

論文

복합적층판의 변형파손 동시감지를 위한 광섬유 센서 시스템에 관한 연구

방형준*, 강현규**, 홍창선***, 김천곤****

Study of Optical Fiber Sensor Systems for the Simultaneous Monitoring of Fracture and Strain in Composite Laminates

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

ABSTRACT

To perform the real-time strain and fracture monitoring of the smart composite structures, two optical fiber sensor systems are proposed. The two types of the coherent sources were used for fracture signal detection - EDFA with FBG and EDFA with Fabry-Perot filter. These sources were coupled to EFPI sensors imbedded in composite specimens. To understand the characteristics of matrix crack signals, at first, we performed tensile tests using surface attached PZT sensors by changing the thickness and width of the specimens. This paper describes the implementation of time-frequency analysis such as short time Fourier transform (STFT) and wavelet transform (WT) for the quantitative evaluation of fracture signals. The experimental result shows the distinctive signal features in frequency domain due to the different specimen shapes. And, from the test of tensile load monitoring using optical fiber sensor systems, measured strain agreed with the value of electric strain gage and the fracture detection system could detect the moment of damage with high sensitivity to recognize the onset of micro-crack fracture signal.

초 록

본 연구에서는 구조의 건전성을 실시간으로 모니터링하기 위해 변형률 및 파손을 동시에 감지할 수 있는 두 가지 형태의 광섬유 센서 시스템을 제안하였다. 구성된 광섬유 센서 시스템은 파손신호 취득에 사용되는 단파장 광원의 형태에 따라 EDFA에 FBG 사용한 것과 Fabry-Perot 필터를 사용한 것으로 나뉘며 EFPI센서를 통해 복합재 시편의 인장실험을 모니터링 하는데 적용되었다. 먼저, 복합재의 초기파손모드에 해당하는 모재균열 신호의 특징을 알기 위해 압전세라믹 센서를 이용하여 시편의 두께와 폭의 변화에 따른 신호특성을 파악하였다. 정량적 파손신호의 특성 분석을 위해 STFT와 Wavelet Transform과 같은 시간 주파수 변환방법을 사용하였으며, 시편의 형상변화에 따라 모재균열 신호의 주파수영역 특성이 변화함을 확인하였다. 광섬유 센서로 취득된 파손신호 및 변형률 측정값을 각각 압전세라믹 센서와 변형률게이지의 결과 값과 서로 비교하였다. 광섬유 센서 시스템들을 이용한 장시간동안의 인장실험 결과 변형률의 값은 변형률게이지의 측정값과 잘 일치하였으며 파손감지 시스템 또한 미세한 파손신호까지 민감하게 감지해 낼 수 있음을 알 수 있었다.

Key Words: 광섬유센서(Fiber optic sensors), 변형률 측정(strain measurement), 파손 감지(fracture detection)

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

** 삼성전자 반도체 사업부

*** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 교수

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

1. 서론

일반 금속재료에 비해 내부의 균열발생을 감지하기 어려운 복합재 구조물의 경우 과도하중 및 충격에 의한 급격한 파손의 위험성을 감소시키기 위하여 변형률 및 초기 파손의 발생 여부를 감지하고 손상을 판단할 수 있는 시스템 및 판단기준을 확립하는 것은 매우 중요한 연구 분야이다. 특히 경량 복합재료의 사용이 점차 늘고있는 항공우주구조물에 이러한 실시간 구조 모니터링 기법이 사용된다면 운용 중 구조모니터링이 어려웠던 기존의 비파괴 검사 방법의 단점을 보완함과 동시에 관리비용의 절감까지도 기대할 수 있다.

이러한 요구에 의하여 최근에는 기계 구조물이 외부의 환경 변화를 스스로 감지하고 이에 적절히 반응하도록 하여 구조물의 안전성 및 신뢰성을 확보하고자 하는 스마트 구조물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 스마트 구조물의 감지계로 이용되는 광섬유 센서는 기존의 센서와 달리 전자기파의 영향을 받지 않으며, 크기가 매우 작아 구조물 내부에 쉽게 삽입될 수 있고, 높은 작동온도 범위와 해상도 등 많은 장점과 잠재적 가능성을 지니고 있다[1]. 광섬유 센서를 이용하여 구조물의 건전성을 모니터링하는 것에 관한 연구는 변형률 측정을 중심으로 진동 및 파손 그리고 온도검출 등 여러 가지 물리량을 측정하는 것으로 연구범위가 확대되고 있다[1-4].

본 연구는 스마트 복합재 구조물의 안전 진단 시스템에 관한 것으로, 광섬유 센서를 이용하여 변형률 및 파손발생 유무를 동시에 모니터링 할 수 있는 시스템을 개발하는 것이 목적이다. 본 논문에서는 실시간 변형, 파손 동시 모니터링 위한 두 종류의 광섬유 센서 시스템을 제안하였으며, 파손감지를 위해 복합적층판의 초기 파손 신호인 모재균열의 신호특성과 및 신호처리 기법에 대해 연구하였다. 복합재 구조의 파손여부를 모니터링하기 위한 방법으로는 푸리에 변환(Fourier transform)을 이용한 주파수 영역 분석 방법이 많이 사용되고 있으며[3], 최근에는 시간에 따른 주파수 성분 변화 등을 이용하여 정량적인 파손발생 여부를 판단하기 위한 연구들이 수행되었다[4-5].

본 연구에서는 파손신호 검출을 위해서 쇼트타임-푸리에 변환(short-time Fourier transform; STFT) 과 웨이블릿 변환(wavelet transform; WT)과 같은 시간-주파수 분석 방법(time-frequency analysis)을 이용하였으며 사용된 복합재 시편의 두께(thickness) 및 폭(width) 변화에 따른 모재균열의 신호특성을 정량적으로 구분하였다.

변형률 및 파손신호의 동시취득을 위한 광섬유 센서 시스템은 파손신호 취득을 위한 광원의 적용형태에 따라 두 종류의 시스템을 제안하였다. 사용된 광원은 두 시스템 모두 광대역의 EDFA 광원을 사용하였으며 파손신호 취득을 위한 단파장을 분리해내는 과정에 따라서 브래그 격자

(fiber Bragg grating; FBG)와 패브리-페로(Fabry-Perot) 필터를 각각 사용하였다.

