

광섬유 센서를 이용한 복합재 구조물의 실시간 파손감지

방형준* · 강현규 · 류치영 · 김대현 · 강동훈 · 홍창선 · 김천곤

Real-time Failure Detection of Composite Structures Using Optical Fiber Sensors

H. J. Bang, H. K. Kang, C. Y. Ryu, D. H. Kim, D. H. Kang, C. S. Hong and C. G. Kim

KEY WORDS : Optical fiber(광섬유), EFPI(페브리-패로 간섭계), Failure detection(파손감지)

ABSTRACT

The objective of this research is to develop real-time failure detection techniques for damage assessment of composite materials using optical fiber sensors. Signals from matrix cracking or fiber fracture in composite laminates are treated by signal processing unit in real-time. This paper describes the implementation of time-frequency analysis such as the Short Time Fourier Transform(STFT) to determine the time of occurrence of failure. In order to verify the performance of the optical fiber sensor for stress wave detection, we performed pencil break test with EFPI sensor and compared it with that of PZT. The EFPI sensor was embedded in composite beam to sense the failure signals and a tensile test was performed. The signals of the fiber optic sensor when damage occurred were characterized using STFT and wavelet transform. Failure detection system detected the moment of failure accurately and showed good sensitivity with the infinitesimal failure signal.

1. 서론

과도하중이나 충격등에 의해 구조물에 손상이 발생한 경우 금속 구조물의 파손은 쉽게 확인이 가능한데 반해 복합적층의 경우에는 층 내에 파손이 발생하는 경우가 많아 파손유무를 감지하기가 쉽지 않으며 안전성 여부의 확인에 어려움이 있다.

본 연구의 목적은 복합재 구조물의 신뢰성 및 안전성을 확보하기 위한 연구로서 복합재료의 초기 파손형태에 해당하는 모재파손을 실시간으로 검출하는 것이다. 기존의 연구문헌들을 통하여 볼 때 복합재 구조물에 광섬유 센서를 적용한 지금까지의 연구들은 크게 두 가지로 구분해 볼 수 있는데, 첫번째는 파손신호 검출을 위해 사용되는 광섬유 센서의 적용성을 검증하기 위한 센서 특성에 대한 연구이며[1], 두번째는 복합재 구조물의 손상

시 발생하는 신호특성에 대한 연구이다[2]. 하지만 복합재 구조물의 파손유무를 감지하여 정확한 파손시점을 알기 위해서는 파손신호에 대한 광섬유 센서의 정량적인 신호처리 방법과 이를 검증하는 연구가 선행되어야 한다.

이를 위해 본 연구에서는 실시간으로 복합재 구조물의 파손 시점을 감지하기 위한 신호처리 방법으로 시간-주파수 영역 해석을 통한 파손감지 프로그램을 작성하였으며, 응력파 감지센서로서 광섬유 센서의 성능을 검증하기 위한 예비 실험으로서 연필파괴시험(ASTM E976-94)을 수행하였고, 이때의 광섬유 센서 신호를 압전세라믹 센서로부터 감지된 신호와 서로 비교하였다. 최종적으로, 광섬유 파손감지 시스템을 이용하여 복합재료의 파손시점을 실시간으로 감지하기 위해 EFPI 센서가 삽입된 복합재 시편의 인장실험을 실시하였다. 취득된 파손신호는 별도의 후처리 과정을 통하여 정량화 되었으며, 주파수 영역에서의 파손특성을 관찰하여 실시간 신호처리 결과와 비교하였다.

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

2. 측정원리 및 신호처리

2.1 EFPI 센서를 이용한 파손신호 측정원리

광섬유 코어의 굴절률은 1.45 이고 공기는 약 1 정도로 굴절률의 차이가 생기므로 광섬유의 단면과 공기가 접하는 부분에서는 부분적인 반사가 일어나게 된다. 공기와 광섬유 단면에서 약 4%의 부분반사가 생기고 나머지 96%의 빛은 공기 진공 증착된 2차 반사면에서 전반사 되어 재입사되며 1차 반사면에서의 빛과 서로 만나게 된다. 외부 패브리-페로 간섭계(EFPI)는 이 두 반사면을 통한 빛의 간섭현상을 이용하여 구성된다.

