

Design and Fabrication of Eyepiece with 30° Field of View

Dong-Hee Lee*

Dept. of Visual Optics, Far East University, Professor, EumSeong 27601, Korea
(Received August 30, 2024; Revised September 12, 2024; Accepted September 14, 2024)

Purpose: To design and fabricate an eyepiece for organic light-emitting diode (OLED) display devices with a 30° field of view, an exit pupil size of 7.0 mm, and an eye relief of 30.0 mm. **Methods:** Design optimization was performed by setting the eye relief of 30.0 mm and the exit pupil size of 7.0 mm as fixed variables (constraints) and configuring the merit function with a high weight on the removal of distortion, which the user focuses on minimizing. In addition, design optimization was performed by adjusting the weight of each term of the merit function so that the MTF value was 0.4 or higher at a spatial frequency of 33.3 lp/mm. **Results:** We designed and fabricated an eyepiece optical system for an OLED display device with a focal length of 23.0 mm, distortion of <0.2%, and a field of view of 30°. This eyepiece consists of five lenses (+ power lens, - power doublet, + power lens, - power lens) and has resolution performance of 0.4 or higher at a spatial frequency of 33.3 lp/mm. **Conclusions:** We designed an eyepiece for the VGA-grade OLED display device with a pixel size of 15×15 μm², which has an MTF resolution of 0.4 or higher at a spatial frequency of 33.3 lp/mm.

Key words: Eye relief, Distortion, Eyepiece, MTF, Spartial frequency

서 론

최근 열상 카메라가 산업용 및 군용으로 많이 사용되는데, 열상 카메라는 관찰 목표물로부터의 적외선을 결상시키는 결상 광학계, 이를 검출하는 열상 디텍터로 구성된다.^[1-4] 그러나 열상 디텍터로 결상된 상을 전기적인 신호로 변환하여 관찰자가 볼 수 있는 영상으로 출력하여 관찰자가 볼 수 있게 해야 한다. 이들은 micro-OLED, OLED, LCOS, LCD 등의 영상 디스플레이 소자로 이루어져 있는데, 그중에서 고온 저온의 온도에도 잘 작동할 수 있는 micro-OLED, OLED 디스플레이 소자가 산업용 및 군용으로 많이 사용되고 있다.^[5-7]

그런데 이들 디스플레이 소자가 작은 크기를 갖는다면, 관찰자가 직접 보기에는 눈의 안정피로(asthenopia)가 유발되어 관찰자의 눈을 피로하게 할 수 있다. 이러한 상황을 극복하기 위한 수단으로써 안광학 분야에서는 적절한 안점거리(eye relief)^[8-11]를 가지고, 디스플레이 소자의 상을 확대해 볼 수 있는 상 확대용 접안렌즈를 사용하고 있다. 특히 디스플레이 소자가 군용으로 사용될 경우에는 장비 소형화의 필요성에 의해 디스플레이 소자가 작을 수밖에 없고, 이 작은 디스플레이 화면을 눈의 안정피로 없이 확대해 보기 위해 영상소자 확대용 접안렌즈를 필요로 하게

된다.

본 논문에서는, 0.59" OLED 디스플레이 소자의 상을 확대해서 볼 수 있는, 안점거리 30.0 mm이고 시야각 30도를 가지는 접안렌즈의 설계 제작에 대한 내용을 전개하고자 한다.

대상 및 방법

1. 접안렌즈의 설계 초기조건

사용자의 설계 요구조건은 Table 1에 나와 있다. 사용자는 수급의 용이성과 공급가격의 적절성 판단에 의해 SVGA(픽셀수: 640×480)급 0.59" OLED 디스플레이 소자를 선택하였고, 안점거리 30.0 mm과 시야각 30도의 광학적

Table 1. Design specifications demanded by users

Field of View	(15±1%) deg
Eye Relief	≥30.0 mm
Axial Length from 1 st lens to IMAGE	<32.0 mm
Entrance Pupil	7.0 mm
Distortion	<±0.25%
Wavelength range	Visible range
MTF (640×480, 15 μm pixel)	>0.40 @ 33.3 lp/mm

*Corresponding author: Dong-Hee Lee, TEL: +82-043-880-3808, E-mail: dhlee99@hanafos.com
Authors ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7655-0058

특성은 본 광학계를 채택하려고 하는 열상 카메라 사용환경의 운용 평가에 의해 선택된 특성으로 판단된다.

