

◆특집◆ 첨단레이저 응용 미세가공기술

첨단 레이저 응용 계측기술 현황

조성학*, 유병현**, 장원석**, 김재구**, 황경현**

Recent measurement techniques using the advanced lasers

Sung-Hak Cho*, Byung-Heon Yoo**, Won-Seok Chang**, Jae-Gu Kim**, Kyung-Hyun Whang**

Key Words : Laser(레이저), Interferometer(간섭계), OCT(Optical Coherence Tomography), LRF(Laser Range Finder)

1. 서론

레이저는 일반적인 광파에서 볼 수 없는 간섭성과 지향성을 가진 것이 특징이며 레이저를 계측에 이용하게 된 절대적인 이유이기도 하다. 이것은 1960년 미국의 물리학자 T.H.Maiman이 루비 레이저를 처음으로 발진시킨 이래, 레이저가 적용된 최초의 장비는 레이저 거리측정기였음을 보아도 알 수 있다. 레이저를 이용한 계측 분야는 다양하지만 거리계측의 경우 간섭(interferometer) 방식과 반사펄스법(pulse-echo techniques)이 주로 사용되고 있다. 두 방식은 기본적으로 거리측정이라는 공통점이 있으나, 간섭방식은 레이저의 파장을 이용하여 10m 이내의 거리에서 수 nm의 정밀도를 갖는 측정에 이용되며, 반사펄스 방식은 레이저의 직진성(directivity)을 이용하여 타겟에 반사되어 돌아온 빛의 시간(time of flight)을 얻음으로써 수 km 이상의 장거리 측정에 이용된다. 여기서는 광 간섭을 이용한 정밀 측정 방법과 반사 펄스법을 이용한 장거리 계측에 대해 소개하고자 한다. 주로 레이저를 이용한 거리 계측의 기본 원리와 개발된 장비에 대해 다루었으나 그 외에 의료 분야에서 주목받고 있는 광학 이미징 기술도 포함하였다.

2. 광파 간섭을 이용한 정밀 계측

2.1 간섭계(Interferometer)

같은 광원에서 나오는 빛을 적당한 방법으로 둘 또는 그 이상의 광행로(光行路)로 나누고, 그것을 겹쳐서 간섭시켜 그 간섭무늬를 관측하는 장치를 간섭계라 한다. 간섭계를 이용한 길이측정은 빛의 짧은 파장이 길이의 척도로 사용된다고 말할 수 있다. Fig. 1에서와 같이 레이저 빛이 광분할기(Beam splitter)에 투사되면 일부는 반사하여 광원 a로 되고 다른 것은 투과하여 광원 b로 나뉜다. 광원 a, b는 다시 각각의 거울에서 반사되어 광분할기로 돌아와 투과된 빛과 반사된 빛이 간섭을 일으킨다. 간섭을 일으키는 두 광원의 광로차가 반파장($\lambda/2$)의 홀수배일 때는 두 파장은 서로 상쇄되어 어두워지며 암대를 형성한다. 그러나 반대로 이 두 광선의 광로차가 반파장의 짝수배로 되면 광파는 서로 겹쳐서 진폭은 2배로 되고 더욱 밝게 되어 명대를 형성한다. 이것을 간섭무늬(interference fringe)라 한다. 무늬의 1 피치(pitch)의 차이는 광분할기와 이동거울간의 간격이 반파장만큼 변하는 것에 상당하므로, 이동거울의 변위 x 에 대한 무늬의 이동량을 무늬의 수로 표시하여 n 개라 하면 $x = n \cdot \lambda/2$ 로 되어, 미소 변위를 파장의 단위로 한 광신호로 변환할 수 있다. 따라서 어두운 횡수를 기록하면 이동거울(movable mirror)의 거리를 파장의 1/4 정도로 정밀하게 측정할 수 있다. 간섭계에는 주로 632.8nm 파장의 He-Ne 레이저가

* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부

Tel. 042-868-7077, Fax. 042-868-7149

Email shcho@kimm.re.kr

펄스초 레이저 극미세 가공, 나노-광-바이오 융합 연구에 관심을 가지고 있다.

