

줌렌즈 광속확대기를 적용한 레이저 레이더용 송수광 내접형 광학계 설계

고해석^{1†} · 옥창민² · 홍진석³ · 이창재¹ · 박찬근² · 김현규²

¹국방과학연구소 국방신기술본부 2부
 ☎ 305-600 대전광역시 유성우체국 사서함 35호

²(주)토핀스
 ☎ 305-732 대전시 유성구 문지동 103-6 KAIST ICC F714

³삼성탈레스
 ☎ 449-885 경기도 용인시 처인구 남사면 창리 304번지

(2012년 11월 22일 받음, 2012년 12월 17일 수정본 받음, 2012년 12월 17일 게재 확정)

송광광학계의 광원으로 사용되는 광섬유 레이저의 개구수, NA가 0.13~0.22의 범위에 있으면, 이 NA에 관계없이 1 km 전방에서 빔직경이 4.8 m 또는 6.8 m이 되도록 줌렌즈형 광속확대기를 적용한 송광광학계를 설계하였으며, 표적에서의 foot prints를 통하여 빔직경을 확인하였다. 16×16(100 μm×100 μm) 픽셀 검출기를 사용하는 수광광학계를 설계하였으며, 검출면의 픽셀 위치에 따른 spot diameter는 모두 55 μm 이하가 됨을 확인하였다. 스캔을 고려하여 송광광학계를 수광부 대물렌즈에 내접하도록 구성하였으며, 이때 송광부에 의하여 가려진 부분은 11%가 되었다.

Inscribed Transceiver Optical System Design for Laser Radar with Zoom-type Expander

Hae Seog Koh^{1†}, Chang Min Ok², Jin Sug Hong³, Chang Jae Lee¹, Chan Geun Park²,
 and Hyun Kyu Kim²

¹Defense Advanced R&D Institute, Agency for Defense Development, Yuseong P.O. Box 35, Daejeon 305-600, Korea

²Topins, F714, KAIST ICC, 103-6 Moonji-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-732, Korea

³Yongin R&D Center, Samsung THALES, 304, Chang-li, Namsa-myun, Cheoin-gu, Yongin 449-885, Korea

(Received November 22, 2012; Revised manuscript December 17, 2012; Accepted December 17, 2012)

In this paper, an optical system was designed for 3D imaging laser radar with optical scanner. In order to make it easy to scan, the system was designed to inscribe the transmitting objective lens in the receiving lens. In transmitting optics, the beam expander was designed to have a zoom mechanism so that the transmitted beam size would be 4.8 m or 6.8 m at 1 km distance, when the laser source's numerical aperture value is between 0.13 and 0.22. The beam diameter at the target 1 km away was confirmed by design program. The receiving optics for the returning beam from the target was designed for the 16×16 array detector with 100 μm pixel width. The spot diameter in every pixel was designed and verified to be less than 55 μm. The receiving optics' obscuration ratio by transmitting optics was 11%.

Keywords: Laser radar, Inscribed transceiver optical system, Zoom-type beam expander, Lasers' numerical aperture

OCIS codes: (110.6880) Three-dimensional image acquisition; (120.4820) Optical systems; (220.4830) Systems design

I. 서 론

레이저 레이더는(laser Radar 또는 Ladar)는 레이저를 전방

에 조사하고 반사되어 되돌아오는 광신호를 검출기에서 감지하는 광학식 레이저 레이더 시스템이다. 레이저가 조사된 영역의 2차원 영상정보와 거리정보를 통합하여 3차원 영상

†E-mail: hskoh@add.re.kr

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

을 얻을 수 있다. 마이크로파를 사용하는 기존 레이저에 비하여 미크론 또는 그 이하의 짧은 파장과 좁은 폴스 폭을 가지는 레이저를 사용하기 때문에 고해상도, 고정확도의 표적 정보 획득이 가능하다. 반면 레이저의 특성상 대기의 영향으로 운용상 탐지거리의 영향을 받을 수 있는 단점이 있다.^[1-5]

