

Design and Fabrication of Eyepiece with 40° Field of View and One Aspheric Surface

Sun-Dong Kim^{1,a} and Dong-Hee Lee^{2,b,*}

¹Dept. of Energy IT Engineering, Graduate School of Far East University, Student, EumSeong 27601, Korea

²Dept. of Visual Optics, Far East University, Professor, EumSeong 27601, Korea

(Received December 10, 2024; Revised December 19, 2024; Accepted December 20, 2024)

Purpose: To design and manufacture an eyepiece for a 15 μm -pixel VGA-grade OLED display device with a 40-degree field of view, an eye relief of 25.0 mm, an exit pupil size of 4.6 mm, and a focal length of 16.485 mm. **Methods:** A field of view of 40°, a maximum effective lens diameter of 26.0 mm, and a focal length of 16.485 mm were set as fixed variables (constraints), a merit function was set to ensure an MTF value of 0.3 or higher and a distortion of 1% or lower at a reference spatial frequency of 33.3 lp/mm, and optimization was performed using the CodeV lens design program. **Results:** We designed and manufactured an eyepiece with a 5-lens configuration that can magnify a 15 μm -pixel VGA-grade OLED display device with a focal length of 16.485 mm, a distortion $\leq 0.8\%$, and a 40° field of view. This eyepiece consists of five lenses (+ refractive power spherical lens, - refractive power doublet spherical lens, + refractive power spherical lens, and - refractive power aspherical lens), and has an optical system with a resolution of MTF ≥ 0.3 at 33.3 lp/mm spatial frequency. **Conclusions:** By introducing an aspherical surface into the existing eyepiece with a 30-degree field of view, our eyepiece achieved a resolution of MTF ≥ 0.3 at 33.3 lp/mm spatial frequency, which can magnify a 300,000-pixel (640 \times 480 VGA grade) OLED element with a pixel size of 15 μm .

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

서 론

요즘 산업용 및 군용으로 열상 카메라가 많이 사용되는데, 이 열상 카메라는 적외선 결상광학계가 열상 디텍터에 외부의 상을 결상시킨다.^[1-3] 이를 관찰자가 보기 위해서는 디텍터에 결상된 상을 전기적인 신호로 변환하여 가시광선의 영상으로 출력하여 관찰자가 볼 수 있게 하여야 하는데 여기에는 OLED, LCOS, LCD 등의 영상 소자가 사용된다.^[4-6]

그런데 이들 영상 소자는 크기가 0.47" 정도로 작아서 관찰자가 영상 소자의 상을 직접 보고자 할 때에는 눈의 안정피로(asthenopia)가 유발되어 눈이 쉽게 피곤해진다. 따라서 이 영상 소자의 상을 확대하여 관찰자의 원점에 허상으로 결상하여 확대해서 보는 것이 일반적이며, 안광학 분야에서는 이러한 광학계로는 적절한 안점거리(eye relief)^[7-9]를 가지는 영상 소자의 상 확대용 접안렌즈^[10]가 설계 제작되고 있다. 그런데 요즘은 시야각이 40도 이상되는 고시야각용 접안렌즈의 요구도 증가하는 실정이다.

본 논문에서는 기존 발표된 0.47" 크기의 영상소자의 상

을 시야각 30도로 확대해 볼 수 있는 OLED용 접안렌즈^[10]에 비구면을 한 면의 채택함으로써 시야각을 40도까지 확대해 볼 수 있는 고시야각 접안렌즈가 설계 제작될 수 있음을 밝히고자 한다.

대상 및 방법

1. 비구면 접안렌즈의 설계 초기조건^[10]

Table 1은 사용자의 설계 요구조건을 보여주고 있다. 일반적인 열상 카메라의 열상 디텍터의 화소수는 VGA(픽셀 수: 640 \times 480)급을 사용하고 있는데 사용자는 영상소자로서는 SVGA(픽셀 수: 800 \times 600)급 0.61" OLED 영상 소자를 채택하고 있음을 볼 수 있다. 이는 공급가격 및 수급의 안정성에 의한 선택으로 보인다. 즉 SVGA급 OLED 영상 소자가 VGA급 OLED 영상 소자보다 가격 및 수급에서 유리하다는 것을 반영한 것으로 보인다. 따라서 사용자는 영상소자의 SVGA급 픽셀 중 640 \times 480 픽셀만 사용하면 열상 디텍터의 결상을 1:1로 영상 소자의 상으로 변환하여 사용할 수 있게 되는 것이다.

