금속의 반사 위상 변이

(총 배점: 8.0)

서론

자연에 있는 물질의 굴절률 n 은 진공의 굴절률보다 크다는 것 $(n > n_o = 1)$이 알려져 있다. 그러나 메타 물질(나노 규모 구조를 가진 인공 물질)은 음의 굴절이 같은 이색적인 현상을 보일 수 있으며, 이는 음의 유효 굴절률을 생각하면 설명할 수 있다. 일반적으로 금속 같은 물질의 굴절률은 빛 흡수가 있을 때 복소수가 될 수도 있다.

복소 굴절률을 연구하는 간단한 방법 하나는 빛다발이 물질 표면에서 반사될 때의 위상 변이 ϕ 를 재는 것이다. 광학에서 표면 반사에 의한 위상 변이는 많은 응용, 특히 홀로그래피 측정에서 중요하다.

보통 유리의 경우 수직 입사에 대한 반사 위상 변이 ϕ 는 $180°$(라디안으로는 π)이다. 그러나 금속의 경우 ϕ 는 금속의 흡수에 따라 다른 값을 가질 수 있다. 광학에서 위상 측정은 어려우며 높은 정밀도가 필요하다. 광학 위상 측정을 위해 정교한 기법과 방법이 많이 개발되었다. 그러나 그것들은 고등학생이 수행하기에는 너무 복잡하다. 여기서는 간단하고 값싼 접근법을 소개한다.

목표

파브리-페로 레이저 간섭계를 써서 타이타늄(Ti) 표면에서 반사된 빛의 위상 변이를 연구한다.

