



움직이고 부딪치는 운동량과 충격량

글 최영 이투스 통합과학 강사

사과가 놓여있다. 사과보다 질량이 꽤 작은 총알이 사과를 향해 날아온다. 총알은 사과를 관통하고, 사과는 산산조각난다. 총에서 발사된 총알의 질량은 작지만 속도가 매우 빨라서 사과를 관통하고 사과를 산산이 부술 만큼의 위력을 가지고 있다. 반면 정지하고 있는 자동차의 경우 질량은 총알에 비해 매우 크지만 사과를 산산이 부술 만큼의 위력을 가지고 있지는 않다. 이는 물체가 가지는 물리량의 정도가 물체의 질량 뿐 아니라 물체의 속도 와도 밀접한 관계가 있기 때문이며, 운동하는 물체와 충돌한 물체가 받는 충격의 정도 또한 이와 관련이 있기 때문이다.



강의보기

최영

이투스 통합과학 대표 강사이자 '본과탐 통합과학'의 저자다. 2014년부터 이투스에서 고등학교 1학년을 대상으로 통합과학 강의를 하고 있다.



Jasper Nance(F)

스칼라와 벡터

운동하는 물체의 운동량과 충돌한 물체의 충격량을 포함한 역학적 시스템에 대해 알아보기에 앞서 물리량을 나타내는 스칼라와 벡터에 대해 알아보자. 통합과학에서는 스칼라와 벡터에 대한 정의나 언급은 따로 없다. 하지만 스칼라와 벡터에 대한 정의는 여러 가지 역학적 시스템을 이해하는 데 있어서 중요하다.

물체의 운동에서 이동 거리는 크기만으로 나타내는데, 이런 물리량을 스칼라라고 한다. 즉, 스칼라는 크기를 나타내는 물리량으로 질량, 시간, 이동 거리, 속력, 일, 에너지, 온도 등이 있다. 반면 물체의 변위는 크기와 방향을 같이 나타내는데, 이런 물리량을 벡터라고 한다. 벡터에는 위치, 변위, 속도, 가속도, 힘, 전기장, 자기장 등이 있다.

속도는 벡터로 나타내는 물리량으로 크기와 방향을 동시에 가지는 물리량이다. 이때, 속도의 크기를 속력이라고 한다. 속력이 클수록 운동량이 커지는데, 이는 속도가 커지면 운동량이 증가한다는 말과 같은 의미다.

운동량과 충격량

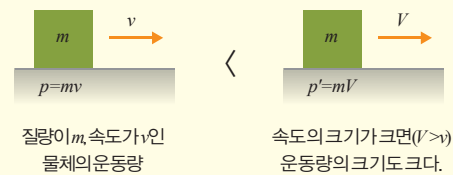
운동량(P)이란 운동하는 물체의 효과를 나타내는 물리량으로, 크기와 방향을 가진다. 운동량의 크기는 물체의 질량과 속도에 비례한다. 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

운동량

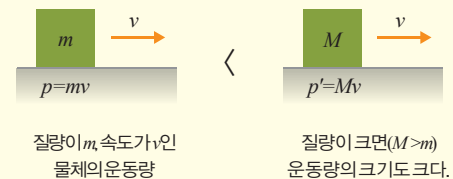
$$\text{운동량}(P) = \text{질량}(m) \times \text{속도}(v) \quad \text{단위: kg} \cdot \text{m/s}$$

오른쪽 위 그림은 질량이 동일한 경우 물체의 속력과 운동량의 관계를, 물체의 속도가 동일한 경우 질량과 운동량의 관계를 나타낸 그림이다. 그리고 두 경우 모두 운동량의 방향은 물체의 속도의 방향과 같다.

질량이 같을 때: 속력이 클수록 운동량이 크다



속도가 같을 때: 질량이 클수록 운동량이 크다



위와 같은 이유로 질량은 작지만 빠른 속도로 날아가는 총알은 큰 운동량을 가지고 있는 반면, 질량의 크기는 크지만 정지한 자동차의 운동량은 0이다. 그런데 운동량이 큰 총알이 사과를 산산조각냈다는 것은 총알이 가지고 있던 운동량이 정지해 있던 사과에게 큰 충격을 가했다는 의미며, 그 충격으로 사과가 부서진 것이다.

