

Chapter 2

진공 중의 정전기

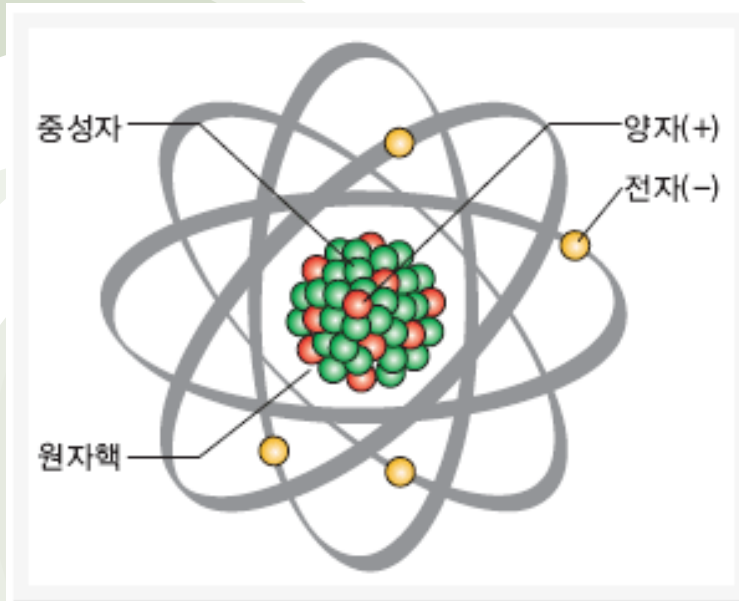
2.1 대전현상

2.1.1 전기현상

- 전기현상

: 물체가 가진 속성 중 전하와 전하 사이에 작용하는 전기력이 발생하는 현상

- 질량을 가진 물체가 중력 영향을 받듯이 전하를 가진 물체는 전기력 영향을 받음



원자의 구조를 보면

- 원자핵 주위를 전자가 회전
- 원자핵 : 양성자와 중성자로 구성
- 양성자 (+)전하, 전자 (-)전하
- 수가 같으므로 원자는 전기적으로 중성임
- 전하 또는 전하량의 기호는 Q, 단위는 C

※ <http://appleii.tistory.com/74>, <http://yjh-phys.tistory.com/96>

2.1 대전연상

2.1.1 마찰전기와 대전

- 대전(electrification) : 전기적 성질을 띠는 현상
- 대전체 : 정(+) 또는 부(-)로 대전된 물체
- 전기량, 전하량 $Q[C]$: 대전된 물체가 갖는 전기의 양
- 전하(electric charge) : 정(Positive)과 부(Negative) 전하의 두 종류
- 마찰전기 계열(대전열)
: 임의의 두 물체를 서로 마찰하면 왼쪽의 물체는 정(+), 오른쪽의 물체는 부(-)
의 전기로 대전

참고

마찰전기 계열(대전열)

⊕ 모피, 유리, 운모, 비단, 무명, 목재, 호박, 수지, 금속, 에보나이트, 고무 ⊖

2.1 대전연상

2.1.1 마찰전기와 대전

- **대전 현상** : 마찰전기에 의한 대전체는 전기적으로 중성인 두 물체 중에서 한 물체에 있던 전자가 다른 물체로 이동하였기 때문이고, 이 때 전자가 이동하여 전자를 잃은 물체는 정전하, 전자를 얻은 물체는 부전하로 대전됨
- **전하 보존의 법칙** : 마찰전기에 의한 두 대전체가 띤 전하는 외부에서 얻어지는 것이 아니라 마찰 과정에서 전자를 서로 주고받으면서 발생하는 현상으로 전하가 새로이 생성되거나 소멸되는 것이 아니다. 이와 같이 마찰 전후에 두 대전체의 전하의 총량은 변하지 않게 되는 현상

2.1 대전현상

TIP 전기의 본질

- 전하의 단위 : 쿨롱(coulomb)[C], Q[C]
- 물질의 구성 : 물질은 분자로 이루어져 있고, 분자는 원자의 집합체로 구성
- 원자의 구조

