

측면 에어 가이드 트랙을 이용한 새로운 운동마찰계수 측정 장치의 개발

남형주
중앙대학교 다빈치교양대학

Development of New Measurement Device for the Coefficient of Kinetic Friction by Using Side Air-Guide Track

Nam, Hyoung Joo
Da Vinci College of General Education, Chung-Ang University

ABSTRACT

In this study, a new experimental device was developed for measurement of the coefficient of kinetic friction using a photo gate timer system which have advantages of easy and accurate detection of motion. This device, consisting of a side air-guide track and a side friction-free glider, forces a friction sample to move in a straight line without producing unnecessary friction. The new device is compared to two conventional measuring methods of friction for four different friction samples: one is using a camera system and the other is using a force sensor. It is demonstrated that the developed friction device in this study is easier to operate and produces the most accurate and the least deviating results among them. On the basis of these results, we propose that friction experiment using the new friction device is included in general physics experiment, so that engineering students should have a chance to get correct understanding of classical mechanics including friction phenomenon.

Keywords: General physics experiment, Coefficient of kinetic friction, Friction experiment

1. 서 론

일반물리실험 강좌는 일반물리학 강좌와 더불어 공학입문 과정에서 전공기초 과목으로서 중요하게 다루어지는 강좌이다. 특히, 공학교육인증에서는 MSC(Mathematics, Science, Computer)과 BSM(Basic Science & Math)에 포함되는 대표적인 강좌이기도 하다. 이러한 일반물리실험 강좌는 실험 자체로서도 교육적 목표와 역할이 분명하지만, 학생들이 일반물리학 강좌에서 배우게 되는 이론적인 내용을 실험으로 확인하고 경험하는 측면에서도 매우 중요한 역할을 수행한다. 또한, 공학교육인증 측면에서는 기초 지식 습득 및 응용, 문제 해결 능력 향상, 데이터 분석 능력 향상, 실험 능력 향상 등의 프로그램 학습 성과를 기대하게 한다.

이러한 일반물리학과 일반물리실험 강좌에서는 1학기에 고전역학, 달리 말해서 뉴턴역학을 집중적으로 교육 받게 되며,

이 과정에서 마찰력, 특히 운동마찰력에 대한 이해와 이러한 마찰력이 포함되는 여러 상황에서의 물체의 운동을 해석하는 방법을 배우게 된다(Walker et al., 2014; Raymond & John, 2017). 이러한 마찰력은 물리학 영역뿐만 아니라 공학 전반에 걸쳐 그 현상이 나타나므로, 공대생들에게는 이에 대한 이해와 응용 능력이 필히 요구된다. 그런데, 교육 현장에서 마찰력을 설명하다 보면 많은 학생들이 마찰력에 대한 이해에 어려움을 겪거나 교육 이후로도 이해가 바르지 못함을 많이 경험하게 된다. 이러한 문제점은 마찰력에 관한 여러 연구(최계영, 2002; 김영민·안민영, 2013; 하상우·이경호, 2011; 홍성욱, 2010)에서도 지적되고 이를 개선시킬 수 있는 방법이 제안되었다. 그러나 이러한 연구에도 불구하고 마찰 실험(마찰력 측정, 마찰계수 측정)을 통해 학생들이 직접 실험함으로써 경험하고 이해하게 하는 실험 교육에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한, 대학 교육 현장에서도 마찰 관련 실험은 제대로 편성되지 않아 이에 대한 교육이 효과적으로 이루어지지 않고 있다. 이러한 문제는 마찰 실험의 핵심 측정값인 운동마찰계수를 쉽고 정확하게 측정할 수 있는 실험 장치가 마땅하지 않은 데에 그 원인

Received May 5, 2018, Revised May 28, 2018

Accepted May 29, 2018

† Corresponding Author: todayonlybabo@cau.ac.kr

이 있다고 생각된다.

현재 대학의 일반물리실험 또는 역학 실험에서 운동마찰계수를 측정할 수 있는 실험 방법은 동영상 시스템을 이용하는 방법(인하대학교 물리학과)과 힘 센서를 이용하는 방법(충북대학교 물리학과, 고려대학교 물리학과, 숭실대학교 물리학과)의 두 가지가 대표적으로 활용되고 있다. 그런데 이 두 실험 방법은 마찰시료의 운동을 측정하고 분석하기 위해서 컴퓨터 프로그램을 사용하기 때문에 컴퓨터에 익숙한 요즈음 학생들에게는 실험의 집중력을 높일 수 있다는 점에서 큰 장점을 가지고 있으나, 한정된 수업시간 안에 학생들이 컴퓨터 조작과 분석 방법을 모두 습득하고 실험 내용을 이해하여 실험까지 수행하기에는 시간적으로 무리가 있으며, 또한 기대와는 달리 마찰시료의 운동을 정확하게 측정하지 못하거나 마찰시료의 동일한 운동을 상당히 큰 편차로 측정하기도 하여 측정값에 대한 신뢰도가 높지 않다는 단점이 있다.

이에 본 연구자는 이전 연구에서 물체의 운동을 아주 간단하면서도 정확하게 측정할 수 있는 포토게이트 타이머 시스템을 이용하여 운동마찰계수를 측정하는 방법을 제안하였다. 그리고 이 측정 시스템을 사용하기에 위해서는 반드시 전제가 되어야 하는 시료의 직선 운동을 가이드 레일을 장착한 실험대와 베어링을 장착한 글라이더로 가능케 한 새로운 운동마찰계수 측정 장치를 개발하였다(남형주, 2016). 하지만, 새로 개발한 이 장치는 개발 의도처럼 운동마찰계수를 간단한 방법으로 쉽고 상당히 정확하게 측정할 수 있음에도 불구하고, 원래 측정하려는 마찰시료의 마찰 외에도 글라이더의 직선 운동을 유도하기 위해 설계된 글라이더의 베어링과 가이드 레일 사이의 추가적인 마찰이 발생하여 운동마찰계수가 실제보다도 약간 크게 측정되는 문제점이 있었다. 더욱이 측정 장치의 균형이 잘 맞지 않거나 글라이더의 고속 운동에서는 이러한 오차가 더욱 커지는 점이 관측되었다.

