인하대학교
INHA UNIVERSITY

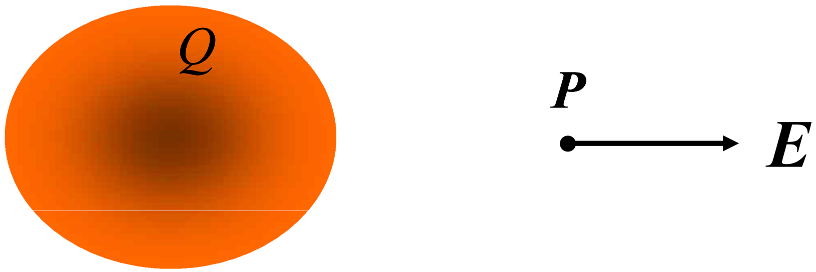
일반물리학

제16장. 가우스 법칙과 전위

목차

들어서며

- 가우스 법칙 - 쿨롱의 법칙의 또 다른 수학적 표현
  - [가우스법칙 ≡ 쿨롱의 법칙]
- 연속적 전하분포를 가지는 경우, 전기장의 계산

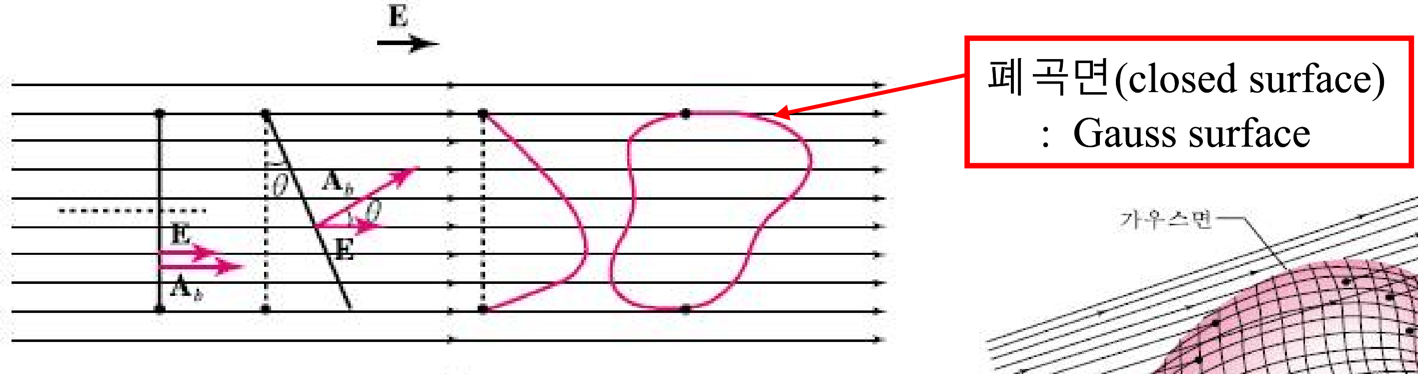


  - 쿨롱의 법칙 : 대부분의 경우에 비실용적
  - 가우스 법칙 : **대칭성**이 있는 경우에 매우 편리
- 전위 (스칼라) ↔ 전기장(벡터) [에너지 ↔ 힘]

전위 = 단위전하당 전기 위치에너지

선속(flux) - flow

- 면(surface)을 통과하는 물리량



(a)

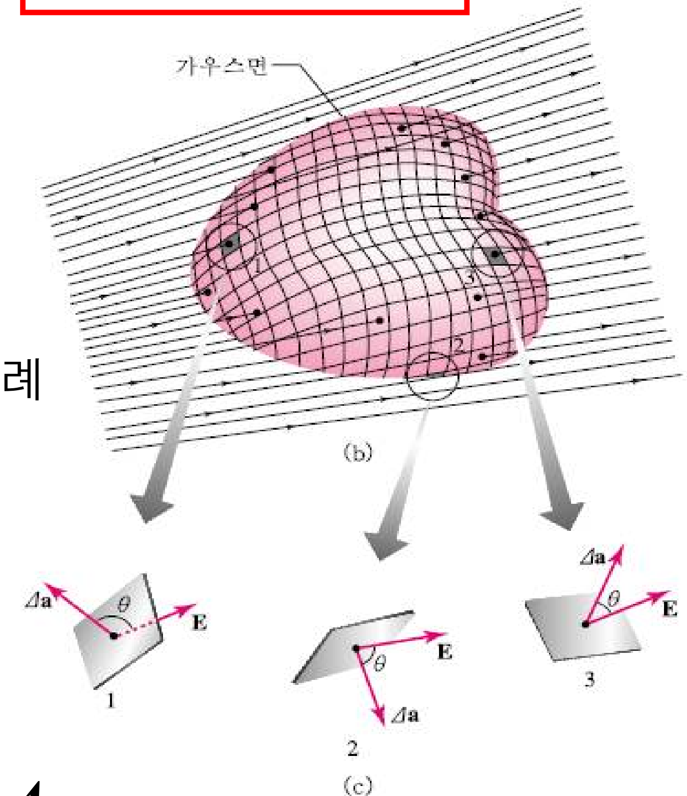
유량

- 단위시간당 통과한 물의 량 - 속도, 면적에 비례

$$\Phi = vA_\theta = vA\cos\theta = \boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{A}$$

면적벡터

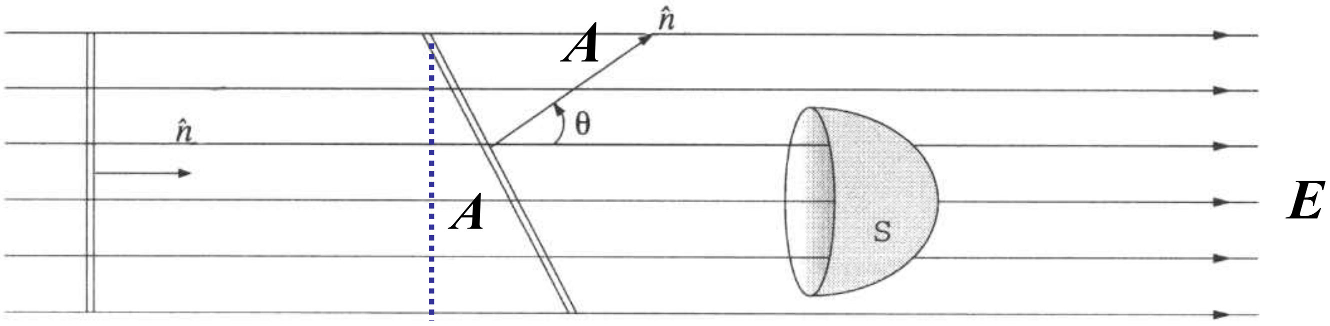
- 크기 - 면적에 비례
- 방향 - 면에 수직한 방향
- 면적벡터를 이용한 선속의 표현: $\Phi = \int \boldsymbol{v} \cdot d\boldsymbol{A}$



▲ 그림 16.1 | 면벡터와 선속

선속(flux)

- 면(surface)을 통과하는 선(line)들의 다발



- 전기선속 $\Phi_S = EA\cos\theta$ [면을 통과하는 전기력선 다발]
  - 면벡터 $\boldsymbol{A}$ 의 경우: [크기 - 면의 넓이, 방향 - 면에 수직 방향]

$$\Phi_S = \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{A}$$

  - 일반적인 곡면에서 균일하지 않은 전기장의 경우

$$\Phi_S = \int_S \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{a}$$

예제 16.1 평면의 전기선속

z축을 향하는 균일한 전기장 $\boldsymbol{E} = E_0\boldsymbol{k}$가 있다. 면 S가 xy평면에 놓인 넓이가 A인 면일 때 이 면 S를 통과하는 전기선속은 얼마인가?

