[국제캠퍼스 실험 전용]

원운동과 구심력

Objective

등속 원운동에서 물체의 질량, 속력 및 회전 반경과 구심력의 관계를 이해한다.
등속 원운동을 하는 물체에 작용하는 구심력을 측정하여 이론으로 배운 내용을 확인한다.

Theory

Reference:
Young & Freedman, *University Physics* (15th ed.), Pearson, 2020
3.4 Motion in a Circle (p.109~112)
4.3 Newton's Second Law (p.135~140)
5.4 Dynamics of Circular Motion (p.177~182)

등속 원운동(uniform circular motion)이란 일정한 속력으로 원형 경로를 따라 이동하는 운동을 말한다. 이와 같이 운동하는 물체는 진행 방향이 아닌 진행 경로에 수직 방향으로 가속한다. 즉 등속 원운동의 가속 성분은 항상 원형 경로의 중심을 향한다. 그 결과 속력의 변화가 없이 속도의 방향이 지속적으로 바뀐다.

그림 1(a)의 물체는 중심 O 로부터 거리 R 만큼 떨어진 원형 경로를 일정한 속력으로 이동한다. 이 물체는 시간 Δt 동안 P_1 에서 P_2 로 이동한다. 이 때, 속도는 그림 1(b)와 같이 $\boldsymbol{\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1}$ 만큼 변한다. 그림 1(a), (b)에서 $\vec{\boldsymbol{v}}_1$ 과 OP_1, $\vec{\boldsymbol{v}}_2$ 와 OP_2 는 서로 수직이므로 각도 $\Delta\phi$ 가 동일하다. 따라서 다음의 식이 성립한다.

$$\frac{|\boldsymbol{\Delta\vec{v}}|}{v_1} = \frac{\Delta s}{R} \quad or \quad |\boldsymbol{\Delta\vec{v}}| = \frac{v_1}{R}\Delta s \qquad (1)$$

이 시간 Δt 동안 평균 가속도의 크기 a_{av}는 다음과 같다.

$$a_{\mathrm{av}} = \frac{|\boldsymbol{\Delta\vec{v}}|}{\Delta t} = \frac{v_1}{R}\frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad (2)$$

P_1 에서 순간 가속도 $\vec{\boldsymbol{a}}$ 의 크기 a 는 P_2 가 P_1 에 근접할 때의 극한값과 같다.

$$a = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{v_1}{R}\frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{v_1}{R}\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad (3)$$

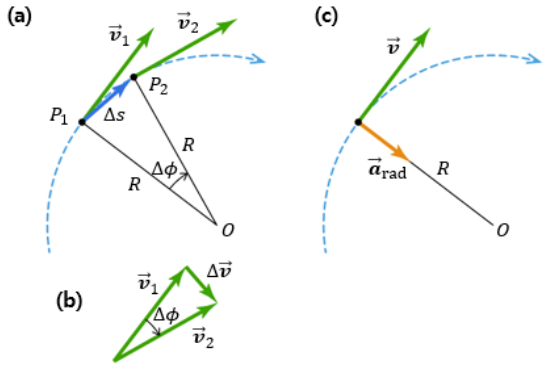


그림 1 일정한 속력으로 원운동을 하는 입자의 속도의 변화량 $\boldsymbol{\Delta\vec{v}}$, 평균가속도 $\vec{\boldsymbol{a}}_{\mathrm{av}}$ 및 순간가속도 $\vec{\boldsymbol{a}}_{\mathrm{rad}}$ 를 구하는 방법

시간 Δt 가 매우 작을 경우 Δs 는 원형 경로를 따라 운동하는 물체의 이동 거리와 같다. 따라서 $\Delta s/\Delta t$ 의 극한값은 P_1 에서의 속력 v_1 이 된다. 그런데, P_1 은 원형 경로 상의 임의의 위치이기 때문에 식(3)은 경로 상의 모든 위치에서 성립한다. 따라서, v_1 을 일반화하여 v 로 표현할 수 있다.

$$a_{\text{rad}} = \frac{v^2}{R} \tag{4}$$

등속 원운동에서 가속도 방향은 그림 1(c)와 같이 속도의 방향에 수직이며 원의 중심을 향한다. 그래서 등속 원운동에서 가속도를 'seeking the center' 를 의미하는 그리스어에서 기원한 "centripetal"을 사용하여 구심 가속도(求心加速度, centripetal acceleration)라고도 표현한다. 등속 원운동을 하는 물체에 대해 다양한 위치에서 속도와 가속도 벡터 방향을 표시하면 그림 2 와 같다.

물체가 원형 경로를 한 바퀴 회전하는데 걸리는 시간, 즉 회전 주기(period) T 를 사용하여 구심 가속도를 표현할 수도 있다. 경로의 반경이 R 이라면 물체는 시간 T 동안 원주 $2\pi R$ 의 거리를 이동하므로, 물체의 속력은 다음과 같다.

$$v = \frac{2\pi R}{T} \tag{5}$$

식(5)를 식(4)에 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$a_{\text{rad}} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} \tag{6}$$

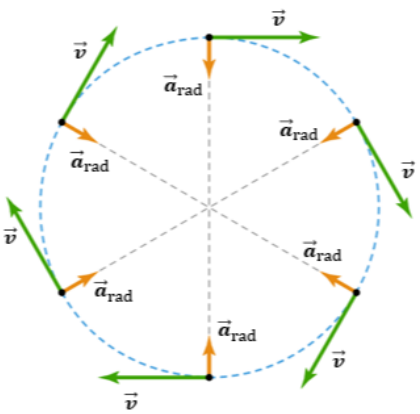


그림 2 등속 원운동에서 물체의 가속도와 속도

등속 원운동은 다른 운동과 마찬가지로 뉴턴의 운동법칙 $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ 를 따른다. 물체를 원형 경로를 따라 가속시키기 위한 힘 $\sum \vec{F}$ 는 그림 3 과 같이 항상 원의 중심을 향한다. 가속도의 크기가 일정하므로, 힘의 크기 F_{net} 도 항상 일정하다. 만약, 내부로 향하는 힘이 멈추면 물체는 그림 4 와 같이 원형 경로의 접선 방향으로 날아간다.

등속 원운동에서 가속도 크기는 식(4)와 같으므로 질량이 m 인 물체에 작용하는 힘의 크기 F_{net} 은 다음과 같다.

$$F_{\text{net}} = ma_{\text{rad}} = m\frac{v^2}{R} \tag{7}$$

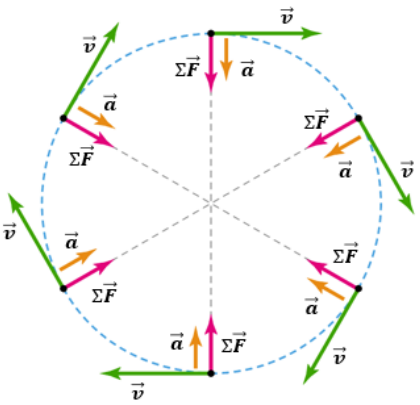


그림 3 등속 원운동의 알짜힘, 가속도 및 속도

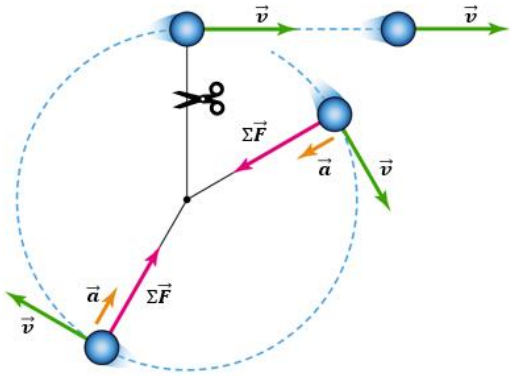


그림 4 원운동을 유지시키는 힘이 갑자기 사라질 경우 나타나는 현상

Equipment

1. 실험장비

장비	수량	용도 및 비고
컴퓨터 및 소프트웨어 데이터분석: Capstone	1	인터페이스의 다양한 기능을 제어한다. 각종 센서에서 측정한 데이터를 표시하고 분석한다.
인터페이스	1	다양한 센서를 연결하여 물리량을 측정한다. 최대 15V 1A 의 직류/교류 전원 및 다양한 파형을 회로에 공급한다.
힘센서	1	$-50\text{N} \sim 50\text{N}$ 범위의 힘의 세기를 측정한다.
포토게이트 (전용 케이블 포함)	1	광학적인 방법으로 물체의 유무를 판단하여 주기, 속력 등 시간과 관련된 물리량을 측정한다.
원운동 장치	1	모터를 사용하여 물체를 일정한 속력으로 회전시킨다. 회전대, 모터 및 포토게이트 거치대로 구성된다.
회전고리	1	회전하는 와이어를 고정된 힘센서에 연결한다.
와이어	1	질량추와 힘센서를 연결한다.
질량추 세트	1 set	다양한 질량을 가진 질량추이다. (고리형 유동질량 4 종, 관통형 고정질량 4 종) (플라스틱, 알루미늄, 알루미늄/황동, 스테인리스강)
고정질량 추걸이 (고정너트 포함)	1	고정질량을 고정한다. 회전 주기를 측정하는 포토게이트의 측정 기준점이 된다.

장비	수량	용도 및 비고
원형 수준기	1	장비의 수평 상태를 확인한다.
전선	2	인터페이스의 전원 출력 단자와 원운동 장치의 모터 전원 입력 단자를 연결한다.
A 형 베이스 멀티클램프 지지막대 (600mm) 지지막대 (300mm)	1 1 1 1	실험 장비를 다양한 방법으로 고정하여 구성한다.
전자저울 (공용)	공용	추의 질량을 측정한다.