이에, 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하여 마찰시료를 장착한 글라이더의 운동 중에 마찰시료의 마찰을 제외한 일체의 부가적인 마찰이 작용하지 않는 새로운 운동마찰계수 측정 장치를 개발하였다. 이 새 운동마찰계수 측정 장치는 기다란 직육면체 형의 트랙 양 측면에 작은 공기구멍을 내고, 공기펌프로 이 공기구멍에서 바람을 나오게 하여 마찰시료를 장착한 글라이더가 트랙을 따라 운동할 때, 글라이더 측면의 부가적인 마찰 없이 일직선 운동을 하게 하였다. 이러한 부가적인 마찰을 없앤 개선으로 인해 새 측정 장치로는 이전 연구에서 개발했던 장치보다도 실험에서의 장치 조작은 간단하면서도 매우 정확하고 일정한 값으로 운동마찰계수를 측정할 수 있게 되었다.

이하에서는 새로 개발한 운동마찰계수 측정 장치의 제작 과

정을 소개하고, 이를 이용한 실험과 기존의 운동마찰계수 측정 장치인 동영상 시스템 장치, 그리고 힘 센서 장치를 이용한 실험 결과를 비교하여 그 우수성과 장치 개발의 필요성을 제안하고자 한다.

II. 운동마찰계수 측정 원리

마찰이 있는 실험대 위에 질량 m 의 마찰시료를 올려놓고, 이 실험대의 한쪽 끝을 들어 올려 경사를 주면 마찰시료는 경사면을 따라 등가속도로 미끄러져 내려온다. 이때 실험대의 경사각이 θ 라고 하면, 마찰시료에 경사면에 나란한 방향으로 작용하는 힘과 경사면에 수직인 방향으로 작용하는 힘은 각각

$$\begin{aligned} \sum F_{\parallel} &= mg \sin\theta - f_k = ma \\ \sum F_{\perp} &= N - mg \cos\theta = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

이다. 여기서, f_k 는 운동마찰력, N 은 수직항력이다. 한편, μ_k 를 운동마찰계수라고 하면, 운동마찰력은

$$f_k = \mu_k N \quad (2)$$

이므로, 위의 두 방정식을 연립하여 풀면 운동마찰계수는

$$\mu_k = \tan\theta - \frac{a}{g \cos\theta} \quad (3)$$

이 된다. 위의 식 (3)으로부터 실험대의 경사각 θ 와 마찰시료가 실험대를 미끄러져 내려오는 가속도 a 를 측정하면, 마찰시료와 실험대의 접촉면 사이의 운동마찰계수 μ_k 를 알아낼 수 있다.

III. 운동마찰계수 측정 장치의 제작

앞서 논의한 운동마찰계수 측정 원리를 따르면, 운동마찰계수 측정 장치는 마찰시료를 올려놓은 실험대의 경사각 θ 와 마찰시료가 실험대 위를 미끄러져 내려오는 가속도 a 를 측정할 수 있는 장치이어야 한다. 경사각 θ 는 각도기를 이용하여 쉽게 측정할 수 있기 때문에 문제가 되지 않지만, 가속도의 정확한 측정은 그리 간단한 문제가 아니다. 본 연구에서는 이 가속도를 측정하기 위해서 포토게이트 타이머 시스템을 사용하였다. 포토게이트 타이머 시스템은 마찰 실험대 위에 적절한 간격을 두어 두 개의 포토게이트를 설치하고, 마찰시료가 이 두 개의 포토게이트를 각각 지나는 순간의 순간 속력과 두 포토게이트의 구간을 지나는 경과 시간을 측정하여 마찰시료의 평균 가속

도를 측정하여 준다. 그런데, 이러한 포토게이트 타이머 시스템으로 가속도를 정확히 측정하기 위해서는 시료(또는 시료를 장착한 글라이더) 위에 장치하는 플래그가 포토게이트를 정확히 수직하게 지나야 한다. 그래서 본 연구에서는 부가적인 마찰 없이도 시료를 장착한 글라이더가 두 포토게이트를 수직하게 일직선 운동으로 통과할 수 있도록 에어 가이드 트랙과 측면 무마찰 글라이더로 이루어진 새로운 운동마찰계수 측정 장치를 다음과 같이 제작하였다.

1. 측면 에어 가이드 트랙의 제작

본 연구에서 제작한 마찰 실험대로서의 측면 에어 가이드 트랙의 모양은 Fig. 1과 같으며 규격은 다음과 같다.

