《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 31, No. 2, April 2020, pp. 96-104
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2020.31.2.096
ISSN : 1225-6285(Print)
ISSN : 2287-321X(Online)

Design and Performance of a Catadioptric Omnidirectional Zoom Optical System Using a Hybrid Lens for Visible Light

Hyun Sik Park and Jae Heung Jo†

Department of Photonics and Sensors, Graduate School, Hannam University, 70, Hannam-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34430, Korea

(Received December 27, 2019; Revised February 15, 2020; Accepted February 17, 2020)

A catadioptric omnidirectional zoom optical system using a hybrid lens (COZOSH) that performs simultaneously two functions of a lens and a mirror was designed at the visible wavelength range for daytime unmanned surveillance, and its performance was analyzed. The hybrid lens has lots of advantages in terms of fabrication and assembly of a COZOSH, because of the obviation of a lens boring process and reduction of the number of optical components. Additionally, we designed the COZOSH to expand the compressed inner-image region of a donut image at low spatial frequencies. As a result, the optimized design performance of the optical system that satisfies all initial design specifications was obtained from calculation of the modulation transfer function, spot diagram, and tolerance analysis. We confirmed that the COZOSH is a passively athermalized optical system under conditions of temperature variation from -30°C to 50°C, by using athermalization analysis during zooming.

Keywords: Lens design, Omnidirectional zoom optical system, Hybrid lens, Catadioptric imaging system
OCIS codes: (220.0220) Optical design and fabrication; (220.3620) Lens system design

가시광에서 하이브리드 렌즈를 사용한 반사굴절식 전방위 줌 광학계의 설계 및 성능평가

박현식 · 조재흥†

한남대학교 대학원 광·센서공학과
㊞ 34430 대전광역시 대덕구 한남로 70

(2019년 12월 27일 받음, 2020년 2월 15일 수정본 받음, 2020년 2월 17일 게재 확정)

주간 무인 감시를 위하여 가시광 파장 범위인 400~700 nm에서 렌즈와 거울의 기능을 동시에 갖는 구멍 없는 하이브리드 렌즈를 활용한 반사굴절식 전방위 줌 광학계를 설계하고 그 성능을 분석하였다. 하이브리드 렌즈는 렌즈에 구멍을 뚫는 작업이 없고 광학 부품의 수량을 줄일 수 있기 때문에 전방위 줌 광학계의 제작과 조립에서 많은 장점을 갖는다. 이 광학계에서 결상된 도넛 형태의 상에서 안쪽의 압축된 낮은 공간주파수의 상 영역을 확대하여 보기 위해서 줌 렌즈의 기능을 추가한 전방위 광학계의 최적화 설계를 진행하였다. 그 결과 최적화 설계된 광학계의 변조전달함수, 스폿 다이어그램 분석, 공차 분석을 통해 이 광학계의 성능을 분석한 결과로부터 설계 목표 사양을 만족함을 알 수 있었다. 줌 광학계를 주밍할 때 -30~50°C의 온도 변화에 따른 비열화 해석을 한 결과, 적절한 렌즈의 재질을 선정하여 온도 변화에도 상 거리 변화가 거의 없는 광학계임을 확인하였다.

Keywords: 렌즈 설계, 전방위 줌 광학계, 하이브리드 렌즈, 반사굴절식 결상계
OCIS codes: (220.0220) Optical design and fabrication; (220.3620) Lens system design

I. 서 론

광축을 기준으로 시야각이 180도를 넘어가는 영상을 한 번에 결상하는 단일 광학계를 전방위 광학계라고 한다[1]. 이러한 시야각 범위 안에 있는 물체들이 광축상에 놓여져 있는 평면의 CCD나 CMOS에 결상이 되면 심하게 왜곡된 파노라마 영상이 보여진다[2]. 본 논문에서 제한하는 전방위 광학계는 광축을 기준으로 일정 부분까지의 시야각이 차폐되는 전방위 광학계이다. 그러므로 본 전방위 광학계에서 획득된 영상은 중심 부분의 영상이 없이 심하게 왜곡된 도넛 형태의 상이다[3]. 이것을 기반으로 광축의 수직 방향을 기준으로 잡아서 그 기준에서 일정한 시야각을 360도로 볼 수 있는 광학계를 전방위 광학계로 정의한다[2]. 이러한 전방위 광학계는 렌즈나 거울을 사용하여 광각의 이미지를 보는 특징을 갖는다.

†E-mail: jhjo@hnu.kr, ORCID: 0000-0002-0699-8073
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

1997년에 최초로 반사굴절식 카메라 광학계가 제안되고 이를 통한 전방위 상을 볼 수 있게 되었다[1]. 그리고 2002년에는 포물면 거울을 집광부로 사용한 반사굴절식 전방위 광학계가 제안되었다[4]. 2011년 국내에서도 반사굴절식 전방위 광학계에 대한 특허가 등록되고[5] 이를 이용한 가시광 영역의 반사굴절식 전방위 광학계가 제작되었다[3]. 이후 2개의 거울을 이용한 적외선 영역의 반사굴절식 전방위 광학계도 제안되고 설계되었다[6,7]. 또한 순수 거울만을 이용한 반사식 전방위 광학계가 제안되고 이를 가시광 및 적외선 영역에 동시에 적용된 설계도 발표되었다[8]. 그러나 반사굴절식 및 반사식 전방위 광학계는 전방위 광학계의 특성상 검출기에서 결상된 도넛 형태의 상에서 광축에 가까운 영역의 상이 광축보다 먼 영역의 상보다 왜곡 및 영상 압축이 심하여 상 분해능이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 반사식 전방위 광학계에 줌 시스템을 도입한 반사식 전방위 줌 광학계에서 광축에 가까운 도넛 형태의 압축된 영상 부분을 광학적으로 확대하여 볼 수 있도록 하였다[9]. 그러나 반사식 전방위 줌 광학계는 4매의 거울만을 사용하기 때문에 전파장대에서 사용이 가능하고 시스템의 무게가 가벼우며 제작비가 저렴하다는 장점을 갖는 반면에, 공차에 민감하고 반사굴절식 전방위 광학계보다 결상 성능이 떨어지는 단점을 갖는다[9]. 또한 반사식 및 반사굴절식 전방위 광학계는 구멍이 있는 거울을 사용하기 때문에 결상부로 외부의 환경오염에 노출되는 단점도 있다.

