

한국과학기술원 면접·구술고사

자연계열 · 물리

문제 · 예시답안

시험 구분
자료 출처
출제 과목
문항 수
핵심 개념

입학전형 구술면접고사 (물리 A · 물리 B)
2016학년도 KAIST 선행학습 영향평가 결과보고서
물리 I, 물리 II
2문항 (소문항 6개)
평행판 축전기와 유전체, 전기 용량·전하량·전위차의 관계,
축전기에 저장된 에너지, 패러데이 전자기 유도,
맴돌이 전류에 의한 제동과 에너지 전환, 비저항과 제동력

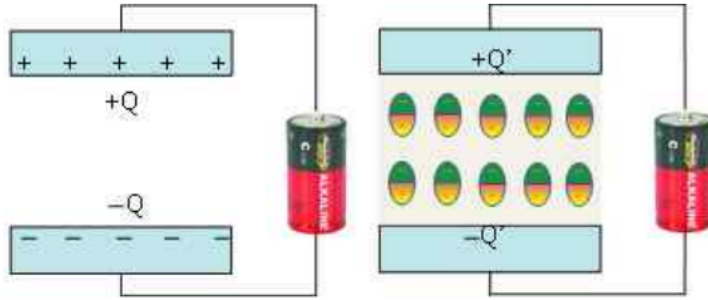
I. 문제

문제 A 평행판 축전기에 유전체를 삽입할 때의 전하량·전위차·에너지

물리 II · 전기와 자기 · 소문항 3개

- (1) 평행 금속판으로 이루어진 축전기의 전위차를 일정하게 유지하면서 유전체를 금속판 사이에 삽입할 때, 각각의 금속판에 대전되는 전하량은 어떻게 변하는지 이유와 함께 설명하시오. (3점)

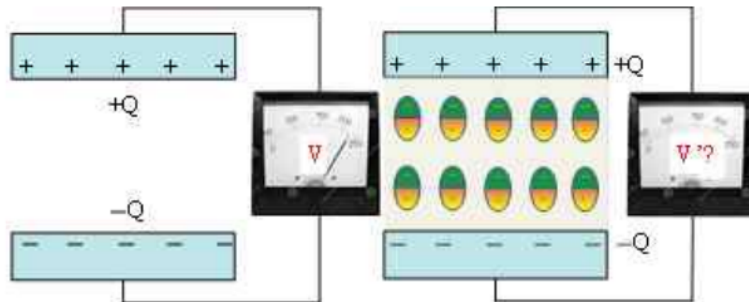
- a) 증가한다($Q' > Q$) b) 감소한다($Q' < Q$) c) 변화 없다($Q' = Q$)



전위차를 일정하게 유지한 채(전지 연결) 유전체를 삽입하는 경우

- (2) 축전기의 각 평행 금속판에 대전된 전하량을 일정하게 유지하면서 유전체를 금속판 사이에 삽입할 때, 금속판 사이의 전위차는 어떻게 변하는지 이유와 함께 설명하시오. (3점)

- a) 증가한다($V' > V$) b) 감소한다($V' < V$) c) 변화 없다($V' = V$)



전하량을 일정하게 유지한 채(전압계만 연결) 유전체를 삽입하는 경우

- (3) 위의 (1), (2)번에 기술된 각각의 경우에 대해 유전체의 삽입 전후로 발생하는 축전기에 저장된 에너지의 증감에 대해 설명하시오. (4점)

문제 B 자이로드롭의 전자기 제동

물리 I · II · 전자기 유도 · 소문항 3개

놀이공원에서 자이로드롭은 높은 위치에서부터 자유낙하를 경험하게 하는 놀이기구로서 많은 인기를 끌고 있다. 자이로드롭 설계에서 가장 중요한 것은 바닥에 닿기 전에 하강 속도를 안전하고 신뢰성 있게 줄여주는 것이다. 이를 위하여 낙하하게 되는 탑승부에는 큰 영구 막대자석이 중심에 수직방향의 자기장을 생성하도록 설치되어 있고, 가운데 기둥의 지표면 근처 하단부는 속이 빈 파이프 형태의 금속 실린더로 둘러싸여 있도록 설계하였다.