** 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부

사용되므로 약 158.2nm 의 정밀도가 가능하다. 그렇다고 파장의 1/4 이 간섭계의 정밀도 한계가 되는 것은 아니다. 간섭무늬 사이를 소프트웨어 적인 방법으로 나누어 파장의 1/100 이하까지 측정하는 것이 일반적이다. 간섭계는 미국의 Renishaw 와 Agilent, Optodyne 등에서 대표적으로 생산되고 있는데, Renishaw 사는 파장을 나누는 기술과 광검출기의 신호를 정밀하게 측정하는 기술을 통해 1.25nm 해상도를 이루었다. 이 정도의 정밀성을 갖기 위해서는 측정 재질의 온도뿐만 아니라 대기의 온도, 습도, 기압을 측정할 수 있는 센서가 사용되고 측정된 값은 환경보상장비에 제공되어 보상 값을 적용하게 된다. 간섭계는 주로 공작기계의 성능평가에 사용되며 반사경(reflector) 구성에 따라 진직도, 직각도, 각도, 편평도, 요잉과 롤링 등 다양한 동특성(dynamic) 측정이 가능하다. Fig. 2 는 실제 간섭계를 이용한 측정 모습이다.

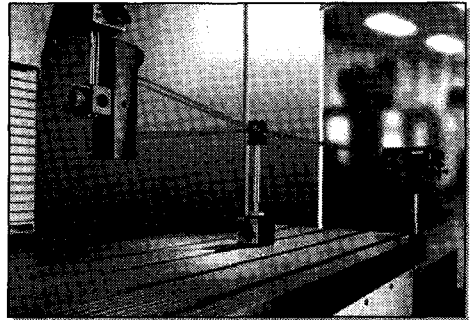


Fig. 2 Measurement of straightness using interferometer

2.2 OCT (Optical Coherence Tomography)

단층영상이라함은 보고자 하는 샘플의 깊이 방향에 대한 정보를 샘플의 절개 없이 얻어 이를 영상화하는 것을 말한다. 주로 초음파 촬영기나, CT(Computed Tomography), MRI(Magnetic Resonance Imaging) 등이 사용되는데 최근에는 광 간섭을 이용한 OCT(Optical Coherence Tomography) 단층영상 측정방법이 의료 진단방법으로 주목받고 있다^{1,3}. 광결맞음단층영상기법이라 불리는 OCT 는 Fig. 3 에 나타난 것과 같이 기존의 방식에 비해 침투깊이는 작으나 고해상의 단층영상취득이 가능하고 X-ray 와 같은 유해성이 없다는 장점이 있다.

OCT 는 빛의 간섭성을 이용한 대표적인 계측기이며, 원리는 마이켈슨 간섭계를 이용한 거리 측정 방법과 근본적으로 동일하다. 기본적인 OCT 시스템은 시간 가간섭성(coherence)이 매우 짧은 광원을 이용한 마이켈슨 간섭계로 구성된다(Fig. 4). 광원을 통해 나온 광은 광분할기에서 양분되어 한 쪽은 기준 거울로 입사되고 다른 한쪽은 대물렌즈를 통해 조직(tissue)에 집광된다. 입사된 광은 조직 내부에 존재하는 세포나 상이한 조직 층 사이에 발생하는 굴절률 차이에 의해 산란이나 반사를 일으키게 된다. 조직에 의해 산란된 광 중에서 대물렌즈의 초점 심도 안에서 산란된 광만이 시스템으로 역입사되며, 광분할기에 의해 기준 거울에서 반사된 빛과 결합된다. 이때, 사용된 광원의 저간섭성에 의해, 기준 거울에 의해 반사되어 나온 광과 산란광 사이에 광경로차가 가간섭거리 안에 있는 경우에만 두 광이 보강 또는 상쇄간섭을 일으키게 된다¹. 기준 거울을 이동하여 기준광의 광경로를 선형적으로 증가시킬 경우, 조직 내부의 미세구조에 의해 반사되는 광에 의한 간섭무늬를 깊

