

광선추적법에 의한 푸리에변환 렌즈로서의 TPK(Telecentric Paraxial Holographic Kinoform)의 표면양각형태에 대한 분석

김성우 · 조두진

아주대학교 자연과학대학 물리학과

(1996년 11월 28일 받음, 1998년 3월 12일 수정본 받음)

엄밀한 기하광학적 광선추적을 이용하여, 2차원 TPK가 푸리에변환 렌즈로 사용될 때, 표면양각형태에 따른 특성을 분석하였다. 2차원 TPK(F/8, 초점거리 15 mm)의 기관두께가 0, 50 μm 인 두 경우에 있어서, 표면양각형태를 평면-블록면에서 블록면-평면까지 51단계로 나누어, 세가지 입사각(0° , 2.5° , 5°)에 대한 광선추적을 실시하였다. 광선추적의 결과로 얻은 rms 스폿크기, $f \sin\theta$ 위치에 대한 rms편차, 최고점위치, FWHM(full width at half maximum), 추적에서 제외된 광선수 등을 평가 기준으로 사용하였는데, 그 결과, 기관의 유무(有無)에 무관하게, 표면양각높이의 80%가 상면 쪽에 존재하는 양블록 형태를 가지는 TPK가 푸리에변환 렌즈로서 가장 우수한 것으로 나타났다.

I. 서 론

렌즈의 푸리에변환 특성은 광정보처리를 포함하는 여러 분야에서 기본적인 역할을 하고 있다.^[1,2] 푸리에변환 렌즈^[3,4]란 물체의 공간주파수를 뒤초점면(back focal plane)에 정확히 대응시킬 수 있는 광학계를 의미하는데, Buralli와 Morris^[5,6]는 Sweatt 모형^[7,8]을 이용하여 근축근사(paraxial approximation)에 따라 설계된 TPK(telecentric paraxial holographic kinoform)가 매우 우수한 푸리에변환 특성을 갖는다고 발표하였다.

홀로그래픽 키노폼(holographic kinoform)이란 DOE(diffraction optical elements, 회절광학소자)의 하나로서 일반적으로 표면양각형태를 갖는 위상형 홀로그램을 지칭하는데, 여기에서는 프레넬 윤대판과 유사한 특성을 갖으나 회절효율이 이론적으로 100%가 가능한 위상형 표면양각 회절렌즈를 의미한다.^[9] 홀로그래픽 광학소자(holographic optical elements), 이진광학소자(binary optics) 등을 포함하는 DOE는 굴절 및 반사현상을 주로 이용하는 종래의 광학소자들과는 달리 회절현상을 주로 이용하는 것으로서 리소그래피(lithography), 레이저직접기록, 다이어몬드 선반 등의 제작기술의 발전으로 인하여 다양하고 특수한 기능을 갖춘 DOE들이 개발되고 있다.^[10-15] DOE는 얇고 가벼우며 쉽게 여러장을 겹쳐놓을 수 있고, 복잡한 파면 특성과 동시에 여러가지 기능을 갖는 소자의 구현이 가능하고, 대형으로 제작하기가 비교적 용이하며 대량생산에 적합하는 등의 여러가지 장점을 가지고 있어서 많은 분야에서 재래식의 광학소자들을 보완, 대체하고 있다.

DOE는 국부적으로 가변주기를 갖는 회절격자로 간주할 수 있으며, 회절격자방정식^[16] 또는 Sweatt 모형^[7,8] 등을 이용하여 원하는 회절차수에 대한 파면특성을 분석할 수 있다. 한편, 입사광은 여러 회절차수로 회절되므로, 설계한 회절차수의 회절효율은 매우 중요하다. DOE를 두께를 무시한 위상스크린(thin phase screen)으로 간주하는 스칼라이론^[1]을 이용하여 회절효율을 계산하는 것이 보통이며, 이 외에도 여러 다른

방법들이 있다.^[17] 일반적으로 표면양각형 DOE의 회절효율은 그 표면모양, 즉 blaze 형태에 관계되는데, 표면의 각점에서의 광선방향이 스넬의 법칙과 회절격자방정식을 동시에 만족하는 것이 이상적이다.^[18,19] 평면-블록면, 블록면-평면, 좌우대칭 블록면의 3가지 표면양각형태를 갖는 1차원 TPK에 대하여 스넬의 법칙을 이용한 엄밀한 광선추적법을 이용하여 그 표면양각형태에 따른 특성을 분석한 바 있다.^[20] 본 연구에서는 2차원 TPK로 확장하여 기관이 없는 경우와 기관의 두께가 50 μm 인 두 경우에 있어서 평면-블록면에서 블록면-평면까지 51가지의 표면양각형태에 대하여 스넬의 법칙을 이용한 엄밀한 광선추적결과와 회절격자방정식에 의한 광선추적결과를 비교하므로써 푸리에변환 렌즈로서의 특성을 분석하였다.

2절에서는 TPK에 대한 개략적인 설명을 하고, 3절에서는 TPK에 대한 회절격자방정식에 따른 광선추적방법과 스넬의 법칙을 이용한 엄밀한 광선추적방법에 대해서 논의하고 광선추적결과와 올바른 평가를 위한 회절이론을 간략히 논의한다. 그리고, 4절에서는 TPK에 대한 광선추적결과를 보이고, 푸리에변환 렌즈로서 우수한 표면양각형태를 찾아낸다.

