



Physics Laboratory

실험 2-7. 빛의 진행

실험 목적

빛은 진행 도중 매질의 경계나 장애물을 만나는 등 다양한 환경의 변화를 겪을 수 있다. 이 실험에서는 다양한 상황에서 일어나는 빛의 진행을 관찰한다. 먼저 매질 경계면에서 일어나는 반사와 굴절 현상을 조사해서 이를 통해 빛의 진행에 관한 광선 모델을 이해한다. 또 볼록렌즈와 오목렌즈의 초점 거리를 구하는 방법도 알아본다. 그리고 이중 슬릿 간섭 실험을 통해 빛의 파동성을 이해한다.

실험 개요

- 레이저와 반원형 프리즘을 사용해서 매질 경계에서 일어나는 빛의 반사와 굴절, 전반사 현상을 관찰한다. 굴절 실험과 전반사 실험 결과를 스넬의 법칙에 적용해서 프리즘의 굴절률을 구해본다.
- 볼록렌즈와 오목렌즈가 만드는 상(image)을 관찰해서 초점 거리를 구해본다.
- 레이저와 이중 슬릿을 이용해서 만든 간섭 무늬를 관찰하고, 결과로부터 이중 슬릿의 사이 간격을 계산해 본다.
- 빛의 성질에 관한 광선 모델과 파동 이론을 이해한다.

실험 방법

실험실에는 다음과 같은 장치가 준비되어 있다. (그림 1 참조)

기초 광학 실험 세트	광학대(optical bench)	1 개
	다이오드 레이저	1 개
	램프(LED)	1 개
	거울/반원형 프리즘	각 1 개
	원반+지지대	1 개
	볼록렌즈/오목렌즈	각 1 개
	화살표 물체	1 개
	회절판	1 개
	눈금 스크린/눈금자	각 1 개
	기타 (이 실험에 필수적이지는 않음)	

이외에도 더 필요한 것이 있으면 담당 조교에게 문의하거나 각자 미리 준비하도록 한다.



[그림 1] 빛의 진행 실험 장치

권장할 만한 표준적인 실험 방법은 다음과 같다.

<스텝 1> 빛의 반사와 굴절, 전반사

(1) 광학대를 수평이 되게 조정하고, 다이오드 레이저와 원반(+지지대)을 설치한다. 다이오드 레이저를 켜고, 레이저 빛이 광학대의 축과 평행하게 진행하여 원반의 중심(즉 원반에 그려진 각도기의 중심)을 지날 수 있도록 방향을 잘 조정한다.

(2) 레이저를 끄고, 거울을 원반 위에 얹는다. 이 때 평면 거울면이 원반의 중심 위에 놓이도록 한다.

(3) 다시 레이저를 켜다. 원반을 돌리면서 입사 광선과 반사 광선을 확인하고, 여러 입사각에 대해 반사각을 측정한다. (실험 노트 측정 I)

(4) 레이저를 끄고, 이번에는 반원형 프리즘을 원반 위에 얹는다. 이 때 프리즘의 평평한 면이 원반의 중심 위에 놓이도록 한다.

(5) 다시 레이저를 켜다. 원반을 돌리면서 입사 광선과 굴절 광선을 확인하고, 여러 입사각에 대해 굴절각을 측정한다. (실험 노트 측정 II)

(6) 이번에는 작은 각도부터 시작해서 입사각을 차츰 증가시키다가, 굴절 광선이 사라지기 시작하는 입사각을 기록해 둔다. 이것이 입계각 θ_c 이다. (실험 노트 측정 III)

<스텝 2> 볼록렌즈의 초점 거리 측정 (실험 노트 측정 IV)

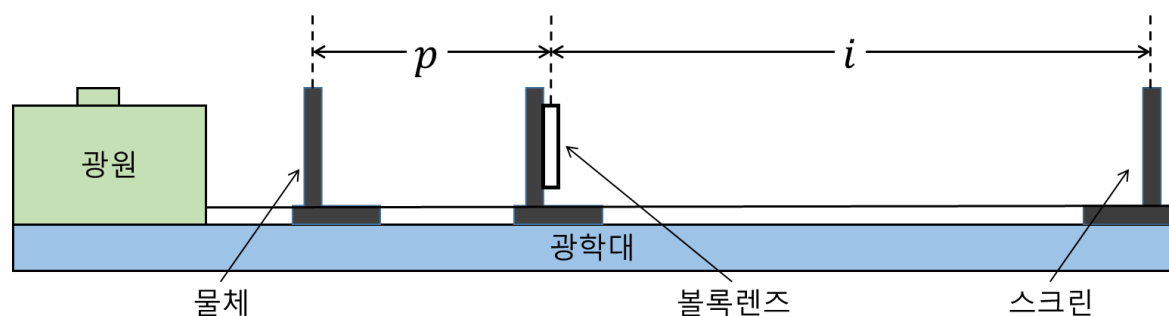
(1) 레이저를 분리하고 광학대의 한쪽 끝에 램프를, 반대쪽 끝에는 스크린을 설치한다.

