

論文

광섬유 센서를 이용한 복합재의 파손 및 변형을 동시 측정

방형준*, 강현규*, 홍창선**, 김천곤***

Simultaneous Sensing of Failure and Strain in Composites
Using Optical Fiber Sensors

Hyung-Joon Bang*, Hyun-Kyu Kang*, Chang-Sun Hong** and Chun-Gon Kim***

ABSTRACT

In aircraft composite structures, structural defects such as matrix cracks, delaminations and fiber breakages are hard to detect if they are breaking out in operating condition. Therefore, to assure the structural integrity, it is desirable to perform the real-time health monitoring of the structures. In this study, a fiber optic sensor was applied to the composite beams to monitor failure and strain in real-time. To detect the failure signal and strain simultaneously, laser diode and ASE broadband source were applied in a single EFPI sensor using wavelength division multiplexer. Short time Fourier transform and wavelet transform were used to characterize the failure signal and to determine the moment of failure. And the strain measured by AEFPI was compared with the that of strain gage. From the result of the tensile test, strain measured by the AEFPI agreed with the value of electric strain gage and the failure detection system could detect the moment of failure with high sensitivity to recognize the onset of micro-crack failure signal.

초 록

급격한 과도하중이나 충격 등에 의해서 발생한 복합적층 내부의 손상은 항공기 구조물과 같이 안전성이 중요시되는 구조의 신뢰성을 저하시키며 또한 큰 위험 요인이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 구조의 건전성을 모니터링하고 파손여부를 실시간으로 감지하기 위해 단파장 레이저와 광대역광원을 동시에 적용한 광섬유 센서를 이용하여 변형을 및 파손을 실시간으로 동시에 모니터링 할 수 있는 시스템을 구성하였다. 이때 서로 다른 파장대의 두 광원은 파장분할다중송신기를 이용하여 하나의 광섬유 센서에 적용되었다. 파손신호의 특징을 정량적으로 구분하기 위해 STFT와 Wavelet Transform 과 같은 시간 주파수 분석법을 사용하였으며, 광섬유 센서로 취득 된 파손신호 및 변형을 측정값을 각각 압전 세라믹 센서와 스트레인게이지의 값과 서로 비교하였다. 장시간동안 파손과 동시에 측정된 변형률의 값은 스트레인게이지의 측정값과 잘 일치하였으며 파손감지 시스템 또한 미세한 파손신호까지 민감하게 감지해 낼 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서 론

항공기와 같은 경량 구조물에 많이 사용되는 복합재료는 일반 금속재료에 비해 비강성과 비강도가 매우 높고 내 부

식성 및 피로특성이 우수하다는 장점이 있다. 하지만 과도한 하중이나 충격 등에 의해서 구조물의 복합적층 내부에 손상이 발생했을 경우 육안으로는 파손여부를 감지하기가 어려우며 초음파 검사법이나 X선 검사법과 같은 비파괴

* 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원

** 한국과학기술원 항공우주공학전공

*** 한국과학기술원 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

시 발생하는 응력과 진동은 구조물 및 센서에 미소변형을 발생시키며, 광섬유 센서는 파손신호의 동적 특성을 유지하며 미소변형을 광강도로 표시되는 간섭신호의 위상차 변화로 전환시켜준다.

2.2 AEFPI 센서의 변형률 측정원리

변형률 측정에 있어 단파장 레이저를 사용한 EFPI센서를 사용하는데 있어서 가장 큰 제한점은 정현파 형태의 출력 신호의 비선형성으로 인한 신호처리의 어려움이다. 또한 EFPI는 인장/압축과 같은 변형률의 방향을 구별할 수 없다는 단점이 있다[2].

