



Physics Laboratory

실험 2-2. 전하와 전하 사이

- 전기력과 축전기 -

주의: 이 실험에서는 10 kV 정도의 고전압이 걸린 축전기를 사용한다. 높은 전압으로 인해 감전 사고의 위험이 있으므로 전원장치의 +전극과 축전기의 극판을 취급할 때는 반드시 주의를 기울여야 한다. 또한 축전기 극판 사이의 거리가 너무 가까우면 스파크가 일어날 수 있으므로, 역시 반드시 유의하며 안전하게 실험할 필요가 있다.

실험 목적

전하를 띤 입자들은 전기력을 통해 상호 작용한다. 축전기는 전하를 저장하기 위한 장치로, 가장 기본적인 축전기는 평행한 두 도체 판(극판)으로 이루어져 있다. 여기에 전압을 걸게 되면 양쪽 극판에 서로 반대의 전하가 대전되어, 결과적으로 양 극판 사이에는 전기력이 작용하게 된다. 이 실험에서는 축전기에 걸리는 전압, 극판 사이의 거리, 극판 사이의 유전체 물질을 변화시켜가며 전자 저울을 통해 이 전기력을 측정한다. 이를 통해 극판 사이 전기력이 전압과 거리에 따라 어떻게 변하는지를 알아보고, 여러 물질의 유전 상수를 계산해 본다.

실험 개요

- 전자 저울을 사용하여 평행판 축전기의 극판 사이에 작용하는 전기력을 측정한다.
- 축전기의 전압과 극판 사이의 거리에 따라 전기력이 어떻게 변화하는지 알아본다.
극판 사이의 유전체 물질에 따른 결과의 변화도 조사한다.
- 축전기의 전기장과 전기력 사이의 관계를 이해하고, 축전기의 조합에 따른 합성 전기 용량 계산 방법을 이해한다.

실험 방법

실험실에는 다음과 같은 장치가 준비되어 있다. (그림 1 참조)

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 전원 공급 장치 (0-15kV) | 1 대 |
| 전기력 측정 장치 (축전기, 마이크로미터, 전자 저울 포함) | 1 대 |
| 버니어 캘리퍼스 | 1 개 |
| 유전체 판(아크릴/유리/테플론) | 4 개 |

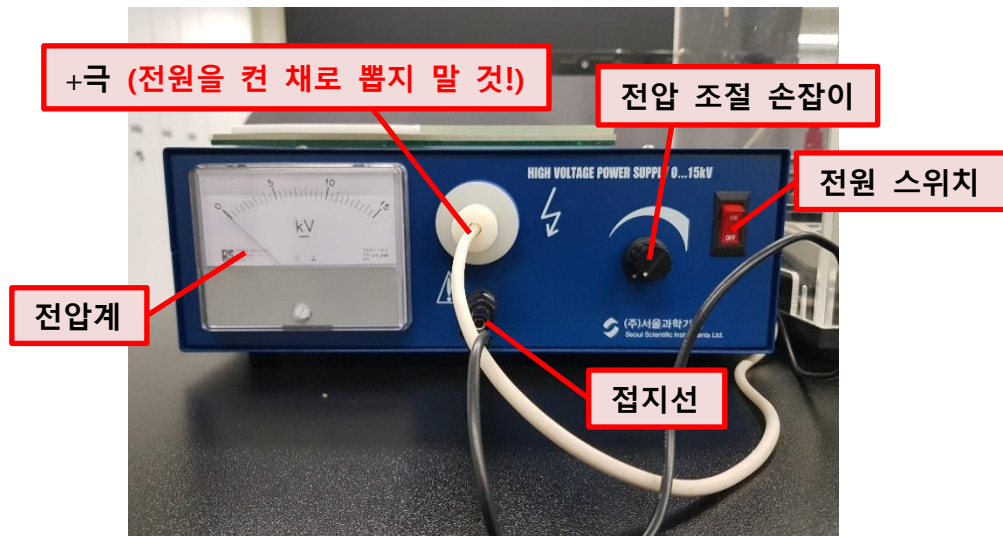
이외에도 더 필요한 것이 있으면 담당 조교에게 문의하거나 각자 미리 준비하도록 한다.



