

論文

복합재료 파손 검출을 위한 EFPI 센서 위상 안정화 시스템

김대현*, 구본용**, 방형준*, 김천곤*, 홍창선*

A Phase Stabilization System of EFPI
for Damage Detection of CompositeDae-Hyun Kim*, Bon-Yong Koo**, Hyung-Joon Bang*
Chun-Gon Kim* and Chang-Sun Hong*

ABSTRACT

In case of an extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor, the phase compensating technique is particularly necessary in applying the interferometer to detecting acoustic emission signals because of signal-fading problems. The technique makes it possible to maintain the phase at the quadrature point. In this paper, we developed the stabilization control sensor system that is composed of a broadband light source, a tunable Fabry-Perot (F-P) filter and a control-circuit board. A tension test of a composite specimen was performed to verify if the developed system could compensate the phase change induced from the tension strain and keep the phase at the quadrature point.

초 록

EFPI (extrinsic Fabry-Perot interferometer) 센서를 이용해 복합재료의 파손 신호를 취득하기 위해서는 파손 신호에 비해 상대적으로 낮은 주파수의 열적, 기계적 준정적 변형에 의해 발생하는 위상 변화를 보상해 주는 기술이 필요하다. 또한 센서의 민감도를 최적화하기 위해 출력 신호의 위상을 쿼드러처 (quadrature) 지점에 유지시켜야 한다. 본 논문에서는 EFPI 센서 시스템의 출력 신호 위상을 일정하게 유지시킬 수 있는 안정화 제어 시스템을 개발하였다. 안정화 제어 시스템은 광대역 파장 레이저 광원, 가변 F-P (Fabry-Perot) 필터 그리고 필터를 제어할 수 있는 전자 회로 시스템으로 구성하였다. 개발된 시스템의 위상 제어 성능을 평가하기 위해 복합재료 시편의 인장 실험을 수행하여 인장 변형에 의해 발생하는 위상 변화를 개발된 시스템을 이용해 쿼드러처 지점에 일정하게 유지할 수 있음을 보였다.

Key Words : fiber optic sensor(광섬유 센서), phase control(위상 제어), stabilization(안정화), composite(복합재료), damage detection(파손검출)

1. 서 론

광섬유 센서는 광소자의 성능 향상과 가격 하

† 2003년 4월 14일 접수 ~ 2003년 7월 2일 심사완료

* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

연락처자, E-mail : cgkim@kaist.ac.kr

대전시 유성구 구성동 373-1

** 정회원, 한진중공업 연구소

락으로 인해 변형량, 압력, 가속도, 진동 및 음향 파 센서 등의 기존의 센서 시스템을 성공적으로 대체하고 있다. 특히 광섬유 센서는 크기가 작고 민감도가 우수하며 전자기장의 영향을 받지 않는다는 장점으로 인해 여러 분야로의 적용 가능성이 높다[1]. 더욱이 광섬유 센서는 재료 내에 삽입이 용이하기 때문에 파손 거동이 복잡한 복합재료의 재료 및 구조 건전성 모니터링 등의 연구

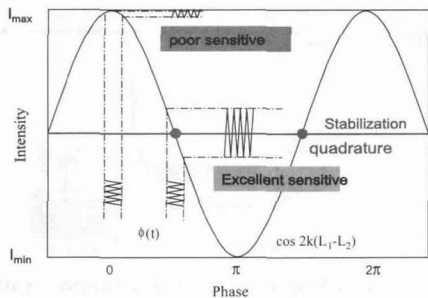


Fig. 1. The variation of the sensitivity of EFPI under quasi-static displacement (fade-out problem)

에 활발히 적용되고 있다. 특히 간섭형 광섬유 센서의 경우, 동적 응답 특성이 우수하고 민감도가 뛰어나 복합재료의 파손 검출 및 손상 평가 연구에 적극 활용되고 있다 [2-4].

