2025 최신판 [개정5판]

# 변리사 끗 물리

개념편

김현완 지음

Possibility must be in Practice !

카다리꼬마

Chapter

# 01 정전기

## 전하와 전기력

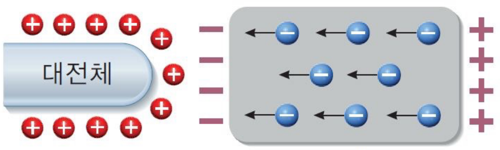
**1. 전하** : 물체가 띠고 있는 정전기의 양으로 모든 전기 현상의 근원을 말한다.

※ 전하의 종류 : 전하는 양전하(+)와 음전하(-)로 나눌 수 있고, 전하량의 단위로는 $C$(쿨롱)을 사용한다.

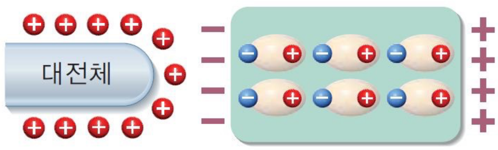
**2. 정전기 유도** : 전하를 띠지 않은 중성의 물체에 전하를 띤 물체인 대전체를 가까이하면 중성인 물체에 전하가 유도된다. 이때, 대전체와 가까운 쪽에는 대전체의 전하와 반대 종류의 전하가 유도되고, 먼 쪽에는 대전체의 전하와 같은 종류의 전하가 유도된다.

1) 도체의 정전기 유도 : 자유 전자가 이동하여 대전체에서 가까운 쪽은 대전체와 반대 종류의 전기를 띠고, 대전체에서 먼 쪽은 대전체와 같은 종류의 전기를 띠는 현상

2) 부도체의 정전기 유도 (유전 분극) : 분자나 원자 안에 있는 전자의 평균적 위치가 변하여 대전체에서 가까운 쪽은 대전체와 반대 종류의 전기를 띠고, 대전체에서 먼 쪽은 대전체와 같은 종류의 전기를 띠는 현상




▲ 도체에서의 정전기 유도




▲ 부도체에서의 정전기 유도 (유전 분극)

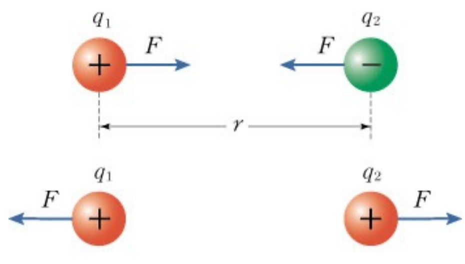
**3. 전하량 보존의 법칙**

| |
|---|
| 전하는 전자와 원자핵, 이온으로 이루어지고 이들이 띠는 전하량은 물리적, 화학적 변화에 의해 바뀌지 않는다. 전하량이 보존되므로 전력량계의 위치를 임의로 변경하여도 사용한 전기 에너지는 변하지 않는다. 전기 회로에 이 법칙을 적용해 보면, 전기 회로에 흘러 들어가는 전하량과 회로로부터 흘러나오는 전하량의 크기는 같다. 그리고 전하가 여러 회로로 나누어 흘러도 각각의 전하량을 합하면 하나의 회로로 흐르는 전하량과 같다. |

**4. 전기력** : 전하를 띠는 두 물체 사이에 작용하는 힘으로, 같은 부호의 전하 사이에는 서로 밀어내는 힘(척력)이 작용하고, 서로 다른 부호의 전하 사이에는 서로 당기는 힘(인력)이 작용한다.

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \text{ : 쿨롱 상수 = } 9\times10^9 N \cdot m^2/C^2)$$

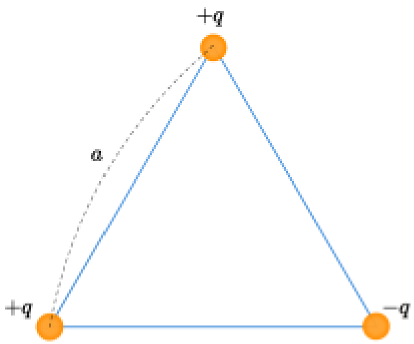
($q_1$ , $q_2$ : 전하량 , $r$ : 두 전하의 중심 사이의 거리)




▲ 전기력의 방향

※ 유전율($\epsilon$) : 전기장이 주어졌을 때 분극 현상을 일으키는 정도 (유전상수(비유전율) : $\kappa = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$)

예제 102




한 변의 길이가 $a$ 인 정삼각형의 꼭지점에 $+q$ , $+q$ 및 $-q$ 의 세 점전하가 놓여 있다. $+q$ 전하 중의 하나에 작용하는 전기력의 크기는? (단, 쿨롱 상수는 $k$ 이다.)

정답 : $k\dfrac{q^2}{a^2}$

## 전기장

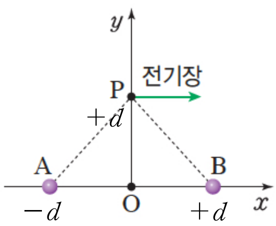
### 1. 전기장과 전기력선

1) 전기장 : 단위 양전하(+1C)가 받는 전기력 (포괄적 의미 : 전기력이 작용하는 공간) (벡터)

2) 전기장의 세기 : 전기장 내의 한 점에 단위 양전하(+1$C$)를 놓았을 때 그 전하가 받는 전기력의 크기

$$E=\frac{F}{q}\quad [N/C]\ ,\ F=qE$$

예제 103



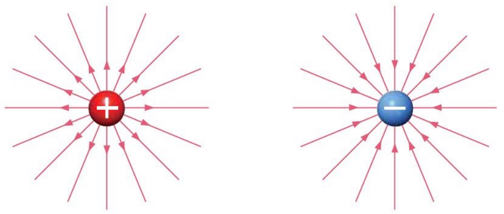

그림은 원점 O에서 같은 거리만큼 떨어져 $x$ 축 위에 고정되어 있는 두 점전하 A, B에 의한 점 P 에서의 전기장 방향이 $+x$ 방향인 것을 나타낸 것이다. A의 전하량 크기가 $q$ 일 때 P에서 전기장의 세기는? (단, 원점으로부터 A, B, P점까지 거리는 $d$ 로 같고, 공간의 유전율은 $\epsilon_0$ 이다.)

P점에서 $+x$ 방향 전기장이 형성되므로 A는 (+)전하, B는 (−)전하이고, 전하량 크기는 같다.

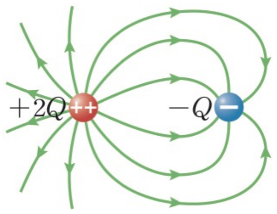
$$E=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q}{(\sqrt{2}\,d)^2}\cos45^\circ\times 2$$

정답 : $\dfrac{q}{4\sqrt{2}\,\pi\epsilon_0 d^2}$

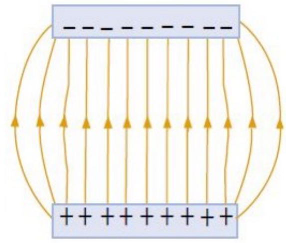
3) 전기력선 : 전기장 내에 놓인 단위 양전하 (+1 $C$)가 받는 전기력의 방향을 접선으로 이은 선



▲ 점전하 주위의 전기력선



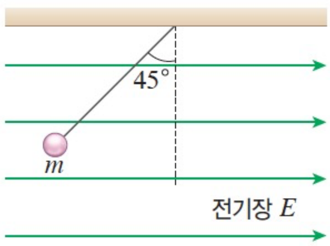

▲ 두 점전하에 의한 전기력선



▲ 평행한 두 판에서의 전기력선

- 전기력선은 양(+)전하에서 나와 음(-)전하로 들어가며, 교차되거나 분리되지 않는다.
- 전기력선 위의 한 점에서 그은 접선의 방향은 그 점에서 전기장의 방향과 일치한다.
- 평행한 두 금속판(축전기) 사이의 전기력선 : 거의 균일한 전기장이 형성된다.
- 전하량이 다른 두 전하에 의한 전기력선 : 전기력이 전하량에 비례하므로 전기력선의 수는 전하량에 비례한다.
- 전기력선은 보통 폐곡면을 기준으로 할 때 면 내부로 들어가면 (-)부호를 면 외부로 빠져나오면 (+)부호로 표현한다.

