

# CFRP에 내재된 결함의 비파괴 평가를 위한 Shearography기법 적용

최상우<sup>1)</sup>, 이준현<sup>2)</sup>

## Application of Shearography for Nondestructive Evaluation of Internal Defects in CFRP

Sang-Woo Choi and Joon-Hyun Lee

**Key Words** : CFRP, Shearography, Nondestructive Evaluation, Defects

### Abstract

Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) is one of optical technique to measure displacement precisely, uses CCD camera to show result image in real time. General ESPI system measures in-plane or out-of-plane displacement. Shearography is one of electronic speckle pattern interferometric methods which allow full-field observation of surface displacement derivatives and it is robust in vibration. The shearography provides non-contacting technique of evaluating defects nondestructively. In this study, the shearography was used to evaluate defects in Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP). Various sizes of artificial defects were embedded in various depths of woven CFRP plate. Effects due to the variation of size and depth of defects were evaluated in this study.

### 1. 서론

최근 비접촉 방법의 비파괴 평가에 관한 필요성이 증대되고 있다. 특히 고온의 대상체 등과 같이 직접적인 접근이 불가능할 때는 비접촉식의 평가 방법은 필수적이

---

1) 부산대학교 기계기술연구소  
2) 부산대학교 기계공학부

다. 이를 위하여 레이저를 이용하여 초음파를 비접촉의 방법으로 발생시키고 레이저 간섭계를 이용하여 초음파를 비접촉으로 수신하는 레이저 유도 초음파 기법이 국내외에서 활발히 연구되기 시작하였다.<sup>[1-3]</sup> 또한 기존의 비파괴 평가방법과는 달리 전자 스펙클 패턴 간섭계(ESPI)를 이용하는 기법이 비파괴 평가 방법에 적용되기 시작하였으며, 특히 ESPI기법의 일종인 shearography는 변형의 구배를 측정하는 기법으로 재료에 내재된 결함검출에 유용한 기법이다.<sup>[4-8]</sup>

우주항공분야의 구조물 재료로 알루미늄 합금 등의 금속재료와 섬유강화 복합재료 등이 널리 사용되고 있다. 특히 섬유강화 복합재료에서 층간분리의 결함이 예상되므로, 이들 섬유강화 복합재료 구조물의 안전성을 위해서는 재료 내부에 존재하는 결함에 대한 비파괴 평가가 필수적이며, 이를 위하여 초음파를 이용하는 평가 방법 등의 비파괴 평가 방법이 적용되어 왔다. 한편, 레이저를 조사하고 산란된 레이저광을 CCD카메라로 촬영하는 광학적 기법으로 넓은 영역에서 결함을 실시간으로 평가할 수 있는 shearography기법이 선진국에서 효율적인 결함검출 기법으로써 연구가 진행되고 있다.<sup>[4-6]</sup>

본 연구에서는 탄소섬유강화 복합재료에서 깊이와 크기가 다른 다양한 인공결함을 내재시키고, 이를 shearography 기법을 적용하여 검출하며, 결함의 크기 및 깊이에 따른 특성을 평가하고자 하였다.

