

Conservation of momentum and impulse

일물실1 U분반 20250473 유태영

Abstract

본 실험에서는 운동량 보존과 충격량의 개념을 실험적으로 검증하였다. 탄성 충돌, 완전 비탄성 충돌, 폭발 실험, 충격량 측정 실험을 통해 운동량 보존, 에너지 보존 및 운동량과 충격량의 관계를 분석하였다. 실험 결과, 이상적인 상황에서는 운동량이 보존되어야 하지만, 마찰과 공기 저항 등의 요인으로 인해 일부 운동량이 손실됨을 확인하였다. 특히, 탄성 충돌에서는 평균 2.1%, 비탄성 충돌에서는 6.4%, 폭발 실험에서는 3.4%의 운동량 손실이 발생하였다. 또한, 탄성 충돌 상황에서는 운동에너지도 보존되어야 하지만, 평균 11.2%의 에너지 손실을 확인하였다. 충격량 측정 실험을 통해 운동량의 변화량과 충격량이 같다는 것을 실험적으로 확인하였다.

I. Introduction

본 실험에서는 운동량 보존과 충격량의 개념을 실험적으로 검증하고, 다양한 조건에서의 운동량 변화를 분석한다. 이를 통해 운동량과 충격량의 관계를 보다 명확하게 이해하고, 물리 법칙이 실제 현상에서 어떻게 적용되는지를 탐구하고자 한다.

위 실험 목적을 달성하기 위해 4가지 실험을 구성하여 외력이 작용하지 않을 때 물체가 충돌하는 경우 운동량이 보존됨을 확인하고, 충격량이 운동량의 변화와 같음을 확인하며, 충돌 시간에 따라 충격량이 어떻게 달라지는지를 확인한다.

II. Theoretical Background

II.1. 운동량 보존 법칙

뉴턴의 제 2법칙에 따라, 다음이 성립한다.

$$F_{\text{알짜}} = \frac{d\vec{P}}{dt}$$

이때 $F_{\text{net}}=0$ 인 경우, $dP/dt=0$ 이므로 계의 전체 운동량은 보존된다.

II.2. 반발 계수 및 탄성/비탄성 충돌

반발 계수를 이용하여 충돌 이후 속도 v_1' , v_2' 을 나타내면 아래와 같다.

$$v_1' = \frac{(e+1)m_2v_2 + v_1(m_1 - em_2)}{m_1 + m_2}, v_2' = \frac{(e+1)m_1v_1 + v_2(m_2 - em_1)}{m_1 + m_2}, e = \frac{v_2' - v_1'}{v_1 - v_2}$$

$e=1$ 인 경우를 탄성충돌, $0 < e < 1$ 인 경우를 비탄성 충돌, $e=0$ 인 경우를 완전 비탄성 충돌이라 한다.

완전 비탄성 충돌의 경우 충돌 후 물체가 하나가 되어 운동한다. 이 경우, 충돌 후 속도 v' 은 다음과 같다.

$$v' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

이상적인 상황(마찰력과 공기저항 무시)에서 탄성충돌의 경우에는 보존력만 작용하기 때문에 에너지가 보존되는 반면, 비탄성 충돌의 경우에는 충돌 시 발생하는 열, 소리 등의 에너지 변환이 일어나 에너지가 보존되지 않는다.

II.3. 충격량

충돌 시의 충격량은 다음과 같다. 충돌 시간이 길어질수록 충격력은 약해진다.

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F dt = \int_{p_1}^{p_2} dp = p_2 - p_1 = \Delta p$$

III. Methods

기본적인 설정은 아래와 같다.

- 1) 스마트 카트의 전원을 켜고, 블루투스를 이용해 컴퓨터와 연결한다.
 - 2) 레일을 설치하고 수평을 맞춘다.
 - 3) 스마트 카트의 질량을 측정하고, 스마트 카트를 레일 위에 놓는다.
 - 4) PASCO 프로그램을 실행하여 스마트 카트의 정보가 정확히 측정되는지 확인한다.
- 파란 카트의 질량은 247.1g, 빨간 카트의 질량은 248.5g이며, 올리는 무게추는 각각 253.8g, 253.0g이고, magnetic bumper의 질량은 파란 카트에는 23.5g, 빨간 카트에는 24.0g, 용수철은 5.8g, 고무는 1.9g이다.

