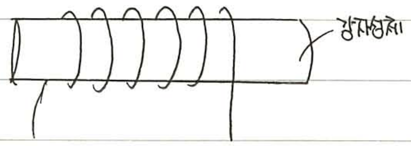
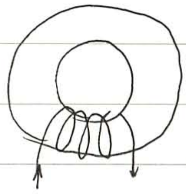
5-10. Inductor : 코일이름.

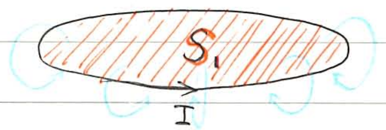
Inductance : $\mathbb{H}$, $\mathbb{B}$ ($\mathbb{B}' = \mu \mathbb{H}'$)





$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\text{전류에 의한 자속과 Coil의 쇄교자속수.}}{\text{Coil에 흐르는 전류.}}$$

우선 Coil이 하나인 경우.



$\frac{\mathbb{H}}{\mu_0} = \mathbb{B}$

$\mathbb{B}$가 I와 쇄교.

= S를 관통

= 쇄교.

S를 통과하는 자속 ($\mathbb{B}$)의 수 = $\bar{\Phi}$

$\bar{\Phi}_1$ = S_1을 뚫고 나온다. = 발산 = $\int \mathbb{B}_1 \cdot ds_1$

$\therefore \bar{\Phi}_1 = \int \mathbb{B}_1 \cdot ds_1$

where, $\mathbb{B}_1 = \underbrace{\frac{\mu_0 I_1}{4\pi}}_{\propto I_1} \oint \frac{dl \times \mathbb{R}}{R^2}$

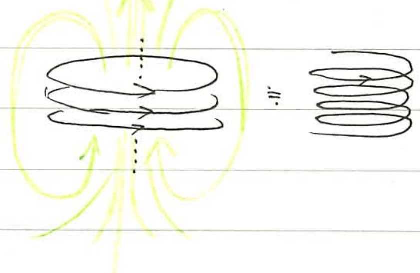
$$\therefore \bar{\phi}_1 = L_{11} I_1$$

where, L_{11} = Inductance [H]

자인덕턴스, 쇄교자속. 전류에비례.

$$\therefore L_{11} = \frac{\bar{\phi}_1}{I_1} = \frac{\int \mathbb{B}_1 \cdot d\mathbb{S}_1}{I_1} \, [H] = \frac{\text{쇄교자속수}}{\text{Coil에 흐르는 전류}}$$

2. Coil이 N개 있는 경우.



$$L_{11} = \frac{\bar{\phi}_1}{I_1} \cdot N$$

$$= \frac{\bar{\phi}_1 N}{I_1}$$

$$= \frac{\Lambda_{11}}{I_1}$$

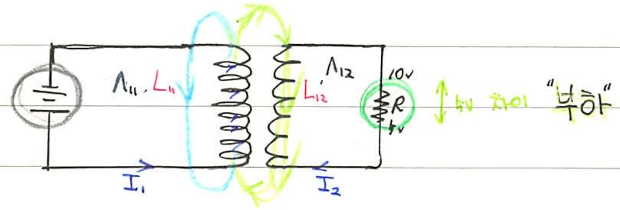
$$= \frac{N_1 \int \mathbb{B}_1 \cdot d\mathbb{s}}{I_1}$$

< self Inductance >

자기 자신하고만 쇄교 (5-79)

tip> 이웃.이번 → 피평생얻하라니

3. coil 이 인접해 있는 경우.



총쇄교자속수.

$I_1 \rightarrow \Lambda_{11}, \Lambda_{12}$

where,

$\Lambda_{12} = L_{12} I_1$

$\Lambda_{11} > \underbrace{\Lambda_{12}}$ (5-78)

↳ I_2 발생.

$\therefore L_{12} = \dfrac{A_{12}}{I_1} N_2$

정전과 4장 ~ 22p.

$= \dfrac{N_1 \bar{\varnothing}_{12} \cdot N_2}{I_1}$

$= \dfrac{\int \mathbb{B}_1 \cdot ds_2}{I_1} \cdot N_2$

$= N_2 \dfrac{\int \mathbb{B}_1 \cdot ds_2}{I_1}$ (5-77)

= Mutual Inductance, 상호 인덕턴스.

