

## 토목 구조물 건전성 평가를 위한 무아래 프린지 기법 광섬유 가속도계 시스템 개발

김대현<sup>†</sup> · Maria Q. Feng

### Geometric moire fringe fiber optic accelerometer system for monitoring civil infrastructures

Dae-Hyun Kim<sup>†</sup> and Maria Q. Feng

#### Abstract

This paper presents a novel fiber optic accelerometer system for monitoring vibration of large-size structures. The system is composed of one (or multiple) sensor head, a light control unit and a signal processing unit. The sensing mechanism of the sensor head is based on a novel integration of the moire fringe phenomenon with fiber optics to achieve a robust performance in addition to its immunity to EM interference, easy cabling, and low cost. In this paper, a prototype of the fiber optic accelerometer system has been developed successfully. A low-cost light control unit has been developed to drive the system's optic and electronic components. A unique algorithm has also been developed to derive the sensor's acceleration from the raw signals of the light control unit; it is implemented via a separate signal processing unit. Finally, the shaking table tests successfully demonstrate the performance and the potential of the moire fringe fiber optic sensor system to monitor the health of civil infrastructures.

**Key Words :** fiber optic, accelerometer, moire fringe, monitoring, civil structure

#### 1. 서 론

대형 지진, 홍수, 산불 및 허리케인 등 다양한 자연 재해들에 노출되어 있는 대형 구조물은 갑작스런 붕괴나 사고로 인해 대형 인명 피해를 일으킬 수 있다. 특히 교량, 고속도로, 대형 빌딩, 및 파이프라인과 같은 기간구조물은 상시 안전성을 모니터링하고 주기적인 유지/보수가 필요한 산업기반 구조물이라 할 수 있다<sup>[1]</sup>. 최근 이러한 산업기반 시설 및 구조물의 상시 감시를 위해 구조물의 진동 특성을 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있으며 또한 이를 위한 새로운 센서 시스템의 개발 연구, 특히 가속도계와 같은 진동형 센서 개발 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[2]</sup>. 그러나 실제 토목 구조물에 감시 센서를 적용하기 위해서는 토목 구조물이 갖고 있는 거친 환경에서의 생존성을 보장할 수 있어

야 하고 실제 가설이 용이해야 한다. 특히 전자기적 환경이 열악한 발전소와 철도 설로들은 기존의 전자기반 센서로는 접근이 용이하지 못하다. 또한 실제 대형 기간 구조물의 경우, 설치되는 센서의 수가 상당하고 센서를 연결하는 전기 전선의 길이도 상당히 길어 전자파 차단을 하지 못 할 경우 신호 잡음 문제가 심각하다.

따라서 이러한 어려움을 극복하기 위해 최근에는 무선 센서(wireless sensor)나 광섬유를 이용한 센서 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 무선 센서의 경우, 전력의 안정적인 공급이 다소 어렵고 신호 전달의 안정성이 떨어져 장시간 감시 시스템으로 제약점이 있다. 반면 광섬유를 이용한 광 센서의 경우, 전자기적 잡음에 영향을 받지 않고 원거리 신호의 전달이 효율적이며 나노 크기의 정밀한 측정이 가능하다<sup>[3]</sup>. 따라서 토목 구조물과 같은 대형 구조물에 센서 설치가 기존의 전자기 센서에 비해 용이하며 신호의 안정성 및 정밀도가 높아 최근 토목 구조물로의 광섬유 센서 적용 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[4]</sup>. 하지만 대부분의 토목 구조 용 광섬유 센서 연구들은 변형률과 같은 정적 물

(Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Irvine, CA 92697-2175, USA)

<sup>†</sup>Corresponding author: daehk@uci.edu

(Received : October 5, 2005, Accepted : October 19, 2005)

리량에 치중되어 있으며, 진동과 같은 동적 물리량의 측정 연구는 상대적으로 미비한 실정이다<sup>15,6)</sup>. 따라서 본 논문에서는 토목 구조물의 진동을 측정할 수 있는 광섬유 가속도계 시스템을 새롭게 제안하고 성공적으로 개발하였다.

