

광학적 비접촉 측정에 의한 구조물 해석의 화상처리 계측 시스템 개발에 관한 연구

장순석*, 김경석**, 홍진후***, 최지은****, 강기수****, 김달우*****

A Study on the Development of Image Processing Measurement System for Structural Analysis by Optical Non-contact Measurement

Soon Suck Jang*, Koug Suk Kim**, Jin Who Hong***, Ji Eun Choi****, Ki Soo Kang****, Dal Woo Kim*****

ABSTRACT

This study discusses a non-contact optical technique, electronic speckle pattern interferometry(ESPI), that is well suited for a deformation measurement of structure. Phase shifting method and unwrapping method have used to make deformation quantitative widely. In this paper, a previous numerical formula for phase shifting method is reconstructed in addition to least square fitting method to improve sensitivity and phase unwrapping based on vertical-horizontal scanning method is applied to analyze in-plane and out-of-plane deformation quantitatively.

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI), Phase Shifting Method(위상이동기법), Phase Unwrapping(위상결편침), Least Square Fitting Method(최소자승법),

1. 서론

ESPI는 레이저를 확산하여 측정 대상체 전체를 동시에 측정할 수 있으며, 빛의 파장영역만큼의 나노단위 정밀도의 고 분해능을 가진다. 또한, 기존의 접촉식 기법의 한계인 대상 체의 표면처리, Gauge의 접촉 등의 선처리가 필요하지 않는다는 장점을 가지고, 물체의 진동이나 변형 상태에 관한 정보를 간편하고도 빠르게 비접촉으로 얻을 수 있다. ESPI는 Holography 기법에서 Hologram을 CCD camera로 대체하여 노광, 현상, 재위치 등의 번거로운 작업 없이 스펙클(Speckle) 간섭현상을 이용하여 변위

를 정량화할 수 있다. 정량화 과정은 컴퓨터의 발전과 함께 많은 진보가 있었으며, 많은 연구가 진행되고 있다. 초기의 변위정량화를 위한 화상처리 기법은 물체의 변형전후의 상태만을 기록하고, 처리함으로써 많은 부분에서 물체의 변형에 대한 위상 정보를 잃거나, CCD camera 분해능의 문제로 정밀한 계측이 어려웠다. 등간격의 간섭무늬(Fringe pattern)에 대해서는 보간법등을 이용해 해결을 하였으나, 비등간격의 간섭무늬에 대해서는 복잡한 처리과정으로 비효율적이었다.¹⁾

2001년 3월 13일 접수

* 조선대학교 전기 제어계측공학부 ** 조선대학교 기계공학부

*** 조선대학교 고분자화학공학과 **** 조선대학교 대학원

***** 포항산업과학연구원

이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 위상이동 기법²⁾은 레이저의 위상을 변화시켜 얻은 각 이미지를 처리함으로써 물체의 변형에 따른 위상정보를 보다 정확하게 획득할 수 있고 변위 정량화가 가능하였다. 변위 정량화 과정은 위상이동으로부터 얻은 이미지들을 적절한 수식적 조합을 통하여 위상지도(Phase map)를 형성하고, 이 위상지도에서 위상 급변점을 추출하여 전체적으로 위상보정을 하는 단계인 결렬침기법(Unwrapping)을 적용하여 최종의 변위정보를 추출하게 된다.^{3,4)} 본 논문에서는 분해능 개선을 위해 기존의 위상이동 기법에 최소자승 기법을 조합한 변형된 위상이동 기법을 제시하였으며, 적용실험을 통하여 개선된 위상지도를 형성하였다. 결렬침기법에서는 $2n\pi$ 의 연속적인 분포로 이루어진 ESPI Fringe pattern에서 각 위상값이 정확한 차수로 계산 될 수 있고, 빠르게 위상보정을 할 수 있도록 수평과 수직으로 동시에 위상 값을 검사하여 각 줄무늬의 차수를 정확하게 인식하고 각 위상값을 보정함으로써 분해능 개선을 하였다.