II. 푸리에변환 렌즈로서의 TPK

TPK는 동공(aperture stop)이 앞초점면(front focal plane)에 있으며 윤대(zone)의 경계가

$$r_m = \left(\frac{2m\lambda f}{n} \right)^{1/2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

으로 주어지고, 위상이

$$\phi(r) = 2\pi \left(m + 1 - \frac{nr^2}{2\lambda f} \right), \quad r_m < r < r_{m+1} \quad (2)$$

으로 주어지는 렌즈계이다.^[5a] 여기서 λ 는 진공중의 빛의 파장, n 은 주변매질의 굴절율, f 는 렌즈의 초점거리, M 은 최외각 윤대를 나타낸다. 본 논문에서 좌표축은 렌즈의 중심을 원점으로, 광축을 z 축으로 하고 모든 입사광선의 방향은 xz -평면내에서 변화도록 한다. $\phi(r)$ 는 $[0, 2\pi]$ 의 범위를 가지는데 $r=r_m$ 에서 0에서 2π 로 변화한다. 푸리에변환 렌즈가 물체의 공간주파수를 렌즈계의 뒷초점면에 정확히 대응시키기 위해서는 평행광에 대한 스폿크기가 작고 입사각에 대한 변화가 적을 뿐만 아니라 스폿의 위치가 입사각 θ 에 따라 $f \sin\theta$ 에 따라야 한다.^[3a]

일반적으로 DOE에 있어서 윤대의 경계는 파면특성을 결정하고 그 표면양각형태는 회절효율 또는 상면에서의 세기(intensity)분포를 좌우한다. 본 연구에서는 식 (1)과 (2)에 의해서 주어지는 동일한 위상을 갖는 표면양각형태로서 그림 1에 보인 바와 같이 기판이 없는 경우와 50 μm 의 두께를 갖는 경우를 포함하여 총 102가지 경우를 고려하였다. 표면양각 형태에 따라 #0에서 #50까지 번호를 주었는데, 기판이 없는 번호 N 인 렌즈의 입사측 표면은

$$z = -\frac{L}{2\pi} \left(\frac{N}{50} \right) \phi(r), \quad (3a)$$

출사측 표면은

$$z = \frac{L}{2\pi} \left(1 - \frac{N}{50} \right) \phi(r) \quad (3b)$$

로 나타내진다. 여기서 L 은 TPHK의 두께로서 그 굴절율을 n_l 이라 하면

$$L = \frac{\lambda}{n_l - n} \quad (4)$$

으로 주어진다. 예를 들면 기판이 없는 #0 렌즈의 경우 첫째면은 xy -평면이고 둘째면은 볼록면으로서 $z=L\phi(r)/2\pi$ 로 나타내지며, #50 렌즈의 경우는 #0 렌즈의 형태를 반전시킨 것이고, #25 렌즈의 경우는 첫째면은 $z=-L\phi(r)/4\pi$, 둘째면은 $z=L\phi(r)/4\pi$ 으로 한 것이다. 한편 기판이 있는 경우에는 식(3b)에 그 두께를 합하면 된다. 그림 1에서 표면양각형태를 분명히 나타내

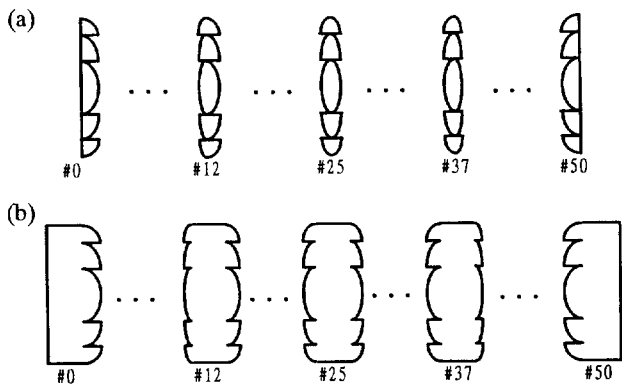


그림 1. TPHK의 여러 가지 표면양각형태. #0은 평면-볼록면, #50은 볼록면-평면을 갖는다. (a) 기판이 없는 경우, (b) 기판이 있는 경우.

기 위해 TPHK의 두께를 과장했음을 부연한다.

III. 광선추적과정

3.1. 스넬의 법칙을 이용한 엄밀한 광선추적

먼저 TPHK의 앞초점면에 있는 동공에 균일한 간격을 갖는 평행광선을 설정하고 주어진 입사각에 따라 진행시킨다. 동공으로부터 진행된 광선에 대하여 그림 2에 보인 바와 같이 렌즈 원면에 접하는 평면 P1과의 교점 즉, 점 a를 구하게 되는데, 이는 TPHK의 윤대의 경계 때문이다. 즉, 윤대가 바뀌는 g-h와 i-j를 지나는 광선들은 거의 모두가 상면 상에서 스폿 즉, 광선들이 밀집된 지역을 크게 벗어나므로 추적대상에서 제외하기 위함이다. 점 a를 구한 후, 렌즈표면과의 교점인 점 b까지 광선을 진행시켜서 스넬의 굴절법칙을 적용한다.^[21] 그 다음 평면 P2와의 교점인 점 c를 구해서, 점 a와 동일한 윤대에 있는가를 시험하고, 마찬가지로 방법으로 점 d, e 및 f를 지나서 상면까지 진행시킴으로써 교점을 구한다. 이때, 점 c에서 전반사를 일으키는 광선도 추적대상에서 제외한다. 이 과정을 설정된 광선 들에 대하여 되풀이 하므로써 PSF(point spread function, 점퍼짐함수)를 얻게된다. 본 광선추적법은 완전히 기하광학적인 것으로 회절효과와 렌즈표면에서의 반사를 무시한 것임을 부연한다. DOE에 있어서는 설계차수 이외의 회절차수와 표면의 불완전성 등으로 인하여 PSF가 어느 정도 넓어지게 마련인데, 위의 추적대상에서 제외한 광선들은 이와 같은 효과에 포함되는 것으로 생각할 수 있다.