일반적으로 간섭형 센서의 출력 신호는 Fig. 1 과 같이 정현파 형태로서 외부의 환경 변화에 의해 출력 빛의 위상이 주기적으로 변화한다. 이처럼 외부의 준정적인 환경 변화에 의해 π 이상의 위상 변화가 발생하면서 동시에 π 이하의 위상 변화를 발생시키는 파손 신호가 발생할 경우, Fig. 1처럼 최악의 민감도 (poor sensitive) 구간에서 파손 신호가 사라지는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 페이드-아웃 문제 (fade-out problem) 라고 하며, 이 같은 문제를 극복하기 위해서는 준정적 환경 변화에 의해 발생하는 위상 변화를 보상해 주면서 위상을 최상의 민감도 (excellent sensitive)에 유지할 수 있도록 조절해야 한다. 일반적으로 최상의 민감도가 유지되는 지점을 쿼드러처 지점 (quadrature point) 이라 하며 Fig. 1과 같이 코사인 함수에서 위상이 $N\pi/2$ ($N=1,3,5, \dots$)인 지점을 나타낸다.

최근 페이드-아웃 문제를 해결하기 위해 여러 가지 연구들이 수행되고 있다. 이 같은 문제 해결 방법에는 수동적 방법 (passive method)과 능동적 방법 (active method)으로 나뉜다. 수동적 방법은 위상의 차이가 $\pi/2$ 만큼 발생하는 두 개의 신호를 동시에 취득할 수 있도록 센서나 시스템을 개선하는 방법[5]이다. 반면, 능동적 방법은 광섬유의 길이나 혹은 사용되는 레이저의 파장을 능동적으로 조절 (active control)하여 위상을 조절해 주는 방법이다. 본 논문에서는 능동적 조절 방법에 초점을 맞추도록 하였다.

마흐젠더 (Mach-Zehnder) 형태의 간섭형 센서의 경우, 압전 재료 실린더를 이용해 광섬유 길이를 능동 제어함으로써 위상을 유지시킬 수 있

다. 그러나 이러한 방법은 EFPI 센서 시스템에는 적용하기 힘들다. 따라서 Dorigi 등[6]은 센서 시스템에 사용되는 레이저의 파장을 능동 제어하는 방법으로 출력 신호의 위상을 일정하게 유지시켰다.

본 논문에서는 EFPI 센서 시스템의 안정화를 위해, 레이저 파장 이동 방식을 채택하였다. 기존의 파장 가변 레이저는 가격이 매우 높기 때문에 본 논문에서는 광대역 파장 레이저와 가변 F-P 필터를 이용해 레이저의 파장을 능동 제어 할 수 있는 새로운 위상 안정화 시스템을 구성하였다. 또한 이러한 위상 능동 제어를 위한 전자 회로 모듈도 개발하였다. 그리고 개발된 시스템의 위상 제어 성능을 평가하기 위해 복합재료 시편의 인장 실험을 수행하여 인장 변형에 의해 발생하는 위상 변화를 쿼드러처 지점에 일정하게 유지할 수 있음을 보였다. 또한 본 연구에서 개발된 시스템을 이용해 파손 신호의 취득 가능성 여부를 검증하기 위해 연필심 파손 신호 취득 실험을 수행하였다.

II. 작동 원리

EFPI 센서는 Fig. 2와 같이 수직 절단된 두 광섬유 단면이 유리관에 삽입되어 서로 마주보고 있는 형태를 취한다. 여기서 수직 절단된 두 광섬유 사이의 간극은 공진기 (cavity)의 역할을 하게 된다. 본 논문에서 사용된 EFPI 센서는 두 번째 반사면을 금으로 증착 처리한 G-EFPI (Gold deposited EFPI) 센서로서 민감도가 기존의 EFPI 센서보다 우수하다[7].

