

# Contents

<b>1 기초</b>	<b>3</b>
1.1 맥스웰 방정식(2021, 2020 경북대 편입학 문제 1번, 2022 2번) . . . . .	4
<b>2 정전기학</b>	<b>9</b>
2.1 가우스 법칙의 활용 (2025 경북대 편입학 문제 1번) . . . . .	10
2.2 가우스 법칙 활용조건 (2023 경북대 편입학 문제 1번) . . . . .	12
2.3 가우스 법칙의 활용 (2024 부산대 편입학 문제 2번) . . . . .	14
2.4 구도체 충전 (2021 부산대 편입학 문제 3번) . . . . .	16
2.5 구도체 충전 (2024 경북대 편입학 문제 1번) . . . . .	18
2.6 정전계에너지 (2021 부산대 편입학 문제 4번) . . . . .	20
2.7 정전용량 (2020 부산대 편입학 문제 4번) . . . . .	22
2.8 정전용량 (2020 경북대 편입학 문제 2번) . . . . .	24
2.9 동축케이블 (2022 경북대 편입학 문제 1번) . . . . .	26
2.10 변위전류 (2021 경북대 편입학 문제 2번) . . . . .	28
<b>3 정자기학</b>	<b>31</b>
3.1 암페어 법칙 (2025 부산대 편입학 문제 1번) . . . . .	32
3.2 암페어 법칙 (2024 부산대 편입학 문제 1번) . . . . .	34
3.3 원통도선의 자기인덕턴스 (2022 부산대 편입학 문제 2번) . . . . .	36
3.4 동축 케이블 (2025 경북대 편입학 문제 2번) . . . . .	39
3.5 경계조건 (2023 경북대 편입학 문제 2번) . . . . .	41
<b>4 전자기유도</b>	<b>45</b>

4.1 유도기전력 (2024 경북대 편입학 문제 2번)	46
4.2 유도기전력 (2022 부산대 편입학 문제 1번)	48
4.3 유도기전력 (2020 부산대 편입학 문제 3번)	50

# Chapter 1

## 기초

## 1.1 맥스웰 방정식(2021, 2020 경북대 편입학 문제 1번, 2022 2번)

네 개로 구성되는 맥스웰 방정식에 대해 아래 물음에 답하시오.

- (1) 맥스웰 방정식의 미분형을 기술하고 미분 연산자의 의미와 함께 각 방정식의 의미를 설명 하시오.
- (2) 맥스웰 방정식의 미분형으로부터 적분형을 도출하는 과정을 기술하되, 발산정리와 스톡 스정리를 적용하고 기하학적인 구조와 함께 각 방정식의 의미를 설명하시오.

**Solution.**

### 1. 미분형과 물리적 의미 (with material fields)

맥스웰 방정식의 매질 중 일반형은 자유전하/자유전류를 source으로 삼고, 전기변위  $\mathbf{D}$ , 자기장  $\mathbf{H}$ 를 통해 물질의 분극/자화를 포함하여 기술한다.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f \quad (\text{Gauss's law for } \mathbf{D}) \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{No magnetic monopoles}) \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{Faraday's law}) \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{Ampère-Maxwell law}) \quad (1.4)$$

여기서  $\rho_f$ ,  $\mathbf{J}_f$ 는 자유(free) 전하/전류밀도이다. 연산자  $\nabla \cdot$ 는 장의 source/sink를 나타내는 발산,  $\nabla \times$ 는 장의 회전성을 나타낸다.

**의미 요약** (1.1)는 닫힌 곡면을 통과하는  $\mathbf{D}$  플럭스의 source가 자유전하임을, (1.2)는 자기단극자가 없음을, (1.3)는 시간변화하는  $\mathbf{B}$ 가 소용돌이형  $\mathbf{E}$ 를 유도함을, (1.4)는 전도전류  $\mathbf{J}_f$ 와 변위전류  $\partial \mathbf{D} / \partial t$ 가 소용돌이형  $\mathbf{H}$ 를 만든다는 사실을 뜻한다.

또한 (1.1), (1.4)의 발산을 취하면

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_f + \frac{\partial \rho_f}{\partial t} = 0$$

이 되어 전하보존(연속방정식)이 따라 나온다.

**물질 응답(구성 방정식)** 물질의 분극/자화를  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{M}$ 이라 하면

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad \mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}).$$

선형 · 등방 · 균질(LIH) 매질이면

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r, \mu = \mu_0 \mu_r),$$

또한 도체에서는 보통  $\mathbf{J}_f = \sigma\mathbf{E}$  (Ohm)로 둔다. 분극이 만들어내는 bound charge는  $\rho_b = -\nabla \cdot \mathbf{P}$ , 자화가 만들어내는 magnetization current는  $\mathbf{J}_b = \partial\mathbf{P}/\partial t + \nabla \times \mathbf{M}$ 로 나타나며, 이들을  $\mathbf{D}, \mathbf{H}$ 에 포함하여 식 (1.1)–(1.4)는 자유 전하와 자유 전류만을 노출한다.

## 2. 적분형 유도, 정리의 적용, 기하학적 해석

발산정리  $\int_V \nabla \cdot \mathbf{F} dV = \oint_{\partial V} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{A}$ , 스톡스 정리  $\int_S (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot d\mathbf{A} = \oint_{\partial S} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l}$ 를 각 미분형에 적용한다.

### 가우스 법칙(전기)

$$\oint_{\partial V} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = \int_V \nabla \cdot \mathbf{D} dV = \int_V \rho_f dV = Q_{f, enc}.$$

닫힌 곡면을 지나는  $\mathbf{D}$ 의 총 플럭스는 내부의 자유전하 합과 같다.

### 가우스 법칙(자기)

$$\oint_{\partial V} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0,$$

어떤 닫힌 곡면도  $\mathbf{B}$ 의 순플럭스를 가지지 않는다(자기 단극자 부재).

### 페리레이 법칙

$$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_S (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot d\mathbf{A} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}.$$

폐곡선을 따라 도는 기전력은 그 곡면을 지나는 자기플럭스의 시간변화율과 같다.

### 암페어-맥스웰 법칙

$$\oint_{\partial S} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{A} = \int_S \mathbf{J}_f \cdot d\mathbf{A} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A}.$$

우변 첫 항은 포함 자유전류  $I_{f, enc}$ , 둘째 항은 변위전류이다.

