

[최고의 수험물리 전문가]

윤형철

변리사 탄탄물리

[개념+기출]

— 11장 전위, 전기위치에너지, 축전기 —

“물리는 외우는 과목이 아니라 생각하는 과목입니다.”

세 가지 강의 철학

목차

— 성장기반 물리

(Grow-based Physics)

— 취사선택 물리

(Cut-off Strategy Physics)

— 생각하는 물리

(Thinking Physics)



물리

윤형철 교수

물리 윤형철 교수입니다.

약력

전남과학고등학교 졸업
서울대학교 사범대학 물리교육과 졸업

전 대치 미래탐구
전 대치 새움학원
현 대치 링크물리
현 변리사스쿨 물리 전문교수

개념 POINT

[전기 개관]

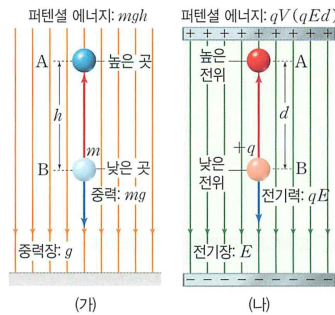
물리현상 (문제상황)	→ 물리량	물리법칙
전기현상	① 전하 ② 전기력 ③ 전기장 ④ 전기 퍼텐셜에너지 ⑤ 전기 퍼텐셜(전위) ⑥ 전기 퍼텐셜차(전위차)	쿨롱의 법칙 가우스 법칙

I. 전위와 전위차

전기 회로에 전류가 흐르게 하기 위해서는 전하가 이동할 수 있도록 전기 에너지를 공급해 주어야 하는데, 이때 회로에 전기 에너지를 공급해 주는 장치를 전원이라고 한다. 물뿔프가 수로에서 물의 높이차를 만들어 주는 것처럼 전원은 전기 회로에서 전위차를 만들어 준다.

1. 전기력에 의한 퍼텐셜 에너지

그림 (가)와 같이 중력장 내에서 질량이 m 인 물체를 높이 h 만큼 들어올리기 위해서는 중력에 대하여 mgh 만큼의 일을 해 주어야 한다. 이때 B점에 있는 물체를 A점까지 이동시키기 위해 외부에서 한 일만큼 A점에서 물체는 중력 퍼텐셜 에너지를 갖게 되고, A점에서 다시 B점으로 이동할 때 중력은 물체에 일을 하게 된다. 그림 (나)와 같이 전기장 내에서도 전하량이 $+q$ 인 전하를 전기장과 반대 방향으로 거리 d 만큼



▲ 중력장과 전기장 내에서의 퍼텐셜 에너지 비교

이동시키기 위해서는 전기력에 대하여 qEd 만큼의 일을 해 주어야 한다. 이때 B점에 있는 전하를 A점까지 이동시키기 위해 외부에서 한 일만큼 A점에서 전하는 전기력에 의한 퍼텐셜 에너지를 갖게 된다. 즉, A점에서는 B점보다 전기력에 의한 퍼텐셜 에너지가 높다.

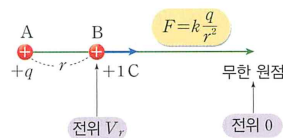
2. 전위

(1) 전위: 전기장 내에서 단위 양전하($+1\text{ C}$)가 가지는 전기력에 의한 퍼텐셜 에너지를 전위라고 한다. 이는 전기장 내에서 기준점으로부터 어떤 한 지점까지 단위 양전하($+1\text{ C}$)를 이동시키는 데 필요한 일과 같다.

① 전위의 기준점: 전위의 기준점은 중력장에서와 같이 임의로 선택할 수 있으며, 기준이 되는 점의 전위를 0으로 정한다. 따라서 기준점이 달라지면 각 지점의 전위는 달라지게 된다. 이론상으로는 대전체에서 무한히 멀리 떨어진 점(무한 원점)을 기준점으로 하지만, 실용적으로는 지면 또는 도체면을 기준점으로 정한다.

② 전하와 전기력: (+)전하는 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 전기력을 받고, (-)전하는 전위가 낮은 곳에서 높은 곳으로 전기력을 받는다.

(2) 점전하에 의한 전위: 그림과 같이 전하량이 $+q$ 인 점전하 A로부터 거리 r 만큼 떨어진 지점에 전하량이 $+1\text{ C}$ 인 점전하 B를 놓으면 B는 전기력을 받아 멀어진다. 이때 B는 속력이 빨라지므로 운동 에너지는 증가하지만, 전기력에 의한 퍼텐셜 에너지는



▲ 점전하에 의한 전기력과 전위

감소한다. 또 A로부터 무한히 멀리 떨어진 지점에서 전기력은 0이 되므로 무한 원점을 전위의 기준점으로 하고, A로부터 r 만큼 떨어진 지점의 전위를 V_r 라고 하면, V_r 는 B를 무한 원점에서 r 인 지점까지 이동시키는 데 필요한 일 W 와 같다. 쿨롱 법칙에 의해 r 만큼 떨어진 지점에서 B가 받는 전기력 $F = k \frac{q \cdot 1}{r^2} = k \frac{q}{r^2}$ 이므로, W 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \int_{\infty}^r F \cdot dr = \int_{\infty}^r k \frac{q}{r^2} \cdot dr = k \frac{q}{r}$$

따라서 V_r 는 다음과 같다.

$$V_r = k \frac{q}{r}$$

이때 A로부터 r 만큼 떨어진 지점은 원 모양으로 나타나므로, 반지름이 r 인 원 위의 점들은 전위가 모두 같다.

(3) 여러 개의 점전하에 의한 전위: 전위는 스칼라량이므로, 여러 개의 점전하가 만드는 전위를 구하기 위해서는 각각의 점전하가 만드는 전위를 구하여 더해야 한다. 즉, 전기장 내에서 전하량이 각각 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 인 점전하로부터 거리가 각각 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ 만큼 떨어진 한 지점의 전위를 V 라고 하면, V 는 다음과 같다.

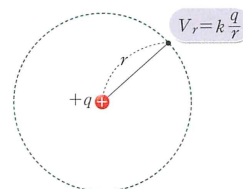
$$V = k \frac{q_1}{r_1} + k \frac{q_2}{r_2} + k \frac{q_3}{r_3} + \dots + k \frac{q_n}{r_n} = \sum_{i=1}^n k \frac{q_i}{r_i}$$

기전력

전하의 흐름을 일정하게 유지시켜 주는 능력을 기전력이라고 하며, 전지나 발전기 등과 같이 기전력을 공급하는 장치를 전원이라고 한다. 전원은 전하의 흐름을 일정하게 유지시켜 주기 위해 전하에 전기력에 의한 퍼텐셜 에너지를 공급해 준다.

개념 POINT

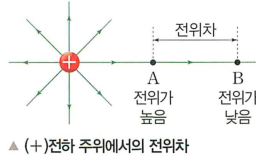
점전하에 의한 전위



3. 전위차

(1) **전위차**: 전기장 내에서 두 지점 사이의 전위의 차이를 전위차 또는 전압이라고 한다. 전기장 내에서 한 지점의 전위는 기준점에 따라 다르지만, 두 지점 사이의 전위차는 기준점에 상관없이 일정하다.

(2) **점전하 주위에서의 전위차**: 그림과 같이 단위 양전하(+1 C)를 무한 원점에서 B점까지 이동시키는 것보다 A점까지 이동시키는 데 더 많은 일을 필요로 한다. 즉, (+)전하에 가까운 A점이 B점보다 전위가 높다. 이때 전하량이 +q인 전하를 B점에서 A점까지 이동시키는 데 W만큼의 일을 했다면, A점과 B점 사이의 전위차 V는 다음과 같다.



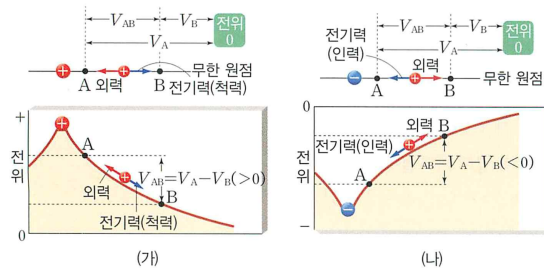
▲ (+)전하 주위에서의 전위차

$$V = \frac{W}{q} \quad (\text{단위: V})$$

전위차의 단위로는 V(볼트)를 사용하며, 한 지점에서 어떤 한 지점까지 전하량이 +1 C인 전하를 이동시키는 데 1 J의 일이 필요할 때 두 지점 사이의 전위차를 1 V라고 한다.

$$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$$

(3) **전위차와 일**: 그림 (가)는 산 꼭대기로 물건을 운반할 때처럼 전기장 내에서 (+)전하를 전위가 높은 곳으로 이동시키는 모습을 나타낸 것으로, 이때 외력이 하는 일은 (+)이다. 그림 (나)는 골짜기로 물건을 운반할 때처럼 전기장 내에서 (+)전하를 전위가 낮은 곳으로 이동시키는 모습을 나타낸 것으로, 이때 외력이 하는 일은 (-)이다.



▲ 전기장 내에서 (+)전하를 이동시키는 데 필요한 일

① **전위차와 일**: 전기장 내에서 전위차가 V인 두 지점 사이에서 전하량이 +1 C인 전하를 이동시키는 데 V(J)의 일이 필요하다. 따라서 전위차가 V인 두 지점 사이에서 전하량이 q인 전하를 이동시키는 데 필요한 일 W는 다음과 같다.

$$W = qV \quad (\text{단위: J})$$

② **전기력이 한 일**: 전하량이 +q인 전하를 전위가 높은 곳에서 가만히 놓으면 전하는 전기력을 받아 전위가 낮은 곳으로 이동한다. 이때 전기력이 한 일 $W = qV$ 가 전하의 운동 에너지로 전환된다. 따라서 전하의 속력이 0에서 v로 되었다면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$qV = \frac{1}{2}mv^2$$

(4) **균일한 전기장 내에서의 전위차**: 평행한 두 금속판 사이와 같이 균일한 전기장 내에 있는 전하는 크기와 방향이 일정한 전기력을 받는다. 그림과 같이 세기가 E인 균일한 전기장 내에서 전하량이 +q인 전하가 받는 전기력 $F = qE$ 이므로, 전하를 B에서 거리 d만큼 떨어진 A로 이동시키는 데 필요한 일 W는 다음과 같다.

$$W = Fd = qEd$$

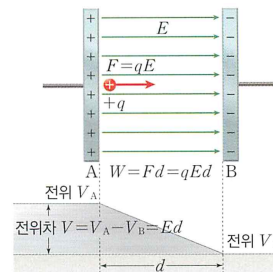
A와 B 사이의 전위차를 V라고 하면, A와 B 사이에서 전하량이 +q인 전하를 이동시키는 데 필요한 일 W는 다음과 같다.

$$W = qV$$

따라서 전기장 E와 전위차 V의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = Ed$$

즉, 균일한 전기장 내에서 전위차 V는 전기장과 나란한 방향으로의 거리 d에 비례한다.



▲ 균일한 전기장 내에서의 전위와 전위차

개념 POINT

전기력에 의한 퍼텐셜 에너지 차이와 전위차
균일한 전기장 내에서 두 지점의 전기력에 의한 퍼텐셜 에너지 차이는 전하에 따라 달라지지만, 전위차는 전하로 단위 양전하(+1 C)를 사용한 값이므로, 항상 일정하다.

전위와 전위차의 단위

전위의 단위도 전위차와 같은 V(볼트)를 사용한다.

전하의 종류와 일

(+)전하는 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 스스로 이동하지만, (-)전하는 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동할 때 외부에서 일을 해 주어야 한다.

전자 볼트(eV)

전자나 양성자 등을 다루는 미시 세계에서 에너지의 단위로 J를 사용하기에는 에너지가 너무 작다. 따라서 전위차가 1 V인 두 지점 사이에서 기본 전하 e를 이동시키는 데 필요한 일을 1 eV로 정하여 일 또는 에너지의 단위로 사용한다.

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

전기장의 단위

$F = qE$ 에서 전기장의 단위는 N/C이고, $V = Ed$ 에서 전기장의 단위는 V/m이다. 즉, $1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$ 이다.

II. 등전위면

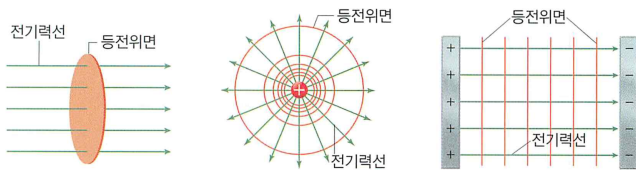
전기력선으로 전기장의 모양을 시각적으로 이해할 수 있었던 것과 마찬가지로, 등전위면도 전기장의 모양을 파악하는 데 유용하다.

1. 등전위면

전기장 내에서 전위가 같은 지점을 연결하여 얻어지는 선을 등전위선, 면을 등전위면이라고 한다.

(1) 등전위면의 특징

- ① 등전위면 위의 모든 지점에서는 전위가 같으므로, 전위차는 0이다.
- ② 전하가 전기장으로부터 받는 힘의 방향은 등전위면에 수직이다.
- ③ 등전위면이 조밀할수록 그 위치에서 전기장의 세기는 세다.
- ④ 등전위면을 따라 전하를 이동시키는 데 필요한 일 $W=qV$ 에서 $V=0$ 이므로, $W=0$ 이다. 즉, 등전위면에서 전하를 이동시킬 때는 일을 하지 않는다.
- ⑤ 전기장 내에서 도체 표면과 내부는 등전위면을 이룬다.
- ⑥ 두 대전체를 접촉시키면 전하량의 일부가 상쇄되어 알짜 전하량만 남게 되는데, 이때 접촉된 두 대전체의 표면이 등전위면이 되도록 알짜 전하량이 재분배된다.



(가) 전기력선의 단면과 등전위면

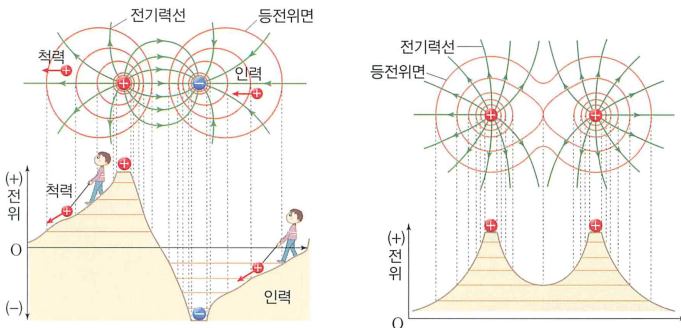
(나) (+)전하 주위

(다) 평행한 두 금속판 사이

▲ 전기력선과 등전위면

(2) 두 전하가 만드는 등전위면

그림 (가)는 (+)전하와 (-)전하에 의한 전기력선과 등전위면의 모습을 나타낸 것이고, 그림 (나)는 두 개의 (+)전하에 의한 전기력선과 등전위면의 모습을 나타낸 것이다.



(가) (+)전하와 (-)전하가 만드는 등전위면

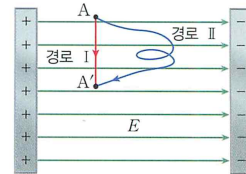
(나) 두 (+)전하가 만드는 등전위면

▲ 두 전하가 만드는 등전위면

개념 POINT

등전위면과 일

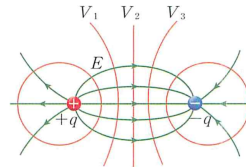
그림은 평행한 두 금속판 사이에 있는 (+)전하를 A점에서 A'점으로 이동시키는 모습을 나타낸 것이다.



• 경로 I과 같이 등전위면을 따라 (+)전하를 이동시키는 데 전기력이 한 일은 0이다.

• 경로 II와 같이 (+)전하를 등전위면이 아닌 경로로 이동시키더라도 다시 같은 등전위면으로 되돌아오면 (+)전하를 이동시키는 데 전기력이 한 일은 0이 된다.

등전위면과 전위



등전위면이 (+)전하에 가까이 있을수록 전위가 높으므로, 전위는 V_1 가 가장 크고, V_3 가 가장 작다. $\Rightarrow V_1 > V_2 > V_3$

III. 축전기

1. 축전기

용수철을 늘이거나 활시위를 잡아당길 때에는 퍼텐셜 에너지의 형태로 에너지를 저장할 수 있다. 마찬가지로 전기장에서도 퍼텐셜 에너지의 형태로 에너지를 저장할 수 있는데, 이 장치를 축전기라고 한다.