본 논문에서는 앞서 언급된 반사식 전방위 줌 광학계의 단점을 보완하고자 수광부에서 사용하는 구멍이 뚫린 큰 거울 대신에 구멍이 없는 렌즈 앞면의 중앙 부분을 제외한 가장자리 부분을 거울로 만든 하이브리드 렌즈를 사용함으로써 수광부인 거울과 결상부인 렌즈의 기능을 동시에 수행하도록 설계한다. 이러한 하이브리드 렌즈를 사용하면 결상부의 공간이 밀폐되어 참고문헌 [6]~[9]의 전방위 광학계에서 결상부의 외부환경오염을 방지할 수 있다. 또한 반사굴절식 전방위 광학계의 도넛 형태의 영상에서 가운데 부분의 압축된 영상을 확대하기 위하여 반사식 전방위 줌 광학계에 대한 참고문헌 [9]에서 채택한 줌 광학계를 본 논문의 하이브리드 렌즈를 사용한 반사굴절식 전방위 광학계에도 처음으로 적용하고자 한다.

II. 설계 사양과 기초 설계

2.1. 설계 사양

하이브리드 렌즈를 사용한 줌 기능이 탑재된 전방위 줌 광학계에서 주간에 영상의 이미지가 분별이 가능한 정도를 확인하고 정확한 사물의 이미지를 판독하기 위해서 가격이 저렴하면서 구입이 쉬운 CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) 센서를 선택한다. 광학계의 크기와 상의 크기를 고려하여 본 논문에서는 전장 길이를 150 mm 이하로 정하고, 센서는 Semiconductor device사의 MT9P001로 선택하였다. 이 센서의 크기는 1/2.5 inch이며, 5메가픽셀의 화소수를 갖는 CMOS 센서이다. 촬상소자의 크기는 가로방향 5.7 mm이고, 세로방향 4.28 mm이며 화소의 크기는 2.2 μm × 2.2 μm이다. 화소의 크기를 고려한 나이퀴스트 주파수는 114 lp/mm이므로 이 주파수에서 0.3 이상의 변조전달함수(modulation transfer function, MTF)를 갖도록 한다. 반시야각(half field of view, HFOV)의 범위는 참고문헌 [9]의 반사식 전방위 줌 광학계에서 설정한 상방 반시야각(upper HFOV)인 40°에서 하방 반시야각인(lower HFOV)인 110° 사이로 설정하였다. 이 광학계를 주간 감시용 카메라로 사용하기 위해서 가시광 파장을 선택하였고, 상의 밝기를 고려하여 모든 줌 모드에서 f/수는 2.9 이하로 설정하였다. 그리고 도넛 형태인 상의 중앙 부분에서 압축된 상을 확대하면서 차폐된 영역의 상의 한계로 인하여 줌 비는 1.4 이하로 설정한다. 그리고 실제로 도넛 형태의 상이 가시적으로 판독되기 위한 최소의 픽셀 수를 1.4 Mpixel 이상으로 설정한다. 표 1은 이러한 설계 사양을 정리하여 보여준다.

2.2. 기초 설계

반사굴절식 전방위 줌 광학계에서 결상부의 줌 궤적과 각 군의 굴절능은 군별로 나누어 계산한다. 2.1절에서 말한 것과 같이 줌 배율은 1.4배를 목표로 하고 이를 3군으로 집광자,

Table 1. Design specifications of the catadioptric omnidirectional zoom optical system using a hybrid lens

Items	Specifications	
Optical type	Catadioptric imaging system	
Wavelength	Visible light (380~700 nm)	
Range of HFOV	Wide mode	Upper HFOV: 40 deg ~ Lower HFOV: 110 deg
	Middle mode	Upper HFOV: 40 deg ~ Lower HFOV: 80 deg
	Tele mode	Upper HFOV: 40 deg ~ Lower HFOV: 60 deg
Total length	Less than 150 mm	
MTF	MTF 30% @ 114 lp/mm on middle field	
Zoom magnification	Less than 1.4	
F-number	Less than 2.9	
Number of pixels for zoom image	More than 1.4 Mpixel	

변배자, 보상자로 나누어 3군 배치 광학계를 목표로 설정하였다. 이를 광학계의 광선추적과 배율을 가우스 괄호법으로 나타내면 식 (1)과 같다[12].

$$\begin{aligned}&[-fwd_H, k_1, -z_1, k_2-z_2, k_3, -bwd_H]=0\\&[-fwd_H, -z_1, k_2-z_2, k_3]=\frac{1}{m}\\&T=z_1+z_2+bwd_H\end{aligned} \tag{1}$$

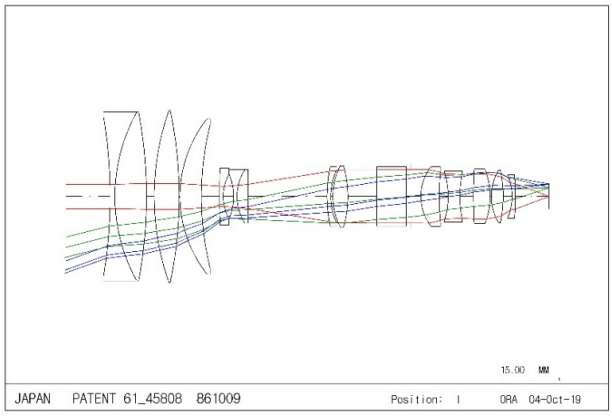
여기서 T는 전체 길이, fwd_H는 물체에서 1군까지의 거리, bwd_H는 3군에서 상면까지의 거리, z_1는 1군에서 2군까지의 거리, z_2는 2군에서 3군까지의 거리를 나타낸다. 식 (1)에서 z_1을 소거하여 계산하면 식 (2)(2a, 2b)로 계산된다[10].

$$-fwd_H k_1+\frac{z_2+bwd_H}{m}k_2+\frac{bwd_H}{m}k_3+\frac{z_2 bwd_H}{m}k_2k_3=\frac{1}{m}-1 \tag{2a}$$