**기하학적 구조(요약)**  $\mathbf{E}, \mathbf{H}$ 는 순환(circulation)이 본질인 1-형(field)로서 선적분  $\oint (\cdot) \cdot d\mathbf{l}$ 에 자연스럽고,  $\mathbf{D}, \mathbf{B}$ 는 플럭스가 본질인 2-형으로서 면적분  $\int (\cdot) \cdot d\mathbf{A}$ 에 자연스럽다. 발산정리는 “2-형의 플럭스  $\leftrightarrow$  체적 내 source(전하)”를, 스톡스 정리는 “1-형의 순환  $\leftrightarrow$  2-형의 시간/공간

변화(유도/변위)”를 연결한다. 곡면/경계의 방향(바깥 법선, 우수 규약)을 일관되게 취해야 부호가 올바르다.

**경계조건(적분형의 즉각적 귀결)** 두 매질 경계면의 단위 법선  $\hat{\mathbf{n}}$ 과 접선  $\hat{\mathbf{t}}$ 에 대해

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \rho_{s,f}, \quad \hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0,$$

$$\hat{\mathbf{t}} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = \mathbf{0}, \quad \hat{\mathbf{t}} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{K}_f,$$

여기서  $\rho_{s,f}$ 는 자유 표면전하밀도,  $\mathbf{K}_f$ 는 자유 표면전류밀도이다.

### 3. 결론(정리)

매질 내 일반형 맥스웰 방정식은

$$\boxed{\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \partial_t \mathbf{D}}$$

이며, 구성 방정식  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ ,  $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$  (LIH 매질에서는  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ ) 을 통해  $\mathbf{E}, \mathbf{B}$ 와의 구분이 명확해진다. 적분형은 발산/스톡스 정리로 곧바로 도출되며, 각 항의 기하학적 본질(선순환 vs 면플럭스)을 드러낸다.



# Chapter 2

## 정전기학

## 2.1 가우스 법칙의 활용 (2025 경북대 편입학 문제 1번)



옆의 그림과 같이 공기중에  $z$ 축상으로 무한  
한 길이의 선 전하밀도  $\rho_l$ 이 놓여있을 때,  
반경  $r$  만큼 떨어진 곳의 전기장의 세기  
벡터  $\vec{E}$ 의 표현식을 가우스의 법칙을 이용  
하여 구하시오.

**Solution.**

- **대칭성:** 전하는  $z$ 축을 따라 무한히 길게 분포하므로  $\vec{E}$ 는 반지름  $r$ 만의 함수이고, 방향은 원통좌표계의 방사방향  $\hat{\mathbf{r}}$ 을 따른다.

**Remark. 대칭성을 활용한 전기장 방향 논증 :** 선전하를  $z$ 축을 따라 translation하거나  $z$ 축에 대해 회전하여도 시스템에 물리적 변화가 없기 때문에, 전기장 역시  $z$ 축 translation이나 회전과 independent해야 한다. 즉  $\vec{E}(r, \phi, z) = \vec{E}(r)$ 이다.)

- **가우스 면 선택:** 반지름  $r$ , 길이  $L$ 인 원통을 선택한다. 전기장은 측면을 통해서만 플럭스를 만든다.

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = E(r) (2\pi r L)$$

- **포함 전하:**

$$Q_{\text{enc}} = \rho_\ell L$$

- **가우스 법칙 적용:**

$$\begin{aligned} E(r) (2\pi r L) &= \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0} = \frac{\rho_\ell L}{\epsilon_0} \\ \Rightarrow E(r) &= \frac{\rho_\ell}{2\pi\epsilon_0 r} \end{aligned}$$

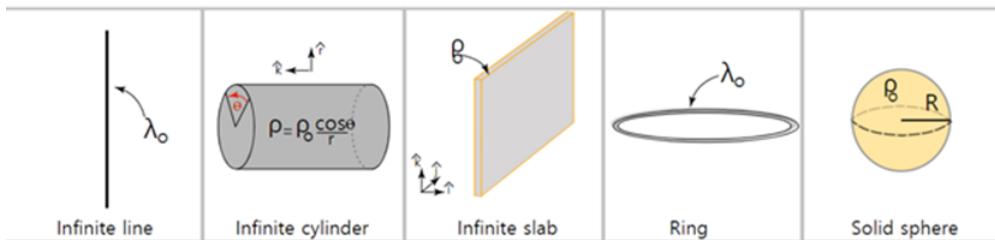
- **벡터 형태:**

$$\vec{E}(\mathbf{r}) = \frac{\rho_\ell}{2\pi\epsilon_0 r} \hat{\mathbf{r}}$$

( $\rho_\ell > 0$ 이면 바깥쪽,  $\rho_\ell < 0$ 이면 안쪽 방향)

## 2.2 가우스 법칙 활용조건 (2023 경북대 편입학 문제 1번)

다음 주어진 전하분포에서 전계의 세기를 계산하고자 한다.  
이때 가우스법칙을 활용하여 보다 쉽게 전계의 세기를 계산  
할 수 있는 기하학적 구조는 어떤 것인가? 해당되는 구조를  
모두 선택하고 그 이유를 각각 설명하시오.



**Solution.** 자유공간에서 가우스 법칙의 적분형은 다음과 같다.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0}.$$

가우스 법칙의 적분형을 활용하여 전기장의 세기를 계산하려면, 우리가 설정한 가우스 곡면 상에서 (1) 전기장의 세기가 일정하게 분포하고, (2) 가우스 곡면의 미소면적과 전기장의 방향이 일치해야 한다. 이 경우 전기장의 면적분은 단순한 전기장의 세기와 면적의 곱으로 표현된다.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint |\vec{E}| dS = E \oint dS = ES.$$

따라서 전기장의 대칭성을 고려하여 적절한 가우스 곡면을 설정할 수 있다. 주어진 전하분포에 대해 가우스 법칙을 쉽게 적용할 수 있는 경우는 다음과 같다.

1. **Infinite line charge:** 선대칭(line symmetry)을 가지므로, 전하선을 축으로 하는 원통형 가우스 면을 선택한다. 이때 전기장은 곡면 위에서 반지름  $r$ 에만 의존하고 일정하다.
2. **Infinite cylinder (균일 부피전하):** 원통대칭(cylindrical symmetry)을 가지므로, 축을 중심으로 하는 원통형 가우스 면을 택한다. 전기장은 반경  $r$ 에만 의존하며 곡면 위에서 일정하다.
3. **Infinite slab:** 평면대칭(plane symmetry)에 의해 전기장은 slab의 범선 방향( $z$ 축 방향)으로만 존재한다. 따라서 slab의 양쪽을 통과하는 *pillbox* 형태의 직육면체 가우스 면을 설정하면 된다.
4. **Solid sphere (균일 구체 전하):** 구대칭(spherical symmetry)에 의해 전기장은 구의 중심에서 방사(radial) 방향 성분만 가진다. 따라서 중심을 기준으로 한 구형 가우스 면을 설정하면 된다.

