

한국과학기술원 면접·구술고사

자연계열 · 물리

문제 · 채점 기준 · 예시답안

시험 구분
문항 구성
핵심 개념

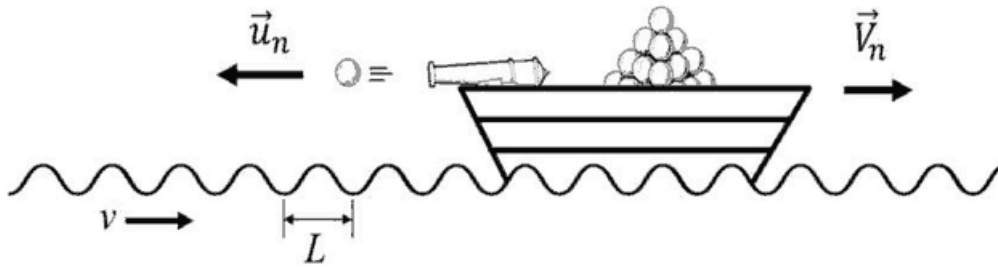
면접 및 구술고사 (물리)
4문항 (문항정보 5-8) · 총 20점
운동량 보존과 도플러 효과,
전자기 유도·상호 유도와 정류 작용,
전기장 속 대전 입자의 포물선 운동,
전자기파의 회절·광양자·복사 세기

I. 문제

문제 5 운동량 보존과 물결파의 도플러 효과

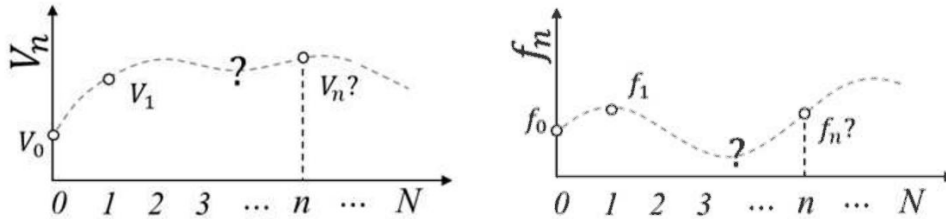
문항정보 5 · 소문항 2개 · 총 5점

배에 질량이 m 인 포탄이 N 개 실려 있고 포탄을 제외한 배의 질량은 M 이다. 배는 물의 흐름이 없는 호수에서 수평 방향의 초기속력 v_0 로 등속직선운동을 한다. 호수 밖의 정지해 있는 관찰자가 보기에, 수면에는 인접한 두 마루 사이의 거리가 L 이고 v 의 속력으로 움직이는 물결파가 배의 운동 방향과 같은 방향으로 진행하고 있다. ($v > v_0$ 라고 가정한다.)



[그림 1] 물결파와 같은 방향으로 나아가는 배. 배에 대한 상대 속력 u 로 포탄을 뒤쪽으로 발사한다.

- (1) 배의 운동 방향과 반대 방향으로 배에 대한 상대 속력 u 로 포탄을 하나씩 발사하자. 호수 밖의 정지해 있는 관찰자가 보기에, 발사된 포탄의 개수 n ($0 \leq n \leq N$)이 증가함에 따라 배의 속력 (V_n)과 단위 시간당 배에 도달하는 물결파 마루의 개수(f_n)는 어떻게 변하는지 설명하라. 즉, n 에 따른 V_n 과 f_n 의 그래프의 형태와 중요한 특성을 정성적으로 설명하라. (단, 물결파는 배의 운동에 영향을 미치지 않으며, 포탄이나 배의 운동 역시 물결파에 영향을 미치지 않는다고 가정하자. 공기 저항 및 물의 저항도 무시하자.) [4점]



[그림 2] 문항에서 답을 요구하는 두 그래프의 개형 (V_n, f_n)

- (2) 만약 포탄의 질량이 $m/2$ 이 되고 포탄의 개수가 $2N$ 이 되면, (1)에서와 같은 조건으로 포탄이 모두 발사된 후의 배의 최종속도는 (1)의 경우에 비해 늘어날지, 줄어들지, 아니면 변화가 없을지를 정성적으로 설명하라. [1점]

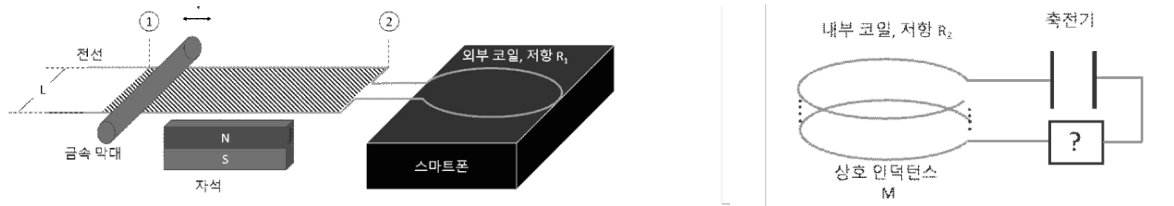
채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	$V_n - V_{n-1}$에 대한 식을 유도했으면 (+1점) - 유도한 식을 이용하거나 운동량 보존의 개념을 이용하여, 속력 V_n이 점점 증가함을 설명했으면 (+1점) - 배의 속력의 변화량 $V_n - V_{n-1}$이 점점 증가함을 설명했으면 (+1점) (발사되는 포탄의 질량 대비 배와 남은 포탄의 질량의 비율이 점점 줄어들. 따라서 비록 배가 받는 충격량(운동량 변화량)은 점점 줄어드나 배의 속력의 변화량은 점점 증가함) - 배가 물결파보다 느린 경우의 f_n의 변화 경향을 바르게 설명했으면 (+0.5점) - 배가 물결파보다 빨라지는 경우까지 정성적으로 바르게 설명했으면 (+0.5점) (f_n 그래프의 구체적인 모양은 중요하지 않으며 증가 및 감소만 잘 설명하면 됨)	4점
(2)	- 옳은 답과 함께 부분적으로라도 개념을 설명했다면 (+0.5점) - 개념까지 바르게 설명했다면 (+0.5점)	1점