*Corresponding author: Dong-Hee Lee, TEL: +82-043-880-3808, E-mail: dhlee99@hanafos.com
Authors ORCID: ^ahttps://orcid.org/0000-0003-0936-5295, ^bhttps://orcid.org/0000-0001-7655-0058

안점거리(eye relief) 25.0 mm 이상, 입사동의 크기 4.0 mm 이상 시야각 40도의 광학적 스펙은 렌즈의 최대 유효경 26.0 mm와 관계가 있다. 일반적으로 시야각 안점거리 및 입사동의 크기가 커지면 렌즈의 유효경이 커지게 되기 때문에 사용하고자 하는 광학계 렌즈의 최대 유효경을 26.0 mm 이내로 제한하기 위해서는 안점거리, 입사동의 크기 및 시야각의 크기의 3가지 변수의 크기에 있어서 최적화 과정에서 최적점을 찾아야 한다.

Table 1 설계 요구조건에서의 반시야각의 2배 크기인 시야각 40도와 렌즈의 최대 유효경 26.0 mm를 고정변수 (constraint)로 두고, 안점거리 25.0 mm이상, 입사동 크기 4.0 mm 이상은 범위가 제한되는 변수로 선언을 하였다. 개발하고자 하는 사용자 장비의 전장 길이에 관계되는 첫 번째 렌즈에서 결상면까지의 거리 32.0 mm와 왜곡수차 <1.0%도 범위가 제한되는 변수 선언을 하였다. 자유변수로는 곡률반경, 비구면 계수, 렌즈사이의 거리 및 굴절률로 하여 상용 CodeV 프로그램^[11,12]을 사용하여 초기설계 작업, 최적화 설계 작업 및 성능 평가를 진행하였다.

열상 카메라의 열상 디텍터가 VGA(픽셀수: 640×480)급으로 되어 있기 때문에 영상소자는 800×600 픽셀 중 640×480 픽셀만 사용하는 것으로 하였다. 따라서 640×480 픽셀로 이루어진 영상소자의 크기인 대각선 방향 12 mm(가로 9.6 mm×세로 7.2 mm)의 영상소자 면을 40도 시야각으로 확대해서 볼 수 있는 비구면을 가지는 접안렌즈 설계가 본 논문에서 설계 평가하고자하는 목표가 된다.

영상소자의 픽셀 크기가 15 μm이기 때문에 MTF 분해능의 기준 공간주파수^[8,9]는

$$\frac{1}{0.015mm} \div 2 = 33.3 \text{ lp/mm} \tag{1}$$

로 계산되어 진다.

따라서 Table 1 설계 요구조건에서의 MTF 분해능이 공간주파수 33.3 lp/mm에서 0.3 이상이 되도록 최적화 merit function 설정에 도입된 각 항의 가중치(weighting)를 조정하여 사용자가 요구하는 시야각 40도를 가지는 접안렌즈가 되도록 설계 최적화를 진행하였다.

2. 최대 유효경 26.0 mm, 시야각 40도, 안점거리 25.0 mm, 왜곡수차 1.0% 이하를 갖는 접안렌즈의 설계^[10,13-17]

Table 1의 요구조건 중 시야각 40도, 렌즈의 최대 유효경 26.0 mm를 고정변수로 두고 안점거리와 입사동 크기는 범위가 제한되는 변수로 사용하였기 때문에, 공간주파수 33.3 lp/mm에서 MTF 분해능이 0.3 이상 왜곡수차 1.0% 이하가 되도록 하는 최적화 과정에서 안점거리와 입사동

Table 1. Design specifications demanded by user

Half Field of View	(20±1%) deg
Eye Relief	≥25.0 mm
Axial Length from 1 st lens to IMAGE	< 32.0 mm
Maximum Effective Diameter of Lens	< 26.0 mm
Entrance Pupil	>4.0 mm
Distortion	<±1.0%
Wavelength range	Visible range
MTF (640×480, 15 μm pixel)	>0.30 @ 33.3 lp/mm
Thermal detector: 640×480, 15 μm pixel	
Display panel: 800×600, OLED, 15 μm pixel (effective area 640×480)	

크기는 결정되게 된다.

