

Design of Folded Telephoto Camera Lens System for Mobile Devices

Dong-Seok Choi^{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 September 26, 2024)

Purpose: In this study, we aimed to design a folded telephoto camera lens for mobile devices using eight aspherical lenses and one mirror, to simultaneously achieve miniaturization and high performance, which are required for mobile device cameras. **Methods:** The optical system was designed by determining its structure through an analysis of prior design specifications reported in the literature and in patents, further setting target specifications. The performance of the designed optical system was subsequently evaluated through optical simulations conducted using lens design software. The distortion, modulation transfer function (MTF), and spot diagram were analyzed to assess the performance of the optical system. **Results:** The folded telephoto camera lens for mobile devices had an effective focal length of approximately 50 mm and was designed to have a width of less than 9 mm, considering the thickness of mobile devices. Within a 12° field of view, the distortion was less than 0.3% for the full field, indicating reduced peripheral distortion in the image. The MTF was over 20% at 150 lp/mm, demonstrating stable performance. **Conclusions:** We designed a folded telephoto camera lens applicable to mobile devices. The designed optical system ensured a long focal length while minimizing the aberrations caused by changes in the optical axis. This is expected to contribute to miniaturization and high performance, thereby enhancing performance in a wide range of applications beyond mobile devices.

Key words: Mobile camera, Folded telephoto camera, Telephoto camera, Optical design

1. 서 론

모바일 기기는 단순한 통신 수단을 넘어 사용자의 시각적 경험을 풍부하게 하는 핵심 매체로 자리매김하였다. 특히, 모바일 카메라는 고화질 이미지 획득을 위한 사용자들의 요구가 증가함에 따라 급격한 발전을 이루고 있으며 매년 출시되는 신제품들은 더욱 얇고 가벼워진 디자인과 더불어 고성능 카메라를 탑재하고 있다.^[1] 하지만 기기의 슬림화와 고성능 카메라의 요구는 서로 상충하는 문제를 야기한다.^[2-4] 이 중 망원 카메라의 경우 긴 초점거리를 확보하기 위해 광학계의 전장은 길어질 수밖에 없으며 이는 기기의 두께를 증가시키는 주된 원인이 된다.^[5] 이러한 문제를 해결하기 위하여 다양한 기법 및 기술들이 연구 및 적용되고 있으며 최근 모바일 카메라 제조업체들은 프리즘이나 미러를 이용하여 광로를 기울여 줄으로써 광학계의 전장을 효과적으로 줄이는 혁신적인 접이식 카메라 렌즈 설계 방식을 채택하고 있다.^[6,7] 이 설계 방식은 모바일

기기의 슬림화와 동시에 고성능 망원 카메라를 구현할 수 있는 해결책으로 주목받고 있다. 따라서 본 연구에서는 모바일 기기에 적용 가능한 접이식 망원 카메라 광학계를 최적화 설계를 통해 망원 카메라 렌즈의 긴 전장 길이와 초점거리를 효과적으로 확보하며, 보다 고성능을 가진 광학계 설계를 목표로 하였다.

2. 대상 및 방법

2.1. 설계 및 측정 방법

본 연구에서는 Synopsys사의 CODE V Version 11.5 결상 광학 설계 소프트웨어를 사용하여 모바일 기기에 적용 가능한 접이식 망원 카메라 광학계의 설계 및 성능 평가를 하고자 한다. 모바일 기기용 카메라 렌즈는 고성능과 소형화가 동시에 요구되고 있어 요구되는 성능을 만족하기 위하여 광학계 구성에 수차 보정이 용이하고 대량생산에 유리한 비구면 렌즈를 채택하였다.^[8] 특히, 긴 초점거

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

Authors ORCID: ^a<https://orcid.org/0009-0000-4431-0068>, ^b<https://orcid.org/0000-0003-4825-933X>, ^c<https://orcid.org/0000-0003-0193-5302>, ^d<https://orcid.org/0000-0003-0876-6169>

리를 확보하고 고성능을 구현하기 위해 4개의 비구면 렌즈를 추가하여 광학계를 설계하였다.

