

서울대학교 면접·구술고사

자연계열 · 물리학

문제 · 예시답안

시험 구분
전형
출제 과목
문항 수
핵심 개념

면접 및 구술고사 (자연계열, 물리)
수시모집 일반전형
물리 I, 물리 II
2문항 (소문항 10개)
표준모형의 기본입자와 기본 상호작용, 뮤온의 붕괴,
2차원 탄성충돌과 최대 에너지 전달, 중성자 감속재,
평행판 축전기의 유전율, RLC 직렬회로의 공진,
변압기와 다이오드 정류·평활 회로

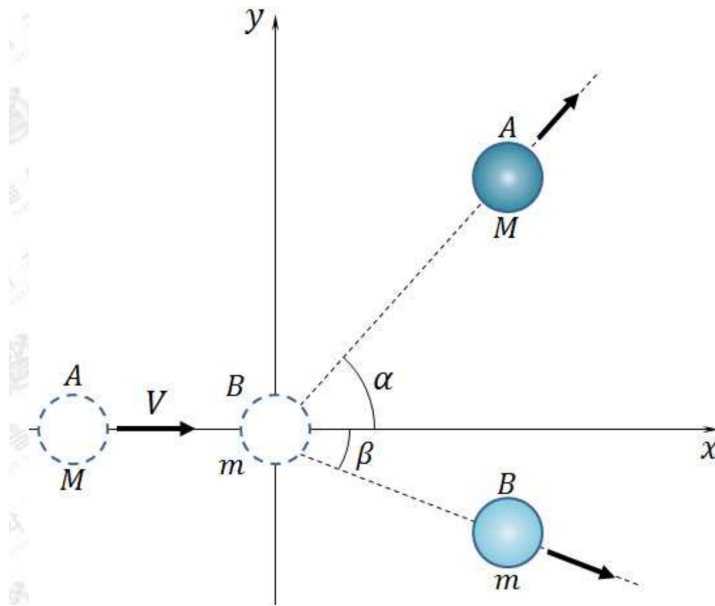
I. 문제

문제 1 뮤온과 표준모형 · 2차원 탄성충돌에 의한 에너지 손실

물리 I · II · 소문항 5개

우주선(cosmic ray)이 지구 대기권에 도달하여 공기와 충돌하면 뮤온을 만든다. 이때 생긴 뮤온은 질량이 전자 질량의 약 200배이며 광속의 약 99%로 이동한다. 뮤온이 가진 에너지는 물질 속을 지나면서 물질에 흡수된다.

- (1-1) 뮤온은 표준모형의 기본입자 가운데 하나로 경입자(렙톤)의 한 종류이다. 표준모형을 구성하는 기본입자들과 기본 상호작용을 설명하시오.
- (1-2) 뮤온은 수명이 다하면 다른 경입자(들)로 바뀐다. 뮤온을 다른 경입자(들)로 바뀌게 하는 상호작용은 어떤 상호작용인지 설명하시오.
- (1-3) 입자가 물질 속을 통과할 때 에너지를 잃어 가는 과정 가운데 하나는 물질 속의 다른 입자들과의 탄성 충돌이다. [그림 1]과 같이 2차원 평면상에서 속력 V 로 움직이는 질량 M 인 물체 A 가 정지해 있는 질량 m 인 물체 B 와 충돌하는 과정을 생각해 보자. 충돌 후 물체 A 는 원래의 진행 방향에서 어떤 각도 α ($0 \leq \alpha \leq \pi$) 로 꺾여 진행하면서 물체 B 를 각도 β (≥ 0) 로 튕겨낸다. 이 때 물체 A 가 잃어버리는 운동에너지($\Delta K \geq 0$)를 그림에서 주어진 변수들을 이용하여 나타내고 질량 m 과 각도 α 를 변화시킬 때 ΔK 의 최댓값을 구하시오. (많은 기본입자들은 거의 빛의 속도로 움직이고 있어서 특수 상대성 이론의 효과를 고려해야 하지만 본 문제에서는 무시한다.)



[그림 1] 정지한 B 와 충돌한 뒤 각각 α, β 로 갈라지는 두 물체

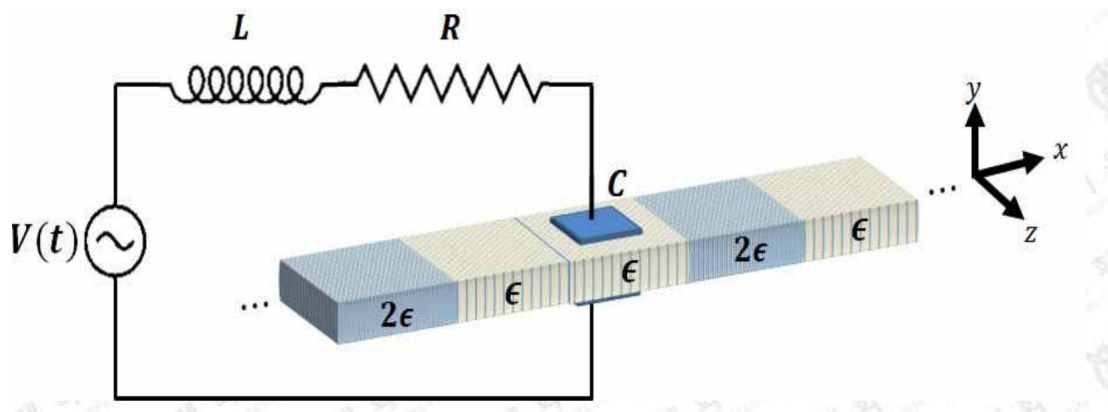
- (1-4) 뮤온은 물질 속을 통과할 때 주로 물질 속의 전자와 탄성 충돌을 일으키면서 자신의 에너지를 잃어간다. 뮤온의 속력에 비하면 물질 속의 전자는 정지해 있다고 보아도 무방하다. 그렇다면 뮤온이 전자와 한 번의 탄성 충돌에서 최대 몇 %정도의 운동에너지를 잃어버리는지 설명하시오.
- (1-5) 원자로에서는 원자핵의 분열에서 나오는 고속 중성자를 느리게 하여 연쇄 반응을 일으킨다. 이 때 중성자를 느리게 하는 데는 감속재를 사용한다. 감속재 속에서 고속 중성자가 어떤 과정을 거쳐서 느려지는지 설명하고 중성자 감속에 효율적인 물질을 생각해 보시오.

