



## 2주차 결정론의 종말

3교시 결정론의 종말

True or False!

1. 마찰력의 방향은 운동방향에 반대이다.

☐ O ☒ X

2. 접촉 면적이 넓어질 수록 마찰력도 커진다.

☐ O ☒ X

3. 중력은 질량이 있는 물체 사이에 작용한다.

☐ O ☒ X

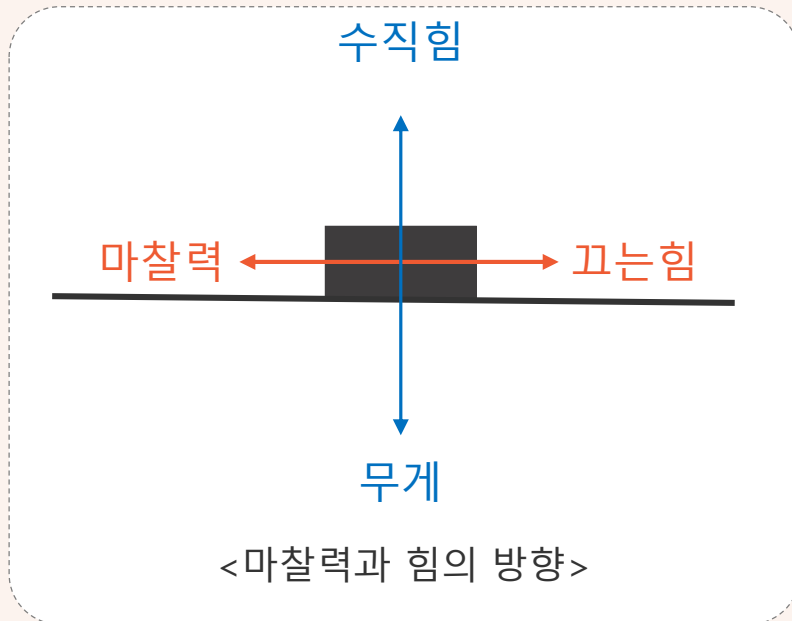
이번 시간 수업이 끝나면 정답을 알게 될 거예요!

# 1. 마찰력(슬림 힘)

✎ 마찰력은 다른 물체와 접촉한 물체가 움직이려고 하거나, 움직이고 있을 때 나타나는 힘입니다.

정지 마찰력이란 : 물체가 움직이려고 하지만 움직이지 않고 ( )한 상태에서 작용하는 마찰력

운동 마찰력이란 : 물체가 미끄러지고 있는 상태에서 작용하는 마찰력



왼쪽 그림과 같이 마찰력의 크기는 ( )에 비례합니다.  
물체가 운동하고 있을 때 비례상수를 운동마찰계수라 합니다.

$$\text{운동 마찰력} = (\text{운동 마찰계수})(\text{수직힘})$$

물체가 움직이기 직전에 물체에 작용하는 정지 마찰력을  
**최대 정지 마찰력**이라 합니다.

여러분이 큰 물체를 밀 때, 힘을 점점 크게 가하면 어느 순간 물체가  
밀리게 됩니다. 바로 물체가 밀리기 직전에 작용하는 마찰력이 최대  
정지 마찰력입니다.

# 1. 마찰력(슬림 힘)

그런데 일단 물체가 밀리면 최대 정지 마찰력보다 작은 힘으로 물체를 밀어도 물체가 계속 밀립니다.

즉, 운동 마찰력은 최대 정지 마찰력보다 항상 작거나 같습니다.

