

구조물 건전성 감시를 위한 무아레식 광섬유 경사계 센서 개발

Moire-Fringe-Based Fiber Optic Tiltmeter for Structural Health Monitoring

김대현

Dae-Hyun Kim

초 록 본 논문에서는 대형 구조물의 감시를 위한 새로운 광섬유 경사계를 제시한다. 이 경사계 시스템은 센서 헤드, 광 조절부 그리고 신호처리부로 이루어진다. 또한 본 시스템은 무아레 프린지 현상의 원리를 이용하여 광섬유라는 새로운 광측정 장치를 적용하였다. 이를 통해, 센서 시스템은 가격이 저렴하고 전자기학 잡음에 강하며 설치가 용이해 졌다. 실제로 본 논문에서는 저비용의 광전자 구동 시스템을 포함한 실제 시제품을 성공적으로 개발하였다. 그리고 실제 실험을 통해 센서의 선형성을 포함한 성능을 검증하였고 이를 통해 실제 토목구조물의 처짐각을 측정할 수 있는 광섬유 경사계 시스템으로서의 가능성과 성능을 입증하였다.

주요용어: 광섬유 경사계, 구조 건전성 감시, 무아레 프린지

Abstract This paper presents a novel fiber optic tiltmeter system for the health monitoring of large-size structures. The system is composed of a 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 tiltmeter system has been developed successfully. A low-cost light control unit has been developed to drive the system's optic and electronic components. From an experimental test, the fiber optic tiltmeter is proven to be a prospective sensor for the monitoring of the tilting angle of civil structure with a good linearity. Finally, the test also successfully demonstrates the performance and the potential of the novel fiber optic tiltmeter system to monitor the health of civil infrastructures.

Keywords: Fiber Optic Tiltmeter, Structural Health Monitoring, Moiré Fringe

1. 서 론

최근 토목/건축 구조물들의 대형화 및 기존 산업 기반 시설 구조물의 노후화로 인해 구조물의 안전성 확보를 위한 첨단 기술의 필요성이 대두되고 있다. 특히 최근에는 여러 가지 센서 및 모니터링 기술이 대형 토목/건축 구조물에 적용되어 새로운 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring) 기술들이 개발 되고 있다. 또한 여러 다양한 필요 기술 중에 거친 토목 환경 구조물에서의 생존성을

보장하고 정확/정밀도를 보다 높일 수 있는 새로운 센서의 개발 기술은 매우 중요하다. 따라서 최근에는 광학/기계/화학/전기 등 다양한 물리 분야의 원리를 이용한 구조 건전성 모니터링 센서가 다양하게 개발되고 있으며, 구체적으로 구조 건전성 모니터링을 위한 변형량, 온도, 가속도, 경사도 등의 다양한 물리량들을 측정할 수 있는 새로운 센서들이 개발되고 있다[1,2]. 본 논문에서는 이들 다양한 물리량 중에 구조물의 처짐을 모니터링 하기 위한 경사계를 새롭게 제안한다.

현재 경사계로서 많이 활용되고 있는 서보 가속도계 형 경사계의 경우, 경사계에 작용하는 회전에 의해 발생하는 진자(pendulum)의 움직임을 전자기학적인 방법으로 계측하게 된다. 그러나 이러한 전자기학적 방법을 이용한 센서들은 발전소, 고속전철 등 고전자기력이 발생하는 환경에서는 사용에 제약이 따른다. 또한 전원 공급 및 신호 전달을 위해 사용되는 리드 선(lead wire)을 길게 이용할 경우, 신호에 잡음이 심각하게 발생하여 센서의 정밀도를 보장할 수 없는 등의 문제점을 발생 시킨다. 따라서 이러한 단점 및 문제점을 보완하기 위해 최근에는 신호의 전달 및 전원의 공급을 일반 전선이 아닌 광섬유로 대체하려는 많은 시도들이 이루어지고 있다. 본 논문에서도 센서 내부에 전자기학적 부품의 사용을 제한하고 신호의 전달 및 전원 공급에 사용되는 전선 또한 사용을 최소화 할 수 있는 새로운 형태의 광섬유 경사계 센서를 제안한다. 이렇듯 광섬유를 이용한 광 센서의 경우, 전자기적 잡음에 영향을 받지 않고 원거리 신호의 전달이 효율적이며 나노 크기의 정밀한 측정이 가능하다[3]. 따라서 토목 구조물과 같은 대형 구조물에 센서 설치 기준의 전자기 센서에 비해 용이하며 신호의 안정성 및 정밀도가 높아 최근 토목 구조물로의 광섬유 센서 적용 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. 하지만 대부분의 토목 구조 용 광섬유 센서 연구들은 변형률이나 온도과 같은 정적 물리량 측정에 치중되어 있으며, 경사계와 같은 처짐을 측정할 수 있는 센서 개발은 미비한 실정이다[4,5]. 최근에는 무아레 프린지 현상을 이용한 신개념의 광섬유 가속도계 센서가 연구 개발되고, 대형 토목 구조물에 적용되어 구조물의 건전성 모니터링 연구에 성공적으로 사용되고 있다[6,7]. 본 연구에서도 무아레 프린지 현상을 이용한 광섬유 가속도 센서 시스템을 이용해 구조물의 처짐등을 모니터링 할 수 있는 새로운 광섬유 경사계 시스템을 구축하고자 하였다.

