

뉴턴운동법칙에 관한 시범실험장치 : 작용점이 다른 경우

박재성^{*}, 최연호, 권재술

한국교원대학교 물리교육과, 충청북도 363-791

서 론

물리를 공부하는 사람은 누구나 뉴턴운동법칙을 배우게 된다. 중학교 과학시간에서부터 다루게 되는 뉴턴운동법칙은 고전역학의 기본이 되고, 내용 또한 $F=ma$ 로 매우 간결하다. 그래서 누구나 다 잘 알고 있다고 생각하기 쉽다. 하지만 실제로 그럴까?

뉴턴 제2법칙의 내용은 질량이 m 인 물체에 F 의 힘을 가하면 물체는 그 방향으로 $a = F/m$ 만큼의 가속도로 가속된다는 것이다. 이 법칙은 물체에 작용하는 힘과 가속도의 관계를 나타낸 것으로 다른 조건은 필요 없이 관성계에서는 항상 성립한다. 대부분의 물리교재에서 뉴턴의 운동 제2법칙을 설명할 때 단단한 물체의 중심에 힘이 작용하는 경우처럼 특별한 조건의 예시만을 들고 있다. 하지만 뉴턴의 운동 제2법칙은 물체가 단단하든지 물렁하든지, 물체의 속도가 빠르든지 느리든지, 물체가 회전을 하고 있든지 정지해 있든지, 물체의 중심에 힘을 작용하든지 가장자리에 힘을 작용하든지 항상 성립한다.

뉴턴의 운동법칙을 잘 안다고 생각하면서도 물질의 고유한 속성인 질량을 제외한 어떠한 조건과도 무관한 법칙임을 간과하는 경우가 많다.

대부분의 교재에서 다루는 경우가 아닌 위에서 언급한 다른 조건을 가진 물체의 가속도를 물어보면, 물리에 초심자들뿐만 아니라 숙련자들도 뉴턴 운동법칙을 올바르게 적용하지 못하고 실생활에서의 경험이나 에너지 보존과 같은 다른 물리법칙을 잘못 적용하여 결과를 예측하고 설명하는 경우가 많다. 이는 뉴턴운동법칙의 본질을 잘못 이해하고 있는 것이다(권재술, 기초물리강좌, 제4강).

그래서 물체의 단단한 정도, 물체의 운동 상태, 힘의 작용점과 같은 변인을 독립변인으로 한 실험이나 예시자료는 뉴턴의

운동법칙을 올바르게 이해하는데 도움을 줄 수 있을 것이며, 이러한 실험의 구현과 자료의 개발이 필요하다고 생각되었다.

Sherwood(2007)는 그의 강의에서 $F=ma$ 와 관련된 문제 중 물체의 중심에 힘이 작용하는 경우와 가장자리에 작용하는 경우 물체의 가속도를 비교하는 시범실험을 보여주었다.

우리는 Sherwood의 영상을 보고 실험장치를 구성해 제 53차 과학교육학회 동계학술대회 워크숍에서 활용해보았다.

문제 상황 및 시범실험장치 설명

이 시범실험에서 구현하고자 한 문제 상황은 구체적으로 다음과 같다(그림 1).

『마찰이 없는 평면위에 놓인 질량이 같은 원판을 같은 시간동안 실로 잡아당길 경우 어느 쪽이 더 빨리 움직이는가?』

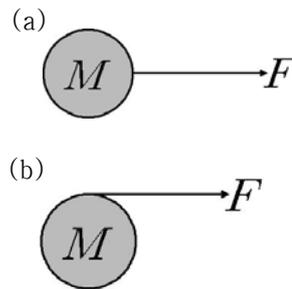


그림 1. 문제 상황. (a) 원판 중심에 힘이 작용할 때. (b) 원판의 가장자리에 힘이 작용할 때. 이 그림들은 위에서 본 모양이고, (b)의 경우 실이 원판 둘레에 충분히 감겨 있다.

