

컴퓨터로 설계한 2 위상 홀로그램 광 저대역 필터에서 위상차가 필터의 MTF 특성에 미치는 영향

Effects of the Phase Error on the MTF Characteristics of Binary-phase Hologram Optical Low-pass Filter

고춘수^{1,a}, 오용호¹
(Chun-Soo Go^{1,a} and Yong-Ho Oh¹)

Abstract

When we design a binary phase holographic optical low-pass filter (HOLF), the phase difference is generally set to be π to optimize the diffraction efficiency. However, the phase difference of real HOLF mostly deviate from π by the error in the fabrication process. The deviation causes the (0,0)-th order diffracted beam to increase, which results in raising the diffraction efficiency. To study the effects of the phase error on the performance of HOLF, we calculated the MTF of HOLF for various phase differences. The results show that the phase error of 10 % makes little change in the filtering characteristics of HOLF. Considering the filtering by lens and CCD, the effects of the phase error becomes much smaller. To confirm it experimentally, we fabricated HOLF's for various phase differences. After installing it in a digital camera, we take picture of test targets and observe the Moiré fringes and the resolution. The results agree with our prediction.

Key Words : Spatial frequency filter, Computer generated hologram, MTF(modulation transfer function), Binary phase hologram, Moiré fringe

1. 서론

CCD(charge-coupled device), CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) 영상센서 등을 이용하는 디지털 영상 입력 장치에는 광 저대역 통과 필터(optical low-pass filter, OLPF)가 필요하다. OLPF의 목적은 높은 공간 주파수 성분을 제거하는 것이다. 디지털 영상 장치로 입력되는 상에 기준 주파수보다 큰 공간주파수 성분이 있으면 재생된 상에 왜곡(aliasing)이 생긴다[1-3]. 또한 많은 무아레(Moiré) 무늬가 나타난다. 여기서 기준

공간주파수는 화소(pixel) 주기의 역수의 반에 해당하며 이를 Nyquist 주파수라고도 부른다.

현재 주로 사용되는 광 저대역 필터는 결정 두 장을 붙여 만든 복굴절 필터 (birefringent optical low-pass filter, BLF)인데 비교적 비싸고 두꺼워 이동 통신용 단말기 등의 카메라에는 적용하기 곤란하다[4,5]. 이러한 요구에 따라 회절 격자형 광 저대역 필터 (grating optical low-pass filter, GOLF)와 홀로그램 필터(hologram optical low-pass filter, HOLF)가 연구되고 있다[6-9]. GOLF나 HOLF는 유리 표면에 얇은 막으로 2 차원 격자나 홀로그램을 형성한 것으로서 얇고 경제적이란 장점이 있다.

GOLF나 HOLF의 성능은 그 회절 패턴에 달려 있다. GOLF나 HOLF는 결상 렌즈의 앞이나 뒤에 놓이게 되고 CCD는 결상면(초점면)에 위치하므로 그 회절 패턴은 Fraunhofer 회절에 해당한다. 공간

1. 원광대학교 반도체·광디스플레이학부
(전북 익산시 신용동 344-2)
a. Corresponding Author : kosoo@wonkwang.ac.kr
접수일자 : 2005. 4. 25
1차 심사 : 2005. 7. 3
심사완료 : 2005. 7. 13

주파수 필터의 역할은 렌즈에 의해 한 점으로 수렴해야 할 빛을 적당한 크기를 갖는 유한한 영역으로 퍼뜨리는 것이다. 고주파 성분을 적당히 제거하면서도 영상장치의 해상도를 높게 유지하려면 회절 효율이 높아야 한다. 여기서 회절 효율이란 전체 입사광 중에서 목표로 하는 유한한 영역 안으로 회절되는 비율로 정의한다.

우리는 최근에 몬테-카를로(Monte-Carlo) 방법으로 2 위상 HOLF를 설계하고 이를 실제로 제작하여 디지털 영상 장치에 적용한 결과를 보고한 바 있다[9]. 홀로그래를 작은 셀들로 나누고 각 셀은 0 또는 $\pi(180^\circ)$ 의 위상을 갖도록 하며, 홀로그래의 회절 패턴이 목표로 한 상(image)에 가장 가깝도록 셀들의 위상을 최적화하였다. 위상차를 π 로 한 이유는 2 위상 홀로그래에서 최대 위상차 값이 π 이고 일반적으로 이 때 홀로그래의 회절 패턴이 목표 상(goal image)에 가장 가깝기 때문이다. 그런데 위상 홀로그래를 제작하는 과정에서 위상 오차가 발생하면 위상차를 π 로 가정하여 최적화된 HOLF의 회절 효율이 설계치와 달라진다. 일반적으로 위상차에 오차가 생기면 회절 효율이 감소하리라 예상할 수 있다. 특정 영역으로 회절광을 모으기 위해 HOLF를 최적화하였는데 위상값이 처음의 설정값과 다르면 그 영역 밖으로 퍼져 나가는 회절광이 더 많아질 것이기 때문이다. 그러나 일반적으로 2 위상 격자나 홀로그래에서 위상차가 π 에서 멀어지면 상쇄 효과가 감소하여 (0,0)-차 회절광의 세기가 커진다. HOLF를 설계할 때 목표로 한 상이 (0,0)-차 회절광을 포함하는 경우가 대부분인데 이 경우에 위상 오차가 발생하면 회절 효율이 오히려 증가할 수 있는 것이다.