설계 요구조건에서 입사동의 크기가 7.0 mm로 주어졌는데 본 논문에서는 이를 고정변수(constraint)로 두었다. 안점거리(eye relief)를 30.0 mm 이상으로 하였지만 안점거리가 길면 길수록 렌즈의 직경이 커지고 무게가 무거워지기 때문에 최소거리 30.0 mm로 고정변수로 하여 설계를 진행하였다. 첫 번째 렌즈에서 결상면까지의 길이는 사용자가 개발하고자 하는 장비의 전장길이에 관계되기 때문에 32.0 mm를 넘지 않도록 할 필요가 있다. 이 접안렌즈의 설계에서 초기설계 작업, 최적화 설계 작업 및 성능 평가는 상용 CodeV 프로그램^[12,13]을 사용하여 진행하였다.

일반적인 망원경에서의 접안렌즈 설계와는 다르게 왜곡수차를 0.25% 이내로 제한하고 있는데, 이는 설계될 접안렌즈로 볼 수 있는 디스플레이 소자의 가장자리의 형태가 왜곡되지 않는 정확한 4:3 비율의 직사각형으로 보여야 한다는 제한 조건에서 제시된 것으로 보인다, 따라서 설계에서는 무엇보다도 왜곡수차 제거에 높은 가중치를 두는 merit function을 작성하여 설계 최적화를 진행할 필요가 있다.

여기서 사용되는 디스플레이 소자는 픽셀의 크기가 SVGA(픽셀수: 800×600)급 0.59" OLED를 사용하지만, 열상 카메라의 열상 디텍터가 VGA(픽셀수: 640×480)급으로 되어 있기 때문에 디스플레이 소자의 640×480 픽셀만 사용하는 것으로 하였다. 결국 설계해야 할 내용은 디스플레이 소자의 640×480 픽셀의 크기인 9.6 mm×7.2 mm (대각선 방향 12 mm)의 디스플레이 면을 확대해서 볼 수 있는 접안렌즈인 것이다.

MTF의 기준 공간주파수 분해능^[10,11,14]은

$$\frac{1}{0.015 \text{ mm}} \div 2 = 33.3 \text{ lp/mm} \quad (1)$$

에서 계산되어지는 값이고, MTF 값은 0.4 이상을 요구하고 있는 설계 요구조건으로 판단된다. 따라서 MTF의 기준 공간주파수 분해능 33.3 lp/mm에서 MTF 값이 0.4 이상이 되도록 하는 방향으로 merit function의 각 항의 가중치를 조절하면서 설계 최적화를 진행할 필요가 있다.

2. 안점거리 30.0 mm, 왜곡수차 0.25% 이하를 갖는 접안렌즈의 설계^[9,15-17]

Table 1에 나와 있는 사용자 요구조건 중 안점거리 30.0 mm는 설계의 고정 제한조건으로 사용하였다. 그러면 확대하여 보고자 하는 디스플레이 소자의 대각 사이즈가 12 mm 가 되고, 반시야각이 $15 \pm 1\% \text{ deg} = 15.15^\circ \sim 14.85^\circ$ 이기 때문에 초점거리를 f 라고 하면

$$f \times \theta = f \times \frac{15.15^\circ \sim 14.85^\circ}{180^\circ} \times \pi = \frac{12 \text{ mm}}{2} \quad (2)$$

에서 $f = 22.69 \text{ mm} \sim 23.15 \text{ mm}$ 로 계산된다. 따라서 접안렌즈의 설계변수에 광학계 초점거리의 변화범위를 $f = 22.69 \text{ mm} \sim 23.15 \text{ mm}$ 로 하여 최적화되는 초점거리의 광학계를 선택하였다.

설계 초기에는 + 굴절력의 렌즈 2개 - 굴절력의 렌즈 2개를 사용하여 상기의 제한조건과 Table 1의 사용자 요구조건을 충족시키는 광학계의 구성을 시도하였으나 해가 존재하지 않았다. 이는 색수차 발생으로 유한광선 수차가 크게 되어 사용자의 기준 공간주파수에서 MTF 요구 값을 충족시킬 수 없었기 때문이었다.