3.2. 회절격자방정식에 따른 광선추적

일반적인 DOE의 설계에서는 두께를 무시한 위상스크린을 가정한다. 이 위상스크린의 위상을 $\phi(r)$ 이라 하면 DOE는

$$d = \frac{2\pi}{\left| \frac{d\phi(r)}{dr} \right|} \quad (5)$$

로 주어지는 가변격자주기를 갖는 회절격자로서 회절격자방정식

$$\hat{s} \times \hat{r} = \mu \hat{s} \times \hat{r} + \frac{p\lambda}{n'd} \hat{q} \quad (6)$$

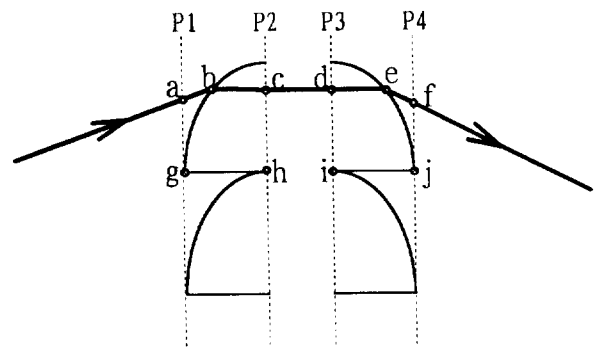


그림 2. 스넬의 법칙을 이용한 광선추적과정.

에 따라 입사방향이 \hat{s} 로 주어지는 광선을 \hat{s}' 으로 회절시킨다.^[6] 여기서, \hat{r} 은 렌즈면에 수직인 방향을 나타내는 단위벡터이고, \hat{q} 는 격자와 평행한 방향을 나타내는 단위벡터이다. 그리고 $\mu=n/n'$ 인데, n 과 n' 은 각각 DOE의 왼편과 오른편 매질의 굴절율을 나타내는데, 본 연구에서는 $n=n'=1$ 이고, p 는 회절차수로서 정수인데 본 연구에서는 $p=1$ 인 경우만을 취급한다. TPHK의 경우에 식 (2)와 (5)에 의하여 식 (6)은

$$\hat{s}' \times \hat{r} = \hat{s} \times \hat{r} + \frac{r}{f} \hat{q} \quad (7)$$

가 된다. 이 식은 1차회절방향 \hat{s}' 이 굴절율에는 무관하고 입사방향 \hat{s} 와 TPHK와의 교점 r , 격자방향을 나타내는 \hat{q} , 그리고 초점거리 f 에만 관계된다는 것을 보여준다.

한편, 광선추적결과를 올바르게 평가하기 위해서는 회절이론과 비교, 검토하여야 한다. TPHK를 두께를 무시한 위상스크린으로 가정하고 프레넬 근사를 이용하면 원형 구멍에 의한 회절무늬, 즉 에어리(Airy) 무늬와 동일한 관계식을 얻게 된다.^[1] 즉, 상면에서의 PSF는 입사각 θ 에 대하여

$$I(x, y) = I_0 \left[\frac{2J_1(R)}{R} \right]^2, \quad (8)$$

로 주어지는데, 여기서

$$R = \frac{\pi n D}{\lambda f} \sqrt{(x - f \sin \theta)^2 + y^2} \quad (9)$$

이고, I_0 는 최대 세기, D 는 동공의 직경이다. 스폿의 중심점은 정확한 푸리에변환 관계를 주는 $(f \sin \theta, 0)$ 에 있게되고, 3dB 스폿크기 즉, FWHM 2σ 는 $I(x, y) = I_0/2$ 가 되는 쪽으로서 $R = 0.5145\pi$ 일때, 즉,

$$2\sigma = 1.029 \frac{\lambda f}{nD} \quad (10)$$

가 된다. 한편 식(8)에 따라 rms 스폿크기를 계산하면 ∞ 가 되므로 광선추적결과와 비교할 때는 위의 2σ 를 이용하여야 한다.

IV. 광선추적결과 및 논의

본 연구에서는 참고문헌^[6,20]에서 다룬 TPHK의 제원을 참조하여 F/8(초점거리 15 mm, 동공의 직경 1.875 mm)인 TPHK 푸리에변환 렌즈계를 고려하였다. 빛의 파장 λ 는 헬륨 네온레이저의 $0.6328 \mu\text{m}$ 으로 하였고, 키노폼 자체의 직경은 5 mm로서 F/3이고 vignetting되지 않는 최대입사각은 약 6° 이다. 이 푸리에변환 렌즈계는 수차를 무시하고 회절한계를 가졌을때 공기중($n=1$)에서 식 (10)에 따른 3dB 스폿크기 $2\sigma = 5.21 \mu\text{m}$ 이고, 최대 1차원 space-bandwidth product가 F/3 키노폼의 최대값의 약 94%인 350이 된다.

광선추적에서는 동공에서의 간격이 가로와 세로방향으로 $0.9375 \mu\text{m}$ 인 3,141,521개의 광선을 입사각 $0^\circ, 2.5^\circ$, 그리고

5° 의 세 경우에 각각 사용하였다. 참고로 광선수를 증가시키도 추적결과 즉, PSF에는 거의 변화가 없다. 여기서 PSF는 규격화된 세기(normalized intensity)로서 광선수밀도를 총추적광선수(3,141,521)로 나눈 것을 의미하는데, 광선수밀도란 상면 위에 있는 작은 셀(cell)의 광선수를 셀의 면적($0.4 \mu\text{m} \times 0.4 \mu\text{m}$)으로 나눈 것을 의미한다. 키노폼 자체의 굴절율은 1.5이고 주변매질의 굴절율은 1로 하였는데, 키노폼의 두께 L 은 식 (4)에 따라서 $1.27 \mu\text{m}$ 이다. 한편, 운대의 수 즉, 최외각 운대의 M 은 329이고, 운대의 최소 간격은 $3.80 \mu\text{m}$ 이다.