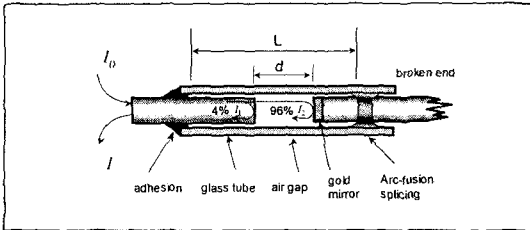


Fig. 1 Schematic diagram of EFPI sensor

변형이 가해짐에 따라 발생하는 간섭신호의 위상과 미소변형과의 관계는 1305 nm 의 파장을 가진 레이저 다이오드를 사용할 경우 최종적으로 아래의 식 (1)로 표시된다[3].

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta L} = 0.9629 \times 10^7 \quad (\text{rad/m}) \quad (1)$$

구조물의 파손시 발생하는 응력과 진동은 ΔL 의 미소변형을 발생시키며, 광섬유 센서는 파손신호의 동적 특성을 유지하며 미소변형을 광강도로 표시되는 간섭신호의 위상차 변화로 전환시켜준다.

2.2 시간-주파수 분석법(STFT, WT)

일반적 주파수 영역 해석에는 Fourier Transform (FT)을 사용하는데, FT 는 입력신호가 정상(stationary)신호라는 가정 아래 사용할 수 있으며, 파손신호와 같이 국소적인 변화나 일시적인 변형을 보이는 비정상(non-stationary) 신호에는 적합하지 않다는 단점이 있다. 따라서 이러한 기존 방법의 단점을 해결하기 위해 본 연구에서는 시간-주파수 영역을 동시에 해석할 수 있는 wavelet transform(WT)이나 short-time Fourier transform(STFT)의 방법을 사용하였다. 입력신호 $f(t)$ 에 대한

STFT 는 다음과 같다.

$$STFT(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t-\tau)e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

식 (2)에서 볼 수 있듯이 STFT 의 결과는 시간 τ 주위에 윈도우 함수 $g(t)$ 에 의해 분할된 신호 $f(t)$ 에 대한 FT 이며, 분할된 윈도우를 시간축에 따라 연속적으로 움직이면서 시간에 따른 주파수 특성 변화를 계속 관찰할 수 있다. STFT 는 시간 및 주파수 해상도를 동시에 향상시킬 수 없다는 단점이 있으나 처리속도가 빨라 실시간 신호처리에 적합하다.

WT 는 STFT 와 마찬가지로 시간 주파수 해석이 가능하며, STFT 에 비해 시간영역 해상도가 높다. 또한 WT 는 신호를 저주파와 고주파로 분해함으로써 기존의 신호처리 방법이 놓치기 쉬운 trend, break-down 점이나, 미분 불가능한 불연속점의 처리 및 특성파악에 유리하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 파손특성을 관찰하기 위한 신호의 후 처리에 STFT 와 함께 WT 를 사용하였다. 신호 $f(t)$ 에 대한 WT 는 다음과 같이 정의된다.