Sum>

4장> 3차 (전체) ⇒ $\mathbb{J} = \sigma \mathbb{E}$, 금 구리 ,

10^7 이상 (도체) - 부족하고. 경계조건

↔ $\mathbb{D} = \varepsilon_0 \mathbb{E} + \mathbb{P}$ 비교.

5장> 정자계 { 1. 자석 → "전자의 spin 속도" $\mathbb{B} = \mu_0 \mathbb{H} + \mathbb{M}$

2. 전류 자화 (≒ 분극)

자성체 ← 자기가 하므로.

$\mathbb{H} = -\nabla U$

$\oint \mathbb{H} \cdot d\mathbb{l} = 0$

Ampere's law. 앙페어 주회법칙, $\oint \mathbb{H} \cdot d\mathbb{l} = nI$. $\neq 0$

→ 이용법, $\mathbb{H} = \dfrac{I}{2\pi r}$ (크기, 방향 x)

$\nabla \cdot \mathbb{B} = 0$ (cf. $\nabla \cdot \mathbb{D} = \rho$)

차이점

Next

morning glory

회전하는 Vector → $\nabla \times \mathbb{A}$, $\nabla \times \mathbb{H}$ (curl)

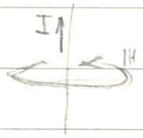
< Stoke's Law >

↓

비보존형 정전계 회전? 정자계 회전?

$\nabla \times \mathbb{H} \neq 0$ $\nabla \times \mathbb{E} = 0$

$= \mathbb{J}$



Vector P

→ $\mathbb{B}$: Biot - Savart.

V.B → 이용방법.

Inductor

→ 월 1.2교시 306.

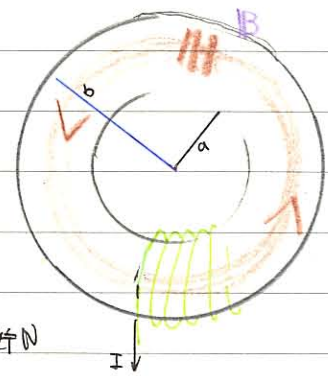
Inductance

전류에 의한 에너지 비축능력.

- self (5-79)
- mutual (5-77)

224p 예제 5-8 : Self inductance.

ex. 예제 5-2)



1. troidal 구조! → 원통구조, 원통좌표계.
2. 코일에 전류 I
3. B를 구한다 $(B = \mu H)$
   - B가 좌우대칭 → Ampere's Circuital Law
   - B가 좌우대칭이 아니면 → Biot-Savart's Law.

troidal 의 경우, B는 좌우대칭

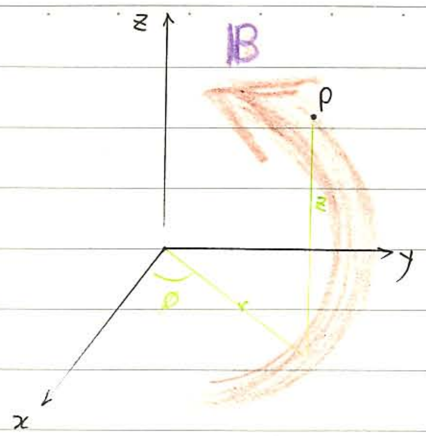
∴ Ampere's Circuital Law 사용.

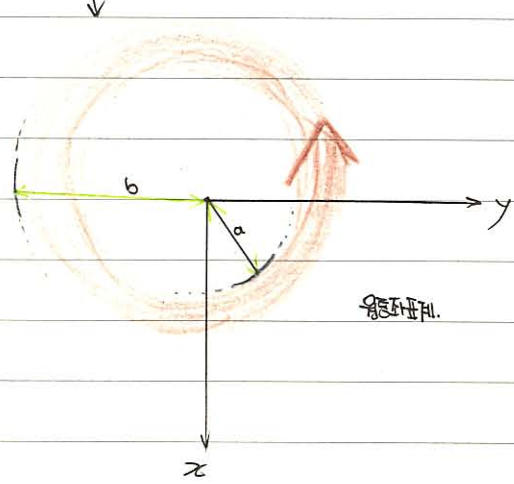
$$\oint B \cdot dl = \mu_0 I \quad , \quad B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi r}$$

$$\oint H \cdot dl = nI \quad , \quad H = \frac{NI}{2\pi r}$$

예제 5-2.