이 상황을 시범실험으로 보여주기 위한 실험장치를 개발하는데 있어 가장 핵심이 되는 아이디어는 두 물체에 같은 크기의 힘을 작용하는 것이다. 얼핏 생각하면 그림 2와 같이 고정도르래와 추를 이용하면 쉽게 될 것 같지만 그렇지 않다.

*교신저자: jspark009@nate.com

•2008년 2월 1일 접수, 2008년 2월 25일 통과.

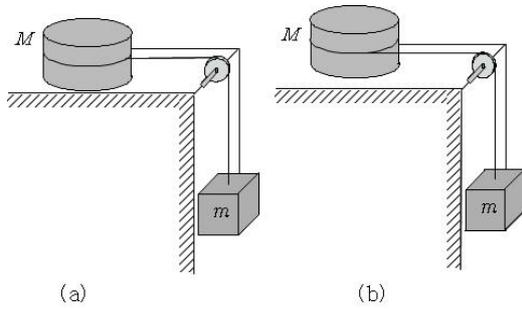


그림 2. 고정도르래와 추를 이용한 실험 장치. (a) 원판 중심에 힘이 작용할 때. (b) 원판의 가장자리에 힘이 작용할 때.

우리가 구현하고자 하는 상황에서는 질량 M 인 원판에 작용하는 장력이 같아야 한다. 하지만 (b)는 원판이 진행하면서 회전을 하게 되므로 원판에 감겨있던 실이 풀어져 추가 낙하하는 거리와 원판이 진행하는 거리가 다르다. (a)에서의 실의 장력은 추의 질량에만 영향을 받는 것이 아니라 원판의 질량에도 영향을 받는 것처럼 (b)에서의 실의 장력은 추의 질량, 원판의 질량과 회전관성에 의해 결정된다. 따라서 (a)와 (b)는 실의 장력이 다르며, 이와 같은 방법으로는 (a)와 (b)의 원판에 같은 힘을 작용할 수 없다.

다른 한 가지 방법으로 대부분의 고등학교 물리교과서에 제시되어 있는 뉴턴운동법칙 실험에서 힘을 작용하는 방법은 고무줄과 자를 이용하여 일정한 길이만큼 늘어나게 당기는 것이다. 이 방법은 탄성력을 이용하여 늘어난 길이를 일정하게 하는 것이 관건이지만 많은 연습이 필요할 뿐만 아니라 그 결과로 나온 측정값의 정밀도가 낮아서 좋은 방법이라고 보기 어렵다.

Sherwood(2007)는 이 문제를 움직도르래를 이용하여 해결하였다. 우리는 Sherwood의 demo 영상을 보고 그가 한 것과 같이 실험장치를 구성하였다. 기본적인 재료는 Sherwood의 영상에 나오는 것과 같이 PASCO 실험장치인 역학수레와 레일(2m)을 활용하였고, 그 외에는 실험을 하면서 보완하였다. 실험장치의 개요도와 사진은 그림 3, 4와 같다.

두 원판의 가속도가 같음을 쉽게 관찰하기 위해 실제 실험장치는 그림 3에서 두 원판이 나란히 진행하도록 설치한다.

실험 활동

(1) 처음에는 실험에 나일론실을 사용하였는데 한번 시연 후

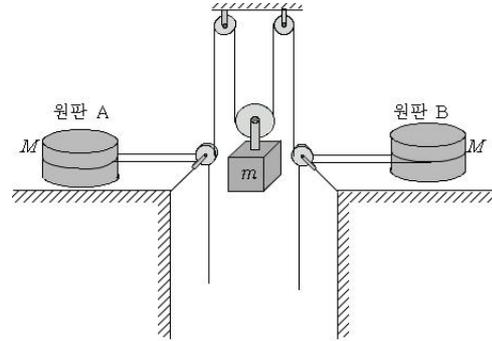


그림 3. 실험 장치 개요도



그림 4. 실험 장치 사진

실이 꼬이는 단점이 있었다. 그래서 낚시줄로 교체하였다. 본 실험에 사용한 낚시줄은 4호 컬러낚시줄이다.

