

CHAPTER04 정전계와 전자유도

Contents

- 4.1 자기현상
- 4.2 쿨롱의 법칙
- 4.3 자계의 세기
- 4.4 자속밀도
- 4.5 자성체와 자화의 세기
- 4.6 자계에너지
- 4.7 강자성체의 자화
- 4.8 정전계와 정자계의 유사성
- 4.9 자석에 작용하는 회전력
- 4.10 암페어의 오른나사 법칙
- 4.11 암페어의 주회적분 법칙
- 4.12 전류에 의한 자계
- 4.13 자기회로
- 4.14 자계 내의 전류에 작용하는 힘[전자력]
- 4.15 핀치 효과와 홀 효과
- 4.16 전자유도
- 4.17 인덕턴스
- 4.18 변압기
- 4.19 인덕턴스의 접속
- 4.20 전류에 의한 자계에너지

4.1 자기현상

▶ 용어해설

- ◆ **자기 현상** : 두 개의 자석 상호간에 흡인력이나 반발력이 작용하고 또 자석이 철을 끌어당기는 현상
- ◆ **자극** : 영구 자석은 그 주위의 공간에 자기적 작용을 미치며, 그 작용이 강한 부분은 자석의 양쪽 끝에 있다. 이것을 자극(magnetic pole)이라고 함.
 - 자극의 극성은 정반대이며, 지구의 북극을 가리키는 자극을 N극 또는 정(+)자극, 남극을 가리키는 자극을 S극 또는 부(-)자극
- ◆ **자기력** : 극성의 자극은 서로 반발하고, 반대 극성의 자극은 서로 흡인력이 작용하는 데 전기력과 구분하여 자기력(magnetic force)이라 함
 - 자석이 있는 자기적 공간은 벡터장이고, 전계와 마찬가지로 자계라고 하는 자기력선(자력선)으로 표현

4.1 자기현상

▶ 용어해설

- ◆ **자하** : 전기력선의 양 끝에 전하가 있듯이 자력선에도 자하(magnetic charge, 자기의 양)가 있다. 이 자하는 항상 N극과 S극이 같은 양으로 존재
- ◆ **자력선** : N극에서 S극으로 향하는 방향을 정방향으로 정의(단위 : Weber[Wb])
- ◆ **자기유도 현상** : 철편을 자계 내에 놓으면 이 철편은 자기적 성질을 띠게 되어 양단에 자극이 생기며 이 현상을 의미함
- ◆ **자기와 전기가 다른 점** : 단독으로 자하를 분리할 수 없으며, 자석을 이등분하여도 양쪽 끝에 극성이 나타나 각각 정. 부의 자극을 갖는 자석이 만들어짐

4.2 쿨롱의 법칙

▶ 지구자석과 자석의 성질

▶ 쿨롱의 법칙

◆ 점자극 : 자석은 매우 가늘고 길어서 자석의 두 극이 서로 영향을 미치지 않는 것을 가정하였을 때, 이 조건을 만족하는 가상 자극

◆ 쿨롱의 법칙 :
$$F = \frac{m_1 m_2}{4\pi\mu_0 r^2} = 6.33 \times 10^4 \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

◆ 진공의 투자율 :
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H / m]$$

4.3 자계의 세기

▶ 자계의 세기

◆ 자계 : 자기적 힘이 미치는 공간

◆ 자계의 세기 H : 자계 중의 한 점에 단위자하[+ 1Wb]를 놓았을 때,
이에 작용하는 힘의 크기 및 방향으로 표현하는 벡터량

$$H = \frac{m}{4\pi\mu_0 r^2} = 6.33 \times 10^4 \frac{m}{r^2} [N / Wb] \text{ or } [AT / m]$$

◆ 단위 : $[AT/m]$ or $[N/Wb]$

◆ 자계 H 내에 점자극 $m[Wb]$ 를 놓았을 때 점자극이 받는 힘 F :

$$F = mH [N]$$

4.4 자속밀도

▶ 자계의 세기와 자속밀도

◆ 자기력선(자속) : 자계 내에서 단위자하가 아무 저항없이 자기력에 따라 이동할 때 그려지는 가상선

◆ 자계의 세기 : 단위면적당의 자력선의 수를 나타내는 자력선 밀도

◆ 진공 중의 점전하 $Q[C]$ 에서 나오는

$$Q[C] \begin{cases} \text{전 속} : \phi = Q[C] \\ \text{전기력선 수} : N = \frac{Q}{\epsilon_0} [\text{개}] \end{cases}$$

◆ 진공 중의 점자극 $m[Wb]$ 에서 나오는

$$m[Wb] \begin{cases} \text{자 속} : \phi = m[Wb] \\ \text{자기력선 수} : N = \frac{Q}{\mu_0} [\text{개}] \end{cases}$$

4.4 자속밀도

▶ 자계의 세기와 자속밀도

◆ B와 H의 관계

- 자속밀도 B 는 단위면적당 자속선 수
- 자계의 세기 H 는 단위면적당 자기력선 수

$$\begin{cases} B = \frac{\phi}{S} = \frac{m}{s} [\text{Wb} / \text{m}^2] & \therefore \phi = BS \\ H = \frac{N}{S} = \frac{m}{\mu_0 S} [\text{AT} / \text{m}] & \therefore N = HS \end{cases}$$

$$H = \frac{m}{\mu_0 S} = \frac{B}{\mu_0}$$

$$\therefore B = \mu_0 H [\text{Wb} / \text{m}^2]$$

4.5 자성체와 자화의 세기

▶ 자성체

- ◆ 자화 : 물질을 자계 내에 놓았을 때 자기적 성질, 즉 자성을 나타내는 현상
- ◆ 자성체(magnetic substance) : 자화되는 물질
- ◆ 비자성체(non-magnetic substance) : 자화되지 않는 물질

▶ 자성체의 종류 (자화의 성질에 따른 분류)

- ◆ 상자성체 : 외부 자계에 대하여 그림 4.1(a)와 같은 방향으로 자화되는 물질
- ◆ 반자성체(또는 역자성체) : 그림 4.1(b)와 같은 방향으로 자화되는 물질
- ◆ 강자성체 : 상자성체 중에서도 특히 강하게 자화되는 자성체

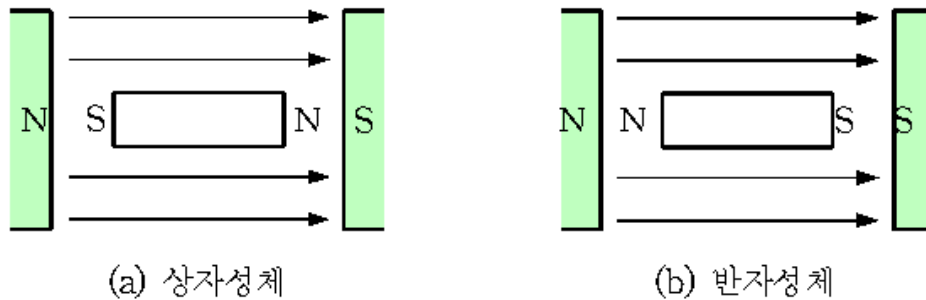


그림 4.1 자성체

4.5 자성체와 자화의 세기

▶ 각 자성체의 대표적 물질

- ◆ 상자성체 : 백금(Pt), 알루미늄(Al), 산소(O₂), 공기(N₂)
- ◆ 반자성체 : 은(Ag), 구리(Cu), 비스무트(Bi), 물(H₂O)
- ◆ 강자성체 : 철(Fe), 니켈(Ni), 코발트(Co)

▶ 자기의 발생 원인

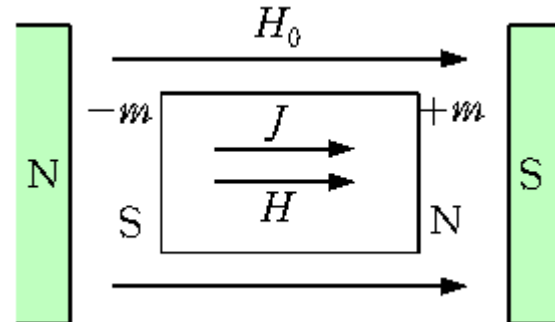
- ◆ 자기의 발생 원인 : 전류, 즉 전자의 운동이다. 원자를 구성하는 전자는 원자핵의 주위를 궤도운동을 함과 동시에 전자 자신은 자전(spin)운동
- ◆ 전자의 자전운동 때문에 전자는 영구 자기모멘트를 갖게 되고, 외부 자계가 없을 때에는 전자의 자기모멘트가 각각 자유로운 방향을 갖고 있어서 전체적으로는 자성을 나타내지 않게 됨

