

Design of a Mobile Wide-Angle Lens for 8 Megapixels with 1.6 μm Pixel Size 8

Yeong-Bin Kwon^{1,a}, Byung-Ho Ha^{2,b}, Bo-Sun Kang^{3,c}, and Ki-Hong Kim^{4,d,*}

¹Dept. of Optometry & Vision Science, Daegu Catholic University, Student, Gyeongsan 38430, Korea
²Dept. of Optometry & Vision Science, Daegu Catholic University, Post-doc, Gyeongsan 38430, Korea
³Department of Radiological Science, Konyang University, Professor, Daejeon 35365, Korea
⁴Dept. of Optometry & Vision Science, Daegu Catholic University, Professor, Gyeongsan 38430, Korea
(Received August 30, 2024; Revised September 13, 2024; Accepted November 21, 2024)

Purpose: The importance of mobile camera lens images is increasing due to the increasing popularity of media. The goal of this study was to design mobile wide-angle lenses to reduce thickness and enhance image clarity, resulting in more natural and realistic images. **Methods:** We used a Code V Version 11.5 design program to construct a model for a mobile wide-angle camera by modifying the distance and aspherical curvature between lenses. The TTL was set to ± 7 mm and the thickness was minimized by reducing the number of lens surfaces to five. MTF performance aimed to achieve more than 60% of the 120 lp/mm spatial frequency at FOV 72°. Later, optical performance was evaluated through MTF and aberration graphs of the designed optical system. **Results:** Optical system design analysis showed that the MTF performance was 312.5 lp/mm at FOV 72°, achieving a value of 20% or more, and a value of 60% or more at 120 lp/mm spatial frequency, satisfying the design conditions. The light aberration was very low within 0.025 mm and the distortion aberration was up to -13.98%. This is a common problem with wide-angle lenses in small display systems and has been effectively corrected through software correction technology. **Conclusions:** In this study, a high-resolution mobile wide-angle lens with minimal thickness was designed using aspherical lenses. Although it provided high image quality at the basic viewing angle and showed relatively high distortion aberration, it could be supplemented with software correction technology. Mobile wide-angle lenses need continuous research and will contribute to the development of mobile lens technology.

Key words: High resolution, Wide angle, MTF, Mobile camera, Optical design

1. 서 론

소형 모바일 카메라 렌즈는 개발된 이래로 끊임없는 개발과 발전을 거듭해 왔다.^[1-4] 모바일 카메라 렌즈의 소형화와 해상도에 대한 인식이 강해지면서, 더 높은 광학적 성능을 요구하고 있다. 특히, SNS와 같은 플랫폼의 대중화로 인해 이미지 표현의 시각적 인식이 부각되면서 고해상도의 이미지가 필수적이다. 이에 이미지 수정 및 편집 과정에서 품질의 저하를 최소화하며 선명한 이미지를 유지하는 것이 중요한 과제로 떠오른다.^[5]

더불어 광각 렌즈의 넓은 시야각에서 발생하는 광학적 왜곡 현상도 필연적으로 고려해야 할 사항 중 하나이다. 최근에는 소형 디스플레이 시스템에서 발생하는 왜곡 현상을 실시간으로 추적하여 보정하는 알고리즘과 같은 기술로 고해상도 이미지의 왜곡을 효과적으로 보정할 수 있기 때문에 해상도 향상을 목표로 하는 것에 더 주목할 필요

가 있다.^[6,7] 해상도는 사용자의 연령대와 용도에 따라 사용 목적에 맞게 결정할 필요가 있으며, 특히 AI 기반 기술의 상용화로 인해 인식에 유리한 높은 해상도의 이미지가 필요하다. AI 딥러닝 기술의 경우, 촬영한 이미지를 분석하여 알고리즘으로 사람과 사물 인식의 정확도를 높이는 역할을 한다.^[8]