위에서 바라볼때





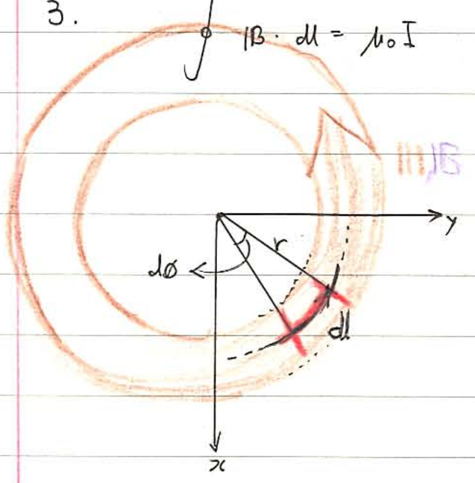
원통좌표계.

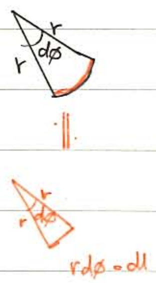
3. $\oint \mathbb{B} \cdot d\mathbb{l} = \mu_0 I$

$\mathbb{B} = ?$

$\overbrace{\oint \mathbb{B} \cdot d\mathbb{l}}^{\text{폐곡선}} = \mu_0 I$

$d\mathbb{l}$ → 좌표계로 표현 → 원통.





$\therefore d\mathbb{l} = r\,d\phi$

$d\mathbb{l} = r\,d\phi\ \bar{\phi}$

$\oint \mathbb{B} \cdot d\mathbb{l} = \oint \mathbb{B} \cdot r\,d\phi\ \bar{\phi} = \mu_0 I$

둘레길이

$\int_0^{2\pi r} B_\phi\ \bar{\phi} \cdot r \cdot d\phi\ \bar{\phi}$

$= \int_0^{2\pi r} B_\phi\ r \cdot d\phi = \mu_0 I$

$= B_\phi\ r \int_0^{2\pi r} d\phi$

$= B_\phi \; 2\pi r$

$= \mu_0 I$

그런데 권선수 = N

$= \mu_0 N I$ $\qquad \therefore \; B_\phi = \dfrac{\mu_0 N I}{2\pi r}$

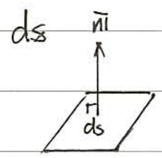
★ $\therefore \; \mathbb{B} = \dfrac{\mu_0 N I}{2\pi r} \bar{\phi}$

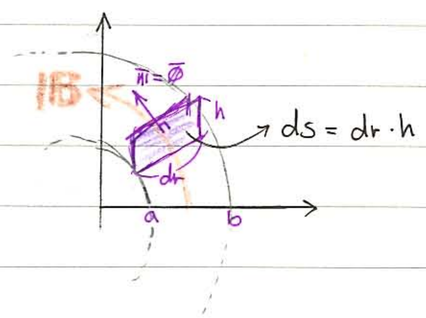
4.

$\Phi = \int \mathbb{B} \cdot ds = \int B_\phi \bar{\phi} \cdot ds$

$= \int B_\phi \bar{\phi} \cdot \underline{ds \; \bar{n}}$

↓
좌표계.
↓
원통좌표계.





$= \int_a^b B_\phi \bar{\phi} \cdot dr \, h \, \bar{\phi}$

$= \int_a^b B_\phi \, dr \, h$ $\qquad$ where, $B_\phi = \dfrac{\mu_0 N I}{2\pi r}$

$= \int_a^b \dfrac{\mu_0 N I h}{2\pi r} \, dr$

$$= \frac{\mu_0 N I h}{2\pi} \int_a^b \frac{1}{r} \, dr$$

$$= \frac{\mu_0 N I h}{2\pi} \Big| \ln r \Big|_a^b$$

$$\therefore \phi = \frac{\mu_0 N I h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

