

레이저 간섭계를 응용한 비접촉 진단기법

김 수 길<호서대학교 전기정보통신공학부 정보제어전공 조교수>

1 서 론

다양한 산업분야에서 제품의 개발속도를 높이고, 생산된 제품의 품질확인 및 개선을 위해서 접촉식 탐촉자를 이용한 기계적, 전기적인 결함검출 방법이 주로 사용되어왔다. 그러나, 이 방법은 정확도가 뛰어나지만 측정시간이 길고 물체에 손상을 줄 수 있다는 단점을 가지고 있다.

근래에는 측정 대상물체에 대하여 비접촉 광학식 진단기법이 산업분야에 폭넓게 적용이 이루어지고 있다. 그 이유는 기계식이나 전기식에 비해 측정시간이 짧을 뿐만 아니라 비접촉식이기 때문에 물체의 손상이 없다는 장점을 가지고 있기 때문이다.

이러한 광학기술을 이용한 계측방식은 지난 100여 년간 꾸준히 개발되어 왔으며 매우 큰 실용가능성에 비해 제반기술의 미비로 실제 적용은 활발히 이루어지지 못했다. 그러나 최근 광통신 산업과 기술의 발달로 인하여 광기술, 광부품 및 소자의 가격과 품질이 높은 경쟁력을 확보하게 되어 고정밀도와 비접촉, 비파괴 특성을 요구하는 계측분야에 빠르게 적용되고 있으며 특히 전자기와 간섭에 영향받지 않는다는 특성에 의해 고전압, 전력계통 분야에의 적용이 다양한 각도로 모색되고 있는 계측기술이다.

비접촉 광학식 진단기법에 요구되는 기능 및 성능 등은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 비접촉식 계측방식
- 주사(scanning) 방식이 아닌 full-field 계측 방식
- μm 대역의 고해상도
- 응력, 스트레스, 온도 등에 의한 변형 검출이 가능
- 구조와 조작성의 편이성

광을 이용하는 실용화된 계측방식 중 위 조건에 근접하는 기술로는 기계적인 복합구조물의 진동이나 변형, 또는 3차원 형상을 측정하는 방법으로 적용되어 온 Moire Topography(1) (Shadow or Projection), Confocal Microscopoe(2), 홀로그래피(Holography)(3), ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)(4), Shearography(5, 6) 등이 있다. 그러나, Moire와 Confocal 기술은 진단대상의 표면정보를 격자무늬의 위상이나 반사광의 세기로부터 검출해내는 방식으로 표 1에서 정리한 바와 같이 제한된 해상도와 긴 주사과정에 의한 느린 속도 등의 단점이 있다.

표 1. 간섭계 진단기술의 특징 및 비교

구 분	비접촉식	Full-Field 계측방식	해상도	구조·조작 편이성
Triangular Interferometry	○	○	High	Good
Holography	○	○	Medium	Poor
Shearography	○	○	M-high	Good
Moire Topography	○	○	Low	Good
Confocal Microscope	○	×	High	Poor
ESPI	○	○	High	P-medium

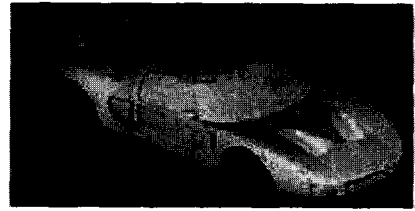


그림 1. 3차원 스캐너를 이용한 위상추출예

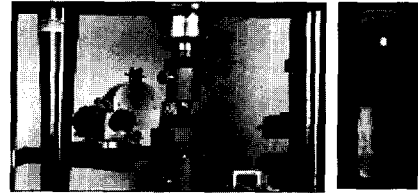


그림 2. 스펙클 패턴 분석을 통한 비파괴검사

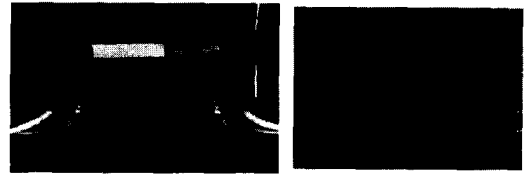
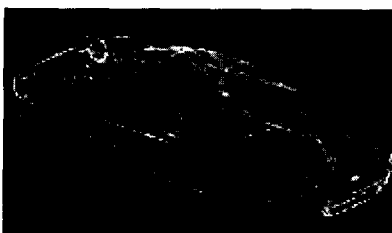