따라서 AI 기술에 정확하고 자연스러운 이미지를 형성하기 위해서는 선명한 이미지 인식이 필요하다. 해상도 향상은 사실적인 이미지 형성에 기본적으로 지녀야 할 필수 요소이며, 모바일 카메라는 두께와 이미지 센서 크기의 제약으로 인해 일반 카메라에 비해 성능이 제한되기 때문에 광학적 하드웨어 자체의 해상도를 증가시키는 연구 및 개발이 필요하다. 향상된 해상도 이미지는 사용자의 시각적 만족도를 극대화할 뿐만 아니라, 다양한 응용 분야에 적용할 수 있는 기반을 마련할 필요가 있다. 특히, 실제 사용 환경에서의 해상도 향상을 목적으로 성능이 요구된다. 이

*Corresponding author: Ki-Hong Kim, TEL: +82-53-850-2551, E-mail: kkh2337@cu.ac.kr

Authors ORCID: ^a<https://orcid.org/0009-0006-8708-2900>, ^b<https://orcid.org/0000-0003-4825-933X>, ^c<https://orcid.org/0000-0003-0193-5302>, ^d<https://orcid.org/0000-0003-0876-6169>

에 본 연구에서는 모바일 광각 렌즈의 설계를 통해 광학 적 두께의 최소화를 기반으로 해상도를 높여 이미지가 자연스럽고 사실적인 이미지를 구현하는 데 주안을 두고 설계하고자 한다.

2. 방 법

2.1. 설계 조건 및 목표 사양

본 연구에서는 Code V Version 11.5의 설계 프로그램을 활용하여 앞서 선정한 설계 형태와 목표 사양에 맞추기 위해 기존 문헌의 광각 렌즈 형태를 초기 모델로 선정하여 기초 설계하였다.^[1,9,10] 렌즈 디자인 선택의 기준은 외부에서 비치는 모바일 카메라의 크기를 줄이고자 렌즈 구경이 작은 형태를 선택하였다. 이미지 센서는 ‘OmniVision OV32A’의 사양으로 옵티컬 포맷을 고정하였다.^[11] 모바일 광학계가 요구하는 소형화를 고려하여 ± 7 mm를 기준으로 TTL(total track length)를 설정하고, 광학 시스템에 렌즈 요소가 많으면 TTL을 유지하거나 줄이기가 어려워지기 때문에 렌즈의 면을 5개로 줄여 두께의 최소화 및 경량화를 실현하고자 한다. MTF 성능은 광각인 점을 고려하여 FOV 72°에서 공간 주파수가 312.5 lp/mm에서 20%이상의 성능을 기반으로 120 lp/mm에서 60%의 이상의 값을 갖는 모바일 광각 렌즈를 설계 목표로 선정하였다. 초기 모델에서 전장의 길이를 보정하고 렌즈 간의 거리와 비구면 계수를 조정하여 실제 사용 환경에서 더욱 선명한 해상도를 위한 목표 성능을 만족하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 초기 설계

모바일 광각 카메라의 기초 설계는 7개의 비구면을 사용하며, 파장은 656 nm, 589 nm, 434 nm을 기준으로 설정하였다. F-number는 8.47, 초점거리는 8.47 mm, TTL은 9.8 mm의 사양을 보여주며, 기본 광각 화각의 FOV 60°를 기준으로 설계하였다. 각 파라미터는 가져온 초기 디자인 형태에서 초점이 맺힌 직후 형성된 값을 기준으로 도출되었으며, 디자인 형태를 효과적으로 활용하여 최적화를 위한 설계의 기초로 삼았다. 본 연구에서는 초기 설계를 기반으로 보완 및 수정 설계를 진행하였으며, glass code의 유리 초자는 Ohara사의 유리를 사용하였다.^[12] 초기 설계의 레이아웃은 Fig. 1에 나타나 있다.

