

## 광학적 방법에 의한 비파괴 평가

### Nondestructive Evaluation using Optical Methods

강영준\*  
 Young-June Kang\*

**초 록** 최근 가속화되어 가는 산업발전으로 인하여 산업구조물 및 기계 부품의 안정성 및 비파괴 검사에 대한 요구가 크게 대두되고 있다. 이는 곧 산업구조물 및 제품의 품질 향상을 위한 기존의 검사방법으로는 제품의 완성도를 높이기 어렵다는 것을 의미하며, 제품의 질을 향상시키기 위해서는 새로운 비파괴 평가방법이 필요하다는 것을 의미한다. 또한 모든 구조물의 보수 유지 및 안전성 진단의 차원에서 모든 산업적 구조물의 변형과 응력, 진동모드, 미소3차원 형상에 대한 평가 및 해석은 구조물의 수명과 관계되어 그 중요성이 크다 할 수 있다. 이에 본고에서는 기존의 비파괴 검사 방법들이 많은 장점이 있음에도 불구하고, 단점을 극복할 수 있는 평가 기술로서, 고체재료 및 산업구조물 - 기계구조물, 전자 부품, 배관, 토목건축 구조물 등 - 의 변형, 결함, 균열, 응력 등을 검사 및 평가할 수 있는 광학적인 비파괴 평가 방법에 대해 소개하고자 한다.

#### 1. 서론

1960년대 초에 도입되어 40년의 역사를 지니고 있는 우리나라의 비파괴검사기술은 질, 양 면에서 크게 성장하여 산업기반기술로 정착되고 있다. 비파괴검사는 원자력 발전설비를 비롯한 각종 산업설비, 화학플랜트, 에너지공급시설, 조선, 해양구조물, 고층철골빌딩, 대형교량 등 대형설비의 제작, 설치, 유지관리에서부터 항공기, 방위산업 제품 등의 소형 정밀 기계부품의 제조, 조립에 이르기까지 설비의 안전성 및 신뢰성 확보와 제품의 품질보증 수단으로 널리 활용되고 있다.

1980년대 이후 중화학공업의 발전과 더불어 비파괴 검사의 필요성과 이에 대한 인식이 높아지면서 검사의 수요는 크게 증가하였고, 검사 적용대상도 다양해졌다.

그러나 현재 그 신뢰성을 인정받아 사용되고 있는 측정법들은 대부분이 파괴적 방법이거나 점 단위의 측정법 이어서 검사평가하는데 많은 시간이 소모된다. 그 중에서도 잔류 응력의 측정에서는 주로 파괴적인 방법을 많이 사용함으로써 측정 대상체를 파괴시켜야만 한다는 근본적인 문제점이 있다. 비파괴적인 방법으로는 X-ray 회절법,

중성자 회절법, Barkhausen법과 초음파법(ultrasonics) 등이 있다. X-ray 회절법은 표면 상태에 따라 영향을 많이 받는다는 가장 큰 단점이 있으며, 중성자 회절법은 원자량과 같이 강한 중성자 원료가 필요하기 때문에 산업 현장으로 확대되지 못하고 실험실 수준으로 제한되어 있다. 그리고 초음파법은 측정하는데 시간이 많이 걸리고, 국부적으로 미세하게 변하는 응력 분포 측정이 용이하지 않다.

이에 본 해설에서는 대형구조물이나 산업설비를 파손 시키거나 그 성능을 훼손시키지 않으면서 평가할 있는 비접촉, 비파괴 방법인 광학적인 비파괴 평가 기술에 대해 소개하고자 한다.

#### 2. Holographic Interferometry에 의한 방법

홀로그래피란 일반적인 사진술에 쓰이는 태양광과 같은 보통의 빛 대신에 레이저 광을 이용하여 3차원의 입체사진을 찍는 기술을 말한다. 홀로그래피는 레이저광의 간섭성을 이용하여 물체로부터 반사되는 광의 강도뿐만 아니라 위상까지도 필름에 담을 수 있는 방법이다. 이 원리를 Fig. 1에

간단히 나타내었다[1].

Fig. 1에서처럼 레이저빔은 광분할기(Beam splitter)에 의해 두 빔으로 나누어진다. 하나의 빔(기준빔)은 홀로그람 plate에 비추고, 다른 하나의 빔은 측정물체에 비추어주면, 홀로그람 plate에는 기준빔과 물체로부터 산란된 빔의 일부가 동시에 닿게 되어 두 빔은 간섭현상에 의해서 변형전의 완전한 3차원 상을 저장하고, 측정물체에 변형을 가한 후에 레이저를 조사하여 변형전의 상을 기록한 홀로그람 플레이트에 변형후의 상을 기록한다.

홀로그람을 기록한 건판을 현상과정을 거친후 측정물체의 홀로그람을 원래의 위치에 놓고, Fig. 2에서처럼 기준 빔만을 이용하여 홀로그람 plate에 레이저 빔을 조사하면 변형전의 상과 변형후의 상이 간섭을 일으켜 프린지 패턴을 형성한다.

홀로그래픽 간섭계는 매우 고정밀도로 물체의 변형을 감지해낼수 있다. 이것은 또한 거친 표면을 갖는 물체에 이용될 수 있기 때문에 비파괴 검사와 변형해석분야에 광범위하게 사용될수 있으며 진동해석에도 또한 유용하게 쓰

일수 있다. 이와 같은 홀로그래픽 간섭법을 이용하면 물체의 미세한 변화를 쉽게 측정할 수 있다.

### 2.1. 파이프 내부균열 검출

발전소나 송유관 같은 압력용기 등에 대한 유지보수는 매우 중요하다. 따라서 이들에 발생하는 균열을 검출해내는 것에 매우 중요한 일이다.

Fig. 3은 실시간 홀로그래픽 간섭계를 이용하여 검출된 압력용기의 축방향 내부결함이다. 압력여기에 의해 결합있는 부위가 주위와의 변형을 차이를 보임으로써 현저하게 검출되는 결과를 보여주고 있으며, Fig. 4는 검출된 결함을 1차 미분을 통해 국부적인 결함만을 증폭한 결과로 결함에 의한 변형을 확실하게 파악할 수 있으므로 검사자의 시각에 의존하는 검사 형태라면 일차 미분한 결과만으로도 충분히 결함 검출이 가능하다. 그러나 이 결과를 자동적인 결함 검출에 응용하기 위하여 재미분처리를 행하면 결함이 있는 위치에서 변형의 강도가 가능하고, 이를 이치화시켜주면 결함의 위치와 크기를 결정할 수 있다[1].

