

# 복합재 보의 층간분리 좌굴 및 진전시 광섬유 센서의 신호처리

박중완\* · 류치영 · 강현규 · 김대현 · 홍창선(한국과학기술원)

## 1. 서론

항공구조물에 많이 사용되고 있는 적층 복합재 구조물은 금속재 구조물에 비해 비강성 및 비강도가 우수한 장점을 가지고 있으나, 모재균열, 층간분리 및 섬유파손과 같은 복잡한 파손모드를 가지고 있다. 층간분리 파손은 저속충격이나 구조물의 자유경계단에서 주로 발생하고 좌굴하중 및 압축강도의 급격한 저하를 유발하는 특징이 있다. 또한 이러한 파손모드는 매우 복잡하여 해석적 접근이 쉽지 않아 실질적인 검사방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

광섬유 센서는 기존 센서에 비해 많은 가능성을 가지고 있는 센서로서 현재 많은 연구가 진행되고 있으며 항공 우주 구조물뿐만 아니라 댐, 교량과 같은 일반 구조물로 적용이 점차로 확대되고 있다 [1]. 그러나, 기존의 연구는 광섬유 센서를 사용하여 단순히 구조물의 변형률을 측정이 주로 연구되어져 왔으며, 구조물의 파손시 광섬유 센서의 신호 특성에 대한 연구[2]는 거의 전무한 실정이다. 그러므로, 층간분리파손과 같은 파손시 광섬유 센서의 취득신호의 특성파악과 신호처리 방법에 대한 개발이 중요하다.

본 연구에서는 근래에 지능구조물에 많이 적용되고 있는 간섭형 광섬유 센서인 EFPI 센서를 사용하여 층간분리가 내재된 일방향 적층 복합재 시편에 압축실험을 통해 좌굴 및 층간분리 진전시 간섭형 광섬유 센서의 신호처리 방법을 제안하였다.

## 2. 광섬유 센서와 신호처리

### 2.1. 광섬유 센서

본 연구에서 사용한 광섬유 센서는 광간섭형으로 extrinsic Fabry - Perot interferometer (EFPI)를 사용하였으며, Fig. 1은 EFPI의 개략도이다. 광간섭형 센서는 변형과 빛의 간섭세기와의 관계는 간단히 식 (1)로 표시할 수 있다.

$$I_{\text{ref}} = A(1 + B \cos 2ks) \quad (1)$$

여기서 A와 B는 다음과 같은 상수이다.

$$A = 1 + \left\{ \frac{r_c}{r_c + 2s \tan(\sin^{-1}NA)} \right\}^2 \quad (2)$$

$$B = \frac{2r_c}{A\{r_c + 2s \tan(\sin^{-1}NA)\}}$$

식 (2)에서 's'는 EFPI의 겹간극이며, 'r<sub>c</sub>'는 광섬유

의 코어반지름, NA는 광섬유의 개구수(numerical aperture)를 의미한다.

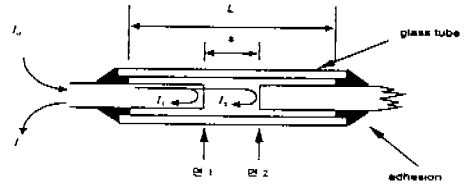


Fig. 1. Schematic diagram of EFPI

s가 증가 혹은 감소함에 따라 식 (1)에서 알 수 있듯이 발생하는 빛의 세기 I는 코사인 함수로 나타나며, 변형이 가해짐에 따라 발생하는 간섭무늬와 변형률의 관계는 최종적으로 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\epsilon = \frac{N\pi}{0.9593 \times 10^7 L} \quad (3)$$

$$= 3.275 \times 10^{-7} N/L$$

여기서, N은 간섭무늬의 개수(N=1은 간섭 peak에서 valley까지)이며, L은 EFPI의 개지 길이를 의미한다. 실험에서 사용한 레이저는 1300 nm 파장을 갖는 레이저 다이오드를 사용하였다. 식 (3)에서 EFPI의 개지 길이 L이 1 cm이고 N이 1이라고 가정하면, EFPI는 0.003275 %의 변형률을 측정할 수 있다. 그러므로 EFPI는 복합재료의 변형률 및 파손을 측정하기 위한 충분한 해상도를 갖고 있음을 알 수 있다.

