# Chapter 8

# 전류에 의한 자계

# 8.1 전류의 자기작용

## 전류의 자기작용

● 전류의 자기작용

: 전류가 흐르고 있는 직선 도체 부근에 자침을 가까이 하면 자침은 일정한 방향으로 회전을 하고, 전류의 방향을 바꾸면 자침의 회전 방향은 반전하게 된다. 이와 같이 자침의 자극에 힘을 미치게 하는 원천은 또 다른 자계가 있기 때문으로 전류가 흐르는 도체 주위에 동심원의 자계가 형성됨

● **전류 : 자계를 발생하는 원천**

**→ 전류가 흐르고 있는 도체 주위에 자계가 형성된다는 의미**

● 전류의 자기현상 역사 : 외르스테드(Oersted), 암페어(Ampere), 패러데이(Faraday) 등에 의해 발전을 거듭해 왔으며, 19세기 중반 맥스웰(Maxwell)에 의해 전기 현상과 자기 현상의 상호 관계를 정립하여 오늘날 전기자기학의 완성

# 8.2 암페어의 오른나사 법칙

● 암페어의 오른나사 법칙

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

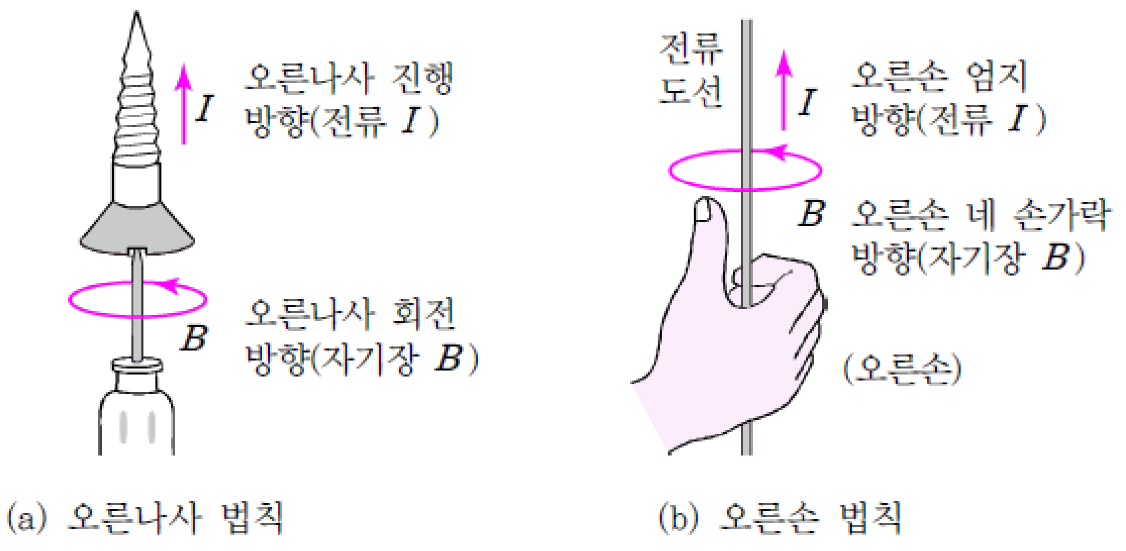


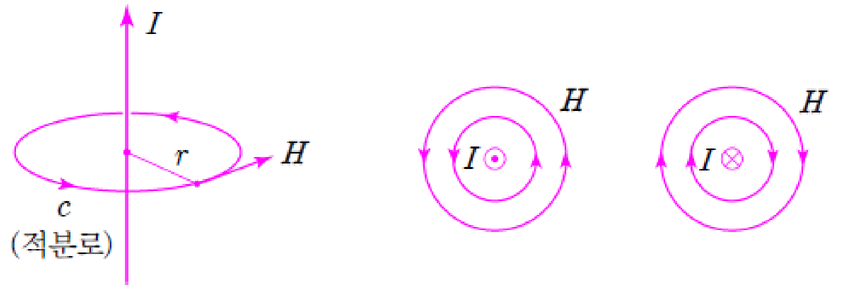

그림 8.1 ▶ 암페어의 오른나사 법칙

# 8.2 암페어의 오른나사 법칙

● 방향 표시법

▪ ⊙ : 지면의 뒷면에서 표면으로 나오는 방향

▪ ⊗ : 지면의 표면에서 뒷면으로 들어가는 방향




(a) 암페어의 오른나사 법칙 (b) 전류에 의한 자계 방향(동심원)