접안렌즈의 초점거리는 확대하여 보고자 하는 영상 소자의 화면 대각 사이즈가 12 mm 이고, 반시야각이 20도이기 때문에 접안렌즈의 초점거리를 f 라고 하면

$$f \times \tan\theta = f \times \tan 20^\circ = \frac{12}{2} mm \tag{2}$$

에서 16.485 mm로 계산된다. 따라서 접안렌즈의 최적화 설계변수에서 초점거리 16.4849 mm를 고정변수로 추가하여 최적화를 진행하였다.

설계 시작 초기 데이터는 Lee^[10]의 연구에서 발표된 구면렌즈로 구성된 접안렌즈 설계 데이터를 사용하였는데 + 굴절력 렌즈, -굴절력 더블렛, + 굴절력 렌즈, -굴절력 렌즈로 구성된 광학계이었다. 시야각 40도, 렌즈의 최대 유효경 26.0 mm, 초점거리 16.485 mm를 고정변수로 사용하여 비구면을 도입하지 않고 최적화를 해보았는데 이때 얻어지는 MTF curve가 Fig. 1에 제시되어 있다.

이를 Lee^[10]의 연구에서 발표된 MTF curve와 비교해 보면 15도 및 20도 필드각에서 MTF 분해능이 상당히 떨어짐을 확인할 수 있다. 이러한 사실로서 사용자가 원하는 40도 시야각을 갖는 접안렌즈 구성을 위해서는 구면렌즈 5매로는 해를 구하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

이를 해결하기 위해 비구면 1면을 도입하기로 하고 결상면과 마주보는 면에 비구면을 도입하여 최적화를 진행하였다. 그 결과 Table 1의 사용자 요구조건을 모두 충족하는 접안렌즈를 설계할 수 있었다. 이때 사용한 비구면 렌즈 설계에 사용되는 비구면(aspherical surface) 방정식을 아래와 표현된다^[16,17].

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + A_4r^4 + A_6r^6 + A_8r^8 + A_{10}r^{10} \tag{3}$$

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

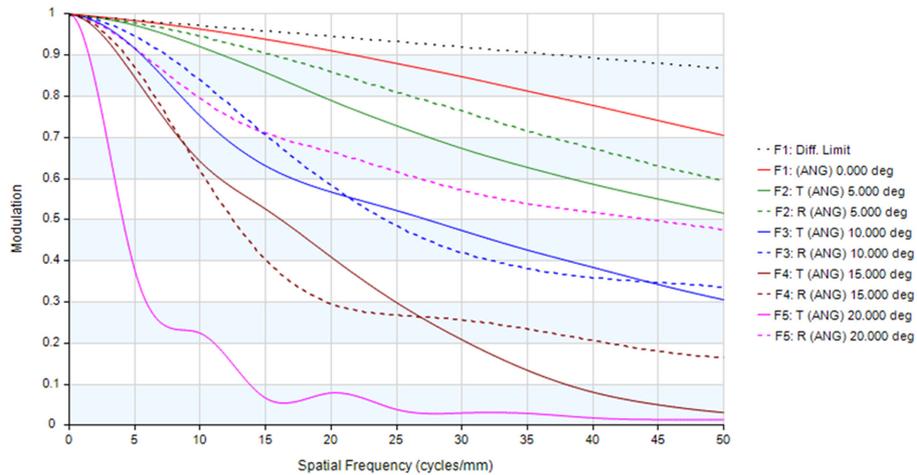


Fig. 1. MTF curves of the optimized OLED imaging optical system consisting of five spherical lenses with a focal length of 16.485 mm.

결과 및 고찰

Table 2에서는 최적화 설계된 OLED용 접안렌즈의 설계 데이터, Table 3에서는 1차 광학량의 특성을 확인할 수 있다.

