

# 스펙클패턴 전단간섭법을 이용한 폴리머 시료의 결함진단

(A Defect Diagnosis of Polymer Specimen using Shearography)

김수길\* · 이준호

(Soo-Gil Kim · Jun-Ho Lee)

## 요 약

본 논문에서는 편광소자를 이용하는 스펙클패턴 전단간섭법(shearography)에서 스펙클패턴의 각 지점에서의 위상을 얻을 수 있는 방법을 설명하고, 폴리머 시료에 대한 결함 진단 실험을 통하여 제안된 방법의 적용가능성을 입증하였다.

## Abstract

We present the method to calculate the phase at each point of the speckle pattern in shearographic system using Polarization components. And, to demonstrate the feasibility of the proposed system, we present the experimental results using polymer specimen.

Key Words : Shearography, Wollaston prism, Phase-shifting technique, Polymer specimen

## 1. 서 론

1973년에 Leendertz와 Butters에 의해 스펙클패턴 전단간섭법이 발표된 이래로 많은 연구자들이 이에 대한 연구결과를 발표하였다[1-6].

스펙클패턴 전단간섭법을 이용하여 구한 결과는 프린지패턴 형태이며, 이러한 프린지 패턴으로부터 위상을 구하여 이를 이용하여 측정대상물체의 변형 정도를 구하게 된다. 스펙클패턴 전단간섭법에서 프린지 패턴을 구하기 위해 적용되는 것이 위상천이기

술이다[7].

위상천이기술은 측정된 스펙클패턴으로부터 인터페로그램(interferogram)의 위상분포를 결정하는 방법이다.

위상천이기술은 부가적인 위상을 3번에서 5번까지 천이시켜 3개에서 5개의 스펙클패턴을 얻고, 이로부터 스펙클패턴의 각 지점의 위상분포를 결정하는 기술이다[8].

윌라스톤 프리즘(Wollaston prism)을 이용하는 스펙클패턴 전단간섭법은 구조가 단순하고 외부환경에 대해 아주 강인한 특성을 가지고 있다[9-10]. 그러나 이 방법은 위상천이기술을 적용하기가 어렵다는 단점을 가지고 있다.

최근에 윌라스톤 프리즘을 이용한 스펙클패턴 전단간섭법에서 편광소자인 파장판과 편광판을 이용

\* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수

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

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

접수일자 : 2006년 4월 26일

1차심사 : 2006년 5월 4일

심사완료 : 2006년 7월 1일

## 스펙클패턴 전단간섭법을 이용한 폴리머 시료의 결함진단

하여 안정적으로 위상천이를 발생시키는 방법이 제안되고, 제안된 시스템에서 파장판의 불완전성에 의한 위상오차해석이 이루어졌다[11].

본 논문에서는 제안된 스펙클패턴 전단간섭법의 적용가능성을 입증하기 위하여 현장에서 자기애자의 대체용도로 많이 사용되고 있는 폴리머애자와 동일한 재료로 만들어진 시료에 대한 결함진단 실험을 하였으며, 이에 대한 결과를 분석하였다.

### 2. 파장판을 이용한 shearographic system의 원리

그림 1의 P<sub>1</sub>과 P<sub>2</sub>에서 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<sub>1</sub>(x,y)와 P<sub>2</sub>(x+ $\delta x$ ,y)로부터의 랜덤 위상관계를 표시하고, a<sub>1</sub>와 a<sub>2</sub>는 빛의 진폭이다.

