

◆특집◆ 광학식 3차원 형상측정기술

레이저를 이용한 형상측정법

박낙규*, 강영준**

Shape Measurement by using Laser

Nak Gyu Park*, Young June Kang**

Key Words : ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry, 전자 스펙클 패턴 간섭계), Surface Measurement (표면형상측정), Confocal Microscope (CFM, 공초점 현미경), ESC(Electronic Speckle Contouring, 전자 스펙클 등고선 추출법)

1. 서론

레이저는 단색성, 간섭성, 직진성, 편광성이 우수하고, 큰 에너지를 넓은 면에 조사할 수 있는 등의 여러 장점을 가지고 있기 때문에 공학을 비롯한 순수과학, 의료, 예술 등 다양한 분야에서 광원으로서 널리 이용되고 있다. 이러한 여러 분야 중에서도 일찍이부터 상용화된 분야는 레이저를 응용한 계측분야였다. 레이저는 시공간적으로 가간섭성이 우수하기 때문에 이를 이용한 많은 계측 및 검사기법이 제안되었다. 그 중에서도 전자 스펙클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)를 예로 들자면 ESPI 는 기록 및 재생처리 과정이 간단하고 그 속도가 빠를 뿐만 아니라 HI 에 비해 간섭 무늬의 해석이 간단해서 정량적인 실시간 계측이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 폭넓은 분야에 적용이 가능하고 이에 따라 산업 현장에서의 활용도 계속 늘고 있다. ESPI 의 응용 분야는 일반+ 물체의 변형이나

진동, 유체의 가시화 및 굴절을 분포 측정 등이며, 힘을 가했을 때의 국부적인 미세 변형을 측정함으로써 내부의 결함을 측정하는 비파괴 검사에까지 활용이 가능한 기술 분야이다.

레이저를 이용한 계측시스템은 레이저의 역사만큼이나 다양한 시스템들이 개발되어 활용되어지고 있으나 본 기사에서는 레이저를 이용한 계측분야 중, ESPI 를 중심으로 한 3 차원형상측정에 대하여 소개하고자 한다. 현재 레이저를 이용한 표면형상 측정방법에는 전자스펙클 등고선 추출법(Electronic Speckle Contouring Method, ESC), 공초점 현미경을 이용한 측정방법(Con-focal Lens Method), PMP(Phase Measuring Profilometry) 및 광삼각법을 이용한 방법(Optical Triangulation Method)등이 있다. ESC 방법이나 PMP 방법은 레이저빔이나 레이저빔으로 구성된 간섭격자를 분산, 조사하여 조사면적 전체의 형상을 측정할 수 있는 반면, 공초점 현미경 방식의 경우 측정물 표면의 각각의 점에 대하여 스캐닝해 나가는 방식으로 측정시간면에서 다소 단점을 가지고 있다. 그러나 절대적 기준을 정하여 시스템의 장단점을 논하는 것은 무의미하므로 각각의 시스템은 적용할 수 있는 기하학적 조건, 측정물의 형상 및 요구 측정 정밀도에 따라서 최적의 시스템 구성으로 시스템 자체오차가 적은 형상측정을 수행하는 것이 중요하다.

* 전북대학교 기계설계학과 대학원
Tel. 063-270-2453, Fax. 063-270-2460
Email parker3@chonbuk.ac.kr
** 전북대학교 기계항공시스템공학부, 원자력기초공동연구실
Tel. 063-270-2453, Fax. 063-270-2460
Email yjkang@chonbuk.ac.kr
광계측을 전공하였으며 ESPI, 무아래등을 이용하여 레이저 및 광학기술의 산업적 응용에 관심을 두고 있다.

2. 스페클과 레이저계측

스페클 현상은 레이저 광원과 같은 간섭성이 높은 빛의 고유성질로서 미시적인 관점에서 표면의 고저면이가 제멋대로 이고, 거친 표면에서 산란된 빛의 간섭에 의한 것으로 홀로그래피와 ESPI 같은 파동광학 분야에서 중요한 역할을 하기 때문에 그 특성에 대한 이해는 필수적이라 할 수 있다.

