

碩士學位論文

회절 현상에 대한 고찰

濟州大學校 大學院

物理學科

姜 明 和



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1993年 6月

회절 현상에 대한 고찰

指導教授 金 斗 哲

姜 明 和

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함

1993 年 6 月

姜明和의 理學 碩士學位 論文을 認准함



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

審査委員長	_____	印
委 員	_____	印
委 員	_____	印

濟州大學校 大學院

1993 年 6 月

A Review on Phenomena of Diffraction

Myeong-Hwa Kang

(Supervised by professor Doo-Chul Kim)

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF NATURAL SCIENCE**



**DEPARTMENT OF PHYSICS
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

1993. 6

목 차

Abstract	1
I. 서론	2
II. 이론적 고찰	3
1. 단일, 이중 slit에 대한 회절	3
2. 다중 slit에 의한 회절	7
3. 입사빛이 slit에 경사입사 되는 경우의 회절 형태	9
4. 삼각형 모양에 의한 회절	12
III. 실험 및 분석	15
1. Aperture 제작	15
2. 실험 및 분석	15
2-1) 이중 slit에 의한 회절무늬	15
2-2) 다중 slit에 의한 회절	21
2-3) 입사빛이 slit에 경사입사 되는 경우의 회절 형태	24
2-4) 삼각형 모양에 의한 회절	29
IV. 결론	33
V. 참고문헌	35

ABSTRACT

A review of diffraction phenomena for a double slit, grating and regularly triangular aperture has been done.

First, as a width b and a space d of double slit vary, a diffraction pattern has been simulated by computer. In case of $d \gg b$, as a width b is kept constant and a space d varies, an interference pattern within envelope varies and as $n(=d/b)$ is increase, the number of principal maxima within the envelope occurred $2n+1$. As a space d is kept constant and a width b varies, a scale of the interference pattern and diffraction pattern varies and when $1/n$ is 0.1, the value of principal maxima and first maxima are nearly equal. Conversely, in case of $d \ll b$, as a width b is kept constant and a space d varies, a scale of the interference pattern and diffraction pattern remains and when n is 0.1, diffraction pattern is similar to a single slit. As a space d is kept constant and width b varies, a scale of the interference pattern and diffraction pattern varies and as $1/n$ is increase, the diffraction pattern almostly disappears.

Second, an intensity of diffraction light and separation between fringes for grating have been measured. Using this data, calculated values of space between the slits agree with practical values of space between the slits.

Third, as a grating is rotated to a incident laser beam, the diffraction pattern appears in the arc of a circle. The measured values of radi of a circle agree with theoretical values.



Lastly, we can expect that the calculated diffraction pattern for a regularly triangular aperture has three symmetric axes, and the diffraction pattern in each axes has bright and dark fringes like the diffraction pattern of single slit.

I. 서론

광원으로부터 직진하여 장애물에 도달한 빛은 직진하던 광경로의 방향 변화를 일으켜 새로운 방향으로 퍼져 나가게 된다. 이러한 현상을 빛의 회절이라고 한다.

회절 현상은 일반적으로 두가지로 구별하는데, screen과 광원이 slit에서 멀리 떨어져 있어서 입사파와 회절파의 파면이 평면파라고 볼 수 있는 Fraunhofer 회절과 screen과 광원이 slit에서 가까이 있어서 입사파와 회절파의 파면이 구면파라고 볼 수 있는 Fresnel 회절이 있다.

이러한 회절 현상은 장애물의 모양에 따라 회절의 형태도 다르게 되므로 장애물의 모양 변화에 따른 회절 현상에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 최근에 Marvin(1988)은 다이아몬드형의 구멍에 의한 회절 현상을, 김(1985) 등은 정삼각형 모양의 구멍에 의한 회절 현상에 대한 이론적 계산 및 실험적 결과를 발표한 바 있다. 그리고 계(1991) 등은 태양전지를 이용한 회절격자의 주기와 간격의 측정 결과를 발표하였으며, 문(1991) 등은 빛의 회절 현상에 대한 시범 실험에 관한 논문을 발표하였고, 백(1985)은 He-Ne 레이저를 사용한 광회절에 관한 논문을 발표하였다.

따라서 본 연구에서도 장애물 모양의 변화에 따른 몇가지 실험과 이론적 계산을 하여 기존의 실험과 비교하려 한다. 즉, 이중 slit에 대하여 slit의 간격과 폭을 변화시키면서 회절무늬 형태를 컴퓨터 시뮬레이션하고, slit의 간격과 폭을 변화시킨 회절격자를 제작하고 이 회절격자에 의한 회절광의 세기와 회절광의 주요 극대치간의 거리를 측정하여 제작한 slit의 간격을 구하여 이론적인 값과 비교하였다. 그리고, laser beam이 slit에 수직입사하지 않고 일정한 각으로 경사입사하는 경우의 회절무늬 변화를 관찰하고, 정삼각형 모양의 구멍에 대한 회절현상의 이론적 계산을 하여 기존의 실험들과 비교하려 한다. 그리고 다음의 논의를 위해 여러가지 모양(, , T, W)의 slit를 만들어 회절 무늬 형태를 관찰하려 한다.

II. 이론적 고찰

1. 단일, 이중 slit에 의한 회절

Fig.1과 같이 임의의 모양을 가진 aperture에서 P점에서 관측되는 파동함수는 근사화된 Fresnel-Kirchhoff 적분 공식인

$$U_p = C \iint e^{ikr} dA \quad \dots \dots \dots (1)$$

로 주어진다(Fowles, 1975)(Halliday 와 Resnick, 1992). 이 식은 엄밀하게는 vector 파동인 빛에 대하여 사용할 수 없으나 파동함수의 절대치의 제곱은 방사각도의 크기로 생각될 수 있으므로 빛의 Fraunhofer 회절의 계산에 사용할 수 있다. r은 점 P에서 구멍까지의 거리, k는 파수(wave number)이며, C는 모든 일정한 자를 포함하는 복소 비례 상수이며 적분은 구멍의 면적에 대하여 행해진다.

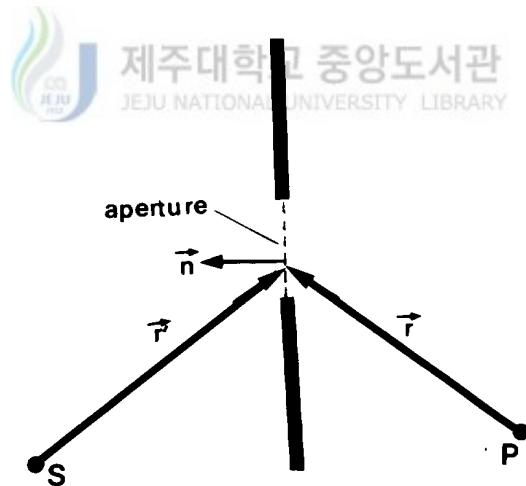


Fig. 1. Geometry for the Fresnel-Kirchhoff formula

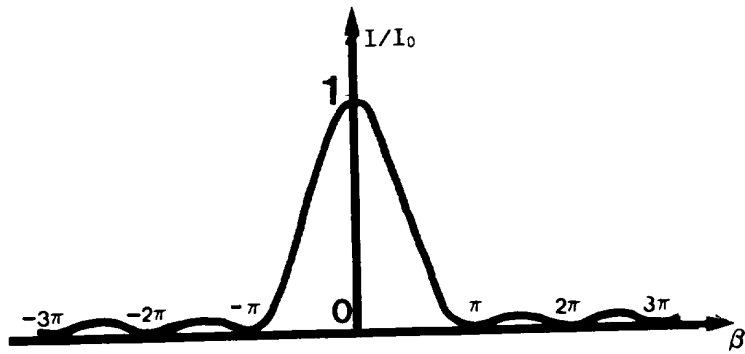


Fig. 3. Fraunhofer diffraction pattern of single slit

다음으로 이중 slit에 의한 회절 현상을 살펴보기 위해서 각기 폭 b 를 가지고 거리 h 로 떨어져 있는 Fig. 5와 같은 이중 slit을 생각하면,

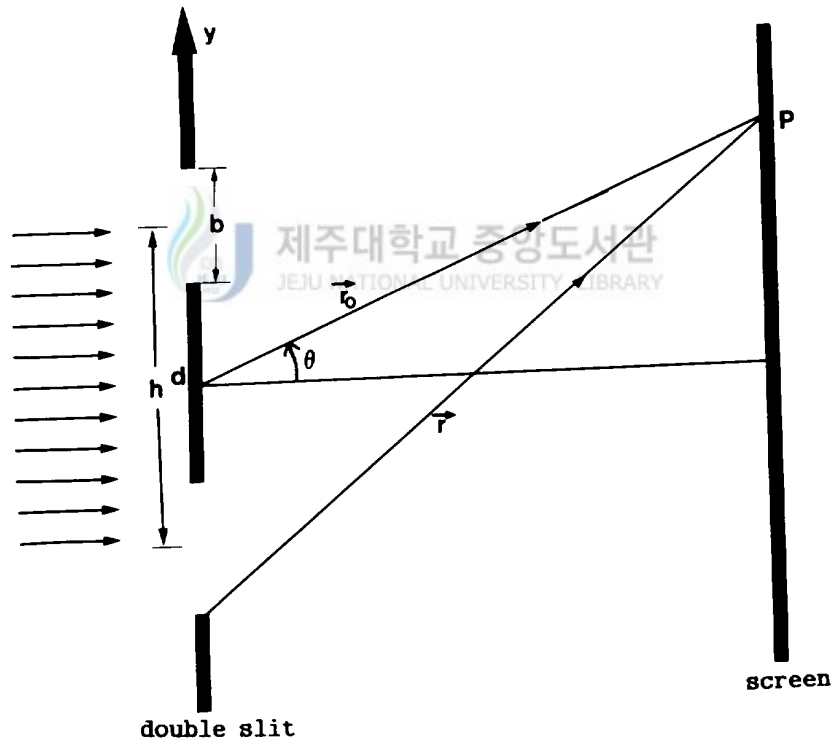


Fig. 5. Double slit aperture

(2)식에서 단일 slit에서 계산과 동일하고 적분 구간만 다르게 되므로, P점에서 파동함수 U_p 는

$$\begin{aligned}
 U_p &= C \iint e^{ikr} dA = C \int_{\Lambda} e^{ik(r, +y \sin \theta)} dy = C' \int_{\Lambda} e^{iky \sin \theta} dy \\
 &= C' \left\{ \int_{-(h/2+b/2)}^{-(h/2-b/2)} e^{iky \sin \theta} dy + \int_{(h/2-b/2)}^{(h/2+b/2)} e^{iky \sin \theta} dy \right\} \\
 &= 2b e^{i\beta} e^{i\gamma} (\sin \beta / \beta) (\cos \gamma) \dots \dots \dots (5)
 \end{aligned}$$

로 된다(Fowles, 1975). 여기서 $\beta = \frac{1}{2}kbsin \theta$, $\gamma = \frac{1}{2}khsin \theta$ 이다.

따라서 이중 slit에 의한 방사 강도 분포 함수는

$$I = |U_p|^2 = I_0 (\sin \beta / \beta)^2 (\cos^2 \gamma) \dots \dots \dots (6)$$

이 된다. Fig. 5는 이중 slit에 의한 회절 모양이다. 여기서 단일 slit에 의한 회절 방사 강도 $(\sin \beta / \beta)^2$ 에 $(\cos^2 \gamma)$ 을 곱한 함수의 형태로 무늬 모양은 $(\cos^2 \gamma)$ 에 의해 간섭무늬를 형성하여 $(\sin \beta / \beta)^2$ 의 간섭무늬들의 포락선을 형성함을 볼 수 있다. 그리고 (6)식에서 $\gamma / \beta = h/b$ 이므로 이중 slit의 폭 b와 slit 간의 간격 h의 비에 따라 회절 무늬의 형태인 간섭무늬와 포락선이 다르게 나타난다.