[그림 1] 실험 장치들의 모습. 왼쪽이 전원 공급 장치, 오른쪽이 측정 장치.

권장할만한 표준적인 실험 방법은 다음과 같다.

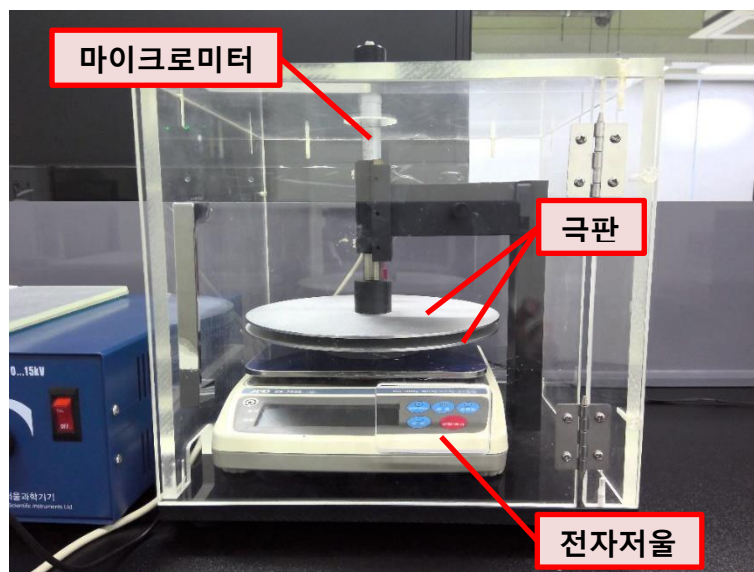
<스텝 1> 본격적인 측정에 앞서 몇 가지 준비가 필요하다. 먼저 **전원 공급 장치의 전원 스위치가 OFF에, 그리고 전압 조정 손잡이가 최소에 놓여있는지 확인한다.**(그림 2 참조)



[그림 2] 전원 공급 장치의 각 부위

(a) 전자 저울 바닥에 있는 조절 나사를 돌려서 수평을 맞춘다. 수평을 잘 맞추었으면 다음으로는 전자 저울의 영점/용기 버튼을 눌러서 영점을 맞춘다. 이렇게 영점을 맞추게 되면 무게의 증가 또는 감소분만이 패널에 표시되므로 변화량을 쉽게 측정할 수 있다.

(b) 극판 사이의 거리 측정을 위한 기준을 잡는다. 극판 사이의 거리는 위쪽 판에 연결된 마이크로미터(그림 3 참조)를 돌리면 바꿀 수 있고, 거리도 마이크로미터 눈금을 이용해서 알아내면 편하다. 그러나 대부분의 실험 장치에서 두 극판이 서로 닿으면 마이크로미터의 눈금이 한계를 벗어나게 된다. 때문에, 극판들 사이에 아크릴 판 또는 유리 판을 넣고 극판 사이 간격이 이 유전체 판의 두께와 같도록 조절한다. 그리고 이 상태에서

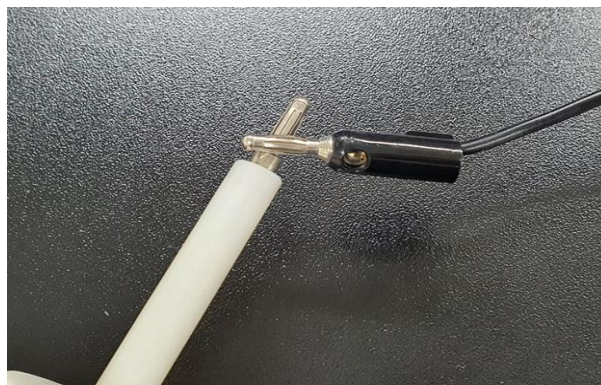


[그림 3] 측정 장치의 각 부분

읽은 마이크로미터의 눈금을 기준점으로 삼으면 된다. 유전체 판의 실제 두께는 준비된 버니어 캘리퍼스를 이용해 측정할 수 있다.

