

파장판을 이용한 스펙클패턴 전단간섭법에 있어서의 위상오차 해석

(Phase Error Analysis in Shearography Using Wave Plates)

김수길*

(Soo-Gil Kim)

요 약

본 논문에서는 Wollaston 프리즘을 이용한 스펙클패턴 전단간섭법(shearography)에서 수동소자인 두 개의 파장판과 편광판의 조합을 통해 각각 90도의 위상차이를 가지는 4개의 스펙클 패턴을 얻고, 이로부터 스펙클패턴의 각 지점에서의 위상을 얻을 수 있는 방법을 제시하였다. 제안된 방법에 사용되는 파장판에 의한 위상오차를 Jones 행렬을 이용하여 분석하였다.

Abstract

We presented the method to obtain four speckle patterns with relative phase shift of $\pi/2$ by passive devices such as wave plate and polarizer, and calculate the phase at each point of the speckle pattern in shearography using Wollaston prism. And, we analyzed the phase error caused by wave plates used in the proposed method by Jones matrix.

Key Words : Shearography, Wollaston prism, Phase-shifting technique, Phase error

1. 서 론

스펙클패턴 전단간섭법은 레이저를 이용하여 물체의 변형 기울기를 구할 수 있는 광 계측시스템이다. 가장 중요한 레이저 스펙클 측정 방법은 스펙클패턴 간섭법(ESPI)과 스펙클패턴 전단간섭법(shearography)이다. 스펙클패턴 간섭법과 스펙클패

턴 전단간섭법에서 변형과 변형기울기를 나타내는 간섭패턴은 변형전과 변형후의 상태에 대응하는 두 개의 스펙클패턴(speckle pattern)을 기록하고 차를 구하면 볼 수 있다.

이것은 변형과 변형의 기울기 측정을 위한 스펙클패턴 간섭법과 스펙클패턴 전단간섭법의 기본적인 개념이다. 1973년에 Leendertz와 Butters에 의해 스펙클패턴 전단간섭법이 발표된 이래로 많은 연구자들이 이에 대한 연구결과를 발표하였다[1-6].

스펙클패턴 전단간섭법을 이용하여 구한 결과는 패턴은 프린지패턴 형태이며, 이러한 프린지 패턴으로부터 위상을 구하여 이를 이용하여 측정대상물체

* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수

Tel : 041-540-5676, Fax : 041-540-5693

E-mail : sgkim@office.hoseo.ac.kr

접수일자 : 2004년 12월 13일

1차심사 : 2004년 12월 16일

심사완료 : 2005년 1월 13일

의 변형정도를 구하게 된다. 스펙클패턴 전단간섭법에서 프린지 패턴을 구하기 위해 적용되는 것이 위상천이기술이다[7]. 위상천이기술은 측정된 스펙클패턴으로부터 간섭무늬(interferogram)의 위상분포를 결정하는 방법이다. 위상천이기술은 부가적인 위상을 3번에서 5번까지 천이시켜 3개에서 5개의 스펙클패턴을 얻고, 이로부터 스펙클패턴의 각 지점의 위상분포를 결정하는 기술이다[8].

Wollaston 프리즘을 이용하는 스펙클패턴 전단간섭법은 구조가 단순하고 외부환경에 대해 아주 강한 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 고 복굴절(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 광섬유가 외부환경에 민감하게 반응하기 때문에 일정한 위상차를 가지는 간섭패턴을 얻는 것이 어렵다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 Wollaston 프리즘을 이용한 스펙클패턴 전단간섭법에서 수동소자인 파장판(wave plate)과 편광판을 이용하여 안정적으로 위상천이를 발생시킬 수 있는 방법을 설명하고, 제안된 방법에 사용되는 파장판에 의한 위상오차를 Jones 벡터를 이용하여 이론적으로 분석하였다.

2. 파장판과 편광판을 이용한 위상천이기술

본 논문에서는 Wollaston 프리즘을 이용한 스펙클패턴 전단간섭법에서 온도와 외부환경에 영향을 쉽게 받는 광섬유를 사용하지 않고 수동소자만을 이용하여 위상천이를 발생시키는 새로운 시스템을 제안하고자 한다. 그림 1은 본 논문에서 제안된 시스템이며, 두 개의 파장판과 하나의 편광판을 이용하여 위상천이를 발생시킬 수 있는 스펙클패턴 전단간섭법 시스템이다. 제안된 시스템은 마이켈슨 간섭계대