그러나 이 스페클 패턴은 종래에는 잡 신호등의 부정적인 요소로 생각되었다. 그러던 중 1968년에 Groh²가 Cambridge 대학에서 열린 '홀로그래피의 공학적 이용'이라는 논제의 1차 학술 토론회에서 비파괴 검사분야에 지금은 스페클 사진기법(Speckle Photography, SP)이라는 스페클 기법을 이용한 연구 논문을 발표하면서부터 스페클이 정보전달자라는 사실을 인식하게 되었다. 그 후 스페클을 이용한 간섭법의 응용성을 확대시키기 위해 TV 와 홀로그래피 기술과의 연계를 이용하여 실시간 계측의 영역이 열리게 되었는데,⁴ 이것을 TV 홀로그래피(TV Holography) 또는 TV 스페클 간섭법 (TV Speckle Interferometry) 이나 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)라고 한다. 이 여러 이름들은 이 방법에 접근하는 시각의 차이로 할 수 있는데 편의상 일반적으로 ESPI 라 부른다. 또한 TV 카메라를 이용하는 아날로그적 ESPI 에 반해, 현재에는 디지털 데이터 처리를 위해 컴퓨터에 CCD 카메라 등을 사용하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이를 특히 디지털 스페클 패턴 간섭법(Digital Speckle Pattern Interferometry, DSPSI)이라고 하는데, 일반적으로 특별한 구분없이 통상 ESPI 라고 한다.

변형측정을 위해서는 물체의 두 상태에 대응되는 두 frame 을 디지털 영상으로 저장하여 두 frame 데이터를 빼거나 더해서 간섭무늬가 얻어지는데 빼거나 더하기가 컴퓨터 프로그램에 의해 기억장치에서 이루어지므로 정확하고 빠르다. 이런 컴퓨터 처리는 아날로그 처리에 비해 디지털화된 신호를 다루는 것이 쉽고 편리하며 유연하다는 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 디지털 영상처리 기술과 접목이 쉽게 되어 해석의 자동화에 쉽게 접근할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 DSPSI 가 모든 데이터를 디지털화하여 레이저 계측의 용이한 자동화의 기반을 마련했다고 할 수 있다.

3. 레이저를 이용한 3차원 형상 측정

3.1 전자 스페클 등고선 추출법을 이용한 3차원 형상 측정

전자 스페클 간섭법을 이용한 등고선 추출법(contouring method)은 대상 물체의 높이와 형상에 대한 일정 등고선 간격(contour interval)의 간섭무늬를 얻고, 이를 통하여 3차원 물체의 형상에 대한 정보를 얻는 광학적 방법이며, 이를 ESC(Electronic Speckle Contouring)라 한다. 이 방법을 통해 물체에 대한 정확한 형상정보를 얻어 이를 바탕으로 물체의 형상학적 특성을 요구하는 로보틱스, CAD/CAM, NC Machine, On-line inspection 등에 응용될 수 있을 것으로 전망된다.

3.1.1 ESC의 이론

전자 스페클 등고선 추출법(ESC)은 기본적으로 ESPI의 기본원리를 바탕으로 하고 있다. 물체의 형상에 대한 정보를 갖고 있는 등고선 간섭무늬(contour fringe)는 Fig.1,2와 같이 격자 형태의 격자 등고선 간섭무늬(grid contour fringe)와 물체의 형상을 직접적으로 표현하는 높이 등고선 간섭무늬(depth contour fringe)의 두 가지로 나눌 수 있다.

격자 등고선 간섭무늬는 물체의 표면상위에 격자형태로 나타나는 간섭무늬로서 간섭무늬 자체가 물체 위에 평행한 격자 형태를 보이기 때문에 이해하는데 다소 어려움이 있고 정량적 해석 시에는 간섭무늬의 차수를 요구하며, 데이터를 보간하기 위한 curve-fitting routines 을 사용하여야 한다.