개발된 시스템은 센서 감지부, 광/전자 조절부 그리고 신호 처리부 이렇게 세 부분으로 구성된다. 그 중 센서 감지부는 무아레 프린지 광학 현상을 기본 측정 원리로 사용한다. 무아레 프린지 광학 현상 연구는 오랜 역사를 갖고 있으므로 보다 안정된 기술을 통해 신뢰할 수 있는 측정이 가능하다<sup>7)</sup>. 특히, 무아레 프린지 광학 현상의 보다 정밀하고 안정적인 측정을 위해 광섬유 광학 시스템이 적용 된다. 이를 통해 센서 감지부 내에 전자기적 개념을 배제시킬 수 있으며, 최종적으로 전자기적 잡음에 열악한 환경에서도 센서의 사용이 가능해 진다. 또한 초대형 토목구조물에 본 센서를 설치할 경우, 기존 전기선을 이용하는 센서에 비해 신호 전달이 효율적이며 신호 잡음비 역시 향상 된다. 그리고 기존의 무아레 프린지 기법의 적용 시 어려움 이었던 방향성 판단 문제를 해결할 수 있도록 두 개의 서로 다른 지점에서 동일한 무아레 프린지 현상을 감시하도록 설계한다. 또한 신호 처리부에서는 이렇게 측정된 두 개의 신호를 이용해 진동의 크기 뿐 아니라 방향까지 실시간으로 처리할 수 있는 새로운 신호처리 알고리즘이 적용된다. 최종적으로 개발된 광섬유 가속도 센서 시스템의 성능 평가를 위해 진동 테이블 테스트(shaking table test)를 성공적으로 수행하였고, 이를 통해 개발된 광섬유 가속도계 시스템의 가속도 측정 능력과 가능성을 검증하였다.

## 2. 가속도 측정 원리

기본적으로 가속도계는 단자유도 동적 시스템으로서 단일질량  $m$ , 단일 탄성자  $k$  그리고 단일 감쇠기  $c$ 로 구성된다. 그리고 이러한 단자유도 시스템의 동적 지배방정식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m\ddot{x}_0 \quad (1)$$

여기서  $x$ 는 그림 1에서 표현된 것과 같이 센서 내부의 진동자 질량과 센서 케이스 사이의 상대 변위를 나타내며,  $\ddot{x}_0$ 는 센서 외부에서 가해지는 가속도이다. 센서 케이스가 측정하려는 구조물에 완벽하게 부착된다면  $\ddot{x}_0$ 는 센서에 의해 측정되는 가속도가 된다.

수식 (1)은 센서 감지부 내의 질량  $m$ 과 탄성자  $k$ 에 의해 결정되는 고유진동수  $\omega_n$ 와 감쇠자의 감쇠계수  $\zeta$

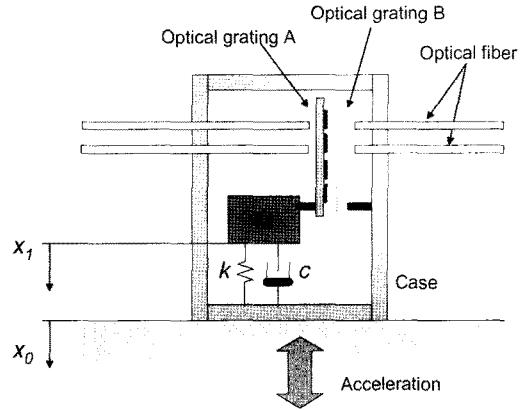


그림 1. 무아레 프린지 광섬유 가속도계 센서 감지부의 기본 계략도

Fig. 1. Conceptual design of moiré fringe-based fiber optic accelerometer.

에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\ddot{x} + 2\omega_n\zeta\dot{x} + \omega_n^2x = \ddot{x}_0 \quad (2)$$

여기서  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  이고  $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$  이다.

외부로부터 입력되는 진동  $\omega$ 에 의해 표현되는 외부의 가속도를  $\ddot{x}_0 = A_{excited}e^{i\omega t}$ 로 가정한다면, 센서 감지부 내부 질량의 상대변위는  $x = D_{response}e^{i\omega t}$ 와 같이 표현된다. 이때 이론적으로  $D_{response}$ 와  $A_{excited}$ 의 비는 아래와 같은 관계식을 만족 시켜야 한다.

$$\frac{D_{response}}{A_{excited}} = \frac{-1}{\omega_n^2 - \omega^2 + 2i\omega_n\omega\zeta} \quad (3)$$

따라서, 센서로 가해지는 가속도와 센서 내부에서 발생하는 진동자 질량의 상대변위 사이에는 일정한 관계가 성립되며, 그 관계는 수식 (4)에 표현된 변형 반응 계수(deformation response factor,  $R$ )와 위상 차이( $\phi$ )로 다시 표현될 수 있다.

$$R = \left| \frac{D_{response}}{A_{excited}} \right| \cdot \omega_n^2 = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (4)$$

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{2\zeta r}{1-r^2}\right)$$

여기서, 변수  $r$ 은  $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ 와 같은 관계에 의해 구해진다.

