

레이저 계측 기술

Laser Gauging Technology

원 종 육

한국표준연구소

표 1. 레이저 응용계측 분야

I. 머릿말

고위도성, 고단색성, 간섭성, 직진성, 편광, 반사 및 조절, 산란, 흡수 및 발광, 물질과의 상호작용 등과 같이 레이저광이 갖는 특성을 잘 이용하면 다른 방법으로는 측정할 수 없거나 측정하기 힘든 것 또는 정밀정확도가 떨어지는 것들을 해결할 수 있다.

한국의 표준연구소(KSRI), 미국의 국립표준국(NIST), 독일의 연방물리기술청(PTB), 영국의 국립물리연구소(NPL), 일본의 계량연구소(NRIM) 등과 같은 각국의 표준기관들은 거의 모든 정밀 측정 분야에 레이저광을 이용하고 있다. 특히 미터의 원기 유지나 질량 원기와의 비교 측정, 전기 용량 측정 등과 같은 최고의 정밀도를 필요로 하는 측정 분야에는 예외없이 레이저광을 이용하고 있다. 또한 산업 현장에서도 정밀하면서 고속의 측정을 요하는 분야에는 레이저 광 기술이 널리 활용되고 있으며, 계속적으로 새로운 응용 기술이 개발되고 있다.

레이저 계측은 측정력의 영향을 받지 않는 비접촉식 측정이고, 전자기 간섭현상이 없는 무유도성 측정이며, 고속측정이 가능하다. 또한 레이저 계측은 기존 다른 방법보다 정밀정확도가 높으며, 화학반응이나 방사선 등 주위 영향을 받지 않고 측정이 가능하며, 물체의 미세 변형량이나 물질판의 정현파 측정등과 같이 극히 적은 변화량을 민감하게 측정할 수 있고 공간적으로 범용계측이 가능하다. 측정자가 측정에 영향을 줄 수 있거나 접근할 수 없는 상태에서 측정이 가능하며 측정되는 양을 아날로그나 디지털 신호의 검출이 모두 가능하므로 컴퓨터 입력이나 측정장치 개개변수에 독립입이 가능하다. 다만 레이저 계측의 단점이라고 하면 장비가 고가이고 사용에 고도의 기술을 요한다는 점이다.

레이저 계측을 세분화하면

- 정밀계측 - 길이, 각도, 표면거칠기, 속도, 온도, 전기량, 밀도, 질량, 중력가속도 등
- 공업계측 - 담긴 양의 측정, 비파괴 검사, 광 섬유 센서, 측량, 기계 제어 등
- 환경계측 - 공해, 산소농도, 원격탐사, 이온층, 해심 등
- 물성계측 - LMR, 열팽창 계수 등

과 같이 대별할 수 있다.

표 1에는 레이저로 계측할 수 있는 물리량과 측정 방법, 레이저 광원에 관하여 실었다. 본 논문에서는 레이저의 유용한 계측활용 실태들을 소개하고 최근에는 연구실에서 수행되고 있는 레이저 계측기술들을 소개하고자 한다.

물리량 측정 분야	측정 방법	레이저 광원
길이, 면적	간섭법, 레퍼도안법, 공초점법, 초단펄스법, 스테일, 홀로그래피, 모아레 간섭법	우초안광을 발출 내온 레이저 및 기타 수파수 안광용 레이저, 초단 펄스레이저, 안도제 레이저, 인두 및 수파수 안도 레이저
선식도, 표면도	간섭법, 모아레간섭법, 홀로그래피	Zemax 안경 카메라 및 기타 수파수 안광용 레이저, 필스레이저, 일관기스레이저, 안도제 레이저
표면거칠기	공산란, 간섭법	간섭모드 수파수안광용 레이저, 필스 레이저, 안도제 레이저, 가스레이저
선 폭도	간섭법, 홀로그래피, 모아레 간섭법	Zemax 안경 카메라, 필스레이저, 안도제 레이저, 가스레이저
각도	오르토펠리메션, 간섭법, 홀로그래피, 모아레간섭법	안도제 레이저, 수파수 안광용 레이저, 홀릭 안광용 레이저
선 폭	간섭법	안도제 레이저, 수파수안광용 레이저
속도	간섭법, 스테일	수파수안광용 레이저, 가스레이저, 안도제 레이저
가속도, 중력	간섭법	수파수안광용 레이저, 가스레이저
비파괴 크기 및 두께도	도플러, 스테일, 공산란법	가스레이저, 고체 레이저, 발출 내온 레이저
고전속도	스테일, 모아레간섭법, 레퍼도안법	고체 레이저, 가스레이저, 발출 내온레이저, 수파수안광용 레이저, 홀릭 안광용 레이저
비파괴 계측 및 3차원 측정	홀로그래피, 모아레 간섭법, 간섭법	필스레이저, 안도제 레이저, 가스레이저
선도	CMS, 광학투영서	색소레이저, 수파수 가변 고체 레이저, 안도제 레이저
추량	LPR	안도제, 가스레이저, 발출내온레이저
밀도	간섭법	우초안광용 레이저, 수파수 안광용 레이저
안개 및 먼기	간섭법	우초안광용 레이저, 수파수 안광용 레이저
광학 및 광학 측정	PR	색소 레이저, 수파수 가변 고체 레이저, 가스 레이저
전기량: 전류 및 차압, 전압, 전압	간섭법, 편광, 감도 및 수파수 변조법	안도제 레이저, 가스레이저, 수파수 레이저
Semiconductor Laboratory 미소배인인사	간섭법, 광학 조사법	수파수 및 홀릭 안광용 레이저, 안도제 레이저
원형계측: 구배, 유속, 비파괴사, 이온층 계측	LIDAR	색소 레이저, 수파수 가변 고체 레이저, 가스 레이저, 안도제 레이저
물리량 측정	간섭법, 공초점	발출내온레이저, 수파수 가변 고체 레이저, 후비 레이저
중성 측정	LDR 등	수파수 가변 고체 레이저, 색소 레이저, 안도제 레이저

II. 레이저 계측의 활용

이 절에서는 레이저 계측의 실태들을 상세히 소개하고자 한다.

1. 일렬 정렬

터널을 뚫을 때나 파이프를 똑바로 설치할 때, 또는 다리를 놓을 때 등과 같이 건설공사장뿐만 아니라 일자가속기를 설치할 때와 같이 중요한 장비를 설치할 때에 정확하고도, 손쉽고, 반복성이 좋은 일렬 정렬 방법이 필요하다. 이것은 출력이 워낙으로 대칭인 단상이고 퍼짐성이 거의 없는 레이저를 이용하면 좋다.

터널을 뚫는 것과 같이 고정밀도가 필요하지 않을 때에는 대략적으로 레이저 광선속의 증감을 어림잡아 이용하면 된다. 광선속이 지나는 길에 동심원 고리를 설치하여 이용하면 된다.

좀더 정확한 작업을 위해서는 그림 1과 같은 전자 감응장치를 이용하면 된다. 유리로 만들어진 피라미드형의 반사체의 밑면이 레이저 광선속에 수직이 되도록 그림 1(a)와 같이 설치한다. 그러면, 광선속이 4등분 되는데, 그 주위의 4개의 실리콘 광전지 각각에 분리된 광선속 각각이 전부 비추어지도록 설치한다. 서로 정반대로 있는 광전지들 사이에는 그림 1(b)의 전자회로와 같이 연결시켜 같은 빛의 세기가 조정되면 검류계(galvanometer)가 0이 되도록 연결시킨다. 이 장치는 광전지의 온도 차이가 특성에 따른 영향을 보정해 주기 위해서 처음에 안전저항(ballast resistor)을 조절해서 균형을 잡아야 한다. 레이저 광선속을 피라미드 헤드에 비추었을 때, 서로 정반대로 있는 광전지들 사이에 설치된 검류계 2개가 동시에 0일때가 광속이 피라미드 헤드 정 가운데를 비출 때이다.

