

파장판을 이용한 Shearography의 위상천이기술에 대한 이론적 고찰

(The Theoretical Analysis about the Phase-Shifting Technique of Shearography Using Waveplates)

김수길*

(Soo-Gil Kim)

요 약

본 논문에서는 Wollaston prism을 이용한 Shearography에서 수동소자인 두 개의 Waveplate와 편광판의 조합을 통해 각각 90도의 위상천이를 가지는 4개의 스펙클 패턴을 얻고, 이로부터 스펙클의 각 지점에서의 위상을 얻을 수 있는 방법을 제시하고, Jones 행렬을 이용하여 이론적으로 입증하였다.

Abstract

We presented the method to obtain four speckle interferograms with relative phase shift of $\pi/2$ by passive devices such as waveplate and polarizer, calculate the phase at each point of the speckle interferogram in shearography using Wollaston prism, and theoretically demonstrated the feasibility of the proposed method by Jones matrix.

Key Words : Shearography, Wollaston prism, Waveplate, Phase-shifting Technique

1. 서 론

Shearography는 레이저를 이용하여 물체의 변형 기울기를 구할 수 있는 광 계측시스템이다. 가장 중요한 레이저 스펙클 측정 방법은 스펙클 패턴 간섭계 기술(ESPI)과 스펙클 패턴 전단 간섭계 기술(shearography)이다. ESPI와 shearography에서 변

형과 변형기울기를 나타내는 간섭패턴은 변형전과 변형후의 상태에 대응하는 두 개의 스펙클 패턴(speckle pattern)을 기록하고 차를 구하면 볼 수 있다.

이것은 변형과 변형의 기울기 측정을 위한 ESPI와 shearography의 기본적인 개념이다.

Shearography는 인간과 생물의 기관뿐만 아니라 기계 부품, 전기기기, 그리고 토목공학 구조물의 결함 또는 불규칙성을 밝히기 위해 사용되며, 물체의 표면과 내부의 결함을 검출할 수 있다. 이것은 내부의 결함이 표면에서 매우 멀리 떨어져 있는 것이 아니라면 표면의 변형에 영향을 미치지 때문이다.

* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수
Tel : 041-540-5676, Fax : 041-540-5693
E-mail : sgkim@office.hoseo.ac.kr
접수일자 : 2004년 7월 22일
1차심사 : 2004년 8월 2일
심사완료 : 2004년 10월 21일

Leendertz와 Butters는 1973년에 shearography를 이용하여 변형의 1차 미분의 직접적인 측정에 대하여 발표하였다[1]. 1982년에 Hung은 이 기술을 더욱 발전시켜 면외 변형 기울기의 수치적인 해법을 발표했다[2]. 앞에 언급한 방법들은 스펙클 패턴을 필름에 기록한 다음에 습식 처리와 광학적 복원을 필요로 하였기 때문에 현장에 직접 적용하는 것은 문제가 있었다. 이러한 단점을 해소하기 위해 개발된 것이 디지털 shearography이다. 디지털 shearography는 필름에 기록하는 기술과는 대조적으로 스펙클 패턴을 변형 전후에 CCD camera에 의해 기록하고 이미지 프로세서 장치에 의해 온라인으로 처리하므로 실시간으로 shearogram을 관측하는 것이 가능하게 되었다.

디지털 shearography는 필름을 이용하는 shearography처럼 면외성분을 수치적으로 결정할 수 있으며, 많은 분야에서 응용이 이루어지고 있다[3-6].

Shearography의 출력은 인간의 해석을 요구하는 프린지 패턴 형태이며, 프린지패턴의 프린지 차수를 정의하기 위한 가장 실용적인 방법은 경계조건과 그 문제에 대한 특징과 같은 문제에 대한 사전지식에 의존한다. 여러 해 동안 이 문제는 shearography에 있어서 프린지 위상 결정의 자동화를 막는 주요한 장애물중의 하나였다. 이것을 가능하게 한 것이 위상천이기술이다[7]. 위상천이기술은 측정된 스펙클 패턴으로부터 interferogram의 위상분포를 결정하는 방법인데, 위상천이기술은 부가적인 위상을 3번에서 5번까지 천이시켜 3개에서 5개의 스펙클 패턴을 얻고, 이로부터 스펙클 패턴의 각 지점의 위상분포를 결정하는 기술이다[8].