본 논문은 3차원 영상 레이저 레이더용 광학계 설계 및 분석에 대한 내용이다. 16×16 픽셀 검출기를 사용하여 3차원의 영상을 획득하기 위해서는 스캔이 필요하며, 일부 광학부품을 같이 사용하는 일축으로 송수광광학계를 설계할 경우에 나타날 수 있는 내부반사에 의한 거리측정 신호의 오류 가능성을 최소화하면서, 스캐너의 크기가 최소가 되도록 송광광학계가 수광광학계에 내접하도록 설계하였다. 사용되는 광섬유 레이저의 개구수(numerical aperture, NA) 및 시스템의 요구조건에 따라 표적에서의 빔 크기를 조절하기 위하여 광속확대기를 줌렌즈로 설계하였다. 시스템에서는 대기의 영향을 최소화 하기 위하여 Geiger-mode로 동작하는 검출기를 사용하였으며, 표적까지의 거리를 최대 16개의 구역으로 분할하여 신호처리 되도록 하였다.

II. 줌렌즈 광속확대기를 적용한 송광광학계 설계 및 분석

광원으로 사용되는 레이저 제작의 편의성을 제공하기 위하여, 광섬유 레이저의 end cab 직경은 $70 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 일 때 NA가 $0.13 \sim 0.22$ 에서 어느 값을 갖더라도 적용할 수 있도록 하며, 1 km 떨어진 지점에서 빔 직경이 4.8 m 또는 6.8 m로 조사될 수 있도록 줌렌즈형 송광광학계를 설계하였다. 이 때 사용된 광섬유 레이저의 파장은 $1560 \pm 0.5 \text{ nm}$ 이다. 1 km 떨어진 지점의 빔 직경이 4.8 m 또는 6.8 m 일 때 송광광학계의 광발산각은 각각 $0.275^\circ \sim 0.389^\circ$ 가 되며, 이는 수광광학계에서 사용되는 16×16 어레이 검출기에 각각 내접 및 외접에 대응되는 값으로 시스템의 필요에 따라 검출기에 입사되는 레이저 빔의 세기를 선택할 수 있도록 하였다.

위와 같은 조건에 따라 NA가 0.13일 때 설계된 송광광학계는 그림 1, 광학계 설계자료는 표 1과 같다. 이 경우 시준렌즈를 통과할 때의 빔직경은 5.916 mm이며, 표적에서의 빔직경이 4.8 m, 6.8 m 일 때 광속확대기 출력빔의 직경은 각각 22.141 mm, 22.159 mm이다. 광섬유 레이저의 end cap에서 출력된 레이저 빔은 시준렌즈(collimating lens)를 통하여

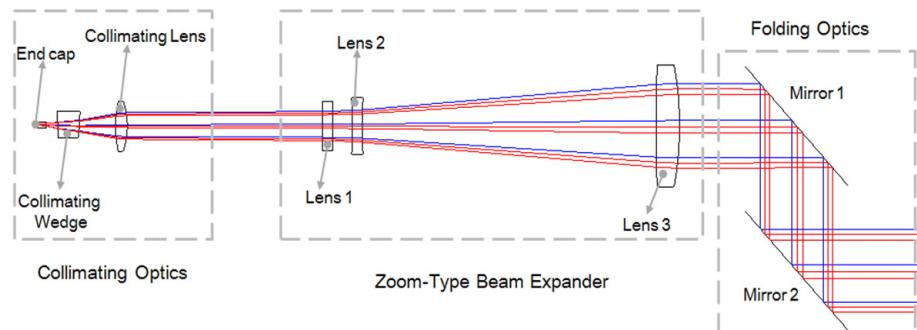


FIG. 1. Schematic diagram of the transmitting optics with zoom-type beam expander.

