/

$[F_E] = N$ $\qquad\qquad\qquad\qquad$ $[E] = \frac{N}{C} = \frac{V}{m}$

전기력: $\boxed{\vec{F}_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{qq'}{r^2}\hat{r}} \xleftarrow{\vec{F}_E = q'\vec{E}} \boxed{\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q}{r^2}\hat{r}}$: 전기장

전기력은 전하가 2개 이상 일 때 발생
(벡터)

(전하 q 하나만 있어도 그 주위에 전기장은 만든다.)
전하 q가 만드는 전기장
(벡터)

전기 위치에너지: $\boxed{E_p(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{qq'}{r}} \xleftarrow{E_p = q'V} \boxed{V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q}{r}}$: 전위

전기력 위치에너지는 전하 2개 이상이
있을 때 발생
(스칼라) $[E_p] = J$

전하 q 하나만 있으면
r만큼 떨어진 곳에서의
전위를 구할 수 있다.
(스칼라) $[V] = \frac{J}{C} = V$

* 일과 에너지 원리

(1) 일과 운동에너지 원리 : 항상 가능 (If $\vec{F}_{tot}$)

$$W = \int_A^B \vec{F}_{tot} \cdot d\vec{x} = K(B) - K(A)$$

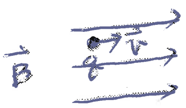
(2) 일과 potential energy 원리 : If $\vec{F}$ is 보존력,

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{x} = E_p(A) - E_p(B)$$

(3) If $\vec{F}_{tot}$ is 보존력,

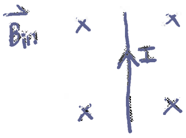
$$W = \int_A^B \vec{F}_{tot} \cdot d\vec{x} = E_p(A) - E_p(B) = K(B) - K(A)$$

$\Rightarrow K(A) + E_p(A) = K(B) + E_p(B)$: 에너지 보존법칙.



$\vec{F}_B = q\vec{v}\times\vec{B}$

$\vec{F}_E = q\vec{E}$

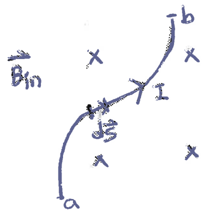


$\vec{F}_B = I\vec{L}\times\vec{B}$

$\vec{L}$: 전류방향으로의 도선의 길이 벡터

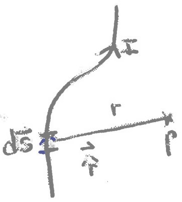
$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9\times10^{9} \ (Nm^2/C^2)$$

$$\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \ (Tm/A)$$



$$d\vec{F}_B = I(d\vec{s}\times\vec{B})$$

$$\therefore \vec{F}_B = \int d\vec{F}_B = \int_a^b I(d\vec{s}\times\vec{B})$$



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I d\vec{s}\times\hat{r}}{r^2}$$

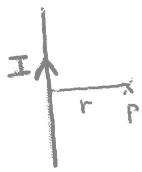
$$\therefore \boxed{\vec{B} = \int d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\int\frac{d\vec{s}\times\hat{r}}{r^2}}$$

: 비오-사바르 법칙

$[B] = T = \frac{N}{A\,m}$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q}{r^2}\hat{r}$$

$[E] = \frac{N}{C} = \frac{V}{m}$



$$\boxed{\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \otimes}$$

: 직선 도선의 전류가 P점에 만드는 자기장

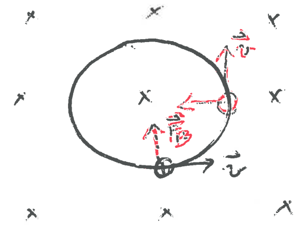
↳방향 : 오른손 법칙

$$\boxed{\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2r} \odot}$$

: 환도선의 전류가 P점에 만드는 자기장

↳방향 오른손 법칙

예) 싸이클로트론 : $\vec{B} \perp \vec{v}$ => 원운동



$$F_B = qvB = m\frac{v^2}{r}$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$: cyclotron radius (싸이클로트론 반지름)

