히 수험생들에게 좋다고 알려짐



기억력 향상 알파파 발생기 “브레인컴”

생물의 리듬과 요동: 신체의 진동(Body Vibration)

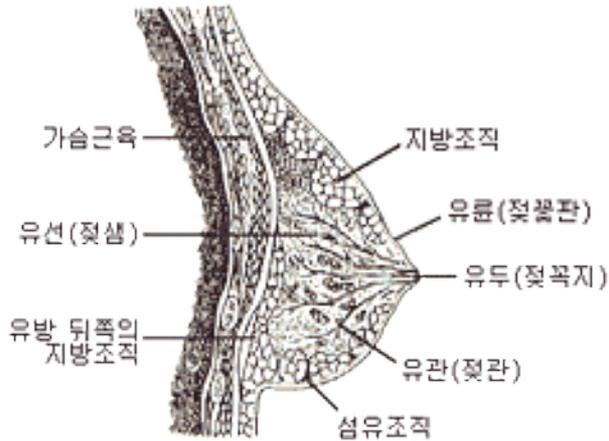
- **멀미** : 신체의 진동으로 교통기관, 즉 버스, 열차, 배, 비행기 등에 의해 발생
- 교통기관에 의한 멀미는 **교통기관의 진동수**와 신체가 가지는 고유의 진동수, 특히 **내장(內臟)이 흔들리는 진동수**가 서로 가까울 때에 내장의 진동이 크게 되고, 이로 인해 신경이 자극되어 기분이 나빠지게 되는 것
- 예를 들면 **위장의 고유진동수**는 대략 **5 ~ 7Hz** 정도이고, 자동차 주행 시 많이 발생하는 **자동차의 진동수**는 **수 Hz ~ 20Hz**의 범위로 비슷할 때 **공진** 발생
- 매우 느리게 이동하는 선박의 진동에 의한 배 멀미는 진동 주기가 **15 ~ 30초** 정도로 길고, 이는 **신체의 평형 감각**과 관계
- 배 멀미는 신체의 평형을 판단하는 귀 안쪽에 있는 **3개의 반규관(semicircular canals)**이 **마비**되어 발생. 차 멀미도 이 현상에 의한 증상이 부가되어 나타남



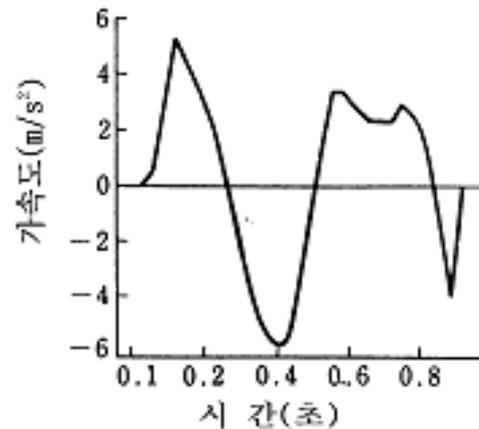
귀와 반규관 구조

생물의 리듬과 요동: 신체의 진동(Body Vibration)

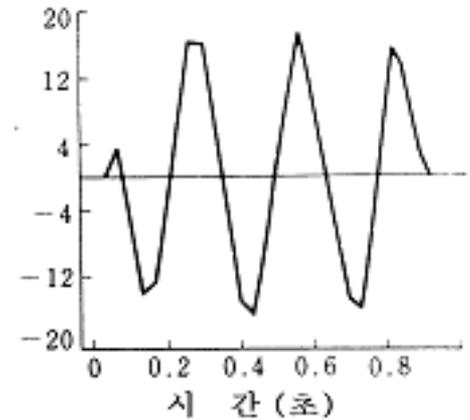
- **여성의 유방**은 신체의 움직임에 따라서 어떻게 진동할까?
- 주행 중에 유방의 진동에 대한 연구에 따르면, 몸의 주행 동작에 따라, **수직방향은 규칙적으로 진동**하지만, **수평방향은 유방 고유의 진동수**가 나타나 복잡한 흔들림 발생
- 이에 대한 검토를 발전시켜 **브래지어의 진동 방지 효과**, 즉 방진(防振) 효과와 유방 자신의 거동에 의해 발생하는 **브래지어의 미끄러짐 현상**이 규명됨



유방의 구조



(a) 수평방향

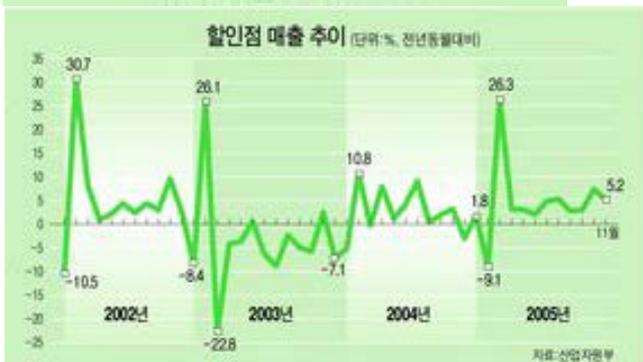
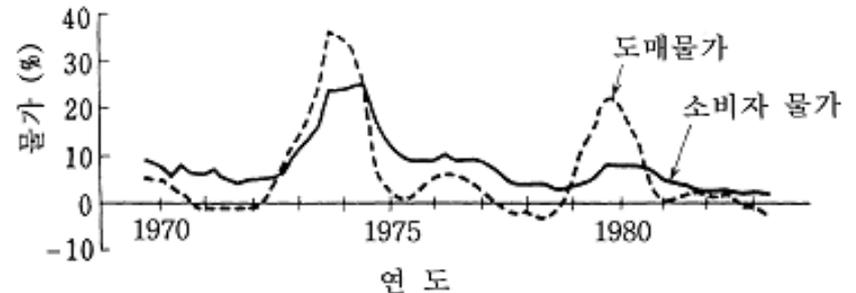


(b) 수직방향

주행 중 유방의 흔들림

인간 활동과 욕망에 의한 진동: 경제 변동(Economic Change)

- **경제 변동**의 예 : 매일 마스크를 통해 알려지는 **주가**(株價)나 **환율**(換率)
- 조금 장기적으로 보면, **임금, 물가, 생산고, 노동력, 각종 투자, 수출입의 국제 수지 및 국민총생산(GNP)** 등이 있고, 이들이 **경제 변동을 나타내는 지표**가 됨
- 경제의 기본으로서 첫 번째로 존재하는 것은 **수요와 공급의 균형**
- **물가**는 하나의 경제지표(그림). 물가는 생계비 그 자체에 크게 영향을 주고, 수요는 경기 동향을 나타내므로, 물가로부터 민감하게 경기 동향을 알 수 있음



몸으로 느끼는 진동 : 노면 진동(Road Surface Vibration)

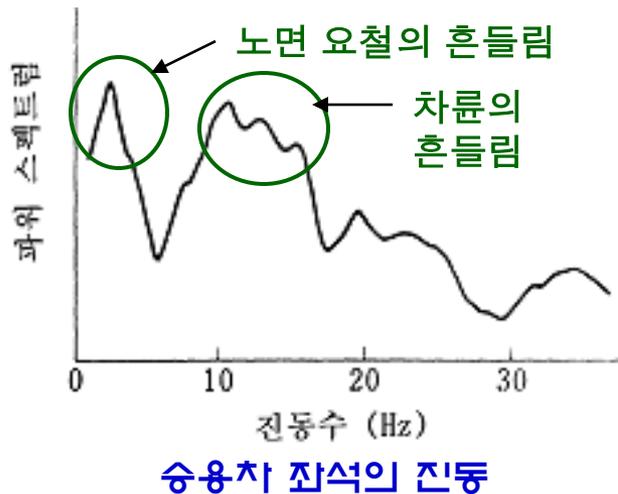
- **몸으로 느끼는 진동** : 자동차나 기차에 탔을 때의 신체 진동
- **자갈길**이나 **울퉁불퉁한 도로**나 **철로의 이음매** 부분을 통과할 때, **차량의 흔들림**
- **급 발진**, **급 정지**, **우회전**이나 **좌회전**할 때, **몸에 작용하는 힘의 느낌**
- 교통기관 내부에서 발생하는 **진동으로부터 사람이 감지하는 것은 힘 F보다는 힘의 변화** $dF/dt = m da/dt$ 로서, 가속도의 시간 변화인 **저크(jerk) da/dt** 임
- 연속적으로 작용하는 같은 크기의 힘, 예로 **지구 중력**이나, **일정 속도로 직선도로를 달리는 자동차** 등에서는 가속도가 일정하거나 없으므로, 가속도 변화를 느끼지 못함
- 이들 **힘이나 가속도의 변화가 시간적으로 되풀이되거나, 강하게 변화하는 경우**에만 힘이 신체에 작용하고 있다고 느끼게 됨

