

서울대학교 면접·구술고사

자연계열 · 물리학

문제 · 예시답안

시험 구분
전형
출제 과목
문항 수
핵심 개념

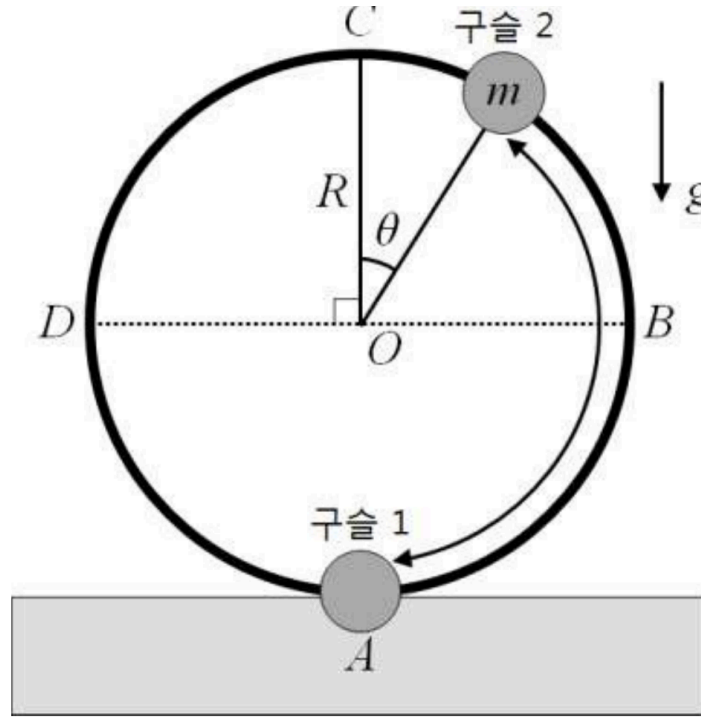
면접 및 구술고사 (자연계열, 물리)
수시모집 일반전형
물리 I, 물리 II
2문항 (소문항 8개)
쿨롱 법칙과 구속된 물체의 역학적 평형, 단진동의 주기,
영의 이중슬릿 간섭, 빛의 편광과 말루스 법칙,
광자의 파동성·입자성, 경로 정보와 양자 지우개

I. 문제

문제 1 원형 루프에 꿰어진 두 전하의 평형과 단진동

물리 I · II · 소문항 3개

반경 R 의 원형 루프($ABCD$)가 수직으로 세워져 있고, 이 루프에 동일한 전하량을 갖는 구슬 두 개가 꿰어져 있다. 구슬 1은 최하점(A)에 고정되어 있고, 구슬 2는 루프를 따라 마찰 없이 움직일 수 있다. 전기력과 중력에 의해 구슬 2는 루프의 어느 위치에서 평형을 이루게 될 것이다. 구슬 2의 질량은 m , 중력가속도는 g 이며, 쿨롱 법칙의 비례 상수는 k 이다.



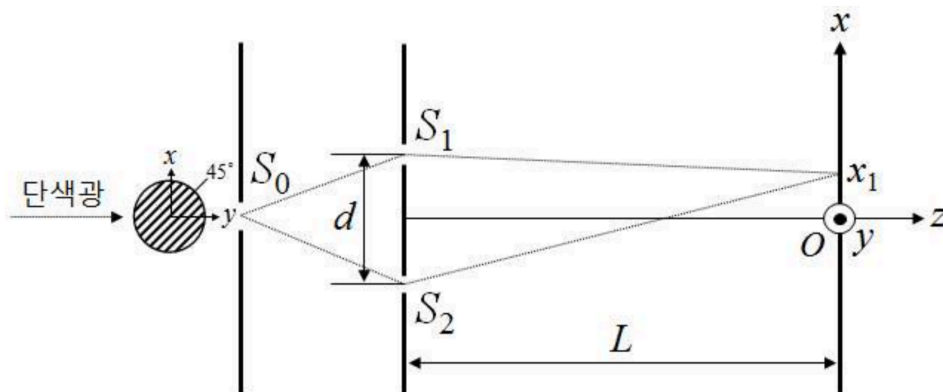
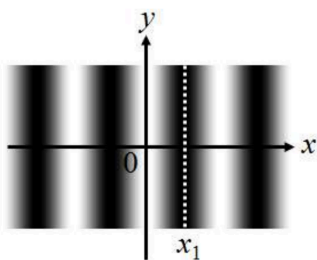
최고점 C 로부터 잰 각 θ 위치에서 평형을 이루는 구슬 2