## 2. Shearography의 특성

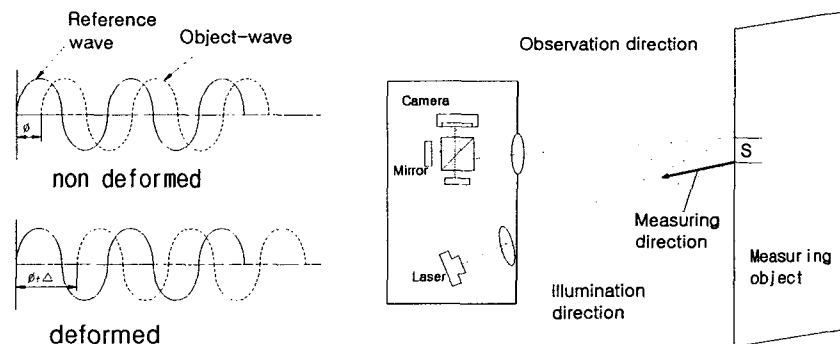


Fig. 1 Principle of shearography

Shearography는 원래 응력(변형률) 측정을 위하여 개발되어진 레이저를 기초로한 광학기법이다. 이는 넓은 영역의 응력분포를 측정할 수 있으며 실시간 측정이 가능하다. Shearography의 원리는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 레이저빔이 시험 대상면에 조사되고 산란된 레이저광은 두 개의 반사경에 의해 중첩되어 CCD카메라에 측정된다. 즉, shearography에서 측정되는 신호는 두 점에서의 산란된 레이저광의 간섭광을 측정하는 것으로 레이저광원에서 CCD카메라까지의 두 점에 대한 광로차의 변화의 차이

를 측정하여 표면 변형률을 나타내게 된다. ESPI를 포함한 일반적인 홀로그래피가 미세한 진동에도 매우 민감한 반면 shearography는 진동 등과 같은 외부 교란에 둔감하므로 산업현장의 적용이 용이하다.

### 3. 재료 및 실험 방법

본 연구에서 적용된 시험편은 탄소섬유가 평직(plain weave)으로 직조(woven)된 프리프레그 8층(2.3mm)을 적층하여 제작한 탄소섬유강화 복합재료이다. 본 시험편 내부에는 Fig. 2와 같이 1 ply 깊이에서 4 ply 깊이까지 정사각형의 인공결함이 다양한 크기로 내재되어 있다. 즉, 인공결함은 테프론으로 3mm×3mm에서 5mm×5mm, 10mm×10mm, 15mm×15mm, 20mm×20mm까지의 5가지 크기로 각각의 깊이마다 내재시켰다.

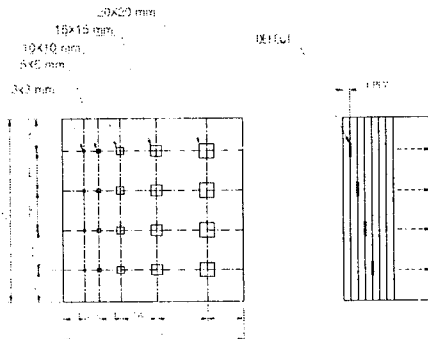


Fig. 2 Location and size of artificial defect in CFRP

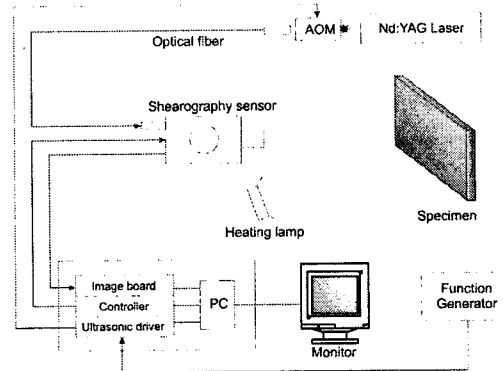


Fig. 3 Schematic experimental setup

Fig. 3은 본 연구에서 적용된 shearography 측정 장비의 장치도이다. 본 연구에서 사용된 레이저는 532nm의 파장을 가지며 광섬유(Optical fiber)를 통하여 shearography sensor로 전달된다. Shearography sensor는 레이저를 대상체에 조사시키고, 대상체에서 산란된 빛을 수신하는 광학기구와 CCD 카메라의 일체형으로 구성되어 있다. CCD카메라에서 측정된 영상데이터는 이미지보드를 통하여 PC에서 처리되어 결과이미지를 실시간으로 출력하게 된다.