현가장치



몸으로 느끼는 진동 : 좌석 진동(Seat Vibration)

- 자동차 노면으로부터 작용하는 진동 외력에 의한 **승용차 좌석의 진동**
- **15 Hz 정도까지가 노면(road surface)의 요철(凹凸)에 의한 진동**
- 주로 **15 Hz 부근은 차륜(wheel)의 흔들림**에 의한 진동
- 포장 도로에서 승용차 좌석은 가장 나쁜 경우의 진동 가속도는 **0.6G** 정도
트럭 화물칸에서 **2 ~ 3 G** 정도, 놀이기구가 최대 **5G** 정도 (G는 중력가속도 9.8m/s^2)
- **증상** : 메스꺼움과 구토가 흔하고 식욕 감퇴, 졸림, 식은땀, 두통, 입안에 침 고임 등
- **흔들린 아기 증후군** : 보통 **생후 4개월에서 2년 이내**에 주로 발생 가능,
뇌와 척수 손상에 의한 증상임



몸으로 느끼는 진동 : 차량 진동(Vehicle Vibration)

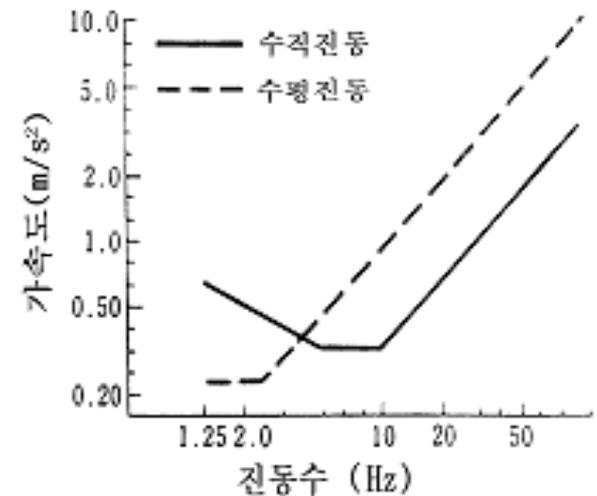
- **승차감(ride quality)** : 가속도의 반복되는 변화나 급격한 변화에 대해 인간이 느끼는 감도(感度, sensitivity)로 사용
- 평가 방법의 하나로서 1초 동안의 반복 수인 **진동수에 대한 감도**가 이용
- 진동수 특성은 그림과 같이 진동수에 따라 느끼는 형태가 달라짐
- **수평방향 흔들림에 대한 인간의 감도는 수직방향 흔들림(상하 흔들림)과 다름**
- **수 Hz 이하의 진동수는 민감하게 느끼지만, 수십 Hz가 되면 둔감해짐**
60Hz 부근의 진동수에서 졸리거나, 높은 진동수에서 머리가 아프게 되는 경우도 있음
- **신체 각 부분에는 흔들리기 쉬운 진동수가 있고, 외부로부터의 진동의 전달에 의해 그 진동수에서 흔들리기 쉬운 부분이 특히 자극을 받게 되고, 생리적인 반응이 나타남**



소렌토



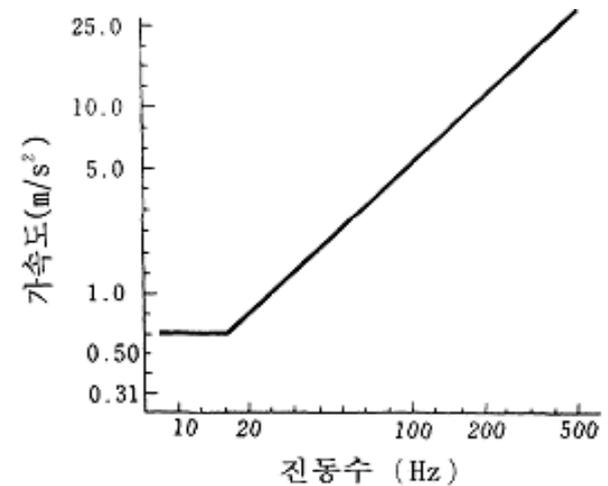
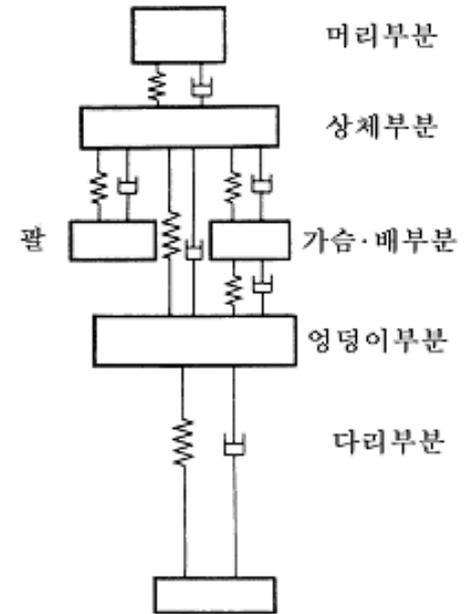
스테인즈맨(GM대우)



신체 진동의 감도특성(8시간 견디는 가속도)

몸으로 느끼는 진동과 피부를 따라 전달되는 진동

- **신체의 진동 모델**을 질량과 스프링을 이용하여 나타낸 모델로 인간의 기본적인 진동특성이나 진동에 대한 반응을 이해할 수 있음.
- 몸으로 느끼는 진동으로는 또 다른 종류의 진동:
힘으로서 피부를 통해 전해오는 진동
 예로 손에 주는 **전동공구의 진동**, **전기면도기와 마사지 기구**, **굴착기의 진동** 등
- 이들이 손에 전해져 오는 진동에 대한 감각은 주로 **압각(壓覺)**에 의해 감지되며, 인간이 느끼는 형태는 손의 흔들림 가속도 값으로, 가속도(그 변화)를 전신으로 느끼는 경우에 비해 진동수 영역으로서는 조금 높은 영역까지 느끼게 되지만, 절대치로서는 둔감하게 됨
- 굴착기 노동자는 종종 **손 끝 세포가 죽어 하얗게 썩어 들어가는 흰 손가락 증후군**을 경험. 손상이 심해지면 손가락을 절단해야 할 정도로 심각한 이 병의 원인은 **반복되는 강한 진동**



신체 진동의 영향

진동 주파수 영역별 사람에게 미치는 영향

❖ 감각적 영향

- 6 Hz : 허리, 가슴, 등쪽에 심한 통증을 일으킴
- 13 Hz : 머리 부분이 가장 크게 느끼고, 안면의 볼, 눈꺼풀이 진동
- 4 ~ 14 Hz : 복통을 느낌
- 9 ~ 20 Hz : 대소변을 보고 싶고, 무릎에 탄력감, 땀, 혹은 열이 나는 느낌을 받음

❖ 생리적 영향

- **후두계** : 12 ~ 16 Hz에서 배속 음식물이 오르락 내리락 하게 하고, 발성에 영향
- **호흡계** : 1 ~ 3 Hz 에서 호흡이 힘들고, 산소의 소비가 증가
- **순환계** : 맥박수 증가 → 수직과 수평진동이 동시에 가해지면 자각현상이 2배로 증가

❖ 신체적 영향

- 3~6 Hz : 신체의 심한 공진현상을 보여 가해진 진동보다 크게 느낌
- 20~30 Hz : 신체의 2차 공진현상이 나타나고, 이후에는 주파수가 증가할 수록 감쇠가 급격히 증가
- **전신진동** : 차량 탑승자는 진동으로 압박감을 느끼고 심하면 공포감과 오한을 느낌
- **국소진동** : 광산근로자, 조선공 등과 같이 착암기, 공기 헤머, 글라인더(grinder) 등을 사용하는 사람은 손가락 말초혈관운동의 장애로 인해 혈액순환 장애가 되어 창백해지는 **Raynaud씨 현상** 이 생김

심리적 불안 증상 : 면접 공포증, 떨림

- 면접 상황에서 경험하는 **심한 긴장과 과도한 불안 증상**
- 이러한 증상이 수준을 지나쳐 단지 수줍거나 부끄러움을 넘어서는 경우, 이를 의학에서는 **사회공포증**으로 진단
- 10대부터 성인기 초기까지 발병. 평생 1번은 걸릴 수 있는 유병률이 약 3~13% 정도
- 설문조사에 따르면 66.1%가 면접 때 극도의 긴장감이나 불안감을 경험
- 극심한 심리적 불안과 **말더듬기**, 말 빨라짐, **목소리 떨림**, 식은 땀, 면접관 시선 회피, 얼굴 붉어짐, **손발 떨림** 발생

