

회절무늬의 세기와 간격을 이용한 회절격자의 주기 예측에 대한 모형 및 실험

문현주 · 이성묵 · 신희명

서울대학교

정 해 빈

삼양광학주식회사

(1992년 10월 23일 받음)

주기가 일정하지 않은 다중 슬릿의 회절 무늬에 대한 식을 유도하고, 여러가지 주기의 data 값에 대하여 컴퓨터를 이용하여 회절 무늬를 시뮬레이션 해 보았다. 두개의 주기가 혼합되어 있는 회절격자의 회절무늬 시뮬레이션 결과 세가지 경향이 관찰되었다. 첫째는 각각의 주기의 위치에 peak형태의 회절무늬가 나오는 경우이고 둘째는 두 주기의 평균의 위치에 peak형태의 회절무늬가 나오는 경우이고 셋째는 두 주기의 합에 위치에 peak형태의 회절무늬가 나오는 경우이다. 이러한 결과를 이용하여 관측된 회절무늬의 위치에서 부터 회절격자의 형태를 예측하는 것이 가능하게 되었다.

I. 서 론

Diffraction gratings의 Fraunhofer 회절 및 Fresnel 회절 효과^[2,6]중 주기의 변화를 고려하지 않은 즉 주기가 일정한 grating에 의한 회절의 경우 만이 문헌에 소개되어 있으나 이 논문에서는 주기가 일정하지 않은 여러가지 grating의 회절 효과를 컴퓨터로 시뮬레이션해 보고 주기의 변화 정도와 회절무늬의 형태 사이의 관계를 파악하여 grating의 주기결정에 이용하고자 한다.

II. 이 론

1. 주기가 일정하지 않은 회절격자의 회절무늬에 관한 식

일반적으로 회절격자(grating)는 주기와 선폭으로써 그 모양을 특징지을 수 있다. 아래 그림의 d_1, d_2, \dots, d_6 가 주기에 해당되며 d_1, d_2, \dots, d_6 가 모두 같은 값이면 주기가 일정한 회절격자이고, 다른값이면 주기가 일정하지 않은 회절격자이다. 그리고 아래 그림의 b_1, b_2, \dots, b_6 는 회절격자에서 빛이 통과하는 부분이며 선폭에 해당된다.

우리가 실험에서 사용하는 회절격자는 이상적인 것이

아니므로 주기가 모두 일정하지 않다. 주기가 일정하지 않은 다중 슬릿에 의한 회절 무늬를 알아보고 역으로 회절 무늬를 분석하여 주기 및 주기의 변화 정도를 알아보고 한다.

회절격자와 같은 방향의 축을 y축으로 보면 그림 1과 같은 모양의 gratings 을 통과한 Fraunhofer 영역에서의 빛의 진폭 A는 아래식과 같다.^[7,8,14]

$$A = A_0 \left[\int_0^{b_1} e^{ik \cdot \vec{y}} dy + \int_{d_1}^{d_1+b_2} e^{ik \cdot \vec{y}} dy + \int_{d_1+d_2}^{d_1+d_2+b_3} e^{ik \cdot \vec{y}} dy + \dots + \int_{d_1+d_2+\dots+d_{(n-1)}}^{d_1+d_2+\dots+d_n} e^{ik \cdot \vec{y}} dy + \dots \right]$$

윗식에서 \vec{k} 와 \vec{y} 가 이루는 각을 $90^\circ - p$ 라 하면 윗 식은 아래와 같이 정리할 수 있다.

빛의 세기는 진폭의 제곱에 비례하므로

$$A = A_0 \left(\left[\frac{e^{ik \sin p}}{ik \sin p} \right]_0^{b_1} + \left[\frac{e^{ik \sin p}}{ik \sin p} \right]_{d_1}^{d_1+b_2} + \left[\frac{e^{ik \sin p}}{ik \sin p} \right]_{d_1+d_2}^{d_1+d_2+b_3} \right)$$

grating

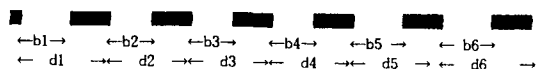


그림 1. 격자의 모양

$$\begin{aligned}
 & + \dots + \left[\frac{e^{ik\sin\theta}}{ik\sin\theta} \right]_{d_1+d_2+\dots+d_{(n-1)}+b(n)} \\
 & = \frac{A_0}{ik\sin\theta} \left[\sum_{i=1}^N \left\{ \cos(k\sin\theta(\sum_{j=0}^{i-1} d_j + b_j)) - \cos(k\sin\theta(\sum_{j=0}^{i-1} d_j)) \right\} \right. \\
 & \quad \left. + i \sum_{i=1}^N \left\{ \sin(k\sin\theta(\sum_{j=0}^{i-1} d_j + b_j)) - \sin(k\sin\theta(\sum_{j=0}^{i-1} d_j)) \right\} \right]
 \end{aligned}$$

빛의 세기는 진폭의 제곱에 비례하므로

$$\begin{aligned}
 I = \frac{A_0^2}{k^2 \sin^2 \theta} & \left[\sum_{i=1}^N \left\{ \cos(k\sin\theta(\sum_{j=0}^{i-1} d_j + b_j)) - \cos(k\sin\theta(\sum_{j=0}^{i-1} d_j)) \right\} \right]^2 \\
 & + \left[\sum_{i=1}^N \left\{ \sin(k\sin\theta(\sum_{j=0}^{i-1} d_j + b_j)) - \sin(k\sin\theta(\sum_{j=0}^{i-1} d_j)) \right\} \right]^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

과 같이 쓸 수 있다.

컴퓨터를 이용하여 빛의 세기를 계산해보므로써 여러가지 종류의 회절격자에 의한 회절 무늬를 시뮬레이션해 볼 수 있다. 빛 식에 의해서 시뮬레이션된 회절무늬를 분석하여 격자에 대한 모든 정보를 얻는 것은 불가능하다. 왜냐하면 주기가 일정하지 않은 격자에서 격자에 대한 정보는 $b_1 \sim b_n$, $d_1 \sim d_n$ 로써 모두 $2n$ 가지 이므로 peak의 위치와 빛의 세기를 분석하여 정확한 격자의 모양을 예측하는 것은 불가능하다. 그러나 주기의 변화정도가 심하지 않고 2~3개 정도의 주기의 조합으로 이루어진 격자의 주기는 예측 가능하다. 주기가 일정한 회절격자에서는 peak의 위치를 측정하면 회절격자의 주기가 계산된다. 마찬가지로 2~3개의 주기의 조합으로 이루어진 격자의 peak의 위치도 회절격자의 주기에 대한 정보를 가지고 있다. III절에서 여러종류의 격자에 대한 회절무늬를 시뮬레이션해 보고 주기가 일정하지 않은 (2~3개의 주기가 조합된 형태의 회절격자) 격자에서 peak의 위치와 주기의 관계를 찾아 보겠다.