변형률 측정에는 절대 변형률 측정 외부 패브리-페로 간섭센서(absolute extrinsic Fabry-Perot interferometer; AEFPI)에서의 측정원리를 사용하였으며, 파손신호 취득에는 광대역 광원에서 분리된 단파장 간섭을 이용한 외부 패브리-페로 간섭센서(extrinsic Fabry-Perot interferometer; EFPI)의 고주파 진동 취득원리를 이용하였다. 단일파장 간섭을 이용한 EFPI 센서는 변형률을 측정할 경우 신호처리 방법이 복잡하며 오차가 누적될 수 있다는 단점이 있으나 매우 민감하여 미세한 고주파 진동취득에는 유리하다는 장점이 있다 [1]. 또한 광대역 광원을 이용한 AEFPI센서는 연속적인 신호취득 여부와는 상관없이 필요한 측정시점의 변형률 정보를 반사스펙트럼을 통해서 바로 계산할 수 있으므로 시간에 따른 변형률 측정의 오차누적이 없으며 신호처리 방법 또한 간단하다는 장점이 있다[4].

본 연구에서는 하나의 EFPI 센서에 단일 광원을 사용하여 광대역 간섭과 단일파장 간섭을 동시에 적용함으로써 파손시점 및 변형률을 동시에 취득 가능한 광섬유 센서 시스템을 구성하였으며 최종적으로 구성된 센서 시스템을 이용하여 인장실험 시 실제 변형률과 파손여부를 실시간으로 동시에 모니터링하는 실험을 수행하였다.

2. 측정원리

2.1 변형률 측정원리

AEFPI 센서 시스템은 EFPI센서 시스템과 비교할 때 탐촉자의 형태는 동일하지만 변형률 측정에 단일파장 광원을 사용하는 EFPI와는 달리 광대역 광원을 이용한 다중파장 간섭원리를 사용한다는 것이 다르다[4].

Fig. 1에서 보는 바와 같이 EFPI센서는 첫번째 반사면과 두 번째 반사면의 빛이 서로 간섭을 하여 출력광 I를 만드는 두 빔 간섭계로써 간섭신호의 출력강도는 아래의 식 (1)과 같이 정현파 형태로 주어진다[6].

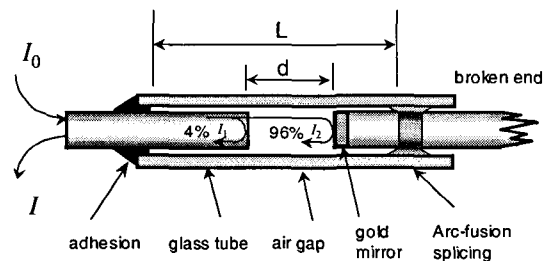


Fig. 1 Schematic diagram of EFPI sensor.

$$I = I_0(1 + \cos\phi) \quad (1)$$

$$\phi = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (2)$$

위 식에서 간섭신호의 위상(ϕ)은 간극길이(d)에 대한 함수로써 광대역 광원에 의한 다중파장간섭이 발생하는 경우 파장영역에서의 다중파장간섭신호의 최고점들의 파장간격으로부터 아래의 식과 같이 간극의 길이를 구할 수 있다 [7].

$$d = \frac{m\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (3)$$

여기서 λ_1 과 λ_2 는 2π 의 정수배 만큼의 위상차를 갖는 최고점의 파장 값을 나타내며, m 은 정수이다. 일정한 파장 범위에서의 다중파장간섭무늬의 개수는 인장하중에 의해 증가하고 압축하중에 의해 감소하며 반대로, 신호의 강도는 인장 시 감소하고 압축 시 증가하는데 이는 간극 길이 변화에 따른 광 손실량에 관계된다[8].

변형률의 계산은 하중이 가해지기 전, 후의 간극 값($d_n - d_0$)의 차이를 센서의 게이지 길이로 나눈 값으로부터 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{d_n - d_0}{L} = \frac{\Delta d}{L} \quad (4)$$

2.2 파손신호 취득원리

EFPI센서를 통해 파손신호를 취득할 경우에는 단파장 광원의 간섭을 이용하는데 간섭신호의 강도는 위의 식 (1)과 마찬가지로 정현파 형태가 된다. 식 (2)에 증분을 취하고 게이지 구간 내에서 광섬유는 자유단 상태이므로 $\Delta L = \Delta d$ 임을 이용하여 정리하면 다음과 같은 식 (5)가 된다. 여기서 λ_0 는 진공 중에서 레이저의 파장을 나타낸다.

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta L} = \frac{4\pi}{\lambda} = \frac{4\pi n_c}{\lambda_0} \quad (5)$$

실험에서 사용된 레이저의 파장($\lambda_0 = 1533.8nm$)과 공기의 굴절률($n \approx 1$)을 대입하면 식 (6)이 된다[1].

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta L} = 0.8193 \times 10^7 \text{ (rad/m)} \quad (6)$$

식 (6)은 미소변형의 절대값을 측정하는 것은 아니지만 파손에 의한 변위의 주파수 특성이 위상차에서도 동일함

특성을 보인다는 사실을 보여주고 있으며 작은 진동에 의한 게이지길이 변화에 대해서도 높은 민감도로 광 강도의 위상이 변한다는 사실을 보여주고 있다[9].

3. 시간-주파수 분석법

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[10]. 따라서 이러한 신호를 분석하기 위해서는 시간에 따른 주파수영역 분해가 가능한 STFT를 사용한다. 외부입력신호 $f(t)$ 에 대한 STFT는 다음과 같이 정의된다.

$$STFT(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t-\tau)e^{-i\omega t} dt \quad (7)$$

식 (7)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 스펙트럼 계수(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. 또한 신호분해에 사용되는 기본함수로 무한한 길이를 가진 정현파 함수를 사용하므로 국부적으로 급격한 변화를 갖는 신호를 분석하는데 한계가 있다. 하지만 STFT의 경우 신호처리 속도가 빠르며 주파수 값으로 나오는 신호처리결과를 이해하기가 쉬운 장점이 있으므로 실시간 파손감지를 위한 광섬유 센서시스템의 신호처리방법에 적용되었다. 사용된 시간 윈도우는 해밍 윈도우(hamming window)를 사용하였으며, 밴드 폭은 64포인트로 증첩 폭은 16포인트로 설정하였다.