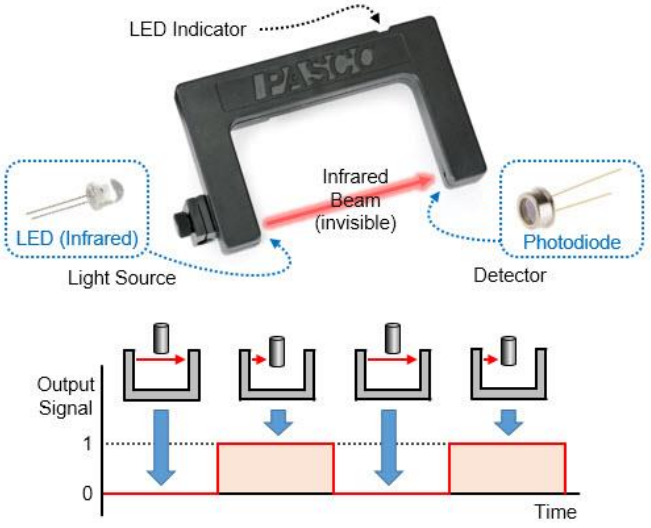
2. 주요 장비 기능 및 작동 원리

(1) 포토게이트 (Photogate)

광학적 방법으로 물체의 존재 여부를 감지하는 센서이다. 광학 스위치로 사용하거나 시간과 관련된 물리량을 측정하는데 응용하는 등 다양한 용도로 활용할 수 있다.

적외선을 방출하는 발광다이오드(LED)와 적외선을 검출하는 광센서(Photodiode or Phototransistor)가 일직선 상에 마주보는 형태로 구성된다. 만약 두 소자 사이에 물체가 있을 경우에 적외선이 차단되면서 센서의 출력 신호가 바뀐다.

그림과 같이 발광다이오드에서 방출된 적외선이 차단되지 않고 광센서에 도달하면 디지털 신호 0 이 출력되고, 어떤 물체에 의해 적외선이 차단되면 디지털 신호 1 이 출력된다. 따라서, 인터페이스 장치를 통해 시간에 따른 디지털 신호의 변화를 감지하여, 포토게이트 사이로 지나가는 물체의 속도를 측정하거나 반복적으로 움직이는 물체의 주기를 측정하는데 활용할 수 있다.

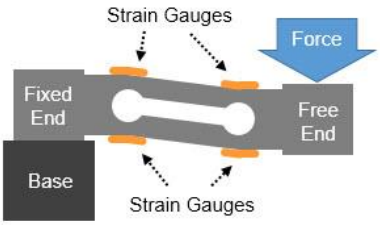


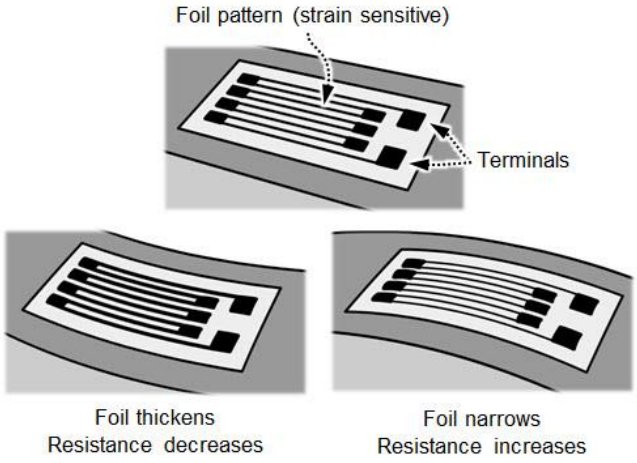
(2) 힘센서 (Force Sensor)

$-50\mathrm{N} \sim 50\mathrm{N}$ 범위의 당기는 힘 또는 미는 힘의 세기를 측정한다.

힘센서는 주변에서 많이 사용되는 전자 저울과 동일한 방식으로 작동하며, 로드셀(load cell)을 사용하여 힘의 세기를 측정한다. 로드셀은 다음 그림과 같이 외력에 대해 비례적으로 변형되는 탄성체와 변형의 정도를 전기적인 신호로 바꾸어주는 스트레인 게이지(strain gauge)로 구성된다.

탄성체가 힘을 받아서 변형되면, 탄성체의 표면에 부착된 스트레인 게이지의 박막 패턴이 이완되거나 수축되어 두께가 변하게 되고 결과적으로 박막의 전기 저항이 변한다. 따라서 스트레인 게이지 양 끝의 단자 전압을 측정하면 힘의 세기를 정밀한 전기적 신호로 변환하여 표시할 수 있다.





(3) 질량추 세트 (Mass Set)

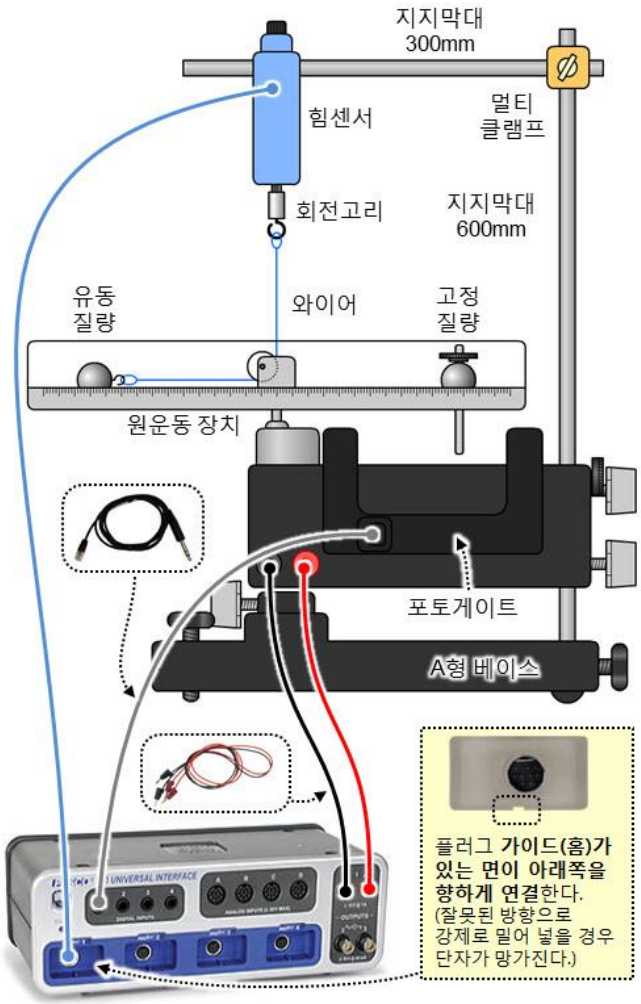
용도에 따라 두 가지 형태로 구분되며, 각각 크기는 동일하나 밀도가 다른 네 종류의 물질로 구성되어 있다.

	유동질량	고정질량
용도	구심력 측정	회전 균형, 장비 보호
특징	고리가 달려 있음	구멍이 뚫려 있음
사용 방법	힘센서에 연결된 와이어에 걸어줌	회전대에 고정함
질량 측정	전자저울로 정확하게 측정	측정할 필요 없음

재질	색상	질량 범위 (g)
플라스틱	흰색	11.50~12.50
알루미늄	밝은 은색	23.50~24.50
알루미늄+황동	은색+황색	43.00~44.00
스테인리스 강	어두운 은색	66.50~67.50

Setup

Setup 1. Equipment setup



CAUTION

실험 장비가 회전할 때에는 부상 또는 장비 파손이 발생할 수 있으므로 다음 사항을 반드시 확인한다.

① 작동 중에는 장비에서 1m 이상 떨어져서 관찰한다.

② 장비에 연결된 각종 케이블이 회전 운동 장치에 걸리지 않도록 잘 정리한다.

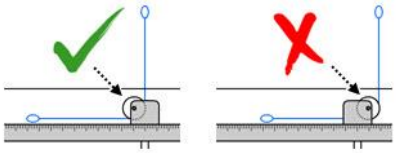
③ 장치가 LCD 모니터에 충돌하지 않도록 배치한다.

CAUTION

회전 고리를 장착할 때 강한 힘으로 조이지 않도록 주의한다. 센서 파손, 측정 오류가 발생할 수 있다.

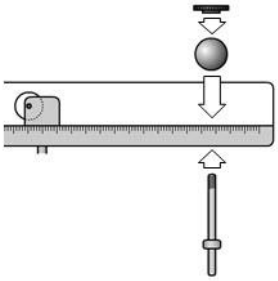
NOTE

① 와이어를 도르래 아래로 밀어 넣는다. 힘센서–와이어–회전축이 일직선 상에 놓여야 한다.



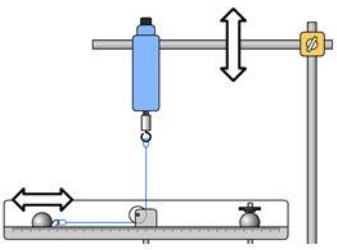
② 고리가 달린 유동질량은 와이어에 걸어준다.

③ 구멍이 뚫린 고정질량은 다음과 같이 고정한다.



NOTE

유동 질량의 회전 반경은 상단 지지막대의 높이를 조정하여 변경할 수 있다.

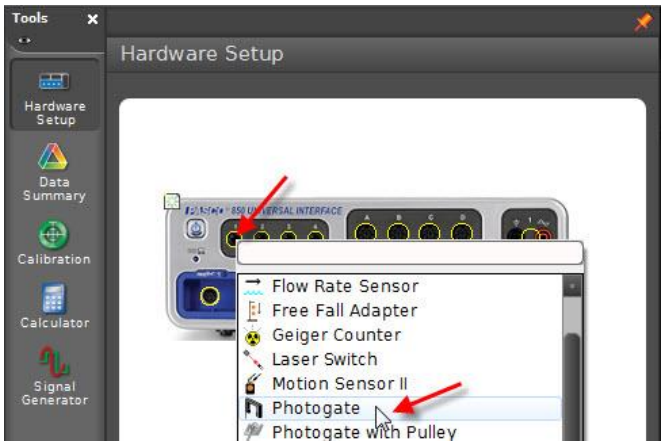


Setup 2. Software Setup

(1) 캡스톤 프로그램을 실행한다.

