

2018학년도 2학기

물리학및실험 (US0019)

4부 전기와 자기

15장 전기력과 전기장

상명대학교 융합공과대학
전기공학과
조 수 환 교수





15. 전기력과 전기장

이 사진은 애리조나 주 투산에 있는 키트피 크국립천문대에 떨어지는 번갯불의 모습을 밤에 찍은 것이다. 천둥이 치는 동안, 번개 구름 속에 밀집되어 있는 전하들은 음으로 대전된 지표와 번개 구름 사이에 정상보다 높은 전기장을 형성한다. 이 강한 전기장은 구름과 지면 사이에 전기 방전(엄청난 불꽃)을 일으킨다. 하늘에서 관측되는 또 다른 형태의 방전은 구름과 구름 사이에 일어나는 것으로서 매우 자주 방전이 일어난다.

- 15.1 전하의 성질
- 15.2 절연체와 도체
- 15.3 쿨롱의 법칙
- 15.4 전기장
- 15.5 전기력선
- 15.6 정전 평형 상태의 도체
- 15.7 밀리컨의 기름 방울 실험
- 15.8 밴 더 그래프 발전기
- 15.9 전기선속과 가우스의 법칙

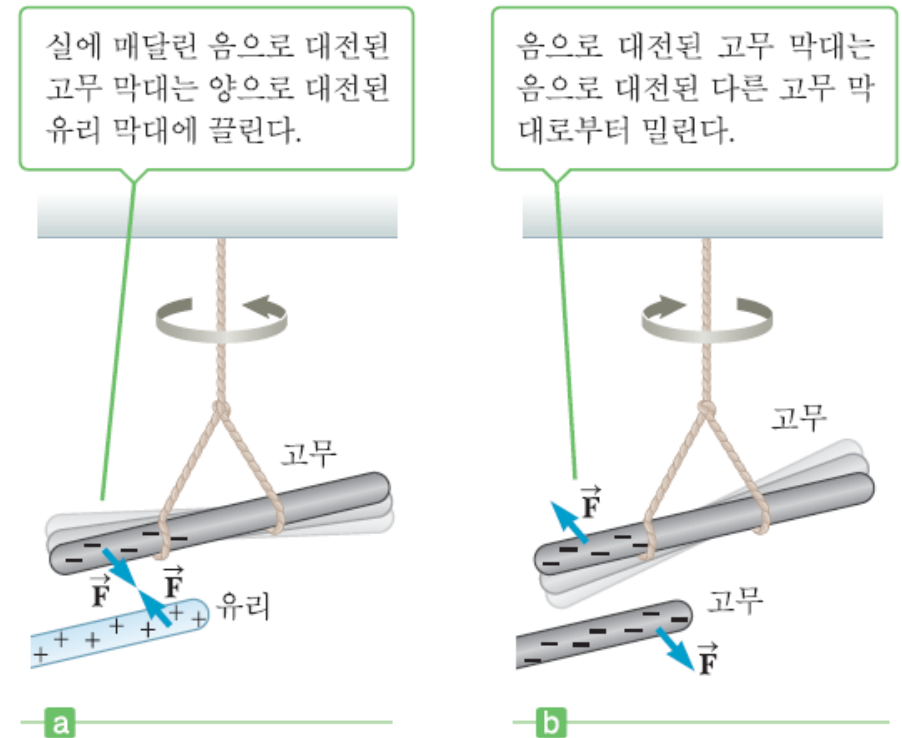
15.1 전하의 성질 Properties of Electric Charge

- 전하

- 양전하 (Positive Charge)
- 음전하 (Negative Charge)

- 전하의 성질

- 인력 혹은 척력이 작용함
 - 인력(당기는 힘) : 다른 종류의 전하 사이에서의 작용력
 - 척력(밀어내는 힘) : 같은 종류의 전하 사이에서의 작용력
- 전하는 항상 보존됨 : 음전하가 한 물체에서 다른 물체로 전달됨
 - 한 물체가 대전(음전하의 이동으로 인해 극성을 띠는 현상)되는 경우, 물체의 전하는 항상 기본 전하량 e ($1.60212 \times 10^{19} \text{C}$)의 정수배



15.2 절연체와 도체 Insulators and Conductors

- 전하를 전달하는 능력에 따른 분류

- 도체(Conductor) : 전기력에 반응하여 전하가 자유롭게 움직이는 물질
- 절연체(Insulator) : 전하가 자유롭게 움직이지 못하는 물질
- 반도체(Semi-conductor)