최적화 과정을 통해서 설계된 영상소자 OLED용 접안 렌즈의 2D 단면과 3D 측면도 5개의 필드에서의 광선추적도가 Fig. 2와 Fig. 3에 나타나 있다. 설계된 광학계는 굴절력의 구성이 (+ 굴절력 구면, -굴절력 더블렛 발삼접합, + 굴절력 구면, -굴절력 비구면)의 5매 구성되어 있으며 5 번째 렌즈는 후면이 비구면인 비구면 렌즈로 구성되었다. 초차는 각각 NSK14, NSK16, NSF4, NLAK7, PSTYR의 순서로 구성되어 있다. 이들 초차 중 PSTYR는 폴리스틸렌 플라스틱으로 비구면 사출을 위한 선택으로 파장 588 nm에서 굴절률 =1.590474인 초차이다.

-굴절력의 더블렛은 발삼접합이 필요한 렌즈인데 굴절

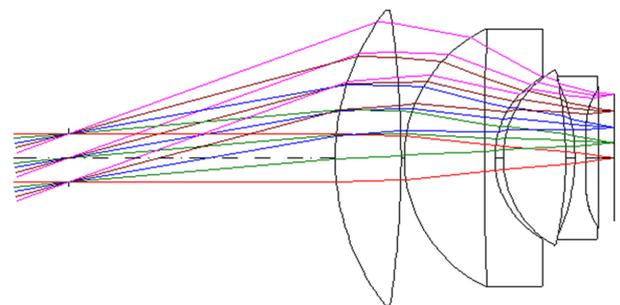


Fig. 2. Ray-trace drawing of the optimized OLED imaging optical system with a 16.485 mm focal length.

률이 낮은 초차 NSK16(=1.620408)이 +굴절력을 갖고, 굴절률이 높은 초차 NSF4(=1.755126)가 -굴절력을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 이는 일반적인 색수차 제거렌즈에서의 굴절률과 굴절력의 분포와 같음을 보여준다.^[11,12]

Table 2. Optimized design data of the OLED imaging optical system with a 16.485 mm focal length (unit: mm)

Surface #	Surface Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Aperture
Objective	Sphere				
Stop	Sphere		25.000		2.300
2	Sphere	22.9584	6.160	NSK14	12.825
3	Sphere	-96.7503	0.300		12.735
4	Sphere	13.3947	7.500	NSK16	11.343
5	Sphere	280.0254	1.000	NSF4	10.489
6	Sphere	8.7912	0.787		7.638
7	Sphere	9.5122	5.840	NLAF7	7.668
8	Sphere	-37.1616	0.866		7.165
9	Sphere	-17.7431	1.000	PSTYR	7.007
10	Aspher	8346.1131	2.702		6.145
		k: -0.304512E11 A ₄ : 0.462800E-03 A ₆ : 0.104702E-04 A ₆ : -0.738010E-07 A ₁₀ : -0.172351E-08			
Image	Sphere		0.000		5.999

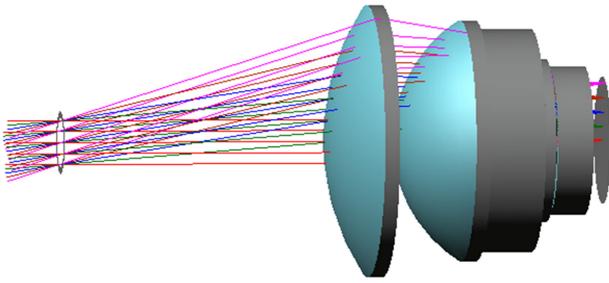


Fig. 3. 3D ray-trace drawing of the optimized OLED imaging optical system with a 16.485 mm focal length.

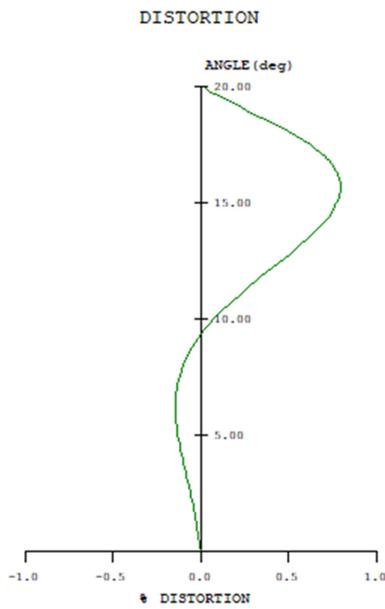


Fig. 4. Distortion diagram of the optimized OLED imaging optical system with a 16.485 mm focal length.