(2) 광원 가까이에 화살표 물체(크기를 미리 측정해 둔다)를 설치하고 물체와 스크린 사이에 볼록렌즈를 설치한다. 렌즈는 스크린보다 물체에 더 가깝도록 한다. (그림 2 참조)

(3) 광원을 켜고, 물체의 상이 스크린에 선명하게 형성되도록 렌즈와 스크린의 위치를 잘 조정한다.

(4) 상이 선명해지면 이 때의 물체, 볼록렌즈, 스크린의 광학대 측상 위치와 상의 크기를 측정한다.

(5) 물체와 렌즈 사이 거리를 바꾸어가며 위 (3), (4) 실험을 5회 이상 반복 수행한다.



[그림 2] 볼록렌즈의 초점거리 측정

<스텝 3> 오목렌즈의 초점거리 측정 (실험 노트 측정 V)

- (1) 위 <스텝 2>에서 했던 것처럼 물체와 볼록렌즈를 배치하고, 축소된 상이 선명하게 맺히게 되는 곳에 스크린을 설치한다. 이 때 스크린의 위치를 기록해 둔다. 단, 스크린은 광학대의 맨 끝에 두지 말고 어느 정도 뒤로 움직일 수 있는 공간을 두어야 한다.
- (2) 볼록렌즈와 스크린 사이에 오목렌즈를 설치한다. 선명한 상이 형성될 때까지 스크린의 위치를 조정한다.
- (3) 상이 선명해지면 이 때의 물체, 볼록렌즈, 오목렌즈, 스크린의 광학대 축상 위치를 측정한다.
- (4) 물체와 볼록렌즈 사이의 거리를 바꾸어가면서 위 (1)(2)(3) 실험을 3회 이상 반복 수행한다.

<스텝 4> 이중 슬릿 간섭 실험 (실험 노트 측정 VI)

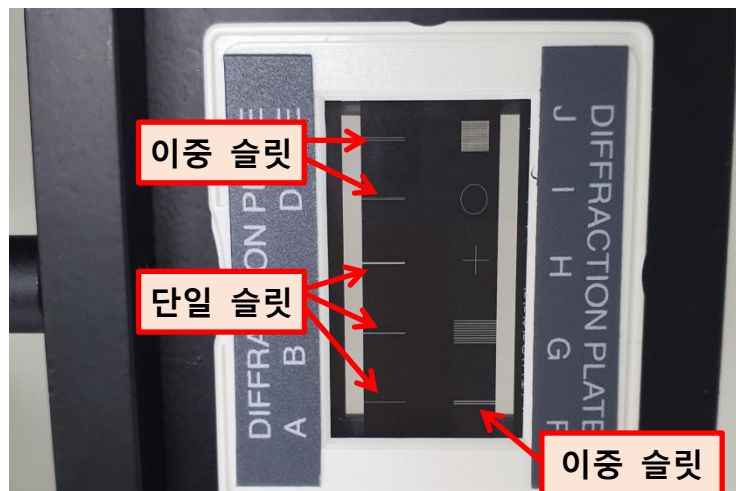


[그림 3] 빛의 간섭

- (1) 다이오드 레이저와 스크린을 각기 광학대의 맨 끝에 설치한다. 레이저를 켜고, 빛이 광학대의 축과 평행하게 진행하도록 방향을 잘 조정한다.
- (2) 회절판을 레이저 가까이에 설치한다. (그림 3 참조) 회절판과 스크린의 광학대 축상 위치를 기록해 둔다.
- (3) 회절판 위에는 여러 개의 홈(슬릿)이 나 있는데, 그 중 이중 슬릿(D, E, F 중 하나)을 레이저 빛이 지나도록 한다. (그림 4 참조) 슬릿의 사이 간격은 D가 0.125 mm, E와 F가 0.250 mm이다.

