

Design and Analysis of Infrared Diffractive Optical Systems Using Beam Synthesis Propagation

Hyun Bae Kong¹ and Doo Jin Cho^{2†}

¹LIG Nex1 Co., Ltd., 148-1, Mabuk-dong, Giheung-gu, Yongin 446-912, Korea

²Department of Physics, Ajou University, San 5, Woncheon-dong, Yeongtong-gu, Suwon 443-749, Korea

(Received April 18, 2013; Revised manuscript July 19, 2013; Accepted July 22 2013)

An F/1.2 infrared optical system that involves two aspheric BD-2 lenses and an aspheric diffractive surface was designed over 8-14 μm with a field angle of 15.2°. The system may be used in uncooled cameras and is analyzed using beam synthesis propagation (BSP). The diffractive surface is modeled as a physical surface with a given thickness, and results are compared with those obtained by conventional methods, such as the exit-pupil method and a method which superposes diffraction orders.

Keywords: Diffractive optics, Aspheric optics, Infrared optics, Optical system design, Beam synthesis propagation

OCIS codes: (220.0220) Optical design and fabrication; (220.3620) Lens system design; (050.1965) Diffractive lenses; (050.1970) Diffractive optics

회절광학을 이용한 적외선 광학계 설계 및 BSP를 이용한 성능 평가, 분석

공헌배¹ · 조두진^{2†}

¹LIG 넥스원(주)

☎ 446-912 경기도 용인시 기흥구 마북동 148-1

²아주대학교 물리학과

☎ 443-749 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206

(2013년 4월 18일 받음, 2013년 7월 19일 수정본 받음, 2013년 7월 22일 게재 확정)

본 논문에서는 두 개의 BD-2 렌즈와 비구면 회절 광학을 포함하는 F/1.2, 시야각 15.2°와 8-14 μm 의 원적외선 파장대역을 가지는 광학계를 설계하였다. 이 광학계는 uncooled camera에 사용될 수 있으며, 광학계의 분석은 BSP로 진행되었다. 회절광학은 주어진 두께를 가지는 물리적인 면으로 취급하였으며, 분석결과를 출사동공법과 같은 기존 방법들에 의한 것과 회절차수 합성법에 의한 것과 비교하였다.

Keywords: 회절광학, 비구면광학, 적외선광학, 광시스템설계, 빔합성전파

OCIS codes: (220.0220) Optical design and fabrication; (220.3620) Lens system design; (050.1965) Diffractive lenses; (050.1970) diffractive optics

I. 서 론

현대의 고성능 렌즈설계에 있어서 회절렌즈의 사용은 필수 시 되고 있다. 이는 회절렌즈가 음의 고분산 특성을 가지므로 적은 수의 렌즈로도 색수차를 보정하여 광학계의 성능을 향상시킬 수 있기 때문이다^[1]. 다른 광학계와 비교하여 적외선 광학계는 색수차의 영향을 덜 받지만, 높은 회절효율에 의해 회절 광학을 적용하기에 용이하므로 그 적용사례가 증

가하고 있다. 적외선의 특징을 이용하여 군사용, 자동차 산업, 보안 분야 등의 상업적 영역에서 많은 관심을 끌고 있다.

CODE V를 비롯한 광학설계 프로그램의 경우 회절광학이 포함된 광학계를 분석할 때 설계차수만을 설계 및 분석에 고려한다. 이를 보완하기 위하여 개선된 방법으로 회절효율을 가중치로 하여 설계차수 이외의 회절차수들을 합성하는 SDOM (회절차수 합성법, summation over diffraction orders method) 이 가장 널리 사용된다. zone의 수가 10개 이상인 회절광학

[†]E-mail: djcho@ajou.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

의 경우 이 방법은 좋은 결과를 줄 수 있다^[2]. Sauer^[3] 등은 윤대분할법을 제안하였는데, 이는 각 zone에 의한 PSF(Point Spread Function)를 가간섭적으로 합성하는 것으로서 본 논문에서 비교한 출사동공법과 유사하다. 또한 Zhang^[4] 등은 각 파장에서 실제 위상함수를 고려하여 일반적인 광학설계 프로그램에 적용할 수 있는 방법을 제안하고 SDOM과 비교한 바 있는데, 적용범위와 정확도 측면에서 제한을 가진다.

본 논문에서는 BSP(빔 합성 전파, Beam synthesis propagation)를 이용하였는데, 이 방법은 광선추적법을 이용하여 회절효과를 매우 정확하게 계산하며, 적용범위에 제한이 없는 것으로 알려져 있다.

