진공중의 정전계

- ε_0 (진공중의 유전율) = 8.855×10^{-12} [F/m]

- 쿨롱의 법칙
$F = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \dfrac{Q_1 Q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \dfrac{Q^2}{r^2}$ [N]

- 전계의 세기 E [V/m = N/C] : 단위 정전하가 받는힘
$\mathbf{E} = 9 \times 10^9 \dfrac{Q}{r^2} \mathbf{a}_r \rightarrow E = 9 \times 10^9 \dfrac{Q}{r^2}$ [V/m = N/C]

- 전위(전압) [J/C = V] : $V = 9 \times 10^9 \dfrac{Q}{r^2}$

- F, E, V 의 비교 :
$F = QE = qE = eE = ma = mg = m\dfrac{v}{t}$
$V = Er = Ed$

- 도체구의 성질
  1. 주입된 전하는 도체 표면에만 존재
  (도체내부의 전계 $E = 0$, 전위 $V =$ 일정하게 존재)
  2. 전기력선은 도체표면과 수직으로 발산, 흡입된다
  (전기력선과 수직인면=등전위면→V 값은 항상일정)
  3. 도체 표면의 전기력선 밀도 = 전계의 세기
  4. 주입된 전하는 곡률이 큰 (곡률 반경이 작은) 곳에 집중.

- 포와송 방정식 : $\nabla^2 \cdot V = -\dfrac{\rho}{\varepsilon_0}$

- 라플라스 방정식(자유공간 $\rho = 0$) : $\nabla^2 \cdot V = 0$

- 전기력선 방정식 : $\dfrac{d_x}{E_x} = \dfrac{d_y}{E_y} = \dfrac{d_z}{E_z}$

- 전계 계산식 $\mathbf{E}$ [V/m]
  1. 전하 Q 가 주어질때 : $\mathbf{E} = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \mathbf{a}_r \rightarrow E = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$
  2. V 와 R 이 주어진 경우 : $E = \dfrac{V}{r} = \dfrac{V}{l}$
  3. 선 전하 밀도가 주어진 경우 : $\mathbf{E} = \dfrac{\rho_L}{2\pi\varepsilon_0 \rho} \mathbf{a}_\rho$
  4. 면 전하 밀도가 주어진 경우
     - 무한평판 : $\mathbf{E} = \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0} \mathbf{a}_x$
     - 두개평판 또는 (구)도체 : $\mathbf{E} = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0} \mathbf{a}_x$
  5. 가상구 : $E = \dfrac{Q \cdot r}{4\pi\varepsilon_0 a^3} \propto r$
  6. 전위경도 : $\mathbf{E} = -\nabla V$
  (전계와 전위경도는 크기는 같고 방향은 반대이다)

- 정전응력 f_e [N/m^2] = 에너지 밀도 dW_E/dv = [J/m^3]
⇒ 도체 표면에 작용하는 힘
$f_e = \dfrac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 = \dfrac{1}{2} DE = \dfrac{D^2}{2\varepsilon_0}$

- 전기 쌍극자 모멘트 : $\mathbf{p} = Q\mathbf{d}$ [C·m]
$V = \dfrac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{a}_r}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \dfrac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cos\theta$ [V] $\theta = 0^o$ 일때 V 최대
$E = \dfrac{V}{r} \propto \dfrac{1}{r^3} \rightarrow r^3$에 반비례

진공중의 도체계

- 전위계수 $P_{rr} = P_{sr}$ (s 도체는 r 도체 내부에 존재)
$V_i = \sum_j P_{ij} Q_j$, $Q_i = \sum_j q_{ij} V_j$

- 용량계수, 유도계수
$q_{rr} > 0 \Rightarrow$ 용량계수, $q_{sr} \leqslant 0 \Rightarrow$ 유도계수

- 정전용량 C [F] 계산식
  1. 동심구 : $Q = CV$[C], $C = \dfrac{4\pi\varepsilon_0}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b}} = \dfrac{4\pi\varepsilon_0 ab}{b-a}$ [F]
  2. 반경 a[m] 인 도체구 : $C = 4\pi\varepsilon_0 a$ [F]
  3. 평행판 콘덴서 : $C = \dfrac{\varepsilon_0 S}{d}$ [F]
  4. 동심원통 : $C = \dfrac{2\pi\varepsilon_0 l}{\ln\frac{b}{a}}$[F], $C = \dfrac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{b}{a}}$ [F/m]
  5. 두 평행 도선간 : $C = \dfrac{\pi\varepsilon_0 l}{\ln\frac{d}{r}}$[F], $C = \dfrac{\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{d}{r}}$ [F/m]