반면, **ring 전하분포**의 경우에는 회전대칭은 존재하지만, 임의의 가우스 곡면 위에서 전기장의 세기가 균일하지 않다. 따라서 가우스 법칙으로 직접 전기장을 구할 수 없으며, 쿨롱 법칙에 의한 적분을 통해 계산해야 한다.

## 2.3 가우스 법칙의 활용 (2024 부산대 편입학 문제 2번)

$r = 2, 4, 6 \text{ m}$  구 표면에 균일한 표면전하  $20 \text{ nC/m}^2, -4 \text{ nC/m}^2, \rho_S$ 로 각각 대전되어 있다.

$r = 7$ 에서 전속 밀도  $\mathbf{D} = 0\text{i}$  되도록  $\rho_S$ 를 구하여라.

**Solution:**

$\rho = 4 \text{ } nC/m^2$ 이라 정의하자. 가우스 법칙의 적분형에 의하여  $r = 7$ 에서의 전속 밀도의 세기  $D(r)$ 와 가우스 곡면 내부의 전하간의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \oint \vec{D} \cdot d\vec{S} &= D(r) \cdot 4\pi r^2 = Q_{enc} \\ &= 4\pi \times 2^2 \times 5\rho + 4\pi \times 4^2 \times (-\rho) + 4\pi \times 6^2 \times \rho_S \\ &= 4\pi[(20 - 16)\rho + 36\rho_S] = 16\pi(\rho + 9\rho_S) \end{aligned}$$

$r = 7 \text{ m}$ 에서 전속 밀도가 0, 즉  $D(r = 7) = 0$ 를 만족하려면 위 식으로부터  $\rho + 9\rho_S = 0$ , 즉

$$\rho_S = -\frac{\rho}{9} = -\frac{4}{9} \text{ } nC/m^2$$

## 2.4 구도체 충전 (2021 부산대 편입학 문제 3번)

멀리 떨어진 두 개의 금속구에 전하밀도의 비가  $4 : 9$  되도록 전하를 주었을 때, 전위가 각각  $V_1 = 400$  [V],  $V_2 = 600$  [V]로 되었다. 금속구의 반지름의 비  $r_1 : r_2$ 를 구하시오.

**Solution.** 두 구 모두 도체이므로 표면에만 전하가 분포한다. 두 구가 각 구의 반지름보다 훨씬 멀리 떨어져 있다고 가정하면 각 구의 전위는 다른 구의 영향을 받지 않는다. 고립된 구의 총 전하량을  $Q$ 라 하고, 무한대의 전위를 0이라 가정했을 때 반지름이  $R$ 인 구 표면에서 전위는

$$V = \frac{Q}{4\pi R}$$

로 표현된다. 구 껍질의 표면이 전하 밀도  $\rho$ 로 균일하게 대전된다면 전위를 다음과 같이 표면 전하밀도  $\rho$ 의 함수로 표현할 수 있다.

$$V = \frac{4\pi R^2 \rho}{4\pi R} = \rho R$$

따라서 두 금속구의 전위 비가  $400 : 600 = 2 : 3 = \rho_1 R_1 : \rho_2 R_2$ 이고  $\rho_1 : \rho_2 = 2^2 : 3^2$ 으로  $R_1 : R_2 = \frac{1}{2} : \frac{1}{3} = 3 : 2$ 이다.

## 2.5 구도체 충전 (2024 경북대 편입학 문제 1번)

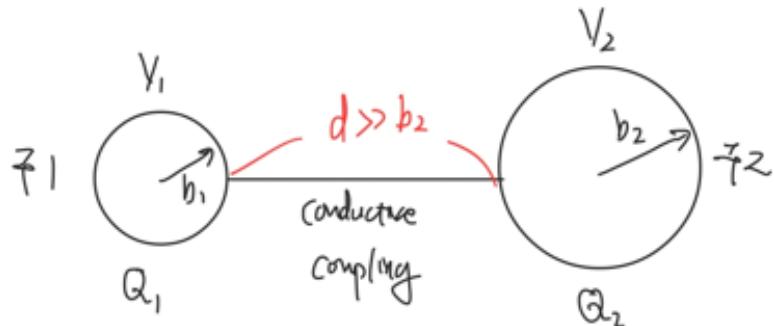
도선으로 연결된 반경  $b_1$ 과  $b_2$  ( $b_2 > b_1$ )인 두 구 도체를 생각하자. 도체 사이의 간격은  $b_2$ 보다 상대적으로 매우 크다고 간주하고 구 도체의 전하는 균일하게 분포되었다고 가정한다. 총 전하  $Q$  가 구에 분포되어 있다. 다음을 구하라.

- a) 두 구에서 전하
- b) 구표면에서의 전계강도

Solution.

Solution.

$$V(\infty) = 0$$



$$Y_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1}{b_1} \quad Y_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_2}{b_2}$$

$$\textcircled{1} \quad Y_1 = Y_2 \rightarrow \frac{Q_1}{b_1} = \frac{Q_2}{b_2} \quad \therefore \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{b_2}{b_1}$$

$$\textcircled{2} \quad Q = Q_1 + Q_2 \quad \therefore Q_1 = \frac{b_1}{b_1+b_2} Q, \quad Q_2 = \frac{b_2}{b_1+b_2} Q \rightarrow (\alpha)$$

구조면 1의 전류  $\approx$  구 1에 의한 전기장 ( $\because$  구 2에 의한 전기장 무기)

$$|\vec{E}_1| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{Q_1}{b_1^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{b_1(b_1+b_2)}$$

$$\text{Similarly, } |\vec{E}_2| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_2}{b_2^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{b_2(b_1+b_2)}$$

## 2.6 정전계에너지 (2021 부산대 편입학 문제 4번)

전위  $V = x + y$  일 때,  $0 \leq x \leq 1$ ,  $0 \leq y \leq 1$ ,  $0 \leq z \leq 1$ 의 자유공간의 전계에 저장되는 에너지를 구하시오.

**Solution:** 주어진 전위로부터 전기장을 구하면

$$\vec{E}(x, y, z) = -\nabla V = -\frac{\partial V}{\partial x}\hat{x} - \frac{\partial V}{\partial y}\hat{y} - \frac{\partial V}{\partial z}\hat{z} = -\hat{x} - \hat{y}$$

따라서 자유공간의 정전기적 에너지밀도는

$$u_E = \frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}(x, y, z)|^2 = \frac{\epsilon_0}{2} [(-1)^2 + (-1)^2] = \epsilon_0$$

최종적으로 변의 길이가 1짜리인 정육면체 공간에 저장된 에너지는

$$U_E = u_E \cdot V = \epsilon_0 \cdot (1)^3 = \epsilon_0$$

## 2.7 정전용량 (2020 부산대 편입학 문제 4번)

내압이  $1 \text{ kV}$ 이고 용량이 각각  $0.01 \mu\text{F}$ ,  $0.02 \mu\text{F}$ ,  $0.04 \mu\text{F}$ 인 콘덴서를 직렬로 연결했을 때 전체 콘덴서의 내압은 몇 V인가?

