

Catadioptric Omnidirectional Optical System Using a Spherical Mirror with a Central Hole and a Plane Mirror for Visible Light

Hyeon Jin Seo^{1,2} and Jae Heung Jo^{1†}

¹*Department of Photonics and Sensors, Hannam University, 70 Hannam-ro, (Ojung-dong, Hannam Univ.)
Daeduk-gu, Daejeon 306-791, Korea*

²*Annex Research Institute, Korea Electro Optics Co., Ltd., 8, 398 Beon-gil, Seokcheon-ro, Ojung-gu, Bucheon 421-809, Korea*

(Received March 12, 2015; Revised manuscript April 1, 2015; Accepted April 1, 2015)

An omnidirectional optical system can be described as a special optical system that images in real time a panoramic image with an azimuthal angle of 360° and the altitude angle corresponding to the upper and lower fields of view from the horizon line. In this paper, for easy fabrication and compact size, we designed and fabricated a catadioptric omnidirectional optical system consisting of the mirror part of a spherical mirror with a central hole (that is, obscuration), a plane mirror, the imaging lens part of 3 single spherical lenses, and a spherical doublet in the visible light spectrum. We evaluated its image performance by measuring the cut-off spatial frequency using automobile license plates, and the vertical field of view using an ISO 12233 chart. We achieved a catadioptric omnidirectional optical system with vertical field of view from +53° to -17° and an azimuthal angle of 360°. This optical system cleanly imaged letters on a car's front license plate at the object distance of 3 meters, which corresponds to a cut-off spatial frequency of 135 lp/mm.

Keywords: Lens design, Omnidirectional lens system, Panoramic vision, Catadioptric imaging system

OCIS codes: (110.0110) Imaging systems; (220.0220) Optical design and fabrication; (220.3620) Lens system design; (220.4610) Optical fabrication

중심 구멍이 있는 구면거울과 평면거울을 이용한 가시광용 반사굴절식 전방위 광학계

서현진^{1,2} · 조재흥^{1†}

¹한남대학교 공과대학 광·센서공학과
⊕ 306-791 대전광역시 대덕구 한남로 70 (오정동)

²(주) 한국전광
⊕ 421-809 경기도 부천시 오정구 석천로 398번길 8 (삼정동)

(2015년 3월 12일 받음, 2015년 4월 1일 수정본 받음, 2015년 4월 1일 게재 확정)

전방위 광학계는 360도의 방위각과 지평선 위와 아래의 수직화각에 대한 상을 동시에 결상이 가능한 광학계이다. 본 논문에서는 제작을 쉽게 하면서 크기가 작아지도록 하기 위해서 가운데에 구멍이 뚫려있는 옵스큐레이션(obscuration)을 갖는 구면거울 1장과 평면거울 1장으로 이루어진 거울계 및 이 거울계에서 반사하여 구면거울의 옵스큐레이션을 통과한 시야각 범위 안의 광을 결상하는 구면렌즈 3개와 하나의 구면 이중렌즈로 구성된 결상렌즈계를 사용하는 가시광용 반사굴절식 전방위 광학계를 설계하고 제작하여 전방위 영상을 실제로 결상하였다. 그리고 자동차 앞, 뒷번호판의 영상을 보고 이 전방위 광학계의 통과 공간주파수를 측정하고, ISO 12233 차트의 영상으로부터 전방위 광학계의 수직화각을 측정하여 광학계의 성능을 평가하였다. 이 결과 전방위 광학계의 수직화각은 +53° ~ -17°이며, 방위각은 360°이고, 3 m 거리에서 자동차 앞번호판의 숫자를 구별할 수 있었는데, 이는 135 lp/mm의 통과 공간주파수에 해당한다.

Keywords: 렌즈설계, 전방위 광학계, 전방위 영상, 반사굴절식 결상계

OCIS codes: (110.0110) Imaging systems; (220.0220) Optical design and fabrication; (220.3620) Lens system design; (220.4610) Optical fabrication

[†]E-mail: jhjo@hnu.kr

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

I. 서 론

전방위 영상이란 촬영자가 제자리에서 한 바퀴 돌면서 고개를 젓히거나 숙여서 바라볼 수 있는 모든 경치를 한꺼번에 동시에 찍은 영상을 의미한다. 이와 같은 영상시스템을 구현하기 위해 가장 많이 사용되는 기술은 화각이 넓은 어안 렌즈(Fisheye Lens) 기술이다.^[1, 2] 어안 렌즈를 채용한 전방위 카메라는 고품질의 이미지를 획득하기 위해 어안 렌즈는 크기가 커져야 하며, 중량이며 고가인 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해서 1987년에는 다수의 카메라를 이용한 전방위 카메라가 처음으로 등장하였다^[3]. 그리고 1990년대에 이르러 사다리꼴 형태의 거울이나 원추 형태의 거울을 이용한 반사굴절식 전방위 카메라도 제안되었다.^[4-7] 이러한 전방위 카메라는 2000년대에 이미지 센서의 집적도와 해상력이 증가하면서 비약적으로 발전된 전자기술 및 영상기술에 따라 다수의 카메라를 여러 대 붙여 모든 방향의 사진을 찍어 이미지를 합성하는 방식, 180° 화각을 갖는 양방향 카메라 방식 등이 꾸준히 개발되어 왔다.^[8-10] 국내에서도 2004년에 들어서면서 원추형 거울을 이용한 반사굴절식 전방위 카메라가 개발되었다.^[11]

그러나 이러한 감시용 카메라는 광각이라 하더라도 왜곡이 심하거나 해상력이 낮아 화질이 떨어지기 때문에는 영상 식별이 불분명해지며, 심지어는 촬영에 대한 의미가 없어지기도 하는 경우도 흔하게 볼 수 있다. 그래서 이를 해결하면서 넓은 시야를 확보하기 위해서 여러 대의 카메라를 설치하는데 이 방법은 비용이 많이 든다. 또한 기존의 전방위 카메라는 비구면 거울 또는 렌즈가 사용되어 고가이거나 부피가 크고 설치 시 추가적인 기구물이 들어가는 불편함이 있고,^[12, 13] 보안 감시용 카메라로 가장 널리 사용되는 어안렌즈는 그 특성상 출력된 영상은 원형으로 촬영이 되기 때문에 그 자체로는 감시 영상으로 사용이 용이하지 않다. 이것을 화상 프로그램을 사용해서, 촬영한 영상을 평면으로 전개해서 부분적으로 확대하는 것으로 되지만, 종래의 CCD 카메라용 렌즈에서는 충분한 해상도를 얻을 수 없다. 그리고 어안렌즈와 같은 초광각의 감시 카메라를 이용할 경우 사각 지대는 없지만, 왜곡이 심하여 한 개의 카메라로 고화질의 영상을 촬영할 수 없다. 이에 반하여 광학계의 가운데 부분에 일부의 사각 지역이 있더라도 한 개의 카메라로 보다 넓은 영역에 대해 촬영할 수 있는 반사굴절식 전방위 카메라는 많은 장점을 갖는다.^[13, 14]

