

1채널 단일광자검출기를 이용한 낮은 광출력의 SWIR(Short Wave Infrared) 3D 라이다 시스템 개발

Development of SWIR 3D Lidar System with Low Optical Power Using 1 Channel Single Photon Detector

권오성¹, 이승필², 신승민³, 박민영⁴, 반창우^{5*}

Oh-Soung Kwon¹, Seung-Pil Lee², Seung-Min Shin³,
Min-Young Park⁴, Chang-Woo Ban^{5*}

〈Abstract〉

Now that the development of autonomous driving is progressing, LiDAR has become an indispensable element. However, LiDAR is a device that uses lasers, and laser side effects may occur. One of them is the much-talked-about eye-safety, and developers have been satisfying this through laser characteristics and operation methods. But eye-safety is just one of the problems lasers pose. For example, irradiating a laser with a specific energy level or higher in a dusty environment can cause deterioration of the dust particles, leading to a sudden explosion. For this reason, the dust ignition proof regulations clearly state that “a source with a pulse period of less than 5 seconds is considered a continuous light source, and the average energy does not exceed 5 mJ/mm² or 35 mW” [2]. Energy of output optical power is limited by the law. In this way, the manufacturer cannot define the usage environment of the LiDAR, and the development of a LiDAR that can be used in such an environment can increase the ripple effect in terms of use in application fields using the LiDAR. In this paper, we develop a LiDAR with low optical power that can be used in environments where high power lasers can cause problems, evaluate its performance. Also, we

1 주저자, (주)퀀텀센싱, 팀장

2 (주)퀀텀센싱, F/W

3 (주)퀀텀센싱, S/W

4 (주)퀀텀센싱, PM

5* 교신저자, (주)퀀텀센싱, 연구소장

E-mail: chwban@quantsensing.co.kr

1 QuantumSensing Co., Ltd, Research Team Leader

2 QuantumSensing Co., Ltd Embedded Software Engineer

3 QuantumSensing Co., Ltd Application Software Engineer

4 QuantumSensing Co., Ltd Project Management Engineer

5* QuantumSensing Co., Ltd, Research Director

E-mail: chwban@quantsensing.co.kr

discuss and present one of the directions for the development of LiDAR with laser power limited by dust ignition proof regulations.

Keywords : Low Optical Output Power, LiDAR, Reflecting Optical System, Single Photon Detector, Dust Ignition Proof

1. 서 론

자율주행의 발달이 진행되고 있는 현재 라이다(LiDAR)는 없어서는 안 되는 필수적인 요소가 되었다. 그러나 라이다는 레이저를 사용하는 장치로 레이저에 의한 부작용이 발생할 수 있다[1]. 그중 하나가 흔히 이야기하는 Eye-safety이며, 개발사들은 레이저의 특성 및 운용방식을 통해 이를 만족해 오고 있다. 그러나 Eye-safety는 레이저가 초래하는 문제의 한 가지에 해당하는 것일 뿐 전부는 아니다. 예로, 분진이 발생하는 환경에서 레이저를 특정 에너지 이상으로 조사할 때 분진 알갱이의 열화를 일으켜 급기야 폭발로 이어질 수 있다. 이를 위해 분진 방폭 규정에는 '5초 미만의 펄스 주기를 가지는 발생원은 연속광원으로 간주하여 평균 에너지를 $5\text{mJ}/\text{mm}^2$ 또는 35mW 를 초과하지 않을 것'이라고 명시되어 있을 정도로 레이저의 출력 에너지에 제한을 두고 있다[2]. 이처럼 라이다의 사용 환경을 제조사가 정의할 수 없고, 이러한 환경에서 사용할 수 있는 라이다의 개발은 라이다를 이용한 응용 분야에 파급력을 넓힐 수 있어 이에 대한 필요성은 충분하다.

본 논문에서는 높은 출력의 레이저가 문제를 일으킬 수 있는 환경에서 사용할 수 있는 낮은 광출력을 가지는 라이다를 개발하여 그 성능을 평가하고, 분진 방폭 규정에서 제한하는 레이저 출력을 가지는 라이다 개발을 위한 방향성 중 하나를 제시한다.