TABLE 1. Transmitter optics design data (NA=0.13)

| | Radius (mm) | Thickness (mm) | Material | Name |
|--------------------|-------------|----------------|----------|---------------------|
| Collimating Optics | ∞ | 3.0 | silica | Fiber laser end cap |
| | 1∞ | 3.0 | | |
| | ∞ | 5.5 | silica | Collimating wedge |
| | ∞ | 14.8 | | |
| | 22.82 | 3.0 | silica | Collimating lens |
| | -14.74 | 50.0 | | |
| Zoom Beam Expander | -90.00 | 2.5 | silica | Lens 1 |
| | 90.00 | 5.1032 | | |
| | -90.00 | 2.5 | silica | Lens 2 |
| | 90.00 | 75.2167 | | |
| | 322.91 | 6.0 | silica | Lens 3 |
| | -66.12 | 30.0 | | |
| Folding Mirror | ∞ | -32.0 | mirror | Mirror 1 |
| | ∞ | 33.0 | mirror | Mirror 2 |

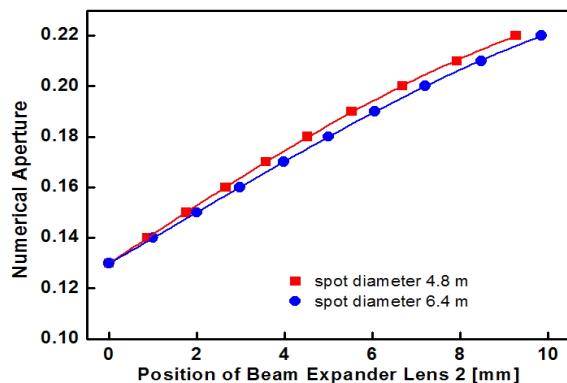


FIG. 2. The displacement value of a moving lens of zoom-type beam expander according to the numerical apertures of the source laser and beam diameters of target at 1 km away.

여 시준광이 생성되고, 광속확대기 조절을 통하여 표적에서의 빔 크기를 원하는 크기로 맞추게 되며, 송광광학계와 내접형으로 구성하기 위하여 반사경 2개를 사용하였다. 광섬유레이저의 NA에 관계 없이 시준렌즈는 고정하였으며, 광속확대기 렌즈 2를 이동시키면서 NA 또는 표적에서의 빔 크기에 따른 광발산각을 조절하도록 하였다.

가변 되는 NA 값에 따른 줌렌즈형 광속확대기 렌즈 2의 상대적인 위치 변화량은 그림 2와 같다. 표적에서의 레이저 빔직경 4.8 m, 6.8 m를 얻기 위하여서는 NA=0.13을 기준으로 NA가 변함에 따라 렌즈 2의 변이는 거의 선형적으로 증가하였으며, 최대 변이는 각각 9.1 mm, 10 mm로 나타났다. 따라서 NA가 달라지더라도 광속확대기 제작은 어렵지 않게 구현될 것이다.

