

홀로그램 광 저대역 필터의 MTF 특성 개선을 위한 다중 위상 설계

오용호 · 고춘수[†]

원광대학교 반도체 · 광디스플레이학부
☎ 570-749, 전북 익산시 신용동 344-2

(2005년 4월 15일 받음, 2005년 5월 24일 수정본 받음)

디지털 영상 장치에서 홀로그램 광 저대역 필터를 사용할 때 해상도 저하 문제를 개선하기 위해 다중 위상 홀로그램을 설계하였다. 자체 제작한 몬테-카를로 방식의 홀로그램 설계 프로그램을 이용하여 회절광 세기 분포가 원형에 가깝도록 홀로그램을 설계하였고 그 회절 효율과 MTF를 구하였다. 설계 결과 홀로그램의 한 주기를 구성하는 셀의 개수는 MTF 특성에 별로 영향을 미치지 못한 반면에 홀로그램의 위상 수는 큰 영향을 미침을 확인하였다. 4 위상 홀로그램은 2 위상 홀로그램과 회절 효율이 같고 MTF 또한 2 위상에서와 같이 저주파수 영역에서 직선 형태가 되어 필터로서의 특성이 변하지 않았다. 그러나 8 위상 홀로그램의 경우에는 회절 효율도 2 위상에 비해 크게 개선되었고 저주파수 영역에서의 MTF 값도 증가하여 필터의 성능이 크게 향상되었다. 16 위상인 경우에는 회절 효율도 더 증가하고 MTF 그래프도 더 위로 볼록한 모양이 되었으나 그 증가 폭은 크게 감소하였다. 설계된 8 위상 홀로그램을 제작하고 MTF를 측정하여 2 위상보다 MTF 특성이 향상됨을 실험적으로 확인하였다.

주제어 : Spatial frequency filter, Computer generated hologram, MTF(modulation transfer function), Nyquist frequency.

I. 서 론

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. 디지털 영상 장치로 입력되는 상에 어떤 임계주파수보다 큰 공간주파수 성분이 있으면 재생된 상에 왜곡(aliasing)이 생기고 무아레(Moiré)무늬가 나타난다.^[1-3] 여기서 임계 공간주파수는 화소(pixel) 주기의 역수의 반에 해당하며 이를 Nyquist 주파수라고도 부른다.

이상적인 광 저대역 필터는 Nyquist 주파수보다 큰 성분은 모두 제거하고 그보다 작은 성분은 모두 통과시키는 것이다. 이러한 특성을 갖는 필터의 MTF(modulation transfer function) 그래프를 그림 1에 나타냈다. 일반적인 필터의 MTF는 영상 센서(화소)가 있는 평면에서 필터에 의해 형성되는 빛의 세기 분포를 푸리에 변환하여 구할 수 있다. 그런데 이상적인 MTF 그래프를 푸리에 변환하면 음의 계수가 존재하므로 이를 만족하는 세기 분포는 없다. 따라서 이상적인 특성을 갖는 필터는 존재하지 않는다.

현재 주로 사용되는 공간주파수 필터는 복굴절 필터(birefringent optical low-pass filter, BLF)이다. 복굴절 필터는 하나의 빛살을 네 개로 나누는 역할을 하는데 그 MTF 그래프를 그림 1에서 볼 수 있다.^[4,5] 그림에서 볼 수 있는 것처럼 MTF 값이 처음으로 0이 되는 차단주파수(cutoff frequency)를 Nyquist 주파수와 같게 맞추었을 때 차단주파수보다 작은 영역에서는 비교적 큰 MTF 값을 가지므로 복굴절 필터를

사용한 영상 장치의 해상도 저하가 심각하지 않지만, Nyquist 주파수보다 큰 영역에서도 MTF 값이 크기 때문에 무아레 무늬를 비롯한 노이즈가 나타나게 된다. 또한 복굴절 필터는 두 장의 결정(crystal)을 붙여 만들기 때문에 매우 두껍다는 단점이 있다.