신에 Wollaston 프리즘을 이용하여 전단영상을 얻는 기술이며, 그림 1에서 보는 바와 같이 Wollaston 프리즘은 직교하는 편광을 가진 빔이 Wollaston 프리즘의 출력단에서는 적당한 각을 가지며 분리되도록 하는 것을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 물체의 P₁점은 Wollaston 프리즘을 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 가지고 있으므로 두 광파가 중첩되더라도 간섭이 일어나지 않는다. 따라서, 두 광파간에 간섭을 일으키기 위해서는 Wollaston 프리즘뒤에 점선으로 표시된 선형편광판이 있어야 한다. 본 논문에서는 위상천이기술을 적용하기 위해 Wollaston 프리즘과 편광판 사이에 두개의 파장판을 위치시킴으로써 3개에서 5개의 스펙클패턴을 얻을 수 있는 방법을 제안하였다. 그림 1에서 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].

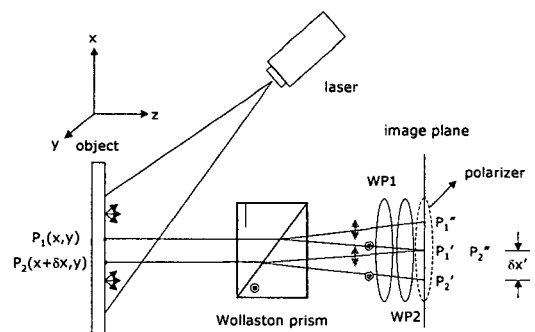


그림 1. Wollaston 프리즘과 파장판을 이용한 스펙클패턴 전단간섭법 시스템

Fig. 1. Shearographic system using a Wollaston prism and two wave plates

그림 1의 P₁과 P₂에서 반사된 광파가 $U_1 = a_1 e^{-j\theta(x,y)} = a_1 e^{-j\theta_1}$, $U_2 = a_2 e^{-j\theta(x+\delta x,y)} = a_2 e^{-j\theta_2}$ 라고 하자. 여기서 $\theta(x,y)$ 와 $\theta(x+\delta x,y)$ 는 각각 점

파장판을 이용한 스펙클패턴 전단간섭법에 있어서의 위상오차 해석

$P_1(x, y)$ 와 $P_2(x + \delta x, y)$ 로부터의 랜덤 위상관계를 표시하고, a_1 와 a_2 는 빛의 진폭이다. 그러면 두 개의 파장판을 통과한 후에는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$U = \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} & \mp i \sin \frac{\Gamma_2}{2} \\ \mp i \sin \frac{\Gamma_2}{2} & \cos \frac{\Gamma_2}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_1 \mp i e^{i\Gamma_1} \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_2 \\ \mp i \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_1 + e^{i\Gamma_1} \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 \mp 부호에서 $-$ 부호는 WP2의 slow axis가 $-x$ 축에 대하여 45도 회전되어 있는 경우에 대응하고, $+$ 부호는 WP2의 slow axis가 -45 도 회전되어 있는 경우에 대응하는 것이다. 광파가 x 축 편광판을 통과한 후에 이미지 면에서의 복소진폭은 다음과 같이 주어진다.

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

첫 번째로 두 개의 $\lambda/4$ 파장판을 이용할 경우에는 위상지연이 $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \pi/2$ 이므로 식 (2)는 다음 식과 같이 된다.

$$U_{wp2 \pm 45} = \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-i\frac{\pi}{4}} \{U_1 \pm U_2\} \quad (3)$$

식 (3)에 대한 빛의 세기는 다음 식과 같이 주어진다.

$$I_1 = U_{wp2+45} U_{wp2+45}^* = I_0 [1 + \gamma \cos \phi] \quad (4)$$

$$I_3 = U_{wp2-45} U_{wp2-45}^* = I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 180)] \quad (5)$$

여기서 $I_0 = (a_1^2 + a_2^2)/2$ 는 빛의 세기의 평균값이며, $\gamma = 2a_1 a_2 / (a_1^2 + a_2^2)$ 는 간섭항의 변조이며, $\phi = \theta_1 - \theta_2$ 는 랜덤 위상차를 나타낸다. 두 번째는 WP1과 WP2의 slow axis를 각각 0도와 45도(또는

-45 도)로 유지하고, 편광판의 축을 $-x$ 축에 대하여 45도와 -45 도로 한 경우에 편광판을 통과한 후의 복소진폭을 구하면 각각 식 (6) 및 식 (7)과 같이 주어진다.