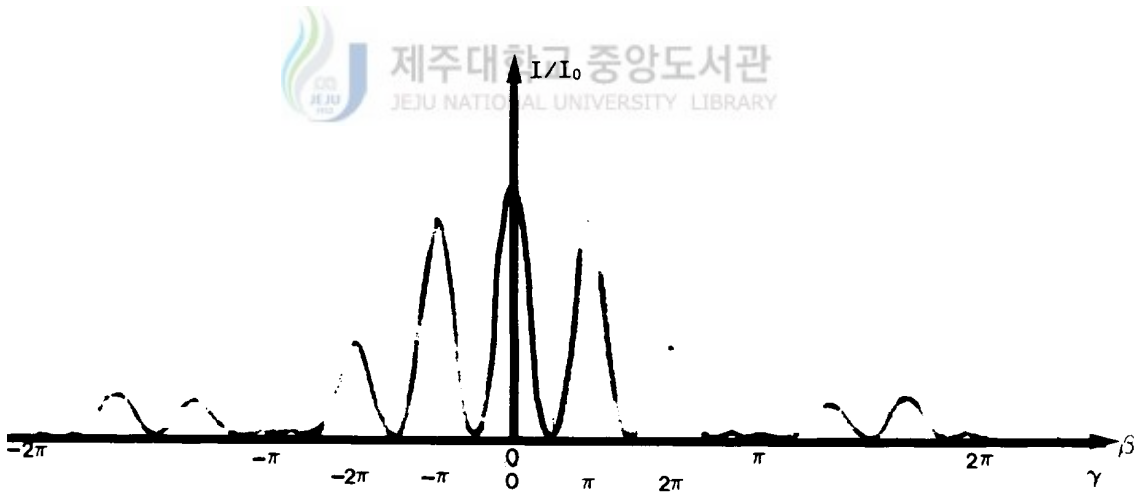


Fig. 5. Fraunhofer diffraction pattern of a double-slit aperture

2. 다중 slit에 의한 회절

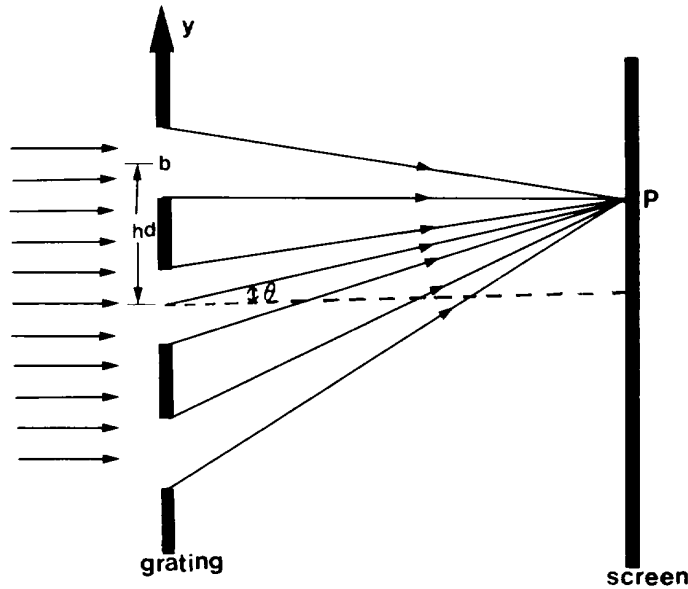


Fig. 6. Multiple-slit aperture or diffraction grating

Fig. 6은 폭 b 와 간격 h 를 가진 동일한 평행 slit이 N 개로 구성된 다중 slit의 경우를 나타낸다. 회절된 파동함수의 형태는 (2)식에서 적분 구간을 달리하면 계산할 수 있으므로

$$\begin{aligned}
 U_p &= C \iint e^{ikr} dA = C \int_A e^{ik(r+y\sin\theta)} dy = C' \int_A e^{iky\sin\theta} dy \\
 &= C' \left\{ \int_0^b e^{iky\sin\theta} dy + \int_b^{b+h} e^{iky\sin\theta} dy + \dots + \int_{(N-1)h}^{(N-1)h+b} e^{iky\sin\theta} dy \right\} \\
 &= be^{i\alpha} e^{i(N-1)\gamma} (\sin\beta/\beta) (\sin N\gamma/N\sin\gamma) \dots \dots \dots (7)
 \end{aligned}$$

으로 된다(Fowles, 1975). 여기서 $\beta = \frac{1}{2}kbsin\theta$, $\gamma = \frac{1}{2}khsin\theta$ 이다.

따라서 회절격자에 의한 회절 방사강도 분포 함수

$$I = |U_p|^2 = I_0 (\sin\beta/\beta)^2 (\sin N\gamma/N\sin\gamma)^2 \dots \dots \dots (8)$$

로 주어지며, $(\sin\beta/\beta)^2$ 의 포락선 내에 $(\sin N\gamma/N\sin\gamma)^2$ 에 의해 주요 극대들이 나타난다.

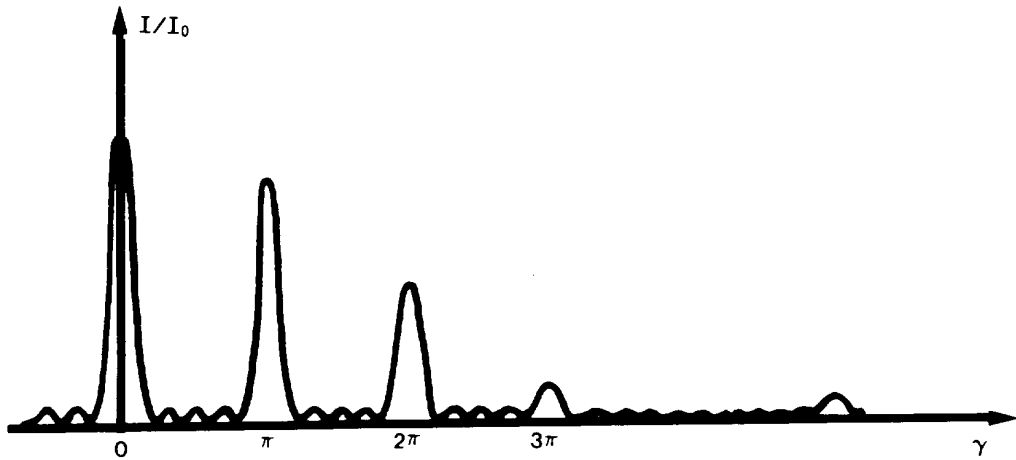


Fig. 7. Fraunhofer diffraction pattern of a multiple-slit aperture

포락선의 주요 극대치들은 $\gamma = 0, \pm\pi, \pm2\pi, \dots = n\pi$ (n 은 정수)에 있게 되므로

$$h \sin \theta = n \lambda \quad \dots \dots \dots (9)$$

인 관계식을 얻을 수 있다. 이 식은 파장과 회절각 사이의 관계를 맺어주는 격자 공식이고 n 을 회절의 차수라 한다. 여기서 λ 는 입사광의 파장이다. Fig.6에서 slit과 screen 사이의 거리를 x , 1차 주요 극대치간의 거리를 y 라 두고, 각거리가 작을 경우 즉, $\sin \theta \cong \theta = y/x$ 인 근사를 이용하면

$$h = x \lambda / y \quad \dots \dots \dots (10)$$

인 관계식을 얻을 수 있다.

따라서 회절무늬의 주요 극대치간의 거리 y 를 구하면 slit의 간격(h)을 구할 수 있는 관계식이 얻어진다.

3. 입사빛이 slit에 경사입사 되는 경우의 회절 형태

일반적으로 회절 실험은 입사광은 slit에 수직하게 입사시킨다. 그런데 slit에 입사되는 빛을 slit과 경사 입사되는 경우의 회절무늬 형태는 수직 입사 되었을때와 어떠한 변화를 보이는지에 대해서 알아보기 위해 Fig.8을 생각하면, Fig. 8-a)는 laser beam은 x축을 따라 입사되고 slit은 y축에 평행하게 y-z 평면에 놓여있는 경우로 회절 무늬 형태는 Z축에 위치한다. 회절 무늬는 screen의 중앙에 위치한다. Fig. 8-b)는 입사광과 slit은 수직이나 slit은 y축에 대해 θ 만큼 회전한 경우인데, 회절 무늬는 Fig. 8-a)와 같은 형태가 된다. Fig. 8-c)는 입사광이 x축을 따라 입사되고 slit은 z축에 대해 θ 만큼 회전된 경우인데 이 경우는 회절 무늬가 원의 호 형태로 screen(Y-Z 평면)에 나타난다. 격자가 회전됨에 따라 회절 무늬는 중심에 최대가 존재하고 경사각에 따라 원의 반경이 변화됨을 Phadke 등이 발표한 바 있다(Phadke 와 Allen, 1987).

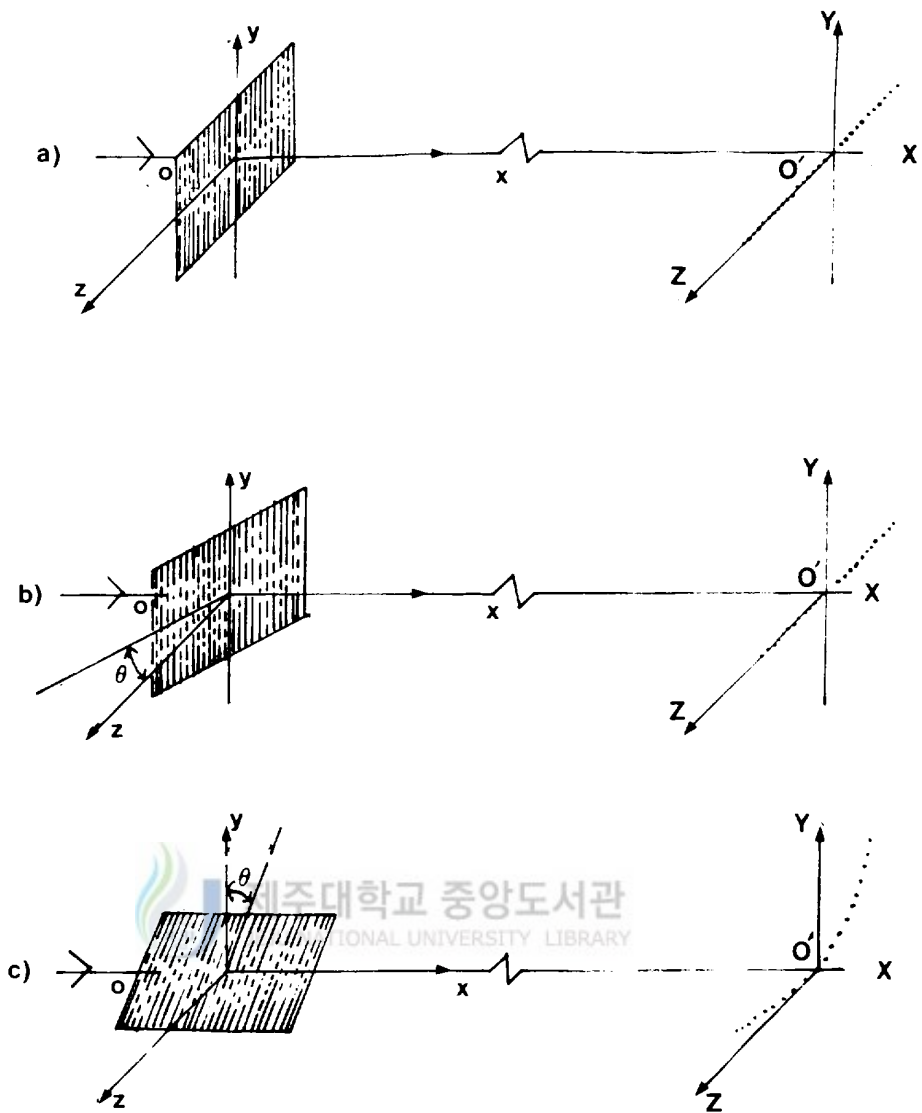


Fig. 8. a) The geometry of a normal incidence diffraction grating setup
 b) The geometry of a nonzero angle of incidence. The ruling are perpendicular to the incident rays.
 c) The geometry of the diffraction grating setup where the rulings are no more perpendicular to the incident rays. The locus of the diffraction maxima is along a curved path.
 (Phadke & Allen, 1986)

입사광과 slit의 각도를 변화시킬 때 즉, slit을 y축으로 부터 일정한 각(θ)을 회전시켰을 때 screen에 나타나는 회절 무늬를 관찰하기 위해 길이 $2L$ 인 좁은 단일 slit을 간주하자. Fig. 9는 z방향에서 폭을 갖는 slit이 θ 만큼 y축으로 부터 회전된 경우이다. screen은 원점으로 부터 D 거리에 있고 screen에서 점 $P(D, Y', Z')$ 는 회절무늬 위의 점이다. 만약 laser가 x축 방향으로 입사되면 A와 B의 두 끝점은 원점에 대해 상대적으로 $\pm L \sin \theta$ 의 경로차가 있게 된다.