II. 회절광학의 분석 방법들에 대한 간단한 소개

CODE V의 BSP 분석은 파동방정식의 선형성에 기초를 두고 있으며, 입력 광학장(Optical field) 또는 빔(Beam)을 많은 수의 빔릿(Beamlet)의 합성으로 근사한다. 광선추적법을 이용하여 각각의 빔릿을 진행시킨 다음, 그들을 합성하여 진행된 빔을 얻게 된다. 각 빔릿에는 기본광선(base ray)과 그 주변의 광학장이 결부되어 있다^[5].

BSP와 유사한 방법들이 ASAP^[6]과 같은 상용 분석 소프트웨어에 사용되고 있지만, 렌즈설계 소프트웨어로서는 CODE V가 유일하다. BSP에 의하여 얻어진 PSF로부터 MTF의 계산은 2차원 푸리에변환으로 수행된다. 이때 수치적 오차를 최소화하기 위하여 PSF의 그리드(grid) 크기와 전체크기를 유의해서 설정하여야 한다.

대부분의 광학설계 프로그램에서는 일반 광소자의 경우와 마찬가지로 회절광학도 출사동공법을 적용한다. 물체로부터 출사동공까지 빛의 진행을 광선추적에 의하여 수행하고 빛의 파동성은 출사동공에서 상면까지의 한 번의 회절전파로 취급한다. 이 때 회절광학의 경우 광선추적은 설계차수에 대해서만 수행하기 때문에 여러 차수를 가지는 실제와 차이가 발생할 수 있다.

SDOM에서는 여러 회절차수에 의한 세기(intensity)를 적절히 합성함으로써 회절 광학의 특성을 해석한다. 설계차수 이외의 상의 크기가 설계차수의 것과 크게 차이 나지 않을 경우 그들의 PSF들을 그 회절효율을 가중치로 하여 적절히 합성한 다음 푸리에변환에 의하여 MTF를 구하게 된다. 이 때 상들의 위치, 기준구면의 크기, PSF 그리드 크기 등을 유의해서 맞추어야 한다. 이 방법은 윤대의 수가 10 또는 그 이상인 회절광학에 대하여 적절하다. 윤대의 수가 많아지면 설계차수 이외의 상의 크기가 상당히 커지게 되고 MTF는 설계차수의 회절효율과 그 차수의 MTF의 곱으로 주어진다^[7].

III. 광학계의 구성 및 설계

본 논문에서 취급한 것은 그림 1에 보인 2개의 BD-2 비구면 렌즈와 실리콘 재질의 Window로 구성된 시야각 15.2°, 중심파장 10,500 nm를 가지는 적외선 광학계이다^[8].

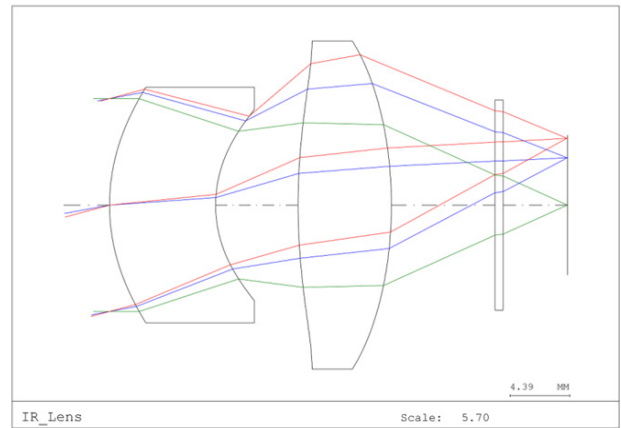


FIG. 1. Optical systems drawing with rays from three fields.

TABLE 1. Optical system data that involves two aspheric lenses. Surface 4 includes a diffractive surface with the aspheric

Surface number	Surface Type	Radius (mm)	Thickness (mm)	Material
Object	Sphere	Infinity	Infinity	
1	Asphere	14.66	7.784	BD-2
2	Asphere	9.42	6.054	
3	Asphere	49.36	6.845	BD-2
4	Asphere-DOE	-31.63	7.606	
5	Sphere	Infinity	0.591	Silicon
6	Sphere	Infinity	4.730	
Image	Sphere	Infinity	0	

