

2. 축전기와 전기용량



장비 구성

EX-5533 Capacitance

Basic Electrometer	ES-9078A
Electrostatic Voltage Source	ES-9077
Basic Variable Capacitor	ES-9079

기본 이론

축전기는 전하를 저장하기 위하여 사용된다. 축전기는 서로 절연된 두 개의 도체로 만들 수 있는데, 두 도체가 배터리의 양극과 같은 전위차 V_0 에 연결되면, 두 도체는 극성이 반대이지만 동일한 양의 전하 Q 로 충전되며, 이것을 축전기의 전하량이라 한다. 실제 축전기의 알짜 전하는 0이다. 장치의 전기용량은 전위차 V 가 인가된 후 각 도체에 저장된 전하량 Q 로 정의된다. □□□

$$C = \frac{Q}{V}$$

이를 다시 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. □□□

$$V = \frac{Q}{C} \quad (1)$$

(1) 가장 간단한 형태의 축전기는 각각의 면적이 A 인 두 개의 평행한 도체 판을 거리 d 만큼 떨어지도록 배치하여 만들 수 있다. 전하는 판의 표면에 균일하게 분포된다. 평행판 축전기의 전기용량은 다음과 같다.

$$C = \frac{x\epsilon_0 A}{d}$$

여기서 x 는 평행판 사이의 절연 물질의 유전 상수(진공에서 $x=1$, 다른 값들은 실험적으로 측정되며 표에서 찾을 수 있음)이며, ϵ_0 는 진공유전율이다. 진공유전율의 일반적인 값은

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m이다. 전기용량의 SI 단위는 Farad(F)이다. 우리가 사용하는 시스템은 더 복잡하다. 두 개의 움직일 수 있는 판 뿐

만 아니라, 연결 도선 및 전위계 또한 전기용량을 가지고 있다. 이 전기용량은 판이 1cm 가량 떨어져 있을 때의 전기용량과 거의 비슷하며 무시할 수 없는 크기이다. 이것을 포함하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{x\epsilon_0 A}{d} + C_{sys} \quad (2)$$

여기서 C_{sys} 는 시스템의 나머지 부분의 전기용량이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{Q}{x\epsilon_0 A/d + C_{sys}} \quad (3)$$

축전기의 판 사이에 임의의 물질을 넣으면 유전 상수 x 인자에 의하여 전기용량이 증가한다. □□□□

$$C = xC_0 \quad (4)$$

여기서 C_0 는 축전기의 판 사이가 진공일 때의 전기용량이다. 유전 물질은 부도체이다. 임의의 유전체는 축전기의 판 사이의 접촉 및 방전을 방지하여 절연할 수 있다. 공기의 유전 상수를 유효숫자 3개로 나타내면 $x=1.00$ 이다. 모든 물질에서 $x>1$ 이다. 만일 판 사이에 유전체가 삽입되는 동안 축전기의 전하량이 일정하게 유지되면, 식 (1)과 (4)로부터 다음과 같은

식을 얻을 수 있다.

$$Q = CV = C_0 V_0 = (C/x) V_0$$
$$V = V_0/x$$

여기서 V_0 는 유전체를 삽입하기 전의 전압이며 V 는 삽입 후의 전압이다. $x > 1$ 이므로, 항상 다음이 성립한다.

