E - 압전 현상의 물리 (20점)

석영이나 지르콘 티탄산 납 같은 일부 결정성 전기 절연 물질은 기계적 압력을 받으면 전기적 반응을 나타낸다. 간단히 말해 기계적 응력이 결정을 분극시키는데, 이를 압전 효과라고 한다. 이 현상은 분자의 특별한 구조로 설명할 수 있다. 변형이 일어나면 각 분자에 전기 쌍극자 모멘트가 생긴다. 거꾸로, 전기장이 있으면 기계적 응력이 생기는데, 이 현상을 역압전 효과라고 한다. 그러나 이 문제에서는 역압전 효과를 무시한다.

이 문제에서는 압전 현상을 이용하는 간단한 장치인 압전 소자를 다룬다. 압전 소자는 두 원형 금속판 사이에 압전 물질을 넣은 것이다. 금속판에 수직인 힘을 소자에 가하면 두 판 사이에 힘에 따라 달라지는 전압이 생긴다.

장비 (그림 1도 참고)

A 전선이 달린 압전 소자. 나무 바닥판과, 작은 구멍이 난 덮개판에 붙어 있다. 구멍은 덮개판 전체를 관통하므로 압전 소자의 위쪽 전극 일부가 구멍으로 보인다. 이 전극은 얇고 잘 휜다.

B 멀티미터(내부 저항은 주어져 있으니 다음 쪽의 중요한 유의 사항을 참고할 것).

C 커넥터가 달린 1.5 V AA 건전지.

D 전기 용량을 모르는 축전기. 한쪽 다리에 다이오드가 납땜되어 있다(다이오드에 순방향 전류가 흐를 때 다이오드 양단의 전압 강하는 0.56 V이다).

E 전선에 연결된 누름 스위치 4개(누르는 동안 연결됨).

F 악어 클립 6개.

G 디지털 저울(최대 10 kg).

H 디지털 스톱워치.

I 서로 다른 고무공 2개.

J 높이를 조절할 수 있는 낙하 장치가 달린 나무 받침대.

K 50 cm 자.

L 길이가 두 가지인 작은 나무 막대(지름 2 mm).

M 큰 금속 나사.

N 나무 빨래집게.

O 연필, 펜, 연필깎이.

과제 E.1 — 공의 탄성 (2.0점)

주어진 두 고무공 가운데 하나가 다른 하나보다 탄성이 크다.

탄성이 더 큰 고무공에 대해, 단단한 면과 충돌할 때 잃는 운동 에너지의 비율을 구하시오. 처음 운동 에너지의 세 가지 서로 다른 값에 대해 이 비율을 구하시오.

과제 E.2 - 압전 특성 (10.0점)

a 축전기의 전기 용량 C를 측정하시오(그림 3b). (2.0점)

b 압전 소자 양면의 금속판도 축전기 역할을 한다. 압전 소자의 전기 용량 C_p를 구하시오. (2.5점)

c 압전 소자의 두 판 사이의 전압이, 나무 덮개판을 통해 압전 소자의 면 전체에 고르게 분포하는 전체 수직 힘에 따라 어떻게 달라지는지 측정하고 그래프로 그리시오. 힘이 작을 때 이 관계는 선형이다. 이 영역에서의 기울기 β를 구하시오. (4.0점)

d 결정 분자의 분극은 어떤 임계값보다 작을 수밖에 없다. 압전 소자의 최대(포화) 전압, 포화될 때의 압력 p_{sat}, 압전 소자 표면의 최대 전하 면밀도 σ_{max}를 구하시오. (1.5점)

과제 E.3 - 작은 넓이에서의 거동 (1.0점)

압전 결정의 좁은 영역에 힘을 가하면, 전기-기계 결합 때문에 결정이 휘려고 한다. 그러나 나무판이 이를 막으므로, 결과적으로 결정의 다른 부분에도 기계적 응력이 생긴다.

결정의 좁은 넓이에 힘을 가하면 전기적 반응은 얼마나 달라지는가? 반응의 선형 영역만 고려하시오.

