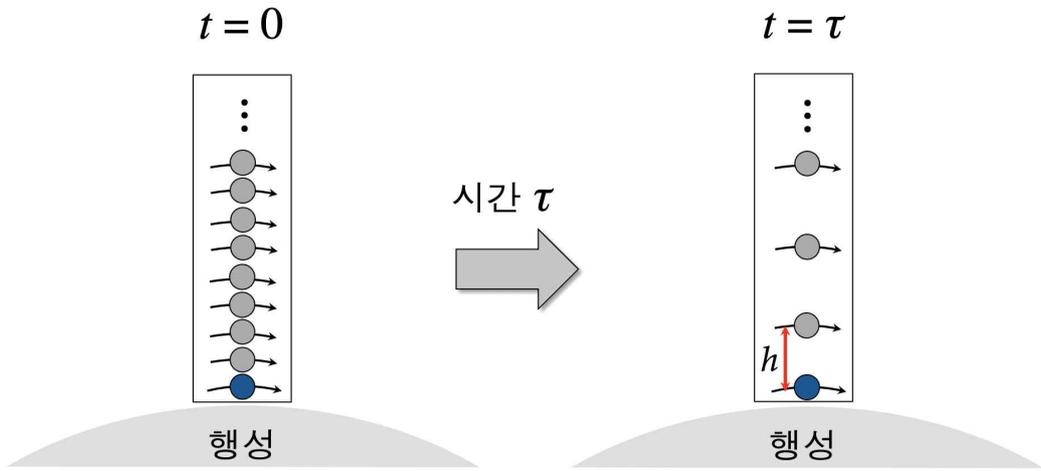


[한국과학기술원(KAIST) 문항정보 5]

1. 일반정보

유형	□ 논술고사 ■ 면접 및 구술고사 □ 선다형고사	
전형명	일반전형	
해당 대학의 계열(과목) / 문항번호	자연계열(물리) / 문제1	
출제 범위	과학과 교육과정 과목명	물리학II
	핵심개념 및 용어	원운동, 케플러 법칙, 중력 법칙
예상 소요 시간	10분	

2. 문항 및 제시문



우주 탐사선이 미지의 행성들을 관측하던 중, 대기가 없고 수많은 자갈 조각들로 둘러싸인 특수한 행성을 발견하였다. 자갈들은 행성을 따라 다양한 높이에서 등속 원운동을 하고 있다. 위 그림은 행성 지표면의 특정 위치에서 각각 $t=0$, $t=\tau$ 의 시각에 관측된 자갈들의 모습이다. 그중 지표면 근처에서 운동하는 자갈이 시간 τ 동안 행성을 다섯 바퀴 회전하여 제자리로 돌아오는 것을 확인하였다. 같은 시간 동안 이보다 높은 곳에서 제자리로 돌아온 자갈의 최소 높이는 h 로 관측되었다. 이 행성의 지표면 근처에서 나타나는 중력 가속도를 구하라. (행성은 완벽한 구형이고, 자갈들은 높이 방향으로 고르게 분포한다고 가정하며, 자갈들 사이의 만유인력 및 충돌은 무시한다.) (5점)

3. 출제 의도

- 만유인력의 법칙과 케플러 법칙을 이해하고 이를 적용할 수 있는지 평가한다.

4. 출제 근거

가) 교육과정 및 관련 성취기준

적용 교육과정	예) 교육부 고시 제2015-74호 [별책 9] “과학과 교육과정”
문항 및 제시문	학습내용 성취 기준
(1)	<p>교육과정 물리학II: 역학적 상호 작용(등속 원운동, 케플러 법칙, 중력 법칙)</p> <p>성취기준·성취수준 [12물리II 01-5] 구심력을 이용하여 등속 원운동을 설명할 수 있다. [12물리II 01-10] 행성의 운동에 대한 케플러 법칙이 뉴턴의 중력 법칙을 만족함을 설명할 수 있다.</p>

나) 자료 출처

참고자료	도서명	저자	발행처	발행년도	쪽수
고등학교 교과서	물리학II	강남화 외 5명	천재교육	2018	34p~42p
기타					

5. 문항 해설

등속 원운동과 중력 법칙을 이용해 주기와 반지름 사이의 관계를 파악하거나 케플러 제3 법칙에서 주기와 반지름 사이의 관계가 $T^2 \propto r^3$ 임을 이용해 지구 반지름(R)과 지표면으로부터 높이 h의 관계를 구해 지표 근처의 중력가속도를 구하는 문항이다.

6. 채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
없음	<ul style="list-style-type: none"> • 케플러 법칙 $T^2 \propto r^3$ (또는 중력에 의한 등속 원운동 주기)을 사용하여 문제를 해결하려고 하면 +1점 • h 높이의 자갈 주기가 $\tau/4$임을 찾았으면 +1점 • 식 (4)와 같이 행성의 반지름을 구했으면 +1점 • 식 (6)에서 $g = R\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$ 까지 구했으면 +1점 • 식 (6)과 같이 중력 가속도를 찾았으면 +1점 	5점

7. 예시 답안

자갈은 행성의 중력에 의해 등속 원운동을 하므로 다음 식을 세울 수 있다.

$$m\frac{v^2}{r} = \frac{GmM}{r^2} \quad (1)$$

(M : 행성의 질량, m : 자갈의 질량, v : 자갈의 속력, r : 원 궤도의 반지름, G : 만유인력 상수)

이를 정리하여 등속 원운동의 주기 T 를 구할 수 있다.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}} \quad (2)$$

$$\rightarrow T^2 \propto r^3 \quad (3)$$

원 궤도의 반지름이 클수록 주기가 길어지므로 지표면에서 위로 올라갈수록 자갈의 원운동 주기는 길어진다. 따라서 지표면의 자갈이 5번 회전하는 동안 그보다 높은 고도에서 회전하여 제자리로 돌아올 수 있는 자갈의 최대 회전수는 4번이며, 이때 고도가 h 에 해당한다. 즉, 지표면의 자갈은 $\tau/5$ 의 원운동 주기를 갖고, h 높이의 자갈의 원운동 주기는 $\tau/4$ 이다. 행성의 반지름을 R 이라 할 때, 식 (3)을 사용하면,

$$\left(\frac{\tau/5}{\tau/4}\right)^2 = \left(\frac{R}{R+h}\right)^3 \rightarrow R = \frac{h}{(5/4)^{2/3} - 1} \quad (4)$$

행성 표면에서의 중력 가속도 g 는 다음과 같이 표현되며,

$$mg = \frac{GmM}{R^2} \rightarrow g = \frac{GM}{R^2} \quad (5)$$

식 (2)와 (4)를 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$g = R\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{h}{(5/4)^{2/3} - 1} \left(\frac{10\pi}{\tau}\right)^2 \quad (6)$$

8. 총 평

[고등학교 물리교사 A]

원운동하는 물체의 구심력과 중력 법칙을 이용하여 주기와 반지름 사이의 관계를 유도하거나 케플러 제3칙을 활용하여 주기와 물체의 원운동 반지름 사이의 관계를 구할 수 있음. 이를 바탕으로 주기와 거리 사이의 비율을 통해 행성의 반지름과 h 사이의 관계를 구하고 지표 근처에서 중력가속도를 구할 수 있음. 물리학II에서 다룬 원운동과 케플러 법칙, 중력 법칙을 통해서 충분히 해결할 수 있는 문항이라고 판단됨.

