

Instruction Manual  
for the PASCO scientific  
Model EX-5508

# 미끄럼 마찰력



## 장비 구성

### EX-5508 Sliding Friction

Discover Friction Accessory	ME-8574
Force Sensor	PS-2104
Motion Sensor	PS-2103
500g Cart Masses (4)	ME-6757
Physics String	SE-8050

### Required :

850 Universal Interface

PASCO Capstone Software

## 소개

이 실험의 목적은 서로 다른 표면에 대한 정지 마찰계수 및 운동 마찰계수를 구하는 것이다. 힘 센서는 마찰 수레를 정지 상태에서 일정한 속도로 끄는 동안 정지 마찰 및 운동 마찰을 측정할 수 있다. 이러한 힘과 각각의 수직항력에 대한 그래프로 두 가지 계수를 알아낸다. 또한 마찰력이 접촉 표면의 종류에 따라 달라지는 것과 속력이 운동 마찰력에 미치는 영향 등을 조사할 수 있다.

## 기본 이론

어떤 표면 위에 놓인 물체에 힘  $F$ 를 가할 때, 최대 정지 마찰력보다 큰 힘이 가해질 때까지 물체는 움직이지 않는다. 정지 마찰계수  $\mu_s$ 는 최대 정지 마찰력  $F_s$ 와 수직항력  $F_N$  사이의 비율로 정의된다.

$$\mu_s = \frac{F_s}{F_N} = \frac{F_{\max}}{mg}$$

여기서  $F_{\max}$ 는 미끄러짐을 방해하는 수평 힘이며,  $F_N$ 은 수직 방향이 운동이 없으므로  $mg$ 와 같다.

물체가 일정한 속력을 유지하기 위하여, 가해진 힘  $F$ 는 운동 마찰력과 같아야 한다. 운동 마찰계수  $\mu_k$ 는 운동 마찰력  $F_k$ 와 수직항력  $F_N$  사이의 비율로 정의된다.

$$\mu_k = \frac{F_k}{F_N} = \frac{F}{mg}$$

## 장비 설치

1. 힘 센서와 운동 센서를 850 인터페이스의 PASPort 단자에 연결한다.
2. 스트링을 50cm 가량의 길이로 자른다. 스트링을 고리(loop) 모양으로 묶어준다. 고리의 한쪽 끝을 마찰 수레 앞쪽의 브라켓 구멍에 통과시킨다. 고리의 다른 한쪽 끝을 이 고리로 통과시키고(Sliding Friction Capstone 파일 Setup 페이지 동영상 참조), 브라켓 가운데에 오도록 하여 단단히 조여 준다. 이는 수레가 움직이는 동안 옆으로 회전하는 것을 막아준다. 코르크 바닥 수레와 펠트 바닥 수레, 플라스틱 바닥 수레 중 1개에 대하여 이 과정을 반복한다.
3. 스트링의 반대쪽 끝을 힘 센서의 후크에 걸고 묶어준다.
4. 운동 센서의 스위치를 카트 모드로 설정한다. 각도를 0도로 만들어 센서가 위나 아래를 향하지 않도록 한다.
5. 마찰 수레를 운동 센서 앞에서 약 15cm 정도 떨어진 곳에 놓는다. 접촉 표면의 변화는 결과에 영향을 줄 수 있으므로 각각의 시행마다 테이블의 같은 위치를 이용하도록 한다.