III. 컴퓨터를 이용한 회절무늬의 시뮬레이션

앞에서 Fraunhofer 회절무늬 식을 이용하여 주기가 일정하지 않은 회절무늬식을 유도하였다. 시뮬레이션을 하기 전에 앞서 식(1)의 값들을 모두 구체적으로 주어야 한다. k 는 파수로써 $2\pi/\lambda$ 이고, 여기서 λ 는 빛의 파장이고, 뒷 장의 실험에서 레이저를 사용하였으므로 구체적인 값은 6328×10^{-10} m이다. 그리고 $\sin\theta$ 에서 각 θ 는 회절후 레이저빛의 진행방향인 k 와 각각의 슬릿에서 나오는 중심 peak방향이 서로 이루는 각이다.

컴퓨터를 이용하여 아래와 같이 6가지 조건하에서 회절무늬가 계산 되었다.

(회절격자의 슬릿의 갯수는 N , 슬릿의 주기는 d , 슬릿의 폭은 b 로 나타내었다.)

(1) $N=100$ 개이고 주기 $d=10 \mu\text{m}$, 슬릿폭 $b=5 \mu\text{m}$ 일 때 회절무늬

(2) $N=100$ 개이고 $d_1 \sim d_{50}=10 \mu\text{m}$, $d_{51} \sim d_{100}=9 \mu\text{m}$, $b=5 \mu\text{m}$

(3) $N=100$ 개이고 $d_1=9 \mu\text{m}$, $d_2=10 \mu\text{m}$, $d_3=9 \mu\text{m}$, ... 반복되어 있고 $b=5 \mu\text{m}$ 일 때

(4) $N=100$ 개이고 $d_1=9 \mu\text{m}$, $d_2=9 \mu\text{m}$, $d_3=9 \mu\text{m}$, $d_4=10 \mu\text{m}$, $d_5=10 \mu\text{m}$, $d_6=10 \mu\text{m}$, $d_7=9 \mu\text{m}$... 반복되어 있고 $b=5 \mu\text{m}$ 일 때

(5) $N=20$ 개이고 $d_1=10 \mu\text{m}$, $d_2=5.5 \mu\text{m}$, $d_3=10 \mu\text{m}$, ... 반복 되어있고 $b=5 \mu\text{m}$ 일 때

(6) $N=100$, $d=9 \mu\text{m}$ 에서 $d=10 \mu\text{m}$ 까지 점진적으로 변화하는 data, $b=5 \mu\text{m}$ 일 때

위의 조건에서 수행된 회절무늬는 아래 그림 2와 같이 나타나고 있다.

본 연구에서는 2단계의 작업을 수행하였다. 첫번째 단계에서의 작업은 회절격자의 형태에 관한 정보를 받아서 회절무늬를 시뮬레이션하여 보여준다.(그림2) 그리고 두번째 단계에서는 시뮬레이션된 회절무늬의 각 peak의 위치를 측정하여 peak의 위치와 관련된 주기를 계산한다.

그림 2의 (1)에서 시뮬레이션된 회절무늬의 peak의 위치를 측정하여 2단계 프로그램에 넣어 주기 d 를 계산해보면 $d=10.00 \mu\text{m}$ 이다. 시뮬레이션하기 위해서 주어진 회절격자의 주기 $d=10 \mu\text{m}$ 의 값과 일치함을 볼 수 있다.

그림 2의 (2), (3), (4)는 모두 주기가 $10 \mu\text{m}$ 인 것이 50개, 주기가 $9 \mu\text{m}$ 인 것이 50개로 구성된 회절격자에 의한 회절 무늬이다.

(2)의 회절격자는 주기가 $10 \mu\text{m}$ 이고 슬릿갯수가 50개인 회절격자와 주기가 $9 \mu\text{m}$ 이고 슬릿갯수가 50개인 회절격자를 붙여놓은 모양이다. 시뮬레이션된 그림을 보면 중심 peak양쪽에 각기 두개의 작은 peak가 관측된다. 중심에서 가까운것의 위치를 측정하여 참고문헌^[1]에서 유도된 식에 의하여 d 를 계산해보면 $d=10.057 \mu\text{m}$ 이고, 중심에서 먼 것의 위치를 측정하여 d 를 계산해 보면 $d=8.945 \mu\text{m}$ 이다.

(3)는 주기가 $10 \mu\text{m}$ 와 $9 \mu\text{m}$ 가 교대로 배열되어 있는 회절격자에 의한 회절 무늬이다. 작은 peak는 중심 peak양쪽으로 한개씩 나타나며, peak의 위치를 측정하여 d 를

