

〈論 文〉

위상변이법과 디지털 영상처리를 이용한 홀로그래피 간섭무늬의 정량적 해석

고영욱* · 권영하** · 강대임* · 박승욱***

(1992년 1월 10일 접수)

Quantitative Interpretation of Holographic Fringe by Using Phase Shifting Method and Digital Image Processing

Y. U. Ko, Y. H. Kwon, D. I. Kang and S. O. Park

Key Words : Holographic Interferometry(홀로그래피 간섭법), Phase Shifting Method(위상변이법),
Fringe Interpretation(간섭무늬해석)

Abstract

Holographic interferometry technique has been used for the measurement of whole-field deformation with high sensitivity. However there are some difficulties in quantitatively analyzing the holographic fringes. Recently, quantitative and automatic fringe analysis by using phase shifting method in interferometry has been studied in many fields. In this paper, a real time holographic interferometry system and a phase shifting method combined with digital image processing technique are employed to record and quantitatively analyze holographic fringe patterns. To evaluate our system and analyze errors, comparison of measured deformation with theoretical deformation of cantilever beam was carried out. The accuracy of 4.5% in our system was verified. We have tried to apply this method to quantitatively measure the deformation of turbine blade under the bending force.

1. 서 론

변형을 측정하는 방법으로는 종래에 스트레인 게이지법, 광탄성법 등이 많이 사용되어 왔다. 스트레인 게이지법은 정밀도가 비교적 높고 변형도를 직접 측정할 수 있는 반면에 스트레인 게이지가 부착되는 지점에서의 변형만을 알 수 있는 단점이 있다. 반면에 광탄성법은 대상물체 전체의 변형거동을 동시에 파악할 수 있으나 감도(sensitivity)가

떨어진다. 근래에 스트레인 게이지법과 광탄성법의 문제점을 해결하기 위하여 비접촉식 측정방법의 하나인 홀로그래피 간섭법을 이용한 변형 측정 연구가 많이 시도되고 있다.

홀로그래피 간섭법은 물체의 변형전과 변형후의 입체영상을 서로 간섭시켜 얻어진 간섭무늬를 해석하여 물체의 변형을 알아내는 방법이다. 홀로그래피 간섭법은 변형을 삼차원 영상으로 관측할 수 있고 감도가 좋으며 대상물체의 넓은 영역을 측정할 수 있는 장점이 있으나 간섭무늬의 정량적 해석에 어려움이 따른다. 그 중에서도 Fig.1(a)와 같이 외팔보의 중간 부분에 힘 F 를 가하여 변형되었을 때 측정자가 측정 system의 구조와 변위의 방향을 모

* 정회원, 한국표준과학연구원

** 정회원, 경희대학교 섬유공학과

*** 대전대학교 물리학과

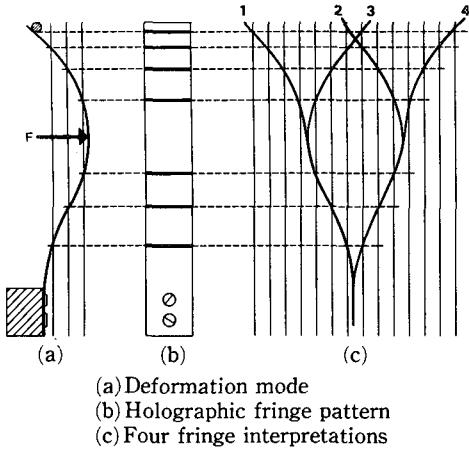


Fig. 1 Holographic fringe interpretation possibilities

르면, 동일한 간섭무늬(b)로부터 (c)와 같이 4가지 경우의 변형상태로 해석할 가능성이 있다. 즉 물체의 변형방향을 알수 없게 된다. 최근 컴퓨터의 발달과 디지털 영상처리기술(digital image processing)의 도입으로 간섭무늬를 고속, 정밀하게 해석할 수 있게 됨으로써 이러한 난점을 해결하여 간섭무늬를 정량적으로 해석할 수 있게 되었다. 이러한 방법으로는 간섭무늬 차수 매김법(fringe order numbering method),^{(1),(2)} 광혼성법(optical heterodyne method),^{(3),(4)} 고속 푸리에 변환법(FFT method),^{(5),(6)} 위상 변이법(phase shifting method)^(7~20) 등이 있다. 간섭무늬 차수 매김법은 간섭무늬 강도의 최소점과 최대점을 추출한 다음 수학적 보간법을 이용하는 방법으로서, 주변의 불균일한 배경잡음(background noise)이나 스펙클잡음(speckle noise) 등이 상대적으로 큰 경우 정확한 최대, 최소점을 결정하기 어려울 뿐만 아니라 수학적 처리에서 오차가 발생할 수 있는 단점이 있다. 광혼성법은 가장 정확도가 높은 방법이지만 point by point 측정으로 데이터를 연속적으로 검출해야 하고, 측정하는 동안 물체의 변형이 없어야 하므로 가장 이상적인 측정조건을 맞추어야 하는 어려움이 따른다. 푸리에 변환법은 하나의 간섭무늬로 물체 각점에서의 위상을 직접 계산함으로써 정량적으로 정확히 해석할 수 있는 장점이 있으나 계산시간이 다른 방법에 비해 많이 들고 측정하는 조건에 따라 중심 주파수를 결정하는 어려움이 따른다. 위상 변이법은 앞의 방법들과 비교하여 비교적 간단히 실험장치를 구성할 수 있고 기준 거울을