그림 8.2 ▸ 직선 전류에 의한 자계 방향

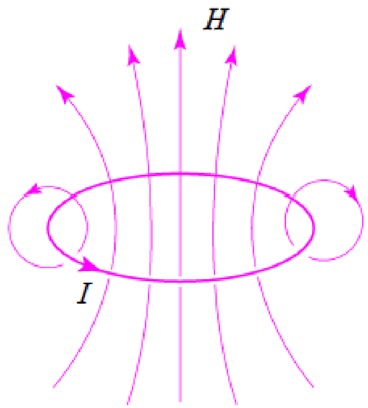



그림 8.3 ▸ 원형전류와 자계

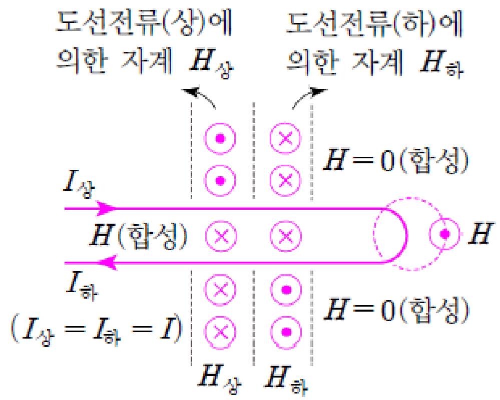



그림 8.4 ▸ 왕복전류에 의한 자계

# 8.3 암페어의 주회적분 법칙

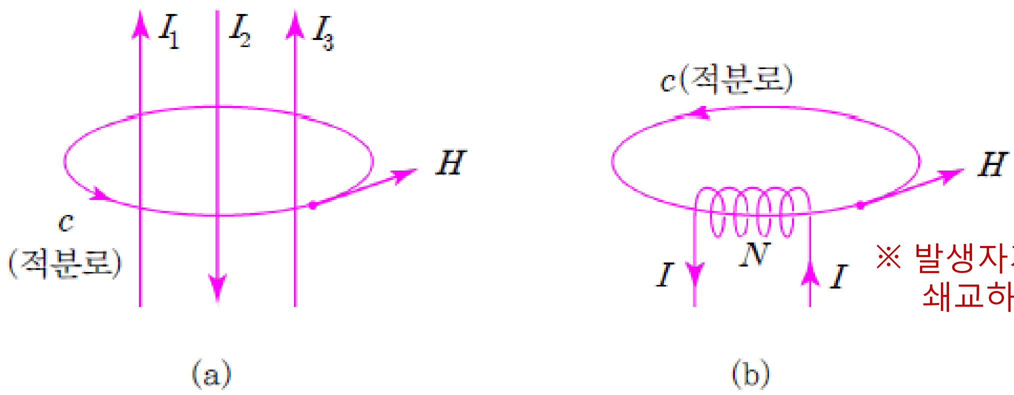
## 암페어 주회적분 법칙

● 정의 : 임의의 폐곡선에 대한 자계의 선적분은 이 폐곡선을 관통하는 전류와 같다

$$\oint_c H \cdot dl = I$$

▪ 그림 8.5(a) : $\oint_c H \cdot dl = I_1 - I_2 + I_3$

▪ 그림 8.5(b) : $\oint_c H \cdot dl = NI$




※ 발생자계는 1회 전류 코일의 N배가 되어
쇄교하는 전류는 NI가 된다.

그림 8.5 ▸ 전류와 적분로의 쇄교

# 8.4 전류에 의한 자계 계산

● 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

## 8.4.1 암페어의 주회적분 법칙에 의한 방법

● 암페어 주회적분 법칙

$$\oint_c H \cdot dl = I$$

※ 스칼라곱 : 유효성분에 대한 성분만 본다

① 자력선 $H$가 적분로와 접선(동일)방향이 되도록 취한다. 즉, $H \cdot dl$은 $Hdl$이다.

② 자력선 $H$가 적분로와 수직이 되도록 한다. 즉, $H \cdot dl$은 0이 된다.