풀이]

- 면 S의 면벡터(면벡터 방향에 따라 차이)

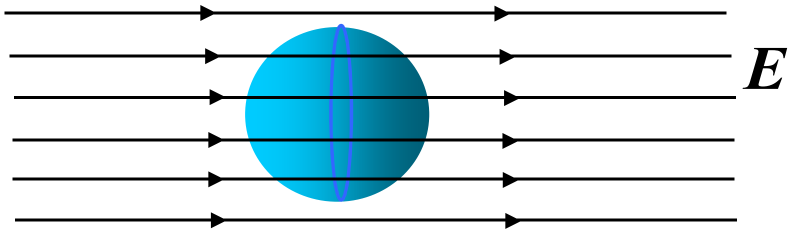
$$\boldsymbol{A} = A\boldsymbol{k} \qquad \left(\text{or } \boldsymbol{A} = -A\boldsymbol{k}\right)$$

전기선속

$$\Phi_E = \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{A} = E_0 A \qquad (\text{or } \Phi_E = -E_0 A)$$

1. 가우스 법칙

폐곡면(가우스 면)을 통과하는 전기선속 [균일한 전기장]

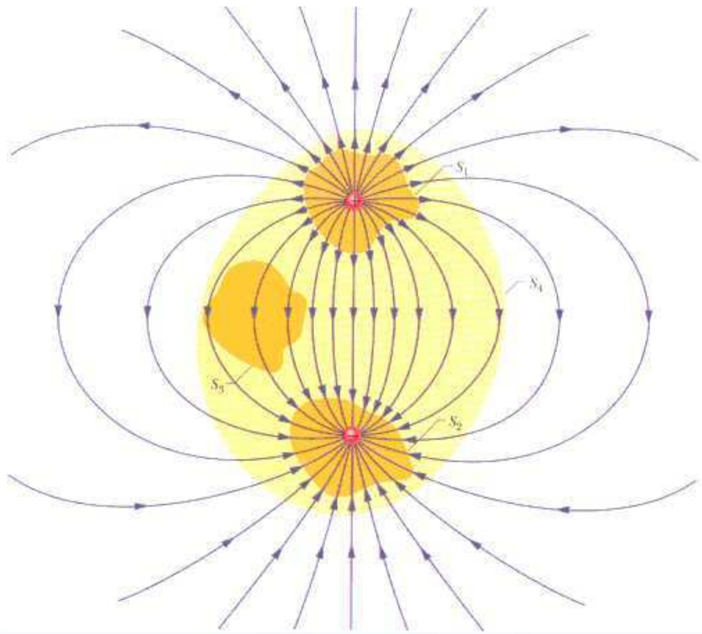


- 면벡터의 방향 : 폐곡면 안에서 바깥으로 나가는 방향
- $\Phi_S = \oint_S \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{a} = 0$ [나가는 전기력선 수 - 들어오는 전기력선 수]

가우스 법칙

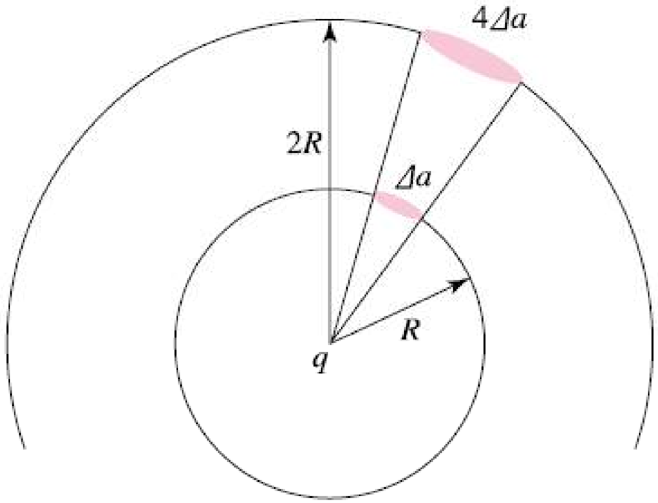
$$\Phi_S = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

(q : 폐곡면 S 내부에 있는 전하의 총합)



점전하의 전기력선

- 점전하 q 를 중심으로 하는 반지름 r 인 가우스 면 S



▲ 그림 16.2 | 점전하를 중심으로 한 임의의 공

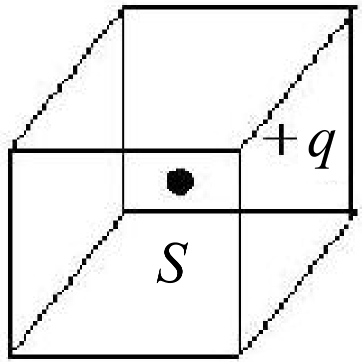
의 $\begin{cases} \text{크기 :} \quad \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q}{r^2} \ \text{[일정]} \\ \text{방향 :} \quad \mathrm{d}\boldsymbol{a} \ \text{와 같은 방향} \end{cases}$

$$\Phi_S = \oint_S \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{a} = \oint_S E\ \mathrm{d}a = E\oint_S \mathrm{d}a = E\cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

예제 16.2 점전하들의 전기선속

아래 그림과 같이 점전하 q가 한 변이 a인 정사각형의 중심으로부터 $a/2$만큼 떨어져 있다. 정사각형 면을 통과하는 전기선속을 구하여라.