높이 등고선 간섭무늬는 물체에 평행한 평면 형태의 간섭무늬로서 일정한 물체의 형상과 높이를 직접적으로 서술하기 때문에 간섭무늬만으로 물체의 형상이 어떻게 생겼는지를 바로 한 눈에 알 수가 있다. 그리고 변위 측정 해석 시와 같은 기법을 사용하여 직접적으로 바로 해석이 가능하다.

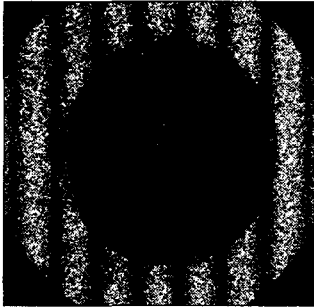


Fig. 1 Grid contour fringes on a object formed by object-beam-tilt

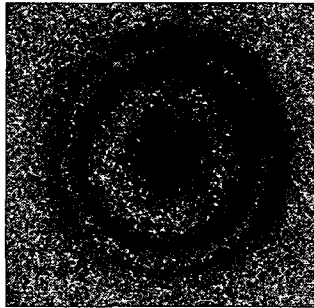


Fig. 2 Depth contour fringes on a object formed by dual-beam-shift

3.1.2 ESC 시스템 구성

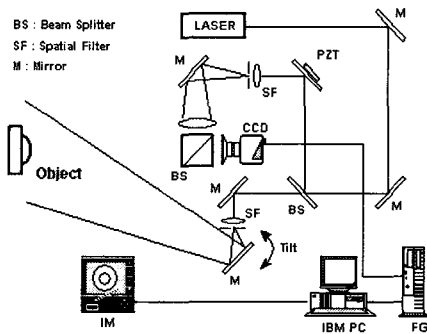


Fig. 3 Experimental arrangement for dual-beam-shifted ESPI contouring

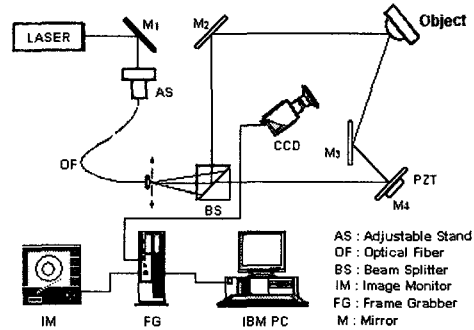


Fig. 4 Experimental arrangement for one-object-beam-tilt ESPI contouring

Fig. 3의 실험 개략도를 보면 발진된 레이저빔은 광섬유를 통하여 전달되고, 광분할기에 의하여 2개의 물체빔으로 나뉘어 같은 각도로 물체를 조사하게 된다. 광섬유 자체가 확산자(expander) 역할을 하기 때문에 광섬유를 통한 레이저빔은 확산된다. 따라서 확산자를 사용할 필요가 없어 간섭계는 좀 더 간편화되었다. 광섬유를 통한 물체 조사빔은 광섬유 아래에 설치된 마이크로미터에 의하여 축에 수직한 방향으로 이동되도록 시스템을 구성하였다. 빔의 두 경로중 한 경로에 다르게 설치된 미러 M3는 두 물체빔의 K 벡터가 마이크로미터 이동시 같은 방향으로 이동하도록 하여 정확한 등고평면(contour plane)을 형성하고 높이 등고선 간섭무늬를 얻기 위한 방향 보정자의 역할을 한다.