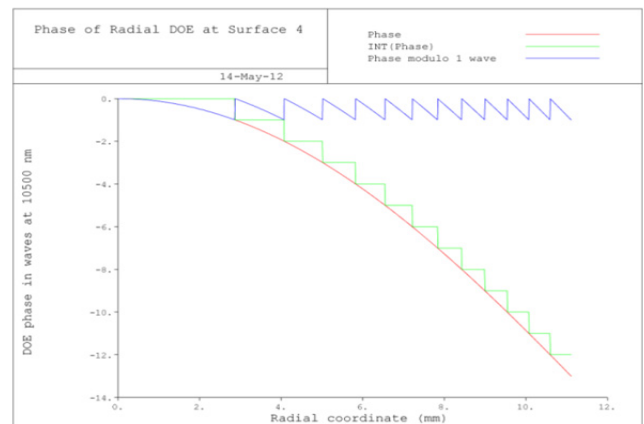


FIG. 2. DOE phase vs. Radial coordinate. Diffractive surface has 12 zones and 3329.9 nm depth.

최적화된 광학계의 면 속성은 표 1과 같다. 파장대역은 8,000 nm, 10,000 nm, 10,500 nm, 12,000 nm, 14,000 nm를 사용하였으며, 중심파장에서의 굴절률은 2.6003이다. 또한 네 번째 면의 회절면은 그림 2에 보인 바와 같이 3329.9 nm의 깊이로 12개의 윤대(zone)를 가짐으로 색수차를 효율적으로 감소시켰다.

광학계의 초기 설계는 식 (1), (2), (3)을 연립하여 각 렌즈의 굴절능을 결정하였으며, 결정된 굴절능에 따라 렌즈제작자의 공식을 이용하여 색수차 0을 만족하는 각 면의 곡률을 지정하였다. Φ_1 은 첫 번째 렌즈의 굴절능이며, Φ_2 는 두 번째 렌즈의 굴절능, Φ_3 은 회절면의 굴절능이다. 광설계 소프트웨어 상에서 비구면에 회절면이 적용되어도 실제 회절면의 두께는 고려하지 않기 때문에 $\Phi_{2,3}$ 으로 표현하였다.

$$\Phi_1 + \Phi_{2,3} - t\Phi_1\Phi_{2,3} = \Phi_{total} \quad (1)$$

$$\frac{\frac{1}{\Phi_{2,3}}(t - \frac{1}{\Phi_1})}{t - \frac{1}{\Phi_1} - \frac{1}{\Phi_{2,3}}} = BFL \quad (2)$$

$$\frac{y_1^2\Phi_1}{V_1} + \frac{y_2^2\Phi_2}{V_2} + \frac{y_3^2\Phi_3}{V_3} = 0^{[9]} \quad (3)$$

식 (1)~(3)에서 t 는 두 렌즈 사이의 거리이다.

회절면의 아베수는 $V_{dif} = \frac{\lambda_c}{\lambda_s - \lambda_l}$ 으로 정의되며, $\Phi_{dif} = \frac{V_{dif}}{V_{dif} - V_{ref}}\Phi_{total}$ 의 식^[10]에 따라 회절면의 2차 계수를 얻어 내었으며, 최적화 과정에서 4차계수를 적용하였다.

광학계 설계 및 최적화는 CODE V와 OSLO^[11]를 이용하여 진행하였으며, 광학계의 조리개는 외부 보호창에 붙는 잡티들이 상에 주는 영향을 최소화하기 위하여 첫 번째 면에 위치하였으며, 이는 첫 번째 렌즈의 크기를 줄여주는데도 기여한다. 렌즈의 나머지 면들은 모두 비구면으로 구성되어 있으며, 마지막 면은 Kinoform DOE가 비구면과 같이 위치되어 있다. DOE는 12개의 윤대수를 가지며, 효과적으로 광학계의 색수차를 줄여주는 역할을 하였다^[12].

각 면에 대한 최적화는 EFL(=19 mm), BFL(13.6 mm), 전장길이(32.6 mm)를 최종단계까지 구속조건으로 적용시켰으며, 물체에서 가까운 면부터 순차적으로 진행하며 시야각을 점진적으로 증가시켰다. 조리개에 해당하는 첫 번째 비구면은 3차 코마, 비점수차와 왜곡수차에 영향을 주지 못하기 때문에 구면수차에 대해서만 가중치를 적용시켰다. 또한 각 면의 차이텔 수차에 있어서 CC(Conic Constant)와 fourth-order coefficient는 동일한 효과를 가지기 때문에 동시에 적용시키지 않았으며, 모두 CC를 사용하였다. Window를 제외한 각 면에 CC가 적용된 상태에서 8차까지의 고차 비구면 계수들을 변수로 지정하여 RMS Spot Size 방법을 이용하여 Spot size를 감소시켰으며, 각 비구면 계수들은 코마수차, 비점수차, 페즈발 수차, 왜곡수차를 줄여주는 데 기여하였다. 비구면을 포함하는 광학설계는 일반 구면 광학설계에 비하여 많은 수의 광선을 필요로 하기 때문에 시야각은 0, 0.7, 0.85, 0.9, 1 시야각을 사용하였다.