과제 E.4 - 공의 변형 (4.5점)

이 부분에서는 탄성이 더 큰 고무공을 압전 소자 위에 떨어뜨린다. 공과 압전 소자가 충돌하는 동안 공은 변형된다. 공에 작용하는 힘 F는 공의 탄성 변형 x에 거듭제곱 법칙으로 의존한다고 가정해도 된다:

$$F = kx^{\alpha} \, . \tag{1}$$

지수 α와 물질 상수 k를 구하시오.

과제 E.5 - 상호작용 시간 (2.5점)

앞 과제의 결과로, 탄성이 더 큰 공이 나무 면과 상호작용하는 시간 τ를 구할 수 있을 것이다. 그러나 탄성이 더 작은 공에는 식 1과 같은 간단한 기술이 없다. 대신 다음과 같이 가정할 수 있다.

어떤 충돌 속력 v_0에서 공이 받는 힘을 시간의 함수로 $F_0(t) = f(t)$라고 쓸 수 있다면, 다른 속력 v_1에서도 시간 의존성은 비슷한 모양이어서 힘을 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$F_1(t) = a_1 f(b_1 t) \, . \tag{2}$$

탄성이 더 작은 고무공이 단단한 면과 충돌할 때, 상호작용 시간 τ가 충돌 속력 v에 따라 어떻게 변하는지 추정하고 그래프로 그리시오.

중요한 실험상 유의 사항

- 측정할 때마다 그 측정의 회로도를 함께 제시해야 한다. 그림 2의 기호를 쓰시오.
- 멀티미터를 단락시키지 않도록 조심하시오! 주어진 내부 저항은 직류 전압 측정에서만 유효하다.
- 압전 소자에 가하는 힘은 모두 합쳐 100 N을 넘지 마시오.
- 두 전선을 연결할 때는 서로 감은 뒤 악어 클립으로 연결부를 고정하는 것이 좋다. 그림 3a를 보시오.
- 다이오드의 극성은 그림 3b에 보인다.
- 뒤쪽의 나사 두 개로 낙하 장치의 높이를 조절할 수 있다. 그림 4를 보시오. 낙하 장치의 수직 너트를 풀어 수평 위치도 조절할 수 있다.
- 튀는 공이 달아나지 않도록 조심하시오. 낙하 장치가 달린 받침대를 벽 쪽이나 책상 모서리에 두고, 자를 빨래집게로 고정해 투명한 벽으로 쓰면 공이 책상을 벗어날 가능성을 줄일 수 있다. 그래도 공을 놓치면 도움을 요청하고, **자리를 떠나지 마시오**.
- 한동안 조작하지 않으면 멀티미터가 삐 소리를 내기 시작하고, 다시 몇 분이 지나면 꺼진다. 아무 버튼이나 누르면 꺼지는 것을 막을 수 있다.
- 책상의 어떤 부분은 하중을 받으면 튀어 오를 수 있다. 공 튀기기 실험에는 책상의 단단한 부분을 쓰는 것이 좋다.
- 일련의 측정을 평가할 때는 데이터를 그래프로 그려야 한다.
- 가장 높은 정밀도와 정확도를 기대할 수 있는 측정과 평가 방법에만 만점을 준다. 도구의 정밀도를 생각하며 방법을 고르시오. 그러나 오차 추정에는 점수를 주지 않는다.
- 가장 작은 자릿수의 분해능이 δU인 범위에서 멀티미터로 직류 전압을 잴 때, 측정값 U의 불확도 ΔU는 다음과 같이 어림할 수 있다:

$$\Delta U = 0.7\% \cdot U + 3 \cdot \delta U \, . \tag{3}$$

- 직류 전압계 설정에서 멀티미터의 내부 저항은 측정 범위와 모델 번호에 따라 다르다. 그림 5에서 전압계의 모델 번호를 어디서 찾는지 볼 수 있다. 다음 표는 두 측정 범위에 대한 모든 모델의 내부 저항이다.

