

Slim Mobile Lens Design Using a Hybrid Refractive/Diffractive Lens

Yong Chul Park^{1,2}, Ji Yong Joo¹, and Jun Ho Lee^{1†}

¹Department of Optical Engineering, Kongju National University, 1223-24, Cheonan-daero, Seobuk-gu, Cheonan 31080, Korea

²R&D Center, Koh Young Technology, 18, Po Eun-daero 59beon-gil, Suji-gu, Yongin 16864, Korea

(Received September 24, 2020; Revised October 8, 2020; Accepted October 9, 2020)

This paper reports a slim mobile lens design using a hybrid refractive/diffractive optical element. Conventionally a wide field of view (FOV) camera-lens design adopts a retrofocus type having a negative (-) lens at the forefront, so that it improves in imaging performance over the wide FOV, but with the sacrifice of longer total track length (TTL). However, we chose a telephoto type as a baseline design layout having a positive (+) lens at the forefront, to achieving slimness, based on the specification analysis of 23 reported optical designs. Following preliminary optimization of a baseline design and aberration analysis based on Zernike-polynomial decomposition, we applied a hybrid refractive/diffractive element to effectively reduce the residual chromatic spherical aberration. The optimized optical design consists of 6 optical elements, including one hybrid element. It results in a very slim telephoto ratio of 1.7, having an *f*-number of 2.0, FOV of 90°, effective focal length of 2.23 mm, and TTL of 3.7 mm. Compared to a comparable conventional lens design with no hybrid elements, the hybrid design improved the value of the modulation transfer function (MTF) at a spatial frequency of 180 cycles/mm from 63% to 71-73% at zero field (0 F), and about 2-3% at 0.5, 0.7, and 0.9 fields. It was also found that a design with a hybrid lens with only two diffraction zones at the stop achieved the same performance improvement.

Keywords: Hybrid lens, Diffractive optical element, Lens design, Mobile lens

OCIS codes: (050.1965) Diffractive lenses; (220.1000) Aberration compensation; (220.2740) Geometric optical design; (080.4225) Nonspherical lens design

굴절/회절 하이브리드 렌즈 적용 슬림 모바일 렌즈 설계

박용철^{1,2} · 주지용¹ · 이준호^{1†}

¹공주대학교 기하광학연구소

☎ 31080 충청남도 천안시 서북구 천안대로 1223-24

²고영테크놀로지 R&D 센터

☎ 16864 경기도 용인시 수지구 포은대로59번길 18

(2020년 9월 24일 받음, 2020년 10월 8일 수정본 받음, 2020년 10월 9일 게재 확정)

본 논문은 하이브리드 굴절/회절광학소자를 이용한 초슬림 모바일 카메라 렌즈를 보고한다. 먼저 앞서 보고된 23개의 광학 설계 사양 분석을 통해 전장길이(total track length) 최소화를 위하여, 광시야 렌즈 설계에서 일반적으로 적용되는 음(-)의 렌즈를 제1렌즈로 사용하는 리트로포커스(retrofocus) 타입이 아닌, 양(+의) 렌즈가 제일 먼저 선행하는 텔레포토(telephoto) 타입을 선택하였다. 이후 초기 최적 설계 및 제르니케 다항식 기반 수차 분석을 통한 보정 설계를 진행하였으며, 보정 설계 과정에서 잔여 구면색수차(chromatic spherical aberration)의 효과적 제거를 위하여 굴절 및 회절이 결합된 하이브리드 렌즈 1매를 적용하였다. 적용된 최종 설계는 하이브리드 렌즈 1매 포함 총 6매의 렌즈를 이용하여 F/2.0, 화각 90°, 유효초점길이 2.23 mm, 전장길이 3.7 mm를 달성하였고, 결과적으로 1.7의 낮은 전장길이 대 초점길이 비 즉, 텔레포토비(telephoto ratio)를 달성하였다. 동일 전장길이를 갖는 하이브리드 렌즈 미적용 비교 설계 대비, 공간주파수 180 cycles/mm에서 MTF 값이 중심 시야에서는 63%에서 71~73%로 약 8~10% 개선되었고, 0.5, 0.7, 0.9 시야에서도 2~3% 개선되었다. 또한, 가공성 및 회절 패턴에 의한 산란 등을 고려하였을 때 조리개에 위치한 렌즈가 하이브리드 렌즈로 적절함을 알 수 있었고, 이 경우 2개의 회절존으로도 성능 개선이 확인되었다.

Keywords: 하이브리드 렌즈, 회절광학소자, 렌즈 설계, 모바일 렌즈

OCIS codes: (050.1965) Diffractive lenses; (220.1000) Aberration compensation; (220.2740) Geometric optical design; (080.4225) Nonspherical lens design

[†]E-mail: jhlsat@kongju.ac.kr, ORCID: 0000-0002-4075-3504

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

최근 스마트폰, 전방시현기, 웨어러블 장치, 가상/증강현실 장치 등 다양한 분야에서 광학 카메라 렌즈가 요구되고 있다. 최근 요구되는 렌즈는 고분해능, 낮은 F/수, 넓은 시야(field of view, FOV) 및 소형화 등으로 특징될 수 있으며, 특히 모바일 카메라 렌즈의 경우 밝기 및 영상 품질의 척도인 F/수가 점점 작아짐과 함께 소형화 또는 경박화에 대한 요구가 강조되고 있다. 이러한 요구에 대응하기 위하여 다양한 기법 및 기술들이 연구 및 적용되고 있으며, 이 중 하이브리드 렌즈의 적용에 대한 요구도 증가하고 있다.

