Shearographic system을 이용한 폴리머애자 결함 진단

(A Defect Diagnosis of Polymer Insulator using Shearographic system)

김수길* · 고명숙

(Soo-Gil Kim · Myungsook Ko)

*호서대학교 전기정보통신공학부 · 부천대학 전산정보처리과

Abstract

We present the method to obtain four speckle patterns with relative phase shift of π/2 by passive devices such as wave plate and polarizer, and calculate the phase at each point of the speckle pattern in shearographic system using Wollaston prism. And, to demonstrate the feasibility of the proposed system, we present the experimental results using polymer insulator.

1. 서 론

Wollaston 프리즘을 이용하는 스펙클패턴 전단간섭법은 구조가 단순하고 외부환경에 대해 아주 강인한 특성을 가지고 있다.[1,2] 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.[3] 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. 파장판을 이용한 shearographic system의 원리

그림 1의 P_1과 P_2에서 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 $P_1(x,y)$와 $P_2(x+\delta x,y)$로부터의 랜덤 위상관계를 표시하고, a_1와 a_2는 빛의 진폭이다.

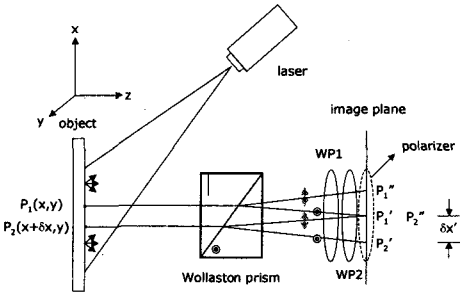

그림 1. Wollaston 프리즘과 파장판을 이용한 스페클패턴 전단간섭법 시스템

그러면, 두 개의 파장판을 통과한 후에는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.[4]

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

여기서, 干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.

$$U_{wp2\pm45} = e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}}\{cos\frac{\Gamma_2}{2}U_1 \mp ie^{i\Gamma_1}\sin\frac{\Gamma_2}{2}U_2\} \quad (2)$$

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

$$U_{wp2\pm45} = \frac{\sqrt{2}}{2}e^{-i\frac{\pi}{4}}\{U_1 \pm U_2\} \quad (3)$$

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, $\gamma=2a_1a_2/(a_1^2+a_2^2)$는 간섭항의 변조이며, $\phi=\theta_1-\theta_2$는 랜덤 위상차를 나타낸다. 두 번째는 WP1과 WP2의 slow axis를 각각 0도와 45도(또는 -45도)로 유지하고, 편광판의 축을 -x축에 대하여 45도와 -45도로 한 경우에 편광판을 통과한 후의 복소 진폭을 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 두개와 하나의 편광판을 이용함으로써 각각 90도의 위상천이를 가지는 4개의 스펙클패턴을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 앞에서 구한 4개의 간섭패턴으로부터 각 지점의 위상은 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$\phi = arctan\frac{(I_1-I_2)}{(I_1-I_3)} \quad (10)$$