3.2. 최종 설계

최적화된 모바일 광각 카메라 렌즈는 초기 설계와 같은 파장 범위에서 시야각을 넓히고자 초점거리를 3 mm 줄여

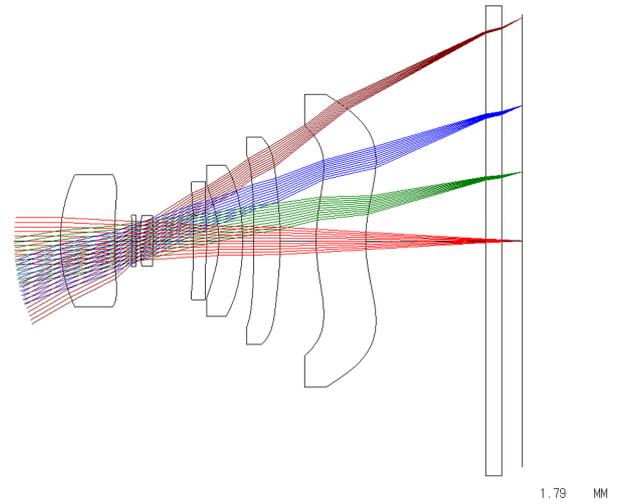


Fig. 1. Pre-Modification optical system configuration.

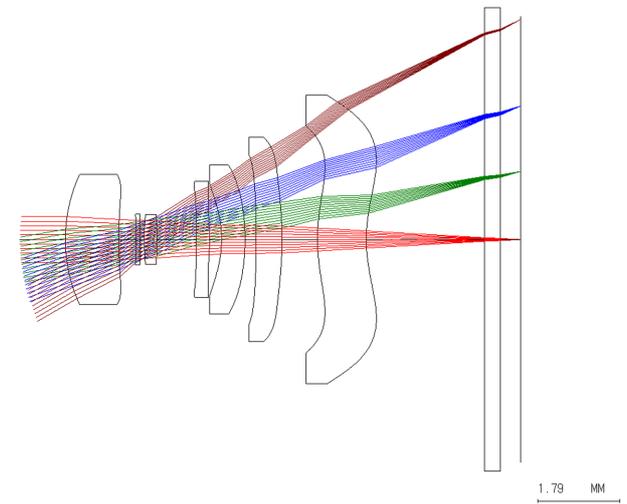


Fig. 2. Layout of the optical configuration.

fov 72°로 넓히면서 F-number를 낮춰 초기 설계보다 밝은 광학계를 설계하였다. 컴팩트한 설계를 위해 렌즈의 면을 2개 줄이고, 비구면 곡률을 수정함으로써 TTL의 길이를 3 mm 가량 감소시켰다. 5개의 비구면을 사용하여 최적화된 모바일 광각 카메라의 개략도는 Fig. 2와 같다. 본 연구에서 모바일 광각 카메라의 초점거리는 4.876229 mm, F-number는 3.15의 값을 가지며, TTL은 약 6.752 mm로 설계 조건에 만족하는 수치로 광학적으로 우수하며 더욱 밝은 광학계를 보여주었다. 이미지 센서의 활용도는 가우스 광학 이미지가 약 98.4%, 왜곡수차를 고려한 이미지는 약 84.6%로 잘 활용되고 있음을 보여주었다. 다음 최적화 설계한 광학 시스템 제원을 Table 1에, 설계 사양은 Table 2에서 나타내었다. 비구면 계수는 Table 3에 나타내었다.

