한국정밀공학회지 제16권 제10호 (1999년 10월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 16, No. 10, October 1999.

위상이동법과 시간평균법의 면내변위 측정 비교

김경석*, 김동일**, 정현철***, 강기수***, 이찬우***, 양승필****, 장순석*****

Comparison of In-Plane Measurement of Phase-Shifting with Time-Average Method

Koung-Suk KIM*, Dong-Iel KIM**, Hyun-Chul JUNG***, Ki-Soo KANG***
Chan-Woo LEE***, Seung-Pil YANG****, Soon-Suck JARNG*****

ABSTRACT

Even if the Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) method that measure the strain of object within wavelength of light is less visibility than Holographic Interferometry(HI) method, the merits of application, convenience and time-save have made the method practical in industry. However, the existing ESPI methods that are based on dual-exposure, real-time and time-average method have difficulties for accurate measurement, due to irregular intensity and shake of phase. Recently, in order to solve this problem, phase shifting method have been proposed. In this method, the path of reference light in interference is shifted to make improvement in distinction and precision. But this method includes too many noise, caused by the problem of relationship between object and phase. Therefore, a method to reduce noise muse be introduced. In this paper, least square fitting method is proposed. As results, the phase-map is influenced by precise phase shifting and current of motes and speckle pattern obtained by phase shifting method is improved on the existing method driven from time-average method.

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자스페클패턴간섭법), Phase Shifting Method(위상이동법), Dual-Exposure Method(이중노광법), Real-Time Method(실시간법), Time-Average Method (시간평균법), Precision Improvement(정밀도 개선)

1. 서론

급속히 발전하고 있는 현대사회의 문명은 보다 신속하고 정확한 정보의 처리가 크게 요구되고 있으며, 소형화 및 경량화 추세에 따라 자동차, 선박, 항공기 등 수송기기들은 안전성에 가장 필수 조건이라 할 수 있는 충분한 강도가 요구되고 있다. 이 시대에 부응하여 인간의 편리와 안전을 책임지고 있는 수송기기의 새시 및 프레임, 기관 등의 성능과 밀접한 관계가 있는, 자연적 혹은 인위적인 충격, 하중 등의 외력이 발생하였을 때 생성되는 변위 정보를 효과적으로 계측하는 방법이 필요하다.[1,2,3,6]

시간적· 공간적으로 가간섭성이 우수한 레이저를 이용하여 검사하는 비접촉 비파괴 검사기술은 물체의 표면에 대한 전처리 과정 및 센서의 부착 등을 요구하지 않기 때문에 극한의 상황하에 있는 구조물에 대해 효과적으로 측정할 수 있다는 장점

* 조선대학교 기계공학부
** 한국표준과학연구원 내구성그룹
*** 조선대학교 대학원
**** 동아인재대학 자동차 · 기계계열
***** 조선대학교 전기 · 제어계측공학부

이 있다. 레이저가 처음 발명되었을 때는 당시의 조명 문제에 대한 해결책으로 많은 사람들에게 관심의 대상이 되었으나 해상도를 극히 저해하는 알갱이 구조로 되어 있는 '스페클' 때문에 조명에 대해 불필요한 존재로까지 여겨졌다. 그러나 시간이 흐름에 따라 스페클 효과가 점차적으로 대두되었고, 이 효과를 이용한 새로운 측정 기술인 SPI (Speckle Pattern Interferometry)가 본질적인 문제를 해결하기 위해 연구되기 시작했다[3,4,5,7,9,12]

SPI에 대한 연구는 크게 SPCI(Speckle Pattern Correlation Interferometry)와 SPP(Speckle Pattern Photography)로 들 수 있으며, Optical Metrology와 관련되어 있는 SPI는 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)의 근간이 된다. ESPI는 SPI에 전자적인 처리 즉, 영상을 기록하고 처리하는 기술을 응용하여 형성된 간섭법으로서 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 홀로그램을 이용하는 홀로그래피법보다도 실시간 적으로 물체의 변형을 빛의 파장 영역의 정밀도로 관측할 수 있으나 선명도가 다소 떨어진다는 약점에도 불구하고 응용성, 편리성, 시간 이득에서 산업적인 응용성이 높다고 할 수 있다. 그러나 기존의 이중노광법, 실시간법 및 시간평균법에만 기반을 둔 ESPI는 물체에 대한 불규칙한 빛의 세기와 위상의 큰 요동으로 인해 노이즈가 매우 심하여 측정의 정밀도 및 선명도에서 ESPI의 큰 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 간섭계에 참조광의 경로를 빛의 한 파장 영역에서 미세하게 변형시켜 ESPI의 선명도와 정밀도를 크게 향상시키는 위상이동법을 들 수가 있다.[3,8,10,12,13,14]

