

July 09, 2015

일반 지침

- 이론 시험 시간은 총 5시간이며, 30점 만점입니다.
- 시작을 알리는 신호음이 울리기 전까지는 문제지가 들어 있는 봉투를 절대 열어서는 안 됩니다.
- 답안을 작성할 때는 IPhO 전용 답안지를 사용해야 하며, 최종 정답은 해당되는 답안란(Answer Sheet, A)에 기입하십시오. 자세한 풀이나 연습은 작업지(Detail Sheet, D)에 자유롭게 작성할 수 있으며, 채점에서 제외하고 싶은 내용이 있다면 선을 그어 표시하십시오.
- 상단 헤더에는 반드시 참가자 코드, 문항 번호(Q - T1, T2 또는 T3), 페이지 번호를 기입해야 합니다.
- 문제의 뒷부분은 앞부분을 풀지 않고도 독립적으로 풀이가 가능한 경우가 많습니다.
- 감독관의 허락 없이 자리에서 이탈할 수 없습니다. 계산기 고장, 화장실 이용 등의 도움이 필요할 경우, 빨간 카드(도움 요청) 또는 초록 카드(화장실 요청) 중 하나를 들어 감독관의 주의를 끌어 주세요.
- 시험 시작과 종료는 신호음으로 안내됩니다. 또한, 매 시간 경과 시 시간 경과 신호음이 울리고, 시험 종료 15분 전에는 경고용 버저음이 울립니다.
- 시험 종료 후에는 즉시 작성을 멈추고, 답안지와 풀이지를 정리하고 번호를 매긴 후, 제공된 봉투에 넣어 자리에 그대로 두십시오. 시험장이 아닌 곳으로 어떠한 종이도 가지고 나갈 수 없습니다.
- 감독관이 봉투를 수거할 때까지 자리에서 기다리십시오. 모든 봉투가 수거된 후, 학생 안내자가 시험장에서 퇴실을 안내합니다.
- 다음 페이지에는 물리 상수표가 제공됩니다.

General Data Sheet

지구 중력 가속도	g	9.807 m s^{-2}
대기압	P_{atm}	$1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$
아보가드로 수	N_A	$6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
볼츠만 상수	k_B	$1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
수소 원자의 결합 에너지	–	13.606 eV
전자 전하의 크기	e	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
전자 질량	m_e	$9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
양성자 질량	m_p	$1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
중성자 질량	m_n	$1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
자유 공간의 투자율	μ_0	$1.257 \times 10^{-6} \text{ H m}^{-1}$
자유 공간의 유전율	ϵ_0	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
플랑크 상수	h	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$
공기 중 소리의 속도 (상온에서)	c_s	$3.403 \times 10^2 \text{ m s}^{-1}$
진공 중 빛의 속도	c	$2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
스테판-볼츠만 상수	σ	$5.670 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
만유인력 상수	G	$6.674 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
기체 상수	R	$8.315 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

태양으로부터 오는 입자들

(Total Marks: 10)

태양의 표면에서 방출되는 광자와 중심에서 발생하는 중성미자는 태양의 온도를 알려줄 수 있으며, 또한 태양이 핵반응 때문에 빛난다는 사실을 확인시켜 줍니다. 이번 문제 전반에서 태양의 물리 상수들은 다음과 같이 사용합니다: 질량: $M_{\odot} = 2.00 \times 10^{30} \text{ kg}$, 반지름: $R_{\odot} = 7.00 \times 10^8 \text{ m}$, 광도(단위 시간당 방출되는 에너지): $L_{\odot} = 3.85 \times 10^{26} \text{ W}$, 지구-태양 거리: $d_{\odot} = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$. 다음 적분식들도 계산에 사용할 수 있습니다:

$$(i) \int x e^{ax} dx = \left(\frac{x}{a} - \frac{1}{a^2}\right)e^{ax} + \text{constant}$$

$$(ii) \int x^2 e^{ax} dx = \left(\frac{x^2}{a} - \frac{2x}{a^2} + \frac{2}{a^3}\right)e^{ax} + \text{constant}$$

$$(iii) \int x^3 e^{ax} dx = \left(\frac{x^3}{a} - \frac{3x^2}{a^2} + \frac{6x}{a^3} - \frac{6}{a^4}\right)e^{ax} + \text{constant}$$