예제 104

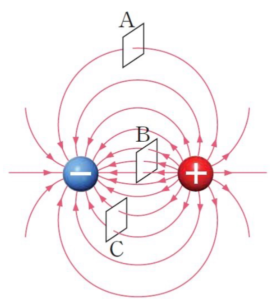



그림은 균일한 전기장에서 질량 $m$ 인 대전체가 실에 매달려 정지해 있는 모습을 나타낸 것이다, 실은 연직 방향과 $45°$ 를 이루며, 전기장의 세기는 $E$ 이고 방향은 중력에 수직하다. 대전체의 전하량은? (단, 중력 가속도는 $g$ 이고, 실의 질량은 무시한다.)

$-x$ 방향의 전기력을 받으므로 대전체는 (-)전하이다.

$mg\tan 45° = qE$

정답 : $-\dfrac{mg}{E}$




▲ 전속 밀도

4) 전기선속($\Phi$) : 전기장에 수직인 임의의 단면을 지나가는 전기력선의 총 개수

5) 전기력선과 전기장의 세기 : 전기력선에 수직인 단위 면적을 지나가는 전기력선의 수를 비교하여 전기장의 세기를 비교할 수 있다. ($E = \dfrac{\Phi}{A}$)

- 전기력선의 밀도가 높은 곳이 전기장의 세기가 세고, 전기력선의 밀도가 낮은 곳이 전기장의 세기가 약하다.

6) 전하 밀도

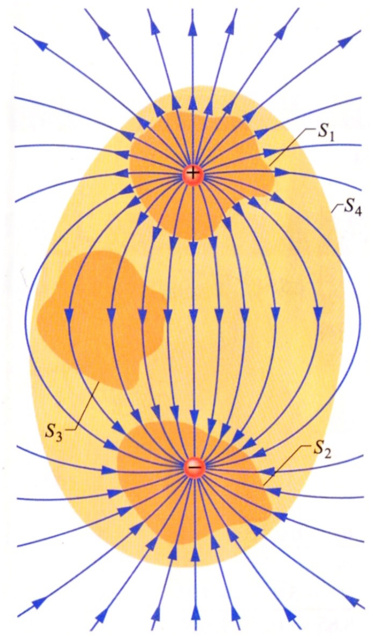
| 선 전하 밀도 | 면 전하 밀도 | 부피 전하 밀도 |
|---|---|---|
| $\lambda = \dfrac{q}{L}$ ; $q = \lambda L$ | $\sigma = \dfrac{q}{S}$ ; $q = \sigma S$ | $\rho = \dfrac{q}{V}$ ; $q = \rho V$ |

**2. 가우스 법칙** : 폐곡면(가우스면)을 통과하는 전기선속이 폐곡면 속의 알짜 전하량에 비례한다. 수학적으로 쿨롱의 법칙을 달리 표현하면 임의의 폐곡면을 관통하는 전기력선의 합은 그 폐곡면 내에 있는 전하밀도와 같다는 결론이 된다.

$$\Phi = E \cdot S = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0} \quad (S \text{ : 가우스면의 면적, } Q_{in} \text{ : 가우스면 내부의 알짜 전하량})$$

$$(\Phi = \oint E \, dS)$$

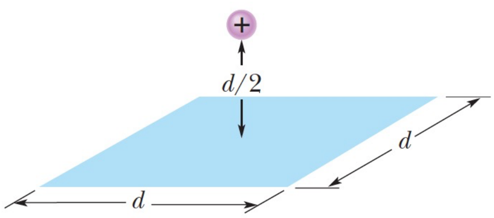
예제 105




그림은 크기는 $q$ 로 같고 부호가 반대인 두 전하와 이들이 주위 공간에 만든 전기력선을 나타낸 것이다. 이때 $S_1$ , $S_2$ , $S_3$ , $S_4$ 는 모두 가우스면이다. 가우스 법칙에 따라 각각의 가우스면을 기준으로 전기선속은? (단, 공간의 유전율은 $\epsilon$ 이다.)

정답 : $S_1$ : $+\frac{q}{\epsilon}$ , $S_2$ : $-\frac{q}{\epsilon}$ , $S_3$ : $0$ , $S_4$ : $0$

예제 106

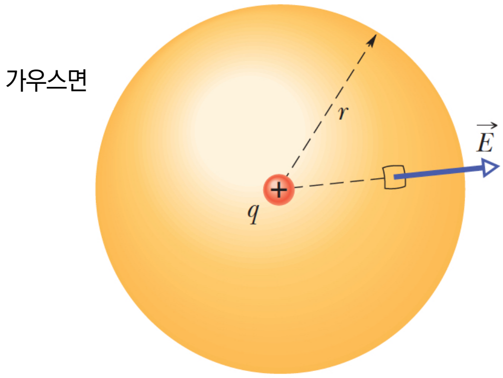



한 변의 길이가 $d$ 인 정사각형 면의 중심에서 면에 대해 수직 방향으로 $\frac{d}{2}$ 위치에 $+q$ 의 점전하가 고정되어 있다. 정사각형 면을 통과하는 알짜 전기선속은? (단, 공간의 유전율은 $\epsilon$ 이다.)

점전하를 중심에 둔 정육면체를 통과하는 전기 선속은 $\Phi = \frac{q}{\epsilon}$ 이다.

정답 : $\frac{q}{6\epsilon}$

1) 점전하 주위의 전기장

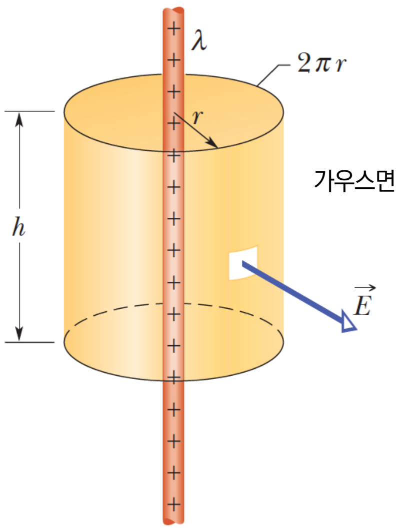



점전하로부터 $r$ 만큼 떨어진 지점을 포함하여 점전하에 대해 대칭성 있는 가우스면은 구면이 된다. 가우스면의 면적은 $4\pi r^2$ 이다.

$$\Phi = E \cdot S = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0} \;;\; E(4\pi r^2) = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0}$$

$$\boxed{E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q}{r^2}}$$

2) (무한) 선 전하 주위의 전기장



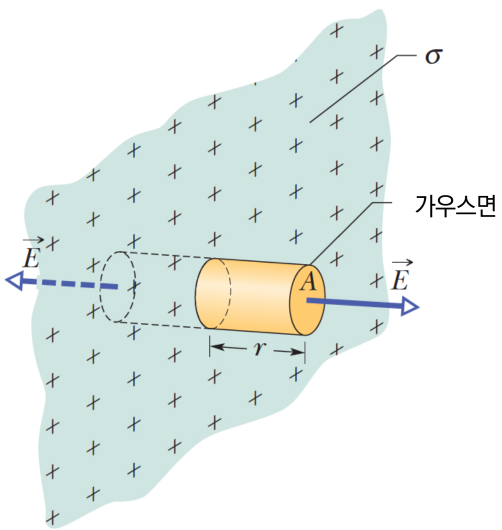

선 전하로부터 $r$ 만큼 떨어진 지점을 포함하여 선 전하에 대해 대칭성 있는 가우스면은 원통 옆면이 된다. 가우스면의 면적은 $2\pi r \cdot h$ 이다.

선 전하 밀도가 $\lambda$ 일 때 가우스면 내부의 알짜전하는 $\lambda \cdot h$ 이다.

$$\Phi = E \cdot S = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0} \;;\; E(2\pi rh) = \frac{\lambda h}{\epsilon_0}$$

$$\boxed{E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0}\frac{\lambda}{r}}$$

3) (무한) 면 전하 주위의 전기장




면 전하로부터 $r$ 만큼 떨어진 지점을 포함하여 면 전하에 대해 대칭성 있는 가우스면은 면전하와 평행한 면이 되며 면 전하를 기준으로 대칭적으로 존재하므로 한쪽 면의 면적이 $A$ 일 때 가우스면의 면적은 $2A$ 가 된다.