IV. BSP 및 MTF 분석

그림 1의 적외선 광학계에 대하여 CODE V를 이용하여 BSP 분석을 수행하였다. 분석 조건은 빔릿의 갯수를 결정하며 입사동을 분할하는 광선의 수 70개, 그리드 간격 5.8 μm , 그리드 전체크기는 1024 \times 1024로 설정하였다. CODE V의 BSP 분석은 standard, enhanced, high의 3가지 정확도 수준 설정 기능을 제공하는데 본 논문에서는 0.1의 기본값을 가지는 standard를 사용하였으며, 빔릿들이 얼마나 많은 수차를 축적하고 있는지 확인하기 위한 임계값을 나타내는 BWE(Beamlet wavefront error)는 0.8로 설정하였다.

광학계의 성능은 BSP 분석을 수행할 때 입사동을 분할하는 광선의 수, 그리드 크기, 그리드 전체크기에 따라서 차이를 보이기 때문에 타당성을 가지는 조건들로 BSP 분석을 해야 한다. BSP 분석을 통해 광학계의 PSF를 푸리에변환하여 얻은 MTF를 그림 3에 보였으며, 회절광학이 포함된 광학계의 특징인 낮은 공간주파수에서 MTF 저하 현상을 확인할 수 있다.

CODE V의 BSP 분석 후 MTF를 산출하기 위한 조건들의 타당성 확보를 위해 별도로 MATLAB의 FFT를 이용하여 MTF를 산출하는 과정과 비교 검토하였다. 3 μm 의 그리드 간격과 1025 \times 1025의 그리드 크기, BWE 0.4의 조건으로 BSP 수행 후 얻은 PSF 데이터를 MATLAB을 이용하여 MTF로 변환 후 CODE V의 BSP 방법에 의한 MTF와 임의로 선택된 주파수(12, 24, 36 lp/mm)에서 비교하였다. 모든 시야각에 대하여 두 방법에 의한 MTF 값의 최대 차이는 0.6%였다.

그림 4는 3 μm 의 그리드 간격과 1025 \times 1025의 그리드 크기를 조건으로 BSP 수행 후 얻은 중심파장(10,500 nm)에서의 PSF와 사용한 5개의 파장을 동일한 가중치로 계산한 시야각별 PSF를 보였다. 그림을 보면 시야각이 증가할수록 PSF의 크기가 커짐을 알 수 있는데, 이에 따라 그림 3에서 알 수 있듯이 최대 시야각에 근접할수록 MTF의 저하가 커짐을 볼 수 있다. 또한 CODE V의 BSP 분석 시 설정한 5.8

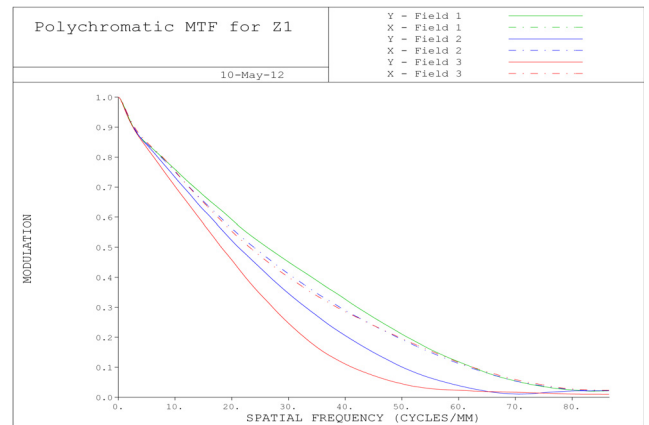


FIG. 3. MTF obtained by BSP as the field angle varies up to 15.2 degrees. Graph shape shows diffractive surface's characteristic at low spatial frequency.