따라서 경로 AP와 BP는 같게 되기 위해선

$$AP + L \sin \theta = BP - L \sin \theta$$

이 되어야 한다. 따라서

$$\begin{aligned} [(Y' - L \cos \theta)^2 + Z'^2 + (D - L \sin \theta)^2]^{1/2} + 2L \sin \theta \\ = [(Y' + L \cos \theta)^2 + Z'^2 + (D + L \sin \theta)^2]^{1/2} \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

인 관계식을 얻을 수 있는데 $D \gg L$ 이므로

$$[\cot^2 \theta - 1]Y'^2 + 2Y'D \cot \theta - Z'^2 = 0 \dots \dots \dots (12)$$

으로 표현된다. 만약 $\theta < \pi/4$ 인 경우는 $\cot \theta > 1$ 이 되어 (12)식은 쌍곡선을 나타내고 $\theta = \pi/4$ 인 경우는 $\cot \theta = 1$ 이 되어 (12)식은 포물선을 나타낸다. 그리고 $\theta > \pi/4$ 인 경우는 $\cot \theta < 1$ 이 되어 (12)식은 다음과 같은 식

$$\left(Y' - \frac{D \cot \theta}{1 - \cot^2 \theta} \right)^2 + \frac{Z'^2}{1 - \cot^2 \theta} = \left(\frac{D \cot \theta}{1 - \cot^2 \theta} \right)^2 \dots \dots \dots (13)$$

으로 표현된다(Phadke와 Allen, 1987). θ 가 90° 에 접근함에 따라 $1 - \cot^2 \theta \cong 1$ 이 되어 식(13)은 원의 방정식이 되고 원의 반경은

$$R = D \cot \theta \dots \dots \dots (14)$$

로 주어진다.

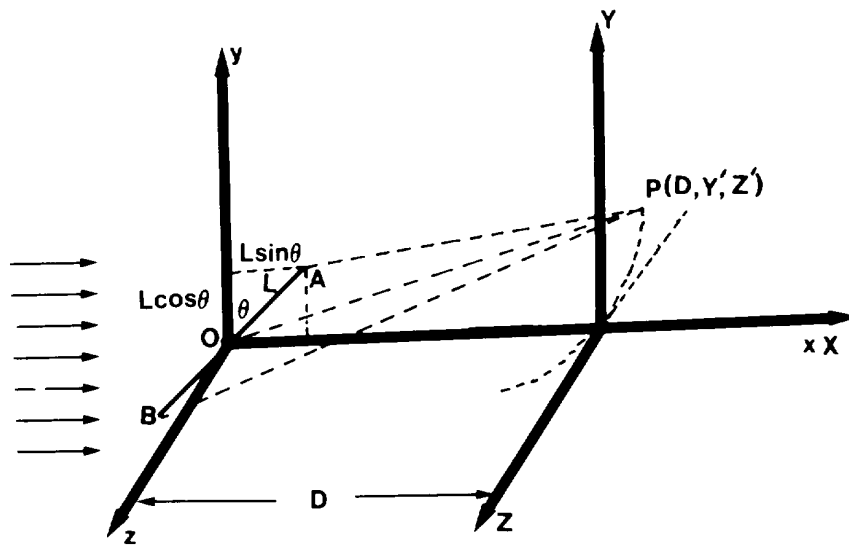


Fig. 9. The coordinate system used in the calculation of the circle pattern

4. 삼각형 모양에 의한 회절

제주대학교 중앙도서관
 Fig. 10과 같이 단색광파가 x 방향으로 미소 구멍을 통하여 screen에 회절되는 경우를 생각해 보자. 임의의 점 P에서 파동함수를 구하기 위해 미소 면적 dS에 대해 Huygens-Fresnel 적분공식을 적용하면

$$U_p = U_0 e^{i(\omega t - kr)/R} \iint e^{ik(Yy + Zz)/R} dS \dots\dots\dots (15)$$

로 주어진다(Hecht 와 Zajac, 1973)

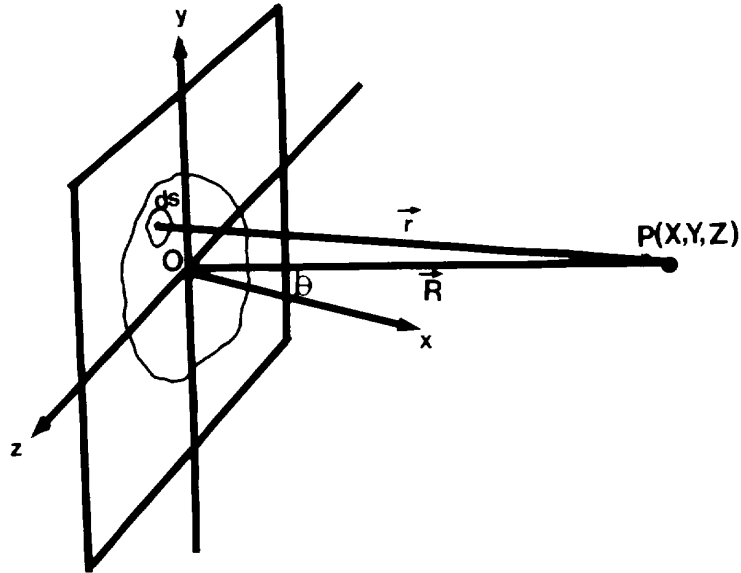


Fig. 10. Fraunhofer diffraction from an aperture

이제 Fig. 11과 같이 한변의 길이가 a 인 정삼각형에서 AD축을 y 축으로 하고 삼각형의 무게중심을 원점(o)으로 택한 좌표계에서 정삼각형 구멍에 의한 회절 파동함수를 계산하면

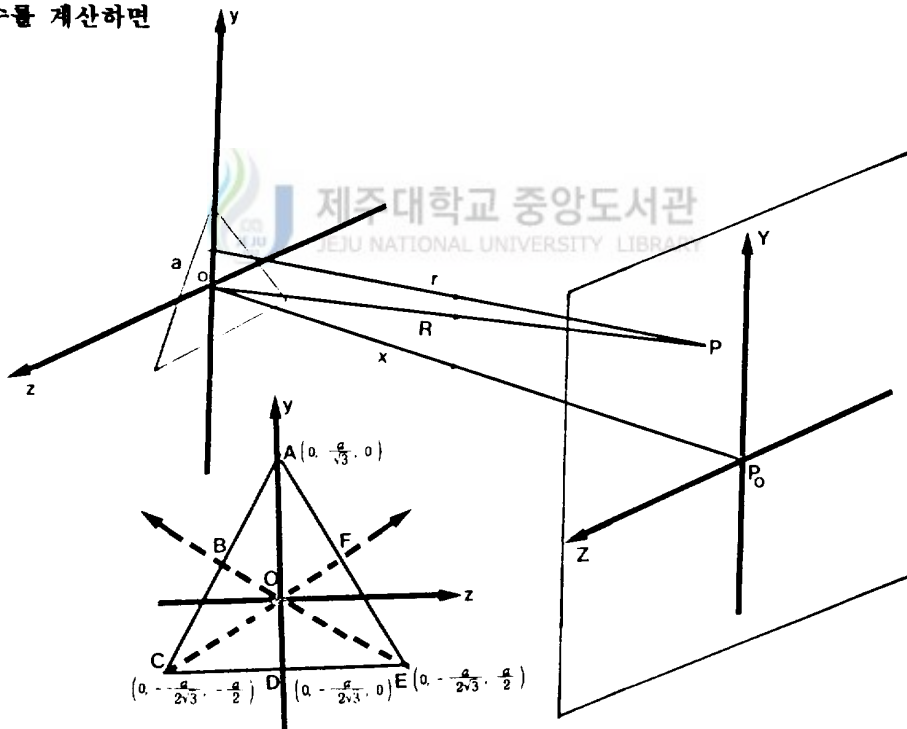


Fig. 11. A regular triangular aperture

$$\begin{aligned}
U_p &= U_0 e^{i(\omega t - kr)/R} \iint e^{ik(Yy + Zz)/R} dA \\
&= U_0 e^{i(\omega t - kr)/R} \int_{-a/2\sqrt{3}}^{a/\sqrt{3}} e^{ikYy/R} dy + \int_{y/\sqrt{3}-a/3}^{-y/\sqrt{3}+a/3} e^{ikZz/R} dz \\
&= C \frac{\sqrt{3}a}{2i\beta} \left[e^{i\beta a/3} e^{iA/2} \frac{\sin(3A/2)}{3A/2} - e^{-i\beta a/3} e^{iB/2} \frac{\sin(3B/2)}{3B/2} \right] \dots (16)
\end{aligned}$$

와 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서 $C = U_0 e^{i(\omega t - kr)/R}$, $A = a/2\sqrt{3}(\alpha - \beta/\sqrt{3})$, $B = a/2\sqrt{3}(\alpha + \beta/\sqrt{3})$, $\alpha = kY/R$, $\beta = kZ/R$ 이다.

따라서 회절 방사장도 함수는

$$\begin{aligned}
I &= |U_p|^2 = \frac{I_0}{\beta^2} \left[\frac{\{\sin(3A/2)\}^2}{(3A/2)^2} + \frac{\{\sin(3B/2)\}^2}{(3B/2)^2} - \right. \\
&\quad \left. 2 \frac{\{\sin(3A/2)\}\{\sin(3B/2)\}}{9AB/4} \cos\left(2/3\beta a + \frac{A}{2} - \frac{B}{2}\right) \right] \\
I_{I_0} &= \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{\{\sin(3A/2)\}^2}{(3A/2)^2} + \frac{\{\sin(3B/2)\}^2}{(3B/2)^2} - \right. \\
&\quad \left. 2 \frac{\{\sin(3A/2)\}\{\sin(3B/2)\}}{9AB/4} \cos\left(2/3\beta a + \frac{A}{2} - \frac{B}{2}\right) \right] \dots \dots (17)
\end{aligned}$$

와 같이 계산 되었다.

Ⅲ. 실험 및 논의

1. Aperture의 제작

slit을 제작하기 위해 켈트지에 slit형, 여러가지 모양(△, □, T, W)을 그려서 촬영 하였다. 먼저 촬영한 필름이 축소되는 비율을 알아보기 위해 물체에서 1m, 2m, 2.5m, 3m, 3.5m, 4m의 거리에서 촬영하여 현상된 필름을 분석하였으며, 그 결과는 1m에서 촬영한 것은 실제 크기의 1/33배, 2m에서 촬영한 것은 1/50배, 2.5m에서 촬영한 것은 1/62.5배, 3m에서 촬영한 것은 1/76.9배, 3.5m에서 촬영한 것은 1/83.3배, 4m에서 촬영한 것은 1/100배로 축소 되었다. 따라서 본 실험에서는 grating, 삼각형 모양 그리고 여러가지 모양의 구멍을 2m에서 촬영하고 현상한 필름을 slit으로 사용하였다. 이때 사용한 사진 필름은 Konica 흑백필름, ASA 100인 필름으로 카메라의 노출 상태는 Auto로 하여 촬영하였다.

2. 실험 및 분석

2-1) 이중 slit에 의한 회절무늬

slit의 폭(b)와 간격(d)을 변화시키면서 회절 방사각도의 분포 변화를 보기위해서 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. 이중 slit에서 회절 광선의 방사 각도의 함수는 식 (6)에서 $I/I_0 = (\sin \beta / \beta)^2 \cos^2 \gamma$ 이며, 여기서 $\beta = \frac{1}{2}kbsin \theta$, $\gamma = \frac{1}{2}khsin \theta$ 이다. 따라서 $\gamma/\beta = h/b$ 이다. 여기서 h는 slit간의 간격인데 Fig.4에서 $h = b + d$ 라 두면 (d는 slit을 분리하는 불투명한 부분)

$$\frac{\gamma}{\beta} = \frac{b+d}{b} = 1 + \frac{d}{b} = 1 + n \dots\dots\dots (18)$$

로 표현된다. 본 연구에서는 $n = d/b$ 의 변화에 의한 회절 격자의 회절 형태를 컴퓨터 시뮬레이션 하였다.