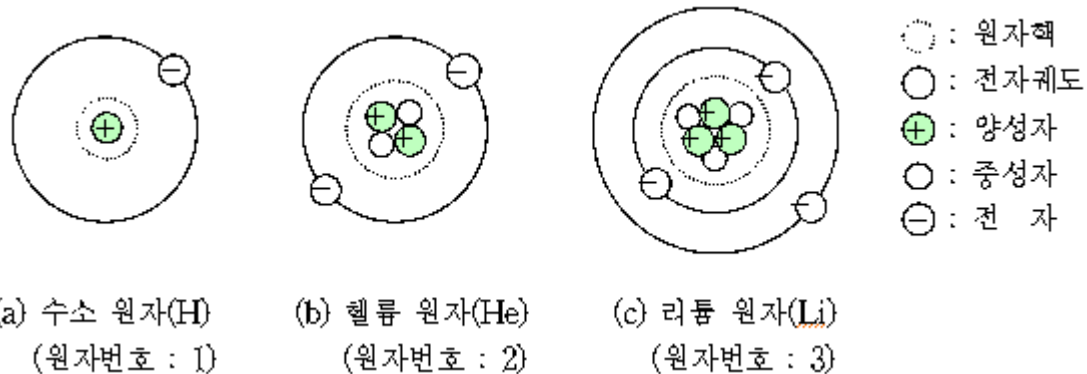


표 2.1 ▶ 원자의 구성입자

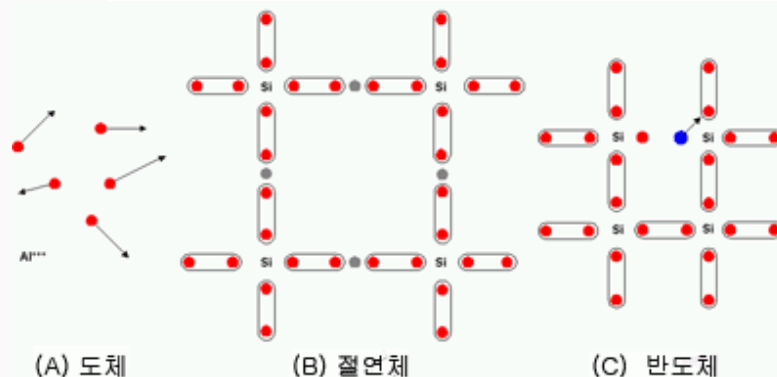
원자의 입자		전하량(전기량) Q	질 량 m	질량비
원자핵	양성자	$+1.602 \times 10^{-19} [C]$	$1.673 \times 10^{-27} [kg]$	1,840 배
	중성자	$0 [C]$	$1.673 \times 10^{-27} [kg]$	1,840 배
전 자		$-1.602 \times 10^{-19} [C]$	$9.107 \times 10^{-31} [kg]$	1 (기준)

2.1 대전연상

2.1.2 전기적 성질에 의한 물질의 분류

- 물질의 전기적 분류

- ① 도체(conductor) : 전하의 이동을 자유로이 허용하는 물질(금속, 대지, 전해액 등) : 자유전자
- ② 부도체(non-conductor) : 전하의 이동을 허용하지 않는 물질(공기, 애자, 기름, 운모, 순수한 물(증류수) 등) : 구속전자(속박전자)
- ③ 반도체(semiconductor) : 도체와 부도체의 중간의 성질을 갖는 물질(실리콘, 게르마늄 등) : 정공(홀, hole), 전자(도너, donor)



2.1 대전현상

2.1.3 정전유도현상

- 정전유도(electrostatic induction)현상 ※ 일반적으로 도체에서 전하분리가 일어나는 현상
: 중성 도체 A에 대전체 B를 접근시키면 그림과 같이 도체 A에는 대전체 B의 가까운 쪽에 다른 부호의 전하, 먼 쪽에 같은 부호의 전하가 나타나는 현상