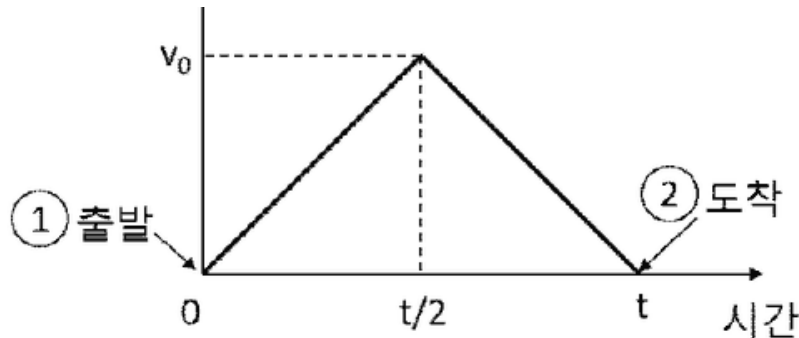
문제 6 전자기 유도와 상호 유도 · 정류 작용

문항정보 6 · 소문항 2개 · 총 5점

당신은 등산하다가 깊은 숲에서 조난을 당했고, 구조 요청을 해야 하는데 스마트폰 배터리가 완전히 방전되었다. 다행히 무선 충전이 가능한 스마트폰이라 아래 그림과 같이 자석, 전선, 금속 막대를 이용하여 충전하려고 한다. 세기 B 의 균일한 자기장이 폭이 L 인 빗금 친 면을 수직하게 통과하게 하고, 금속 막대를 다음과 같이 두 지점 ①과 ② 사이를 반복해서 왕복운동하게 하자. 그래프와 같이 지점 ①을 정지상태에서 출발하여 중간지점까지는 $t/2$ 의 시간 동안 속력이 v_0 까지 증가하는 등가속도 운동을, 중간지점에서 지점 ②까지는 $t/2$ 의 시간 동안 속력이 v_0 에서 0으로 감소하는 등가속도 운동을 하게 한다. 지점 ②에서 지점 ①로 돌아올 때도 같은 방식으로 움직이게 하고, 여기까지의 운동을 ‘왕복운동 1회’라고 부르자. 외부 코일의 저항은 R_1 , 내부 코일의 저항은 R_2 이며 다른 전선의 저항은 무시하자. (외부 코일의 모든 자기장이 스마트폰 내부의 코일을 통과한다고 가정하자.)



[그림 3] 자석·전선·금속 막대로 만든 충전 장치(왼쪽)와 스마트폰 내부 회로도(오른쪽)



[그림 4] 금속 막대의 속도-시간 그래프. 지점 ①에서 ②까지 시간 t 동안 삼각형 모양으로 변한다.

- (1) 스마트폰이 충전되기 위해서는 스마트폰 내부의 코일에 유도되는 전압의 크기가 V_2 이어야 한다고 한다. 스마트폰 내부 코일의 상호 인덕턴스가 M 일 때, 금속 막대의 최대속력 v_0 는 얼마가 되어야 하는가? [3점]
- (2) 외부 코일로부터 전달된 전기 에너지가 스마트폰 내부의 충전기에 저장되기 위해서는 내부 회로도의 물음표 상자에 무엇이 들어가야 하는가? (스마트폰 내부 회로도에서 충전기가 배터리의 역할을 하여 에너지를 저장하며, 회로도에 나타난 배선 이외의 추가 배선 및 전원 장치는 없다.) 또한, 충전기에 전기 에너지 W 를 충전하려면 금속 막대는 왕복운동을 몇 회 해야 하는가? (저항에서 열에너지로의 변환은 무시할 수 있다고 가정하자.) [2점]

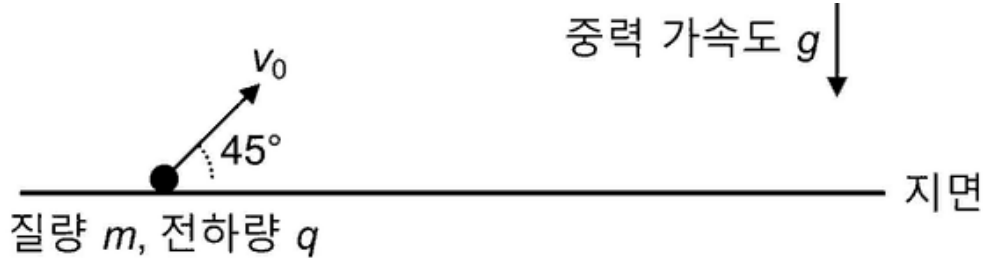
채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	- 유도 기전력 $V_1 = BLv$이 외부 코일에 걸림을 설명했으면 (+1점) - 내부 코일에 전압 V_2가 유도되려면 단위 시간당 전류 변화 $(\Delta I_1)/(\Delta t) = -V_2/M$가 필요함을 설명했으면 (+1점) - 최대속력이 $v_0 = (tR_1V_2)/(2MBL)$임을 구했으면 (+1점)	3점
(2)	- 내부 코일에 흐르는 전류의 방향이 계속 바뀌므로 충전을 위해서는 정류 작용을 해주는 다이오드가 필요하다고 설명했으면 (+1점) - 왕복운동 1회당 충전되는 전기 에너지 $W_1 = P_2t = V_2I_2t = (V_2^2t)/R_2$와 필요한 총 왕복운동 횟수 $N = W/W_1 = (WR_2)/(V_2^2t)$를 구했으면 (+1점)	2점