본 연구에서는 지금까지 연구되어왔던 줄무늬 패턴의 노이즈문제를 해결하기 위해 위상이동법을 도입하여 이론적으로 위상 이동 방법과 노이즈를 제거하기 위한 알고리즘에 대해 논하였으며, 실험적으로 등방성 재료인 일반 압연 강재에 인위적인 하중을 가하였을 경우에 발생되는 변화를 위상이동이 적용되지 않은 즉, 기존의 ESPI 알고리즘에 의존한 프로그램을 이용하여 측정하였고, 또한 π /2씩 위상을 이동시켜 구성한 화상처리 시스템에 의한 스페클 패턴의 위상도와 프로파일 결과를 서로 비교하였다.

2. 이 론

2.1 위상이동법

본 연구에서 이용한 알고리즘은 물체의 변형 전후에 위상을 각각 $\pi/2$만큼 이동시킴으로써 변형 정보를 나타내는 위상 $\Psi_{i,j}$를 얻어낸다. 다음은 참조광에 위상을 이동시키는 알고리즘을 수식화한 것이다[1,2,3,7]

$$I_{1,i,j} = \alpha_{i,j} + \beta_{i,j}\cos\phi_{i,j} \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned} I_{2,i,j} &= \alpha_{i,j} + \beta_{i,j}\cos(\phi_{i,j} + \pi/2) \\ &= \alpha_{i,j} - \beta_{i,j}\sin\phi_{i,j} \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned} I_{3,i,j} &= \alpha_{i,j} + \beta_{i,j}\cos(\phi'_{i,j} + \pi/2) \\ &= \alpha_{i,j} + \beta_{i,j}\cos(\phi_{i,j} + \Psi_{i,j} + \pi/2) \\ &= \alpha_{i,j} - \beta_{i,j}\sin(\phi_{i,j} + \Psi_{i,j}) \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$\begin{aligned} I_{4,i,j} &= \alpha_{i,j} + \beta_{i,j}\cos(\phi_{i,j} + \Psi_{i,j} + \pi) \\ &= \alpha_{i,j} - \beta_{i,j}\cos(\phi_{i,j} + \Psi_{i,j}) \end{aligned} \tag{2.4}$$

여기서 $I_{i,j}$는 각각의 변형 전후 위상변화에 대한 광의 세기를 나타내며, $\alpha_{i,j}$와 $\beta_{i,j}$는 물체광과 참조광에 의해 수광소자에 조사되는 빛의 진폭을 나타내는 계수이며, 또한 ϕ와 ϕ'은 변형 전후의 변위를 나타낸다.

위 식들을 같은 위상에 대해서 $I_{1,i,j} - I_{4,i,j}$와 $I_{2,i,j} - I_{3,i,j}$에 대해 정리하고 두 값을 서로 제산처리하면

$$\begin{aligned} \frac{I_{2,i,j} - I_{3,i,j}}{I_{1,i,j} - I_{4,i,j}} &= \frac{\sin(\phi_{i,j} + \Psi_{i,j}) - \sin\phi_{i,j}}{\cos\phi_{i,j} + \cos(\phi_{i,j} + \Psi_{i,j})} \\ &= \frac{\sin\left(\frac{\Psi_{i,j}}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\Psi_{i,j}}{2}\right)} = \tan\left(\frac{\Psi_{i,j}}{2}\right) \end{aligned} \tag{2.5}$$

식(2.5)를 정리하면 변위에 대한 위상은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_{i,j} = 2\tan^{-1}\left(\frac{I_{2,i,j} - I_{3,i,j}}{I_{1,i,j} - I_{4,i,j}}\right) \tag{2.6}$$

2.1.1 최소자승위상추정법

위상이동법에 의해 얻은 최종적인 변위 위상은

픽셀상의 물체에 대한 세기와 위상의 큰 요동으로 인해 매우 노이즈가 심하므로 노이즈를 감소시키기 위한 방법이 함께 다루어져야 하는데 최소자승위상추정법은 잡음이 보다 감소된 변위 위상을 얻을 수 있도록 개발된 방법으로서 이 방법을 이용하여 다음과 같은 세기 차이 $X_{i,j}$와 $Y_{i,j}$ 분포로부터 변위 위상을 추정할 수 있다.

