《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 12, Number 2, April 2001

주기적인 진폭격자들에 의한 Talbot 결상 및 가시도 분석

김영란 · 이승복 · 조재홍† · 장 수 · 임천석

한남대학교 자연과학부 광 · 전자물리학 전공

㉾ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

(2000년 12월 15일 받음, 2001년 3월 9일 수정본 받음)

주기적인 진폭물체를 가간섭광인 레이저광으로 조명하였을 때, 이 물체가 렌즈없이 회절에 의하여 결상되는 Talbot 결상을 회절이론으로 해석하고, 물체의 상이 1:1로 결상되는 Talbot 거리(Z_T)를 정의하였다. 그리고 실험적으로 이 Z_T에서 직선격자, 원형격자, ×형 2차원 배열판을 이용하여 Talbot 거리에서 Talbot 결상이 되는 것을 확인하였으며, $Z_T/2$ 위치에서는 위상이 반전되는 현상도 동시에 관찰하였다. 이러한 Talbot 결상시 주기적인 물체의 개수, 즉 격자의 수에 따라 Talbot 상의 가시도를 Talbot 상의 FFT(Fast Fourier Transform)로부터 측정하였으며, 그 결과 적어도 15개 이상의 격자들로 구성되어야 가시도 0.25로 정상적인(stationary) Talbot 결상이 됨을 알 수 있었다.

분류코드 : DI.010, SM.020, SM.030.

I. 서 론

가간섭 광원인 레이저 빛(파장: λ)을 격자주기가 L인 주기적인 격자에 평행하게 비추면, 이 회절격자로부터 $2L^2/\lambda$의 정수배에 해당하는 거리에 격자와 동일한 상이 렌즈없이 순수하게 회절효과만으로 물체인 격자와 동일한 상이 형성되는데, 이 현상을 Talbot 결상 또는 자체결상(self-imaging), 렌즈없는 결상(lensless-imaging)이라고 한다.[1] 이 Talbot 효과는 프레넬 회절분야에서 조명방향에 따라 물체의 진폭전달을 반복하는 효과와 관련되어 있다. 이와 같은 주기적인 물체 뒤에 나타나는 회절현상에 의한 독특한 빛의 강도 분포는 1836년 H. F. Talbot에 의해서 최초로 관찰되었으며,[2] 1967년 W. D. Montgomery[3]는 무한한 평면 물체에 단색 평면파가 수직으로 입사할 때 물체의 Talbot 효과가 생길 일반적인 조건에 대하여 연구하였고, 자체결상(self-imaging)이라는 용어를 최초로 사용하였다. 그 후 1970년대와 1980년대에 출판된 각종 논문들에서는 'Talbot 효과'라는 용어와 함께 '자체결상'이라는 용어가 보편적으로 사용되었다.[1]

Talbot 효과는 조명하는 광원과 입사각 그리고 격자에 따라 그 현상이 달라진다. Talbot 효과에서 광원의 간섭성에 대한 연구가 Y. Imai와 Y. Ohtsuka[4]에 의해 행해졌으며, M. Testorf, J. Jahns, N. A. Khilo 그리고 A. M. Goncharenko[5]는 입사각이 커질수록 Talbot 효과가 나타나는 거리, 즉 Talbot 거리가 코사인 형으로 짧아짐을 보고하였다. Talbot 효과를 이용한 영상처리에 대한 연구는[6] B. Packross, R. Eschbach와 O. Bryngdahl[6]들이 하였고, 이미지 합성에서의 Talbot 효과는 J. F. Ebersole,[7] O. Bryngdahl[8]이 연구하였으며, 이들은 상보격자(complementary gratings)를 형성하기 위해 주기적인 구조의 Talbot 효과를 이용하였다. 이 밖에도 Talbot 효과는 특정 패턴의 격자 등을 만드는 광학 부품의 생산,[9,10] Talbot 간섭기를 이용한 광학적 시험,[11-13] 또는 길이 측정 등의 광학적 계측[14,15]에 응용된다.

본 논문에서는 프레넬 회절원리를 이용하여 렌즈없이 상을 전달하여 재현하는 Talbot 효과에 대한 이론분석 및 응용 가능성을 조사하고, 진폭형 격자의 Talbot 결상에 대한 실험과 이에 대한 전산시늉을 분석하여 주기적인 영상이나 물체의 상 전달과 상 복원에 사용될 Talbot 효과의 가능성을 조사하고자 한다. 그리고 격자의 수에 따라 Talbot 거리에서 관측한 Talbot 상들의 밝기를 측정하여 Talbot 결상의 가시도를 격자의 수로 분석하고, 이로부터 Talbot 결상시 필요한 최소의 격자수를 결정하고자 한다.

II. 이론 및 전산모의

2.1. Talbot 결상에 대한 이론

주기적인 격자에 가간섭광원인 레이저 빛을 조명하여 나타나는 회절무늬를 분석하는 방법은 많이 있으나, 본 논문에서는 프레넬 회절방정식과 convolution 정리를 이용한 방법으로 Talbot 효과를 분석하고자 한다.

그림 1과 같이 z에 대한 거리에서의 프레넬 회절장 $U(x)$는 다음과 같다.[16]

$$U(x)=\frac{e^{ikz}}{i\lambda z}\int_{-\infty}^{+\infty}U(x_0)\exp\left\{\frac{ik}{2z}(x-x_0)^2\right\}dx_0 \tag{1}$$

여기에서 λ는 입사파의 파장이며, k는 입사파의 파수(wave number)이다. (1)식을 convolution 형태로 기술하면

$$U(x)=\int_{-\infty}^{+\infty}U(x_0)h(x-x_0)dx_0 \tag{2}$$

이고, impulse response는 $h(x)=\frac{e^{ikz}}{i\lambda z}\exp\left\{\frac{ik}{2z}x^2\right\}$ 이다. 그림 1과

†E-mail: jhjo@mail.hannam.ac.kr

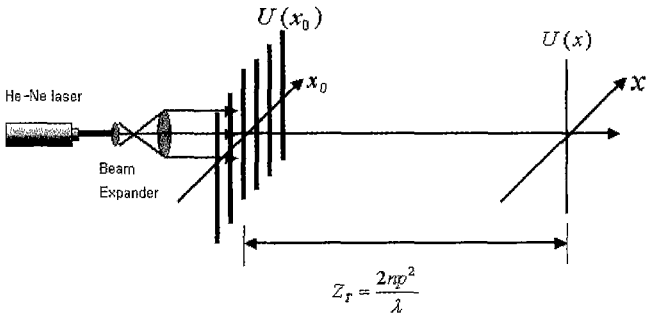


그림 1. 확대된 헬륨-네온 레이저광으로 조명한 직선격자 $U(x_0)$의 Talbot 결상 모식도.

