



# Physics Laboratory

*Last modified : 2015-08-31*

## 실험 1-1A. 뉴턴의 사과는 어떻게 떨어졌는가?

### 실험 목적

우리가 관측할 수 있는 계의 운동을 설명하기 위해 뉴턴은 힘이라는 개념을 도입했다. 오늘날 자연계에는 기본적으로 중력, 전자기력, 강력, 약력의 4가지 종류의 힘이 존재한다고 알려져 있는데, 이 가운데 이 실험과 가장 관련성이 큰 것은 중력이다. 중력은 그 힘이 미치는 범위가 매우 넓기 때문에 일상생활에서 느끼는 많은 운동의 원인이 된다.

이 실험은 중력에 어떠한 기본적인 규칙이 있는지 확인하는 것이 목적이다. 힘이 작용하는 두 대상을 지구와 물체로 생각하면, 중력에 의해 물체는 지구 중심방향으로 힘을 받게 된다. 실험실의 관측자에게는 이것이 지면으로 낙하하는 것처럼 보이는데, 이 운동을 분석해보면 어떠한 물리량에 일정한 규칙이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 그러한 규칙이 나타나는 것은 뉴턴역학의 기본적인 이론에 의해 뒷받침된다.

### 실험 개요

이 실험에서 확인하고자 하는 것은 지구의 중력에 의해 낙하하는 물체가 항상 일정한 가속도를 가지고 운동한다는 것이다. 측정의 편의를 위해 낙하하는 물체는 형광종이가

붙어 있는 구슬추&자 를 이용하며, 이 추&자를 이용하여 자유낙하 하는 모습을 카메라로 담게된다..

추가로 실험조건을 변경시켰을 때 낙하하는 물체의 운동은 어떻게 달라지는지 확인해 볼 수 있다. 이를 위해 준비된 실험장치로 두 가지 실험을 더 해볼 수 있는데, 첫째는 추를 낙하시켜보는 것이고 둘째는 헬륨풍선을 추에 매달아 낙하시켜보는 것이다.

★ 실험이 되지 않을 때는 1차적으로 실험장비의 연결상태를 확인하자.

## 실험 방법

실험실에는 이 실험을 위해서 다음과 같은 장치가 준비되어 있다.

CCD CAMERA (1) 컴퓨터 (1) 1 m 자 (1) 추 (40 g, 1) 공기를 채운 풍선 (1) 헬륨을 채운 풍선 (1) 실타래 (1, 공용) 칼 (1, 공용)

이외에도 더 필요한 것이 있으면 미리 담당 조교나 실험 준비실로 문의하거나 각자가 미리 준비하도록 한다.

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

### 실험 1. 낙하하는 물체의 중력가속도 측정

a) 실험장비(Camera)의 연결상태를 확인하고 컴퓨터의 I-CA프로그램을 실행한다.

b) camera의 기본 세팅을 다음과 같이 한다.

c) \* Tip. I-CA 사용시 유의사항

1. 밝기나 노출 그리고 초점은 모두 수동으로 설정한다. 자동을 쓰지 않는 이유는 자동을 쓰면 촬영도중 초점을 변경하거나 밝기를 변경하면서 투사체가 화면에 잘 잡히지 않기 때문이다.

2. Zoom을 많이 하지 않는다. 마찬가지로 zoom기능을 많이 사용하면 화면에 투사체가 잘 잡히지 않기 때문에 쓰는 것을 자제한다. 가까이서 찍고 싶다면 카메라 자체를 앞뒤로 움직여가면서 최적의 상태를 조성한다. (zoom 기능은 한 칸 이상은 쓰지 않는 것을 권장한다.)

3. 프로그램 내에서 좌표계의 비틀어짐을 보정할 수 있지만 최대한 카메라를 잘 조정해 수직, 수평을 맞추도록 한다.

4. 마지막으로, I-CA프로그램에서 화면캡처한 동영상파일은 분석하지 않으면 실험이 다 끝났을 때 Data가 없는 것이나 다름없다. I-CA프로그램이 없다면 분석할 수 없으니, 꼭

실험도중에 분석을 해가면서 실험하길 당부한다. (조교의 경험으로 처음 실험할 경우 시간이 많이 걸리기 때문에 실험 반 당 한 조씩은 꼭 이런 문제를 일으키곤 했으니 특별히 유의한다.)