최근에 시스템의 소형화 추세에 따라 회절 격자형 광 저대역 필터(grating optical low-pass filter, GOLF)와 홀로그램 광 저대역 필터(hologram optical low-pass filter, HOLF)가 연구되고 있다.^[6-9] GOLF나 HOLF는 유리 표면에 얇은 막으로 2차원 격자나 홀로그램을 형성한 것으로서 얇고 경제적인 장점이 있다. 최근에 2 위상 HOLF를 설계 및 제작하여 디지털 영상 장치에 적용한 결과가 보고된 바 있다.^[9] 그런데 보고한 2 위상 HOLF의 특징 중의 하나는 그 MTF 그래프가 저주파수 영역에서 직선에 가깝다는 것이다. 그림 1에서 HOLF1으로 표시된 것처럼 차단주파수를 Nyquist 주파수에 맞추면 저주파수 영역에서 손실이 많아 해상도 저하가 크게 나타난다. 만약 복굴절 필터와 해상도 수준을 맞추기 위해 HOLF의 주기를 증가시켜 그림 1의 HOLF2와 같이 차단주파수를 Nyquist 주파수보다 크게 만든다면 고주파수 차단 효과가 떨어져 필터 본래의 의미를 상실한다. 따라서 이러한 필터로는 해상도와 필터 효과 양쪽 모두를 만족시키기 어려우며 곡선 형태의 MTF 특성을 갖는 필터 설계가 필요하다.

필터의 MTF 그래프가 복굴절 필터와 같이 곡선 형태가 되기 위해서는 필터가 빛을 유한한 영역에 퍼뜨려야 한다. 복굴절 필터는 초점면에서 하나의 점으로 맺힐 광선을 나누어 화소 크기만큼 떨어진 4개의 점이 되게 한다. 그 이외의 점은 존재하지 않는다. 그러나 격자나 홀로그램은 아무리 최적화해도 일정 차수 이내의 회절 효율이 100%가 될 수 없다.

[†] E-mail: kosoo@wonkwang.ac.kr

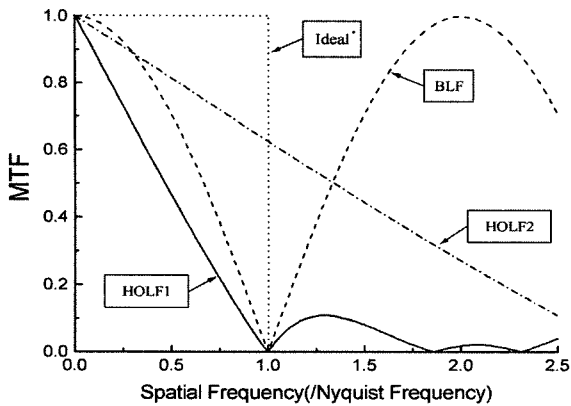


그림 1. 여러 가지 필터의 MTF 그래프. BLF는 복굴절 필터이고, HOLF1과 HOLF2는 같은 홀로그램 필터를 주기만 다르게 한 것이다.

목표로 정하지 않은 차수의 회절광들이 존재하고 그것들이 MTF를 직선으로 만든다. 따라서 곡선 형태의 MTF 그래프를 갖는 HOLF를 만들기 위해서는 회절 효율을 높여야 한다. 본 논문에서는 이러한 방향으로 MTF 특성을 개선한 홀로그램 설계 결과를 보고한다. 2절에서는 몬테-카를로 방식의 홀로그램 설계 프로그램과 그 설계 변수들에 대해 설명하고, 3절에서는 각 설계 변수에 따른 회절 효율과 MTF 특성 변화를 기술한다. 4절에서는 최적화 과정을 거쳐 얻은 홀로그램과 그 필터로서의 특성을 기술하고 5절에서는 홀로그램의 실제 제작 및 MTF 측정 결과에 대해 기술한다.

II. HOLF 설계 프로그램

광 저대역 필터의 MTF는 상면(image plane, CCD 면)에서의 광 분포에 의해 결정된다.^[10] 홀로그램을 필터로 사용할 경우에 광 분포는 Fraunhofer 회절 패턴에 해당한다. 목표로 하는 Fraunhofer 회절 패턴을 보이는 위상 홀로그램을 설계하기 위해 자체 제작한 몬테-카를로(Monte-Carlo) 방식의 프로그램을 사용하였다. 프로그램의 기본 원리는 2차원 주기성을 갖는 홀로그램의 한 주기를 작은 셀(cell)들로 나누고 각 셀의 위상을 최적화하여 홀로그램의 Fraunhofer 회절 패턴이 목표로 하는 상의 세기 분포에 근접하도록 하는 것이다. 홀로그램에 주기성을 부여하는 이유는 필터의 크기에 따라 그 회절 특성이 크게 변하지 않게 하고 또 설계의 편의성을 도모하기 위함이다.