A. 태양복사 :

A.1	태양을 완벽한 흑체(blackbody)로 가정하고, 이 사실을 이용해 태양 표면 온도 T_s 를 계산하시오.	0.3
-----	--	-----

태양 복사 스펙트럼은 빈의 법칙(Wien's law)에 따라 근사가 잘 됩니다. 따라서 지구 표면의 특정 면적 A에 단위 시간당 단위 주파수 간격으로 입사하는 태양 에너지 $u(\nu)$ 는 다음과 같이 주어집니다:

$$u(\nu) = \frac{AR_{\odot}^2}{d_{\odot}^2} \frac{2\pi h}{c^2} \nu^3 \exp(-h\nu/k_B T_s)$$

여기서 ν 는 주파수이며, A는 입사하는 복사선 방향에 수직인 면의 면적입니다. 이제, 반도체 재질로 이루어진 얇은 원판 형태의 **태양 전지**를 생각해 봅시다. 이 태양 전지는 면적 A를 가지며, 태양광이 입사하는 방향에 **수직하게 배치**되어 있습니다.

A.2	위의 빈 근사식을 사용하여, 태양전지 면에 입사하는 총 태양 복사 에너지 P_{in} 를 A, $R_{\odot}$, $d_{\odot}$, T_s , 그리고 상수 c, h, k_B 로 표현하시오.	0.3
-----	--	-----

A.3	주파수 ν 당 단위 시간에 태양전지 면에 입사하는 광자 수 $n_{\gamma}(\nu)$ 를 A, $R_{\odot}$, $d_{\odot}$, T_s , 그리고 상수 c, h, k_B 로 표현하시오.	0.2
-----	---	-----

이제 반도체 태양전지의 모델을 고려하겠습니다. 이 태양전지는 밴드갭 에너지 E_g 를 가지며, 다음 가정을 따릅니다: 입사 광자가 $E \geq E_g$ 일 경우, 광자 하나당 전자 하나를 여기시키고, 이를 통해 E_g 만큼의 유효 출력 에너지가 생성됩니다. 입자의 추가 에너지는 모두 열로 방출되며 유용한 에너지로는 사용되지 않는다고 가정합니다.

A.4	$x_g = h\nu_g/k_B T_s$ (단, $E_g = h\nu_g$)라 정의합시다. 이때 태양전지의 유효 출력 전력 P_{out} 을 x_g , A, $R_{\odot}$, $d_{\odot}$, T_s , 그리고 상수 c, h, k_B 로 표현하시오.	1.0
-----	--	-----

A.5	이 태양전지의 효율 η 를 x_g 의 함수로 표현하시오.	0.2
-----	--	-----

A.6	$\eta(x_g)$ 를 정성적으로 스케치하고, $x_g = 0$ 과 $x_g \rightarrow \infty$ 에서의 값을 명확히 표시하시오. 또한 이 함수의 기울기가 해당 두 지점에서 어떻게 되는지도 설명하시오.	1.0
-----	---	-----

A.7	효율이 최대가 되는 $x_g = x_0$ 일 때, 이 x_0 을 구하는 3차 방정식 을 유도하고, 식의 해를 ± 0.25 정확도 내에서 추정하시오. 그 값으로부터 효율 $\eta(x_0)$ 도 계산하시오.	1.0
-----	---	-----

A.8	순수 실리콘의 밴드갭 에너지 $E_g = 1.11 \text{ eV}$ 를 이용해, 이 모델에 해당하는 실리콘 태양전지의 효율 η_{Si} 을 계산하시오.	0.2
-----	---	-----

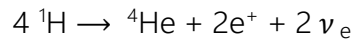
19세기 후반, 켈빈과 헬름홀츠(Kelvin and Helmholtz, KH)는 태양이 어떻게 빛을 내는지를 설명하기 위한 가설을 제안했습니다. 그들은 태양이 질량 $M_{\odot}$ 를 가진 매우 거대한 물질 구름에서 시작했으며, 초기 밀도는 무시할 수 있을 정도로 작았다고 가정했습니다. 이후 태양은 서서히 수축하면서, 그 과정에서 방출되는 중력 퍼텐셜 에너지가 태양의 빛의 원천이라고 설명했습니다.