III.1. 탄성 충돌

- 1) 카트에 magnetic bumper를 장착하고, 서로 마주보도록 레일 위에 배치한다.
- 2) 컴퓨터를 이용하여 속도를 측정한다.
- 3) 파란 카트를 밀어 빨간 카트와 충돌하게 한다.
- 4) 기록을 멈추고, 빨간 카트에 무게추를 추가한 후 동일한 실험을 반복한다.

III.2. 완전 비탄성 충돌

- 1) 카트에 Velcro bumper를 장착하고, 서로 마주보도록 레일 위에 배치한다.
- 2) 컴퓨터를 이용하여 속도를 측정한다.
- 3) 파란 카트를 밀어 빨간 카트와 충돌하게 한다.
- 4) 기록을 멈추고, 빨간 카트에 무게추를 추가한 후 동일한 실험을 반복한다.

III.3. 폭발

- 1) 두 카트를 서로 반대 방향으로 향하도록 해 붙여 놓는다.
- 2) 컴퓨터를 이용하여 속도를 측정한다.
- 3) Trigger를 눌러 카트가 서로 반대 방향으로 움직이게 한다.
- 4) 기록을 멈추고, 빨간 카트에 무게추를 추가한 후 동일한 실험을 반복한다.
- 5) Trigger 장치의 세기를 두 배로 하여 1~4의 과정을 반복한다.

III.4. 충격량

- 1) 카트에 magnetic bumper를 장착하고, 벽을 향하도록 레일 위에 배치한다.
- 2) 컴퓨터를 이용하여 카트의 속도와 힘을 측정하기 시작한다. 이때, 힘은 1kHz 주파수로 정보를 통신하게 하여 보다 세밀하게 측정한다.
- 3) 카트를 밀어 벽과 충돌시키도록 한다.
- 4) 기록을 멈추고, 카트에 장착된 bumper를 spring bumper와 rubber bumper로 변경하며 같은 실험을 반복한다.

IV. Results

IV.1. 탄성 충돌

빨간 카트에 올린 무게추 수	충돌 전후 운동량 변화 (파란카트, $\text{kg}\cdot\text{m/s}$)	충돌 전후 운동량 변화 (빨간카트, $\text{kg}\cdot\text{m/s}$)
0	$-154.51 \cdot 10^{-3}$	$153.23 \cdot 10^{-3}$
1	$-234.34 \cdot 10^{-3}$	$227.89 \cdot 10^{-3}$
2	$-275.20 \cdot 10^{-3}$	$268.08 \cdot 10^{-3}$

운동량은 각각 0.83%, 2.75%, 2.59% 손실되었다.

빨간 카트에 올린 무게추 수	충돌 전후 운동에너지 변화 (파란카트, J)	충돌 전후 운동에너지 변화 (빨간카트, J)
0	$-44.11 \cdot 10^{-3}$	$43.36 \cdot 10^{-3}$
1	$-56.24 \cdot 10^{-3}$	$49.33 \cdot 10^{-3}$
2	$-57.33 \cdot 10^{-3}$	$46.11 \cdot 10^{-3}$

운동에너지는 각각 1.70%, 12.29%, 19.57% 손실되었다.

IV.2. 완전 비탄성 충돌

빨간 카트에 올린 무게추 수	충돌 전후 운동량 변화 (파란카트, $\text{kg}\cdot\text{m/s}$)	충돌 전후 운동량 변화 (빨간카트, $\text{kg}\cdot\text{m/s}$)
0	$-90.38 \cdot 10^{-3}$	$89.29 \cdot 10^{-3}$
1	$-109.86 \cdot 10^{-3}$	$102.10 \cdot 10^{-3}$
2	$-134.76 \cdot 10^{-3}$	$120.01 \cdot 10^{-3}$

운동량은 각각 1.21%, 7.06%, 10.95% 손실되었다.

IV.3. 폭발

1) Trigger 장전 1단

빨간 카트에 올린 무게추 수	충돌 전후 운동량 변화 (파란카트, kg*m/s)	충돌 전후 운동량 변화 (빨간카트, kg*m/s)
0	$-67.65 * 10^{-3}$	$66.76 * 10^{-3}$
1	$-87.40 * 10^{-3}$	$81.58 * 10^{-3}$
2	$-91.46 * 10^{-3}$	$88.06 * 10^{-3}$

운동량은 각각 1.32%, 6.66%, 3.72% 손실되었다.