$$U_{p+45} = \frac{1}{2} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} (\cos \frac{\Gamma_2}{2} - i \sin \frac{\Gamma_2}{2}) \begin{pmatrix} U_1 + e^{i\Gamma_1} U_2 \\ U_1 + e^{i\Gamma_1} U_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$U_{p-45} = \frac{1}{2} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} (\cos \frac{\Gamma_2}{2} + i \sin \frac{\Gamma_2}{2}) \begin{pmatrix} U_1 - e^{i\Gamma_1} U_2 \\ -U_1 + e^{i\Gamma_1} U_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$\Gamma_1 = \pi/2$, $\Gamma_2 = \pi/2$ 인 경우에 식 (6)과 (7)에 대한 빛의 세기는 다음 식과 같다.

$$I_2 = U_{p+45} U_{p+45}^* = I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 90)] \quad (8)$$

$$I_4 = U_{p-45} U_{p-45}^* = I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 270)] \quad (9)$$

식 (4), (5), (8), (9)에서 보는 바와 같이 파장판 두 개와 하나의 편광판을 이용함으로써 각각 90도의 위상천이를 가지는 4개의 스펙클패턴을 얻을 수 있음을 알 수 있다. $\lambda/4$ 파장판 두개를 이용하여 4개의 스펙클 패턴을 얻는 경우에 대한 동작을 나타내면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

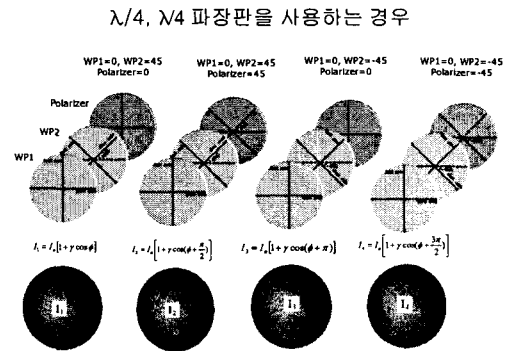


그림 2. $\lambda/4$ 파장판 두개를 사용하여 스펙클 패턴을 얻는 동작

Fig. 2. Operations obtaining speckle patterns using $\lambda/4$ wave plates

$\lambda/2$ 파장판과 $\lambda/4$ 파장판의 조합을 통해서도 90도의 위상천이를 가지는 4개의 스펙클패턴을 얻을 수 있다. $\Gamma_1 = \pi$, $\Gamma_2 = \pi/2$ 인 경우에 식 (2)는 식 (10)과 같이 된다.

$$U_{up2 \pm 45} = -\frac{\sqrt{2}}{2} i \{U_1 \pm i U_2\} \quad (10)$$

식 (10)에 대한 빛의 세기는 다음 식과 같이 주어진다.

$$I_2 = U_{up2+45} U_{up2+45}^* = I_0 [1 + \gamma \cos(\phi + 90)] \quad (11)$$

$$I_4 = U_{up2-45} U_{up2-45}^* = I_0 [1 + \gamma \cos(\phi + 270)] \quad (12)$$

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 (6)과 식 (7)과 같이 주어진다. $\Gamma_1 = \pi$, $\Gamma_2 = \pi/2$ 인 경우에 식 (6)과 (7)에 대한 빛의 세기는 다음 식과 같다.

$$I_3 = U_{p+45} U_{p+45}^* = I_0 [1 + \gamma \cos(\phi + 180)] \quad (13)$$

$$I_1 = U_{p-45} U_{p-45}^* = I_0 [1 + \gamma \cos \phi] \quad (14)$$

앞에서 알 수 있는 바와 같이 수동소자인 $\lambda/4$ 파장판 두개와 편광판 한개 또는 $\lambda/2$ 와 $\lambda/4$ 파장판과 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.

$$\phi = \arctan \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (15)$$

3. 파장판에 의한 위상오차 해석

파장판을 이용한 스펙클패턴 전단간섭법에서 주요한 위상오차는 편광소자의 불완전성에 기인한다. 본 논문에서는 $\lambda/2$, $\lambda/4$ 파장판 조합과 $\lambda/4$ 파장판 두개의 조합의 경우에 대하여 스펙클 패턴을 얻는 방법을 이야기하였는데, 편광소자의 불완전성에 의한 위상오차도 두 가지 경우에 대하여 고려하여 분석할 것이다. 그림 1에서 출력단에서의 빔은 Jones 행렬을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{out} = A(\varphi_3) WP2(\varphi_2) WP1(\varphi_1) E_{in} \quad (16)$$

여기서, E_{in} 은 입력광파를 나타내며, $A(\varphi_3)$, $WP2(\varphi_2)$, $WP1(\varphi_1)$ 는 각각 편광판, WP2, WP1의 Jones 행렬을 나타내며, 다음과 같다.