하이브리드(hybrid) 렌즈는 유리와 플라스틱, 유리와 자외선 경화 수지 등 서로 다른 이종의 재료가 결합된 렌즈를 의미^[1]하기도 하지만, 본 논문에서는 서로 다른 광학 현상을 이용한다는 의미로 일반 굴절 렌즈에 회절광학소자(diffraction optical element, DOE)를 추가하여 굴절 현상과 회절 현상을 동시에 사용하는 비구면 렌즈를 말한다^[2]. 하이브리드 렌즈는 넓은 의미에서 회절광학소자의 한 종류로 보기도 한다. 그림 1에 하이브리드 렌즈의 측면 및 정면을 보여주고 있으며, 측면 단층 구조 및 정면 동심원은 회절 소자의 회절 존을 보여주고 있다.

하이브리드 렌즈에 적용된 굴절 소자 및 회절광학소자는 파장 대비 각 반대 방향의 색퍼짐(분산)을 갖고 있어, 하이브리드 렌즈는 색퍼짐 상쇄 즉, 몰색화 설계 적용에 용이하다는 장점이 있다^[2]. 그림 2는 일반 굴절 렌즈, 회절광학소자 및 하이브리드 렌즈의 색퍼짐 현상을 개념적으로 보이고 있

다. 본 논문에서 적용된 예와 같이 회절 존의 수가 5개 미만인 경우, 회절에 의한 고차 발생 및 이에 따른 광 손실은 무시될 수 있다^[3].

이러한 하이브리드 렌즈를 기존 광학계에 적용하면, 수차 개선, 온도 변화에 대한 민감도 감소, 광학계의 소형화/경량화/경박화/저가화가 가능해진다. 이러한 특징을 이용하여, 렌즈의 고가의 이상 저분산 유리 대체 f/4 망원 렌즈 설계^[4], 초경박 f/4 디지털 스틸 카메라 설계^[5], HUD 소형화 설계^[6], 초소형 f/2.2 카메라 렌즈^[7] 등이 보고되었다. 더 나아가 온도 변화에 따른 적외선 카메라 성능 유지 설계 즉 비열화 설계에의 적용^[8,9], 회절광학소자 및 파면 코딩(wavefront coding) 기법을 적용한 모바일 렌즈의 소형화^[10] 및 가시광 영역(450~700 nm)의 모든 대역에서 색지움을 구현한 슈퍼몰색렌즈(super-achromatic)도 최근 보고되었다^[11].

본 논문에서는 f/2.0 및 화각 90°을 갖는 모바일 카메라 렌즈의 전장 길이(total track length, TTL) 최소화를 위한 하이브리드 렌즈의 적용 연구를 보고한다.

II. 일반 비구면 설계

2.1. 설계 사양

요즘 휴대폰에는 와이드 카메라, 울트라 와이드 카메라, 텔레포토 카메라 등 복수의 카메라가 탑재되어 있으며, 각 카

Table 1. Lens specifications

Item	Specification	Note	
Optical format	1/4"		
F#	2.0		
Telephoto ratio	<1.7		
Flange back length	0.6 mm		
Field of view	>90°		
MTF	Center	>65%	0.0 F
	0.5 field	>50%	0.5 F
	0.7 field	>40%	0.7 F
	0.9 field	>20%	0.9 F
	[cycles/mm]	180	
Relative illumination	>50%	0.7 F	
Chief ray angle	<35.0°	1.0 F	

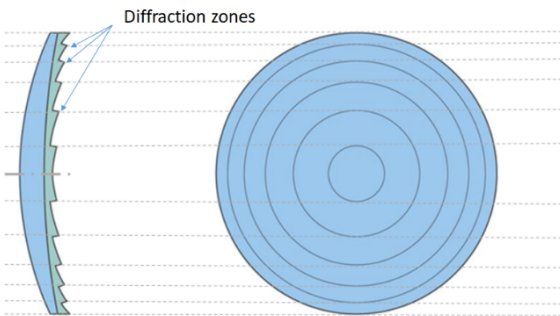


Fig. 1. Side and front views of a hybrid refractive-diffractive optical element: Each circle represents a diffraction zone.