4.5 자성체와 자화의 세기

▶ 자화의 세기

자화의 세기 (J) :

$$\begin{cases} \text{단위면적당의 자화된 자극의 세기} \left(= \frac{m}{S} \right) \\ \text{단위체적당의 자기모멘트} \left(= \frac{M}{V} \right) \end{cases}$$



분극의 세기(유전체 내부현상)	자화의 세기(자성체 내부현상)
$P = \chi E$ 분극률 : $\chi = \varepsilon - \varepsilon_0 = \varepsilon_0 (\varepsilon_s - 1)$	$J = \chi H$ 자화율 : $\chi = \mu - \mu_0 = \mu_0 (\mu_s - 1)$
$P = (\varepsilon - \varepsilon_0) E$ $= \varepsilon E - \varepsilon_0 E \quad (D = \varepsilon E)$ $= D - \varepsilon_0 E$	$J = (\mu - \mu_0) H$ $= \mu H - \mu_0 H \quad (B = \mu H)$ $= B - \mu_0 H$
$\therefore D = \varepsilon_0 E + P$	$\therefore B = \mu_0 H + J$

4.6 자계에너지

▶ 자계에너지

표 4.2 정전계와 정자계의 에너지밀도 및 힘의 대응

구 분		공 식
정 전 계	정전에너지 밀도	$w_e = \frac{1}{2} DE = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \frac{D^2}{\epsilon_0} \text{ [J/m}^3\text{]}$
	정 전 력	$f = \frac{1}{2} DE = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \frac{D^2}{\epsilon_0} \text{ [N/m}^2\text{]}$
정 자 계	자계에너지 밀도	$w_m = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ [J/m}^3\text{]}$
	흡인력	$f = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ [N/m}^2\text{]}$

4.7 강자성체의 자화

◆ 상자성체 : B와 H의 선형성

$$B = \mu H \quad (\text{투자율 일정})$$

◆ 강자성체 : B와 H의 비선형성

$$B = \mu H \quad (\text{투자율 변화})$$

▶ 전기력선

◆ 자화곡선(또는 B - H 곡선)

◆ 바크하우젠 효과 : B - H 곡선을 자세히

관찰하면 자속밀도는 매끈한 곡선이 아니고 불연속적인 계단상으로 변화하고 있음.

이것은 자구가 어떤 순간에 급격히 회전하기 때문이며, 이 현상을 바크하우젠 효과라 함

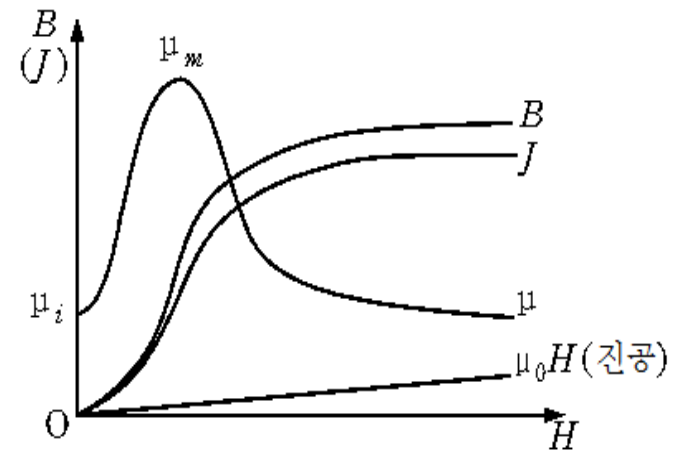


그림 4.4 자화곡선

4.7 강자성체의 자화

▶ 히스테리시스 곡선

◆ 히스테리시스 곡선(hysterisis loop)

: 자화되지 않은 강자성체에 외부자계 H 를 다음과 같이 변화하였을 때, 자속밀도 B 는 그림 4.5에서와 같이 반복되는 환선을 나타내는 곡선

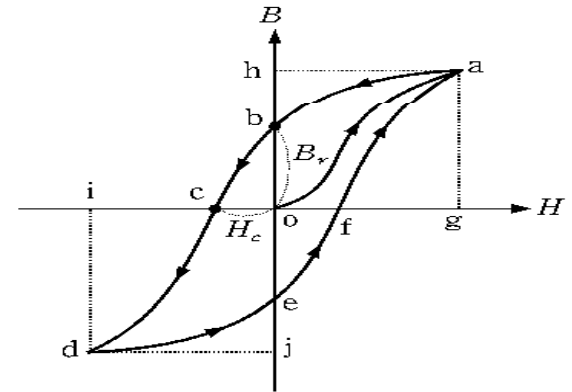
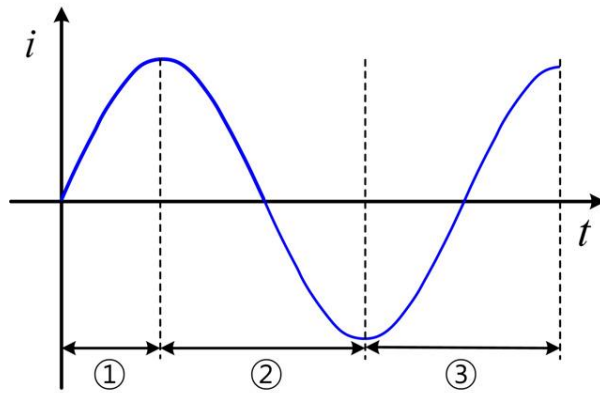


그림 4.5 히스테리시스 곡선

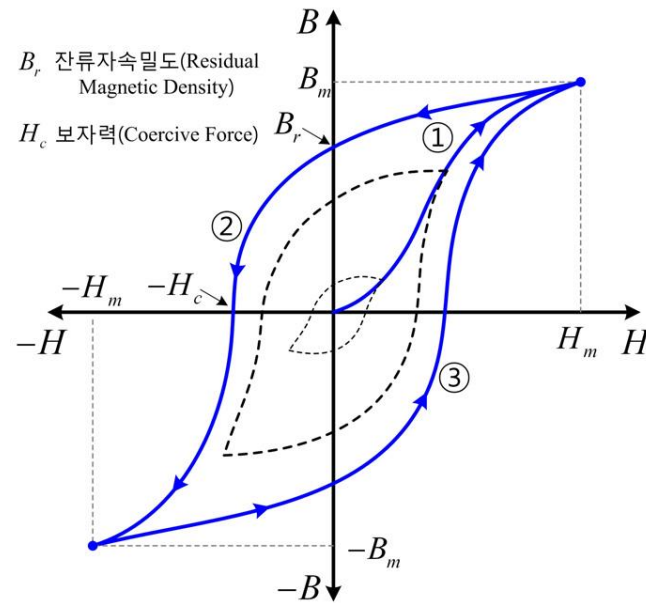
- 잔류자기 Br : 외부에서 가한 자계의 세기를 0으로 해도 자성체에 남는 자속밀도
- 보자력 Hc : 자화된 자성체 내부의 B 를 0으로 하기 위하여 외부에서 자화와 반대방향으로 가하는 자계의 세기
- 히스테리시스 손 : 히스테리시스 곡선을 다시 일주시켜도 항상 처음과 동일하기 때문에 히스테리시스의 면적에 해당하는 에너지는 열로 소비되는 손실