3.2 Wavelet transform

WT는 STFT에 비해서 계산 속도가 느리며 주파수값에 해당하는 스케일 값을 반대로 환산하여 이해해야 한다는 단점이 있다. 하지만 상대적으로 시간영역 해상도가 높다는 장점이 있으며, 기존의 신호처리 방법에서 놓치기 쉬운 trend, break-point나, 미분 불가능한 불연속점의 처리에 유리하다[5]. 또한 이산화된 형태의 DWT를 이용한 경우에는

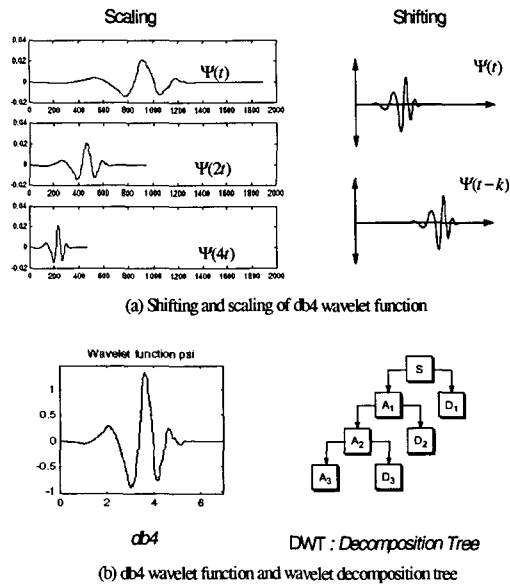


Fig. 2 Scaling and shifting of db4 wavelet function and wavelet decomposition.

레벨에 따라 분해된 각 고주파 영역 성분을 비교함으로써 신호특성에 대한 정량적 비교가 가능하므로 본 연구에서는 시편의 형상변화에 따른 모재균열 신호특성변화를 정량적으로 관찰하는데 이용하였다.

Fig. 2(a)에서처럼 WT는 원형의 웨이블릿 기본 함수의 크기변환 및 수평 이동된 형태의 함수를 이용하여 신호를 분해하는 것이다.

CWT(Continuous Wavelet Transform)는 식 (8)과 같이 정의된다[11].

$$CWT_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (8)$$

여기서 a , b 는 각각 스케일(scale, dilation)과 수평이동(translation)을 나타내는 파라미터로써 웨이블릿의 형상을 결정하는 상수이다. $\psi(t)$ 는 웨이블릿 함수이고 ψ^* 는 공액복소 함수(complex conjugate)이다. 식 (8)의 값은 웨이블릿 계수로써 주어진 시간 축 상에서의 입력신호가 해당 레벨의 웨이블릿과 얼마나 일치하는가를 나타내는 계수가 된다.

실제 계산에서는 이산화된 형태의 DWT(Discrete Wavelet Transform)을 사용하는데 이때 웨이블릿 해석에서 입력신호는 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 성분으

로 분해될 수 있으며, 이를 웨이블릿 분해 구조(wavelet decomposition tree)라고 부른다[5,11]. 입력신호 S는 Fig. 2(b)에서 보여지는 바와 같이 고주파성분인 $D1$ 과 저주파 성분인 $A1$ 으로 분해되며 분해레벨이 높아질수록 세부적인 주파수성분에 대한 분해가 가능하다. 본 연구에서는 다우베치(Daubechy)4 웨이블릿 함수를 사용하였다.

4. 모재균열 신호특성 분석 실험

4.1 실험 장치 및 실험 방법

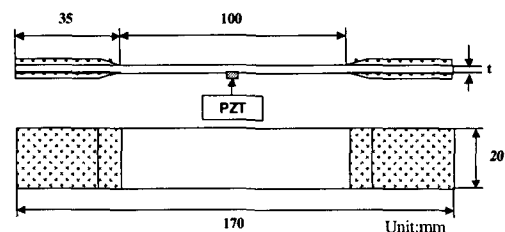


Fig. 3 Tensile test specimen for the matrix cracking signal acquisition.

복합적층 시편의 모재균열 신호특성을 관찰하기위해 HFG CU-125NS Graphite/Epoxy 프리프레그테이프를 이용하여 적층 한 후에 오토클레이브로 성형하여 Fig. 3과 같은 형상의 시편을 제작하였다. 시편 표면의 중앙에는 모재균열 신호 취득을 위한 압전세라믹센서를 부착하였으며 시편의 적층은 모재균열이 쉽게 발생할 수 있도록 바깥쪽 0°층과 안쪽의 90°층으로 이루어진 직교-적층 형태로 제작하였다. 시편형상을 변화시키는 변수로는 시편의 폭과 모재균열이 발생하는 90°층의 두께변화 두 가지이다. 두께변화의 경우에는 (1) 0°층 두께를 고정한 상태에서 90°층 두께를 변화시킨 경우, (2) 전체두께를 고정한 상태에서 0°층과 90°층의 비율을 변화시킨 경우, (3) 0°층과 90°층의 비율을 고정한 상태에서 전체 두께를 변화시킨 경우의 세 가지에 대해서 모재균열 신호의 특성변화를 관찰하였다. 실험장치의 구성은 Fig. 4와 같다.

시편의 두께와 폭의 변화에 따른 모재균열 신호의 정량적인 변화 비교를 위해서는 WT를 통한 시간-주파수 영역 분석방법을 이용하였다. 신호처리 방법은 다음과 같다. 먼저 각 신호의 최대값으로 신호를 나눠 정규화(normalize)를 한 후 WT를 통해 시간-주파수 변환을 한다. 그리고 WT를 통해 변환되어 분리된 이산화된 고주파 영역 성분 $D1$, $D2$, $D3$, $D4$ 의 분포 비율 변화를 비교하기 위해 각 성분의 크기를 시간에 따라 수치 적분하고 $D1$, $D2$, $D3$, $D4$ 적분 값의 비율 변화를 관찰하였다. 각 고주파성분의 주파수영역은 1 MHz로 샘플링된 신호에 대해서 $D1$ 은 약 200~500

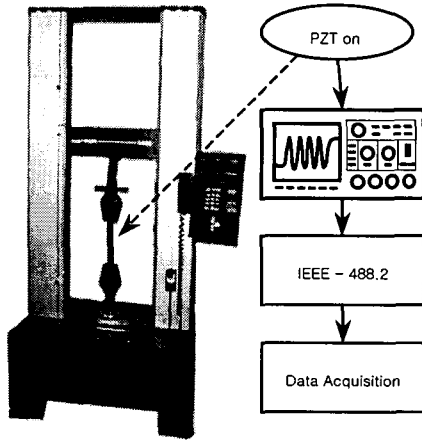


Fig. 4 Experimental setup for the matrix cracking signal acquisition.