# 8.4 전류에 의한 자계 계산

## (1) 무한장 직선 전류에 의한 자계

● 암페어 주회적분 법칙

$$\oint_c \boldsymbol{H} \cdot dl = \oint H\, dl = 2\pi r H = I$$

● 자계의 세기

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

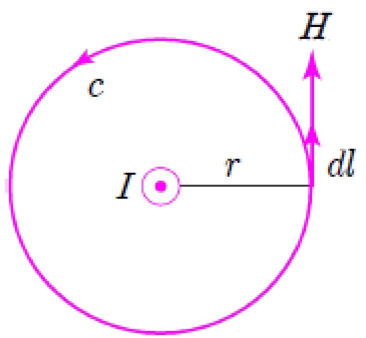



그림 8.6 ▸ 무한장 직선 전류

❖ 직선 전류에 의한 자계의 세기는 거리에 반비례

❖ 자석에 의한 자계와는 달리 투자율에 관계없음

# 8.4 전류에 의한 자계 계산

## (2) 무한장 원주형 도체에 의한 자계

◆ 전류가 균일하게 흐르는 경우

● 외부 자계

$$\oint_c \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = \oint H\,dl = 2\pi r H = I$$

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

● 내부 자계

$$\oint_c \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = \oint H\,dl = 2\pi r H = I'$$

$$H = \frac{I'}{2\pi r}[\mathrm{AT/m}] \quad \left(I' = \frac{r^2}{a^2} I\right)$$

※ 전류가 흐르는 원주형 도체의 단면적에 비례

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

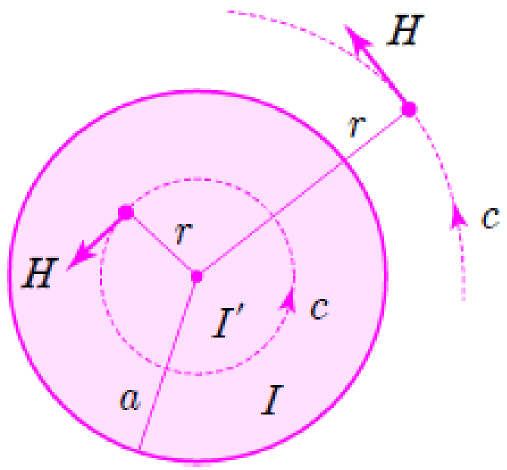



그림 8.8 ▸ 무한장 원주형 도체

(※ 전류가 도체표면에만 흐르는 경우 : 내부 자계 H=0)