- 전도에 의한 대전

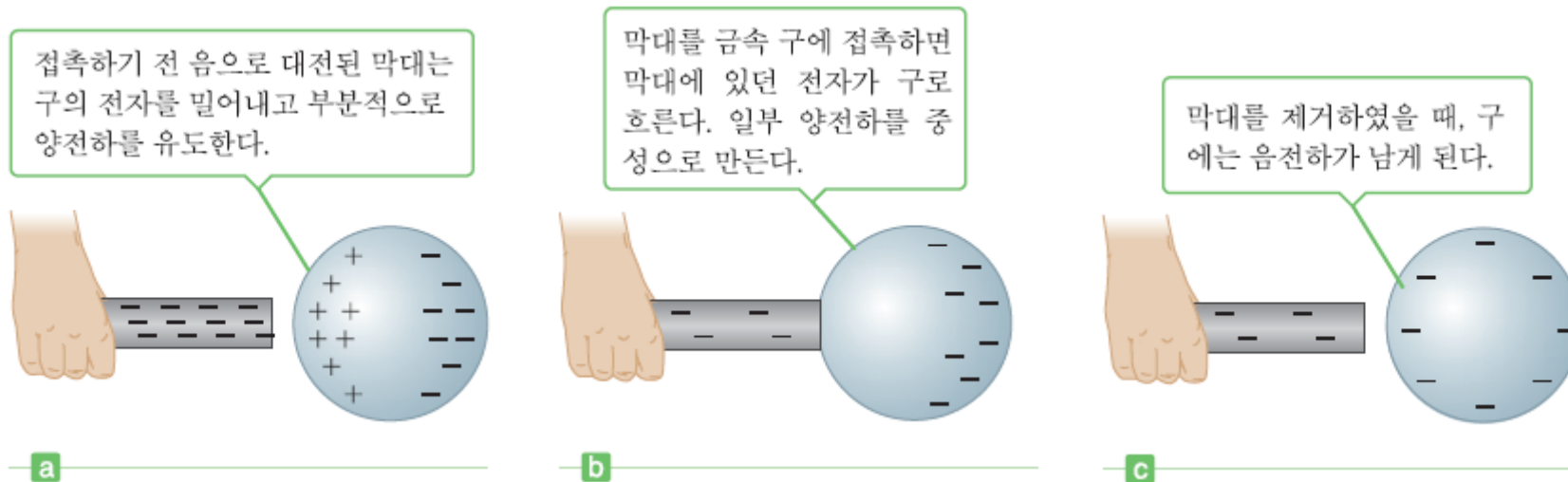
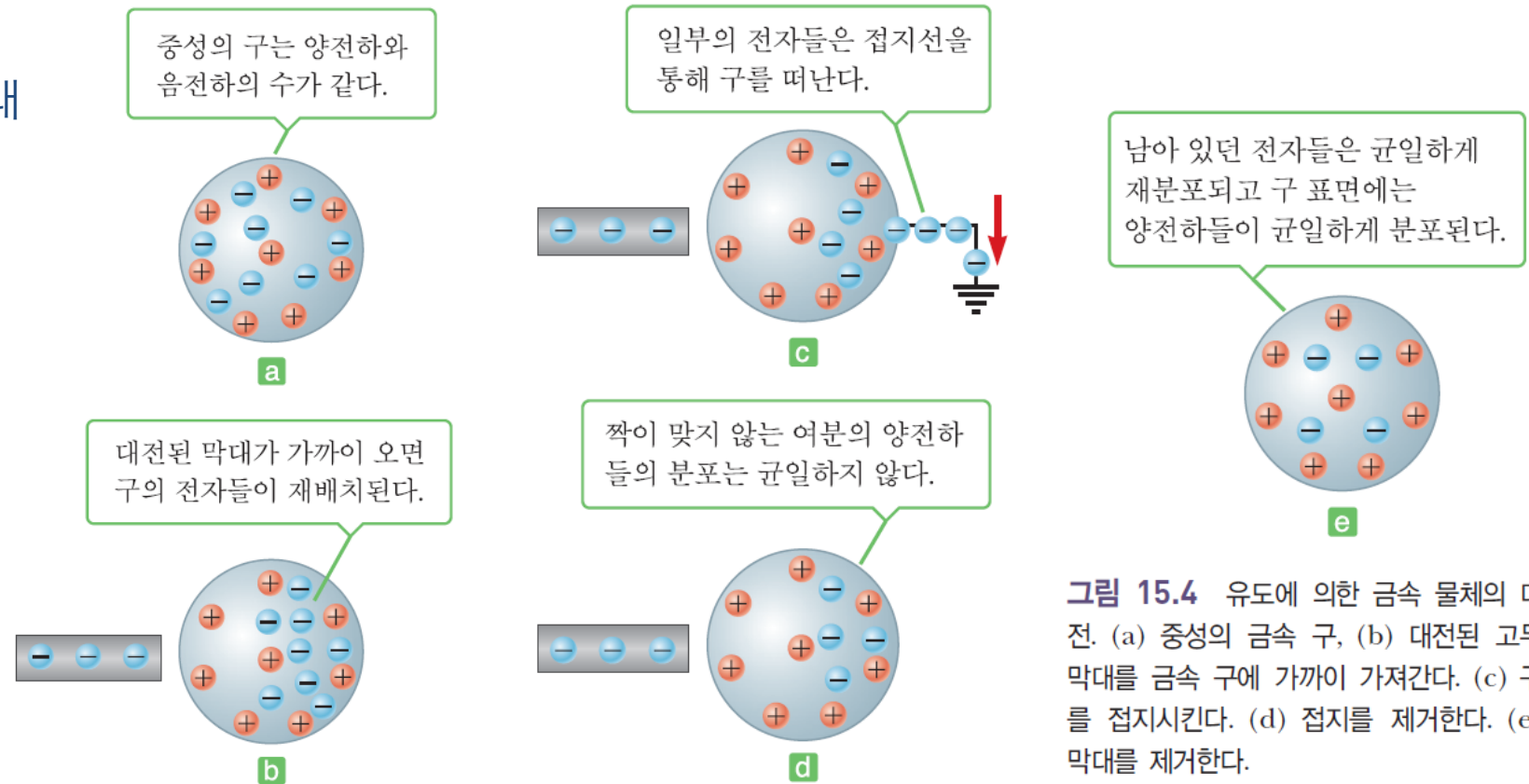


그림 15.3 전도에 의한 금속 물체의 대전

15.2 절연체와 도체 Insulators and Conductors

- 유도에 의한 대전

- 접지 : 어떤 도체가 도선(wire)에 의해 지구(무한대의 전자를 받아드리거나 공급할 수 있음을 의미)로 연결
- 유도(Induction)
- 분극(Polarization) : 분자 내에서 전하의 재배열



15.3 쿨롱의 법칙 Coulomb's Law

- 쿨롱의 법칙

- 1785년 쿨롱에 의해 실험적으로 정지된 두 대전 입자 사이에 작용하는 전기력에 대한 기본 법칙을 확립

전기력(electric force)은 다음과 같은 성질을 갖는다.