2. 이론

2.1 ESPI

ESPI는 가장 널리 알려진 Holography 기법과 같은 맥락에서 이해할 수 있다. 즉, Fig. 1에서와 같이 참조광(Reference beam)과 물체광(Object beam)의 간섭현상을 이용하여 변형 전과 변형후의 이미지를 Hologram에 저장하고, 처리하여 이를 재생(Reconstruction)함으로써 변형정보를 얻을 수 있다.

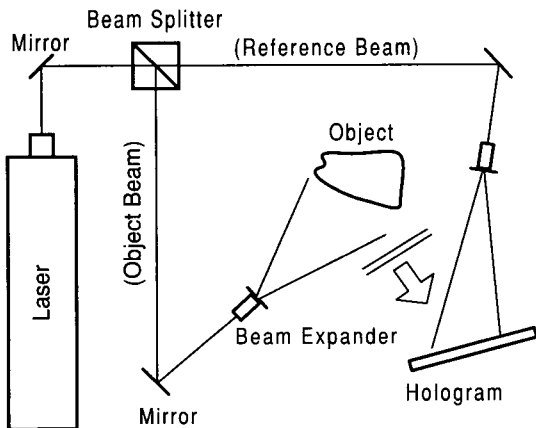


Fig. 1 Holographic interferometer

ESPI에서는 Fig. 2에서와 같이 Hologram을 대신하여 CCD camera와 광합성광학기기(Beam combiner)를 이용하여 각 이미지의 위상정보를 레이저의 간섭성질에 의해 일어나는 물체표면의 Speckle의 강도분포로 컴퓨터에 저장하고, 화상처리장치를 통하여 두 이미지를 감산(Subtraction) 또는 더하기(Addition)처리를 함으로써 Fringe Pattern을 형성하게 된다. 즉, 두장의 스페클 패턴 변형 전후 $I_{bef}(x, y)$ 와 $I_{aft}(x, y)$ 는 CCD에 수광된 빛의 강도분포를 나타내며, 이들의 차를 구함으로써 관찰 대상의 변화된 정도가 가시화 된다. 만일 CCD 카메라의 수광소자에 입력되는 변형전후의 신호인 $V_{bef}(x, y)$ 와 $V_{aft}(x, y)$ 가 이미지의 강도 분포에 비례한다면 감산된 신호 $V_S(x, y)$ 는 다음과 같다⁵⁾.

$$V_S(x, y) = V_{bef}(x, y) - V_{aft}(x, y) \\ = 4\sqrt{I_{bef}I_{aft}} \sin\left(\phi(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y)}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi(x, y)}{2}\right) \quad (1)$$

여기에서 $\phi(x, y)$: 초기위상,

$\Delta\phi(x, y)$: 물체의 변형에 따른 위상차

이 값을 모니터 상에 출력하면 물체의 변형된 정도를 관측할 수 있는데 모니터 상에서 음의 출력 신호는 검은색으로 출력되기 때문에 신호의 손실을 피하기 위해 모니터로 출력하기 전에 절대값을 취해 V_S 값을 정류시킨다. 따라서 모니터 한 점에서의 밝기 $B(x, y)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

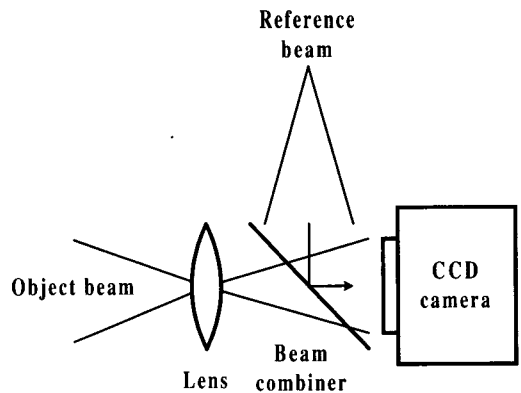


Fig. 2 Combination of reference with object beam

$$B(x, y) = |V_S(x, y)|$$

$$= K \left| \sqrt{I_{be} I_{aft}} \sin \left(\phi(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y)}{2} \right) \sin \left(\frac{\Delta\phi(x, y)}{2} \right) \right| \quad (2)$$