따라서 색수차를 줄여서 사용자의 MTF 요구 값을 충족시킬 새로운 초기설계 조건의 설정이 필요하게 되었다. 이를 본 설계에서는 일반적으로 색수차 제거가 잘되는 더블렛 렌즈를 도입하여 해결하기로 하였다. 즉 광학계의 조합을 + 굴절력 렌즈, 더블렛, + 굴절력 렌즈, -굴절력 렌즈로 하고, 상기의 고정 제한조건과 Table 1의 사용자의 요구조건을 충족시키도록 최적화 작업을 진행하였다. 그 결과 사용자의 요구조건을 모두 충족시키는 광학계를 구성할 수 있었다. 광학계 초점거리는 사용자의 요구조건에서의 반시야각 공차 1.0%로 $f = 22.69 \text{ mm} \sim 23.15 \text{ mm}$ 와 같은 변수를 가질 수 있었으나, 이 변수 이내로 최적화된 광학계의 MTF의 광학적 특성이 모두 비슷하게 나타났기 때문에 최종적인 해를 Fig. 1과 같은 CodeV의 Scale mode를 사용하여 초점거리 23.0 mm가 되도록 scaling 하였다. 이는 접안렌즈의 초점거리의 규격화 필요성을 요구하는 사용자의 의견을 반영한 결과이다.

결과 및 고찰

최적화 설계된 OLED용 접안렌즈의 설계 데이터는

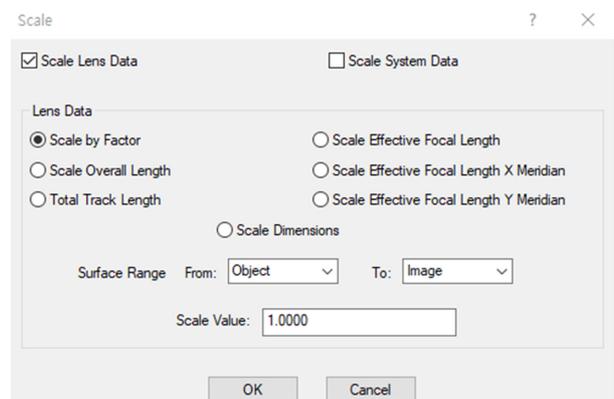


Fig. 1. Figure showing the Scale Mode available in CodeV.

Table 2. Optimized design data of the OLED imaging optical system having a 23.0 mm focal length (unit: mm)

Surface #	Surface Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Aperture
Objective	Sphere				
Stop	Sphere		30.000		3.5
2	Sphere	36.2365	6.300	NSK16	12.095
3	Sphere	-70.7567	0.300		12.149
4	Sphere	13.7125	8.100	NSK16	11.524
5	Sphere	84.2909	1.800	NSF4	10.233
6	Sphere	9.4788	2.385		7.706
7	Sphere	15.4033	5.600	NLAF2	7.720
8	Sphere	-41.2619	1.408		7.072
9	Sphere	-15.8142	1.000	NSF4	6.762
10	Sphere		4.500		6.618
Image	Sphere		0.000		6.165

Table 3. 1st optical characteristics of the optimized OLED imaging optical system having a 23.0 mm focal length

Infinite conjugates	
EFL	23.000
BFL	4.573
FFL	-1.343
FNO	3.286
IMG DIS	4.500
OAL	56.893
Paraxial image	
HT	6.163
ANG	15.000
Entrance pupil	
DIA	7.000
THI	0.000
Exit pupil	
DIA	119.905
THI	-389.399

Table 2에, 1차 광학량의 특성은 Table 3에 나타나 있다.

최적화 설계된 OLED용 접안렌즈의 형상 및 광선추적도는 Fig. 2와 Fig. 3에서 보여지고 있다. 본 광학계는 (+ 굴절력 렌즈, -굴절력의 더블렛, + 굴절력 렌즈, - 굴절력 렌즈)의 5매 구성되어 있으며 각각은 NSK16, NSK16, NSF4, NLAF2, NSF4의 초자로 구성되어 있다. 이들 초자는 최적화 후 결정된 초자코드에 대응되는 초자를 국내 초자 공급업체에서 제공하는 초자 공급표에서 선택하여 설정하게 된다. 만약 국내에서 공급 불가능한 초자일 경우에는 초자 공급 기간이 약 4주~8주 정도 더 길어지게 되어 개발에 큰 영향을 주게 된다.