따라서 센서 감지부 내의 진동자 질량을 작게 하고 탄성자의 탄성계수를 크게 한다면 진동자의 고유진동

수  $\omega_n$ 을 높게 설계할 수 있다. 이런 상태에서 측정하려는 진동의 주파수가 센서 진동자의 고유진동수에 비해 상대적으로 많이 작다면 수식 (4)의 변형 반응 계수  $R$ 은 1에 가까워진다. 따라서 측정하려는 외부의 가속도  $\ddot{x}_0$ 는 센서 내부 진동자의 상대변위  $x$ 와 비례관계를 갖게 되어 결국 진동자의 상대변위를 측정함으로써 외부의 가속도를 쉽게 측정할 수 있게 된다. 본 논문에서도 센서 내부 진동자의 상대변위를 측정함으로써 외부의 가속도를 측정할 수 있도록 센서를 설계하였으며, 특히 이 상대변위를 측정하기 위해 새롭게 무아레 측정법과 광섬유 광학 기술이 적용되었다.

그림 1은 본 논문에서 새롭게 제안한 광섬유 가속도계 센서 감지부의 계략도를 보여준다. 그림에서와 같이 센서는 단일 질량, 단일 탄성자 그리고 단일 감쇠자로 구성된 단자유도 시스템이다. 하지만, 기존의 일반적인 가속도계와 다르게, 광섬유 가속도계 센서는 두 개의 광격자판(optical grating panel)이 센서의 진동자와 센서 케이스에 각각 부착된다. 그리고 네 개의 다중모드 광섬유를 두 개씩 짝을 지어 광격자판에 수직이 되게 정렬시켰다. 두 개의 광섬유는 빛을 내보내는 광원과 나머지 두 개는 광검출기에 각각 연결된다. 결국, 센서 내부 진동자의 상대 변위를 측정하기 위한 새로운 방법으로 광격자판에 의한 무아레 측정법이 적용되고, 이러한 무아레 프린지 변화를 보다 안정적이고 정밀하게 측정하기 위한 방법으로 광섬유 광학 시스템이 새롭게 적용된 것이다.

그림 1에서와 같이 두 광격자판 사이의 상대변위는 진동자와 센서 케이스 사이의 상대변위와 동일하므로, 두 광격자판 사이의 상대변위를 측정함으로써 외부로 들어오는 가속도를 측정할 수 있게 된다. 이론적으로 그림 2에서와 같이 동일 피치 간격  $\theta$ 를 갖는 두 개의 광격자판이 미소의 어긋남 각도  $D$ 를 갖고 서로 평행하게 겹쳐지면 빛이 통과되는 부분과 그렇지 못한 부분이 일정한 주기를 갖고 반복적으로 발생한다<sup>[7]</sup>.

이때  $x$  방향으로 두 격자판 사이의 상대변위가 발생하면 무아레 프린지는 일정 간격  $D$ 를 유지하며  $y$  방향으로 이동하게 된다. 이론적으로  $x$  방향으로의 상대 변위가 격자판의 피치 간격인  $d$ 만큼 발생하면 무아레 프린지는 프린지 간격인  $D$ 만큼 이동하게 된다. 결과적으로  $x$  방향의 미소 변위를  $y$  방향의 대변형으로 인식할 수 있게 된다. 또한 프린지 간격  $D$ 는 관계식  $D = d/\theta$ 와 같이 격자판의 피치 간격  $d$ 와 어긋남 각도  $\theta$ 에 의해 결정된다. 따라서 어긋남 각도를 작게 하면 할수록  $D$ 는 점점 커져 더욱 정밀한 측정이 가능하게 되며 이는 센서의 정밀도 향상에 영향을 준다.

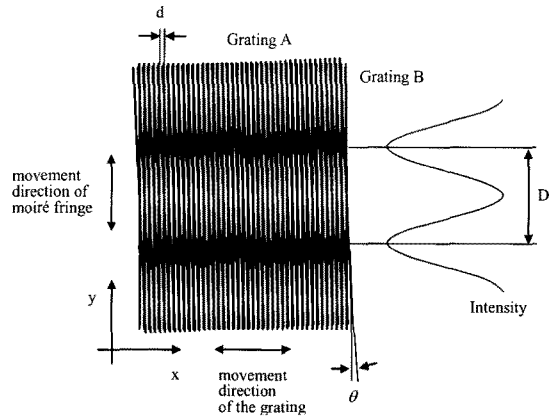


그림 2. 두 광격자판을 이용한 무아레 검출법  
Fig. 2. Moiré fringes for displacement amplification.