AEFPI는 기존의 EFPI와 센서 탐촉자 부분의 구성은 동일하지만 EFPI가 협대역 광원, 즉 레이저를 사용하는데 반해 AEFPI는 광대역 광원을 사용한 다중 광 간섭 센서라는 점이 다르다. 기존의 EFPI와 비교한 AEFPI의 장점은 광섬유 센서의 신호를 시간에 따라 연속적으로 취득할 필요 없이 필요한 시점에 반사 스펙트럼을 취득하여 파장 영역에서 반사 신호의 최고점(peak)들 사이의 파장 간격의 변화만을 측정하면 된다는 것이다[8]. 즉, AEFPI센서를 사용하면 측정이 필요할 시점에서 비연속적으로 신호를 취득하여 간단한 계산을 통해 변형률을 구할 수 있으므로 실시간 신호처리가 용이하다. 또한 반사 신호의 최고점 사이의 파장 간격이 감소하면 인장 변형이고 증가하면 압축변형을 받는 것이므로 변형률 방향을 구별할 수 있다는 장점이 있다.

EFPI센서에서 유리/공기 경계에서의 반사는 매우 낮으므로 EFPI센서는 저 피네스(low finesse) 패브리-페로 간섭계이며 두 빔 간섭계(two beam interferometer)로 볼 수 있다. 따라서 간섭 신호의 출력 강도는 식 (1)과 같은 정현파 형태로 나타나며 간섭 신호의 위상은 다음 식과 같이 간극 길이에 대한 함수로 주어진다[8].

$$\phi = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (5)$$

Fig. 2 는 파장분석기를 통해 관찰한 AEFPI의 출력 값이다. 간섭 무늬의 개수는 EFPI 간극 길이(d)에 의해 결정되므로 아래의 식 (6)과 같이 간섭 무늬의 최고점 파장들의 간격으로부터 간극 길이를 구할 수 있다[8].

$$d = \frac{m\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (6)$$

여기서 λ_1 과 λ_2 는 m 만큼의 위상 차이를 가지는 두 파장이며, m 은 정수이다. AEFPI센서에 변형이 가해졌을 때, 센서의 게이지 길이를 L , 변형을 가하기 전 초기의 간극 길이를 d_0 , 변형이 가해진 후의 간극 길이를 d_n , 그리고 변형 전후의 간극 길이의 변화량을 Δd 라고 하면, AEFPI센서에 의해서 측정되는 변형률은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{d_n - d_0}{L} = \frac{\Delta d}{L} \quad (7)$$

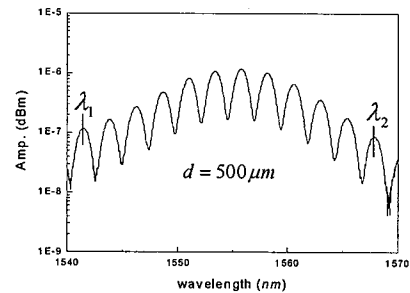


Fig. 2 Typical output of the AEFPI.

3. 신호처리

3.1 Short time Fourier transform

일반적인 주파수 영역분석에 사용되는 Fourier 변환은 시간에 관계된 정보를 잃어버리므로 파손신호와 같이 국소적인 변화나 일시적인 변형(transient process)과 같은 비정상(non-stationary) 신호에는 적합하지 않다[9]. 외부입력신호 $f(t)$ 에 대한 STFT는 다음과 같이 정의된다.

$$STFT(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t-\tau)e^{-i\omega t} dt \quad (8)$$

식(8)에서 볼 수 있듯이 STFT의 결과는 시간 τ 주위에 윈도우 함수 $g(t)$ 에 의해 분할되어진 입력신호 $f(t)$ 를 Fourier 변환하는 것이다. 이때 계산된 국소 스펙트럼계수(local spectral coefficient)가 시간 t 에서의 주파수 성분을 나타내게 되는데 윈도우를 시간축에 따라 연속적으로 움직이면서 시간에 따른 주파수 특성의 변화를 계속 관찰할 수

있다. 하지만 이 방법의 경우 윈도우의 크기 T 에 대해 주파수 밴드폭은 $1/T$ 의 관계를 가지고 있기 때문에 시간영역과 주파수 영역에서 동시에 높은 해상도를 갖기 어렵다는 단점이 있다. 하지만 계산속도가 충분히 빠른 경우에는 윈도우를 중첩하는 overlap방법을 통해 단점을 보완할 수 있다. 신호처리에 사용된 시간 윈도우는 해밍 윈도우(hamming window)를 사용하였으며, 밴드 폭은 64포인트로 중첩 폭은 16포인트로 설정하였다.