홀로그램의 한 주기는 사각형이며 그 주기를 구성하는 셀들도 사각형이다. 한 주기 내 셀의 개수가 많을수록 회절 효율은 높겠지만 최적화하는데 시간이 많이 걸리므로 적당한 선택이 필요하다. 각 셀이 취할 수 있는 위상은 2 위상 홀로그램인 경우에는 $-\pi/2, \pi/2, 4$ 위상 홀로그램인 경우에는 $-3\pi/4, -\pi/4, \pi/4, 3\pi/4$ 등이며 이를 일반화하면 n -위상

홀로그램인 경우에는 $(2m-n-1)\pi/n, (m=1, 2, \dots, n)$ 이다. 위상의 개수로는 2, 4, 8, 16 등 2의 거듭제곱수를 사용하였는데 그 이유는 홀로그램을 제작하는 과정에서 n 번의 공정을 거친다면 최대 2^n 가지의 위상을 구현할 수 있기 때문이다.

홀로그램이 주기적이므로 그에 의한 회절 패턴은 불연속적인 점들로 나타나며 따라서 목표 상(goal image)도 불연속적인 점들의 집합이어야 한다. 목표 상은 직접 점을 찍어 입력할 수 있고 외부 그림 파일을 불러들여 입력할 수도 있으며 또한 원과 같이 미리 입력된 모양을 사용할 수도 있는데 어느 경우이건 프로그램은 불연속적인 점들의 집합으로 인식한다. 광 저대역 필터로 사용될 홀로그램의 목표 상으로 우리는 앞서 발표한 논문^[9]에서와 같이 원형을 사용하였다. 원의 내부에 일정한 간격의 불연속적인 회절광들이 들어가므로 실제의 목표 상은 그림 3(a)에서 볼 수 있는 것처럼 21개의 점으로 이루어진, 원과는 조금 다른 모양이다.

설계 프로그램에 목표 상을 입력하고 홀로그램 셀의 개수와 위상의 개수를 입력한 후에 최적화 과정을 수행한다. 최적화 과정의 순서도는 그림 2와 같다. 무작위로 선택된 셀의 위상을 바꾼 후 비용 함수를 계산하여 그 값이 감소하면 바뀐 위상을 유지하고 반대로 증가하면 위상을 원상 복귀시킨다. 비용 함수는 상면의 불연속적인 점에서 홀로그램에 의한 회절광 세기와 목표 상 세기와의 차이를 제공하여 모든 점에 대해 평균한 값으로 정의하였다. 셀의 위상을 바꾸는 방법은 이웃하는 셀의 위상으로 바꾸거나, 가장 가까운 위상 값으로 바꾸거나, 또는 모든 위상값으로 단계적으로 바꾸는 등 여러 방법들을 선택할 수 있도록 하였다. 충분히 최적화가 이루어져 선택된 셀 중에서 위상이 바뀌는 경우가 거의 없을 때 최적화를 종료하고 홀로그램을 출력하였다.

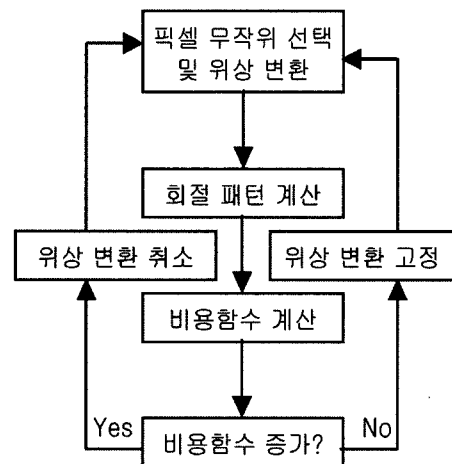


그림 2. 홀로그램 설계 프로그램의 최적화 순서도. 최적화 과정은 스스로 종료하지 않으며 선택된 셀 중에서 위상이 바뀌는 경우가 거의 없을 때 강제로 종료한 후 홀로그램을 출력한다.

III. 설계 변수에 따른 HOLF의 MTF 특성

원형 회절광 세기 분포를 목표로 셀의 개수와 각 셀이 취할 수 있는 위상의 수를 변화시키며 홀로그래를 설계하였다. 위상 계단의 수는 2, 4, 8, 16개로 하였다. 위상 계단의 수를 결정한 후 한 주기를 이루는 셀의 개수를 변화시키며 홀로그래를 설계하였고 그 각각에 대해 회절 효율과 MTF를 구해 비교하였다. 그림 3에 목표 상의 모양과 설계된 홀로그래의 한 예를 나타냈다. 또한 표 1에는 설계된 여러 가지 홀로그래의 회절 효율을 정리하였다.

