

# 복합재료 파손 검출을 위한 EFPI 센서 안정화 시스템

김대현\* · 구본용\*\* · 방형준\* · 김천곤\* · 홍창선\*

## A Stabilization System of EFPI for Damage Detection of Composites

Dae-Hyun Kim<sup>\*</sup>, Bon-Yong Koo<sup>\*\*</sup>, Hyung-Joon Bang<sup>\*</sup>  
Chun-Gon Kim<sup>\*</sup> and Chang-Sun Hong<sup>\*</sup>

**Key Words** : 광섬유 센서, 위상 제어, 안정화, 복합재료, 파손검출

### ABSTRACT

EFPI (extrinsic Fabry-Perot interferometer) 센서를 이용해 복합재료의 파손 신호를 취득하기 위해서는 파손 신호에 비해 상대적으로 낮은 주파수의 열적, 기계적 정적 변형에 의해 발생하는 위상 변화를 보상해 주는 기술이 필요하다. 또한 센서의 민감도를 최적화하기 위해 출력 신호의 위상을 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 Quadrature 지점에 일정하게 유지할 수 있음을 보였다. 또한 연필심 파손 실험을 통해 개발된 시스템이 파손 신호를 잘 취득할 수 있음을 확인하였다.

#### 기호설명

EFPI : extrinsic Fabry-Perot interferometer  
G-EFPI : gold deposited EFPI  
F-P : Fabry-Perot

### 1. 서론

광섬유 센서는 광소자의 성능 향상과 가격 하락으로 인해 변형량, 압력, 가속도, 진동 및 음향파 센서 등의 기존의 센서 시스템을 성공적으로 대체하고 있다. 특히 광섬유 센서는 크기가 작고 민감도가 우수하며 전자기장의 영향을 받지 않는

다는 장점으로 인해 여러 분야로의 적용 가능성이 높다[1]. 더욱이 광섬유 센서는 재료 내에 삽입이 용이하기 때문에 파손 거동이 복잡한 복합재료의 재료/구조 건전성 모니터링 등의 연구에 활발한 적용되고 있다. 특히 간섭형 광섬유 센서의 경우, 동적응답특성이 우수하고 민감도가 뛰어나 복합재료의 파손 검출 및 손상 평가 연구에 적극 활용되고 있다.

일반적으로 간섭형 센서의 출력 신호는 Fig. 1과 같이 정현파 형태로서 외부의 환경 변화에 의해 출력 빛의 위상이 주기적으로 변화한다. 이처럼 외부의 정적인 환경 변화에 의해  $\pi$  이상의 위상 변화가 발생하면서 동시에  $\pi$  이하의 위상 변화를 발생시키는 파손 신호가 발생할 경우, Fig. 1처럼 최악의 민감도 (worst sensitivity) 구간에서 파

\* 한국과학기술원

\*\* 한진중공업

손 신호가 사라지는 문제를 발생시킨다. 이러한 문제를 페이드-아웃 문제 (fade-out problem) 라고 하며, 이 같은 문제를 극복하기 위해서는 정적 환경 변화에 의해 발생하는 위상 변화를 보상해 주면서 위상을 최상의 민감도(best sensitivity)에 유지할 수 있도록 조절해야 한다. 일반적으로 최상의 민감도가 유지되는 지점을 쿼드러처 지점 (quadrature point) 이라 하며 Fig. 1 과 같이 코사인 함수에서 위상이  $N\pi/2$  ( $N=1,3,5, \dots$ )인 지점을 나타낸다.

