

광의 산란, 회절 및 간섭을 이용한 계측 기술

Optical Measurement Techniques Based on Scattering, Diffraction and Interference

손 정영

(한국과학기술연구원)

1. 서론

광의 경로중에 있는 물체나 물리량은 반사(reflection), 흡수(absorption), 굴절(refraction), 산란(scattering), 분산(dispersion), 간섭(interference), 그리고 회절(diffraction)과 같은 현상들을 야기시킨다. 이러한 현상들에 의해 주어지는 광의 특성인 진폭(amplitude), 파장(wavelength), 위상(phase) 그리고 편극(polarization)의 어떤 방향에서의 값 또는 공간분포는 물체의 특성과 물리량의 크기나 그 변위에 대한 정보를 제공한다. 광계측(optical measurement)이란 상기와 같은 원리에 입각한 계측기술로서 레이저 개발에 힘입어 우주항공, 기계, 화학, 의학, 대기환경, 물리, 반도체, 전기, 전자 등을 포함한 여러 과학 기술 분야의 핵심 기술로서 쓰이고 있다. 광계측 기술은 상기에서 나열된 것과 같이 물체나 물리량의 광과의 상호작용에서 나타나는 현상들과 광특성들과의 조합에 의해 주어지는 많은 계측 원리에 기초를 두고 있다.

레이저의 단색성, coherent 특성 그리고 방향성 등의 특성은 광의 간섭에 기초를 둔 계측기술, 즉 holography, holographic interferometer, speckle interferometer 등의 새로운 기술들을 가능하게 하여 광계측 응용 영역의 확장 및 정밀도를 크게 향상시켰다. 또한 기존의 기술들(예를 들어 Moire 간섭계)을 자극시켜 이러한 기술들의 새로운 분야에서의 응용을 유도시켰다. 광의 일부 특성들은 매질이나 측정환경에 거의 영향을 받지도 주지도 않고, 또한 sensing zone의 크기를 극소화 시킬 수 있으므로 극소성이나 안정성 등이 뛰어난 고감도의 고정밀 계측 기술로서 응용이 가능하다. 또한 광파이버(optical fiber)나 다른 광학 부품을 사용하면 광의 원거리 송수신이 가능하므로 근접 측정이 불가능한 지역이나 위험지역 등에서도 사용할 수 있고, 광의 분리에 의한 병렬 구성이 가능하므로 다점 측정도 가능하다. 그러나 이러한 광계측의 특성들을 살릴 수 있는 실용화 기술의 미숙으로 많은 광계측 기술들이 실험실적 영역을 아직 벗어나지 못하고 있다. 그러나 최근의 광변조 기술, 광파이버, 반도체 레이저 및 detector 제조기술의 발달은 광계측 기술의 실용화를 촉진시킬 것으로 전망된다.

기본적인 광계측 system은 광원, 감지부(measurement volume or sensing zone)를 형성하기 위한 송광부, 그리고 수광부(detector 포함)로 구성되어 있는데 일부 간섭계에서는 수광부와 송광부의 일부가 같이 사용되어지기도 한다. 광원으로서의 주로 가시영역의 백열등(white light source) 또는 단색광원(레이저, 수은램프) 등이 많이 쓰이나, 때로는 UV나 원적외선 영역의 레이저를 사용하기도 한다. Detector로서는 광배관(photomultiplier tube), 광다이오드, CCD,

광다이오드 array, monolithic photodetector, film(holographic 또는 photographic) 등이 쓰이고 있다.

현재 광계측 기술은 optical metrology에서 취급하는 거리, 각도 및 surface profile 측정외에도 물체와 관련한 크기(size), 형상(shape), 굴절률(refractive index), 밀집도(concentration), 변형(deformation), 진동(vibration) 그리고 매질의 온도, 압력, 속도, species concentration 및 density gradients 측정을 위해 쓰이고 있다. 또한 광학소자의 검사와 측정, 수질이나 대기의 오염도 측정에도 쓰인다. 특수광학소자나 광파이버를 센서로 사용하는 계측에서는 음향압, 전계 및 자계, 전류 및 전압, 회전율(rotation rate), 유체의 량 및 레벨(liquid level) 등도 측정가능하다.

광계측 기술은 detector의 출력형태에 따라 image와 nonimage 형으로 대별할 수가 있고, 광특성의 변화가 물체나 물리량의 직접 접촉에 의해 생기는 것인지 또는 물리량에 의해 주어지는 중간매질의 특성변화에 의해 생기는 것인지에 따라 광계측 기술과 광센서 기술로 나눌 수 있다. 여기서는 광센서의 범주에 속하지 않는 광의 산란, 회절 및 간섭을 이용한 계측기술에 대해 기술하고자 한다.

2. 광의 산란, 회절 및 간섭 특성

광이 매질이 다른 두 물체의 경계면(boundary)을 통과할 때면 항상 광의 반사, 굴절 및 회절이 생긴다. 따라서 어느 물체가 매질속에 있을 때는 반사, 굴절 및 회절이 동시에 일어나는데 이를 통틀어 산란(scattering)이라고 한다. 그림 1에 보이는 것과 같이 물체의 특성에 따라서는 투과광이나 산란광의 파장이 변할 수도 있고, 입사광의 편파면이 달라질 수도 있다. 공간 좌표에서 물체로부터 r 거리 떨어지고 θ (zenith angle)와 ϕ (azimuth angle) 방향에서의 산란광의 공간 에너지 분포는 다음 식으로 표시된다[1].

$$I = I_0 NV \frac{F(\theta, \phi)}{k^2 \gamma^2} \quad (1)$$

여기서 I_0 는 입사광의 강도, k는 파수(wave number), $F(\theta, \phi)$ 는 차원이 없는 물체의 특성과 관련한 θ, ϕ 의 함수이고, NV는 감지부에 있는 물체의 총 수이다. 따라서 θ 나 ϕ 에 따른 $F(\theta, \phi)$ 의 정확한 측정은 물체와 관련한 크기, 형태, 굴절률 그리고 밀도에 관한 정보를 준다. 그림 2에 산란광의 공간 에너지 분포 패턴을 나타내었다.