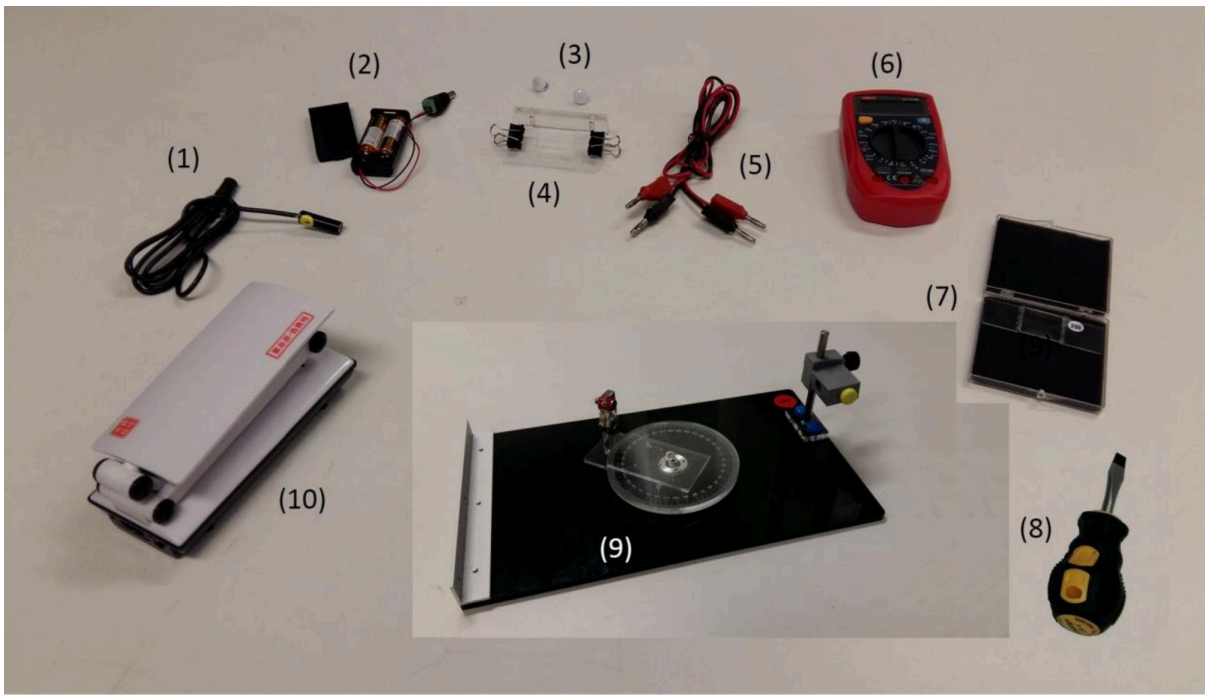


그림 1: 이 실험에 쓰는 장치

장치 목록

[1]	레이저 다이오드
[2]	레이저 다이오드용 배터리가 든 배터리 팩
[3]	시료 홀더용 흰색 머리 나사
[4]	종이 클립 두 개가 있는 시료 홀더
[5]	바나나 커넥터가 달린 전선
[6]	디지털 멀티미터
[7]	고유 시료 번호가 있는 타이타늄(Ti) 코팅 파브리-페로 에탈론 하나가 든 시료 상자
[8]	일자 드라이버
[9]	회전 원판, 회전 검출기 홀더, 고정 각도 눈금, 레이저 다이오드 홀더로 이루어진 광학 플랫폼
[10]	LED 램프

장치 설명



그림 2: 파장 650 nm, 출력 0.5 mW의 레이저 다이오드(Class II)



그림 3: 2×1.5V AA 배터리와 레이저 다이오드용 출력 플러그가 있는 배터리 팩

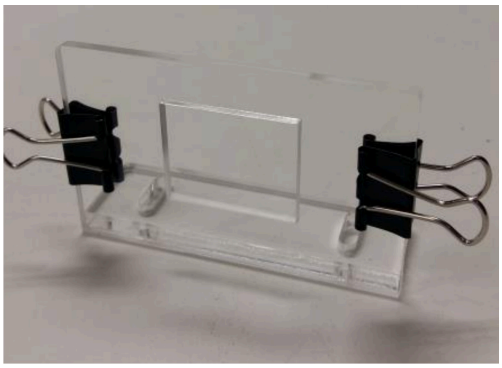


그림 4: 종이 클립 두 개가 있는 시료 홀더



그림 5: 디지털 멀티미터와 바나나 커넥터가 달린 전선



그림 6: 시료 상자와 Ti 코팅 파브리-페로(FP) 에탈론 하나(예시로 든 이 그림의 시료 번호는 #250)



그림 7: 레이저 다이오드의 빔 크기를 조절하는 일자 드라이버



그림 9: 읽기·쓰기용 LED 램프

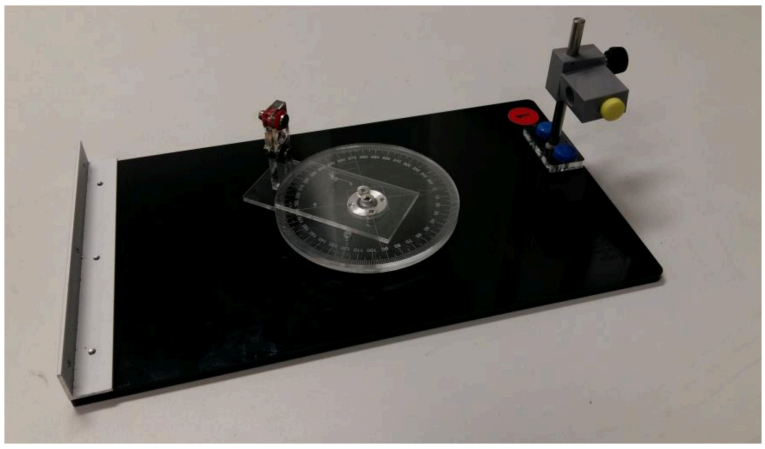


그림 8: 회전 원판, 회전 검출기 홀더, 고정 각도 눈금, 레이저 다이오드 홀더로 이루어진 광학 플랫폼

이론

그림 10에 보인 것처럼 이상적인 공기 간극 파브리-페로(FP) 에탈론을 생각하자. 이 에탈론은 위쪽의 두꺼운 유리판(굴절률 n_g)과 아래쪽의 시료판(굴절률 n_s)이 얇은 공기 간극($L \sim 5$ 마이크론)을 사이에 두고 끼워진 구조이다.

