

위상형 직선격자의 자체결상과 가시도 분석

백승선 · 이상일 · 조재홍[†]

한남대학교 자연과학부 광 · 전자물리학 전공
Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

김영란

(주)삼성 테크윈 광영상개발유니트
Ⓣ 641-716 경상남도 창원시 성주동 42번지

(2003년 7월 22일 받음, 2003년 11월 6일 수정본 받음)

위상형 직선격자에 가간섭 광원인 레이저 광을 조명하였을 때 이 격자가 렌즈없이 회절에 의하여 결상되는 자체결상 현상 (또는 렌즈없는 결상)을 회절이론으로 해석하고 실험적으로 조사하였다. 위상형 격자의 위상분포가 강도분포로 바뀌면서 1:1로 결상하는 자체결상거리($z_{T,a}$)를 진폭형 직선격자의 자체결상시 정의되는 자체결상거리 $z_{T,a}$ 를 이용하여 $(4n-3)z_{T,a}/4$ (n =양의 정수)와 같이 새로이 정의하였다. 실험적으로 $z_{T,p} = z_{T,a}/4$ 와 $z_{T,p} = 5z_{T,a}/4$ 에서 위상형 직선격자를 이용하여 자체결상거리에서 자체결상이 되는 것을 확인하였으며, $z_{T,p} = 3z_{T,a}/4$ 위치에서는 이 자체결상된 상의 위상이 반전되는 현상도 동시에 관찰하였다. 이러한 자체결상시 격자의 수에 따라 자체결상된 상의 가시도를 FFT(fast Fourier transform)로 처리하여 측정한 결과, 위상형 직선격자는 15 개 이상의 직선격자들로 구성되어야만 자체결상된 상의 가시도가 최대값 0.10 근처에서 일정하게 유지됨을 알 수 있었다.

주제어 : talbot effect, self-imaging, lensless imaging, diffraction grating, Fresnel diffraction.

I. 서 론

가간섭 광원인 레이저 빛(파장 λ)을 격자주기가 p 인 주기적인 격자에 평행하게 비추면, 이 격자로부터 자체결상거리 또는 탈보(Talbot)거리라고 하는 특정한 거리의 정수배가 되는 곳에서 이 격자와 동일한 상이 형성되는데, 이를 탈보효과(Talbot effect) 또는 자체결상(self-imaging)이라고 한다.^[1] 자체결상 효과는 프레넬 회절분야에서 조명방향에 따라 물체의 진폭전달을 반복하는 효과와 관련되어 있다.

주기적인 물체 뒤에 나타나는 회절현상에 의한 독특한 빛의 강도 분포는 1836년 H. F. Talbot에 의해서 관찰되었으며,^[1] 1967년 W. D. Montgomery^[2]는 무한한 평면 물체에 단색평면 파가 수직으로 입사할 때 물체의 탈보(Talbot) 효과가 생길 일 반적인 조건에 대하여 연구하였으며 자체결상(self-imaging)이라는 용어를 최초로 사용하였다. 자체결상 효과는 조명되어지는 광원과 입사각 그리고 격자에 따라 그 현상이 달라진다. 자체결상 효과에서 광원의 간섭성에 대한 연구는 Y. Imai와 Y. Ohtsuka^[3]이 하였으며, M. Testorf, J. Jahns, N. A. Khilo 그리고 A. M. Goncharenko^[4]는 입사각이 커질수록 자체결상 효과가 나타나는 거리, 즉 탈보거리가 코사인 형태로 짧아짐을 보였다. 이러한 자체결상 효과는 탈보 간섭계 연구,^[5] 영상 처리 및 합성,^[6] 특정형태의 격자 생산,^[7] 광학적 검사,^[8] planar optics^[9] 분야에 응용하는 연구가 진행되었다. 이러한

다양한 자체결상 연구과정에서 사용하는 격자, 즉 주기적인 물체에는 진폭형 물체만 있는 것이 아니라 위상형 물체도 존재하는데,^[5,9] 이에 대한 자체결상의 해석적 연구가 아직 미진하며, 위상형 격자의 자체결상거리에 대한 정의도 정확히 되어 있지가 않다.

본 논문에서는 앞서 발표하였던 진폭형 직선격자에 대한 자체결상 및 가시도 측정에 대한 연구논문^[10]에 이어서 진폭형 직선격자를 표백시켜서 제작한 위상형 직선격자에서 프레넬 회절식을 이용하여 렌즈없이 상을 완전하게 재현하는 자체결상 효과에 대한 해석적 이론을 전개하고, 이로부터 위상형 직선격자의 자체결상거리를 새로이 정의하고자 한다. 그리고 위상형 직선격자의 자체결상 실험으로부터 주기적인 위상물체의 상 전달과 상 복원에 사용될 자체결상 효과의 가능성을 조사하고자 한다. 또한 이 자체결상된 위상형 직선격자의 상에 대한 FFT(fast Fourier transform)를 하여 격자의 수에 따라 자체결상거리에서 관측한 자체결상된 상의 가시도를 격자의 수에 대하여 측정하고, 이로부터 자체결상시 필요한 최소의 격자수를 결정하고자 한다.