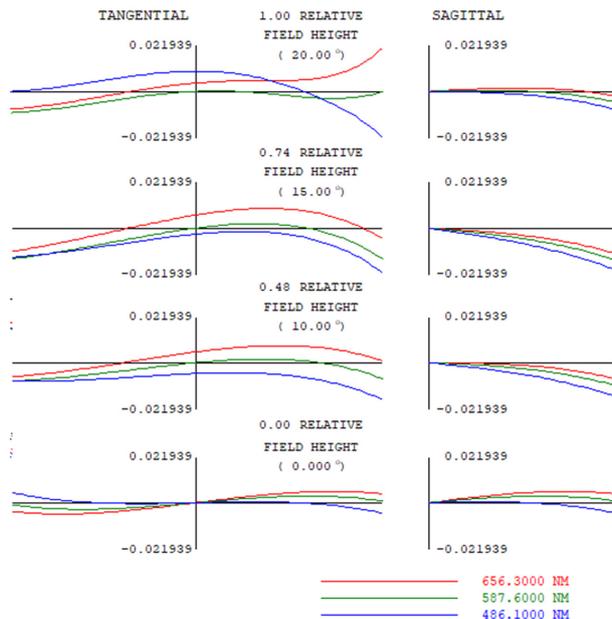


Fig. 5. Finite ray aberrations of the optimized OLED imaging optical system with a 16.485 mm focal length.

Table 3. First optical characteristics of the optimized OLED imaging optical system with a 16.485 mm focal length

Infinite conjugates	
Effective Focal Length (mm)	16.485
Back Focal Length (mm)	1.556
Front Focal Length (mm)	7.572
FNO	3.584
Image Distance (mm)	1.500
Overall Length (mm)	49.654
Paraxial image	
Height (mm)	6.000
Angle (°)	20.000
Entrance pupil	
Diameter (mm)	4.600
Thickness (mm)	0.000
Exit pupil	
Diameter (mm)	10.014
Thickness (mm)	37.444

최적화 설계된 OLED용 접안렌즈의 왜곡수차량은 Fig. 4에서 볼 수 있는데, Table 1에 나타나 있는 사용자의 요구조건(왜곡수차<1.0%)을 충족시키고 있음을 알 수 있다. 즉 Fig. 4에서 보면 약 15도 시야각 필드에서 약 +0.8%의 왜곡수차량을 가지는데 이는

$$f \times \tan \theta = 16.485 \text{ mm} \times \tan 15.0^\circ = 4.417 \text{ mm} \quad (4)$$

의 0.8%로 계산되는 편차는 약 35 μm로 계산된다. 즉 시야각 15도 위치의 결상점 높이 4.417 mm가 약 35 μm 높은 위치로 결상된다는 것을 의미한다. 이 정도의 왜곡량은 사용자의 요구조건에 의해 충분히 허용되는 값으로 판단된다.

최적화 설계된 OLED용 접안렌즈의 유한광선 수차량은 Fig. 5에서 보여주고 있는데 비네텡^[18]이 없는 전체 시야각

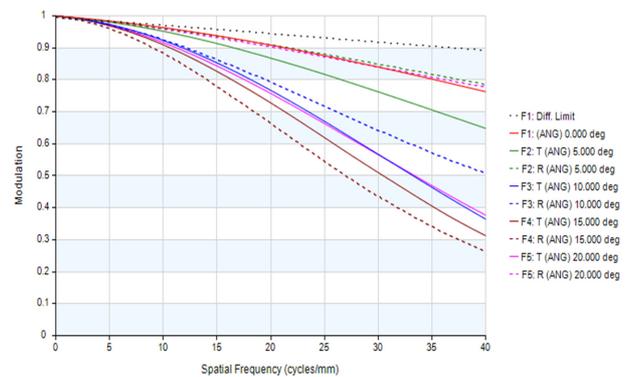


Fig. 6. MTF curves of the optimized OLED imaging optical system with a 16.485 mm focal length.