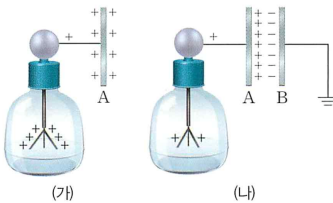
1. 축전기

(1) **축전기**: 전하를 저장하는 장치를 축전기라고 하며, 전하를 띤 축전기에는 전기 에너지가 저장된다.

(2) **축전기의 구조**: 축전기는 외부와 절연된 두 개의 금속판(극판)으로 이루어져 있으며, 두 금속판을 다른 종류의 전하로 채워 전하를 모아 둔다.

평행판 축전기	원통형 축전기	구형 축전기
		
두 개의 동일한 금속판을 서로 평행하게 마주보도록 만든 축전기	평행판 축전기 내에 유전체를 넣고 말아서 원통 모양으로 만든 축전기	반지름이 다른 두 개의 금속 구면을 서로 마주보도록 만든 축전기

(3) **축전기의 원리**: 그림 (가)와 같이 한 개의 금속판 A만으로도 전하를 저장할 수 있으나, 전하량이 증가하면 같은 종류의 전하끼리 서로 반발하게 되고 금속의 뾰족한 부분에서 전기장이 강해져 쉽게 방전되므로, 많은 양의 전하를 모을 수 없게 된다. 반면 그림 (나)와 같이 금속판 A에 접지된 금속판 B를 가까이 가져가면 정전기 유도가 일어나 B에서 A와 가까운 쪽은 A와 다른 종류의 전하가 유도된다. 이때 이들 전하 사이에 서로 끌어당기는 전기력이 작용하므로, 전하들이 안정적으로 모여 있게 된다. 이와 같은 방법으로 많은 양의 전하를 모을 수 있다.



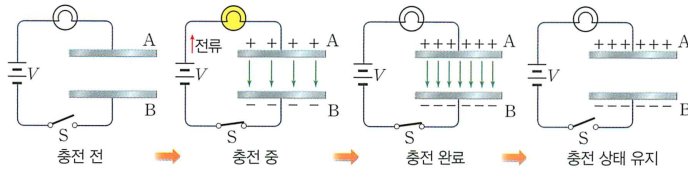
축전기와 축전지

축전기는 전위차에 비례하는 전하를 모아 필요한 곳에 공급하는 장치를 말하며, 축전지는 외부에서 들어오는 전기 에너지를 화학 에너지 형태로 바꾸어 저장해 두었다가 필요할 때 전기 에너지로 바꾸는 장치를 말한다.

개념 POINT

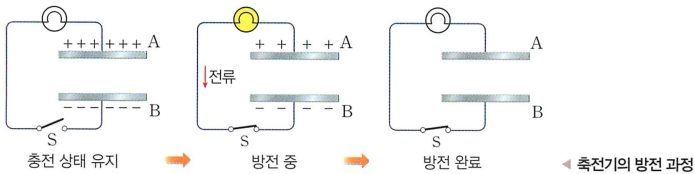
2. 축전기의 기능

- (1) **충전**: 축전기에 전지와 같은 전원을 연결하여 전하를 저장하는 현상을 충전이라고 한다.
 ① 축전기에 전지를 연결하고 스위치를 닫으면 금속판 A에는 (+)전하가, 금속판 B에는 (-)전하가 대전되며, 두 금속판 사이에는 전기장이 형성되어 전위차가 생긴다.
 ② 두 금속판 사이의 전위차가 전지의 전위차와 같아질 때까지 전하가 이동하여 각 금속판에는 같은 양의 전하가 분포한다.
 ③ 스위치를 열어두면 두 금속판의 전하는 전기력에 의해 그대로 저장된다.



▲ 축전기의 충전 과정

- (2) **방전**: 축전기에 저장된 전하가 회로를 통해 빠져나가 저장된 전하량이 감소하는 현상을 방전이라고 한다.
 ① 충전된 축전기를 전지가 제거된 회로에 연결하고 스위치를 닫는다.
 ② 두 금속판 사이의 전위차가 0이 될 때까지 전하가 이동하여 충전된 전하가 모두 방전된다.



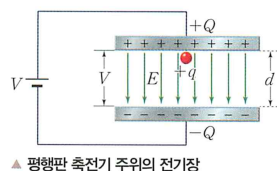
◀ 축전기의 방전 과정

3. 평행판 축전기 주위의 전기장

- (1) **금속판 주위의 전기장**: (+)전하로 고르게 대전된 넓은 금속판 주위에 단위 양전하(+1 C)를 놓으면, 단위 양전하는 금속판의 전하로부터 각각 전기력을 받는다. 이때 전기력의 수평 성분은 모두 상쇄되므로, 단위 양전하는 금속판에 수직 방향으로 전기력을 받는다.
 ➡ 대전된 금속판 주위의 전기장의 방향은 금속판에 수직으로 들어가거나 나가는 방향이다.

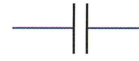
- (2) **평행판 축전기 주위의 전기장**: 금속판의 면적이

두 금속판 사이의 간격보다 매우 크다면, 대전된 평행판 축전기가 만드는 전기장은 (+)전하와 (-)전하로 대전된 두 개의 금속판이 만드는 전기장의 합과 같다. 이때 평행판 축전기 외부에는 두 금속판이 만드는 전기장이 서로 상쇄되어 0이 되고, 내부에는 균일한 전기장이 형성된다. 그림과 같이 두 금속판 사이의 전기장의 세기가 E 일 때 (+)전하로 대전된 금속판에 전하량이 $+q$ 인 전하를 놓으면 전하는 전기력 $F=qE$ 를 받아 d 만큼 이동한다. 이때 전하를 이동시키는 데 필요한 일 $W=Fd=qEd$ 이므로, 금속판 사이의 전위차 $V=\frac{W}{q}=Ed$ 가 된다.



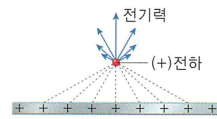
▲ 평행판 축전기 주위의 전기장

축전기의 기호



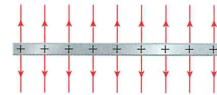
평행판 축전기의 모양을 본뜬 기호로 표시한다.

금속판 주위의 전기력

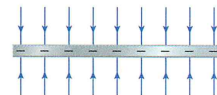


금속판 주위의 전기장

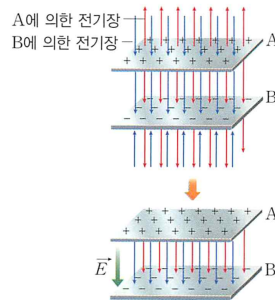
• 금속판이 (+)전하로 대전된 경우



• 금속판이 (-)전하로 대전된 경우



평행판 축전기 주위의 전기장



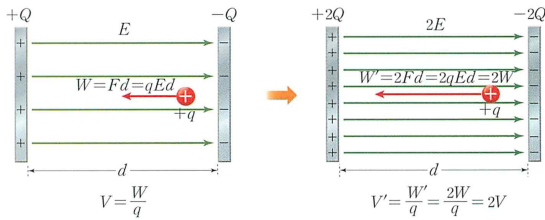
2. 축전기의 전기용량

축전기를 전하를 담는 그릇이라고 생각해 보면 그릇에 전하를 담을 때 그릇이 클수록, 즉 전기 용량이 클수록 더 많은 전하를 담을 수 있다. 또 그릇에 전하를 담을 때 그릇이 깊을수록, 즉 전압이 높을수록 더 많은 전하를 담을 수 있다.

1. 전기 용량

(심화) 83쪽

도체에 (+)전하를 주면 그 주위에 전기장이 형성되므로, 전하량이 +1 C인 전하를 이 도체까지 이동시키기 위해서는 외부에서 일을 해 주어야 한다. (+)전하가 저장된 이 도체에 가까이 갈수록 더 많은 일이 필요하므로, (+)전하로 대전된 도체의 전위가 높다는 것을 알 수 있다. 이때 도체에 저장된 전하량이 2배가 되면 전기장의 세기도 2배가 되고, 이 도체까지 전하를 이동시키는 데 필요한 일도 2배가 된다. 따라서 전위차도 2배가 된다.



▲ 전하량과 전위차

(1) **전기 용량**: 축전기에 전하가 충전되면 전하량에 비례하여 두 극판 사이의 전기장의 세기가 증가하므로, 극판 사이의 전위차도 비례하여 증가한다. 즉, 축전기에 충전되는 전하량 Q 는 두 극판 사이의 전위차 V 에 비례한다.

$$Q \propto V$$

따라서 Q 와 V 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Q = CV \quad (\text{단위: C})$$

이때 비례 상수 C 를 전기 용량이라고 하며, 단위로는 F(패럿)을 사용한다. 1 F은 축전기의 두 극판 사이에 1 V의 전위차를 걸었을 때 1 C의 전하량이 충전되는 전기 용량이다.

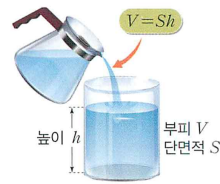
$$1 \text{ F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}} = 1 \text{ C}^2/\text{J}$$

F은 매우 큰 단위이므로, 실용적으로는 μF (마이크로 패럿)이나 pF (피코 패럿)을 주로 사용한다.

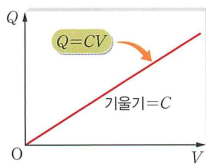
$$1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}, 1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$$

(2) **전기 용량의 결정**: $Q = CV$ 에서 $C = \frac{Q}{V}$ 이므로, 축전기의 전기 용량은 축전기의 두 극판 사이의 전위차가 1 V 높아지는 동안 충전되는 전하량과 같다. 즉, 전기 용량이 큰 축전기는 같은 전위차를 걸었을 때 전하를 더 많이 충전할 수 있고, 전기 에너지도 더 많이 저장할 수 있다. 이때 전기 용량의 크기는 극판의 면적, 모양, 두 극판 사이의 간격, 두 극판 사이를 채우는 물질의 종류에 따라 달라진다.

축전기를 그릇에 비유

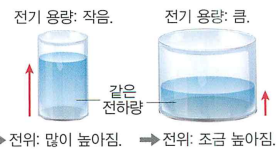


- 물통: 축전기
- 물의 부피(V): 전하량(Q)
- 물통의 단면적(S): 전기 용량(C)
- 물의 높이(h): 전위(V)



▲ 전하량-전위차 그래프

전하량이 같을 때 전기 용량의 비교



⇒ 전위: 많이 높아짐. ⇒ 전위: 조금 높아짐.

개념 POINT

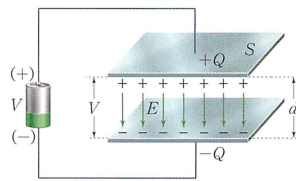
2. 평행판 축전기의 전기 용량

집중 분석 8쪽

(1) 평행판 축전기의 극판의 면적 및 두 극판 사이 간격과 전기 용량의 관계

① 평행판 축전기의 마주보는 두 극판의 면적 S 가 넓을수록 전하를 저장할 장소가 넓어지므로, 많은 양의 전하를 모을 수 있다.

② 평행판 축전기의 두 극판 사이의 전기장의 세기가 E 일 때 전위차 $V=Ed$ 이므로, 전위차 V 가 일정할 때 두 극판 사이의 간격 d 가 작을수록



▲ 평행판 축전기의 전기 용량

록 극판 사이의 전기장의 세기가 커져서 더 많은 양의 전하를 모을 수 있다.

➡ 극판의 면적이 넓을수록, 두 극판 사이의 간격이 작을수록 전기 용량은 증가하게 된다.

(2) 평행판 축전기의 전기 용량: 평행판 축전기의 전기 용량 C 는 극판의 면적 S 에 비례하고, 두 극판 사이의 간격 d 에 반비례한다. 따라서 평행판 축전기의 전기 용량 C 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (\text{단위: F})$$

이때 비례 상수 ϵ 은 축전기의 두 극판 사이를 채운 물질(유전체)에 따라 정해지는 값으로, 유전율이라고 한다.

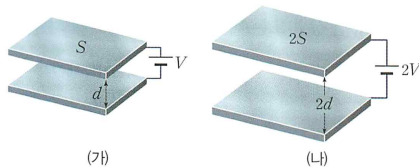
예제

1. 전기 용량이 $1 \mu\text{F}$ 인 평행판 축전기가 있다. 이 축전기의 극판의 면적을 2배로 증가시키고, 두 극판 사이의 간격을 $\frac{1}{2}$ 배로 감소시켰을 때 축전기의 전기 용량은 몇 μF 이 되는지 구하시오.

해설 평행판 축전기의 전기 용량 $C = \epsilon \frac{S}{d}$ 에서 극판의 면적 S 를 2배, 두 극판 사이의 간격 d 를 $\frac{1}{2}$ 배로 하면, 전기 용량 C 는 4배가 된다. 따라서 전기 용량은 $4 \mu\text{F}$ 이다.

정답 $4 \mu\text{F}$

2. 그림 (가)는 전압이 V 로 일정한 전원에 극판의 면적이 S 이고, 두 극판 사이의 간격이 d 인 평행판 축전기를 연결한 모습을 나타낸 것이고, (나)는 전압이 $2V$ 로 일정한 전원에 극판의 면적이 $2S$ 이고, 두 극판 사이의 간격이 $2d$ 인 평행판 축전기를 연결한 모습을 나타낸 것이다.



(1) 두 축전기의 전기 용량의 비((가) : (나))를 구하시오.

(2) 두 축전기에 충전되는 전하량의 비((가) : (나))를 구하시오.

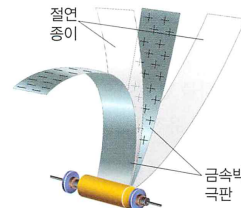
해설 (1) 평행판 축전기의 전기 용량 $C = \epsilon \frac{S}{d}$ 이므로, 두 축전기의 전기 용량의 비 $C_{(가)} : C_{(나)} = \frac{S}{d} : \frac{2S}{2d} = 1 : 1$ 이다.

(2) 두 축전기의 전기 용량이 같으므로, $Q = CV$ 에서 축전기에 충전되는 전하량의 비는 전위차의 비에 비례한다. 따라서 두 축전기에 충전되는 전하량의 비 $Q_{(가)} : Q_{(나)} = 1 : 2$ 이다.

정답 (1) $1 : 1$ (2) $1 : 2$

개념 POINT

원통형 축전기의 구조



극판의 면적을 넓게 하고, 두 극판 사이의 간격을 작게 하기 위해 금속박 극판 사이에 파라핀 종이나 기름종이 등의 절연 종이를 넣고 말아서 원통 모양으로 만든다.

3. 축전기와 유전체

대부분의 축전기의 두 극판 사이에는 종이, 플라스틱, 광물성 기름과 같은 절연체가 들어 있다. 이는 축전기의 전기 용량을 증가시켜 축전기에 더 많은 전기 에너지를 저장하기 위해서이다.

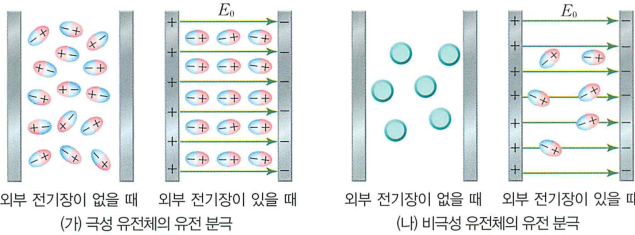
1. 유전체

(1) **유전체**: 전기장에 의해 유전 분극이 되는 물질을 유전체라고 한다.

(2) **유전체의 유전 분극**: 축전기를 충전시켜 두 극판 사이에 전기장 E_0 이 형성될 때 두 극판 사이에 유전체를 넣으면 극판 사이의 전기장에 의해 유전 분극이 일어난다.

① **극성 유전체의 유전 분극**: 물 분자와 같이 영구 전기 쌍극자인 물질을 극성 유전체라고 한다. 그림 (가)와 같이 전기장 내에서 극성 유전체는 전기 쌍극자가 전기장과 나란하게 정렬되는 유전 분극이 일어난다.

② **비극성 유전체의 유전 분극**: 영구 전기 쌍극자가 아닌 비극성 유전체는 전기장이 없을 때는 전기 쌍극자가 나타나지 않다가, 전기장 내에서는 전하의 재배열을 통해 (+)전하와 (-)전하를 띤 부분으로 분극이 일어나 전기 쌍극자가 된다. 그림 (나)와 같이 전기장 내에서 비극성 유전체는 전기 쌍극자가 전기장과 나란하게 정렬되는 유전 분극이 일어난다.



