

엄밀한 광선추적법에 의한 푸리에변환 holographic kinoform의 분석*

조두진 · 고근하 · 원영희

아주대학교 자연과학대학 물리학과

(1993년 10월 26일 받음)

1차원 telecentric paraxial holographic kinoform을 푸리에변환 렌즈로 사용하는 경우에 있어서, 3가지 표면양각형태, 즉 평면-블록면, 블록면-평면, 좌우대칭 블록면에 대하여 스넬의 법칙을 기반으로 하는 엄밀한 광선추적법을 적용하여 분석하였다. kinoform은 F/8, 초점거리 15 mm이며 kinoform과 그 주변 매질의 굴절율을 변화시키므로써 zone수와 두께 그리고 포물면의 경사도를 변화시켰다. 일반적으로 좌우대칭 블록면 형태가 가장 좋은 성능을 갖는 것으로 나타났고, 모든 경우에 있어서 포물면의 경사도가 증가함에 따라 입사각의 증가에 따른 성능이 저하되었다.

I. 서 론

DOE(Diffractive Optical Elements, 회절광학소자)는 굴절 및 반사현상을 주로 이용하는 종래의 광학소자들과는 달리, 회절현상을 주로 이용한 것으로서 최근에 다이어몬드 선반, 반도체 VLSI 기술, 레이저직접기록 등 제작기술의 발전으로 인하여 과거에 불가능했던 다양하고 특수한 기능을 갖춘 DOE들이 개발되고 있다.^[1-6] DOE는 얇고 가벼우며 쉽게 여러장을 겹쳐 놓을 수 있고, 복잡한 파면특성과 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.

Holographic kinoform은 DOE의 하나로서 일반적으로 표면양각형태를 갖는 위상형 홀로그램을 지칭하는데, 여기에서는 Fresnel zone판과 유사한 특성을 갖으나 회절효율이 이론적으로 100%가 가능한 위상형 표면양각렌즈를 의미한다.^[7] Buralli와 Morris^[8,9]는 Sweatt모형^[10,11]을 이용하여 근축근사(paraxial approximation)에 따라 설계된 TPHK(telecentric paraxial holographic kinoform)가 푸리에변환 렌즈^[12,13]로서 매우 우수하다는 결과를 발표하였다. 일반적으로 DOE의 회절효율은 표면양각 즉, blaze 형태에 관계되는데, 표면의 각점에서의

광선방향이 스넬의 법칙과 회절격자방정식을 동시에 만족하는 것이 이상적이다.^[14,15] 따라서 본 연구에서는 TPHK를 푸리에변환 렌즈로 사용함에 있어서 3가지 표면양각형태, 즉 평면-블록면, 블록면-평면, 좌우대칭 블록면에 대하여 스넬의 법칙을 이용한 엄밀한 광선추적법을 적용하여 얻은 결과와 회절격자방정식에 의한 광선추적결과를 비교하므로써 분석하였다. 광선추적은 분석의 단순화를 위하여 1차원 즉 렌즈면에 수직인 평면 내에 국한하였는데, 이 결과는 실린더형 렌즈와 광도파관렌즈(waveguide lens)에 직접 적용될 수 있다. 광도파관상에서 TPHK와 유사한 Fresnel렌즈는 여러가지 장점들로 인하여 활발한 연구의 대상이 되어온 바 있다.^[16-19] 2절에서 TPHK에 관하여 간략히 논의하고, 3절에서는 본 연구에서 시행한 광선추적 과정들을 기술한다. 그리고 4절에서는 F/8, 초점거리 15 mm의 TPHK에 대하여 TPHK와 그 주변매질의 굴절율을 변화시키므로써 zone수, 두께 그리고 포물면의 경사도를 변화시켰을 때의 광선추적 결과를 기술하고 그에 대한 논의를 한다.

II. 푸리에변환 렌즈로서의 TPHK

TPHK는 stop이 앞초점면(front focal plane)에 있으며 zone경계가

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

* 본 연구는 1992년도 교육부 기초과학육성연구비(BSRI 92-237) 지원에 의하여 수행되었음.