여기에서 K : 모니터 상수

즉, 변형전후의 2장의 이미지를 처리하여 Fringe pattern을 얻을 경우 줄무늬는 사인함수의 특성을 따르며, 이러한 특성은 정확한 위상급변점을 찾기를 어려우며, 일부구간에서는 정확히 보정된 위상값을 갖지 못한다.

2.2 최소자승 위상이동기법

위상이동기법은 ESPI 뿐만 아니라 Holography, Moire 등 비접촉 측정분야에서 다양하게 응용되고 있다. ESPI에서는 위상이동기법을 적용하기 위해 참조광의 광로상에 거울이 장착된 Piezoelectric transducer을 삽입하여 인위적으로 레이저의 위상을 $\pi/2$ 씩 변화하면서 변형 전에 2장의 이미지 $I_1(x, y)$ 와 $I_2(x, y)$ 를 획득하고, 변형 후 2장의 이미지 $I_3(x, y)$, $I_4(x, y)$ 를 획득하여 식(3)과 같이 처리함으로써 위상지도를 형성할 수 있다. 다양한 위상이동기법들이 제시되고 있으며, 본 논문에서 4단계 위상이동기법을 사용하였다.

$$\Delta\phi(x, y) = 2 \tan^{-1} \left(\frac{I_2(x, y) - I_3(x, y)}{I_1(x, y) - I_4(x, y)} \right) \quad (3)$$

$$I_1 = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos \phi(x, y)$$

$$I_2 = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos \left\{ \phi(x, y) + \frac{\pi}{2} \right\}$$

$$= \alpha(x, y) - \beta(x, y) \sin \phi(x, y)$$

$$I_3 = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos \left\{ \phi(x, y) + \frac{\pi}{2} + \Delta\phi(x, y) \right\}$$

$$= \alpha(x, y) - \beta(x, y) \sin \{ \phi(x, y) + \Delta\phi(x, y) \}$$

$$I_4 = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos \{ \phi(x, y) + \pi + \Delta\phi(x, y) \}$$

$$= \alpha(x, y) - \beta(x, y) \cos \{ \phi(x, y) + \Delta\phi(x, y) \}$$

식(3)의 결과에서 위상의 분포가 Arc tangent 함수로 표현이 되어 위상의 급변점이 정확히 나타나 Finge pattern의 차수를 정확히 셀 수가 있으며, 비교적 정확한 위상값을 갖게된다. 그러나, 실제 적용 실험에서는 외란 등의 문제로 잡음이 많으며, 이는

위상값 또는 정확한 차수를 계산하는데 오차의 원인으로 나타난다. 따라서, 본 논문에서는 위상이동기법에 최소자승법을 적용하여 최적 위상을 추정하여 노이즈를 감소함으로써 정확한 위상값과 차수를 계산하도록 하여 분해능을 개선한다. 식(3)에서 변형에 따른 위상분포를 분모와 분자의 강도의 세기차로 각각 나타내면 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta\phi(x, y) = 2 \tan^{-1} \left(\frac{Y(x, y)}{X(x, y)} \right) \quad (4)$$

$$X(x, y) = I_1(x, y) - I_4(x, y)$$

$$= \cos \left(\phi(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y)}{2} \right) \cos \left(\frac{\Delta\phi(x, y)}{2} \right)$$

$$Y(x, y) = I_2(x, y) - I_3(x, y)$$

$$= \cos \left(\phi(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y)}{2} \right) \sin \left(\frac{\Delta\phi(x, y)}{2} \right)$$

위상값 $\Delta\phi(x, y)$ 를 Fig. 3에서와 같이 한 화소의 주위로 일정 거리까지 표본을 추출하여 $X(x, y)$, $Y(x, y)$ 평면상에 각도 개념으로 나타내면 노이즈가 없을 경우 일직선상에 놓여야 하나, 옆고자하는 위상근처에서 무작위 노이즈를 갖는 분포로 나타나게 된다. 여기에 최소자승기법을 적용하여 위상을 구하는 방법이다. 즉, 최소자승위상 추정법은 추정 윈도우 상의 세기차이 $X(x, y)$, $Y(x, y)$ 분포로부터 위상값을 예측할 수 있다.