회절 효율이 증가한다고 반드시 필터의 성능이 향상되는 것은 아니지만 위상 오차에 의해 필터의 성능이 급격히 저하되지는 않을 것이라 예상할 수 있다. 본 논문에서는 2 위상 HOLF에서 위상 오차가 필터의 특성에 미치는 영향에 대해 보고한다. 2 절에서는 위상 오차에 따른 이론적인 회절 효율과 MTF(modulation transfer function) 특성 변화를, 3 절에서는 여러 가지 위상차의 HOLF를 제작하고 디지털 카메라에 부착하여 실험한 결과를 기술하며, 4 절에서는 렌즈와 CCD까지 고려한 전체 영상계의 MTF 특성에서 위상 오차가 미치는 영향을 분석한다.

2. 위상 오차에 따른 HOLF의 특성 변화

몬테-카를로 방법으로 설계한 2 위상 홀로그래

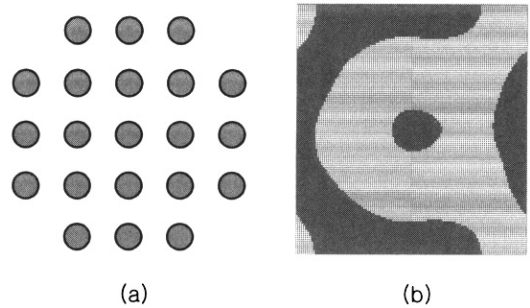


그림 1. (a) HOLF 설계시의 목표 상(goal image). (b) 설계된 2 위상 HOLF의 위상 구조.
 Fig. 1. The goal image of the hologram. (b) The phase structure of a designed HOLF.

광 저대역 필터를 그림 1에서 볼 수 있다[9]. 목표로 삼은 회절 패턴은 그림 1(a)과 같이 원에 가까운, 21 개의 회절 빔살로 이루어져 있다. 홀로그래가 주기적이므로 그에 의한 회절 패턴이 불연속적인 점들로 나타난다. 위상차를 π 로 설정하고 설계한 HOLF의 위상 구조는 그림 1(b)와 같다. 그림에 나타난 것은 한 주기에 해당하며 120×120 개의 셀들로 이루어져 있다. 각 셀은 0 또는 π 의 위상을 갖는다.

위상차가 π 일 때 그림 1(b)에 나타난 HOLF의 회절 효율은 78 %이다. 여기서 회절 효율은 입사광 중에서 21 개의 회절 빔살이 차지하는 세기 비율을 의미한다. (0,0)-차 회절 빔살의 세기는 3.8 %로서 21 개 회절 빔살의 평균에 가깝다. 이는 21 개 회절 빔살들이 거의 균일한 세기 분포를 갖는다는 것을 의미한다.

위 홀로그래의 위상차가 π 로부터 멀어질 때 회절 효율과 (0,0)-차 회절 빔살의 세기를 표 1에 나타냈다. 여기서 효율과 세기는 홀로그래 설계 프로그램에서 계산된 값이다. π 보다 작은 위상차만 나타냈는데, 2 위상 홀로그래이므로 위상차가 $(\pi+\delta)$ 인 경우는 $(\pi-\delta)$ 인 경우와 같다. 표를 보면 위상차가 π 에서 멀어질수록 회절 효율이 커짐을 알 수 있다. 위상차를 π 로 설정하여 설계한 HOLF지만 π 에서 멀어질수록 오히려 회절 효율이 커지는 것은 (0,0)-차 회절광이 커지기 때문이다. 표에서 보면 위상차가 0.5 π 일 때 (0,0)-차 회절광의 비율이 전체 입사광의 50 %를 넘음을 알 수 있다. 이렇게 한 점이 차지하는 비중이 너무 크면 고주파수 성분 제거 효과가 떨어진다. 극단적으로 위상차가 0으로

표 1. 여러 가지 위상차에 대해 계산한 2 위상 HOLF의 회절 효율과 (0,0)-차 회절 빔살의 세기 비율.