으로 주어지고, 위상이

$$\phi(x) = 2\pi \left(m + 1 - \frac{nx^2}{2\lambda f} \right), \quad x_m < |x| < x_{m+1} \quad (2)$$

으로 주어지는 렌즈계이다. 여기서 λ 는 진공중의 빛의 파장, n 은 주변매질의 굴절율, f 는 렌즈의 초점거리, M 은 최외각 zone을 나타내며 좌표축은 렌즈방향을 x 축으로 광축을 z 축으로 한다. $\phi(x)$ 는 $[0, 2\pi]$ 의 범위를 가지는데 $x=x_m$ 에서 0에서 2π 로 변화한다. 푸리에변환 렌즈가 물체의 공간주파수를 렌즈계의 뒷초점면(back focal plane)에 정확히 대응시키기 위해서는 평행광에 대한 spot크기가 작고 입사각에 대한 변화가 적을 뿐만 아니라 spot의 위치가 입사각 θ 에 따라 $f \sin\theta$ 에 따라야 한다.^[8,12]

본 연구에서는 (1)식과 (2)식에 의해 주어지는 동일한 위상을 갖는 표면양각형태로서 그림 1에 보인 바와 같이 (a) 평면-블록면, (b) 블록면-평면, (c) 좌우대칭 블록면의 3가지 경우를 고려하였다.

(a) 평면-블록면의 경우 첫째면은 xy -평면이고 둘째면은 블록면으로서

$$z = \frac{L}{2\pi} \phi(x) \quad (3)$$

로 나타내지는데, 여기서 L 은 TPHK의 두께로서 TPHK의 굴절율을 n' 이라 하면

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

으로 주어진다. (b) 블록면-평면형태는 (3)식에 의해 주어지는 평면-블록면형태를 xy -평면에 대해 반전시킨 것이고, (c) 좌우대칭 블록면형태는 첫째면은 $z = -L\phi(x)/(4\pi)$, 둘째면은 $z = L\phi(x)/(4\pi)$ 으로 한 것이다. 그림 1에서 표면형태를 분명히 나타내기 위해 TPHK의 두께를 과장했음을 부연한다.

III. 광선추적과정

1. 스넬의 법칙을 이용한 엄밀한 광선추적

먼저 TPHK의 앞초점면(front focal plane)에 있는 stop에 균일한 간격을 갖는 평행광선들을 설정하고 주어진 입사각에 따라 첫째면까지 진행시킨다음 첫째면과의 교점을 구한다. 그리고 스넬의 법칙에 따라 TPHK 내부에서의 굴절방향을 계산하여 둘째면까지 진행시키고 다시 교점을 구한다. 마지막으로 둘째면에서 다시 스넬의 법칙을 사용하여 추적광선의 최종방향을 계산하고 뒷초

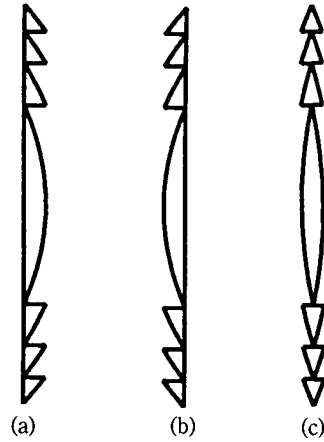


그림 1. kinoform의 표면양각형태: (a) 평면-블록면, (b) 블록면-평면, (c) 좌우대칭 블록면.

점면까지 진행시켜 교점을 구하므로써 PSF(point spread function)을 얻게 된다. 추적과정에서 zone경계면($x=x_m$)과 교차하는 광선들은 거의 전부 잘못된 방향을 가지게 되므로 추적대상에서 제외한다. 이들은 spot의 모양을 왜곡시켜 렌즈계의 성능을 저하시킨다. 본 광선추적법은 완전히 기하광학적인 것으로 회절효과를 무시한 것이며, TPHK면에서의 반사도 무시하였음을 부연한다.

2. 회절격자방정식에 따른 광선추적

일반적인 DOE의 설계에서는 두께를 무시한 위상스크린(thin phase screen)을 가정한다. 이 위상스크린의 위상을 $\phi(x)$ 라 하면 DOE는

$$d = \frac{2\pi}{\frac{d\phi}{dx}} \quad (5)$$

로 주어지는 가변격자주기를 갖는 회절격자로서 회절격자방정식

$$d(\sin\theta_p - \sin\theta) = p \frac{\lambda}{n} \quad (6)$$

에 따라 입사각 θ 의 주어진 광선을 p 차회절각 θ_p 방향으로 회절시킨다. 여기에서 θ 와 θ_p 는 z 축에서 반시계방향을 양(+)으로 하고, p 는 회절차수로서 정수인데 본 연구에서는 $p=1$ 인 경우만 고려한다. (6)식은 서론에서 언급한 바 있는 Sweatt모형과 동일한 결과를 주게 된다. TPHK의 경우에 (2)식과 (5)식에 의하여 (6)식은

$$\sin\theta_1 = \sin\theta - \frac{x}{f} \quad (7)$$

으로 된다. 이 식은 1차회절각 θ_1 이 굴절율에는 무관하고 입사각 θ 와 TPHK와의 교점 x , 그리고 초점거리 f 에만 관계된다는 것을 보여준다.