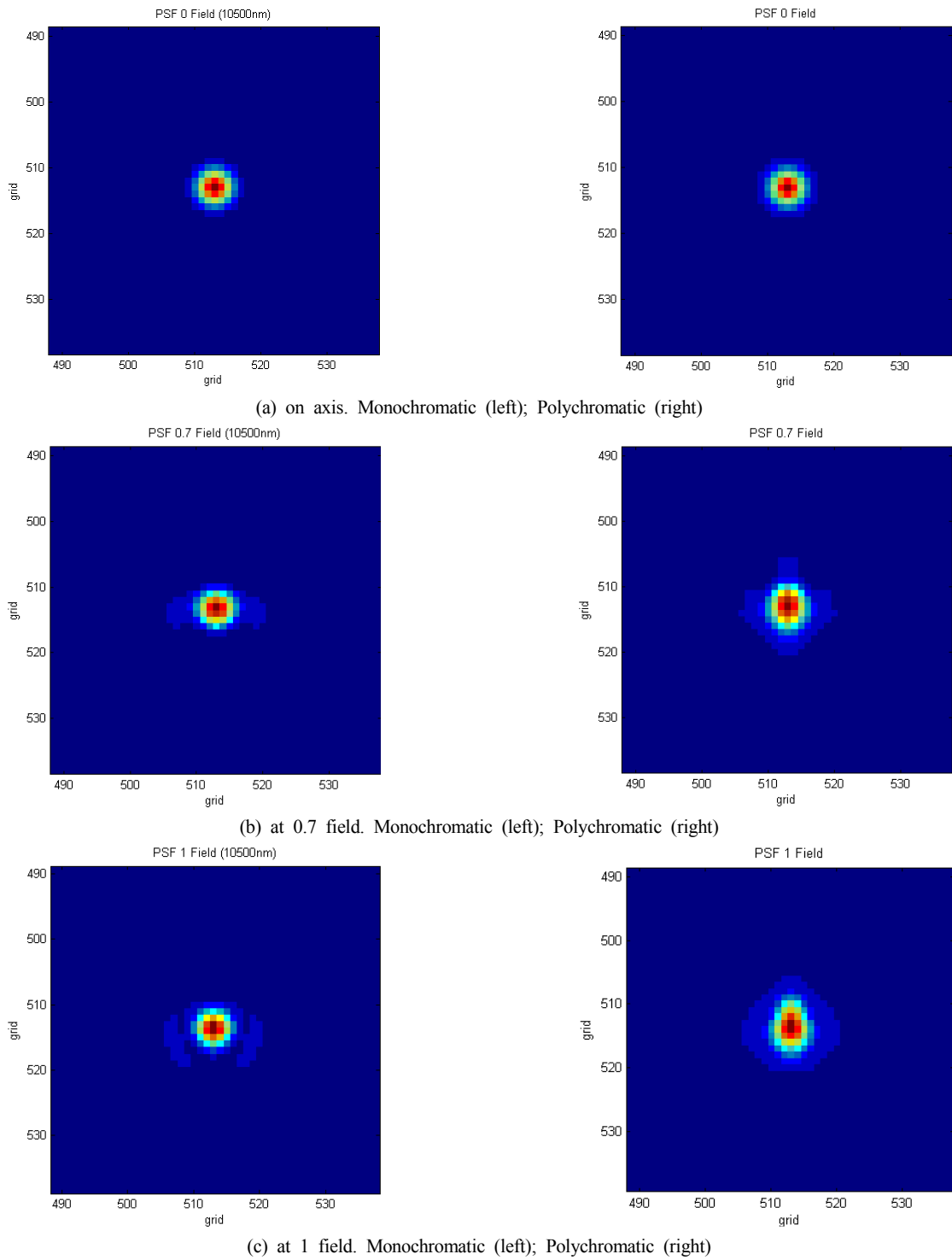


FIG. 4. Point Spread functions obtained by BSP.

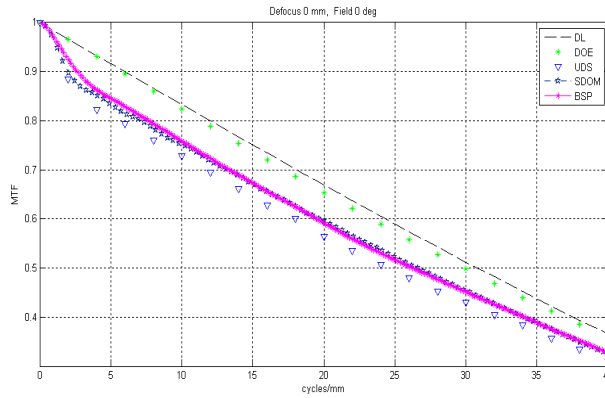
μm , 1024×1024 의 조건과 MATLAB의 $3 \mu\text{m}$, 1025×1025 조건의 전체그리드 크기는 다르지만, 0.03 mm 정도로 형성되는 PSF를 볼 수 있다.