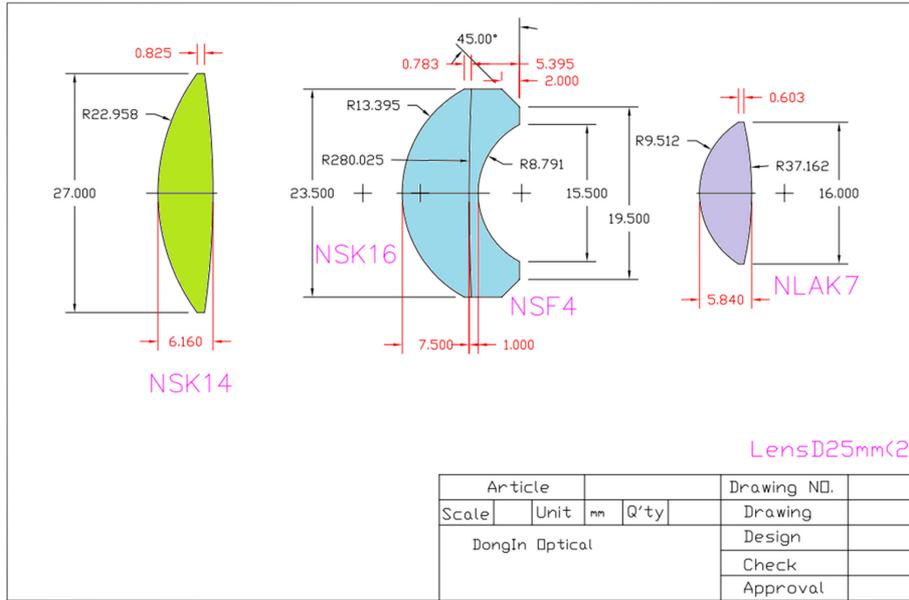


Fig. 7. Manufacturing drawing of four spherical lenses among the lenses that constitute the optimized OLED imaging optical system with a focal length of 16.485 mm.

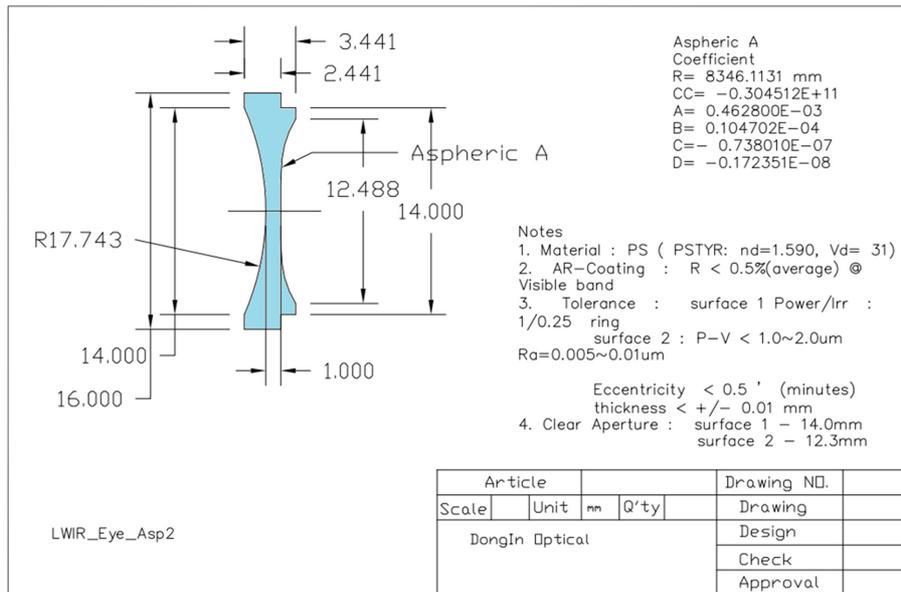


Fig. 8. Manufacturing drawing of an aspherical lens among the lenses that constitute the optimized OLED image optical system with a focal length of 16.485 mm.

±20도 이내에서 수차량이 ±0.022 mm 이하로 나타나고 있음을 알 수 있다.

비네팅이 없는 반시야각 20도 범위에서 상기 Fig. 5의 유한광선 수차량의 수차를 가지는 광학계의 MTF 분해능의 분포가 Fig. 6에 나타나 있다. Fig. 6은 기준 공간주파수 33.3 lp/mm에서 0.3 이상의 MTF 값을 갖도록 하는 사용자의 MTF에 대한 요구조건(Table 1)을 충족시키고 있다. 또한 Fig. 1과 Fig.6의 비교는 접안렌즈 시야각을 30도 이상 높이기 위해서는 적어도 1면은 비구면화된 렌즈가

사용되어야 함을 알게 해준다.

