Physics Laboratory

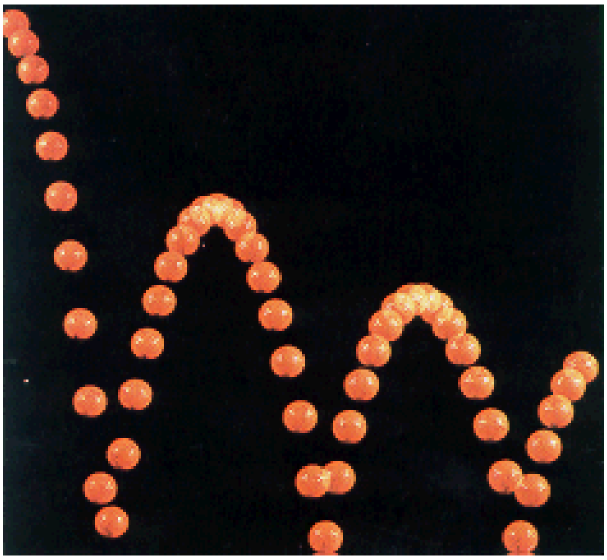
Last modified : 2017-09-11

단 학기 실험 2. 대충돌 실험

실험 목적

물리학은 자연 현상을 이해하는 하나의 길을 우리에게 제시해준다. 하지만 실제의 자연 현상은 너무도 복잡하고 미묘한 부분이 많아 말 그대로 정확한 자연계의 정보를 모두 알아내는 것은 불가능하다.(적어도 현재 까지는 그렇죠?) 하지만 어떤 현상을 이해함에 있어서 모든 정보를 정확하게 얻는 것 보다는 직관을 통해 현상적으로 이해하는 것이 우리에게 더 의미가 있는 경우가 대부분이다. 즉, 여러 물리 법칙들은 일정한 상태를 가정한 뒤에 설명하고 있는데 비록 실제의 계가 전제한 조건들과 정확하게 일치하지는 않는다 하더라도 우리는 이를 통해 개략적으로 이해하고 또 예상할 수도 있는 것이다. 이러한 예로 뉴턴의 운동의 법칙, 운동량 보존법칙 등을 들 수 있다.

이 실험에서는 일차원에서의 충돌 실험을 통하여 충돌에 대한 개략적인 이해의 방법을 살펴보고 이를 통해 운동량 보존의 법칙을 검증해본다. 그리고 그 안에 포함된 뉴턴의 운동법칙에 대해서도 확인해보자.



– Halliday & Resnick 일반물리학 책에서

사진은 주황색 골프공이 바닥에 충돌해서 튀는 모습을 보여주고 있다. 이전보다 낮은 높이로 튀는 것을 불 수 있는 데 이로부터 이 충돌은 비탄성 충돌 임을 확인할 수 있다. 그렇다면 그림에서는 운동량이 보존되지 않는 것일까?

실험 개요

- 뉴턴의 제 1 운동법칙을 확인한다.
  - 본 실험 장치는 정말로 무마찰 실험 장치라 할 수 있는가?
- 글라이더의 충돌에서의 충돌은 탄성충돌인가?
  - 탄성충돌의 경우와 완전 비탄성 충돌의 경우 모두에서 운동량은 보존되는가?
- 충돌하는 물체사이의 질량과 충돌 후의 속력의 변화와는 어떤 관계가 있는가?
- 이로부터 뉴턴의 제 3 운동법칙을 확인할 수 있는가?

실험 방법

실험실에는 이 실험을 위해서 다음과 같은 장치가 준비되어 있다. (괄호 안은 준비된 개수)

CCD CAMERA (1)

송풍기 : AC 220 V, Motor 송풍기 (1)