첫째로 $d \geq b$ 인 경우에 d의 값을 b의 정수배로 변화시키면서, 즉 $d = b$ 에서 부터 $d = 9b$ 까지 변화하면서 ($n=1 \rightarrow 9$) 회절격자의 분포 함수를 그린 것이 Fig.

12-a)이다. n 값이 증가함에 따라 포락선 내의 주요 극대치가 증가하였으며, 주요 극대치의 수는 $2n+1$ 임을 알 수 있었다.

둘째로 $d \geq b$ 인 경우에 b 의 값을 d 의 일정한 비의 값으로 변화하였는데 즉 $b = d$ 에서 부터 $b = 0.1d$ 까지 변화하면서 ($1/n = 1 \rightarrow 0.1$) 회절 분포의 형태를 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. 그 결과는 Fig. 12-b)에 나타냈는데 $1/n$ 가 감소할수록 포락선과 간섭 무늬 형태가 변함을 볼 수 있고 n 가 0.1인 경우는 1차 회절 무늬의 세기가 거의 0차 회절 무늬 세기와 비슷한 값이 되는 것을 볼 수 있었다.

셋째로 $d \leq b$ 인 경우 d 를 b 의 일정한 비율의 값으로, 즉 $d = b$ 에서 $d = 0.1b$ 까지 변화하면서 ($n = 1 \rightarrow 0.1$) 회절 분포의 형태를 나타낸 것이 Fig. 12-c)이며 포락선과 간섭 무늬의 형태는 변하지 않고 n 의 값이 변함에 따라 1차 회절 무늬의 세기가 점차 감소하여 n 가 0.1인 경우는 거의 단일 slit의 형태가 된다.

넷째로 $d \leq b$ 인 경우 b 를 d 의 일정한 비율의 값으로 변화시키면서, 즉 $b = d$ 에서 부터 $b = 10d$ 까지 변화하면서 ($1/n = 1 \rightarrow 10$) 회절 분포 형태를 나타낸 것이 Fig. 12-d)이며 포락선과 간섭무늬의 형태가 전부 변하고 $1/n$ 가 증가할수록 회절 무늬의 형태가 사라져감을 볼 수 있었다.



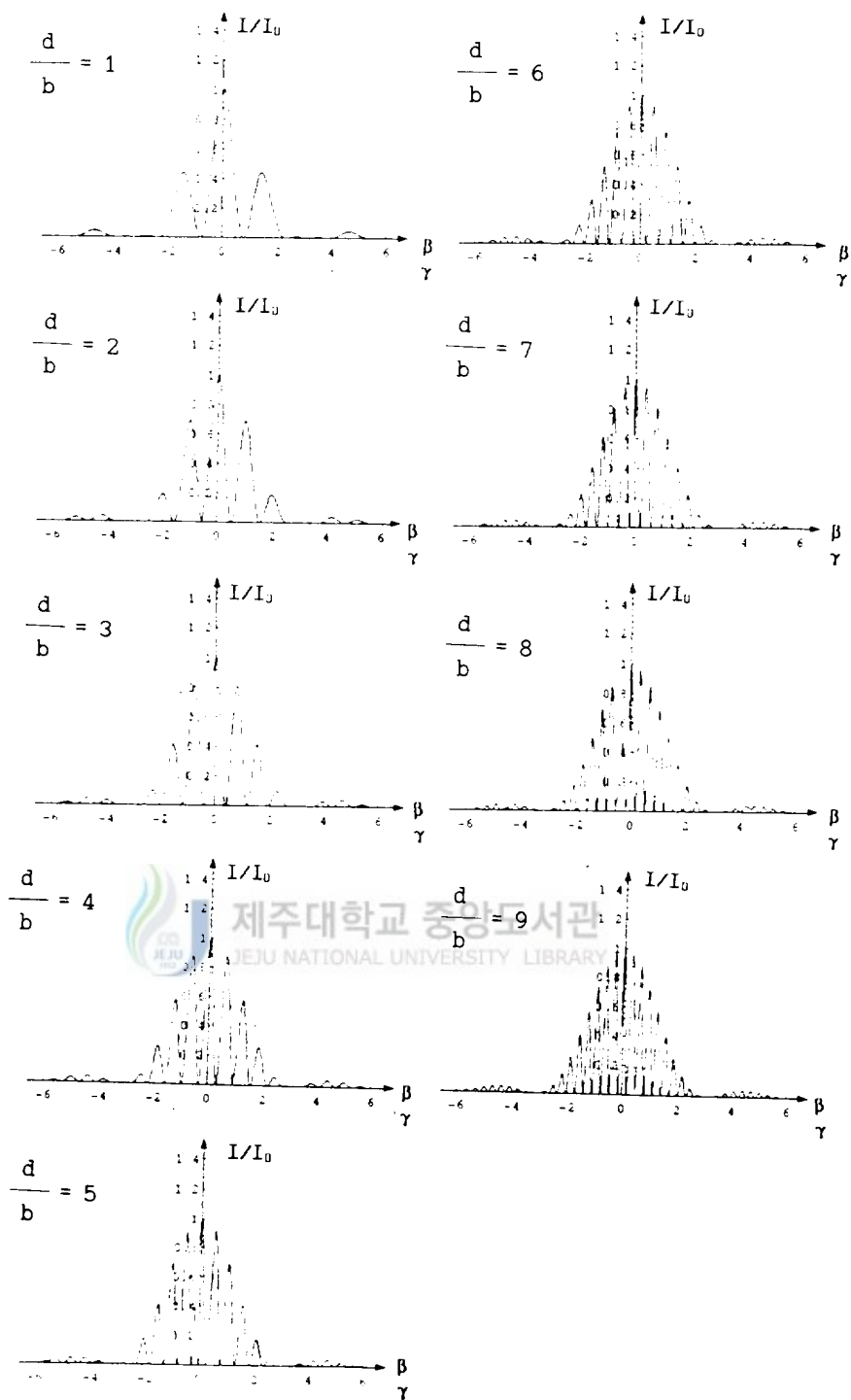


Fig. 12-a) The Fraunhofer diffraction pattern of a double slit by a computer simulation ($d \geq b$, b : fix, d : variation).

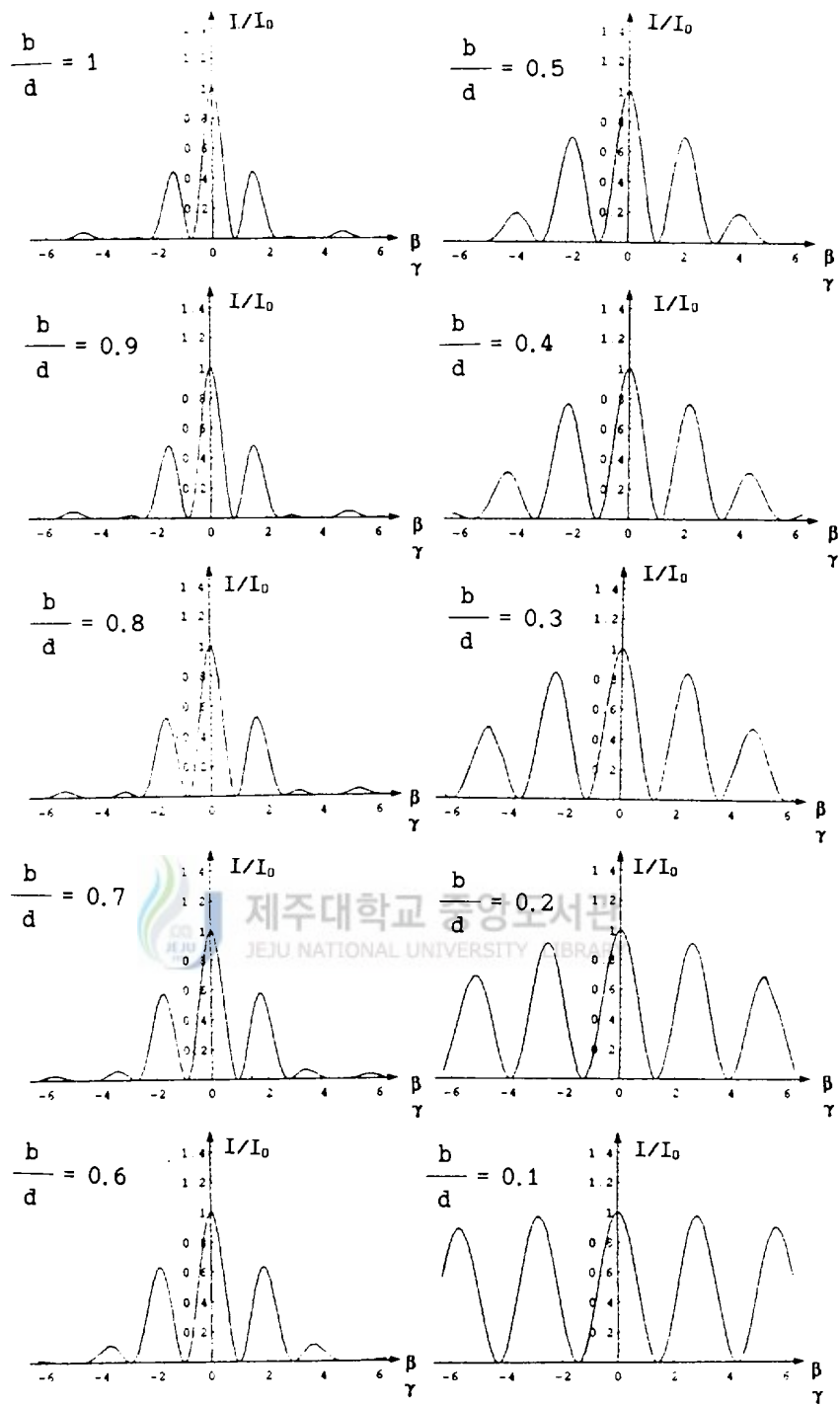


Fig. 12-b) The Fraunhofer diffraction pattern of a double slit by a computer simulation ($d \geq b$, b : variation, d : fix).