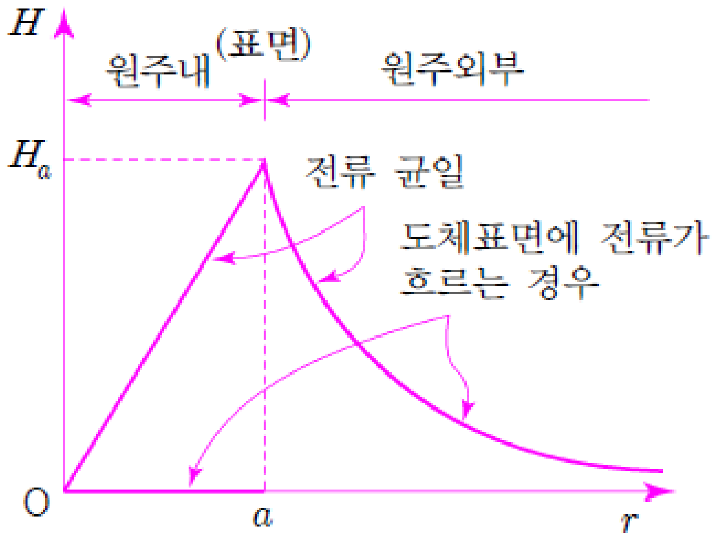
# 8.4 전류에 의한 자계 계산

## (2) 무한장 원주형 도체에 의한 자계

◆ 전류가 균일하게 흐르는 경우

$$\therefore \; H = \frac{r}{2\pi a^2} I \,[\mathrm{AT/m}]$$

※ 전류가 균일하게 흐를 때
도체 내부 자계




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

※ 전류가 균일하게 흐를 때
도체 외부 자계

그림 8.9 ▸ 무한장 원주형 도체에서의 자계 분포

– 무한장 원주전류에 의한 자계는

1) 도체 내부에서는 중심으로부터의 거리에 비례

2) 도체 외부에서는 중심으로부터의 거리에 반비례

# 8.4 전류에 의한 자계 계산

## (3) 무한장 솔레노이드에서의 자계

● 솔레노이드(solenoid) : 원통 모양으로 도선을 감은 코일

※ 전계(H)의 방향과 수직인 지점은 cos 90도이므로, 값은 0이 됨

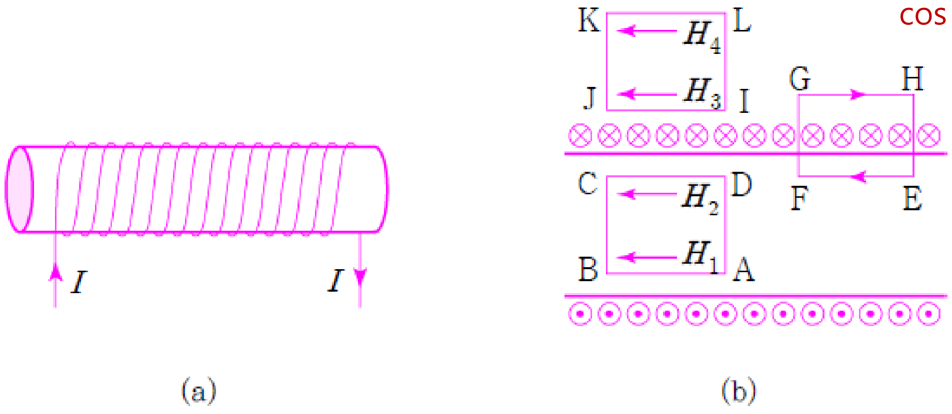



그림 8.10 ▶ 무한장 솔레노이드에 의한 자계

- 내부 자계

$$H_i = nI\,[\mathrm{AT/m}]$$ (n : 1[m]당의 권선수)

- $\oint H \cdot dl = \int_{AB} H_1 \cdot dl + \int_{BC} H \cdot dl - \int_{CD} H_2 \cdot dl + \int_{DA} H \cdot dl = 0$

※ 자계와 적분경로가 수직　　※ 자계와 적분경로가 수직

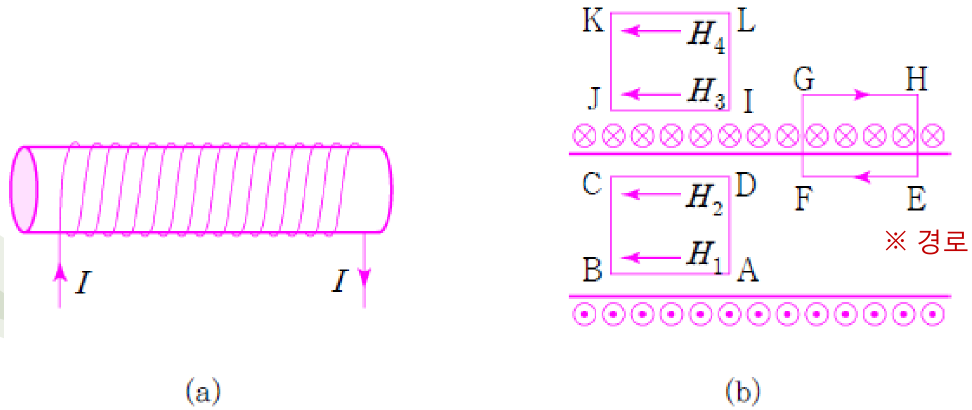
- $\oint H \cdot dl = H_1 \cdot l - H_2 \cdot l = 0$

→ 솔레노이드 내부는 축방향에 평행한 평등자계가 된다.

# 8.4 전류에 의한 자계 계산

## (3) 무한장 솔레노이드에서의 자계

● 솔레노이드(solenoid) : 원통 모양으로 도선을 감은 코일




※ 경로 FE에 대한 내부 자계만 존재함

그림 8.10 ▸ 무한장 솔레노이드에 의한 자계

- 외부 자계 : H=0

  → $H_3=H_4$가 되어 외부에서도 자계는 일정하지만, 무한원점에서도 성립해야 하므로 ($H_3=H_4$ = 0)이 된다. (무한원점에서는 자계의 세기는 0이므로)