3.2 Wavelet transform

WT는 STFT에 비해서 계산 속도는 느리지만 상대적으로 시간영역 해상도가 높다는 장점이 있으며, 기존의 신호처리 방법에서 놓치기 쉬운 trend, break-point 나, 미분 불가능한 불연속점의 처리에 유리하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 신호의 후처리를 통한 파손특성의 관찰에 STFT와 WT를 이용하였으며 이를 실시간으로 처리된 결과와 비교하였다.

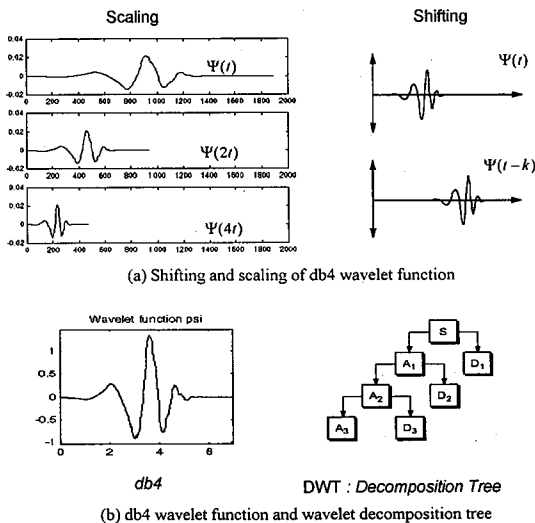


Fig. 3 Scaling and shifting of db4 wavelet function and wavelet decomposition tree.

Fig. 3(a)에서처럼 WT는 원형의 웨이블릿 기본 함수의 크기변환 및 수평 이동된 형태의 함수를 이용하여 신호를 분해하는 것이다.

CWT(Continuous Wavelet Transform)는 다음과 같이 정의된다.

$$CWT_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (9)$$

여기서 $a > 0, b \in R$ 는 각각 스케일(scale, dilation)과 수평이동(translation)을 나타내는 파라미터이다.

$\Psi(t)$ 는 웨이블릿 함수이고 Ψ^* 는 공액복소 함수(complex conjugate)를 나타낸다. 식(9)의 결과는 스케일과 수평이동 파라미터에 대한 웨이블릿 계수이다.

실제 계산을 위하여는 이산화된(discretized) 스케일 a 와 수평이동 b 를 이용하는 DWT(Discrete Wavelet Transform)를 사용한다. 이때 웨이블릿 해석에서 신호 $X(t)$ 는 높은 스케일의 저주파수 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 분해 구조(wavelet decomposition tree)라고 부른다. Fig. 3 (b)에서 신호 S 를 세 단계로 분해한 것을 보여준다. 신호는 낮은 스케일의 세부성분 $D1$ 과 그 보다 큰 스케일의 세부성분 $D2, D3$ 과 근사 성분 $A3$ 으로 분해된다[9].

4. 파손신호 검출 및 특성

4.1 시편 및 실험방법

본 실험에서는 복합적층 시편의 인장 파괴실험을 통해 시편내부에 삽입된 광섬유 센서에 의해 취득된 파손신호의 특성을 관찰하였으며, 파손감지 시스템이 정확하게 파손시점을 감지하는지의 여부를 확인하였다.

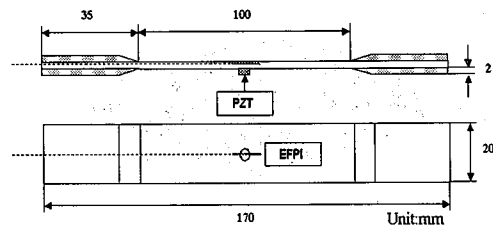


Fig. 4 Configuration of the specimen.