II. 위상형 직선격자의 자체결상 이론

주기적인 직선격자에 가간섭 광원인 레이저 빛을 조명하여 나타나는 회절무늬를 프레넬 회절이론을 이용하여 자체결상 효과를 분석할 수 있다.^[10] 그림 1과 같이 일차원 형태의 입사 광학장 $U(x_0)$ 에 대한 거리 z 에서의 1차원 프레넬 회절장 $U(x)$

[†]E-mail: jhjo@mail.hannam.ac.kr

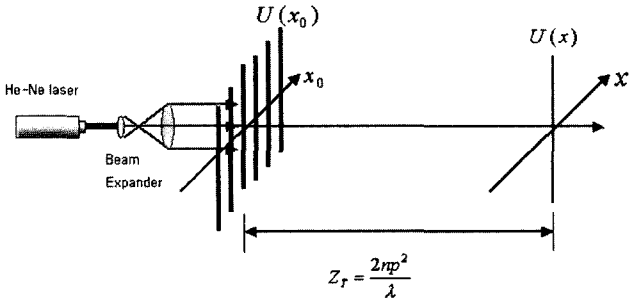


그림 1. 주기가 일정한 위상형 직선격자로의 자체결상 개략도.

는 다음과 같다.^[11]

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

여기에서 λ 는 입사파의 파장이며, k 는 입사파의 파수(wave number)로 $2\pi/\lambda$ 이다. (1)식에서 위상형 직선격자의 가간섭(coherent) 입력상의 투과율 $U(x_0)$ 는 위상항 δ 의 변화가 매우 작은 위상형 직선격자의 경우 근사적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U(x_0) \propto \exp(i\delta) \approx 1 + i\delta \quad (2)$$

이때 위상격자는 회절격자를 표백시켜 만들기 때문에 회절격자의 표백시킨 부분의 굴절률 n_0 를 갖는 부분의 두께와 이 표백시킨 부분이 없는 공기만으로 이루어진 부분들 사이의 두께 차를 $\Delta(\Delta \ll 1)$ 라고 하면 이 부분들에 의한 주기 p 를 갖는 정현파 형태의 위상형 격자의 위상항, 즉 (2)식은

$$\delta = (1 - n_0) \frac{\Delta}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi x_0}{p}\right) \right] \quad (3)$$

이 된다. (3)식을 (2)식에 대입하여 정리하면 얇은 위상형 직선격자의 입력상은 다음과 같이 표현된다.

$$U(x_0) = A_0 + A_1 \exp\left(\frac{i2\pi x_0}{p}\right) + A_{-1} \exp\left(\frac{-i2\pi x_0}{p}\right) \quad (4)$$

여기에서

$$A_0 = 1 + i\frac{\Delta}{2}(1 - n_0), \quad A_1 = A_{-1} = i\frac{\Delta}{2}(1 - n_0) \quad (5)$$

이다. 진폭형 직선격자의 자체결상거리(탈보(Talbot)거리)중 차수 n 이 가장 낮은 거리에 해당하는 것을

$$z_{T,a} = \frac{2p^2}{\lambda} \quad (6)$$

이라고 한다면,^[10] $\Delta \ll 1$ 인 경우의 위상형 직선격자에 대한 프레넬 회절에 의한 회절장 $U(x)$ 는 (4)식과 (5)식을 (1)식에 대입하여

$$z = z_{T,p} = \frac{2p^2}{\lambda l'^2} = \frac{z_{T,a}}{l'^2} \quad (7)$$

인 위상형 격자의 자체결상거리 $z_{T,p}$ 에서 근사적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U(x) = C' \sum_{l=-1}^1 A_l \exp\left(\frac{i2\pi lx}{p}\right) \exp\left(\frac{-i2\pi l^2 z}{l'^2}\right) \quad (8)$$

여기에서 l 은 (5)식에서 나오는 정수로 0, 1, -1이며, l' 은 임의의 수이고, C' 은 비례상수이다. (6)식에서 $l' = 1$ 의 경우, 회절장의 세기 $|U(x)|^2$ 을 계산하면 $|C'|^2 \left\{ 1 + (1 - n_0) \frac{2\Delta^2}{4} \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right)^2 \right\}$ 이다. 여기에서 $\Delta^2 \approx 0$ 이므로 이 회절장의 세기분포는 거의 1로 계산되므로 위상변화량을 상의 세기로 읽을 수가 없게 된다. 그러나 $l' = 2$ 에서 $\Delta^2 \approx 0$ 의 조건을 사용할 경우 (8)식의 회절장의 세기 $|U(x)|^2$ 은 근사적으로 원래의 위상분포인 (3)식과 같이 된다. 그러므로 $l'^2 = \frac{4}{1}, \frac{4}{3}, \frac{4}{5} \dots$ 에서 다음과 같이 된다.