4.1. 회절격자방정식을 이용한 광선추적의 결과

식 (7)의 회절격자방정식을 이용한 광선추적의 결과에서 관찰되는 두드러진 현상은 입사각에 따라서 rms 스폿크기, $f \sin \theta$ 위치에 대한 rms편차, 최고점 위치 그리고 FWHM 뿐만 아니라 PSF에도 변화가 거의 없는 것이다. PSF의 경우, 입사각이 증가하더라도 항상 그림 3에 보인 바와 같으며 $x=f \sin \theta$ 에서 최대값을 가지고 중앙에 광선이 밀집해 있다. 또한, $f \sin \theta$ 위치에 대한 평균점(centroid)의 x좌표의 편차도 $0.0097 \mu\text{m}$ 이내였고 rms 스폿크기도 단지 $0.0002 \mu\text{m}$ 의 변화만을 보여주었다.^[21] 즉,

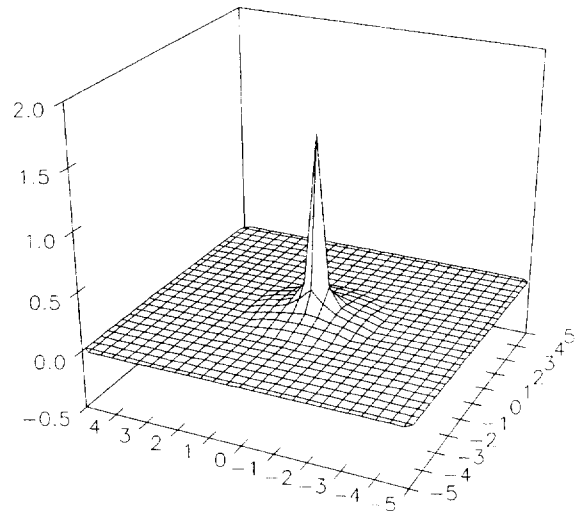


그림 3. 회절격자방정식에 의한 PSF. 연직방향은 세기를 임의의 단위로 나타낸 것이고, 밑면의 각 방향의 단위는 μm 이다.

표 1. 여러 가지 평가기준에 따라 푸리에변환 렌즈로서 우수한 표면양각형태들

	기판이 없을때	기판두께 50 μm
광선투과율	#0-36	#0-36
평균점의 x좌표	#8-12	#9-14
rms 스폿크기	#9-11	#9-11
$f \sin \theta$ 위치에 대한 rms편차	#5-7, #9-11	#6-11
최고점 위치	#13-20	#16-24
최고점 값	#10, #14-15	
회절한계(5.21 μm) 이하 FWHM(yz-평면)	#0-26, #48-50	#0-25, #49
FWHM(xz-평면)	#2, #3	
FWHM(xz-평면)	#10, #11, #16, #17	#11, #14, #16

TPHK는 이상적인 푸리에변환 렌즈인 것이다. 단, 이 결과는 식 (7), 즉 1차회절에만 국한된 것임을 부연한다.

4.2. 스넬의 법칙에 기반을 둔 엄밀한 광선추적의 결과

본 연구에서는 기판이 없는 경우와 그 두께가 50 μm 일때,

각각 51가지 표면양각형태와 세가지 입사각(0° , 2.5° , 5°)에 대해서 스넬의 법칙에 기반을 둔 엄밀한 광선추적을 실시하였다. 그 결과, 표 1에 나타난 9가지 수치적인 항목과 PSF의 3-D 그래프에서 판단할 수 있는 스폿의 모양 즉, 10가지의 항목에 걸쳐서 표면양각형태에 대한 특성을 분석하였다. 표 1에는

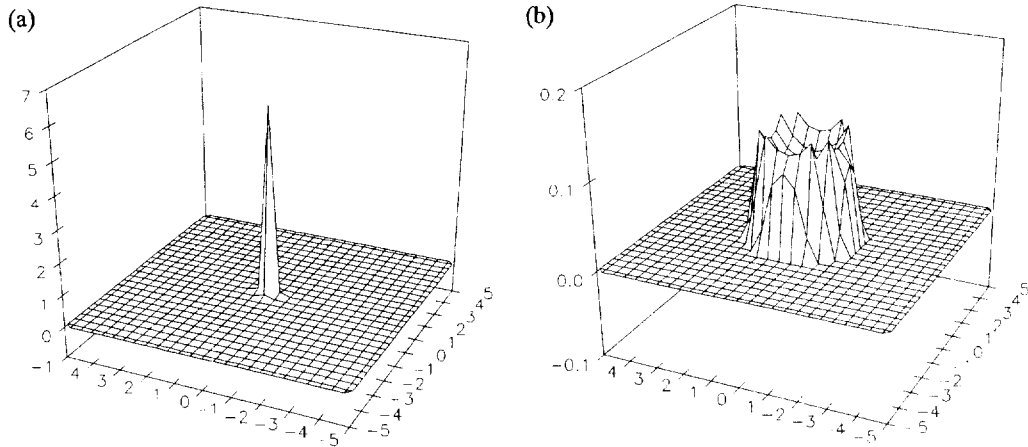


그림 4. 기판두께에 따른 PSF의 변화. #48 렌즈에 대한 것으로서 입사각 0° 일 때. (a) 기판이 없는 경우, (b) 기판의 두께가 50 μm 인 경우. 연직방향은 세기를 임의의 단위로 나타낸 것이고, 밑면의 각 방향의 단위는 μm 이다.