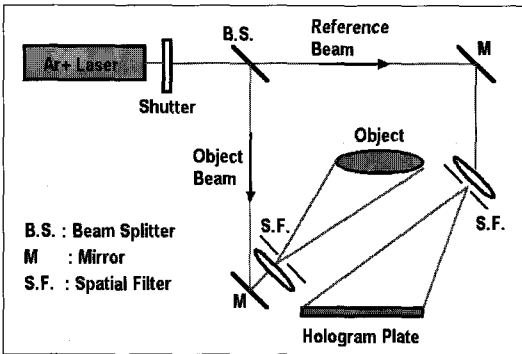


Fig. 1 Holographic interferometry for recording

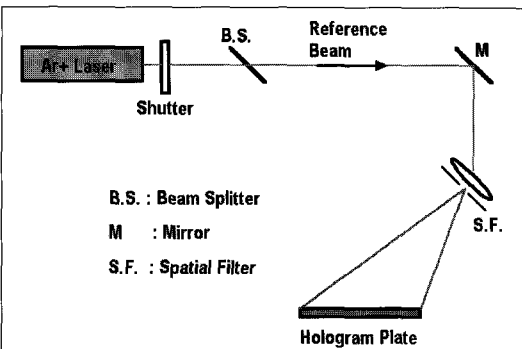


Fig. 2 Holographic interferometry for reconstruction

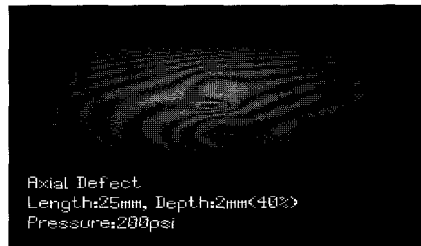


Fig. 3 Fringe pattern of pressurized axial defective tube



Fig. 4 First derivative image

### 2.2. 진동모드 측정

현재 구조물과 기계부품의 진동특성에 대한 연구는 대

부분이 물체의 고유 진동수나 댐핑 등 피상적인 기계적 특성 파악이 주류를 이루어 왔으며 이들을 구하기 위해 물체에 부착한 strain gauge나 accelerometer 등은 구조물의 응답에 영향을 미칠 수 있다. 또한 전문가가 아닌 이상은 이러한 수치들만으로는 물체의 진동특성에 대한 정확한 이해가 어려울 것이다. 하지만 레이저를 이용한 홀로그래픽 간섭법은 측정물체의 전역적인 진동모드와 변형을 직접 가시화 할 수 있을 뿐만 아니라 정량적인 평가가 가능해 전문가가 아닌 일반 사용자에게도 아주

유용한 방법이다.

현재 홀로그래픽 간섭법을 이용한 진동모드 측정방법에는 더블펄스 홀로그래피 방법이 사용된다. Fig. 5는 더블 펄스 홀로그래피의 원리를 나타낸다[2]. 물체의 임의의 진동 주기 부분에서 매우 짧은(수 ns)의 간격으로 두 개의 레이저 펄스를 발생시켜 주면, 첫 번째 레이저 펄스에 의해 형성된 한 개의 홀로그램과 두 번째 펄스 레이저에 의해 형성된 홀로그램이 동일한 홀로그래피 건판에 기록되어 이를 재생할 시 두 개의 홀로그램이 간섭을 일으킴으로써 간섭무늬를 획득하는 원리를 이용하게 되는데 변형전(laser pulse 1)과 변형후(laser pulse 2)의 이미지를 얻는 간격이 극히 짧기 때문에 정현적인 진동 주기를 갖는 물체뿐만 아니라 불규칙한 자유 진동을 갖는 물체의 진동모드 가시화에 적합한 방법이다.

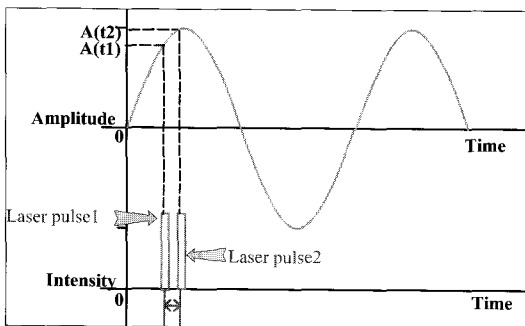


Fig. 5 The signal of pulsed laser at the free vibration

Fig. 6과 7은 자동차의 문을 닫을 때 일어나는 자동차 door slam 문제를 해결하기 위한 자동차 도어의 진동모드를 보여주고 있다. Fig. 6은 Laser pulse 1이 발진된 후 Laser pulse 2가 50ms 후에 발진되어 생성한 진동모드이고, Fig. 7은 150ms 후에 발진되어 생성된 진동모드를 나타낸다.

### 2.3. 충격파의 정량화

펄스 홀로그래피 방법에는 홀로그램 재생시 압전소자탐촉자(PZT: piezo-electric transducers)를 이용한 위상이동법을 수행하여 위상 측정을 통한 정량화를 할 수 있도록 펄스 홀로그램을 찍을 때 기준빔 두 개를 사용하는 준 헤테로다인 홀로그래피 방법을 사용하여, 평판에 가해진 충격파의 순간적인 변형을 정량적으로 산출할 수 있다.

Fig. 8은 정량화를 수행하여 나타낸 두께가 2mm인 평판에 대하여 10 μs, 50 μs, 120 μs까지 각각의 충돌 지연 시간에 따른 3차원 형상을 보여준다[3].

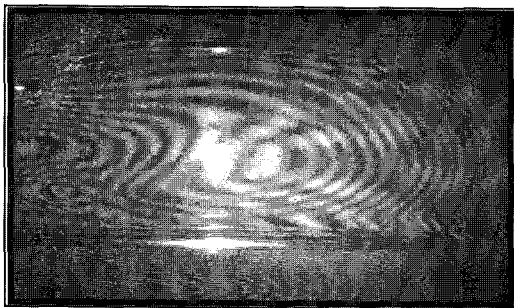


Fig. 6 The vibration mode at the delay time 50ms



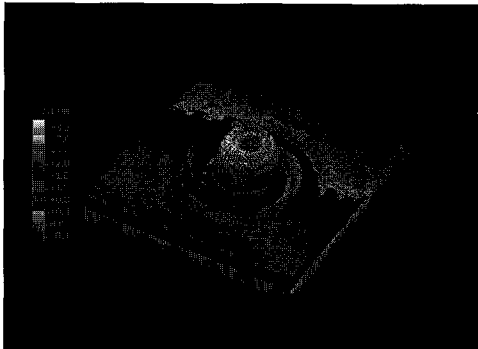
Fig. 7 The vibration mode at the delay time 150ms

### 3. Digital Shearography에 의한 방법

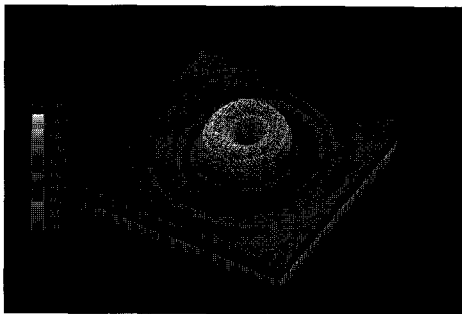
디지털 진단 간섭계는 기존에 결함검출을 위해 사용되던 홀로그래피 방법을 이용한 광학적 비파괴 검사 방법에 비해 광학적인 구성이 간단하고, 진동 등 환경적인 소음에 상당히 둔감하기 때문에 소형 경량화를 통해서 실제 현장에 적용하기가 대단히 유용한 방법이다. 또한 이 방법 역시 레이저빔의 가간섭성을 이용하기 때문에 레이저가 조사되는 영역에 대해서 한번에 검사를 할 수 있으며, CCD 카메라와 화상처리 시스템을 이용해서 실시간으로 계측할 수 있기 때문에 기존의 비파괴 검사



(a) 10  $\mu$ s



(b) 50  $\mu$ s



(c) 90  $\mu$ s

Fig. 8 Image showing shock waves propagation in plate after the pulse impact

방법의 가장 큰 단점으로 지적되어 온 시간소비성을 획기적으로 줄일 수 있다. 또한 물체의 구조적인 특성에 맞는 다양한 진단 방법의 적용이 가능하다. 즉 물체에 형태에 따라 측면형(lateral), 방사형(radial), 회전형(rotational) 등 광학계의 구성에 따라 구현될 수 있다[4].