2) Trigger 장전 2단

빨간 카트에 올린 무게추 수	충돌 전후 운동량 변화 (파란카트, kg*m/s)	충돌 전후 운동량 변화 (빨간카트, kg*m/s)
0	$-152.62 * 10^{-3}$	$151.60 * 10^{-3}$
1	$-179.95 * 10^{-3}$	$173.15 * 10^{-3}$
2	$-190.77 * 10^{-3}$	$182.36 * 10^{-3}$

운동량은 각각 0.67%, 3.78%, 4.41% 손실되었다.

IV.4. 충격량

빨간 카트에 장착 된 bumper	충돌 전후 F-t 그래프의 면적(N*s)	충돌 전후 운동량 변화 (kg*m/s)
rubber	-0.27	0.27
magnetic	-0.25	0.27
spring	-0.29	0.29

V. Discussion

실험 결과를 통해 운동량 보존 법칙이 실제 환경에서도 상당히 잘 적용되지만, 완전히 보존되지는 않는다는 점을 확인할 수 있었다.

실험 1, 실험 2, 실험 3 모두에서 운동량이 약간 손실되는 것을 확인하였다. 이는 마찰, 공기저항 등의 요인의 영향을 받아 나타난 결과이다.

특히 실험 1은 탄성 충돌 상황이기 이상적인 상황에서는 에너지가 보존되어야 하나, 실제로는 마찰로 인한 열과 소리의 발생으로 에너지가 전환되어 에너지가 보존되지 않는다.

또한, 무게추를 추가한 경우 운동량 및 운동에너지 손실률이 증가하는 현상이 관찰되었다. 이는 질량이 커질수록 마찰 등 외부 요인의 영향을 더 크게 받기 때문으로 해석할 수 있다.

실험 4에서는 대체로 두 계산 방식에서 비슷한 값을 보였으나, magnetic bumper의 경우에는 약간의 차이를 보였다. 이 경우 자석의 자기력으로 인한 오차로 판단된다.

VI. Conclusion

본 실험을 통해 운동량 보존 법칙과 충격량의 개념을 실험적으로 확인하였다. 탄성 충돌, 완전 비탄성 충돌, 폭발 실험에서 운동량이 일정 부분 보존되었으나, 실제 환경에서는 마찰력과 공기 저항 등의 외부 요인으로 인해 일부 운동량이 손실되는 현상을 관찰하였다.

실험 결과, 운동량의 손실률은 탄성 충돌에서 평균 2.1%, 완전 비탄성 충돌에서 6.4%, 폭발 실험에서 3.4%로 나타났다. 또한, 탄성 충돌에서는 운동에너지가 보존되어야 하지만, 평균 11.2%의 에너지 손실이 발생하여 실험 환경의 영향을 받음을 확인하였다. 충격량 측정 실험에서는 운동량의 변화량과 충격량이 일치함을 실험적으로 검증하였다.

충돌 과정에서 발생하는 마찰력, 공기 저항, 소리 및 열 에너지 전환이 운동량 및 에너지 손실의 주요 원인으로 작용하였다. 또한, 무게추를 추가했을 때 운동량 및 운동에너지 손실률이 증가하는 경향을 보였는데, 이는 질량이 커질수록 마찰 등 외부 요인의 영향을 더 크게 받기 때문으로 해석할 수 있다.

향후 연구에서는 마찰력을 최소화할 수 있는 환경을 조성하거나, 고속 카메라를 이용하여 보다 정밀한 속도 측정 기법을 도입하면 더욱 정확한 데이터를 얻을 수 있을 것이다.

VII. References

- [1] Essential University Physics by Richard Wolfson (Pearson Addison Wesley, 4th ed.)
- [2] General Physics Laboratory Manual Ch 2. Conservation of momentum and impulse
- [3] The Feynman Lectures on Physics Vol. I Ch. 9: Newton's Laws of Dynamics
- [4] Newton, I (1729) [Original work published 1686]. The mathematical principles of natural philosophy. Translated by Motte, A. Printed for Benjamin Motte. pp. 1-2.