그림 3. Photogrammetry를 이용한 변형도 및 진동 측정

홀로그래피(Holography)나 ESPI, Shearography 등은 계측대상의 표면정보를 광학적 간섭계를 이용하여 상관간섭무늬(correlation fringes)로 변환하고 이를 CCD 등의 영상수집장치와 위상추출 알고리즘을 이용하여 복원함으로써 변형이나 구조적 결함, 열화패턴 등을 분석하는 원리를 가지는데 빛의 간섭현상을 이용하므로 사용하는 광원파장과 비슷한 수 [μm] 또는 1 [μm] 보다 작은 측정해상도를 쉽게 달성할 수 있다. 또한 적용되는 응용범위에 따라 구조가 약간씩 변형되었을 뿐 기본적으로 빛의 간섭현상을 이용하는 원리와 구조는 동일하다. 그림 1은 광학적 기술을 이용하여 개발기간을 획기적으로 단축시킨 자동차의 클레이 모델을 3차원 스캔한 예이다. 그림 2는 간섭계를 이용한 시편의 비파괴검사를 하는 모습과 그 결과이며 그림 3은 시편에 가해진 기계적 변형도 및 진동을 측정하는 예를 보이고 있다.



위 예들은 독일과 미국 등의 일부 기업에서 발췌한 자료로서 광 간섭계 기술이 다양한 복합구조물의 표면과 비파괴적인 내부 진단 기술에 적용되고 있고 그 정밀도가 매우 높다는 것을 알 수 있게 하는 사례이다. 이와 같이 최근 광기술의 기술적, 가격적 경쟁력의 향상에 따라 이전의 기계적, 전기적인 계측방식의 기술적 한계를 극복하는 방식으로서 광계측 기술이 빠르게 확산적용되고 있다.

2. 비접촉 광학식 진단기법의 종류와 원리

비접촉 광학식 진단기법의 기본적인 원리는 크게 interferometry와 holographic interferometry로 분류할 수 있다. 두 기술은 동일광원에서 나온 빛을

중첩시켜 간섭패턴을 얻고 이를 해석함으로써 다양한 물리량을 계측할 수 있다는 점은 같지만, interferometry는 표면의 굴곡과 광학적 물리량을 해석하는데 적합한 기술이며, holographic interferometry는 표면의 굴곡에는 반응하지 않고 변형 또는 변화에 대해서만 반응하므로 변형량을 계측하고자 할 때 적합한 기술이다. Interferometry는 크게 마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer), 마하젠드 간섭계(Mach-Zehnder), 그리고 산약간섭계(Sagnac interferometer)로 구분할 수 있는데, 이러한 기술은 산업현장보다는 실험실이나 연구소에서 실험목적에 사용되고 있는 반면에, 홀로그래픽 간섭계 기술은 산업현장에 직접 적용하기가 용이한 기술이라 할 수 있으며, 이는 크게 아날로그 방식과 디지털 방식의 두 가지로 구분할 수 있다.

2.1 아날로그 방식

홀로그래픽 간섭계는 1948년 게이버가 처음 발표한 홀로그래피기술을 이용하여 여러 가지 물리량을 계측할 수 있는 기술이다. 홀로그래피는 홀로(holo)와 포토그래피(photography)의 합성어로서 3차원 영상을 기록할 수 있다는 의미로 사용되고 있다. 홀로그래피의 원리를 간단하게 그림으로 나타내면 그림 4와 같다. 레이저에서 나온 빛을 분리하여 하나는 참조광으로 하고, 다른 하나는 물체로 보내 물체에서 반사되는 물체광을 생성하여 참조광과 물체광이 사진건판에서 중첩되어 간섭패턴이 생기게 되는 데, 이를 사진건판에 기록한다. 기록된 간섭패턴을 홀로그램(hologram)이라 하며, 홀로그램이 기록된 사진건판을 참조광으로 다시 조명하면 기록된 물체가 재생이 되어 사람눈으로 관측할 수 있으며, 3차원적으로 물체를 감상할 수 있는 것이 바로 홀로그래피이다.