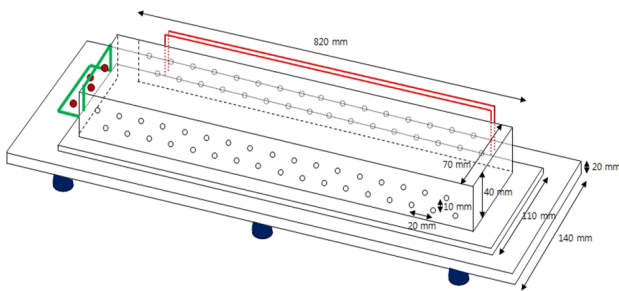


Fig. 1 3-dimensional illustration of side air-guide track system

먼저, 가로 820 mm, 세로 40 mm, 두께 8 mm 크기의 아크릴판 2장에 각각 10 mm 간격의 두 줄로 가로 방향을 따라 지름 1 mm의 구멍을 20 mm 간격으로 뚫는다. 그리고 이 두 아크릴판 중 하나의 끝 쪽에는 가로 50 mm, 세로 32mm의 구멍을 내어 공기펌프 관을 삽입할 수 있도록 한다. 친공한 두 아크릴판을 평행하게, 그리고 수평면에 대하여 수직하게 세운 후 그 사이 위로는 가로 820 mm, 세로 54 mm, 두께 8 mm 크기의 아크릴판을 올려놓아 트랙이 직육면체를 이루도록 접착한다. 이어 직육면체의 모양 중 열려 있는 면에는 가로 890 mm, 세로 110 mm, 두께 8 mm 크기의 아크릴판을 부착하여 트랙의 밑면이 되게 한다. 트랙의 밑면 아래에는 가로 970 mm, 세로 140 mm, 두께 20 mm 크기의 받침판을 두고 트랙의 한 쪽 끝을 경첩을 이용하여 받침판에 부착한다. 한편, 직육면체의 트랙과 나란하게 20 mm 거리를 두고 길이 700 mm, 높이 50 mm의 포토게이트 스탠드를 장치하여 포토게이트를 쉽게 장치할 수 있게 한다. 이 포토게이트 스탠드는 이전 연구(남형주, 2016)에서 만들어 사용하였던 장치인데, 트랙의 어떠한 경사각에서도 포토게이트의 설치가 용이한 장점이 있어 본 연구에

서도 동일하게 채택하였다. 트랙의 윗면에 붙여 마찰시료에 접촉하는 면의 소재로는 하드보드지를 사용하였다. 이렇게 제작한 측면 에어 가이드 트랙에 공기펌프를 연결하여 작동시키면, 트랙의 양 측면에서는 작은 구멍으로 바람이 나와 다음에서 제작한 글라이더가 측면 마찰 없이 트랙을 따라 직선 운동을 할 수 있게 해준다.

2. 측면 무마찰 글라이더의 제작

측면 무마찰 글라이더는 Fig. 2와 같이 측면 에어 가이드 트랙에 얹어 트랙을 따라 운동하게 하는 장치로, 가로 130 mm, 세로 70 mm, 두께 3 mm 크기의 아크릴판을 수평하게 두고 그 양 측면에 똑같은 크기의 두 장의 아크릴판을 각각 수직하게 부착하여 만든다. 이 수직하게 부착한 두 아크릴판은 측면 에어 가이드 트랙의 양 측면과 맞닿는 면이 되고, 트랙의 구멍에서 나오는 바람과 닿아 측면 마찰 없이 글라이더를 운동하게 한다. 글라이더의 수평한 면 아래에는 벨크로 테이프의 걸림고리 부분을 붙여 벨크로 테이프의 갈고리 부분을 붙인 마찰시료를 쉽게 탈부착 할 수 있게 하였다. 이 글라이더의 질량은 190.3 g이다.

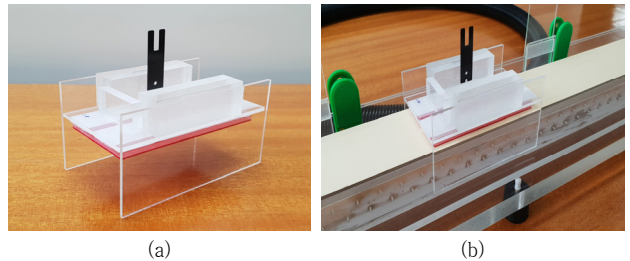


Fig. 2 (a) Side friction-free glider. (b) The glider mounted on the side air-guide track system

3. 탈부착이 용이한 마찰시료의 제작

마찰시료는 가로 120 mm, 세로 60 mm 크기의 면으로 제작하였으며, 한쪽 면에는 벨크로 테이프의 갈고리 부분을 붙여 마찰시료를 측면 무마찰 글라이더의 아랫면에 쉽게 탈부착 할 수 있게 하였다. 이러한 방법은 이전 연구(남형주, 2016)에서도 사용하였으나, 이전 연구와는 달리 가이드 레일이 없기 때문에 마찰시료를 두 부분으로 나누지 않고 하나의 면으로 제작하였다. 마찰시료로는 모양은 거치나 부드러운 소재의 펠트지, 표면을 아노다이징 처리하여 매끄러운 알루미늄판, 커팅매트 소재의 고무판, 베니어판 소재의 나무판의 4가지 재료를 사용하였다.

IV. 운동마찰계수 측정 실험

본 연구에서 제작한 운동마찰계수 측정 장치의 성능을 평가할 목적으로 현재 대학에서 마찰계수 측정 실험을 하는데 대표적으로 사용되고 있는 ‘동영상 시스템을 이용하는 방법’ 그리고 ‘힘 센서를 이용하는 방법’의 두 측정 방법과 비교 실험을 하였다. 실험에 사용한 마찰시료는 세 실험 똑같이 펠트지, 알루미늄판, 고무판, 나무판의 4가지를 사용하였으며, 마찰시료와 닿는 다른 마찰 면은 하드보드지를 사용하였다. 하드보드지는 스크래치가 잘 나지 않아 여러 차례 실험을 하여도 그 표면 상태가 비교적 일정하게 유지되는 재질을 가졌기 때문에 학생들의 실험에서도 실험의 소재로 사용하기에 적당하여 채택하였다. 한편, 세 가지 실험에서 동일한 마찰시료를 사용할 목적으로 동영상 시스템을 이용하는 방법과 힘 센서를 이용하는 방법의 실험에서는 본 연구에서 제작한 마찰시료 부착용 글라이더를 사용하였다. 이 세 가지의 운동마찰계수의 측정 방법과 그 특징은 다음과 같다.