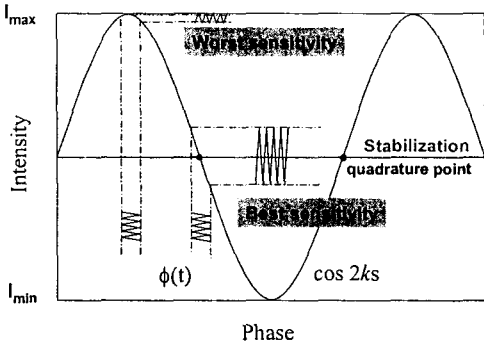


Fig. 1 In the absence of compensating demodulation methods, the sensitivity of the interferometer varies as a sinusoidal function

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. 칫제 수동적 방법은 위상의 차이가  $\pi/2$  만큼 발생하는 두개의 신호를 동시에 취득할 수 있도록 센서나 시스템을 개선하는 방법[2]인 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 형태의 간섭형 센서의 경우, 압전 재료 실린더를 이용해 광섬유 길이를 능동 제어함으로써 위상을 유지시킬 수 있다. 그러나 이러한 방법은 EFPI 센서 시스템에는 적용하기 힘들다. 따라서 Dorigi 등[3]은 센서 시스템에 사용되는 레이저의 파장을 능동 제어하는 방법으로 출력 신호의 위상을 일정하게 유지시켰다.

본 논문에서는 EFPI 센서 시스템의 안정화를 위해, 광대역 파장 레이저와 가변 F-P 필터를 이용해 레이저의 파장을 능동 제어 할 수 있도록 안정화 시스템을 구성하였고, 이러한 위상 능동 제어를 위한 전자 회로 모듈을 개발하였다. 마지막으로 이렇게 개발된 안정화 시스템을 이용해 파손 신호 모의 실험을 성공적으로 수행하였다.

## 2. 작동 원리

EFPI 센서는 Fig. 2 와 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 기존이 EFPI 센서보다 우수하다[4].

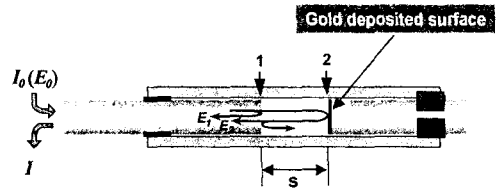


Fig. 2 Schematic diagram of gold deposited EFPI (G-EFPI)

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

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

여기서  $A$  는 비례상수 이고  $\phi$  는 두개의 반사면에서 반사된 두 반사광의 보강, 상쇄 간섭에 의해 발생하는 빛의 위상을 나타낸다. 또한 위상  $\phi$  는 Fig. 2 에서의 센서 간극  $s$  와 다음과 같은 관계를 갖는다.

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

여기서  $\lambda$  는 사용되는 레이저의 파장을 나타낸다. 결과적으로 식 2 에서 알 수 있듯이 위상  $\phi$  는 사용되는 레이저 파장  $\lambda$  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 있게 구성하였다. 따라서 식 2 는 간극  $s$  와 레이저 파장  $\lambda$  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  $\lambda_i$ 는 초기 레이저 파장이고  $s_i$ 는 센서의 초기 간극을 나타낸다.

최종적으로 센서의 간극의 변화에 의해 발생하는 위상의 변화 속도 만큼 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 정적 변형과 같이 속도가 느린 변화량은 위상을 보상해 줌으로써 출력 신호에 나타나지 않게 된다. 반면에 파손 신호와 같은 고주파 신호는 상대적으로 보상 신호의 속도 보다 빨라 출력 신호로 나타나게 된다. 또한 Quadrature 위치에 위상을 고정시킴으로써 센서의 민감도를 최대화 할 수 있게 된다.

### 3. 안정화된 광섬유 센서 시스템

2 절에서 설명했듯이 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 레이저를 구성하였다. 또한 원하는 파장의 광원을 통과 시키기 위해 가변 F-P 필터를 능동 제어하였다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 안정화된 광섬유 센서 시스템의 개략도를 나타낸다. 본 시스템은 센서의 민감도를 일정하게 유지할 수 있도록 능동 제어 방식을 선택하였다.

