Journal of the Korea Convergence Society
Vol. 9. No. 6, pp. 203-207, 2018

ISSN 2233-4890
https://doi.org/10.15207/JKCS.2018.9.6.203

# MWIR용 24mm 초점거리를 가지는 결상광학계의 설계

이상길[1], 이동희[2*]
[1]극동대학교 대학원 정보통신학과, [2]극동대학교 안경광학과

# Design of Imaging Optical System with 24mm Focal length for MWIR

**Sang-Kil Lee[1], Dong-Hee Lee[2*]**
**[1]Department of Information & Telecommunication, Graduate School of Far East University**
**[2]Department of Visual Optics, Far East University**

요 약 본 연구는 초점거리가 24mm 인, 대기투과 특성이 좋은 3~5$\mu m$ 파장대역의 적외선의 상을 결상할 수 있는 렌즈계의 설계 개발에 관한 것이다. 설계는 상용 설계 프로그램인 CodeV를 사용하였고, 색수차, 구면수차 및 왜곡 제거에 가중치를 가지는 최적화를 진행하였다. 설계되어진 렌즈계는 Si와 Ge로 구성된 2매의 렌즈로 이루어져 있는데, 각각의 렌즈는 한 면이 비구면으로 이루어져 있다. 그리고 이 광학계는 선폭 20lp/mm에서는 MTF값이 0.40, 선폭 29lp/mm에서는 MTF값이 0.25인 특성의 분해능을 갖게 되었다. 이 광학계는 25$\mu m$ pixel의 206×156 어레이 및 17$\mu m$ pixel의 320×240 어레이 적외선 검출소자를 사용하는 MWIR용 열화상 카메라에 적용할 수 있는 성능을 가진 것으로 판단된다.

주제어 : 3~5$\mu m$, MWIR, 열화상 카메라, 24mm 초점거리, 비구면

**Abstract** This paper deals with the design and development of a lens system capable of imaging an infrared image of 3~5$\mu m$ wavelength bands with a focal length of 24mm and good atmospheric transmission characteristics. The design used CodeV, a commercial design program, and the optimization is carried out with weighting to eliminate chromatic aberration, spherical aberration and distortion. The designed lens system consists of two lenses consisting of Si and Ge. Each lens has an aspherical surface on one side. And this optical system has the resolution of the characteristics that the MTF value is 0.40 at the line width of 29lp/mm and the MTF value is 0.25 at the line width of 20lp/mm. This optical system is considered to have the capability to be applied to the thermal imaging camera for MWIR using the 206×156 array infrared detector of 25$\mu m$ pixels and the 320×240 array infrared detector of 17$\mu m$ pixels.

**Key Words :** 3~5$\mu m$, MWIR, Thermal camera, 24mm focal length, Aspheric surface

## 1. 서론

요즈음 산업계에 광기술과 메카일렉트로닉스가 융합된 열화상 카메라가 많이 사용되는데 전자 제품 및 기계 설비의 발열상태를 모니터링하거나 진단하기 위해 많이 사용되고 있다. 열화상 카메라를 통해 열적 문제점을 미리 찾아낼 수 있으면, 구동 전자 제품 및 기계 설비가 심각한 상태로 발전되어 수리에 엄청난 비용이 발생되는 것을 미연에 방지할 수 있는 장점이 있다. 이러한 열화상 카메라에는 피사체로부터의 적외선을 결상시키는 광학계의 설계 기술과 적외선 검출소자의 센서 구동을 위한 메카일렉트로닉스 기술이 융합되어 사용된다.

적외선 중에서 대기투과 특성이 좋은 3~5$\mu m$ 파장대역과 8~12$\mu m$ 파장대역을 일반적으로 대기창[1,2]이라고 하는데(Fig. 1), 3~5$\mu m$ 파장대역을 MWIR, 8~14 $\mu m$ 파장대역을 LWIR이라고 한다.

*Corresponding Author : Dong-Hee Lee (2013059@kdu.ac.kr)
Received April 25, 2018 Revised May 28, 2018
Accepted June 20, 2018 Published June 28, 2018

최근 적외선 검출소자 기술이 급속하게 발전함에 따라, 검출소자의 픽셀 크기는 점점 더 작아지고 해상도는 점점 더 높아지고 있는데, 최근 상용할 수 있는 픽셀 크기가 약 50μm에서 12 ~ 30μm 까지로 작아지고 있는 추세에 있다[3-6].