Wollaston prism을 이용하는 shearography는 구조가 단순하고 외부환경에 대해 아주 강인한 특성을 가지고 있다[9,10]. 그러나 이 방법은 위상천이기술을 적용하기가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 최근에는 이러한 단점을 개선하여 위상천이를 시킬 수 있는 방법이 보고되었다. 이것은 원통형 PZT에 고복굴절(highly-birefringent : HiBi) 광섬유를 감고, PZT에 가하는 전압을 변화시킴으로써 광섬유에서 나오는 두 개의 직교하는 편광을 가지는 모드간에 위상차를 발생시킴으로써 위상의 변화를 일으키는

방법이다[11]. 그러나, 이 방법은 광섬유에 고유한 외부환경에 민감한 특성 때문에 외부환경에 관계없이 일정한 위상차를 가지는 간섭패턴을 얻는 것이 어렵다.

따라서 본 논문에서는 Wollaston prism을 이용한 shearography에서 수동소자인 파장판과 편광판을 이용하여 외부환경에 관계없이 특정한 위상천이를 발생시킬 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 이 방법은 두 개의 파장판과 하나의 편광판의 회전각을 조절함으로써 90도씩 위상이 천이된 4개의 스펙클패턴을 얻을 수 있는 방법이며, Jones 벡터를 이용하여 이론적으로 제안된 방법의 유용성을 입증하였다.

2. Wollaston prism을 이용한 shearography

일반적인 디지털 shearography는 측정대상물체에서 반사되는 빔을 마이켈슨 간섭계를 이용하여 두 개의 경로를 갖는 빔을 만들고 이 중에 하나의 경로에 있는 거울을 약간 기울게 하여 반사된 물체의 빔간에 전단을 일으킨다. 그리고 위상천이는 PZT에 부착된 거울을 움직여서 두 개의 빔간에 원하는 위상차를 발생시킨다. 이렇게 위상차를 달리하여 물체의 변형 전후에 대하여 3개에서 5개 정도의 스펙클 패턴을 얻은 다음에 각 지점의 위상과 상대적인 위상차를 구하고, 이로부터 물체의 변형기울기를 얻을 수 있는 방식이다.

Wollaston prism을 이용한 shearography는 마이켈슨 간섭계대신에 Wollaston prism을 이용하여 전단영상을 얻는 기술이다. 그림 1은 Wollaston prism의 동작을 보여주는 그림이며, 그림에서 보는 바와 같이 Wollaston prism은 직교하는 편광을 가진 빔이 Wollaston prism의 출력단에서는 적당한 각을 가지며 분리되도록 하는 것을 알 수 있다.

이러한 Wollaston prism의 특성을 이용한 shearography는 그림 2와 같다. 그림에서 보는바와 같이 물체의 P₁점은 Wollaston prism을 통과하여 이미지면에서의 P₁'과 P₁''점으로 투영되고, P₂점은 P₂'과 P₂''점으로 투영되며, P₁'과 P₂'은 중첩이 된다. P₁'과 P₂''에 도달하는 광파는 서로 직교하는 편광을 가

파장판을 이용한 Shearography의 위상천이기술에 대한 이론적 고찰

지고 있으므로 두 광파가 중첩되더라도 간섭이 일어나지 않는다. 따라서, 두 광파간에 간섭을 일으키기 위해서는 Wollaston prism 뒤에 점선으로 표시된 x 축에 대하여 45도 회전된 선형편광판이 있어야 한다.

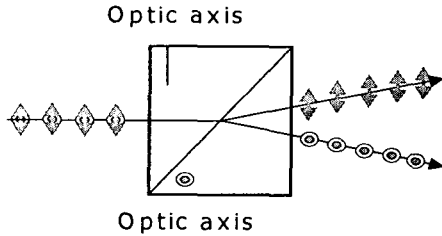


그림 1. Wollaston prism의 원리
Fig. 1. Operation of a Wollaston prism

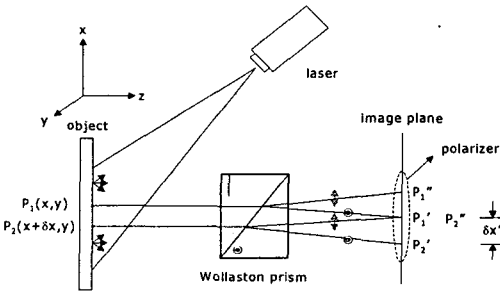


그림 2. Wollaston prism을 이용한 shearography
Fig. 2. Shearographic system with a Wollaston prism