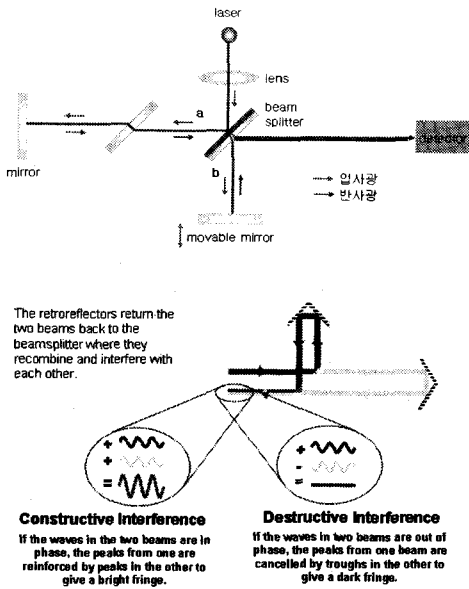


Fig. 1 Principle of Michelson Interferometer

이 별로 얻어낼 수 있다. 광검출기에서는 등속 이송하는 거울에 의해 도플러 주파수를 가지는 간섭 무늬가 검출되어진다. 증폭기를 거쳐 증폭된 신호는 밴드투과필터를 이용하여 도플러 주파수보다 높거나 낮은 주파수를 걸러내고 변조기를 거쳐 대상조직의 깊이별 역산란광의 크기를 얻어낸다. 이를 통해 입사광이 집광되는 부위에서 깊이별 불연속성의 분포를 얻어낼 수 있으며, 궁극적으로 얻고자 하는 단면이미지는 입사광의 초점을 횡 방향으로 이송하고 위와 같은 과정을 반복함으로써 구현할 수 있다³.

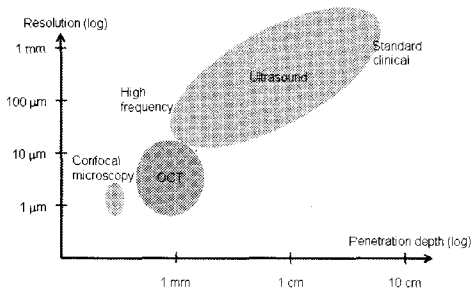


Fig. 3 Comparison with Ultrasound and OCT

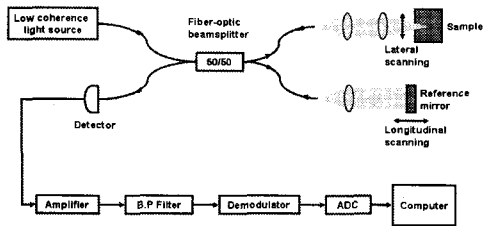


Fig. 4 Schematic diagram of OCT

Fig. 5 는 현재 안과 질환을 측정하기 위해 임상적으로 쓰이고 있는 OCT 이미지중 하나로써 OCT 를 이용한 생체 이미징이 가지는 높은 분해능과 그 효율을 잘 보여주고 있다¹³. 반사광은 색깔로써 표시되는데 어두운 색(청색, 흑색)은 상대적으로 작은 광학반사를 나타내는 조직을 뜻하며 밝은색(적색, 백색)은 높은 광학반사를 나타내는 조직을 의미한다.

