제8장 자성체와 자기회로

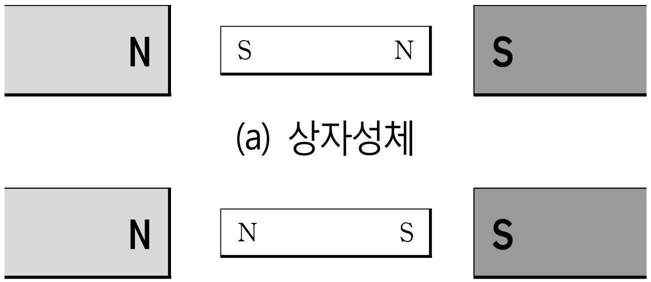
8-1 자화의 본질

- 자화: 모든 물질은 자계내에 놓이면 자성을 나타냄

- 자성체: 자화된 물질

- 강자성체 이외에는 자성이 매우 약하므로 비자성체로 취급해도 문제 없음

구 분		물 질
상자성체	강자성체	철, 니켈, 코발트, 퍼말로이, MKS강
	약자성체	크롬, 망간, 알루미늄, 산소, 공기
반자성체		수은, 금, 동, 연 및 산소와 공기 이외의 기체

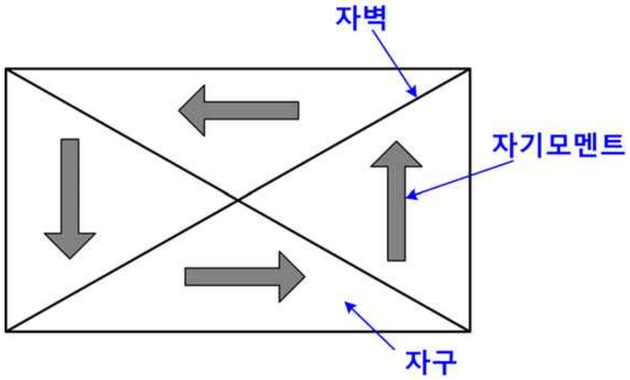


(a) 상자성체

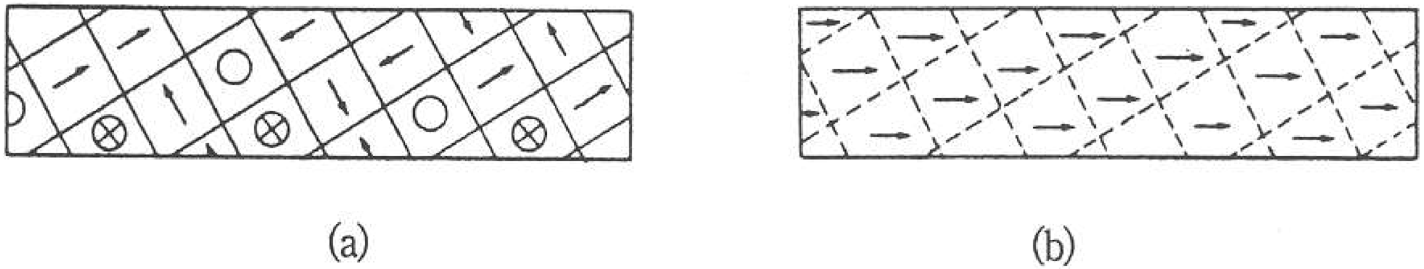
(b) 역자성체

그림 8-1 자성체

- 강자성체는 전자의 스핀운동(자전)에 의해 자기(쌍극자)모멘트를 갖게 되며, 자기 모멘트는 일정한 영역에 뭉쳐 단체적 행동을 하게 되는데, 이러한 영역을 자구라고 한다.