그림 5는 BSP, DOE, UDS, SDOM 방법에 의한 MTF를 Radial, Tangential 별로 40 lp/mm 까지 비교한 것이며, 0필드의 경우 Radial, Tangential MTF 값이 같기 때문에 Radial

MTF 값으로 표기하였다. 여기서 DOE와 UDS 방법은 단순히 CODE V 상에서 Quick MTF를 통해 얻은 것이며, UDS 방법은 CODE V의 UDS(User Define Surface) 기능을 이용하여 회절면의 두께가 고려된 MTF를 나타낸다.

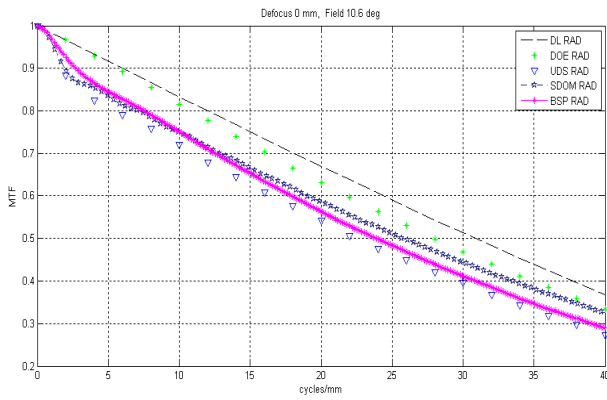
MTF를 보면 알 수 있듯이 회절면의 두께와 회절차수를 모두 고려하지 않은 DOE 방법은 다른 방법들에 비하여 가장

Radial MTF

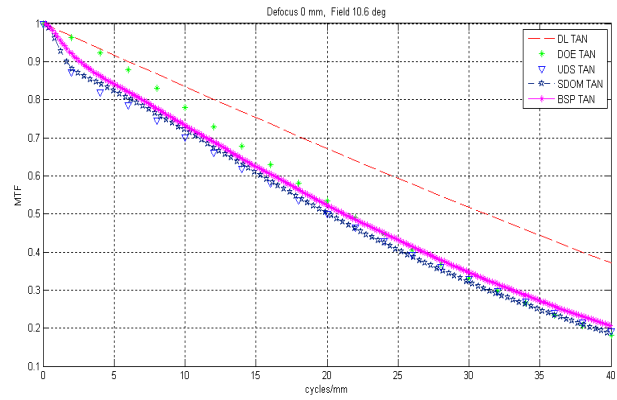


(a) radial MTF on axis

Radial MTF

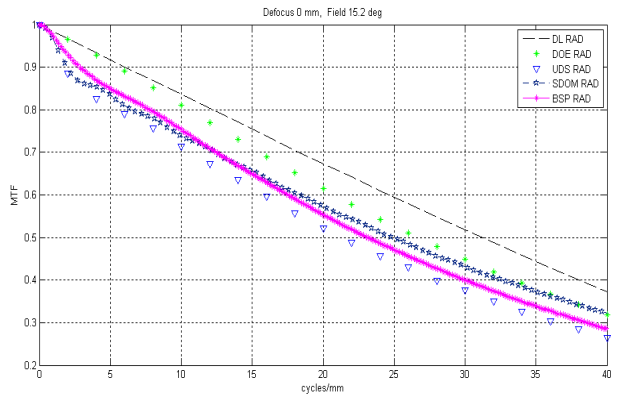


Tangential MTF

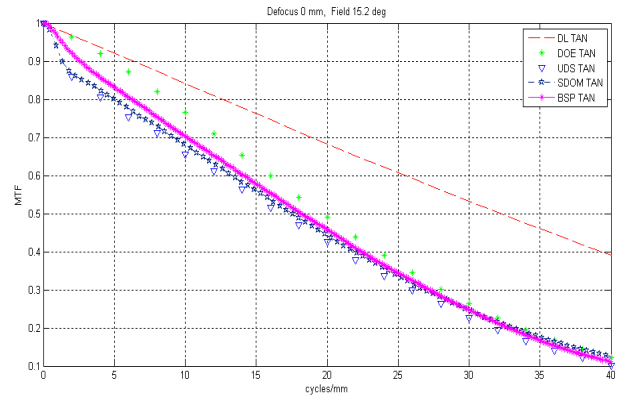


(b) radial and tangential MTF at 0.7 field

Radial MTF



Tangential MTF



(c) radial and tangential MTF at 1 field

FIG. 5. MTF's obtained from BSP are compared to that of 5-orders method and exit-pupil methods.