- (1-1) 구슬 2가 루프의 중간점 B ($\theta = \pi/2$)에서 평형을 이루기 위한 전하량(Q_1)을 구하시오.
- (1-2) 문제 1-1의 상태에서 두 구슬의 전하량을 서서히 증가시켜서 구슬 2의 위치를 중간점 B 에서 최고점 C 까지 점진적으로 올리는 상황을 생각해보자. 이때 구슬 2가 루프의 최고점 C 에서 평형을 이루기 위해 필요한 최소의 전하량(Q_2)을 구하시오. 이때 구슬 2에 작용하는 전기력과 중력 사이의 크기 비는 얼마인가?
(참고) $\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$
- (1-3) 두 구슬의 전하량을 문제 1-2에서 구한 Q_2 값의 두 배로 늘렸다. 이때 C 점 근방에서 루프를 따라 구슬 2를 약하게 밀어주면(θ 가 충분히 작으면) 단진동을 하게 된다. 이 단진동의 주기를 m, g, R 의 함수로 구하시오.

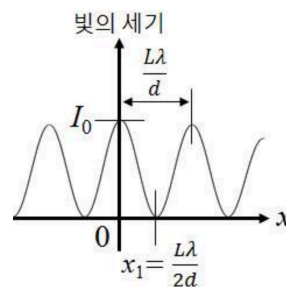
문제 2 편광판을 넣은 영의 이중슬릿 간섭과 광자의 경로 정보

물리 II · 소문항 5개

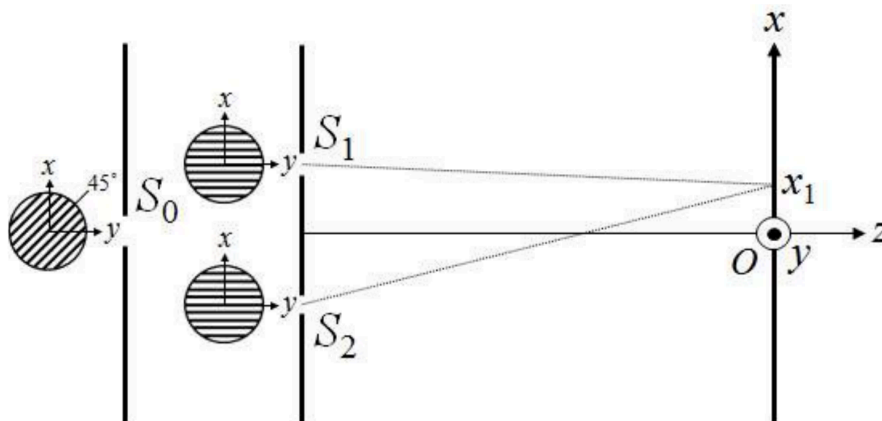
[그림 2-1]과 같이 영의 이중슬릿 실험을 생각하여 보자. 45° 편광판과 슬릿 S_0 를 통과한 단일 파장 λ 인 편광된 빛은 이중슬릿 S_1 과 S_2 를 동시에 지나 스크린에 도달한다. 편의상, 슬릿 S_0 에서 스크린의 중심 O 의 방향을 z 축으로, 종이면에 수직인 방향을 y 축으로 생각하자. 이때 스크린에는 [그림 2-2]와 같은 밝고 어두운 무늬가 반복되는 빛의 간섭무늬가 나타난다. [그림 2-3]은 스크린에서의 위치 x 에 따라 변화하는 빛의 세기를 개략적으로 보여준다.