2. 낮은 광출력의 레이저

일반적인 상용 라이다의 경우 사용 레이저의 파장에 따라 평균 광출력은 25~120W를 사용하며, 사용 출력 펄스의 주기와 펄스 폭에 따라 순간 광출력은 25~240kW에 이른다. 일반적인 라이다에 사용되는 파장 중 SWIR(Short Wave Infrared) 대역으로 대표되는 1550nm파장은 NIR(Near Infrared) 대역으로 대표되는 905nm파장보다 더 높은 광출력을 사용한다. 이는 SWIR이 NIR보다 수분에 잘 흡수되어 안개나 비의 영향을 낮추기 위함이며, 이러한 성질 때문에 SWIR은 NIR에 비해 수정체에 대부분 흡수되어 눈의 망막에 도달하지 못해 더 높은 광출력을 사용함에도 눈에는 더 안전하다. 그러나 분진 발생 환경에서 사용하기에는 평균 광출력이 기준치의 700배 이상으로 적합하지 않다.

상용 라이다에서 사용하는 레이저는 레이저의 출력을 높이기 위해 레이저 다이오드 바(이하 다이오드)를 적층하여 출력을 높인다. 이러한 레이저를 이용하여 낮은 광출력의 레이저를 생성하기 위해서는 크게 두 가지의 방법이 있다. 하나는, 낮은 전류로 구동하여 낮은 광출력의 펄스 레이저를 만들어 내는 것이다. 이러한 레이저의 운용은 적층 레이저 다이오드 바 각각에 소비되는 전력이 최소 한계 전류에 가까워 불안정한 상태가 된다. 두 번째는 레이저 펄스의 주기를 높여 다이오드 각각에 소비되는 전력을 최소 한계 전력 이상으로 끌어올리며 평균 광출력은 낮게 유지하는 방법이다. 그러나 여러 개의 다이오드가 적층 되어있는 레이저의 경우 반

응 속도가 이를 따라주지 못해 불가능한 방식이다.

통신용 레이저의 경우 단일 다이오드를 사용하여 10~15mW의 평균 광출력을 가지는 레이저를 사용한다. 이를 MOPA(Master Oscillate Pulse Amplification)[3] 기술을 이용하여 펄스 레이저로 변조 및 증폭을 할 수 있으며, 펄스 속도는 최대 수 ns에 이른다.

3. 단일광자 검출기

상용 라이다의 검출기(Detector)의 경우 Linear-Mode에서 사용하는 APD(Avalanche Photo Diode)가 널리 사용되며, NIR의 경우에는 실리콘(Si) 기반으로 생산되고, SWIR의 경우에는 인듐, 갈륨, 비소(InGaAs) 도핑을 통해 SWIR에 반응하는 APD가 생산된다. 이러한 APD는 민감도가 약 10A/W로 1W의 광자 에너지가 입력되었을 때 10A가 흐른다. 그러나 라이다에서 광자의 감쇠는 Formula 1.과 같이 거리의 제곱에 반비례한다.

$$OP(uncollimated) = \frac{A}{d^2}$$

Formula 1. Relationship between optical power and distance

즉, 광자 에너지가 100m 거리를 이동하면 1/10,000의 에너지만이 직선거리의 목표에 도달한다. 예로 240kW의 순간 펄스 광출력을 보냈을 때 100m 떨어진 거리에서는 24W의 광자 에너지만 도달하게 된다. 라이다의 경우는 빛을 쏘고 반사되어 돌아오는 광자 에너지를 감지한다. 또한, 쏘아지는 빛은 감지 범위에 따라 일정 각도 이상으로 발산시킨다. 따라서 거리의 4제곱에 반비례하게 되어 2.4mW만 돌아오게 된다. 이때 APD의

민감도에 따르면, 검출기가 24mA를 출력하는 것을 기대할 수 있다. 만일 이때, 분진 환경에서 사용하기 위해 레이저의 광출력을 낮춘다면 APD를 이용해서는 돌아오는 광자를 감지할 수 없는 상황이 된다. 따라서 기존의 APD가 아닌 더욱 민감한 소자의 사용이 요구된다.

