인하대학교
INHA UNIVERSITY

일반물리학

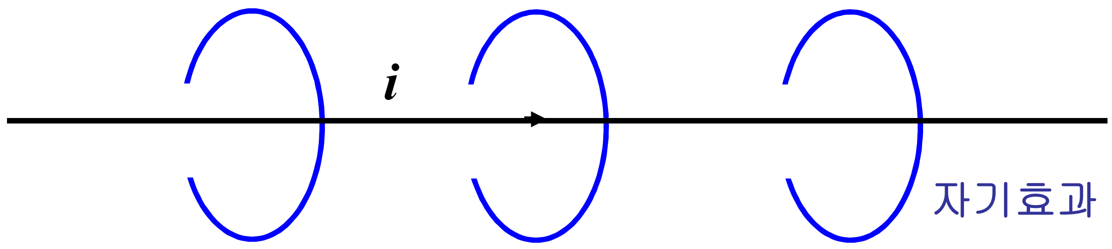
제19장. 자기장

목차

들어서며

- 그리스 시대 : 영구자석 → 자기력 (전기와 무관?)

  Oersted(1820) : 전류(움직이는 전하)가 자기력을 유도



- 전기 : 전하 ⟶ 전기장 ($\boldsymbol{E}$) ⟶ 다른 전하

  유도 영향

  자기 : 전류 ⟶ 자기장 ($\boldsymbol{B}$) ⟶ 다른 전류

- 전자기 법칙
  - 전기 : 쿨롱법칙(가우스법칙)
  - 자기 : 비오-사바르법칙 (암페어법칙)

$$\boldsymbol{F}_E = q\boldsymbol{E}$$
$$\boldsymbol{F}_B = q\,\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$$

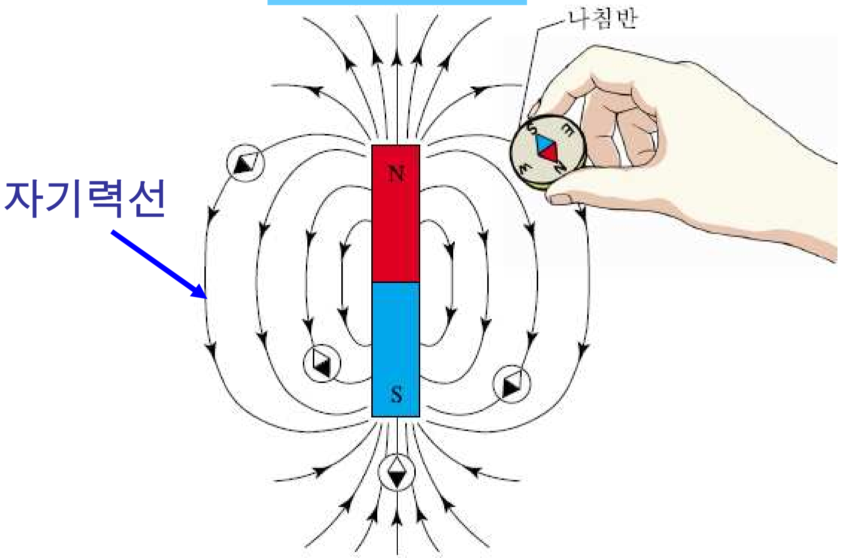
(로렌츠법칙)

1. 자석과 자기 쌍극자

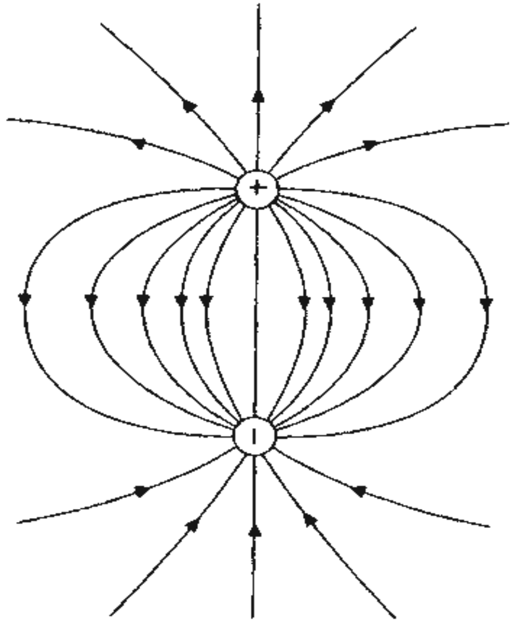
- **영구자석** : N**극과** S**극** [N ↔ N, S ↔ S, N →← S]