- **진전(떨림, tremor)** : 근육의 불수의적 수축에 의해 발생
- 이는 몸의 어느 부분에서도 일어날 수 있으나 주로 목, 팔, 손 등에서 나타남
- 대부분의 사람들은 스트레스를 받거나 매우 지쳤을 때, 카페인을 많이 섭취했거나, 부작용으로 진전을 일으키는 약을 복용하는 상태에서 발생
- 파킨스병, 본태성 진전, 알콜중독, 다발성 경화증, 종양, 뇌졸중, 갑상선 기능항진증, 월슨병 등



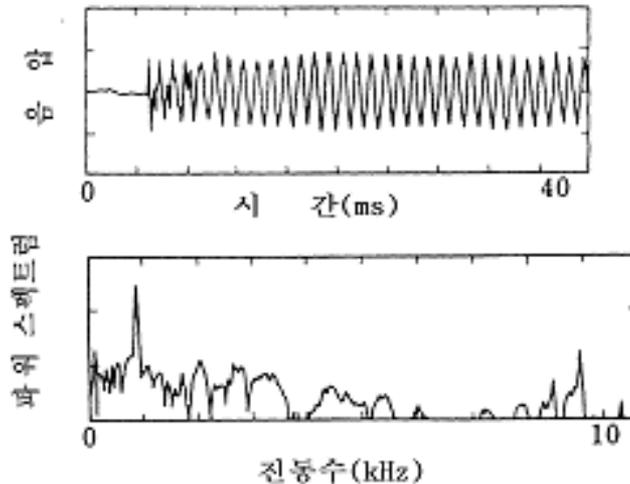
면접 광경

공기 압력의 변동 : 소리 (Sound)

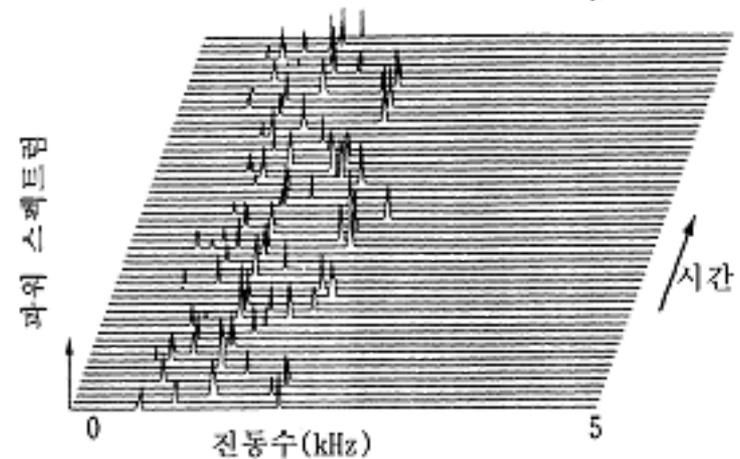
- **오르골**(orgel) : 태엽을 이용 자동적으로 간단한 음악이 연주되도록 장치한 상자 또는 장난감. 음악상자. 자명금(自鳴琴).
- 오르골을 울린 경우, 소리의 시간적 변화를 조사하기 위해, 진동수를 수평축에, 파워 스펙트럼 밀도를 수직 축으로 하여 시간 변화를 조사(그림)
- 멜로디에 따라 1초 사이의 반복 횟수(진동수, Hz)가 변화



오르골



(a) 한 음의 울림과 진동수특성

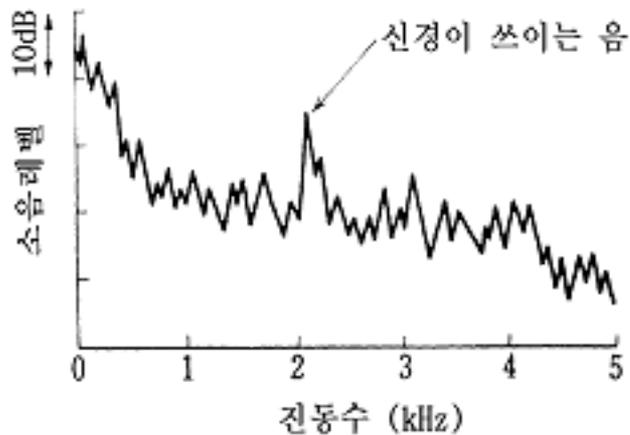


(b) 한 멜로디의 진동수 특성의 시간변화

오르골의 한 음과 멜로디의 스펙트럼 변화

공기 압력의 변동 : 소음(Noise)

- **소음(noise)** : 원하지 않은 불쾌한 소리
- 소음 중에서도 강하게 느낄 수 있는 싫은 소리의 경우는 그림과 같이 여러 가지 진동수의 소리 가운데 **몇 개의 특정한 강한 성분**이 들어 있는 경우가 많음
- 이들 특정의 강한 소리 성분은 **소리의 세기가 5 dB(데시벨) 이상 다른 성분보다 크게 되면 두드러지게 나타나게 됨**



특정음이 5 dB 이상 클 때 신경이 쓰인다

소음 스펙트럼의 예

지하철 소음
방지 자동문

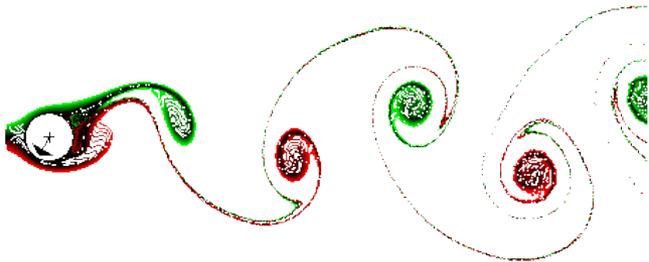


자기부상열차



공기 압력의 변동 : 자연의 소리(Natural Sound)

- 자연에서 발생하는 소리도 소리로 들리는 데는 어떤 수의 반복된 공기 압력의 변동이 필요
- 바람의 경우도 풍압(風壓) 변동 만으로는 변화의 시간 간격이 길고 완만하므로, 소리로 되지 않고, 바람이 건물이나 전선 등의 장애물에 부딪히거나, 피해서 지나갈 때 그 뒤에 생기는 소용돌이(vortex)의 발생과 소멸에 의해서 소리로 되고 「휴- 휴-」 하는 소리로 들림
- 천둥소리가 「우르르 짹」 하고 들리는 것은 왜 일까?
천둥의 전기 방전(電氣 放電)에서는 어떤 부분에 높은 전류가 흘러서 급격히 고온으로 되고, 공기에 압력변화 발생. 그것만으로는 「광」 하는 소리만 들리게 되고, 압력 변화의 파동이 구름이나 지표와의 사이에서 반사하여 시간이 지연되어 차례차례 전해져 오기 때문
- 번개가 먼저 나타나고, 소리는 늦게 들린다? (광속과 음속의 차이)

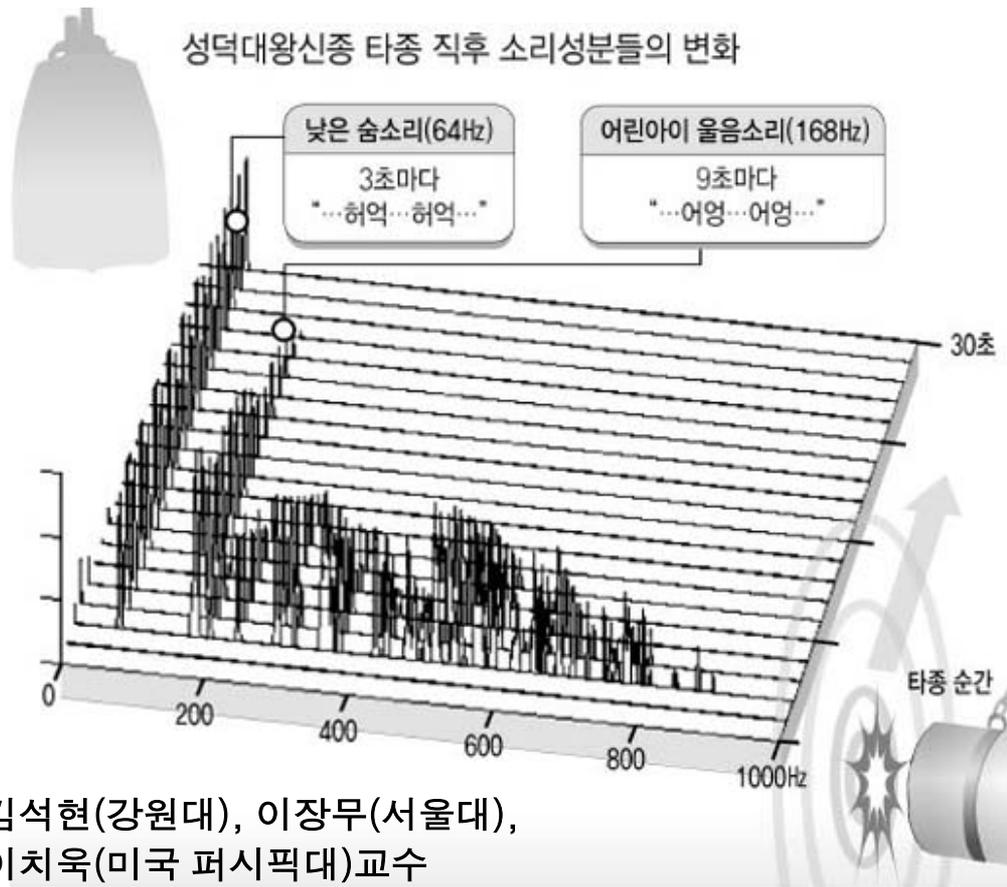


카르만 소용돌이(Karman Vortex)