문제 7 전기장 속에서의 포물선 운동

문항정보 7 · 총 5점

그림과 같이 질량이 m 이고 전하량이 q ($q > 0$)인 물체를 지면에 대해 45° 각도로 v_0 의 속력으로 던진다. 이제 지면에 수직인 방향으로 균일한 전기장을 걸어서 물체의 수평 방향 이동 거리를 조절하려고 한다. 수평 방향 이동 거리가 전기장이 없는 경우의 3배가 되게 하려면 얼마의 전기장을 어느 방향으로 걸어 주어야 하는가? (단, 중력 가속도는 g 이며, 물체의 크기 및 공기 저항은 무시한다.) [5점]



[그림 5] 지면에 대해 45° 로 던져지는 질량 m , 전하량 q 인 물체

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
없음	“수평 방향으로의 전기장에 상관없이 물체는 같은 속력의 등속도 운동을 하여, 수평 방향 이동 거리는 체공 시간에 비례한다”를 알고 활용했으면 (+1점) - 체공 시간이 가속도에 반비례한다는 식(예: $t = (\sqrt{2}v_0)/g$)을 얻었으면 (+1점) “수평 방향 이동 거리가 전기장이 없는 경우의 3배가 되게 하려면, 체공 시간을 3배로 만들면 되고, 이를 위해서는 가속도가 연직 아래 방향으로 $g/3$가 되도록 전기장을 걸면 된다”는 아이디어를 갖고 문제를 풀려고 했으면 (+1점) - 물체가 양전하를 띠고 있으므로($q > 0$) 전기장을 연직 위 방향으로 걸어야 한다고 답했으면 (+1점) - 전기장의 크기가 $E = (2mg)/(3q)$임을 구했으면 (+1점)	5점

문제 8 전자기파의 회절과 광양자 · 복사 세기

문항정보 8 · 소문항 3개 · 총 5점

5G 통신은 LTE 통신보다 높은 주파수의 전자기파를 이용하고 넓은 주파수 대역을 사용하여 더 빠른 무선통신을 제공하는 것으로 알려져 있다.

- (1) 5G 통신은 LTE 통신에 비하여 기지국 안테나의 크기를 작게 할 수 있는 장점이 있지만, 전자기파가 건물과 같은 사물에 가려질 경우 수신이 나빠지는 단점이 있다고 한다. 이러한 장점과 단점의 이유를 설명해 보라. [2점]
- (2) 감마선과 같이 에너지가 높은 전자기파는 원자로부터 전자를 유리(전리)시켜 DNA를 손상시키는 작용을 할 수 있다. 5G 통신에 50 W 출력을 가지는 3.5 GHz 주파수의 전자기파가 사용된다고 할 때, 이러한 전자기파가 DNA를 손상시킬 수 있는 위험도는 어느 정도인가? 이온화 에너지가 다른 원자들에 비해 낮은 것으로 알려진 세슘 원자의 이온화 에너지는 6.2×10^{-19} J이다. (플랑크 상수는 $h = 6.6 \times 10^{-34}$ kg·m²/s이다.) [1.5점]
- (3) 전자기파는 물체에 흡수될 때 열에너지로 전환될 수 있다. 기지국으로부터 50 W의 전자기파가 발생하여 모든 방향으로 고르게 퍼져나간다. 기지국으로부터 5 m 떨어진 곳에서 전자기파가 전달할 수 있는 최대 열에너지를 지표면에서의 태양 복사에너지와 비교해 보라. (맑은 날 1 m²의 지표면에 한 시간 동안 약 3600 kJ의 태양 복사에너지가 도달한다.) [1.5점]

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	5G 통신의 장점을 설명할 때, 주파수와 파장의 관계를 바르게 설명하였으면 (+1점) 5G 통신의 단점을 설명할 때, 파장의 길이와 회절의 정도를 바르게 설명했으면 (+1점)	2점
(2)	- 광자 에너지가 세슘 원자의 이온화 에너지보다도 훨씬 낮으므로 전자기파가 원자를 이온화시켜 DNA를 손상시킬 가능성이 극히 낮다고 답했으면 (+1점) 50 W (빛의 파동성)가 아닌 광자 에너지 hf (빛의 입자성)를 고려해야 하는 이유를 설명했으면 (+0.5점)	1.5점
(3)	- 기지국으로부터 5 m 떨어진 곳에서 전자기파가 전달할 수 있는 최대 열에너지 0.16 W/m^2를 구했으면 (+1점) - 지표면에서의 태양 복사에너지를 구해서, 기지국으로부터 전달받을 수 있는 열에너지가 태양 복사 에너지보다 매우 적다고 답했으면 (+0.5점)	1.5점

II. 예시답안

문제 5 운동량 보존과 물결파의 도플러 효과

운동량 보존 · 상대 속도 · 겉보기 진동수

(1) V_n 은 계속 증가하며 그 증가폭 ΔV_n 자체도 커진다. f_n 은 줄어들어 $V_n = v$ 인 순간 0이 되었다가, 배가 물결파를 앞지르면 다시 커진다.

(a) 계와 좌표를 정한다 — 호수 밖에 정지한 관찰자를 기준으로 배의 진행 방향을 +로 잡는다. 계는 "배 + 배에 남아 있는 포탄 전부"이며, 포탄을 쏘는 순간 이 계에는 외력이 작용하지 않으므로 **운동량이 보존된다**.

n 번째 포탄을 쏘기 직전의 계에는 아직 $N - n + 1$ 개의 포탄이 남아 있으므로 전체 질량은 $(N - n + 1)m + M$ 이고 속력은 V_{n-1} 이다. 쏜 직후에는 배 쪽 질량이 $(N - n)m + M$, 속력이 V_n 이고, 포탄 하나가 속력 u_n 으로 따로 떨어져 나간다.