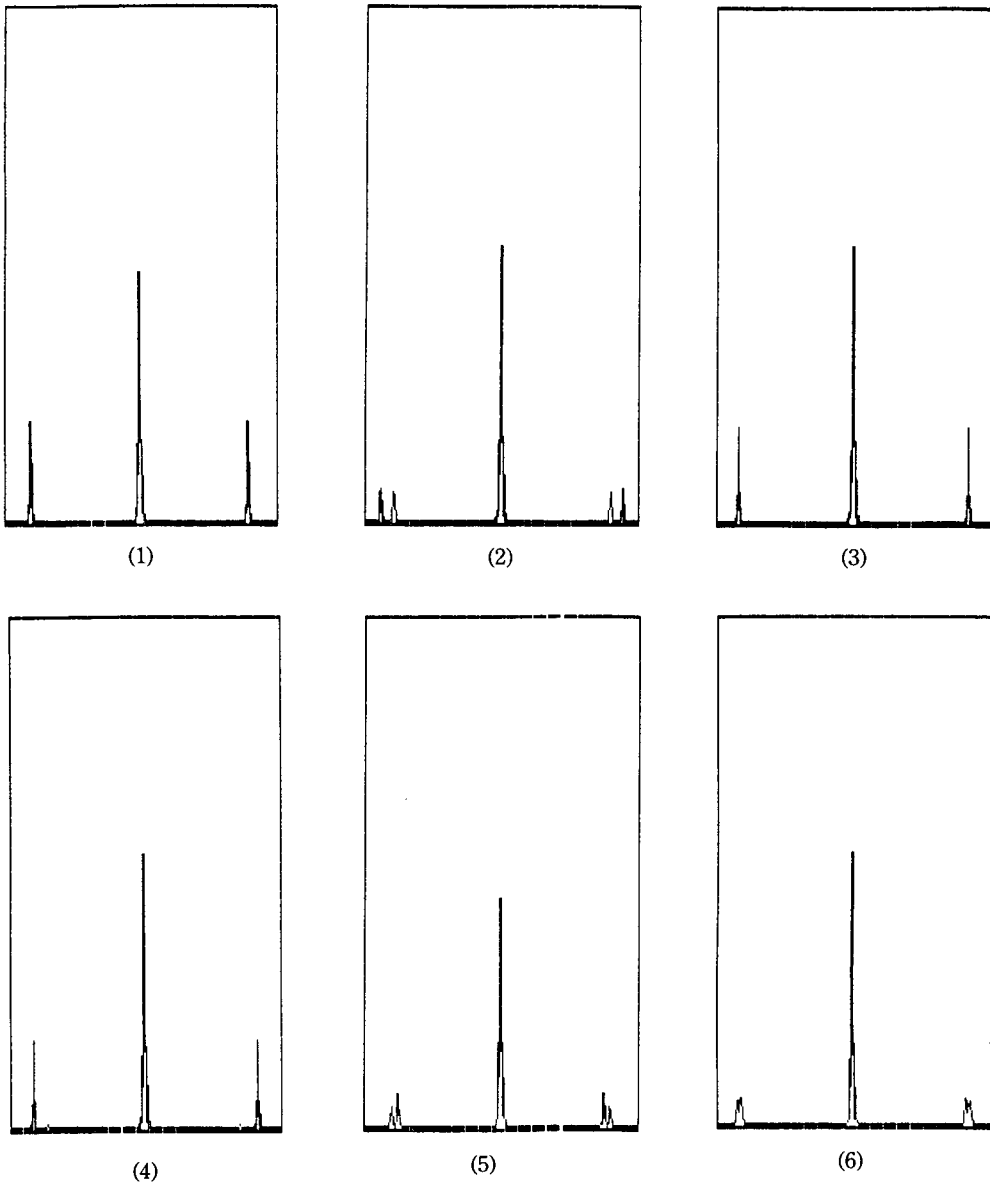


그림 2. 여러종류의 회절무늬의 보기

계산하니 $d=9.5 \mu\text{m}$ 로 측정이 되었다. 즉 9와 10의 평균인 $9.5 \mu\text{m}$ 가 주기로 계산되는 위치에 peak가 나타났다.

(4)는 주기가 $10 \mu\text{m}$ 인 것과 $9 \mu\text{m}$ 인 것이 3개씩 반복되어진 회절격자에 의한 회절 무늬이다. peak가 (3)의 회절무늬와 같이 중심 peak 양쪽으로 한개씩 나타나며 peak의 위치를 측정하여 d 를 계산하니 $d=9.500 \mu\text{m}$ 이었다. (3)에서와 마찬가지로 9와 10의 평균인 $9.5 \mu\text{m}$ 가 주기로 계산되는 위치에 peak가 나타났다.

(3)과 (4)는 peak의 위치는 같게 나타나지만 peak에서의 빛의 세기는 다르게 나타남을 알 수 있다.

그림 2의 (5)에서 시뮬레이션된 회절무늬는 중심 peak 양쪽으로 작은 peak가 두개 나타났다. 첫번째 peak의 위치를 이용하여 측정한 $d=15.5 \mu\text{m}$ 이고, 두번째 peak의 위치를 이용하여 측정한 $d=7.8 \mu\text{m}$ 로 측정이 되었다. 즉 중심에서 가까운 peak의 위치로 계산한 주기는 두 주기의 합에 해당하는 값이고 중심에서 먼곳의 peak의

위치로 계산한 주기는 두 주기의 평균에 해당하는 값이다.

그림 2의 (6)의 시뮬레이션에서는 중심 peak 양쪽으로 작은 peak가 한개 나타났으며 퍼져있는 모습이다. peak의 위치를 측정하여 d 를 계산하면 $d=9.60 \mu\text{m}$ 이다. (3)과 (5)의 시뮬레이션은 모두 두개의 주기가 교대로 반복되어 있는 회절격자에 의한 회절무늬이다. 그러나 (3)의 경우는 두주기의 평균값이 계산되는 위치에만 peak가 나타났고 (5)의 경우는 두주기의 평균과 합이 계산되는 위치에 peak가 나타났다. 몇가지 시뮬레이션을 더해서 이와 같은 차이를 나게 하는 변수가 무엇인가를 알아보았다.

- (1) $n=20$, $10 \mu\text{m}$ 과 $5.5 \mu\text{m}$ 의 주기가 교대로 반복
- (2) $n=20$, $10 \mu\text{m}$ 과 $6 \mu\text{m}$ 의 주기가 교대로 반복
- (3) $n=20$, $10 \mu\text{m}$ 과 $8 \mu\text{m}$ 의 주기가 교대로 반복
- (4) $n=20$, $10 \mu\text{m}$ 과 $9 \mu\text{m}$ 의 주기가 교대로 반복

그림 3의 예를 보면 (1)~(4)의 모든 회절무늬가 합의 위치와 평균의 위치에 peak를 가짐을 알 수 있다. 두 주기의 차가 크면 합의 위치의 peak가 강하게 나타나고 두 주기의 차가 작으면 평균의 위치의 peak가 강하게 나타났다.

IV. 실험

회절격자를 직접 제작^{9,10,11}하여 회절 무늬를 정밀하게 분석하여 앞에서 한 시뮬레이션 결과를 검증하였다.

실험 장치중 광원으로 사용하는 레이저는 시간에 따라 12%까지 그 세기가 변화한다. 이때 발생하는 오차는 나눗셈회로를 이용하여 줄였다. 실제로는 그림5와 같은 나눗셈 회로가 사용되었다. 그림4의 나눗셈회로는 input 단자가 V_0 , V_x 두개가 있고, output 단자는 V_0 1개가 있다. 중심에서의 빛의 세기를 V_x 에 입력시키고 n 번째 peak