PZT(piezoelectric transducer) 등을 이용하여 이동 시킴으로써 두 개의 간섭광 사이의 위상 차이를 순차적으로 변화시켜 검출기에 기록하고 물체의 각 지점에서 상대 위상차를 직접 얻어 변형을 계산하는 방법이다. 이 방법은 배경잡음이나 스펙클잡음에 영향을 거의 받지 않으면서 고속 정밀하게 측정할 수 있어 광학면 검사,^(7,15,17) 물체의 표면 거칠기^(18~20)나 형상,^(12,15) 변형^(8~10,16) 등을 측정하는 간섭계에 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 실시간 홀로그래피 간섭계(real time holographic interferometry system)를 구성하고 위상변이법과 디지털 영상처리를 이용하여 물체 변형을 실시간으로 자동 측정이 가능하도록 하였다. 한편 광학계 구성과 대상물체의 상태에 따른 오차 요인을 해석하기 위해서 외팔보를 대상물체로 하여 측정된 변형값과 이론값을 비교하였다. 응용 예로써는 터빈 블레이드(turbine blade)에 굽힘력이 가해질때 나타나는 미소변형을 측정하였다.

2. 위상변이법에 의한 간섭무늬 해석

일반적으로 간섭계에 의해 형성된 물체 각 지점에서의 간섭무늬의 세기 분포 $I_i(x,y)$ 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.^(14,15)

$$I_i(x,y) = I_0(x,y) [1 + \gamma \cos(\phi(x,y) + \alpha_i)] \quad (1)$$

여기서 I_0 는 간섭무늬의 배경세기(background intensity)이고 γ 은 무늬의 명암을 나타내는 변조량, α_i 는 i 번째 가해진 위상차, $\phi(x,y)$ 는 우리가 알고자 하는 각 지점에서의 위상으로 물체의 변형에 따라 다르게 측정된다. 여기서 $I_i(x,y)$ 는 실험적으로 측정되는 양이고 α_i 는 임의로 변화시켜 주는 양이다. 식(1)은 $I_i(x,y)$, γ , $\phi(x,y)$ 의 값이 미지수가 되므로 식(1)의 해를 구하기 위해서는 3개 이상의 식을 얻으면 가능하다. 그러므로 측정 물체 각 지점의 상대적인 위상 값을 얻기 위해서는 순차적으로 일정한 위상변화를 가해줌으로써 3개 이상의 간섭무늬 세기 $I_i(x,y)$ 를 얻으면 된다. 오차의 최소화와 효율적인 계산을 위해서 간섭무늬 개수와 관련하여 많은 알고리즘이 개발되어 있으나 보통 $\pi/2$ 씩 위상을 증가시켜 5개의 간섭무늬를 얻는 방법이 많이 쓰여지고 있다.⁽¹⁴⁾ 여기서 식(1)의 α_i 를 0에서 부터 $\pi/2$ 씩 위상을 증가시켜 얻은 간섭무늬의 세기를 각각 $I_1(x,y)$, $I_2(x,y)$, $I_3(x,y)$, $I_4(x,$

y), $I_5(x,y)$ 라 하고 그것을 구하면 식(2)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} I_1(x,y) &= I_0(x,y) [1 + \gamma \cos(\phi(x,y))] \\ I_2(x,y) &= I_0(x,y) [1 + \gamma \cos(\phi(x,y) + \pi/2)] \\ I_3(x,y) &= I_0(x,y) [1 + \gamma \cos(\phi(x,y) + \pi)] \\ I_4(x,y) &= I_0(x,y) [1 + \gamma \cos(\phi(x,y) + 3\pi/2)] \\ I_5(x,y) &= I_0(x,y) [1 + \gamma \cos(\phi(x,y) + 2\pi)] \end{aligned} \quad (2)$$