본 논문에서는 전방위 광학계의 소형화와 저렴한 제작가격을 위하여 옵스큐레이션(obscuration)을 가운데 구멍으로 갖고 있는 구면거울과 이 구면거울에서 반사된 입사광선을 굴절(결상)계로 보내는 평면경으로 구성된 2장의 거울을 갖는 새로운 광학계를 설계하고 제작하며 이를 평가하고자 한다. 이 광학계는 줌(zooming)과 같은 물리적인 작동을 사용하지 않으면서 응답속도가 매우 빠르면서, 수직화각(고도각)은 수평선 위로(상방) +50° 이상이면서 수평선 아래로(하방) -17° 이하로 잡아서 360°의 방위각으로 모든 방향의 영상을 한 번

에 포착하도록 하고자 한다. 특히 설계의 용이성과 구조의 단순성을 통해 전장길이 50 mm 이하의 작은 부피를 갖고, 반사계와 굴절계 모두 구면을 사용하여 저가격으로 제작하고자 한다. 또한 3 m 거리에서 자동차 뒷 번호판의 숫자를 구분할 수 있는 분해능을 갖도록 한다.

II. 가시광용 반사굴절식 전방위 광학계 설계

2.1. 광학계의 제원

전방위 광학계의 특성을 고려하여 경량화와 가격 경쟁력 면을 고려하여 CCD(Charge Coupled Device) 보다는 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)를 영상 센서로 선택하였다.^[15] CMOS 센서 중에서 고해상도 이미지 프로세서와 327만 화소를 갖고 1/2.8인치의 크기이며, 가시광에서 민감하게 작동하는 LI-CAM사의 CMOS 센서(IMX036 WDR HD Camera Module)를 기준 영상 센서로 정하였다. 이 센서는 화소 크기가 2.5 μm × 2.5 μm이며, 센서의 크기는 5.2 mm × 3.9 mm이다.

본 광학계는 가시광 영역에서 사용할 것이고, 제작시 본체 모듈부와 결합할 것을 고려하여 전장길이는 50 mm 이내로 목표하였고, 광학계를 바로 세웠을 때 광축으로부터 90°를 지평선과 평행으로 본다면, 어안렌즈는 보통 지평선과 평행한 최대 180°의 화각을 가지고 있지만 본 논문에서는 자동차 위에 전방위 광학계를 설치했을 때 지평선을 기준으로 주변 시야를 확보하기 위해서 상방 +50° 이상, 약 3 m 정도 떨어진 앞차의 번호판을 식별하기 위해서 하방 -17° 이하를 갖는 수직 화각 67°를 목표로 하였고, 이 수직 화각을 만족하기 위하여 반사 광학부품과 굴절 광학부품이 혼합된 반사굴절식 광학계(catadioptric system)를 채택하였다.

그리고 이미지 센서에 결상된 왜곡영상을 파노라마 영상으로 펼치는 이미지 프로세싱 과정을 고려하여 상의 크기는 이미지 센서의 크기보다 작도록 하고, 상의 해상도는 3 m 거리에서 약 20 lp/mm의 자동차 번호판 글씨가 식별 될 정도로 목표하여 이 글씨가 CMOS 센서에 결상될 때 중심 필드의 공간주파수 150 lp/mm에서 MTF 30 % 이상으로 나오도록 설계 조건을 정하였다. 또한 선택한 이미지 센서에서의 나이퀴스트 주파수(Nyquist frequency)를 계산해보면 센서에서는

TABLE 1. Design specifications of catadioptric omnidirectional optical system with a spherical mirror including a center hole (obscuration) and a plane mirror

items	specifications
optical type	catadioptric imaging system
wavelength	visible light(380 nm ~ 700 nm)
field of view(FOV)	Total more than 67 deg. (upper FOV : more than + 50 deg., lower FOV : less than -17deg.)
total length	less than 50 mm
MTF	MTF 30% @ 150 lp/mm on middle field

200 lp/mm으로 목표한 MTF(modulation transfer function)를 만족함을 확인하였다. 위와 같은 조건을 고려하여 Table 1과 같이 광학계의 설계 사양을 정하여 설계하였다.

2.2. 반사굴절식 전방위 광학계의 기초설계

사용 대표파장은 가시광선의 영역 중 파랑에 해당하는 486 nm, 노랑에 해당하는 588 nm, 빨강에 해당하는 656 nm를 사용하였고, 전체의 무게와 가격을 고려하여 광학계 재질은 특수소재가 아닌 광학유리로 결정하였다. 그 중, 생산성과 가격 경쟁력을 고려하여 Schott사의 N-BK7과 SK2, SF4를 사용하여 설계하였다. 시야범위는 수평방향으로 360°의 방위각과 기구물에 의한 화각감소를 고려하여 수직화각(field of view(FOV))(광학계를 수직으로 세운 상태에서 수평면에서 상방과 하방으로 받아들이는 시야각, 즉 고도각)은 하방으로 -17° 및 상방으로 50°이상으로 광학계를 수평으로 놓은 상태에서는 광축을 기준으로 37°~ 107°인 67°이상의 화각을 갖도록 설계하였다. 이때 사용한 광학설계 프로그램은 ORA사의 Code V ver.10.4이다.

수평방향으로 방위각이 360°인 시야를 얻기 위하여 반사굴절식 전방위 광학계에 대한 기존 특허들은 주로 두 거울을 모두 구면과 비구면으로 가공을 하였는데^{16, 17)} 본 논문에서는 가공의 용이성을 위하여 Fig. 1과 같이 1번 거울은 구면으로, 2번 거울은 평면으로 기초설계를 하였다. 단일렌즈로 구성한 결상렌즈를 1번 거울로부터 약 10 mm에 위치시키고 광선이 중앙 구멍으로 잘 들어가는 조건을 찾기 위하여 광선 추적을 하였을 때, Fig. 1과 같이 1번 거울의 곡률에 따라 2번 평면 거울에서 반사한 full-field의 주광선의 반화각이 약 13°~ 25°사이로 변한다. 이를 기초 데이터로 해서 렌즈계에서 25°이하의 반화각을 만족하고, 3차 수차와 색수차를 보정하기 위해 단일렌즈의 결상렌즈를 최소 5매의 렌즈를 사용하는 조건을 만족하도록 참고문헌 [12]에서 언급된 결상렌즈계를 단일렌즈 대신에 1번 거울 뒤에 위치시킨 후 우선 전장길이는 고려하지 않고 최적화를 진행하였다. 그 결과 전장길이를 고려하지 않은 최적화된 기초설계에서는 중심필드에

대해서 150 lp/mm에서 약 50 %의 MTF를 달성할 수 있었다. 그러나 주어진 전장길이의 설계 사양을 만족하지 못하며, 중심필드가 아닌 세부필드별 MTF 및 기타 수차에서는 데이터가 만족스럽지 못하여 전장길이를 포함한 설계목표에 맞도록 최적화를 계속 진행하여 최종설계를 하였다.

