KAIST형 모의 면접·구술고사

물리학

PHYSICS

오토 사이클과 열효율 · 질량-에너지 등가

※ 면접위원(감독관)의 “시작” 신호가 있기 전에는 절대로 문제지를 펼치지 마십시오. ※

수험번호		**성 명**	
모집단위		**고사실**	
입실 시각	시 분	**감독관 확인**	(서명)

■ 시험 구성

문항	주제	준비·답변	배점
문제 1	단열·등적 과정으로 이루어진 순환 과정과 열효율	10분 · 8분	5점
문제 2	서로의 둘레를 도는 두 천체의 합체와 방출 에너지	10분 · 8분	5점
계	출제 범위: 물리학 Ⅰ · 물리학 Ⅱ	준비 20분 · 답변 문항당 8분 내외	**10점**

■ 수험생 유의사항

1. 휴대전화·스마트워치 등 모든 전자기기는 전원을 끈 뒤 감독관에게 제출하십시오. 소지 사실이 확인되면 **부정행위**로 간주되어 해당 전형 지원이 무효 처리됩니다.
2. 문제지는 표지 포함 총 **3쪽**입니다. “시작” 신호 후 쪽수와 인쇄 상태를 먼저 확인하고, 이상이 있으면 즉시 손을 들어 알리십시오.
3. 준비 시간(20분) 동안 문제지 여백과 배부된 메모지에 풀이를 정리할 수 있습니다. 계산기·참고 서적·본인 필기구 이외의 물품은 사용할 수 없습니다.
4. 면접실에서는 문제지와 메모지를 지참하고, 면접위원의 질문 순서에 따라 **근거를 들어 구술**로 답하십시오. 최종 결과만 말하는 답변은 배점의 일부만 인정됩니다.
5. 면접위원은 답변 도중 추가 질문을 할 수 있으며, 이는 감점 요소가 아니라 평가 절차의 일부입니다.
6. 문제지·메모지는 면접 종료 후 **전량 회수**됩니다. 문항 내용을 기록·촬영·유출하는 행위는 부정행위로 처리됩니다.
7. 문항에 이상이 있다고 판단되더라도 임의로 조건을 바꾸지 말고, 본인이 세운 가정을 명확히 밝힌 뒤 답하십시오.
8. 면접 종료 신호 후에는 답변을 계속할 수 없습니다. 시간 배분에 유의하십시오.

문항 코드 KAIST형 · PHYSICS-23 **제작** 2026. 9. **봉인 상태 확인** 개봉 흔적이 있으면 배부 전 감독관에게 알리십시오.

본 문항은 KAIST 면접 및 구술고사 공개 문항 형식에 맞추어 자체 제작한 **비공식 창작 모의문항**입니다. KAIST의 공식 또는 예상 문항이 아니며, 특정 대학의 실제 시험 문항을 옮긴 것이 아닙니다.

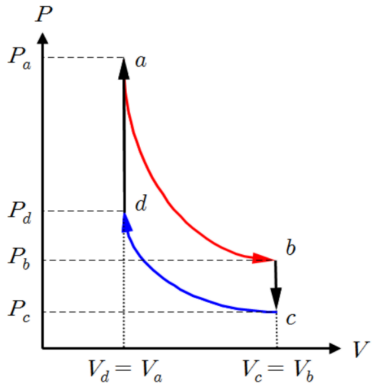
문제 1 순환 과정과 열기관의 효율

물리학 I · II | 열역학 제1법칙, 단열 과정, 등적 과정, 내부 에너지, 열효율 | 준비 10분 · 답변 8분 | 5점

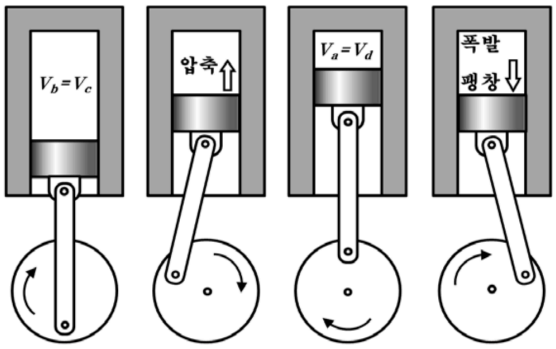
문항 및 제시문

[그림 1]은 어떤 열기관 안에 들어 있는 n몰의 단원자 분자 이상 기체가 겪는 순환 과정을 P–V 그림으로 나타낸 것이다. 기체는 $a \to b \to c \to d \to a$의 순서로 한 바퀴 돌며, 네 과정은 다음과 같다.