- 굴절력의 더블렛은 +굴절력의 1번째 렌즈와 -굴절력

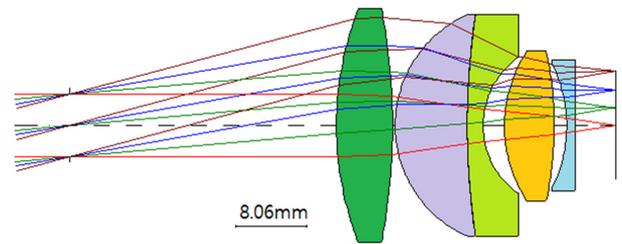


Fig. 2. Ray tracing drawing of the optimized OLED imaging optical system having 23.0 mm focal length.

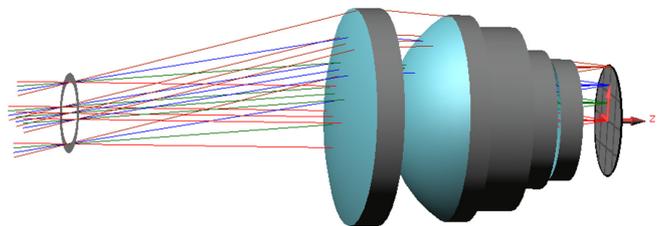


Fig. 3. 3D ray tracing drawing of the optimized OLED imaging optical system having 23.0 mm focal length.

의 2번째 렌즈가 발삼접합을 하고 있음을 볼 수 있다. 일반적인 색수차가 제거된 더블렛에서의 구성과 마찬가지로, 본 설계에서 색수차를 감소시켜 사용자의 MTF 요구 값을 충족시키도록 하기 위해 사용된 더블렛 구성도, + 굴절력의 렌즈는 굴절률이 낮고 아베수가 높으며, -굴절력의 렌즈는 굴절률이 높고 아베수가 낮은 것으로 최적화가 되어 있음을 확인할 수 있다. 이는 NSK16과 NSF4의 초자 코드가 각각 620410.603236 및 755131.273770 임에서 확인되는 것이다.^[12,13]

Fig. 4에서는 최적화 설계된 OLED용 접안렌즈의 왜곡 수차량을 보여주는데, Table 1에서의 사용자의 요구조건 $\pm 0.25\%$ 이하를 충족하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 4에서 보면 약 10.0 deg 시야각 필드(OLED의 약 4 mm 반경

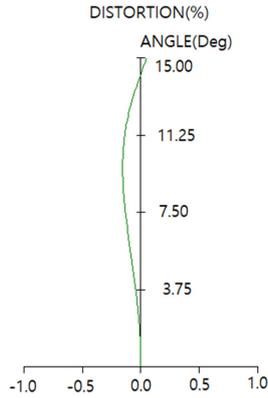


Fig. 4. Distortion diagram of the optimized OLED imaging optical system having 23.0 mm focal length.

위치)에서 약 0.2%의 최대 왜곡량을 가지는데 이는

$$f \times \Delta\theta = 23 \text{ mm} \times \frac{10.0^\circ \times 0.002}{180^\circ} \times \pi = 0.008 \text{ mm} \quad (2)$$

로 계산되는 편차 약 8 μm에 해당된다. 이것으로 확인할 수 있는 것은 사용자는 디스플레이용 OLED가 접안렌즈에 의해 약 8 μm 정도의 최대 편차만 허용되도록 외부 물체의 열상의 영상이 관찰자에게 전달되어야 하는 광학계를 요구하고 있었음을 확인할 수 있다. 이는 실제 전장에서 목표물을 추적 관찰하는 데 있어서 목표물을 결상하는 열상카메라의 상이 왜곡이 거의 없는 상태로 관찰자의 디스플레이 창을 통해서 관찰자에게 전달되어야 한다는 요구조건과 일치한다고 볼 수 있다.