시편은 (주)한국화이버사의 CU-125 NS Gr/Ep프리프레그를 사용하였으며, 복합재의 초기 파손형태인 모재균열이 쉽게 발생할 수 있도록 $[0_2/\{0\}/90_1/0_2]_T$ 의 적층순서로 제작하였

다. 시편의 형상은 Fig. 4 와 같고, 센서는 게이지길이 9.59 mm, 간극 29 μ m 의 금증착된 EFPI 센서가 사용되었다. 광섬유 센서는 복합적층 시편의 0° 층과 90° 층 사이, 시편의 중앙에 0° 방향으로 삽입되었고, 동일한 위치의 시편 반대 면에는 PZT센서를 부착하여 파손신호를 서로 비교하였다.

4.2 실험결과 및 고찰

복합적층판에서 파손발생시에는 20kHz이상의 고주파 응력파손신호가 방출된다[9]. Fig. 5는 모재균열시 방출된 파손신호를 PZT센서를 통해 취득한 후 STFT를 통해 주파수영역 해석을 한 결과이다. 주파수 영역별로 파손신호를 구분하면 20 ~ 60 kHz 에 해당하는 영역과 60 kHz 이상의 영역으로 구분할 수 있는데, 약 40 kHz 를 중심으로 한 첫번째 영역은 주위보다 주파수 영역 진폭이 크며, 파손발생 후 1 ms 정도 지속되다가 점차 소멸된다. 60 kHz 이상의 고주파영역에서의 파손신호는 0.2 ms ~ 0.4 ms 정도 지속이 되며 200 kHz 이상의 고주파 영역까지 관찰되었다.

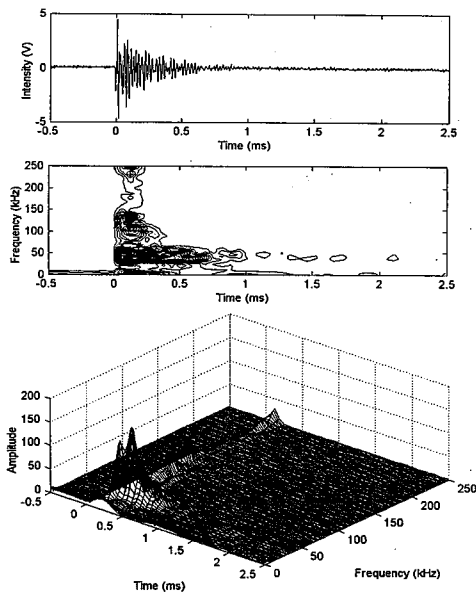
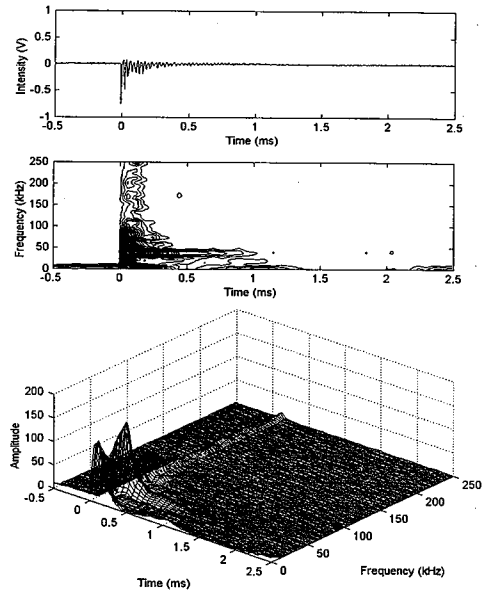


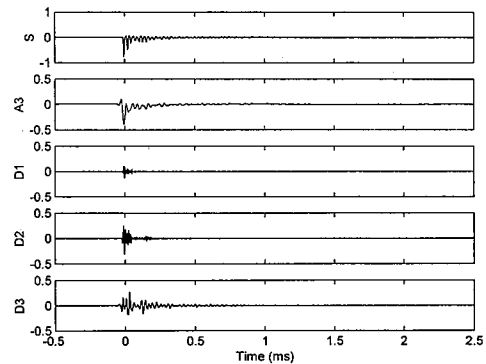
Fig. 5 Matrix cracking signal and its STFT by PZT.