일반적으로 홀로그래를 구성하는 셀의 개수가 클수록 자유도가 커 최적 조건에 더 접근할 수 있으므로 회절 효율이 높을 것이다. 또한 각 셀이 취할 수 있는 위상의 수가 클수록 효율이 높으리라 예상할 수 있다. 표 1에서 이를 확인할 수 있다. 그런데 표를 보면 셀의 개수보다는 셀이 취할 수 있는 위상의 수가 회절 효율에 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

2 위상 홀로그래의 경우에 한 주기를 40×40개의 셀로 나누면 충분하며 그 이상 더 작게 나누는 것은 의미가 없다. 2 위상으로 구현할 수 있는 회절 효율의 최대값은 대략 78%이다.

4 위상 홀로그래는 매우 특이한 경우에 해당한다. (0, π)의 두 가지 위상 값만을 가질 수 있는 2 위상 홀로그래에 비해 (0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$) 등의 네 가지 위상 값을 가질 수 있는 4 위상 홀로그래가 최적의 위상 조건에 더 접근하리라 예상할 수 있지만 설계된 홀로그래의 회절 효율은 2 위상에 비해

전혀 나아지지 않았다. 홀로그래 설계 과정에서도 이와 연관된 현상을 볼 수 있다. 최적화 과정이 끝난 2 위상 홀로그래에 대해 4 가지의 위상 값을 가질 수 있도록 설정한 후 다시 '최적화'를 실행하였을 때 전혀 위상 구조가 바뀌지 않았다. 이는 두 가지의 새로운 위상 값을 가질 수 있는 자유도를 주는 것이 회절 효율면에서 전혀 도움이 되지 않았기 때문이라 할 수 있으며 그 이유에 대한 연구가 필요하다.

위상의 수가 8인 경우에는 효율이 약 87%로 2, 4 위상에 비해 크게 증가하였다. 셀 수 증가에 따른 효율의 변화는 적은 편이며 80×80개보다 더 커져도 효율이 거의 증가하지 않음을 알 수 있다.

16 위상 홀로그래를 사용하면 8 위상에 비해 효율이 증가하기는 하지만 4 위상에서 8 위상으로 바뀔 때에 비해서는 증가량이 적다. 위상수가 2배 될 때마다 홀로그래 제작 공정이 하나씩 추가된다. 각 공정에 수반되는 마스크 정렬 오차 및 식각 오차에 의해 실제 제작된 홀로그래의 효율은 이론적으로 예측한 회절 효율보다 작다. 그러므로 위상 수를 늘릴 때 이론적 효율의 증가 효과가 크지 않다면 위상 수를 늘리는 것이 바람직하지 않다고 할 수 있다. 따라서 효율과 경제성을 함께 고려할 때 8 위상 홀로그래를 사용하는 것이 가장 바람직하다고 판단된다.

홀로그래의 공간주파수 필터로서의 특성은 MTF를 통해 알 수 있다. 적당한 셀의 수를 결정하기 위해 여러 가지 셀의 수에 대해 설계한 8 위상 HOLF의 MTF 그래프를 그림 4에 나타냈다. MTF는 홀로그래 설계 프로그램에서 이론적인 회절광 분포를 푸리에 변환하여 구한 것이다.

그림 4를 보면 MTF 역시 회절 효율처럼 셀의 수에 따라서는 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 셀 수가 80×80개보다 커도 MTF가 거의 변하지 않으며 따라서 그 이상은 필요치 않다.

여러 가지 위상 수에 대해 설계된 HOLF의 MTF 그래프를 그림 5에 나타냈다. 셀의 개수는 모두 80×80개이다. 그림을 보면 2 위상 HOLF의 경우에는 앞서 보고된 바와 같이 차단 주파수 이하에서 그래프가 직선에 가깝다. 특이한 점은 4 위상의 경우에도 그래프가 직선이 되며 2 위상과 구분할 수 없을 만큼 비슷하다는 것이다. 앞에서 언급했던, 두 가지 홀로

표 1. 설계된 홀로그래의 회절 효율(%). 회절 효율은 입사광 중에서 목표로 한 21개의 회절광이 차지하는 비율로 정의하였다.