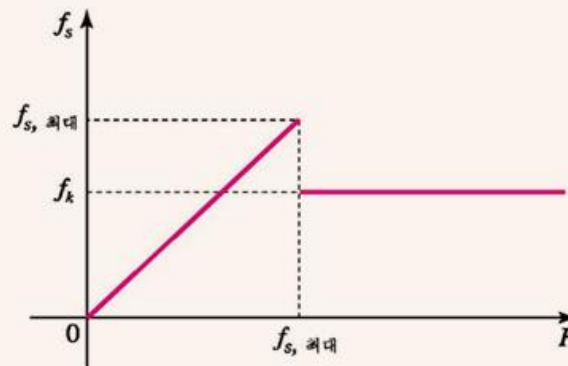
일반적으로 최대 정지 마찰력의 크기는

$$\text{최대 정지 마찰력} = (\text{정지 마찰계수})(\text{수직힘})$$

물체가 움직일 때 운동 마찰력은 물체의 운동 방향과 반대 방향을 향합니다. 마찰계수는 두 마찰면의 성질에 의존합니다. 물체의 두 면이 접촉하여 발생하는 마찰력을 보통 **마른 마찰력**이라 합니다.

## • 마찰 계수의 특징

- 🖋 두 물체의 접촉 면적에 ( )하다.
- 🖋 두 물체의 속도가 크지 않으면 두 물체의 속력에 무관하다.
- 🖋 단위가 없다.



### ✏️ 접촉면의 마찰계수

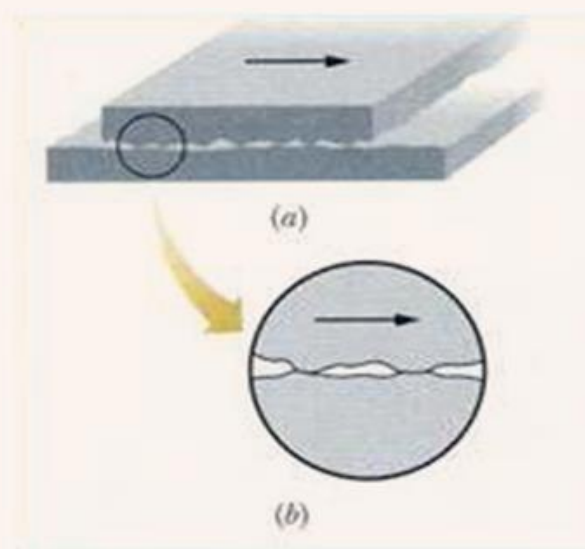
: 마찰계수는 두 접촉면의 물리적 성질에 의존한다.

#### • 정지 마찰력과 정지 마찰계수:

- ☞ 건조한 콘크리트에서 고무로 된 신발이 접촉할 때 마찰 계수는 거의 1이므로 마찰력은 몸무게와 같다.
- ☞ 따라서 콘크리트에서 잘 미끄러지지 않는다.
- ☞ 반대로 얼음이나 기름이 칠해져 있는 면은 ( )가 매우 작으므로 쉽게 미끄러진다.

물질	정지마찰계수
철 위의 철	0.15
마른 콘크리트 위의 고무타이어	1.00
젖은 콘크리트 위의 고무타이어	0.7
얼음 위의 철	0.03
힘줄(tendon)과 건초(sheath)	0.013
건강한 관절	0.003

[표 2.1] 여러 접촉면의 정지 마찰계수



# 1. 마찰력(솔림 힘)

## 물, 기름, 공기 속에서 움직일 때도 마찰력이 존재하나요?

네, 존재합니다.

물체가 유체(물, 기름, 공기 등)속에서 움직일 때도 마찰력이 존재합니다.

이 때 작용하는 마찰력을 **속 마찰력**이라 부릅니다.

보통 속 마찰력의 크기는 물체의 속도에 비례합니다.

유체에서 물체의 속도가 커지면 속 마찰력은 속도에 따라 복잡하게 변합니다.



유체와 마찰력 때문에 물체가 낙하하는 동안 **끝 속도(종단속도, terminal velocity)**가 생기게 됩니다. 낙하산을 펴고 떨어지면 처음에는 속도가 증가하지만, 어느 속력에 도달하면 더 이상 속도가 증가하지 않고 일정한 속력으로 떨어집니다. 속력이 끝속도에 도달하면 물체에 작용하는 합력은 ( )입니다. 이때 아래로 작용하는 중력과 위로 작용하는 공기마찰력이 서로 상쇄됩니다. 만약 끝 속력이 없다면 낙하산은 무용지물이 될 것입니다. 마찰력이 생기는 궁극적인 이유는 접촉면에서 두 물체 사이에 작용하는 전기적인 상호작용 때문입니다.