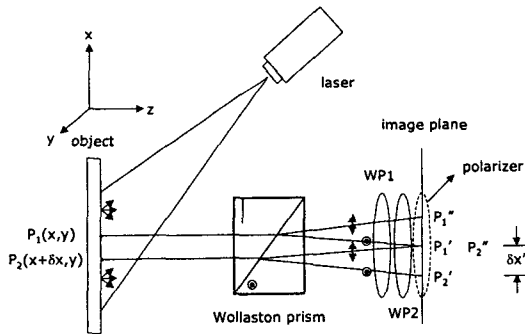


그림 1. Wollaston 프리즘과 파장판을 이용한 스펙클패턴 전단간섭법 시스템

Fig. 1. Shearographic system using polarizing elements

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

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

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

여기서  $\Gamma_1$ 는 두 개의 파장판의 위상차,  $\Gamma_2$ 는 파장판의 위상차이다.  $\Gamma_1 = \pi/2$ 인 경우에  $-x$ 축에 대하여 45도 회전되어 있는 경우에 대응하고,  $\Gamma_1 = 0$ 인 경우에  $x$ 축 편광판을 통과한 후에 이미지 면에서의 복소진폭은 다음과 같이 주어진다.

$$U_{w\lambda/4} = e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_1 \mp i e^{i\Gamma_1} \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_2 \quad (2)$$

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

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

식 (3)에 대한 빛의 세기는 다음 식과 같이 주어진다.

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

$$I_3 = U_{w\lambda/4} U_{w\lambda/4}^* = I_0 [1 + \gamma \cos(\phi + 180)] \quad (5)$$

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

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

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

$\Gamma_1 = \pi/2$ ,  $\Gamma_2 = \pi/2$ 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. 앞에서 구한 4개의 간섭패턴으로부터 각 지점의 위상은 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$\phi = \arctan \frac{(I_4 - I_2)}{(I_1 - I_3)} \quad (10)$$

변형전과 후에 대하여 각각 4개의 스펙클 패턴을 얻고 식 (10)을 이용하여 스펙클 패턴의 각 지점의 위상을 구한 다음에, 변형전과 후의 위상으로부터 위상차를 구하여 얻을 수 있다. 이렇게 구한 위상차로 구성된 것이 위상지도이며 이를 위상펼침한 영상으로부터 물체의 결함유무를 진단할 수가 있다[8].

### 3. 실험결과

본 논문에서 제안된 방법의 적용가능성을 입증하기 위하여 폴리머 시료에 대한 결함진단 실험을 하였으며, 실험구성도는 그림 2와 같다.

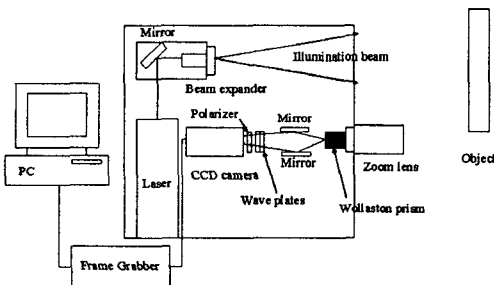


그림 2. 실험구성도  
Fig. 2. Experimental setup

그림 2의 실험구성도에서 레이저는 35[mW]의 출력과 633[nm]의 파장을 가진 He-Ne 레이저(Model 25 LHP 928-230, Melles-Griot)를 사용하였다.

그림 3은 실험에 사용된 폴리머 재질의 시료사진이며, 실험에 사용된 폴리머 시료는 결함을 만들기 위해 열화실험을 통해 열화된 상태이다. 그림 3의 폴리머 시료에서 열화실험에 의하여 시료의 중앙부분에 방전으로 인해 만들어진 경로가 존재하는 것이 보인다.