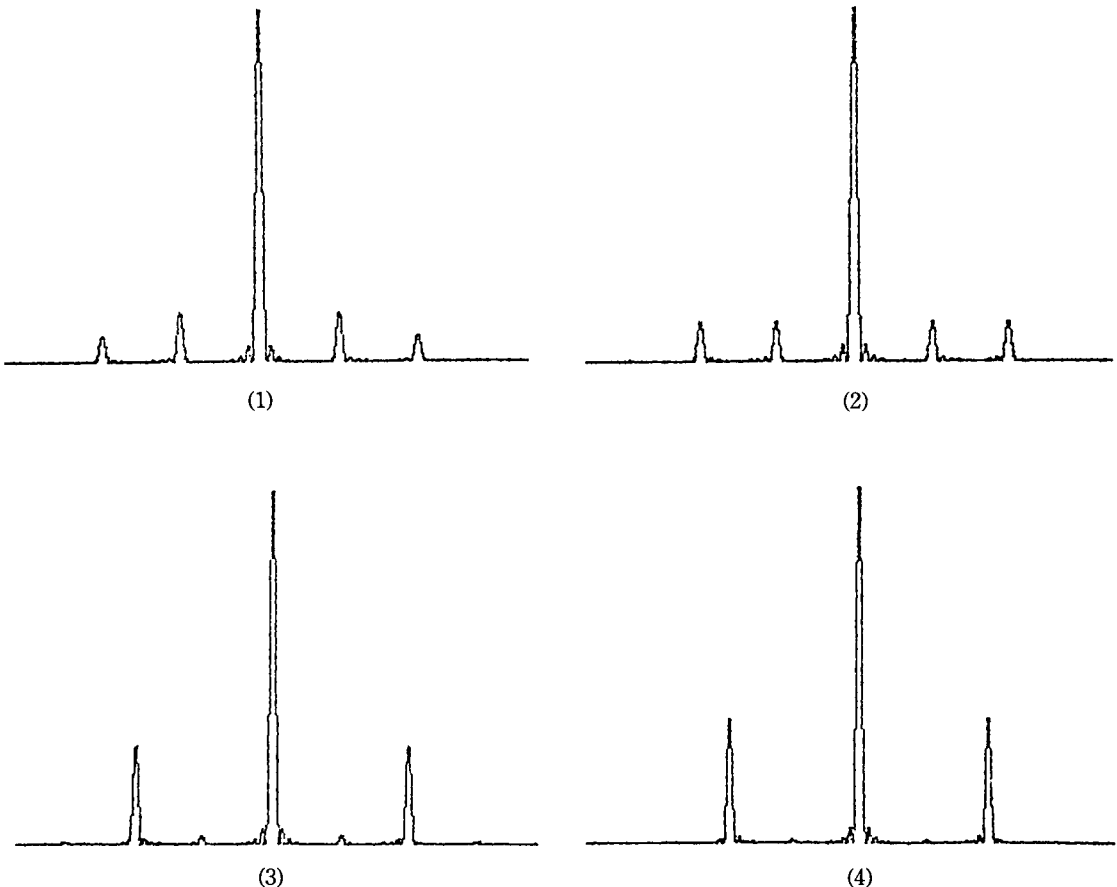


그림 3. 시뮬레이션의 예

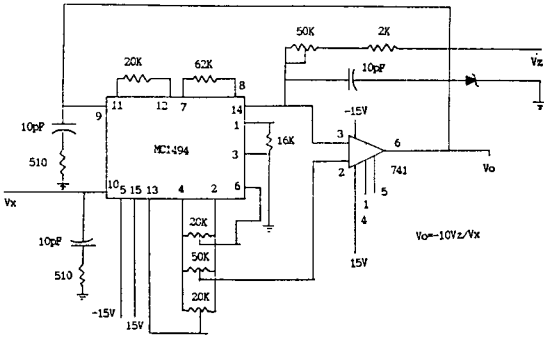


그림 4. 나눗셈 회로도

에서의 빛의 세기를 V_z 에 입력시키면 결과는 다음과 같이 나온다.

$$V_o = -\frac{10V_z}{V_x}$$

실험 샘플로는 주기가 일정하지 않은 회절격자를 3개 만든 후, 레이저를 이용하여 각각의 회절 무늬를 만든 후 이를 관측하여 회절격자의 주기를 예측하여 보고, CCD를 이용하여 직접 눈으로 격자를 관측하여 주기를 측정 후, 앞서 예측한 주기값과 비교해 보았다. 그리고 실험에 사용한 회절격자에 의한 회절 무늬를 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션 해보고 그 결과가 실험과 일치함을 검증하여 보겠다.(즉 회절격자의 회절무늬를 컴퓨터로 시뮬레이션하여 그모양을 보고, 레이저로 만든 회절무늬와 일치하는가를 알아보았다.)

1. 회절격자1

1.1 회절무늬의 관측과 주기의 계산

첫번째 회절격자에 의한 회절 무늬는 아래 그림 5와 같은 모양으로 관측되었다.

정량적으로 빛의 세기의 비와 peak의 위치를 측정하여 표 1에 기록 하였으며 peak의 위치를 이용하여 주기를 계산하여 표 1의 오른쪽에 기록하여 놓았다. 표에서 중심이라고 표현한 것은 가장 밝은 회절 무늬의 peak의 위치를 나타내며 오른쪽1이라고 쓴 것은 중심 peak에서 오른쪽으로 첫번째에 위치한 peak를 나타낸다. I_n/I_0 는 중

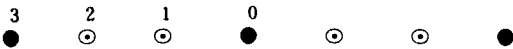


그림 5. 관측된 회절무늬의 모양

- (●) - 빛의 세기가 강한 회절 무늬 모양
- (○) - 빛의 세기가 약한 회절 무늬 모양

표 1. 실험에 의한 회절 무늬의 관측과 측정값으로부터 계산한 회절격자 주기

회절무늬	위치(mm)	I_n/I_0	주기계산(μm)
중심	0.0		
오른쪽 1	8.9		73.3
오른쪽 2	17.5	0.207	37.3
오른쪽 3	26.5	0.537	24.6
오른쪽 4	35.5	0.108	*
오른쪽 5	44.3	0.059	*

슬릿에서 스크린까지의 거리 $s=1030.3 \text{ mm}$

심에 위치한 peak의 빛의 세기를 나타내며 세번째 옆에 나타난 I_n 은 n번째 위치한 peak의 빛의 세기를 나타낸다. 이제 위에서 관측된 회절무늬 그림 5만을 보고 역으로 그런 무늬를 나타내게한 회절격자를 예측하여 보고자 한다.

회절무늬를 분석하기에 앞서 앞 그림 2에서 유추한 결론을 정리하여 보겠다. 그림 2에서 보면 d_1 주기와 d_2 주기가 혼합되어 있는 회절격자에 의한 회절무늬의 peak의 위치를 분석하여 주기를 결정할때는 3가지 경향을 보인다. 첫번째는 peak를 분석하여 주기를 계산하여 보면, d_1 주기와 d_2 주기가 모두 계산되어진다. 두번째는 peak의 위치를 분석하여 보면 d_1 주기와 d_2 주기의 평균인 $(d_1+d_2)/2$ 가 계산되어 나온다. 세번째는 peak의 위치를 분석하여 주기를 계산하여 보면 d_1 주기와 d_2 주기의 합인 (d_1+d_2) 가 계산되어 나온다.