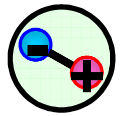
자기쌍극자

전기쌍극자

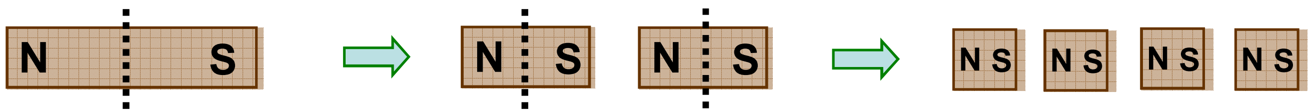


▲ 그림 19.1 | 자석과 자기장의 방향－나침반을 통한 방향 측정





- **자기홀극의 존재**? **(N극 자하, S극 자하)** **No !!!** **(닫힌 자기력선)**

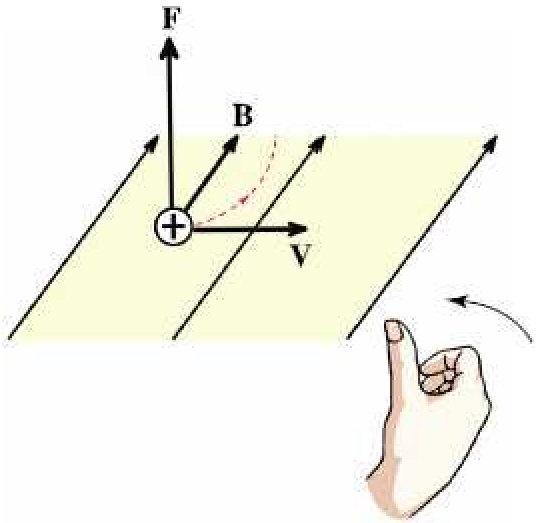


자기장의 정의

- 전기장 : 정지하고 있는 단위전하가 받는 힘 $\boxed{\boldsymbol{F}_E = q\boldsymbol{E}}$
- 자기장 : 움직이는 단위전하가 받는 수직힘과 관계 $\boxed{\boldsymbol{F}_B = q\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}}$
  - $\boldsymbol{F}_B \perp \boldsymbol{v}$ and $\boldsymbol{F}_B \perp \boldsymbol{B}$
  - $F_B = q\,\mathrm{v}B\sin\theta$
  - $\mathrm{v}=0 \Rightarrow F_B = 0$ even if $B \neq 0$
  - $W_B = \int \boldsymbol{F}_B \cdot d\boldsymbol{l} = 0\ \ (\because \boldsymbol{F}_B \perp d\boldsymbol{l}\,//\,\boldsymbol{v})$

  [B의 단위: N/(C·m/s)=N/(A·m)=T : Tesla]
- 전하가 받는 총 힘

$$\boxed{\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E} + q\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}}$$ [로렌츠의 법칙]



▲ 그림 19.2 | 자기장 내에 놓인 전하의 운동과 힘의 방향

예제 19.1 자기력

+z축 방향으로 크기가 2.0 T인 자기장이 작용하고 있다. 전하량이 1.0×10^{-3} C인 입자가 +y축 방향으로 50 m/s의 속력으로 운동할 때 자기장으로부터 받는 힘의 크기와 방향을 구하여라.

풀이]