공기 압력의 변동 : 종의 소리(Bell Sound)

- 우리나라 최고의 범종 : **성덕대왕신종** (에밀레종, 18.9t, 통일신라 771년 주조, 경주박물관)
- 고주파수 성분은 타종 뒤 몇 초 안에 거의 대부분 소멸
- 9초 이후 에밀레종 소리는 **숨소리 같은 64Hz**와 **어린아이 곡소리 같은 168Hz** 음파만이 지배



성덕대왕신종

공기 압력의 변동 : 현악기(String Instrument)의 소리

- 바이올린은 **송진을 바른 말총**으로 줄을 켜서 소리를 내며, 아름답지도 않고 대단히 작음
- 그러나 이 소리가 멋스럽게 생긴 **울림통**을 울리고 나면 대단히 고풍적인 현악기 특유의 소리로 변할 뿐 아니라, 소리의 크기를 증폭시켜 콘서트 홀의 구석 구석까지 전해짐
- 울림통은 대부분의 악기가 가지고 있고, 파이프 오르간이나 관악기의 경우는 **관(管)**이, 사람의 발성 기관에서는 **입과 코**가 그 역할 수행
- 울림통은 재질의 탄성과 그 생김새에 따라 **고유한 떨림**을 가지며, 외부에서 가해지는 자극이 울림통의 고유한 떨림과 일치할 때 소리가 커지게 되며, 이러한 현상을 **공명(共鳴)**이라 함
- 줄의 떨림이 울림통의 그것과 유사한 경우는 아주 작은 떨림에도 울림통은 크게 울리지만, 그렇지 않다면 아무리 큰 떨림이라 하더라도 울림통을 울릴 수 없음
- 이러한 원리로 **울림통은 줄의 떨림 중 듣기 싫은 소리는 억제하고 아름다운 소리만 크게 울림**



바이올린



비올라



콘트라베이스

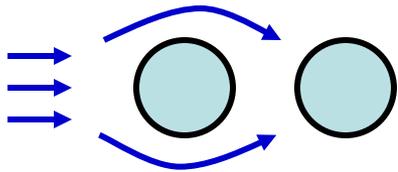


첼로

공기 압력의 변동 : 케이블의 진동(Cable Vibration)

♣ 사장교 케이블 진동의 종류

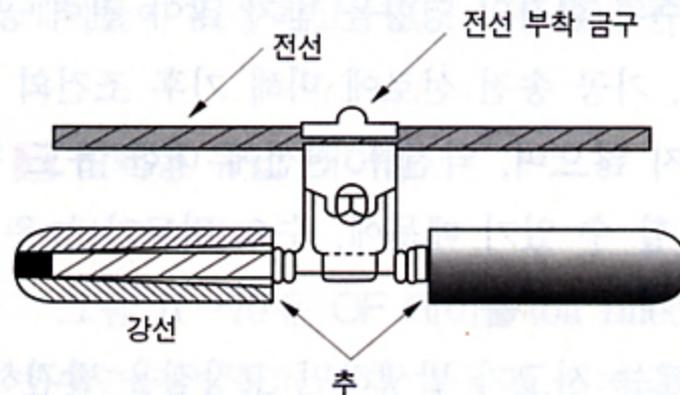
- 바람이 케이블을 통과하면서 케이블 뒤쪽에서 교번적인 와류(vortex)를 발생, 이 와류의 발생 주파수와 케이블의 고유진동수가 일치할 때 생기는 **유동 여기 진동**
- 2개의 케이블이 병렬로 배치되어 있을 때, **앞쪽 케이블을 통과한 바람의 흐름이 뒤쪽 케이블을 진동**시키는 **Wake Galloping**
- 강우를 동반한 바람이 불 때, **케이블의 상, 하면에 2개의 수로가 형성**되어 케이블 단면이 공기역학적으로 불안정한 단면을 이루면서 발생하는 **Rain Vibration**



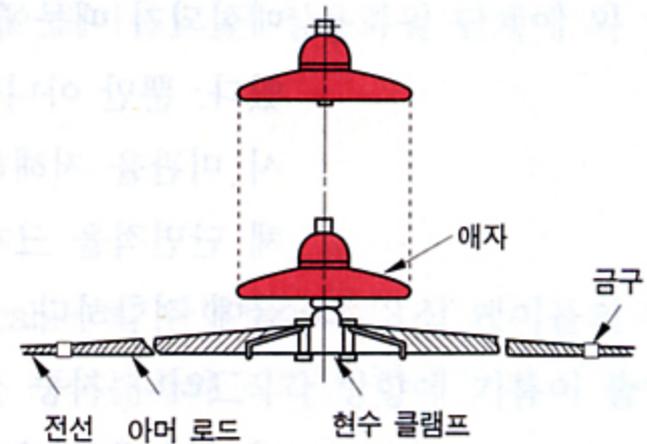
제 2 진도대교 전경(현수교)

공기 압력의 변동 : 케이블의 진동(Cable Vibration)

- 전선의 직각 방향으로 바람이 불면, 전선의 배후에서 소용돌이 현상이 발생
- 전선의 고유 진동수와 같아지면 공진을 일으켜 전선이 상하로 진동
- 진동이 오래 계속되면 전선의 일정한 부분이 응력을 받아 전선이 끊어질 수 있음
- 진동을 막기 위해 댐퍼(damper) 또는 어머 로드(armor rod) 등을 사용
- 어머 로드는 전선의 진동 방지 외에 전선 지지점에서의 단선 방지를 위해 사용



감쇠기(damper)



어머 로드(armor rod)

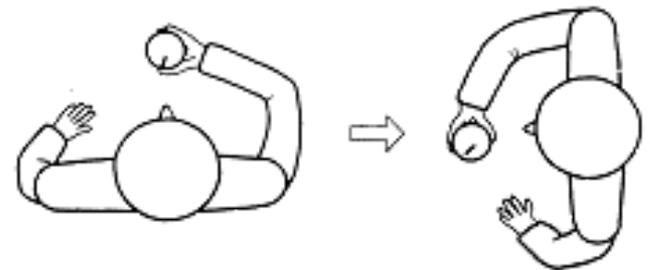
상태를 지속시키는 성질 : 관성(Inertia)

♣ 관성(inertia) : 물체가 자신의 상태를 계속 유지하려는 성질

- 녹차를 마실 때, 찻잔의 자기 앞의 마시는 쪽에 차의 찌꺼기나 차의 줄기가 붙어있어 차를 마실 때 신경이 쓰임. 이를 입으로 붙어서 움직이려고 해도 잘 움직이지 않고, 또는 찻물을 회전시켜 찻물과 함께 차 찌꺼기가 입을 대는 부분에서 멀리 벗어나기를 바라나, 잘 안됨
- 또한, 물이 잘 회전되는 경우에도 물의 흐름이 멈추지 않고 계속 회전함. 이는 뜨거운 물의 관성으로 자신의 회전상태를 계속 유지하려 하고, 운동에 저항하는 점성(粘性)이 없어 자유롭게 움직이기 때문
- 관성의 성질을 역이용하여 회전하지 않으려는 물의 관성을 이용, 마시는 사람이 몸을 돌려서 옆쪽으로 하여 마시면 차의 찌꺼기나 줄기는 본래의 위치로 멈추어져 있기 때문에 그것들을 피하여 마실 수 있음
- 액체의 관성은 용기가 흔들렸을 경우나 지진 등과 같은 가진력이 작용하는 경우에는 액체의 진동으로 나타나게 됨