$$CWT_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

여기서, $a>0, b \in R$ 는 각각 스케일(scale, dilation)과 수평이동(translation)을 나타내는 파라미터이다. $\Psi(t)$ 는 웨이블릿 해석 함수이고 Ψ^* 는 공액복소함수(complex conjugate)를 나타낸다. 식(3)의 결과는 스케일과 수평이동 파라미터에 대한 웨이블릿 계수이며, 실제 계산에서는 이산화된(discretized) 스케일 a 와 수평이동 b 를 이용하는 DWT(Discrete Wavelet Transform)을 사용한다. 웨이블릿 해석에서 신호는 높은 스케일의 저주파 성분을 나타내는 근사 성분(approximations)과 낮은 스케일의 고주파 성분을 나타내는 세부 성분(details)으로 표현된다. 다른 이진 스케일(dyadic scales)을 선택함으로써 신호는 여러 낮은 해상도의 성분으로 분해될 수 있으며, 이를 웨이블릿 분해구조라고 부른다. Fig. 2(b)에서는 신호 S 를 세 단계로 분해한 것을 보여준다. 신호 S 는 낮은 스케일의 세부성분 $D1$ 과 그보다 큰 스케일의 세부성분 $D2, D3$ 그리고 저주파 근사 성분 $A3$ 으로 분해된다.

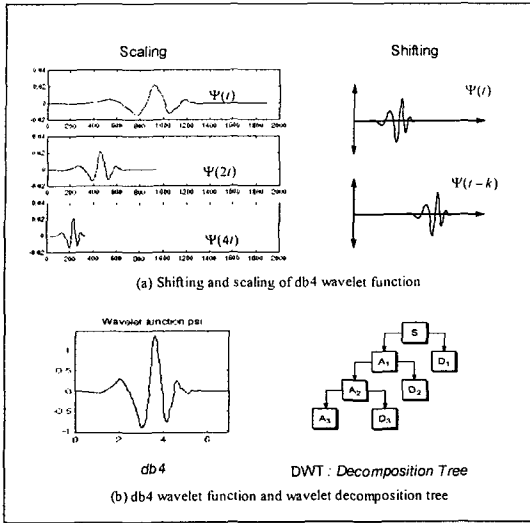


Fig. 2 Scaling and shifting of db4 wavelet function ; wavelet decomposition tree

3. 광섬유 센서의 검증 및 비교

Pencil Break Test 를 통해 연필심 파손시 방출되는 미소한 크기의 고주파 파손신호를 적용된 센서가 민감하게 취득하는지의 여부를 확인하였다.

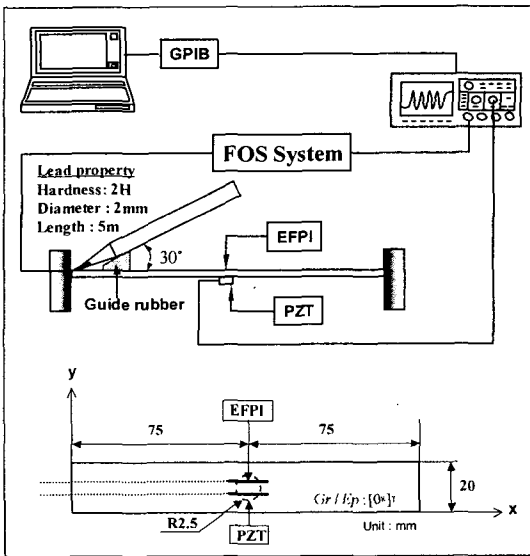


Fig. 3 Configuration of the composite specimen for pencil break test

Fig.3은 실험장치 및 시편의 형상이며, Fig. 4는 시편 뒷면에 부착된 PZT 센서로부터 취득한 연필심의 파손신호이다. 시간 영역의 신호를 살펴보면, 약 80 mV 정도의 신호잡음 레벨을 가지고 있으며, 파손발생후 0.1 ms 정도에서 1.3 V 정도의

