

論文

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 복합재 구조물의 파손 검출

고종인*, 김천곤***, 홍창선**

Failure detection of composite structures using a fiber Bragg grating sensor

Jong-In Koh*, Chun-Gon Kim*** and Chang-Sun Hong**

ABSTRACT

Failure detection in a cross-ply laminated composite beam under tensile loading were performed using a fiber Bragg grating (FBG) sensor. A passive Mach-Zehnder interferometric demodulator was proposed to enhance sensitivity and bandwidth. The proposed FBG sensor system without active device such as a phase modulator is very simple in configuration, easy to implement and enables the measurement of high-frequency vibration with low strain amplitude such as impact or failure signal. Failure signals detected by a FBG sensor had offset value corresponding to the strain shift with vibration at a maximum frequency of several hundreds of kilohertz at the instant of transverse crack propagation in the 90 degree layer of composite beam.

초 록

광섬유 브래그 격자센서를 이용하여 인장하중을 받는 직교적층 복합재료 빔에서 발생하는 파손신호를 검출하였다. 민감도와 주파수 대역성능을 향상시키기 위하여 수동 마흐-젠더 간섭계 방식의 복조기를 제안하였다. 제안한 FBG 센서 시스템은 위상변조기와 같은 능동소자가 없기 때문에 구성이 간단하고 쉽게 구현할 수 있으며 충격이나 파손 신호와 같이 작은 진폭의 고주파 진동 측정이 가능하다. FBG 센서로 측정된 복합재료의 파손신호는 복합재료 시편의 90도 층에서 모재 균열이 진전하면서 발생하는 급격한 변형률 변이에 해당하는 초기 오프셋 값과 최대 수백 킬로헤르쯔에 이르는 주파수로 진동하고 있었다.

Key Words : 광섬유브래그격자(fiber Bragg grating), 마흐-젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer), 파손신호(failure signal)

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 금속재료에 비하여 비강도, 비강성이 우수하고 설계요구조건에 맞게 물성치를 조절할 수 있는 장점을 보유하고 있어서 항공우주분야에서 자동차나 열차 같은 육상 수송 분야나 대형건물, 교량 같은 토목 건축분야에 이르기까지 적용범위를 계속 확대해나가고 있다. 그러나 압축강도를 저하시킬 수 있는 층간분리 같은 파손이 발생할 경우 쉽게 발견할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 복합재료의 구조적

인 안전성을 보장하기 위하여 실시간 구조건전성 감시체계가 요구되고 있다. 구조건전성감시분야에서 파손감지는 매우 중요하며 주로 압전형 음향방출센서를 이용한 파손감지 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1-3].

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 주

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

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

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

목받고 있다. 광섬유 센서는 여러가지 형태로 개발되어 왔는데 현재는 간접계 형식인 EFPI(extrinsic Fabry-Perot interferometer) 센서와 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서등이 주로 활용되고 있다. EFPI 센서는 민감도가 매우 높아 주로 음향방출신호 계측에 사용되고 있으며, 실제로 복합재 구조물의 다양한 파손신호를 계측한 연구결과들이 보고되고 있다[4,5].

한편 FBG센서는 EFPI센서에 비하여 민감도 및 주파수 대역이 상대적으로 낮지만 다중센싱능력이 뛰어나 주로 변형률, 온도나 압력같은 저주파 신호 측정에 사용되고 있다 [6,7]. 최근에는 FBG센서의 민감도와 주파수 대역을 향상시켜 음향방출신호와 같은 고주파신호 측정에 응용하려는 연구가 시도되고 있다[8-10]. 그러나 아직까지는 민감도와 주파수 대역을 높이기 위한 복조방법의 개발 등에 관한 연구에 집중되어 있으며, FBG센서를 이용하여 복합재 구조물의 파손신호를 계측하려는 실제적인 연구가 부족한 실정이다.

본 논문에서는 FBG센서시스템으로 복합재 구조물의 파손신호를 측정하려고 한다. 민감도와 주파수대역을 개선한 수동 마흐-젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer) 방식의 복조기를 채용하였다. FBG센서를 복합재료 빔 시편에 부착하여 인장하중시 기지균열이나 층간분리에 의하여 발생하는 파손신호를 계측하였고 계측된 파손신호의 특성을 분석하였다.