광선추적결과를 올바르게 평가하기 위해서는 회절이론과 비교, 검토하여야 한다. TPHK를 두께를 무시한 위상스크린으로 가정하고 Fresnel근사^[20]를 이용하면 입사각 θ 에 대한 normalized PSF는

$$I(x) = \gamma \text{sinc}^2[\gamma(x - f\sin\theta)] \quad (8)$$

로 주어지는데, 여기서 $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$ 를, $\gamma = nD/(\lambda f)$ (D 는 stop의 직경)을 나타낸다. 따라서 spot의 중심점은 정확한 푸리에변환 관계를 주는 $x = f\sin\theta$ 에 있게 되고 3dB spot크기, 즉 FWHM(full width at half maximum) 2σ 는 $0.884/\gamma$, 즉

$$2\sigma = 0.884 \frac{\lambda f}{nD} \quad (9)$$

가 된다. 한편 (8)식에 따라 rms spot크기를 계산하면 ω 가 되므로 광선추적결과와 비교할 때는 3dB spot크기 2σ 를 사용하여야 한다.

IV. 광선추적결과 및 논의

본 연구에서는 F/8 (초점거리 15 mm, stop직경 1.875 mm)의 푸리에변환 렌즈계로서의 TPHK를 고려하였다. 빛의 파장 λ 는 헬륨네온레이저의 $0.6328 \mu\text{m}$ 으로 하였고, kinoform자체의 직경은 5 mm로서 F/3이고 vignetting되지 않는 최대입사각은 약 6° 이다. 이 푸리에변환 렌즈계는 수차를 무시하고 회절한계를 가정했을때 공기중 ($n=1$)에서 최대 1차원 space-bandwidth product^[8]가 F/3 kinoform의 최대치의 약 94%인 350이 된다.

광선추적에서는 stop에서의 간격이 $0.9375 \mu\text{m}$ 인 2001개의 광선을 입사각 $0^\circ, 2.5^\circ$, 그리고 5° 의 3 경우에 각각 사용하였다. 참고로 광선수를 증가시켜도 추적결과 즉, PSF에는 거의 변화가 없다. TPHK의 zone수, 두께 그리고 포물면의 경사도를 변화시키는데 있어서 kinoform 주변매질의 굴절율 n 은 1(공기)인 경우와 2.2(Ti:LiNbO₃ 광도파관^[16])인 2가지 경우를 고려하였고, kinoform자체의 굴절율 n' 은 $n=1$ 에 대해 1.5와 2, $n=2.2$ 에 대해서는 2.3과 3인 경우를 각각 고려하였다. 여기서 n' 이 2와 3인 경우는 두께의 변화를 위하여 인위적으로 고려한 것임을

표 1. 입사각에 따라 실제로 광선추적에 사용된 최외각(최소간격) zone

n	$\theta(^{\circ})$		
	0	2.5	5
1	46	133	266
2.2	101	293	586

부연한다. zone수 즉, 최외각 zone M 은 $n=1$ 일때 329, $n=2.2$ 일때는 724이고, 최소 zone간격은 $n=1$ 일때 $3.80 \mu\text{m}$, $n=2.2$ 일때는 $1.73 \mu\text{m}$ 이다. 표 1에 입사각에 따라 실제로 광선추적에 사용된 최외각 zone을 보였는데, 입사각의 증가에 따라 보다 외각에 있는 경사도가 큰 zone이 사용됨을 보여준다. kinoform의 두께 L 은 (4)식에 따라서 각각 $1.27 \mu\text{m}$ ($n=1, n'=1.5$), $0.633 \mu\text{m}$ ($n=1, n'=2$), $6.33 \mu\text{m}$ ($n=2.2, n'=2.3$), $0.791 \mu\text{m}$ ($n=2.2, n'=3$)으로 주어진다.