같이 주기가 p이고, y축에 평행한 직선 격자의 투과율 $t_G(x_0)$는 원래 사각함수(square function)형태로 기술하여야하나, 이를 Fourier 급수로 전개할 때 나타나는 주파수가 가장 작은 기본 주파수를 갖는 sine 함수나 cosine 함수로 근사하여도 전체적인 물리적 의미에서는 변화가 거의 없다. 그러므로 직선 격자의 투과율 $t_G(x_0)$를 간단히 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$t_G(x_0)=\frac{1}{2}\left[1+\cos\left(\frac{2\pi x_0}{p}\right)\right] \tag{3}$$

이 투과도 함수가 (1)식과 (2)식에서 언급한 입사장 $U(x_0)$에 대응한다. 이 격자로부터 z만큼 떨어진 거리에서의 광학장을 Fourier 변환으로 계산하면

$$F\{t_G(x_0)\}=\frac{1}{2}\delta(f_X)+\frac{1}{4}\delta\left(f_X-\frac{1}{p}\right)+\frac{1}{4}\delta\left(f_X+\frac{1}{p}\right) \tag{4}$$

으로 쓸 수 있고, $h(x)$를 Fourier 변환으로 계산하면 다음과 같다.

$$F\{h(x)\}=\frac{e^{ikz}}{i\lambda z}\exp(-i\pi\lambda z f_x^2) \tag{5}$$

결국 격자 뒤에서 거리 z만큼 떨어진 장 $U(x)$의 Fourier 변환은 convolution 정리에 의하여 (4)식과 (5)식의 곱으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}F\{U(x)\}=\frac{e^{ikz}}{iz\lambda}\Big\{&\frac{1}{2}\delta(f_X)\exp\{-i\pi\lambda z(f_X)^2\}\\&+\frac{1}{4}\delta\left(f_X-\frac{1}{p}\right)\exp\{-i\pi\lambda z(f_X)^2\}\\&+\frac{1}{4}\delta\left(f_X+\frac{1}{p}\right)\exp\{-i\pi\lambda z(f_X)^2\}\Big\}\end{aligned} \tag{6}$$

그러므로 격자로부터 거리 z만큼 떨어진 곳의 회절상 $U(x)$는 (6)식의 역 Fourier 변환을 하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U(x)=\frac{e^{ikz}}{i\lambda z}\frac{1}{2}\left[1+\exp\left\{\frac{-i\pi\lambda z}{p^2}\right\}\cos\left(\frac{i2x\pi}{p}\right)\right] \tag{7}$$

이때 회절상을 세기로 나타낼 때, (7)식의 $\exp(ikz)/i\lambda z$는 큰 의미가 없기 때문에 이를 생략하면, 다음과 같이 회절상 $U(x)$를 기술할 수 있다.

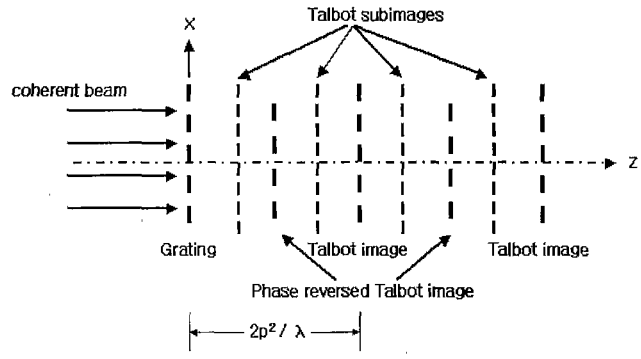


그림 2. 격자 뒤의 Talbot 상과 위상반전된 Talbot 상 및 원래상인 격자의 주파수보다 2배의 주파수를 갖는 Talbot subimages의 위치.

$$U(x)=\frac{1}{2}\left[1+\exp\left\{\frac{-i\pi\lambda z}{p^2}\right\}\cos\left(\frac{i2x\pi}{p}\right)\right] \tag{8}$$

그림 2에서 보듯이 격자로부터 거리 z가

$$\frac{\pi\lambda z}{p^2}=2n\pi \text{ 또는 } z=\frac{2np^2}{\lambda} \text{ (단, n은 정수)} \tag{9}$$

일 때 (8)식은 (3)식의 입력상의 광학장과 같은 형태가 되기 때문에 격자 뒤에서 나타나는 재현되는 상을 Talbot 상이라 하며, 이러한 Talbot 상이 보이는 거리를 Talbot 거리($z=Z_T$)라고 부른다. 또한 $\pi\lambda z/p^2=(2n+1)\pi$ 또는 $z=(2n+1)p^2/\lambda$일 때는 회절면에서 관측되는 상은 (8)식에 따르면, 앞서 설명한 Talbot 상과는 음영이 뒤집힌 위상반전 Talbot 상이 나타난다. 그리고 $\pi\lambda z/p^2=(2n-1)\ \pi/2$ 또는 $z=(n-1/2)p^2/\lambda$일 때는 (8)식과 그림 2에서 보듯이 회절상이 원래 격자의 주파수의 2배가 된 형태로 관측이 되기 때문에 이를 Talbot subimage라고 부른다.[16]

2.2. Talbot 결상에 대한 전산모의

(8)식과 같이 기술된 Talbot 효과의 전산모의를 위한 프로그램 언어로 Turbo-C를 사용하였으며, 데이타 개수는 C언어의 특성상 2^n개로 선정하였다. 그림 3에서 표기한 가로축인 Period는 격자의 주기이며, 세로축인 bright는 한 주기에서 밝은 부분의 크기를 의미한다. Z_t는 회절상의 관찰 거리 z를 Talbot 거리 Z_T로 나눈 상대적인 거리를 나타낸 값으로 Z_t= 1.0은 $z=2L^2/\lambda$을 의미한다. 전산시늉에 사용한 함수는 임의의 함수로 실험과 비교하기 위해서는 한 주기 m = 64를 실험에 사용한 직선격자의 한 주기로 보면 된다.