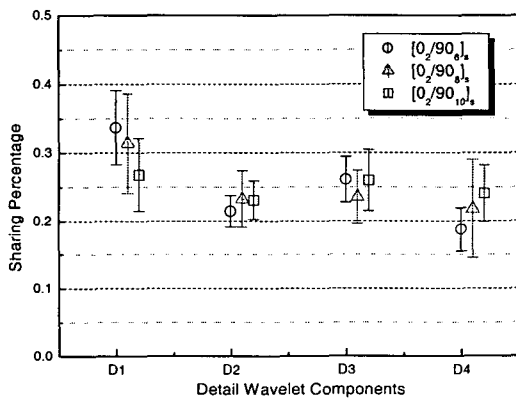


Fig. 5 Comparison of proportion of detail WT components. : $[0_2/90_6]_s$, $[0_2/90_8]_s$, $[0_2/90_{10}]_s$

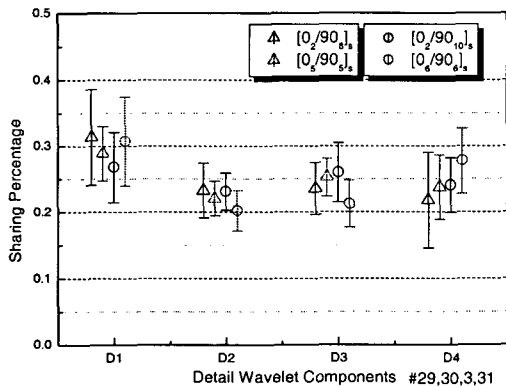


Fig. 6 Comparison of proportion of detail WT components. : $[0_2/90_8]_s$, $[0_2/90_{10}]_s$, $[0_2/90_6]_s$

kHz, D2는 100~300 kHz, D3는 40~160 kHz, D4는 0~80 kHz의 범위를 갖는다. 이것은 웨이블릿 함수가 조화함수처럼 하나의 주파수 특성만을 가지고 있지 않은 로컬 함수이기 때문이며 샘플링 주파수 및 웨이블릿 함수가 바뀌는 것에 따라 다른 주파수 특성을 나타내게 된다.

4.2 실험 결과 및 고찰

시편의 두께 변화에 대한 신호특성의 첫번째 비교로 0°층이 고정된 상태에서 모재균열이 발생하는 90°층의 두께를 $[0_2/90_6]_s$, $[0_2/90_8]_s$, $[0_2/90_{10}]_s$ 과 같이 3:4:5의 비율로 증가시키면서 신호특성을 관찰하였다.

Fig. 5의 그림은 위 세 종류의 시편에 대해 고주파 영역 성분의 변화를 비교한 것이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 대부분의 시편에서 발생하는 모재균열 신호들은 0°층이 고정된 상태에서 90°층의 두께가 증가하면 D1의 비율은 줄어들고 D4의 비율은 증가하는 일관된 경향성을 확인할 수 있었다. 즉, 90°층의 두께가 증가함에 따라 고주파 성분은 줄어들고 저주파 성분은 늘어난다는 것을 알 수 있다. 반면 중간 영역에 해당하는 D2, D3의 경우 주파수영역의 변화폭이 거의 없거나 불규칙적으로 변하는 등 경향성을 확인하기 어려웠다. 또한 실험 결과 90°층의 두께가 3:4:5로 일정하게 증가했지만 주파수영역성분은 일정하게 변화하지 않고 영역에 따라 비선형적으로 변화한다는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 6은 두께 변화에 대한 두 번째 경우로 전체 두께를 고정된 상태에서 0°층과 90°층의 비율을 동시에 변화시켰다. 서로 다른 전체 두께를 가진 두 가지 경우에 대해서 실험을 했는데 그림에서 삼각형으로 중심을 표시한 것이 적층이 $[0_2/90_8]_s$ 인 시편과 $[0_2/90_6]_s$ 인 경우이며, 원으로 중심을 표시한 것이 $[0_2/90_{10}]_s$ 과 $[0_2/90_8]_s$ 의 적층을 가진 시편의 결과이다. 이 경우 전체 두께가 고정되어 있는 상태에서 90°층의 두께가 증가해도 0°층의 두께가 함께 변하면 D1~D4의 비율 변화의 일관성을 관찰할 수 없었다. 이러한 결과는 $[0_2/90_{10}]_s$ 과 $[0_2/90_6]_s$ 과 같이 전체 두께가 더 증가한 경우의 실험 결과의 비교에서도 마찬가지로 확인할 수 있는데 적층에서 대부분의 하중을 담당하는 0°층의 변화가 모재균열 신호의 주파수 영역 변화에 복잡한 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 7은 두께변화에 대한 세 번째 실험결과로 0°층과 90°층의 두께 비율을 1:1로 고정된 상태에서 전체 두께를 변화시킨 실험의 결과이다. 이 실험에서는 3:4:5의 전체 두께 비율을 가진 $[0_2/90_6]_s$, $[0_2/90_8]_s$, $[0_2/90_{10}]_s$ 세 시편에 대해 두께변화에 대한 주파수 영역 분포변화를 관찰해 보았다. 전체두께 변화비가 3:4 인 실험결과에서는 D1, D4의 비율이 감소하고 D2, D3의 비율이 증가하였지만 두께 변화비가 4:5인 결과에서는 D1, D2의 비율이 증가하고 D3,

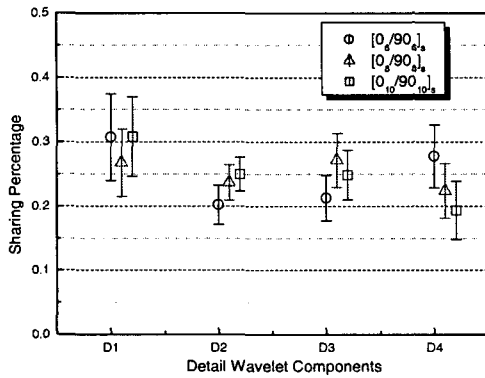


Fig. 7 Comparison of proportion of detail WT components. : [0₂/90₂], [0₂/90₄], [0₁₀/90₁₀].

