

실험 중심의 물리 교육 - 알짜기도 물리다.

유인석

시작하는 글

대부분의 사람들은 물리가 어렵고 재미없다고 한다. 그러면서 정말로 그런지 알아볼 생각은 아예 하지 않는다. 왜 이렇게 되었을까? 이 질문에 대한 답은 물리가 정말로 그렇거나, 아니면 무슨 연유로 사람들이 잘못 생각하게 되었기 때문일 터이다. 나는 두 번째 답이 정답일 것이라고 여기면서 첫 번째가 아니라는 것을 여기서 증명해 보이려고 한다.

만약 두 번째 답이 옳다면 무엇이 사람들을 잘못 생각하게 만들었을까? 혹시 중, 고등학교나 대학교에서 물리를 잘못 가르친 때문은 아니었을까? 물리란 사물의 이치를 따지는 공부로 세상 만사에 다 적용된다. 그리고 물리는 실험이나 관측을 통해 실증되는 사실만을 인정한다. 따라서 물리의 시작은 태양계의 운행에 대한 관측이나 피사 사탑에서 자유낙하에 대한 실험이었고, 그 후 많은 사실들이 의도적이거나 혹은 우연한 실험에 의해 알려져 지금과 같은 물리학으로 발전하게 되었다. 물리를 가르칠 때도 이러한 물리의 속성을 잘 살려 실험적인 사실에서 출발하여 그것을 이해하는 방향으로 이론을 세우고, 이론의 예측을 다른 실험으로 검증하는 순서로 한다면 더 많은 사람들이 물리에 가까워질 수 있지 않을까? 지금까지의 물리교육은 이러한 실험과 이론의 상관관계를 쏙 빼고서 대뜸 잘 정리된 이론을 들이밀어 기계적으로 공식을 외우게 함으로써, 물리를 마치 억지로 만들어낸 듯한 문제를 푸는 쓸데없는 도구로 여기게 하거나, 이름난 물리학자들이나 하는 매우 어렵고 딱딱한 학문 정도로 생각하게 만들었다. 결국 물리는 나오는 상관없는 것이고, 이렇게 어렵고 딱딱한 물리를 잘 해서 유명해진 사람들을 이해할 수가 없는 신비로운 대상으로 생각하게끔 되었다. 대학에서의 일반물리교육도 비슷해서 강의와 함께 실험교육이 이루어지지만 이들 사이의 연계가 잘 이루어지지 않아, 강의를 담당하는 교수가 학생들이 무슨 실험을 하는지도 모르는 경우가 태반이고, 학생들도 왜 실험을 해야하는지에 대한 이해가 없이 피동적으로 임하는 경우가 대부분이다. 이런 상황에서 대부분의 학생들이 물리를 싫어하게 되는 것은 어쩌면 당연한 결과일 것이다.

문제의 해법은 의외로 가까이에서 찾을 수 있고 간단할 수도 있다. 우리에게 주어진 문제가 대부분의 사람들이 물리를 어렵고 재미없다고 생각하는 것이라면, 그 해법은 대부분의 사람들에게 물리를 쉽고 재미있게 가르치는 일일 것이다. 그리고 물리의 나무 결(속성)을 따라서 실험에서 시작해서 실험으로 마치는 것이 순리일 것이다. 그러나 소문이 나기 전까지는 내용물이 아무리 좋아도 포장이 형편없으면 소비자의 눈길을 끌 수가 없으므로, 대부분의 사람이 흥미를 느낄만한 대상에서 소재를 찾을 필요가 있다. 여기서는 한 예로서 수년전 모 TV 방송국의 코미디 프로로 인기를 모았던 “알짜기”(사진 1)에^[1] 얽힌 물리 얘기를 소재로 실험 중심의 물리교육을 중, 고등 또는 대학교 차원에서 살펴보고자 한다.^[2]