### 2.2. 신호처리

간섭형 광섬유 센서는 식 (1)에서 보는 바와 같이 구조물의 변형률에 대한 정보를 정현파의 형태로 표현하며, 이는 변형을 간섭무늬의 주파수 특성으로 표현될 수 있음을 의미한다. 그러므로 광섬유 센서를 이용한 구조물의 변형 및 파손을 주파수 영역에서 관찰하게 되면 유용한 정보를 얻을 수 있다. 기존의 시간영역의 데이터를 주파수 영역으로의 변환은 Fourier Transform (FT)을 이용하였다. 그러나 FT는 stationary 신호라는 가정하에 쓸 수 있으며, 국소적인 변화나 일시적인 변형(transient process) 및 non - stationary process에는 적합하지 않다. 또한 FT에 의해 주파수 영역으로 변환된 정보는 어느 사건의 발생시점과 같은 시간영역의 정보를 잃어버리는 단점을 가지고 있다. 근래에는 이

러한 기존 방법의 단점을 해결하기 위해 시간-주파수 영역을 동시에 관찰하거나, 기존의 신호처리 방법으로 해결하기 어려운 미분불가능 점, 일시적 현상 및 non-stationary 데이터를 처리할 수 있는 방법으로 Wiegner - Ville transform(WVT), short-time Fourier transform (STFT) 및 wavelet transform (WT) 등이 있다. WVT와 STFT는 시간-주파수 영역을 동시에 관찰할 수 있는 장점이 있다. 기존의 FT는  $f = 1/T$ 의 관계에 의해 시간영역의 해상도와 주파수 영역의 해상도는 역수관계에 있으므로 STFT는 시간-주파수 두 영역에서 해상도의 향상에 제한을 갖고 있으나, 이에 비해 WVT는 시간-주파수 두 영역에서 높은 해상도를 보인다[3,4]. 그러나 WVT는 STFT에 비해 많은 계산시간을 요하는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 복합재료의 층간분리 좌굴 및 층간분리 성장시 발생하는 간섭형 광섬유 센서의 신호특성을 정량적으로 평가하기 위해 STFT와 WT를 사용하였다.

STFT는 non-stationary 신호를 처리하는데 있어서 기존 FT의 단점을 보완하기 위해 사용되는데, non-stationary 신호  $f(t)$ 의 STFT는 다음과 같이 정의된다.

$$STFT(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g^*(t-\tau)e^{-i\omega t} dt \quad (4)$$

식 (4)에서 알 수 있듯이 신호  $f(t)$ 는  $\tau$  만큼 크기를 갖는 윈도우 함수  $g(t)$ 에 의해 윈도우되어진 FT이다. 그러므로 STFT는 시간정보와 주파수 정보를 동시에 나타낼 수 있다. WT는 기존의 신호처리 방법에서 쉽게 놓칠 수 있는 trend, breakdown 점이나 미분불가능한 불연속점의 처리에 매우 유리하다. 신호  $f(t)$ 의 WT는 다음과 같이 정의된다.

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

식 (5)에서  $a > 0, b \in R$  이며 각각 dilation과 translation을 의미한다. 함수  $\Psi(t)$ 는 analyzing wavelet이라고 하며, '\*'는 복소수의 공액(complex conjugate)을 의미한다. dilation과 translation의 특성 때문에, 'a'와 'b'의 값을 조절함에 의해 특정한 시간에 대한 관찰이 가능하다. WT는 기존의 신호처리 방법에서 발생하는 신호의 소실 등이 없이 데이터 압축 및 잡음제거에 이용되기도 하며, 또한 decompose되어진 신호를 재구성하는 경우 데이터의 손실없이 완벽하게 재구성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 복합재료의 층간분리 좌굴 및 층간분리 성장시 취득된 광섬유 센서의 신호처리를 위해 MATLAB toolbox<sup>®</sup>를 사용하여 처리하였다. WT에 사용된 analyzing 함수는 다부치(Daubechey) 함수(db4)를 사용하였으며, decomposition은 한차례 수행하였다.

### 3. 실험

#### 3.1. 시편제작

본 연구에서 사용된 광섬유 센서의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 제작방법은 참고문헌[5]에 기술된 방법으로 제작하였다. 시편제작에 사용된 프리프레그(prepreg)는 (주) 한국카아본 사의 CU - 125 NS graphite/epoxy이며, 한 층의 두께는 0.125 mm이고, 재료상수는 다음과 같다[7].

$$\begin{aligned} E_1 &= 135.4 \text{ GPa} & E_2 &= E_3 = 9.6 \text{ GPa} \\ G_{12} &= G_{13} = 4.8 \text{ GPa} & G_{23} &= 3.2 \text{ GPa} \\ \nu_{12} &= \nu_{13} = 0.31 & \nu_{23} &= 0.52 \\ X_T &= 1933 \text{ MPa} & Y_T &= 51 \text{ MPa} \\ X_C &= 1051 \text{ MPa} & Y_C &= 141 \text{ MPa} \end{aligned}$$