- $a \to b$: **단열 팽창**. 부피가 V_a에서 V_b로 늘어난다.
- $b \to c$: **등적 냉각**. 부피가 $V_c = V_b$로 고정된 채 압력이 P_b에서 P_c로 내려간다.
- $c \to d$: **단열 압축**. 부피가 $V_c = V_b$에서 $V_d = V_a$로 줄어든다.
- $d \to a$: **등적 가열**. 부피가 $V_d = V_a$로 고정된 채 압력이 P_d에서 P_a로 올라간다.



[그림 1] 순환 과정의 P–V 그림. 빨간 곡선이 단열 팽창 $a \to b$, 파란 곡선이 단열 압축 $c \to d$이다.



[그림 2] 같은 순환을 실린더와 피스톤의 네 단계로 나타낸 개략도.

네 꼭짓점 a, b, c, d에서의 절대 온도를 각각 T_a, T_b, T_c, T_d라 하고, 압축비를 $r = V_b/V_a > 1$로 둔다. 이상 기체 상태방정식은 $PV = nRT$이고, 단원자 분자 이상 기체의 내부 에너지는 $U = (3/2)PV = (3/2)nRT$이다. 열역학 제1법칙은 $Q = \Delta U + W$이며, 여기서 W는 **기체가 외부에 한 일**로 팽창할 때 $W > 0$, 압축될 때 $W < 0$이다. 열기관의 효율은 $\eta = (\text{한 순환 동안 기체가 외부에 한 알짜 일})/(\text{한 순환 동안 기체가 흡수한 열})$로 정의한다.

(1) 과정 $a \to b$와 과정 $c \to d$ 각각에서 기체의 온도가 높아지는지 낮아지는지를 열역학 제1법칙을 써서 설명하시오. **[1점]**

(2) 이상 기체는 단열 과정에서 $PV^{5/3} = C$(C는 상수)를 만족한다. 이를 이용하여 $T_d/T_a = T_c/T_b$가 성립함을 보이시오. **[1점]**

(3) 네 과정에서 기체가 외부에 한 일 $W_{ab}, W_{bc}, W_{cd}, W_{da}$를 n, R와 온도로 각각 나타내시오. 이어서 한 순환 동안 기체가 흡수한 열을 구하고, 효율 η를 온도만의 식으로 나타내시오. (2)의 결과를 쓰면 η가 더 간단해짐도 보이시오. **[2점]**

(4) (3)의 결과를 압축비 r만으로 나타내고 $r = 8$일 때의 값을 구하시오. 또 이 열기관을 최고 온도 T_a와 최저 온도 T_c 사이에서 작동하는 카르노 기관($\eta_C = 1 - T_c/T_a$)과 비교하시오. **[1점]**

메모란 (풀이 정리용 · 채점 대상 아님)

문제 2 두 천체의 합체에서 방출되는 에너지

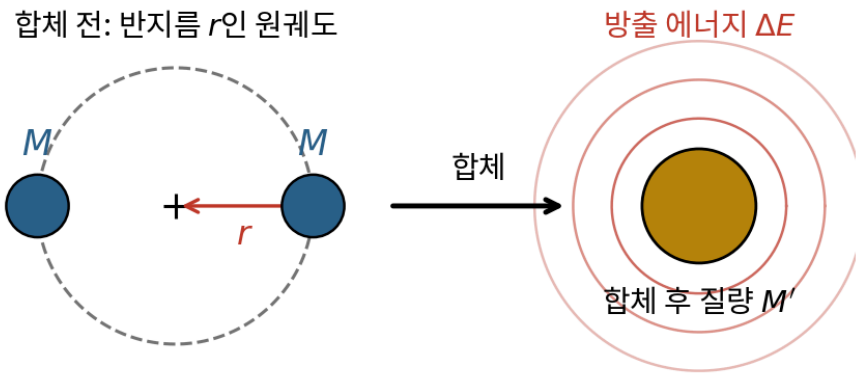
물리학 I · II | 질량-에너지 등가, 만유인력, 등속 원운동, 중력 퍼텐셜 에너지, 에너지 보존 | 준비 10분 · 답변 8분 | 5점

문항 및 제시문

질량이 각각 M으로 같은 두 천체가 자전하지 않고 서로의 만유인력만으로 끌어당기면서, 공통 질량 중심을 중심으로 하는 반지름 r인 원궤도를 같은 주기로 돌고 있다([그림 3]). 여기서

$$r = 5000\frac{GM}{c^2}$$

이다. 시간이 지난 뒤 두 천체는 하나로 합쳐져 질량이 $M' = 1.999M$인 천체가 되어 정지하였고, 합쳐진 뒤에도 자전하지 않는다. 줄어든 에너지는 모두 중력파의 형태로 계 밖으로 방출되었다.



