



Design of Aspheric Imaging Optical System having 35 mm Focal Length for MWIR

Seung-Hwan Park¹, Sang-Kil Lee², and Dong-Hee Lee^{3,*}

¹Dept. of Biomedical Engineering, Eulji University, SeungNam 13135, Korea

²Dept. of Information & Telecommunication, Graduate School of Far East University, EumSeong 27601, Korea

³Department of Visual Optics, Far East University, EumSeong 27601, Korea

(Received November 30, 2018; Revised December 6, 2018; Accepted December 10, 2018)

Purpose: We will design the imaging optical system with a focal length of 35 mm that can image an image of mid-wave infrared (MWIR). **Methods:** The desired solution can be obtained by using Ge and Si materials with good transmission characteristics for MWIR and by carrying out optimization with weighting for elimination of the chromatic aberration, spherical aberration, and distortion which affect the resolution. **Results:** The optimized optical system consists of three lenses with material distribution of (Si, Ge, Ge) and refraction powers with a distribution of (+, -, +). This optical system also has a resolution performance with MTF value of 0.4 at 15.0 lp/mm. **Conclusions:** It is judged that the optimized optical system has enough performance to be applied to the MWIR detector with 360 × 270 arrays configuration of 34 μm pixels.

Key words: MWIR, 35 mm focal length, Aspheric, Thermal detector, Aberration

서 론

최근 적외선 카메라가 산업계에 많이 사용되는데 이는 전자기기, 기계장치 및 화학설비 등의 발열 상태를 파악하여 제품 또는 설비의 이상 유무를 미리 알아내기 위함이다. 이상 유무를 미리 파악하면 제품 또는 설비가 망가지서 일어나는 2차 피해를 미리 방지할 수 있는 장점이 있게 된다. 이러한 사전 진단 작업이 제품 개발 공정에도 자주 이용되는데 안광학계에서는 안경렌즈의 물리적강화법 또는 화학적강화법의 온도 변화의 추이를 파악하는데 이용되기도 한다. 적외선 카메라는 관찰 대상으로부터의 적외선을 결상시키는 결상 광학계, 이를 검출하는 열상 디텍터로 구성된다. 적외선을 분류하면 1.4~3 μm 파장대역을 SWIR(short wavelength infrared), 3~5 μm 파장대역을 MWIR (mid-wavelength infrared), 8~15 μm 파장대역을 LWIR (long-wavelength infrared)로 분류되는데, 스펙트럼이 5~8 μm 파장대역에서 연속적이지 못한 이유는 Fig. 1과 같은 대기 창^[1,2]이 존재하기 때문이다. 이는 사실상 5~8 μm 파장대역의 빛은 대기 중에서 먼 거리를 진행하지 못하기 때문에 대상물 관측 스펙트럼으로서의 의미를 가질 수 없다는 것을 의미한다.

열상 디텍터 즉 적외선 검출소자의 발전은 산업계에서 적외선 카메라 수요의 상승에 따라 비약적으로 이루어지고 있는데, 검출소자의 픽셀 크기는 과거의 약 50 μm에서 현재의 17~34 μm로 작아지고 있다.^[3-6]

본 연구에서는 이미 상용화에 성공했던 초점거리 24 mm MWIR용 결상광학계 개발^[7,8]에 이어 Table 1에 나타나 있는 사용자의 요구에 맞는 초점거리 35 mm MWIR

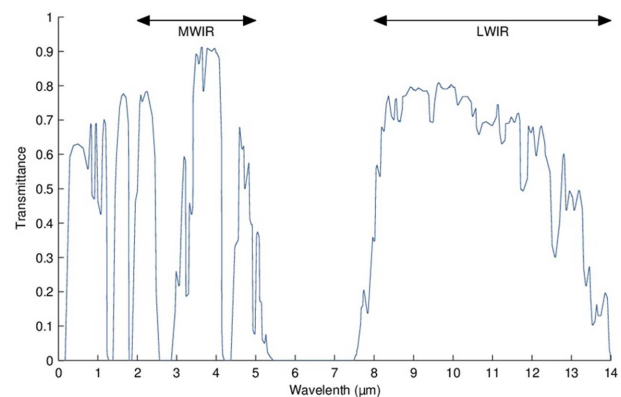


Fig. 1. Atmospheric transmittance at one nautical mile, 70% relative humidity, 15.5°C, and at sea level (quoted from reference [2]).