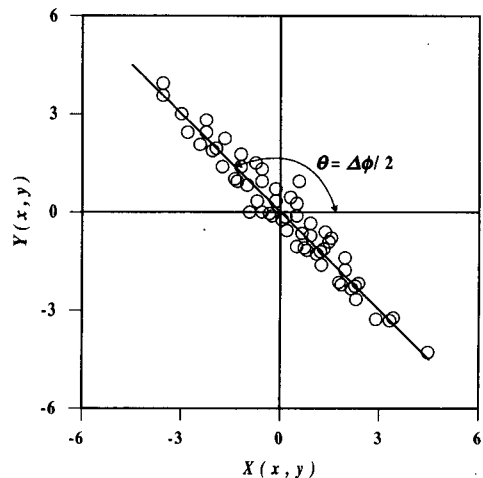


Fig. 3 Phase distribution on $X-Y$ plane

추정윈도우 내의 픽셀들의 모든 변위 위상들은 일정하다고 가정하여 데이터 분포로부터 한 직선을 추정하고, 그 직선과 데이터들과의 거리의 제곱의 합을 최소화한다. 따라서 추정된 직선의 기울기 각의 두배가 추정 윈도우의 중심 픽셀의 변위 위상으로 지정되어 질 수 있다. 임의의 데이터로부터 직선까지의 거리 $d(x, y)$ 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d(x, y) = (\cos \theta, \sin \theta) \cdot (X(x, y), Y(x, y)) \quad (5)$$

여기서, θ 는 직선의 기울기 각이다.

이 추정법은 데이터를 나타내는 점들로부터 직선까지의 거리의 합을 나타내는 함수 $F(\theta)$ 를 최소화하는 각을 찾기 위한 방법으로 식(6)를 미분하여 식(7)과 같이 최소각을 찾을 수가 있다.

$$F(\theta) = \sum_{x,y} (X(x, y)\cos\theta + Y(x, y)\sin\theta)^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{F(\theta)}{\partial\theta} &= \sum_{x,y} (Y(x, y)^2 - X(x, y)^2 \sin 2\theta \\ &\quad + 2X(x, y)Y(x, y) \cos 2\theta) \\ &= 0 \\ 2\theta &= \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{x,y} (2X(x, y)Y(x, y))}{\sum_{x,y} (X(x, y)^2 - Y(x, y)^2)} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

라인의 경사도는 변형된 위상의 두배를 나타내므로 최소자승위상 추정법에 의한 위상값 $\Delta\phi_{LS}(x, y)$ 는

$$\Delta\phi_{LS}(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{2 \sum_{x,y} (X(x, y)Y(x, y))}{\sum_{x,y} (X(x, y)^2 - Y(x, y)^2)} \right) \quad (8)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 이러한 방법은 고전적인 영상처리에서 합성(Convolution)에 해당되는데 차이점은 합성은 전달함수에 의해 새로운 값이 결정되어지는 반면에 이 방법은 얻고자하는 위상값과 밀접한 관계가 있는 주변 픽셀 값에 의해 새로운 값이 결정이 되어진다. 여기에서 추정 윈도우의 사이즈는 가변될 수 있다. 윈도우의 사이즈가 커질수록 노이즈의 감소하는 반비례 관계를 가지고 있으나, 계산시간이 많이 소요되고 원정보를 오히려 손실할 우려가 있다.