d) 화면 캡처 방법. 화면 캡처를 누르고 캡처가 다되면 동영상을 저장한다. **동영상 2 확인**

e) 카메라 세팅이 끝나면 기준자를 운동면에 수직하게 놓고 화면을 캡처한다. **동영상 3 확인**

f) 기준자를 캡처한 영상을 좌표계 설정을 위해 메뉴에서 좌표계 설정을 클릭하고 좌표계를 설정 해준다. 이때 화면상의 가로와 세로가 비스듬한 경우 x축과 y축을 다시 알맞게 설정 해준다. **동영상 4 확인**

g) 이제 구슬을 적당한 높이에서 떨어뜨리면서 화면캡처를 통해서 녹화한다.

h) 캡처한 파일을 메뉴/분석을 통하여 불러와 다음과 같은 방법으로 분석한다. **동영상 5 확인**

i) 분석 방법은 다음과 같다. 1. 분석할 시작 프레임 부분 설정. 2. 분석할 마지막 프레임 부분 설정. 3. 분석할 대상 선택. 4. 분석시작. ★ 간혹 분석 중간에 대상체를 못찾을 경우 직접 대상체를 찾아 선택해준다.

j) 분석이 끝나면 Excel 프로그램을 통해 실험이 잘 되었는지 간단하게 확인하고 중력 가속도도 구해본다.(구하지 않고 실험을 할 경우 실험이 잘 못 되었는지 확인하지 못한 채로 계속 오류를 범할 수 있다.

k) 동일 실험을 여러번 반복하여 해본다.

## 실험 2. 낙하하는 물체의 질량변화에 따른 중력가속도의 변화 여부

a) 실험실에 준비된 실을 이용하여 자와 추를 연결한다.

b) 실험 1의 과정을 반복한다.

☞ 실험 1의 결과와 비교했을 때 어떠한가?

## 실험 3. 낙하하는 물체에 부력이 작용했을 때의 운동 변화 측정

a) 공기가 들어있는 풍선과 헬륨 풍선을 준비한다.

★ 공기가 들어있는 풍선을 준비하는 이유는 풍선 자체에 의한 마찰력을 알아보기 위한 대조군이다. 실험을 통해 풍선을 매달았을 경우 마찰력의 크기가 얼마나 되는지 확인해 보자. 이는 중력가속도가 얼마나 변화했는가를 통해 알아낼 수 있다.

☞ 공기가 들어있는 풍선과 헬륨 풍선의 크기는 왜 같아야 하는가?

☞ 헬륨풍선 질량은 어떻게 측정해야 하는가? (He: 4.0026 ref: Principle of Modern chemistry, oxtoby)

b) 각각의 풍선을 실험실에 준비된 실을 이용하여 **추**와 연결한다.

c) 실험 1의 과정을 반복한다.

☞ 실험 1의 결과와 비교했을 때 어떠한가? 이론적으로 부력을 고려하여 운동방정식을 세우면 나타나야 할 가속도를 구할 수 있다. 실험 결과는 이와 일치하는가? 오차가 있다면 그 오차의 크기는 대조군을 통해 알아낸 마찰력과 비교했을 때 어떠한가?

## 배경 이론

### I. 뉴턴의 제 2법칙

물체의 운동 상태를 변화시킬 수 있는 요인을 힘(force)이라고 부르며, 운동 상태의 변화는 가속도로 나타난다. 이 힘과 운동 상태의 변화 즉, 가속도 사이의 관계를 운동법칙(law of motion), 또는 뉴턴(Newton)의 제2법칙이라고 부른다.

뉴턴이 발견한 운동법칙에 의하면 물체에 가해진 힘  $F$  와 힘에 의한 물체의 가속도  $a$  사이에 아래와 같은 비례 관계가 성립한다.

$$F=ma \quad (1)$$

이 때, 비례상수  $m$  이 물체의 (관성)질량이다.

힘  $F$  가 일정한 경우에는 (1)에 따라서 물체의 가속도도 일정하고(물체의 질량이 속도에 무관하게 일정한 경우), 따라서 시간  $t$  에서의 물체의 속도  $v$  는 다음과 같이 주어진다.

$$v=v_0+at, \quad v_0: \text{initial velocity} \quad (2)$$

1차원 운동을 하는 물체가 시간  $t$  동안에 움직인 거리는 식(2)의 적분으로부터 아래 식과 같이 주어진다.

$$h = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \quad (3)$$

실험을 통해 얻어진 위치-시간 그래프 및 속도-시간 그래프는 (2) 및 (3)과 비교해 볼 수 있다. 즉, 시간  $t$  에 따른 낙하 거리  $h$  의 변화를 측정한 결과를 (3)과 비교하면 가속도의 변화를 통해 물체의 운동상태를 파악할 수 있다.

### II. 중력 가속도

실험을 통해 낙하하는 물체는 일정한 가속도를 가진다는 것을 확인할 수 있을 것이다. 이를 뉴턴의 2법칙을 이용하여 뒷받침 할 수 있다.