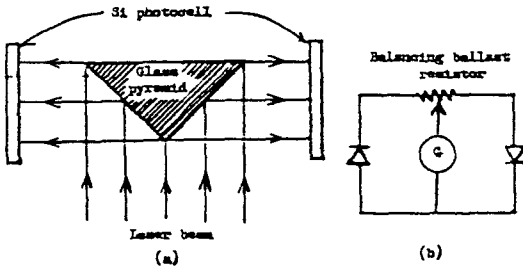


그림 1. 레이저 광속의 일렬정렬 헤드와 그 전자회로

레이저에 광학부품들을 사용하는 진보된 일렬 정렬방법이 개발되었다. 그림 2(a)에서 보이는 원형회절발(원형회절격자)이나 그림 2(b)의 프레넬 구역판이 바로 그것들이다. 이들은 평면판으로 만들어졌으며, 레이저 광선속에 수직이 되도록 설치한다. 원형 회절발에 레이저광속을 수직으로 입사되었을 때는 그 반대쪽에 그 회절발면에 평행한 면에 대하여 원형의 간섭무늬가 생긴다. 이 간섭무늬의 중앙이 일렬정렬이 필요할 때는 폭이 달라지는 동심원으로된 프레넬 구역판을 사용하면 편리하다. 이 경우에는 입사된 레이저 광속이 회절되어 대부분 한점에 모이게 된다. 따라서 이와같은 구역판을 연속적으로 사용하면으로써 같은 직선상에 있는 점들의 열을 얻게 된다. 이 방법을 이용하여 스탠포드대학에서는 길이가 3 km에 달하며 전길이에서 ±1/2 mm의 정밀도를 요하는 선형가속기를 설치하였다.

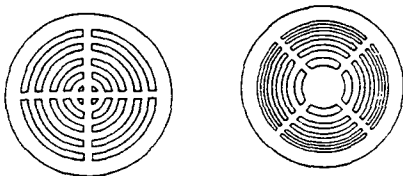


그림 2. (a) 원형의 회절발 (b) 프레넬 구역판

2. 거리 (길이) 측정

레이저로 거리 또는 길이를 측정하는 데 이용하면 매우 편리할 뿐만 아니라 정밀정확도도 아주 높다.

레이저로 거리(길이)를 측정하는 방법에는 표 2에서의 같이 크게 4가지로 나눌 수 있다.

표 2. 레이저를 이용한 거리측정

방법	사용 레이저	측정범위	정확도	응용예
간섭무늬 헤아림	He-Ne, CO ₂	수십 m	~0.01 μm (10 ⁻⁷ -10 ⁻⁹)	길이 표준물 고정
이동적분 헤아림	He-Ne	수십 m	~0.01 μm (10 ⁻⁷)	길이표준물고정, 공차기계나 측정기기의 교정 및 control
선속변조	He-Ne, GaAs	수백만 km	10 ⁻⁶	측량
펄스매아리	Q-switched CO ₂ 레이저, TEA CO ₂	수백만 km	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁷	군사용 거리측정기 위성거리측정
그림자용	He-Ne, 이온레이저, 반도체	수십 cm	수 μm	내·외경 측정

가. 간섭무늬 헤아림

레이저는 간섭성, 단색성, 높은 출력강도등 때문에 이 방법이 정밀길이측정에 많이 사용된다. 그림 3은 전형적인 마이켈슨 간섭계에 레이저광이 레이저속으로 들어가서 발생하는 되먹임 효과를 방지하고 정렬을 쉽게 하기 위하여 반사경 대신 코너-큐브를 사용한 간섭계이다. 여기에서 코너-큐브 A, B에서 반사된 두 광속사이에는 광로차가 발생되는데 이때 두 빛이 서로 간섭을 일으켜 그 간섭무늬가 광검출기에 생긴다.

코너-큐브 B가 반파장(λ/2) 만큼 이동할 때 마다 밝고 어두운 간섭무늬가 한 주기로 나타난다. 따라서 밝고 어두워지는 간섭무늬의 수를 세어서 여기에 공기중에서의 광파장의 반을 곱하여 주면 코너-큐브 B가 움직인 거리를 구할 수 있게 된다. 이 방법은 레이저가 나오기 전에도 이미 잘 알려져 있었다. 그러나 레이저가 아닌 다른 광원의 경우, 간섭거리가 수 mm에서 1 m정도였다. 반면에 레이저를 이용할 경우 간섭거리는 수십 m에 달한다. 반사경 B를 1 cm 이동시킬 때 파장이 0.6328 μm He-Ne 레이저를 사용하면 간섭무늬의 수는 거의 33000에 달한다. 따라서 이 양을 광검출기로 감지하여 전자적으로 헤아려야 하는데 너무 빠르게 움직이면 광검출기의 최대반응주파수에 제약을 받게 된다. 간섭무늬의 헤아림은 전자공학적으로 1/10 ~ 1/100 까지 가능하다. 따라서 간섭무늬의 헤아림능력과 파장측정 정도를 고려하면 보통 ~10⁻⁶ 정도의 정밀정확도를 갖는다. 이 마이켈슨 간섭계 이외에 초미세거리 측정을 위한 편광간섭계와 평면도 측정을 위한 피조간섭계등에서 레이저가 이용된다.

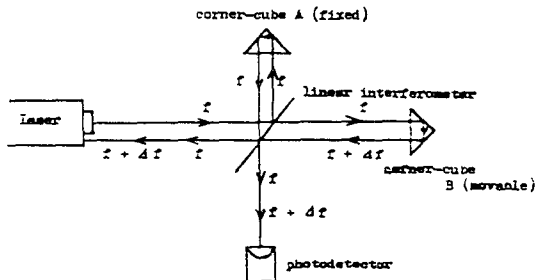


그림 3. Corner-cube를 사용한 마이켈슨 간섭계

나. 선속변조

간섭무늬 헤아림이나 도플러 이동적분 같은 방법은 야외의 장거리 측정에는 적합치 않다. 레이저가 생기기 전에 주로 이용된 장거리 측정법은 마이크로파의 r.f 변조에 의한 방법이었다. 그러나 마이크로파는 직진성이 약해 정확한 거리측정이 불가능하다. 때문에 직진성과 집중력이 좋은 레이저 광원에 마이크로파 변조로 거리를 측정하게 되었다.

그림 4는 선속변조를 이용한 거리측정장치의 개략도이다. 발진기의 주파수로 진폭이 변조된 레이저 광속은 집속되어 먼 거리에 있는 측정물체에 조사된다. 이 빛은 다시 반사되고 망원경에 의해 모아져 광검출기에 집중된다. 이때 검출된 파의 위상은 측정물체까지의 거리에 따라 달라지며 이 반사파와 발진기의 상대적인 위상차를 위상검출기로 검출한다. 완전히 위상이 일치하게 되면 그 거리는 변조파 반파장의 정수배가 되고 위상차이가 θ 만큼 생기면 변조파 반파장의 어떤 정수배에(반파장) $\times \theta/2\pi$ 를 더하면 된다. 그러면 정수를 구하기 위해서는 변조파의 주파수를 비슷한 여러 진동수로 같은 거리를 반복측정하면 정수를 결정할 수 있다. 이 방법은 레이저 스펙트럼의 좁은 띠폭 때문에 다산탄광과 식별이 용이하여 낮에도 신호대 잡음비가 높다. 따라서 레이저를 이용할 경우 1 km 까지는 1 mm의 분해능이 가능하고 코너큐브 프리즘과 함께 사용하면 낮에는 64 km, 밤에는 80 km 까지도 측정이 가능하다.