(2) 포토게이트를 설정한다.

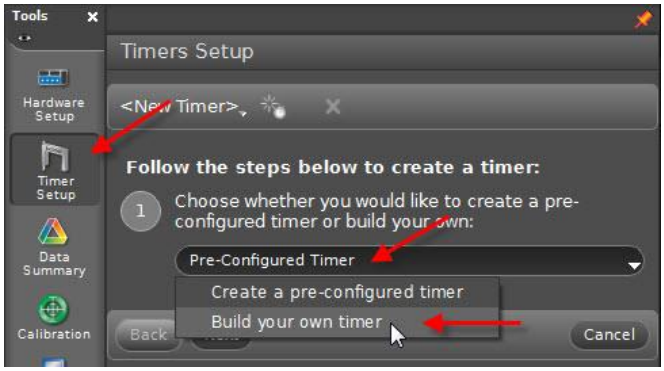
포토게이트가 연결된 포트를 클릭한 후 목록에서 [Photogate]를 선택한다.



(3) 타이머를 설정한다.

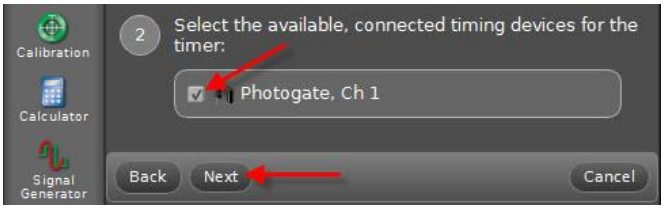
원운동의 회전 주기를 측정하기 위해 타이머를 구성한다. [Timer Setup]을 클릭하여 순차적으로 설정한다.

① 타이머를 생성한다. 사용자 설정 타이머를 생성하기 위해 [Build your own timer]를 선택한다.



② 측정 장치를 선택한다.

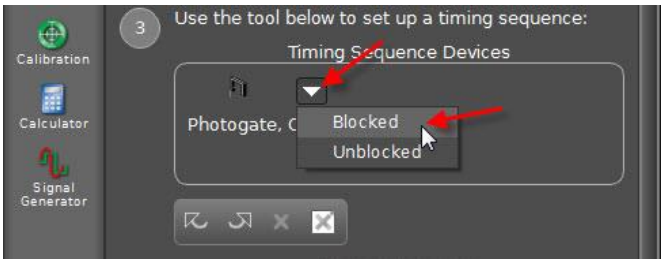
[Photogate, Ch1]을 체크한 후 [Next]를 클릭한다.



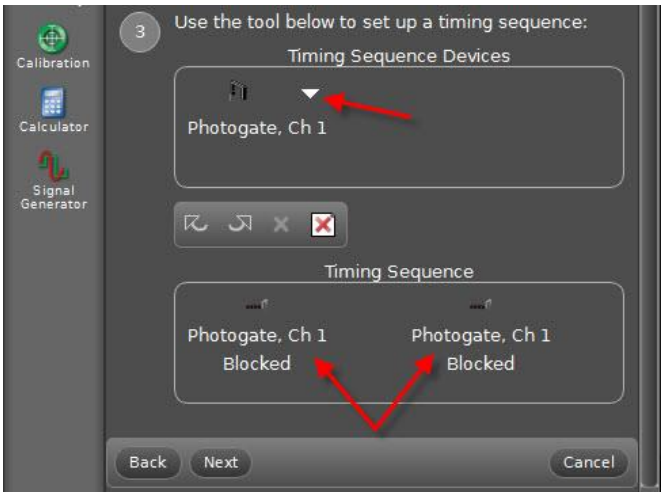
③ 주기 계산을 위한 신호를 배열한다.

고정질량 추걸이 막대가 포토게이트를 지나가면, 포토게이트 적외선이 차단되면서 [Blocked] 신호가 발생한다. 이후 회전대가 1 회전하여 다음 신호가 발생할 때까지의 시간이 회전대의 회전 주기 T 가 된다. (이 값은 순서(5)에서 추의 속력을 계산할 때 사용된다.)

Photogate 아이콘의 [▼]를 클릭, [Blocked]를 선택한다.



다시 한 번 [▼]를 클릭하여 [Blocked]를 선택하면, 두 개의 [Blocked] 신호가 생성된다. 완료 후 [Next]를 클릭하여 다음 단계로 넘어간다.



④ 사용자 설정 타이머를 저장한다.

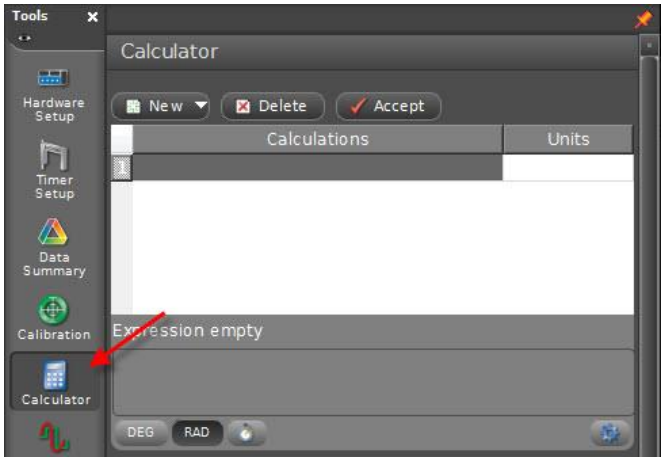
"period" 또는 적절한 타이머 이름을 입력한 후 [Finish]를 클릭하여 설정을 완료한다.

(5) 수식을 설정한다.

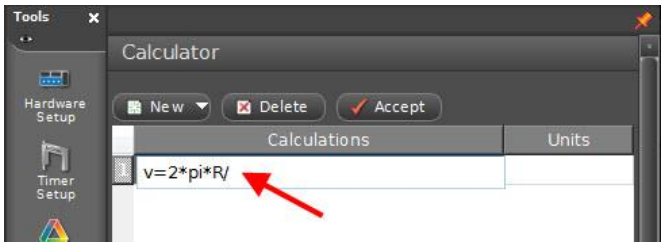
등속 원운동에서 물체의 속력 v 는 다음과 같다.

$$v = \frac{\text{원운동 1 회전 거리}}{\text{회전주기}} = \frac{2\pi R}{T} \qquad (5)$$

여기에서 회전주기 T 는 순서(4)에서 설정한 타이머에 의해 측정된다. 변수 v, R 은 [Tools] 메뉴의 [Calculator]를 사용하여 정의한다.



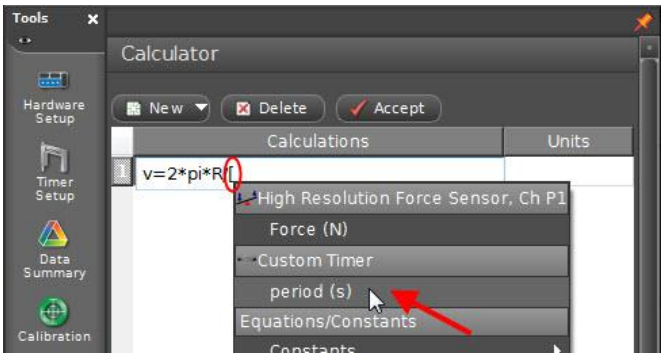
속도 v 의 수식을 정의한다. 첫 번째 행에 적절한 수식을 입력한다.



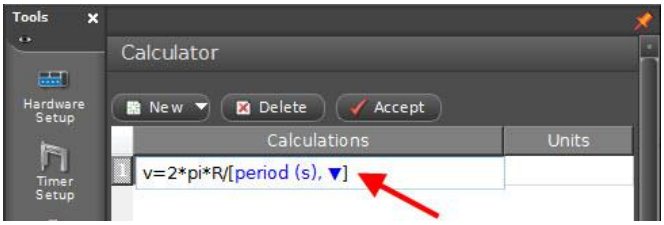
식 $v = 2\pi R/T$ 을 정의하기 위해 "v=2*pi*R/" 과 "["를 입력한다. 주기 "T" 대신 "[" 를 입력해야 하는 것에 주의한다.

주기 T 는 순서(4)의 타이머에 의해 측정되는 값을 불러오는데, 센서 측정값을 수식으로 불러올 때는, 대괄호 "[" 와 "]" 를 사용하여 다른 변수와 구분한다.

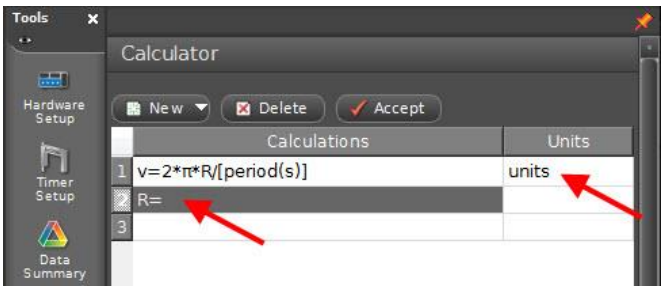
대괄호 "[" 를 입력하는 순간 다음과 같은 팝업 메뉴가 생기는 것을 확인할 수 있다.



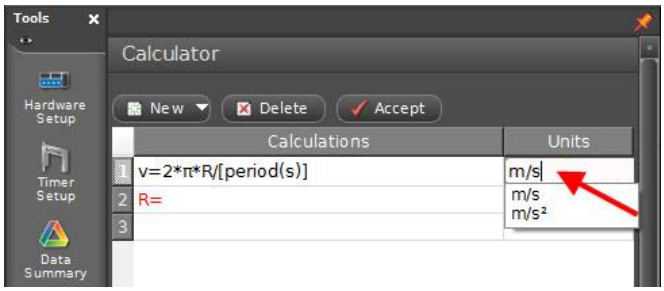
순서(4)-④에서 설정한 타이머 이름 [period(s)]를 선택한다. 해당 변수를 선택하면 다음과 같이 [period(s), ▼]로 표시되는 것을 확인할 수 있다.



