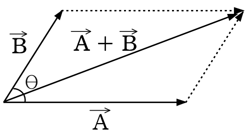
제 1 장 벡터의 해석

1. 벡터의 합과 차 : 같은 성분의 단위벡터의 계수끼리 더하고 뺀다.

$\vec{A} = A_x i + A_y j + A_z k$, $\vec{B} = B_x i + B_y j + B_z k$

$\vec{A} \pm \vec{B} = (A_x \pm B_x)i + (A_y \pm B_y)j + (A_z \pm B_z)k$

2. 평행 사변형의 원리



$|\vec{A}+\vec{B}| = \sqrt{A^2+B^2+2AB\cos\theta}$

3. 두 벡터량의 곱

$\vec{A} = A_x i + A_y j + A_z k$, $\vec{B} = B_x i + B_y j + B_z k$

1) 벡터의 내적 (·) : 벡터를 스칼라로 환원 시킨다.

① 내적의 정의식 : $\vec{A}\cdot\vec{B} = |\vec{A}||\vec{B}|\cos\theta$

② 내적의 성질:

$i\cdot i = j\cdot j = k\cdot k = 1$, $i\cdot j = j\cdot k = k\cdot i = 0$

③ 내적의 계산 : $\vec{A}\cdot\vec{B} = A_xB_x + A_yB_y + A_zB_z$

즉 같은 성분 끼리 계수만 곱하여 모두 합산한다.

2) 벡터의 외적 (×) : 벡터를 벡터로 (벡터곱)

① 외적의 정의식 :

$$\vec{A}\times\vec{B} = |\vec{A}||\vec{B}|\sin\theta\ n = |A\times B|\,n = \begin{vmatrix} i & j & k \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$$

② 외적의 크기 : 평행사변형의 넓이(면적)가 된다.

③ 외적의 방향 : 앞쪽 벡터에서 뒤 벡터를 오른손으로 감았을 때 엄지손가락의 방향. 즉, 오른나사법칙을 사용한다.

④ 외적의 성질

$i\times i = j\times j = k\times k = 0$

$i\times j = -j\times i = k$ (i 에서 j를 감으면 엄지는 k를가리킨다.)

$j\times k = -k\times j = i$ (j 에서 k를 감으면 엄지는 i를가리킨다.)

$k\times i = -i\times k = j$ (k 에서 i를 감으면 엄지는 j를가리킨다.)

⑤ 외적의 계산 : 행렬식으로 계산한다.

$$\vec{A}\times\vec{B} = |\vec{A}||\vec{B}|\sin\theta\, n = |A\times B|\,n = \begin{vmatrix} i & j & k \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$$

$$= (A_yB_z - A_zB_y)i - (A_xB_z - A_zB_x)j + (A_xB_y - A_yB_x)k$$

4. 미분 연산자

1) ▽(nabla) : $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$

$$\nabla\cdot\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k\right)\cdot\left(\frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k\right)$$

$= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \nabla^2$ 이며 이를 라플라스 연산자라 한다.

2) 스칼라 V의 구배(기울기) ($grad$) : 스칼라 함수 V 를 벡터로 환원

$$grad\, V = \nabla V = \left(\frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k\right)V = \frac{\partial V}{\partial x}i + \frac{\partial V}{\partial y}j + \frac{\partial V}{\partial z}k$$

3) 벡터의 발산 ($div\vec{E}$) : 벡터함수 $\vec{E}$ 를 스칼라로 환원

$$div\vec{E} = \nabla\cdot\vec{E} = \left(\frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k\right)\cdot(E_x i + E_y j + E_z k)$$

$$= \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$$

발산의 정리 : 면적분을 체적적분으로의 변환

$$\oint_s \vec{E}ds = \int_v div\vec{E}dv = \int_v \nabla\cdot\vec{E}dv$$

4) 벡터의 회전 (rotation, curl)

: 벡터 함수 $\vec{A}$ 를 벡터로 환원

$$rot\,\vec{E} = curl\,\vec{E} = \nabla\times\vec{E} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix}$$

$$= \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right)i - \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z}\right)j + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right)k$$

Stokes의 정리 : 선적분을 면적으로 변환

$$\oint_c \vec{E}dl = \int_s rot\vec{E}ds = \int_s \nabla\times\vec{E}ds$$

제 2 장 진공중의 정전계

1. 두 전하사이에 작용하는 힘 : $F = \frac{Q_1Q_2}{4\pi\epsilon_o r^2} = 9\times10^9\frac{Q_1Q_2}{r^2}$ [N]

2. 진공의 유전율 :

$$\epsilon_o = \frac{1}{\mu_o C_o^2} = \frac{10^7}{4\pi C_o^2} = \frac{10^{-9}}{36\pi} = \frac{1}{120\pi C_o} = 8.855\times10^{-12}\ [\mathrm{F/m}]$$

3. 전계의 세기 및 정의: $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_o r^2} = 9\times10^9\frac{Q}{r^2}$ [V/m]

임의의 전하 $Q[C]$과 단위 정전하($1[C]$)사이에 작용하는 힘

4. 전계내에 전하 Q [C]를 놓았을 때 전하가 전계에 의하여 받는 힘 : $F = QE$ [N]

5. 전기력선의 성질

① 전하가 없는 점에서는 전기력선의 발생 및 소멸은 없다.

② 전기력선은 정(+)전하에서 시작하여 부(-)전하에서 끝난다.

③ 전기력선의 방향은 그점의 전계의 방향과 일치한다.

④ 전기력선의 밀도는 전계의 세기와 같다.

⑤ 전기력선은 전위가 높은 점에서 낮은 점으로 향한다.

⑥ 전기력선은 서로 반발하여 교차 할 수 없으며 그 자신만으로 폐곡선을 이룰 수 없다.

⑦ 전기력선 전계 전하는 도체 표면과 외부공간에 존재하고 도체 내부에는 존재하지 않는다.(대전상태)

⑧ 전기력선 전계 전하는 도체표면과 수직으로 출입한다. (대전된 도체는 등전위이다)

⑨ 전하는 곡률이 큰 곳 곡률반경 작은 곳에 큰 밀도를 이룬다.

⑩ 전기력선의 수는 $\frac{Q}{\epsilon_0}$개다.

6. 전기력선의 수 : $N = \frac{Q}{\epsilon} = \frac{Q}{\epsilon_o \epsilon_s}$ [개] (진공시 $\epsilon_s = 1$)

7. 전속수 :$\Psi = Q$ [개] (매질과 관계없다.)

8. 전속밀도 $D = \frac{\Psi}{S} = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{4\pi r^2} = \epsilon_o E = \rho_s = \sigma$[C/m^2]

9. 가우스 법칙

전기력선수 $N = \int E\, ds = \frac{Q}{\epsilon_o}$: 대칭 정전계의 세기를 계산)

전속수 $\Psi = \int D\, ds = Q$: 폐곡면 내에서 전하와 전속의 상관 관계를 나타낸식

점전하 $Q[C]$

선전하 $\lambda = \rho_l = \frac{Q}{l}\,[C/m]$, $Q = \lambda\, l\,[C]$

면전하 $\sigma = \rho_s = \frac{Q}{S}\,[C/m^2]$, $Q = \sigma\, S[C]$

체적전하 $\rho = \rho_v = \frac{Q}{v}\,[C/m^3]$, $Q = \rho\, v\,[C]$

10. 점전하에 의한 전계의 세기 $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_o r^2}$ [V/m]

11. 구도체에 의한 전계의 세기

① 내외 전하 균일시 : (r > a) 외부의 전계의 세기

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

(r < a) 내부의 전계의 세기

$E_i = \frac{Q\, r}{4\pi\epsilon_o a^3}$ [V/m]

② 전하 대전시 : (r > a) 외부의 전계의 세기

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

(r < a) 내부의 전계의 세기 $E_i = 0$

12. 무한장 직선 전하에 의한 전계

$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_o r} = 18\times10^9\,\frac{\lambda}{r}$ [V/m] : 거리에 반비례 한다.

13. 원통(원주)도체에 의한 전계의 세기

① 내외 전하 균일시 :

(r > a) 외부의 전계의 세기 $E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_o r}$ [V/m]

(r < a) 내부의 전계의 세기 $E_i = \frac{\lambda r}{2\pi\epsilon_o a^2}$ [V/m]

② 전하 대전시 :

(r > a) 외부의 전계의 세기 $E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_o r}$ [V/m]

(r < a) 내부의 전계의 세기 $E_i = 0$

14. 무한 평면(무한평판)에 의한 전계

① 평행판, 구도체 표면에 면전하 존재시 : $E = \frac{\sigma}{\epsilon_o}$ [V/m]

② 무한평면 : $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_o}$ [V/m]

③ 무한 평판에 의한 전계의 세기는 거리와 무관하다.