2.3. 광학계 최종설계 및 분석

Figure 2는 2.2절의 기초설계를 바탕으로 결정된 Table 1에서 제시한 설계 사양을 만족하는 최종적으로 최적화 설계된 2개의 반사거울을 이용한 가시광용 반사굴절식 전방위 광학계의 광로도이다. Figure 2에서 보듯이 이 광학계는 1번 구면거울과 2번 평면거울로 구성된 반사계와 4번~5번, 6번~7번, 8번~9번의 구면으로 구성된 3개의 단일렌즈와 10번~12번의 2개의 구면렌즈로 구성된 1개의 이중렌즈로 만든 색차 보정 렌즈로 결상계를 구성하였다. 광학설계 후 광학계에 대한 제작을 용이하게 하고 제작비용을 낮추기 위하여 반사계 및 결상계의 모든 면들은 구면으로 설계하였고, 렌즈로 이루어진 결상계에서 단일렌즈는 Schott사의 N-BK7으로 재질을 선택하고, 색차 보정 렌즈인 접합렌즈는 SK2와 SF4를 사용하였다. 이때 앞서 설명한 것과 같이 알루미늄으로 코팅된 두 개의 반사거울은 보는 전방위 시야와 상방과 하방 화각을 넓혀주는 역할을 하고 후단의 렌즈들은 이미지 검출기 상에 상이 맺도록 한다. 전방위 광학계의 각 광학소자의 곡률(radius) 및 각 면들 사이의 거리(thickness), 재질(material)에 대한 설계데이터(RDN 데이터)는 Table 2에 자세히 정리하였다. 이 광학계의 최적화 시에는 6 m × 6 m의 방이나 6 m 폭의 도로를 설정하여 물체거리는 3 m로 설정하였고, 상 거리는 마지막 렌즈와 이미지 센서의 기계적인 최단거리로 설정하여 광학계의 초점거리는 1 mm로 설계하였다. 설계 및 제작 용이성을 고려하여 거울을 포함한 모든 광학부품의 면은 구면으로 설계하였고, 실제적인 사용을 위하여 광학계의 전장길이는 50 mm 이하로 제한하였다.

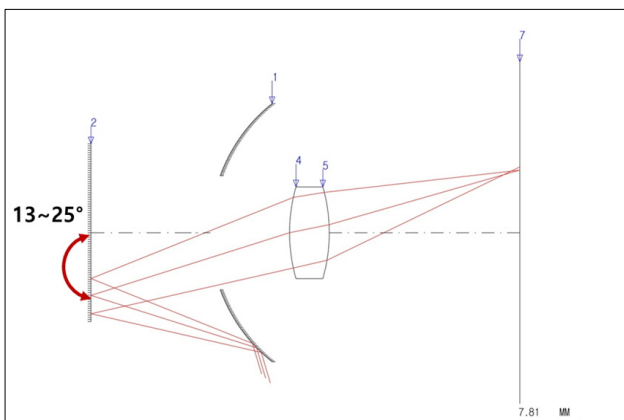


FIG. 1. Initial optical Design for the catadioptric omnidirectional optical system with a single imaging lens.

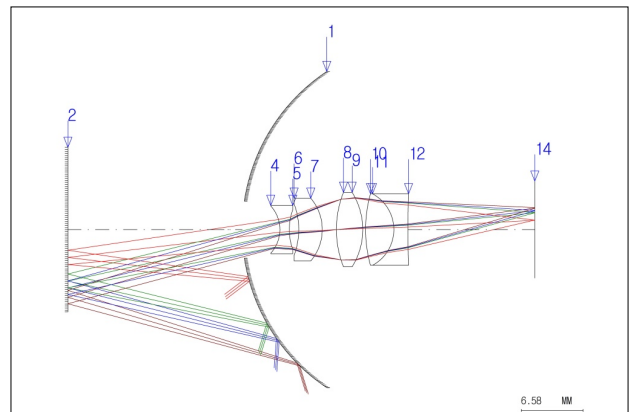


FIG. 2. Optical layout of the optimized catadioptric omnidirectional optical system with an optimized imaging lens system consisting of three single lenses and one doublet.

TABLE 2. RDN data sheet for the optimized catadioptric omnidirectional optical system with a spherical mirror and a plane mirror

Surface	Radius[mm]	Thickness[mm]	Aperture[mm]	Material
1	21.5	-18.5	31.0	Mirror
2	-	18.5	16.0	Mirror
3	-	2.5	4.0	Central hole
4	-2.86	2.1	2.0	516800.641
5	3.43	1.6	3.0	
6	-44.05	3.2	3.0	516800.641
7	-4.01	1.0	3.0	
STOP	-17.70	3.1	1.28	516800.641
9	-7.00	0.1	3.5	
10	6.41	3.0	3.5	607381.566
11	-6.16	2.2	3.5	755201.275
12	11.14	10.2	3.5	
Image Sensor				

Figure 2와 같은 전방위 광학계의 초기설계에서는 상의 밝기를 고려한 F수는 2.8를 목표로 삼았으나, 2번 거울과 중심 구멍과 중심차폐로 인해 최종설계된 광학계의 F수는 5.7이 되었다. 또한 Fig. 2와 Table 2의 광로도도와 광학계 RDN데이터를 분석하면 1면과 2면의 거울에 의해 광학계를 수평으로 놓을 경우 광축을 기준으로 37°~ 107°까지의 광선(즉 광학계를 수직으로 세울 경우, 수평면을 기준으로 상방 +53°이고 하방으로 -17°까지 입사하는 광선)이 지름이 4 mm인 중앙의 옵스큐레이션(구멍)으로 모이게 된다. 그리고 이 광선들은 광학계의 STOP인 8면을 기준으로 4면부터 7면까지 두 장의 렌즈는 중앙의 홀로 들어온 광선을 모아주는데, 5면과 7면에서 주로 양의 비점수차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이것을 4, 6, 9, 11면에서 음의 비점수차로 5면과 7면에서 발생한 양의 비점수차를 상쇄시키며, 10면부터 12면까지는 색수차를 보정하였다. 이렇게 맺힌 CMOS 센서에 맺힌 상 크기는 107도 시야에서 최대 반지름 2.50 mm이며, 37도 시야에서 최소 반지름 1.14 mm로 크기가 5.2 mm × 3.9 mm인 CMOS 센서 안에 들어온다.