[그림 3] 합체 전 반지름 r인 원궤도를 도는 두 천체와, 합체 후 정지한 질량 M'인 천체.

계산에는 다음 약속을 따른다. 두 천체는 크기를 무시할 수 있는 점질량으로 보고, 두 천체 사이의 거리가 d일 때 중력 퍼텐셜 에너지는 $U = -GM^2/d$이며 무한히 먼 곳에서 $U = 0$이다. 또 **궤도 운동 중인 각 천체의 에너지(정지 에너지와 운동 에너지의 합)가 Mc^2이 되도록 M을 정하였다.** 즉 합체 전 계의 전체 에너지는 $E_i = 2Mc^2 + U$이고, 합체 후 천체는 정지해 있으므로 $E_f = M'c^2$이다.

(1) 두 천체 사이의 거리 d를 r로 나타내고, 등속 원운동의 조건에서 각 천체의 속력 v에 대하여 v^2/c^2의 값을 구하시오. **[1점]**

(2) 합체 직전 두 천체의 중력 퍼텐셜 에너지 U를 Mc^2의 몇 배인지로 나타내시오. **[1점]**

(3) 에너지 보존을 써서 이 과정에서 방출된 에너지 ΔE를 Mc^2의 식으로 구하시오. 질량만 보면 $2M \to 1.999M$으로 $1.0 \times 10^{-3}M$이 사라졌는데도 방출 에너지가 $1.0 \times 10^{-3}Mc^2$보다 작은 까닭을 설명하시오. **[2점]**

(4) 만일 제시문의 약속을 바꾸어 M을 각 천체의 **정지 질량**으로 본다면 ΔE는 얼마가 되는지 구하고, 두 값의 차이가 무엇에서 비롯되는지 밝히시오. 또 M이 태양 질량(2.0×10^{30} kg)의 30배일 때 (3)의 ΔE를 J 단위로 어림하시오. **[1점]**

메모란 (풀이 정리용 · 채점 대상 아님)

면접위원용 자료

물리학 제 23 회 — 출제 의도 · 채점 기준 · 예시 답안

수험생에게 배부하지 마십시오. 이 부분은 문항정보(일반정보·출제 근거·문항 해설·채점 기준·예시 답안·추가 질문)를 담고 있으며, 면접 후 문항 검토와 피드백에 사용합니다.

[모의 면접 문항정보 — 물리학 제 23 회 · 문제 1]

1. 일반정보

유형	☐ 논술고사 ■ 면접 및 구술고사 ☐ 선다형고사
전형명	KAIST형 자체 제작 모의 면접
계열(과목) / 문항번호	물리학 / 문제 1
출제 범위 (과목명)	물리학 I , 물리학 II
핵심 개념 및 용어	열역학 제1법칙 $Q=\Delta U+W$, 단열 과정 $PV^{5/3}=$ 일정, 등적 과정, 내부 에너지 $U=(3/2)nRT$, 열효율, 압축비
예상 소요 시간	준비 10분 · 답변 8분

2. 출제 의도

· 1-(1) 단열 과정에서 $Q=0$이라는 조건을 일의 부호와 연결하여 온도 변화의 방향을 스스로 판정할 수 있는지 평가한다.
· 1-(2) 주어진 단열 관계식에 상태 방정식을 결합하여 **온도와 부피만의 관계** $TV^{2/3}=$ 일정을 끌어내고, 두 단열 과정의 부피가 같은 쌍임을 이용할 수 있는지 평가한다.
· 1-(3) 네 과정의 $W, \Delta U, Q$를 하나의 변수(온도)로 통일해 표현하고, 흡수한 열만 모아 효율을 정의대로 계산할 수 있는지 평가한다.
· 1-(4) 유도한 효율을 설계 변수인 압축비로 환원하고, 같은 온도 범위의 카르노 효율과 비교하여 열역학 제2법칙의 한계를 확인할 수 있는지 평가한다.