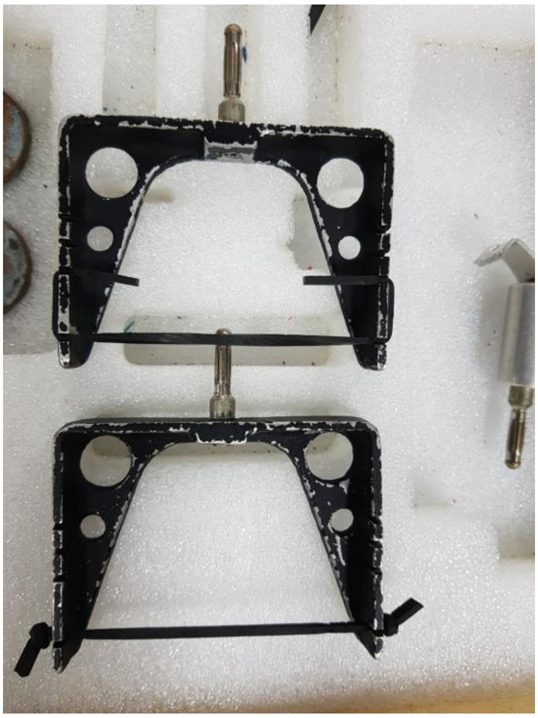
무마찰 운동대 : 알루미늄 사각 파이프, 전장 2100 mm(눈금 길이 2000 mm, 높이 280 mm) (1)

글라이더 : 중량 약 200 g(깃대 포함), 반발대 연결 가능 (2)

부속 상자 (1)

- 추 : 금속제 30 g (4)

· 고무줄 반발대 (3)



· 비탄성 충돌용 연결 부품 set : 바늘과 꽂히는 것 암 수 1 쌍 (1)

· 기타 연결 부품 (3)

공용 저울

이외에도 더 필요한 것이 있으면 미리 담당 조교나 실험 준비실(19동 114호)로 문의하거나 각자가 미리 준비하도록 한다.

구체적인 실험 방법에 제한은 없으나 권장할 만한 표준적인 실험 방법은 다음과 같다.

-실험 방법

① 송풍기의 풍량 조절 손잡이가 'Off' 상태로 두고 전원을 연결한 다음 전원을 킨다. 그 후 조금씩 풍량을 조절하여 글라이더가 충분히 뜰 수 있을 만큼의 풍량을 설정한다.

※ 송풍기의 풍량 조절 손잡이의 전원이 켜진 상태로 전원을 연결하면 퓨즈가 손상될 수 있으니 주의한다.

② 운동대의 높이를 조절하여 글라이더가 움직이지 않도록 수평을 맞춘다. (진동한다면 풍량을 줄인다.) 이때 글라이더의 앞, 뒤 균형이 맞지 않을 경우 실제의 수평과 다르게 맞춰질 수 있으므로 반드시 글라이더의 앞, 뒤의 무게 균형을 맞추고 조절하도록 하자.

③ 두개의 글라이더를 준비하고 하나의 글라이더 양쪽에 충돌용 범퍼를 끼운다. 다른 글라이더에는 완전 탄성 충돌을 위해 충돌할 수 있는 깃대를 끼운다. 송풍기의 전원을 키고 충분한 바람이 나오도록 한다.

④ 프로그램을 이용하여 캡쳐 한다.

- 캡쳐방법 : I-CA 프로그램을 키고 왼쪽 상단에 카메라 버튼을 누른다.
- 밝기와 zoom, 노출, 초점을 조정한 후 파일을 저장할 경로를 설정한다.

- 캡쳐 버튼을 누르고 실험을 진행한다.
- 중지를 누르고 영상을 저장한다.

⑤ 프로그램을 이용하여 분석한다.

- 분석 방법 : I-CA 프로그램에서 왼쪽 상단 빨간색 화살표를 클릭한다.
- 방금 저장한 파일을 불러온다. 재생을 눌러 파일이 맞는지 확인한다.
- 분석할 시작 프레임을 선택하고 다음을 누른다.
- 분석을 마칠 마지막 프레임을 선택하고 다음을 누른다.
- 빠른 분석과 일반 분석 중 선택을 한다. 일반 분석은 분석에 시간이 조금 걸리지만 더 정확하게 할 수 있다.
- 피사체의 개수를 선택하고 test를 눌러 피사체에 해당하는 색깔 스티커를 클릭한다. 다음과 분석 시작을 누른다. (분석에 실패했다면 밝기, zoom, 노출, 초점을 다시 설정하여 프로그램이 스티커를 확실히 인식할 수 있도록 해준다)
- y좌표가 일정 한지 확인을 한다.(일정하지 않다면 다시 운동대의 위치를 바꿔서 일정한 y좌표를 설정하도록 한다)
- 그래프 보기를 클릭한 후 T-X 그래프를 누르고 분석하고 싶은 피사체를 설정한 후 확인을 누른 다음 그래프의 형태가 1차 선형 그래프임을 확인하고 저장을 한 뒤 닫기를 누른다.
- 저장을 누르면 실험 데이터를 텍스트 파일로 저장할 수 있다. 엑셀로 이동시켜 기울기를 구해보자.