결국, 두 격자판 사이의 무아레 프린지 패턴의 변화를 측정함으로써 두 격자판 사이의 상대변위는 측정된다. 그러나 이 상대변위의 방향 변화에 대한 정보는 얻기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 상대변위의 크기와 방향을 동시에 검출하기 위해,  $y$  방향으로  $D/4$ 만큼의 사이 간격을 갖는 두 지점에서 동일한 무아레 프린지 패턴의 변화를 동시에 검출하도록 센서 감지부를 설계하였다. 이를 위해 그림 1에서와 같이 두 개의 광섬유를  $D/4$ 만큼의 사이 간격을 두고 위치시킨다. 또한 광격자판 반대쪽 역시 두 개의 광섬유를 앞서 설명한 두 광섬유와 정확히 마주하도록 정렬시킨다. 이 경우, 한쪽 광섬유에서 발진한 광원은 무아레 프린지 패턴이 형성된 두 광격자판을 통과하고 광검출기에 연결된 다른 광섬유로 입사되어 광격자판에서 발생한 무아레 프린지 패턴의 변화를 감지하게 된다. 마지막으로 본 논문에서 제안한 신호처리 알고리즘을 이용해 측정된 두 개의 신호를 진동자의 상대변위 크기와 방향 정보로 변환시킨 후, 수식 (4)를 이용해 최종의 가속도가 측정된다.

### 3. 신호 처리 원리

그림 2에서 처럼 두 광격자판의 상대변위가 한쪽 방향으로 일정하게 증가하면 광섬유로 측정된 빛의 세기는 광섬유의 초점 영역이 유한한 크기를 갖고 있기 때문에 정현파 형태의 신호로 검출된다. 그리고 앞서 설명했듯이 본 논문에서는 그림 1에서와 같이 두 개의 광섬유를 사용하기 때문에 동일한 변위 변화에 대해 두 개의 무아레 프린지 변화 신호를 동시에 취득할 수 있게 된다. 이때 두 광섬유의 사이 간격은 무아레 프린지

지 간극의 4 분의 1이 되도록 설계하기 때문에 두 광섬유를 통해 취득된 두 신호는 위상차가 90도 만큼 발생하는 동일한 신호가 된다. 결과적으로 두 신호는 아래의 수식(5)에서와 같이 광격자판의 피치간극  $d$ 와  $x$  방향의 상대 변위  $x(t)$ 를 이용해 사인(sine)과 코사인(cosine) 함수로 표현 된다.

$$s_1(t) = C_1 \sin\left(\frac{2\pi x(t)}{d}\right) + C_2$$

$$s_2(t) = C_3 \sin\left(\frac{2\pi x(t)}{d} + \frac{\pi}{4}\right) + C_4 = C_3 \cos\left(\frac{2\pi x(t)}{d}\right) + C_4 \quad (5)$$

여기서  $C_1$ 와  $C_2$ 는 비례상수이며  $C_3$ 와  $C_4$ 는 신호의 DC(Direct Current) 레벨 값들이다. 수식 (5)의 신호들은 정규화(normalization)를 통해 다음의 수식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{s}_1(t) = \frac{s_1(t) - C_2}{C_1} = \sin\left(\frac{2\pi x(t)}{d}\right)$$

$$\bar{s}_2(t) = \frac{s_2(t) - C_4}{C_3} = \cos\left(\frac{2\pi x(t)}{d}\right) \quad (6)$$

상대변위  $x(t)$ 는 수식 (6)에 표현된 두 신호를 수식 (7)과 같은 관계식에 적용하여 계산될 수 있다.

$$x(t) = \frac{d}{2\pi} \text{unwrap}\left(\arctan\left(\frac{\bar{s}_1}{\bar{s}_2}\right)\right) \quad (7)$$

여기서 함수  $\text{unwrap}$ 은 arctangent 함수 결과의 위상 각 불연속점들을 서로 연결해 주는 역할을 하게 된다. 결국, 수식 (7)을 통해 얻어진 상대변위  $x(t)$ 는 수식 (4)에 나타난 것과 같이, 센서의 동적 인자(parameter)인 고유진동수와 감쇠 계수를 이용해 최종적인 외부의 가속도로 변환 될 수 있다.