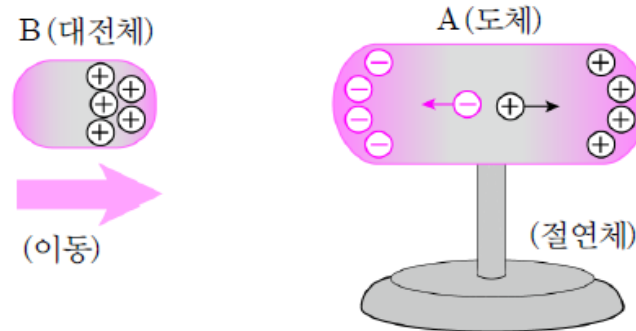


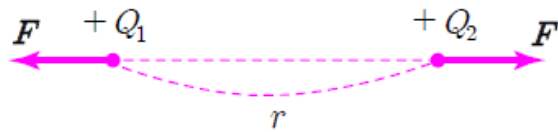
그림 2.1 ▶ 도체의 정전유도현상

- 도체 : 정전유도 현상은 같은 부호의 전하는 반발, 다른 부호의 전하는 서로 흡인하는 정전력의 작용으로 금속과 같은 도체뿐만 아니라 모든 물체에 발생 (도체내부에 이동하기 쉬운 자유전자에 의한 전하분리가 용이하기 때문)
- 절연체 : 전자에 대한 원자핵의 구속력이 강한 속박전자로 인해 전하 분리가 일어나지 않고 원자핵과 전자의 변위만 일으키면서 정렬하여 표면에 전기를 띠게 되는 현상을 전기분극(유전분극)

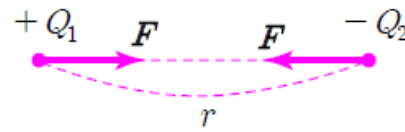
2.2 쿨롱의 법칙

2.2 쿨롱의 법칙

- 두 점전하 사이에 작용하는 전기력(힘) F : **전기력 또는 정전기력**

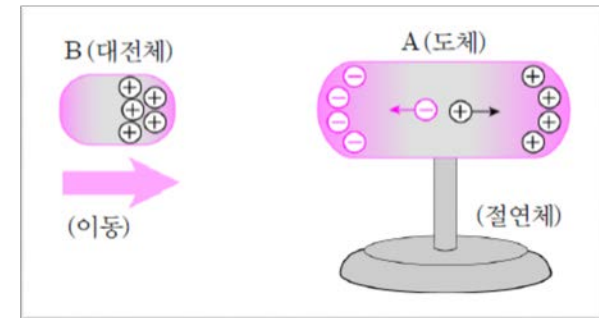


(a) 동종 전하(반발력)



(b) 이종 전하(흡인력)

그림 2.2 ▶ 쿨롱의 법칙



$$\textcircled{1} \text{ 크기 : } F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \text{ [N]}$$

- ② 방향 : 두 점전하를 연결하는 직선상에서의 방향으로 취함

동종전하(반발력), 이종전하(흡인력)

(진공의 유전율 ϵ_0)

$$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi C_0^2} = \frac{10^7}{4\pi \cdot (3 \times 10^8)^2} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

- 진공의 전파속도 $v_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 = c \text{ [m/s]}$ (광속)

※ 11.3.3장 평면파

2.2 쿨롱의 법칙

2.2 쿨롱의 법칙

● 힘 F 의 벡터량 구하는 방법과 순서

- (1) 좌표계에 점전하의 위치를 나타낸다. 단, 2차원 직교좌표계는 정확한 좌표의 위치를 좌표계에 나타내고, 3차원 공간 좌표계는 원점만 정확한 위치를 나타내며 나머지의 좌표는 임의의 위치에 나타내는 것이 편리하게 구할 수 있다.
- (2) 점전하 Q_1 에 의한 Q_2 가 받는 힘의 방향을 흡인력 또는 반발력으로 표시하여 그린다.
- (3) 두 점전하 사이의 변위벡터 r 의 방향을 힘의 방향과 동일한 방향으로 취함과 동시에 r 을 구한다. 또 변위벡터 r 방향의 단위벡터 r_0 를 구한다. 이 단위벡터 r_0 는 벡터의 상등에 의해 힘의 벡터 F 의 단위벡터가 된다.

$$r = r r_0 \quad \therefore r_0 = \frac{r}{r} \quad (2.4)$$

- (4) 벡터 F 는 식 (1.3)에 의해 벡터 $F = F r_0$ 의 관계식으로 나타낼 수 있고, 식 (2.3)의 힘의 크기 F 와 위에서 구한 단위벡터 r_0 를 대입하여 구한다. 즉,

$$F = F r_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} r_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \cdot \frac{r}{r}$$

$$\therefore F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^3} r \text{ [N]} \quad (2.5)$$