높은 MTF 값을 가졌으나, 실제 회절광학을 포함하는 렌즈를 제작하여 MTF로 성능 평가 시 발생하는 낮은 공간주파수 대에서의 일반적인 MTF 저하 현상은 보이지 않았다. 이는 CODE V에서 제공하는 일반적인 DOE 설계에 의한 MTF 평가는 정확하지 않음을 보여준다. 이에 비해 회절면의 두께를 고려한 UDS 방법, 각 회절차수에서 빛의 세기를 합해 정규화 시킨 SDOM 방법, UDS를 적용시킨 상태에서 수행한 BSP 방법은 DOE 방법보다 낮은 MTF 성능을 보이지만 더욱 정

확하게 광학계를 분석하고 실제 제작 시에 발생하는 회절효과를 분석했다고 할 수 있다. 4번 면에 위치하는 회절렌즈의 윤대수가 극히 적었다면 SDOM 방법에 의한 MTF 값이 상당히 높았을 것이라 예상되지만, 12개의 윤대수를 가짐으로 BSP와 SDOM에 의한 결과는 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 낮은 공간주파수 대에서 나타나는 일반적인 MTF 저하 현상 영역에서는 UDS와 SDOM 방법은 비슷한 MTF 값을 가짐에 비해 BSP 방법은 모든 시야각에서 상대적으로 높은

MTF 성능을 보였다. 그리고 0.7, 1시야각에서 공간주파수가 증가하였을 경우 SDOM 방법에 의한 radial MTF 값은 DOE를 제외한 다른 방법에 의한 결과보다 상대적으로 높았는데, 이는 회절면의 두께를 무시하고 위상다항식으로 취급한 영향이라고 생각된다.

각각의 방법에 대하여 임의로 선택한 공간주파수 12(lp/mm), 24(lp/mm), 36(lp/mm)에서의 MTF 값을 표 2에 보였다. BSP 방법을 중심으로 radial과 tangential의 합의 평균으로 MTF 성능을 비교하며 BSP와 DOE 방법을 비교하였을 때, 0시야각에서는 8.99%, 11.13%, 9.57%, 0.7 시야각에서는 7.65%, 6.65%,

4.91%, 1 시야각에서는 8.74%, 9.88%, 11.25% 이다. BSP와 UDS를 비교했을 때의 0 시야각에서 MTF의 차이는 3.87%, 4.34%, 5.32%, 0.7 시야각에서는 4.29%, 4.44%, 5.41%, 1 시야각에서는 5.73%, 6.59%, 7.71%이다. BSP와 SDOM에 대하여 비교하여 보면 0 시야각에서 0.69%, 1.32%, 0.27%, 0.7 시야각에서는 0.78%, 0.31%, 2.36% 이며 1시야각에서는 1.54%, 2.24%, 9.58%의 차이를 보인다. 가장 큰 차이를 보인 것은 1 시야각의 36 lp/mm에서 BSP와 DOE 방법이며 11.25%의 차이를 보였다.

V. 결 론

본 논문에서는 2개의 BD-2 렌즈와 Window로 구성된 시야각 15.2°, F/1.2의 회절면을 포함하는 적외선 광학계를 광학설계 프로그램인 CODE V와 OSLO를 이용하여 설계하였으며 두 번째 렌즈에 위치한 12개의 zone을 가진 회절면은 비구면 기판위에 입혀진 것으로 블레이즈 두께를 갖는 물리적인 면으로 취급하였다. 회절효과를 매우 정확하게 분석하는 BSP 방법을 이용하여 광학계의 성능을 DOE, UDS 및 SDOM에 의한 MTF와 비교하고 분석하였다.

radial과 tangential MTF의 합의 평균으로 각 시야각에 대하여 임의로 선택한 12, 24, 36 lp/mm에서 각각의 방법에 의한 MTF를 BSP 방법을 중심으로 비교하였을 때, 회절면의 두께, 회절차수 등을 고려하지 않은 일반적인 분석방법인 DOE 방법이 가장 높은 MTF 값을 보였지만, 회절광학을 포함한 광학계에서 나타나는 낮은 공간주파수 대역에서 일반적인 MTF 저하 현상도 보이지 않았다. 이에 비해 회절면의 두께만을 고려한 UDS 방법은 상대적으로 가장 낮은 MTF 성능을 보였으며, 회절면의 윤대수가 12개라는 점에 기인하여 BSP와 SDOM 방법은 큰 차이를 보이지 않았다. SDOM 방법의 0.7, 1시야각의 경우 공간주파수가 증가하였을 때 radial MTF 값이 다른 방법에 의한 결과보다 상대적으로 높았는데 이는 SDOM 방법이 회절면의 두께를 고려하지 않으며, 위상다항식으로 취급한 영향이라 생각된다.