No. of Phases \ No. of cells	2	4	8	16
20×20	76.2	76.5	85.0	88.2
40×40	77.3	78.2	86.8	90.1
80×80	77.9	78.5	87.2	90.5
160×160	78.0	78.6	87.3	90.7

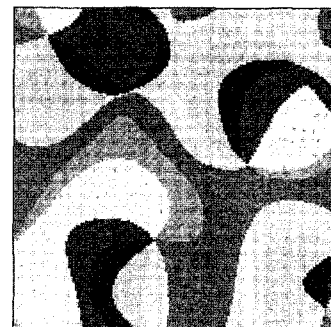
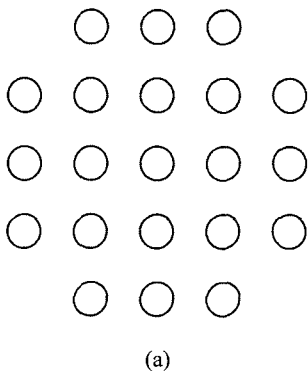


그림 3. (a) 홀로그래의 설계 목표 상(goal image), 21개 회절광의 세기를 같도록 하였다. (b) 설계된 8 위상 홀로그래의 한 예, 그림은 한 주기를 나타내고 있으며 160×160개의 셀들로 이루어져 있다.

그림의 회절 효율이 같다는 점과 일관된 것이라 할 수 있으며 따라서 4 위상 HOLF는 2 위상에 비해 유리한 점이 전혀 없다고 할 수 있다.

홀로그래프의 각 셀이 취할 수 있는 위상의 수를 8로 늘리면 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼 차단주파수 이하의 영역에서 MTF 값이 증가하여 그래프가 직선에서 벗어나 위로 볼록한 모양이 된다. 차단주파수보다 큰 고주파수 영역에서도 MTF 값이 조금 증가하지만 실제 영상 장치에서 CCD와 렌즈의 MTF를 곱하면 그 영향은 매우 적어진다. 따라서 위상의 수를 늘리면 해상도를 향상시키는 방향으로 필터의 특성이 개선됨을 알 수 있다. 16 위상 HOLF를 사용하면 MTF 특성이 더 개선되기는 하지만 8 위상과의 차이가 그렇게 크지는 않다. 그림에 나타내지는 않았지만 32 위상을 사용한 경우에는 16 위상에 비해 별로 나아지지 않았으며 따라서 그 이상의 위상 수에 대해서는 고려하지 않았다. 따라서 HOLF를 제작하는 공정상의 오차를 고려할 때 HOLF의 MTF 특성을 개선하기 위해서는 8 위상으로 설계하는 것이 가장 좋다고 판단된다.

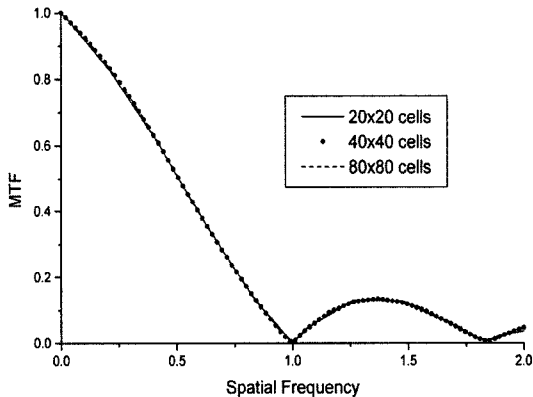


그림 4. 8 위상 HOLF의 이론적인 MTF 그래프, 이 그래프들은 3-원 그래프의 x-축(또는 y-축) 방향 단면도이다. 가로축의 공간 주파수는 차단주파수로 규격화하였다. 상자 안의 숫자는 홀로그래프의 한 주기를 구성하는 셀의 개수를 의미한다.

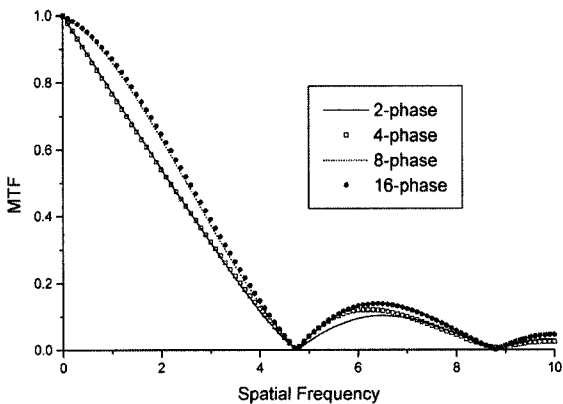


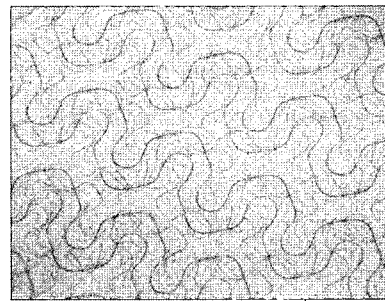
그림 5. 여러 가지 HOLF의 이론적인 MTF 그래프. 셀의 수는 80×80개이고 다른 모든 조건은 그림 4와 같다.