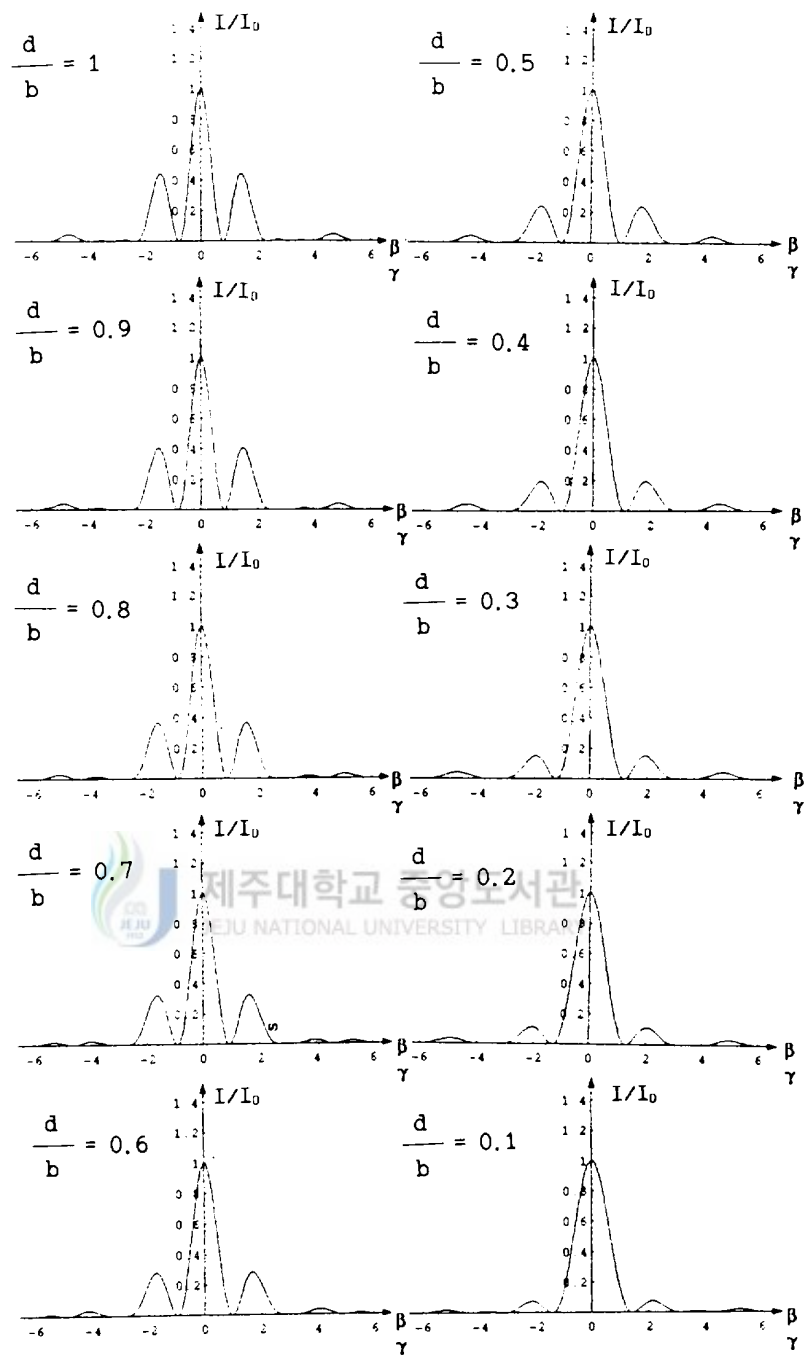


Fig. 12-c) The Fraunhofer diffraction pattern of a double slit by a computer simulation ($d \leq b$, b : fix, d : variation).

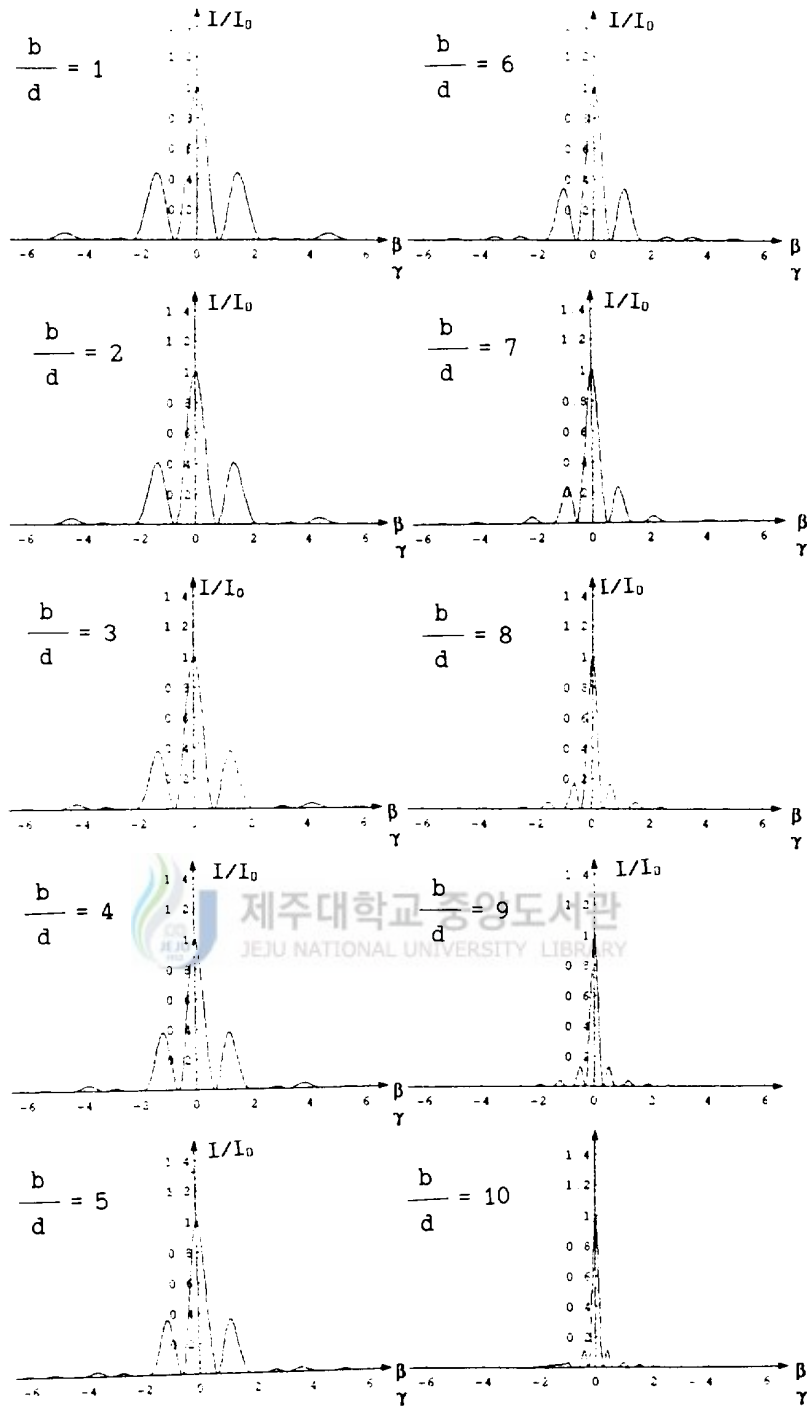


Fig. 12-d) The Fraunhofer diffraction pattern of a double slit by a computer simulation ($d \leq b$, b :variation, d :fix) .

2-2) grating에 의한 회절

slit의 폭과 간격을 변화시킨 grating에 대한 회절무늬의 주요 극대치 사이의 거리를 측정하기 위해 Fig. 13과 같은 장치를 하였다.

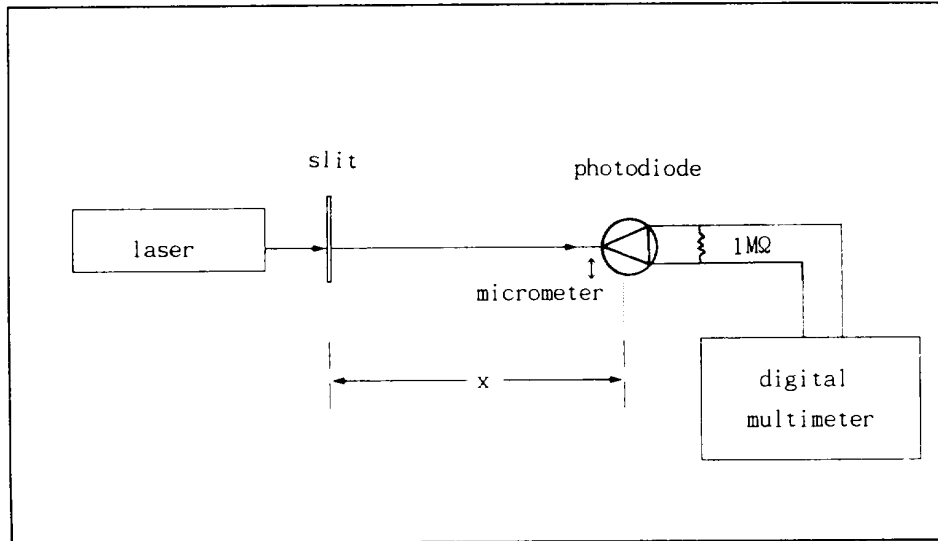


Fig. 13. Block diagram to observe the distance of maximum for the diffraction pattern.

실험에 사용한 광원은 He-Ne laser ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$)를 사용하였고, 회절무늬 내의 극대치 사이의 거리 및 강도를 측정하기 위해 마이크로미터가 부착된 photodiode와 digitalmultimeter를 이용하였다. 마이크로미터를 0.1mm 간격으로 변화시키면서 photodiode의 양단에 저항 1M Ω 을 부착하여 양단간의 전압을 측정하므로써 회절 무늬의 세기를 측정하였다. 측정 결과는 Fig. 14와 같고 나머지 slit에 대한 결과도 비슷한 형태로 나타났으며 이론에서 보여준 형태(Fig. 7)와 일치함을 볼 수 있었다. 그리고 Fig. 15는 회절 무늬 모양을 사진 촬영한 그림이다.

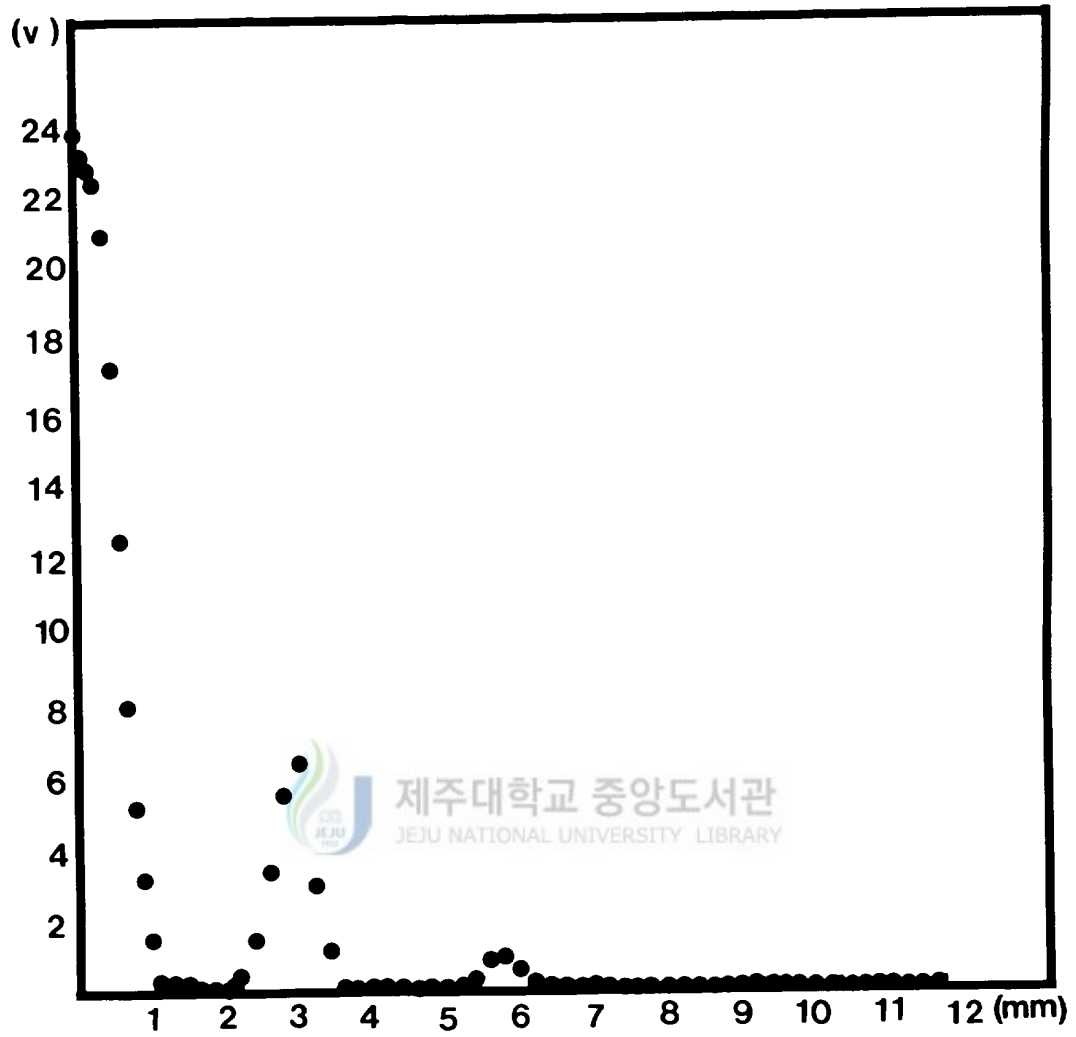


Fig. 14. Intensity curve for grating diffraction pattern.