(b) 운동량 보존식과 상대 속도 조건을 세운다

$$\underbrace{\{(N - n + 1)m + M\}V_{n-1}}_{\text{발사 직전}} = \underbrace{\{(N - n)m + M\}V_n + mu_n}_{\text{발사 직후}}$$

포탄은 배의 진행 방향과 반대 방향으로 배에 대해 상대 속력 u 로 나가므로

$$u_n - V_{n-1} = -u$$

(c) u_n 을 소거하여 정리한다 — 두 번째 식을 첫 식에 넣으면

$$\{(N - n)m + M\}V_{n-1} + mV_{n-1} = \{(N - n)m + M\}V_n + mV_{n-1} - mu$$

양변의 mV_{n-1} 이 지워지므로

$$\Delta V_n \equiv V_n - V_{n-1} = \frac{mu}{(N - n)m + M} > 0$$

- (d) V_n 그래프의 개형 — 분모 $(N - n)m + M$ 은 발사 직후 배에 남아 있는 질량이다. n 이 커질수록 포탄이 줄어 이 질량이 작아지므로

$$\Delta V_1 = \frac{mu}{(N-1)m+M} < \Delta V_2 < \dots < \Delta V_N = \frac{mu}{M}$$

이다. 즉 V_n 은 단조 증가하면서 그 증가폭도 함께 커지므로, n 에 대해 아래로 볼록한(기울기가 점점 가팔라지는) 증가 곡선이 된다.

같은 사실을 충격량으로 뒤집어 볼 수도 있다. 한 발을 쏘 때 배 쪽(배와 남은 포탄)이 받는 충격량은 mu 로 언제나 일정하다. 그런데 그 충격량을 나누어 가질 배 쪽 질량 $(N - n)m + M$ 이 발사를 거듭할수록 줄어들므로, 같은 충격량이 만들어 내는 속도 변화가 점점 커지는 것이다.

- (e) f_n — 단위 시간당 배에 도달하는 마루의 개수 — 배가 정지해 있을 때 마루는 L 간격으로 속력 v 로 다가오므로 단위 시간에 $f = v/L$ 개가 도달한다. 배가 파와 같은 방향으로 속력 V_n 으로 달리면 파에 대한 배의 상대 속력이 $|v - V_n|$ 으로 바뀌므로

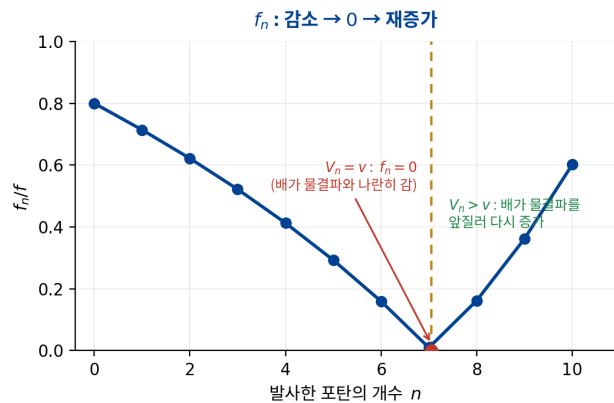
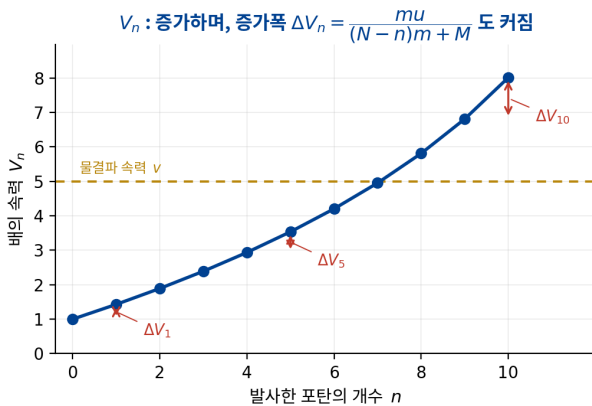
$$f_n = \frac{|v - V_n|}{L} = f \left| 1 - \frac{V_n}{v} \right|$$

$$f_n = f \left(1 - \frac{V_n}{v} \right) \quad (V_n < v), \quad f_n = f \left(\frac{V_n}{v} - 1 \right) \quad (V_n > v)$$

- (f) 세 구간으로 나누어 읽는다

- $V_n < v$ — 파가 배를 뒤에서 따라잡는다. V_n 이 커질수록 따라잡는 속도가 느려져 f_n 은 감소한다.
- $V_n = v$ — 배가 물결파와 나란히 달린다. 배에서 보면 마루가 멈춰 있는 것처럼 보이므로 $f_n = 0$ 이다.
- $V_n > v$ — 배가 물결파를 추월한다. 이제 마루는 배의 앞쪽에서부터 닿게 되고, 상대 속력 $V_n - v$ 가 커지므로 f_n 은 다시 증가한다.

제시문에서 $v > v_0$ 이므로 처음에는 반드시 f_n 이 감소하는 구간에서 출발한다. 이후 V_n 이 v 를 넘는지 아닌지는 M, m, N, u 의 값에 달려 있으며, 넘는 경우 f_n 은 V자 모양으로 꺾여 되돌아온다.



[답안 그림 1] V_n 은 증가폭이 커지며 단조 증가하고, f_n 은 감소하다가 $V_n = v$ 에서 0이 된 뒤 다시 증가한다.

(2) 최종 속도는 (1)의 경우보다 줄어든다.