피크값을 보이고 있다. 하지만 이와 같은 높은 고주파 신호잡음은 신호의 크기가 작은 경우 고주파 영역에서의 주파수 해상도를 많이 떨어뜨리게 되는 단점이 있다. 시간에 따른 신호의 주파수 영역에서의 해석결과를 보면 파손 발생 후 약 0.2 ms 동안 20 kHz ~ 100 kHz 정도의 특징적인 고주파 응답특성을 보이고 있으며, 그 이상의 고주파 특성신호는 주위의 고주파 노이즈의 영향으로 구별이 불가능하다. 파손발생 후 0.3 ms 시점부터는 0 ~ 20 kHz의 주파수 영역에서 높은 진폭을 가진 신호가 고르게 분포되어있는 것을 관찰할 수 있는데, 이 영역의 신호는 그 주파수 영역 분포로 보아 파손에 의한 고주파 신호가 아니라 연필심의 파손시 발생하는 시편의 인의적 진동에 의해서 생긴 신호임을 알 수 있다.

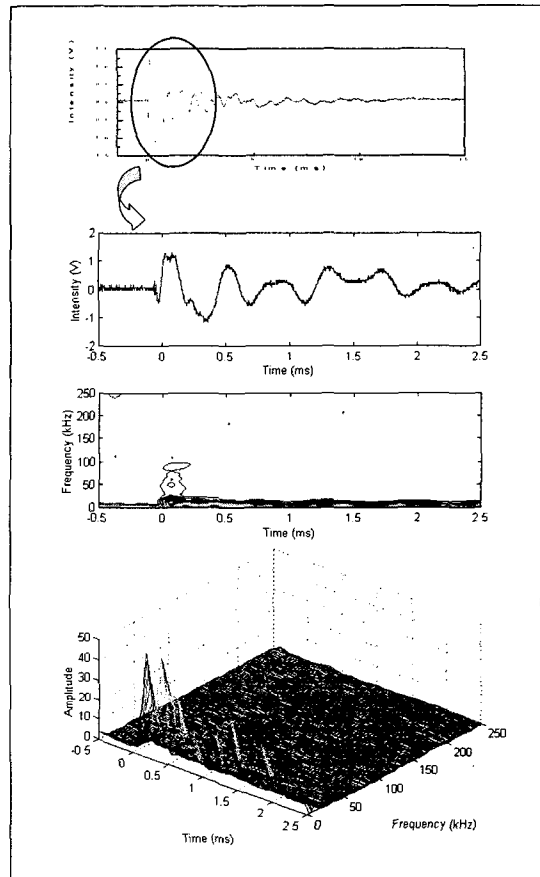


Fig. 4 Pencil lead failure signal and its STFT by PZT

Fig. 5는 센서의 민감도를 높이기 위해 금속의 진공 증착을 통하여 반사면에 코팅을 하여 제작한 EFPI센서로부터 얻어진 파손신호이다. 시간영역에서의 신호의 신호잡음 레벨은 20 mV 정도의 크기

로서 앞의 PZT 신호에 비해 신호의 진폭은 약 35 % 정도 작지만 신호잡음의 경우 약 1/4로 감소되어 전체적으로 약 2.5배의 신호 대 잡음비 향상이 있었다. 이는 제2 반사면의 금속코팅에 의해 반사율을 높임으로써 신호의 출력을 높인 결과이다. 고주파 신호잡음의 감소는 시간-주파수 영역의 해석 결과에서도 확인 할 수 있는데, 앞의 PZT 에서의 결과 연필심의 파손신호가 100 kHz 근방 까지만 확인된 것에 비해 반사율을 높인 EFPI의 경우 신호의 크기는 작지만 파손이 일어난 시점으로부터 0.2 ms 되는 지점에서는 0~230 kHz까지 수직적으로 분포되어있는 미세한 파손신호의 특성 주파수를 관찰할 수 있다. 반면 PZT 에서와 같이 시간영역의 신호진폭은 크지만 신호에 고주파 신호잡음이 많이 발생하는 경우에는 미소 신호에 대한 정량적인 고주파 해석시 신호잡음과 파손신호를 구분할 수 어렵다는 단점이 있다.