위의 식을 풀어 위상 $\phi(x,y)$ 를 구하면

$$\begin{aligned} \phi(x,y) &= \tan^{-1} \left(\frac{2\{I_2(x,y) - I_4(x,y)\}}{2I_3(x,y) - I_1(x,y) - I_5(x,y)} \right) \\ -\pi &\leq \phi(x,y) \leq \pi \end{aligned} \quad (3)$$

가 된다.⁽¹²⁾

여기서 구한 위상은 arctan 함수값으로 나타내지므로 $-\pi$ 와 π 사이의 불연속적인 위상 분포를 가지게 된다. 따라서 각 지점 사이의 상대적인 위상차를 나타내기 위해서는 보정 위상을 더하여 연속적인 형태로 나타내야 한다. 이를 위해서는 인근점의 위상차가 π 보다 작을지 점검하여 그 차이가 π 보다 크면 인근 점의 위상차가 π 보다 작도록 2π 의 배수를 빼거나 더해 주어 위상 보정을 한다.^(5,6,22,23)

위상 보정으로 연속적인 위상이 얻어지면 각 점에서의 상대적인 위상을 계산할 수 있으므로 물체의 변위를 구할 수 있다. 여기서 계산된 위상과 변위와의 관계는 식(4)와 같다.⁽¹²⁾

$$D(x,y) = \frac{\phi(x,y) \lambda}{2\pi |2\cos(\theta/2)|} \quad (4)$$

이때 $D(x,y)$ 는 각 점에서의 변위를 나타내며, λ 는 사용한 레이저의 파장이며 θ 는 Fig.2에서 나타내는 바와 같이 빛이 물체에 비추어진 방향과 간섭

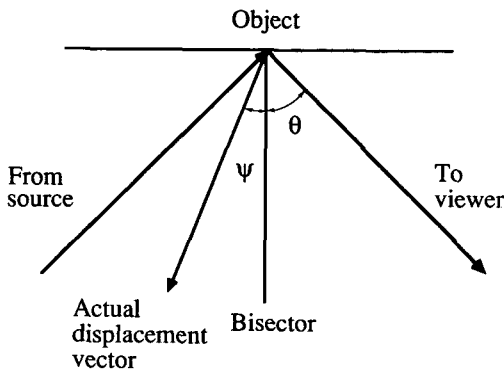


Fig. 2 Object geometry for displacement measurement

무늬 관찰 방향이 이루는 각도이다. 측정된 성분은 광원에서 조사된 방향과 관측자가 보는 방향이 이루는 bisector 방향에 놓이게 되고, 이 bisector는 측정방향을 나타나게 되며 감도벡터(sensitivity vector)로 정의된다. 그리고 이 감도벡터와 실제로 변형이 일어난 방향이 이루는 각도를 ψ 라고 하면 실제 변위의 크기는 $D(x,y)/\cos \psi$ 가 된다.⁽¹²⁾

본 연구에서는 변형이 일어난 방향과 관측 방향을 일치시켜 변위의 한 성분만을 구하였다.

3. 실험장치의 구성

위상 변이법에 의한 실시간 홀로그래피 간섭계의 구성은 Fig. 3와 같으며 홀로그래피 간섭계와 영상 처리 및 데이터 처리부의 3가지 부분으로 나눌 수 있다.

3.1 홀로그래피 간섭계

12 mW 출력의 He-He레이저에서 나오는 빛을 variable beam splitter를 사용하여 기준파와 물체 파를 원하는 비율로 나누었으며 나누어진 빛은 각각 평면파 성분만을 걸러내기 위하여 대물렌즈와 그 초평면(focal plane)에 놓인 pinhole로 구성된 spatial filter로 빛을 퍼뜨렸고 물체파는 다시 원통 렌즈(cylindrical lens)를 통해 원통형으로 퍼지게 하여 외팔보의 크기에 맞게 빛의 모양을 조절하였다. 대상물체인 외팔보에 변형이 일어나기 전의 상태를 필름(8E75HD, Agfa-Gevaert)에 기록하여 현상, 처리한 후 다시 제 자리에 놓고 Fig. 3의 F방향으로 외팔보의 끝단에 힘을 가하였다. 홀로그래피

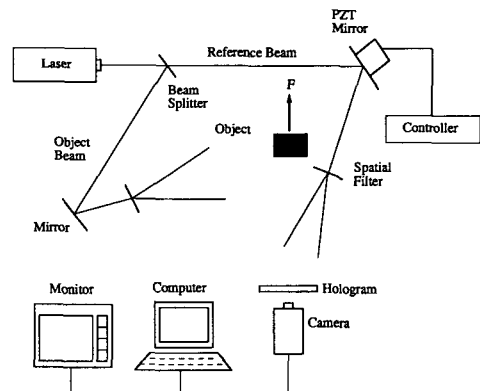


Fig. 3 Schematic diagram of phase shifting holographic interferometry

은 F방향과의 수직이 되게 놓았으며 동일방향에서 실시간으로 간섭무늬를 관측하였다.