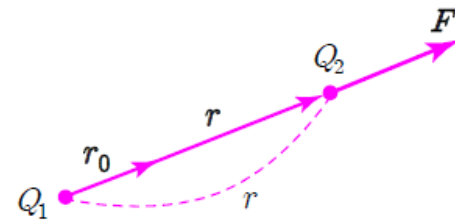


그림 2.3 ▶ 쿨롱의 법칙

2.3 전계와 전기력선

2.3.1 전계의 세기

- 전계(전기장, 전장, Electric field) : 전기력이 미치는 공간

- 정전계(Electrostatic field)

- 전하가 정지되어 있는 상태에서의 전계
- 전계에너지가 최소로 되는 전하분포의 전계

- 전계의 세기 E (한 개의 점전하 Q)

- 크기 : 전계(전기장) 내의 임의의 한 점에 단위전하 $+1[C]$ 을 놓았을 때, 이에 작용하는 힘(즉, 전계 내에서 $+1[C]$ 이 받는 힘)
- 방향 : 단위 정전하가 받는 힘의 방향

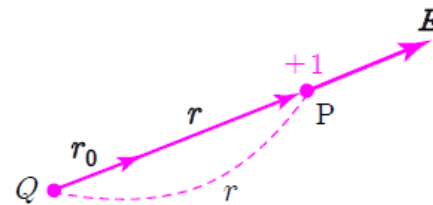
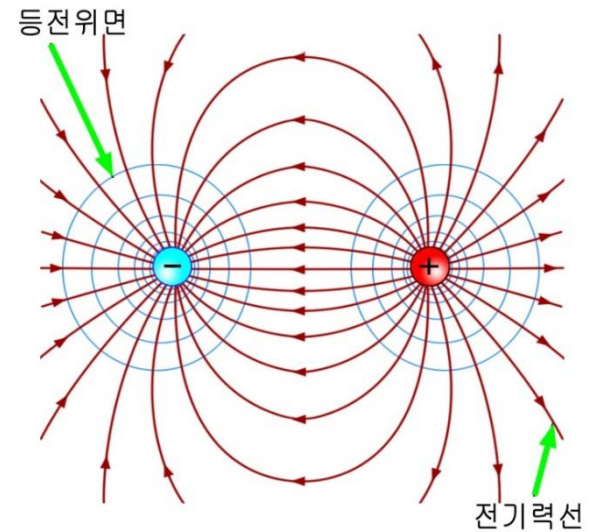


그림 2.7 ▶ 점전하에 의한 전계의 세기

2.3 전계와 전기력선

2.3.1 전계의 세기

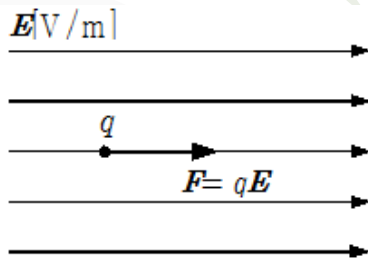
- 전계의 세기 E 와 힘 F 의 관계

: 전계의 세기 $E[V/m]$ 인 공간에서 임의의 한 점의 전하 $q[C]$ 이 받는 힘 F

$$F = qE[N], \quad E = F/q[V/m]$$

(1) 양성자 전하 $q[C]$ 인 경우

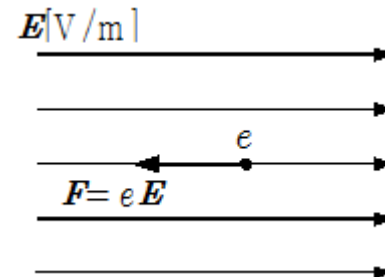
- 힘의 크기 : $F = qE[N]$
- 힘의 방향 : 전기력선과 동일 방향



(양성자 $q[C]$ 인 경우)

(2) 전자 전하 $e[C]$ 인 경우

- 힘의 크기 : $F = eE[N]$
- 힘의 방향 : 전기력선과 반대 방향



(전자 $e[C]$ 인 경우)

2.3 전계와 전기력선

2.3.1 전계의 세기

(1) 한 개의 점전하에 의한 전계 E

- 크기 : 전계의 세기는 +1[C]이 받는 힘이므로 점 P에 우선 +1[C]을 놓고, 쿨롱의 법칙에 의한 전기력 F가 전계의 세기 E가 된다. 즉

$$E(=F) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q \times 1}{r^2} \text{ [V/m]}$$

$$\therefore E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \text{ [V/m]}$$