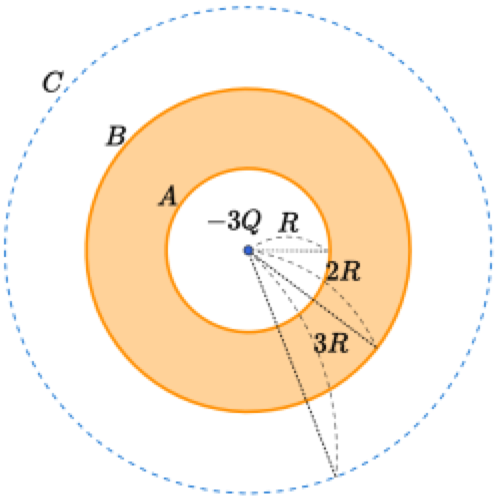
면 전하 밀도가 $\sigma$ 일 때 가우스면 내부의 알짜전하는 $\sigma \cdot A$ 이다.

$$\Phi = E \cdot S = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0} \;;\; E(2A) = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

$$\boxed{E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}}$$

예제 107

그림은 알짜 전하량이 $+Q$ 인 도체구 껍질의 중심에 전하량이 $-3Q$ 인 점전하가 고정되어 있는 것을 나타낸 것이다. 도체구 껍질의 안쪽 반지름은 $R$ 이고, 바깥쪽 반지름은 $2R$ 이다. A, B, C는 각각 점전하를 중심으로 반지름 $R$ , $2R$ , $3R$ 에 해당하는 구면이다. 공간의 유전율은 $\epsilon$ 이다.




1) A와 B에서 표면 전하 밀도의 비는?

2) 점전하로부터 $\frac{R}{2}$ 떨어진 지점의 전기장 세기는?

3) 점전하로부터 $\frac{3R}{2}$ 떨어진 지점은 전기장 세기는?

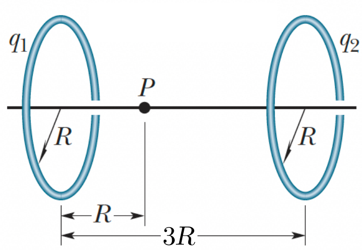
4) C면을 통과하는 알짜 전기선속은?

정전기 유도 현상에 의해 A면에는 $+3Q$ 의 전하가 유도된다. 따라서, B면의 전하량은 $-2Q$ 이다.

1) $\frac{3Q}{4\pi R^2}:\frac{2Q}{4\pi(2R)^2}$ 2) $E=\frac{1}{4\pi(\frac{R}{2})^2}\times\frac{3Q}{\epsilon}$ 3) $Q_{in}=0$ 4) $\Phi=\frac{-2Q}{\epsilon}$

정답 : 1) $6:1$ , 2) $\frac{3Q}{\pi\epsilon R^2}$ , 3) 0 , 4) $-\frac{2Q}{\epsilon}$

예제 108 심화



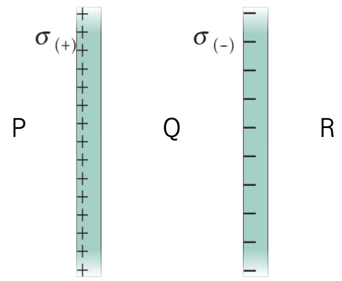

그림은 서로 평행하고 반지름이 $R$ 인 중심축이 같은 두 원형 고리가 $3R$ 만큼 떨어져 고정되어 있는 것을 나타낸 것이다. 두 원형 고리에는 각각 전하량 $q_1$ , $q_2$ 가 균일하게 분포해 있다. $q_1$ 전하량의 고리의 중심으로부터 중심축을 따라 $R$ 만큼 떨어진 P점에서 전기장의 크기가 0일 때, $\frac{q_2}{q_1}$ 는? (단, 공간의 유전율은 일정하다.)

하나의 원형 고리에 의한 P점에서 전기장은 고리의 점전하들이 P점에서 만드는 중심축과 나란한 방향의 전기장의 합이다.

$$k\frac{q_1}{(\sqrt{2}R)^2}\times\frac{1}{\sqrt{2}}\times 2\pi R=k\frac{q_2}{(\sqrt{5}R)^2}\times\frac{2}{\sqrt{5}}\times 2\pi R$$

정답 : $\frac{5\sqrt{5}}{4\sqrt{2}}$

예제 109



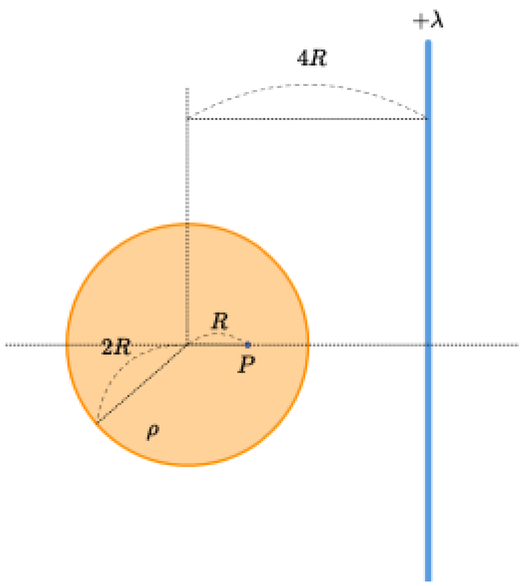

그림은 균일한 면 전하밀도 $+\sigma$, $-\sigma$의 평행하게 마주보는 무한 평면을 나타낸 것이다. P, Q, R에서 전기장 세기는?

두 면전하가 만드는 전기장의 세기는 $\frac{\sigma}{2\epsilon}$ 이다. 음전하와 양전하가 만드는 전기장 방향이 P, R에서 반대이고, Q에서 같다.

정답 : P, R : 0 , Q : $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$

예제 110 심화

그림은 반지름이 $2R$ 인 부피 전하 밀도가 $\rho$ 로 균일한 속이 찬 구와 선 전하 밀도가 $\lambda$ 로 균일한 무한히 긴 양(+)전하로 대전된 직선 도선을 나타낸 것이다. 점 P는 구의 중심에서 도선을 향하는 방향으로 도선과 수직한 직선 위에서 구 중심으로부터 $R$ 만큼 떨어진 지점이다. 구의 중심에서 도선은 $4R$ 만큼 떨어져 있다. 점 P에서 전기장의 세기가 0일 때 구의 부피 전하 밀도 $\rho$ 는? (단, 모든 공간의 유전율은 일정하다.)




구와 도선이 만드는 P점에서 전기장은 세기는 같고 방향은 반대이다. (구는 (+)로 대전되어 있다.)

$$\frac{1}{4\pi R^2}\cdot\frac{\rho\cdot(\frac{4}{3}\pi R^3)}{\epsilon}=\frac{1}{2\pi(3R)}\cdot\frac{\lambda}{\epsilon}$$

정답 : $\frac{\lambda}{2\pi R^2}$

# 전위

## 1. 전위 (전기 퍼텐셜)

1) 전위 : 단위 양전하(+1C)가 갖는 전기력에 의한 퍼텐셜 에너지 (스칼라)

(전위가 0인 지점으로부터 전기장 내의 한 지점까지 +1C의 전하를 옮기는 데 필요한 일)

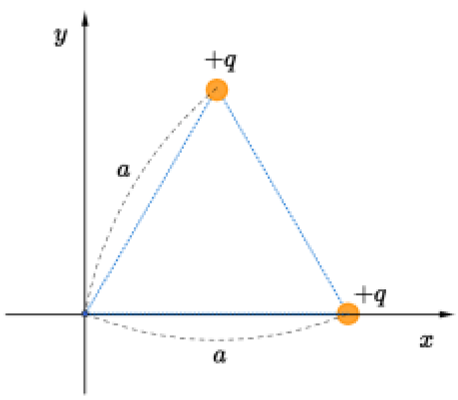
$$V=\frac{W}{q} \quad [V=J/C]\ (\text{전기 퍼텐셜 에너지 } E_p=qV)$$

$$V=-\int_{\infty}^{r}Edr$$

※ 보존력에 의한 퍼텐셜 에너지가 (-)의 부호인 것은 보존력에 의해 속박되어 있는 것을 의미한다. 즉, 인력이 작용할 때는 퍼텐셜 에너지의 부호가 (-)이고, 척력이 작용할 때는 퍼텐셜 에너지의 부호가 (+)인 것으로 생각하면 된다.