이와 같은 세가지 경향을 염두에 두고 그림 5의 회절무늬를 분석해 보겠다. 가장 밝은 무늬인 3번째 peak를 1차 회절무늬로 놓고 계산한 주기의 값은 $24.6 \mu\text{m}$ 이다. 즉 회절격자1은 주기가 $24.6 \mu\text{m}$ 인 부분을 가지고 있음을 알 수 있다. ($d_1=24.6 \mu\text{m}$) 밝기가 약한 첫번째, 두번째 무늬는 회절격자가 가지고 있는 서로 다른 주기들의 조합에 의해서 생겼을 것이다. 첫번째 peak와 두번째 peak는 표에서 보듯이 그 주기가 $73.3 \mu\text{m}$ 과 $37.3 \mu\text{m}$ 인 것에 의해서 생긴 회절 무늬로 계산된다. 이 값들을 보면 $73.3 \mu\text{m}$ 은 $37.3 \mu\text{m}$ 의 두배와 그 값이 비슷하다는 것을 알 수 있다. $73.3 \mu\text{m}$ 은 위에서 세번째 경우에 의해서 생긴 주기라고 보면 다른 하나의 주기 d_2 는 $48.7 \mu\text{m}$ 로 계산된다. 즉 회절격자1은 $48.7 \mu\text{m}$ 와 $24.6 \mu\text{m}$ 가 교대로 반복되어 만들어졌음을 예측할 수 있다. $48.7 \mu\text{m}$ 와 $24.6 \mu\text{m}$ 가 교대로 반복되어 있어서 그 두 주기의 합인 $73.3 \mu\text{m}$ 와 그 두 주기의 평균인 $36.65 \mu\text{m}$ 가 새로운 주가로 나타났다고 추측해 볼 수 있다.

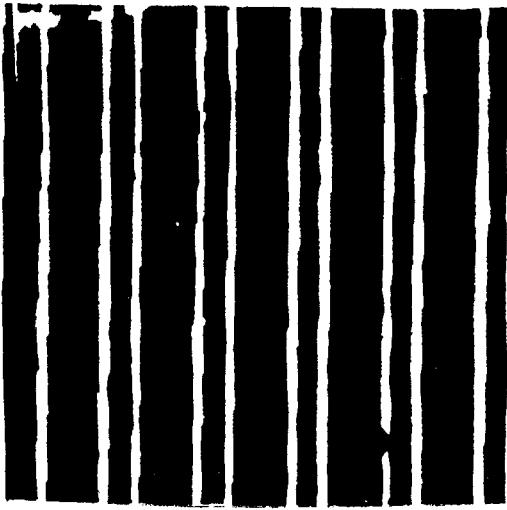


그림 6. CCD로 찍은 회절격자1의 모양



그림 7. 회절격자1의 모양, 검게 칠해져 있는 부분이 빛이 통과하는 부분이다.

그리고 $d_1=24.6 \mu\text{m}$, $d_2=37.3 \mu\text{m}$, $d_3=73.3 \mu\text{m}$ 를 주기로 가진 회절격자라고도 예측해 볼 수 있다.

1.2 CCD를 이용한 회절격자1의 관찰

CCD를 이용하여 회절격자1을 관찰하고 그 주기를 직접 측정하였다. 모양은 아래 그림 6과 같으며 주기는 $24.5 \mu\text{m}$ 와 $49 \mu\text{m}$ 가 교대로 반복되어 있다. 실험을 통해서 우리가 첫번째로 예측한 사실과 일치함을 알 수 있다.

CCD로 관측결과 회절격자1의 전체적인 모양은 아래 그림 7과 같다는 것을 알았다.

1.3 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션

CCD로 관측된 그림 6과 같이 주기가 $24.5 \mu\text{m}$ 과 $49 \mu\text{m}$ 이 교대로 14번 반복 되어있는 회절격자에 의한 회절무늬를 컴퓨터로 시뮬레이션 해보았다.

그림 8의 (a)는 회절격자1에 의한 회절 무늬를 컴퓨터로 시뮬레이션한 결과이며 (1), (2), (3)의 peak를 보면 그 모양이 우리의 실험과 일치함을 알 수 있다.

표 1과 마찬가지로 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션한 회절 무늬를 분석하여 표 2를 작성하였다.

컴퓨터로 분석한 값들인 표 2의 왼쪽에서 2번째 열의 값들이 실험으로 측정된 값들인 표 1의 해당값과 거의 일치함을 알 수 있다. 그림 15의 (a)는 표 1과 표

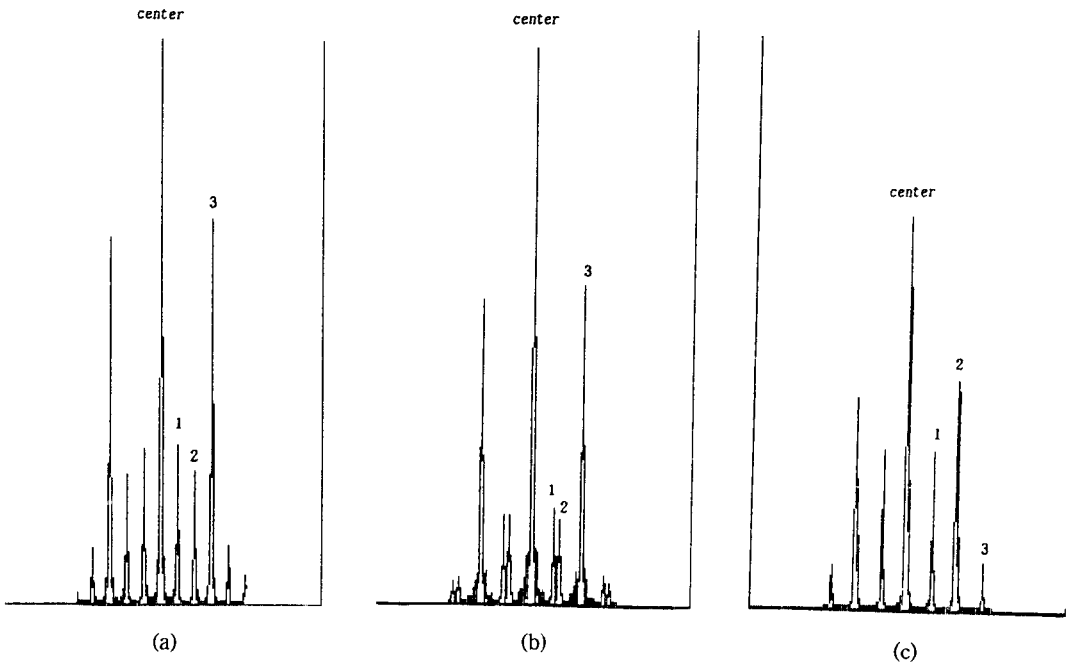


그림 8. (a) 회절격자1, (b) 회절격자2, (c) 회절격자3에 의한 회절무늬의 시뮬레이션

표 2. 회절격자 1에 의한 컴퓨터로 시뮬레이션한 회절 무늬의 분석

회절무늬	위치(mm)	I_0/I_1	주기계산(μm)
중심	0.0	1	
오른쪽 1	8.87	0.238	73.5
오른쪽 2	17.73	0.198	36.8
오른쪽 3	26.61	0.572	24.5
오른쪽 4	35.5	0.087	*
오른쪽 5	44.38	0.041	*

2가 거의 일치함을 그림으로 보여주고 있다.