# 1. 마찰력(솔림 힘)

인간은 왜 빗방울에 맞아도 별 탈이 없는 물렁물렁한 피부를 갖게 되었는가?



공기 마찰이 없다면 빗방울이 지상에 떨어지면서 작용하는 충격력이 매우 큼니다. 따라서 이러한 큰 충격력을 견디기 위해서 생물은 더 두꺼운 피부를 가져야 할 것입니다. 그러나 지구의 공기 때문에 빗방울은 속마찰력을 받고 빗방울의 최대 속도는 기껏해야 끝속도입니다.

따라서 지구상의 생명체는 끝속도 정도의 빗방울이 주는 충격력을 견딜 정도의 피부를 갖도록 진화한 것입니다. 더 두꺼운 피부를 갖는 것은 더 많은 자원과 에너지를 낭비하는 것이기 때문에 생명체는 이러한 환경에 최적인 상태로 진화하였는데, 그 모습이 현재 지구상의 우리의 모습입니다.

## 2. 마찰력에 대한 일상생활 예제

### 예제 1)

경주용 자동차 바퀴에는 왜 접지 홈이 없는가?

### 풀이)

자동차 바퀴의 접지 홈은 단지 젖은 도로에서 견인력을 증가시키기 위한 것입니다.

즉, 바퀴 밑의 물이 효과적으로 빠져나가서 바퀴가 도로와 접촉이 잘 되도록 고안한 것입니다.

자동차 경기는 비 오는 날 열리지 않습니다.

따라서 자동차 경주에서 도로에 착 달라붙는 접지 홈이 없는 바퀴를 사용하는 것이 오히려 도로와의 마찰력을 증가시키므로 효과적입니다.





## 2. 마찰력에 대한 일상생활 예제

### 예제 2)

자동차가 빙판 길에서 미끄러질 때 왜 브레이크를 밟으면 안 되는가?

### 풀이)

바퀴가 도로 위를 구를 때, 타이어의 아래 부분이 도로와 접촉하는 동안 도로와 타이어 사이에는 미끄러짐이 없으므로 **정지 마찰력**이 작용합니다. 그러나 브레이크가 걸리면 고무 바퀴가 도로 위를 **미끄러지는 운동 마찰력**이 작용하게 됩니다.

운동마찰계수는 정지마찰계수보다 작으므로, 바퀴가 미끄러지면 바퀴가 굴러갈 때 보다 상대적으로 운전자의 통제 능력이 떨어집니다. 따라서 브레이크를 밟았다 떼었다 하는 동작을 반복하여 바퀴가 미끄러지지 않고 굴러가게 하는 것이 자동차를 통제하는데 더 유리합니다.

미끄러지는 방향으로 핸들 조작



미끄러지는 반대 방향으로 핸들 조작



이것이 ABS(Anti-breaking system)의 원리입니다.

자동차가 미끄러질 때 운동 마찰력이 작용하기 시작하는데, 이 때 미끄러지는 반대방향으로 핸들을 틀면 자동차 바퀴와 미끄러지는 방향 사이의 각도가 커져서 바퀴가 구를 수 없게 되므로 운동 마찰력만이 작용하게 됩니다. 만약 미끄러지는 방향으로 핸들을 틀면 자동차 바퀴가 미끄러지는 방향으로 향하기 때문에 구름이 가능하며 정지 마찰력이 작용합니다. 따라서 큰 마찰력 때문에 자동차 방향을 서서히 안전하게 바꿀 수 있게 됩니다.

## 2. 마찰력에 대한 일상생활 예제

### 예제 3)

얼음 위에서 스케이트를 타는 사람은 왜 잘 미끄러져 나아가는가?