편광판이 없는 경우에 있어서, 그림 2의 P_1 과 P_2 에서 반사되어 Wollaston prism을 통과하여 P_1' 과 P_2' 에 도달하는 광파가 각각 $U_1 = a_1 e^{-j\theta(x, y)} = a_1 e^{-j\theta_1}$, $U_2 = a_2 e^{-j\theta(x + \delta x, y)} = a_2 e^{-j\theta_2}$ 라고 하면, 이미지 면에서 중첩되는 광파는 Jones 행렬에 의해 다음 식과 같이 표현할 수 있다[14].

$$U(x, y) = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 e^{-j\theta(x, y)} \\ a_2 e^{-j\theta(x + \delta x, y)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, $\theta(x, y)$ 와 $\theta(x + \delta x, y)$ 는 각각 점 $P_1(x, y)$ 와 $P_2(x + \delta x, y)$ 로부터의 랜덤 위상관계를 표시하고, a_1 와 a_2 는 빛의 진폭이며, 이웃한 두 점에 대해서 같다고 가정한다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 직교하는 편광을 가진 광파 U_1 , U_2 가 이미지 면에서 서

로 중첩이 이루어지므로 이미지면에서는 간섭이 일어나지 않는다. 이미지 면에 -x축에 대하여 45도 회전된 편광판이 있는 경우에는 식 (1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$U(x, y) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 e^{-j\theta_1} \\ a_2 e^{-j\theta_2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} a_1 e^{-j\theta_1} + a_2 e^{-j\theta_2} \\ a_1 e^{-j\theta_1} + a_2 e^{-j\theta_2} \end{pmatrix}$$

위 식에 대한 intensity는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$I = UU^* = (a_1^2 + a_2^2)/2 + a_1 a_2 \cos \phi \quad (3)$$

$$= I_0 (1 + \gamma \cos \phi)$$

여기서, $I_0 = (a_1^2 + a_2^2)/2$ 는 intensity의 평균값이며, $\gamma = 2a_1 a_2 / (a_1^2 + a_2^2)$ 는 간섭항의 변조이며, $\phi = \theta_1 - \theta_2$ 는 랜덤 위상차를 나타낸다. 식 (3)에서 편광판이 있는 경우에는 이미지 면에서 간섭이 일어남을 알 수 있다.

이와 같이 변형 전후에 대한 스펙클 패턴을 얻고 이에 대한 차를 구하면 결함이 있는 부분 주위에 변형이 집중된 간섭패턴을 얻을 수 있으며, 이의 해석을 통해 측정대상 물체의 결함을 얻는 방법이 Wollaston prism을 이용한 shearography의 측정원리이다. 그리고 Wollaston prism을 이용한 shearography의 경우 이미지 면에서의 전단량은 Wollaston prism을 z축 방향으로 이동시킴으로써 조절이 가능하다. 그런데 그림 2의 Wollaston prism을 이용한 shearography system에서는 위상천이를 발생시킬 수 없으므로 측정대상물체에 대한 보다 정확하고 정밀한 정보를 얻는 것이 불가능하다.

3. 파장판을 이용한 위상천이기술

본 논문에서는 Wollaston prism을 이용한 shearography에서 온도와 외부환경에 영향을 쉽게 받는 광섬유를 사용하지 않고 수동소자만을 이용하여 위상천이를 발생시키는 새로운 시스템을 제안하

고자 한다. 그림 3은 본 논문에서 제안된 시스템이며, 두 개의 파장판(waveplate)과 하나의 편광판을 이용하여 위상천이를 발생시킬 수 있는 shearography system이다. 그림 3에서 WP1과 WP2는 파장판을 나타낸다. 여기에서 WP1은 slow axis가 0도이고, WP2는 slow axis가 -x축에 대하여 ±45도 회전되어 있는 상태이다. 본 논문에서 제안한 시스템이 위상천이를 발생시킬 수 있다는 것을 입증하기 위해 Jones 행렬을 이용한다[12].