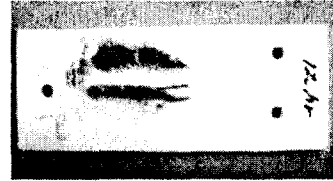


그림 3. 폴리머 시료  
Fig. 3. Polymer specimen

시료의 결함진단을 하기 위해서 먼저 변형전과 변형 후에 대한 스펙클 패턴을 얻어야 하며, 이로부터 각 지점의 위상을 식 (10)으로부터 구하고 변형전과 후에 대한 위상차를 구하여 폴리머 시료의 위상지도를 얻어야 한다. 이 위상지도를 이용하여 위상펼침(phase unwrapping)을 하고 적절한 영상처리를 함으로써 결함유무를 진단할 수 있다. 이에 대한 과정은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

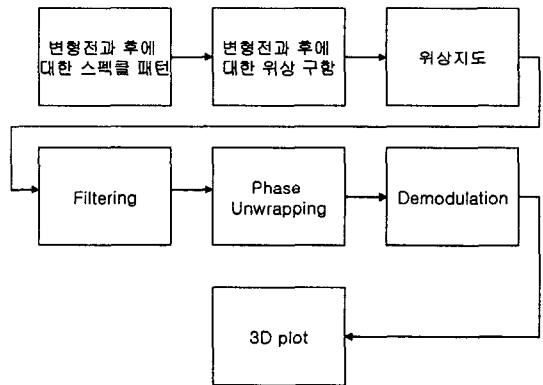


그림 4. 위상복원 알고리즘  
Fig. 4. Phase extraction algorithm

본 논문에서 변형전과 후에 대한 위상차를 얻기 위하여 폴리머 주변의 온도를 변화시켰다. 폴리머 시료에 변형을 주기전의 온도가 약 5도였으며, 변형을 주기 위해서 폴리머 주변의 온도를 약 30도까지 상승시켰다. 변형전과 후에 대하여 4단계의 위상천이 방법을 이용하여 각각 4개의 스펙클 패턴을 얻고 이로부터 폴리머 시료의 위상지도를 구하였으며, 이에 대한 결과는 그림 5와 같다. 그림 5의 2차원 평면 형태의 위상지도를 보면 방전경로의 좌측부분에 검은 흔적들이 보이지만 그림에서 결함유무를 식별하기가 쉽지 않다. 이것은 위상지도에서는 0~2[π]까지

스펙클패턴 전단간섭법을 이용한 폴리머 시료의 결함진단

의 위상이 반복적으로 나타나므로 결함부분이 명확히 드러나지 않기 때문이다.



그림 5. 폴리머 시료의 위상지도  
Fig. 5. Phase map of polymer specimen

따라서 보다 정확한 진단을 하기 위해서는 위상지도 전체에 대하여 위상이  $0 \sim 2[\pi]$  값만을 갖도록 위상펼침(phase unwrapping)을 하여야 한다. 그림 6은 그림 5의 위상지도를 위상펼침하여 얻은 결과를 보여준다.

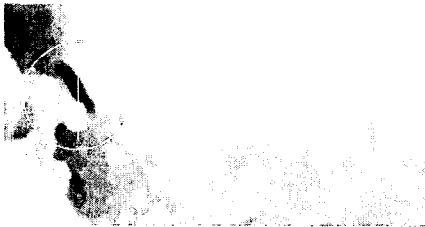


그림 6. 위상펼침한 결과  
Fig. 6. Result of phase unwrapping

그림 6은 위상지도를 위상펼침하여  $0 \sim 2[\pi]$ 까지의 위상을 크기에 따라 색깔별로 나타낸 것이다. 그림에서 위상이  $0 \sim [\pi]$  사이의 위상인 경우에는 검은색 계열로,  $[\pi] \sim 2[\pi]$  사이의 위상은 흰색 계열로 표시된다. 위상이 0에 가까울수록 검은 색이 짙어지고, 위상이  $2[\pi]$ 에 가까워질수록 밝은 흰 색으로 나타나도록 하였다. 다시 말하면 변형에 대한 기울기가 증가하는 부분과 감소하는 부분을 각각 흰 색과 검은색 계열로 표시한 것이다. Shearography를 이용하여 결함을 진단하는 경우에는 위상펼침한 결과에서 흰색과 검은색이 한 쌍으로 존재하는 부분이 결함이 존재할 가능성이 가장 높은 부분으로 알려져 있다

[8]. 그림 6에서는 좌측부분(원으로 표시된 안쪽 부분)에 이와 같은 모양이 나타난 것을 알 수가 있다.