- 전위는 (+)전하에 가까울수록 높고, (-)전하에 가까울수록 낮다.
- (+)전하는 전위가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 전기력을 받고, (-)전하는 전위가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 전기력을 받는다.
- 점전하 $+Q$ 로부터 $r$ 인 곳에서 전위 : $V=+\frac{kQ}{r}$ (전하로부터 멀어질수록 전위가 낮다.)
- 점전하 $-Q$ 로부터 $r$ 인 곳에서 전위 : $V=-\frac{kQ}{r}$ (전하로부터 멀어질수록 전위가 높다.)

예제 111

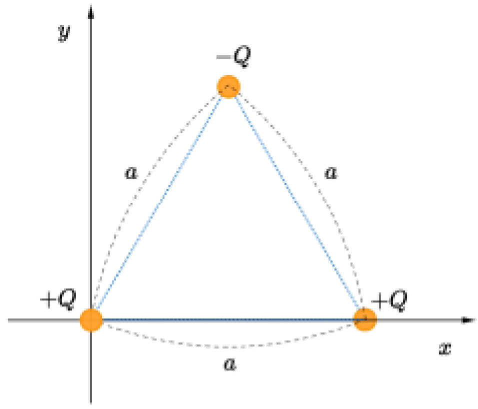



그림은 $xy$ 평면에 전하량이 $+q$ 인 두 점전하가 원점으로부터 $a$ 만큼 떨어져 고정되어 있는 것을 나타낸 것이다. 원점에서 전위는? (단, 공간의 유전율은 $\epsilon$ 이다.)

$$V=(+\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{q}{a})+(+\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{q}{a})$$

정답 : $+\frac{q}{2\pi\epsilon a}$

예제 112




그림은 전하량이 각각 $+Q$ , $+Q$ , $-Q$ 인 점전하를 $xy$ 평면에서 같은 간격 $a$ 로 놓아 고정한 것을 나타낸 것이다. 계의 전기 퍼텐셜 에너지는? (단, 공간의 유전율은 $\epsilon$ 이다.)

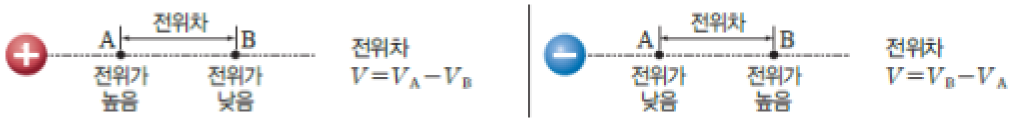
계의 퍼텐셜 에너지 : 입자들을 순차적으로 떼어 내는데 필요한 일의 합

$$\frac{1}{4\pi\epsilon}\left(-\frac{Q^2}{a}-\frac{Q^2}{a}+\frac{Q^2}{a}\right)$$

정답 : $-\dfrac{Q^2}{4\pi\epsilon a}$

2) 전위차(전압) : 전기장 내 두 지점 사이의 전위의 차

- 점전하 주위에서의 전위차 : 높은 전위 값과 낮은 전위 값의 차




▲ 전위차

예제 113 심화

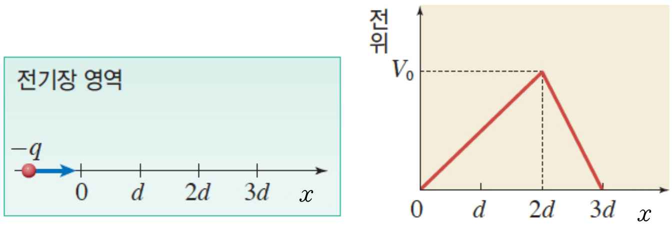
$+\lambda$ 의 전하 밀도로 균일하게 대전된 무한 선 전하로부터 거리 $r$ 만큼 떨어진 지점과 $R$ 만큼 떨어진 지점의 전위차는? (단, 공간의 유전율은 $\epsilon$ 이고, $r < R$ 이다.)

$$\varDelta V = -\int_R^r \frac{1}{2\pi r}\frac{\lambda}{\epsilon}dr = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon}\ln\frac{R}{r}$$

정답 : $\dfrac{\lambda}{2\pi\epsilon}\ln\dfrac{R}{r}$

예제 114

그림 (가)는 전기장 영역에서 전하량 $-q$ 인 대전 입자가 $x$ 축 상에서 $+x$ 방향으로 직선 운동하는 것을 나타낸 것이다. 그림 (나)는 입자의 운동 경로 상의 전위를 $x$ 에 따라 나타낸 것이다. 입자는 $x=3d$ 지점을 통과한다. 이에 대한 설명으로 옳은 것은? (단, 전기력 이외의 힘과 전자기파 발생은 무시한다.)



(가) (나)

ㄱ. $x=d$ 에서 전기장 방향은 입자의 운동 방향과 반대이다.

ㄴ. 입자가 받는 전기력의 크기는 $x=d$ 에서가 $x=2.5d$ 에서보다 작다.

ㄷ. $x=0$ 과 $x=3d$ 에서 입자의 속력은 같다.

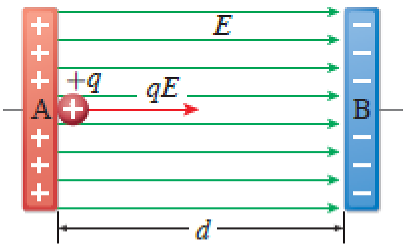
ㄱ. 전기장의 방향은 전위가 높은 곳에서 낮은 곳을 향한다. $x=d$ : $-x$ , $x=2.5d$ : $+x$

ㄴ. (나) 기울기 = $E$

ㄷ. 역학적 에너지 보존 : $x=0$ 과 $x=3d$ 사이 전위차는 0이다. 따라서, 퍼텐셜 에너지 차이는 0이고 운동 에너지는 같다.

정답 : ㄱ, ㄴ, ㄷ

- 균일한 전기장에서 전위차



▲ 균일한 전기장

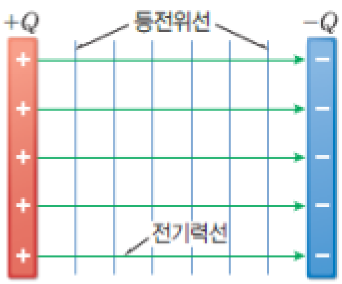
균일한 전기장 $E$ 에서 전하 $+q$ 가 받는 전기력은 $F=qE$ 이므로, $+q$ 를 B에서 A까지 거리 $d$ 만큼 옮기는 데 필요한 일은 $W=qEd$ 이다.

$$\Delta V = V_A - V_B = \frac{W}{q} = \frac{qEd}{q} = Ed$$

**2. 등전위선** : 전기장 내 전위가 같은 점을 연결한 선

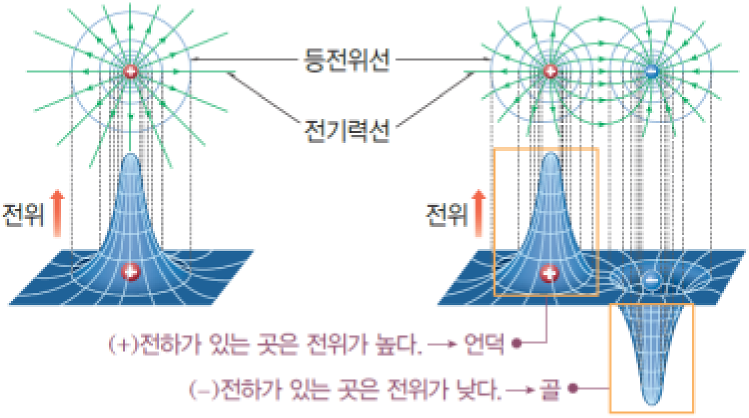
1) 등전위선과 전기력선

- 등전위선 위 모든 점은 전위가 같다.
- 등전위선은 전기력선에 항상 수직하다.
- 등전위선 간격이 좁을수록 전기장이 세다.
- 전기력선은 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 향한다.