Fig. 4는 격자 등고선 간섭무늬를 얻기 위해 구성된 면의 변위 측정 전자 스펙클 간섭계와 화상처리장치 시스템의 구성도이다. 레이저 빔은 광분할기를 통하여 기준빔과 물체빔으로 나뉘고, 기준빔 광경로상에는 PZT를 설치하여 위상이동을 수행한다. 격자 등고선 간섭무늬를 얻기 위해 물체빔 경로상의 확산자 바로 전의 미러 아래에는 rotational stage를 설치하여 미러에 tilt를 줄 수 있도록 시스템을 구성하였다. 미러가 tilt되면 tilt 방향에 수직한 방향으로 tilt 양만큼 격자 등고선 간섭무늬가 생성이 되고, 이 간섭무늬에 물체의 형상에 대한 정보가 저장된다.

3.1.3 ESC 시스템 실험 결과

ESC 시스템의 특징을 살펴보면, 첫째로 형상 정보를 내포하고 있는 등고선 간섭무늬의 형성과정과 간섭무늬 간격을 간섭계의 기하학적 구조에 따른 벡터해석을 수행함으로써 산출할 수 있다. 둘째로, 면의 변위 측정 간섭계와 면내 변위 측정 간섭계를 이용하여 각각의 간섭계 구조에 따른 격자 등고선 간섭무늬와 높이 등고선 간섭무늬의 형성과정과 특성에 대한 해석을 수행할 수 있으며, 데이터 보간법이나 curve-fitting routine의 해석법을 요하는 격자 등고선 간섭무늬를 간섭무늬 차감법을 적용하여 물체의 형상과 높이를 직접적으로 서술하는 높이 등고선 간섭무늬로 변화시킬 수 있다. 셋째로, 면의 변위 간섭계에서는 미러의 tilt를 이용하여 격자 등고선 간섭무늬를 생성시킬 수 있으며, 면내 변위 간섭계에서는 이중 조사빔(dual-object-beam)의 이동을 통해 높이 등고선 간섭무늬를 생성시킬 수 있다. 조사빔의 이동을 통한 3차원 물체의 형상측정법은 물체를 변화시키는 방법, 두 파장의 조사빔을 사용하는 방법, 물체빔을 변화시키는 방법 등 전자 스펙클 패턴 간섭계를 이용한 기존의 다른 등고선 추출법보다 훨씬 더 쉽게 물체의 등고선 패턴을 얻을 수 있는 방법으로서 실제적 응용의 관점에서 볼 때 더 유용한 방법이 될 것으로 판단된다.

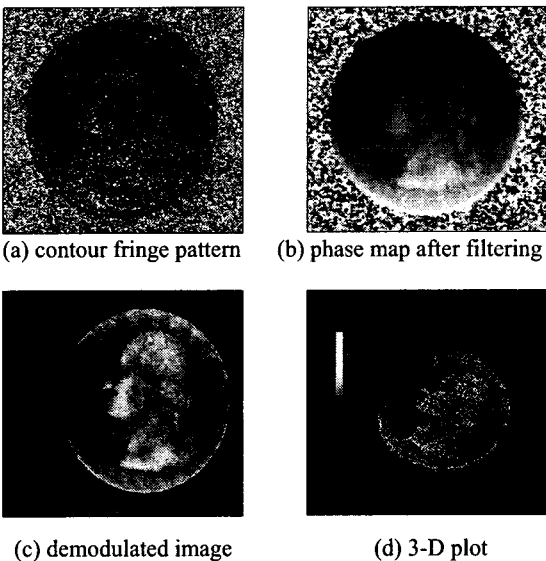


Fig. 5 Surface measurement of copper coin

3.2 공초점 현미경을 이용한 형상측정

현재 표면 형상 측정을 위해 주로 사용되고 있는 방법으로는 다이아몬드 촉침법, 삼각 측정을 이용한 방법 등이 이용되고 있다. 하지만, 이러한 방법들은 측정 대상물의 표면에 영향을 주게 되는 접촉식 검사 방법이거나 측정 속도 및 측정 영역의 제한을 가지는 등의 문제점을 안고 있다. 이를 극복하기 위해서 선진국에서는 이미 80년대부터 공초점 원리를 이용한 계측 방법을 개발하려는 연구가 활발히 이루어져 왔으나, 국내에서는 이에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정으로서 시급한 개발이 요구되고 있다.