2. 광섬유 브래그 격자 센서 시스템

2.1 수동 마흐-젠더 간섭계 복조

FBG는 광섬유의 코어부분에 새겨진 굴절률이 주기적으로 변하는 격자이다. 광대역광원이 FBG에 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.

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

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

여기서 ΔT 는 온도 변화, ϵ 는 기계적 변형률, α 는 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고 ξ 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.

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

브래그 파장 변화를 측정하는 복조기술은 FBG센서 개발에서 가장 중요한 기술로서 여러 가지 복조기술이 제안되었다. 현재 가변 패브리-페로 필터를 사용한 복조기[11]가 주로 많이 쓰이고 있다. 그러나 파장 주사 속도의 한계로 인하여 1kHz 이상의 동적변형률은 측정하기 어렵다는 단점이 있다. 광세기복조(intensity demodulation)는 브래그 파장의 이동을 광세기의 변화량으로 변환시킬 수 있기 때문에 측정속도는 매우 빠르다는 장점이 있다. 대표적인 광세기 복조방법으로서 Kersey는 마흐-젠더 간섭계 방식의 복조를 제안하였는데, 선형성과 정확도를 높이기 위하여 위상변조기를 채용하였다[12]. 그러나 위상변조기의 주파수 대역 한계로 인하여 수십 킬로헤르쯔 이상의 고주파 신호를 측정하기 어려웠다.

복합재 구조물은 모재 균열이나 층간분리와 같은 파손이 발생할 때 수십 킬로헤르쯔에서 수백 킬로헤르쯔에 이르는 고주파 진동이 발생한다고 보고되고 있다 [5]. 따라서, 본 논문에서는 수십 킬로헤르쯔 이상의 주파수성분을 갖는 파손신호를 측정하기 위하여 위상변조기를 제거한 수동 마흐-젠더 간섭계 방식의 복조기를 사용하였다. (Fig. 1 참조)

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 (5)와 같이 표현할 수 있다.

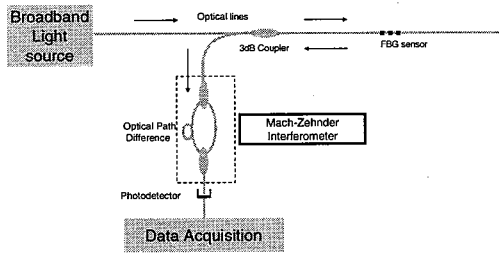


Fig. 1 Schematic diagram of FBG sensor system with passive Mach-Zehnder interferometric demodulator.

$$T = \frac{I_o}{I_i} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \frac{2\pi nd}{\lambda} \right\} \quad (5)$$

여기서 I_i 는 입력광세기, I_o 는 출력광세기, d 는 경로차 (path difference), n 은 광섬유의 굴절률이다. 간섭계의 위상, ϕ 는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\phi = \frac{2\pi nd}{\lambda} \quad (6)$$

Fig. 2는 위상변화에 따른 이상적인 간섭계의 투과율을 나타내고 있다. 간섭계 투과율의 주기는 FSR(free spectral range)로 정의되며 파장단위로 표시하면 식 (7)과 같다.

$$FSR = \frac{\lambda^2}{nd} \quad (7)$$

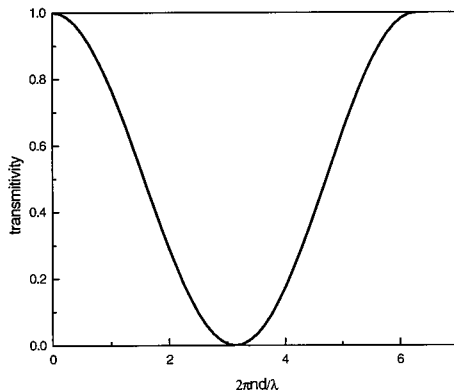


Fig. 2 Transmittance of Mach-Zehnder interferometer.