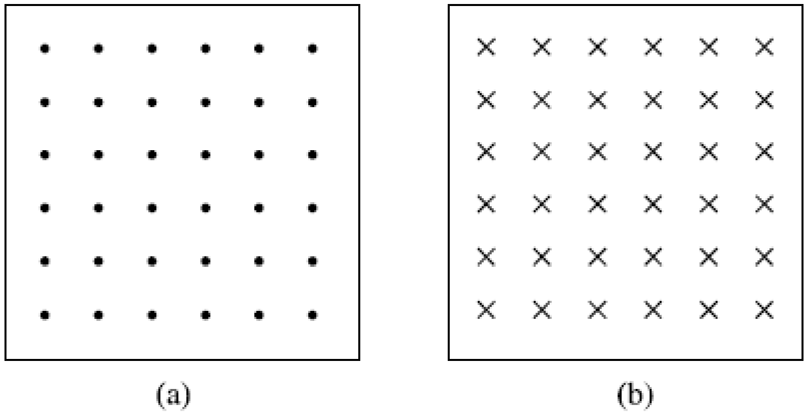
- 자기력

$$\boldsymbol{F}_B = q\,\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$$
$$= (1.0\times10^{-3}\ \mathrm{C})(50\ \mathrm{m/s})\boldsymbol{j}\times(2.0\ \mathrm{T})\boldsymbol{k}$$
$$= (1.0\times10^{-3}\ \mathrm{C})(50\ \mathrm{m/s})(2.0\ \mathrm{T})\boldsymbol{i}$$
$$(\because\ \boldsymbol{j}\times\boldsymbol{k} = \boldsymbol{i})$$

: x축의 양의 방향

자기력의 크기

$$F_B = (1.0\times10^{-3}\ \mathrm{C})(50\ \mathrm{m/s})(2.0\ \mathrm{T})$$
$$= 0.1\ \mathrm{N}$$

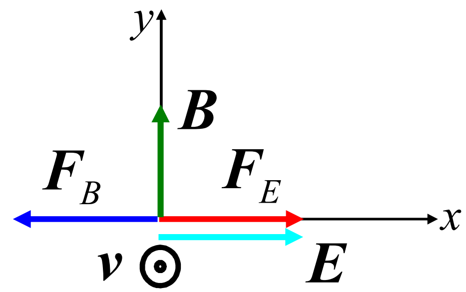


▲ 그림 19.3 | 평면에 수직인 방향의 자기장을 나타내는 방법.

예제 19.2 로렌츠의 법칙

균일한 전기장 E는 x방향이며 균일한 자기장 B는 y방향일 때, 전하량이 q인 점전하가 아무런 힘도 받지 않고 등속도로 움직일 수 있는 속도와 방향을 구하여라. 단, 여기서 중력은 무시하고, 점전하는 자기장에 수직인 방향으로 움직인다.

풀이]



- 등속 조건

$$\sum \boldsymbol{F}_q = 0$$

$$\boldsymbol{F}_E = q\boldsymbol{E} = qE\,\boldsymbol{i}$$

$$\boldsymbol{F}_B = q\,\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B} = -qvB\sin\theta\,\boldsymbol{i} \qquad \left[\because \theta = 90^o \left(\boldsymbol{F}_B \perp \boldsymbol{B}\right)\right]$$

속도의 방향 : 벡터곱에 의하면 z축의 양의 방향

속도의 크기 : $F_B = F_E$

$$qE = qvB \qquad v = \frac{E}{B}$$

$$\boldsymbol{v} = \frac{E}{B}\boldsymbol{k}$$

2. 자기장과 자기선속

자기선속

- 자기력선

  - 닫힌 폐곡선(자기홀극의 부재)

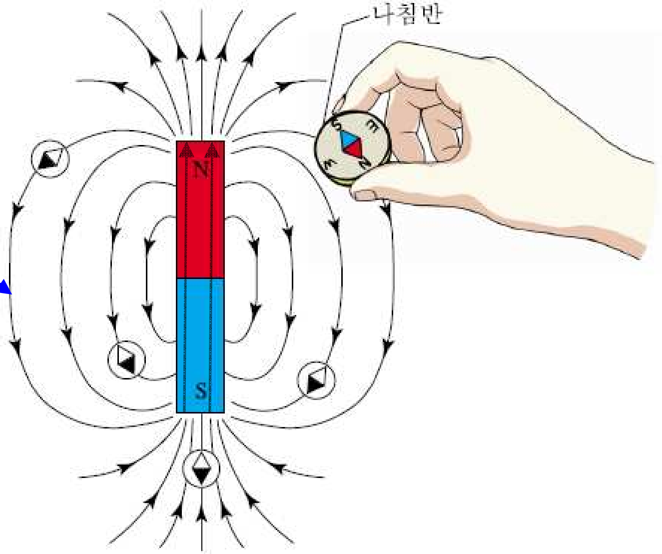
- 자기선속

  - 자기장에서의 가우스 법칙

$$\Phi_S = \oint_S \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{a} = 0$$

