



인하대학교  
INHA UNIVERSITY



# 일반물리학

## 제15장. 전하와 전기장



$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} k(\phi) \frac{a^2 - r^2}{a^2 + 2ar \cos(\phi - \theta) + r^2} d\phi$$



## 목차

### 들어서며

1. 전하
2. 쿨롱의 법칙
3. 전기장
4. 쌍극자와 전기장

! 물질 - 질량  $m \leftrightarrow$  만유인력  
전하  $q \leftrightarrow$  전자기력

! 전하 - 양(+) 과 음(-) [cf. 질량]

! 만유인력 vs 전자기력

- 양성자와 전자 사이에 작용하는 전기력과 만유인력

$$\frac{\text{전기력}}{\text{만유인력}} \cong 2 \times 10^{39}$$

# 1. 전하

! 물질을 이루는 기본입자 ? ... → 분자 → 원자

- 원자 = 원자핵 + 전자
- 원자핵 = 양성자 + 중성자 (수소핵  $^1\text{H}$  : 양성자로만 구성)

! 양성자 : 양(+) 전하의 기본 입자

! 전자 : 음(-) 전하의 기본 입자

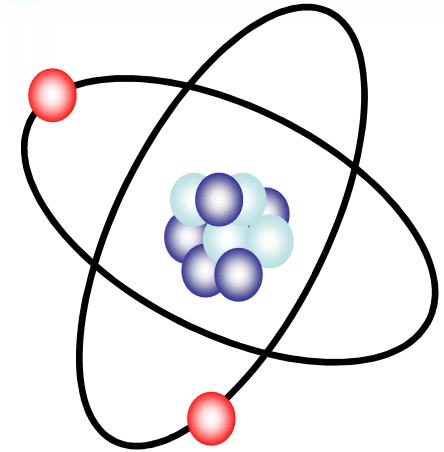
▼ 표 15.1 | 몇 가지 기본 입자의 특성들

입자	기호	전하량	질량
양성자	$p$	$+e$	$1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$
중성자	$n$	0	$1.6759 \times 10^{-27} \text{ kg}$
전자	$e^-$	$-e$	$9.1100 \times 10^{-31} \text{ kg}$

\*  $e = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$

! 전하의 양자화

- Benjamin Franklin 시대 : 전하를 연속적인 유체
- 오늘날 : 불연속적인 입자인 원자나 분자로 구성
  - 모든 전하는 기본전하의 정수 배  $q = ne$



## 예제 15.1 구리 동전 하나의 양전하량

구리 동전 하나의 질량이 1.0 g이라 하자. 구리원자 한 개당  $4.6 \times 10^{-18} \text{ C}$  크기의 양전하와 음전하를 갖는다고 가정하고 구리 동전 하나에 들어 있는 총 양전하량을 구하여라(단, 구리의 원자량은 64이다).

### 풀이]

- 구리조각에 들어 있는 구리 원자의 개수  $N$ (몰 정의 사용)

$$\frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$$

$$N = N_A \frac{m}{M} = \frac{(6.0 \times 10^{23} \text{ atoms/mol})(1.0 \text{ g})}{(64 \text{ g/mol})} = 9.4 \times 10^{21} \text{ (atom)}$$

$N_A$ : 아보가드로 수

$m$ : 동전의 질량

$M$ : 구리의 원자 질량(= 64 g/mol)

$$\therefore q_{\text{tot}} = Nq_0 = (9.4 \times 10^{21} \text{ atom})(4.6 \times 10^{-18} \text{ C/atom}) = 4.3 \times 10^4 \text{ C}$$

# 1. 전하

## ! 전하의 보존

- 고립 계의 총 전하량 보존
- 쌍생성과 쌍소멸

$$e^+ + e^- \leftrightarrow \gamma + \gamma$$

## ! 도체와 절연체

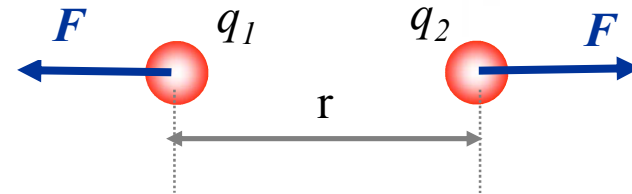
- 물체
  - 도체 (conductor)
    - 전자가 자유로이 이동 가능 (자유전자) [금속]
  - 절연체 (insulator) 또는 유전체 (dielectric)
    - 전자들이 각 원자에 구속 [유리, 도기, 플라스틱,..]
  - 반도체 (semiconductor)
    - 온도에 따라 절연체에서 도체로 특성 변화 [실리콘, 게르마늄]
  - 초전도체 (superconductor)
    - 저항이 없음 [-200° C 이하의 매우 낮은 온도]