그림 3은 (8)식을 이용한 Talbot 결상의 전산모의를 위한 직선격자 입력상 및 이에 대한 회절상의 결과들로서 격자의 단면의 x 위치를 격자 주기 p로 나눈 규격화된 단면을 사용하였다. 그림 3(a)는 실제 제작한 직선격자(입력상)를 CCD 카메라에서 직접 밀착하여 촬영한 결과로 이를 전산모의용 모델로 사용하였다. 이는 가능한 이론에 따라 CAD 작업으로 그린 밑그림을 필름으로 만들 경우 완벽한 사각형 다중 슬릿으로 제작되지 못하리라 예상이 되어서 이를 전산모의용 모델로 사용하였다. 그러나 그림에서 보듯이 거의 완벽한 사각형 다중 슬

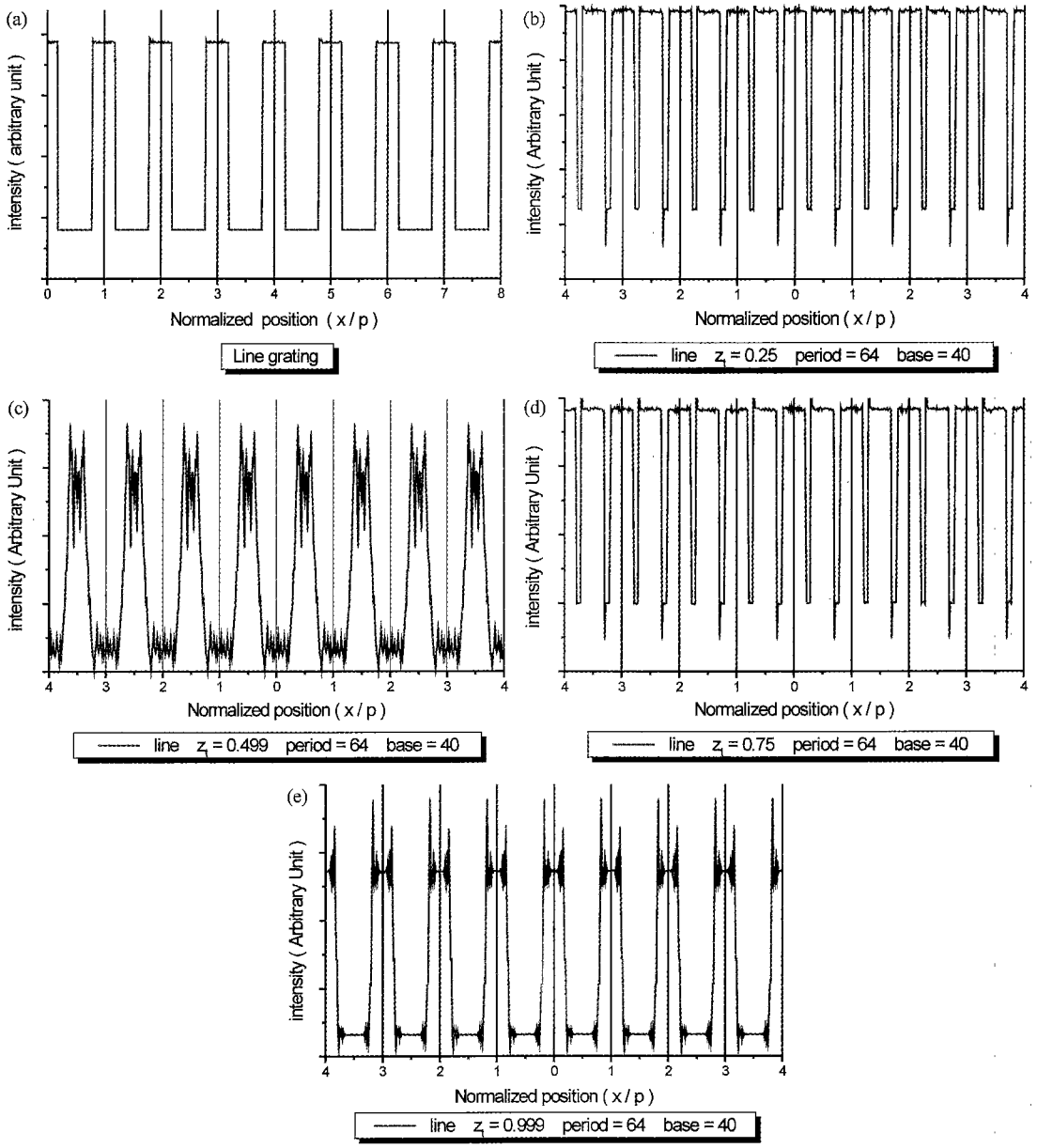


그림 3. 전산모의를 위한 직선격자 입력상((a) Z_t = 0.0)과 프레넬 회절 결과들 ((b) Z_t = 0.25, (c) Z_t = 0.5, (d) Z_t = 0.75, (e) Z_t = 1.0).

릿이지만 빛이 나오지 말아야 할 기저부분에서 어느 정도 빛이 투과함을 알 수 있다. (b)는 (a)의 격자모델로부터 Z_t = 0.25의 거리에, (c)는 Z_t = 0.5에, (d)는 Z_t = 0.75에, (e)는 Z_t = 1.0에서 (1)식에 대입하여 얻은 전산모의 결과들이다. 이 결과들의 세기가 어두운 부분만을 세어보면 이론에 나온 (8)식에서 예상한 바와 같이 (a)와 (d)에서는 입력되는 직선격자의 주파수의 2배에 해당하는 Talbot subimage가 나오고, (b)에서는 입력상과는 명암이 뒤바뀐(즉, 위상이 반전된) Talbot 상이 나타남을 알 수 있으며, (e)에서는 밝은 쪽의 폭이 약간 좁아지지만 주기는 입력상과 명암의 위치가 같은 Talbot 상이 재현됨을 알 수 있다. 단지 입력하는 격자가 이상적인 형태가 아니라 필름으로 제작하여 이를 CCD 카메라에 비춘 상을 사용하였기에 완벽한 형태로 재현되지 않고 밝은 부분 등에 잡음이 들어가는 형태로 나타나고 있다.