[나가는 자기력선 수
 − 들어오는 자기력선 수 = 0]

자기력선



▲ 그림 19.1 | 자석과 자기장의 방향 – 나침반을 통한 방향 측정

균일한 자기장 내에서 전하의 운동

(자기장에 수직으로 입사된 전하)

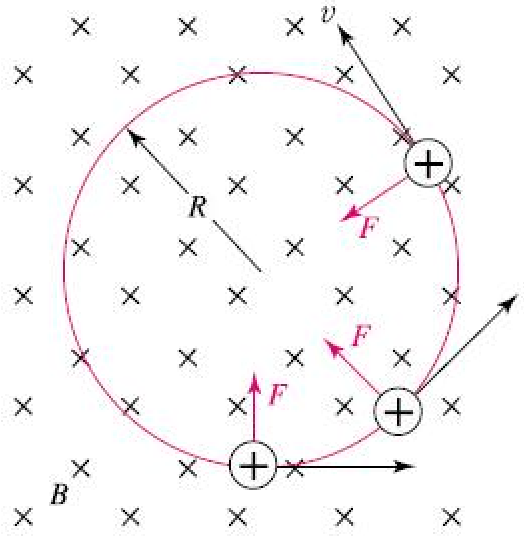
- 자기력 F에 의해 한 일 $= 0$
  - → 전하의 운동에너지의 변화는 없다.
  - → 전하의 속력은 일정.
  - → 등속력 원운동
- 자기력 F : 구심력의 역할

$$F = q\mathrm{v}B = \frac{m\mathrm{v}^2}{R} \Rightarrow \boxed{R = \frac{m\mathrm{v}}{qB}}$$

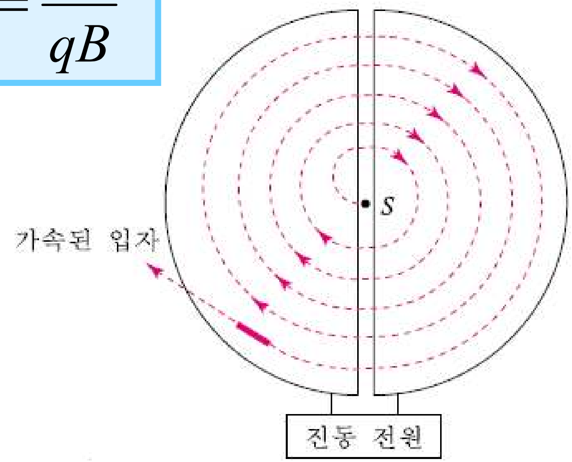
- 원운동의 주기

$$T = \frac{2\pi R}{\mathrm{v}} = \frac{2\pi m}{qB}$$

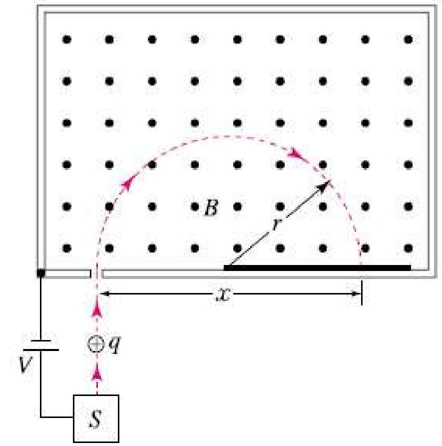
[속력 v 에 상관없는 상수]



▲ 그림 19.5 | 자기장 내의 전하의 원운동 모양



▲ 그림 19.6 | 사이클로트론의 구조



▲ 그림 19.7 | 질량분석기의 구조

예제 19.3 자기장 내 점전하의 운동

전하 q, 질량 m인 점전하가 북쪽으로 속도 v로 운동하다가 균일한 자기장 영역으로 들어가 반원 궤도를 그리면서 동쪽으로 d만큼 떨어진 곳에 도달하였다. 이때 자기장의 크기는 얼마인가? (이 자기장은 지면에 수직 방향으로 걸려 있다.)

