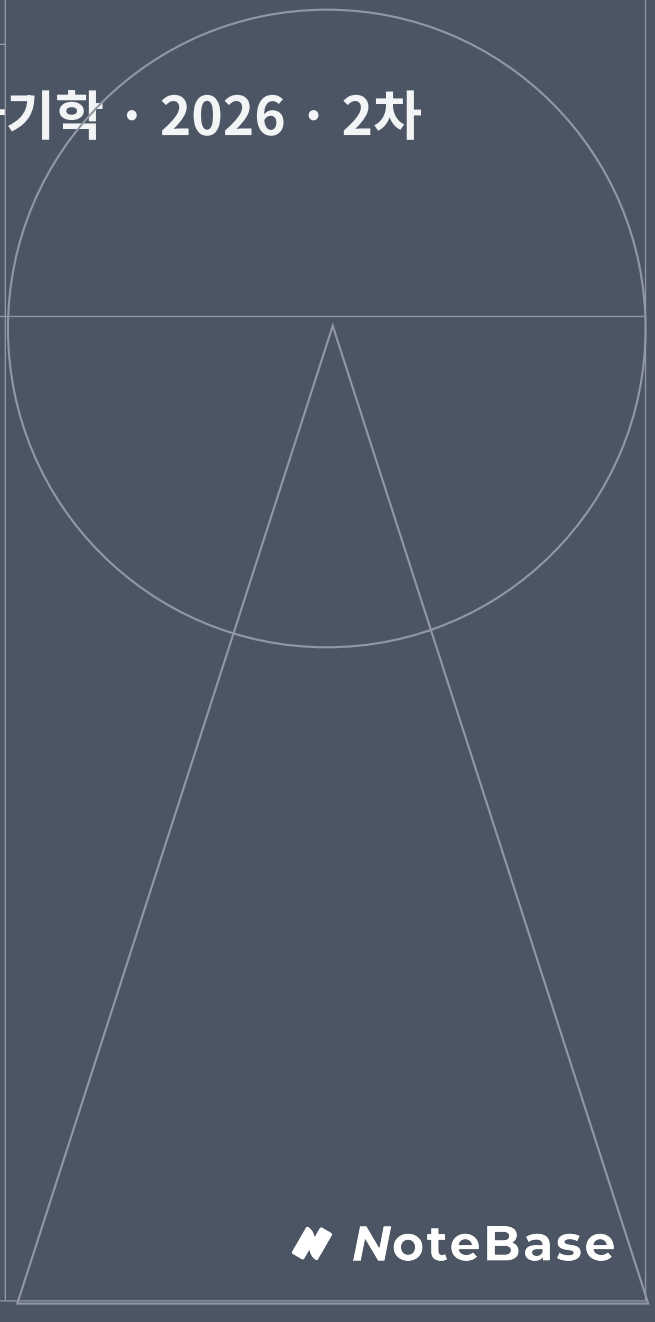
기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 전기자기학 · 2026 · 2차



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 전기자기학 · 2026 · 2차

공무원/국가직/7급 · 전기자기학 · 2026 · 2차

문 1. 유전율 ε_0인 공간의 전위가 $V = 3x^2 + 2y^2 + z^2$ [V]이다. 전하밀도 ρ_v [C/m^3]는?

① $-4\varepsilon_0$

② $-8\varepsilon_0$

③ $-12\varepsilon_0$

④ $-16\varepsilon_0$

정답 3번

간단한 해설

전하밀도는 전위의 **각 좌표에 대한 2차 편미분의 합**에 $-\varepsilon_0$를 곱해 구한다. 이 합이 $6 + 4 + 2 = 12$이므로 전하밀도는 $-12\varepsilon_0$ C/m^{3}이다.

계산 과정

전위와 전하밀도의 관계: 전계는 $\mathbf{E} = -\nabla V$이고, 가우스 법칙은 $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$이다. 주어진 공간의 유전율이 일정하므로 $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}$를 대입하면 **푸아송 방정식** $\rho_v = -\varepsilon_0 \nabla^2 V$를 얻는다. 여기서 $\nabla^2 V$는 전위를 x, y, z 각각에 대해 두 번 편미분한 값을 더한 것이다.

2차 편미분 계산: $V = 3x^2 + 2y^2 + z^2$에서 x에 대해 미분할 때 y와 z는 상수로 취급한다. 따라서 $\frac{\partial V}{\partial x} = 6x$, $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = 6$이다. 같은 방법으로 $\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 4$, $\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 2$이므로 $\nabla^2 V = 6 + 4 + 2 = 12$이다. 이 값은 전위의 세 방향 곡률을 합한 값이며 위치에 관계없이 일정하다.

전하밀도 계산: $\rho_v = -\varepsilon_0 \cdot 12 = -12\varepsilon_0$ C/m^{3}이다. 전위에서 전계로 바꿀 때의 **음의 부호**가 전하밀도에도 반영되므로 양수가 되지 않는다. 이 값은 ③의 $-12\varepsilon_0$와 일치한다.

NoteBase

문 2. 자유공간에 정지된 점전하 $Q = 10$ [nC]에 작용하는 힘이 $\vec{F} = 2\vec{a}_x + 4\vec{a}_y - 4\vec{a}_z$ [mN]이다. Q의 위치에서 전계의 크기 [V/m]는?

① 4×10^5

② 5×10^5

③ 6×10^5

④ 7×10^5

정답 3번

간단한 해설

전계의 크기는 **힘의 크기를 전하량의 절댓값으로 나눈 값**이다. 힘의 직교 성분으로 구한 크기는 6 mN이므로, 이를 10 nC로 나누면 6×10^5 V/m이다.

계산 과정

전계와 힘의 관계: 전계는 단위 양전하가 받는 전기력이다. 정지한 전하에 작용하는 전기력은 $\vec{F} = Q\vec{E}$이므로, 구하려는 전계의 크기는 $|\vec{E}| = \frac{|\vec{F}|}{|Q|}$이다.

힘의 크기: $\vec{a}_x$, $\vec{a}_y$, $\vec{a}_z$는 서로 직교하는 단위벡터이다. 따라서 성분을 그대로 더하지 않고 **각 성분의 제곱합에 제곱근을 취한다**. $|\vec{F}| = \sqrt{2^2 + 4^2 + (-4)^2} = 6$ mN이다. z방향 성분의 음수 부호는 방향을 나타내며, 크기를 구할 때는 제곱되어 양수가 된다.

단위 환산과 계산: **힘은 N, 전하량은 C로 환산**한다. $|\vec{F}| = 6 \times 10^{-3}$ N이고, $Q = 10 \times 10^{-9} = 10^{-8}$ C이다. 이를 대입하면 $|\vec{E}| = \frac{6 \times 10^{-3}}{10^{-8}} = 6 \times 10^5$ N/C이다. 전계의 단위 N/C는 V/m와 같다.

따라서 전계의 크기는 6×10^5 V/m이며, ③의 값과 일치한다.

NoteBase

문 3. 전계가 $\vec{E} = 4x\overrightarrow{a_x} + 3y^2\overrightarrow{a_y} + 2z\overrightarrow{a_z}$ [V/m]인 공간에서 점 $P_1(2, -2, 1)$과 점 $P_2(4, 2, -2)$ 사이의 전위차 V_{12} [V]는? (단, 길이의 단위는 [m]이다)

① 86

② 43

③ −43

④ −86

정답 2번

간단한 해설

전위차 $V_{12} = V(P_1) - V(P_2)$는 전계를 **첫 점에서 둘째 점까지 선적분한 값**이다. 각 좌표 성분의 기여를 더하면 24 + 16 + 3 = 43 V이다.

계산 과정

전계와 전위의 관계는 $\vec{E} = -\nabla V$이다. 따라서 두 점의 전위차는 $V_{12} = V(P_1) - V(P_2)$로 두고, $V_{12} = \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \cdot d\vec{l}$로 계산한다. **둘째 점의 전위에서 첫째 점의 전위를 빼는 경우에는 부호가 반대**이다. 주어진 전계는 각 성분이 해당 좌표에만 의존하므로, x·y·z축에 평행하게 차례로 이동하는 경로를 택해 각 성분을 따로 적분할 수 있다.

x 성분: x는 2 m에서 4 m로 변한다. 전위차에 대한 기여는 $\int_2^4 4x\,dx = [2x^2]_2^4$이므로 $2 \times (16 - 4) = 24$ V이다.

y 성분: y는 −2 m에서 2 m로 변한다. $\int_{-2}^{2} 3y^2\,dy = [y^3]_{-2}^{2}$이므로 $8 - (-8) = 16$ V이다. **아래끝의 세제곱 값이 −8**이므로 이를 빼면 양수 16 V가 된다.

z 성분: z는 1 m에서 −2 m로 변한다. $\int_1^{-2} 2z\,dz = [z^2]_1^{-2}$이므로 $4 - 1 = 3$ V이다. 적분의 위끝과 아래끝은 좌표의 크기순이 아니라 이동 방향에 따라 정한다.

세 성분을 합하면 $V_{12} = 24 + 16 + 3 = 43$ V이며, 이는 ②의 값과 일치한다. 즉, 첫째 점의 전위가 둘째 점보다 43 V 높다.

NoteBase

문 4. 비투자율 $\mu_r = 400$인 선형 등방성 자성체 내부에서 자계의 크기가 $H = 10$ [A/m]일 때, 자화의 세기 M [A/m]은?

① 400

② 3990

③ 4000

④ 5030

정답 2번

간단한 해설

선형 등방성 자성체에서 자화의 세기는 $M = (\mu_r - 1)H$로 구한다. **비투자율에서 1을 뺀 값**인 399에 자계의 세기 10 A/m를 곱하면 3990 A/m이다.

계산 과정

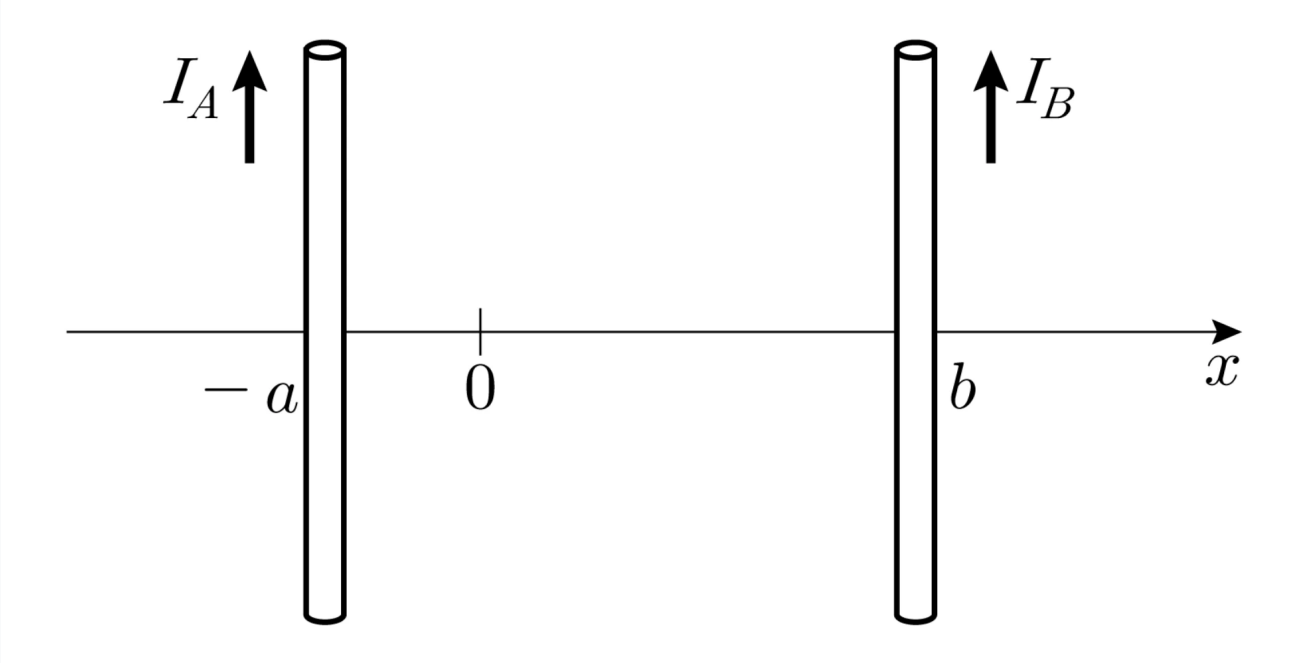
자속밀도 B는 자계 H와 자화 M에 의해 $B = \mu_0(H + M)$으로 나타난다. 여기서 μ_0는 진공의 투자율이다. 선형 등방성 자성체에서는 $B = \mu_0\mu_r H$이므로, 두 식을 비교하면 $H + M = \mu_r H$이다.