비행기에 싣고 지표면을 조사하게 되면 낮에는 3 km 까지 밤에는 5 km 까지 2 cm의 정밀도로 지표면의 높낮이를 관측할 수 있다. 따라서 지형의 윤곽조사나 측량에서 장거리 측정에 유용하게 활용될 수 있다.

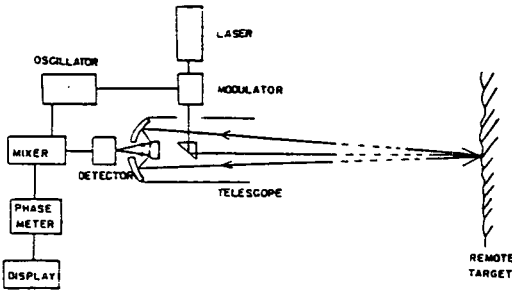


그림 4. 선속변조를 이용한 거리측정장치

다. 펄스메아리

펄스메아리를 이용한 레이저 거리측정원리는 고출력의 펄스형 레이저를 목표물에 명중시켜 그 반사파를 수신하여 빛이 왕복하는데 소요되는 시간을 측정하므로써 목표물까지의 거리를 알 수 있게 된다. 이 펄스메아리 방법은 초음파를 이용한 두께측정기에도 많이 적용되고 있으며 발사된 펄스가 반사되어 다시 검출될 때까지의 시간을 T, c를 광속이라고 하면 그 거리 d는

$$d = \frac{c \cdot T}{2} \quad (1)$$

이 된다. 이때 사용되는 레이저의 펄스지속시간이 짧을수록, 집중력이 좋을수록 분해능과 측정정도가 좋아진다.

이 방법으로 측정한 것중 흥미있는 것이 지구와 달 사이의 거리측정이다. 1975년까지는 재래식 천문학적 방법으로 거리를 측정하였는데 그 정확도는 ± 3.2 km 이었다. 그러나 1969년 Appolo 11호 우주선 발사 때

달의 표면에 많은 코너큐브로 구성된 반사체를 설치해 놓았는데, 이 반사체와 현재 생산되고 있는 펄스지속 시간 10 nsec인 Q-switched 투비레이저를 이용하면 불과 ± 15 m 정도의 정확도로 거리를 측정할 수 있게 거리뿐 아니라 그 거리의 변화까지 측정할 수 있게 되었다. 특히 이 레이저 거리측정기는 군사용, 측전방의 관측포병, 부대 관측소, 전차, 헬리콥터 등에 부착되어 목표물까지의 정확한 거리를 측정하여 사격의 정밀도를 높이는데 많이 이용되고 있다.

라. 도플러 이동 적분

레이저를 이용하여 움직이는 물체의 속도를 측정할 수 있다. 이 속도를 시간에 따라 적분하면 그 물체의 이동거리를 측정할 수 있다. 레이저 광속을 움직이는 물체에 투사시키면 반사되어 나오는 광속의 진동수는 입사광선의 진동수와 차이가 생긴다. 이 진동수차이는 물체의 이동속도에 따라 달라지며 이 현상을 도플러효과라 한다. 이때 달라진 진동수 f'는 맥놀이 현상이라 하며 이 주기적인 진동을 맥놀이이라 한다. 그런데 이 맥놀이는 간섭한 두 빛의 진동수 차에 해당된다. 따라서 광검출기에 입사된 f와 f + 4f의 빛이 간섭하여 4f의 맥놀이를 형성시킨다. 그러나 그림 3과 같은 시스템에서는 진동수 차이만 감지하고 진동수가 증가했는지 감소했는지, 즉 물체의 이동방향을 알 수 없다. 때문에 이 해결책으로 그림 5와 같은 두 개의 발진 주파수를 갖는 지만 레이저 간섭계가 이용되고 있다.

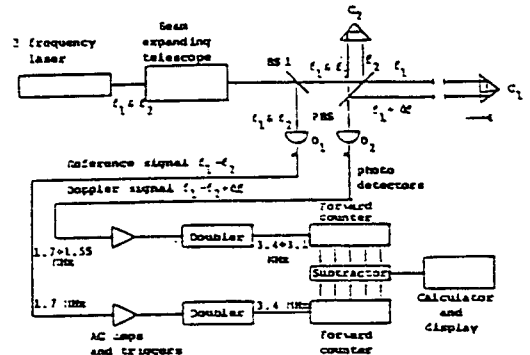


그림 5. 지만레이저 간섭계

헬륨-네온 레이저의 광축방향으로 자장을 걸어주면 Ne의 에너지준위가 지만효과에 의해 분리되어 출력 특성이 달라진다. 즉 선편광되어 있는 성분이 주파수가 서로 다른 오른쪽 원편광(RHCP)과 왼쪽 원편광(LHCP)으로 된다. 이것은 레이저 매질이 자장에 의해 광학특성을 갖게 되는데 원형편광의 방향에 따라서 다른 굴절율을 갖게 되어 광로차이가 생기기 때문이다.

두 원편광 출력은 $\lambda/4$ 판에 의해 수직, 수평방향의 선편광으로 바뀌어 발진하게 된다. 본 레이저의 두 출력성분의 주파수 차이 $f_1 - f_2$ 는 약 1.7 MHz 이다. 두개의 출력성분은 광속의 분산을 줄이기 위해 광속 확장이로 평행광선을 만든다. 기준신호를 얻기 위해 광속분리기 BS1에 의해 광속의 일부분을 반사시키고 광소자 D1에 입사시켜 두 주파수 차이인 맥놀이 신호를 검출한다. 이 검출된 양은 배가기에 의해 2가 곱해진 후 주파수 계수기 FC에 의해 계수된다. 한편 광속분리기 BS1에서 통과된 빛은 편광분리기 PBS에게 분리되어 f_2 의 성분은 코너큐브 C2에서 반사 되고, f_1 의 성분은 통과되어 코너큐브 C1에 반사된 후 두 광속이 광소자 D2에 함께 입사된다.

이때 코너큐브 C1을 어떤 속도 V로 이동시키면

주파수 f_1 의 빛을 도플러 효과에 의해 변조된 주파수 $f_1 + \Delta f_1$ 이 되고, 이렇게 바뀐 주파수 $f_1 + \Delta f_1$ 과 f_2 사이에 맥놀이(beat)가 일어나 이 맥놀이 주파수 $|f_1 - f_2 + \Delta f_1|$ 이 광속자 D_2 에서 검출된다. 이 검출된 양은 배가기를 거쳐 2배가 된 후 주파수 계수기 FC_2 에 의해 계수된 후 FC_1 에서 계수된 기준신호 $|f_1 - f_2|$ 의 2배와 비교하여 $2\Delta f_1$ 을 구한다. 그런데 Δf_1 은 $2V/c \cdot f_1$ 이고, 코너큐브가 움직인 거리 S 는

$$S = \int_0^t V dt$$

이므로 다시

$$S = \int_0^t \frac{c}{2f_1} \Delta f_1 dt$$

$$\int_0^t \frac{\lambda_0 \cdot \Delta f_1}{2} dt$$

$$\int_0^t \frac{\lambda_1}{4} (2\Delta f_1) dt \quad (2)$$

가 된다.