[그림 2-1] 45° 편광된 단색광이 이중슬릿 S_1, S_2 를 지나 스크린에 도달하는 배치

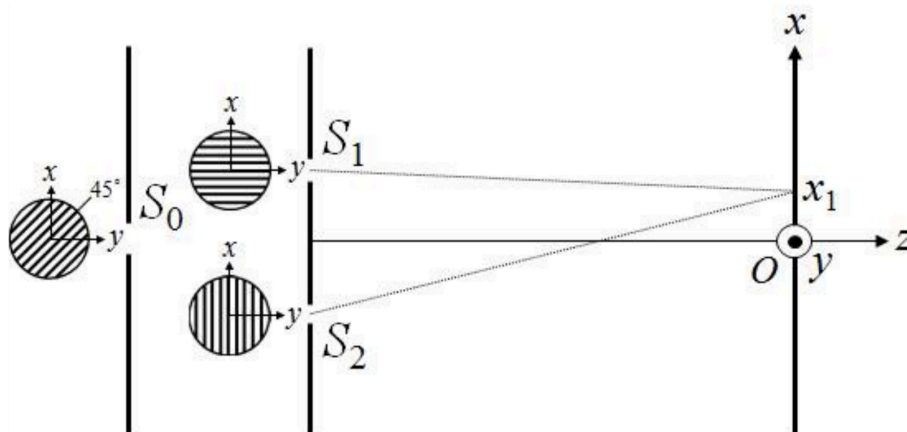
[그림 2-2] 스크린에 나타나는 간섭무늬

[그림 2-3] 위치 x 에 따른 빛의 세기

- (2-1) 아래의 그림과 같이 슬릿 S_1 과 S_2 앞면에 편광축이 y 방향인 편광판을 각각 놓았다. 이때 스크린에서의 위치 x 에 따라 변화하는 빛의 세기를 개략적인 그림으로 나타내고 이유를 설명하시오.

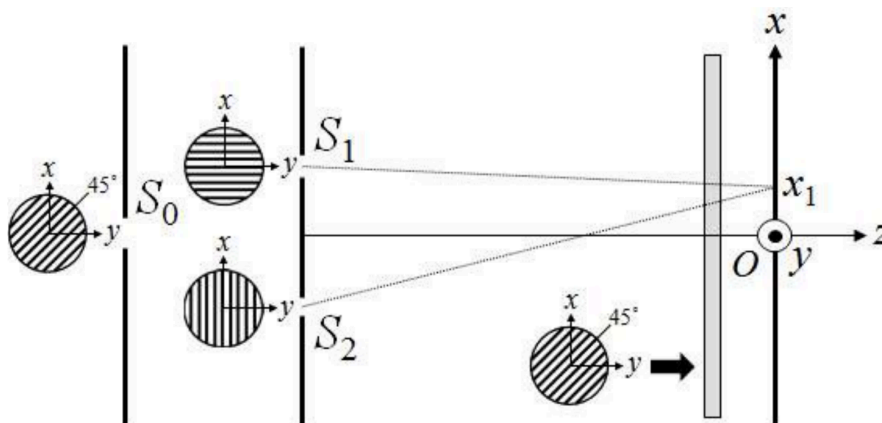
 S_1, S_2 앞면에 모두 y 방향 편광판을 놓은 경우

- (2-2) 문제 2-1의 경우와 달리 아래의 그림처럼 슬릿 S_1 앞면의 편광축은 y 방향을 유지한 채, S_2 앞면의 편광축을 x 방향으로 돌려놓았다. 이때 스크린에서의 위치 x 에 따라 변화하는 빛의 세기를 개략적인 그림으로 나타내고 이유를 설명하시오.



S_1 은 y 방향, S_2 는 x 방향 편광판을 놓은 경우

- (2-3) 문제 2-2에서처럼 이중슬릿 바로 앞면에 y 방향 및 x 방향의 편광판을 각각 놓은 상태에서 편광축이 x 축과 45° 인 편광판으로 스크린을 덮었을 때 스크린에서의 위치 x 에 따라 변화하는 빛의 세기를 개략적인 그림으로 나타내고 이유를 설명하시오.



스크린 앞을 x 축과 45° 를 이루는 편광판으로 덮은 경우

- (2-4) 양자물리에 의하면 빛(또는 광자)은 파동성과 입자성의 이중성을 가지고 있다. 문제 2-2의 실험 장치를 이용하여 광자를 한 개씩 보내면서 실험을 진행한다고 하자. 이때 스크린에 위치한 관찰자는 스크린에 도착하는 광자가 이중슬릿 가운데 어느 쪽을 통과하였는지 알아낼 수 있는가? 그 이유를 설명하시오.
- (2-5) 이번에는 문제 2-3의 실험 장치를 이용하여 광자를 한 개씩 보내면서 실험을 진행한다고 하자. 이때 스크린에 위치한 관찰자는 스크린에 도착하는 광자가 이중슬릿 가운데 어느 쪽을 통과하였는지 알아낼 수 있는가? 그 이유를 설명하시오.