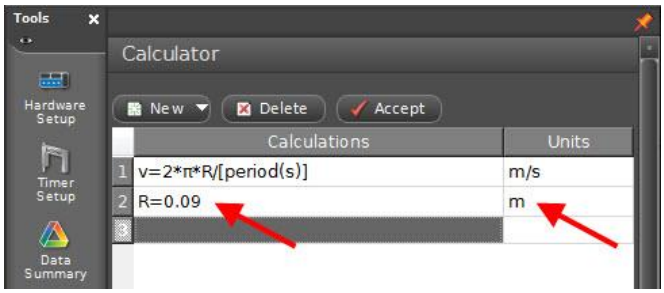
수식 입력을 완료하고 [Enter] 키를 누르면, 해당 변수의 단위를 입력하는 셀과, 1 행에서 정의되지 않은 변수 R 을 정의하는 셀이 자동으로 생성된다.



속도 v 의 단위를 적절하게 입력한다.



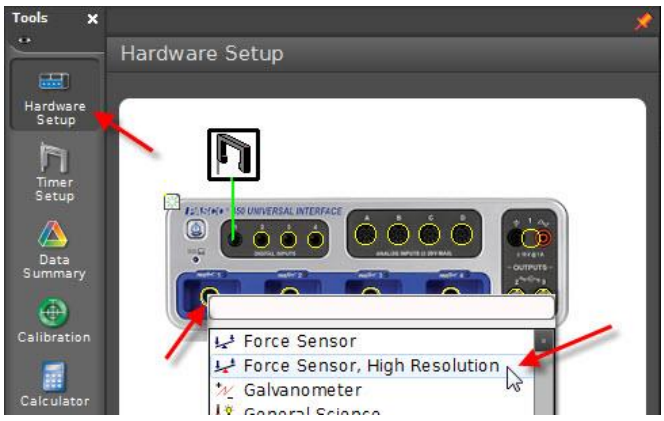
반경 R 에 적절한 상수와 단위를 입력한다. 반경 R 은 실험 중 설정한 질량추의 회전 반경에 따라 적절한 값으로 변경해 주어야 한다.



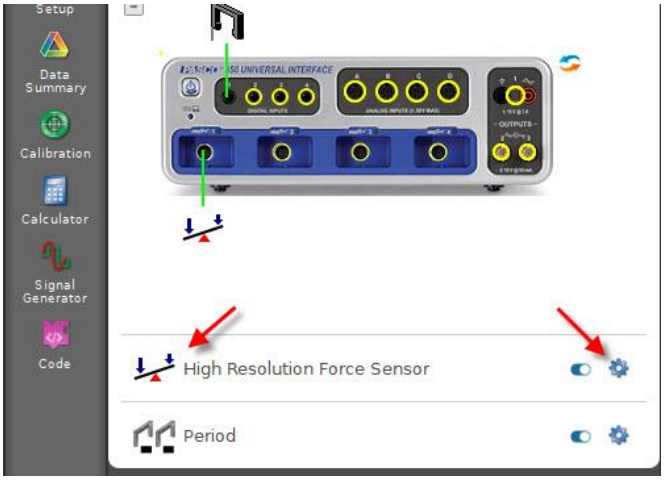
(6) 힘센서를 설정한다.

힘센서는 자동으로 인식된다.

만약 인식되지 않았을 경우에는 힘센서가 연결된 채널을 클릭하여 [Force Sensor, High Resolution]를 선택한다.

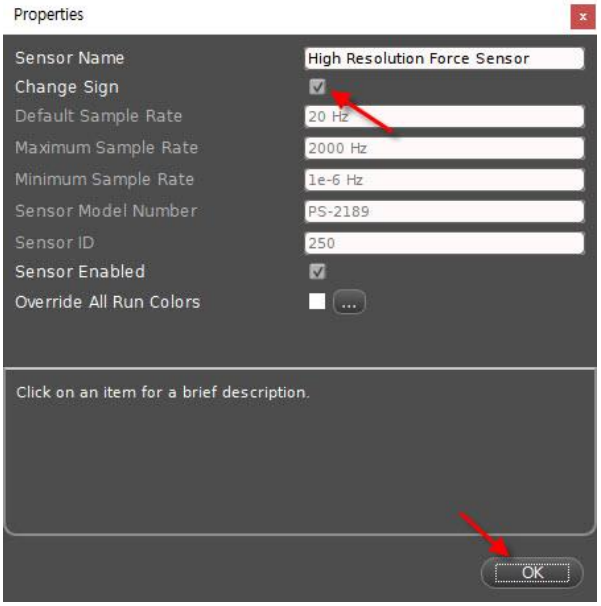


힘센서 설치가 완료되면 다음을 확인할 수 있다. 힘센서 설정을 위해 우측 하단의 [Properties, ☼] 아이콘을 클릭한다.



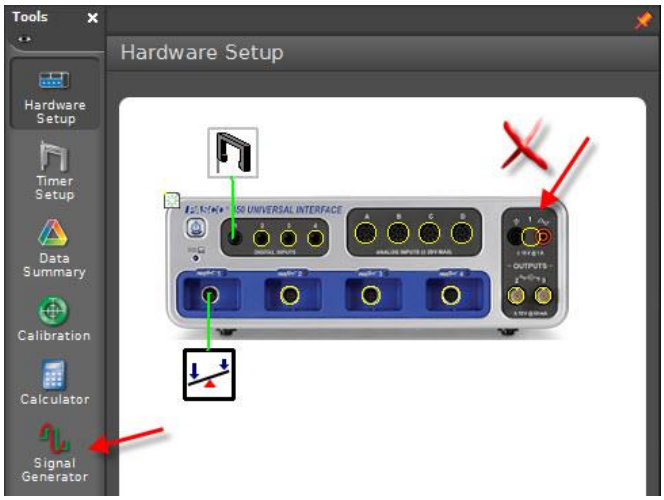
힘센서 [Properties] 창에서 [Change Sign]을 체크한다.

기본적으로 힘센서를 미는 힘이 양의 값, 당기는 힘이 음의 값으로 표시된다. 이 실험에서는 당기는 힘을 양의 값으로 표시해야 하므로, 데이터의 부호를 바꿔준다.

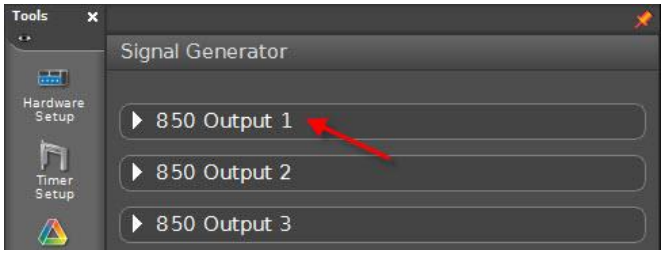


(7) 모터 구동을 위한 DC 출력 전압을 설정한다.

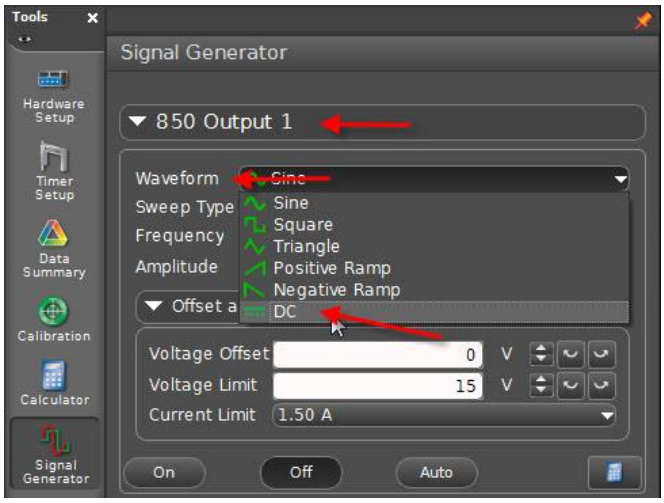
[Hardware Setup]에서 [OUTPUTS 1] 은 모터를 구동하는 배선을 연결한 상태이지만, 프로그램 상에서 센서를 설치할 필요가 없다.



좌측 [Tools] 메뉴에서 [Signal Generator]를 선택하면 다음 그림과 같이 설정창이 열린다. [850 Output 1]을 선택한다.

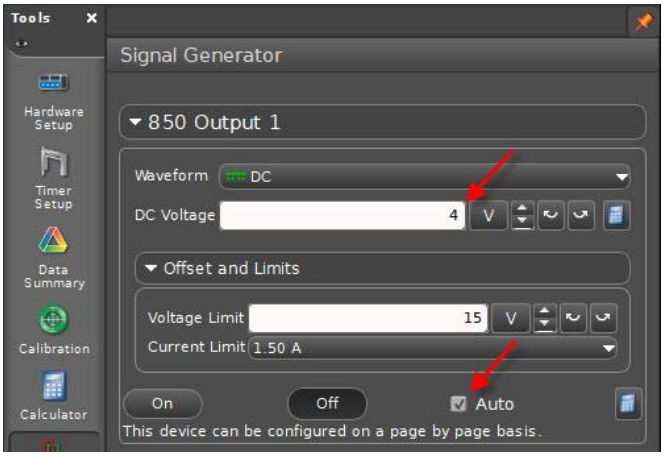


[Waveform]을 [DC]로 바꾼다.



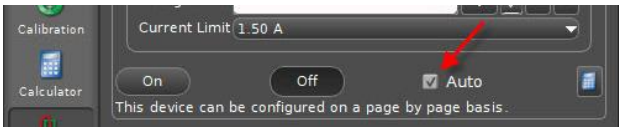
전압을 4V 로 설정한다.

또한, [Auto]를 체크하여, 데이터 측정 시 전원이 자동으로 공급되도록 설정한다.



NOTE

[Signal Generator]의 DC 전원 또는 파형은 출력 버튼의 설정에 따라 다음과 같이 작동한다.