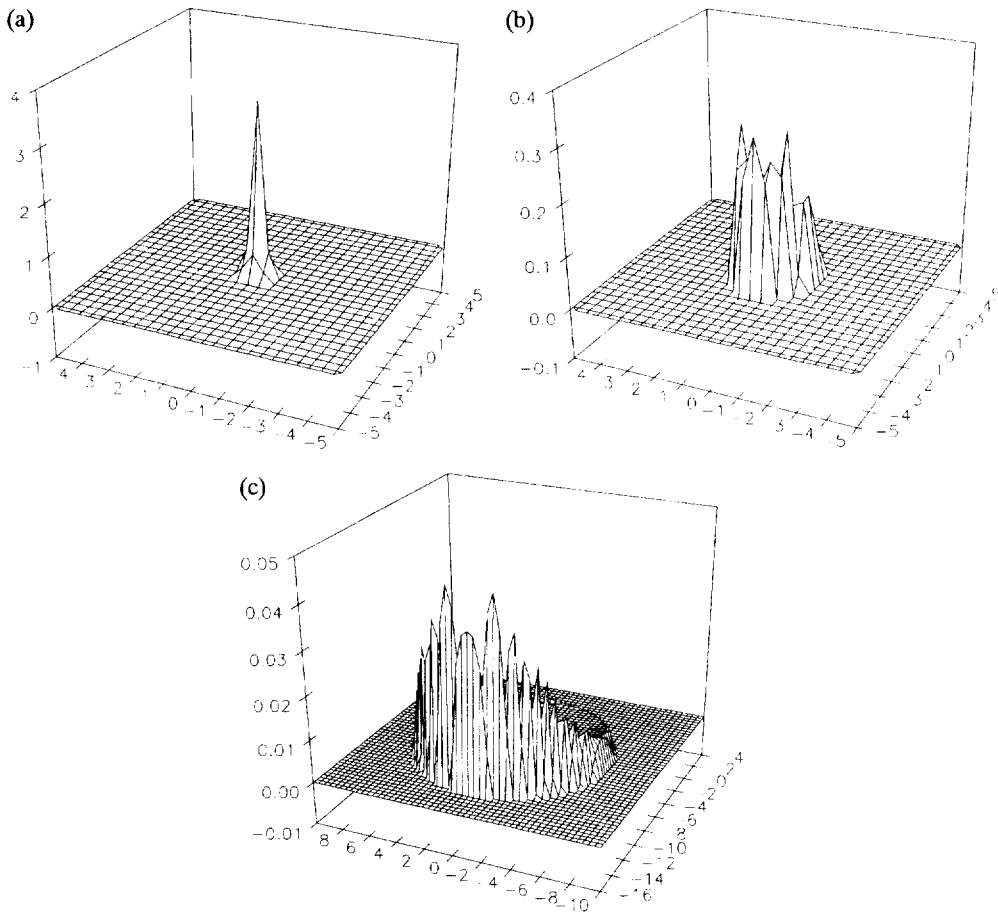


그림 5. 입사각에 따른 PSF의 변화. #50 렌즈에 있어서 기판이 없을 때. 입사각이 (a) 0° , (b) 2.5° , (c) 5° 인 경우. 연직방향은 세기를 임의의 단위로 나타낸 것이고, 밑면의 각 방향의 단위는 μm 이다.

광선투과율이 최대값과의 차이 1%이내, 평균점의 x 좌표와 최고점 위치가 $f\sin\theta$ 로 부터 $1\ \mu\text{m}$ 이내, 나머지는 최우수값과의 차이 10%이내인 표면양각형태를 보였다. 여기서 광선투과율은 동공에서 발생하는 총광선수에서 광선추적과정에서 제외된 광선수를 뺀 값을 다시 총광선수로 나누어서 백분율을 취한 것이고, $f\sin\theta$ 위치에 대한 rms편차는 점($f\sin\theta, 0$)로 부터 광선추적을 통해 상면에 도달한 광선들의 좌표까지의 표준편차를 구한 것으로서 점($f\sin\theta, 0$)에서 광선들이 벗어난 정도 즉, 푸리에변환 렌즈로서의 적합성을 잘 보여준다. $f\sin\theta$ 위치에 대한 rms편차는 평균점의 위치가 점($f\sin\theta, 0$)로 부터 벗어난 정도와 rms 스폿크기를 종합적으로 보여주는 것이지만, 광선추적결과 본 연구의 범위에서는 rms 스폿크기와 큰 차이가 없었다.

그림 4는 입사각 0° 에서 기관두께에 따른 PSF의 변화를 보여주는데 두께가 주어짐에 따라서 구면수차의 증가에 따른 PSF의 왜곡을 볼 수 있다. 기관두께가 $50\ \mu\text{m}$ 인 경우 #47 부터 #50 까지의 렌즈는 입사각이 0° 일 때에도 구면수차의 영향으로 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 여러개의 최고점을 나타낸다. 그림 5는 기관이 없는 #50 렌즈의 입사각에 따른 PSF의 3-D 그래프인데, 입사각의 증가에 따라서 코마수차에 의하여 PSF가 넓어지고 최대값이 작아지는 것을 볼 수 있다.

그림 6부터 10에서 여러 가지 평가지표를 51가지의 렌즈

형태에 따라 나타내었다. 전반적으로 광선투과율, rms 스폿크기 및 $f\sin\theta$ 위치에 대한 rms편차에 있어서는 기관의 유무에 따라 거의 차이를 보이지 않으나, PSF 모양과 최고점 값(peak normalized intensity)에 있어서는 기관이 있을 때 변화가 심하다. 그림 6에서는 광선투과율을 보이고 있는데, 렌즈의 표면양각형태가 평면-블록면에서 블록면-평면으로 갈수록 입사각의 증가에 따라서 투과율이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 한편, 광선투과율은 기관의 유무에는 거의 영향을 받지 않고 표면양각형태와 입사각에 따라 변화가 심한 것을 볼 수 있는데, 이는 그림 2에서 주로 g-h영역에 도달하는 광선수의 증가에 기인한 것이다. 그림 7은 최고점 값을 보여주는데, 기관의 유무에 따라서 #20 이상의 렌즈는 구면수차의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있고, 기관이 없는 경우 #10, #14, #15에서 입사각의 증가에도 최고점 값은 거의 변화가 없었고, 기관 두께가 $50\ \mu\text{m}$ 인 경우는 입사각의 증가에 따라 모든 형태의 렌즈에 있어서 변화가 심했다. 그리고 최고점 위치가 점($f\sin\theta, 0$)에서 벗어나는 정도를 살펴보면, 기관이 없는 경우 #16, #17 렌즈에 있어서, 기관두께가 $50\ \mu\text{m}$ 인 경우에는 #18, #19, #20 렌즈에 있어서 입사각의 변화에도 거의 벗어나지 않았다.