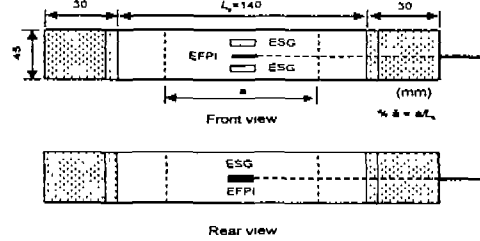


Fig. 2. Configuration of specimen

Fig. 2에서 제작된 시편의 형상 및 제원을 나타내었다. 압축시편에서 적층된 복합재 내부에 층간분리를 모사하기 위해 길이 'a'를 갖는 테프론 필름(teflon film)을 삽입하였다. 시편은 일방향 적층을 하였으며 층간분리 길이에 따른 영향을 알아보기 위하여 층간분리의 길이를  $\bar{a} = 0.5$ 로 하여 제작하였으며, 광섬유 센서는 표면부착의 경우와 시편 내부에 삽입하는 두 가지 경우에 대해 제작하였다. 여기서  $\bar{a}$ 는 층간분리의 길이 'a'를 시편 시험부 길이( $L_0$ )로 나눈 무차원화된 층간분리 길이를 의미한다. 시편내부에 삽입한 경우의 층간분리 및 광섬유 센서위치는  $[0_6//0_6/[0]_2]_T$ 로 적층되어졌으며, '/'은 층간분리를 의미하고, '[']은 광섬유 센서의 삽입 위치 및 방향을 의미한다. 광섬유 센서를 표면부착한 경우 EFPI를 시편의 앞면과 뒷면에 CIBA-GEIGY사의 속건성 에폭시를 사용하여 상온 경화시켜 부착하였다. 또한 광섬유 센서와 변형률을 비교하기 위하여 상용의 변형률 센서인 스트레인 게이지를 부착하였다. 시편의 정렬을 맞추기 위해 시편의 앞면에 스트레인 게이지(ESG)를 두 개 부착하였으며 뒷면에 한 개를 부착하였다.

#### 3.2. 실험방법

제작된 시편의 광섬유 센서를 광섬유 센서 시스템과의 연결은 아크 퓨전 스플라이서를 사용하여 연결하였다. 그리고 사용되지 않는 광섬유는 신호의 왜곡을 방지하기 위하여 끝단면에 글리세린에 함침하였다. 층간분리가 내재된 복합재 시편의 좌

굴기시험을 위해 만능시험기(INSTRON, 4482)를 사용하였으며 스트레인 게이지의 데이터 취득은 Vishay사의 스트레인 게이지 컨디셔너를 사용하였다. 층간분리 좌굴시험에서 만능시험기는 변위가 일정하게 조절되는 1 mm/min로 변위제어를 하였다. 좌굴이 발생하여 층간분리가 성장하는 동안의 시험시간이 길기 때문에 전체 실험 동안의 하중, 변형을 및 광섬유 센서 데이터는 A/D 변환기를 이용하여 취득하였다. 취득된 데이터의 후처리를 위해 GPIB를 사용하여 컴퓨터에서 처리하였으며, Fig. 3에 전체적인 실험장치의 개념도를 나타내었다.