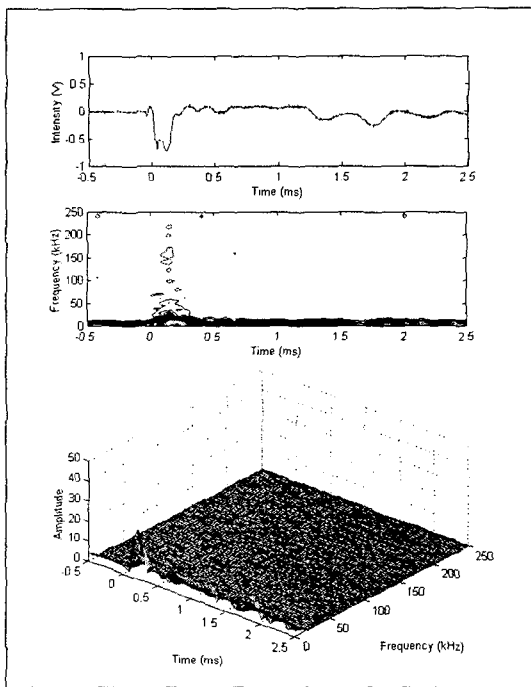


Fig. 5 Pencil lead failure signal and its STFT by EFPI

위의 실험 결과 반사면을 금속코팅한 EFPI 센서의 경우 신호대 잡음비가 PZT 에 비해 향상된 것을 확인할 수 있으며, 파손신호가 아주 미세한 경우에도 고주파 신호잡음으로부터 파손의 특성 주파수를 분리해 낼 수 있을 만큼 높은 주파수 해상도를 가졌음을 알 수 있다.

4. 실시간 파손시점 검출

복합재료의 파손에 따른 파손신호의 정량적 해석 및 파손감지 시스템의 파손시점 감지여부를 확인하기 위해 Fig. 6 과 같은 복합재 시편에 EFPI 센서를 삽입한 후 인장실험을 실시 하였다.

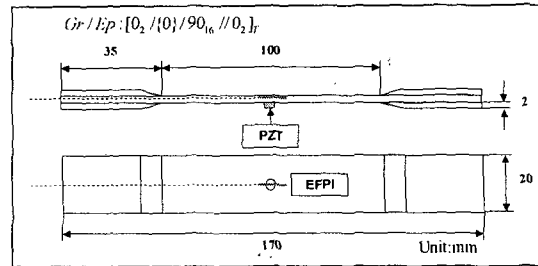


Fig. 6 Composite specimen for tensile test

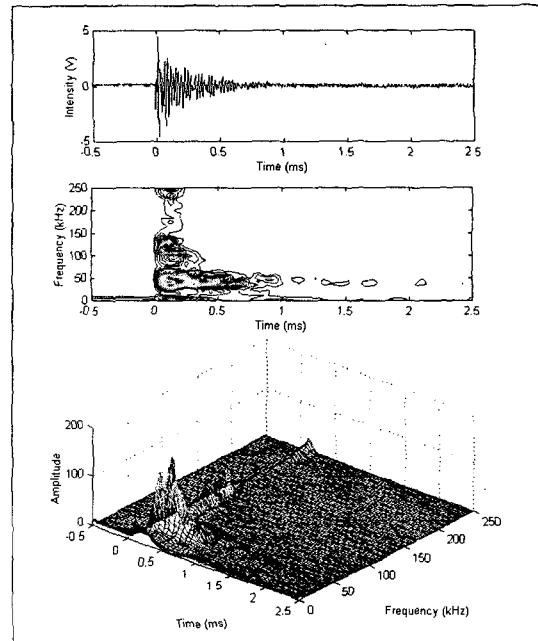


Fig. 7 Matrix cracking signal and its STFT by PZT

복합재 구조물에 과도하중이나 충격이 가해졌을 때 손상이 발생하지 않은 경우에는 20 kHz 미만의 주파수 만이 관찰되는데 비해, 모재 및 강화섬유에 손상이 발생한 경우에는 20 kHz ~ 200 kHz 의 높은 주파수의 응력파가 발생한다[4].