[고등학교 물리교사 B]

만유인력이 구심력으로 작용해 등속 원운동 하는 물체의 회전 반지름과 주기의 관계를 유도하고, 회전반지름에 따른 주기의 규칙성으로부터 지표 근처에서 중력가속도를 구할 수 있음. 뉴턴의 운동방정식을 적절히 활용하는 문항으로 물리학II에서 학습한 등속 원운동과 만유인력, 케플러 법칙을 바탕으로 충분히 해결할 수 있는 문항으로 고교 교육과정에 적합하다고 판단됨.

< 유사 기출 문제 >

유사문제 2021학년도 9월 모평 13번

근거

- 케플러 법칙과 중력 법칙을 모두 이용해서 해결하는 문항으로 xy 평면에서 원점을 중심으로 반지름이 다를 때 일정 시간이 지난 후 물체의 위치를 통해 주기와 구심 가속도를 구하는 문항으로 면접 문항과 유사함.

[한국과학기술원(KAIST) 문항정보 6]

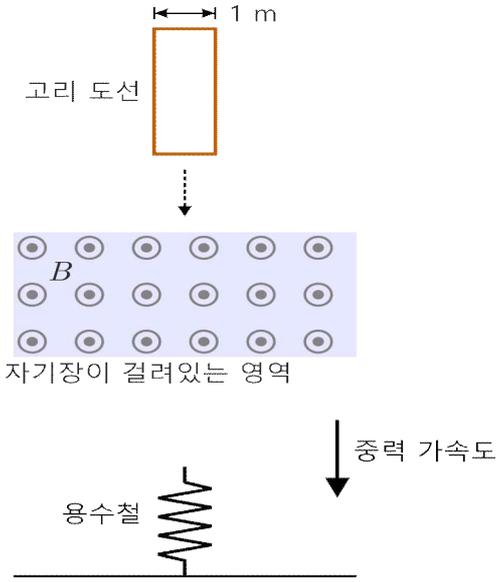
1. 일반정보

유형	□ 논술고사 ■ 면접 및 구술고사 □ 선다형고사	
전형명	일반전형	
해당 대학의 계열(과목) / 문항번호	자연계열(물리) / 문제2	
출제 범위	과학과 교육과정 과목명	물리학 I, 물리학 II
	핵심개념 및 용어	역학적 에너지 보존, 전자기 유도
예상 소요 시간	10분	

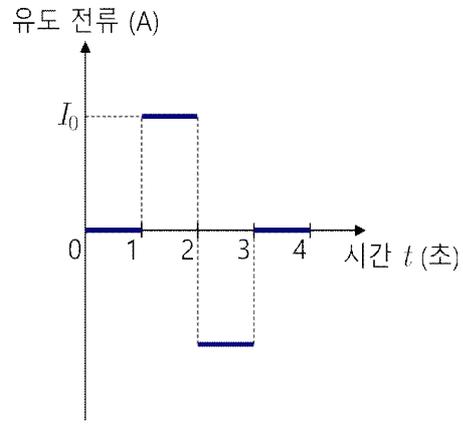
2. 문항 및 제시문

갑돌이는 한국 최초의 달 탐사선 다누리호가 스페이스X사의 로켓에 실려 발사되는 장면을 지켜보고 있었다. 발사가 성공적으로 이루어진 후 1, 2단 로켓이 분리되고, 1단 로켓은 재활용하기 위해 다시 지구로 내려와 착륙하였다. 착륙 시 속도를 줄이기 위해 강하게 연료를 소모하는 것을 본 갑돌이는, 놀이공원에 있는 자이로드롭의 원리를 이용하면 더 효율적으로 로켓의 속도를 줄일 수 있지 않을까 하는 생각이 들어서 다음과 같은 실험을 구상해 보았다.

[그림 1]과 같이 질량이 1 kg이고 저항이 1 Ω이며 너비가 1 m인 직사각형 모양의 고리 도선을 준비하여 $t=0$ 시각에 정지 상태에서 자유낙하 시킨다. 이후 고리 도선은 세기 B 의 균일한 자기장이 걸려있는 영역을 통과하며, 이 과정에서 고리 도선이 이루는 면은 자기장에 수직인 상태로 유지된다. 고리 도선은 자유낙하를 시작한 지 4초 후에 바닥에 있는 용수철에 닿았다. 이 실험을 하면서 고리 도선에서 발생하는 유도 전류를 측정하였더니 [그림 2]와 같은 결과를 얻었다. (중력 가속도는 10 m/s^2 이고, 공기 저항과 용수철의 질량은 무시한다.)



[그림 1]



[그림 2]

-
- (1) 고리 도선이 용수철에 붙은 채로 용수철이 압축된다. 이때 최대 2 m만큼 압축되었다면, 용수철 상수는 얼마인가? (3점)
- (2) 고리 도선이 자기장이 걸려있는 영역을 통과할 때 발생하는 에너지 변환을 설명하고, 이를 이용하여 고리 도선에서 발생하는 유도 전류의 크기 I_0 와 자기장의 세기 B 를 구하라. (2점)

3. 출제 의도

- 유도 기전력의 발생 원리를 이해하고 있는지 확인한다.
- 등속 및 가속 운동을 기술할 수 있는지 확인한다.
- 에너지 변환 및 보존 개념을 이해하고 있는지 확인한다.

4. 출제 근거

가) 교육과정 및 관련 성취기준

적용 교육과정	예) 교육부 고시 제2015-74호 [별책 9] “과학과 교육과정”	
문항 및 제시문	학습내용 성취 기준	
(1)	교육과정	물리학 I: 힘과 운동, 전기와 자기, 열과 에너지 물리학 II: 힘과 운동, 전기와 자기, 열과 에너지
	성취기준·성취수준	<p>[12물리I 01-02] 뉴턴 운동 법칙을 이용하여 직선 상에서 물체의 운동을 정량적으로 예측할 수 있다.</p> <p>[12물리I 01-06] 직선 상에서 운동하는 물체의 역학적 에너지가 보존되는 경우와 열에너지가 발생하여 역학적 에너지가 보존되지 않는 경우를 구별하여 설명할 수 있다.</p> <p>[12물리II 01-03] 평면상의 등가속도 운동에서 물체의 속도와 위치를 정량적으로 예측할 수 있다.</p> <p>[12물리II 02-07] 자기선속이 시간에 따라 변화할 때 유도 기전력이 회로에 유도되는 현상에서 기전력의 크기를 구할 수 있다.</p>
(2)	교육과정	물리학 I: 힘과 운동, 전기와 자기, 열과 에너지 물리학 II: 힘과 운동, 전기와 자기, 열과 에너지
	성취기준·성취수준	<p>[12물리I 01-02] 뉴턴 운동 법칙을 이용하여 직선 상에서 물체의 운동을 정량적으로 예측할 수 있다.</p> <p>[12물리I 01-06] 직선 상에서 운동하는 물체의 역학적 에너지가 보존되는 경우와 열에너지가 발생하여 역학적 에너지가 보존되지 않는 경우를 구별하여 설명할 수 있다.</p> <p>[12물리II 01-03] 평면상의 등가속도 운동에서 물체의 속도와 위치를 정량적으로 예측할 수 있다.</p> <p>[12물리II 02-07] 자기선속이 시간에 따라 변화할 때 유도 기전력이 회로에 유도되는 현상에서 기전력의 크기를 구할 수 있다.</p>

나) 자료 출처

참고자료	도서명	저자	발행처	발행년도	쪽수
고등학교 교과서	물리학 I	강남화 외 5명	천재교육	2018	18~26 45~50
	물리학 II	강남화 외 5명	천재교육	2018	25~28 126~131
기타					

5. 문항 해설

(1)번 문항은 등가속도 운동하는 물체의 운동 시간에 따라 물체의 속력을 구하고 이를 바탕으로 역학적 에너지가 보존됨을 통해 용수철의 탄성 계수를 구하는 문항이다.