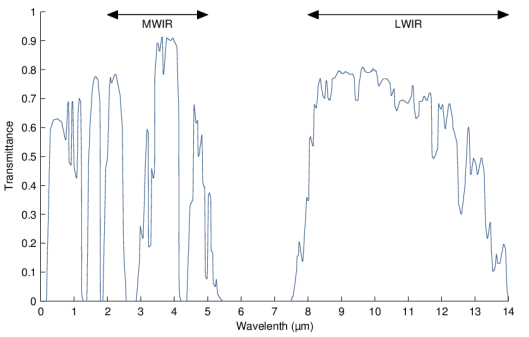


Fig. 1. Atmospheric transmittance at one nautical mile, 15.5℃, 70% relative humidity and at sea level (quoted from reference [2])

본 연구에서는 Table 1에 나타나 있는 사용자의 요구에 의한 광학적 성능을 만족하는 열화상 카메라에 사용되는, 대기투과 특성이 좋은, 3~5$\mu m$ 파장대역의 적외선 결상용 렌즈계를 설계해 보고자 한다.

## 2. MWIR용 결상렌즈의 설계 초기조건

Table 1의 사용자의 요구 사항을 살펴보면 F/#가 1.2 이하이므로 렌즈의 유효구경은 24mm/1.2 에서 20mm이상이어야 함을 알 수 있다[7,8]. 또한 25μm 픽셀과 17μm 픽셀을 사용하는 조건으로 2가지 적외선 검출소자 겸용 MWIR용 결상렌즈임을 확인할 수 있다.

Table 1. Design specifications demanded by user

| | | |
|---|---|---|
| EFL | | 24mm |
| BFL | | >10mm |
| OAL | | < 40mm |
| F/# | | ≤1.2 |
| Distortion | | <0.5% |
| Wavelength Range | | 3~5μm |
| MTF | ( 206×156, 25$\mu m$ pixel ) | >0.40 @ 20lp/mm |
| | ( 320×240, 17$\mu m$ pixel ) | >0.25 @ 29lp/mm |
| Notes) Reduce the number of lenses as much as possible. | | |

25μm 픽셀을 사용하는 적외선 검출소자의 화소수가 206×156 이므로 대각선 사이즈는 6.46mm가 되고, 17μm 픽셀을 사용하는 적외선 검출소자의 화소수가 320×240 이므로 대각선 사이즈는 6.80mm가 됨을 알 수 있기 때문에 설계해야할 광학계의 최대 image-size는 지름 6.80mm로 해야함을 알 수 있다. 일반적으로 206×156의 화소수를 갖는 열화상 카메라는 포켓사이즈 또는 스마트폰 장착용으로 개발되고 있고, 320×240의 화소수를 갖는 열화상 카메라는 높은 분해능을 요구하는 열화상 분석기기[9]에 사용되고 있다.

본 연구에서는 상기 두 가지의 용도에 사용이 가능한 적외선 결상용 렌즈계를 개발해야 한다.

## 3. MWIR용 결상광학계 설계 이론

일반적으로 적외선에서 투과율이 우수한 Ge, ZnSe, Si의 3 종류가 적외선 결상용 렌즈의 초자로 많이 사용되고 있고, Si(실리콘)는 MWIR용 렌즈 설계에 적절하고, Ge(게르마늄)은 LWIR용 렌즈 설계에 적절한 것으로 알려져 있다[10-12].

이번 연구에서의 사용자 요구에 맞는 MWIR용 결상광학계의 설계를 완성하기 위해서는 pixel 크기가 비교적 작아 색수차와 구면수차의 발생으로 spot의 번짐이 나타남으로서 분해능의 약화를 초래하는 것을 막기 위해 상기 세가지 초자의 적절한 조합으로 색수차와 구면수차를 최소화하는 구성을 찾아내어 최적화된 사용자의 요구조건에 맞는 결상광학계를 설계하여야 한다. 그리고 적외선 검출소자 어레이에 결상하는 상에 왜곡이 발생하면 왜곡 보정을 위한 영상보정 S/W가 사용되어야 하는데 이 부담을 줄이기 위해 왜곡 수차를 최소화하도록 최적화 하여야 한다.

사용자의 사용 렌즈의 맷수를 줄이는 조건을 충족시키기 위해서 처음 2매의 구면 렌즈 조합으로 상기 3가지 초자의 여러가지 조합으로 설계해보았으나 구면수차량이 커서 원하는 분해능을 얻기 어려웠다. 이어 구면수차량의 제어에 우수한 비구면 사용을 시도해 보았다. 일반적인 비구면( aspherical surface ) 방정식을 적어보면 아래와 같다[13-15].