Shearography를 이용한 표면 내부결함을 검출하기 위하여 일반적인 ESPI의 적용 기법과 동일하게 변형전의 기준이미지(reference image)와 변형후의 이미지가 필요하다. Shearography의 이미지에서는 변형전과 변형후의 결함부위의 변형률의 차이를 나타내어 결함을 검출 및 평가하게 된다. 본 연구에서는 600W의 할로겐 램프를 이용하여 시험편에 열변형을 유발하였으며, 약 20cm거리에서 5초동안 시험편 표면을 할로겐

램프를 조사하여 시험편이 미소변형을 가지도록 하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 20mm×20mm의 정사각형 인공결합 2개가 내재된 영역의 shearography 기법으로 측정된 phase map 이미지이다. 이미지의 중앙에 2개의 정사각형 테두리 형태의 결합 형상이 나타나고 있다. Phase map에서 좌측 상부에서 우측하부로 갈수록 점차 어두워지다가 흑색에서 백색으로 반전되고 다시 백색이 점차 어두워지는 결과를 나타내고 있다. 흑색에서 백색으로 반전되는 곳은 위상값을 항상 0과  $\pi$  사이 값으로 나타내게 되므로 위상이 0으로 감소하다가 0미만으로 감소하는 경우  $\pi$ 로 바뀐 후 감소하게 되는 이미지를 나타내고 있다. 본 phase map은 좌측 상부에서 우측하부의 방향으로 변형률이 증가함을 나타내는데, 이는 열적 변형을 가하는 할로겐 램프의 위치에 의하여 가열의 불균형으로부터 기인된 것이다. 전체적인 영역에서 세로 미세한 줄무늬가 나타나고 있으며 이는 탄소섬유 강화재의 직조 방향에 의한 것으로 shearography의 전단 방향이 수평이므로 수직방향의 섬유 강화재 배향이 검출된 결과이다.

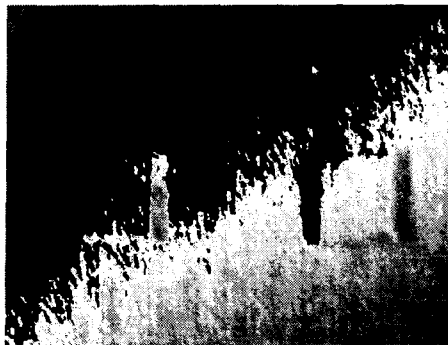


Fig. 4 Phase map

다음 Fig. 5는 앞의 Fig. 4의 phase map을 0에서  $\pi$ 까지의 위상으로 나타낸 결과를 연속된 값으로 나타낸 결과(unwrapped image)이다. 이것은 shearography의 전단 방향이 수평 즉, X축 방향이므로 Z축방향(out-of-plane)의 변위의 X축 방향의 변화율을 나타낸다. 본 Fig. 5의 결과에서 두 정사각형 결합의 형상이 측정면 중앙에서 좌우에 각각 나타났으며, 좌측의 결합은 시험편 표면에서 1 ply 아래에 존재하는 인공결합이고 우측의 결합은 시험편 표면에서 2 ply 아래에 존재하는 결합이다. Shearography sensor의 전단방향이 수평방향이므로 결합의 세로 경계부분이 뚜렷하게 나타났으며, 이로부터 결합의 형상과 크기를 알 수 있다.

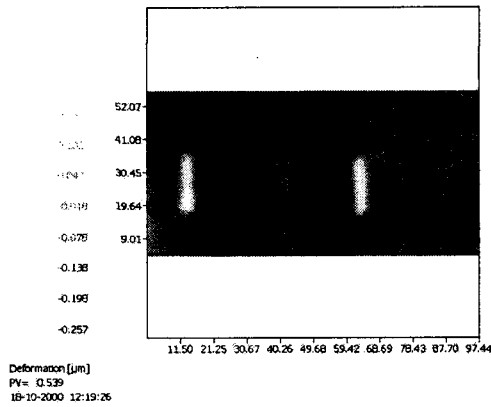


Fig. 5 Unwrapped image (defect size : 20mm×20mm, location : 1 ply, 2 ply)

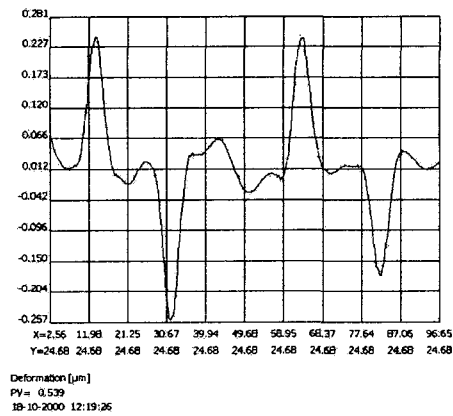


Fig. 6 Profile data (defect size : 20mm×20mm, location : 1 ply, 2 ply)