Figure 3은 1.0필드, 0.8필드, 0.68필드, 0.35필드에 대한 반사굴절식 전방위 광학계의 ray fan으로 왼쪽 그래프와 오른쪽 그래프는 각각 자오광선과 구결광선에 대한 ray fan이며, 파장은 481 nm(청색 실선), 588 nm(녹색실선), 656 nm(적색 실선)이다. 각 필드별 ray fan은 ±0.025 mm scale 이내에서 보정된 수차를 보여준다. Figure 4의 실선들은 구결(sagittal) 방향에 대한 구면수차(왼쪽 그래프)와 비점수차(가운데 그래프)를 나타낸 것으로 ±0.050 mm scale 이내에서 보정된 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 4의 가운데 비점수차 그래프에서 점선으로 나타낸 자오(tangential)방향에서의 배율 색수차도 이미 지 센서의 픽셀크기 안에 들어오는 것을 확인하였다. 그리고 동 바깥으로 갈수록 약간의 코마수차가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 4의 오른쪽 그래프인 왜곡수차는 입사각이 90도를 넘으면서부터는 Code V의 고유의 오류로 인해

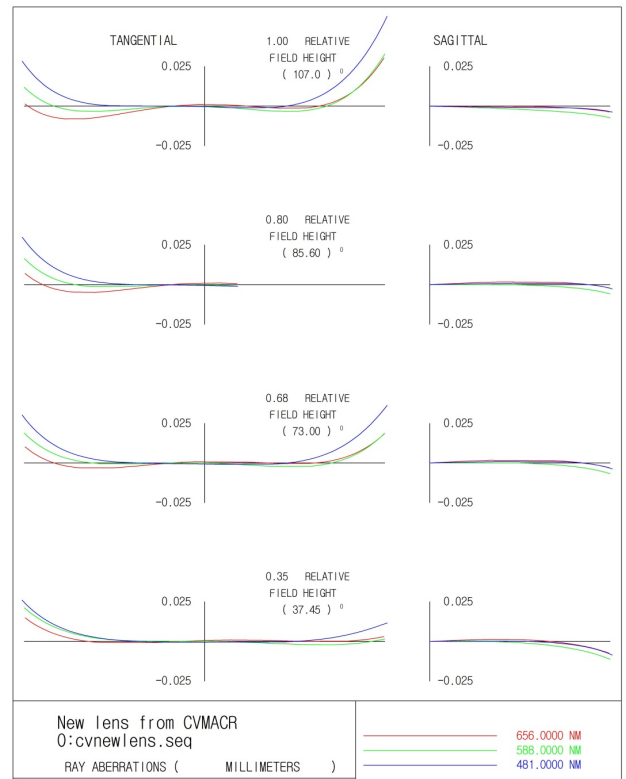


FIG. 3. Tangential(left graphs) and sagittal(right graphs) ray fans of the optimized catadioptric omnidirectional optical system with a spherical mirror including a center hole and a plane mirror according to 1.0 field, 0.8 field, 0.68 field, 0.35 field, respectively. (blue line: 481 nm, green line : 588 nm, red line : 656 nm).

서 왜곡수차가 100 %로 나타나는데, 이는 투영방법에 따른 문제로 파악되었다.^[18]

최적화된 광학계의 MTF 성능은 Fig. 6과 같다. Figure 6에서 보듯이 0.3필드(적색선), 0.7필드(녹색선), 0.8필드(청색선),

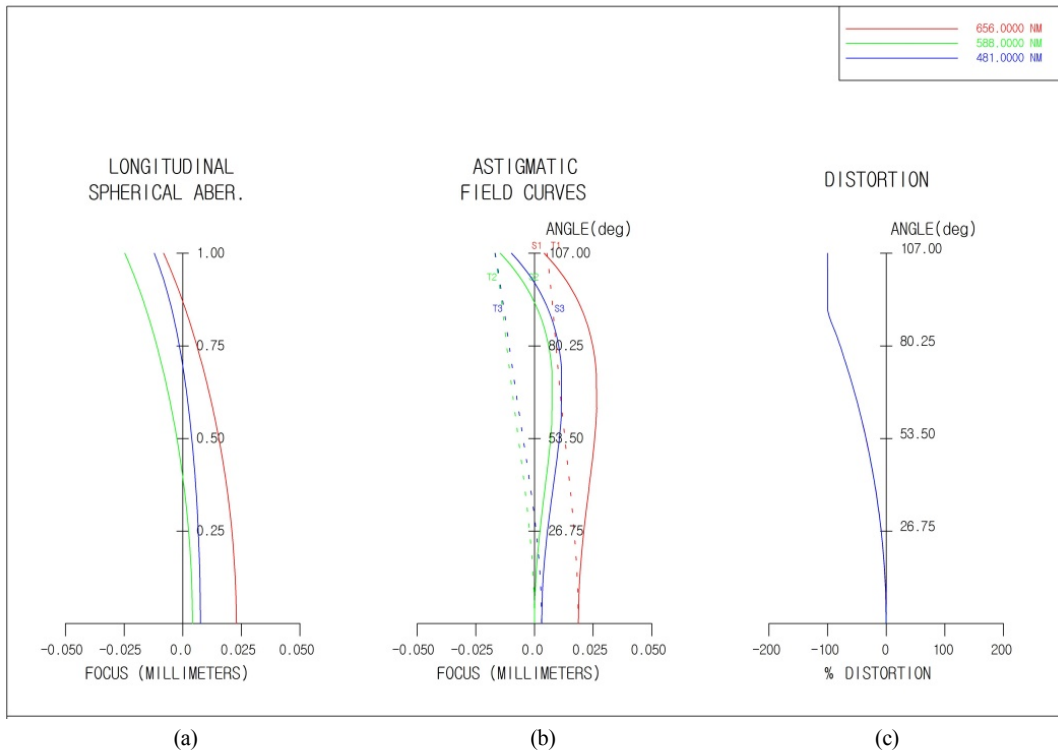


FIG. 4. Various aberration curves for the optimized catadioptric omnidirectional optical system: (a) longitudinal spherical aberration, (b) astigmatic field curvature, (c) distortion. (blue line: 481 nm, green line : 588 nm, red line : 656 nm).

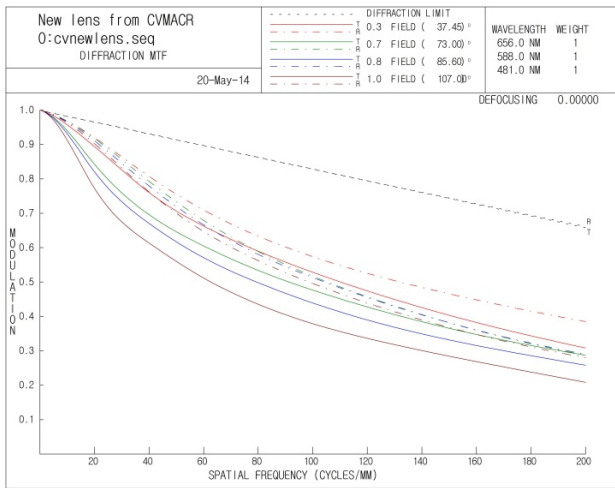


FIG. 5. MTF chart of the optimized catadioptric omnidirectional optical system.

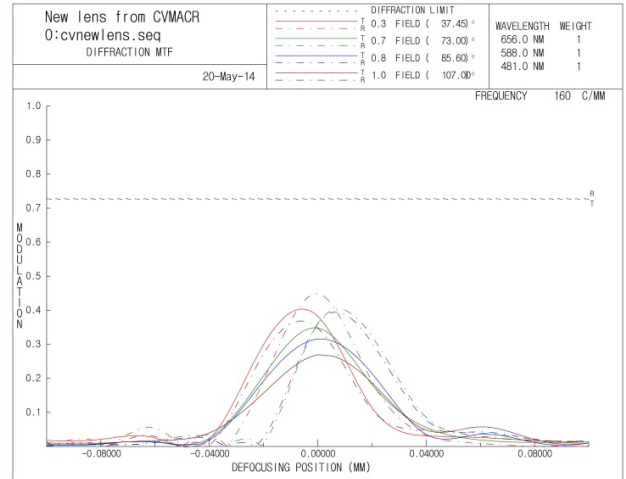


FIG. 6. MTF curves(solid line: tangential ray, dot line: sagittal ray) via defocusing position at 160 lp/mm, where three wavelengths of blue, green, and red lines are 481 nm, 588 nm, 656 nm, respectively.