문제 2 유전체가 이동하는 축전기를 포함한 RLC 직렬회로

물리 I · II · 소문항 5개

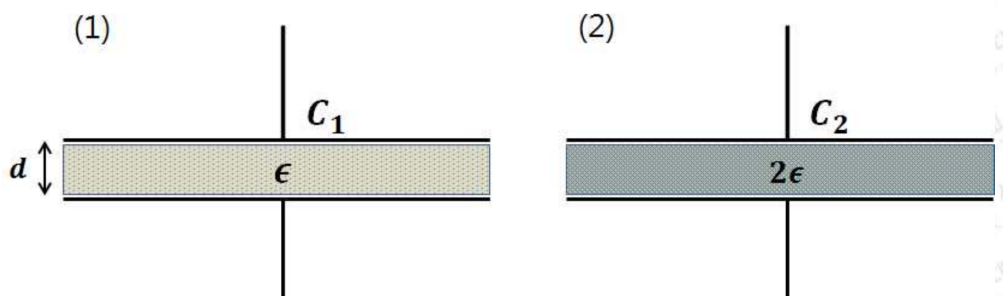
문제 2. [2-1 ~ 2-3]

다음 그림은 저항 R , 코일 L , 축전기 C 가 교류 전원 장치 $V(t)$ 에 직렬로 연결되어 있는 전기회로를 나타낸다. 축전기의 두 극판은 넓이가 A 이고 극판 사이의 거리는 d 이다. 또한, 축전기 극판 사이를 긴 유전체의 일부분이 채우고 있다. 이 유전체는 길이가 일정한 마디의 배열로 이루어져 있고 각 마디의 유전율은 ϵ 또는 2ϵ 이다.