Tip: 극판 사이 간격을 유전체 판의 두께와 최대한 같게 맞추기 위해서 다음과 같은 방법을 사용해 볼 수 있다. 먼저 유전체 판이 두 극판 사이에 아주 살짝 끼이게 한다. 그리고 조금씩 극판 사이 간격을 증가시켜가며, 저울의 눈금 변화가 사라지는 순간을 찾는다. 이 때의 판 사이 간격이 유전체 판의 두께와 거의 같다고 생각할 수 있다.

<스텝 2> 전원 공급 장치로부터 접지선과 +극 선을 뽑아 그림 4처럼 서로 접촉시켜서 극판을 방전시킨다. **이 때 전원 공급 장치의 스위치는 반드시 OFF 여야 하며 전압 조정 손잡이도 최소에 놓여 있어야 한다.** 그 이후 마이크로미터를 돌려 극판 사이의 거리를 원하는 값으로 맞춘다. (마이크로미터 눈금에서 기준 상태였을 때의 눈금을 뺀 값이 극판 사이의 거리가 된다) 이 때 두 판들이 정확히 정렬되어 있는지, 간격이 판 전체에 걸쳐 균일한지도 확인한다.



[그림 4] 극판을 방전시키는 방법

<스텝 3> 저울의 패널에 표시된 눈금이 0 인지 확인한 다음 (영점이 어긋나 있다면 다시 맞춘다), 전원 장치의 전원 스위치를 ON으로 바꾼다. 이제 전압 조절 스위치를 돌려 출력 전압을 원하는 값으로 맞추고, 저울 패널의 눈금을 읽는다. **전압이 지나치게 높으면 아크(arc) 방전이 일어나므로 감전되지 않도록 주의해야 한다.** 전압을 바꾸는 즉시 저울 눈금이 변하지는 않을 수도 있으므로, 잠시 기다린 다음 눈금을 읽는 것이 좋다. 눈금이 - 값이 나오면 극판들 사이에 작용하는 전기력은 인력이고, + 값이 나오면 척력인 셈이다.

※참고: 본 실험과 같이 축전기에 고전압이 걸리면 공기 중으로 낮은 전류가 새어나갈 수 있다. (특히 습도가 높으면 그럴 가능성이 더욱 높아진다) 때문에 전원 장치의 전류 공급 능력이 부족하면 원하는 고전압을 제대로 걸지 못하는 문제가 발생할 수 있다. 실험실에 준비된 전원 장치는 정상적으로 작동할 경우 최대 2mA 정도의 전류를 공급할 수 있다. 고장이 의심된다면 즉시 조교에게 문의하도록 한다.

<스텝 4> 거리를 고정시킨 채 전압을 바꾸어 가며 측정해 보고(실험 노트 측정 I), 또 전압을 고정시킨 채 극판 사이의 거리를 바꾸면서도 측정해 본다(실험 노트 측정 II). 전압이나 거리를 변화시키고자 할 때는 **전원 장치의 전압 조정 손잡이를 최소로 하여 출력 단자에서 전압이 나오지 않게 한 다음 전원 장치의 스위치도 OFF 시키고, 스텝 2로 돌아가 장치를 방전시키는 데서부터 다시 시작한다.**

<스텝 5> 극판 사이에 유전체 판을 넣고 다시 영점을 맞춘 다음, 전압을 바꾸어가며 측정한다(실험 노트 측정 III). 되도록이면 극판 사이의 간격이 유전체 판의 두께와 딱 맞도록 조절한다. 이는 오차를 줄이기 위해서이며, 이 때문에 유전체 판을 넣은 상태에서는 판 사이 거리는 바꾸지 않고 전압을 바꾸어가며 측정하는 실험만 한다. 이 실험 결과를 통해 유전체의 유전 상수를 알아낼 수 있다.