그림 6의 영상에서 원안에 있는 직선부분에 대한 단면도를 구하면 그림 7과 같이 나타나는데, 그림에서 보는 바와 같이 뚜렷하게 산과 골이 보이는 것을 알 수가 있다.

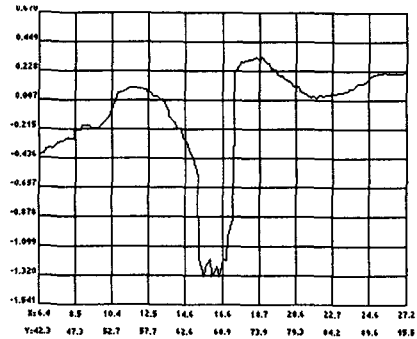


그림 7. 그림 6에 대한 단면도  
Fig. 7. Cross section of Fig. 6

산은 그림 6에서 흰색계열에 해당되는 부분이며, 골은 그림 6에서 검은색 계열에 해당되는 부분을 나타낸다. 이를 통해서 변형이 생긴 곳에서는 기울기의 변화가 생기는 것을 확인할 수가 있으며, shearography의 특징이 변형이 생긴 부분을 기울기에 의해 검출할 수 있다는 사실과 부합되는 결과를 보여주는 것을 알 수가 있다.

제안된 시스템을 이용하여 결함이 의심되는 부분을 검출하였는데, 실제 이 부분에서 어떤 결함이 있는지 확인하기 위하여 현미경을 이용하여 폴리머 시료를 확대하여 보았다.

그림 8은 결함이 의심되는 부분을 반사형 현미경을 이용하여 확대한 영상으로 화살표로 표시된 부분에 크랙이 있는 것을 알 수가 있으며, 크랙의 크기는  $10[\mu m]$  이하로 관측되었다.

그림 9는 결함이 없는 부분을 현미경으로 확대하여 보았는데, 결함이 없는 부분은 표면이 깨끗한 것을 확인할 수 있다.

실험결과로부터 제안된 시스템을 이용하여 폴리머 시료의 결함을 검출할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.



그림 8. 반사형 현미경을 이용하여 40배 확대한 폴리머 시료(결함이 있는 부분)  
Fig. 8. Magnification of polymer specimen with a defect

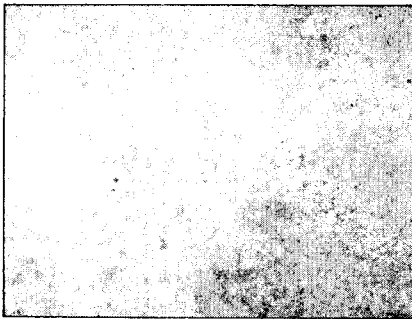


그림 9. 반사형 현미경을 이용하여 10배 확대한 폴리머 시료(결함이 없는 부분)  
Fig. 9. Magnification of polymer specimen without a defect

#### 4. 결 론

본 논문에서는 Wollaston 프리즘을 이용한 스펙클패턴 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 폴리머 시료의 결함을 제안된 방식을 이용하여 측정하였다. 실험결과  $[\mu\text{m}]$  정도의 변형도 검출할 수 있다는 것이 입증되었다.

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

#### 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] S.-C. Kim, "Phase Error Analysis in Shearography using Wave Plates," *J. of KIEE* vol. 19, no.1, pp. 34-39, 2005.
- [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 졸업(석사). 1997년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~현재 호서대학교 정보제어공학과 부교수.

##### 이준호 (李俊昊)

1962년 9월 25일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~1994년 일본전력연구소 초빙연구원. 2001~2002년 미국 MIT 방문연구원. 1994년~현재 호서대학교 전기공학과 교수.