- (1) 위 자이로드롭의 제동 원리를 설명하시오. (4점)
 (2) 하강 전의 위치에너지는 어떠한 형태의 에너지들로 순차적으로 변환되는가? (3점)
 (3) 실린더를 구성하는 금속의 비저항이 하강 속도를 줄이는 제동력과 어떤 관계가 있는가? (3점)

II. 예시답안

문제 A

평행판 축전기에 유전체를 삽입할 때의 전하량·전위차·에너지

유전율과 전기 용량 · 유전 분극 · 저장 에너지

공통 준비 — 유전체가 하는 일

극판의 넓이 A , 간격 d 인 평행판 축전기의 전기 용량은 진공(공기)일 때 $C_0 = \epsilon_0 A/d$ 이다. 유전체를 넣으면 유전체 분자들이 전기장 방향으로 분극되어 극판에 가까운 유전체 표면에 극판과 반대 부호의 분극 전하가 나타난다. 이 분극 전하가 극판의 자유 전하가 만드는 전기장을 일부 상쇄하므로, 같은 자유 전하량에 대해 내부 전기장과 전위차가 비유전율(유전상수) κ (> 1) 배만큼 줄어들고, 결국 전기 용량은

$$C' = \kappa C_0 = \frac{\kappa \epsilon_0 A}{d} > C_0$$

로 커진다. 이 한 가지 사실 $C' = \kappa C_0$ 와 정의식 $Q = CV$ 로부터 (1), (2), (3)이 모두 나온다.

(1) a) 증가한다 ($Q' = \kappa Q > Q$)

전지를 연결한 채 유전체를 넣으면 전위차가 V 로 고정되므로

$$Q' = C'V = \kappa C_0 V = \kappa Q > Q$$

가 되어 전하량이 κ 배로 증가한다.

이유 — 전위차가 일정하다는 것은 극판 사이의 전기장 $E = V/d$ 도 일정하다는 뜻이다. 그런데 유전체의 분극 전하는 극판 전하가 만드는 전기장을 깎아내리므로, 전기장을 원래 값 그대로 유지하려면 극판에 자유 전하를 더 있어야 한다. 그 부족분을 전지가 회로를 통해 밀어 넣어 주기 때문에 전하량이 늘어난다. (유전체를 넣는 순간 전지에서 극판으로 향하는 순간적인 충전 전류가 흐른다.)

(2) b) 감소한다 ($V' = V/\kappa < V$)

축전기를 전지에서 떼어 내고(전압계만 연결) 유전체를 넣으면 극판의 전하량 Q 가 갈 곳이 없어 고정되므로

$$V' = \frac{Q}{C'} = \frac{Q}{\kappa C_0} = \frac{V}{\kappa} < V$$

가 되어 전위차가 $1/\kappa$ 배로 감소한다.

이유 — 전하량이 일정하면 극판의 자유 전하가 만드는 전기장은 그대로인데, 분극 전하가 만드는 반대 방향 전기장이 새로 더해져 알짜 전기장이 $E' = E/\kappa$ 로 줄어든다. 전위차는 $V' = E'd$ 이므로 같은 비율로 줄어든다.

(3) 전위차를 유지한 경우는 κ 배로 증가, 전하량을 유지한 경우는 $1/\kappa$ 배로 감소

축전기에 저장된 에너지는 $U = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2}QV$ 로 쓸 수 있으므로, 각 경우에 고정된 양을 쓰는 표현을 고르면 곧바로 답이 나온다.

• (1)의 경우 (V 일정): $U = \frac{1}{2}CV^2$ 에서 C 만 κ 배가 되므로

$$U' = \frac{1}{2}(\kappa C_0)V^2 = \kappa U \rightarrow \kappa \text{ 배로 증가}$$

• (2)의 경우 (Q 일정): $U = \frac{Q^2}{2C}$ 에서 C 만 κ 배가 되므로

$$U' = \frac{Q^2}{2\kappa C_0} = \frac{U}{\kappa} \rightarrow 1/\kappa \text{ 배로 감소}$$

에너지는 어디서 오고 어디로 가는가 — 두 경우 모두 유전체는 전기장이 센 쪽(극판 사이)으로 끌려 들어간다. 즉 전기력이 유전체에 양의 일을 해 준다.

• V 일정: 전지가 $\Delta Q \cdot V = (\kappa - 1)C_0 V^2$ 만큼의 일을 하고, 그 가운데 절반인 $\frac{1}{2}(\kappa - 1)C_0 V^2$ 이 축전기의 저장 에너지 증가분이 되며, 나머지 절반이 유전체를 끌어들이는 역학적 일(과 마찰·저항에 의한 열)로 나간다. 그래서 저장 에너지가 늘어나도 에너지 보존에 어긋나지 않는다.

• Q 일정: 전지가 없으므로 에너지를 공급해 줄 곳이 없다. 유전체를 끌어들이는 일을 축전기에 저장된 에너지가 스스로 감당하고, 그만큼 저장 에너지가 줄어든다. 감소량 $U - U' = U(1 - 1/\kappa)$ 이 바로 그 일에 해당한다.

두 경우가 정반대의 결과를 주는 이유는 “유전체를 넣으면 C 가 커진다”는 사실은 같지만, 무엇이 고정되어 있는지가 다르기 때문이다.