따라서 $M = (\mu_r - 1)H$이다. 자계에 대한 자화의 비례계수인 자화율 χ_m은 **비투자율보다 1 작은 값**이므로, $\chi_m = \mu_r - 1 = 400 - 1 = 399$이다. 자화율과 비투자율은 모두 무차원이다.

주어진 자계의 세기 10 A/m를 곱하면 $M = \chi_m H$에 따라 $399 \times 10 = 3990$ A/m이다. 자화율이 무차원이므로 자화의 단위는 자계와 같은 A/m이며, 이 값은 ②의 3990에 해당한다.

NoteBase

문 5. xy평면에서 $+y$방향으로 흐르는 두 무한선전류원 $I_A = 2[A]$와 $I_B = 3[A]$가 원점에서 각각 거리 a와 b만큼 떨어져 있다. 원점에서 자계가 0일 때, $\frac{a}{b}$는?



① $\frac{4}{9}$
② $\frac{2}{3}$
③ $\frac{3}{2}$
④ $\frac{9}{4}$

정답 2번

간단한 해설

무한선전류의 자계 크기는 **전류에 비례하고 거리에 반비례**한다. 원점에서 서로 반대인 두 자계가 상쇄되려면 $\frac{I_A}{a} = \frac{I_B}{b}$여야 하므로, 거리비는 $\frac{a}{b} = \frac{2}{3}$이다.

NoteBase

계산 과정

자계 방향: 그림에서 두 전류는 각각 $x=-a$, $x=b$에 있고 모두 $+y$방향으로 흐른다. 오른손 엄지를 전류 방향으로 두고 나머지 손가락이 감기는 방향을 따르면, 원점에서 A의 자계는 $-z$방향, B의 자계는 $+z$방향이다. 따라서 합성 자계가 0이 되려면 **두 자계의 크기가 같아야 한다**.

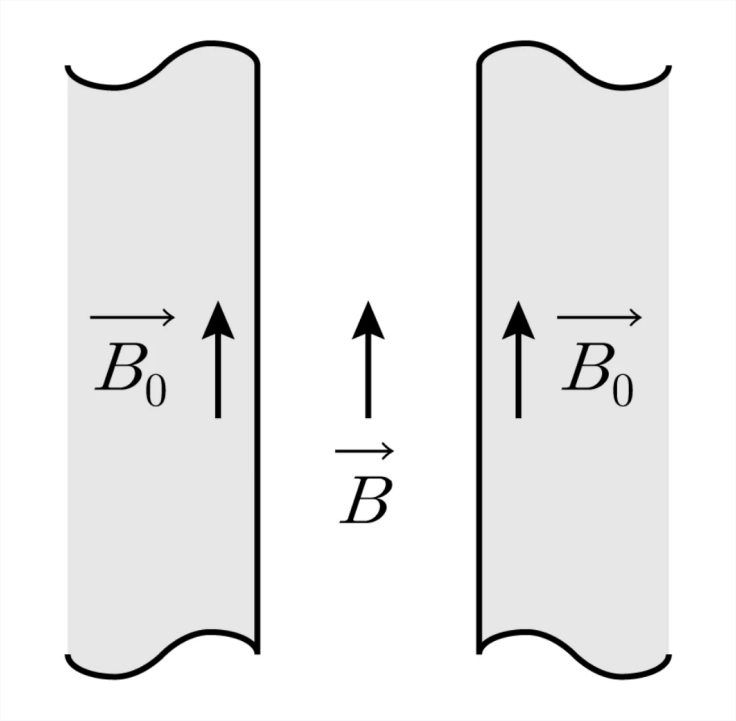
자계 크기: 무한히 긴 직선 전류에서 수직거리 r만큼 떨어진 점의 자계 크기는 $H=\frac{I}{2\pi r}$이다. 이는 전류를 중심으로 반지름 r인 원 위에서 자계 크기가 일정하고, 암페어 법칙에 따라 $H\cdot 2\pi r=I$가 성립하기 때문이다. 전류를 A, 거리를 m로 나타내면 자계의 단위는 A/m이다. 원점까지의 거리는 각각 a, b이므로 $H_A=\frac{2}{2\pi a}$, $H_B=\frac{3}{2\pi b}$이다.

상쇄 조건 적용: $H_A=H_B$를 대입하면 $\frac{2}{2\pi a}=\frac{3}{2\pi b}$이고, 공통인 2π를 소거하면 $\frac{2}{a}=\frac{3}{b}$이다. 즉, 전류가 더 큰 B가 원점에서 더 멀리 있어야 같은 크기의 자계를 만든다.

거리비 계산: 위 식을 정리하면 $2b=3a$이므로 $\frac{a}{b}=\frac{2}{3}$이다. 길이끼리의 비이므로 단위가 없으며, ②의 값과 일치한다.

NoteBase

문 6. 투자율 μ인 두 무한 평행 자성체판 사이에 진공 틈이 있다. 자성체 내부에서의 자속밀도 $\vec{B}_0$가 경계면에 평행할 때, 진공 영역에서 자속밀도 $\vec{B}$의 크기[Wb/m^2]는? (단, 진공의 투자율은 μ_0이고, 자성체 표면에 흐르는 전류는 없다)



① $\mu_0 \mu B_0$

② $\frac{1}{\mu \mu_0} B_0$

③ $\frac{\mu_0}{\mu} B_0$

④ $\frac{\mu}{\mu_0} B_0$

정답 3번

간단한 해설

표면전류가 없으므로 경계면에서 **자계의 세기 H의 접선 성분이 연속**이다. 자속밀도가 경계면에 평행하므로 $B/\mu_0 = B_0/\mu$이며, 진공의 자속밀도는 $B = (\mu_0/\mu)B_0$이다.

NoteBase

계산 과정

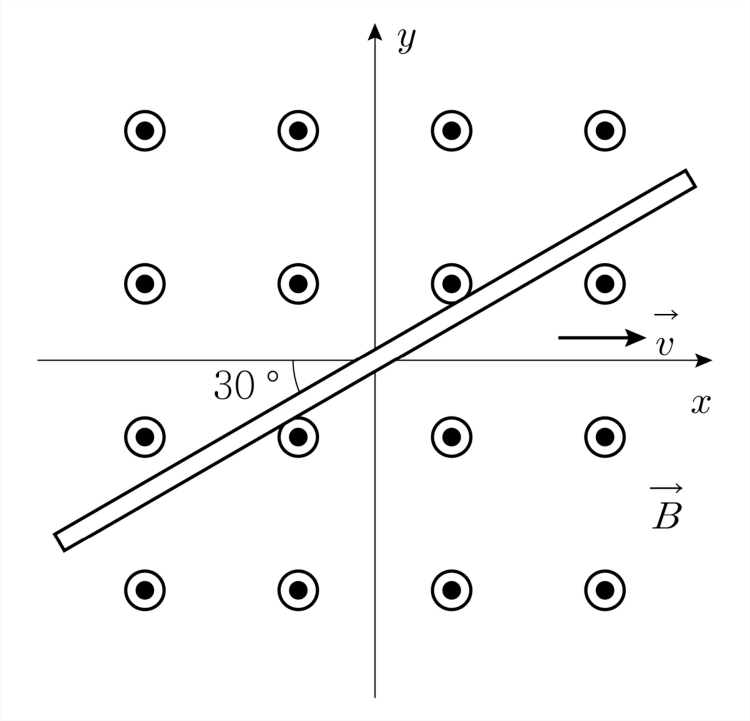
경계조건 적용: 그림에서 자성체 내부와 진공 틈의 자속밀도 화살표는 모두 경계면에 평행하다. 표면전류가 없을 때는 **자계의 세기 H의 접선 성분이 연속**이므로, 자성체 내부의 자계의 크기를 H_{m}, 진공의 자계의 크기를 H_{v}라 하면 $H_{\mathrm{v}} = H_{\mathrm{m}}$이다.

자계의 크기 계산: 자속밀도와 자계의 관계는 $B = \mu H$이다. 따라서 투자율이 μ인 자성체 내부에서는 $H_{\mathrm{m}} = \frac{B_0}{\mu}$이며, 이 값이 진공에서도 유지되는 자계의 크기이다. 자계의 세기 단위는 A/m이다.

진공의 자속밀도 계산: 진공에서는 투자율이 μ_0이므로 $B = \mu_0 H_{\mathrm{v}} = \frac{\mu_0}{\mu} B_0$이다. 두 투자율의 비는 무차원이므로 자속밀도의 단위는 주어진 B_0와 같은 $\mathrm{Wb/m^2}$이며, 이 식은 ③과 일치한다.

NoteBase

문 7. 균일한 자속밀도 $\vec{B} = \vec{a}_z[\mathrm{Wb/m^2}]$가 인가된 xy평면에서 길이 1 [m]인 직선 도선이 x축과 30°를 이루며 $\vec{v} = 20\vec{a}_x$ [m/s]로 등속운동을 한다. 직선 도선 양단의 유도기전력 크기 [V]는?



① 5

② 10

③ 15

④ 20

정답 2번

간단한 해설

기전력에 기여하는 길이는 **운동 방향에 수직인 도선의 성분**인 $l\sin 30^\circ = 0.5\mathrm{m}$이다. 유도기전력의 크기는 $Bvl\sin 30^\circ$이므로 10 V이다.

NoteBase

계산 과정

자속밀도의 크기는 B = 1 Wb/m^2, 속력은 v = 20 m/s, 도선의 길이는 l = 1 m이다. 도선이 자기장 속에서 움직이면 도선 내부의 전하가 자기력을 받아 양 끝에 전하가 분리된다. 균일한 자기장에서 직선 도선 전체가 같은 속도로 움직이므로, 운동기전력은 $\varepsilon = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l}$로 구한다. 여기서 $\vec{l}$은 도선의 한 끝에서 다른 끝으로 향하는 길이벡터이다.

그림의 원 안의 점은 자기장이 종이 밖인 +z 방향임을 나타내고, 속도는 +x 방향이다. 따라서 $\vec{v} \times \vec{B} = -20\vec{a}_y$이며, 기전력에는 **도선의 y 방향 길이 성분**만 기여한다. 도선은 x축과 30°를 이루므로 이 성분의 크기는 $l_y = l\sin 30^\circ = 0.5\text{m}$이다.

유도기전력의 크기는 $|\varepsilon| = Bvl_y$이다. 값을 대입하면 $|\varepsilon| = 1 \cdot 20 \cdot 0.5 = 10\text{V}$이므로, ②의 10 V에 해당한다.

NoteBase

문 8. 균일한 자속밀도 $\vec{B} = 0.5\vec{a}_x$ [Wb/m^2]가 인가된 공간에 권수 $N = 10$, 한 변의 길이 10 [cm]인 정사각 도체루프가 xy평면에 놓여 있다. 루프에 2 [A]의 전류가 흐를 때 발생하는 토크 T [N · m]는?

