4. 정상 전류

전류밀도와 Ohm의 법칙

대 류전류(Convection current)

전공이나 희박한 가스 내에서 양이나 음으로 대전된 입자의 움직임으로 발생.

예) 음극선관에서의 전자빔과 번개칠 때 대전된 전하 입자의 격렬한 움직임.

Ohm의 법칙을 따르지 않고 입자 이동을 수반하는 유체 역학적 움직임에 따라 전류가 흐른다.

전 도전류(Conduction current)

도체 원자의 전도대 전자들(핵의 구속력이 약한 바깥쪽 궤도에 있는 전자들)은 자유롭게 한 원자에서 다른 원자로 이동 할 수 있다.

도체에 외부 전계가 가해지면 전도대 전자들의 유기적 이동이 전류를 발생시킨다.

전자들의 평균 드리프트 속도는 양도체라고 하더라도 매우 느리다.($10^{-4} \sim 10^{-3}$ m/s)

또한 전자들이 이동하면서 원자들과 충돌하게 되고 운동 에너지의 일부가 열로 소비된다. 이는 저항으로 나타난다.

전도 전류 밀도와 전계는 Ohm의 법칙을 따른다.

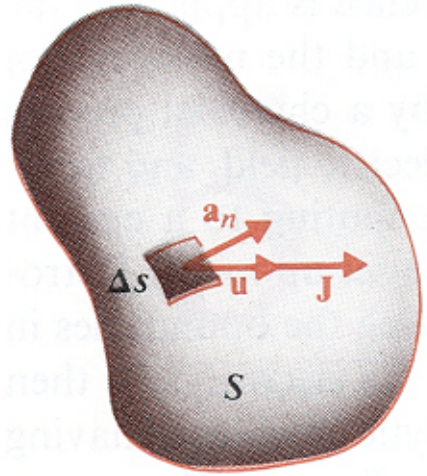
전류밀도와 Ohm의 법칙

대류전류

전하량 q인 전하 캐리어가 그림과 적 를 질러 속도 로서 정상(steady) 있는 경우

Δs $\vec{u}$ Δt $\vec{u}\Delta t$ Δs

$$\Delta Q = Nq\vec{u}\cdot\vec{a}_n\Delta s\Delta t \quad (C)$$



단위 체적당 전하 캐리어 수를 N 이라고 하면 시간 후에 각 전하들은 만큼의 거리를 이동하게 되며, 따라서 면적 를 통과하는 전하량은 아래와 같다.

ΔQ Δt ΔI

$$\Delta I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = Nq\vec{u}\cdot\vec{a}_n\Delta s = Nq\vec{u}\cdot\Delta\vec{s} \quad (A)$$

$$\vec{J} = Nq\vec{u}\ \left[A/m^2\right]$$

$$\Delta I = \vec{J}\cdot\Delta\vec{s}\ \left[A\right]$$

또한 전류는 전하의 시간 변화율이므로

$$I = \int_s \vec{J}\cdot d\vec{s}\ \left[A\right]$$

ρ_v

$$\vec{J} = \rho_v\vec{u}\ \left[A/m^2\right]$$

→ 대류전류밀도

전도전류

전도전류의 경우, 다른 속도로 이동하는 한 종류 이상의 전하들(전자(electron), 정공(hole), 이온(ion))이 있을 수 있다. 따라서 다음과 같이 일반화 하여야 한다.

$$\vec{J} = \sum_i N_i q_i \vec{u}_i \left[A/m^2\right]$$

$$\vec{u}_e = -\mu_e \vec{E} \left[m/s\right]$$

$\vec{u}_e$: electron mobility

$$\vec{J} = -\rho_e \mu_e \vec{E} \longrightarrow \boxed{\vec{J} = \sigma \vec{E} \left[A/m^2\right]}$$

$(\rho_e = -Ne)$: 드리프트 전자들의 전하밀도

$\sigma = -\rho_e \mu_e$

도전율(conductivity)

Point form of Ohm's law

전도전류는 외부 전계의 영향하에서 전하캐리어의 드리프트 이동 결과이다. 도체에서 평균

전하보존의 원리와 연속방정식

전하보존의 원리(Principle of conservation of charge)

전하는 생성되거나 소멸될 수 없다.

$$I = \oint_S \vec{J} \cdot d\vec{s} = -\frac{dQ}{dt} = -\frac{d}{dt}\int_V \rho_v dv \quad (1)$$

표면 S로 둘러싸인 임의의 체적 V가 있고 그 영역 내에 순전하 Q가 있다고 하자. 표면을 가로질러 영역 밖(안)으로 전류 I가 흐른다면 체적내의 전하는 동일한 비율로 감소(증가)되어야만 한다.

$$\int_V \nabla \cdot \vec{J}\, dv = -\frac{d}{dt}\int_V \rho_v dv \quad (\mathrm{A/m^3})$$

연속방정식(equation of continuity)

$$(\partial \rho_v / \partial t) \Rightarrow \boxed{\nabla \cdot \vec{J} = 0}$$

전하보존의 원리와 연속방정식

3장에서 설명하였듯이 도체내부에 들어온 전하들은 평형 상태에서 내부가 이 되도록 도체 표면으로 이동한다. 이를 증명해 보고 평형 상태에 도달할 때 걸리는 시간을 계산해 본다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{d\rho_v}{dt}$$