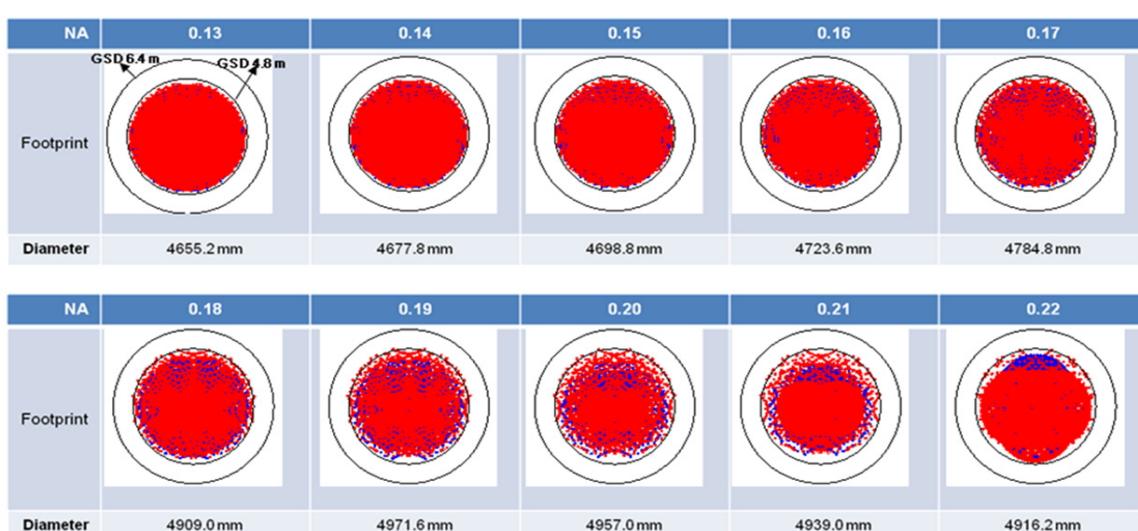


FIG. 3. The foot prints of beam that was designed 4.8 m by the transmitting optics according to the numerical apertures of the source laser at 1 km away target.

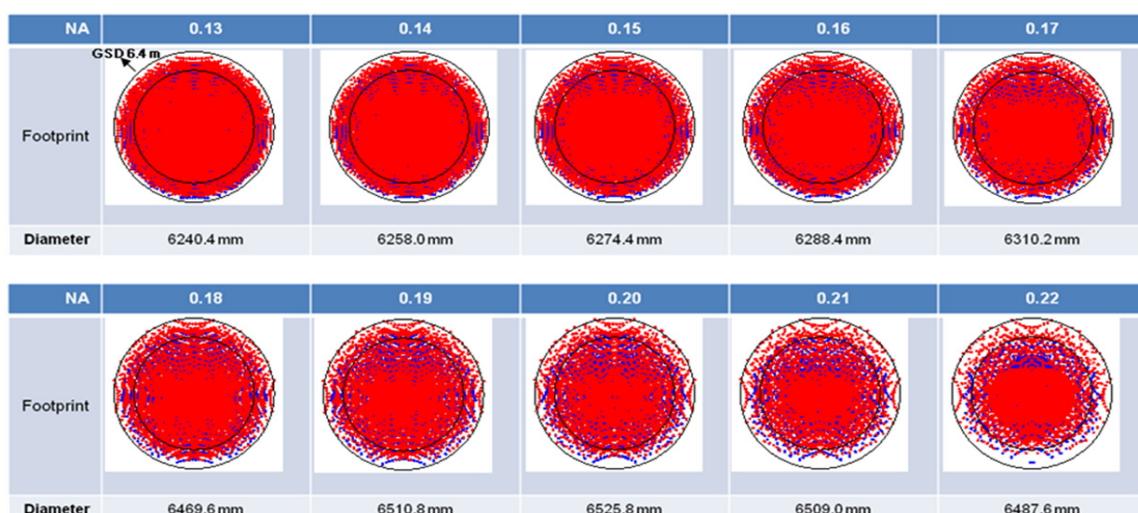


FIG. 4. The foot prints of beam that was designed 6.8 m by the transmitting optics according to the numerical apertures of the source laser at 1 km away target.

NA 변화에 따라 1 km 떨어진 표적에서 범위경이 4.8 m와 6.8 m로 설계된 경우의 foot prints를 분석하였다. 그림 3은 범위경이 4.8 m, 그림 4는 6.8 m의 경우의 NA에 따른 foot prints를 보이고 있다. 두 경우 모두 NA가 커짐에 따라 수차가 증가하여 spot의 불균일도가 증가하였으나, 이 값이 검출기에 직접 입력되는 값이 아니며, 표적에서 난반사되어 되돌아오는 반사빔을 검출하기 때문에 시스템 측면에서는 수용 가능한 값으로 판단되었다.