풀이]



- 정육면체 전체에 대한 전기선속

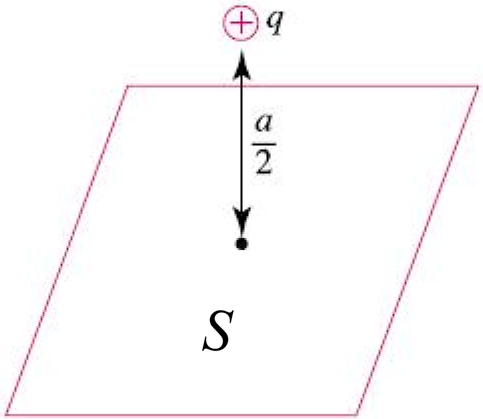
$$\Phi_{tot} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

면 하나를 통과는 전기선속 : 점전하의 위치에 따라 차이

만약 육면체 중앙에 점전하 q가 있다면 대칭성에 의해 각 면에 대한 선속은 동일

정사각형 한 면을 통과하는 전기선속

$$\Phi_S = \frac{\Phi_{tot}}{6} = \frac{q}{6\varepsilon_0}$$

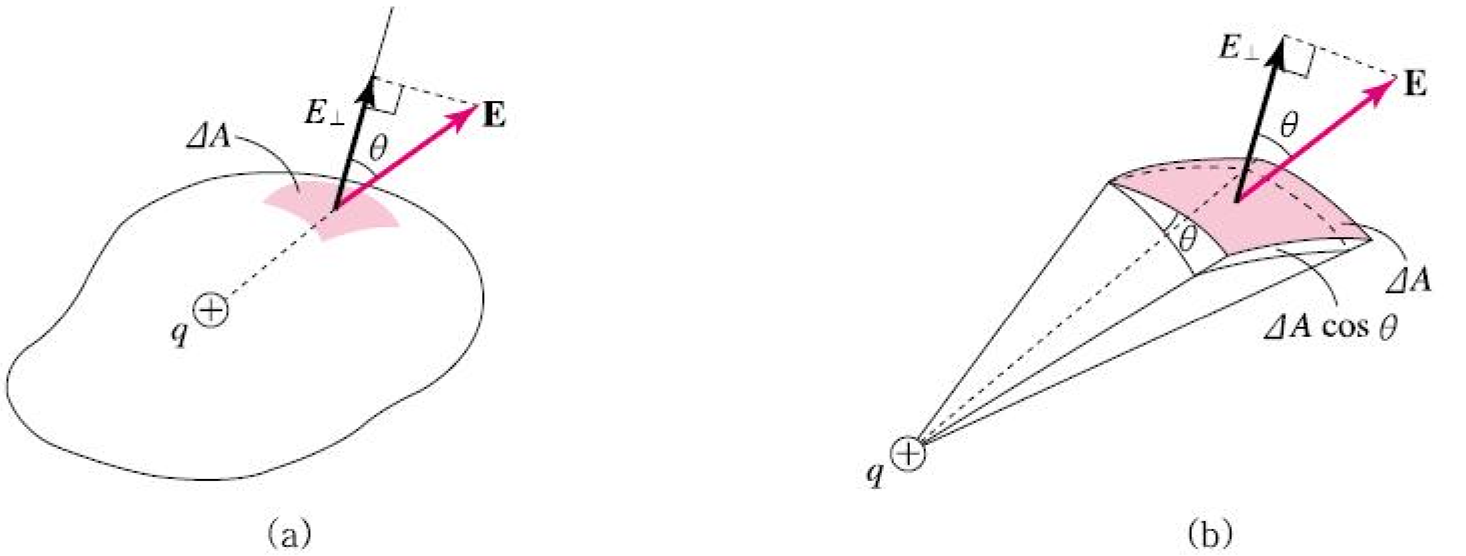


일반적인 가우스 면에서도 가우스 법칙 성립

$$\boxed{\varepsilon_0 \oint_S \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{a} = q}$$

[주의: q 는 가우스면 내부의 전하량]

$$\sum \boldsymbol{E} \cdot \Delta \boldsymbol{A} = \sum E \Delta A \cos\theta = \frac{q}{\varepsilon_0}$$



▲ 그림 16.3 | 임의 모양 폐곡면과 그 선속

2. 가우스 법칙의 응용

가우스 법칙

- 전하 분포가 대칭성을 가짐
- 대칭성 있는 전하 분포에 의한 전기력선
  - 전하분포의 대칭성에 의해 대칭성이 결정됨.

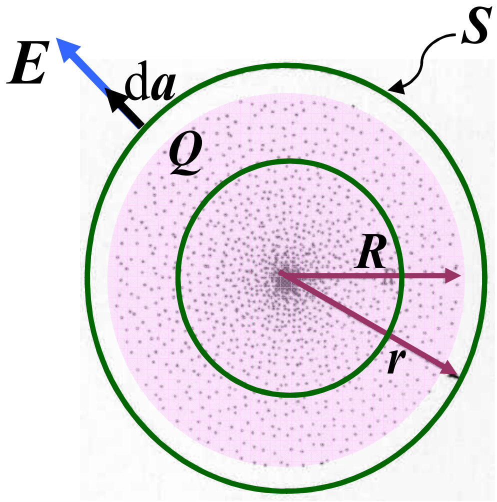
가우스 면 설정의 단계

- 계의 대칭성으로부터 전기장의 방향을 추측해 본다.
  어떤 점에서 전기장의 방향은 그 점에 양전하를 놓았을 때
  그 양전하가 이동하는 방향과 같다.
- 추측된 전기장의 방향과 수직이 되거나
  같은 면벡터 방향을 갖는 면들을 알아본다.
- 각각의 면에서 전기장의 세기가 같도록 면을 설정한다.

구대칭, 면대칭, 선대칭 전하분포계의 전기장

구대칭 전하분포

*S*면 위의 모든 점에서 전기장의 크기는 같으며, 방향은 그 점에서의 면벡터의 방향과 동일하다.



(i) $r > R$

$$Q = \varepsilon_0 \oint_S \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{a} = \varepsilon_0 \oint_S E \mathrm{d}a = \varepsilon_0 E \oint_S \mathrm{d}a = \varepsilon_0 E 4\pi r^2$$

$$\therefore E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

[원점에 점 전하 *Q*가 놓여 있을 때와 동일]

(ii) $r < R$

$$Q\left(\frac{r}{R}\right)^3 = \varepsilon_0 \oint_S \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{a} = \varepsilon_0 E 4\pi r^2 \;\therefore E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{R^3} r$$

[$E \propto r$]

예제 16.3 구대칭 전하 분포의 전기장

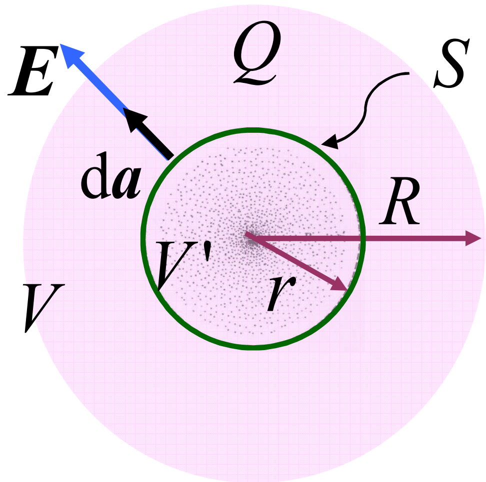
인하대학교

반지름이 R인 절연된 구에 전하량 Q가 균일하게 분포되어 있다. 구의 중심으로부터 $R/3$만큼 떨어진 곳에서 전기장의 크기는 얼마인가?