5. 총 쇄교자속수 = 쇄교자속수 x 권선수

$$\Lambda = \phi N$$

$$= \frac{\mu_0 N^2 I h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

6. $\Lambda =$

$I =$

cf. $C = Q/V$

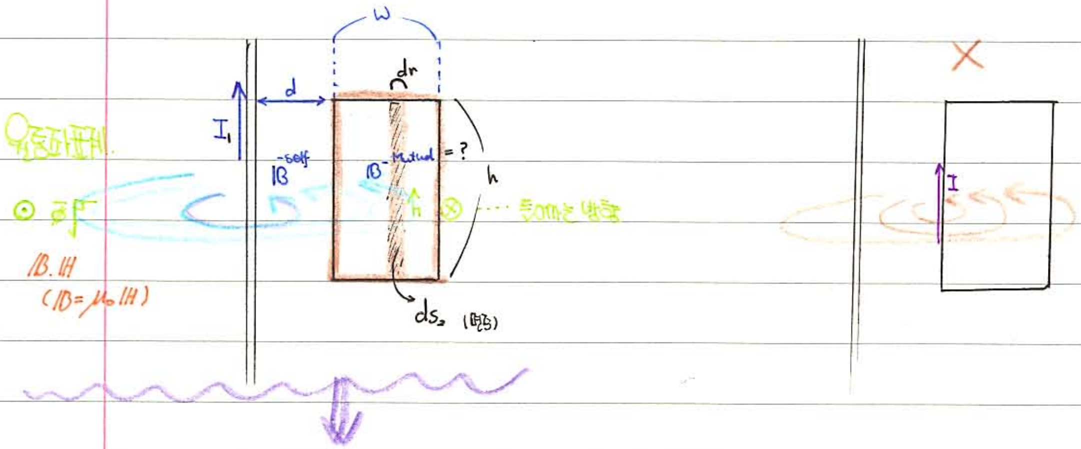
$$\therefore L_{11} = \frac{\Lambda}{I} \qquad L_{11} = \frac{\mu_0 N^2 h}{2\pi r} \ln\frac{b}{a} \quad [H]$$

- 전류 I 값이 없다!! 자기 유도 용량은 권선수 제곱에 비례.

한번 해보기

(예 5-9)

예제 5-12) Mutual Inductance (L_{12})



1. 도선 구조에 의한 좌표계 설정
→ 원통.

2. 직선 도체 → I_1

3. by Ampere's Circuital Law.

$$\mathbf{B}_1 = \text{(by 예제 5-1.)}$$
$$= \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}\,\bar{\phi}$$
$$H = I/2\pi r$$

4. I_1에 의한 자속 B가 오른쪽 사각형 Loop와 쇄교자속수 Φ의 계산=?

원통좌표계.

$$\Phi = \int \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{s}_2$$

where, $\mathbf{B}_1$과 쇄교하는 사각형 Loop의 미소면적

$$\therefore d\mathbf{s}_2 = ds_2\,\bar{n} = dr\,h\,\bar{n} = dr\,h\,\bar{\phi}$$

$$\therefore \Lambda_{12} = \int \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} \bar{\phi} \cdot dr\, h\, \bar{\phi}$$

$$= \int_d^{d+w} \frac{\mu_0 I_1 h}{2\pi r}\, dr$$

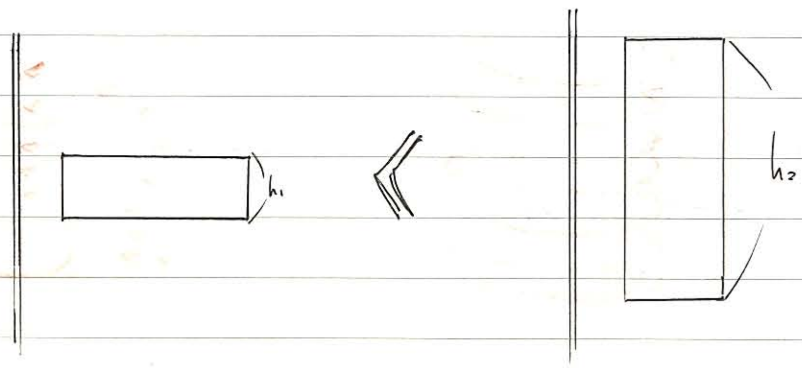
$$= \frac{\mu_0 I_1 h}{2\pi} \int_d^{d+w} \frac{1}{r}\, dr$$

$$= \frac{\mu_0 I_1 h}{2\pi} \ln\left({d+w}/{d} \right)$$

$$= \frac{\mu_0 I_1 h}{2\pi} \ln\left(1 + {w}/{d} \right)$$

$$L = \bar{\Phi}/I$$

5-99) 6. $L_{12} = \frac{\Lambda_{12}}{I_1} = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{w}{d}\right)$ [H]



5-11 정자계 Energy

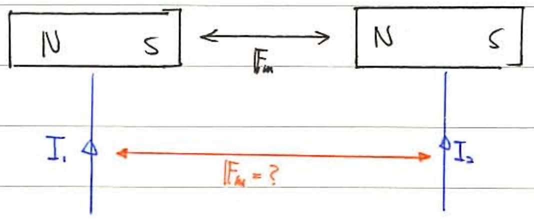
cf. 정전계 Energy $\bar{W}_{ork} = \frac{1}{2}C\bar{V}^2 = \frac{1}{2}\bar{V}Q$