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$: 싸이클로트론 각속력

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m}$$: 싸이클로트론 진동수

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$: 싸이클로트론 주기

<전기 쌍극자>

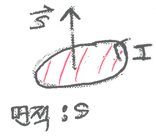
$\vec{d}$: -전하에서 +전하로의 거리 벡터

$\vec{p} = q\vec{d}$: 전기 쌍극자 모멘트

$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$: 전기에서의 토크

$U_p = -\vec{p} \cdot \vec{E}$: 전기에서의 Potential energy

<자기쌍극자>

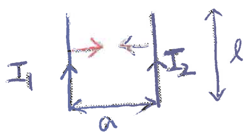


$\vec{S}$: 오른손 네 손가락을 전류 방향으로 감았을 때 엄지 방향을 갖는 면적 벡터

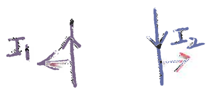
$\vec{\mu} = I\vec{S}$: 자기 쌍극자 모멘트

$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$: 자기 에서의 토크

$U_p = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$: 자기 에서의 Potential energy

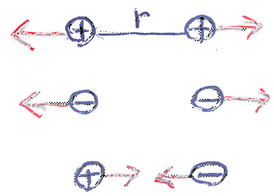


: 인력



: 척력

$$F_{12} = F_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}$$



: 척력

: 척력

: 인력

$$F_{12} = F_{21} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

인덕터 (L) :

$U_B = U_L = \frac{1}{2}LI^2$: L에 저장된 자기에너지

$u_B = u_L = \frac{B^2}{2\mu_0}$: 자기에너지 밀도

$$= \frac{\text{자기에너지}}{\text{부피}}$$

$$[U_B] = H\,A^2 = J = \frac{kg\,m^2}{s^2}$$

$$[u_B] = \frac{J}{m^3} = \frac{kg}{m\,s^2}$$

축전기 (C) :

$U_E = U_C = \frac{1}{2}CV^2$: C에 저장된 전기에너지

$u_E = u_C = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$: 전기에너지 밀도

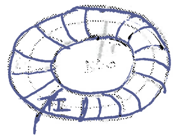
$$= \frac{\text{전기에너지}}{\text{부피}}$$

$$[U_E] = F\,V^2 = J = \frac{kg\,m^2}{s^2}$$

$$[u_C] = \frac{J}{m^3} = \frac{kg}{m\,s^2}$$

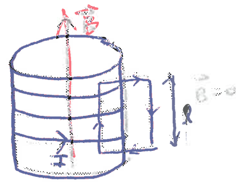
$$[\vec{\tau}] = [\vec{r} \times \vec{F}] = N\,m = \frac{kg\,m^2}{s^2}$$

ex) 토로이드에 의한 자기장 : $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} N$



ex) Solenoid에 의한 자기장 : $B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{l} I$

$n = \frac{N}{l}$

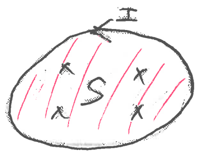


$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \iff \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot \hat{n}\, ds$$

⇒ 어떤 open surface (개곡면 = S) 에 자기선속이 시간에 따라 변하면

그 면의 boundary 를 형성하는 closed line (폐곡선 = c) 에

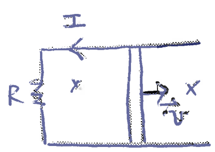
유도 기전력이 발생하여 유도 전류가 흐른다.



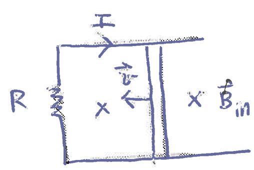
: Faraday 법칙

⇒ Lenz의 법칙 : ⊖의 의미

폐회로 (c) 에서 유도 전류는 폐회로로 둘러싸인 부분(S)을 통과하는 자기선속의 변화를 방해하는 방향으로 흐른다.

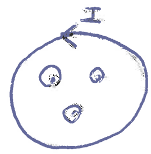


Φ_B 선속증가 ⇒ 선속감소하는 방향으로 유도전류 발생



Φ_B 선속감소 ⇒ 선속 증가하는 방향으로 유도전류 발생

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$$: 자체 유도 기전력



$\Phi_B = LI = B \cdot A$ = 자기장 × 면적

L : 자체 유도계수

$$[L] = \frac{[\varepsilon][t]}{[I]} = \frac{V \cdot sec}{A} = H$$ (헨리)

$$= \frac{kg\ m^2}{C \cdot \cancel{sec^2}} \frac{\cancel{sec}}{A} = \frac{kg\ m^2}{C \cdot sec} \frac{sec}{C} = \frac{kg\ m^2}{C^2}$$