▲ 유전체의 유전 분극

(3) **유전율**: 유전체가 유전 분극이 되는 정도를 유전율 ϵ 이라고 하며, 이는 유전체의 종류에 따라 다르다. 진공의 유전율은 ϵ_0 으로 표기하며, 쿨롱 법칙을 통해 얻을 수 있다. 쿨롱 법칙

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \text{에서 } \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{이므로, } \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \approx 8.85 \times 10^{-12} (\text{F/m}) \text{이다.}$$

(4) **유전 상수**: 진공의 유전율 ϵ_0 에 대한 유전체의 유전율 ϵ 의 비를 유전 상수 또는 비유전율 κ 라고 한다.

$$\kappa = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

진공의 유전 상수는 1이고, 다른 물질들의 유전 상수는 1보다 크다. 즉, 축전기의 두 극판 사이에 유전체를 넣으면 진공일 때보다 전기 용량이 κ 배만큼 증가한다.

(5) **유전 강도**: 축전기 내의 유전체가 파괴되지 않고, 견딜 수 있는 전기장의 최대값을 유전 강도라고 한다. 유전 강도의 단위로는 V/m를 사용하고, 물질마다 다른 값을 가진다. 유전 강도가 큰 유전체일수록 더 큰 전압을 견어 줄 수 있으므로 축전기에 더 많은 전하를 저장할 수 있다.

개념 POINT

유전체의 종류

- **강유전체**: 외부 전기장 없이도 스스로 분극되는 물질을 강유전체라고 한다. 강유전체는 외부 전기장에 의해 분극의 방향을 바꿀 수 있다.
- **상유전체**: 외부 전기장이 있을 때 분극되는 물질을 상유전체라고 한다. 상유전체는 외부 전기장이 없으면 분극이 사라진다.

여러 가지 물질의 유전 상수(20 °C)

물질	유전 상수
진공	1
공기(1기압)	1.00059
파라핀	1.9~2.4
천연 고무	2.1~3.3
폴리 에틸렌	2.25
운모	3~6
종이	3.7
에보나이트	2.7~2.9
물	80.4
석영	3.5~4.0
유리	4~6
글리세린	42.5
메틸 알코올	30
티타니아 세라믹	130
스트론튬 티타네이트	310
소금	6
얼음	100~190
다이아몬드	6

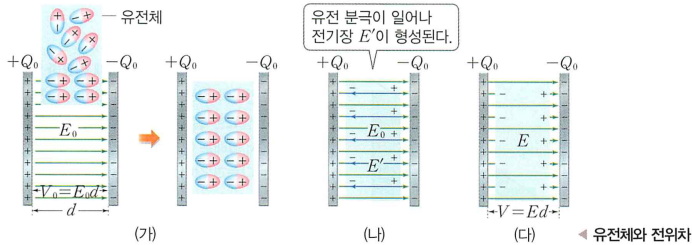
축전기의 내전압

축전기의 두 극판에 걸어 주는 전압에는 한도가 있어서 어느 한도 이상의 전압이 걸리면 절연되지 않고, 두 극판 사이에 전기가 흐르게 된다. 이와 같이 축전기의 두 극판 사이에서 방전되지 않고 견딜 수 있는 최대 전압을 축전기의 내전압이라고 한다. 내전압의 크기는 두 극판 사이의 유전체의 종류에 따라 다르고, 두 극판 사이의 간격에 거의 비례한다. 따라서 축전기를 사용할 때에는 축전기에 표시된 내전압을 확인하고, 내전압 이하의 전압에서 사용해야 한다.

2. 유전체와 전기 용량

(집중 분석) 82쪽

(1) 유전체와 전위차: 그림 (가)와 같이 전압이 V_0 인 전원에 축전기를 연결하여 전하량 Q_0 으로 충전시킨 후 전원에서 분리하면 축전기의 두 극판 사이에는 전기장 E_0 이 형성된다. 이때 축전기의 두 극판 사이에 유전체를 넣으면 극판 사이의 전기장에 의해 유전 분극이 일어나 유전체가 전기장과 나란하게 정렬된다. 유전체의 양 표면에는 각 극판과 다른 종류의 전하가 유도되므로, 유전체 내부에는 그림 (나)와 같이 축전기의 전기장 E_0 과 반대 방향으로 전기장 E' 이 형성된다. 즉, 두 극판 사이에 유전체를 넣으면 극판 사이의 전기장의 세기 $E = E_0 - E'$ 으로, 유전체를 넣기 전보다 약해진다. 따라서 그림 (다)와 같이 전위차 $V = Ed$ 로 V_0 보다 작아진다.

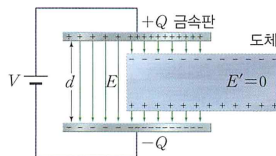


(2) 유전체와 전기 용량

전위차가 일정한 경우	전하량이 일정한 경우
<p>축전기의 두 극판 사이에 유전체를 넣으면 유전 분극에 의해 극판 사이의 전위차는 감소한다. 이때 두 극판 사이의 전위차가 전원의 전위차와 같아질 때까지 전하가 더 충전되므로, 전하량이 증가하게 된다. 따라서 전기 용량 $C = \frac{Q}{V}$에서 전기 용량은 증가한다.</p>	<p>축전기의 두 극판 사이에 유전체를 넣으면 유전 분극에 의해 극판 사이의 전위차는 감소한다. 이때 충전된 전하량이 일정하므로, 전기 용량 $C = \frac{Q}{V}$에서 전기 용량은 증가한다.</p>

시야확장 + 축전기에 도체를 넣은 경우

축전기의 두 극판 사이에 두께가 있는 도체를 넣으면 극판 사이의 전기장 E 에 의해 정전기 유도가 일어나 도체 내부의 전기장의 세기는 0이 된다. 이는 도체의 두께만큼 두 극판 사이의 간격이 줄어든 것과 같다. 이때 축전기의 한 극판과 삽입된 도체 사이의 전기장의 세기는 도체를 넣기 전과 같으므로, 전위차 $V = Ed$ 에서 두 극판 사이의 전위차는 감소한다. 따라서 축전기에는 더 많은 전하를 충전시킬 수 있다.



개념 POINT

축전기와 전원

축전기의 두 극판 사이에 유전체를 넣는 것과 같이 축전기를 변경하는 경우 축전기의 변경이 전원을 연결한 채 일어났는지 혹은 전원을 분리한 채 일어났는지 알아야 한다.

- 전원을 연결한 채 축전기를 변경한 경우: 전위차가 일정하다.
- 전원을 분리한 채 축전기를 변경한 경우: 충전된 전하량이 일정하다.

4. 축전기에 저장된 전기에너지

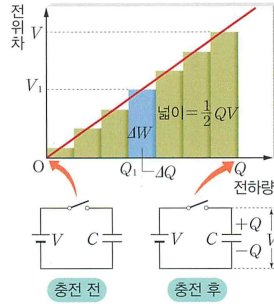
전원 장치를 이용하여 축전기를 충전하면 두 극판 사이에 형성된 전기장으로 인해 전위차가 생긴다. 이때 충전된 축전기에 저항을 연결하면 전류가 흐르면서 일을 할 수 있게 된다. 즉, 충전된 축전기는 전기 에너지를 저장하고 있다.

1. 축전기에 저장된 전기 에너지

(집중 분석) 81쪽~82쪽

(1) 축전기에 저장된 전기 에너지: 축전기의 극판을 대전시키기 위해서는 외부에서 일을 해주어야 하며, 극판에 전하가 쌓일수록 추가로 전하를 이동시키는 데 더 많은 일이 필요하다. 이때 축전기의 극판을 대전시키기 위해 필요한 일은 축전기에 전기력에 의한 퍼텐셜 에너지로 변환되어 저장된다. 즉, 전원 장치가 축전기에 해 준 일이 전기력에 의한 퍼텐셜 에너지로 축전기에 저장되며, 이를 축전기에 저장된 전기 에너지라고 한다.

(2) 전기 용량이 C 인 축전기의 두 극판에 전하량 Q 가 이동하여 전위차가 V 가 되었다면 $Q = CV$ 의 관계가 성립하므로, 그림과 같이 전위차-전하량 그래프는 원점 O 를 지나는 기울기가 일정한 직선 모양으로 나타난다. 축전기의 한 극판에서 다른 극판으로 전하를 이동시켜 충전시키는 어느 순간에 충전된 전하량을 Q_1 이라고 할 때, 그 순간에 전위차 $V_1 = \frac{Q_1}{C}$ 이다. 여기에 추가로 미소 전하량 ΔQ 를 이동시키는 데 필요한 일을 ΔW 라고



▲ 축전기에 저장된 전기 에너지

하면 $\Delta W = \Delta Q V_1$ 이고, 이는 전위차-전하량 그래프에서 색칠한 작은 직사각형의 넓이와 같다. 따라서 축전기에 전하량 Q 를 충전시킬 때 필요한 일 W 는 작은 직사각형의 넓이를 모두 합한 것과 같으며, 이는 전위차-전하량 그래프에서 그래프 아래의 넓이이다. 즉, 축전기에 전하량 Q 를 충전시키기 위해 필요한 일은 축전기에 저장된 전기 에너지와 같으므로, 전기 에너지 W 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \text{ (단위: J)}$$

개념 POINT

축전기에 전하를 충전시킬 때 필요한 일
축전기의 전하량을 0부터 Q 까지 충전시킬 때 필요한 일 W 는 전위차-전하량 그래프에서 그래프 아래의 넓이와 같다. 따라서 W 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

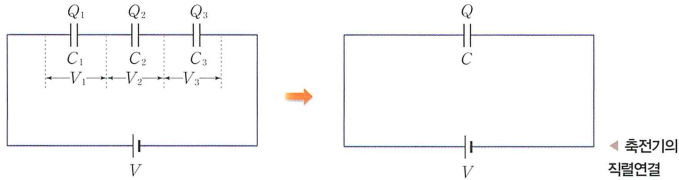
$$W = \int_0^Q dW = \frac{1}{C} \int_0^Q q dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

5. 축전기의 연결

축전기가 포함되어 있는 전기 가구에는 여러 개의 축전기가 다양한 방법으로 연결되어 있다. 이처럼 서로 연결된 여러 개의 축전기는 같은 값을 가지는 한 개의 축전기로 나타낼 수 있다.

1. 축전기의 직렬연결

그림과 같이 전기 용량이 각각 C_1, C_2, C_3 인 세 개의 축전기를 직렬로 연결했을 때 합성 전기 용량과 전기 에너지는 다음과 같다.

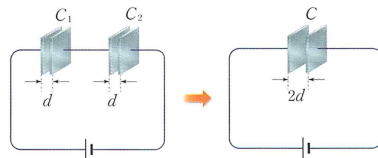


(1) **합성 전기 용량:** 축전기의 직렬연결에서 전원은 전원의 양 단자에 연결된 두 극판에만 전하를 충전한다. 축전기의 형태나 전기 용량에 관계없이 전원의 양 단자에 연결되어 있지 않은 극판 사이에서는 정전기 유도에 의해 전하가 충전되며, 이 부분은 회로의 나머지 부분으로부터 전기적으로 고립되어 있으므로, 알짜 전하량은 0이다. 따라서 전체 전하량은 각 축전기에 충전된 전하량과 같고, 전체 전압은 각 축전기에 의한 전압 강하의 합과 같다. 전체 전하량 $Q=Q_1=Q_2=Q_3$ 이므로, 각 축전기에 걸리는 전압 V_1, V_2, V_3 을 구하면 $V_1=\frac{Q}{C_1}, V_2=\frac{Q}{C_2}, V_3=\frac{Q}{C_3}$ 이다. 즉, 각 축전기에 걸리는 전압은 각 축전기의 전기 용량에 반비례한다. 따라서 전체 전압 $V=V_1+V_2+V_3=\frac{Q}{C_1}+\frac{Q}{C_2}+\frac{Q}{C_3}=\frac{Q}{C}$ 이므로, 직렬연결된 축전기의 합성 전기 용량 C 의 역수는 다음과 같다.

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}$$

① **합성 전기 용량:** 직렬연결된 축전기의 합성 전기 용량 C 의 역수는 각 축전기의 전기 용량의 역수의 합과 같다. $\Rightarrow \frac{1}{C}=\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$

② **합성 전기 용량의 크기:** 직렬연결된 축전기의 합성 전기 용량은 두 극판 사이의 간격이 증가하는 것과 같은 효과를 내며, 축전기 중 전기 용량이 가장 작은 것보다 작다. 그림과 같이 동일한 2개의 축전기를 직렬연결하면 등



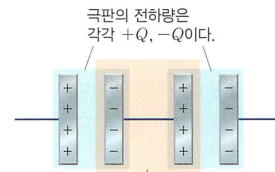
▲ 직렬연결된 축전기의 합성 전기 용량

가 축전기의 두 극판 사이의 거리가 2배가 되는 효과가 되므로, 합성 전기 용량은 작아진다.

(2) **전기 에너지:** 축전기에 저장된 전체 전기 에너지는 각 축전기에 저장되는 전기 에너지의 합과 같다. $\Rightarrow W=W_1+W_2+W_3=\frac{1}{2}Q^2\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}\right)$

개념 POINT

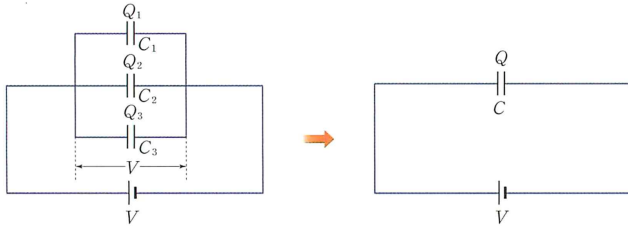
축전기의 직렬연결과 전하량



정전기 유도에 의해 자유 전자가 이동하며, 이 부분의 알짜 전하량은 0이다.

2. 축전기의 병렬연결

그림과 같이 전기 용량이 각각 C_1, C_2, C_3 인 세 개의 축전기를 병렬로 연결했을 때 합성 전기 용량과 전기 에너지는 다음과 같다.



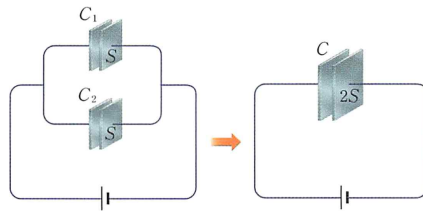
▲ 축전기의 병렬연결

(1) **합성 전기 용량:** 축전기의 병렬연결에서 전체 전압은 각 축전기에 의한 전압 강하와 같고, 전체 전하량은 각 축전기에 충전된 전하량의 합과 같다. 전체 전압 $V = V_1 = V_2 = V_3$ 이므로, 각 축전기에 충전된 전하량 Q_1, Q_2, Q_3 을 구하면 $Q_1 = C_1V, Q_2 = C_2V, Q_3 = C_3V$ 이다. 즉, 각 축전기에 충전된 전하량은 각 축전기의 전기 용량에 비례한다. 따라서 전체 전하량 $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = C_1V + C_2V + C_3V = CV$ 이므로, 병렬연결된 축전기의 합성 전기 용량 C 는 다음과 같다.

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

① **합성 전기 용량:** 병렬연결된 축전기의 합성 전기 용량 C 는 각 축전기의 전기 용량의 합과 같다. $\Rightarrow C = \sum_{i=1}^n C_i$

② **합성 전기 용량의 크기:** 병렬연결된 축전기의 합성 전기 용량은 극판의 면적이 증가하는 것과 같은 효과를 내며, 축전기 중 전기 용량이 가장 큰 것보다 크다. 그림과 같이 동일한 2개의 축전기를 병렬연결하면 등가 축전기 극판의 면적이



▲ 병렬연결된 축전기의 합성 전기 용량

2배가 되는 효과가 되므로, 합성 전기 용량은 커진다.

(2) **전기 에너지:** 축전기에 저장된 전체 전기 에너지는 각 축전기에 저장되는 전기 에너지의 합과 같다. $\Rightarrow W = W_1 + W_2 + W_3 = \frac{1}{2} V^2 (C_1 + C_2 + C_3)$

3. 축전기의 혼합 연결

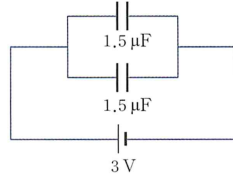
저항의 혼합 연결과 마찬가지로, 여러 개의 축전기가 혼합 연결되어 있을 때에는 분기점을 기준으로 하나씩 단계별로 합성 전기 용량을 구하는 과정을 반복하여 전체 합성 전기 용량을 구한다.

개념 POINT

예제

1. 그림과 같이 전압이 3 V로 일정한 전원에 전기 용량이 1.5 μF 인 동일한 축전기 2개를 병렬연결하였다.