센서의 출력 신호는 입력광(I_0)에 의해 출력광(I)을 정상화 (normalization)하면 식 (1)과 같이 간단한 정현파 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{I}{I_0} = A(1 - \cos \phi) \tag{1}$$

여기서 A 는 비례상수이고 ϕ 는 두개의 반사면에서 반사된 두 반사광의 보강, 상쇄 간섭에 의해 발생하는 출력광의 위상을 나타낸다. 또한 위상

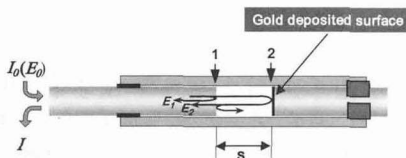


Fig. 2. A schematic diagram of gold deposited EFPI (G-EFPI)

ϕ 는 Fig. 2에서의 센서 간극 s 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

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

여기서 λ 는 사용되는 레이저의 파장을 나타낸다. 결과적으로 식 (2)에서 알 수 있듯이 위상 ϕ 는 사용되는 레이저 파장 λ 와 센서의 간극 s 와 함수 관계를 갖는다.

기존의 EFPI 센서 시스템의 경우, 고정된 레이저 파장을 사용하기 때문에 출력 신호의 위상은 센서의 간극에만 영향을 받게 된다. 그러나 본 논문에서는 레이저의 파장도 변할 수 있도록 시스템 구성하였다. 따라서 식 (2)는 간극 s 와 레이저 파장 λ 가 동시에 변화할 때 아래의 식처럼 표현된다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta s - \frac{4\pi}{\lambda^2} s \Delta\lambda \quad (3)$$

결과적으로 위상을 일정하게 유지 ($\Delta\phi=0$)하기 위해서는 간극 s 의 변화에 의해 발생한 위상을 아래의 관계식과 같이 파장의 변화로 보상해 주어야 한다.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_i}{s_i} \Delta s \quad (4)$$

여기서 λ_i 는 초기 레이저 파장이고 s_i 는 센서의 초기 간극을 나타낸다. 최종적으로 센서의 간극의 변화에 의해 발생하는 위상의 변화 속도만큼 빠르게 레이저의 파장을 변화시킬 수 있다면 위상을 일정한 값으로 유지할 수 있게 된다. 다시 말해 위상을 보상해 주는 최대 속도는 보상해 줄 수 있는 신호의 최대 속도와 같다는 의미이다. 따라서 외부의 준정적 변형과 같이 속도가 느린 변화량은 위상을 보상해 줌으로써 출력 신호에 나타나지 않게 된다. 반면에 파손 신호와 같은 고주파 신호는 상대적으로 보상 신호의 속도보다 빨라 출력 신호로 나타나게 된다. 또한 쿼드러처 위치에 위상을 고정시킴으로써 센서의 민감도를 최대화할 수 있게 된다.

III. 위상 안정화 센서 시스템

제2절에서 설명 했듯이 속도가 낮은 저주파 변형에 의해 발생한 위상 변화를 보상하기 위해서는 레이저의 파장 이동이 가능해야 한다. 따라서 본 연구에서는 광대역 파장 레이저 (BBS 1550, JDS Uniphase, USA)와 가변 F-P 필터 (Micron Optics Inc., USA)를 사용하여 파장 가변 레이저

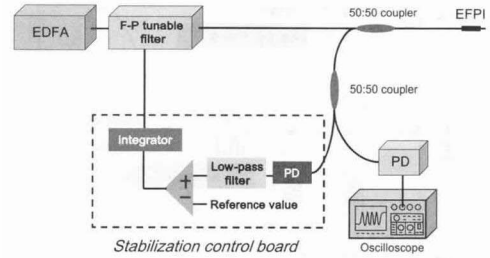


Fig. 3. A closed-loop stabilization control system to compensate the phase shift by controlling the tunable Fabry-Perot filter

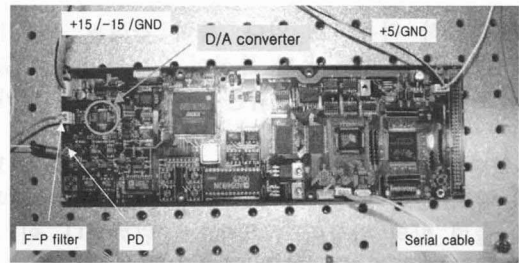


Fig. 4. A control-circuit board which was developed to tune the tunable F-P filter to the proper wavelength