Fig. 9는 디지털 전단 간섭계의 개략도이다. 레이저에

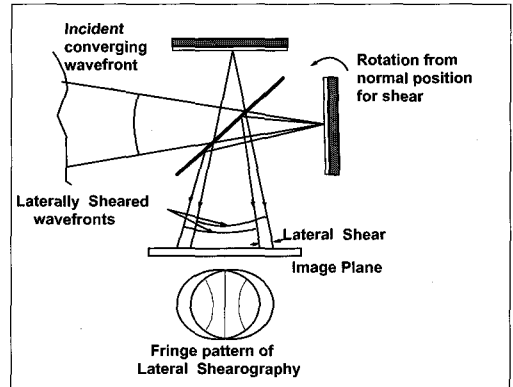


Fig. 9 Schematic diagram for a lateral digital shearography

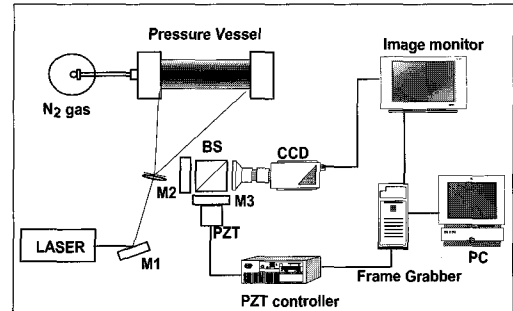


Fig. 10 Schematic diagram of lateral digital shearography

서 나온 빛이 물체면에 조사된 후 반사되어 나와서 광분할기에서 두 개의 빔으로 나누어 진 후 하나는 위에 있는 거울에 반사되어 상면에 맺히고, 나머지 하나는 옆에 있는 거울에서 반사되어 다시 광분할기로 들어가서 상면에 맺히게 된다. 이때 Fig. 9에서 보듯이 옆에 있는 거울을 살짝 회전시켜주면 회전된 거울에서 반사된 파면은 회전하지 않은 거울에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단되어 상면에 맺히게 된다. 이렇게 변형된 물체의 정보를 가진 스펙클 패턴과 물체에 변형을 준 후 위에서와 같은 방식으로 저장한 스펙클 패턴을 전자적으로 빼주게 되면 Fig. 9에서 보이듯이 간섭무늬를 형성하게 된다. Fig. 10은 전자 전단간섭계의 구성을 나타낸다[5,6].

### 3.1. 복합재료의 변형 검출

디지털 전단 간섭법을 사용하여 복합재료의 크랙검출 및 변형량을 검출할 수 있다. Fig. 11은 원형 평판 복합재료의 중앙에 힘을 가했을 때 면의 변형 구배를 나타내는 프린지 패턴이다[7].

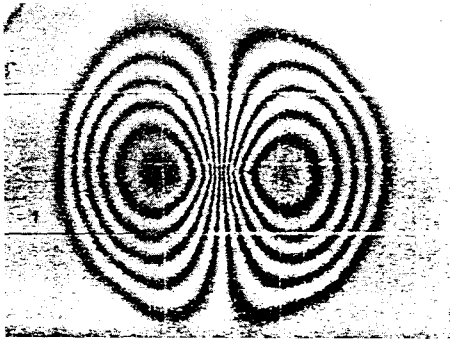


Fig. 11 Displacement gradient contours of plate

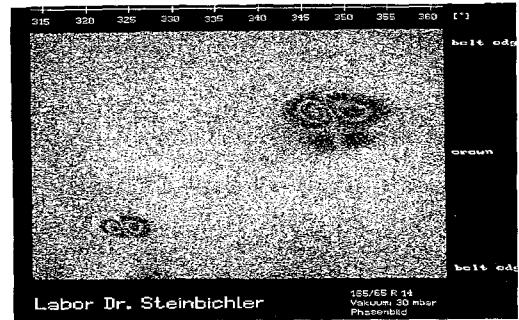


Fig. 13 Fringe pattern of tire

3.2. 파이프의 내부 크랙 검출

래터럴 전자 전단 간섭계를 이용하여 원자력 발전소나 화학 공장 등의 보편적인 부재인 파이프 배관이나 압력용기의 내부에 부식 등의 효과로 발생하는 결함을 효과적으로 검출하고 결함길이를 정량적으로 측정할 수 있다.

Fig. 12는 측면형(lateral) 전자전단 간섭계를 이용하여 검출된 압력용기 내부의 결함이다. 전자전단 간섭계는 변위구배를 측정하는 간섭계로서 미려의 기울임을 통하여 전단량을 조절하고 전단에 의해 변위 구배가 측정되어 측정된 결과는 변형이 아닌 변형률을 나타내게 된다. 따라서 결함이 변형률 차이에 의해 정성적으로 가시화되어 쉽게 검출될 수 있다. Fig. 12는 압력용기 내부에 존재하는 종축결함과 횡축결함이 가해진 압력에 의한 변형률 차이에 의해 현저하게 도출되어지고 있다. 측정된 결과의 간섭무늬는 변형구배를 나타내고, 이로써 쉽게 결함을 검출할 수 있다.

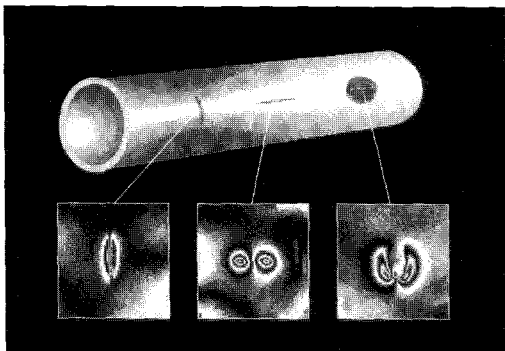


Fig. 12 Detection of pressurized tube flaw

3.3. 타이어 결합 측정

전자전단 간섭법은 결합검출에 탁월한 기능을 발휘하며, Fig. 13은 전자전단간섭계를 이용하여 항공기 타이어의 결합을 측정된 결과를 보여주고 있다[7].

3.4. 진동 모드 측정

전자 전단 간섭계를 이용한 진동계측방법의 이론적 배경은 홀로그래피 간섭법에 근거한다. 이 방법은 시간평균법(time average method)을 이용하여 베셀함수형 간섭무늬를 얻고, 여기에 위상이동법을 도입하여 변형량을 정량화하는 방법이다. 이 이론을 d전자 전단 간섭계에 도입하기 위하여 2개의 광경로에 대해 한쪽 빔은 위상이동을 그리고 다른 한쪽 빔은 위상변조(phase modulation)을 시킨다. 즉 정적인 변위의 계측에 있어서는 단지 한쪽 빔의 위상만을 변경시킴으로써 정량적이 해석이 가능하나 진동으로 인한 동적인 변형의 경우에는 나타나는 간섭무늬의 형태가 다를 뿐만 아니라 위상이동만으로는 간섭무늬의 이동효과를 가져올 수 없기 때문에 다른쪽 빔을 물체와 동일한 주파수로 진동시키고 그 진폭을 변경함으로써 간섭무늬를 이동시켜 정량적 해석이 가능하다. Fig. 14는 진동모드 측정을 위한 래터럴 전자 전단 간섭계의 시스템도를 나타내고 있다[8].

Fig. 15 (a)는 y축 방향의 전단에 대한 간섭무늬이고, (b)는 정량화와 적분과정을 통하여 얻어진 3-D plot이다.

구조적인 대칭성을 지니는 물체의 밸런스과 크랙부위를 파악하는에는 방사형(radial) 전단 간섭계가 사용된다. Fig. 16은 방사형 전단 간섭계의 기본구성도이고, Fig. 17은 이 간섭계를 이용하여 측정된 air-fan의 진동 모드이다[6].