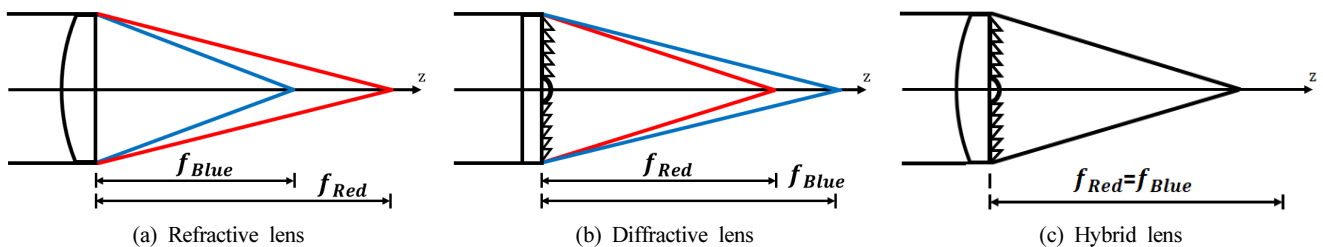


Fig. 2. Chromatic dispersion of refractive, diffractive and hybrid lens: f_{Blue} and f_{Red} are the focal lengths at a blue and red wavelength, respectively.

메라는 타입에 따라 F/수 및 화각(FOV)의 차이는 있으나, 대략적으로 F/수는 1.8~2.4 정도이며, 화각은 70~120°의 범위를 갖는다^[12,13]. 본 논문에서는 현재 핸드폰에 적용되는 다양한 카메라 사양과 함께 전장 길이 최소화라는 목표를 고려하여 표 1과 같이 설계 사양을 결정하였다. MTF (modulation transfer function) 및 중심대비주변밝기 등의 이미지 품질 지표는 카메라 수요 업체와의 논의를 통해 결정하였다. 이중 텔레포토비(telephoto ratio, TR, 망원비)는 광학계의 경박화(compactness) 수준을 나타내는 지표로^[14] 식 (1)로 표현된다.

$$TR = L/F \tag{1}$$

여기서 L 은 광학계 전장 길이(TTL), F 는 유효초점길이(EFL)이다.

2.2. 사양 분석

렌즈 타입 및 구성 배치를 결정하는 사양으로는 F/#와 시야각(FOV)이 가장 많이 사용된다^[14]. 이는 자이텔 수차의 F/# 및 시야각 다항식 기반 의존성에 기인한 것으로 판단될 수 있다^[15]. 이에 더하여, 본 논문에서 가장 관심있는 경박화를 판단하기 위하여 2.1에서 언급한 텔레포토비(TR)도 주요 판단 지수로 추가하였다.

일반적으로 $TR < 1$ 즉, 유효초점길이보다 광학계 길이가

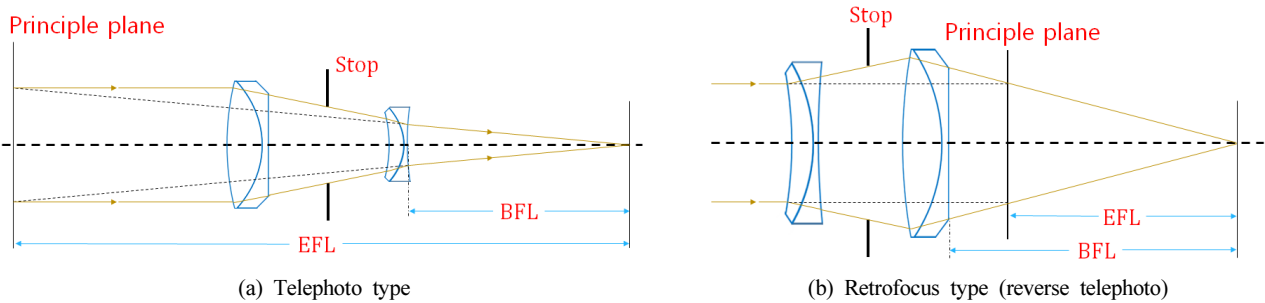


Fig. 3. Telephoto type vs Retrofocus type: BFL = back focal length, EFL = effective focal length.

Table 2. Lens construction

No	Type	# of lens	Configuration	Reference
1	Tele-photo	2	S (+) (+)	US Patent No 8,654,454 (2014) ^[16]
2		2	S (+) (-)	KR Patent No 1020030017602 (2003) ^[17]
3		3	(+) S (+) (-)	Appl Opt, 31, 365-369 (2010) ^[18]
4		3	(+) S (+) (-)	KR Patent No 1020090041342 (2009) ^[19]
5		4	S (+) (-) (+) (-)	Appl Sci 6, 1160-1165 (2013) ^[20]
6		4	S (+) (-) (+) (-)	Proc IEEE IMCCC '13, 569-573 (2013) ^[21]
7		4	S (+) (-) (+) (-)	Appl Opt, 31, 34-38 (2010) ^[22]
8		4	S (+) (-) (+) (-)	Proc Soc Korea 32, 17-18 (2007) ^[23]
9		4	S (+) (-) (+) (-)	US Patent No 0135743 (2005) ^[24]
10		4	S (+) (-) (-) (+)	US Patent No 7643225 (2010) ^[25]
11		4	S (+) (-) (+) (+)	J Kor Oph Opt Soc. 18, 503-507 (2013) ^[26]
12		4	S (+) (-) (+) (-)	US Patent No 7345830 (2006) ^[27]
13		4	(+) S (-) (+) (-)	KR Patent No 1020100014742 (2010) ^[28]
14		5	(+) S (-) (+) (+) (-)	US Patent No 9772472 (2016) ^[29]
15		5	(+) S (-) (+) (-) (+)	US Patent No 20120147482 (2011) ^[30]
16		5	S (+) (-) (-) (-) (+)	US Patent No 20130182335 (2012) ^[31]
17		5	S (+) (-) (-) (-) (-)	US Patent No 8817393 (2013) ^[32]
18		5	S (+) (-) (-) (+) (+)	US Patent No 8411376 (2011) ^[33]
19		7	S (+) (-) (+) (-) (-) (+) (-)	US Patent No 20140139719 (2013) ^[34]
20	Retro-focus	3	(-) S (+) (-)	US Patent No 7099092 (2005) ^[35]
21		4	(-) S (+) (+) (-)	KR Patent No 1020130113173 (2013) ^[36]
22		5	(-) (+) S (+) (-) (-)	US Patent No 7538958 (2007) ^[37]
23		6	(-) (-) (-) S (+) (+) (+)	CN Patent No 102778745 (2012) ^[38]