를 구성하였다. 또한 원하는 파장의 광원을 통과시키기 위해 가변 F-P 필터를 능동 제어하였고 이를 통해 민감도를 일정하게 유지시킬 수 있었다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 안정화된 광섬유 센서 시스템의 개략도를 나타낸다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 가변 F-P 필터를 제어하기 위해 센서로부터 신호를 분기해 안정화 조절부의 입력 신호로 사용하였다. 안정화 조절부에서는 센서로부터 분기된 신호와 기준 위상 값과의 차이를 계산하고 이를 보상해 주기 위해 정해진 비례상수를 곱한 후 가변 F-P 필터를 제어해 주었다. 결과적으로 폐회로 (closed loop circuit) 형태로 센서의 출력 신호를 기준 위상 값으로 보상해 주었다. 본 연구에서는 안정화 조절 회로부를 DSP (digital signal processor) 칩과 광검출기가 회로 내부에 포함되는 하나의 회로판 형태로 구성하였다. 또한 컴퓨터와 통신을 할 수 있도록 시리얼 포트 (serial port)를 구성하였고 이 포트를 통해 프로그램을 업로드 (upload)할 수 있도록 설계하였다. 본 논문에서 사용하기 위해 업로드한 프로그램은 신호의 취득 주파수를 100 kHz로 설정하였고 잡음을 줄이기 위해 100회 평균하도록 설계되었다. 결과적으로 1 kHz 이하의 저주파 위상 변화는 모두 보상되도록 설

계하였다. Fig. 4는 본 연구에서 개발한 안정화 전자 회로부를 보여주고 있다.

그리고 Fig. 3에서와 같이 위상 안정화 회로부 외에 고주파 파손 신호 측정을 위한 광검출기를 별도로 설치함으로써 고주파의 신호 취득이 가능하도록 하였다. 참고로 본 논문에서 사용한 광검출기 (PDA 400, THORLABS, USA)의 가용 주파수 대역은 DC~10 MHz 이다.

IV. 실험 및 고찰

4.1 센서 및 시편 제작

단일모드 광섬유 (single mode fiber, 삼성전자 SB6C402-RD)를 10 cm 정도로 자른 후 피복 제거기를 이용하여 광섬유의 피복을 제거하고 클리버를 사용하여 수직 절단하였다. 이렇게 준비된 광섬유의 수직 단면을 진공 증착법을 이용하여 금으로 증착 처리하였다. 증착 처리된 광섬유를 미세 조정 장치를 이용하여 Fig. 2와 같이 내경이 130 μm 이고 외경이 280 μm 인 유리 모세관 한쪽 끝에 삽입하였고 CIBA-GEIGY 사의 5분 경화에폭시 (Araldite)를 이용하여 광섬유와 유리 모세관을 접합시켰다. 유리 모세관의 다른 한쪽은 증착 처리되지 않은 광섬유를 수직 절단하여 삽입하고 광학 현미경을 이용하여 두 광섬유 단면의 간극을 200 μm 로 조절한 후에 동일한 에폭시로 광섬유와 유리 모세관을 접합하였다. 금증착 처리한 광섬유의 삽입 후 남은 부분은 끝 단면에서 난반사가 일어날 수 있도록 잘라내었다. 마지막으로 에폭시가 완전히 경화된 후에 광학현미경을 이용하여 두 에폭시 접합부 사이의 길이를 측정하여 센서의 게이지 길이를 측정하였다. 본 논문에서 사용된 G-EFPI 센서의 게이지 길이는 8.40 mm이고 초기 간극은 200 μm 로 제작 되었다.

본 논문에서 사용한 복합재료 시편은 (주) 한국 화이바의 CU - 125 NS graphite/epoxy 프리프레그를 사용하여 $[0_3/90_3]_5$ 와 같이 직교 적층한 후 오토클레이브 (autoclave)를 이용해 성형하였다. 그리고 시편의 끝부분은 유리섬유판을 이용하여 탭을 만들어 부착하였다. 완성된 복합재 평판을 길이 170 mm, 폭 20 mm 로 절단하여 복합재 시편을 제작하였다. 제작된 시편의 한쪽 면 중앙에 앞서 제작한 G-EFPI 센서를 부착하였다.