Fig. 6 은 Fig. 5와 동일한 모재균열 신호에 대한 EFPI 센서의 응답을 나타낸다. 전반적인 주파수 영역 신호분포는 PZT의 경우와 유사함을 알 수 있지만, 40 kHz 근방의 주파수 영역의 경우 PZT 쪽이 더 민감하였고, 150 kHz 이상

의 영역에서는 EFPI에 의해 취득된 파손신호의 경우가 더 명확함을 확인할 수 있다. 파손직후 약 0.2 ms 동안 방출되는 100 kHz 이상의 주파수 신호는 신호잡음과 구분될 수



(a) STFT

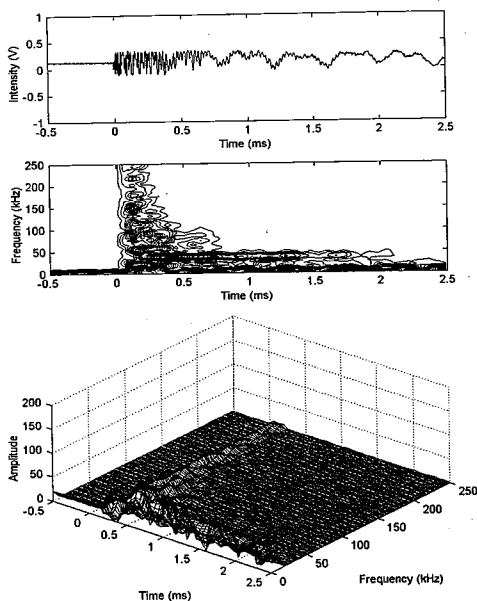


(b) Wavelet transform

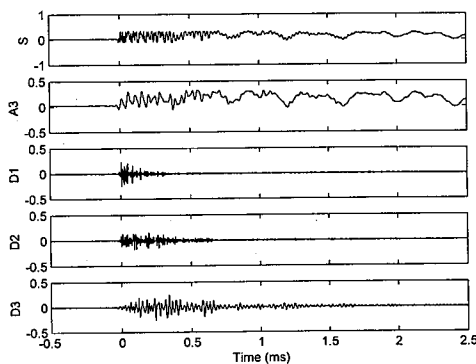
Fig. 6 Matrix cracking signal by EFPI and its STFT & WT.

있을 만큼의 충분한 진폭을 가지고 있으며 이러한 고주파 파손특성은 구조물의 파손유무를 감지하는데 이용될 수 있다. 웨이블릿 계수의 크기는 EFPI가 PZT의 경우에 비해 약 10배 정도 작은 값을 갖고 있는데, 이는 EFPI의 경우 시간영역에서의 파손신호의 크기가 PZT에 비해 작기 때문에 생긴 결과이다. 분리된 고주파 신호 (D1 ~ D3)의 결과로

불 때 0~200kHz에 해당하는 D1, D2영역의 신호가 주된 파손신호로 방출됨을 확인할 수 있다.



(a) STFT



(b) Wavelet transform

Fig. 7 Fiber breakage signal by EFPI and its STFT & WT.