앞서 자연계에는 기본적으로 4가지의 힘이 존재한다고 했는데 이 가운데 이번 실험과 가장 큰 연관이 있는 힘은 중력이다. 뉴턴은 모든 물체 사이에 서로 잡아당기는 방향의 힘이 존재하며 그 크기는 물체 사이 거리의 제곱에 반비례하고 두 물체의 질량에 각각 비례한다고 주장하였다. 즉, 중력의 크기는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (4)$$

여기서  $G$ 는 비례상수이다. ( $=6.67 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{s}^2\text{kg}$ ) 또한 여기에서 거리  $r$ 은 두 물체의 질량중심 사이의 거리를 의미한다.

이 주장이 성립하는지 여부는 실험에 의해 확인될 수밖에 없으며, 지금까지의 실험실 규모로부터 천체의 운동 등 광대한 범위에 걸친 수많은 관측을 통하여 (4)의 표현이 (아직까지는) 정확한 것으로 받아들여지고 있다.

이 실험에서 물체를 지면 쪽으로 낙하시키는 힘의 정체는 바로 물체와 지구 사이의 중력이며, 지구의 질량이 매우 크기 때문에 물체가 지구 쪽으로 끌려가는 것처럼 보인다. 이제 뉴턴의 2 법칙을 적용해보자. 지표면으로부터 물체까지의 거리가 지구의 반지름에 비해 매우 작은 경우 물체의 운동에 상관없이 (4)에서

$$r = R \quad (R = 6370 \text{ km, 지구의 평균 반지름}) \quad (5)$$

와 같이 근사해도 무방하며, (1)과 (4)를 연결하면 질량이  $M (= 5.98 \times 10^{24} \text{ kg})$ 인 지구의 중력에 의해서 자유 낙하하는 물체의 중력 가속도가  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 으로 물체에 상관없이 일정함을 알 수 있다. 실제로는 지구의 질량 분포가 균일하지 않으며, 구형이 아닐뿐더러 지구의 자전에 따른 영향 등으로 중력 가속도는 위치나 시간에 따라서 다소 변화한다.

### III. 마찰력

플라스틱 자에 공기를 채운 풍선을 매달고 하는 실험의 경우, 그렇지 않은 경우와 비교해 공기의 마찰력이 더해지게 된다. 각각의 실험에 대하여 시간 - 속도 그래프를 그려보면 마찰력의 효과를 확인해볼 수 있다.

### IV. 부력

부력이란, 흐를 수 있다는 성질을 가지는 유체(기체 및 액체)에 대하여, 유체의

압력차이로 인해 생겨나는 힘이다.

유체 안의 어떤 한 점을 중심으로 작은 부피요소  $\Delta V$  를 생각하고, 그 부피 요소 안의 유체의 질량  $\Delta m$  을 측정하면, 그 점에서의 유체의 밀도(density)  $\rho$  는 다음과 같다.

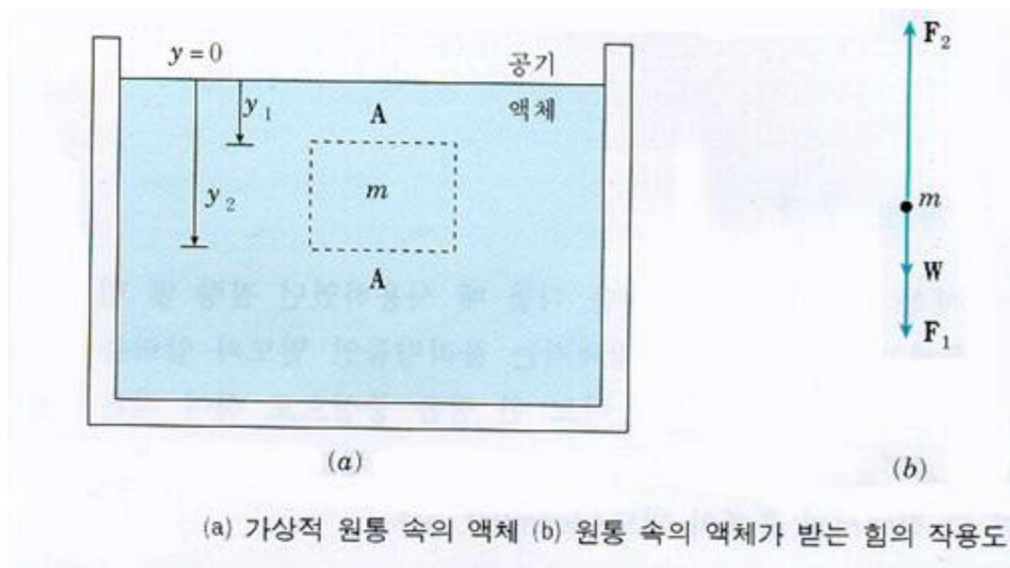
$$\rho = \Delta m / \Delta V \quad (6a)$$

$\Delta V$ 를 유체 전체 부피로 잡으면 (6a)는 그 유체의 평균밀도를 준다.