2.3 결렬침 기법

식 (8)으로부터 구하여진 위상은 Arc tangent의 형태로 나타나게 되며, $2n\pi$ 에서 톱니 형태(Saw tooth or wrapped image)로 불연속성을 갖게 된다. 따라서, 대상체의 모든 점에서 정확한 위상정보를 얻기 위해서는 이 불연속 부를 연결하여 2π 이상의 위상점에 대해서는 적절한 위상보정을 해주어야 하며, 이 위상보정과정을 결렬침(Unwrapping)이라 한다. 최소자승법에 의한 프린지 패턴 또는 위상지도(Phase map)에서도 위상보정방법은 같으며 Fig. 4와 같은 알고리즘을 이용하여 수행하였다. 여기에서 C : 위상급변점 판별 문턱값, $\Delta\phi_{PC}$: 보정된 위상이다. Fringe에서 차수의 결정은 매우 중요한 인자이며, 정확한 차수를 결정하기 위해서 본 논문에서는 수직과 수평의 2차원으로 정보를 Scanning하고, 각 정보를 비교하여 각 차수의 위치를 재결정하여 줌으로서, 원형 Fringe 등에서 발생할 수 있는 차수의 중복 연산, 차수의 오인 등의 문제를 해결하였다.

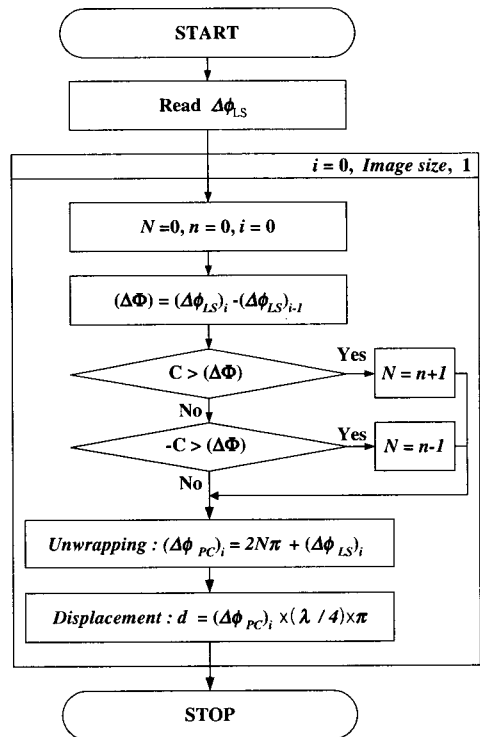


Fig. 4 Flowchart of unwrapping algorithm

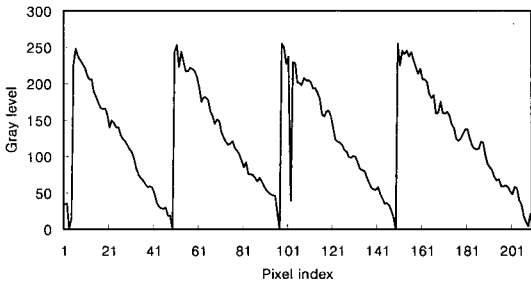
3. 적용실험

3.1 최소자승법 적용 결과

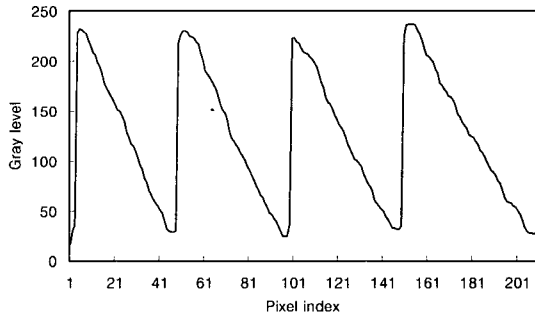
기존의 위상이동기법과 결과비교를 위해서 획득된 위상지도에서 강도 분포를 Gray level로 표시된 프로파일(Profile)을 그려서 확인하였다. Fig. 5(a)은 기존 위상이동기법을 적용하여 얻은 프로파일을 나타내었으며 Fig. 5(b)는 최소자승법을 적용한 결과로서 많은 부분에서 노이즈를 감소하였다. 결과 해석에서는 위상급변점의 오인으로 사용된 레이저의 한 파장 정도의 오차를 포함하게 된다. 추정 윈도우의 크기는 5×5를 사용하였으며, 3×3의 윈도우와 비교하여서는 결과값에 거의 영향이 없었으며, 연산속도만이 의존을 하게 된다.