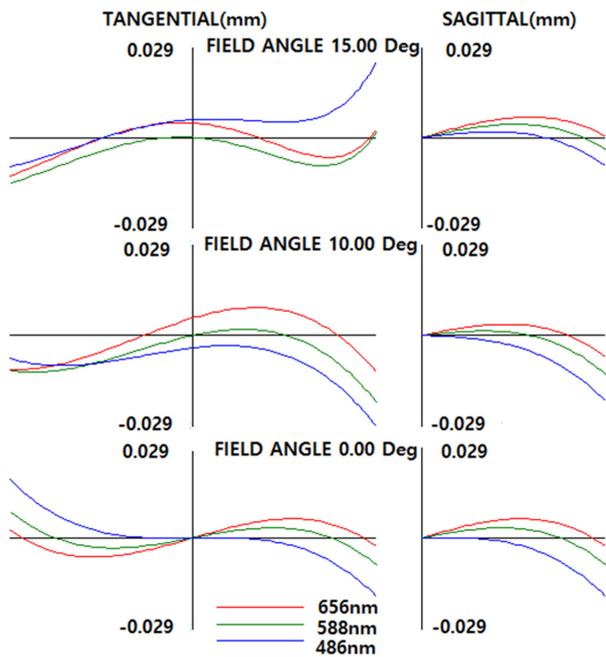


Fig. 5. Finite ray aberrations of the optimized OLED imaging optical system having 23.0 mm focal length.

Fig. 5는 최적화 설계된 OLED용 접안렌즈의 유한광선 수차량을 보여주고 있는데 비네팅^[18]이 없는 전체 시야각 ±15 deg 이내에서 수차량 ±0.029 mm 이내로 잘 제어되어 지고 있음을 보여준다,

Fig. 6는 비네팅이 없는 반시야각 15 deg 범위 이내에서 상기 유한광선 수차량에 의해 광학계가 가질 수 있는 MTF 값의 분포를 보여주고 있다. 즉 기준 공간주파수 33.3 lp/mm에서 0.4 이상의 MTF 값을 갖도록 하는 Table 1에서의 사용자의 요구조건을 충족시키고 있음을 보여준다. 여기서 보면 자오광선 10 deg 필드(F3 T 그래프)와 자오광선 15 deg 필드(F4 T 그래프)에서의 MTF 값이 내려가고 있는데 이는 왜곡수차량을 ±0.25% 이내로 제한해야 한다는 사용자의 요구조건을 반영하여 최적화를 진행한 결과로 나타난 것이다.

이러한 해석을 확인하기 위해 저자는 다음과 같은 본 광학계의 재평가 설계를 진행하였었다. 즉 같은 광학계의 구성에서 일반적인 망원경용 접안렌즈와 같이 왜곡수차량을 ±2.0% 이내로 제한하여 최적화를 진행하였었다. 그 결과 자오광선 10 deg 필드(F3 T 그래프)와 자오광선 15 deg 필드(F4 T 그래프)에서의 MTF 값이 구결광선 10 deg 필드(F3 R 그래프)와 구결광선 15 deg 필드(F4 R 그래프)에서의 MTF 값 정도로 올릴 수 있게 되고, 광학계의 분해능은 기준 공간주파수 33.3 lp/mm에서 MTF 0.6 정도까지 올릴 수 있는 광학계를 구성할 수 있었다. 따라서 본 광학계는 왜곡수차량을 줄이기 위해 MTF 분해능을 희생한 광학계의 설계였음을 확인할 수 있었다.

Fig. 7에는 설계된 OLED용 접안렌즈 광학계의 경통 및 구성 렌즈의 제작도 작성을 위한 렌즈 배치도를 보여주고 있는데, 각각의 렌즈는 렌즈 경통 스페이스(spacer)를 고려한 실제 가공될 크기를 가지고 있다. 여기서 A 위치는 광학계의 stop 위치로 관찰자의 눈이 위치하는 곳이고, B 위치