Table 1. The calculated diffraction efficiency and the intensity ratio of (0,0)-th order diffracted beam of a binary phase HOLF for various phase differences.

위상차	회절 효율 (%)	(0,0)-차 회절광 세기 (%)
π	78	3.8
0.9π	79	6.1
0.8π	80	13
0.7π	83	24
0.6π	86	37
0.5π	89	52

접근하면 (0,0)-차가 100 %를 차지하게 되고 이것은 필터가 없는 경우와 같다. 따라서 필터로서의 성능은 회절 효율뿐만 아니라 회절 빔살들의 분포도 함께 고려해야 함을 알 수 있다. 어떤 분포가 이상적인지 판단하기 위해서는 필터의 특성을 나타내는 MTF를 살펴보아야 한다.

그림 1에 나타난 HOLF에 대해 위상차를 변화시키며 계산한 MTF 그래프를 그림 2에 나타냈다. MTF 값들은 홀로그래프 설계 프로그램에서 이론적인 회절광 세기 분포를 푸리에 변환하여 구한 것이다. 2 차원의 세기 분포 함수를 푸리에 변환하였으므로 3 차원 그래프를 그릴 수 있지만 2 차원 그래프가 정량적인 비교를 하기엔 더 편하므로 일반적으로 축 방향 단면도로 나타낸다. 그림 2 또한 축 방향 단면도이며 특히 이 HOLF의 경우에는 세기 분포가 원형에 가까우므로 방향에 따라 큰 차이가 없다. 그래프의 가로축은 차단주파수(cutoff frequency)로 규격화하였는데 여기서 차단주파수는 위상차가 π 일 때 MTF 값이 처음으로 0이 되는 공간주파수로 정의하였다.

공간주파수 필터의 목적은 Nyquist 주파수보다 큰 성분을 제거하는 것이다. 그보다 높은 주파수 성분이 많이 남아 있으면 왜곡 신호가 많고 반면에 낮은 주파수 성분을 많이 제거하면 영상계의 해상도가 감소한다. 고주파 영역과 저주파 영역의

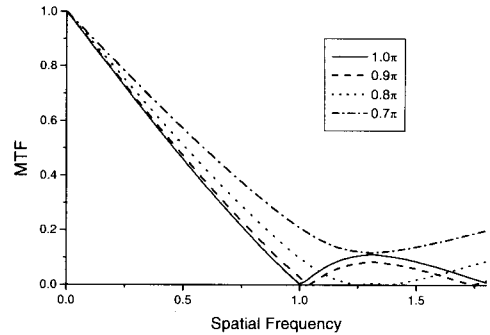


그림 2. 설계된 HOLF의 위상차를 변화시키며 계산한 MTF 그래프.

Fig. 2. Calculated MTF graph of designed HOLF for various phase differences.

상반된 요구를 만족시키기 위해서는 차단주파수의 적절한 선택이 필요한데 일반적으로 차단주파수를 Nyquist 주파수와 같도록 하는 것이 최선의 방법이다. Nyquist 주파수는 CCD 화소의 크기에 의해 결정되므로 고정된 상수라 할 수 있고 따라서 홀로그래프의 주기를 변화시켜 차단주파수를 조절한다.

그림 2에서 위상차가 0.9π 일 때의 MTF 그래프를 1.0π 일 때와 비교해 보면 우선 저주파수 영역에서 MTF 값이 조금씩 증가했음을 알 수 있다. 이러한 현상이 생긴 원인은 앞에서 언급한 바와 같이 (0,0)-차 회절 빔살의 세기가 증가하며 회절 효율이 조금 증가한 결과이다. 결과적으로 필터를 통과하는 저주파수 성분이 많아졌으므로 영상계의 해상도는 조금 증가할 것으로 예상된다. 위상차가 0.9π 일 때에 볼 수 있는 다른 현상은 차단주파수가 1.0π 일 때에 비해 약 4 % 커졌고 또 일부 고주파수 영역에서는 MTF 값이 감소했다는 것이다. 일부 고주파수 영역에서는 MTF 값이 증가하였고 차단주파수가 커졌으므로 영상계 왜곡 신호가 약간 증가할 것이라 예상할 수 있지만 그 변화 폭이 매우 작아 오차 한계 이내일 것으로 판단된다. 따라서 10 %의 위상 오차는 공간주파수 필터로서의 특성에 큰 영향을 주지 못한다고 할 수 있다.