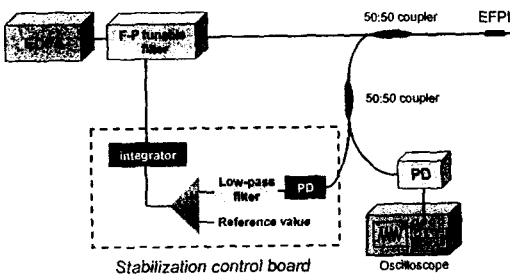


Fig. 3 Closed-loop stabilization control system to compensate the phase shift by controlling the Fabry-Perot tunable filter

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 가변 F-P 필터를 제어

하기 위해 센서로부터 신호를 분기해 안정화 조절부에 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 on-board 형태의 전자 회로판으로 구성하였다. 또한 컴퓨터와 통신을 할 수 있도록 시리얼 포트(serial port)를 구성하였고 이 포트를 통해 프로그램을 업로드(upload)를 할 수 있도록 설계하였다. 본 논문에서 사용하기 위해 업로드한 프로그램은 신호의 취득 주파수를 100kHz로 설정하였고 잡음을 줄이기 위해 100회 평균하도록 설계되었다. 결과적으로 1kHz 이하의 저주파 위상 변화는 모두 보상되도록 설계하였다. Fig. 4는 본 연구에서 개발한 안정화 전자 회로부를 보여주고 있다.

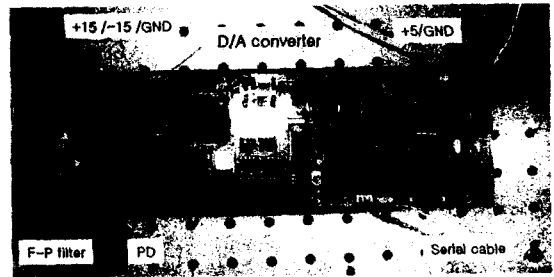


Fig. 4 Control-circuit board developed to tune the FP tunable filter to the proper wavelength

### 4. 실험 및 고찰

#### 4.1 위상 제어 실험

위상 제어 시스템의 성능을 실험하기 위해 G-EFPI 센서를 부착한 복합재료 시편의 정적 변형 실험을 수행하였다. 우선 게이지 길이 8mm, 초기 간극 200 $\mu$ m 인 G-EFP 센서를 제작하였다. 초기 간극은 위상을 일정하게 제어하기 위해 필요한 레이저 파장의 이동량과 함수 관계를 갖는다. 본 논문에서 사용한 200 $\mu$ m 간극의 G-EFPI 센서의 경우, 간극 변화에 의해 발생한  $2\pi$ 의 위상 변화를 제어하기 위해 레이저 파장은 대략 6nm 정도 이동되어야 한다. 따라서 사용 될 가변 F-P 필터의 가용 파장 범위에 맞는 적당한 초기 간극의 설정은 매

우 중요하다. 그리고 준비된 G-EFPI 센서를 Graphite/Epoxy [0<sub>3</sub>/90<sub>3</sub>], 직교 적층판 시편의 한쪽 표면 중앙에 부착하였다. 사용된 시편의 크기는 길이 170mm, 폭 20mm 이다. 광섬유 센서가 부착된 시편을 만능시험기 (INSTRON 4482)에 장착하고 일정 변위 제어 방식으로 인장 실험을 수행하였다. 인장 하중에 의한 인장 변형이 가해지고 있을 때, 개발된 제어기를 이용해 센서 출력 신호의 위상을 Quadrature 지점에 유지되도록 하였다. Fig. 5 는 개발된 제어기로 위상을 제어하지 않을 때와 제어할 때의 위상의 변화를 보여주고 있다.

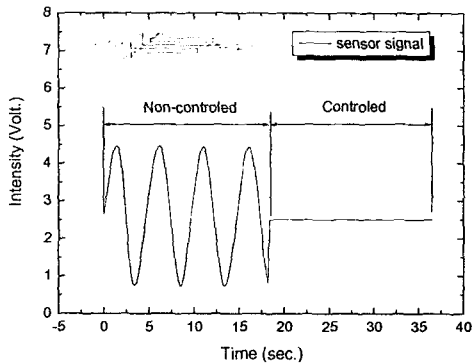


Fig. 5 Change of the output intensity from G-EFPI when the stabilization control system was operated

그럼처럼 시편의 인장 변형에 의해 센서의 출력 신호는 정현파 형태를 나타낸다. 그러나 개발된 제어기로 위상을 제어하면 위상은 Quadrature 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.