구면 상수, a_{2n} 은 다항식(r^{2n}) 계수이다.

최적 설계된 초기 설계의 광선추적도와 광학 설계 데이터를 표 3 및 그림 5에 정리하여 놓았다. 초기 설계는 중심 시야 MTF 조건이 2% 부족한 점을 제외하곤 표 1의 정리된 설계 요구 조건이 모두 달성되었다. 그림 6(a)는 각 0, 0.5, 0.7, 0.9 시야에서의 MTF를 보여주고 있으며, 그림 6(b)는 5개의 설계 기준 파장에서의 상면 만곡 및 왜곡을 보여주고 있다.

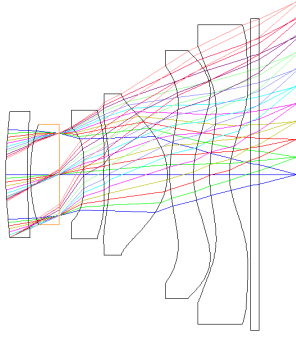
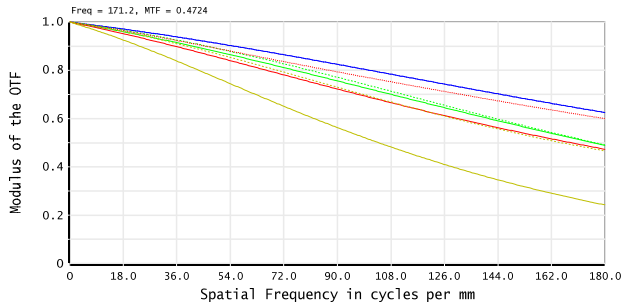
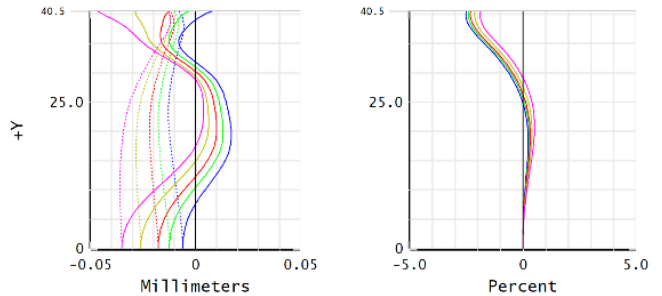


Fig. 5. Preliminary lens design using only conventional even aspheric optical surfaces.



(a) Panchromatic MTF



(b) Field curvature & distortion

Fig. 6. Optical performances of the preliminary lens design in Table 3 and Fig. 5.

Table 4. Zernike polynomial coefficients of the preliminary lens design in Table 3

No	Polynomial	0 field			0.7 field		
		436 nm	546 nm	656 nm	436 nm	546 nm	656 nm
Z4	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	0.165	-0.003	-0.111	0.004	0.014	-0.025
Z5	$\sqrt{6}\rho^2 \sin(2\theta)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z6	$\sqrt{6}\rho^2 \cos(2\theta)$	0.000	0.000	0.000	0.015	0.020	0.007
Z7	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin(\theta)$	0.000	0.000	0.000	-0.078	-0.012	0.006
Z8	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos(\theta)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z9	$\sqrt{8}\rho^3 \sin(3\theta)$	0.000	0.000	0.000	-0.022	0.018	0.026
Z10	$\sqrt{8}\rho^3 \cos(3\theta)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z11	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	-0.022	0.016	0.023	-0.049	-0.023	-0.013
Z12	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos(2\theta)$	0.000	0.000	0.000	-0.029	-0.018	-0.013
Z13	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin(2\theta)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z14	$\sqrt{10}\rho^4 \cos(4\theta)$	0.000	0.000	0.000	-0.026	-0.016	-0.012
Z15	$\sqrt{10}\rho^4 \sin(4\theta)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

III. 하이브리드 렌즈 적용 설계

3.1. 수차 분석

파면 수차 $W(\rho, \theta)$ 는 제르니케 다항식의 합으로 표현하는 제르니케(Zernike) 다항식으로 표현될 수 있다.

$$W(\rho, \theta) = \sum b_i Z_i(\rho, \theta) \quad (3)$$

여기서 Z_i , b_i 는 i 번째 제르니케 다항식 및 이때의 계수이다^[39]. 2.3에서 제시된 초기 설계의 파면 수차 제르니케 계수 값을 표 4에 정리하여 놓았다. 표 4의 값으로부터 설계 개선을 위해서는 우선적으로 파장에 따른 Z_4 및 Z_{11} 의 변화 즉, 횡색수차 및 구면색수차(chromatic spherical aberration)의 제거가 필요하다.