#### 4. 광섬유 가속도계 시스템 시제품 개발

그림 3은 본 연구에서 개발 성공한 광섬유 가속도계 시스템을 보여준다. 그림에서와 같이, 개발된 광섬유 가속도계 시스템은 센서 감지부, 광/전자 조절부 그리고 신호 처리부로 구성 된다.

광섬유 가속도계 시스템 시제품의 센서 감지부는 크기가 33\*33\*48 mm이며 무게는 대략 150 g 정도로 기존의 토목 구조용 가속도계 센서에 비해 상대적으로 가볍고 작은 크기이다. 센서의 내부에는 유리(quartz)로 제작된 두 개의 광격자판( $d=0.02$  mm, 18.0\*5.0\*0.8 mm)이 0.5 mm 이하의 간극을 두고 서로 마주하도록

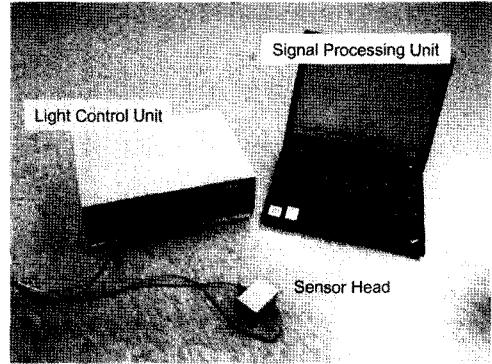


그림 3. 개발된 광섬유 가속도계 시스템 시제품  
Fig. 3. Prototype of fiber optic accelerometer system.

설계한다. 그리고 이들 광격자판에 의해 발생하는 부아레 프린지의 변화를 추적하기 위해 4개의 광섬유 수신부를 그림 1에서와 같이 광격자판과 서로 1.0 mm 이하의 간극을 갖고 서로 마주하도록 설치한다. 또한 단자유도 시스템의 구성을 위해 판 스프링(spiral type)과 감쇠기(air damper)를 사용하여 센서 감지부를 설계한다. 마지막으로 센서 감지부로부터 나온 네 가닥의 광섬유(CORNING 다중모드 광섬유, 62.5/125  $\mu$ m) 라인은 광/전자 조절부와 연결된다. 본 연구에서 개발된 광/전자 조절부는 여덟 개의 센서를 장착할 수 있도록 설계하였으며 다른 광섬유 센서 시스템과의 가격 경쟁력을 높이기 위해 상대적으로 가격이 저렴한 광소자(1300 nm LED, InGaAs Photo detector)들을 이용해 구성하였다. 그리고 센서 시스템의 이동성을 향상시키고, 전원을 구하기 힘든 측정 환경에서도 사용이 가능하도록 충전지를 내장하였다. 마지막으로 센서 감지부에서 발생된 두 개의 기본 신호를 실제 가속도로 변환해주는 신호 처리부는 C++ 언어를 이용해 자체 개발하였다. 본 연구에서 개발된 프로그램을 이용할 경우, 센서의 신호를 실시간으로 쉽게 가속도로 변환시킬 수 있다.

#### 5. 광섬유 가속도계 센서의 실험 검증

제 2장 가속도 측정 원리에서 설명했듯이 센서로부터 측정된 상대변위를 실제 가속도로 변환해 주기 위해서는 센서 내부 단자유도 시스템의 고유진동수와 감쇠계수를 이용해야 한다. 따라서 본 연구에서 개발한 시제품 센서 감지부 역시 실제 가속도계 센서로 사용되기 위해서는 우선 센서 자체의 고유진동수와 감쇠계수를 측정해야 한다. 본 연구에서는 이들 두 개의 센서 인자(parameter)를 측정하기 위해 진동테이블(shaking

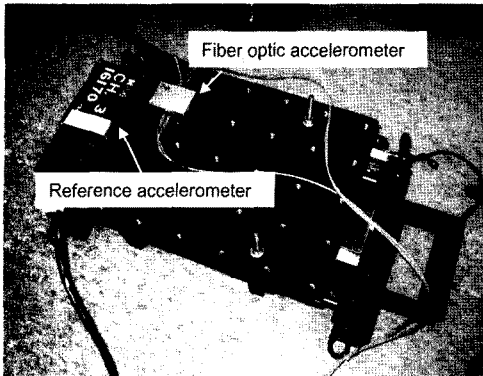


그림 4. 진동테이블 실험 장치  
Fig. 4. Setup for shaking table test.

table) 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 기준 가속도계 센서와 개발된 광섬유 가속도계 센서를 동시에 사용하여 제 2장에서 설명한  $|D_{response}/A_{excited}|$ 를 측정하였다. 이를 통해 얻어진  $|D_{response}/A_{excited}|$ 값과 수식 (4) 이용해 얻을 수 있는 두 변형 반응 계수 값을 서로 잘 일치시킬 수 있는 고유진동수와 감쇠계수를 trial and error 방법을 이용해 찾아냈다.