$$|U(x)|^2 \approx 1 \pm \Delta(1 - n_0) \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (9)$$

그러므로

$$z_{T,p} = \frac{(4n - 3)z_{T,a}}{4}, \quad (n \text{은 양의 정수}) \quad (10)$$

에서는 (2)식과 (3)식으로 표현하는 위상형 직선격자에서 (9)식의 +인 경우와 같이 위상형 직선격자의 형태가 그대로 진폭형 직선격자 형태로 나타나는 경우가 생기며, 이 거리를 자체결상거리라고 정의한다. 즉 위상형 격자의 자체결상거리에서는 진폭형으로 바뀌는 위상형 격자의 자체결상을 볼 수 있다. 그리고

$$z_{T,p} = \frac{(4n - 1)z_{T,a}}{4} \quad (11)$$

에서는 (9)식의 -인 경우에 해당하는데, 이는 마치 (10)식의 경우에 발생하는 자체결상된 상의 반전된(즉 위상이 180° 어긋난) 상을 의미한다. 그리고 $l' = 2$ 의 경우에 대해서 찾은 (10)식과 (11)식이 아닌 다른 l' 에서는 (9)식과 같은 형태가 유도되지 않으므로 위상형 직선격자의 경우는 위상의 변조 형태와 1:1로 대응하는 진폭형태의 상이 나오는 (10)식의 경우를 진폭형 격자의 자체결상거리와는 다른 위상형 격자의 자체결상거리로 새로이 정의한다.

III. 실험장치 및 방법

필름의 표백효과를 이용하여 위상형 격자를 제작하기 위하여 그림 2와 같이 진폭형 격자를 AutoCAD 2000 프로그램을

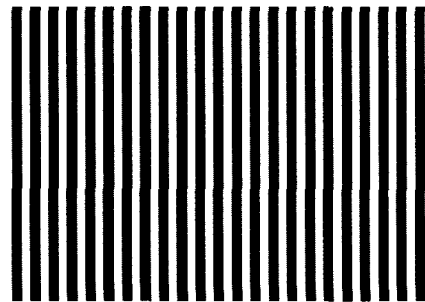


그림 2. 필름의 표백효과를 이용한 위상형 격자를 제작하기 위하여 AutoCAD 2000 프로그램으로 그린 크기가 40 mm × 40 mm이고 주기(p)가 0.5 mm인 진폭형 직선격자.

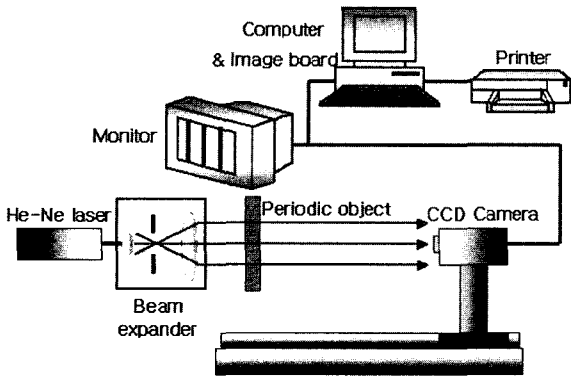


그림 3. 위상형 직선격자의 뒤에서 자체결상된 상을 측정하기 위한 실험장치도.

이용하여 제작하였다. 제작한 격자는 X-Y 플로터를 이용해 710 mm×710 mm 크기로 출력하였다. 그리고 출력한 격자는 다시 투명필름에 크기 40 mm×40 mm로 축소하여 주기(p)가 0.5 mm가 되도록 제작한다. 그리고 이 투명필름의 원판을 사진 필름에 1:1로 노출한 후 이를 표백(bleaching)시켜서 위상형 격자를 만들었다.^[12] 표백할 때 사용한 중크롬산 보렐액은 참고문헌 [12]에 따라 증류수 1리터, 중크롬산 칼륨 90 g, HCl 64 g을 섞어서 만들었으며, 필름을 표백시킬 때에는 이 원액과 증류수를 다시 1:3으로 희석시켜서 사용하였다. 이 때 희석시킨 보렐액의 온도는 20°C이며, 필름을 희석시킨 보렐액에 20 초 동안 담근 후 흐르는 물에 수세하였다. 이렇게 제작하고자 하는 위상형 직선격자의 주기는 0.5 mm이며, 총 격자수(밝은 무늬(bright fringes)와 어두운 무늬(dark fringes)가 1개의 격자는 80개이다.