광경로차와 FSR은 반비례 관계를 가진다. 간섭계의 투과율은 광경로차와 파장의 함수이므로 광경로차가 일정하다면 FBG센서의 브래그파장변화는 간섭계를 통하여 투과율의 변화로 변환된다.

브래그 파장에 대한 간섭계 투과율의 최대 기울기는 식 (8)과 같으며, 변형률 민감도와 같은 의미를 갖는다.

$$\left| \frac{\Delta T}{\Delta \lambda_B} \right| = \left| \sin \left(\frac{2\pi nd}{\lambda_B} \right) \right| \frac{\pi}{FSR} \quad (8)$$

간섭계 복조의 변형률 민감도는 간섭계의 위상과 FSR에 따라 다른 값을 가지게 된다. 간섭계의 위상이 동일하다면 FSR이 작을수록 측정구간이 감소하지만 변형률 민감도가 증가한다. 한편 FSR이 클수록 측정구간은 증가하지만 변형률 민감도가 감소한다. 따라서 측정하려는 신호의 특성에 따라 FSR을 결정하여야 하며, 파손신호와 같이 미세한 변형을 변화를 갖는 음향방출신호를 측정할 경우 FSR을 감소시켜 민감도를 높이는 것이 바람직하다.

이러한 수동간섭계 복조는 위상변조기와 같은 능동소자가 없기 때문에 위상복조와 같은 추가적인 신호처리과정이 필요 없게 된다. 따라서 이 복조 방식은 구성이 매우 간단하여 쉽게 구성할 수 있으며, 측정속도는 보통 수백 킬로헤르츠 이상인 광검출기의 주파수대역까지 가능하다. 하지만 간섭계의 위상에 따라 변형률 민감도가 거의 없는 측정 불가능 영역이 존재할 수 있다. 이 문제점을 해결하기 위해서는 위상이 서로 90도 차이된 두 개의 간섭계로 동시에 복조하여 모든 위상에서 민감도가 일정한 값 이상이 되도록 해야한다.

3. 복합재 구조물의 파손 신호 측정

수동 마흐-젠더 간섭계 복조기를 사용한 FBG센서시스템을 사용하여 복합재 구조물의 파손신호를 측정하였다.

3.1. 시험준비

시험장치는 Fig. 3과 같이 만능시험기, 복합재료 시편, 센서시스템과 센서출력을 저장하기 위한 자료취득장비 등으로 구성되어 있다.

복합재료 시편은 (주)한국화이바 사의 CU-125NS 그래파이트/에폭시(graphite/epoxy) 프리프레그를 $[0_2/90_8]_s$ 의 적층순서로 적층하고 표준성형공정으로 성형하여 제작되었다. 직교적층 복합재료는 90도층에서 기지 균열에 의해 파손이 발생한다. 시편의 형상은 Fig. 4와 같으며, 글라스/에폭시(glass/epoxy) 탭을 시편 양 끝에 각각 부착하였다.

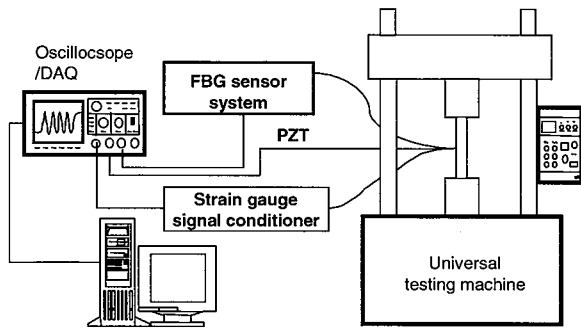


Fig. 3 Test setup for simultaneous measurement of strain and failure signal.

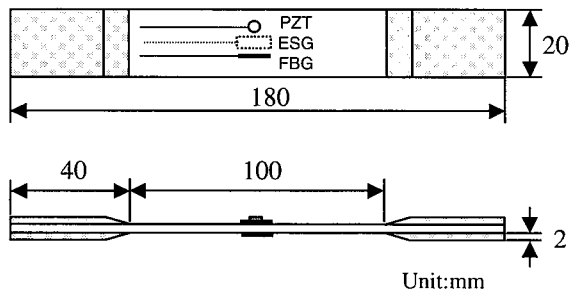


Fig. 4 Specimen configuration.