- (1) 합성 전기 용량은 몇 μF 인지 구하시오.
- (2) 두 축전기에 충전된 전체 전하량은 몇 μC 인지 구하시오.
- (3) 두 축전기에 저장된 전체 전기 에너지는 몇 μJ 인지 구하시오.

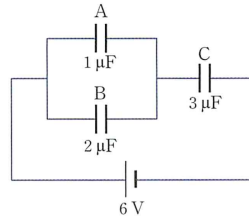


해설 (1) 축전기의 병렬연결에서 합성 전기 용량은 각 축전기의 전기 용량의 합과 같다. 따라서 합성 전기 용량 $C = 1.5 \mu\text{F} + 1.5 \mu\text{F} = 3 \mu\text{F}$ 이다.
 (2) 전하량 $Q = CV$ 에서 전체 전하량 $Q = 3 \mu\text{F} \times 3 \text{ V} = 9 \mu\text{C}$ 이다.
 (3) 전기 에너지 $W = \frac{1}{2} CV^2$ 에서 전체 전기 에너지 $W = \frac{1}{2} \times 3 \mu\text{F} \times (3 \text{ V})^2 = 13.5 \mu\text{J}$ 이다.

정답 (1) 3 μF (2) 9 μC (3) 13.5 μJ

2. 그림과 같이 전압이 6 V로 일정한 전원에 전기 용량이 각각 1 μF , 2 μF , 3 μF 인 축전기 A, B, C를 혼합 연결하였다.

- (1) 합성 전기 용량은 몇 μF 인지 구하시오.
- (2) A에 충전된 전하량은 몇 μC 인지 구하시오.
- (3) C에 저장된 전기 에너지는 몇 μJ 인지 구하시오.

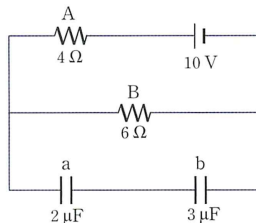


해설 (1) A와 B는 병렬연결되어 있으므로, A와 B의 합성 전기 용량 $C_{AB} = 1 \mu\text{F} + 2 \mu\text{F} = 3 \mu\text{F}$ 이다. 또 A, B와 C는 직렬연결되어 있으므로, 전체 합성 전기 용량 C 는 $\frac{1}{C} = \frac{1}{3 \mu\text{F}} + \frac{1}{3 \mu\text{F}} = \frac{2}{3 \mu\text{F}}$ 에서 $C = 1.5 \mu\text{F}$ 이다.
 (2) 전하량 $Q = CV$ 에서 전체 전하량 $Q = 1.5 \mu\text{F} \times 6 \text{ V} = 9 \mu\text{C}$ 이다. 축전기의 직렬연결에서 전체 전하량은 각 축전기에 충전된 전하량과 같으므로, A, B와 C 각각에 9 μC 의 전하량이 충전된다. 또 축전기의 병렬연결에서 각 축전기에 충전된 전하량은 각 축전기의 전기 용량에 비례하므로, A에는 3 μC , B에는 6 μC 의 전하량이 충전된다.
 (3) 전기 에너지 $W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$ 에서 C에 저장된 전기 에너지 $W_C = \frac{1}{2} \times \frac{(9 \mu\text{C})^2}{3 \mu\text{F}} = 13.5 \mu\text{J}$ 이다.

정답 (1) 1.5 μF (2) 3 μC (3) 13.5 μJ

3. 그림과 같이 전압이 10 V로 일정한 전원에 저항값이 각각 4 Ω , 6 Ω 인 저항 A, B와 전기 용량이 각각 2 μF , 3 μF 인 축전기 a, b를 혼합 연결하였다.

- (1) 합성 전기 용량은 몇 μF 인지 구하시오.
- (2) a에 충전된 전하량은 몇 μC 인지 구하시오.



해설 (1) a와 b는 직렬연결되어 있으므로, 전체 합성 전기 용량 C 는 $\frac{1}{C} = \frac{1}{2 \mu\text{F}} + \frac{1}{3 \mu\text{F}} = \frac{5}{6 \mu\text{F}}$ 에서 $C = 1.2 \mu\text{F}$ 이다.
 (2) 축전기의 충전이 완료되면 전류는 저항으로만 흐른다. A와 B는 직렬연결되어 있으므로, 전체 합성 저항 $R = 4 \Omega + 6 \Omega = 10 \Omega$ 이고, 전체 전류의 세기 $I = \frac{10 \text{ V}}{10 \Omega} = 1 \text{ A}$ 이다. 따라서 A와 B에는 각각 세기가 1 A인 전류가 흐르므로, B의 양단에 걸리는 전압 $V_B = 1 \text{ A} \times 6 \Omega = 6 \text{ V}$ 이다. 이때 B와 a, b는 병렬연결되어 있으므로, a, b에 걸리는 전압도 6 V이다. 따라서 전하량 $Q = CV$ 에서 전체 전하량 $Q = 1.2 \mu\text{F} \times 6 \text{ V} = 7.2 \mu\text{C}$ 이다. 축전기의 직렬연결에서 전체 전하량은 각 축전기에 충전된 전하량과 같으므로, a와 b 각각에 7.2 μC 의 전하량이 충전된다.

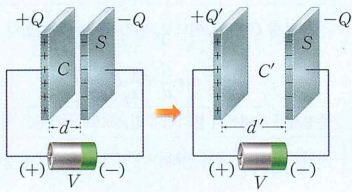
정답 (1) 1.2 μF (2) 7.2 μC

개념 POINT

6. 평행판 축전기의 전기용량과 전기 에너지

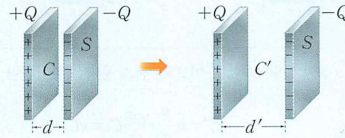
① 두 극판 사이의 간격을 d 에서 d' 으로 증가시킨 경우

(1) 전원을 연결한 채 두 극판 사이의 간격을 증가시킨 경우



전기 용량	전기 용량 $C = \epsilon \frac{S}{d}$ 이므로, 전기 용량은 감소한다. $C' = \epsilon_0 \frac{S}{d'} = \frac{d}{d'} C$
전위차	축전기가 전원에 연결되어 있으므로, 전위차는 일정하다.
전하량	전하량 $Q = CV$ 에서 전위차가 일정하고 전기 용량이 감소하므로, 충전된 전하량은 감소한다. $Q' = C'V = \frac{d}{d'} CV = \frac{d}{d'} Q$
전기장	전기장의 세기 $E = \frac{V}{d}$ 에서 전위차가 일정하고 두 극판 사이의 간격이 증가하므로, 전기장의 세기는 감소한다. $E' = \frac{V}{d'} = \frac{d}{d'} E$
전기 에너지	전기 에너지 $W = \frac{1}{2} CV^2$ 에서 전위차가 일정하고 전기 용량이 감소하므로, 저장된 전기 에너지는 감소한다. $W' = \frac{1}{2} C'V^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{d}{d'} C\right) V^2 = \frac{d}{d'} W$

(2) 전원을 분리한 채 두 극판 사이의 간격을 증가시킨 경우

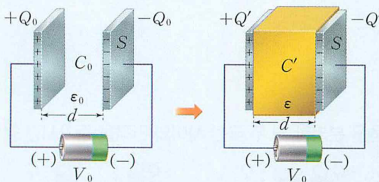


전기 용량	전기 용량 $C = \epsilon \frac{S}{d}$ 이므로, 전기 용량은 감소한다. $C' = \epsilon_0 \frac{S}{d'} = \frac{d}{d'} C$
전하량	축전기가 전원에서 분리되어 있으므로, 충전된 전하량은 일정하다.
전위차	전위차 $V = \frac{Q}{C}$ 에서 전하량이 일정하고 전기 용량이 감소하므로, 전위차는 증가한다. $V' = \frac{Q}{C'} = \frac{C}{C'} V = \frac{d'}{d} V$
전기장	전기장의 세기 $E = \frac{V}{d}$ 에서 전위차와 두 극판 사이의 간격이 같은 비율로 증가하므로, 전기장의 세기는 일정하다. $E' = \frac{V'}{d'} = \frac{V}{d} = E$
전기 에너지	전기 에너지 $W = \frac{1}{2} QV$ 에서 전하량이 일정하고 전위차가 증가하므로, 저장된 전기 에너지는 증가한다. $W' = \frac{1}{2} QV' = \frac{1}{2} Q \left(\frac{d'}{d} V\right) = \frac{d'}{d} W$

개념 POINT

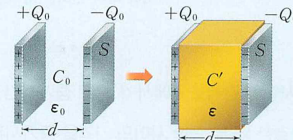
② 두 극판 사이에 유전 상수가 κ 인 유전체를 넣은 경우

(1) 전원을 연결한 채 두 극판 사이에 유전체를 넣은 경우



전기 용량	전기 용량 $C = \epsilon \frac{S}{d}$ 이므로, 전기 용량은 증가한다. $C' = \epsilon \frac{S}{d} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} C_0 = \kappa C_0$
전위차	축전기가 전원에 연결되어 있으므로, 전위차는 일정하다.
전하량	전하량 $Q = CV$ 에서 전위차가 일정하고 전기 용량이 증가하므로, 충전된 전하량은 증가한다. $Q' = C'V_0 = \kappa C_0 V_0 = \kappa Q_0$
전기장	전기장의 세기 $E = \frac{V}{d}$ 에서 두 극판 사이의 간격과 전위차가 일정하므로, 전기장의 세기도 일정하다. $E' = \frac{V_0}{d} = E$
전기 에너지	전기 에너지 $W = \frac{1}{2} CV^2$ 에서 전위차가 일정하고 전기 용량이 증가하므로, 저장된 전기 에너지는 증가한다. $W' = \frac{1}{2} C'V_0^2 = \frac{1}{2} (\kappa C_0) V_0^2 = \kappa W_0$

(2) 전원을 분리한 채 두 극판 사이에 유전체를 넣은 경우



전기 용량	전기 용량 $C = \epsilon \frac{S}{d}$ 이므로, 전기 용량은 증가한다. $C' = \epsilon \frac{S}{d} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} C_0 = \kappa C_0$
전하량	축전기가 전원에서 분리되어 있으므로, 전하량은 일정하다.
전위차	전위차 $V = \frac{Q}{C}$ 에서 전하량이 일정하고 전기 용량이 증가하므로, 전위차는 감소한다. $V' = \frac{Q_0}{C'} = \frac{Q_0}{\kappa C_0} = \frac{1}{\kappa} V_0$
전기장	전기장의 세기 $E = \frac{V}{d}$ 에서 두 극판 사이의 간격이 일정하고 전위차가 감소하므로, 전기장의 세기도 감소한다. $E' = \frac{V'}{d} = \frac{1}{\kappa} E$
전기 에너지	전기 에너지 $W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$ 에서 전하량이 일정하고 전기 용량이 증가하므로, 저장된 전기 에너지는 감소한다. $W' = \frac{1}{2} \frac{Q_0^2}{C'} = \frac{1}{2} \frac{Q_0^2}{\kappa C_0} = \frac{1}{\kappa} W_0$

■ 변리사 기출문제

개념 POINT

1. [2004년 변리사] (중) - 축전기

단면적이 A 이고 두 판 사이의 거리가 d , 정전용량(전기용량)이 $\epsilon_0 \frac{A}{d}$ 인 평행판 축전기가 있다. 축전기의 두 판 사이에 두께가 $\frac{d}{4}$ 인 도체를 양쪽 판에 닿지 않게 밀어 넣어 도체가 차지하는 면적이 원래 판 면적의 반이 되게 하였다. 즉 두 판 사이의 $\frac{A}{2}$ 면적은 두께가 $\frac{d}{4}$ 인 도체가 끼워져 있고 나머지 $\frac{A}{2}$ 면적은 원래 그대로 남아 있다. 이렇게 바뀐 축전기의 정전용량은? (도체 끝이나 판 양쪽 끝에서 나타나는 가장자리 효과는 무시한다.)¹⁾

① $\epsilon_0 \frac{8A}{19d}$

② $\epsilon_0 \frac{2A}{7d}$

③ $\epsilon_0 \frac{19A}{6d}$

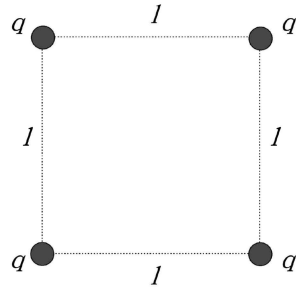
④ $\epsilon_0 \frac{A}{3d}$

⑤ $\epsilon_0 \frac{7A}{6d}$

2. [2005년 변리사] (하) - 전기 퍼텐셜에너지

동일한 전하량 q 를 가진 네 개의 점전하가 그림과 같이 한 변의 길이가 l 인 정사각형의 네 귀퉁이에 배치되어 있다. 이 계의 전기 퍼텐셜에너지는 얼마인가?²⁾

개념 POINT



① $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{l} (2 + \sqrt{2})$

② $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{l} (2 + 2\sqrt{2})$

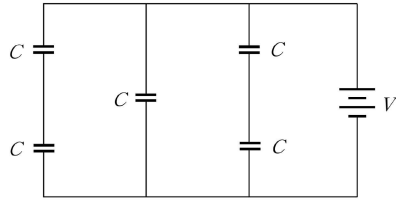
③ $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{l} \times 4$

④ $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{l} (4 + \sqrt{2})$

⑤ $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{l} (4 + 2\sqrt{2})$

3. [2005년 변리사] (하) - 축전기

아래 그림에서 각 축전기의 전기용량은 C 이다. 이 회로에서의 등가(합성) 전기용량은 얼마인가?³⁾



① $\frac{1}{5}C$

② $\frac{5}{4}C$

③ $2C$

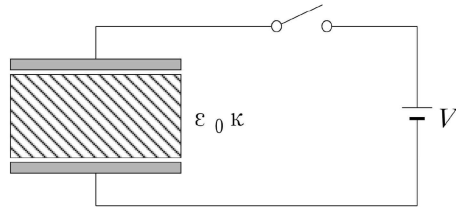
④ $\frac{5}{2}C$

⑤ $5C$

개념 POINT

4. [2007년 변리사] (상) - 축전기

어떤 평행판 축전기가 있는데, 두 금속판 사이가 유전율이 ϵ_0 인 공기로 채워진 경우의 전기용량을 C 라고 하자. 두 평행판 사이에 유전율 $\epsilon = \epsilon_0 \kappa$ (κ 는 유전체의 유전상수)인 유전체를 채워 넣고 기전력이 V 인 건전지로 충전을 한 후 스위치를 열어 회로 연결을 끊었다. 이 상태에서 평행판 사이의 유전체를 빼내는 데 필요한 최소한의 일은 얼마인가? (단, 공기의 유전율 ϵ_0 는 진공의 유전율과 같다.)⁴⁾



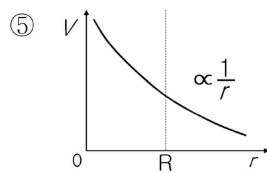
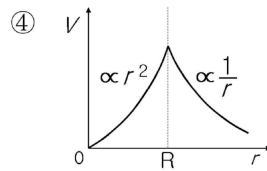
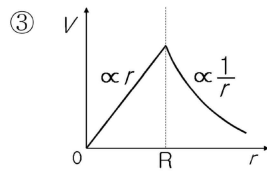
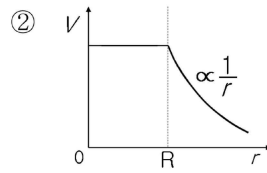
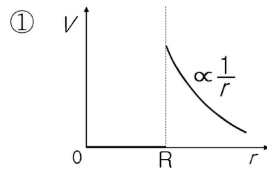
- ① $\frac{1}{2}(\kappa-1)CV^2$ ② $\frac{1}{2}(\kappa^2-1)CV^2$ ③ $\frac{1}{2}\kappa(\kappa-1)CV^2$
 ④ $\frac{1}{2}\kappa\frac{\kappa-1}{\kappa+1}CV^2$ ⑤ $\frac{1}{2}\kappa\frac{\kappa-1}{\kappa+2}CV^2$

개념 POINT

5. [2008년 변리사] (하) 전위

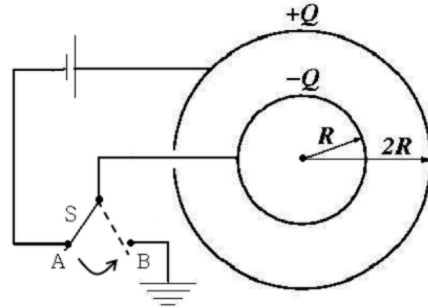
반지름이 R 인 금속구의 표면에 일정량의 양(+)전하가 고르게 분포되어 있다. 금속구의 중심으로부터의 거리 r 에 따른 전위(electric potential)를 나타낸 그래프로 가장 적절한 것은?5)

개념 POINT



6. [2009년 변리사] (상) - 축전기

그림은 중심이 일치하고 반지름이 R 과 $2R$ 인 두 개의 구면 도체로 이루어진 축전기의 모식도이다. 스위치 S 를 A 에 연결하여 충분히 대전시켰더니 바깥쪽 구면에 전하량 $+Q$ 가 대전되었다.