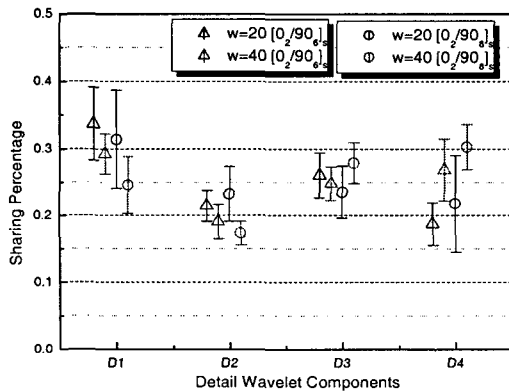


Fig. 8 Comparison of proportion of detail WT components. : [0₂/90₂], [0₂/90₄], w=20, 40

D4의 비율이 감소하였다. 결과에서 알 수 있듯이 이 경우에도 앞의 두 번째 두께변화의 실험결과와 같이 고주파 영역 성분의 특성변화에 대한 일관성을 찾을 수 없었다. 즉 0°층과 90°층의 비율이 동일하다 하더라도 전체 두께가 변화하면 모재균열의 신호특성은 변화하며 90°층 두께만 변화한 경우 신호특성의 변화가 일정했던 것에 반해 0°층 및 전체두께가 함께 변화한 경우에는 주파수신호 특성변화에 대한 일관성을 발견할 수 없었다. 이러한 결과는 시편의 적층 방법에 따라 모재균열 신호의 주파수 특성변화가 일어난다는 사실을 보여준다.

Fig. 8은 시편의 폭 변화에 따른 모재균열 신호의 주파수 특성 변화를 보여주고 있다. 중심이 삼각형으로 표시된 그래프는 [0₂/90₂]의 적층을 가진 시편에서 폭이 20 mm인 경우와 40 mm인 경우를 서로 비교하고 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 시편의 폭이 증가하는 경우 변화량에는 각각 차이가 있지만 상대적으로 고주파 성분인 D1과 D2성분은 감소 하였으며 저주파 성분인 D3와 D4성분은 증가하였음을

확인할 수 있다. 중심이 원으로 표시된 그래프의 결과는 90°층의 적층이 더 두꺼운 [0₂/90₄]시편의 폭 변화에 대한 결과로써 마찬가지로 시편의 폭이 증가함에 따라 상대적으로 높은 주파수 성분은 감소하고 낮은 주파수 성분은 증가하는 경향성을 관찰할 수 있다.

5. 변형 및 파손 동시감지 실험

본 실험에서는 하나의 EFPI 센서에 광대역 광원의 다중 파장 간섭과 단일파장 간섭을 동시에 적용함으로써 파손시점 및 변형률을 동시에 취득 가능한 광섬유 센서 시스템을 구성하였으며 이를 통해 복합적층판의 변형률 및 파손시점을 실시간으로 동시에 모니터링하는 실험을 수행하였다.

5.1 실험 장치 및 실험 방법

- 광섬유센서 시스템

본 연구에서 제안한 변형률 및 파손신호의 동시취득을 위한 두 종류의 광섬유 센서시스템은 모두 광대역의 EDFA 광원을 사용하였으며 파손신호 취득을 위한 단파장을 분리해내는 과정에 따라서 브래그 격자(fiber Bragg grating; FBG)와 패브리-페로(Fabry-Perot) 필터를 각각 사용하였다. Fig. 9는 사용된 광섬유 센서 시스템의 개략도를 보여주고 있다.

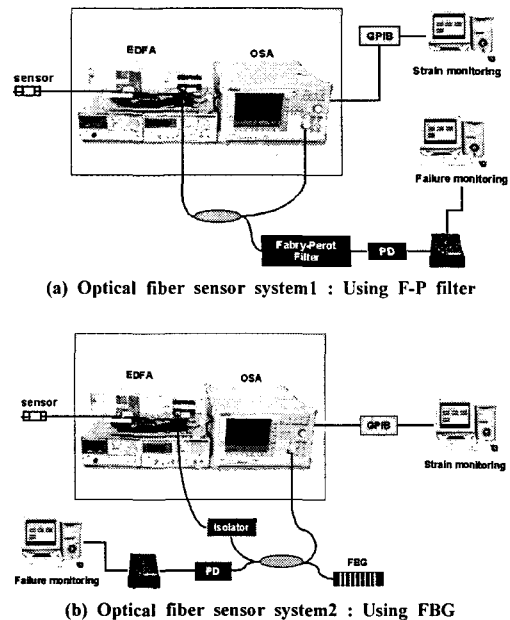


Fig. 9 Optical fiber sensor systems for the simultaneous monitoring of fracture and strain.

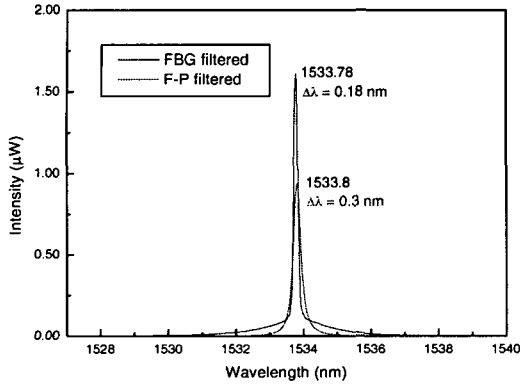


Fig. 10 Coherent source profile of the two systems.