따라서 펄스기에서 $2\Delta f_1$ 를 2 ms 동안 계수하여 적분한 다음 $\lambda_1/4$ 을 곱하여 코너큐브 C_1 의 이동거리를 구한다. 여기서 λ_1 은 레이저의 공기중 파장으로 레이저 측정장치 내부에 기억되어 있는 진공파장 λ_0 을 자동 보정기에 의해 측정된 공기중의 굴절률로 나누어 얻을 수 있다. C_1 은 정지해 있고, C_2 가 움직일 때나 C_1 과 C_2 가 모두 움직일 때도 마찬가지로, 레이저 측정장치는 단지 C_1 과 C_2 의 상대적인 이동거리를 구하게 된다.

마. 그림자 이용

그림 6은 레이저 광속의 직진성을 이용하여 실린더의 내외경을 측정하는 것을 보여주고 있다. 레이저 광속을 광속확장기로 평행확장하여 피측정물에 투영시키면 뒤에 설치된 어레이 감지기에서는 빛이 입사되고 있는지의 여부로 판별하여 피측정물의 내경이나 외경등을 측정할 수 있다.

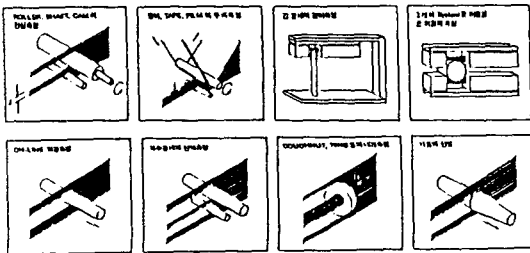


그림 6. 그림자 방법을 이용한 길이 측정

3. 각도 측정

레이저에서 발진된 광속이 광속분리기에 부딪히면 f_1 의 광속은 통과되고 f_2 의 빛은 반사된다. 이 f_2 의 빛은 다시 반사경에 의해 반사되어 코너큐브를 향한다. 이때 두 코너큐브가 부착된 코너큐브 마운트(corner cube mount)를 미소각도 회전시켜 주면 두 코너큐브에서 반사된 광속은 주파수 변화가 생기게 된다. 따라서 이 주파수 변화량을 검출함으로써 두 코너큐브의 광로차의 변화량 d 를 구할 수 있다. 이 광로차의 변화량 d 는 광축방향에 따른 두 코너큐브 중심의 상대적인 위치변화이다. 그러므로 코너큐브 마운트의 회전각도 θ 라 하면 d 는 $\sin \theta$ 에 비례하는 양이 된다.

$$\sin \theta = \frac{d}{L} \text{ 가 되고, } \theta \text{ 는}$$

$$\theta = \arcsin \frac{d}{L} \quad (3)$$

가 된다.

이 식에서 L 은 두 코너큐브 중심사이 거리로 측정치나 설계치로 이미 알고 있는 값이고, d 는 레이저의 측정치 이므로 회전각 θ 를 구할 수 있다. (그림 7 참조)

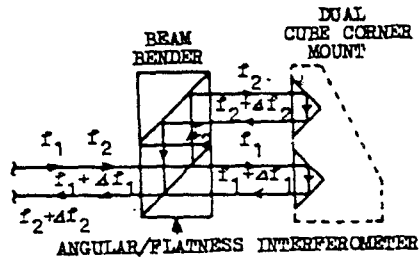


그림 7. 레이저 각도간섭계

(13)식에서 볼 수 있듯이 두 코너큐브 중심사이 거리 L 이 크면 각도 분해능이 커진다. 제품으로 나온 코너큐브 마운트의 L 은 대략 50 mm 정도로 레이저 분해능 0.1 μm 에 대해 이 각도간섭계의 분해능은 대략 0.4 초가 된다.

위에서 기술한 각도 측정장치를 응용하여 한국표준 연구소에서 개발한 시준기 교정장치의 개략도가 그림 8에 보인다. 각도 측정분해능을 높이기 위해 두 코너큐브는 간격을 50 cm로 하여 회전대에 부착시켰고 이 회전대는 마이크로미터 헤드로 밀어주어 미소 회전하도록 하였다. 이 회전대의 회전각은 두 코너큐브와 레이저 각도간섭계로 측정하도록 하였으며, 또 반사경과 시준기도 측정할 수 있도록 하였다. 따라서 이 두 기기에서 측정한 값을 비교함으로써 시준기를 교정할 수 있다.

분해능이 낮은 시준기의 경우, 전술한 수준기 교정용 경사대나 회전원판을 이용하여 이 기기로서 미소각도를 형성시켜 주고 이 회전각을 레이저와 시준기로 각각 읽어 그 읽음치를 비교함으로써 시준기를 교정할 수 있다. 이 교정장치의 장점은 회전축에 대하여 회전 중심의 직선운동이 두 코너큐브에서 반사될 때 생기는 광로차에 전혀 영향을 주지 않는다는 점이다.

4. 속도의 측정

레이저를 이용해서 움직이는 물체의 속도를 측정할 수 있다. 레이저 광선속을 어떤 움직이는 물체에

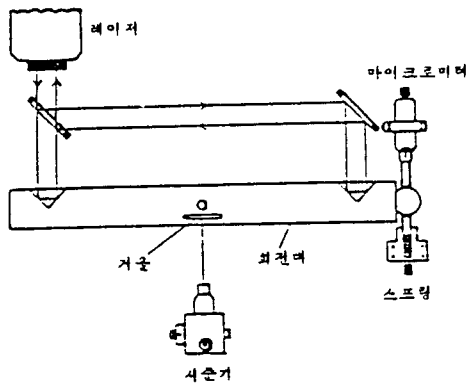


그림 8. 시준기 교정을 위한 기기설치

투사시키면 반사되어 나오는 광선속의 진동수는 레이저 광선속의 진동수와 차이가 있다. 그 물체의 속도에 따라 진동수이동(frequency shift)이 달라지는데, 이것을 도플러 효과(Doppler effect)라고 하며, 달라진 진동수 f' 은

$$f' = f \frac{1 + v/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (4)$$

으로 표시된다. 여기서 f 는 원래의 레이저 진동수이며, c 는 광속도, v 는 움직이는 물체의 속도이다. v 의 부호는 레이저와 그 물체 사이의 거리가 가까와지면 +, 그 반대이면 -이다.

따라서 진동수 이동을 측정만 할 수 있으면 우리는 그 물체의 움직이는 속도를 얻을 수가 있다. 식(2)에서 v 가 c 에 비해 아주 작다고 하면 대략

$$f' = f \left(1 + \frac{v}{c}\right) \quad (5)$$

이 되어 진동수 이동(frequency shift) Δf 는

$$\Delta f \sim \frac{v}{c} f \quad (6)$$

이다. 따라서 대략 진동수 이동은 움직이는 물체의 속도에 비례한다. 한편 움직이는 물체가 광선속에 대하여 사각으로 움직일때는 그 사이의 각도가 α 일때

$$f \sim \frac{v \sin \alpha}{c} f \quad (7)$$

가 되어 α 에 따라 진동수 이동이 달라짐을 알 수 있다. 진동수 이동을 측정하기 위해서는 그림 3과 같은 마이켈슨 간섭계가 이용된다. 레이저에서 나온 진동수 f 인 광선속이 간섭계(linear interferometer or beam-splitter)에서 나뉘어져 반은 코너-큐브A로, 반은 코너-큐브B로 향한다. 고정된 코너-큐브A에서 반사된 빛은 진동수의 변화가 없으며 간섭계를 두과

하여 광검출기(photodetector)로 향하고, 이동할 수 있는 코너-큐브 B에서 반사된 빛은 코너-큐브 B의 움직이는 속도 v 에 따라 도플러 효과 때문에 진동수가 $f + \Delta f$ 로 변하며 간섭계에서 반사되어 광검출기로 향한다. 두 광속은 진동수가 f 만큼 약간의 차이가 있으므로 광검출기에서는 간섭계에 의하여 맥놀이 신호가 검출되어 f 를 관측할 수 있다. 따라서 식에서 v 는

$$v \sim \frac{c \cdot \Delta f}{\sin \alpha \cdot f} \quad (8)$$

로 표시될 수 있으므로 이 식에서 속도를 구할 수 있다.