※참고: 슬릿 홈의 폭은 D와 E의 경우 0.04 mm, F는 0.08 mm이다.
- (4) 스크린에 나타나는 간섭 무늬를 관찰한다. 밝은 줄무늬들 중, 선명하게 보이면서도 중앙으로부터 가급적 멀리 떨어진 줄무늬를 택해서 이는 중앙으로부터 몇 번째(m) 밝은 줄무늬인지 센다. 또한 이 줄무늬와 중앙 지점 사이의 간격 y_m 을 측정한다.

- (5) 이중 슬릿 3쌍 모두에 대해 위 (3), (4) 실험을 반복 수행한다.



[그림 4] 회절판의 모습. A, B, C는 단일 슬릿이고 D, E, F는 이중 슬릿이다.

<스텝 5> 단일 슬릿 회절 실험 (실험 노트 측정 VII)

(1) 앞의 <스텝 5>의 (2)까지는 동일하게 수행한 다음, 이번에는 회절판의 단일 슬릿(A, B, C 중 하나)을 레이저 빛이 지나도록 한다. 슬릿의 폭은 A가 0.04 mm, B가 0.08 mm, C가 0.16 mm 이다.

(2) 스크린에 나타나는 회절 무늬를 관찰한다. 어두운 줄무늬 중, 확실하게 구별되면서도 중앙으로부터 가급적 멀리 떨어진 줄무늬를 택해서 중앙으로부터 몇 번째(m) 어두운 줄무늬인지 센다. 또한 이 줄무늬와 중앙 사이의 간격 y_m 을 측정한다.

(3) 단일 슬릿 3개 모두에 대해 위 (1), (2) 실험을 반복 수행한다.

실험 노트의 작성은 다음과 같은 방법으로 하는 것이 좋다.

측정 I

횟수	입사각 (θ_1)	반사각 (θ'_1)
1		
2		
3		
4		
5		
6		

측정 II

횟수	입사각 (θ_1)	굴절각 (θ_2)	굴절률 (n)
1			
2			
3			
4			
5			
6			

배경 이론의 식 (2)를 사용해서 프리즘의 굴절률을 계산한다.

측정 III

횟수	임계각 (θ_c)
1	
2	
3	
4	
5	

실험에서 구한 임계각과 배경 이론의 식 (3)을 이용해서 프리즘의 굴절률을 계산하고, 위 측정 II 에서 얻은 결과와 비교해 본다.

측정 IV

횟수	물체의 위치 (mm)	렌즈의 위치 (mm)	상의 위치 (mm)	$f(> 0)$ (mm)	물체의 크기 (mm)	상의 크기 (mm)
1						
2						
3						
4						
5						

배경 이론의 식 (4)를 사용해서 볼록렌즈의 초점거리를 계산한다.

물체의 크기와 상의 크기로부터 배율을 계산하고, 배경 이론의 식 (5)가 성립하는지 확인해 보자.

측정 V

횟수	볼록렌즈에 의한 상의 위치 (mm)	오목렌즈의 위치 (mm)	오목렌즈에 의한 상의 위치 (mm)	$p_2(< 0)$ (mm)	$i_2(> 0)$ (mm)	$f(< 0)$ (mm)
1						
2						
3						

$p_2 = -|볼록렌즈에 의한 상과 오목렌즈 사이 거리|$,

$i_2 = |오목렌즈에 의한 상과 오목렌즈 사이 거리|$

로 구할 수 있다. 배경 이론을 통해 그 이유를 알아보고, 식 (4)를 사용해서 오목렌즈의 초점거리를 계산한다.

측정 VI

다이오드 레이저의 파장 λ (nm):

	이중 슬릿 D	이중 슬릿 E	이중 슬릿 F
L (mm)			
m			
y_m (mm)			

L 은 슬릿과 스크린 사이의 거리.

m 은 선택한 밝은 줄무늬가 간섭 무늬의 중앙으로부터 몇(m) 번째인지 의미.

y_m 은 선택한 밝은 줄무늬(의 중심)와 간섭 무늬의 중앙 지점 사이의 거리.

측정 결과와 배경 이론의 식 (9)를 사용해서 슬릿의 사이 간격을 계산하고, 제원과 비교해 보자.

측정 VII

다이오드 레이저의 파장 λ (nm):

	단일 슬릿 A	단일 슬릿 B	단일 슬릿 C
$L(\text{mm})$			
m			
x_m (mm)			

L 은 슬릿과 스크린 사이의 거리.