OCT 는 안과, 치과, 피부과, 신경외과 등 의학

진단분야에서 다양한 방면에 적용이 되고 있으며, 특히 안과분야에서는 망막의 시기능에 중요한 지표가 될 수 있는 시신경섬유층(RNFL) 진단에 활발하게 사용되고 있다. Carl Zeiss 에서는 10 μm 이하의 축방향 해상도를 갖는 망막진단용 OCT 를 제품화하여 출시하고 있다. OCT 는 광의 생체조직에 대한 투과 깊이에 의존하므로 영상화 할 수 있는 깊이가 수 mm 에 불가하다는 단점이 있으나 기존의 단층촬영기술에 비해 인체에 무해하고 고해상도의 이미지를 실시간으로 제공할 수 있다. 또한 광섬유를 통해 내시경과 함께 사용할 수 있으므로 접근이 불가능한 조직을 비침습적으로 진단 가능한 장점이 있다.

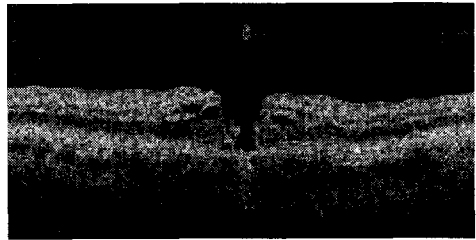


Fig. 5 OCT imaging for retinal nerve fiber layer analysis

3. 레이저를 이용한 장거리 계측

3.1 LRF (Laser Range Finder) 기본원리

거리 측정에 사용했던 삼각법에 의한 광학식 거리측정기는 측정 시간이 오래 걸리고 오랜 속달이 필요할 뿐만 아니라 거리가 멀수록 오차가 커지는 단점이 있었다. 이러한 단점은 레이저가 거리측정에 사용되면서 모두 해결되었으며 그 응용분야도 다양해지고 있다. 초기의 레이저 거리측정기(LRF)는 1960 년 최초로 발진에 성공한 루비 레이저(694nm)가 매질로 사용되었다. 그후 루비레이저의 단점을 개선한 Nd:YAG 레이저와 CO2 레이저가 LRF 에 적용되었으며, 80 년대 말에 이르러 인체에 안전한 레이저에 대한 기술과 관심이 증가하면서 점차 eye-safe 레이저가 거리측정기에 사용되기 시작했다. eye-safe 레이저는 망막에 손상을 주지 않는 1.4 μm 이상의 파장을 가진 레이저를 말한다. 따라서 최근에는 1.54 μm 파장의 라만(raman) 레이저, 어븀(erbium)레이저 등이 사용되고 있으며 OPO 를 이용한 파장변환 방식도 관심이 증가하고

있다.