4.7 강자성체의 자화

▶ 히스테리시스 곡선



(a) 외부 자계의 시간변화



4.7 강자성체의 자화

▶ 자석재료

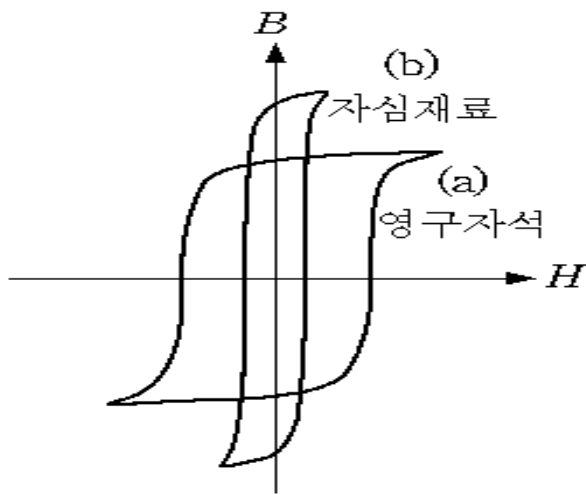
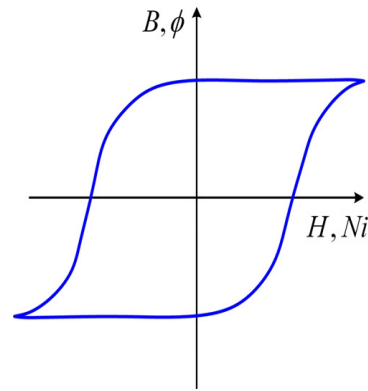
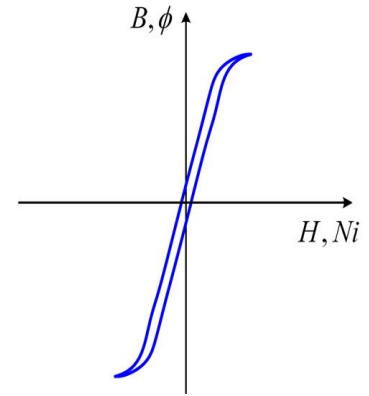


그림 4.6 영구자석재료와 자심재료



(a) 경자성체



(b) 연자성체

◆ 자석재료

(a) 영구자석 재료 : 잔류자기(Br)와 보자력(Hc) 클 것

히스테리시스 곡선 면적 클 것

(b) 전자석 재료(자심 재료) : 잔류자기(Br) 크고, 보자력 (Hc) 작을 것

히스테리시스 곡선 면적 작을 것

4.7 강자성체의 자화

▶ 소자법

- ◆ **소자법** : 강자성체에 일단 자계를 가하면 자화되어 잔류자기의 형태로 항상 자성을 보유하게 된다. 이 자화에 의한 자성을 제거하여 소실시키는 방법
 - ① **직류법** : 처음에 준 자계와 같은 정도의 직류 자계를 반대 방향으로 가하는 조작을 반복하여 감소
 - ② **교류법** : 자화할 때와 같은 정도의 교류자계를 가하고 그 값이 0이 될 때까지 점차로 감소
 - ③ **가열법** : 강자성체의 온도를 퀴리점 이상이 될 때까지 상승시킨다. 철의 경우 약 $770[^\circ\text{C}]$ 에서 강자성을 잃어버리는데, 이 온도를 퀴리점(Curie point)

4.8 정전계와 정자계의 유사성

표 4.3 정전계와 정자계의 대응에 대한 여러 가지 공식

정 전 계		정 자 계	
전 하	Q [C]	자 하(자 극)	m [Wb]
진공의 유전율	$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ [F/m]	진공의 투자율	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]
유 전 율	$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_s$	투 자 율	$\mu = \mu_0 \mu_s$
쿨롱의 법칙 (전기력)	$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \epsilon r^2}$ [N]	쿨롱의 법칙 (자기력)	$F = \frac{m_1 m_2}{4\pi \mu r^2}$ [N]
전계의 세기	$E = \frac{Q}{4\pi \epsilon r^2}$ [V/m]	자계의 세기	$H = \frac{m}{4\pi \mu r^2}$ [AT/m]
힘과 전계	$F = QE$ [N]	힘과 자계	$F = mH$ [N]
전 위	$V = \frac{Q}{4\pi \epsilon r}$ [V]	자 위	$U = \frac{m}{4\pi \mu r}$ [AT]
전 속	$\phi = Q$ [C], $\phi = DS$ [C]	자 속	$\phi = m$ [Wb], $\phi = BS$ [Wb]
전기력선	$N = \frac{\phi}{\epsilon} = \frac{Q}{\epsilon}$ [lines]	자기력선	$N = \frac{\phi}{\mu} = \frac{m}{\mu}$ [lines]
D 와 E 의 관계	$D = \epsilon E$ [C/m ²]	B 와 H 의 관계	$B = \mu H$ [Wb/m ²]

4.9 자석에 작용하는 회전력

▶ 소자석에 작용하는 회전력

◆ 회전력

$$\begin{aligned} T &= Fl' = Fl \sin \theta \\ &= mH \sin \theta [N \cdot m] \end{aligned}$$

◆ 회전력의 벡터표시

$$T = MH \sin \theta$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{M} \times \mathbf{H} [N \cdot m]$$

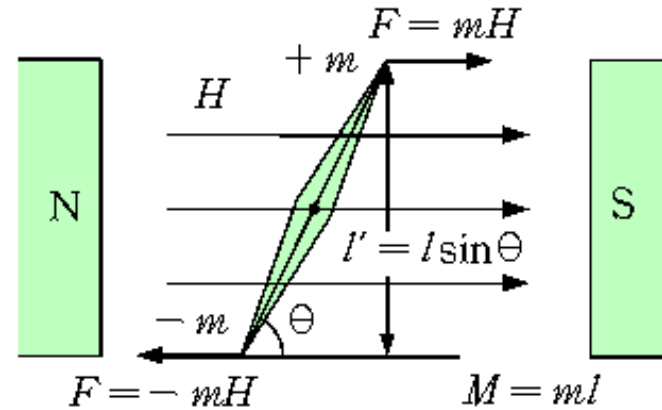


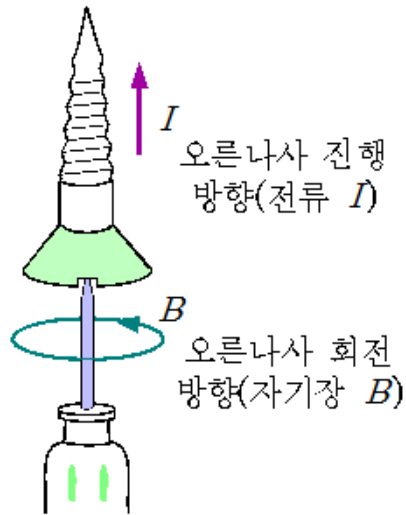
그림 4.7 평등자계 속의 회전력

4.10 암페어의 오른나사 법칙

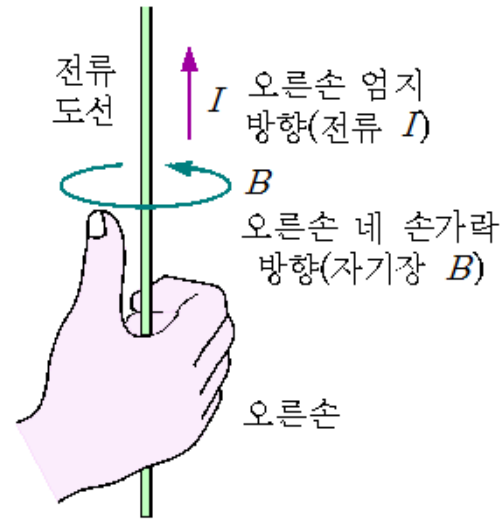
▶ 암페어의 오른나사 법칙

◆ 암페어의 오른나사 법칙

: 직선 도체에 전류가 흐르면 자계가 형성되는데, 도체에 수직인 평면상에서 오른나사가 진행되는 방향으로 전류가 흐를 때 나사를 돌리는 방향으로 자계가 발생한다. 즉, 전류에 의한 자계 방향의 관계를 나타낸 법칙