**Remark.** 콘덴서(또는 축전기)의 **내압(voltage rating)** : 축전기가 견딜 수 있는 최대 전압 (dielectric strength). 문제에서 ”내압이  $1 \text{ kV}$ ”라고 했으니, 이 축전기들은  $1 \text{ kV}$  이상 걸리면 절연 파괴가 일어나서 축전기 내부의 유전체가 손상될 수 있다는 뜻이다. 따라서 실제로 회로에서 사용할 때는 보통 정격 내압보다 낮은 전압에서 안전 여유를 두고 사용한다.

**Solution.**

각 축전기(콘덴서)의 내압과 용량을 곱하면 최대로 충전가능한 전하량을 구할 수 있다.

$$Q_1 = C_1 V \leq (0.01 \mu F)(1kV) = 10 \mu C$$

$$Q_2 = C_2 V \leq (0.02 \mu F)(1kV) = 20 \mu C$$

$$Q_3 = C_3 V \leq (0.04 \mu F)(1kV) = 40 \mu C$$

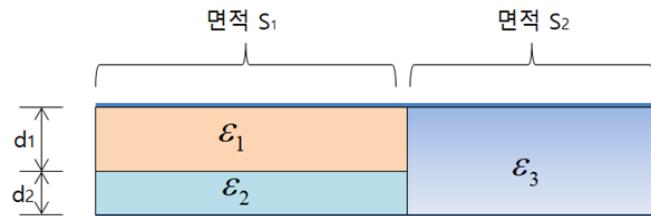
축전기를 직렬 연결한다면 각 축전기에 충전되는 전하량은 모두 동일하다. 따라서 각 축전기에 최대로 충전할 수 있는 전하량은 위에서 구한 최대 전하량 중 최솟값인  $Q_1 = 10\mu C$ 가 되어야 한다. 이보다 큰 전하량이 충전된다면 용량이  $0.01 \mu F$ 인 충전기의 내압이  $1kV$ 보다 커져 내부 유전체가 손상되기 때문이다.

직렬로 연결된 축전기의 전압  $V_{tot}$ 은 각 축전기의 전압을 더한 것이고, 전체 축전기의 내압은 각각의 축전기에  $Q_1$ 의 전하량이 충전된 경우이다. 따라서

$$V_{tot} = \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) Q \leq \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) Q_1 = 1.75 kV$$

## 2.8 정전용량 (2020 경북대 편입학 문제 2번)

아래와 같이 도체판 사이에 3가지의 다른 유전체가 채워져 있다. 전체 정전용량을 구하시오.



**Solution.**

유전체의 종류에 따라 정전용량이 서로 다른 세 축전기로 볼 수 있다.

$$C_1 = \frac{\varepsilon_1 S_1}{d_1}, \quad C_2 = \frac{\varepsilon_2 S_1}{d_2}, \quad C_3 = \frac{\varepsilon_3 S_2}{d_1 + d_2}$$

문제에 주어진 상황은 직렬로 연결된 용량이  $C_1, C_2$ 인 축전기들과 용량이  $C_3$ 인 축전기가 병렬로 연결된 상황이다. 따라서 전체 정전용량은

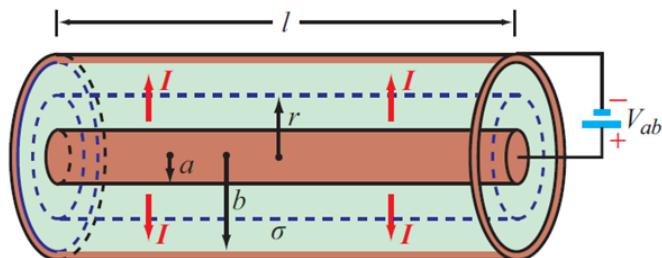
$$C_{tot} = (C_1 \parallel C_2) + C_3 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_3$$

각 정전용량의 표현식을 위 식에 대입하면

$$\therefore C_{tot} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 S_1}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} + \frac{\varepsilon_3 S_2}{d_1 + d_2}.$$

## 2.9 동축케이블 (2022 경북대 편입학 문제 1번)

다음과 같은 내부와 외부 도체의 반경이 각각  $a$ 와  $b$ 인 동축케이블이 있다. 절연체의 도전율은  $\sigma$ 이다. 내외부 도체 사이에 있는 절연층의 단위길이당 컨덕턴스  $G$ 구하시오.



**풀이**

**Background.** Ulaby Example 4.12 1. 전계 도출

가우스 법칙에 의해

$$\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = Q_{\text{enc}} \Rightarrow D(s) = \frac{Q}{2\pi s}.$$

따라서

$$\mathbf{E}(s) = \frac{Q}{2\pi\epsilon_s} \frac{1}{s} \hat{s} \quad (a \leq s \leq b).$$

**2. 전위차**

$$V_{ab} = - \int_b^a \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{b}{a}\right).$$

**3. 전류 계산**

옴의 법칙

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

이므로, 전류는

$$I = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = |\mathbf{J}| \cdot \int dS = \sigma |\mathbf{E}(s)| (2\pi s).$$

위의 전기장 표현을 대입하면

$$I = 2\pi s \cdot \sigma \cdot \frac{Q}{2\pi\epsilon s} = \frac{\sigma Q}{\epsilon}.$$

**4. 컨덕턴스**

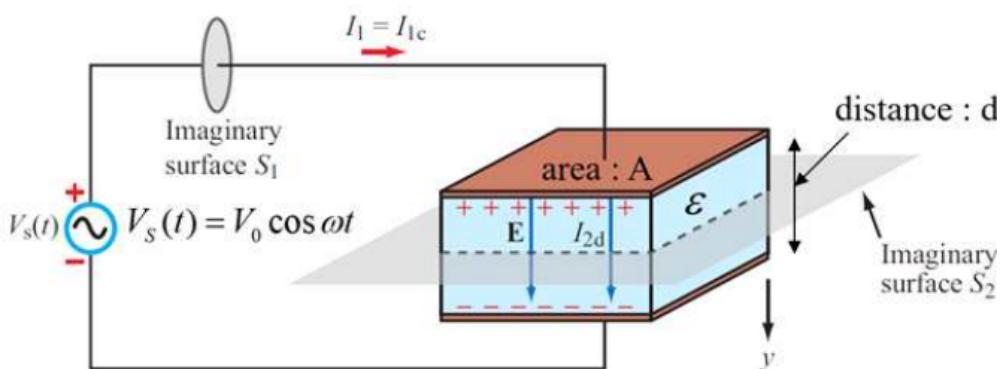
$$G = \frac{I}{V_{ab}} = \frac{\frac{\sigma Q}{\epsilon}}{\frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln(b/a)} = \frac{2\pi\sigma}{\ln(b/a)}.$$

$$G = \frac{2\pi\sigma}{\ln(b/a)}$$

## 2.10 변위전류 (2021 경북대 편입학 문제 2번)

그림과 같은 평행판 커패시터가 회로로 연결되어 있을 때 아래 물음에 답하시오. 여기서 도선은 완전도체, 커패시터의 유전체는 완전유전체로 가정을 한다.