선행 연구^[2,47]에 따르면, 기존 광학면에 회절소자를 추가하면, 추가된 회절소자는 일반 굴절 렌즈 분산(V_{ref})과는 반대 방향의 색퍼짐(V_{diff})을 가진다.

$$V_{ref} = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} > 0 \quad (4)$$

$$V_{diff} = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C} < 0 \tag{5}$$

여기서 F , d , C 는 각 파장 486.1, 587.6, 656.3 nm을 의미한다. 앞서 언급된 잔여 색수차 및 구면 색수차 제거를 위하여 하이브리드 렌즈 즉, 회절소자의 추가 적용을 고려하였다.

3.2. 설계 결과

회절광학소자(DOE)의 설치 위치는 각 면의 수차 발생 형태를 고려하여, DOE가 조리개에 해당하는 2번 렌즈 뒷면에 설치되는 경우와 굴절능이 가장 많이 발생하는 4번 렌즈 뒷면에 설치하는 2가지 경우를 고려하였다. 각 설치되는 회절소자는 회전대칭 위상함수 $\phi(r)$ 로 표현되면, 다음과 같이 주어진다^[40].

$$\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sum_{n=1}^{\infty} c_n r^{2n} = \frac{2\pi}{\lambda_0} (c_1 r^2 + c_2 r^4 + c_3 r^6 + c_4 r^8 + \dots) \tag{6}$$

정의된 위상함수는 광학 해석 및 제작 시 실제 적용은 기준 파장(λ_0) 대비 모듈리(modulo)를 적용한 키노폼(kinoform)으로 적용된다.

최종 설계 진행된 설계 결과를 표 5, 그림 7 및 8에 정리하여 놓았다. 그림 7은 최종 설계된 2가지 경우의 최종 설계 광선 추적도를 보여주고 있으며, 각 설계된 경우의 위상함수 계수 및 키노폼 형상을 표 5 및 그림 8에 표현하였다.

DOE 적용 2종 설계에 대한 비교 성능을 그림 9 및 10과 표 6에 정리하여 놓았다. DOE 적용 2종 설계는 위치와 상관없이 모두 일반 비구면 초기 설계에 비하여, 중심 MTF 성능이 8~10% 향상된 것으로 확인되었다. DOE 2종을 비교하면, 4번 렌즈 후면(8번면)에 위치한 경우가 조리개에 DOE가 설치된 경우에 비하여 2% 정도 다소 중심 MTF 값이 높았다. 이는 조리개 위치에 DOE가 위치한 경우, 이 DOE는 모든 시야에 동일한 수차 보정 기능을 갖게 되어, 시야 전체에 균형된 보정 설계가 된다. 반면, 조리개와 떨어진 4번째 렌즈에 DOE를 설치하는 경우, 일정 수준의 시야별 설계 자유도를

Table 5. Parameters for defining DOE phase functions

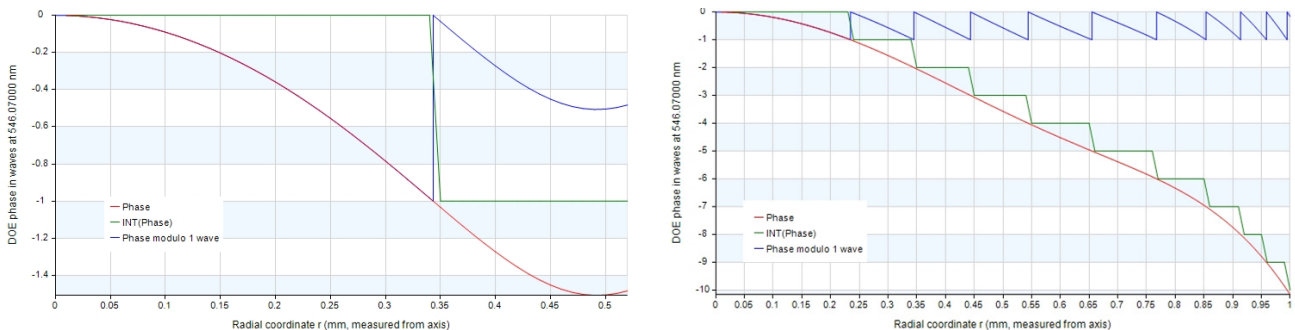
Case	DOE location	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
1	S4	-0.00496	0.00129	0.00477	0.04755	0.17044	0.10287	-1.87728
2	S8	-0.01059	0.01247	-0.00381	-0.00664	0.00287	0.00026	-0.00012



(a) DOE is at the rear surface of the 2nd lens (S4)

(b) DOE is at the rear surface of 4th lens (S8)

Fig. 7. Ray tracing of the two optimized hybrid designs.