## 2. 쿨롱의 법칙

### 쿨롱의 법칙 :

- 점전하

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1 q_2}{r^2} \right)$$



### 진공의 유전률 ( $\epsilon_0$ )

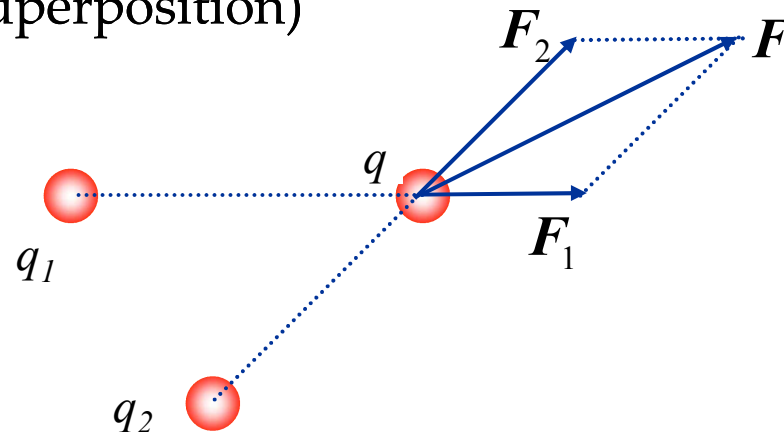
$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cong 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$$

### 중첩의 원리 (principle of superposition)

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots$$

$$= \sum_i F_i$$



## 예제 15.2 이온의 전하

거리가  $7.0 \times 10^{-10}$  m만큼 떨어져 있는 동일한 두 이온 사이의 전기력의 크기가  $1.88 \times 10^{-9}$  N이다. 각 이온의 전하를 구하여라.

### 풀이]

- 쿨롱의 법칙

$$F = k \frac{q^2}{r^2}$$

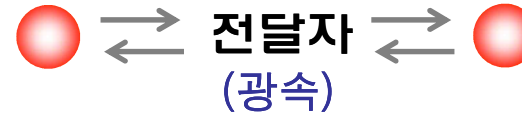
$$= (8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2) \frac{q^2}{(7.0 \times 10^{-10} \text{ m})^2} = 1.88 \times 10^{-9} \text{ N}$$

$$\therefore q = \sqrt{\frac{1.88 \times 10^{-9} \text{ N}}{8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2}} \times 7.0 \times 10^{-10} \text{ m} = 3.2 \times 10^{-19} \text{ C}$$



### 3. 전기장 (Electric Fields)

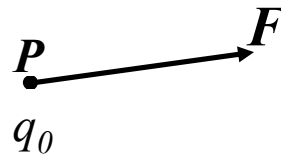
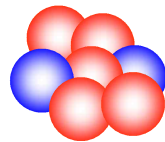
! 전하와 전하 사이의 상호작용



! 전기장 : 전하에서 내보내는 전달자에 대한 정보

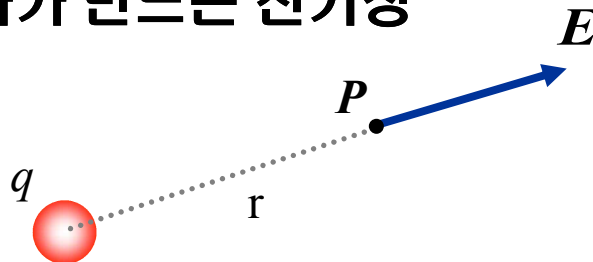
전하  $\Leftrightarrow$  전기장  $\Leftrightarrow$  전하

! 전기장의 정의 ( $E$ ) : 단위전하당 받는 힘



$$E = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{F}{q_0} \quad [\text{N/C}]$$