### 풀이)

얼음판 위에서 스케이트는 왜 마찰을 줄어둘게 할까요?

마찰력은 접촉 면적의 크기와 관계가 없기 때문에, '접촉 면적이 줄어들기 때문'이라는 것은 옳은 답이 아닙니다. 널리 알려진 한 가지 설명은 높은 압력이 가해졌을 때 얼음이 녹는다는 "되얼음 효과"입니다. 얇은 스케이트 날에 의해 수막이 형성되어 얼음의 마찰력이 줄어들기 때문에 마찰력이 줄어든다는 설명입니다. 그러나 Ediminston의 계산에 의하면 80kg인 사람의 압력에 의해서 얼음의 녹는점은 단 0.6도 낮아진다고 합니다. 따라서 되얼음 효과는 적합한 설명이 되지 못합니다. 얼음 위에서 스케이팅이 가능한 것은 얼음 표면이 녹아 있기 때문입니다. 실험에 의하면 얼음 위에 형성된 수막의 두께는 0°C에서 40nm이고, 영하 35°C에서 0.5nm 정도입니다.

결국 얼음 위의 마찰력이 줄어드는 주된 이유는 얼음 표면에 형성된 얇은 수막 때문입니다.

## 2) 걸어갈 때 마찰력

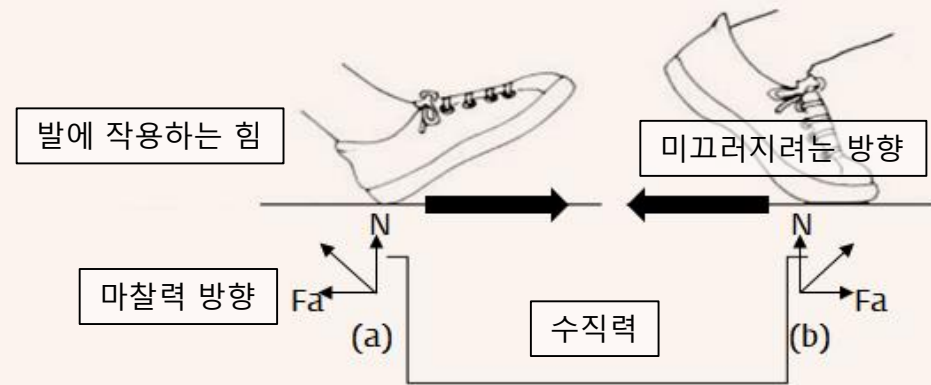
### ✏ 걸어갈 때 발에 작용하는 힘

그림과 같이 걸어갈 때 발에 작용하는 힘을 생각해 보자.

발뒤꿈치가 땅에 닿을 때 발에서 땅으로 힘이 전달된다.

반대로 땅은 작용-반작용의 법칙에 의해서 그림 (a) 와 같이 힘 R을 발에 작용하여 발이 미끄러지지 않게 한다.

이 힘 R은 지면에 수직인 힘인 수직력(수직항력) N과 수평으로 작용하는 마찰력  $F_a$  의 합과 같다.



\* 발이 미끄러지지 않을 마찰계수 = 마찰계수  $> 0.15$

\* 평평한 땅에서 수직력의 크기  $\approx$  몸무게

\* 미끄러지지 않을 최소 마찰력 =  $(0.15) \times (\text{몸무게})$

### 3. 중력

✎ 중력은 질량을 가진 물체 사이에 작용하는 인력입니다.

중력은 뉴턴에 의해서 처음 발견되었습니다. 뉴턴은 사과가 땅에 떨어지는 힘과 달이 지구 주위를 돌게 하는 힘이 같은 힘이라는 사실을 처음 깨달았습니다.

**중력의 크기는 두 물체의 질량에 비례하고, 두 물체의 중심 사이의 거리의 ( )에 반비례 합니다.**

물체 1의 질량을  $m_1$ , 물체 2의 질량을  $m_2$ 라 하고 두 물체의 중심 사이의 거리를  $r$ 이라 하면, 중력(또는 만유인력)의 크기  $F$ 는

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

여기서 **G**는 **중력상수**이다.