달리던 물체는 브레이크를 밟지 않으면 계속 달림
: 관성의 법칙

버스가 갑자기 출발할 때 몸이 뒤로 쏠리는 현상,
버스가 갑자기 정지할 때 몸이 앞으로 쏠리는 현상



녹차 마시는 법

상태를 지속시키는 성질 : 관성 효과(Inertia Effect)

♣ 경제적 관성효과 : 래치 효과

- 소득이 높을 때의 소비 행동 패턴은 소득이 다소 낮아져도 곧 변하기 어려움.
- 이처럼 소득이 늘어나지 않아도, 그 소득과 균형 잡힌 상태로 소비가 바로 줄지 않는 현상
- 관성효과가 작용하면, 소득이 감소 국면에 들어가는 경기후퇴 시 소비성향이 일시에 상승

♣ 인간의 심리적 관성효과

- 첫 인상, 선입관, 편견 등도 인간심리의 관성효과 of 전형적인 예
- 처음에 좋게 본 것은 계속해서 좋게 보려고 하며, 첫인상이 나쁜 것은 아무리 예쁜 짓을 한다고 해도 나쁘게 보임 → 관성의 법칙이 인간심리를 그대로 지배하고 있음을 반증
- 인간의 심리적 관성은 좋은 면만을 선택적으로 인식하게 하고, 나쁜 측면에 대해서는 의식적이든, 무의식적이든 간에 관계없이 외면하게 만들곤 함
- 선택적 지각만을 강요하려는 심리적 관성 에, 대다수 시장 참여자들의 동의 획득 과정을 거친 후에 나타나는 집단 사고, 그리고 이에 따른 결과로 나타나는 군중 심리 까지 가세 하게 되는 경우에는 주가에는 더욱 더 가속도가 붙을 수 밖에 없고, 주가는 더 빠른 속도로 가던 방향으로 이동 → 인터넷 효과



미세 진동 : 유용한 이용

- **자동 면도기** : 손잡이에 모터, 스위치 및 배터리가 장착되어 전원을 켜는 순간 미세진동 발생. 미세진동 기술은 여러 방향으로 자라난 수염을 자극하여 피부로부터 일으켜 세우고, 단 한 번의 면도만으로 더욱 밀착되고 깔끔한 면도가 가능
- 병원에서 물리치료에 사용하는 **진동 매트**가 가정용 제품으로 보급되어 있는데, 이 같은 원리의 **가정용 안마기** (안마 의자와 손 안마기)의 신제품들이 등장
- **휴대전화용 진동모터**: 반도체 칩을 소형 모터 내부에 장착, 브러시가 없는 제품으로 진동의 강약 조절이 가능해서, 휴대전화 사용자가 버튼 하나로 자유롭게 진동 세기 조절



면도기(Gillette사) 휴대용 초음파 미용기



방진 패드



휴대 전화

진동의 유용한 이용 : 안마기



안마기



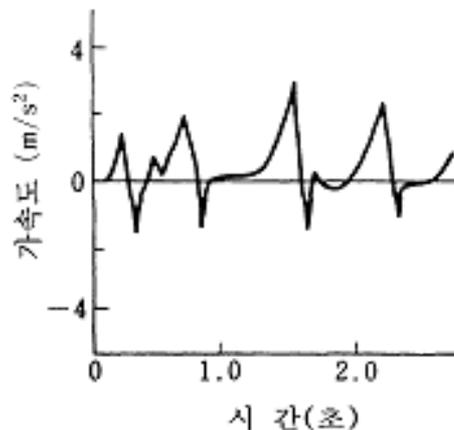
쿠션 안마기

삶의 질과 관련된 환경진동 : 바닥 충격진동(Floor Impact Vibration)

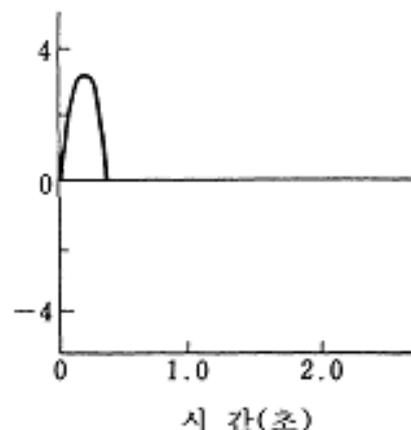
- 바닥 진동이나 신발 소리 등이 주택이나 사무실에서 **충간 소음문제**로 민원 야기
- 건축 분야에서는 사전에 이들의 평가와 저감대책의 검토가 이루어짐(**법적 강제조항**)
- 한 걸음씩 이동한 발이 착지(着地)할 때의 충격을 측정하면, 그 가속도는 사람 어깨의 위치에서 그림과 같이 됨
- 이 짧은 시간에 작용하는 외력은 작용하고 있는 시간이 **0.4초** 정도에 크기는 **0.3G** 정도

공동주택의 충간 바닥 충격음

- 경량 충격음 : 58dB 이하
- 중량 충격음 : 50dB 이하



(a) 실측치



(b) 한걸음의 충격모델

보행자 착지 시의 충격 가속도

보행 충격력의 전달 : 보행 충격진동(Walking Impact Vibration)

- 보행 충격 외력은 노면(路面)에도 작용하게 되므로 건물의 바닥에 가해지는 힘이나 걸을 때 신발 소리에 관련되고, 유연한 **육교의 흔들림**에도 영향을 미치게 됨
- 1831년 **영국 보병부대**가 맨체스터 근처 **현수교**를 우연히 다리의 고유 진동수에 맞춰 행진하는 바람에 다리가 무너진 사례가 있음
- 런던 **밀레니엄 교**에서 2000년 개막식에 참석한 행인 2천명의 발 맞추기 행진에 의한 **교량의 심한 진동 발생으로 교량 폐쇄**
- 행진하는 군인의 규칙적인 발걸음이 교량의 고유 진동수 중 하나와 같게 되어 **공진(resonance)**에 의한 **과대한 진동**이 발생하였기 때문



군인들의 규칙적인 보행 광경

바람에 의한 외력 : 건물 진동(Building Vibration)

- 타이베이 금융센터 101 빌딩의 88층과 92층 사이에는 지름 6m, 무게 660 ton에 달하는 커다란 강철 공이 매달려 있음
- **동조질량감쇠기**라 불리는 이 장치는 건물이 바람에 흔들릴 때 반대방향으로 움직여 건물의 흔들림을 저감
- 주위에 8개의 **유압 댐퍼(damper)**가 설치돼 진동을 흡수하는 이 강철 공은 타이베이 금융센터 101 빌딩의 **최대 진동치를 3분의 1 이상 감소**시킴



▲뉴욕 엠파이어스테이트 빌딩 ▲상하이여 건축 중인 세계금융센터 ▲타이베이금융센터 101빌딩

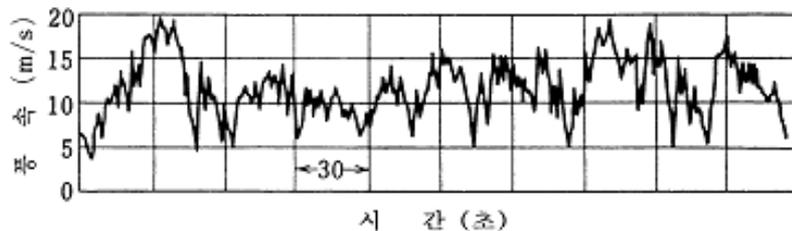
고층 빌딩의 예



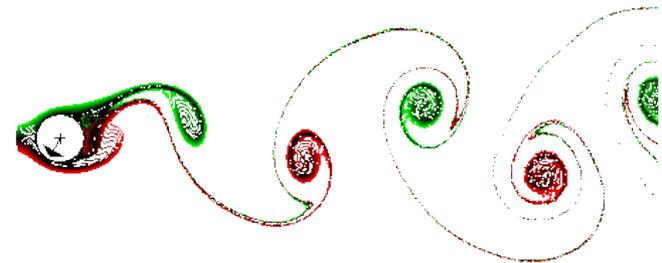
수직진동용 동조질량감쇠기
(Tuned Mass Damper)

바람에 의한 외력 : 유동여기진동(Flow-induced Vibration)

- 일반적으로 풍압(風壓)이나 풍속(風速)의 큰 변화는 주기가 10초 이상으로 길고, 그 중에 작은 변화가 중첩되어 그림과 같은 시간 파형으로 나타남
- 이러한 변동은 지구 규모의 큰 공기 흐름의 흐트러짐이나, 산이나 섬 등의 지형에 의한 흐름의 흐트러짐의 결과로서 일어남
- 바람에 의한 외력은 고층 빌딩, 타워, 교량, 전선 등에는 큰 영향을 미치고, 이들에 공기가 부딪쳐 흐름이 흐트러지고, 이들의 후류(後流, wake)에 미세하게 변동하는 바람이 발생
- 흐름 중에 어떤 물체를 놓으면 흐름은 그 주위를 돌아서 흐르지만, 그 때에 물체를 따라 흐르는 흐름이 물체로부터 분리되어 작은 소용돌이(渦, vortex)를 만들며 흐트러져 흐르기도 하고, 물체 뒤에 큰 소용돌이를 발생
- 이들에 의해 소음이나, 물체에 진동 발생. 이때 발생하는 진동수는 흐름의 분리에 의한 작은 소용돌이 무리에서는 수백 ~ 수천 Hz 정도