1. 각 마찰 수레의 질량을 측정하고 각 질량 막대(Mass bar)의 질량이  $500 \pm 5\text{g}$ 인지 확인한다. Data 2 탭에 있는 Friction Tray Masses 표에 측정한 값을 입력한다.
2. 스트링에 장력이 없을 때, 힘 센서의 "zero" 버튼을 누른다.
3. 코르크 바닥 수레에 질량 막대 1개를 넣는다. 수레가 옆으로 돌아가지 않도록 질량 막대를 수레의 가운데에 놓아주도록 한다.
4. 마찰 수레를 실험 테이블 위에 놓는다. 접촉 표면의 변화는 결과에 영향을 줄 수 있으므로 각각의 시행마다 테이블의 같은 위치를 이용하도록 한다.
5. RECORD 버튼을 클릭한다. 힘 센서가 수레에 묶여있는 상태에서, 수레가 움직이기 시작할 때까지 천천히 수평 방향으로 수레를 당기고 느리고 일정한 속도로 실험대를 가로지르도록 계속 당겨준다. Procedure 1 탭에 있는 속도 vs. 시간 그래프를 보고 거의 일정한 속도로 움직이는지 확인한다. 정확히 일정한 속도로 움직이는 것은 매우 어렵지만, 거의 일정하도록 유지된 구간을 구분할 수는 있을 것이다. 마찰 수레를 관찰하면서 등속운동을 유지하도록 하는 것이 좋다. 속도 vs. 시간 그래프를 보려고 하면 과잉으로 행동하여 위아래로 오가게 되는 경향이 있다. 데이터 수집이 끝나면 STOP 버튼을 클릭한다. Smoothing 값을 20으로 설정하여 속도 vs. 시간 그래프에서 대략적인 속력 값을 읽는다. Data 2 탭으로 가서 Approx. Tray Speeds 표의 Low Speed 열에 이 값을 기록한다.
6. Data 1 탭에 있는 힘 vs. 시간 그래프는 아래와 비슷하게 보일 것이다. 만일 피크와 그보다 낮은 수평 구간이 나타나지 않는다면 카트의 속력을 일정하게 유지하지 못하였거나 카트가 이동하는 선로 표면이 오염되었을 수 있다. 테이블 위를 깨끗이 닦거나, 테이블의 다른 구간을 이용하거나, 일정한 속력으로 카트를 이동시키는 연습을 하도록 한다. 원치 않은 시행을 삭제하려면, 화면 오른쪽 하단의 Delete Last Run을 클릭한다.



**[분석 1]**

1. Data 1 탭을 열어 상단의 도구 막대에서 Statistics 아이콘 옆의 검정색 삼각형을 클릭한 다음, 최대값(Max)이 선택되어 있는지 확인한다. Statistics 아이콘을 클릭한다. 왼쪽 상단에 힘의 최대값이 나타날 것이다. Data 2 탭의 Cork Bottom Tray 표의 static 열에 이 값을 기록한다. Data 1 탭으로 돌아온다. Statistics 아이콘을 다시 클릭하여 비활성화 시킨다.
2. 그래프 도구 막대의 Selection 아이콘을 클릭한 다음, 하이라이트 상자의 크기와 모양을 조절하여 힘이 일정한 구간(Procedure 1 탭에 있는 힘 vs. 시간 그래프에서 속력이 일정하게 보이는 위치)을 포함 시킨다. Statistics 도구 옆의 삼각형을 클릭하여 평균값(Mean)을 선택한다. Statistics 아이콘을 클릭한다. 하이라이트 상자의 왼쪽 중앙에 수레가 일정한 속력으로 움직이는 동안의 힘의 평균값이 나타날 것이다. Data 2 탭에 있는 표의 kinetic 열에 이 값을 입력한다. Data 1 탭으로 돌아온다. Statistics 아이콘을 다시 클릭하여 비활성화 시킨다. 그래프 도구 막대에서 Delete Active Element 아이콘을 클릭하여 Selection 도구를 비활성화 시킨다.
3. Data 2 탭의 Cork Bottom Tray 표의 첫 번째 열에 코르크 바닥 수레 및 500g 질량 막대를 합한 총 질량을 기입한다.
4. 오른쪽 하단의 Delete Last Run 버튼을 클릭한다.
5. 코르크 수레에 질량 막대를 2개, 3개, 4개를 넣어 실험 절차 1의 과정 2-6과 분석 1의 1-4를 반복한다. 이전과 동일한 속력으로 움직여 실험하도록 한다.

**[분석 2]**

1. Analysis 2 탭의 마찰력 vs. 수직항력 그래프에서, 도구 막대의 Curve Fit 도구를 이용하여 최적의 선형 맞춤 직선 그래프를 찾고, 정지마찰(static) 및 운동마찰(kinetic) 그래프의 기울기를 구한다. 그래프 위쪽의 범례 상자에서 static 데이터 기호를 클릭하여 정지마찰 데이터를 강조 표시한다. Curve Fit 도구의 삼각형을 클릭하고 '비례(Proportional)'를 선택한다. 이것은 원점을 지나는 직선 그래프로 맞추어 준다. 왜 이것을 선택해야 할까? 기울기 A가 의미하는 물리량은 무엇인가? Conclusion B 탭에 있는 표에 이 기울기 값을 입력한다. 삼각형을 다시 한 번 클릭하여 비례(Proportional) 선을 없앤다. 운동마찰(kinetic) 데이터에 대해서도 이 과정을 반복한다. 실험 결과는 직선 그래프와 얼마나 잘 일치하는가?
2. 더 빠른 속력으로 카트를 움직이면서 실험 절차 1의 과정 2-6을 반복한다. 분석 1의 과정 2-6도 반복하여 수행한다. 과정 6에서 fast 실행 데이터의 기울기를 구하고, Conclusion B 탭에 있는 표의 fast kin 열에 입력한다. 실험 절차 1의 과정 5로부터 속력을 구하여 Data 2 탭에 있는 표에 입력한다. Analysis 2 탭의 마찰력 vs. 수직항력 그래프를 관찰한다. 운동 마찰력은 속력과 관계없이 독립적인 것으로 추정하는 것에 문제가 없는가? 실험 결과는 이러한 추정을 뒷받침하는가?