1. 측면 에어 가이드 트랙을 이용

다음의 Fig. 3은 본 연구에서 제작한 측면 에어 가이드 트랙과 무마찰 측면 글라이더를 이용하여 운동마찰계수를 측정하는 모습을 나타낸 것이다.

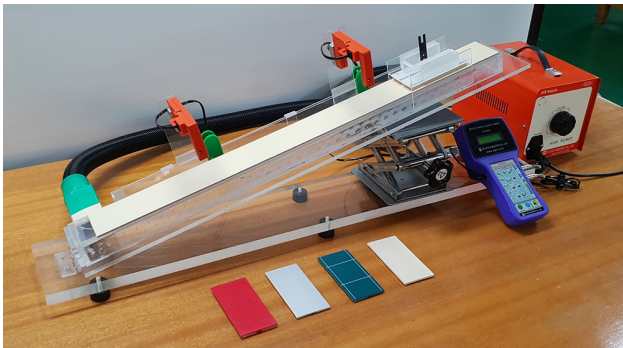


Fig. 3 Measuring the coefficient of kinetic friction based on the side friction-free glider and the side air-guide track

측면 에어 가이드 트랙 밑에 서포트잭을 넣어 트랙에 경사를 준 후 경사각을 측정하고, 마찰시료를 아래에 부착한 측면 무마찰 글라이더를 트랙에 올려놓는다. 그리고 공기펌프를 켜서 글라이더의 양 측면에서의 마찰은 없이 글라이더 아래에 부착한 마찰시료만 마찰을 겪으며 미끄러져 내려가도록 운동시키며 포토게이트 타이머 시스템을 이용하여 글라이더(마찰시료)의 가속도를 측정한다. 경사각은 디지털 각도기인 핸드폰 어플

리케이션 Clinometer를 사용하여 소수점 첫째 자리까지 정밀하게 측정한다. 가속도는 Two Gates 모드를 이용하여 두 포토게이트 구간의 평균 가속도를 측정한다. 이렇게 측정한 가속도와 경사각을 식 (3)의 운동마찰계수 계산식에 대입하여 마찰시료와 하드보드지 사이의 운동마찰계수를 구한다.

이와 같이 측면 에어 가이드 트랙을 이용하여 글라이더(마찰시료)를 운동시키면 글라이더를 똑바로 직선 운동시킬 수 있어서 포토게이트 타이머 시스템을 이용한 가속도 측정이 매우 정확해진다. 포토게이트 타이머 시스템은 가속도를 매우 정확하게 측정하면서도 간단하게 측정할 수 있어 가속도 측정에 있어서 어려움이나 시간 소요가 거의 요구되지 않는다. 그러나 포토게이트 타이머 시스템은 두 포토게이트 사이의 평균적인 운동만을 측정할 수 있을 뿐 글라이더의 운동 궤적을 쫓아 매 순간의 운동을 측정할 수는 없기 때문에 글라이더의 운동을 온전히 관찰할 수 있는 정보를 주지는 못한다.

2. 동영상 시스템 이용

다음의 Fig. 4는 (주)세계과학에서 제작, 판매하는 동영상 시스템을 이용하여 운동마찰계수를 측정하는 모습을 나타낸 것이다.

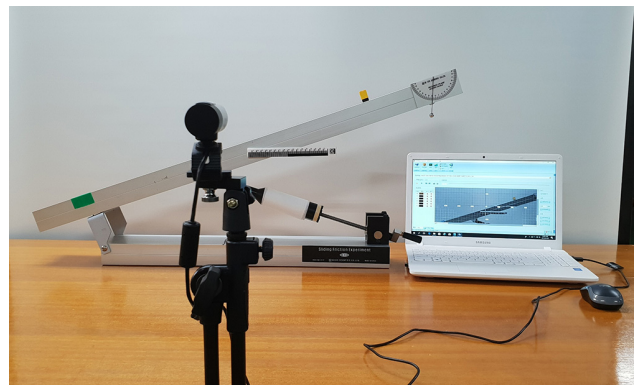


Fig. 4 Measuring the coefficient of kinetic friction based on the video camera system

먼저, 실험테이블 한쪽 끝에 수직하게 하얀 색의 스크린을 설치하고 그 앞에 운동마찰계수 측정 장치를 배치한다. 운동마찰계수 측정 장치의 경사 조절 스크루를 이용하여 실험 장치에 경사를 준 후 경사각을 측정한다. 스크린의 맞은편에 카메라를 설치하고 usb 연결선으로 컴퓨터에 연결한다. 물체의 운동을 분석해주는 컴퓨터 프로그램을 실행하고 카메라의 시험 녹화를 거쳐 화면 조정을 한다. 마찰시료를 경사면 위에 올려놓고 미끄러져 내려가게 하면서 그 운동을 촬영한다. 컴퓨터 프로그

램의 '분석' 기능을 이용하여 촬영한 영상으로부터 마찰시료의 운동을 분석하고, 그 결과로 엑셀 파일 형식의 운동 데이터 시트를 얻는다. 운동 데이터 시트로부터 각각 x 축과 y 축 방향의 가속도를 구하고, 두 방향의 가속도의 합을 크기를 마찰시료의 가속도 a 라 한다. 이렇게 측정된 가속도와 경사각을 식 (3)의 운동마찰계수 계산식에 대입하여 마찰시료와 하드보드지 사이의 운동마찰계수를 구한다.