회절은 입사광 축방향에 나타나는 산란광의 공간에너지 분포를 칭하는 것으로 물체에서의 거리에 따라 Fresnel 회절(근거리)와 Fraunhofer 회절(원거리)로 구분하는데, 광계측에서는 주로 Fraunhofer 회절 현상이 많이 이용되고 있다. Fraunhofer 회절은 수식적으로 물체 형상의 Fourier 변환으로 주어진다[2].

$$G(f_x, f_y) = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} g(x, y) e^{-i(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)} dx dy \quad (2)$$

방정식 (2)에서 $g(x, y)$ 는 광진행 방향에 수직인 물체 단면을 나타내는 2차원 함수이며, f_x 와 f_y 는 각각 x 및 y 방향의 공간 주파수(spatial frequency) 그리고 a 와 b 는 각각 x 와 y 방향으로의 물체의 크기이다. 따라서 $G(f_x, f_y)$ 의 공간에너지 분포나 공간주파수 분포를 측정하면 물체의 형상이나 크기에 대한 정보를 얻을 수 있다. $g(x, y)$ 가 단위 채적내에 있는 물체 단면을 나타내는 함수의 집합을 나타내면, $G(f_x, f_y)$ 는 물체의 밀집도에 대한 정보를 준다. 그림 3에 Fraunhofer 회절의 원리도를 나타내었다.

간섭은 두개 이상의 빔(beam)이 서로 중첩할 때 생기는 광강도(light intensity)의 변화를 일컫는 것으로 두개의 빔이 서로 중첩할 때는 그 간섭 무늬의 강도, I ,는 다음과 같이 표시된다.

$$I = A(x, y) + B(x, y) \cos[(k_1 - k_2) \cdot r - (\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2] \quad (3)$$

여기서 $A(x, y)$ 는 bias 강도, $B(x, y)$ 는 변조파의 강도, k_i, ω_i 및 ϕ_i ($i=1, 2$)는 각각 i 번째 빔의 파수, 각주파수 그리고 초기 위상치를 나타낸다. 여기서 B/A 는 간섭무늬의 명암(contrast)을 나타내며, 간섭무늬의 파장과 이동속도는 각각 $2\pi/|k_1 - k_2|$ 와 $|\omega_1 - \omega_2|/|k_1 - k_2|$ 로 주어진다. 만약에 $\omega_1 - \omega_2 = 0$ 이면 정지된 간섭무늬가 생기며, 아니면 간섭무늬가 $|\omega_1 - \omega_2|/2\pi$ 의 주기로 변동하는데 이것을 광 Heterodyne 또는 Beat 신호라고 한다. 방정식 (3)에서 $\omega_1 = \omega_2, k_2 = -k_1$ 이면 $(k_1 - k_2) \cdot r = \frac{4\pi}{\lambda} r = \frac{2\pi}{\lambda} (2r)$. 여기서 $2r$ 은 빔 1과 빔 2의 경로차(path length difference)를 나타내며, 만약 광의 경로에 따른 굴절율이 거리의 함수이면 광의 경로차는 다음식으로 주어진다.

$$\text{광경로차} = \int_0^L n(x) dx \quad (4)$$

여기서 L 은 x 방향으로의 총 경로차를 나타낸다. 그림 4는 Mach-Zehnder 형 간섭계의 기본구조를 보여준다. 간섭무늬의 특성을 측정함에 의해 알 수 있는 양들은 1) 무늬의 위치: 굴절율, 거리 및 복 굴절율, 2) 무늬의 위치 분포: 표면형상, 굴절율 분포, 렌즈 수차 및 복 굴절율 분포, 3) 무늬의 위치 이동: 변위 및 굴절율 변화, 4) 무늬의 위치 이동 속도: 속도, 그리고 5) 무늬의 명암과 무늬위치의 파장 의존성: spectrum line들의 폭과 미세구조이다[3].

광계측 기술의 또하나 특징은 같은 목적을 위한 서로 다른 여러가지의 계속 원리가 존재한다는 것이다. 가장 대표적인 예로는 단일 입자의 크기를 측정하는 것으로 7가지의 서로 다른 계속 원리가 응용되고있다. 이러한 의미는 입자크기의 측정을 위해 광계측 원리에 근거를 둔 표준기술이 아직까지는 존재하지 않는다는 것을 의미하므로 필요에 부합하는 특정 측정 기술의 선택에 신중을 기해야 한다.

3. 거리, 각도, 두께 및 surface profile 측정 기술

거리, 각도, 두께 및 surface profile의 측정 기술을 나타낸 표 1에서 보는 바와 같이 거리 측정 방법에는 3각 측량법, 시간차법 및 광변조법 등이 있다. 대상 물체에 조사한 광 spot의 영상 위치는 대상 물체의 변위에 따라 변화하게 되므로 검출기에 나타나는 광 spot의 영상 위치를 측정함으로써 대상 물체의 위치를 측정할 수 있으며, 이와 같은 방법을 3각 측정법이라 한다. 이 방법은 수 mm에서 수 m 정도의 거리에 적용 가능하며, 정밀도가 높으면서 간단하고 또한 가격이 저렴한 이점이 있어 산업 분야 전반에서 널리 사용되고 있다[4]. 시간차법은 일반적으로 펄스 레이저를 사용하여 펄스가 송신된 시간과 물체에서 되돌아오는 수신 pulse와의 시간차에 의해 거리를 측정하는 방법이며, 광변조법은 광의 진폭을 일정주파수로 변조시켜 송신하고, 수신파와 송신파의 간섭에 의해 거리를 측정하는 방법으로서, 적용 거리 범위에 따라 변조 주파수를 달리해야 한다.