⑥ 완전 비탄성 충돌인 경우를 실험하기 위해 비탄성 충돌용 범퍼를 글라이더에 끼워 다시 실험해본다. 그리고 충돌용 범퍼의 충돌계수를 구하기 위해 하나의 글라이더를 이용하여 다시 실험해본다. 또한 무게추를 글라이더에 장착하여 실험을 진행해본다.

⑦ 위의 캡쳐 방법과 분석 방법을 이용하여 다시 분석을 한다.

(a) 비탄성 충돌, 탄성 충돌의 경우 운동량과 에너지는 보존되는가? 보존되지 않는다면 그 이유는 뭘까?

(b) 글라이더의 무게가 바뀌는 경우 운동량과 에너지는 보존되는가? 보존되지 않는다면 그 이유는 뭘까?

(c) 한 개의 글라이더에 충돌용 범퍼를 끼워 실험을 했을 때 반발 계수는 몇인가?

(d) c에서 반발 계수를 구했다. 이를 통해 충돌용 범퍼를 이용한 충돌은 완전 탄성충돌인지 탄성충돌인지 구분하고 그 이유를 써보자.

(e) 실험에서 오차가 발생하였다면 얼마만큼 발생했는지 써보자. 오차를 줄일 수 있는 방법에는 어떤 것들이 있을까?

(f) 이로써 뉴턴의 제3 법칙을 확인했다고 할 수 있는가? 이유와 함께 서술해보자.

배경 이론

질점계의 총 운동량은 계를 구성하는 알갱이들 사이에 상호 작용이 있든 없든, 또 그 상호작용이 의존적이든 아니든 관계없이 그 계에 바깥힘이 미치지만 않는다면 보존되는 중요한 역학적인 양이다. 바깥힘이 작용하면 계의 총 운동량은 변화되며, 이것의 시간적 변화율은 계에 작용하는 바깥힘의 합과 같다. 이에 따라 뉴턴의 제 2법칙은 계의 총 운동량을 써서 다른 말로 표현할 수 있으며, 이를 활용하여 질점계 내의 알갱이들의 충돌 현상 및 질량이 변화하는 물체들의 운동 등을 용이하게 기술할 수 있게 된다.

질량 m, 속도 **v**를 지닌 질점의 운동량 **p**는

$$\boldsymbol{p} \equiv m\boldsymbol{v} \tag{1}$$

로 정의된다. 질량 m이 상수이면 **p**의 시간적 변화율은

$$\frac{d\boldsymbol{p}}{dt} = \mathrm{m}\frac{d\boldsymbol{v}}{dt} \tag{2}$$

이며, 질점에 대한 운동의 제 2법칙이

$$\boldsymbol{F} = \frac{d\boldsymbol{p}}{dt} \tag{3}$$

로 표현된다. 즉, 한 물체의 운동량의 시간적 변화율은 그 물체에 작용하는 합력과 같고, 그 방향은 합력의 방향과 같다. (3)으로 표현된 운동의 법칙은 질량이 변하는 경우에도 그대로 적용할 수 있는 일반적인 표현이다. 그러나 여기서는 특별히 언급하지 않고 질량이 일정한 경우에 대해서만 생각하자.