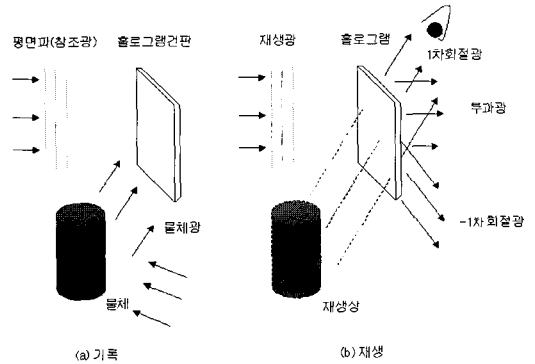


그림 4. 홀로그래피의 원리

이러한 홀로그래피의 원리를 이용한 홀로그래픽 간섭계는 실시간 홀로그래픽 간섭계, 이중노출 간섭계, 시간평균 간섭계 등으로 구분할 수 있다.

2.1.1 실시간 홀로그래픽 간섭계

이 기술은 변형전 상태의 물체를 기록하여 홀로그램을 만들며, 이를 측정대상물체와 중첩되게 정확히 원래의 위치에 놓이게 한다. 그런 다음에 물체에 변형을 가해주면서 홀로그램을 통해 관찰하면 원영상의 빛과 변형된 후의 물체에서 나오는 빛이 간섭을 일으켜 변형정도에 따른 간섭무늬를 눈으로 실시간으로 볼 수 있게 해 주는 기술이며, 그림 5는 실시간 홀로그래픽 기술을 이용하여 기록한 물체의 실시간 간섭패턴이다.



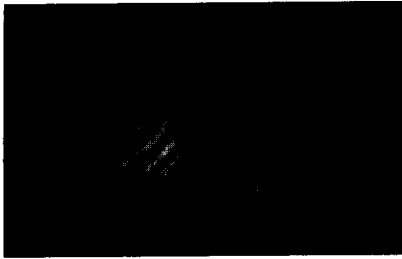


그림 5. 실시간 홀로그래픽 간섭계로 찍은 물체의 간섭패턴

2.1.2 이중노광 홀로그래픽 간섭계

원리는 변형전과 후의 물체를 기록매질에 따로 저장한 다음에 레이저를 이용하여 동시에 복원하게 되면 두 물체에서 나오는 빛이 중첩이 되므로 변형량에 대한 간섭패턴이 얻어지게 된다. 변형이 큰 부분에서는 간섭무늬의 밀도가 높게 나타난다. 이에 대한 간략한 구조는 그림 6과 같으며, 그림 7은 총알이 지나가는 모습과 타이어의 변형상태, 그리고 촛불주위의 온도변화를 찍은 간섭패턴이다.

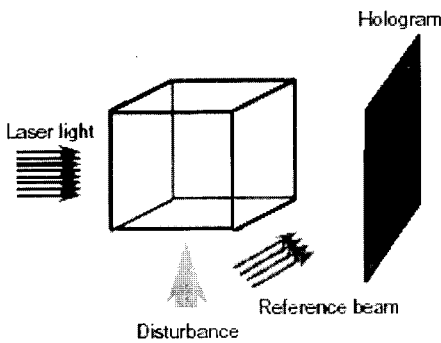


그림 6. 이중노출 홀로그래픽 간섭계

그림 7에서 총알주위의 공기의 흐름과 화살표로 표시된 것과 같이 타이어에 있어서 변형이 크게 일어난 부분에서는 간섭패턴이 밀집되어 나타나 타이어의 제조과정에 있어서의 결함을 찾아내는 데 중요하게 사용되고 있다. 그리고 물체나 물체주변의 온도분포도 이중노광법을 사용하면 쉽게 구할 수 있다.

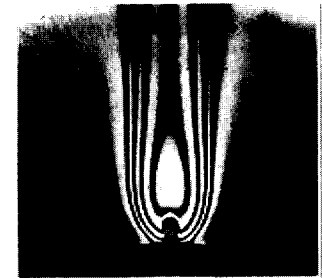
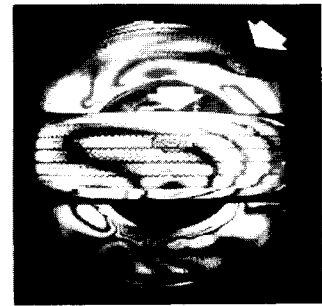
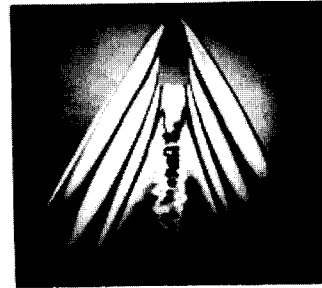