변형률을 측정하기 위한 전기저항식 스트레인게이지(ESG), 파손신호 취득을 위한 압전센서(PZT)와 FBG센서를 Fig. 4와 같이 시편 중앙에 접착제(Cyanoacrylate, Tokyo Sokki Kenkyujo)로 부착하였다. 스트레인 게이지용 신호조절기(signal conditioner)는 Tokyo Sokki Kenkyujo사의 SDA-810C 모델이며, 3dB 주파수는 2.5kHz이다. 압전센서는 Fuji-Ceramics사에서 제작한 PZT(Pb(Zi,Ti)O₂)재질의 C-6 모델로서 원판형태이며, 5mm의 직경과 2mm의 두께를 가지고 있다. 만능시험기는 Instron사의 4482 모델이며 분당 0.1mm~1mm의 속도로 시편에 인장력을 가하였다.

FBG 센서시스템은 광대역광원, FBG센서, 마흐-젠더 간섭계와 광검출기로 구성된다. 광대역광원은 JDS사 제품으로 40nm의 파장폭에서 전체 50mW의 광량(optical power)을 가지고 있다. FBG센서의 초기 브래그파장은 1540nm이고 게이지길이는 10mm이다. 광검출기는 Newport사의 2011 모델을 사용하였고 주파수대역은 200kHz이다. 본 논문에서 제작한 마흐-젠더 간섭계는 0.8nm 정도의 FSR를 가지고 있다. 센서 신호들은 오실로스코프나 DAQ(data acquisition) 장비에서 계측된 후 개인용 컴퓨터에 저장된다.

3.2. 시험결과

첫 번째 시편에 대한 시험에서 압전센서의 신호를 트리거 신호로 설정하였다. 파손신호가 발생하였을 때 오실로스코프를 이용하여 스트레인게이지에서 나오는 변형률, 압전센서 신호와 FBG센서시스템에서 나오는 교류전압을 2.5MHz의 취득속도로 계측하였다. 만능시험기의 인장속도는 분당 0.1mm의 속도로 하였다.

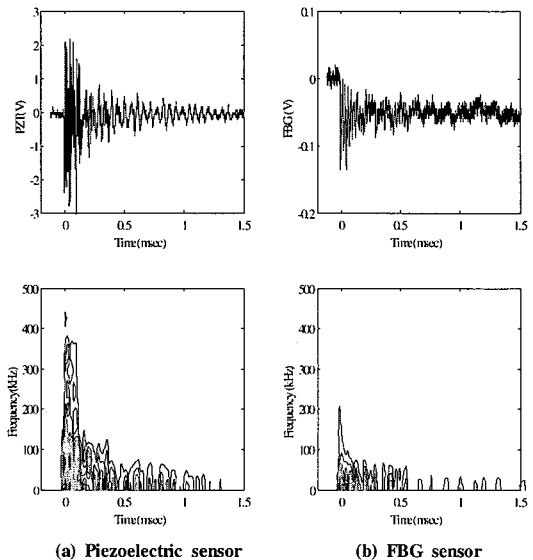


Fig. 5 Failure signal measured by oscilloscope(sampling rate : 2.5MHz).

Fig. 5는 0.315%의 변형률에서 시편에 발생한 파손신호를 압전센서와 FBG센서로 계측한 결과이다. 압전센서로 계측한 파손신호를 시간-주파수신호분석인 STFT(short-time Fourier transform)을 수행한 결과 파손 초기 0.1msec 동안 최대 500kHz에 이르는 광범위한 주파수성분이 검출되었고 그 이후부터 1msec까지 최대 100kHz에 이르는 주파수범위를 갖는 신호가 반복되고 있다. FBG센서로 계측한 파손신호의 경우 초기에 최대 200kHz에 이르는 주파수 성분이 검출되었고 그 이후부터 최대 100kHz에 이르는 주파수 범위를 갖는 신호가 반복되고 있다. 압전센서에 비하여 FBG센서가 200kHz이상의 고주파신호에 대한 낮은 민감도를 보이고 있으며 이는 광검출기의 주파수 대역한계가 원인인 것으로 예상된다. 한편 FBG센서로 계측한 파손신호는 파손발생시점에서 순간적으로 평균전압의 이동이 발생하면서 진동하는 특징을 가지고 있다.