III. 실험장치 및 방법

실험에 사용한 실제 격자는 AutoCAD 2000 프로그램을 이용하여 크기가 40 mm×40 mm이고, 격자의 주기(p)가 0.5 mm가 되도록 밑그림을 그렸다. 이 밑그림으로 그린 격자그림들은 X-Y plotter를 이용해 710 mm×710 mm 크기로 출력하였으며, 출력한 격자그림들은 다시 투명 필름에 크기 40 mm ×40 mm로 축소하여 제작하였다. 그림 4는 최종 제작한 이런 격자들을 실험에서 사용한 렌즈가 없는 상태의 CCD 카메라((주)삼성전자, BW-360ED)의 바로 앞에서 촬영한 결과들이다. CCD 카메라는 선형성을 유지하면서 포화 및 잡음을 최대한 억제하기 위하여 카메라의 gamma 값은 1.0으로 설정하였고, gain을 manual로 조정하여 포화 및 dark current에 대한 보상을 위해서 gray level은 20-230까지만 사용하였고 Frame

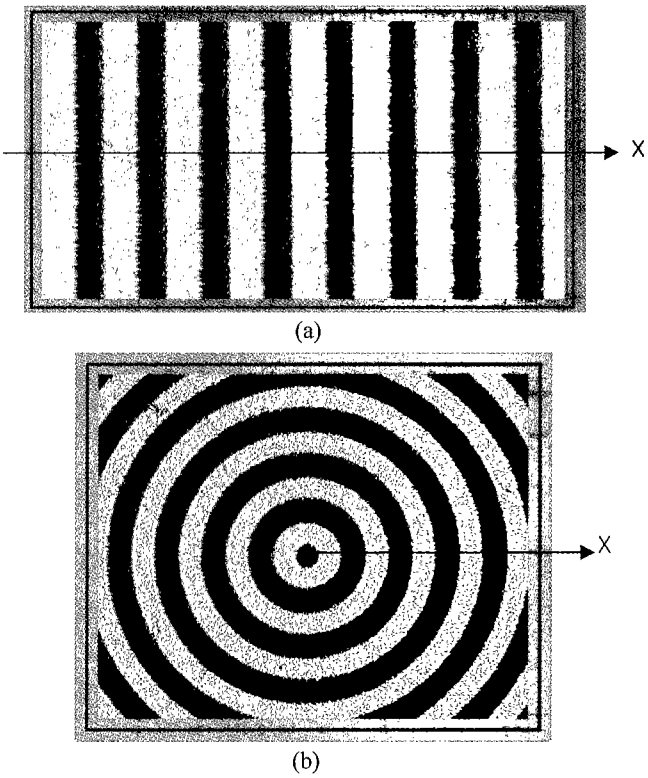


그림 4. Talbot 결상용 투과형 진폭격자들의 CCD 카메라 출력상. (a) 직선격자, (b) 원형격자.

grabber의 offset 값은 0으로 잘 설정하였다. 그림 4(a)는 직선격자의 경우이며, 그림 4(b)는 원형격자의 중심부분이다. 이 직선격자의 경우에 있어서 헬륨-네온 레이저광인 파장 $\lambda = 6328$ Å를 조명한다면 (9)식에 따라 1차 Talbot 거리($n = 1$)는 $Z_t =$ 790 mm가 된다.

그림 5는 주기적인 투과형 물체 뒤에서의 Talbot 상을 측정하기 위한 실험장치이다. 광원은 파장(λ)이 632.8 nm인 헬륨-네온 레이저(Uniphase, 1135P)이고, 광속확대기(beam expander)를 사용해 이 레이저 광속을 확대된 평행광으로 만든다. 평행광을 앞에서 제작한 격자에 수직하게 입사시키고, 이 격자로부터 거

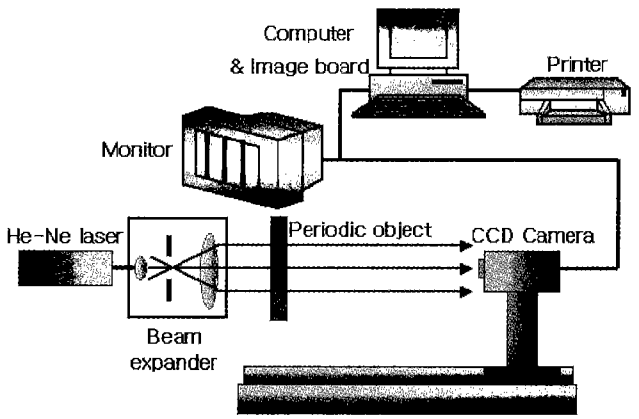


그림 5. 주기적인 투과형 물체 뒤에서의 Talbot 상을 측정하기 위한 실험장치.

리(z)에 따른 회절상들을 렌즈를 제거한 CCD 카메라로 측정하였고, 이때 CCD 카메라와 컴퓨터에 설치한 영상보드(DATA TRANSLATION, DT-3155)를 연결하여 CCD 카메라의 각 화소들에서 출력되는 값들을 읽어서, 이들 영상을 출력하며, 이들 값들을 이용하여 자체적으로 구성한 FFT(Fast Fourier Transform) 프로그램으로 회절상들의 공간주파수를 분석하여 비교함으로써 Talbot 상의 가시도를 분석하였다.

