

펄스형 eye-safe 레이저를 이용한 거리측정

유병현*(충남대학교 대학원 기계공학과), 조성학, 장원석, 김재구, 황경현(한국기계연구원),
이동주(충남대학교 기계공학과)

Distance measurement using pulsed eye-safe laser

B. H. Yoo* (Mechanical Eng. Dept., CNU), S. H. Cho, W. S. Chang, J. G. Kim, K. H. Whang(KIMM),
D. J. Lee(Mechanical Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

In this project, we have developed the eye-safe LRF system of 1.54 μm wavelength using OPO. The maximum measured distance was 3.7km in outdoor experiment. We used Nd:YAG (1064nm) as a laser medium. It was applied BBO to construct the system. We also developed a time-counter for the range finder using a method of TOF (time of flight). The counter-clock used at the time counter was 320MHz making resolution within $\pm 1\text{m}$. Start and stop signals were detected by two channel systems using PIN and APD. The LRF's repetition rate was 4 times per minute. The energy was measured to be over 9mJ. And, pulse-duration was 23ns. Resolution was $\pm 2\text{m}$ at the distance measurement using a target.

Key Words : Laser Range Finder(레이저 거리측정기), OPO(Optical Parametric oscillator), Eye-safe Lasers(아이세이프 레이저), Optics(광학), APD, PIN

1. 서론

레이저를 이용한 1km 이상의 장거리용 거리측정기는 국방용 장비에 활용하기 위해 개발이 시작되었으며, 전차는 물론 항공기, 야포 등 각종 사격체계에 필수적인 장비가 되었다. 현재 레이저 거리측정기는 산업, 연구 분야 등으로 그 사용범위를 넓히고 있어 eye-safe 레이저의 중요성 역시 높아지고 있다. 따라서 본 연구에서는 OPO를 이용한 파장변환 원리를 통해 eye-safe 레이저를 출력하는 레이저 거리측정기(LRF)를 개발하였다. 레이저 매질은 비교적 소형으로 제작이 가능하고 고효율을 얻을 수 있는 Nd:YAG를 사용하였으며 OPO는 투과 영역이 자외선과 적외선에 걸쳐 넓고 온도 변화에 대한 안정성이 뛰어난 BBO를 적용하였다.

본 연구 초기에 제작한 LRF를 실험한 결과 장거리 측정에 어려움이 있었다. 광학계 크기를 줄이기 위해 사용된 $\varnothing 25\text{mm}$ 의 작은 수광렌즈로 인해 수 km를 진행하여 되돌아온 신호 집광이 어려웠

며, 레이저 헤드로부터 빔 익스펜더까지의 광학계가 작은 케이스에 밀집되어 있어 만족스런 품질의 레이저 펄스를 만들지 못했다. 따라서 수광렌즈를 $\varnothing 50\text{mm}$ 로 충분히 크게 늘리고 광학계 배열 간격을 늘림으로써 전체적으로 부피는 커졌으나 광학 부품간의 정밀한 정렬을 가능하게 하였다. 빔 익스펜더(beam expander)는 기존의 4x를 10x로 변경하여 보다 확대된 레이저 펄스를 1mrad 이내의 발산각(beam divergence)으로 발사한다. TOF(time of flight) 방법은 빛의 진행시간을 거리로 계산하는 방식이므로 포토다이오드의 감도 반응 곡선과 회로 내에서 발생하는 미소한 지연시간이 수 m 이상의 오차를 만들 수 있다. 때문에 타임카운터 설계시 이를 보정해주는 값을 설정할 수 있도록 고려하였다.

본 연구에서는 실측거리와 LRF 측정 거리 비교를 통해 오차를 확인하고 보정값을 결정하였으며, 주변의 건물들을 상대로 최대측정거리를 확인하였다.

2. LRF 시스템 구성

2.1 OPO 를 이용한 eye-safe 레이저

레이저 매질은 50~60mJ 출력 에너지를 갖는 Nd:YAG 레이저를 사용하고 크세논(Xenon) 램프를 이용한 플래시 펌핑으로 발진시킨다. 레이저 로드와 플래시 램프를 고정시키고 금도금된 리플렉터(reflector)를 석위 펌핑 효율을 높게 하였다. 레이저 헤드에서 발생한 열은 공랭식으로 발산되므로 이를 용이하게 하기 위해 외부로 방열판(heat sink) 형태로 설계하였다. 발진된 레이저는 양쪽에 설치된 미러를 반복하다가 큐스위치 신호에 의해 외부로 방사된다. 이때 빔 출력을 위한 아웃풋 컷플러는 1.064 μm 파장에서 90%의 투과율을 갖는 제품을 사용하였다.