접이식 카메라의 구조적 특징을 고려하여 폴디드 텔레 카메라 구조를 기반으로 설계를 진행하였다. 접이식 구조는 스마트폰의 두께를 최소화하면서 긴 초점거리를 확보할 수 있다는 장점이 있지만, 광축의 변화에 따른 수차 발생 가능성이 높다는 단점도 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 광학 시뮬레이션을 통해 다양한 변수를 조절하며 최적의 광학 설계를 도출하였다. 이후 설계된 광학계의 성능 평가를 위해 이미지 가장자리의 왜곡 정도를 나타내는 지표로 이미지 품질에 직접적인 영향을 미치는 Distortion, 광학계의 해상력을 나타내는 지표로 공간 주파수에 따른 콘트라스트 감소를 나타내는 MTF (modulation transfer function) 및 광학계의 점 이미지 형성 능력을 나타내는 지표로 이미지의 선예도를 평가하는 데 사용되는 spot diagram을 측정하여 평가하고자 한다.

2.2. 설계 사양 및 조건

본 연구에서는 모바일 기기에 적용 가능한 고성능 망원 카메라를 구현을 목표로 접이식 망원 카메라 광학계를 설계하고자 하였다. 먼저 다수의 특허 및 문헌을 검토한 결과, Corephotonics사가 2022년 공개 출원한 PCT/IB2022/055745 특허의 구조 및 형태를 참고하여 설계하고자 하였다.^[9] 해당 특허는 접이식 구조를 통해 컴팩트한 광학계를 구현하여 본 설계가 목표로 하는 사양과 성능 조건에 적용될 수 있다는 점에서 본 연구의 목적에 부합한 구조라 판단하였다.

설계 제약 조건 및 목표 사양으로 Table 1에서 제시된 바와 같이 모바일 기기의 두께 제한을 고려하여 두께를 9 mm 이내로 설정하였으며, 3.33 μm 크기의 화소를 기반으로 높은 수광량과 소형화의 장점을 가진 5MP 1/2.36" 이미지 센서에 대응하는 것을 목표로 두었다. 4개의 비구면 렌즈를 추가해 총 8개의 비구면 렌즈와 1개의 미러를 사용하여 EFL(effective focal length) 50 mm를 확보하였고 FOV(field of view)는 12°로 설정한 후 촬영된 사진에서

Table 1. Target specifications of folded telephoto camera lens

Parameter	Value	
Wavelength	656–486 nm (visible range)	
Field of View	12°	
Effective Focal Length	50 mm	
Width	> 9 mm	
Sensor	Type	$\leq 1/2.36"$, ≥ 5 MP
	Pixel Size	$\leq 3.33 \mu\text{m}$
Modulation Transfer Function	> 20% (150 lp/mm)	
Distortion	$\leq 1\%$	

사람의 눈이 감지할 수 없는 수준의 왜곡수차량인 1% 이내의 왜곡수차를 만족하도록 하여 이미지 왜곡을 최소화하도록 하였다. 또한 MTF를 광학계가 목표로 한 화소에 적용될 수 있도록 150 lp/mm의 모든 field에서 20% 이상을 만족하도록 설정하였다. 파장은 실제 광원 조건을 고려하여 Fraunhofer C, d 및 F-line인 656.28 nm, 587.56 nm, 486.13 nm을 사용하여 설계를 진행하였다.

결과 및 고찰

1. 최종 설계 결과

본 연구에서는 접이식 망원 카메라의 광학계를 설계하였으며, 최종적으로 설계된 접이식 망원 카메라 광학계의 구성도를 Fig. 1에서 나타내었다. 설계 과정에서 4개의 비

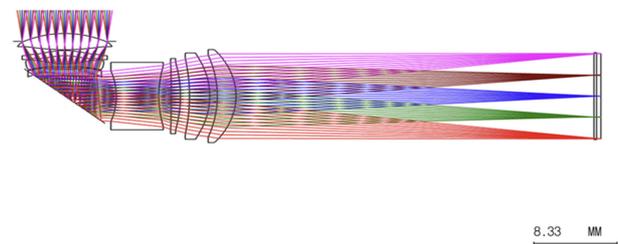


Fig. 1. Layout of optimized folded telephoto camera lens.