스넬의 법칙을 이용한 광선추적결과는 그림 2부터 5에 ($n=1, n'=1.5$), ($n=1, n'=2$), ($n=2.2, n'=2.3$), ($n=2.2, n'=3$)인 경우에 대한 PSF를 각각 나타내었고, 표 2에는 rms spot크기와 추적에서 제외된 광선수(%)를 나타내었다.

그림 2부터 5에서 (a)는 입사각 $\theta=0^\circ$, (b)와 (c)는 각각 $\theta=2.5^\circ$ 와 $\theta=5^\circ$ 의 경우이고, 그림안에 표시되지 않은 곡선은 평면-볼록면형태, R 은 볼록면-평면, B 는 좌우대칭 볼록면형태에 대한 PSF를 나타내며 가로축(x 축)은 뒷초점면에서의 spot의 위치를 나타내는데 그 중앙점($x=0$)은 $f\sin\theta$ 에 대응하므로 PSF가 중앙에 집중되는 것이 우수하다. 여기서 PSF는 normalized intensity로서 광선수밀도를 총추적광선수(2001)로 나눈 것을 의미하는데, 광선수밀도란 작은 x 의 범위 Δx 안에 있는 광선수를 Δx 로 나눈 것이다. 표 2에서 rms spot크기 옆의 별표(*)는 렌즈로부터 멀어지는 방향으로 약간의 defocus를 도입함에 따라 spot크기가 작아짐을 나타내고, *가 없는 경우는 그 반대 즉, 렌즈쪽에서의 defocus가 spot크기를 감소시킨다. 이것은 적절한 defocus의 도입이 구면수차의 효과를 상쇄시키기 때문이다. 그러나 rms spot크기가 작더라도 평면-볼록면의 경우에서 보는 바와 같이 spot모양이 크게 왜곡되는 경우가 있으므로, 동시에 rms spot크기와 3dB spot크기가 작은 것이 바람직하다.

입사각이 0° 일때는 모든 경우에 있어서 회절한계 이하인데, 회절한계는 (9)식에 따라서 3dB spot크기 2σ 가 $n=1$ 과 $n=2.2$ 에 대해서 각각 $4.5 \mu\text{m}$, $2.0 \mu\text{m}$ 로 주어진다. 3dB spot크기가 가장 큰 그림 4a의 평면-볼록면에

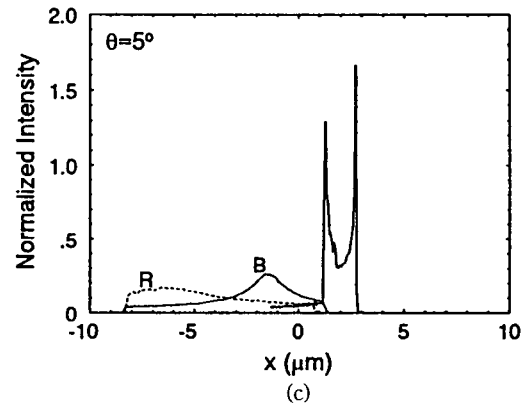
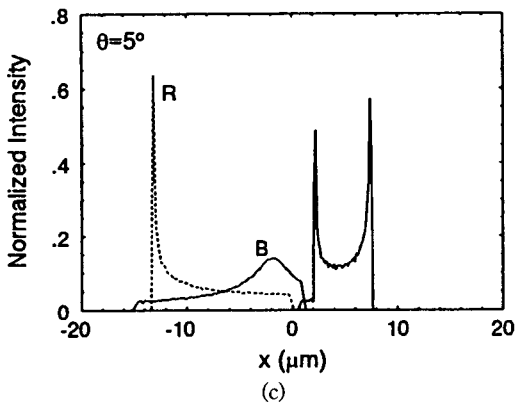
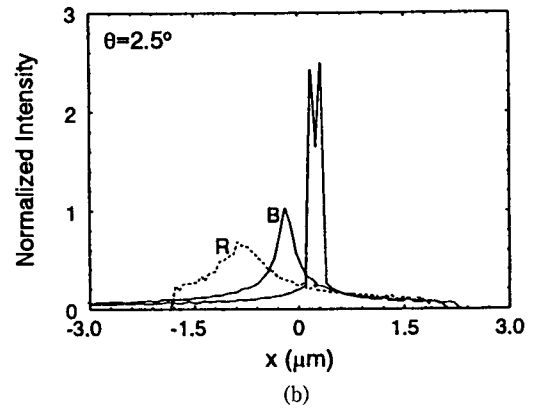
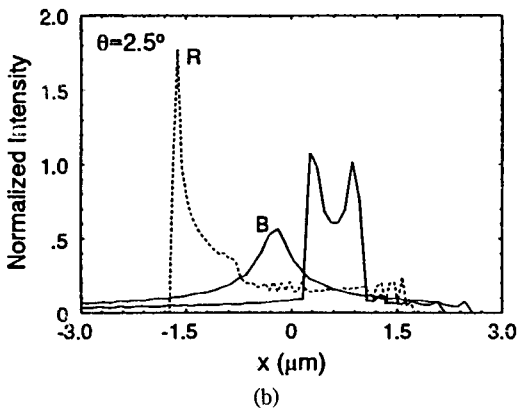
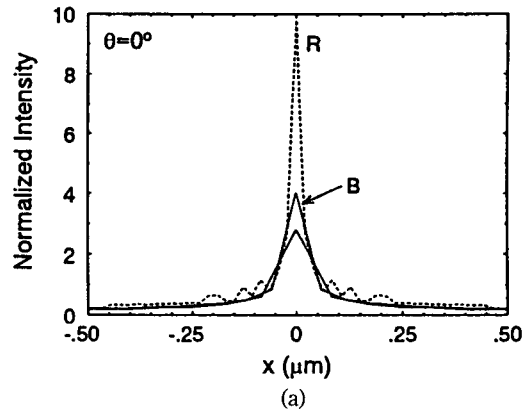
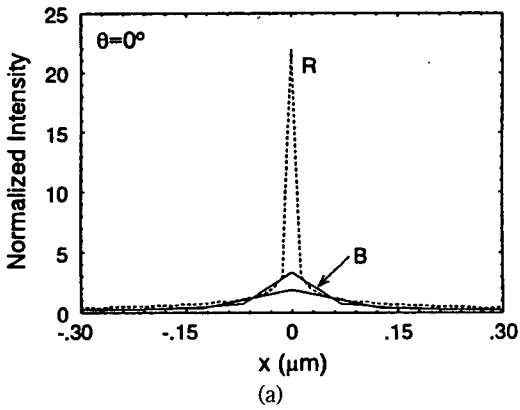