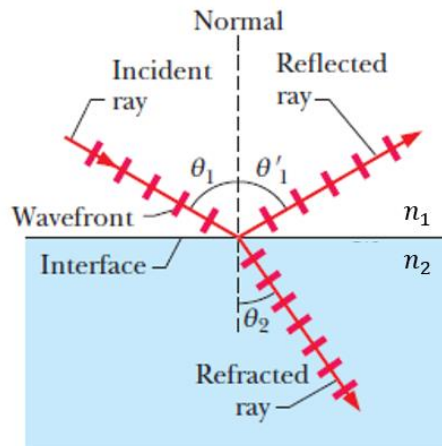
m 은 선택한 어두운 줄무늬가 회절 무늬의 중앙으로부터 몇 (m) 번째인지 의미.

x_m 은 선택한 어두운 줄무늬(의 중심)와 회절 무늬의 중앙 지점 사이의 거리.

측정 결과와 배경 이론의 식 (9)를 사용해서 슬릿의 폭을 계산하고, 제원과 비교해 보자.

배경 이론

1. 빛의 반사와 굴절



[그림 5] 빛의 반사와 굴절 (Walker, 2020, p.874)

고전물리학적으로 빛은 전자기파 파동으로 볼 수 있다. 전자기파 에너지의 흐름 선을 광선이라고 하는데, 먼저 광선의 경로를 통해 빛의 진행을 설명하는 법을 알아보자.

그림 1과 같이 광선이 매질의 경계면에 입사할 경우, 반사 광선(reflected ray)과 굴절 광선(refracted ray)이 형성된다. 입사 광선과 경계면의 법선(normal) 사이의 각도를

입사각(θ_1)이라 하고, 반사 광선과 법선 사이 각도는 반사각(θ_1'), 굴절 광선과 법선 사이 각도는 굴절각(θ_2)이라 한다. 입사 광선과 반사, 굴절 광선, 매질 경계면의 법선은 모두 한 평면상에 있고, 입사각과 반사각, 굴절각 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\theta_1 = \theta_1' \text{ (반사의 법칙)} \quad (1)$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \text{ (스넬의 법칙)} \quad (2)$$

식 (2)에서 n_1 은 입사 광선이 진행하던 매질의 굴절률, n_2 는 굴절 광선이 진행하는 매질의 굴절률이다. 진공 공간의 굴절률은 1 이며, 공기의 굴절률도 거의 1 이다. 한편 굴절률이 큰 물질에서 굴절률이 작은 물질로 빛이 입사할 때 (즉 $n_1 > n_2$) 입사각이 다음의 식

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

를 만족하는 θ_c 보다 크다면, 실수인 굴절각이 없으므로 굴절 광선이 존재할 수 없고 모든 빛은 반사된다. 이를 전반사라 하고, θ_c 를 임계각(critical angle)이라 한다.

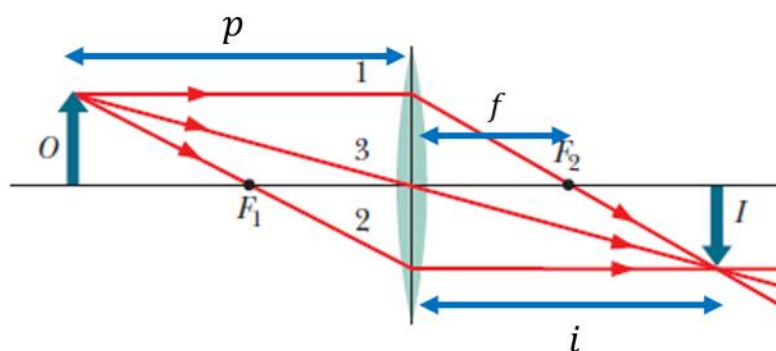
2. 얇은 렌즈가 만드는 상

렌즈는 굴절에 의해 상을 만드는 대표적인 광학 부품이다. 위에서 살펴본 광선 모델을 사용하고 광선들이 렌즈의 광축(렌즈의 양쪽 면의 중심들을 통과하는 직선 축) 근처에서만 진행한다고 가정하면, 얇은 렌즈에 의해 만들어지는 상의 위치와 크기는 다음의 간단한 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad (4)$$