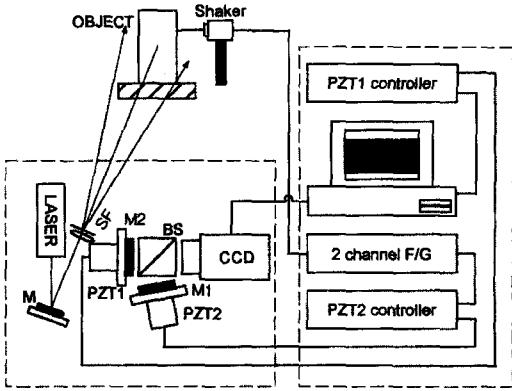


Fig. 14 Schematic of the laser interferometer used to the lateral shearography and image acquisition system

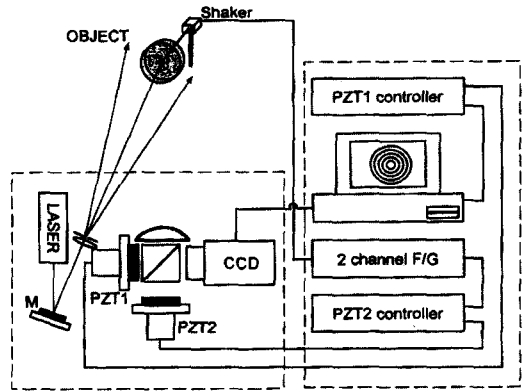
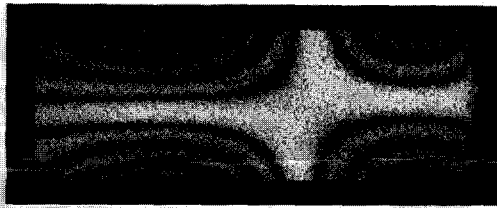
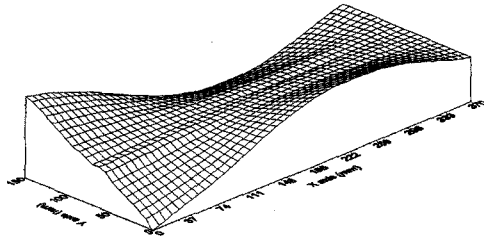


Fig. 16 Schematic of the laser interferometer used to the radial shearography and image acquisition system



(a) Phase modulation for fringe of a plate

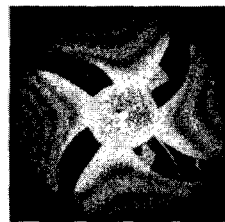


(b) 3-D Plot for vibration amplitude of a plate

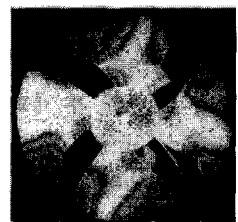
Fig. 15 Fringe and 3-D plot when a plate was excited at a frequency of 1090 Hz

3.5. 스트레인 측정

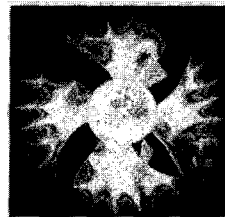
일반적으로 구조물 및 재료에 작용하게 되는 변형은 면내(In-plane)와 면외(Out-of-plane) 변위가 혼합된 형태로서 대부분 나타나게 되기 때문에 각각의 변위에 대한 변형, 변형률 및 응력을 구하여 해석을 수행하게 된다. 여기서, 구조물의 변형을 일으키는 외부요인으로는 열, 압력, 회전, 장력, 구조물의 하중, 진동등을 들수 있다. Fig. 18은 구멍이 존재하는 시편에 인장응력이 작용하였을 때 전단 간섭법에 의해 측정된 변형을 보이는 간



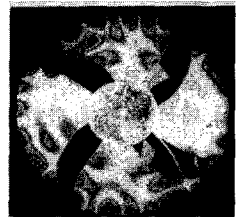
(a) F = 90.2 Hz



(b) F = 359 Hz



(c) F = 1188 Hz



(d) F = 1830 Hz

Fig. 17 Fringe pattern for the vibration amplitude of an air-fan attached balancer

섭무늬 위상도이다. Fig. 18에서 인장응력의 방향은 x와 y의 두 면내 변위요소가 모두 포함된 방향에서 인장을 가하였기 때문에 Fig. 18의 간섭무늬에는 x방향 변위구배와 y방향 변위구배가 포함되어 있다. 따라서 변형률 산출을 위한 해석에서는 각각의 변형률을 산출해야만 한다. Fig. 19과 20은 면내 변위 구배(du/dx)의 분포를 보이는 간섭무늬 그림으로서 먼저, Fig. 19은 x방향에서의 시편의 변형율을 나타내고 있으며, Fig. 20은 y방향에서의 시편의 변형율을 나타내고 있다.

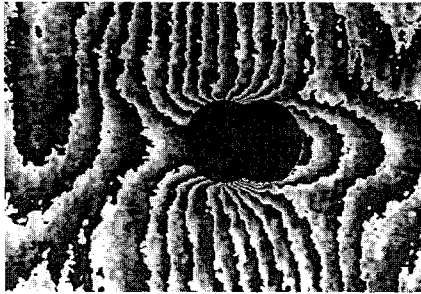


Fig. 18 The phase fringe pattern of a deformed rectangular specimen with a central hole

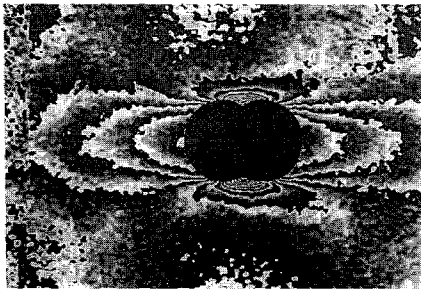


Fig. 19 The strain in the specimen in the x direction

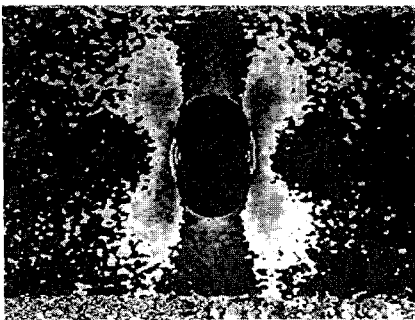


Fig. 20 The strain in the specimen in the y direction

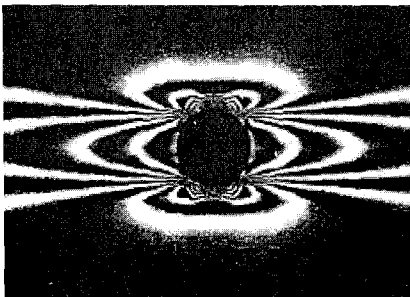


Fig. 21 The calculated distribution of the strain in the x direction

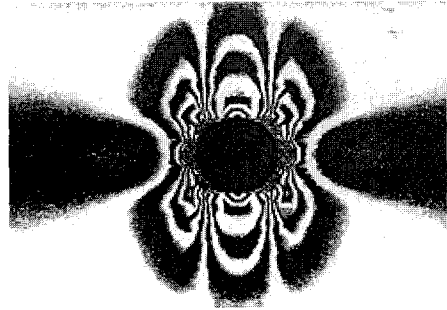


Fig. 22 The calculated distribution of the strain in the y direction

Fig. 21와 22은 인장응력에 의한 변형 해석 결과를 보이는 그림으로서 Fig. 21은 Fig. 19에 대응하는 해석 결과이고, Fig. 22은 Fig. 20에 대응하는 해석 결과이다. x, y 각 방향에서의 변형을 분포가 측정결과와 잘 일치하고 있음을 보이고 있는데, 이는 전자 전단 간섭계가 변형량 측정에 유용한 측정방법임을 시사한다[4].

