

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 복합재 구조물의 변형률 및 파손신호 동시 측정

고종인* · 방형준* · 김천곤** · 홍창선**

Simultaneous Measurement of Strain and Damage Signal of Composite Structures Using a Fiber Bragg Grating Sensor

Jong-In Koh, Hyung-Joon Bang, Chun-Gon Kim and Chang-Sun Hong

Key Words: dynamic strain, damage signal, fiber Bragg grating sensor, composite structure

Abstract

For the simultaneous measurement of strain and damage signal, a fiber Bragg grating sensor system with a dual demodulator was proposed. One demodulator using a tunable Fabry-Perot filter can measure low-frequency signal such as strain and the other demodulator using a passive Mach-Zehnder interferometer can detect high-frequency signal such as damage signal or impact signal. Using a proposed fiber Bragg grating sensor system, both the strain and damage signal of a cross-ply laminated composite beam under tensile loading were simultaneously measured. Analysis of the strain and damage signals detected by single fiber Bragg grating sensor showed that sudden strain shifts were induced due to transverse crack propagation in the 90 degree layer of composite beam and vibration with a maximum frequency of several hundreds of kilohertz was generated.

초록

변형률과 파손신호를 동시에 계측하기 위하여 이중복조기를 갖는 광섬유 브래그 격자센서시스템을 제안하였다. 이중복조기는 가변 패브리-페로 필터를 사용하여 변형률과 같이 변화가 큰 저주파신호를 측정하는 복조기와 수동 마흐-젠더 간섭계를 사용하여 파손신호나 충격신호와 같이 미세한 크기의 고주파 신호를 측정하는 복조기로 구성된다. 제안된 광섬유 브래그 격자센서시스템을 이용하여 인장하중을 받는 직교적층 복합재 구조물의 변형률과 파손신호를 동시에 계측할 수 있었다. 하나의 광섬유브래그격자센서로 측정된 변형률과 파손신호를 분석한 결과, 복합재 시편의 90도 층에서 모재균열이 발생할 때 급격한 변형률 변이가 유발되고, 최대 수백킬로헤르쯔에 이르는 주파수 성분을 가진 진동신호가 발생함을 알 수 있었다.

기호설명

SHM : structural health monitoring
FBG : fiber Bragg grating
TFPF : tunable Fabry-Perot filter

MZI : Mach-Zehnder interferometer
FSR : free spectral range

1. 서론

* 한국과학기술원 항공우주공학전공 박사과정

** 한국과학기술원 항공우주공학전공 교수

섬유강화복합재료는 금속재료에 비하여 비강도, 비강성이 우수하고 설계요구조건에 맞게 물성치를 조절할 수 있는 장점을 보유하고 있어서

항공우주분야에서 자동차나 열차 같은 육상수송 분야나 대형건물, 교량 같은 토목 건축분야에 이르기까지 적용범위를 계속 확대해나가고 있다. 그러나 제조공정에 따라 재료의 물성치의 편차가 있을 수 있으며, 압축강도를 저하시킬 수 있는 층간분리 같은 파손이 발생할 경우 쉽게 발견할 수 없어 복합재료의 신뢰도를 떨어뜨리고 있다. 따라서 복합재료의 구조적인 안전성을 보장하기 위하여 실시간 구조건강성감시(SHM: Structural Health Monitoring)가 요구되고 있다.

구조건강성에 관계되는 물리량은 변형률, 온도와 파손발생을 알려주는 음향방출등이 있으며, 전기저항식 스트레인게이지(ESG: electric strain gauge), 온도센서(thermocouple), 음향방출(AE: Acoustic Emission)센서나 압전센서등과 같은 전기적인 센서를 이용하여 이러한 물리량을 측정하고 있다. 이러한 전기적인 센서는 측정신뢰도가 매우 높고 가격 또한 저렴하여 광범위하게 쓰이고 있으나 전자파 간섭의 영향을 받을 수 있으며, 센서수가 증가할 경우 부피가 커지는 단점이 있다.