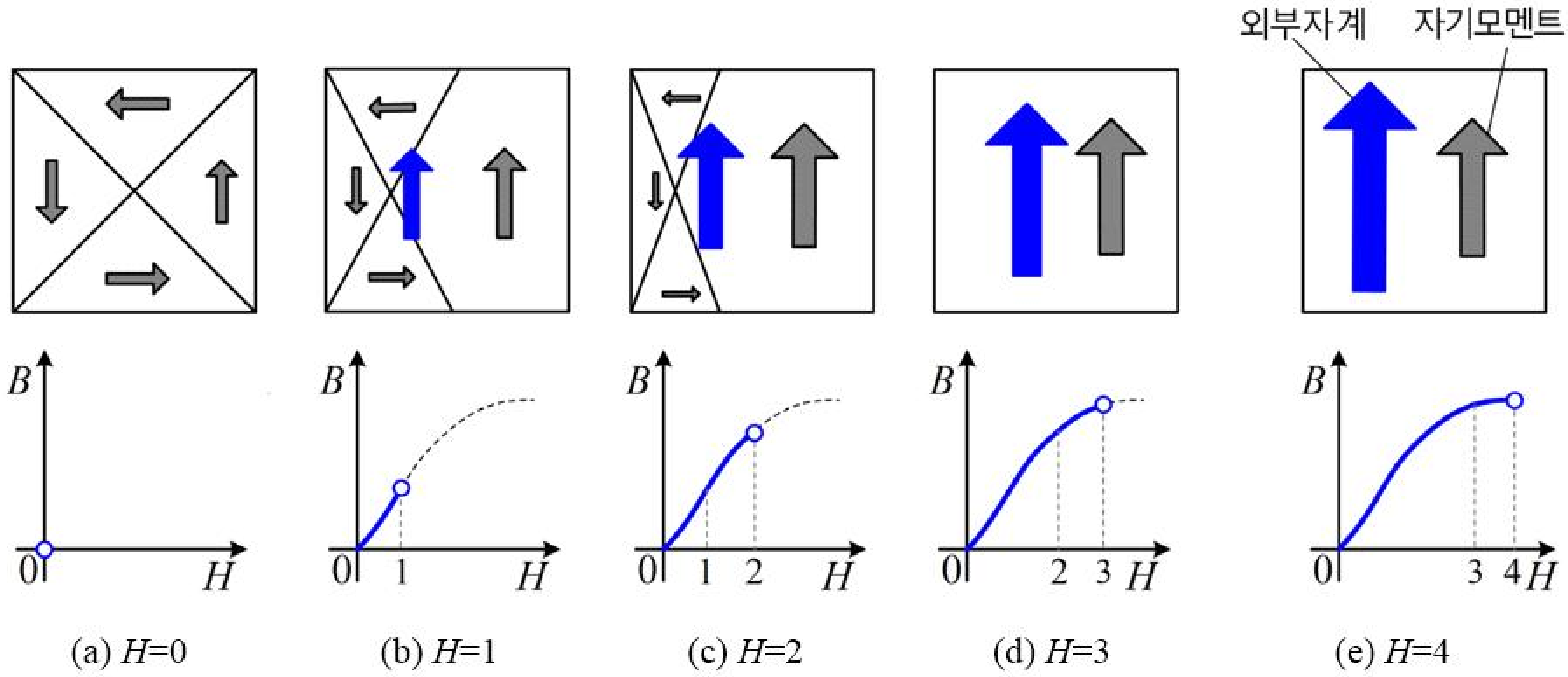
- 외부자계가 없을 때: 자기모멘트가 각각 자유로운 방향 (전체적인 자성은 0)
- 외부자계 인가 후: 자기모멘트는 외부자계 인가방향으로 정렬