그림 7. 이중노광 홀로그래픽 간섭계로 찍은 간섭패턴

2.1.3 시간평균 홀로그래픽 간섭계

원리는 정현파와 진동하는 물체로부터의 위상변화를 진동주기보다 충분히 긴 노광시간에 걸쳐 홀로그램에 기록하면 진동, 진폭분포를 간섭무늬로 측정할 수 있으며 진동이 많이 일어나는 부분은 나이트형태의 간섭무늬가 나타나게 된다. 그림 8은 시간평균법으로 기록한 간섭패턴을 보여준다. 그림에서 나이트가 있는 부분은 진동이 많이 일어나는 부분이고 그렇지 않은 부분은 진동이 일어나지 않는 부분을 나타낸다. 이를 이용하면 스피커나 기타에 있어서의 진동을 해석하는데 유용하게 사용될 수 있는 기술이다.

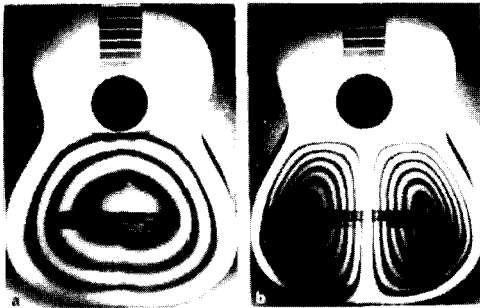


그림 8. 시간 평균 홀로그래픽 간섭패턴

앞에서 언급한 홀로그래픽 간섭계에서 실시간법과 이중노광법은 움직임(응력이나 변형)을 광원의 파장에 해당하는 정밀도로 계측할 수 있으며, 시간평균법은 진동의 진폭을 측정하는 데 적합한 기술이다.

2.2 디지털 방식

2.2.1 위상이동법을 이용한 디지털 홀로그래피

그림 9는 위상이동법을 이용한 디지털 홀로그래피 [7]를 기반으로 하는 간섭계이다. 측정대상(전력용 애자)에서 반사되는 광신호와 기준 광신호가 CCD 카메라에서 중첩이 되어 간섭패턴이 형성된다. 측정체의 표면정보를 얻어내기 위해서는 PZT (piezo-electric transducer, 압전소자)를 이용한 위상변조 기술을 사용하며 서로 $\pi/2$ 만큼의 위상차를 갖는 3개 내지 4개의 서로 다른 간섭패턴을 만들고 이를 연산하여 위상정보를 추출하는 원리를 갖고 있다.

$$I_1 = I_0[1 + V\cos(\phi(x, y))],$$

$$I_2 = I_0[1 - V\sin(\phi(x, y))],$$

$$I_3 = I_0[1 - V\cos(\phi(x, y))],$$

$$I_4 = I_0[1 + V\sin(\phi(x, y))]$$

$$\Rightarrow \phi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right)$$

위상 추출방법은 다양한 연구결과들이 이루어져 3개, 4개, 5개의 간섭패턴을 구성하여 위상지도를 얻는 방법들이 개발되었다. 위상지도를 구한 이후에 적절한 필터링과 잡음제거기법을 적용하여 보다 정확한 위상지도를 얻고, 이를 이용하여 측정대상물체 표면의 변형도를 얻을 수 있게 된다.

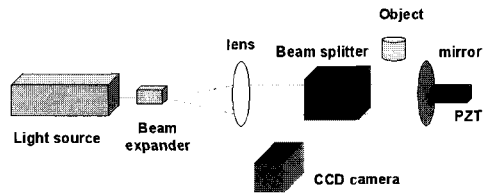


그림 9. 위상이동법 디지털 홀로그래피

위상추출방법의 특징은 다음과 같다.

- TPMS(Temporal phase shift method) 기법적용.
- 정밀한 PZT를 이용해 위상을 변화시킴.
- 순차적으로 3개내지 4개의 간섭패턴을 생성함.

그림 10은 위상이동법 디지털 홀로그래피의 구현 과정을 흐름도로 표현한 것이다.