그림 3은 주기적인 위상형 직선격자의 뒤에서 자체결상된 상을 측정하기 위한 실험장치도이다. 광원은 파장(λ)이 632.8 nm인 He-Ne laser(Uniphase, 1135P)를 사용하였으며, 광속확대기(beam expander)를 사용하여 직경 5 cm의 평행광을 만들었다. 이 평행광을 격자에 수직하게 입사시키고 각각의 거리(z)에 따라 자체결상된 상들을 렌즈가 없는 CCD 카메라(Samsung, BW-360ED)로 측정하였고, CCD 카메라와 영상처리용 컴퓨터(DATA-TRANSLATION, DT-3155 image board)를 연결하여 CCD 화소 각각의 세기를 읽고, 이 값을 이용하여 상을 저장하고 자체적으로 만든 FFT(fast Fourier transform) 프로그램을 이용하여 가시도를 측정하였다.

IV. 실험결과 및 토의

그림 4는 투명필름에 제작한 직선격자를 코닥 마이크로 필름(ASA 16)에 1:1로 4초간 노출시켜서 제작한 투과형태의 진폭형 직선격자를 CCD 카메라(Panasonic, WV-CP220)에 부착된 고배율 현미경(서울광학기기(주), SL-5-3BH)으로 100배 확대하여 촬영한 사진이다. 그림 4에서 보듯이 격자 간격은 0.51 mm임을 확인할 수 있는데, 이는 필름의 축소과정에서 격자간격이 약간 넓어졌기 때문이다. 이러한 격자가 나오는 필름의 노출과정과 암실과정을 결정한 후에 앞서 설명한 위상격자 제

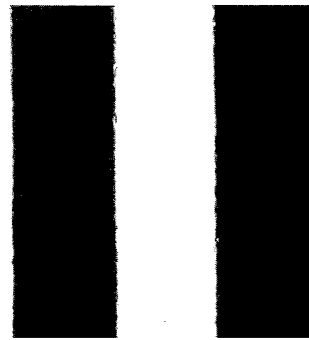


그림 4. 위상형 격자를 만들기 위하여 제작한 진폭형 직선격자의 100배 확대 사진.

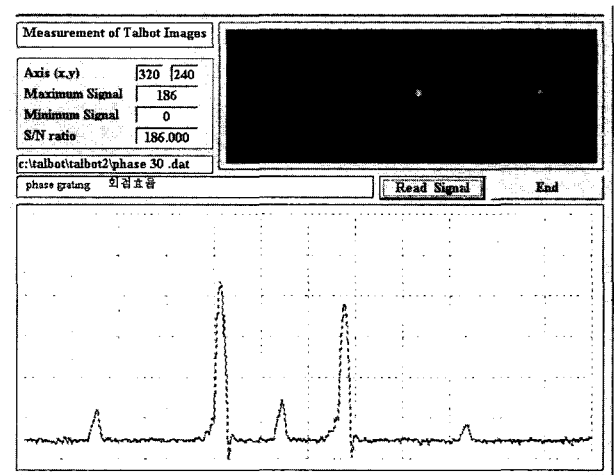
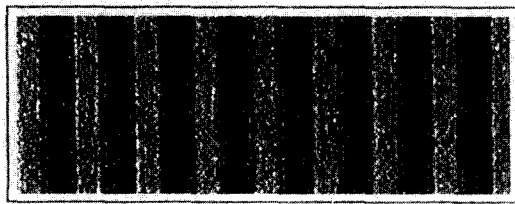


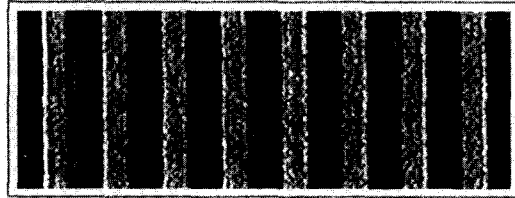
그림 5. 제작된 위상형 직선격자에 He-Ne 레이저 광속을 비추어 나오는 프라운호퍼 회절무늬 형태 및 크기.

작 방법을 사용하여 진폭격자의 필름을 현상 후 표백과정을 통하여 얻은 노란 색의 투명한 위상형 격자를 제작하였다. 그림 5는 제작된 위상격자의 성능을 보기 위하여 확대한 He-Ne 레이저를 위상형 직선격자에 비추었을 때 나오는 프리운호퍼 회절무늬를 보여주는 것으로 전형적인 위상형 직선격자에 의한 회절형태를 보여준다. 이는 진폭형 격자에 의한 프라운호퍼 회절무늬는 0차 회절인 중앙의 세기가 크며 ± 1 차 회절광이 상대적으로 작지만, 그림 5의 상단 그림(회절광의 분포)과 하단 그림(회절광의 세기 분포)에서 보듯이 0차 회절광의 세기보다 ± 1 차 회절광의 세기가 약 33% 정도로 더 크고 ± 2 차 회절광의 세기는 0차 회절광과 거의 크기가 같은 전형적인 위상격자의 회절형태를 보여주고 있다. 다만 측정시 격자의 배치가 정확히 CCD 카메라의 수직축에 평행하게 정렬하지 못하여 회절무늬의 배치가 CCD 카메라의 수평축과 일치하지 않아서 정확한 좌우 대칭의 회절형태를 보여주지는 못하고 있지만 위상격자가 잘 만들어졌음을 알 수 있었다.