$$V < V_0 \quad (5)$$

목 표

거리에 따른 capacitance 변화 분석

[실험 1] The Effect of the Plate Separation

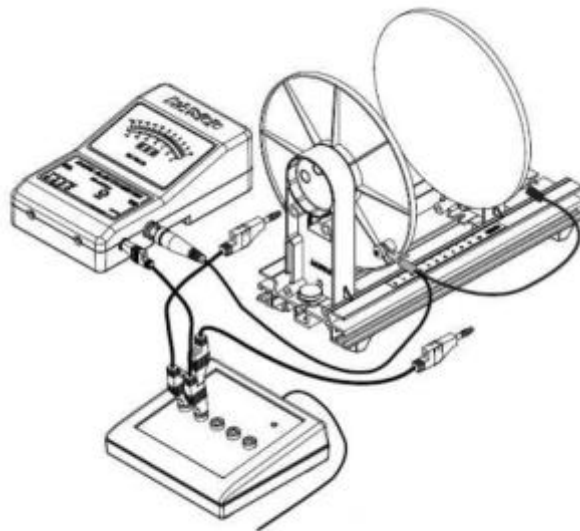


그림. 장비 설치

※ PASCO ES-9079 가변 축전기는 다양한 간격으로 조정 가능한 직경 17.7cm의 두 개의 플라스틱 판(고정판 1개, 이동판 1개)으로 구성되어 있다.(판의 면적 $\square A = 2.46 \times 10^{-2} m^2$) 고정판에는 3개의 플라스틱 스페이서가 부착되어 있으며, 이동판이 스페이서에 닿으면 간격은 1mm가 된다. 플레이트를 전위계에 연결할 때에는 전기용량이 낮은 케이블을 사용하고, 케이블 도선 간의 거리를 가능한 많이 떨어뜨려 놓음으로써 도선의 전기용량을 최소화한다. **축전기의 플레이트를 평행으로 유지**하는 것이 매우 중요하다. 축전기를 잘못 다루어 평행이 흐트러질 경우, 반드시 다시 평행으로 조정한다. 고정 플레이트의 뒷면을 보면 멈춤 나사 세 개가 있는 작은 보조 플레이트가 있다. 이 나사 세 개를 조정하여, 두 플레이트를 평행으로 유지할 수 있다. 투명한 아크릴 플레이트 받침대를 깨끗이 유지하여 플레이트에서 전하가 새는 것을 방지한다.



그림 1. 셋업

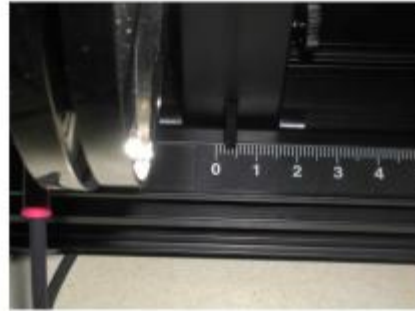


그림 2. 인디케이터 풋

1. 고정판을 벤치의 끝에 조립하고, 고정판과 이동판이 약 2mm 간격만큼 떨어지도록 만든다. 이동판 뒷면에 있는 조절 나사를 이용하여 판을 평행하게 만든다. 가장 쉬운 방법은 위에서 수직으로 내려다보면서 간격이 균일하게 보일 때까지 수평 나사를 조정하는 다음, 측면에서 간격을 확인하면서 수직 나사를 조정하는 것이다. 이 과정을 몇 번 반복해야 할 수도 있다.
2. 이동판의 인디케이터 풋 앞쪽 가장자리가 2mm 눈금 위치에 오도록 한다. 이때, 두 판 사이의 간격은 모든 방향에서 보았을 때 2mm가 되어야 한다. 눈금자로 확인해보고, 만일 간격이 고르지 않다면 과정 1을 반복한다. 간격이 2mm가 되지 않을 경우, 고정판의 위치를 조정한다.
3. Signal Input 케이블(BNC 잭에서 빨간색과 검정색 스페이드 러그 도선으로 갈라지는 케이블)의 BNC잭을 전위계의 Signal Input 단자에 연결한다. 도선을 가능하면 손이나 신체로부터 멀리 떨어져 있도록 배치한다. 이 실험에서의 전하는 매우 작아서 정전기 방전이 실험 결과에 영향을 줄 수 있다. 또한, 사람 역시 전도성 판에 해당하며 전기용량이 상당히 크다. (따라서 실험자가 가까이 다가가면 실험 결과가 엉망이 될 수 있다!) Signal Input 케이블의 검정색 스페이드 러그를 고정판의 터미널에 연결하여 고정판을 접지하는 것이 좋다. 빨간색 스페이드 러그는 이동판의 터미널에 연결한다. 판이 움직일 때 도선이 자유롭게 움직일 수 있어야 한다.
4. 검정색 바나나/바나나 잭 케이블이 있다면(미포함), 이것을 정전압 공급장치의 COM 단자와 전위계의 Ground 단자에 연결한다.(그림 1 참조) 바나나/바나나 잭 케이블이 없다면, 제공된 검정색 바나나/스페이드 도선의 바나나잭을 COM 단자에 꽂고, 스페이드 끝을 접지 도선이 이미 연결되어있는 고정판의 터미널에 연결한다. 빨간색 바나나/스페이드 도선의 바나나잭을 정전압 공급장치의 +30V 단자에 연결하고 스페이드 끝을 자유롭게 놓아둔다. 정전압 공급장치에 전원 어댑터를 연결한 다음, 장치 뒤쪽의 스위치를 ON 위치에 놓는다. 녹색 전원 표시등이 켜져야 한다.
5. 제공된 인터페이스 어댑터 케이블을 이용하여 전위계의 Signal Output 단자와 850 인터페이스의 아날로그A 채널을 연결한다. 인터페이스를 사용하지 않을 경우, Capstone을 이용하여 표를 만들어 사용할 수 있다.
6. PASCO Capstone에서 표를 만들고, Cm단위로 Separation이라는 사용자 입력 데이터 세트를 작성한다. 표에 표시된 값을 입력한다. 두 번째 열은 전압(V)를 선택한다. 850인터페이스를 사용하지 않는 경우, 사용자 입력 데이터 세트의 Voltage(V)를 작성한다.