Table 2. Design data of the optimized folded telephoto camera lens

Surface	Radius	Thickness	Index	Abbe #
Stop	-	-0.963	-	-
1	6.248	1.977	1.487	70.4
2	-8.902	0.100	-	-
3	4.472	0.615	1.646	34.6
4	3.489	0.986	-	-
5	-3.340	0.422	1.695	48.1
6	-8.900	0.241	-	-
7	-9.669	0.491	1.754	28.1
8	-8.585	2.774	-	-
Mirror	-	-4.250	-	-
9	10.598	-3.490	1.750	32.3
10	-18.728	-1.029	-	-
11	146.436	-0.742	1.501	62.8
12	21.486	-0.751	-	-
13	30.054	-1.662	1.650	55.0
14	12.184	-0.622	-	-
15	16.575	-1.536	1.681	35.9
16	10.045	-29.440	-	-
Filter	-	-0.210	1.520	64.2
	-	-0.350	-	-
Image	-	-	-	-

Table 3. Aspheric coefficients for the optimized folded telephoto camera lens

#	4 th (A)	6 th (B)	8 th (C)	10 th (D)
1	4.05E-05	-2.47E-05	1.64E-05	-4.58E-06
2	8.06E-03	-1.96E-03	3.59E-04	-4.94E-05
3	-3.27E-03	-3.21E-04	-3.04E-04	3.99E-05
4	-1.43E-02	1.14E-03	-1.36E-03	3.49E-04
5	3.34E-02	-3.76E-03	2.80E-05	5.55E-05
6	1.49E-02	5.28E-03	-1.75E-03	1.65E-04
7	-1.19E-02	1.13E-02	-3.06E-03	5.55E-04
8	7.41E-04	4.14E-03	-1.01E-03	1.80E-04
9	5.57E-05	-8.73E-06	-5.40E-07	6.02E-09
10	-1.61E-05	4.29E-06	1.88E-07	-7.01E-10
11	3.98E-05	-2.37E-06	-1.33E-07	-1.56E-09
12	-4.04E-05	1.31E-06	8.52E-08	9.84E-10
13	1.08E-05	-1.20E-07	-2.05E-08	-3.31E-10
14	3.99E-05	-4.05E-07	-1.82E-09	2.38E-10
15	-3.92E-05	5.69E-07	6.67E-09	-1.93E-10
16	4.99E-05	-9.77E-07	-2.30E-08	-9.22E-11

구면 렌즈를 순차적으로 배치한 후 1개의 미러를 사용하여 광로를 기울이는 방식을 채택함으로써 전체 광학계의 두께가 효율적으로 감소하였다. 이후 4개의 비구면 렌즈를 사용하여 초점거리와 이미지 센서의 크기를 고려한 최적화된 광학 성능을 구현하였으며, 설계 제원 및 비구면 계수의 값을 Table 2와 Table 3에서 나타내었다. 최적화 설계한 광학계의 EFL은 49.2775 mm로 목표 값인 50 mm에 매우 근접하게 설계되었으며 전체 광학계의 두께는 약 8.6 mm로 목표한 설계 조건을 충분히 만족하였다. 이는 설계된 광학계가 망원 기능을 갖추고 있으며 모바일 기기에 적합함을 보여준다.

본 연구에서 설계한 광학계의 성능을 정량적으로 평가하고, 그 결과를 바탕으로 광학계가 제시된 목표 사양을

만족하는지 확인하고자 distortion, MTF, spot diagram을 분석하였다.

