

Chapter 11

전자계

11.1 변위전류

변위전류

※ 자유전자의 이동에 의한 도체 내에 흐르는 전류 : 전도전류

- 변위전류 : 유전체에서 구속전자의 변위에 의해 나타나는 전류

$$I_d = \frac{dQ}{dt} = S \frac{\partial D}{\partial t} [\text{A}]$$

- 변위전류밀도

$$i_d = \frac{\partial D}{\partial t} [\text{A/m}^2], \quad \text{또는} \quad i_d = \frac{\partial D}{\partial t} [\text{A/m}^2]$$

(정의 : 전속밀도의 시간적 변화율에 의한 전류)

$$i_d = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} [\text{A/m}^2]$$

$$(D = \epsilon E = \epsilon_0 E + P)$$

※ 유전체 중의 변위전류는 진공중의 전계변화에 의한 변위전류 + 구속전자의 변위에 의한 분극전류

- 변위전류(일반 매질) : 전도전류와 변위전류

$$\begin{aligned} i &= i_c + i_d = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} \\ &= \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \\ &= \sigma E + \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} [\text{A/m}^2] \end{aligned}$$

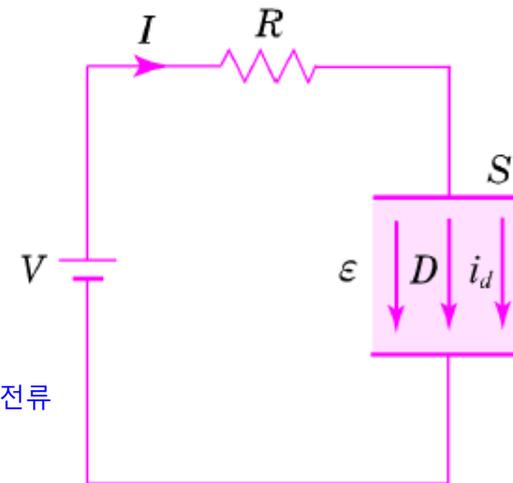


그림 11.1 ▶ 변위전류

※ 변위전류는 전속밀도 D가 시간적으로 변화할 때, 항상 존재하지만 반드시 적용할 필요는 없음

→ 가정에서 사용하는 상용주파수 50, 60[Hz]의 교류에서는 거의 무시할 정도로 작은 값임

(참조) 전류의 정의

- **전류(current)** : 외부전계에 의한 전하의 이동

- ① 방향 : 정전하의 이동 방향
- ② 크기 : 전류의 이동 방향에 직각인 단면을 단위 시간에 통과한 전하량
- ③ 단위 : 암페어[A]

$$I = \frac{Q}{t} \quad I = \frac{dQ}{dt}$$

- **직류와 교류**

- ① 직류(direct current, DC), 정상전류(stationary current) : 시간에 대하여 크기와 방향이 변하지 않는 전류
- ② 교류(alternating current, AC) : 시간에 대하여 크기와 방향이 변하는 전류

- **전류의 종류**

- ① 전도전류(conduction current) : 금속 도체 중을 흐르는 전류
- ② 대류전류(convection current) : 전해액 또는 공간적으로 분포되어 있는 대전된 전하입자의 이동에 의한 전류
- ③ 변위전류(displacement current) : 진공 또는 유전체 내에서 전속밀도의 시간적 변화에 의하여 발생하는 전류

(참조) 전류밀도와 도전율

- 길이에 비해 단면적이 큰 도체에서의 전류

- 한 개 입자의 전하량 q , 단위체적당 전하의 수 n , 전하속도 v

- ① 전류 I : 전류의 이동 방향에 직각인 단면을 단위 시간에 통과한 전하량
(체적전하밀도 $\rho = nq[\text{C}/\text{m}^3]$)

$$I = nqSv = \rho Sv$$

- ② 전류밀도 i : 단위면적당 전류

$$i = \frac{I}{S} = nqv = \rho v \quad (v = \mu E)$$

$$i = nq\mu E = \rho\mu E \quad \text{또는} \quad i = \sigma E [\text{A}/\text{m}^2]$$