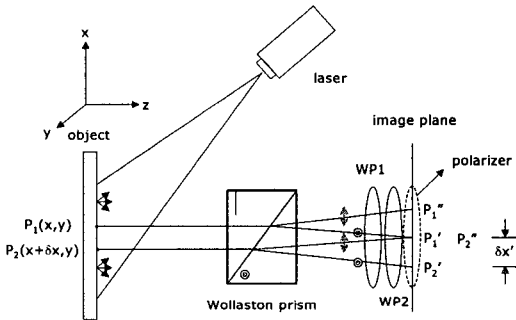


그림 3. Wollaston prism과 waveplate를 이용한 shearography
Fig. 3. Shearographic system consisting of a Wollaston prism and two waveplates

그림 3의 P₁과 P₂에서 반사된 광파가 두 개의 파장판을 통과한 후에는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$U = \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} & \mp i \sin \frac{\Gamma_2}{2} \\ \mp i \sin \frac{\Gamma_2}{2} & \cos \frac{\Gamma_2}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$= e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_1 \mp i e^{i\Gamma_1} \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_2 \\ \mp i \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_1 + e^{i\Gamma_1} \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_2 \end{pmatrix}$$

여기서, ± 부호에서 -부호는 WP2의 slow axis가 -x축에 대하여 45도 회전되어 있는 경우에 대응하고, +부호는 WP2의 slow axis가 -45도 회전되어 있는 경우에 대응하는 것이다. 광파가 x축 편광판을 통과한 후에 이미지 면에서의 복소진폭은 다음과 같이 주어진다.

$$U_{wp2 \pm 45} = e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \{ \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_1 \mp i e^{i\Gamma_1} \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_2 \} \quad (5)$$

첫 번째로, 두 개의 λ/4 파장판을 이용할 경우에는 위상지연이 Γ₁ = Γ₂ = π/2이므로 식 (5)는 다음 식과 같이 된다.

$$U_{wp2 \pm 45} = \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-i\frac{\pi}{4}} \{ U_1 \pm U_2 \} \quad (6)$$

식 (6)에 대한 intensity는 다음 식과 같이 주어진다.

$$I_1 = U_{\delta 2+45} U_{\delta 2+45}^* = 1/2 [(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \cos \phi] = I_0 [1 + \gamma \cos \phi] \quad (7)$$

$$I_3 = U_{\delta 2-45} U_{\delta 2-45}^* = 1/2 [(a_1^2 + a_2^2) - 2a_1 a_2 \cos \phi] = I_0 [1 - \gamma \cos \phi] = I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 180)] \quad (8)$$

두 번째는 WP1과 WP2의 slow axis를 각각 0도와 45도(또는 -45도)로 유지하고, 편광판의 축을 -x축에 대하여 45도와 -45도로 한 경우에 편광판을 통과한 후의 복소진폭을 구하면 각각 식 (9) 및 식 (10)과 같이 주어진다.

$$U_{\delta+45} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} & -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} \\ -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} & \cos \frac{\Gamma_2}{2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$= \frac{1}{2} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \left(\cos \frac{\Gamma_2}{2} - i \sin \frac{\Gamma_2}{2} \right) \begin{pmatrix} U_1 + e^{i\Gamma_1} U_2 \\ U_1 + e^{i\Gamma_1} U_2 \end{pmatrix}$$

$$U_{\delta-45} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} & -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} \\ -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} & \cos \frac{\Gamma_2}{2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$= \frac{1}{2} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \left(\cos \frac{\Gamma_2}{2} + i \sin \frac{\Gamma_2}{2} \right) \begin{pmatrix} U_1 - e^{i\Gamma_1} U_2 \\ -U_1 + e^{i\Gamma_1} U_2 \end{pmatrix}$$

파장편을 이용한 Shearography의 위상천이기술에 대한 이론적 고찰

$\Gamma_1 = \pi/2$, $\Gamma_2 = \pi/2$ 인 경우에 식 (9)와 (10)에 대한 intensity는 다음 식과 같다.