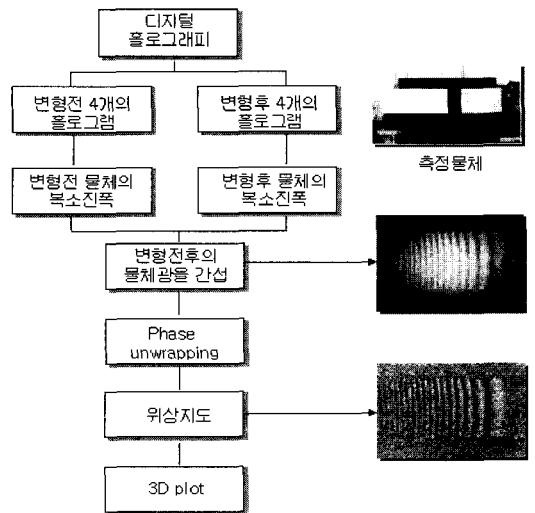


그림 10. 위상이동법 디지털 홀로그래피 구현과정

이후에 설명되는 비접촉 진단기술들도 대부분 그림 10과 같은 과정을 거쳐 물체의 표면윤곽이나 결함, 변형량 등을 측정할 수 있다.

2.2.2 ESPI(Electronic speckle pattern interferometry)

홀로그래피와 원리가 유사하나 기록매질로서 CCD카메라가 사용된다는 점이 다르다. ESPI는 CCD카메라로 잡힌 간섭패턴을 신호처리과정을 거쳐 측정물체의 변형 등을 계측할 수 있다. 그림 11은 ESPI의 일반적인 구성도를 나타내는 그림이다.

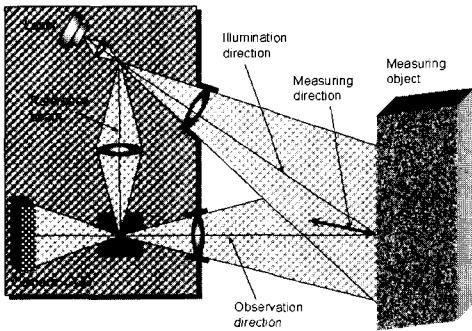
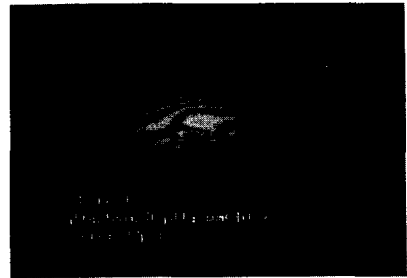


그림 11. ESPI의 구성도

ESPI 측정은 크게 두 단계로 나눌 수 있다. 첫째, 그림 11에서 보는바와 같이 변형전 물체에 레이저광을 조명하고 물체에서 반사된 빛과 참조광을 CCD 카메라에서 중첩시키면 밝고 어두운 부분들이 뒤섞여 있는 형태의 패턴이 얻어지는데, 이를 스펙클패턴이라 한다. 두 번째는 변형후 물체에 대해 동일한 방법을 통해 역시 스펙클 패턴을 얻는다. 변형전과 변형후의 패턴을 빼주면 일반적인 홀로그래피 방법에서 얻어지는 결과와 같은 변형량에 대한 스펙클이 있는 간섭패턴이 얻어진다. 이 간섭패턴을 해석함으로써 여러 가지 물리량을 계측할 수 있다. 그림 12는 ESPI를 이용하여 결함을 측정한 결과를 보여주고 있다.

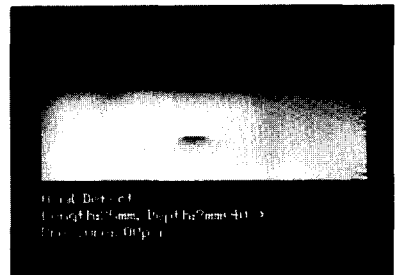
(a)는 간섭패턴이고 (b)는 이로부터 얻어진 위상지도이다. 그리고 (c)는 1차미분결과를 보여주고 있는데, 그림을 통해 결함이 있다는 사실을 알 수 있다.



(a) 간섭패턴



(b) 위상지도



(c) 1차미분결과

그림 12. ESPI로 찍은 측정대상물체의 패턴

2.2.3 Shearography

그림 13 (a)에서 보는 바와 같이 한 점에서 나오는 빛을 쉐기형 유리나 기타 다른 형태의 shearing device를 사용함으로써 분리시켜 관측면에서는 다른 부분에 초점이 맺히도록 한다. 그러면 동일한 점에 대

해 측면으로 분리된 영상이 관측면에 맺히게 된다. 역으로 생각하면 그림 13(b)에서 보는바와 같이 물체에 있어서 한 점과 근처의 다른 한 점이 동일한 곳에 초점이 맺히는 것으로 이해할 수 있다. Shearography는 이러한 원리를 이용하여 변형전과 후의 interferogram을 기록하고 이를 영상처리함으로써 물체의 변형 기울기와 방향을 알 수 있다.