IV. HOLF 제작 및 MTF 측정

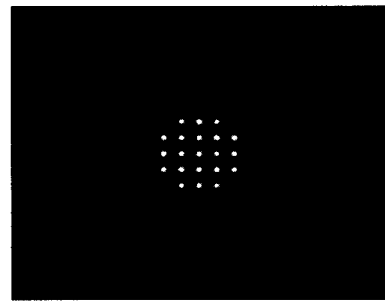
2 위상 및 8 위상 HOLF를 제작하고 그 MTF를 측정하였다. 설계된 홀로그래프를 GDS-2 형식으로 출력하여 마스크를 제작하였고 각각 세 번의 리소그래피(lithography)와 식각(etching) 공정을 거쳐 유리판에 위에 위상 홀로그래프를 형성하였다. 유리판에 스핀 코팅(2500 rpm, 30초)하여 포토레지스트(PR)를 도포하였고, 60분 동안 굽기(baking) 한 후 노광 장치(contact aligner)에서 350 mW에 6초 동안 노출하였다. 유리 재료(sod-lime silicate glass)의 굴절률은 1.523이며 판의 두께는 0.7 mm이다. 파장 550 nm를 기준으로 할 때 위상차 $\pi(180^\circ)$ 에 해당하는 식각 깊이는 530 nm이고 오차한계는 10 nm이다.

그림 6에서 제작한 HOLF의 현미경 사진과 그 Fraunhofer 회절 패턴을 볼 수 있다. 홀로그래프의 가로 및 세로 주기는 각각 120 μm 이고 한 주기는 80×80개의 셀로 이루어져 있으므로 셀 하나의 크기는 1.5 μm 이다. 인접한 위상 계단간의 위상차는 $\pi/4(45^\circ)$ 이며 그 깊이차는 133 nm이다.

8 위상 홀로그래프를 제작하기 위해서는 세 장의 서로 다른 마스크를 가지고 세 번의 공정을 거쳐야 한다. 각 공정에서 마스크의 불일치에 의해 생기는 정렬 오차가 홀로그래프의 특성을 저하시킬 수 있다. 제작된 홀로그래프의 현미경 사진에서, 여러 위상 계단이 모여 소용돌이(vortex) 모양을 이루는 곳을 보면 정렬 오차의 크기를 대략 알 수 있는데 그림 6(a)를 보



(a)



(b)

그림 6. (a) 제작된 8 위상 HOLF의 현미경 사진, 홀로그래프의 주기는 120 μm 이다. (b) 제작된 8 위상 HOLF에 의한 Fraunhofer 회절 패턴 사진. He-Ne 레이저의 파장 543.5 nm를 사용하였다.

면 정렬오차가 매우 적음을 알 수 있다. 그런데 그림 6(b)의 회절 패턴 사진에서 목표로 했던 중앙 21개의 회절광 이외에도 주변에 많은 회절광들이 약하게 보이는데 이는 약간의 정렬 오차와 사진으로는 판단할 수 없는 시각 깊이의 오차 때문이다.

제작한 HOLF의 MTF를 측정하기 위해 그림 7과 같이 장치하였다. 격자의 MTF는 Fraunhofer 회절광 세기 분포의 푸리에 변환으로 구할 수 있으므로 격자에 수렴하는 빛을 입사시키고 초점면에서의 세기 분포를 측정하여 컴퓨터로 푸리에 변환하였다.

광원으로는 파장 543.5 nm의 He-Ne 레이저(Melles Griot, 25 LGR025)를 사용하였다. 격자를 제작할 때 파장 550 nm를 기준으로 하였으므로 그에 가장 가깝고 간편한 레이저를 사용하였다. 파장의 오차가 대략 1%인데 이는 격자 제작 공정상의 오차(2%)보다 작으므로 무시하였다. 레이저의 출력은 0.2 mW 이고 연속 발진(CW) 레이저이다. 레이저 광속(beam)의 공간적인 세기 분포는 가우시안수(Gaussian) 모양이며 지름($1/e^2$)은 0.63 mm이다. 실험에 사용할 격자의 주기가 120 μm 이므로 레이저 광속에 5 주기밖에 들어가지 않아 5배 광속 확대기(beam expander)를 사용하였다.

