

고리형 위상 격자의 공간 주파수 필터 효과

Spatial Frequency Filtering Characteristics of Annular Phase Gratings

김인길^{1,a}, 고춘수¹, 임성우¹, 오용호², 이재철²

(In-Gil Kim^{1,a}, Chun-Soo Go¹, Sung-Woo Lim¹, Yong-Ho Oh², and Jai-Cheol Lee²)

Abstract

We studied the characteristics of annular phase gratings as spatial frequency filters. We first calculated the Fraunhofer diffraction patterns of annular gratings and then got the modulation transfer function (MTF) from the zeroth order Hankel transform of the intensity distribution function. Binary phase annular grating shows higher diffraction efficiency than binary phase rectangular grating. But the MTF decreases linearly in the low-frequency region as that of rectangular grating does. The diffraction pattern of 4-phase annular grating is similar to that of 2-phase grating and hence MTFs of the two are much alike. For 8-phase annular grating, the 7th order diffracted beam is the lowest one next to the first. Consequently, the diffraction efficiency is very high and the MTF graph is curved upward. The diffracted beams except the first order are negligible and hence the MTF characteristics are more improved in the case of 16-phase grating. But the degree of improvement becomes lowered compared with 8-phase grating. We made a 16-phase annular grating and measured its MTF. The experimental result agrees well with the calculated one.

Key Words : Annular grating, Optical low-pass filter, Modulation transfer function, Digital imaging system, Aliasing, Moire fringe, Resolution

1. 서 론

CCD, CMOS 영상센서 등을 이용하는 디지털 영상 입력 장치에는 광 저대역통과 필터(optical low-pass filter, OLPF)가 사용된다. OLPF를 사용하는 목적은 높은 공간 주파수 성분을 제거하는 것이다. 디지털 영상 장치로 입력되는 상에 임계주파수보다 큰 공간주파수 성분이 있으면 재생된 상에 왜곡(aliasing)이 생기고 무아레(moire) 무늬가 나타난다[1-3]. 여기서 임계 공간주파수는 화소(pixel) 주기의 역수의 반에 해당하며 이를 Ny-

quist 주파수라고 부른다.

현재 주로 사용되는 필터는 복굴절 필터(birefringent low-pass filter, BLF)이다[4,5]. 복굴절 필터는 두 장의 결정을 서로 수직하게 붙여 만드는데 두껍고 가격이 높은 편이다. 최근에 시스템의 소형화 추세에 따라 회절광학 소자를 저대역 필터로 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다[6,7]. 격자형 필터(grating optical low-pass filter, GOLF)[8]나 홀로그램 필터(hologram optical low-pass filter, HOLF)[9]와 같은 회절 광학 소자형 필터는 유리 표면에 얇은 막으로 2 차원 격자나 홀로그램을 형성한 것으로서 얇고 경제적이란 장점이 있다.

회절 광학 소자형 필터의 단점은 복굴절 필터에 비해 영상 장치의 해상도가 떨어진다는 것이다. 복굴절 필터는 하나의 입사광을 복굴절 현상에 의해 4 개의 빛살로 나눈다. 각 빛살간의 거리는 CCD

1. 원광대학교 자연과학부

(전북 익산시 신용동 344-2)

2. 원광대학교 전기전자공학부

a. Corresponding Author : cross-4@hanmail.net

접수일자 : 2004. 5. 10

1차 심사 : 2004. 5. 31

심사완료 : 2004. 7. 23

화소 주기와 같다. 반면에 회절 광학 소자형 필터는 회절 현상에 의해 원하는 세기 분포를 만든다. 중심(0차) 부근의 일정 영역에 빛을 모두 모으는 것이 좋지만 영역 밖의 고차 회절광들이 적은 양이라도 존재하기 마련이고 이것이 해상도를 떨어뜨린다. 중심 부근의 원하는 영역 안으로 들어가는 빛의 비율을 회절 효율로 정의할 때 회절 효율이 높을수록 영상 장치의 해상도가 증가한다고 할 수 있다.