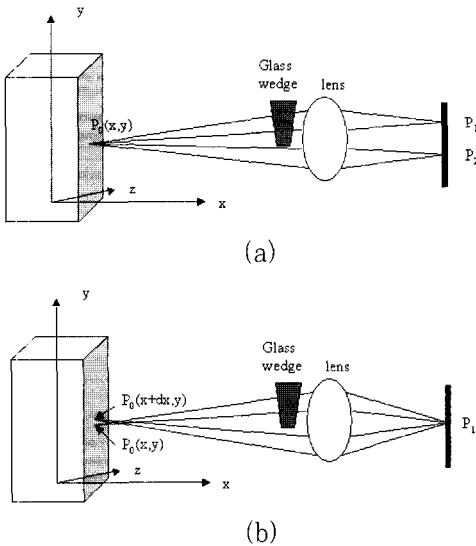


그림 13. Shearography의 원리

3. 비접촉 광학식 진단시스템의 구조

비접촉식 레이저 간섭계형 진단시스템은 일반적으로 그림 14와 같이 구성되어 있으며, 크게 세부분으로 분류할 수 있다. 첫째, 물체에 인위적인 변형을 가하는 부분이다. 인위적인 변형을 가함으로써 변형전과 변형후의 물체의 상태를 비교함으로써 여러 가지 변화량을 측정할 수 있다. 두 번째는, 물체를 조사하는 레이저와 물체에서 반사되는 광으로 간섭패턴을 생성하는 부분이며, 세 번째는 생성된 간섭패턴 영상으로부터 위상과 변형량을 계산하는 부분으로 구분할 수 있다.

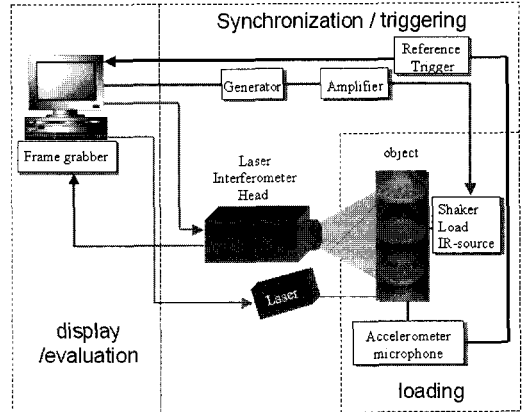


그림 14. 레이저간섭계의 일반적인 구성

그림 15는 일반적인 레이저간섭계형 비접촉진단기술에서 이루어지는 S/W의 결함검출과정을 보여준다. 위상추출과정과 필터링 그리고 물체의 결함부분 검출, 3D 영상구현 등의 과정을 거쳐 물체의 변형을 구할 수 있으며, 상용화된 물체의 변위검출량의 최고 해상도는 0.1(μm)로 보고되고 있다.

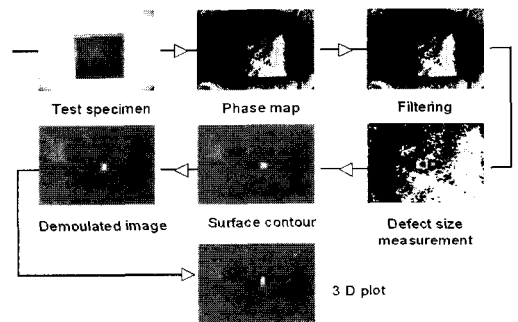


그림 15. 위상추출 및 결함검출 단계

4. 국내외 관련기술연황

4.1 국외기술 현황

레이저 간섭계 기술의 국외 연구동향을 살펴보면

주로 기계나 건축 구조물 등의 진동이나 변형도 등을 측정하는 것에 연구개발의 노력이 집중되고 있으며, Ettemeyer[8] 와 Syncretex[9], MetroLaser [10], Gom mbH[11]사 등을 ESPI나 Shearography 등의 광 간섭계 기술을 복합구조물의 진단기법으로 실용화한 대표적인 기업으로 꼽을 수 있다.