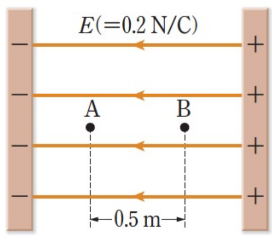


▲ 균일한 전기장에서 등전위선

2) 등전위선을 따라 전하를 이동시킬 때 전기력에 대한 한 일 : 0

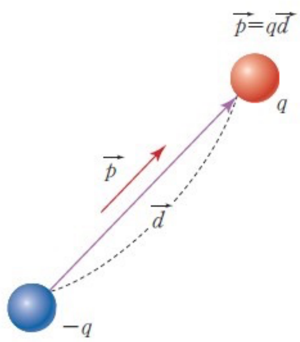


▲ 점전하 주변의 등전위선

| 예제 115 |
| --- |
| 두 평행 금속판 사이 세기가 $0.2N/C$ 인 균일한 전기장이 형성되어 있다. A점과 B점 사이의 거리가 $0.5m$ 일 때 두 점 사이의 전위차는?   |
| $\varDelta V = Ed$ 정답 : $0.1V$ |

## 심화 전기 쌍극자

**1. 전기 쌍극자** : 물질은 (-) 전하를 띤 전자와 (+) 전하를 띤 핵이 평형을 이루고 전기적으로 중성을 띤다. 총 (-)전하와 총 (+)전하의 위치가 일치하지 않을 경우나, (-)전하를 띤 물질과 (+)전하를 띤 물질이 일정한 거리를 두고 떨어져 있는 상태(계)를 전기쌍극자라고 한다. (벡터)



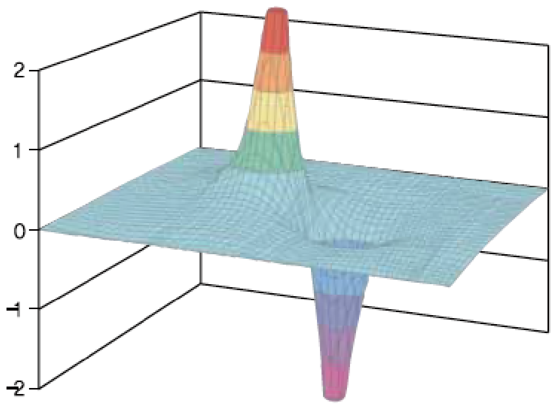
▲ 전기 쌍극자

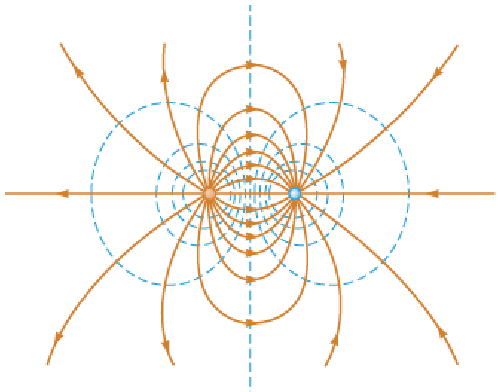
전기 쌍극자 모멘트 : $\vec{P}=q\vec{d}$

(전기 쌍극자의 방향 : $(-)\rightarrow(+)$)

## 2. 전기 쌍극자와 전위

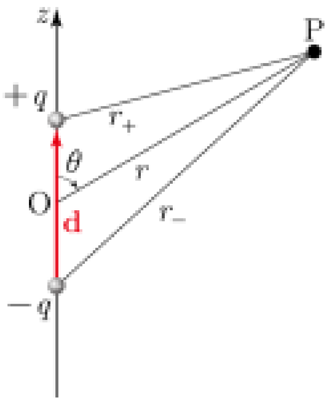
### 1) 전기 쌍극자 주변의 전위



▲ 전기 쌍극자 주변의 등전위선과 전기력선

### 2) 전기 쌍극자로부터 떨어진 임의의 지점에서의 전위




▲ 전기 쌍극자에 의한 전위

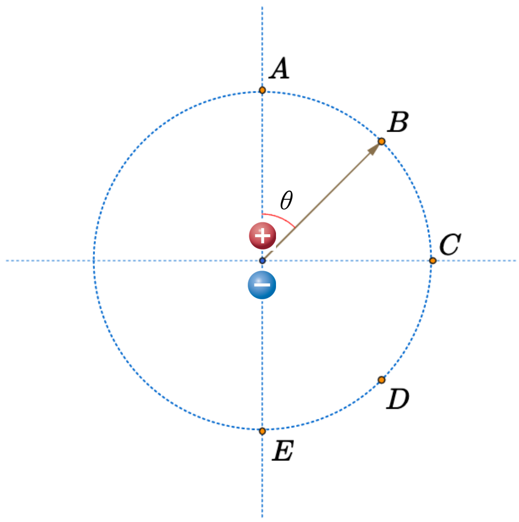
P점에서의 전위

$$V = V_+ + V_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{+q}{r_+} + \frac{-q}{r_-}\right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{r_- - r_+}{r_+ \times r_-}\right)$$

이때 $r \gg d$ 이므로, $\Delta r = r_- - r_+ = d\cos\theta$, $r_+ \times r_- \approx r^2$

$$\boxed{V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0}\frac{d\cos\theta}{r^2}}$$

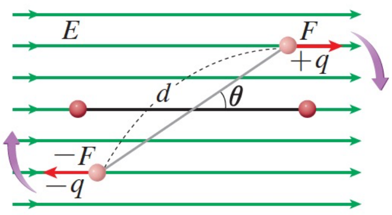
### 3) $\theta$ (극고도각)에 따른 전기 쌍극자에 의한 전위




▲ 전기 쌍극자 주변의 전위

| 지점 | $\theta$ | 거리 | 전위 |
|---|---|---|---|
| A | $0^\circ$ | (+) 전하와 거리가 더 가까움 | 최대 (+) |
| C | $90^\circ$ | 거리가 같음 | 0 |
| E | $180^\circ$ | (-) 전하와 거리가 더 가까움 | 최소 (-) |

### 3. 균일한 전기장 내의 전기 쌍극자



▲ 전기장 내 전기 쌍극자

1) 전기 쌍극자에 작용하는 토크

$$\Sigma\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{1}{2}d \times F\sin\theta + \frac{1}{2}d \times F\sin\theta = Fd\sin\theta$$

$$\Sigma\tau = Fd\sin\theta = Eqd\sin\theta = EP\sin\theta$$

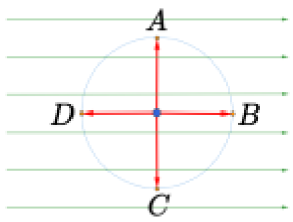
2) 전기 쌍극자의 퍼텐셜 에너지

- 전기 쌍극자 모멘트 방향이 전기장 방향과 나란해질 때까지 회전한다.
- 전기 쌍극자의 방향과 전기장의 방향이 $90^\circ$ 일 때를 퍼텐셜 에너지 0으로 정한다.

$$U = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\theta} \tau\, d\theta = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\theta} Fd\sin\theta\, d\theta = -Fd\cos\theta = -Eqd\cos\theta = -\vec{P} \cdot \vec{E}$$

예제 116

균일한 전기장 영역 내에 전기쌍극자가 존재한다. 전기장 내에서의 전기 쌍극자의 방향을 화살표로 나타내었다. 이에 대한 설명으로 옳은 것은?

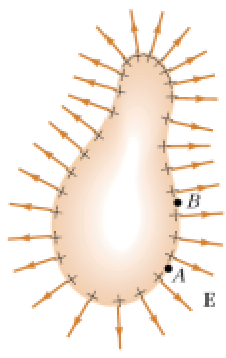



ㄱ. B 방향에서 전기 쌍극자에 작용하는 토크의 합은 0이다.
ㄴ. A, C 방향에서 전기 쌍극자 토크의 크기는 같다.
ㄷ. 전기 쌍극자 토크가 가장 큰 것은 D이다.
ㄹ. B 방향에서 전기 쌍극자 에너지가 $0J$ 이다.
ㅁ. 전기 쌍극자 에너지가 가장 큰 것은 D이다.