(2)번 문항은 역학적 에너지가 보존되지 않는 경우 중력 퍼텐셜 에너지가 전기 에너지로 전환되는 것임을 확인하고 감소한 중력 퍼텐셜 에너지만큼 전기 에너지가 증가함을 통해 자기장의 세기를 구하는 문항임.

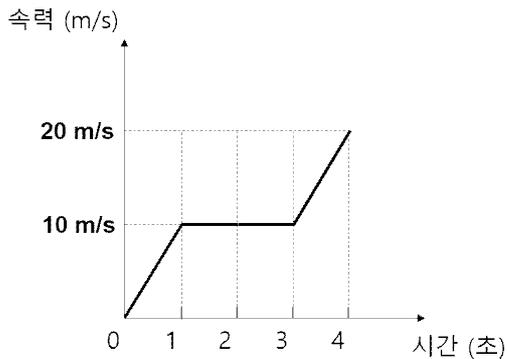
6. 채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	<ul style="list-style-type: none"> 측정된 유도 전류로부터 고리 도선의 운동상태(자유낙하-등속 운동-자유낙하)를 기술할 수 있으면 +1점 용수철이 압축될 때 ‘구리 도선의 (운동 에너지 + 중력 퍼텐셜 에너지) → 용수철의 탄성 퍼텐셜 에너지’ 개념을 설명하면서 $\frac{1}{2}mv^2 + mgx = \frac{1}{2}kx^2$ 식을 얻었다면 +1점 용수철 상수 $k = 110 \text{ N/m}$를 정확히 계산하였다면 +1점 	3점
(2)	<ul style="list-style-type: none"> 고리 도선의 운동상태로부터 ‘중력 퍼텐셜 에너지 → 전기 에너지’ 개념을 설명하면서 $mgh = I_0^2 R t$ 식을 얻었다면 +1점 유도 전류 $I_0 = 10 \text{ A}$와 자기장 세기 $B = 1 \text{ T}$를 정확히 계산하였다면 +1점 	2점

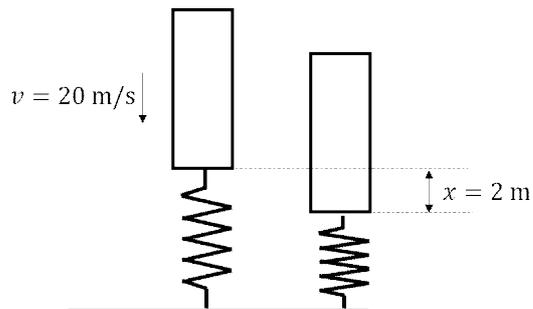
7. 예시 답안

(1) 세기 B 의 균일한 자기장이 걸린 영역에 너비 l 의 직사각형 고리 도선이 속력 v 로 들어갈 때 발생하는 유도 기전력의 크기는 $V = Blv$ 로 표현된다. 또한 유도 전류의 크기는 $I = \frac{V}{R} = \frac{Blv}{R}$ (R : 고리 도선의 저항)가 된다. 여기서 중요한 사실은, 유도 전류는 고리 내부의 자기 선속이 변할 때만 발생하며, 이때 발생하는 유도 전류의 크기는 고리 도선의 속력에 비례한다는 사실이다.

고리 도선이 자유낙하를 시작한 후 0~1초 구간에는 유도 전류가 발생하지 않았기 때문에 공기 중에서 자유낙하를 하였음을 알 수 있고, 이후 1~2초 구간에서 일정한 크기의 유도 전류가 발생하였다는 것은 자기장이 걸린 영역에 진입한 후 등속 운동을 하였음을 의미한다. 이후 유도 전류의 방향이 바뀌었다는 것은 고리 도선이 자기장 영역을 빠져나가기 시작하였음을 의미하며, 2초에서 유도 전류가 즉각적으로 바뀌었다는 것은 고리 도선의 높이가 자기장이 걸린 영역의 높이와 같다는 것을 의미한다. (즉, 고리 도선이 완전히 자기장 영역에 진입하자마자 바로 빠져나가기 시작한다) 따라서 2~3초 구간에서도 같은 속력으로 등속 운동을 함을 알 수 있다. 이후 3~4초 구간에서는 유도 전류가 발생하지 않았으므로 도선이 자기장 영역을 완전히 빠져나가 다시 자유낙하를 함을 알 수 있다. 이 과정에서 도선의 속력 변화를 그래프로 나타내면 [그림 S1]과 같다. (중력 가속도 10 m/s^2 으로 낙하하므로, 자유낙하 시 1초당 10 m/s 의 속력 변화가 발생한다.)



[그림 S1]



[그림 S2]

따라서 자유낙하를 시작한 지 4초 후 고리 도선이 용수철에 도달하였을 때 속력은 $v = 20 \text{ m/s}$ 이 된다. 이후 [그림 S2]와 같이 용수철이 압축되기 시작하는데, 이때 고리 도선의 (중력 퍼텐셜 에너지 + 운동 에너지)가 용수철의 탄성 퍼텐셜 에너지로 변환되고, 이 과정에 적용되는 에너지 보존 법칙은 아래 식으로 표현된다.

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgx = \frac{1}{2}kx^2 \quad (x: \text{용수철이 최대로 수축한 길이})$$

이 식에 $m=1 \text{ kg}$, $v=20 \text{ m/s}$, $g=10 \text{ m/s}^2$, $x=2 \text{ m}$ 를 대입하면 용수철 상수 $k=110 \text{ N/m}$ 가 나온다.

(2) [그림 S1]에서 고리 도선이 자기장 영역을 통과하는 시간은 1~3초 구간이며, 이때 $h=20 \text{ m}$ 의 높이를 $v=10 \text{ m/s}$ 의 속도로 등속으로 낙하한다. 이 과정에서 속도가 일정하므로 운동 에너지의 변화는 없고, 중력 퍼텐셜 에너지가 전기 에너지로 변환된다. 따라서

$$mgh = I_0^2 R t$$

가 되며, $m=1 \text{ kg}$, $g=10 \text{ m/s}^2$, $h=20 \text{ m}$, $R=1 \ \Omega$, $t=2 \text{ s}$ 를 대입하면 $I_0=10 \text{ A}$ 가 나온다.