지금까지 발표된 모든 회절 소자형 필터는 직각 좌표계(x, y)의 축을 따라 주기성을 갖는 격자 형태였다. 전형적인 직각형 필터라고 할 수 있는 체스 판 모양의 2 위상 격자[10]는 65 % 정도의 회절 효율을 보인다. 그런데 고리 모양의 2 위상 격자는 80 %의 회절 효율을 갖는다는 것이 확인되었다. 따라서 고리형 위상 격자를 광 저대역 필터로 사용한다면 더 높은 해상도를 기대할 수 있을 것이다. 또한 고리형 필터는 이론적으로 등방성(isotropic)인 필터 효과를 갖는다는 특징이 있다. 이 논문에서는 고리형 위상 격자를 광저대역 필터로 사용할 때 그 공간주파수 제거 특성에 대해 분석하였다. 고리형 격자의 회절 패턴을 구하고, 공간주파수 필터의 특성을 나타내는 MTF(modulation transfer function)를 구해 기존의 다른 필터와 비교하였다. 2 위상 뿐만 아니라 다중 위상 격자에 대해서도 필터로서의 특성을 구해 비교하였다. 또한 다중 위상 고리형 격자를 제작하고 그 MTF를 측정하여 계산 결과와 비교하였다. 2절에서는 고리형 위상 격자의 회절 패턴을 기술하였고 3절에서는 MTF를 구해 필터로서의 특성을 분석하였다. 4절에서는 실험 방법과 결과를 기술하였다.

2. 고리형 격자의 회절 패턴

회절 격자를 영상 장치에서 공간주파수 필터로 사용할 때 입사광은 관측면인 초점면으로 수렴하는 빛이므로 격자의 회절에 의한 세기 분포는 Fraunhofer 회절로 기술할 수 있다[11]. Fraunhofer 회절에 의한 파동 함수는 고리형 격자 투과 함수(transmittance)의 푸리에 변환(Fourier transform)으로부터 구할 수 있다. 따라서 격자의 회절 패턴은 격자 투과 함수를 푸리에 변환하면 알 수 있다.

그림 1에서 볼 수 있는 것과 같이 격자의 투과

함수가 원형 대칭성(radial symmetry)을 갖는 경우에는 극좌표를 사용하는 것이 편리하다. 2 차원 극좌표계 (r, θ)에서 원형대칭성을 갖는 함수 $f(r)$ 의 푸리에 변환은 아래와 같이 0-차 Hankel 변환이 된다[12].

$$F(\rho) = 2\pi \int_0^{\infty} r f(r) J_0(2\pi r \rho) dr \quad (1)$$

여기서 J_0 는 0 차 제 1 종 Bessel 함수를 의미한다.

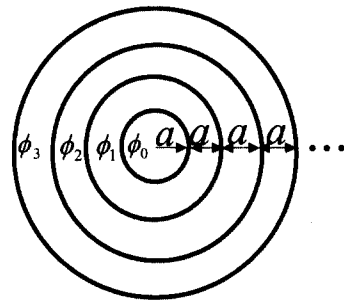


그림 1. 고리형 격자의 위상 구조. 각 위상 계단의 폭은 모두 같다.

Fig. 1. Phase structure of the annular grating.

함수 $f(r)$ 이 반지름 a 인 원형 구멍(circular aperture)일 때 그 푸리에 변환을 $G_a(\rho)$ 라고 하면 다음과 같이 된다[12].

$$G_a(\rho) = 2\pi \int_0^a r J_0(2\pi r \rho) dr = \frac{a}{\rho} J_1(2\pi a \rho) \quad (2)$$

여기서 J_1 은 1 차 제 1 종 Bessel 함수이다. 푸리에 변환은 선형적(linear)이므로 바깥쪽 반지름 b , 안쪽 반지름 a 인 고리 함수의 푸리에 변환은 $G_b(\rho) - G_a(\rho)$ 이다. 따라서 그림 1과 같은 격자의 투과 함수 $t(r)$ 의 푸리에 변환 $T(\rho)$ 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} T(\rho) &= e^{i\phi_0} G_a(\rho) + \sum_{n=1}^{\infty} e^{i\phi_n} \{G_{(n+1)a}(\rho) - G_{na}(\rho)\} \\ &= e^{i\phi_0} \frac{a}{\rho} J_1(2\pi a \rho) \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} e^{i\phi_n} \left\{ \frac{(n+1)a}{\rho} J_1[2\pi(n+1)a\rho] - \frac{na}{\rho} J_1(2\pi na\rho) \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

상면(스크린)에서의 극좌표를 (R, Θ) 라 하면 격자에 의한 회절광의 세기 분포는 다음과 같이 된다.

$$I(R) = |T(R/\lambda D)|^2 \quad (4)$$

여기서 λ 는 파장, D 는 격자로부터 상면까지의 거리이다.