*Corresponding author: Dong-Hee Lee, TEL: +82-043-880-3808, E-mail: dhlee99@hanafos.com

Table 1. Design specifications demanded by users

EFL (Effective focal length)	35.0 mm
BFL (Back focal length)	>15.0 mm
OAL (Overall length)	< 50.0 mm
FNO	≤ 1.1
Distortion	<1.5 %
Wavelength range	3~5 μm
MTF (360 × 270) (34 μm pixel)	>0.35 @ 15 lp/mm

Notes: Reduce the number of lenses as much as possible.

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + A_4r^4 + A_6r^6 + A_8r^8 + A_{10}r^{10} \quad (1)$$

여기서 c ; 근축영역의 곡률 즉 곡률반경의 역수, k ; 코닉 (conic)계수, A_4, A_6, A_8, A_{10} ; 비구면 계수

그리고 열상광학계의 분해능을 약화시키는 수치는 구면 수차와 색수차로 알려져 있다. 색수차를 최소화하기 위해서는 굴절률과 아베수가 다양한 종류의 초자를 잘 선택하여 사용할 필요가 있다. 그러나 3~5 μm 파장대역의 MWIR용 광학계에서는 초자의 종류가 위 3가지로 제한적이라 색수차를 최소화하기 위해서는 위 3가지 초자에서 최적화로 선택할 수밖에 없다.

용 결상광학계를 설계해 보고 그 특징을 논하고자 한다.

대상 및 방법

1. 초점거리 35 mm MWIR용 결상광학계의 설계 초기조건

Table 1에서 보면 사용자는 FNO(F/#)가 1.1 이하인 것을 요구하고 있기 때문에 렌즈의 유효직경은 $\frac{\text{초점거리}}{FNO} = \frac{35}{1.1} \text{mm} \approx 31.8 \text{mm}$ 임을 알 수 있다.^[9,10] 또한 34 μm 픽셀을 사용하는 열영상 검출소자의 화소수가 360 × 270 이므로 검출소자는 가로 12.24 mm, 세로 9.18 mm, 대각선 15.30 mm을 사용한다. 따라서 설계해야 할 광학계의 최대 image-size는 반지름 7.65 mm를 가지는 원임을 알 수 있다. 초점거리가 35 mm 이므로 반시야각(half-field)은 $\tan^{-1}\left(\frac{7.65}{35}\right) = 12.33^\circ$ 임을 확인할 수 있다. 일반적으로 360 × 270의 화소수를 갖는 열영상 카메라는 높은 분해능을 요구하는 열영상 분석기기^[11]에 사용되고 있다.

2. 초점거리 35 mm MWIR용 결상 광학계 설계 이론

일반적으로 적외선에서는 Si, Ge, ZnSe 의 3 종류의 초자가 내부 투과율이 우수하여 적외선 결상용 렌즈의 초자로 많이 사용되어 오고 있다. 특히 Si와 Ge는 각각 MWIR용 렌즈, LWIR용 렌즈 설계에 적절한 것으로 알려져 있다.^[12-14]

이번 연구에서는 적은 수의 렌즈를 사용하여 비교적 분해능이 좋은 광학계를 개발하여야하기 때문에 비구면 사용이 필연적이다. 그러나 비구면은 가공비가 비싸기 때문에 비경제적인 선택이 된다. 특히 양면 비구면 렌즈 가공비는 단면 비구면 렌즈 2매의 가공비보다 훨씬 비싼 것이 현실이다. 따라서 비구면을 사용하되 가능한 한 단면 비구면 렌즈를 사용할 필요가 있다. 비구면 렌즈 설계에 사용되는 비구면(aspherical surface) 방정식은 아래와 같이 표현된다.^[15-17]

3. 초점거리 35 mm MWIR용 결상렌즈의 설계

초기 설계의 제한조건으로는 Table 1에 나와 있는 사용자 요구조건인 렌즈의 EFL, BFL, OAL, FNO의 범위를 사용하였고, 렌즈 3매의 구성으로 최적화를 진행하였다. 처음 시도에서는 구면만의 구성으로 최적화를 하였으나 원하는 해를 얻기가 어려웠다. 다음 시도에서는 하나의 렌즈의 한 면만의, 식 (1)과 같은, 구면 계수(처음 시도에서 이미 변수로 사용됨)를 제외한 비구면 계수 5가지를 변수로 추가하여 최적화를 하였으나 역시 마찬가지로 사용자가 요구하는 해를 얻기가 어려웠다. 최종적으로 두 개의 렌즈의 전후면 중 각각 1면을 비구면화 하는 최적화를 진행하였다. 이 때는 처음 시도 보다 최적화를 위한 변수가 10가지가 늘어난 상태임을 알 수 있다. 이렇게 늘어난 최