풀이]

- 구 내부의 전하밀도

$$\rho = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$



반지름 $R/3$인 가우스면 내부의 총 전하 량

$$q = \rho V' = \frac{Q}{\frac{4}{3}\pi R^3}\frac{4}{3}\pi\left(\frac{R}{3}\right)^3 = \frac{Q}{27}$$

$$\varepsilon_0 \oint_S \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{a} = \varepsilon_0 E 4\pi (R/3)^2 = q$$

$$\therefore E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{9}{R^2}\frac{Q}{27} = \frac{1}{12\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{R^2}$$ (방향 : 가우스면에서 나가는 방향)

예제 16.4 공기 중의 전하밀도

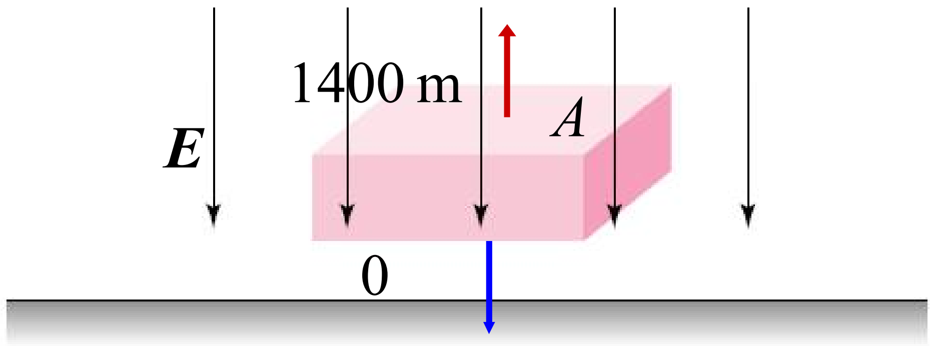
그림 16.5와 같이 지표면 근처의 전기장 방향은 지표면을 향하는 것으로 알려져 있다. 평범한 날 지표면에서의 전기장은 약 200 N/C의 세기인 것으로 알려져 있다. 그러나 1,400 m 상공에서의 전기장 세기는 20 N/C로 약해진다. 지표면으로부터 1,400 m 상공까지의 평균 부피전하밀도는 얼마인가?

풀이]

- 지표면과 나란히 놓인 직육면체 가우스면의 전기선속

$$\Phi_S = \Phi_0 + \Phi_{1400} = Q/\varepsilon_0$$

$$\Phi_0 = \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{A} = E_0 A$$
$$= 200A\ \mathrm{N\cdot m^2/C}$$

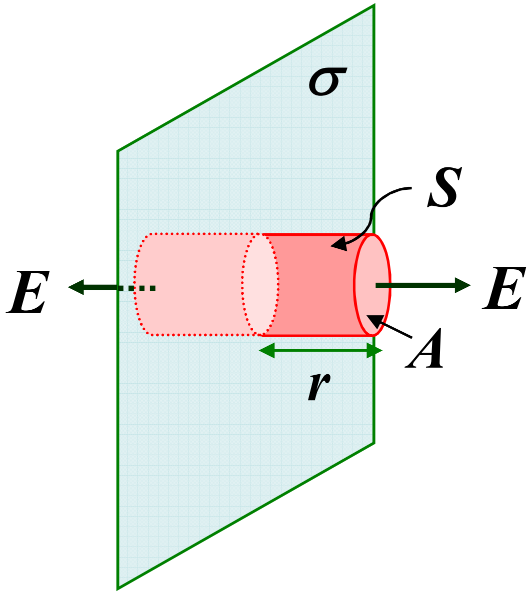


▲ 그림 16.5 | 지표면 근처의 전기장

$$\Phi_{1400} = \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{A} = -E_{1400}A = -20A\ \mathrm{N\cdot m^2/C}$$

$$\Phi_S = 180A\ \mathrm{N\cdot m^2/C} = \frac{\rho V}{\varepsilon_0} = \frac{1400A\rho}{\varepsilon_0} \qquad \therefore \rho = 1.1\times10^{-12}\ \mathrm{C/m^3}$$

면대칭 전하분포



[균일하게 대전된 무한히 넓은 평면]

면전하밀도 : σ

S의 둥근면: $\mathbf{E} \perp \mathrm{d}\boldsymbol{a}$

S의 양쪽면: $\mathbf{E} // \mathrm{d}\boldsymbol{a}$ [$\mathbf{E}$는 일정]

$$Q = \sigma A = \varepsilon_0 \oint_S \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{a} = \varepsilon_0 \int_{\text{양쪽면}} E\, da = 2\varepsilon_0 EA$$

$$\therefore \quad E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

[거리 r에 관계없이 일정]

예제 16.5 부호가 반대인 두 무한전하평면에 의한 전기장

균일한 면전하밀도 σ와 −σ로 각각 대전된 두 무한전하평면이 나란히 놓여 있다. 모든 공간에서 전기장의 세기를 구하여라.

풀이]

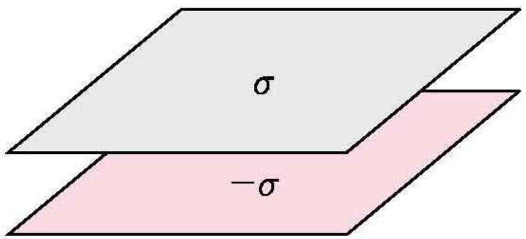
- 무한 평면전하에 의한 전기장

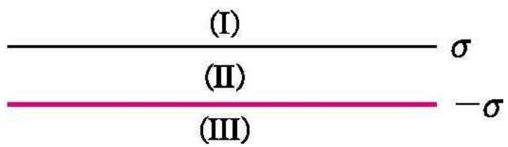
$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

중첩의 원리를 이용하여

(i) 축전기 외부 (I, III)

$$\frac{\sigma}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = 0$$





(ii) 축전기 내부 (II)

$$\frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

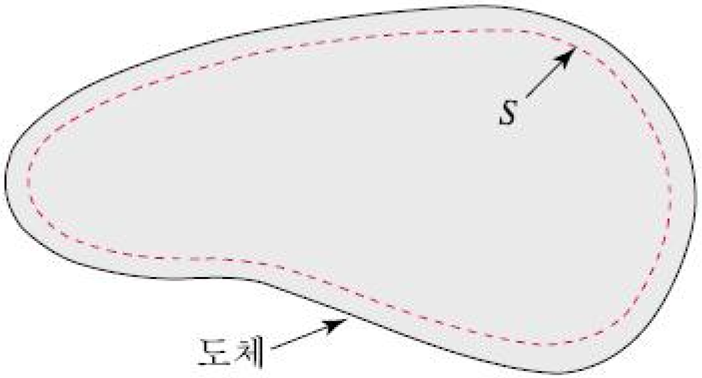
방향: 양전하의 면으로부터 음전하의 면을 향함

도체에서의 전하분포

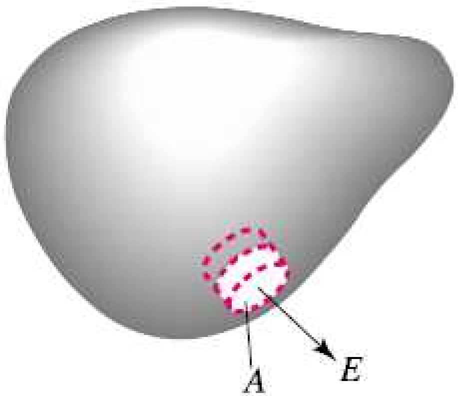
- 도체내의 전기장 $\boldsymbol{E} = 0$ [정전상태]
- 도체 표면 안쪽에 매우 가까운 가우스면 S

  - 가우스면 내부의 총전하 $= 0$

  - 도체에 주어진 알짜 전하는 모두 도체 표면에만 분포



▲ 그림 16.7 | 도체 내부의 가우스면



▲ 그림 16.8 | 대전된 도체와 가우스면

예제 16.6 도체 내의 전기장

매우 큰 도체 덩어리 안에 반지름이 R인 구 모양의 빈 공간이 있으며, 빈 공간의 중심에 점전하 q가 놓여 있다. 점전하에서 (a) $2R$과 (b) $R/2$만큼 떨어진 곳의 전기장을 구하여라.