DOE와 BSP 방법과의 MTF 성능 차이는 시야각의 증가함에 따라 더욱 커졌으며 1시야각의 36 lp/mm에서 11.25%로 가장 큰 차이를 보였다. 이러한 결과는 DOE방법에 의존하여 광학계의 성능을 평가하고 제작 및 생산했을 때 실제 광학계의 성능과 큰 차이를 보일 수 있음을 의미한다.

추후 BSP를 바탕으로 회절광학의 최적화와 zone의 Back Cut Edge를 적용시키는 연구를 통해 보다 효율적이고 정확한 회절광학 광학계의 분석이 가능하리라 기대된다.

감사의 글

이 논문은 아주대학교 물리학과, LIG 넥스원 탐색기/광학 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

TABLE 2. MTF values obtained by BSP are compared with that obtained by exit pupil methods(DOE, UDS) and a method which superposes diffraction orders(SDOM) at 12, 24, 36 lp/mm

DOE	MTF(12 lp/mm)		MTF(24 lp/mm)		MTF(36 lp/mm)	
	radial	tangential	radial	tangential	radial	tangential
0 Field (0°)	0.788		0.589		0.412	
0.7 Field (10.6°)	0.778	0.728	0.563	0.447	0.385	0.235
1 Field (15.2°)	0.770	0.710	0.543	0.391	0.367	0.167

UDS	MTF(12 lp/mm)		MTF(24 lp/mm)		MTF(36 lp/mm)	
	radial	tangential	radial	tangential	radial	tangential
0 Field (0°)	0.695		0.507		0.356	
0.7 Field (10.6°)	0.679	0.660	0.476	0.429	0.318	0.241
1 Field (15.2°)	0.672	0.611	0.457	0.337	0.303	0.140

SDOM	MTF(12 lp/mm)		MTF(24 lp/mm)		MTF(36 lp/mm)	
	radial	tangential	radial	tangential	radial	tangential
0 Field (0°)	0.718		0.537		0.375	
0.7 Field (10.6°)	0.714	0.674	0.526	0.424	0.370	0.235
1 Field (15.2°)	0.708	0.632	0.512	0.357	0.362	0.164

BSP	MTF(12 lp/mm)		MTF(24 lp/mm)		MTF(36 lp/mm)	
	radial	tangential	radial	tangential	radial	tangential
0 Field (0°)	0.723		0.530		0.376	
0.7 Field (10.6°)	0.710	0.689	0.498	0.449	0.334	0.257
1 Field (15.2°)	0.709	0.652	0.486	0.364	0.327	0.153

References

1. D. C. O'Shea, T. J. Suleski, A. D. Kathman, and D. W. Prather, *Diffractive Optics : Design, Fabrication, and Test* (SPIE Press, Bellingham, USA, 2004).
2. M. D. Thorpe, R. P. Jonas, and S. Szapiel, "Modeling of polychromatic MTF losses due to secondary effects in diffractive lenses," Proc. SPIE **6667**, 66670E1-66670E12 (2007).
3. H. Sauer, P. Chavel, and G. Erdei, "Diffractive optical elements in hybrid lenses: modeling and design by zone decomposition," Appl. Opt. **38**, 6482-6486 (1999).
4. H. Zhang, H. Liu, Z. Lu, and H. Zhang, "Modified phase function model for kinoform lenses," Appl. Opt. **47**, 4055-4060 (2008).
5. CODE V, Optical Research Associates, Inc., California, USA.
6. ASAP, Breault Research Associates, Inc., Arizona, USA.
7. H. S. Lee, "Lens design involving diffractive optics and performance evaluation and analysis using Beam Synthesis Propagation." M.S. Thesis, Ajou University (2010).
8. G. Curatu, "Design and fabrication of low-cost thermal imaging optics using precision chalcogenide glass molding," Proc. SPIE **7060**, 706008-1 (2008).
9. J. M. Geary, *Introduction to Lens Design* (Willmann-Bell, Inc. Virginia, USA, 2002) p. 205.
10. H. S. Lee, C. Seog Rim, and J. H. Jo, "The comparison and the analysis of the optical performances between the single and the symmetrical double DOE lenses," Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji) **13**, 258-265 (2002).
11. OSLO, Lambda Research Corporation, Littleton, MA, USA.
12. H. B. Kong, "Design and analysis of infrared diffractive optical systems using beam synthesis propagation," M.S. Thesis, Ajou University (2012).