ㄱ, ㄷ. 전기 쌍극자에 작용하는 전기력이 전기 쌍극자와 나란하므로 알짜 토크는 0이다.
ㄴ. 토크의 방향은 반대이고 크기는 같다.
ㄹ. A 또는 C에서 퍼텐셜 에너지가 0이다.
ㅁ. 전기쌍극자 모멘트의 방향과 전기장 방향이 반대일 때 퍼텐셜 에너지가 최대이다.

정답 : ㄱ, ㄴ, ㅁ

## 대전된 도체와 부도체



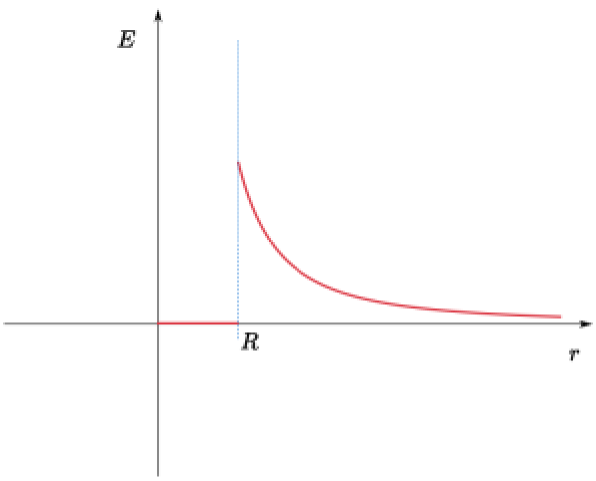
▲ 대전된 도체

**1. 대전된 도체의 전하** : 평형을 이루고 있는 도체의 전하들은 전기적 반발력에 의해 최대한 멀리 떨어져 있으려 하기 때문에 전하들은 도체의 표면에 존재하게 된다. 즉, 도체의 내부에는 전하가 존재하지 않는다. 따라서, 도체 내부의 전기장은 0이 되고, 내부에서 표면까지의 전위는 같다.

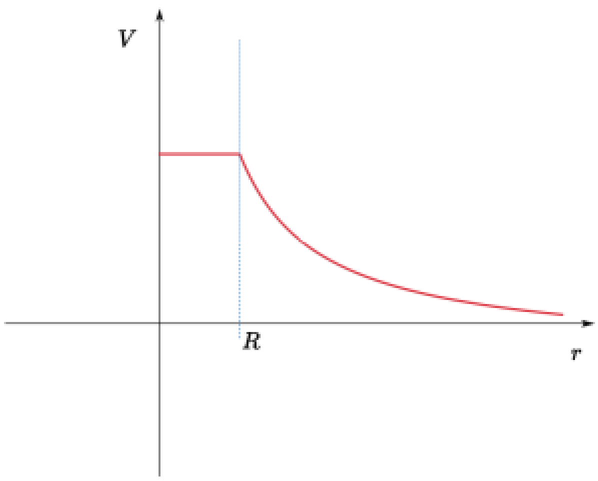
## 2. 대전된 도체의 전기장과 전위

전하량 $+Q$ 로 대전된 반지름 $R$ 의 도체구를 가정한다.

| | 전기장 | 전위 |
|---|---|---|
| 도체 외부<br>$(r>R)$ | $E=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r^2}$ | $V=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r}$ |
| 도체 표면<br>$(r=R)$ | $E=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{R^2}=\frac{\sigma}{\epsilon_0}$<br>($\sigma$ : 표면 전하밀도) | $V=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{R}$ |
| 도체 내부<br>$(r<R)$ | $E=0$ | $V=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{R}$ |



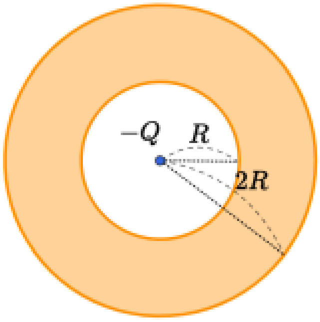

▲ 대전된 도체구의 전기장




▲ 대전된 도체구의 전위

예제 117 심화

알짜 전하량이 0인 도체구 껍질 내부 중심에 전하량이 $-Q$ 인 점전하가 고정되어 있다. 도체구 껍질의 안쪽 반지름은 $R$ , 바깥쪽 반지름은 $2R$ 이다. 점전하로부터 거리 $r$ 인 지점에서 전위는? (단, 공간의 유전율은 $\epsilon$ 이다.)




1) $r \geqq 2R$

2) $R \leqq r \leqq 2R$

3) $0 < r \leqq R$

1) $r \geqq 2R$ ; $(-\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{Q}{r})+(+\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{Q}{r})+(-\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{Q}{r})$

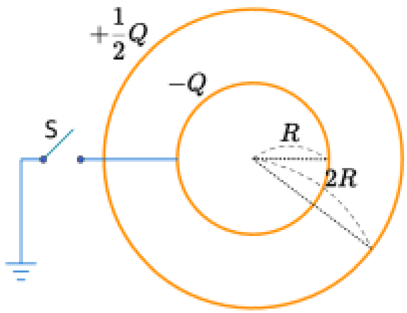
2) $R \leqq r \leqq 2R$ ; $(-\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{Q}{2R})+(+\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{Q}{r})+(-\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{Q}{r})$

3) $0 < r \leqq R$ ; $(-\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{Q}{2R})+(+\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{Q}{R})+(-\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{Q}{r})$

정답 : 1) $-\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{Q}{r}$ , 2) $-\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{Q}{2R}$ , 3) $-\frac{Q}{4\pi\epsilon}(\frac{1}{r}-\frac{1}{2R})$

예제 118 심화

중심이 일치하고 두께를 무시할 수 있는 반지름이 각각 $R$ , $2R$ 인 두 도체구 껍질이 각각 $-Q$ , $+\frac{1}{2}Q$ 전하량으로 대전되어 있다. 스위치 S를 닫아 접지시킨 후 충분한 시간이 지난 상태에서 반지름 $R$ 의 도체구 껍질에 대전된 전하량은? (단, 접지선은 반지름 $R$ 의 도체구 껍질에만 연결되어 있다.)




$R$ 의 도체구 구면의 전위는 0이다. $0=\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{x}{R}+\frac{1}{4\pi\epsilon}\frac{\frac{1}{2}Q}{2R}$

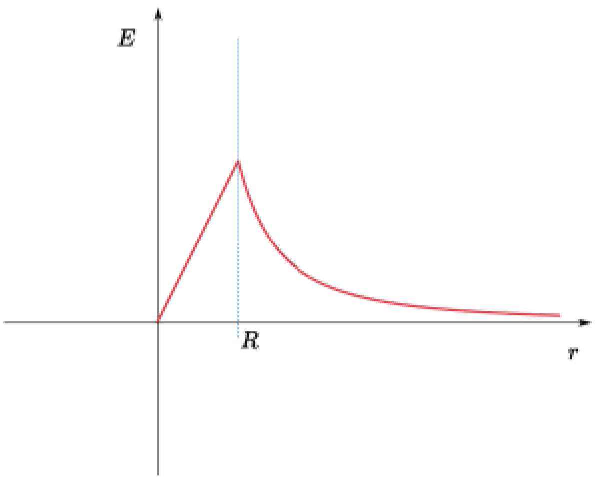
정답 : $-\frac{1}{4}Q$

## 3. 대전된 부도체의 전기장과 전위

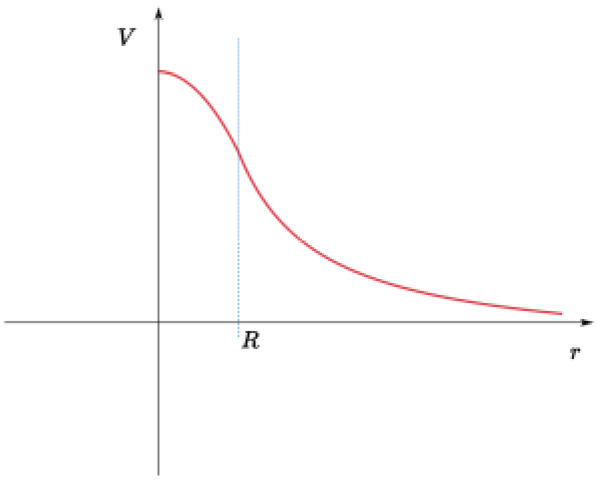
부도체 내부의 전하들은 도체와 달리 이동할 수 없다. 따라서, 부도체의 경우 전하들이 내부와 표면에 존재하게 되며, 전하 밀도는 대전시킨 방법에 따라 균일하거나 불균일하다.