광전자 기술의 발달로 탄생한 광섬유 센서는 작고 가벼우며, 복합재 구조물에 쉽게 삽입이 가능하고 전자파간섭의 영향을 전혀 받지 않는다는 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 변형률, 온도, 가속도, 음향방출신호들을 측정할 수 있어서 기존의 전기적인 센서를 대체할 우수한 센서로 주목받고 있다.

광섬유 센서는 여러가지 형태로 개발되어 왔는데 현재는 간섭계 형식인 EFPI(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer) 센서와 광섬유 브래그 격자(FBG: Fiber Bragg Grating) 센서등이 주로 활용되고 있다. EFPI 센서는 민감도가 매우 높아 주로 음향방출신호 계측에 사용되고 있으며, 실제로 복합재 구조물의 다양한 파손신호를 계측한 연구결과들이 보고되고 있다 [1,2].

한편 FBG센서는 EFPI센서에 비하여 민감도 및 주파수 대역이 상대적으로 낮지만 다중센싱능력이 뛰어나 주로 변형률, 온도나 압력같은 저주파 신호 측정에 사용되고 있다 [3,4].

최근에는 FBG센서의 민감도와 주파수 대역을 향상시켜 음향방출신호와 같은 고주파신호 측정에 응용하려는 연구가 시도되고 있다 [5,6,7].

그러나 아직까지는 민감도와 주파수 대역을 높

이기 위한 복조기(demodulator)의 개발 등에 관한 연구에 집중되어 있으며, 복합재 구조물의 파손 신호 계측과 같은 실제적인 연구가 부족한 실정이다. 또한 FBG센서의 민감도와 주파수 대역을 높일 경우 고주파 신호는 측정할 수 있지만 측정 범위가 줄어들게 되는 단점이 있다. 따라서, 변형률과 같이 변화가 큰 저주파 신호를 측정할 수 있으면서도 파손신호나 충격신호와 같이 미세한 크기의 고주파 신호를 동시에 계측할 수 있는 FBG센서시스템 개발이 요구되고 있다.

본 논문에서는 다중센싱능력이 뛰어난 FBG센서시스템으로 복합재 구조물의 변형률 및 파손신호를 동시에 측정하려고 한다. 이를 위해 이중복조기를 갖는 FBG센서시스템을 제안하였다. FBG센서를 복합재료 빔 시편에 부착하여 인장하중시 변형률과 기지균열이나 층간분리에 의하여 발생하는 파손신호를 동시에 계측하였고 계측된 파손 신호의 특성을 분석하였다.

2. 광섬유 브래그 격자 센서 시스템

2.1 광섬유 브래그 격자 센서 측정 원리

FBG는 광섬유의 코어부분에 새겨진 굴절률이 주기적으로 변하는 격자이다. 광대역광원이 이 격자에 입사될 경우 (1)식과 같이 브래그 조건(Bragg condition)에 의해 결정된 브래그 파장(Bragg wavelength, λ_B)의 빛은 격자에서 반사되며 나머지 파장의 빛은 격자를 통과하게 된다.

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

여기서, n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률(effective refractive index)이고 Λ 는 광섬유 격자의 간격(grating period)이다. 광섬유 격자에 온도변화나 변형률 등의 외란이 가해지면 브래그 파장은 (2)식과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi) \Delta T + (1 - p_e) \varepsilon] \quad (2)$$

$$p_e = \left(\frac{n_e^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (3)$$

여기서 ΔT 는 온도 변화, ε 는 기계적 변형률, α 는 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion

coefficient)이고 ζ 는 온도 변화에 따른 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다. p_e 는 광탄성 상수(photoelastic constant)로서 일반 단일모드 광섬유인 경우 0.22의 값을 가진다고 알려져 있으며, p_{11} 과 p_{12} 는 스트레인 광학 텐서의 성분이고, ν 는 프와송비(Poisson's ratio)이다. 온도 변화가 없는 경우 (4)식과 같이 변화된 브래그 파장으로부터 광섬유 격자에 가해진 변형률을 계산할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{1}{1 - p_e} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

2.2 이중해상도 복조

브래그 파장 변화를 측정하는 복조는 FBG 센서 개발에서 가장 중요한 기술로서 여러 가지 복조 기술이 제안되었으며, 대표적인 복조방법은 그림 1에 나타나 있다.