#### 4. Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)에 의한 방법

ESPI는 레이저에 의해서 발생된 스페클을 정보전달자로 이용하는 방법이라고 할수 있다. 레이저 빛이 거친 표면에서 반사되거나 굴절률이 일정하지 않은 매질을 통과할 때 고운 입자 형태의 밝고 어두운 점이 무질서한 분포를 이루는 것을 볼수 있다. 이것을 스페클 패턴(speckle pattern)이라한다.

이 스페클 패턴은 관찰자의 움직임과 조리개의 구경에 의하여 영향을 받게 되는데, 관찰자가 움직이면 물체의 표면에서 관찰자를 따라 상대적으로 움직이며 눈을 가늘게 뜨면 스페클이 커지는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 스페클 현상은 레이저 광원과 같은 간섭성이 높은 빛의 고유성질로서 미시적인 관점에서 표면의 고저면이 가 제멋대로 이고, 거친 표면에서 산란된 빛의 간섭에 의한 것으로 홀로그래피와 ESPI같은 파동광학 분야에서 중요한 역할을 하기 때문에 그 특성에 대한 이해는 필수적이라 할 수 있다. 여기서 '거칠다'는 것은 미시적인 관점에서 표면의 고저면이 제멋대로 이고, 레이저의 파장보다 클 때를 의미하며, 간유리와 같은 산란 물체를 통과할 때도 생긴다[9].

ESPI는 스페클 상관간섭(speckle pattern correlation interference)의 원리에 의해 측정이 가능하다. Fig. 23은

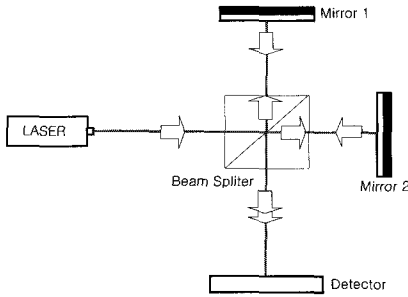


Fig. 23 Schematic of the Michelson Interferometer

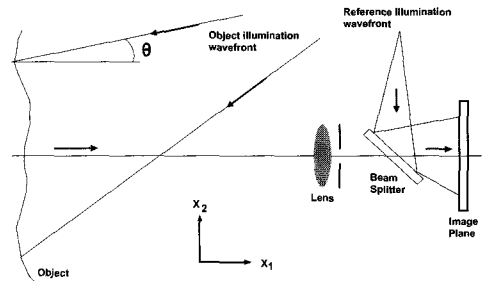


Fig. 24 면외변형에 민감한 간섭계

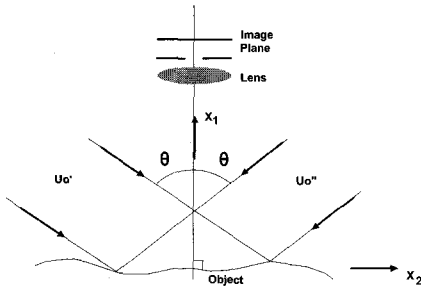


Fig. 25 면내변형에 민감한 간섭계

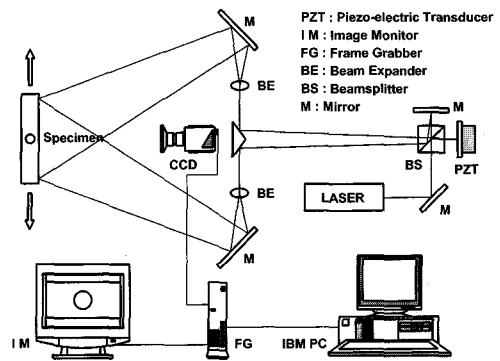


Fig. 26 Experimental Setup

마이켈슨 간섭계의 원리를 나타낸다. 마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer)는 하나의 광선을 두 개의 광선으로 나누고, 이들을 다시 결합함으로써 간섭 현상을 인위적으로 발생하도록 한 간섭계이다. 가간섭 광원은 45°로 경사진 광 분할기에 의해 두 개의 광 경로로 나뉜다. 각각의 광파들은 거울에 의해 반사되고 다시 광 분할기를 통해 검출기에서 합쳐진 후 간섭 무늬를 생성한다. 분리점에서 광파들은 위상을 담고 있다. 만약 광파들이 다시 합쳐지기 전에 경로가 같다면 극대가 되는 위상을 포함하지만 둘 중 하나의 광경로가 다른 것의 반파장의 경로 차를 가진다면 이들의 합성파의 강도는 극소가 된다. 광파의 이 변화는 만약 한 거울이 연속적으로 이동한다면 주기적으로 반복된다. 그래서 등고선 간격이 광 파장의 정확히 반이 되는 거울 이동의 주기적인 결과를 얻는다. 이 간섭계에서는 중심원의 간섭무늬를 얻을 수 있는데 이로부터 거리 측정에 이용할 수 있다. ESPI는 이러한 마이켈슨 간섭계의 원리를 이용하여 물체의 변형이나 변위 구배 특성을 측정하는 간섭법이다.

ESPI 시스템을 구성하는데 있어서 측정하고자 하는 물체에 나타나는 간섭무늬의 변위에 대한 감도는 물체빔과 기준빔의 기하학적 구조에 관계한다. 그러므로 ESPI 시스템은 그 민감한 변위성분에 따라 크게 면외변위(Out-of-plane displacement), 관측방향에 수직인 면내변위(In-plane displacement)와 변위 구배 미분(displacement gradient derivative) 시스템으로 나눌 수 있다.

Fig. 24는 면외변형에 민감한 간섭계의 구성도가 보여진다. 그러나 이 간섭계는 두 거친 산란면에서의 산란과 광분할기에 의해 적어도 50% 이상의 빛을 잃어버리므로 대단히 비효율적이다. 그러나 두 면의 상대적인 변위를 측정하고자 할 때 매우 효과적이므로 주로 그러한 경우에 사용된다. 또한 Fig. 25는 면내변형에 민감한 간섭계가 보여지고 있다. 이 간섭계는 구성이 간단하고 조작이 편리하며, 면내의 변형 및 응력측정에 가장 적합한 시스템이다.

Fig. 26은 면내변위 간섭계를 응용하여 시편의 면내 변형 및 응력을 측정할 수 있는 시스템의 예를 나타낸 것이다[9].



4.1. 미소변형량 및 응력 측정

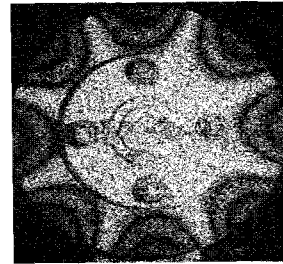
Fig. 27과 28은 각각 원형구멍과 노치가 있는 시편의 면내 변형 측정결과를 보여준다. 면내 변형이 비록 수 $\mu\text{m}$ 인 미소변형임에도 불구하고 정량적으로 측정이 가능함을 보여주고 있다[10].