[실험 1] 실험 방법

1. 받침대의 선단이 0.3cm 표시에 오도록 이동 평행판을 위치시켜, 평행판을 0.3cm 간격으로 설정한다.
2. 전위계를 켜고 범위를 100V 로 설정한다.
3. 손으로 동시에 두 개의 판을 터치하여 평행판에서 전하를 제거한다.
4. 바늘이 제로가 될 때까지 "ZERO"버튼을 눌러 전위계를 제로화한다.
5. 전압 소스의 +30V 콘센트에 이동식 평행판 뒷면에 케이블을 일시적으로 연결하여 평행판을 충전하고, 충전케이블을 제거한다.
6. 표에서 설정된 거리에 맞춰 각 전압값을 입력한다. 습도가 높은 경우, 전하가 전위계에서 천천히 빠져나가기 때문에 신속하게 실험을 진행하도록 한다. 한 사람은 컴퓨터에 판독 값을 입력하고, 다른 사람은 평행판을 움직인다. 이 때, 다른 사람들은 모두 뒤로 물러서야 한다. 모든 사람은 실험과정에 있어서 동일한 위치에 있도록 한다. 사람 자체가 평행판 역할을 하기 때문에 판독 값을 변경될 수 있다.
7. Capstone에서 왼쪽하단의 미리보기를 클릭하여 데이터 수집을 시작한다. 850인터페이스를 사용하지 않을 경우, 데이터 수집은 필요없다. 컴퓨터를 조작하는 실험자는 표의 첫 번째 행에 숫자가 나타나면 샘플에 대한 Keep(왼쪽 하단의 빨간색 확인 표시) 버튼을 클릭한다. 첫 번째 행의 숫자가 검은 색으로 바뀌고 숫자가 두 번째 행으로 이동한다. 컴퓨터를 조작하는 실험자는 현재 측정되는 거리를 소리내어 읽어 평행판을 조작하는 사람이 알 수 있도록 한다.
8. 판을 7.0cm로 이동하고 0.3cm까지 과정을 반복한다.
9. Stop 버튼을 눌러 데이터 수집을 중지한다.
10. 그래프를 확인한다. 부드러운 곡선이 보이면 실험이 정상적으로 진행된 것이다. 그렇지 않은 경우, 환경(사람의 위치 등)을 조금 더 신경 써서 실험을 다시 진행한다.

[분석]

$$V = \frac{Q}{x\epsilon_0 A/d + C_{sys}} \quad (3)$$

1. 식 (3)을 살펴보면 $C_{sys} = 0$ 이면 V 는 d 에 정비례 하고, 전압vs거리의 그래프는 직선이어야 한다. 그러나, 실험 결과 직선이 아님을 알 수 있다. C_{sys} 가 0이 아닌 경우, 식 (3) 을 확인하려면 Q 와 C_{sys} 를 알아야 한다. 식 (3)을 데이터에 피팅하여 이를 결정할 수 있다.