본 연구에서 개발한 광섬유 경사계 센서의 원리는 기본적으로 서보 가속도계형 경사계의 원리와 흡사하다. 따라서 센서 내부 구성은 진자 형태의 질량(mass)과 센서 시스템의 동적 안정성을 높이기 위한 탄성자(spring) 그리고 감쇠자(damper)로 이루어진다. 또한 이러한 기계 구성은 보통 가속도를 측정하는 가속도계와 동일하지만 경사계의 경우, 외부에서 작용하는 중력 가속도(gravity) 만을 측정한다는 점에서 일반 가속도계와 차이를 나타낸

다. 다시 말해, 경사계는 일종의 단축 가속도계로서 기준 축과 중력 가속도 방향과의 불일치로 발생하는 측정 정적 가속도의 차이를 이용해 기준 축의 회전량, 즉 경사 정도를 측정할 수 있게 된다. 본 연구에서는 무아레 기법을 적용한 실제 광섬유 경사계 센서 시스템을 개발하고 실제 각도 측정 실험을 통해 개발된 광섬유 경사계 센서 시스템의 오차와 선형성을 성공적으로 검증하였다.

2. 광섬유 경사계 센서의 측정 원리

본 연구에서 소개하는 광섬유 경사계 센서는 일반적인 서보 가속도계의 기계 구조인 단자유도 동적 시스템으로서 Fig. 1과 같이 단일 질량 m , 단일 탄성자 k 그리고 단일 감쇠기 c 로 구성된다. 이러한 단자유도 시스템의 동적 지배방정식은 아래와 같이 2차 미분 방정식으로 간단히 표현된다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -\ddot{u}_0 \tag{1}$$

여기서 u 는 Fig. 1에서 표현된 것과 같이 센서 내부의 진동자 질량과 센서 케이스 사이의 상대 변위 $u_1 - u_0$ 를 나타내며, \ddot{u}_0 는 센서 외부에서 가해지는 가속도이다. 센서 케이스가 측정하려는 구조물에 완벽하게 부착된다면 \ddot{u}_0 는 센서에 의해 측정되는 가속도가 된다.

식 (1)은 센서 감지부 내의 질량 m 과 탄성자 k 에 의해 결정되는 고유진동수 ω_0 와 감쇠자의 감쇠계수 ζ 에 의해 다음과 같이 다르게 표현될 수 있다.

$$\ddot{u} + 2\omega_0\zeta\dot{u} + \omega_0^2u = -\ddot{u}_0 \tag{2}$$

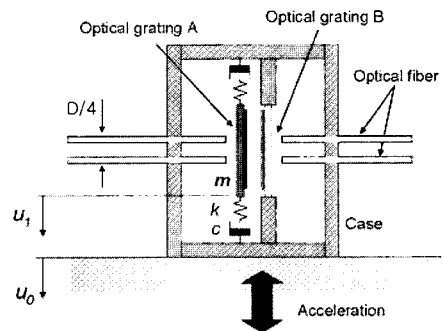


Fig. 1 Conceptual design of novel fiber optic accelerometer

여기서 $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 이고 $\zeta = \frac{c}{2m\omega_0}$ 이다.

외부로부터 입력되는 진동 ω 에 의해 표현되는 외부의 가속도를 $\ddot{u}_0 = A_{excited} e^{j\omega t}$ 로 가정한다면, 센서 감지부 내부 질량의 상대변위는 $u = D_{response} e^{j\omega t}$ 와 같이 표현 된다. 이때 이론적으로 $D_{response}$ 와 $A_{excited}$ 의 비는 아래와 같은 관계식을 만족 시킨다.

$$\frac{D_{response}}{A_{excited}} = \frac{-1}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\omega_0\omega\zeta} \quad (3)$$

따라서, 센서에 가해지는 가속도와 센서 내부에서 발생하는 진동자 질량의 상대변위 사이에는 일정한 관계가 성립되고, 그 관계는 아래의 식 (4) 에 표현된 변형 반응 계수(deformation response factor, R) 와 위상 차이 (ϕ) 로 다시 표현될 수 있다.

$$R = \left| \frac{D_{response}}{A_{excited}} \right| \cdot \omega_0^2 = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (4)$$