$$I_2 = U_{p+45} U_{p+45}^* = 1/2 [(a_1^2 + a_2^2) - 2a_1 a_2 \sin \phi] \quad (11)$$

$$= I_0 [1 - \gamma \sin \phi] = I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 90)]$$

$$I_4 = U_{p-45} U_{p-45}^* = 1/2 [(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \sin \phi] \quad (12)$$

$$= I_0 [1 + \gamma \sin \phi] = I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 270)]$$

식 (7), (8), (11), (12)에서 보는 바와 같이 파장편 두개와 하나의 편광판을 이용함으로써 각각 90도의 위상천이를 가지는 4개의 스펙클패턴을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

$\lambda/2$ 파장편과 $\lambda/4$ 파장편의 조합을 통해서도 90도의 위상천이를 가지는 4개의 스펙클패턴을 얻을 수 있다. $\Gamma_1 = \pi$, $\Gamma_2 = \pi/2$ 인 경우에 식 (5)는 식 (13)과 같이 된다.

$$U_{wp2 \pm 45} = -\frac{\sqrt{2}}{2} i \{U_1 \pm i U_2\} \quad (13)$$

식 (13)에 대한 intensity는 다음 식과 같이 주어진다.

$$I_2 = U_{wp2+45} U_{wp2+45}^* \quad (14)$$

$$= 1/2 [(a_1^2 + a_2^2) - 2a_1 a_2 \sin \phi]$$

$$= I_0 [1 - \gamma \sin \phi] = I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 90)]$$

$$I_4 = U_{wp2-45} U_{wp2-45}^* \quad (15)$$

$$= 1/2 [(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \sin \phi]$$

$$= I_0 [1 + \gamma \sin \phi] = I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 270)]$$

그리고 두 번째는 WP1과 WP2의 slow axis를 각각 0도와 45도(또는 -45도)로 유지하고, 편광판의 축을 -x축에 대하여 45도와 -45도로 한 경우에 편광판을 통과한 후의 복소진폭은 식 (9)와 식 (10)과 같이 주어진다. $\Gamma_1 = \pi$, $\Gamma_2 = \pi/2$ 인 경우에 식 (9)와 (10)에 대한 intensity는 다음 식과 같다.

$$I_3 = U_{p+45} U_{p+45}^* = 1/2 [(a_1^2 + a_2^2) - 2a_1 a_2 \cos \phi] \quad (16)$$

$$= I_0 [1 - \gamma \cos \phi] = I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 180)]$$

$$I_1 = U_{p-45} U_{p-45}^* = 1/2 [(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \cos \phi] \quad (17)$$

$$= I_0 [1 + \gamma \cos \phi]$$

두 개의 파장편과 편광기를 이용하여 90도의 위상천이를 가지는 4개의 스펙클패턴을 얻는 조합을 요약하면 표 1과 같다.

표 1. 파장편과 편광판의 조합에 따른 intensity 분포
Table 1. Intensity patterns by combination of two waveplates and a linear polarizer

파장편의 위상지연	편광판의 회전각	파장편의 회전각		intensity 분포
		WP1	WP2	
$\Gamma_1 = \pi/2$ $\Gamma_2 = \pi/2$	0도	0도	45도	$I_0 [1 + \gamma \cos \phi]$
	45	0도	45도(또는 -45도)	$I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 90)]$
	0도	0도	-45도	$I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 180)]$
	-45도	0도	45도(또는 -45도)	$I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 270)]$
$\Gamma_1 = \pi$ $\Gamma_2 = \pi/2$	-45도	0도	45도(또는 -45도)	$I_0 [1 + \gamma \cos \phi]$
	0도	0도	45도	$I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 90)]$
	45도	0도	45도(또는 -45도)	$I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 180)]$
	0도	0도	-45도	$I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 270)]$

표 1에서 보는 바와 같이 수동소자인 $\lambda/4$ 파장편 두개와 편광판 한개 또는 $\lambda/2$ 와 $\lambda/4$ 파장편과 편광판 한개의 조합을 통해 90도의 위상천이를 가지는 4개의 스펙클패턴을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 앞에서 구한 4개의 간섭패턴으로부터 각 지점의 위상은 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$\phi = \arctan \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (18)$$