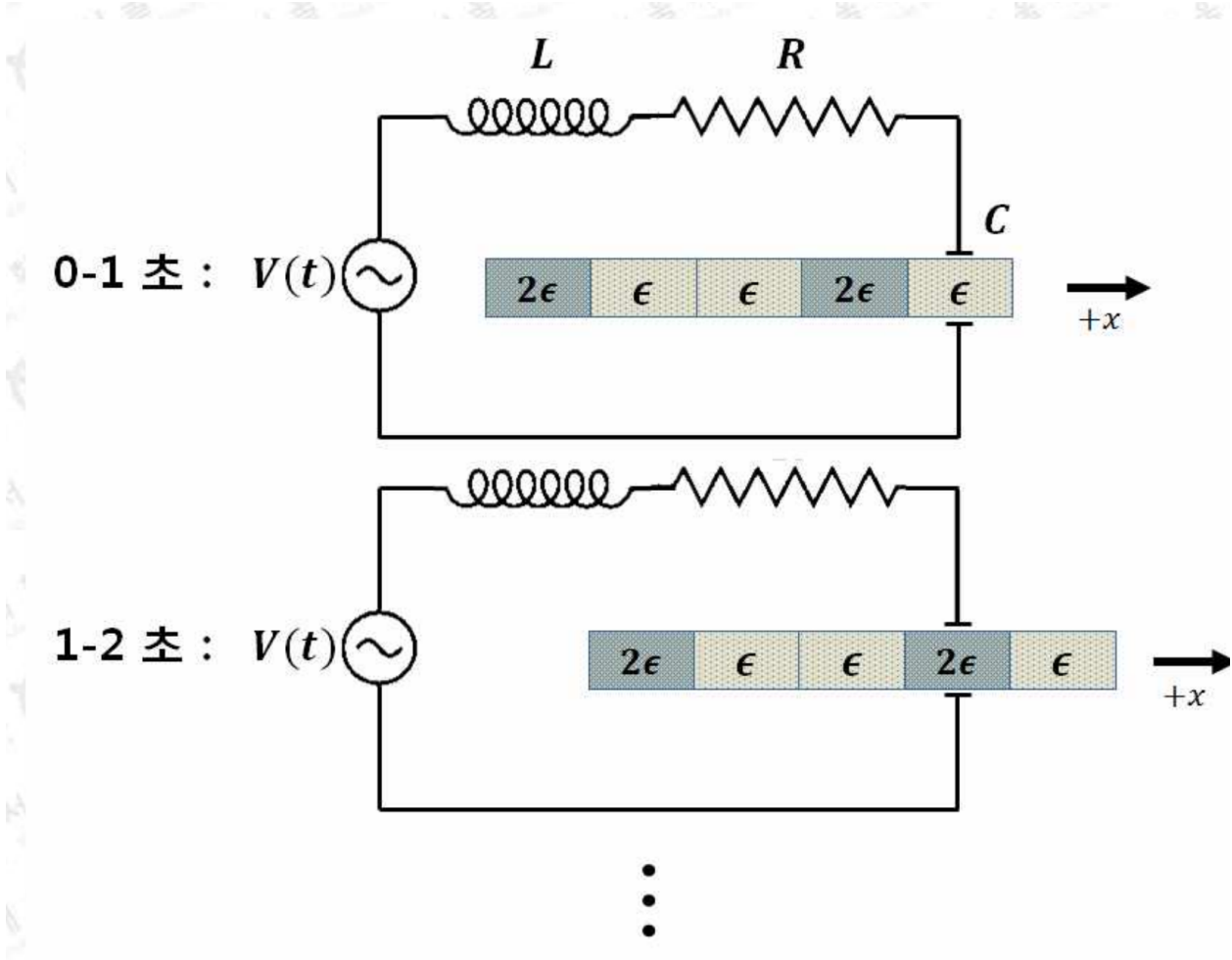


[그림 2] 유전체 마디 배열이 극판 사이를 지나가는 RLC 직렬회로

- (2-1) 유전체의 유전율에 따라 다음의 두 경우가 가능하다. 유전율 ϵ 과 2ϵ 인 마디가 극판 사이에 위치할 때의 전기용량을 각각 C_1, C_2 라고 할 때, C_1 과 C_2 를 구하시오. 두 유전체 마디의 경계가 극판 사이에 위치하는 경우는 무시한다.

[그림 3] 극판 사이를 유전율 ϵ (좌) 또는 2ϵ (우) 인 마디가 채운 경우

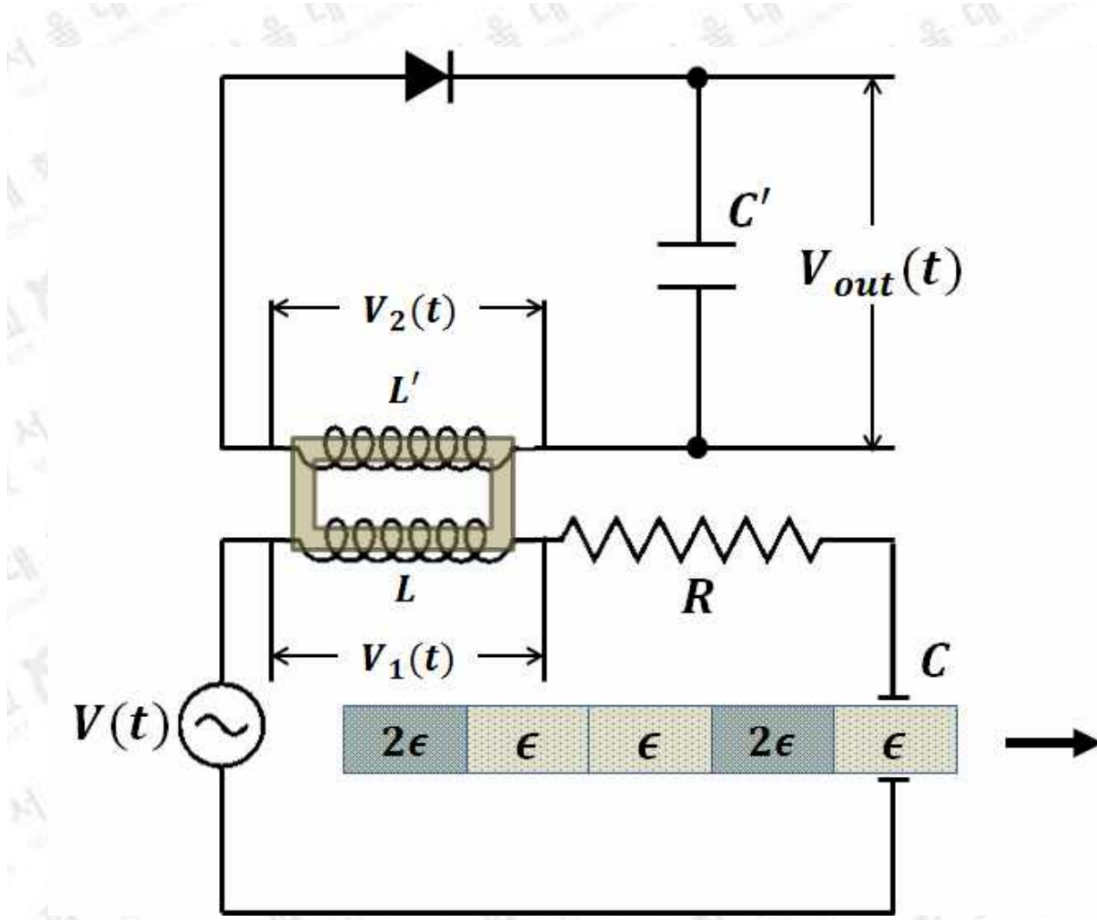
- (2-2) 위 회로의 전원장치는 $V(t) = V_0 \sin(2\pi ft)$ 의 교류전압을 회로에 걸어주고 있다. $C = C_1, C = C_2$ 인 각각의 경우에 대하여 주파수 f 에 대한 교류전류의 진폭 I_0 의 변화를 개략적으로 그리고 공진 주파수와 I_0 의 최댓값을 구하시오.
- (2-3) 아래 그림과 같이 유전체가 x 방향으로 1초에 한 마디씩 움직이는 경우를 생각해 보자. 각 마디는 축전기 극판 사이에 1초간 머무르다가 다음 마디로 즉시 넘어가며, 두 마디의 경계가 축전기에 위치하는 경우는 무시하기로 한다. $C = C_2$ 일 때 **문제 2-2**에서 구한 공진 주파수를 f_2 라고 하자. 또한 교류전원의 주파수 f 를 f_2 로 고정시키면 회로에는 $I(t) = I_0 \sin(2\pi f_2 t)$ 의 교류전류가 흐른다고 한다. 이때 $I(t)$ 의 그래프를 0초에서 5초까지 개략적으로 그리고 설명하시오. 단, f_2 는 1 Hz보다 충분히 크다고 가정한다.