## 실험 절차 2

### [실험 절차 2]

1. 펠트 및 플라스틱 바닥 수레에 500g 질량 막대를 4개씩 넣어 느린 속력에서 실험 절차 1의 과정 2-6을 반복한다. 분석 1의 과정 1, 2, 4를 반복하여 수행하고, 힘 데이터를 Data 3 탭의 Felt Static, Felt Kinetic, Plastic Static, Plastic Kinetic 열에 입력한다. 전체 질량이 2100g인 것을 이용하여, 절편을 영점으로 가정하였을 때 각 수레에 대한 마찰력 vs. 수직항력 그래프의 기울기를 계산하여라. (그래프를 보지 않고도 계산할 수 있어야 한다.) Conclusion B 탭에 있는 표에 기록한다.
2. 2개의 플라스틱 바닥 수레(또는 같은 바닥면을 가진 2개의 수레라면 어느 것이든 사용 가능) 안에, 500g 질량 막대를 2개씩 넣는다.
3. 그림 1과 같이 하나의 수레를 다른 수레 위로 쌓아둔다. 각 수레에 500g 질량 막대가 2개씩 들어있는 상태에서, 실험 절차 1의 과정 2-6을 반복한다. 이전과 마찬가지로, 최대 정지 마찰력과 일정한 속력에서의 운동 마찰력을 구한다. Data 3 탭에 있는 Stack Static 및 Stack Kinetic 열에 이 값을 입력한다.

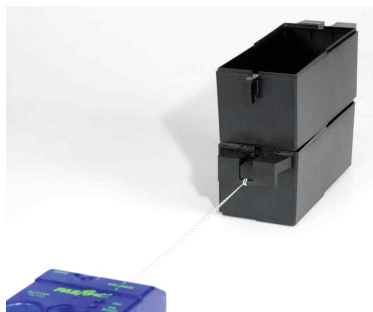


그림 1. Stack

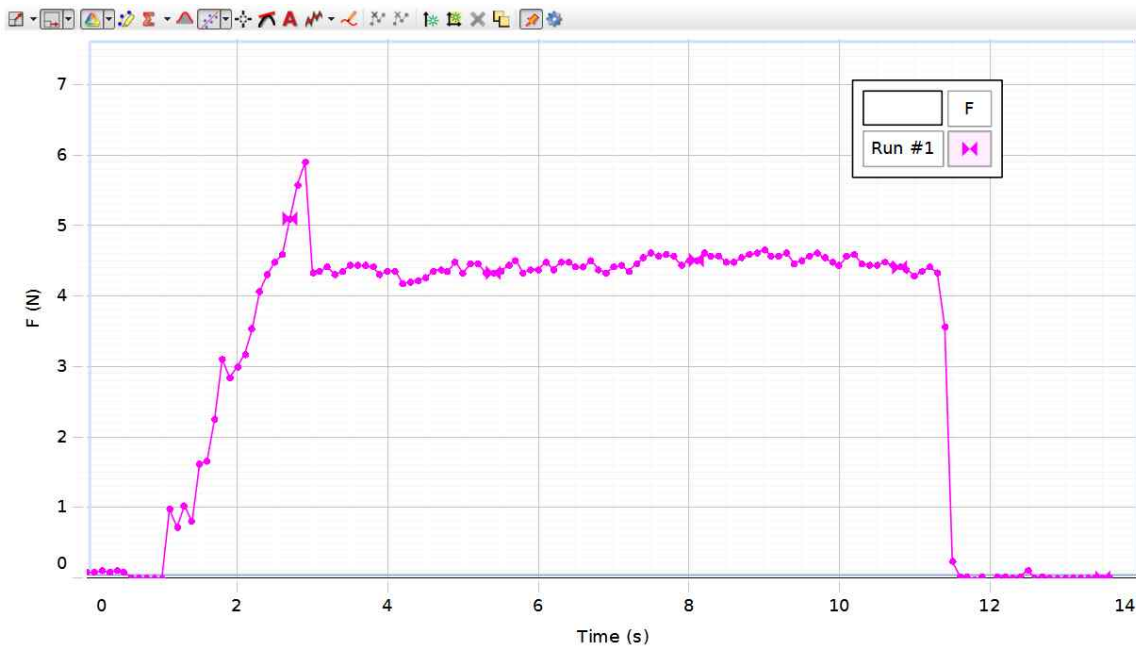
4. 그림 2와 같이 하나의 수레를 다른 수레의 뒤에 걸어준다. 이렇게 하면 수직항력은 동일하지만 접촉면적이 2배가 된다. 각 수레에 500g 질량 막대가 2개씩 들어있는 상태에서, 실험 절차 1의 과정 2-5를 반복한다. 이전과 마찬가지로, 최대 정지 마찰력과 일정한 속력에서의 운동 마찰력을 구한다. Data 3 탭에 있는 Train Static 및 Train Kinetic 열에 이 값을 입력한다.