① 0.05

② 0.1

③ 0.2

④ 1

정답 2번

간단한 해설

루프의 법선은 z축 방향이고 자기장은 x축 방향이므로, **법선과 자기장이 직각**을 이루어 토크의 크기가 최대가 된다. 면적이 0.01 m^{2}이므로 토크는 0.1 N·m이다.

계산 과정

루프의 면적: 한 변의 길이는 10 cm = 0.1 m이므로, 한 바퀴가 둘러싸는 면적은 $A = (0.1)^2 = 0.01\text{m}^2$이다. 권수 N = 10은 토크 계산에서 별도로 곱한다.

토크 공식과 각도: 균일한 자기장 속에서 N회 감은 평면 전류 루프의 토크 크기는 $T = NIAB\sin\theta$이다. 여기서 I는 전류, A는 한 바퀴의 면적, B는 자속밀도의 크기이고, θ는 **루프의 법선과 자기장 사이의 각도**이다. 루프가 xy평면에 놓여 있으므로 법선은 z축 방향이며, x축 방향의 자기장과 수직이다. 따라서 $\theta = 90^\circ$, $\sin\theta = 1$이다.

수치 대입: N = 10, I = 2 A, B = 0.5 Wb/m^{2}를 대입하면 $T = 10 \cdot 2 \cdot 0.01 \cdot 0.5 = 0.1\text{N} \cdot \text{m}$이다. 이는 ②의 0.1에 해당한다.

NoteBase

문 9. 유전율 ε인 선형 매질에서 전계가 $\vec{E} = E_0 \sin(\omega t - \beta z)\vec{a_x}$ [V/m]일 때 변위전류밀도 [A/m^2]는?

① $\beta\varepsilon E_0 \cos(\omega t - \beta z)\vec{a_x}$

② $-\beta\varepsilon E_0 \cos(\omega t - \beta z)\vec{a_x}$

③ $\omega\varepsilon E_0 \cos(\omega t - \beta z)\vec{a_x}$

④ $-\omega\varepsilon E_0 \cos(\omega t - \beta z)\vec{a_x}$

정답 3번

간단한 해설

변위전류밀도는 전속밀도의 **시간 변화율**이므로, 전계를 시간에 대해 미분한 뒤 유전율을 곱한다. 그 결과는 $\omega\varepsilon E_0 \cos(\omega t - \beta z)\vec{a_x}$ A/m^{2}이다.

계산 과정

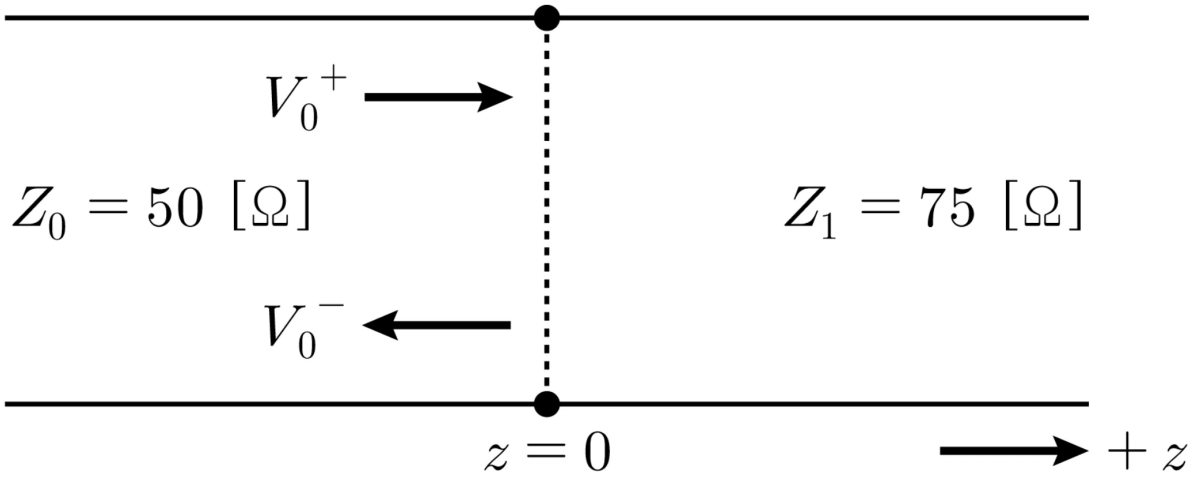
변위전류밀도의 관계: 전속밀도 $\vec{D}$의 시간 변화율이 변위전류밀도 $\vec{J_d}$이다. 주어진 선형 매질에서 $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$이고 유전율 ε은 일정하므로, $\vec{J_d} = \varepsilon\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$를 적용한다.

전계의 시간 미분: E_0는 전계의 진폭, ω는 각주파수, β는 위상상수이다. 시간에 대한 편미분에서는 **위치 z를 고정**하므로 $\frac{\partial}{\partial t}(\omega t - \beta z) = \omega$이다. 사인함수를 미분하면 코사인함수가 되고, 연쇄법칙에 따라 ω가 곱해진다. 따라서 $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \omega E_0 \cos(\omega t - \beta z)\vec{a_x}$이다. $-\beta z$는 시간에 대해 상수이므로 미분 계수에 음의 부호나 β가 붙지 않는다.

변위전류밀도 계산: 위 미분값에 유전율을 곱하면 $\vec{J_d} = \omega\varepsilon E_0 \cos(\omega t - \beta z)\vec{a_x}$이다. 전속밀도의 단위 C/m^{2}를 시간으로 나누므로 단위는 A/m^{2}이며, 이는 ③의 식과 일치한다.

NoteBase

문 10. 특성 임피던스가 각각 $Z_0 = 50[\Omega]$, $Z_1 = 75[\Omega]$인 두 무손실 전송선을 $z = 0$에서 연결하였다. 전압파가 $+z$방향으로 진행할 때, $z = 0$에서의 전압 반사계수 Γ는?



① 0.5

② 0.2

③ −0.2

④ −0.5

정답 2번

간단한 해설

전압 반사계수는 접속점에서 **반사 전압과 입사 전압의 비**이며, 두 선로의 임피던스 차이를 합으로 나누면 0.2이다. 진행 방향의 선로 임피던스가 더 크므로 부호는 양수이다.

계산 과정

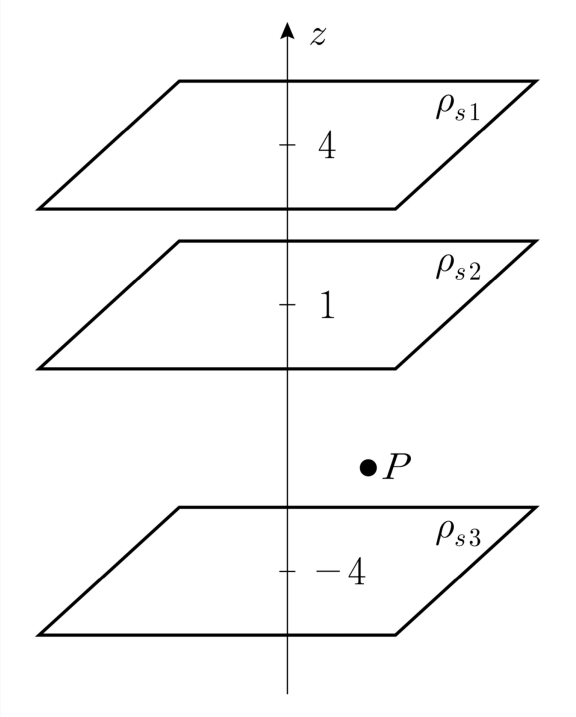
그림에서 입사파 V_0^+는 왼쪽의 50 Ω 선로에서 오른쪽의 75 Ω 선로로 진행하고, 반사파 V_0^-는 왼쪽으로 돌아간다. 따라서 입사측 특성 임피던스는 $Z_0 = 50\Omega$, 접속점 너머 선로의 특성 임피던스는 $Z_1 = 75\Omega$이다.

접속점에서 전압과 전류가 연속이어야 하므로, 전압 반사계수는 $\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$이다. 분자는 **진행 방향의 임피던스에서 입사측 임피던스를 뺀 값**이며, 두 임피던스의 차이가 반사의 부호를 결정한다.

수치를 대입하면 $\Gamma = \frac{75 - 50}{75 + 50} = \frac{25}{125} = 0.2$이다. 전압끼리의 비이므로 단위가 없고, 양수이므로 반사 전압은 접속점에서 입사 전압과 같은 위상이다. 반사 전압의 크기는 입사 전압의 20%이며, 계산값 0.2는 ②에 해당한다.

NoteBase

문 11. $z=4$, $z=1$, $z=-4$**인 세 무한평면에 각각** $\rho_{s1}=-8$ **[nC/m^2],** $\rho_{s2}=6$ **[nC/m^2],** $\rho_{s3}=3$ **[nC/m^2]의 면전하가 분포한다.** $P(1,\ 3,\ -3)$**에서 전계** $\vec{E}$ **[nV/m]는? (단, 공간의 유전율은** ε_0**이다)**



① $\frac{5}{2\varepsilon_0}\vec{a}_z$

② $\frac{2\varepsilon_0}{5}\vec{a}_z$

③ $-\frac{5}{2\varepsilon_0}\vec{a}_z$

④ $-\frac{2\varepsilon_0}{5}\vec{a}_z$

정답 1번

간단한 해설

P에서 음전하인 위쪽 평면의 전계와 양전하인 맨 아래 평면의 전계는 위를 향하고, 가운데 평면의 전계는 아래를 향한다. 세 전계를 **방향을 고려하여 중첩**하면 $\vec{E}=\frac{5}{2\varepsilon_0}\vec{a}_z$[nV/m]이다.

NoteBase

계산 과정

무한평면에 균일하게 분포한 면전하가 만드는 전계는 평면에 수직이고, 크기는 $E = \frac{|\rho_s|}{2\varepsilon_0}$이다. 평면 양쪽에서 전계의 크기가 같으므로 가우스 법칙을 적용할 때 두 면으로 전기선속이 나가 분모에 2가 붙는다. 전계는 **양전하 평면에서 멀어지고 음전하 평면으로 향하며**, 평면까지의 거리에는 무관하다. $\vec{a}_z$는 z축의 양의 방향 단위벡터이다.

위치 확인: P의 z좌표는 −3이므로 $z = 4$, $z = 1$ 평면보다 아래에 있고 $z = -4$ 평면보다 위에 있다. 모든 평면이 xy평면과 평행한 무한평면이므로 P의 x, y좌표는 전계에 영향을 주지 않는다.

$z = 4$ 평면의 전계: 면전하밀도가 −8 nC/m^{2}인 음전하 평면이므로, 그 아래의 P에서는 평면을 향하는 위쪽 전계가 생긴다. 따라서 $\vec{E}_1 = \frac{8}{2\varepsilon_0}\vec{a}_z$[nV/m]이다.

$z = 1$ 평면의 전계: 면전하밀도가 6 nC/m^{2}인 양전하 평면이므로, 그 아래의 P에서는 평면에서 멀어지는 아래쪽 전계가 생긴다. 따라서 $\vec{E}_2 = -\frac{6}{2\varepsilon_0}\vec{a}_z$[nV/m]이다.

$z = -4$ 평면의 전계: 면전하밀도가 3 nC/m^{2}인 양전하 평면이므로, 그 위의 P에서는 평면에서 멀어지는 위쪽 전계가 생긴다. 따라서 $\vec{E}_3 = \frac{3}{2\varepsilon_0}\vec{a}_z$[nV/m]이다.