15. 원형(원환)도체전하에 의한 전계

① $E = \frac{Qx}{4\pi\epsilon_o(a^2+x^2)^{\frac{3}{2}}}$ [V/m]

② 선전하λ[C/m]로 표현시 전계의 세기

$E = \frac{\lambda a x}{2\epsilon_o(a^2+x^2)^{\frac{3}{2}}}$ [V/m]

여기서 $a[m]$ 원환도선의 반지름, $x[m]$ 중심축상 거리

16. 전계의 세기 계산법 : 지정된 지점에 단위 정전하 +1[C]을 두고 지정된 거리까지 전하의 극성과 관계없이 각각 계산 후 1[C]을 기준으로 작용하는 힘의 방향이

서로 같은 방향이면 : $E_1 + E_2$,서로 반대 방향이면 : 大 – 小

※ 그림을 주지 않고 두 전하가 일직선상 수평(평행)으로 놓여져 있는 상황

① 일직선상 두 전하의 극성이 같으면: 임의의 전하와 단위 정전하 +1[C]사이로 전하의 극성에 관계없이 각각 전계를 계산 후 큰 전계에서 작은 전계를 빼준다

② 일직선상 두 전하의 극성이 다르면: 임의의 전하와 단위 정전하 +1[C]사이로 전하의 극성에 관계없이 각각 전계를 계산 후 큰 전계에서 작은 전계를 더 해준다

※ 정삼각형 정점의 전계의 세기

① 정삼각형 각 정점에 전하 존재 시 주어진 두전하의 극성과 전하량이 같다면 :

평행사변형의 원리를 이용 $\sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\theta} = \sqrt{3}\ E_1$

② 정삼각형 각 정점에 전하 존재 시 주어진 두전하의 극성은 다르고 전하량이 같다면 :

평행사변형의 원리를 이용 $\sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\theta} = E_1$

17. 전계의 세기가 0(최소) 되는 점: $E_1 = E_2$

① 두 전하의 극성이 같으면: 절대값 작은 전하 기준 두 전하 사이

② 두 전하의 극성이 다르면: 절대값 크기가 작은 전하의 외측

18. 전계의 세기 벡터 표시 방법 $\vec{E} = E\,|\vec{n}| = E\,\frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$

19. 전위의 정의 $V = -\int_{\infty}^{r} E\, dr = \int_{r}^{\infty} E\, dr$ [V]

20. 점전하 Q [C]에 의한 전위 $V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_o r} = 9\times10^9\frac{Q}{r}$ [V]

21. 전계 내에서 r [m]떨어진 점의 전위 V = E·r [V],

$E = \frac{V}{r}$[V/m]

22. 동심구 전위

①A 도체에 $+Q[C]$ B도체 $Q = 0\,[C]$ 인경우의 A도체의 전위

$V_A = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} + \frac{1}{c}\right)$[V]

② A도체에 $+Q$[C] B도체 $-Q$[C] 인 경우

$V_{AB} = V_A - V_B = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)$[V] 이다

23. 무한장 직선, 원통, 원주, 동축

① $V = \infty$

② 동축원통 : a 와 b사이의 전위차 $V = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0}\ln\frac{b}{a}$ [V]

여기서 a[m] : 내원통 반지름,

b[m] : 외원통 반지름, $\lambda = \rho_l$[C/m] : 선전하

24. 평행 두 도선간의 전위($d > a$) : $V = \frac{\lambda}{\pi\epsilon_0}\ln\frac{d}{a}$ [V]

여기서 $d[m]$: 극판사이 간격,

$a[m]$: 도선의 반지름, $\lambda = \rho_l$[C/m] : 선전하

25. 무한평면= 무한평판

① 무한평면 = 얇은판 $V = \infty$
② 두꺼운판 = 평행판 = 구도체 표면에 면전하존재

$V = Ed = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \cdot d[\mathrm{V}]$

여기서 $\sigma = \rho_s [\mathrm{C/m^2}]$: 면전하, $d = r = a[\mathrm{m}]$: 떨어진 거리

26. 1변의 길이가 $a[\mathrm{m}]$인 각 정점에 $Q[\mathrm{C}]$인 정사각형 중심 전위

$V = \frac{\sqrt{2}\ Q}{\pi\ \epsilon_0\ a}[\mathrm{V}]$ (전계는 $E = 0$)

27. 1변의 길이가 $a[m]$인 각 정점에 $Q[C]$인 정육각형 중심 전위

$V = \frac{3\ Q}{2\ \pi\ \epsilon_0\ a}[\mathrm{V}]$ (전계는 $E = 0$)

28. 전위의 기울기 : 전위함수를 가지고 전계의 세기를 구한다.

$E = -grad\ V = -\nabla\ V = -\frac{dV}{dr}[\mathrm{V/m}]$

29. 전기 쌍극자

① 전기 쌍극자 모멘트
$M = Q \cdot l\ [\mathrm{C \cdot m}]$ 단, l : 두 전하 사이의 미소거리
② 전위 $V = \frac{M}{4\pi\epsilon_o r^2}cos\theta = \frac{Ql}{4\pi\epsilon_o r^2}cos\theta = 9\times10^9\frac{M\cos\theta}{r^2}[\mathrm{V}]$
③ 전계의 세기

1) $E_r = \frac{2M}{4\pi\epsilon_o r^3}cos\theta\ [\mathrm{V/m}]$

2) $E_\theta = \frac{M}{4\pi\epsilon_o r^3}sin\theta\ [\mathrm{V/m}]$

3) 중심축 방향으로 향한다는 말이 나오면

$E = \frac{M}{4\pi\epsilon_o r^3}\sqrt{1+3\cos^2\theta}\ [\mathrm{V/m}]$

30. 전기력선의 방정식 : $\frac{dx}{E_x} = \frac{dy}{E_y} = \frac{dz}{E_z}$

① i, j 가 동일 부호이면 $y = Cx$ C(임의 상수)
② i,j 가 다른 부호이면 $y = \frac{C}{x}$
③(x,y) 한점(좌표값)이 주어지면 보기의 각 식에 대입하여 등식이 성립하면 답

31. 가우스의 발산의 정리

$N = \int_S E\ ds = \int_v div\ E\ dv = \int_v \frac{\rho}{\epsilon_0}\ dv$

가우스의 미분형

① $divE = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ ② $divD = \rho[\mathrm{C/m^3}]$

여기서 $\rho[\mathrm{C/m^3}]$는 체적당 전하량(공간전하밀도) 이다

32. 포아손의 방정식 :
전위함수를 가지고 공간전하밀도를 구한다.

$-\nabla^2 V = \frac{\rho}{\epsilon_o}$ 또는 $\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_o}$

(단, $\rho[\mathrm{C/m^3}]$: 단위체적당 전하량 = 공간전하밀도)

33. 라플라스 방정식 : 전하가 없는 곳의 포아손의 방정식
$\nabla^2 V = 0$

제 3 장	진공중의 도체계

1. 정전 용량 $C = \frac{Q}{V} = \frac{\text{전기량}}{\text{전위차}}[\mathrm{F}]$

① 축적되는 전하량 $Q = CV[C]$

② 전위차 $V = \frac{Q}{C}[\mathrm{V = C/F}]$

③ 엘라스턴스 $P = \frac{1}{C} = \frac{V}{Q} = \frac{d}{\epsilon_0\ S}[\mathrm{daraf} = \frac{1}{\mathrm{F}}]$

2. 전위 계수 및 성질 ($P_1 = P_r$, $P_2 = P_s$)
① $V_1 = P_{11}Q_1 + P_{12}Q_2$
② $V_2 = P_{21}Q_1 + P_{22}Q_2$
③ $P_{11} > 0$, $P_{11} \geqq P_{12}$, $P_{12} = P_{21} \geqq 0$,
$P_{11} = P_{12}$ (1 도체는 2 도체를 포함한다.)

3. 유도 계수 및 용량 계수의 성질 ($q_1 = q_r$, $q_2 = q_s$)
① $Q_1 = q_{11}V_1 + q_{12}V_2$
② $Q_2 = q_{21}V_1 + q_{22}V_2$
③ $q_{11} > 0$, $q_{11} \geqq -q_{12}$, $q_{12} = q_{21} \leqq 0$
$q_{11} = -q_{12}$ (2 도체는 1 도체를 포함한다.)

4. 전위계수에 의한 전위차($\pm Q[C]$대전시) :
$V_1 - V_2 = (P_{11} - 2P_{12} + P_{22})Q\ [\mathrm{V}]$

5. 전위계수에 의한 정전 용량($\pm Q[C]$대전시) :
$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} = \frac{1}{P_{11} - 2P_{12} + P_{22}}[\mathrm{F}]$

6. 구도체의 정전 용량 : $C = 4\pi\epsilon_o r\ [\mathrm{F}]$
(단, r는 구도체의 반지름)

7. b > a 동심구의 정전용량 :
$C = \frac{4\pi\epsilon_o}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b}} = \frac{4\pi\epsilon_o ab}{b-a} = \frac{1}{9\times10^9} \cdot \frac{ab}{b-a}[\mathrm{F}]$

$a[\mathrm{m}]$: 동심구의 내 반지름, $b[\mathrm{m}]$: 동심구의 외 반지름

8. 평행판 정정용량 : $C = \frac{\epsilon_o S}{d}[\mathrm{F}]$

(단위 면적당 $C = \frac{\epsilon_0}{d} = \frac{E\epsilon_0}{V}[\mathrm{F/m^2}]$)

$S[\mathrm{m^2}]$: 극판의 면적 $E[\mathrm{V/m}]$: 전계, $V[\mathrm{V}]$: 전위차

9. b > a 동심 원통 도체의 정전용량 : $C = \frac{2\pi\epsilon_o}{\ln\frac{b}{a}}[\mathrm{F/m}]$

$a[\mathrm{m}]$: 내 원통의 반지름, $b[\mathrm{m}]$: 외 원통의 반지름

10. d > a 평행 도선간의 정전용량 $C = \frac{\pi\epsilon_o}{\ln\frac{d}{a}}[\mathrm{F/m}]$

$d[\mathrm{m}]$:평행 두 도선 사이의 거리, $r[\mathrm{m}]$: 도선의 반지름

11. 합성 정전 용량

1) 직렬 연결(저항의 병렬 개념으로 해석)

① 합성정전용량 : $C = \dfrac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ [F]

② 전압 분배 법칙 : $V_1 = \dfrac{C_2}{C_1+C_2}V$ [V], $V_2 = \dfrac{C_1}{C_1+C_2}V$ [V]

③ 먼저 파괴되는 콘덴서 : $Q = CV$[C]으로 계산 시 전하량이 가장 작은 콘덴서가 먼저 파괴 된다

전체내압 $= \dfrac{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}{\frac{1}{C_1}} \times$ 내압 $[V]$

여기서 분모의 $\dfrac{1}{C_1}$은 먼저 파괴되는 콘덴서이다

2) 병렬 연결 = 가는 선으로 연결 = 접촉

(저항의 직렬 개념으로 해석)

① 합성정전용량 : $C = C_1 + C_2$ [F]

② 전하량 분배법칙 :

$Q_1 = \dfrac{C_1}{C_1+C_2}Q$[C], $Q_2 = \dfrac{C_2}{C_1+C_2}Q$[C]