3. 실험결과

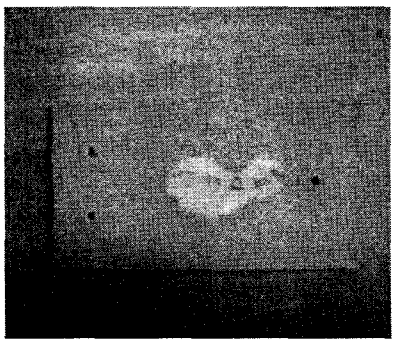

그림 2. 열화된 폴리머 애자 샘플

그림 2는 열화된 폴리머애자의 샘플을 보여주는 사진이다. 열화실험에 의하여 샘플의 중앙부분에 방전에 의한 길이 보인다. 본 논문에서는 폴리머 애자의 열화현상에 의하여 생긴 폴리머애자의 결함을 제안된 시스템을 이용하여 검출하는 실험을 하였다. 변형전과 후에 대한 위상을 각각 구하고 이에 대한 위상차를 구하게 되면 위상지도가 얻어진다. 본 논문에서 변형을 일으키기 위해서 온도를 변화시켰다. 실험조건은 변형 전에 온도가 약 5도였으며, 변형을 일으키기 위해 온도를 약 30도까지 상승시켰다. 온도를 변화시킨후 약 30-60초 후에 변형후의 위상을 구하기 위해 제안된 시스템을 이용하여 위상을 구하였다. 변형전과 후에 대하여 4단계의 위상천이 방법을 이용하여 위상지도를 구한 결과 그림 3과 같은 결과를 얻었다. 그림 3의 위상지도를 가지고서는 결함을 파악하는 것이 어렵다. 보다 정확한 진단을 하기 위해서는 그림 3의 정보를 가공하여 그림 4와 같은 컬러 영상을 얻었다.

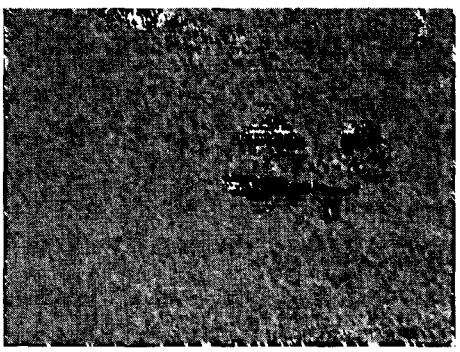

그림 3. 열화된 폴리머애자 샘플의 위상지도

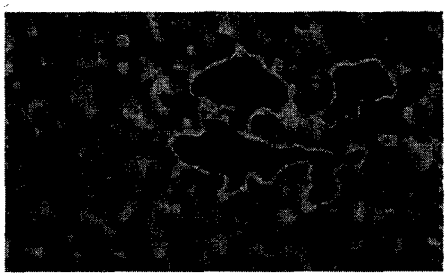

그림 4. 열화된 폴리머애자 샘플의 컬러 영상

그림 4는 그림 3의 위상지도의 정보를 가공하여 변형에 대한 기울기 정보를 크기에 따라 색깔별로 나타낸 것이다. 그림에서 빨간 색은 변형에 대한 기울기가 증가하는 부분을 보여주며 파란 색은 기울기가 감소하는 부분을 보여주는 것이다. Shearography를 이용하여 결함을 추출할 시에는 컬러 영상에서 빨간부분과 파란 부분이 한 쌍으로 존재하는 나비모양형태가 존재하는 부분이 결함이 존재하는 부분이다. 그림 4에서는 중앙부분에 한 쌍의 나비모양이 보이는 것을 알 수가 있다. 보다 상세히 표현하기 위해 그림 4에서의 영상에 대한 단면도를 구하여 보았다. 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 왼쪽부분에는 산이 보이고 오른쪽 부분에는 골이 보인다. 산쪽 부분은 그림 4에서의 빨간 부분에 해당되는 부분이며, 골 부분은 그림 4에서의 파란 부분에 해당되는 부분이다. 이를 통해서 변형이 있는 부분에서의 기울기의 변화가 생기며, shearogrphy의 특징이 변형이 있는 부분에서는 기울기로서 결함을 검출할 수 있다는 사실과 부합되는 결과를 보여주는 것과 일치하는 것을 알 수가 있다.