유도 전류의 크기는 $I_0 = \frac{V}{R} = \frac{Blv}{R}$ 이므로, 자기장의 세기는 $B = \frac{I_0 R}{lv}$ 이며, $I_0=10 \text{ A}$, $R=1 \ \Omega$, $l=1 \text{ m}$, $v=10 \text{ m/s}$ 를 대입하면 $B=1 \text{ T}$ 를 얻을 수 있다. (T는 자기장의 단위 테슬라)

8. 총 평

[고등학교 물리교사 A]

패러데이 법칙으로부터 일정한 유도 전류가 흐르기 위해서는 도선의 속도가 일정해야 함을 유추할 수 있으며, 그래프를 분석하여 전류가 흐르지 않는 구간에서 물체가 중력 가속도로 등가속도 운동하는 것을 알 수 있음. 이를 통해 시간에 따른 물체의 속도를 구할 수 있음. 역학적 에너지 보존 법칙을 통해 운동 에너지와 중력 퍼텐셜 에너지가 탄성 퍼텐셜 에너지로 전환됨을 확인하고 탄성계수를 구할 수 있음. 또한 감소한 중력 퍼텐셜 에너지가 전기 에너지로 전환됨을 알 수 있으며 이를 통해 자기장의 크기를 구할 수 있음. 결론적으로 전자기 유도 법칙과 역학적 에너지 보존을 통해 충분히 해결할 수 있는 문항이라 판단됨.

[고등학교 물리교사 B]

고리 도선을 통과하는 자기 선속의 시간적 변화에 따른 유도 전류의 방향과 크기를 정량적으로 구할 수 있음. 시간에 따른 유도 전류의 그래프를 통해 고리에 작용하는 자기력을 고려해 중력장내에서 고리 도선의 움직임을 추론할 수 있음. 또한 손실된 역학적 에너지를 이용해 고리에서 발생한 전기에너지와 용수철에 저장된 퍼텐셜 에너지를 구할 수 있음. 유도 기전력과 자기력, 역학적 에너지 보존 등 물리학 II에서 다루는 전자기적인 개념뿐 아니라 역학적인 개념을 모두 활용해 충분히 해결할 수 있는 문항이라고 판단됨.

< 유사 기출 문제 >

유사문제 물리1 2017학년도 수능 11번

근거

- 금속 고리가 균일한 자기장 영역을 등속도로 운동할 때 유도 전류의 세기가 일정한 값을 갖는 그래프로 표현되어 있음. 금속 고리에 균일한 유도 전류가 흐르기 위해서는 금속 고리가 등속도로 운동해야 함을 나타냄.

< 유사 기출 문제 >

유사문제 물리1 2020학년도 수능 14번

근거

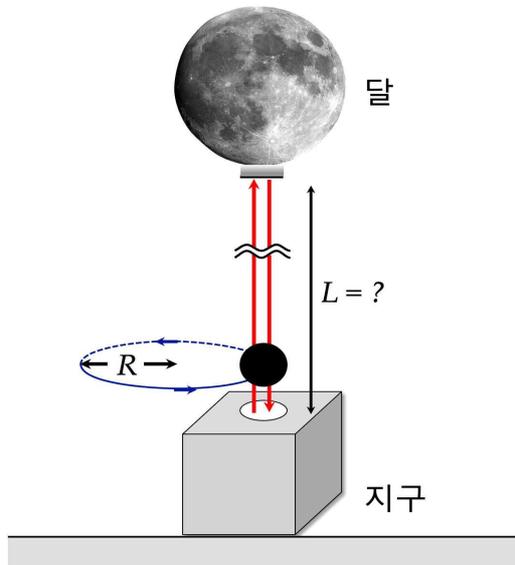
- 마찰이 없는 빗면에 자석이 코일을 통과할 때 전구의 밝기가 통과한 후의 전구의 밝기 보다 밝다라는 명제를 통해 해결하는 문항으로 퍼텐셜 에너지가 감소했지만 운동에너지도 역시 감소 했음을 통해 역학적 에너지가 전기 에너지로 전환되었음을 알 수 있음.

[한국과학기술원(KAIST) 문항정보 7]

1. 일반정보

유형	□ 논술고사 ■ 면접 및 구술고사 □ 선다형고사	
전형명	학교장추천전형, 고른기회전형	
해당 대학의 계열(과목) / 문항번호	자연계열(물리) / 문제1	
출제 범위	과학과 교육과정 과목명	물리학 I, 물리학 II
	핵심개념 및 용어	빛의 속도, 등속 원운동
예상 소요 시간	10분	

2. 문항 및 제시문



1971년 발사된 아폴로 15호의 임무 중 하나는 달 표면에 거울을 설치하는 것이었다. 그림과 같이 지구에서 보낸 빛이 거울에서 반사된 후 처음 빛을 내보낸 위치로 항상 되돌아오도록 거울을 설치하였다. 일정한 세기의 빛이 상자의 구멍을 통해 연속적으로 방출되고, 거울에서 반사되어 다시 구멍으로 들어오는 빛의 평균 세기를 상자 안에서 측정하는 상황을 생각해보자. 이때, 상자의 구멍 바로 위에서 검은색 공이 수평면 상에서 반지름이 R 인 등속 원운동을 하고 있으며, 공의 속력(v)을 자유롭게 조절할 수 있게 만들었다. 이를 이용하여 지구에서 달까지의 거리(L)를 측정하는 방법을 정량적으로 기술하라. (공의 단면적은 상자 구멍의 크기와 동일하고, 지구와 달의 공전 및 자전 효과는 무시한다. 상자 안에서 빛의 세기를 측정할 때 순간적인 세기 변화는 알 수 없고 평균 세기만 알 수 있다.) (5점)

3. 출제 의도

- 빛이 유한한 속력을 가지고 있음을 알고, 이를 빛의 이동 거리를 찾는 데 적용할 수 있는지 평가한다.

4. 출제 근거

가) 교육과정 및 관련 성취기준

적용 교육과정	교육부 고시 제2015-74호 [별책 9] “과학과 교육과정”	
문항 및 제시문	학습내용 성취 기준	
(1)	교육과정	물리학I: 역학과 에너지 - 속도, 특수 상대성 이론 물리학II: 역학적 상호 작용 - 등속 원운동
	성취기준·성취수준	[12물리 I 01-01] 여러 가지 물체의 운동 사례를 찾아 속력의 변화와 운동 방향의 변화에 따라 분류할 수 있다. [12물리 I 01-09] 모든 관성계에서 빛의 속도가 동일함을 알고 시간 지연, 길이 수축, 동시성과 관련된 현상을 설명할 수 있다.
		[12물리II 01-05] 구심력을 이용하여 등속 원운동을 설명할 수 있다.

나) 자료 출처

참고자료	도서명	저자	발행처	발행년도	쪽수
고등학교 교과서	물리학 I	손정우 외 5인	(주)비상교육	2021	12-13, 68
	물리학 I	강남화 외 5인	(주)천재교육	2021	12, 70
	물리학II	손정우 외 5인	(주)비상교육	2021	32-33
	물리학II	강남화 외 5인	(주)천재교육	2021	34-35
기타					

5. 문항 해설

지구와 달 사이에 경로를 따라 진행한 빛이 돌아오는 시간과 등속 원운동하는 물체의 주기의 관계를 통하여 지구에서 측정한 빛의 세기가 최대화 되는 조건을 찾고, 이를 통해 지구와 달 사이의 거리를 측정하는 방법을 묻는 문항이다.