모델 번호	**범위**	**내부 저항**
모든 모델	2 V	11.1 MΩ
UT33B+	200 mV	9.65 MΩ
UT33C+	200 mV	9.91 MΩ
UT33D+	200 mV	9.70 MΩ

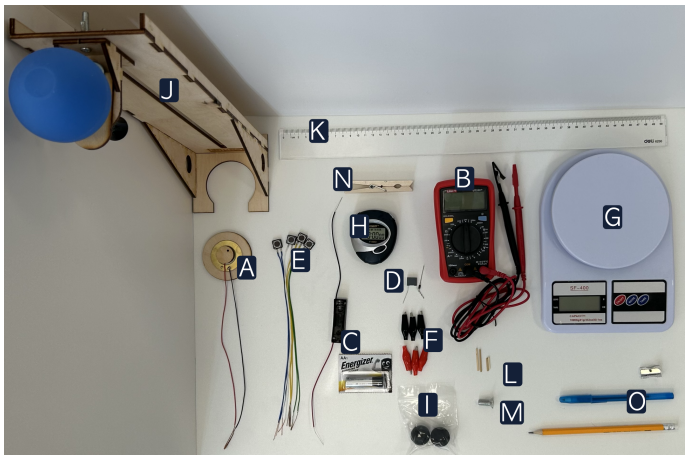


그림 1: 이 실험에 쓰이는 모든 재료의 개관.

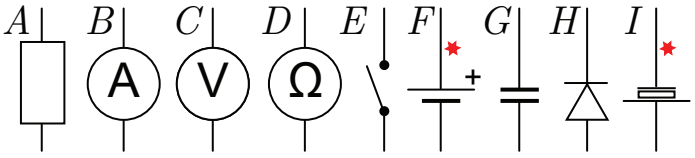
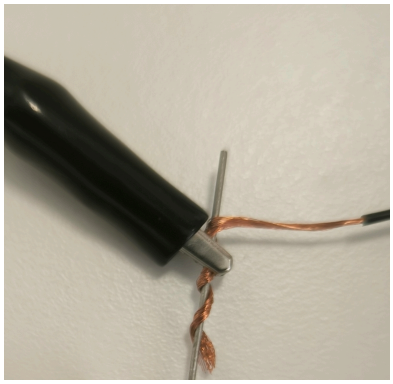
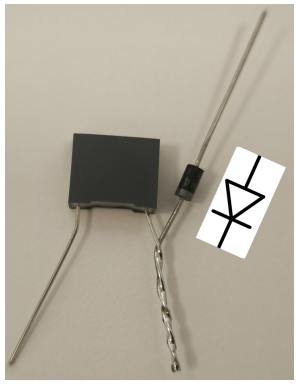


그림 2: 가장 흔히 쓰이는 회로 기호: **A** - 저항, **B** - 전류계, **C** - 전압계, **D** - 저항계, **E** - 스위치, **F** - 전지, **G** - 축전기, **H** - 다이오드, **I** - 압전 소자. 빨간 별표가 있는 전선은 빨간 피복을 입혔다.



(a) 권장하는 전기 연결: 전선을 서로 감고 악어 클립으로 고정한다.



(b) 축전기에 붙은 다이오드와, 다이오드 옆에 올바른 방향으로 놓은 회로 기호.

그림 3: 전기 부품에 관한 도움말

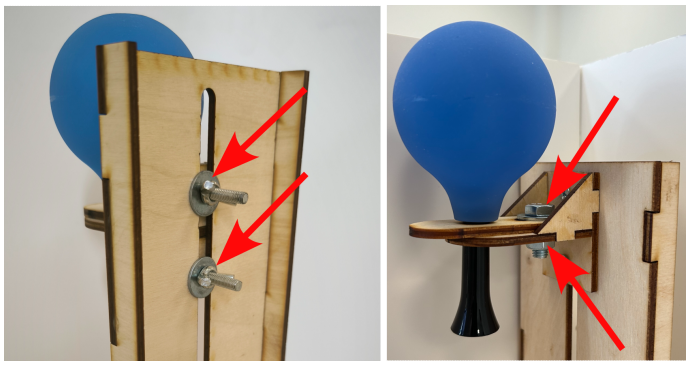


그림 4: 뒤쪽의 나비 너트 두 개를 쉽게 풀어 낙하 장치를 위아래로 움직일 수 있다. 또한 수직 너트로 수평 위치를 조절할 수 있다.



그림 5: 빨간 화살표가 멀티미터의 모델 번호를 가리킨다.