(정상전류계에서 **옴 법칙의 미분형**)

(σ : 도전율(conductivity))

11.2 맥스웰의 전자방정식

11.2.1 맥스웰의 전자방정식

- 정상계와 비정상계의 비교

- ① **정상계[불시변계]** : 정전계 및 직류가 흐를 때 발생하는 자계(정자계) 등이 이에 속하며, 정전계와 정자계는 독립적으로 존재할 수 있다. 즉, 시간이 변화하지 않으면 전계와 자계는 상호 관련이 없는 관계이다.

- ② **비정상계[시변계]** : 시간적으로 변화하는 전계와 자계에서 실험 법칙으로 다음과 같은 중요한 현상이 있다. 즉,

자계가 변화하면 전계가 발생한다. [수학적 표현 : 식 (11.12)]

전계가 변화하면 자계를 발생한다. [수학적 표현 : 식 (11.13)]

- 전계와 자계는 독립된 것이 아니라 상호 관련성 : 맥스웰의 전자방정식

11.2 맥스웰의 전자방정식

11.2.1 맥스웰의 전자방정식

- 전자계에서 성립하는 맥스웰 전자방정식

표 11.1 ▶ 맥스웰 전자방정식의 미분형과 적분형

맥스웰 전자방정식		의미	수식 번호
미분형	적분형		
$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_c E \cdot dl = -\int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS$	패러데이 법칙	(11.12)
$\nabla \times H = i_c + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint_c H \cdot dl = I + \int_s \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS$	암페어 주회적분 법칙	(11.13)
$\nabla \cdot D = \rho$	$\oint_s D \cdot dS = \int_v \rho dv = Q$	가우스 정리	(11.14)
$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_s B \cdot dS = 0$	가우스 정리	(11.15)

※ 맥스웰
전자방정식

※ 맥스웰
보조방정식

※ 맥스웰의 전자방정식은 전계 및 자계에 관한 모든 현상을 집약한 것으로,
전계 및 자계에 관한 모든 법칙을 유도할 수 있다.

11.2 맥스웰의 전자방정식

※ 전도전류 $i=0$ 인 진공 중에 안테나와 같은 도체가 있고, 도체에서 전류가 변화하고 있을 때, 전계 및 자계 주위의 진공 매질에 관한 식은

11.2.2 맥스웰의 전자방정식의 물리적 의미

● 맥스웰 전자방정식 변형

$$D = \epsilon_0 E, \quad B = \mu_0 H \text{ 대입}$$

$$\text{rot} E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (11.17) \quad \text{rot} H = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (11.18)$$

$$\begin{aligned} i &= i_c + i_d = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} \\ &= \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \\ &= \sigma E + \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} [\text{A/m}^2] \end{aligned}$$

- ① 공간의 한 점에서 시간적으로 변화하는 전계 E 는 주위에 회전하는 자계 H 를 발생하고[식 (11.18)], 그 자계도 시간적으로 변화하고 있기 때문에 다시 그 주위에 회전하는 전계를 발생하게 한다[식 (11.17)]. **전계와 자계는 진공 중에서 순차적으로 그 주위에 만들어 가기 때문에 전계와 자계는 도체의 전류로부터 차례로 진공 중을 전파해 간다.**
- ② **변위전류를 고려하지 않으면 식 (11.18)의 우변은 0이 되어 전계가 변해도 그 주위에 자계가 발생하지 않으므로 그 이상 전파할 수 없다. 즉, 전류 주위에 전계와 자계가 발생하지만 그 이상 파동으로 전파할 수 없고 변위전류를 도입함으로써 순차적으로 반복되어 파동으로 전파하는 것이다.**