두번째 시편에 대한 시험에서 DAQ장비를 이용하여 스트레인게이지에서 나오는 변형률, 압전센서 신호와 FBG센서시스템에서 나오는 교류전압을 100kHz의 취득속도로 연속적으로 계측하였다. 만능시험기의 인장속도는 분당 1mm로 하였다.

Fig. 6은 인장하중 시 ESG로 측정된 변형률과 FBG센서 신호의 이력선도이며, 변형률은 거의 선형적으로 증가하고 있었다. FBG센서 신호는 사인함수 형태로 변하고 있었으며, 이는 변형률이 증가함에 따라 FBG센서의 브래그 파장이 이동하고 있음을 알 수 있다. 0.28%의 변형률에서 FBG센서가 파손되어 측정을 중단하였다.

Fig. 7은 30초와 37초 사이에 DAQ장비로 측정된 신호들이다. 압전센서신호에서 침두가 발생한 때를 파손시점으로 보면, 모두 3개의 파손신호를 발견할 수 있었고, 각각의 파손시점에서 변형률의 급격한 이동이 발견되었다.

Fig. 8은 파손시점에서 계측한 압전센서신호와 FBG센서 신호를 확대한 결과이다. FBG센서로 계측한 첫 번째와 세 번째 파손신호는 이전 시험결과와 같이 파손시점에서 순간적으로 평균전압의 이동이 발생하면서 진동하였다. 0.245% 변형률에서 FBG센서 신호로 계측한 파손신호인 경우 다른 신호에 비하여 평균전압 이동량과 진폭이 컸다. 이는 복조기로 사용된 간섭계의 위상에 따라서 민감도가 달라지기 때문이다. 한편, 압전센서에서 계측한 신호에서는 파손시점에서 순간적인 전압이동이 발견되지 않았다. 압전센서는 고주파 성분의 신호에 대한 민감도는 높은 반면 준정적인 신호에는 거의 반응하지 않기 때문이다.

FBG센서의 순간적인 평균전압이동은 시험의 파손 발생으로 인한 강성저하로 변형률의 순간적인 변화가 발생되었기 때문이라고 판단된다. 구조물의 강성을 감소시킬 정도의 파손이 발생하였을 경우 변형률의 순간적인 이동이 발생할 가능성이 높다. 비파괴 검사시 사용되는 충격파나 응력파는 변형률의 고주파 진동을 유발하지만 평균변형률의 순간적인 이동을 가져오지는 않는다. 따라서, FBG센서의 경우 변형률과 고주파 진동신호를 동시에 계측할 수 있으므로, 파손신호와 비파괴 검사시 사용되는 응력파를 구분할 수 있는 능력을 가지게 된다.

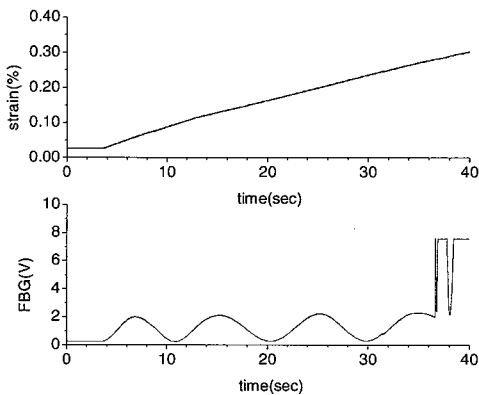


Fig. 6 Continuous signals measured by DAQ(sampling rate : 100kHz).