전계의 중첩: 세 전계는 모두 z축 방향이므로 **방향에 따른 부호를 유지하여 더한다**. 공통 분모가 같고 분자의 합은 $8 - 6 + 3 = 5$이므로, $\vec{E} = \frac{5}{2\varepsilon_0}\vec{a}_z$[nV/m]이다. 면전하밀도의 단위가 nC/m^{2}이므로 전계는 nV/m로 표시하며, 이 결과는 ①의 식과 일치한다.

NoteBase

문 12. 점전하 $Q=-3[\mathrm{C}]$가 전계 $\vec{E}=\vec{a}_x-2\vec{a}_y+\vec{a}_z[\mathrm{V/m}]$, 자속밀도 $\vec{B}=\vec{a}_x+3\vec{a}_y+2\vec{a}_z[\mathrm{Wb/m^2}]$인 공간을 $\vec{v}=2\vec{a}_x+\vec{a}_y-\vec{a}_z[\mathrm{m/s}]$의 속도로 운동한다. Q에 작용하는 힘 $\vec{F}[\mathrm{N}]$은?

① $-18\vec{a}_x+21\vec{a}_y-18\vec{a}_z$

② $18\vec{a}_x-21\vec{a}_y+18\vec{a}_z$

③ $-18\vec{a}_x+9\vec{a}_y-18\vec{a}_z$

④ $18\vec{a}_x-9\vec{a}_y+18\vec{a}_z$

정답 1번

간단한 해설

운동하는 점전하에는 전기력과 자기력을 합한 **로런츠 힘** $\vec{F}=Q(\vec{E}+\vec{v}\times\vec{B})$가 작용한다. 외적을 구한 뒤 **음전하의 부호**를 반영하면 F=-18 a_x+21 a_y-18 a_z [N]이다.

계산 과정

1. 적용식과 조건: 전계와 자계 속에서 운동하는 점전하에 작용하는 힘은 $\vec{F}=Q\vec{E}+Q(\vec{v}\times\vec{B})$이다. 첫 항은 전기력, 둘째 항은 자기력이며, $\vec{a}_x$, $\vec{a}_y$, $\vec{a}_z$는 각 좌표축의 단위벡터이다. 주어진 전하량은 −3 C이고, 전계·자속밀도·속도가 모두 SI 단위로 주어져 단위 변환 없이 대입한다.

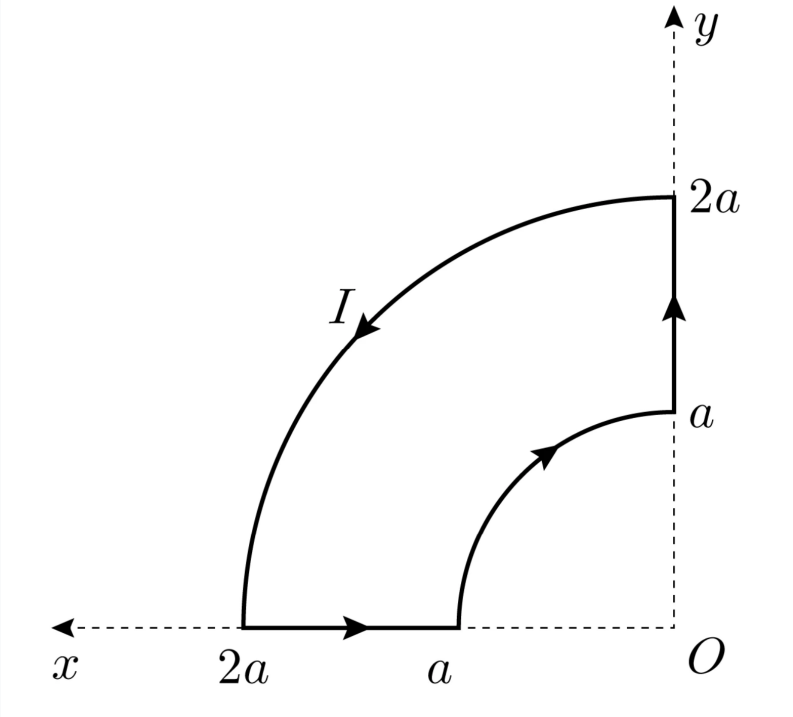
2. 속도와 자속밀도의 외적: 자기력에 들어가는 외적은 **속도 × 자속밀도의 순서**로 계산한다. 각 성분은 다음과 같다.
$(\vec{v}\times\vec{B})_x=1\cdot 2-(-1)\cdot 3=5$
$(\vec{v}\times\vec{B})_y=(-1)\cdot 1-2\cdot 2=-5$
$(\vec{v}\times\vec{B})_z=2\cdot 3-1\cdot 1=5$
따라서 $\vec{v}\times\vec{B}=5\vec{a}_x-5\vec{a}_y+5\vec{a}_z[\mathrm{V/m}]$이다. 이 벡터는 자기력의 전하량당 값이다.

3. 전계와 합산: 전계의 성분 (1, −2, 1)에 외적의 성분 (5, −5, 5)을 더하면 $\vec{E}+\vec{v}\times\vec{B}=6\vec{a}_x-7\vec{a}_y+6\vec{a}_z[\mathrm{V/m}]$이다. 이는 전기력과 자기력을 합한 힘의 전하량당 값이다.

4. 전하량을 곱한 힘: 각 성분에 −3을 곱하면 F_x=-3·6=-18 N, F_y=(-3)·(-7)=21 N, F_z=-3·6=-18 N이다. **전하량이 음수이므로** 앞에서 구한 전하량당 힘과 실제 힘의 방향이 반대가 된다. 따라서 F=-18 a_x+21 a_y-18 a_z [N]이며, ①의 벡터와 일치한다.

NoteBase

문 13. 투자율 μ_0인 공간에서 전류 I가 xy평면 위의 원호와 직선 폐경로를 따라 흐른다. 점 O에서 자속밀도의 크기[Wb/m^2]는?



① $\frac{\mu_0 I}{2a}$
② $\frac{\mu_0 I}{4a}$
③ $\frac{\mu_0 I}{8a}$
④ $\frac{\mu_0 I}{16a}$

정답 4번

간단한 해설

직선 부분의 자속밀도는 0이고, 두 원호가 만드는 자속밀도는 **방향이 반대이므로 크기를 뺀다**. 반지름이 작은 원호의 기여가 더 커서, 합성 자속밀도의 크기는 $\frac{\mu_0 I}{16a}$ Wb/m^{2}이다.

NoteBase

계산 과정

직선 부분: 그림의 두 직선 도선은 점 O를 중심으로 한 방사 방향에 놓여 있다. 비오·사바르 법칙에서 전류 요소와 O를 향하는 벡터가 나란하므로 외적이 0이다. 따라서 **두 직선 부분의 자속밀도는 각각 0**이다.

원호의 중심 자속밀도: 반지름 R, 중심각 θ(라디안)인 원호에서는 각 전류 요소가 만드는 자속밀도의 방향이 같고, 전류 요소와 중심을 향하는 벡터가 수직이다. 따라서 $dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} dl$을 원호 길이 $R\theta$에 걸쳐 더하면 $B = \frac{\mu_0 I \theta}{4\pi R}$이다. 그림의 두 원호는 모두 사분원이므로 $\theta = \frac{\pi}{2}$이고, 각각 $B = \frac{\mu_0 I}{8R}$를 적용한다.

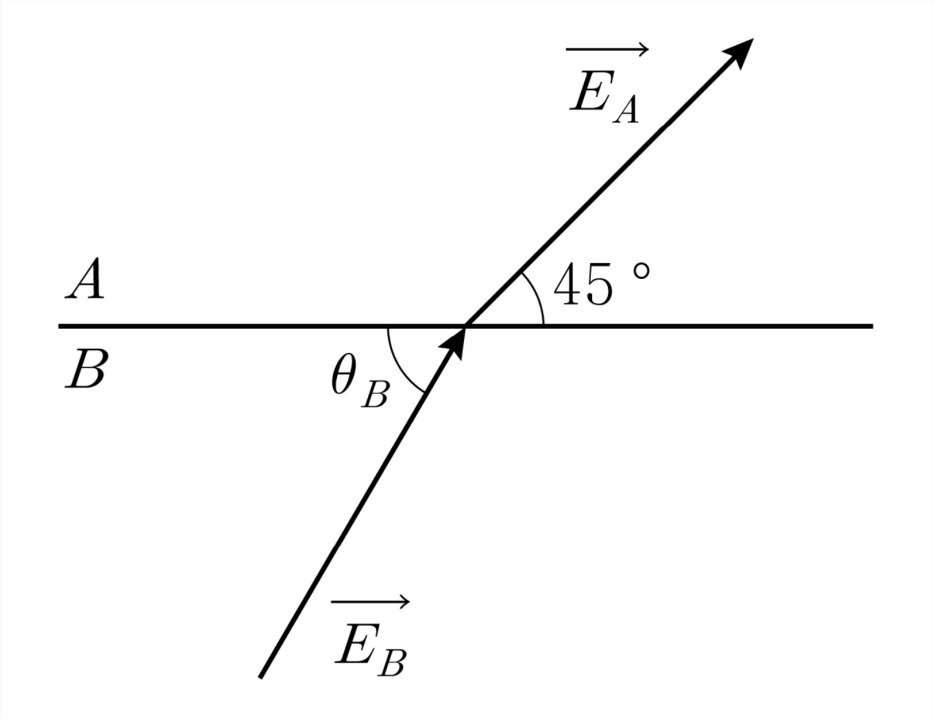
안쪽 원호: 반지름이 a이므로 B_안=(_0 I)/(8a)이다. 그림에서 전류가 왼쪽 끝에서 위쪽 끝으로 흐르므로 오른손 법칙에 따라 자속밀도는 종이 안쪽을 향한다.

바깥쪽 원호: 반지름이 2a이므로 B_밖=(_0 I)/(8· 2a)=(_0 I)/(16a)이다. 전류는 위쪽 끝에서 왼쪽 끝으로 흘러 자속밀도는 종이 바깥쪽을 향한다. 같은 중심각에서는 **반지름이 2배이면 자속밀도는 절반**이다.

합성: 두 원호의 자속밀도는 서로 반대 방향이고 안쪽 원호의 기여가 더 크다. 따라서 크기는 B=B_안-B_밖이며, $B = \frac{\mu_0 I}{8a} - \frac{\mu_0 I}{16a} = \frac{\mu_0 I}{16a}$ Wb/m^{2}이다. 이는 ④의 식과 일치한다.

NoteBase

문 14. 유전율 $2\varepsilon_0$인 유전체 A와 유전율 $3\varepsilon_0$인 유전체 B가 접해 있다. 유전체 A에서의 전기장 $\vec{E}_A$가 유전체 경계면과 45°각을 이룬다. 유전체 B에서의 전기장 $\vec{E}_B$가 유전체 경계면과 이루는 각이 θ_B일 때 $\tan(\theta_B)$는? (단, 유전체 경계면에 자유전하는 없다)



① $\frac{1}{2}$
② $\frac{2}{3}$
③ $\frac{4}{3}$
④ $\frac{3}{2}$

정답 2번

간단한 해설

경계면에서 전기장의 **접선성분은 연속**이고, 자유전하가 없으므로 **전속밀도의 법선성분도 연속**이다. B에서는 전기장의 법선성분이 A의 $\frac{2}{3}$배가 되므로, 경계면과 이루는 각에 대해 $\tan\theta_B = \frac{2}{3}$이다.

NoteBase

계산 과정

그림의 45°와 θ_B는 모두 **경계면을 기준으로 한 각**이다. 전기장의 크기를 E, 경계면에 평행한 접선성분을 E_t, 수직인 법선성분을 E_n이라 하면 $E_t = E\cos\theta$, $E_n = E\sin\theta$이다. 따라서 $\tan\theta = \frac{E_n}{E_t}$를 사용한다.