3. 출제 근거

가) 적용 교육과정 및 학습내용 성취 기준

문항	교육과정	학습내용 성취 기준
(1)(3)	물리학 I — 열과 에너지	열역학 제1법칙을 이용하여 기체가 받은 열과 한 일, 내부 에너지 변화의 관계를 설명할 수 있다.
(1)(2)	물리학 II — 열역학	등압·등적·등온·단열 과정에서 기체의 상태 변화를 분석할 수 있다.
(3)(4)	물리학 I — 열과 에너지	열기관의 순환 과정과 열효율을 이해하고 열역학 제2법칙을 설명할 수 있다.

나) 자료 출처

참고 자료	해당 내용
고등학교 물리학 I	열과 에너지 — 열역학 제1·2법칙, 열기관과 열효율
고등학교 물리학 II	열역학 — 이상 기체의 상태 변화, 단열 과정

4. 문항 해설

(1) 단열이므로 $Q=0$이고 $0=\Delta U+W$에서 $\Delta U=-W$이다. $a\to b$는 팽창이라 $W>0$이므로 $\Delta U<0$, 즉 $T_b<T_a$로 온도가 내려간다. $c\to d$는 압축이라 $W<0$이므로 $\Delta U>0$, 즉 $T_d>T_c$로 온도가 올라간다. (2) $PV=nRT$를 $PV^{5/3}=C$에 넣으면 $TV^{2/3}=C/(nR)$로 일정하다. $a\to b$에서 $T_aV_a^{2/3}=T_bV_b^{2/3}$, $c\to d$에서 $T_cV_b^{2/3}=T_dV_a^{2/3}$이므로 두 식에서 $T_a/T_b=(V_b/V_a)^{2/3}=T_d/T_c$이고, 이는 곧 $T_d/T_a=T_c/T_b$이다. (3) 등적 과정은 $W=0$이고, 단열 과정은 $W=-\Delta U$이므로 $W_{ab}=(3/2)nR(T_a-T_b)>0$, $W_{cd}=(3/2)nR(T_c-T_d)<0$이다. 열을 흡수하는 과정은 $d\to a$뿐이고 $Q_{da}=(3/2)nR(T_a-T_d)$이므로 $\eta=[(T_a-T_b)-(T_d-T_c)]/(T_a-T_d)=1-(T_b-T_c)/(T_a-T_d)$이다. (2)의 $T_c=T_bT_d/T_a$를 넣으면 $T_b-T_c=(T_b/T_a)(T_a-T_d)$이므로 $\eta=1-T_b/T_a$로 간단해진다. (4) $T_a/T_b=r^{2/3}$이므로 $\eta=1-r^{-2/3}$이고 $r=8$에서 $\eta=1-1/4=0.75$이다. $T_b>T_c$이므로 $\eta=1-T_b/T_a<1-T_c/T_a=\eta_C$로 언제나 카르노 효율보다 작다.

5. 채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	$Q=0$에서 $\Delta U=-W$를 세우고 $T_b<T_a, T_d>T_c$를 각각 근거와 함께 밝힌 경우	1
(2)	$TV^{2/3}=$ 일정을 유도하고 $V_c=V_b, V_d=V_a$를 써서 $T_d/T_a=T_c/T_b$를 보인 경우	1
(3)	네 과정의 W를 온도로 바르게 나타낸 경우 (1점) / 흡수열이 $d\to a$뿐임을 밝히고 $\eta=1-(T_b-T_c)/(T_a-T_d)=1-T_b/T_a$를 얻은 경우 (1점)	2
(4)	$\eta=1-r^{-2/3}$와 $r=8$에서 0.75를 구하고 카르노 효율보다 작음을 $T_b>T_c$로 설명한 경우	1

6. 예시 답안

(1) 두 단열 과정에서의 온도 변화

단열 과정이므로 $Q=0$이고, 제1법칙 $Q=\Delta U+W$에서 $\Delta U=-W$이다. 단원자 분자 이상 기체는 $U=(3/2)nRT$이므로 ΔU의 부호가 곧 온도 변화의 부호이다.