- (1) 주어진 시스템에 대하여 등가 전기회로를 그림으로 그리고 집중정수회로 소자를 기호로 표시하시오.
- (2) 문제 (1)에서 구한 등가회로 개념을 이용하여 단면  $S_1$ 에 흐르는 전도전류  $I_{1c}$ 와 변위전류  $I_{1d}$ 의 표현식을 구하시오.
- (3) 주어진 변수를 이용하여 단면  $S_2$ 에 흐르는 전도전류  $I_{2c}$ 와 변위전류  $I_{2d}$ 의 표현식을 구하시오.
- (4) 도선에 흐르는 전체 전류 표현식을 구하시오.



### Solution. Background (Ulaby Chap 6.7)

Ampère's law in differential form is given by

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (6.41)$$

Integrating both sides of Eq. (6.41) over an arbitrary open surface  $S$  with contour  $C$ , we have

$$\int_S (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{s} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} + \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (6.42)$$

The surface integral of  $\mathbf{J}$  equals the conduction current  $I_c$  flowing through  $S$ , and the surface integral of  $\nabla \times \mathbf{H}$  can be converted into a line integral of  $\mathbf{H}$  over the contour  $C$  bounding  $S$  by invoking Stokes's theorem. Hence,

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_c + \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (6.43)$$

The second term on the right-hand side of Eq. (6.43) has the same unit (amperes) as the current  $I_c$ , and because it is proportional to the time derivative of the electric flux density  $\mathbf{D}$  (electric displacement), it is called the *displacement current*  $I_d$ . That is,

$$I_d = \int_S \mathbf{J}_d \cdot d\mathbf{s} = \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (6.44)$$

where  $\mathbf{J}_d = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  represents a *displacement current density*. In view of Eq. (6.44),

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_c + I_d = I \quad (6.45)$$

where  $I$  is the total current. In electrostatics,  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0$ , and therefore  $I_d = 0$  and  $I = I_c$ .

**Given:** Wires are perfect conductors and capacitor insulator material is a perfect dielectric.

$$V_s(t) = V_0 \cos(\omega t)$$

**For Surface  $S_1$ :**

$$I_1 = I_{1c} + I_{1d}$$

$$I_{1c} = C \frac{dV_c}{dt} = C \frac{d}{dt} (V_0 \cos(\omega t)) = -CV_0\omega \sin(\omega t)$$

$$I_{1d} = 0 \quad (D = 0 \text{ in perfect conductor})$$

**For Surface  $S_2$ :**

$$I_2 = I_{2c} + I_{2d}$$

$$I_{2c} = 0 \quad (\text{perfect dielectric})$$

$$\mathbf{E} = \hat{\mathbf{y}} \frac{V_c}{d} = \hat{\mathbf{y}} \frac{V_0}{d} \cos(\omega t)$$

$$I_{2d} = \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$$

$$= \int_A \frac{\partial}{\partial t} \left( \hat{\mathbf{y}} \frac{\varepsilon V_0}{d} \cos(\omega t) \right) \cdot (\hat{\mathbf{y}} ds)$$

$$= -\frac{\varepsilon A}{d} V_0 \omega \sin(\omega t) = -CV_0\omega \sin(\omega t)$$

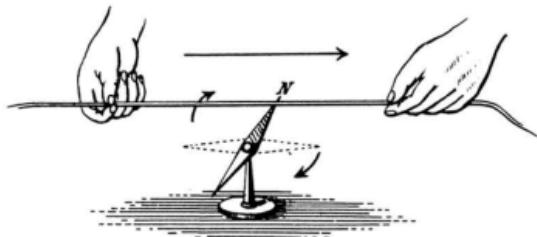
$$\therefore I_1 = I_2$$

# Chapter 3

## 정자기학

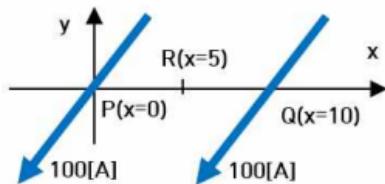
### 3.1 암페어 법칙 (2025 부산대 편입학 문제 1번)

문제 1(15점)



1820년 Hans C. Oersted는 위 그림과 같은 실험으로 전류가 자기장을 생성하는 것을 발견하였고, 이 현상은 Ampere에 의하여 편미분 방정식으로 표기되었다.

아래 그림과 같은 크기의 무한직선전류에 의한 자계의 세기와 자기력을 다음 순서로 계산하시오.



- (1) Maxwell 방정식 중 직류전류에 의한 자계를 나타내는 Ampere의 법칙을 쓰시오.
- (2) P선상의 전류에 의한 Q지점의 자계의 세기 H(Magnetic Field Intensity) Vector와 단위
- (3) Q선상의 전류에 의한 P지점의 자계의 세기 H(Magnetic Field Intensity) Vector와 단위
- (4) P와 Q의 중점인 R지점에서의 자계의 세기 H(Magnetic Field Intensity) Vector와 단위
- (5) P선상의 전류가 받는 단위길이당 자기력 F(Magnetic Force)의 크기와 방향 및 단위
- (6) Q선상의 전류가 받는 단위길이당 자기력 F(Magnetic Force)의 크기와 방향 및 단위

**Solution**

- (1) Ampere 법칙의 미분형 :  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ , Ampere 법칙의 적분형 :  $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{enc}}$   
 (2)  $P$ 선 상의 전류가 만든  $H$  vector는  $x = 10$ 의 도선  $Q$ 에 작용하며 방향은  $+\hat{y}$ 이고, 세기는 Ampere의 법칙에 의해

$$2\pi(10) \times |\mathbf{H}_Q| = 100 \text{ A}$$

$$\therefore \mathbf{H}_Q = \frac{5}{\pi} \hat{y} \text{ [A/m]}$$

- (3)  $Q$ 선 상의 전류가 만든  $H$  vector는  $x = 0$ 의 도선  $P$ 에 작용하며 방향은  $-\hat{y}$ 이고, 세기는 (2)번에서 구한 값과 같다.