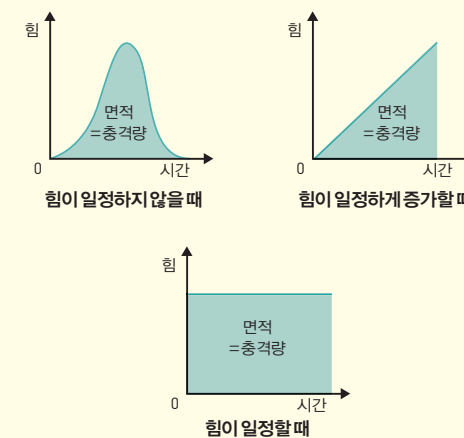
사과가 총알에 의해 받은 충격처럼 물체가 받는 충격의 정도를 나타내는 물리량을 충격량(I)이라고 한다. 충격량은 물체의 운동을 변화시키는 물리량이기도 하다. 충격량 역시 크기와 방향을 가지는데, 충격량의 크기는 충돌하는 동안 물체에 작용한 힘과 작용한 시간에 비례한다. 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

충격량

$$\text{충격량}(I) = \text{힘}(F) \times \text{시간}(\Delta t) \quad \text{단위: N} \cdot \text{s 또는 kg} \cdot \text{m/s}$$

충격량은 힘과 시간을 곱한 값으로, 힘만 방향을 가지므로 충격량의 방향은 물체에 작용한 힘의 방향과 같다. 또한 물체가 받는 힘을 시간에 따라 나타낸 힘-시간 그래프에서 그래프 아래의 면적이 충격량이다.

아래 그래프들은 힘이 일정하지 않을 때, 힘이 일정하게 증가할 때, 힘이 일정할 때 등 3가지 경우에 대해 힘-시간 그래프를 나타낸 것이다.

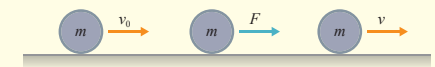


운동량과 충격량의 단위

가속도의 법칙(운동 제2법칙)은 '힘=질량×가속도'로 나타낼 수 있다. 이를 토대로 힘(F)을 단위로 나타내면 $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ 으로 나타낼 수 있다. 시간의 단위는 s이므로, 결국 충격량(힘×시간)의 단위는 $(\text{kg} \cdot \text{m/s}^2) \cdot \text{s}$ 이다.

그런데 이를 정리해 보면 $(\text{kg} \cdot \text{m/s}^2) \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m/s}$ 로 운동량의 단위와 같아진다. 이는 운동량과 충격량이 동일한 차원의 물리량이라는 것을 의미하며, 결국 '충격량=운동량의 변화량'이라는 관계식이 성립한다. 뿐만 아니라 '충격량=운동량의 변화량=나중 운동량-처음 운동량'이므로 오른쪽 위와 같이 설명할 수 있다.

질량이 m , 초기속도가 v_0 인 물체에 일정한 힘 F 가 시간 t 동안 작용해 나중 속도가 v 가 됐을 때,
 $F=ma=m\left(\frac{v-v_0}{t}\right)$ 에서 $Ft=mv-mv_0$ 다.
 따라서 $I=P-P_0$ 다.



위에서 언급한 충격량과 운동량의 변화량에 대한 관계를 토대로, 힘이 오랜 시간 작용하거나 같은 시간 동안 큰 힘이 작용하면 물체가 받는 충격량이 증가하고 결국 물체의 운동량의 변화량도 증가함을 알 수 있다.

이는 실제 생활에서 다양한 형태로 적용될 수 있다. 테니스나 야구, 골프에서 공을 멀리 보내기 위해서는 큰 힘으로 치거나(즉, F 를 크게 만들거나), 스윙을 끝까지 유지하면서 공이 힘을 받는 시간을 길게 만들어야(즉, Δt 를 크게 만들거나) 한다.

대포를 쏘는 경우에도 포신을 길게 만들면 포탄에 힘이 작용하는 시간을 늘려 포탄을 멀리 보낼 수 있고, 총신이 긴 총일수록 총알이 힘을 받는 시간이 길어지므로 총알이 받는 충격량이 커져 총알이 멀리 날아간다.