- $a\to b$는 부피가 $V_a\to V_b(>V_a)$로 늘어나는 팽창이므로 $W_{ab}>0$이고 $\Delta U<0$이다.
- $c\to d$는 부피가 $V_b\to V_a(<V_b)$로 줄어드는 압축이므로 $W_{cd}<0$이고 $\Delta U>0$이다.

$$a\to b: T_b<T_a\,(\text{온도 하강}),\qquad c\to d: T_d>T_c\,(\text{온도 상승}).$$

열의 출입이 없으므로 기체가 한 일은 오직 자신의 내부 에너지에서 꺼내 쓰고, 기체가 받은 일은 모두 내부 에너지로 쌓인다.

(2) $T_d/T_a=T_c/T_b$의 증명

상태 방정식 $PV=nRT$에서 $P=nRT/V$이므로 이를 단열 조건에 대입하면

$$\frac{nRT}{V}\cdot V^{5/3}=C\quad\Longrightarrow\quad TV^{2/3}=\frac{C}{nR}=\text{일정}\ .$$

두 단열 과정에 각각 적용하면 ($V_c=V_b, V_d=V_a$에 주의)

$$a\to b: T_aV_a^{2/3}=T_bV_b^{2/3},\qquad c\to d: T_cV_b^{2/3}=T_dV_a^{2/3}.$$

두 식을 각각 정리하면 $T_a/T_b=(V_b/V_a)^{2/3}=r^{2/3}$이고 $T_d/T_c=(V_b/V_a)^{2/3}=r^{2/3}$이다. 즉 $T_a/T_b=T_d/T_c$이고, 양변을 교차하여 쓰면

$$\frac{T_d}{T_a}=\frac{T_c}{T_b}\quad\left(=r^{-2/3}\right).$$

(3) 각 과정의 일과 열효율

등적 과정에서는 부피 변화가 없으므로 $W=0$이고, 단열 과정에서는 $W=-\Delta U$이다.

$$W_{ab}=-\Delta U_{ab}=\frac{3}{2}nR(T_a-T_b)>0,\quad W_{bc}=0,$$

$$W_{cd}=-\Delta U_{cd}=\frac{3}{2}nR(T_c-T_d)<0,\quad W_{da}=0.$$

한편 등적 과정에서는 $Q=\Delta U$이므로 $Q_{bc}=(3/2)nR(T_c-T_b)<0$(방출), $Q_{da}=(3/2)nR(T_a-T_d)>0$(흡수)이고 단열 과정은 $Q=0$이다. 따라서 흡수한 열은 $d\to a$ 과정의 것뿐이다.

$$Q_{\text{흡수}}=\frac{3}{2}nR(T_a-T_d),\quad W_{\text{알짜}}=\frac{3}{2}nR[(T_a-T_b)-(T_d-T_c)].$$

$$\eta=\frac{W_{\text{알짜}}}{Q_{\text{흡수}}}=\frac{(T_a-T_b)-(T_d-T_c)}{T_a-T_d}=1-\frac{T_b-T_c}{T_a-T_d}.$$

(2)에서 $T_c = T_b T_d / T_a$이므로 $T_b - T_c = T_b(1 - T_d/T_a) = (T_b/T_a)(T_a - T_d)$이고,

답

$$\eta = 1 - \frac{T_b}{T_a} = 1 - \frac{T_c}{T_d}.$$

효율이 단열 팽창의 두 끝 온도비만으로 정해진다.

(4) 압축비로 본 효율과 카르노 기관과의 비교

(2)에서 $T_b/T_a = r^{-2/3}$이므로

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{2/3}}, \qquad r = 8 \Longrightarrow \eta = 1 - \frac{1}{8^{2/3}} = 1 - \frac{1}{4} = 0.75.$$

압축비가 클수록 효율이 올라가지만 $r \to \infty$에서도 1에 수렴할 뿐 1을 넘지 못한다. 카르노 기관과의 비교: 이 순환의 최고 온도는 T_a, 최저 온도는 T_c이다. 같은 두 온도 사이의 카르노 효율은 $\eta_C = 1 - T_c/T_a$인데, (1)에서 $T_b > T_c$이므로

답

$$\eta = 1 - \frac{T_b}{T_a} < 1 - \frac{T_c}{T_a} = \eta_C.$$

즉 이 순환의 효율은 언제나 카르노 효율보다 작다.

> 차이가 생기는 까닭은 열을 주고받는 두 등적 과정이 **온도가 변하는 동안** 열을 교환하기 때문이다. 카르노 기관은 열 교환을 등온 과정으로만 하여 온도 차에 의한 비가역 손실이 없다. $r \to \infty$이면 $T_b \to 0$이 되어 두 효율이 모두 1에 가까워진다.