풀이]

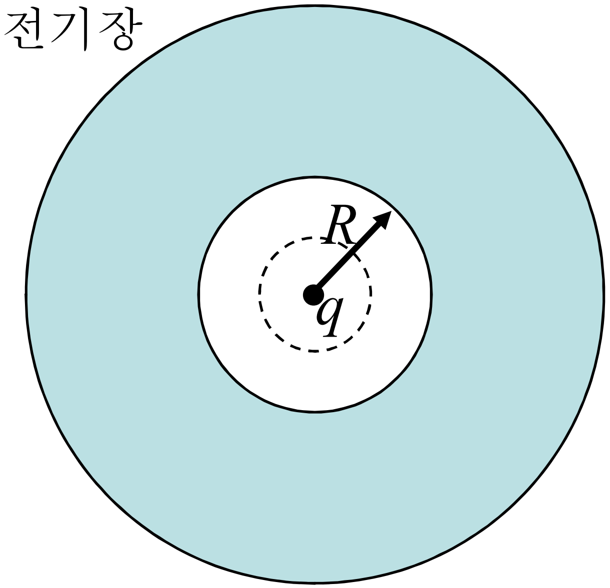
- 정전상태에서 도체 내부의 전기장은 0

$$a)\ E_{2R} = 0$$

$b)$ 빈공간에서의 전기장은 점전하에 의한 전기장

$$E_{R/2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{(R/2)^2} = \frac{1}{\pi\varepsilon_0}\frac{q}{R^2}$$



예제 16.7 평행판 축전기

그림 16.9와 같이 각각 $\pm\sigma$의 면전하밀도로 대전된 두 무한 도체판면이 나란히 놓여 있다. 도체면 사이 공간과 그 외부 공간에서의 전기장을 구하여라. 이때 도체에 주어진 전하는 어떻게 분포되겠는가? 이러한 구조를 평행판 축전기라 부른다.

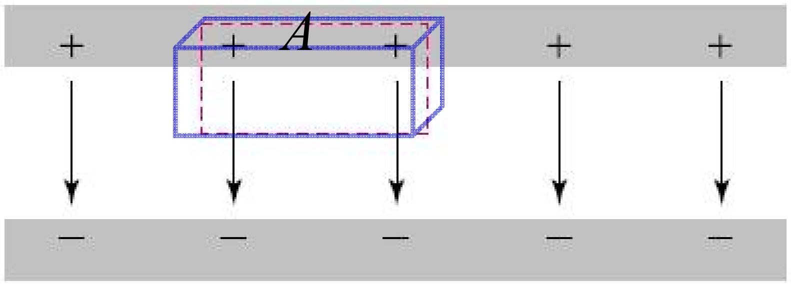
풀이]

- 직육면체의 가우스면을 선택
  - 왼쪽면, 앞면, 오른쪽면, 뒷면 : $\boldsymbol{E} \perp \mathrm{d}\boldsymbol{a}$
  - 윗면 : 도체 내부(q = 0)
  - 아랫면 : $\boldsymbol{E} \,//\, \mathrm{d}\boldsymbol{a}$ [$\boldsymbol{E}$는 일정]

$$Q = \sigma A = \varepsilon_0 \oint_S \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{a}$$

$$= \varepsilon_0 \int_{\text{아랫면}} E\mathrm{d}a = \varepsilon_0 EA$$

$$\therefore \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$



▲ 그림 16.9 | 두 도체면과 가우스면

전하는 모두 서로를 마주 보는 도체면에만 집중

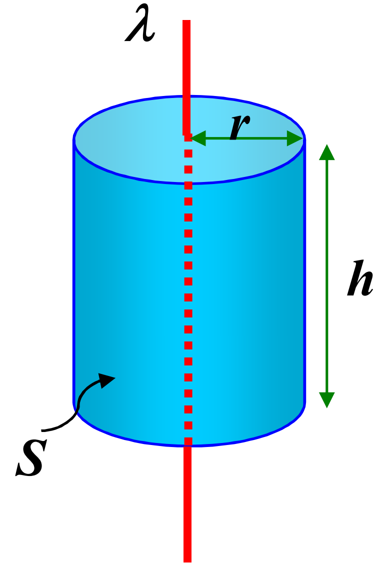
선전하에 의한 전기장

- 선전하밀도 : λ
- S의 둥근면: $\boldsymbol{E} \,//\, \mathrm{d}\boldsymbol{a}$ [$\boldsymbol{E}$ 는 일정]
- S의 양쪽면: $\boldsymbol{E} \perp \mathrm{d}\boldsymbol{a}$

$$Q = \lambda h = \varepsilon_0 \oint_S \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{a} = \varepsilon_0 \int_{\text{둥근면}} E \, \mathrm{d}a = \varepsilon_0 E 2\pi r h$$

$$\therefore \quad E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \frac{\lambda}{r}$$

대단히 긴 줄

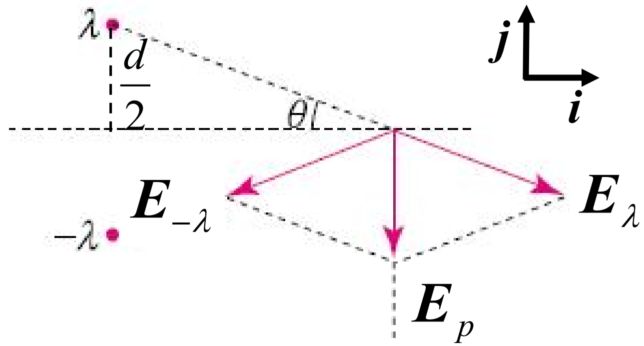


예제 16.8 대전된 두 도선에 의한 전기장

인하대학교

균일한 선전하밀도 λ와 −λ로 반대 부호로 대전된 무한히 긴 두 도선이 나란히 놓여 있으며, 두 도선 사이의 거리는 d이다. 두 도선으로부터 같은 거리만큼 떨어져 있으며 도선 하나로부터 r만큼 떨어진 P점에서 전기장을 구하여라.