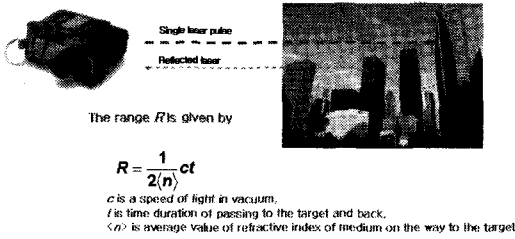


Fig. 6 Principle of LRF

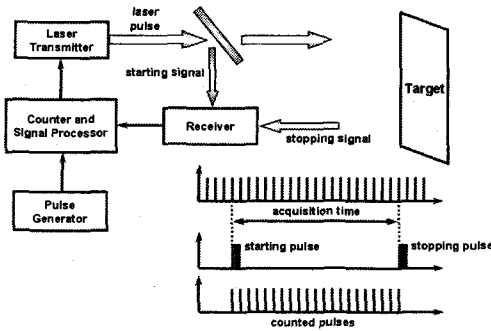


Fig. 7 Schematic diagram of start & stop signal detection

레이저 거리측정기의 기본 원리는 Fig. 6 에 나타난 바와 같이 빛의 속도 C 와 시간 t 의 관계로써 매우 단순하지만 장거리 계측을 수행하기 위해 거쳐야 할 난점도, 있다. 보통 5~20mJ 의 높은 펄크 에너지를 갖는 펄스 형태로 발사된 레이저는 일부는 공기 중의 입자에 의해 산란되면서 목표점에 도달하게 된다. LRF 에 사용되는 빔 발산각 (beam divergence)은 1mrad 정도 이므로 만약 목표점이 1km 에 있다고 가정하면 직경 1mm 의 펄스는 1m 까지 확대된다. 면적으로 따지면 대략 1 만 배 정도 확대되는 셈이다. 더군다나 대부분의 목표물은 반사도가 높지 않으며 수직으로 입사되지 않을 수 있고 무수히 많은 나무를 가진 산과 같이 난반사가 심한 곳을 향해 측정을 시도할 수도 있다. 따라서 반사되어 돌아온 레이저는 처음 출력의 극히 일부분이라 할 수 있으며 이 반사 펄스를 직경 40mm 정도의 수광렌즈로 집광하여 포토다이오드로 신호를 검출하게 된다. 산란된 신호에 의해 일반적으로 수 개의 신호가 다이오드에 감지되지만 실제거리는 대부분 첫 번째 감지된 펄스로

계산하는 것이 정확하다. 즉 나머지 신호는 난반사 되어 돌아온 신호로 볼 수 있다. LRF 의 최대 측정거리는 높은 에너지와 짧은 펄스폭을 가진 레이저를 만드는 광학계 제작 기술과 수광부 신호검출 기술의 정밀도에 따라 달라지므로 효율적인 광학계 구성과 함께 자연광 또는 전기회로에서 발생할 수 있는 노이즈 차폐에 신중을 기해야한다.

펄스의 진행 시간을 통해 계측하는 것을 TOF(Time of flight) 방식이라 하며 두 신호 사이의 시간차를 계산하기 위해 타임카운터(time counter)가 사용된다(Fig. 7). 발사된 레이저 신호를 start 로 하고 포토다이오드에 검출된 신호를 stop 신호로 하면, 타임카운터 내에서 초당 수백 MHz 진동하는 진동자의 start 와 stop 신호간의 진동 횟수를 통해 시간 간격을 계산하고 결과를 출력하게 된다^{4,5}. 빛의 속도를 1m 진행하는데 걸리는 시간으로 따지면 3ns(나노초) 정도이다. 따라서 120MHz 클럭의 수정진동자를 사용하면 1 클럭은 왕복거리이므로 이론적으로 1.25m 해상도가 가능하다. 하지만 목표점에서 일어나는 산란의 불규칙한 변수와 시스템 내의 신호처리 오차를 고려하면 실제 적용시 약 5m 정도의 해상도를 얻게 되며, 현재 1km 이상의 LRF 는 보통 5m 이내의 해상도를 갖고 있다. 더욱 높은 해상도를 위해서는 높은 클럭의 타임카운터를 적용할 필요가 있는데, 높은 클럭을 사용할 경우 노이즈에 대한 영향과 시스템 안정성 확보가 수반되어야 한다.

3.2 LRF 개발현황

초기의 장거리 계측용 LRF 는 주로 전차나 헬기 등 국방 장비에 장착하기 위해 개발되었으나 최근에는 개인이 화기에 장착하거나 휴대하면서 사용할 수 있는 LRF 가 많이 개발되고 있다. 군사 강국이라 할 수 있는 미국, 프랑스, 독일, 노르웨이, 스웨덴이 대표적인 기술 보유국이라 할 수 있으며 국내에서도 국방과학연구소에서 자체적인 개발이 진행 중이다. Fig. 8 에 나타난 LRF 는 SIMRAD 사의 제품으로써 무게 2kg 내외로 휴대가 가능하고 최대 20km 까지 측정 가능한 고성능을 보여준다. 최근에 개발되고 있는 LRF 는 측정 성능 면에서는 만족할 만한 위치에 오른 것으로 판단되므로 앞으로는 고반복 측정과 소형화에 초점이 맞춰질 것으로 보인다.