EDFA 광대역 광원으로부터 나온 빛은 광분계기(coupler)를 거쳐 둘로 나누어진 후 한쪽은 파장분석기(OSA)를 통해 변형률 측정용 컴퓨터로 출력신호가 전해지게 된다. 이때 파장분석기로 입력되는 신호는 EFPI센서로부터 반사된 광대역 광원의 다중파장 간섭신호이며 식 (3)과 (4)를 이용하여 신호처리 컴퓨터를 통해 변형률을 계산하게 된다. 광분계기를 거쳐 분리된 반대쪽 빛은 시스템에 따라 각각 패브리-페로 필터와 FBG쪽으로 들어가 특정파장(1533.8 nm) 성분만 분리되어 광감지기(photo detector)를 통해 파손감지 시스템으로 신호가 입력된다. 이때 FBG를 통해 반사된 빛은 브래그조건(Bragg Condition)에 따라 결정된(1533.8 nm) 단일 파장의 반사광으로써 단파장의 Laser Diode를 사용하여 파손을 감지했을 경우와 동일한 효과를 얻을 수 있다 [9,12]. 패브리-페로 필터를 이용하여 시스템을 구성하는 경우 필터 제작에 사용되는 장비가 FBG에 비해 간단하고 제작 시 시간조절을 통하여 원하는 파장의 필터를 쉽게 제작할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 빛이 공기 층으로 된 간극을 통과함으로써 생기는 반사손실이 존재하므로 FBG에 비해 손실이 상대적으로 크다는 단점이 있다.

Fig. 10은 두 시스템에 사용된 파손신호 취득용 단파장 분리부의 성능을 비교하기 위해 파장분석기를 통해 분리된 파장을 서로 비교한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 FBG를 사용한 경우가 패브리-페로 필터를 사용한 경우보다 광원으로서의 성능이 더 좋은 것을 알 수 있다. 광 강도의 경우에는 약 1.8배가 크고 중심파장의 밴드폭은 0.12 nm (FWHM) 정도가 좁다는 결과를 얻었다. 따라서 미세한 파손신호를 취득할 경우 FBG를 이용한 시스템이 좀더 민감하게 신호를 취득할 수 있음을 알 수 있다.

- 변형률 및 파손신호 동시감지 실험

본 실험에서는 앞서 구성된 광섬유 센서 시스템을 이용하여 복합적층판의 인장실험을 통해 시편에 발생하는 변형률 및 파손신호를 모니터링 하였다. 실험에 사용된 시편은

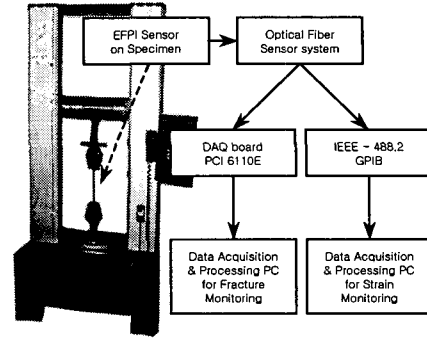


Fig. 11 Experimental setup for the simultaneous monitoring of fracture and strain in composites.

HFG CU-125NS Graphite/Epoxy 프리프레그테이프을 $[0_2/90_8]_s$ 로 적층 한 후 오토클레이브를 통해 성형 하였다. 광섬유 센서는 복합적층 시편의 0° 층과 90° 층의 사이에 삽입하였으며 센서의 게이지 길이는 10.45 mm 이며 간극은 $245 \mu m$ 이다. 사용된 시편의 형태는 Fig. 3과 같으며 전체적인 실험장치의 구성은 Fig. 11과 같다.

5.2 실험 결과 및 고찰

복합적층판에서 파손발생시에는 20 kHz이상의 고주파 응력파신호가 방출된다[5]. Fig. 12는 광섬유 센서의 파손신호와 비교하기 위해 $[0_2/90_8]_s$ 로 적층 된 인장시편에서 방출된 모재균열 신호를 PZT센서를 통해 취득한 후 STFT를 통해 주파수영역 해석을 한 결과이다. 20 kHz이상의 가청 주파수 영역 밖에서 주파수 대역별로 각각 40 kHz와 150 kHz근처에서 높은 강도의 주파수신호를 확인할 수 있었으며 약 0.2 ms정도 지속되었다. 각 주파수 대역별로 파손신호의 지속시간이 다른데 저주파에서 고주파로 갈수록 지속시간이 짧아지며[12] 150 kHz이상의 영역은 신호의 지속시간이 0.15 ms정도이다. 50~150 kHz구간은 약 0.3 ms정도로 150 kHz이상의 구간에 비해 2 배정도 긴 시간동안 파손신호를 방출하였다. 이러한 결과는 WT을 이용하여 신호처리한 Fig. 13의 결과와 비교할 수 있는데 200 kHz이상의 고주파영역에 해당하는 D1성분의 경우 약 0.15 ms정도 파손신호를 방출하였으며 50~150 kHz구간을 포함하는 D2, D3의 영역의 경우 약 0.3 ms정도 신호방출이 지속되었음을 확인할 수 있다.

광섬유 센서시스템을 이용한 모재균열 신호의 신호처리를 위해서는 실시간 신호처리를 고려해 WT보다 신호처리 속도가 우수한 STFT를 사용하였다.

Fig. 14와 Fig. 15는 패브리-페로 필터를 이용한 광섬유 센서 시스템을 이용하여 $[0_2/90_8]_s$ 복합적층시편의 모재균열 신호를 취득하여 신호처리 한 그림이다. Fig. 14는 0.5 %

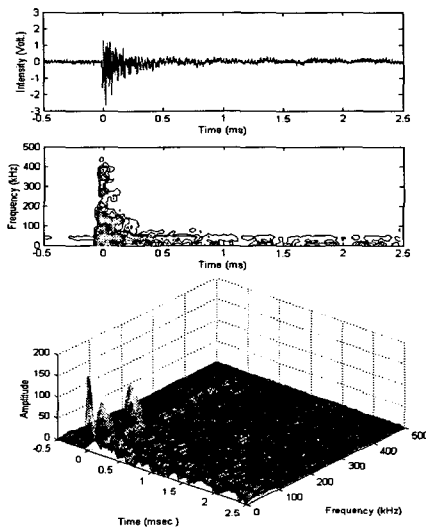


Fig. 12 Matrix cracking signal and its STFT. : using PZT sensor.

변형률에서 발생한 모재균열 신호로써 시간영역에서 약 20 mV정도의 최대진폭을 가지고 있다. 이것은 넓은 간극을 가진 센서의 사용과 EDFA광원으로부터의 빛이 광분계기 및 필터 등을 통과하면서 발생하는 손실 때문인데 Fig. 12의 PZT신호와 비교해 볼 때 약 1/200~1/150정도로 신호의 세기가 작다. 하지만 작은 신호세기에도 불구하고 광섬유 센서는 20 kHz이상의 파손신호를 취득할 수 있었으며 150 kHz이상의 고주파에 해당하는 미세한 파손신호도 감지할 수 있었다.