회절 무늬를 관측하여 보면 같은 모양이 주기적으로 반복되어 있다. 관찰 시 중심에 가까운 회절 무늬일수록 그 peak의 값이 크고 따라서 주기 결정의 오차가 적기 때문에 회절 무늬의 중심에 가까운 1번 2번 3번 회절 무늬만을 이용하여 주기를 계산하였다(표 1). 표 1에서 예측된 $24.6 \mu\text{m}$ 는 실제값 $24.5 \mu\text{m}$ 와 0.4% 이내에서 일치함을 알 수 있다. 표 2의 3번째 열에 표시된 주기 값들은 표 1의 해당 주기 값들과 잘 일치하고 있다.

2. 회절격자2

2.1 회절무늬의 측정과 주기계산

두번째 회절격자에 의한 회절 무늬는 아래 그림 9와 같은 모양이다.

표 1과 마찬가지로 정량적으로 빛의 세기의 비와 peak의 위치를 측정하여 표 3에 기록 하였으며 peak의 위치를 이용하여 주기를 계산하여 표 3의 오른쪽에 기록하여 놓았다.

가장 밝은 무늬인 3번째 회절 무늬를 1차로 놓고 계산한 주기의 값은 $24.4 \mu\text{m}$ 이다. 즉 회절격자2는 $24.4 \mu\text{m}$ 를 주기로 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 밝기가 약한 첫번째 두번째 회절 무늬는 다른 주기와의 조합에 의해서 생겼을 것이라고 추측할 수 있으나 이를 예측하는 방법은 더 연구를 필요로 한다.

2.2 CCD를 이용한 회절격자의 관찰

CCD를 이용하여 관측한 회절격자2는 그림 10과 같고 주기가 $49 \mu\text{m}$ 와 $24.5 \mu\text{m}$ 이 세개씩 교대로 반복되어 있으며, 앞에서 예측한 $24.4 \mu\text{m}$ 와 관측값인 $24.5 \mu\text{m}$ 이 잘 일치함을 알 수 있다.

CCD로 관측결과 회절격자2의 전체적인 모양은 아래 그림과 같다는 것을 알았다.

2.3 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션

그림 11과 같은 모양의 회절격자에 의한 회절 무늬를



그림 9. 관측된 회절무늬의 모양

(●-빛의 세기가 강한 회절 무늬 모양)
(○-빛의 세기가 약한 회절 무늬 모양)

표 3. 실험에 의한 회절 무늬의 관측과 측정값으로부터 계산한 회절격자 주기

회절무늬	위치(mm)	I_0/I_1	주기계산(μm)
중심	0.0		1차 회절
오른쪽 1	11.6		56.2
오른쪽 2	14.7		44.4
오른쪽 3	26.7	0.538	24.4
오른쪽 4	38.5	0.11	*
오른쪽 5	42.5	1.10	*

슬릿에서 스크린까지의 거리 $s=1030.3 \text{ mm}$

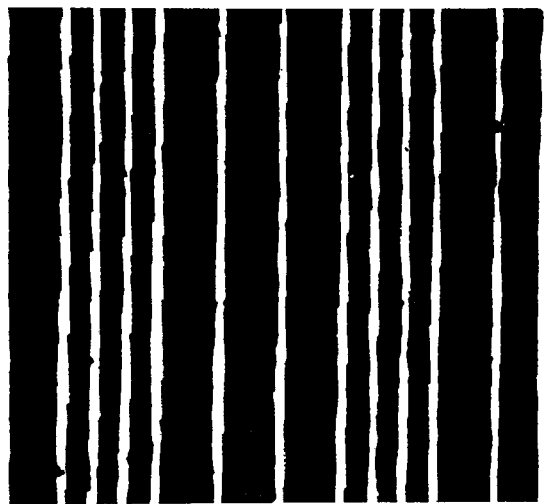


그림 10. CCD로 찍은 회절격자2의 모양



그림 11. 회절격자2의 모양

컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션 해보았다. 컴퓨터로 시뮬레이션한 회절무늬인 그림 8의 (b)를 보면 관측된 회절 무늬와 시뮬레이션된 회절 무늬가 일치함을 알 수 있다.

표 4. 회절격자 2에 의한 컴퓨터로 시뮬레이션한 회절 무늬의 분석

회절무늬	위치(mm)	I_n/I_0	주기계산(μm)
중심	0.0	1	
오른쪽 1	11.9	0.162	54.8
오른쪽 2	14.88	0.154	43.8
오른쪽 3	26.62	0.575	24.5
오른쪽 4	38.57	0.05	*
오른쪽 5	41.52	0.034	*

회절격자1의 경우와 마찬가지로 peak의 위치와 빛의 세기의 비를 컴퓨터로 계산하여 표로 만들어 놓았다.

컴퓨터로 분석한 값들인 표 4가 실험으로 측정된 값들인 표 3과 그 값이 거의 일치함을 알 수 있다. 뒷장의 그림 15의 (b)는 표 3과 표 4가 거의 일치함을 그림으로 보여주고 있다.

회절 무늬를 관측하여 보면 같은 모양이 주기적으로 반복되어 있다. 관찰 시 중심에 가까운 회절 무늬일수록 그 peak의 값이 크고 따라서 주기 결정의 오차가 적기 때문에 회절 무늬의 중심에 가까운 1번 2번 3번 회절 무늬만을 이용하여 주기를 계산하였다(표 3). 표 3에서 예측된 $24.4 \mu\text{m}$ 는 실제값 $24.5 \mu\text{m}$ 와 0.4% 이내에서 일치함을 알 수 있다. 표 4의 3번째 열에 표시된 주기 값들은 표 3의 해당 주기 값들과 완전히 일치하지는 않으나 이는 조합에 의한 주기값들을 잘 설명하고 있다.

3. 회절격자3

세번째 회절격자에 의한 회절 무늬는 아래 그림 12와

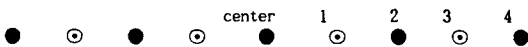


그림 12. 관측된 회절무늬의 모양

- (●)-빛의 세기가 강한 회절 무늬 모양
- (⊙)-빛의 세기가 약한 회절 무늬 모양

같은 모양이다.

앞에서와 같은 방식으로 표 5를 기록 하였다.