유체 안의 어느 한 점에서의 압력을 알기 위해서는 그 점에서 넓이  $\Delta A$ 인 면을 생각하고 그 면에 수직으로 작용하는 힘의 크기  $\Delta F$ 를 구하면 된다. 이 경우 압력(pressure)  $p$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$p = \Delta F / \Delta A \quad (6b)$$

(엄밀하게는  $\Delta A$ 가 충분히 작아질 때의 극한값) (6b)에 의해 정의된 압력은 유체 안에서 면의 방향과 상관없이 일정하게 되는데, 이는 압력이 힘의 크기에만 관계되고 방향에 무관한 스칼라량임을 말한다.



위 그림과 같이 통에 담긴 밀도가  $\rho$ 인 액체 내의 압력을 생각해보자. 액체 안에 단면적(cross section)이  $A$ 인 가상적인 원통을 생각하고 그 위 아래 면이 각각  $y=y_1$ 과  $y=y_2$ 에 위치한다고 하자. 아랫면에서 받는 압력  $p_2$ 에 의한 힘 ( $F_2 = p_2 A$ )은 윗방향이며, 윗면에서 받는 압력  $p_1$ 에 의한 힘 ( $F_1 = p_1 A$ )은 아랫방향이다. 그러면, 원통 속의 액체에 작용하는 힘은  $F_1$ ,  $F_2$ 에 더하여 중력( $W = mg = \rho A (y_1 - y_2) g$ )이 작용하여 평형상태를 이루고 있으므로,  $F_2 - F_1 - W = 0$ 이 되어야 한다. 따라서 이들의 관계는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$p_2 = p_1 + \rho g (y_1 - y_2) \quad (6c)$$

$y_1 = 0$  으로 택할 경우 은 액체 표면에서의 압력, 즉 대기압 가 되므로 깊이  $h$  에서의 압력  $p$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$p = p_0 + \rho gh \quad (6d)$$

(6d)에서 알 수 있듯이 어느 점에서의 압력은 그 점의 깊이에만 관계하고 수평위치에는 관계하지 않는다.

위 그림에서 원통 속의 부피  $V$ 인 액체는 주위의 액체로부터 위 방향으로  $F_2$ , 아랫 방향으로  $F_1$ 의 힘을 받게 되므로 그 알짜힘은 크기가  $F_2 - F_1 = (p_2 - p_1)A = \rho g A(y_1 - y_2) = \rho g V$  이고 방향은 위를 향하게 된다. 이러한 힘을 부력이라 하며, 이는 가상적 원통이 아닌 실제의 물체에 대해서도 마찬가지로 작용하게 된다. 다시 말하여, 유체 속의 물체는 잠겨 있는 부분의 부피에 해당하는 유체의 무게만큼 부력을 받게 되는데, 이를 아르키메데스의 원리(Archimedes' principle)라 한다.

유체 속에 잠겨 있는 물체의 밀도를  $\rho$ 라 하면, 그 물체는 크기  $\rho g V$ 인 부력외에 크기  $g V$ 인 중력을 아래 방향으로 받는다. 따라서, 물체의 밀도가 유체의 밀도보다 크면( $\rho_0 > \rho$ ) 중력의 크기가 부력의 크기보다 크므로 물체는 가라앉게 되고, 반대로 물체의 밀도가 유체의 밀도보다 작으면( $\rho_0 < \rho$ ) 물체는 유체 위로 떠오르게 된다.

헬륨 풍선의 경우, 헬륨 풍선 주변을 공기라는 유체가 채우고 있기 때문에, 헬륨 풍선 만큼의 부피와 같은 공기 무게가 헬륨 풍선에 부력으로 작용하게 된다. 공기 풍선과 헬륨 풍선의 실험을 비교하게 될 경우, 풍선 모양이 똑같다고 하면 두 실험에 대해 각각 가속도를 계산하고 그 차이를 부력의 효과로서 확인할 수 있다. 따라서 헬륨 풍선 실험을 통해 부력에 대한 효과만 확인하고 싶다면 마찰력에 의한 효과를 제거해야 하며 이를 위해 헬륨 풍선과 공기 풍선의 크기는 같아야만 한다.