Fig. 15는 동일한 시스템을 통해 시편의 변형률이 0.9 %인 경우에 취득되어진 모재균열 신호이다. 이 경우 변형률 증가에 따라 센서의 간극이 더 늘어나므로 센서의 출력신호의 진폭은 15 mV정도로 더 작아지게 되었으며 80 kHz이상의 파손 주파수신호는 감지할 수 없었다.

Fig. 16과 Fig. 17은 파손신호 분리에 FBG를 이용한 광섬유 센서시스템을 통해 동일한 형태의 시편에서 모재균열 신호를 취득하여 신호처리 한 그림이다. Fig. 16은 0.5 % 변형률 상태에서 발생한 모재균열 신호로써 시간영역에서 신호의 진폭이 패브리-페로 필터를 이용한 시스템에서의 신호보다 증가함을 확인할 수 있었다. 이것은 FBG를 이용한 시스템에서의 광 손실이 상대적으로 적기 때문인데 결과적으로 150 kHz이상의 고주파 파손신호를 좀 더 명확하게 취득할 수 있었다.

Fig. 17은 0.9 % 변형률에서 취득된 모재균열 신호인데 넓은 센서 간극에도 불구하고 앞의 패브리-페로 필터를 이용한 시스템에서 감지할 수 없었던 80 kHz이상의 파손주파수 신호를 취득할 수 있을 만큼 충분한 광 강도를 유지할 수 있었다.

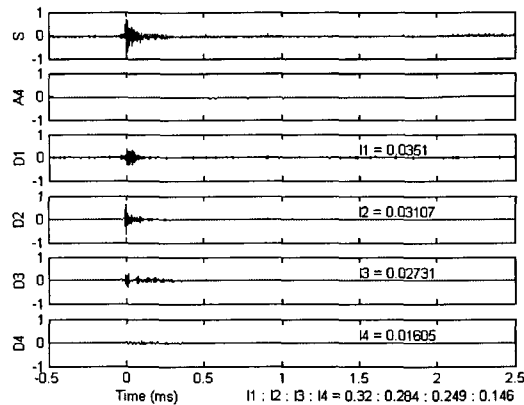


Fig. 13 WT of matrix cracking signal.

결과적으로 광 손실이 적은 FBG를 이용한 시스템이 패브리-페로 필터를 이용한 파손감지 시스템에 비해 더 좋은 민감도를 보여주었으나 두 센서시스템은 모두 20 kHz이상의 모재균열에 의한 파손신호를 취득할 수 있을 만큼 충분한 성능을 보여주었다.

Fig. 9에서 제안된 두 종류의 광섬유 센서시스템은 파손신호를 취득하기 위한 부분은 서로 다르지만 변형률을 측정하는 부분은 동일한 장치 및 원리를 이용하였다. 따라서 두 번의 변형 및 파손신호 동시감지실험은 모두 동일한 결과를 보였으며 그 중 하나의 결과를 나타내었다. 센서를 통해 반사된 광대역의 다중파장 간섭신호는 파장분석기를 통해 파장좌표로 변환되며 이 값은 GPIB 인터페이스를 통해 신호처리컴퓨터로 실시간으로 입력되어 변형률 값으로 계산된다.

Fig. 18은 광섬유 센서시스템을 이용하여 파손신호 취득과 동시에 이루어진 변형률 모니터링 결과이다. 점선으로 표시되는 결과는 광섬유 센서로 취득된 변형률 값과 비교하기 위해 시편의 뒷면에 부착된 변형률게이지를 이용하여 취득된 변형률 값이다. 그림에서 볼 수 있듯이 광섬유 센서시스템을 통해 측정된 변형률 값은 변형률게이지로부터 취득된 값과 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

AEFPI의 다중파장간섭의 원리를 이용한 정확한 변형률 측정을 위해서는 센서의 간극길이가 커져야 하지만, 간극이 커질 경우에는 반사되는 빛의 광 강도가 낮아지기 때문에 파손신호의 크기가 작아지는 단점이 있다. 하지만 본 연구에 사용된 광섬유 센서시스템은 센서의 간극이 넓은 경우에서도 파손시점을 구분할만한 충분한 민감도를 보여주었으며, 결과적으로 하나의 광원과 센서를 이용하여 변형률 및 파손시점을 동시에 감지하는 것이 가능함을 확인하였다.

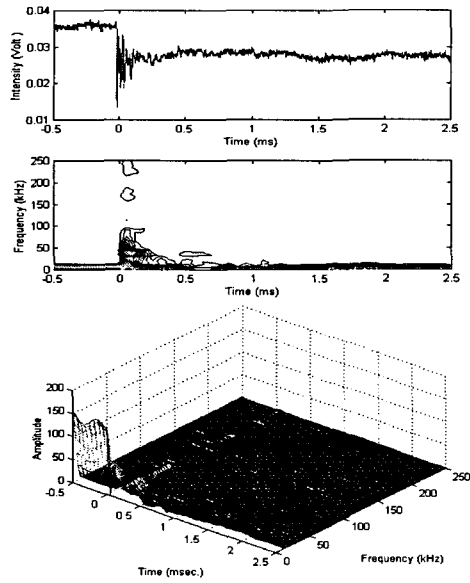


Fig. 14 Matrix cracking signal and its STFT. : EFPI system using F-P filter at 0.5% strain.

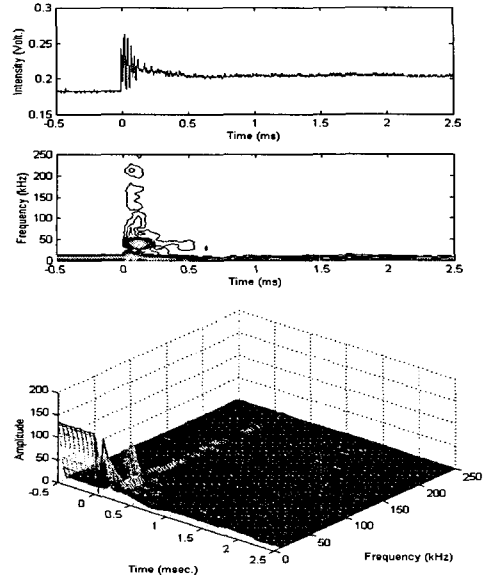


Fig. 16 Matrix cracking signal and its STFT. : EFPI system using FBG at 0.5% strain.