이는 영국의 물리학자 캐번디시(Henry Cavendish)가 1789년에 처음으로 측정하였습니다.

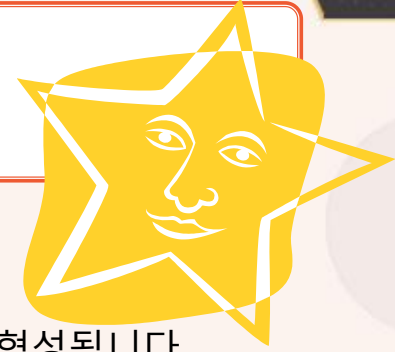
중력은 항상 서로 잡아 당기는 힘이고, 중력의 방향은 두 물체의 중심을 잇는 직선 위에 놓입니다. 중력상수는,

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$$

## 2. 마찰력에 대한 일상생활 예제

### 예제 4)

블랙홀이란 무엇인가?



### 풀이)

블랙홀은 매우 무거운 별의 마지막 상태입니다. 별은 우주 공간의 많은 입자들의 인력에 의해서 형성됩니다. 별이 모여서 형성되면 별의 내부에서 핵융합이 일어납니다.

별의 중심에서 바깥쪽으로 퍼져나가는 전자기 복사력과 안쪽으로 작용하는 중력이 서로 비기면 별은 안정한 상태를 이룹니다.

그러나 핵융합을 위한 연료가 소진되면 바깥쪽으로 작용하는 힘이 약해지므로 별은 다시 수축합니다. 별이 매우 무거워지면 별 내부의 물질들이 중력에 의해서 매우 단단히 압축되어 전자와 양성자가 결합하여 중성자가 되는 **중성자별(neutron star)**이 됩니다.

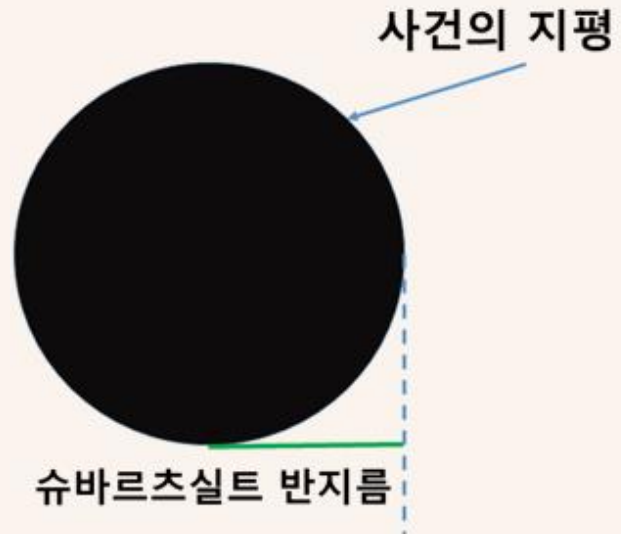
어떤 질량의 범위에서는 중력과 양자역학적 반발력 사이에 평형을 이루게 되지만, 별의 질량이 이 한계를 넘어서면 중력 때문에 계속해서 수축하다가 중심부의 매우 작은 구역에 모이게 됩니다. 이렇게 형성된 별은 밀도가 엄청나게 크고 무겁기 때문에 중력이 매우 커서 빛조차 빠져 나올 수 없게 됩니다. 따라서 별은 완전히 검게 보이기 때문에 **블랙홀(black hole)**이라 부릅니다. 블랙홀의 존재는 블랙홀 근처의 별이나 은하가 블랙홀에 빨려 들어가는 것을 관찰함으로써 확인할 수 있습니다.



✎ 블랙홀의 중력에 의해서 빛이 빠져나올 수 없는 경계를 **사건의 지평(event horizon)**이라 한다.