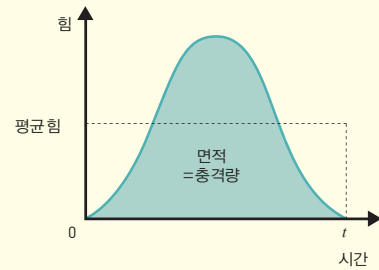
충격량과 충돌 시간의 관계, 충격력

물체가 충돌할 때 받는 힘을 충격력이라고 한다. 그런데 일반적으로 충격력은 매순간 변하기 때문에 충격력은 충격을 가하는 동안의 평균적인 힘을 의미하며, 충격력을 '평균 힘'이라고 부르기도 한다. 충격력의 크기는 단위시간 동안 운동량의 변화량과도 같다.

$$\text{충격량} = \text{힘} \times \text{시간}, I = F \Delta t = \Delta P$$

$$\text{충격력}(F) = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{m \Delta v}{\Delta t} = \frac{mv - mv_0}{\Delta t}$$

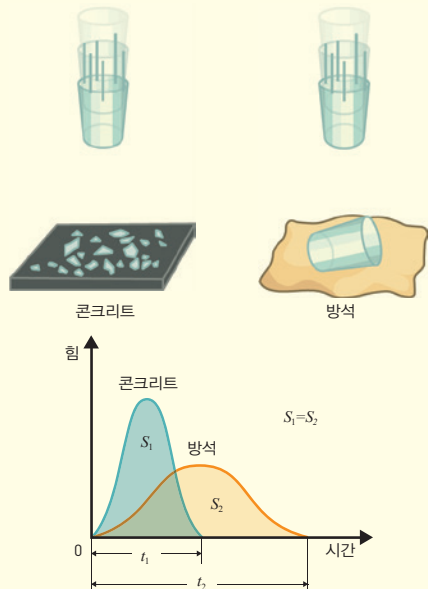
물체에 작용하는 힘이 변할 때 충격력(평균 힘)



위의 그래프에서 볼 수 있듯이 물체에 작용한 힘이 일정할 때뿐만 아니라 힘이 변하는 경우에도 그래프 아래 부분의 면적이 충격량이 된다. 이때 충격량을 힘이 작용한 시간으로 나누면 물체가 받는 평균 힘(충격력)을 구할 수 있다. 충격력과 충돌 시간의 관계는 충격량이 같을 때 충돌 시간이 짧을수록 충격력은 증가하며, 반대로 충돌 시간이 길수록 충격력은 작아진다.

아래 그림은 동일한 유리컵을 같은 높이에서 콘크리트와 방석에 자유 낙하시키는 것이고, 그래프는 유리컵이 받는 힘의 변화를 시간에 따라 나타낸 것이다.

유리컵이 받는 힘의 변화



구분	크기비교	내용
충격량	$I_1 = I_2$ 콘크리트 방석	힘-시간 그래프 아래의 면적이 충격량이므로 유리컵이 받은 충격량은 같다.
운동량의 변화량	$\Delta P_1 = \Delta P_2$ 콘크리트 방석	충격량=운동량의 변화량 이므로 서로 같다.
충격력을 받는 시간	$t_1 < t_2$	방석이 폭신하므로 콘크리트보다 충격 시간이 길다.
충격력(평균 힘)	$F_1 > F_2$ 콘크리트 방석 $(F = \frac{I}{t})$	충격량은 같은데 콘크리트가 방석보다 충격 시간이 짧으므로 콘크리트가 방석보다 충격력이 크다.

충돌과 안전장치

시간에 따라 충격력이 다르다는 점을 이용해 일상생활에서는 의도적으로 충격력을 줄여 안전장치를 만들거나, 안전사고를 예방한다. 대표적인 예로 자동차의 에어백을 들 수 있다. 에어백은 자동차가 충돌 시 승객의 신체가 충돌할 때까지 걸리는 시간을 연장함으로써 신체가 받는 충격력을 줄여 승객을 보호한다.

자동차의 안전벨트는 충돌 시간을 길게 만들어 충격력을 줄이기도 하지만, 충격력을 분산시키기도 한다. 또 운동하던 자동차가 급정거할 경우 운전자가 관성에 의해 진행하던 방향으로 이동해 유리창 등에 부딪히는 현상도 방지한다. 이외에도 아래 표처럼 다양한 형태로 충격력을 줄이는 방법들이 사용되고 있다.

포수 미트	태권도 보호대
포수 미트는 속력이 큰 야구공을 받을 때 충돌 시간을 길게 해서 손이 받는 충격력을 줄이기 위해 두껍게 만든다.	태권도 시합에서 발이나 손과 몸이 충돌할 때 충돌 시간을 길게 해서 선수가 받는 충격력을 줄이기 위해 보호대를 착용한다.
에어캡 포장지	자동차 범퍼
포장재에 공기를 충전하는 이유는 상품이 외부와 충돌할 때 충돌하는 시간을 길게 해서 상품이 받는 충격력을 줄인다.	자동차 범퍼는 자동차가 충돌해 정지할 때까지의 시간을 길게 만들어 승객이 받는 충격력을 줄여준다.