정전기장에서 전기장의 접선성분은 경계면 양쪽에서 같으므로 $E_{At} = E_{Bt}$이다. A의 각이 45°이므로 $\frac{E_{An}}{E_{At}} = \tan 45^\circ = 1$, 즉 A에서는 법선성분과 접선성분의 크기가 같다.

전속밀도는 $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$이며, **경계면에 자유전하가 없으면** 그 법선성분이 연속이다. 따라서 $\varepsilon_A E_{An} = \varepsilon_B E_{Bn}$이다. 주어진 유전율을 대입하면 $2\varepsilon_0 E_{An} = 3\varepsilon_0 E_{Bn}$이므로 $E_{Bn} = \frac{2}{3}E_{An}$이다. 이는 B에서 법선성분만 A의 $\frac{2}{3}$배가 된다는 뜻이다.

접선성분은 그대로이고 법선성분은 줄어들므로 $\tan\theta_B = \frac{E_{Bn}}{E_{Bt}} = \frac{2}{3}\frac{E_{An}}{E_{At}}$이다. 여기에 A의 성분비 1을 대입하면 $\tan\theta_B = \frac{2}{3}$이며, ②의 값과 일치한다. 탄젠트는 같은 단위를 가진 두 전기장 성분의 비이므로 단위가 없다.

NoteBase

문 15. 자성체에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 상자성체는 양의 자화율을 가지고, 비투자율이 1보다 약간 크다.

② 반자성체는 외부 자계와 반대 방향으로 자화되며, 음의 자화율을 가진다.

③ 강자성체는 자구(magnetized domain) 구조를 가지며, 자기이력(hysteresis) 특성을 나타낸다.

④ 강자성체의 자화율은 퀴리 온도(Curie temperature) 이상에서 더 커진다.

정답 4번

간단한 해설

④의 '퀴리 온도 이상에서 자화율이 더 커진다'는 설명이 잘못되었다. 퀴리 온도를 넘으면 **자발자화가 사라져 상자성체로 거동**하며, 이 영역에서는 온도가 더 높아질수록 자화율이 감소한다.

선지별 해설

① O: 상자성체에서는 외부 자계를 가하면 원자 등의 자기모멘트가 자계 방향으로 약하게 정렬되어 **자계와 같은 방향**으로 자화된다. 따라서 자화율은 작은 양수이다. 선형 자화 범위에서 비투자율과 자화율의 관계는 $\mu_r = 1 + \chi_m$이므로 비투자율은 1보다 약간 크다.

② O: 반자성체에서는 외부 자계에 의해 **자계와 반대 방향의 자화**가 유도된다. 자화 방향이 자계 방향과 반대이므로 자화율은 음수이며, 비투자율은 1보다 약간 작다.

③ O: 강자성체는 내부의 자기모멘트가 같은 방향으로 정렬된 영역인 자구를 가진다. 외부 자계를 가하면 자구의 크기와 자화 방향이 변하면서 전체 자화가 커진다. 자계를 줄이거나 방향을 바꿀 때 자화가 처음 경로를 그대로 되짚지 않아 **자기이력**이 나타나며, 자계를 제거한 뒤에도 자화가 남을 수 있다.

④ X: 퀴리 온도는 강자성체의 자발자화가 사라지는 전이 온도이다. 온도가 높아지면 열운동이 자기모멘트의 정렬을 방해하고, 퀴리 온도를 넘으면 강자성 질서를 잃어 **상자성체로 거동**한다. 이 상자성 영역에서는 온도가 더 높아질수록 외부 자계에 의한 정렬이 어려워져 자화율이 감소한다. 따라서 '자화율이 더 커진다'는 표현은 '퀴리 온도를 넘으면 상자성을 나타내며, 이후 온도가 높아질수록 자화율이 감소한다'로 고쳐야 한다.

NoteBase

문 16. 주파수 $f = 100$ [MHz]에서 무손실 전송선로의 위상상수와 특성 임피던스가 각각 $\beta = 0.8\pi$ [rad/m], $Z_0 = 50$ [Ω]이다. 이 전송선로의 단위 길이당 정전용량 C [pF/m]는?

① 20

② 40

③ 80

④ 160

정답 3번

간단한 해설

무손실 전송선로에서는 위상상수와 특성 임피던스로부터 $C = \frac{\beta}{2\pi f Z_0}$를 얻는다. 주어진 값을 대입하면 **단위 길이당 정전용량은 80 pF/m**이다.

계산 과정

무손실 전송선로에서는 단위 길이당 저항과 누설 컨덕턴스가 0이므로 $\beta = \omega\sqrt{LC}$, $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$가 성립한다.
여기서 L은 단위 길이당 인덕턴스, C는 단위 길이당 정전용량이며, $\omega = 2\pi f$는 각주파수이다.

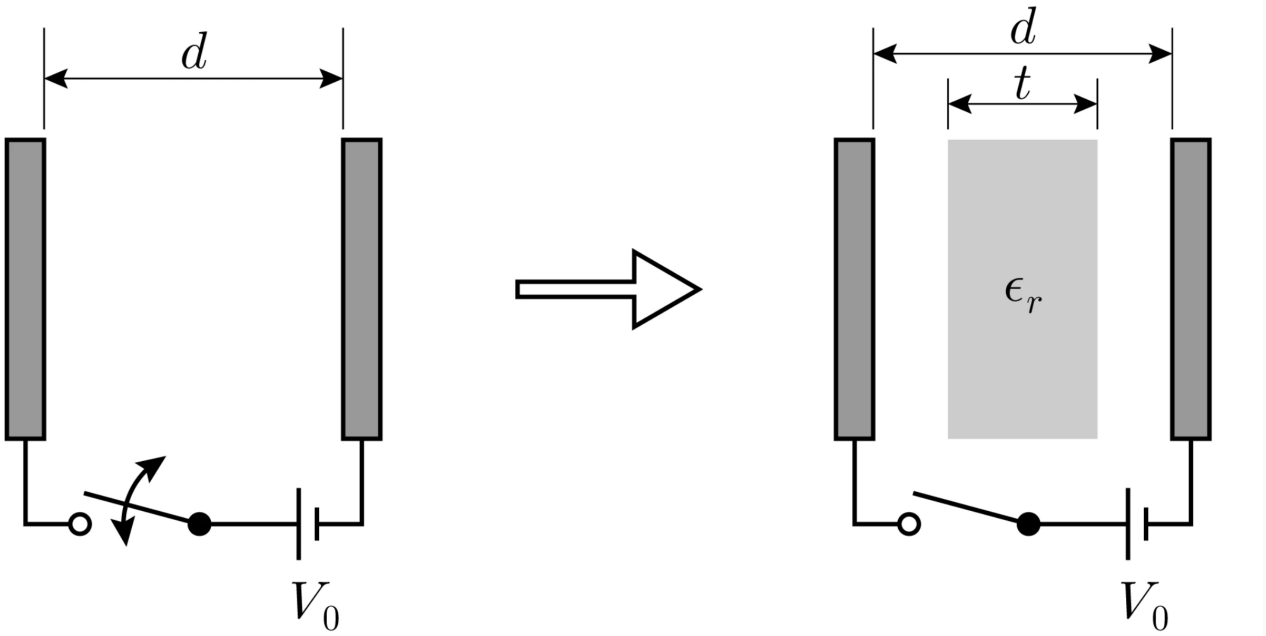
두 식을 나누면 **인덕턴스 L이 소거**되어 $\frac{\beta}{Z_0} = \omega C$가 된다. 따라서 구하려는 정전용량은 $C = \frac{\beta}{2\pi f Z_0}$이다.

주파수를 Hz로 바꾸면 $f = 100\text{MHz} = 10^8\text{Hz}$이다. 이를 대입하면 $C = \frac{0.8\pi}{2\pi \cdot 10^8 \cdot 50} = 8 \times 10^{-11}\text{F/m}$이다.

$1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$이므로 단위 길이당 정전용량은 80 pF/m이며, ③의 80에 해당한다.

NoteBase

문 17. 도체판 사이 간격 $d = 1[\mathrm{cm}]$인 평행판형 공기커패시터를 전원 $V_0 = 100[\mathrm{V}]$에 연결하였다. 충분한 시간이 지난 후 전원을 분리하고 두께 $t = 0.5[\mathrm{cm}]$, 비유전율 $\varepsilon_r = 7$인 유전체 슬랩을 커패시터 도체판과 평행하게 삽입하였다. 유전체 슬랩 영역의 전계 크기 [kV/m]는? (단, 공기 유전율은 ε_0이고, 가장자리효과는 무시한다)



① $\frac{1}{7}$

② $\frac{5}{7}$

③ $\frac{10}{7}$

④ 10

정답 3번

간단한 해설

전원을 분리했으므로 도체판의 **자유전하량이 보존**된다. 유전체 내부 전계는 삽입 전 공기 중 전계의 1/7이므로, $E = \frac{10}{7}$kV/m이다.

NoteBase

계산 과정

1. 삽입 전 전계와 보존량: 가장자리효과를 무시한 평행판 사이의 전계는 균일하다. 판 사이 간격은 1 cm = 0.01 m이므로, 삽입 전 전계는 $E_0 = \frac{V_0}{d} = \frac{100}{0.01} = 10000\text{V/m}$이다. 전원을 분리한 뒤에는 전하가 출입할 수 없으므로 **각 도체판의 자유전하량이 일정**하다.

2. 유전체 내부 전계: 그림에서 슬랩은 도체판과 평행하므로 전계는 공기층과 유전체층의 경계면에 수직이다. 도체판 면적을 S, 한 판의 자유전하량의 크기를 Q라 하면 전속밀도는 $D = \frac{Q}{S} = \varepsilon_0 E_0$이다. 공기와 유전체의 경계면에 자유전하가 없으므로 **전속밀도의 수직 성분이 연속**이며, 유전체 안에서도 같은 D가 유지된다. 따라서 $D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$에서 $E = \frac{E_0}{\varepsilon_r}$를 얻는다. 이 조건에서 두께 t = 0.5 cm는 삽입 후 전체 전압에 영향을 주지만, 유전체 내부 전계는 보존된 자유전하량과 유전율로 결정된다.

3. 수치 대입과 단위 변환: 비유전율이 7이므로 $E = \frac{10000}{7}\text{V/m}$이다. 1 kV/m = 1000 V/m이므로 $E = \frac{10}{7}\text{kV/m}$이며, 이는 ③의 값에 해당한다.

NoteBase

문 18. 투자율 μ_0인 공간의 z축상에 놓인 무한도선에 +z 방향으로 전류 I가 흐른다. z축으로부터 거리 r 떨어진 위치에서 벡터 자기포텐셜 $\vec{A}$ [Wb/m]는? (단, $r = r_0$에서 $\vec{A} = 0$이다)

① $\frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right)\vec{a}_z$
② $\frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right)\vec{a}_z$
③ $\frac{\mu_0 I}{2\pi r} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right)\vec{a}_z$
④ $\frac{\mu_0 I}{2\pi r} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right)\vec{a}_z$

정답 1번

간단한 해설

자속밀도와 벡터 자기포텐셜의 관계는 $B_\phi = -dA_z/dr$이므로, 거리의 역수에 비례하는 자속밀도를 적분하면 **로그함수**가 된다. 기준 위치에서 포텐셜이 0인 조건을 적용하면 $\vec{A} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right)\vec{a}_z$ [Wb/m]를 얻는다.

계산 과정

1. 도선 주위의 자속밀도: 무한 직선도선에서는 원통 대칭에 의해 자계가 도선을 중심으로 하는 원의 접선 방향으로 형성된다. +z 방향 전류에 오른손 법칙을 적용하면 자속밀도의 방향은 $\vec{a}_\phi$이다. 반지름 r인 원형 경로에 앙페르 법칙을 적용하면 $H_\phi(2\pi r) = I$이므로, $\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\vec{a}_\phi$이다. 여기서 r은 도선으로부터의 거리이며, 도선 밖인 r > 0을 대상으로 한다.