5. 회전속도 측정

그림 9는 레이저를 이용해서 회전속도를 측정하는 방법을 나타낸 것이다. 4개의 레이저 튜브를 정방형 고리가 되도록 설치하고 각 코너에는 유전체로 피복된 거울을 45° 각도로 설치한다. 그러면 시계방향과 반시계방향으로 도는 두 광속이 있다. 이제 중앙을 중심으로 회전시키면 도플러 효과 때문에 회전방향과 같은 방향으로 도는 광속은 진동수가 감소하고, 그 반대방향으로 도는 광속은 증가한다. 거울 하나를 광속분할기로 대체하고 광 검출기에 두 광속이 합치도록 하면 맥놀이 현상으로 그 진동수 이동을 측정할 수가 있다.

이론적으로 그 진동수 이동 Δf 와 회전속도 ω 사이의 관계식을 구하면

$$f = \frac{4A \cdot \omega}{\lambda P} \quad (9)$$

이 된다. 여기서 λ 는 레이저 파장, A 는 정방형 고리의 면적, P 는 그 고리의 둘레길이를 나타낸다.

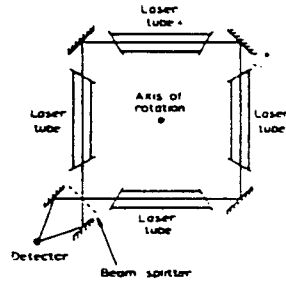


그림 9. 회전속도 측정장치

6. 레이저 도플러 유속계

레이저 도플러 유속계(Laser Doppler Velocimeter; LDV)는 피토관이나 열선 유속계 등의 보편적인 방식보다 진보하여, 유동유체와 접촉이 없이 높은 정밀도로 유속 정보를 얻을 수 있는 방법으로 1970년대 초부터 활용되기 시작한 방법이다.

유동 유체에 탐촉자를 삽입함으로써 발생하는 교란을 없앨 수 있는 비접촉식이며, 공간분해능 및 반응시간이 매우 작다는 장점이 있다. 측정점의 공간분해능은 $100 \mu\text{m}$ 이하로서 재래식 피토관이나 열선 유속계의 probe 보다는 수십배 이상 월등하다.

그림 10은 LDV 시스템의 한 예를 보여주는데 광학 및 신호처리 방식에 따라 여러가지 형태로 나누어진다.

LDV의 정확도는 광학계의 배열과 신호처리에 의해 결정된다. 정밀한 광학계의 배치와 신호처리가 갖추어졌을 경우 $\pm 0.1\%$ 정도의 정확도를 예상할 수 있다. LDV는 유체역학, 연소공학 등 여러분야에서의 유속 측정 요구가 증가함에 따라 근래에 들어서 많이 활용되고 있으며, 계속 구성 및 제작기술이 개선되고 있다.

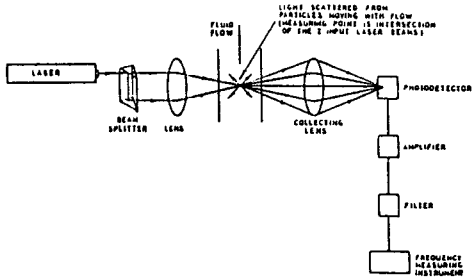


그림 10. LDV 시스템의 개략도

두 광선이 교차함으로써 생기는 간섭현상은 진동의 중첩원리로도 설명할 수 있는데 두 광선의 합성세기는 두 전자기파의 합으로 얻어진다.

그림 11에 나타낸 것과 같이 스크린에 입사하는 두 광선에 대한 표현식을 다음과 같이 표현하자.

$$E_1 = E_{01} \exp [i (2\pi \nu t - k \eta_1 + \phi_1)] \quad (10)$$

$$E_2 = E_{02} \exp [i (2\pi \nu t - k \xi_2 + \phi_2)] \quad (11)$$

위 두 식을 합하면

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \\ &= E_{01} \exp [i (2\pi \nu t - k \eta_1 + \phi_1)] + \\ &\quad E_{02} \exp [i (2\pi \nu t - k \xi_2 + \phi_2)] \\ &= \exp (i 2\pi \nu t) \{ E_{01} \exp [-i (k \eta_1 - \phi_1)] + \\ &\quad E_{02} \exp [-i (k \xi_2 - \phi_2)] \} \end{aligned}$$

가 된다. 위 관계식으로 부터 두 광선을 합한 세기는

$$\begin{aligned} I &= E^* \cdot (E_1 + E_2) \\ &= E^* + E^* + 2E_{01} E_{02} \cdot \\ &\quad \cos [(\xi_2 - \eta_1) + (\phi_2 - \phi_1)] \end{aligned} \quad (12)$$

로 주어진다. 여기서 $k = 2\pi/\lambda$ 이다. 위 식으로부터 I의 세기는 $(\xi_2 - \eta_1)$ 가 $N\lambda$ (정수) 일때 최대가 되며 $(\xi_2 - \eta_1) = (N + 1/2)\lambda$ 일때 최소가 된다. 스크린상에서는 그의 세기가 최대인 곳과 최소인 곳에 따라 각각 밝은 무늬와 어두운 무늬가 교대로 나타난다.

이제 위에서 얻은 관계식들을 이용하여 간섭무늬간격을 구하기로 하자. 그림 12는 간섭무늬 간격을 구하기 위한 그림이다. 그림 12에서

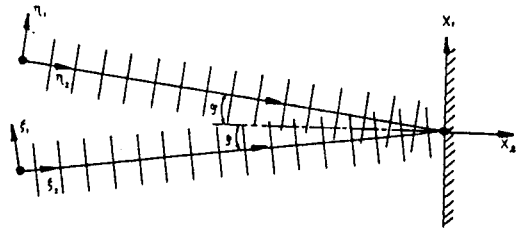


그림 11. 두 광파의 간섭

$$\eta_2 = x_2 \cos \varphi - x_1 \sin \varphi \quad (13)$$

$$\xi_2 = x_2 \cos \varphi + x_1 \sin \varphi \quad (14)$$

이다.

식 (13)과 (14)에서

$$\xi_2 - \eta_2 = 2 x_1 \sin \varphi \quad (15)$$

가 된다. 따라서 N번째 밝은 무늬와 (N+1) 번째 밝은 무늬의 위치는

$$2 (x_1)_N \sin \varphi = N \lambda \quad (16)$$

$$2 (x_1)_{N+1} \sin \varphi = (N+1) \lambda \quad (17)$$

가 된다. 위의 두 식으로부터 밝은 무늬의 간격 즉 간섭무늬의 간격 Δx 는

$$\begin{aligned} \Delta x &= (x_1)_{N+1} - (x_1)_N \\ &= \lambda / 2 \sin \varphi \end{aligned} \quad (18)$$

가 된다. 따라서 간섭무늬의 간격은 파장 λ 와 두 파동 사이의 각도에 의존함을 알 수 있다. 그리고 도플러 주파수는 입자가 측정지점에 생긴 간섭무늬 간격 Δx 를 횡단할 때 생기는 명암의 주기

$$f_D = V / \Delta x \quad (19)$$

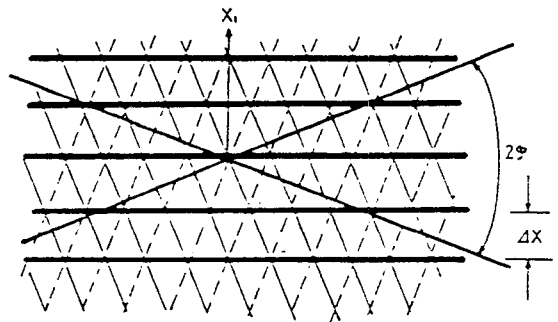


그림 12. 레이저 도플러 신호의 간섭무늬 모델; 간섭무늬 간격 $\Delta x = \lambda / 2 \sin \varphi$ 는 x_1 의 위치에 관계없이 일정하다.