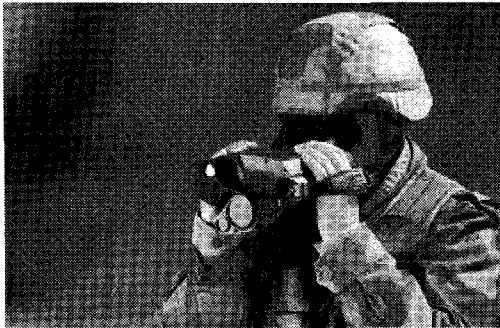


Fig. 8 LRF for military use (Simrad Optronics, LP10 [0.5-20km], Norway)

우리 주변에 쉽게 접할 수 있는 레이저는 다이오드 레이저(LD)이다. 장거리 계측용 LRF 는 일반인들이 접하기 어려운 반면 1km 이내에서 측정할 수 있는 LD 를 이용한 LRF 는 이미 다양한 상용제품들이 개발되고 있다. 사용 목적과 정밀도를 기준으로 건축 현장에서 사용되는 측량용 거리측정기와 사냥 스포츠 등 레저를 위한 거리측정기로 나눌 수 있다. Fig. 9 는 현재 상용으로 판매되고 있는 사냥, 스포츠 등을 위한 레저용 LRF 로써 최대 800m 까지 1m 의 해상도로 측정할 수 있다. 측정거리는 타깃의 반사도에 따라 크게 차이가 나므로 항상 최대측정거리 성능을 나타내는 것은 아니다. 때문에 반사판을 사용하지 않고 실제로 현장에서 건물 등을 타깃으로 측정할 경우 600m 이내, 깃발과 같이 산란이 심한 타깃에는 300m 정도의 성능을 나타낸다. 사용되는 파장대는 일반적으로 900nm 로써 eye-safe 영역은 아니지만 피크 출력이 낮아 대부분 최고 안전 등급인 class 1 을 받고 있다. LD 를 사용할 때의 장점은 가벼울 뿐만 아니라 분당 수십 회에 이르는 빠른 반복측정이 가능하다는 것이며 그만큼 상품성이 뛰어나다고 할 수 있다. 현재 기존의 광학업체를 중심으로 상용화된 제품들이 다양하게 발표되고 있으므로 가격 부담만 줄어든다면 곧 대중화 될 것이다.

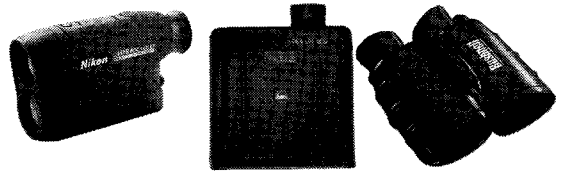


Fig. 9 Compact LRF for leisure (Nikon, Leica, Bushnell)

3.3 OPO 들 이용한 Eye-safe LRF 개발

레이저의 효율가치를 넓히기 위한 방법으로 파장을 변환시킬 수 있는 여러 가지 방법들이 개발되어 왔다. 대표적으로 고조파 발생(harmonic generation)방법과 광파라메트릭(optical parametric process) 방법이 있으며, 이러한 방법으로 원하는 파장을 선택하여 사용하는 것이 가능하다. eye-safe 레이저를 출력하기 위해 주로 라만레이저와 어븀 레이저가 사용되고 있으나 미국을 중심으로 OPO 를 통해 광파라메트릭 파장변환 방법을 적용한 LRF 가 발표되고 있다. OPO 를 사용할 경우 20% 이하로 출력 효율이 낮아지므로 최대측정거리가 짧아지는 단점이 있으나, 고체 결정(crystal)으로써 안전성이 높고 소형화가 유리한 것이 장점이다.