Fig. 7은 최적화 설계된 OLED용 접안렌즈를 구성하는 구면렌즈의 제작도를 보여주고 있다. 여기서 보면 Table 2의 Semi-Aperture 값의 두 배보다 더 크게 렌즈의 직경을 유지하고 있는데 이는 경통부 스페이스(spacer)를 고려한 조립 여유공간을 가지게 함을 목적으로 하고 있다.

Fig. 8은 최적화 설계된 OLED용 접안렌즈를 구성하는 비구면렌즈의 제작도를 보여주고 있다. 초자는 PS재질을 사용하고 있고, 후면의 비구면 가공에서의 P-V공차는

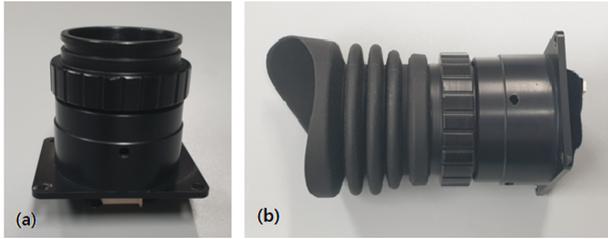


Fig. 9. External view of the assembled barrel with the optimized OLED imaging optical system with a 16.485 mm focal length. (a) with OLED panel attached, (b) with rubber eye guard attached.

1.0~2.0 μm 이내임을 알 수 있다.

Fig. 9는 최적화 설계된 OLED용 접안렌즈의 외관을 보여주고 있다. (a)는 OLED 패널이 장착된 상태를 보여주고 있는데 상부에는 관찰자의 눈 충동을 보호할 보호커버가 안착될 요(凹) 모양의 가공 홈을 볼 수 있다. (b)는 보호커버가 부착된 접안렌즈의 외관을 보여주고 있다.

이상에서 우리는 VGA(픽셀수:640×480, 유효 영상면 크기: 9.6 mm×7.2 mm)급 0.47" OLED 영상소자를 안정피로 없이 확대해 볼 수 있는 안점거리 25.0 mm, 초점거리 16.485 mm, 시야각 40°를 가지는 1면이 비구면인 접안렌즈의 설계 및 제작과정을 살펴볼 수 있었다. 이 광학계는 왜곡수차가 0.8% 이하이고, 5매의 렌즈로 이루어졌는데, (+ 굴절력 구면렌즈, -굴절력의 더블렛 구면렌즈, +굴절력 구면렌즈, -굴절력 비구면 렌즈)의 구성을 가지고 있으며, 33.3 lp/mm 공간주파수에서 MTF가 0.3 이상인 분해능을 갖는 광학계가 되었다.

결 론

본 논문에서는 픽셀의 크기가 15 μm 인 VGA급 OLED 영상 소자용 비구면 접안렌즈를 설계 및 제작 해보았는데, 비구면은 광학계 결상면 바로 앞의 한 면에 사용하였다.

최적화 설계된 접안렌즈는 33.3 lp/mm 공간주파수에서 MTF 값이 0.3 이상인 분해능 성능과 초점거리 16.485 mm, 왜곡수차 0.8% 이하, 시야각 40°도의 광학적 성능을 갖게 되었고, 접안렌즈를 이루는 5매의 렌즈의 굴절력 분포는 (+ 굴절력 렌즈, -굴절력의 더블렛, + 굴절력 렌즈, -굴절력 렌즈)와 같았다. 본 논문의 전개 과정에서 접안렌즈 시야각을 30도 이상 높이기 위해서는 적어도 1면은 비구면화된 렌즈가 사용되어야 함을 확인할 수 있었다.