(a) DOE is at the rear surface of the 2nd lens (S4)

(b) DOE is at the rear surface of 4th lens (S8)

Fig. 8. Phase functions of the added diffractive optical element.

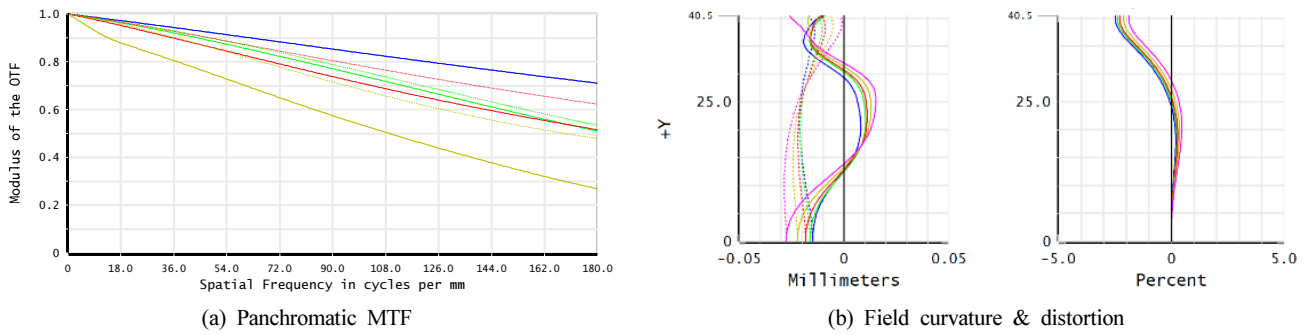


Fig. 9. Optical performances of the hybrid lens design with a DOE at the rear surface of the 2nd lens (S4).

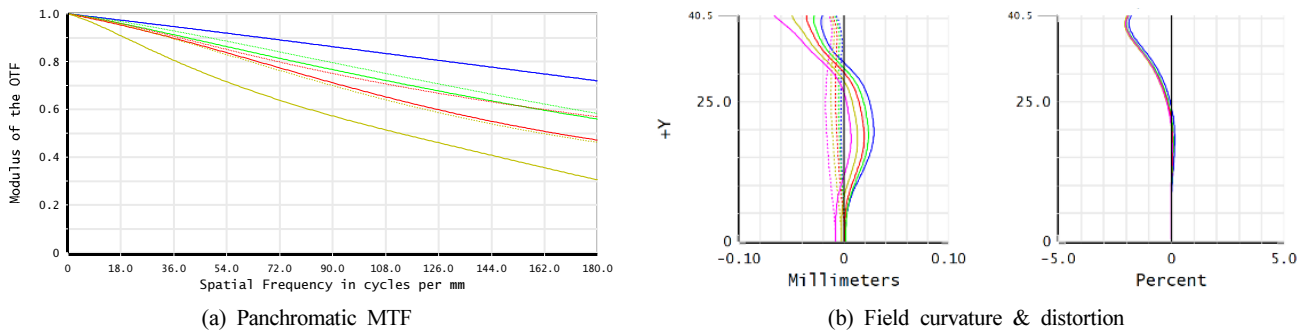


Fig. 10. Optical performances of the hybrid lens design with a DOE at the rear surface of the 4th lens (S8).

Table 6. Performance comparison

Item	Specification	Conventional		DOE at S4		DOE at S8		Note
Optical format	1/4"	1/4"		1/4"		1/4"		
F#	2.0	2.0		2.0		2.0		
Telephoto ratio	<1.7	1.7		1.7		1.7		
Flange back length	0.6 mm	0.6 mm		0.6 mm		0.6 mm		
Field of view	>90°	90°		90°		90°		
MTF	Center	>65%		63%		71%		0.0 F
	0.5 field	>50%	52% (T) 54% (S)	52% (T) 57% (S)	52% (T) 57% (S)	52% (T) 57% (S)	0.5 F	
	0.7 field	>40%	45% (T) 59% (S)	49% (T) 59% (S)	45% (T) 53% (S)	45% (T) 53% (S)	0.7 F	
	0.9 field	>20%	23% (T) 34% (S)	27% (T) 34% (S)	29% (T) 31% (S)	29% (T) 31% (S)	0.9 F	
	[cycles/mm]	180						
Relative illumination	>50%	51.5%		50.0%		52.5%		0.7 F
Chief ray angle	<35.0°	32°		32°		32°		1.0 F

갖게 되어 전체적으로 시야별 개선 성능을 갖는다. 결과적으로, 후자가 전자보다 중심 시야에서 약 2%의 MTF 추가 개선 효과가 있다. 다만, 이를 위하여 회절 존의 수가 2개에서 10개로 증가한다. 이를 고려하면, 회절 소자의 제작성면에서는 조리개 위치에 DOE를 설치한 설계가 좀 더 우수한 접근으로 보인다.