(2) 이 실험에서 우리가 사용한 원판은 베어링이 장착된 고하중용 바퀴(질량:약3kg)였다. 하지만 비슷한 질량의 원판형 물체라면 무엇을 사용해도 무관하다.

원판 A에는 낚시줄을 원판에 그냥 묶고, 원판 B에는 낚시줄을 테이프를 이용해 붙인 다음 여러 번 감았다. 원판 B가 돌아가는 것을 잘 보이게 하려고 CD라벨지에 그림을 인쇄하여 원판에 붙였다.

바퀴축과 금속판, 볼트, 와셔를 이용하여 PASCO 수레에 원판을 고정시켰다(그림 5).

(3) 이 실험에서는 PASCO의 도르래를 이용하였다.

고등학교 수준에서 도르래의 양쪽 실에 같은 크기의 장력이 작용한다고 하는데, 이 경우 도르래는 마찰을 무시할 수 있고, 도르래의 질량(돌아가는 부분)을 무시한다는 가정을 한다. 하



그림 5. PASCO 수레에 원판을 고정하는 과정

지만 현재 우리나라 학교에 흔히 보급되는 도르래는 이 가정을 무시할 수 있는 수준이 아니었다. 이는 도르래가 회전할 때의 마찰과 도르래의 질량이 클수록 움직이고 도르래에 걸려 있는 두 줄의 장력의 차이가 커지기 때문이다. 이들 도르래로 실험해본 결과 PASCO 도르래를 사용했을 때와 달리 두 수레의 가속도가 달랐다.

(4) Sherwood와 마찬가지로 원판에 연결된 낚시줄에 종이를 끼워 실이 진행되는 거리를 표시하였다(그림 6).

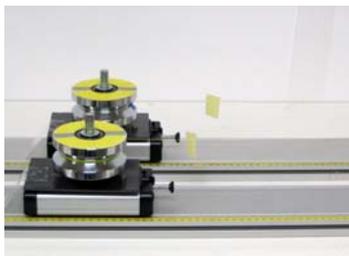


그림 6. 실의 진행 거리 표시 방법

원판 B는 진행하면서 회전을 하게 되므로 원판에 감겨져 있던 실이 풀리게 된다. 따라서 B쪽에 끼워둔 종이가 A보다 많이 진행하게 된다.

또한 두 물체는 같은 속도로 진행하므로 병진 운동에너지는 같고, 원판 B만 회전하므로 총 운동에너지는 B의 회전운동에너지만큼 B가 크다.

물체에 해준 일은 '(힘)×(물체의 이동거리)'가 아니라 '(힘)×

(작용점의 이동거리)'다(권재술. 기초물리강좌, 제15강). 이 실험의 경우 실의 이동거리가 큰 B에 해준 일이 A에 해준 일보다 크다.

실에 종이를 끼워두면 이를 눈으로 쉽게 확인할 수 있으므로 같은 힘이 작용하였음에도 불구하고 원판 A보다 B의 총 운동에너지가 큰 이유가 실의 이동거리에 의한 해준 일의 차이에 기인한다는 사실을 이해시키는데 도움을 줄 수 있다.

(5) 이 실험에서는 Sherwood의 demo 영상과는 달리 도르래를 장착하기 위한 도구로 일반적으로 널리 쓰이는 스탠드 대신 옷걸이용 행어를 사용했다. 이로 인해 실험장치의 안정성과 시범실험 설치 시간 면에서 개선이 되었다.