1. 전기력은 대전된 두 입자를 잇는 선을 따른 방향을 가지며, 두 입자간 거리 r 의 제곱에 반비례한다.
2. 전기력은 대전된 두 입자의 전하 크기 $|q_1|$ 과 $|q_2|$ 의 곱에 비례한다.
3. 두 전하의 부호가 반대이면 인력이 작용하고, 두 전하의 부호가 같으면 척력이 작용한다.

쿨롱의 법칙 ▶

전하 q_1 과 q_2 가 거리 r 만큼 떨어져있을 때 전기력의 크기는 다음과 같다.

$$F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad [15.1]$$

여기서 k_e 는 쿨롱 상수이다.

$$k_e = 8.9875 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

15.3 쿨롱의 법칙 Coulomb's Law

표 15.1 전자, 양성자 및 중성자의 전하와 질량

입자	전하(C)	질량(kg)
전자	-1.60×10^{-19}	9.11×10^{-31}
양성자	$+1.60 \times 10^{-19}$	1.67×10^{-27}
중성자	0	1.67×10^{-27}

$$F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

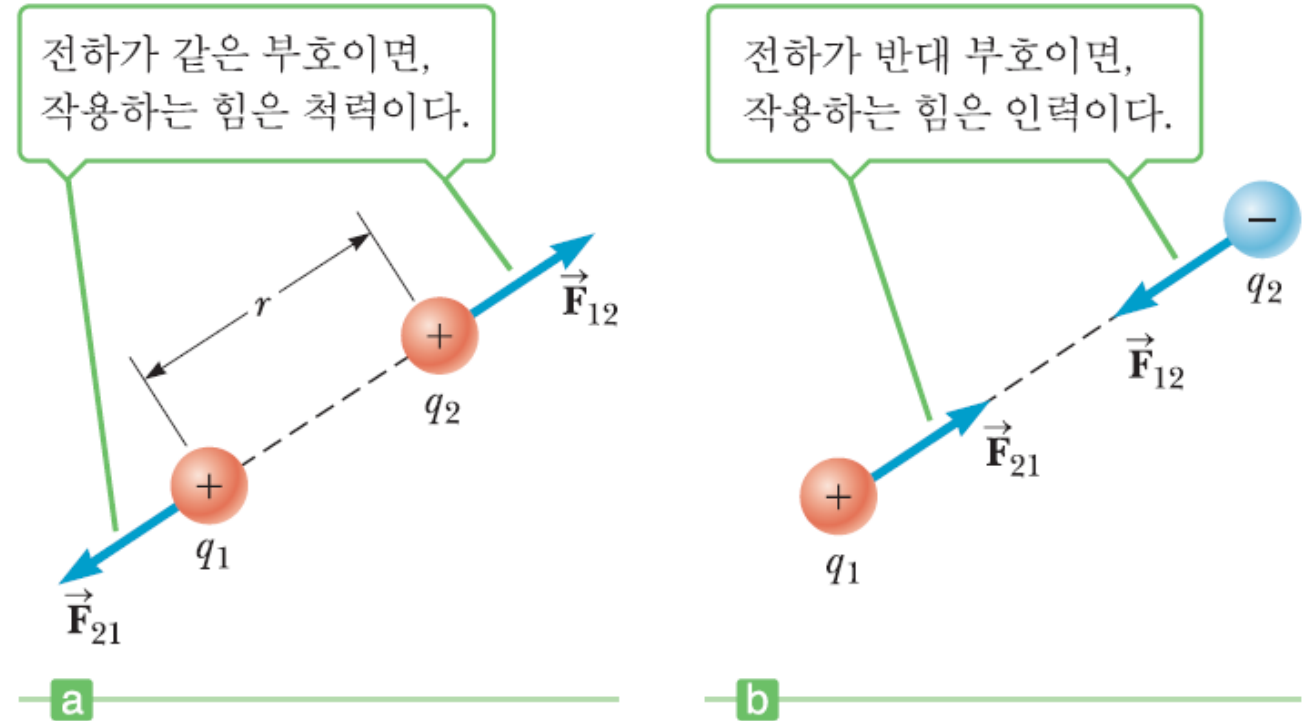


그림 15.6 거리 r 만큼 떨어진 두 점전하는 서로 쿨롱의 법칙으로 주어진 힘을 작용한다. q_1 에 작용하는 힘은 q_2 에 작용하는 힘과 크기는 같고 방향은 반대이다.

15.4 전기장 Electric Field

- 장력(Field Force) : 중력과 정전기력과 같이 두 물체 사이에 접촉이 없이 작용하는 힘
- Michael Faraday (1791~1867) : 대전된 물체의 주변에 전기장(Electric Field)가 존재함
 - 대전된 다른 물체가 전기장 속에 들어가면 전기력의 영향을 받음
 - 쿨롱의 법칙 : 정지된 두 전하 간의 힘 (정전기력)

작은 시험 전하 q_0 의 위치에 전하 Q 가 만들어낸 전기장 \vec{E} 는 Q 가 q_0 에 작용하는 전기력 \vec{F} 를 q_0 로 나눈 값으로 정의한다.