③ 공통전위 = 단자전압 :

$V = \dfrac{Q}{C} = \dfrac{Q_1+Q_2}{C_1+C_2} = \dfrac{C_1V_1 + C_2V_2}{C_1+C_2}$

※ 도체구를 각각 충전 후 두 개를 가는 선으로 연결 시 공통 전위

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{Q_1+Q_2}{C_1+C_2} = \frac{C_1V_1+C_2V_2}{C_1+C_2} = \frac{r_1V_1+r_2V_2}{r_1+r_2} \text{ [V]}$$

여기서 r_1 r_2 [m] : 도체구의 반지름

12. 콘덴서에 저축되는 에너지

① 충전을 해야하는 상황 : 전압을 인가, 콘덴서에 저항 및 코일 연결 시

평행판 콘덴서일 경우 $W = \dfrac{1}{2}CV^2 = \dfrac{1}{2}\dfrac{\epsilon_0 S}{d}V^2$ [J] $\propto \dfrac{1}{\mathrm{d}}$

② 충전이 끝난 상황 (완충) : 전하Q[C] 대전 또는 주었다, 전원 인가 후 제거

평행판 콘덴서일 경우 $W = \dfrac{Q^2}{2C} = \dfrac{dQ^2}{2\epsilon_0 S}$ [J] $\propto$ d

③ 도체계 총에너지 $W = \dfrac{1}{2}\sum Q_n V_n$ [J]

※ 콘덴서 병렬 연결 시 전위차가 같아지도록 전하 이동이 생길 때 줄열 손실에 의해 에너지는 감소

: W(합친 후) $< W_1 + W_2$ (합치기 전)

비누 방울이 합칠 때 에너지는 증가 : W(합친 후) $> W_1 + W_2$ (합치기 전)

13. 전계 내에 축적되는 단위체적당 정전 에너지

$W_E = \dfrac{\sigma^2}{2\epsilon_o} = \dfrac{D^2}{2\epsilon_o} = \dfrac{1}{2}\epsilon_o E^2 = \dfrac{1}{2}ED$ [J/m³]

14. 대전 도체에 작용하는힘 = 면(판)에 작용하는 힘 = 정전응력 = 정전흡인력

단위 면적당 작용하는 힘

$f = \dfrac{\sigma^2}{2\epsilon_o} = \dfrac{D^2}{2\epsilon_o} = \dfrac{1}{2}\epsilon_o E^2 = \dfrac{1}{2}ED$ [N/m²]

15. 정전응력 전체적인 힘 $F = f\,S$ [N]

제 4 장	유 전 체

1.유전체

1) 전계 내 놓았을 때 유전체 내 속박전하의 변위에 의해서 분극현상이 나타나는 물질

2) ① 진공이나 공기 중 일 때는 $\epsilon_s = 1$

② 비유전율은 재질에 따라 다르다.

③ 비유전율 $\epsilon_s = \dfrac{\epsilon}{\epsilon_o} > 1$ 인 절연체

공기중(ϵ_0)	임의의 유전체 ($\epsilon = \epsilon_0\epsilon_s$)	유전율(ϵ_s)
$F_0 = \dfrac{Q_1Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$	$F = \dfrac{Q_1Q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_s r^2}$	$\dfrac{1}{\epsilon_s}$배 감소
$E_0 = \dfrac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$	$E = \dfrac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_s r^2}$	$\dfrac{1}{\epsilon_s}$배 감소
$V_0 = \dfrac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$	$V = \dfrac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_s r}$	$\dfrac{1}{\epsilon_s}$배 감소
$D_0 = \epsilon_0 E_0 = \dfrac{Q}{4\pi r^2}$	$D = \epsilon_0\epsilon_s E = \dfrac{Q}{4\pi r^2}$	불변
$C_0 = \dfrac{\epsilon_0 S}{d}$	$C = \dfrac{\epsilon_0\epsilon_s S}{d}$	$\epsilon_s = \dfrac{C}{C_o}$
Q 일정시 $W_0 = \dfrac{Q^2}{2C_0}$	$W = \dfrac{Q^2}{2\epsilon_s C_o}$	$\dfrac{1}{\epsilon_s}$배 감소
V 일정시 $W_0 = \dfrac{1}{2}C_0V^2$	$W = \dfrac{1}{2}\epsilon_s C_o V^2$	ϵ_s 배 증가

2. 분극의 세기

(분극전하밀도 = 전기분극도 = 유전체 표면의 전하밀도)

$P = D - \epsilon_0 E = \epsilon_o(\epsilon_s - 1)E = xE = D(1 - \dfrac{1}{\epsilon_s}) = \dfrac{M}{V}$ [C/m²]

① 분극률 $x = \epsilon_o(\epsilon_s - 1)$

② 비분극률$x_m = \dfrac{x}{\epsilon_o} = \epsilon_s - 1$

③ 비유전률 $\epsilon_s = \dfrac{x}{\epsilon_0} + 1$

1) 전자분극 : 다이아몬드와 같은 단결정체에서 외부 전계에 의해 양전하 중심인 핵의 위치와 음전하의 위치가 변화하는 분극

2) 이온분극 : $NaCl$ 과 같은 이온결합의 특성을 가진 물질에 전계를 가하면 + - 이온에 상대적 변위가 일어나 쌍극자를 유발하는 분극현상

3) 배향분극 : 물 암모니아 알콜등 영구 자기 쌍극자를 가진 유극분자들은 외부 전계와 같이 같은 방향으로 움직이려는 성질

4) 전기분극 : 유전체에 전계가 인가되면 유전체 안에 있는 중성 상태의 전자와 핵이 외부전계의 영향을 받아 전자운이 전계의 (+)쪽으로 치우쳐서 원자 내에서 약간의 위치이동을 하게 되어 전자운의 중심과 원자핵의 중심이 분리되는 현상

(=전자와 핵의 위치이동으로 인하여 극이 분리되는 것처럼 나타나는 현상)

3. 패러데이관

: 전속밀도의 역선인 전속선으로 역선에 의해 생긴관 역관이라고도 한다

1) 패러데이관내의 전속수는 일정하다.

2) 패러데이관 양단에는 정, 부 단위 전하가 있다.

3) 진 전하가 없는 점에는 패러데이관은 연속이다.

4) 패러데이관의 밀도는 전속밀도와 같다.

5) 단위 전위차 시 에너지는 1/2[J]

4. 복합유전체의 경계면 조건
※ 완전경계조건 :
1) 경계면(접선)에는 진전하가 존재하지 않음 $\sigma = 0$
2) 경계면(접선)에는 전위차는 없다

(1) 법선(수직) 전속밀도 $D_{n1} = D_{n2}$ 만 존재 **(법 밀 코)**

① $D_{n1} = D_{n2}$: 연속적이다
② $E_{n1} \neq E_{n2}$: 불연속적이다
여기서 n는 법선(수직)성분을 의미한다
③ $D_1\cos\theta_1 = D_2\cos\theta_2$, $\epsilon_1 E_1\cos\theta_1 = \epsilon_2 E_2\cos\theta_2$ → (1)식
(2) 접선(수평) = 경계면 전계 $E_{t1} = E_{t2}$ 만 존재 **(접 계 싸)**
① $E_{t1} = E_{t2}$: 연속적이다
② $D_{t1} \neq D_{t2}$: 불연속적이다
여기서 t는 접선(수평)성분을 의미한다
③ $E_1\sin\theta_1 = E_2\sin\theta_2$ → (2)식

(3) 굴절각
굴절각은 $\epsilon_1 \tan\theta_2 = \epsilon_2 \tan\theta_1$ 이며 유전체에 비례한다

※ 굴절하지 않을 경우
① $\theta_1 = 0$
② 전계와 전속밀도가 수직으로 입사할 때 이때 전계는 불연속 전속밀도는 불변

(4) 비례 관계 : $\epsilon_1 > \epsilon_2$일 때 $\theta_1 > \theta_2$, $D_1 > D_2$, $E_1 < E_2$

5. 경계면에 작용하는 힘($\epsilon_1 > \epsilon_2$)(Maxwell 변형력)
1) 유전율이 큰 쪽에서 작은 쪽으로 힘이 작용한다.
2) 전속(밀도)선은 유전율이 큰 쪽으로 모이려는 성질이 있다.
3) 전계(전기력선)는 유전율이 작은 쪽으로 몰리는 속성이 있다.

① 전계가 경계면에 수평으로 입사시 :($\epsilon_1 > \epsilon_2$)
$$f = \frac{1}{2}(\epsilon_1 - \epsilon_2)E^2 \ [\mathrm{N/m^2}]$$
경계면에서는 서로 밀어내는 압축응력(흡인력)이 작용한다.

② 전계가 경계면에 수직으로 입사시 : ($\epsilon_1 > \epsilon_2$)
$$f = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\epsilon_2} - \frac{1}{\epsilon_1}\right)D^2 \ [\mathrm{N/m^2}]$$
경계면에서는 서로 끌어당기는 인장응력(반발력)이 작용한다

6. 평등 전계중 유전체구
① $\epsilon_2 > \epsilon_1$ 유전체구의 전계 : $E' = \dfrac{3\epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2}E \ [\mathrm{V/m}]$
② $\epsilon_2 > \epsilon_1$ 유전체구의 분극의 세기 :
$$P = \frac{3\epsilon_1(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{2\epsilon_1 + \epsilon_2}E \ [\mathrm{C/m^2}]$$

7. 콘덴서의 직, 병렬 연결시 합성정전용량

① 병렬 연결 : 극판의 간격은 일정 극판의 면적이 나누어 진다
극판과 유전체를 수직으로 채운경우
$$C = \frac{1}{d}(\epsilon_1 S_1 + \epsilon_2 S_2) \ [\mathrm{F}]$$
② 직렬 연결 : 극판의 면적은 일정 극판의 간격은 나누어 진다
극판과 유전체를 수평으로 채운경우
$$C = \frac{S}{\dfrac{d_1}{\epsilon_1} + \dfrac{d_2}{\epsilon_2}} = \frac{\epsilon_1\epsilon_2 S}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \ [\mathrm{F}]$$

③ 공기 콘덴서에 유전체를 판간격 반만 평행하게 채운 경우
$$C = \frac{1}{\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2}} = \frac{2C_0}{1 + \dfrac{\epsilon_0}{\epsilon}} = \frac{2C_0}{1 + \dfrac{1}{\epsilon_s}} = \frac{2\epsilon_s}{1 + \epsilon_s}C_0 \ [\mathrm{F}]$$

제 5 장	전기 영상법

1. 접지무한평판과 점전하
1) 영상전하 $Q' = -Q\,[\mathrm{C}]$
① 영상전하는 점전하와 전기량(크기)는 같고 부호(극성)가 반대 이다.
② 영상전하는 점전하와 대칭인 지점에 존재한다.