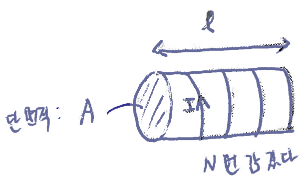
$$[I] = \frac{[dQ]}{[dt]} = \frac{C}{sec} = A$$

⇒ 솔레노이드의 자체유도계수 : $B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{\ell} I$

($V = \ell A$: 솔레노이드 부피) $\Phi_B = NBA = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} I = LI$

$n = \frac{N}{\ell}$ $\therefore L = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} = \mu_0 n^2 \ell A = \mu_0 n^2 V$

⇒ 솔레노이드의 자기에너지 : $U_B = U_L = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 V I^2$



$$= \frac{(\mu_0 n I)^2}{2\mu_0} V = \frac{B^2}{2\mu_0} V$$

⇒ 솔레노이드의 자기에너지 밀도 : $u_B = u_L = \frac{U_B}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0}$

< 맥스웰 방정식 4가지 >

① $\oint_s \vec{E} \cdot \hat{u}_N \, ds = \dfrac{Q_{in}}{\varepsilon_0}$: 전기에서의 Gauss 법칙

② $\oint_s \vec{B} \cdot \hat{u}_N \, ds = 0$: 자기에서의 Gauss 법칙

③ $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\dfrac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot \hat{u}_N \, ds$: Faraday 법칙

④ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{inside}$: Ampere 법칙 (전류가 연속인 경우만 사용)

⇓ (축전기와 같이 전류의 불연속 구간이 있는 경우도, 가장 일반적으로 사용)

④' $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{inside} + \mu_0 \varepsilon_0 \dfrac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot \hat{u}_N \, ds$

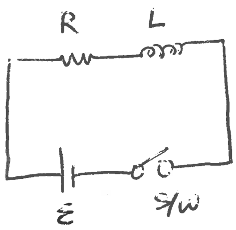
$$= \mu_0 \Big[\underbrace{I_{inside}}_{\text{전도전류}} + \underbrace{\varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot \hat{u}_N \, ds}_{\text{변위전류}} \Big]$$

: Maxwell - Ampere 법칙.

↳ Ampere 법칙을 더 일반적으로 사용 (연속전류 + 불연속전류) 하도록 Maxwell이 수정한 식.

{ I_{inside} : 전도전류 : 실제 흐르는 도선의 전류

$\varepsilon_0 \dfrac{d\Phi_E}{dt}$: 변위전류 : 실제 흐르는 도선의 전류가 아니다.
축전기에 의해 전하의 이동에 의한 전류



$\boxed{1}$ S/w on @ $t=0$, $I(t=0)=0$

키르히호프법칙 : $\varepsilon - IR - L\frac{dI}{dt} = 0$

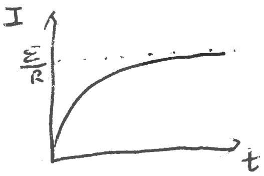
$$\therefore\ I(t) = \frac{\varepsilon}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$$

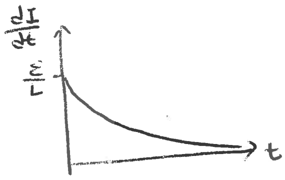
$$\tau \equiv \frac{L}{R}$$

$$= \frac{\varepsilon}{R}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

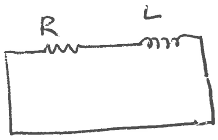
$$[\tau] = \frac{[L]}{[R]} = \frac{H}{\Omega} = \frac{\Omega \cdot sec}{\Omega} = sec$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\varepsilon}{L} e^{-\frac{t}{\tau}}$$





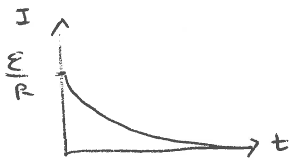
$\boxed{2}$



$t=0$, $I(t=0) = \frac{\varepsilon}{R}$

키르히호프법칙 : $-IR - L\frac{dI}{dt} = 0$

$$\therefore\ I(t) = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$



→ 저항에서 소비하는 전력 : $P = \frac{dE}{dt} = RI^2 = \frac{\varepsilon^2}{R} e^{-\frac{2t}{\tau}}$