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}}{q_0} \quad [15.3]$$

SI 단위: 뉴턴/쿨롱(N/C)

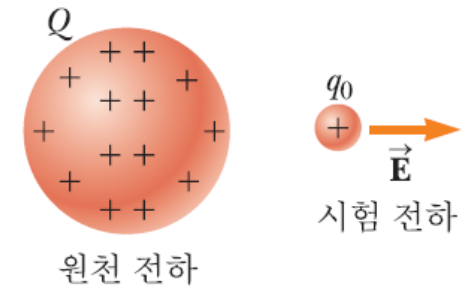


그림 15.8 양전하 q_0 를 가진 작은 물체가 더 큰 양전하 Q 를 가진 물체의 근처에 놓여, 그림과 같은 방향의 전기장 \vec{E} 를 받는다. 전기장의 크기는 q_0 에 작용하는 힘을 전하량 q_0 로 나눈 값으로 정의한다.

15.4 전기장 Electric Field

- 전기장(Electric Field)

- 전하량 q 인 전하로부터 거리 r 만큼 떨어진 거리에서의 전기장의 크기(E)

$$E = k_e \frac{|q|}{r^2}$$

- 전하량 q 인 전하로부터 거리 r 만큼 떨어진 거리에 전하량 q_0 인 전하를 위치하는 경우 : 전기력(F)이 상호 작용함

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

$$F = k_e \frac{|q||q_0|}{r^2}$$

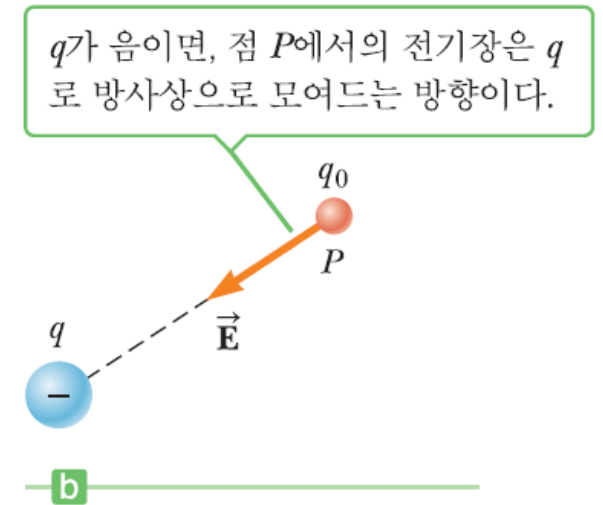
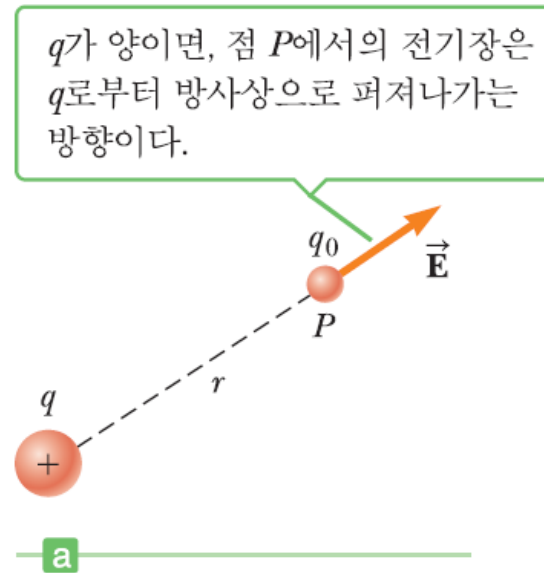


그림 15.10 점 P 에 있는 시험 전하 q_0 는 점전하 q 로부터 거리 r 만큼 떨어져 있다.

15.4 전기장 Electric Field

예제 15.3 두 점전하에 의한 전기장

목표 중첩의 원리를 사용하여 두 점전하에 의한 전기장을 계산한다.

문제 전하 $q_1 = 7.00 \mu\text{C}$ 은 원점에 있고 $q_2 = -5.00 \mu\text{C}$ 은 원점으로부터 0.300 m 떨어진 x 축에 있다(그림 15.11). (a) 점 $P(0, 0.400) \text{ m}$ 에서 전기장의 방향과 크기를 구하라. (b) 점 P 에 $2.00 \times 10^{-8} \text{ C}$ 의 전하가 있다면, 이 전하에 작용하는 전기력은 얼마인가?

$$E = k_e \frac{|q|}{r^2}$$

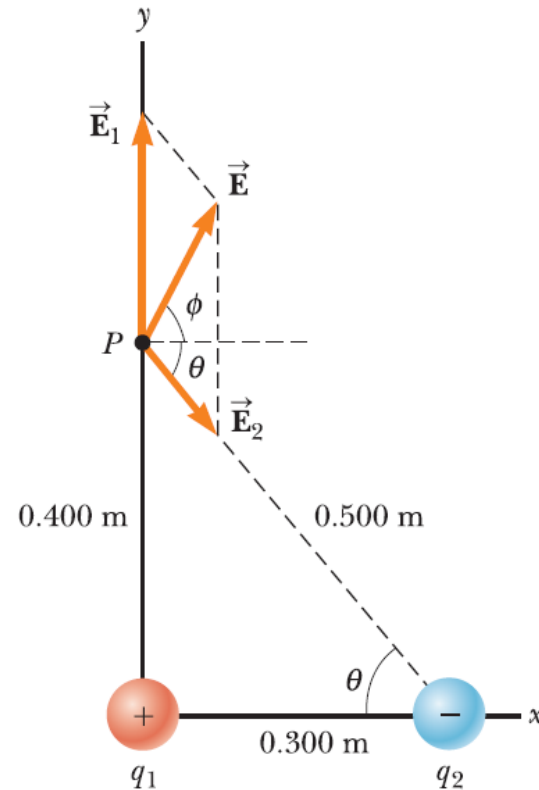


그림 15.11 (예제 15.3) 점 P 에서의 전체 전기장은 벡터 합 $\vec{E}_1 + \vec{E}_2$ 이다. \vec{E}_1 은 양전하 q_1 에 의한 전기장이고 \vec{E}_2 는 음전하 q_2 에 의한 전기장이다.