2. Distortion 분석 및 평가

Fig. 2에서 설계한 광학계의 왜곡수차량을 나타내었다. 왜곡수차는 모든 field에서 약 0.3% 이하의 수준으로 목표 값인 1%보다 매우 낮은 우수한 결과를 보여주었다. 김 등^[10]의 연구에 따르면 왜곡수차가 모든 field에서 1% 이내를 만족하여 주변부 상에 발생하는 왜곡을 광학적으로 보정함으로써 소프트웨어 보정에 소모되는 전력을 줄일 수 있다는 연구가 있었다. 또한, 설계된 광학계의 왜곡 격자 무늬가 거의 직선에 가까운 형태를 보이며 기하학적 왜곡이 매우 작다는 것을 시각적으로 확인할 수 있다. 따라서 본 광학계는 왜곡이 최소화되어 일관되고 정확한 이미지를 형성할 수 있을 것이며, 고해상도 이미지가 요구되는 응용 분야에 적합한 성능을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

3. MTF 분석 및 평가

설계한 광학계의 MTF 특성 곡선을 Fig. 3에서 나타내었다. 분석 결과, 150 lp/mm에서 nyquist frequency의 20% 이상의 MTF 값을 보여 목표 성능을 충족하며 우수한 해상력을 가지는 것을 확인할 수 있었다. Sun 등^[11]의 연구에서 제시한 스마트폰용 접이식 광학계와 동일한 초점거리 및 공간 주파수 조건에서 본 설계는 약 10% 개선된 성능을 보였다. 본 결과는 광학계의 공간 주파수 특성을 정량적으로 평가하여 해상력을 검증했음을 보여주며 설계한 광학계가 다양한 응용 분야에 적합하고 선명한 이미지를 제공할 수 있음을 의미한다.

4. Spot diagram 분석 및 평가

Fig. 4에서 설계된 광학계의 spot diagram을 나타내었다.

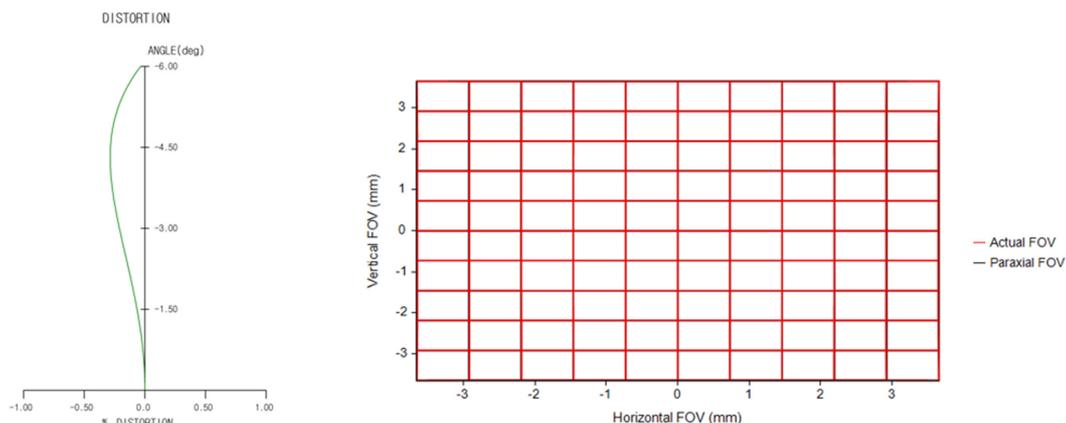


Fig. 2. Distortion (%) and distortion grid of optimized folded telephoto camera lens.

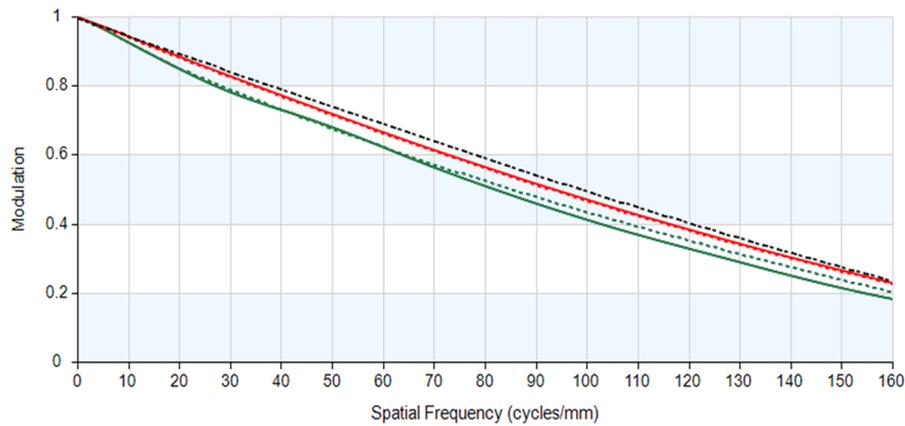


Fig. 3. MTF characteristics of optimized folded telephoto camera lens.