(a) 오른나사 법칙



(b) 오른손 법칙

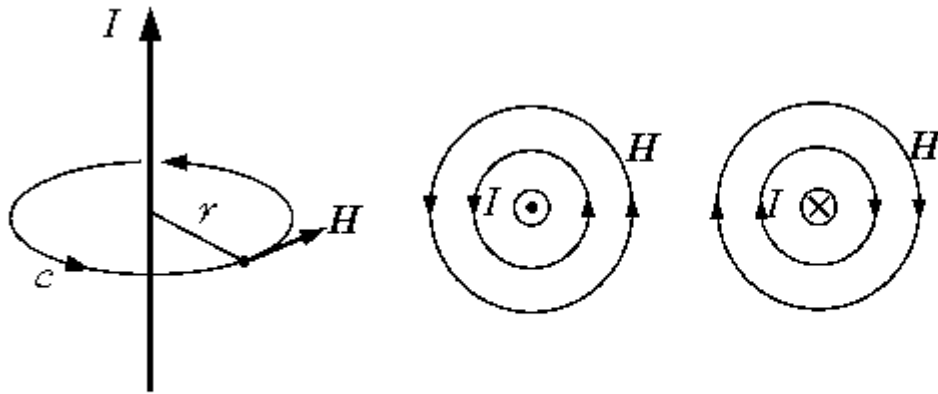
4.10 암페어의 오른나사 법칙

▶ 암페어의 오른나사 법칙

◆ 방향 표시

: 지면의 뒷면에서 표면으로 나오는 방향

: 지면의 표면에서 뒷면으로 들어가는 방향



(a) 전류에 의한 자기방향

(b) 지면 표시법

그림 4.8 암페어의 오른나사 법칙

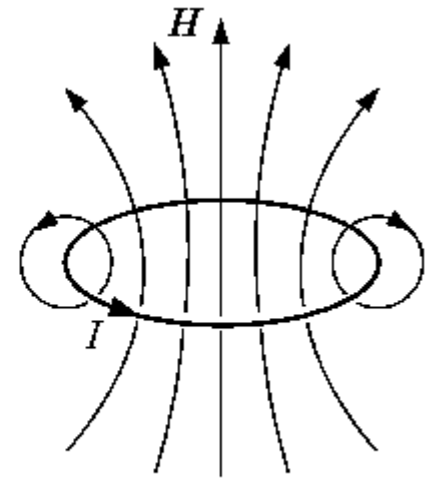
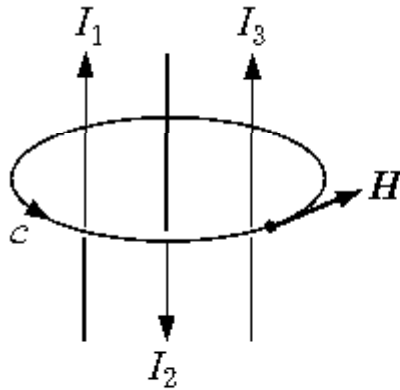


그림 4.9 원형전류와 자기

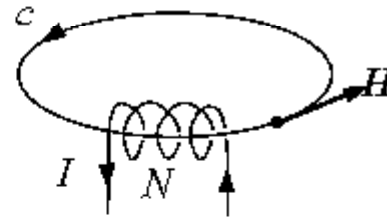
4.11 암페어의 주회적분 법칙

▶ 암페어의 주회적분 법칙

: 임의의 폐곡선에 대한 자계의 선적분은 이 폐곡선을 관통하는 전류와 같다



$$(a) \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_1 - I_2 + I_3$$



$$(b) \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = NI$$

그림 4.10 암페어의 주회적분 법칙에 의한 관계식

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad \text{그림 4.10(a) : } \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_1 - I_2 + I_3$$

$$\text{그림 4.10(b) : } \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = NI$$

4.12 전류에 의한 자계

▶ 전류에 의한 자계 계산 방법

◆ 전류에 의한 자계 계산 방법

- ① 암페어 주회적분 법칙 : 무한장 직선 도체, 무한장 원주형 도체, 무한장 솔레노이드, 환상 솔레노이드
- ② 등가 판자석 : 원형 도체 전류
- ③ 비오-사바르 법칙 : 유한장 직선 도체, 유한장 솔레노이드, 원형 도체 전류

▶ 암페어의 주회적분 법칙에 의한 방법

◆ 암페어의 주회적분 법칙 $\oint_c H \cdot dl = I$

- ① 자력선 H 가 적분로와 접선(동일)방향이 되도록 취한다.
즉, $H \cdot dl$ 은 $H dl$ 이 된다.
- ② 자력선 H 가 적분로와 수직이 되도록 한다.
즉, $H \cdot dl$ 은 0 이 된다.

4.12 전류에 의한 자계

▶ 무한장 직선 도체에 의한 자계

◆ 암페어 주회적분 법칙

$$\oint_c H \cdot dl = \oint H dl = 2\pi rH = I$$

◆ 자계의 세기

$$H = \frac{I}{2\pi r} [AT / m]$$

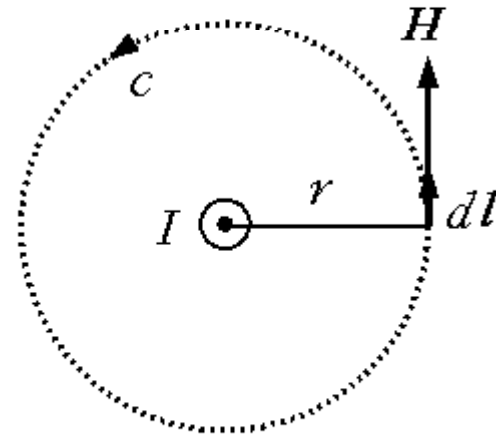


그림 4.11 무한장 직선 도체

4.12 전류에 의한 자계

▶ 무한장 솔레노이드의 자계

◆ 솔레노이드(solenoid) : 원통 모양으로 도선을 감은 코일

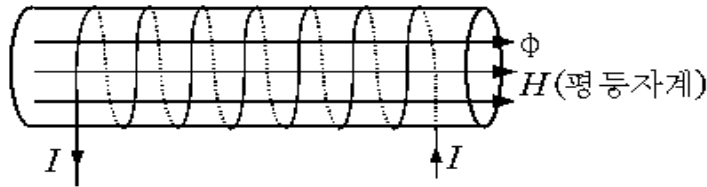


그림 4.12 무한장 솔레노이드에 의한 자계

- 내부 자계 $H_i = nI [AT / m]$
- 외부 자계 $H = 0$

◆ 평등자계를 얻기 위하여 무한장 솔레노이드가 필요하지만 불가능하기 때문에 실제로는 단면적에 비해 길이가 충분히 긴 솔레노이드를 만들어 사용하고, 도선을 치밀하게 감아서 누설자속이 없도록 해야 함

4.12 전류에 의한 자계

▶ 환상 솔레노이드의 자계

◆ 환상 솔레노이드 : 솔레노이드를 구부려 양 끝을 합해 무단으로 한 모양, 즉, 도넛 모양의 틀에 감은 코일을 환상 솔레노이드, 무단 솔레노이드 또는 토로이드 코일(toroid coil)이라고도 함

- 내부 자계 $\oint H \cdot dl = 2\pi rH = NI$
 $\therefore H = \frac{NI}{2\pi r} [AT/m]$

- 외부 자계 $H = 0$

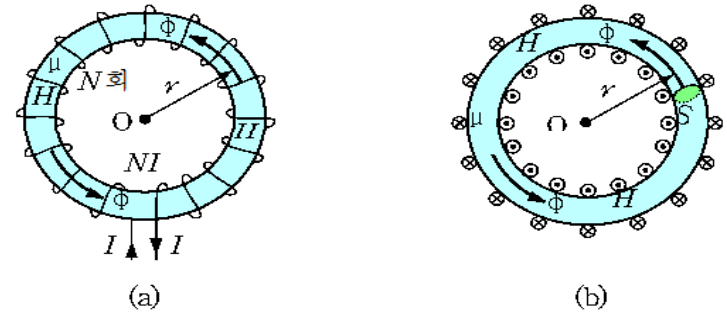


그림 4.13 환상 솔레노이드

◆ 환상 솔레노이드 공심 및 철심에서의 자속밀도 및 자석

{	진공 : $B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} [\text{Wb/m}^2]$	{	진공 : $\phi = BS = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} S [\text{Wb}]$
	철심 : $B = \mu H = \frac{\mu NI}{2\pi r} [\text{Wb/m}^2]$		철심 : $\phi = BS = \frac{\mu NI}{2\pi r} S [\text{Wb}]$