문제 B **자이로드롭의 전자기 제동**

패러데이 법칙 · 맥스웰 전류 · 렌츠 법칙

(1) 맥스웰 전류(유도 전류)에 의한 제동

탐승부가 낙하하여 하단부의 금속 실린더 영역에 들어서면, 탐승부에 설치된 영구 막대자석이 함께 내려오면서 금속 실린더를 지나는 자기다발이 시간에 따라 변한다. 패러데이 전자기 유도 법칙에 의해 실린더 안에 유도 기전력이 생기고, 실린더는 도체이므로 그 벽면을 따라 원형으로 도는 맥스웰 전류(eddy current)가 흐른다.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad I_{\text{eddy}} = \frac{\varepsilon}{R_{\text{실린더}}}$$

렌츠 법칙에 의해 이 유도 전류는 자기다발의 변화를 방해하는 방향으로 흐르므로, 자석과 실린더 사이에는 상대 운동을 방해하는 방향의 힘이 작용한다. 자석(탐승부)의 입장에서는 낙하를 방해하는 위쪽 방향의 제동력이 되어 하강 속도가 줄어든다.

자기다발의 변화율이 속도에 비례하므로 유도 기전력과 전류도 속도에 비례하고, 결국 제동력은

$$F_{\text{제동}} \propto v$$

즉 빠르게 떨어질 때 강하게, 느려지면 약하게 걸리는 속도 비례 제동력이 된다.

이 특성 때문에 자이로드롭은 기계적인 접촉 없이(마찰 브레이크의 마모·발열·고장 없이) 부드럽고 신뢰성 있게 감속하며, 속도가 커질수록 저항이 커지므로 어느 속도 이상으로는 빨라지지 않는 종단속도에 가까운 안전한 하강이 가능하다.

(2) 중력 위치에너지 → 운동에너지 → 전기에너지 → 열에너지

$$\underbrace{\text{중력 위치에너지}}_{\text{하강 전}} \rightarrow \underbrace{\text{운동에너지}}_{\text{자유낙하 구간}} \rightarrow \underbrace{\text{전기에너지}}_{\text{맴돌이 전류}} \rightarrow \underbrace{\text{열에너지}}_{\text{실린더의 줄열}}$$

- ① **중력 위치에너지 → 운동에너지**: 실린더 영역에 들어가기 전까지는 거의 자유낙하이므로 높이가 줄면서 속력이 커진다.
- ② **운동에너지 → 전기에너지**: 실린더 영역에서 자석의 운동이 유도 기전력을 만들고, 이 기전력이 맴돌이 전류를 흐르게 한다. 이때 제동력이 탐승부에 음의 일을 하여 운동에너지를 가져간다.
- ③ **전기에너지 → 열에너지**: 맴돌이 전류는 실린더의 저항을 통과하면서 줄열 $I^2 R$ 로 소모된다. 결국 탐승부가 잃은 역학적 에너지는 전부 금속 실린더의 온도를 올리는 열로 바뀌고, 일부는 소리·미세한 진동으로 나간다.

에너지 보존의 관점에서 이 놀이기구는 위치에너지를 최종적으로 실린더의 열로 버리는 장치이다.

(3) 제동력은 비저항에 반비례한다 — 비저항이 작을수록 제동력이 크다

맴돌이 전류의 크기는 유도 기전력을 실린더의 전기 저항으로 나눈 값이고, 저항은 비저항 ρ 에 비례한다($R = \rho \ell / A$). 제동력은 이 전류가 자기장 속에서 받는 힘이므로 전류에 비례한다.

$$I_{\text{eddy}} = \frac{\varepsilon}{R} \propto \frac{\varepsilon}{\rho}, \quad F_{\text{제동}} \propto I_{\text{eddy}} B \propto \frac{v B^2}{\rho}$$

$$F_{\text{제동}} \propto \frac{1}{\rho}$$

즉 비저항이 **작은**(전기가 잘 통하는) 금속을 쓸수록 같은 속도에서 더 큰 제동력을 얻는다.

따라서 실린더 재료로는 비저항이 작은 **구리**($1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)나 **알루미늄**($2.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)이 적합하고, 실제 자이로 드롭·놀이기구의 자기 제동 장치에도 이 금속들이 쓰인다. 반대로 비저항이 큰 금속(예: 스테인리스강, 니크롬)을 쓰면 같은 속도에서 맴돌이 전류가 작게 흘러 제동력이 부족해진다. 알루미늄은 구리보다 비저항이 조금 크지만 가볍고 값이 싸다는 장점이 있어 함께 고려된다.

같은 이유로 실린더를 두껍게 만들어 전류가 흐르는 단면적을 넓히면 저항이 줄어 제동력이 커지고, 반대로 실린더에 세로로 홈을 파서 맴돌이 전류의 경로를 끊으면(변압기 철심을 얇은 판으로 겹쳐 만드는 것과 같은 이유) 제동력이 크게 줄어든다.