전하량 $+Q$ 로 균일하게 대전된 반지름 $R$ 의 부도체구를 가정한다.

| | 전기장 | 전위 |
|---|---|---|
| 부도체 외부 $(r>R)$ | $E=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r^2}$ | $V=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r}$ |
| 부도체 표면 $(r=R)$ | $E=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{R^2}=\frac{\rho R}{3\epsilon_0}$ ($\rho$ : 부피 전하밀도) | $V=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{R}=\frac{\rho R^2}{3\epsilon_0}$ |
| 부도체 내부 $(r<R)$ | $E=\frac{\rho r}{3\epsilon_0}$ | $V=\frac{\rho}{2\epsilon_0}R^2-\frac{\rho}{6\epsilon_0}r^2$ |




▲ 대전된 부도체구의 전기장




▲ 대전된 부도체구의 전위

※ 심화 중력장 가우스 법칙 : 중력($G\frac{Mm}{r^2}$)과 전기력($k\frac{Qq}{r^2}$)은 발생 원인(질량, 전하량)에서만 차이가 있을 뿐, 공간에서 갖는 물리적 특성이 동일하다. 따라서, 부피 전하 밀도가 일정한 부도체구의 가우스 법칙 정리는 질량 밀도가 일정한 구에 그대로 적용할 수 있다. 중력장에 대한 가우스면에 작용하는 중력장 총합은 가우스면 내부 알짜 질량에 비례한다.

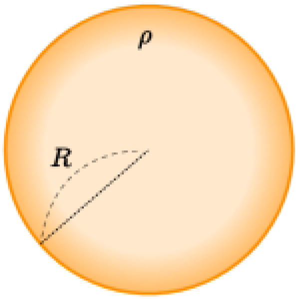
$$\Phi_g=\oint g dS=4\pi GM_{in}\ ;\ g=\frac{\Phi_g}{\oint dS}=\frac{4\pi GM_{in}}{\oint dS}$$

밀도 $\rho$ 가 일정하고, 반지름이 $R$ , 질량이 $M$ 인 구(지구) 내부 중력장 ($\rho=\frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$)

$$g=\frac{4\pi G}{4\pi r^2}\times(\rho\times\frac{4}{3}\pi r^3)=\frac{4\pi G\rho}{3}r=\frac{GM}{R^3}r \quad (\text{지구 표면 } g=\frac{GM}{R^2})$$

예제 119

속이 찬 반지름이 $R$ 인 부도체구에 전하 $Q$ 가 균등한 부피전하밀도 $\rho$ 로 대전되어 있다. 공간의 유전율은 $\epsilon$ 이다.




1) 부도체 표면의 전기장의 세기는?

2) 표면으로부터 거리 $R$ 에서 전기장의 세기는?

3) 부도체 내부의 전기장의 세기는?

1) $E = \dfrac{1}{4\pi R^2}\dfrac{Q}{\epsilon} = \dfrac{1}{4\pi R^2}\dfrac{(\rho \times \frac{4}{3}\pi R^3)}{\epsilon} = \dfrac{\rho R}{3\epsilon}$

2) $E = \dfrac{1}{4\pi (2R)^2}\dfrac{Q}{\epsilon} = \dfrac{1}{4\pi (2R)^2}\dfrac{(\rho \times \frac{4}{3}\pi R^3)}{\epsilon} = \dfrac{\rho R}{12\epsilon}$

3) $E = \dfrac{1}{4\pi r^2}\dfrac{Q_{in}}{\epsilon} = \dfrac{1}{4\pi r^2}\dfrac{(\rho \times \frac{4}{3}\pi r^3)}{\epsilon} = \dfrac{\rho r}{3\epsilon}$

정답 : 1) $\dfrac{\rho R}{3\epsilon}$ , 2) $\dfrac{\rho R}{12\epsilon}$ , 3) $\dfrac{\rho r}{3\epsilon}$

# Chapter 02 직류 회로

## 전기 에너지

[주요 전기 회로 장치]

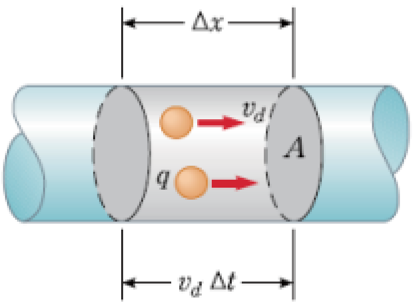
| 직류 전원 | 교류 전원 | 저항($R$) | 축전기($C$) | 코일($L$) | 전류계 | 전압계 |
|---|---|---|---|---|---|---|
|  |  |  |  |  |  |  |

### 1. 전류, 전압, 저항

1) 전류($I$) : 도선에 흐르는 전기의 양 ∝ 도선에 흐르는 전자의 양

- 전류의 세기 : 단위 시간 (1초) 동안 도선의 한 단면을 통과하는 전하($C$)의 양

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \qquad [A = C/s]$$




▲ 평균 전류

※ 도체 내 평균 전류 ($I_{av}$)

단위 부피당 전하 운반자의 수를 $n$ 이라 하면, 부피 속에 있는 전하 운반자의 수는 $nA\Delta x$ 이다. 전하 운반자의 전하량을 $q$ 라 할 때, 부피 속에 있는 총 전하 $\Delta Q = (nA\Delta x)q$ 이다.

전하 운반자가 속력 $v_d$ 로 이동한다면, 이들 전하 운반자가 시간 $\Delta t$ 동안 $x$ 방향으로 이동한 거리는 $v_d\Delta t$ 이다.

따라서, 도체 내 평균전류는 $I_{av} = \dfrac{\Delta Q}{\Delta t} = nqv_dA$ 이다.

(전하 운반자의 평균 속력 $v_d$ 를 유동 속력이라 한다.)

- 전류의 방향 : 양전하(+)의 이동 방향 ; 전원 장치의 (+)극에서 나와 (-)극으로 들어간다.
- 전류 밀도($J$) : 단위 면적당 전류

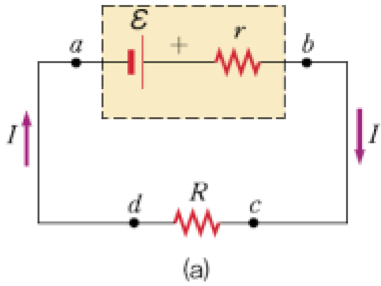
$$J = \frac{I}{S} \qquad [A/m^2]$$

$J$ : 전류 밀도, 단위 , $I$ : 전류 , $S$ : 면적

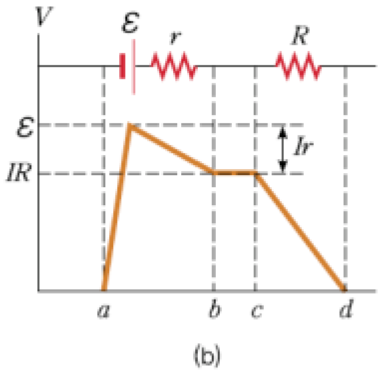
$$(I = \int J\, dS)$$

2) 전압($V$)(=전위차) : 도선에 전류를 흐르게 하는 원인, 단위 : [$V$]

- 기전력 : 전위차를 유지하는 능력 (전지의 능력), 전지의 기전력($E$)은 전지 양단에 공급할 수 있는 최대의 전위차를 의미한다.



(a)



(b)

내부 저항이 0인 이상적인 전지의 경우, 전지 양단의 전위차(단자 전압)는 전지의 기전력과 같다. 그러나 전류가 흐르는 회로 내의 실제 전지에 있어서 단자 전압은 기전력과 같지 않다.