인 것으로 해석할 수도 있다. 여기서 V 는 입자의 속도 벡터이다.

그림 13은 이와 같은 이중 광속(Dual Beam)에 의해 생기는 간섭무늬속을 유체유속의 입자가 지나갈 때 산란되는 빛의 세기를 검출기로 감지된 신호를 보여 준다. 여기에서 배경으로 깔려 있는 소위 Pedestal 잡음을 전자적인 필터를 사용하여 제거하면 그림 14와 같은 신호로 바꾸어 줄 수 있으며 이 신호로부터 분석하면 유체의 흐르는 속도를 얻을 수 있다.

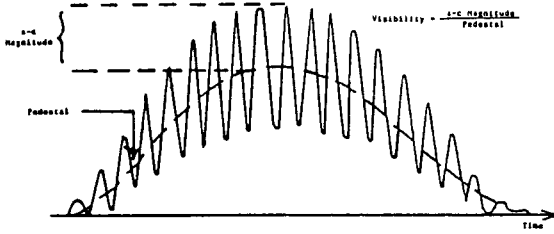


그림 13. 이중광속에 의해 생기는 간섭무늬속을 입자가 지나갈때 생기는 산란신호

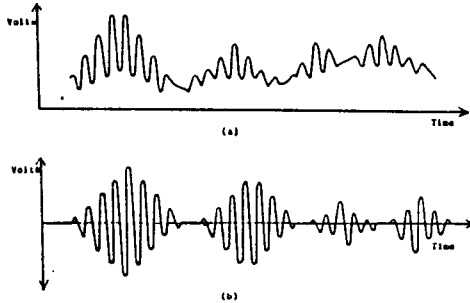


그림 14. 레이저 유체유속 측정장치의 신호특성
(a) 광검출기에 검출된 신호
(b) 고주파수 통과필터를 거친후의 신호

7. 중력가속도 측정

중력가속도는 절대측정과 상대측정으로 나누어진다. 대부분의 선진국 표준연구소에서는 레이저 간섭계의 원리를 이용한 절대중력가속도 측정기를 자체 개발하여 사용하고 있으며 오늘날의 측정 수준은 자유낙하체의 낙하거리를 레이저 간섭계로 정밀 측정하므로써 10^{-9} Gal의 정확도에 이르고 있다. 우리나라에서는 아직 절대 중력가속도 측정에 관한 연구가 수행된 바 없고 일본에 의존하여 상대 측정에 의한 중력값을 받아 사용하고 있는 실정이다. 그러므로 우리의 과학 발전과 국내외의 자원 개발을 중요시하는 현실에서 기초가 되는 절대중력가속도 측정 연구가 시급히 이루어져야 한다.

절대 중력가속도의 측정은 원래 reversible pendulum에 의하여 10^{-5} Gal 정도의 정밀측정이 가능하였으나, 1946년 Volet가 진공중에서 눈금 부자의 자유낙하 방법을 제안한 이후 새로운 자유 낙하 방법의 절대 중력계가 혁신적으로 발전되어 왔다. 이 새로운 방법은 물체를 위에서 낙하시키는 자유낙하와 밑에서 위로 쏘아 올려서 다시 떨어지는 대칭 자유운동으로 나누어지며 사용 방법상 실험실 위주의 대형 구조에서 휴대용 형태로 발전하였다.

그림 15는 대칭 자유 운동과 자유 낙하의 방법으로 g 가 계산되는 원리를 나타내며 그림 16은 대칭 자유 운동의 절대 중력가속계에 대한 구조의 예이다. 절대 중력가속도계는 길이측정을 위한 레이저 간섭계, 코너

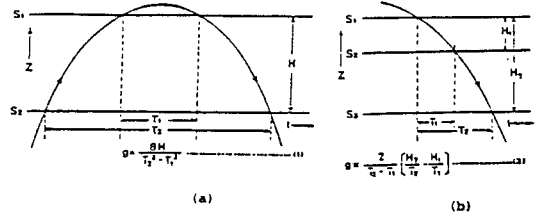


그림 15. 중력가속도 측정원리
(a) 대칭자유운동
(b) 자유 낙하

큐브, 시간 측정시스템, 발사 장치, 진공시스템, 향온시스템, 진도검출장치 등으로 구성되어 있으며 각 시스템 별로 측정기술이 발전해 감에 따라 g 의 측정 정밀도가 향상되었는데 기본 구조를 이루는 간섭계 분야에서 레이저 광파장을 이용 함으로 5×10^{-6} Gal의 정밀도가 얻어지고 있다. 대칭 자유 운동은 시간 측정 및 진공의 잔유공기저항이 제거 되는 장점이 있으나 반면에 발사장치에 의한 충격이 방지되도록 하는 어려움이 있다.

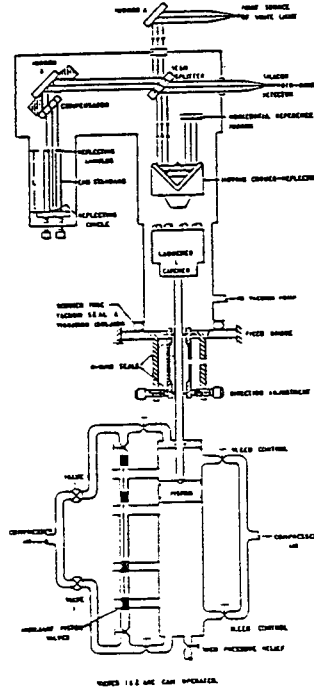


그림 16. 레이저를 응용한 중력가속도 측정장치

8. 기타

그림 17은 초음파와 레이저광을 이용하여 물질 내부의 구조를 측정하는 시스템을 보여주고 있다. 이와같은 방법으로 비파괴 검사가 가능하다.

그림 18은 인공위성과 레이저광을 이용하는 원격탐사 장면을 보여준다. 이것은 대류권이나 성층권의 공기 이동이나 대기 기체상태, 이온층 상태 등을 측정하거나 지상의 이동상태를 측정하는데 이용된다.

그림 19는 레이저 자이로이다. 항공운행에 있어서 자이로는 방향감지뿐만 아니라 비행기의 pitch, roll,

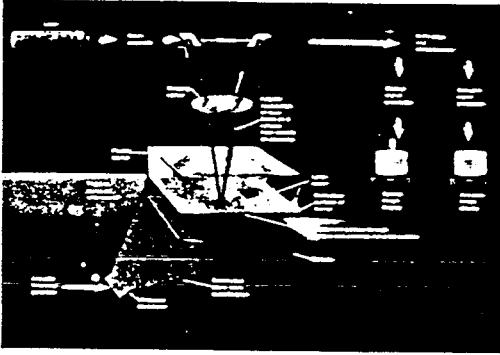


그림 17. 레이저 음향 현미경

yaw의 측정에 필수적인 장비로서 신빙성이 생명이다. 기존 자이로가 베어링, 모터, 집발히터 등을 사용함으로써 오는 저신빙성을 레이저 자이로는 극복하여 최근에는 거의 모든 비행기의 자이로를 이것으로 대체하는 중이다.