한국기계연구원에서는 OPO 파장변환 원리를 이용한 eye-safe LRF 개발을 3 년에 걸쳐 수행하였다. LRF 광학계의 구성은 Fig. 10 과 같다. 사용한 레이저 매질은 50~60mJ 출력이 가능한 $\phi 2\text{mm}$, 길이 30mm 의 Nd:YAG 이다. 레이저 발진을 위해 크세논(Xenon) 램프를 적용하였고, 레이저 로드와 함께 금도금된 리플렉터(reflector)를 씌워 효율을 높게 하였다. 레이저 헤드에서 발진된 레이저는 큐스위치(q-switch)의 신호에 의해 외부로 발사된다. 큐스위치는 패시브 방식과 액티브 방식이 있는데 보다 큰 피크 출력을 얻을 수 있는 액티브 방식이 주로 사용되고 있다. 큐스위치 밖으로 출력된 레이저는 OPO 를 통과하면서 eye-safe 영역으로 파장변환이 이루어진다. 비선형 결정인 OPO 는 결정 조성에 따라 다양한 종류가 있는데 LRF 에는 BBO 가 사용되었다. BBO 의 복굴절성으로 인해 레이저는 signal 과 idler 의 두 파장이 생성되므로 output coupler 를 두어 $1.5\mu\text{m}$ 이외의 파장은 차단함으로써 유해한 파장이 외부로 출력되는 것을 방지하였다. 최종단의 광 확대기(beam expander)는 10 배율로써 직경 1mm 레이저를 10mm 로 확

대하여 발사하는 역할을 한다.

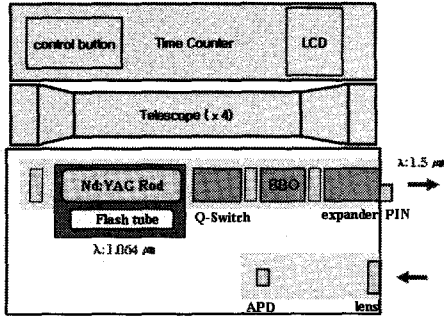


Fig. 10 Eye-safe LRF using OPO

TOF(time of flight)방식의 타임카운터는 레이저와 전기적 펄스 신호로 구성된 트랜스미터(transmitter), 1~2 개의 수신채널 및 측정결과를 수집하여 계산하는 카운터(counter unit)로 이루어진다. 각각의 수신채널은 포토다이오드, 전치증폭기, CFD(Constant Fraction Discriminator)로 구성된다⁵. 본 LRF 에는 start 신호는 PIN 다이오드로 검출하고 보다 미세한 신호를 검출해야하는 stop 신호는 감도 높은 APD 를 사용하는 두 채널 타임카운터를 구성하였다. CFD 는 아날로그 형태의 펄스를 논리 레벨 형태로 변환하여 그 결과를 카운터 장치에 제공하고, 카운터는 수정 발진기(quartz oscillator)로 클럭을 생성하여 순차적으로 입력된 두 신호를 클럭에 기록하게 된다. 정밀한 거리 측정 결과를 위해서는 독립적인 두 신호를 동일한 타임 라인에 기록하는 것이 중요하며, 여기서 얻어진 클럭 수와 한 클럭 동안 빛의 진행거리를 곱하고 1/2 하면 거리를 알 수 있다. 발사된 레이저가 공기 중의 입자에 의해 반사되어 감도 높은 APD 에 검출되면 잘못된 측정 결과를 얻을 수밖에 없다. 이를 방지하기 위해 시간 경과함에 따라 이득값을 변화시키는 기술이 상용된다. 즉 단거리 측정시 강한 펄스가 반사되므로 문턱전압을 높게 설정하고 장거리 측정 시는 문턱전압을 낮게 설정함으로써 오측정될 확률을 줄일 수 있다.

LRF 의 최대측정거리는 펄스 에너지와 펄스폭, 수신 다이오드 감도, 목표물의 반사도와 대기 상태 등에 따라 크게 달라지므로 환경 조건을 고려할 필요가 있다. 본 시스템은 9mJ 이상의 펄스 에

너지와 32nm 의 펄스폭을 가지며, 시정거리 15km 이상의 맑은 날씨에 측정한 최대 측정거리는 3.7km 였다. 타임카운터에 사용된 수정 진동자는 320MHz 이므로 이론상 0.5M 의 해상도를 가지나 실측을 통해 확인한 오차 범위는 ± 2m 이다(Fig. 11).