15.5 전기력선 Electric Field Lines

- 전기력선(Electric Field Lines)

- 전기장의 모양을 시각화하기 위한 수단

- 전기력선과 전기장의 관계

- 1. 전기장 벡터는 각 점에서 전기력선에 접함

- 2. 전기력선에 수직인 면을 지나는 단위 넓이당 전기력선의 수는 주어진 영역에서 전기장의 세기에 비례함

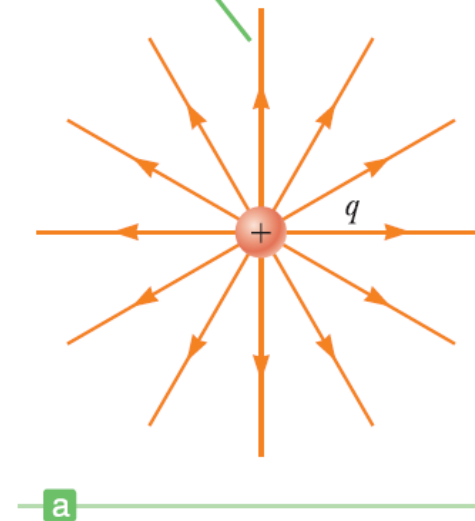
- 전기력선을 그리는 규칙

- 1. 전기력선은 양전하에서 시작해서 음전하에서 끝남

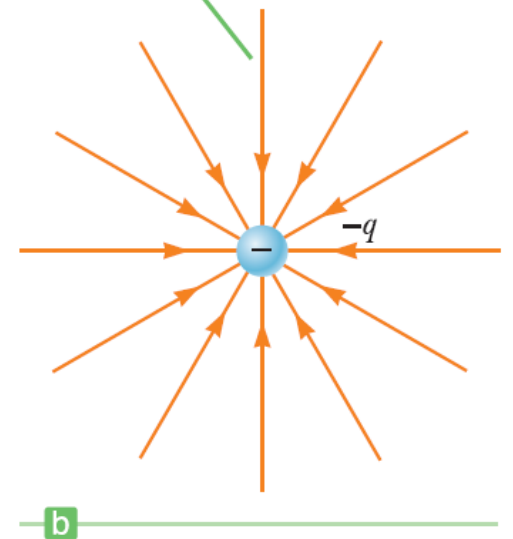
- 2. 양전하에서 나오거나 음전하로 들어가는 전기력선의 수는 전하의 크기에 비례함

- 3. 두 전기력선은 교차할 수 없음

양의 점전하인 경우 전기력선은 밖으로 퍼져나간다.



음의 점전하인 경우 전기력선은 안으로 모여든다.



15.5 전기력선 Electric Field Lines

- 전기쌍극자(Electric Dipole)에서의 전기력선
 - 크기가 같고 부호가 반대인 두 점전하에 대한 전기력선
 - 양전하로부터 시작한 전기력선의 수는 음전하에서 끝나는 전기력선의 수와 같아야 함