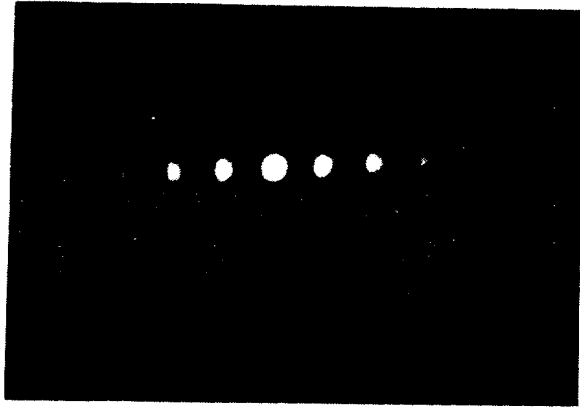


Fig. 15. Diffraction pattern for grating.

회절무늬의 강도 분포 세기 측정에서는 마이크로미터를 이동하면서 최대 극대치(I_0)와 제1극대치(I_1)이 나타나는 점의 위치 y 를 측정하였다. 측정된 y 값과 (10) 식 $h = x\lambda/y$ 를 이용하여 slit간의 간격(h_3)을 계산하였으며 실험결과와 비교한 것이 표1이다.

Table 1. Separation of slit and value of intensity at maxima

(h_1 : 원래 slit 간격, h_2 ; 제작한 slit 간격, h_3 ; 계산한 slit 간격
 I_0 ; 0차 극대치, I_1 ; 1차 극대치, y ; 무늬 사이 거리)

Slit No	h_1 (mm)	h_2 (mm)	I_0 (mV)	I_1 (mV)	y (mm)	h_3	$h_2 - h_3$
1	2.54	0.05	241.9	7.0	5.5	0.05	0
2	2.54	0.05	195.4	11.7	5.8	0.04	0.01
3	2.54	0.05	241.0	27.0	5.4	0.05	0
4	2.54	0.05	250.0	41.1	5.7	0.05	0
5	2.54	0.05	248.6	28.4	5.8	0.04	0.01
6	5.08	0.10	239.1	11.9	2.4	0.11	0.01
7	5.08	0.10	239.3	63.8	2.9	0.09	0.01
8	5.08	0.10	267.9	104.2	2.4	0.11	0.01
9	4.00	0.08	265.6	246.7	3.5	0.08	0
10	5.08	0.10	269.7	227.4	2.8	0.10	0

h_1 은 켈트지에 그린 slit 사이의 간격, h_2 는 제작한 slit 간격, h_3 는 (10)식에 의해 계산한 slit 간격, I_0 와 I_1 는 각각 0차 극대치와 1차 극대치이며 y 는 밝은 무늬 사이의 거리 즉 I_0 와 I_1 사이의 거리이고, x 는 slit과 photodiode 사이의 거리 (45.5cm)이다. 표에서 제작한 slit 간격의 값 h_2 와 (10)식에 의한 계산된 slit 간격의 값 h_3 가 잘 일치함을 볼 수 있었다.

2-3) 입사빛이 slit에 경사입사 되는 경우의 회절 형태

Laser beam의 입사방향과 slit 사이의 각도를 변화시키므로써 screen에 나타나는 회절무늬를 관찰하기 위해 Fig. 16과 같은 장치를 하였다.

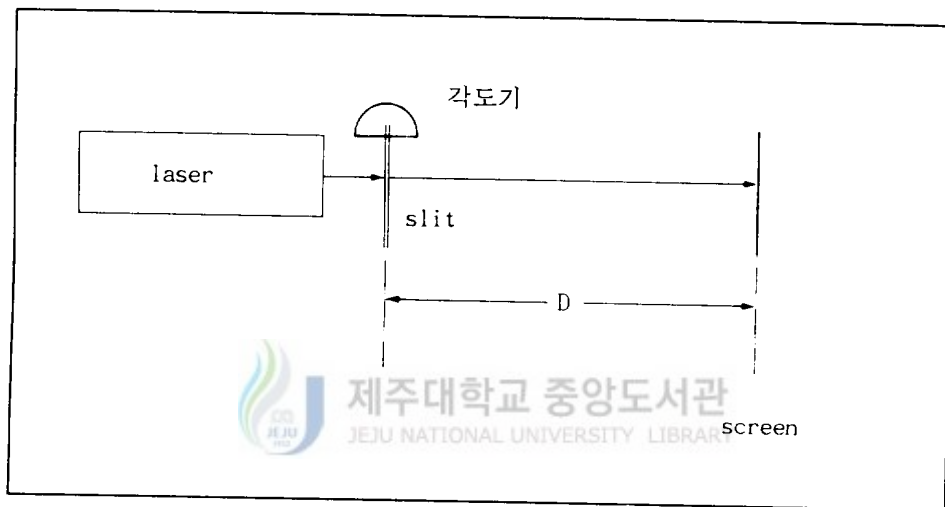
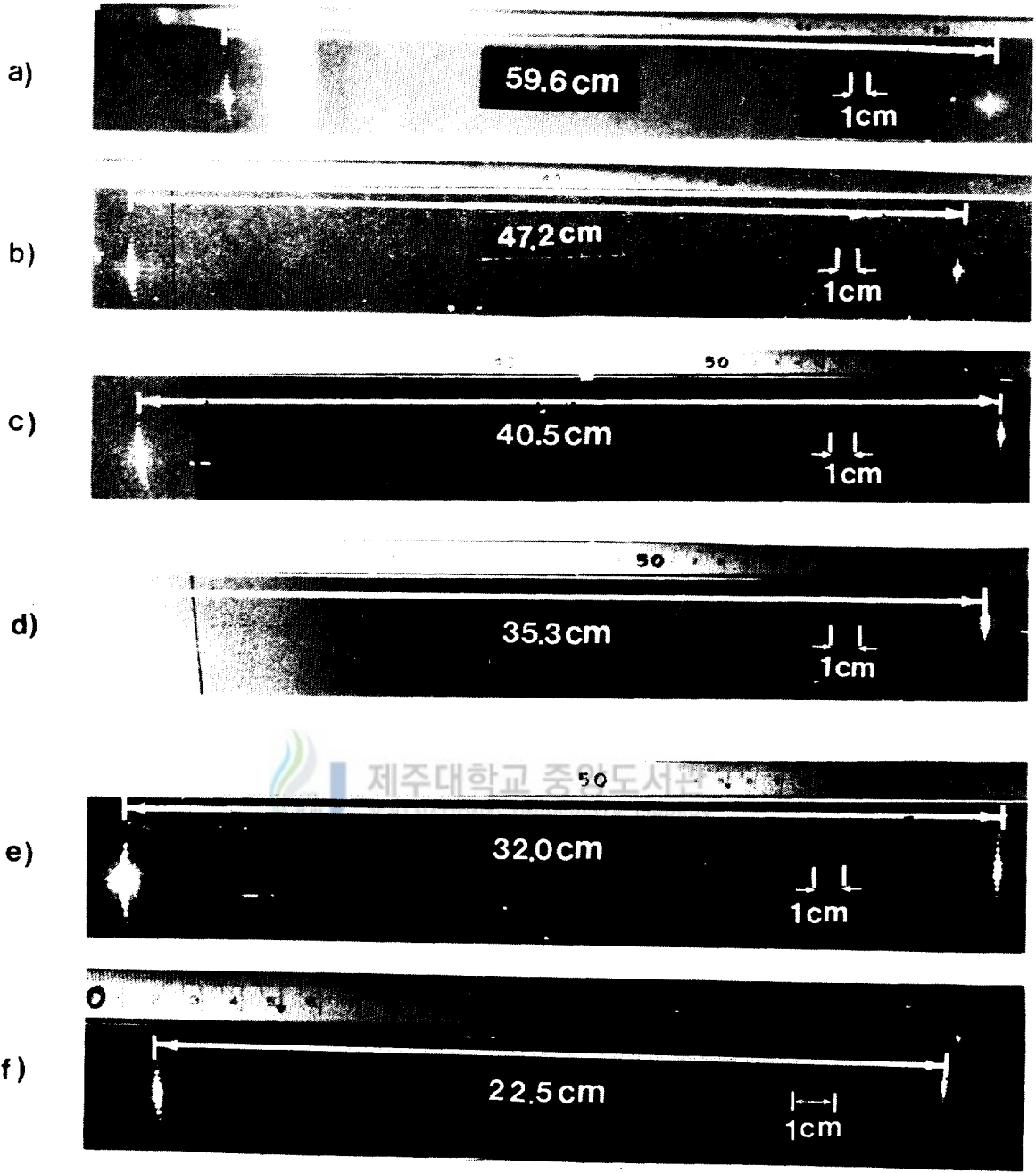


Fig. 16. Block diagram to observe a diffraction pattern for grating no perpendicular to the incident rays.

slit의 각도를 55° 에서 80° 까지 변화시키면서 나타나는 회절 무늬를 촬영한 사진이 그림 Fig. 17에 있다.



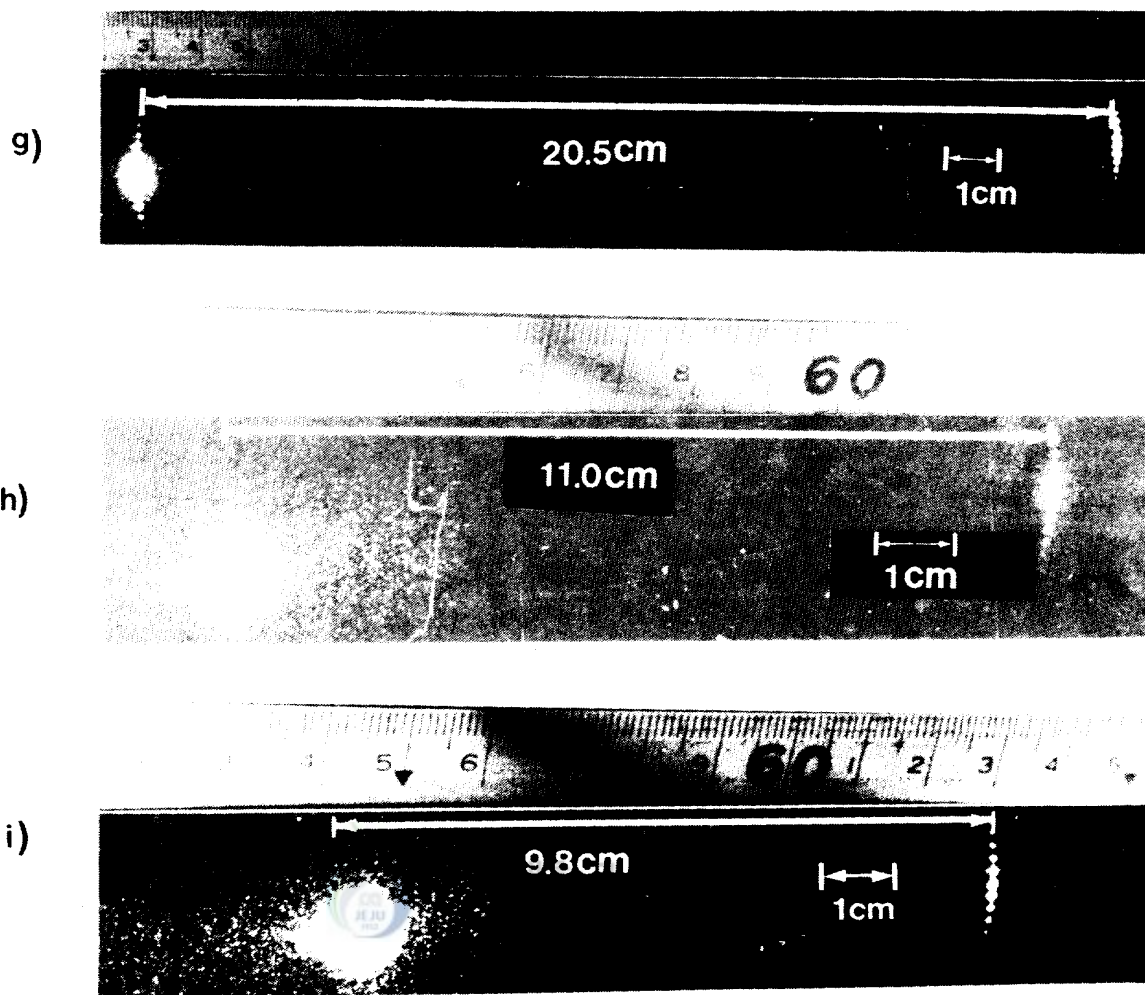


Fig. 17. Diffraction pattern for the variation of rotating angle(θ).