단일광자 검출기(SPD, Single-Photon Detector)는 항복전압을 넘어서 구동되는 APD로 SPAD(Single-Photon Avalanche Diode)라 불리는 광자 1개의 에너지에도 반응하도록 개발된 검출기다[3]. SPAD는 APD를 Geiger-Mode 구간에서 작동시켜 무한에 가까운 증폭 비를 얻는다[4]. 이렇게 민감하게 반응하도록 동작하는 SPAD는 광자 에너지의 양과 관계없이 무작위의 높은 출력을 보인다. 심지어, 광다이오드에서 발생하는 암전류에 의해서도 신호가 출력된다. 암전류의 발생을 억제하고, 유효한 신호들을 식별하여 출력되도록 개발된 검출기가 SPD이다.

SPD의 출력은 광자 에너지의 감지 유무에 따라 양자화하여 이산신호로 출력된다. 따라서 단순히 한순간의 출력 신호만을 통해서 감지된 광자 에너지의 양을 알 수 없으며, TCSPC(Time-Correlated Single Photon Counting)을 통한 히스토그램(Histogram) 누적으로 에너지양을 계산한다.

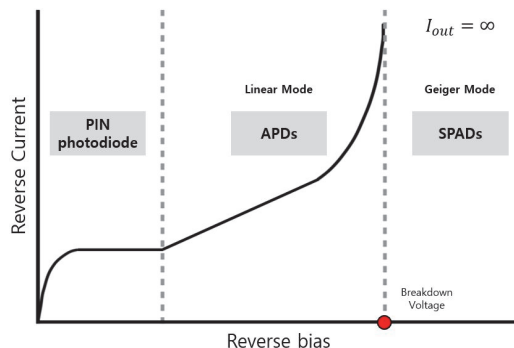


Fig. 1 I-V curve in different photodetectors

4. 상용 라이다의 굴절 광학계

대부분의 상용 라이다는 기본적으로 렌즈를 사용하는 굴절 광학계를 사용한다. 굴절 광학계의 재질은 용융 실리카로 여기에 사용 파장 대역에 해당하는 AR(Anti-Reflection) 코팅을 통해 투과도를 높여 사용한다. 그러나 기본적인 굴절 광학계의 한계 때문에 매질에 의한 흡수 및 산란으로 렌즈의 수에 따라 감쇠가 일어난다. 이에 대한 감쇠율은 1~2%로 kW 대역의 순간 광출력을 가지는 광원에서는 무시할 수 있는 수치이나, 낮은 광출력의 광원 사용 시에는 영향을 미치게 된다. 특히, 낮은 광출력의 광원 사용 시에는 미광에 의한 간섭이 더 커지기 때문에 굴절 광학계의 매질에 의한 감쇠는 무시할 수 없게 된다. 또한, 굴절 광학계는 구면수차 및 색수차에 의해 집광 시 초점이 한곳에서 모이지 않는 문제가 있다. 일반적인 결상 광학계의 경우 비구면 렌즈를 사용하거나 구면 렌즈를 여러 장 이용하여 이러한 왜곡을 보정하지만, 집광 광학계의 경우 렌즈의 사용량에 따라 광자 에너지의 손실이 발생하기 때문에 바람직하지 않다.

한편, 반사 광학계의 경우 굴절광학계에서 발생하는 문제 대부분을 해결할 수 있다. 반사 광학계는 표면에서 반사되는 거울과 같은 효과를 이용하

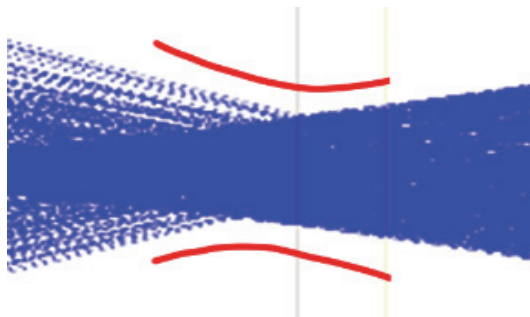


Fig. 2 Waist of focus by spherical aberration

는 것으로 입사된 광이 매질을 통과하지 않아 굴절 광학계에서 발생하는 수차의 발생이 없으며, 매질 통과 시 발생하는 광자 에너지의 감쇠 또한 적다. 또한, 제작 시 사용하는 재료의 종류도 매질을 통과해야 하는 굴절광학계와 다르게 금속의 이용이 가능해 상대적으로 큰 구경의 광학계를 제작하기에 용이하다.