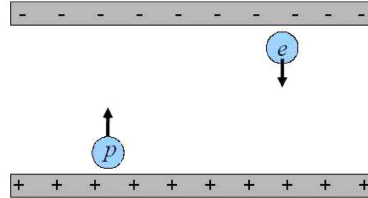
스위치 S 가 B 에 접지된 후 안쪽 구면에 남겨진 전하량은? (단, 접지점의 전위는 무한히 먼 곳에서의 전위와 같다.)⁶⁾

- ① 0 ② $-\frac{1}{8}Q$ ③ $-\frac{1}{4}Q$ ④ $-\frac{1}{2}Q$ ⑤ $-\frac{2}{3}Q$

개념 POINT

7. [2012년 변리사] (중)

양(+)과 음(-)으로 대전된 두 평행 극판 면 앞에 양성자와 전자를 그림과 같이 각각 1개씩 정지 상태로 놓았다. 이때 각 입자에서 반대 극판까지의 거리는 동일하고, 양성자의 질량은 전자보다 약 1800배 크다. 두 극판 사이의 전기장은 균일하다고 가정한다. 이 전기장에 의해 두 입자는 각각 가속되어 맞은편 판에 도달하였다. 두 입자의 운동에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 전자와 양성자 간의 전자기력은 무시하고 중력은 고려하지 않는다. 전자 전하량은 $-e$ 이고 양성자 전하량은 $+e$ 이다. $e = 1.60219 \times 10^{-19} C$)



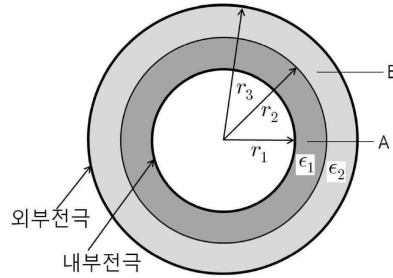
- ㄱ. 두 입자가 받는 전기력의 크기는 서로 다르다.
 ㄴ. 전자가 양성자보다 맞은편 극판에 먼저 도달한다.
 ㄷ. 맞은편 극판에 도달했을 때 운동에너지는 양성자가 전자보다 더 크다.

- ① ㄱ ② ㄱ, ㄴ ③ ㄱ, ㄴ, ㄷ ④ ㄴ ⑤ ㄴ, ㄷ

개념 POINT

8. [2015년 변리사] (상) - 축전기

그림과 같이 내부 전극의 반지름이 r_1 , 외부 전극의 반지름이 r_3 인 이상적 금속으로 이루어진 동심원 구형 축전기가 있다. 두 전극 사이에 유전율이 ϵ_1 인 유전체 A와 유전율이 ϵ_2 인 유전체 B가 각각 채워져 있다. 이 축전기의 전기용량 C 는?⁸)



① $C = \frac{4\pi\epsilon_1\epsilon_2r_1r_2r_3}{\epsilon_1(r_1r_3 - r_1r_2) + \epsilon_2(r_2r_3 - r_1r_3)}$

② $C = \frac{4\pi\epsilon_1\epsilon_2r_1r_3}{\epsilon_1(r_1 - r_2) + \epsilon_2(r_3 - r_2)}$

③ $C = \frac{4\pi}{\epsilon_1(r_1 - r_2) + \epsilon_2(r_2 - r_3)}$

④ $C = \frac{4\pi\epsilon_1\epsilon_2r_1r_2r_3}{\epsilon_2(r_1r_3 - r_1r_2) + \epsilon_1(r_2r_3 - r_1r_3)}$

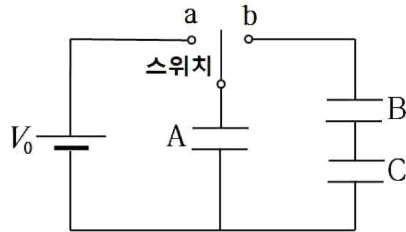
⑤ $C = \frac{4\pi\epsilon_1\epsilon_2r_1r_2}{\epsilon_1(r_3 - r_2) + \epsilon_2(r_2 - r_1)}$

개념 POINT

9. [2016년 변리사] (상) - 축전기

그림과 같이 전기용량이 모두 C_0 이고 충전되지 않은 세 축전기 A, B, C와 기전력이 V_0 인 전지로 회로를 구성하였다. 스위치를 a에 연결하여 A를 충전한 후, 스위치를 b에 연결하였을 때 A의 전하량은?⁹)

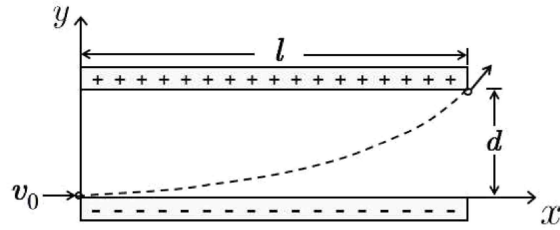
개념 POINT



- ① $\frac{1}{3} C_0 V_0$ ② $\frac{1}{2} C_0 V_0$ ③ $\frac{2}{3} C_0 V_0$ ④ $\frac{3}{4} C_0 V_0$ ⑤ $C_0 V_0$

10. [2018년 변리사] (중)

그림과 같이 xy 평면상에서, v_0 의 속력으로 $+x$ 방향으로 운동하던 질량 m , 전하량 q 인 입자가 길이 l , 판 사이 간격 d 인 평행판 축전기를 지난다. 입자는 $(0,0)$ 인 지점으로 들어와 (l,d) 인 지점을 통과하여 나간다.



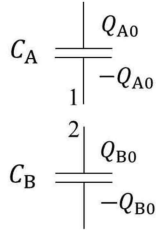
축전기 내부의 전기장 세기는? (단, 축전기 내부는 진공이고, 축전기 내에서 전기장은 균일하며, 입자의 크기와 전자기파 발생은 무시한다.)¹⁰⁾

- ① $\frac{mdv_0^2}{2ql^2}$ ② $\frac{mdv_0^2}{\sqrt{2}ql^2}$ ③ $\frac{mdv_0^2}{ql^2}$ ④ $\frac{\sqrt{2}mdv_0^2}{ql^2}$ ⑤ $\frac{2mdv_0^2}{ql^2}$

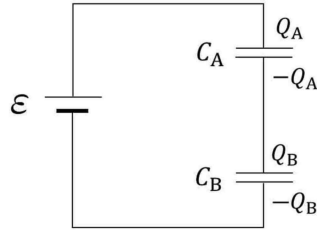
개념 POINT

11. [2023년 변리사] (상)

그림 (가)와 같이 전기용량 C_A , C_B 인 축전기에 각각 전하량 Q_{A0} , Q_{B0} 이 저장되어 있다. 그림 (나)와 같이 두 축전기의 단자 1과 2가 연결되고, 기전력 ϵ 인 전지와 연결되어 평형을 이룬 후 전기용량 C_A 인 축전기에 저장된 전하량 Q_A 는?¹¹⁾



(가)



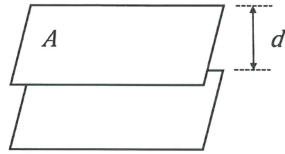
(나)

- ① $\frac{C_A C_B}{C_A + C_B} \epsilon + \frac{(Q_{A0} - Q_{B0}) C_A}{C_A + C_B}$ ② $\frac{C_A C_B}{C_A + C_B} \epsilon - \frac{(Q_{A0} - Q_{B0}) C_A}{C_A + C_B}$
- ③ $\frac{C_A C_B}{C_A + C_B} \epsilon + \frac{(Q_{A0} - Q_{B0}) C_B}{C_A + C_B}$ ④ $\frac{C_A C_B}{C_A + C_B} \epsilon - \frac{(Q_{A0} - Q_{B0}) C_B}{C_A + C_B}$
- ⑤ $\frac{C_A C_B}{C_A + C_B} \epsilon$

개념 POINT

12. [2025년 변리사] (하) - 축전기

그림과 같이 넓이가 A 인 동일한 금속 평면판이 간격 d 를 유지하고 있을 때, 전기용량은 C_0 이다. 금속판의 넓이를 $2A$, 간격을 $d/2$ 로 할 때, 전기용량은? (단, 판 사이는 진공이고, 가장자리 효과는 무시한다.)¹²⁾



① $\frac{C_0}{4}$

② $\frac{C_0}{2}$

③ C_0

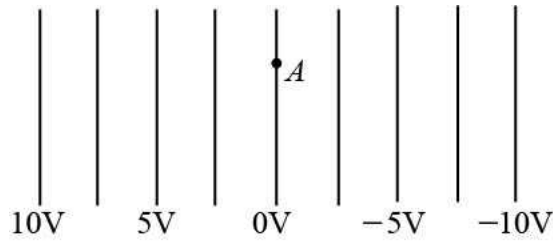
④ $2C_0$

⑤ $4C_0$

개념 POINT

■ 개념확인문제

13. 수평면의 전위를 측정하여 그림과 같은 등전위선을 얻었다.¹³⁾

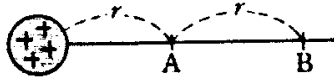


점 A에 전자를 놓았을 때, 전자의 운동 경로를 가장 잘 예상한 것은? (단, 전자의 초기속력은 0이다.) [4.0점]

- ① ②
- ③ ④
- ⑤

개념 POINT

14. 그림과 같이 양전하를 고정시켜 놓았다. A, B 두 점은 양전하로부터 거리 r , $2r$ 인 점이다.¹⁴⁾

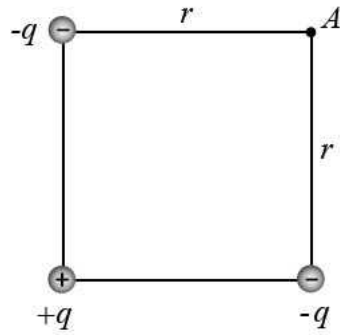


- (1) 점 A의 전위는 $4V$ 이다. 점 B의 전위는 얼마인가?
- (2) 질량 10^{-30}kg , 전하량 10^{-18}C 인 입자를 점 A에 놓으면, 이 입자는 B쪽으로 운동한다. 점 B를 지날 때의 속력은 얼마인가?

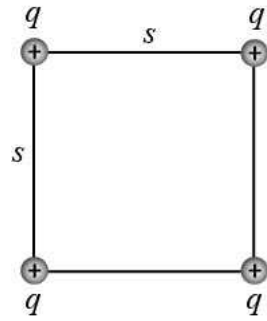
개념 POINT

15. 그림과 같이 각 변의 길이가 r 인 정사각형의 모서리에 3개의 전하가 놓여 있다. 전하 $+q$ 를 무한대로부터 빈 모서리 A 로 가져오는 데 드는 일을 구하시오. (단, 진공의 유전율은 ϵ_0 이다.)¹⁵⁾

개념 POINT



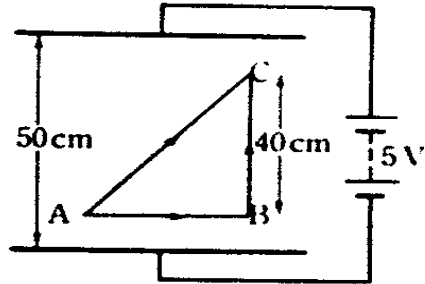
16. 각 변의 길이가 s 인 정사각형의 네 꼭지점에 전하 q 를 가져다 놓는데 필요한 일은 얼마인가?¹⁶⁾



개념 POINT

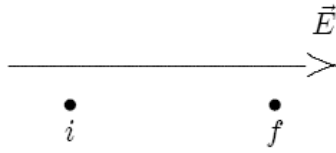
17. 다음 안에 알맞은 답을 쓰라.¹⁷⁾

오른쪽 그림과 같이 두 개의 금속판을 50cm 간격으로 평행하게 놓고 5V의 전지에 연결하여 균일한 전기장을 만든 후 $+2C$ 의 전하를 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 로 이동시키려고 한다. AB의 전위차는 ㉠ V, BC의 전위차는 ㉡ V, AC의 전위차는 ㉢ V이다. 따라서 $+2C$ 의 전하를 $A \rightarrow B$ 로 이동시키는 데 필요한 일은 ㉣ J이고, $B \rightarrow C$ 로 이동시키는 데 필요한 일은 ㉤ J이므로 전하를 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 로 이동시키는 데 필요한 전체 일은 ㉥ J이다.



개념 POINT

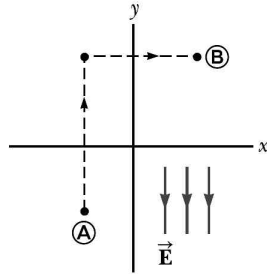
18. 전자가 점 i 에서 점 f 까지 균일한 전기장을 따라 운동한다.¹⁸⁾



- ① 전기력이 한 일은 양이고 퍼텐셜에너지는 증가한다.
- ② 전기력이 한 일은 음이고 퍼텐셜에너지는 증가한다.
- ③ 전기력이 한 일은 양이고 퍼텐셜에너지는 증가한다.
- ④ 전기력이 한 일은 음이고 퍼텐셜에너지는 감소한다.
- ⑤ 전기력이 한 일은 양수이고 퍼텐셜에너지는 변하지 않는다.

개념 POINT

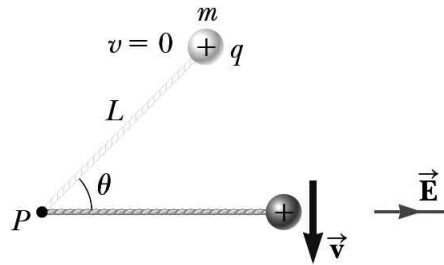
19. 그림과 같이 325V/m 의 균일한 전기장이 $-y$ 축 방향을 향하고 있다. 점 A 의 좌표는 $(-0.200, -0.300)\text{m}$ 이고, B 의 좌표는 $(0.400, 0.500)\text{m}$ 이다. 그림에 표시된 경로를 따라서 이동했을 때의 전위차 $V_B - V_A$ 를 구하라.¹⁹⁾



개념 POINT

20. 전하량 q , 질량 m 인 입자가 길이 L 인 줄 끝에 매달려서 마찰이 없는 수평면 위에서 P 점에 대해 자유롭게 돌 수 있다. 평면에는 그림과 같이 오른쪽 방향의 균일한 전기장 E 가 걸려 있다. 전하를 매단 줄이 전기장과 θ 의 각을 이룰 때 전하를 놓아 주었다. 줄이 전기장과 평행하게 되었을 때 전하의 속력을 구하라.²⁰⁾

개념 POINT



21. 그림과 같이 균일한 전기장 영역 I, II에서 점전하 A를 $x=0$ 에 가만히 놓았더니 $+x$ 방향으로 운동하였다. A의 운동 에너지는 $x=2d$, $x=3d$ 에서 각각 $4K$, K 이다. $x=2d$ 와 $x=3d$ 사이의 전위차는 V 이다.

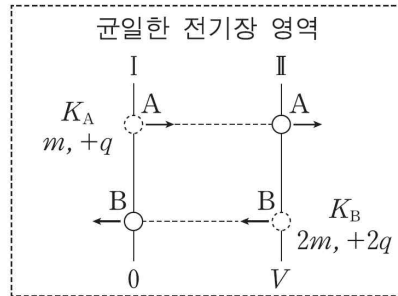
개념 POINT



$x=d$ 와 $x=2d$ 사이의 전위차는? (단, 전기력 이외의 힘과 전자기파의 발생은 무시한다.)²¹⁾

- ① $\frac{1}{2}V$ ② $\frac{2}{3}V$ ③ V ④ $\frac{4}{3}V$ ⑤ $2V$

22. 그림은 균일한 전기장 영역에서 입자 A, B가 동시에 각각 등전위선 I, II를 통과한 후 등가속도 직선운동을 하여 동시에 각각 II, I에 도달한 것을 나타낸 것이다. A, B의 질량은 각각 $m, 2m$ 전하량은 각각 $+q, +2q$ 이다. A가 I을 통과할 때 A의 운동에너지는 K_A 이고, B가 II를 통과할 때 B의 운동에너지는 K_B 이다. I, II의 전위는 각각 0, V 이다.