6. 채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
없음	<ul style="list-style-type: none"> • 빛의 속력이 c로 일정함을 이용하여 빛이 달 표면 거울에서 반사되어 돌아온 시간(τ)으로부터 거리 $L=c\tau/2$를 찾으려 하면 +1점 • 빛이 이동하는 시간 정보를 얻기 위해 빛을 주기적으로 차단해야 함을 알고 있고, 공의 원운동에 의한 빛의 차단 주기 $T=\frac{2\pi R}{v}$를 찾으면 +1점 • 식 (3)과 같이 반사되어 되돌아온 빛의 세기가 최소가 될 때 공이 상자 입구를 막는 조건을 찾으면 됨을 알고 있고, 그 실험 방법을 구체적으로 제시하면(예: 상자 안에 들어가는 빛의 평균 세기가 최대화되는 조건을 찾는다) +1점 • 식 (5)의 결과를 얻어 지구와 달 사이의 거리를 구하는 방법을 정량적으로 찾으면 +2점 	5점

7. 예시 답안

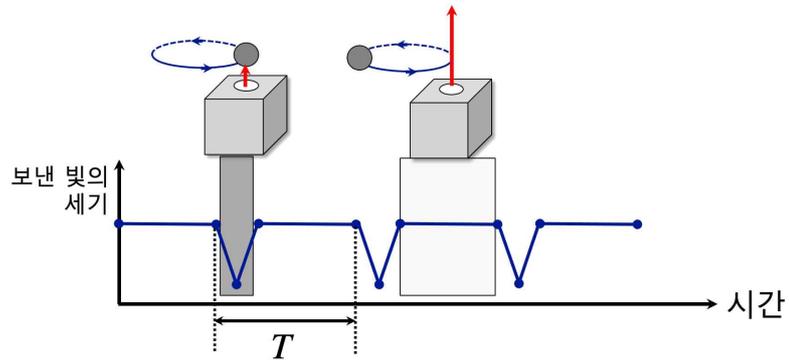
빛은 일정한 속력(c)을 가지므로, 빛이 지구에서 출발하여 달 표면의 거울에서 반사되어 돌아오는 데 걸리는 시간(τ)을 측정함으로써 지구와 달 사이의 거리(L)를 알 수 있다.

$$2L = c\tau \quad (1)$$

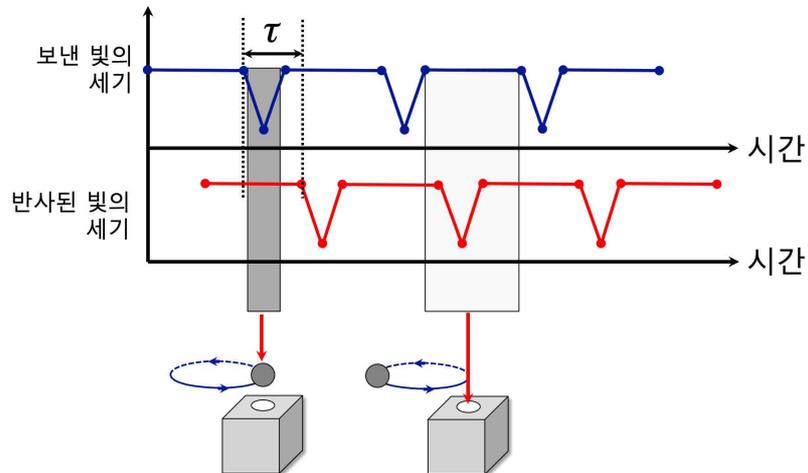
하지만 연속적으로 방출되는 빛으로는 시간 정보를 알 수 없으므로, 빛의 세기를 주기적으로 조절하는 과정이 필요하다. 등속 원운동을 하는 공은 빛을 주기적으로 차단하므로 빛의 세기를 시간에 따라 변화시킬 수 있다. 이때 빛이 차단되는 주기(T)는 공의 원운동 주기와 일치한다.

$$T = \frac{2\pi R}{v} \quad (2)$$

따라서 공의 속력(v)을 조절하여 빛이 차단되는 주기를 조절할 수 있다. 공의 운동에 의해 발생하는 달로 보낸 빛의 세기 변화를 아래 그림과 같이 표현할 수 있다.



반사된 빛이 지구로 되돌아올 때 τ 시간만큼 지연이 생기며, 이 빛은 상자에 들어오기 직전 공의 운동에 의해 같은 방법으로 주기적으로 차단된다.



상자 안으로 들어가는 빛의 평균 세기를 최대화하려면 반사되어 되돌아온 빛의 세기가 최소가 될 때 공이 입구를 막도록 설계하면 된다. 즉

$$\tau = nT \quad (n: \text{자연수}) \quad (3)$$

일 때 빛의 평균 세기가 최대가 된다. 이 조건은 식 (1)과 (2)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{2L}{c} = n \frac{2\pi R}{v} \rightarrow v = n \frac{c\pi R}{L} \quad (4)$$

따라서 공의 속력이 $\frac{c\pi R}{L}$ 의 배수가 될 때 빛의 평균 세기가 최대가 된다. 공의 속력을 0에서 점차 증가시키며 처음으로 빛의 평균 세기가 최대가 되는 속력(v_0)을 찾으면, 이를 이용하여 지구와 달 사이의 거리를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L = \frac{c\pi R}{v_0} \quad (5)$$

8. 총 평

[고등학교 물리교사 A]

빛의 속력이 일정함을 통하여 왕복운동하는 시간을 구할 수 있으며, 등속 원운동하는 물체의 주기를 구하여 왕복 운동하는 시간과 등속 원운동하는 물체의 주기가 맞물리는 조건을 유도할 수 있음. 또한, 이 경우에 등속 원운동하는 물체에 의한 빛 가림 현상이 최소화되어 측정되는 빛의 세기가 최대화 될 수 있음을 충분히 추론할 수 있으므로 주어진 조건에 의해서 지구와 달 사이의 거리를 구하는 과정은 교육과정 내에서 충분히 해결 가능하다고 판단됨.

[고등학교 물리교사 B]

주어진 상황에서 빠르지만 유한한 빛의 속력을 구하는 방법을 정량적으로 기술하는 문항으로 등속 원운동하는 물체의 규칙성을 바탕으로 빛의 세기를 측정해 빛의 속력을 추론할 수 있음. 물리학 I의 속도와 등속 원운동에서 주기라는 비교적 단순한 개념으로 접근해 주어진 조건에서 반사된 빛의 세기의 규칙성을 파악한다면 충분히 해결할 수 있는 문항으로 판단됨.

< 유사 기출 문제 >

유사문제

근거

- 새로운 유형으로 유사 기출문제를 찾을 수 없음.