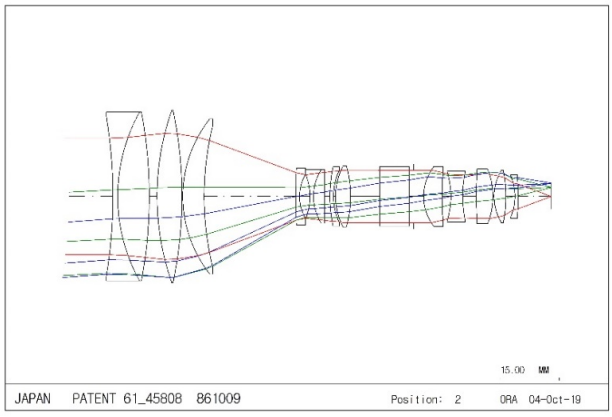
$$-fwd_H(z_2+bwd_H)k_1-T+z_2+fwd_H Tk_1+\frac{z_2 bwd_H}{m}k_3=\left(\frac{1}{m}-1\right)(z_2+bwd_H)+fwd_H \tag{2b}$$

줌 모드를 고려하여 wide 모드와 tele 모드의 끝 단으로 나누어 fwd_H와 bwd_H를 각각 대신하여 fwd_{H1} 또는 fwd_{H2}와 bwd_{H1} 또는 bwd_{H2}로 각각 나누고 z_1과 z_2를 각각 대신하여 z_{11} 또는 z_{12}와 z_{12} 또는 z_{22}로 나누어 식 4개로 표현한다. 이 결과 미지수가 많기 때문에 몇 가지 변수들은 선정한다. 광학계의 배율은 1.4배로 앞에서 정하였고, 전방초점거리인 fwd_{H1}을 38 mm, fwd_{H2}을 39.5 mm로 결정하고, 이 중간 값인 38.5 mm에서 평행광이 나온다는 가정으로 $k_1=1/38.5$ mm^{-1}로 결정한다. bwd_{H1}와 bwd_{H2}는 전방위 광학계 특성상 짧은 후방초점거리를 가지므로 각각 3.25 mm와 3.36 mm로 결정하고 광학계의 전체 길이는 150 mm로 설정하여 계산한다. 계산식이 복잡하기 때문에 연산 프로그램인 Matlab으로 계산한 결과 3군의 초점 길이는 약 104.58 mm로 계산된다. 첫 번째로 생성된 값의 z_2는 53.35 mm로, z_3는 96.65 mm로 각각 계산되고 두 번째로 생성된 z_2는 50.09 mm로 z_3는 99.91 mm로 계산된다. 이를 토대로 초기 줌 군의 굴절능 배치를 진행하였다. 이러한 3군의 초기 줌군의 굴절능 배치와 표 1의 목표 사양을 고려하여 줌 기능이 수반된 결상부의 줌 렌즈로 특허 렌즈를 선택하였다[11]. 그리고 수광부의 기초 설계를 위한 형상은 가시광 영역이면서 반사굴절식 전방위 광학계인 참고문헌 [3]의 구면거울과 평면거울로 구성하였다.

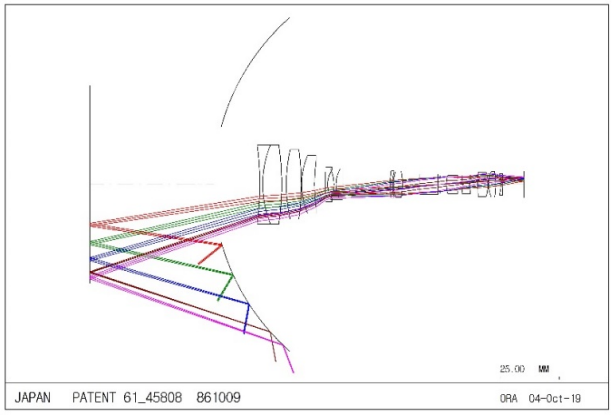
그림 1은 참고문헌 [11]인 JP 53-141851의 실시예로 (a) 변배자 이동 전, (b) 변배자 이동 후, (c) 광학계의 수광부와 결상부를 결합한 초기 설계의 각각에 대한 광로도이다. 그림 1(c)의 반사굴절식 전방위 줌 광학계에 대한 단순한 기초설계에서 보듯이 렌즈의 매수가 15매로 너무 많고 결상도 제대로 이루어지지 않음을 알 수 있다. 그러므로 최적화 설계를 통하여 설계 사양을 만족하는 광학계를 설계하여야 한다.



(a)



(b)

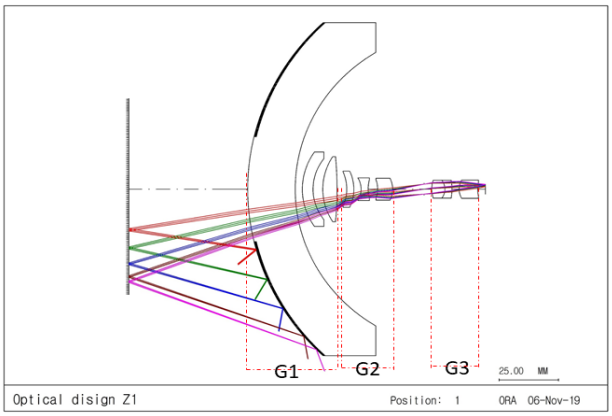


(c)

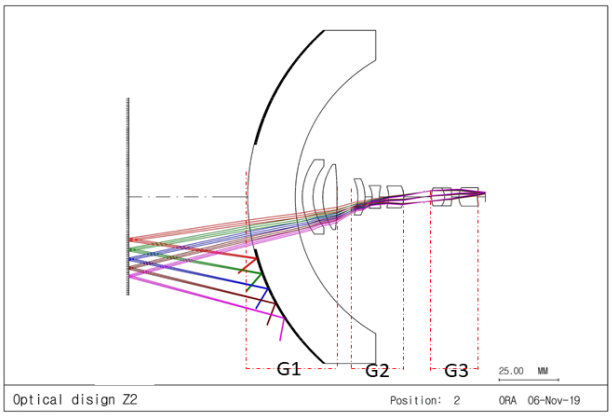
Fig. 1. (a,b) Patented zoom lens (JP 53-141851) without (a) and with (b) the movement of a variator. (c) Initial optical design of the catadioptric omnidirectional optical system combing the collecting part of the optical system and the imaging part of the patented zoom lens.