A.9	태양 내부의 물질 밀도가 균일하다고 가정해 봅시다. 이때 현재 태양의 총 중력 퍼텐셜 에너지 Ω 를 중력상수 G , 태양 질량 $M_{\odot}$, 그리고 반지름 $R_{\odot}$ 을 사용해 표현하십시오.	0.3
A.10	KH(켈빈-헬름홀츠) 가설을 통해, 태양이 지금까지 빛을 낼 수 있었던 최대 시간 τ_{KH} (단위: 년)을 추정해 보십시오. 단, 이 기간 동안 태양의 광도는 일정했다고 가정합니다.	0.5

위에서 계산한 τ_{KH} 는 운석의 연구를 통해 추정된 태양계의 나이와 일치하지 않습니다. 이는 태양의 에너지원이 단순한 중력 수축만은 아님을 의미합니다.

B. 태양으로부터 오는 중성미자 :

1938년, 한스 베테(Hans Bethe)는 태양의 중심에서 수소가 헬륨으로 핵융합되는 과정이 태양의 에너지 원천이라는 이론을 제안했습니다. 그 과정의 순 반응식은 다음과 같습니다:



여기서 생성된 전자 중성미자 ν_e 는 질량이 0이라고 가정할 수 있으며, 태양을 빠져나와 지구에서 관측됩니다. 이 중성미자의 검출은 태양 내부에서 핵반응이 실제로 일어나고 있음을 입증하는 중요한 증거입니다. (이 문제에서는 중성미자가 운반하는 에너지는 무시합니다.)

B.1	위의 핵반응에서 방출되는 에너지는 $\Delta E = 4.0 \times 10^{-12}\text{J}$ 이라고 가정합니다. 태양에서 방출되는 전체 복사 에너지가 전적으로 이 반응에 의한 것이라고 가정할 때, 지구에 도달하는 중성미자의 유속 밀도, Φ_{ν} 를 구하십시오. 단위는 $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 입니다.	0.6
-----	---	-----

중성미자는 태양 중심에서 출발해 지구에 도달하는 동안 일부가 다른 종류의 중성미자 ν_x 로 변환됩니다. 이때 검출기가 ν_x 를 감지할 수 있는 효율은 전자 중성미자 ν_e 를 감지하는 효율의 1/6에 불과합니다. 만약 중성미자 변환이 없다면, 1년 동안 평균적으로 N_1 개의 중성미자가 검출되어야 합니다. 하지만 변환이 일어나기 때문에 실제로 검출되는 중성미자 수 (전자 + 변환된 중성미자)는 연간 평균 N_2 개입니다.

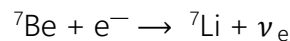
B.2	N_1 과 N_2 를 사용하여 전자 중성미자 ν_e 가 다른 종류의 중성미자 ν_x 로 변환되는 비율 f 을 계산하십시오.	0.4
-----	--	-----

중성미자를 검출하기 위해, 내부에 물이 가득 찬 거대한 검출기들이 만들어집니다. 중성미자가 물질과 상호작용하는 경우는 매우 드물지만, 때때로 물 분자의 전자를 튕겨내는 일이 발생합니다. 이렇게 튕겨나온 고에너지 전자는 물 속을 빠르게 이동하며 전자기 복사를 방출합니다. 이 전자의 속도가 물 속에서의 빛의 속도보다 클 경우 체렌코프 복사(Cherenkov radiation)라고 불리는 복사가 원뿔 모양으로 방출됩니다.

B.3	중성미자에 의해 튕겨나간 전자가 물 속을 이동하면서 일정한 비율 α 로 에너지를 잃는다고 가정합니다. 이 전자가 체렌코프 복사를 방출하는 시간 Δt 동안, 중성미자로부터 전자에 전달된 에너지 E_{imparted} 를 $\alpha, \Delta t, n, m_e, c$ 로 나타내시오. (단, 전자는 중성미자와 상호작용하기 전까지 정지해 있었다고 가정합니다.)	2.0
-----	--	-----

수소가 헬륨으로 융합되는 반응은 여러 단계를 거칩니다. 이 중간 과정 중 하나에서 ${}^7\text{Be}$ 핵(질량 m_{Be})이 생성되고,

이후 전자 하나를 흡수하여 ${}^7\text{Li}$ 핵(질량 $m_{\text{Li}} < m_{\text{Be}}$)을 만들며 전자 중성미자 ν_e 를 방출하는 반응이 일어납니다:



베릴륨 핵(질량 $m_{\text{Be}} = 11.65 \times 10^{-27} \text{ kg}$)이 정지해 있는 상태에서, 마찬가지로 정지해 있는 전자를 흡수할 경우, 방출되는 중성미자의 에너지는 다음과 같습니다: $E_\nu = 1.44 \times 10^{-13} \text{ J}$. 그러나 실제로는 태양 중심의 온도 T_c 로 인해, 베릴륨 핵은 무작위적인 열 운동(thermal motion)을 하고 있습니다. 따라서 이 베릴륨 핵들은 정지 상태가 아닌 움직이는 중성미자 방출원 역할을 하며, 그 결과 방출되는 중성미자의 에너지는 일정하지 않고 변화하게 됩니다. 이러한 에너지 변화는 제곱평균변위(root mean square, rms)의 형태로 기술되며, 이를 ΔE_{rms} 라고 합니다.

B.4	만약 $\Delta E_{\text{rms}} = 5.54 \times 10^{-17} \text{ J}$ 일 때, 베릴륨 핵의 rms 속도 v_{Be} 를 계산하고, 그로부터 태양 중심의 온도 T_c 를 추정하십시오. (힌트: ΔE_{rms} 는 시선 방향 속도 성분의 rms 값에 의존합니다.)	2.0
-----	--	-----

극값 원리

(Total Marks: 10)

A The Extremum Principle in Mechanics

수평하고 마찰이 없는 x-y 평면이 도식 1(Fig. 1)에 제시되어 있다. 이 평면은 식 $x = x_1$ 을 만족하는 선 AB에 의해 두 영역 I과 II로 나뉜다. 질량이 m 인 점 입자의 위치 에너지(potential energy)는 영역 I에서는 $V=0$, 영역 II에서는 $V = V_0$ 이다. 입자는 원점 O에서 속도 v_1 로, x축과 각 θ_1 을 이루며 출발한다. 그 후, 영역 II에 있는 점 P에 도달하게 되며, 이때의 속도는 v_2 , 이동 경로는 x축과 각 θ_2 를 이룬다. 중력 및 상대론적 효과는 무시하며, 본 문제 T-2의 모든 항목에서 고려하지 않는다.

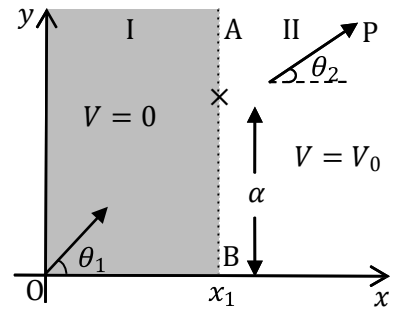


Figure 1

A.1	v_2 를 m, v_1, V_0 로 표현하시오.	0.2
A.2	v_2 를 v_1, θ_1, θ_2 로 표현하시오.	0.3

입자의 운동 경로를 따라 정의되는 작용(action)은 다음과 같다: $A = m \int v(s) ds$ 여기서 ds 는 입자의 경로를 따라가는 무한소 거리, $v(s)$ 는 해당 지점에서의 속도이다. 예시로, 속도 v 로 반지름 R 의 원형 경로를 도는 입자의 작용은 $A=2\pi m R v$ 이다. 입자의 에너지가 일정한 경우, 두 고정된 점 사이의 가능한 모든 경로 중 실제 경로는 작용 A 가 극값(최소 또는 최대)을 갖는 경로라는 것이 역사적으로 최소 작용 원리(Principle of Least Action, PLA)라고 알려져 있다.

A.3	PLA는 일정한 퍼텐셜을 가진 영역에서 두 점을 잇는 입자의 경로가 직선임을 의미한다. 도식 1에서 고정된 두 점 O와 P는 각각 좌표 $(0,0), (x_0, y_0)$ 를 가진다. 입자가 영역 I에서 II로 전이(transit)하는 경계점의 좌표는 (x_1, α) 이며, 이때 x_1 은 고정되어 있고 작용 A 는 오직 α 에만 의존한다. 작용 $A(\alpha)$ 의 수식을 쓰고, PLA를 사용하여 v_1/v_2 와 이 좌표들 사이의 관계식을 도출하시오.	1.0
-----	--	-----

B 광학에서의 극값원리

광선이 굴절률이 각각 n_1, n_2 인 두 매질을 지날 때, 매질의 경계면은 x축과 평행하다. 광선은 첫 번째 매질(I)에서 y축과 각도 i_1 을 이루고, 두 번째 매질(II)에서는 i_2 를 이룬다. (그림 2 참고) 페르마의 최소 시간 원리(Fermat's Principle of Least Time)에 따르면, 광선은 두 지점을 잇는 경로 중 이동 시간이 극값(최소 또는 최대)이 되는 경로를 따른다.