(정면) 알짜기

알짜기란 어린 시절 누구나 한 두 차례는 해봤음직한 바둑알(또는 장기 알)로 상대방의 알을 쳐서 밀어내는 게임으로, 2000년부터 모 방송국을 통해 인기 코미디언이 유행시킨 다소 장난 같은 게임이다. 이 게임의 승부의 요체는 어떻게 하면 자신의 알은 그대로 유지한 채 상대방의 알을 잘 맞춰 판으로부터 밀어내느냐 하는 것이다. 장난기 섞인 이 게임은 그러나 그 속을 들여다보면 당구처럼 물체들 사이의 충돌현상을 이용하는 것으로 그 자체가 바로 물리덩어리라고 할 수 있다. 사실 이 세상에 물리 아닌 것이 그 무엇이 있으랴? 알짜기를 잘하려면 물리를 잘 알아야 한다는 말이 된다. 또, 달리 표현하자면 알짜기 같은 장난스런 게임조차 물리의 영역에 속하기 때문에 알짜기를



사진 1. 알짜기 게임^[1]

유인석 교수는 미국 Northwestern University 이학박사(1980)로서 Duke University 박사후연구원(1980-82)을 거쳐, 현재 서울대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. (isyu@snu.ac.kr)



사진 2. 알까기 실험 장치.

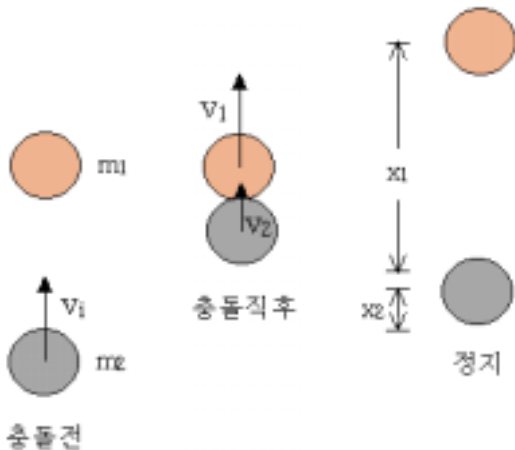


그림 1. 정면 충돌 알까기 실험.

잘 하기 위해서라도 물리를 알아볼 필요가 있다는 말도 된다. 이제 알까기를 해보기로 한다. 보통 알려진 알까기는 바둑판 위에서 희고 검은 바둑알을 써서 두 사람이 대결을 하는 것이지만 바둑알의 생김새가 운동을 불안정하게 하고, 고르지도 않아서 좀 더 나은 알을 쓰도록 한다. 그리고 게임과 달리 알까기에 숨어있는 물리를 알아보려면 정량적인 관측을 필요로 하기 때문에, 바둑판 대신에 촘촘히 선이 그어진 모눈종이를 평평한 곳에 놓고 그 위에서 알까기를 한다. 알로는 쉽게 구할 수 있는 10원 짜리 동전을 사용한다. 또, 알을 통기는 힘의 크기에 따라서 결과가 달라질 것이므로, 이 정량화 된 알까기 실험에서는 사람의 손 대신에 비교적 고른 힘을 가할 수 있는 방법을 쓰기로 한다. 사용할 방법은 용수철이 들어있는 볼펜(막 볼펜)을 이용하여 끝 부분을 눌러 용수철을 압축시킨 다음에 동전에 대고 걸개부분을 살짝 눌러 통기는 것이다.^[3] (사진 2) 처음에는 다소 불편하지만 몇 차례 거듭하면 곧 익숙해져서 매번 통길 때마다 비교적 고르게 통길 수 있다. 동전을 통길 때마다 동전과 볼펜의 끝 사이의 간격을 같게 하는 것이 중요하고, 필요하면 볼펜의 앞부분을 약간 풀어서 용수철이 미치는 힘을 줄일 수 있다.