[그림 4] 1초마다 한 마디씩 $+x$ 로 이동하는 유전체

문제 2. [2-4 ~ 2-5]

아래 그림과 같이 원래 전기회로의 코일 L 에 연철심을 넣고 2차 코일 L' 을 L 의 감은 수와 같게 감았다. 또한 2차 코일과 직렬로 다이오드와 축전기 C' 이 달려있다.



[그림 5] 2차 코일 L' 에 다이오드와 축전기 C' 을 연결한 회로

- (2-4) 1차 코일 L 에 걸리는 전압을 $V_1(t)$, 2차 코일 L' 에 걸리는 전압을 $V_2(t)$ 라고 하자. 교류전원의 주파수 f 를 f_2 로 고정시키면 $V_1(t) = 2\pi f_2 L I_0 \sin(2\pi f_2 t)$ 이다. 문제 2-3과 같은 방식으로 유전체 마디가 축전기 극판 사이를 1초에 한 마디씩 지나갈 때 $V_2(t) = V_2 \sin(2\pi f_2 t)$ 의 그래프를 시간 0초에서 5초까지 개략적으로 그리고 설명하시오. 단, f_2 는 1 Hz보다 충분히 크다고 가정한다.
- (2-5) 다이오드와 축전기를 지난 출력 전압을 $V_{out}(t)$ 라고 했을 때, $V_{out}(t)$ 의 시간에 대한 그래프를 시간 0초에서 5초까지 개략적으로 그리고 설명하시오.

II. 예시답안

문제 1 뮤온과 표준모형 · 2차원 탄성충돌에 의한 에너지 손실

표준모형 · 탄성충돌 · 감속제

(1-1) 물질입자 12종(쿼크 6 + 렙톤 6)과 매개입자, 그리고 세 가지 기본 상호작용

① 물질을 이루는 기본입자(페르미온, 스핀 1/2) — 3세대로 반복

	1세대	2세대	3세대
쿼크	u, d	c, s	t, b
렙톤	e^-, ν_e	μ^-, ν_μ	τ^-, ν_τ

쿼크는 분수 전하($+2/3e$ 또는 $-1/3e$)를 가지며 색전하를 띠어 강한 상호작용에 참여하고, 렙톤은 색전하가 없어 강한 상호작용을 하지 않는다. 각 입자마다 반입자가 존재한다. **뮤온 μ^- 는 2세대의 하전 렙톤**으로, 전자와 전하·스핀이 같고 질량만 약 200배 크다.

② 힘을 매개하는 기본입자(게이지 보손, 스핀 1)와 힉스 보손

광자 γ (전자기력), 글루온 g (강한 상호작용), $W^\pm$ 와 Z^0 (약한 상호작용), 그리고 입자에 질량을 부여하는 힉스 보손 H (스핀 0).

③ 기본 상호작용

자연의 기본 상호작용은 **강한 상호작용, 전자기 상호작용, 약한 상호작용, 중력**의 네 가지이며, 표준모형은 이 가운데 **앞의 세 가지만** 기술한다(중력은 아직 표준모형에 포함되어 있지 않다). 강한 상호작용은 쿼크를 묶어 양성자·중성자를 만들고 원자핵을 결합시키며, 전자기 상호작용은 전하를 띤 입자 사이에, 약한 상호작용은 입자의 종류(플레이버)를 바꾸는 붕괴에 작용한다.

(1-2) 약한 상호작용

뮤온의 붕괴는

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

로 일어난다. 이 과정에서 뮤온은 W^- 보손을 방출하며 뮤온 중성미자 ν_μ 로 바뀌고, W^- 는 곧바로 e^- 와 $\bar{\nu}_e$ 로 붕괴한다. 즉 **W 보손이 매개하는 약한 상호작용**이다.

강한 상호작용은 색전하가 없는 렙톤에는 작용하지 않고, 전자기 상호작용은 입자의 종류를 바꾸지 못한다(광자는 플레이버를 보존한다). 뮤온을 전자와 중성미자로 **바꾸는**, 즉 렙톤의 세대(플레이버)를 변화시키는 상호작용은 약한 상호작용 뿐이다. 약한 상호작용은 매개입자 W, Z 의 질량이 매우 커서 도달 거리가 짧고 세기가 약하며, 그 때문에 뮤온의 수명이 2.2×10^{-6} 초로 상대적으로 길다.