각도 측정 방법에는 피측정 물체에 반사된 격자 무늬와 장치에 내장된 다른 격자의 무늬를 중첩시켜 얻는 Moire 간섭 무늬를 이용한 Moire 간섭 무늬법, polarizer의 회전 각도에 따른 통과에너지의 증감을 측정함으로써 각도를 측정하는 polarimeter, 그리고 Michelson type의 2 빔 간섭을 이용한 pointing 간섭계가 있다[5]. Pointing 간섭계는 필름의 두께나 굴절율 등을 측정하는데 쓰이기도 한다.

두께 측정 방법에는 편광을 피측정물의 표면에 비스듬히 입사시키면 반사되는 빛의 편광 상태는 피측정물의 박막 두께나 굴절율에 따라 변화하는 것을 이용하는 ellipsometer가 있다. 이것은 주로 실리콘 웨이퍼 상에 성장시킨 산화막층의 두께를 측정하는데 사용되며, ellipsometer는 측정빛의 강도를 가지고 측정하는 측광법, 측정빛의 편광각도를 측정하는 소광법이 있는데 측정 정밀도는 소광법이 좋다[6]. 최근에는 InP/InGaAsP double heterodyne laser의 active층의 두께를 측정하기 위해 InP나 InGaAsP에 photoluminescence를 일으키는 파장의 빛이 상기 레이저의 active 층을 통과할 때 생기는 강도의 감쇄정도를 이용하는 방법도 개발이 되었다[7].

물체표면의 roughness를 측정하는 방법에는 Mirau 간섭계를 이용한 파장 측정 광간섭계와 물체 변형 전후의 speckle 패턴의 간섭을 이용한 speckle 간섭계 그리고 특수한 패턴의 monolithic photodetector를 사용하여 물체표면에서 일어나는 Fourier 변환 패턴을 탐지하는 Wedge ring detector법이 있다. 현재 파장 측정 광 간섭계에 의한 정밀도는 높이 측정에는 1Å , lateral 측정에는 $2\mu\text{m}$ 으로 알려져 있고[8], speckle 간섭계의 응용범위는 $1 - 30\mu\text{m}$ 정도이며, 정밀도는 2×10^{-4} 정도이다[9]. 그리고 Wedge ring detector는 $0.1 - 10\mu\text{m}$ 정도의 roughness를 측정할 수 있다고 하나 그 정밀도는 알려지지 않고 있다[10].

4. 입자 크기 측정 기술

전자부품, 반도체, 식품, 화학, 금속, 철강, 제약, 요업 등 많은 산업 분야에서 사용되는 원료나 중간 및 최종 산출물들은 분말이나 입자의 형태로 되어있는 경우가 많고, 분말이나 입자의 크기는 반응속도, 점착강도, 걸연특성, 유백, 코팅, 맛 등의 제품 특성과 제품의 산출율에 관계하고 있다. 이에 따라 많은 종류의 입자 측정장비가 개발되었다. 입자크기 측정 장비의 부류는 표 2에 주어져 있다. 입자 크기 측정 장비는 단일입자와 복수입자 측정장비로 분류할 수 있으며 단일입자 측정 기술에는 holographic이나 photographic image 외에도 광학계에 의해 확대된 입자상의

크기를 photo diode array로 측정하는 그림자(shadow)법, 입자의 영상면에 특수 code화된 plate를 이용하는 coded plane법, 입자의 공기 역학적인 크기를 측정하는 optical aerodynamic법, 산란광의 공간에너지 분포를 이용하는 multi-angle intensity 측정법, 입자에서 산란된 광의 절대값을 측정하는 scattered intensity법, 산란광의 변조도를 측정하는 visibility법, 그리고 산란광의 강도 변조파의 위상을 측정하는 phase법 등이 있다[11]. 이러한 단일입자 측정 장비로 측정 가능한 입자 크기의 범위는 대략 0.1 μm 에서 1mm 사이이며, 측정방법을 선택할 경우, 입자의 상(고체, 액체), 입자의 채집여부, 입자의 크기 범위, 그리고 요구되는 정밀도 등을 고려하여야 한다. 복수입자 측정기술에도 여러가지 방법이 있지만 실용화되어 있는 기술은 diffraction pattern analyzer 뿐이다. 이 방법은 복수입자에 의해 생긴 회절무늬의 공간분포를 측정하는 방식(Melvern type)과 회절무늬를 code화시켜 측정하는 방식(Leed-Northrop type)이 있다. 두 방법 모두 입자 측정 범위는 1 μm 에서 수 mm 정도이다. 입자 측정 기술의 최근 동향은 1 μm 이하의 크기를 가진 입자를 측정하는 기술 개발에 중점을 두고 있으며 또한 측정 정밀도를 높이는 데 주력하고 있다.