그림 2. $n=1$, $n'=1.5$ 일때 스넬의 법칙을 이용한 광선 추적에 의한 PSF. (a)는 입사각 $\theta=0^\circ$, (b)와 (c)는 각각 $\theta=2.5^\circ$ 와 $\theta=5^\circ$ 의 경우이고, 그림안에 표시되지 않은 곡선(실선)은 평면-블록면형태, R(점선)은 블록면-평면, B(실선)는 좌우대칭 블록면형태에 대한 PSF를 나타낸다.

그림 3. $n=1$, $n'=2$ 일때 스넬의 법칙을 이용한 광선 추적에 의한 PSF. (a)는 입사각 $\theta=0^\circ$, (b)와 (c)는 각각 $\theta=2.5^\circ$ 와 $\theta=5^\circ$ 의 경우이고, 그림안에 표시되지 않은 곡선(실선)은 평면-블록면형태, R(점선)은 블록면-평면, B(실선)는 좌우대칭 블록면형태에 대한 PSF를 나타낸다.

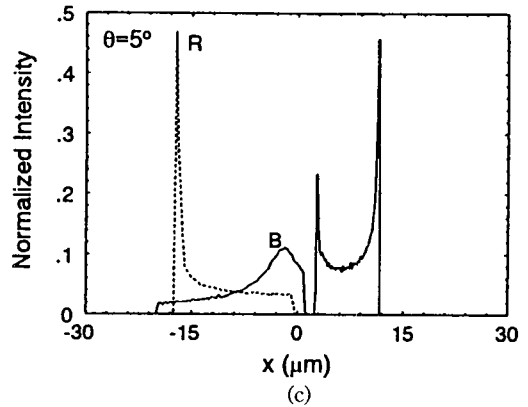
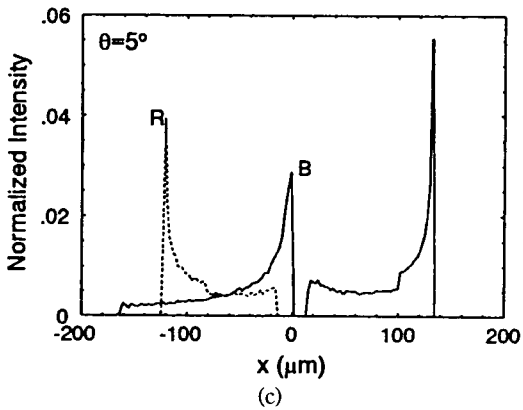
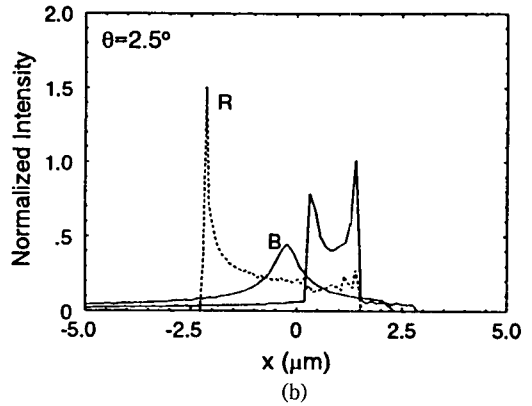
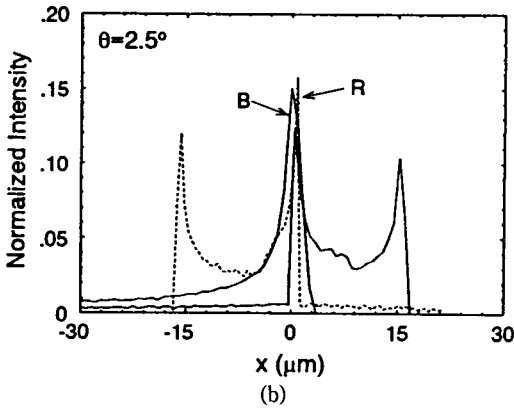
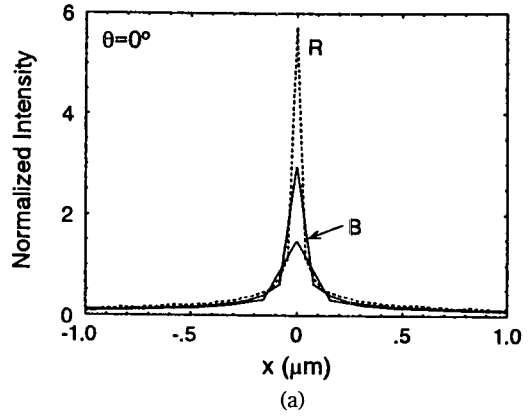