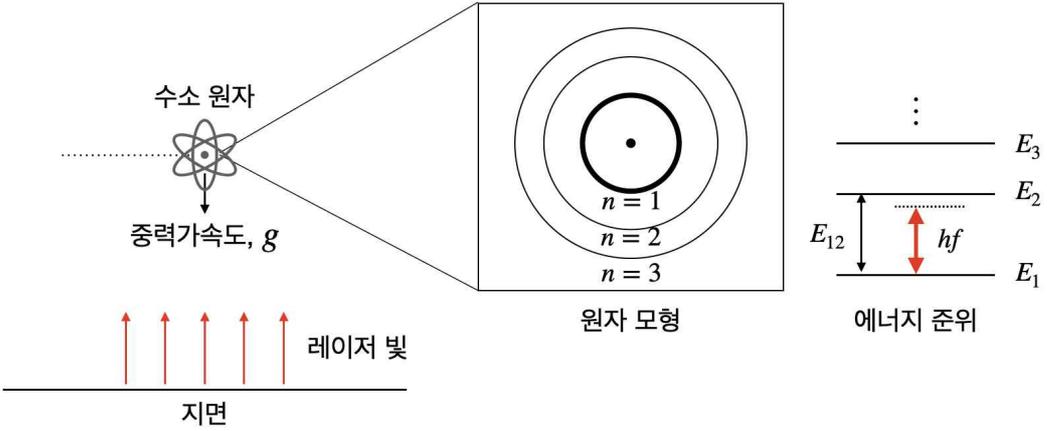
[한국과학기술원(KAIST) 문항정보 8]

1. 일반정보

유형	□ 논술고사 ■ 면접 및 구술고사 □ 선다형고사	
전형명	학교장추천전형, 고른기회전형	
해당 대학의 계열(과목) / 문항번호	자연계열(물리) / 문제2	
출제 범위	과학과 교육과정 과목명	물리학 I, 물리학 II
	핵심개념 및 용어	등가속도 운동, 운동량 보존, 도플러 효과, 원자 모형, 에너지 준위, 빛의 입자성
예상 소요 시간	10분	

2. 문항 및 제시문

그림과 같이 질량이 m 인 수소 원자가 정지 상태에서 자유 낙하를 시작하였다. 이 원자는 연직 위 방향으로 전파하는 진동수 f 의 레이저 빛에 노출되어 있다. 자유 낙하를 시작할 때 수소 원자의 전자는 에너지가 가장 낮은 바닥상태($n=1$)에 있었으며, 레이저 빛의 광자의 에너지는 수소 원자의 첫 번째 전이 에너지 E_{12} (수소 원자가 바닥상태에서 첫 번째 들뜬상태($n=2$)로 전이하는 데 필요한 에너지) 대비 미세하게 작다고 한다. (중력 가속도는 g 이고, 레이저 빛의 전파 속력은 c 이며, 플랑크 상수는 h 이다. 공기 저항은 무시한다.)



(1) 수소 원자의 전자가 첫 번째 들뜬 상태로 전이되는 시점까지 낙하한 거리를 구하라. (자유 낙하를 시작할 때 수소 원자가 지면으로부터 충분히 높은 곳에 있었다고 가정한다.) (2점)

(2) 수소 원자의 전자가 첫 번째 들뜬 상태로 전이된 직후 바로 광자를 방출하여 바닥상태로 돌아오게 된다. 이때 광자가 방출되는 방향은 언제나 연직 아래 방향이라고 가정하고, 방출되는 광자의 에너지는 항상 E_{12} 이다. 광자를 방출하는 시간 동안 수소 원자가 이동한 거리는 무시하자. 광자를 방출한 직후 수소 원자의 운동 방향이 연직 위 방향으로 바뀌게 될 수 있음을 설명하고 그러기 위한 레이저 빛의 진동수 f 의 조건을 구하라. 그리고 이 경우 시간이 더 지남에 따라 원자가 나타낼 수 있는 움직임 양상을 정성적으로 기술하고, 매우 긴 시간이 흐르는 동안의 원자의 변위를 최소화하는 레이저 빛의 진동수 f 를 구하라. (3점)

3. 출제 의도

- 보어의 수소 원자 모델과 빛의 흡수나 방출에 의한 전이 현상을 이해하고, 도플러 효과 및 물체의 역학 운동을 적용할 수 있는지 평가한다.

4. 출제 근거

가) 교육과정 및 관련 성취기준

적용 교육과정	교육부 고시 제2015-74호 [별책 9] “과학과 교육과정”	
문항 및 제시문	학습내용 성취 기준	
(1)	교육과정	물리학I: 역학과 에너지 - 속도, 가속도, 등가속도 직선 운동, 특수 상대성 이론, 원자의 스펙트럼 물리학II: 파동과 물질의 성질 - 도플러 효과, 원자 모형
	성취기준·성취수준	[12물리 I 01-01] 여러 가지 물체의 운동 사례를 찾아 속력의 변화와 운동 방향의 변화에 따라 분류할 수 있다. [12물리 I 01-09] 모든 관성계에서 빛의 속도가 동일함을 알고 시간 지연, 길이 수축, 동시성과 관련된 현상을 설명할 수 있다. [12물리 I 02-02] 원자 내의 전자는 불연속적 에너지 준위를 가지고 있음을 스펙트럼 관찰을 통하여 설명할 수 있다. [12물리 II 03-02] 파원의 속도에 따라 파장이 달라짐을 이해하고, 활용되는 예를 찾아 설명할 수 있다. [12물리 II 03-08] 수소 원자 내에서 전자의 궤도를 고전 역학으로 설명할 수 없음을 불확정성 원리를 사용하여 설명할 수 있다.

(2)	교육과정	물리학I: 역학과 에너지 - 운동량 보존, 원자의 스펙트럼 물리학II: 파동과 물질의 성질 - 빛의 입자성, 원자 모형
	성취기준·성취수준	[12물리 I 01-04] 물체의 1차원 충돌에서 충돌 전후의 운동량 보존을 이용하여 속력의 변화를 정량적으로 예측할 수 있다. [12물리 I 02-02] 원자 내의 전자는 불연속적 에너지 준위를 가지고 있음을 스펙트럼 관찰을 통하여 설명할 수 있다. [12물리 II 03-06] 광전 효과 실험을 근거로 빛의 입자성을 설명할 수 있다. [12물리 II 03-08] 수소 원자 내에서 전자의 궤도를 고전 역학으로 설명할 수 없음을 불확정성 원리를 사용하여 설명할 수 있다.

나) 자료 출처

참고자료	도서명	저자	발행처	발행년도	쪽수
고등학교 교과서	물리학 I	손정우 외 5인	(주)비상교육	2021	14-15, 29-33, 68, 94-96
	물리학 I	강남화 외 5인	(주)천재교육	2021	25, 37-41, 70, 96-97
	물리학II	손정우 외 5인	(주)비상교육	2021	150-153, 174-175, 182-187
	물리학II	강남화 외 5인	(주)천재교육	2021	154-158, 181-182
기타					

5. 문항 해설

(1)은 수소 원자가 자유낙하하는 상황에서 도플러 효과에 의해 변화한 레이저 빛의 진동수를 구하고, 광자의 에너지가 수소 원자 에너지 준위 차이와 같을 때 흡수하는 조건을 통하여 수소 원자가 전이할 때까지 낙하한 거리를 구할 수 있는지 묻는 문항이다.