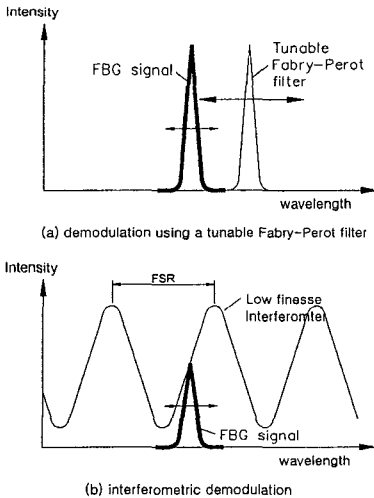


Fig. 1 Typical demodulations of FBG sensor.

현재 가변 패브리-페로 필터를 사용한 복조기 [8]가 주로 많이 쓰이고 있으며, 측정범위가 넓고 다중센싱을 쉽게 구현할 수 있다. 그러나 파장 주사 속도의 한계로 인하여 1kHz 이상의 동적 변형률은 측정하기 어렵다.

주로 간섭계를 사용하는 광세기복조(intensity

demodulation)는 브래그 파장의 이동을 광세기의 변화량으로 변환시킬 수 있기 때문에 민감도 및 주파수대역이 매우 높다는 장점이 있으나 측정범위가 좁아지는 단점이 있다.

변형률 및 파손신호의 동시 측정을 위해서는 FBG센서의 복조기 또한 넓은 측정범위와 높은 주파수 대역 및 고해상도가 요구되고 있으나 이러한 요구조건을 만족시키는 FBG센서의 복조기는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 변형률 및 파손신호의 동시측정을 위해 이중복조기를 제안하였다. 그림 2와 같이 이중복조기는 가변 패브리-페로 필터를 사용한 복조기와 간섭계를 사용한 복조기로 구성되며, 두가지 복조방식의 장점을 모두 활용할 수 있다. 즉 가변 패브리-페로 필터 복조기는 변형률과 같은 저주파 신호를 측정하고, 간섭계 복조기는 파손신호나 충격신호와 같은 고주파 신호를 측정한다.

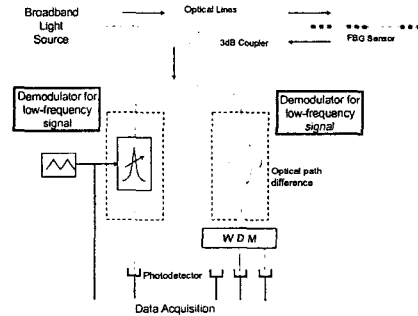


Fig. 2 Schematic diagram of FBG sensor system with a dual demodulator.

2.2.1 가변 패브리-페로 필터 복조

가변 패브리-페로 필터는 그림 3과 같이 구성되어 있으며 간극은 압전작동기로 변화시킬 수 있다.

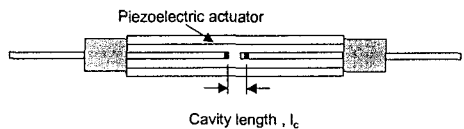


Fig. 3 Tunable Fabry-Perot filter.

가변 패브리-페로 필터를 통과한 빛의 스펙트럼은 그림 4와 같으며 첨두파장(peak wavelength)

은 식(5)와 같이 표현된다.

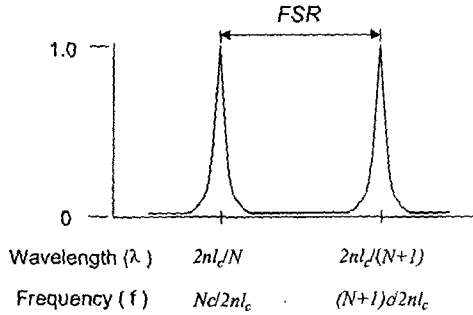


Fig. 4 Transmitted light of tunable Fabry-Perot filter.

$$\lambda_{peak} = \frac{2nl_c}{N} \quad (5)$$

여기서 n 은 간극의 굴절률, l_c 는 간극길이, N 은 정수이다.