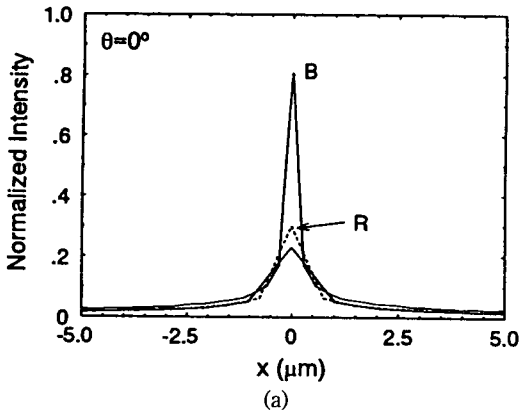


그림 4. $n=2.2$, $n'=2.3$ 일때 스넬의 법칙을 이용한 광선추적에 의한 PSF. (a)는 입사각 $\theta=0^\circ$, (b)와 (c)는 각각 $\theta=2.5^\circ$ 와 $\theta=5^\circ$ 의 경우이고, 그림안에 표시되지 않은 곡선(실선)은 평면-블록면 형태, R (점선)은 블록면-평면, B (실선)는 좌우대칭 블록면형태에 대한 PSF를 나타낸다.

그림 5. $n=2.2$, $n'=3$ 일때 스넬의 법칙을 이용한 광선추적에 의한 PSF. (a)는 입사각 $\theta=0^\circ$, (b)와 (c)는 각각 $\theta=2.5^\circ$ 와 $\theta=5^\circ$ 의 경우이고, 그림안에 표시되지 않은 곡선(실선)은 평면-블록면 형태, R (점선)은 블록면-평면, B (실선)는 좌우대칭 블록면형태에 대한 PSF를 나타낸다.

표 2. rms spot크기(μm)와 추적에서 제외된 광선수(%). U는 평면-블록면, R은 블록면-평면 B는 좌우대칭 블록면 형태를 나타내며, rms spot크기 옆의 별표(*)는 렌즈로부터 멀어지는 방향으로 약간의 defocus를 도입함에 따라 spot크기가 작아짐을 나타낸다.