Table 1. Prescription data of the wide-angle optical system

(unit: mm)

| Surface Number | Surface Type | Y Radius | Thickness | Glass Code | Semi aperture |
|----------------|--------------|----------|-----------|------------|---------------|
| Object | Sph | Infinity | Infinity | | |
| 1 | Asph | 1.4406 | 0.3787 | S-LAM60 | 0.9399 |
| 2 | Asph | 1.3403 | 0.2254 | | 0.7437 |
| Stop | Sph | 3.5153 | 0.7279 | S-FPM4 | 0.6943 |
| 4 | Asph | -4.1931 | 0.6570 | | 0.9028 |
| 5 | Asph | -1.0964 | 0.3163 | S-TIH4 | 0.9783 |
| 6 | Asph | -2.2611 | 0.1751 | | 1.3121 |
| 7 | Asph | 14.6028 | 0.6142 | S-LAM60 | 1.6523 |
| 8 | Asph | -4.3168 | 0.8054 | | 1.8032 |
| 9 | Asph | 4.1502 | 1.3999 | S-BSM16 | 2.5132 |
| 10 | Asph | 3.0496 | 0.7591 | | 2.8912 |
| 11 | Sph | Infinity | 0.4 | S-TIH4 | 3.0016 |
| 12 | Sph | Infinity | -0.0383 | | 3.0016 |
| Image | Sph | Infinity | 0.3329 | | 3.0459 |

Table 2. Design specifications

| Parameter | Specification |
|-------------------------------|---------------|
| Sensorformat | 1/2.75" |
| Field Of Angle (FOV) (degree) | 72 |
| Effective focal length (mm) | 4.876229 |
| F# number | < 3.2 |
| Total track length (TTL) (mm) | < 7 |
| Number of lenses | 5 |
| Optical distortion (OD) | ≤ 13.5 |
| Entrance pupil diameter (mm) | 1.55 |

3.3. 설계 성능 평가

3.3.1 Modulation transfer function(MTF)

Fig. 3은 FOV 72°에서 모바일 광각 광학계의 modulation transfer function(MTF)를 분석하였다. 공간 주파수가 높아 질수록 더 섬세한 이미지가 가능하고 물체의 대비가 뚜렷해진다. 이미지 센서의 nyquist Frequency인 312.5lp/mm에서 20% 이상의 MTF 성능을 보였으며, 모바일 해상도 이미지에서의 필수적인 세부 묘사와 선명도를 확보하는 데 충분한 성능을 제공하였다. Kim 등과^[9] Hou 등의^[10] 연구 분석 결과는 공간 주파수 110 lp/mm에서 60% 미만인 수

Table 3. Coefficient data for the aspheric surfaces

| | 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| A | -0.015861 75618368 | -0.003664 30070748 | -0.071503 23086155 | 0.0491189 166898146 | 0.0132131 331831934 | -0.002908 119420732 | 0.0131664 244865587 | -0.021646 308974041 | -0.0255713 845577028 |
| B | -0.013944 90319597 | -0.006645 86947543 | -0.043918 35779081 | 0.0050837 014052478 | 0.0003946 723104151 | -0.004811 473379924 | -0.005040 486483864 | -0.000113 863679297 | 0.00053218 872801968 |
| C | -0.004447 66347546 | -0.020767 72339592 | 0.0149563 991059479 | -0.003165 255920345 | -0.004460 784323332 | -0.000738 011988943 | -0.000465 650865645 | 0.000231 2213695558 | -4.4826283 25304e-05 |
| D | -0.013745 82461785 | 0.0171148 72169643 | -0.042810 847774134 | 0.0023995 35447429 | -0.000249 869756743 | -6.290139 29078e-05 | 2.0996023 91753e-05 | 1.465473 167399e-05 | -7.9892681 84827e-08 |
| E | - | - | - | 0.0007364 464590914 | 0.0006512 378041472 | 1.1372223 78696e-05 | 1.2529557 12673e-05 | -8.448093 16459e-07 | 1.61750680 93069e-07 |
| F | - | - | - | -0.007159 328251631 | 0.0003977 764297478 | 2.8518968 50843e-06 | -2.877164 23206e-06 | -3.327738 75308e-07 | 5.17323108 30251e-09 |
| G | - | - | - | 0.0108427 79516988 | -0.000251 448337049 | -1.160373 08324e-05 | -4.103750 43894e-06 | -4.693764 74732e-08 | -2.1407029 00315e-09 |
| H | - | - | - | - | - | - | - | -5.238501 10231e-09 | -1.9898592 17925e-10 |
| J | - | - | - | - | - | - | - | 1.5792530 86981e-09 | -6.7625968 55164e-11 |

