

컴퓨터로 설계한 홀로그램 광 저대역 필터의 특성 분석

The Characteristics of Computer-Generated Holographic Optical Low-Pass Filter

김인길, 고춘수, 임성우, 오용호, 이재철*

(In-Gil Kim, Chun-Soo Go, Sungwoo Lim, Yong-Ho Oh, and Jai-Cheol Lee)

Abstract

Since the grating optical low-pass filter degrades the resolution of images, we developed a hologram optical low-pass filter that show low degradation of the image and studied its characteristics. We designed the hologram that divides input beam into circular shaped 21 beams with a Monte-Carlo based hologram generation program and calculated its MTF characteristics to compare it with that of a grating filter. The hologram was manufactured through the optical lithography process and attached to a digital imaging device (Zoran 732212) for measurement. The moir filtering is compared with zone plate images and the resolution loss is measured with USAF resolution chart. The hologram optical low-pass filter showed better characteristics in both moir filtering and resolution.

Key Words : Holographic optical low-pass filter(HOLF), Grating optical low-pass filter, Moire fringe, Aliasing, Resolution of imaging system

1. 서론

CCD, CMOS 영상센서 등을 이용하는 디지털 영상 입력 장치에는 광 저대역 통과 필터(Optical Low-Pass Filter, OLPF)가 사용된다. OLPF를 사용하는 목적은 높은 공간 주파수 성분을 제거하는 것이다. 고주파 성분이 남아 있을 때 나타나는 현상은 무아레(moiré) 무늬를 포함한 상의 왜곡(aliasing)이다[1]. 무아레 무늬는 공간적으로 주기적 구조를 가지고 있는 두 개 이상의 물체가 겹쳐질 때 형성되는 물결무늬 형태의 간섭무늬를 의미한다. 무아레 현상은 비간섭성 광원을 이용해서도 얻을 수 있는 일종의 강도 간섭효과이다.

현재 사용되는 광 저대역 통과 필터는 복굴절 필터(birefringent optical low-pass filter, BLF)이다. 복굴절 필터는 결정에 의해 정상광선(ordinary ray)과 비정상광선(extraordinary ray)이 분리되는 성질을 이용하며 두 장의 복굴절 결정을 붙여 사용하므로 4-빔 분할기의 역할을 한다[2-4]. 최근 시스템의 소형화 추세에 따라 회절 격자형 광 저대역 필터(Grating Optical Low-pass Filter, GOLF)가 연구되고 있다[5-7]. 격자형 필터는 2 차원 격자에 의한 회절을 이용한 것으로서 얇고 경제적이란 장점이 있다.

GOLF의 최대 단점은 해상도가 떨어진다는 것이다[6]. 해상도를 증가시키면서 동시에 필터로서의 성능을 유지하기 위해서는 회절된 빛을 중앙의 일정 영역에 많이 모아야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해 2 차원 격자의 구조를 변경할 수 있는 방법은 위상 계단의 수를 늘려 다중 위상(multi-phase) 구조로 만들거나 또는 직선적인 격

* : 원광대학교 물리반도체학부
(전북 익산시 신용동 344-2
FAX: 063-858-7389

Corresponding Author : cross-4@hanmail.net
2003년 4월 8일 접수, 2003년 5월 26일 1차 심사완료,
2003년 6월 27일 최종 심사완료

자 구조를 탈피하고 곡선 모양의 일반적인 홀로그래램을 만드는 두 가지를 고려할 수 있다. 그러나 다중 위상 구조의 격자를 만드는 것은 두 번 이상의 공정이 필요하므로 경제성과 생산성 면에서 불리하고 또한 공정 오차에 의해 성능이 감소할 수도 있다. 따라서 실용성면에서 2 위상 구조를 유지하되 일반적인 형태의 홀로그래램을 만드는 것이 유리하다고 볼 수 있다. 다양한 형태의 홀로그래램을 이용하면 직선적인 격자에 비해 더 다양한 회절 패턴을 얻을 수 있으므로 따라서 필터로서 다양한 MTF(modulation transfer function) 특성을 얻을 수 있다. 또한 홀로그래램을 이용하여 격자에 비해 높은 회절 효율을 얻는다면 필터가 채용된 카메라의 해상도를 높일 수 있다. 이러한 동기로 우리는 2 위상 홀로그래램을 광 저대역 필터로 적용하고자 하였다.