풀이]



- 무한도선에서 r 떨어진 곳의 전기장 크기

$$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda}{r}$$

$$\boldsymbol{E}_\lambda = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda}{r}(\cos\theta\,\boldsymbol{i} - \sin\theta\,\boldsymbol{j}) \qquad \boldsymbol{E}_{-\lambda} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda}{r}(-\cos\theta\,\boldsymbol{i} - \sin\theta\,\boldsymbol{j})$$

중첩의 원리에 의해

$$\boldsymbol{E}_P = \boldsymbol{E}_\lambda + \boldsymbol{E}_{-\lambda} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda}{r}[(\cos\theta\,\boldsymbol{i} - \sin\theta\,\boldsymbol{j}) + (-\cos\theta\,\boldsymbol{i} - \sin\theta\,\boldsymbol{j})]$$

$$= -\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda}{r}2\sin\theta\,\boldsymbol{j} = -\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda d}{r^2}\boldsymbol{j} \qquad \left(\because \sin\theta = \frac{d/2}{r}\right)$$

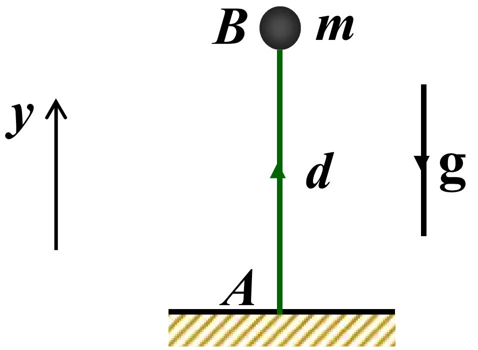
3. 전위 (Electrostatic Potential)

인하대학교

위치에너지 U와 보존력이 하는 일 W

$$U_B - U_A = -W_{AB}$$

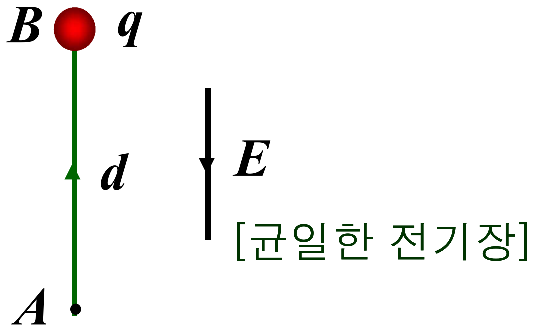
중력의 경우



$$W_{AB} = \int_0^d (-mg)\mathrm{d}y = -mgd$$

$$U_B - U_A = mgd$$

전기력의 경우



$$W_{AB} = \int_0^d (-qE)\mathrm{d}y = -qEd$$

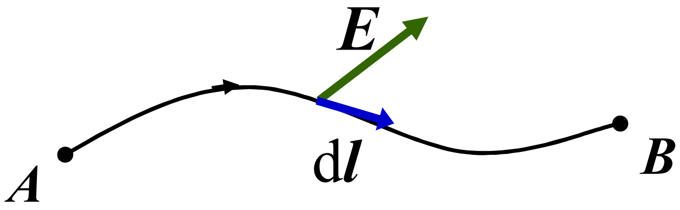
$$U_B - U_A = qEd$$

전위 : 단위 전하당 위치에너지 $V \equiv U / q$ (J/C=V: volt)

전위차 : $V_B - V_A = Ed$ [균일한 전기장]

전위와 전기장

- 일반적인 전기장



전하 q 를 A → B 까지 옮기는데 전기력이 하는 일 W

$$W_{AB} = \int_A^B \boldsymbol{F} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \int_A^B q\boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

$$\boxed{V_B - V_A = -\int_A^B \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}}$$

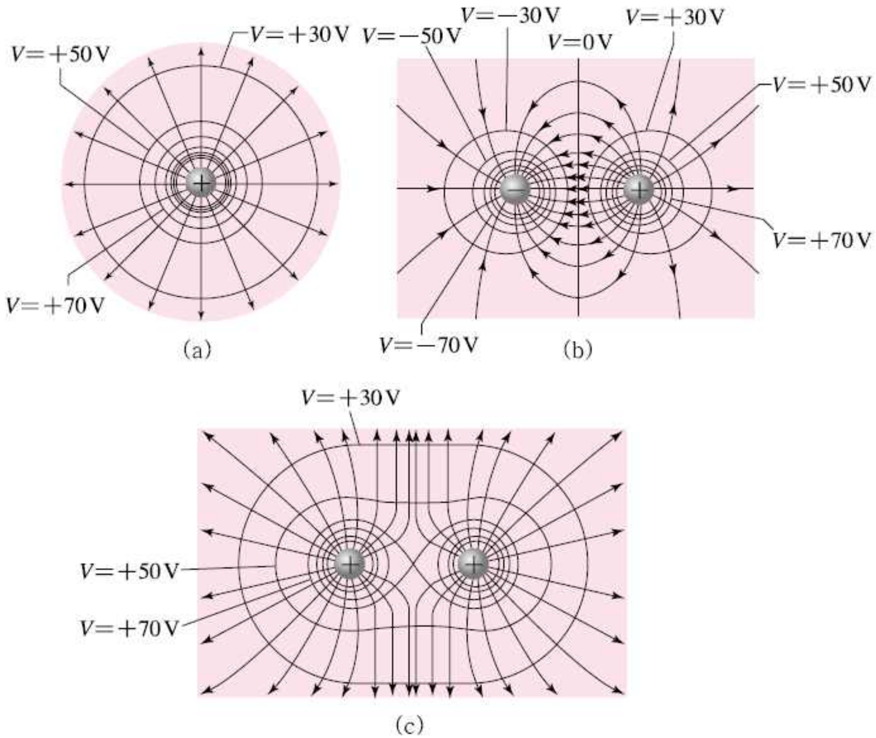
- 전위의 높고 낮음

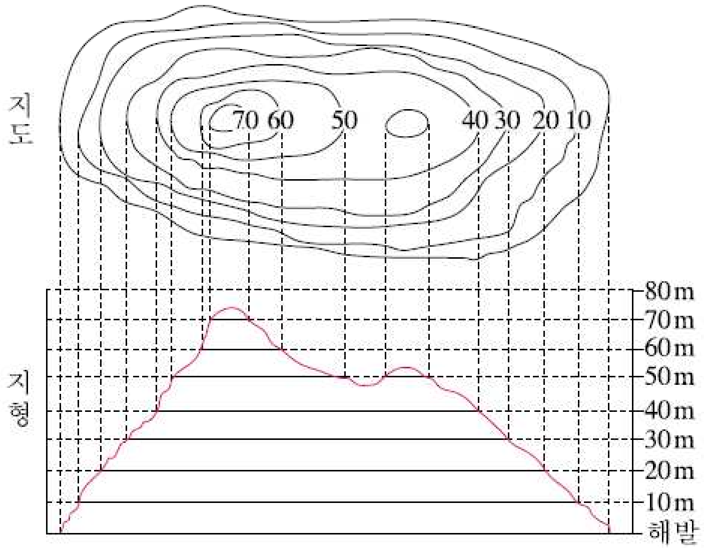
$$\boxed{V_A > V_B \Rightarrow U_A > U_B \quad (q > 0)}$$

[+ 전하는 A(전위가 높은 곳)에서 B(낮은 곳)으로 스스로 움직인다.]