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

# 8.4 전류에 의한 자계 계산

## (4) 환상 솔레노이드

- **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** $\oint H \cdot dl = 2\pi r H = NI$

$$\therefore \quad H = \frac{NI}{2\pi r} = \frac{NI}{l} \ [\mathrm{AT/m}]$$

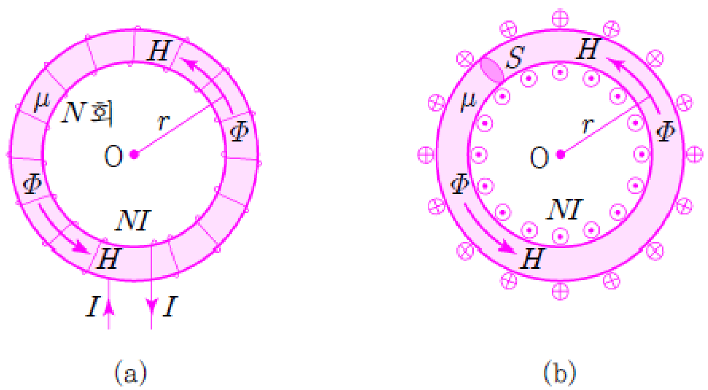



그림 8.11 ▶ 환상 솔레노이드

→ 환상 솔레노이드 내부의 자계는 투자율 $\mu$ 과 무관

또한 길이 l은 솔레노이드 중심에서의 반경반향 길이

▪ **외부 자계** : H=0

외부에서의 자계는 적분로를 취한 원주와는 쇄교하는 전류가 없기 때문에 외부의 자계의 세기는 0

# 8.4 전류에 의한 자계 계산

## (4) 환상 솔레노이드

● 환상 솔레노이드 공심 및 철심에서의 자속밀도 및 자속

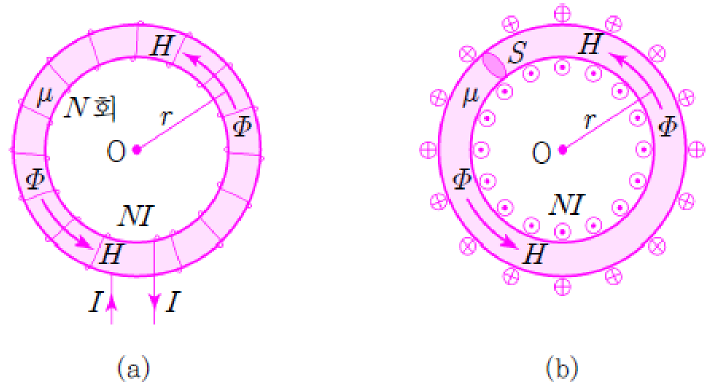



그림 8.11 ▶ 환상 솔레노이드

$$\begin{cases} \text{진공}: \ B = \mu_0 H = \dfrac{\mu_0 NI}{2\pi r} [\mathrm{Wb/m^2}] \\ \text{철심}: \ B = \mu H = \dfrac{\mu NI}{2\pi r} [\mathrm{Wb/m^2}] \end{cases} \qquad \begin{cases} \text{진공}: \ \phi = BS = \dfrac{\mu_0 NI}{2\pi r} S \ [\mathrm{Wb}] \\ \text{철심}: \ \phi = \mathrm{BS} = \dfrac{\mu \mathrm{NI}}{2\pi \mathrm{r}} \mathrm{S} \ [\mathrm{Wb}] \end{cases}$$

※ 자계의 세기는 공심 또는철심의 재질과 상관이 없으나 자속밀도는 투자율과 상관이 있음

→ $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$

# 8.4 전류에 의한 자계 계산

## 8.4.2 등가 판자석에 의한 방법

- 등가 판자석 : 그림 8.11(a)반지름 a인 폐회로에 원형 전류 I가 흐르고 있을 때 암페어의 오른나사 법칙에 의해 자력선 분포가 형성되는데, 외부자계만을 생각하면 그림 8.11(b)와 같이 원형의 폐회로를 면적으로 하는 얇은 판자석으로 바꾸어 놓은 것과 같은 자력선 분포가 형성된다. 이를 **등가 판자석**이라 함