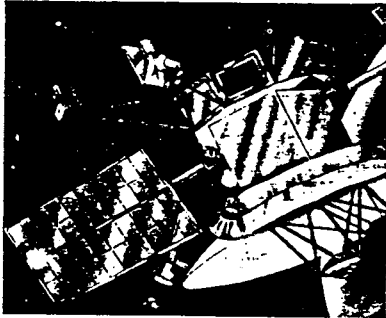


그림 18. 인공위성과 레이저광을 이용한 원격탐사

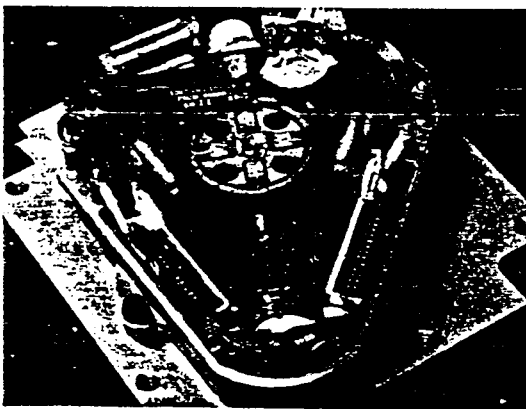


그림 19. He-Ne 링 레이저 자이로

그림 20은 레이저로 바다 깊이를 측정하는 것을 보여 준다.

레이저를 이용한 물성 측정방법 즉 물성계측 중의 하나인 레이저 자기공명 방법은 전자나 원자핵 등의 자기 모멘트와 외부 자기장과의 상호작용을 이용하여 원자의 미세구조, 초미세구조 연구 및 결정구조 연구

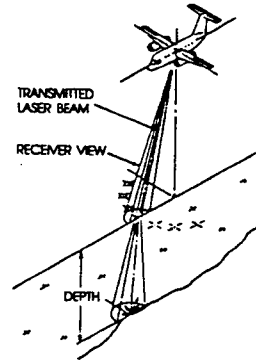


그림 20. 레이저를 응용한 바다 깊이 측정

분야에 널리 이용되어온 첨단과학 기술이다. 현재까지 연구되어온 자기공명 방법에는 원자핵의 자기모멘트를 대상으로 하는 NMR과 NQR 그리고 전자의 자기모멘트를 대상으로 하는 ESR 등이 많은 분야에 이용되어 왔다. 그러나 분자의 회전 운동상태나 진동 상태 에너지는 이제까지 연구되어온 자기공명 방법의 사용 주파수 영역보다 훨씬 높은 주파수 영역이기 때문에 이들의 상태를 정확히 연구하기 위하여는 레이저 주파수를 이용하고 분자의 자기모멘트와 외부 자기장과의 상호작용을 이용하는 레이저 자기공명(LMR) 분광기의 개발이 필요하다.

표 3에서는 현재까지 연구되어온 자기공명 방법과 LMR 방법의 차이점과 응용분야에 대하여 열거하였다.

표 3. 자기공명 방법과 응용분야

분광기	사용 주파수	분광 대상	연구 응용 분야
핵자기공명 (NMR)	Radio wave (10^8 Hz)	원자핵 스핀 I가 0이 아닌 모든핵	결정구조 연구, charge transfer 연구 등 다양
핵 사중극 공명(NQR)	Radio wave (10^8 Hz)	핵사중극 모멘트를 가진 모든핵	물체의 분극을 측정, 결정 구조 분석 연구등
전자 스핀 공명 (ESR)	Micro wave (10^9 Hz)	스핀 계의 스핀이 0이 아닌 원자	반도체 내의 결함 연구, Color Center연구 등 다양
레이저 자기공명 (LMR)	FIR, IR Laser (10^{10} Hz - 10^{14} Hz)	각 운동량의 항이 0이 아닌 모든 이온, 분자기 (Radical)	이온, 분자기, (Radical) 등의 회전 및 진동 에너지 상태 연구 등 응용범위가 확대됨

LMR 분광기는 기존의 자기공명 분광기와는 달리 그 연구 대상이 분자, 이온, 자유기(free radical), 준안정 상태 등 지금까지 연구하지 못한 분야를 취급할 수 있는 것이 가장 큰 장점이다.

III. 계측용 레이저

정밀계측을 하기 위해서는 레이저 계측에 사용되는 레이저는 주파수나 출력이 안정화된 레이저가 필요하다. 또한 순간적으로 일어나는 현상을 분석하기 위한 레이저로는 극초단 펄스 레이저가 사용된다. 따라서 이 장에서는 이에 관하여 소개하고자 한다.

1. 극초단 펄스레이저

순간적으로 일어나는 초고속 현상의 관찰은 폭이 매우 짧은 극초단 펄스 레이저를 사용해야 가능하다.

이 레이저를 이용한 연구분야는 선진국에서도 1980년대에 들어 활성화된 분야로 제 2세대 컴퓨터 및 통신 장비 개발과 같은 부가가치가 매우 큰 산업적 응용 분야에서부터 반도체와 금속 등 여러가지 소재의 여기 상태나 전도자의 수명 측정, 광화학 반응과 운동이나 여기상태의 이완 현상 연구등의 기초과학 분야에 널리 활용되는 첨단연구 분야이다. 즉, 극초단 펄스 레이저를 이용하여 과거에는 불가능했던 초고속 현상의 연구가 가능해짐에 따라 여러가지 과학 및 기술의 발전이 현재에도 급속히 이들 분야에서 이루어지고 있다.

펄스폭이 10^{-12} - 10^{-16} 초인 레이저를 극초단 펄스 레이저라 분류할 수 있는데 펄스폭의 크기 및 발진 파장에 따라 여러 종류의 펄스 레이저가 개발되어 있다. 현재 가능한 펄스폭은 5 fs가 최고의 수준이며 세계적으로도 몇몇 실험실에서만 발전에 성공하고 있다. 상용화된 레이저로 가능한 펄스폭은 1 ps가 한계이며 이것보다 짧은 펄스레이저는 실험실에서 자체 제작한 것만 가능한 상태이다. (국내에서 개발된 가장 짧은 펄스폭의 레이저는 표준연구소에서 구성한 mode-locked 색소 레이저로 펄스폭이 현재 300 fs에 이르고 있다.)

그림 21은 70 fs의 미국 Bell Telephone Laboratory에서 개발된 펄스 레이저를 보여준다.

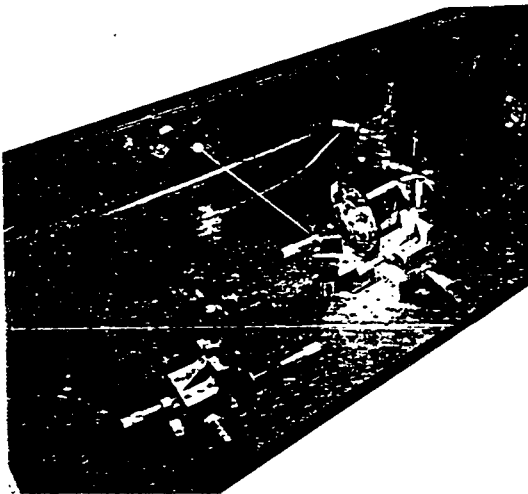


그림 21. Bell Telephone Laboratory에서 개발된 70 fs 펄스레이저

제2세대 컴퓨터 개발 및 초고속 통신장비 개발 등 전자 산업에서도 부가가치가 매우 큰 이 분야의 연구 방향은 보다 빠른 초고속 반도체 소자 및 전자 소자와 광소자 개발에 있다. 이러한 초고속 소자의 개발을 위해 새로운 초고속 전자 천이 현상 측정방법인 electro-optic sampling 기법이 최근 개발되어 시간 분해능이 200 fs에 이르고 있다. 현재 도달한 최고의 시간 분해능은 앞에서 언급한 mode-locked 색소 레이저를 이용한 것으로 초고속 GaAs 반도체 소자의 개발이 이를 통해 이루어지고 있으며 더 많은 발전이 이루어지리라 예상된다.