Fig. 7은 섬유파단시 EFPI센서에 의해 취득된 파손신호의 해석결과이다. 시편의 표면에 부착된 PZT의 경우 섬유파단시 시편에서 분리되어 신호를 취득할 수 없었다. 섬유파단시에는 40 kHz 부근의 주파수 신호의 진폭이 모재균열시보다 작았으나 신호의 지속시간은 모재균열시의 약 2배 정도 지속되었다. 특히 20 kHz 이하의 주파수를 갖는 파손

신호는 모재균열시에는 거의 발생하지 않았지만 섬유파손시에는 높은 진폭을 갖고 오랜 시간 지속됨을 관찰할 수 있으며, 100 kHz 이상의 고주파 신호도 더 큰 진폭을 가지고 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 파손특성은 WT를 이용한 해석결과를 이용하여 좀 더 명확히 확인할 수 있다. 고주파 신호의 방출시간의 경우 가장 높은 주파수영역을 타나 내는 D1에서는 모재파손시의 2배 정도에 해당하는 0.4 ms 동안 지속되었다. D1에서의 파손신호의 경우 섬유파단의 경우가 모재파손의 경우보다 웨이블릿 계수가 2 배정도 높은 것을 관찰할 수 있으며, 이는 강화섬유의 강도가 모재의 파손강도보다 높으므로 파손시 방출되는 응력파의 에너지량도 더 많기 때문에 생긴 결과이다. 모재균열의 경우에는 D1보다 낮은 주파수에 해당하는 D2, D3의 웨이블릿 계수가 D1보다 더 높았지만, 섬유파단의 경우에는 D1의 경우가 더 높아 섬유파손시에는 200 kHz 이상의 고주파 특성신호의 크기가 상대적으로 더 컸음을 알 수 있다.

5. 변형률 및 파손의 실시간 동시감지

5.1 시편 및 실험방법

본 실험에서는 하나의 EFPI센서를 사용하여 복합적층 시편에서의 변형률 및 파손시점을 실시간으로 동시에 모니터링 하였다. 시편은 (주) 한국화이버사의 CU-125 NS graphite/epoxy 프리프레그 테이프를 사용하여 $[O_2/90_8]_3$ 의 적층순서로 시편을 제작하였으며 Instron 4482 만능시험기에 장착되었다. 광섬유센서와 동일한 위치의 시편 반대면에는 스트레인게이지를 부착하여 측정된 변형률을 서로 비교하였다. 시편의 치수 및 형상은 4장에서 사용된 Fig. 4의 시편과 동일하다.

본 실험에 사용된 광섬유 센서 시스템은 하나의 센서를 사용하여 변형률 및 파손신호를 동시에 취득하기 위해 파장대가 다른 2가지의 광원을 동시에 사용한 시스템이 적용되었다. Fig. 8 에는 이 두 가지의 광원을 이용한 광섬유 실험장비의 개략도를 나타내고 있다. 변형률 취득에는 ASE 광대역 광원의 1540 nm ~ 1570 nm 의 파장영역을 이용하여 절대적인 변형률을 얻기 위한 AEFP 시스템 구성하였으며, 파손신호 검출을 위해서는 앞의 4장에서 사용한 것과 동일한 1305 nm 의 단파장 레이저 광원의 EFPI 시스템이 사용되었다. 또한 이때 적용된 각기 다른 파장의 광원으로부터의 빛을 하나의 광섬유 센서에 투입하고 다시 분리해 내기 위해 wavelength division multiplexer

(Shin Young telecom, STWDM-HI-1310/1350)을 이용하였다.

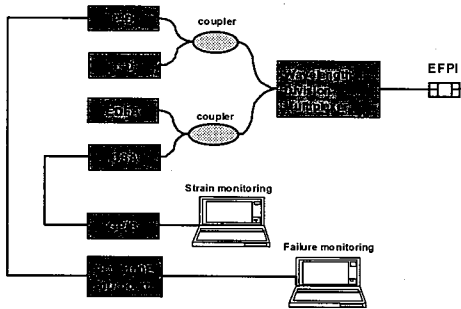


Fig. 8 Optical fiber sensor system for simultaneous strain and failure monitoring

하중은 우선 초기 미세 모재균열이 발생하기 이전인 0.4 % 이하의 변형을 까지만 가해졌다가 적용된 광섬유 센서가 하중의 방향을 구별하는지의 여부를 관찰하기 위해 0.2 % 변형률까지 경감되었으며 다시 증가시켜 모재파손 및 섬유파단이 일어나는 시점까지 하중을 가하였다. 광섬유 센서를 통해 취득된 변형률 및 파손신호는 동시에 실시간으로 모니터링되었으며, 변형률 값은 스트레인 게이지의 값과 비교하기 위해 별도로 저장하였다.