여러 개의 알갱이로 이루어진 질점계의 운동량 P는 각 질점의 운동량 p_1, p_2, …의 벡터합

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{p}_1 + \boldsymbol{p}_2 + \cdots = \sum \boldsymbol{p}_i$$

$$= m_1\boldsymbol{v}_1 + m_2\boldsymbol{v}_2 + \cdots = \sum m_i\boldsymbol{v}_i \tag{4}$$

로 정의된다. P의 시간에 대한 변화율을 취하고 각 질점에 식 (3)을 적용하면

$$\frac{d\boldsymbol{P}}{dt} = \frac{d\boldsymbol{p}_1}{dt} + \frac{d\boldsymbol{p}_2}{dt} + \cdots = \sum \frac{d\boldsymbol{p}_i}{dt}$$

$$= \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 + \cdots = \sum \boldsymbol{F}_i$$

가 된다. 여기서 합력 $\sum F_i$ 가운데 계를 구성하는 알갱이들 상호간의 주고받는 힘은 뉴

턴의 제 3법칙에 의하여 상쇄되고 바깥힘 F^e만이 남게 되므로

$$\boldsymbol{F^e} = \frac{d\boldsymbol{p}}{dt} \tag{5}$$

의 관계가 성립된다. 이것은 식 (3)의 질점계에 대한 일반화이다. 한편, 질량 중심의 정의를 사용하여 식 (4)를 다시 쓰면

$$\boldsymbol{P} = \frac{d}{dt}\sum m_i \boldsymbol{r}_i = M\frac{d\boldsymbol{R}}{dt} = M\boldsymbol{V} \tag{6}$$

임을 알 수 있다. 즉, 질점계의 총 운동량은 계의 총 질량 M에 질량 중심의 속도 V를 곱한 것과 같다.

주어진 질점계에 바깥힘이 작용하지 않는다면 식 (5)에서

$$\frac{d\boldsymbol{p}}{dt} = 0$$

즉,

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{p}_1 + \boldsymbol{p}_2 + \cdots = \text{상수 벡터} \tag{7}$$

가 된다. 따라서, 주어진 계에 작용하는 바깥힘의 합이 0이 되면 주어진 질점계의 총 운동량은 보존된다. 이것은 주어진 계의 한 부분의 운동량이 증가하면 그에 상응하는 운동량의 감소가 다른 부분에서 일어나야 함을 의미한다. 계에 미치는 외부적인 힘만이 총 운동량의 변화를 가져올 수 있다. 이 운동량 보존의 법칙은 뉴턴의 제 1법칙의 일반화된 형태라고 할 수 있는 것으로서 수많은 현상에서 확인된 매우 중요한 물리 법칙의 하나이다.

지금 질량 m_1, m_2인 두 알갱이로 이루어진, 바깥힘이 작용하지 않는 고립계(isolated system)를 생각해 보자. 바깥힘이 작용하지 않으므로 총 운동량

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{p}_1 + \boldsymbol{p}_2 = m_1\boldsymbol{v}_1 + m_2\boldsymbol{v}_2 \tag{8}$$

는 시간에 관계없이 일정하게 유지된다. 그러나 두 알갱이 사이에 상호작용이 있을 경우

각 알갱이의 운동량은 시간에 따라 변할 수 있으며, 한 알갱이의 운동량의 증가는 다른 알갱이의 운동량의 감소를 의미하게 된다. 즉, $\Delta p_1 + \Delta p_2 = 0$ 또는 $\Delta p_1 = -\Delta p_2$인 관계를 만족한다. 알갱이들의 운동량의 이러한 변화가 미소 시간 dt 사이에 일어난다면 그 시간에 대한 변화율은

$$\frac{d\boldsymbol{p}_1}{dt} = -\frac{d\boldsymbol{p}_2}{dt} \tag{9}$$

로 될 것이다. 그런데 알갱이의 운동량의 시간 변화율은 그 알갱이에 작용하는 힘이므로 식 (9)는

$$\boldsymbol{F}_1 = -\boldsymbol{F}_2 \tag{10}$$

로 되는데, $\mathbf{F}_1$은 질량 m_2의 물체가 질량 m_1의 물체에 작용하는 힘이고, $\mathbf{F}_2$는 질량 m_1의 물체가 질량 m_2의 물체에 작용하는 힘이므로 식 (10)은 바로 뉴턴의 운동의 제 3법칙을 뜻한다. 즉, 임의의 계에 대한 운동량 보존 법칙 속에는 이미 뉴턴의 제 3법칙이 그 안에 함축되어 있음을 확인할 수 있다.