3.2.1 공초점의 원리

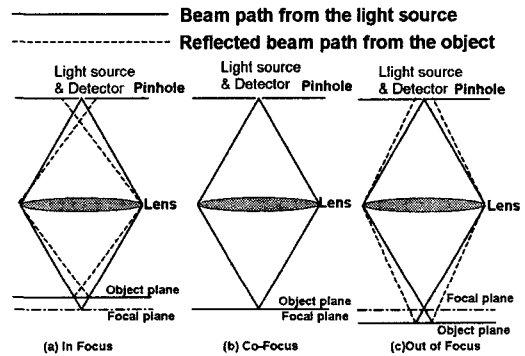


Fig. 6 Principle of the confocal

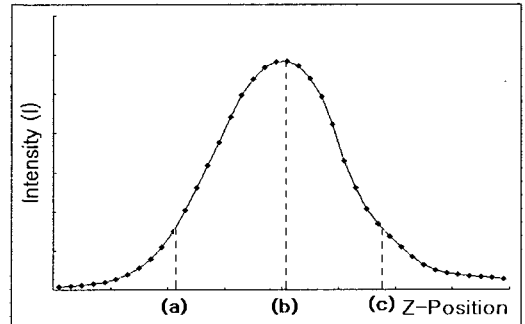


Fig. 7 The intensity variation in the general CFM according to the position of the object

공초점 현미경은 Fig. 6에서 보는 것처럼 광원에서 나온 빔을 집속 렌즈를 통해 시료 표면에 조사하고, 시료 표면에서 반사되어 나오는 빔의 세

기 변화를 광 검출기로 검출하여 전기적 신호로 변환해서 표면 정보를 획득하는 구조를 가지고 있다. Fig. 6 에서 (a)와 (c)는 물체 표면이 초점 평면과 어긋나 있어서 물체 표면에서 반사되는 빔의 일부만이 편홀을 통해서 광 검출기에 검출된다. 반면에 Fig. 6 (b)의 경우, 물체 표면이 초점 평면과 일치하여 반사된 빔의 전부가 편홀을 통과하여 광 검출기에 검출된다. 그래서, 물체를 Fig. 6 (a)의 위치에서 (c)의 위치까지 이동시키면서 광 검출기로 반사되는 빔을 검출해 보면 Fig. 7 와 같은 곡선을 얻을 수 있다. 즉, Fig. 7 의 그래프에서 곡선의 최고점이 바로 물체 표면과 초점 평면이 일치하는 위치를 나타내는 것이다.

이러한 원리를 이용하는 공초점 현미경은 일반적인 광학 현미경으로는 관측할 수 없는 시료 표면의 거칠기나 높이의 변화를 3 차원 영상으로 얻을 수 있으며, 영상처리 속도가 빠르고 사용에 편리하다.

3.2.2 측정 시스템의 구성 (2-채널방식)

시스템 구성도를 살펴보면, 광원으로 부터 나오는 레이저는 공간 필터(spatial filter)를 통과하면서 확대되고 시준 렌즈(collimation lens)를 지나면서 평행하게 진행하게 된다. 그리고, 편광 광 분할기(polarized beam splitter)에서 수평 편광된 광은 반사되어 소멸되고, 수직 편광된 광은 그대로 진행하여 $\lambda/4$ -plate 와 대물 렌즈를 거쳐 물체까지 진행하게 된다. 물체에서 반사된 광은 다시 편광 광 분할기에 도달하게 된다. 하지만 이 과정에서 $\lambda/4$ -plate 를 두 번 통과하면서 수직 편광된 광이 다시 수평 편광된 광으로 바뀌게 된다. 그래서 물체로부터 반사된 광이 편광 광 분할기를 투과하지 않고 반사하여 광 분할기로 진행하게 된다. 다시 광 분할기에서 두 개의 광으로 갈라져서 각각 렌즈와 편홀(pinhole) 등을 통해 두개의 광검출기에서 각각 검출하게 된다.