4.2 위상 제어 실험

본 연구에서 사용된 200 μm 초기 간극의 G-EFPI 센서의 위상을 보상하기 위해 필요한 레

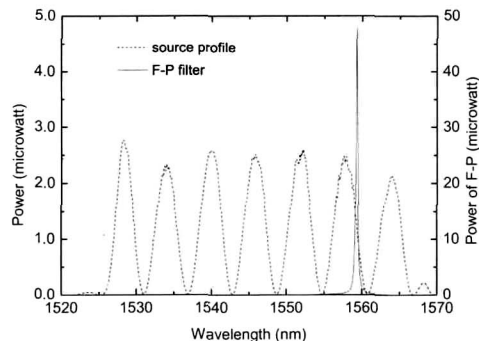


Fig. 5. Power spectrums of the G-EFPI and the tunable F-P filter

이저 파장 이동량을 알아보기 위해 광대역 파장 레이저와 OSA (optical spectrum analyser)를 이용해 파워 스펙트럼 (power spectrum)을 측정하였다. 또한 가변 F-P 필터의 파장 선포도 동일한 방법으로 측정하였다. Fig. 5는 G-EFPI 센서와 가변 F-P 필터의 파워 스펙트럼을 보여주고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 가변 F-P 필터를 이용해 통과 파장을 변화시키면 필터를 통과한 광원의 파워는 점선으로 표시된 정현파 형태를 취하게 된다. 따라서 제2절에서 설명한 것과 같이 센서의 간극 변화로 발생한 위상은 필터의 통과 파장을 변화시킴으로써 보상될 수 있다. 또한 본 연구에서 사용한 200 μm 초기 간극의 G-EFPI 센서의 경우, Fig. 5를 통해 알 수 있듯이 2π 의 위상을 보상하기 위해서는 대략 6 nm의 파장 이동량이 필요하다. 본 연구에서 사용된 광대역 광원의 경우 대략 40 nm의 대역을 갖고 있으므로 가변 F-P 필터의 1회 스캐닝(scanning)을 통해 대략 14π 의 위상을 보상해 줄 수 있다. 또한 본 연구에서 사용한 가변 F-P 필터의 FSR(free spectral range)가 47 nm이므로 광대역 광원 구간에서는 단일 파장만이 통과 된다. 따라서 가변 F-P 필터를 40 nm 구간 내에서 왕복시키면 14π 이상의 위상을 발생시키는 변형에 대해서도 보상이 가능해진다. 그러나 G-EFPI 센서의 경우, 두 반사면의 간극이 커질수록 광 손실은 크게 발생한다[7]. Fig. 6에서와 같이 간극이 200 μm 에서 300 μm 로 증가할 경우 최대 값의 차이가 약 20% 정도 감소함을 알 수 있다. 결국 이러한 차이만큼 초기 위상 제어 기준값을 감소시켜야 한다. 그러나 그 값의 차이가 선형구간 내에 있으므로 결과 값에는 큰 영향을 미치지 못한다. 또한 센서의 게이지 길이를 조절함으로써 센서 간극이 보상 가능 최대 범위를 넘지 않도록 조절할 수 있다.

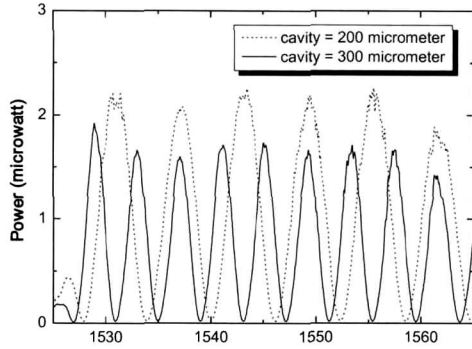


Fig. 6. Power spectrums of G-EFPI according to the cavity length

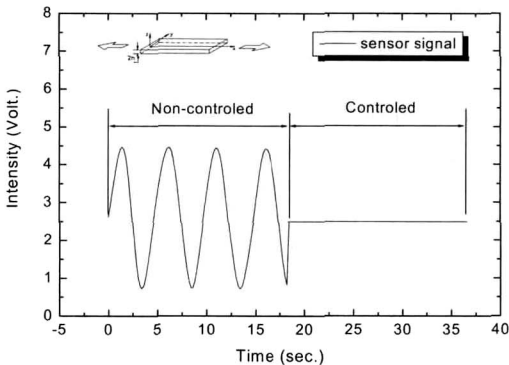


Fig. 7. A change of the output intensity from G-EFPI when the stabilization control system was operated