### 5.1. 실험 과정

그림 4에서처럼, 본 연구에서 개발된 시제품 광섬유 가속도계 센서와 기준 센서(Kinematics, FBA-11)를 진동테이블(Shaker : APS-Dynamics, model 113)에 부착하였다. 본 연구에서 사용한 기준 센서는 진동자 서보(servomotor) 제어 방식의 센서로서 동적 영역(dynamic bandwidth)이 DC-50 Hz로 충분히 큰 센서이다. 그림에서와 같이 두 센서를 장착한 후에 신호 발전기(function generator)를 이용해 여러 주파수대의 정현파 신호를 진동 테이블에 입력시켜 센서에 진동을 가하였다. 본 실험에서 사용한 주파수는 0.5 Hz, 1.0 Hz, 2.5 Hz, 5.0 Hz, 10.0 Hz, 15.0 Hz, 16.0 Hz, 17.0 Hz, 18.0 Hz, 19.0 Hz, 20.0 Hz, 21.0 Hz, 21.5 Hz, 22.0 Hz, 23.0 Hz, 24.0 Hz, 25.0 Hz, 30.0 Hz 그리고 40 Hz로 진동 테이블을 다양한 주파수로 가진 시켰다. 각각의 주파수에서 5회의 반복 실험을 수행하였으며, 실험을 통해 각 주파수에 따른  $|D_{response}/A_{excited}|$ 를 측정하였다. 측정된 진동 신호의 진폭을 보다 정확하게 측정하게 위해, 진동테이블의 진동 주파수에 따라 신호의 샘플링 주파수를 12.5 khz에서 100 khz 범위에서 높게 선택하였다. 또한 정밀한 실험을 위해 고성능 오실로스코프(Tektronix, TDS5034B)를 이용해 센서의 신호를 취득하였다.

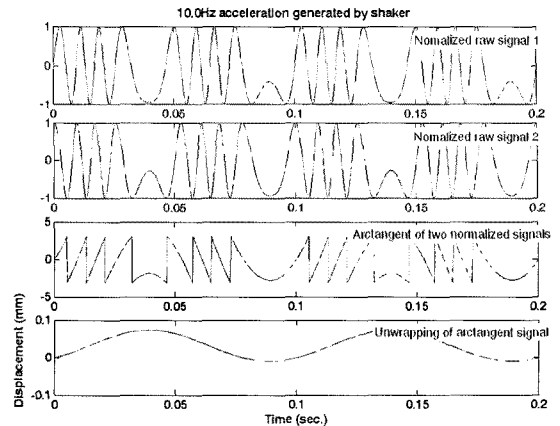


그림 5. 신호 처리 과정  
Fig. 5. Sequence of signal processing.

### 5.2. 실험 결과와 토의

그림 5는 진동테이블을 10.0 Hz로 가진 하면서 측정된 광섬유 가속도계 센서의 두 기본 신호를 이용해 센서 진동자의 상대변위를 구하는 신호처리 과정을 보여주고 있다.

처음 두 개의 신호는 진동 시 센서에서 발생된 두 개의 기본 신호를 정규화한 결과를 보여주고 있다. 세 번째 신호는 제3장에서 설명한 두 신호에 arctangent를 적용하여 상대 변위로 계산된 신호를 보여주고 있다. 마지막 신호는 arctangent 적용 후 계산된 위상각 신호의 불연속점들을 서로 연결하고 수식 (7)에 의해 결정된 비례계수를 적용하여 구해진 센서 진동자의 상대변위를 나타낸다. 이렇게 구해진 상대변위는 아래의 진동테이블 실험을 통해 얻어진 센서 진동자의 고유진동수와 감쇠 계수를 이용해 최종 가속도로 변환된다.