[On] : [Record]와 상관없이 설정된 전압의 전원이 항상 공급된다.

[Off] : [Record]와 상관없이 전원이 공급되지 않는다.

[Auto] : [Record]를 클릭하여 데이터를 측정하는 동안에만 전원이 공급된다.

(8) 테이블과 그래프를 생성하고 설정한다.

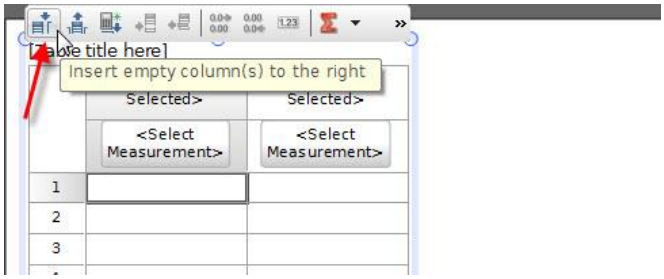
이 실험에서는 다음과 같이 테이블 1 개, 그래프 2 개 및 디지털 미터 1 개가 필요하다.

데이터 테이블 $(t\text{-}F\text{-}v)$
그래프 1 $(F\text{-}t)$
그래프 2 $(F\text{-}v)$
디지털 미터 (v)

우측 [Displays] 메뉴에서 [Table] 또는 [Graph] 아이콘을 드래그하여 중앙 페이지로 끌어오면 적절한 테이블과 그래프가 생성된다.

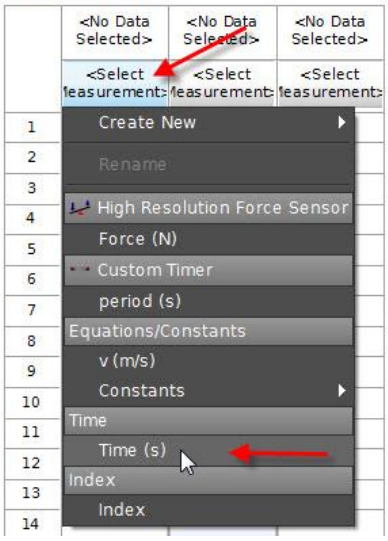
① 데이터 테이블 생성 및 설정

데이터 테이블을 생성하면, 기본적으로 두 열의 테이블이 생성된다. 한 개의 열을 추가하기 위해 테이블 상단 메뉴의 [Insert empty column] 아이콘을 클릭한다.



각 열의 변수를 설정하기 위해 <Select Measurement>를 클릭한 후 각각 Time(s), Force(N), v(m/s)를 선택한다. 여기에서 Time(s)은 시스템의 기본 변수이며 데이터 측정 시작 후 경과 시간을 의미한다.

[Table title here]



설정이 완료되면 다음과 같은 테이블이 생성된다. (데이터는 측정을 시작하면 자동으로 표시된다.)

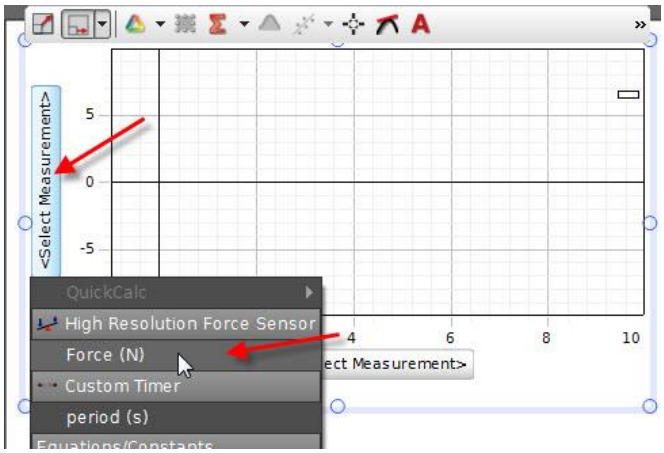
[Table title here]

		<No Data Selected>	<No Data Selected>
	Time (s)	Force (N)	v (m/s)
1			
2			

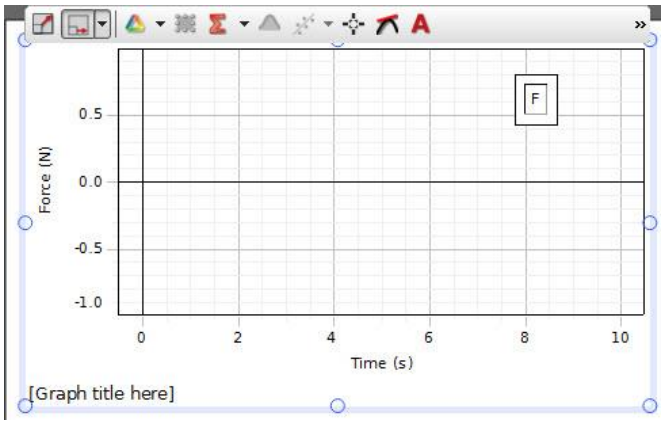
② 그래프 생성 및 설정

그래프를 생성하면 다음과 같은 그림을 확인할 수 있다.

x 축 또는 y 축의 <Select Measurement>를 클릭하여 적절한 변수를 지정한다.



x 축으로 Time(s), y 축으로 Force(N)을 선택하여 F-t 그래프를 생성한다.

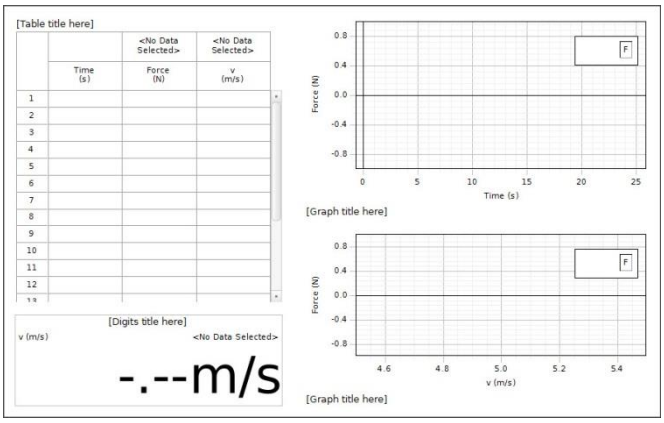


동일한 방법으로 그래프를 추가한 후, x 축으로 회전속도 v(m/s), y 축으로 구심력 Force(N)을 선택하여 F-v 그래프를 생성한다.

③ 디지털 미터 설정

[Displays] 메뉴의 [Digits] 아이콘을 드래그하여 다음의 디지털 미터를 생성한 후, 표시값으로 v(m/s)를 선택한다.

실험 진행 시 측정 데이터를 쉽게 관찰할 수 있도록 다음 그림과 같이 각 테이블과 그래프를 적절하게 배치한다.

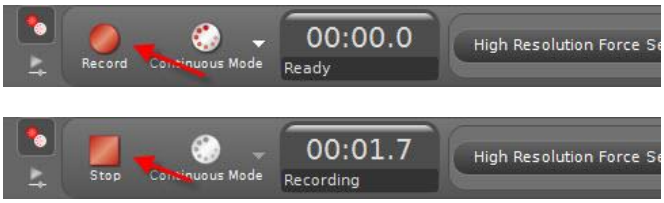


(9) 단위 시간 당 측정 횟수를 설정한다.

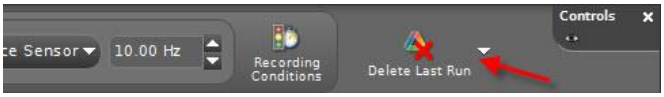
하단의 [Controls] 메뉴에서 [Sample Rate]을 10.00Hz 로 설정한다. (1 초 당 10 회 측정하여, 0.1 초 간격으로 측정값을 표시한다.)

(10) 데이터 측정을 시작/완료한다.

적절한 실험 조건을 설정한 후, [Controls] 메뉴의 [Record]를 클릭하여 실험 및 데이터 측정을 시작한다. 측정을 중지할 때에는 [Stop]을 클릭한다.



측정을 반복하면 데이터는 순서대로 이름이 붙어서 저장된다. 필요 없는 데이터는 [Controls] 메뉴의 [Delete Last Run] 또는 하위 메뉴를 선택하여 삭제할 수 있다.



Procedure

NOTE

질량추 세트는 다음과 같이 구성되어 있다.

	유동질량	고정질량
용도	구심력 측정	회전 균형, 장비 보호
형태	고리가 달려 있음	구멍이 뚫려 있음
사용 방법	힘센서에 연결된 와이어에 걸어줌	회전대에 고정함
질량	전자저울로 정확하게 측정	측정할 필요 없음

재질	색상	질량 범위 (g)
플라스틱	흰색	11.50~12.50
알루미늄	밝은 은색	23.50~24.50
알루미늄+황동	은색+황색	43.00~44.00
스테인리스 강	어두운 은색	66.50~67.50

유동 질량추의 정확한 질량을 측정하여 기록한다.

유동질량	질량 (g)
플라스틱	
알루미늄	
알루미늄+황동	
스테인리스 강	

NOTE

측정을 시작하기 전에 힘이 작용하지 않는 상태에서 힘센서의 [ZERO] 버튼을 눌러 영점을 조정한다. (센서 특성 상 여러 가지 이유로 측정값이 조금씩 지속적으로 변할 수 있으므로 **수시로 눌러준다**.)

실험 1. $F-v$

물체의 질량 m 과 회전 반경 R 을 일정하게 유지한 상태에서, 속력 v 를 변화시키면서 속력과 구심력의 관계를 확인한다. (속력은 모터의 입력 전압을 변경하여 바꾼다.)

(1) 실험장비를 설치한다.

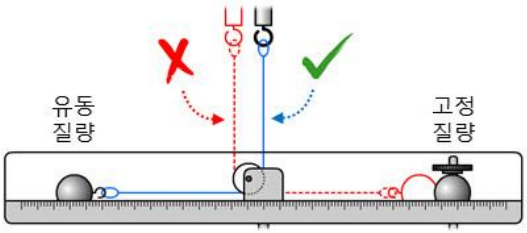
6 페이지 [Setup1. Equipment Setup]

(2) 프로그램을 설정한다.