그림 8에서는 최고점에서 PSF를 xz -평면으로 잘랐을 때, 그 단면에 나타나는 2차원 PSF의 FWHM을 입사각에 따라

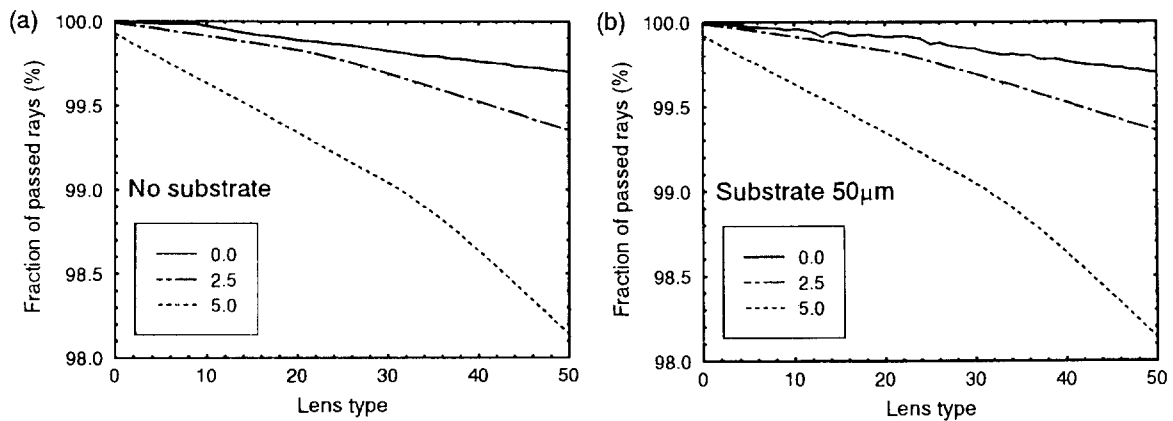


그림 6. 표면양각형태에 따른 광선투과율. (a) 기관이 없는 경우, (b) 기관두께가 $50\ \mu\text{m}$ 인 경우.

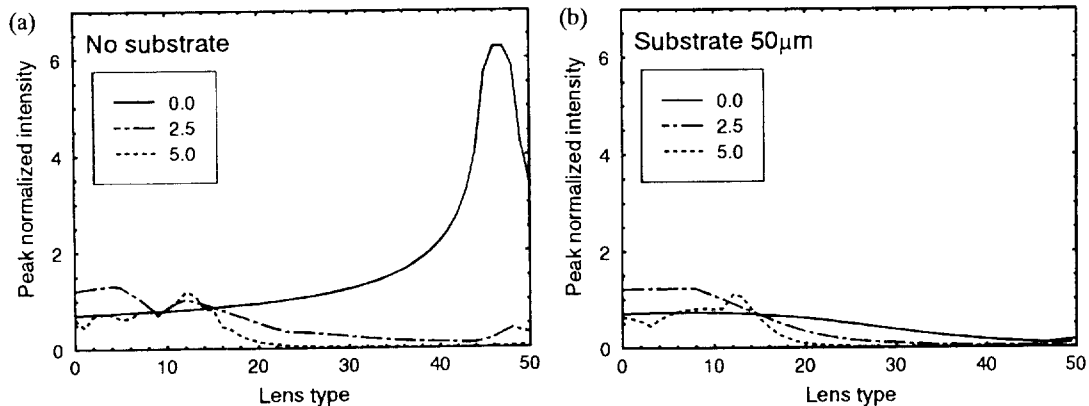


그림 7. 최고점에서의 규격화된 세기의 비교. (a) 기관이 없는 경우, (b) 기관두께가 $50\ \mu\text{m}$ 인 경우.

나타내었다. 대체로 표면양각형태가 좌우대칭 볼록면에서 볼록면-평면으로 갈수록, 광선의 입사각이 증가함에 따라서 FWHM이 증가하였다. 그러나 평면-볼록면에 접근할수록 FWHM이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 PSF의 원형대칭이 급격히 깨지면서 -x축 방향으로 peak를 형성하기 때문이다. FWHM를 회절한계(5.21 μm)와 비교하면 기판의 유무에 따라 약간의 차이는 있으나, 일반적으로 좌우대칭 볼록면에서 볼록면-평면으로 갈수록, 입사각의 증가에 따라서 회절한계를 벗어나는 것을 볼 수 있다. 그림 9, 10은 평균점의

위치와 rms 스폿크기를 나타내는데, #10 부근에서 입사각의 증가에도 불구하고 이들의 변화가 거의 없음을 보여준다. 한편 이들을 종합적으로 나타내는 $f\sin\theta$ 위치에 대한 rms편차에 있어서도 같은 현상이 관찰되었고, 그림 10과 유사한 형태의 그래프를 보였다. 앞에서 보인 표 1에 이상의 결과를 종합하였는데, 기판이 없는 #10 렌즈가 가장 우수한 것으로 평가된다. 실제로 제작이 불가능한 기판이 없는 경우를 제외하더라도 #10 렌즈 즉, 표면양각높이의 80%가 상면 쪽에 존재하는 양볼록형태를 가지는 TPHK가 푸리에변환 렌즈로서 가장 우