위상차가 더 작아지면 저주파수 영역의 MTF 값이 더욱 증가하고 또한 차단주파수도 증가하다가 0.8π 보다 더 작아지면 차단주파수가 없어지면서 고주파수 영역의 MTF가 크게 증가하게 된다. 따라서 위상차가 π 에서 멀어질수록 영상계의 해상도는 더 좋아지지만 왜곡 신호가 많아질 것이라 예상할 수 있다.

3. HOLF 실장 실험 및 결과

위상차에 따른 필터의 특성을 확인하기 위해 HOLF를 제작하였고 제작된 필터를 카메라에 부착하여 상을 촬영하였다. HOLF의 재료는 두께 0.7 mm의 유리(soda-lime silicate glass, B207)이다. 설계된 HOLF의 마스크를 주문 제작하였고 리토그래피(lithography)와 식각(etching) 공정을 통해 유리 표면에 홀로그램을 새겼다. 유리의 굴절률이 1.523이므로 기준 파장 550 nm에서 위상차 $\pi(180^\circ)$ 에 해당하는 식각 깊이는 530 nm이다. 식각 깊이의 오차 범위는 ± 10 nm이다. 주기 120 μm , 위상차 π 로 제작된 HOLF의 현미경 사진을 그림 3에서 볼 수 있다.

실장 실험을 위한 장치는 그림 4와 같다. 영상 장치로는 CMOS 이미지 센서가 장착된 Zoran의 실험용 카메라(ZR732212)를 사용하였다. 이 장치의 유효 화소 수는 1288 \times 968 개이고 픽셀의 크기는 6 μm 이다. 렌즈는 초점거리 50 mm의 TV 줌 렌즈(Compuar)를 사용하였고 조리개의 F#는 2.0으로 고정하였다. CMOS 이미지 센서 표면으로부터 HOLF까지의 거리는, HOLF에 의해 회절된 21 개 회절광들이 정확히 하나의 화소에 들어간다는 조건에 의해 약 330 μm 가 되므로 HOLF를 렌즈와 카메라 사이에 설치하였다.

조명판에 시험용 표적을 설치하고 카메라로 촬영한 사진을 컴퓨터에 연결하여 기록하였다. 촬영 대상(test target)으로는 무아래 무늬를 관측하기 위해서는 윤대판(zone plate)을, 그리고 분해능을 비교하기 위해서는 EIAJ 도표(EIAJ test chart A)를 사용하였다.

윤대판(zone plate)을 촬영한 결과를 그림 5에 나타냈다. 네 개의 그림은 각각 위상차가 π , 0.9π , 0.8π , 0.7π 인 HOLF를 카메라에 부착한 후 촬영한 것이다. 각 그림에서 윤대판의 중심이 아닌 곳에 여러 개의 동심원들이 있는데 이들이 바로 무아래 무늬이다. 그림 5(a)와 (b)를 비교해 보면 무아래 무늬의 차이가 거의 없으며 따라서 고주파 성분 제거 효과가 유사하다고 할 수 있다. 그러나 그림 (c)에서는 앞의 사진들에 비해 조금 많은 무아래 무늬가 관측되며 (d)의 경우에는 더 많은 무늬가 관측된다. 그림의 좌, 우변 점선으로 표시한 부분에 (a)나 (b)에서는 볼 수 없는 새로운 무아래 무늬가 나타난다. 따라서 2 위상 HOLF의 위상차가 작을수록 무아래 무늬 제거 효과가 적다고 할 수 있으며 이는 MTF 그래프 및 회절 효과에 의한 예측과 일치한다.

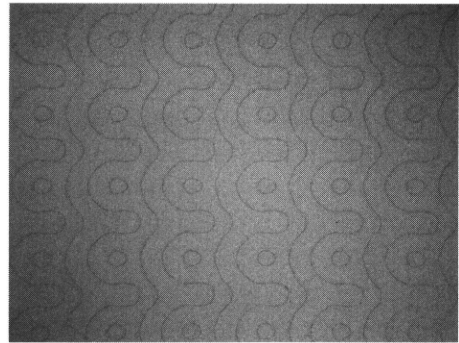


그림 3. 제작된 21-빔 HOLF의 현미경 사진. 홀로그램의 주기는 120 μm 이다.
Fig. 3. The photomicrography of 21-beam HOLF. The period of HOLF is 120 μm .