IV. 실험 결과 및 논의

그림 6은 그림 5와 같은 실험장치의 확대된 헬륨-네온 레이저 평행광으로 조명한 주기적인 직선격자의 프레넬 회절상을 격자 뒤쪽의 일정한 여러 거리에서 CCD 카메라로 찍은 결과들((a), (c), (e), (g))과 이들 단면의 1차원 밝기((b), (d), (f), (h))를 보여준다. 여기에서 (a)와 (b)는 $Z_t = 0.25$의 경우이고, (e)와 (f)는 $Z_t = 0.75$로서 잡음 때문에 일정하게 보이지는 않지만 단면의 밝기에서 어두운 부분 즉, 빛의 세기 값이 작은 부분들을 세어보면 이 회절상의 주파수가 거의 원래 격자(그림 4 (a)와 그림 3(a))의 2배가 되는 것을 확인 할 수 있어서 이것들이 Talbot subimage임을 알 수 있다. 또한 (c)와 (d)의 경우는 $Z_t = 0.5$인 경우로서 원래 격자(그림 4(a)와 그림 3 (a))와 주기는 같으나 위상이 반전되어 명암이 뒤바뀌어 있어 있으므로 위상 반전된 Talbot 상이라는 것을 알 수 있다. 그리고 (g)와 (h)는 Talbot 거리인 $Z_t = 1.0$에서의 회절 상으로 원래의 격자(그림 4(a)와 그림 3(a))와 같은 주기로 어두운 부분의 잡음을 제외하고는 똑같이 재현되므로 이것이 Talbot 상임을 알 수 있다. 이러한 결과들은 Talbot 결상에 대한 전산모의 결과인 그림 3의 결과와 잘 일치하고 있다. 그러므로 시스템의 구성상 렌즈 없이 격자를 결상을 해야하는 상황에서는 가간섭광을 격자에 비추고, 이 격자의 주기에 맞는 Talbot 거리에서 회절 상을 찍으면 격자와 같은 형태의 회절 상을 결상할 수 있다.

이러한 Talbot 결상에 대한 결과는 직선격자 뿐만이 아니라 주기적인 물체에 항상 적용이 가능한데, 그림 4(b)와 같은 원형격자의 경우에 있어서도 그림 7과 같은 Talbot 효과를 볼 수 있다. 그림 7의 (a)는 $Z_t = 0.25$에서 관찰한 Talbot subimage이며, (b)는 $Z_t = 0.5$에서 찍은 위상 반전된 Talbot 상이고, (c)는 $Z_t = 0.75$에서 관찰한 Talbot subimage, 그리고 (d)는 $Z_t = 1.0$에서 측정한 원형격자와 같은 Talbot 상이다. 이러한 단순한 1차원 격자들에 대한 Talbot 효과는 2차원 주기적인 배열을 갖는 물체들에 대해서도 적용할 수 있다. 그림 8과 그림 9는 각각 주기가 0.5 mm인 주기적인 ×자 형태의 2차원 배열과 ◎ 형태의 2차원 배열에 대한 Talbot 결상을 찍은 결과들이다. 그림 8, 9의 (a)들은 입력시킨 ×자 형태의 2차원 배열의 상과 ◎자 형태의 2차원 배열 상들을 CCD 카메라로 찍은 것이며, 그림 8, 9의 (b)들은 $Z_t = 0.75$에서 관찰한 주기가 2배로 된 Talbot subimage들이며, 그림 8, 9의 (c)들은 $Z_t = 1.0$에서 관찰한 Talbot 상이며, 이때의 Talbot 거리는 790 mm이다. 이 결과 예상하였던 대로 Talbot 효과가 2차원 배열의 주기적인 물체에 대해서도 잘 나타남을 알 수가 있다.

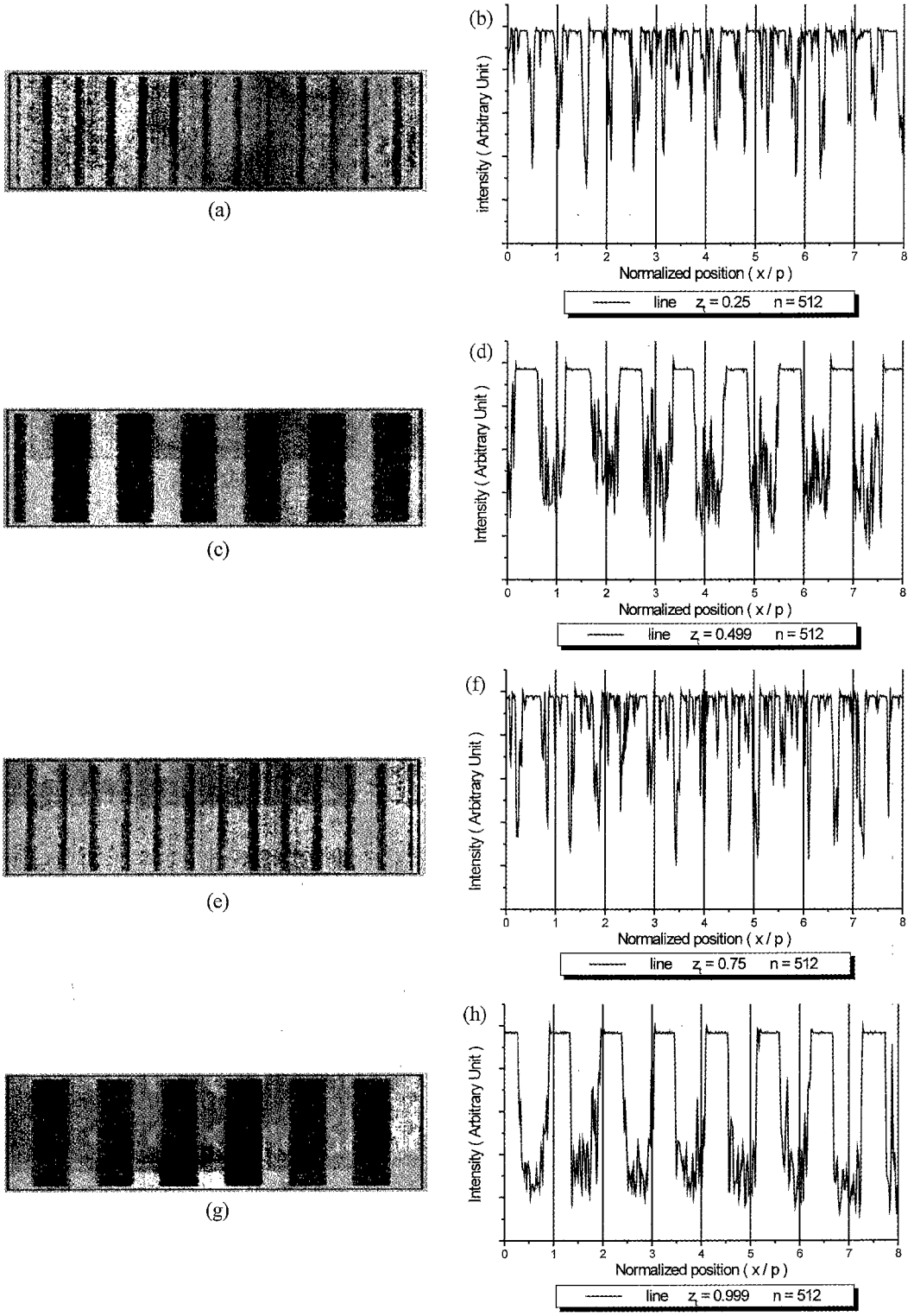
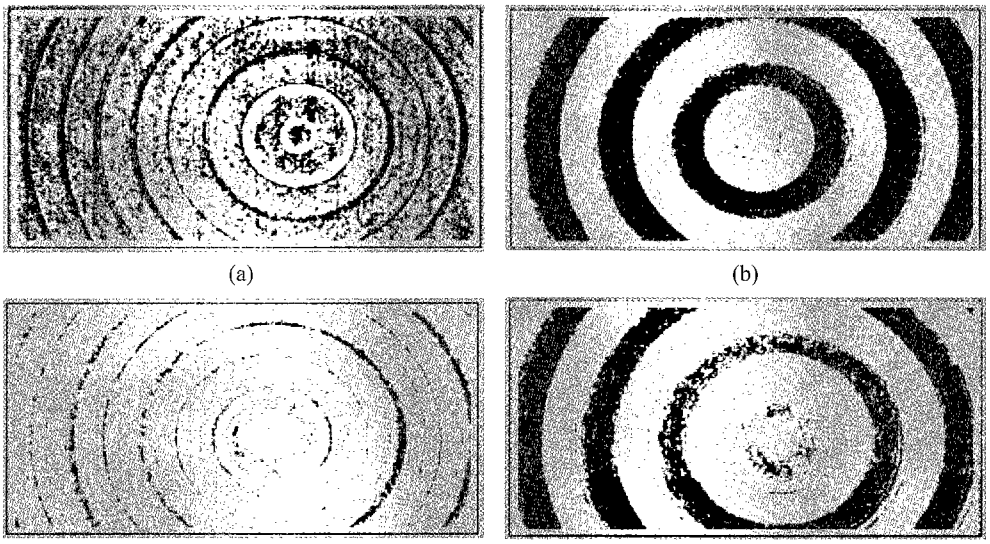