II. 예시답안

문제 1 원형 루프에 꿰어진 두 전하의 평형과 단진동

쿨롱 법칙 · 구속 운동의 평형 · 단진동

임의의 각 θ 에서의 평형 조건

구슬 2를 최고점 C 로부터 켜 각 θ 의 위치에 두면, 중심 O 를 원점으로 하여

$$\text{구슬 2 : } (R \sin \theta, R \cos \theta), \quad \text{구슬 1(점 A) : } (0, -R)$$

이다. 두 구슬을 잇는 현의 길이는 중심각이 $\pi - \theta$ 이므로

$$s = 2R \sin\left(\frac{\pi - \theta}{2}\right) = 2R \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

이다. 구슬 2는 루프에 꿰어져 있어 수직항력이 항상 반지름 방향이다. 따라서 **중심 O 에 대한 돌림힘**을 따지면 수직항력은 자동으로 사라진다. 중심에서 각 힘의 작용선까지의 수직거리는

- 중력 mg (연직 아래): 작용선까지의 거리 $= R \sin \theta \rightarrow$ 돌림힘 $mgR \sin \theta$ (θ 를 키우는 방향)
- 전기력 F (현 $A \rightarrow$ 구슬 2 방향): 중심에서 현까지의 거리 $= R \cos(\frac{\pi - \theta}{2}) = R \sin(\frac{\theta}{2}) \rightarrow$ 돌림힘 $FR \sin(\frac{\theta}{2})$ (θ 를 줄이는 방향)

평형은 두 돌림힘이 같을 때이므로, $F = kQ^2/s^2 = kQ^2/(4R^2 \cos^2(\theta/2))$ 를 대입하면

$$mgR \sin \theta = \frac{kQ^2}{4R^2 \cos^2(\theta/2)} R \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

이고, $\sin \theta = 2 \sin(\theta/2) \cos(\theta/2)$ 를 쓰면 $\sin(\theta/2)$ 가 약분되어

$$kQ^2 = 8mgR^2 \cos^3\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (0 \leq \theta < \pi)$$

$\cos(\theta/2)$ 는 θ 가 작을수록 크므로, **전하량이 클수록 평형 위치는 위로 올라간다.**

$$(1-1) Q_1 = R \sqrt{\frac{2\sqrt{2}mg}{k}} = 2^{3/4} R \sqrt{\frac{mg}{k}}$$

$\theta = \pi/2$ 를 평형 조건에 대입하면 $\cos(\theta/2) = \cos(\pi/4) = \sqrt{2}/2$ 이므로

$$kQ_1^2 = 8mgR^2 \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^3 = 8mgR^2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{4} = 2\sqrt{2}mgR^2$$

$$Q_1 = R \sqrt{\frac{2\sqrt{2}mg}{k}}$$

(검토: 이때 두 구슬 사이의 거리는 $s = 2R \cos(\pi/4) = \sqrt{2}R$, 전기력은 $F = kQ_1^2/(2R^2) = \sqrt{2}mg$ 이다. B 점에서 접선은 연직 방향이고 전기력이 연직과 45° 를 이루므로, 접선 성분 $\sqrt{2}mg \cdot \cos 45^\circ = mg$ 가 중력과 정확히 상쇄된다.)

$$(1-2) Q_2 = 2R\sqrt{\frac{2mg}{k}}, \text{ 전기력 : 중력} = 2 : 1$$

전하량을 키우면 평형각 θ 는 계속 작아지고, 구슬 2가 최고점 C 에 도달하는 것은 $\theta = 0$ 인 극한이다. 평형 조건에 $\theta = 0$ 을 넣으면 $\cos 0 = 1$ 이므로

$$kQ_2^2 = 8mgR^2 \rightarrow Q_2 = 2R\sqrt{\frac{2mg}{k}}$$

이다. $\theta = 0$ 은 대칭성 때문에 전하량과 무관하게 언제나 평형점이지만, $Q < Q_2$ 이면 그 평형은 불안정하여 구슬이 최고점에 머무를 수 없다. 실제로 작은 θ 에 대한 알짜 접선 방향 힘은

$$F_t(\theta) = mg \sin \theta - \frac{kQ^2}{4R^2 \cos^2(\theta/2)} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \approx \left(mg - \frac{kQ^2}{8R^2}\right)\theta$$

이므로, $kQ^2 < 8mgR^2$ 이면 계수가 양수가 되어 θ 를 더 키우는 방향(불안정)이고, $kQ^2 \geq 8mgR^2$ 이라야 최고점이 안정한 평형이 된다. 따라서 Q_2 가 최소 전하량이다.