4.12 전류에 의한 자계

▶ 비오-사바르의 법칙

: 전류에 의한 자계 계산에 이용

◆ 자계의 세기

$$dH = \frac{I dl \sin \theta}{4\pi r^2}$$

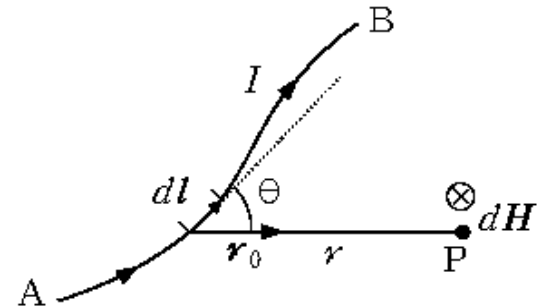


그림 4.14 비오-사바르 법칙

▶ 원형전류에 의한 중심자계

◆ 원형 코일의 중심부에서 자계의 세기

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

◆ 권선 N회의 중심부에서 자계의 세기

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

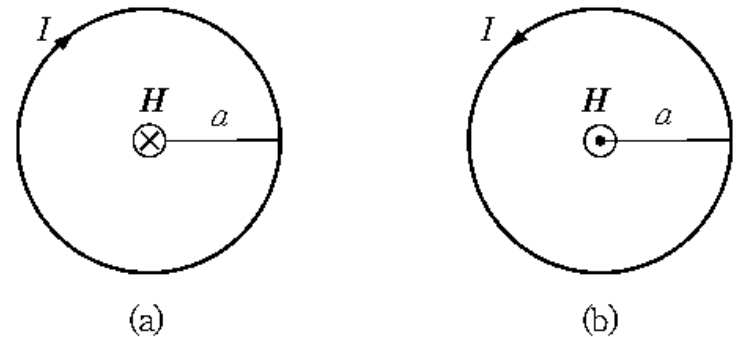



그림 4.15 원형 도체

4.12 전류에 의한 자계

▶ 전계에 의한 자계의 세기

 전류에 의한 자계의 세기 요약

종 류	자계의 세기 [AT/m]	비 고
무한장 직선도체	$H = \frac{I}{2\pi r}$	거리에 반비례
무한장 솔레노이드 (내부자계)	$H = nI$	n : 단위길이당 권선수 (외부자계 : 0)
환상 솔레노이드 (내부자계)	$H = \frac{NI}{2\pi r}$	(외부자계 : 0)
원형 코일(중심부)	$H = \frac{NI}{2a}$	$H = \frac{I}{2a}$ ($N = 1$)

4.13 자기회로

▶ 자기 저항과 옴의 법칙

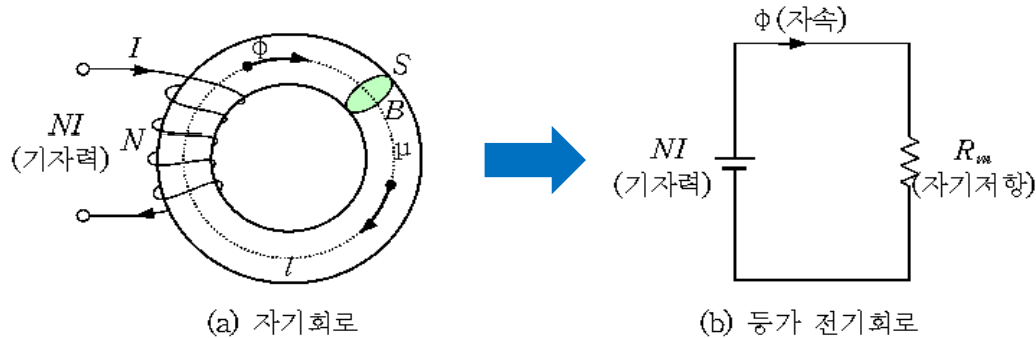


그림 4.16 자기회로

◆ 회로

- 전기회로(electrical circuit) : 전류가 흐르는 통로
- 자기회로(magnetic circuit) : 자속의 통로, 간단히 자로라 함

◆ 기자력 : 자속을 발생시키는 힘 $F_m = NI [AT]$

◆ 자기저항 $R_m = \frac{l}{\mu S} [AT / Wb]$ $\left(\oint H \cdot dl = H \oint dl = Hl = \frac{\phi l}{\mu S} = \phi R_m \right)$

◆ 옴의 법칙(자기회로) $NI = \phi R_m \quad \therefore \phi = \frac{NI}{R_m} [Wb]$

4.13 자기회로

▶ 전기회로와 자기회로

표 4.4 전기회로와 자기회로의 대응

전 기 회 로		자 기 회 로	
기 전 력	E [V]	기 자 력	$F_m = NI$ [AT]
전 류	I [A]	자 속	ϕ [Wb]
전 계	E [V/m]	자 계	H [AT/m]
전기저항	R [Ω]	자기저항	R_m [AT/Wb]
도 전 율	σ [S/m]	투 자 율	μ [H/m]
옴의 법칙	$E = IR$ [V] $\therefore I = \frac{E}{R}$ [A]	옴의 법칙	$F_m = \phi R_m$ [AT] $\therefore \phi = \frac{NI}{R_m}$ [Wb]

4.14 자계 내의 전류에 작용하는 힘

▶ 자계 내에서 전류 도체가 받는 힘 [전자력]

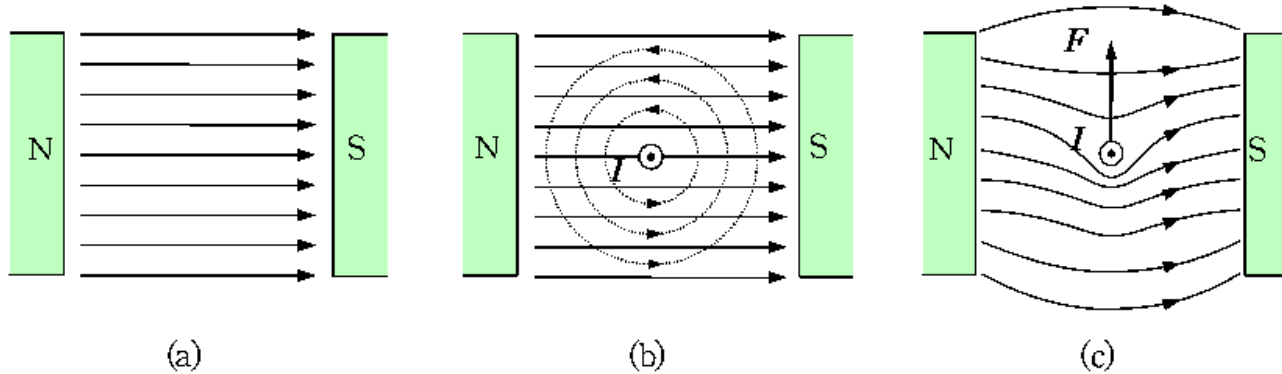


그림 4.17 외부자계와 전류 도체의 자력선 및 합성 자력선

- ◆ 전자력(electromagnetic force) : 자계 내에서 전류가 흐르는 도체가 받는 힘
 - ① 그림과 같이 외부 자석에 의한 자계 내에 전류 도체가 있으면, 외부 자계에 의한 자력선 → [그림 (a)]
 - ② 전류가 흐르는 도체 주위에 동심원으로 형성된 자계를 나타내는 자력선 발생 → [그림 (b)]
 - ③ 자석과 전류 도체에 의한 합성 자력선은 그림 (c)와 같이 도체의 위쪽은 적게되고, 아래 부분은 많아지기 때문에 도체는 위로 힘을 받게 된다.