직선 구조가 아닌, 일반적인 모양의 홀로그래램을 설계하는 것은 간단한 계산으로 이루어질 수 없으며 이를 위한 설계 도구가 필요하다. 우리는 이를 위해 홀로그래램을 설계할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 제작하였다. 이를 이용하면 특정한 형태의 회절 패턴을 갖는 홀로그래램을 설계할 수 있으며 그 필터로서의 특성도 알 수 있다.

본 논문에서는 2 위상 홀로그래램 광 저대역 필터(Holographic Optical Low-pass Filter, HOLF)의 특성을 GOLF와 비교하여 분석한 결과를 보고한다. 2 절에서는 자체 제작한 프로그램을 이용한 설계 과정을 기술한다. 3 절에서는 설계된 HOLF의 MTF를 이론적으로 분석하였다. 4 절에서는 설계된 HOLF의 제작 과정과 이를 영상 기기에 직접 부착하여 실시한 실장 실험 결과를 보고한다.

2. HOLF 설계

광 저대역 필터의 성능은 MTF 그래프로부터 예측할 수 있고 MTF는 상면(CCD 면)에서의 광 분포에 의해 결정된다. 회절광학 소자를 필터로 사용할 경우에 광 분포는 Fraunhofer 회절 패턴에 해당한다. Fraunhofer 회절에 의해 우리가 원하는 광 분포를 만들 수 있는 홀로그래램을 설계하기 위해 몬테-카를로(Monte-Carlo) 방식의 HOLF 설계 프로그램을 제작하였다.

그림 1은 HOLF 설계 프로그램의 실행레이드. 그림에서 가장 위에 있는 것이 홀로그래램이고 가운데에 있는 것은 위의 홀로그래램에 의한 Fraunhofer 회절 패턴이며 가장 아래쪽에 있는 것은 설계자가

목표로 하는 상면(image plane)에서의 광 분포(object image)이다. 홀로그래램은 주기적(periodic)인데 그림에 있는 것은 한 주기에 해당한다. 한 주기의 홀로그래램은 정방형의 작은 셀들로 나누어져 있고 각 셀은 0 또는 π 의 위상을 갖는다. 실제 사용한 HOLF는 홀로그래램의 한 주기를 140×140 개의 셀들로 나누어 설계하였다. 홀로그래램이 주기적이므로 그에 의한 회절 패턴(가운데 그림)은 불연속적인 점들로 나타나며 따라서 목표 상(아래 그림)도 불연속적인 점들의 집합으로 입력할 수 있다. 목표상은 직접 점을 찍어 입력할 수 있고 또한 외부 그림 파일을 불러들여 입력할 수도 있다.

홀로그래램의 설계 방법은 무작위로 선택된 셀의 위상을 0에서 π 로, 또는 π 에서 0으로 바꾼 후 이득값(merit value)을 계산하여 비용함수의 값이 감소하면 바뀐 위상을 유지하고 반대로 증가하면 위상을 원상회복시키는 몬테-카를로 방식을 이용하였다. 이득값은 홀로그래램에 의한 Fraunhofer 회절 패턴과 목표 상과의 차이를 수치화한 것으로 목표 상(그림 1의 아래 그림)의 불연속적인 각 점의 세기와 회절 패턴(그림 1의 중간 그림)에서 해당되는 점의 세기의 차이를 제공하여 평균한 값으로 정의하였다.

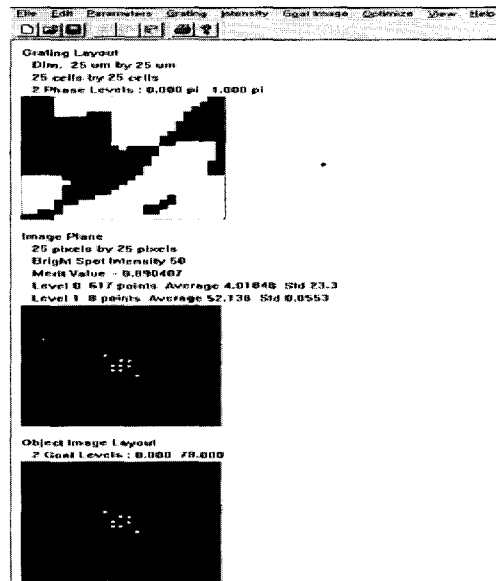


그림 1. 홀로그래램을 설계하기 위해 자체 제작한 프로그램의 실행레이드.