외부자계 없을 때　　　　　　　　외부자계 인가 후

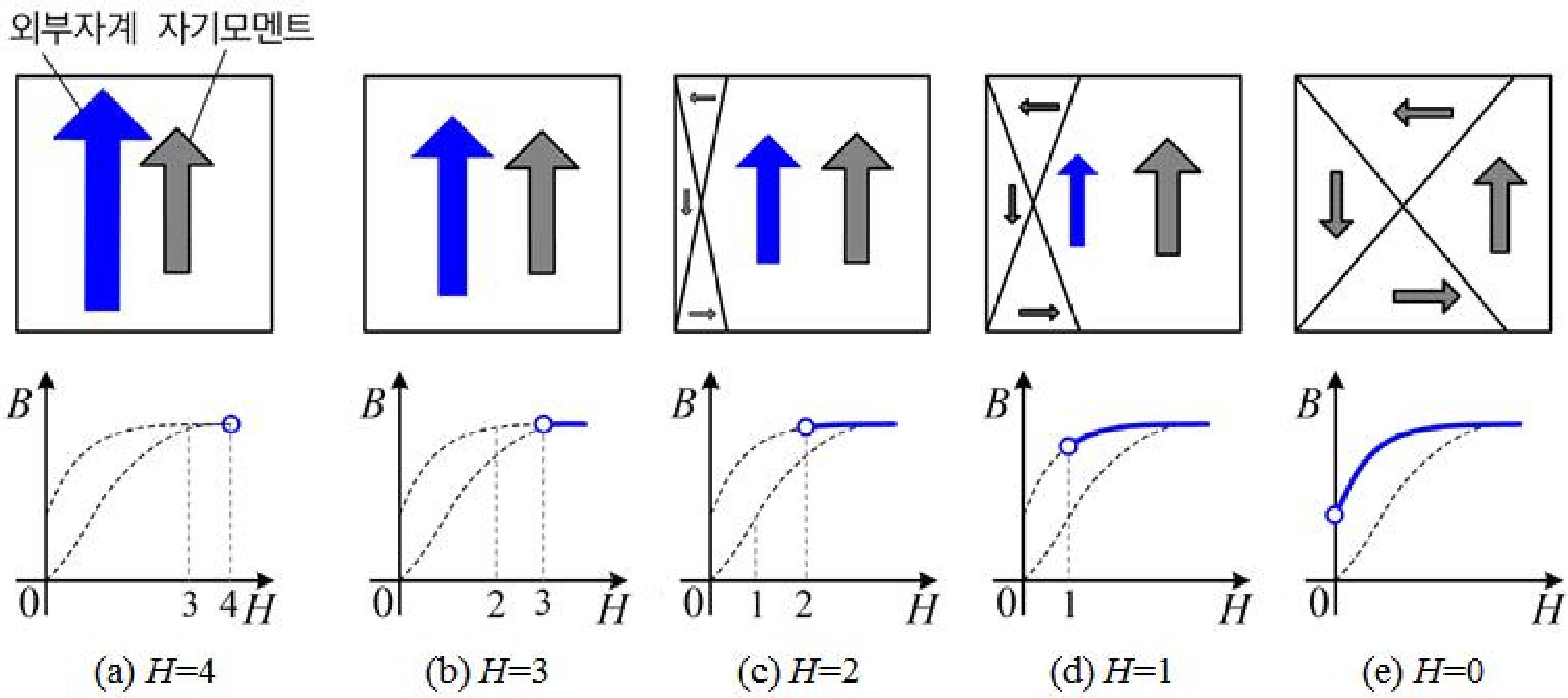
그림 8-2　자구의 변화

- 자기포화: 외부자계를 계속 인가하여도, 자성은 더 이상 커지지 않음

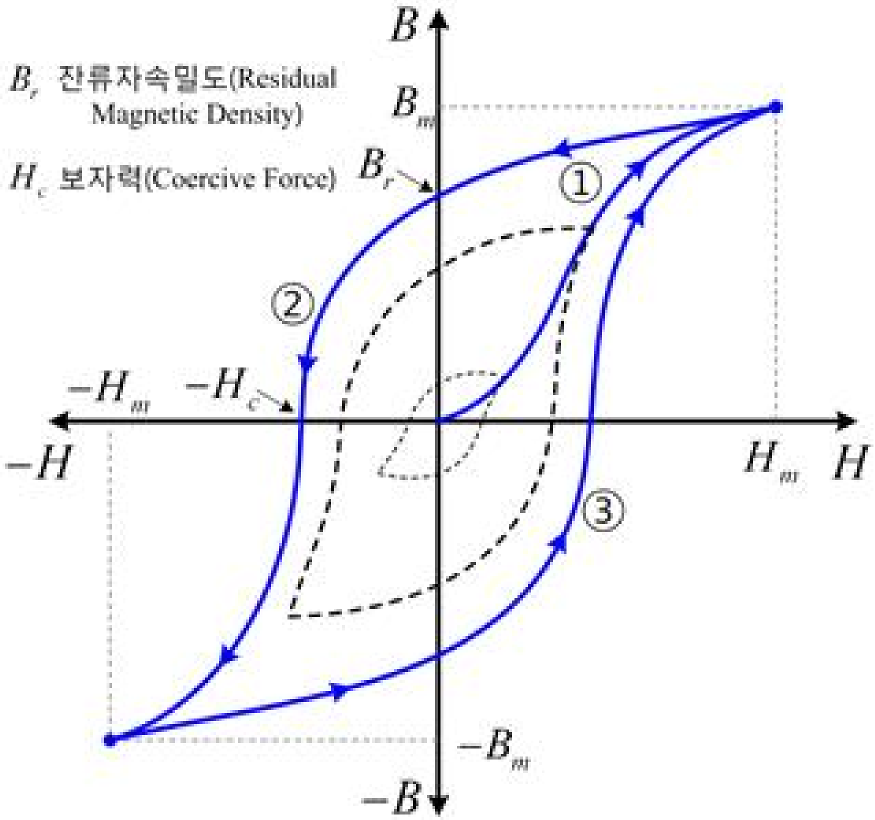


자계의 증가에 따른 자벽의 이동 및 B-H 곡선

- 영구자석: 외부자계를 제거하여도 일부의 자기모멘트가 인가자계 방향으로 남아있는 물질



자계의 감소에 따른 자벽의 이동 및 B-H 곡선



자기 포화곡선 (히스테리시스 곡선, B-H곡선)

8-2 자화의 세기

- 자화도(자화의 세기): 자성체의 단위면적당 발생하는 자기량

- 자화의 방향(자화선): S극(-m자하)→N극(+m자하)

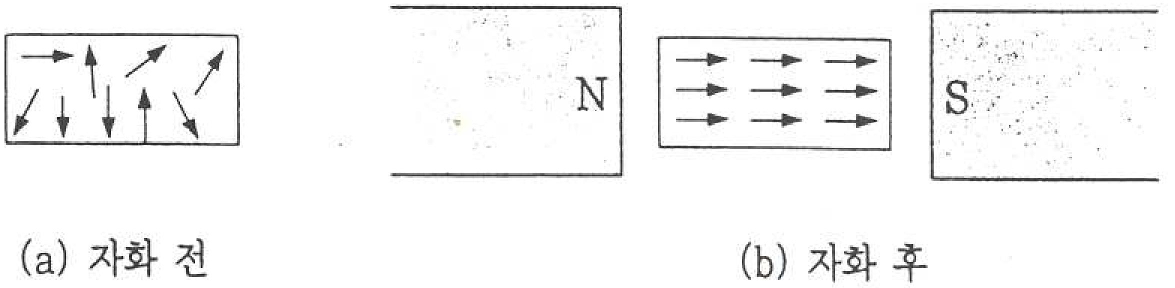


그림 8-3 자성체의 자화 원리

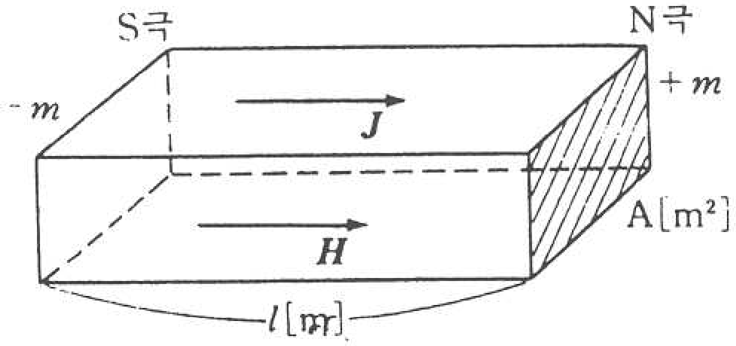


그림 8-4 자화의 세기

- 자화의 세기

$$J = \frac{m}{A}\,[\mathrm{Wb/m^2}] \qquad \cdots\cdots \quad (8\text{-}1)$$

- 자기쌍극자 모멘트 $M = m \times l$ 이므로, 단위체적당 자기쌍극자 모멘트로써 정의 가능

$$J = \frac{m \times l}{A \times l} = \frac{M}{V}\,[\mathrm{Wb{\cdot}m/m^3}] \qquad \cdots\cdots \quad (8\text{-}2)$$

- 벡터량으로 표시하면

$$\boldsymbol{J} = \frac{\boldsymbol{M}}{V}\,[\mathrm{Wb/m^2}] \qquad \cdots\cdots \quad (8\text{-}3)$$

- 또한 자화율($\chi = \mu_0(\mu_s - 1)$)과 자계의 세기의 곱으로 표현 가능

$$\boldsymbol{J} = \chi \boldsymbol{H}[Wb/m^2] \qquad \cdots\cdots \quad (8\text{-}4)$$

$$\boldsymbol{J} = \mu_0(\mu_s - 1)\boldsymbol{H}[Wb/m^2] \qquad \cdots\cdots \quad (8\text{-}5)$$

