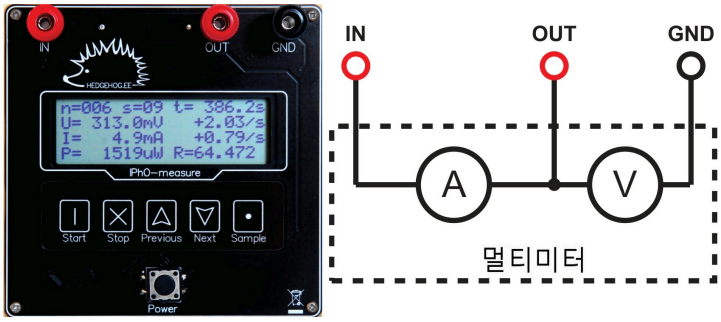
문제 E2. 비선형 블랙박스 *(10점)*

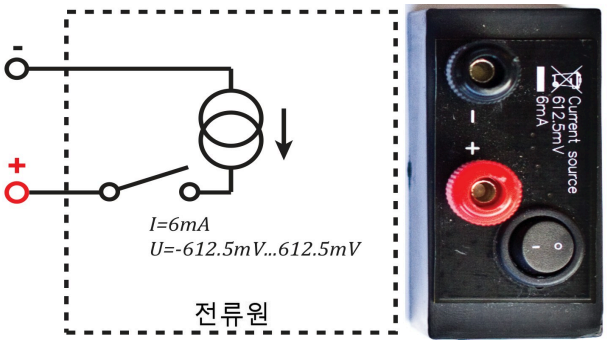
간단한 문제에서는 전기 회로가 선형 소자로 이루어져 있다고 가정한다. 선형 소자에서는 전기적 특성량들이 서로 정비례한다. 저항($V = RI$), 전기용량($Q = CV$), 인덕턴스($V = L\dot{I} = L\frac{dI}{dt}$)가 그 예이며, 여기서 R, C, L은 상수이다. 그러나 이 문제에서는 블랙박스 안에 든 비선형 소자를 포함한 회로를 다룬다. 비선형 소자에서는 비례 가정이 더는 성립하지 않는다.

장치는 **멀티미터**("IPhO-measure"라는 이름표), 전류원 역할을 하는 **블랙박스** 하나, 비선형 소자가 든 **블랙박스** 하나, 쌓아 꽂을 수 있는 커넥터가 달린 배선용 측정 도선 네 개로 이루어져 있다. 블랙박스의 봉인을 깨지 않도록 조심하시오.

멀티미터는 전류와 전압을 동시에 잴 수 있다. 자료점을 2000개까지 저장할 수 있으며, 각 자료점은 전압 V, 전류 I, 전력 $P = IV$, 저항 $R = V/I$, 전압의 시간 도함수 $\dot{V}\,(= \frac{dV}{dt})$, 전류의 시간 도함수 $\dot{I}\,(= \frac{dI}{dt})$, 시간 t로 이루어진다. 자세한 것은 멀티미터 설명서를 보라. 저장한 자료점이 2000개를 넘으면 가장 오래된 자료부터 덮어쓴다.

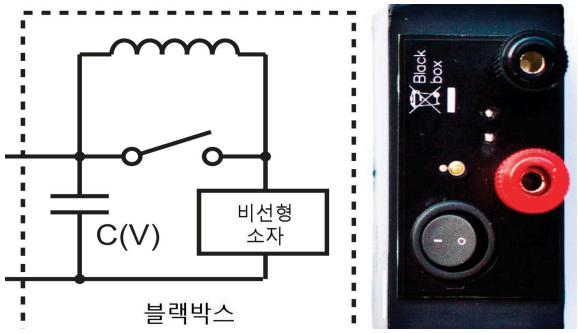


정전류원은 단자 사이 전압이 −0.6125 V와 0.6125 V 사이에 있는 한 안정된 전류를 공급한다. 꺼져 있을 때 정전류원은 큰(사실상 무한대) 저항처럼 행동한다.



블랙박스에는 전기 이중층 축전기(약간 비선형인 대용량 축전기), 알 수 없는 비선형 소자, 저항을 무시할 수 있는 인덕터 $L = 10\,\mu$H가 들어 있으며, 인덕터는 회로도에 나타낸 것처럼 스위치로 켜고 끌 수 있다. 비선형 소자는 전압과 전류 사이의 관계가 비선형인 저항으로 볼 수 있다[$I(V)$는 $I(0) = 0$인 V의 연속함수이다]. 마찬가지로 축전기의 미분 전기용량 $C(V) = dQ/dV$도 정확히 일정하지는 않다.

블랙박스의 빨간 단자의 전위가 검은 단자의 전위보다 높을 때 블랙박스의 전압이 양이라고 한다. 블랙박스와 전류원의 같은 색 단자끼리 연결하면 양의 전압을 얻는다(음의 전압을 써도 된다).



블랙박스의 입력 단자를 그 자체로, 또는 멀티미터의 IN과 OUT 단자를 통해 단락시켜 블랙박스 속 축전기를 방전시켜도 안전하다. 이 축전기의 내부 저항이 전류가 어떤 것도 망가뜨리지 않게 막아 줄 만큼 크다.

이 문제 전체에서 불확도는 어림하지 않아도 된다.