$\kappa\epsilon_0 A = (1.00) * (8.85 * 10^{-12} F/m) (2.46 * 10^{-2} m^2) = 2.18 * 10^{-13} Fm = 2.18 * 10^{-11} Fcm$
 따라서 $d=1cm$ 일 때, 평행판 축전기는 $C_{1.0} = 2.18 * 10^{-11} F$ 이다. 이 값은 Capstone에 표시된 두 번째식에 사용된다. d 가 작을 때 ($0.3cm$), 첫 번째 항에서

$$Q \sim V_{0.3} (\kappa\epsilon_0 A) / d = (30 V) * (2.18 * 10^{-11} Fcm) / (0.3cm) = 2.2 * 10^{-11} Fcm$$

이 값은 Capstone 계산기의 첫 번째 Q값에 대한 초기 추측으로 입력된다. Q는 일정하므로 d 가 커지면 C_{sys} 가 분모가 되어 다음과 같이 계산된다.

$$C_{sys} \sim Q / V_8 \sim 2.2 * 10^{-9} C / 80 V = 2.7 * 10^{-11} F$$

여기서 V_8 은 $d=8$ 일때의 전압이다. 이것은 Capstone 계산기 3항에 있는 $C_{sys}(=C1)$ 에 대한 초기 추측으로 간주된다. C_{sys} 는 $1.0cm$ 에서 $C_{1.0}$ 과 거의 같다. $0.3cm$ 에서 $C_{0.3} = 7 * 10^{-11} F$ 이므로 $C_{0.3} \sim 3 C_{sys}$ 와 근사치는 괜찮은 편이지만 좋지는 않다. $8cm$ 에서 $C_8 = 2.7 * 10^{-12} F = C_{sys} / 10$ 이므로 근사치로는 좋지만 완벽하지는 않다.

1. Capstone 계산기에 다음과 같이 입력한다.

$Q = 3.0 * 10^{-9}$	Units of C
$\kappa\epsilon_0 A = 2.18 * 10^{-11}$	Units of (F cm)
$C_1 = 3.6 * 10^{-11}$	Units of F
$V \text{ model} = [Q] / ([\kappa\epsilon_0 A] / [Separation] + [C_1])$	Units of V

2. Data Display 버튼을 이용하여 가장 좋은 실행을 선택한다.

3. 계산기의 1항에서 Q 값을 조정하고 라인 2에서 C1 값을 조정하여 모델이 가능한 한 실험 곡선과 일치하도록 한다.

[실험 2] The Effect of a Dielectric between the Plates

유전체 유무에 따른 capacitance 변화 분석

[실험 2] 실험 방법

1. PASCO Capstone에 다음과 같이 표를 작성한다.

	Paper Position	Voltage (V)
1	out	
2	in	
3	out	
4	in	
5	out	
6	in	
7	out	
8	in	
9	out	

2. 플레이트 사이에 삽입할 유전체를 결정한다. 종이의 경우 1cm 두께의 용지 더미를 사용한다.

3. 커패시터의 이동 플레이트를 8cm에 배치한다.

4. 전위계를 켜고 범위 버튼을 100V로 설정한다.

5. 두 플레이트를 동시에 터치하여 커패시터에서 전하를 제거한다.

6. 'ZERO'버튼을 눌러 전위계를 제로화한다.

7. 전압 소스의 + 30V 콘센트에서 이동식 커패시터 플레이트 뒷면의 스타드로 케이블을 일시적으로 연결하여 커패시터를 충전하고, 충전 케이블을 제거한다.

8. PREVIEW버튼을 클릭한다. (850인터페이스 사용시)

9. 한 명은 종이의 긴면이 수직이되도록 축전 기판 사이의 틈 바로 위에 종이 더미를 들고 있다. 한손으로 종이를 잡고 다른 손은 전위계의 신호 입력에 부착된 금속 커넥터에 유지하여 종이를 들고있는학생에게 정전기가 발생하지 않도록 한다. 용지가 플레이트 사이에

있지 않을 때 전압을 기록한다. 인터페이스 사용시 KEEP 버튼을 눌러 기록한다.

10. 바닥에 닿을 때까지 두 판 사이의 용지를 내린다. 용지가 플레이트에 닿지 않도록 해야 한다! 가능한한 플레이트 위쪽으로 손을 유지한다. 용지가 플레이트 사이에 있을 때 전압을 기록한다. 인터페이스 사용시 KEEP 버튼을 눌러 기록한다.

11. 판 위로 종이를 다시 당기고 8 단계와 9 단계를 여러 번 반복한다.

12. 인터페이스 사용시 STOP 버튼을 클릭하여 데이터 사용을 중지 한다.

13. 종이를 뺀 최종 전압이 초기 종이 출력 값과 많이 다를 경우, 실험을 다시 처음부터 반복한다.