(2)는 먼저 빛의 입자성과 운동량 보존을 활용하여 수소 원자가 빛을 흡수하고 방출할 때 수소 원자의 운동량 변화를 구하고, 연직 위로 운동할 수 있는 진동수 조건을 찾을 수 있는지 묻는다. 또한, 자유낙하와 빛의 흡수 방출 과정을 통하여 시간에 따라 등가속도 운동을 반복하는 원자의 운동 양상을 설명하고, 이를 통해 원자의 변위가 최소화하는 빛의 진동수 조건을 구할 수 있는지 묻는 문항이다.

6. 채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	<p>- 도플러 효과로 인해 자유 낙하하는 원자가 느끼는 빛의 진동수 (f_v)가 점점 증가하여 $hf_v = E_{12}$가 성립할 때 원자가 광자를 흡수할 수 있음을 설명했으면 +1점</p> <p>- 전이가 일어날 때의 원자의 속력 $v_1 = c\left(1 - \frac{hf}{E_{12}}\right)$ 및 그때까지의 낙하 거리 $L = \frac{c^2}{2g}\left(1 - \frac{hf}{E_{12}}\right)^2$을 구했으면 +1점</p>	2점
(2)	<p>- 운동량 보존 법칙을 적용하여 광자의 방출 직후 원자의 운동량(p_1')을 얻은 후, 레이저 빛의 진동수(f)가 $f > \frac{mc^2 - E_{12}}{h(1 + mc^2/E_{12})}$의 조건을 만족할 때 원자가 광자를 방출한 직후 연직 위 방향으로 운동하게 됨을 구했으면 +1점</p> <p>(동일한 답안으로 $f > \frac{E_{12}(mc^2 - E_{12})}{h(mc^2 + E_{12})}$, $f > \frac{E_{12}(1 - E_{12}/mc^2)}{h(1 + E_{12}/mc^2)}$, $f > \frac{1}{h}\left(\frac{mc - E_{12}/c}{1/c + mc/E_{12}}\right)$)</p> <p>- 원자가 광자를 반복적으로 흡수 및 방출하면서 상하운동이 반복됨을 언급하고(세 가지 가능성을 모두 열거하지 않아도 됨), 매우 긴 시간이 흐르는 동안의 원자의 변위가 최소화되려면 일정한 높이에서 상하운동을 하게 만드는 조건(광자 방출 직후 속도가 $-v_1$ 또는 (*) $p_1' = -mv_1$)을 만족해야 함을 설명했으면 +1점</p> <p>- 원자가 일정한 높이에서 상하운동을 반복하게 만드는 레이저 빛의 진동수 $f = \frac{2mc^2 - E_{12}}{h(1 + 2mc^2/E_{12})}$를 구했으면 +1점</p> <p>(동일한 답안으로 $f = \frac{E_{12}(2mc^2 - E_{12})}{h(2mc^2 + E_{12})}$, $f = \frac{E_{12}(2 - E_{12}/mc^2)}{h(2 + E_{12}/mc^2)}$, $f = \frac{1}{h}\left(\frac{2mc - E_{12}/c}{1/c + 2mc/E_{12}}\right)$)</p>	3점

7. 예시 답안

(1) 수소 원자가 자유낙하를 하면서 연직 아래 방향으로 $v = gt$ 의 속력을 갖게 된다. 그러면 원자의 움직임으로 인한 도플러 효과로 원자가 느끼는 레이저 빛의 진동수(f_v)가 변하게 된다. 특수 상대성 이론의 광속 불변 원리에 의하면 빛의 속력(c)은 관찰자의 속도에 관계없이 일정하다. 따라서 원자가 빛을 향해 이동하는 거리만큼 빛이 덜 이동함을 이용하여, 움직이는 원자가 느끼는 레이저 빛의 주기(T_v)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$cT_v = cT - vT \rightarrow T_v = T \left(\frac{c-v}{c} \right) \quad (T: \text{빛의 원래 주기})$$

이를 빛의 진동수로 표현하면 다음과 같다.

$$f_v = f \left(\frac{c}{c-v} \right)$$

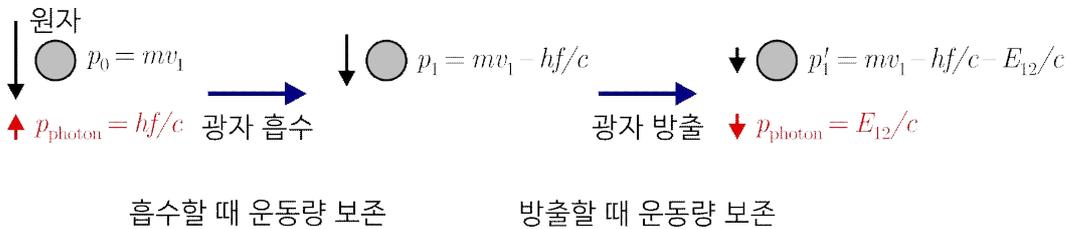
첫 번째 들뜬상태로 전이가 일어나기 위해서는 $hf_v = E_{12}$ 의 관계를 만족해야 하므로, 수소 원자는 다음의 속력을 가질 때 첫 번째 들뜬상태로 전이된다.

$$v_1 = c \left(1 - \frac{hf}{E_{12}} \right)$$

따라서 자유 낙하를 시작하여 전이가 일어날 때까지 걸리는 시간은 $t_1 = \frac{c}{g} \left(1 - \frac{hf}{E_{12}} \right)$

이며, 그때까지의 낙하 거리는 $L = \frac{1}{2}gt_1^2 = \frac{c^2}{2g} \left(1 - \frac{hf}{E_{12}} \right)^2$ 이다.

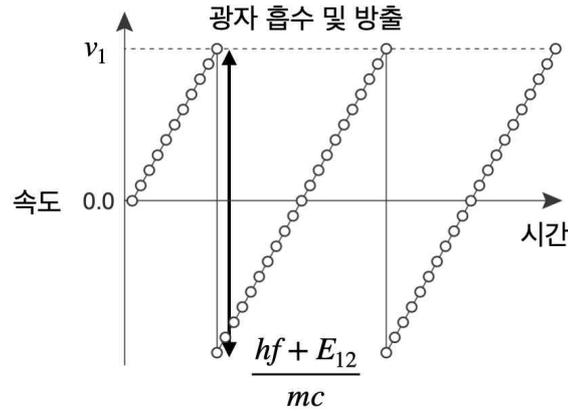
(2) 운동량 보존 법칙에 따라 광자가 흡수된 직후 원자의 운동량은 $p_1 = mv_1 - h/\lambda = mv_1 - hf/c$ ($\lambda = c/f$: 레이저 빛의 파장)가 된다. 이후 연직 아래 방향으로 광자를 다시 방출하기 때문에 바닥상태로 돌아온 직후의 원자의 운동량은 $p_1' = mv_1 - hf/c - E_{12}/c$ 가 된다.