5.2 실험 결과 및 고찰

하중을 가하기 이전의 센서 간극의 길이는 $239\ \mu\text{m}$ 이며, 게이지 길이는 $10.73\ \text{mm}$ 이다. Fig. 9 는 인장하중이 가해지는 상태에서 하중을 증가, 감소시킨 경우 광섬유 센서를 통해 구해진 변형률의 값과 스트레인 게이지를 통해서 구해진 변형률의 값을 서로 비교한 그림이다. 위 결과로부터 두 센서로부터 얻어진 변형률의 값은 서로 매우 잘 일치함을 확인할 수 있으며, AEFPI 가 오랜 시간동안 변형률을 모니터링 하는데 있어 매우 유용하게 적용될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 10 의 (a), (b) 의 두 그림은 각각 모재파손과 섬유파손시의 신호를 파손감지 시스템을 이용하여 취득한 결과이다. Fig. 10(a)는 0.5 %의 변형률 상태에서 발생한 모재균열을 실시간으로 감지한 그림으로서, 40 kHz 근방에서 높은 피크를 갖는 파손신호의 특징을 보여주고 있다. Fig. 10(b)의 섬유파단 역시 전 주파수 영역대에 걸쳐 고르고 높은 진폭을 갖고 파손신호가 분포되어 있으며 신호방출 시간이 긴 특징을 가지고 있다. 이러한 파손신호 특징은 4

장에서의 밝힌 모재균열 및 섬유파단시의 파손특성과 동일함을 알 수 있으며, 파손감지시스템이 정확하게 파손신호를 감지할 수 있음을 확인할 수 있다.

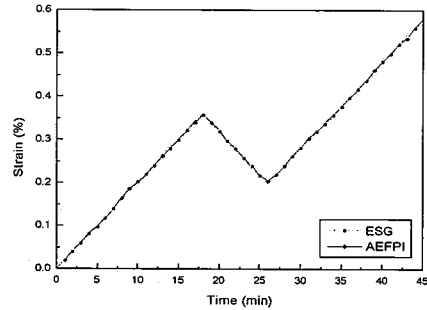
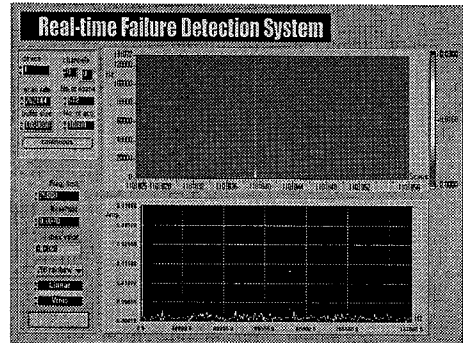
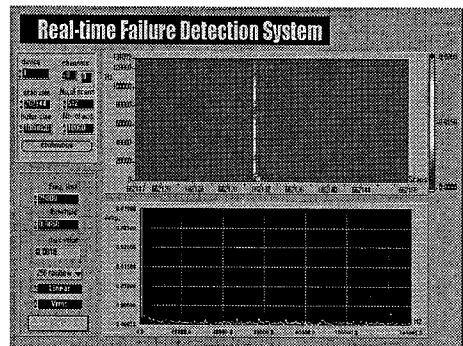


Fig. 9 Experimental result of strain measurement using AEFPI.



(a) Matrix cracking



(b) Fiber breakage

Fig. 10 Failure signals detected by real-time failure detection system.