표 8-1　자성체의 비투자율

물　질	종　별	비 투 자 율
은	역자성체	0.99998
주석	역자성체	0.999983
동	역자성체	0.999991
진공		1
공기	약자성체	1.00000004
알루미늄	약자성체	1.00002
코발트	강자성체	250
니켈	강자성체	600
철(0.2% 불순물)	강자성체	5,000
규소강(4% 규소)	강자성체	7,000
퍼멀로이(Fe22, Ni78)	강자성체	100,000
슈퍼멀로이(Fe17, Mo5, Ni78)	강자성체	1,000,000

예제 8.1 비투자율 μ_s=300인 환상철심 내의 평균자계의 세기가 H=4000[AT/m]이다. 철심 중의 자화의 세기[Wb/m^2]를 구하여라.

[풀이] 식(8-5)를 이용하여

$$J = \chi H = \mu_0(\mu_s - 1)H = 4\pi \times 10^{-7}(300-1) \times 4000 = 1.5[\mathrm{Wb/m^2}]$$

예제 8.2 길이 40[cm] 단면의 반지름 1[cm]인 자성체를 길이방향으로 균일하게 자화시켰을 때 자화의 세기가 0.2[Wb/m^2]일 경우 이 자성체의 자극세기[Wb]를 구하라.

[풀이] 식(8-1) $J = \dfrac{m}{A} = \dfrac{m}{\pi a^2}$에서

$$m = J \cdot \pi a^2 = 0.2 \times 3.14 \times (1 \times 10^{-2})^2 = 6.28 \times 10^{-5}[\mathrm{Wb}]$$

8-3　자속밀도

- 외부자계 H_0를 가하면 자성체는 자화되며, 자화의 세기 J는 외부자계와 같은 방향(S→N)
- 자기감자계 $(H^{'})$: 자성체 내부의 자기력선 (N→S)
- 자성체 내부의 합성자계 $H = H_0 + H^{'}$
- 자성체에는 자성체 내부합성자계 H에 의한 자기력선과 외부자계에 의한 자화선이 동시에 존재

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{H} + \boldsymbol{J} [\mathrm{Wb/m^2}] \qquad \cdots\cdots (8\text{-}6)$$

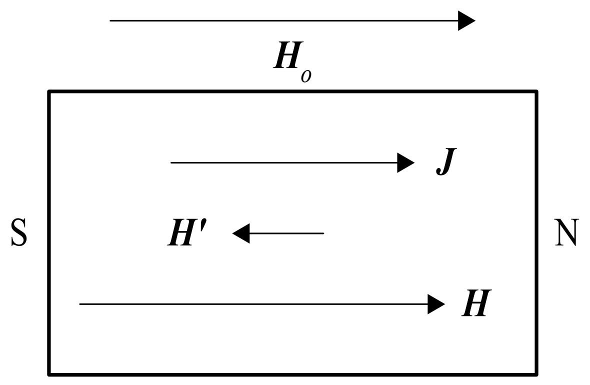


그림 8-5　자성체 내의 자속

- **진공중**에서 $J=0$이므로, ($\because \mu_s = 1 \rightarrow \chi = \mu_0(\mu_s - 1) = 0$)

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{H} \qquad \cdots\cdots \text{(8-7)}$$

$$d\psi = \boldsymbol{B} \bullet d\boldsymbol{S}[\mathrm{Wb}] \qquad \cdots\cdots \text{(8-8)}$$

- 만일 B가 dS에 수직이 아닐 경우,

$$\psi = \int_s B\cos\theta\, dS = \int_S B \bullet \boldsymbol{n}\, dS \qquad \cdots\cdots \text{(8-9)}$$

- m[Wb]의 N극에서 발산하는 총 자속은 반지름 r[m] 구면상의 자속밀도의 총합

$$\psi = \int_S \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{n}\, dS = B \cdot 4\pi r^2 = \mu_0 H \cdot 4\pi r^2$$

$$= \mu_0 \frac{1}{4\pi \mu_0} \frac{m}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = m$$

- 한편 $\boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{H} + \boldsymbol{J}[\mathrm{Wb/m^2}]$, $\boldsymbol{J} = \chi \boldsymbol{H}[Wb/m^2]$이므로

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{H} + \chi \boldsymbol{H} = (\mu_0 + \chi)\boldsymbol{H} \quad \cdots\cdots \text{(8-10)}$$

$$\mu = \mu_0 + \chi \quad \cdots\cdots \text{(8-11)}$$

$$\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H}[\mathrm{Wb/m^2}] \quad \cdots\cdots \text{(8-12)}$$

- 자성체의 비투자율

$$\mu_s = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\mu_0 + \chi}{\mu_0} = 1 + \frac{\chi}{\mu_0} \quad \cdots\cdots \text{(8-13)}$$

예제 8.3 공기 중에 *H*=1200[AT/cm]의 자계와 30°의 각을 이루는 면적 20×40 [cm²]인 사각코일을 지나는 자속을 구하시오.