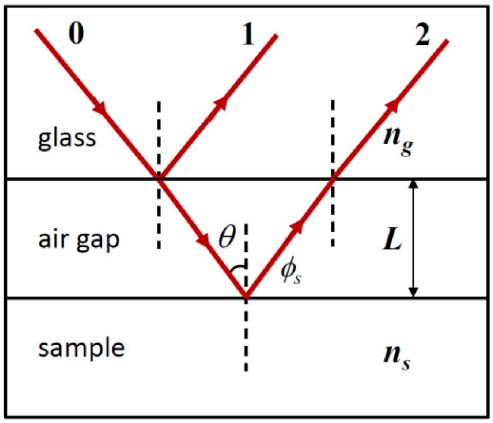


그림 10: 위쪽 유리판과 아래쪽 시료판으로 이루어진 이상적인 공기 간극 파브리-페로 에탈론에서의 빛 반사.

공기 간극 에탈론을 모형화하는 데 두 빔 간섭 근사를 쓴다. 위쪽 유리판에 입사한 빛다발(빔 0)은, 위쪽 유리의 공기-유리 경계면에서의 반사를 무시하면, 유리-공기 경계면에서 일부는 반사되고(빔 1) 일부는 투과(굴절)된다. 투과(굴절)된 빔은 공기-시료 경계면에서 반사된 뒤 위쪽 유리판을 지나 투과(굴절)되며, 이를 그림 10의 빔 2로 표시한다. 빔 2의 경우 공기-시료 경계면에서의 반사가 추가 위상 변이 ϕ_s 를 얻지만 다른 경계면에서는 위상 변이가 없다. 입사각 θ 에 대해 반사된 빛의 세기 $I(\theta)$ 는 빔 1과 2의 중첩으로 다음과 같이 주어진다:

$$I(\theta) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(2kL\cos\theta + \phi_s), \tag{1}$$

여기서 I_1 과 I_2 는 각각 빔 1과 2의 세기이고, $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ 는 파수이며 λ 는 입사광의 파장이다. 식 (1)은 고정된 파장 λ 와 공기 간극 간격 L 에 대해 입사각 θ 의 함수로서 세기의 마루와 골을 보여 준다. 이 실험에서는 입사광의 편광 방향을 고정하고, 빔이 경계면에서 반사·굴절될 때의 편광 효과는 무시한다. 또 FP 에탈론의 아래쪽 시료판으로 타이타늄(Ti) 코팅 유리판을 쓴다.

준비 절차 / 조정

1. **실험 E1을 먼저 하기로 했다면, 이 실험 E2의 장치를 조립하기 전에 E1의 관측판과 핀홀을 반드시 떼어 내어라.**

2. **주의: 레이저 다이오드의 레이저 빛을 직접 들여다보지 말 것!!**

3. 그림 11에 보인 것처럼 레이저 다이오드를 레이저 홀더의 원형 구멍에 설치하여라. 노란 머리 나사로 레이저 다이오드를 고정하여라. 레이저 헤드의 몸통이 수평이 되고 붙어 있는 노란 표지가 위를 향하도록 하여라(레이저 빛의 편광을 수직 방향으로 맞추기 위해, 그림 2의 노란 표지가 있는 레이저 다이오드 참고). [*참고: 레이저 홀더의 (노란 머리) 나사를 너무 세게 조이지 말 것. 그렇지 않으면 레이저 다이오드가 손상된다!*]