침투파장 사이의 간격은 FSR(free spectral range)로 정의하며 주파수단위로 표시하면 식(6)과 같다.

$$FSR = \Delta f = \frac{c}{2nl_c} \quad (6)$$

가변 패브리-페로 필터 복조기의 신호처리 과정은 다음과 같다.

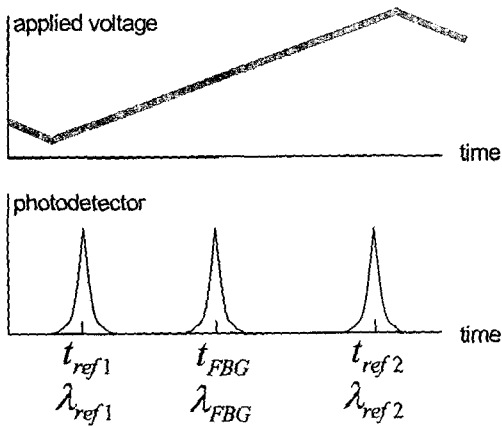


Fig. 5 Signal processing of demodulator with a tunable Fabry-Perot filter.

그림 5와 같이 가변 패브리-페로 필터에 선형으로 변하는 삼각파 형태의 전압을 가하면 압전

작동기에 의해 간극이 변하면서 침투파장이 이동하게 된다. 이 복조기는 가변 패브리-페로 필터의 침투파장이 FBG의 브래그 파장과 일치할 때 광검출기의 출력전압이 최대가 되는 현상을 이용하여 FBG의 브래그 파장을 재측한다.

본 논문에서는 FBG센서의 반사파장을 측정하기 위하여 외부 환경 변화로부터 격리되어 일정한 브래그파장 λ_{ref1} , λ_{ref2} 을 유지하는 두 개의 FBG를 이용하였다. 가변 패브리-페로 필터의 침투파장이 이동하면서 광검출기의 출력이 최대가 되는 시점을 t_{ref1} , t_{FBG} , t_{ref2} 라고 하고, 침투파장이 전압에 대해 선형으로 변한다고 가정하면 FBG센서의 반사파장, λ_{FBG} 은 식(7)에 의하여 계산할 수 있다.

$$\lambda_{FBG} = \lambda_{ref1} + \frac{(\lambda_{ref2} - \lambda_{ref1})(t_{FBG} - t_{ref1})}{(t_{ref2} - t_{ref1})} \quad (7)$$

이 복조기의 취득속도는 가변 패브리-페로 필터의 파장주사속도의 영향을 받는다.

2.2.2 수동 마흐-젠더 간섭계 복조

대표적인 광세기 복조방법으로서 Kersey는 마흐-젠더 간섭계 방식의 복조를 제안하였는데, 선형성과 정확도를 높이기 위하여 위상변조기를 채용하였다 [9]. 그러나 위상변조기의 주파수 대역한계로 인하여 수십킬로헤르쯔 이상의 고주파 신호를 측정하기 어려웠다.

본 논문에서는 수십킬로헤르쯔 이상의 주파수 성분을 갖는 파손신호를 측정하기 위하여 위상변조기를 제거한 수동 마흐-젠더 간섭계 방식의 복조기를 사용하였다.

광섬유 마흐-젠더 간섭계는 2개의 3dB 광섬유 커플러를 연결하면 간단하게 제작할 수 있으며, 입사광은 첫번째 커플러에 의해 분기되고 나서 서로 다른 길이의 경로를 진행한 후 두 번째 커플러에 의해 합쳐지는데 이때 광경로차(optical path difference)에 의하여 간섭이 발생하게 된다.

이상적인 마흐-젠더 간섭계의 투과율(transmittance)은 식 (8)와 같이 표현할 수 있다.

$$T = \frac{I_o}{I_i} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \frac{2\pi nd}{\lambda} \right\} \quad (8)$$

여기서 I_i 는 입력광세기, I_o 는 출력광세기, d 는 경로차(path difference), n 은 광섬유의 굴절률이다.