격자의 Fraunhofer 회절 패턴을 얻기 위해서는 수렴하는 빛을 입사시켜야 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(UNIQ UP1830CL)를 사용하였다. CCD의 유효 화소수는 1024 \times 1024개이고 픽셀의 크기는 6.45 \times 6.45 μm 이다. 회절광의 세기 분포를 정확하게 측정하기 위해서는 화소의 세기 측정 범위(dynamic range)가 커야 하므로 10 bit 디지털 카메라를 사용하였다.

가능하면 높은 회절 차수까지 CCD에서 측정하는 것이 정확한 MTF를 구하는데 도움이 되지만 회절광들이 중첩(overlap) 되면 세기 분포가 왜곡되므로 적당한 차수에서 자를 필요가 있다. 본 실험에서는 ($\pm 40, \pm 40$)-차까지 CCD의 유효 영역 안으로 들어오게 하였는데, CCD의 유효 면적이 6 mm \times 6 mm 이므로 이웃하는 회절광들 사이의 거리는 약 80 μm 가 된다. 초점거리 30 cm의 렌즈로 집속된 광속(Gaussian beam)의 초

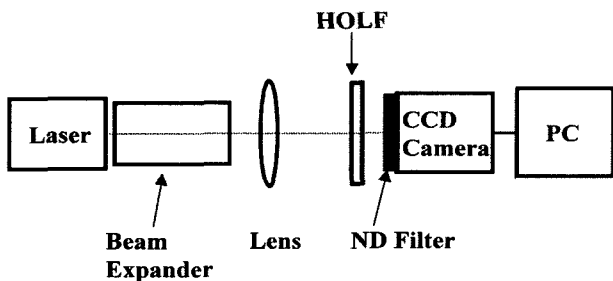


그림 7. MTF 측정 장치의 개략도.

점면에서의 크기(spot size)는 16 μm 이므로 회절광들이 충분히 떨어져 있다고 할 수 있다.

카메라로 수렴하는 회절광이 매우 강하여 CCD 화소를 포화시키므로 ND(neutral density) 필터를 CCD 앞에 설치하였다. CCD의 신호를 영상 획득 보드(frame grabber)를 통해 컴퓨터로 읽었으며 자체 제작한 프로그램을 통해 푸리에 변환하였다.

앞의 장치를 이용하여 측정한 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.^[11] 따라서 격자를 설치한 후 측정한 MTF를 격자 없이 측정한 MTF로 나누어 격자만의 MTF를 측정하였다. 측정 결과는 그림 8과 같다.

그림 8의 측정 결과를 보면 차단 주파수 이하의 영역에서 8 위상 HOLF의 MTF 값이 2 위상에 비해 크다는 것을 알 수 있다. 이는 그림 5에 나타난 이론적 예측과 일치한다. 따라서 8 위상 HOLF를 광 저대역 필터로 채용하면 2 위상일 때에 비해 해상도가 높으리라 예상할 수 있다.

측정된 2 위상 HOLF의 MTF 그래프가 직선에 가깝게 감소하는 점도 계산 결과와 일치한다. 다만 주파수가 0 근처일 때 위로 조금 볼록한 모양을 보이는데 이는 유한한 영역만을 측정하는 장치의 한계라 판단된다. 유한한 영역에 국한된 함수를 푸리에 변환하면 직선이 될 수 없기 때문이다. 가능하면 넓은 영역에서 높은 차수까지 측정해야 하지만 CCD에 약간의 잡음(noise)이 존재하여 이를 제거하는 과정에서 일부 높은 차수의 회절광들도 함께 제거되므로 측정 영역과 차수를 늘리기 어렵다.

그림 8을 보면 2 위상과 8 위상의 MTF 값 차이가 계산 결과에 비해 조금 작는데 이는 제작 과정에서 생기는 정렬 오차나 위상 오차 등에 의한 것이라 판단된다.

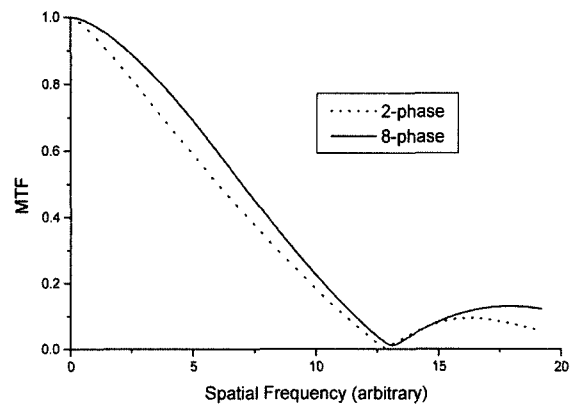


그림 8. 8 위상 및 2 위상 HOLF의 MTF 측정 결과, 가로축의 공간 주파수는 측정 장치의 조건에 의해 결정되므로 그 절대값은 의미가 없다.