Fig. 7 은 시편의 뒷면에 부착된 PZT 센서를 통해 취득한 모재균열시 방출된 응력파 신호이다. 파손신호는 파손발생 후 약 0.2 ms 동안 150 kHz 이상의 특성주파수가 방출되며, 40 kHz 근처의 특성주파수는 1 ms 정도 지속되다가 소멸되었다.

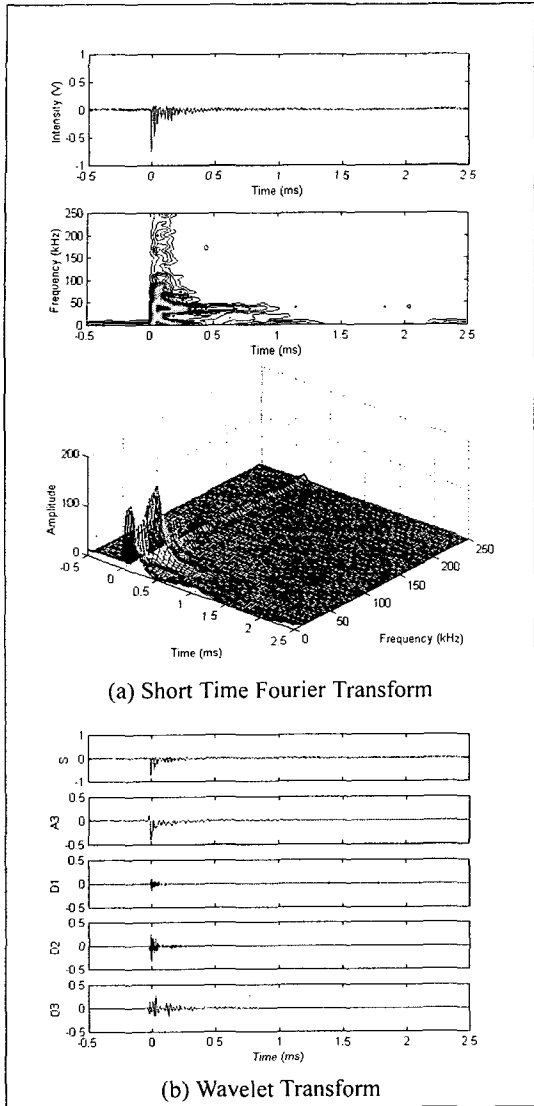


Fig. 8 Matrix cracking signal by EFPI and its STFT & WT

Fig. 8 은 Fig. 7 과 동일한 모재균열의 응력과 신호에 대한 EFPI 센서의 응답을 나타낸다. 전반적인 특성주파수 영역의 분포는 PZT 의 경우와 유사함을 알 수 있지만, 40 kHz 근방의 주파수 영역의 경우 PZT 쪽이 더 민감하였고, 150 kHz 이상의 고주파 영역에서는 EFPI 에 의해 취득된 파손신호의 경우가 더 명확함을 확인할 수 있다.

(b) 의 웨이블릿을 통해 분해된 단계별 고주파 성분(D1~D3)과 저주파 성분(A1)을 보면, 미세한 스케일의 고주파 성분인 D1~D3 에서 파손에 의한 웨이블릿 계수를 볼 수 있으며, 발생시점도 0.1 ~ 0.3 ms 정도로 (a) 의 100 kHz 이상의 고주파 성분의 신호발생 시점과 일치함을 알 수 있다.