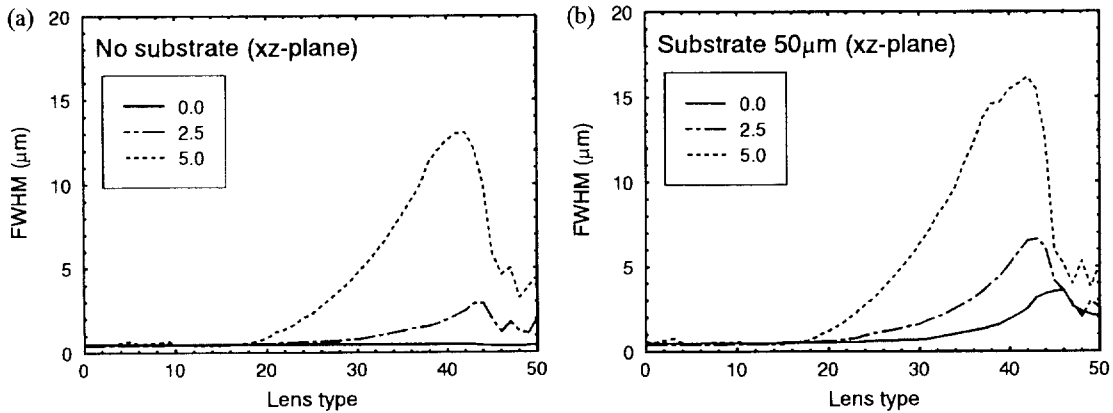


그림 8. 최고점위치에서의 FWHM의 비교. (a) 기판이 없는 경우, (b) 기판두께가 50 μm 인 경우.

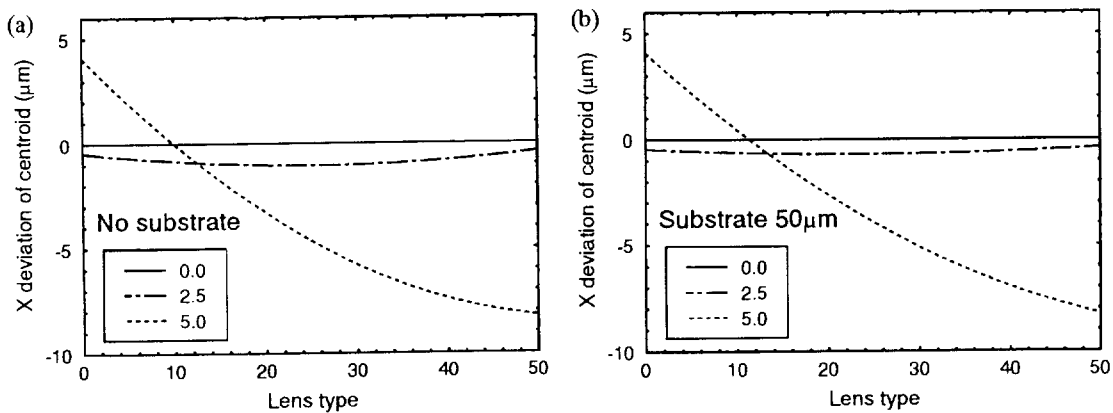


그림 9. $f\sin\theta$ 위치에 대한 평균점의 x 좌표. (a) 기판이 없는 경우, (b) 기판두께가 50 μm 인 경우.

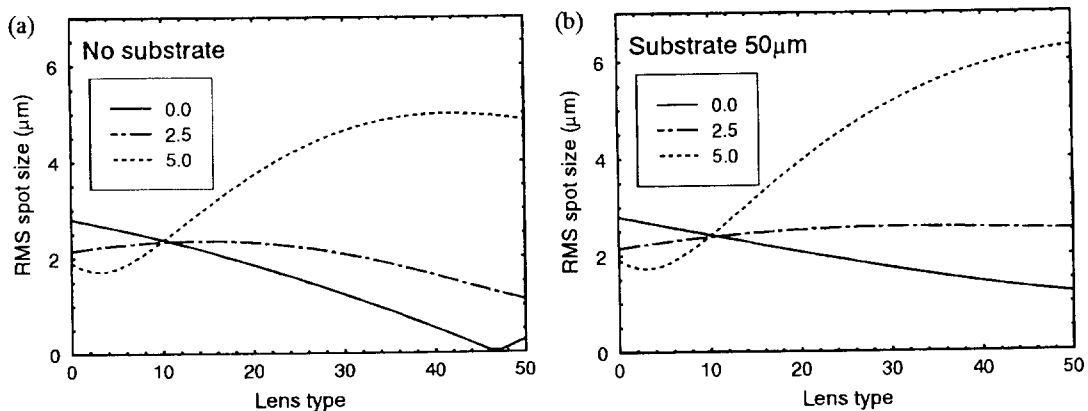


그림 10. rms 스폿크기. (a) 기판이 없는 경우, (b) 기판두께가 50 μm 인 경우.

수하다.

1차원 TPHK에 대한 분석결과[20]와 비교해 보면 skew ray가 있는 2차원 렌즈임에도 불구하고 최고점이 $f\sin\theta$ 로 부터 벗어나는 정도와 rms 스폿크기 등의 평가지표에 있어서 입사각에 따른 변화에 큰 차이점을 보이지 않았다. 그러나 1차원 TPHK의 경우 평면-블록면, 좌우대칭 블록면, 블록면-평면의 세 가지 표면양각형태의 비교에서 좌우대칭 렌즈가 가장 우수했는데, 2차원의 경우에 있어서는 평면-블록면 형태의 #0 렌즈가 오히려 더 우수한 성능을 갖는 것으로 나타났다.