Fig. 1. The screen capture of a program execution of our home-made 'hologram designer'.

목표 상을 입력하고 홀로그래프를 적당한 수의 셀들로 나눈 후 프로그램을 실행하면 회절 패턴이 목표 상에 접근하는 홀로그래프를 구할 수 있는데 이득값의 극소점들(local minima)이 많이 존재하므로 초기 조건에 따라 다른 모양의 홀로그래프를 얻는다. 다양한 홀로그래프를 설계하여 그 특성을 비교하기 위해 각 셀의 초기 조건을 무작위로 줄 수 있도록 하였다.

제작된 프로그램을 이용하면 우리가 원하는 회절 광 분포를 만드는 홀로그래프를 설계할 수 있다. 원하는 광분포란 필터로서 MTF특성이 좋은 분포를 의미한다. 우리가 설정한 목표 광분포는 그림 2.(a)에서 볼 수 있는 것과 같은 21-빔이다. 이러한 광분포를 택한 이유는 비교적 적은 숫자로 입력이 간편하면서도 그 분포가 원형에 가까워 회절 효율이 높고 또한 방향에 따른 필터 특성 변화가 매우 적기 때문이다.

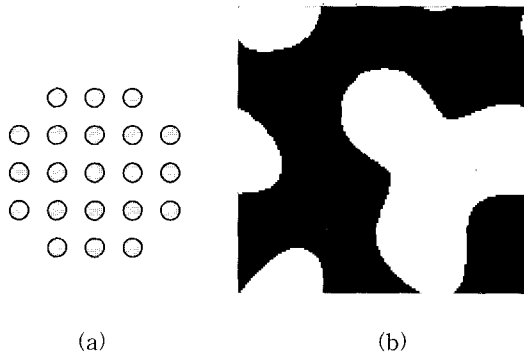


그림 2. (a) HOLF를 설계하기 위해 입력한 홀로그래프의 목표 광분포. (b) 이러한 21-빔을 목표상으로 HOLF설계 프로그램에 입력하여 최적화 과정을 거쳐 얻은 홀로그래프의 위상 구조. 검은 부분과 흰 부분의 위상차는 $\pi(180^\circ)$ 이다.

Fig. 2. (a) Hologram target image for HOLF, (b) The phase structure of the hologram for 21-beam circle that was obtained through the hologram design program. Black and white parts have phase difference of $\pi(180^\circ)$.

21-빔을 목표로 HOLF설계 프로그램에 입력하여 최적화 과정을 거쳐 얻은 홀로그래프의 모양을 그림 2.(b)에서 볼 수 있다. 그림은 홀로그래프의 한

주기만을 표시한 것이며 실제로는 이 모양이 2차원 평면에서 주기적으로 반복된다. 홀로그래프의 한 주기를 140×140 개의 셀(cell)들로 나누어 설계한 것이며 위상차는 $\pi(180^\circ)$ 이다. 그림 2.(b)에 나타난 홀로그래프가 최적의 것이라고 할 수는 없다. 몬테-카를로 방식에 의해 최적화 과정을 수행하므로 초기 조건에 따라 다양한 형태의 홀로그래프를 얻을 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 홀로그래프는 21-빔을 목표로 설계한 홀로그래프 중 회절 효율면에서 우수한 것을 선택한 것이다. 회절 효율은 전체 입사광 중 목표로 한 21 개의 빔이 차지하는 세기 비율이다. 이에 따른 홀로그래프의 회절 효율은 78%이다. 4-빔을 목표로 설계했던 체스판 모양의 GOLF의 회절 효율이 66%였던 것에 비하면 회절 효율이 크게 향상되었다고 할 수 있다.