등전위면

- 전위 값이 같은 점들이 만드는 면
- 등전위면 ⊥ 전기장
- 등고선과 유사





▲ 그림 16.11 | 등전위면과 등고선

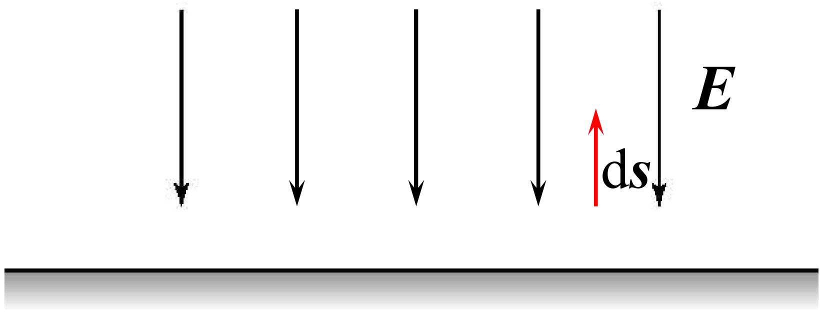
예제 16.9 지표면 근처에서 전위 계산

지표면에는 하늘에서 지표면을 향하는 전기장이 있다. 그 전기장 세기는 약 150N/C이라 한다. 지표면의 전위를 0이라 할 때 지상 10m 높이의 전위는 얼마인가?

풀이]

- 전기장과 전위 관계

$$\Delta V = -\int_i^f \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{s}$$



$$V(10\,\mathrm{m}) - V(0) = -\int_0^{10\,\mathrm{m}} \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{s} = \int_0^{10\,\mathrm{m}} E ds$$

$$= E\int_0^{10\,\mathrm{m}} ds = El = (150\mathrm{N/C})(10\mathrm{m}) = 1500\mathrm{V}$$

$$\therefore V(10\,\mathrm{m}) = 1500\ \mathrm{V}$$

예제 16.10 전기장이 입자에 행한 일

$q = 3.0$ nC의 전하를 갖는 입자가 a점에서 b점으로 직선을 따라 총 거리 $d = 0.5$ m를 움직이고 있다. 전기장은 이 직선을 따라 변하는 동안 a에서 b로 향하는 방향을 가지며, 크기는 $E = 200$ N/C으로 균일하다. q에 작용하는 힘을 구하고, 전기장이 입자에 행한 일을 구하고 그리고 $V_a - V_b$의 전위차를 구하여라.

풀이]

- 전기장내 전하가 받는 힘의 크기

$$F = qE = (3.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})(200\,\mathrm{N/C}) = 6.0\times10^{-7}\,\mathrm{N}$$

힘이 한 일

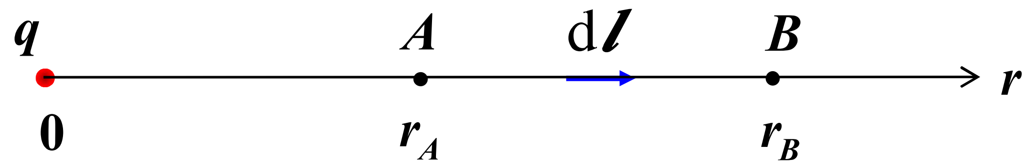
$$W_E = \int \boldsymbol{F}\cdot d\boldsymbol{s} = Fd = (6.0\times10^{-7}\,\mathrm{N})(0.5\,\mathrm{m}) = 3.0\times10^{-7}\,\mathrm{J}$$

전위차

$$V_a - V_b = \frac{W_E}{q} = \frac{3.0\times10^{-7}\,\mathrm{J}}{3.0\times10^{-9}\,\mathrm{C}} = 100\,\mathrm{V}$$

or $V_b - V_a = -\int_a^b \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{s} = -Ed = -(200\,\mathrm{N/C})(0.5\,\mathrm{m}) = -100\,\mathrm{V}$

점전하의 전위

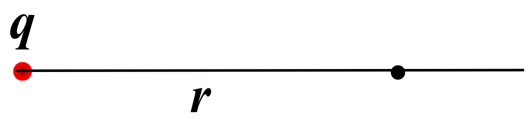


$$\boldsymbol{E} // \mathrm{d}\boldsymbol{l} \quad \text{and} \quad E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2} \qquad (\mathrm{d}l = \mathrm{d}r)$$

$$|\Delta V| = \left| -\int \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} \right| = \left| \int_{r_A}^{r_B} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\,dr \right| = \left| \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r} \right|_{r_A}^{r_B} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{q}{r_B} - \frac{q}{r_A}\right]$$

$$V_A = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r_A} \quad \left(\because r_B = \infty \quad \Rightarrow \quad V_B = V_\infty = 0\right)$$

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}$$



예제 16.11 여러 개의 점전하에 의한 전위

인하대학교

전하량이 q인 동일한 점전하 6개가 평면 위에 있으며 한 변이 a인 정육각형을 형성하고 있다. 육각형의 중심에서의 전위를 구하여라.

풀이]

- 점전하에서 r 떨어진 곳의 전위

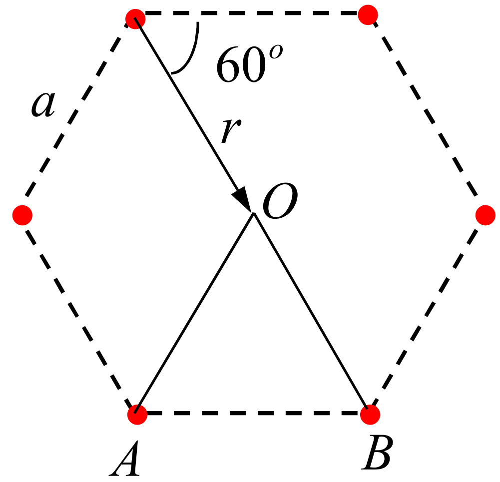
$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}$$