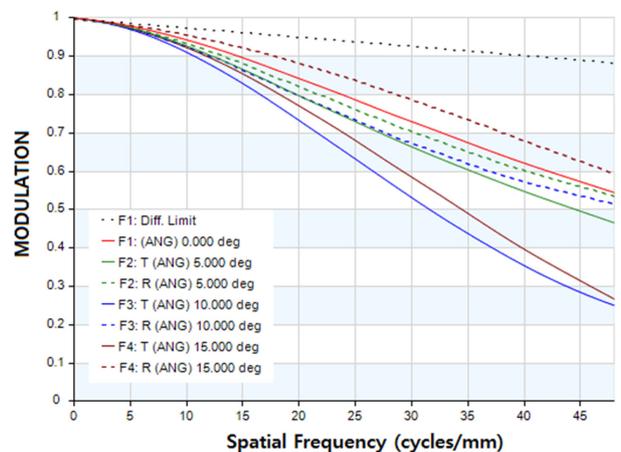


Fig. 6. MTF curves of the optimized OLED imaging optical system having 23.0 mm focal length.

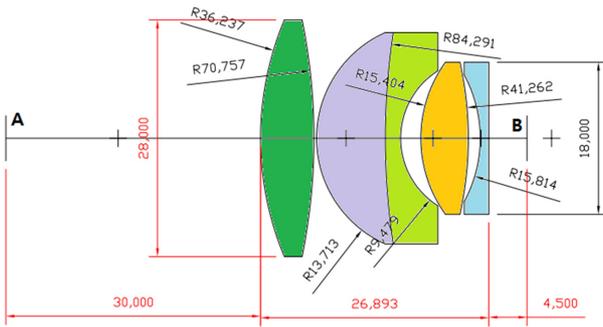


Fig. 7. Manufacturing schematic drawing for the four lenses that make up the optimized OLED imaging optical system with a 23.0 mm focal length.



Fig. 8. External view of the assembled barrel with the optimized OLED imaging optical system having 23.0 mm focal length.

는 디스플레이 소자의 디스플레이 면이 위치하는 곳이다.

Fig. 8에는 Fig. 7 도면을 기초 도면으로 하여 각각 렌즈 가공도 및 경통 제작도를 작성하여 렌즈 5개와 경통을 만들고 이들을 조립하여 구성한 광학계를 보여주고 있다. 경통 상반부에는 관찰자 눈 보호커버가 안착될 요(凹)홈 가공 상태가 보인다.

이상에서 우리는 사용자의 수급의 용이성과 공급가격의 적절성 판단에 의해 결정된 SVGA(사용 픽셀수: 640×480, 디스플레이 면 크기: 9.6 mm×7.2 mm)급 0.59" OLED 디스플레이 소자를 안정피로 없이 확대해 볼 수 있는, 사용자의 광학적 요구조건 안점거리 30.0 mm 시야각 30°를 충족시킬 수 있는, 접안렌즈의 설계 제작과정을 살펴볼 수 있었다.

결 론

본 논문에서는 픽셀의 크기가 $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ 인 VGA급 OLED 디스플레이 소자용 접안렌즈를 설계 제작하였다. 이 광학계는 33.3 lp/mm 공간주파수에서 MTF 값이 0.4 이상인 분해능 성능과 초점거리 23.0 mm, 왜곡수차 0.2% 이하, 시야각 30 도의 광학적 성능을 갖게 되었다. 사용자