간섭계의 위상, ϕ 는 식(9)과 같이 정의된다.

$$\phi = \frac{2\pi nd}{\lambda} \quad (9)$$

그림 6은 위상변화에 따른 이상적인 간섭계의 투과율을 나타내고 있다.

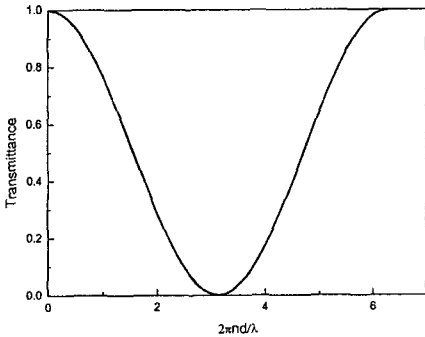


Fig. 6 Transmittance of Mach-Zehnder interferometer.

간섭계 투과율의 주기를 파장단위로 표시하면 식(10) 같다.

$$FSR = \frac{\lambda^2}{nd} \quad (10)$$

광경로차와 FSR은 반비례관계를 가진다.

간섭계의 투과율은 광경로차와 파장의 함수이므로 광경로차가 일정하다면 FBG센서의 브래그 파장변화는 간섭계를 통하여 투과율의 변화로 변환된다. 이것이 간섭계 복조의 원리이며 측정속도는 광검출기의 주파수대역까지 가능하다.

브래그 파장에 대한 간섭계 투과율의 기울기는 식(11)과 같으며, 변형을 민감도와 같은 의미를 갖는다.

$$\left| \frac{\Delta T}{\Delta \lambda_B} \right| = \left| \sin\left(\frac{2\pi nd}{\lambda_B}\right) \right| \frac{\pi}{FSR} \quad (11)$$

간섭계 복조의 변형을 민감도는 간섭계의 위상과 FSR에 따라 다른 값을 가지게 된다. 간섭계의 위상이 동일하다면 FSR이 작을수록 변형을 민감도는 증가하지만 측정범위는 감소한다. 한편 FSR이 클수록 민감도는 감소하지만 측정범위는 증가한다.

따라서 측정하려는 신호의 특성에 따라 FSR을 결정하여야 하며, 파손신호와 같이 미세한 변형을 변화를 갖는 음향방출신호를 측정할 경우 FSR을 감소시켜 민감도를 높이는 것이 바람직하

다.

3. 동적변형을 및 파손신호 동시 측정

이중복조기를 사용한 FBG센서시스템을 사용하여 인장하중을 받는 복합재 구조물의 변형률과 파손신호를 동시에 측정하였다.

3.1 시험장치

시험장치는 그림 7과 같이 만능시험기, 복합재료 시편, 센서시스템과 센서출력을 저장하기 위한 자료취득장비 등으로 구성되어 있다.

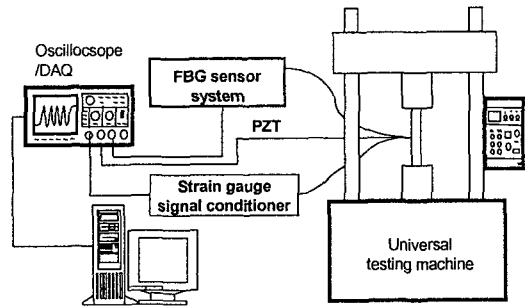


Fig. 7 Test setup for simultaneous measurement of strain and damage signal.

복합재료 시편은 (주)한국화이바 사의 CU-125NS 그래파이트/에폭시(Graphite/Epoxy) 프리프레그를 [0₂/90₈]_s의 적층순서로 적층하고 표준성형공정으로 성형하여 제작되었다.

시편의 형상은 그림 8과 같으며, 글라스/에폭시(Glass/Epoxy) 탭을 시편 양 끝에 각각 부착하였다.