III. 16×16 어레이 검출기용 수광광학계 설계 및 분석

3차원 레이저 레이더 영상을 획득하기 위한 수광부는 1 km 떨어진 지점에서 물체에서 반사되는 1560 nm 레이저 광을

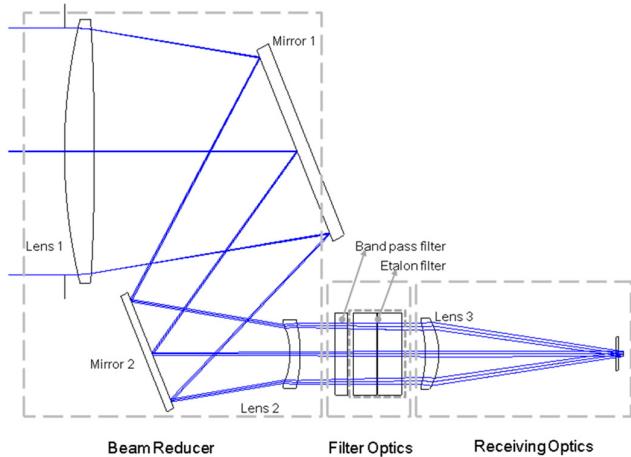


FIG. 5. Schematic diagram of the receiving optics.

수광하기 위해 픽셀 피치 100 μm 인 16×16 어레이 검출기를 수광부 상면에 위치시켜 표적에서 반사된 반사광을 수광한다. 이 때 수광부의 시야각은 $0.275^\circ \times 0.275^\circ$ 이며, 수광부는 F/4로 설계하였다.

수광광학계는 대물렌즈를 포함한 광속축소부와 반사광을 검출기에 집속시키는 집속부로 구성되었으며, 이들 사이에 필터를 적용하였다. 설계된 수광광학계는 그림 5와 같고, 설계 자료는 표 2와 같다. 광속축소부는 필터 등 평행판 광학소자를 적용할 수 있도록 수신되는 표적 반사광을 평행광으로 만들게 되며, 2개의 반사경은 기구적인 크기를 줄이기 위하여 적용되었다. 원론적으로 1개의 photon만 입사되더라도 감지하는 Geiger-mode로 동작하는 검출기를 사용하기 때문에, 햇빛 등 외부 잡음을 제거하기 위하여 수광광학계의 시준빔 영역에서 레이저 파장만을 투과시키는 에탈론 필터와 band-pass 필터를 이중으로 사용하였다. 이는 통상의 거리측정기에서 사용되는 단일 소자 검출기와 달리 시야각이 넓은 어레이 검출기를 사용하기 때문이다. 검출기에 집광하는 렌즈 3은 수차를 줄이기 위하여 비구면 렌즈로 설계되었다. 비구면 방정식은 $Z=(\text{Curv})Y^2/[1+\{1-(1+K)(\text{Curv})^2Y^2\}^{1/2}]+(A)Y^4+(B)Y^6+(C)Y^8+(D)Y^{10}$, Curv=-0.05005005, K=0.000000, A=0.0634730 ×10⁻⁵, B=0.181046×10⁻⁷, C=0.499801×10⁻⁷, D=0.000000이다.

1 km 전방에서 반사되어 수광광학계를 통과한 반사광의 검출기 상면에서의 spot diagram은 그림 6에, 검출기에서의 encircle energy는 그림 7에 나타내었다. 16×16 검출기의 중앙 뿐 아니라 모서리 검출기에서도 약 55 μm 이하의 spot dia.를 보이고 있으며, 각 검출소자 위치에 관계없이 대략 직경 40 μm 에 90% encircled energy가 집중되고 있다. 이는 조립공차와 제작공차를 고려하면 충분할 것으로 보인다.