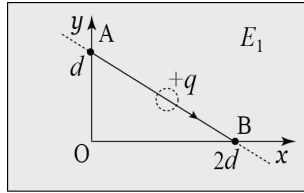


V 는? (단, A와 B에는 균일한 전기장에 의한 전기력만 작용한다.)²²⁾

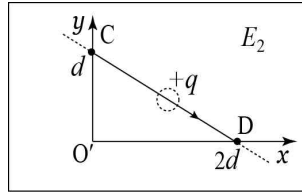
- ① $\frac{K_A - K_B}{2q}$ ② $\frac{2K_A - K_B}{2q}$ ③ $\frac{K_A - 2K_B}{2q}$
 ④ $\frac{K_A - K_B}{q}$ ⑤ $\frac{2K_A - K_B}{q}$

개념 POINT

23. 그림은 세기가 각각 E_1 , E_2 인 균일한 전기장 영역의 xy 평면에서 전하량이 q 이고 양(+) 전하인 동일한 입자가 (가)에서는 점 A에서 점 B까지 일정한 속도로, (나)에서는 점 C에서 점 D까지 일정한 가속도로 각각 직선 운동한 경로를 나타낸 것이다. 입자에는 $-y$ 방향으로 중력이 작용하고, A와 C의 전위는 같으며 (나)에서 전기장의 방향은 x 축과 나란하다.



(가)



(나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, A, B, C, D는 xy 평면에 있는 점들이다.)²³⁾

<보 기>

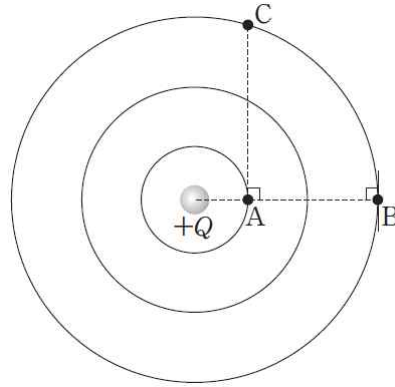
- ㄱ. 전위는 D에서가 B에서보다 높다.
- ㄴ. $E_2 = 2E_1$ 이다.
- ㄷ. (나)에서 입자가 C에서 D까지 운동하는 동안 입자의 운동 에너지 변화량은 $\frac{5}{2}qE_2d$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

개념 POINT

24. 그림은 평면상에 고정된 전하량이 $+Q$ 인 점전하와 그 전하에 의한 평면상의 등전위선을 나타낸 것이다. 실선은 등전위선이고 A, B, C는 실선상의 세 지점이다.

개념 POINT



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?²⁴⁾

<보 기>

- ㄱ. 전위는 A에서가 C에서보다 낮다.
- ㄴ. 음(-)의 점전하의 전기적 위치 에너지 변화량은 A에서 B로 이동할 때가 A에서 C로 이동할 때보다 작다.
- ㄷ. B에 음(-)의 점전하를 놓으면 점전하는 A쪽으로 전기력을 받는다.

① ㄴ

② ㄷ

③ ㄱ, ㄴ

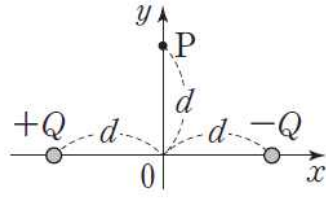
④ ㄱ, ㄷ

⑤ ㄴ, ㄷ

25. 양전하 Q 의 입자가 점 P 에 고정되어 있다. 질량이 m , 전하가 $-q$ 인 두 번째 입자가 반지름이 r_1 이고 점 P 를 중심으로 하는 원을 따라서 일정한 속력으로 움직이고 있다. 두 번째 입자가 운동하는 반지름을 r_2 로 증가시키는데 필요한 일 W 를 구하여라.²⁵⁾

개념 POINT

26. 그림과 같이 전하량이 $+Q$, $-Q$ 인 두 점전하가 x 축 상에 고정되어 있다. 점 P는 y 축 상의 점이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?²⁶⁾

<보 기>

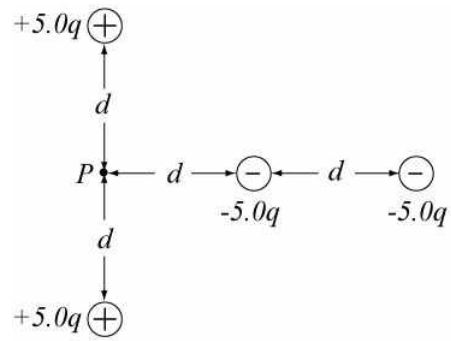
- ㄱ. 전기장의 세기는 원점에서 P에서보다 크다.
- ㄴ. P에서 전기장의 방향은 $-x$ 방향이다.
- ㄷ. 전위는 원점에서 P에서보다 높다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

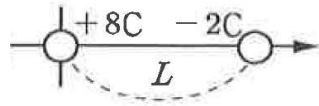
개념 POINT

27. 그림의 네 전하들이 점 P 에 만드는 전기 퍼텐셜은 얼마인가? 단, 무한 원점에서 전위는 0이다.²⁷⁾

개념 POINT



28. 아래 그림은 x 축의 원점에 $+8C$ 의 전하를 $x=L$ 에 에 전하 $-2C$ 의 전하를 고정시켜 놓았다.28)



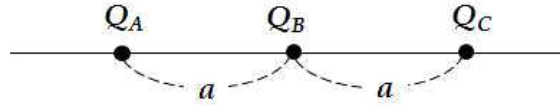
(1) 두 전하에 의한 알짜 전기장이 0이 되는 위치는?

(2) 전위가 0이 되는 위치는?

개념 POINT

29. 그림과 같이 전하량이 각각 $Q_A = Q_B = +Q$, $Q_C = -Q$ 인 세개의 점전하가 일직선으로 배열되어 있다.²⁹⁾

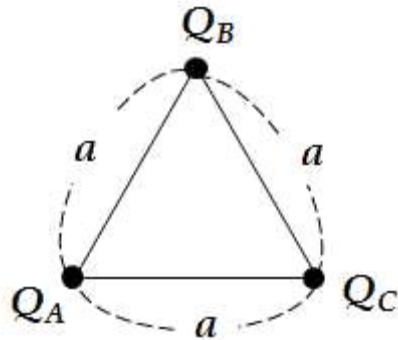
개념 POINT



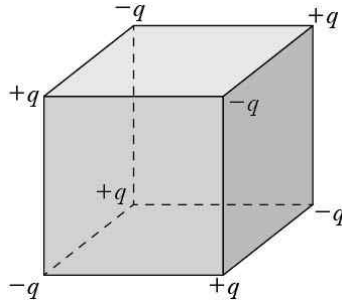
(1) Q_A 의 전기 퍼텐셜에너지를 구하시오.

(2) 세 개의 점전하로 이루어진 계의 전기 퍼텐셜에너지를 구하시오.

(3) 일직선으로 배열되어 있는 세 점전하의 배열을 아래 그림과 같이 정삼각형 형태로 바꾸는데 필요한 일을 구하시오.



30. 다음과 같이 여덟 개의 점전하들이 변의 길이가 L 인 정육면체의 꼭지점에 배열되어 있는 계의 전기 퍼텐셜 에너지를 $\alpha \times \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 L}$ 이라 할 때 α 와 가장 가까운 값을 다음 보기 중에서 찾으시오. (단, $\sqrt{2} \approx 1.414$, $\sqrt{3} \approx 1.732$)³⁰⁾



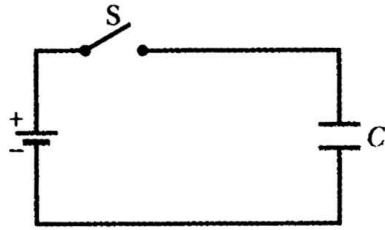
- ① -10 ② -6 ③ -2 ④ +2 ⑤ +6

개념 POINT

31. 무한대에서 전기 퍼텐셜이 0일 때 전기 퍼텐셜이 V 인 반지름 R 인 도체구의 표면의 전하 밀도는?⁽³¹⁾

개념 POINT

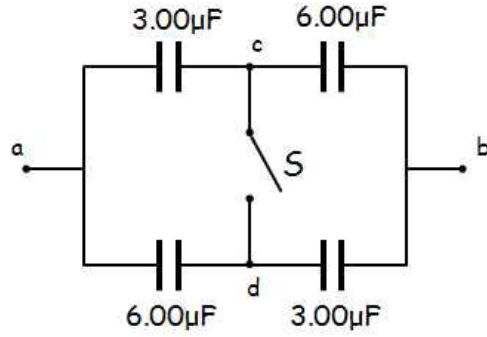
32. 그림의 축전기는 $25\mu\text{F}$ 의 전기용량을 가지고 있는데, 처음에는 대전되어 있지 않다. 120V 퍼텐셜 차의 전지를 연결하고 스위치 S 를 닫으면, 전지를 통해서 흘러간 전하의 양은 얼마인가?³²⁾



개념 POINT

33. 대전되어 있지 않은 축전기를 그림과 같이 연결한 후 스위치 S 가 열려 있는 상태에서 전압 $V_{ab} = +210\text{V}$ 를 걸어주었다.³³⁾

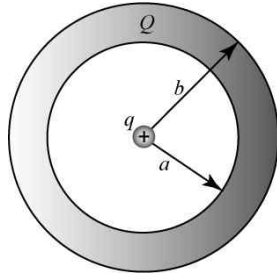
개념 POINT



- (1) 점 c 와 d 사이의 전위차 $V_{cd} = V_c - V_d$ 를 구하시오.
- (2) 스위치 S 를 닫았을 때 각 축전기의 전위차를 구하시오.
- (3) 스위치 S 를 닫을 때 스위치 S 를 흐르는 전하의 양을 구하시오.

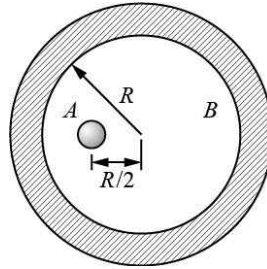
34. 안쪽 반지름이 a , 바깥쪽 반지름이 b 인 도체 구각이 총 전하 Q 로 대전되어 있다. 점전하 q 가 구각의 중심에 놓여 있다.³⁴⁾

개념 POINT



- (1) 구각의 안쪽 표면에서 표면 전하 밀도를 구하라.
- (2) 구각의 바깥쪽 표면에서 표면 전하 밀도를 구하라.

35. 그림과 같이 진공 상태에서 반지름이 R 인 도체 껍질 내부에 $-5C$ 의 작은 대전체가 껍질의 중심에서 $\frac{R}{2}$ 인 거리에 놓여 있다. 구 껍질이 전기적으로 중성이라 할 때, 도체 껍질의 전하 분포에 대한 설명 중 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?³⁵⁾



<보 기>

- ㄱ. 도체 껍질 안쪽 표면은 양전하가 유도된다.
- ㄴ. 도체 껍질 안쪽의 전하 밀도는 A와 B가 같다.
- ㄷ. 도체 껍질 바깥쪽 표면의 전하 밀도는 전체 표면에서 균일하다.

- ① ㄱ ② ㄱ, ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

개념 POINT

36. 세 개의 축전기가 병렬로 연결되어 있다 각각의 축전기의 극판 간격은 d 이고 극판의 넓이는 A 이다. 이 때 전기용량이 면적이 A 인 하나의 축전기의 전기용량과 같으려면 간격은 얼마가 되어야 하는가?³⁶⁾

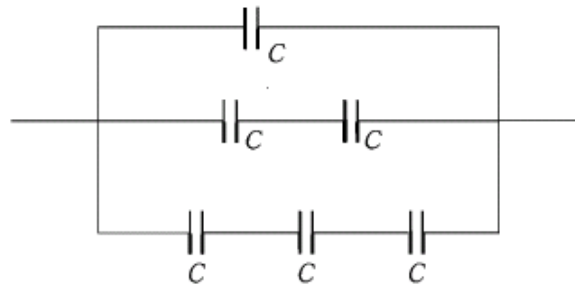
개념 POINT

37. 세 개의 축전기가 직렬로 연결되어 있다. 각각의 축전기의 극판간격은 d 이고 극판의 넓이는 A 이다. 이 때 전기용량이 면적이 A 인 하나의 축전기의 전기용량과 같으려면 간격은 얼마가 되어야하는가?³⁷⁾

개념 POINT

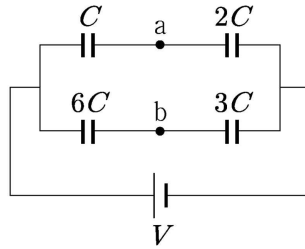
38. 그림과 같은 축전기 회로의 합성 전기용량은?³⁸⁾

개념 POINT



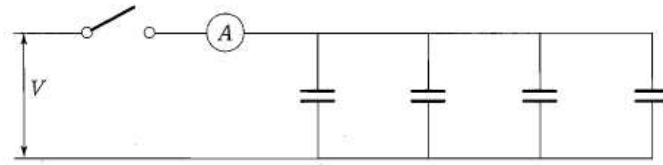
39. 그림은 전기 용량이 C , $2C$, $3C$, $6C$ 인 축전기 4개를 전압이 V 로 일정한 전원에 연결한 것을 나타낸 것이다. 회로상의 두 점 a, b에서의 전위는 각각 V_a , V_b 이다. $V_b - V_a$ 는?³⁹⁾

개념 POINT



- ① $\frac{1}{3}V$ ② $\frac{1}{4}V$ ③ $\frac{1}{5}V$ ④ $\frac{1}{6}V$ ⑤ $\frac{1}{8}V$

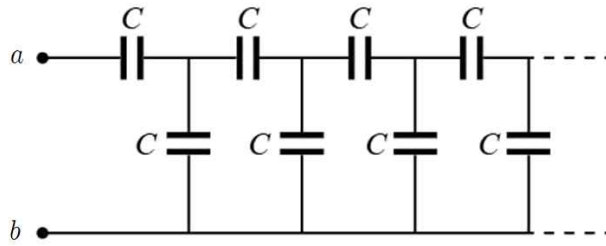
40. 그림과 같이 대전되지 않은 축전기 각각의 전기용량이 C 일 때 스위치가 닫힌 후 전위차가 V 일 때 계기 A 를 통해 흐르는 전하량은? ⁴⁰⁾



개념 POINT

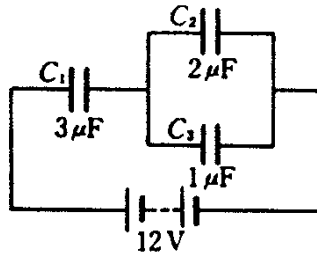
41. 그림과 같이 점 a와 점 b 단자에 동일한 축전기를 무한히 연결한 회로를 구성하였다. 각각의 축전기의 전기 용량은 C이다. a-b 단자의 합성 전기용량은?⁴¹⁾

개념 POINT



- ① ∞ ② C ③ $\frac{\sqrt{7}-1}{2}C$ ④ $\frac{\sqrt{5}-1}{2}C$ ⑤ $\frac{\sqrt{3}-1}{2}C$

42. 아래 그림과 같이 3개의 축전기를 12V의 전원에 연결하였다.⁴²⁾



(1) 세 축전기의 합성 전기용량은 얼마인가?

(2) 각 축전기에 걸리는 전압의 비는?

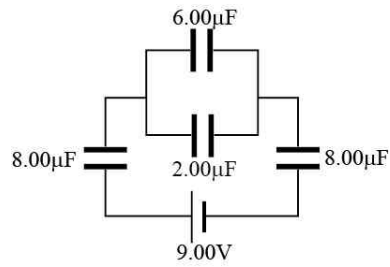
- ① 1 : 1 : 1 ② 1 : 2 : 3 ③ 3 : 2 : 1
 ④ 3 : 1 : 1 ⑤ 3 : 3 : 1

(3) 각 축전기에 충전되는 전하량의 비는 얼마인가?

개념 POINT

43. 다음에 답하여라.⁴³⁾

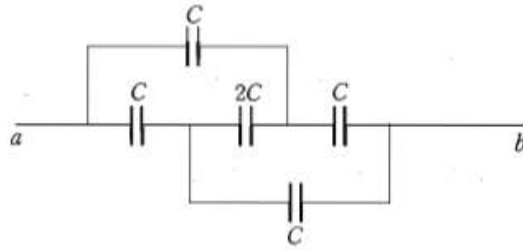
개념 POINT



- (1) 그림에서 축전기들의 합성 전기용량,
- (2) 각 축전기의 전하량,
- (3) 각 축전기 양단의 전위차를 구하라.