1,0필드(자색선)(시야각 기준으로 하방 -17°를 의미함)에서의 30%의 MTF는 설계 목표인 Table 1의 MTF 값을 초과하여 150 lp/mm 이상으로 설계되었음을 알 수 있다. Figure 5에서 점선은 구결방향이고 실선은 자오방향의 MTF이다. Figure 6은 실제로 공간주파수 160 lp/mm에서 디포커싱을 고려한 MTF 결과로, 필드별 그래프의 색은 Fig. 5와 같다. Figure 6

에서 보듯이 공간주파수 160 lp/mm에서 디포커싱 위치선을 확인했을 때 1.0필드에서는 MTF가 30%에 조금 부족하지만 나머지 대부분의 필드에서는 디포커싱 차이가 약 ±10 μm 미만인 것을 확인하였다. 이는 Table 1의 설계 제원을 충분히 만족할 만한 결과임을 알 수 있다.

III. 반사굴절식 전방위광학계 제작

전방위 광학계의 광기구물도 광학계와 마찬가지로 경량화와 저가의 제작비 그리고 광학적 성능을 고려하여 설계하고 제작하여야 한다. 또한 기존의 방식이 가지는 단점을 보완한 설계 및 조립의 용이성과 구조의 단순성을 고려하여야 하며 좁은 공간에 설치하기 위한 공간적인 제약이 적어야 한다. 이러한 사양을 고려하여 모든 광기계부 재질은 알루미늄을 사용하고 광학적 성능을 위하여 검정색 무광표면으로 처리

하였다. Figure 7은 전방위 광학계의 광학소자들과 광기구물의 제작 및 조립을 개략적으로 보여준 순서도로 광기구물은 검정색으로 표시되어있으며, 광학계는 투명한 푸른색으로 표시하였다. 전방위 광학계의 광학소자와 광기구물은 Fig. 7에서 보듯이 평면 거울에 대한 (a)의 제2거울부, 구면거울에 대한 (b)의 제1거울부, 결상렌즈로 구성된 (c)의 렌즈부, CMOS 센서가 놓인 (d)의 본체부로 구성된다. (a)의 제1거울부의 세발로 고정된 광기구물은 구면거울을 고정하면서 세발의 앞부분이 구면거울과 평면거울 사이의 거리를 유지시키면서

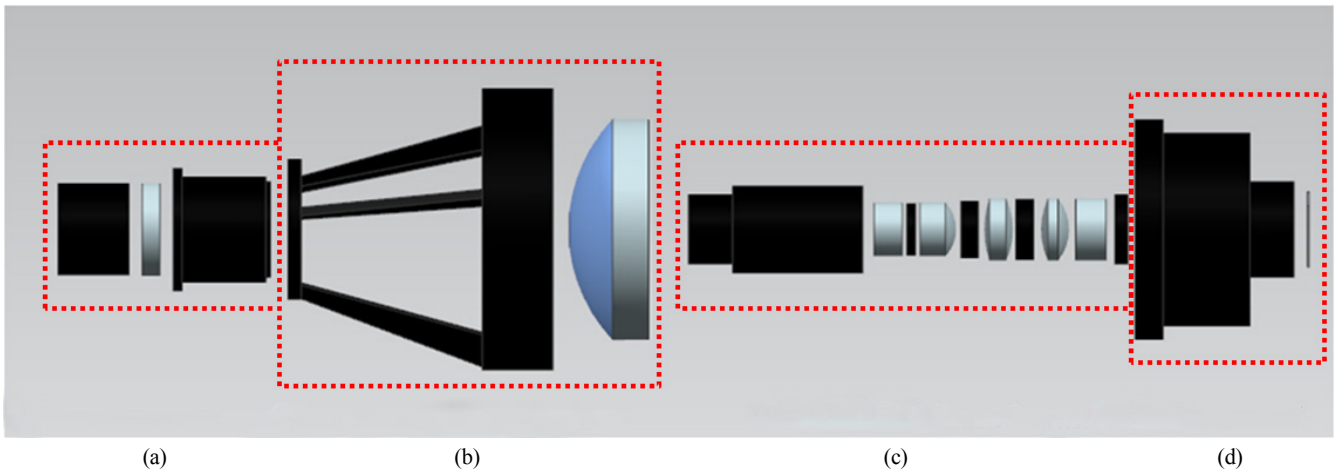


FIG. 7. Assembling schematic diagram of optical elements and mechanical parts for the optimized catadioptric omnidirectional optical system with a spherical mirror including a center hole and a plane mirror : (a) secondary mirror part, (b) primary mirror part, (c) imaging lens part, (d) CMOS sensor part.

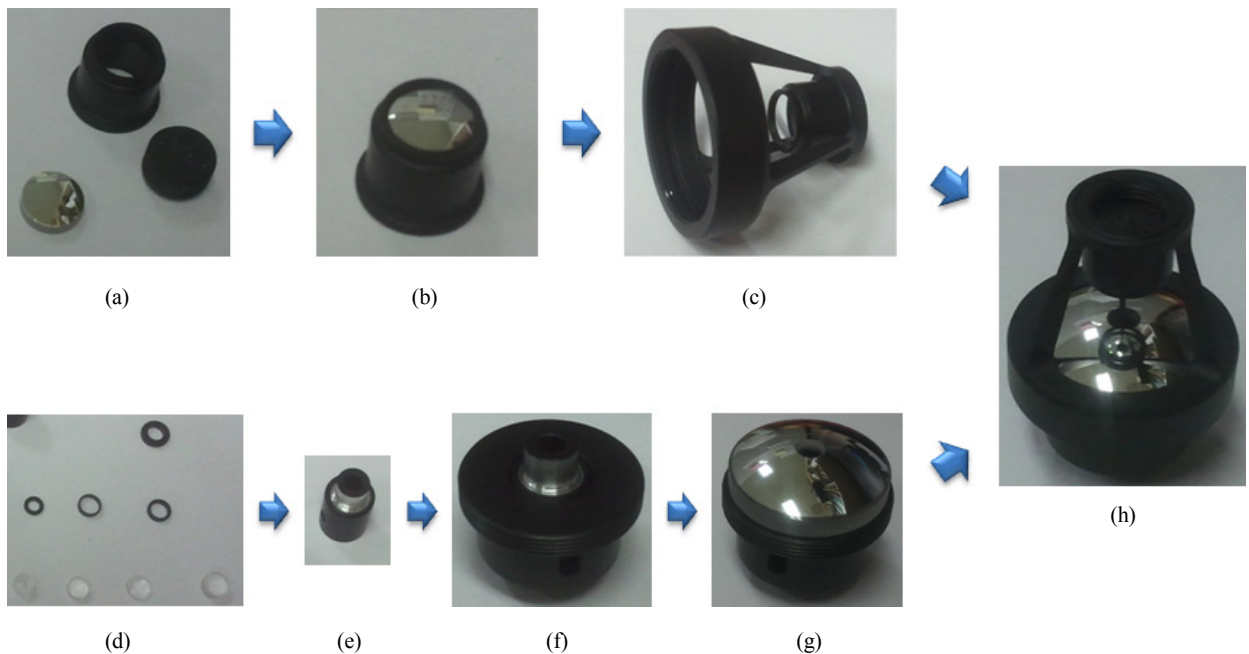


FIG. 8. Fabricated optical elements and mechanical parts of the optimized catadioptric omnidirectional optical system and its assembling sequence diagram. (a) and (b): secondary mirror part, (c): mechanical spacer part, (d) and (e): imaging lens part, (f): CMOS sensor part, (g): primary mirror part, (h): finally assembled catadioptric omnidirectional optical system.