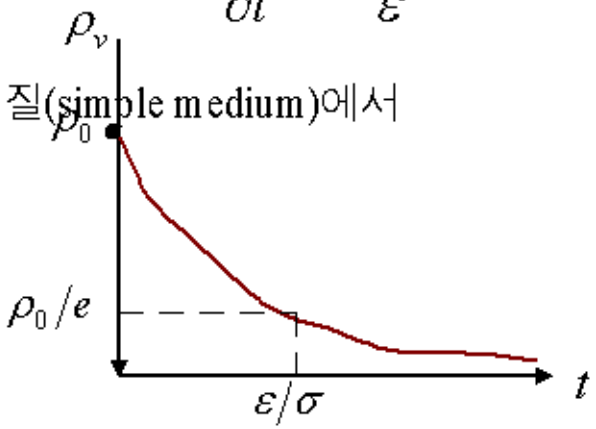
$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho_v / \varepsilon$$

먼저 Ohm의 법칙과 연속 방정식을 결합하면,

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \frac{\sigma \rho_v}{\varepsilon} = 0$$

$$\boxed{\rho_v = \rho_0 e^{-(\sigma/\varepsilon)t} \quad \left(C/m^3\right)}$$

단순매질(simple medium)에서



이므로 ρ_0 : t=0에서의 초기전하밀도

$\tau = \dfrac{\varepsilon}{\sigma}$: 완화시간(relaxation time), 전하밀도가 1/e(36.8%)로 감소하는데 걸리는 시간

예) 구리: 1.53×10^{-19} (s) 고무: 1일10시간

정상전류밀도에 성립하는 식

정상전류밀도에 성립하는 식	
미분형(Differential Form)	적분형(Integral Form)
$\nabla \cdot \vec{J} = 0$	$\oint_s \vec{J} \cdot d\vec{s} = 0$
$\nabla \times \left(\frac{\vec{J}}{\sigma} \right) = 0$	$\oint_c \frac{1}{\sigma} \vec{J} \cdot d\vec{l} = 0$

v 법선성분에 대한 경계조건

무발산계$(\nabla \cdot \vec{J} = 0)$ 는 연속하는 법선성분을 갖는다.

$$J_{1n} = J_{2n}$$

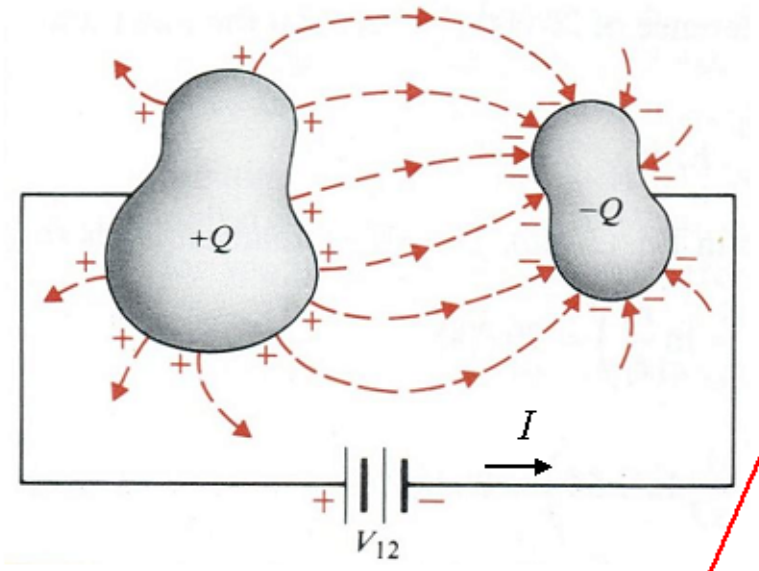
v 접선성분에 대한 경계조건

무회전계$(\nabla \times (\vec{J}/\sigma) = 0$ 는 연속하는 접선성분을 갖는다.

$$\frac{J_{1t}}{J_{2t}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$$

저항계산

3장에서 두 도전체 사이의 정전용량을 계산하였다.



$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\oint_S \vec{D}\cdot d\vec{s}}{-\int_L \vec{E}\cdot d\vec{l}} = \frac{\oint_S \varepsilon\vec{E}\cdot d\vec{s}}{-\int_L \vec{E}\cdot d\vec{l}} \qquad (1)$$

-분자의 면적분은 양의 도체를 둘러싸고 있는 표면을 밖으로 적분

-분모의 선적분은 음의 도체로부터 양의 도체로 선적분

v 식(1)과 식(2)를 결합하면,

$$\boxed{RC = \frac{C}{G} = \frac{\varepsilon}{\sigma}}$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{-\int_L \vec{E}\cdot d\vec{l}}{\oint_S \vec{J}\cdot d\vec{s}} = \frac{-\int_L \vec{E}\cdot d\vec{l}}{\oint_S \sigma\vec{E}\cdot d\vec{s}} \qquad (2)$$