(a ; $\theta=55^\circ$, b ; $\theta=57^\circ$, c ; $\theta=60^\circ$, d ; $\theta=62^\circ$,
 e ; $\theta=65^\circ$, f ; $\theta=67^\circ$, g ; $\theta=70^\circ$, h ; $\theta=77^\circ$,
 i ; $\theta=80^\circ$)

뚜렷한 상을 얻기 위해 암실에서 실험을 하였으며 slit과 screen 사이의 거리는 $D = 30\text{cm}$ 를 유지하였다. Laser 빛이 수직 입사한 경우 회절 무늬는 Fig.16과 같이 회절무늬가 일직선상에 나타나고 있으나 slit과 입사광과의 회절격자 각의 경사각이 커질수록 회절무늬는 원호상에 있음을 확인할 수 있었다. 표2는 경사각 θ 에 따른 회절무늬를 촬영한 사진에서의 원의 반경(R_e)과 $R_t = D \cot \theta$ 에 의해 계산된 원의 반경을 비교하였다.

Table. 2. Radius of circle for the variation of incident angle(θ).

(R_t : theoretical value, R_e : experiment value)

θ ($^\circ$)	R_t (cm)	R_e (cm)	$ R_t - R_e $
55	21.0	29.8	8.8
57	19.5	23.6	4.1
60	17.3	20.3	3.0
62	15.9	17.6	1.7
65	13.9	16.0	2.1
67	12.7	11.3	1.4
70	10.9	10.3	0.6
77	6.9	5.5	1.4
80	5.2	4.9	0.3

경사각 θ 가 증가할수록 뚜렷한 원형태를 관찰할 수 있었고, 반경이 작아짐을 관찰할 수 있었다. 그리고 θ 가 증가할수록 오차가 적게 나타남을 볼 수 있는데 이는 이론에서 원의 공식을 구하기 위해 θ 가 90° 에 접근함에 따라 $1 - \cot^2 \theta \cong 1$ 로 가정했기 때문이라 볼 수 있다. Fig.18은 경사각에 따른 R_t 와 R_e 의 값을 비교한 그래프이다.

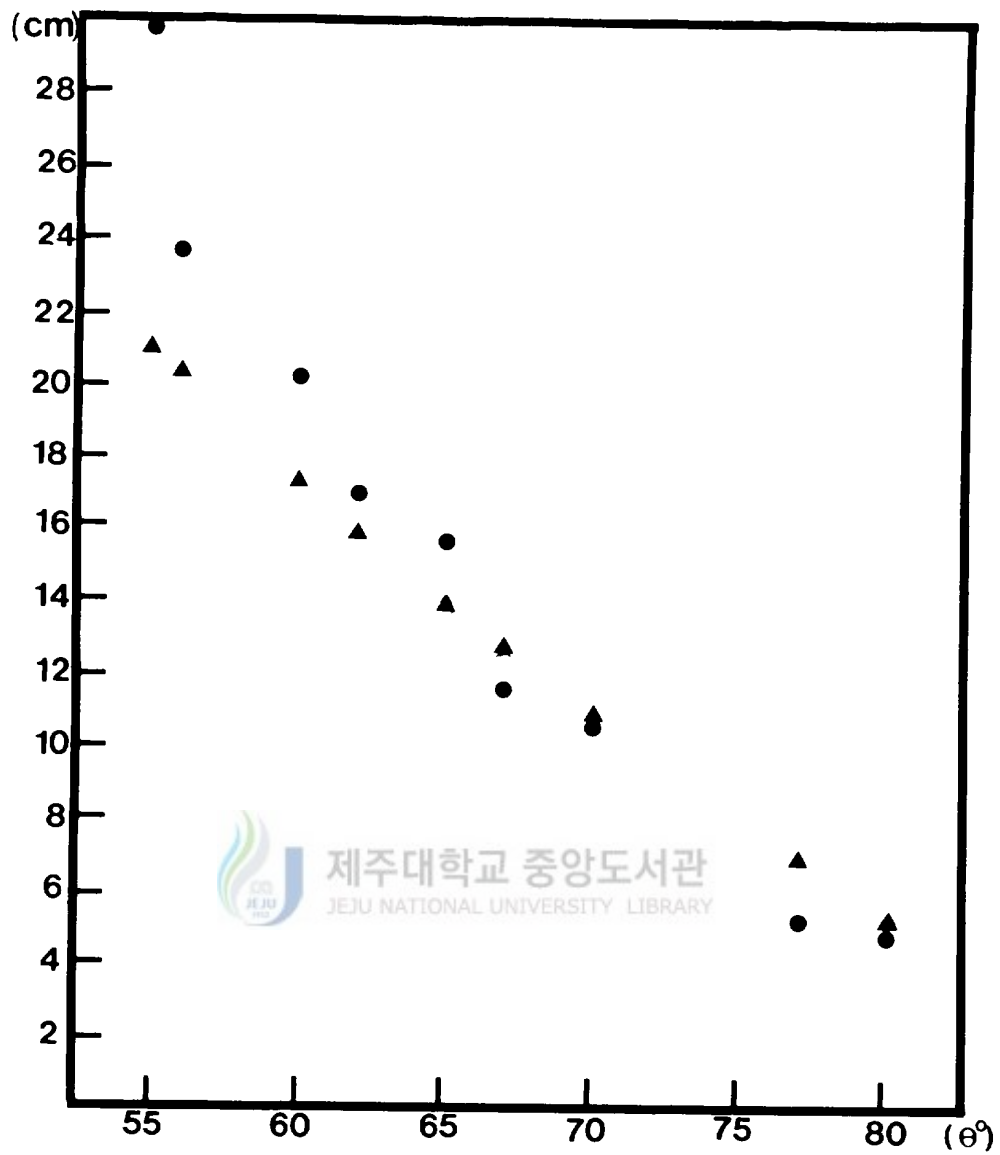


Fig. 18. Theoretical and experimental values of radius for variation of incident angle(θ) .
 (●: experimental value, ▲: theoretical value)

2-4) 삼각형 모양에 의한 회절

한변의 길이가 a인 정삼각형에 의한 회절 광선의 방사 강도 분포는 (17)식에서 계산하였다.

(17)식은 다시

$$I/I_0 = \frac{1}{\beta^2} \frac{1}{(3A/2)^2 (3B/2)^2} \left\{ \left(\frac{3B}{2} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{3A}{2} \right) + \left(\frac{3A}{2} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{3B}{2} \right) - \left(\frac{3A}{2} \right) \left(\frac{3B}{2} \right) \sin \left(\frac{3A}{2} \right) \sin \left(\frac{3B}{2} \right) \cos \left(3/2\beta a + \frac{A}{2} - \frac{B}{2} \right) \right\}. \quad (19)$$

로 표현할 수 있다. 따라서 (19)식은 $\beta = 0$, $A = 0$, $B = 0$ 인 점에서 극대값을 가질 수 있다. 즉 $\beta = 0$ 에서 $\beta = kZ/R$ 이므로 $Z=0$ 인 Y축이며, $A = 0$ 에서는 $A = a/2\sqrt{3}(\alpha - \beta/\sqrt{3}) = 0$ 에서 $Y = Z/\sqrt{3}$ 인 축 그리고 $B = 0$ 에서는 $B = a/2\sqrt{3}(\alpha + \beta/\sqrt{3}) = 0$ 에서 $Y = -Z/\sqrt{3}$ 인 축이다. 따라서 한변의 길이가 a인 정삼각형 구멍에 의한 회절 광선은 $Z = 0$ 인 Y축, $Y = \pm Z/\sqrt{3}$ 축에 3개의 대칭이 분포된다.(Fig.19)

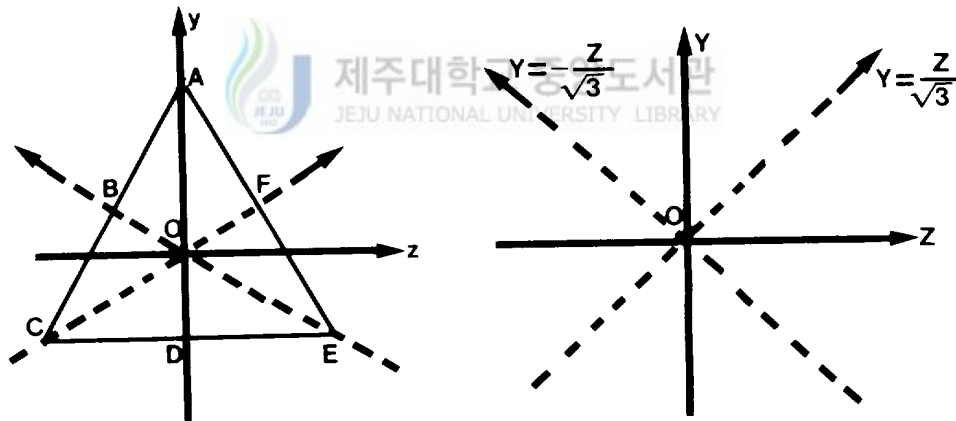


Fig. 19. The coordinate system used in calculated of the regularly triangular pattern

계산상에서 y축을 중심축으로 설정하였으므로 screen상에서 Y축에 의한 회절 모양만 분석하여 보면, Z = 0인 경우인 Y축에서는 A=B이며, L'hoptial의 정리를 이용하면 (19)식은 A = 0에 극대치가 있으며, $3A/2 = \pm\pi, \pm2\pi, \pm3\pi \dots$ 에서 0의 값이 된다. 즉 A=B이면 (19)식은

$$\begin{aligned}
 I/I_0 &= \frac{1}{\beta^2} \left[2 \left\{ \frac{\sin(3A/2)}{3A/2} \right\}^2 - 2 \left\{ \frac{\sin(3A/2)}{3A/2} \right\}^2 \cos(2/3\beta a) \right] \\
 &= \frac{1}{\beta^2} 2 \left\{ \frac{\sin(3A/2)}{3A/2} \right\}^2 \{ 1 - \cos(2/3\beta a) \} \\
 &= 4/9 a^2 \left\{ \frac{\sin(3A/2)}{3A/2} \right\}^2 \dots \dots \dots (20)
 \end{aligned}$$

로 표현되어 Y축에서는 상수항에 의한 차이는 있지만 회절 광선의 분포는 단 slit에 의한 분포와 같이 명암이 교차되는 형태가 될 것이 예상되며, (17)식을 컴퓨터 시뮬레이션하였는데, 그 결과는 Fig. 20이다.

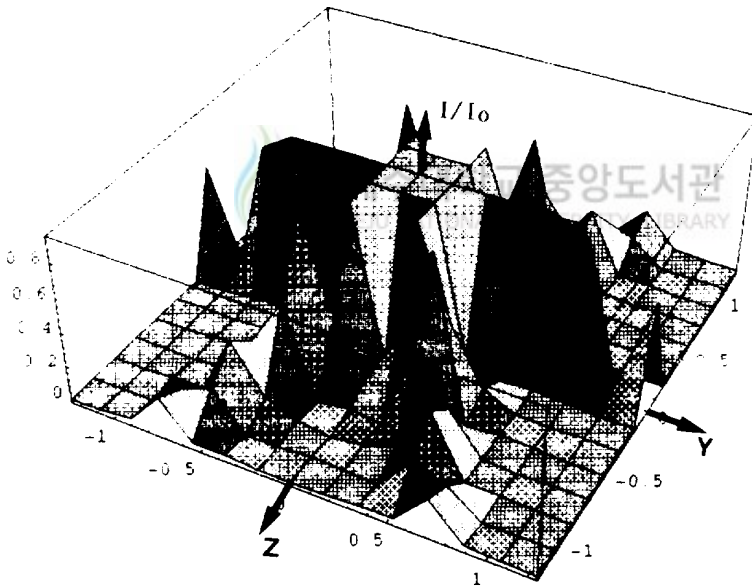


Fig. 20. The Fraunhofer diffraction pattern of the regularly triangular aperture by a computer simulation

본 연구에서는 실험적으로 정삼각형 모양에 의한 회절 분포를 보기 위해서 정삼각형 모양의 aperture을 제작하고 회절 무늬를 관측한 결과 screen상에 본 연구에서 예측한 것과 같이 3개의 대칭축에 명암이 교차되는 회절 모양을 얻을 수 있었다(Fig. 21). Hecht 등의 연구 결과에 의하면 정삼각형에 의한 회절 광선의 모양은 Fig. 22와 같다.