3.2 면내변위 정량화

본 논문에서는 해석이 간단한 일반평판에 대하여 면내와 면외 변형실험을 행하여 얻은 간섭무늬에 알고리즘을 적용하여 변위 정량화를 하였다.



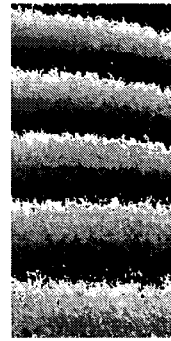
(a) General phase-shifting method



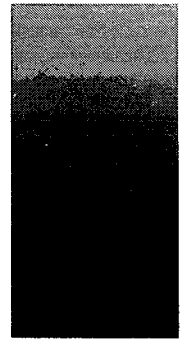
(b) Least Square phase-shifting method

Fig. 5 Comparison of two methods

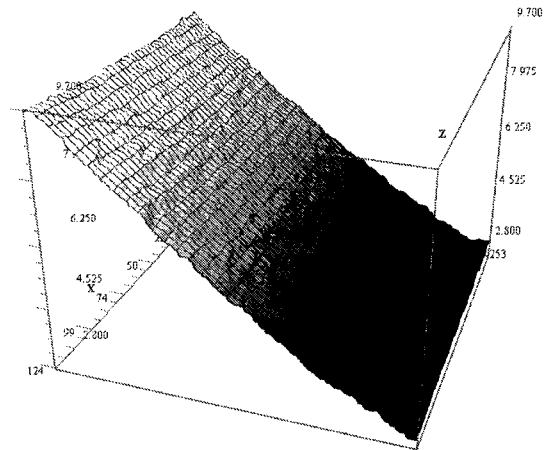
먼저 면내변위 정량화를 위해 시험편은 두께 0.8 mm, 50 × 100 mm² 일반압연강판을 사용하였으며, 경계 조건을 상하부 양단고정으로 하고, 인장하중을 가하였다. 최소자승위상추정법을 적용하여 얻어진 간섭무늬패턴을 Fig. 6(a)에 나타내었다. 얻어진 간섭무늬는 외란에 의해 잡음을 갖게되고 위상의 급변점에서 주로 나타나게된다. 이 노이즈는 부정확한 줄무늬 차수를 세게 할 수 있으며, 본 논문에서는 이를 제거하기 위해 Median 필터와 Smoothing 필터를 사용하였다. 간섭무늬로부터 변위 정량화를 위해서 개발된 결렬침 알고리즘을 적용하여 각 줄무늬의 차수에 대한 위상이 보정된 Fig. 6(b)의 결과를 얻었으며, 이 결과를 3차원 그래프(9.70 μm)로 Fig. 6(c)에 나타내었다.