이것은 센서 제작 시 최대 보상 가능 변형량을 결정하고 이를 기준으로 게이지 길이를 결정하면 가능해 진다.

이러한 위상 안정화 EFPI 센서 시스템의 성능을 검사하기 위해 4.1절에서 설명한 시편을 만능시험기 (INSTRON 4482)에 장착하고 일정 변위 제어 방식으로 인장 실험을 수행하였다. 인장 하중에 의한 인장 변형이 가해지고 있을 때, 개발된 제어기로 센서 출력 신호의 위상을 쿼드러쳐 지점에 유지시키도록 하였다. Fig. 7은 개발된 제어기로 위상을 제어하지 않을 때와 제어할 때의 위상의 변화를 보여주고 있다.

그림처럼 시편의 인장 변형에 의해 센서의 출력 신호는 정현파 형태를 나타낸다. 그러나 개발된 제어기로 위상을 제어하면 위상은 쿼드러쳐 지점으로 유지된다. 결과적으로 인장 변형으로 발생한 위상의 변화를 파장 가변 F-P 필터를 이용해 입력광의 파장을 변화 시켜줌으로써 일정한 위상 값의 출력 신호를 성공적으로 얻을 수 있었다.

4.3 연필심 파손 실험

개발된 안정화 제어 광섬유 센서 시스템의 파손 신호 취득 가능성을 알아보기 위해 연필심 파손 실험을 수행하였다.

위상제어 실험에서 사용했던 동일한 시편을 Fig. 8에서와 같이 특수 지그(jig)를 사용해 양쪽 끝을 완전 지지(clamping) 시켰다. 또한 광섬유 센서와의 신호 비교를 위해 PZT (Disk type PZT, FUJI CERAMIC, JAPAN)를 G-EFPI 센서 부근에 부착시켰다. 또한 부착된 G-EFPI 센서를 본 연구에서 개발된 위상 안정화 시스템에 연결시켰다. 그리고 광섬유 센서 신호와 PZT 신호를 동시에 취득하기 위해 각 센서를 디지털 오실로스코프 (TDS 420, Tektronix)에 연결하였다.

실험 준비를 완료하고, 파손 신호를 재현하기 위해 준비된 2H 연필심을 지그로 고정 지지된 복합재 시편의 한쪽 모서리 부근에서 강제로 파손시켰다.

연필심 파손으로 재현된 신호는 Fig. 9 에서와 같이 성공적으로 취득되었다. 우선 신호 초반부에 연필심 파손 시 발생한 고주파 신호가 성공적

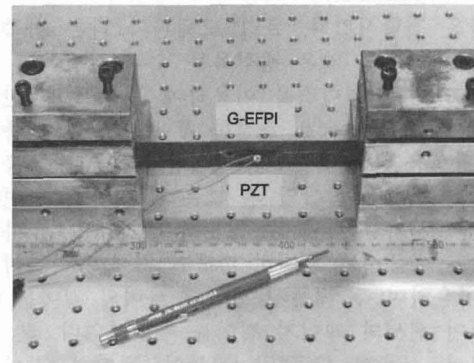


Fig. 8. Schematic of the experimental setup for a lead pencil-break test

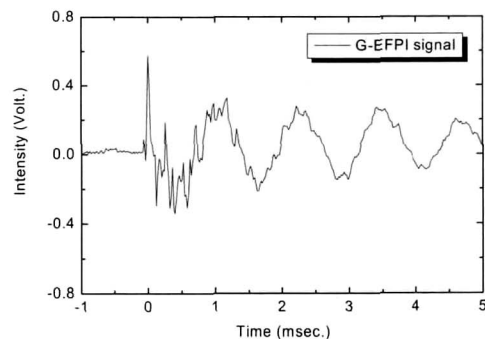


Fig. 9. A simulated acoustic emission induced by a lead pencil-break

으로 취득되었음을 확인할 수 있다. 또한 신호 후반부에는 구조 진동으로 보이는 진동 신호가 취득되었다. 참고로 PZT로 측정된 신호 역시 동일한 신호 특성을 나타냈다.