삼각형 ABO : 정삼각형

$r = a$

전위는 스칼라량이며, 중첩의 원리에 의해

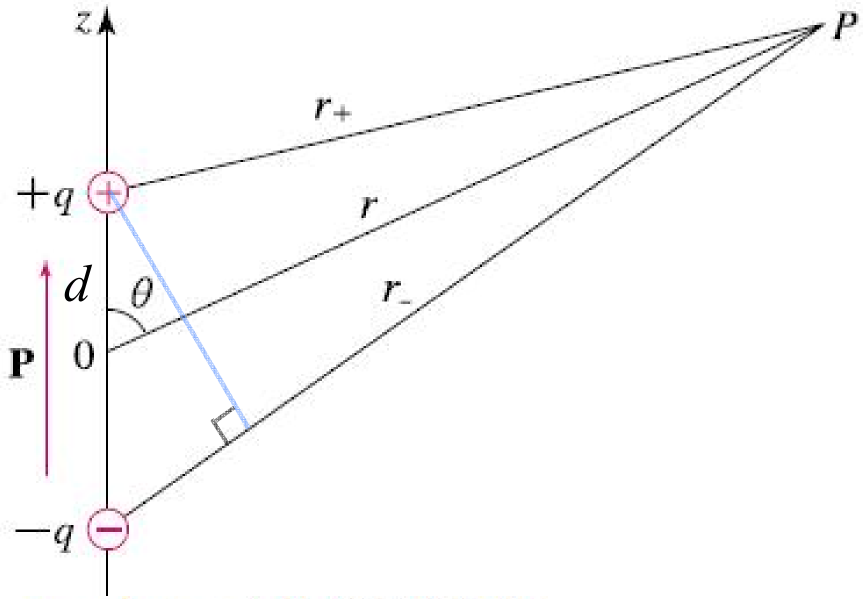
$$V_O = 6\times\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{a} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{6q}{a}$$



예) 전기쌍극자의 전위

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q}{r_+} - \frac{q}{r_-}\right) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{r_- - r_+}{r_- r_+}\right)$$

$$\cong \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{p\cos\theta}{r^2} \quad \text{for} \quad r >> d$$



▲ 그림 16.12 | 전기쌍극자의 전위

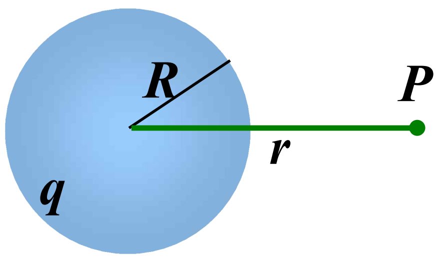
4. 전위의 계산

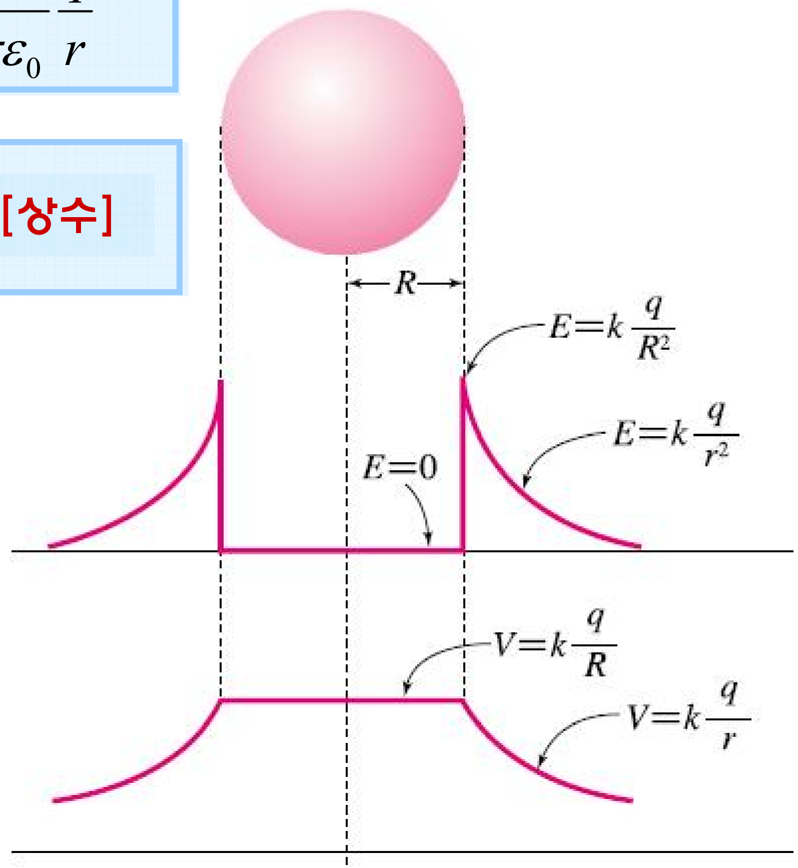
예) 도체구의 전위

[전하 q는 도체 표면에 고르게 분포]

(i) $r > R$: $E = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q}{r^2}, \quad V = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q}{r}$

(ii) $r < R$: $E = 0, \quad V = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q}{R}$ **[상수]**

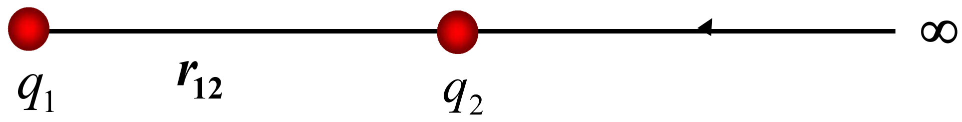




▲ 그림 16.13 | 도체구에 의한 전기장과 전위

5. 점전하계의 위치에너지

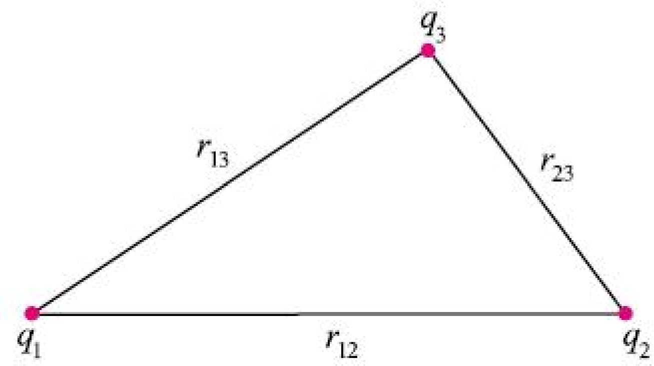
두 점전하의 위치에너지



- 무한히 떨어져 있는 전하들을 현 상태로 만드는데 드는 일
  = ***U***(현상태) - ***U***(무한히 떨어져 있는 상태) = ***U***(현상태)
- q_1에 의해 q_2 위치에 생기는 전위 $\quad V_1 = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q_1}{r_{12}}$
- ***U***(현상태) = $\quad q_2 V_1 = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q_1 q_2}{r_{12}}$

세 점전하의 위치에너지

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}} + \frac{q_3 q_1}{r_{31}}\right]$$



▲ 그림 16.14 | 세 점전하계

예제 16.11 여러 개의 점전하에 의한 전위

한 변의 길이가 d인 정삼각형의 세 꼭지점에 각각 놓인 점전하 q가 있다. 이 계의 전기 위치에너지를 구하여라.

풀이]

- 전하계의 전기 위치에너지

$$U = \sum_{i \neq j} U_{ij} = \sum_{i \neq j} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_i Q_j}{r_{ij}}$$

$$= U_{12} + U_{23} + U_{31}$$

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q^2}{d}$$

$$= \frac{3}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q^2}{d}$$