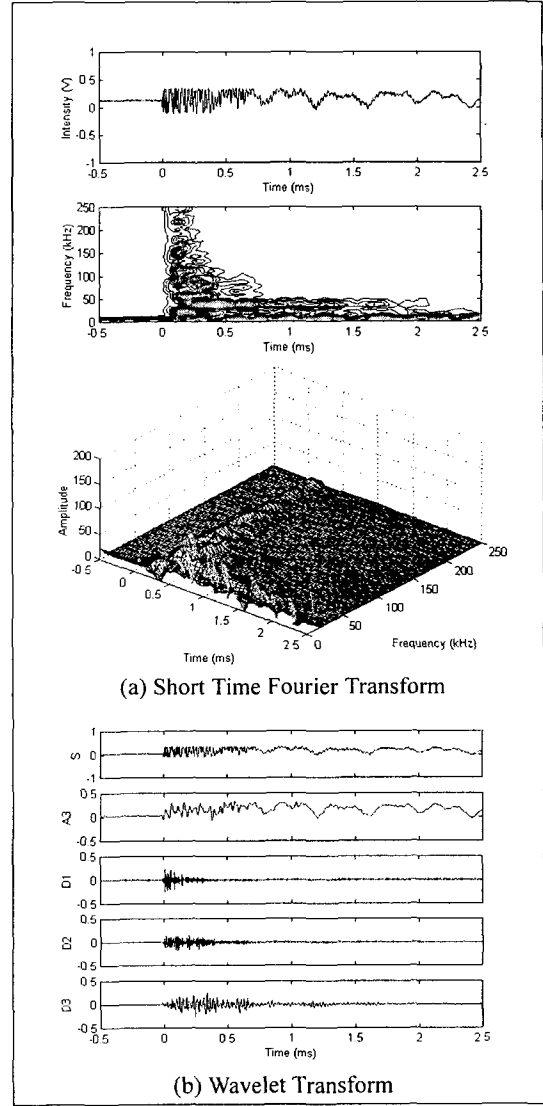
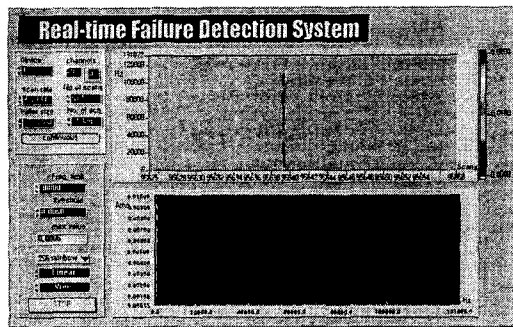
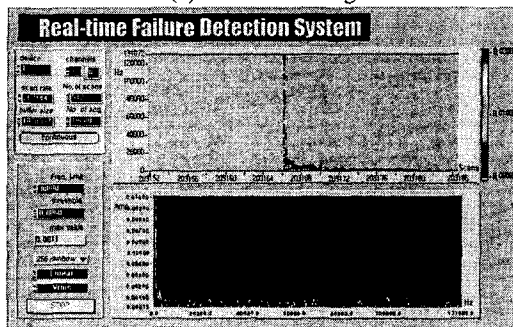


Fig. 9 Fiber fracture signal by EFPI and its STFT & WT

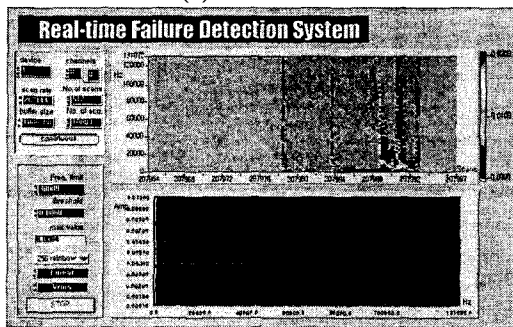
Fig. 9 는 섬유파단시 EFPI 센서에 의해 취득된 파손신호이다. 표면에 부착된 PZT 의 경우 섬유파단시 시편에서 분리되어 신호를 취득할 수 없었다 섬유파단에서는 40 kHz 영역에서의 주파수 신호 진폭이 모재균열시 보다 작았으나 바로 소멸하지 않고 2 ms 정도로 길게 지속되었으며, 10 kHz 미만의 신호 또한 높은 진폭을 갖고 지속되고 있음을 볼 수 있다. 100 kHz 이상의 고주파 특성 주파수는 모재균열시 보다 더 큰 진폭을 갖고 분포되었으며 웨이블릿 변환에서의 고주파 성분(D1~D3) 신호로 볼 때 발생 지속시간은 0.3 ~ 0.8 ms 정도로 모재파손시 보다 약 2 배정도 긴 시간동안 고주파 신호가 방출됨을 확인할 수 있었다.