(a) Phase map



(b) Unwrapped image

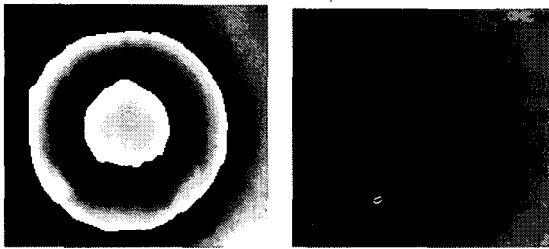


(c) 3D-distribution

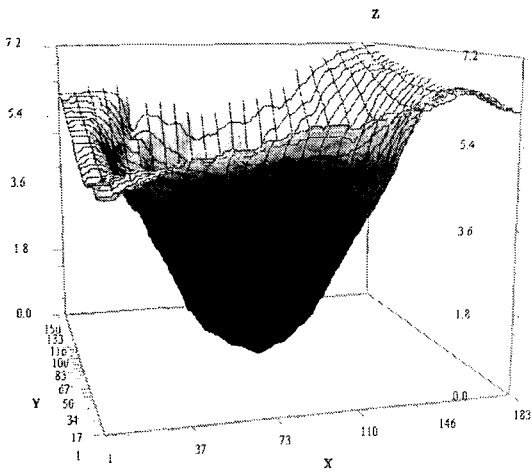
Fig. 6 In-plane displacement measurement

3.3 면외변위 계측실험

Fig. 7은 면내변위 계측실험과 같은 실험조건으로 평판의 후면에서 마이크로미터(Micrometer)을 이용하여 면외 방향으로 강제 변위를 주고, 전면에서 면외 변위 ESPI 시스템을 구성하여 측정된 결과이다. Fig. 7(a)는 최소자승위상 추정법을 적용하여 얻어진 간섭무늬에 필터링을 하여, 얻어진 결과이며, 이를 2차원 Scanning으로 픽셀정보를 재조정하여 결편침 기법을 적용한 결과를 Fig. 7(b)에 나타내었다. Fig. 7(c)는 변위를 3차원 그래프로 표현한 결과로서 마이크로미터에 의해 $7\ \mu\text{m}$ 변위를 가하여 개발된 시스템을 이용하여 $7.2\ \mu\text{m}$ 의 변위 정보를 얻었으며, 계측 결과로부터 $0.0286\ \mu\text{m}/\mu\text{m}$ 의 오차를 보이고 있다. 따라서, ESPI 시스템의 측정 감도를 $5\sim 100\ \mu\text{m}$ 로 하였을 경우⁶⁾, 최대 $2.86\ \mu\text{m}$ 의 오차를 가지게 된다.



(a) Phase map (b) Unwrapped image



(c) 3D-distribution

Fig. 7 Out-of-plane displacement measurement

4. 결론

본 논문에서는 비접촉, 전면(Whole-field) 검사기법으로 최근 각광받는 ESPI의 정밀도 향상을 위해 기존의 위상이동 기법에 최소자승기법을 도입하여 노이즈를 감소하였으며, 변위의 정량화를 위해 2차원으로 결과를 Scanning하는 결편침 알고리즘을 개발하여 적용하였다. 적용실험으로 인장하중에 의해 발생하는 면내 변위 계측을 하였으며, 마이크로미터에 의해 일어나는 면외변위 방향의 변위를 계측하였다. 실험 결과는 파장이 $514.5\ \text{nm}$ 인 Ar^+ 레이저를 사용하여 $0.0286\ \mu\text{m}/\mu\text{m}$ 의 정밀도를 가지고 측정이 되었으며, 보다 짧은 파장의 레이저를 사용할 경우 정밀도는 더욱 높으리라 사료된다.

후기

본 과제는 학술진흥재단 자유공모과제(No. 1998-001-E01212)의 지원을 받아 연구되었습니다.

참고문헌

1. P. Hariharan, "Optical Holography principles, techniques, and applications 2nd Edition," Cambridge University Press, 1996.
2. Kjell J. Gasviki, "Optical Metrology, 2nd Edition," John Wiley & Sons Ltd, 1995.
3. P. Andra, U. Mieth and W. Osten, "Strategies for unwrapping noisy interferograms in phase-sampling interferometry," Proc. SPIE, Vol. 1508, pp. 50~60, 1991.
4. P. G. Charette and I. W. Hunter, "Robust phase-unwrapping method for phase images with high noise content," Appl. Opt., Vol. 35, No. 29, pp. 3506~3513, 1996.
5. Gray L. Cloud, "OPTICAL METHODS OF ENGINEERING ANALYSIS," Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, 1999.
6. R. Jones and C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry," Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, 1983.