향후, 본 논문과 관련된 접안렌즈 분야에서 구성 렌즈의 비구면화된 면의 증가가 시야각에 어떠한 효과를 유발할 수 있는지에 대한 추가연구와 어느 면의 비구면화가 시야각의 개선에 더 효과적인지에 대한 추가연구가 이어질 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 (주)동인광학 정인희장님의 샘플제작비 지원의 도움을 받아 완성되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] Dereniak EL, Boreman GD. Infrared detectors and systems, 1st Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996;23-128.
- [2] Rogalski A. Infrared detectors: an overview. Infrared Phys Technol. 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)
- [3] 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.01.015>
- [4] 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>
- [5] MicroLED-Info. What is MicroLED, 2023. [https://www.microled-info.com/introduction\(10 October 2024\)](https://www.microled-info.com/introduction(10 October 2024)).
- [6] 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>
- [7] Smith WJ. Modern optical engineering, 4th Ed. New York: McGraw-HILL, 2000;287-338.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Lee DH. Design and fabrication of eyepiece with 30° field of view. J Korean Ophthalmic Opt Soc. 2024;29(3):139-144. DOI: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2024.29.3.139>
- [11] Synopsys. Code V Optical Design Software, 2017. [https://www.synopsys.com/optical-solutions/codev.html\(12 October 2024\)](https://www.synopsys.com/optical-solutions/codev.html(12 October 2024)).
- [12] Optical Research Associates. Code V: introductory user's guide CODE V 10.1. California: Optical Research Associates, 2009;17-42.
- [13] Smith WJ. Modern lens design, 2nd Ed. New York: McGraw-HILL, 1992;87-121.
- [14] Kingslake R. Optical system design, 1st Ed. New York: Academic Press, 1983;7-25.
- [15] Smith WJ. Modern optical engineering, 4th Ed. New York: McGraw-HILL, 2008;457-500.
- [16] Laikin M. Lens Design, 4th Ed. New York: CRC Press, 2007;7-10.
- [17] Park SH, Lee SK, Lee DH. Design of aspheric imaging optical system having 35 mm focal length for MWIR. J Korean Ophthalmic Opt Soc. 2018;23(4):497-502. DOI: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2018.23.4.497>
- [18] Hecht E, Zajac A. Optics, 1st Ed. London: Addison-Wesley Publishing Co., 1982;118-119.

한 개의 비구면과 40도 시야각을 갖는 접안렌즈 설계 및 제작

김순동¹, 이동희^{2*}

¹극동대학교 대학원 에너지IT공학과, 학생, 음성 27601

²극동대학교 안경광학과, 교수, 음성 27601

투고일(2024년 12월 10일), 수정일(2024년 12월 19일), 게재확정일(2024년 12월 20일)

목적: 초점거리 16.485 mm, 40도 시야각, 안점거리 25.0 mm 및 입사동 크기 4.6 mm를 갖는 15 μm 화소의 VGA급 OLED 영상소자용 접안렌즈를 설계 제작하고자 한다. **방법:** 화각 40도, 렌즈의 최대 유효경 26.0 mm 및 초점거리 16.485 mm를 고정변수(constraint)로 두고, 기준 공간주파수 33.3 lp/mm에서 MTF 값 0.3 이상, 왜곡수차 1% 이하가 되도록 하는 merit function을 설정하고 CodeV 렌즈설계 프로그램을 사용하여 optimization 작업을 진행하였다. **결과:** 초점거리 16.485 mm, 왜곡수차 0.8% 이하, 시야각 40도를 가지는 15 μm 화소의 VGA급 OLED 영상소자 판넬을 확대해 볼 수 있는 5매 렌즈 구성의 접안렌즈를 설계 제작하였다. 이 접안렌즈는 5매 렌즈로 이루어졌는데, (+ 굴절력 구면렌즈, -굴절력의 더블렛 구면렌즈, + 굴절력 구면렌즈, - 굴절력 비구면 렌즈)의 구성을 가지고 있으며, 33.3 lp/mm 공간주파수에서 MTF가 0.3 이상인 분해능을 갖는 광학계가 되었다. **결론:** 기존 30도 화각을 갖는 접안렌즈에서 비구면 1면의 도입으로 우리는 픽셀의 크기가 15 μm 인 30만 화소(640X480 VGA급) OLED 소자를 확대해 볼 수 있는, 33.3 lp/mm 공간주파수에서 MTF가 0.3 이상이 되는 분해능을 갖는, 접안렌즈를 설계하였다.

주제어: 왜곡수차, 접안렌즈, MTF, 공간주파수, 안점거리