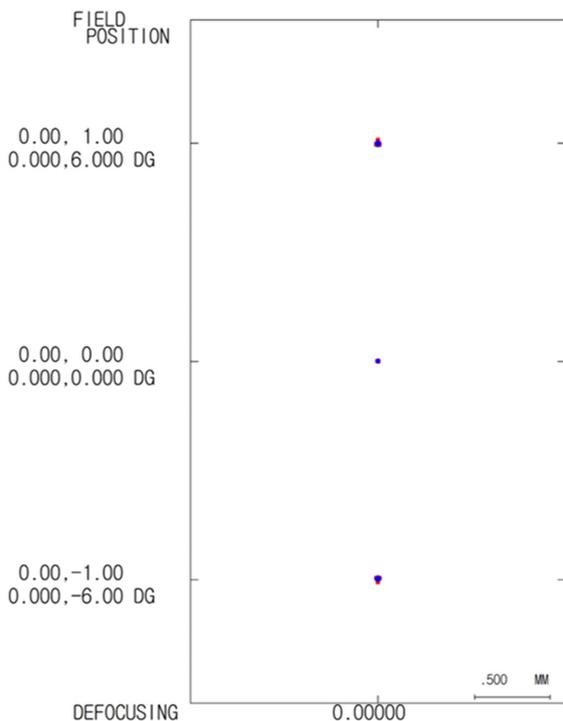


Fig. 4. Spot diagram of optimized folded telephoto camera lens.

점 상이 작고 원형에 가까운 형태를 보이며 비대칭성이 거의 관찰되지 않아 코마수차가 적음을 확인하였으며, 높은 선예도를 가지는 것을 확인하였다. 본 결과에서 광학계의 결상 성능을 시각적으로 확인하여 설계된 광학계가 축상에서 왜곡 없이 선명한 점 이미지를 형성할 수 있는 결상 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

제시된 설계 사양 및 조건을 바탕으로, 모바일 기기의 두께를 고려하여 접이식 망원 카메라 광학계를 설계하였으며, 설계된 광학계의 왜곡수차, MTF, spot diagram을 분석한 결과, 목표로 한 광학적 성능에 도달한 것을 확인하였다. 본 연구 결과는 설계된 광학계가 다양한 광학시스

템에 적용될 수 있는 가능성을 보여주며 향후 고성능 광학계 개발에 도움이 될 수 있을 것이라 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 목표한 설계 사양 및 조건을 충족하는 접이식 망원 카메라 광학계를 설계함으로써 모바일 기기의 슬림화와 고성능 카메라 구현이라는 상반된 요구를 동시에 만족시키는 설계안을 제시하였다. 최근 모바일 기기 시장에서 슬림화에 대한 요구와 접이식 카메라 렌즈에 대한 수요가 증가하고 있어 소형화와 고성능이라는 상반된 요구를 동시에 만족시키는 광학계 설계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 모바일 기기의 한정되어 있는 두께에 초점거리가 상대적으로 긴 망원 렌즈를 적용하기에는 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 총 8개의 비구면 렌즈와 1개의 미러로 구성된 접이식 망원 카메라 렌즈를 설계하였다. 본 광학계는 모바일 기기에 목적을 두었지만 안경, 안광학기기 등 소형 광학계가 요구되는 장치에 적용 가능한 작은 크기의 구성으로 전체적인 기기의 크기를 줄이는데 도움이 될 수 있으며 가볍고 범용으로 사용 가능한 제품 개발에 사용되어 향후 다방면으로 적용 될 수 있을 것이라 사료된다. 향후 연구에서는 실제 광학 시스템에 적용하여 성능을 검증하고, 다양한 파장 및 온도 조건에서의 성능 변화를 분석하여 광학계의 신뢰성을 확보하는 연구가 필요할 것이며, 광학계의 제작 공차를 고려한 성능 분석을 수행하여 실제작 시 발생할 수 있는 성능 저하를 개선하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] The Scoop. Is it a smartphone or a camera that I bought, 2023. <https://www.thescoop.co.kr/news/articleView.html?>