(1-3) $\Delta K = \frac{1}{2}M(V^2 - V_A^2)$, 최댓값은 $\frac{1}{2}MV^2$ ($m = M$ 인 정면충돌)

충돌 후 A, B 의 속력을 각각 V_A, v_B 라 하면 운동량 보존과 운동에너지 보존은

$$MV = MV_A \cos \alpha + mv_B \cos \beta, \quad 0 = MV_A \sin \alpha - mv_B \sin \beta$$

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}MV_A^2 + \frac{1}{2}mv_B^2$$

이다. 앞의 두 식을 각각 제곱하여 더하면 β 가 소거되어

$$m^2 v_B^2 = M^2 (V^2 - 2VV_A \cos \alpha + V_A^2)$$

이고, 에너지 보존식에서 $mv_B^2 = M(V^2 - V_A^2)$ 이므로 이를 대입하면

$$m(V^2 - V_A^2) = M(V^2 - 2VV_A \cos \alpha + V_A^2)$$

$$\rightarrow (M + m)V_A^2 - 2MV \cos \alpha \cdot V_A + (M - m)V^2 = 0$$

$$V_A = \frac{M \cos \alpha \pm \sqrt{m^2 - M^2 \sin^2 \alpha}}{M + m} V, \quad \Delta K = \frac{1}{2}M(V^2 - V_A^2)$$

정리하면 ΔK 는 다음과 같이 쓸 수도 있다.

$$\Delta K = \frac{M^2 V^2}{(M + m)^2} (m + M \sin^2 \alpha \mp \cos \alpha \sqrt{m^2 - M^2 \sin^2 \alpha})$$

산란각의 제한 — 근호 안이 음수가 아니어야 하므로 $m \geq M \sin \alpha$ 가 성립해야 한다. 즉 $M > m$ (무거운 입자가 가벼운 입자를 때리는 경우)이면 산란각이 $\alpha \leq \arcsin(m/M)$ 로 제한되며, 이 범위에서 두 부호 모두 물리적인 해이다. 반대로 $M \leq m$ 이면 α 는 0 부터 π 까지 자유롭게 $V_A > 0$ 을 주는 + 부호의 해만 남는다.

최댓값 — $\Delta K = 1/2M(V^2 - V_A^2)$ 는 V_A 가 작을수록 커지며, A 가 잃을 수 있는 에너지는 처음 운동에너지를 넘을 수 없으므로 $\Delta K \leq 1/2MV^2$ 이다. 등호는 $V_A = 0$, 즉 V_A 에 대한 이차방정식의 상수항 $(M - m)V^2$ 이 0이 되는 $m = M$ 일 때 성립한다. 실제로 정면충돌($\alpha = 0$, 따라서 $\beta = 0$)에서는 $|V_A| = |M - m| V / (M + m)$ 이므로

$$\frac{\Delta K}{\frac{1}{2}MV^2} = 1 - \left(\frac{M - m}{M + m} \right)^2 = \frac{4Mm}{(M + m)^2} \leq 1$$

이고, 산술·기하평균 부등식 $(M + m)^2 \geq 4Mm$ 에서 등호는 $m = M$ 일 때만 성립한다.

$$\Delta K_{\max} = \frac{1}{2}MV^2 \quad (m = M \text{ 인 정면충돌})$$

이때 A 는 완전히 정지하고 B 가 A 의 운동에너지를 모두 가져간다.

(1-4) 약 2%

뮤온을 $M = 200m_e$, 정지한 전자를 $m = m_e$ 로 두고 1-3에서 얻은 최대 에너지 전달률 공식을 쓰면

$$\frac{\Delta K}{K} \Big|_{\max} = \frac{4Mm}{(M+m)^2} = \frac{4 \cdot 200m_e \cdot m_e}{(201m_e)^2} = \frac{800}{40401} \approx 0.0198$$

한 번의 탄성 충돌에서 뮤온이 잃는 운동에너지는 최대 약 2% 이다.

즉 뮤온은 자기보다 200배 가벼운 전자와 부딪혀서는 한 번에 거의 에너지를 잃지 못하며, 수십~수백 번의 충돌을 겪어야 비로소 상당한 에너지를 잃는다. 이것이 뮤온이 물질을 깊이 관통하여 지표면까지 도달할 수 있는 이유 가운데 하나이다. (질량비가 클수록 전달률이 작아지는 것은 무거운 공이 가벼운 공을 튕겨내도 거의 그대로 진행하는 것과 같다.)

(1-5) 감속재 원자핵과의 반복적인 탄성 충돌 — 가벼운 원자핵일수록 효율적 (중수 D_2O , 흑연, 경수 H_2O)

감속 과정 — 핵분열에서 나오는 고속 중성자(약 2 MeV)는 전하가 없어 전자와는 거의 상호작용하지 않고 **감속재의 원자핵과 탄성 충돌**을 반복하면서 운동에너지를 원자핵의 되튐 운동에너지로 넘겨준다. 여러 번의 충돌을 거쳐 결국 감속재 원자들과 열평형에 이르는 열중성자(약 0.025 eV)가 되고, 이때 ^{235}U 의 핵분열 단면적이 매우 커지므로 연쇄 반응이 유지된다.

효율적인 물질 — 1-3의 결과에서 한 번의 정면충돌로 전달되는 에너지의 비율은

$$\frac{4Mm}{(M+m)^2}$$

이고 이는 감속재 원자핵의 질량 m 이 중성자 질량 M 과 같을 때 최대(=1)가 된다. 따라서 **가벼운 원자핵**을 가진 물질이 유리하다.