기준파와 물체파의 상대적 위상차를 주기 위하여 PZT 구동거울을 기준파의 진행경로에 설치하였다. 사용한 PZT는 독일 Dr.Luts Pickelmann Piezomechanik사의 Piezo-mirror shifters MB-Str이며 PZT의 인가전압량과 이동량 사이의 관계를 알기 위하여 Michelson 간섭계로 교정하였다. 2π 의 위상 변이에 해당되는 한 파장 λ 의 변이를 주기 위해서는 빛이 거울면에서 반사하여 되돌아오므로 PZT는 $\lambda/2$ 만큼 이동시키면 된다. 교정결과 86 V의 전압이 가해졌을 때 2π 의 위상차가 생김을 알 수 있었다. 그러나 실제의 실험 장치에서 PZT 거울의 수직면에 α 의 각도로 빛을 입사하면 전압 V_0 일때 2π 의 위상차가 생긴다고 하면 인가 전압량 V 에 대해서 $V/V_0 * 2\pi / (2\cos\alpha)$ 만큼의 위상변이가 생기므로 본 실험에서는 20° 의 각도로 레이저 빛을 입사하고 인가전압을 46 V로 가해 주어 2π 만큼 위상 이동을 시켜주었다. 순차적인 위상차를 $\pi/2$ 씩 주기 위해서 각 단계별로 11.5 V씩 전압을 증가시켰다.

3.2 영상처리 및 데이터 처리부⁽²¹⁾

홀로그램에서 재생된 간섭무늬의 세기를 검출하기 위하여 512×512 의 분해능을 가지는 Hitachi VM-S7200A CCD카메라를 사용하였다. 이 신호를 컴퓨터에 내장된 Data Translation사의 DT2851 frame grabber board를 이용하여 A/D변환시켜 간섭무늬의 세기에 대한 정보를 계산하였으며 이를 다시 D/A변환시켜 TV 모니터로 영상처리 결과를 관찰하였다. 이 때 레이저 광원에서의 출력변화와 전자회로에서 나올 수 있는 전기적인 잡음의 영향을 없애기 위하여 각 간섭 무늬마다 20개의 frame을 잡아 평균값을 내었다. 그리고 대상물체 표면의 거칠기 때문에 나타난 스펙클 반점에 의한 간섭무늬 세기의 영향을 최소화하기 위하여 Fig.4와 같이 3×3 template를 이용하여 저주파 통과(low pass filtering)를 하였다. 이것은 각각 임의의 값을 가진 9개의 부분으로 나누어진 마스크를 하나의 중심점과 8개의 주변점으로 둘러싸인 영상구역에 곱하여 그 평균값을 그 중심점의 새로운 값으로 정의함으로써 수행한다. 저주파 통과작업은 DT2858 auxiliary frame processor를 이용하였다. 변위는 5개의 간섭무늬 세기 정보로부터 식(2)~(4)를 이

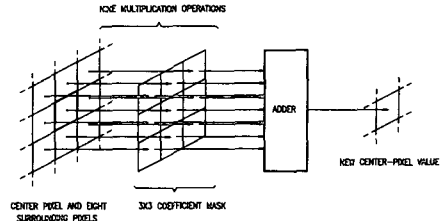


Fig. 4 Simplified convolution for low pass filtering

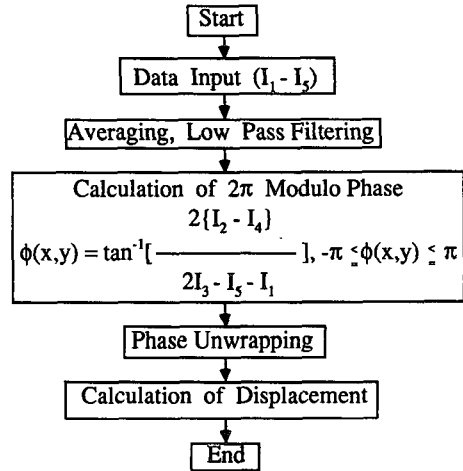


Fig. 5 Flow chart of PSHI

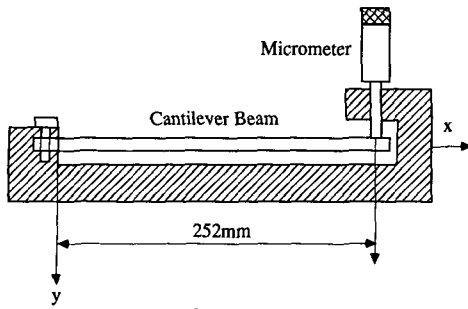
용하여 계산하였다. 식(4)의 θ 값을 20° 로 하였다. 컴퓨터는 데이터의 빠른 처리를 위하여 80387 coprocessor가 부착된 compaq 80386을 이용하였다.