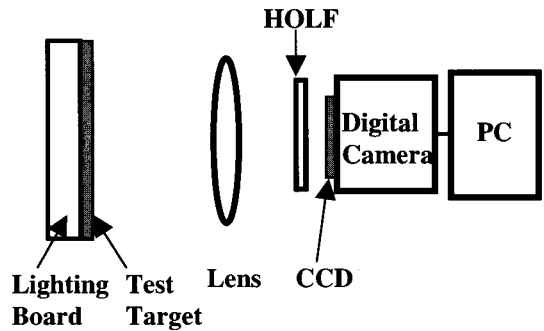


그림 4. HOLF 실장 실험을 위한 장치도.
Fig. 4. Experimental setup to take pictures of test charts by a camera with HOLF.

HOLF를 설치한 디지털 카메라로 EIAJ 도표를 촬영한 결과는 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)부터 6(d)까지 네 장의 사진을 비교해 보면 해상도의 차이가 뚜렷하게 느껴지지는 않지만 (a)보다는 (d)가 더 상이 분명함을 알 수 있다. 예를 들어 중앙 부분의 상, 하, 좌, 우 네 곳에 있는, 공간주파수가 연속적으로 변하는 선들을 보면 (a)의 경우에는 '500'까지 선들이 충분히 분리되어 보이지만 (d)의 경우에는 '400'까지도 약하게 분해(resolve)된다. 네 가지 그림을 좀 더 정량적으로 비교하기 위해 주기적인 선들의 선명도(contrast)를 비교하였다. 선명도는 다음과 같이 정의된다.