7. 면접 추가 질문 및 검토 의견

· 추가 질문: “이원자 분자 이상 기체($\gamma = 7/5$)로 바꾸면 $r = 8$에서 효율이 얼마가 되는가?” ($\eta = 1 - 8^{-2/5} \approx 0.565$로 오히려 작아진다. 같은 압축비에서도 기체의 자유도가 효율을 바꾼다)
· 추가 질문: “$b \to c$와 $d \to a$를 등적 대신 등압 과정으로 바꾸면 효율 식은 어떻게 달라지는가?”
· 검토 의견: (3)에서 네 과정의 열을 모두 더해 분모로 쓰는 실수가 가장 흔하다. 효율의 분모가 **흡수한 열만**임을 먼저 확인시키고, “Q가 양수인 과정은 몇 개인가”를 묻는다. (2)를 쓰지 않고 $\eta = 1 - (T_b - T_c)/(T_a - T_d)$에서 멈추어도 (3)의 두 번째 1점은 부분 인정한다.

[모의 면접 문항정보 — 물리학 제 23 회 · 문제 2]

1. 일반정보

유형	□ 논술고사 ■ 면접 및 구술고사 □ 선다형고사
전형명	KAIST형 자체 제작 모의 면접
계열(과목) / 문항번호	물리학 / 문제 2
출제 범위 (과목명)	물리학 I , 물리학 II
핵심 개념 및 용어	질량-에너지 등가 $E=mc^2$, 만유인력과 등속 원운동, 중력 퍼텐셜 에너지 $U=-GM^2/d$, 에너지 보존, 결합 에너지
예상 소요 시간	준비 10분 · 답변 8분

2. 출제 의도

· 2-(1) 질량 중심 둘레의 원운동에서 **궤도 반지름과 두 천체 사이 거리**를 구분하고, 만유인력을 구심력으로 놓아 속력을 구할 수 있는지 평가한다.
· 2-(2) 중력 퍼텐셜 에너지에 주어진 반지름을 대입하면 G와 M이 모두 소거되어 Mc^2의 배수로 떨어짐을 간파할 수 있는지 평가한다.
· 2-(3) 질량 결손만으로 방출 에너지를 세지 않고, 처음 상태가 이미 퍼텐셜 에너지만큼 낮다는 점을 에너지 수지에 반영할 수 있는지 평가한다.
· 2-(4) 문제에서 주어진 질량의 **정의**가 바뀌면 답이 어떻게 달라지는지를 따져, 비리얼 관계 $K=|U|/2$의 의미를 스스로 드러낼 수 있는지 평가한다.

3. 출제 근거

가) 적용 교육과정 및 학습내용 성취 기준

문항	교육과정	학습내용 성취 기준
(1)	물리학 II — 역학적 상호작용	만유인력이 구심력으로 작용하는 천체의 원운동을 분석할 수 있다.
(2)(3)	물리학 I — 역학과 에너지	에너지 보존 법칙을 이용하여 계의 에너지 변화를 정량적으로 설명할 수 있다.
(3)(4)	물리학 I — 열과 에너지	질량과 에너지의 등가성을 이해하고 질량 결손으로 방출되는 에너지를 구할 수 있다.

나) 자료 출처

참고 자료	해당 내용
고등학교 물리학 I	열과 에너지 — 질량-에너지 등가, 핵반응과 질량 결손
고등학교 물리학 II	역학적 상호작용 — 만유인력과 천체의 운동, 중력 퍼텐셜 에너지