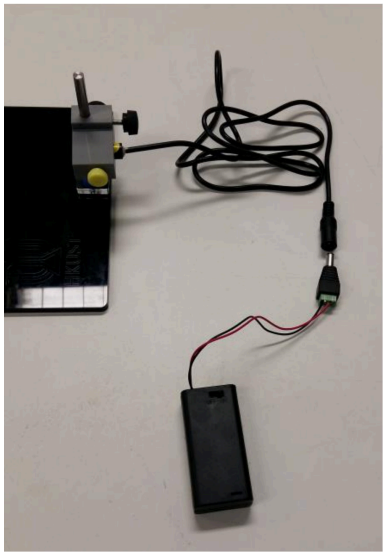


그림 11: 레이저 홀더 안에 장착된 레이저 다이오드

4. 그림 11에 보인 것처럼 배터리 팩을 레이저 다이오드에 연결하고 레이저 다이오드를 켜라.

5. 레이저 다이오드가 20 cm 거리에서 지름 약 1 mm 인 빔 점을 만들도록 하는 것이 바람직하다. 빔 크기를 확인하려면 레이저 다이오드에서 약 20 cm 떨어진 곳에 종이를 놓고 레이저 다이오드가 내는 레이저 빔의 점 크기를 관찰하여라. 필요하면 일자 드라이버로 레이저 다이오드의 조리개를 조절해 지름 약 1 mm 인 점 크기를 얻어라.

6. 그림 12에 보인 것처럼 전선을 써서 검출기 홀더에 미리 장착된 광검출기의 출력 단자를 멀티미터에 **조심스럽게** 연결하여라. 광검출기는 저항과 병렬로 연결된 광다이오드로, 빛을 받았을 때 광다이오드가 만드는 전류를 저항 양단의 전압을 재어 기록할 수 있다.

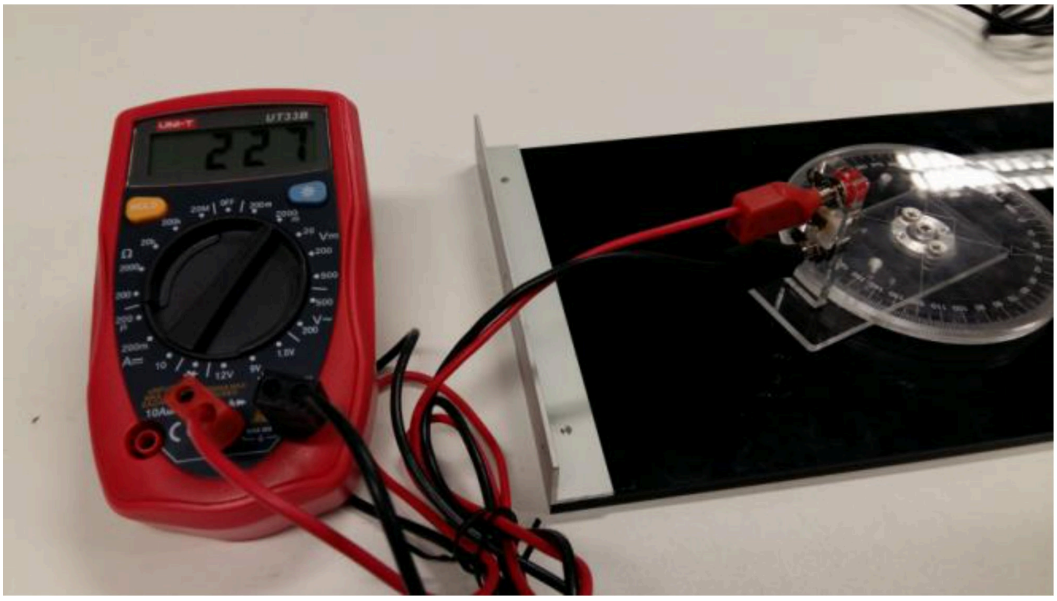


그림 12: 멀티미터에 연결된 광검출기

7. 레이저 빔이 각도 눈금의 0° 표시 위를 수평으로 지나 회전 원판의 중심을 가로지르고, 각도 눈금의 180° 표시에 놓인 검출기에 곧바로 맞도록 레이저 다이오드의 위치를 조절하여라(그림 13 참고). 멀티미터를 켜서 레이저 빔의 세기(전압으로)를 살펴보며 최적 조건을 얻을 수 있다. [*참고: 이 단계를 마치면 레이저 다이오드를 끄는 것을 잊지 말 것!*]