- **수소(1H)**: 질량이 중성자와 거의 같아 한 번의 정면충돌로 에너지를 모두 넘겨줄 수 있어 감속 능력이 가장 크다. 다만 1H 는 중성자를 흡수($n + p \rightarrow d + \gamma$)하는 성질이 있어, 경수로에서는 농축 우라늄을 함께 써야 한다. → **경수(H_2O)**
- **중수소(2H)**: 질량이 중성자의 약 2배로 감속 능력은 수소보다 조금 떨어지지만 중성자 흡수가 매우 적어 천연 우라늄으로도 임계에 도달할 수 있다. → **중수(D_2O)**
- **탄소(^{12}C)**: 질량이 12배라 한 번에 최대 $4 \cdot 12/13^2 \approx 28\%$ 만 전달하므로 충돌 횟수는 많이 필요하지만, 흡수가 적고 값이 싸며 고온에 강하다. → **흑연**
- 납·우라늄처럼 무거운 원자핵은 $4Mm/(M+m)^2$ 가 매우 작아 거의 감속되지 않고 튕겨 나오기만 하므로 감속재로 부적합하다.

문제 2 유전체가 이동하는 축전기를 포함한 RLC 직렬회로

전기용량 · 공진 · 변압기와 정류

$$(2-1) C_1 = \frac{\varepsilon A}{d}, C_2 = \frac{2\varepsilon A}{d}$$

극판 넓이 A , 간격 d 인 평행판 축전기의 전기 용량은 극판 사이를 유전율 ε' 인 유전체가 가득 채울 때 $C = \varepsilon' A/d$ 이다. 유전체 한 마디가 극판 사이를 완전히 채우고 있으므로

$$C_1 = \frac{\varepsilon A}{d}, C_2 = \frac{(2\varepsilon)A}{d} = \frac{2\varepsilon A}{d} = 2C_1$$

즉 2ε 마디가 들어와 있을 때의 전기 용량은 ε 마디일 때의 정확히 2배이다.

$$(2-2) \text{ 공진 주파수 } f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{d}{L\varepsilon A}}, f_2 = \frac{f_1}{\sqrt{2}}, \text{ 최댓값은 모두 } I_0 = V_0/R$$

RLC 직렬회로에서 유도 리액턴스와 용량 리액턴스는 $X_L = 2\pi fL$, $X_C = 1/(2\pi fC)$ 이고 임피던스는 $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ 이므로

$$I_0(f) = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}$$

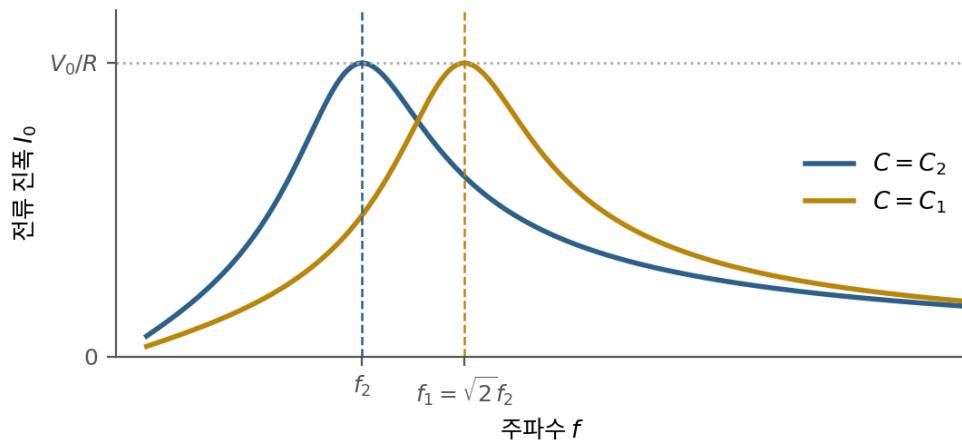
이다. 이 값은 $X_L = X_C$ 일 때, 즉 $Z = R$ 로 최소가 될 때 최대가 된다(공진).

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \rightarrow f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, I_{0,\max} = \frac{V_0}{R}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{d}{L\varepsilon A}}, f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{d}{2L\varepsilon A}} = \frac{f_1}{\sqrt{2}}$$

두 경우 모두 공진에서 I_0 의 최댓값은 V_0/R 로 같다.

$C_2 = 2C_1$ 이므로 $f \propto 1/\sqrt{C}$ 에 의해 C_2 쪽의 공진 주파수가 $1/\sqrt{2}$ 배로 낮아진다. 공진점의 높이는 C 와 무관하게 V_0/R 로 같고, 공진에서 멀어지면 I_0 는 급격히 작아진다.



예시 작도 - $I_0(f) = V_0/\sqrt{R^2 + (2\pi fL - 1/2\pi fC)^2}$, 두 공진 곡선

(2-3) 주파수는 f_2 로 일정하고, 진폭만 1초마다 두 값 사이에서 계단처럼 바뀐다

전원의 주파수는 f_2 로 고정되어 있으므로 파형의 주기는 변하지 않고, 극판 사이에 있는 마디의 유전율에 따라 **진폭 I_0** 만 달라진다.