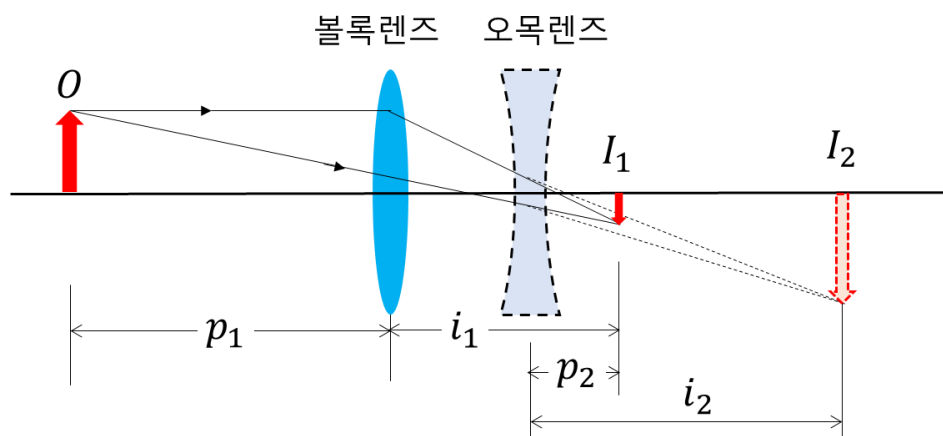
이를 렌즈 공식이라고 한다. 여기서 p 는 물체와 렌즈 간의 거리, i 는 렌즈와 상까지의 거리, f 는 렌즈의 초점 거리이다. i 가 양수이면 상은 실상(real image)이라서 스크린에 상이 맺힐 수 있다. 반면에 i 가 음수이면 렌즈를 통과한 빛은 발산하게 되고 눈으로 이 빛을 보면 렌즈의 뒤쪽에서 상을 보게 된다. 이런 상을 허상(virtual image)이라 한다.

광축과 평행하게 진행하다가 렌즈를 통과한 광선(혹은 그 연장선)들은 광축과 한 점에서 만나게 되는데, 이 점을 때 이점을 렌즈의 초점이라 하고 렌즈의 중심으로부터 초점까지의 거리가 바로 초점거리다. (그림 5 참조) 볼록렌즈의 초점 거리는 양수이고 오목렌즈의 경우 음수가 된다. <스텝 2> 실험 결과를 렌즈 공식에 대입해서 볼록렌즈의 초점 거리를 구해보자.



[그림 6] 볼록 렌즈의 초점거리 (Walker, 2020, p.897)

그런데 <스텝 3>에서 오목렌즈의 초점 거리를 구할 때는 보다 복잡한 방법을 사용했다. 그 이유는 오목렌즈 하나만을 사용하면 허상이 만들어지기에 실제 스크린에 맺히지 않기 때문이다. 다음의 그림 7을 보면서 <스텝 3>에서 사용한 방법에 대해 알아보자.



[그림 7] 오목렌즈의 초점거리 측정 실험

먼저 볼록렌즈에 의해 오목렌즈의 너머에 상 I_1 이 만들어지게 한다. (물체와 볼록렌즈 사이 거리 p_1 , 볼록렌즈와 I_1 사이 거리 i_1) 이 I_1 이 오목렌즈에 대해 물체 역할을 한다. 그러면 이제 오목렌즈에 의해 실상 I_2 가 만들어지므로 스크린을 써서 볼 수 있게 된다.

I_1 과 오목렌즈 사이 거리를 p_2 , 오목렌즈의 상과 오목렌즈 사이 거리를 i_2 라 하고 렌즈 공식에 대입하면 오목렌즈의 초점 거리를 구할 수 있다. 주의할 점은 여기서 p_2 는 음수라는 것이다. (즉 실제 공간상의 거리에 음의 부호를 붙인 값이다) 이는 그림의 볼록렌즈와는 경우가 다르게 오목렌즈에 대해서는 물체 역할을 하는 I_1 이 우측에서 좌측으로 광선을 보내주는 셈이기 때문이다.

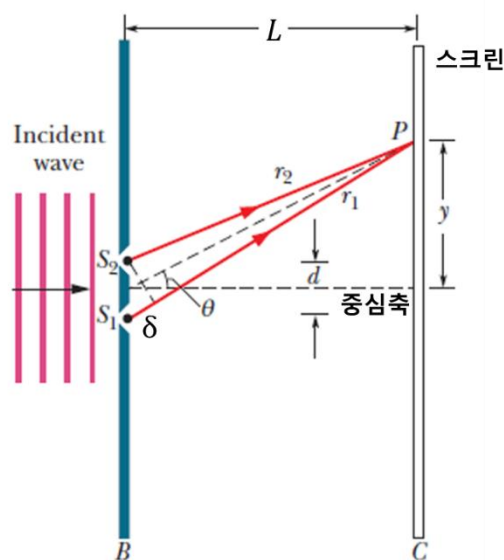
렌즈의 배율은 렌즈에 의해 만들어진 상의 길이 I 와 물체의 길이 O 의 비로 정의된다. 이것은 또한 식 (1)에 나왔던 p 와 i 의 비와도 같다.

$$m = \frac{I}{O} = \frac{i}{p} \quad (5)$$

3. 이중 슬릿 간섭과 단일 슬릿 회절

빛의 간섭과 회절은 광선 모델만으로는 설명할 수 없는 대표적인 광학 현상이다. 이들은 전자기파의 전기장 또는 자기장이 어떻게 진행하는지 살펴보면 이해할 수 있다.