2 위상 고리형 격자의 회절 패턴을 그림 2에 나타냈다. 2 위상 격자의 위상 값들은 $\phi_n = n\pi$ 이다. 그림은 20 주기($n=39$ 까지)의 고리를 포함하여 Mathematica로 계산한 것이다. 그래프의 가로축은 스크린 평면상에서 중심점으로부터의 거리를 의미하지만 회절의 차수와 숫자가 일치하도록 규격화하였다. 회절 패턴을 보면 홀수차에서 강한 회절광들이 나타나는 반면에 짝수차는 존재하지 않는데 이는 격자에서 위상이 0인 고리와 π 인 고리에 의한 상쇄 효과 때문이라 이해할 수 있다. 1 차와 3 차 회절광 분포를 확대한 그림 3을 보면 모양이 정확히 같고 높이만 약 27 배가 됨을 알 수 있는데 더 높은 차수를 관측한 결과 m 차 회절광의 세기는 m^{-3} 에 비례하였다.

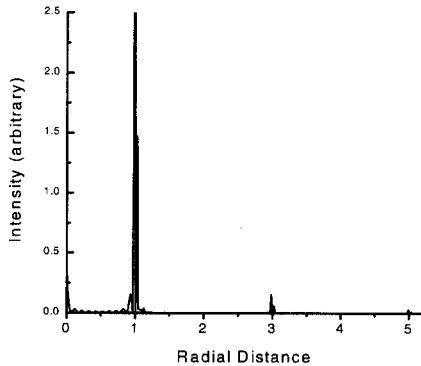


그림 2. 2-위상 고리형 격자의 회절 패턴. 그래프의 가로축은 상면에서 반지름 방향의 거리에 해당하는데 회절의 차수와 일치하도록 규격화 하였다.

Fig. 2. Diffraction pattern of the 2-phase annular grating. The radial distance is normalized to the order of the diffracted beam.

고리형 격자를 광 저대역 필터로 사용할 때 일반적으로 적용할 수 있는 주기의 기준은 1 차 회절광 분포의 크기를 CCD의 화소(pixel) 주기와 일치시키는 것이다. 이런 경우에 필터의 특성을 결정하는 변수 중의 하나가 회절 효율이다. 이 경우에 회절 효율은 전체 입사광 중에서 1 차 회절광이 차지하는 비율로 정의할 수 있다. 그림 1에 나타난 2 위상 고리형 격자의 회절 효율은 80 %이다. 체스판 모양의 2 위상 직각 격자에서 1차 회절광의 효율이 65 %인 것과 비교하면 이 값은 매우 높은 것이다.

회절 패턴을 계산할 때 더 많은 주기가 포함되면 주기수에 반비례하여 피크의 폭(width)이 감소하고 높이는 증가한다. 그러나 각 차수간의 세기 비율이나 회절 효율은 크게 변하지 않는다. 격자의 주기수가 감소하면 반대의 현상이 생기며 다만 10 주기 이하가 될 경우에는 상쇄 효과의 감소로 인해 0 차 회절광이 중심에 나타난다.

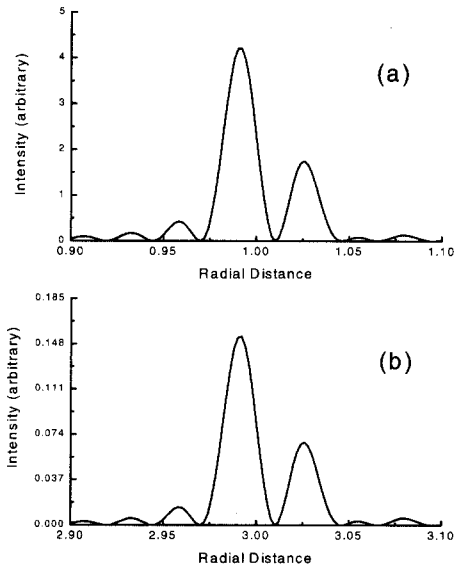


그림 3. 2-위상 고리형 격자에 의한 1 차(a), 3 차(b) 회절광 분포. 윤곽은 거의 일치하고 높이 비율은 27.3 : 1 이다.