AEFPI 센서에서 정확한 변형률 측정을 위해서는 센서의 간극길이가 커져야 하지만, 간극이 커질 경우에는 반사되

는 빛의 광강도가 낮아지기 때문에 파손신호의 크기가 작아지는 단점이 있다. 하지만 본 연구에서는 반사면에 금을 증착하여 반사율을 높인 EFPI센서를 사용하여 간극이 큰 경우에서도 민감하게 파손신호를 감지 할 수 있었다. 또한 WDM 을 이용하여 각기 서로 다른 파장대의 빛을 하나의 EFPI센서에 사용하여 변형률 및 파손신호를 동시에 모니터링하는 것이 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

1. 복합적층 시편의 파손실험 결과 모재균열시는 40 kHz 부근에서 높은 진폭을 가진 주파수특성을 관찰할 수 있었으며 100 kHz 이상의 고주파 특성신호가 0.2 ms 정도 지속되었다. 또한 섬유파손시에는 200 kHz 이상의 고주파 신호 까지도 높은 진폭으로 고르게 파손신호가 분포하였으며 이와 같은 주파수영역 특성을 이용하여 파손발생 여부를 구분할 수 있었다. 실시간 파손감지 시스템은 이러한 판단기준을 이용하여 파손시점을 정확하게 감지하였다

2. 변형률 및 파손시점을 동시에 측정하는 실험에서는 WDM 을 이용하여 각기 서로 다른 파장대의 빛을 하나의 EFPI센서에 사용하여 변형률 및 파손시점을 동시에 모니터링하는 것이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 기초연구사업의 연구비 지원에 의해 수행 되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) Sirkis, J., Putman, M. A., Berkoff, T. A., Kersey, A. D., et al., "In-line Fiber Etalon (ILFE) for internal Strain Measurement," *SPIE : Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, Vol. 2191, 1994, pp. 137-147.
- 2) Tran, T. A., Greene, J. A., Murphy, K. A., Bhatia, V., Sen, M. B. and , Claus, R. O., "EFPI Manufacturing Improvements for Enhanced Performance and Reliability," *SPIE : Smart Structures and Materials: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*,

Vol. 2447, 1995, pp. 312-323.

- 3) Liu, K., Ferguson, S. M. and Measures, R. M., "Damage detection in composite with embedded fiber optic interferometric sensors," *SPIE : Fiber Optic Smart Structures and Skins II*, Vol. 1170, 1989, pp. 205-210.
- 4) Alcoz, Jorge J., Lee, C. E. and Taylor, H. F., "Embedded fiber-optic Fabry-Perot ultrasound sensor," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 37, No. 4, 1990, pp. 302-306.
- 5) Murphy, K. A., Schmid, C. A., Tran, T. A., Carman, G., Wang, A. and Claus, R. O., "Delamination detection in composite using optical fiber techniques," *SPIE : Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, Vol. 2191, 1994, pp. 227-231.
- 6) Kwon, I. B., Kim, C. G., and Hong, C. S., "Simultaneous sensing of the strain and points of failure in composite beams with an embedded fiber optic Michelson sensor," *Composites Science and Technology*, Vol. 57, 1997, pp. 1639-1651.
- 7) Park, J. W., Ryu, C. Y., Kang, H. K., and Hong, C. S., "Detection of Buckling and Crack Growth in the Delaminated Composites Using Fiber Optic Sensor," *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, No. 19, 2000, pp. 1602-1623.
- 8) Bhatia, V., Sen, M. B., Murphy, K. A., and Claus, R. O., "Wavelength-tracked White Light Interferometry for Highly Sensitive Strain and Temperature Measurements," *Electronics Letters*, Vol. 32, No. 3, 1996, pp. 247-249.
- 9) Sung, D. U., Oh, J. H., Kim, C. G. and Hong, C. S., "Impact monitoring of smart composite laminates using neural networks and wavelet," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, 2000, pp. 180-190.