III. 최적화 설계

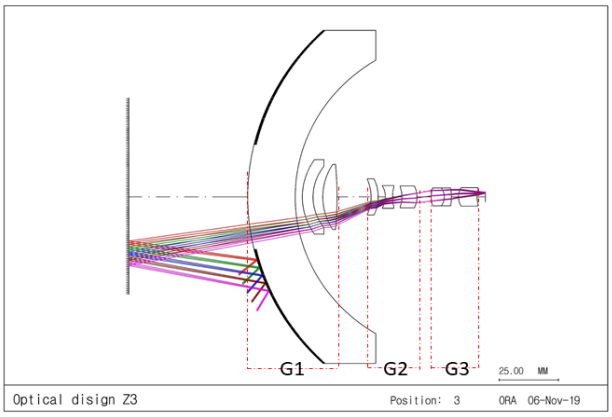
2.2절에서 제시한 그림 1(c)를 기초로 수광부의 거울과 결상부의 첫 번째 렌즈를 결합한 하이브리드 렌즈가 적용된 최적화된 광학계를 설계한 결과 렌즈의 매수는 9매가 되었다. 이때 렌즈의 재질은 SCHOTT사의 일반적인 유리 재질인 N-BK7과 N-LAF2를 사용하고 무색 수차 렌즈에서 보편적으로 사용하는 N-SF4와 N-SK16를 선택하고 온도변화에 따른 굴절률의 변화가 음수 값을 갖는 N-FK5로 설정하였었다[12]. 그림 2는 기초 설계를 바탕으로 설계 사양을 만족하는 최적화 설계된 전방위 줌 광학계의 (a) wide 모드, (b) middle 모드, (c) tele 모드에서의 광로도이다. 이 광로도를 통하여 집광자(G1), 변배자(G2), 보상자(G3)의 이동 경로를 확인할 수 있으며, 상면에서 시야각에 따른 상의 크기를 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Optical Layout of the optimized catadioptric omnidirectional zoom optical system using a hybrid lens. (a) Wide mode. (b) Middle mode. (c) Tele mode.

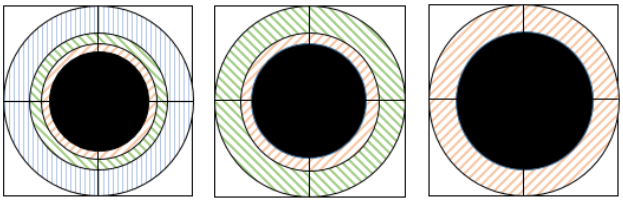
표 2는 표 1의 설계 사양을 만족하는 최적화된 하이브리드 렌즈를 사용한 반사굴절식 전방위 줌 광학계에 대한 렌즈 데이터(RDN data)이다. 각 3개씩 렌즈들은 집광자, 변배자, 보상자의 기능을 갖는 군이다.

그림 3은 하이브리드 렌즈의 앞면에 대한 정점에서 그은 광축에 대한 수직선을 기준으로 해서 wide 모드(시야각 범위: 상방 50°~하방 -20°)의 시야각에서 middle 모드(시야각 범위: 상방 50°~상방 10°)를 거쳐서 tele 모드(시야각 범위: 상방 50°~상방 30°)의 시야각까지의 축소된 도넛 형태의 상을 CMOS 범위 안에서 확대시키는 개념도이다. 그림 3에서 보듯이 (a)에서는 상의 구별을 3가지 서로 다른 사선으로 나누어 설정하여 wide 모드인 상은 45° 사선, middle 모드의 상은 135° 사선, tele 모드의 상은 90° 사선으로 설정하였다. 결과적으로 그림 3에서 시야각의 변화로 인하여 차폐된 중앙부분과 tele 모드가 갖는 40~60°의 압축된 상의 영역이 점차 확대되는 것을 볼 수 있다. 이러한 원형 상의 경우 직사각형 형태의 CMOS 센서가 가지고 있는 화소의 갯수를 다 활용하지 못한다. 즉 wide 모드, middle 모드, tele 모드에서 각각 2.15 Mpixel, 1.85 Mpixel, 1.55 Mpixel의 화소수가 실제로 상을 보여주는데 기여한다. 그러나 줌 모드에 관계없이 표 1에서 제시한 상에 기여하는 화수소의 설계 사양 1.4 Mpixel을 초과하므로 상은 선명하다. 줌 비가 1.4보다 커지면 tele 모드에서 CMOS 센서에서 상에 기여하는 픽셀의 총 수가 1.4 Mpixel 이하로 작아지기 때문에 줌 비는 최대 1.4가 된다.

그림 4는 tele 모드의 상방 HFOV인 60°부터 wide 모드의 하방 HFOV인 110°까지를 5° 간격으로 11 step을 계산하여 각 렌즈군의 마지막 렌즈의 뒷면이 이동하는 줌 궤적을 나타낸 그래프이다. 하이브리드 렌즈의 앞면 정점을 0으로 해서 이 광학계의 거울들의 위치와 줌렌즈의 각 군의 위치를 x축에 나타내었다. 여기서 3점 쇄선의 직선, 1점 쇄선의 곡선, 2점 쇄선의 곡선은 결상부의 G1 (집광자), G2 (변배자), G3 (보상자)를 나타내고 마지막 4점 쇄선의 직선은 CMOS 센서의 위치를 나타낸다. G1은 결상부의 거울 기능을 갖는 하이브리드 렌즈가 포함되어 있기 때문에 가능하면 고정된 상태로 놓는 것이 좋다고 판단하여 고정하였다. 그러므로 줌 변화를 wide 모드에서 tele 모드로 변화시킴에 따라 G2는 센서 쪽으로 10.3 mm만큼 이동하고 G3는 물체 쪽으로 0.18 mm 만큼 이동하는 것을 알 수 있다. 또한 변배자와 보상자의 줌 궤적들이 부드럽게 변하기 때문에 기계적으로 줌 군의 이동에 무리가 없음을 알 수 있다. 이 경우 수광부의 평면 거울에서 센서까지의 거리는 주밍이 되는 동안에 전혀 변화가 없음을 알 수 있다.