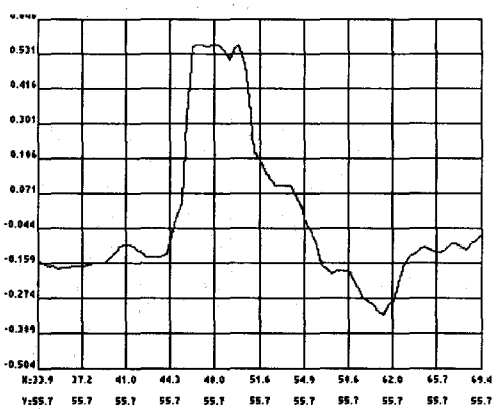

그림 5. 그림 4에서의 컬러 영상에 대한 단면도

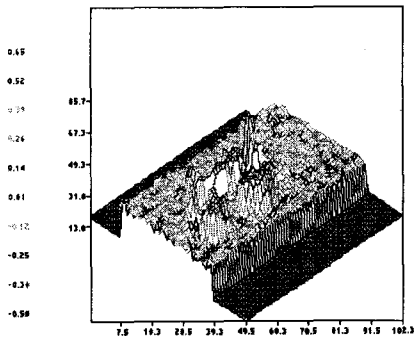

그림 6. 위상지도의 3차원 영상

그림 4에서의 컬러 영상을 3차원으로 표현하면 그림 6과 같은 결과로서 나타난다. 그림에서 보는 바와 같이 우측부분에 피크부분이 보이는데, 이 부분이 변형 또는 결함이 생긴 부분으로 볼 수 있다. 실제로 폴리머 애자의 샘플에서 제안된 시스템을 이용하여 검출된 부분에서 어떠한 이상이 있는 지 확인하기 위해 샘플을 현미경을 통해 분석하여 보았다.

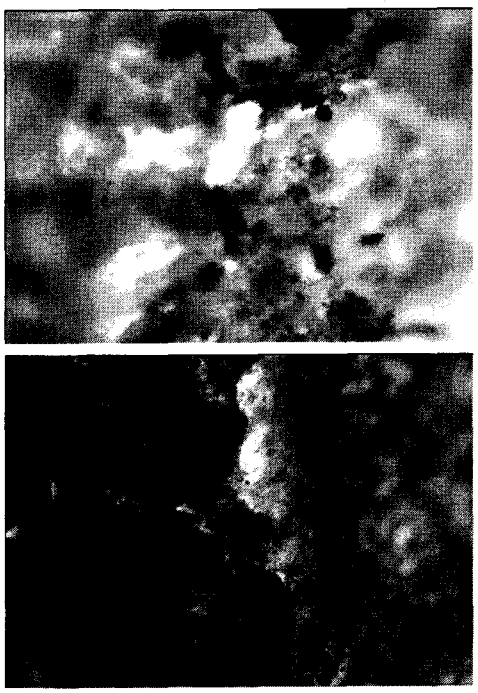

그림 7. 투과형 현미경을 통하여 본 폴리머애자의 샘플(10배 확대)

그림 7은 열화된 폴리머애자의 샘플을 10배 확대한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 확대영상에서 크랙이 생긴 것을 알 수가 있다. 이 결과로부

터 제안된 시스템을 이용하여 검출한 결과가 폴리머애자의 결함을 검출하였음을 알 수 있다. 폴리머애자의 샘플에 생긴 크랙의 크기는 대략 50 ㎛로 측정되었다. 본 논문에서 제안된 시스템이 ㎛ 정도의 변형에 대하여서도 검출할 수 있다는 것이 입증되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 Wollaston 프리즘을 이용한 스펙클 패턴 전단간섭법에서 변형전후의 간섭패턴을 각각 4개씩 얻고 이로부터 각 지점에서의 위상을 얻은 후에, 위상차를 구함으로써 물체의 변형에 대한 기울기 정보를 얻을 수 있는 원리를 소개하였으며, 제안된 시스템의 가능성을 입증하기 위해 폴리머애자의 결함을 제안된 방식을 이용하여 측정하였다. 측정한 결과 ㎛정도의 변형에 대하여서도 검출할 수 있다는 것이 입증되었다.

참 고 문 헌

[1] Y.Y. Hung, "Shearography fo non-destructive evaluation of composite structures," Optics and Lasers in Engineering vol. 24, pp. 161-182, 1996.

[2] S. Dilhaire, S. Jorez, A. Cornet, L.D. Patino Lopez, W. Claeys, "Measurement of the thermomechnical strain of electronic devices by shearography," Microelectronics Reliability vol. 40, pp. 1509-1514, 2000.

[3] 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.

[4] A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*(Wiley, New York, 1984), Chap. 5.