파트 A. 인덕턴스가 없는 회로 *(7점)*

이 파트에서는 블랙박스의 스위치를 닫아("I"를 아래로 누름) 인덕턴스를 단락시켜 두시오. **어떤 측정은 시간이 꽤 걸릴 수 있으니, 쓸데없는 작업을 피하도록 파트 A의 과제를 모두 먼저 읽어 보기를 권한다.**

i. (1.0점) 전류원의 출력 전류가 약 6 mA임을 확인하고, 전압이 0과 +480 mV 사이일 때 출력 전류가 변하는 범위를 구하시오. 사용한 회로도를 적으시오.

ii. (1.2점) 원하는 전압 하나 $C(V_0) = C_0$에서 값을 재어, 블랙박스에 쓰인 미분 전기용량 $C(V)$가 대략 2 F임을 보이시오. 회로도를 적으시오.

iii. (2.2점) 전기용량의 비선형성을 무시하고[$C(V) \approx C_0$] 블랙박스에 쓰인 비선형 소자의 전류–전압 특성을 구하시오. 블랙박스에서 얻을 수 있는 양의 전압에 대한 $I(V)$ 곡선을 답안지에 그리시오. 회로도를 적으시오.

iv. (2.6점) 얻을 수 있는 전압 범위 전체에서 잰 측정값으로, 블랙박스에서 얻을 수 있는 양의 전압에 대한 $C(V)$ 곡선을 계산하여 답안지에 그리시오. 미분 전기용량의 최솟값과 최댓값 $C_{\min}$, $C_{\max}$를 적으시오. 회로도를 적으시오.

파트 B. 인덕턴스가 있는 회로 *(3점)*

블랙박스의 스위치를 열어("0"을 아래로 누름) 인덕턴스를 켜시오. A-iii와 같은 방법으로 비선형 소자의 전류–전압 특성을 재어 그리시오. 파트 A와 B의 곡선 사이에 뚜렷한 차이가 있으면 설명하고, 정성적 논증으로 그 까닭을 제시하시오. 비선형 소자에는 비선형 저항과 병렬로 연결된 전기용량(≈ 1 nF)도 있다는 것을 알아야 한다.

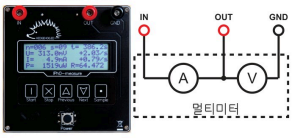
문제 E2

IPhO-measure: 간단한 설명서

*IPhO-measure*는 전압 V와 전류 I를 동시에 잴 수 있는 멀티미터이다. 또한 그 시간 도함수 $\dot{V}$와 $\dot{I}$, 곱 $P = VI$, 비 $R = V/I$, 표본의 시간 t도 기록한다. 저장한 측정값은 별개의 세트로 정리되며, 저장된 표본마다 세트 번호 s와 세트 안의 일련번호 n이 붙는다. 저장된 표본은 모두 내부 플래시 메모리에 기록되어 나중에 다시 불러올 수 있다.

전기적 특성

이 장치는 다음과 같이 연결된 전류계와 전압계처럼 행동한다.



	범위	내부 저항
전압계	0 … 2 V	1 MΩ
전압계	2 … 10 V	57 kΩ
전류계	0 … 1 A	1 Ω

기본 사용법

- "Power"를 눌러 *IPhO-measure*를 켜시오. 장치는 아직 측정하지 않는다. 측정을 시작하려면 "Start"를 누르시오. 또는 이때 저장된 자료를 살펴볼 수 있다. 아래를 보라.
- 앞서 저장한 표본을 (모든 세트에 걸쳐) 살펴보려면 "Previous"나 "Next"를 누르시오. 길게 누르면 세트 사이를 바로 건너뛴다.
- 측정하지 않을 때 "Start"를 누르면 새 세트의 측정을 시작한다.
- 측정 중에는 새 자료(즉 화면에 보이는 읽음값)를 저장하고 싶을 때마다 "Sample"을 누르시오.
- 측정 중에도 "Previous"와 "Next"로 현재 세트의 다른 표본을 살펴볼 수 있다.
- "Stop"을 누르면 세트를 끝내고 측정을 멈춘다. 장치는 여전히 켜져 있다. 새 측정을 시작하거나 저장된 자료를 살펴볼 수 있다.
- "Power"를 누르면 장치가 꺼진다. 장치에 "my mind is going …"이라는 글이 나타나는데, 걱정하지 마시오. 모든 측정 자료는 저장되며 장치를 다시 켜면 살펴볼 수 있다. 저장된 표본은 지워지지 않는다.

화면



화면에 나타나는 표본은 변수 아홉 개로 이루어진다.

1. 세트 안 표본의 번호 n;
2. 세트의 번호 s;
3. 세트를 시작한 뒤의 시간 t;
4. 전압계 출력 V;
5. V의 변화율(시간 도함수 $\dot{V}$). 요동 때문에 도함수를 믿을 만하게 구할 수 없으면 "+nan/s"가 나타난다;
6. 전류계 출력 I;
7. I의 변화율(시간 도함수 $\dot{I}$). 요동 때문에 도함수를 믿을 만하게 구할 수 없으면 "+nan/s"가 나타난다;
8. 곱 $P = VI$;
9. 비 $R = V/I$.

변수가 허용 범위를 벗어나면 화면에 "+inf" 또는 "−inf"가 나타난다.