(a) 비교의 핵심은 분모다 — (c)에서 얻은 식을 다시 보면 속력 증가분은

$$\Delta V = (\text{발사되는 질량}) \times \frac{u}{\text{발사 직후 남아 있는 질량}}$$

이다. 같은 총 질량 Nm 을 실어 보내더라도, 한 발을 언제 쏘느냐에 따라 그 순간 남아 있는 질량이 다르므로 총 증가량이 달라진다.

(b) 첫 두 발로 직접 견주어 본다 — 질량 m 인 포탄 한 발을 쏘는 것과, 질량 $m/2$ 인 포탄 두 발을 잇달아 쏘는 것을 비교한다. 앞의 경우

$$V_1 - V_0 = \frac{mu}{(N-1)m + M} = \frac{(m/2)u}{(N-1)m + M} + \frac{(m/2)u}{(N-1)m + M}$$

뒤의 경우 첫 발을 쏜 직후에는 아직 $(N-1/2)m$ 만큼의 포탄이 남아 있으므로

$$V_2 - V_0 = \frac{(m/2)u}{(N-1/2)m + M} + \frac{(m/2)u}{(N-1)m + M}$$

두 결과의 두 번째 항은 서로 같고, 첫 항은 분모가 $(N-1)m + M \leq (N-1/2)m + M$ 이므로

$$\frac{(m/2)u}{(N-1)m + M} \geq \frac{(m/2)u}{(N-1/2)m + M}$$

즉 한꺼번에 쏘는 쪽이 항상 유리하다. 이 비교가 모든 발사에 대해 똑같이 성립하므로 총합에서도 부등호가 유지된다.

(c) 왜 그런가 — 포탄을 잘게 나누면, 뒤에 쏘 포탄이 앞 포탄을 쏘 때 함께 가속되어야 할 짐으로 남아 있는 시간이 길어진다. 실어 나른 짐이 무거울수록 같은 충격량으로 얻는 속력 변화가 작으므로 손해를 본다.

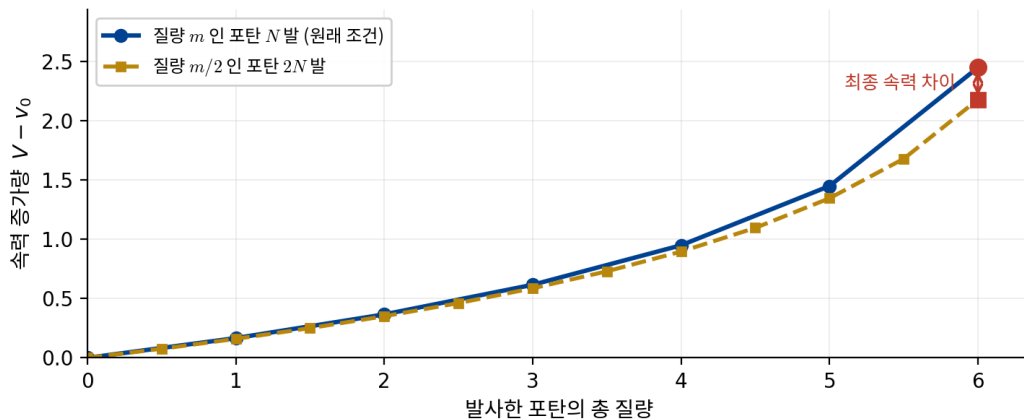
또 다른 관점으로, 잘게 나눌수록 이 합은 연속 극한

$$\Delta V \rightarrow \int_M^{Nm+M} \frac{u dm'}{m'} = u \ln \left(\frac{Nm + M}{M} \right)$$

에 아래로 수렴한다. 유한한 덩어리로 쏘 때의 값은 언제나 이 극한값보다 크고, 덩어리가 클수록 더 크다.

포탄의 질량을 $m/2$, 개수를 $2N$ 으로 바꾸면 배의 최종 속도는 줄어든다.

같은 총 질량을 잘게 나누어 쏘면 최종 속력이 작아진다



[답안 그림 2] 같은 총 질량을 절반 크기로 나누어 두 배 많이 쏘면 최종 속력 증가량이 작아진다.

문제 6 전자기 유도와 상호 유도 · 정류 작용

유도 기전력 · 상호 인덕턴스 · 정류

(1) 금속 막대의 최대 속력은 $v_0 = tR_1V_2/(2MBL)$ 이어야 한다.

(a) 외부 회로: 유도 기전력과 전류 — 폭 L 인 자기장 영역을 금속 막대가 속력 v 로 가로지르면 막대에는 크기

$$V_1 = BLv$$

의 유도 기전력이 생긴다. 회로에서 저항은 외부 코일의 R_1 뿐이므로 외부 코일에 흐르는 전류는

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{BLv}{R_1}$$

즉 외부 코일의 전류는 막대의 속력에 정비례한다. 따라서 [그림 4]의 삼각형 $v-t$ 그래프는 그대로 I_1-t 그래프가 된다.

(b) 내부 회로: 상호 유도 — 외부 코일의 전류가 변하면 상호 인덕턴스 M 을 통해 내부 코일에 기전력이 유도된다.

$$V_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \Rightarrow \left| \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \right| = \frac{V_2}{M}$$

내부 코일에 일정한 크기의 전압 V_2 가 걸리려면 I_1 이 일정한 비율로 변해야 한다. 즉 막대는 등가속도 운동을 해야 하며, 제시문의 삼각형 속력 그래프가 바로 그 조건을 만족한다.