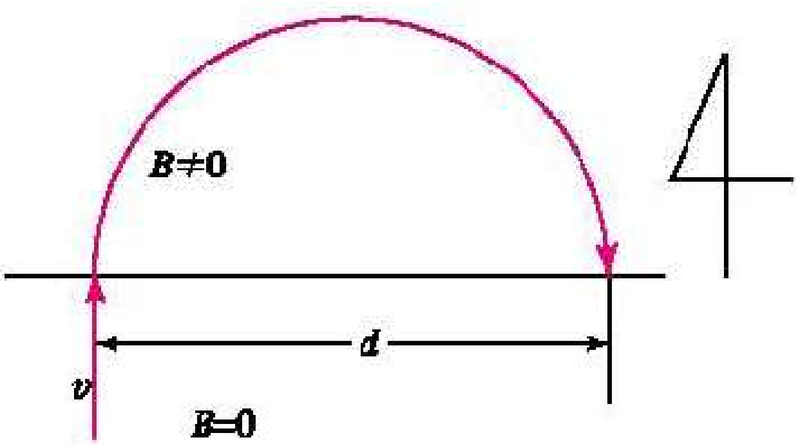
풀이]

- 원운동의 평형 조건

$$F_c = F_B$$

$$m\frac{v^2}{d/2} = qvB$$

$$\therefore B = \frac{2mv}{qd}$$



직선 전류도선

- 총 자기력

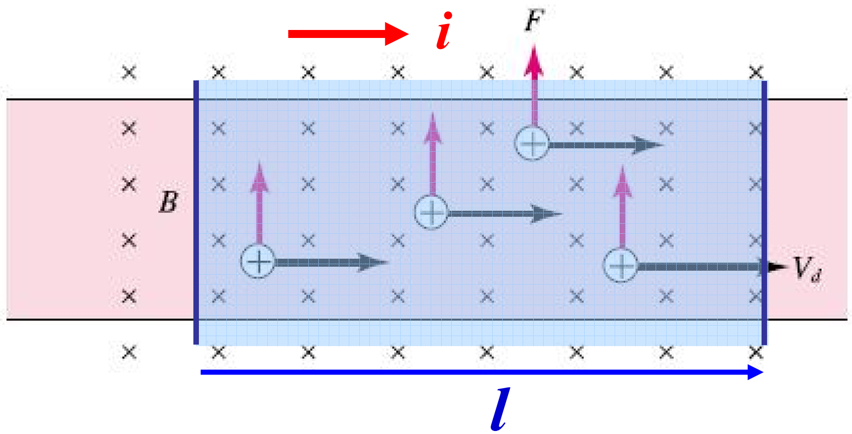
$$F = \sum_i F_i = \left(\sum_i q_i\right) v_d B = Nqv_d B$$

(Nq : 자기장 안에 있는 총전하량)

i = 단위 시간에 도선 단면을 통과하는 전하량
= 도선길이 v 안에 있는 총 전하량

$$F = i\left(\frac{l}{v}\right) vB = ilB$$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{F} = i\,\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B}$$



▲ 그림 19.8 | 자기장 내에 놓인 도선－전하들의 운동 방향과 자기력의 방향

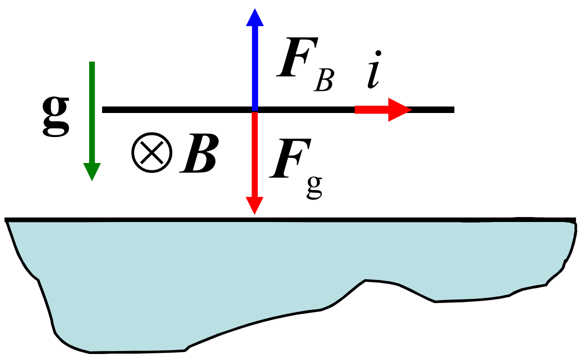
예제 19.4 전류가 흐르는 도선에 작용하는 자기력

인하대학교

30 A의 전류가 흐르는 곧은 직선 도선이 지면과 나란하게 공중에 떠 있기 위한 자기장의 세기를 구하여라. 자기장의 방향은 직선과 수직하며 중력과도 수직하다. 도선의 선질량밀도는 40 g/m이다.

풀이]