의 요구사항을 반영하여 최적화 설계된 접안렌즈는(+ 굴절력 렌즈, - 굴절력의 더블렛, + 굴절력 렌즈, - 굴절력 렌즈) 굴절력의 구성을 가지는 5개의 렌즈로 이루어졌는데, 제2렌즈와 제3렌즈는 광학계의 색수차를 완화시키기 위해 사용되어졌고 발삼접합을 하고 있다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 극동대학교 교내연구비(과제번호 :FEU2023R19) 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Rogalski A. Infrared detectors: an overview. *Infrared Phys Techn.* 2002;43(3-5):187-210. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1350-4495\(02\)00140-8](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(02)00140-8)
- [2] Kopytko M. Design and modelling of high-operating temperature MWIR HgCdTe nBn detector with n- and p-type barriers. *Infrared Phys Techn.* 2014;64:47-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.01.015>
- [3] Dereniak EL, Boreman GD. *Infrared detectors and systems*, 1st Ed. New York: Wiley-Interscience, 1996;23-128
- [4] Elliott CT. New detector for thermal imaging systems. *Electron Lett.* 1981;17(8):312-315. DOI: <https://doi.org/10.1049/el:19810218>
- [5] Chen D, Chen YC, Zeng G, et al. Integration technology of micro-LED for next-generation display. *Research.* 2023;6:0047. DOI: <https://doi.org/10.34133/research.0047>
- [6] MicroLED-Info. What is MicroLED, 2023. [https://www.microled-info.com/introduction\(20 July 2024\)](https://www.microled-info.com/introduction(20 July 2024)).
- [7] Hong SM, Song IS, Kim CW, et al. Thermal imaging sensor design using 320x240 IRFPA. *Korean J Opt Photon.* 2004;15(5):423-428. DOI: <https://doi.org/10.3807/KJOP.2004.15.5.423>
- [8] Smith WJ. *Modern optical engineering*, 4th Ed. New York: McGraw-HILL, 2008;287-338.
- [9] Smith WJ. *Modern lens design*, 2nd Ed. New York: McGraw-HILL, 1992;87-121
- [10] Park SH, Lee DH. Development on a roofed pechan prism type scope with long eye relief. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2010;15(3):247-255.
- [11] Park SH, Lee DH. Development on a relay lens type scope with 70mm eye relief. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2009;14(3):29-35.
- [12] Synopsys. Code V Optical Design Software, 2017. [https://www.synopsys.com/optical-solutions/codev.html\(27 May 2024\)](https://www.synopsys.com/optical-solutions/codev.html(27 May 2024)).
- [13] ORA. Code V Introductory User's Guide CODE V 10.1. California: Optical Research Associates, 2009.
- [14] Smith WJ. *Modern optical engineering*, 4th Ed. New York: McGraw-HILL, 2008;365-406.

- [15] Kingslake R. Optical system design, 1st Ed. New York: Academic Press, 1983;7-25.
- [16] Laikin M. Lens design, 4th Ed. New York: CRC Press, 2007;119-129.
- [17] Smith WJ. Modern optical engineering, 4th Ed. New York: McGraw-HILL, 2008;457-500.
- [18] Hecht E, Zajac A. Optics, 3rd Ed. London: Addison-Wesley Publishing Co., 1982;118-119.

30도 시야각을 갖는 접안렌즈 설계 및 제작

이동희*

극동대학교 안경광학과, 교수, 음성 27601

투고일(2024년 8월 30일), 수정일(2024년 9월 12일), 게재확정일(2024년 9월 14일)

목적: 30도 시야각, 출사동 크기 7.0 mm, 및 안점거리 30.0 mm를 갖는 OLED 디스플레이 소자용 접안렌즈를 설계 제작하고자 한다. 방법: 안점거리 30.0 mm, 출사동 크기 7.0 mm를 고정변수(constraint)로 두고, 사용자가 최소화 에 중점을 두는 왜곡수차 제거에 높은 가중치를 둔 merit function을 작성하여 설계 최적화를 진행하였다. 또한 공간주파수 33.3 lp/mm에서 MTF 값이 0.4 이상이 되도록 하는 방향으로 merit function의 각 항의 가중치를 조절하면서 설계 최적화를 진행하였다. **결과:** 초점거리 23.0 mm, 왜곡수차 0.2% 이하, 시야각 30도를 가지는 OLED 디스플레이 소자용 접안렌즈 광학계를 설계 제작하였다. 이 접안렌즈(+ 굴절력 렌즈, -굴절력의 더블렛, + 굴절력 렌즈, -굴절력 렌즈)의 구성을 가지는 5개의 렌즈로 이루어졌는데, 33.3 lp/mm 공간주파수에서 0.4 이상의 MTF 값을 갖는 분해능의 성능을 갖게 되었다. 결론: 본 논문에서 우리는 픽셀의 크기가 $15 \times 15 \mu m^2$ 인 VGA급 OLED 디스플레이 소자를 위한, 33.3 lp/mm 공간주파수에서 0.4 이상이 되는 MTF 분해능을 갖는, 접안렌즈를 설계할 수 있었다.

주제어: 안점거리, 왜곡수차, 접안렌즈, MTF, 공간주파수