$$E_{in} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 e^{-j\theta_1} \\ a_2 e^{-j\theta_2} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$A(\varphi_3) = \begin{pmatrix} \cos^2 \varphi_3 & 1/2 \sin 2\varphi_3 \\ 1/2 \sin 2\varphi_3 & \sin^2 \varphi_3 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$WPi(\varphi_i) = \begin{pmatrix} 2j \sin^2 \varphi_i \sin \frac{\Gamma_i}{2} + e^{-i\frac{\Gamma_i}{2}} & j \sin 2\varphi_i \sin \frac{\Gamma_i}{2} \\ j \sin 2\varphi_i \sin \frac{\Gamma_i}{2} & -2j \sin^2 \varphi_i \sin \frac{\Gamma_i}{2} + e^{i\frac{\Gamma_i}{2}} \end{pmatrix} \quad (19)$$

여기서, $i=1, 2$ 이며, 1과 2는 각각 WP1과 WP2에 대한 Jones행렬을 나타내는 첨자이다. 그리고, 윗 식에서 $\varphi_3, \varphi_2, \varphi_1$ 는 각각 편광판, 파장판 WP2, 파장판 WP1소자들의 방위각을 나타낸다.

3.1 두개의 $\lambda/4$ 파장판이 사용되는 경우에 대한 위상오차

파장판의 불완전성에 의한 위상오차를 구하기 위해서 식 (16)에서 다음과 같은 4가지 경우에 대한 편광판과 파장판의 방위각조합에 대하여 각각 빛의 세기를 구해야 한다.

(1) $\varphi_3 = 0, \varphi_2 = 45, \varphi_1 = 0$ 인 경우에 대한 빛의 세기

$$I_1 = a_1^2 \cos^2 \frac{\Gamma_2}{2} + a_2^2 \sin^2 \frac{\Gamma_2}{2} \quad (20)$$

$$+ 2a_1 a_2 \cos \frac{\Gamma_2}{2} \sin \frac{\Gamma_2}{2} \sin(\phi + \Gamma_1)$$

(2) $\varphi_3 = 45, \varphi_2 = 45, \varphi_1 = 0$ 인 경우에 대한 빛의 세기

$$I_2 = 1/2 [(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \cos(\phi + \Gamma_1)] \quad (21)$$

(3) $\varphi_3 = 0, \varphi_2 = -45, \varphi_1 = 0$ 인 경우에 대한 빛의 세기

파장판을 이용한 스피클패턴 전단간섭법에 있어서의 위상오차 해석

$$I_3 = a_1^2 \cos^2 \frac{\Gamma_2}{2} + a_2^2 \sin^2 \frac{\Gamma_2}{2} - 2a_1 a_2 \cos \frac{\Gamma_2}{2} \sin \frac{\Gamma_2}{2} \sin(\phi + \Gamma_1) \quad (22)$$

(4) $\varphi_3 = 45, \varphi_2 = 45, \varphi_1 = 0$ 인 경우에 대한 빛의 세기

$$I_4 = 1/2 [(a_1^2 + a_2^2) - 2a_1 a_2 \cos(\phi + \Gamma_1)] \quad (23)$$

식 (15)와 식 (20)~(23)을 이용하여 광파 U_1 과 U_2 의 위상차 ϕ' 를 구하면 식 (24)로 표현할 수 있다.

$$\tan \phi' = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{-\cos(\phi + \Gamma_1)}{\sin \Gamma_2 \sin(\phi + \Gamma_1)} \quad (24)$$

불완전한 두 개의 $\lambda/4$ 파장판에 대하여 위상지연은 각각 $\Gamma_1 = \pi/2 + \gamma_1, \Gamma_2 = \pi/2 + \gamma_2$ 으로 놓을 수 있으며, 여기서 γ_1, γ_2 는 파장판에 의해 도입되는 상대적인 위상지연에 있어서의 오차를 의미한다. 오차를 포함한 위상지연을 식 (24)에 대입하여 계산하면 각 지점의 위상은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\tan \phi' = \frac{\tan \phi + \gamma_1 \sec^2 \phi}{1 - 1/2 \gamma_2^2} \quad (25)$$

위상오차가 포함된 $\tan \phi'$ 는 식 (26)과 같이 표현할 수 있다.

$$\tan \phi' = \tan(\phi + \Delta \phi) \approx \tan \phi + \Delta \phi \sec^2 \phi \quad (26)$$

따라서, 식(25)와 식 (26)을 이용하면 불완전한 파장판에 의한 위상오차 $\Delta \phi$ 는 식 (27)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta \phi = \gamma_1 + 1/4 \sin(2\phi) \gamma_2^2 \quad (27)$$

변형전과 후의 위상은 각각 위상오차를 가지게 되는데, 변형전과 후의 위상을 빼주게 되면 1차 위상오

차항 γ_1 은 사라지게 된다.