! 점전하가 만드는 전기장



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

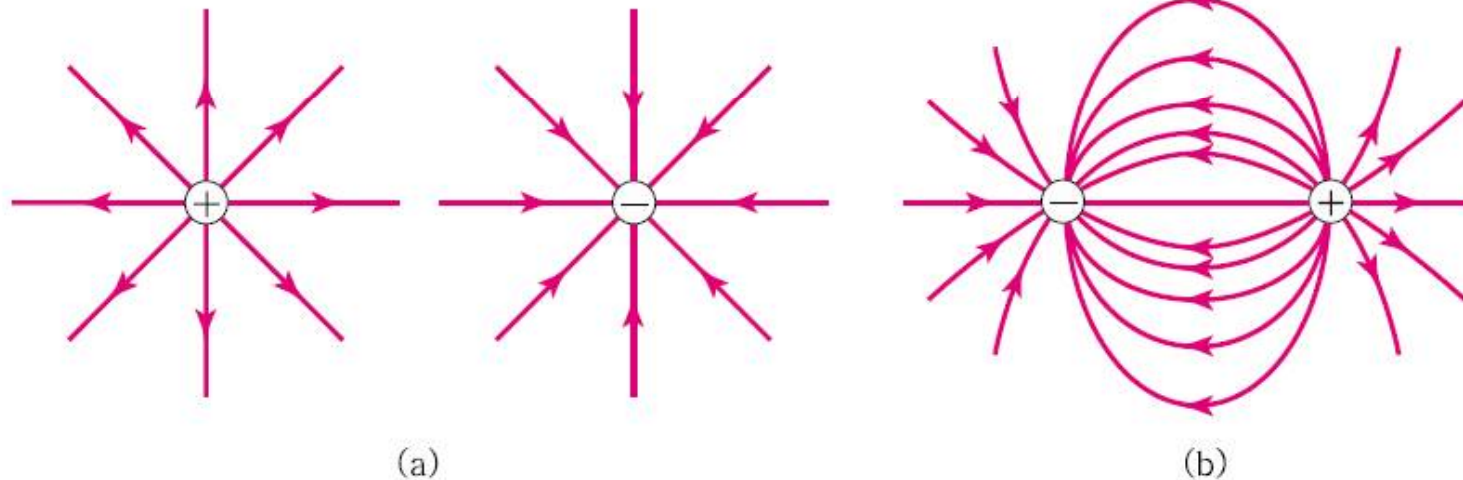
[전기장의 방향 : 양전하가 받는 힘의 방향]

### 3. 전기장

#### ! 전기력선 : 전기장을 시각화하는 개념

- 전기력선의 밀도 : 전기장의 세기와 비례
- 전기력선의 접선 : 전기장의 방향

#### 전기력선의 모습



▲ 그림 15.2 | (a) 양전하와 음전하의 전기력선, (b) 쌍극자에 의한 전기력선

## 예제 15.3 전기장을 이용한 전기력 계산

균일한 전기장  $E = 1.0 \times 10^4 \text{ N/C}$ 이 있는 상자 안에 전자 하나가 있다. 전기장의 방향은 수직 상방이다. 전자에 미치는 전기력을 중력과 비교하라.

### 풀이

- 전기장 내의 전하가 받는 힘(전기력)

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

$$F_E = eE = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1.0 \times 10^4 \text{ N/C}) = 1.6 \times 10^{-15} \text{ N}$$

$$F_g = mg = (9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2) = 8.9 \times 10^{-30} \text{ N}$$

$$\therefore \frac{F_E}{F_g} = \frac{1.6 \times 10^{-15} \text{ N}}{8.9 \times 10^{-30} \text{ N}} = 1.8 \times 10^{14}$$

$$F_E \gg F_g$$

## 예제 15.4 균일한 전기장 내의 전하 운동

질량이  $m$ 이고 전하량이  $q$ 인 입자를 다음 그림과 같이 균일한 전기장  $E$ 가  $y$ 방향으로 작용하고 있는 공간에 가만히 놓으면, 이 입자는 전기장에 의해서 가속운동을 한다. 이때 이 입자의 운동을 기술하여라.

### 풀이

- 전기장 내의 전하가 전기력

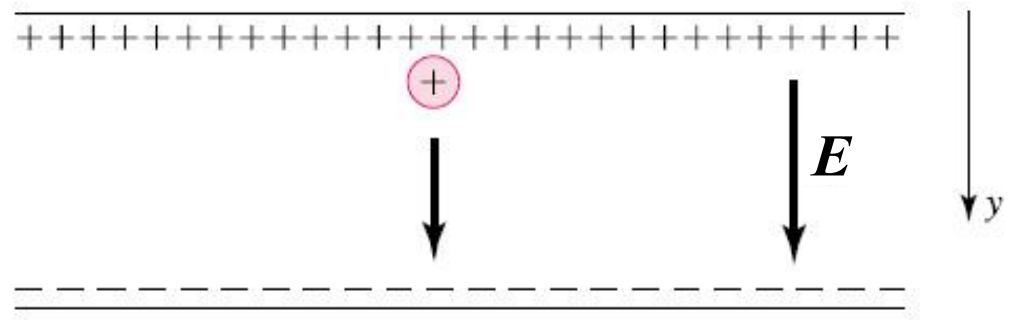
$$F = qE$$

$$\text{가속도 : } a = \frac{F_E}{m} = \frac{qE}{m}$$

$$\text{속도 : } v = at = \frac{qEt}{m}$$

$$\text{위치 : } y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{qEt^2}{2m}$$