3. HOLF와 GOLF의 MTF 비교

공간 주파수 필터의 목적은 고주파 성분을 제거하는 것이다. 고주파의 기준은 디지털 영상 장치에서 sampling 주파수의 절반인 Nyquist 주파수이다. Nyquist 주파수보다 높은 공간주파수 성분을 많이 차단할수록 왜곡 신호가 적다. 또한 Nyquist 주파수보다 낮은 성분은 많이 통과할수록 영상 장치의 상이 선명하고 분해능이 높다. 이러한 특성은 필터의 MTF(modulation transfer function)를 통해 쉽게 볼 수 있다. 광 저대역 필터의 MTF는 영상 정보에 담겨 있는 공간 주파수 성분들이 필터를 통과하는 비율을 나타낸다.

광 저대역 필터의 MTF는 아래의 식 (1)로 구할 수 있다[7].

$$M(\xi, \eta) = \sum_m \sum_n I_{mn} e^{-2\pi i(m x_0 \xi + n y_0 \eta)} \quad (1)$$

여기서 ξ, η 는 각각 x, y 방향에 해당하는 공간 주파수이고 I_{mn} 은 홀로그래프에 의한 Fraunhofer 회절에서 (m, n) -차 회절광의 세기이다. 또한 x_0, y_0 는 각각 x, y 방향으로 인접한 회절광 사이의 간격이다. 따라서 홀로그래프에 의한 회절광 분포를 알고 또 회절빔 사이 간격과 CCD 화소 간격 사이의 관계를 알면 (1)로부터 Nyquist 주파수로 표현된 MTF를 구할 수 있다.

회절빔 사이 간격과 CCD 화소 간격 사이의 관

계는 일반적으로 목표로 한 광 분포가 CCD 화소(pixel) 크기와 같도록 한다는 조건으로부터 구한다. 현재 상업적으로 사용되고 있는 복굴절 필터의 경우도 분리된 빔들 사이의 간격이 화소 크기와 같도록 만든다. 이러한 조건에서 차단주파수인 Nyquist 주파수에서 MTF 값이 0이 된다. 같은 조건을 우리의 21-빔 HOLF에 적용하면 $4\times(\text{회절빔 간격})=(\text{화소간격})$ 이 된다. 이보다 빔 간격이 커지면 무아레 제거 효과는 커지지만 해상도가 감소한다. 빔 간격이 작아지면 반대의 현상이 일어난다. 본 논문에서 사용한 HOLF는 위와 같은 조건을 적용하였다.

HOLF 설계 프로그램에서 홀로그래프의 Fraunhofer 회절 분포를 구해 식 (1)에 대입하여 구한 MTF 그래프를 그림 3에서 볼 수 있다. MTF 특성을 비교하기 위해 체스판 모양의 2 위상 GOLF의 MTF도 함께 나타냈다[7]. 그림에 있는 곡선들은 2 차원 MTF 함수 $M(\xi, \eta)$ 를 ξ -축 ($\eta=0$)에서 그린 것이고 공간주파수는 Nyquist 주파수로 규격화하였다. 그림 3의 MTF를 보면 두 필터의 특성을 비교할 수 있다. Nyquist 주파수보다 작은 공간주파수 영역에서는 MTF값이 클수록 영상계의 해상도가 높으므로 좋다. 그림을 보면 이 영역에서 HOLF의 MTF가 GOLF에 비해 높으므로 해상도면에서 뛰어나리라 예상할 수 있다. 이것은 HOLF의 회절 효율이 GOLF보다 높다는 사실로부터 짐작할 수 있는 것이다.

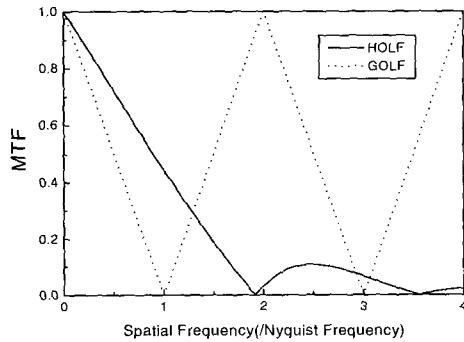


그림 3. HOLF와 GOLF의 이론적인 MTF 그래프. 2 차원 MTF 함수를 한 축 위에서 그린 것이다.