5. 속도 측정 기술

현재 가장 많이 사용되고 있는 속도 측정 기술은 두개의 coherent beam이 만나는 지역에 생기는 격자형 광무늬의 입자 속도에 따른 이동시간을 측정함으로써 입자의 속도를 측정하는 laser doppler velocimeter(LDV)로 속도 측정과 동시에 그 속도를 주는 입자의 크기도 측정 가능하다[12]. 현재 LDV는 분극이나 색깔이 다른 두쌍의 빔을 이용하여 sensing zone의 간섭무늬 패턴을 그물형으로 하여 매질의 2차원 속도를 동시에 측정하기도 하며, 또한 유체의 3차원적 분포도 측정하고 있다. Bragg cell 이나 음향 광학 기기에 의해 두 빔을 변조시키면 sensing zone에서는 간섭무늬의 이동효과를 얻어 속도방향까지 측정할 수 있다. 그림 5는 LDV의 기본적인 구성도이며 sensing zone의 광간섭 패턴과 강도분포를 보여주고 있다. 그림 6은 LDV를 가지고 측정한 Annular jet combustor flow의 속도분포를 보여주고 있다. 다른 속도 측정 장비는 sensing zone이 두개의 서로 다른 분극을 가진 가는 선으로 구성된 time of flight velocimeter, sensing zone이 집속된 단일 빔으로 구성된 single beam transit time velocimeter, 2중 촬영된 입자의 상대적인 어긋남을 측정함으로써 입자의 속도를 측정하는 holographic method 등이 있다. 레이저 에너지의 집속에 의한 충격파를 유체중에 발생시키고 이 충격파의 속도를 측정함으로써 유체의 속도를 계산한다. 이 방법은 seed 입자를 필요로 하지 않으며 또한 유체의 온도도 측정할 수 있다[13]. 그 외에도 speckle velocimeter, supersonic 이상의 유체 속도 측정에 이용하는 laser induced fluorescence 등이 있으며, 표 3에 속도 측정 기술들이 요약되어 있다. 레이저를 이용한 속도 측정에서 가장 문제가 되는 것은 유체의 속도가 빠를수록 유체내에서 일어나는 turbulence의 크기가 sensing zone의 크기보다 작으므로 속도 측정의 정확도가 떨어지며, 또한 입자의 sensing zone을 통과하는데 걸리는 시간이 아주 적어 탐지할 만한 신호를 얻지 못 한다. 현재 Fourier 변환 signal processor를 가진 LDV system에서는 최소한 3개 이상의 간섭 무늬를 필요로 하므로, 그 속도 측정 상한은 Mach No.2 정도이다.

6. 변형(deformation), 진동(vibration) 및 물체의 형상 측정

진동 측정은 변형 측정에 사용되는 대다수의 방법을 사용할 수 있다. 진동 측정에 주로 사용되는 방법으로는 간섭계형으로써 holographic 및 speckle 간섭계가 있다. Holographic 간섭계의 특징은 광의 파면을 수시로 재생하는 것이 가능하므로 고정적인 간섭계로서는 측정이 불가능한 diffusive object(random 방향으로 빛을 산란시키는 물체)의 간섭무늬를 만들 수 있지만, 변형이나 진동 등의 측정을 위해서는 높은 공간 주파수 특성을 가진 light receptor, 즉 photographic film이나 판(plate)이 요구되므로 TV 카메라와 같이 제한된 resolution을 가진 장치를 사용할 수 없어 산업검사(industrial inspection)를 위해 사용하기에는 부족하다[9]. 그러나 speckle 간섭계의 경우는 정보가 speckle pattern속에 있지 높은 주파수 부분에는 포함되어 있지 않으므로 TV 카메라를 사용할 수 있는 장점이 있으나 물체에 높은 강도의 레이저 빔을 조사해야 한다는 문제가 있다. 변형 측정을 위해 가장 많이 사용되는 간섭계로는 Twyman-Green 간섭계가 있는데, 기준파의 변조나 위상천이에 의해서 측정 정밀도를 $\lambda/100$ 까지 올릴 수 있다. speckle 간섭계는 물체에서 반사된 speckle pattern을 소구경(높은 f#) lens를 통해 기준파와 간섭을 시키는 것으로 그 측정 resolution은 holographic 간섭계와 비슷하다. speckle 사진기술(photography)은 2중 촬영 hologram과 비슷하나, 물체의 변위를 측정하기 위해서는 speckle-gram을 Fourier 변환시켜야 한다. speckle 사진 기술에 의한 resolution은 간섭계에 비해 한 order 떨어진다. Moire 간섭계로도 진동 측정이 가능하며, 이것은 회절 격자의 무늬를 2중 촬영하는 것인데 회절격자가 피측정 물체와 가까이 있을 때는 shadow Moire법이라 한다. 이것의 측정 resolution은 10^{-4} order이다. Doppler 진동계는 산란광의 doppler 천이 주파수를 측정함에 의해 진동을 측정하는 것으로 참조형과 차동형이 있는데 응용 속도 범위는 0.01 - 1m/sec이며 측정 resolution은 0.4 μm 정도이다[14].

물체 표면에서 생기는 초음파의 관측은 물체의 nondestructive testing을 위한 주 기술이다. 물체 표면에서 생기는 초음파의 관측에는 간섭계형과 비간섭계형이 있다. 비간섭계형으로 가장 알려진 기술은 knife-edge를 사용하여 초음파에 의해 변형된 물체 표면에서 반사되는 빛의 휘어짐 정도를 측정하는 것으로 간단하면서도 정밀도가 높은 측정방법이나 물체의 표면처리가 아주 좋아야 한다는 단점이 있다. 간섭계형 기술로는 Bragg-cell에 의한 주파수 천이를 사용하는 heterodyne 간섭계와 물체 표면의 두 점에서 반사되는 빛의 간섭이나 또는 한점으로 부터 반사되는 주파수가 상이한 빛의 간섭을 이용하는 미분형 간섭계. 그리고 산란으로 시간 지연된 자신의 빛과의 간섭을 이용하는 시간지연 간섭계가 있는데 그 측정 resolution은 $10^{-6} \text{A}^\circ(\text{W/Hz})^{1/2}$ 정도로 모두 비슷하다[15]. 물체의 형상 측정 기술에는 Moire topology, spot 광주사식, slit 광 주사식, 공간 code화[16] 그리고 2쌍의 주파수가 다른 빛을 사용하는 speckle 간섭계 등이 있다. 표 4에 이 기술들의 특징이 기술되어 있다.