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

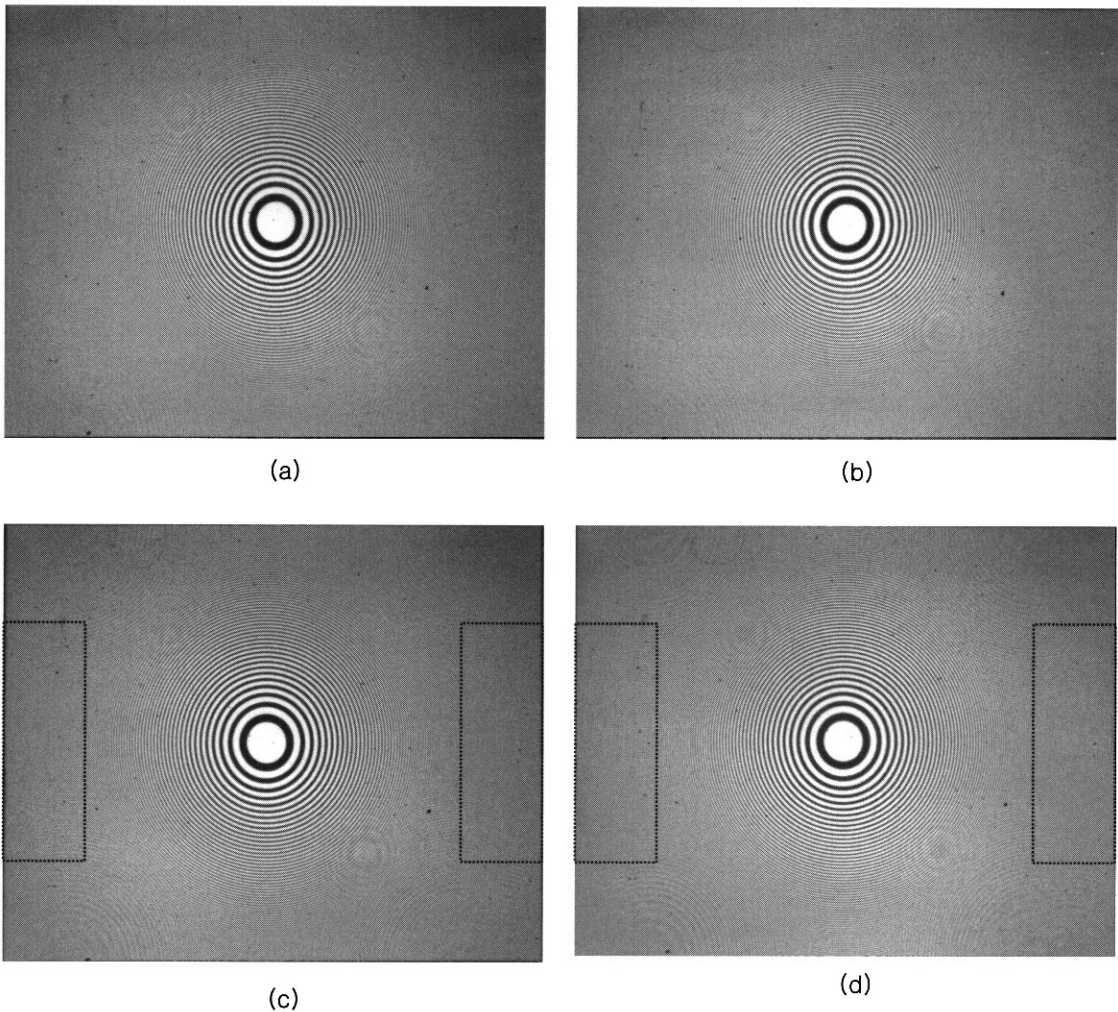


그림 5. 윤대판(zone plate) 촬영 사진. HOLF의 위상차는 각각 (a) π , (b) 0.9π , (c) 0.8π , (d) 0.7π 이다.
 Fig. 5. Images of Zone plate. The phase differences of HOLF: (a) π , (b) 0.9π , (c) 0.8π , (d) 0.7π .

여기서 I_{\max} , I_{\min} 는 각각 주기적인 선들 내부에서의 최대 및 최소 밝기이다. 그림 6 (a), (b), (c), (d)에서 중앙에 있는 평행한 세로줄들의 선명도는 각각 0.27, 0.29, 0.30, 0.33이다. 예측한 대로 HOLF의 위상차가 작을수록 선명도가 높아짐을 확인할 수 있다. 그러나 그 선명도 차이는 예상보다 적다고 할 수 있는데 10%의 위상 오차에 의해 발생한 선명도 차이가 0.02에 불과했으며 또한 20%의 위상 오차에 의해 0.03의 선명도 차이가 나타났다. 그림 2의 그래프에서는 MTF 값들의 차이가 비교적 큰 편인데 이와 같이 실험 결과에서는 차이가

적은 이유는 영상계의 또 다른 요소들이 MTF에 영향을 주기 때문이며 이는 다음 절에서 좀 더 자세히 기술하였다.

4. 토론: 전체 영상계의 MTF에 미치는 영향

디지털 영상 장치는 일반적으로 CCD 또는 CMOS 영상 소자와 렌즈계로 구성된다. 그런데 CCD와 렌즈 모두 높은 공간주파수 성분을 제거하는 필터 역할을 한다. 따라서 디지털 영상 장치에 설치된 HOLF와 같은 광 저대역 필터의 특성을 살