먼저 가장 간단한 알까기를 해본다. 즉, 그림 1과 같이 두 동전을 일정한 거리(3~5 m)만큼 떨어트려 모눈종이 위에 놓고 위치를 표시한다. 다음 한 동전을 통겨 정면으로 충돌하게끔 한다. 통겨진 동전이 정지한 후 두 동전의 위치를 모눈종이 위

에 표시하여 각각의 움직인 거리를 측정한다. 알까기에서 중요한 것은 자신의 알은 가능하면 가만히 있고 상대방의 알을 많이 움직이게 만들어서 판으로부터 떨어지도록 하는 것이다. 그러기 위해서는 두 움직인 거리의 비 x_2/x_1 값이 작을수록 좋다.

(정면) 알까기의 결과 및 분석

충돌 후 알(동전)은 움직이다 곧 정지한다. 동전이 움직인 거리를 그림 1에서와 같이 각각 x_1 과 x_2 라고 하면 x_2 는 x_1 에 비해 매우 작음을 알 수 있다. (예: $x_1=14.4$ cm, $x_2=0.3$ cm) 왜 x_2 는 이렇게 작은 것일까? 이를 이해하기 위해서는 충돌 직후 두 동전의 속도 v_1 과 v_2 를 알아내야 하는데, 가진 장치를 가지고는 측정할 수가 없다. 그러나 조금 노력하면 쉽게 측정할 수 있는 거리 x_1 과 x_2 로부터 속도 v_1 과 v_2 를 알아낼 수 있다.

알이 정지하는 이유는 판(모눈종이)과 알 사이의 쓸림(마찰)에 의한 것임은 자명하다. 미끄럼 쓸림힘 f_s 은 알의 중력 mg 에 비해하나, 운동속력 v 에 관계없이 일정하고, 운동방향에 반대방향이다. 따라서 $f_s = -\mu_k mg$ 라고 하자. 여기서 μ_k 는 상수로서 미끄럼 쓸림계수(운동 마찰계수)라고 한다. 충돌 후 알이 정지할 때까지 움직인 거리로부터 충돌직후의 속력을 알아내기 위해서 알에 대한 뉴턴의 운동방정식을 세워보자. 뉴턴의 운동법칙은 알의 가속도 a 가 알에 가해지는 힘에 비해하고, 비례상수는 알의 관성의 정도 즉, 질량 m 의 역수라고 한다. 미끄럼 쓸림힘이 가해진 동전의 경우 가속도는

$$a = f_r/m = -\mu_k g$$

로 일정하다. 일정한 가속도의 운동에서 속도는 시간에 비례하여 변하게 되어

$$v(t) = v(0) - \mu_k g t$$

로, $v(0)$ 는 충돌 직후(시간 $t=0$)의 알의 속력이다. 움직인 거리는

$$x(t) = v(0)t - \frac{1}{2} \mu_k g t^2$$

이 된다. 알이 충돌 후 정지할 때까지 걸린 시간을 T 라고 하면

$$0 = v(0) - \mu_k g T$$

로부터

$$T = v(0) / \mu_k g$$

이고, 그때까지 알이 움직인 거리는

$$x = v(0)T - \frac{1}{2} \mu_k g T^2 = \frac{1}{2} v(0)^2 / \mu_k g$$

이 된다. 즉, 알이 정지할 때까지 움직인 거리는 충돌 직후의 속력의 제곱에 비례한다. 실험 예($x_1=14.4$ cm, $x_2=0.3$ cm)에 대해 적용하면 정지해있던 알의 충돌직후 속도 v_1 과 충돌하는 알의 충돌 직후 속도 v_2 사이의 비는 $v_1/v_2 = (14.4/0.3)^{1/2} = 6.9$ 임을 알 수 있다.