그림 (a)에서 전지의 기전력 $E$와 내부 저항 $r$로 표현되어 있다. $a$에서 $b$로 진행하며 전위를 측정한다면, 음극에서 양극 단자로 지나갈 때 전위는 $E$만큼 증가한다. 그리고 내부 저항 $r$을 통해서 지나갈 때 전위는 $Ir$만큼 감소한다. 그러므로 전지의 단자 전압 $V = V_b - V_a = E - Ir$ 이다.

그림 (b)는 회로에서 시계 방향으로 진행하며 측정한 전위의 변화를 나타낸 것이다. 따라서, 기전력 $E$는 다음과 같이 표현된다.

$$E = IR + Ir,\ I = \frac{E}{R+r}$$

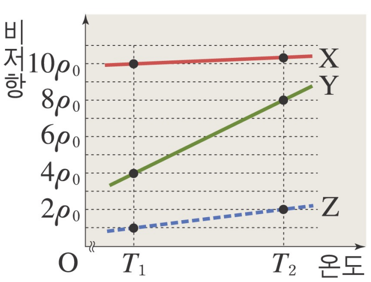
3) 저항($R$) : 전류의 흐름을 방해하는 정도

| |
|---|
| $R = \rho\frac{l}{S}$ [$\Omega$] $R$ : 저항, $\rho$ : 비저항, $l$ : 길이, $S$ : 단면적 |

- 비저항과 전류 밀도

| |
|---|
| $E = \rho J$ ; $\gamma = \frac{1}{\rho}$ ; $J = \frac{1}{\rho}E = \gamma E$ ($E$ : 전기장, $\rho$ : 비저항, $J$ : 전류 밀도, $\gamma$ : 전기전도도) |

- 온도와 저항



▲ 온도와 비저항

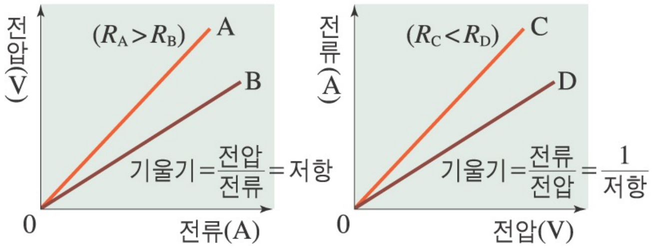
〈온도와 저항을 선형 비례관계로 가정할 경우〉

$\rho - \rho_0 = \rho_0\alpha(T - T_0)$ ; $\rho = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0))$ ($\alpha$ : 온도 상수)

일반적으로 온도가 높아지면 물질을 구성하는 원자의 진동이 활발해져서 전자와의 충돌 횟수가 많아지기 때문에 저항이 커진다.

**2. 옴의 법칙** : 저항체에 흐르는 전류의 세기는 저항체 양단의 전압에 비례하고 저항체의 전기저항에 반비례한다.

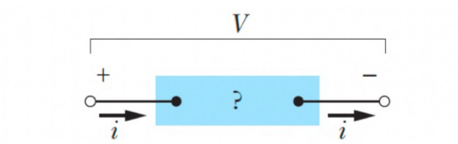
$$I=\frac{V}{R}\ ,\ V=IR$$




▲ 옴의 법칙

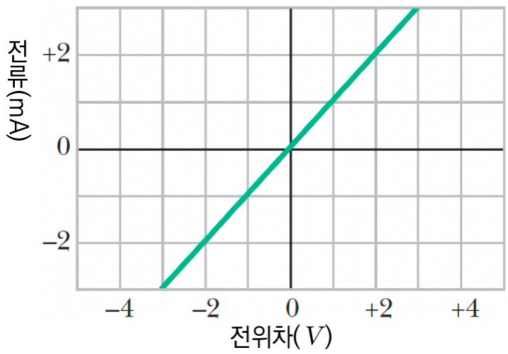
1) 저항을 기준으로 한 옴의 법칙의 의미 : 저항기 양 끝에 전압(전위차)를 걸어 전류를 발생시킬 때, 전압에 대한 전류의 변화율은 항상 일정하다. 즉, 옴의 법칙은 저항(전도 장치)을 통해 흐르는 전류가 저항에 걸린 전위차(전압)에 정비례한다는 것이다.

2) 옴의 도체와 비옴의 도체 : 옴의 도체는 저항이 일정한 도체이고, 비옴의 도체는 저항이 일정하지 않은 도체



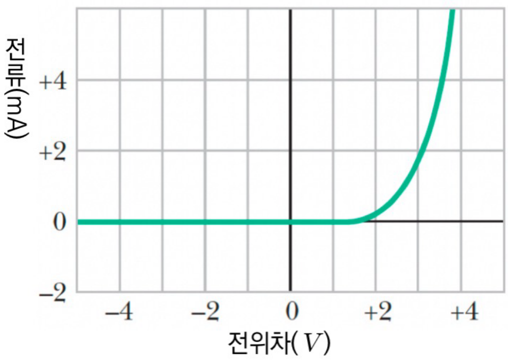

(a)

(a) 저항값이 있는 전도 장치에 전류가 흐르기 위해서는 전도 장치 양단에 전위차가 발생하여야 한다.




(b)

(b) 전도 장치의 저항이 전위차의 크기나 방향(극성)에 무관하면 옴의 법칙을 따른다. ($I=\frac{V}{R}$) 또는 전도 물질의 저항이 전기장의 크기나 방향에 무관하면 옴의 법칙을 따른다. ($J=\frac{E}{\rho}$)

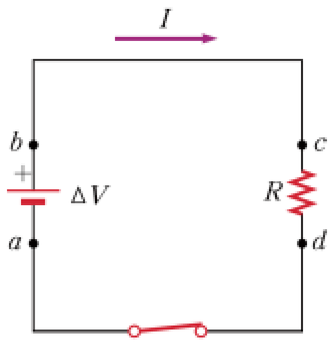



(c)

(c) 그러나 p-n 접합 다이오드처럼 비옴의 도체는 옴의 법칙을 따르지 않는다. 다만, 비옴의 도체에서도 저항의 정의식은 그대로 적용한다.

**3. 전력**($P$) : 단위 시간 동안 공급되거나 소비되는 전기 에너지의 양(일률)

$$P = VI = \frac{V^2}{R} = I^2R \quad [W]$$



▲ 저항의 소비 전력

점 $a$ 로부터 시계 방향으로 양전하 $Q$ 가 전지와 저항기를 통해 이동하여 점 $a$ 로 되돌아온다. 전하가 $a$ 에서 $b$ 로 움직일 때 전기적 퍼텐셜 에너지는 $Q\Delta V$ 만큼 증가하고, 전지 내 화학 에너지는 같은 양만큼 감소한다. 전하가 $c$ 에서 $d$ 로 저항을 통해 이동할 때 저항 내의 원자들과 전자들이 충돌하는 동안 에너지는 소모된다. 전하 $Q$ 가 저항을 통과할 때 전기적 위치 에너지를 잃는 비율은 다음과 같다.

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d(Q\Delta V)}{dt} = \frac{dQ}{dt}\Delta V = I\Delta V$$

따라서 저항기에서 소모되는 에너지 비율은 $P = I\Delta V = I^2R = \dfrac{(\Delta V)^2}{R}$ 이다.

**4. 전력량**($W$) : 임의의 시간 동안 총 소비되는 전기 에너지의 양

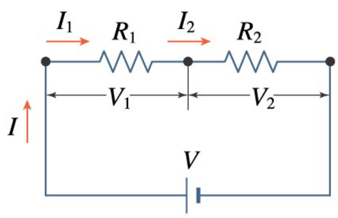
$$W = Pt \quad (1\,Wh = 3600\,Ws = 3600J)$$

## 저항의 연결

**1. 저항의 연결**

1) 직렬 연결 : 각 저항에 흐르는 전류의 세기는 같고, 전체 전압은 각 저항에 걸리는 전압의 합과 같다.

- 저항을 연결할수록 전체 저항은 증가하며, 소비 전력은 저항에 비례한다.



▲ 저항의 직렬 연결

| | |
|---|---|
| 전류 | $I = I_1 = I_2$ |
| 전압 | $V = V_1 + V_2$ |
| 합성 저항 | $R = R_1 + R_2$ |

13420
9 791198 695123
ISBN 979-11-986951-2-3

정가 : 29,000원