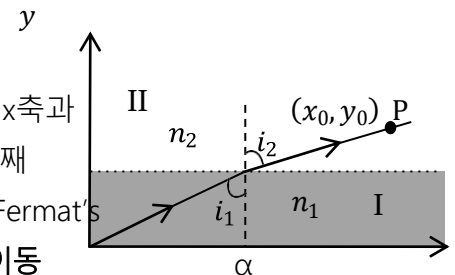


Figure 2

B.1	이 원리는 두 고정된 지점 사이에서, 광선이 이동하는 경로는 그 지점들 사이를 이동하는 데 걸리는 시간이 극값(최소 또는 최대)을 갖도록 한다고 말한다. 페르마의 원리에 기반하여 $\sin i_1$ 와 $\sin i_2$ 사이의 관계를 유도하시오.	0.5
-----	--	-----

수평으로 입사하는 경우의 개략적인 경로가 나타나 있다. 이 빔은 설탕 용액에 입사하며, 이 용액에서는 높이가 증가함에 따라 설탕의 농도가 감소한다. 그 결과, 용액의 굴절률도 높이에 따라 감소하게 된다.

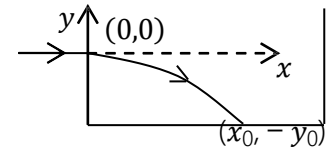


Figure 3: Tank of Sugar Solution

B.2	굴절률 $n(y)$ 가 y 에만 의존한다고 가정하자. B1에서 얻은 식을 이용하여, 레이저 빔 경로의 기울기 dy/dx 를 $y = 0$ 에서의 굴절률 n_0 와 $n(y)$ 로 표현하라.	1.5
B.3	레이저 빔은 탱크의 바닥으로부터 높이 y_0 에서 시작하여, 원점 $(0,0)$ 에서 수평으로 설탕 용액 안으로 입사한다. 굴절률은 $n(y) = n_0 - ky$ 로 주어지며, 여기서 n_0 와 k 는 양의 상수이다. 레이저 빔의 실제 경로에 대해, x 를 y 와 관련된 변수들로 나타낸 식을 구하라. 다음 적분 공식을 사용할 수 있다: $\int \sec\theta d\theta = \ln(\sec\theta + \tan\theta) + \text{constant}, (\sec\theta = 1 / \cos\theta)$ 또는 $\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 - 1}} = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1}) + \text{constant}$	1.2
B.4	레이저 빔이 탱크의 바닥과 만나는 지점의 위치 x_0 를 구하라. $y_0 = 10.0 \text{ cm}$, $n_0 = 1.50$, $k = 0.050 \text{ cm}^{-1}$ ($1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$)을 사용하라.	0.8

C The Extremum Principle and the Wave Nature of Matter

우리는 이제 극값 원리(Principle of Least Action, PLA)와 운동하는 입자의 파동성 사이의 관계를 탐구해 본다. 이를 위해 입자가 O에서 P로 이동할 때 가능한 모든 경로를 고려하고, 드브로이 물질파의 간섭을 통해 실제로 선택되는 경로를 찾아보려 한다.

C.1	입자가 그 경로를 따라 아주 작은 거리 Δs 만큼 이동할 때, 드브로이 물질파의 위상 변화 $\Delta\phi$ 를 작용의 변화 ΔA 및 플랑크 상수 h 와 어떻게 관련지을 수 있는지 구하라.	0.6
C.2	앞서 A파트의 문제에서처럼 입자가 O에서 P까지 이동한다고 하자 (그림 4 참고). 두 영역 I과 II의 경계 AB에 불투명한 벽을 세운다. AB 경계에는 너비가 d 인 아주 좁은 구멍 CD가 있어 입자가 그 틈을 통과할 수 있다. 단, $d \ll (x_0 - x_1)$, $d \ll x_1$ 임을 가정한다. 극단적인 두 경로인 OCP와 ODP를 고려하라. 이때 OCP는 A파트에서 다룬 고전적인 경로에 해당한다고 하자. 두 경로 간 위상 차이 $\Delta\phi_{CD}$ 를 일차 근사(1st order)로 구하라.	1.2