Fig. 3. The intensity distribution of the first order(a), and the third order(b) diffracted beams. They resemble each other in profile, but the intensity scale of (a) is 27.3 times larger than (b).

4 위상 고리형 격자($\phi_n = n\pi/2$)에 대해 회절 패턴을 계산한 결과 2 위상의 경우와 같이 홀수차 피크만 나타났으며 m 차 회절광의 세기는 m^{-3} 에 비례하였다. 따라서 회절 효율도 2 위상의 경우와 같을 수밖에 없으며 다만 각 차수의 세기 분포 모양이 그림 3에 나타낸 것에 비해 매우 단조롭다.

8 위상 고리형 격자($\phi_n = n\pi/4$)의 경우에는 2,4 위상의 경우와는 다르게, 1 차 회절광이 매우 강하게 나타나고 3 차 및 5 차는 존재하지 않으며 7,9,15,17,, $8m-1, 8m+1$ ($m=1,2,3,$) 차의 피크들만 나타났다. 그러나 각 차 회절광세기가 차수의 세제곱에 반비례하는 경향은 앞과 동일하였다. 1 차 이후 가장 낮은 차수가 7 차이고 그 세기는 1 차의 1/340에 불과하므로 1차 회절광의 효율이 매우 높으리라 예상할 수 있는데 계산 결과 93%에 이르렀다. 이렇게 높은 회절 효율은 광저대역 필터로서의 성능을 향상시킬 수 있는 요소가 된다. 위상의 개수를 2의 거듭제곱수로 하는 것은 위상 격자의 제작 공정을 고려할 때 가장 효율적인 수이기 때문이다.

16 위상 고리형 격자($\phi_n = n\pi/8$)의 경우에는 1차 및 15,17,31,33,, $16m-1, 16m+1$ ($m=1,2,3,$) 차의 피크들만 나타났다. 이 경우에도 각 차 회절광 세기가 차수의 세제곱에 반비례하는 경향은 앞과 동일하였다. 16 위상 고리형 격자의 회절 효율은 96% 이상이다.

3. 고리형 격자의 MTF 계산 및 분석

비간섭성 결상계(incoherent imaging system)의 OTF(optical transfer function)는 결상계의 공간주파수 전달 특성을 나타내는 함수이며, 상면에서 세기 분포의 푸리에변환으로 정의된다. 따라서 원형 대칭성을 갖는 계에 대해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$OTF : O(\zeta) = 2\pi \int_0^\infty I(R)R J_0(2\pi R\zeta) dR \quad (5)$$

MTF는 OTF의 절대값이다. 앞의 식 (4)에서 구한 세기 분포를 위 식에 대입하여 계산하면 MTF를 구할 수 있다. 식 (5)의 적분 구간은 원칙적으로 무한대까지 해야 하지만 현실적으로 불가능하므로 구간을 한정해야 하는데 세기 분포가 OTF에 영향을 미치는 영역까지는 해야 한다. 회절광의 차수가 10 차가 넘을 경우에 세기는 1 차의 0.1%보다 작

아지므로 별 의미는 없으나 16 위상의 경우에 1 차 회절광을 제외한 가장 낮은 차수가 15,17 차이므로 모든 경우에 17 차까지 포함하여 적분하였다.

2 위상 고리형 격자에 대해 고리의 수를 달리하며 계산한 MTF 그래프를 그림 4에서 볼 수 있다. 그림에서 가로축은 1차 회절광 분포의 크기(지름)를 디지털 카메라의 화소 주기와 같게 한 조건에서 공간주파수를 Nyquist 주파수로 규격화하였다. 그림을 보면 계산에 포함된 주기수가 10 개 이상이면 더 이상 MTF가 변하지 않음을 알 수 있다. 4,8,16 위상인 경우에도 10 주기 이상 포함될 때 더 이상 MTF가 변하지 않았으며 따라서 모든 경우에 10 주기까지 포함하여 MTF를 계산하였다.