Table 2. Design data of the optimized MWIR imaging optical system with 35 mm focal length

Surface #	Surface Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Aperture
Objective	Sphere	∞	∞	AIR	
1	Sphere	∞	0	AIR	15.90
Stop	Asphere	32.84143	6.400	Si	15.90
	$k: -2.151797 \ A_4: 0.862379E-05, \ A_6: 0.501339E-08, \ A_8: -0.112199E-10, \ A_{10}: 0.488361E-13$				
3	Sphere	53.06018	4.308	AIR	15.47
4	Sphere	-109.16523	1.900	Ge	14.77
5	Sphere	∞	14.392	AIR	14.67
6	Asphere	55.7319	42.600	Ge	12.53
	$k: -38.310379 \ A_4: 0.220604E-04, \ A_6: -0.135800E-06, \ A_8: 0.508554E-09, \ A_{10}: -0.122013E-11$				
7	Sphere	109.07576	0.000	AIR	12.22
8	Sphere	∞	16.400	AIR	12.41
Image	Sphere	∞	0.000		7.83

적화를 위한 변수를 사용함으로써 우리는 비로소 Table 2와 같은 사용자의 요구조건을 충족시키는 해를 구할 수 있었는데, 색수차, 구면수차 및 왜곡 제거에 가중치를 가지는 최적화를 진행하여 구한 해였다. 초기설계, 최적화 설계 및 성능 평가는 CodeV 프로그램^[18]을 사용하여 수행하였다.

최적화로 설계되어진 결상 광학계의 설계 데이터와 1차 광학량은 각각 Table 2와 Table 3에 나타나 있다. 제1 렌즈의 1면과 제3 렌즈의 1면을 비구면으로 한 것은 비구면의 DTM(Diamond turning machine) 가공 시 불룩한 면의 가공이 단가를 줄이는 효과가 있기 때문에 채택한 방법이다. 최적화 과정에서 제1 렌즈는 Si, 제2 렌즈와 제3 렌즈는 Ge로 구성되는 것이 구면 수차 및 색수차를 최소화하는데 가장 유리한 것으로 판단되었다.

결과 및 고찰

최적화하여 설계된 광학계의 렌즈 형상 및 광선추적도는 Fig. 2에 나타내었다. 광학계는 (+, -, +) 굴절력의 구성을 가지면서 초자가(Si, Ge, Ge)로 구성되는 3렌즈의 조합으로 구성되고 있음을 볼 수 있다. 2번째 렌즈의 2면은 최적화 과정에서 항상 곡률반경이 395.130 mm 정도의 특정한 값으로 나오는데, 이 때의 MTF 커브와 이 면을 평면으로 두고 최적화 했을 때의 MTF 커브를 서로 비교해 보았다. 비교 결과 두 MTF 커브의 분해능 차이가 거의 나타나지 않는 것을 발견하였다. 2면 중 한 면이 평면으로 이루어진 렌즈가 한 면이 큰 곡률반경을 갖는 렌즈보다 렌즈 연마 가공에서는 유리하기 때문에 본 연구에서는 2번째 렌즈의 2면을 평면으로 두고 최적화를 하였다. 그 결과 Table 2와 같은 사용자의 요구조건을 충족시키는 해를 구할 수 있게 되었다.

Fig. 3은 최적화된 초점거리 35 mm MWIR용 결상 광학계의 왜곡수차의 특성을 보여준다. 12.4°의 반시야각에서 1.5% 이내로 왜곡수차가 잘 제어되어 있음을 보여준다.

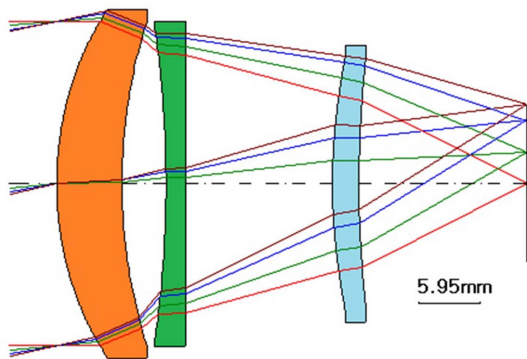


Fig. 2. Ray tracing drawing of the optimized MWIR imaging optical system with 35 mm focal length.