<스텝 6> 이번에는 극판 사이에 아크릴판과 유리판을 2층으로 쌓고 전압을 바꾸어가며 측정한다(실험 노트 측정 IV). 역시 유전체들을 넣은 다음 영점을 다시 맞추고 극판 사이 거리는 2층으로 쌓은 유전체 판들의 전체 두께와 같게 조절한다. 이 단계의 측정 결과는 축전지의 직렬 연결을 이해하는데 활용될 수 있다.

※참고: 실험실에는 크기가 작은 아크릴 판과 테플론판도 준비되어 있으므로, 시간이 남는다면 다른 형태의 유전체 조합에 대해서도 실험해 볼 수 있다. 이 결과를 해석할 때는 유전체 판의 크기와 모양(직육면체)에 유의해야 한다.

실험 노트(예시)

측정 I

극판 사이의 유전체 = 공기, 극판 사이의 거리 = mm

[illegible]

측정 II

극판 사이의 유전체 = 공기, 극판 사이의 전압 = kV

[illegible]

측정 III

극판 사이의 유전체 = 유리판 or 아크릴판, 극판 사이의 거리 = mm

[illegible]

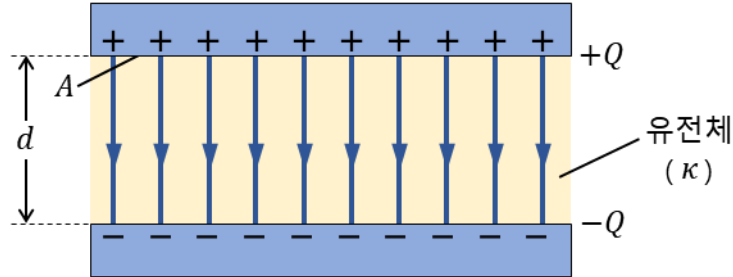
측정 IV

극판 사이의 유전체 = 유리판+아크릴판(직렬), 극판 사이의 거리 = mm

[illegible]

배경 이론

이 실험에서 사용되는 축전기는 평행판 축전기(parallel plate capacitor)로 볼 수 있다.



[그림 5] 평행판 축전기

평행한 금속 극판 2개와 그 사이 공간을 채운 유전체로 이루어진 축전기가 있다고 하자. 이 축전기의 전기용량은 아래와 같이 주어진다.

$$C = \kappa \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (1)$$

여기서 κ 는 유전체의 유전상수를 의미한다. (진공이라면 1) ϵ_0 는 진공의 유전율이고 A 는 극판의 면적, d 는 두 극판 사이의 거리이다. (그림 5 참조) 이 평행판 축전기에 전압 V 를 건다면 축전기의 전하량은 $Q = CV$ 로 나타낼 수 있다. 전원의 +극에 연결된 판은 $+Q$, -극에 연결된 판은 $-Q$ 로 대전된다.

이제 두 축전기 사이에 작용하는 전기력을 계산해 보자. 우선 두 극판의 전하는 서로 반대이므로, 이 전기력은 인력임을 알 수 있다. 그리고 극판 하나가 만들어내는 전기장의 세기는 $E = \frac{V}{2d}$ 이다. 따라서 극판이 받는 전기력의 크기는 아래와 같다.