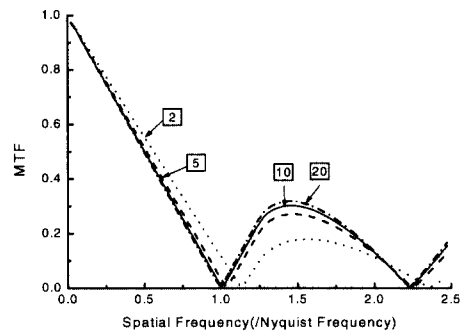


그림 4. 2-위상 고리형 격자의 MTF 그래프. 상자 안의 숫자들은 격자의 주기수를 의미한다. 1차 회절광 분포의 크기(지름)를 카메라의 화소 주기와 같게 한 조건에서 가로축을 Nyquist 주파수로 규격화하였다.

Fig. 4. MTF graphs of 2-phase annular gratings. The numbers in the boxes mean the number of periods of the grating. The spatial frequency is normalized to the Nyquist frequency on condition that the diameter of the first order diffracted beam is equal to the pixel size of the imaging system.

이상적인 광 저대역 필터는 Nyquist 주파수보다 큰 성분은 모두 차단하고 그보다 작은 성분은 모두 통과시키는 것이다. 따라서 이상적인 필터의 MTF는 0부터 Nyquist 주파수까지는 함수값이 1이고 그 이상에서는 0인 것이다. Nyquist 주파수보다 작은 영역에서 MTF 값이 작으면 그 필터를 영상 장치에 설치했을 때 해상도가 나빠진다.

Nyquist 주파수보다 큰 영역에서 MTF 값이 0이 아니면 무아래 무늬를 비롯한 왜곡 신호가 생긴다. 그림 4를 보면 2 위상 고리형 격자의 MTF 그래프가 저주파수 영역에서 직선 형태가 된다. 2 위상 직각 격자의 MTF도 직선이 되는데[10], 직각 격자에 비해 고리형 격자의 회절 효율이 높아 저주파수 영역에서 MTF 값이 증가하여 위로 볼록한 곡선 형태의 그래프를 기대했지만 결과는 마찬가지로 직선 형태가 되었다. 물론 MTF 값이 0이 되는 공간주파수의 값이 직각 격자와 다를 수 있는데 이는 격자의 주기를 변화시켜 조절할 수 있는 것이다. 즉, 가로축의 축적(scale)은 중요하지 않으며 MTF 그래프의 전체적인 모양이 의미가 있다. 따라서 해상도 측면에서는 고리형 격자가 직각 격자에 비해 나아진 점이 없다고 할 수 있다.

그림 4의 그래프에서 Nyquist 주파수보다 큰 고주파수 영역을 보면 MTF 값이 비교적 작음을 알 수 있다. 특히 MTF가 주기 함수인 직각 격자와 비교하면 그 값이 매우 작다고 할 수 있으며 따라서 고리형 격자를 사용할 경우에 무아래 무늬와 왜곡 신호가 적으리라 예상할 수 있다.

4 위상, 8 위상, 그리고 16 위상 고리형 격자의 MTF를 그림 5에 나타냈다. 모두 10 주기를 포함하여 계산하였고 앞에서와 같이 공간주파수를 Nyquist 주파수로 규격화하였다.

그림에서 4 위상 고리형 격자의 MTF 그래프가 2 위상 격자와 같이 저주파수 영역에서 직선이 되는데 실제로 모든 영역에서 두 격자의 MTF가 거의 동일한 결과를 얻었다. 이러한 결과는 회절 격자의 세기 분포로부터 예측할 수 있다. 4 위상 격자의 경우에 2 위상과 같이 모든 홀수 차수가 존재하고 각 차수간 세기 비율도 같으며 회절 효율도 차이가 없다. 즉, 세기 분포가 거의 동일하므로 그 푸리에 변환인 OTF도 비슷하다고 볼 수 있다.

8 위상 고리형 격자의 MTF는 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 4 위상과 다르다. 저주파수 영역에서 직선에서 벗어나 위로 볼록한 모양이 되는데 이는 고차항들이 많이 존재하지 않고 또한 회절 효율이 높기 때문인 것으로 이해할 수 있다. 저주파수 영역에서 MTF 값이 크므로 이 격자를 광 저대역필터로 사용할 경우에 영상 장치의 해상도가 높으리라 기대할 수 있다. 16 위상의 경우에는 저주파수 영역에서 8 위상에 비해서도 더 큰 MTF 값을 얻을 수 있다. 따라서 필터로서의 성능은 위상의 수가 클수록 더 좋다고 할 수 있다. 그러나 위상의 수가 많아지면 필터의 제작 과정에서 더 많은 공정이 필요하게 된다. 공정의 수가 많아지면 경

제성이 떨어질 뿐만 아니라 정렬 오차나 식각(etching) 깊이에서의 오차에 의해 격자의 회절 효율이 떨어지고 이는 MTF 값이 감소하는 요인이 된다. 따라서 해상도의 필요성 및 생산 여건에 따라 적절한 위상 조건을 택해야 한다.