$\theta(^{\circ})$	0						2.5						5					
	U		R		B		U		R		B		U		R		B	
	μ	%	μ	%	μ	%	μ	%	μ	%	μ	%	μ	%	μ	%	μ	%
1, 15	2.1	0	0.2*	0.60	1.2	0.20	1.7	0	1.0	0.60	1.9	0.25	2.0*	0.15	4.0	2.15	4.0	1.20
1, 2	1.4	0	0.4	0.20	1.0	0.20	1.2	0	0.9	0.30	1.3	0.20	1.0	0.10	2.4	1.20	2.3	0.55
2.2, 2.3	17.1	0	12.6*	2.40	4.8	1.00	12.3	0.40	8.9*	6.65	15.0	2.40	38.1*	1.70	33.6	21.0	45.1	9.65
2.2, 3	2.6	0	0.7*	0.10	1.3	0	2.0	0	1.1	0.55	2.3	0.10	3.0*	0.15	5.2	2.90	5.4	1.30

있어서도 $1.3 \mu\text{m}$ 정도이고, $n=1, n'=1.5$ 일때의 블록면-평면형태에 대한 spot모양이 가장 좋다. 그러나 입사각의 증가에 따라 spot크기가 증가하고, spot중심의 $\text{fsin}\theta$ 로부터의 편차도 증가하는데 블록면-평면의 경우에는 왼쪽(광축쪽)으로 평면-블록면의 경우에는 그 반대방향으로 편이한다. 특히 두께가 가장 두껍고 zone간격이 좁아 포물면의 경사도가 가장 큰 $n=2.2, n'=2.3$ (그림 4)의 경우에는 성능의 급격한 저하가 관찰되는데 블록면-평면의 경우에는 추적에서 제외된 광선도 21%나 된다. $n=1, n'=1.5$ (그림 2, 표 2 첫째줄)의 경우 rms spot크기는 모든 표면형태에 대해서 회절관계의 2σ 보다 작지만 그림 2c에 나타난 바와 같이 입사각이 5° 일때 평면-블록면의 경우 spot모양이 크게 왜곡되어 있고 블록면-평면의 경우에는 중심으로부터의 편차가 크다. 따라서 좌우대칭 블록면의 경우가 $2\sigma=5.6 \mu\text{m}$, $\text{fsin}\theta$ 로부터 최고점의 편차가 약 $-2 \mu\text{m}$, 추적대상에서 제외된 광선도 1% 정도로서 가장 우수하다. 이러한 특성은 그림 3과 표 2의 둘째줄에 나타난 바와 같이 두께가 더 얇은 $n'=2$ 일 때 더욱 향상된다.

한편 $n=1, n'=1.5$ (그림 2)인 경우와 $n=2.2, n'=3$ (그림 4)의 경우를 비교하여 보면 전자가 두께는 더 두껍지만 더 우수하다. 이 사실은 TPHK의 특성에 있어서 두께와 zone간격에 따른 포물면의 경사도가 중요한 역할을 한다는 것을 나타내는데, $n=1$ 의 경우 주변매질의 굴절율이 낮아 zone간격이 넓으므로 포물면의 경사도가 보다 작은 것이다.

회절격자방정식 즉, (7)식을 이용한 광선추적 결과, 입사각 θ 가 10° 정도까지는 PSF의 모양에 거의 변화가 없으며 그림 5a의 블록면-평면(R) 경우의 PSF와 매우 유사하다. rms spot크기도 약 $0.70 \mu\text{m}$ 으로서 표 2에서 보는 바와 같이 블록면-평면의 경우와 거의 일치한다. rms spot크기는 렌즈쪽에서의 defocus에 의하여 감소한

다. 그리고 PSF의 최고점은 거의 정확히 $\text{fsin}\theta$ 에 따른다. 이상으로 스넬의 법칙을 이용한 엄밀한 광선추적결과와 회절격자방정식을 이용한 광선추적결과를 종합하여 보면 PSF의 최고점이 $\text{fsin}\theta$ 에 가장 가까운 좌우대칭 블록면형태가 가장 우수함을 알 수 있다. 그리고 대부분의 경우에 있어서 평면-블록면이 블록면-평면형태보다 우수하고 $n=2.2, n'=2.3$ 인 경우에만 비슷하다.