$$\therefore \mathbf{H}_P = -\frac{5}{\pi} \hat{y} \text{ [A/m]}$$

- (4)  $R(x = 5)$ 에서는 도선  $P$ 와 도선  $Q$ 가 만드는 자기장의 방향이 서로 반대이고 세기가 같으므로  $\mathbf{H}_R = \vec{0}$  (5)  $P$  선상의 전류가 받는 자기력은

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_P &= I \int d\vec{l} \times \vec{B} = (100 \text{ A}) \int (dl\hat{z}) \times (\mu_0 \mathbf{H}_P) \\ &= (100\mu_0) \int dl \left( \hat{z} \times \left( -\frac{5}{\pi} \hat{y} \right) \right) = \frac{500\mu_0}{\pi} \hat{x} \times \int dl = \frac{500\mu_0 l}{\pi} \hat{x} \end{aligned}$$

따라서 단위 길이당 자기력은

$$\frac{\mathbf{F}_P}{l} = \frac{500\mu_0}{\pi} \hat{x}$$

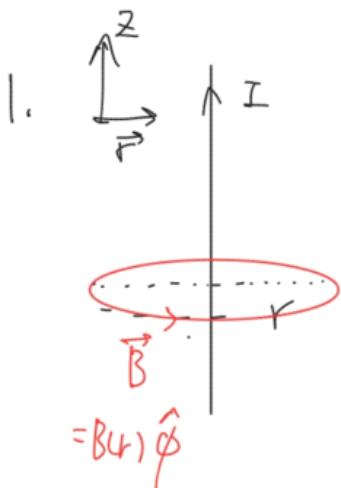
- (6) (5)에서 구한 자기력의 반작용이므로 크기는 같고 방향이 반대이다. 따라서

$$\frac{\mathbf{F}_Q}{l} = -\frac{500\mu_0}{\pi} \hat{x}$$

### 3.2 암페어 법칙 (2024 부산대 편입학 문제 1번)

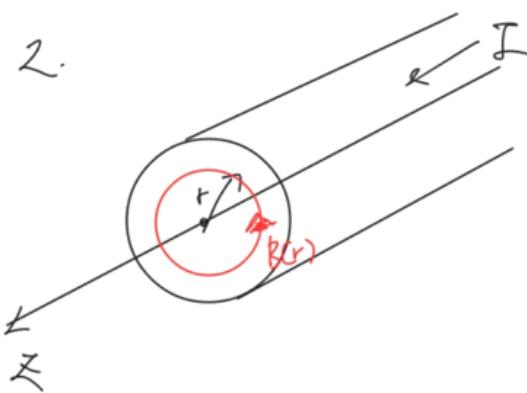
1. 무한 길이의 직선형 도체에 전류  $I$  [A]가 흐르고 있을 때 이 도선으로부터  $r$  [m] 떨어진 점에서의 자기장을 구하시오.
2. 반경  $a$  [m]인 무한 길이 원통형 도체에 전류  $I$  [A]가 균일하게 흐르고 있을 때, 이 도체 내에서의 자기장을 구하시오.

Solution.



$$2\pi r \cdot B(r) = \mu_0 I$$

$$\therefore \vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r} \hat{\phi}$$



surface current density.

$$J = \frac{I}{\pi a^2}$$

$$\therefore 2\pi r \cdot B(r) = \mu_0 \cdot J \cdot (\pi r^2)$$

$$\therefore B(r) = \frac{\mu_0 r}{2} J \hat{\phi}$$

$$= \frac{\mu_0 I}{2\pi a^2} \cdot r \cdot \hat{\phi}$$

### 3.3 원통도선의 자기인덕턴스 (2022 부산대 편입학 문제 2번)

반경이  $a$  [m]인 무한 길이 도체에 전류  $I$ 가 단면에 균일하게 분포되어 흐를 때 단위길이당 내부 인덕턴스  $L$ 를 구하시오.

## 문제 2. 원통 도체의 내부 인덕턴스(단위길이)

반지름  $a$ 인 긴 원통 도체에 전류  $I$ 가 단면에 균일하게 분포하여 흐를 때(저주파 영역), 단위 길이당 내부 인덕턴스  $L'_{\text{int}}$ 를 구하라.

### 해설 (방법 A: 플럭스 연계—연계비율 강조)

#### 1) 내부 자기장 $B(r)$

앰페어 법칙과 포함 전류  $I_{\text{enc}}(r) = I \frac{r^2}{a^2}$  (균일 분포)로

$$B(r) (2\pi r) = \mu I_{\text{enc}}(r) \Rightarrow B(r) = \frac{\mu I}{2\pi a^2} r \quad (0 \leq r \leq a).$$

#### 2) 연계비율의 의미

플럭스 연계량  $\lambda$ 는 “각 전류소자  $dI$ 가 끼는 플럭스  $\Phi$ 의 합”이다:

$$\lambda = \int \Phi(dI).$$

반지름  $r$ 에서 두께  $dr$ 인 반지름 방향 스트립(길이 1)의 미소 자속은

$$d\Phi' = B(r) dr \quad (\text{단위길이당}).$$

이 자속은 반지름  $r$  이내를 흐르는 전류만과 연계된다. 그 이유는, 반지름  $r$ 의 원형 전류고리로 경계지은 “반경 방향 면”을 생각하면 그 면을 관통하는 자속선은  $r$  이내의 전류가 만드는 자기장 성분만 포함하기 때문이다 (외부 전류가 만드는 자속은 그 면을 관통하지 않음).

따라서 이 자속과 실제로 연계되는 전류의 비율이 곧

$$\boxed{\frac{I_{\text{enc}}(r)}{I} = \frac{r^2}{a^2}} \quad (\text{연계비율}).$$

#### 3) 미소 연계량과 적분

단위길이당 미소 플럭스 연계량은

$$d\lambda' = \underbrace{\frac{I_{\text{enc}}(r)}{I}}_{\text{연계비율}} \underbrace{d\Phi'}_{\substack{\text{해당 스트립의 자속} \\ \text{연계비율}}} = \frac{r^2}{a^2} B(r) dr = \frac{r^2}{a^2} \left( \frac{\mu I}{2\pi a^2} r \right) dr = \frac{\mu I}{2\pi a^4} r^3 dr.$$

따라서

$$\lambda' = \int_0^a \frac{\mu I}{2\pi a^4} r^3 dr = \frac{\mu I}{2\pi a^4} \cdot \frac{a^4}{4} = \frac{\mu I}{8\pi}.$$

#### 4) 내부 인덕턴스

$$L'_{\text{int}} = \frac{\lambda'}{I} = \boxed{\frac{\mu}{8\pi}} \quad (\text{H/m}).$$

주석: 연계비율을 빠뜨리면  $L' = \mu/(4\pi)$ 로 두 배 오답이 된다. 이는 각 스트립의 자속이 전체 전류가 아니라  $r$  이내의 전류만과 연계됨을 반영하지 못했기 때문이다.