Table 1 Specification of LRF optics

Dimensions	100×70×300(mm), AL 6061
Laser	Laser type: FPSS / Active Q-switched / OPO, Laser material: Nd:YAG(1.064 μm) Output wavelength: 1.5 μm
Beam expander	Input Diameter: Ø10mm Output Diameter: Ø25mm Magnification 10× Coating: AR Coating at 1.5 μm
Receiving Lens	Diameter: Ø50mm, Focal Length: 70mm Clear Aperture: Ø48mm, AR coating at 1.5 μm
Telescope	Length: 233mm, Magnification: 4× Field lens: Ø 32mm, Eye lens: Ø 32mm
Detector (start)	InGaAs PIN, Active diameter: 0.5mm, Responsivity at 1.55 μm: 0.95A/W Dark Current: 1nA, Bandwidth: 350MHz, Operating Temperature: -40~85 °C
Detector (stop)	InGaAs APD, Active diameter: Ø 200 μm Sensitivity: 8nW typical at 1.54 μm, 28ns, pulse 50% detection Operating Temperature: -32~64 °C

큐스위치(Q-switch)로부터 생성된 단 펄스 레이저는 OPO 를 통과하면서 eye-safe 영역으로 파장변환이 이루어진다. 적용한 OPO 는 5× 5× 10(mm)의 BBO 이며, 각도 및 파장에 따라 410~3300nm 의 파장 영역을 달리할 수 있어 필요할 경우 쉽게 다른 파장을 이용할 수 있다는 장점이 있다. BBO 의 비굴절성으로 인해 레이저는 signal 과 idler 의 두 파장이 생성되므로 1.5 μm 에서 최대 투과율을 갖는 아웃풋 컷플러를 두어 1.5 μm 이외의 파장은 차단함

으로써 유해한 파장이 외부로 출력되는 것을 방지하였다. LRF 광학계를 통과한 최종 출력 에너지는 OPO 가 갖는 20% 이하의 효율로 인해 평균 11.7mJ 을 나타내었고, 이때 펄스폭은 23ns 이다.

2.2 전기광학적 큐스위치

Nd-YAG 레이저는 비교적 낮은 레이저 임계(low laser threshold)의 이점을 갖는 4-레벨 시스템으로써 일상적인 작동온도에서 단지 가장 강한 1064nm 의 파장을 방사한다. 완화모드에서 임계에 도달하자마자 레이저 캐비티의 임계치에 따라 집단 반전이 일어나게 되며, 이러한 식으로 플래시램프의 펌프 펄스 동안 수많은 연속적인 펄스를 얻을 수 있다. 레이저 공진기로부터 ns 정도의 짧은 펄스폭을 가진 높은 레이저 출력을 얻기 위해 큐스위칭 방법이 이용된다. 큐스위치는 보통 편광자(偏光子)와 Pockels cell 의 전압에 따라서 광학 공명기의 질을 변경시키는 Pockels cell 로 구성되어 있으며, 캐비티 안쪽에 큐스위치를 포함시킴으로써 트리거모드에서 레이저를 작동시킬 수 있다. 플래시램프 사이클 동안 캐비티가 최대 에너지 포인트에서 공명하도록 허용하면서 큐스위치가 작동되면 강력한 레이저펄스, 소위 자이언트 펄스를 얻을 수 있다.³ LRF 에 사용된 큐스위치 특징은 Table 2 에 나타나 있다.

Table 2 Specification of the Q-switch

Interaction Material	Tellurium Dioxide
RF frequency	80MHz
Wavelength	1064nm
AR Coating reflectivity	<0.1% per surface
Transmission	>99.5% single pass
Polarization	Linear, Vertical to base
Length	10mm
Voltage	24V
Current	500mA

2.3 송수광 광학계

LRF 의 광학계는 송광부와 수광부로 구분할 수 있다. 송광부는 큐 스위치로부터 생성된 펄스형 레이저를 타겟에 보내주는 역할을 하며, 레이저의 발산각을 줄여 반사되어 돌아오는 광량을 높이는 효과를 얻게 한다. 송광부 광학계는 Ø 10mm 와 Ø 25mm 렌즈를 조합한 10× 빔 익스펜더로서 직경 Ø 1mm 의 레이저 펄스를 Ø 10mm 로 확대하여 방사한다.