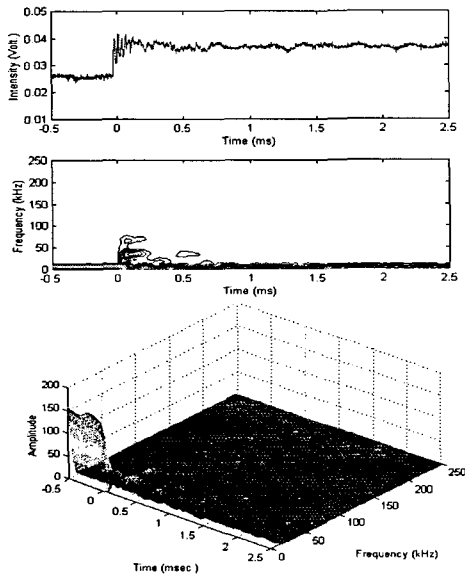


Fig. 15 Matrix cracking signal and its STFT. : EFPI system using F-P filter at 0.9% strain.

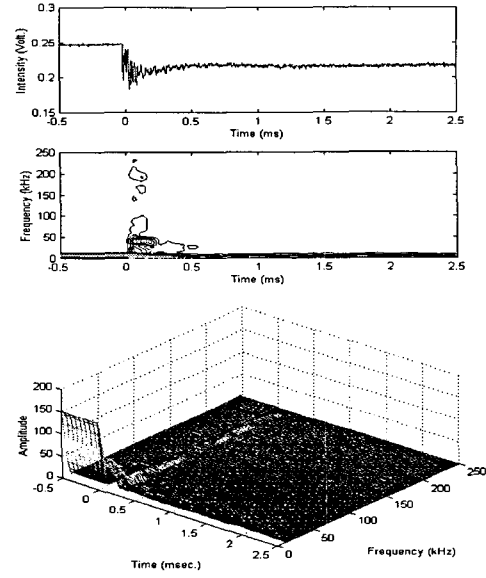


Fig. 17 Matrix cracking signal and its STFT. : EFPI system using FBG at 0.9% strain.

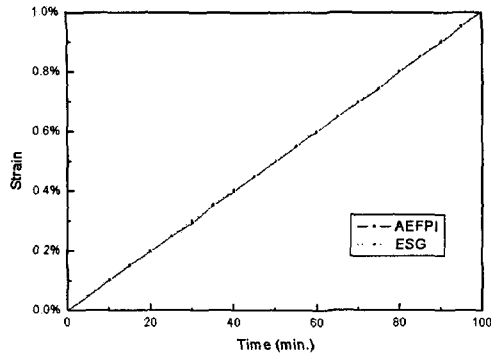


Fig. 18 Test result of strain measurement using optical fiber sensor system.

결론

본 연구는 스마트 복합재 구조물의 안전 진단 시스템에 관한 것으로, 단일광원 및 광섬유센서를 이용하여 변형률 및 파손발생 유무를 동시에 모니터링 할 수 있는 시스템을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 모재균열신호의 특성을 관찰하는데 WT와 STFT의 시간-주파수 해석방법을 사용하였으며 센서 신호를 계속적으로 시간-주파수 분석하여 파손여부를 판단할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 하나의 광대역 광원으로부터의 빛에 단일파장간섭과 다중파장간섭을 동시에 이용하여 하나의 센서에서 변형률 및 파손신호를 동시에 감지할 수 있는 시스템을 개발하였으며 본 시스템이 변형률 모니터링과 동시에 파손신호를 정확히 취득할 수 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 특정연구개발사업 중 중점국가 연구개발사업(기계설비요소기술개발)의 지원으로 수행되었으며, 지원에 대해 진심으로 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) 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 Composite Materials*, Vol. 34, No. 19, 2000, pp. 1602 -1623
- 2) I. B. Kwon, C. G. Kim, and C. S. Hong, "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.

- 3) K. A. Murphy, C. A. Schmid, T. A. Tran, Greg Carman, A. Wang and R. O. Claus, "Delamination detection in composite using optical fiber techniques," *SPIE : Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, Vol. 2191, 1994, pp. 227-231.
- 4) C. S. Hong, H. J. Bang, H. K. Kang, and C. G. Kim, Real-time damage detection for smart composite materials using optical fiber sensors, *Proc. of the 13th International Conference on Composite Materials (ICCM-13)*, Beijing, China, June 25-29, 2001, CD-ROM ID-1509
- 5) D. U. Sung, C. G. Kim and C. S. Hong, "Monitoring of impact damages in composite laminates using wavelet transform," *Composites: Part B*, Vol 33, 2002, pp. 35-43.
- 6) D. A. Jackson, and J. D. C. Jones, *Interferometers Optical Fiber Sensors (Optical Fiber Sensors)*, Vol. 2, Ed. B. Culshaw and J. Dakin, London, Artech House, 1988.
- 7) V. Bhatia, M. B. Sen, K. A. Murphy, and R. O. Claus, "Wavelength-tracked White Light Interferometry for Highly Sensitive Strain and Temperature Measurements," *Electronics Letters*, Vol. 32, No. 3, 1996, pp. 247-249.
- 8) H. K. Kang, D. H. Kang, H. J. Bang, C. S. Hong, and C. G. Kim, "Cure Monitoring of Composite Laminates Using Fiber Optic Sensors," *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, No. 2, 2002, pp. 279-287.
- 9) 방형준, 강현규, 홍창선, 김천근, "광섬유 센서를 이용한 복합재의 파손 및 변형률 동시 측정," *한국복합재료학회지*, 14권 5호, 2001, pp.12~19.
- 10) J. S. Bendat and A. G. Piersol, *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, 2nd ed., Wiley Interscience, 1993.
- 11) M. Misiti, G. Oppenheim, and J. M. Poggi, *Wavelet Toolbox*, The Math Works, Inc., 1997
- 12) 김대현, 박중완, 류치영, 강현규, 홍창선, 김천근, "복합재료 파손모드에 따른 광섬유 센서의 신호특성에 관한 연구", *한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집*, 항공우주연구소, 1999, pp. 386-389.