4.2. 진동모드 측정

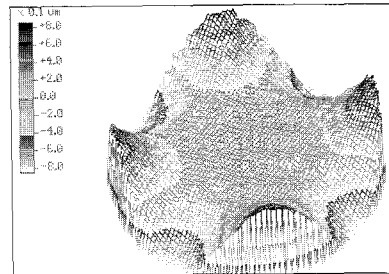
ESPI법을 사용하여 각종기계부품들의 진동모드를 측정하기 위한 방법에는 시간평균법, 스트로보스코픽방법 등이 있다. 시간평균법은 정현적인 진동모드를 실시간적으로 관찰할수 있으며, 스트로보스코픽 방법은 시간평균법에 chopping 장치를 설치하여 가시화된 진동모드를 정량적으로 측정할 수 있다. Fig. 29와 30은 자동차 디스크 브레이크와 스피커의 진동모드와 진동진폭 분포를 정량화한 것이다[8,9,15].

4.3. 잔류응력 측정

ESPI법에 유한요소법과 점가열법을 적용하여 잔류응력을 구할 수도 있다. 유한요소법은 시편 가열부의 온도와



(a) Fringe pattern



(d) 3D plot

Fig. 29 Vibration mode shape of disk brake

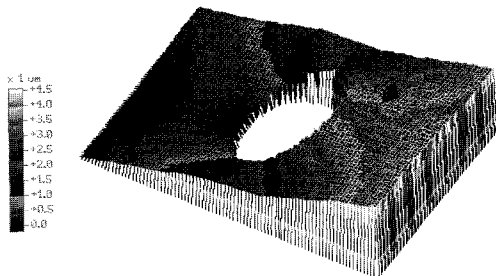


Fig. 27 In-plane deformation result in circle-hole specimen

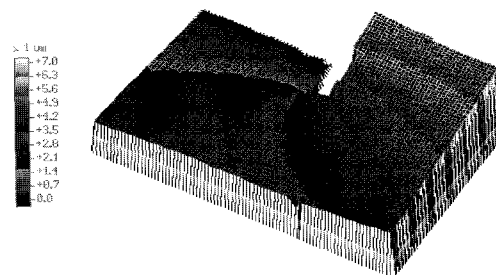
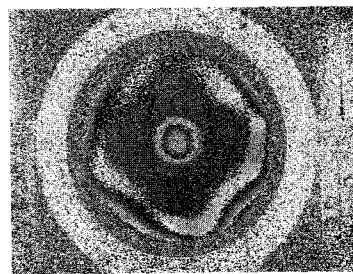
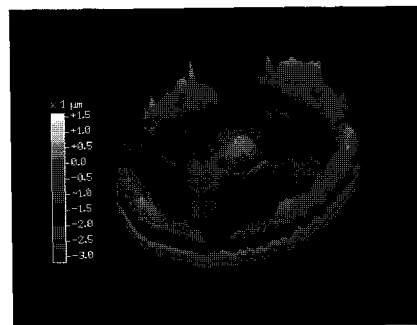


Fig. 28 In-plane deformation result in notch specimen

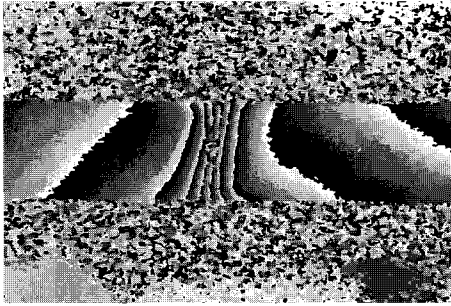


(a) Fringe pattern

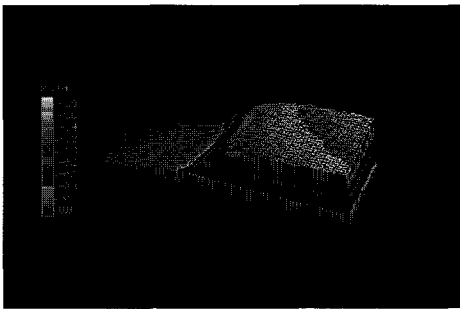


(b) 3-D plot

Fig. 30 Vibration mode shape of speaker



(a) Fringe pattern



(b) 3-D plot

Fig. 31 The measurement results of residual stress

그 외 변수들을 정하는데 사용되고, ESPI시스템은 측정 시편의 응력이 이완될 때의 면내변형을 측정하는데 사용된다. 그리하여, 잔류응력은 측정하고자 하는 부위의 가열 냉각에 의한 변형률에 의해 결정되어 진다. Fig. 31은 점 가열 후 냉각된 시편의 면내변형량을 측정한 결과가 나타나 있으며, 이로 인해 잔류응력을 산출할 수 있게 된다[10].

4.4. 3차원 형상측정

ESPI를 이용한 3차원 형상 측정법은 표면크랙등을 측정하여 수명을 평가하고, 반도체 리드 프레임 검사등에 사용되므로 3차원 형상을 측정하는 것이 중요하며, 기존의 형상측정 방법에 비해 많은 장점들을 가지고 있는데, 첫째로 측정 프로브를 측정 대상물에 주사시키기 위한 기계적 구동의 제한에 영향을 받지 않으므로 측정시간이 매우 짧고 이 때문에 생산공정의 고속화에 알맞고, 둘째로 측정 대상물에 접촉하지 않고 확산된 레이저 빔을 사용하기 때문에 물체의 손상이 없으며, 실시간 개념에 의한 자동측정이 가능하게 된다. Fig. 32와 33에 탁구공과 25센트 동전의 측정 결과가 나타나 있다[12].

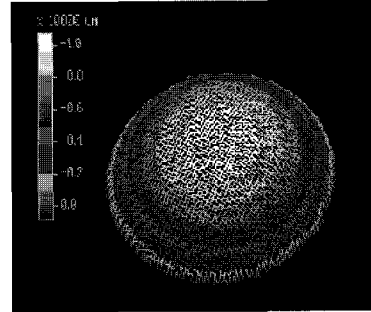


Fig. 32 Shape measurement result of butterfly ball

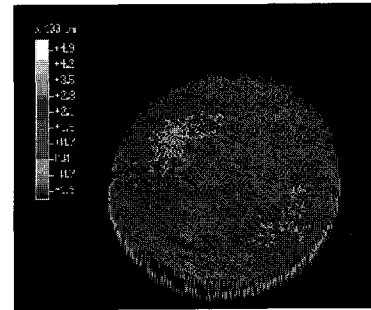


Fig. 33 Shape measurement result of 25 cent coin

4.5. 균열길이 측정

Fig. 34는 면내변위에 민감한 ESPI 간섭계를 나타내고 이를 이용하여 진전하는 균열의 선단 위치를 추적하고, 균열길이를 측정하기 위한 간섭계를 나타낸다. Fig. 35는 면내변위에 민감한 ESPI 간섭계와 현미경을 통하여 측정된 크랙길이를 비교분석한 결과이며, 오차분석결과 4% 오차 범위 이내에서 측정가능함을 확인하였다[18].

Fig. 36 (a)는 크랙이 3.5mm 진전된 후의 프린지 패턴을 나타내고, Fig. 36 (b)는 파단된 후의 프린지 패턴을 나타낸다.

5. Moire Interferometry에 의한 방법

“모아레”란 말은 처음으로 프랑스인 들에 의해 불려진 단어로서 고대 중국에서 수입된 비단위에 새겨진 물결무늬(wave pattern)를 일컫는 말이다. 이렇게 불리어지는 모아레는 두 개 이상의 주기적인 패턴(periodic pattern)을 겹쳤을 때 보다 큰 주기를 갖는 무늬가 생기는 현상으로 다양한 분야에서 매우 광범위하게 이용되고 있다.