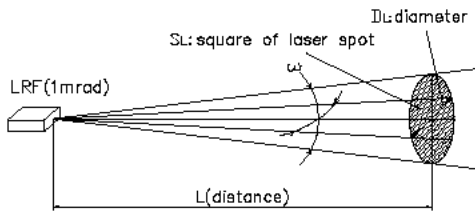


Fig. 1 Definition of the size of illuminating spot

LRF 에서 발사된 레이저 펄스는 목표물에 도달 할 때까지 발산각에 따라 확대된다(Fig. 1). 거리에 따라 확대된 레이저 펄스의 크기는 식 (1)을 이용하며, 이로부터 면적을 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 D_L 은 확대된 펄스의 직경이고 ω 는 확산각(radian), L 은 진행거리이다.

$$D_L = \omega L \quad (1)$$

$$S_L = \pi(\omega L)^2 / 4 \quad (2)$$

레이저 거리측정기의 최대 측정거리는 주요 요소인 평균 펄스에너지, 펄스크기, 대기감쇄도, 표적 반사도, 수신부 감도 등이 고려되어야 한다. 타겟 면적이 충분히 크다고 가정하면 수신된 광의 세기 P_R 은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_R = T_T T_R \frac{P_d}{\pi} \cos \theta \frac{A_R}{D^2} \quad (3)$$

여기서 P_0 는 레이저 출력, T_T 는 대기투과도, T_R 은 수광렌즈투과도, ρ_d 는 타겟의 Lambertian 반사계수, θ 는 타겟에 대한 빔 입사각, A_R 은 수광렌즈 면적을 나타낸다.^{3,4}

본 연구의 LRF 는 1mrad 발산각을 가지므로 1.5km 거리를 측정할 경우 발사된 레이저 면적에 비해 20,000 배까지 확대된다. 이에 따라 단위면적당 펄스 에너지 역시 급격히 감소하게 되므로 레이저 출력을 높이고 레이저 발산각을 줄이거나 수신부 집광 능력 및 다이오드 감도를 높임으로써 최대 측정 거리를 향상시킬 수 있다. 반사되어 돌아온 레이저 펄스를 수신 디텍터에 최대한 모아주는 역할을 하는 수광렌즈는 ϕ 50mm, f=70mm 로써 ϕ 25mm 렌즈를 사용한 연구 초기의 LRF 에 비해 집광 능력을 향상시켰다. 집광된 레이저 펄스는 200 μ m 검출 직경(active diameter)을 가진 APD 로 검출하였다.

3. 측정결과

3.1 오차 보정

TOF 방식의 거리측정은 빛을 매체로 하므로 1 미터를 진행하는데 3 나노초 밖에 걸리지 않는다. 따라서 start 및 stop 신호 검출과정에서 다이오드의 반응 곡선에 따라 발생하는 미소한 차이가 측정 거리에 영향을 주게 되므로 offset 값을 적용하여 실험을 통한 오차 보정을 할 수 있도록 LRF 타임카운터를 설계하였다. offset 값을 설정하기 위한 실험은 백색광의 영향이 적은 실내에서 1.5m×1m의 타겟을 설치하고 진행하였다. 측정간격은 최소측정거리인 타겟으로부터 30m 에서 시작하여 70m 까지 10m 간격으로 실시하였으며 각각의 경우 3 회 반복 측정하였다. Fig. 2 에 나타난 바와 같이 동일 측정거리에서 \pm 1m 이내의 오차가 발생하였으며 실거리보다 평균 2m 높게 나왔으므로 offset 값으로 보정하였다.

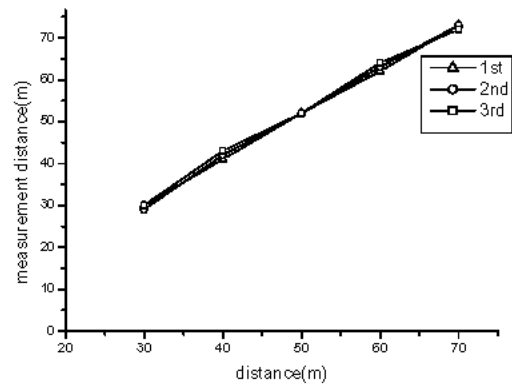


Fig. 2 Decision of the offset value

3.2 실외 거리측정

최대 측정거리테스트는 장거리 시야확보 및 전원공급이 용이한 기계연구원 건물 옥상에서 실시하였다. 레이저 거리측정기 특성상 대기조건에 따른 최대측정거리가 크게 차이난다. 따라서 본 시험평가의 목적은 우천이나 안개 등이 발생하지 않은 일반적인 상황에서 얻을 수 있는 최대 성능을 평가하는 것으로 하였다.