$$t\text{초 후의 운동에너지 : } K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m \frac{q^2 E^2 t^2}{m^2} = qE \frac{qEt^2}{2m} = qEy$$



▲ 그림 15.3 | 균일한 전기장 안에서의 입자의 운동

# 예제 15.5 균일하게 대전된 링의 전기장 세기

다음 그림과 같이 균일하게 대전된 반지름  $a$ 인 고리의 중심에서 거리  $x$ 만큼 떨어진 점  $P$ 에서의 전기장의 세기를 구하여라. 단, 고리에 대전된 총 전하량의 크기는  $q$ 이다.

## 풀이

- 미분소  $ds$ 내의 전하량  $dq$ 에 의한 전기장

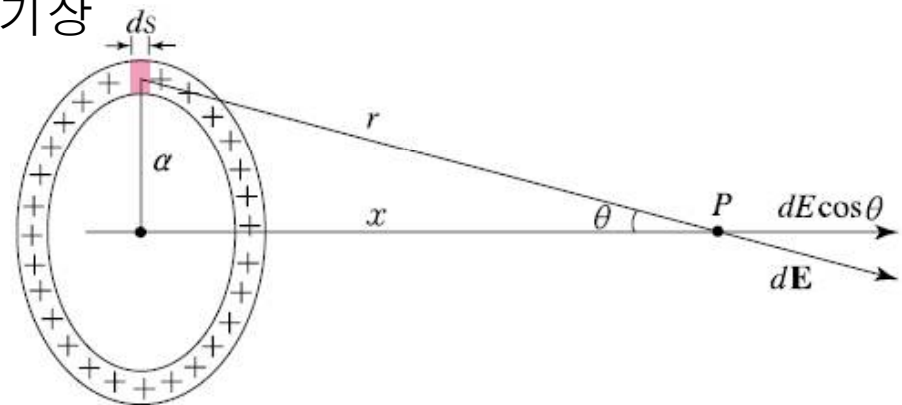
$$dq = q \frac{ds}{2\pi a}$$

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{(a^2 + x^2)}$$

$$\left( \because \cos\theta = \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} \right)$$

$$E = \int dE \cos\theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{qx}{(a^2 + x^2)^{3/2}} \right]$$

$$\approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{x^2} \quad (x \gg a)$$

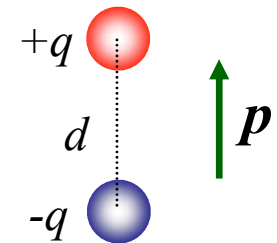


▲ 그림 15.4 | 균일하게 대전된 링

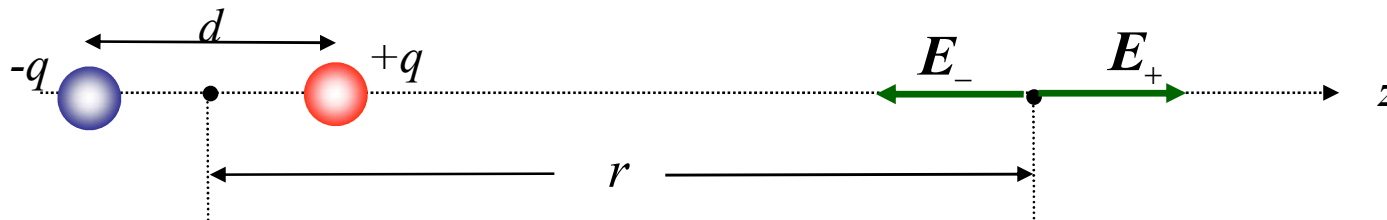
# 4. 쌍극자 전기장

## ! 전기쌍극자 (electric dipole)

- 크기는 같고 부호가 다른 전하 쌍(+q, -q) 이 서로 떨어져 있는 구조
- 전기쌍극자 모멘트의 크기 :  $p = qd$
- 전기쌍극자 모멘트의 방향  
: 음전하에서 양전하로 향하는 방향