이제 충돌한 두 알의 속력이 어떻게 결정되는지를 알아보기로 한다. 충돌은 짧은 시간 동안 알 사이에 큰 힘을 주고받는 복잡한

현상이지만, 전체로 보면 가해진 총 힘이 0이어서 충돌전후에 총 운동량이 변하지 않고 같게 되는 특성을 가지고 있다. 그림 1에서와 같이 정지해 있던 알의 질량을 m_1 이라고 하고 충돌하는 알의 질량을 m_2 , 충돌직전의 속력을 v_i 라고 하면 운동량보존은

$$m_2 v_i = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

가 된다. 만약 충돌 전후의 총 운동에너지도 같은 완전 탄성(탄성)충돌이라면

$$\frac{1}{2} m_2 v_i^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

이고, 알끼리 실험에서처럼 두 알의 질량이 같으면($m_1 = m_2$) 두 식으로부터 놀라운 결과

$$v_1 = v_i, v_2 = 0$$

를 얻는다. 즉, v_i 의 속력으로 충돌한 알은 정지하고, 정지해 있던 알은 대신 속력 v_i 로 움직여 마치 충돌한 알이 충돌전과 같은 속력으로 정지한 알을 뚫고 지나가는 것과 같다.

그러면 $v_2 \neq 0$ 인 측정결과는 어떻게 된 것인가? 한가지 가능성은 분석에서 가정한 것과는 달리 동전사이의 충돌이 완전 탄성충돌이 아닐 수 있다는 것이다. 실제로 충돌을 할 때 작지만 “딱” 하는 소리가 난다. 이같이 동전의 운동에너지가 소리에너지 등 다른 형태의 에너지로 변환되어 줄어들 수 있다. 이제 충돌전후의 운동에너지의 비를 f 라고 하자. 그러면 $m_1 = m_2$ 일 때

$$v_1^2 + v_2^2 = f v_i^2$$

이고, 운동량보존식

$$v_1 + v_2 = v_i$$

와 함께

$$v_1 = \frac{1 + \sqrt{1 - 2(1-f)}}{2} v_i, v_2 = \frac{1 - \sqrt{1 - 2(1-f)}}{2} v_i$$

인 것을 알 수 있다. 살펴본 예에서 $v_1/v_2 = 6.9$ 는 $f = 0.78$ 임을 알려준다. 즉, 입사하는 알의 운동에너지의 22%가 소리 등 다른 형태의 에너지로 변환된다.

(정면) 알끼리의 예측 및 확인

만약 충돌하는 두 알끼리의 질량이 다르면 운동량보존과 에너지 관계식은 각각

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_2 v_i, \quad m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 = f \cdot m_2 v_i^2$$

으로, 이로부터

$$v_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)(1-f)} \right\} v_i$$

$$v_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \left\{ 1 - \frac{m_1}{m_2} \sqrt{1 - \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)(1-f)} \right\} v_i$$

을 얻는다. 이 경우 $v_2 = 0$ 이 되기 위해서는 $m_2/m_1 = f$ 이어야 한다. 이때 $v_1 = f v_i$ 가 된다. 먼저 구한 $f = 0.78$ 을 사용하면 $m_2/m_1 = 0.78$ 일 때 $v_2 = 0$ 이 되는 것을 예측할 수 있다. 10원짜리 동전의 질량이 4.0 g인데 비해서 100원짜리 동전은 5.4 g으로 이를 사용하면 $m_2/m_1 = 0.74$ 이다. 10원짜리 동전을 통거 정지해 있던 100원짜리 동전에 충돌시키면, 10원짜리 동전은 충돌 후 그 자리에 정지하는 것을 확인할 수 있다.

즉, 알끼리에서 정면으로 알을 깔 때는 상대방의 알보다 약간 가벼운 알을 써서 통거는 것이 유리하다.

(빗겨) 알끼리

이번에는 빗겨서 알을 까는 경우를 생각해보기로 한다. 두 알의 중심이 빗긴 거리 d 를 충격 맺음변수(impact parameter)라고 한다. $d \neq 0$ 이면 충돌한 후 알의 운동방향이 틀어진다. 운동방향이 틀어지는 정도를 쓸림각(deflection angle) θ_1, θ_2 로 나타낸다. (그림 2) 충격 맺음변수를 달리하면 쓸림각도 달라진다.