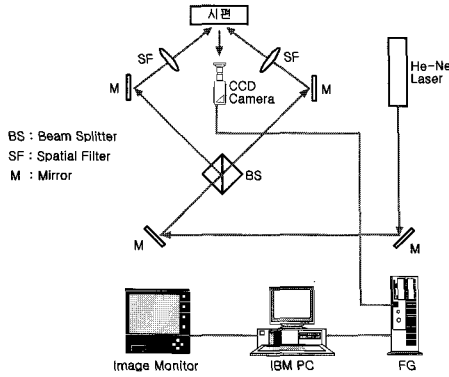
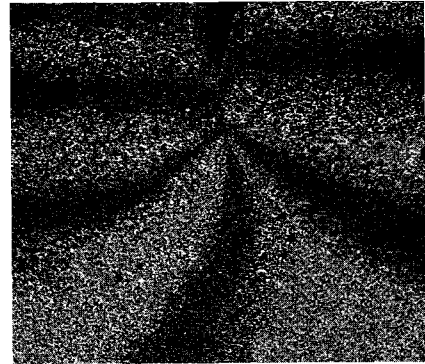


Fig. 34 Crack propagation set-up



(a) After crack propagated up to 3.5mm

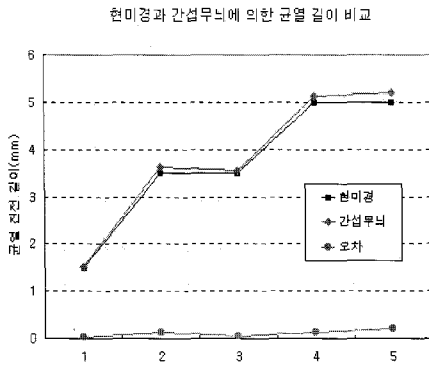
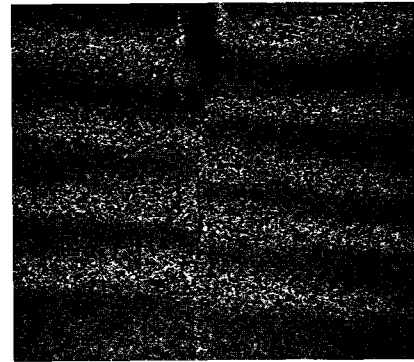


Fig. 35 Comparison with crack length by microscope and interference fringe



(b) At the onset of failure

Fig. 36 Results of crack propagation

이렇듯 물결무늬를 의미하는 불어에서 유래된 모아레 무늬를 학문적으로 정의하면 비슷한 주기를 갖는 여러개의 격자를 겹쳐질 때 맥놀이(beatting) 현상에 의해 발생하는 저주파의 고유한 무늬로 정의할 수 있다.

이 모아레 무늬는 여러 가지 성질을 가지고 있는데, 그 중에서도 특히 우리가 모아레 무늬에 주목하는 부분은 모아레 무늬의 변화가 실제 물체의 움직임을 상당히 증폭해서 나타낼 수 있는 것과 이 모아레 무늬의 형성 과정에 따라 물체의 형상에 대한 3차원 정보를 가지고 있다는 사실이다.

우선 모아레 무늬의 증폭효과를 보기 위해서 Fig. 37을 보면, (a)는 주기가 p인 격자이고, (b)는 격자 (a)와 동일한 주기를 갖는데 반시계 방향으로  $\theta$ 만큼 회전된 격자이다. 이 두 개의 격자를 겹치면 (c)와 같은 모아레 무늬가 얻어지는데 이 모아레 무늬에서 주기 P는 다음 식과

같이 격자의 주기보다 월등히 큰 주기를 가지게 된다

$$P = \frac{p}{2 \sin(\theta/2)}$$

이 상태에서 격자(a)를 p/2만큼 수평방향으로 이동하면, (d)와 같은 모아레 무늬를 얻을 수 있는데 결국 격자 자체의 이동량을  $\frac{1}{2 \sin(\theta/2)}$  배 만큼 증폭시키는 효과를 가지게 된다.

따라서 이 모아레 현상이 가지는 일반적인 현상을 잘 이용하면 공학 전반분야의 물체의 거동해석이나 물체의 비접촉 형상측정분야에서 많은 응용이 가능하다.

Fig. 38은 그림자식 모아레 방법의 대표적인 시스템 구성도를 나타낸다. 그림자식 모아레법은 측정하고자 하는 물체의 바로 앞에 기준격자를 위치시키고 조명하게 되고, 일정한 각도를 가지고 이를 관찰함으로써 기준격자와 측

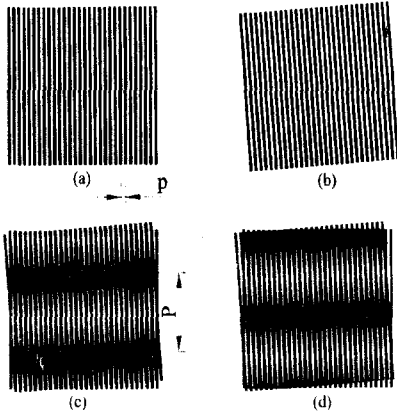


Fig. 37 Displacement amplification effect

정물체 위에 형성된 기준격자의 그림자가 겹쳐진 영상을 얻게 되는데 이 영상에는 모아레 무늬가 담겨있게 된다.

여기에 얻어진 모아레 무늬에는 측정대상물의 형상에 따라 결정되는 격자의 그림자 영상이 포함되어 있기 때문에 이 모아레 무늬를 해석함으로써 측정대상물의 형상 정보를 얻을 수 있다.

이러한 간섭무늬 해석 방법으로는 푸리에 변환이나 위상이동등의 방법으로 측정분해능을 향상시키고 있다. 그림자식 모아레법의 측정원리에서 알수 있듯이 측정대상물의 측정영역 전체를 덮을 수 있는 정밀한 기준격자가 필요로 하기 때문에 주로 측정대상물의 작은 경우에 사용되고 있다[14].

5.1. 3차원 형상측정

3차원 형상을 측정하는데 있어서 측정대상물체의 중

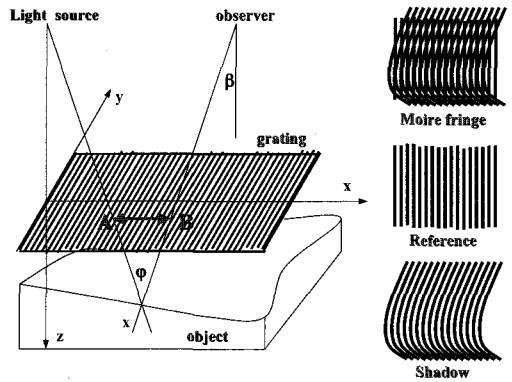


Fig. 38 Principle of shadow moire

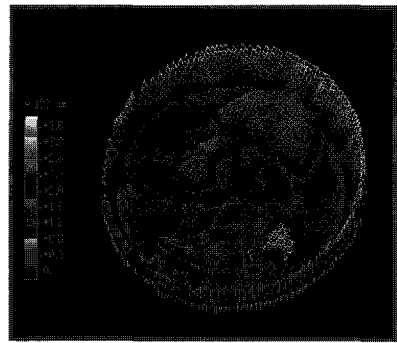
류에 따라 크게 두 가지로 나누어 질수 있다. 형상의 대부분이 평면으로 이루어진 기하학적 형상과 자유곡면으로 이루어진 자유곡면 형상으로 구별될 수 있다. 과거 대부분의 제품들은 취급의 용이성 때문에 기하학적 형상이 주로 사용되었으나, 최근에는 소비자의 욕구가 다양해짐에 따라 자유곡면을 채택하는 비중이 늘고 있다.