5. 낮은 광출력을 가지는 라이다 설계

낮은 광출력을 가지는 라이다의 개발을 위해서는 레이저, 검출기, 광학계의 설계가 기존의 라이다와 완전히 달라진다. Fig. 1과 같이 레이저는 분산 피드백 레이저(DFB Laser, Distributed-Feedback Laser)를 이용하고 변조를 통한 펄스화(Amp and Switch)를 구현하며, 검출기는 SPD를 이용하여 TCSPC를 구현한다. 광학계의 경우 굴절 광학계의 단점을 극복하기 위해 반사 광학계를 사용한다.

레이저의 송/수신을 위한 제어를 구현하고 FPGA 기반으로 TCSPC기반의 히스토그램을 누적하여 정확한 거리를 연산하기 위한 시간 제어기(Time Controller)를 제작한다.

반사 광학계의 설계 및 분석을 위한 소프트웨어

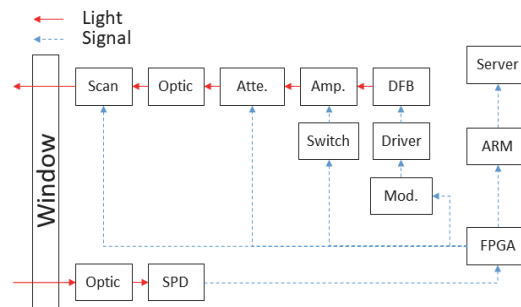


Fig. 3 System block diagram with signal flow

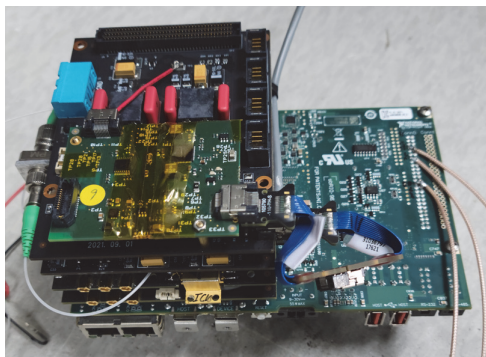


Fig. 4 Time controller for Tx/Rx laser and TCSPC

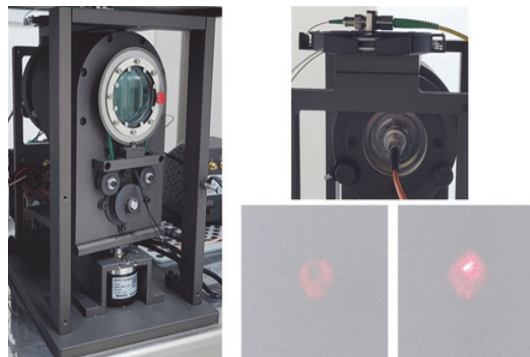


Fig. 7 Alignment of Tx and Rx mirror

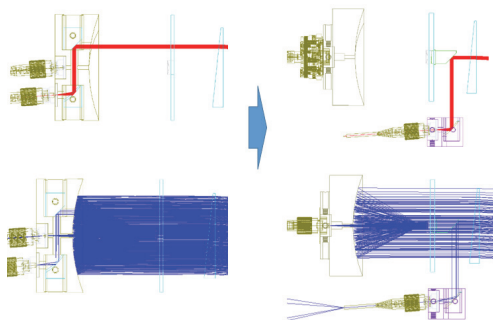


Fig. 5 Ray trace simulation with coaxial optic system

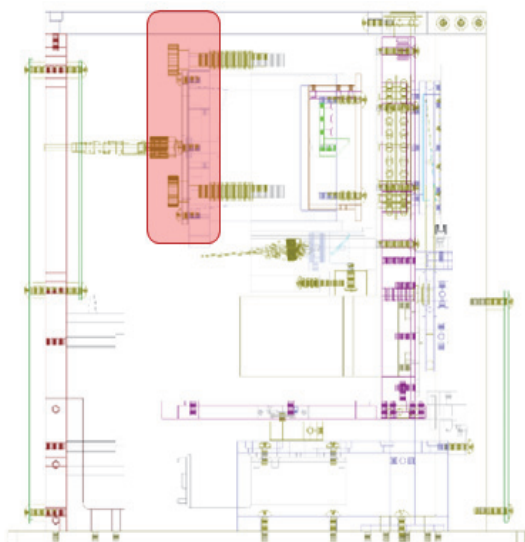


Fig. 6 Design adjusting nobs for align mirrors

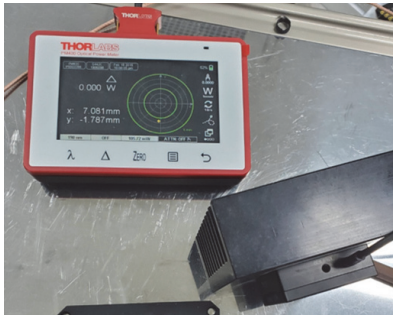
프로그램으로 Lambda Research 사의 Tracepro를 이용하여 Fig. 5와 같이 시뮬레이션을 통해 광 경로의 무결성을 확인한다. 광학계 설계 시 완전 동축을 통한 수/발광 광 경로의 일치를 유도하고, 이를 통해 최대의 집광 효율을 얻음과 동시에 스캔을 통한 광 경로 변경 시 동축 유지를 우선으로 한다.