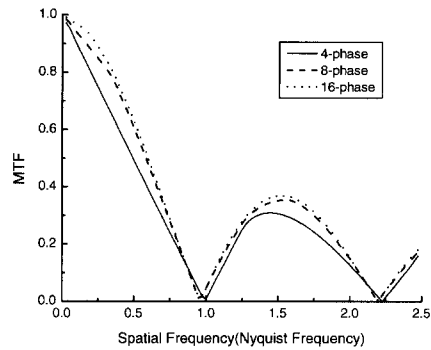


그림 5. 4,8,16-위상 고리형 격자의 MTF 그래프. 1차 회절광 분포의 크기(지름)를 디지털 카메라의 화소 주기와 같게 한 조건에서 가로축을 Nyquist 주파수로 규격화하였다.

Fig. 5. MTF graphs of 4, 8, and 16-phase annular gratings. All the conditions are the same as those of Fig. 4.

4. 실험 및 결과

16 위상 고리형 격자를 실제로 제작하고 측정 장치를 이용하여 MTF를 측정한 후 이론 값과 비교하였다. 격자의 OTF는 Fraunhofer 회절광 세기 분포의 푸리에 변환이므로 격자에 수렴하는 빛을 입사 시키고 초점면에서의 세기 분포를 측정하여 컴퓨터로 푸리에 변환하였다. 측정 장치는 그림 6과 같다.

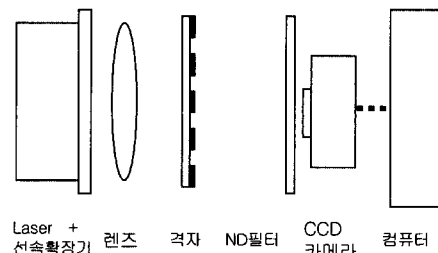


그림 6. OTF 측정 장치의 개략도.

Fig. 6. Diagram of OTF measurement system.

광원으로는 파장 543.5 nm의 *He - Ne* 레이저(Melles Griot, 25LGR025)를 사용하였다. 격자를 제작할 때 파장 550 nm를 기준으로 하였으므로 그에 가장 가깝고 간편한 레이저를 사용하였다. 파장의 오차가 대략 1 %인데 이는 격자 제작공정상의 오차(2 %)보다 작으므로 무시할 수 있다. 레이저의 출력은 0.2 mW이고 연속 발진(CW) 레이저이다. 레이저 광속(beam)의 공간적인 세기 분포는 가우스함수(Gaussian) 모양이며 지름($1/e^2$)은 0.63 mm이다. 실험에 사용할 격자의 주기가 96 μm 이므로 레이저 광 속에 6 주기밖에 들어가지 않아 광속 확대기(beam expander, 10)를 사용 하였다. 격자의 Fraunhofer 회절 패턴을 얻기 위해서는 수렴하는 빛을 입사 시켜야 하며 따라서 렌즈가 필요하다. 렌즈와 그 초점면 사이에 다양한 격자를 놓을 수 있도록 초점 거리가 30 cm인 렌즈를 사용하였다.

초점면에서의 세기 분포를 측정하기 위하여 CCD 카메라(UNIQ의 UP600)를 사용하였다. CCD의 유효 화소수는 659×494 개이고 픽셀의 크기는 7.4×7.4 μm 이다. 카메라로 수렴하는 회절광이 매우 강하여 CCD 화소를 포화 시키므로 ND(neutral density) 필터(밀도 2.0)를 CCD 앞에 설치하였다. CCD의 신호를 영상 획득보드(frame grabber)를 통해 컴퓨터가 읽어 푸리에 변환하였다.