3.2 $\lambda/2, \lambda/4$ 파장판이 사용되는 경우에 대한 위상오차

$\lambda/2, \lambda/4$ 파장판 조합에 의한 위상오차도 3.1에서 유도한 것과 비슷한 방법으로 구할 수 있으며, 두 개의 파장판의 불완전성에 의한 위상오차를 구하기 위해서는 식 (16)에서 4가지 경우에 대한 편광판과 파장판의 방위각조합에 대하여 각각 빛의 세기를 구해야 한다.

(1) $\varphi_3 = 0, \varphi_2 = 45, \varphi_1 = 0$ 인 경우에 대한 빛의 세기

$$I_2 = a_1^2 \cos^2 \frac{\Gamma_2}{2} + a_2^2 \sin^2 \frac{\Gamma_2}{2} + 2a_1 a_2 \cos \frac{\Gamma_2}{2} \sin \frac{\Gamma_2}{2} \sin(\phi + \delta_1) \quad (28)$$

(2) $\varphi_3 = 45, \varphi_2 = 45, \varphi_1 = 0$ 인 경우에 대한 빛의 세기

$$I_3 = 1/2 [(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \cos(\phi + \delta_1)] \quad (29)$$

(3) $\varphi_3 = 0, \varphi_2 = -45, \varphi_1 = 0$ 인 경우에 대한 빛의 세기

$$I_4 = a_1^2 \cos^2 \frac{\Gamma_2}{2} + a_2^2 \sin^2 \frac{\Gamma_2}{2} - 2a_1 a_2 \cos \frac{\Gamma_2}{2} \sin \frac{\Gamma_2}{2} \sin(\phi + \delta_1) \quad (30)$$

(4) $\varphi_3 = 45, \varphi_2 = 45, \varphi_1 = 0$ 인 경우에 대한 빛의 세기

$$I_1 = 1/2 [(a_1^2 + a_2^2) - 2a_1 a_2 \cos(\phi + \delta_1)] \quad (31)$$

식 (15)와 식 (28)~(31)을 이용하여 광파 U_1 과 U_2 의 위상차 ϕ' 를 구하면 식 (32)로 표현할 수 있다.

$$\tan \phi' = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{\sin(\Gamma_2) \sin(\phi + \delta_1)}{\cos(\phi + \delta_1)} \quad (32)$$

불완전한 $\lambda/2$, $\lambda/4$ 파장판에 대하여 위상지연은 각각 $\delta_1 = \pi/2 + \gamma$, $\Gamma_2 = \pi/2 + \gamma_2$ 으로 놓을 수 있으며, 여기서 γ , γ_2 는 각각 $\lambda/2$, $\lambda/4$ 파장판에 의해 도입되는 상대적인 위상지연에 있어서의 오차를 의미한다. 오차를 포함한 위상지연을 식 (32)에 대입하여 계산하면 각 지점의 위상은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\tan \phi' = \cos \gamma_2 \tan(\phi + \gamma) \quad (33)$$

식 (26)과 식 (33)을 이용하면 불완전한 파장판에 의한 위상오차 $\Delta\phi$ 는 식 (34)와같이 구할 수 있다.

$$\Delta\phi = \gamma - 1/4 \sin(2\phi) \gamma_2^2 \quad (34)$$

변형전과 후의 위상차를 구하면 $\lambda/2$ 파장판에 의한 위상오차 γ 는 사라진다. 위상오차의 해석을 통해 파장판에 의한 위상오차의 1차항은 사라진다는 것을 확인할 수가 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 Wollaston 프리즘을 이용한 스펙클패턴 진단간섭법에서 변형전후의 간섭패턴을 각각 4개씩 얻고 이로부터 각 지점에서의 위상을 얻은 후에, 위상차를 구함으로써 물체의 변형에 대한 기술기 정보를 얻을 수 있다. 또한, $\lambda/2$, $\lambda/4$ 파장판 조합과 $\lambda/4$ 파장판 두개의 조합의 경우에 있어서의 파장판의 불완전성에 의해 발생하는 위상오차를 Jones 행렬을 이용하여 해석하였으며, 해석을 통해 파장판에 의한 위상오차의 1차항의 영향은 무시될 수 있다는 것을 알 수가 있었다. 추후에는 각 편광소자들의 방위각과 입사각의 변화에 의한 위상오차 연구가 이루어질 예정이다.

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. Cornet, 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 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과(석사). 1997년 서울대학교 대학원 전기공학과(박사). 1997년~현재 호서대학교 정보제어공학과 부교수, 본 학회 조사이사.