Fig. 3 Distance measurement using the eye-safe LRF system

테스트가 진행된 시간대의 날씨엔 시정거리 15km 이상의 맑은 날씨였으나 습도는 최고 80%까지 높게 나타났다. 일반적인 상온에서 분당 4~5 회 측정 가능하나 측정 당일의 최고 기온이 30 도를 넘는 높은 온도임을 감안하여 20s 간격으로 측정하였다(Fig. 3). 측정 대상은 원거리의 건물을 상대로 하였으며 각각의 대상물에 대해 3 회씩 반복 측정한 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 실험을 통해 검증한 최대 측정 거리는 3.7km 이다. 이때 반복 측정 결과는 3720m, 3722m, 3723m 로써 타깃을 사용하지 않은 결과임을 감안할 때 만족스런 성능을 나타내었다. 측정 결과를 LCD 에 나타낸 모습은 Fig. 4 와 같다. 타임카운터에서는 거리측정 결과와 함께 계산에 사용된 카운터 클럭수를 함께 표시하도록 제작하였다. 광의 속도를 카운터 클럭수로 나누어 얻은 1 카운터 동안 광의 진행거리는 0.9375m 이다. 이 값과 측정된 start, stop 신호 사이의 클럭수의 곱으로 거리를 알 수 있으며, 왕복 거리이므로 1/2 하고 보정값을 적용하여 최종 측정결과를 표시한다.

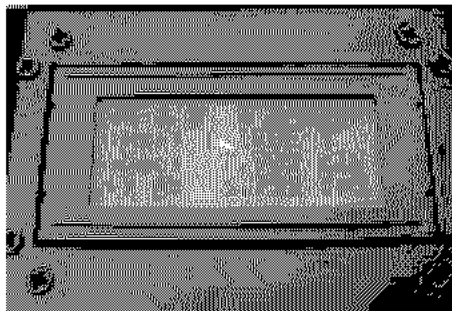


Fig. 4 The Result Display on LCD

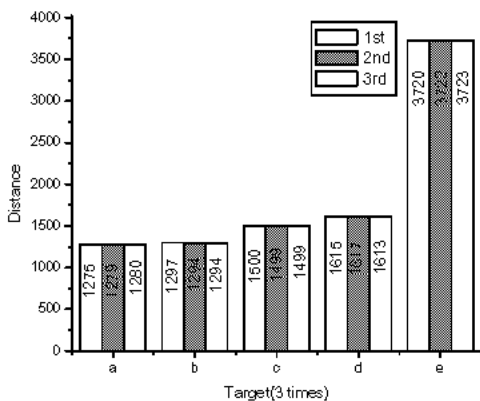


Fig. 5 Results of distance measurement for several targets

3.7km 이상의 거리는 적절한 목표물을 찾지 못해 검증하기 어려웠으나 펄스 에너지를 고려할 때 보다 장거리도 측정 가능할 것으로 기대된다. 1km 이내의 거리에서는 $\pm 1m$ 이내의 측정 오차가 발생함을 확인하였고, 목표물에 따라 최대 5m 까지 차

이가 발생하였다. 이는 타깃을 사용하지 않았기 때문에 조준점 주위에서 반사한 산란광에 의한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 OPO 를 이용한 eye-safe 레이저를 이용한 거리측정 시스템을 개발하였다. 1mrad 의 발산각을 위해 10x 빔 익스팬더를 제작하였고, 수광렌즈는 1.5 mm AR 코팅된 50mm 렌즈를 사용하여 충분한 집광이 가능하도록 하여 거리측정 능력을 향상시켰다. 신호검출을 위해 송광부에는 PIN 다이오드를 적용하였고, 반사되어 돌아온 펄스는 수광광학계로 집광하고 감도 높은 APD 를 이용하여 검출하였다.

최대 측정거리에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 펄스 에너지와 펄스폭이다. LRF 의 펄스 에너지는 9mJ 이상으로 수 킬로미터 측정에 충분한 출력을 나타내었고 펄스폭은 23ns 로써 수신부 APD 의 기준인 28ns 를 만족하였다. 시계조건 15km 이상의 맑은 날 획득한 최대 측정거리는 3.7km 이며 반복 측정으로 확인한 측정 오차는 $\pm 2m$ 이다.

후 기

본 연구는 국제공동연구사업으로서 과학기술부의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Albert V. Jelalian., "Laser Radar System," Artech House, Boston, 1991.
2. 최영수, 박용찬, 강용철, "펄스형 고반복 레이저를 이용한 거리측정," Optical Society of Korea Vol. 6, Number 1, 1995.
3. 구연덕, "Aerosol 투과특성에 따른 적외선 레이저 거리측정기의 최대 거리측정 능력분석," The Korean Physical Society, Vol. 11, Number 2, pp. 123~127, 1998
4. Markus-Christlan Amann, Therry Bosch, Rlsto Myllyla, Marc Rloux, "Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement," Opt. Eng 40(1) pp. 10~19, 2001
5. John J. Zayhowski, "Passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers and applications," Journal of Alloys and Compounds, 2000.