TABLE 2. Receiver optics design data

| | Radius (mm) | Thickness (mm) | Material | Name |
|------------------|-------------|----------------|-------------|--------------------|
| Object | | 1 km | | |
| | 163.91 | 11.8 | silica | Objective lens |
| | -689.34 | 80 | | |
| | ∞ | -89 | mirror | |
| | ∞ | 54.4 | mirror | |
| | 21.15 | 4 | NBK7 | Collimating Lens |
| | 40.75 | 26.91 | | |
| Beam Reducer | -41.73 | 13.8 | | |
| | | | | |
| | ∞ | 5 | 'Borofloat' | Band Pass Filter |
| | ∞ | 2 | | |
| | ∞ | 9.53 | silica | Etalon filter 1 |
| | ∞ | 0.25 | | |
| Filter Optics | ∞ | 9.53 | silica | Etalon filter 2 |
| | ∞ | 9.3 | | |
| Receiving Optics | -33.09 | 5.3 | NBK7 | Focusing lens |
| | -19.98 | 70 | | (Aspheric surface) |

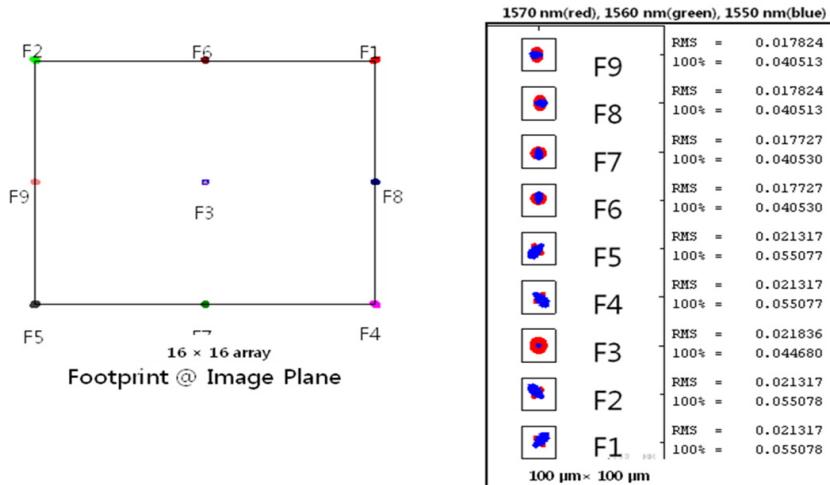


FIG. 6. Spot diagrams of the each detector element at image plane.

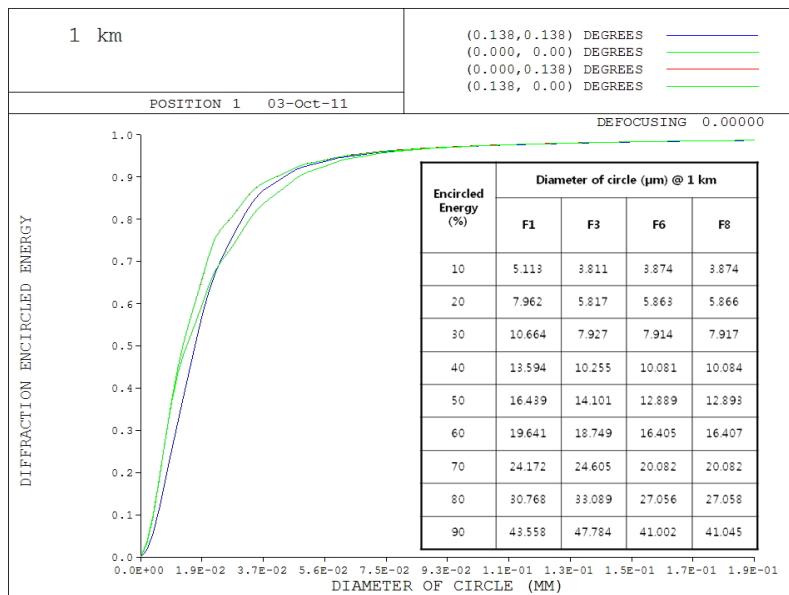


FIG. 7. Encircled energy of the each detector elements at image plane.