그림 16은 Ettemeyer사에서 판매하고 있는 ESPI 중의 하나인 Q-300 모델이며, 그림 17은 이를 이용하여 응력과 변형을 측정한 예들을 보여주고 있다.

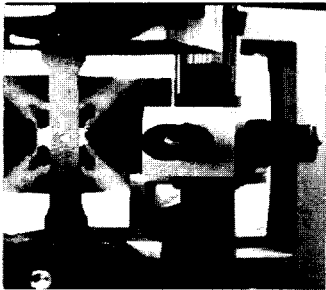
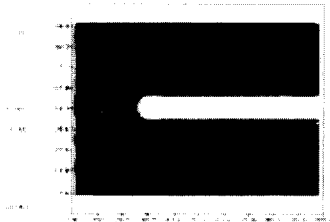


그림 16. Ettemeyer사의 Q-300



(a) 기계적 파손부분에서의 응력집중현상



(b) 이빨에서의 3-D변형과 strain측정

그림 17. Q-300을 이용한 측정 예

그림 17은 Syncretex사에서 제작하여 판매하고 있는 shearography이다.

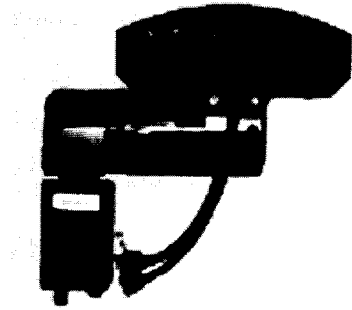


그림 17. Syncretex사의 shearography

그림 18은 shearography로 파이프관 표면에서 생긴 여러 가지의 결함을 검출한 것을 나타낸 것이다.

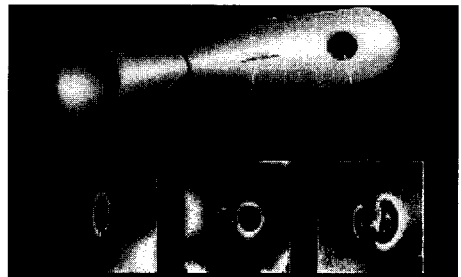


그림 18. Shearography로 측정된 결함검출

그림에서 보면 알 수 있듯이 결함의 형태에 따라서 나비모양의 간섭패턴이 다른 형태로 나타나며, 이를 해석함으로써 변형된 정도와 방향 등을 검출할 수 있다.

대학에서는 미국 Pennsylvania state university의 Reichard 그룹, Kansas state university의 Arieli 그룹, ORNL(Oak Ridge National Laboratory)연구소의 ISMV(image science and machine vision)그룹과 독일 Stuttgart 대학의 Wolfgang Osten 그룹, 네델란드 Bouwkunde 대학

의 Snijder 그룹, 체코의 Pavelek 그룹 등에서 활발한 실용화 연구를 수행하고 있다.

4.2 국내기술현황

국내에서 연구되는 대부분의 광계측 기술은 fiber Bragg grating이나 fiber Fabry-Perot 간섭계 등의 광섬유 소자를 이용한 온도, 변형 등의 측정과 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry), Shearography 등을 이용하는 구조물 변형 측정 기법개발 등이 그것으로 서울대, KAIST, 성균관대, 부산대, 한양대, 포항공대 등 몇 개의 대학과 한국표준연구원 및 기업의 품질연구소 등에서 수입한 ESPI나 shearography를 이용하여 제품의 품질 검사를 하고 있는 수준이다.

그리고 서울대 내의 기초전력공학공동연구소내에 설치되어 있는 레이저계측진단센터(LaMD)에서 여러 분야에서 적용할 수 있는 계측진단방법에 대한 기초연구를 통해 기반기술을 확보하고, 이를 산업계에 교육 및 전파하는 역할을 담당하고 있다. 이 그룹에서는 전류와 전압을 측정하기 위한 광계측기술과 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)를 이용하여 제품의 결함이나 변형 등을 계측하는 연구를 하고 있으며, 최종적으로는 ESPI를 직접 개발하여 제품화할 계획으로 있다. 앞에 언급된 그룹들이 하고 있는 연구는 크게 광섬유나 광섬유 간섭계를 이용하여 여러 가지 물리량을 계측하거나 전자 부품이나 기계에 있어서 비틀림, 변형, 결함, 면내변위, 면외변위, 표면의 거칠기 등을 계측하기 위해 레이저 간섭기술을 사용하고 있다.