- 방향 : +1[C]이 받는 전기력에 의한 방향이 전계의 방향이 됨

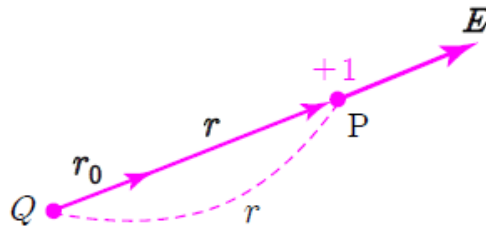


그림 2.7 ▶ 점전하에 의한 전계의 세기

2.3 전계와 전기력선

2.3.1 전계의 세기

(2) 복수 개의 점전하에 의한 전계 E

- 여러 개의 점전하에 의한 임의의 한 점 P에서의 전계의 세기는 각 점전하에 의한 전계를 구하여 벡터적으로 합성한다.
- 즉, 합성전계 E는

$$E = E_1 + E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{r_1^2} r_{01} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_2}{r_2^2} r_{02}$$
$$\therefore E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i^2} r_{0i}$$

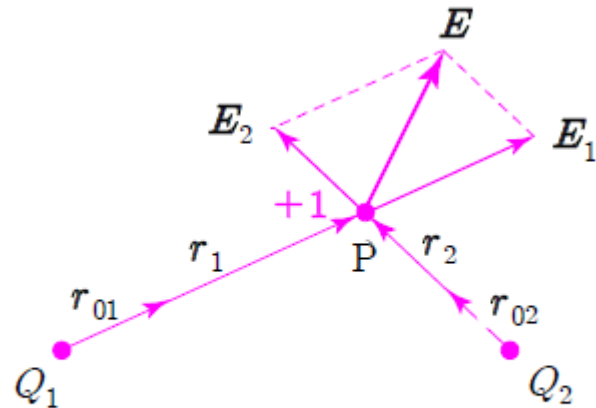
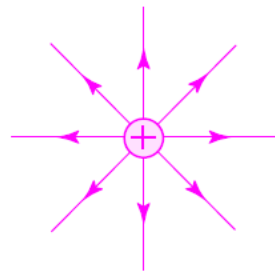


그림 2.10 ▶ 복수 개의 점전하에 의한 전계

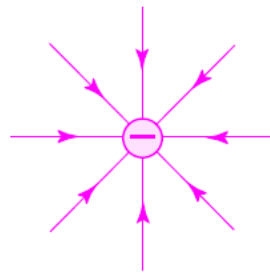
2.3 전계와 전기력선

2.3.2 전기력선

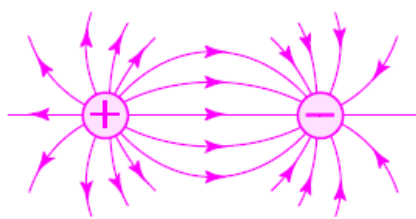
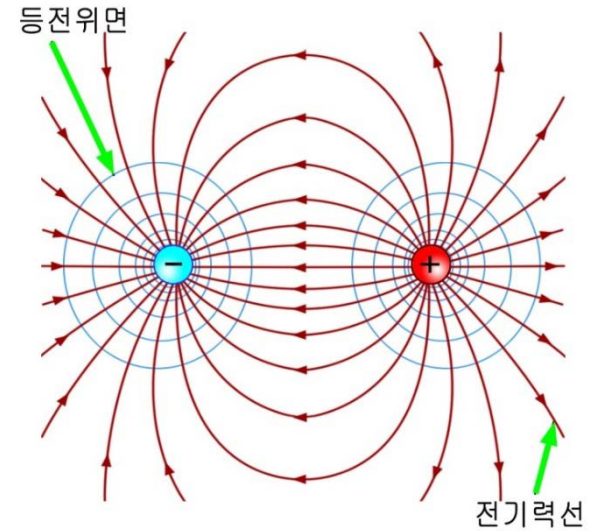
- 전기력선 : 전계 내에서 단위전하 $+1[C]$ 이 아무 저항없이 전기력에 따라 이동할 때 그려지는 가상선
- 전기력선의 분포