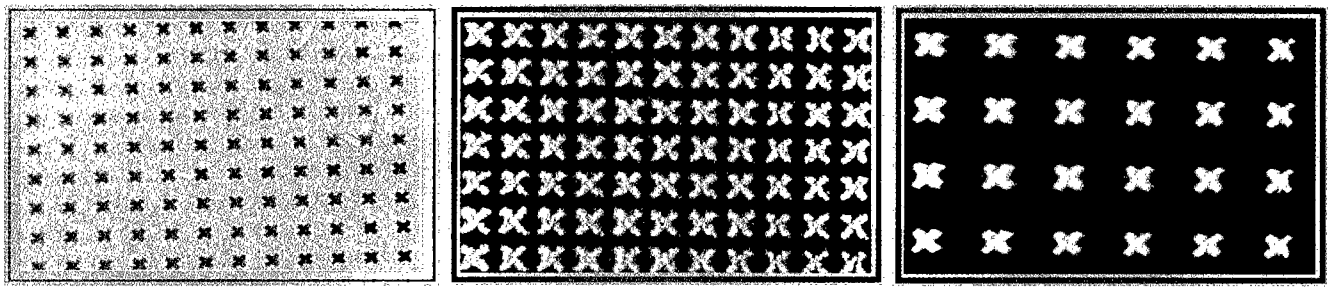
그림 6. CCD 카메라로 찍은 직선격자의 Talbot 효과가 들어간 프레넬 회절 상들 ((a), (c), (e), (g))과 이들 단면의 1차원 밝기 ((b), (d), (f), (h)). (a)와 (b):Z_t= 0.25, (c)와 (d):Z_t= 0.5, (e)와 (f):Z_t= 0.75, (g)와 (h):Z_t= 1.0.

그림 10은 그림 4(a)의 직선격자의 격자쌍(밝고 어두운 무늬 1쌍을 의미함)을 1개부터 시작하여 총 80개까지 늘렸을 때 Talbot 거리인 790 mm 뒤에서 CCD 카메라로 찍은 Talbot 상들을 FFT(Fast Fourier Transform)시킨 결과이다. 그림 10의 가로축은 공간주파수를 의미하며, 세로축은 각 주파수 성분의 진폭을 의미한다. 그림 10(a)는 격자쌍이 5개인 경우로 공간주파수 0(data number 0)인 성분(진폭 A)과 양옆의 ±1차 성분의 공간주파수에 대응하는 진폭(B_1)만을 볼 수 있다. 그림



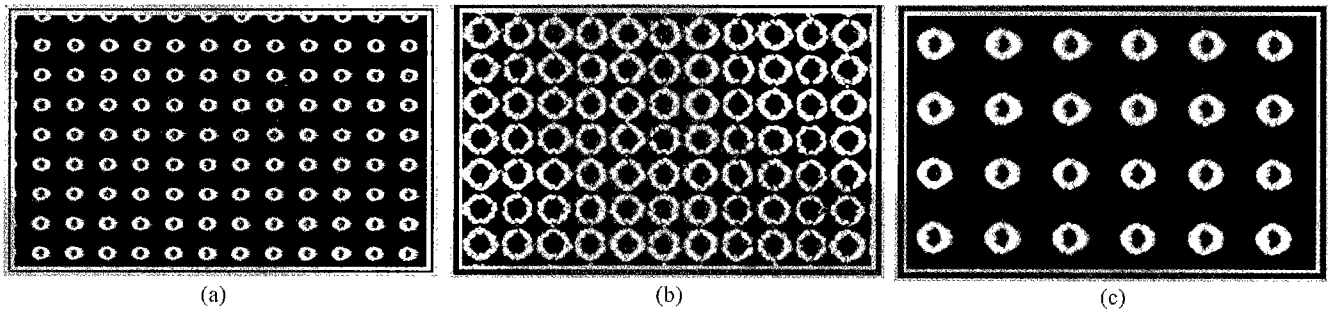
(a) (b) (c) (d)

그림 7. 원형격자의 Talbot 효과 (a) $Z_t = 0.25$, (b) $Z_t = 0.5$, (c) $Z_t = 0.75$, (d) $Z_t = 1.0$.