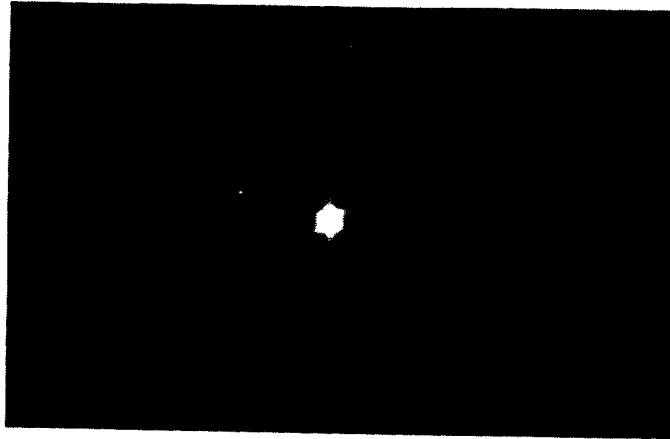


Fig. 21. Diffraction pattern for the regularly triangular(our experimental result)

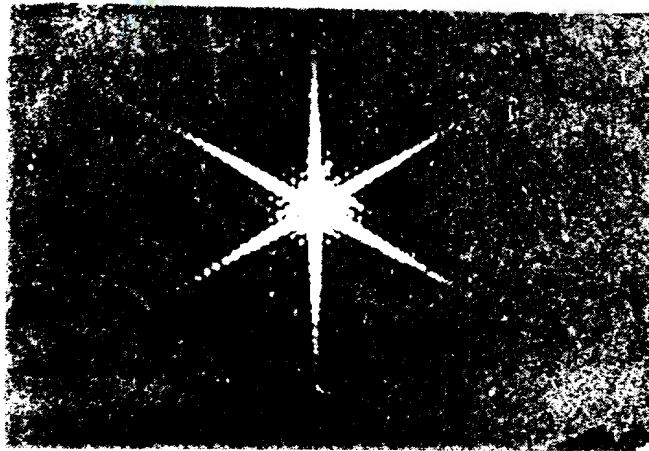


Fig. 22. Diffraction pattern for the regularly triangular (Hecht 와 Zajac, 1973)

2-5) 여러가지 모양에 의한 회절

여러가지 Aperture에 의한 회절 무늬 분포를 관측하기 위해서 여러가지 모양의 Aperture 즉 T, W, \triangle , \square 모양의 Aperture를 제작하고 회절 무늬를 관측하였다. 관측된 회절 무늬는 Fig. 22와 같으며 앞으로 이러한 Aperture의 회절 무늬 분포를 정량적으로 분석하여 보는 것이 바람직하다고 사료된다.

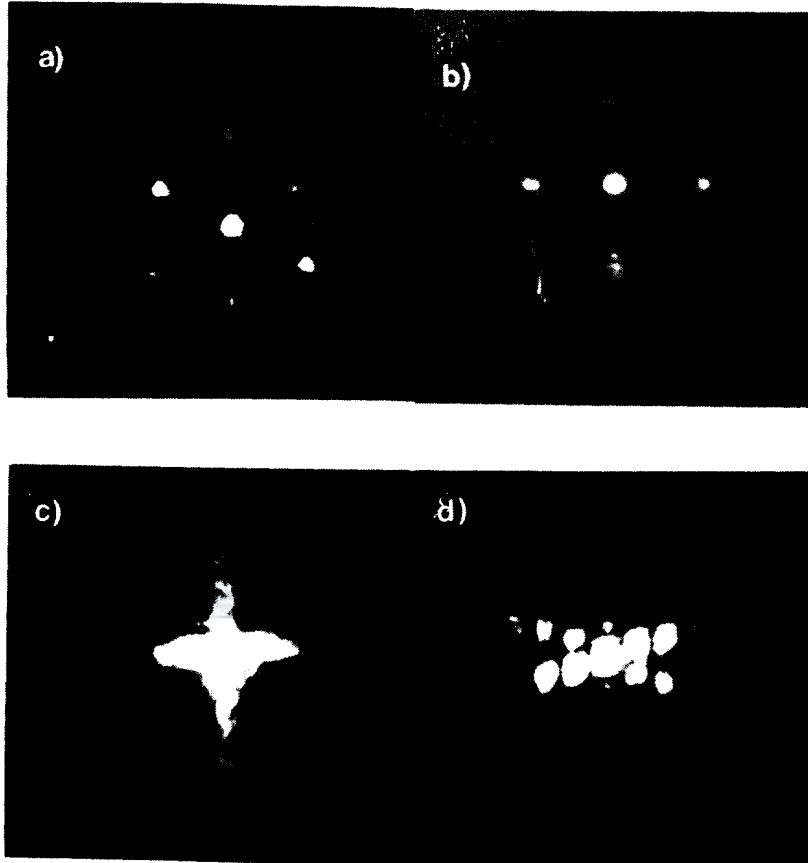


Fig. 22-a) Diffraction pattern for the \triangle
b) Diffraction pattern for the \square
c) Diffraction pattern for the T
d) Diffraction pattern for the W

IV. 결 론

이중 slit에 대하여 slit의 간격과 폭을 변화시키면서 회절무늬 형태를 컴퓨터 시뮬레이션 하였고, slit의 간격과 폭을 변화시킨 회절격자를 제작하고 이 회절격자에 의한 회절광의 세기와 회절광의 주요 극대치 간의 거리를 측정하여 제작한 slit의 간격을 구하여 이론적인 값과 비교하였다. 그리고 laser beam이 slit에 수직입사하지 않고 일정한 각으로 경사입사하는 경우의 회절무늬 변화를 관찰하며, 정삼각형 모양의 구멍에 대한 회절현상의 이론적 계산을 하여 기존의 실험들과 비교하였는데 그 결과는 다음과 같다.

1. 이중 slit에 의한 회절 무늬는 slit의 폭(b)와 간격(d)을 변화시키며 컴퓨터 시뮬레이션 하였으며 결과는

첫째, $d \geq b$ 인 경우에 d 의 값을 b 의 정수배로 변화시키면서, 즉 $d = b$ 에서 부터 $d = 9b$ 까지 변화시키면서 ($d/b=n=1 \rightarrow 9$) 관측한 회절 무늬의 모양은 n 가 증가할수록 간섭 무늬의 형태가 변하고 포락선의 모양은 변하지 않음을 볼 수 있으며, 1차 포락선내의 주요 극대의 갯수가 $2n+1$ 로 나타남을 볼 수 있었다.

둘째, $d \geq b$ 이면서 b 의 값을 d 의 일정한 비의 값으로 변화시키면서, 즉 $b = d$ 에서 부터 $b = 0.1d$ 까지 변화시키면서 ($b/d=1/n=1 \rightarrow 0.1$) 관측한 회절 무늬의 모양은 $1/n$ 가 감소할수록 포락선과 간섭 무늬 형태가 변함을 볼 수 있고 n 가 0.1인 경우는 1차 회절 무늬의 세기가 거의 0차 회절 무늬 세기와 비슷한 값이 되는 것을 볼 수 있었다.

셋째, $d \leq b$ 인 경우 d 를 b 의 일정한 비의 값으로 변화시키면서, 즉 $d = b$ 에서 부터 $d = 0.1b$ 까지 변화시키면서 ($d/b=n=1 \rightarrow 0.1$) 관측한 회절 무늬의 모양은 포락선과 간섭 무늬의 형태는 변하지 않고 n 의 값이 변함에 따라 1차 회절 무늬의 세기가 점차 감소하여 n 가 0.1인 경우는 거의 단일 slit의 형태가 되었다.



넷째, $d \leq b$ 이면서 b 를 d 의 일정한 비의 값으로 변화시키면서, 즉 $b = d$ 에서 부터 $b = 0.1d$ 까지 변화시키면서 ($b/d=1/n=1 \rightarrow 10$) 관측한 회절 무늬의 모

양은 포락선과 간섭무늬의 형태가 전부 변하고 $1/n$ 가 증가할수록, 즉 slit의 폭이 넓어짐에 따라 회절 무늬의 형태가 사라져감을 볼 수 있었다.

2. slit의 폭과 간격을 변화시킨 다중 slit의 회절 강도의 극대치간의 거리 y 를 측정하여 $h = x\lambda/y$ 에 의해 계산한 값은 실제 크기와 잘 일치함을 볼 수 있었다.

3. Laser beam에 grating이 경사지게 있을때 회절 무늬는 원호상에 있게 되며, 원의 반경은 $R = D\cot\theta$ 로 계산되는데 θ 값이 90° 로 접근함에 따라 실험 결과와 잘 일치하였다.

4. 한변의 길이가 a 인 정삼각형에 대한 회절 무늬는 Y 축, $Y = \pm Z/\sqrt{3}$ 축에 3개의 대칭이 분포된다. 그리고 각 축에서 회절 무늬는 단일 slit에서 처럼 명암이 교차되며 Y 축에서 회절 무늬의 주요 극대는 $A(=a/2\sqrt{3} \cdot kY/R) = 0$ 에 극대치가 있으며, $3A/2 = \pm\pi, \pm2\pi, \pm3\pi \dots$ 에서 0이 되고, 이 값들 사이에서 2차적인 극대치가 존재함을 알 수 있었다.

5. 여러형태( ,  , T, W)에 대한 Aperture를 제작하고 회절 무늬를 관측하였는데 이들에 대한 정량적 분석은 앞으로 해야할 과제이다.



V. 참고문헌

- 백낙권. 1985. He-Ne 레이저를 사용한 광회절에 관한 연구. 연세대, 석사학위논문. 28.pp
- Fowles, G. R. 1975, Introduction to Modern Optics. 2nd ed, Holt, Rinehart and Winston, Inc. New York, pp.106~147.
- Halliday, D. and R. Resnick. 1992, physics, 4th ed, Wiley, New York, pp.980~985.
- Hecht, E. and A. Zajac. 1973, optics, Addison-Wesley, London, pp.347~349.
- Jenkins, F. A. and E. W. Harvey. 1986, Fundamentals of Optics, McGraw Hill. pp.315~374.
- 김현수, 정순영, 노경숙, 1985, 정삼각형 구멍의 Fraunhofer 회절에 대한 고찰, 경상대논문집, 24. pp.31~33.
- Klein, M. V. and E. F. Thomas, 1985, Optics, Wiley, pp.337~500.
- 계종욱, 이성목, 1991, 태양전지를 이용한 회절격자의 주기 및 간격 측정, 한국물리학회지, "물리교육", 9. pp.42~46.
- Marvin, H. J. 1988. Fraunhofer diffraction by diamond-shaped apertures : A theoretical and experimental study. *Am. J. Phys.* 56. 551~554.
- Möller, D. 1988. Optics. University science Books. pp.127~174.
- 문현주, 이성목, 1991, 빛의 회절현상을 보여주는 시범실험. 한국물리학회지, "물리교육", 9. pp.101~107.
- Phadke, L. G. and A. Jim. 1987. Diffraction Patterns for the Oblique Incidence gratings. *Am. J. Phys.* 55. 562~565.

감 사 의 글

본 논문이 완성되기 까지 아낌없는 조언과 격려로 지도해주신 김두철 교수님께 깊은 감사할 드립니다. 바쁘신 중에도 세심하게 심사를 해주신 현남규 교수님과 고정대 교수님께 감사 드립니다. 학위 이수 과정 동안 항상 믿음과 깊은 관심으로 지도해 주신 물리학과 교수님께 감사 드립니다.

또한 논문 실험을 수행할 수 있도록 사진현상을 해주신 강희만 선배님, 정창인 학생과 김영하 학생에게 감사 드립니다.

딸을 위하여 모든 것을 희생하시고 고귀한 사랑을 주시는 부모님, 사랑하는 동생 경아, 경남, 경이, 친구들에게 이 논문을 바칩니다.