[풀이] 식(8-9) $\psi = \int_s B\cos\theta\, dS = B\cos\theta \cdot S$에서

$$B = \mu_0 H = 4\pi \times 10^{-7} \times 1200 \times 10^2 \fallingdotseq 150 \times 10^{-3} = 15 \times 10^2 [\mathrm{Wb/m^2}]$$

이므로 ψ는

$$\psi = B\cos\theta \cdot S = 15 \times 10^2 \times \cos 30^\circ \times 20 \times 40 \times 10^{-4}$$

=103.9

가 된다.

8-4 감자작용(減磁作用)

- 자성체를 그림 8-6과 같이 외부평등자계 H_0내에 놓으면 자기유도작용에 의해 자화 (N,S극 발생)
- 자기감자계 (H'): 자성체 내부의 자기력선 (N→S)
- 자기감자계 H'는 외부자계 H_0를 감소시키는 방향이므로, 상자성체 내부의 합성자계

$$H = H_0 - H' \qquad \cdots\cdots \ (8\text{-}14)$$

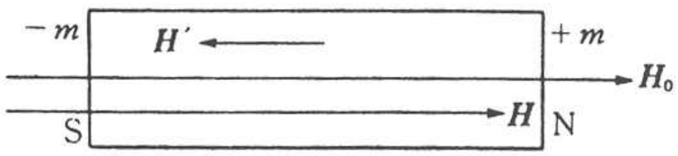


그림 8-6 감자작용

- 따라서, 자기감자계 H'를 감자력이라고도 하며, 이러한 현상을 감자작용이라고 한다.
- 감자력은 자성체 양단에 나타나는 자화의 세기에 비례하며, 자성체의 형상에 따라 다르므로 비례상수를 N (감자율; $0 \le N \le 1$)이라고 하면,

$$H' = N\frac{J}{\mu_0} \qquad \cdots\cdots \ (8\text{-}15)$$

- 환상철심과 같이 자성체에 공극이 없는 경우, 자극이 나타나지 않으므로 $N = H^{'} = 0$이 된다.
- 따라서 공극이 없으면 감자력도 발생하지 않으므로, 말굽자석 보관 시 양쪽 극에 막대모양의 쇠를 붙여놓으면 됨

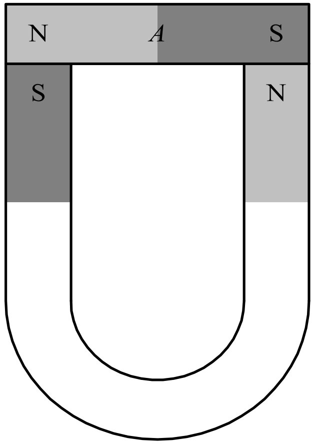


그림 8-7 영구자석의 보관법

- 그런데 $J = \chi H$ 이므로

$$\boldsymbol{H}' = N\frac{\chi}{\mu_0}\boldsymbol{H}$$

- 식 (8-14)과 (8-13)으로부터

$$H = H_0 - H' = H_0 - N\frac{\chi}{\mu_0}H$$

$$H = \frac{H_0}{1 + N\frac{\chi}{\mu_0}} = \frac{H_0}{1 + N(\mu_s - 1)} \qquad \cdots\cdots \text{(8-16)}$$