$$X_{i,j} = I_{1,i,j} - I_{4,i,j}$$
$$= 2\beta_{i,j}\cos\left(\phi_{i,j} + \frac{\Psi_{i,j}}{2}\right)\cos\left(\frac{\Psi_{i,j}}{2}\right) \quad (2.7)$$
$$Y_{i,j} = I_{2,i,j} - I_{3,i,j}$$
$$= 2\beta_{i,j}\cos\left(\phi_{i,j} + \frac{\Psi_{i,j}}{2}\right)\sin\left(\frac{\Psi_{i,j}}{2}\right) \quad (2.8)$$

단, 여기에서 이미지에 더해지는 시스템 노이즈는 무시한다.

최소자승위상추정법은 추정 윈도우 상의 세기 차이 $X_{i,j}, Y_{i,j}$ 분포로부터 위상 값을 예측할 수 있으며, Fig. 1은 추정 윈도우 내에서 세기 차이의 분포에 대한 일례를 나타내고 있다. $X_{i,j}$와 $Y_{i,j}$는 $\Psi_{i,j}$에 대한 좌표를 의미하며, 노이즈가 없을 경우 그들은 일직선상에 놓여야 한다.

추정 윈도우 내의 픽셀들의 모든 변위 위상들은 일정하다고 가정하여 데이터 분포로부터 한 라인을 추정하고, 그 라인과 데이터들과의 거리의 제곱의 합을 최소화한다. 따라서, 추정된 라인의 기울기 각의 두 배가 추정 윈도우의 중심 픽셀의 변위 위상으로 지정될 수 있다.

임의의 데이터 포인트로부터 직선까지의 거리 $d_{i,j}$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[3)]

$$d_{i,j} = (\cos\theta, \sin\theta) \times (X_{i,j}, Y_{i,j}) \quad (2.9)$$

여기서, θ는 직선의 기울기 각을 나타낸다.

이 추정법은 데이터를 나타내는 점들로부터 직선까지의 거리의 합을 나타내는 함수 $F(\theta)$를 최소화하는 각을 찾기 위한 방법으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\theta) = \sum_{i,j}(Y_{i,j}\cos\theta - X_{i,j}\sin\theta)^2 \quad (2.10)$$

식(2.10)을 θ에 대해 미분하면 최소화된 각 θ를 얻을 수 있다.

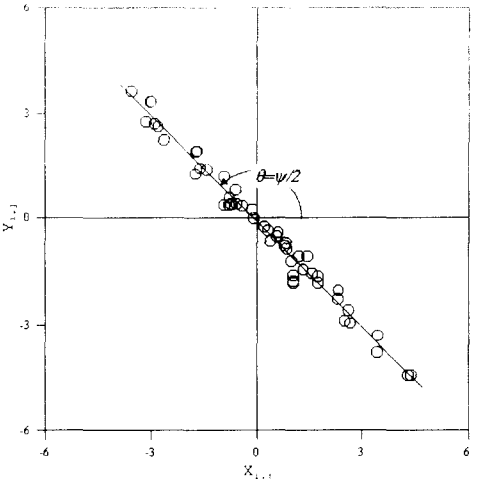

Fig. 1 A sample distribution of the intensity differences of four speckle patterns with $X_{i,j} = I_{1,i,j} - I_{4,i,j}$ and $Y_{i,j} = I_{2,i,j} - I_{3,i,j}$.

$$\frac{\partial F(\theta)}{\partial \theta}$$
$$= \sum_{i,j}\{(X_{i,j}^2 - Y_{i,j}^2)\sin 2\theta - 2X_{i,j}Y_{i,j}\cos 2\theta\}$$
$$= 0 \quad (2.11)$$

$$2\theta = \tan^{-1}\left\{\frac{\sum_{i,j}(2X_{i,j}Y_{i,j})}{\sum_{i,j}(X_{i,j}^2 - Y_{i,j}^2)}\right\} \quad (2.12)$$

라인의 경사도는 변형된 위상의 두배를 나타내므로 최소자승위상추정법에 의한 Ψ_{LS}는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_{LS} = \tan^{-1}\left\{\frac{2\sum_{i,j}(X_{i,j}Y_{i,j})}{\sum_{i,j}(X_{i,j}^2 - Y_{i,j}^2)}\right\} \quad (2.13)$$

또한, 위의 추정값을 얻기 위해 행해지는 단순 조작은 추정 윈도우의 크기와 관계가 있다. 각각의 이미지 면에서 주변 픽셀들과의 상호 밀접한 관계를 가지고 임의의 좌표에 대응하는 픽셀의 값은 최소자승위상추정법에 의해 새롭게 추정된 값을 갖게

됨으로서 노이즈가 한층 제거된 위상도를 얻을 수 있다.