이 동영상 시스템을 이용하는 방법은 카메라로 운동하는 물체를 촬영하기 때문에 눈으로 확인할 수 없는 물체의 운동 궤적까지 정확히 그려내어 준다. 그래서 경사면에서 미끄러져 내려오는 마찰시료가 등가속도 운동하는 것까지도 쉽게 확인할 수 있게 해준다. 이 동영상 시스템의 운동 분석 프로그램은 물체를 색상 차이로 인식하기 때문에 측정하고자 하는 물체를 색깔 있는 테이프를 붙여 나타내고, 또 이 테이프가 주위의 물체의 색상과 뚜렷하게 대비되게 하여야 한다. 본 연구에서는 마찰시료 위에 폭 1 cm의 플래그를 달고 이 플래그에 노란색 테이프를 붙였다. 이 측정 시스템은 측정 장치를 세팅하는 데와 측정 결과를 분석하는 데 있어서 생각보다 큰 어려움을 겪기도 한다. 동영상 촬영 당시 조명의 각도에 따라 측정 장치의 일부에서 반사되는 빛을 노란색으로 테이핑한 플래그로 인식하여 컴퓨터 프로그램이 운동하는 시료를 여럿으로 판단하기도 하고, 심지어는 시료를 잡고 있던 손이 촬영되어 영상 화면에 남으면 손의 살색을 노란색으로 오인하기도 하여 손과 테이핑한 플래그를 구분하지 못할 때도 있다. 이러한 현상 때문에 테이프의 색깔을 바꿔 실험하여도 또 다른 방식으로 유사한 상황을 겪게 되곤 한다. 한편, 경사면의 실험대에는 시료가 경사면에서 이탈하지 않고 경사면을 따라 내려가도록 인도하는 벽면이 있는데, 시료가 경사면을 미끄러져 내려가면서 이 벽면에 스치는 등의 원치 않는 비정상적인 운동이 발생하기도 한다.

3. 힘 센서를 이용

다음의 Fig. 5는 코리아디지털(주)에서 제작, 판매하는 Smart MBL 장치의 Sensor Box와 HBL 힘 센서를 이용하여 운동마찰력을 측정하는 모습을 나타낸 것이다.

먼저, 마찰시료의 질량을 측정하고 이 값을 m 이라고 한다. 마찰시료를 하드보드지가 놓인 수평한 면 위에 올려놓고 힘 센서와 실로 연결한다. Sensor Box를 usb 연결선으로 컴퓨터에 연결하고, 힘 센서는 Sensor Box에 연결선을 이용하여 연결한다. 컴퓨터 프로그램을 실행하고 힘 센서를 수평하게 잡자 힘을 주어 잡아당기다가 마찰시료가 움직이기 시작하면, 일정한 속력으로 운동하도록 힘 센서를 일정한 힘으로 잡아당긴다.



Fig. 5 Measuring the force of kinetic friction by using the force sensor equipment

마찰시료를 충분히 운동시킨 후 측정을 종료하고, 컴퓨터 프로그램이 분석한 평균 힘을 F_E 라 한다. 이때, 마찰시료를 일정한 속력으로 운동하게끔 잡아당긴 힘(F_E)은 마찰시료에 작용한 운동마찰력(f_k)과 힘의 크기는 같고 방향은 반대가 된다. 이러한 사실로부터 운동마찰계수 μ_k 를 다음과 같이 구한다.

$$F_E = f_k = \mu_k N = \mu_k mg \quad (4)$$

$$\mu_k = \frac{F_E}{mg} \quad (5)$$

여기서, N 은 마찰시료에 작용한 수직항력이고 g 는 중력가속도이다.

이 힘 센서를 이용하는 방법은 마찰시료에 작용하는 힘을 연속적으로 측정하여 시간에 대한 힘의 그래프로 나타내 준다. 그래서 이 그래프로부터 최대정지마찰력과 운동마찰력을 쉽게 알아낼 수 있는 장점이 있다. 그러나 운동마찰력을 측정하기 위해서는 마찰시료를 일정한 속력으로 운동하도록 힘 센서를 일정한 힘으로 잡아당겨야 하는데, 이 과정이 다분히 임의적으로 결정되므로 실험자에 따라 상당히 다른 실험 결과를 낼 수도 있는 문제점이 있다.

V. 실험 결과

실험 결과를 설명하기에 앞서 마찰계수의 특성에 대해 먼저 간단한 설명을 하고자 한다. 마찰계수는 시료에 따라 정해진 참값이 없다. 시료와 시료 사이의 측정값이기 때문에 어떤 시료의 참값을 단독으로 정의할 수가 없는데다가, 시료의 표면 상태가 실험 중에 계속해서 조금씩 변하는 점에 의해서도, 실

힘 공간의 습도 등과 같은 공기 여건의 변화에 의해서도 그 값이 달라진다. 그리고 직접 측정할 수 있는 물리량도 아니다. 그러므로 식 (3)과 같이 마찰계수를 구하기 위해 측정하는 물리량, 즉 경사각 θ 와 마찰시료의 가속도 a 와 같이 직접 측정하는 물리량을 얼마나 오차 없이 참값에 가깝게 측정할 수 있는가를 평가하는 것으로써, 그 마찰계수 측정의 정확도를 논하는 것이 옳다고 생각한다. 그래서 본 연구에서도 이러한 관점에서 실험 결과를 논하고자 한다.