동아일보

컬링에 들어 있는 운동량과 충격량

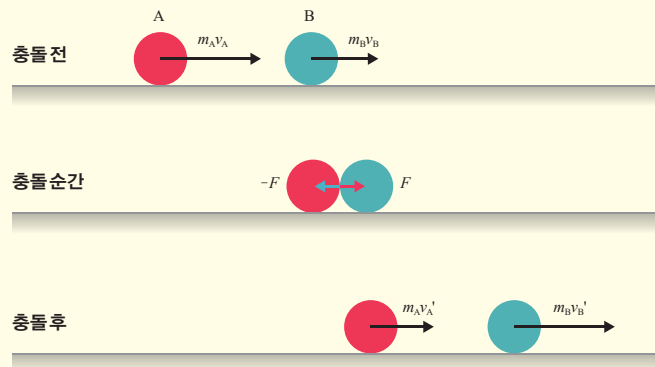
올해 2월 평창 동계올림픽에서 컬링이 큰 인기를 끌었다. 컬링은 중세 스코틀랜드의 얼어붙은 호수에서 무거운 돌덩이를 맞추는 놀이에서 시작됐다고 한다. '스톤'이라고 부르는 무겁고 넓적한 돌을 번갈아 던지며, '하우스'라는 원으로 된 표적에 얼마나 가까이 보내는지에 따라 게임의 승패가 갈린다.

그런데 이렇게 스톤을 움직이거나, 스톤을 다른 스톤으로 쳐내 이동시키는 과정에는 운동량과 충격량이 들어 있다. 조금 더 정확하게 말하자면 '운동량 보존 법칙'이 숨어

있다. 운동량, 충격량에 대한 이야기에서 더 나아가 운동량 보존 법칙에 대해 알아보자. 이는 통합과학 교과서의 내용은 아니지만 한번쯤 알아두면 다양한 운동 경기를 더욱 재미있게 관람할 수 있을 것이다.

운동량 보존 법칙

운동량 보존 법칙은 외부에서 힘이 작용하지 않으면 계의 전체 운동량의 합은 변하지 않고 보존된다는 것이다. 운동량 보존 법칙을 설명할 때 가장 많이 사용되는 예는 당구공의 충돌이다.



위 그림에서처럼 운동을 하는 당구공이 있다. 이때 왼쪽에 있던 당구공 A가 오른쪽의 당구공 B와 충돌하고, 충돌 뒤 두 당구공 A와 B는 진행하던 방향으로 운동을 계속한다.

두 당구공이 충돌하는 과정을 조금 더 자세히 살펴보자. 두 당구공은 충돌 시 작용과 반작용의 법칙에 의해 서로 반대되는 힘을 같은 시간동안 받게 된다. 그리고 두 물체의 충돌 시간은 동일하다. 그렇다면 '충격량=힘×시간'에 따라 A와 B가 받은 충격량은 동일하며, 방향은 반대가 된다.

이처럼 두 당구공은 충돌과 함께 운동량이 변한다. 왼쪽에서 다가온 A는 B와 충돌 뒤 운동 방향과 반대 방향의 충격량을 받았기 때문에 충돌 시 받은 충격량만큼 운동량이 감소한다. 반면 B는 A와 충돌 시 A로부터 받은 충격량에 더해져 운동량이 증가한다. 이때 A와 B가 받는 충격량은 같다는 사실을 우리는 이미 알고 있다. 따라서 외부에서 어떠한 힘도 가해지지 않은 상황이라면 아래와 같은 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \text{(가) } & A \text{의 처음 운동량} + \text{충격량} = A \text{의 나중 운동량} \\ \text{(나) } & B \text{의 처음 운동량} + \text{충격량} = B \text{의 나중 운동량} \end{aligned}$$

(가)와 (나)의 충격량은 크기는 같고 방향이 반대이기 때문에 식을 더하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & A \text{의 처음 운동량} + B \text{의 처음 운동량} \\ & = A \text{의 나중 운동량} + B \text{의 나중 운동량} \\ & (m_A v_A + m_B v_B = m_A v_A' + m_B v_B') \end{aligned}$$

이는 다음과 같이 일반화해서 나타낼 수 있다. 이를 운동량의 보존 법칙이라고 한다.