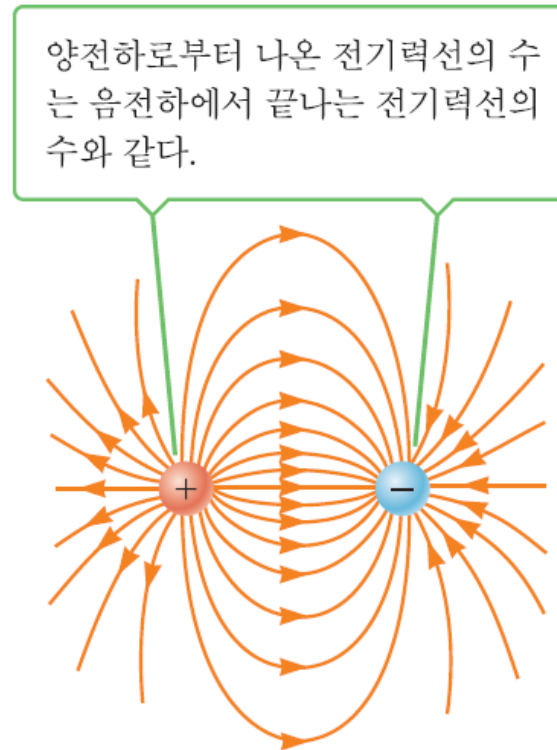


그림 15.13 크기가 같고 부호가 반대인 두 점전하(전기 쌍극자)에 대한 전기력선

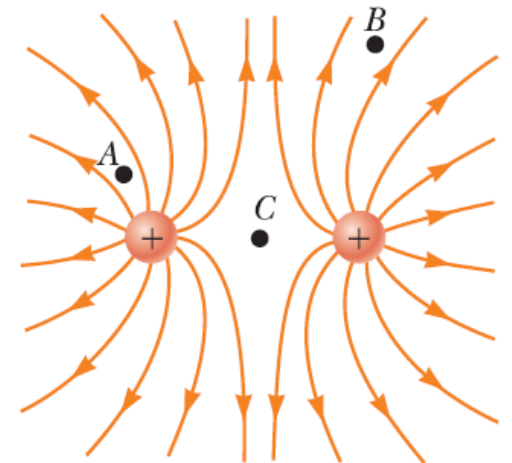


그림 15.14 두 양전하에 대한 전기력선

15.5 전기력선 Electric Field Lines

- 크기가 다른 양전하/음전하에 의한 전기력선
 - 양전하($+2q$)와 음전하($-q$)인 경우
 - 양전하에서 나온 전기력선의 수는 음전하로 들어가는 전기력선 수의 두 배임
 - 양전하로부터 나온 전기력선 중 반만 음전하로 들어가고 나머지는 무한히 먼 곳에 있다고 가정하는 음전하에 도달함
 - 이 전하로부터 매우 먼 거리(전하 사이 거리에 비해 매우 큰 경우)에서의 전기력선은 단일 전하 $+q$ 에 의한 전기력선과 같음

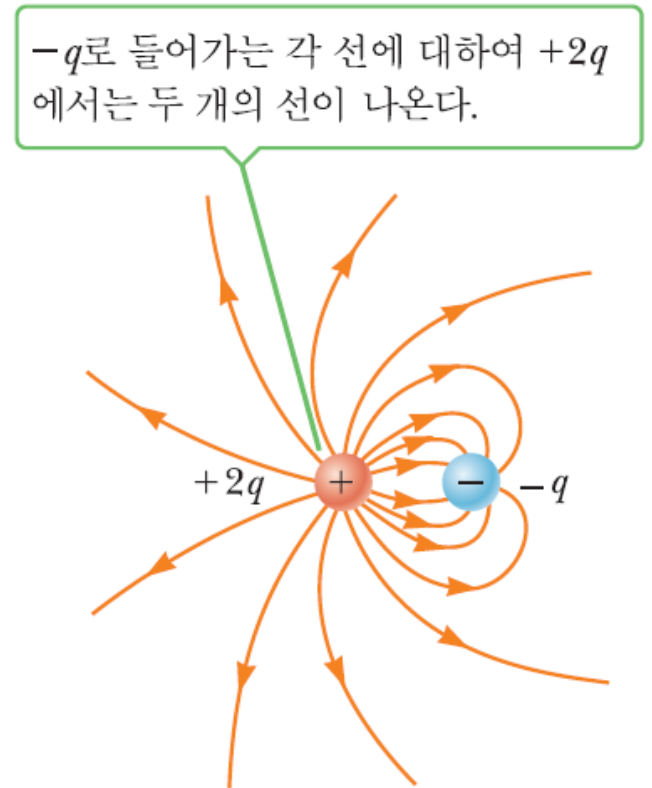


그림 15.15 한 점전하 $+2q$ 와 다른 점전하 $-q$ 에 의한 전기력선

15.6 정전 평형 상태의 도체 Conductors in Electrostatic Equilibrium

- 전도체(예, 구리)
 - 전기적 중성임에도 어떤 원자에도 구속되지 않고 물질 내에서 자유롭게 움직이는 전하(자유전자)를 지님
- 정전 평형 상태 : 도체 내에서 전하의 알짜 운동이 없을 경우

고립된 도체의 성질 ▶

1. 도체 내부의 어느 위치에서나 전기장은 영이다.
2. 고립된 도체에 생긴 과잉 전하는 도체 표면에만 분포한다.
3. 대전된 도체 바깥쪽의 전기장은 도체 표면에 수직이다.
4. 불규칙적인 형태의 도체에서 전하는 표면의 곡률 반지름이 가장 작은 곳, 즉 뾰족한 점에 모인다.

15.7 밀리컨의 기름 방울 실험 Millikan's Oil-Drop Experiment

- 밀리컨(Robert A. Millikan, 1868~1953)의 기름 방울 실험
 - 전자의 기본 전하량의 크기 e 를 측정하기 위한 실험
 - 분무기 내부의 마찰력에 의해 음으로 대전된 기름 방울이 작은 구멍을 통해 내부로 유입
 - 수평 방향으로 빛을 비추고, 망원경으로 작은 기름 방울을 관찰
 - 질량이 m 이고 전하의 크기가 q 인 음전하를 띤 기름 방울 한 개를 관찰
 - 전하에 작용하는 힘 = 중력(mg) + 점성끌림력(D , 속도에 비례)
 - 속도가 증가하여 $mg = D$ 인 순간 등속도(v) 운동