- idxno=57493(11 December 2024).
- [2] Jeong HJ. Optical system design for mobile camera phone using free shaped prism. MS Thesis. Dankook University, Seoul. 2005;12-44.
- [3] Park YC, Joo JY, Lee JH. Slim mobile lens design using a hybrid refractive/diffractive lens. Korean J Opt Photon. 2020; 31(6):281-289. DOI: <https://doi.org/10.3807/KJOP.2020.31.6.281>
- [4] Lee J. A study on the design of a mobile slim optical system applied with a super-large sensor and the improvement of the relative illumination. MS Thesis. Yonsei University, Seoul. 2023;4-68.
- [5] Ryu JM. Focus-adjustment method for a high-magnification zoom-lens system. Korean J Opt Photon. 2023;34(2): 66-71. DOI: <https://doi.org/10.3807/KJOP.2023.34.2.066>
- [6] Yedid I. The Evolution of Zoom Camera Technologies in Smartphones, 2017. https://corephotonics.com/wp-content/uploads/2021/10/Corephotonics-White-Paper_The-Evolution-of-Zoom-Camera-Technologies-in-Smartphones_Aug-2017.pdf(24 August 2024).
- [7] Oh Y. A study on optical design for folded telephoto systems for mobile cameras. MS Thesis. Yonsei University, Seoul. 2024;4-80.
- [8] Rim CS. Design of smart phone camera lens using forbes aspherical surface. Korean J Opt Photon. 2017;28(4):141-145. DOI: <https://doi.org/10.3807/KJOP.2017.28.4.141>
- [9] Shabtay G, Goulinski N, Goldenberg E, et al. Compact Folded Tele Cameras. U.S. Patent 0126051, 2023.
- [10] 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>
- [11] Sun WS, Liu YH, Tien CL. Optical design of a miniaturized 10× periscope zoom lens for smartphones. Micromachines. 2023;14(6):1272. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi14061272>

모바일 기기용 접이식 망원 카메라 렌즈 광학계 설계

최동석¹, 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 9월 26일)

목적: 본 연구에서는 모바일 기기의 카메라에서 소형화와 고성능화를 동시에 만족시키는 광학계 개발이 요구됨에 따라 8매의 비구면 렌즈와 1매의 미러를 사용하여 모바일 기기용 접이식 망원 카메라 렌즈를 설계하고자 한다. **방법:** 결상 광학계 설계는 문헌 및 특허 등에서 보고된 선행 설계 사양 분석을 통해 광학계의 구조를 결정하여 목표 사양을 설정 후 설계하였다. 이후, 설계한 광학계의 성능 평가는 렌즈 설계 소프트웨어를 이용한 광학 시뮬레이션을 통해 진행하였고 distortion, MTF 및 spot diagram을 분석하여 광학계의 성능을 평가하였다. **결과:** 모바일 기기용 접이식 망원 카메라는 약 50 mm의 유효초점거리를 가지며 모바일 기기의 두께를 고려하여 9 mm 이내의 두께로 설계되었다. 화각 12°의 field에서 왜곡수치는 full field에서 0.3% 이내의 결과를 보여 주변부 상의 왜곡이 감소되었고, MTF는 150 lp/mm에서 20% 이상으로 나타나며 안정된 성능을 보였다. **결론:** 모바일 기기에 적용 가능한 접이식 망원 카메라 렌즈를 설계하였다. 설계된 광학계는 긴 초점거리를 확보하며 광축의 변화에 따른 수차 발생 문제를 최소화하였다. 이에 따라 향후 모바일 기기뿐만 아니라 다방면으로 적용되어 소형화 및 고성능에 도움이 될 수 있을 것이라 사료된다.

주제어: 모바일 카메라, 접이식 망원 카메라, 망원 카메라, 광학 설계