본 논문에서 수행한 phase shifting holographic interferometry (PSHI)의 과정을 전체적으로 요약한 흐름도를 Fig. 5에 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 위상 및 변위의 계산

외팔보는 Fig.6에서와 같이 길이 252 mm이며 끝단에서 마이크로미터를 이용하여 $5 \mu\text{m}$ 의 변위를 주었으며 데이터 처리는 CCD카메라로 촬영 가능한 230 mm까지 하였다. 실험의 재현성에 따르는 오차요인을 줄이기 위하여 6회 반복 실험하여 외팔보 수직 중심선의 변위의 평균값과 오차의 rms값을 계산하였다. 계산된 오차의 rms값은 PZT만에 의한 값과 거기에다 다른 실험오차를 더한 값을 구하였다. Fig.7은 2π modulo를 가진 불연속적인 위



$$y = \frac{\delta x^2}{2L^3} (3L - x)$$

y : deflection at x
 δ : deflection at end of cantilever (applied by micrometer)
 L : length of cantilever beam (252mm)

Fig. 6 Schematic diagram of cantilever beam

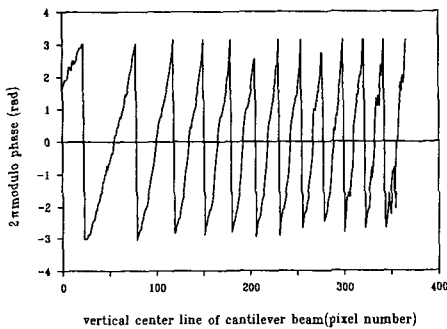


Fig. 7 2π modulo phase distribution of vertical center line of cantilever

상 분포를 나타낸다. 최대점과 최소점 사이의 국부적인 jiggling은 특히 외팔보의 양 끝단에서 많이 일어나는데 이는 중심부보다 광의 세기가 상대적으로 작기 때문에 따른 스펙클잡음이 잔류되어있고 간섭무늬의 밀도가 높기 때문에 영상처리부에서의 진동에 민감하게 반응하는 것이 원인이라고 생각된다.

Fig.8은 2π modulo를 가지는 불연속적인 위상을 위상보정을 하여 연속적인 위상으로 바꾼 다음 식(4)로부터 변위를 계산하고 curve fitting 한 것이다. 이론식(5)와 비교하여 2.5% 이내로 잘 일치하였다. 식(5)에서 x는 변위지점, y는 x에서의 변위량, δ는 외팔보 끝점에서 마이크로미터로 가한 변위량, L은 외팔보의 길이를 나타낸다.

$$y = \frac{\delta x^2}{2L^3} (3L - x) \quad (5)$$

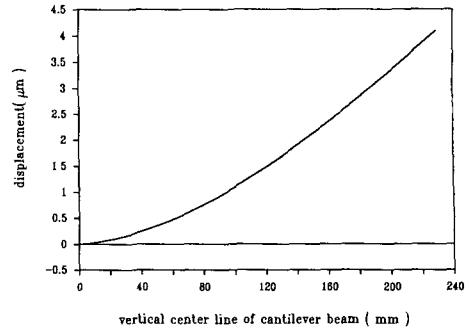


Fig. 8 Deflection curve of vertical center line of cantilever

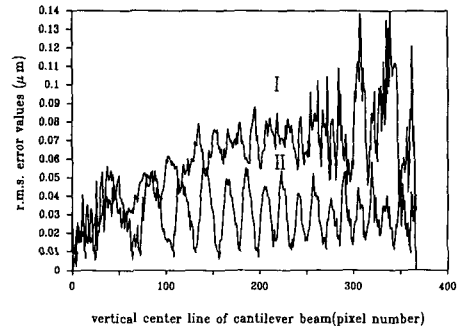


Fig. 9 R.M.S. error values by PZT moving and other errors
 I : PZT moving + other errors,
 II : PZT moving

4.2 오차해석

본 연구에서 응용된 홀로그래피 광학계와 영상처리 방법을 이용한 외팔보의 변형 측정에서 나타나는 주요 오차는 우연오차(random error)와 계통오차(systematic error)로 구분하여 해석하였다. 우연오차는 PZT 구동에 의한 오차가 대부분으로 본 연구에서는 마이켈슨 간섭법으로 반복 교정을 실시하여 구동에 따르는 오차범위를 측정하였다. 측정 결과 한 파장 이동시킬 때 0.5%의 비선형성과 0.3 V의 편차(drift)가 오차요인으로 나타남을 확인하였다. 이것은 위상 계산에서 +1.3°의 영향을 미치게 된다. 식(3)에서 구한 위상 φ(x,y)와 실제의 위상 φ(x,y)와의 차이 Δφ는 J.Schwider et al. 이 규명한 대로 sin 2φ(x,y)와 cos 2φ(x,y)에 의존한다.⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾ 즉 오차의 공간 주파수가 간섭 무늬의 공간 주파수의 2배인 정현파(sinusoidal wave)를 나

타내게 된다. 본 실험에서는 PZT의 구동에 의한 오차의 rms 값이 0.2~1%사이임을 확인하였다.