Fig. 3. Theoretical MTF of HOLF and GOLF that was drawn on an axis of two dimensional MTF.

Nyquist 주파수보다 큰 공간주파수가 성분이 많이 통과하면 무아레 무늬가 많고 상의 왜곡(aliasing)이 심해진다. 그림 3에서 두 필터를 비교해 보면 $1.0f_N \sim 1.3f_N$ (f_N 은 Nyquist 주파수)에서는 HOLF의 MTF 값이 크고 $1.3f_N$ 보다 큰 영역에서는 GOLF의 MTF 값이 크다. 물론 그림 3에 있는 필터만의 MTF 그래프로 전체 영상계의 왜곡 정도를 판단할 수는 없다. CCD나 렌즈계 등의 MTF 함수를 곱해야 전체 영상계의 MTF 함수를 알 수 있는데 CCD와 렌즈의 MTF 모두 주파수가 갈수록 MTF 값이 감소하므로 정확한 왜곡 정도를 현재 상태에서 파악하기 어렵다. 다만 $1.3f_N$ 보다 큰 매우 넓은 영역에서 GOLF의 MTF 값이 HOLF 보다 크므로 무아레 무늬나 왜곡 신호가 심할 것이라 추측할 수는 있을 것이다.

4. HOLF 실장 실험과 그 결과

MTF 비교를 통한 필터 특성에 대한 예측을 확인하기 위해 최적화 조건에 따라 설계된 HOLF를 광 lithography 공정을 통해 제작 하였다. HOLF의 재료는 두께 0.7 mm의 유리(soda-lime silicate glass, B207)이다. 광 lithography 세부 공정은 세척을 한 유리 원판에 스펀코팅(2500rpm, 30초) 방법으로 PR을 도포하였고, 60 분가량 PR Baking 처리 하였다. 설계된 HOLF의 마스크는

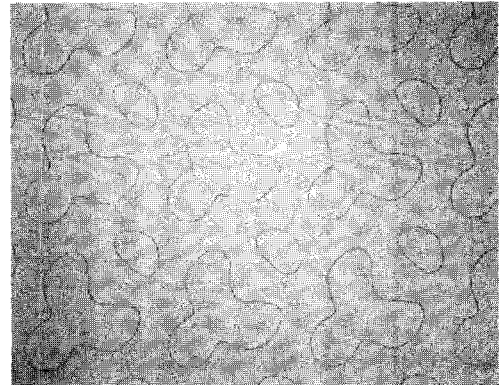


그림 4. 제작된 21-빔 HOLF의 현미경 사진. 홀로그래프의 주기는 280 μm 이다.

Fig. 4. The photomicrography of 21-beam HOLF. The period of HOLF is 280m.

외부에서 제작하였다. 그리고 contact aligner에서 350mW i-line에 6초 동안 노출 했으며, 식각 깊이는 $4800 \pm 100 \text{ \AA}$ 이다. 홀로그램의 주기는 280 μm 이고 홀로그램에서 가장 작은 패턴의 크기는 대략 70 μm 이므로 contact aligner로도 충분한 해상도를 얻을 수 있다. 제작된 HOLF의 현미경 사진을 그림 4에서 볼 수 있다. 제작된 필터를 카메라에 부착하여 상을 촬영하였다.

실장 실험을 위한 장치는 그림 5와 같다. 영상 장치로는 CMOS 이미지 센서가 장착된 Zoran의 실험용 카메라(ZR732212)를 사용하였다. 이 장치의 유효 화소수는 1288×968 개이고 픽셀의 크기는 6 μm 이다. 렌즈와 CMOS 이미지 센서 사이에 HOLF를 설치하기 위해 렌즈의 초점거리가 큰 Computar사의 TV 줌 렌즈를 설치하였다. 조명판에 test target을 설치한 후 카메라로 촬영하였고 이를 컴퓨터에 연결하여 기록하였다.