$Q = C\bar{V}$

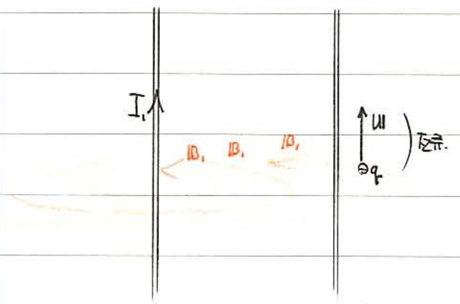
정자계 Energy $\bar{W} = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}I\phi$,, $L = \phi / I$

(식5-104)

5-12. 자기력 (magnetic force)



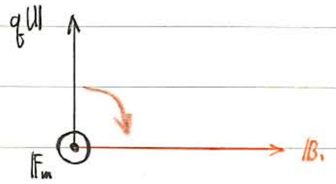
$$\mathbb{F}_m = \frac{m_1 m_2}{4\pi\mu_0 R^2}\,\mathbb{R}$$



$$\mathbb{F}_m = q\,\mathbb{U} \times \mathbb{B}_1 \qquad (5\text{-}113)$$

by Ampere's 실험.

where, $q\,\mathbb{U}$ = 전류 = $\mathbb{I}$



$$\therefore\ \mathbb{F}_m = \mathbb{I} \times \mathbb{B}_1$$

$$= I_2\, d\mathbb{l}_2 \times \mathbb{B}_1$$

$$\therefore\ \mathbb{F}_m = I_2 \oint d\mathbb{l}_2 \times \mathbb{B}_1 \qquad (5\text{-}116)$$

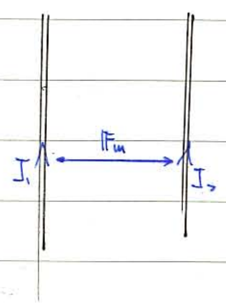
where, $\mathbb{B}_1$ = I_1 에 의한 자속밀도

= Biot - Savart's Law.

$$= \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \oint \frac{d\mathbb{l} \times \mathbb{R}}{R^2} \qquad (5\text{-}110)$$

$$\therefore\ \mathbb{F}_m = I_2 \oint d\mathbb{l}_2 \times \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\mathbb{l}_1 \times \mathbb{R}}{R^2}$$

$$= \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint\oint \frac{d\mathbb{l}_2 \times d\mathbb{l}_1 \times \mathbb{R}}{R^2} \qquad (5\text{-}118)$$



= Ampere's Force Law

70

연대표 1-1 : 고전시대 전자기학의 연대기

고전시대 전자기학

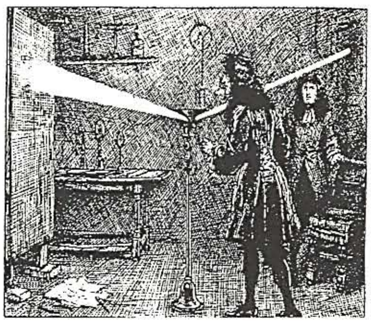
ca. 900 BC 매크너스(Magnus)라는 양치기가 그리스의 북쪽 지방을 가로지르는 동안 그의 샌들에 있는 철못이 검은 돌에 의해서 당겨지는 것을 경험한 전설이 있다. 나중에 이 지역은 마그네시아(Magnesia)라고 불렸고, 그 돌은 마그네타이트(magnetite)[영구적인 자성이 있는 물질]로 알려지게 되었다.

ca. 600 BC 그리스의 철학자 탈레스(Thales)는 고양이 털에 호박을 문지른 후에 어떻게 깃털을 끌어 올릴 수 있는지를 설명했다(static electricity)[정전기].

ca. 1000 자석 나침반은 항해 도구로 사용되었다.

1600 윌리엄 길버트(William Gilbert)(영국)는 호박(elektron)에 대한 그리스 단어 이후에 전기(electric)라는 용어를 만들었다. 그리고 지구가 막대 자석으로 작용해서 나침반 바늘이 북쪽과 남쪽을 가리키는 것을 관찰했다.

1671 아이작 뉴턴(Issac Newton)(영국)은 백색광(white light)이 모든 색을 합한 것이라는 것을 증명했다.