Fig.9는 각 pixel에서 계산된 오차의 rms 값으로, I은 PZT 구동과 다른 오차가 종합된 오차의 rms값을, II는 PZT의 구동만에 의한 오차의 rms값을 나타내 주고 있다. II는 PZT구동에서 나타나는 오차를 알기 위하여 변위를 한번씩된 뒤 PZT만을 구동시켜 위상 계산을 5번 반복하여 얻은 오차의 rms값이고, I은 변위를 5번시켜 각각의 위상을 계산하여 얻은 오차의 rms값이 더해진 것으로 판단된다. 간섭무늬 간격이 좁게 나타나는 외팔보 윗부분은 오차요인이 크기 때문에 오차의 rms값이 최대 $0.14 \mu\text{m}$ 정도의 값으로 계산되었다.

Fig.10은 이론값과 실험에서 측정된 값의 차이를 나타낸다. 이러한 계통 오차의 요인은 광학계 구성중에 발생하는 것과 대상물체(외팔보)가 가지고 있는 오차이다. 광학계 구성에 따르는 오차는 다른 오차에 비해 무시할 수 있으나 대상체의 변형이 이론식과 차이가 있는 것은 외팔보를 실험적으로 재현시키기 어렵기 때문이다. 가능한 한쪽으로 고정시키기 위하여 볼트로 고정시키며 경계조건을 만들

었으나 완벽한 고정이라고 하기 어려우며, 마이크로미터로 변위를 발생시킬 때 약 1%의 오차가 발생할 가능성이 있다. 그 밖에 입사광이 구면파이기 때문에 생기는 오차, 데이터를 pixel단위로 디지털 화시킬 때 비롯되는 sampling 오차 등이 있으나 위에서 언급한 오차에 비해서 매우 작기 때문에 여기서는 다루지 않았다. 그러므로 위와 같은 장치구성에서 4.5%이내의 오차를 가지고 사용할 수 있음을 알 수 있었으며, 만약에 PZT의 동작이나 대상물체의 상태를 개선하면 1% 이내로 더욱 오차의