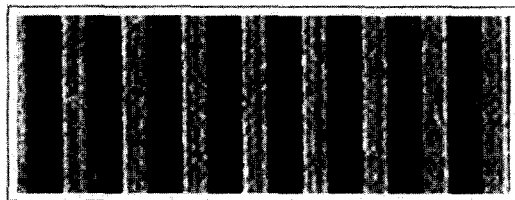
그림 6은 본 실험에서 제작한 위상형 직선격자를 사용하여 자체결상시킨 상을 찍은 사진이다. 그림 6(a), (b), (c)는 각각 $z_{T,p} = 221$ mm, 664 mm, 1094 mm에서 CCD 카메라(주)삼성전자, BW-360ED)로 찍은 자체결상된 상의 사진이다. 여기에서 그림 6(a)와 (c)는 위상형격자의 자체결상된 상의 세기가 마차



(a)



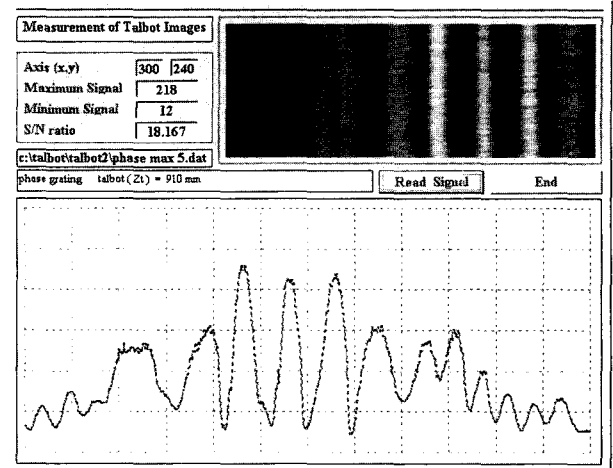
(b)



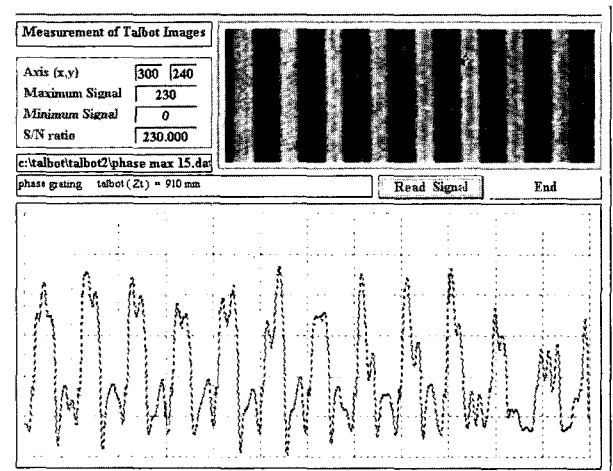
(c)

그림 6. 위상형 직선격자를 사용하여 자체결상시킨 상을 찍은 사진. (a), (b), (c)는 각각 $z_{T,p} = 221$ mm, 664 mm, 1094 mm에서 CCD 카메라로 찍은 자체결상된 상임.

진폭형 격자형태로 나타나는 것으로 $z_{T,p} = z_{T,d}/4$ 와 $z_{T,p} = 5z_{T,d}/4$ 에 해당한다. 이때 사용한 위상격자의 격자간격은 0.51 mm이고 파장이 632.8 nm이므로 (7)식과 (10)식의 첫 번째와 두 번째 등식들을 사용하여 계산한 위상형 직선격자의 자체결상거리 (a)의 경우 $z_{T,p} = 205.5$ mm이고, (c)의 경우는 $z_{T,p} = 1027.6$ mm로 실험과 각각 91.4%와 92.8% 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 6(b)의 경우는 그림 6(a)와 (c)와 비교하여 공간적으로 위상이 반전되어 있음을 확인할 수 있고, 이는 $z_{T,p} = 3z_{T,d}/4$ 에 해당한다. 역시 (7)식과 (11)식의 첫 번째 등식을 사용하여 계산한 $z_{T,p} = 616.5$ mm와 비교하면 역시 93.9%로 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 이론에서 위상격자의 변조 진폭이 작다는 가정((2)식)과 실험에 사용한 사각형 격자를 사인격자로 근사한 (3)식의 가정이 실험과 정확히 일치하지 않는데 기인한다고 생각한다. 그림 6에서 밝은 줄 무늬 부분이 깨끗하게 나오지 않은 이유는 실험적으로 이 밝은 부분들에 대한 표백이 완전하게 투명한 위상형 격자가 만들어지지 않고 노란색의 흡수가 생겨서 완벽한 위상형 격자의 형태를 이루지 못하는데 기인한다. 이는 참고문헌 [10]의 그림 6에서 보여준 진폭형 직선격자의 자체결상된 상에서 밝은 부분이 상대적으로 깨끗이 나온 결과와 비교해보면 표백과정이 문제라는 것을 알 수 있다. 이와 동시에 이론에서 살펴보면 (9)식으로 근사하는 $l' = 2$ 의 경우가 아닌 다른 경우들에 의하여 발생하는 회절무늬들이 겹쳐서 깨끗한 자체결상된 상이 생기지 못한다는 것을 알 수가 있다.