HOLF 평가 실험에 있어 가장 중요한 요소 중의 하나가 HOLF로부터 영상 센서 표면까지의 거리이다. HOLF의 주기를 P 라 하고 파장을 λ , HOLF로부터 CMOS 센서 표면까지의 거리를 D 라 하면, 21 개의 빛이 하나의 화소에 들어차게 한다는 조건에 의해 $4 \frac{\lambda D}{P} = x_s$ 의 관계가 성립한다. 여기서 x_s 는 화소의 크기이다. 따라서 $D = \frac{P x_s}{4\lambda}$ 이

므로 기준 파장 550 nm에서 거리는 760 μm 가 된다. 만약 거리가 이보다 커지면 회절 빔들 사이의 거리가 커지므로 무아레 무늬 제거 효과는 좋아지지만 해상도가 감소하고, 거리가 작아지면 반대의 현상이 생긴다. 거리와 초점면의 위치를 정확히 조절하기 위해 렌즈와 HOLF를 모두 미세 이동이 가능하도록 설치하였다.

광 저대역 필터의 성능을 평가하기 위한 촬영 대상(test target)으로는 zone plate와 USAF 분해능 도표(resolution chart)를 사용하였다. zone plate은 모든 방향으로 연속적으로 변하는 공간주파수를 가지고 있어 무아레 무늬를 포함한 aliasing을 관측하는 대상으로 주로 사용된다. USAF 분해능 도표는 다양한 공간주파수를 그룹(group)과 원소(element)로 배정하고 그에 해당하는 막대들을 가로와 세로 방향으로 배치한 것으로서 해상도를 관측하기 위해서 많이 사용된다. 촬영 대상은 투명한 판 위에 그려져 있고 이를 조명판 위에 설치하여 HOLF를 바꾸어가며 촬영하였다. Zone plate를 촬영한 결과를 그림 6에 나타냈다. 모든 사진을 촬영할 때 렌즈 조리개의 F#는 2.8로 고정하였다. 그림에서 볼 수 있는 굵은 가로선들은 조명판의 교류 진동수와 CMOS 센서 스캔 진동수의 차이에 의한 것으로 HOLF와는 관계가 없다. 그림 6(a)는 광 저대역 필터로 HOLF를 사용하여

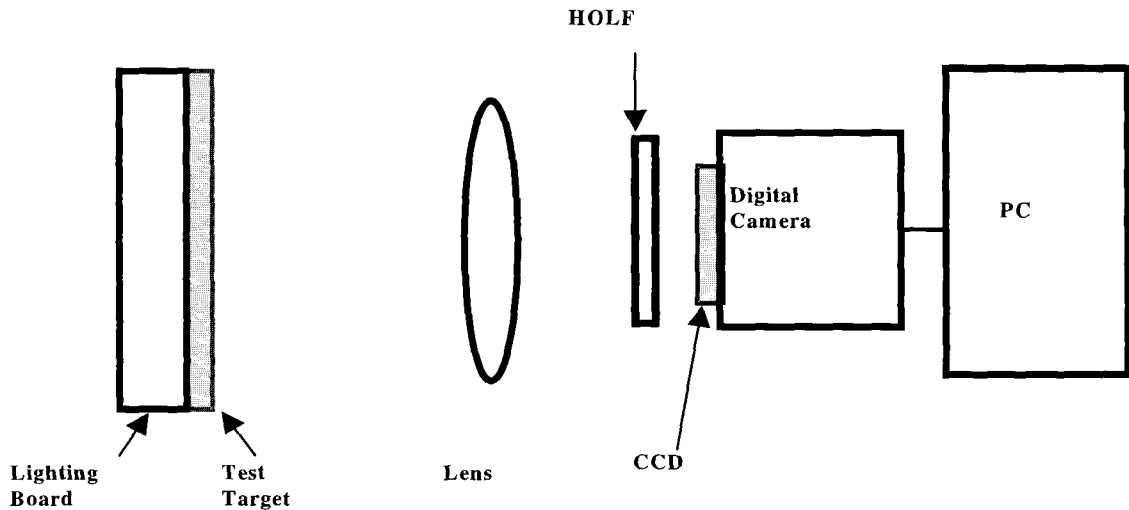


그림 5. HOLF 실장 실험을 위한 장치도.
Fig. 5. Experimental setup of HOLF characteristic measurement.