## ! 전기쌍극자가 만드는 전기장



$$E = E_+ + E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{q}{(r - d/2)^2} + \frac{-q}{(r + d/2)^2} \right] k$$

$k$ : unit vector to  $z$  direction

$$(1+x)^n \cong 1+nx$$

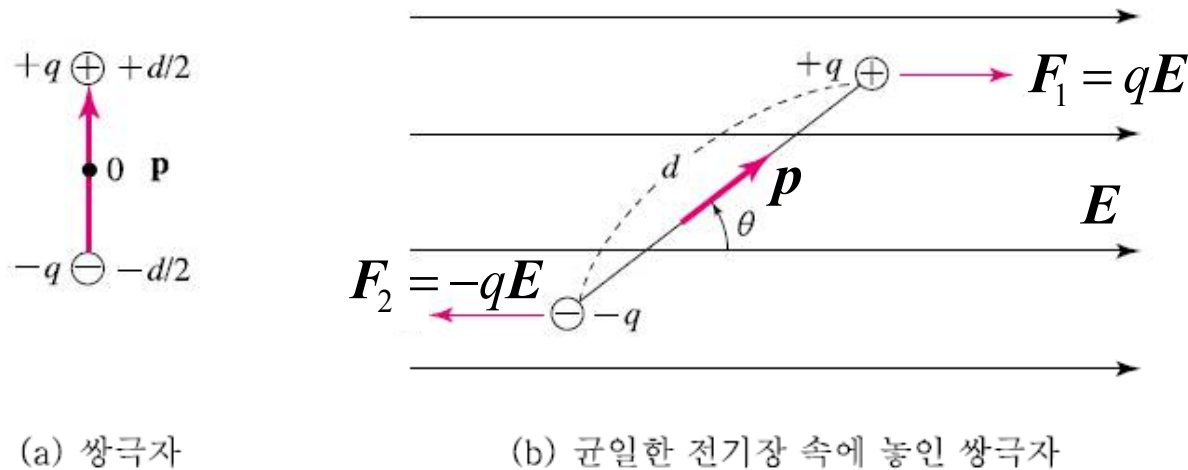
$$(1+x)^2 = 1+2x+x^2$$

$$E \cong \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3} \propto \frac{1}{r^3} \quad [p = pk] \quad \text{for } r \gg d$$

# 4. 쌍극자 전기장

## 전기쌍극자가 받는 힘

! 전기쌍극자가 **균일한** 전기장 내에 놓여 있는 경우



▲ 그림 15.5 | 전기쌍극자의 구조와 외부 전기장 속의 쌍극자

! 전기쌍극자가 받는 총 힘 : 0

! 전기쌍극자가 받는 돌림힘 :  $\tau = r_1 \times F_1 + r_2 \times F_2$

• 크기 :  $|\tau| = dqE \sin(\theta)$

• 방향 : 지면을 뚫고 들어가는 방향

$$\tau = p \times E$$

## 예제 15.6 수소 원자의 쌍극자 모멘트

수소 원자 하나가 균일한 전기장 속에 들어 있는 경우를 고려하자. 수소 원자의 양전하의 질량중심점과 수소 원자의 음전하의 질량중심점이 각각 원래의 중심점으로부터 1 pm만큼씩 이동하였다면, 이 새로운 구조의 수소 원자가 갖는 쌍극자 모멘트를 구하여라.

### 풀이]

- 양전하와 음전하 사이 거리  $2 \times 10^{-12} \text{ m}$
- 유도 쌍극자 모멘트 크기

$$p = qd$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$d = 2 \times 10^{-12} \text{ m}$$

$$p = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(2 \times 10^{-12} \text{ m}) = 3.2 \times 10^{-31} \text{ C} \cdot \text{m}$$



## 예제 15.7 쌍극자의 돌림힘

그림 15.5와 같이 균일한 전기장 속에 전기쌍극자가 놓여 있다. 전기쌍극자에 작용하는 돌림힘의 크기가 최대가 되는 각도  $\theta$ 를 구하여라.

**풀이]**

- 돌림힘

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{p} \times \boldsymbol{E}$$

$$|\vec{\tau}| = pE \sin \theta$$

$$\theta = 90^\circ \text{ or } 270^\circ$$

일때 최대, +, -부호는 돌림힘의 방향

$\therefore$  쌍극자 모멘트와 전기장이 수직일 때 최대 돌림힘