- ◆ 응용 분야 : 전기 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 전동기(motor) 등

4.14 자계 내의 전류에 작용하는 힘

▶ 자계 내에서 전류 도체가 받는 힘 [전자력]

◆ 전자력

- 벡터 $F = I \times B [N/m]$

$$F = (I \times B)l [N]$$

- 크기 $F = BIl \sin \theta [N]$ $\begin{cases} \theta = 90^\circ : F = BIl \\ \theta = 0^\circ : F = 0 \end{cases}$

- 방향 : 플레밍의 왼손법칙

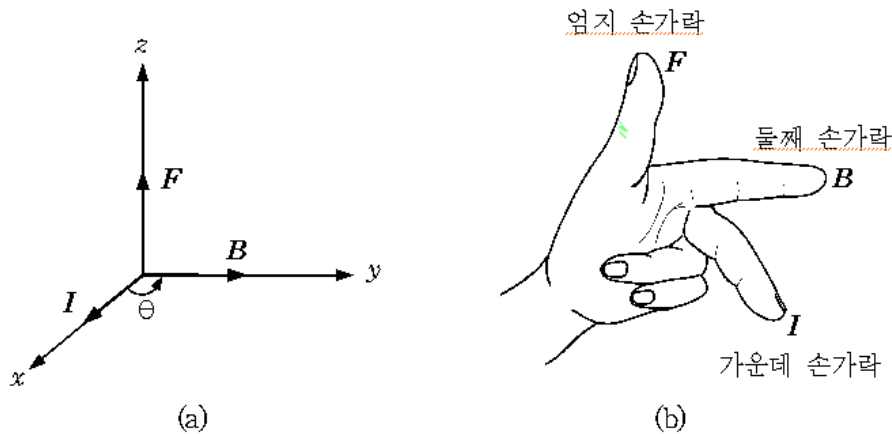


그림 4.18 플레밍의 왼손법칙

4.14 자계 내의 전류에 작용하는 힘

▶ 평행도체 상호간에 작용하는 힘

◆ A도체에 의한 B도체가 받는 힘

- 크기

① 전류 I_1 에 의한 전류 I_2 가 있는 지점에서의 자계의 세기

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi r} [AT/m]$$

② 도체 B가 받는 힘

$$F = B_1 I_2 [N/m] \quad (B_1 = \mu_0 H_1)$$

$$\therefore F = \mu_0 H_1 I_2 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} [N/m]$$

- 도체에 작용하는 힘의 방향 :

① 전류 동일 방향 : 흡인력

② 전류 반대 방향 : 반발력

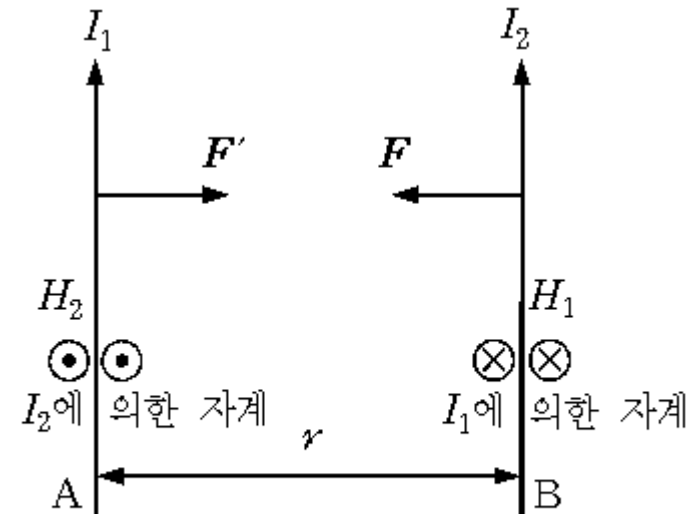


그림 4.19 평행도체에서 받는 힘

4.15 핀치 효과와 홀 효과

▶ 핀치효과 (pinch effect)

: 원통 단면을 갖는 액체 도체에 전류를 흘리면
 전류의 방향과 수직방향으로 원형 자계가 생겨서
 전류가 흐르는 액체에는 구심력의 전자력이 작용한다.

그 결과 액체 단면은 수축하여 저항이 커지기 때문에
 전류의 흐름은 작게 된다. 전류의 흐름이 작게 되면
 수축력이 감소하여 액체 단면은 원상태로 복귀하고,
 다시 전류가 흐르게 되어 수축력이 작용한다.

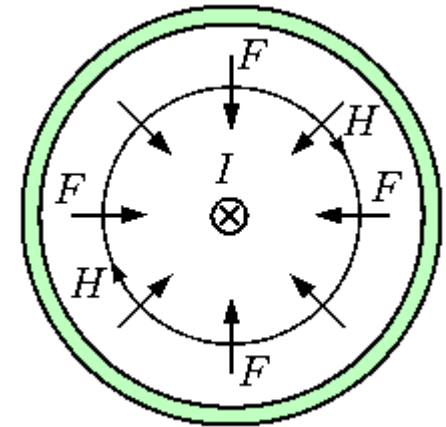


그림 4.20 핀치 효과

▶ 홀 효과 (Hall effect)

: 도체나 반도체의 물질에 전류를 흘리고
 이것과 직각 방향으로 자계를 가하면,
 I 와 B 가 이루는 면에 직각 방향으로
 기전력이 발생하는 현상

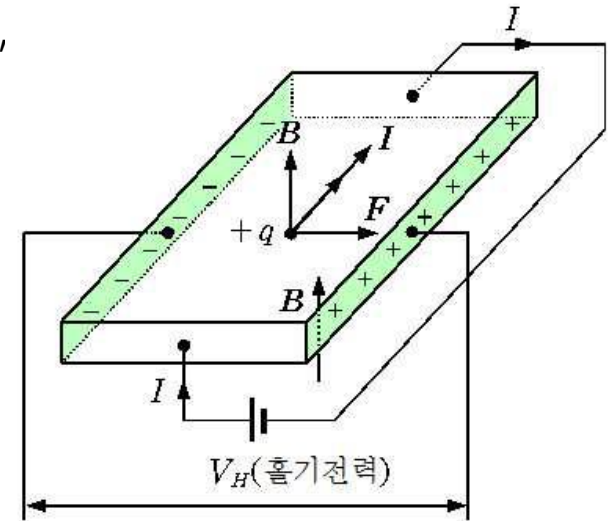


그림 4.21 홀 효과 (p형 반도체)

4.16 전자유도 현상

▶ 전자유도 현상

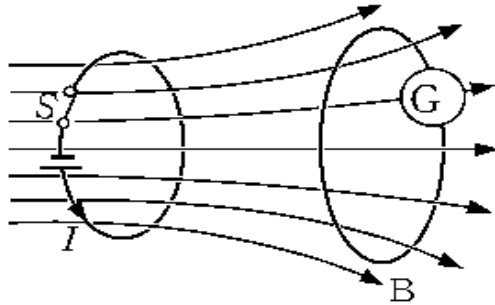


그림 4.22 전자유도 현상

◆ 전자유도현상 : 시변계

- 정상자계에 대해 시간적으로 변화하는 자계
(시변계)에서 일어나는 현상

※ 하나의 회로에 쇄교하는 자속 Φ 의 시간적 변화에 의하여 기전력이 유기되는 현상을 패러데이의 **전자유도(electromagnetic induction) 현상**이라 한다.

4.16 전자유도 현상

▶ 렌츠의 법칙

◆ 렌츠의 법칙(Lenz's law) : 기전력의 방향 결정

- "전자유도에 의해 발생하는 기전력은 **자속 변화를 방해하는 방향으로** 전류가 발생한다."

- 전자유도에 의한 기전력의 방향을 결정해 주는 법칙으로

물체는 처음의 운동 상태를 계속 유지하려는 성질 (뉴턴의 관성의 법칙)

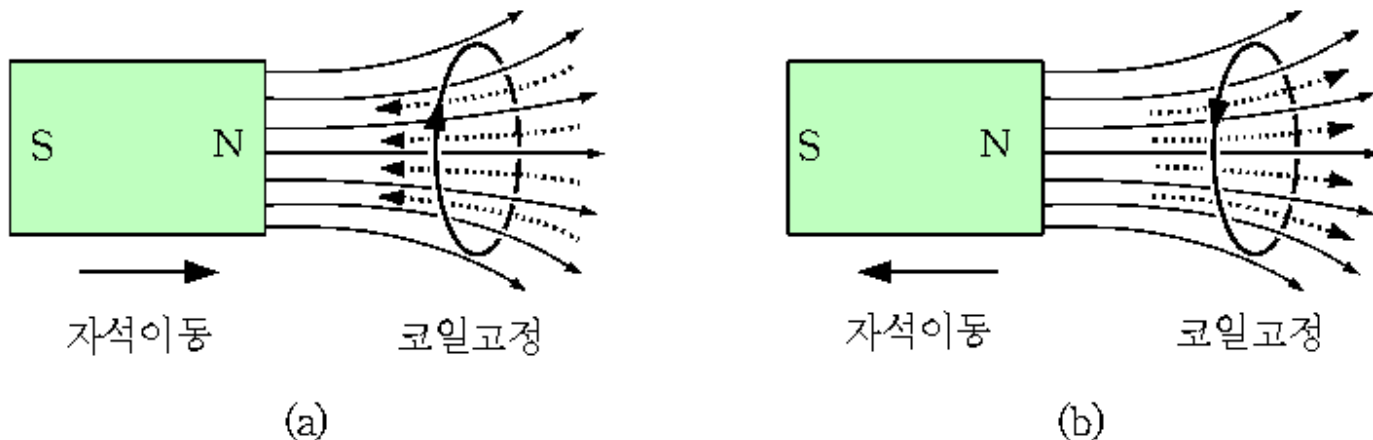


그림 4.23 쇠교자속에 의한 기전력의 방향

4.16 전자유도 현상

▶ 패러데이 법칙

◆ 패러데이 법칙(Faraday's law) : 기전력의 크기 결정

◆ "유도 기전력의 크기는 폐회로에 쇠교하는 자속의 시간적 변화율에 비례"

$$e = \frac{d\Phi}{dt} [V]$$

◆ 패러데이 법칙(기전력 크기)와 렌츠의 법칙(기전력 방향) 결합한 유도 기전력
- 렌츠의 법칙 적용 : 기전력의 방향이 쇠교 자속의 변화를 방해하는 방향으로 발생하므로 (-) 부호