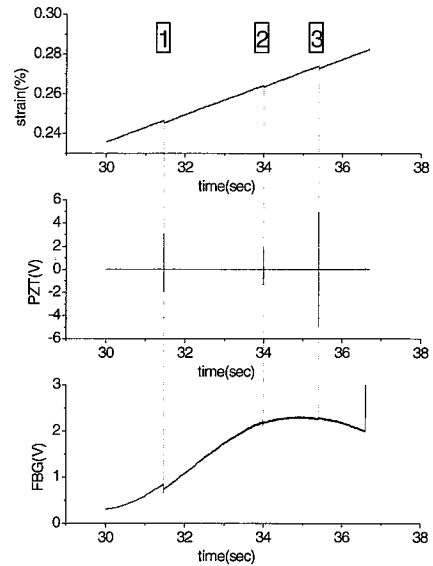


Fig. 7 Continuous signals between time 30second and 37second measured by DAQ.

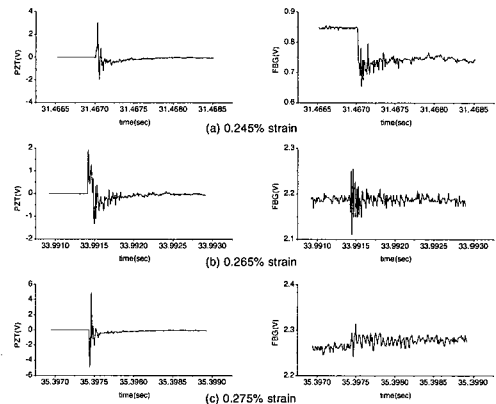


Fig. 8 Magnified failure signals measured by DAQ.

4. 결론

FBG센서를 이용하여 인장하중을 받는 복합재 구조물의 파손신호를 측정하였다. 민감도와 주파수 대역 성능을 향상시키기 위하여 수동 마흐-젠더 간섭계 방식의 복조기를 제안하였다.

FBG센서로 측정된 파손신호에서 최대 200kHz에 이르는 주파수 성분이 검출되었고, 파손시점에서 평균전압의 순간적인 이동이 관측되었으며, 이는 복합재료 시험의 파손 발생시 강성저하로 인한 변형률의 급격한 변화가 원인이라는

것을 알 수 있었다. 압전센서로 측정한 파손신호에서는 파손시점에서 순간적인 평균전압이동을 관측할 수 없었다. 따라서, FBG센서는 변형률과 같은 저주파 신호와 파손신호와 같은 고주파 신호를 동시에 계측할 수 있음을 알 수 있었다.

본 논문에서 제안한 FBG센서의 수동간섭계 복조는 구성이 간단하여 쉽게 구현할 수 있으며 파손신호와 같은 미세한 크기의 고주파 신호를 측정할 수 있을 정도로 높은 민감도와 높은 주파수 대역을 보유하고 있음을 알 수 있었다. 하지만 간섭계의 위상에 따라 변형률 민감도가 매우 낮은 영역이 존재하므로 변형률 민감도를 일정한 값 이상으로 유지시키는 개선이 필요하다.

후 기

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

참고문헌

- 1) J.H. Williams, Jr. and S.S. Lee, "Acoustic Emission Monitoring of Fiber Composite Materials and Structures," *Journal of Composite Materials*, Vol. 12, 1978, pp. 348-370.
- 2) W.H. Prosser, K.E. Jackson, S. Kellas, B.T. Smith, J. McKeon, and A. Fridman, "Advanced waveform-based acoustic emission detection of matrix cracking in composites," *Materials Evaluation*, 1995, pp. 1052-1058.
- 3) M. Johnson and P. Gudmundson, "Broad-band transient recording and characterization of acoustic emission events in composite laminates," *Composite Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 2803-2818.
- 4) 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*, Vol. 57, 1997, pp. 1639-1651.
- 5) D.H. Kim, B.Y. Koo, C.S. Hong and C.G. Kim, "Damage Detection of Composite Structures Using a Stabilized Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Sensor System," *Smart Materials and Structures*, submitted.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) J. Seim, W.L. Schulz, E. Udd, M. Morrell, "Higher Speed Demodulation of Fiber Grating Sensors," *SPIE Proceedings*, Vol. 3670, 1999, pp. 8.
- 9) Perez, H.L. Cui, and E. Udd, "Acoustic Emission Detection using Fiber Bragg Gratings," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4328, 2001, pp. 209.
- 10) 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, pp. 122-128.
- 11) 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.
- 12) 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.