다음의 Table 1은 측면 에어 가이드 트랙을 이용하는 방법, 동영상 시스템을 이용하는 방법, 힘 센서를 이용하는 방법의 세 가지로 각각 4개의 마찰시료인 펠트지, 알루미늄판, 고무판, 나무판과 하드보드지간의 운동마찰계수를 측정한 결과를 기록한 것이다. 측정 장치의 경사각을 이용한 두 실험인 측면 에어 가이드 트랙을 이용하는 방법과 동영상 시스템을 이용하는 방법에서 펠트지와 금속판, 나무판의 경우는 19.0°의 경사각에서 마찰시료를 운동시켰으며 고무판은 26.0°의 경사각에서 운동시켰다. 그리고 각각의 실험은 각 시료에 대해 14회씩 측정하였으며, 이 중 가장 큰 값과 가장 작은 값 2개씩을 제외하고 나머지 10개의 측정 결과를 채택하여 기록하였다.

Table 1 Coefficient of kinetic friction for four friction samples obtained with three measuring methods (10 times experiments)

| 측정 방법 | | 펠트지 | 알루미늄판 | 고무판 | 나무판 |
|--------------|------|----------|---------|---------|----------|
| 측면 에어 가이드 트랙 | 평균 | 0.246 | 0.198 | 0.332 | 0.245 |
| | 표준편차 | 0.000602 | 0.00155 | 0.00228 | 0.000481 |
| 동영상 시스템 | 평균 | 0.244 | 0.198 | 0.329 | 0.242 |
| | 표준편차 | 0.00796 | 0.00980 | 0.0171 | 0.00959 |
| 힘 센서 시스템 | 평균 | 0.217 | 0.156 | 0.224 | 0.174 |
| | 표준편차 | 0.00407 | 0.00452 | 0.00496 | 0.00567 |

Table 1에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제작한 측면 에어 가이드 트랙을 이용한 경우와 동영상 시스템을 이용한 경우의 운동마찰계수 측정 결과는 마찰시료에 따라 아주 약간의 차이를 보이지만 전체적으로 거의 비슷하다. 그러나 힘 센서를 이용한 측정에서는 그 측정값이 다른 두 실험의 측정값과 비교(측면 에어 가이드 트랙을 이용한 방법을 기준으로)하여 펠트지의 경우 88.2%, 금속판의 경우 78.8%, 고무판의 경우 67.5%, 나무판의 경우 71.0%의 크기로 측정되어, 모든 측정값이 상당한 차이로 작게 측정되는 결과를 보였다. 이러한 결과는 힘 센서의 정확도가 낮아 발생하는 결과가 아닌가 생각된다. 힘 센서를 이용하여 무게를 측정해 보았을 때, 이 측정값이 전자저울의 무게 측정값에 비해 약 9.86% 정도 작게 측정되는 것이 관측되었는데, 이러

한 점은 힘 센서의 정확도를 더욱 의심케 한다. 이상의 힘 센서를 이용한 측정값은 실험 전후에 센서의 0점 보정과 관련해서 세 차례나 보정을 한 결과이기도 한데, 보정을 하기 전 측정 결과는 위의 측정값보다도 평균 7.93% 정도 더 작게 측정되어 다른 두 측정 방법의 결과와는 더 큰 차이를 보였다. 이러한 사실은 힘 센서에 대한 이해가 부족한 학생들이 실험한다면, 보정의 필요성을 인지하지 못해 지금의 분석보다도 더 큰 차이의 오차를 발생시킬 수도 있음을 염려케 한다. 또한, 컴퓨터 프로그램을 새로 실행할 때마다 그리고 힘 센서의 실을 거는 후크를 건드릴 때마다 보정 값이 달라지는 점과 이러한 보정에 상당한 시간이 소요되는 점은 학생들이 실험 수업 시간에 해결하기에는 큰 문제점이 될 것으로 생각된다. 또한, 힘 센서를 이용한 측정은 앞서 언급하였듯이 마찰시료가 일정한 속력으로 운동하도록 힘 센서를 잡아당겨야 하는데, 이러한 실험자의 임의적인 판단에 의해 결정되는 요소가 측정값을 크게 좌우하기 때문에 측정값의 신뢰성이 높을 수가 없다고 생각된다. 그렇기 때문에 실제 학생들의 실험 수업에서도 신뢰성 있는 데이터를 얻는 것이 상당히 어려운 것으로 알려져 있다. 이러한 단점에도 불구하고 힘 센서를 이용한 측정 결과는 측정값의 표준편차가 동영상을 이용한 측정 방법보다는 상대적으로 작아 측정값이 비교적 고르게 나오는 점에서는 비교 우위에 있음을 알 수 있다. 이러한 표준편차에서의 힘 센서를 이용한 측정 결과의 비교 우위는 본 연구에서 매순간 마찰시료를 일정한 속력으로 운동시키겠다는 실험자의 강한 의지와 집중이 반영된 점과, 또한 동영상을 이용한 측정 방법에서 동영상 분석 시스템이 마찰시료의 운동을 분석하여 가속도를 알아내는 과정에서 종종 일부 구간의 운동을 잘못 해석하는 데에도 불구하고, 이 오류를 측정 결과에 반영하여 상대적으로 측정값의 편차가 커지기 때문으로 생각된다. 이러한 동영상 분석 시스템의 측정 오류는 이어지는 논의에서 자세히 설명하였다.

한편, 측면 에어 가이드 트랙을 이용한 측정과 동영상을 이용한 측정은 운동마찰계수의 값 면에서는 거의 비슷한 값으로 측정되었으나 측정값의 표준편차를 비교해 보면, 동영상을 이용한 측정의 경우가 측면 에어 가이드 트랙을 이용한 측정의 경우보다 작게는 금속판의 경우 6.32배에서 크게는 나무판의 경우 19.9배에 이를 정도로 상당히 크다. 이렇게 편차가 크다는 점은 동일한 운동을 큰 차이의 여러 값으로 측정한다는 점에서 측정값의 신뢰성을 낮게 한다.