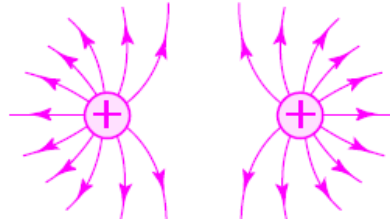
(a) 정(+의 점전하



(b) 부(-의 점전하



(c) 동량의 부호가 반대인 두 전하



(d) 동량의 부호가 똑같은 두 전하

그림 2.13 ▶ 점전하와 전기력선의 분포

2.3 전계와 전기력선

2.3.2 전기력선

● 전기력선의 성질

- ① 전기력선은 정(+)**전하**에서 출발하여 부(-)**전하**에서 멈추거나 무한원까지 퍼진다.
- ② 전기력선은 서로 교차하지 않으며, 전하가 없는 곳에서는 전기력선의 발생과 소멸이 없고 연속적이다.
- ③ 전기력선 밀도는 전계의 세기와 같다.
- ④ 전기력선상의 임의의 한 점에서의 접선 방향은 그 점의 전계의 방향을 나타낸다. 즉, 전기력선의 방향은 전계의 방향과 일치한다.
- ⑤ 전기력선은 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 향한다.
- ⑥ 전기력선은 등전위면과 직교한다.

2.3 전계와 전기력선

2.3.2 전기력선

- 전계의 세기 E의 선속 개념

전계의 세기 = 전기력선 밀도

$$E [V/m] = \frac{N}{S} [\text{lines}/m^2]$$

(전계의 세기) = (전기력선 밀도)

$$\left(\text{전기력선 밀도} = \frac{\text{전기력선 총수}(N)}{\text{면적}(S)} \right)$$

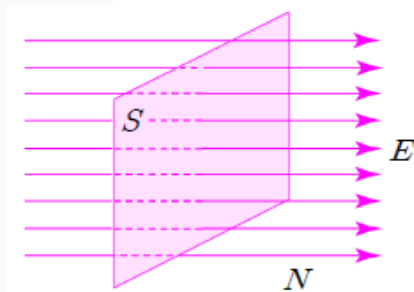
(전기력선 밀도 : 단위면적당 전기력선 수)

- 전기력선 수 N

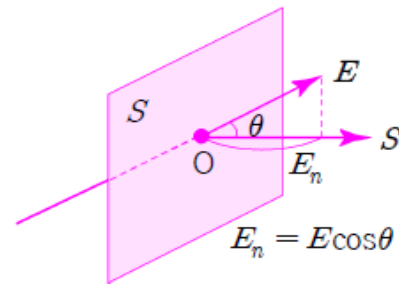
(1) (균일한 계[평면]) 전계(전기력선) E가 면적 S에 수직으로 관통하는 전기력선

총수 N [그림 a]

$$N = ES [\text{lines}]$$



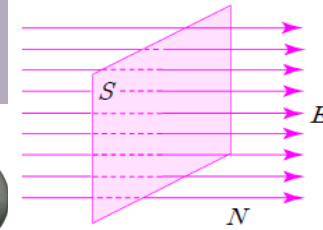
(a) 수직 관통



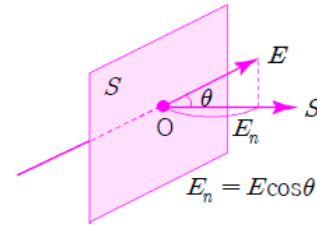
(b) 각 θ 관통

그림 2.14 ▶ 균일한 계에서 전기력선 수

2.3 전계와 전기력선



(a) 수직 관통



(b) 각 θ 관통

그림 2.14 ▶ 균일한 계에서 전기력선 수

2.3.2 전기력선

● 전기력선 수 N

(2) (균일한 계[평면]) 전계 E 가 면벡터 S 와 각 θ 로 관통하는 전기력선 총수 N
 [그림 b]

$$N = E_n S = ES \cos \theta = \mathbf{E} \cdot \mathbf{S} \text{ [lines]} : \text{일반식(균일한 계)}$$

(1)의 수직으로 관통은 면벡터 S 와 전계 E 는 $\theta = 0$ 이고, 이를 윗 식에 대입하면 수직으로 관통하는 (1)과 동일한 값 $N = ES \text{ [lines]}$ 이 나옴

(3) (불균일한 계[곡면] S) 전계 E 가 곡면 S 를 관통하는 전기력선 총수 N

$$dN = E dS \cos \theta = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \text{ [lines]}$$

$$N = \int_S E dS \cos \theta = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \text{ [lines]} \quad \text{※ 모든계에서 선속수의 일반식}$$