시야를 확보하는 스페이서 역할을 한다. (b)의 제2거울부는 거울 셀에 고정하여 제1거울부의 스페이서에 고정함으로써 조립, 정렬하도록 하였다. (c)의 렌즈부는 결상계의 렌즈들이 쉽게 조립되도록 하여 모든 렌즈가 하나의 몸체로 조립되면서 CMOS 센서를 고정한 (d)의 본체부와 조립되고 정렬되었다. 이렇게 조립될 광학계의 전체 길이는 47.5 mm이고 가로 및 세로는 원형으로 지름이 32 mm가 되도록 하였다.

Figure 8은 Fig. 2와 Table 2에서 설계한 광학소자의 제작된 결과물과 Fig. 7에서 설계한 광기구물의 제작된 결과물들을 보여주며, 이들을 조립하여 전방위 광학계로 만들어가는 과정을 보여주는 조립순서도이다. Figure 8(a)는 평면거울과 이를 고정하는 광기구물의 분해된 모습이며, 이들은 Fig. 8(b)와 같이 조립되어 제2거울부가 된다. 이 후에 Fig. 7의 (b)부분에서 스페이서 역할을 하는 세발 달린 광기구물을 조립하여 Fig. 8(c)와 같은 평면거울의 제2거울부를 고정한다. Figure 8(d)는 3개의 구면렌즈와 1개의 색지움 이중렌즈(Fig. 8(d)의 아래쪽) 및 이들을 고정하는 광기구물(Fig. 8(d)의 위쪽)을 보여준다. 이 렌즈들을 조립하면 결상렌즈부는 Fig. 8(e)와 같이 되며, 이 부분을 CMOS 센서를 고정한 Fig. 7의 (d)부분을 제작한 광기구물에 고정하여 Fig. 8(f)와 같이 된다. Figure 8(f)에 이 부분과 가운데 지름이 4 mm인 구멍을 뚫어서 옅스큐레이션을 만든 구면거울을 고정하면 Fig. 8(g)에서 보는 부품이 된다. 최종적으로 앞에서 미리 제작 및 조립해 놓은 제2거울부인 Fig. 8(c) 부품과 구면거울의 제1거울부와 렌즈로 구성된 결상계를 제작 및 조립해 놓은 Fig. 8(g) 부품을 한 몸체로 조립하면 Fig. 8(h)와 같은 전방위 광학계가 조립되어 제작된다.

IV. 전방위 광학계의 상평가 및 분석

4.1. 물체거리에 따른 결상성능 측정

Figure 9는 전방위 광학계에서 물체거리에 따른 결상성능 평가를 위한 실험장치도로 이 광학계로부터 d만큼 떨어져 있는 자동차(물체)의 앞번호판(Fig. 9의 위쪽 번호판), 뒷번호판(Fig. 9의 아래쪽 번호판)을 물체로 하여 유효초점거리가 1 mm인 전방위 광학계로 결상한 상의 공간주파수를 직접적으로 측정한다. 자동차의 앞번호판의 글씨 두께는 10 mm이고 자간은 12 mm로 번호판의 공간주파수는 0.045 lp/mm이다. 이것을 상공간의 공간주파수로 환산하면 135 lp/mm이고, 뒷

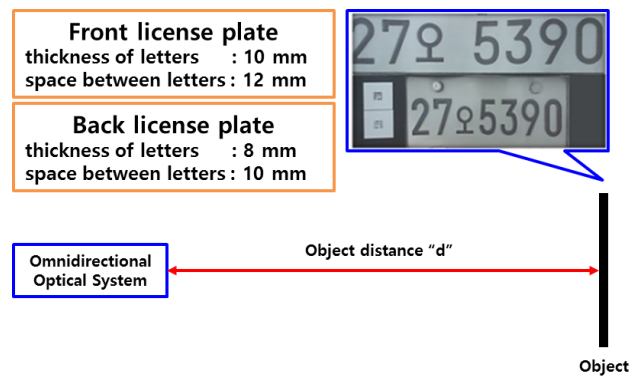


FIG. 9. Schematic diagram for the measurement of imaging performance evaluation of the catadioptric omnidirectional optical system according to various object distances d through the images of car's front and back license plates.

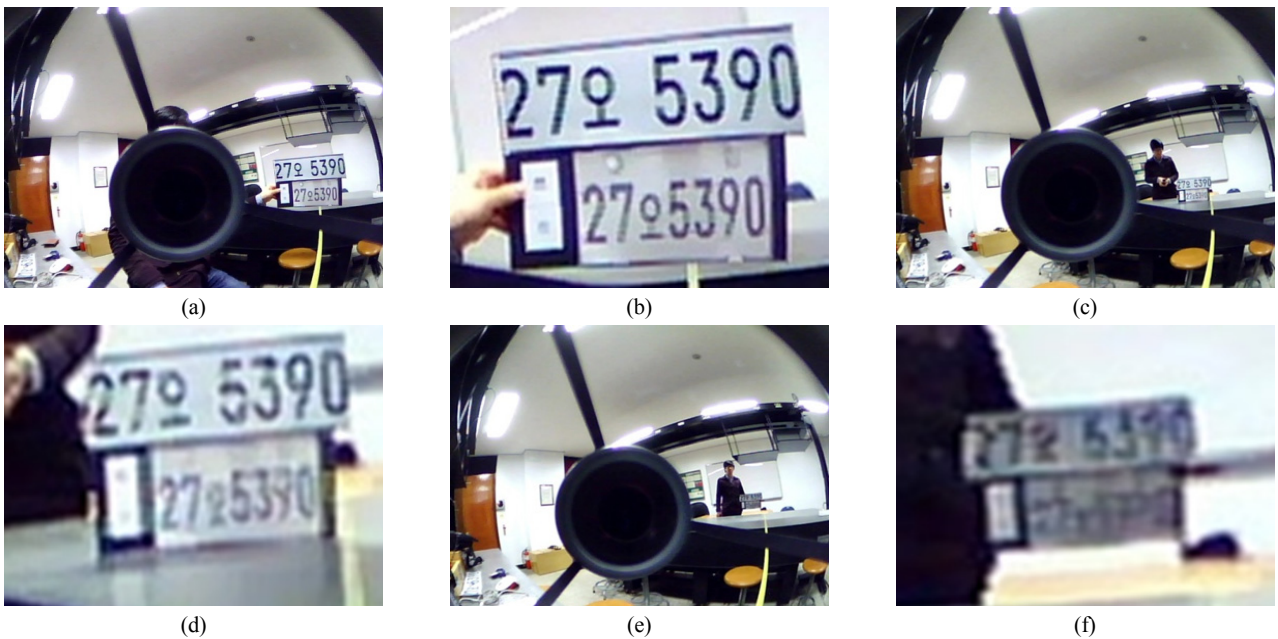


FIG. 10. Measured images of car's front and back license plates according to various object distances from the measuring system (Fig. 9) of imaging performance evaluation of the catadioptric omnidirectional optical system. (a) and (b): object distance = 1 m, (c) and (d): object distance = 2 m, (e) and (f): object distance = 3 m.