그림 6은 실험과 이론식을 통해 얻어진 주파수의 변화에 따른 센서의 변위반응계수  $R$ 의 변화를 보여주고 있다. 개발된 광섬유 가속도계 센서의 고유진동수와 감쇠계수를 찾기 위해 실험을 통해 구해진 변위 반응 계수와 수식 (4)를 통해 구해진 이론식을 비교하였다. 두 개의 결과를 얻기 위해 임의의 고유진동수와 감쇠계수를 이용하였으며 trial and error 방법을 통해 실험 값과 이론 값을 서로 잘 일치시킬 수 있는 고유진동수와 감쇠계수를 찾아냈다. 그림 6에서 보는 것과 같이, 고유진동수 22.45 Hz와 12%의 감쇠계수를 이용할 경우, 실험 결과와 이론 값이 정확히 일치함을 확인할 수 있었다. 이 같은 실험을 통해, 본 연구를 통해 개발된 광섬유 가속도계 센서의 고유진동수와 감쇠계수를 성공적으로 찾아낼 수 있었다. 또한 각 주파수에 따른 5회

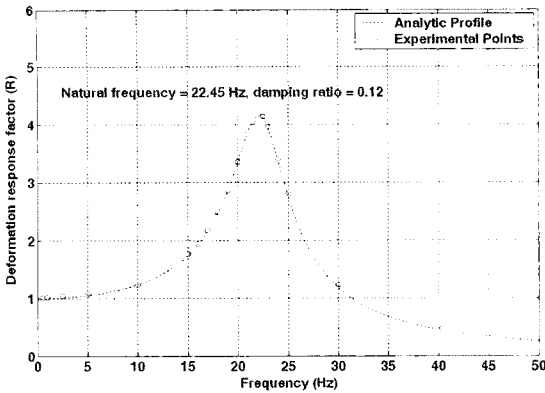


그림 6. 실험과 이론식을 통해 얻은 변위반응계수 비교  
Fig. 6. Comparison of measured and theoretical deformation response factors.

의 반복 실험을 통해 최대 표준편차가 1% 이내임을 확인하였으며 이를 통해 실험의 재현성을 검증하였다.

그림 6을 통해 변위반응계수가 1에 가깝고 동시에 선형성이 보장되는 동적 범위(dynamic bandwidth)를 측정된 결과, 5 Hz 미만의 범위에서 실제 가속도와 개발된 광섬유 가속도계로 측정된 가속도 사이의 오차가 5% 미만으로 발생하고 선형성 또한 보장됨을 확인하였다. 결과적으로 개발된 광섬유 가속도계 센서가 5.0 Hz 미만의 임의의 가속도를 5% 미만의 오차를 갖고 정확히 측정할 수 있음을 검증하였다. 이 같은 동적 범위는 5.0 Hz 미만의 고유 진동수를 갖는 매우 큰 토목 기간구조물의 모니터링을 위해 적당하다고 할 수 있다. 또한 개발된 센서 시스템이 단자유도 시스템임을 실험을 통해 확인했기 때문에 동적 범위 역시 센서 내부의 질량과 탄성계수 그리고 감쇠계수의 적절한 설계를 통해 충분히 조절할 수 있다. 표 1은 개발된 광섬유 센서 시스템의 성능지수를 보여준다.

그림 7은 진동테이블 실험을 통해 찾아낸 고유진동수와 수식 (4)를 이용해 광섬유 가속도계 센서로 측정된 가속도를 보여주고 있다. 0.5 Hz, 1.0 Hz 그리고 5.0 Hz의 가속도를 각각 기준 가속도계 센서 그리고 본 연구에서 개발한 광섬유 가속도계 센서로 측정하여 각각

표 1. 개발된 광섬유 가속도계 시스템의 성능지수  
Table 1. Specifications of fiber optic acceleration system

측정 범위 (span)	-1 g to +1 g
동적 범위 (dynamic bandwidth)	DC to 5 Hz
선형성 (linearity)	<5 %

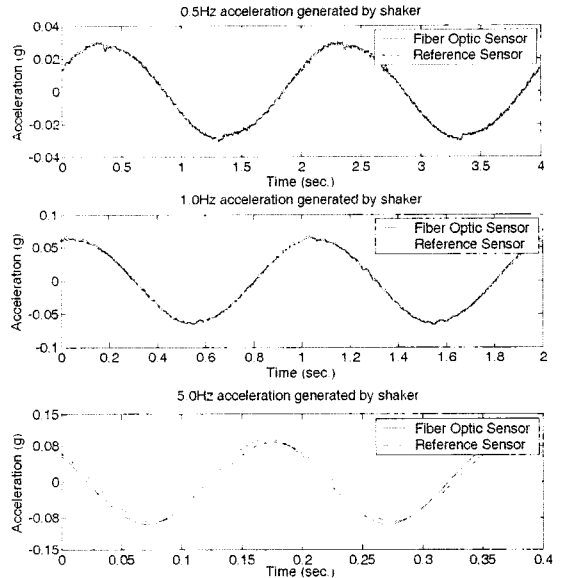


그림 7. 광섬유 가속도계와 기준 센서로 측정된 가속도 비교

Fig. 7. Comparison of accelerations measured by fiber optic sensor and by reference.