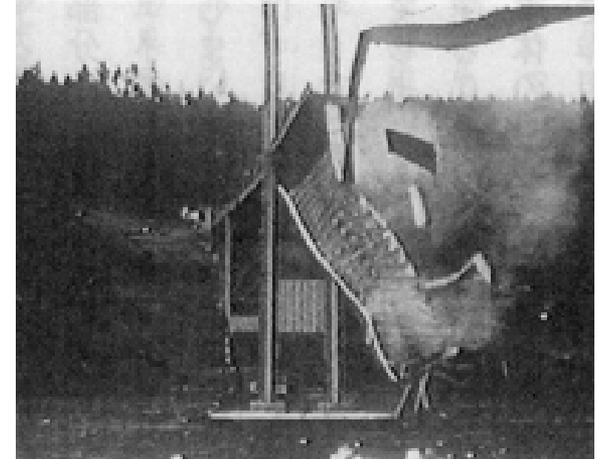
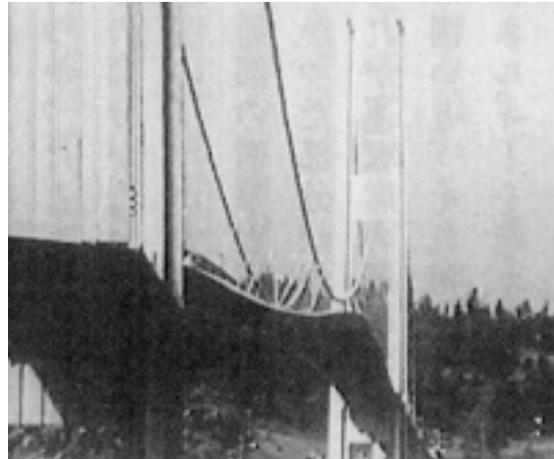
풍속 변화의 예



후류의 소용돌이 발생

바람에 의한 외력 : 유동여기진동(Flow-induced Vibration)

- 바람에 의한 진동으로 가장 유명한 예는 미국 **타코마교**(橋)의 파괴 사고
- 1940년 미국 워싱턴주 타코마(Tacoma) 해협을 횡단하는 길이 853m 다리가 건설
- 개통해서 수개월 지났을 때, **17~18m/s**로 수평방향으로 부는 바람을 받아 그림과 같이 크게 진동하다가 붕괴됨
- 정확한 원인은 분명하지 않으나 처음에 교량의 뒤에서 발생한 **공기의 소용돌이**에 의해 진동이 성장하고, **굽힘 변형과 비틀림 변형을 동반한 플러터 진동**으로 되어, 더욱 더 큰 진동으로 성장한 것이 원인



타코마교에서 발생한 유동 여기 진동과 파괴 사진

바람에 의한 외력 : 유동여기진동(Flow-induced Vibration)

- 현수교로서 교각 단면은 형 거더로 이루어지고 폭 12m 플랜지 높이 2.4m의 단면
- 이 다리는 약한 바람이 불어도 좌우로 흔들리는 경향이 있었음
- 개통식 후 4개월이 지난 11월 7일 아침 시속 67km/h의 바람을 동반한 폭풍이 1시간 이상 불었고, 타코마 다리에는 옆으로 흔들리는 동시에 노면이 비틀리는 비틀림 진동이 가세
- 교량면의 각변위는 수평선의 양쪽으로 45도에 달했고 진동모드는 전 스팬에 걸쳐 정현파의 반파가 2개 포함된 진동이 발생
- 그 결과 원인을 알 수 없는 진동에 의해 교량은 4개월만에 붕괴됨
- 이 사건은 그 당시 그때까지 그만한 규모의 현수교가 붕괴된 적이 없었고, 붕괴 원인이 불명확 했다는 것 때문에 널리 주목을 받음
- 유체역학자 Von Karman이 참가한 조사단은 다리의 붕괴원인을 조사하였고 워싱턴대학에 특별히 만든 풍동에 의해 유체역학적 가진력(exciting force)에 대하여 수년간 연구 끝에 **주기적인 와동에 의한 진동현상**이 발생할 수 있음을 밝혀냄. 이를 Von Karman의 이름을 따서 **Karman 와류**라 명명
- 유체가 원통형 물체의 주변을 흐를 때, 물체의 뒷면에는 이미 규칙적인 흐름은 없어지고 특이한 와동(Vortex)이 발생
- 소용돌이는 반시계 방향으로 엇갈려서 나타나고 원통으로부터 규칙적으로 배출되어 교번 횡적인 힘을 발생

바람에 의한 외력 : 유동여기진동(Flow-induced Vibration)

- 관성력을 점성력으로 나눈 무차원 수인 **레이놀즈 수**(Reynolds number) **Re**가 < 45인 정상류의 경우, 원통 주변의 유선(stream line)들은 대칭적이고 항력(抗力)만 존재
- 그러나 Re가 증가하는 비대칭 유동에 대해서는 양력(Lift)과 회전력이 발생
- 이러한 현상은 유체가 원통표면에서 역압력 구배를 만나 박리(떨어짐)되면서 주기적인 와동을 유기하여 발생하는 것
- 이러한 현상은 실험적으로 연구되어 **Strouhal 수 St** 라는 무차원 수를 제안
- $St \times Re$ 를 **발렌시 수**(Valensu number) 또는 **진동 레이놀즈 수**라고 하며 $Re > 400$ 인 경우에 St는 대략 Re와 관계없이 0.22라는 일정한 값을 지니게 된다. 즉

$$St = f D / V = 0.22$$

여기서 f는 진동수, D는 원통의 지름, V는 유체의 속도

- 타코마교에 있어서 대략의 Re 값과 이에 따른 St에서 가진주파수를 계산해 보자

$$Re = V D / \nu = 18.6\text{m/s} \times 2.4\text{m} / 15 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s} = 3 \times 10^6$$

$$f = 0.22 V / D = 0.22 \times 18.6\text{m/s} / 2.4\text{m} = 1.7\text{Hz}$$

여기서 원통의 지름 D 대신 계산의 편의를 위해 특성길이(대표길이)를 바람에 대하여 수직으로 놓인 플랜지의 높이를 사용함. 단면의 형상에 따라 수렴 St는 조금씩 다른데 편의상 원통의 형상과 같다고 고려

- 이는 교량을 10초에 17번 비틀리게 하는 주파수로서 **교량의 비틀림 고유진동수와 공진** 할 수 있는 상당히 그럴듯한 값임



바람에 의한 외력 : 유동여기진동(Flow-induced Vibration)

- 정밀한 연구 후에 교량은 **3가지 중요한 점에서 구조를 변경**
 - 1) 교량의 측면 플랜지면을 틈이 없는 철판으로 만든 것을 개방된 트러스 구조로 변경하여 큰 와류를 형성하기 전에 바람이 통과하게 함(**와류 방지**)
 - 2) 교량의 도로 면에 긴 홈을 형성하여(차선간에 문살 구조) 큰 와류가 발생하더라도 교량 면의 위아래의 압력차가 발생하지 않게 좌우 위아래의 **개방구조**를 택함(**가진력 저감**)
 - 3) 교량을 단혀있는 상자형 단면(위 뚜껑을 씌움)을 형성하고, 폭을 18m, 높이를 10m로 증대시킴으로써 비틀림에 대하여 강성을 100배정도 향상(**고유진동수 증가, 공진회피**)
- Karman 와류가 발생하는 가장 작은 현상은 지름 약 1mm 정도의 빗방울에서라고 함.
- 빗방울은 정지한 공기 속에서 수직으로 떨어지나 지름이 꼭 1mm정도의 빗방울은 바람이 없어도 예외로서 옆으로 묘한 자취를 그리며 빗나감
- 이와 같은 빗방울의 낙하속도를 계산하고 St 가 0.22임을 적용하면 와동의 진동수가 계산되고 직경 1mm의 빗방울의 표면장력의 스프링효과에 의해 빗방울은 구형체로부터 타원체로 변형하고 이 변형의 진동수를 고유진동수로 보면 와동의 진동수와 일치
- 따라서 직경 1mm의 빗방울은 낙하하면서 맥동하고 그것의 낙하 자취는 단순한 수직선이 아니고 불규칙해짐