7. 기타 측정 기술

유체의 굴절율이나 밀도 경도 측정에는 간섭계, 홀로그래픽 간섭계, Schlieren과 shadowgraph 등이 있다[17]. 간섭계형은 물체내에서의 빛의 속도가 그 물질의 굴절율에 반비례한다는 그 원리를 두고 있으며, holographic 간섭계, Schlieren 그리고 shadow-graph는 빛의 진행 방향과 수직으로 존재하는 굴절율 경도에 의해 생기는 빛살의 부분적인 집속 및 분산에

그 기초를 두고 있다. 이 부분적인 빛의 집속과 분산에 따라 직접 유체를 통과한 빔 단면에 생기는 명암을 이용하여 밀도 경도를 측정하는 것이 shadow-graph이며, 유체를 통과한 빛을 집속하여 knife edge에 의하여 굴절을 경도에 영향을 받지않은 빔을 제거하고 오로지 휘어짐이 생긴 빔만을 이용하여 밀도 경도를 측정하는 것이 Schlieren이다. holographic 간섭계는 background에 대한 유체의 밀도 변화를 나타낸다. 간섭계는 정량적인 밀도 정보를 주지만 그의 방법은 밀도 변화 지역의 형태에 대한 정보를 준다. 그림 7은 유체가시화를 홀로그래픽 system이다. 온도 측정 기술에는 pyrometry, line reversal, Rayleigh scattering, Raman scattering, laser induced fluorescence 등이 있다. 그 외에도 레이저 빔의 profile을 측정하기 위한 beam profile meter, 필립의 grain을 측정하는 micro-densitometer, 물체의 형태 식별 및 인식을 위한 회절 무늬 해석기 및 정합 필터(matched filter) method 등이 있다. 그림 8은 정합 필터를 사용한 물체 식별 장치이다.

8. 최근의 기술 동향

최근에 가장 주목할만한 기술 중에 하나는 위상천이 간섭계(phase shift interferometer)로 알려진 위상천이를 이용한 간섭계의 구성이다[18]. 위상천이 간섭계는 기준파의 경로 길이를 주기적으로 변화시켜, 간섭무늬의 한 특정점에서 강도를 주기적으로 측정하여 측정점에서의 기준파와 피측정의 광경로차에 의해 생긴 위상을 구하는 것이다. 이 위상천이 간섭계에 의해, 지금까지의 간섭무늬의 디지털화에 의해 얻을 수 있던 측정 정밀도($\lambda/10$)보다 한 order 이상이 높은 정밀도의 측정이 가능케하여 optical quality surface의 미세구조와 optical surface figure를 측정하는데 쓰이고 있다. 위상천이 간섭계를 이용한 surface profile은 depth of focus가 제한되어 있어 step height가 높은 물체에서는 응용이 곤란하나 파장이 다른 두개의 가시 레이저 광을 사용해 이문제를 해결하고 있다. 이것은 두개의 짧은 파장광을 간섭계에 동시에 사용하면 한개의 장파장 $\{\lambda_{eq} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|\}$ 레이저를 사용할 때 얻을 수 있는 간섭계의 감도를 얻을 수 있다는데 기초를 두고 있다. 이 다중 파장 간섭계는 step height가 20 μ m 정도까지 되는 물체의 surface profile을 측정할 수 있어 실리콘 상의 resist profile, 집적회로 제조에 있어 line width 특징, 필름 두께 그리고 압력센서 제조를 위한 실리콘 박막의 두께를 재는데 응용되고 있다. 위상천이를 이용한 holographic 간섭계는 thermal stress나 housing에 물체를 장착함에 의해 생기는 stress를 측정하는데 쓰인다.

최근에 또하나 주목할 것은 optical phase conjugation(OPC)의 광계측 기술에의 응용이다[19]. OPC는 고강도 빛에 의한 물질의 비선형 특성 변화에 의해 일어나는 현상으로 아직 초기 개발단계에 있으므로 실용화 기술이 별로 알려지고 있지 않으나 앞으로의 광계측에 있어 응용 가능성도 아주 많은 것으로 예상된다. 그외에 laser induced fluorescence를 이용한 PCB 기관 측정 및 hypersonic 영역의 속도 측정, computer generated hologram을 이용한 aspheric lens 측정 등이 있다.