(c) 막대의 가속도를 구한다 — (a)를 시간에 대해 변화율로 보면 $(\Delta I_1)/(\Delta t) = (BL)/R_1 \cdot (\Delta v)/(\Delta t)$ 이므로

$$a = \left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = \frac{R_1}{BL} \left| \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \right| = \frac{R_1 V_2}{MBL}$$

(d) 최대 속력 — 막대는 정지 상태에서 출발해 $t/2$ 동안 이 가속도로 가속되므로

$$v_0 = a \cdot \frac{t}{2} = \frac{tR_1V_2}{2MBL}$$

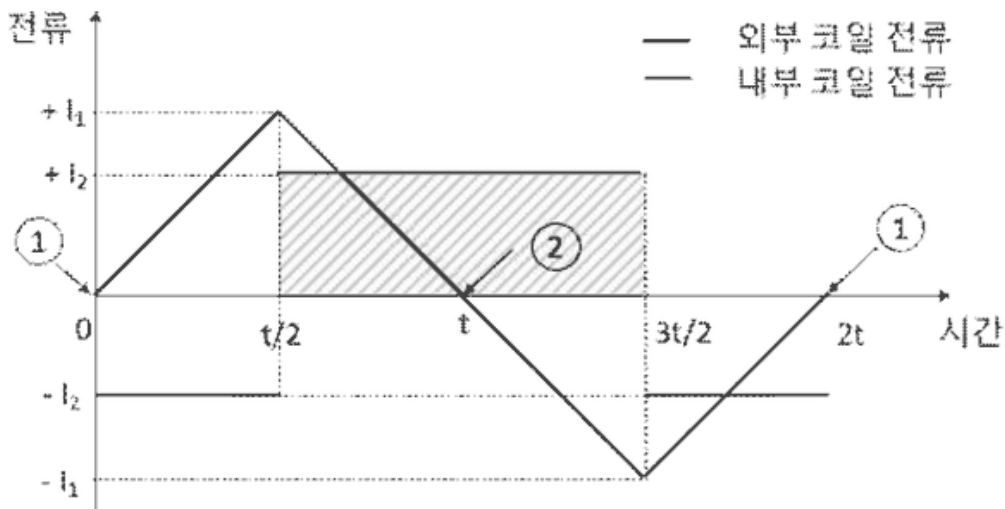
M 이나 BL 이 클수록 작은 속력으로도 충분하고, R_1 이 크면 같은 기전력에 대해 전류가 작아지므로 그만큼 더 빨리 움직여야 한다는 것을 식이 그대로 말해 준다.

(2) 물음표 상자에는 p-n 접합 다이오드가 들어가야 하며, 필요한 왕복운동 횟수는 $N = WR_2/(V_2^2 t)$ 이다.

(a) 두 코일의 전류가 시간에 따라 어떻게 흐르는가 — 막대가 ①→②로 갈 때 속력은 $0 \rightarrow v_0 \rightarrow 0$ 이고, ②→①로 돌아올 때는 방향이 반대이므로 I_1 의 부호도 뒤집힌다. 따라서 왕복운동 1회(시간 $2t$) 동안 I_1 은 삼각파, 그 변화율 $(\Delta I_1)/(\Delta t)$ 의 부호는

$$\bullet 0 \sim t/2 : + \quad \bullet t/2 \sim 3t/2 : - \quad \bullet 3t/2 \sim 2t : +$$

로 바뀐다. $I_2 = V_2/R_2$ 의 크기는 일정하지만 방향이 반주기마다 뒤집히는 사각파가 되는 것이다.



[답안 그림 3] 왕복운동 1회 동안의 외부 코일 전류(삼각파)와 내부 코일 전류(사각파). 빗금 친 부분이 정류 후 축전기로 들어가는 구간이다.

- (b) 왜 다이오드인가 — 축전기를 충전하려면 극판에 **한쪽 방향으로만** 전하가 쌓여야 한다. 위와 같이 방향이 계속 바뀌는 전류를 그대로 흘리면 충전과 방전이 번갈아 일어나 에너지가 쌓이지 않는다. 따라서 한 방향 전류만 통과시키는 정류 소자가 필요하다.

트랜지스터도 스위칭으로 정류에 쓸 수 있지만, 문제에서 **추가 배선과 전원 장치가 없다고** 못 박았으므로 바이어스 전원이 필요한 트랜지스터는 쓸 수 없다. 남은 답은 별도의 전원 없이 스스로 한 방향만 통과시키는 **p-n 접합 다이오드**이다.

- (c) 왕복운동 1회에 저장되는 에너지 — 내부 코일에 걸리는 전압이 V_2 , 저항이 R_2 이므로 전류는 $I_2 = V_2/R_2$ 이고 순간 전력은

$$P_2 = V_2 I_2 = \frac{V_2^2}{R_2}$$

정류를 하면 왕복운동 1회($2t$) 가운데 다이오드가 통과시키는 방향으로 전류가 흐르는 시간만 충전에 쓰인다. (a)에서 보았듯 그 시간은 $t/2 \sim 3t/2$ 의 총 t 이다 (나머지 t 는 반대 방향이라 막힌다). 그러므로

$$W_1 = P_2 \cdot t = \frac{V_2^2 t}{R_2}$$

이며, 이것이 [답안 그림 3]의 빗금 친 넓이에 해당한다.

- (d) 필요한 횟수

$$N = \frac{W}{W_1} = \frac{WR_2}{V_2^2 t}$$

R_2 가 클수록 같은 전압에 흐르는 전류가 작아 한 번에 담기는 에너지가 줄고, 그만큼 더 많이 왕복해야 한다. 반대로 V_2 를 높이면 저장 에너지가 제곱으로 늘어 횟수가 급격히 줄어든다.

문제 7 전기장 속에서의 포물선 운동

등가속도 운동 · 체공 시간 · 전기력

크기 $E = 2mg/(3q)$ 인 균일한 전기장을 연직 위 방향으로 걸어 주면 된다.