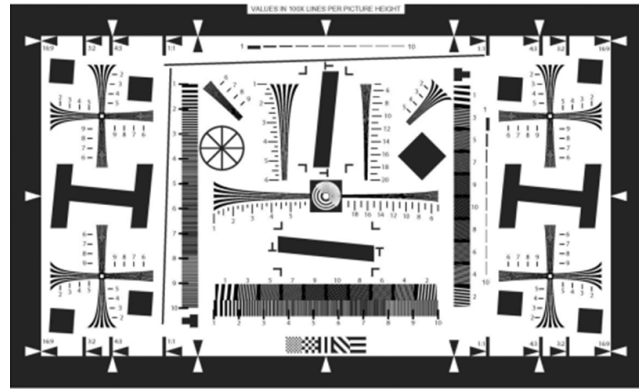
번호판의 글씨 두께는 8 mm이며 자간은 10 mm로 물체의 공간주파수는 0.056 lp/mm로 상공간의 공간주파수로 환산하면 166 lp/mm이다. 이러한 물체를 Fig. 9와 같이 설치하여 물체 거리를 $d = 1\text{ m}$, 2 m , 3 m 로 변화시키며 영상을 촬영하였다. 물체거리가 짧으면 동일한 물체에 대한 상공간에서의 공간주파수는 점점 커지고, 눈으로 직접 구분이 가능한 공간주파수가 실제로 제작된 전방위 광학계의 MTF에 해당하는 공간주파수로 분석할 수 있다.

Figure 10은 제작된 전방위 광학계의 결상성능 평가 결과로 Fig. 10 (a)와 (b), (c)와 (d), (e)와 (f)는 각각 물체거리 d 가 1 m, 2 m, 3m인 경우에 대한 약 0.5 필드에 해당하는 자동차 번호판의 영상이다. Figure 10에서 보듯이 물체거리 1 m와 2 m에서는 자동차의 앞번호판, 뒷번호판 모두를 식별 가능하므로 MTF를 만족하는 공간주파수는 166 lp/mm 이상임을 확인할 수 있다. 반면에 3 m의 물체거리에서는 자동차의 앞번호판은 식별가능하나 자동차 뒷번호판은 식별 불가능하여 자동차 앞번호판의 MTF인 135 lp/mm 이하의 분해능을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이러한 MTF가 저하되는 주요 원인은 설계 및 제작 상에서 광학소자 및 광기구물의 제작과 이들에 대한 조립과정에서 제작공차 또는 조립공차에 의한 결과이다. 앞으로는 왜곡이 극대화되는 전방위 광학계에 대한 정확한 필드별 MTF 측정법과 이에 대한 결과 분석에 대해서는 추가로 더 연구하여 논의하고자 한다.

4.2. 수직화각 측정

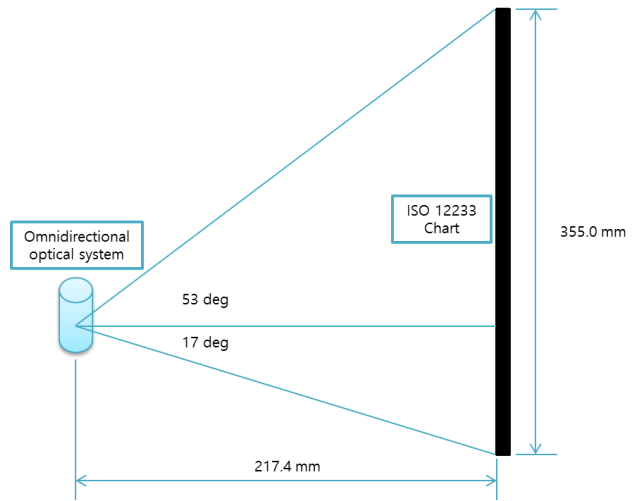
제작된 전방위 광학계의 수직 화각을 평가하기 위하여 Fig. 11 (a)와 같은 ISO 12233 차트를 물체로 사용하였다. ISO 12233 차트는 카메라 및 렌즈 테스트 차트로 사용되는 차트로, 화면 비율, 영역별 해상도 등을 확인할 때 사용되고 있는 표준 차트이다. ISO 12233 차트를 물체로 이용하여 제작된 전방위 광학계의 수직화각을 측정하기 위하여 Fig. 11 (b)와 같이 실험 장치를 구성하였다. 이때 355 mm의 차트 높이와 앞서 설계한 상방과 하방 수직화각에 해당하는 총 시야각 70도에 대응하는 물체 거리는 217.4 mm이므로 이 위치에 차트를 설치하였다. Figure 11에서 수직화각 측정장치에서 217.4 mm 물체거리의 화각은 ISO 12233차트의 높이인 335 mm에 해당한다.

Figure 12는 Fig. 11의 실험장치를 이용하여 촬영한 전방위 광학계의 영상으로 수직화각 내에서 촬영되는 영상의 범위는 노란색 화살표 부분이다. ISO 12233 차트의 아래쪽은 잘리는 부분 없이 다 보이는 것을 확인하였으나 차트 위쪽부분은 차트에 그려진 하얀색 화살표 위쪽부분이 약간 잘리는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 실제 차트의 약 17.5 mm의 손실이 된 것을 확인하였고 각도로 계산하니 최종적으로 수직화각은 약 68.2°인 것으로 확인하였다. 제작되고 조립된 전방위 광학계의 수직화각 측정값은 광학설계시 어느 정도 성능에서 여유를 둔 70°에는 못 미쳤으나 Table 1과 보는 초기에 정한 전방위 광학계의 제원인 67°이상의 수직화각을 달성하였다.



ISO_12233 chart

(a)



(b)

FIG. 11. (a) ISO 12233 chart and (b) Experimental setup for the measurement of field of view of the catadioptric omnidirectional optical system using ISO test chart.



FIG. 12. The measurement of field of view of the catadioptric omnidirectional optical system by the image of ISO 12233 chart.