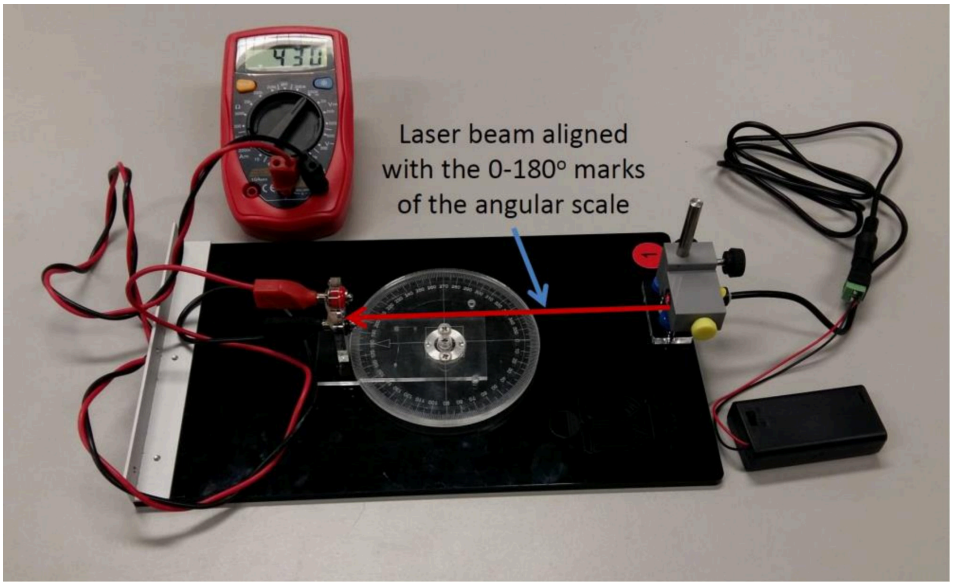


그림 13: 레이저 빔의 정렬

8. 그림 14에 보인 것처럼 흰색 머리 나사를 써서 시료 홀더를 광학 플랫폼의 회전 원판에 장착하여라.

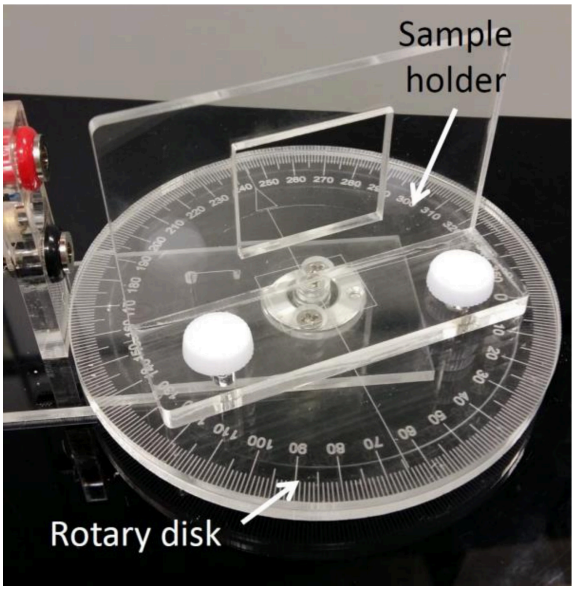


그림 14: 회전 원판에 장착된 시료 홀더

9. 그런 다음 그림 15에 보인 것처럼 제공된 종이 클립 두 개를 써서, 시료 번호(여기서는 #250)가 있는 Ti 코팅 에탈론을 시료 홀더에 똑바로 세워 장착하되, 시료의 아래쪽 유리판이 홀더의 벽면에 닿도록 하여라.