4. 문항 해설

(1) 질량이 같으므로 질량 중심은 두 천체의 중점이고 두 천체 사이 거리는 $d=2r=10^4GM/c^2$이다. $GM^2/d^2=Mv^2/r$에 $d=2r$를 넣으면 $v^2=GM/(4r)$이고, $r=5000GM/c^2$를 대입하면 $v^2/c^2=1/(2\times10^4)=5.0\times10^{-5}$, 즉 $v/c\approx7.1\times10^{-3}$이다. (2) $U=-GM^2/d=-GM^2c^2/(10^4GM)=-1.0\times10^{-4}Mc^2$로 G와 M이 소거된다. (3) $E_i=2Mc^2+U=(2-0.0001)Mc^2=1.9999Mc^2$이고 $E_f=1.999Mc^2$이므로 $\Delta E=E_i-E_f=9\times10^{-4}Mc^2$이다. 질량 결손은 $1.0\times10^{-3}M$이지만 처음 계가 이미 $1.0\times10^{-4}Mc^2$만큼 낮은 에너지에 있었으므로 그만큼 덜 방출된다. (4) M을 정지 질량으로 보면 각 천체의 에너지가 γMc^2이고 $\gamma-1\approx v^2/(2c^2)=2.5\times10^{-5}$이므로 운동 에너지 합은 $2(\gamma-1)Mc^2=5.0\times10^{-5}Mc^2=|U|/2$이다. 따라서 $E_i=(2+0.00005-0.0001)Mc^2=1.99995Mc^2$이고 $\Delta E=9.5\times10^{-4}Mc^2$가 된다. $M=30\times2.0\times10^{30}$ kg이면 $\Delta E\approx9\times10^{-4}\times6.0\times10^{31}\times9\times10^{16}\approx4.9\times10^{45}$ J이다.

5. 채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	$d=2r$를 밝히고 $v^2=GM/(4r)$에서 $v^2/c^2=5.0\times10^{-5}$를 구한 경우 ($d=r$로 쓰면 0점)	1
(2)	$U=-1.0\times10^{-4}Mc^2$을 얻은 경우	1
(3)	$E_i=2Mc^2+U$로 에너지 수지를 세운 경우 (1점) / $\Delta E=9\times10^{-4}Mc^2$을 구하고 질량 결손보다 작은 까닭을 퍼텐셜 에너지로 설명한 경우 (1점)	2
(4)	정지 질량 해석에서 $\Delta E=9.5\times10^{-4}Mc^2$을 구하고 차이가 운동 에너지 $\lvert U\rvert/2$ 때문임을 밝힌 경우 (수치 어림 포함)	1

6. 예시 답안

(1) 두 천체 사이의 거리와 속력

두 천체의 질량이 같으므로 질량 중심은 둘을 잇는 선분의 중점이고, 각 천체는 중점에서 r만큼 떨어진 원궤도를 돈다. 따라서

$$d=2r=10^4\frac{GM}{c^2}.$$

만유인력이 구심력 노릇을 하므로 (원궤도 반지름은 r, 두 천체 사이 거리는 $d=2r$임에 주의)

$$\frac{GM^2}{d^2}=\frac{Mv^2}{r}\quad\Longrightarrow\quad\frac{GM^2}{4r^2}=\frac{Mv^2}{r}\quad\Longrightarrow\quad v^2=\frac{GM}{4r}.$$

$r=5000GM/c^2$를 넣으면 $v^2=GMc^2/(4\cdot5000GM)=c^2/(2\times10^4)$이므로

$$\frac{v^2}{c^2}=5.0\times10^{-5},\qquad\frac{v}{c}=\frac{1}{\sqrt{2\times10^4}}\approx7.1\times10^{-3}.$$

빛의 속력의 1% 미만이므로 상대론적 보정은 매우 작다.

(2) 합체 직전의 중력 퍼텐셜 에너지

$$U=-\frac{GM^2}{d}=-\frac{GM^2}{10^4(GM)/c^2}=-\frac{Mc^2}{10^4}.$$

$$U=-1.0\times10^{-4}Mc^2.$$

G와 M이 모두 소거되어 Mc^2의 일정한 배수가 되는 것이 이 문제의 핵심 장치이다.

(3) 방출된 에너지

제시문의 약속에 따라 궤도 운동 중인 각 천체의 에너지가 Mc^2이므로, 합체 직전 계의 전체 에너지는 질량-운동 에너지의 합 $2Mc^2$에 중력 퍼텐셜 에너지를 더한 것이다.

$$E_i=2Mc^2+U=2Mc^2-1.0\times10^{-4}Mc^2=1.9999Mc^2.$$

합체 후 천체는 정지해 있고 자전도 하지 않으므로 그 에너지는 정지 에너지뿐이다.

$$E_f=M'c^2=1.999Mc^2.$$

에너지는 보존되므로 줄어든 만큼이 중력파로 방출된다.

답

$$\Delta E=E_i-E_f=(1.9999-1.999)Mc^2=9\times10^{-4}Mc^2.$$

질량만 비교하면 $2M \to 1.999M$으로 $1.0\times10^{-3}M$이 사라졌지만, 처음 상태는 이미 중력에 묶여 $1.0\times10^{-4}Mc^2$만큼 **낮은** 에너지에 있었다. 그만큼은 이미 '빛'으로 깎여 있었으므로 밖으로 내보낼 몫에서 빠지고, 방출량은 $(10-1)\times10^{-4}Mc^2 = 9\times10^{-4}Mc^2$이 된다.