10원짜리 동전 둘을 사용하여 충격 맺음변수를 일정하게 유지한 채 몇 차례 알끼리를 해본다. 충돌 후 멈춘 동전의 위치를 표시하여 쓸림각과 움직인 거리를 구한다.

(빗겨) 알끼리의 결과 및 분석

빗겨 알끼리 실험을 한 결과는 그림 3과 같다. 그림의 예는 충격 맺음변수 $d = 1.65$ cm에 대한 세 번의 측정결과이다. 매번 충돌 때마다 충돌조건이 약간씩 달라서 두 동전의 쓸림각들은 약간씩 달라진다. 그러나 흥미로운 것은 두 쓸림각의 합이 거의 일정하다는 점이다. 그림에서 보인 측정예의 경우 $\theta = \theta_1 + \theta_2 = 77^\circ, 69^\circ, 75^\circ$ 로서 평균값은 $\theta_{av} = 74 \pm 2.4^\circ$ 이다.

쓸림각이 어떻게 결정되는지 알아보기 위해 빗겨 충돌하는 현상에 대해 분석해보기로 한다. 그림 3과 같은 평면상의 2차

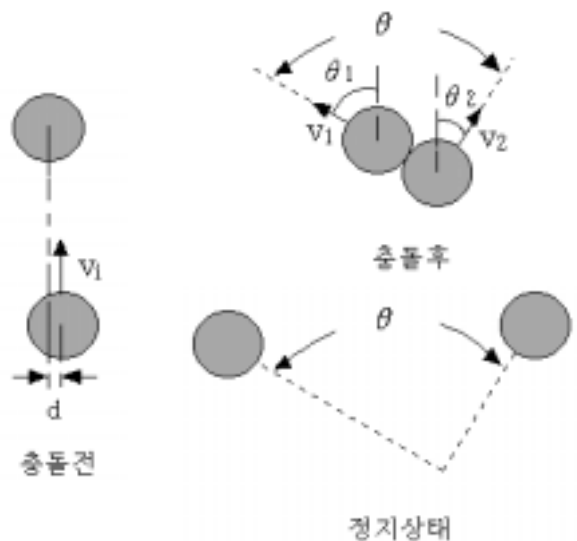


그림 2. 빗겨 충돌 알끼리 실험.

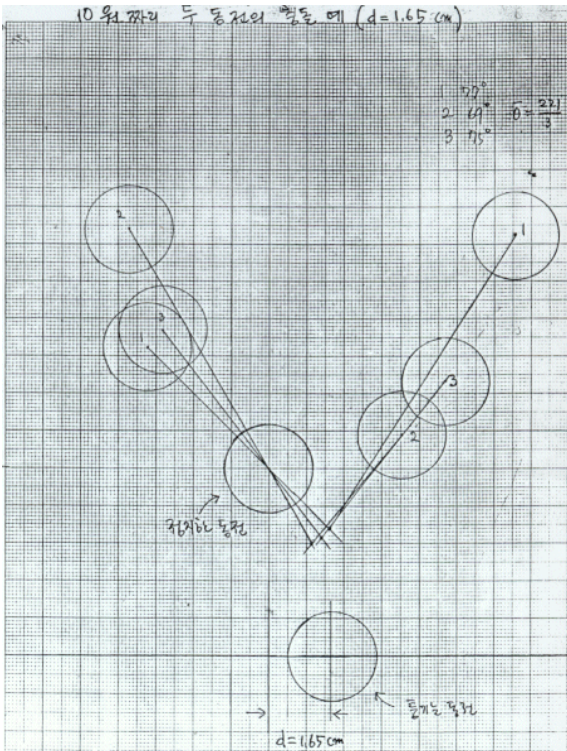


그림 3. 빗겨 충돌 알짜기 실험 결과.