참고 문헌

1. H. C. van de Hulst, Light Scattering by Small Particles, Dover Publication, Inc, New York, 1981.
2. J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill, New York, 1968.
3. 光工業計測研究専門委員会, 光応用計測の基礎計測自動制御学会, 1984.
4. 高嶋和夫, et.al., "レーザ応用測距装置," 三菱電機技報, V63, p291, 1989.
5. W. G. Driscoll, and W. Vaughan, Handbook of Optics, McGraw-Hill, New York, 1978.
6. オプトロニクス社 編集部, 光技術の半導体製造への応用, 1985.
7. Y. Nakano, and N. Tsujuki, "Active Layer Thickness Measurement System for Double Heterostructure Laser Wafers.", Optical Eng., V28, p42, 1989
8. J. C. Wyant, "Optical Testing and Testing Instruments." Short Course Note, (Contemporary Optics), Uni. of Rochester, 1986.
9. A. E. Ennos, "Speckle Interferometry." E. Wolf, Ed., Progress in Optics, North-Holland, p233, 1978.
10. C. Gorecki, "Classification of Rough Surface : Comparison Between Two Hybrid Optical Coherent Processors.", Optics & Laser Tech., V21, p117, 1989.
11. A. K. Ghosh, J. Y. Son, "Development of An In-Situ Particle Sizing System." SRS/STD-TR87-09, 1986.
12. W. M. Farmer. "Measurement of Particle Size, Number Density and Velocity Using a Laser Interferometer." Applied Optics, V11, p2603, 1972.
13. W. Zapka and A. C. Tam, "Noncontact Optoacoustic Determination of Gas Flow Velocity and Temperature Simultaneously." Appl. Phys. Lett., V40, p1015, 1982.
14. 田代秀夫, et.al., "レーザドップラ振動計," 三菱電機技報, V63, p295, 1989.
15. J. P. Monchalin, "Optical Detection of Ultrasound." IEEE, Trans., Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, V UFFC-83, p485, 1986.
16. 山下安彦, "立体形状の自動計測," エレトロニクス, Jan. 1989.
17. D. W. Holder and R. J. North, "Schlieren Methods." Notes on Applied Science, National Physical Lab. London, 1964.
18. M. Mittelstaedt, "Technology Trends, Non-Destructive Testing." Photonics Spectra, p121, Oct. 1987.
19. M. Paul, R. Betz and W. Aronold, "Interferometric Detection of Ultrasound of Rough Surfaces Using Optical Phase Conjugation." Appl. Phys. Lett., V50, p1569, 1987.