(4) 질량의 정의를 바꾼 경우와 수치 어림

M을 정지 질량으로 보면 궤도 운동 중인 천체 하나의 에너지는 γMc^2이고, $v^2/c^2 = 5.0\times10^{-5}$이 작으므로

$$\gamma - 1 \approx \frac{v^2}{2c^2} = 2.5\times10^{-5} \quad\Longrightarrow\quad 2(\gamma-1)Mc^2 = 5.0\times10^{-5}Mc^2 = \frac{|U|}{2}.$$

이것은 원궤도에서 성립하는 관계 $K = |U|/2$와 정확히 일치한다. 따라서

$$E_i = 2Mc^2 + K + U = (2 + 0.00005 - 0.0001)Mc^2 = 1.99995Mc^2,$$

답

$$\Delta E = (1.99995 - 1.999)Mc^2 = 9.5\times10^{-4}Mc^2.$$

두 값의 차이 $0.5\times10^{-4}Mc^2$은 곧 궤도 운동의 운동 에너지 $K = |U|/2$이다. 앞의 약속에서는 이 운동 에너지가 이미 $2Mc^2$ 안에 들어 있었고, 정지 질량 약속에서는 밖에 따로 더해지기 때문이다. 어느 쪽이든 **질량을 어떻게 정의했는지 밝혀야** 답이 하나로 정해진다. 수치 어림: $M = 30\times2.0\times10^{30}\ \text{kg} = 6.0\times10^{31}$ kg이면 $Mc^2 = 6.0\times10^{31}\times9.0\times10^{16} = 5.4\times10^{48}$ J이므로

$$\Delta E \approx 9\times10^{-4}\times5.4\times10^{48} \approx 4.9\times10^{45}\ \text{J}.$$

방출이 0.2 s 동안 일어났다면 평균 일률은 약 2.4×10^{46} W로, 태양의 광도 3.8×10^{26} W의 10^{19}배를 넘는다.

7. 면접 추가 질문 및 검토 의견

· 추가 질문: "합체 직전의 궤도 반지름이 더 작았다면 방출 에너지는 커지는가, 작아지는가?" ($|U|$가 커져 E_i가 낮아지므로 같은 최종 질량이라면 방출은 오히려 작아진다. 반대로 최종 질량이 더 줄어들 수 있으므로 두 효과를 나누어 보아야 한다)
· 추가 질문: "이 에너지가 중력파로 나간다는 것을 어떻게 검증할 수 있는가?" (마이컬슨형 간섭계로 팔 길이 변화 측정)
· 검토 의견: (1)에서 r를 두 천체 사이 거리로 잘못 읽어 $d = r$로 두는 실수가 가장 잦다. "질량 중심은 어디인가"를 먼저 묻는다. (3)에서 $\Delta E = 1.0\times10^{-3}Mc^2$으로 답하면 "처음 상태의 퍼텐셜 에너지는 어디로 갔는가"를 되묻는다.

PARTNER SERVICE

써봄 AI 논술 첨삭 서비스

말로 준비한 답, 글로 써 보면 빈틈이 보인다.

구술 답안을 글로 정리해 올리면, AI가 평가 기준에 따라 채점하고 상세한 피드백을 준다.

4개 영역 점수

논리구조 · 근거타당성 · 주장명확성 · 언어표현을 영역별 점수로 제공한다.

상세 피드백

강점, 개선점, 구체적 제안사항을 함께 짚어 준다.

간편한 업로드

PDF · DOCX · TXT 파일을 지원하고, 최대 10편까지 일괄 처리한다.

리포트 저장

첨삭 결과 리포트를 PDF로 내려받아 다시 볼 수 있다.

이 모의고사와 함께 쓰는 법

① 문항마다 내 답변을 한 편의 글로 정리한다. 결론 → 근거 → 검증 순서로 쓴다.

② writegrow.net 에 답안을 올려 영역별 점수와 피드백을 받는다.

③ 예시답안과 비교해 빠진 논리 단계를 채우고, 다시 써서 점수 변화를 확인한다.

회원가입 시 3회 무료 분석

Google Gemini 기반 AI가 논술문을 자동 분석한다.

writegrow.net