7~12 페이지 [Setup2. Software Setup]

(3) 질량과 **회전 반경**을 특정 값으로 결정한다.

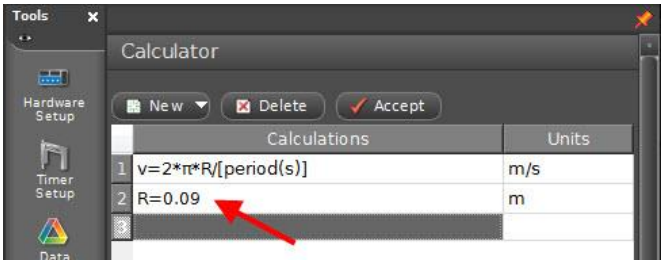
① 질량추 세트 1 종을 선택하여 회전대에 놓고 고정한다. (유동질량은 정확한 값을 측정하여 기록한다.)



② 유동질량을 중심으로부터 9 cm (0.09 m) 거리에 놓는다. 손으로 잡은 상태에서 와이어가 팽팽하게 당겨지도록 힘센서가 고정된 상단 지지막대의 위치를 위아래로 조정한다.

③ 고정질량을 반대쪽의 동일한 거리에 고정한다.

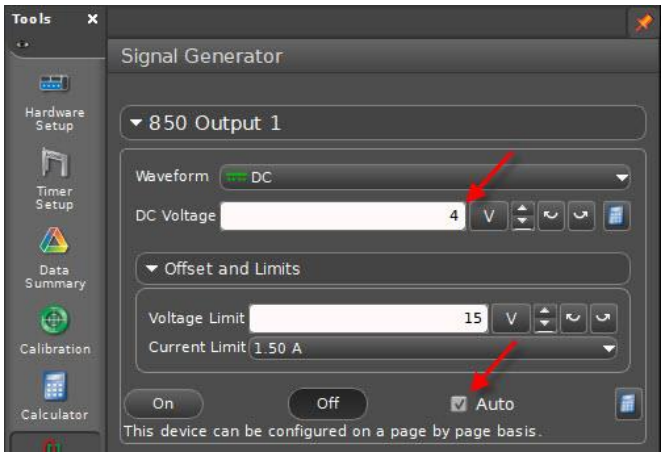
④ 회전 반경을 입력한다. 회전 반경을 9 cm 로 설정하였으므로 $R = 0.09$ m 를 입력한다.



(4) 속력을 설정한다.

질량추의 속력은 모터의 입력 전압을 조정하여 변경한다. 모터 입력 전압을 4, 5, 6, 7, 8 V 로 변경하며 실험한다. (설정한 타이머와 수식에 의해 속력이 계산되어 표시된다.)

[Signal Generator]의 [DC Voltage]를 4 V 로 설정한다.



(5) 정해진 조건에서 구심력을 측정한다.

[Controls] 메뉴의 [Record]를 클릭하여 측정을 시작한다.

설정한 전압의 전원이 공급되어 모터가 회전하기 시작하며, 그래프에 속력 및 구심력이 표시된다. 모터의 회전속도가 안정될 때까지 일정 시간을 대기한다.

NOTE

[Tools] 설정창이 그래프와 겹쳐서 그래프 관찰이 어려울 경우, 핀 아이콘을 클릭하면 해결할 수 있다.

(6) 속력을 변경한다.

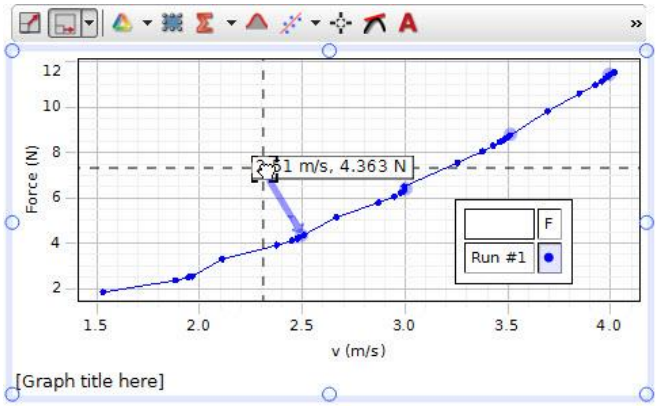
[Signal Generator]의 [DC Voltage]를 4, 5, 6, 7, 8V 로 변경해 가면서 그래프를 관찰한다. 회전 속도가 안정되는데 약간의 시간이 소요되므로, 적절한 시간 동안 대기한다.

(7) 측정을 종료한다.

실험을 완료하면 [Stop]을 클릭하여 측정을 종료한다.

(8) 결과를 분석한다.

속력–구심력 그래프에서 [Show coordinates ...] 아이콘을 클릭한 후, 속력에 대한 구심력의 좌표값을 읽는다.



(9) 실험을 반복한다.

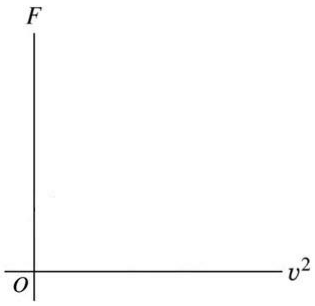
모든 조건에 대해 실험을 3 회 이상 반복하고, 평균값을 실험값으로 사용한다.

(10) 결과를 정리하고 오차를 분석한다.

질량 m (kg)	반경 R (m)	속력 v (m/s)	구심력 (이론) $\frac{mv^2}{R}$ ($\mathrm{kg \cdot m/s^2}$)	구심력 (결과) F (N)

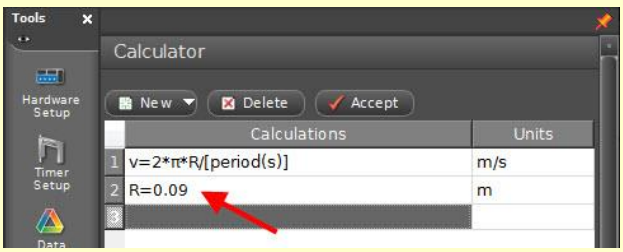
(11) F-v^2 그래프를 작성한다.

v 와 F 측정값을 사용하여 F-v^2 그래프를 작성한 후, 구심력이 속력의 제곱에 비례함을 확인한다. 필요하면 최소자승법을 사용하여 결과를 확인한다. (최소자승법은 "자유낙하와 포물체 운동" 실험 매뉴얼을 참고한다.)



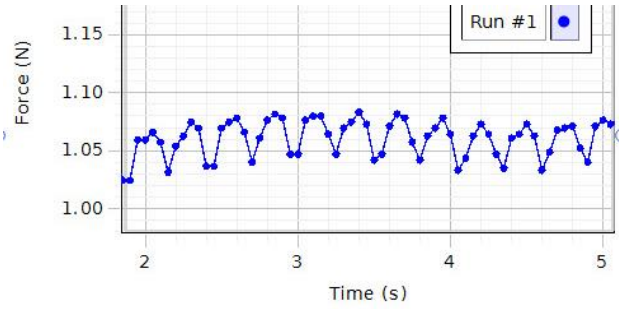
CAUTION

실험 1, 2, 3 의 데이터는 각각 다른 이름의 파일로 저장한다. 특히 실험 3. $F-R$ 측정 시에는 [Calculator]에서 회전 반경 R 값을 수정해야 하는데, 만약 이미 측정한 실험 데이터가 있다면 함께 재계산 되어버리기 때문에 결과가 완전히 달라지므로 주의해야 한다.

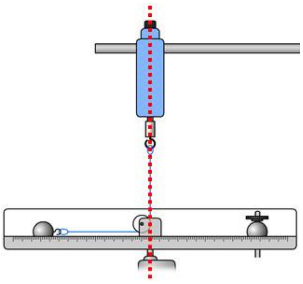


NOTE

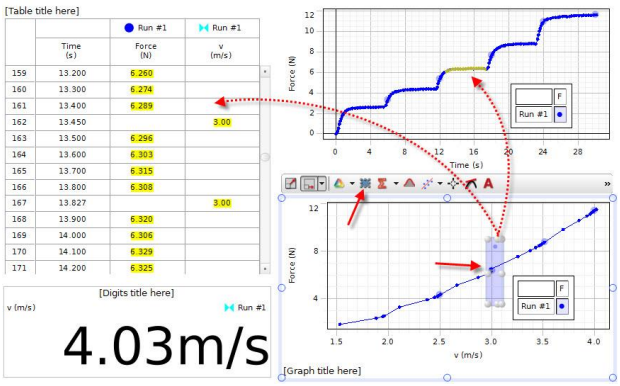
만약 F-t 그래프가 다음과 같이 진동한다면,



① 힘센서–와이어–회전축이 정렬되지 않을 경우 발생할 수 있다. 힘센서–와이어–회전축이 정확히 수직으로 일직상에 있는지 확인하고 필요하면 위치를 조정한다.



② 베어링 등의 구조적인 문제로 인해 이상적으로 회전하지 않아 발생할 수 있다. 쉽게 해결되지 않는 문제이므로, 속력이 비슷한 일정 구간의 데이터를 테이블에서 찾은 후 평균값을 실험값으로 사용한다.



실험 2. $F - m$

물체의 속력 v 와 회전 반경 R 을 일정하게 유지한 상태에서, 질량 m 을 변화시키면서 질량과 구심력의 관계를 확인한다. (질량추 세트를 바꿔가며 실험한다.)

(1) 실험장비를 설치한다.

6 페이지 [Setup1. Equipment Setup]

(2) 프로그램을 설정한다.