3. 실 험

3.1 위상보정실험

Fig. 2는 본 연구에서 위상을 보정하기 위해 구성한 Michelson 간섭계를 도식화하였다. 가간섭성이 우수한 레이저가 Beam Splitter(B.S)에 의해 두 빔으로 나뉘고 한쪽은 전반사가 가능한 Mirror를 이용하여 렌즈에 결상하고 다른 한쪽은 레이저의 한파장 내에서 미세하게 이동시키기 위해 전압에 민감한 압전소자로 구성된 Piezoelectric Transducer(PZT)를 이용하여 렌즈에 함께 결상, 간섭시켜 Photo-Detector(P-D)에서 레이저의 위상을 얻어냄으로써 정확히 이동시키고자 하는 위상을 찾아낼 수가 있다.

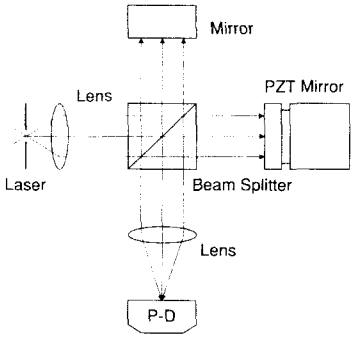

Fig. 2 Schematic of michelson interferometer for phase calibration

Fig. 3은 위상(π /2)을 얻기 위해 구성한 시스템을 도식화한 것이며, Fig. 4는 P-D에 의해 얻어진 위상의 결과값을 그래프화한 것이다.

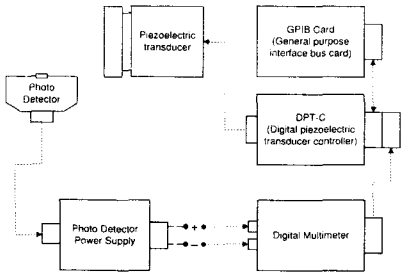

Fig. 3 Diagram of phase calibration system

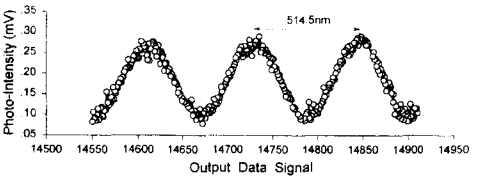

Fig. 4 Relationship of measured photo intensity respect to output data signal

3.1.1 광학계 구성

본 연구에서 구성한 광학계의 배치도와 화상처리장치를 Fig. 5에 나타냈다. 연속파 아르곤 레이저에서 편광되어 나온 레이저광이 B.S1에 의해 2개의 빔으로 나뉘게 되며, 물체광은 Spatial Filter, S.F1에 의해 확산되어 시험편에 직접적으로 조사되고, 다른 한 빔은 PZT Mirror에 의해 레이저의 한 파장 내에서 미세하게 이동되어 S.F2에 의해 공간적으로 확산되어 다시 시험편에 조사된다. 이 빔을 참조광이라 한다. 이렇게 물체광과 참조광에 의해 새로운 간섭 패턴이 형성되어 CCD 카메라의 수광소자에 결상된다. 수광소자에 결상된 빛의 세기는 프레임 그래버에 의해 육안으로 관측할 수 있는 이미지로 생성된다. 한 파장 내에서 미세하게 이동되는 파장은 GP-IB를 통하여 디지털신호를 전달하고 Digital Piezoelectric Transducer-Controller(DPT-C)에서 아날로그신호로 변환하여 PZT를 이동시키게 하였다.