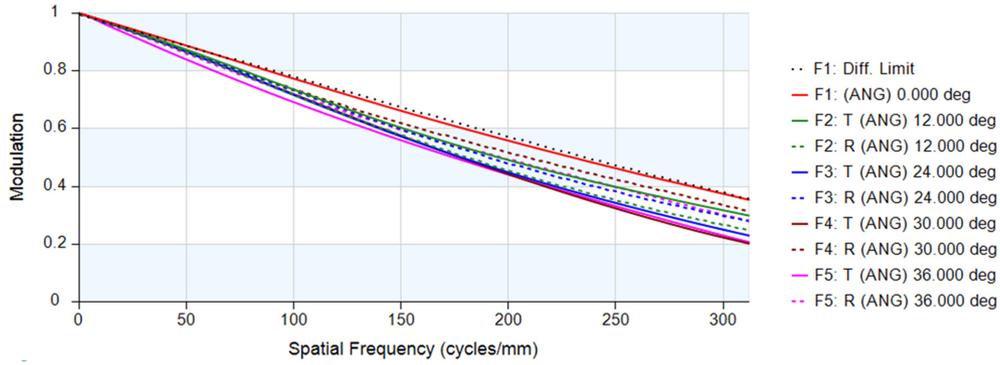


Fig. 3. MTF of the wide angle optical system.

치와 비교하여 본 연구에서는 동일한 화각의 범위 기준으로 120 lp/mm에서 60% 이상의 값을 가짐으로써 더 높은 공간 주파수에서 약 10% 이상의 차이 값으로 높은 광학적 성능의 설계 조건에 달성하였다. 또한, Peng의^[4] 연구와 비교시 더 넓은 화각에서 유사한 성능을 낼 수 있었다.

3.3.2 Spot diagram

스팟 다이어그램은 광학계를 지난 빛이 각 필드마다 집중되는 정도를 나타내며 스팟이 작고 집중되어 있을수록 이미지 품질이 우수하다. 점에 가까울수록 시스템이 일관되게 작동하며, 높은 정확도를 보인다. 설정 각도 내에 모두 한 점에 집중되어 있는 형태를 보여주어, 우수한 광학적 성능을 확인할 수 있었다. 스팟 다이어그램의 그림은 Fig. 4에 나타내었다.

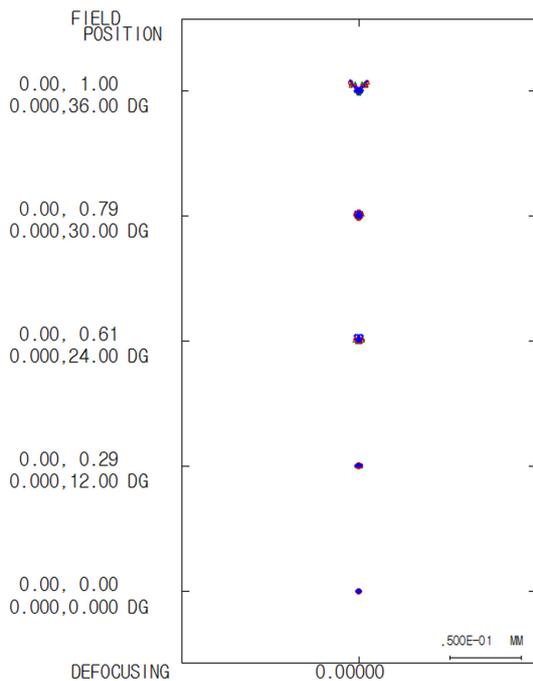


Fig. 4. Spot diagram of optical system.