Table 2. RDN data for the catadioptric omnidirectional zoom optical system using a hybrid lens

Surface #	Surface type	Radius (mm)	Thickness (mm)	Material	Half-aperture size (mm)	Mode
Object	-	Infinity	Infinity			
1	Sphere	100.00	-50.00		70.5	Reflect
2	Sphere	infinity	50.00		40.94	Reflect
3	Sphere	100.00	20.00	NBK7 SCHOTT	70.50	Refraction
4	Sphere	70.00	3.00		70.50	Refraction
5	Sphere	28.73	4.50	NSF4 SCHOTT	15.15	Refraction
6	Sphere	21.96	4.10		13.45	Refraction
7	Sphere	26.49	6.00	NSK16 SCHOTT	13.20	Refraction
8	Sphere	157.22	4.07~14.3		12.69	Refraction
9	Sphere	-19.71	3.00	NSF4 SCHOTT	7.15	Refraction
10	Sphere	-18.69	3.03		6.74	Refraction
11	Sphere	-9.90	3.00	NSK16 SCHOTT	4.35	Refraction
12	Sphere	17.29	3.98		3.80	Refraction
13	Sphere	-12.48	6.30	NLAF2 SCHOTT	3.62	Refraction
14	Sphere	-11.07	13.24		4.19	Refraction
Stop	-	Infinity	3.24~3		2.20	Refraction
16	Sphere	12.71	5.50	NSK16 SCHOTT	2.96	Refraction
17	Sphere	-6.83	3.00	NSF4 SCHOTT	3.11	Refraction
18	Sphere	-24.20	3.01		3.36	Refraction
19	Sphere	8.26	7.80	NFK5 SCHOTT	3.44	Refraction
20	Sphere	13.14	3.24		2.47	Refraction
Image	Sphere	Infinity	0.00		2.14	



(a) (b) (c)

Fig. 3. Schematic diagram of the imaging shape on the CMOS from wide mode to tele mode. (a) Wide mode. (b) Middle mode. (c) Tele mode.

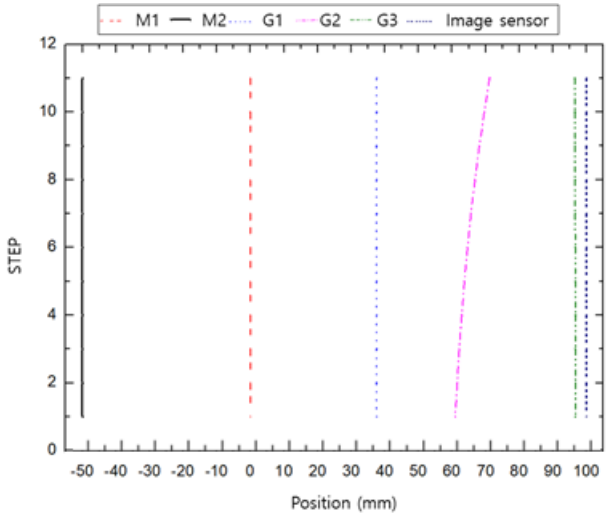


Fig. 4. Zoom loci of the catadioptric omnidirectional zoom optical system using a hybrid lens during zooming.

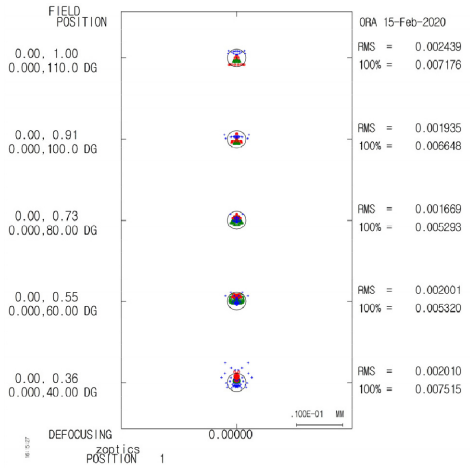
IV. 성능평가

4.1. 스폿 다이어그램

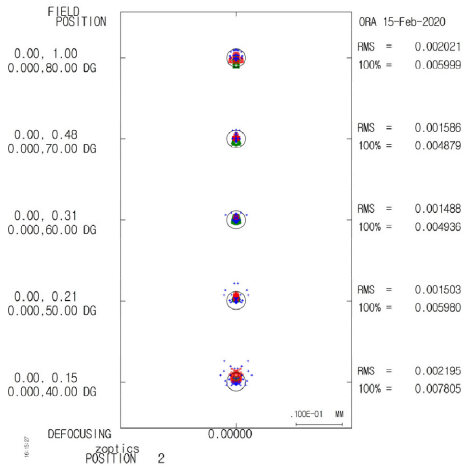
그림 5는 모드 별로 입사 필드에 따라 하이브리드 렌즈를 사용한 최적화된 반사굴절식 전방위 줌 광학계의 스폿 다이어그램이다. 왼쪽에 적혀 있는 값들은 각각의 필드를 나타내고 그 밑에 쓰여 있는 값들은 HFOV를 나타낸다. 그림 5에서 (a), (b), (c)는 wide 모드, middle 모드, tele 모드에 대한 스폿 다이어그램이다. 그림 5에서 보듯이 최대 스폿의 크기는 wide 모드의 1필드에서 2.429 μm이고 최소 크기는 tele 모드의 0필드에서 1.977 μm이다. 이는 센서의 픽셀 크기인 2.2 μm보다 작음을 확인하였고 정확한 성능은 MTF를 통하여 자세히 알 수 있다.