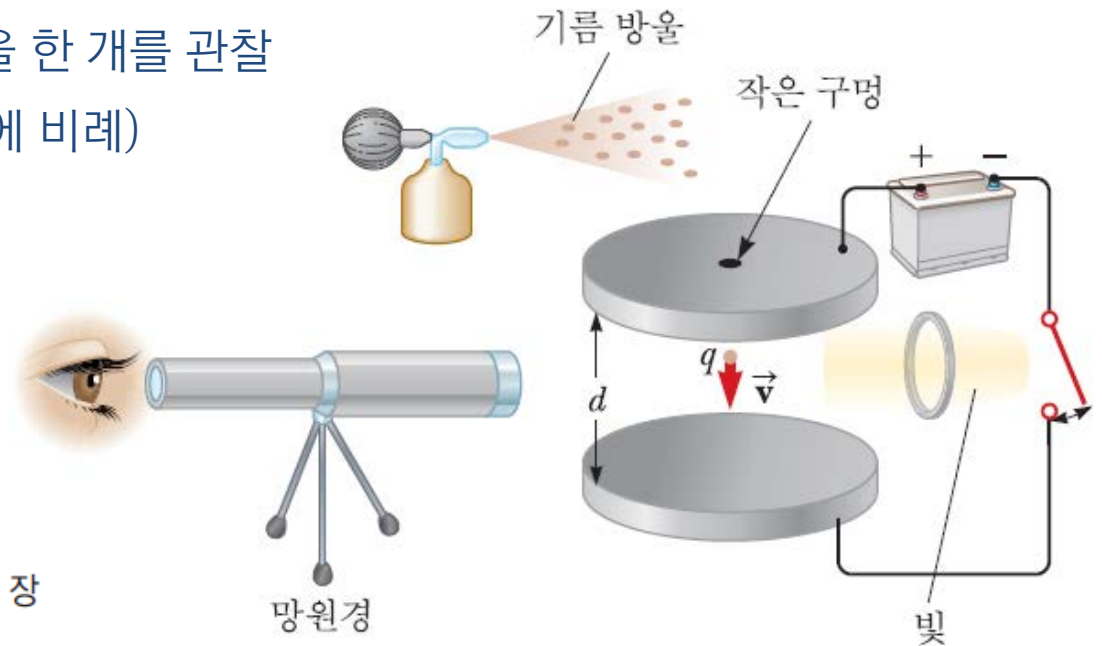


그림 15.19 밀리컨의 기름 방울 실험 장치의 개략도

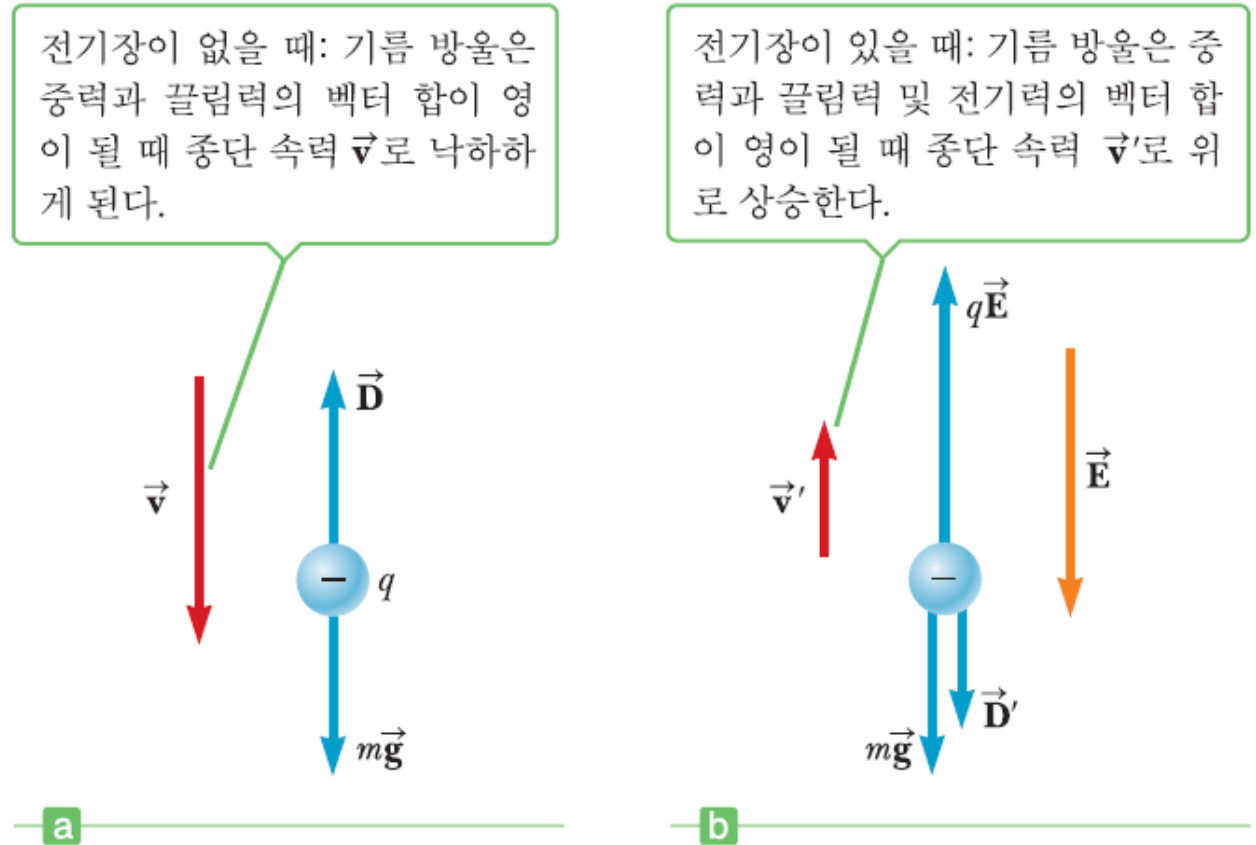
15.7 밀리컨의 기름 방울 실험 Millikan's Oil-Drop Experiment