Fig. 6는 Fig. 5에서 결함이 존재하는 수평단면 즉, Y=24.68mm의 지점에서 X축의 변화에 따른 신호의 세기를 나타낸 결과이다. 양의 피크에서 음의 피크까지의 거리로 결함의 폭이 측정될 수 있음을 보여주고 있으며, 좌측의 표면에서 1 ply 아래에 있는 결함의 피크 크기가 우측의 표면에서 2 ply 아래에 있는 결함의 피크 크기에 비하여 큰 값을 나타냄을 보여주고 있다.

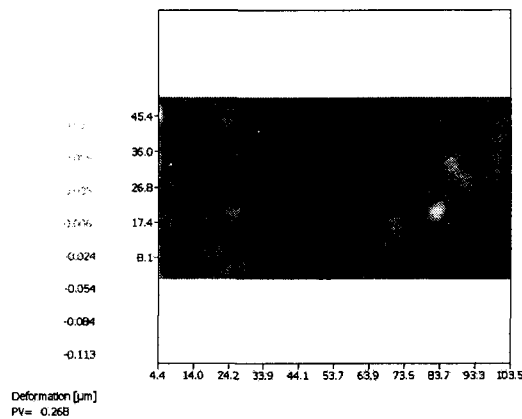


Fig. 7 Unwrapped image (defect size : 5mm×5mm, 3mm×3mm, location : 3 ply, 4 ply) (shear:4mm)

Fig. 7은 균열크기 5mm×5mm와 3mm×3mm에 대한 shearography 측정 결과로 시험편 표면아래 3 ply, 4 ply아래의 깊은 곳에 결함이 위치한 경우이다. 본 결과에서는 5mm×5mm 크기의 결함은 검출되었으나 그 이미지는 결함의 깊이가 표면으로부터

터 1 ply, 2 ply아래인 경우보다 미약하였고, 3mm×3mm 크기의 결함은 검출되지 못하였다. 즉, 결함의 크기가 감소할수록 결함의 검출이 가능한 깊이도 감소함을 나타내고 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 결함 검출능을 향상시키기 위하여 shearography의 전단크기를 4mm에서 3mm로 감소시켜 측정한 결과이다. Fig. 8은 표면으로부터 2 ply, 3 ply아래에 3mm×3mm 크기의 결함과 5mm×5mm크기의 결함이 존재하는 경우의 측정 결과 이미지이다. 앞의 결과에서 측정이 불가능하였던 3mm×3mm크기의 결함 중에서 표면으로부터 3 ply, 4 ply아래의 결함을 검출하고자 전단크기를 3mm로 감소시켰으나 시험편 내부의 결함보다는 시험편을 구성하는 탄소섬유의 배향 특성을 나타내는 세로 줄무늬가 더욱 강하게 나타났다.

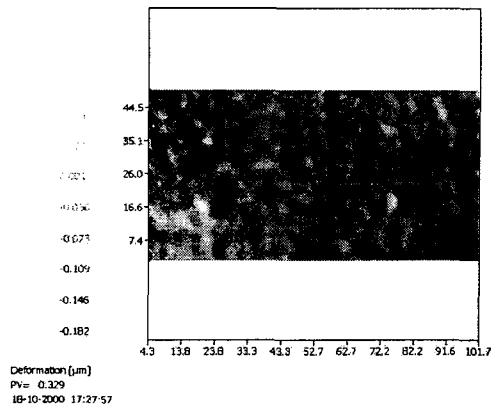


Fig. 8 Unwrapped image (defect size:5mm×5mm, 3mm×3mm defect location:2 ply, 3 ply) (shear:3mm)