$$F = QE = \frac{CV^2}{2d} \quad (2)$$

여기에 식 (1)을 대입하면

$$F = \kappa \frac{\epsilon_0 A V^2}{2d^2} \quad (3)$$

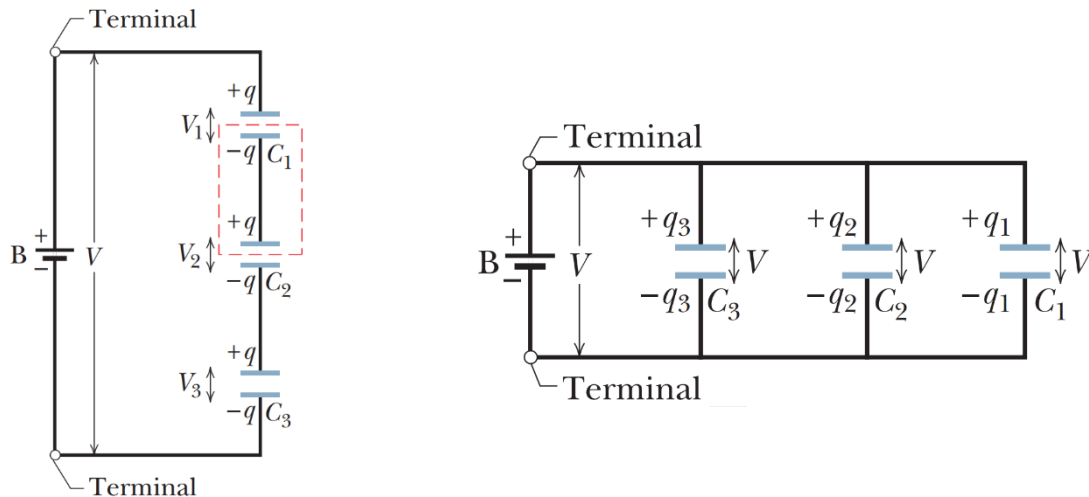
가 됨을 알 수 있다. 즉 두 극판 사이에 작용하는 전기력의 크기는 전압의 제곱에 비례하고, 거리의 제곱에 반비례한다. 본 실험에서는 저울의 눈금을 통해 이러한 전기력을

측정하는 것이라고 할 수 있다. 단, 저울의 패널에 나타나는 양은 질량이므로, 힘의 크기를 구하기 위해서는 여기에 중력 가속도 g 를 곱해주어야 한다.

실험의 <스텝 4>까지는 극판 사이에 공기 유전체가 들어간 것으로 볼 수 있다. 그런데 공기의 유전 상수는 거의 1로, 극판 사이가 진공일 때와 상황이 흡사하다. 따라서 만약 극판의 넓이를 안다면 식 (2)를 이용해서 진공의 유전율을 근사적으로 계산해 볼 수 있을 것이다.

<스텝 5>처럼 유전체 판을 극판 사이에 넣는다면, 같은 전압에 대해 극판에 대전되는 전하량은 극판 사이가 진공일 때와 비교하여 κ 배이고 전기장의 세기는 변함이 없으므로 결과적으로 극판 사이에 작용하는 전기력의 크기는 κ 배가 된다. 이를 이용해서 유전체 판의 유전상수를 구해보자.

<스텝 6>이나 처럼 극판 사이 공간이 여러 유전체로 채워져 있다면, 이는 사실상 여러 개의 축전기가 연결되어 조합을 이룬 것과 같은 상황이라고 생각할 수 있다. 축전기 조합에 대한 전하와 전압의 관계도 $Q = CV$ 로 얻을 수 있다. 단 여기에서 C 는 이 조합 전체의 합성 전기용량을 의미한다.



[그림 6] 축전기의 직렬(왼쪽), 병렬(오른쪽) 연결 (Walker, 2020, pp. 627-628). 직렬 연결일 경우 직접 연결된 판들(예: 점선 박스 내)에 대전된 전하는 서로 반대라는 점에 주의.

그림 6과 같이 전기용량이 C_1, C_2, C_3 인 세 축전기를 직렬 또는 병렬로 연결하면 합성 전기용량은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (\text{직렬}) \quad (4)$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (\text{병렬}) \quad (5)$$

실험에서 사용한 유전체 판의 조합에 대해 등가 전기용량을 계산해 보고, 전기력의 크기 측정 결과와 식 (2)를 통해 예상된 값이 서로 부합하는지 조사해 보자.

참고문헌

Walker, J., *Halliday & Resnick's Principles of Physics* (11th ed.), 2020.