다음의 Table 2는 비교되는 두 실험의 측정값의 표준편차를 조금 더 자세히 비교해 보기 위해서, 두 실험 방법으로 운동마찰계수를 구하는 데 있어 실제 측정값이 되는 마찰시료의 가속도 측정값을 비교하여 나타낸 것이다.

Table 2 Comparison of acceleration for four friction samples obtained with two measuring methods (10 times experiments). The unit is cm/s^2

| 측정 방법 | | 펠트지 | 알루미늄판 | 고무판 | 나무판 |
|--------------|------|-------|-------|-------|-------|
| 측면 에어 가이드 트랙 | 평균 | 90.8 | 135.8 | 136.8 | 92.2 |
| | 표준편차 | 0.558 | 1.44 | 2.01 | 0.446 |
| 동영상 시스템 | 평균 | 92.9 | 135.7 | 140.2 | 95.1 |
| | 표준편차 | 7.38 | 9.08 | 15.1 | 8.88 |

Table 2에서와 같이 동영상 시스템을 이용하는 방법이 이와 같은 큰 편차를 보이는 데는 다음과 같은 이유가 있는 것으로 생각된다. 이 측정 실험에서는 카메라로 촬영한 시료의 운동을 동영상 분석 프로그램으로 분석하는 데, 이때 분석 프로그램이 시료의 운동 궤적을 놓쳐 일부 구간에서 데이터를 얻을 수 없거나, 시료의 위치를 운동 궤적과는 조금 다른 위치로 인식하여 잘못된 데이터로 주는 일이 흔히 발생한다. 그래서 이러한 오류로 인해 실제의 운동과는 다른 가속도로 측정되는 것이다. 특히, 이러한 현상은 시료의 운동 속도가 클수록, 즉 본 실험에서는 가속도가 큰 운동일수록 더욱 크게 나타났는데, Table 2의 측정 결과에서도 가속도의 측정값이 큰 알루미늄판과 고무판의 경우가 다른 두 마찰시료보다 상대적으로 큰 표준편차를 보여 주고 있다. 또한, 마찰계수가 작은 시료의 경우는 실험대를 매끄럽게 내려가는 데 반해, 마찰계수가 큰 시료의 경우는 실험대를 내려가는 동안 약간의 회전이 발생해 시료가 실험대의 벽면과 닿았다 떨어졌다 하는 점도 가속도 측정값의 불규칙성을 더하는 것으로 생각된다. 이러한 편차 논의를 표준편차가 상대적으로 컸던 고무판 시료의 경우로 하여 실제 측정되었던 가속도로 살펴보면, 동영상 시스템을 이용한 측정에서는 가속도가 작게는 124.3 cm/s^2 에서 크게는 161.7 cm/s^2 로 측정되었으며, 측면 에어 가이드 트랙을 이용한 측정에서는 작게는 133.8 cm/s^2 에서 크게는 138.1 cm/s^2 로 측정되어 측면 에어 가이드 트랙을 이용한 측정 방법이 상대적으로 매우 안정된 가속도 측정값을 주는 측정 방법임을 확인할 수 있다.

한편, 측면 에어 가이드 시스템을 이용한 측정의 경우를 보면, 가속도의 측정값이 커질수록 편차가 조금씩 커지기는 하나, 그 크기는 상대적으로 상당히 작아 모든 실험에서 상당히 고른 측정이 이루어졌다고 할 수 있을 것으로 판단된다.

다음의 Fig. 6은 이상의 세 가지 측정 방법의 비교 목적과는 별도로 측면 에어 가이드 트랙을 이용하여 추가 실험을 한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 이러한 추가 실험은 네 가지 마찰시료에 대해 각기 트랙의 경사각에 변화를 주어 운동마찰계수를 측정하는 것이다. 본 연구에서 제작한 장치가 실험자의 의도에 따라 여러 각도, 즉 다양한 크기의 가속도로 마찰시료를 운동시켜 실험할 수도 있기 때문에 이러한 점을 고려하여 실험한 것이다.

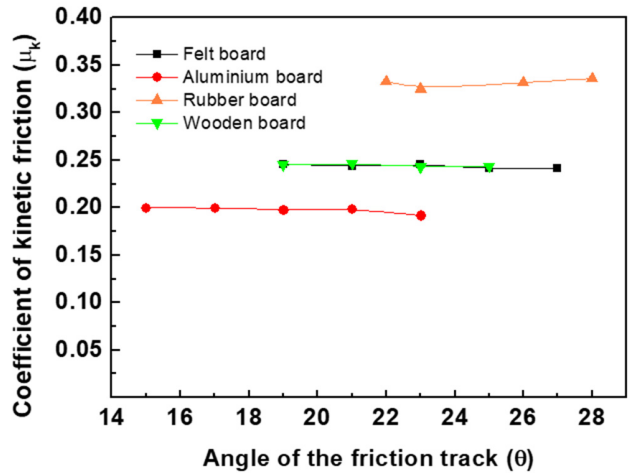


Fig. 6 Coefficients of kinetic friction are compared for four friction samples for various angles of the friction track

Fig. 6으로부터 마찰시료를 운동시키는 경사각에 관계없이, 즉 운동하는 마찰시료의 가속도의 크기에 관계없이 운동마찰 계수가 거의 일정하게 측정되는 것을 볼 수 있다. 이는 운동마찰력은 물체의 운동 속도와는 무관하다는 아몽톤의 마찰 법칙 (Amontons' laws of friction)을 잘 설명하는 결과이기도 하다. 이 추가 실험의 결과로부터 본 연구에서 제작한 측정 장치는 마찰 시료의 다양한 속도의 운동에서도 매우 일정하고 정확하게 운동마찰계수를 측정할 수 있음을 알 수 있다.