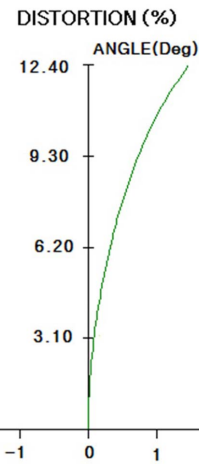


Fig. 3. Distortion diagrams of the optimized MWIR imaging optical system with 35 mm focal length.

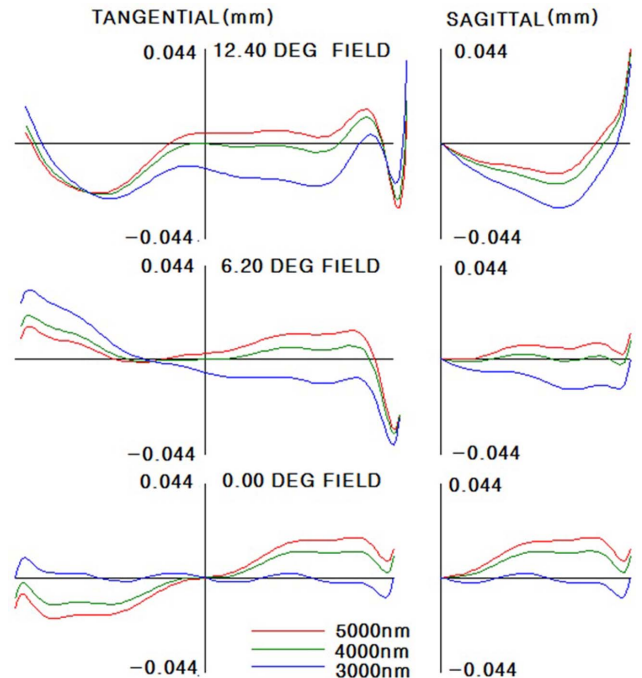


Fig. 4. Finite ray aberrations of the optimized MWIR imaging optical system with 35 mm focal length.

또한 Fig. 4는 이 광학계의 유한광선 수차의 특성을 보여 주는데, 광선수차 및 색수차가 약 0.04 mm 이내로 잘 제어되고 있음을 보여준다. Fig. 5는 설계되어진 결상광학계의 MTF 커브를 보여주는데 15.0 lp/mm에서 0.4 MTF 값의 특성을 보여준다. 이는 픽셀 사이즈 $\frac{1}{15.0 \times 2} = 33.3 \mu\text{m}$ 이 열영상 소자에 적합한 광학계라는 것을 보여준다. 즉, 본 광학계가 Table 1의 사용자의 분해능 요구조건을 잘 만족하고 있는 초점거리 35 mm MWIR용 결상 광학계가 될 수 있음을 보여준다.

최적화 설계되어진 광학계를 구성하는 3개의 렌즈 중 비구면 렌즈는 제1 렌즈와 제3 렌즈였는데 비구면인 면은

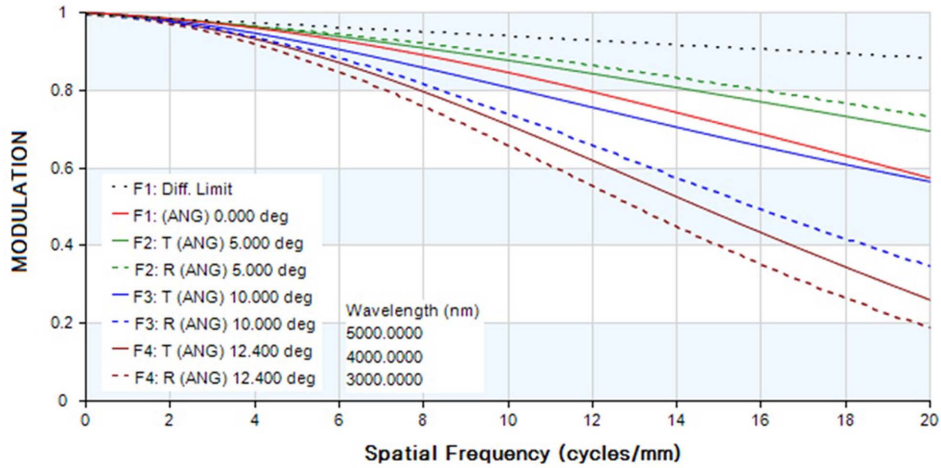


Fig. 5. MTF curves of the optimized MWIR imaging optical system with 35 mm focal length.