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

(여기서 $c$는 근축영역의 곡률반경의 역수 즉 곡률이고, $k$ 는 코닉(conic)계수이고 $A_4$, $A_6$, $A_8$, $A_{10}$은 비구면 계수이다.)

## 4. 초점거리 24mm 용 MWIR 결상렌즈의 설계

설계는 CodeV 프로그램[16]을 사용하여 진행하였다. 초기 설계 제한조건으로 사용자 요구조건에 의한 EFL, BFL, OAL, F/#의 범위를 사용하였고, 제1렌즈에서의 변수는 두께, 제1면과 제2면의 곡률반경, 제1면의 상기 식(1)에서의 코닉계수 및 비구면계수 4개를 사용하였고, 제2렌즈에서의 변수는 두께, 제1면과 제2면의 곡률반경, 제2면의 상기 식(1)에서의 코닉계수 및 비구면계수 4개를 사용하였고, 두 렌즈 사이의 거리도 변수로 사용하였다. 실제 설계에서는 두 렌즈 각각의 1면 만을 비구면화하였을 때 비로소 사용자의 요구조건에 맞는 해가 도출되었다.

여기서 렌즈의 초자는 제1렌즈는 실리콘, 제2렌즈는 게르마늄으로 구성되는 것이 구면 수차 및 색수차를 제어하는 최적화 과정에서 가장 유리한 것으로 판단되었다.

Table 2. Design data of the optimized MWIR imaging lens system

| Surface # | Surface Type | Radius | Thickness | Glass | Semi-Aperture |
|---|---|---|---|---|---|
| Objective | Sphere | ∞ | ∞ | AIR | |
| 1 | Sphere | ∞ | 0 | AIR | 9.925 |
| Stop | Asphere | 42.973 | 2.500 | Si | 9.925 |
| | $k$ :8.550698<br>$A_4$:-.155537E-04, $A_6$:-.649984E-07,<br>$A_8$:0.190103E-09, $A_{10}$:-.237489E-11 | | | | |
| 3 | Sphere | 68.568 | 0 | AIR | 9.844 |
| 4 | Sphere | ∞ | 17.360 | AIR | 9.886 |
| 5 | Sphere | -81.049 | 3.300 | Ge | 9.882 |
| 6 | Asphere | -42.499 | 0.300 | AIR | 9.075 |
| | $k$ :-8.511306<br>$A_4$:-.852467E-05, $A_6$:0.186865E-07,<br>$A_8$:-.148972E-09, $A_{10}$:0.586046E-12 | | | | |
| 7 | Sphere | ∞ | 13.000 | AIR | 8.587 |
| 8 | Sphere | ∞ | 0.300 | AIR | 3.515 |
| Image | Sphere | | 0 | | 3.398 |

Table 3. 1st optical characteristics of the optimized MWIR imaging lens system

| INFINITE CONJUGATES | |
|---|---|
| EFL | 24.0000 |
| BFL | 0.3000 |
| FFL | -7.1532 |
| FNO | 1.2091 |
| IMG DIS | 0.3000 |
| OAL | 36.4601 |
| PARAXIAL IMAGE | |
| HT | 3.3730 |
| ANG | 8.0000 |
| ENTRANCE PUPIL | |
| DIA | 19.8500 |
| THI | 0.0000 |
| EXIT PUPIL | |
| DIA | 66.5997 |
| THI | -80.2236 |

이렇게 설계되어진 광학계의 설계 데이터와 1차 광학량은 각각 Table 2와 Table3에 제시되어 있다. 각 렌즈의 볼록한 면을 비구면화로 한 것은 렌즈의 DTM(Diamond Turning Machine) 가공시 제작의 편리성을 가지기 위한 것이다.

## 5. 설계된 초점거리 24mm 용 MWIR 결상렌즈의 성능분석 및 제작

설계되어진 광학계의 광선추적도 및 렌즈의 형상은 Fig. 2에 나타나 있는데 +메니스커스 타입의 두 렌즈가 볼록한 면이 서로 바깥쪽으로 배치된 특성을 보이고 있다. 이는 가시광선 영역에서의 같은 정도의 초점거리를 갖는 결상광학계의 구성인 두 +메니스커스 타입의 렌즈가 피사체 방향으로 볼록한 면이 배치되는 특징과는 차이를 보인다. 이는 파장이 길어지면 + 굴절력의 메니스커스 형상의 2번째 렌즈의 볼록한 면이 결상면 쪽으로 이동하여야 비축 수차의 제어 에 유리하다는 것을 알 수 있게 한다.