$47 \mu\text{m}$ 와 $23.7 \mu\text{m}$ 가 반복되어 나타나고 있으므로 세 번째 회절격자는 $47 \mu\text{m}$ 와 $23.7 \mu\text{m}$ 를 주기로 가지고 있음을 알 수 있다. 두 주기의 조합에 의해서 생긴 새로운 주기가 나타나지 않는 것으로 보아 $47 \mu\text{m}$ 를 주기로 가진 회절격자와 $23.7 \mu\text{m}$ 를 주기로 가진 회절격자를 붙여 놓은 모양이라고 추측할 수 있다.

3.1 CCD를 이용한 회절격자3의 관찰

CCD로 관측결과 회절격자3는 그림 13과 같이 주기가 $49 \mu\text{m}$ 이고 슬릿갯수가 20개인 회절격자와 주기가 $24.5 \mu\text{m}$ 이고 슬릿갯수가 20개인 회절격자가 붙어있는 모양이다.

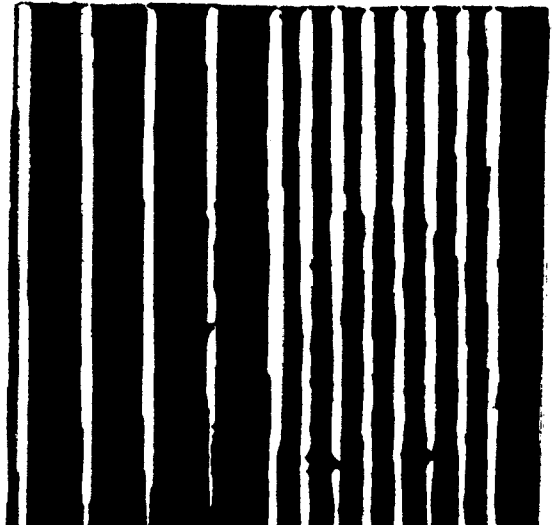


그림 13. CCD로 찍은 회절격자3의 모양



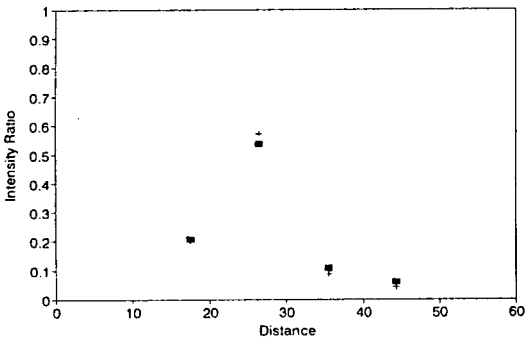
그림 14. 회절격자3의 모양

표 5. 실험에 의한 회절 무늬의 관측과 측정값으로부터 계산한 회절격자 주기, $S=1030.3 \text{ mm}$.

회절무늬	위치 (mm)	I_n/I_0	주기계산(μm)				
			1차회절	2차회절	3차회절	4차회절	5차회절
중심	0.0						
오른쪽 1	14.3		45.6	*	*	*	*
오른쪽 2	27.5	0.68	23.7	47.4	*	*	*
오른쪽 3	41.5	0.13	*	*	47.2	*	*
오른쪽 4	55.1	0.091	*	23.7	*	47.4	*
오른쪽 5	68.9	*	*	*	*	*	47.4

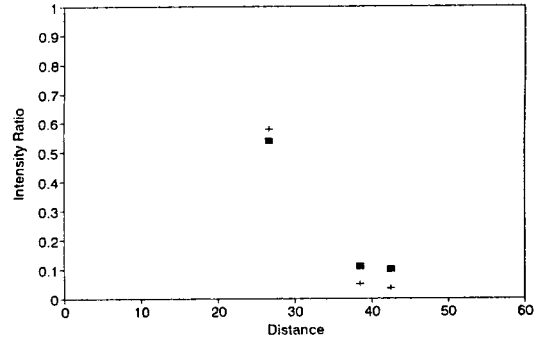
표 6. 회절격자 3에 의한 컴퓨터로 시뮬레이션한 회절 무늬의 분석

회절무늬	위치 (mm)	I_n/I_0	주기계산(μm)				
			1차회절	2차회절	3차회절	4차회절	5차회절
오른쪽 1	14.23	0.326	45.8	*	*	*	*
오른쪽 2	26.62	0.587	24.5	49	*	*	*
오른쪽 3	40.87	0.092	*	*	47.9	*	*
오른쪽 4	53.29	0.054	*	24.5	*	49	*



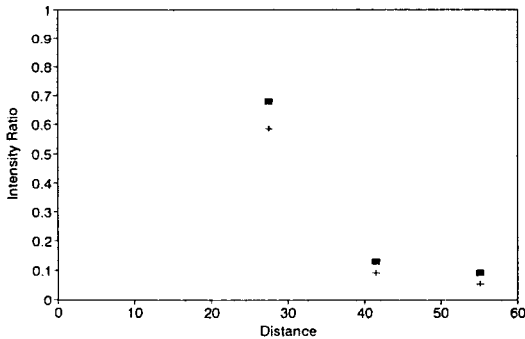
■ Experiment + Simulated

(a)



■ Experiment + Simulated

(b)



■ Experiment + Simulated

(c)

그림 15. (a) 회절격자1에서 I_n/I_0 값의 실험값과 계산값의 비교, (b) 회절격자2에서 I_n/I_0 값의 실험값과 계산값의 비교, (c) 회절격자3에서 I_n/I_0 값의 실험값과 계산값의 비교

CCD로 관측결과 회절격자3의 전체적인 모양은 아래 그림 14과 같다는 것을 알았다.

3.2 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션

그림 14과 같은 모양의 회절격자에 의한 회절무늬를 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션한 것이 그림 8의 (c)이다.

관측된 회절무늬와 시뮬레이션된 회절무늬가 일치함을 알 수 있다.

마찬가지로 peak의 위치와 빛의 세기의 비를 컴퓨터로 계산하였다. 컴퓨터로 분석한 값들인 표 6이 실험으로 측정된 값들인 표 5와 그 값이 거의 일치함을 알 수 있다. 뒷장의 그림 15의 (c)는 표 5와 표 6이 거의 일치함을 그림으로 보여주고 있다.

회절 무늬를 관측하여 보면 같은 모양이 주기적으로 반복되어 있다. 관찰 시 중심에 가까운 회절 무늬일수록 그 peak의 값이 크고 따라서 주기 결정의 오차가 적기 때문에 회절 무늬의 중심에 가까운 1번 2번 3번 4번 5번 회절 무늬만을 이용하여 주기를 계산하였다(표 5). 표 5에서 예측된 $23.7 \mu\text{m}$ 과 $47 \mu\text{m}$ 는 실제값 $24.5 \mu\text{m}$, $49 \mu\text{m}$ 와 8% 이내에서 일치함을 알 수 있다. 표 6의 3번째 열에 표시된 주기 값들은 표 5의 해당 주기 값들과 완전히 일치하지는 않으나 이는 조합에 의한 주기값들을 잘 설명하고 있다.