시스템을 구성할 때 편광 광 분할기와 $\lambda/4$ -plate 로 편광성질을 적절히 이용하면 레이저 출력의 1/2 정도까지 시스템에 적용시킬 수 있다.

Fig. 9(a)의 I1 과 I2 는 Fig. 8 의 시스템 구성도에서 보면 렌즈의 초점거리를 중심으로 서로 반대 방향의 같은 거리에 위치시킨 두 개의 광 검출기로 입력되는 신호이다. 측정시간 및 피측정물체의 표면정보로 인식되는 Gaussian 분포의 최고점을

결정해야 하는 모호성을 개선하고 측정면적 전체에 대한 X,Y,Z 방향의 스캔 중에서 Z-방향의 스캔을 피측정 물체의 한 점에 국한시켜 측정시간을 단축시킬 수 있다. 또한, 2-채널 방식에서 I1 과 I2 의 교차점은 1-채널 공초점 현미경 방식에서 한 개의 Gaussian 분포 형태의 최고점에 해당하는 값이 되며 경사가 완만한 Gaussian 분포 형태의 신호에서 최고점을 결정해야 하는 모호성이 사라졌다. 뿐만 아니라, 이러한 2 채널 방식의 사용은

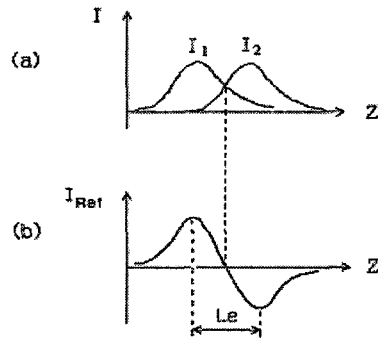


Fig. 8 Diagram of advanced CFM

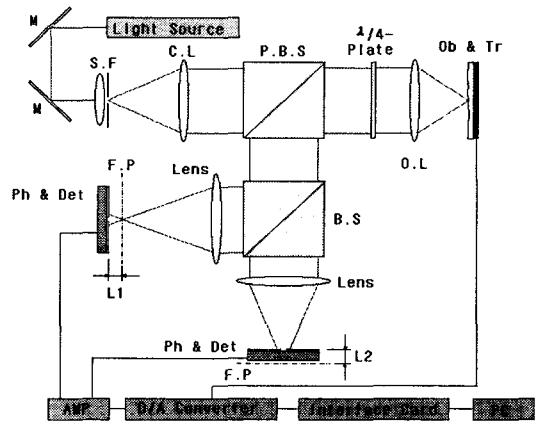


Fig. 9 Graph of the reference signal

Z 축 방향에 대한 스캔은 측정 시작점에만 실시하여 I1 과 I2 의 교점에 상응하는 Z 값을 기준으로 하고 그 외의 나머지 모든 점들의 높이 정보값(Z 값)에 대해서는 X,Y 방향만의 스캔을 실시하여 시

작점에서 얻어진 값에 대한 각 교점들의 Z 축 상의 상대적인 분포를 통해 구할 수 있으므로 모든 점에 대해 Z-방향에 스캔이 필요했던 1-채널 공초점 현미경 방식에 비해 측정시간을 단축시킬 수 있다.

3.2.3 시스템 실험 결과

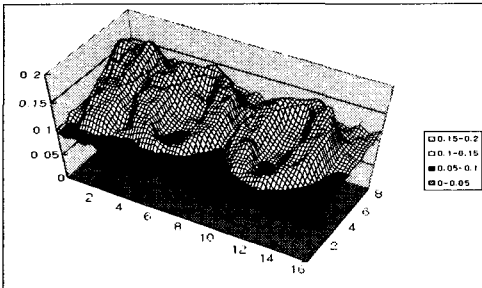


Fig. 10 Measurement result of coin surface

2 채널 스캔 방식 공초점 현미경은 Z-방향에 대한 스캔 과정이 필요하지 않기 때문에 측정 소요 시간을 단축시킬 수 있으나 분해능이 좋아짐과 동시에 측정 가능한 범위가 줄어들기 때문에 측정 대상에 적절한 시스템을 구성하여 사용해야 한다.