44. 그림과 같은 축전기 회로의 합성 전기용량은? ⁴⁴⁾

개념 POINT



■ 정답과 해설

개념 POINT

1) [정답] ⑤

[해설]

1. 회로 분리(병렬구조파악)

전체 면적 A 를 도체가 있는 영역($A/2$)과 없는 영역($A/2$)으로 나누면

- 영역 1 (도체 없음) : 면적 $A/2$, 간격 d 인 평행판 축전기
- 영역 2 (도체 있음) : 면적 $A/2$, 내부에 두께 $d/4$ 인 도체가 들어간 구조

2. 각 영역의 전기용량 계산

- 영역 1 : $C_1 = \epsilon_0 \frac{A/2}{d} = \epsilon_0 \frac{A}{2d}$
- 영역 2 : 도체를 넣으면 그 두께만큼 간격이 줄어드는 효과가 있으므로 유효간격은 $d - \frac{d}{4} = \frac{3}{4}d$ 가 되므로 $C_2 = \epsilon_0 \frac{A/2}{3d/4} = \epsilon_0 \frac{2A}{3d}$

3. 전체 합성 전기용량(C_{eq}) 계산

두 영역은 병렬로 연결되어 있으므로 각 전기용량을 더하면

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = \epsilon_0 \frac{A}{2d} + \epsilon_0 \frac{2A}{3d} = \epsilon_0 \frac{7A}{6d} \text{ 이다.}$$

2) [정답] ④

[해설]

두 점전하 사이의 전기 퍼텐셜 에너지는 $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}$ 이므로 네 점전하 사이의 전기 퍼텐셜 에너지는 $4C_2 = 6$ 쌍이 존재한다. 이때 점전하 사이의 거리가 l 인 경우가 4가지, $\sqrt{2}l$ 인 경우가 2가지 이므로 이 계의 전기 퍼텐셜에너지는 $U_{\text{계}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{l} \times 4 + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{\sqrt{2}l} \times 2$ 이므로 정리하면 $U_{\text{계}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{l} (4 + \sqrt{2})$ 이다.

3) [정답] ③

[해설]

가장 왼쪽부터 합성 전기용량은 차례로 $\frac{C}{2}$, C , $\frac{C}{2}$ 이고 모두 병렬연결이므로 등가 전기용량은 $C_{eq} = \frac{C}{2} + C + \frac{C}{2} = 2C$ 이다.

4) [정답] ③

[해설]

1. 충전을 한 후 스위치를 열어 회로 연결을 끊었으므로 축전기에 저장된 전하량 Q 가 일정하게 유지된다. $Q = \kappa CV$ 이고 처음 정전에너지는 $U_i = \frac{1}{2} \kappa CV^2$ 이다. 유전체를 빼면 전기용량은 다시 C 이고 전하량 $Q = \kappa CV$ 는 변하지 않으므로 $U_f = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(\kappa CV)^2}{2C} = \frac{1}{2} \kappa^2 CV^2$ 이다.
2. 외부에서 축전기에 한 일은 축전기에 저장된 에너지의 변화량과 같다. 따라서 $W = \Delta U = U_f - U_i = \frac{1}{2} \kappa^2 CV^2 - \frac{1}{2} \kappa CV^2 = \frac{1}{2} \kappa (\kappa - 1) CV^2$ 이다.

5) [정답] ②

[해설]

1. 도체(금속구)의 정전기적 특성

- 도체 내부의 전기장 : 정전기적 평형상태에서 도체 내부의 전기장은 항상 0이다.
- 전위와 전기장의 관계 : 전위는 전기장의 선적분($V = - \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$)으로 정의되므로 전기장이 0인 구간에서는 전위의 변화가 없으므로 전위는 일정(constant)하게 유지된다.

2. 구간별 전위 분포

- 구 내부 및 표면에서는 도체 내부의 전기장이 0이므로, 중심부터 표면까지의 전위는 표면에서의 전위값과 동일하게 된다. $V_{in} = k \frac{Q}{R}$
- 구 외부에서는 구 전체의 전하가 중심에 모여 있는 점전하처럼 행동하므로 전위는 거리에 반비례하여 감소한다. $V_{out} = k \frac{Q}{r}$

3. 그래프 선택

내부에서는 그래프가 수평선(상수)을 유지해야 하며, 외부에서는 곡선을 그리며 감소해야 하므로 ②이 된다.

4. 주의

- 도체 내부 : 많은 학생들이 내부 전위가 0이라고 착각(①번선택)하지만, 전위는 에너지 개념이므로 기준점(무한대)으로부터 표면까지 온 일을 그대로 유지하고 있는 상태임을 명심해야 한다.
- 연속성 : 전위 그래프는 모든 지점에서 끊어지지 않고 연속적으로 이어져야 한다.

6) [정답] ④

[해설]

1. 물리적 상황 분석

- 초기상태($S \rightarrow A$) : 바깥쪽 구면에 $+Q$ 가 대전되어 있다.
- 최종상태($S \rightarrow B$) : 안쪽 구면이 접지(Ground)되므로 안쪽 구면의 전위가 0이 된다. 따라서 안쪽 구면의 전위가 0이 되기 위해 필요한 안쪽 구면의 전하량 q 를 구해야 한다.

2. 전위 공식 수립

임의의 지점에서의 전위는 각 전하가 만드는 전위의 합(중첩의 원리)으로 계산한다.

- 안쪽 구면 전하에 의한 전위 : $V_q = k \frac{q}{R}$
- 바깥쪽 구면 전하에 의한 전위 : 바깥쪽 껍질 내부의 전위는 표면 전위와 같으므로 $V_Q = k \frac{Q}{2R}$ 이다.

3. 접지 조건 적용 및 계산

접지에 의해 $V_R = 0$ 이 되어야 하므로 $V_R = V_Q + V_q = k \frac{Q}{2R} + k \frac{q}{R} = 0$ 에서 $q = -\frac{1}{2}Q$ 이다.

4. 최종 결론

안쪽 구면이 접지되어 전위가 0이 되기 위해서는 바깥쪽 구면 전하가 만드는 전위를 상쇄할 만큼의 유도전하가 안쪽면에 모여야 하므로 계산 결과 안쪽 구면에 남겨진 전하량은 $q = -\frac{1}{2}Q$ 입니다.

5. 주의

- 접지의 의미 : “접지= 전하가 다 빠져나감”이 아니라, “접지 = 해당 도체의 전위가 0”이 되

개념 POINT

도록 전하가 이동한다는 개념이 핵심이다.

- 중첩의 원리 : 구각(Spherical shell) 내부의 전위는 그 구각 표면의 전위와 동일하다는 점을 이용하여 식을 세워야 한다.

개념 POINT

7) [정답] ④

[해설]

ㄱ. $F=qE$ 에서 전기장이 동일하고 양성자와 전자는 전하량의 크기가 같으므로 두 입자가 받는 전기력의 크기는 서로 같다. (거짓)

ㄴ. $F=qE=ma$ 에서 $a=\frac{qE}{m}$ 이므로 양성자와 전자의 가속도의 크기는 질량에 반비례한다. 따라서 전자의 가속도의 크기가 양성자의 가속도의 크기의 1800배이다. 따라서 전자가 양성자보다 많은편 극판에 먼저 도달한다. (참)

ㄷ. 역학적 에너지 보존에 의해 양성자와 전자가 가지는 전기 퍼텐셜 에너지는 동일하므로 많은편 극판에 도달했을 때 운동에너지도 동일하다. (거짓)

8) [정답] ①

[해설]

이 회로는 반지름 r_1 에서 r_2 까지의 축전기 A와 r_2 에서 r_3 까지의 축전기 B가 직렬로 연결되어 있다. 반지름이 $a, b(a < b)$ 이고 유전율이 ϵ 인 구형 축전기의 전기용량은 $C=\frac{4\pi\epsilon ab}{b-a}$ 이므로 축

전기 A와 B의 전기용량은 각각 $C_A=\frac{4\pi\epsilon_1 r_1 r_2}{r_2-r_1}$, $C_B=\frac{4\pi\epsilon_1 r_2 r_3}{r_3-r_2}$ 이다. 직렬연결이므로 합성 전

기용량은 $C=\frac{C_A C_B}{C_A+C_B}$ 이고 대입하여 정리하면 $C=\frac{4\pi\epsilon_1 \epsilon_2 r_1 r_2 r_3}{\epsilon_1(r_1 r_3-r_1 r_2)+\epsilon_2(r_2 r_3-r_1 r_3)}$ 이다.

9) [정답] ③

[해설]

1. 스위치를 a에 연결하여 A를 충전한 후 A에 저장된 전하량은 $Q=C_0 V_0$ 이다.

2. 스위치를 b에 연결하였을 때 A에 저장된 전하량은 보존되고 이 전하량은 A와 (B+C)의 전기용량의 비에 비례하여 배분된다.

B와 C는 직렬연결이므로 합성전기용량은 $C_{B+C}=\frac{C_0 C_0}{C_0+C_0}=\frac{C_0}{2}$ 이다.

따라서 $Q_A:Q_{B+C}=C_0:\frac{C_0}{2}=2:1$ 이므로 $Q_A=\frac{2}{3}Q=\frac{2}{3}C_0 V_0$ 이다.

10) [정답] ⑤

[해설]

그림을 보면 x 축 방향으로 v_0 로 입사한 입자가 +극판으로 휘므로 이 입자는 음전하이다. 따라서 x 축 방향은 등속도 운동이므로 (l, d) 지점에 도달하는 데 걸린 시간을 t 라고 하면 $l=vt$

이고 y 축 방향으로 $F=qE=ma$ 를 받아 등가속도 운동하므로 $a=\frac{qE}{m}$ 이다.

따라서 $d=\frac{1}{2}at^2=\frac{1}{2}\frac{qE}{m}t^2$ 이 되고 $t=\frac{l}{v}$ 를 대입하여 정리하면 $E=\frac{2mdv_0^2}{ql^2}$ 이다.

11) [정답] ①

[해설]

1. 전기용량 C_A, C_B 인 축전기를 직렬로 연결하면 단위 1 하단의 판 전하량은 $-Q_0$ 이고 단

자 2상단의 판 전하량은 $+Q_{B0}$ 이므로 고립된 부분의 전하량은 $-Q_{A0} + Q_{B0} = -Q_A + Q_B$ 이다.

2. (나) 회로에서 전체 기전력 ϵ 는 두 축전기에 걸리는 전압의 합과 같으므로

$$\epsilon = V_A + V_B = \frac{Q_A}{C_A} + \frac{Q_B}{C_B} \text{이다.}$$

3. 1과 2를 연립하면 $Q_A = \frac{C_A C_B}{C_A + C_B} \epsilon + \frac{(Q_{A0} - Q_{B0}) C_A}{C_A + C_B}$ 이다.

12) [정답] ⑤

[해설]

$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d}$ 이므로 금속판의 넓이를 $2A$, 간격을 $d/2$ 로 할 때의 전기용량은

$$C = \epsilon_0 \frac{2A}{d/2} = \epsilon_0 \frac{4A}{d} = 4C_0 \text{이다.}$$

13) [정답] ①

[해설] 등전위선이 전기장에 수직이므로 전기장은 평행하게 왼쪽에서 오른쪽으로 작용한다. 또한 전자의 전하 부호는 음수이므로 전기장의 반대 방향으로 움직인다. 따라서 A에 전자를 놓으면 평행하게 오른쪽에서 왼쪽으로 이동한다.

14) [정답] (1) $2V$ (2) $2 \times 10^6 \text{m/s}$

[해설] (1) 점전하에 의한 전위는 $V = k \frac{q}{r}$ 이므로 거리에 반비례한다. 따라서 B점의 전위는 $2V$ 이다.

(2) A, B 두 점의 전위차가 $2V$ 이므로 $qV = \frac{1}{2}mv^2$ 에서

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^{-18} \times 2}{10^{-30}}} = 2 \times 10^6 (\text{m/s})$$

15) [정답] $-\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r} \left(2 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$

$$\begin{aligned} \text{[해설]} \quad W &= q \left(-\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{2}r} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \\ &= -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r} \left(2 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \end{aligned}$$

16) [정답] $\frac{kq^2}{s}(4 + \sqrt{2})$

[해설] 네 전하 사이의 정전 에너지와 같다.

$$U = k \frac{q^2}{s} \times 4 + k \frac{q^2}{\sqrt{2}s} \times 2 = \frac{kq^2}{s} (4 + \sqrt{2})$$

17) [정답] ㉠ 0 ㉡ 4V ㉢ 4V ㉣ 0 ㉤ 8J ㉥ 8J

[해설] 균일한 전기장에서 전위는 거리에 비례하므로 $V_{BC} = 5 \times \frac{40}{50} = 4(V)$

또, A, C의 전위차는 B, C의 전위차와 같다. A, B의 전위차는 0이므로 전하를 이동시키는 데 일이 필요 없고, B→C로 이동시킬 때는 $qV = 2 \times 4 = 8(J)$ 의 일이 필요하다.

18) [정답] ②

[해설]

전자는 음전하이므로 힘의 방향은 전기장과 반대 방향이다. 전기력은 왼쪽, 이동방향은 오른쪽
이므로 전기력이 한 일은 -이다. 전기력이 한 일이 - 이므로 퍼텐셜 에너지는 증가한다. (-전
하의 퍼텐셜 에너지가 증가하므로 전위는 감소한다.)

19) [정답] 260V

[해설] $A \rightarrow C$ 로 갈 때의 전위차는

$$V_C - V_A = -\vec{E} \cdot \vec{d} = -Ed \cos 180^\circ = Ed = 325\text{V} \times 0.800\text{m} = 260\text{V}$$

$C \rightarrow B$ 로 갈 때의 전위차는

$$V_B - V_C = -\vec{E} \cdot \vec{d} = 0$$

따라서,

$$V_B - V_A = (V_B - V_C) + (V_C - V_A) = 260\text{V}$$

20) [정답] $\sqrt{\frac{2qEL(1-\cos\theta)}{m}}$

[해설] 처음 위치와 나중 위치에서 전위차를 $\Delta V = V_f - V_i$

라 하면, 전위차는 전기장에 평행한 거리에만 의존하므로

$$\Delta V = -Ed_{\parallel} = -EL(1-\cos\theta)$$

역학적 에너지 보존에서

$$qV_i = \frac{1}{2}mv^2 + qV_f$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{-2q\Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{2qEL(1-\cos\theta)}{m}}$$

21) [정답] ②

[해설]

[출제의도] 전기장과 전위 결론 도출하기

전기력이 한 일은 운동 에너지 변화량과 같다($qV = \Delta K$). 입자의 전하량을 q 라 하면 $x = 2d$ 와
 $x = 3d$ 에서 $qV = 3K$ 이다. 균일한 전기장에서 거리와 전위차는 비례하고, $x = d$ 와 $x = 2d$ 에서
의 전위차를 V_1 이라 할 때, $qV_1 = 2K$ 이므로, $V_1 = \frac{2}{3}V$ 이다.

22) [정답] ② $\frac{2K_A - K_B}{2q}$

[해설]

같은 거리를 동시에 도달하므로, A와 B의 평균속력이 같다. 두 입자의 비 전하가 $\frac{q}{m} = \frac{2q}{2m}$
이므로 같은 전기장에서 같은 가속도가 되므로 같은 위치에서 같은 속력이야 평균 속력이
같음을 알 수 있다.

I 에서 속력이 같고 B의 질량이 A의 2배이다. 따라서 B의 운동에너지가 A의 운동에너지의 2
배이다.

$$2K_A = K_B + 2qV$$

정리하면 $V = \frac{2K_A - K_B}{2q}$ 이다.

개념 POINT

23) [정답] ④

[해설] [출제의도] 대전 입자의 운동 분석하기

ㄱ. (가), (나)에서 등속, 등가속도 운동하므로 전기장의 방향은 각각 $+y$, $+x$ 방향이다. 따라서 B의 전위는 A보다 높고, D의 전위는 C보다 낮으므로 D의 전위는 B보다 낮다.

ㄴ. (가)에서 qE_1 은 중력과 같고, (나)에서 중력 방향으로 d 만큼 이동하는 동안 전기장 방향으로 $2d$ 만큼 이동하므로 $s = \frac{1}{2}at^2$ 에서 qE_2 는 중력의 2배이다. 따라서 $E_2 = 2E_1$ 이다.

ㄷ. 중력과 전기력이 한 일의 합이 운동 에너지 변화량 E_K 와 같으므로 $E_K = mgd + qE_2(2d) = \frac{1}{2}qE_2d + 2qE_2d = \frac{5}{2}qE_2d$ 이다.

24) [정답] ② ㄷ

[해설]

ㄱ. 점전하 근처에서의 전위는

$$V = k \frac{Q}{r}$$

이므로, 양전하 근처에서는 전하에 가까울수록 전위가 높아진다.