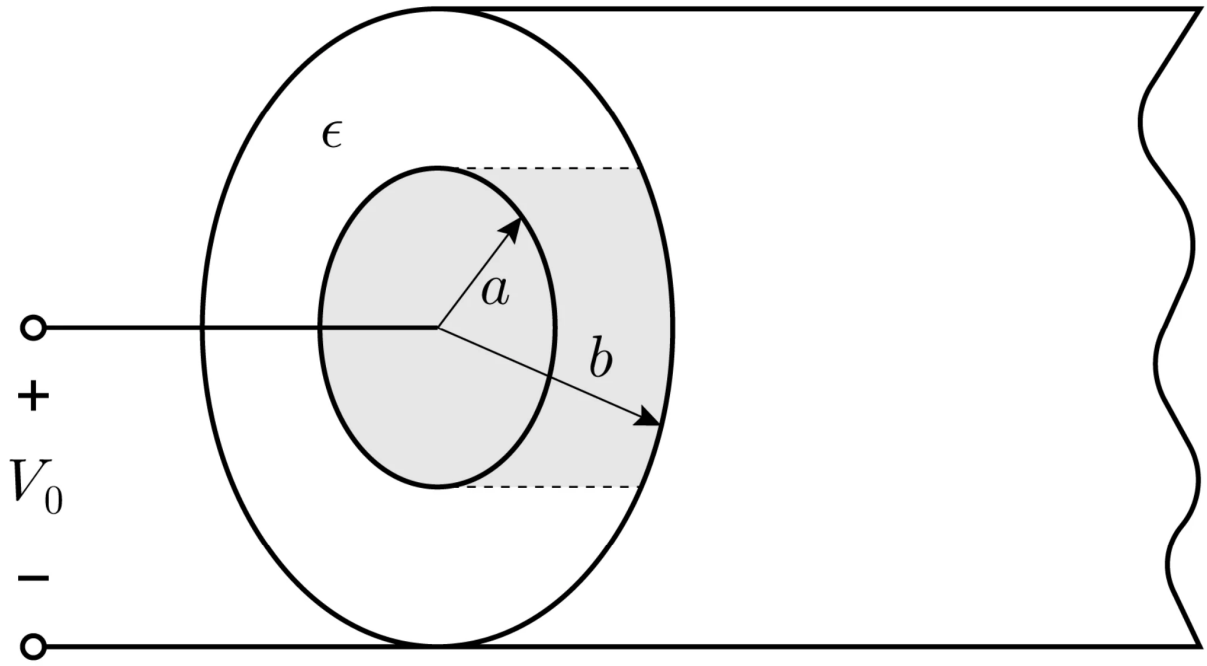
2. 자기포텐셜과 자속밀도의 관계: 벡터 자기포텐셜은 $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$를 만족한다. 전류 방향의 성분을 갖는 $\vec{A} = A_z(r)\vec{a}_z$로 놓으면 원통좌표계에서 $B_\phi = -\frac{dA_z}{dr}$이다. 따라서 $\frac{dA_z}{dr} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$가 된다. 이때 **미분 앞의 음의 부호**가 로그 안의 비율을 결정한다.

3. 기준 조건을 적용한 적분: $r = r_0$에서 $A_z = 0$이므로 기준 위치부터 적분한다. $A_z(r) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi}\int_{r_0}^{r} \frac{1}{\rho} d\rho$이며, ρ는 적분에 쓰는 거리 변수이다. 적분하면 $A_z(r) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right)$를 얻는다. 즉 **기준 위치와의 포텐셜 차이**가 거리 비율의 로그로 정해지며, $r = r_0$을 대입하면 로그가 0이 되어 주어진 조건을 만족한다.

따라서 $\vec{A} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right)\vec{a}_z$ [Wb/m]이며, ①의 식과 일치한다.

NoteBase

문 19. 반지름 a인 내부 도체와 반지름 b인 외부 도체 사이에 유전율 ε인 유전체가 채워진 무한 동축선로에서, 도체 사이 전위차는 V_0이다. $r = a$에서의 면전하밀도 ρ_s [C/m^2]는? (단, 도체의 비저항은 0이다)



① $\frac{a\ln(a/b)}{\varepsilon V_0}$
② $\frac{a\ln(b/a)}{\varepsilon V_0}$
③ $\frac{\varepsilon V_0}{a\ln(a/b)}$
④ $\frac{\varepsilon V_0}{a\ln(b/a)}$

정답 4번

간단한 해설

동축선로의 전기장은 반지름에 반비례하며, 도체 사이에서 적분하면 전위차에 $\ln(b/a)$가 나타난다. 내부 도체 표면에서는 **면전하밀도가 유전율과 표면 바로 바깥 전기장의 곱**이므로 $\rho_s = \frac{\varepsilon V_0}{a\ln(b/a)}$ [C/m^2]이다.

NoteBase

계산 과정

1. 조건과 전기장: 그림에서 내부 도체는 +극, 외부 도체는 −극이므로 $V(a) - V(b) = V_0$이다. 도체는 비저항이 0인 완전도체이므로 내부 전기장은 0이고, 각 도체는 등전위이다. 내부 도체의 단위 길이당 전하를 λ [C/m]라 두면, 무한 동축 구조의 대칭성에 따라 유전체의 전기장은 반지름 방향이고 같은 반지름에서 크기가 같다. 반지름 r, 길이 L인 원통형 가우스면에 가우스 법칙을 적용하면 $\varepsilon E(r) \cdot 2\pi rL = \lambda L$이다. 따라서 $E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon r}$이며, 적용 범위는 $a < r < b$이다.

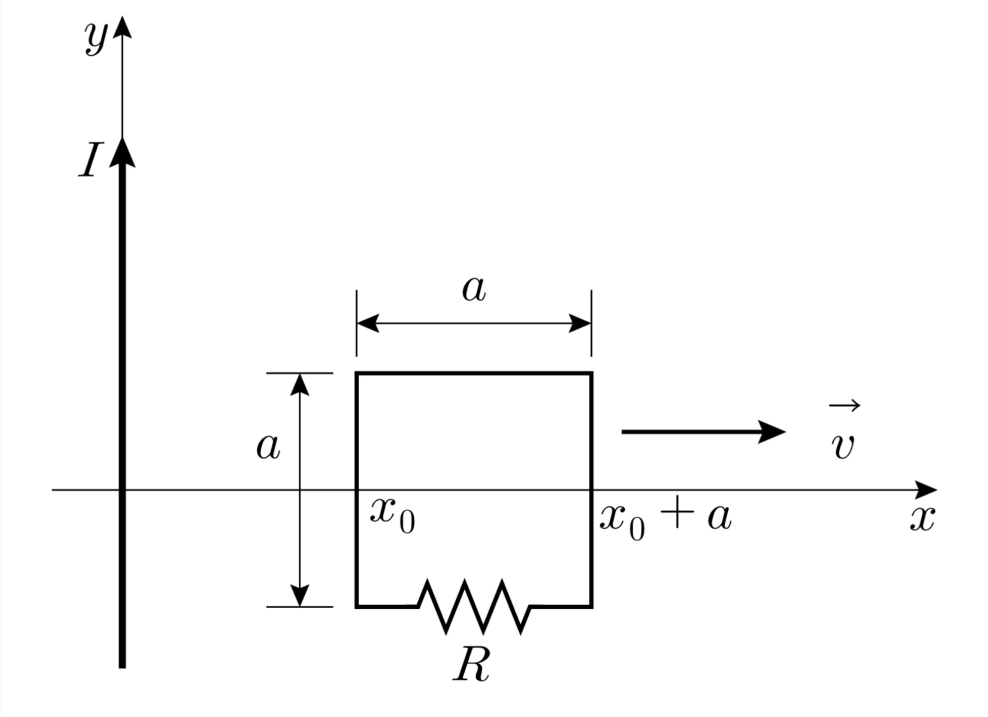
2. 전위차로 전하 구하기: **내부 도체에서 외부 도체까지 전기장을 적분한 값**이 두 도체의 전위차이다. 따라서 $V_0 = \int_a^b E(r)dr$이고, 위 전기장 식을 대입하면 $V_0 = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon}\ln(b/a)$이다. 이를 정리한 $\lambda = \frac{2\pi\varepsilon V_0}{\ln(b/a)}$는 주어진 전위차를 만드는 내부 도체의 단위 길이당 전하이다.

3. 면전하밀도 구하기: 완전도체 표면에서 **바로 바깥쪽 전속밀도의 법선 성분**은 자유 면전하밀도와 같다. 내부 도체 표면 바로 바깥의 전기장은 $E(a^+) = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon a}$이므로 $\rho_s = \varepsilon E(a^+) = \frac{\lambda}{2\pi a}$이다. 앞서 구한 전하를 대입하면 $\rho_s = \frac{\varepsilon V_0}{a\ln(b/a)}$ [C/m^2]이다. 유전율의 단위 F/m에 전압 V를 곱하고 길이 m로 나누므로 단위는 C/m^{2}가 된다.

4. 선택지와 연결: $b > a$이므로 $\ln(b/a) > 0$이며, 내부 도체의 면전하밀도는 그림의 +극 표시와 같이 양수이다. 구한 식 $\frac{\varepsilon V_0}{a\ln(b/a)}$는 ④와 일치한다.

NoteBase

문 20. 투자율 μ_0인 공간의 y축상에 놓인 무한 직선 도선에 전류 I가 흐른다. 한 변이 a인 정사각 도체루프가 x축 방향으로 $\vec{v}$의 속도로 이동한다. 도체루프가 그림의 위치를 지날 때, 유도기전력의 크기 [V]는?



① $\frac{\mu_0 vaI}{2\pi}\ln\left(\frac{x_0}{x_0+a}\right)$
② $\frac{\mu_0 va^2I}{2\pi}\ln\left(\frac{x_0}{x_0+a}\right)$
③ $\frac{\mu_0 vaI}{2\pi x_0(x_0+a)}$
④ $\frac{\mu_0 va^2I}{2\pi x_0(x_0+a)}$

정답 4번

간단한 해설

두 세로변에서 생기는 운동기전력은 루프를 도는 방향을 기준으로 서로 반대이므로 **두 변의 자기장 크기 차**를 사용한다. 유도기전력의 크기는 $va[B(x_0) - B(x_0+a)]$이며, 이를 계산하면 $\frac{\mu_0 va^2I}{2\pi x_0(x_0+a)}$ V이다.

NoteBase

계산 과정

자기장과 위치: 그림에서 도선과 가까운 세로변은 x_0, 먼 세로변은 $x_0 + a$에 있고, 각 변의 길이는 a이다. 무한 직선 도선에 암페어 법칙을 적용하면 $2\pi x B(x) = \mu_0 I$이므로 $B(x) = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$이다. 따라서 **도선에 가까운 세로변의 자기장이 더 강하다**.