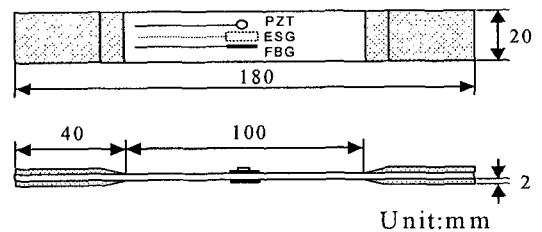


Fig. 8 Specimen configuration.

변형률을 측정하기 위한 전기저항식 스트레인 게이지, 파손신호 취득을 위한 압전센서(PZT)와

FBG센서를 그림 8과 같이 시편 중앙에 부착하였다. 스트레인 게이지용 신호증폭기(signal conditioner)는 Vishay사의 P-3500모델이며, 3dB 차단주파수는 4kHz이다. 압전센서는 Fuji-Ceramics사에서 제작한 PZT(Pb(Zi,Ti)O₂)제질의 C-6모델로서 원판(disk)형태이며, 5mm의 직경과 2mm의 두께를 가지고 있다. 만능시험기는 Instron사의 4482모델이며 분당 1mm의 속도로 시편에 인장력을 가하였다.

FBG센서의 초기 브래그파장은 1540nm이고 게이지길이는 10mm이다.

FBG 센서시스템은 광대역광원, FBG센서, 본 논문에서 제안한 이중복조기와 광검출기로 구성된다. 광대역광원은 JDS사 제품으로 40nm의 파장폭에서 전체 50mW의 광량(optical power)을 가지고 있으며, 광검출기는 Newport사의 2011모델을 사용하였고 주파수대역은 200kHz이다.

이중복조기는 가변 패브리-페로 필터, 전압발생기와 마흐-젠더 간섭계로 구성된다. 가변 패브리-페로 필터는 Micron Optics사 제품으로 FSR은 7150GHz이고, 12V의 진폭과 200Hz 주파수를 갖는 삼각파의 전압을 가하였다. 기준 FBG의 브래그파장은 각각 1536nm, 1552nm이다. 직접 제작한 마흐-젠더 간섭계의 FSR은 대략 0.8nm이다.

시험절차 및 자료처리과정은 다음과 같다.

센서 신호들은 500kHz의 취득속도로 DAQ(Data Acquisition) 장비를 통하여 개인용 컴퓨터에 저장된 후 후처리과정을 통하여 변형률 및 파손신호를 계측하였다.

FBG센서의 변형률은 가변 패브리-페로 필터 복조기의 출력신호를 분석하여 측정되며 변형률 취득속도는 가변 패브리-페로 필터에 가해지는 전압의 가진주파수와 동일한 200Hz이다.

수동 마흐-젠더 복조기의 출력신호를 가지고 FBG센서의 파손신호를 분석하였다. 파손시점은 압전센서의 침두전압이 발생한 때를 기준으로 하였고 압전센서와 FBG센서의 출력신호를 비교하였다. 압전센서신호와 FBG센서의 파손신호는 10kHz이상의 주파수성분만 통과시키는 디지털고역여파기(digital high-pass filter)를 거친 후 시간-주파수 분석기법인 STFT(short-time Fourier transform)를 사용하여 분석하였다.

3.2 시험결과

그림 9는 인장하중 시 스트레인게이지와 FBG센서로 측정된 변형률 이력선도이며, 취득속도는 200Hz이다.

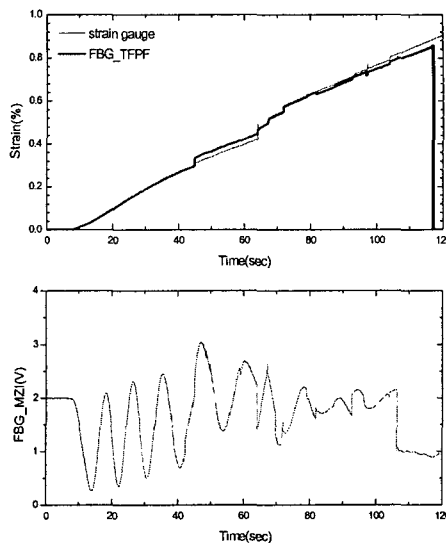


Fig. 9 Continuous signals(sampling rate : 200Hz)

FBG센서로 측정된 변형률은 스트레인게이지로 측정된 값과 거의 일치하고 있으며, 0.8%의 변형률에서 FBG센서가 파손되었다.