2) 영상전하와 점전하 사이에 작용하는 힘 = 영상력
$$F = -9 \times 10^9 \frac{Q^2}{4a^2} = -2.25 \times 10^9 \frac{Q^2}{a^2} = -\frac{Q^2}{16\pi\epsilon_0 a^2} \ [\mathrm{N}]$$
(-) : 항상 흡인력 $a\,[\mathrm{m}]$: 무한평면에서 떨어진 거리

3) 점전하가 무한평면(무한원점)까지 이동시 한일(에너지)
$$W = F \cdot a = \frac{Q^2}{16\pi\epsilon_0 a} \ [\mathrm{J}]$$

4) 최대전하밀도=최대전속 밀도
$$\rho_{smax} = D_{\max} = -\frac{Q}{2\pi a^2} \ [\mathrm{C/m^2}]$$

2. $d > a$ 접지도체구와 점전하

1) 영상전하 $Q' = -\dfrac{a}{d}Q\,[\mathrm{C}]$
여기서 $d\,[\mathrm{m}]$: 접지 구도체 중심에서 떨어진 거리,
$a\,[\mathrm{m}]$: 접지구도체의 반지름

2) 영상전하 위치 : 접지구도체 내부인 $x = \dfrac{a^2}{d}\ [\mathrm{m}]$

3) 작용하는 힘 $F = \dfrac{Q \cdot Q'}{4\pi\epsilon\left(\dfrac{d^2 - a^2}{d}\right)^2}\ [\mathrm{N}]$

4) 항상 흡인력이 작용한다.

3. 접지무한 평판과 선전하

1) 영상 선전하 $\lambda' = -\lambda$[C/m]
2) 작용하는 힘 $f = -\dfrac{\lambda^2}{4\pi\epsilon h}$[N/m]
3) 항상 흡인력이 작용한다.
4) 도체와 대지사이의 정전용량 $C' = \dfrac{2\pi\epsilon}{\ln\dfrac{2h}{r}}\ [\mathrm{F/m}]$

5. 영상전하 개수

1) 무한평면이 직교 수직 $n = \dfrac{360^\circ}{\theta} - 1 = \dfrac{360^\circ}{90^\circ} - 1 = 3$
2) 무한평면 $n = \dfrac{360^\circ}{\theta} - 1 = \dfrac{360^\circ}{180^\circ} - 1 = 1$

제 6 장	전 류

1. 전기의 발생원인 : : 자유전자의 과부족현상

2. 전류I[A] : 단위 시간당 이동한 전기량의 크기

$I = \frac{Q}{t} = \frac{ne}{t}$ [C/sec=A]

단, n : 전자의 개수, $e = 1.602 \times 10^{-19}$[C] : 전자의 전하량

3. 전압V[V] :
전기량이 어떤 도선 내를 이동시 잃거나 얻는 에너지의 비

$V = \frac{W}{Q}$ [J/C = V] , $W = QV$[J]

4. 도선에서의 전기 저항R[Ω]

$R = \rho\frac{l}{S} = \rho\frac{l}{\pi r^2} = \rho\frac{4l}{\pi D^2} = \frac{l}{kS}$ [Ω]

여기서 $k = \sigma = \frac{1}{\rho}$ [℧ / m] : 도전율

$\rho = \frac{1}{k}$ [Ωm] : 고유 저항, l[m] : 도선의 길이

$S = \pi r^2 = \frac{\pi D^2}{4}$ [m²] : 도선의 단면적, r[m] : 반지름, D[m] : 지름

5. 온도 변화에 따른 저항값
도체의 처음 온도가 t[℃]의 저항값이 R_t 라면 나중 온도 T[℃]가 되었을 때의 저항값 R_T 는

$R_T = R_t[1+\alpha_t(T-t)] = R_t\frac{234.5+T}{234.5+t}$ [Ω] 이 된다.

α_t 는 t[℃]에서의 온도계수로서 $\alpha_t = \frac{1}{234.5+t}$이다.

※ 저항 2개가 직렬로 연결시 합성 온도계수 :

$\alpha = \frac{\alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2}{R_1 + R_2}$

6. 전력, 전력량, 주울열
1) 전력 : 단위 시간(1[sec])동안 전기가 한 일의 양

$P = VI = I^2R = \frac{V^2}{R} = \frac{W}{t}$ [W], [J/sec]

마력 환산 가능 (1[HP]= 746[W]) 열량환산 불가능

2) 전력량 : 전기장치가 일정 시간 동안 전기가 한 일의 양

$W = Pt = VIt = I^2Rt = \frac{V^2}{R}t$ [J = W · sec]

① 열량환산 가능 1[J] = 0.24[cal]
1[Wh] = 3600[W · sec] = 3600[J] = 860[cal]
1[KWh] = 3600[KJ] = 3.6 × 10⁶[J] = 860[Kcal]
② 마력환산 불가능

3) 전열기 출력
① 보일러의 흡수열량
비열 C[Kcal/Kg], 질량 M[Kg]인 물을T_1[℃]에서 T_2[℃]까지 상승 시키는데 필요한 열량 $Q = CMT = CM(T_2 - T_1)$[cal]
② 전열기의 발생열량
소비전력 P[KW], 효율이 η인 전열기를 이용하여 t[h]시간동안 물을 가열했다면 $H = 860Pt\eta = Cm(T_2 - T_1)$[Kcal]
만일 P[W], t[sec], m[g] 단위라면
$H = 0.24Pt\eta = Cm(T_2 - T_1)$[cal]

7. 전기저항과 정전용량의 관계
1)$RC = \rho\epsilon$ 2) 접지저항 $R = \frac{\rho\epsilon}{C}$[Ω]

3) 누설전류 $I = \frac{CV}{\rho\epsilon}$[A]

4) 여러 가지 도체의 접지저항
(손실유전체, 비저항물질, 정전용량을 준경우)

① 도체구
$R = \frac{\rho\epsilon}{C} = \frac{\rho\epsilon}{4\pi\epsilon a} = \frac{\rho\epsilon}{4\pi\epsilon a} = \frac{\rho}{4\pi a} = \frac{1}{4\pi k a}$[Ω]

② 반구 : $R = \frac{\rho}{2\pi a}$[Ω]

③ 동심구 : $R = \frac{\rho}{4\pi}\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{b}\right) = \frac{1}{4\pi k}\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{b}\right)$[Ω]

④ b > a 동축 : $R = \frac{\rho\epsilon}{C} = \frac{\rho\epsilon}{2\pi\epsilon l}ln\frac{b}{a} = \frac{\rho}{2\pi l}ln\frac{b}{a}$[Ω]

8. 전류 밀도 i[A/m²] : 단위 면적당 전류

$i = \frac{I}{S} = kE = nev = Qv$[A/m²]

여기서, I[A] : 전류 , S[m²] : 면적 , k[℧/m] : 도전율 , E[V/m] : 전계의 세기 n[개/m³] : 단위체적당 전자 개수 , v[m/sec] : 전자 이동속도 Q[C/m³] : 단위체적당 전하량

9. 전류의 연속성
임의의 도체 단면에 유입하는 전류의 총합은 유출하는 전류의 총합과 같다. (kirchoff의 제 1법칙)를 전류의 연속성이라 한다.

$\sum I = 0 = \int_s i \cdot dS = \int_v div\, i\, dv$가 되어 $div\ i = 0$이다.

즉 단위 체적당의 전류의 발산은 없다.

10. 전기의 여러가지 현상
1) 제백 효과(열전효과) : 서로 다른 금속을 접속하고 접속점을 서로 다른 온도를 유지하면 기전력이 생겨 일정한 방향으로 전류가 흐른다.
2) 펠티어 효과 (제벡의 역효과): 서로 다른 금속에서 다른 쪽 금속으로 전류를 흘리면 열의 발생 또는 흡수가 일어나는 현상을 펠티어 효과라 한다. 전자 냉동기의 원리
3) 톰슨 효과 : 동종의 금속에서 각부에서 온도가 다르면 그 부분에서 열의 발생 또는 흡수가 일어나는 효과를 톰슨 효과라 한다.
4) 홀(Hall) 효과 : 홀 효과는 전류가 흐르고 있는 도체에 자계를 가하면 플레밍의 왼손 법칙에 의하여 도체 내부의 전하가 횡방향으로 힘을 받아 도체 측면에 (+), (-)의 전하가 나타나는 현상이다.
5) 핀치 효과 : 직류(D.C)전압 인가시 전류가 도선 중심쪽으로 집중되어 흐르려는 현상
6) 파이로(Pyro)전기 (초전효과) : 롯셀염이나 수정의 결정을 가열하면 한면에 정(正), 반대편에 부(負)의 전기가 분극을 일으키고 반대로 냉각시키면 역의 분극이 나타나는 것을 파이로 전기라 한다.
7) 압전효과
① 어떤 유전체의 결정을 압력이나 인장을 가하면 그 응력으로 인하여 내부에 전기분극이 일어나고 그 단면에 분극전하가 나타나는 현상
② 압전기 진동자 : 압전기 현상이 가장 현저한 로셀염을 비롯하여 수정, 전기석, 티탄산바륨 등이 있다
③ 응용범위 : 마이크, 압력측정, 초음파발생, 전기진동(발진기),크리스탈픽업
④ 응력과 분극방향이 동일방향인 경우를 종효과
응력과 분극방향이 수직방향인 경우를 횡효과 라한다

8) 접촉전기 (=볼타효과)
도체와 도체, 유전체와 유전체, 유전체와 도체를 접촉시키면 전자가 이동하여 양, 음으로 대전되는 현상.