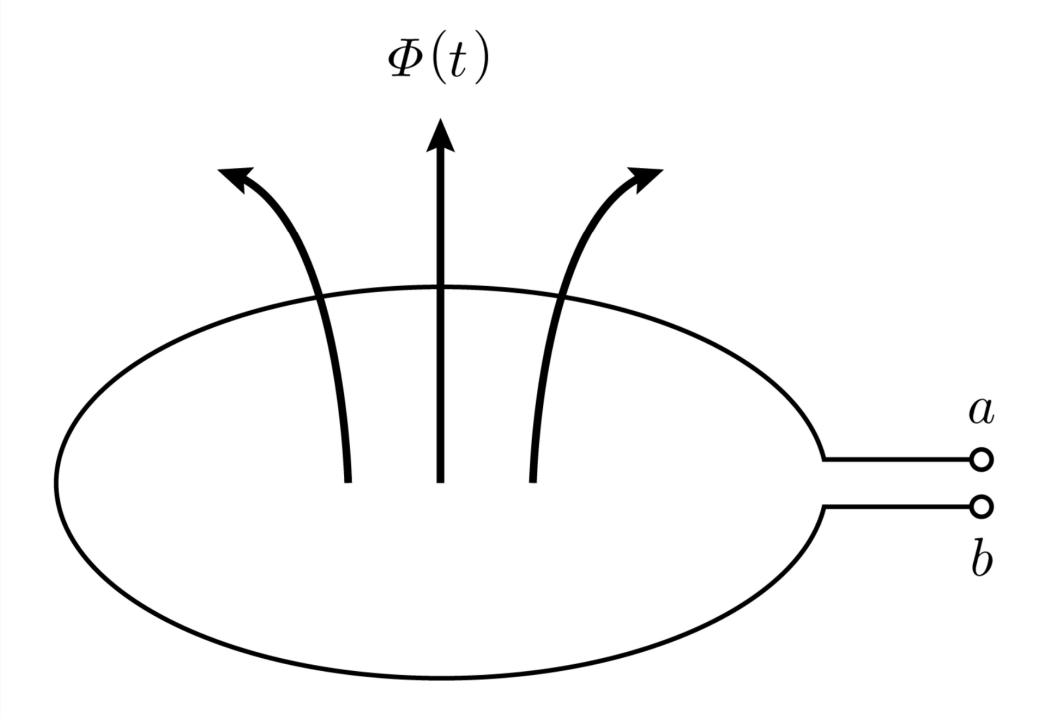
운동기전력의 합성: 속력은 $v = |\vec{v}|$이다. 전류가 위로 흐르므로 루프 위치의 자기장은 지면 안쪽을 향하고, $\vec{v} \times \vec{B}$는 위쪽을 향한다. 길이 a인 각 세로변에는 Bva의 운동기전력이 생기지만, 루프를 한 바퀴 도는 방향을 기준으로 두 기전력은 반대로 작용한다. 가로변은 $\vec{v} \times \vec{B}$와 수직이므로 기전력에 기여하지 않는다. 따라서 전체 기전력의 크기는 **두 세로변의 기전력 차**인 E=va[B(x_0)-B(x_0+a)]이다.

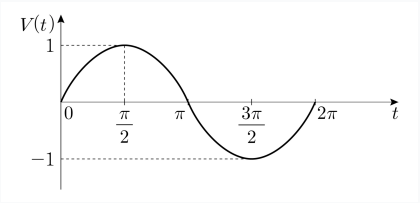
대입과 정리: 두 위치의 자기장을 대입하면 E=(_0vaI)/(2π)≤ft((1)/(x_0)-(1)/(x_0+a))이다. 괄호 안은 $\frac{1}{x_0} - \frac{1}{x_0 + a} = \frac{a}{x_0(x_0 + a)}$이므로, 세로변 길이에서 나온 a에 자기장 차를 정리하면서 나온 a가 곱해진다.

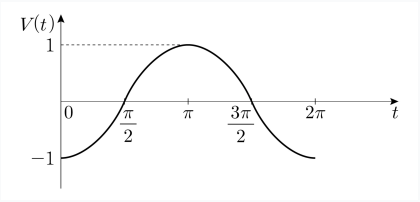
결과: 유도기전력의 크기는 E=(_0va^2I)/(2π x_0(x_0+a)) V이며, ④의 식과 일치한다.

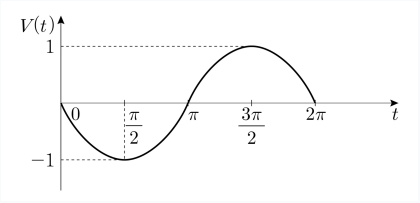
NoteBase

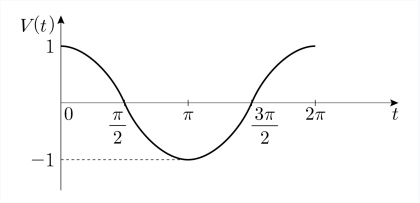
문 21. 자유공간의 xy 평면에 놓인 원형 도체루프에 $+z$축 방향으로 통과하는 시변자속이 $\Phi(t) = \sin t$ [Wb]일 때, 도선 양단의 전위 V_{ab}를 나타낸 그래프는?



① 

② 

③ 

④ 

NoteBase

정답 4번

간단한 해설

유도전압은 **자속의 시간 변화율**로 정해지며, 그림의 단자 배치에서는 $V_{ab} = \cos t$ [V]이다. 자속이 증가하기 시작하는 순간에는 **a의 전위가 b보다 높으므로** 전압은 +1 V에서 시작한다.

계산 과정

1. 단자 전압의 극성: $V_{ab} = V_a - V_b$이므로 a가 높은 전위이면 양수이다. $t = 0$에서 자속은 0이지만, $+z$축 방향으로 증가하고 있다. 렌츠의 법칙에 따라 이 증가를 방해하는 자기장은 $-z$축 방향이다. 따라서 $+z$축 쪽에서 루프를 내려다보면 시계 방향으로 전류를 흐르게 하는 유도작용이 생긴다. 그림에서 이 방향은 도선을 따라 b에서 a로 향하므로, 열린 단자에는 **a가 양극, b가 음극**이 되는 전하 분리가 생긴다.

2. 자속의 미분: 고정된 한 바퀴 루프의 유도기전력은 패러데이 법칙에 따라 **자속의 시간 변화율**로 구한다. 위에서 확인한 단자 극성을 적용하면 $V_{ab} = \frac{d\Phi}{dt}$이다. 주어진 $\Phi(t) = \sin t$를 미분하면 $\frac{d\Phi}{dt} = \cos t$이므로 $V_{ab}(t) = \cos t$ [V]이다. 자속의 단위 Wb를 시간에 대해 미분한 Wb/s는 전압의 단위 V와 같다.

3. 그래프 대응: 전압은 $t = 0$에서 +1 V이고, $t = \frac{\pi}{2}$에서 0 V, $t = \pi$에서 −1 V, $t = \frac{3\pi}{2}$에서 0 V를 거쳐 $t = 2\pi$에서 +1 V로 돌아온다. 자속이 최댓값이나 최솟값에 도달하는 순간에는 변화율이 0이므로 전압도 0이다. 이처럼 +1에서 시작하는 코사인 파형을 나타낸 그래프가 ④이다.

NoteBase

문 22. 시정현 벡터장의 페이저 $\vec{B}_s = \frac{20}{j}\vec{a}_x + 10e^{j\frac{2\pi}{3}}\vec{a}_y$ [Wb/m^2]에 대한 순시 표현식은? (단, 각주파수는 ω이다)

① $\vec{B} = 20\sin(\omega t)\vec{a}_x + 10\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\vec{a}_y$
② $\vec{B} = -20\sin(\omega t)\vec{a}_x + 10\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\vec{a}_y$
③ $\vec{B} = 20\cos(\omega t)\vec{a}_x + 10\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\vec{a}_y$
④ $\vec{B} = -20\cos(\omega t)\vec{a}_x + 10\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\vec{a}_y$

정답 1번

간단한 해설

페이저의 순시값은 **시간 인자를 곱한 뒤 실수부를 취해** 구한다. $1/j = -j$이므로 x성분은 $20\sin(\omega t)$, y성분은 $10\cos(\omega t + 2\pi/3)$이 된다.

계산 과정

코사인 기준 페이저에서 순시 벡터장은 $\vec{B}(t) = \mathrm{Re}\{\vec{B}_s e^{j\omega t}\}$로 구한다. 여기서 $j^2 = -1$이고, $\vec{a}_x$, $\vec{a}_y$는 각 좌표 방향의 단위벡터이다. 두 성분은 같은 각주파수 ω로 변하므로 각 성분에 같은 시간 인자를 곱한다.

x성분: $\frac{20}{j} = -j20 = 20e^{-j\pi/2}$이므로 진폭은 20, 위상은 $-\pi/2$이다. 따라서
$B_x(t) = 20\cos(\omega t - \pi/2) = 20\sin(\omega t)$이다. **코사인의 위상이 π/2만큼 늦어지면 양의 사인**이 되므로 부호에 주의한다.

y성분: $10e^{j2\pi/3}$의 진폭은 10, 위상은 $2\pi/3$이다. 시간 인자를 곱하면 $10e^{j(\omega t + 2\pi/3)}$이므로 실수부는
$B_y(t) = 10\cos(\omega t + 2\pi/3)$이다. **주어진 위상은 시간 위상에 그대로 더한다.**

두 성분을 $\vec{B}(t) = B_x(t)\vec{a}_x + B_y(t)\vec{a}_y$로 합한다. 즉, x방향에는 $20\sin(\omega t)$, y방향에는 $10\cos(\omega t + 2\pi/3)$이 놓이며 단위는 Wb/m^{2}이다. 이 순시 표현식은 ①과 일치한다.

NoteBase

문 23. 무원천 자유공간을 진행하는 전자기파의 전계가 $\vec{E} = 2\cos(10^8 t - \beta z)\vec{a}_y$ [V/m]이다. $\vec{E}_s$와 $\vec{H}_s$가 각각 전계와 자계의 페이저일 때, 다음 중 옳지 않은 것은? (단, 빛의 속도 $c = 3 \times 10^8$ [m/s]이다)

① 주어진 전계의 순시식의 페이저 표현은 $2e^{-j\beta z}\vec{a}_y$이다.

② $\nabla \cdot \vec{E}_s = 0$이다.

③ $\nabla \cdot \vec{H}_s = 0$이다.

④ 파수는 $\beta = \frac{3}{2}$이다.

정답 4번

간단한 해설

자유공간의 파수는 **각주파수를 빛의 속도로 나눈 값**이다. 따라서 $\beta = \frac{\omega}{c} = \frac{1}{3}$ rad/m이며, ④의 $\frac{3}{2}$와 다르다.

선지별 해설

① O: 시간 인자를 $e^{j\omega t}$로 두면 순시 전계는 $\vec{E} = \mathrm{Re}\{\vec{E}_s e^{j\omega t}\}$로 표현한다. 주어진 코사인 함수에서 **시간 인자를 제외한 복소 진폭**을 취하면 $\vec{E}_s = 2e^{-j\beta z}\vec{a}_y$ [V/m]가 된다.