A가 C보다 가까우므로 전위가 높다. (X)

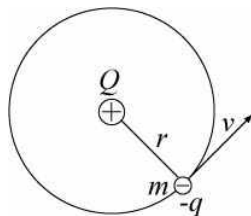
ㄴ. Q로 부터 C와 B사이의 거리가 같으므로 $V_B = V_C$ 이다. 따라서 A에서 B로 이동할 때와 A에서 C로 이동할 때의 전기적 위치에너지 변화량이 같다. (X)

ㄷ. 음전하는 전위가 높은 방향으로 전기력을 받는다. (전기장 반대방향) 따라서 B에 음(-)의 점전하를 놓으면 점전하는 A쪽으로 전기력을 받는다. (O)

25) [정답] $\frac{Qq}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

[해설]

원운동의 구심력 역할을 하는 힘은 전기력이다.



$$\frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{Qq}{8\pi\epsilon_0 r}$$

반지름 r_1 인 원궤도를 돌 때, 총 역학적 에너지는

$$U_1 = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r_1} = -\frac{Qq}{8\pi\epsilon_0 r_1}$$

마찬가지로, 반지름 r_2 인 원궤도를 돌 때, 총 역학적 에너지는

$$U_2 = -\frac{Qq}{8\pi\epsilon_0 r_2}$$

필요한 일은

$$W = U_2 - U_1 = \frac{Qq}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

26) [정답] ① ㄱ

[해설]

ㄱ. 원점에서의 전기장은 양의 x 방향이며

$$E_0 = 2 \times \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{d^2} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{Q}{d^2} \text{ 이며}$$

P 점에서의 전기장은 음의 y 방향이며

$$E_P = 2 \times \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\sqrt{2}d^2} \sin 45^\circ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{d^2}$$

따라서 $E_0 > E_P$ 이다. (O)

ㄴ. P 에서 전기장의 방향은 $-y$ 방향이다. (X)

ㄷ. 원점과 P 는 전위가 모두 0이다. (X)

27) [정답] $k \frac{5q}{2d}$

[해설] 전위는 스칼라량이므로 (방향을 생각하지 않고) 더하면 된다.

$$V = k \frac{5q}{d} - k \frac{5q}{2d} - k \frac{5q}{d} + k \frac{5q}{d} = k \frac{5q}{2d}$$

28) [정답] (1) $x = 2L$ (2) $x = \frac{4}{3}L$, $x = \frac{4}{5}L$

[해설]

(1) 양전하가 음전하보다 전하량의 크기가 4배이므로 거리의 비율이 2:1인 x 축 위의 점에서 전기장이 0이다.

$x = 2L$ 인 곳에서 $E = 0$ 이다.

(2) 양전하가 음전하보다 전하량의 크기가 4배이므로 거리의 비율이 4:1인 점에서 전위가 0이다.

x 축 위의 점으로는 $x = \frac{4}{3}L$, $x = \frac{4}{5}L$ 인 곳이며, xy 평면에서는 위의 두 점을 지름으로 하는 원, xyz 공간에서는 구가 된다.

29) [정답] (1) $U_A = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{a}$

(2) $U = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{a}$

(3) $W = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{a}$

[해설]

(1) 점전하 Q_B 와 Q_C 에 의한 Q_A 의 전기퍼텐셜에너지는

$$U_A = Q_A V_A = Q \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q}{a} + \frac{-Q}{2a} \right) = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{a}$$

(2) 정전 퍼텐셜 에너지는

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q_A Q_B}{r_{AB}} + \frac{Q_A Q_C}{r_{AC}} + \frac{Q_B Q_C}{r_{BC}} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q^2}{a} - \frac{Q^2}{2a} - \frac{Q^2}{a} \right) = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{a}$$

(3) 나중 퍼텐셜에너지는

$$U' = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q_A Q_B}{r'_{AB}} + \frac{Q_A Q_C}{r'_{AC}} + \frac{Q_B Q_C}{r'_{BC}} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q^2}{a} - \frac{Q^2}{a} - \frac{Q^2}{a} \right) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{a}$$

필요한 일은 퍼텐셜 에너지 변화량이다.

$$W = \Delta U = U' - U = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{a}$$

30) [정답] ② -6

[해설]

이웃한 변의 수는 12개이며 서로 부호가 반대이다.

그리고 $\sqrt{2}L$ 만큼 떨어진 점들의 쌍은 12개이며 서로 부호가 같다.

마지막으로 $\sqrt{3}L$ 만큼 떨어진 두 점의 쌍은 4개이며 서로 부호가 같다.

전체 쌍을 다 구했는지 확인해 보면

$${}_8C_7 = 28 = 12 + 12 + 4$$

이다.

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[12 \times \frac{(-q^2)}{L} + 12 \times \frac{q^2}{\sqrt{2}L} + 4 \times \frac{(-q^2)}{\sqrt{3}L} \right] \\ &= \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 L} \left\{ -12 + \frac{12}{\sqrt{2}} - \frac{4}{\sqrt{3}} \right\} \\ &= (-5.8) \times \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 L} \end{aligned}$$

31) [정답] $\sigma = \frac{\epsilon_0 V}{R}$

[해설]

$$V_R - V_\infty = - \int_\infty^R E dr = - \int_\infty^R \frac{Q dr}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$V_\infty = 0 \text{ 이므로 } V_R = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R} = V \text{ 이고}$$

$$Q = \sigma \cdot 4\pi R^2 \text{ 이므로 } \sigma = \frac{\epsilon_0 V}{R}$$

32) [정답] $3.0 \times 10^{-3} \text{C}$

[해설] $Q = CV = 25 \times 10^{-6} \text{F} \times 120 \text{V} = 3.0 \times 10^{-3} \text{C}$

33) [정답] (1) $V_{cd} = V_c - V_d = -70 \text{V}$

(2) 모든 축전기에 전위차가 105V가 된다.

(3) $d \rightarrow c$ 로 $315 \mu\text{C}$ 만큼 흘러간다.

[해설] (1) 스위치가 열려있는 상태에서는 $3.00 \mu\text{F}$ 과 $6.00 \mu\text{F}$ 이 직렬연결되어 있으므로

$$V_{ac} : V_{cb} : V = 2 : 1 : 3 \text{ 이다.}$$

$$V_{ac} = \frac{2}{3} \times 210 \text{V} = 140 \text{V}, \quad V_{cb} = \frac{1}{3} \times 210 \text{V} = 70 \text{V}$$

같은 방식으로 $V_{ad} = 70 \text{V}$, $V_{db} = 140 \text{V}$ 이다.

$$V_{cd} = V_c - V_d = (V_c - V_b) - (V_d - V_b)$$

$$= 70 \text{V} - 140 \text{V} = -70 \text{V}$$

(2) 스위치 S 를 닫으면 $9.00 \mu\text{F}$ 의 축전기 2개의 직렬연결이 되며 모든 축전기에 전위차가

$$V' = \frac{210}{2} \text{V} = 105 \text{V} \text{ 가 된다.}$$

(3) 스위치를 닫기 전에는 모든 축전기가

$$q_i = (3.00 \mu\text{F})(140 \text{V}) = (6.00 \mu\text{F})(70 \text{V}) = 420 \mu\text{C} \text{만큼 대전되어 있었다.}$$

스위치를 닫으면 $3.00 \mu\text{F}$ 의 축전기는

$$q_1' = (3.00 \mu\text{F})(105 \text{V}) = 315 \mu\text{C}$$

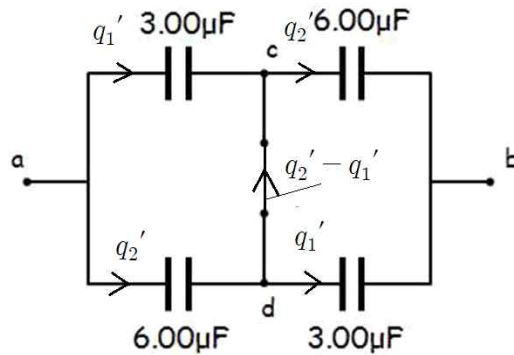
$6.00 \mu\text{F}$ 의 축전기는

$$q_2' = (6.00 \mu\text{F})(105 \text{V}) = 630 \mu\text{C} \text{만큼 대전된다.}$$

스위치를 닫기 전에는 S 를 통해 전하량이 흘러가지 않았다. 스위치를 닫게 되면 d 에서 c 방향으로

$$q_2' - q_1' = 315 \mu\text{C}$$

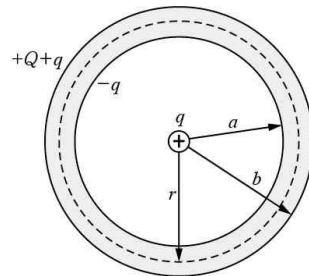
만큼 흘러가게 된다.



개념 POINT

34) [정답] (1) $-\frac{q}{4\pi a^2}$ (2) $\frac{q+Q}{4\pi b^2}$

[해설] (1) 그림과 같이 반지름 $r(a < r < b)$ 인 Gauss면에 대해 Gauss 법칙을 적용하면, 구각의 안쪽 표면의 전하량은 $-q$ 가 됨을 알 수 있다. 따라서, 표면 전하 밀도는 $\sigma_a = -\frac{q}{4\pi a^2}$



(2) 구각의 총전하량 Q 는 보존되므로, 바깥쪽 표면의 전하량은 $Q+q$ 이다. 따라서, 표면 전하 밀도는 $\sigma_b = \frac{q+Q}{4\pi b^2}$

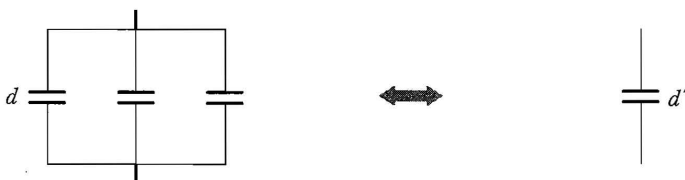
35) [정답] ③ ㄱ, ㄷ

[해설]

- ㄱ. 내부의 대전체가 음전하이므로 도체 껍질 안쪽 표면은 양전하가 유도된다. (O)
- ㄴ. 도체 껍질 안쪽의 전하 밀도는 A쪽이 더 크다. (X)
- ㄷ. 안쪽 전하에 대한 정보는 정전기 차폐에 의해 전달되지 않는다. 따라서 바깥쪽 표면의 전하 밀도는 전체 표면에서 균일하다. (O)

36) [정답] $d' = \frac{1}{3}d$

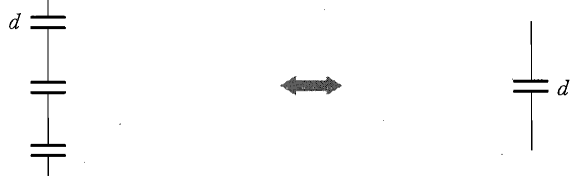
[해설]



$$3\epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon_0 \frac{A}{d'} \text{에서 } d' = \frac{1}{3}d$$

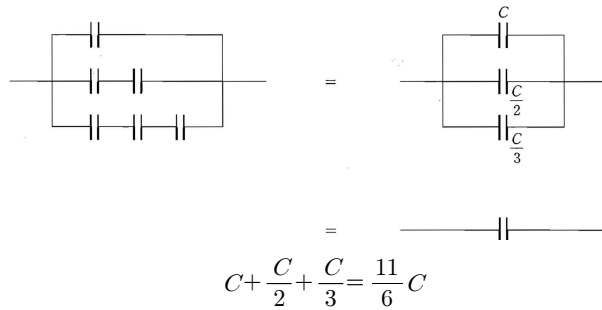
37) [정답] $d' = 3d$

[해설]



$$\frac{1}{3}\epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon_0 \frac{A}{d'} \text{에서 } d' = 3d$$

38) [정답] $\frac{11}{6}C$



39) [정답] ① $\frac{1}{3}V$

[해설] 직렬 연결된 축전기에 충전된 전하량이 같으므로 축전기의 양단에 걸리는 전압은 축전기의 전기용량에 반비례한다.

전기용량이 C , $2C$ 인 축전기가 직렬로 연결되어 있으므로 전기용량이 C 인 축전기의 양단에 걸리는 전압은 $\frac{2}{3}V$ 이다. 따라서 a의 전위 $V_a = \frac{1}{3}V$ 이다. 전기용량이 $6C$, $3C$ 인 축전기가 직

렬로 연결되어 있으므로 전기 용량이 $6C$ 인 축전기의 양단에 걸리는 전압은 $\frac{1}{3}V$ 이다. 따라서

b의 전위 $V_b = \frac{2}{3}V$ 이다. 그러므로 $V_b - V_a = \frac{1}{3}V$ 이다.

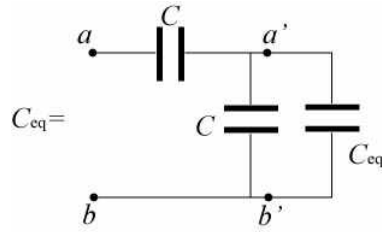
40) [정답] $q = 4CV$

[해설] $q = 4CV$

41) [정답] ④ $\frac{\sqrt{5}-1}{2}C$

[해설] 전체 등가 전기용량을 C_{eq} 라 하면 다음 그림과 같이 회로를 생각할 수 있다.

개념 POINT



$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C + C_{eq}} \quad (*)$$

위의 유리식을 정리하면 2차 방정식이 나온다.

$$(*) \Leftrightarrow \frac{1}{C_{eq}} - \frac{1}{C + C_{eq}} = \frac{1}{C}$$

$$\Leftrightarrow \frac{C}{C_{eq}(C + C_{eq})} = \frac{1}{C}$$

$$\Leftrightarrow C_{eq}^2 + CC_{eq} - C^2 = 0$$

$C_{eq} > 0$ 이므로 근의 공식의 +인 해를 선택을 하면

$$C_{eq} = \frac{(\sqrt{5}-1)C}{2} \text{ 이다.}$$

42) [정답] (1) $1.5 \mu\text{F}$ (2) ① (3) 3 : 2 : 1

[해설]

$$(1) \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_3} = \frac{1}{3} + \frac{1}{2+1} = \frac{2}{3}$$

$$\therefore C = \frac{3}{2} = 1.5(\mu\text{F})$$

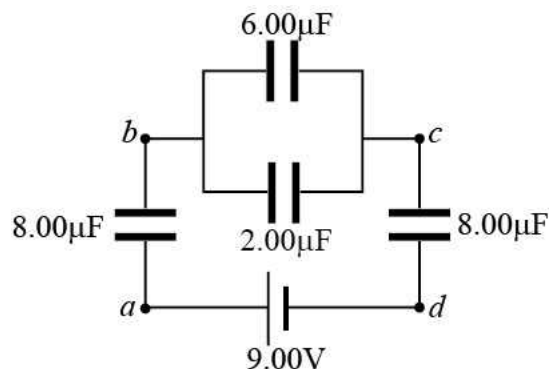
(2) 직렬연결에서는 전압이 전기용량에 반비례하고, 병렬연결에서는 전압이 같다.

(3) 직렬연결에서는 전하량이 같고, 병렬연결에서는 전기용량에 비례한다. 따라서 C_2 와 C_3 의 전하량의 비는 2 : 1이고, C_1 에는 그 합만큼의 전하량이 저장된다.

43) [정답] (1) $2.67 \mu\text{F}$ (2) 풀이 참조 (3) 모두 3.00V

$$[해설] (1) \frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{8.00 \mu\text{F}} \times 3 \Rightarrow C_{eq} = 2.67 \mu\text{F}$$

(2)(3) $V_{ab} = V_{bc} = V_{cd} = 3.00\text{V}$ 이므로,



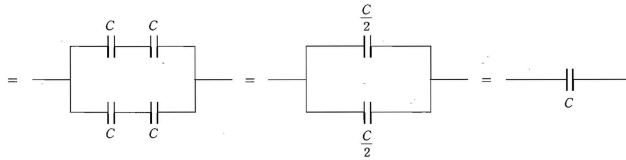
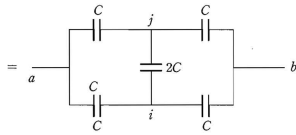
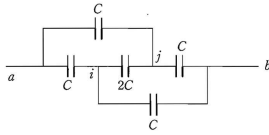
두 $8.00 \mu\text{C}$ 의 축전기는 동일하게 $24.0 \mu\text{C}$

$6.00 \mu\text{C}$ 의 축전기는 동일하게 $18.0 \mu\text{C}$

$2.00 \mu\text{C}$ 의 축전기는 동일하게 $6.00 \mu\text{C}$

44) [정답] C

[해설]



개념 POINT