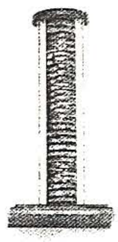


1733 찰스-프링크 드 페이(Charles-Francois du Fay) (프랑스)는 전하(electric charge)가 두 개의 형태이고, 같은 전하는 밀어내고 다른 전하는 끌어당긴다는 것을 발견했다.

1745 피터 반 뮤센프로크(Piter van Musschenbroek) (독일)는 첫 번째 전기 콘덴서(capacitor)인 레이덴 병을 발명했다.

1752 벤자민 프랭클린(Benjamin Franklin)(미국)은 피뢰침(lightning rod)을 발명했고, 번개가 전기라는 것을 입증했다.

1785 찰스-오거스틴 디 쿨롱(Charles-Augustin de Coulomb)(프랑스)은 전하 사이의 전기적 힘은 전하 사이의 거리의 제곱의 역에 비례한다는 것을 입증했다.



1800 알렉산드로 볼타(Alessandro Volta)(이탈리아)는 첫 번째 전기 배터리를 발명했다.

1820 한스 크리스찬 외르스테드(Hans Christian Oersted)(덴마크)는 전선에서 전류가 나침반 바늘을 전선에 수직하게 동쪽으로 스스로 움직이도록 하는 것을 발견함으로써 전기와 자기 사이에 상호 관련이 있다는 것을 입증했다.

1820 앙드레-마리 암페어(Andre-Marie Ampere)(프랑스) 전선에서 평행한 전류는 서로를 끌어당기고, 반대 방향의 전류는 서로 밀어낸다고 언급했다.

1820 진-밥티스테 비오(Jean-Baptiste Biote)(프랑스)와 페릭스 사바르(Felix Savart)(프랑스)는 자기장은 전류가 흐르는 전선의 작은 부분에 의해서 유도되는 것과 관련된 비오-사바르 법칙을 개발했다.

71

9781

연대표 1-1 : 고전시대 전자기학의 연대기

고전시대 전자기학

1827 조지 시몬 옴(Georg Simon Ohm)(독일)은 전류와 저항의 전기 포텐셜과 관련된 옴의 법칙을 공식화했다.

1827 조셉 헨리(Joseph Henry)(미국)는 **인덕턴스**(inductance)의 개념을 제안했다. 그리고 최초의 전기 모터를 만들었다. 또한 **무선전신**(telegraph)의 개발에 있어서 사무엘 모르스(Samual Morse)를 도왔다.

1831 미이클 패러데이(Michael Faraday)(영국)는 자속의 변화가 **기전력**(electromotive force)을 유도한다는 것을 발견했다.

1835 칼 프리드리히 가우스(Carl Friedrich Gauss)(독일)는 내부의 전하에서 닫힌 표면을 통과하는 전속과 관련된 **가우스의 법칙**(Gauss' s law)을 공식화했다.

Gauss' Law for Electricity

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{inside}}{\varepsilon_0}$$

1873 제임스 클락 맥스웰(James Clerk Maxwell)(스코트랜드)은 쿨롱, 외르스테드, 암페어, 패러데이와 다른 발견들을 **맥스웰 방정식**(Maxwell' s Equations)이라고 알려진 4개의 훌륭한 수학적 방정식으로 통합한 전기와 자기에 대한 논문을 발표했다.

Timon Stowe

1887 하인리히 헤르츠(Heinrich Hertz)(독일)는 **전자기파**(electromagnetic wave)(무선 주파수에서)를 생성하고 검파할 수 있는 시스템을 만들었다.

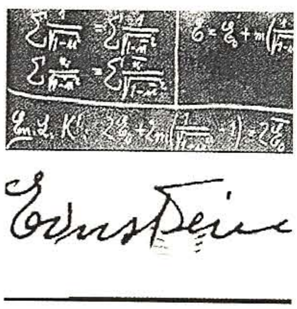
Name. MEMS

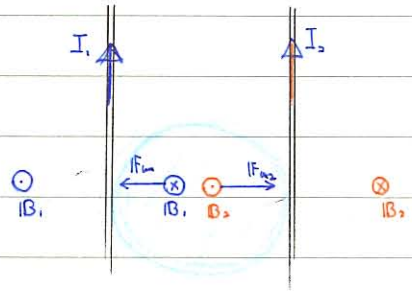
1888 니콜라 테슬라(Nikola Tesla)(크로아티아, 미국)는 **교류**(ac) (alternating current)모터를 발명했다.