유전체

- 유전율 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ [F/m] 전속밀도 $D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E = \varepsilon E$ [C/m^2]

- 분극 P [C/m^2]⇒ 유전체 내의 전속밀도
$P = \chi_e E = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E - \varepsilon_0 E = \varepsilon E - \varepsilon_0 E$
$P = D - \varepsilon_0 E = D - \dfrac{\varepsilon_0 \varepsilon_r E}{\varepsilon_r} = D - \dfrac{D}{\varepsilon_r} = D\left(1 - \dfrac{1}{\varepsilon_r}\right)$

- 경계조건 (p.152)
  1. 전계 E 의 평행(접선)성분은 같다.
  $E_1 \sin\theta_1 = E_2 \sin\theta_2$
  2. 전속 D 의 수직(법선)성분은 같다.
  $D_1 \cos\theta_1 = D_2 \cos\theta_2$, $\varepsilon_1 E_1 \cos\theta_1 = \varepsilon_2 E_2 \cos\theta_2$
  3. 전속선은 유전율이 큰쪽으로 집중된다.
  $\dfrac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \dfrac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$, $\theta \propto \varepsilon$
  4. 힘은 유전율이 작은 쪽으로 작용한다.
  수평성분 $= \dfrac{1}{2}\varepsilon E^2$, 수직성분 $= \dfrac{D^2}{2\varepsilon}$

전류

- 옴의 법칙
전류밀도 $i = \mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} = \dfrac{I}{S}$ [A/m^2]
$k = \sigma$: 도전율 [℧/m], $\rho = \dfrac{1}{\sigma}$: 비저항, 고유저항율 [Ω·m]

- $RC = \rho\varepsilon \Rightarrow R = \dfrac{\rho\varepsilon}{C}$ $\left[\because R = \rho\dfrac{l}{s}, C = \dfrac{\varepsilon S}{l}\right]$

전계와 자계의 비교

전계	자계
전하 : Q[C]	자극의 세기 m[Wb]
유전율 : $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$[F/m]	투자율 : $\mu = \mu_0 \mu_r$[H/m]
전계 : $E = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$ $E = 9\times 10^9 \dfrac{Q}{r^2}$[V/m]	자계 : $H = \dfrac{m}{4\pi\mu_0 r^2}$ $H = 6.33\times 10^4 \times \dfrac{m}{r^2}$[AT/m]
전위 : $V = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$ $V = 9\times 10^9 \dfrac{Q}{r}$[V]	자위 : $V_m = \dfrac{m}{4\pi\mu_0 r} = U$ $V_m = 6.33\times 10^4 \times \dfrac{m}{r}$[AT]
전속밀도 : $D = \varepsilon E = \varepsilon_0 E + P$ [C/m^2]	자속밀도 : $B = \mu H = \mu_0 (H + M)$ [Wb/m^2]
분극 : $P = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) E$, $P = D\left(1 - \dfrac{1}{\varepsilon_r}\right)$ [C/m^2]	자화의 세기 : $M = \mu_0 (\mu_r - 1) H = J$, $M = B\left(1 - \dfrac{1}{\mu_r}\right)$ [Wb/m^2]
정전응력 : $f_e = \dfrac{1}{2}\varepsilon E^2$ $f_e = \dfrac{1}{2} DE = \dfrac{D^2}{2\varepsilon}$[N/m^2]	에너지밀도 : $f_m = \dfrac{1}{2}\mu H^2$ $f_m = \dfrac{1}{2} BH = \dfrac{B^2}{2\mu}$ [J/m^2]