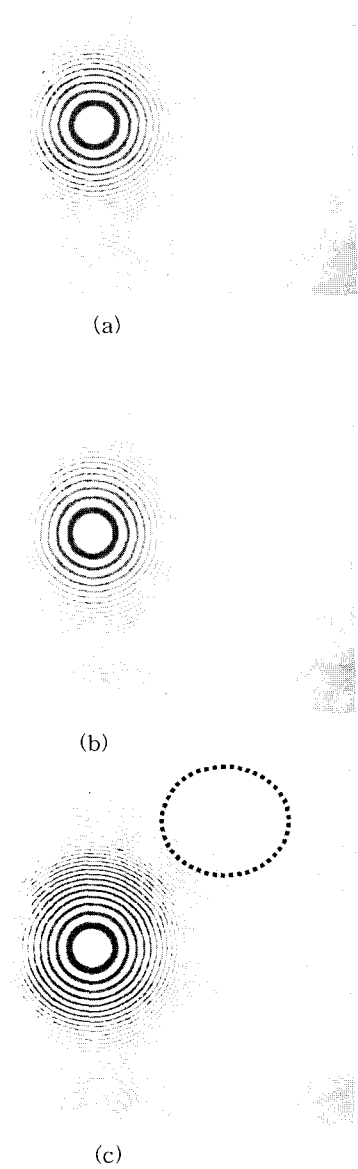


그림 6. 실장 실험용 카메라로 촬영한 zone plate의 상. (a) HOLF를 장착한 경우, (b) GOLF를 장착한 경우, (c) 광 저대역 필터가 없는 경우.

Fig. 6. Zone plate image through the digital camera for measurement. (a) With HOLF, (b) With GOLF, (c) No optical low-pass filter.

촬영한 것이고 6(b)는 GOLF를 사용하여 촬영한 것이다. 필터의 효과를 확인하기 위해 필터가 없이 촬영된 사진을 그림 6(c)에 함께 나타냈다. 그림 6(c)를 보면, 점선으로 표시된 원에서 볼 수 있는 것처럼, zone plate의 중심이 아닌 곳에 여러 개의 동심원들이 있는데 이들이 바로 무아레 무늬이다. 필터가 없을 때 무아레 무늬가 매우 심하게 나타남을 알 수 있다. HOLF와 GOLF를 사용하여 측정된 결과인 그림 (a), (b)를 보면 무아레 무늬가 크게 감소한 것을 알 수 있다. 그리고 HOLF와 GOLF를 사용하여 측정된 경우를 비교해 보면 두 필터의 무아레 제거 효과가 확연히 구별되지 않지만 화면상으로 HOLF가 약간 우수함을 알 수 있다. 무아레 무늬의 선명도를 비교하기는 어려우므로 동심원 집단의 수를 세어 두 필터를 비교해 보았다. 여기서 동심원 집단이란 중심이 같은 위치에 있는 무아레 원무늬들을 의미한다. HOLF를 사용한 경우에는 동심원 집단의 수가 16개, GOLF의 경우 18개가 관측되었다. 따라서 HOLF의 필터 효과가 GOLF보다 우수하다고 할 수 있다.

USAF1951 분해능 도표를 촬영한 결과는 그림 7에 나타내었다. USAF 도표에는 여러 개의 그룹(그림에서는 -4 그룹부터 1 그룹까지 볼 수 있다.)이 존재하고 각 그룹은 6 개의 원소(element)로 이루어져 있다. 각 원소는 3 개씩의 가로 막대와 세로 막대로 이루어져 있다. 그룹 번호가 클수록, 그리고 원소 번호가 클수록 공간주파수가 크다. 그룹 번호가 1만큼 증가하면 막대의 간격과 크기가 절반이 되므로 공간주파수가 2 배가 된다. 한 그룹 내에서 원소 번호가 1만큼 증가하면 공간주파수는 $2^{1/6}(=1.12)$ 배만큼 증가한다.