블랙홀의 반지름은 사건의 지평까지의 거리로 나타낼 수 있으며 그 반지름을 **슈바르츠실트 반지름(Schwarzschild radius)**이라 한다.

$$r_s = 2GM/c^2$$



### 3. 중력

브라질 땅콩(brazil nut)의 반중력 현상

#### 작은 크기의 땅콩과 큰 땅콩이 섞여 있는 통을 흔들면?

커다란 땅콩이 위 쪽으로 올라옵니다. 이러한 현상을 **브라질 땅콩 문제(brazil nut problem)**라 하며 요즘도 통계물리학 분야에서 많이 연구하고 있는 문제 중의 하나입니다.

무거운 땅콩이 가벼운 땅콩보다 위로 올라오는 이유는 무엇일까요?

이 현상을 설명하기 위해서는 통계적인 접근이 필요합니다. 통을 흔들면 땅콩들 사이의 틈이 매 순간 좁아지거나 넓어 집니다. 따라서 땅콩 통을 흔드는 동안 작은 땅콩들은 좁은 구멍으로 떨어져 아래쪽으로 이동합니다.

반면, 커다란 땅콩 크기의 구멍이 생길 가능성이 매우 적으므로, 결국 작은 땅콩들이 아래로 떨어지면서 큰 땅콩은 위쪽으로 올라가게 됩니다.

브라질 땅콩 현상은 땅콩 뿐만 아니라 크기가 다른 물체의 혼합물을 흔들어 줄 때 일어납니다.

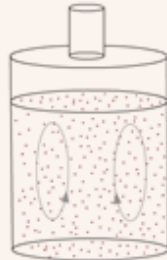
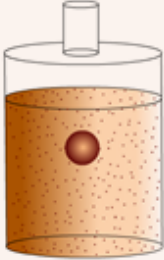


◀ 왼쪽 그림은 브라질 땅콩 현상이 나타나는 모습을 보여줍니다.

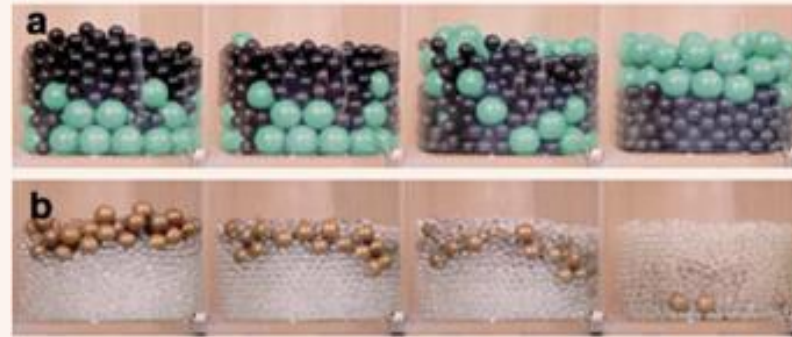
### 3. 중력

#### The Brazil Nut Effect

Shaking induces convection rolls in the system. Particles flow up in the center of the container and down along the walls.



Click on "Play" to continue.



Time

오른쪽 화살표는 시간이 흘러가는 방향입니다. 왼쪽의 처음 상태가 통을 흔들어주면 오른쪽의 나중 상태가 됩니다.

위쪽 그림은 전형적인 브라질 땅콩이 형성되는 모습입니다.