3.3 PMP 형상 측정법

PMP(Phase measuring profilometry) 형상 측정법은 간섭무늬 패턴을 물체에 투영하여, 생성된 간섭무늬의 변형정보에 위상이동법을 적용하여 3 차원 물체의 위상정보를 획득하는 위상측정 3-D 형상측정법에 대한 것이다. 투영된 패턴을 CCD 로 기록하고, 기록된 정보를 컴퓨터에 입력한 뒤 소프트웨어를 이용하여 높이 정보를 추출하여 형상을 재구성한다.

반면 시스템의 주요 요소인 광학 투영기와 CCD 를 이용한 이미지 기록장치의 기하학적 요인에 의한 영향을 무시할 수 없는데 측정 시스템의 중요 요소인 투영계와 기록계에 의해서 발생하는 비선형 오차를 확인하여 보정을 통해 좀더 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

3.3.1 광학계 원리

Fig. 11 은 기본적인 형상측정 광학계의 구성을

보여주고 있다. 프로젝터 부분에 패턴 투영 광학계를 설치하고, CCD 에서 이미지를 획득, 기록하여 컴퓨터로 처리하게 된다. 프로젝터 부분에서 sinusoidal 격자 패턴을 생성하고 투영하게 되는데, 레이저 간섭계를 구성하여 투영하거나, 컴퓨터 프로그램을 통해 격자 패턴을 생성해서 투영할 수 있다.

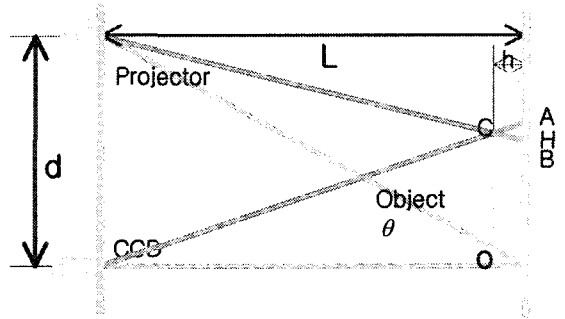


Fig. 11 Optical geometry of the PMP system

기준면 위에 투영된 간섭격자 무늬의 밝기 정보는 다음 식으로 표현된다.

$$I_R = a(x, y) + b(x, y) \cos \Phi(x) \quad (1)$$

a 는 화상의 배경 밝기를 나타내고, b 는 간섭무늬의 명암대비를 나타낸다. Φ 는 각 지점에 존재하는 고유한 위상으로써, 기준면에서의 각 점은 어느 기준점에 대하여 다음과 같은 고유한 위상값을 가진다.

$$\Phi_c = 2\pi n + \Phi_c' \quad (2)$$

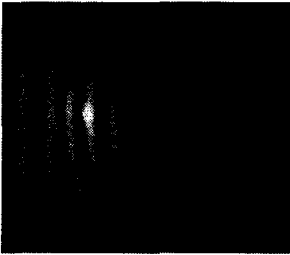
n 은 순차적으로 정해지는 정수이며, Φ_c' 는 0에서 2π 사이의 값을 가진다.