※ (우변) 벡터의 면적분 : 전면적 S 에 수직으로 관통하는 벡터장의 선속수 의미

$$\int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \text{ [lines]} : \text{곡면 } S \text{를 관통하는 전기력선 총수 } N \text{ (E : 전기력선 밀도)}$$

$$\int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} \text{ [lines]} : \text{곡면 } S \text{를 관통하는 전속선 총수 } \phi \text{ (D : 전속밀도)}$$

2.3 전계와 전기력선

2.3.2 전기력선

- 전계의 세기와 전기력선의 밀도와의 관계
→ 전기력선은 전하량과 같음

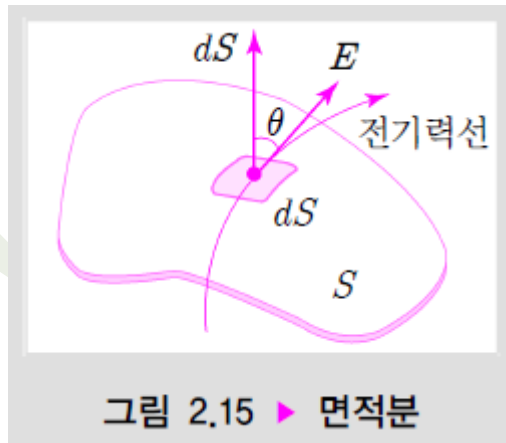
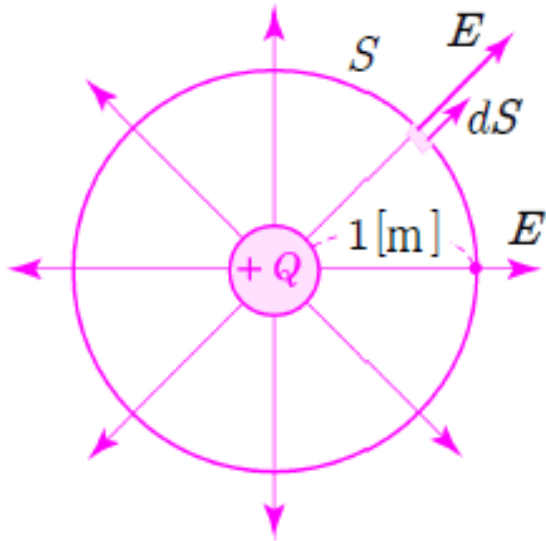


그림 2.15 ▶ 면적분

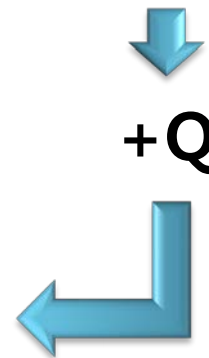
$$E [\text{V/m}] = \frac{N}{S} [\text{lines/m}^2]$$

(전계의 세기) = (전기력선 밀도)

※ dS를 매우 작게 자르면
결국 수직으로 나오는
전기력선만 남게 된다.
이 의미는? $\text{Cos}0 = 1$

$$N = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \int_S E dS \cos\theta = \int_S E dS \cos 0^\circ$$

$$= E \int_S dS = ES = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \times 4\pi = \frac{Q}{\epsilon_0} [\text{lines}]$$



+Q

2.4 전속과 전속밀도

전속과 전속밀도

- 전속(선) Φ : 전기력선은 매질(유전율, ϵ)에 따라 변화하므로, 매질에 관계없는 일정한 선속인 전속선을 도입하여 전계 및 유전체 해석을 용이하게 함

“전속 Φ 는 매질에 관계없이 전하 $Q[C]$ 일 때 Q 개의 전속선이 나온다.”

(즉, 전속 Φ 는 매질에 관계없이 전하량 $Q[C]$ 과 같다.)

전하 $Q[C]$: 전속선 $\Phi = Q[\text{개, 선}] \rightarrow$ 전속선 $\Phi = Q[C]$ (전속의 단위 $[C]$)

전하 $1[C]$: 전속선 $\Phi = 1[\text{개, 선}] \rightarrow$ 전속선 $\Phi = 1[C]$ (전속의 단위 $[C]$)