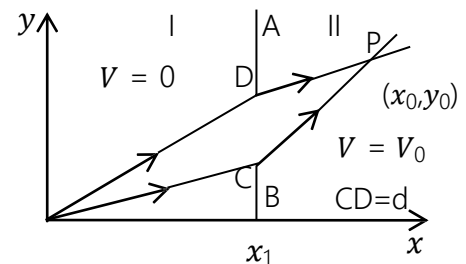


Figure 4

D 물질파 간섭

전자총이 점 O에 위치해 있으며, 좁은 슬릿 F를 향해 정렬된 전자빔을 쏘고 있다. 이 슬릿은 불투명한 벽 A_1B_1 에 있으며, 위치는 $x = x_1$ 이다. 전자는 직선 경로 OFP를 따라 이동하고, P는 화면상 $x = x_0$ 에 있는 한 지점이다 (그림 5 참고). I 영역에서의 전자 속도는 $v_1 = 2.0000 \times 10^7$ m/s이고, 입사각은 $\theta = 10.0000^\circ$ 이다. II 영역에서는 전자 속도가 $v_2 = 1.9900 \times 10^7$ m/s로 바뀐다. $x_0 - x_1$ 거리는 250.00 mm이다. 전자 간 상호작용은 무시한다.

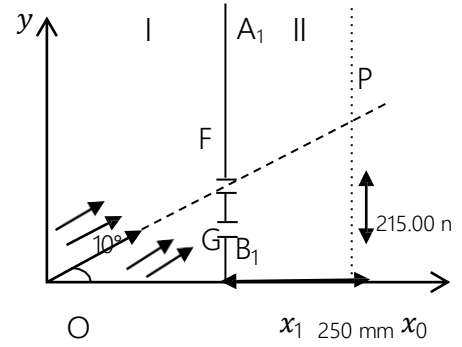


Figure 5

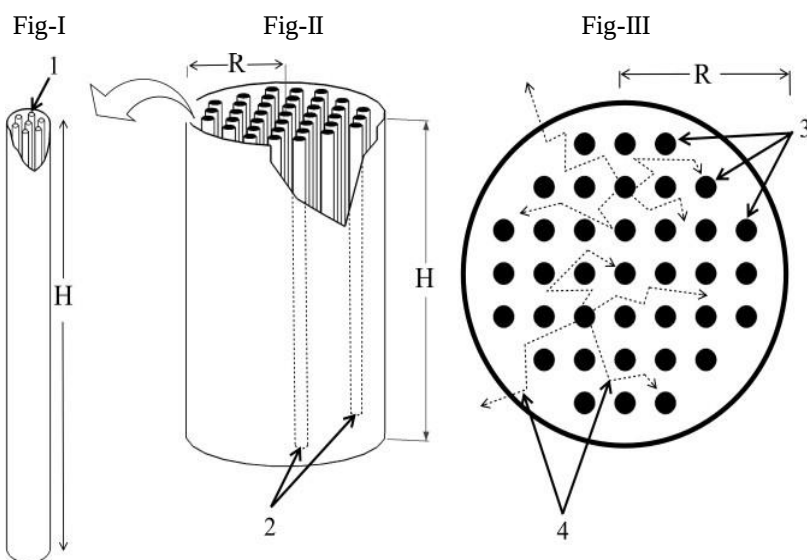
D.1	O에서의 전자가 정지 상태에서 가속되었다면, 가속 전위 U_1 을 구하라.	0.3
D.2	A_1B_1 경계에 F와 동일한 구조의 슬릿 G를 추가로 만들었다. 이 슬릿은 F보다 215.00 nm 아래에 위치한다 ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). F와 G를 통해 도달하는 드브로이 파가 P에서 $2\pi\beta$ 의 위상 차이를 가진다면, β 값을 계산하라.	0.8
D.3	화면 상 P로부터 최소 얼마만큼 Δy 떨어진 지점에서 전자 검출이 "영(null)"이 될 수 있는가? [힌트: 다음 근사를 유용하게 사용할 수 있음: $\sin(\theta + \Delta\theta) \approx \sin\theta + \Delta\theta \cos\theta$]	1.2
D.4	전자빔의 단면은 정사각형이며, 크기는 $500 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$ 이다. 전체 장치의 길이는 2 m이다. 평균적으로 어느 한 순간에 실험 장치 안에 전자가 적어도 하나 존재하도록 하기 위한 최소 플럭스 밀도 $I_{\min}$ (단위 시간당, 단위 면적당 전자 수)을 구하라.	0.4