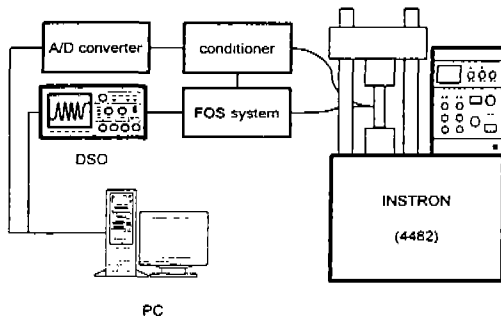


Fig. 3. Overall view of the experimental setup

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1. 좌굴시점 검출

적층된 복합재 구조물과 같은 평판 및 셸구조는 압축강도보다 현저히 낮은 좌굴강도를 가지고 있으므로 매우 낮은 하중하에서 구조물의 파손이 발생할 수 있다. 그러므로 손상허용개념에서 좌굴의 예측과 실제검출은 매우 중요한 요소이다. Fig. 4 (a)는 층간분리된 복합재보에 압축하중을 가하여 좌굴시 스트레인 게이지, 로드셀 및 삽입된 EFPI의 신호이다. 좌굴의 결정은 여러 가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 표면의 스트레인 게이지로부터 측정된 변형률에 접선을 그어 만나는 교점으로 하였다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 간섭형 광섬유 센서는 변형을 정현파의 형태로 표현하며 변형의 속도는 정현파의 주파수와 비례하는 특성을 가지고 있다. 그러므로, Fig. 4 (a)의 EFPI의 신호에서 좌굴이전까지는 낮은 주파수의 간섭신호를 내보내다가 좌굴이 발생한 후 주파수의 급격한 변화를 나타내고 있다. 이로부터 광섬유 센서 신호의 급격한 주파수특성의 변화를 통해 구조물의 좌굴을 검출할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 이와 같은 방법은 좌굴시 발생하는 급격한 주파수 특성의 변화를 평가자의 주관적 판단 등으로 인해 정량적으로 평가하기 어려운 단점을 가지고 있다. 그러므로 본 연구에서는 주파수 특성의 정량적인 평가를 위해 시간-주파수영역을 동시에 관찰할 수 있는 STFT를 통해 Fig. 4 (a)의 광섬유 센서 신호를 처리하였다. Fig. 4 (b)에

서 보는 바와 같이 STFT에 의해 처리된 광섬유 센서 신호가 시간에 따른 주파수특성을 보여주고 있다. Fig. 4 (b)에서 좌굴이 발생하기 전( $u = 0 \sim 0.22 \text{ mm}$ )의 광섬유 센서 신호의 간섭무늬 주파수는 약 0.25 Hz를 유지하고 있으나, 좌굴이 발생하는  $u \cong 0.2 \text{ mm}$ 에서 주파수가 약 0.25 Hz에서 0.75 Hz로 천이가 발생함을 정량적으로 보여주고 있다.

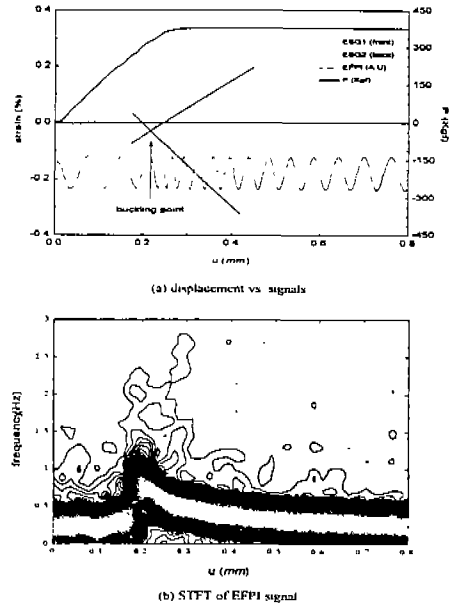


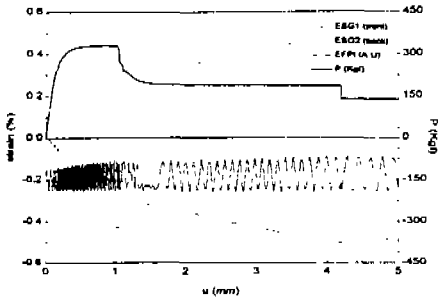
Fig. 4. Detection of buckling in (a) signals of sensors and (b) STFT of EFPI signal

그러므로, 구조물의 좌굴이 발생할 때 광섬유 센서 신호를 시간-주파수 영역을 동시에 관찰할 수 있는 STFT를 사용하여 좌굴로 인한 광섬유 센서 신호의 급격한 주파수 변환을 정량적이고 효율적으로 감지할 수 있음을 알 수 있다.

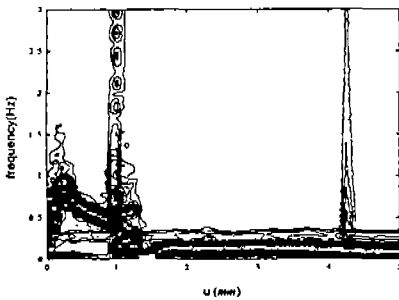
### 4.3. 층간분리 성장

Fig. 5 (a)는 시편이 파손될 때까지 스트레인 게이지, 로드셀 및 시편 표면에 부착된 EFPI의 신호이다. Fig. 5 (a)의 광섬유 센서 신호로부터 좌굴 및 층간분리 성장을 평가하기 쉽지 않은데 비해 STFT에 처리된 Fig. 5 (b)는 시간-주파수 영역의 동시 관찰함에 의해 정량적으로 좌굴 및 층간분리 성장을 감지할 수 있다.  $u \cong 0.2 \text{ mm}$ 에서 좌굴 발생으로 인해 주파수의 천이가 발생하고 있고,  $u \cong 1.1 \text{ mm}$ 과  $u \cong 4.2 \text{ mm}$ 에서 층간분리가 성장하는 순간을 잘 묘사하고 있음을 보여준다. 그러나, STFT로 처리된 결과는 식 (4)에서 볼 수 있듯이 윈도우함수의 윈도우 크기 때문에 시간영역과 주파수영역에