V. 결 론

광 저대역 필터로서의 특성을 고찰하기 위해 다중 위상 홀로그램을 설계하였다. 위상 계단 수와 셀의 수를 변화시키면서 설계한 여러 가지 홀로그램의 MTF를 계산한 결과 위상수에 따라 필터로서의 특성이 크게 변했지만 한 주기를 구성하는 셀의 개수는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 4 위상 홀로그램은 회절 효율과 MTF 모두 2 위상과 동일하였으며 따라서 4 위상 필터는 고려할 필요가 없다. 그러나 위상의 수가 8 이상일 경우에는 차단 주파수 이하의 영역에서 MTF값이 크게 증가하는 결과를 얻었다. 16 위상 홀로그램의 경우에는 같은 영역에서 MTF 값이 더 증가하지만 그 증가 폭은 크게 감소하였다.

2 위상 및 8 위상 홀로그램을 제작하고 실험적으로 MTF를 측정하고, 차단 주파수 이하의 영역에서 MTF 그래프가 2 위상의 경우에는 직선에 가까웠지만 8 위상의 경우에는 MTF 값이 증가하여 위로 볼록한 모양이 되었다. 이러한 결과 또한 이론적 예측과 일치한다.

홀로그램의 위상 수가 증가하면 필터로서의 성능이 좋아지지만 필터를 제작하는 공정의 수가 증가하므로 정렬 오차 및 위상 오차가 더 발생하기 쉽다. 이러한 점을 감안할 때 8 위상을 사용하는 것이 MTF 특성 개선에 가장 유리할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2004년 원광대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] J. D. Gaskill, *Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics*, (John Wiley & Sons, New York, 1978), pp. 266-285.
- [2] G. C. Holst, *Sampling, Aliasing, and Data Fidelity*(SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1998), pp. 82-97.
- [3] R. H. Vollmerhausen, and R. G. Griggers, *Analysis of Sampled Imaging Systems*(SPIE Press, Washington, 2000), pp. 141-145.
- [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, pp. 676-684, 1990.
- [6] K. Fumisawa, M. Uetsiki and Y. Nishida, "Grating optical low-pass filter," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 35, no. 3, pp. 1768-1776, 1996.
- [7] J. C. Lee, S. Lim, S. H. Kim, Y. H. Oh, C. S. Go, "The filtering characteristics of simple grating optical low-pass filter," *Appl. Phys. B*, vol. 74, pp. 563-567, 2002.
- [8] Y. H. Oh, J. C. Lee, S. Lim, S. H. Kim, and C. S. Go, "Filtering characteristics and grating images of multi-phase grating optical low-pass filters," *Opt. Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 994-999, 2003.
- [9] 김인길, 고춘수, 임성우, 오용호, 이재철, "컴퓨터로 설계한 홀로그램 광 저대역 필터의 특성 분석," 전기전자재료학회논문지, vol. 16, no. 12, pp. 1261-1267, 2003.
- [10] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, (McGraw-Hill, New York, 1968), pp. 125-127.
- [11] G. C. Holst, *CCD Arrays, Cameras, and Displays*, (SPIE Optical Engineering Press and JCD Publishing, Washington, 1998), pp. 267-291.

Design of Multi-phase Holographic Optical Low-pass Filter for the Improvement of the MTF Characteristics

Yong-Ho Oh and Chun-Soo Go[†]

Division of Microelectronics and Display Technology, Wonkwang University, Iksan 570-749, Korea

[†]*E-mail: kosoo@wonkwang.ac.kr*

(Received April 15, 2005, Revised manuscript May 24, 2005)

We studied the spatial filtering characteristics of a multi-phase hologram optical low-pass filter(HOLF). Using the Monte-Carlo based hologram generation program, we designed holograms whose diffraction patterns are circular shaped 21 beams and calculated the diffraction efficiencies and MTFs. 4-phase HOLF have the same diffraction efficiency as that of 2-phase HOLF. The MTF graphs of the two are also nearly alike. But 8-phase HOLF shows higher efficiency than those previously discussed and has larger MTF values in the low frequency region. 16-phase HOLF has just a little better characteristics than 8-phase. Considering the errors which can arise in the process of making holograms, 8-phase HOLF fits the goal of improving the resolution of spatial filter. We also fabricated 8-phase HOLF and measured MTF. The experimental results agree well with the theoretical expectations.

OCIS Codes : 070.6110, 090.1760, 110.4100, 110.4280.