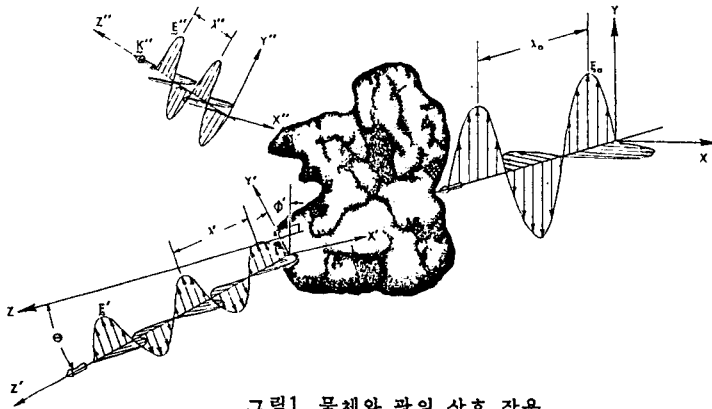


그림1. 물체와 광의 상호 작용

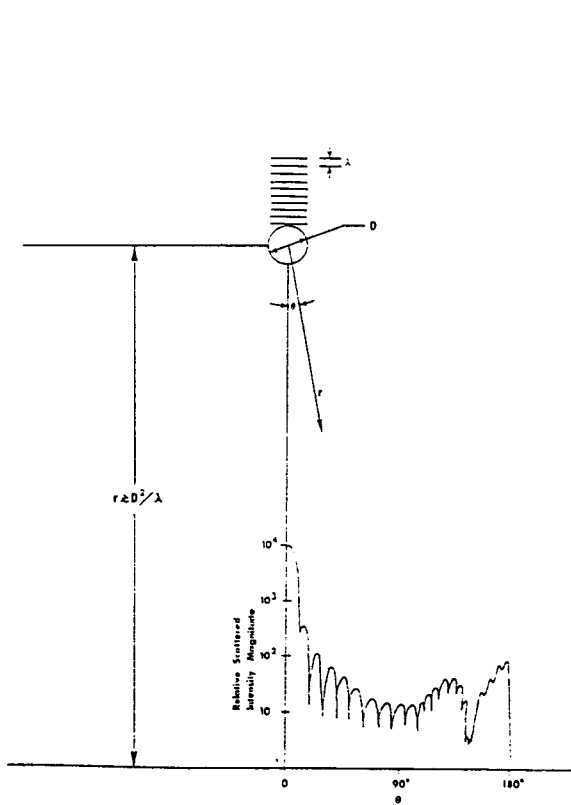


그림2. 산란광의 공간 분포

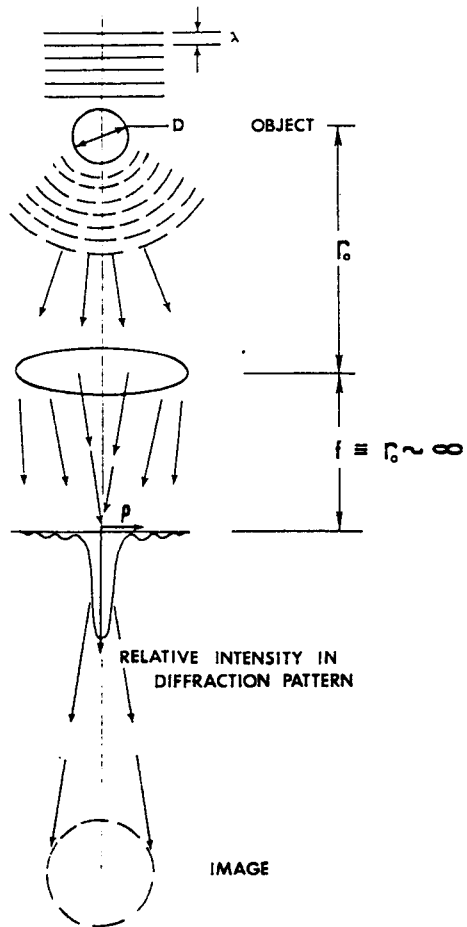


그림3. Fraunhofer 회절

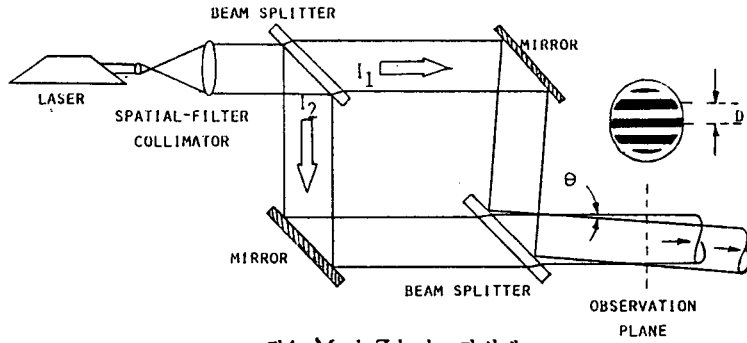


그림4. Mach-Zehnder 간섭계

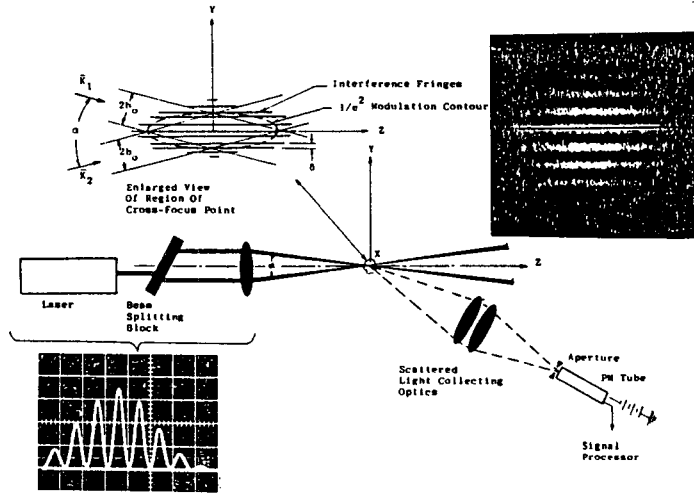


그림5. LDV의 기본 구조 및 sensing zone의 패턴과 강도 분포

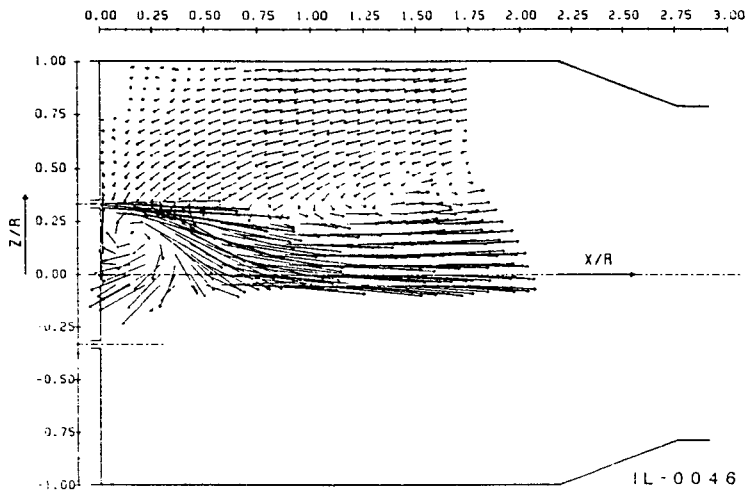
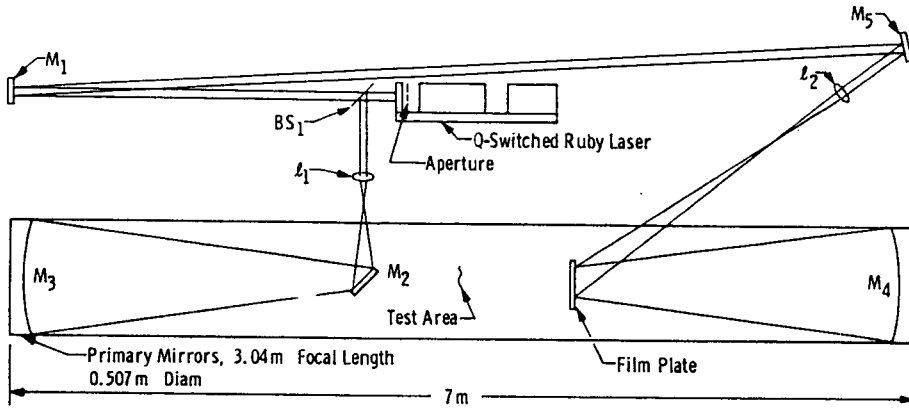
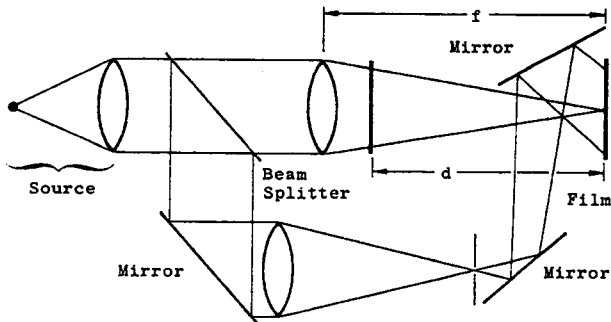


그림6. Annular Jet Combustor에 있어 유체 속도 패턴



Note: Mirror, M_2 , and the film plate are on diagonally opposite sides of the axis of M_3 and M_4 .