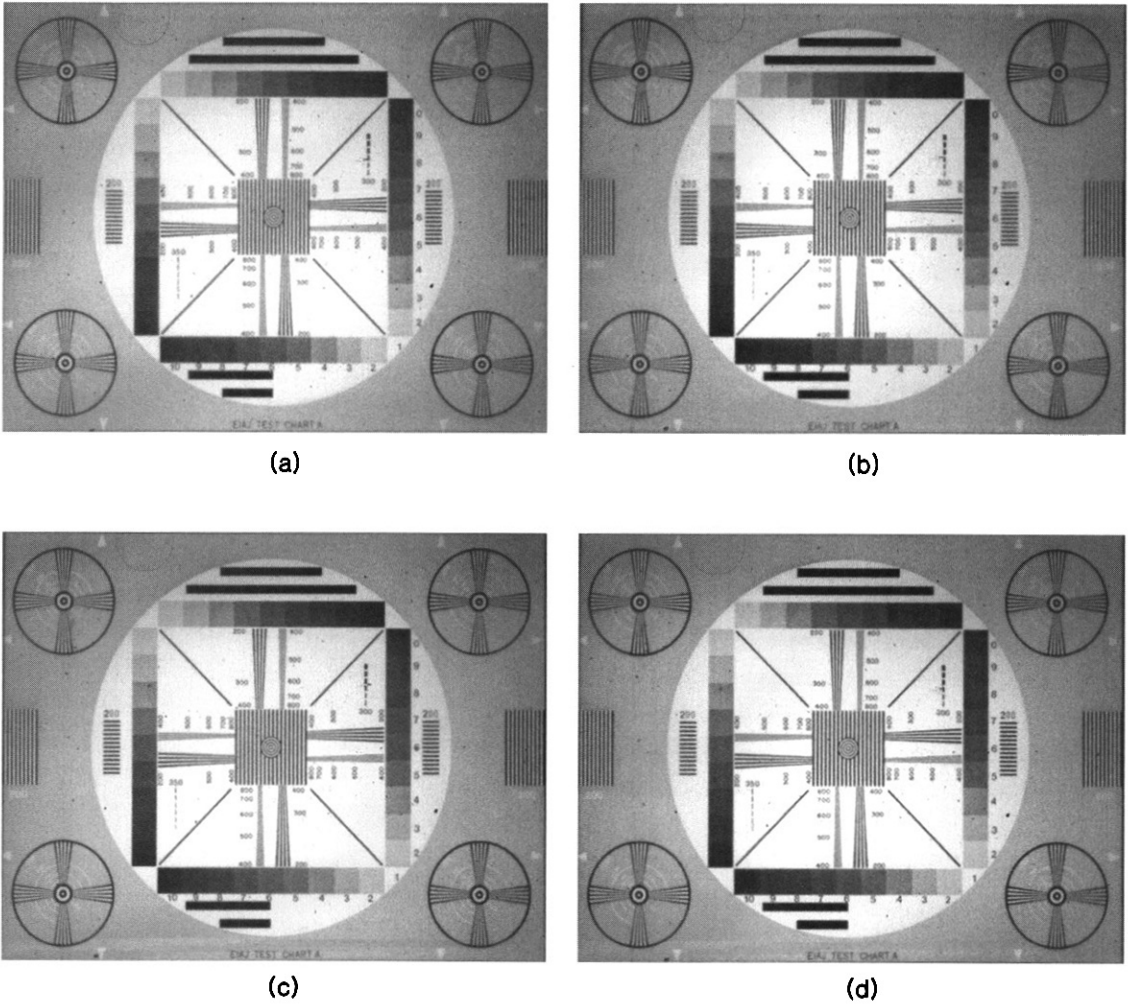


그림 6. EIAJ 도표 촬영 사진. HOLF의 위상차는 각각 (a) π , (b) 0.9π , (c) 0.8π , (d) 0.7π 이다.
 Fig. 6. Images of EIAJ chart. The phase differences of HOLF: (a) π , (b) 0.9π , (c) 0.8π , (d) 0.7π .

피려면 다른 소자들을 함께 고려하여 전체 계의 MTF를 구할 필요가 있다.

CCD의 MTF는 CCD 화소의 채움 인자(fill factor)에 따라 다르다[10]. 채움 인자가 작을수록 차단주파수가 커지고 고주파 성분 제거 효과가 감소한다. 최근에 나오는 대부분의 CCD는 채움 인자가 100 %인데 이 경우에 CCD의 MTF는, 화소 주기만큼의 크기를 갖는 2 차원 사각 함수(rect function)를 푸리에 변환한 것이므로, 다음과 같이 sinc 함수가 된다.

$$M_{CCD}(f_x, f_y) = \text{sinc}\left(\frac{f_x}{2f_{Nx}}\right) \text{sinc}\left(\frac{f_y}{2f_{Ny}}\right) \quad (2)$$

여기서 f_{Nx} , f_{Ny} 는 각각 x , y 방향의 Nyquist 주파수이다. 따라서 차단주파수는 Nyquist 주파수의 두 배가 된다.

렌즈와 조리개로 이루어진 렌즈계의 MTF는 F수(F number)에 의해 결정된다[11]. 공간주파수가 증가함에 따라 MTF 값이 근사적으로 직선 형태로 감소하며 차단주파수는 (파장 \times F수)의 역수이다. 영상계의 F수는 대략 2.0부터 22 이상까지 다양하게 변화시킬 수 있지만 HOLF의 응용 가능성이 높은 이동 통신 단말기 카메라 등에서는 고정된 조리개를 사용하며 그 경우에 F수는 일반적으로 2.8 이하이다. 앞의 실험에서와 같이 F수가 2.0일 때

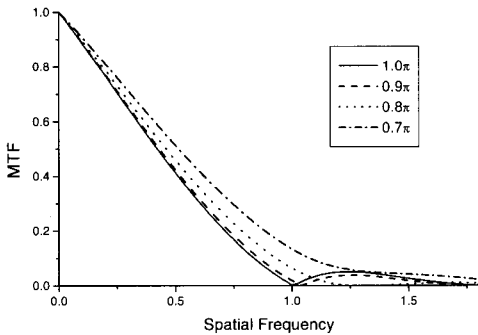


그림 7. 렌즈계, HOLF, CCD로 구성된 영상계 전체의 MTF 그래프.

Fig. 7. MTF graph of the imaging system which consists of lens system, HOLF and CCD.

가시광선의 중심 파장인 $0.55 \mu\text{m}$ 에 대해 차단주파수를 계산해 보면 약 910 lp/mm 이다. 현재 많이 사용되는 디지털 영상 장치의 화소 주기가 대략 $5 \mu\text{m}$ 이므로 그 Nyquist 주파수는 100 lp/mm 이다. 이 값과 비교할 때 렌즈계의 차단주파수는 매우 크므로 Nyquist 주파수 정도의 낮은 주파수 영역에서 렌즈계의 MTF는 많이 변하지 않는다. 따라서 F수가 작을 때 렌즈계에 의한 고주파 성분 제거 효과는 무시할 수 있다.