왼 충돌은 서로 직각인 두 방향(한 방향은 v_1 의 방향으로 택함)의 운동으로 나누어 볼 수 있고, 각각에 대해 운동량이 보존된다. 즉, $m_1=m_2$ 일 때

$$v_i = v_1 \cos \theta_1 + v_2 \cos \theta_2, \quad 0 = -v_1 \sin \theta_1 + v_2 \sin \theta_2$$

이고, 위 두 식의 양변을 제곱하여 더해지면

$$v_i^2 = v_1^2 + 2v_1 v_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + v_2^2$$

이 된다. 충돌 시 에너지 손실을 무시하면 운동에너지도 충돌 직전과 직후에 보존되어

$$v_i^2 = v_1^2 + v_2^2$$

이므로 이 두 식으로부터 $\cos(\theta_1 + \theta_2) = \cos \theta = 0$ 즉, $\theta = 90^\circ$ 가 되는 것을 알 수 있다.

이는 위의 측정 예에서 충돌을 일으킬 때마다 각각의 동전의 쏠림각 θ_1 과 θ_2 는 변하지만 θ 가 거의 일정한 것과 부합한다. 그러나 측정된 θ 값이 74° 로 90° 보다 많이 작아진 이유는 무엇일까? 우선 생각할 수 있는 것은 정면 알짜기 실험에 서처럼 충돌 시 에너지의 손실이 생길 가능성이 있다. 충돌 전후의 운동에너지의 비 f 를 도입하여 위 에너지 보존식 대신에

$$f v_i^2 = v_1^2 + v_2^2$$

을 사용하면

$$(1-f) v_i^2 = 2v_1 v_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

가 되어 $f < 0$ 일 때

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = \cos^{-1}\{(1-f)v_i^2/2v_1 v_2\} < 90^\circ$$

인 것을 알 수 있다. 특별히 $v_1=v_2$ 인 경우에는 $v_i=(2/f)^{1/2}v_1$ 이 되어 각각의 원은 정지된 동전의 테두리를 그린 것이고 충돌하는 동전의 중심의 위치는 정지해 있던 동전의 중심의 이동선을 동전의 지름만큼 연장한 곳이 된다. 같은 실험을 세 번 거듭했는데 그림의 숫자는 실험 순서를 가리킨다.

$$\theta = \cos^{-1}\{(1-f)/f\}$$

로 된다. 정면 충돌 알짜기 실험에서 구한 $f=0.78$ 을 사용하면

$$\theta = \cos^{-1}(0.28) = 74^\circ$$

로 측정된 값 $74 \pm 2.4^\circ$ 와 잘 일치한다. 그림 3에서 보인 충격 멩트변수 $d=1.65$ cm일 때가 동전의 움직인 거리 $x_1 \approx x_2$ 인 경우여서 $v_1 \approx v_2$ 라고 볼 수 있다.

빗겨 알짜기의 예측 및 확인

이제 충돌하는 두 동전의 질량을 달리하면 어떻게 될까? 운동량보존식은 각각

$$m_2 v_i = m_1 v_1 \cos \theta_1 + m_2 v_2 \cos \theta_2$$

$$0 = -m_1 v_1 \sin \theta_1 + m_2 v_2 \sin \theta_2$$

이고, 위 두 식의 양변을 제곱하여 더해지면

$$m_2^2 v_i^2 = m_1^2 v_1^2 + 2m_1 m_2 v_1 v_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + m_2^2 v_2^2$$