그림7. 홀로그래픽 유체 가시 시스템



Arrangement for Generating Matched Filters with a Scale-Searching Capability



Object



Filter for b



Output from Filter

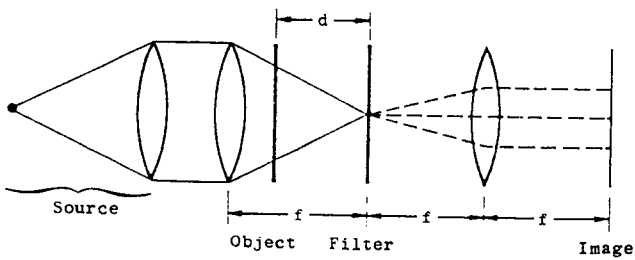


그림8. 정합 필터에 의한 물체 식별 장치

<표 1> 거리, 각도, 두께 및 surface profile 측정 기술

측정 내용	technique	측정 order	비 고
거리 측정	3각 측량법 (triangulization)	수 mm - 수 m	확도 : 측정거리의 0.1%
	시간차법	100m - 10km	light pulse 이용 $\pm 5m$
	광변조법	수 mm - 10km	정확도 10^{-4} order
각도 측정	Moire Fringe 법	25sec	white light 사용, 0.001초의 정밀도
	Polarimeter	180°	정밀도 ± 1 mradian, polarizer 사용
	Pointing interferometer	2000 sec	0.02 sec/arc의 정밀도, refractive index 측정 가능 Michelson type two beam interferometer
두께	Ellipsometer	수 A° - 수 μm	소광형: $\pm 0.5A^\circ$ single layer 측광형: $\pm 3A^\circ$ sample
surface profile	Phase measurement optical profiler	$20\mu m$ 이하	resolution $1A^\circ$ for height, $2\mu m$ for lateral
	Speckle interferometer	1 - $30\mu m$	
	Wedge ring detector	0.1 - $10\mu m$	Fourier pattern analyzer

<표 2> 입자 크기 측정 기술

측정 내용	Technique	크기 범위	비 고
단일 입자	Imaging	$3\mu m - 1mm$	In-situ or sampling
	Coded plate	$>10\mu m$	in-situ
	Optical aerodynamic	0.2 - $15\mu m$	sampling, 공기 역학적인 크기
	Multi-angle intensity	0.1 - $10\mu m$	sampling
	Scattered intensity	0.1 - $120\mu m$	in-situ or sampling
	Visibility	0.3 - $1\mu m$	in-situ
	Phase	0.3 - $1mm$	in-situ
복수 입자	Diffusion broadening spectroscopy	$23nm < PD < 0.5\mu m$	Brownian motion in flames
	Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy	nanometer range	CARS intensity of C_2 : soot 입자
	Diffraction pattern analyzer	$1\mu m$ to few mm	in-situ
	Spectral transparency method	0.1 - $4\mu m$	$n < 1.5$, sampling
	electro-optical method	$<1\mu m$	sampling, optical birefringent material

<표 3> 속도 측정 기술

Technique	응용기술	속도 범위	비고
Laser doppler velocimeter	Two colour, two polarization three colour, two different modulation frequency	수 mm/sec - 700m/sec	방향 정보물 중 laminar and turbalance flow, 입자 필요
Laser transit time velocimeter	Time of flight	수 cm/sec - 300m/sec	laminar flow, slow data rate, 입자 필요
Laser single beam transit time velocimeter		수 m - 100m/sec	high uncertainty, 입자 필요
Holography	Double exposed hologram	노출시간 간격과 입자크기에 의존 < 수 m	속도 및 방향 입자 필요
Optoacoustic method		< 1km	pure gas
ETC	Speckle velocimeter		low velocity
	Laser induced fluorescence, doppler-shifted raman spectroscopy	high speed	

<표 4> 변형(deformation), 진동(vibration), 표면 초음파 및 물체 형상 측정 기술

측정 내용	technique	측정 정밀도	비고
변형 및 진동	Twyman-Green 간섭계	$\lambda/100$	광변조 또는 기준파의 phase shift
	holographic interferometer	Max. 10^{-6}	변형이 시간의 함수, thermoplastic film를 사용
	speckle interferometer	Max. 10^{-6}	평 변형이 비교적 용이하게 측정됨
	speckle photography	1×10^{-4} to 2×10^{-5}	double expose hologram과 유사, specklegram의 Fourier 변환.
	격자 투사법(Moire)	10^{-4}	격자의 회절 무늬의 2중 촬영
	doppler 진동계	참조형: $0.4\mu\text{m}$ 차동형: $>0.4\mu\text{m}$	속도범위: 0.01에서 1m/sec
표면 초음파	stero 법		두대의 카메라 필요, 상의 복원을 위해 긴시간 필요
	knife edge		knife edge에 의한 표면파 가시화, smooth surface
	optical heterodyne	$10^{-6} \text{A}^0(\text{W}/\text{Hz})^{1/2}$	기준파를 Bragg cell에 의해 주파수 천이시킴
	미분형 간섭계		두개의 다른점 빔의 간섭 또는 한개의 점으로부터 나온 두빔의 간섭
	시간 지연 간섭계		산란된 빔이 자신의 시간 지연된 빔과의 간섭
Moire Topography	등고선을 적시 가능, 상대 요철 정보를 얻기 쉽다. 3차원 의 복원을 위해 긴시간이 요구됨.		
형상	spot 광 주사방식		삼각 측량법에 기초, 정지물체에 적용
	slit 광 주사방식		sheet beam 주사, 주사시간과 상의 복원시간이 짧다.
	공간 code화		대상물 표면에 패턴을 주사하여 scenc에 특정점을 중, 상 복원 시간이 짧다.