바람에 의한 외력 : 항공기 진동(Airplane Vibration)

- **청천 난류(晴天亂流, clear-air turbulence)** : 7~12km 고도의 구름이 없는 대기에서 발생, 항공기에 위협적이고 불규칙한 기류로 빠르게 움직이는 기류와 그보다 훨씬 느리게 움직이는 기류가 인접해 있는 **제트 기류 주변에서 풍속의 차이에 의해 발생**

- **제트 기류(jet stream)**:

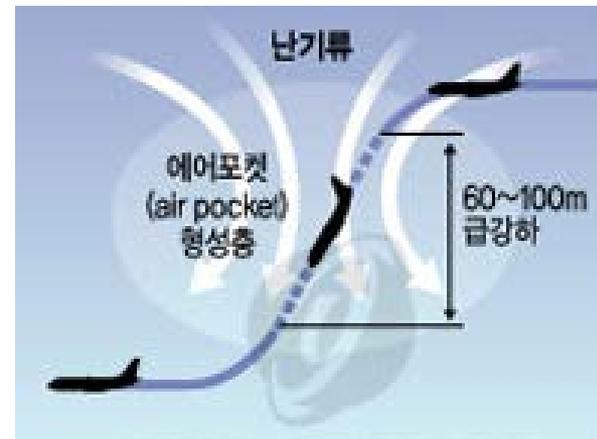
대류권 상층과 성층권에서 수평상으로 동쪽으로 흐르는 길고 좁은 고속 기류.

강한 연직 전단(shear) 작용을 일으키는 바람의 운동으로, 항공기에 매우 위협적인 청천 난류를 일으키는 주요 원인. 제2차 세계대전 동안 비행사들에 의해 처음 발견.

중심에서는 수천km를 따라 500km/h에 이르는 속도를 내지만, 양쪽 수평방향과 연직방향으로 속도가 매우 급격하게 떨어져 빠른 속도를 보이는 범위는 매우 한정

계절에 따라 위치와 속도가 달라짐. 고도, 지역에 따라 다르나, **심한 경우 진동 폭이 상하 100m 정도**. 급강하 안전벨트를 매지 않으면 객실 천장에 부딪치는 사고도 종종 발생

8~9월에 100편 비행 횟수당 평균 1.5편으로 난기류가 가장 많이 발생



난기류 현상

바람에 의한 외력 : 항공기 날개 진동(Flutter Vibration)

- 제 2차 세계대전 직전, 일본 해군은 신형 함상(艦上) 전투기를 개발
- 개발 년도(1940)의 끝 자를 취해 **0식 전투기**라 명명
- 힘이 약한 엔진상태에서 최대한 운동성능 발휘를 위해, 중량은 극한까지 줄이도록 설계
- 완성 후의 시험비행에서는 **급강하 중에 날개가 돌연 격심한 진동을 일으켜서 공중분해**, 추락 및 시험비행사(test pilot)의 순직하는 대사고가 이어서 2회 발생
- 사고기의 면밀한 조사, 해석 및 모형실험 결과, 추락 원인은 **날개의 비틀림 플러터 진동(flutter vibration)**
- **날개의 비틀림 강성(torsional stiffness)을 높이는 설계변경**으로 문제 해결
- 항공기는 공기 중을 빠른 속도로 이동하고, 이때 항공기에 작용하는 공기의 흐름은 항공기에 탄성력으로 작용하고 이는 항공기의 진동을 야기. 이런 현상을 공탄성이라 하며, 이때 발생하는 항공기의 진동을 **플러터(Flutter)**라 함

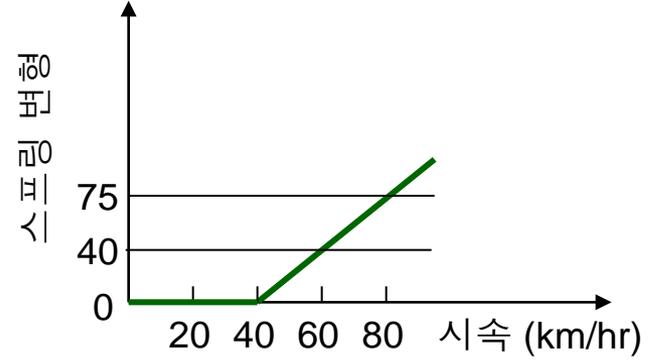
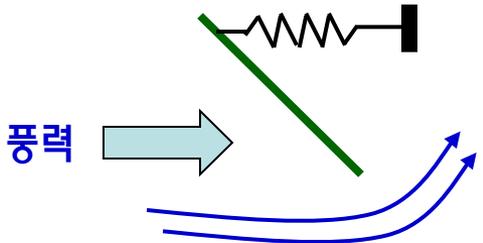


제로식 함상전투기(A6M2)



바람에 의한 외력 : 꺾기 번호판(Illegal Number Plate)

- 무인단속 카메라 적발을 피하기 위한 운전자들의 기법이 갈수록 고도화
- 차량 속도가 시속 60km 이상 되면, **맞바람의 저항을 받아 번호판이 아래로 40도 이상 꺾이도록 설계** : 가격 2만 8천원
- 30도 이상 꺾이면, 과속 카메라의 사진 판독이 불가능



(a) 시속 40km: 정상



(b) 시속 70km: 45도

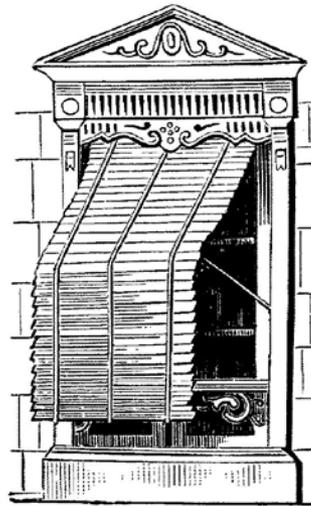


(c) 시속 80km: 75도

꺾기 번호판

바람에 의한 외력 : 유동 여기 진동(Flow-induced Vibration)

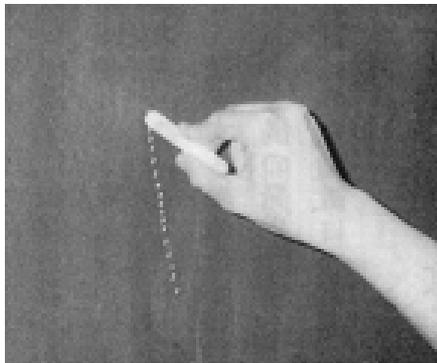
- 유체와 관련된 자려 진동의 예로는 미풍에 떨리는 **창문의 차양(blind)**이 있음
- 적당한 풍속일 때에 차양 판의 각도에 따라 바람이 진동하지 않는 데도 차양이 닿아서 소리를 내는 **자려 진동**이 발생하는 일이 있음
- 이것은 차양 1장의 얇은 판이 바람에 흔들려서 구부러지고 비틀려져서 변형되었을 때에 바람으로부터 에너지를 받아서 또 진동하려고 하고, 이것의 반복에 의해 진동이 계속적으로 발생하게 되며, 이 현상을 **플러터(flutter)**라 부름



차양(blinds)

마찰에 의한 자러 진동 : Stick-Slip

- 흑판에 분필로 직선을 그릴 때, 툇툇툇 하는 소리와 함께 불연속적인 점선이 그려짐
- 분필을 단지 일정 속도로 움직이고 있을 뿐, 특히 분필에 진동을 가하는 것은 아님
- 이와 같이 진동하는 외력이 없는 곳에 특정 진동수의 진동이 발생하는 현상을 **자러 진동 (self-excited vibration)**이라 함
- 특히, 잡은 분필을 밀고 가도록 하면 분필과 손가락이나 손의 근육으로 만들어지는 진동
- 계에 발생하는 자러진동은 안정하게 지속됨. 이 현상은 **분필과 흑판 사이의 마찰력** 때문
- 이 거동 시 움직이는 손으로부터 손가락 끝의 근육에 에너지가 축적되고 멈추게 하려는 마찰력보다 움직이려 하는 큰 상대력이 발생하며, 또 분필이 미끄러져 저장된 에너지가 분필의 운동으로 변환되어버리는 반복 현상으로 됨
- 때로 정지하거나 속도가 늦어지고, 때로 미끄러지므로, 이 현상은 **스틱 슬립**이라 부름
- 접촉하는 두 면사이 상대속도에 대응해서 마찰력이 변화하는 경우에 발생하기 쉬운 현상