이때 두 구슬은 지름의 양 끝(A 와 C)에 있으므로 거리는 $2R$ 이고

$$F_e = \frac{kQ_2^2}{(2R)^2} = \frac{8mgR^2}{4R^2} = 2mg$$

$$Q_2 = 2R\sqrt{\frac{2mg}{k}}, \quad F_e : mg = 2mg : mg = 2 : 1$$

$$(1-3) T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{3g}}$$

전하량을 두 배로 하면 $Q = 2Q_2$ 이므로 $kQ^2 = 4 \cdot 8mgR^2 = 32mgR^2$ 이다. 최고점 C 근방(θ 가 충분히 작음)에서 접선 방향 알짜힘은

$$F_t(\theta) = mg \sin \theta - \frac{kQ^2}{4R^2 \cos^2(\theta/2)} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

이고, $\sin \theta \approx \theta$, $\sin(\theta/2) \approx \theta/2$, $\cos^2(\theta/2) \approx 1$ 로 근사하면

$$F_t \approx mg\theta - \frac{32mgR^2}{4R^2} \cdot \frac{\theta}{2} = mg\theta - 4mg\theta = -3mg\theta$$

이다. 구슬이 루프를 따라 움직인 호의 길이를 $x = R\theta$ 라 하면

$$F_t = -\frac{3mg}{R}x$$

로 변위에 비례하는 복원력이므로 단진동이며, 유효 용수철 상수는 $k_{\text{eff}} = 3mg/R$ 이다. 따라서

$$\omega = \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}}{m}} = \sqrt{\frac{3g}{R}}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{R}{3g}}$$

질량 m 은 복원력과 관성에서 모두 상쇄되어 주기에 나타나지 않는다. 이는 단진자의 주기가 추의 질량과 무관한 것과 같은 이유이다. 한편 $Q = Q_2$ (즉 $kQ^2 = 8mgR^2$)인 임계 상태에서는 $F_t \approx mg\theta - mg\theta = 0$ 으로 **1차(선형) 복원력이 사라져** 단진동이 되지 않는다(이때는 $F_t = -(3/8)mg\theta^3 + \dots$ 인 3차 복원력만 남아 진폭이 작을수록 주기가 길어진다). 전하량을 $2Q_2$ 로 키웠기 때문에 비로소 선형 복원력이 생겨 단진동이 가능해진 것이다.

문제 2 편광판을 넣은 영의 이중슬릿 간섭과 광자의 경로 정보

편광 · 간섭 · 경로 정보

공통 준비 — 진폭과 세기의 표현

편광판이 없을 때 각 슬릿에서 스크린의 한 점에 도달하는 빛의 진폭을 E_0 라 하자. 두 빛의 위상차는 경로차 $\delta_{\text{path}} = dx/L$ 에 의해

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{dx}{L}$$

이고, 세기는 $I(x) = |E_0 + E_0 e^{i\delta}|^2 \propto 4E_0^2 \cos^2(\delta/2)$ 이다. [그림 2-3]의 최대 세기가 I_0 이므로 $I_0 \propto 4E_0^2$ 이고, 밝은 무늬의 간격은 $\delta = 2\pi$ 가 되는 x 간격, 즉 $L\lambda/d$ 이다.

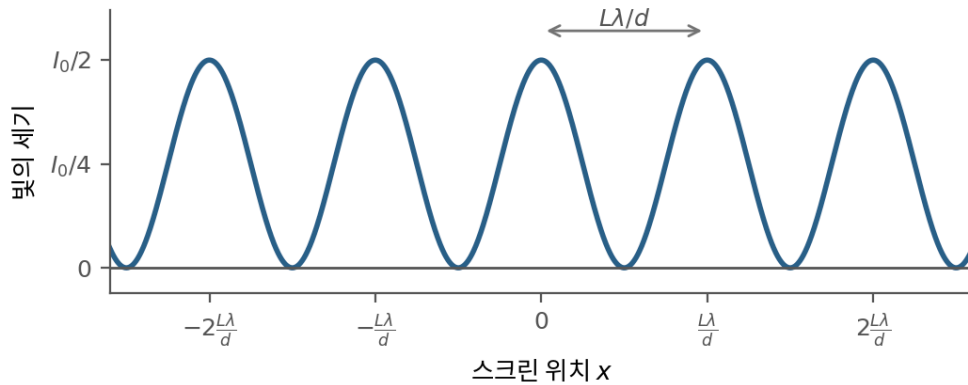
입사광은 x 축과 45° 로 편광되어 있으므로 x 성분과 y 성분의 크기가 같다. 편광축이 편광 방향과 각 φ 를 이루는 편광판을 지나면 진폭은 $\cos \varphi$ 배가 된다(말루스 법칙).