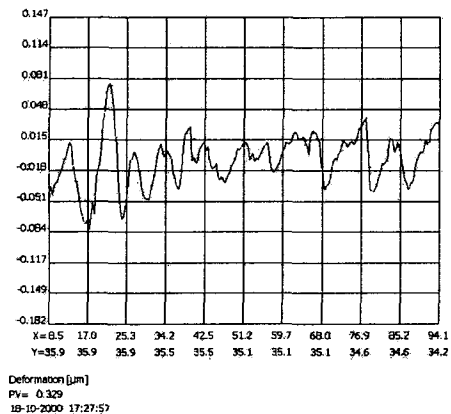


Fig. 9 Profile data (defect size : 3mm×3mm defect location : 2 ply, 3 ply)(shear:3mm)

Fig. 9의 결과는 3mm×3mm 크기의 결함을 지나는 수평선을 따른 데이터를 나타낸 것으로 X축의 좌표의 약 21mm지점에서 양의 피크가 존재하며 여기서부터 결함이 시작되고 약 24mm지점에서 음의 피크의 위치에서 결함이 끝남을 볼 수 있으며 이는 표면으로부터 2 ply 아래에 위치한 결함이다. 그러나 표면으로부터 3 ply 아래에 위치하는 결함은 주위의 세로로 배향된 탄소섬유의 신호로부터 구분할 수가 없었다. 이는 표면에서 나타내는 탄소섬유다발 2mm의 영향이 탄소섬유강화재 3 ply 아래의 3mm의 인공결함의 영향보다 크게 나타나기 때문이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 shearography를 이용하여 탄소섬유강화 복합재료 내부의 다양한 크

기 그리고 다양한 깊이에 존재하는 결함의 검출을 통하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

표면상의 변위에 대한 구배를 나타내는 shearography의 결과이미지에서 결함의 형상 및 크기를 짧은 시간동안 간편하게 측정할 수 있었다.

결함의 위치가 깊어질수록 표면으로 나타나는 그 영향은 감소하여 결함의 크기가 3mm정도로 감소하는 경우 3 ply 아래의 깊은 결함은 검출되지 못하였다.

Shearography의 진단 크기를 감소시키는 경우 미세한 결함에 대한 검출능이 향상되지만 본 연구에서 적용된 직조된 섬유강화재의 경우 섬유다발이 2mm의 넓은 폭을 가지므로 작은 결함보다는 섬유강화재의 영향이 높게 나타났다.

### 참고문헌

- [1] Aussel, J. D., Le Brun, A. and Badboux, J. C., "Generating Acoustic Waves by Laser: Theoretical and Experimental Study of Emission Source," Ultrasonics, Vol. 26, (1998).
- [2] Kromine, A. K., Fomitchove, P. A., Krishnaswamy, S. and Achenbach, J. D., "Scanning Laser Source Technique and Its Application to Turbine Disk Inspection," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 18, pp. 381-386, (1999).
- [3] 최상우, 이준현, "레이저 유도 표면 탄성파를 이용한 비파괴 평가," 비파괴검사학회 2000년도 춘계학술발표회, pp. 332-341, (2000).
- [4] Y. Y. Hung, "Shearography: A Novel and Practical Approach for Nondestructive Inspection," Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 8, No. 2, pp. 55-67, (1989).
- [5] Y. Y. Hung, "Shearography: a New Optical Method for Strain Measurement and Nondestructive Testing," Optical Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 391-395, (1982).
- [6] L. X. Yang, W. Steinchen, M. Schuth and G. Kupfer, "Precision Measurement and Nondestructive Testing by Means of Digital Phase Shifting Speckle Pattern and Speckle Pattern Shearing Interferometry," Measurement, Vol. 16, pp. 149-160, (1995).
- [7] 최상우, 이정호, 이준현, 변준형, "Shearography를 이용한 복합재료의 내부 결함 평가," 비파괴검사학회 2000년도 추계학술발표회, pp. 395-404, (2000).
- [8] Joon-Hyun Lee, Sang-Woo Choi, Seon-Il Ham, Seog-Weon Chang, and Joon-Hyung Byun, " Nondestructive Evaluation of Internal Defects for Composite Using Shearography," Proceedings of the 2nd Korea-Japan Joint Symposium on Composite Materials, pp. 147-153, (2001).