1980년대 후반 3차원 형상측정 기술은 고정밀화, 고속화, 비접촉화 방향으로 발전하고 있으며, 광전자 복합기술의 발달로 인하여 광학이론들이 실제 측정시스템에 쉽게 구현되면서 급속하게 발전하였다. 특히 비전을 이용한 3차원 형상측정기술은 사용에 있어서의 편리성과 측정대상물에 손상을 입히지 않는등 많은 장점들로 인하여 연구가 활발히 이루어지고 있다.

Fig. 39는 그림자식 모아레 방법으로 측정한 동전의 3차원 형상이다.



(a) 3-D plot of the front of a 100won coin



(b) 3-D plot of the front of a 25 cent coin

Fig. 39 Measurement results by shadow moire

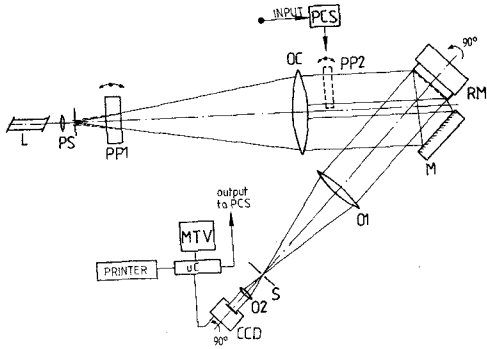
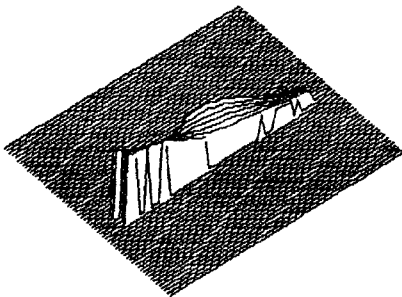


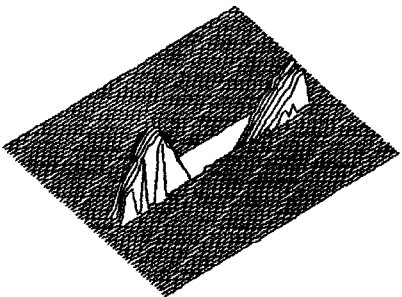
Fig. 40 Schematic of the grating interferometry system



(a) Interferogram



(b) 3-D plot of displacement field



(c) 3-D plot of strain field

Fig. 41 The analysis of the slice the beam

## 5.2. 잔류응력 측정

모아레 방법을 사용하여 기계재료의 잔류응력의 분포를 측정할 수 있다. Fig. 40은 모아레 방법을 사용하여 잔류응력을 측정하기 위한 구성도를 나타내고, Fig. 41은 측정된 결과를 나타낸다[16,17].

## 6. 결 론

지금까지 광학적 방법에 의한 비파괴 검사방법에 대해 실용예를 중심으로 소개하였다. 이외에도 광섬유에 의한 스트레인 측정법, 광탄성법, 레이저 여기 초음파 검사 등의 방법들이 있다. 대형구조물, 산업설비, 첨단기계등의 비파괴적 평가는 안전성 확보 및 수명예측을 위한 핵심 과제이다.

또한 발전을 거듭하고 있는 광섬유 기술과의 접목으로 광학적 비파괴 평가기술은 지금의 무비카메라와 같은 크기의 소형화가 시도되고 있으며, 이런 광학적 비파괴 평가기술은 고부가가치를 가지고 있으며 산업체의 적용조건에도 큰 제약을 받지 않을 뿐만 아니라 그 응용분야의 다양성으로 인해 잠재적인 수요는 매우 많을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] 강영준, 문상준, "위상이동 실시간 홀로그래픽 간섭법을 이용한 파이프의 내부결함 측정법", 정밀공학회지, Vol. 13 No. 12, pp. 68-76, (1996)
- [2] 현대자동차 남양연구소, "더블 펄스 홀로그래피를 이용한 자동차 Door System의 진동모드의 가시화,"(2000)
- [3] 강영준, 노경완, 박상규, "준 헤테로다인 홀로그래피 간섭법을 이용한 평판충격파의 정량화에 관한 연구." 대한기계학회A권 제 23권 제1호, pp. 1-10, (1999)
- [4] R.F. Anastasi, S.M. serabian, 외 2인., "Nondestructive detection of simulated delaminations in composite laminates by laser-speckle shearography," *Journal of Physics*, pp. 28-31, (1987)
- [5] 강영준, 권용기, "진동해석을 위한 전자전단간섭계의 개발," 대한기계학회 A권 제 21권 제 12호, pp. 2047-2054, (1997)
- [6] 강영준, 최장섭, 노경완, "대칭형 물체의 진동 진폭 분포 측정을 위한 레이디얼 전단 간섭계에 대한 연구," 한국정밀공학회지 Vol. 14 No. 12, pp. 9-16, (1997)

- [7] Hubert A. Aebischer, Stephan Waldner, "Strain Distributions made visible with Image-shearing Speckle Pattern Interferometry," *Optics and Laser in Engineering* 26, pp. 407-420, (1997)
- [8] 강영준, 박성태, 신성국, 최영선, "스트로보스코픽 전자 스펙클 패턴 간섭법을 이용한 디스크 브레이크의 진동 모드 정량적 가시화에 관한 연구," 자동차공학회 제 7권 제 9호, pp. 97-104, (1999)
- [9] 강영준, 채희창, "전자 스펙클 간섭계에 의한 진동해석," 한국공작기계학회지, 제 6권, 제 4호, pp. 39-45, (1997)
- [10] 강영준, 노경완, 홍성진, 강형수, "레이저 간섭법과 유한요소법을 이용한 잔류응력 측정방법에 대한 연구," 비파괴검사학회지, 제19권, 제1호, pp. 16-24, (1999)
- [11] 강영준, 김계성, "전자스펙클 패턴 간섭법을 이용한 형상측정에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제15권, 제10호, pp. 156-164, (1998)
- [12] 강영준, 노경완, 강형수, "레이저 스펙클 간섭법을 이용한 면내 변형 측정 및 해석에 대한 연구(I)," 한국정밀공학회지, 제 15권, 제 11호, pp. 121-129, (1998)
- [13] 강영준, 노경완, 나의균, "레이저 스펙클 간섭법을 이용한 면내 변형 측정 및 해석에 대한 연구(II)," 한국정밀공학회지, 제 15권, 제 12호, pp. 113-119, (1998)
- [14] 강영준, 유원재, 김동우, "위상이동 그림자 무아레 방법을 이용한 3차원 형상의 재구성," 대한기계학회 A권 제 22권 제 12호, pp. 2163-2170, (1998)
- [15] 강영준, 김동우, "시간평균 ESPI를 이용한 디스크브레이크의 진동모드 측정에 관한 연구," 한국공작기계학회지, 제 8권, 제 4호, pp. 79-86, (1999)
- [16] Leszda Salbut, Malgorata Kujawinska, "Automatic analysis of residual stresses in rail in the modified moire interferometry system", SPIE Vol. 2004, pp. 44-49, (1993)
- [17] Y.Y. Hung and K.W. Long, "Evaluation of residual stresses in concrete structures by digital shearography", SPIE, Vol. 2004, pp. 27-33, (1993)
- [18] 배진길, "레이저 간섭법을 이용한 균열길이 측정에 관한 연구", 전북대학교 대학원, (2000)