5. 활용분야

디지털 홀로그래피, ESPI와 shearography를 이

용하여 활용할 수 있는 분야는 다음과 같다.

5.1 디지털 홀로그래피의 활용분야

- 항공, 타이어, 자동차, 전자, 제조업 등의 산업 분야에 응용범위를 가지고 있다.

5.2 ESPI의 활용분야

- 순간적이고, 넓은 면적과 비접촉 측정
- 부하반응에 대한 정적과 동적인 측정
- 응력측정
- 크랙과 제조결함 검출
- 용접검사
- 금속/세라믹 접합부분, 금속/복합재료 접합부분 검사
- 터빈날개, 자동차부품, 항공기부품, 브레이크
- 수 mm에서 수 m 크기의 대상물체에 대한 검사 가능함.
- 0.05(μm)의 감도와 0.1(μm)의 해상도

5.3 Shearography 활용분야

- 순간적이고 넓은 면적에 대한 비접촉 검사 및 테스트
- 복합재료에 대한 불량접합 및 결함 검출
- 항공기부품 검사
- 헬리콥터의 프로펠러 검사
- 인쇄회로기판(PCB) 검사
- 타이어 검사 및 테스트, 고무의 결함상대 검사
- 금속코팅
- 압력용기와 탱크 검사
- 세라믹과 세라믹/금속 부품 검사
- 수(mm)에서 수(m) 크기의 대상물체에 대한 검사가능함.

- 0.05[μm]의 감도와 0.1[μm]의 해상도

6. 결 론

홀로그래픽 간섭계는 구성이 간단하여 물체의 변형량을 보다 쉽게 측정할수 있지만 기록매질의 현상과 처리시간이 오래 걸리는 단점을 가지고 있다. ESPI와 Shearography는 이러한 단점을 보완하여 기록매질을 CCD 카메라로 대체함으로써 디지털적으로 영상처리를 가능하게 하여 실시간으로 물체의 결함상태를 알 수 있는 기술이지만, 고가의 측정장비로 인해 일반 중소기업이나 연구소 학교에서 사용하기가 어려운 단점을 가지고 있다.

ESPI는 고정밀도로 진단할 수 있지만 진동에 취약한 단점을 가지고 있어서 포터블형(portable type)은 아직까지 개발되지 못하였으며, Shearography는 물체자체의 움직임에는 상대적으로 둔감하므로 포터블형으로 생산이 가능하며, 제품의 생산라인과 유지보수시에 제품의 결함검출을 위해 사용되는 것이 일반적이다.

Shearography는 진동에 둔감하기 때문에 상대적으로 큰 물체의 정량적인 해석을 위해 산업계에서 많이 이용되고 있으며, 홀로그래픽 기법은 상대적으로 작은 물체의 정량적인 해석을 위해 사용되는 것이 적합한 것으로 보고되고 있다.

참 고 문 헌

[1] P. S. Theocaris, Moire Fringes in Strain Analysis (pergamon, London, 1969).
 [2] T. Wilson and B. R. Masters, "Confocal microscopy," Appl. Opt. vol. 33, pp. 565-566, 1994.

[3] D. Gabor, "A new microscopic principle," Nature, Vol. 161, pp. 777-778, 1948.
 [4] J. N. Butters and J. A. Leendertz, "Holographic and video techniques applied to engineering measurement," Journal of Measurement and Control vol. 4, pp. 349-354, 1971.
 [5] Y. Y. Hung and C. Y. Liang, "Image-shearing camera for direct measurement of surface strains," Appl. Opt. vol. 18, pp. 1046-1051, 1979.
 [6] Y. Y. Hung, L. Lin, and H. M. Shang, "Simple method for direct determination of bending strains by use of digital holography," Appl. Opt. vol. 40, pp. 4514-4518, 2001.
 [7] I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," Opt. Lett. vol. 22, pp. 1268-1270, 1997.
 [8] <http://www.ettemeyer.com>
 [9] <http://www.syncrotek.com>
 [10] <http://www.metrolaserinc.com>
 [11] <http://www.gom.com>

◇ 저 자 소 개 ◇



김 수 길(金秀吉)

1965년 8월 2일생. 1988년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 2월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 2월 서울대 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1997년 9월~현재 호서대 전기정보통신공학부 조교수.