이 된다. 충돌 시 에너지 손실을 무시하면 운동에너지도 충돌 직전과 직후에 보존되어

$$m_2 v_i^2 = m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2$$

이므로 이 두 식으로부터

$$\cos \theta = \frac{(m_2 - m_1)v_1}{2m_2 v_2}$$

이 되어 $m_1 \neq m_2$ 인 경우에는 일반적으로 $\theta = 90^\circ$ 가 되지 않는다. 질량 m_1 과 m_2 의 상대적인 크기에 따라서 $\theta > 90^\circ$ ($m_1 > m_2$ 일 때)이거나 $\theta < 90^\circ$ ($m_1 < m_2$ 일 때)가 된다. 이는 10원($m=4.0$ g), 50원($m=4.1$ g), 100원($m=5.4$ g), 500원($m=7.75$ g) 짜리 동전을 사용하여 확인할 수 있다.

충돌 시 에너지 손실을 감안할 때의 에너지 표현식이

$$f m_2 v_i^2 = m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2$$

이므로

$$\cos \theta = \frac{\left(\frac{m_2}{f} - m_1\right)v_1}{2m_2 v_2} + \frac{\left(\frac{1}{f} - 1\right)m_2 v_2}{2m_1 v_1}$$

이어서, $f=1$ 일 때에 비해서 각도 θ 가 작아진다.

지금까지의 알까기실험에 대한 분석에서는 충격 뺏음변수를 고려하지 않았다. 따라서 주어진 세 개의 식(충돌 전후의 두 방향의 운동량보존식과 에너지식)만으로는 네 개의 미지수($v_1, v_2, \theta_1, \theta_2$)를 모두 알아낼 수가 없다. 그러기 위해서는 한가지 식이 더 필요한데 그것은 충돌의 전후에 각운동량이 보존되는 것이다. 각운동량이란 선운동량의 모멘트로서 크기는 선운동량 mv 에 운동 방향의 회전축으로부터의 수직거리를 곱한 것과 같다. 정지해있던 동전(질량 m_1)의 중심에 대한 각운동량을 살펴보면

$$m_2 v_1 d = m_1 v_1 (r_1 + r_2) \sin(\pi - \theta_1 - \theta_2) = m_1 v_1 (r_1 + r_2) \sin \theta$$

이고, 여기서 r_1 과 r_2 는 각각 두 동전의 반지름이다. 또한, 그림 2를 살펴보면

$$(r_1 + r_2) \sin \theta = d$$

가 된다. 간단히 하기 위해서 두 동전이 같다($m_1 = m_2, r_1 = r_2 = r$)고 한다. 그러면

$$v_1 \sin \theta = v_1 \sin \theta$$

이 되고

$$v_1 = \frac{d}{2r \sin \theta} v_i, \quad v_2 = \sqrt{f - \left(\frac{d}{2r \sin \theta}\right)^2} v_i$$

이다. 따라서

$$\cos \theta = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{f} - 1 \right) \left(X + \frac{1}{X} \right)$$

으로, 여기서

$$X = \frac{1}{\sqrt{f - \left(\frac{2r}{d}\right)^2 \sin^2 \theta} - 1}$$

이다. $\cos \theta$ 가 최소가 되는 경우는 $X=1$ 인 경우로, 이때

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{1}{f} - 1 \right)$$

이고,

$$d = 2 \sqrt{\frac{f - \frac{1}{2}}{f}} r$$

인 경우에 해당한다. 이는 그림 3과 같이 $v_1 = v_2$ 일 때 구한 결과와 일치한다. 또, 10원짜리 동전의 충돌에서 구한 $f=0.78$ 을 사용하면 충격 뺏음변수 $d=1.38$ cm일 때에 해당한다. 이는 실제 예에서 사용한 $d=1.65$ cm와는 차이가 난다. 이 차이는 분석에서 알(동전)과 판(모눈종이) 사이의 쓸림힘에 의한 쓸림 돌림힘(마찰 토크)이 충돌 시에 작용하는 것을 무시했기 때문이다. 쓸림 돌림힘은 부딪친 알의 쓸림각 θ_2 를 증가시키고, 각도 θ 가 최대가 되는 충격 뺏음변수의 크기도 증가시킨다.