1895 빌헬름 뢴트겐(Wilhelm Roentgen)(독일)은 X-선(X-ray)을 발견했다. 그의 첫 X-ray 사진 가운데 하나는 그의 부인의 손의 뼈였다[1901 노벨 물리학상].

1897 조셉 존 톰슨(Joseph John Thomson)(영국)은 전자(electron)와 그것의 전하에 대한 질량의 비를 측정했다[1906 노벨 물리학상].

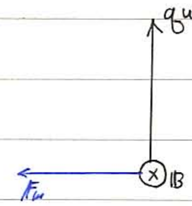
1905 알버트 아인슈타인(Albert Einstein)(독일, 미국)은 1887년 헤르츠에 의해 더 일찍 발견된 **광전 효과**(photoelectric effect)를 설명했다 [1921 노벨 물리학상].





$$F_m = qu \times B$$

$$= J \times B$$



I_1, I_2 = 동방향 : 반발력

I_1, I_2 = 반대방향 : 인력

제 6장 시변계 : 시간에 따라서 "계" 가 변한다.

<timevarying field>

- electric Field
- magnetic Field.

⇓

$\frac{\partial \mathbb{E}}{\partial t} = ?$, $\frac{\partial \mathbb{H}}{\partial t} = ?$

정전계 $\mathbb{E}$ / 정자계 $\mathbb{H}$

electrostatic / magnetic static

$\frac{\partial \mathbb{E}}{\partial t} = 0$ / $\frac{\partial \mathbb{H}}{\partial t} = 0$

Maxwell

<273p> →

$\nabla \times \mathbb{E} = \varnothing =$ (0 이아니라) $- \frac{\partial \mathbb{B}}{\partial t}$

전계회전v.

275p

"Maxwell 정리."

$\nabla \times \mathbb{H} = \mathbb{J} + \partial \mathbb{D}/\partial t = \frac{\partial(\varepsilon \mathbb{E})}{\partial t}$

시변계. Timevarying field.

scalar potential

Vector potential

	정전계	시변 전계	정자계	시변 자계
∇	$\mathbb{E} = -\nabla \bar{V}$	$\mathbb{E} = -\nabla \bar{V}$	$\mathbb{B} = \nabla \times \mathbb{A}$ $\mathbb{H} = \frac{1}{\mu}(\nabla \times \mathbb{A})$	$\mathbb{B} = \nabla \times \mathbb{A}$
$\nabla\cdot$	$\nabla \cdot \mathbb{E} = e_v/\varepsilon_0$	$\nabla \cdot \mathbb{E} = e_v/\varepsilon_0$ $(\mathbb{D} = \varepsilon \mathbb{E})$ $\nabla \cdot \mathbb{D} = e_v$	$\nabla \cdot \mathbb{B} = 0$ $(\mathbb{B} = \mu \mathbb{H})$ $\nabla \cdot \mathbb{H} = 0$	$\nabla \cdot \mathbb{B} = 0$
$\nabla\times$	$\nabla \times \mathbb{E} = 0$	$? \left(= \frac{-\partial \mathbb{B}}{\partial t}\right)$	$\nabla \times \mathbb{H} = \mathbb{J}$	$\boxed{? \left(= \mathbb{J} + \frac{\partial \mathbb{D}}{\partial t}\right)}$

$= \frac{-\partial(\mu \mathbb{H})}{\partial t}$

$= \frac{\partial(\varepsilon \mathbb{E})}{\partial t}$

<맥스웰이 했다 Great!!!한 일>

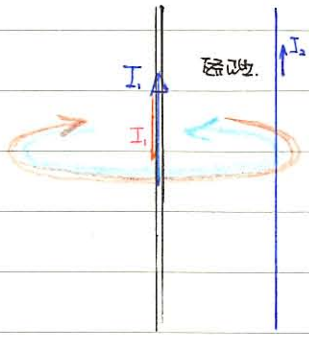
↓

"전자파." (마르코니)

무선통신.

6-2. Faraday's Law

실험발견. 자속이 변하면 → 전류가 생긴다.