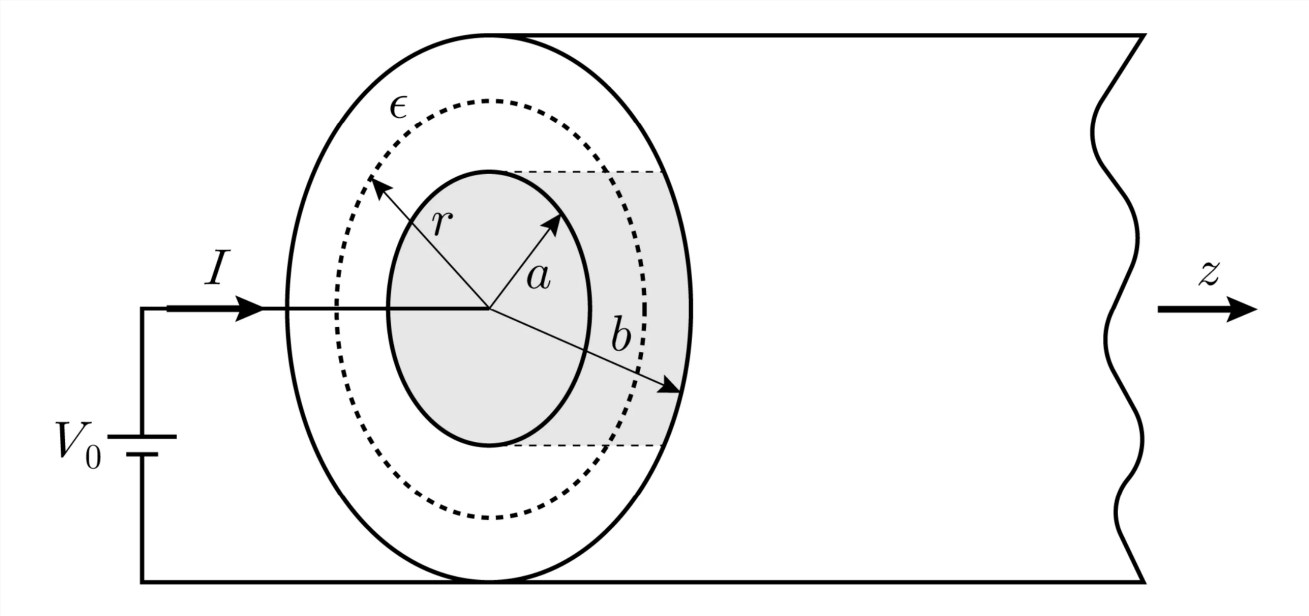
② O: 전계는 y방향 성분만 있으므로 $\nabla \cdot \vec{E}_s = \frac{\partial E_{sy}}{\partial y}$이다. 그 성분은 z에만 의존하고 **y에 따라 변하지 않으므로** 발산은 0이다. 이는 무원천 자유공간에서 전하밀도가 0이므로 전계의 발산도 0이라는 가우스 법칙과 일치한다.

③ O: 자기장에 대한 가우스 법칙에 따라 $\nabla \cdot \vec{B}_s = 0$이다. 자유공간에서는 $\vec{B}_s = \mu_0 \vec{H}_s$이고 **투자율이 공간적으로 일정**하므로, $\mu_0 \nabla \cdot \vec{H}_s = 0$에서 $\nabla \cdot \vec{H}_s = 0$을 얻는다.

④ X: 주어진 위상에서 t의 계수는 각주파수이므로 $\omega = 10^8$ rad/s이다. 일정한 위상 $\omega t - \beta z$를 따라가면 파의 진행 속도는 $c = \frac{\omega}{\beta}$이므로, **파수는 속도가 아니라 각주파수를 속도로 나누어** 구한다. 주어진 자유공간의 빛의 속도를 대입하면 $\beta = \frac{\omega}{c} = \frac{10^8}{3 \times 10^8} = \frac{1}{3}$ rad/m이다. 파수는 진행 방향의 단위 길이당 위상 변화량을 뜻하며, 선지의 $\frac{3}{2}$는 $\frac{1}{3}$로 고쳐야 한다.

NoteBase

문 24. 반지름 a인 내부 도체와 반지름 b인 외부 도체 사이에 유전율 ε인 유전체가 채워진 동축선로의 두 도체 양단에 그림과 같이 전압 V_0를 인가하였다. 정전류 I가 흐를 때, 두 도체 사이에서 포인팅 벡터 $\vec{P}$ [W/m^2]는? (단, 도체의 비저항은 0이고, 가장자리 효과는 무시한다)



① $\frac{V_0 I}{2\pi r \ln\left(\frac{b}{a}\right)}\vec{a_z}$
② $\frac{V_0 I}{2\pi r^2 \ln\left(\frac{b}{a}\right)}\vec{a_z}$
③ $\frac{V_0 I}{2\pi r \ln\left(\frac{a}{b}\right)}\vec{a_z}$
④ $\frac{V_0 I}{2\pi r^2 \ln\left(\frac{a}{b}\right)}\vec{a_z}$

정답 2번

간단한 해설

전기장과 자기장이 각각 중심축으로부터의 거리에 반비례하므로, 두 장의 외적인 포인팅 벡터의 크기는 **거리의 제곱에 반비례**한다. 그림의 극성과 전류 방향을 적용하면 $\vec{P} = \frac{V_0 I}{2\pi r^2 \ln(b/a)}\vec{a_z}$ [W/m^2]이며, 에너지는 +z 방향으로 흐른다.

NoteBase

계산 과정

1. 적용 범위와 방향: 구하려는 위치는 두 도체 사이인 $a < r < b$이다. 그림에서 전원의 양극이 내부 도체에 연결되어 있으므로 내부 도체의 전위가 외부 도체보다 V_0만큼 높고, 내부 도체의 전류는 +z 방향이다. 도체의 비저항이 0이므로 각 도체는 등전위이며, 가장자리 효과를 무시하면 전기장은 반지름 방향, 자기장은 원주 방향으로 나타난다.

2. 전기장: 원통 대칭인 가우스 면에서 둘레는 반지름에 비례하고 둘러싼 전하는 같으므로, 전기장 크기는 $E_r = C/r$로 쓸 수 있다. 여기서 C는 전압 조건으로 정하는 상수이다. 두 도체의 전위차는 $V_0 = \int_a^b E_r dr = C\ln(b/a)$이므로 $C = \frac{V_0}{\ln(b/a)}$이다. 따라서 $\vec{E} = \frac{V_0}{r\ln(b/a)}\vec{a_r}$ [V/m]이다. $\vec{a_r}$는 중심축에서 바깥으로 향하는 단위벡터로, 전기장은 **전위가 높은 내부 도체에서 외부 도체로** 향한다.

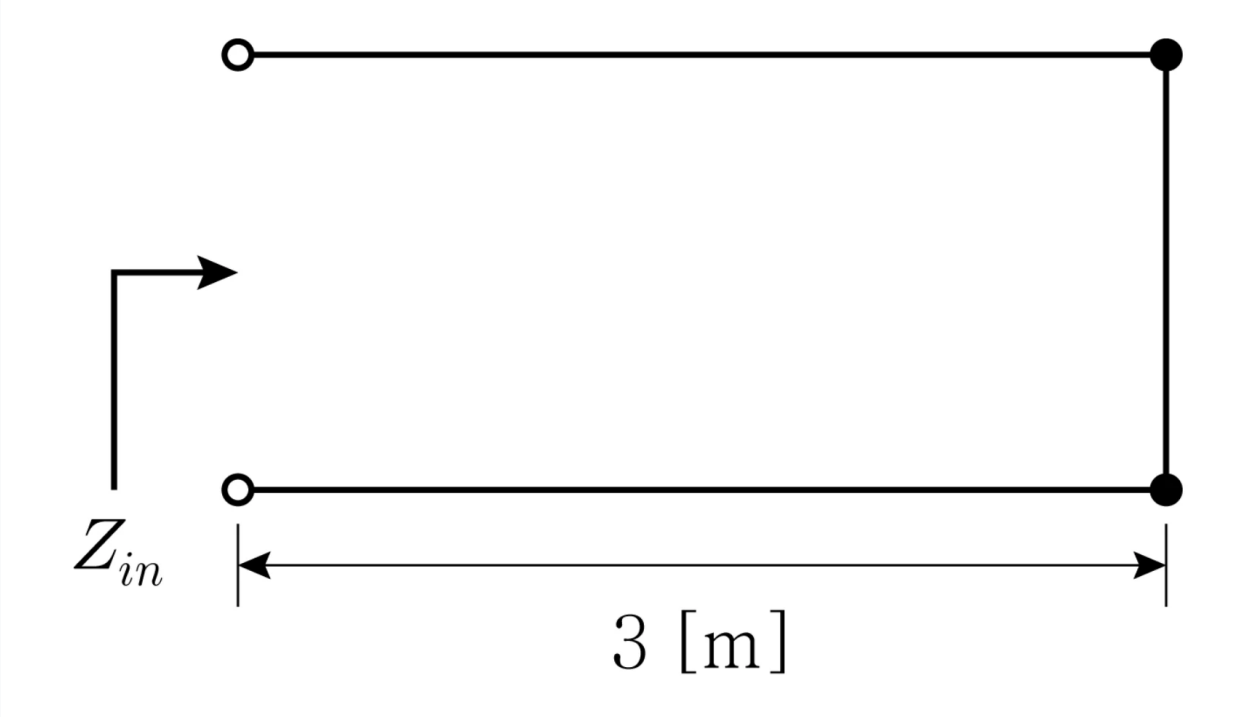
3. 자기장: 반지름 r인 원형 암페어 경로는 내부 도체의 전류 I를 둘러싼다. 원주 위에서 자기장 크기가 같으므로 암페어 법칙에 따라 $H_\phi \cdot 2\pi r = I$이다. 따라서 $\vec{H} = \frac{I}{2\pi r}\vec{a_\phi}$ [A/m]이다. $\vec{a_\phi}$는 +z 방향 전류에 오른손 법칙을 적용한 원주 방향의 단위벡터이다.

4. 포인팅 벡터: 단위 면적당 전력의 흐름은 **전기장과 자기장의 외적**인 $\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$로 구한다. 원통좌표계에서 $\vec{a_r} \times \vec{a_\phi} = \vec{a_z}$이므로 에너지는 +z 방향으로 전달된다. 두 장의 크기를 곱하면 $\vec{P} = \frac{V_0 I}{2\pi r^2 \ln(b/a)}\vec{a_z}$ [W/m^2]이다.

두 장에 각각 포함된 $1/r$이 곱해져 분모에 r^2이 생기고, $b > a$이므로 $\ln(b/a) > 0$이다. 따라서 분모가 $r^2\ln(b/a)$인 ②의 식과 일치한다.

NoteBase

문 25. 공기 중에 길이 3 [m]인 무손실 전송선로의 특성 임피던스가 120π [Ω]이고 단락으로 종단되었다. 37.5 [MHz]의 주파수에서 입력 임피던스 Z□□의 특성은? (단, 빛의 속도 c = 3×10^8 [m/s]이다)



① 개방

② 단락

③ 유도성

④ 용량성

정답 4번

간단한 해설

단락된 무손실 전송선로는 길이에 따라 입력 특성이 달라진다. 이 선로의 길이는 파장의 3/8이므로 입력 임피던스는 $Z_{in} = -j120\pi\Omega$가 되어 **용량성**을 나타낸다.

NoteBase

계산 과정

1. 단락 종단의 입력 임피던스: 그림의 오른쪽 끝에서 두 도선이 연결되어 있으므로 부하 임피던스는 $Z_L = 0$이다. **단락으로 종단된 무손실 선로**에는 $Z_{in} = jZ_0\tan(\beta l)$을 적용한다. 여기서 Z_0는 특성 임피던스, β는 위상정수, l은 선로 길이이며 j는 허수 단위이다.

2. 파장: 공기 중 전파 속도를 주어진 빛의 속도 c로 두면 $\lambda = \frac{c}{f}$이다. 주파수는 $f = 37.5 \times 10^6$Hz이므로 $\lambda = \frac{3 \times 10^8}{37.5 \times 10^6} = 8$m이다. 따라서 3 m 선로의 길이는 $l = \frac{3}{8}\lambda$이다.

3. 전기적 길이: 위상정수는 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$이므로 $\beta l = \frac{2\pi \cdot 3}{8} = \frac{3\pi}{4}$이다. 이는 선로를 따라 진행하면서 생기는 위상 변화이며, $\tan\frac{3\pi}{4} = -1$이다.

4. 입력 특성: $Z_0 = 120\pi\Omega$을 대입하면 $Z_{in} = j120\pi \cdot (-1) = -j120\pi\Omega$이다. **리액턴스가 음수**이므로 입력에서 본 선로는 용량성이며, ④에 해당한다. 임피던스가 0인 단락이나 무한대로 되는 개방이 아니고, 양의 리액턴스를 갖는 유도성과도 구별된다.

NoteBase