제 7 장 제 8 장	진공중의 정자계 및 전류에 의한 자계

정전계와 정자계의 대응관계

정 전 계		정 자 계	
유전율	$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_s$ [F / m] $\epsilon_0 = 8.855 \times 10^{-12}$ [F / m]	투자율	$\mu = \mu_0 \mu_s$ [H / m] $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H / m]
전하	Q[C] Q[C] : 정전하, $-Q$[C] : 부전하	자하 자극의 세기	m[Wb] m[Wb] : 정자하(N극), $-m$[Wb] : 부자하(S극)
쿨롱의 법칙	$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ [N] 동종에 전하는 반발력 이종의 전하는 흡인력	쿨롱의 법칙	`$F = \frac{m_1 m_2}{4\pi\mu_0 r^2}$ [N] 동종에 자하(자극)는 반발력 이종의 자하(자극)는 흡인력
쿨롱 상수	$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9$	쿨롱 상수	$\frac{1}{4\pi\mu_0} = 6.33 \times 10^4$
전계의 세기 (전장)	$E = \frac{F}{Q}$[V / m] $= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ 거리에 따라 감소하는 곡선 : 쌍곡선	자계의 세기 (자장)	$H = \frac{F}{m}$[A / m = AT / m] $= \frac{m}{4\pi\mu_0 r^2}$ 거리에 따라 감소하는 곡선 : 쌍곡선
전계내 작용하 는 힘	$F = QE$[N]	자계내 작용하 는 힘	$F = mH$[N]
전기력 선의 성질	전기력선은 폐곡선을 이룰수 없다 전기력선수 $N = \frac{Q}{\epsilon_o}$	자기력 선의 성질	자기력선은 폐곡선을 이룰수 있다 자기력선수 $N = \frac{m}{\mu_0}$
전계 세기 계산 방법	지정된 지점에 단위 정전하 +1[C]을 두고 계산	자계 세기 계산 방법	지정된 지점에 단위 정자하 +1[wb]을 두고 계산
전속	$\Psi = Q$[C]	자속	$\phi = m = B \cdot S$[Wb]
전속 밀도	$D = \frac{\Psi}{S} = \frac{Q}{S}$ $= \frac{Q}{4\pi r^2} = \epsilon_0 E$[C / m^2]	자속 밀도	$B = \frac{\phi}{S} = \frac{m}{S}$ $= \frac{m}{4\pi r^2} = \mu_0 H$[Wb/m^2]
전 위	$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$ [V]	자위	$U = I = \frac{m}{4\pi\mu_0 r}$ [A]

정 전 계		정 자 계	
전기 쌍 극 자 전위	$V_p = \frac{M}{4\pi\epsilon_0 r^2}\cos\theta$ [V] $\propto \frac{1}{r^2}$ ($\theta = 0°$: 최대, $\theta = 90°$: 최소) 전기 쌍극자 모멘트 $M = Q \cdot \delta$ [$C \cdot m$] δ : 두 전하 사이의 거리	자기 쌍 극 자 자위	$U_P = \frac{M}{4\pi\mu_0 r^2}\cos\theta$ [A] $\propto \frac{1}{r^2}$ ($\theta = 0°$: 최대, $\theta = 90°$: 최소) 자기 쌍극자 모멘트 $M = m \cdot l$ [$Wb \cdot m$] l : 두 자하 사이의 거리
전기 쌍 극 자 전계	$E_r = \frac{M}{2\pi\epsilon_o r^3}\cos\theta$ [V/m] $E_\theta = \frac{M}{4\pi\epsilon_o r^3}\sin\theta$ [V/m] $E = \frac{M}{4\pi\epsilon_o r^3}\sqrt{1+3\cos^2\theta}$[V/m]	자기 쌍 극 자 자계	$H_r = \frac{M}{2\pi\mu_o r^3}\cos\theta$ [AT/m] $H_\theta = \frac{M}{4\pi\mu_o r^3}\sin\theta$ [AT/m] $H = \frac{M}{4\pi\mu_o r^3}\sqrt{1+3\cos^2\theta}$[AT/m]
전위 경도	$E = -\,grad\,V$ $= -\nabla V$[V/m]	자위 경도	$H = -\,grad\,U$ $= -\nabla U$[A/m]
전 기 이 중 층	1) 정전하측 전위 $V_P = \frac{M}{4\pi\epsilon_0}\omega_1$ [V] 2) 부전하측 전위 $V_Q = \frac{-M}{4\pi\epsilon_0}\omega_2$ [V] 이중층세기 또는 판의 세기 $M = \sigma\delta$ [C / m] 입체각 $\omega = 2\pi(1-\cos\theta)$ 3) P, Q점의 (무한히 접근) ① P에서만 무한히 접 근, 또는 Q에서만 무 한히 접근 $\omega = 2\pi$ ② 정전하측과 부전하 측 동시에 무한히 접 근 $\omega = 4\pi$ 이때 전위는 $V_{PQ} = \frac{M}{\epsilon_0}$ [V]	자 기 이 중 층 = 판 자 석	1) N극측 자위 $U_P = \frac{M}{4\pi\mu_0}\omega_1$ [A] 2) S극측 자위 $U_Q = \frac{-M}{4\pi\mu_0}\omega_2$ [A] 이중층세기 또는 판의 세기 $M = \sigma\delta$ [wb / m] 입체각 $\omega = 2\pi(1-\cos\theta)$ 3) P, Q점의 (무한히 접근) ① N극에서만 무한히 접근, 또는 S극 에서만 무한히 접근 $\omega = 2\pi$ ② N극 과 S극 동시에 무한히 접근 $\omega = 4\pi$ 이때 자위는 $U_{PQ} = \frac{M}{\mu_0}$ [A]

정 전 계		정 자 계	
콘덴서에 축적되는 에너지 = 정전 에너지	$W=\frac{1}{2}CV^2$ $=\frac{Q^2}{2C}=\frac{1}{2}QV[J]$ 축적되는 그림 : 포물선	코일에 축적되는 에너지 = 전자 에너지	$W=\frac{1}{2}LI^2$ $=\frac{\phi^2}{2L}=\frac{1}{2}\phi I[J]$ 축적되는 그림 : 포물선
정전 흡인력	$f=\frac{D^2}{2\epsilon_o}$ $=\frac{1}{2}\epsilon_o E^2$ $=\frac{1}{2}ED\ [N/m^2]$	자석 흡인력	$f_m=\frac{B^2}{2\mu_0}$ $=\frac{1}{2}\mu_0 H^2$ $=\frac{1}{2}\ HB[N/m^2]$
전계 (유전체) 내 축적되는 에너지	$W_E=\frac{D^2}{2\epsilon}$ $=\frac{1}{2}\epsilon E^2$ $=\frac{1}{2}ED[J/m^3]$	자계 (자성체) 내 축적되는 에너지	$W_H=\frac{B^2}{2\mu}$ $=\frac{1}{2}\mu H^2$ $=\frac{1}{2}\ HB[J/m^3]$
분극의 세기	$P\ =\ D-\epsilon_0 E$ $=\epsilon_o(\epsilon_s-1)E\ =xE$ $=\ D(1-\frac{1}{\epsilon_s})$ $=\ \frac{M}{V}\ [\mathrm{C/m^2}]$ 1) 분극률 $x\ =\ \epsilon_o(\epsilon_s-1)$ 2) 비분극률 $x_m\ =\ \frac{x}{\epsilon_o}\ =\epsilon_s-1$	자화의 세기	$J\ =\ B-\mu_0 H$ $=\mu_o(\mu_s-1)H\ =xH$ $=\ B(1-\frac{1}{\mu_s})$ $=\ \frac{M}{V}\ [Wb/m^2]$ 1) 자화율 $x\ =\ \mu_o(\mu_s-1)$ 2) 비자화율 $\frac{x}{\mu_o}\ =\mu_s-1$
유전체 경계의 조건	완전경계조건 1) $\sigma\ =\ 0$ 경계면에 진전하가 존재하지 않음 2)경계면의 전위차는 없다 $E_1\sin\theta_1\ =\ E_2\sin\theta_2$ $D_1\cos\theta_1\ =\ D_2\cos\theta_2$ $\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2}\ =\ \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$ 법선(수직) 법밀코 접선(수평) 접계싸	자성체 경계의 조건	완전경계조건 1) $i\ =0$ 경계면에 전류밀도가 존재하지 않음 2) 경계면의 자위차는 없다 $H_1\sin\theta_1\ =\ H_2\sin\theta_2$ $B_1\cos\theta_1\ =\ B_2\cos\theta_2$ $\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2}\ =\ \frac{\mu_1}{\mu_2}$ 법선(수직) 법밀코 접선(수평) 접계싸

1. 자계내 막대자석에 의한 회전력

$T\ =\ mHl\sin\theta\ =\ MH\sin\theta\ =\ M\times H\,[\mathrm{N\cdot m}]$

2. 전류에 의한 자계의 세기

1) 암페어(앙페르) 오른나사법칙

: 도체에 전류를 흘려주었을 때 그 주변에 생기는 자계(자장)의 회전성과 자계의 방향을 결정하며 오른 나사의 진행 방향이 전류의 방향이라면 오른 나사의 회전 방향이 바로 자계(자장)의 방향이다.