간섭이란 여러 개의 파동이 중첩되는 현상을 말한다. 간섭을 보기 위해서는 중첩되는 파동들 사이의 상대적 위상 차이가 일정하게 유지되어야 한다. 이 실험의 <스텝 4>에서는 서로 가까운 두 개의 홈(이중 슬릿)에 의한 레이저 빛의 간섭을 관찰하게 되는데, 이는 그림 8과 같은 상황으로 볼 수 있다.



[그림 8] 영(Young)의 이중 슬릿 실험(Walker, 2020, p.923)

두 슬릿 S_1 과 S_2 에서 나온 빛의 간섭을 생각해 보자. 각 슬릿을 통과한 빛은 퍼져서(회절) 구면파가 된다. 스크린에 형성되는 간섭 무늬는 이들 두 구면파가 중첩된 결과이다. 스크린 상의 어떤 한 점(P)에서 빛의 세기는 각 슬릿으로부터 P까지의 광경로차 δ 에 의해 결정된다. 슬릿의 중심과 P를 잇는 선이 중심축과 이루는 각도 θ 가 작다면, 광경로차 δ 는 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$\delta = d \sin \theta \quad (6)$$

여기서 d 는 이중 슬릿 간격(즉 S_1 과 S_2 사이의 거리)이다. 따라서 광경로차 δ 는 P의 위치에 따라 달라지게 된다. 만약 δ 가 파장의 정수배라면 P에서는 보강 간섭이 일어나서 밝은 빛의 줄무늬가 형성되고, δ 가 반파장의 홀수배라면 상쇄 간섭이 일어나서 어두운 줄무늬가 형성된다.

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{ (보강 간섭)} \quad (7)$$

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{ (상쇄 간섭)} \quad (8)$$

실험에서는 스크린에 나타나는 간섭 무늬의 중앙으로부터 m 번째 밝은 무늬까지의 거리 y_m 을 측정한다. y_m 과 이곳의 각도 θ_m 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$y_m = L \tan \theta_m \quad (9)$$

L 은 이중 슬릿에서 스크린까지 거리로, y_m 보다 매우 크다. 따라서

$$\tan \theta \approx \sin \theta \approx \theta \quad (10)$$

근사식을 적용시킬 수 있다. 또 θ_m 은 식 (7)도 만족할 것이므로, 식 (9)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$y_m = L \frac{\lambda}{d} m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

따라서, 광원의 파장 λ 를 알면 위 식으로부터 이중 슬릿 간격 d 를 구할 수 있다.

한편 회절이란 장애물을 지난 파동이 공간적으로 퍼져버리는 현상을 말한다. 이 실험의 <스텝 5>에서는 가느다란 홈 하나(단일 슬릿)를 통과한 레이저 빛에 의해 만들어지는 회절 무늬를 관찰한다. 이 때 스크린에서 빛의 세기는

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (10)$$

가 된다. 여기서 I_0 는 최대 세기이고 $\alpha = (\pi a \sin \theta)/\lambda$ 이다. a 는 슬릿의 폭이고 θ 는 역시

슬릿의 중심과 스크린상의 어떤 지점 P 를 잇는 선이 중심축과 이루는 각도를 의미한다. 이 경우 최대 세기는 회절 무늬의 정중앙에서 나타난다. 실험에서는 회절 무늬의 중앙으로부터 m 번째 어두운 무늬까지의 거리 x_m 을 측정하는데, 이는 위 식 (10)을 통해 살펴보면 다음 식을 만족하게 된다.

$$x_m = L \frac{\lambda}{a} m, \quad m = 1, 2, \dots \quad (11)$$

따라서, 광원의 파장 λ 를 알면 위 식으로부터 슬릿의 폭 a 를 구할 수 있다.

참고문헌

Walker, J., *Halliday & Resnick's Principles of Physics* (11th ed.), 2020.