그림 7. 도르래 장착을 위해 사용한 옷걸이용 행어

(6) 우리의 실험 동영상은 아래의 홈페이지에서 볼 수 있다.
<http://jskwon.knue.ac.kr> 공개자료실-일반자료

결론 및 제언

뉴턴운동법칙은 물체의 질량을 제외한 어떠한 조건 없이 물체에 작용하는 외력과 물체의 가속도와의 관계를 보여주는 역학의 근본 법칙이다. 그러나 물체의 중심에 힘이 작용할 때와 물체의 가장자리에 같은 크기의 힘이 작용할 때의 가속도의 크기를 비교하여 물어보면 '물체의 중심에 작용할 때 가속도가 더 크다'와 같이 힘의 작용점에 따라 가속도가 다르다는 비과학적 개념이 드러난다.

과학교사들을 대상으로 하는 제 53차 과학교육학회 동계학

술대회 워크숍에서 이 실험을 활용해본 결과, 워크숍 참가자들 대부분이 이러한 비과학적 개념을 가지고 있었다. 이 실험을 통하여 뉴턴운동법칙의 의미를 다시 한 번 생각해보는 시간을 갖고, 뉴턴 제2법칙인 $F=ma$ 가 조건에 관계없이 항상 성립한다는 점을 이해하는데 도움을 줄 수 있었다.

이 실험 장치를 이용하여 학교현장에서 뉴턴 제2법칙 실험을 보다 더 효과적으로 할 수 있으리라 기대된다. 앞에서 말한 바와 같이 현재 교과서에 실려 있는 고무줄과 자를 이용하여 힘을 작용하는 방법은 물체에 일정한 힘을 작용하기 어려울 뿐만 아니라 두 물체에 동일한 힘을 작용하기도 어렵지만 이 장치는 이러한 문제를 한꺼번에 해결할 수 있다.

(1) 이 실험장치를 이용하여 같은 크기의 힘을 작용할 때 물체의 질량과 가속도와의 관계를 알아보는 실험을 할 수 있다.

(2) 도르래를 이용하여 같은 질량의 두 물체에 각각 F 와 $2F$ 또는 $3F$ 의 힘을 작용하는 것도 가능하리라 생각된다. 이 실험장치의 개요도는 그림 8과 같다.

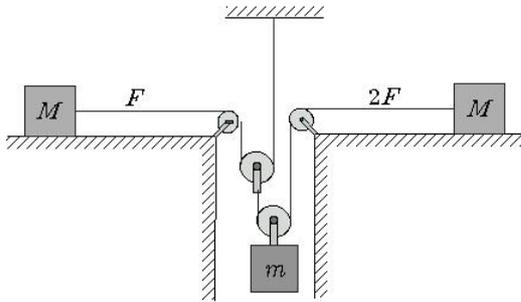


그림 8. 같은 질량의 물체에 다른 크기(두 배)의 힘을 작용하는 방법에 관한 개요도

참고문헌

권재술. 기초물리강좌, 제4강 관성과 $F=ma$ 에 대한 고찰.
 권재술. 기초물리강좌, 제15강 일의 정의에 대한 재검토.
 Ruth C and Bruce, Sherwood. (2007) Matter & Interactions I : Modern Mechanics(2nd ed., pp. 281-282). John Wiley & Sons, Inc.
http://jskwon.knue.ac.kr/zboard/zboard.php?id=scibasicidea&page=2&sn1=&divpage=1&sn=off&ss=on&sc=on&select_arrange=headnum&desc=asc&no=17
http://jskwon.knue.ac.kr/zboard/zboard.php?id=scibasicidea&page=1&sn1=&divpage=1&sn=off&ss=on&sc=on&select_arrange=headnum&desc=asc&no=28
 Bruce, Sherwood의 demo 영상
 Video of a two puck demo for Chapter 8(Multiparticle Systems)
http://www4.ncsu.edu/~rwchabay/mi/mi_lecture_materials.htm

부 록

1. 실험동영상

한국현장과학교육학회 홈페이지(<http://www.kosss.org>)에 탑재함.