그림 7의 (a), (b)를 보면 육안으로는 해상도의 차이가 뚜렷하게 느껴지지 않는다. 그러나 도표의 각 원소들의 선명도(contrast)를 화면으로부터 읽어 계산해 보면 그 차이가 드러난다. 선명도는 아래 식 (2)와 같이 정의된다.

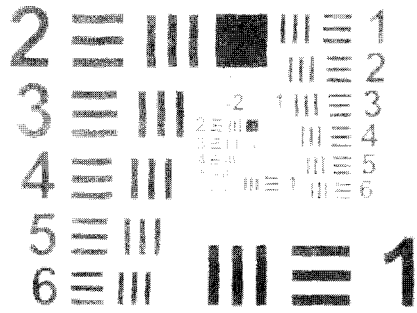
$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

여기서 I_{\max} , I_{\min} 는 각각 원소 내의 줄무늬와 그 주변부에서의 최대 및 최소 밝기이다. 예를 들어 (-1)-그룹 제 1 원소의 최대 선명도는 HOLF를 장착하여 촬영한 그림 7(a)에서는 0.42이지만 GOLF를 사용한 그림 7(b)에서는 0.32이다. 선명도

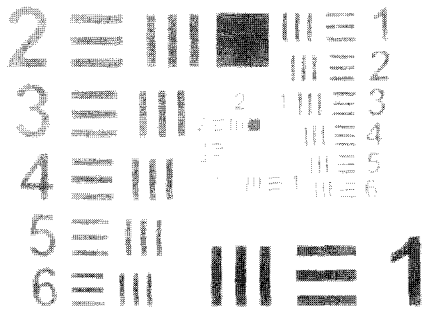
가 0.50 이상일 때 그 원소를 분해하는 것이 가능하다고 할 때 HOLF를 사용한 경우에는 (-2)-그룹 제 4 원소까지 분해가 가능하지만 GOLF를 사용한 경우에는 (-2)-그룹의 제 2 원소까지 분해가 가능하다. 따라서 HOLF의 분해능이 높다고 할 수 있으며 이러한 결과는 MTF 그래프와 회절 광 세기 분포로 예상 했던 결과와 일치 한다.

MTF를 이론적으로 구하여 격자형 필터(GOLF)와 비교한 결과 해상도면에서 HOLF가 더 우수하다는 결과를 얻었다.

설계한 HOLF를 제작하여 실험용 카메라에 부착한 후 실장 실험한 결과 무아레 무늬 제거 효과와 해상도 모두 HOLF가 GOLF보다 우수한 것으로 확인되었다.



(a)



(b)

그림 7. 실장 실험용 카메라로 촬영한 USAF 분해능 도표의 상. (a) HOLF를 장착한 경우, (b) GOLF를 장착한 경우.

Fig. 7. USAF resolution chart image through the digital camera for measurement. (a) With HOLF, (b) With GOLF.

5. 결 론

홀로그래프를 광 저대역 필터로 사용하기 위해 2-위상 홀로그래프를 설계할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 제작하였다. 이를 이용하여 원형에 가까운 21-빔 회절 패턴을 갖는 HOLF를 설계하였고 그

감사의 글

본 연구는 2001년 원광대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] J. D. Gaskill, "Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics", John Wiley & Sons, p. 266, 1978.
- [2] A. Nordbryhn, "Birefringment optical low-pass filter", Proc. SPIE 476, p. 116, 1983.
- [3] T. Asaida, "Optical low-pass filter including 3-crystal plates for solid state color-TV camera", U. S. Patent 4761682, 1988.
- [4] J. E. Greivenkamp, "Color dependent optical prefilter for the suppression of aliasing artifacts", Appl. Opt., Vol. 29, p. 676, 1990.
- [5] K. Fuisawa, M. Uetsiki, and Y. Nishida, "Grating optical low-pass filter", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 35, p. 1768, 1996.
- [6] C. S. Go, S. Lim, S. H. Kim, J. C. Lee, and Y. H. Oh, "The modeling and the optimization of a grating optical low-pass filter", Appl. Phys., Vol. B 73, p. 721, 2001.
- [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. B. 74, p. 563, 2002.
- [8] J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill, p. 152, 1968.