반사 광학계는 특성상 반사경 정렬 오차가 광학계 성능에 미치는 영향이 굴절 광학계에 비해 높은 편이기 때문에 반사경의 정렬을 위한 조정장치 내장이 필요하며, 조립 후 이를 통해 세부 정렬을 위한 조절을 시행하게 된다.

광학계 정렬은 가시광을 광학계의 Tx/Rx(Transmit Data/Receive Data)에 각각 출사하여 두 레이저를 서로 일치시킴으로써 정렬을 가(假)교정한다. 이때, Rx에서 출사되는 빔이 Tx에서 출사되는 레이저를 포함하도록 조정한다. 이후 SWIR 레이저와 검출기의 조립을 완료한 후, 검출기에서 출력되는 신호의 수신되는 정도를 눈으로 확인하며 미세 조절을 수행한다.

6. 라이다 성능 시험

낮은 광출력을 가지는 라이다 시스템 개발의



(a)



(b)

Fig. 8. Power difference between (a) before and (b) after

성능 시험은 라이다의 평균 광출력과 최대 감지 거리를 확인하여 시스템 개발 방향의 유효성을 확인하였다. 라이다의 평균 광출력은 Thorlab 사의 PM400 광출력 감지기와 S442C 열 레이저 출력 검출기를 사용하여 측정하였다.

레이저의 운용 성능 사양과 시험을 통한 평균 광출력은 다음과 같다.

Table 1. Specification of laser and operation performance

Item	Unit	Value
Max Power(avg.)	mW	45
Repetition Rate	MHz	1
Pulse Width	ns	10
Peak Power	W	4.5



Fig. 9 Distance measuring test of low optical power LiDAR

레이저의 순간 최대 출력은 4.5W로 상용 라이다의 최대 순간 출력인 240kW의 약 1/53,000배에 해당하는 수치를 기록하였다.

평균 45mW의 출력을 가지는 라이다 시스템이 측정할 수 있는 최대 거리를 확인하였다.

거리를 명확히 측정하기 위해 라이다로부터 100m 거리에 반사판을 설치하였다. Fig. 10과 같은 결과를 얻었으며, 노이즈와의 확실한 구별을 위해 반사판을 옮겨가며 100m에 측정된 물체(반사판)가 이동하는 것을 확인하였다.