여기서, 설계된 하이브리드 설계는 모두 10개 미만의 회절 존으로 구성되며, 특히 DOE가 조리개에 위치한 설계는 2개의 회절 존으로 구성된다. 이 경우, DOE의 광학 기능은 회절보다는 키노폼(kinofom) 굴절을 이용하는 프레넬(Fresnel)

렌즈에 가깝다⁴¹⁾. 이 경우, 광 손실은 회절에 따른 손실보다는 키노폼 에지(edge)에 의해 발생하는 광손실이 주를 이룬다¹³⁾. 또한, 카메라 렌즈 설계 시 중요한 분석 중의 하나는 고스트(ghost) 분석이다. 그림 11은 2개 설계에 대해 1° 입사빔에 대한 상면에서의 방사 조도(irradiance)를 보여주고 있다. 고스트 패턴의 약한 신호 모양을 표현하기 위하여 Log scale로 표현하였다. 해석 결과, 최대 세기의 고스트 패턴은 각 상대 밝기 4.4×10^{-3} 및 4.3×10^{-3} 로 고스트 효과도 무시할 수준으로 판단된다.

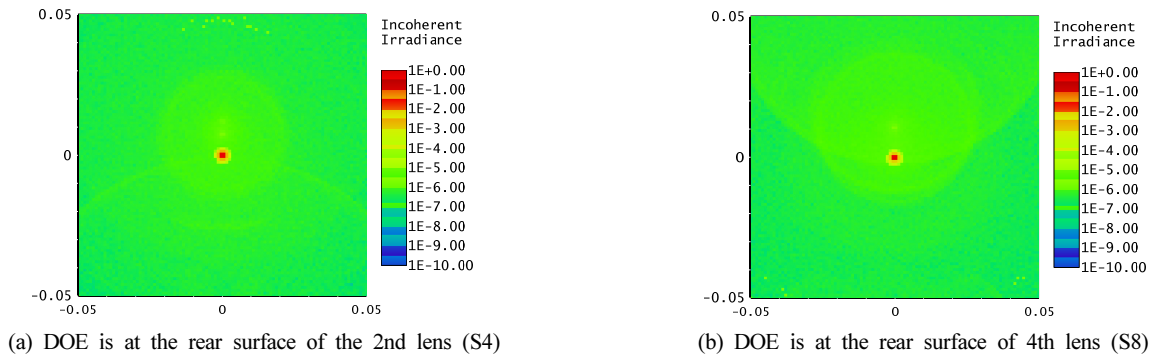


Fig. 11. Ghost analysis of the two optimized hybrid designs plotting the normalized irradiances of $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ area.

IV. 결 론

본 논문에서는 $TR < 1.7$ 인 초경박 광각 모바일 렌즈의 설계를 진행하였다. 먼저, 문헌 및 특허 등에서 보고된, 선행 설계의 사양 분석을 통해, 렌즈 파워 배치 등의 구조를 결정하고, 최적 설계를 진행하였고, 이후 추가의 결상 능력(MTF) 개선을 위하여 회절 소자를 추가하는 하이브리드 렌즈 적용 설계를 진행하였다. 회절 소자의 추가 결과, 일반 비구면 적용 렌즈 설계의 성능이 개선되었으며, 특히 광축 MTF가 공간주파수 180 cycles/mm에서 약 8~10% 개선되었다. 특히, 본 설계에서는 조리개에 위치한 렌즈를 하이브리드화한 경우, 단 2개의 회절준으로 구성된 회절소자의 적용으로 앞서 언급된 8%의 결상 능력 성능 개선을 얻을 수 있었다. 이 경우, 하이브리드 렌즈의 광학 기능은 회절보다는 굴절을 이용하는 프레넬 렌즈에 가깝고, 이 경우 DOE를 사용하는 광학계의 문제였던 회절 효율 변화가 발생하지 않는다.

감사의 글

이 논문은 삼성전기 및 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발 사업의 지원을 받아 진행하였음[No. 1711117093, (세부4) 플렌옵틱 현미경 영상 획득 및 검진 기술 개발].

References

1. L. Li and A. Y. Yi, "An affordable injection-molded precision hybrid glass-polymer achromatic lens," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **69**, 1461-1467 (2013).
2. T. Stone and N. George, "Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats," *Appl. Opt.* **27**, 2960-2971 (1988).
3. T. Hornung and P. Nitz, "Light diffraction by concentrator Fresnel lenses," *Opt. Express* **22**, A686-A704 (2014).
4. Y. G. Hong, S. I. Kim, W. G. Yeo, and C. K. Lee, "Telephotolens design with refractive/diffractive hybrid lens," *J. Opt. Soc. Korea* **1**, 74-80 (1997).
5. S. C. Park and J. H. Jeong, "Optical system design for compact digital still camera using diffractive optical elements," *Korean*