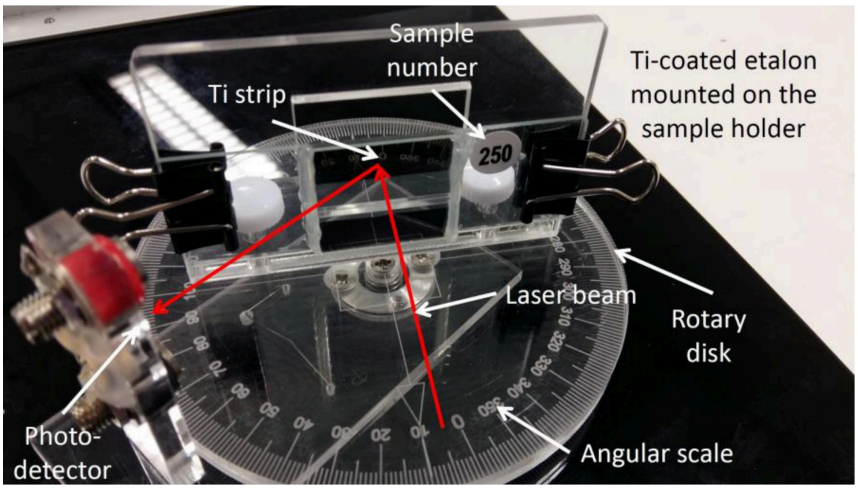


그림 15: 시료 홀더에 장착된 시료

10. 레이저 다이오드를 켜고, 레이저 빔이 에탈론의 위쪽 또는 아래쪽 Ti 띠의 가운데 부분에 맞아 그림 15처럼 광검출기로 반사되도록 에탈론의 수직 위치를 조절하여라. 그런 다음 (멀티미터로 재는 전압으로) 신호가 최대가 되도록 광검출기의 위치를 조절하여라. 나아가 Ti 띠가 회전 원판과 같은 축으로, 즉 동축으로 회전하도록 흰색 머리 나사 두 개로 시료 홀더의 위치를 조절해야 한다.

11. 이제 각도 눈금이 가리키는 대로, 레이저 빔이 시료 표면의 법선에 대해 입사각 θ 를 이루도록 시료 홀더를 장착된 Ti 코팅 에탈론과 함께 회전시켜라. 그런 다음 광검출기를 약 2θ 의 각으로 옮기고, 멀티미터에서 최대 신호를 얻도록 광검출기의 각 위치를 조절하여라. 위의 모든 단계와 절차를 마치면 이제 장치가 실험 준비를 마친 것이다.

참고: 모든 수치 값과 답은 유효 숫자 세 자리여야 한다.