마흐-젠더 간섭계 복조기를 통한 FBG센서의 초기 출력신호는 변형률이 증가함에 따라 사인함수 형태로 변하고 있으나, 0.4%이상의 변형률에서는 사인함수의 형태가 약하게 나타나고 있다. 이는 변형률이 증가하면서 FBG센서의 반사파장 폭이 마흐-젠더 간섭계의 FSR(~0.8nm)보다 크게 되어 나타난 결과이다. FBG센서는 격자의 변형률이 일정하지 않고 구배를 갖거나 횡방향 응력을 받을 경우 반사파장 폭이 증가하거나 심지어는 두 개 이상의 반사파장으로 분리될 수 있으므로, FBG센서의 출력신호를 분석할 때 세심한 주의가 필요로 한다.

그림 10은 35초와 40초사이에 측정된 신호들이며, 모두 5번의 파손이 발생하였다. 각각의 파손시점에서 변형률의 급격한 이동이 발견되었고, 고역여파기를 통과한 FBG센서의 파손신호에서도 압전센서신호와 동일한 형태의 침두전압이 발견되었다.

그림 11은 파손시점에서 계측한 압전센서신호와 FBG센서의 파손신호를 확대한 결과이다.

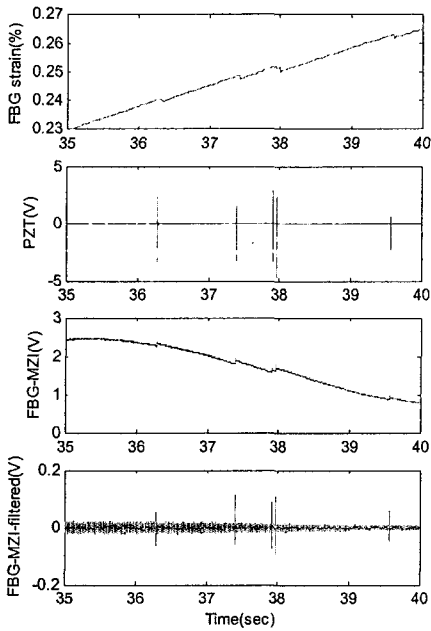
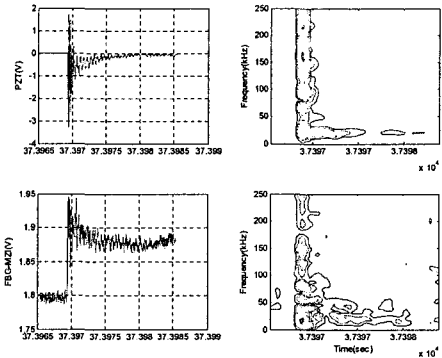


Fig. 10 Continuous signals between 35s and 40s.(sampling rate : 500kHz)



(b) 2nd damage

Fig. 11 Magnified damage signals.

압전센서로 계측한 파손신호를 시간-주파수 신호분석인 STFT(short-time Fourier Transform)을 수행한 결과 파손 초기에 최대 250kHz에 이르는 광범위한 주파수성분이 검출되었다.

FBG센서로 계측한 파손신호의 경우 초기에 최대 최대 250kHz에 이르는 주파수 성분이 검출되었지만 100kHz이상의 주파수강도는 약하게 나타났다.

FBG센서로 계측한 파손신호는 파손시점에서 순간적으로 평균전압의 이동이 발생하면서 진동하는 특징을 가지고 있다. 한편, 압전센서신호의 경우 파손시점에서 평균전압의 이동을 거의 발견할 수 없었다. 압전센서는 고주파 성분의 신호에 대한 민감도는 높은 반면 준 정적인 신호에는 거의 반응하지 않기 때문이다.