실험에 사용한 시료는 16 위상 고리형 격자이다. 격자의 재료는 유리(soda-lime silicate glass)이고 굴절률은 1.523이다. 두께가 0.7 mm인 유리판에 광 리토그래피(lithography)와 식각(etching) 공정으로 두께를 변화시켜 위상 격자를 만들었다. 세부 공정은, 세척을 한 유리 원판에 스피ن 코팅(2500rpm, 30초) 방법으로 포토레지스트(PR)를 도포하였고, 60분 가량 굽기(baking) 한 후 노광 장치(contact aligner)에서 350 mW에 6 초 동안 노출 했다. 위상차 (180)에 해당하는 식각 깊이는 530 nm이고 오차한계는 10 nm이다. 16 위상 격자에서 인접한 계단간의 위상차는 $\pi/8(22.5^\circ)$ 이며 그 깊이는 66 nm이다. 위상 계단 하나의 폭은 6 μm 이며 따라서 격자의 주기는 96 μm 이다.

측정된 MTF는 격자뿐만 아니라 레이저 광의 공간 분포, 렌즈, CCD, 영상 획득 보드 등의 영향이 모두 포함된 결과이다. 이론적으로 구한 격자의 MTF와 비교하기 위해서는 격자만의 MTF를 측정해야 한다. 일반적으로 이러한 전체 계의 MTF는 각 구성 요소들의 MTF의 곱으로 나타난다[13]. 따라서 격자를 설치한 후 측정된 MTF를 격자 없이 측정된 MTF로 나누어 격자만의 MTF를 측정하였다. 측정 결과는 그림 7과 같다.

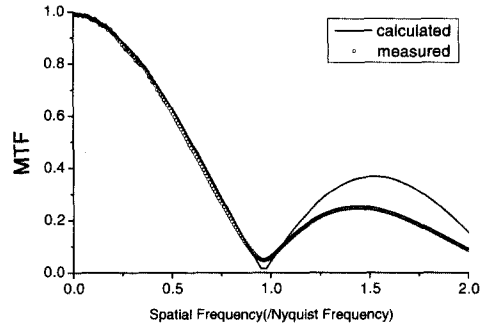


그림 7. 16 위상 고리형 격자의 MTF 측정 결과. 공간주파수는 그림 4에서와 같이 규격화하였다.

Fig. 7. Measured MTF of 16-phase annular grating. The spatial frequency is normalized as in the Fig. 4.

그림 7의 측정 결과를 보면 이론적으로 예측했던 것과 같이 저주파수 영역에서 MTF 그래프가 위로 블록해졌음을 알 수 있다. 이는 저주파수 영역의 MTF 값이 증가했음을 의미하는 것이고 따라서 16 위상 고리형 격자를 사용하면 영상 장치의 해상도가 2 위상에 비해 높을 것이라 예상할 수 있다.

실험 결과는 이론치와 비교적 잘 일치하지만 고주파수 영역에서 약간의 차이를 보이고 있고 또한 Nyquist 주파수에서 MTF 값이 0이 되지 않았다. 시료를 만들 때 식각 깊이의 오차와 다중 위상 구조를 만들 때의 정렬 오차(mis-align) 등 공정상의 오차에 의해 회절광 세기 분포가 이론치와 달라진다. 상면의 중심에는 이론적으로는 거의 회절광이 존재하지 않아야 하지만 시료 제작 과정의 오차로 인해 실제로는 강한 0 차 회절광이 존재함을 실험 과정에서 볼 수 있다. 한 점에만 유한한 세기가 존재하는 함수를 푸리에 변환하면 상수함수가 되므로 0 차 회절광은 MTF 그래프를 위로 뜨게 하는 역할을 한다. 따라서 Nyquist 주파수에서 MTF 값이 0이 되지 않는 이유는 공정상의 오차 때문이라 할 수 있다.

공정상의 오차에 의해 회절 효율이 감소할 경우에는 MTF 그래프가 이론치보다 아래로 내려와야 한다. 그러나 그림 7에서는 이론과 실험이 별 차이를 보이지 않는다. 이는 실험을 할 때 충분히 높은 고차 회절광들까지 CCD에서 측정하지 못했기 때문이라 판단된다.