진공중의 정자계

- 자계 계산식
  1. 반경 a[m] 인 원형 코일 중심의 자계 $H = \dfrac{I}{2a}$ [AT/m]
     권수 (N) 이 주어진 경우 $H = \dfrac{NI}{2a}$ [AT/m]
     z 축 상에서의 자계 $H = \dfrac{I \cdot a^2}{2(a^2+z^2)^{\frac{3}{2}}}$ [AT/m]
  2. 무한장 직선도체 $H = \dfrac{I}{2\pi r}$ [AT/m]
  3. 유한장 직선도체 $H = \dfrac{I}{4\pi r}(\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1)$ [AT/m]
  4. 반경 a[m] 인 무한장 가상원통도체
     (내부에 전류분포가 균일→ 가정)
     $H = \dfrac{r \cdot I}{2\pi a^2} \propto r$[AT/m]
  5. 환상 솔레노이드 내부자계 $H = \dfrac{N \cdot I}{2\pi r}$ [AT/m]
  6. 무한장 직선 솔레노이드 내부자계 $H = n_0 \cdot I$
     where $n_0 =$ 1m 당 권수
     (솔레노이드 내부⇒ 평등자장 , 외부 $H = 0$)
  7. 정 n 변형 중심자계 : $H = \dfrac{nI\tan\frac{\pi}{n}}{2a}$

자기회로, 전자유도, 인덕턴스

- 히스테리시스 곡선 (B - H) 곡선
  종축 (자속밀도) : 잔류자기, 횡축 (자계) : 보자력
  영구자석 ⇔ 연철
  특징 : 보자력이 우수 , 잔류자기 우수
  ⇒ 히스테리시스 곡선의 면적이 크다
- 자기저항(리럭턴스) : $\Re = R_m = \dfrac{l}{\mu S}$
- 공극이 있는경우 자기저항 : $\Re_1 = \dfrac{l}{\mu S} + \dfrac{l_0}{\mu_0 S} = \dfrac{l + \mu_r l_0}{\mu S}$
- 공극이 없는 경우에 대한 있는경우 $\Re$ 의 비교
  $\dfrac{\Re_1}{\Re} = \dfrac{\frac{l+\mu_r l_0}{\mu S}}{\frac{l}{\mu S}} = \dfrac{l + \mu_r l_0}{l} = 1 + \dfrac{\mu l_0}{\mu_0 l}$
- 페러데이 법칙 : $e = -N\dfrac{d\Phi}{dt}$
  (-) : 렌츠의 법칙, N : 노이만의 법칙
  $L = \dfrac{N\Phi}{I} = \dfrac{N^2}{\Re} = \dfrac{\mu S N^2}{l} \propto N^2$
- 상호 인덕턴스 $M = k\sqrt{L_1 L_2} \rightarrow k$: 결합계수
  $M = \dfrac{N_2}{N_1} L_1$, $\dfrac{N_1}{N_2} L_2$, $M = \dfrac{\mu S N_1 N_2}{l}$
  - 가동접속(같은방향) $L = L_1 + L_2 + 2M$
  - 차동접속(다른방향) $L = L_1 + L_2 - 2M$

전자장(전계와 자계가 90 방향 공존)

- 변위전류 $I_d =$ 유전체 내에 흐르는 전류로 자기발생
  - 변위전류 밀도 $\mathbf{J}_d$[A/m^2] = $\dfrac{I_d}{S}$[A/m^2]
    $\mathbf{J}_d = \dfrac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \varepsilon \dfrac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \dfrac{\varepsilon}{d} \cdot \dfrac{\partial V}{\partial t}$
  - 변위전류 최대값 $I_{d,max} = wCV_m$
- 전 자 파
  1. 특성(고유, 파동) 임피던스 :
     $Z_0 = \dfrac{E}{H} = \sqrt{\dfrac{\mu}{\varepsilon}} = 377\sqrt{\dfrac{\mu_r}{\varepsilon_r}}$
  2. 속도 : $v = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \cdot \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}} = \dfrac{3\times 10^8}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}}$ [m/sec]
  3. 파장 : $\lambda = \dfrac{v}{f}$
- 포인팅 벡터 : 순시 전력밀도 (p.428)
  $\mathbf{S} = \dfrac{P}{S} = EH\sin\theta = \mathbf{E}\times\mathbf{H}$ [W/m^2]
- 맥스웰 방정식
  1. $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$ [C/m^3] ⇒ 가우스 법칙
  2. $\nabla \cdot \mathbf{B} = div\,\mathbf{B} = 0$⇒ 독립된 자극은 존재하지 않음
     (자속의 연속성)
  3. $\nabla \times \mathbf{E} = rot\,\mathbf{E} = -\dfrac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$⇒ 페러데이 법칙
  4. $\nabla \times \mathbf{H} = rot\,\mathbf{H} = \mathbf{J} + \dfrac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
     암페어 주회 적분의 법칙
     (전류와 자장의 관계를 가장 잘 나타냄)