- (a) 좌표와 자유물체도 — 지면을 따라 던진 방향을 x 축, 연직 위를 y 축으로 잡는다. 45° 로 던졌으므로 초기 속도 성분은

$$v_{0x} = v_{0y} = v_0 \cos 45^\circ = \frac{v_0}{\sqrt{2}}$$

물체에 작용하는 힘은 중력 $-mg\hat{y}$ 와 전기력 $qE_y\hat{y}$ 뿐이다 (전기장을 지면에 수직으로 걸으므로 x 성분이 없다). 따라서

$$a_x = 0, \quad a_y = -g + \frac{qE_y}{m}$$

- (b) 수평 이동 거리는 체공 시간에 비례한다 — $a_x = 0$ 이므로 수평 방향은 전기장이 있든 없든 언제나 속력 v_{0x} 인 등속도 운동이다. 지면에 다시 닿을 때까지의 시간을 T 라 하면

$$X = v_{0x}T = \frac{v_0}{\sqrt{2}}T \Rightarrow X \propto T$$

즉 사거리를 3배로 만드는 문제는 체공 시간을 3배로 만드는 문제와 같다.

- (c) 체공 시간과 연직 가속도의 관계 — 연직 방향은 등가속도 운동이고, 던진 높이와 떨어지는 높이가 같으므로 올라간 시간과 내려온 시간이 같다. 연직 아래 방향 가속도의 크기를 $\alpha \equiv -a_y$ 라 하면

$$T = \frac{2v_{0y}}{\alpha} = \frac{\sqrt{2}v_0}{\alpha} \Rightarrow T \propto \frac{1}{\alpha}$$

전기장이 없을 때는 $\alpha = g$ 이므로 $T_0 = (\sqrt{2}v_0)/g$, $X_0 = v_0^2/g$ 이다.

(d) 조건을 대입한다 — $T = 3T_0$ 이라면 $\alpha = g/3$ 이어야 한다. 즉

$$a_y = -g + \frac{qE_y}{m} = -\frac{g}{3} \Rightarrow \frac{qE_y}{m} = \frac{2g}{3} \Rightarrow E_y = \frac{2mg}{3q} > 0$$

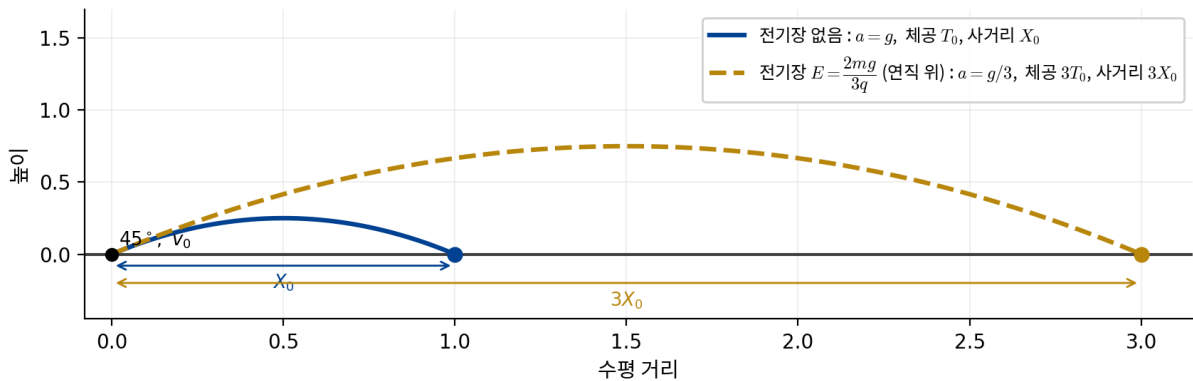
$E_y > 0$ 이고 $q > 0$ 이므로 전기력 $qE_y\hat{y}$ 는 연직 위 방향이다. 즉 전기장을 연직 위 방향으로 걸어 중력을 부분적으로 상쇄해야 한다.

$$E = \frac{2mg}{3q}, \quad \text{방향: 연직 위}$$

(e) 결과 읽기 — 전기장은 물체가 느끼는 유효 중력 가속도를 $g \rightarrow g/3$ 로 줄여 주는 역할을 한다. 그래서 체공 시간과 사거리가 나란히 3배가 되고, 최고점 높이 $h = v_{0y}^2/(2\alpha)$ 역시 3배가 된다. 반대로 전기장을 연직 아래로 걸면 $\alpha > g$ 가 되어 사거리는 오히려 짧아진다.

한편 이 답은 v_0 에 전혀 의존하지 않는다. 사거리의 비만 문제 삼았으므로 초기 속력은 양변에서 지워지기 때문이다.

연직 아래 방향 가속도를 $g \rightarrow g/3$ 로 줄이면 체공 시간과 사거리가 모두 3배



[답안 그림 4] 전기장이 없을 때와 $E = 2mg/3q$ 를 연직 위로 걸었을 때의 궤적 비교.

문제 8 전자기파의 회절과 광양자 · 복사 세기

파장과 회절 · 광양자설 · 역제곱 법칙

(1) 장점은 파장이 짧아 안테나를 작게 만들 수 있기 때문이고, 단점은 파장이 짧아 회절이 잘 일어나지 않기 때문이다.

(a) 장점 — 주파수와 파장 — 전자기파는 매질과 무관하게 $c = f\lambda$ 를 만족하므로

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

로 진동수와 파장은 반비례한다. 안테나는 전자기파를 공명적으로 주고받는 장치여서 그 크기가 파장에 비례한다 (대표적으로 반파장 안테나의 길이는 $\lambda/2$). 5G는 LTE보다 진동수가 높아 파장이 짧으므로, 같은 성능의 안테나를 더 작게 만들 수 있다.