(a) (b) (c)

그림 8. 주기가 0.5 mm인 주기적인 ×자 형태의 2차원 배열(a)과 (b)는 $Z_t = 0.75$에서 관찰한 주기가 2배로 된 Talbot subimage이고, (c)는 $Z_t = 1.0$에서 관찰한 Talbot 상이다.



(a) (b) (c)

그림 9. 주기가 0.5 mm인 주기적인 ◎자 형태의 2차원 배열(a)과 (b)는 $Z_t = 0.75$에서 관찰한 주기가 2배로 된 Talbot subimage이고, (c)는 $Z_t = 1.0$에서 관찰한 Talbot 상이다.

10 (b)는 격자쌍이 15개인 경우로 공간주파수 0(data number 0)인 성분과 양 옆의 ±1차 성분(진폭 B_1) 및 진폭 값이 매우 작은 ±2차, ±3차 ±4차의 공간주파수 성분들(진폭들 : B_i, $i = 2, 3, 4, \cdots$)을 볼 수 있다. 여기에서 보듯이 격자쌍의 개수가 많아질수록 ±1차의 공간주파수 성분의 진폭 값이 커짐을 알 수 있다. 이러한 FFT 결과를 이용할 경우 Talbot 상의 가시도(visibility)를 정의할 수 있다. 즉 Fourier 변환시 ±1차 이상의 고차성분의 진폭을 서로 합하되, ±1차는 양의 값으로 ±2차는 음의 값으로 ±3차는 다시 양의 값으로 놓고 무한 차수까지 서로 합하면 이것이 사각격자(square grating) 함수의 진폭 B가 된다. 그리고 0차 성분의 진폭이 A이므로 가시도는 $V = (I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min}) = B/A = \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^{i+1} B_i/A$로 근사적으로 기술할 수 있다. 여기에서 I_{max}와 I_{min}은 실제 직선격자의 최대 투과도 및 최소 투과도를 의미한다. 이렇게 격자쌍의 수로 가시도를 조사한 결과가 그림 11이다. 이 결과 격자쌍의 개수가 증가하면 Talbot 상은 가시도가 좋아지면서 점점 원래

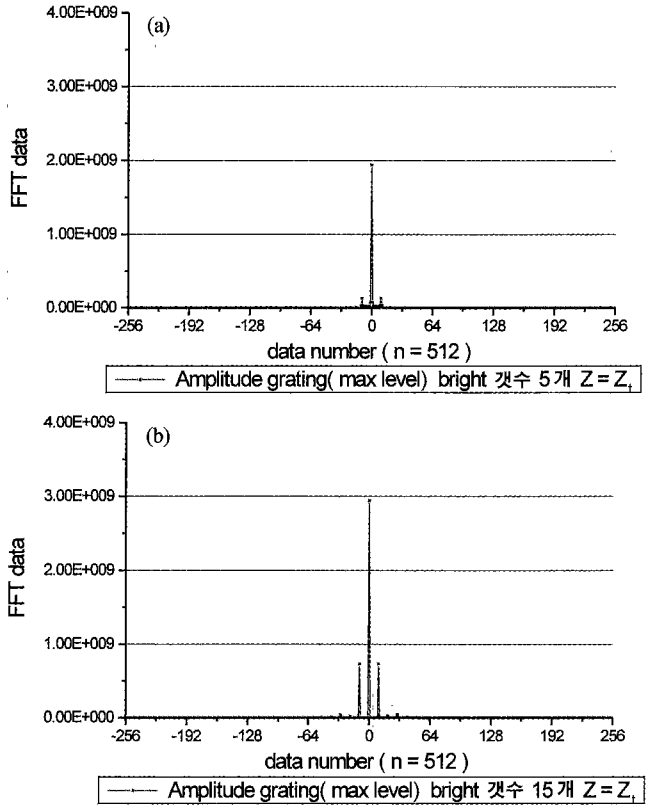


그림 10. 그림 4 (a)의 직선격자의 격자쌍을 1개부터 시작하여 총 80개까지 늘렸을 때 Talbot 거리인 790 mm 뒤에서 CCD 카메라로 찍은 Talbot 상들을 FFT(Fast Fourier Transform)시킨 결과. (a)는 격자쌍이 5개인 경우, (b)는 격자쌍이 15개인 경우.

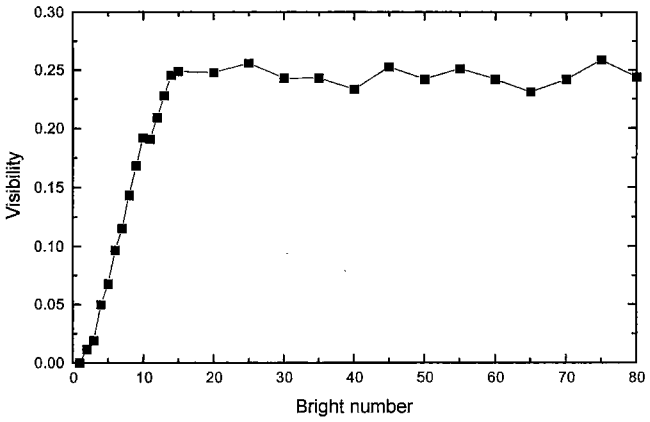


그림 11. 격자쌍의 수에 대한 Talbot 상의 가시도.