$$\begin{aligned} & \text{충돌 전 두 물체의 운동량의 합} \\ & = \text{충돌 후 두 물체의 운동량의 합} \end{aligned}$$

컬링에서도 이와 마찬가지로 스톤끼리 부딪혀 서로 밀고 밀리는 과정에서 작용과 반작용에 의한 힘을 주고받는다. 그리고 밀리는 스톤의 운동량이 변한 만큼(작용) 미는 스톤의 운동량도 그 반대 방향으로 동일하게 변한다(반작용). 운동량의 총합은 각각의 운동량 증가와 감소가 서로 상쇄되는 효과를 나타내기 때문에 변하지 않는데, 이는 운동량 보존 법칙에 의한 것이라고 할 수 있다. 물론 실제 경기에서는 마찰력 등에 의한 운동량 손실이 존재한다.

또 상황에 따라서는 충돌하는 두 스톤이 위의 당구공 충돌처럼 언제나 동일한 충돌 면적을 가지지 않을 수도 있다. 실제로 스톤과 스톤이 어느 정도의 두께로 충돌하는가에 따라 스톤과 스톤 사이에서 전달되는 운동량이 달라진다. 스톤과 스톤이 두껍게 충돌할수록 많은 양의 운동량이 전달되며, 반대로 스톤과 스톤이 얇게 충돌할수록 운동량은 적게 전달되는 것이다. 선수들은 이런 물리법칙을 잘 활용해 다양한 전략과 전술을 구사한다. ❸

과학동아 2011년 06월호 '안전띠에 대한 궁금증 5' 기사 중 발췌

왜 자동차 뒷좌석도 안전띠를 매야 할까?

전문가들은 자동차에 장착된 안전장치 가운데 안전띠가 가장 유용하다고 입을 모은다. 특히 앞좌석보다 뒷좌석이 더 위험하기 때문에 '뒷좌석 안전띠 착용 의무화'는 진작 이뤄졌어야 했다고 말하기도 한다. 시속 50km로 달리던 자동차가 급정거하면 뒷좌석에서 안전띠를 매고 있지 않던 사람(체중 50kg)이 앞으로 튕겨 나갈 때 받는 충격은 1t에 이른다.

미국 연방도로교통안전국(NHTSA)은 안전띠를 매면 승용차의 경우 중·경상을 50%, 사망을 45% 정도, 경트럭은 중·경상을 65%, 사망을 60% 정도 감소시켜(미국에서만) 매년 약 9500명의 목숨을 구한다고 보고했다. 자동차가 뒤집힐 때 승객이 차체 밖으로 튕겨져 나갈 확률은 안전띠를 매었을 때 20분의 1로 줄어든다(실제 확률은 매었을 때 1%, 매지 않았을 때 20%).

안전띠는 나일론이나 폴리에스테르 같은 합성섬유로 만들어, 불에 잘 타지 않고 여간해선 끊어지지 않는다. 국내 안전띠 개발업체 삼송의 윤용찬 전장개발팀장은 "안전띠 하나로 차 두 대 정도는 거뜬히 끌 수 있다"고 설명했다. 개발하고 있는 안전띠를 당기는 실험 중에도 끊어지는 경우는 거의 없다고 한다.

안전띠를 돌돌 말고 있는 얼레(토션)에도 비밀이 숨어 있다. 지름 1cm로 가느다란 이 막대는 비교적 약한 쇠(연성쇠)로 만들어 차량이 충돌하면 파배기처럼 비틀어진다. 엄청난 충격량을 빨아들이기 때문이다. 그렇지 못하면 안전띠가



GIB

버티는 동안 충격량이 승객에게 전해져 오히려 더 크게 다칠 것이다.

전문가들은 차와 차, 차와 장애물, 차와 장애물 모서리(차가 회전하면서 충돌) 등 다양한 교통사고 데이터를 수집한 다음, 슬레드 시스템에서 재현시키면서 안전띠의 성능을 검사한다. 슬레드(sled)라는 이름에서 알 수 있듯이 레일 위에 차를 썰매처럼 깔아놓은 시스템이다. 자동차에 사람대신 더미(마네킹이라고 부르지 않는다)를 앉히고 교통사고를 재현해 어느 부위에 어떤 상해를 입는지, 안전띠가 충격을 얼마나 완화시키는지 등을 분석한다.

33년 과학동아 디지털라이브러리
'디지털라이브러리'를 검색해보세요