(b) 단점 — 파장과 회절 — 파동이 장애물이나 틈을 만났을 때 휘어 돌아 들어가는 회절은 파장이 장애물의 크기와 비슷하거나 클수록 뚜렷하다. 5G의 파장은 건물 크기에 견주어 매우 짧으므로 회절이 거의 일어나지 않고 직진성이 강해진다. 그 결과 건물 뒤편처럼 송신탑이 직접 보이지 않는 그림자 영역이 넓어져 수신이 나빠진다.

같은 이유로 LTE의 긴 파장은 건물을 잘 돌아 들어가지만, 대신 안테나가 커야 한다. 즉 두 성질은 $\lambda = c/f$ 하나에서 나오는 맞바꿈 관계이다.

(2) 광자 한 개의 에너지가 세슘의 이온화 에너지보다 약 27만 배 작으므로, DNA를 손상시킬 위험은 사실상 없다.

(a) 어떤 양을 비교해야 하는가 — 이온화는 광자 한 개가 전자 한 개에게 에너지를 통째로 건네주는 사건이다 (광전 효과와 같은 구조). 파동으로 보아 에너지가 조금씩 쌓여 전자가 튀어나오는 것이 아니므로, 비교해야 할 양은 출력 50 W가 아니라 광자 한 개의 에너지 hf 이다.

(b) 광자 에너지 계산

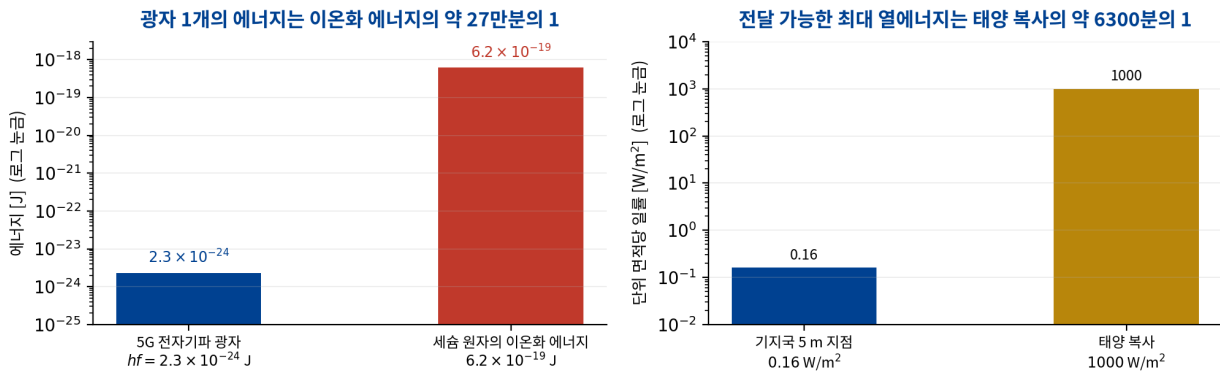
$$hf = (6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) \times (3.5 \times 10^9 \text{ Hz}) = 2.31 \times 10^{-24} \text{ J} \approx 2.3 \times 10^{-24} \text{ J}$$

(c) 이온화 에너지와 견주기 — 이온화 에너지가 낮은 축에 드는 세슘조차 $6.2 \times 10^{-19} \text{ J}$ 가 필요하므로

$$\frac{6.2 \times 10^{-19}}{2.3 \times 10^{-24}} \approx 2.7 \times 10^5$$

광자 한 개의 에너지는 세슘의 이온화 에너지의 약 1/270000에 지나지 않는다.

(d) 출력을 키우면 어떻게 되는가 — 출력 50 W는 단위 시간에 나오는 광자의 개수를 정할 뿐 광자 한 개의 에너지를 바꾸지 못한다. 문턱을 넘지 못하는 광자는 아무리 많이 와도 전자를 떼어내지 못하므로, 5G 전자기파가 원자를 이온화시켜 DNA를 손상시킬 가능성은 극히 낮다.



[답안 그림 5] 광자 에너지와 이온화 에너지의 비교(왼쪽), 기지국 복사 세기와 태양 복사 세기의 비교(오른쪽). 두 그래프 모두 로그 눈금이다.

(3) 기지국에서 5 m 떨어진 곳의 세기는 약 0.16 W/m^2 로, 태양 복사 1 kW/m^2 의 약 6300분의 1에 지나지 않는다.

(a) 역제곱 법칙 — 에너지가 보존되면서 모든 방향으로 고르게 퍼지므로, 반지름 R 인 구면을 지나는 전체 일률은 언제나 P 로 같다. 따라서 단위 넓이당 일률은

$$I = \frac{P}{4\pi R^2} = \frac{50 \text{ W}}{4\pi \times (5 \text{ m})^2} = \frac{50}{100\pi} \approx 0.16 \text{ W/m}^2$$

이것이 단위 시간 동안 단위 넓이에 전달될 수 있는 최대 열에너지이다 (모두 흡수되어 열로 바뀌는 경우).

(b) 태양 복사와의 비교 — 1 m^2 에 한 시간 동안 3600 kJ이 도달하므로

$$I_{\text{태양}} = \frac{3.6 \times 10^6 \text{ J}}{3600 \text{ s}} = 1000 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ kW/m}^2$$

$$\frac{I_{\text{태양}}}{I} \approx \frac{1000}{0.16} \approx 6.3 \times 10^3$$

기지국에서 5 m 거리의 복사 세기는 태양 복사의 약 1/6300이다.

(c) 의미 — 사람이 늘 찢고 있는 햇빛보다 수천 배 약한 세기이므로, 열적인 관점에서도 5G 전자기파가 인체에 유의미한 온도 상승을 일으킨다고 보기 어렵다. (2)의 광양자 관점과 (3)의 열적 관점이 모두 같은 결론을 가리킨다.