마치는 글

한동안 인기를 끌었던 알까기 게임에 숨어있는 물리를 동전과 볼펜을 사용해 모눈종이 위에서 행한 정량화 된 알까기실험을 통해 살펴보았다. 먼저 같은 질량을 갖는 동전의 정면충돌과 같은 간단한 실험을 통해서 충돌한 동전이 거의 제자리에 정지하는 다소 놀라운 사실을 알아내고, 이에 대한 설명으로 충돌과 관련된 충돌전후 운동량의 보존, 에너지보존과 같은 이론을 접하게 되었다. 그러나 이론의 결과는 충돌한 동전의 충돌직후 속력이 0이어야 하는데 비해 실험결과는 작지만 0이 아닌 속력을 보여주고 있어서, 사용한 이론이 실험을 완전히 설명해 주지 못하는 것을 알 수 있었다. 그 이유로 동전이 충돌할 때 나는 소리(충돌 음) 등으로 동전의 운동에너지가 소모되는 것을 생각하여 이를 이론에 포함시킴으로써 실험결과로부터 운동에너지의 상대감소율을 알아내고, 아울러 가장 효과적인 알까기를 위해서는 충돌시키는 알을 상대방의 알보다 약 20% 가벼운 것을 택하는 것이 유리하다는 사실을 알아내었다.

또한 알을 빗겨 충돌시키는 경우에는 충돌 후 쏠린 두 알의 사이 각이 거의 일정하다는 실험사실을 2차원 충돌 이론으로 설명할 수 있었다. 그러나 이론의 예측과는 달리 사이 각이 90° 에 못 미치는 것을 관측한 다음, 이론에 충돌 시 잃는 에너지를 포함하여 정량적으로 설명하였다. 나아가 질량이 다른 알을 충돌시킬 때의 결과를 예측하였고, 사이 각을 최대로 만드는 충격 뺏음변수를 구해 실험결과와 비교함으로써 충돌 시 알 사이에 작용하는 쓸림힘에 따른 쓸림 돌림힘이 사이 각을 키우는 것을 알아내었다. 따라서 알을 최대로 쏠리게 하기 위해서는 충격 뺏음변수를 크게 즉, 상대 알의 가장자리를 겨냥할 필요가 있다.

이처럼 우리의 주위에는 물리공부의 소재로 삼을만한 흥미 거리가 꽤 있다. 이를 비교적 쉽게 해 볼 수 있는 정량적인 실험으로 만든 후 이를 시작으로 하여 실험사실을 설명하는 이론을 전개하고, 이론의 예측을 새로운 실험으로 검증하는 형태로 실험-이론-실험의 실험중심 물리교육을 한다면 학생들의 지적 호기심을 지속시킬 수 있어 학습효과가 크리라고 기대한다.^[4]

참 고 자 료

- [1] www.imbc.com
- [2] 여기에 소개하는 알까기실험의 일부분은 2001년도 서울대학교 교육융합연구원 주최 제13회 시도 중·고등학생 수학·과학 경시대회의 고등학생부 물리2차(실험) 문제로 출제된 것이다.
- [3] 볼펜의 용수철을 실험에 활용하려는 아이디어는 다른 곳에서도 찾아볼 수 있다. 예를 들면 R. Ehrlich, *Using a retractable ball point pen to test the law of conservation of energy*, Am. J. Phys. **64**(2), 176 (1996).
- [4] 일 예로 여기 소개한 볼펜을 사용한 충돌실험의 변형으로 모눈종이 위에 정지해 있는 연필의 한 곳에 충격을 가해 연필이 회전하면서 미끄러지는 것을 실험할 수가 있다. 관련 내용은 2002년도 서울대학교 교육 융합연구원 주최 제14회 시도 중·고등학생 수학·과학 경시대회 고등학생부 물리2차(실험) 문제로 출제함.