- 밀리컨(Robert A. Millikan, 1868~1953)의 기름 방울 실험

- 전기장(E)를 가하면 전기력(F) 작용
- 전기력이 증가하면 기름 방울은 위로 이동
- 점성끌림력(D)은 아래로 작용
- $F = mg + D$ 인 순간 위로 등속도(v') 운동
- 관찰을 통해 모든 기름방울이 기본 전하량(e)의 정수배임을 밝힘

$$q = ne \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

그림 15.20 밀리컨의 실험에서 음으로 대전된 기름 방울에 작용하는 힘



15.9 전기선속과 가우스의 법칙 Electric Flux and Gauss's Law

- 가우스의 법칙

- 폐곡면에 있는 평균 전기장을 계산하기 위한 기법
- 폐곡면을 지나는 전기선속과 폐곡면 내의 전기장을 일으키는 전체 전하와의 직접적인 상관관계

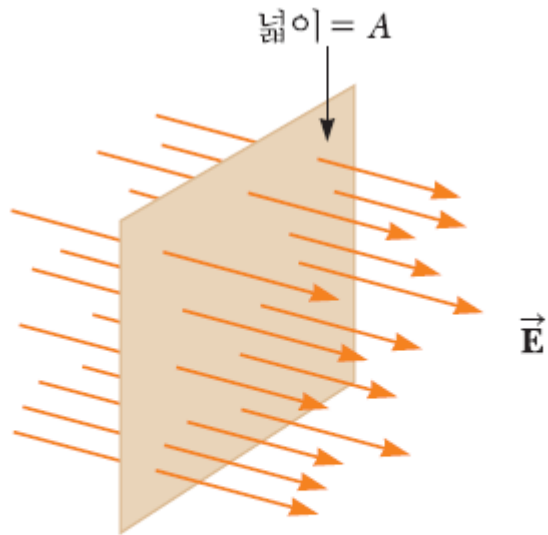


그림 15.22 넓이 A 인 평면을 수직으로 통과하는 균일한 전기장을 나타내는 전기력선. 이 면을 통과하는 전기선속 Φ_E 는 EA 이다.

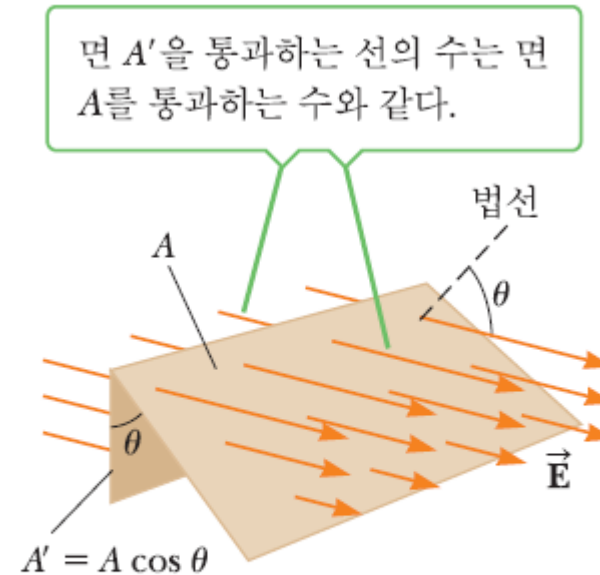


그림 15.23 전기장과 $(90^\circ - \theta)$ 의 각을 이루고 있는 면 A 를 통과하는 균일한 전기장의 전기력선

15.9 전기선속과 가우스의 법칙 Electric Flux and Gauss's Law

- 전기선속(Electric Flux)

- 전기장의 크기(E) \propto 단위 면적당 전기력선의 수(N/A)
- 전기력선의 수(N) \propto 전기장의 크기(E) * 면적(A)

$$E \propto \frac{N}{A} \leftrightarrow N \propto EA$$

- 전기선속(Electric Flux) : Φ_E (Nm^2/C)

$$\Phi_E = EA$$

$$\Phi_E = EA \cos \theta$$

$$A \cos \theta \quad \text{전기력선과 수직인 평면의 면적}$$

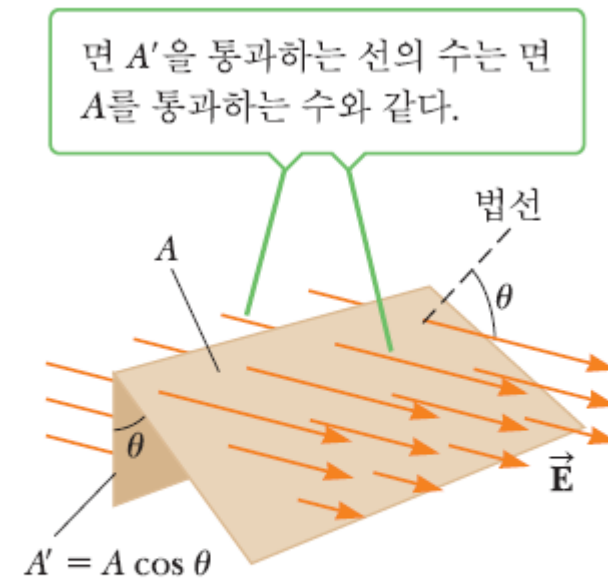


그림 15.23 전기장과 $(90^\circ - \theta)$ 의 각을 이루고 있는 면 A 를 통과하는 균일한 전기장의 전기력선

15.9 전기선속과 가우스의 법칙 Electric Flux and Gauss's Law

- 가우스의 법칙

- 점전하 q 로부터 거리 r 만큼 떨어진 거리(구의 표면)에서 전기장의 크기

$$E = k_e \frac{q}{r^2}$$

- 전기선속 : $\Phi_E = EA = k_e \frac{q}{r^2} (4\pi r^2) = 4\pi k_e q$

- 자유공간의 유전율 (Permittivity of free space)

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_e} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$$

$$\Phi_E = 4\pi k_e q = \frac{q}{\epsilon_0}$$

가우스의 법칙 ▶

임의의 폐곡면을 통과하는 전기선속 Φ_E 는 표면 내부의 알짜 전하 $Q_{\text{내부}}$ 를 ϵ_0 로 나눈 것과 같다.

$$\Phi_E = \frac{Q_{\text{내부}}}{\epsilon_0} \quad [15.11]$$