(a)



(b)

그림 7. 위상형 격자의 자체결상된 상이 격자의 수에 따라 어느 정도 재구성되는 지를 알아보기 위하여 $z_{T,p} = 1094$ mm에서 (a) 격자수가 5개인 경우(밝은 무늬수가 5개임)와 (b) 격자의 수가 15개인 경우를 비교한 결과.

그림 7은 위상형 격자의 자체결상된 상이 격자의 수에 따라 어느 정도 재구성되는 지를 알아보기 위하여 $z_{T,p} = 1094$ mm에서 (a) 격자수가 5개인 경우(밝은 무늬수가 5개임)와 (b) 격자수가 15개인 경우를 비교한 결과이다. 격자의 수가 5개인 경우에는 그림 6(a)의 상단의 사진에서 보듯이 5개 정도의 격자가 상당히 퍼진(blurring) 상태로 나오는 것을 알 수 있으며, 이는 이 사진의 일차원 세기분포를 보여주는 아래 그림으로부터 보다 확실하게 알 수 있다. 그러나 그림 7(b)에서는 보듯이 격자의 수가 15개이면 거의 모든 격자들의 형태가 제대로 복원 되는 정도를 알 수 있다. 이러한 자체결상된 상의 복원정도는 가시도로부터 알 수 있다.

그림 8은 그림 2로부터 제작한 위상형 직선격자의 격자쌍을 1개부터 시작하여 총 80개까지 늘렸을 때 자체결상거리인 $z_{T,p} = 1094$ mm에서 CCD 카메라로 찍은 자체결상된 상들(그림 6의 결과들)을 FFT한 결과이다. 그림 8의 가로축(x 축)은 공간주파수를 의미하며, 세로축(y 축)은 각 주파수 성분의 진폭을 의

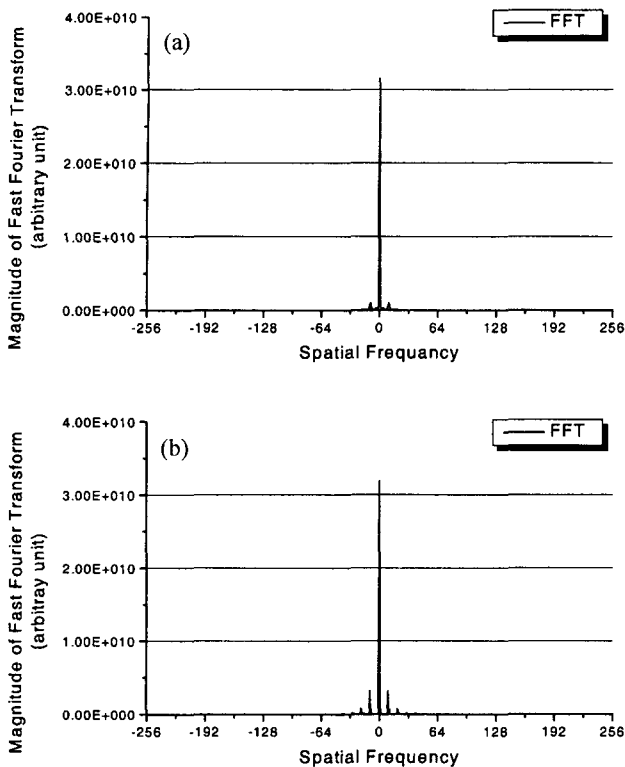


그림 8. 위상형 직선격자의 격자쌍을 1개부터 시작하여 총 80 개까지 늘렸을 때 자체결상거리인 $z_{Tp} = 1094$ mm에서 CCD 카메라로 찍은 자체결상된 상들을 FFT(Fast Fourier Transform)시킨 결과. (a)는 격자쌍이 5개인 경우이며, (b)는 격자쌍이 15개인 경우임.

미한다. 그림 8(a)는 격자쌍이 5개인 경우로 공간주파수 0인 성분(진폭 A)과 양옆의 ± 1 차 성분의 공간주파수에 대응하는 진폭(B_1)만을 볼 수 있다. 그림 8(b)는 격자쌍이 15개인 경우로 공간주파수 0인 성분과 양 옆의 ± 1 차 성분(B_1) 및 진폭 값이 매우 작은 ± 2 차, ± 3 차 ± 4 차의 공간주파수 성분들(B_2, B_3, B_4 등등)을 볼 수 있다. 여기에서 보듯이 격자쌍의 개수가 많아질수록 ± 1 차의 공간주파수 성분의 진폭 값이 커짐을 알 수 있다. 이러한 FFT 결과를 이용할 경우 위상형 직선격자의 자체결상된 상에 대한 가시도(visibility)를 정의할 수 있다. 즉 푸리에(Fourier) 변환시 ± 1 차 이상의 고차성분의 진폭을 서로 합하되, ± 1 차는 양의 값으로 ± 2 차는 음의 값으로 ± 3 차는 다시 양의 값으로 놓고 무한 차수까지 서로 합하면 이것이 사각격자(square grating) 함수의 진폭 B가 된다. 그리고 0차 성분의 진폭이 A이므로 가시도(visibility) V는

$$V = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) = \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^{(i+1)} B_i / A \quad (12)$$