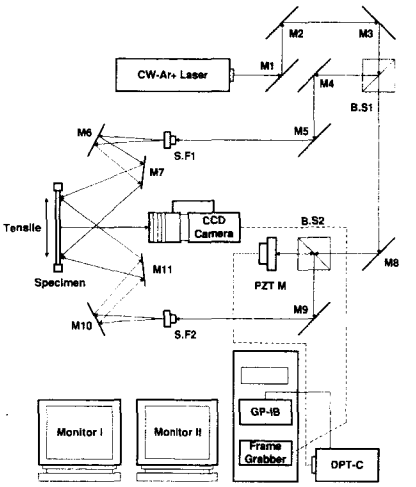

Fig. 5 Arrangement of the ESPI system

본 논문에서 이용한 위상이동법에서는 위상을 $\pi/2$ 간격으로 이동시켰으며, four phase stepping method처럼 물체의 변형 전에 위상 이동 전과 후 2장의 간섭패턴을 얻고, 변형 후에 다시 동일한 양만큼 위상을 이동시켜 2장의 간섭패턴을 얻어 처리하였다. 위상의 이동에 의해 얻어진 간섭 패턴은 하중에 따라 줄무늬가 생성되나 노이즈를 포함하고 있어 노이즈를 줄이기 위해 최소자승위상추정법을 이용하여 얻고자 하는 픽셀의 값과 연계적인 주변 픽셀들의 값들을 평균적으로 처리하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 6에서는 시험편에 임의의 인장하중을 가하였을 경우에 발생하는 위상이동이 적용되지 않은 즉, 이중노광법과 시간평균법을 이용하여 물체의 횡변위 및 종변위를 기존 방법을 토대로 측정하기 위한 프로그램(QUBE)에 의한 줄무늬 패턴과 위상이동에 의해 얻어진 줄무늬 패턴을 각각 비교하였다. Fig. 6(a)에서 나타낸 바와 같이 기존의 방법에 의한 줄무늬 패턴은 주위의 환경과 시스템에 따른 노이즈 등으로 인해 줄무늬 주변의 값들이 매우 노이즈가 심하였다. 그러나 Fig. 6(b)와 같이 위상이동법에 의한 줄무늬 패턴을 보니 가시도가 향상되었으며 프로파일에 나타낸 바와 같이 위상 이동에 의해 2π 특성을 지니고 패턴(즉, 위상도)이 형성됨을 알 수 있었다.

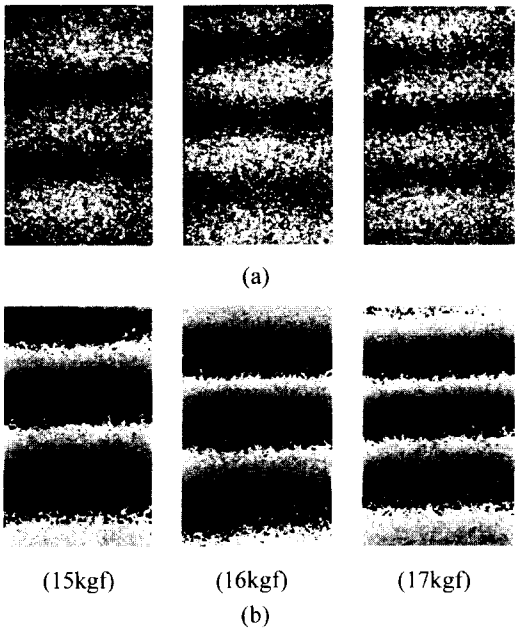

Fig. 6 Compare of fringe patterns by (a)general(not applied PZT) and (b)phase-shifting method

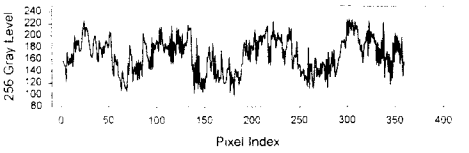

Fig. 7 Profile of fringes obtained by general method

Fig. 8 Profile of fringes obtained by phase-shifting method

변위를 결정하는 데에 있어서 면내 변위에서 정확한 위상 이동량에 의해 줄무늬의 정밀도가 좌우된다는 것을 알 수 있었으며, 레이저의 안정성 또한 하나의 인자에 속함을 알 수 있었으며, 위상을 보정함으로써 얻게 되는 정규적인 사인곡선은 다소 노이즈를 포함하고 있는데 이러한 문제들은 공기중의 미세한 먼지 등의 미세물과 진동으로 인한 공기의 유동 등으로 인해 노이즈를 포함하게 되며, 미세 먼지입자의 크기에 의해 노이즈의 폭이 좌우된다고 사료된다.