흑판과 분필 사이의 stick slip 현상

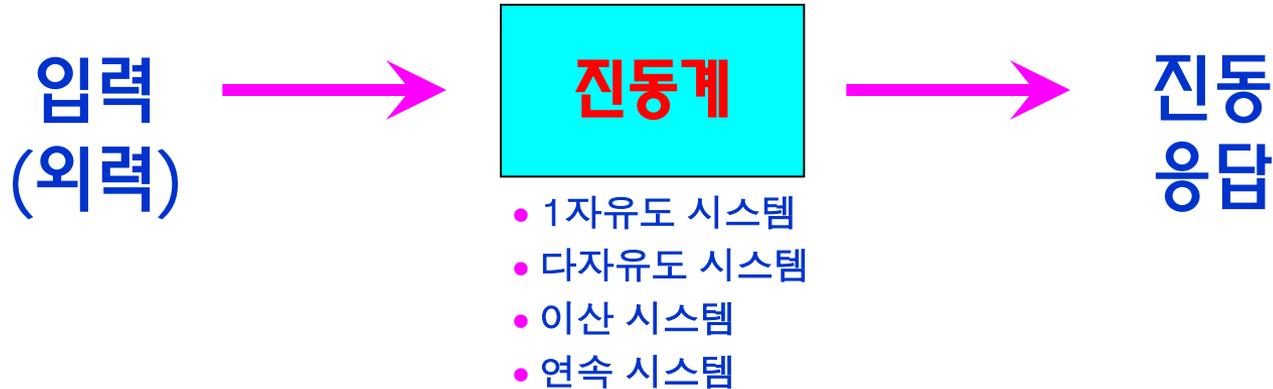


자동차용 와이퍼의 stick slip의 흔적

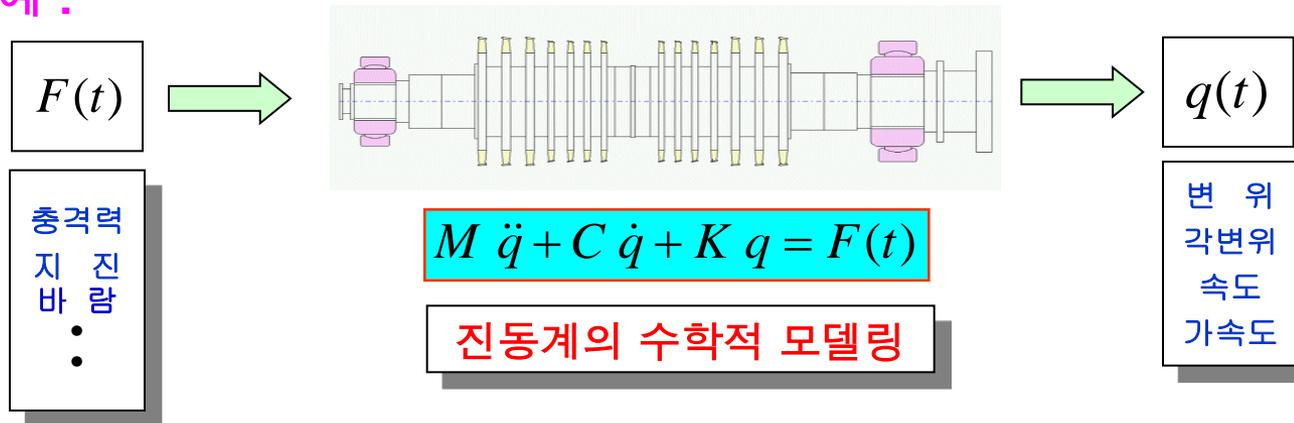
힘과 진동의 관계 : 입력(Input)과 출력(Output)

• 진동계(vibrating system) :

입력이 동적인 힘이고, 출력이 진동으로 나타나는 시스템



예 :

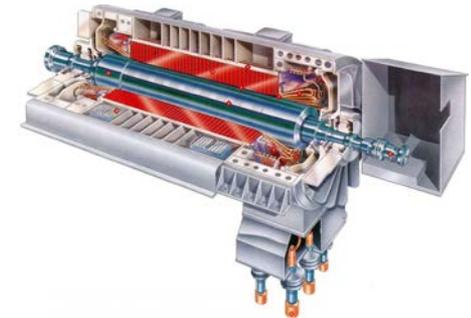


외력의 작용 : 회전기계의 진동(Machinery Vibration)

- **가전 제품** : 테이프 레코더, 전기면도기, 전동공구, 선풍기, 환 등 전동기(motor)
- **산업용 기계** : 증기터빈, 가스 터빈, 압축기, 송풍기, 펌프, 발전기 등
- 회전기계에서 발생하는 진동 외력으로 가장 일반적인 것은 회전체에 존재하는 **질량 불평형**에 의해 발생하는 **휘돌림 진동**(whirling vibration)
- 이 진동은 진동수가 회전수와 일치하고, 진동하는 모습은 회전하는 면내에서 휘돌림 운동을 하고, 일반적으로 전달되어 가는 도중의 구조 특성에 의해 어떤 특정 방향의 진동이 크게 되는 경우가 많음



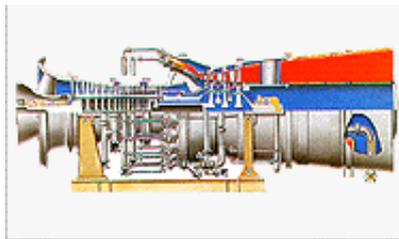
디젤엔진



발전기



증기 터빈



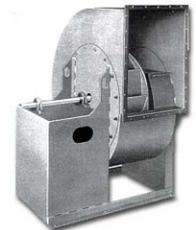
가스 터빈



압축기



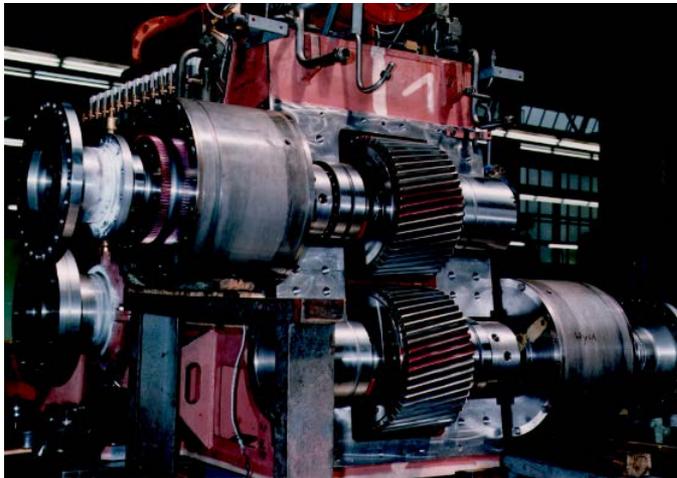
펌프/전동기



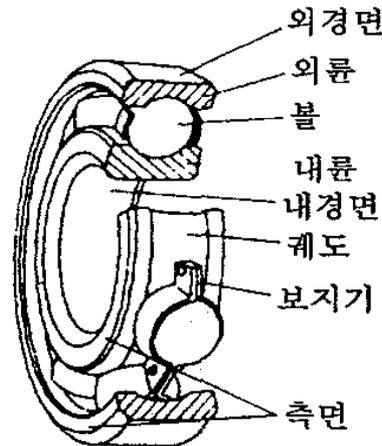
송풍기

입력의 작용 : 회전체의 진동

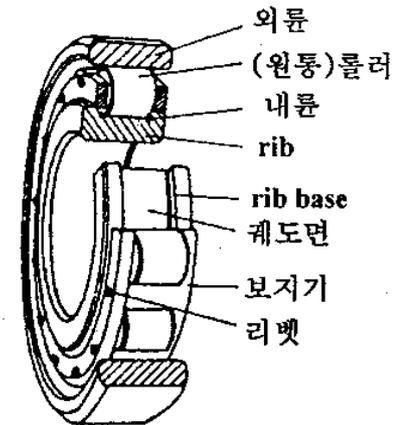
- 회전기계에서 발생하는 진동에는 이 외에 **볼 베어링**에서 발생하는 진동이나 **임펠러**나 **기어(gear)**등에 기인하는 진동
- 볼 베어링에 의한 진동외력은 볼 수나 볼의 이동속도에 의해 결정되는 많은 진동수 성분의 진동이 있고, 발생 진동수는 공식으로 추정이 가능하나 진폭의 절대치는 예측 불가
- 팬이나 펌프 등의 임펠러 및 기어의 진동 외력으로서 임펠러의 날개 수(Z), 기어의 이 수(Z)와 회전수(N)의 곱인 진동수(ZN)와 그 $n(=1, 2, \dots)$ 배인 진동수의 진동이 강하게 발생



기어 장치



볼 베어링



롤러 베어링