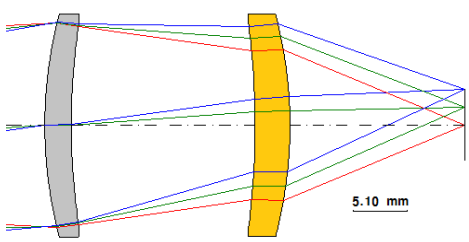


Fig. 2. Ray tracing drawing of the optimized MWIR imaging lens system

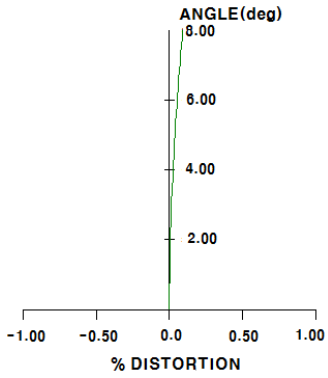


Fig. 3. Distortion diagrams of the optimized MWIR imaging lens system

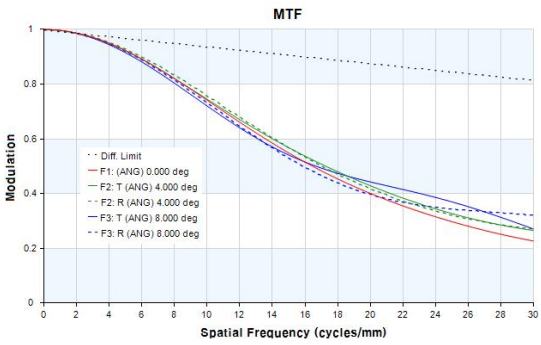


Fig. 4. MTF curves of the optimized MWIR imaging lens system

Fig. 3에는 왜곡수차의 특성을 보여주고 있는데 Full-field에서 0.1% 이내에 잘 제어되고 있음을 보여준다. Fig. 4은 MTF 특성[17]을 보여주는데 20lp/mm에서 0.4 MTF값을 29lp/mm에서 0.25 MTF 값을 보여주는 설계로 사용자의 분해능 요구 조건을 잘 충족하고 있음을 확인할 수 있다.

설계되어진 광학계를 구성하는 두 렌즈는 한 면이 비구면으로 되어 있기 때문에 DTM으로 가공을 하였다. 이때 비구면의 가공공차는 P-V < 2.0um, Ra=0.05um, Eccentricity < 10 ′ (minutes)로 하였고 구면의 가공공차는 Power/Irr 3/1-Ring으로 하였고, 두께공차는 thickness < ±0.03mm로 하였다.

이렇게 해서 가공되어진 렌즈를 하우징에 넣어 구성되는 조립도가 Fig. 5에 나타나 있다. 피사체 거리를 무한대에서 20cm 로 하였을 때 필요로 하는 적외선 검출소자의 이동량이 약 2.89 mm로 계산되는데 이를 반영하여 적외선 검출소자의 이동 보다는 MWIR 결상렌즈를 적외선 검출소자로부터 피사체 쪽으로 이동할 수 있도록 하는 구조로 하우징을 설계하였다. Fig. 5에 나타난 Focusing의 이동범위는 위에 기술된 내용을 반영하여 더 여유있게 피사체 방향으로 3mm, 적외선 검출소자 쪽으로 1mm 이동할 수 있도록 하고 있다. Fig. 6은 실제 가공된 렌즈와 경통의 조립체의 외관을 보여주고 있다.

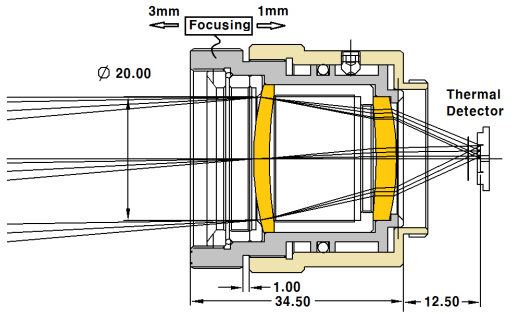


Fig. 5. Barrel sectional view of the optimized MWIR imaging lens system with ray tracing

Fig. 6. External view of the assembled barrel with the optimized MWIR imaging lens system

## 5. 결론

본 연구에서 우리는 초점거리가 24mm 인 대기투과 특성이 좋은 3~5$\mu m$ 파장대역의 적외선 결상용 렌즈계를 설계 개발하였다. 설계되어진 렌즈계 각각 Si와 Ge로 구성된 한 면이 비구면으로 이루어진 2장의 렌즈로 구성되었는데, 분해능이 20lp/mm에서는 MTF값이 0.4, 29lp/mm에서는 MTF값이 0.25 에 이르는 광학계가 되었다. 이 광학계는 25$\mu m$ pixel의 206×156 어레이 및 17$\mu m$ pixel의 320×240 어레이 적외선 검출소자에 사용할 수 있는 성능을 가진 것으로 판단된다.