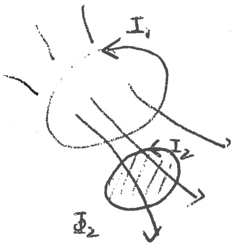
$$\left(\begin{array}{l} V_R = RI \\ V_L = L\frac{dI}{dt} \\ V_C = \frac{q}{C} \end{array}\right)$$

⇒ 저항에서 소비되는 전체 에너지 :

$$E = \int_0^\infty P\,dt = \frac{L\varepsilon^2}{2R^2}$$

from $\boxed{1}$: $\varepsilon = V_C + V_R$

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -M\frac{dI_1}{dt}$$

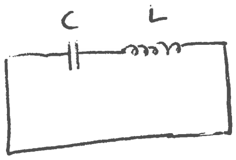


$$\Phi_2 = M I_1$$

M : 상호 유도 계수

$[L] = [M] = H$

ex)



$t=0$, $q(t) = q_0$

키르히호프 법칙 : $-\frac{q}{C} - L\frac{dI}{dt} = 0$

$$\frac{d^2q}{dt^2} = -\frac{q}{LC} = -\omega^2 q$$

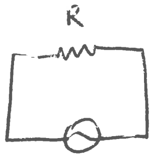
$$\left(\begin{aligned} &\omega \equiv \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f \\ &q = CV \\ &f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \end{aligned} \right)$$

$$\therefore \ q(t) = q_0 \cos(\omega t),$$

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = -\omega q_0 \sin(\omega t)$$

$\Rightarrow \quad U_C + U_L = \frac{1}{2}CV^2 + \frac{1}{2}LI^2 = \frac{q^2}{2C} + \frac{1}{2}LI^2 = \frac{q_0^2}{2C}$: 상수 : 일정

$=$



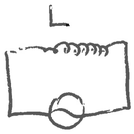
$V=V_0 \sin(\omega t)$

$$V = V_{max} \sin(\omega t) \qquad V_{max} = V_0$$

$$I = I_{max} \sin(\omega t) \qquad I_{max} = \frac{1}{R} V_{max}$$

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{max} \quad , \quad I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{max}$$

$$P_{avg} = I_{rms}^2 R$$: 저항기에 공급되는 평균전력



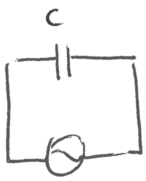
$V=V_0 \sin(\omega t)$

$$V = V_{max} \sin(\omega t)$$

$$I = -I_{max} \cos(\omega t) = I_{max} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$I_{max} = \frac{1}{X_L} V_{max} \quad , \quad X_L \equiv L\omega$$: 유도 reactance

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{max} \quad , \quad V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{max}$$



$V=V_0 \sin(\omega t)$

$$V = V_0 \sin(\omega t)$$

$$q = C V_0 \sin(\omega t)$$

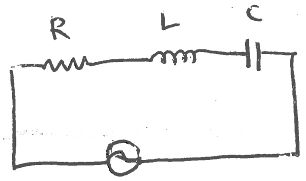
$$I = \frac{dq}{dt} = \omega C V_0 \cos(\omega t) = I_{max} \cos(\omega t) = I_{max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$I_{max} = \frac{1}{X_C} V_{max} \quad , \quad X_C \equiv \frac{1}{C\omega}$$: 용량 reactance

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{max} \quad , \quad V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{max}$$

* $\theta_{rms} \equiv \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \theta^2(t)\, dt}$: root-mean-square (T=주기)

* $\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)\, dt$: 평균 (T=주기)



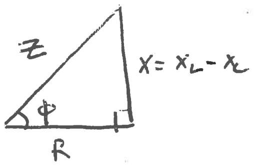
$V = V_0 \sin(\omega t + \phi)$

$$V = V_{max} \sin(\omega t + \phi)$$

$$I = I_{max} \sin(\omega t)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$$

$$X \equiv X_L - X_C \quad : \text{reactance}$$



$$I_{max} = \frac{1}{Z} V_{max}$$

$\omega = 2\pi f$: 각진동수

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad : \text{impedance}$$

$$P = VI = V_{max} I_{max} \left[\cos\phi \sin^2(\omega t) + \sin\phi \sin(\omega t)\cos(\omega t)\right]$$

$$P_{avg} = V_{max} I_{max} \left[\cos\phi \underbrace{\langle \sin^2(\omega t)\rangle}_{=\frac{1}{2}} + \sin\phi \underbrace{\langle \sin(\omega t)\cos(\omega t)\rangle}_{=0}\right]$$

$$= \frac{1}{2} V_{max} I_{max} \underbrace{\cos\phi}_{\text{전력인자}} \qquad \left(\cos\phi = \frac{R}{Z}\right)$$

$$= I_{rms} V_{rms} \cos\phi$$

$$= \frac{1}{2} R I_{max}^2 = R I_{rms}^2$$

$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$: 진동수 ($1/sec = Hz$)