5. 결 론

고리형 격자의 회절 패턴을 이론적으로 구하고 이를 광 저대역 필터로 사용하였을 때의 특성을 분석하였다. 2 위상뿐만 아니라 4,8,16 등 다중 위상고리형 격자의 회절광 분포를 계산한 결과 2,4 위상 격자의 경우에는 모든 홀수차 회절광이 존재한 반면에 8 위상의 경우에는 1 차와 함께 $8m - 1, 8m + 1, (m = 1, 2, 3, \dots)$ 차의 회절광들만 나타났다. 또한 16 위상의 경우에는 1 차와 함께 $16m - 1, 16m + 1, (m = 1, 2, 3, \dots)$ 차의 회절광들만 존재하였다. 그러나 모든 경우에 각차수의 세기 비율은 동일하여 m 차 회절광의 세기는 m^{-3} 에 비례하였다. 1 차 회절광의 효율은 2,4 위상 고리형 격자의 경우에는 약 80 %였고 8 위상의 경우에는 92 %, 그리고 16 위상의 경우에는 96 %에 이르렀다.

각 고리형 격자의 회절광 세기 분포를 푸리에 변환하여 MTF를 계산하였다. 고리형 격자의 회절 효율이 직각 격자에 비해 높았지만 2,4 위상의 경우에 저주파수 영역에서 MTF 그래프가 직선 형태가 되어, 주기를 바꿔 가로축 축척을 조절할 수 있다는 점을 감안하면 해상도 측면에서는 직각 격자와 동일하다고 할 수 있다. 그러나 고주파수 성분 제거효과는 직각 격자보다 좋음을 확인하였다. 격자의 위상 계단의 수를 8 또는 16으로 하면 저주파수 영역에서는 MTF 값이 증가하고 그래프가 위로 볼록한 모양이 되었고 Nyquist 주파수 이상의 고주파수 영역에서는 앞에서와 큰 차이가 없었다.

16 위상 고리형 격자를 제작하고 그 MTF를 측정하였다. 측정 결과는 이론과 같이 저주파수 영역에서 MTF 값이 증가함을 보여주었다. 따라서 다중 위상고리형 격자를 공간주파수 필터로 사용할 때 해상도가 향상될 수 있음을 확인하였다. 그러나 위상의 수가 증가할수록 제작 공정의 수가 증가하고 따라서 공정상의 오차에 의해 MTF 값이 이론치로부터 멀어지므로 상황에 따른 적절한 선택이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2002년 원광대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] G. C. Holst, "CCD Arrays, Cameras, and Displays", SPIE Optical Engineering Press and JCD Publishing, Washington, chap. p. 8, 1998.
- [2] R. H. Vollmerhausen, and R. G. Griggers, "Analysis of Sampled Imaging Systems", SPIE Press, Washington, chap. p. 7, 2000.
- [3] G. C. Holst, "Sampling, Aliasing, and Data Fidelity", SPIE Optical Engineering Press, Washington, chap. p. 4, 1998.
- [4] T. Asaida, "Optical low-pass filter including 3-crystal plates for solid state color-TV camera", U.S. Patent, p. 4761682, 1988.
- [5] J. E. Greivenkamp, "Color dependent optical prefilter for the suppression of aliasing artifacts", Appl. Opt. 29, p. 676, 1990.
- [6] K. Fumisawa, M. Uetsiki, and Y. Nishida, "Grating optical low-pass filter", Jpn. J. Appl. Phys. 35, p. 1768, 1996.
- [7] Y. H. Oh, J. C. Lee, S. Lim, S. H. Kim, and C. S. Go, "Grating images of multi-phase grating optical low-pass filters", Opt. Eng. 42, p. 994, 2003.
- [8] C. S. Go, Y. H. Oh, S. Lim, S. Kim, and J. C. Lee, "Grating optical low-pass filters with near perfect stop band characteristics", Jpn. J. Appl. Phys. 41, p. L1090, 2002.
- [9] 김인길, 고춘수, 임성우, 오용호, 이재철, "컴퓨터로 설계한 홀로그램 광 저대역 필터의 특성 분석", 전기전자재료학회지 제16권, 제125호, p. 1261, 2003.
- [10] J. C. Lee, S. Lim, S. H. Kim, Y. H. Oh, and C. S. Go, "The filtering characteristics of simple grating optical low-pass filter", Appl. Phys. B. 74. p. 563, 2002.
- [11] J. W. Goodman, "Introduction To Fourier Optics", McGraw Hill, New York, 5, 1968.
- [12] J. D. Gaskill, "Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics", John Wiley & Sons, New York, p. 317, 1978.
- [13] G. C. Holst, "CCD Arrays, Cameras, and Displays", SPIE Optical Engineering Press and JCD Publishing, Washington, chap. 10, 1998.