## REFERENCES


[1] Bruce H. Walker. (1995). *Optical Engineering Fundamentals.* NY : McGraw-HILL.

[2] R. Usamentiaga et al. (2014). Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors, 14(7),* 12305 - 12348.
DOI : 10.3390/s140712305

[3] A. Rogalski. (2002). Infrared detectors: an overview. *Infrared Physics & Technology, 43,* 187 - 210.
DOI : 10.1016/S1350-4495(02)00140-8

[4] M. Kopytko. (2014). Design and modelling of high-operating temperature MWIR HgCdTe nBn detector with n- and p-type barriers. *Infrared Physics & Technology, 64,* 47 - 55.
DOI : 10.1016/j.infrared.2014.01.015

[5] E. L. Dereniak. & G. D. Boreman. (1996). *Infrared Detectors and Systems.* NY : John Wiley & Sons, Inc.

[6] C. T. Elliott. (1981). New Detector for Thermal Imaging Systems. *Electron. Lett, 17,* 312-315.
DOI : 10.1049/el:19810218

[7] Warren J. Smith. (2000). *Modern Optical Engineering 3rd Ed.* NY : McGraw-HILL.

[8] R. Kingslake. (1983). *Optical System Design.* NY : Academic Press.

[9] S. M. Hong et al. (2004). Thermal imaging sensor design using 320x240 IRFPA. *Hankook Kwanghak Hoeji, 15(5),* 423-428.
DOI : 10.3807/KJOP.2004.15.5.423

[10] M. W. McDowell & H. W. Klee. (1984). Achromatization in the 3 to 5$\mu m$ spectral region with visible light transmitting materials. *Optical Engineering, 23(2),* 187-192.
DOI : 10.1117/12.7973409

[11] M. Shen et al. (2014). Design of midwave infrared athermalization optical system with a large focal plane array. *Optik, 125,* 3085 - 3087.
DOI : 10.1016/j.ijleo.2013.12.024

[12] A. Mann. (2001). *Infrared Optics and Zoom Lenses 2nd Ed.* Bellingham : SPIE Press.

[13] M. Laikin. (2007). *LENS DESIGN 4th Ed.* NY : CRC Press.

[14] S. H. Park & D. H. Lee. (2008). Design of an Anamorphic Prism Lens for the Head Mount Display. *J. Korean Ophthalmic Opt. Soc., 13(4),* 83-88.

[15] D. H. Lee. (2001). Program Development for Extracting the Numerical Data of Aspherical Surface for the Core Manufacturing of Ophthalmic Lens. *J. Korean Ophthalmic Opt. Soc., 12(4),* 87-90.

[16] CJ. Richard. (1997). *Code V Reference Manual Version 8.20.* California : Optical Research Associates.

[17] D. H. Han. (2016). Design and Characteristics of 6-60 Lens for CCTV. *Journal of Convergence Society for SMB, 6(3),* 85-91.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2016.6.3.085



이 상 길(Sang-Kil Lee) [정회원]

- 1985년 2월 : KAIST 물리학과 (이학석사)
- 2003년 2월 ~ 2007년 1월 :㈜이오테크닉스 상무
- 2008년 7월 ~ 2017년11월 :에이옵틱스(주) 연구소장
- 2017년 12월 ~ 현재 :(주)유남옵틱스 이사
- 2015년 5월 : 한국광학기기산업협회 운영위원
- 관심분야 : 광학계 설계 및 평가, 레이저 가공장비, 3D 디스플레이광학계, 미세광학계
- E-Mail : sglee419@naver.com

이 동 희(Dong-Hee Lee) [정회원]

- 1988년 2월 : KAIST 물리학과 (이학석사)
- 1994년 2월 : KAIST 물리학과 (이학박사)
- 1994년 3월 ~ 1996년 3월 : 대우전자 중앙연구소 선임연구원
- 1996년 3월 ~ 2012년 2월 : 을지대학교 안경광학과 교수
- 2013년 3월 ~ 현재 : 극동대학교 안경광학과 교수
- 관심분야 : 광학계 설계 및 평가, 반도체 검사장비, 안광학 장비
- E-Mail : dhlee99@hanafos.com