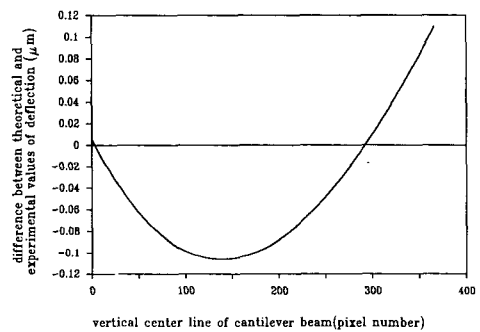


Fig. 10 Difference between theoretical and experimental value of deflection

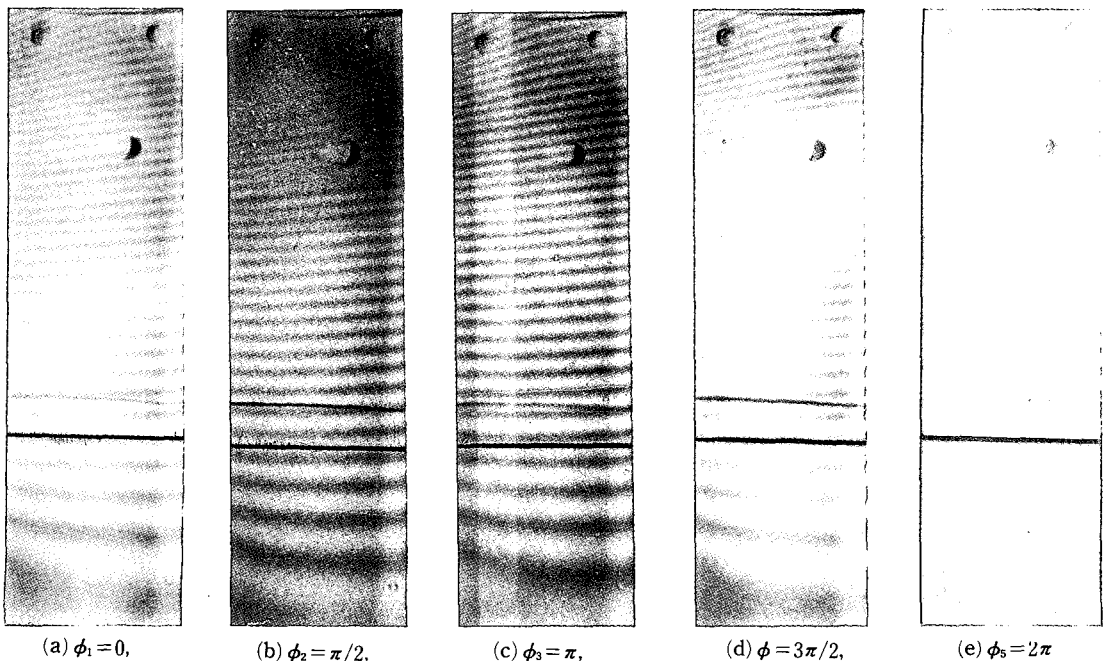


Fig. 11 Fringe patterns of turbine blade under bending force of 1N

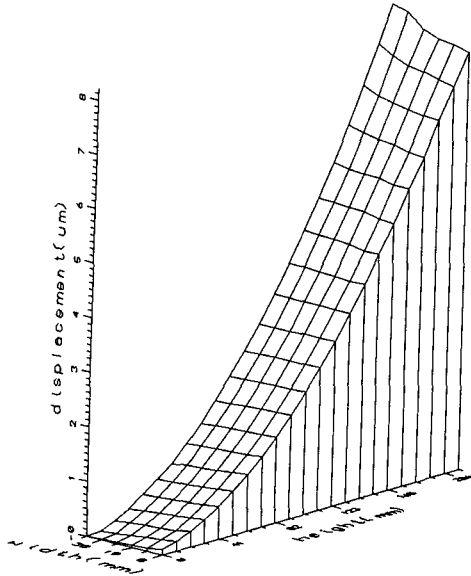


Fig. 12 3-dimensional plotting of the deformation of turbineblade

영역을 줄일 수 있었을 것이다. 이와 같은 오차 해석은 PZT를 이용한 홀로그래피 간섭무늬의 정량적 해석과 자동화에 유용하게 사용될 것이다.

본 연구에서는 이상과 같이 논의한 위상변이법을 터빈블레이드의 변형측정에 적용하여 보았다. 터빈블레이드의 한 끝단에 1N의 굽힘력을 주었으며 나머지 조건은 외팔보의 경우와 동일하게 하였다. 수직 중심선의 변형을 계산한 결과 힘이 가해진 부분에서 $7\mu\text{m}$ 정도의 변위량이 얻어졌다. Fig.11은 터빈블레이드에 굽힘력을 가한 상태에서 위상변이에 따른 터빈블레이드의 간섭무늬 변화를 실시간으로 관측한 결과이다. (a)~(e)는 위상차 ϕ_i ($i=1\sim 5$)를 각각 $0, \pi/2, \pi, 3/2, 2\pi$ 씩 주었을 때의 간섭무늬 형태이며 위상차에 의한 간섭무늬 이동을 쉽게 볼 수 있도록 터빈블레이드에 임의의 기준선을 표시하였다. Fig.11의 (a)와(e)를 비교하여 보면 2π 의 위상차에 대하여 간섭무늬 한 차수가 이동되었음을 알 수 있었으며 이것은 식(2)와 잘 일치한다. Fig.12는 터빈블레이드의 변형량을 3차원 plotting 한 것으로 Fig.11의 사진에서 나타난 간섭무늬의 경향과 잘 일치됨을 알 수 있다.

5. 결 론

실시간 홀로그래피 간섭계에 위상변이법을 적용

하여 간섭무늬를 정량적으로 해석하였다. 특히 홀로그래피 간섭무늬를 영상처리장치로 기록하고 컴퓨터로 데이터를 처리하여 간섭무늬의 해석 자동화가 가능하도록 하였다. PZT가 부착된 거울을 이동시킴으로써 $\pi/2$ 씩 위상변화, 즉 간섭무늬의 세기분포를 변화시켜 물체 각 점에서 5개의 간섭무늬 세기정보를 얻었다. 여기에서 얻어진 물체 각 점에서의 위상변이로부터 변위를 계산하였다.

본 연구에서 구성한 변형측정방법을 평가하고 오차요인을 분석하기 위해서 외팔보에 변형을 주어 측정된 후 이론식과 비교하였다. 비교분석한 결과 약 4.5%의 오차를 갖고 사용할 수 있는 측정방법임을 확인하였다. 터빈블레이드의 한쪽 끝단에 1N의 굽힘력을 가해서 발생하는 변형을 본 연구에서 개발한 방법으로 측정된 결과 최대변위가 약 $7\mu\text{m}$ 였다. 앞으로 홀로그래피 간섭장치에 고정밀 PZT 구동장치와 고감도 CCD 카메라를 사용하고 속도가 빠른 컴퓨터를 이용한다면 오차의 요인을 줄이고 빠른 속도로 변형측정이 가능하게 될 것이다.