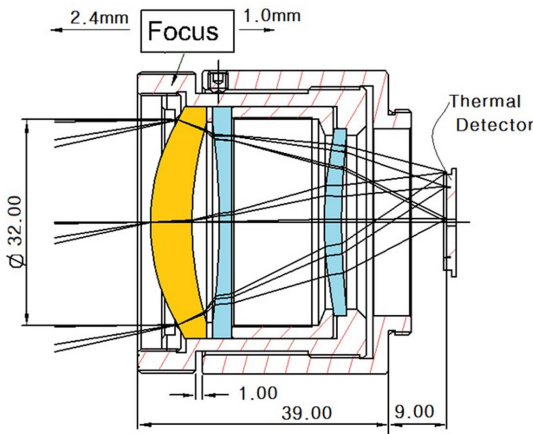


Fig. 6. Sectional view of the barrel containing the optimized MWIR imaging optical system with 35 mm focal length.

DTM으로 가공을 하였다. 그리고 가공 면이 구면인 경우에는 구면의 가공공차를 Power/Irr 3/1 Ring으로 하였고, 가공 면이 비구면인 경우에는 가공공차를 P-V <math> < 2.0 \mu\text{m}</math>, Ra=0.05 $\mu\text{m}</math>, Eccentricity <math> < 10'</math>으로 하였고, 렌즈 두께공차는 $\pm 0.05 \text{ mm}</math> 이내로 하였다.^[7-8]$$

가공된 3개의 렌즈를 하우징에 넣어 구성된 하우징 단면도가 Fig. 6에 나타나 있다. 목표물 거리를 무한대에서 40 cm로 하였을 때 계산되는 MWIR 검출소자의 이동량은 가우스 결상식으로 계산해 보면 약 2.34 mm인데, 이것을 하우징에 반영하기 위해, MWIR 검출소자의 이동보다는 MWIR 결상렌즈를 MWIR 검출소자로부터 목표물 쪽으로 이동하도록 하였다. Fig. 5에 보면 focusing의 이동범위는 상기 언급된 이동을 구현하기 위해 목표물 방향으로 2.4 mm, MWIR 검출소자 쪽으로 1.0 mm 이동하도록 하였는데, 이는 전체적으로 MWIR 검출소자에서 왼쪽으로 MWIR 결상렌즈를 3.4 mm이동하는 것과 같은 것이 된다. Fig. 7과 Fig. 8은 실제 가공된 렌즈의 외관과, 렌즈와 하



Fig. 7. External view of the lenses of the optimized MWIR imaging optical system with 35 mm focal length. ((a) 36 mm Dia., (b) 36 mm Dia., (c) 29 mm Dia.)



Fig. 8. External view of the assembled barrel with the optimized MWIR imaging optical system with 35 mm focal length.

우징의 조립체의 외관을 보여주고 있다. Fig. 7에서 보면 (a), (b), (c)렌즈의 직경이 각각 36 mm, 36 mm, 29 mm로 Table 2에서 계산되는 유효경 31.8 mm, 25.1 mm 보다 크게 가공되어 있는데, 이는 하우징의 스페이서(spacer)에 의해 고정되는 부분의 폭을 반영하여 렌즈를 가공한 결과이다.

결 론

본 연구에서 우리는 초점거리 35 mm인 MWIR용 결상

Table 3. First optical characteristics of the optimized MWIR imaging optical system with 35 mm focal length

Infinite conjugates	
EFL	35.00
BFL	0.00
FFL	-20.70
FNO	1.10
IMG DIS	0.00
OAL	46.00
Paraxial image	
HT	7.70
ANG	12.40
Entrance pupil	
DIA	31.80
THI	0.00
Exit pupil	
DIA	53.78
THI	-59.19

광학계를 설계 개발하였다. 최적화 설계되어진 광학계는 초자가(Si, Ge, Ge)로 구성되고, 굴절력이 (+, -, +)로 분포되는 3개의 렌즈로 이루어졌는데, 제1렌즈와 제3렌즈의 볼록한 면이 비구면으로 구성되어 있다. 분해능 평가에서는 15.0 lp/mm에서 MTF값이 0.4에 이르는 성능을 갖는 광학계가 되었다. 이 결상광학계는 34 μm pixel의 360 \times 270 어레이 구성의 MWIR 검출소자에 적용할 수 있는 성능을 가진 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 극동대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다(과제번호 : FEU2018R16).