2) 암페어의 주회 적분 법칙 : 전류와 자계 의 관계를 정의한 식 $\oint_c Hdl=\sum I$ 로 표시되고 또한 코일 및 도체의 권수가 $N[T]$회 이면 $\oint_c Hdl=\sum NI$ 가 된다

3) 무한장 직선 전류에 의한 자계 : $H\ =\ \frac{I}{2\pi r}$[AT/m]

4) 원통(원주)도체에 의한 자계의 세기(전류 균등시)

① 외부 ($r\ >\ a$) : $H\ =\ \frac{I}{2\pi r}$ [AT/m]

② 내부 ($r\ <\ a$) : $H_i\ =\ \frac{rI}{2\pi a^2}$ [AT/m]

③ 전류가 표면에만 흐를 시에는 전류 균등 시 외부 자계와 같으며 내부의 자계의 세기는 0이다

5) 비오-사바르의 법칙 : 전류에 의한 자계의 크기를 결정하며 미소길이 dl 에대한 미소자장 dH를 계산시 이용

$dH=\frac{Idl\sin\theta}{4\pi r^2}$ [AT / m] (θ 는 r 과 전류방향(I)가 이루는 각)

6) 원형 코일 중심 축 상의 자계의 세기

$H=\frac{I\cdot a^2}{2(a^2+x^2)^{\frac{3}{2}}}$ [AT / m]

만약 권선수가 존재한다면 $H=\frac{NI\cdot a^2}{2(a^2+x^2)^{\frac{3}{2}}}$ [AT / m]

7) 반지름이 a[m]인 원형코일 중심의 자계

$x\ =\ 0$ 일때 $H=\frac{I}{2a}$ [AT / m]

만약 권선수가 존재한다면 $H=\frac{NI}{2a}$ [AT / m]

8) 반지름이 a[m] 반원 $H=\frac{I}{4a}$ [AT / m]

9) 반지름이 a[m] $\frac{3}{4}$원 $H=\frac{3I}{8a}$ [AT / m]

10) 반지름이 a[m] $\frac{3}{4}$원과 반무한장(유한장)직선

$H=\frac{(3\pi-2)I}{8\pi a}$ [AT / m]

11) 유한장 직선 전류에 의한 자계의 세기

$H\ =\ \frac{I}{4\pi r}(\sin\theta_1+\sin\theta_2)=\ \frac{I}{4\pi r}(\cos\alpha_1+\cos\alpha_2)$ [AT/m]

유한장직선 양끝 COS, 유한장 직선에서 떨어진 지점 sin

12) 정삼각형 중심의 자계의 세기 : $H\ =\ \frac{9I}{2\pi l}$ [AT/m]

13) 정사각형 중심의 자계의 세기 : $H = \frac{2\sqrt{2}I}{\pi l}$ [AT/m]

14) 정육각형 중심의 자계의 세기 : $H = \frac{\sqrt{3}I}{\pi l}$[AT/m]

단, l 는 한변의 길이이다.

3. 솔레 노이드의 자계의 세기

1) 환상 솔레노이드 내부자계 $H = \frac{NI}{l} = \frac{NI}{2\pi r}$ [AT/m]

2) 무한장 솔레노이드 내부자계 $H = nI$ [AT/m]
단, n[T/m]은 단위길이당 권선수이다.

3) 솔레노이드 외부자계는 0 이다.

4. 전류에 의한 자위

① 전류 $I = \frac{M_\delta}{\mu_o}$ ② 자위 $U = \frac{I}{4\pi}w$ [A]

5. 플레밍의 왼손법칙: 전류가 흐르는 도선을 자계안에 놓으면 이 도선에 힘이 작용한다 이와 같은 자계와 전류간에 작용하는 힘을 전자력이라 하며 그 세기는 플레밍의 왼손법칙을 이용한다

1) 플레밍의 왼손 법칙 : 전동기원리 및 회전방향 결정
$F = BIl\sin\theta = \mu_0 HIl \sin\theta = \oint (Idl) \times B$ [N]
엄지 : F[N] (힘의 방향 = 전자력의 방향)
검지 : B[wb / m^2](자속밀도, 자장의 방향)
중지 : I[A](전류의 방향)

2) 자계내에서 사각코일의 회전력
$T = NI\phi = NBSI\cos\theta = NBIab\cos\theta$ [N · m]
여기서 N[T] : 권수 B[wb / m^2] : 자속밀도
I[A] : 전류 $S(A)$[m^2] : 면적

6. 로렌쯔의 힘 : 자계내에 전하 입사시 전하가 받는 힘

① 자계만 존재시 : $F = Bqv\sin\theta = \mu_o Hqv\sin\theta = (\vec{v} \times \vec{B})q$[N]

② 자계와 전계가 동시 존재시 :
$F = F_H + F_E = q(\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E})$ [N]

7. 평행 도선 사이에 작용하는 힘

① 단위 길이당 작용하는 힘 $F = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi d} = \frac{2I_1 I_2}{d} \times 10^{-7}$ [N/m]

② 전류의 방향이 같은 경우 : 흡인력이 작용한다.

③ 전류의 방향이 반대인 경우 : 반발력이 작용한다.

8. 자계내에 전자 수직 입사

① 항상 원운동 한다.

② 회전 반경 : $r = \frac{mv}{Be} = \frac{mv}{\mu_o He}$[m]

③ 각속도 : $w = \frac{Be}{m}$ [rad/s]

④ 주기 : $T = \frac{2\pi m}{Be}$ [sec]

9. 정전계와 정자계의 적분형 미분형 공식

구분		적분형	미분형
정전계	가우스의 법칙	$\int_s D\ dS = Q$ $\int_s E\ dS = \frac{Q}{\epsilon_0}$	$div\,D = \nabla D = \rho$ $div\,E = \nabla E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
정전계	보존장의 조건	$\int_l E\ dl = \int_s rot\,E dS = 0$ $E = -grad\,V = -\nabla V[V/m]$	$rot\,E = \nabla \times E = 0$
정자계	암페어의 주회적분	$\int_l H\ dl = \int_s rot\,H dS = i$	$rot\,H = \nabla \times H = i$
정자계	자속 관계식	$\int_s B\ dS = 0$	$div\,B = \nabla B = 0$
정상전류	옴의 법칙	$\int_s i\ dS = I$	$div\,i = \nabla i = 0$

제 9 장 자성체와 자기회로

1. 자화의 근본적인 원인 : 전자의 자전현상

2. 자성체의 종류

1) 상자성체: $\mu_s \geq 1$, 자화가 외부 자계와 같은 방향으로 자화되는 자성체로 미약하게 자화되며 알루미늄(Al), 백금(Pt), 주석(Sn), 산소(O_2), 등이 있다

2) 반(역)자성체 : $\mu_s < 1$, 자화가 외부 자계와 반대 방향으로 자화되며 납(Pb), 아연(Zn), 비스무트(Bi), 금(Au), 은(Ag) 구리(Cu), 탄소, 실리콘, 안티몬

3) 강자성체 : 상자성체중 자화가 강하게 되는 자성체로
철(Fe), 니켈(Ni), 코발트(Co) 등이 있다

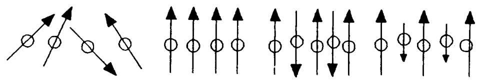
강자성체는 자석재료이며 자기 차폐제로 이용된다.

※ 자기차폐란 강자성체로 물질이나 공간을 포위시켜서 외부 자계의 영향을 차폐시키는 현상으로 완전 차폐는 되지 않는다.

※ 강자성체의 특징
1) 고투자률을 가질 것 2) 자기포화특성이 있을 것
3) 히스테리시스특성 4) 자구

※ 큐리온도(=임계온도) : 자화된 강자성체의 온도를 서서히 높이면 자화가 점점 감소하다가 급격히 강자성을 잃어버리고 상자성체가 되는 온도지점을 말하며 순철기준으로770[℃]~790[℃]가 된다

3. 자성체의 스핀(Spin)배열(자기쌍극자 배열)



상자성체 강자성체 반강자성체 훼리(페리)자성체

4. 자화의 세기J $[\mathrm{Wb/m^2}]$: 단위체적당 모멘트

$$J = \sigma_s = \frac{M[\mathrm{Wb \cdot m}]}{v[\mathrm{m^3}]} = \mu_o(\mu_s - 1)H = B(1 - \frac{1}{\mu_s}) = xH\,[\mathrm{Wb/m^2}]$$

1) 자화율 $x = \mu_o(\mu_s - 1)$

2) 비자화율 $\frac{x}{\mu_o} = \mu_s - 1$

강자성체에서 자화의 세기 J 는 B보다 약간 작다

5. 히스테리 곡선[B－H 곡선]

1) 히스테리시스손 : $P_h = \eta f B^{1.6}[\mathrm{W/m^3}]$ 방지책으로서 규소 강판을 사용한다.

※ 바크하우젠 효과 : 자성체내에서 임의의 방향으로 배열되었던 자구가 외부자장의 힘이 일정치 이상이 되면 순간적으로 회전하여 자장의 방향으로 배열되기 때문에 자속밀도가 증가하는 현상 B-H곡선을 자세히 관찰하면 매끈한 곡선이 아니라 B가 계단적으로 증가 또는 감소함을 할 수가 있다

6. 맴돌이 전류손(와전류손) : $Pe = \eta(fB_m)^2\,[\mathrm{W/m^3}]$

방지책으로서 성층결선을 사용한다.