#### 해설 (방법 B: 에너지 밀도법—검산)

자기 에너지 밀도  $u = B^2/(2\mu)$ , 단위길이당 에너지

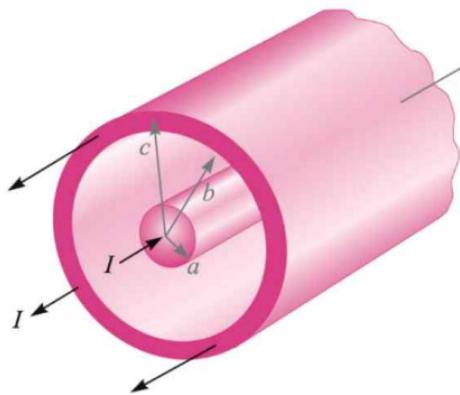
$$W' = \int_0^a u 2\pi r dr = \int_0^a \frac{B^2}{2\mu} 2\pi r dr = \int_0^a \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\mu I}{2\pi a^2} r \right)^2 2\pi r dr = \frac{\mu I^2}{16\pi}.$$

$\frac{1}{2} L'_{\text{int}} I^2 = W'$ 이므로

$$L'_{\text{int}} = \frac{2W'}{I^2} = \boxed{\frac{\mu}{8\pi}}$$

로 방법 A와 일치한다. □

### 3.4 동축 케이블 (2025 경북대 편입학 문제 2번)



옆의 그림은 원통형구조의 두께가 있는 내부도체와 외부도체로 구성된 동축선로를 나타낸다. 여기서  $a, b, c$ 는 원점을 중심으로 하는 반경을 나타내며  $I$ 는 전류, 화살표는 전류의 방향을 나타낸다.

이때  $0 \leq r < \infty$ 인 영역에 대해 자기장의 세기  $\vec{H}$ 를 구하고,  $r - |\vec{H}|$ 의 그래프를 그리시오.(여기서  $r$ 은 원점을 중심으로 하는 임의의 반경이며, 도체에서 전류는 균일하게 흐름)

**Solution** 내부 도체(반지름  $a$ )에는 전류  $+I$ 가, 외부 도체(두께  $b \rightarrow c$ )에는 전류  $-I$ 가 단면에 균일하게 분포하여 흐른다. 축대칭이므로

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\ell = (2\pi r) H_\phi(r) = I_{\text{enc}}(r), \quad d\ell = (2\pi r) \hat{\phi}. \Rightarrow \therefore \mathbf{H} = H_\phi(r) \hat{\phi} = \frac{I_{\text{enc}}(r)}{2\pi r} \hat{\phi}$$

(i)  $0 \leq r < a$  내부 도체의 체적 전류밀도는  $J_{\text{in}} = I/(\pi a^2)$ . 따라서  $I_{\text{enc}}(r) = J_{\text{in}}\pi r^2 = I \frac{r^2}{a^2}$ . 그러면

$$H_\phi(r) = \frac{I_{\text{enc}}}{2\pi r} = \boxed{\frac{I}{2\pi} \frac{r}{a^2}}, \quad (0 \leq r < a).$$

(ii)  $a \leq r < b$  외부 도체는 포함되지 않고 내부 전체 전류만 포함되므로  $I_{\text{enc}}(r) = I$ .

$$H_\phi(r) = \boxed{\frac{I}{2\pi r}}, \quad (a \leq r < b).$$

(iii)  $b \leq r < c$  외부 도체의 전류밀도는  $J_{\text{out}} = -\frac{I}{\pi(c^2 - b^2)}$ . 반지름  $r$ 까지 포함되는 외부 도체의 전류는

$$I_{\text{out,enc}}(r) = J_{\text{out}} \pi(r^2 - b^2) = -I \frac{r^2 - b^2}{c^2 - b^2}.$$

따라서

$$I_{\text{enc}}(r) = I + I_{\text{out,enc}}(r) = I \left[ 1 - \frac{r^2 - b^2}{c^2 - b^2} \right] = I \frac{c^2 - r^2}{c^2 - b^2}.$$

암페어 법칙으로

$$H_\phi(r) = \frac{I_{\text{enc}}}{2\pi r} = \boxed{\frac{I}{2\pi r} \frac{c^2 - r^2}{c^2 - b^2} = \frac{I}{2\pi(c^2 - b^2)} \left( \frac{c^2}{r} - r \right)}, \quad (b \leq r < c).$$

(iv)  $r \geq c$  전류  $+I$ 와  $-I$ 가 모두 포함되어  $I_{\text{enc}} = 0$ . 따라서

$$\boxed{H_\phi(r) = 0}, \quad (r \geq c).$$

**연속성 검증**  $r = a$ 에서  $H(a^-) = \frac{I}{2\pi a} = H(a^+)$ ,  $r = b$ 에서  $H(b^-) = \frac{I}{2\pi b} = H(b^+)$ , 그리고  $r = c$ 에서  $H \rightarrow 0$ . 모든 경계에서 연속이다.

**그래프 모양**  $0 \rightarrow a$ : 선형 증가,  $a \rightarrow b$ :  $1/r$  감소,  $b \rightarrow c$ :  $\frac{c^2}{r} - r$  형태로 0까지 하강,  $r \geq c$ : 0 유지.

### 3.5 경계조건 (2023 경북대 편입학 문제 2번)

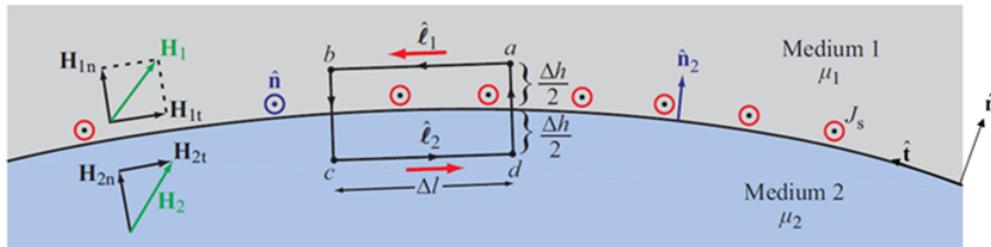
다음은 정자기장에 대한 물음이다. 해당 물음에 답하시오.

- 1) 정자기장에 대한 미분형 맥스웰 방정식은 다음과 같다. 이 미분방정식의 의미를 설명하고, 적분형을 도출하시오.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J}$$

- 2) 경계면상에서는 왜 자기장에 대한 특별한 경계조건이 필요 한지 설명하시오.