실험

과제	설명	배점
1	입사각 θ 의 함수로 Ti 코팅 에탈론의 반사 세기를 전압으로 재어라. $\theta \sim 4^\circ$ 에서 시작하여 될 수 있는 대로 많은 세기 마루가 기록되도록 충분히 촘촘한 각도 간격으로 재어라. 자료를 표 E2_1 에 적어라.	**1.0**
2	레이저 빔이 시료 홀더에 대해, 그리고 광학 플랫폼의 각도 눈금에 대해 어긋나서 생기는 오차를 줄이기 위해, 각도 눈금의 0° 표시 반대쪽 입사각에 대해서도 비슷한 측정을 수행하여라. 먼저 시료를 각도 눈금의 0° 표시 반대쪽을 향하도록 돌린 다음, 반사된 레이저 빔의 세기를 재기 위해 광검출기를 그에 맞게 옮겨라. 자료를 표 E2_2 에 적어라.	**1.0**
3	표 E2_1 에 기록한 자료를 써서 입사각 θ 의 함수로 반사 세기를 모눈종이에 그리고 그 그래프를 '그래프 E2_1' 이라고 이름 붙여라. 표 E2_2 의 자료에 대해서도 다른 모눈종이에 비슷한 그래프를 그리고 '그래프 E2_2' 라고 이름 붙여라. 그래프 E2_1 과 그래프 E2_2 모두에서 자료점에 맞는 매끄러운 곡선을 그려 반사 세기의 변화를 나타내어라.	**0.9**
4	반사 세기의 마루를 찾아, 입사각이 가장 큰 마루부터 시작해 그래프 E2_1 과 E2_2 에 차례로 마루 번호를 붙여라.	**0.2**
5	식 (1)을 써서 $L, \theta, \phi_s, \lambda$ 로 반사 세기 마루의 조건을 유도하여라. 이 조건을 식 (2)라고 이름 붙여라.	**0.3**
6	θ 의 알맞은 함수 $X(\theta)$ 를 새로운 독립 변수로 골라, 반사 세기 대 $X(\theta)$ 그래프에서 그래프 E2_1 과 E2_2 의 반사 세기 마루가 같은 간격으로 놓이도록 하여라. 그런 다음 그에 해당하는 $X(\theta)$ 값을 계산하여 표 E2_1 과 E2_2 에 새로운 열로 넣어라.	**0.4**
7	표 E2_1 과 E2_2 의 자료에 대해 마루 번호와 그에 해당하는 입사각으로 이루어진 표 E2_3 을 만들어라. 각각 LHS(왼쪽)와 RHS(오른쪽)의 표기, 즉 θ_{LHS} 와 θ_{RHS} 로 이름 붙여도 된다. 그런 다음 짝지어진 각 반사 세기 마루에 대해 θ_{LHS} 와 θ_{RHS} 의 평균값을 계산하고, 그 평균을 $\lvert\theta\rvert_{\text{avg}}$ 와 $X(\lvert\theta\rvert_{\text{avg}})$ 로 이름 붙여 그 결과를 표 E2_3 에 새로운 열로 적어라. [참고: 표 E2_1 과 E2_2 의 마루 번호는 다를 수 있다. 그래프 E2_1 과 E2_2 에서 얻은 대응하는 마루를 반드시 맞추어라.]	**0.6**
8	마루 번호와 $X(\lvert\theta\rvert_{\text{avg}})$ 사이의 관계를 보이는 그래프를 다른 모눈종이에 그려라. 이 그래프를 '그래프 E2_3' 이라고 이름 붙여라.	**0.6**

9	그래프 E2_3 의 모든 자료점을 지나는 직선을 그리고 이 직선의 기울기와 y 절편을 구하여라. [참고: 그래프를 이용한 접근도 인정하며 오차 해석은 필요하지 않다.]	**0.4**
10	과제 5에서 유도한 식 (2)를 다시 써서, 간섭 차수 m 과 과제 6에서 얻은 함수 $X(\lvert\theta\rvert_{\text{avg}})$ 의 식을 나타내어라. 이 식을 식 (3a)라고 이름 붙여라. 식 (3a)로부터 L, λ, $\lvert\theta\rvert_{\text{avg}}$ 로 나타낸 m 의 식을 식 (3b)로 적어라. 이어서 규격화된 반사 위상 $\phi_{\text{s,n}} = \phi_{\text{s}}/2\pi$ 를 L, λ, $\lvert\theta\rvert_{\text{avg}}$ 로 나타내어 식 (3c)로 적어라. $\phi_{s,n}$ 의 범위를 적어라. 그런 다음 과제 7에서 얻은 결과로부터 각 마루에 대한 m 의 값을 정하여 표 E2_3 에 새로운 열로 넣어라.	**1.2**
11	그래프 E2_3 에, 즉 마루 번호 대 $X(\lvert\theta\rvert_{\text{avg}})$ 를 그린 같은 그래프에 m 대 $X(\lvert\theta\rvert_{\text{avg}})$ 를 그려라. 이 그림의 모든 자료점을 지나는 선을 그려라. 이로부터 에탈론의 공기 간극 간격 L 과 Ti 의 반사 위상 ϕ_{s} 를 구하여라. [참고: 여기서도 그래프를 이용한 풀이가 가능하며 오차 해석은 필요하지 않다.]	**1.4**

END