최종적으로 라이다의 맵핑 성능에 대한 검증 을 위해 실내 복도에서 측정을 수행하였다. Fig. 11은 복도(a)에서 맵핑을 수행한 결과(b)이다. 비록 45mW의 극히 낮은 에너지의 광출력을 사용

하였으나, 맵핑된 형상이 측정을 수행한 복도와 일치하는 것을 확인하였다.

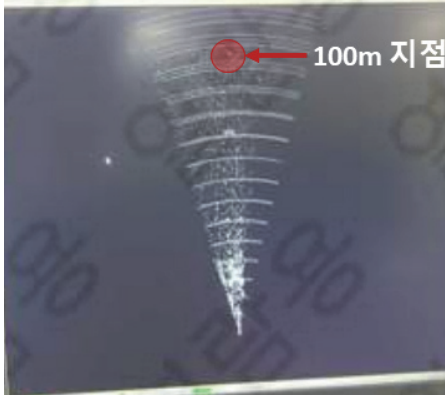


Fig. 10 Distance measuring result of low optical power lidar

7. 결론

레이저의 높은 출력이 영향을 줄 수 있는 환경에서 사용할 수 있는 라이다의 개발을 위해 레이저의 광출력을 낮추고 이를 효과적으로 감지하기 위한 SPD를 사용하였다. 또한, 최소화된 광자 에너지 손실을 위해 일반적으로 사용되는 굴절 광학계 대신 반사 광학계를 차용하여 집광 효율을 극대화하였다.

그러나 반사 광학계 거울 정렬의 난도가 높아 원거리에서 수신율이 떨어지는 현상이 나타났으며, 100m 구간에서 감지가 되었으나, 노이즈의 구분을 위한 알고리즘 탑재가 필요하다고 판단되었다.

감사의 글

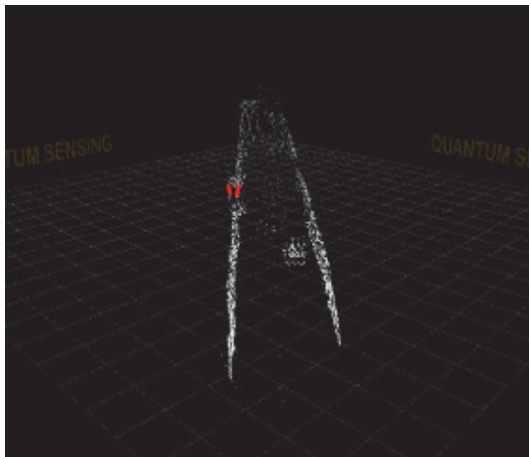
이 연구는 국토교통부 / 국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 “스마트 건설기술 개발 국가 R&D 사업(과제번호 22SMP-A158708-03)”의 지원으로 수행하였습니다.

참고문헌

- [1] Kourkoumelis, N. and Tzaphlidou, M., Eye Safety Related to Near Infrared Radiation Exposure to Biometric Devices, The Scientific World JOURNAL, vol.11, Hindawi Limited, pp. 520-528, (2011).
- [2] 고용노동부 고시 제2019-15호 별표 15-12 가.의 1)번 방사기기.
- [3] Cova, S., Ghioni, M., Lacaita, A., Samori, C. and Zappa, F., Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection,



(a)



(b)

Fig. 11 (a) Mapping environment and (b) mapped result

- Applied Optics, The Optical Society, vol. 35, no. 12, p. 1956, (1996).
- [4] Lin, D., Alam, S., Teh, P. S., Chen, K. K. and Richardson, D. J., Tunable synchronously-pumped fiber Raman laser in the visible and near-infrared exploiting MOPA-generated rectangular pump pulses, Optics Letters, The Optical Society, vol. 36, no. 11, p. 2050, (2011).
- [5] Royo, S. and Ballesta-Garcia, M., An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles, Applied Sciences, MDPI AG, vol. 9, no. 19. p. 4093, (2019).

(접수: 2022.11.02. 수정: 2022.11.22. 게재확정: 2022.11.28.)