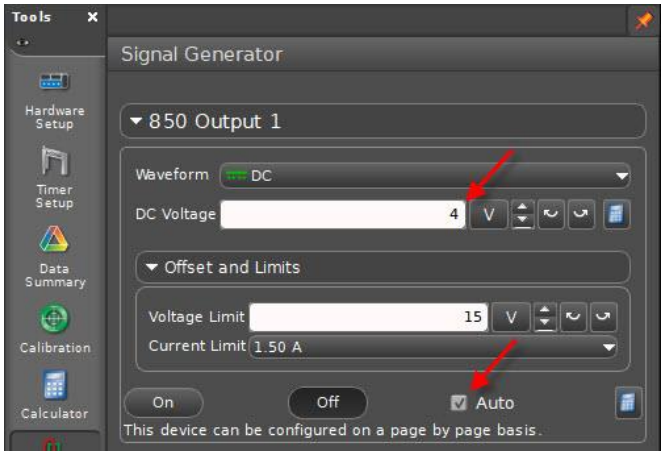
7~12 페이지 [Setup2. Software Setup]

(3) 질량을 설정한다.

모든 질량 세트를 사용하여 실험을 반복한다.

(4) 속력과 **회전 반경**을 특정 값으로 결정한다.

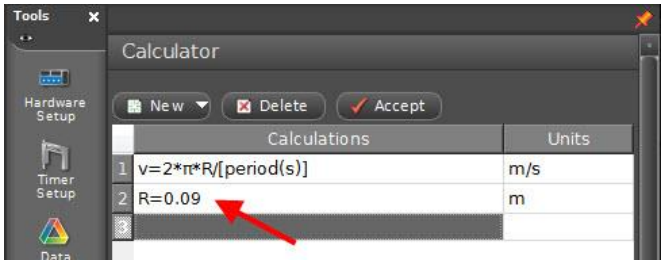
① 모터의 입력 전압을 7 V 로 설정하여 속력을 고정한다.



② 유동질량을 중심으로부터 9 cm (0.09 m) 거리에 놓는다.

③ 고정질량을 반대쪽의 동일한 거리에 고정한다.

④ 회전 반경을 입력한다. 회전 반경을 9 cm 로 설정하였으므로, $R = 0.09$ m 를 입력한다.



(5) 정해진 조건에서 구심력을 측정한다.

[Controls] 메뉴의 [Record]를 클릭하여 측정을 시작한다.

설정한 전압의 전원이 공급되어 모터가 회전하기 시작하며, 그래프에 속력 및 구심력이 표시된다. 모터의 회전속도가 안정될 때까지 일정 시간을 대기한다.

디지털 미터를 확인하여 속력을 기록한다. (전압이 동일하게 공급되어도, 모터의 상태에 따라 속력이 다소 달라질 수 있으므로, 첫 실험의 속력을 기준으로 나중의 실험의 입력 전압을 조정해야 할 수도 있다.)

3 회 이상 반복 측정하고, 평균값을 실험값으로 사용한다.

(6) 측정을 완료한다.

해당 질량에 대한 측정이 끝나면 [Stop]을 클릭하여 실험을 완료한다.

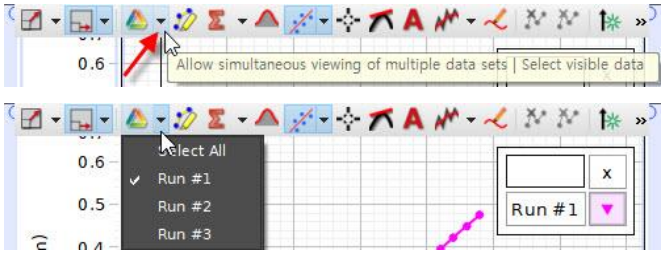
(7) 질량을 변경한다.

질량추를 다른 종류로 교체한 후 순서(4)~(6)을 반복한다.

질량에 따라 동일한 전압을 공급하여도 속도가 다를 수 있다. 디지털 미터를 사용하여 순서 (5)에서 기록한 속력과 동일한지 확인하고, 차이가 있을 경우에는 입력 전압을 적절히 조정한다.

(8) 그래프를 확인하여 구심력을 측정한다.

측정한 데이터가 여러 개일 경우, 디스플레이에는 가장 최근에 측정한 데이터만 표시된다. [Data Selector]의 확장 버튼을 누르면 표시할 데이터를 선택할 수 있다.

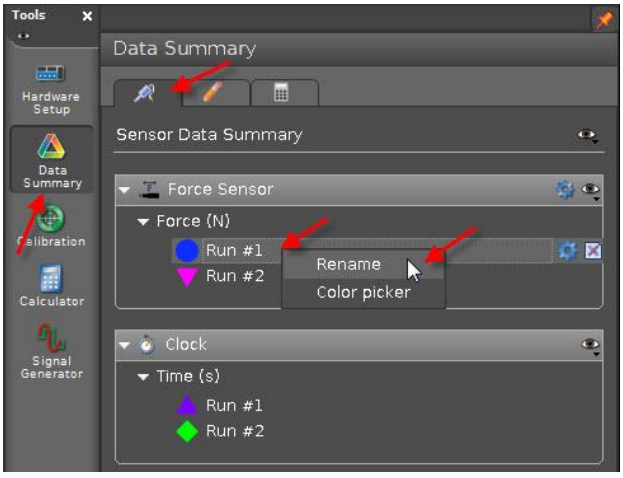


F-t 또는 F-v 그래프에서 각 질량에 대한 데이터를 선택한 후 [Show coordinates …] 을 클릭하여 구심력을 확인한다.

NOTE

측정된 데이터는 측정된 순서에 따라 Run #1, Run #2, … 등의 이름이 자동으로 지정된다. 데이터의 구분을 쉽게 하기 위해서는 이름을 바꿔주는 것이 좋다.

① [Tools] 메뉴에서 [Data Summary]를 선택한다.
② [Show Sensor Data] 탭을 선택한다.
③ 원하는 데이터를 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭한다.
④ 팝업 메뉴에서 [Rename]을 선택하여 이름을 바꾼다.

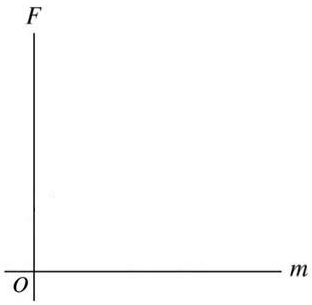


(9) 결과를 정리하고 오차를 분석한다.

질량 m (kg)	반경 R (m)	속력 v (m/s)	구심력 (이론) $\frac{mv^2}{R}$ ($\mathrm{kg \cdot m/s^2}$)	구심력 (결과) F (N)

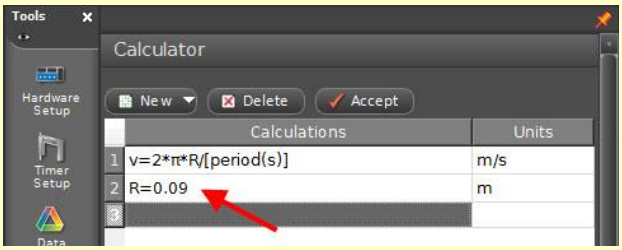
(10) F-m 그래프를 작성한다.

m 과 F 의 측정값을 사용하여 F-m 그래프를 작성한 후, 구심력이 질량에 비례함을 확인한다. 필요하면 최소자승법을 사용하여 결과를 확인한다. (최소자승법은 "자유낙하와 포물체 운동" 실험 매뉴얼을 참고한다.)



CAUTION

실험 1, 2, 3 의 데이터는 각각 다른 이름의 파일로 저장한다. 특히 실험 3. $F-R$ 측정 시에는 [Calculator]에서 회전 반경 R 값을 수정해야 하는데, 만약 이미 측정한 실험 데이터가 있다면 함께 재계산 되어버리기 때문에 결과가 완전히 달라지므로 주의해야 한다.



실험 3. $F-R$

물체의 질량 m 과 속력 v 를 일정하게 유지한 상태에서, 회전 반경 R 을 변화시키면서 회전 반경과 구심력의 관계를 확인한다. (유동질량의 위치를 바꿔가며 실험한다.)

(1) 실험장비를 설치한다.

6 페이지 [Setup1. Equipment Setup]

(2) 프로그램을 설정한다.

7~12 페이지 [Setup2. Software Setup]

(3) 질량을 특정 값으로 정한다.

적절한 질량추 세트를 선택하여 설치한다.

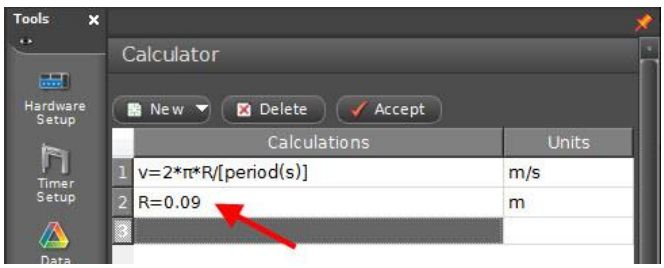
(4) 속력을 특정 값으로 정한다.

모터에 일정한 전압이 인가되어 회전 각속도가 일정하게 유지되어도 회전 반경을 변경하면 속력이 달라진다. 따라서 실험을 진행하면서 일정한 속력이 나올 수 있도록 수시로 공급 전압을 조정해야 한다. 속력은 순서(6)에서 최종 결정한다.

(5) 회전 반경을 설정한다.

물체의 회전 반경을 9cm 로 설정하여 실험을 진행한다.

선택한 질량추 세트를 9 cm 에 위치하도록 조정한 후, [Calculator]에서 회전 반경 $R = 0.09$ m 를 입력한다.