VI. 결론 및 제언

본 연구에서는 트랙의 측면 에어 가이드 효과를 이용하여 마찰시료와 접촉되는 면 외에는 부가적인 마찰 없이 마찰시료를 직선 운동시킬 수 있는 새로운 운동마찰계수 측정 장치를 개발하였다. 그리고 이 장치를 이용한 방법과 현재 운동마찰계수를 측정할 수 있는 대표적인 두 측정 방법인 동영상 시스템을 이용하는 방법, 힘 센서를 이용하는 방법의 세 가지 방법으로 운동마찰계수를 측정하는 비교 실험을 하였다. 그 결과 본 연구에서 개발한 장치로 한 실험에서의 운동마찰계수 측정값이 동영상 시스템을 이용하는 실험과 힘 센서를 이용하는 실험에서의 측정값보다 측정의 편차는 작으면서도 정확도는 높은 것으로 확인되었다. 더욱이 다른 두 측정 방법은 컴퓨터 프로그램으로 측정값을 분석하기 때문에 실험 전에 프로그램 사용법을 습득해야 하고, 가속도와 마찰력의 측정값을 분석하는 데에도 상당한 시간이 소요되는데 반해, 본 연구에서 개발한 장치는 포토게이트 타이머 시스템을 이용하여 간단한 작동으로 실험 즉시 가속도를 측정할 수 있어 실험 방법의 편리성과 적은 시

간이 소용되는 이점도 있다. 이러한 이점은 주어진 실험 시간 내에 다양한 시료를 실험하고, 실험에서 발생할 수 있는 여러 문제점을 고민하고 토론할 수 있는 시간을 확보할 수 있다는 점에서도 물리에 대한 지식이 부족하거나 이제 막 물리를 배우기 시작하는 학생들에게는 적절하고 효과적인 실험 방법이라 할 수 있을 것이다.

또한, 본 연구에서 개발한 장치는 트랙 양 끝에 도르래를 설치하여 도르래를 이용한 여러 역학적 현상을 실험으로 구현할 수도 있기 때문에, 여러 역학 실험에도 폭넓게 사용될 수 있다. 더욱이 이전의 연구에서도 밝혔던 바와 같이 포토게이트 타이머 시스템은 거의 모든 대학에서 이미 구비하고 있는 측정 장치이기 때문에 본 연구에서와 같은 운동마찰계수 측정 방법을 대학의 일반물리실험 또는 역학실험으로 편성하는 데는 실험 운영비용 면에서도 상당한 이점이 있다.

마찰 현상은 거의 모든 역학적 현상에서 나타난다. 그러므로 역학 현상을 다루고 실험하는 공학인은 마찰 현상에 대한 이해가 반드시 필요하다. 그러므로 이러한 마찰을 공학 입문 과정에서 배우고 익히는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러므로 대학에서는 본 연구에서 개발한 운동마찰계수 측정 장치 등으로 마찰 실험을 편성하고 운영함으로써, 학생들이 마찰 현상을 쉽고 올바르게 이해할 수 있는 기회를 갖게 하는 것이 꼭 필요하다고 사료된다.

끝으로, 본 연구에서 개발하고 제시한 운동마찰계수 실험 장치와 같이 뉴턴의 운동 법칙을 이해하는데 도움이 되는 실험 장치의 개발은 물리를 어려워하는 많은 공대생들에게 물리를 쉽고 자연스럽게 이해할 수 있는 기회를 제공한다는 점에서 더 많은 연구와 개발이 요구됨을 제언하고자 한다.

참고문헌

1. Jearl, W., David, H. & Robert, R.(2014). *Principles of Physics* (pp. 106-112), Wiley.
2. Raymond, A. S., John, W. J.(2017). *대학물리학* (pp. 104-108),

북스힐.

3. 최계영(2002). 운동스립힘에 대하여. *Sae Mulii*, 44(6), 352-355.
4. 김명민·안민영(2013). 중·고등학생의 마찰력 개념 이해의 어려움 분석과 한 가지 지도 전략의 제안. *New Physics: Sae Mulii*, 63(10), 1077-1084.
5. 하상우·이경호(2011). 주간보고서에 나타난 전공역학 수강생들의 마찰력에 대한 어려움과 그 어려움의 원인 구조. *New Physics: Sae Mulii*, 61(9), 840-849.
6. 홍성욱(2010). 마찰력과 관련된 기본 역학개념 형성에 관한 연구. *New Physics: Sae Mulii*, 60(2), 142-149.
7. 인하대학교 물리학과, <http://physics.inha.ac.kr/user/physics>
8. 충북대학교 물리학과, http://phy.chungbuk.ac.kr/wordpress/wp-content/uploads/2018/03/2018_일반물리학실험1_dev03.pdf
9. 고려대학교 물리학과, http://inphy.korea.ac.kr/GenPhyLab/Manual/2018_1_GenPhyLab_Manual_Exp1_2.kor.pdf
10. 숭실대학교 물리학과, <http://physics.ssu.ac.kr/web/physics/47>
11. 남형주(2016). 시료의 직선 운동이 가능한 마찰 계수 측정 실험 장치의 개발. *New Physics: Sae Mulii*, 66(7), 900-909.

참고사이트

- (주)세계과학 : http://www.sgs.co.kr/main.html?tm=product&md=product_detail&cc=100102&gc=GD00000654
- 코리아디지털(주) : http://sciencecube.kr/shop/item.php?it_id=1413878612



남형주 (Nam, Hyung Joo)

1992년: 중앙대학교 물리학과 졸업

1997년: 동 대학원 물리학과 석사

2006년: 동 대학원 물리학과 박사

관심분야 : 실험 장치 개발, 물리교육

현재: 중앙대학교 다빈치교양대학 조교수

E-mail: todayonlybabo@cau.ac.kr