영상계 전체의 MTF는 각 소자들의 MTF의 곱으로 표현된다[12]. HOLF가 설치된 영상계의 MTF를 그림 7에 나타냈다. 화소의 채움 인자는 100 %로 하였고 렌즈계에 의한 효과는 F수가 작다는 가정 하에 무시하였으며 나머지 조건은 그림 2에서와 같다. 그래프는 HOLF의 위상차가 π 일 때의 차단주파수를 Nyquist 주파수에 맞춘 경우이다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 HOLF의 위상차가 π 에서 10 % 감소할 때 MTF의 변화가 매우 작음을 알 수 있다. 예를 들어 공간주파수가 $0.5f_N$ 일 때 MTF 값의 변화는 0.01에 불과하다. 공간주파수가 $1.2f_N$ 일 때에도 위상차가 π 에서 0.9π 로 변할 때 MTF 값이 불과 0.01 정도만 변한다. 따라서 실제 영상계에 HOLF를 적용할 때 10 %의 위상 오차는 필터로서의 특성에 큰 영향을 미치지 못한다고 할 수 있다.

HOLF의 위상차가 0.8π , 또는 0.7π 일 때에는

MTF 값이 좀 더 많이 변하고 따라서 선명도의 차이도 더 많이 나와 하지만 실장 실험에서는 차이가 크지 않았는데 이는 실험 과정에서 발생하는 오차 때문이라 판단된다.

5. 결론

위상차를 π 로 설정하여 설계한 2 위상 홀로그래프 광 저대역 필터(HOLF)에 10 %의 위상 오차가 발생해도 필터의 특성이 크게 변하지 않음을 확인하였다. HOLF의 회절 패턴 및 MTF를 계산한 결과 위상차가 π 에서 멀어질 때 중심부의 회절 효율이 증가하여 영상계의 해상도를 증가시켜 주지만 고주파 성분 제거 효과는 감소하였다. 영상계의 다른 요소들까지 고려하여 계산한 결과 10 %의 위상 오차에 의해 발생하는 MTF 차이는 0.02 이하로 매우 작았다. 설계한 HOLF를 여러 위상차로 만들고 디지털 카메라에 부착하여 시험용 표적을 촬영한 결과 위상차가 π 에서 멀어질수록 예측한 바와 같이 무아래 무늬는 증가하고 선명도가 높아졌다. 그러나 위상차에 따른 화질 차이가 매우 적음을 실험적으로 확인하였으며 10 % 정도의 위상 오차는 카메라 성능에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2004년 원광대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. HOLF 시료는 (주)해빛정보에서 제작하였으며 또한 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] J. D. Gaskill, "Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics", John Wiley & Sons, New York, p. 266, 1978.
- [2] R. H. Vollmerhausen and R. G. Griggers, "Analysis of Sampled Imaging Systems", SPIE Press, Washington, p. 141, 2000.
- [3] G. C. Holst, "Sampling, Aliasing, and Data Fidelity", SPIE Optical Engineering Press, Washington, p. 82, 1998.
- [4] T. Asaida, "Optical low-pass filter including

- 3-crystal plates for solid state color-TV camera", U.S. Patent 4761682, 1988.
- [5] J. E. Greivenkamp, "Color dependent optical prefilter for the suppression of aliasing artifacts", *Appl. Opt.*, Vol. 29, No. 5, p. 676, 1990.
- [6] K. Fumisawa, M. Uetsiki, and Y. Nishida, "Grating optical low-pass filter", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, No. 3, p. 1768, 1996.
- [7] 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.*, Vol. B74, p. 563, 2002.
- [8] 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.*, Vol. 42, No. 4, p. 994, 2003.
- [9] 김인길, 고춘수, 임성우, 오용호, 이재철, "컴퓨터로 설계한 홀로그래프 광 저대역 필터의 특성 분석", *전기전자재료학회논문지*, 16권, 12S호, p. 1261, 2003.
- [10] G. C. Holst, "Sampling, Aliasing, and Data Fidelity", SPIE Optical Engineering Press, Washington, p. 102, 1998.
- [11] J. W. Goodman, "Introduction To Fourier Optics", McGraw Hill, New York, p. 113, 1968.
- [12] G. C. Holst, "CCD Arrays, Cameras, and Displays", SPIE Optical Engineering Press and JCD Publishing, Washington, p. 267, 1998.