- 3) 다음 그림을 이용하여 경계면상에서 정자기장에 대한 경계 조건을 도출하시오.



**Solution.** We now derive a similar set of boundary conditions for the magnetic flux and field  $\mathbf{B}$  and  $\mathbf{H}$ . By applying Gauss's law to a pillbox that straddles the boundary, we determined that the difference between the normal components of the electric flux densities in two media equals the surface charge density  $\rho_s$ . That is,

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = Q \quad \Rightarrow \quad D_{1n} - D_{2n} = \rho_s.$$

By analogy, the application of Gauss's law for magnetism, as expressed by Eq. (5.44), leads to the conclusion that

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad \Rightarrow \quad B_{1n} = B_{2n}.$$

Thus the normal component of  $\mathbf{B}$  is continuous across the boundary between two adjacent media.

Because  $\mathbf{B}_1 = \mu_1 \mathbf{H}_1$  and  $\mathbf{B}_2 = \mu_2 \mathbf{H}_2$  for linear, isotropic media, the boundary condition

for  $\mathbf{H}$  corresponding to Eq. (5.79) is

$$\mu_1 H_{1n} = \mu_2 H_{2n}.$$

Comparison of Eqs. (5.78) and (5.79) reveals a striking difference between the behavior of the magnetic and electric fluxes across a boundary: *whereas the normal component of  $\mathbf{B}$  is continuous across the boundary, the normal component of  $\mathbf{D}$  is not (unless  $\rho_s = 0$ )*.

The reverse applies to the tangential components of the electric and magnetic fields  $\mathbf{E}$  and  $\mathbf{H}$ : *whereas the tangential component of  $\mathbf{E}$  is continuous across the boundary, the tangential component of  $\mathbf{H}$  is not (unless the surface current density  $J_s = 0$ )*.

To obtain the boundary condition for the tangential component of  $\mathbf{H}$ , with reference to figure, we apply Ampère's law to a closed rectangular path with sides of lengths  $\Delta l$  and  $\Delta h$ , and then let  $\Delta h \rightarrow 0$ , to obtain

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b \mathbf{H}_1 \cdot \hat{\ell}_1 d\ell + \int_c^d \mathbf{H}_2 \cdot \hat{\ell}_2 d\ell = I.$$

Here  $I$  is the net current crossing the surface of the loop in the direction specified by the right-hand rule ( $I$  is in the direction of the thumb when the fingers of the right hand extend in the direction of the loop  $C$ ). As we let  $\Delta h$  of the loop approach zero, the surface of the loop approaches a thin line of length  $\Delta l$ . The total current flowing through this thin line is  $I = J_s \Delta l$ , where  $J_s$  is the magnitude of the component of the surface current density  $\mathbf{J}_s$  normal to the loop. That is,

$$J_s = \mathbf{J}_s \cdot \hat{n},$$

where  $\hat{n}$  is the normal to the loop. In view of these considerations, Eq. (5.81) becomes

$$(\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) \cdot \hat{\ell}_1 \Delta l = J_s \Delta l.$$

The vector  $\hat{\ell}_1$  can be expressed as  $\hat{\ell}_1 = \hat{n} \times \hat{n}_2$ , where  $\hat{n}$  and  $\hat{n}_2$  are the normals to the loop and to the surface of medium 2, respectively. Applying the vector identity to the above

relation

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = \mathbf{B} \cdot (\mathbf{C} \times \mathbf{A}),$$

leads to

$$\hat{n} \cdot [\hat{n}_2 \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2)] = J_s \cdot \hat{n}.$$

Since Eq. (5.83) is valid for any  $\hat{n}$ , it follows that

$$\hat{n}_2 \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{J}_s.$$

This equation implies that the tangential components of  $\mathbf{H}$  parallel to  $\mathbf{J}_s$  are continuous across the interface, whereas those orthogonal to  $\mathbf{J}_s$  are discontinuous in the amount of  $\mathbf{J}_s$ .

At the interface between media with finite conductivities,  $\mathbf{J}_s = 0$ .

Hence, the tangential components of  $\mathbf{H}$  are continuous:

$$H_{1t} = H_{2t}.$$



# Chapter 4

## 전자기유도

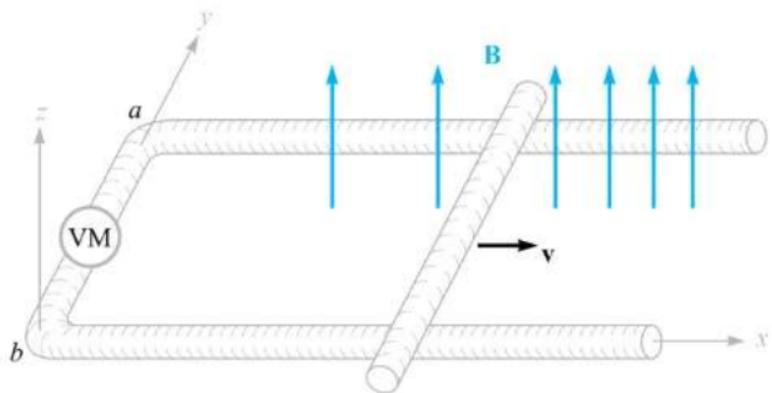
## 4.1 유도기전력 (2024 경북대 편입학 문제 2번)

권선수 N인 원형 도체 루프가  $xy$  평면상에 놓여 있고 그 중심은  $B = a_x B_0 \cos(\pi r/2b) \sin \omega t$ 인 자계 원점에 놓여 있다. 여기서  $b$ 는 루프의 반경이고  $\omega$ 는 각주파수이다. 루프에 유도된 기전력을 구하라.

Solution.

## 4.2 유도기전력 (2022 부산대 편입학 문제 1번)

**문제 1** 미끄러지는 막대의 위치가  $x = 5t + 2t^3[\text{m}]$ 으로 표시되고 두 레일의 간격  $a = 0.2 \text{ m}$ 이다. 가해지는 자속은  $\mathbf{B} = x^2 \mathbf{a}_z [\text{T}]$ 이다.  $t = 1 \text{ s}$ 인 경우에 전압계의 값을 구하여라.



Solution.

### 4.3 유도기전력 (2020 부산대 편입학 문제 3번)

자속 밀도가  $10 \text{ [Wb/m}^2]$ 인 자계 내에 길이  $4 \text{ [cm]}$ 의 도체를 자계와 직각으로 놓고, 이 도체를  $0.4\text{초}$  동안  $1 \text{ [m]}$ 씩 균일하게 이동하였을 때 발생하는 기전력은 몇 V인가?