회절격자 1, 2, 3에 의한 실험에서 측정된 I_n/I_0 값과 컴퓨터로 계산된 I_n/I_0 값이 거의 일치함을 그림 15에서 보이고 있다.

일반적으로 밝은 회절무늬는 다중슬릿의 뿔린부분과

막힌 부분을 한 쌍으로 하는 주기들에 의해서 만들어지고 흐린 회절무늬는 그러한 주기들이 배열하여 새롭게 만들어진 주기에 의해서 회절무늬가 나타난다는 것을 알 수 있었다.

V. 결론 및 논의

주기가 일정하지 않은 회절격자에 의한 회절무늬를 시뮬레이션 해보고 이를 역으로 분석하여 주기를 결정하는 방법에 대해서 논하였다. 즉 만들어질 수 있는 여러 경우에 대해서 미리 시뮬레이션 해봄으로써 그특성과 경향을 이해한 후에 회절무늬를 관측하여 회절격자의 주기를 예측하고자 하였다.

예를들어 슬릿의 갯수가 많은 회절격자를 만들고자 할때 아래 그림 16과 같이 A,B,C,D,E,F,G,H의 연결부분이 다른 부분보다 넓게 연결되어 있는지, 혹은 연결부분이 다른 부분과 같은 간격으로 연결되어 있는지, 혹은 연결부위가 다른 부분보다 좁게되어 있는 가에 대해서 알고 싶다면, 각 경우에 대해서 컴퓨터로 회절무늬를 시뮬레이션 하여 그무늬들의 특성을 파악한 후 레이저로 회절무늬를 만들어 회절격자가 어떻게 만들어졌는지 예측할 수가 있다.

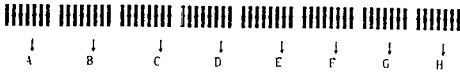


그림 16. 슬릿의 갯수가 많은 회절격자

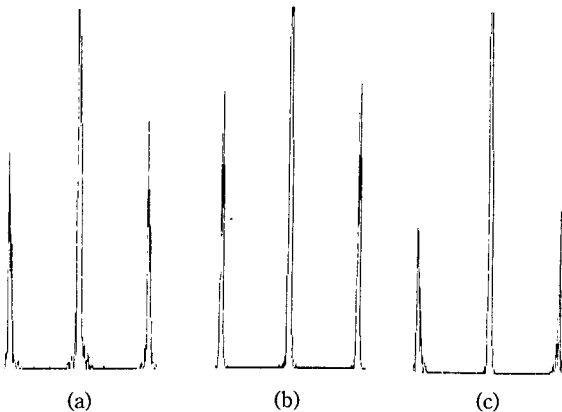


그림 17. (a) $d = 10 \mu\text{m}$ (24개), $d = 50 \mu\text{m}$ (1개)가 8번 반복 ($N=200$)
 (b) $d = 10 \mu\text{m}$ 200개
 (c) $d = 10 \mu\text{m}$ (24개), $d = 7 \mu\text{m}$ (1개)가 8번 반복 ($N=200$)

윗 그림 16에서 A,B,C,D,E,F,G,H 각 부분의 주기는 $10 \mu\text{m}$ 이고 각 부분에서의 슬릿의 갯수는 24개이고 연결부분이 $45 \mu\text{m}$ 인 회절격자에 의한 회절 무늬는 그림 17의 (a)이고, 연결 부분이 $5 \mu\text{m}$ 인 회절격자에 의한 회절 무늬는 (b)이고, 연결 부분이 $2 \mu\text{m}$ 인 회절격자에 의한 회절 무늬는 (c)이다.

각 회절 무늬의 특성을 살펴보면 연결 부위가 넓어지는 경우 중심peak와 첫번째 peak의 회절 무늬가 모두 퍼지게 나타나며, 연결 부위가 좁아지는 경우 중심 peak의 회절 무늬는 퍼지지 않고 첫번째 회절 무늬만 퍼지게 나타난다.

이와같은 시뮬레이션은 규칙성과 비규칙성이 혼합된 광학격자 또는 고체원자가 나타내는 회절무늬를 분석하여 실제 배열구조를 예측하는데 이용가능하다.

참 고 문 헌

[1] F. A. Jenkins and H. E. White, *Fundamentals of Optics* (McGraw-Hill Book Company, 1976) pp. 315-401.
 [2] E. Hecht, *Optics* (Addison-Wesley Publishing Co. 1987).
 [3] J. D. Gaskill, *Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics* (John Wiley & Sons, 1978) pp. 361-385.
 [4] F. S. Harris, Jr., "Light diffraction patterns", *Appl. Opt.* **3**, 909 (1964).
 [5] W. E. James and P. Hariharan, "Line diffraction test", *Appl. Opt.* **25**, 3806 (1986).
 [6] E. Hecht, *Schaum's outline series: Theory and Problems of Optics* (1975).
 [7] Hutley, *Diffraction grating* (Academic Press, 1982) pp. 42-55.
 [8] Reynolds, *Physical Optics Notebook: Tutorials in Fourier Optics* (SPIE optical engineering press, 1989) pp. 8-13.
 [9] Hutley, *Diffraction grating* (Academic Press) pp. 71-127.
 [10] D. J. Elliott, *Integrated Circuit Fabrication Technology* (McGraw-Hill, 1982) pp. 1-23.
 [11] C. G. Willson, M. J. Bowden, L. F. Thompson, *Introduction to Microlithography* (American Chemical Society, 1983) 16-23.
 [12] H. N. Crooks and M. J. Kelly, "Detection of defects in a circular or spirial diffraction grating", *Appl. Opt.* **25**, 588 (1986).
 [13] R. C. Comptons, L. B. Whitbourn, R. C. Mcphed-

ran, "Strip gratings at a dielectric interface and application of Babinet's principle", *Appl. Opt.* **23**, 3236 (1984).

[14] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*

(McGraw-Hill, 1968) *pp.* 58.

[15] 이성목, 계종욱, "태양전지를 이용한 회절격자의 주기 및 간격측정", *물리교육*, 제 9권, 제 1호 (1991. 4).

Model and Experiments of the Diffraction Patterns by Nonregular Periods

Hyun Joo Mun, Sung Muk Lee and Heemyung Shin

Department of Physics Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

Haibin Chung

Samyang Optical Industry Co., Ltd. Masan 630-728, Korea

(Received: October 23, 1992)

The formula of the diffraction patterns which were made by the grating with the variable periods were derived. The diffraction patterns which had the various data value of the variable periods were simulated by the IBM PC., and the characteristics of the patterns were discussed.

The purposes of this study was to find the periods of the real grating and their degree of variation by using the results of the experiment.