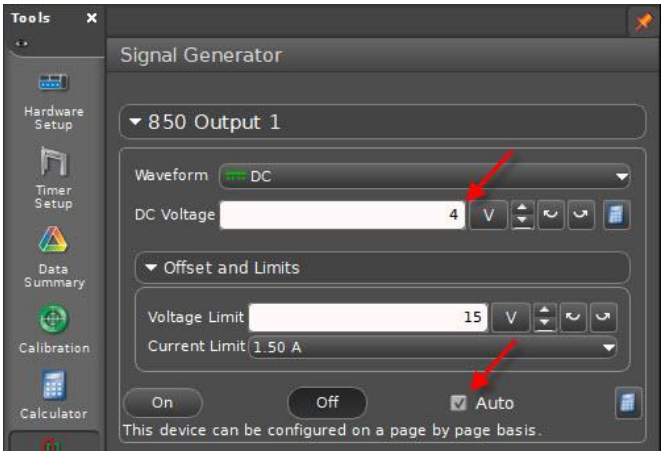
(6) 적절한 모터 입력 전압을 확인한다.

[Controls] 메뉴의 [Record]를 클릭하여 측정을 시작한다.

모터가 회전하기 시작하며, 디지털 미터와 그래프에 속력 및 구심력이 표시된다.

전압을 일단 4 V 로 정한 후, 측정되는 속력이 정수 값이 되도록 (예를 들어 2.0 m/s) 전압을 세밀하게 조정한다.

이 속력을 $F-R$ 실험의 속력 v 로 결정한다.



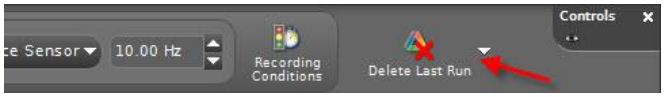
나중에 회전 반경을 변경한 후 실험을 반복할 때, 속력을 일정하게 유지시키기 위해서는 회전 반경이 감소할수록 모터의 입력 전압을 높여야 할 것이다.

예를 들어, 사전 모의실험 결과 $R = 9$ cm 일 때 4.0 V를 인가했더니 속력이 2.0 m/s 가 나왔다. 그리고 $R = 5$ cm 로 변경했을 때 동일한 속력 2.0 m/s 가 나오는 전압은 7.2 V 였다. 이 값은 모터 상태에 따라 다를 수 있다.

모터 입력전압은 가능하면 3 ~ 9 V 사이에서 진행한다. 3 V 보다 낮을 경우 모터가 작동하지 않을 수 있으며, 9 V 보다 높으면 모터에 무리가 가거나 진동과 소음이 심해진다.

(7) 설정한 전압으로 재측정을 실시한다.

모터 입력 전압을 조정하는 과정에서 필요 없는 데이터가 저장될 수 있다. 이 데이터는 [Controls] 메뉴의 [Delete Last Run] 또는 하위 메뉴를 선택하여 삭제한다.



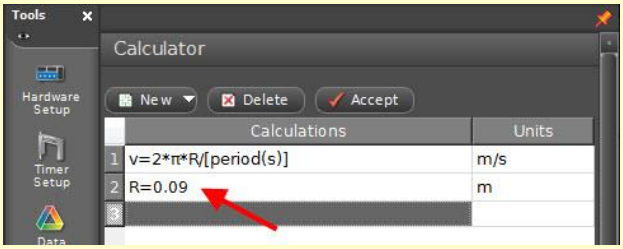
그 후, 순서(6)에서 결정한 전압으로 실험을 진행하여 데이터를 측정한다.

(8) 측정을 완료한다.

해당 반경에 대한 실험을 완료하면 [Stop]을 클릭하여 측정을 완료한다.

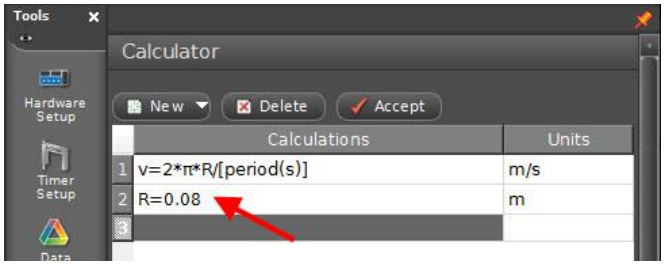
CAUTION

이 실험에서는 회전 반경을 변경할 때마다 각각 다른 이름의 파일로 저장한다. [Calculator]에서 반경 R 을 수정할 경우, 이미 다른 반경에서 측정한 실험 데이터도 함께 재계산되어 결과가 함께 바뀌므로 특히 주의한다.



(9) 회전 반경을 변경한다.

질량추 세트의 위치를 8cm 로 변경한다. (유동질량의 위치를 조정하기 위해 힘센서를 1cm 위로 올린다.) 또한, [Calculator]에서 회전 반경을 $R = 0.08(\mathrm{m})$ 로 수정한다.



(10) 변경된 조건에서 실험을 반복한다.

$R = 8\ \mathrm{cm}$ 조건에서, 순서(6)에서 결정한 속력이 나올 수 있도록 전압을 조정해야 한다.

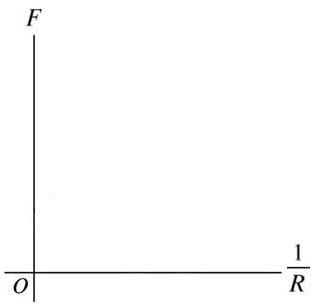
$\mathrm{R} = 9, 8, 7, 6, 5\mathrm{cm}$ 에 대해서 측정을 반복한다.

(11) 결과를 정리하고 오차를 분석한다.

질량 m (kg)	반경 R (m)	속력 v (m/s)	구심력 (이론) $\frac{mv^2}{R}$ $(\mathrm{kg \cdot m/s^2})$	구심력 (결과) F (N)

(12) F-$1/R$ 그래프를 작성한다.

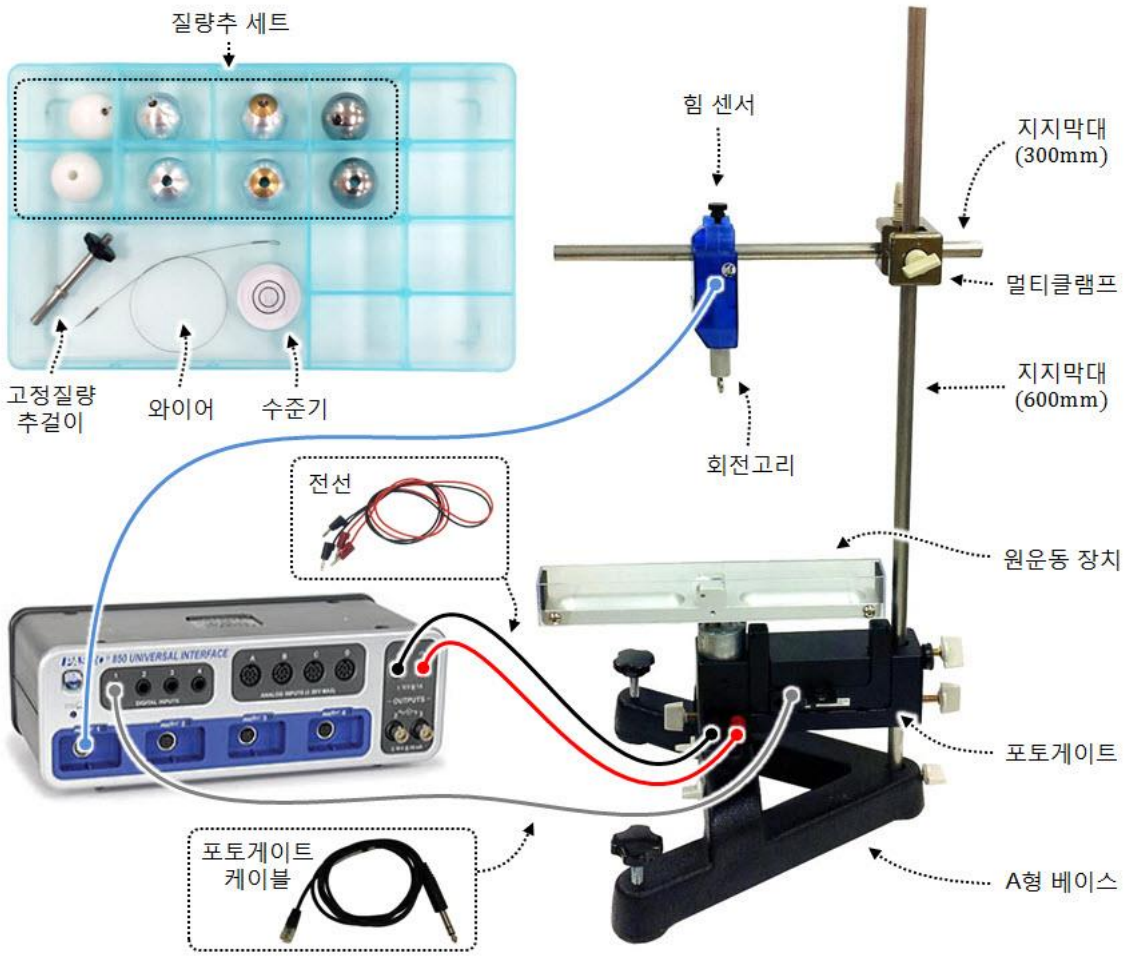
$1/R$ 과 F 의 측정값을 사용하여 F-$1/R$ 그래프를 작성한 후, 구심력이 회전 반경의 역수에 비례함을 확인한다. 필요하면 최소자승법을 사용하여 결과를 확인한다. (최소자승법은 "자유 낙하와 포물체 운동" 실험 매뉴얼을 참고한다.)



Result & Discussion

조교의 안내에 따라 실험 결과를 정리하고 분석한 후 결과 보고서를 작성한다.

End of LAB Checklist

실험을 완료하면 반드시 실험 장비를 정리한 후 조교의 확인을 받고 퇴실한다.

☐ 실험용 컴퓨터에 저장한 **실험 데이터 파일**을 모두 삭제한다.
☐ **컴퓨터**와 **인터페이스** 장치를 끈다.
☐ 실험 장치는 분해하지 말고 그림과 같은 상태로 보관한다.
☐ **질량추** 세트, **고정질량 추걸이**, **와이어**, **수준기**는 부품박스에 보관한다.