#### 4.2 연필심 파손 실험

개발된 안정화 제어 광섬유 센서 시스템의 파손 신호 취득 가능성을 알아보기 위해 연필심 파손 실험을 수행하였다. 본 실험을 위해 4.1 절에서 위상 제어 실험을 위해 준비한 복합재 시편을 이용하였다. 시편에 부착된 G-EFPI 센서는 Fig. 2 에서 보여준 안정화 제어 시스템에 연결하였다. 또한 연필심 파손 실험 시 기준 신호를 취득하기 위해 광섬유 센서가 부착된 시편의 반대 면 중앙에 PZT (Disk type PZT, FUJI CERAMIC, JAPAN)을 부착하였다. Fig. 6 에서와 같이 시편의 양쪽은 고정 지지(jig)를 이용해 클램핑(clamping) 하였다. 그리고 파손 신호를 재현하기 위해 2H 연필심을 시편의

한쪽 끝에 부착하여 강제로 파손시켰다.

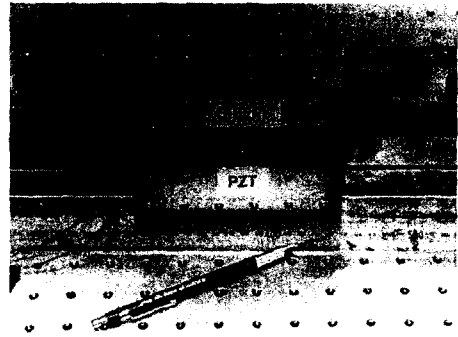


Fig. 6 Schematic of the experimental setup for a lead pencil-break test

Fig. 7 에서와 같이 연필심 파손으로 재현된 파손 신호는 시편에 부착된 G-EFPI 센서를 이용해 성공적으로 취득 되었다. 신호를 자세히 살펴보면, 신호 초반에 고주파 파손 신호가 잘 취득 되었고 후반부에 구조 진동으로 보이는 진동 신호 역시 잘 취득 됨을 확인할 수 있다.

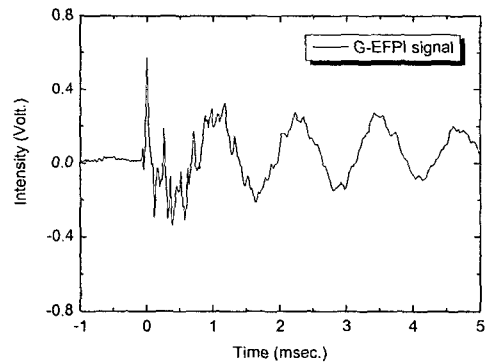


Fig. 7 Simulated acoustic emission induced by a lead pencil-break

## 5. 결론

본 논문에서는 EFPI 센서 시스템의 위상을 일정하게 유지시킬 수 있는 안정화 시스템을 개발하였다. 안정화 제어 광섬유 센서 시스템은 광대역 파장 레이저, 가변 F-P 필터 그리고 필터를 제어할 수 있는 전자 회로 시스템으로 구성하였다. 이렇게 구성된 센서 시스템을 이용해 정적 인장 변형에 의해 발생하는 위상 변화를 Quadrature 지점에 유지할 수 있는지 복합재료 시편의 인장 실험을 통해 검증하였다. 마지막으로 연필심 파손 실험

험을 통해 개발된 안정화 제어 광섬유 센서 시스템이 파손 신호를 훌륭히 취득함을 보였다.

## 후 기

본 연구는 2000 년도 과학기술부의 국가지정연구실(National Research Lab., NRL) 사업지원(과제번호: 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, pp.37-46, July 1992.
- [2] 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, N5-N9, 2002.
- [3] John F. Dorigi, 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, pp. 820-824, September 1990.
- [4] 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. pp. 1-5, 2003.