따라서 $p_1' < 0$ 일 때, 즉,

$$mc \left(1 - \frac{hf}{E_{12}} \right) - \frac{hf}{c} - \frac{E_{12}}{c} < 0 \rightarrow f > \frac{mc^2 - E_{12}}{h(1 + mc^2/E_{12})}$$

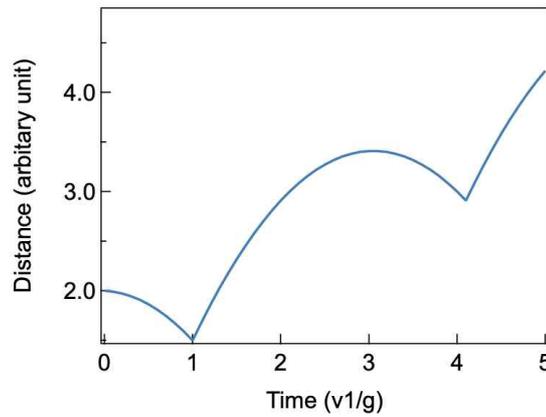
일 때 원자가 광자를 방출한 직후 연직 위 방향으로 운동하게 된다.
 이 경우 시간이 더 지남에 따라 원자가 나타내는 운동을 속도-시간 그래프로 그리면 다음과 같다.



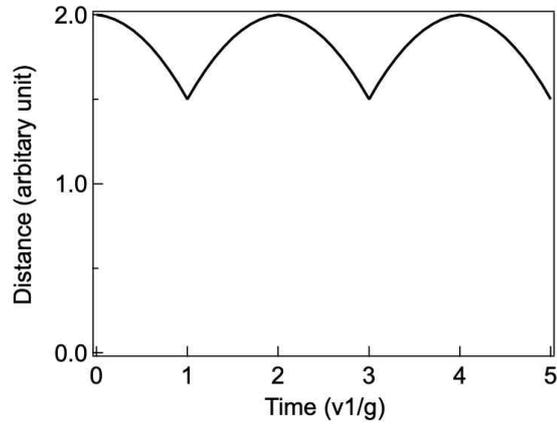
광자가 흡수 및 방출되는 과정에서 광자의 운동량에 의해 원자의 속도가 $(hf + E_{12})/mc$ 만큼 바뀌면서 원자는 연직 위 방향으로 운동하게 된다. 중력에 의해 원자가 다시 낙하하여 $v_1 = c \left(1 - \frac{hf}{E_{12}}\right)$ 조건을 만족하면 앞선 운동을 반복하게 된다.

광자의 운동량에 따라 원자가 ① 점점 위로 올라가는 경우, ② 지면으로 떨어지거나 위로 올라가지 않고 계속 상하운동을 하는 경우, ③ 점점 지면으로 떨어지는 경우를 생각해 볼 수 있다. 각 경우에 대해 위치-시간 그래프는 다음과 같다.

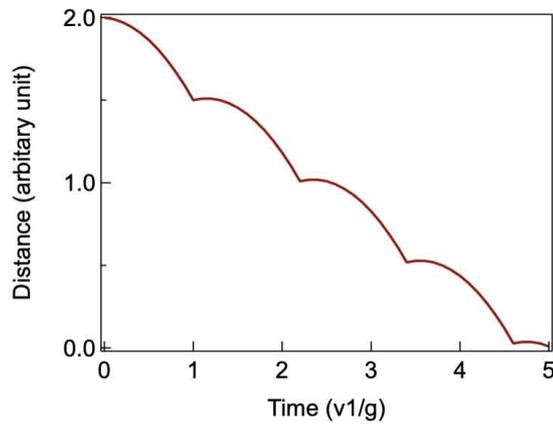
① 점점 위로 올라가는 경우



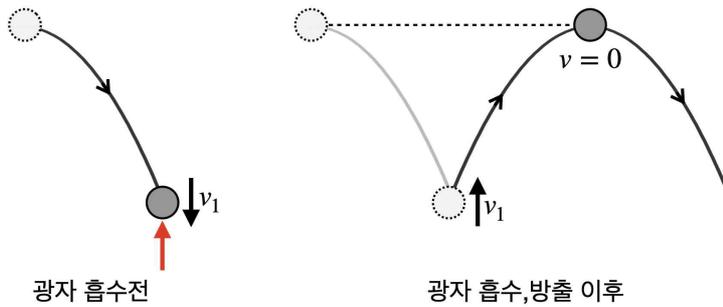
② 일정한 높이에서 상하운동을 하는 경우



③ 점점 지면으로 떨어지는 경우



특히 매우 긴 시간이 흐르는 동안의 원자의 변위가 최소화되는 경우는 ② 일정한 높이에서 상하운동을 하는 경우이다. 이를 위해서는 원자가 광자를 방출한 직후의 속도가 $-v_1$ 이어야 한다 (아래 그림 참고).



이러한 조건을 만족하려면 (*) $p_1' = mv_1 - \frac{hf}{c} - \frac{E_{12}}{c} = -mv_1$, 즉, $\frac{hf}{c} = 2mv_1 - \frac{E_{12}}{c}$ 이어야 하며, 이때 레이저 빛의 진동수(f)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{hf}{c} = 2mc \left(1 - \frac{hf}{E_{12}} \right) - \frac{E_{12}}{c} \quad \rightarrow \quad f = \frac{2mc^2 - E_{12}}{h(1 + 2mc^2/E_{12})}$$

8. 총 평

[고등학교 물리교사 A]

관측자에 따라 빛의 속력이 일정함과 수소 원자가 광원으로 다가갈 때 주기의 짧아짐을 통하여 빛에 도플러 효과에 의한 진동수의 변화를 유도할 수 있으며, 수소 원자가 빛을 흡수 할 때의 에너지 관계식과 등가속도 운동 관계식으로부터 낙하거리를 구할 수 있음. 또한, 빛의 입자성과 운동량 보존을 활용하여 수소 원자가 빛을 흡수, 방출하는 과정에서 운동량 변화량을 구할 수 있으며, 운동량의 부호를 통하여 연직 위로 운동하는 진동수 조건을 추론할 수 있음. 수소 원자의 자유낙하와 빛의 흡수, 방출 과정을 시간에 따라 정성적으로 설명할 수 있으며, 시간에 따른 변위 또는 속도의 변화를 추론하여 원자 변위가 최소화되는 조건을 구할 수 있음. 물리학 I 과 물리학 II의 교과 내용을 종합적으로 적용하면 해결할 수 있는 문제이므로 교육과정을 위배하였다고 보기 어려움.

[고등학교 물리교사 B]

관측자에 관계없이 빛의 속력이 일정함을 이용하여 광원과 관측자의 상대적인 움직임에 따른 진동수의 변화를 유도하고, 수소원자에서 바닥상태의 전자가 첫 번째 들뜬상태로 전이할 때 필요한 에너지의 진동수를 구할 수 있음. 수소원자가 빛을 흡수하거나 방출할 때 빛의 입자적인 관점에서 운동량 보존을 정량적으로 적용하고 상황에 맞는 수소원자의 움직임을 추론할 수 있음. 운동량 보존과 빛의 이중성, 빛의 입자성과 도플러 효과, 수소원자 내 에너지준위 등 물리학 I, 물리학 II의 다양한 개념을 적용한다면 충분히 해결할 수 있는 문항이라고 판단됨.

< 유사 기출 문제 >

유사문제

근거

- 새로운 유형으로 유사 기출문제를 찾을 수 없음.