V. 결 론

중심부 구멍인 옵스큐레이션을 갖는 구면거울과 평면거울로 이루어진 반사계와 3개의 단일구면렌즈와 1개의 구면으로 된 이중렌즈로 구성된 결상계로 이루어진 반사굴절식 전방위 광학계를 설계하고 제작한 후, 이 광학계의 물체거리에 따른 결상 성능과 수직화각을 측정하였다. 설계의 용이성과 구조의 단순성을 통해 작은 부피, 가벼운 무게, 저가격 제조를 위하여 이 광학계의 광학소자들은 펜, 틸트, 줌과 같은 물리적인 작동을 하지 않는다. 그리고 최종 영상을 촬영하는 센서로는 응답속도가 빠른 1/2.8 인치이고 3.27 메가픽셀인 CMOS 센서를 사용하였다. 그 결과 수직화각(고도각) 상하 50° ~ -17°를 기준으로 360° 방위각에 들어오는 영상을 한번에 포착할 수 있었다. 광학계의 전체 길이는 47.5 mm이고 가로 및 세로는 원형으로 32 mm로 공간적 제약을 적게 받도록 설계하였다. 광학계 설계에서 광로도 및 필드별 MTF는 설계시 목표로 했던 중심필드의 MTF 30%에서 150 lp/mm를 도달하였다.

그리고 저가격 및 무게를 고려하여 알루미늄으로 광기구물을 설계하여 광학소자들과 광기구물을 제작하여 조립하여 시작품을 만들었다. 이때 제작한 반사굴절형 전방위 광학계를 가지고 설계, 제작 및 조립이 잘되었는지 확인하기 위하여 MTF 및 수직화각을 평가하였다. 우선 자동차의 앞번호판과 뒷번호판으로 실험하였다. 자동차의 앞번호판의 글씨 두께는 10 mm이고 자간은 12 mm로 물체의 공간분해능은 0.045 lp/mm이고 상공간의 MTF로 환산하면 135 lp/mm이고, 뒷번호판의 글씨 두께는 8 mm이고 자간은 10 mm로 0.056 lp/mm로 상공간의 MTF로 환산하면 166 lp/mm이다. 실험결과, 물체거리가 1 m와 2 m에서는 자동차 앞번호판과 뒷번호판을 모두 확인 할 수 있으나, 물체거리 3 m에서는 자동차 앞번호판만 식별가능하고 자동차 뒷번호판은 식별이 불가능함을 확인하였다. 이로부터 이 광학계의 식별 가능한 물체의 공간주파수는 3 m의 물체거리에서 자동차 앞번호판 분해능 값에 해당하는 공간주파수가 135 lp/mm임을 확인하였다. 이렇게 식별이 가능한 공간주파수가 낮은 이유는 광학소자와 광기구물의 가공 및 조립시 공차에 의해 발생한 것으로 판단이 된다. 또한 수직화각 달성도를 확인하기 위하여 ISO 12233 차트를 가지고 실험을 하였다. 전방위 광학계로부터 217.4 mm 떨어진 곳에 335 mm 높이를 갖는 ISO 12233차트를 놓았을 때 이미지 센서에서 차트가 모두 잡히면 설계시 수직화각인 53° ~ -17°를 만족하게 된다. 실제 측정결과 차트의 아래부분은 영상이 모두 결상되었으나 차트 윗부분에서 약 17.5 mm가 잘린 것을 확인하였고, 이를 고려하여 수직화각을 계산한 결과 이 광학계가 촬영할 수 있는 수직화각은 약 68.2°로 확인되었다. 이는 Table 1에서 제시한 수직화각에 대한 설계 제원의 범위인 67°에 들어가는 값임을 확인하였다.

앞으로는 설계 시 제작 및 조립 공차를 분석하여 보다 정밀한 전방위 광학계를 설계하고자하며, 거울부에 대한 초기

설계의 이론을 정확히 유도하여 체계적인 설계가 되도록 하고자 한다. 또한 왜곡이 심하고 영상정보가 압축 및 손실되는 전방위 광학계의 필드별 보편적인 MTF 측정방법을 정립하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 한남대학교 학술연구조성비 지원(2014A107)에 의하여 연구되었음을 알려드립니다. 그리고 본 연구가 진행되는 동안 연구의 내용을 토론해주고 기술적으로 도움을 준 (주)JM-Tech의 이정환 이사와 국립금오공과대학교 광시스템공학과 류재명 교수 및 실험을 일부 도와준 (주)LIG넥스원의 이상은 박사에게 감사를 드리는 바입니다.

References

1. R. Kingslake, *A History of the Photographic Lens* (University of Rochester NY, USA, 1989), p. 145.
2. D. Brooks, *Lenses and Lens Accessories: A Photographer's Guide* (Curtin & London, Marblehead, Massachusetts, USA, 1982), p. 29.
3. S. J. Oh and E. L. Hall, "Guidance of a mobile robot using an omnidirectional vision navigation system," *Proc. SPIE* **852**, 288300 (1987).
4. D. P. Kuban, H. L. Martin, S. D. Zimmermann, and N. Busico., "Omniview motionless camera surveillance system," U.S. Patent 5359363 (1994).
5. V. Nalwa, *A True Omnidirectional Viewer* (Technical report, Bell Laboratories, Holmdel, NJ 07733, USA, 1996).
6. S. Baker and S. K. Nayar, "Catadioptric image formation," in *Proc. DARPA Image Understanding Workshop* (Columbia University, USA, May 1997), pp. 1431-1437.
7. S. K. Nayar, "Catadioptric omnidirectional camera," *Proc. IEEE* **10.1109/CVPR**, 609369 (1997).
8. D. G. Aliagea, I. B. Carlbom, and HARNESS DICKEY & PIERCE, "Camera model and calibration procedure for omnidirectional paraboloidal catadioptric cameras," U.S. Patent 0004694 (2003).
9. S. Thibault, M.Sc., Ph. D., "Panoramic lens applications revisited," *Proc. SPIE* **7000**, 70000L (2008).
10. J. Parent and S. Thibault, "Tolerancing panoramic lenses," *Proc. SPIE* **7433**, 74330D (2009).
11. NANO PHOTONICS Co., Ltd., "Panoramic mirror and imaging system using the Same," Korea Patent 1004912710000 (2005).
12. J.-H. Lee, "Omnidirectional optical lens," Korea Patent 1012888710000 (2011).
13. J. H. Jo, "Design of omnidirectional camera lens system with catadioptric system," *Proc. SPIE* **8788**, 98 (2013).
14. H.-Y. Jung, "Optical design of a catadioptric panoramic lens system," Cheongju University (2013).
15. G.-i. Kweon, "Design of a mega-pixel grade catadioptric panoramic lens with the rectilinear projection scheme," J.

- Opt. Soc. Korea **10**, 67-75 (2006).
16. Nippon Seiki Co., Ltd., “Omnidirectional camera and omnidirectional lens,” Japan Patent JP22225265 (2010).
17. Nippon DOUROINGU:KK, “Omnidirectional camera,” Japan Patent JP20207575 (2008).
18. J. Heung Jo and J. M. Ryu, *Introduction of Lens Design Technology Using Lens Design Programs and its Applications* (Chungmungak, Seoul, 2013), pp. 143-153.