4.2. 변조전달함수

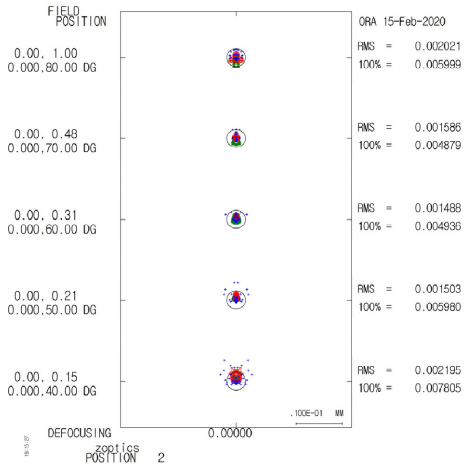
그림 6은 최적화 설계된 하이브리드 렌즈를 사용한 반사굴절식 전방위 줌 광학계의 (a) wide 모드, (b) middle 모드, (c) tele 모드에서의 입사 필드에 따른 MTF이다. 그림 6에서 보듯이 그래프에서 가장 밑에 있는 분홍색 선은 각각 (a) wide 모드, (b) middle 모드, (c) tele 모드에서 줌 모드에 따라 변하는 1필드에 해당하는 하방 HFOV 각도인 110°, 80°, 60°에서의 MTF 곡선이다. 이로부터 wide 모드에 대한 하방 HFOV에서의 MTF가 가장 낮음을 알 수 있다. 그리고 입사광선 1필드에서부터 시작하여 0.8필드, 0.6필드, 0.4필드, 0.2필드, 0필드에서의 각 줌 모드 별 MTF 곡선들을 그림 6에서 볼 수 있다. 표 3에서 1필드에 대한 줌 모드 별 나이퀴스트 주파수인 114 lp/mm에서의 MTF값을 정리한 결과, wide 모드,



(a)



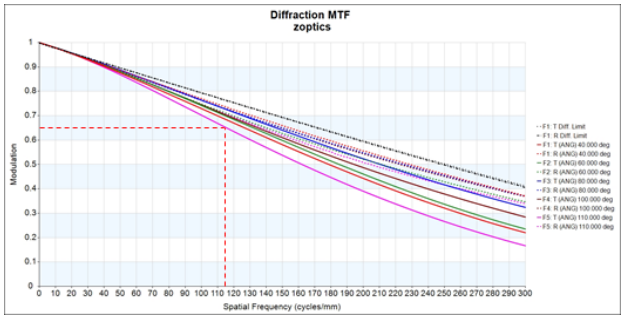
(b)



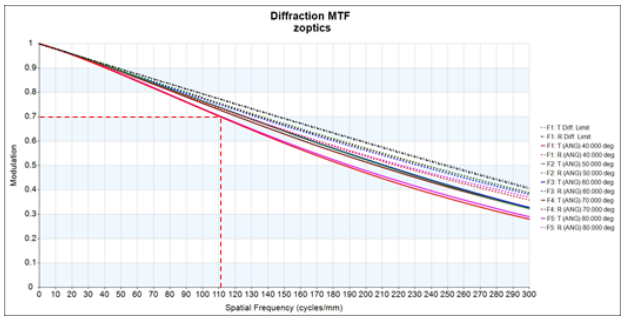
(c)

Fig. 5. Spot diagram of the optimized catadioptric omnidirectional zoom optical system using a hybrid lens according to the incident field. (a) Wide mode. (b) Middle mode. (c) Tele mode.

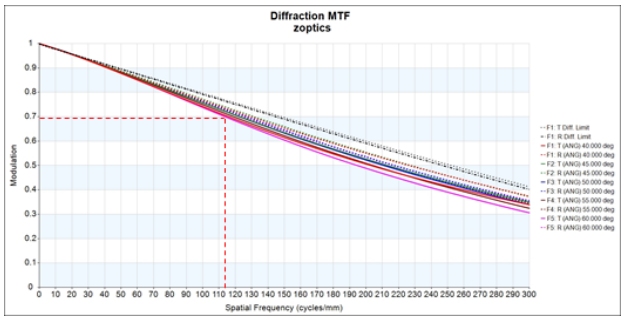
middle 모드, tele 모드에서의 나이퀴스트 주파수인 114 lp/mm에서의 MTF값은 각각 0.655, 0.69, 0.699이다. 이 값들은 표 1의 설계 사양을 충분히 만족함을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. MTF chart of the catadioptric omnidirectional zoom optical system using a hybrid lens according to the incident field. (a) Wide mode. (b) Middle mode. (c) Tele mode.

Table 3. MTF of the catadioptric omnidirectional zoom optical system using a hybrid lens at the Nyquist frequency of 114 lp/mm according to the zoom mode

Modulation transfer function	
	MTF at Nyquist frequency of 114 lp/mm
Wide	0.655
Middle	0.69
Tele	0.699

4.3. 공차 분석

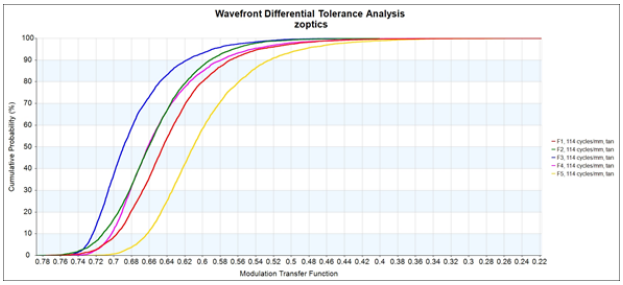
표 4는 하이브리드 렌즈를 이용한 반사굴절식 전방위 줌 광학계의 조립과 제작 시 고려해야 하는 공차의 종류와 공차 범위에 대해서 정리하여 놓은 것이다. 렌즈의 편심 공차(lens decenter), 기울기(tilt), 곡률 반경(radius), 두께(thickness), 면의 불균일도(test plate fit), V값 공차율(fractional V-number),

렌즈의 굴절률(refractive index) 공차의 허용치는 각각 0.005 mm, 3분, 0.1%, 0.02 mm, 0.5 ring, 0.8%, 0.0005로 설정하였고 줌 렌즈의 각 그룹 공차도 같은 값으로 설정하였다.

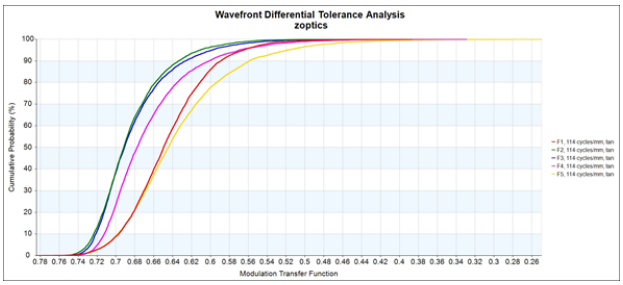
그림 7은 나이퀴스트 주파수인 114 lp/mm에서의 MTF가 0.3일 때 공차 MTF의 누적 확률을 보여주는 그림이다. 이때 (a) wide 모드, (b) middle 모드, (c) tele 모드에서 누적 공차가 각각 99.99%, 99.99%, 98.96%이므로 제작 시 문제가 없음을 알 수 있다.