참고문헌

- (1) Rimmer, M.P., et al., 1972, "Computer Program for the Analysis of Interferometric Test Data," Appl. Opt. 11, pp.2790~2796.
- (2) Funnell, W.R.J., 1981, "Image Processing Applied to the Interactive Analysis of Interferometric Fringes," Appl. Opt. 20, pp. 3245~3250.
- (3) Dandliker, R., et al., 1982, "Fringe Interpolation by Two-Reference-Beam Holographic Interferometry: Reducing Sensitivity to Hologram Misalignment," Opt. Commun. 42, 301~303.
- (4) Dandliker, R., et al., 1985, "Heterodyne and Quasi-Heterodyne Holographic Interferometry," Opt. Eng. 24, pp.824~831.
- (5) Takeda, M., et al., 1982, "Fourier-Transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry," J.Opt. Soc. Am. 72, pp.156~160.
- (6) Kreis, Thomas., 1986, "Digital Holographic Interference-Phase Measurement Using the Fourier-Transform Method," J. Opt. Soc. Am. A.

- 6, pp.847~855.
- (7) Bruning, J.H., et al., 1974, "Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surface and Lenses," *Appl. Opt.*13, pp. 2693~2703.
- (8) Hariharan, P., et al., 1982, "A Digital Phase-Measurement System for Real Time Holographic Interferometry," *Opt. Comm.* 41, pp.393~396.
- (9) Hariharan, P., et al., 1982, "Real-Time Holographic Interferometry: a Microcomputer System for the Measurement of Vector Displacement," *Appl. Opt.* 22, pp.876~880.
- (10) Chang, M., et al., 1985, "Phase Shifting Holographic Interferometry (PSHI)," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 599, pp. 149~154.
- (11) Breuckmann, B., et al., 1985, "Computer-Aided Analysis of Holographic Interferograms Using the Phase-Shift Method," *Appl. Opt.* 24, pp.2145~2149.
- (12) Creath, K., 1989, "Holographic Contour and Deformation Measurement Using a 1.4 Million Element Detector Array," *Appl. Opt.* 28, pp. 2170~2175.
- (13) Lanen, T.A.W.M., et al, 1990, "Phase-Stepping Holographic Interferometry in Studing Transparent Density Fields around 2-D Objects of Arbitrary Shape," *Opt. Comm.* 76, pp. 268~275.
- (14) Creath, K., 1986, "Comparison of Phase-Measurement Algorithms," *Proc. Soc. Photo-Optic. Instrum. Eng.* 680, pp.19~28.
- (15) Creath, K., "Phase-Measuring Holographic Technique Measures Object Deformations in Real Time", *Lase Focus*, April, 1988, pp. 128~140.
- (16) Prettyjolms, K.N., 1984, "Charge-Coupled Device Image Acquisition for Digital Phase Measurement Interferometry," *Opt. Eng.*23, pp. 371~378.
- (17) Elssner, K.N., et al., 1989, "Absolute Sphrecity Measurement," *Appl. Opt.* 28, pp. 4649~4661.
- (18) Bhushan, B., et al., 1985, "Measurement of Surface Topography of Magnetic Tapes by Mirau Interferometry," *Appl. Opt.*24, pp. 1489~1497.
- (19) Creath, K., 1987, "Step Height Measure-Phase using a PC-Board Frame Grabber and Phase Stepping Technique," *Appl. Opt.*29, pp. 237~241.
- (22) Ghiglia, D.C., et al., 1987, "Cellular-Automata Method for Phase Unwrapping," *J. Opt. Soc.Am.* 4., pp.267~280.
- (23) Huntely, J.M., 1989, "Noise-Immune Phase Unwrapping Algorithm," *Appl. Opt.* 28, pp. 3268~3270.
- (24) Schwider, J., et al., 1983, "Digital Wave-Front Measuring Interferometry:Some Systematic Error Sources," *Appl. Opt.* 22, pp. 3421-3432.
- (25) Schwider, J., 1989, "Phase Shifting Interferometry:Reference Phase Error Reduction," *Appl. Opt.* 28, pp.3889~3892.
- ment Using Two-Wavelength Phase-Shifting Interferometry," *App. Opt.* 26, pp.2810~2816.
- (20) Creath, K., et al., 1990, "Absolute Measurement of Surface Roughness," *Appl. Opt.* 28, pp 3823~3827.
- (21) Rosvold, G.O., 1990, "Fast Measurement of