$\lambda = \frac{2\pi}{k}$: 파장 (m)

$\omega = 2\pi f$: 각진동수 (rad/sec)

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$: 파수 (rad/m)

$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$: 주기 (sec)

* 파동방정식

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = c = 3 \times 10^8 \ (m/s)$$: 파동의 속도 = 광속도 (빛의 속도)

$$c = \frac{\omega}{k} = \lambda f = \frac{E}{B} = 3 \times 10^8 \ (m/s)$$

$$[F] = [m][a] = kg\ m/sec^2 = N$$

$$[E] = \frac{[F_E]}{[q]} = \frac{N}{C} = \frac{V}{m} = \frac{kg\ m}{C \cdot sec^2}$$

$$[E] = [F][s] = N \cdot m = J = \frac{kg\ m^2}{sec^2}$$

$$[V] = \frac{[E_p]}{[q]} = \frac{J}{C} = V = \frac{kg\ m^2}{C\ sec^2}$$

$$\left[\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\right] = \frac{[E][r^2]}{[q]} = \frac{N}{C}\ \frac{m^2}{C} = \frac{kg\ m^3}{C^2\ sec^2}$$

$$[\varepsilon_0] = \frac{C^2\ sec^2}{kg\ m^3} = \frac{C^2}{N\ m^2}$$

$$[\Phi_E] = \frac{[Q_{in}]}{[\varepsilon_0]} = \frac{kg\ m^3}{C\ sec^2} = [E][A] = V\ m = \frac{N\ m^2}{C}$$

$$[B] = \frac{[F_B]}{[q][v]} = \frac{N}{C \cdot \frac{m}{sec}} = \frac{N}{\frac{C}{sec}\ m} = \frac{N}{A\ m} = T \quad \text{(테슬라)}$$

$$= \frac{kg\ m}{sec^2} \cdot \frac{sec}{C \cdot m} = \frac{kg}{C \cdot sec}$$

$$[\Phi_B] = [B][A] = T\ m^2 = Wb = \frac{kg\ m^2}{C \cdot sec}$$

$$J = [U_B] = \left[\tfrac{1}{2} L I^2\right] = \frac{V \cdot sec}{A} \cdot A^2 = V \cdot sec \cdot A = \frac{kg\ m^2}{C\ sec^2} \cdot sec\ \frac{C}{sec} = \frac{kg\ m^2}{sec^2}$$

$$[L] = \frac{[\varepsilon][dt]}{[dI]} = \frac{V\ sec}{A} = \frac{\frac{kg\ m^2}{C \cdot \cancel{sec^2}} \cdot \cancel{sec}}{\frac{C}{\cancel{sec}}} = \frac{kg\ m^2}{C^2} = H$$

$$J/m^3 = [u_B] = \frac{[U_B]}{[V]} = \left[\frac{B^2}{2\mu_0}\right] = T^2\ \frac{A}{T\ m} = \frac{T\ A}{m} = \frac{kg}{\cancel{C} \cdot sec}\ \frac{\frac{\cancel{C}}{sec}}{m} = \frac{kg}{m \cdot sec^2}$$

$$[\mu_0] = \frac{[B]\,[r^2]}{[I]\,[ds]} = \frac{T\,m^2}{A\,m} = \frac{T\,m}{A} = \frac{kg}{C\cdot \cancel{sec}}\;\frac{m}{\frac{C}{\cancel{sec}}} = \frac{kg\;m}{C^2}$$

$$[U_B] = J = \frac{kg\;m^2}{sec^2} = N\cdot m$$

$$[u_B] = \frac{J}{m^3} = \frac{kg}{m\cdot sec^2}$$

$$[E] = J = N\cdot m = \left(kg\;{}^{m}/_{sec^2}\right)\,m = kg\,\frac{m^2}{sec^2}$$

$$[\vec{\tau}] = [\vec{r}\times\vec{F}] = N\;m = \frac{kg\;m^2}{sec^2}$$