2. 안정화레이저

레이저를 안정화시킨다는 말에는 두가지의 뜻을 포함하고 있다. 첫째 레이저의 주파수를 안정화시키는 것이고, 둘째는 레이저광의 출력 안정화가 의미한다. 레이저의 안정화 중에서 주파수가 안정화되면 출력도 안정화되는 수가 있으나 출력이 안정화되면 주파수도 안정화되는 경우는 극히 드물다. 그러므로 출력의 안정화 기술보다 주파수의 안정화

기술이 훨씬 고급 기술에 속한다. 주파수 안정화 기술은 초정밀 계측 분야나 기초과학을 위해 급격한 연구성과로 최근 위상 변조 분광학을 이용해서 레이저의 주파수를 10^{-16} 까지 안정화함으로써 현재 시간 표준으로 사용하고 있는 세슘 원자시계의 안정도 10^{-13} 을 훨씬 능가하고 있다. 그러므로 장차의 시간 표준도 레이저 주파수에 기준을 둘 가능성을 배제할 수가 없는 조짐이 나타나고 있다.

레이저 주파수 안정화는 광파장을 기준으로 하여 사용하는 모든 광계측 및 응용에도 필수적인 기술이다. 예를 들면 광속간섭 현상을 이용한 광계측, 홀로그래피 응용계측, 스펙클 간섭계측, 도플러 간섭계측, 광섬유 간섭계측 등 거의 모든 계측분야에 사용되는 광원 레이저는 주파수 안정화가 되어야만 가간섭 길이가 길어져서 측정 영역이 확장되고 또 측정의 정밀정확도는 바로 레이저 광원의 안정화 정도에 따라 직접 제한을 받는다. 보통의 He-Ne Laser의 안정도는 10^{-10} 을 넘지 못하므로 간섭 현상을 이용하여 측정할 수 있는 길이는 수십 cm 밖에 되지 않으며 측정의 정밀도도 10^{-6} 을 초과할 수가 없다. 그러므로 레이저의 주파수를 고정밀 정정확도로 안정화할수록 이것을 사용하는 시스템의 정밀정확도는 높아지게 된다. 레이저의 주파수를 안정화하는 방법에는 표 4 에서 보는 바와 같이 여러가지가 있는데 사용하는 레이저 종류와 필요한 정밀정확도에 따라 선택해서 사용해야 한다. 한 예로 육소의 흡수선에 주파수를 안정화한 육소 안정화 헬륨네온 레이저는 현재 국가 길이의 원기로 사용하고 있다.

최근에 고정밀정확도가 요구되고 차세대의 광통신 방법인 코헤런트 광통신 등의 분야에서는 시급히 안정화한, 반도체 레이저에 관한 연구가 시급히 요구되므로 반도체 레이저의 단일모드 주파수 안정화 연구가 필요하며 초정밀 계측용 레이저 주파수 안정화를 위한 위상 변조 분광학 등에 대한 연구를

표 4. 레이저 주파수 안정화방법

안정화대상 또는 주파수 안정 방법	사용되는 레이저	안정도	사용처	실용레이저
광학공헌의 중심	가스레이저	10^{-11} - 10^{-12}	정밀계측	CO ₂ 레이저
Laser 실험의 중심	가스레이저	10^{-11} - 10^{-12}	정밀계측	Perkin Elmer 5000 Sem. Pur. SP 119 HEC 500 100
모든 예외론 사용 당시	고출력 가스 레이저 색소 레이저 고정밀 레이저 반도체 레이저	10^{-11} - 10^{-12}	정밀계측	대부분의 He 레이저 색소 레이저 기타
방전현상 및 온도 조절 당시	반도체 레이저	10^{-11} - 10^{-12}	정밀계측	단일모드 반도체 레이저
지향 또는 인공 인가 당시	가스레이저	10^{-11} - 10^{-12}	정밀계측, 용액 가측도 측정	SP 5317H (He-Ne) IT 9000 (He-Ne) 21150 (semiconductor laser) HEC-500
2 개 용모드 방진 당시	가스레이저	10^{-11} - 10^{-12}	정밀계측	Treco 200 SP117 (He-Ne)
민감한 광학	색소 레이저 반도체 레이저	10^{-11} - 10^{-12}	고출력 민감 광학	상용 레이저 없음
혼자 및 인공의 흡수선	가스, He, 반도체 레이저	10^{-11} - 10^{-12}	고출력 민감 광학 용액 가측도 측정	상용 레이저 없음
위상 변조 분광학	He 레이저 반도체 레이저 가스 이온 레이저	10^{-11} - 10^{-12}	고출력 민감 광학, 초정밀 계측, 용액 가측도 측정	상용 레이저 없음

특히 필요로 하고 있다.

한편 레이저 출력을 이용하는 모든 계측 분야나 반도체 산업에 근간을 이루는 리소그라피용 레이저 광원, 레이저 가공 산업에서의 고휒력 레이저 광원, 공장 자동화를 위한 광센서 등에 사용하는 반도체 레이저는 출력의 안정화가 필수적으로 뒷받침되어야 하는 기술중의 한가지로 대두되고 있다. 이들 레이저의 출력 안정화 기술은 표 5와 같다. 보통의 He-Ne 레이저는 5% 이하의 출력 요동이 있으나 레이저 튜브의 방전 전류를 제어할 경우 0.1% 이하의 출력 요동으로 줄일 수가 있다.

대부분의 고휒력 레이저에서는 레이저 출력 요동이 사용에 있어서 심각한 문제점으로 나타나고 있으므로 이에 대한 연구도 필요하다고 하겠으나 고전압, 고전류인 이들 레이저에서의 전원부의 제어는 쉽게 해결되고 있는 문제는 아닌 것 같다. 광계측 분야에서 최근 들어서 각광을 받고 있는 반도체 레이저는 단일 모드, 다중 모드와 같은 cw일 경우에는 더욱 출력 요동이 심한데 전류 및 온도를 정밀 제어할 필요가 있으며 단일 모드 발진 반도체 레이저에서는 주파수 안정화를 실현하면 더욱더 높은 정밀도로 레이저 출력을 안정화시킬 수 있으므로 주파수 안정화에 대한 연구가 더욱 기대되고 있다.

표 5. 출력 안정화 방식

안정화 방식	사용되는 레이저	안정도
방전전류 조절 방식	CO ₂ , Nd:YAG, Nd:Glass, Ar ⁺ , He-Ne	0.1 - 1% 이하
방전전류및온도조절	반도체 레이저	1% 이하
외부편광자 도입방식	편광된 모든 레이저	0.1% 이하
브로에탈론도입방식	단일모드 레이저	0.1% 이하

IV. 맺는 말

레이저 계측은 비접촉식, 무유도성, 고속, 고정밀 정확성, 고절연성, 고감도성, 비파괴, 원격 측정의 특성이 있어 정밀계측, 공업계측, 환경계측, 물성계측 등에 유용하게 활용되고 있으며 새로운 측정 기술이 계속적으로 개발되고 있다. 여기에 소개한 것은 극히 그 일부에 불과하며, 다만 독자들이 레이저 계측에 대하여 다소라도 이해하는데 도움이 되었으면 다행으로 생각하고 이만 글을 맺는다.