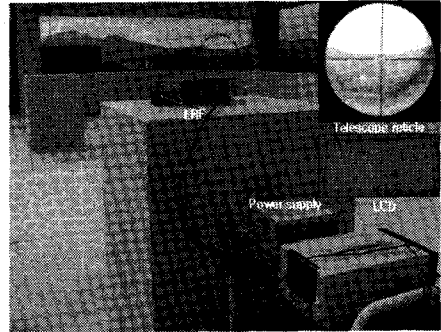


Fig. 11 Distance measurement test

4. 결론

나노 기술이 탄생하기까지는 전자 현미경 기술이 있었고 우주의 신비를 풀기까지는 망원경 기술의 발전이 있었기에 가능했다. 따라서 기술의 발전은 계측 기술과 함께한다고 해도 무리는 아닐 것이다. 그만큼 계측 기술의 발전은 의미가 있으며 레이저가 그 중요한 역할을 하고 있다. 레이저 계측 기술은 일반 광에서 찾아볼 수 없는 우수한 특성으로 각종 계측 분야에서 기존의 측정 방식을 대체할 것이다. 최근 하나의 기기에 다양한 기술을 묶어서 융합하는 디지털 컨버전스가 새로운 흐름으로 자리를 잡아가고 있다. 휴대폰 기능에 카메라와 MP3 기능이 부가되기 시작하더니 캠코더 기능까지 결합되었다. 이처럼 함께 있어서 편한 기능들이 하나로 합쳐지는 것과 같이 앞으로는 거리측정이 필요한 곳에는 어디든 레이저 계측 기술이 컨버전스 될 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Huang, D., "Optical Coherence Tomography," Science, Vol.254, pp. 1178-1181, 1991.
2. Drexler, W., "Ultrahigh-resolution ophthalmic optical coherence tomography," Nature Medicine, Vol.7, No.4,

- pp. 502-507, 2001.
3. 이병하, 김법민, 오정택, “광학 이미징의 원리와 응용,” 광학과 기술, Vol.7, No. 3, pp. 15~16, 2003.
 4. Amann, Markus-Christian, Bosch, Thlerry, Myllyla, Rlsto, Rloux, Marc, "Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement," Opt. Eng 40(1) pp. 10~19, 2001.
 5. Ikonen, Erkki, Krozer, Viktor, "Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast, high precision measurement applications," OULU university press, pp. 24-29, 2004.
 6. Amann, Markus-Christian, Bosch, Thierry, Lescure , Marc, Myllyla, Risto, Rioux, Marc, "Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement," Opt. Eng. Vol. 40, No.10, 2001.
 7. Ostrowski, Roman, Strzelec, M., "Eye-safe lasers," Military University of Technology, 2002.
 8. Duppy, David, Lescure, Marc, “High Frequency scanning response of APD photocurrent for laser range finder” Opt. Eng. Vol.39, No.10, 2000.
 9. Cho, Sung-Hak, Yoo, Byung-Heon, Chang, Won-Seok, Kim, Jae-Gu, Whang, Kyung-Hyun, “ Development of range finder using long wavelength laser,” Report of Ministry of Science & Technology, 2004.
 10. Yoo, Byung-Heon, Cho, Sung-Hak, Whang, Kyung-Hyun, “Development of Eye-safe laser range finder using OPO,” Laser Technology, Vol. 126, pp48-53, 2004.
 11. <http://renishaw.com/client/category/UKEnglish/CAT-1079.shtml>
 12. http://www.risoe.dk/ofd/oct/OCT_background.htm
 13. <http://www.meditec.zeiss.de>