로 기술할 수 있다.^[10] 여기에서 I_{max} 와 I_{min} 은 실제 직선격자의 최대 투과도 및 최소 투과도를 의미한다.

그림 8과 (12)식을 이용하여 격자의 수로 가시도 V를 조사한 결과가 그림 9이다. 이 결과 격자쌍의 개수가 증가하면 자체결상된 상의 가시도는 좋아지면서 점점 원래의 상으로 복구되어 총 15개 이상에서 80개까지는 가시도가 $V=0.10$ 근처에

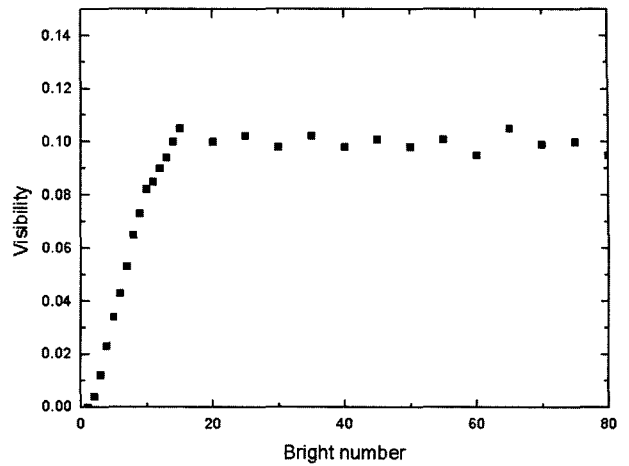


그림 9. 위상형 직선격자의 격자쌍을 1개부터 시작하여 총 80개까지 늘렸을 때 자체결상거리인 $z_{Tp} = 1094$ mm에서 CCD 카메라로 찍은 자체결상된 상들의 FFT를 이용하여 구한 가시도의 변화.

서 거의 비슷하게 일정한 값을 유지함을 알 수 있었다. 이는 진폭형 직선격자의 경우와 비슷하게 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. 이 때 이들 회절 성분들을 모두 모을 수 있으면 다시 주기적인 물체가 재구성될 수 있다. 그러므로 바로 자체결상 거리에 있는 상면의 한 점에서 보면, 각 격자들로부터 서로 다른 고차항의 회절 성분들이 도달함을 알 수 있고, 이들 격자들의 모든 조건들이 완벽히 같다면 그 지점은 이들 회절 성분들의 중첩에 의하여 원래의 주기적인 상을 재현한다. 그러므로 격자수가 많을수록 완벽한 상이 나옴을 알 수 있다. 본 논문에서는 격자수가 15개 이상이면 자체결상된 상이 완전하게 복원되는데 문제가 없음을 실험적으로 밝혔으며, 이는 진폭형 직선격자의 경우와 일치함을 알 수 있다.^[10] 그리고 그림 9에서 보듯이 위상격자의 자체결상된 상의 가시도가 최대 0.10로 진폭형 직선격자의 자체결상된 상에 대한 가시도(0.25)의 40%에 불과함을 알 수 있다.^[10] 이는 그림 5에서 논의한 표백과정 때문에 흡수가 생긴 위상형 직선격자의 자체결상된 상이 진폭형 직선격자의 자체결상된 상보다 밝고 어두운 정도가 많이 낮기 때문이며, 동시에 이론에서 $l'=2$ 의 경우가 아닌 다른 경우들에 의하여 발생하는 회절무늬들이 겹쳐서 깨끗한 자체결상된 상이 생기지 못하기 때문이다.

V. 결 론

위상형 직선격자에 가간섭 광원인 레이저 광을 조명하였을 때, 이 물체가 렌즈없이 회절에 의하여 결상되는 자체결상(self-imaging) 현상을 프레넬 회절이론으로 해석하였다. 그 결과 진폭형 직선격자의 자체결상거리(탈보(Talbot)거리)중 차수 n이 가장 낮은 거리에 해당하는 $z = z_{Tp} = 2p^2/\lambda$ 과는 다르게 위상형 직선격자에서는 (9)식의 +인 경우와 같이 위상형 직선격자의 형태가 그대로 진폭형 직선격자 형태로 나타나는 경우를