Table 4. Items and limits of tolerances of the catadioptric omnidirectional zoom optical system using a hybrid lens

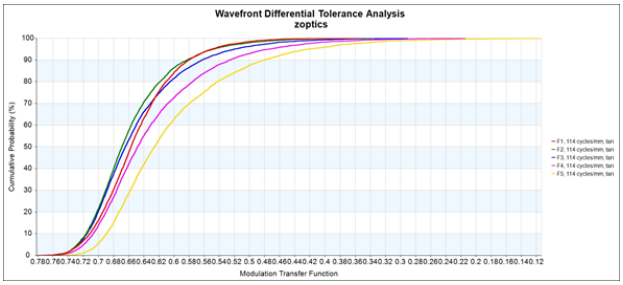
Tolerance analysis	
Lens decenter	0.005 mm
Tilt	3 minute
Radius	0.1%
Thickness	0.02 mm
Test plate fit	0.5 ring
Fractional V-number	0.8%
Refractive index	0.0005



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Cumulative probabilities for MTF of 0.3 at the Nyquist frequency of 114 lp/mm according to the zoom mode.

4.4. 비열화 해석

그림 8은 -30°C부터 50°C까지의 온도 범위에서 wide 모드(검은색 사각형), middle 모드(빨간색 원), tele 모드(파란색 삼각형)에서의 유효초점거리의 변화를 나타낸 그래프이다. 유효초점길이의 변화는 각각 wide 모드, middle 모드, tele 모드에서 최소 0.075 mm에서 최대 0.125 mm까지 변화한다.

그림 9는 -30°C부터 50°C까지의 온도 변화에 따른 wide 모드(검은색 사각형), middle 모드(빨간색 원), tele 모드(파란색 삼각형)에서의 상 거리의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림 9에서 보듯이 온도에 따라서 각각 middle 모드와 tele 모드에서는 상 거리의 변화가 없으며, wide 모드에서의 상 거리의 변화량은 최대 0.0065 mm이다. 그러나 wide 모드에서 이 정도의 상 거리 변화량은 상의 질적 변화에 거의 영향이 없을 것으로 예상된다. 이러한 상의 질적 변화는 그림 10의 온도에 따른 줌 모드 별 MTF 변화에서 자세히 확인할 수 있다.

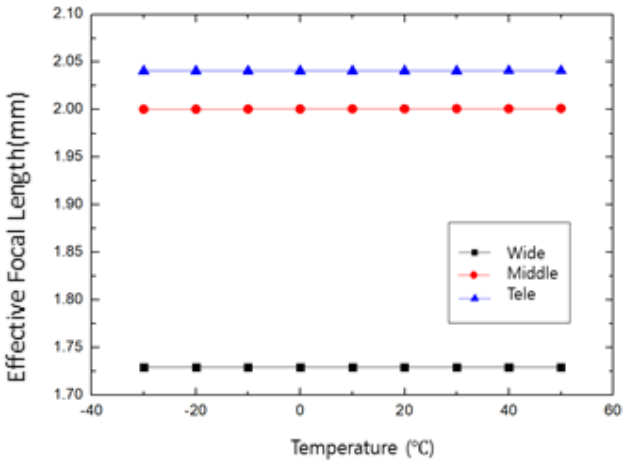


Fig. 8. Variation of the effective focal length over the temperature range from -30°C to 50°C in wide mode (black solid squares), middle mode (red solid circles), and tele mode (blue solid triangles).

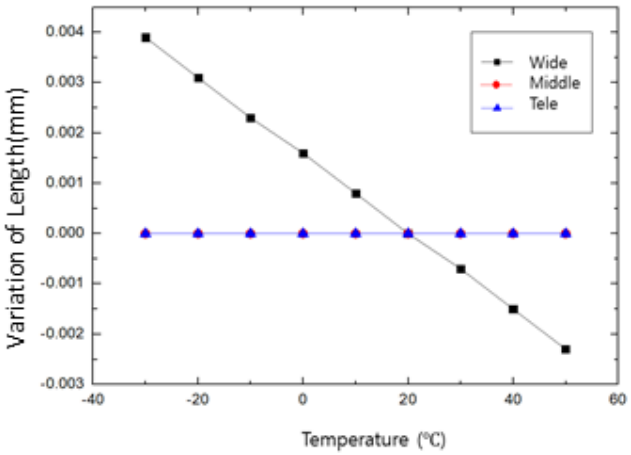


Fig. 9. Variation of the image distance in wide mode (black solid squares), middle mode (red solid circles), and tele mode (blue solid triangles) according to the temperature change from -30°C to 50°C.

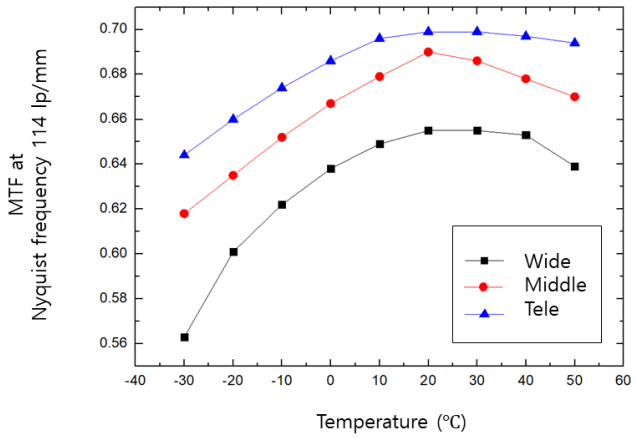


Fig. 10. Variation of the MTF in wide mode (black solid squares), middle mode (red solid circles), and tele mode (blue solid triangles) at the Nyquist frequency of 114 lp/mm according to the temperature change between -30°C and 50°C.