그 결과를 비교하였다. 그림에서와 같이 세 가지 경우 모두, 두 결과가 5% 미만의 오차를 갖고 잘 일치함을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문은 토목 기간구조물의 건전성 모니터링을 위해 개발된 새로운 개념의 광섬유 가속도계 시스템을 제안하였다. 제안된 신개념의 광섬유 가속도계 센서 시스템은 센서 감지부, 광/전자 조절부 그리고 신호 처리부로 구분되며 시제품의 단계까지 성공적으로 개발되었다. 특히 센서 감지부 내부의 단자유도 시스템 진동자의 상대변위를 측정하기 위해 무아레 측정 기법과 광섬유 광학 기술을 새롭게 적용하였다. 또한 광/전자 조절부 역시 기존의 광섬유 센서 시스템에 비해 가격 경쟁력을 갖게 하기 위해 상대적으로 저렴한 광소자들로 시스템을 구성하였고 신호 처리부는 센서 감지부에서 측정된 두 개의 기본 신호를 이용해 측정하려는 가속도의 크기뿐만 아니라 방향의 변화도 실시간으로 감지할 수 있는 알고리즘이 적용되었다. 마지막으로 진동테이블 실험을 통해 개발된 센서 감지부의 고유진동수와 감쇠계수를 측정하였으며 이를 통해 센서의 동적 범위를 성공적으로 측정하였다. 최종적으로 개발된 광

섬유 가속도계 센서는 DC 레벨에서부터 5.0 Hz까지의 임의의 진동을 5%의 오차범위 내에서 성공적으로 측정함을 보였으며 센서 감지부 내부의 질량, 탄성자 그리고 감쇠자의 적절한 조절을 통해 이 동적 범위 또한 증가시킬 수 있는 가능성을 확인하였다.

## 후 기

본 논문은 미국 National Science Foundation(Award No. CMS-0329572)과 한국 학술진흥재단의 해외 Post-doc. 연수지원사업(Grant No. D00276)의 연구지원에 의해 연구되었음.

## 참고 문헌

- [1] American Society of Civil Engineers (ASCE), "Infrastructure Report Card", *ASCE News*, vol. 30, no. 3, pp. 1-7, 2005.
- [2] Feng, M. Q. and Kim, J. M., "Identification of a dynamic system using ambient vibration measurements", *Journal of Applied Mechanics (ASME)*, vol. 65, no. 2, pp. 1010-1023, 1998.
- [3] 박상욱, 김대현, 김천곤, "광섬유 EFPI 센서를 이용한 나노 이송장치의 개발", *센서학회지*, 제14권, 제5호, pp. 302-307, 2005.
- [4] H-N Li, D-S Li, and G-B Song, "Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering", *Engineering Structures*, vol. 26, pp. 16471657, 2004.
- [5] D-H Kim, B-Y Koo, C-G Kim, and C-S Hong, "Damage detection of composite structures using a stabilized extrinsic fabry-perot interferometric sensor system", *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, no. 3, pp. 593-598, 2004.
- [6] K. Kageyama, H. Murayama, I. Ohsawa, M. Kanai, K. Nagata, Y. Machijima, and F. Matsumura, "Acoustic emission monitoring of a reinforced concrete structure by applying new fiber-optic sensors", *Smart Mater. Struct.*, vol. 14, S52-S59, 2005.
- [7] D. Post, B-T Han and P. Ifju, *High Sensitivity Moire* (New York : Springer-Verlag.), 1994.



김 대 현

- 1997년 한국과학기술원 항공우주공학과 졸업(공학사)
- 1999년 한국과학기술원 항공우주공학과 졸업(공학석사)
- 2004년 한국과학기술원 항공우주공학과 졸업(공학박사)
- 2004년~현재 University of California, Irvine 토목공학과 박사 후 연수 연구원
- 주관심분야 : 스마트 구조, 복합재료, 광섬유 센서, 구조 건전성 모니터링



Maira Q. Feng

- 1982년 Nanjing Institute of Technology, Mechanical Engineering(공학사)
- 1987년 University of Tokyo, Mechanical Control Engineering(공학석사)
- 1992년 University of Tokyo, Mechanical Engineering(공학박사)
- 1992년~현재 University of California, Irvine 토목공학과 교수
- 주관심분야 : Civil Structures, Health monitoring, Sensor system