(2-1) 간섭무늬가 그대로 나타나며, 최대 세기만 $I_0/2$ 로 줄어든다

두 슬릿 앞의 편광판이 모두 y 방향이므로, 각 슬릿을 지난 빛의 진폭은 $E_0 \cos 45^\circ = E_0/\sqrt{2}$ 이고 **편광 방향이 서로 같다**. 편광 상태가 동일한 두 빛은 완전히 간섭하므로

$$I(x) = \left| \frac{E_0}{\sqrt{2}} + \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{i\delta} \right|^2 = \frac{E_0^2}{2} \cdot 4 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{I_0}{2} \cos^2\left(\frac{\pi dx}{L\lambda}\right)$$

이다. 즉 무늬 간격 $L\lambda/d$ 와 밝고 어두운 위치는 [그림 2-3]과 완전히 같고, 어두운 무늬의 세기도 여전히 0이다. 다만 각 슬릿에서 세기의 절반이 편광판에 흡수되므로 최대 세기가 $I_0 \rightarrow I_0/2$ 로 줄어든다.



예시 작도 — $I(x) = (I_0/2) \cos^2(\pi dx/L\lambda)$, 무늬 간격 $L\lambda/d$

(2-2) 간섭무늬가 사라지고 세기가 $I_0/4$ 로 균일해진다

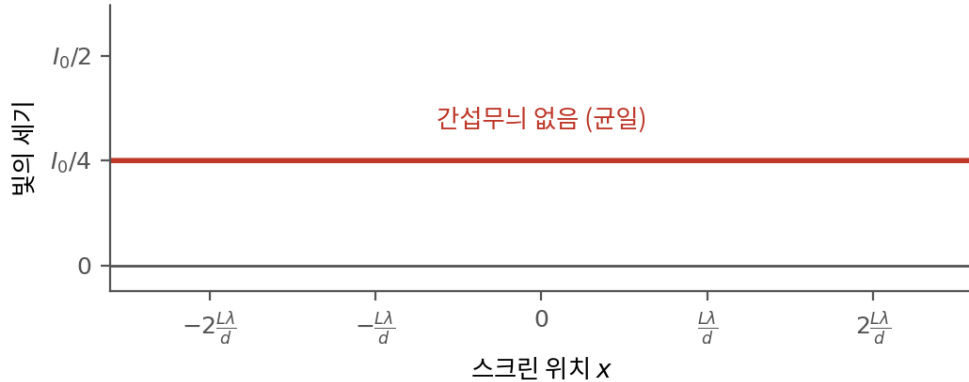
S_1 을 지난 빛은 y 편광, S_2 를 지난 빛은 x 편광이며 두 편광 방향은 서로 수직이다. 서로 직교하는 편광의 두 빛은 어떤 위상차를 갖더라도 진폭이 더해지지 않는다. 전기장을 벡터로 더하면

$$\vec{E} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}\hat{y} + \frac{E_0}{\sqrt{2}}e^{i\delta}\hat{x} \rightarrow I \propto |\vec{E}|^2 = \frac{E_0^2}{2} + \frac{E_0^2}{2} = E_0^2$$

로 위상차 δ 가 아예 나타나지 않는다($\hat{x} \cdot \hat{y} = 0$ 이므로 간섭항이 소멸). 따라서 세기는 위치에 무관하게

$$I(x) = E_0^2 = \frac{I_0}{4} \quad (\text{일정})$$

이며 밝고 어두운 무늬가 전혀 생기지 않는다.