원자로 설계

(Total Marks: 10)

우라늄은 자연 상태에서 UO_2 형태로 존재하며, 그 중 단지 0.720%만이 ^{235}U 동위 원소이다. ^{235}U 는 중성자 유도에 의해 쉽게 핵분열하며, 이 과정에서 운동 에너지가 높은 2~3개의 중성자가 방출된다. 하지만 이러한 핵분열 유도 확률은, 중성자의 운동 에너지가 낮을수록 증가한다. 즉, 중성자의 운동 에너지를 줄이면, 다른 ^{235}U 원자에서의 연쇄 핵분열을 유도할 수 있다. 이는 전력 생산을 위한 원자로(NR) 설계의 기초가 된다.

전형적인 원자로(NR)는 높이 H, 반지름 R의 원기둥 모양 탱크로 구성되며, 그 내부는 감속재(moderator)라는 물질로 채워져 있다. 채널(fuel channels)이라는 원통형 관들이 높이 H인 고체 상태 천연 UO_2 연료 핀들을 묶은 클러스터 형태로 내부에 정렬되어 있다. 연료 채널에서 방출된 중성자들은 감속재와 충돌하여 에너지를 잃고, 주변의 다른 연료 채널에 도달했을 때에는 충분히 낮은 에너지를 가지므로, 다시 핵분열을 유도할 수 있다 (그림 I~III 참고). 핵분열을 통해 연료 핀에서 발생하는 열에너지는 핀을 따라 흐르는 냉각수를 통해 제거된다. 본 문제에서는 (A) 연료 핀, (B) 감속재, 그리고 (C) 원통형 구조의 원자로(NR)의 물리적 원리를 살펴본다.



원자로의 개략도에 대한 설명

Fig-I: 연료 채널 확대도

(1: 연료 핀)

Fig-II: 원자로 측면도

(2: 연료 채널들)

Fig-III: 원자로 위에서 본 모습

(3: 연료 채널의 정사각형

배열, 4: 중성자의 대표적인 이동 경로)

※ 문제와 직접 관련된 요소만 표시되어 있으며, 제어봉이나 냉각수 등은 생략되었습니다.

A 연료 핀

UO_2 데이터	1. 물질량 $M_w = 0.270 \text{ kg mol}^{-1}$	2. 밀도 $\rho = 1.060 \times 10^4 \text{ kg m}^{-3}$
	3. 융점 $T_m = 3.138 \times 10^3 \text{ K}$	4. 열전도율 $\lambda = 3.280 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

A.1	다음 핵분열 반응을 고려하시오. 여기서 정지해 있는 ^{235}U 가 운동 에너지가 거의 없는 중성자를 흡수한 후 핵분열을 합니다. $^{235}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{94}\text{Zr} + {}^{140}\text{Ce} + 2 {}^1_0\text{n} + \Delta E$ 이때 방출되는 전체 핵분열 에너지 ΔE (MeV 단위)를 추정하시오. 핵질량은 다음과 같습니다: $m(^{235}\text{U}) = 235.044 \text{ u}$, $m(^{94}\text{Zr}) = 93.9063 \text{ u}$, $m(^{140}\text{Ce}) = 139.905 \text{ u}$, $m({}^1_0\text{n}) = 1.00867 \text{ u}$, $1 \text{ u} = 931.502 \text{ MeV c}^{-2}$ 전하 불균형은 무시하십시오.	0.8
A.2	자연 상태의 UO_2에서 단위 부피당 ^{235}U 원자 수 N을 추정하시오	0.5