그림 2. Train

## 결과 데이터

### [실험 결과 1] 샘플 데이터



Applied Force

### [실험 결과 2]

#### 표. Friction Tray Masses

	Cor(g)	Felt(g)	Plastic(g)
Mass			

#### 표. Approx. Tray Speeds

	Low speed (m/s)	High speed (m/s)
Speed		

#### 표. Cork bottom tray

Total mass (g)	N (N)	static (N)	kinetic (N)	fast (N)



## [실험 결과 3]

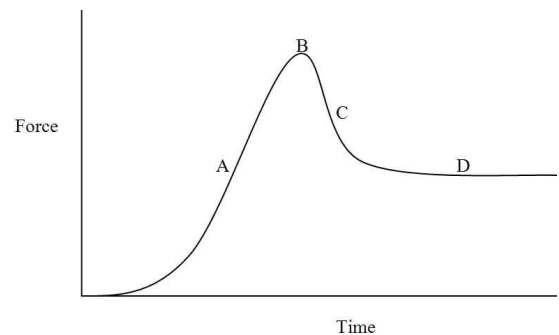
표. Frictional Forces

System	Fric. Force (N)
Felt Static	
Felt kinetic	
Plastic Static	
Plastic Kinetic	
Stack Static	
Stack Kinetic	
Train Static	
Train Kinetic	

## 결론

## [결론 A]

- 오른쪽 그래프는 수평면을 가로질러 물체를 잡아당겼을 때 물체에 작용한 힘을 나타내고 있다. 그래프 위에 표시된 각 위치에서의 힘 다이어그램을 그리고, 물체의 운동을 설명해보라.



- 물체에 작용하는 정지 마찰력과 수직항력 사이에는 어떠한 관계가 있는가? 만일 정비례 관계라면, 이 실험에서의 불확도(uncertainty)는 얼마나 되는가? 실험 데이터의 다소 큰 산포는 어떤 요인으로 설명할 것인가? 힌트: Analysis 2 탭의 그래프를 관찰한다.
- 마찰력 vs. 수직항력 그래프에서 기울기의 물리적인 의미는 무엇인가?
- 마찰력 vs. 수직항력 그래프의 수직 절편은 왜 0이 되어야 하는가?

**[결론 B]****표. Coefficient of Friction**

tray	stat	kin	fast kin
cork			
felt			
plastic			

- 속력은 운동마찰에 영향을 미치는가? 차이가 관찰된다면, 그것은 유의미한 차이인가? 그 이유는 무엇인가?
- 마찰 수레에 대한 수직항력은 정지 마찰계수 또는 운동 마찰계수에 영향을 미치는가? 설명해보아라.
- 마찰 수레를 마찰계수가 큰 것부터 작은 것 순으로 나열해보아라. 마찰계수가 큰 표면과 마찰계수가 작은 표면 사이에는 어떠한 물리적인 차이가 있는가? 설명해보아라.
- 정지 마찰계수와 운동 마찰계수 사이에는 어떠한 패턴이 관찰되는가? 자동차를 운전할 때에 이것이 중요한 이유는 무엇일까? 고무 타이어의 정지 마찰계수 및 운동 마찰계수 사이의 차이는 코르크에서 보다 훨씬 크다.
- 잠김방지(anti-lock) 브레이크가 자동차 사고 방지에 도움이 되는 이유는 무엇인가?

**[결론 C]**

- 마찰력은 접촉 표면의 면적에 의존하는가?(불확도가 다소 높았음을 기억하여라.) 아는 대로 설명하여라. 힌트: Stack 및 Train 실험 결과를 고려한다. 자동차에서 너비가 큰 타이어의 이점은 무엇인가?