- 2ε 마디일 때 ($C = C_2$): 정확히 공진 상태이므로 $Z = R$, 진폭은 최대 $I_0 = V_0/R$.
- ε 마디일 때 ($C = C_1 = C_2/2$): 공진에서 벗어난다. $\omega_2 = 2\pi f_2 = 1/\sqrt{LC_2}$ 이므로

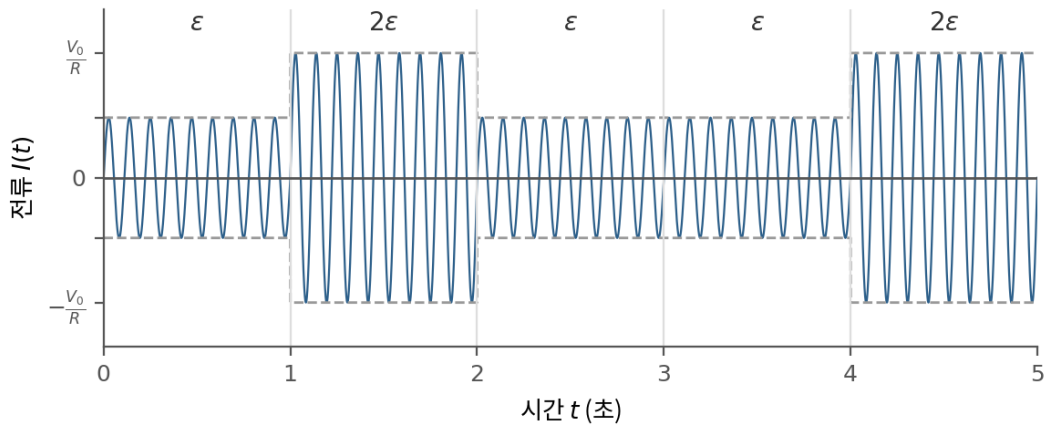
$$X_L = \omega_2 L = \sqrt{\frac{L}{C_2}}, \quad X_C = \frac{1}{\omega_2 C_1} = \frac{2}{\omega_2 C_2} = 2\sqrt{\frac{L}{C_2}}$$

$$\rightarrow |X_L - X_C| = \sqrt{\frac{L}{C_2}}, \quad I_{0'} = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \frac{L}{C_2}}} = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \frac{Ld}{2\varepsilon A}}} < \frac{V_0}{R}$$

[그림 4]에서 축전기는 고정되어 있고 유전체가 $+x$ 로 움직이므로, 극판 사이를 지나가는 마디는 배열의 오른쪽 끝에서 부터 차례로 $\varepsilon \rightarrow 2\varepsilon \rightarrow \varepsilon \rightarrow \varepsilon \rightarrow 2\varepsilon$ 이다. 따라서

시간 구간	마디	전기 용량	전류의 진폭 I_0
0 ~ 1 초	ε	C_1	$V_0/\sqrt{R^2 + L/C_2}$ (작음)
1 ~ 2 초	2ε	C_2	V_0/R (최대, 공진)
2 ~ 3 초	ε	C_1	$V_0/\sqrt{R^2 + L/C_2}$ (작음)
3 ~ 4 초	ε	C_1	$V_0/\sqrt{R^2 + L/C_2}$ (작음)
4 ~ 5 초	2ε	C_2	V_0/R (최대, 공진)

$f_2 \gg 1 \text{ Hz}$ 이므로 1초 구간마다 수많은 진동이 들어 있고, 그래프는 진폭이 1초마다 사각형 포락선처럼 급격히 바뀌는 모양이 된다.



예시 작도 — $I(t) = I_0 \sin(2\pi f_2 t)$, 회색 파선은 진폭의 포락선

(2-4) $V_2(t) = V_1(t)$ — 2-3의 전류와 완전히 같은 모양의 진폭 변화

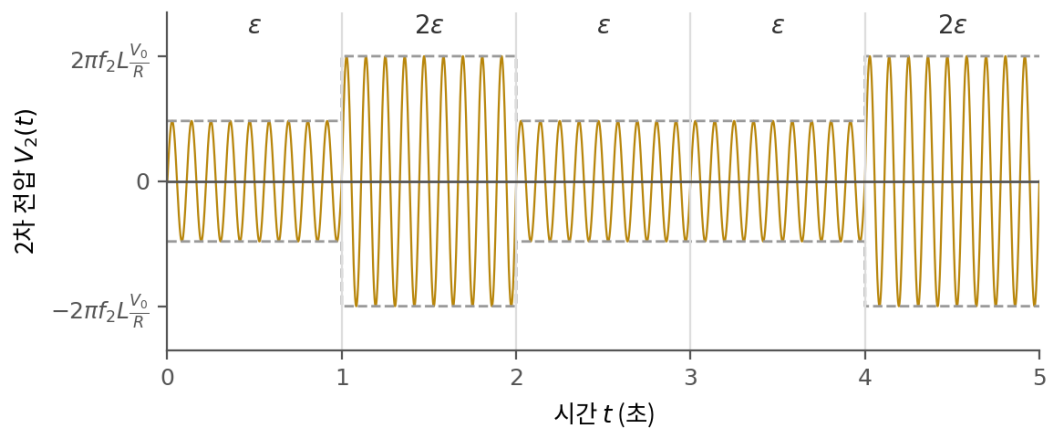
연철심으로 자기력선이 모두 이어지고 2차 코일의 감은 수가 1차 코일과 **같으므로**, 변압기의 원리 $V_2/V_1 = N_2/N_1 = 1$ 에 의해

$$V_2(t) = V_1(t) = 2\pi f_2 L I_0 \sin(2\pi f_2 t)$$

이다. 여기서 $2\pi f_2 L$ 은 시간에 무관한 상수이므로 **2차 전압의 진폭 $V_2 = 2\pi f_2 L I_0$ 는 전류의 진폭 I_0 에 정비례한다.** 따라서 2-3에서 구한 것과 똑같은 시간 구조가 그대로 나타난다.