FBG센서로 계측한 파손신호의 순간적인 평균전압 이동은 복합재 시편의 90도 층에서 발생한 모재균열이 진전하면서 변형률이 순간적으로 이동한 것이 원인이라고 판단된다. 직교적층판에 가해지는 인장하중이 증가할 수록 모재균열의 밀도가 증가하여 결국 강성을 저하시킨다고 알려져 있다 [10]. 따라서 파손신호를 모니터링하면 모재균열과 같은 파손의 누적된 발생빈도를 알 수 있으며 결국 구조물의 잔여강성을 예측할 수 있게 된다.

4. 결론

변형률과 파손신호를 동시에 측정할 수 있는 이중복조기를 갖는 FBG센서시스템을 제안하였

다. 이중복조기는 가변 패브리-페로 필터를 사용하여 변형률과 같이 변화가 큰 저주파신호를 측정하는 복조기와 수동 마호-젠더 간섭계를 사용하여 파손신호나 충격신호와 같이 미세한 크기의 고주파 신호를 측정하는 복조기로 구성된다.

제안된 FBG센서시스템을 이용하여 인장하중을 받는 직교적층 복합재 빔의 변형률과 파손신호를 동시에 계측할 수 있었다. 하나의 FBG센서로 측정된 변형률과 파손신호를 분석한 결과, 복합재 시편의 90도 층에서 모재균열이 발생할 때 급격한 변형률 변이가 유발되고, 최대 수백킬로헤르쯔에 이르는 주파수 성분을 가진 진동신호가 발생함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 장기기초연구과제 (과제번호 : ADD-03-05-02)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] I.B. Kwon, C.G. Kim and C.S. Hong, "Simultaneous sensing of the strain and failure instants of composite beams using fiber optic sensor," *Composites Science and Technology*, 57, 1997, pp.1639-1651.
- [2] D.H. Kim, J.W. Park, H.K. Kang, C.S. Hong and C.G. Kim, "Measuring dynamic strain of structures using a gold-deposited extrinsic Fabry-Perot interferometer," *smart.mater.Struct.* 11, 2002, pp. 1-5.
- [3] R. Foedinger, D. Rea, J. Sirkis, J. Troll, R. Grande and T.L. Vandiver, "Structural Health Monitoring and Impact Damage Detection for Filament Wound Composite Pressure Vessels," *Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring*, 1999, pp. 159-169.
- [4] S.T. Vohra, M.A.Davis, A.Dandridge, C.C.Chang, B.Althouse, H.Patrick, M.Putnal, T.Tsai, G.Wang, P.O.Baalerud, G.B.Haavsgard and K.Pran, "Sixteen channel WDM fiber Bragg grating dynamic strain sensing system for composite panel slamming tests", 12th OFS, 1997, pp.662-665.
- [5] J. Seim, W.L. Schulz, E. Udd, M. Morrell, "Higher Speed Demodulation of Fiber Grating Sensors," *SPIE Proceedings*, Vol. 3670, 1999, p. 8.
- [6] Perez, H.L. Cui, E. Udd, "Acoustic Emission Detection using Fiber Bragg Gratings", *Proceedings of SPIE*, Vol. 4328, 2001, p. 209.
- [7] D.C.Betz, G.Thursby, B.Culshaw and W.J.Staszewski, "Acousto-ultrasonic sensing using fiber Bragg grating," *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, 2003, pp122-128
- [8] D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, "Multiplexed Fiber Bragg Grating Strain-Sensor System with a Fiber Fabry-Perot Wavelength Filter," *Optics Letters*, Vol. 18, No. 16, 1993, pp. 1370-1372.
- [9] A.D. Kersey, T. A. Berkoff and W.W. Morey, "High-Resolution Fiber-Grating Based Strain Sensor with Interferometric Wavelength-Shift Detection," *Electronics Letters*, Vol. 28, 1992, pp. 236-238.
- [10] S.G. Lim and C.S. Hong, "Prediction of Transverse Cracking and Stiffness Reduction in Cross-ply Laminated Composite," *Journal of Composite Materials*, Vol. 23, 1989, pp. 695-713.