자체결상으로 보며, 이 거리를 자체결상거리라고 정의한다. 이러한 경우는 $z_{T,p} = (4n - 3)z_{T,d}/4$ (n 은 양의 정수임)인 위상형 회절격자의 자체결상거리에서 위상 분포가 진폭 분포로 바뀌는 위상형 회절격자의 자체결상이 된다. 그리고 $z_{T,p} = (4n - 1)z_{T,d}/4$ 에서는 자체결상된 상의 반전된(즉 위상이 180° 어긋난) 상이 나타난다. 실험적으로 $z_{T,p} = z_{T,d}/4$ 와 $z_{T,p} = 5z_{T,d}/4$ 에 해당하는 $z_{T,a} = 21$ mm와 $z_{T,p} = 1094$ mm에서 격자간격 0.51 mm인 위상형 직선격자에 대한 자체결상된 상을 관찰하였으며, $z_{T,p} = 3z_{T,d}/4$ 에 해당하는 $z_{T,p} = 664$ mm에서 공간적으로 위상이 반전되어 있는 자체결상된 상을 확인할 수 있었다. 이러한 자체결상거리에 대한 이론값들은 실험값들보다 약 91-94% 정도로 약간 작는데, 이는 이론에서 위상격자의 변조 진폭이 작다는 가정((2)식)과 실험에 사용한 사각형 격자를 사인격자로 근사한 (3)식의 가정이 실험과 정확히 일치하지 않는데 기인한다고 생각한다. 이러한 위상형 직선격자의 자체결상시 격자의 수에 따라 자체결상된 상의 가시도를 FFT(fast Fourier transform)로 처리하여 측정된 결과, 격자의 개수가 증가하면 자체결상된 상의 가시도는 좋아지면서 점점 원래의 상으로 복구되어 총 15 개 이상에서 80개까지는 가시도가 $V=0.10$ 근처에서 거의 비슷하게 일정한 값을 유지함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구에 사용한 각종 프로그램을 작성하는데 도움을 준 (주) 삼성전기의 송종섭 박사와 이론계산에 도움을 준 한남대학교 광·전자물리학전공의 장수 교수님에게 감사드립니다. 이 논문은 2003년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

[1] K. Patorski, *The self-imageing Phenomenon And Its Applica-*

tion (in Progress in Optics Vol. 27, ed. E. Wolf), (Elsevier, New York, USA, 1989) pp. 3-6.

[2] W.D Montgomery, "Self-imaging objects of infinite aperture," *J. Opt. Soc. Am.* vol. 57, pp. 772-778, 1967.

[3] 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, pp. 242-246, 1982.

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

[5] H. Kaijun, J. Jahns and A. W. Lohmann, "Talbot interferometry with a vibrating phase object," *Opt. Commun.* vol. 45, no. 5, pp. 295-300, 1983.

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

[7] 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.

[8] 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.

[9] M. Testorf, J. Jahns, N. A. Khilo, A. M. Goncharenko, "Design of Talbot array illuminators for planar optics," *Opt. Commun.* vol. 132, pp. 205-211, 1996.

[10] 김영란, 이승복, 조재홍, 장수, 임천석, "주기적인 진폭격자들에 의한 Talbot 결상 및 가시도 분석," *한국광학회지*, 제 12권 2호, pp. 83-89, 2001.

[11] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (McGRAW-HILL, New York, 1996), ch 4.

[12] 정환주, *Fourier Transform 평면위에 놓은 위상형 회절격자에 의한 상의 동시가감*(한국과학기술원, 석사학위 청구논문, 1983).

Self-imaging of a phase line grating and analysis of its visibility

Seung Sun Baek, Sang Il Lee, and Jae Heung Jo[†]

Department of Physics, Graduate School, Hannam University Daejeon 306-791, KOREA

Young Ran Kim

Samsung Techwin Co. Ltd., Kyungnam 641-716, KOREA

[†]*E-mail: jhjo@mail.hannam.ac.kr*

(Received July 22, 2003, Revised manuscript November 6, 2003)

The self-imaging effect or lensless imaging effect of a phase line grating is theoretically analyzed by using Fresnel diffraction theory, then experimentally investigated. The self-imaging distance $z_{T,p}$, that is the imaging distance being perfectly copied from the phase distribution of the phase grating to its intensity distribution with the magnification of 1X, can be uniquely defined as the $(4n-3)z_{T,a}/4$ ($n = \text{positive integers}$), where $z_{T,a}$ is the well-known self-imaging distance of an amplitude grating. When the coherent laser beam is illuminated at the phase grating, the self-imaged images were obtained at $z_{T,p} = z_{T,a}/4$ and $z_{T,p} = 5z_{T,a}/4$ without any optics. On the other side, the phase-reversed self-imaging was obviously observed at $z_{T,p} = 3z_{T,a}/4$. The visibility of self-imaged images of a phase line grating as a function of the number of slits of the input grating was measured by the FFT(Fast Fourier Transform) results of the self-imaging images. As a result a stationary maximum visibility of $V = 0.10$ can be obtained from a grating with more than 15 slit pairs.

OCIS Codes : 070.6760, 050.1940, 050.1950.