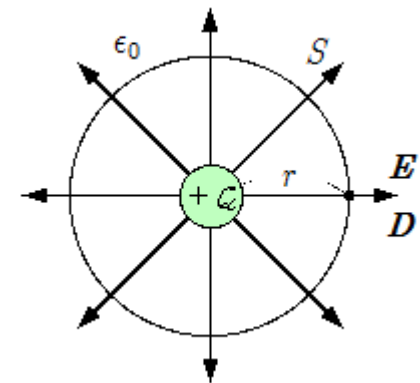
- 전속밀도 D : 단위면적당 전속(선)수

$$D = \frac{\Phi}{S} = \frac{Q}{S} [C/m^2] \quad (\Phi = Q[C])$$

- 전속밀도 D 와 전계 E 의 관계[그림]

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} [V/m] \quad D = \frac{\Phi}{S} = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{4\pi r^2} [C/m^2]$$

$$\therefore D = \epsilon_0 E [C/m^2] \quad \text{또는} \quad E = \frac{D}{\epsilon_0} [V/m]$$



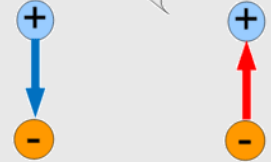
2.4 전속과 전속밀도

유전율

- 유전율 (誘電率, Permittivity)

- 유전체 : 전기는 흐르지 않고 분극만 되는 물질
- 부도체 : 원자핵에 대한 전자의 구속력이 강하여 전자는 물질내를 이동할 수 없고 외부의 전기력에 의해 전자와 원자핵의 변위만 일으킨다. (유전체, 절연체)
- 두 개의 금속판 사이에 유전율이 높은 물질을 채워 넣으면 두 개의 금속판에 적은 전압을 가해도 많은 전하를 저장할 수 있는데 이것을 유전 물질의 분극현상 때문임
- 금속은 자유전자(free electron)가 존재하므로 전압을 가하면 일정한 방향으로 자유롭게 움직이는 것이 가능하다. 그러나 유전물질(dielectric material) 은 자유전자가 없어서 전압을 가해도 자유롭게 움직일 수 없다. 그러나 전자가 이동할 수는 없어도 한쪽으로 치우치는 형태로 변할 수는 있음

전속과 분극벡터의 방향은 반대다.



$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_{pv} \quad \nabla \cdot \vec{P} = -\rho_{pv}$$

2.4 전속과 전속밀도

유전율

- 커패시터의 주요기능

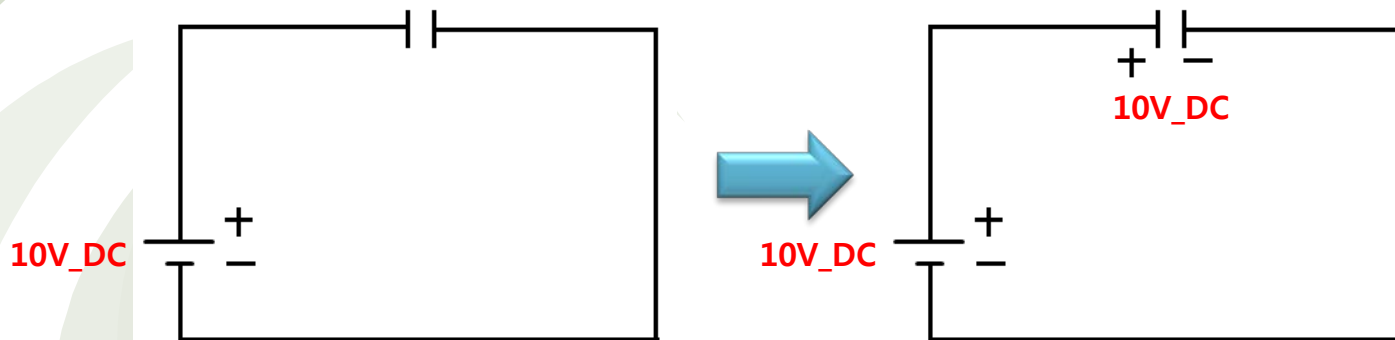
1) 전기를 저장하거나 방출하는 축전지의 기능

Ex. 전원회로의 평활회로, 마이크로 컴퓨터의 백업회로

2) 직류를 통하지 않게 하는 기능

Ex. 특정주파수 성분만을 추출 또는 제거하는 필터역할

※ 작은 용량의 커패시터는 충전시간이 짧으므로 높은주파수의 전류를 넣어주어야 만이 전류가 흐른다.



참조) 전기용량 = Capacity → Capacitor

전기를 압축 (Condense)하는 의미로 축전기 → Condensior