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} [V]$$

◆ 전자유도현상을 응용 분야 : 발전기, 변압기, 그 외 적산전력계 등

4.16 전자유도 현상

▶ 운동도체의 유도 기전력

◆ 일정한 정자계, 즉 자속밀도가 변화하지 않고 폐회로가 이동하는 경우의 운동 도체에서 기전력의 발생

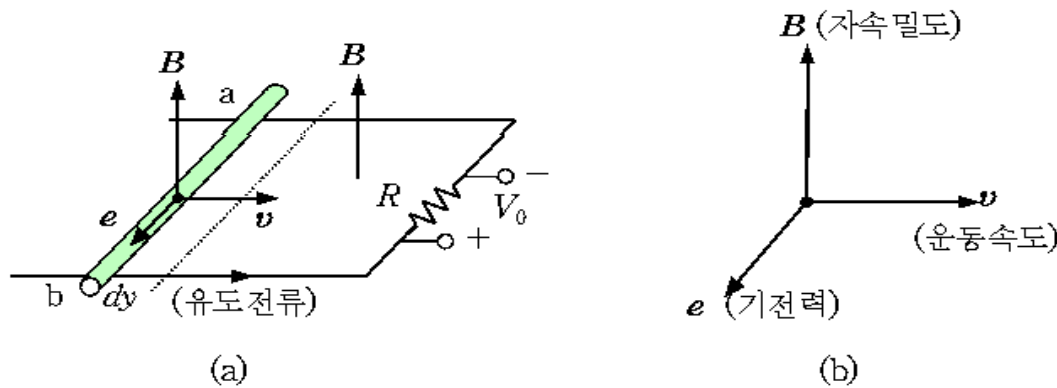


그림 4.24 운동 도체의 기전력과 플레밍 오른손 법칙

◆ 운동 기전력 : 운동 도체에 의한 기전력

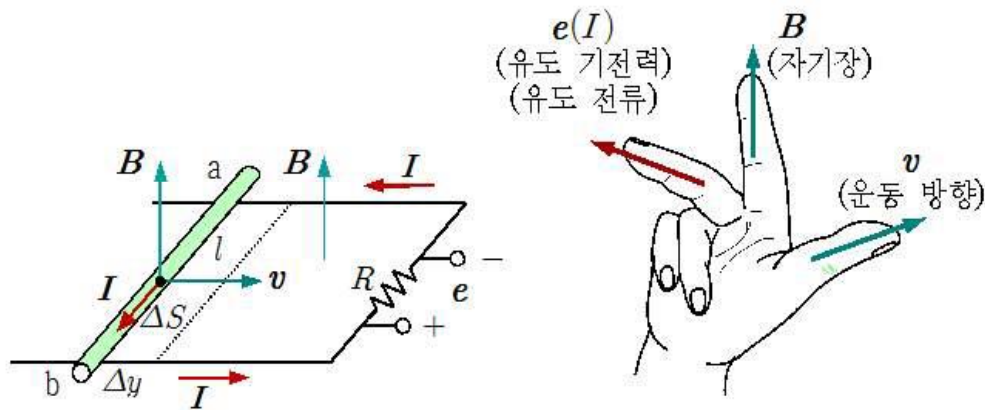
(정(+))의 값 : 자속의 감소를 방해하는 방향으로 운동)

$$e = \frac{d\phi}{dt} = Bl \frac{dy}{dt} = Blv \text{ [V]}$$

4.16 전자유도 현상

▶ 운동도체의 유도 기전력

◆ 플레밍의 오른손 법칙 : 기전력 방향 결정



(a) 운동 도체의 기전력

(b) 플레밍의 오른손 법칙

◆ 기전력

- 벡터 : $e = (v \times B) \cdot l$ [V]

- 크기 : $e = Blv \sin \theta$ [V]

- 미소부분에 의한 전체 운동 기전력 : $e = \oint_c (v \times B) \cdot dl$ [V]

4.17 인덕턴스

▶ 자기유도 및 자기인덕턴스

◆ 자기유도(self induction)

: 스위치를 개폐하는 순간, 전류의 변화에 의한 쇄교 자속도 변화하기 때문에 코일 자체에 전자유도 작용으로 인한 역기전력이 유도된다.

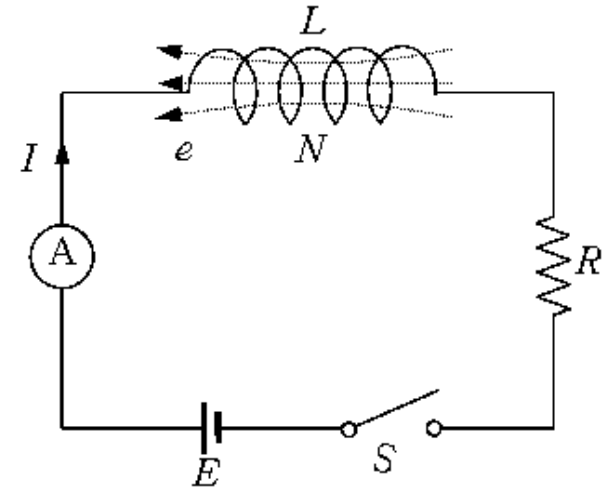


그림 4.26 자기 인덕턴스

◆ 자기유도에 의한 기전력

$$e = -L \frac{dI}{dt} \quad (L: \text{자기 인덕턴스})$$

◆ 자기 인덕턴스

$$L = \frac{N\phi}{I} [\text{Wb} / \text{A}] \text{ or } [H]$$

4.17 인덕턴스

▶ 상호유도 및 상호인덕턴스

◆ 상호유도(mutual induction)

: 코일 상호간의 작용으로 기전력이 유도되는 현상

◆ 상호 유도 기전력(누설자속 없는 경우)

$$e_2 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -N_2 \frac{d\phi_1}{dt} = -M \frac{dI_1}{dt}$$

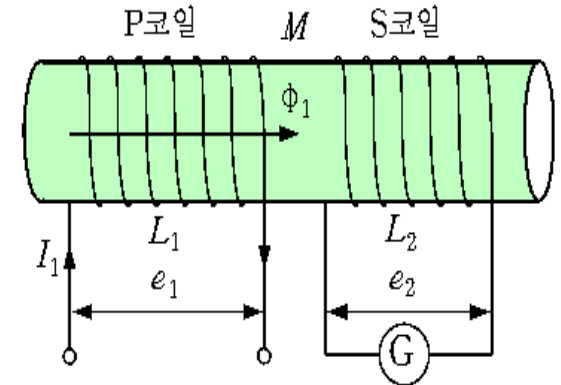


그림 4.27 상호 인덕턴스

◆ 결합계수(coupling factor) : 1, 2차 코일의 쇄교 자속의 비율(자기적 결합정도)

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \text{ or } M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

결합계수 ($0 \leq k \leq 1$)

$$\begin{cases} k=0 : \text{무유도 결합 } (M=0) \\ 0 < k < 1 : \text{일반적인 유도결합 } (M = k\sqrt{L_1 L_2}) \\ k=1 : \text{완전 결합 } (M = \sqrt{L_1 L_2}) \end{cases}$$