(a) Matrix cracking



(b) Fiber fracture



(c) Final failure

Fig. 10 Real-time failure detection system

Fig. 10 은 파손감지 프로그램에서 복합재 시편의 파손 발생시 파손신호를 실시간으로 처리하는 과정을 보여주고 있다. (a) 는 모재균열의 경우로 앞의 후처리 결과와 마찬가지로 40 kHz 근방에서 높은 주파수 영역의 진폭을 관찰할 수 있다. (b) 의 섬유파단의 경우에는 파손신호가 고주파영역까지 전체적으로 높은 주파수영역 진폭을 가지고 있음을 확인할 수 있으며, (c) 는 모재파손과 섬유파단이 결합된 최종파손의 경우를 보여주고 있다.

복합재 시편의 인장실험 결과 파손감지 시스템은 파손 발생시 정확한 파손 시점을 감지할 수 있음을 확인하였으며, STFT 와 WT 을 이용한 신호의 후처리 방법을 통해 손상발생 시점과 파손신호의 특성에 따른 정량적 해석이 가능하였다.

5. 결론

Pencil Break Test 의 결과 PZT 의 경우 $0 \sim 100\text{ kHz}$ 까지의 파손주파수만 감지할 수 있었는데 반해, 상대적으로 고주파 신호잡음을 덜 받는 EFPI 센서의 경우 200 kHz 이상의 영역까지 분포한 특성주파수를 구분할 수 있는 민감도를 보여주었다.

복합재 시편의 파손감지 실험 결과 모재균열 발생시 PZT 센서와 EFPI 센서의 주파수 영역 신호 특성은 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 섬유파단이 일어난 경우에는 PZT 의 경우 시편과 분리되어 신호를 취득할 수 없었으나 시편에 삽입된 EFPI 의 경우 정상적으로 파손신호를 취득할 수 있었으며 시편의 완전파손시점까지 정상적으로 작동하였다. 신호의 후처리 결과와 비교하여 볼 때, 실시간 파손감지 시스템은 주파수 특성의 왜곡없이 정확하게 파손신호를 처리 하였으며, 사용된 EFPI 센서가 복합재 구조물 내에 삽입이 되어 실시간으로 구조물의 파손여부를 정확히 모니터링할 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원에 의해 수행 되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kent A. Murphy, Michael F. Gunther, Richard O. Claus, Tuan A. Tran and Mark S. Miller, "Optical Fiber Sensors for Measurement of Strain and Acoustic Waves", *SPIE Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, Vol. 1918, 1993, pp. 110-120.
- (2) 김대현, 박중완, 류치영, 강현규, 홍창선, 김천곤, "복합재료 파손모드에 따른 광섬유 센서의 신호특성에 관한 연구", 한국항공우주학회 춘계 학술발표회 논문집, 항공우주연구소, 1999.4.17. pp.386-389.
- (3) J. W. Park, C. Y. Ryu, H. K. Kang and C. S. Hong, "Detection of Buckling and Crack Growth in the Delaminated Composites Using Fiber Optic Sensor", *Journal of Composites Materials*, Vol. 34, No. 19, 2000, pp. 1602-1623
- (4) D. U. Sung, J. H. Oh, C. G. Kim and C. S. Hong, "Impact monitoring of smart composite laminates using neural networks and wavelet ", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2000, submitted.