또한 기존의 방법(이중노광, 시간평균법)에 의한 줄무늬 패턴과 위상이동법에 의한 위상도의 프로파일을 측정하여 Fig. 7과 8에 비교하여 256 레벨로 나타내었다. Fig. 7과 8에 나타낸 바와 같이 Tangent 함수의 특성으로 인해 줄무늬 패턴은 2π의 주기로 생성되었으며, 부정확한 위상 이동에 따른 오차와 위상 이동에 의한 조사광의 세기가 완전한 사인함수를 이루지 못할 때의 오차로 인해 물체에 대한 변위 정보의 정밀도가 떨어진다고 사료되

며, 정밀도를 향상시키기 위한 연구가 지속적으로 진행이 됨으로써 횡변위에 대한 측정은 물론, 종변위에 대한 변형 및 진동을 해석하는 데에도 기술적인 변화를 줄 수 있으며, 정량적인 해석 또한 가능하리라 사료된다.

5. 결 론

인위적인 하중에 의해 생성되는 변위를 해석하기 위해 사용하였던 기존의 프로그램 매우 많은 노이즈를 갖는 간섭패턴을 얻으며 평활화, 이치화 등 복잡한 과정을 거쳐야만 어느 정도의 평가가 가능했으며 노이즈를 많이 포함하고 있어 다소 정성적인 평가에만 의존하였다고 할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 압전소자를 이용하는 위상이동법을 적용하여 스페클 패턴에 포함되는 노이즈를 한층 제거시킴으로서 스페클 패턴의 정밀도를 향상시킬 수 있었다. 더 나아가 Tangent 함수에 의한 2π 특성을 지니고 있는 스페클 패턴의 해석에 대한 연구가 진행됨으로서 횡변위에 대한 측정은 물론, 종변위에 대한 변형 및 진동을 해석하는 데에도 기술적인 변화를 추구할 수 있으며, 정량적인 해석 또한 가능하리라 사료된다.

후 기

본 논문은 (주)동광건설의 연구지원에 의해 수행된 연구과제입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Henri A. Vrcoman and Ad A. M. Mass,: "Image processing algorithms for the analysis of phase-shifted speckle interference pattern," Applied Optics, Vol. 30, No. 13, pp. 1636～1641, 1991.
2. Suezou Nakadate, "Vibration measurement using phase-shifting time average holographic interferometry," Applied Optics, Vol. 25, No. 22, pp. 4155-4161, 1986.
3. Chung Ki Hong, Hyun Surk Ryu, Hyun Choon Lim, "Least-squares fitting of the phase map obtained in phase-shifting electronic speckle pattern interferometry," Optics Letters, Vol. 20, pp. 931～933, 1995.
4. Pramod K. Rastogi(Ed.), Holographic Interferometry princples and Methods, Springer-Verlag, pp. 122～125, 1994.
5. Gary L. Cloud, Optical Methods of Engineering Analysis, 1st ed., Cambridge Univ. press, pp. 395～491, 1995.
6. Jun-ichi Kato, Ichirou Yamaguchi, and Qi Ping, "Automatic deformation analysis by a TV speckle interferometer using a laser diode," Applied Optics, Vol. 32, No. 1, pp. 77～83, 1993.
7. Arjan J. P. van Haasteren and Hans J. Frankena, "Real-time displacement measurement using a multicamera phase-stepping speckle interferometer," Applied Optics, Vol. 33, No. 19, pp. 4137～4142, 1994.
8. Jie Gu, Y.Y. Hung, and Fang Chen, "Iteration algorithm for computer-aided speckle interferometry," Applied Optics, Vol. 33, No. 23, pp. 5308～5317, 1994.
9. J. D. Valera and J. D. C. Jones, "Phase stepping in fiber-based speckle shearing interferometry," Optics Letters, Vol. 19, No. 15, pp. 1161～1163, 1994.
10. J. P. Holman, Experimental Methods for Engineers, 1th ed., McGraw-Hill Book Co., pp. 71～75, 1989.
11. Dwayne Phillips, Image Processing in C, R & D Publications, Inc. 1994.
12. 김경석, 정성균, 김형택, 정현철, 양승필, 김동일, 이승환, "전자처리 스페클 패턴 간섭법(ESPI)을 이용한 복합재료의 진동 특성 해석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제15권, 제9호, pp. 68～74, 1998.
13. James C. Wyant, "Interferometric optical metrology : Basic principles and new systems," Laser Focus, 1982.
14. Robert Jones, Catherine Wykes, Holography and speckle interferometry, 2nd ed., Cambridge Univ., 1989.