- 평형 조건



$$F_g = F_B$$

$$mg = ilB$$

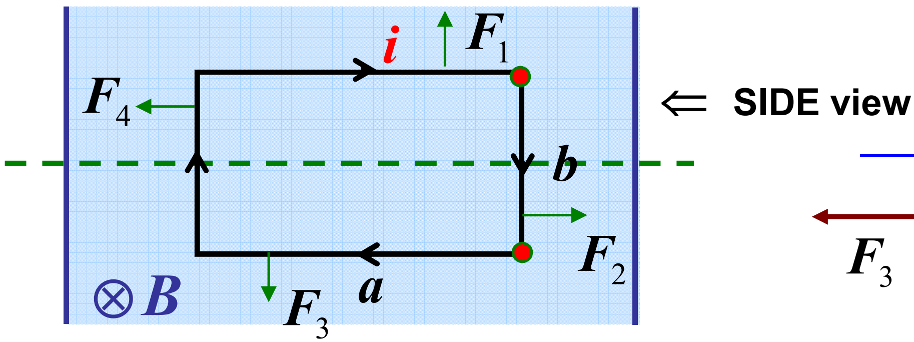
$$B = \frac{mg}{il} = \frac{(m/l)g}{i}$$

$$= \frac{(40\times10^{-3}\,\mathrm{kg/m})(9.8\,\mathrm{m/s^2})}{30\mathrm{A}}$$

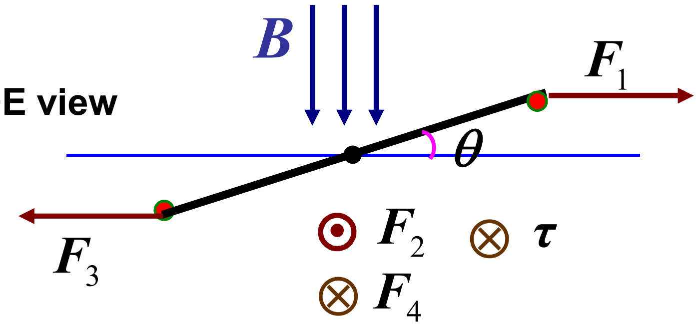
$$= 1.3\times10^{-2}\,\mathrm{T} = 130\,\mathrm{G} \quad (\because 1\mathrm{T} = 10000\ \mathrm{gauss})$$

전류고리

TOP view



SIDE view



$$F_1 = F_3 = iaB$$

$$F_2 = F_4 = ibB\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = ibB\cos\theta$$

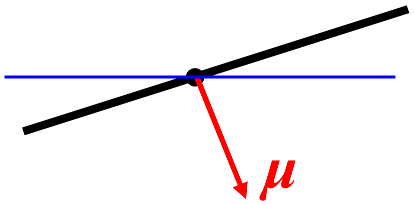
$$\boldsymbol{F}_{\text{total}} = \sum_i \boldsymbol{F}_i = 0$$

- **회전축에 대한 돌림힘**(Torque) $\boxed{\boldsymbol{\tau} = \sum_i \boldsymbol{r}_i \times \boldsymbol{F}_i}$

$$\tau = 2\left|\boldsymbol{r}_1 \times \boldsymbol{F}_1\right| = 2 \cdot \frac{b}{2} \cdot iaB\sin\theta = i\,AB\sin\theta \quad (A : \text{area})$$ 방향: ⊗

- **자기쌍극자 모멘트** [크기: $\mu = iA$ 방향: 오른손법칙]

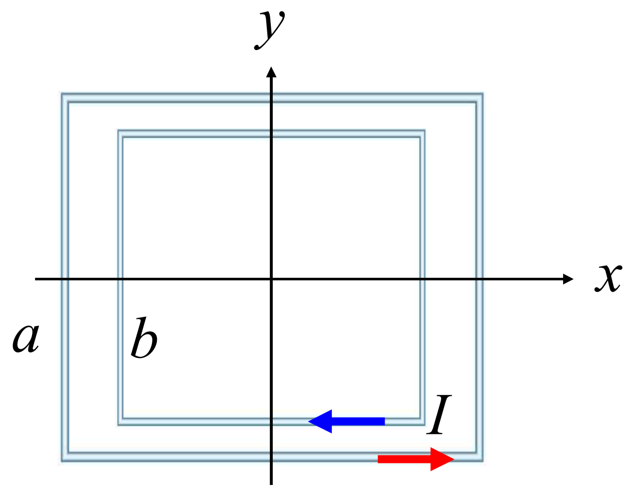
$\boxed{\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \boldsymbol{B}}$ [전기장: $\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{p} \times \boldsymbol{E}$]