V. 결 론

본 연구에서는 2차원 TPHK를 푸리에변환 렌즈로 사용함에 있어서, 기판이 없는 경우와 그 두께가 50 μm 인 경우에 있어서 표면양각형태를 평면-블록면에서 블록면-평면까지 51단계로 나누어, 세가지 입사각(0° , 2.5° , 5°)에 대한 광선추적을 실시하여 회절격자방정식에 의한 결과 및 회절한계와 비교하였다. 광선추적의 결과로 PSF와 광선투과율을 얻고, PSF로부터 rms 스폿크기, $f\sin\theta$ 위치에 대한 rms 편차, 최고점 위치, FWHM 등을 계산하여 TPHK의 표면양각형태에 따른 푸리에변환 렌즈로서의 특성을 비교 분석하였다. $f\sin\theta$ 위치에 대한 rms편차의 변화량에 있어서는 기판두께가 50 μm 인 #8, #9, #10 렌즈가 가장 작았고, 최고점이 $f\sin\theta$ 위치로 부터 벗어나는 정도와 최고점 값의 변화에 있어서는 기판이 없는 #14, #15 렌즈가 가장 작은 값을 나타내었다. 그러나, 기판이 없는 #8, #9, #10 렌즈는 $f\sin\theta$ 위치에 대한 rms편차, 최고점이 $f\sin\theta$ 위치로 부터 벗어나는 정도와 최고점 값, 평균점 위치와 rms 스폿크기 등의 변화에 있어서 고르게 작은 값을 유지했다. 결론적으로 기판이 없는 #8, #9, #10 렌즈가 푸리에변환 렌즈로서 우수하게 평가되는데, 표 1에서 나타난 수치를 종합해 보면 #10 렌즈가 가장 우수하게 평가된다. 그러나 실제로 제작이 불가능한 기판이 없는 경우를 제외한다면 기판의 두께가 50 μm 인 #10 렌즈가 가장 우수한 성능을 보였다. 물론 본 연구결과는 최종적으로 실험과 비교되어야 할 것이다. 여기에서 다룬 여러가지 양들은 TPHK의 성능을 직접적으로 나타낸다고 보다는 그 회절효율에 영향을 주는 것임을 부언한다. DOE의 1차적인 특성 즉, 파면특성은 그 윤대의 경계에 따라 회절격자방정식에 의해 주어진다. DOE의 회절효율에 대해서는 회절이론, 더 나아가서 엄밀한 전자기이론을 적용시키는 것이 타당하겠지만, 회절효율에 대한 완벽한 이론이 없으므로, 본 연구에서는 기하광학적 광선추적을 적용하여 TPHK의 회절효율을 간접적으로 다룬 것이다.

참고문헌

- [1] J. W. Goodman, Introduction to Fourier optics (McGraw-Hill, New York, 1968).
- [2] A. VanderLugt, Optical Signal Processing (Wiley, New York, 1992).
- [3] K. von Bieren, Appl. Opt. **10**, 2739 (1971).
- [4] J. Kedmi and A. A. Friesem, Appl. Opt. **23**, 4015 (1984).
- [5] D. A. Buralli and G. M. Morris, Appl. Opt. **30**, 2151 (1991).
- [6] D. A. Buralli and G. M. Morris, Appl. Opt. **28**, 3950 (1989).
- [7] W. C. Sweatt, J. Opt. Soc. Am. **67**, 803 (1977).
- [8] W. C. Sweatt, J. Opt. Soc. Am. **69**, 486 (1979).
- [9] D. A. Buralli, G. M. Morris, and J. R. Rogers, Appl. Opt. **28**, 976 (1989).
- [10] V. P. Koronkevich, "Computer Synthesis of Diffractive Optical Elements," in Optical Processing and Computing, H. H. Arsenault, T. Szoplik, and B. Macukow, Eds. (Academic, NY, 1989) pp.277-313.
- [11] J. Turunen and F. Wyrowski, "Diffractive Optics: from promise to fruition," in Trends in Optics, A. Consortini, Ed. (Academic, NY, 1996) pp.111-123.
- [12] T. W. Stone and B. J. Thompson, Eds., Selected Papers on Holographic and Diffractive Lenses and Mirrors, SPIE Vol. MS34 (SPIE, Washington, 1991).
- [13] S. H. Lee, Ed., Selected Papers on Computer-Generated Holograms and Diffractive Optics, SPIE Vol. MS33 (SPIE, Washington, 1992).
- [14] J. Opt. Soc. Am. A12, No. 5 (1995) Feature issue on Diffractive Optics Modeling.
- [15] Appl. Opt. 34, No. 14 (1995) Feature issue on Diffractive Optics.
- [16] G. H. Spencer and M. V. R. K. Murty, J. Opt. Soc. Am. **52**, 672 (1962).
- [17] A. Kathman, D. Hochmuth, and D. Brown, Proc. SPIE 2577, 114 (1995).
- [18] D. Richardson, "Diffraction Gratings," in Applied Optics and Optical Engineering Vol. V, R. Kingslake, Ed. (Academic, NY, 1969) pp.17-46.
- [19] C. Londono and P. P. Clark, Appl. Opt. **31**, 2248 (1992).
- [20] 조두진, 고근하, 원영희, 한국광학회지 **4**, 390 (1993).
- [21] W. T. Welford, Aberrations of optical systems (Adam-Hilger Ltd, 1986) pp.50-78.
- [22] 김성우, "광선추적법에 의한 푸리에변환 렌즈로서의 TPHK(Telecentric Paraxial Holographic Kinoform)의 표면양각형태에 따른 특성 분석," 아주대학교 석사학위논문 (1995).

Analysis of surface-relief profile for TPHK(Telecentric Paraxial Holographic Kinoform) as a fourier-transform lens using exact raytracing

Sung Woo Kim and Doo Jin Cho

Department of Physics, Ajou University, Suwon 442-749, Korea

(Received November 28, 1996, Revised manuscript received March 12, 1998)

We investigated surface-relief profiles of the TPHK(telecentric paraxial holographic kinoform) used as a Fourier-transform lens employing exact geometrical raytracing. For the TPHK of F/8 and focal length of 15 mm, we consider the cases where the thickness of the substrate is 0 and 50 μm , dividing the surface-relief profiles into fifty steps from plano-convex to convex-plano shapes and varying the angle of incidence(0° , 2.5° , 5°). In order to identify appropriate surface-relief profiles, we employ, as criteria of performance, rms spot size, rms deviation from $f\sin\theta$, peak position and FWHM(full width at half maximum), number of rays abandoned from raytracing etc., which are determined from the result of exact raytracing. It is found that the profile with 80% of its relief thickness facing the image plane gives the best performance regardless of the presence of substrate.