※ 와전류 = 맴돌이 전류

일반적으로 도체를 관통하는 자속이 변화하든가 또는 자속과 도체가 상대적으로 운동하여 도체 내의 자속이 시간적으로 변화를 일으키면, 이 변화를 막기 위하여 도체 내에 국부적으로 형성되는 임의의 폐회로를 따라 전류가 유기되는데 이 전류를 와전류라 한다

1) 와전류의 방향은 자속이 수직인 면에 회전한다

2) 와전류 응용 : 제동법 (마그네트 브레이크)

7. 영구 자석의 재료 조건

: 히스테리시스곡선의 면적이 크고, 잔류자기와 보자력이 모두 큰 것

8. 전자석의 재료 조건

: 히스테리시스곡선의 면적이 작고, 잔류자기는 크고, 보자력은 작을 것

9. 강자성체의 히스테리시스 루프의 면적 : 강자성체의 단위체적당 필요한 에너지

10. 감자력 H' : 자화의 세기에 비례한다.

$$H' = H_o - H = \frac{N}{\mu_o}J$$

(단, 여기서 N : 감자율 , J : 자화의 세기)

감자율 : N

① 가늘고 긴 막대 $N \fallingdotseq 0$

② 환상(솔레노이드) 철심 $N = 0$

③ 굵고 짧은 막대 $N = 1$

④ 구자성체 $N \fallingdotseq \frac{1}{3}$

11. 단위 체적당 에너지 밀도

$$W = \int_0^B H\,dB = \int_0^B \frac{B}{\mu}dB = \frac{B^2}{2\mu} = \frac{1}{2}\mu H^2 = \frac{1}{2}BH\,[\mathrm{J/m^3}]$$

12. 전자석의 흡인력(단위 면적당 받는 힘) $f_m\,[\mathrm{N/m^2}]$

$$f_m = \frac{F}{S} = \frac{B^2}{2\mu} = \frac{1}{2}\mu H^2 = \frac{1}{2}BH\,[\mathrm{N/m^2}]$$

가장 많이 출제되는 것은 전체 힘 : $F = \frac{B^2}{2\mu} \cdot S\,[\mathrm{N}]$

13. 경계면 조건

정전계와 정자계의 대응

경계 조건	$E_1\sin\theta_1 = E_2\sin\theta_2$ $D_1\cos\theta_1 = D_2\cos\theta_2$ $\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$ 법선(수직) 법밀코 접선(수평) 접계싸	$H_1\sin\theta_1 = H_2\sin\theta_2$ $B_1\cos\theta_1 = B_2\cos\theta_2$ $\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$ 법선(수직) 법밀코 접선(수평) 접계싸

14. 전기회로와 자기회로의 대응관계

전기회로		자기회로	
기전력	$V = IR\,[\mathrm{V}]$	기자력	$F = NI = R_m\phi\,[\mathrm{AT}]$
전류	$I = \frac{V}{R}\,[\mathrm{A}]$	자속	$\phi = \frac{F}{R_m} = \frac{\mu SNI}{l}\,[\mathrm{Wb}]$
전기저항	$R = \rho\frac{l}{S} = \frac{l}{k \cdot S}\,[\Omega]$	자기저항	$R_m = \frac{F}{\phi_m} = \frac{l}{\mu \cdot S}\,[\mathrm{AT/Wb}]$
도전율	$k = \sigma\,[\mho/\mathrm{m}]$	투자율	$\mu\,[\mathrm{H/m}]$
전류 밀도	$i_c = \frac{I}{S}\,[\mathrm{A/m^2}]$	자속 밀도	$B = \frac{\phi}{S}\,[\mathrm{Wb/m^2}]$

① 자기저항의 역수 퍼미언스 $P = \frac{1}{R_m}\,[\mathrm{Wb/AT}]$

② 자기회로의 특징 : 주울열에 의한 손실이 없다

③ 하나의 폐 자기회로에서의 키르히호프 법칙

제1법칙 : $\sum\phi_i = \sum\phi_o,\quad \sum\phi = 0$

제2법칙 : $\sum F\,(NI) = \sum\phi\,R_m$

15. 공극 발생시 자기저항

① 공극 발생시 합성자기저항

$$R = R_m + R_g = \frac{l}{\mu \cdot S} + \frac{l_g}{\mu_0 \cdot S} = \frac{l + \mu_s l_g}{\mu \cdot S}\,[\mathrm{AT/Wb}]$$

여기서 $l_g\,[\mathrm{m}]$ 공극의 길이

② 공극 발생 시 자기저항 증가율

$$\frac{R}{R_m} = 1 + \frac{\mu\,l_g}{\mu_o\,l} = 1 + \frac{l_g\,\mu_s}{l}\text{배}$$

제 10 장	전자유도

1. 전자유도법칙
1) 패러데이(노이만) 법칙 (유기기전력의 크기결정) :
$e = -N\frac{d\phi}{dt}$ [V]

전자 유도에 의해 회로에 발생되는 기전력은 쇄교 자속수의 시간에 대한 감쇠률에 비례한다.
이때 정의는 패러데이 전자 유도 법칙이지만 보기에 패러데이가 없다면 노이만이 답이다.

2) 렌쯔(츠)의 법칙 (유기기전력의 방향결정) :
$e = -L\frac{dI}{dt}$ [V]
유도기전력의 크기가 (+) $e[V] > 0$이면 인가된 전류와 같은 방향으로 유기
유도기전력의 크기가 (-) $e[V] < 0$이면 인가된 전류와 반대 방향으로 유기
유도전압의 방향은 쇄교 자속의 변화를 방해하는 방향이 된다.

2. 정현파 자속에 의한 코일에 유기 되는 기전력
① 정현파 자속$\phi = \phi_m \sin wt$ [Wb]
② 유도기전력
$e = -N\frac{d\phi}{dt} = wN\phi_m \cos wt = wN\phi_m \sin(wt - \frac{\pi}{2})$ [V]
: 코일에 유기되는 전압은 자속보다 위상이 90° 뒤진다.

③ 유도 기전력의 최대값 $e_{\max} = wN\phi_m$ [V]
여기서 $\omega = \frac{2\pi n}{60} = 2\pi f$ [rad/s] : 각속도, f[Hz] : 주파수,
n[rpm] : 분당 회전수, N[T] : 권수

3. 플레밍의 오른손 법칙(발전기의 원리)
: 자계 내에 도체(도선)을 넣고 속도를 가지고 운동 시 발생되는 유도기전력의 방향을 결정
$e = Blv \sin\theta = (\vec{v} \times \vec{B})l = \frac{F}{I}v$ [V]
여기서 B[Wb/m^2] : 자속밀도, l[m] : 도체의 길이, v[m/s] : 이동속도, F[N] : 전자력, I[A] : 전류

오른손의 손가락 방향
v[m/s]:엄지 ,B[Wb/m^2] : 검지(인지) , e[V] : 중지

4. 패러데이 원판 : 원판 회전시 유기되는 유기 기전력
① $e = \frac{wBa^2}{2}$ [V]

② $I = \frac{e}{R} = \frac{wBa^2}{2R}$ [A]

여기서 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ [rad/s] : 각속도, B[Wb/m^2] : 자속밀도
a[m] : 원판의 반지름 n[rpm] : 분당 회전수

※ 원판과 자석을 동시에 같은 방향, 같은 속도로 회전시킬 때
$e = 0$ [V]

5. 표피효과에 의한 침투깊이(표피두께) :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \text{ [m]}$$

여기서 $\omega = 2\pi f$ [rad/s] : 각속도(각주파수), μ[H/m] : 투자율,
$\sigma = k = \frac{1}{\rho}$ [℧/m] : 도전률

6.표피효과

$P = \frac{1}{\delta} = \sqrt{\pi f \mu \sigma}$

영향 : 표피효과는 주파수가 클수록 도선의 온도가 높을수록 크다 그러므로 전기저항을 증가 시킨다.

$R = \rho\frac{l}{S} \propto \sqrt{f}$ 방지책으로는 압분철심, 연선, 중공도선 사용

제 11 장	인덕턴스

1. 자기 인덕 턴스 :
$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{e\,t}{I}$ [Wb/A = V sec/A = Ω sec = J/A^2 = H]
1) 자기인덕턴스의 성질 : 항상 (+) 정이다
2) 1[H]란 1[A]의 전류에 대한 자속이 1[Wb]인 경우이다.
3) 코일에 전류의 변화에 의한 유기기전력$e = -L\frac{dI}{dt}$ [V]

4) 1차 전류 변화에 의한 2차 유기기전력 $e_2 = M\frac{dI_1}{dt}$ [V]

2. 환상 솔레노이드의 인덕턴스
$L = \frac{\mu SN^2}{l} = \frac{N^2}{R_m}$ [H]
여기서 $l = 2\pi r = \pi d$[m] : 자로(철심)의 길이,
r[m] : 평균반지름, d[m] : 평균 지름
$S = \pi a^2$[m^2] : 철심의 단면적, $R_m = \frac{l}{\mu S}$ [AT/m] : 자기저항

3. 무한장 솔레노이드의 인덕턴스
$L = \mu S n^2 = \mu\pi a^2 n^2$[H/m] **: 길이의 증가함과 간계가 없다.**
여기서 $S = \pi a^2$[m^2] : 철심의 단면적,
$n = \frac{N}{l}$ [T/m] : 단위 길이당 권수

4. 동심 원통사이의 단위 길이당 인덕턴스 :
$L' = \frac{\mu_o}{2\pi}\ln\frac{b}{a}$ [H/m]

5. 원주도체 내의 내부 인덕 턴스
1) $L_i = \frac{\mu l}{8\pi}$ [H] 2) $L_i' = \frac{\mu}{8\pi}$ [H/m]
3) 전류균일시 내부 축적에너지
: $W_i = \frac{\mu l I^2}{16\pi}$ [J] (도체의 단면적과는 관계없다.)

6. 평행 도선사이의 단위 길이당 인덕 턴스 :
$L = \frac{\mu_o}{\pi}\ln\frac{D}{r}$ [H/m]

7. 인덕턴스와 정전용량의 관계 : L 과 C 와의 관계 :
$L \cdot C = \mu \cdot \epsilon$

8. 상호 인덕턴스

1) A코일에서 만든 자속은 B코일에 전부 쇄교 되고
B코일에서 만든 자속은 A코일에 전부 쇄교 된다.
2) 상호 인덕턴스의 성질 : 항상 정(+)이거나 항상 부(-)이다
3) $M = k\sqrt{L_1 L_2}$ [H]

결합 계수 : $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$

이상적인 결합 및 누설자속이 없을시 결합계수 $k=1$
결합계수의 범위 $0 \le k \le 1$

4) 결합계수 $k = 1$ 일 경우 상호 인덕 턴스

$$M = \frac{\mu S N_1 N_2}{\ell} = \frac{N_1 N_2}{R_m} = L_1 \frac{N_2}{N_1} = L_2 \frac{N_1}{N_2} \text{ [H]}$$

$l = 2\pi r = \pi d$ [m] : 자로(철심)의 길이, r [m] : 평균반지름
d [m] : 평균 지름, $S = \pi a^2$ [m^2] : 철심의 단면적

5) 노이만의 상호 인덕턴스

$$M_{21} = \frac{\phi_{21}}{I_1}\oint_{c_2} B \cdot dS = \frac{\mu}{4\pi}\oint_{c_1}\oint_{c_2}\frac{dl_1 \cdot dl_2}{r_{21}} = \frac{\mu}{4\pi}\oint_{c_1}\oint_{c_2}\frac{\cos\theta dl_1 dl_2}{r_{21}} \ [H]$$

9. 합성 인덕 턴스 (직렬 연결시)
① 가동 결합 : $L_o = L_1 + L_2 + 2M$
② 차동 결합 : $L_o = L_1 + L_2 - 2M$

10. 코일에 축적되는 에너지
$$W = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\phi I = \frac{\phi^2}{2L} \text{ [J]}$$

제 11 장	전 자 장

1. **변위 전류** : 시간에 대한 전속밀도의 변화율로서 유전체를 통해 흐르는 전류를 변위전류라 한다.