A3	연료에 대한 중성자 플럭스 밀도 $\phi = 2.000 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이 균일하다고 가정합니다. ^{235}U 핵의 핵분열 단면적은 $\sigma_f = 5.400 \times 10^{-26} \text{ m}^2$ 입니다. 핵분열 에너지의 80%가 열로 변환된다고 가정할 때, 단위 부피당 열 발생률 Q (단위: W/m^3)를 추정하세요. ($1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$)	1.2
A4	연료 핀 중심의 온도 T_c 와 표면 온도 T_s 사이의 정상 상태 온도차는 다음과 같이 주어집니다: $T_c - T_s = kF(Q, a, \lambda)$, 여기서 $k = 1/4$, a 는 핀의 반지름, λ 는 UO_2 의 열전도도입니다. $F(Q, a, \lambda)$ 를 차원 해석으로 구하세요.	0.5
A5	냉각수의 목표 온도는 577.0 K 입니다. 이 조건에서 연료 핀 반지름 a 의 최대 허용값 a_u 를 추정하세요.	1.0

B 감속재

2차원 탄성 충돌을 고려합니다. 질량이 1 u 인 중성자가 질량이 $A \text{ u}$ 인 감속재 원자와 충돌합니다. 충돌 전에는 모든 감속재 원자가 실험실 기준계(LF)에서 정지해 있다고 가정합니다. 중성자의 충돌 전 속도: $\vec{v}_b$, 충돌 후 속도: $\vec{v}_a$, CM 기준계(질량 중심 기준계)에서 실험실 기준계로의 속도: $\vec{v}_m$, θ : CM 기준계에서의 중성자 산란 각도. 모든 입자는 비상대론적 속도로 움직입니다.

B1	LF(실험실 기준계)에서의 충돌이 그림 IV에 도식적으로 제시되어 있습니다. CM 기준계에서의 충돌을 도식적으로 그리세요. 입자 1, 2, 3의 속도를 $\vec{v}_b$, $\vec{v}_a$, $\vec{v}_m$을 사용하여 표시하고, 산란 각도 θ를 명시하세요. Fig-IV 실험실 기준계에서의 충돌 1. 중성자 충돌 전 2. 중성자 충돌 후 3. 감속재 원자 충돌 전 4. 감속재 원자 충돌 후	1.0
B2	CM 기준계에서 충돌 이후, 중성자와 감속재 원자의 속도를 각각 v 와 V 라고 할 때, 이를 A 와 v_b 로 표현하세요.	1.0
B3	에너지 비율 $G(\alpha, \theta) = E_a/E_b$ 를 유도하세요. 여기서 E_b , E_a 는 충돌 전후의 중성자 운동 에너지이며, $\alpha \equiv [(A - 1) / (A + 1)]^2$ 로 정의됩니다.	1.0
B4	위 식이 중수(D_2O , 질량 20 u)에 대해서도 성립한다고 가정합니다. 이때, 중성자의 최대 에너지 손실 비율 $f_l \equiv (E_b - E_a)/E_b$ 을 계산하세요.	0.5

C 원자로

원자로(NR)를 일정한 중성자 플럭스 ψ 에서 작동시키기 위해서는, 중성자의 누설(leakage)을 중성자의 과잉 생성으로 보충해야 합니다. 원자로가 원기둥 모양일 경우, 중성자 누설률은 다음과 같이 주어집니다:

누설률 = $k_1 \times [(2.405 / R)^2 + (\pi / H)^2] \times \psi$. 여기서 R은 반지름, H는 높이이며, 과잉 생성률은 $k_2 \times \psi$ 로 주어집니다. 상수 k_1 과 k_2 는 원자로의 재료 특성에 따라 달라집니다

C1	$k_1 = 1.021 \times 10^{-2} \text{ m}$, $k_2 = 8.787 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 인 원자로를 고려합니다. 일정한 부피(Volume)를 유지하는 조건에서 연료를 효율적으로 사용하기 위해 누설률을 최소화해야 합니다. 이러한 조건에서 정상 상태(steady state)를 만족하는 원자로의 치수(R, H)를 구하십시오.	1.5
C2	연료 채널은 그림 III과 같이 정사각형 배열로 배치되어 있으며, 이웃한 채널 간의 거리는 0.286 m입니다. 연료 채널을 고체 실린더로 간주했을 때의 유효 반지름은 $3.617 \times 10^{-2} \text{ m}$ 입니다. 정상 상태에서 작동하기 위한 연료 채널의 개수 F_n 과 필요한 UO_2 의 질량 M을 추정하십시오.	1.0