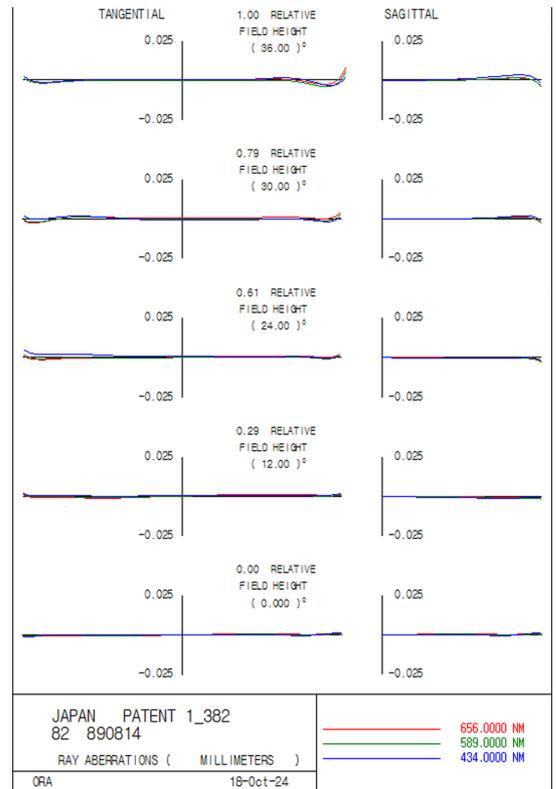


Fig. 5. Ray aberration of optical system.

3.3.3 수차

광학계의 광선 수차는 자오면과 구결면 모두에서 0.025 mm 이내 범위로 나타나 매우 낮은 수차량을 보였으며, 이는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6은 비점수차 및 왜곡수차를 분석한 결과를 제시하였다. 비점수차량은 자오면과 구결면 모두 0.1 mm 이내로 측정되어, 안정적인 광학적 성능을 확보할 수 있었으며, 왜곡수차량은 최대 -13.98%의 값을 나타내었다. 이는 소프트웨어 보정 기술을 적용하여 FHD 해상도 기준 11.9%, HD 해상도 기준 17.8%까지의 TV distortion을 효과적으로 보정이 가능하다.^[6] 왜곡수차가 높아질수록 이미지가 일그러지고 정확한 정보 전달이 줄어들어 부자연스러운 이미지가 연출되기 때문에 이러한 기

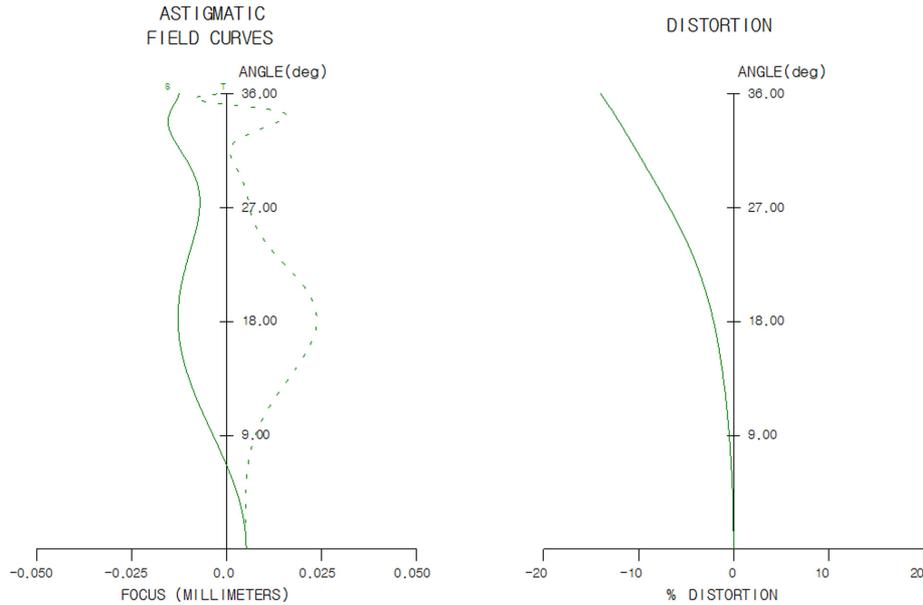


Fig. 6. Optical Distortion. (Field curvature and distortion data)