REFERENCES

- [1] Walker BH. Optical engineering fundamentals, 1st Ed. New York: McGraw-Hill, 1995;213-234.
- [2] Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, Vega L, Molleda J, Bulnes FG. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*. 2014;14(7):12305–12348.
- [3] Rogalski A. Infrared detectors: an overview. *Infrared Phys Technol*. 2002;43(3-5):187–210.
- [4] Kopytko M. Design and modelling of high-operating temperature MWIR HgCdTe nBn detector with n- and p-type barriers. *Infrared Phys Technol*. 2014;64:47–55.
- [5] Dereniak EL, Boreman GD. *Infrared detectors and systems*, 1st Ed. New York: Wiley, 1996;38-199.
- [6] Elliott CT. New detector for thermal imaging systems. *Electron Lett*. 1981;17(8):312-313.
- [7] Lee SK, Lee DH. Design of imaging optical system with 24 mm focal length for MWIR. *Journal of the Korea Convergence Society*. 2018;9(6):203-207.
- [8] Lee SK, Kim BT, Lee DH. Design of aspheric imaging optical system having 24 mm focal length for MWIR with facing symmetric lenses. *Journal of the Korea Convergence Society*. 2018;9(9):183-189.
- [9] Smith WJ. *Modern optical engineering: the design of optical systems*, 3rd Ed. New York: McGraw Hill, 2000;21-60.
- [10] Kingslake R. *Optical system design*, 1st Ed. New York: Academic Press, 1983;7-25.
- [11] Hong SM, Song IS, Kim CW, Yu WK, Kim HS. Thermal imaging sensor design using 320 \times 240 IRFPA. *Korean J Opt Photon*. 2004;15(5):423-428.
- [12] McDowell MW, Klee HW. Achromatization in the 3 to 5 spectral region with visible light transmitting materials. *Opt Eng*. 1984;23(2):187-192. i[13]Shen M, Li C, Ren H, Jiang Q, Chen L. Design of midwave infrared athermalization optical system with a large focal plane array. *Optik* 2014;125(13):3085–3087.
- [14] Mann A. *Infrared optics and zoom lenses*, 2nd Ed. Bellingham: SPIE Press, 2009;25-32.
- [15] Laikin M. *Lens design*, 4th Ed. New York: CRC Press, 2006;1-39.
- [16] Park SH, Lee DH. Design of an anamorphic prism lens for the head mount display. *J Korean Ophthalmic Opt Soc*. 2008;13(4):83-88.
- [17] Lee DH. Program development for extracting the numerical data of aspherical surface for the core manufacturing of ophthalmic lens. *J Korean Ophthalmic Opt Soc*. 2007;12(4):87-90.
- [18] Synopsys. Code V Optical Design Software, 2017. <https://www.synopsys.com/optical-solutions/codev.html>(14 December 2018).

초점거리 35 mm 비구면 MWIR용 결상광학계 설계

박승환¹, 이상길², 이동희^{3,*}

¹을지대학교 의료공학과, 성남 13135

²극동대학교 대학원 정보통신학과, 음성 27601

³극동대학교 안경광학과, 음성 27601

투고일(2018년 11월 30일), 수정일(2018년 12월 6일), 게재확정일(2018년 12월 10일)

목적: MWIR의 상을 결상할 수 있는 초점거리 35 mm의 결상광학계를 설계하고자 한다. **방법:** MWIR에 대해 투과 특성이 좋은 Ge, Si 초자를 사용하고, 분해능에 영향을 주는 색수차, 구면수차 및 왜곡 제거에 가중치를 가지는 최적화를 진행하여 원하는 해를 구할 수 있었다. **결과:** 최적화된 광학계는 초자가(Si, Ge, Ge)로 구성되고, 굴절률이 (+, -, +)로 분포되는 3매의 렌즈로 이루어졌다. 그리고 이 광학계는 15.0 lp/mm에서 MTF값이 0.4에 이르는 분해능 성능을 갖게 되었다. **결론:** 최적화된 광학계는 34 μm pixel의 360 × 270 어레이 구성의 MWIR 검출 소자에 적용할 수 있는 성능을 충분히 가진 것으로 판단된다.

주제어: MWIR, 초점거리 35mm, 비구면, 열상 디텍터, 수차