그림 10은 -30~50°C 사이에서 10°C 간격으로 온도 변화를 주어 나이퀴스트 주파수에서의 wide 모드(검은색 사각형), middle 모드(빨간색 원), tele 모드(파란색 삼각형)에서의 MTF의 변화를 보여주는 그래프이다. 그 결과 20°C일 때 최적화 설계가 진행되었기 때문에 나이퀴스트 주파수인 114 lp/mm에서의 MTF가 가장 높게 나타났고, 20°C에서 온도가 올라가거나 내려갈 경우 MTF가 작아지는 것을 알 수 있다. 그림 10에서 보듯이 온도에 따라서 wide 모드, middle 모드, tele 모드 각각에서의 MTF 변화량은 최소 0.001에서 최대 0.092까지 변화한다.

그림 8, 9, 10은 경통재질로 알루미늄을 선택하였고, 알루미늄의 선팽창계수 2.36×10^{-5}을 고려하여 열 해석을 하였다. 여기서 알 수 있듯이 이 광학계의 비열화 해석을 통해서 보면 표 1의 설계 사양에서 목표 MTF를 달성하였기 때문에 온도에 따른 추가적인 보상화 작업을 진행할 필요가 없다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 결상부를 온도에 따른 굴절률 변화가 양수인 렌즈와 음수인 렌즈를 적절히 배치하여 설계를 진행하였기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 수광부에서 사용하는 구멍이 뚫린 큰 거울 대신에 구멍이 없는 렌즈 앞면의 중앙 부분을 제외한 가장자리 부분을 거울로 만든 하이브리드 렌즈를 사용함으로써 수광부인 거울과 결상부인 렌즈의 기능을 동시에 수행하는 가시광용 전방위 줌 광학계를 설계하고 그 성능을 분석하였다. 또한 반사굴절식 전방위 광학계의 도넛 형태의 영상에서 가운데 부분의 압축된 영상을 확대하기 위하여 줌 광학계를 하이브리드 렌즈를 사용한 반사굴절식 전방위 광학계에도 처음으로 적용하였다. 그 결과 광학계의 MTF와 스폿 다이어그램을 통해 회절 한계선에 근접하는 결상성능을 달성하였으며, 이는 목표 설계 사양을 충분히 만족한다. 스폿 다이어그램에서의 최대 스폿의 크기는 wide 모드의 1필드에서 2.429 μm이고 최소 크기는 tele 모드의 0필드에서 1.977 μm이다. 이는 센서의 픽셀 크기인 2.2 μm×2.2 μm보다 작음을 확인하였다. 또한 줌 모드 별 나이퀴스트 주파수인 114 lp/mm에서의 MTF 값은 wide 모드, middle 모드, tele 모드에서 각각 0.655, 0.69, 0.699이다. 또한 설계된 광학계의 공차 분석 결과, 0.3의 MTF에서 98.9%의 누적 확률을 달성하였다. -30~50°C의 온도 범위에서 비열화 해석을 진행하였고, 주밍하는 동안에 유효초점길이의 변화량은 0~2.42 mm까지 변하는 것을 확인하였다. 온도에 따라서 middle 모드와 tele 모드에서는 상 거리의 변화가 없으며, wide 모드에서의 상 거리의 변화량은 최대 0.0065 mm이다. 그러므로 온도에 따라서 변화량이 MTF에 어떤 영향이 있는지 확인하였고, 그 결과 온도에 따라서 wide 모드, middle 모드, tele 모드 각각에서의 MTF 변화량은 최소 0.001에서 최대 0.092까지 변화하였으나 목표 사양에 도달하였기 때문에 성능 변화에 따른 보상군의 이동으로 보상화를 하지 않아도 사용이 가능함을 확인하였다. 이를 통하여 하이브리드 렌즈를 사용한 반사굴절식 전방위 줌 광학계는 설계 사양을 충분히 만족하며 주간용 무인 감시에 적합함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문을 연구할 때 광학계 전반에 대한 논의를 한 (주)제네랄 옵틱스 연구소 부소장인 이규항 박사에게 감사를 드립니다.

References

1. S. K. Nayar, “Catadioptric omnidirectional camera,” in *Proc. Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (Puerto Rico, USA, Jun. 1997), pp. 482-488.
2. D. B. Oleksijczuk, *The first panoramas: visions of British imperialism* (University of Minnesota Press, USA, 2011).
3. H. J. Seo and J. H. Jo, “Catadioptric omnidirectional optical system using a spherical mirror with a central hole and a plane mirror for visible light,” Korea J. Opt. Photon. **26**, 88-97 (2015).
4. D. G. Aliaga and I. B. Carlbom, “Camera model and calibration procedure for omnidirectional paraboloidal catadioptric cameras,” US Patent US7362969B2 (2008).
5. J. H. Lee, “Omnidirectional optical lens,” KR Patent No. 1020110131472 (2011).
6. J. G. Kang, J. M. Ryu, and J. H. Jo, “Design of IR omnidirectional optical system for night vision and surveillance of defense and safety,” Proc. SPIE **9451**, 94511Y (2015).
7. K. H. Lee, J. G. Kang, and J. H. Jo, “Optical design of a catadioptric omnidirectional LWIR vision system with F/1.4 and a field of view of 30°~110° and analysis of its

tolerance and athermalization," New Phys.: Sae Mulli **67**, 754-764 (2017).
8. Y. J. Ju, J. H. Jo, and J. M. Ryu, "Optical design of a reflecting omnidirectional vision system for long-wavelength infrared light," Korean J. Opt. Photon. **30**, 37-47 (2019).
9. Y. J. Ju, J. H. Jo, and J. M. Ryu, "Optical design of reflecting omnidirectional zoom optical system with peripheral half-field of view from 110° to 72° for day and night surveillance," Optik, to be Published.
10. J. H. Jo and J. M. Ryu, *Foundation and application of lens design as the lens design program* (Chungmungak, Paju, Seoul, 2013).
11. T. Kazuo, "Focusing method which prevents change in angel of view," JP. Patent 53-141851 (1978).
12. P. Du, C. Zhao, Y. Geng, and T. Ma, "Optical design of athermalization stepping-zoom dual FOV MWIR system," Proc. SPIE **9521**, 952115 (2015).