술을 바탕으로 광각 렌즈의 성능 향상에 따른 왜곡 현상의 우려는 소프트웨어로 보정으로 성능적 보완이 가능하였다. 하지만 소프트웨어 보정은 추가적인 연산을 필요로 하므로, 스마트폰의 CPU와 GPU에 부하를 줄 수 있다. 이는 배터리 소모와 발열 문제로 이어질 가능성이 있기 때문에 렌즈 설계 시 복합 광학 소재를 활용하거나 왜곡 보정 알고리즘을 효율화하여 연산 부하를 줄이는 추가적인 연구적 고찰이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 두께를 최소화하면서 비구면 렌즈를 사용하여 고해상도의 모바일 광각 렌즈 광학계를 설계하였다. 모바일 광각 카메라의 기본 화각에서 높은 품질의 이미지를 제공할 수 있었고, 상대적으로 높은 왜곡수차량을 나타내었지만, 소프트웨어 보정 기술을 통해 충분히 보완할 수 있었다.

현재 모바일 시장은 기기 사용량이 증가함에 따라 요구되는 성능에 만족하기 위해 모바일 카메라 렌즈의 지속적인 연구 개발이 필수적이며, 더 높은 이미지 품질을 위한 고해상도 모바일 광각 렌즈 설계 연구가 요구된다. 본 연구를 통해 모바일 광각 카메라의 기본적인 시야각 범위에서 우수한 성능을 발휘하였고, 향후 다양한 타입의 모바일 광학계 설계의 기초자료로 활용될 수 있으며, 고해상도 및 고품질 이미지를 제공하는 모바일 렌즈 기술 발전에 기여할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] Ma B, Sharma K, Thompson KP, et al. Mobile device camera design with Q-type polynomials to achieve higher production yield. *Opt Express*. 2013;21(15):17454-17463. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.21.017454>
- [2] Sun WS, Liu YH, Tien CL. Optical design of a miniaturized 10 \times periscope zoom lens for smartphones. *Micromachines*. 2023;14(6):1272. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi14061272>
- [3] He S, Chen KC, Hsu CM, et al. Design of 13 million pixel camera for cellphone applications. *Sens Mater*. 2022;34(5):1685-1696. DOI: <https://doi.org/10.18494/SAM3815>
- [4] Peng X. Design of high pixel mobile phone camera lens. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013;6(7):1160-1165. DOI: <http://dx.doi.org/10.19026/rjaset.6.3926>
- [5] Bravo ER, Libaque-Saenz CF. A multidimensional view of SNS usage: conceptualization and validation. *Asia Pacific Journal of Information Systems*. 2022;32(3):601-629. DOI: <https://doi.org/10.14329/apjis.2022.32.3.601>
- [6] Eo SW, Lee JG, Kim MS, et al. ASIC design for real-time one-shot correction of optical aberrations and perspective distortion in microdisplay systems. *IEEE Access*. 2018;6:19478-19490. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2815765>
- [7] Bauer A, Vo S, Parkins K, et al. Computational optical distortion correction using a radial basis function-based mapping method. *Opt Express*. 2012;20(14):14906-14920. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.20.014906>
- [8] Gulzar Y. Fruit image classification model based on MobileNetV2 with deep transfer learning technique. *Sus-*