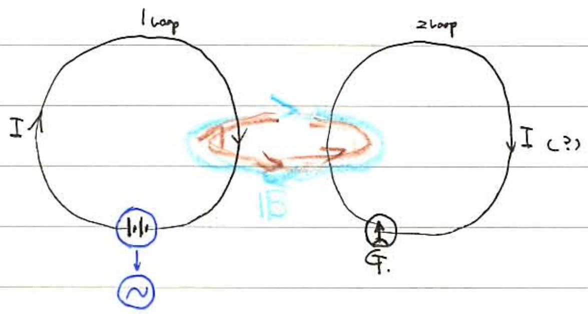


전류 = DC → AC

$$\frac{d(\text{자계})}{dt} \xrightarrow{\text{Faraday's Law}} \text{전류}$$

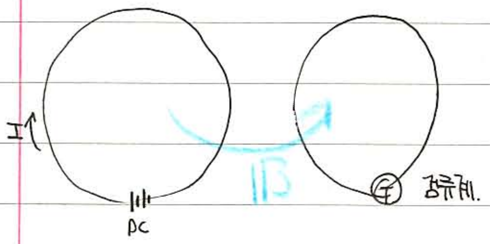
by Ampere's Law.

실험

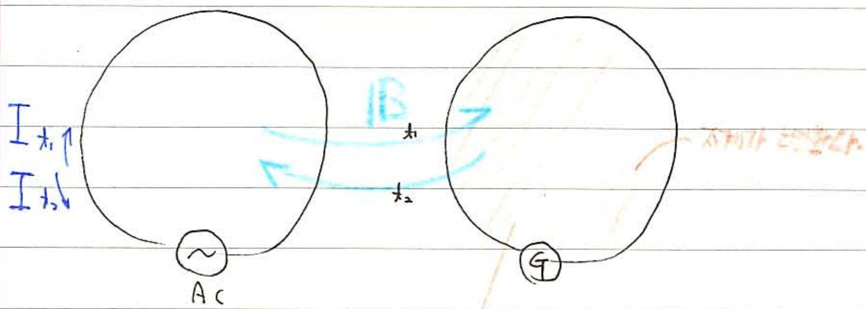


1. DC 연결 → IB = 정자계 → 2번 루프 검류계 반응 없음.

2. AC 연결 → IB = 시변자계 → 〃 반응 → 전류가 흐른다.



1. DC : B = 정자계 : 검류계 움직임 없음. 유도결합 x.

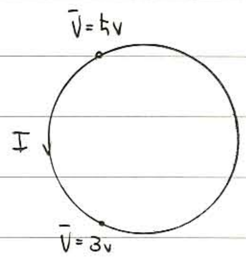


2. AC : B = 시변자계 : 검류계 움직인다. : 유도결합 (o)

전류가 흐른다.

전위차 존재.

Electro Motive force (emf)
기 전 력.



즉. coil 에서 쇄교자속이 변한다.

Φ

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} = V_{기전력} \qquad (6\text{-}12)$$

변화하는 방향.

즉. Coil 면(=S) 에서 Φ, B 가 변하면.

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} = V = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

where, $\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$

선적분.

(6-8, 9) $$-\frac{\partial}{\partial t}\int \mathbb{B}\cdot d\mathbb{s} = \int \mathbb{E}\cdot d\mathbb{l}$$

$\mathbb{B} = \mu\mathbb{H}$. 면적분 $\mathbb{D} = \varepsilon\mathbb{E}$

by Stoke's Theorem

$$-\frac{\partial}{\partial t}\int \mathbb{B}\cdot ds = \int \nabla\times\mathbb{E}\cdot ds$$: Faraday's 적분형

90° 차이.

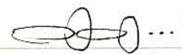
(6-7) $$\therefore\ -\frac{\partial \mathbb{B}}{\partial t} = \nabla\times\mathbb{E}$$: 미분형

$\therefore$ $\mathbb{E}$는 회전한다.

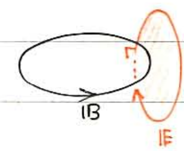
↳ 시변전계.

Maxwell's equation

1st 방정식

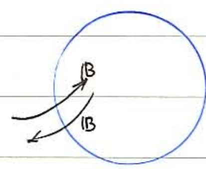


<고리를 형성>

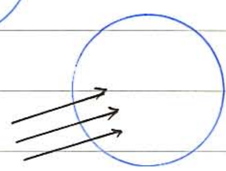


Key Pointer : Φ. $\mathbb{B}$ → 시간에 따라 변화.

방법 6-2-1 시변자계 내에 정지 Loop.



6-2-2 정자계 내에 이동 Loop



6-2-3 시변자계 내에 〃