4.18 변압기

▶ 이상 변압기

◆ 1차 전력=2차 전력

$$P_1 = P_2, \quad V_1 I_1 = V_2 I_2$$

◆ 권수비

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

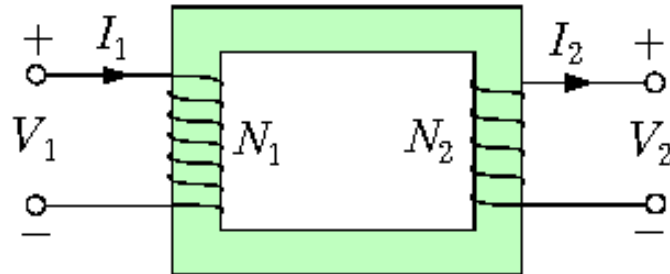


그림 4.28 변압기

4.19 인덕턴스의 접속

▶ 직렬 접속

(1) 각 코일의 기전력

$$e_1 = -L_1 \frac{dI}{dt}, \quad e_2 = L_2 \frac{dI}{dt}, \quad e_3 = L_3 \frac{dI}{dt}$$

$$e = e_1 + e_2 + e_3 = -(L_1 + L_2 + L_3) \frac{dI}{dt} = L \frac{dI}{dt}$$

(2) 합성 인덕턴스

$$L = L_1 + L_2 + L_3 [H]$$

(3) 저항의 합성법과 동일

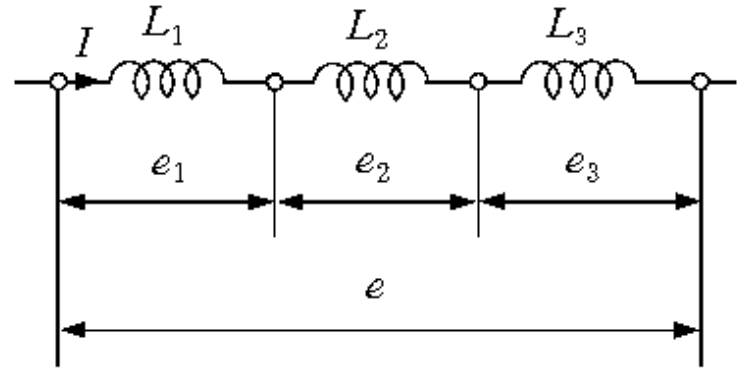


그림 4.29 인덕턴스의 직렬 접속

4.19 인덕턴스의 접속

▶ 병렬 접속

(1) 각 코일의 기전력

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \text{ [A]}$$

$$e = -L_1 \frac{dI_1}{dt} = -L_2 \frac{dI_2}{dt} = -L_3 \frac{dI_3}{dt}$$

$$\frac{dI_1}{dt} = -\frac{e}{L_1}, \quad \frac{dI_2}{dt} = -\frac{e}{L_2}, \quad \frac{dI_3}{dt} = -\frac{e}{L_3}$$

(2) 합성 인덕턴스

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \text{ [H]}$$

(3) 두 개의 인덕턴스 병렬 접속

$$L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

(4) 저항의 합성법과 동일

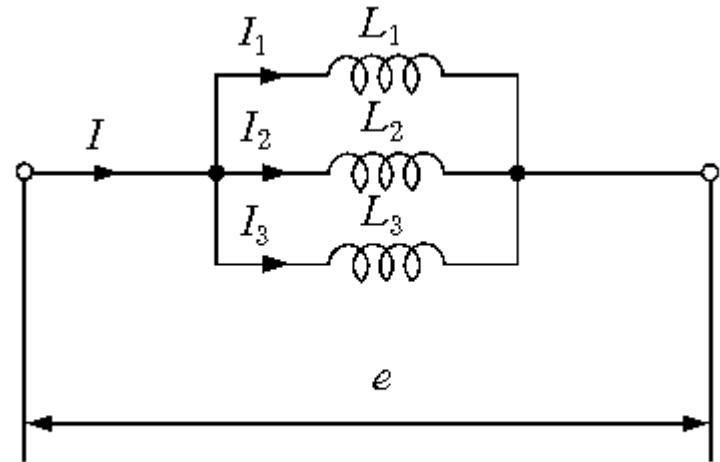


그림 4.30 인덕턴스의 병렬 접속

4.19 인덕턴스의 접촉

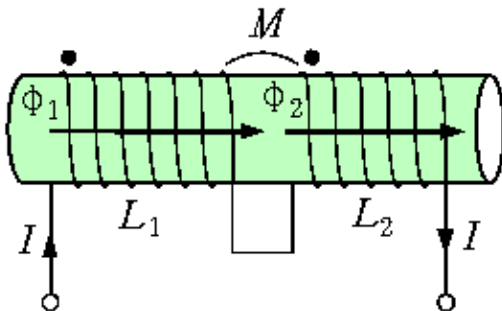
▶ 유도 결합된 인덕턴스의 직렬접속

(1) 상호 자속이 동일 방향

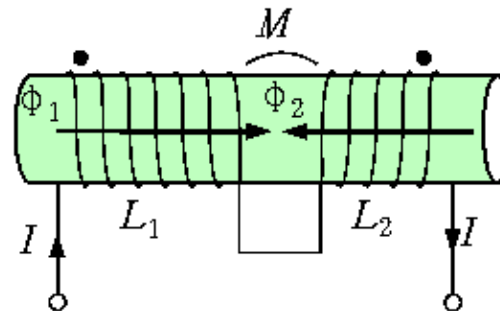
$$L = (L_1 + M) + (L_2 + M) = L_1 + L_2 + 2M \text{ [H]}$$

(2) 상호 자속이 반대 방향

$$L = (L_1 - M) + (L_2 - M) = L_1 + L_2 - 2M \text{ [H]}$$



(a) 상호 자속의 동일 방향



(b) 상호 자속의 반대 방향

그림 4.31 유도 결합을 갖는 인덕턴스의 직렬 접속

4.20 전류에 의한 자계 에너지

▶ 자계 에너지(magnetic energy)

: 전류 증가를 위해 역기전력에 대해 외부에서 일을 공급해야 하는데
전원에서 전력의 형태로 공급되고 인덕턴스에 흐르는 전류에 의하여
만들어진 자계에너지가 축적되는 에너지 (=전자에너지)

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \text{ [J]}$$

$$(\Phi = N\phi = LI)$$

$$\therefore W = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \Phi I \text{ [J]}$$

4장의 핵심포인트!



단원의 핵심 포인트

1. 자화의 세기 : 단위체적당 자기모멘트
2. 강자성체 : 철 Fe, 니켈 Ni, 코발트 Co
3. 히스테리시스 곡선 : 횡축(자계, H), 종축(자속밀도, B)
4. 히스테리시스 곡선에서 횡축, 종축과 만나는 것 : 횡축(보자력), 종축(잔류자기)
5. 직선 전류에 의해 주위에 발생하는 동심원의 자계 방향 : 오른나사의 회전 방향
6. 암페어의 주회적분의 법칙에서 관계되는 요소 : 전류와 자계($\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I$)
7. 두 평행 도선에 작용하는 힘 : $F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$
: 전류의 동일 방향(흡인력), 전류의 반대 방향(반발력)
8. 기자력 : 코일의 감긴 수와 전류와의 곱($F = NI$)
9. 전기회로의 도전율에 대응하는 자기회로의 요소 : 투자율
10. 자기회로의 퍼미언스(자기저항의 역수, permeance)에 대응하는 전기회로의 요소 : 컨덕턴스(전기저항의 역수, conductance)

4장의 핵심포인트!

11. 암페어의 오른나사 법칙 : 전류에 의한 자계 방향 결정(전류의 자기작용)
12. 비오-사바르 법칙 : 전류에 의한 자계의 세기 결정
13. 플레밍 왼손법칙 : 전자력의 방향 결정
14. 플레밍 오른손법칙 : 유도 기전력의 방향 결정
15. 패러데이의 법칙 : 전자유도 현상에 의해 발생하는 유도 기전력의 크기 결정
16. 렌쯔의 법칙 : 전자유도 현상에 의해 발생하는 유도 기전력의 방향 결정
17. 전자유도 현상을 응용한 전기기기 : 발전기, 유도 전동기, 변압기
18. 전기에너지를 일시적으로 전자에너지로 변환시키는 회로 소자 : 인덕턴스