V. 결 론

1차원 TPHK(telecentric paraxial holographic kinoform)을 푸리에변환 렌즈로 사용하는 경우에 있어서, 3가지 표면양각형태, 즉 평면-블록면, 블록면-평면, 좌우대칭 블록면에 대하여 스넬의 법칙을 기반으로 하는 엄밀한 광선추적법을 적용하여 얻은 결과와 회절격자방정식에 의한 광선추적결과를 비교하므로써 분석하였다. TPHK는 F/8, 초점거리 15mm이며 TPHK와 그 주변매질의 굴절율을 변화시키므로써 zone수, 두께 그리고 포물면의 경사도를 변화시켰다. 일반적으로 스넬의 법칙에 따른 광선방향이 회절격자방정식에 의한 방향에 근접하는 좌우대칭 블록면 형태가 가장 좋은 성능을 갖는 것으로 나타났고, 대부분의 경우에 있어서 평면-블록면이 블록면-평면형태보다 우수하고 $n=2.2, n'=2.3$ 인 경우에만 비슷하다. 모든 경우에 있어서 포물면의 경사도가 증가함에 따라 입사각의 증가에 따른 성능이 저하되었다.

참 고 문 헌

[1] 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.

- [2] M. W. Farn, M. B. Stern, and W. Veldkamp, *Opt. & Phot. News* **17:5**, 20 (1991).
- [3] T. W. Stone and B. J. Thompson, Eds., *Selected Papers on Holographic and Diffractive Lenses and Mirrors*, SPIE Vol. **MS34** (SPIE, Washington, 1991).
- [4] S. H. Lee, Ed., *Selected Papers on Computer-Generated Holograms and Diffractive Optics*, SPIE Vol. **MS33** (SPIE, Washington, 1992).
- [5] W. B. Veldkamp and T. J. McHugh, *Sci. Am.* **266** (5), 50 (1992).
- [6] *Appl. Opt.* **32**, No. 14 (1993).
- [7] D. A. Buralli, G. M. Morris and J. R. Rogers, *Appl. Opt.* **28**, 976 (1989).
- [8] D. A. Buralli and G. M. Morris, *Appl. Opt.* **28**, 3950 (1989).
- [9] D. A. Buralli and G. M. Morris, *Appl. Opt.* **30**, 2151 (1991).
- [10] W. C. Sweatt, *J. Opt. Soc. Am.* **67**, 803 (1977).
- [11] W. C. Sweatt, *J. Opt. Soc. Am.* **69**, 486 (1979).
- [12] K. von Bieren, *Appl. Opt.* **10**, 2739 (1971).
- [13] J. Kedmi and A. A. Friesem, *Appl. Opt.* **23**, 4015 (1984).
- [14] D. Richardson, "Diffraction Gratings," in *Applied Optics and Optica Engineering* Vol. V, R. Kingslake, Ed. (Academic, NY, 1969) pp.17-46.
- [15] C. Londoño and P. P. Clark, *Appl. Opt.* **31**, 2248 (1992).
- [16] T. Suhara, S. Fujiwara, and H. Nishihara, *Appl. Opt.* **25**, 3379 (1986).
- [17] H. Nishihara and T. Suhara, "Micro Fresnel Lenses," in *Progress in Optics* Vol. XXIV, E. Wolf, Ed. (North-Holland, Amsterdam, 1987) pp. 1-37.
- [18] K. E. Spaulding, and G. M. Morris, *Appl. Opt.* **30**, 2558 (1991).
- [19] S. Yao, "Planar optical waveguides and waveguide lenses," in *Handbook of Microwave and Optical Components* Vol. 4, K. Chang, Ed. (Wiley, NY, 1991) pp. 56-167.
- [20] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, New York, 1968).

Analysis of Fourier-transform Holographic Kinoforms Using Exact Ray Tracing

Doo Jin Cho, Ken Ha Koh and Young Hee Won
Department of Physics, Ajou University, Suwon 441-749, Korea

(Received: October 26, 1993)

When a one-dimensional telecentric paraxial holographic kinoform is used as a Fourier transform lens, we analyzed three surface-relief structures, i.e., plano-convex, convex-plano and biconvex shapes, employing exact raytracing method based on Snell's law. For the kinoform of F/8 and focal length of 15 mm, the number of zones, the thickness, and the slope of parabolic surfaces are varied by changing the refractive indices of kinoform material and surrounding medium. It is found that biconvex shape gives the best results in general, although off-axis performance degrades in all cases as the slope of parabolic surfaces increases.