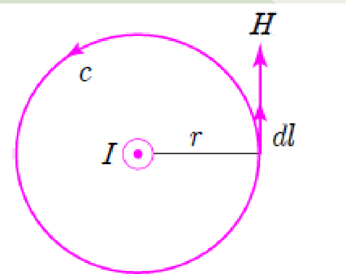



그림 8.6 ▸ 무한장 직선 전류

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

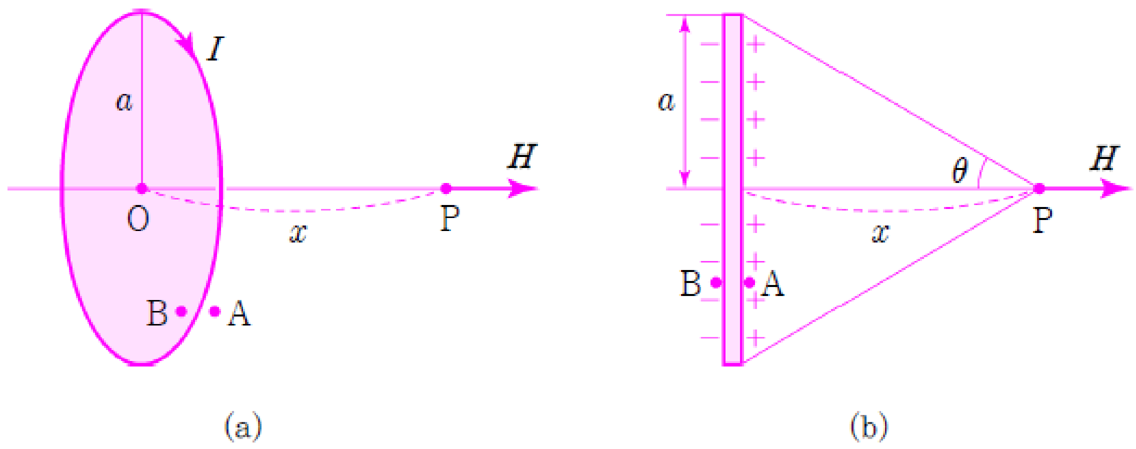



그림 8.12 ▸ 원형전류의 등가 판자석에 의한 방법

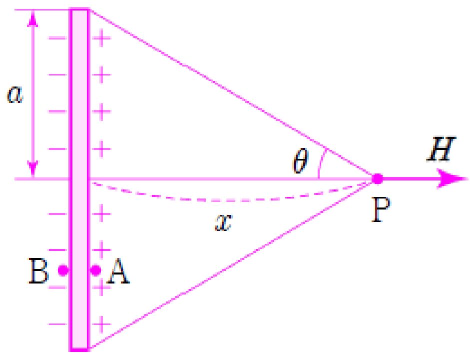
# 8.4 전류에 의한 자계 계산

## 8.4.2 등가 판자석에 의한 방법

● 원형전류의 등가 판자석에 의한 자위 U와 자계 H(등가 판자석의 세기 : $M = \mu_0 I$ )

$$U_P = \frac{M}{4\pi\mu_0}\omega\,[\mathrm{A}]$$

※ 판자석에 의한 점 P의 자위




$$U_{AB} = U_A - U_B = -\int_B^A H \cdot dl = \frac{M}{\mu_0}$$

※ 판자석 양면의 자위차

$$\oint_c H \cdot dl = \int_A^B H \cdot dl + \int_B^A H \cdot dl = I\,[A]$$

$$\int_A^B H \cdot dl = -\int_A^B H \cdot dl = I[A] \Rightarrow M = \mu_0 I \Rightarrow \therefore\ U = \frac{I}{4\pi}\omega\,[\mathrm{A}]$$

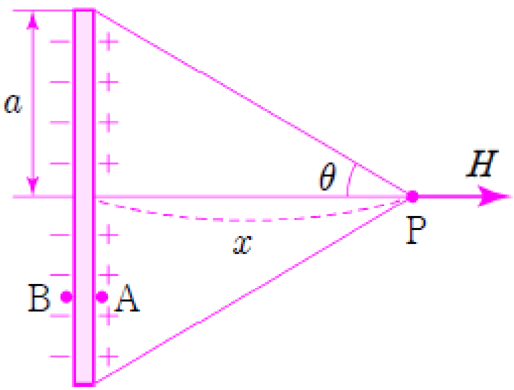
※ 등가 판자석의 세기 ※ 전류에 의한 자위

$$\therefore\ U = \frac{I}{2}\left(1 - \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}}\right) \qquad H_x = -\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{I}{2}\,\frac{a^2}{(a^2 + x^2)^{3/2}}\,[\mathrm{AT/m}]$$

# 8.4 전류에 의한 자계 계산

## 8.4.2 등가 판자석에 의한 방법

● 원의 중심부에서 x=0이므로, 원형 코일의 중심에서 자계의 세기 H는 권선수에 따라 각각 다음과 같다.




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

※ 권선 N=1회

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

※ 권선 N=N회

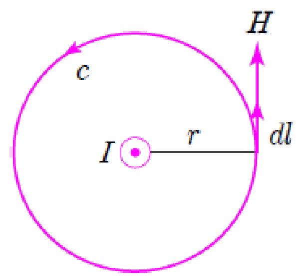



그림 8.6 ▶ 무한장 직선 전류

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