- J. Opt. Photon.* **11**, 239-245 (2000).
6. S. C. Park, "Optical system design for head mounted display using diffractive optical elements," *Korean J. Opt. Photon.* **12**, 512-518 (2001).
7. H. S. Lee, C. S. Rim, J. H. Jo, and S. Chang, "Hybrid (refractive/diffractive) lens design for the ultra-compact camera module," *Korean J. Opt. Photon.* **12**, 240-249 (2001).
8. Y. Liu, Q. Sun, Z. Lu, J. Yue, H. Zhang, and R. Zhu, "Athermal design of hybrid refractive/harmonic diffractive optical system for far-infrared multi-band," *Proc. SPIE* **7282**, 72823Q (2009).
9. B.-I. Ahn, Y.-S. Kim, and S.-C. Park, "Athermal and achromatic design for a night vision camera using tolerable housing boundary on an expanded athermal glass map," *Curr. Opt. Photon.* **1**, 125-131 (2017).
10. S.-H. Lee, N.-C. Park, and Y.-P. Park, "Breaking diffraction limit of a small f-number compact camera using wavefront coding," *Opt. Express* **16**, 13569-13578 (2008).
11. P. Wang, N. Mohammad, and R. Menon, "Chromatic-aberration-corrected diffractive lenses for ultra-broadband focusing," *Sci. Rep.* **6**, 21545 (2016).
12. Samsung, *Galaxy S20 Specifications* (Samsung), <https://www.samsung.com/us/mobile/galaxy-s20-5g/specs/> (Accessed date: 10 Aug. 2020).
13. Apple Inc., *iPhone 11 Specifications* (Apple Inc.), <https://www.apple.com/kr/iphone-11/specs/> (Accessed date: 10 Aug. 2020).
14. W. J. Smith, *Modern Lens Design*, 2nd ed. (McGraw-Hill Education, NY, US, 2004), Chapter 13.
15. W. T. Welford, *Aberrations of Optical Systems* (CRC Press, NY, US, 1986), Chapter 8.
16. H. C. Tang, C. S. Chen, and H.-H. Huang, "Thin optical lens assembly," US Patent 8654454B2 (2014).
17. Y. H. Park, S. G. Choi, D. S. Jang, and K. Y. No, "Very small aspherical plastic lens system for a camera of a camera phone," KR Patent 1004323710000 (2003).
18. H. X. Huang, W. M. Jing, and D. Lu, "Thin aspheric lens for mobile phone," *Appl. Opt.* **31**, 365-369 (2010).
19. J. H. Cho, "Photographic lens optical system," KR Patent No. 1020090041342 (2009).
20. X. Peng, "Design of high pixel mobile phone camera lens," *Res. J. Appl. Sci., Eng. Technol.* **6**, 1160-1165 (2013).

21. J. Y. Zhang and Y. Q. Huang, "Design of 10 mega-pixel mobile phone Lens," in *Proc. Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control* (Shenyang, China, Sep. 2013), pp. 569-573.
22. D. F. Song, P. Zhang, C. Wang, R. J. Zhang, Z. Y. Ren, and J. T. Bai, "Design of mobile phone camera lens based on ZEMAX," *J. Appl. Opt.* **31**, 34-38 (2010).
23. M. Y. Choi and J. Y. Lee, "Optical design of 2 mega mobile phone systems using axial GRIN lens," in *Proc. The Optical Society of Korea Summer Meeting* (Korea, Jul. 2007), WIB-II3.
24. C. Y. Lee, M.-C. Tsai, and T.-W. Chiang, "Lens having aspheric surfaces," US Patent 7079330B2 (2006).
25. T.-H. Tsai, "Optical lens system for taking image," US Patent 7643225B1 (2010).
26. S. J. Kim, H. J. Jung, and H. S. Lim, "The design of wide angle mobile camera corrected optical distortion for peripheral area," *J. Korean Ophthalmic Opt. Soc.* **18**, 503-507 (2013).
27. Y. Shinohara, "Imaging lens," US Patent 7345830B2 (2008).
28. H. B. Park, "Photographic lens optical system," KR Patent 1009596870000 (2010).
29. H.-H. Huang, "Optical imaging lens assembly," US Patent 9772472B2 (2016).
30. T.-H. Tsai, "Image pickup optical system," US Patent 20120147482A1 (2013).
31. T.-H. Tsai and M.-T. Chung, "Imaging lens system," US Patent 20130182335A1 (2013).
32. D. Kwon, "Imaging lens and camera module," US Patent 8817393B2 (2014).
33. Y. Kubota, "Imaging lens," US Patent 8411376B2 (2013).
34. H. Fukaya, "Imaging lens," US Patent 20140139719A1 (2014).
35. K. Sato, "Single focus wide-angle lens," US Patent 7099092B2 (2006).
36. S. C. Choi, S. N. Nam, and K. Y. No, "Photographing wide angle lens system corrected distortion," KR Patent 1014126270000 (2014).
37. N.-Y. Tang, "Wide angle lens," US Patent No. 7538958B2 (2009).
38. X. M. Liu and J. Y. Zeng, "Lens imaging system of high-pixel fish-eye lens," CN Patent 102778745B (2015).
39. L. N. Thibos, R. A. Applegate, J. T. Schwiegerling, and R. Webb, "Standards for reporting the optical aberrations of eyes," *J. Refract. Surg.* **18**, S652-S660 (2002).
40. Optical Research Associates, Pasadena, CA, US, *CODE-V Reference Manual Ver. 11.1* (2017).
41. A. Guidry, M. Kyrish, L. Stone, M. Fraelich, O. Lechuga, and N. Claytor, "Distinguishing characteristics of diffractive optical elements and Fresnel lenses," *Proc. SPIE* **11487**, 1148715 (2020).