한편, 뉴턴의 제 3법칙은 공간적으로 분리되어 있는 알갱이와 알갱이 사이에는 성립하지 않는 경우도 있다. 그렇다면 이 경우 운동량 보존 법칙이 성립하지 않는 것인가? 알려진 바에 의하면, 운동량 보존법칙은 아직 하나의 예외도 없이 성립되는 자연계의 가장 기본적인 법칙 가운데 하나이다. 따라서, 만일 위의 두 알갱이 사이의 힘이 뉴턴의 제 3법칙을 만족하지 않는 것이라면, 이 계는 두 알갱이만으로 이루어진 것으로 볼 수 없고, 이들 사이의 상호작용을 매개하는 마당(field)이 개재된 것으로 해석되며, 이 매개하는 마당까지 합하여 생각할 때 계의 운동량은 여전히 보존되는 것이다.

일직선 위에서 운동하는 두 물체의 충돌을 생각해보자. 물체가 충돌하는 과정에서 바깥힘은 무시되고 충격힘 만이 작용해서 각 물체의 운동 상태가 변화한다고 하자. 질량 m_1, m_2인 두 물체의 충돌 전의 속도를 u_1, u_2, 충돌 후의 속도를 v_1, v_2라 하면 충돌과정에서 운동량은 보존되므로

$$m_1\boldsymbol{u}_{1+}m_2\boldsymbol{u}_2 = m_1\boldsymbol{v}_1 + m_2\boldsymbol{v}_2 \tag{11}$$

가 성립한다. 한편, 충돌 전후에 운동에너지는 일반적으로 달라질 수 있다. 그러나 만일 충돌 전후에 운동에너지가 보존되어

$$\frac{1}{2}m_1\boldsymbol{u}_1{}^2 + \frac{1}{2}m_1\boldsymbol{u}_1{}^2 = \frac{1}{2}m_1\boldsymbol{v}_1{}^2 + \frac{1}{2}m_1\boldsymbol{v}_1{}^2 \tag{12}$$

의 관계가 성립한다면 우리는 이러한 충돌을 **탄성충돌(튐성 부딪침 ; elastic collision)**이라 한다. 이제 이 충돌이 탄성충돌이라면 식 (11), (12)로부터

$$\boldsymbol{v}_2 - \boldsymbol{v}_1 = -(\boldsymbol{u}_2 - \boldsymbol{u}_1) \tag{13}$$

인 관계가 얻어진다. 여기서 보는 바와 같이, 1차원 탄성충돌에서는 충돌 전후에 두 물체의 상대속도의 크기가 같고 그 부호가 반대로 된다. 이와 달리, 충돌 후의 물체의 운동에너지가 감소하는 경우 이를 **비탄성충돌(엇튐성 부딪침 ; inelastic collision)**이라 하며, 이때는 $|v_2 - v_1| < |u_2 - u_1|$ 의 관계가 성립한다. 여기서 만일 **되튐계수(반발계수 ; coefficient of restitution)** e를

$$\mathbf{e} \equiv -\frac{\boldsymbol{v}_1 - \boldsymbol{v}_2}{\boldsymbol{u}_1 - \boldsymbol{u}_2} \tag{14}$$

로 정의하면 되튐계수 e는 물체의 탄성도를 나타내게 된다. 즉, $e = 1$이면 식 (13)의 경우로 되어 탄성 충돌을 의미하고 $e = 0$이면 충돌 후 $v_2 - v_1 = 0$, 즉 두 물체는 한 덩어리가 되는 완전 비탄성 충돌을 의미하며, $0 < e < 1$ 에서는 $|v_2 - v_1| < |u_1 - u_2|$ 가 되는 일반적인 비탄성 충돌이 일어난다.

참고사항

- 물체의 속력 측정 방법 - 빛살문(photogate) 검출기
- 측정 데이터 처리 방법
- 아이작 뉴턴 - 정원에서 만유인력을
- 갈릴레오 갈릴레이 - 뉴턴의 길을 닦은 실험물리학의 아버지
- 공기의 쓸림이 낙하 운동에 미치는 영향