1) 변위 전류 밀도 $i_D = i_d = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\epsilon}{d}\frac{\partial V}{\partial t}$[A/m^2]

여기서 $D = \epsilon E$ [C/m^2] : 전속밀도,
$E = \frac{V}{d}$[V/m] : 전계, $V = Ed$ [V] : 전위

전속밀도의 시간적 변화는 변위 전류를 만들고 변위전류는 **자계를 발생 시킨다.**

2) 전압 $v = V_m \sin wt$ [V]

① 변위전류밀도 $i_d = w\frac{\epsilon}{d}V_m \cos wt$[A/m^2]

② 변위 전류 $I_d = i_d \times S = wCV_m \cos wt$ [A]

3) 유전체 손실 : 유전체 손실은 인가 전압과 무관하다
$$\tan\delta = \frac{i_C}{i_D} = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon} = \frac{f_c}{f}$$

임계주파수 : $i_c = i_D$ 일 때 주파수 $f_c = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon}$ [Hz]

2. 파동 고유 임피던스 : $\eta = Z[\Omega]$

※ 자계에대한 전계의 비 $\sqrt{\epsilon}\,E = \sqrt{\mu}\,H$

$$\eta = Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ [\Omega]$$

1) ($\epsilon_s > 1$, $\mu_s > 1$)
$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\frac{\mu_s}{\epsilon_s}} = \sqrt{\frac{4\pi\times10^{-7}}{\frac{10^{-9}}{36\pi}}\frac{\mu_s}{\epsilon_s}}$$
$$= 120\pi\sqrt{\frac{\mu_s}{\epsilon_s}} = 377\pi\sqrt{\frac{\mu_s}{\epsilon_s}} \ [\Omega]$$

2) (공기 = 진공)
$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377 \ [\Omega]$$

1) 진공(공기)중일 때 전계와 자계의 실효값

① $E = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}}H = 377H$ [V/m]

② $H = \sqrt{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}}E = \frac{1}{377}E = 0.265\times10^{-2}E$ [A/m]

3. 전자파의 속도 v [m/sec]
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{3\times10^8}{\sqrt{\epsilon_s\mu_s}} = \frac{w}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \lambda f \ \text{[m/s]}$$
여기서 $\beta = \omega\sqrt{LC}$: 위상정수, λ [m] : 파장,
f [Hz] : 주파수

전자파의 속도는 주파수$f[Hz]$와 무관하며 매질의 특성 ϵ μ에 관계가 있다
환전 유전체에서 전자파는 무감쇠 진동을 한다.

4. 전자파(평면파)
1) 전자파에서는 전계와 자계가 동시에 존재하고 동상이다.
2) 전계 에너지와 자계 에너지는 같다
3) 포인팅 벡터 : 면적당 전력
$$R = \frac{P}{S} = E\times H = EH\sin\theta = EH\sin 90^o = EH \ \text{[W/m}^2\text{]}$$

4) 진공, 공기중에서 포인팅 벡터
$$R = EH = 377H^2 = \frac{1}{377}E^2 = \frac{P}{S} \ \text{[W/m}^2\text{]}$$

5) 전자파의 진행 방향 : $E\times H$ 의 방향이다.
6) 전자파는 진행 방향에 대한 전계와 자계의 성분은 없고 수직 성분만 존재 한다
만약 Z축으로 진행하는 전자파라고 가정한다면 X, Y축의 미분계수는 존재하지 않으며 Z축의 미분계수만 존재한다. 그래서 Z축의 전계와 자계의 성분이 없다

5. 맥스웰의 방정식(전자 방정식)

1) 맥스웰의 제 1의 기본 방정식
$$rot\,H = curl\,H = \nabla\times H = i_c + \frac{\partial D}{\partial t} = i_c + \epsilon\frac{\partial E}{\partial t}\text{[A/m}^2\text{]}$$
① 암페어의 주회적분법칙에서 유도한 식이다.
② 전도 전류, 변위 전류는 자계를 형성한다.
(전류와 자계와의 관계)
③ 전류의 연속성을 표현한다.

2) 맥스웰의 제 2의 기본 방정식
$$rotE = curl\,E = \nabla\times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu\frac{\partial H}{\partial t}$$

① 자속 밀도의 시간적 변화는 전계를 회전 시키고 유기 기전력을 형성한다.
② 패러데이의 법칙에서 유도한 전계에 관한 식
3) $divD = \nabla \cdot D = \rho\,[\mathrm{C/m^3}]$

① 임의의 폐곡면 내의 전하에서 전속선이 발산한다.
② 가우스 발산 정리에 의하여 유도된 식

4) $divB = \nabla \cdot B = 0$

① N , S 극이 항상 공존한다.
② 자기력선은 연속적이다.
③ 고립된 자극(자하)는 없다.

5) $rot\,\vec{A} = \nabla \times \vec{A} = B\,[\mathrm{Wb/m^2}]$
벡터 포텐셜($\vec{A}$)의 회전은 자속 밀도를 형성한다.

6. 전자파의 파동방정식(완전 절연체인 경우)

1) $\nabla^2 E = \epsilon\mu \dfrac{\partial^2 E}{\partial t^2}$

2) $\nabla^2 H = \epsilon\mu \dfrac{\partial^2 H}{\partial t^2}$

7. 전자파의 경계의 조건
상이한 매질의 경계면에서 전자파는 다음과 같은 조건을 만족한다

① 경계면의 양측에서 전계의 세기의 접선성분은 같다
($E_{t1} = E_{t2} = E$)

② 경계면의 양측에서는 전속밀도의 법선성분이 같다
($D_{n1} = D_{n2}$)

단 전하분포가 있을 경우 진전하밀도만은 다르다.
($D_{n1} - D_{n2} = \sigma$)

③ 경계면의 양측에서는 자계의 세기의 접선성분이 같다
($H_{t1} = H_{t2}$)

④ 경계면의 양측에서는 자속밀도의 법선성분이 같다
($B_{n1} = B_{n2}$)

⑤ 이상 도체면에서는 자계의 세기의 접선 성분은 표면 전류 밀도가 같다

8. 전자파의 반사 및 투과
경계면의 양측에서 전계와 자계와의 접선 성분은 각각 같으므로

$E_1 + E_2 = E_3, \qquad H_1 - H_3 = H_2$

$EH = \sqrt{\dfrac{\mu}{\epsilon}}$ 또는 $\sqrt{\mu}\,H = \sqrt{\epsilon}\,E$ 이므로

$\sqrt{\epsilon_1}\,E_1 = \sqrt{\mu_1}\,H_1 \qquad \sqrt{\epsilon_2}\,E_2 = \sqrt{\mu_2}\,H_2 \qquad \sqrt{\epsilon_1}\,E_3 = \sqrt{\mu_1}\,H_3$

같은 자계와 전계의 관계를 성립할 수 있다

※ 투과파

$$E_2 = \frac{2\sqrt{\dfrac{\mu_2}{\epsilon_2}}}{\sqrt{\dfrac{\mu_1}{\epsilon_1}} + \sqrt{\dfrac{\mu_2}{\epsilon_2}}} E_1 \qquad H_2 = \frac{2\sqrt{\dfrac{\mu_1}{\epsilon_1}}}{\sqrt{\dfrac{\mu_1}{\epsilon_1}} + \sqrt{\dfrac{\mu_2}{\epsilon_2}}} H_1$$

※반사파

$$E_3 = \frac{\sqrt{\dfrac{\mu_2}{\epsilon_2}} - \sqrt{\dfrac{\mu_1}{\epsilon_1}}}{\sqrt{\dfrac{\mu_1}{\epsilon_1}} + \sqrt{\dfrac{\mu_2}{\epsilon_2}}} E_1 \qquad H_3 = \frac{\sqrt{\dfrac{\mu_2}{\epsilon_2}} - \sqrt{\dfrac{\mu_1}{\epsilon_1}}}{\sqrt{\dfrac{\mu_1}{\epsilon_1}} + \sqrt{\dfrac{\mu_2}{\epsilon_2}}} H_1$$

※ $\sqrt{\dfrac{\mu_1}{\epsilon_1}} > \sqrt{\dfrac{\mu_2}{\epsilon_2}}$ 일 때 투과되는
전계는 $E_1 > E_2$이고 $H_2 > H_1$이다

여기서 $\eta_1 = Z_1 = \sqrt{\dfrac{\mu_1}{\epsilon_1}}$, $\eta_2 = Z_2 = \sqrt{\dfrac{\mu_2}{\epsilon_2}}$ 로 환산하면

투과계수 $T = \dfrac{E_2}{E_1}$ 반사계수 $R = \dfrac{E_3}{E_1}$
이므로 이를 정리하면

※ $T = \dfrac{E_2}{E_1} = \dfrac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \dfrac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$

$R = \dfrac{E_3}{E_1} = \dfrac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1 + \eta_2} = \dfrac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$이다.

※ 전자파가 수직입사시 전계가 무반사가 되기 위한 조건
$\eta_1 = \eta_2 \ (Z_1 = Z_2)$