예시 작도 — 위치에 무관하게 $I = I_0/4$ 로 일정

(2-3) 간섭무늬가 되살아나며, 최대 세기는 $I_0/4$ 이고 최소 세기는 0이다

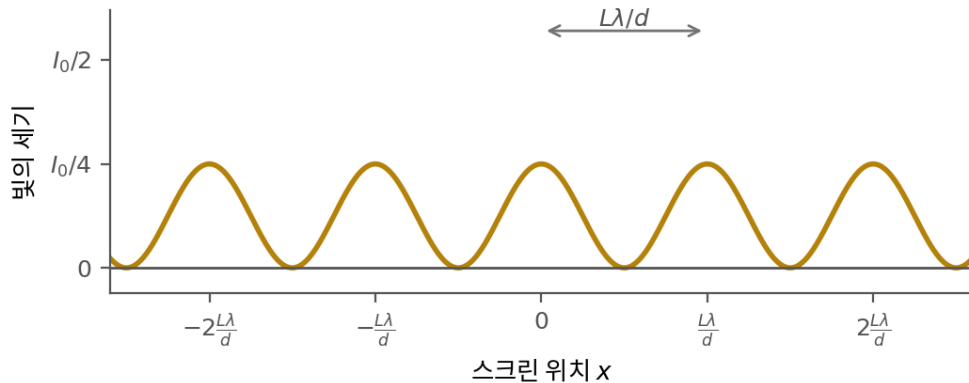
스크린 앞의 편광판은 x 축과 45° 를 이루므로, y 편광 성분과 x 편광 성분 모두 이 축과 45° 를 이룬다. 두 성분은 각각 $\cos 45^\circ = 1/\sqrt{2}$ 배로 줄어들어 투과하며, 투과한 뒤에는 둘 다 같은 45° 방향으로 편광되어 있다. 각 슬릿에서 온 빛의 진폭은

$$\frac{E_0}{\sqrt{2}} \cdot \cos 45^\circ = \frac{E_0}{2}$$

이고 편광 상태가 같으므로 이제 간섭한다.

$$I(x) = \left| \frac{E_0}{2} + \frac{E_0}{2}e^{i\delta} \right|^2 = E_0^2 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{I_0}{4} \cos^2\left(\frac{\pi dx}{L\lambda}\right)$$

무늬 간격은 여전히 $L\lambda/d$ 이고 $x = 0$ 이 밝은 무늬의 중심이며, 어두운 무늬에서는 세기가 정확히 0이 된다.



예시 작도 — $I(x) = (I_0/4) \cos^2(\pi dx/L\lambda)$, 최대 $I_0/4$ · 최소 0

(2-4) 알아낼 수 있다 — 편광이 곧 경로 표지이기 때문

문제 2-2의 배치에서 S_1 을 지난 광자는 y 편광, S_2 를 지난 광자는 x 편광 상태로 스크린에 도착한다. 두 편광 상태는 서로 직교하므로 원리적으로 100% 구별할 수 있다. 스크린 앞에 편광 분석기(예: x 축 편광판)를 놓고 광자가 투과하는지 흡수되는지를 보면, 그 광자가 어느 슬릿을 지나왔는지 확정적으로 알 수 있다.

이렇게 **경로 정보(which-path information)**가 존재하면 두 경로의 확률진폭이 서로 다른(직교하는) 상태에 실려 있으므로 더해지지 않고 확률(세기)만 더해진다. 이것이 2-2에서 간섭무늬가 사라진 이유이며, “경로를 알 수 있으면 간섭은 없다”는 상보성 원리의 직접적인 예이다.

경로 정보가 편광에 기록되어 있으므로 **알아낼 수 있고**, 바로 그 때문에 간섭무늬가 나타나지 않는다.

(2-5) 알아낼 수 없다 — 45° 편광판이 경로 정보를 지우기 때문

문제 2-3에서는 광자가 스크린에 닿기 전에 45° 편광판을 통과한다. y 편광 광자든 x 편광 광자든 이 편광판을 투과하고 나면 모두 똑같은 45° 편광 상태가 된다. 즉 투과한 광자의 편광을 아무리 정밀하게 측정해도 원래 상태가 x 였는지 y 였는지 구별할 수 없다.

경로 정보를 담고 있던 유일한 표지가 지워졌으므로(이것이 이른바 **양자 지우개**, quantum eraser), 두 경로의 확률진폭은 다시 더해질 수 있고 간섭무늬가 되살아난다. 광자를 한 개씩 보내면 각 광자는 스크린의 한 점에만 도달하지만, 그 도달 위치의 확률분포가 $\cos^2$ 꼴이 되어 광자를 충분히 많이 쌓으면 2-3에서 구한 간섭무늬가 그대로 나타난다.

45° 편광판이 편광에 담긴 경로 정보를 지우므로 **알아낼 수 없으며**, 그 결과 간섭무늬가 회복된다.