투영계에 의하여 삼각함수형 밝기 정보를 가지는 sinusoidal 격자패턴을 투영하고, 격자패턴의 pitch 의 1/4 에 해당하는 만큼 이동하여 상대적인 위상차 (각 $\pi/2$)를 지니는 4 개의 화상을 생성하게 된다. 위상이동량을 화상처리 장비에 입력한 후 이를 물체의 각 지점에서의 위상값을 구하면 2π 마다 불연속성을 지니게 되는 위상도(phase-map)를 얻을 수 있다

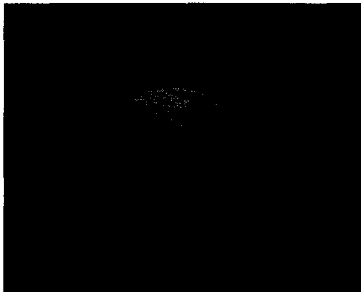
$$AC = p_0 \frac{\Delta\Phi(x, y)}{2\pi} \quad (3)$$

p_0 : 투영간섭무늬 격자의 pitch
 $\Delta\Phi$: 기준면과 물체면의 위상차

3.3.2 실험결과



(a) Sinusoidal grating pattern on specimen



(b) 3-D plotting image of the measurement data

Fig. 12 Measurement results for a hemisphere

PMP 법에서는 기하학적인 관계식을 통해 x 축 방향에 따라 기존보다 더 정확한 pitch 값을 알아 내어 광학 형상 측정법에 따른 보정을 할 수 있다. 이를 실제 실험 Data 에 적용하여 Fig.12 와 같은 측정값을 얻을 수 있다.

4. 결론

ESPI 를 비롯하여 레이저를 이용한 계측법은 비접촉성, 높은 측정정밀도, 실시간적 측정 및 측정안정성 등의 계측분야에서 없어서는 안 될 여러 가지 특징을 모두 가지고 있으며 이러한 특징을

적용하여 현대산업에서는 자동차, 전자부품 및 항공기제조 등의 분야에서 내부 결함검사, 각부품의 강도측정, 치수측정 등에 널리 사용되고 있다.

표면 형상측정면에서 바라볼 때, 레이저를 이용한 계측법은 프로브를 측정 대상물에 주사시키기 위한 기계적 구동의 제한에 영향을 받지 않으므로 측정 시간이 매우 짧고 이 때문에 생산공정의 고속화에 알맞고, 둘째로 측정 대상물에 접촉하지 않고 확산된 레이저 빔을 사용하기 때문에 물체의 손상이 없으며, 실시간 개념에 의한 자동 측정이 가능하다는 등 많은 장점을 가지고 있다.

참고문헌

1. Ennos, A. E., "Speckle Interferometry," Laser Speckle and Related Phenomena, pp. 203, 1975.
2. Butters, J. N., "Electronic Speckle Pattern Interferometry : A General Review," The Engineering Uses of Coherent Optics, pp. 155, 1976.
3. Leendertz, J. A., "Interferometric Displacement Measurement on Scattering Surfaces Utilizing Speckle Effect," Journal of Physics E, Vol. 3, No. 214, 1970.
4. Butters, J. N. and Leendertz, J. A., "Speckle Pattern and Holographic Techniques in Engineering Metrology," Optics and Laser Technology, Vol. 3, No. 27, 1971.
5. Jones, R. and Wykes, C., "Holographic and Speckle Interferometry," Cambridge, 1989.
6. Young June Kang, Kyung Wan Rho, Eui Gyun Na, "A Study on Measurement and Analysis of In-Plane Deformations by Using Laser Speckle Interferometry (II)," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 12, pp.113-119, December 1998.
7. Hertwig, M., "Application of Improved Speckle Contouring Technique to Surface Roughness Measurements," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 26, pp. 115-130., 1997.
8. K. H. Yun, Y. J. Kang, N. K. Park, S. H. Baik and S. J. Kang, "The development of adaptive optical dimension measuring system using zoom lens," Proceedings of the KSME 2004 Fall Annual meeting, pp.20-25, 2004.

9. Youn Kyung Hwan, Kang Young June, Park Nak Gyu, Baik Sung Hoon, Kang Shin Jae, "The development of Adaptable Dimension Measuring System," Proceedings of the KSPE 2004 Fall Annual meeting, pp.690-695, 2004.