$$V_{2,2\varepsilon} = 2\pi f_2 L \cdot \frac{V_0}{R} \quad (1 \sim 2, 4 \sim 5 \text{ 초})$$

$$V_{2,\varepsilon} = 2\pi f_2 L \cdot \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + L/C_2}} \quad (0 \sim 1, 2 \sim 3, 3 \sim 4 \text{ 초})$$



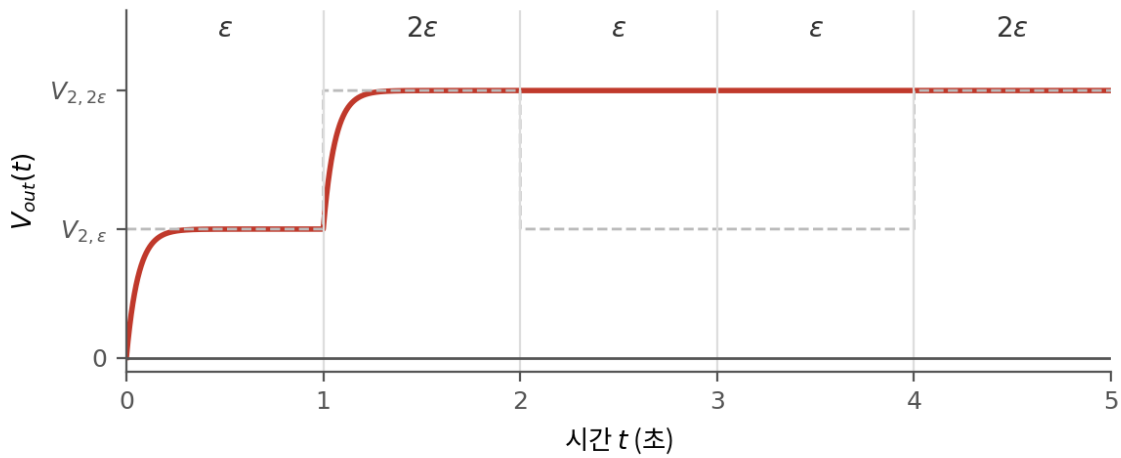
예시 작도 — $V_2(t) = 2\pi f_2 L I_0 \sin(2\pi f_2 t)$, 진폭이 I_0 를 그대로 따라간다

(2-5) 첨두값 검출(peak detector) — 지금까지의 최대 진폭에서 멈추는 계단 모양의 단조 증가 그래프

다이오드는 한쪽 방향으로만 전류를 통과시키므로 $V_2(t)$ 의 양(+) 반주기에만 C' 이 충전된다. 축전기 C' 에 병렬로 연결된 부하(저항)가 없으므로 **한 번 충전된 전하가 빠져나갈 길이 없고**, 다이오드는 $V_2 < V_{out}$ 인 동안 역방향 바이어스가 되어 완전히 차단된다. 따라서 V_{out} 은 결코 감소하지 않고, 그때까지 나타난 V_2 의 **최대 진폭**을 유지한다.

- **0 ~ 1 초:** V_2 의 진폭이 $V_{2,\epsilon}$ 이다. C' 이 몇 주기 만에 빠르게 충전되어 ($1/f_2 \ll 1$ 초) $V_{out} \approx V_{2,\epsilon}$ 에서 평평해진다.
- **1 ~ 2 초:** 공진이 되어 V_2 의 진폭이 $V_{2,2\epsilon}$ 으로 커진다. $V_2 > V_{out}$ 인 동안 다이오드가 다시 도통하여 C' 이 추가로 충전되고 V_{out} 은 $V_{2,2\epsilon}$ 까지 계단처럼 뛰어오른다.
- **2 ~ 4 초:** V_2 의 진폭이 다시 작아지지만 $V_2 < V_{out}$ 이므로 다이오드가 차단되고, 방전 경로가 없으므로 V_{out} 은 $V_{2,2\epsilon}$ 을 그대로 유지한다.
- **4 ~ 5 초:** 다시 공진이지만 C' 은 이미 $V_{2,2\epsilon}$ 까지 충전되어 있으므로 V_{out} 은 변하지 않는다.

$V_{out}(t)$ 는 $t = 0$ 부근에서 $V_{2,\epsilon}$ 까지 빠르게 오른 뒤 평평해지고, $t = 1$ 초에서 $V_{2,2\epsilon}$ 으로 한 계단 뛰어오른 다음 5초까지 그 값을 유지한다.



예시 작도 — 회색 파선은 V_2 의 진폭, 붉은 실선이 $V_{out}(t)$

만약 C' 에 부하 저항이 연결되어 있다면 V_{out} 은 각 반주기 사이에 조금씩 방전하여 작은 리플을 가지며, 진폭이 줄어드는 구간에서는 시상수에 따라 서서히 감소하는 모양이 된다.