- 자기차폐: 어떤 물체를 투자율이 큰 자성체로 감싸면 외부로부터의 자기적 영향을 감소 가능

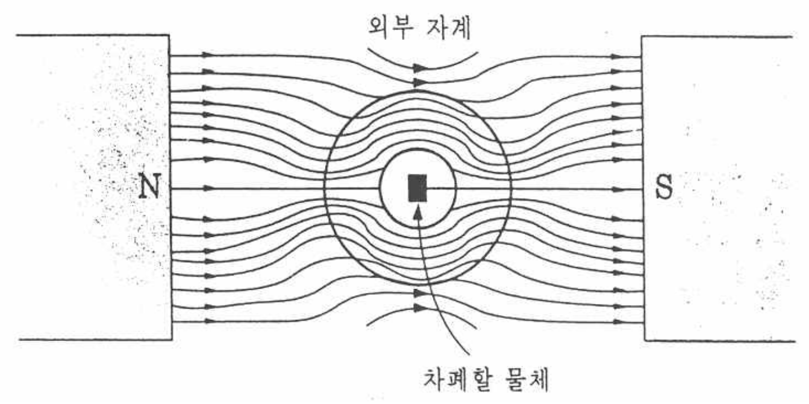


그림 8-8 자기차폐

예제 8.4 비투자율 μ_s=1000인 막대 자성체를 외부자계 H_0=300[AT/m] 내에 놓고 자화시킬 때 자성체의 자화율과 자화의 세기를 구하여라. (단, 감자율 N=0.0162이다.)

[풀이] 자성체의 자화율

$$\chi = \mu - \mu_0 = \mu_0(\mu_s - 1) = 4\pi \times 10^{-7}(1000 - 1) = 1.255 \times 10^{-3}[\mathrm{H/m}]$$

자화의세기

$$J = \chi H = \chi \cdot \frac{H_0}{1 + N(\mu_s - 1)}$$

$$= 1.255 \times 10^{-3} \cdot \frac{300}{1 + 0.0162(1000 - 1)} = 0.022[\mathrm{Wb/m^2}]$$

8-5 경계조건

- 투자율이 다른 두 자성체 경계면에서의 경계조건은 정전계와 같은 방법으로 구할 수 있음

- 투자율 μ_1, μ_2 인 자성체가 맞붙어 있을 때
  1) μ_1 인 매질에서 자계의 세기 H_1, 자속밀도 B_1이 θ_1의 각도로 경계면에 입사
  2) μ_2 인 매질속을 θ_2의 각도로 굴절하여 자계의 세기 H_2, 자속밀도 B_2로 변화하며 통과

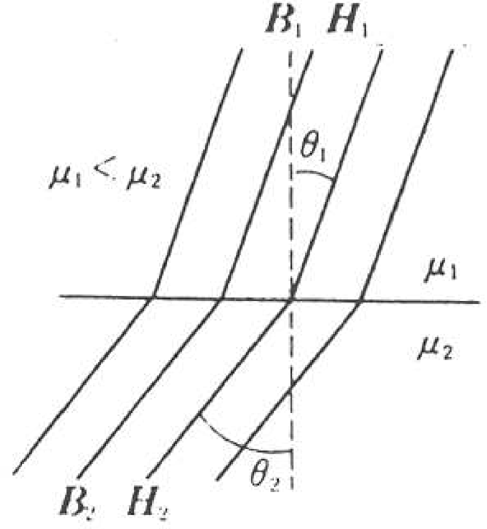


그림 8-9 경계면에서의 자속의 굴절

- 이 때, 정전계의 법칙이 그대로 적용되어 다음 두 조건이 성립

  1) 자계의 세기의 경계면에 평형한 성분은 경계면의 양측에서 서로 같다.

  $$H_1 \sin\theta_1 = H_2 \sin\theta_2 \qquad \cdots\cdots \text{(8-17)}$$

  2) 자속밀도의 경계면에 수직한 성분은 경계면의 양측에서 서로 같다.

  $$B_1 \cos\theta_1 = B_2 \cos\theta_2 \qquad \cdots\cdots \text{(8-17)}$$

- 식 (8-17)을 정리하면,

$$\frac{H_1 \sin\theta_1}{B_1 \cos\theta_1} = \frac{H_2 \sin\theta_2}{B_2 \cos\theta_2}, \quad \frac{H_1 \sin\theta_1}{\mu_1 H_1 \cos\theta_1} = \frac{H_2 \sin\theta_2}{\mu_2 H_2 \cos\theta_2}, \quad \frac{\tan\theta_1}{\mu_1} = \frac{\tan\theta_2}{\mu_2}$$

- 굴절의 법칙

$$\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \qquad \cdots\cdots \text{(8-18)}$$

- 자속은 투자율이 작은 자성체에서 확산되어 투자율이 큰 자성체로 모이는 성질
  $(\mu_1 < \mu_2 \rightarrow \theta_1 < \theta_2 \rightarrow B_1 < B_2)$