- tainability. 2023;15(3):1906. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15031906>
- [9] Kim Sj, Jeong HJ, Lim HS. The design of wide angle mobile camera corrected optical distortion for peripheral area. J Korean Ophthalmic Opt Soc. 2013;18(4):503-507. DOI: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2013.18.4.503>
- [10] Hou C, Yu Y, Zhang D, et al. Miniature wide angle optical system with freeform lens. Opt Rev. 2024;31:497-508. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10043-024-00902-7>
- [11] OmniVision. OmniVision OV32A 32-megapixel Product Brief, 2024. <https://www.ovt.com/wp-content/uploads/2023/03/OV32A-PB-v1.1-WEB.pdf>(11 November 2024).
- [12] Ohara Corporation. Optical Glass Chart, 2023. <https://oharacorp.com/wp-content/uploads/2024/01/glass-chart-2024-01.pdf>(23 September 2024).

1.6 μm 크기 8메가 픽셀용 모바일 광각 렌즈 설계

권영빈¹, 하병호², 강보선³, 김기홍^{4,*}

¹대구가톨릭대학교 안경광학과, 학생, 경산 38430

²대구가톨릭대학교 안경광학과, 박사후연구원, 경산 38430

³건양대학교 방사선학과, 교수, 대전 35365

⁴대구가톨릭대학교 안경광학과, 교수, 경산 38430

투고일(2024년 8월 30일), 수정일(2024년 9월 13일), 게재확정일(2024년 11월 21일)

목적: 모바일 카메라 렌즈는 SNS와 같은 매체의 대중화로 인해 시각적 이미지의 중요성이 증가하면서, 고해상도 이미지에 대한 요구가 높아졌다. 이에 본 연구에서 모바일 광각 렌즈를 설계하여, 두께를 줄이고 이미지의 선명도를 증가시켜 자연스럽게 사실적인 이미지를 구현하는 것을 목표로 설계하고자 한다. **방법:** Code V Version 11.5 설계 프로그램을 사용하여 기본 형태의 광각 렌즈를 수정하고, 모바일 광각 카메라의 설계 모델을 개발하고자 한다. 모바일 광학계의 소형화 및 경량화를 고려하여 total track length(TTL)을 $\pm 7\text{ mm}$ 로 설정하고, 렌즈 면의 수를 5매로 줄여 두께를 최소화하도록 하였다. MTF 성능은 시야각을 넓히고, 렌즈 간의 거리와 비구면 곡률을 수정하여 FOV 72°에서 120 lp/mm 공간 주파수에서 60% 이상의 값을 달성하고자 한다. 이후 설계한 광학계의 (modulation transfer function)MTF와 수차 그래프를 통해 광학적 성능을 평가하였다. **결과:** 광학계 설계에 따른 분석 결과, FOV 72°에서 MTF 성능은 312.5 lp/mm에서 20%이상의 값을 달성하였고, 120 lp/mm 공간 주파수에서 60% 이상의 값을 나타내어 설계 조건을 충족하였다. spot diagram은 한 점에 집중되어 있는 형태로 선명한 이미지 품질을 보였다. 광선 수차는 0.025 mm 이내로 매우 낮으며, 왜곡수차는 최대 -13.98%로 나타났다. 이는 소형 디스플레이 시스템에서 광각 렌즈의 일반적인 문제로, 소프트웨어 보정 기술을 통해 효과적으로 보정이 가능하였다. **결론:** 본 연구에서는 비구면 렌즈를 활용하여 두께를 최소화한 고해상도의 모바일 광각 렌즈를 설계하였다. 이 렌즈는 기본 시야각에서 높은 이미지 품질을 제공하며, 상대적으로 높은 왜곡수차량을 보였으나 소프트웨어 보정 기술을 통해 효과적으로 보완이 가능하였다. 모바일 시장에서 요구하는 광학적 성능에 부응하기 위해 지속적인 연구와 개발이 필요하며, 본 연구를 통해 모바일 광학계 설계의 기초자료로 활용하고, 고해상도의 이미지를 제공하는 모바일 렌즈 기술 발전에 기여할 것으로 판단된다.

주제어: 고해상도, 광각, MTF, 모바일 카메라, 광학 설계