서 해상도에 제한을 받게된다. 그러므로 층간분리 성장과 같이 매우 짧은 시간에 순간적으로 발생하는 경우( $u \cong 1.1 \text{ mm}, 4.2 \text{ mm}$ )에도 선으로 표현하지 못하고 일정폭을 갖는 단점을 가지고 있다.



(a) displacement vs signals



(b) STFT of EFPI signal

Fig. 5. Signals of sensors and STFT of EFPI signal up to failure ( $\bar{a} = 0.5$ , surface attachment)

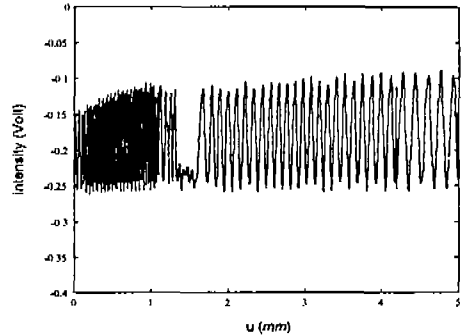
이에 비해 WT에 의해 처리된 Fig. 6 (b)는 좌굴시점 및 층간분리가 성장하는 점을 매우 정확하게 감지함을 알 수 있다. 이는 식 (5)에서 볼 수 있듯이 dilation을 통해 WT는 아주 좁은 영역을 관찰할 수 있는 특징을 잘 보여주고 있다. 또한, 층간분리가 점진적으로 성장하는  $u \cong 1.1 \sim 1.6 \text{ mm}$  구간에서 STFT의 결과보다 WT에 의해 처리된 결과가 더 세밀하게 감지하고 있음을 보여준다.

## 5. 결론

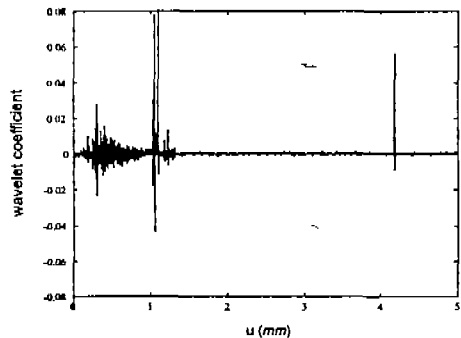
층간분리가 존재하는 일방향 복합재 보에 광섬유 센서를 적용하여 층간분리 좌굴 및 성장시 광섬유 센서의 신호특성에 대해 고찰하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다. 광섬유 센서를 이용하여 층간분리 좌굴 및 층간분리 성장을 STFT와 WT를 사용하여 기존의 방법보다 효율적이고 정량적으로 층간분리 좌굴과 층간분리 성장을 검출할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 STEPI의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자께 감사드립니다.



(a) displacement vs. intensity



(b) displacement vs. wavelet coefficient of EFPI signal (db 4)

Fig. 6. Intensity and wavelet coefficient of EFPI ( $\bar{a} = 0.5$ , surface attachment)

## 참 고 문 헌

1. 박중완, 홍창선, "특집 : 광섬유 센서를 이용한 스마트 구조 연구동향," 항공우주학회지, 제 25 권, 제 3호, pp. 163 ~ 167.
2. 박중완, 경우민 외, "복합재 보의 층간분리좌굴과 진전시 광섬유 센서의 신호특성에 관한 연구," 한국항공우주학회지, 제 26권, 제 1호, 1998, pp. 70 ~ 78.
3. A. Swami, J. M. Mendel and C. L. Nikias, Higher-Order Spectral Analysis Toolbox, The Math Works, Inc., 1998.
4. M. Misiti and Y. Misiti et al, Wavelet Toolbox, The Math Works, Inc., 1998.
5. 박중완, 류치영 외, "EFPI 센서를 이용한 복합적 층판의 변형을 측정," 한국항공우주학회지, 제 24 권, 제 1호, pp.95-105, 1996