IV. 송수광 내접형 레이저 레이더용 광학계

송광광학계와 수광광학계가 결합된 레이저 레이더용 광학계는 그림 8과 같다. 표적에서 반사된 레이저광을 수신하여 3차원 영상을 획득하기 위하여서는 스캔이 필요하며, 실제 시스템에서는 송수광광학계 앞쪽에 스캔 광학계가 추가된다. 따라서 스캔을 용이하게 하기 위하여 송광광학계의 광속이 수광광학계에 내부에 놓이도록 설계되었다. 수광부의 수광량을 최대로 하기 위하여 수광부 대물렌즈에 내접하게 송광부가 설치되었으며, 따라서 송광부에 의하여 가려진 부분은 면적대비 대략 11%로 계산되었다. 특히 일축광학계의 단점인 내부 광학소자에 의한 반사와 제한된 기구물에 의한 회절효과를 최소화 할 수 있도록 수광광학계의 대물렌즈 밖에서 송수광 광축이 결합되도록 하였다.

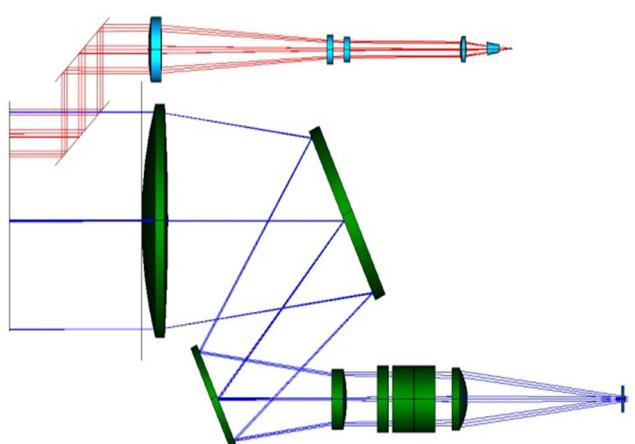


FIG. 8. Layout of the transceiver inscribed optical system.

V. 결 론

16×16 픽셀 검출기를 사용하고, 3차원의 영상을 획득하기 위한 스캔 광학계를 사용하는 3차원 레이저 레이더용 내접형 송수광 광학계를 설계하였다. 송광광학계의 광원으로 사용되는 광섬유 레이저의 NA에 관계없이 1 km 전방에서 빔직경이 4.8 m 또는 6.8 m이 되도록 하기 위하여 줌렌즈형 광속확대기를 적용하여 송광광학계를 설계하였으며, 표적에서의 foot prints를 통하여 NA에 따른 빔직경을 확인하였다. 광속축소기와 집속렌즈로 구성된 수광광학계를 설계하였으며, 설계된 수광광학계의 검출면에서 픽셀 위치에 따른 spot diagram을 분석하여 충분한 영상 분해능을 가짐을 확인하였다. 스캔 광학계 적용이 용이하면서, 송광부에 의하여 가려지는 수광부 면적을 최소화 하기 위하여 내접형으로 광학계를 구성하였으며, 가려지는 부분은 면적대비 대략 11%로 계산되었다.

References

1. A. V. Jelaiian, *Laser Radar Systems* (Artech House, Boston, USA, 1991).
2. C. S. Fox, "Active electro-optical systems," in *The Infrared & Electro-optical Systems Handbook Volume 6* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, USA, 1993), pp. 3-76.
3. R. D. Richmond and S. C. Cain, *Direct-detection LADAR Systems* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, USA, 2009).
4. C. Brenner, "Digital recording and 3D modeling," in *Tutorial of International Summer School* (Crete, Greece, April 2006).
5. M. S. Jo, C.-J. Lee, and E.-C. Kang, "Performance test and analysis of the laser radar system prototype for mapping application," *Korean J. Opt. Photon.* **23**, 197-202 (2012).