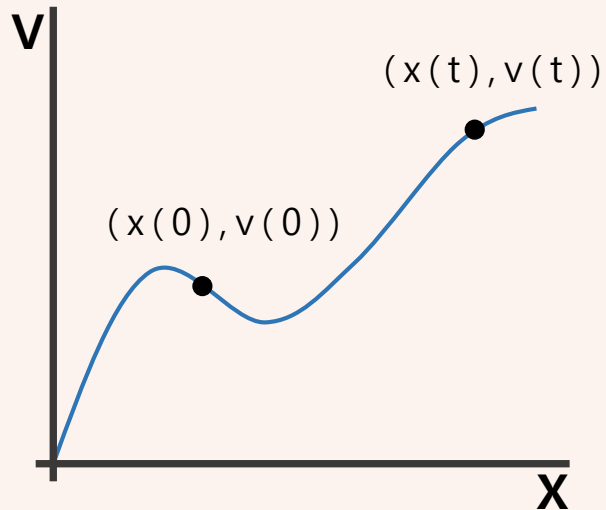
아래 그림은 반대로 통을 흔들어 주면 큰 물체가 아래로 내려가는 현상을 나타내고 있는데, 이것을 **역브라질 땅콩(inverse brazil nut)**현상이라 합니다.

브라질 땅콩과 역브라질 땅콩 현상은 통을 흔들어 주는 진동수와 진폭, 두 물질의 밀도 비 등에 의해서 결정됩니다.

구글에서 "Brazil Nut Effect"를 검색해 보세요. ►

## 4. 결정론의 종말과 나비효과

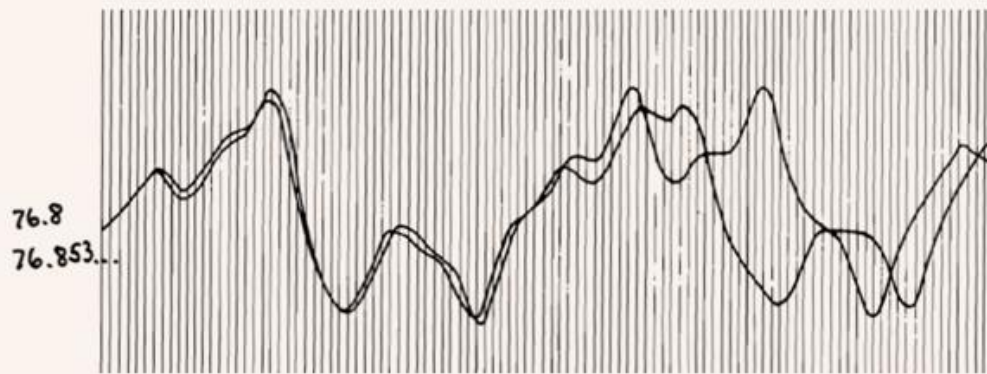
- ✎ 17세기~19세기에 확립된 기계론적 세계관(mechanical theory) 또는 결정론적 세계관(deterministic viewpoint)에 의하면 물체의 초기 조건, 물체에 작용하는 힘을 알고 뉴턴의 운동방정식을 풀 수 있으면 입자의 미래의 운동 상태는 정확히 결정됨



- 라플라스(1749-1827): "우주의 초기조건과 모든 힘을 알고 모든 계산을 할 수 있으면 우주의 미래는 완벽하게 예측할 수 있다."
- 기계론적인 세계관은 20세 중반 컴퓨터가 발전하면서 그 종말을 맞게 된다. 결정론의 종말은 "( )함을 갖는 동력학계"에서 나타난다.

# 나비효과(Butterfly Effect)

- ✎ 로렌츠 방정식(Lorenz Equation): 로렌츠가 발견한 기상현상을 설명하는 간단한 미분정정식.  
이 방정식은 초기조건(initial condition)의 작은 차이가 시간이 조금만 지나도 급격히 커진다.



$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sigma(y - x) \\ \frac{dy}{dt} &= x(\rho - z) - y \\ \frac{dz}{dt} &= xy - \beta z\end{aligned}\quad \begin{aligned}\sigma &= 10 \\ \beta &= 8/3 \\ \rho &= 28\end{aligned}$$

- 비선형 동력학계가 혼돈(chaos)을 나타내는 영역에 있으면 미래의 상태에 초기조건에 극히 민감하다.
- 초기값을 정확히 모르면 예측은 무의미하다.

= **확실성의 종말**

지금까지 확실성의 종말에 대해 알아보았습니다.  
다음시간에는 화석연료의 종말에 대해서 살펴봅시다.