의 상으로 복구되어 총 15 개의 격자쌍 이상에서 80 쌍까지는 가시도가 V = 0.25 근처에서 거의 비슷하게 최대값을 유지함을 알 수 있었다. 이것은 다음과 같은 이유로 설명할 수 있다. 즉 주기적인 물체를 가간섭광으로 비추었을 때, 이 물체의 영상 정보가 프레넬 회절의 0차를 포함한 고차 회절성분으로 분해되어 뒤로 전파된다. 원론적으로 말하자면, 이들 회절 성분들을 모두 모을 수 있으면 다시 주기적인 물체가 재구성될 수 있다. 바로 Talbot 거리의 한 점에서 보면, 각 격자들로부터 서로 다른 고차항의 회절 성분들이 도달함을 알 수 있고, 이들 격자쌍들의 모든 조건들이 완벽히 같다면(즉, 무한대로 넓은 주기적인 물체라면), 그 지점은 이들 회절 성분들의 건설적인 중첩(constructive superposition)에 의하여 원래의 주기적인 상을 재현한다. 그러므로 격자쌍이 많을수록 완벽한 Talbot 상이 나옴을 알 수 있다.

V. 결 론

주기적인 구조를 갖는 물체를 가간섭 광인 레이저광으로 조명하였을 때, 이 물체가 렌즈없이 회절에 의하여 결상되는 Talbot 결상을 프레넬 회절이론으로 해석하고, 물체의 상이 1:1로 결상되는 Talbot 거리를 $Z_T = 2np^2/\lambda$ (n = 정수)로 정의하였다. 그리고 실험적으로 이 주기가 0.5 mm인 직선격자로부터 Z_T = 790 mm에서 Talbot 상이 나타남을 알 수 있었으며, 이 거리의 절반되는 거리에서는 위상이 반전된 Talbot 상이, 또한 이 거리의 1/4 및 3/4 되는 지점에서는 원래 물체의 주파수보다 2배가 되는 subimage들이 형성됨을 알 수 있었다. 이러한 Talbot 효과를 1차원 원형격자, 2차원 ×자 배열, 2차원 ◎자 배열에서도 확인할 수 있었다. 그리고 이러한 Talbot 결상시 주기적인 물체의 개수, 즉 격자의 수에 따라 Talbot 상의 가시도를 조사하기 위하여 Talbot상의 FFT(Fast Fourier Transform)를 하였고 이로부터 가시도를 측정하였다. 이 결과적어도 15개 이상의 격자들로 구성되어야 V = 0.25 근처에서 정상적인 최대 가시도가 나오는 Talbot 결상이 되는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호:2000-1-11100-003-2) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] K. Patorski and M. Kujawinska, *Handbook of The Moire Fringe Technique* (Elsevier Science Publishing Co., New York, 1993), pp. 70-79.

[2] K. Patorski, *The Self-Imaging Phenomenon And Its Application* (in *Progress in Optics XXVII* (edited by E. Wolf)) (Elsevier Science Publishing Co., New York, 1989), pp. 3-6.

[3] W. D. Montgomery, "Self-imaging objects of infinite aperture," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 57, no. 6, pp. 772-778, 1967.

[4] Y. Imai and Y. Ohtsuka, "Acoustically modified optical Fresnel diffraction by a slit and a periodic object in relation to periodic partial coherence," *Opt. Commun.*, vol. 43, no. 4, pp. 242-246, 1982.

[5] M. Testorf, J. Jahns, N. A. Khilo, and A. M. Goncharenko, "Talbot effect for oblique angle of light propagation," *Opt. Commun.*, vol. 129, pp. 167-172, 1996.

[6] B. Packross, R. Eschbach, and O. Bryngdahl, "Image synthesis using self imaging," *Opt. Commun.*, vol. 56, no. 6, pp. 394-398, 1986.

[7] J. F. Ebersole, "Optical image subtraction," *Opt. Eng.*, vol. 14, no. 5, pp. 436-447, 1975.
[8] O. Bryngdahl, "Image formation using self-imaging techniques," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 63, no. 4, pp. 416-418, 1973.
[9] Z. Jaroszawicz and A. Kolodziejczyk, "Application of self-imaging to the production of gratings with asymmetrical groove profile," *Opt. Commun.*, vol. 55, no. 2, pp. 73-76, 1985.
[10] V. V. Aristov, S. Aoki, A. I. Erko, S. Kiluta, and V. V. Martynov, "Observation of Fourier images in soft X-ray radiation," *Opt. Commun.*, vol. 56, no. 4, pp. 223-225, 1985.
[11] T. H. Niemeier and R. Ulrich, "Quadrature outputs from fiber interferometer with 4×4 coupler," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 10, pp. 677-679, 1986.
[12] H. Kaijun, J. Jahns, and A. W. Lohann, "Talbot interferometry with a vibrating phase object," *Opt. Commun.*, vol. 45, no. 5, pp. 295-300, 1983.
[13] M. C. King and D. H. Berry, "Photolithographic mask alignment using Moire techniques," *Appl. Opt.*, vol. 11, no. 11, pp. 2455-2459, 1972.
[14] A. W. Lohmann, "An array illuminator based on the Talbot-effect," *Optik*, vol. 79, no. 1, pp. 41-45, 1988.
[15] J. R. Leger and M. A. Snyder, "Real-time depth measurement and display using Fresnel diffraction and white-light processing," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 10, pp. 1655-1671, 1984.
[16] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (2nd ed., McGRAW-HILL, New York, 1996), pp. 63-95.

Talbot imaging of periodic amplitude objects and its visibility

Young Ran Kim, Seung Bok Lee, Jae Heung Jo†, Soo Chang, and Cheon Seog Rim
Applied Optics and Electromagnetics, School of Natural Sciences, Hannam University, Taejon 306-791, KOREA
†*E-mail: jhjo@mail.hannam.ac.kr*

(Received December 15, 2000 ; Revised manuscript received March 9, 2001)

The Talbot effect for periodic objects with the spatial period p illuminated by expanded coherent light is analyzed by Fresnel diffraction theory, and the Talbot distance (Z_T) at which we can observe 1:1 imaging without any lenses can be defined. We confirmed experimentally the Talbot imaging of line, circular, ×-type and ◎-type 2 dimensional array gratings at Z_T. At the same time, we observed phase reversed Talbot imaging at $Z_T/2$ and Talbot subimage with $p/2$ at $Z_T/4$ and $3Z_T/4$. The visibility of Talbot images as a function of the number of slits of the input grating was measured by the FFT (Fast Fourier Transform) results of these images. As a result stationary maximum visibility of $V = 0.25$ was obtained from grating numbers with more than 15 slit pairs.

Classification codes : DI.010, SM.020, SM.030.