예제 19.5 자기쌍극자 모멘트

xy평면 위에 두 개의 정사각형 도선이 동일한 중심을 가지며 놓여 있다. 두 정사각형의 한 변은 각각 a와 $b(<a)$이다. 두 사각형 도선에는 동일한 전류 I가 흐르며, 전류의 방향이 서로 반대 방향이다. 두 도선에 의한 총 자기쌍극자 모멘트를 구하여라.

풀이]



- 자기쌍극자 모멘트

$$\boldsymbol{\mu} = IA\boldsymbol{n}$$

$$\boldsymbol{\mu}_a = Ia^2\boldsymbol{k}$$

$$\boldsymbol{\mu}_b = -Ib^2\boldsymbol{k}$$

$$\therefore \boldsymbol{\mu}_{net} = \boldsymbol{\mu}_a + \boldsymbol{\mu}_b = I\left(a^2 - b^2\right)\boldsymbol{k}$$

예제 19.6 자기쌍극자 모멘트와 돌림힘

도선이 20회 감긴 5.0 cm × 8.0 cm 넓이의 직사각형 코일이 있다. 이 코일에 10 mA의 전류가 흐른다. 이 코일에 크기가 0.3 T인 균일한 자기장이 고리면에 평행하게 작용할 때 이 고리에 작용하는 돌림힘의 크기는 얼마인가?

풀이]

- 자기쌍극자 모멘트 크기

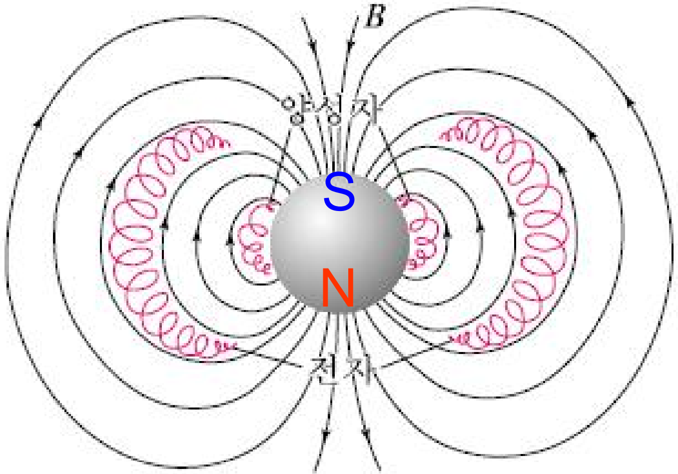
$$\mu = NIA$$
$$= (20)(0.01\,\mathrm{A})(0.05 \times 0.08\,\mathrm{m}^2) = 8.0 \times 10^{-4}\ \mathrm{A \cdot m^2}$$

방향은 코일면에 수직

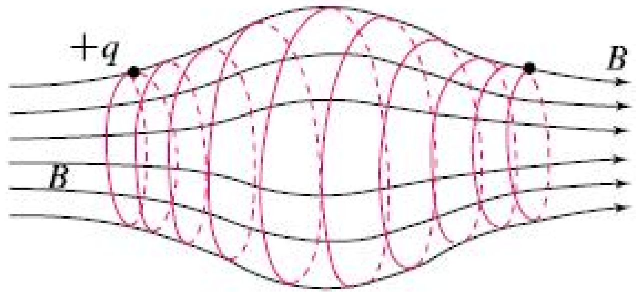
돌림힘의 크기

$$\tau = \mu B$$
$$= (8.0 \times 10^{-4}\ \mathrm{A \cdot m^2}) \times (0.3\,\mathrm{T}) = 2.4 \times 10^{-4}\ \mathrm{N \cdot m}$$

5. 지구의 자기장



▲ 그림 19.11 | 지구의 자기장



지구 : 약하지만 거대한 영구자석 (약 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ T)
(지구자전과의 연관성)
자극 방향의 회전 (약 200만년의 주기)