4. 결론

본 논문에서는 Wollaston prism을 이용한 shearography에서 수동소자인 두 개의 파장편을 추가함으로써 90도의 위상천이를 발생시켜 4개의 스펙클패턴을 얻고, 이로부터 스펙클 패턴의 각 점에서의 위상을 얻을 수 있는 방법을 제시하였다. 표 1에

서 보는 바와 같이 파장판은 $\lambda/2$, $\lambda/4$ 파장판 조합과 $\lambda/4$ 파장판 두개의 조합과 0도와 45도, -45도의 회전각을 가지는 편광판을 조합의 경우를 보여주며, 각 경우에 대한 스펙클 패턴의 intensity 분포를 통해 $\lambda/2$, $\lambda/4$ 파장판 조합과 $\lambda/4$ 파장판 두개의 조합의 경우에 있어서 90도의 위상천이를 가지는 4개의 스펙클 패턴을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

변형전후의 스펙클패턴을 각각 4개씩 얻고 이로부터 각 지점에서의 위상을 얻은 후에, 위상차를 구함으로써 변형에 대한 기울기 정보를 얻을 수 있다. 본 시스템은 수동소자를 추가함으로써 위상천이를 발생시킬 수 있는 shearography 시스템을 제시함으로써, 구조가 간단하고 저가이며 외부환경에 강인한 shearography 시스템을 구성하는데 일조할 것으로 생각한다.

본 논문에서 제안된 방식은 위상천이를 발생시키는 속도에 한계가 있을 수 밖에 없는데, 이를 해결하기 위해서는 채널을 3개나 4개를 만들어서 동시에 위상차가 다른 여러 개의 간섭패턴을 구하면 속도에 대한 제한에서 벗어날 수 있으리라 생각된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (04-522)주관으로 수행된 과제임.

References

(1) J.A. Leendertz and J.N. Butters, "An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments," J. Phys. E. vol. 6, pp. 1107-1110, 1973.
 (2) Y.Y. Hung, "Shearography, a new optical method for strain measurement and nondestructive testing," Opt. Eng. vol. 21, no.3, pp. 391-395, 1982.
 (3) W. Steinchen, "Quality control of fiber-reinforced composites by means the shearographic and holographic method," Proc. SPIE vol. 1756, 1992.
 (4) S.L. Tol, F.S. Chau, V.P.W. Shim, C.J. Tay, and H.M. Shang, "Application of shearography in nondestructive testing of composite plates," J. Mater. Process. Technol. vol. 23, pp. 267-275, 1990.
 (5) W. Steinchen, L.X. Yang, M. Schuth, G. Kupfer, "Application of shearography to quality assurance," J. Mater. Process. Technol. vol. 52, no.1, pp. 141-150, 1992.
 (6) F.S. Chau and T.W. Ng, "A real-time digital shearing speckle interferometer," Measure. Sci. Technol., vol. 3, pp. 381-383, 1992.

(7) Y. Y. Hung, "A phase shift technique for automation of phase determination in digital shearography," Proc. 1994 SEM spring Conf., Baltimore, MD, 6-7 June 1994, pp. 233-240.
 (8) W. Steinchen and L. Yang, Digital shearography, SPIE Press, 2003.
 (9) Y.Y. Hung, "Shearography for non-destructive evaluation of composite structures," Optics and Lasers in Engineering vol. 24, pp. 161-182, 1996.
 (10) S. Dilhaire, S. Jorez, A. Comet, L.D. Patino Lopez, W. Claeys, "Measurement of the thermomechanical strain of electronic devices by shearography," Microelectronics Reliability vol. 40, pp. 1509-1514, 2000.
 (11) V.M. Murukeshan, O. L. Seng, and A. Asundi, "Polarization phase shifting shearography for optical metrological applications," Optics & Laser Technology vol. 30, pp. 527-531, 1998.
 (12) A. Yariv and P. Yeh, Optical Waves in Crystals(Wiley, New York, 1984), Chap. 5.

◇ 저자소개 ◇

김수길 (金秀吉)

1965년 8월 2일생. 1988년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1991년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 2월 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1997~1999년 호서대학교 전기정보통신공학부 전임강사. 1999~2003년 호서대학교 전기정보통신공학부 조교수. 2003년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수.