결과적으로 안정화 시스템을 이용해 파손 신호를 안정적으로 취득할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 본 논문에서 개발한 위상 안정화 시스템을 복합재 구조물의 파손 실험에 응용할 경우, 파손 시 발생하는 AE 신호를 안정적으로 취득할 수 있으므로 기존에 어려웠던 신호 이벤트 누적법을 이용해 복합재 구조물의 파손 정도를 평가할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 EFPI 센서 시스템의 위상을 일정하게 유지시킬 수 있는 위상 안정화 센서 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 광대역 파장 레이저, 가변 F-P 필터 그리고 필터를 제어할 수 있는 전자 회로 시스템으로 구성하였다. 이렇게 구성된 센서 시스템을 이용해 준정적 인장 변형에 의해 발생하는 위상 변화를 쿼드러쳐 지점에 유지할 수 있는지 복합재료 시편의 인장 실험을 통해 검증하였다. 그리고 연필심 파손 실험을 통해 개발된 안정화 제어 광섬유 센서 시스템이 파손 신호를 훌륭히 취득함을 보였다. 이렇게 개발된 위상 안정화 센서 시스템은 인장 혹은 압축과 같이 저주파의 변형이 발생하는 상황에서 동시에 발생하는 파손 신호를 취득하는 실험 등에 유용하게 응용될 수 있다. 또한 패이드-아웃 문제의 해결과 동시에 최대 민감도 구간에 위상을 유지시킬 수 있으므로 안정된 파손 신호 취득이 가능해진다.

후 기

본 연구는 2000년도 과학기술부의 국가지정연구실(National Research Lab., NRL) 사업지원(과

제번호: 2000-N-NL-01-C-250)에 의해 수행된 연구 결과의 일부이며 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] R. M. Measures and K. Liu, "Fiber optic sensors focus on smart systems," IEEE Circuits Devices Mag., vol. 8, no. 4, July 1992, pp.37-46.
- [2] Murphy, K. A., Claus, R. O., Greene, J. A. and Tran, T. A. "Acoustic Wave Response of the Extrinsic Fabry-Perot Interferometric (EFPI) Optical Fiber Sensor," ASME-PUBLICATIONS-AD, vol. 35, 1993
- [3] Furstenu, N., Schmidt, M., Horack, H., Goetze, W. and Schmidt, W. "Extrinsic Fabry-Perot interferometer vibration and acoustic sensor systems for airport ground traffic monitoring," IEEE proceedings: Optoelectronics, vol.144, no.3, 1997, pp.134-14
- [4] J. J. Alcoz, C. E. Lee and H. F. Tayler, "Embedded Fiber-Optic Fabry-Perot Ultrasound sensor," IEEE Tran. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control UFFC-37, 302, 1990
- [5] Ian Read, Peter Foote and Stuart Murray, "Optical fibre acoustic emission sensor for damage detection in carbon fibre composite structures," Measurement Science and Technology, 13, 2002, N5-N9.
- [6] John F. Dorighi, Sridhar Krishnaswamy, and Jan D. Achenbach, "Stabilization of an Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Sensor for Ultrasound Detection," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectron., Freq. Contr., vol. 42, no. 5, September 1990, pp. 820-824.
- [7] D. H. Kim, H. K. Kang, J. W. Park, C. S. Hong and C. G. Kim, "Measuring Dynamic Strain of Structures Using a Gold-Deposited EFPI," Smart Materials and Structures, Vol. 12, No. 1. 2003, pp. 1-5.