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

여기서, 변수 r 은 $r = \frac{\omega}{\omega_0}$ 와 같은 관계에 의해 구해진다. 따라서 센서 감지부 내의 진동자 질량을 작게 하고 탄성자의 탄성계수를 크게 한다면 진동자의 고유진동수 ω_0 을 높게 설계할 수 있다. 이런 상태에서 측정하려는 진동의 주파수가 센서 진동자의 고유진동수에 비해 상대적으로 많이 작다면 식 (4)의 변형 반응 계수 R은 1에 가까워진다. 따라서 측정하려는 외부의 가속도 \ddot{u}_0 는 센서 내부 진동자의 상대변위 u 와 비례관계를 갖게 되어 결국 진동자의 상대변위를 측정함으로써 외부의 가속도를 쉽게 측정할 수 있게 된다.

또한 서보 가속도계 형 경사계 센서의 경우, Fig. 2와 같이 경사계가 회전 할 경우 중력 가속도에 의해 발생하는 정적 가속도(static acceleration)가 경사계의 회전각도(α)와 함수 관계를 갖게 된다. 따라서 경사계에서 측정되는 정적 가속도의 변화를 측정함으로써 경사계의 경사각을 계측할 수 있게 된다. 그리고 경사각 변화 속도가 매우 느릴 경우, ω 는 0에 가깝게 되므로 변형 반응 계수 R은 1에 가깝다고 할 수 있다. 따라서 ω_0 를 크게 할수록 동일한 정적 가속도 변형량($A_{excited}$)에 따른 경사계

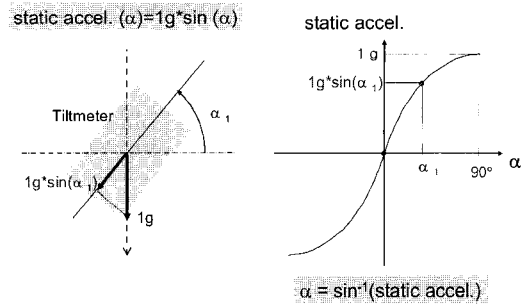


Fig. 2 Mechanism of sensing of tilting angle with accelerometer

센서 내부 질량의 상대 변위($D_{response}$)를 증가시킬 수 있게 되어 경사계의 계측 감도를 높일 수 있게 된다.

결론적으로 식 (4)에 보이는 것 같이, 경사계 센서 내부 질량의 상대변위를 측정함으로써 외부의 정적 가속도를 측정할 수 있게 되고 최종적으로 경사각을 측정할 수 있게 된다. 본 논문에서는 서론에서도 언급했듯이 이러한 질량의 상대변위를 측정하기 위해 새롭게 무아레 측정법과 광섬유 광학 기술을 적용하였다.

앞서 소개한 Fig. 1은 본 논문에서 제안한 광섬유 가속도계 센서 감지부의 내부를 보여준다. 그림에서와 같이 센서는 단일 질량, 단일 탄성자 그리고 단일 감쇠자로 구성된 단자유도 시스템이다. 하지만, 기존의 일반적인 서보 가속도계 형 경사계와 다르게, 광섬유 경사계 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.

Fig. 1에서와 같이 두 광격자판 사이의 상대 변위는 진동자와 센서 케이스 사이의 상대변위와 동일하므로, 두 광격자판 사이의 상대변위를 측정함으로써 외부로 들어오는 가속도를 측정할 수 있게 된다. 이론적으로 Fig. 3에서와 같이 동일 피치 간격 d 를 갖는 두 개의 광격자판이 미소의 어긋남 각도 θ 를 갖고 서로 평행하게 겹쳐지면 빛이 통과

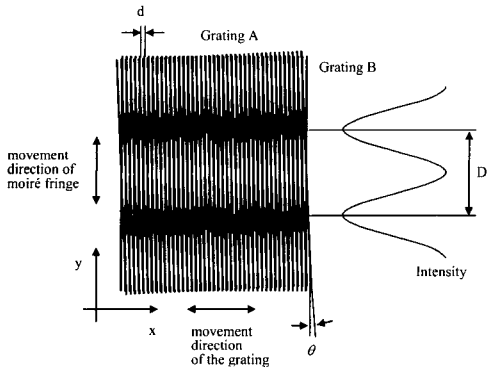


Fig. 3 Moiré fringe phenomena with two grating panels

되는 부분과 그렇지 못한 부분이 일정한 주기 D 를 갖고 반복적으로 발생한다[8].

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 간극인 d 만큼 발생하면 무아레 프린지는 프린지 간극인 D 만큼 이동하게 된다. 결과적으로 x 방향의 미소 변위를 y 방향의 대변형으로 인식할 수 있게 된다. 또한 프린지 간극 D 는 관계식 $D = d/\theta$ 와 같이 격자판의 피치 간극 d 와 어긋남 각도 θ 에 의해 결정된다. 따라서 어긋남 각도를 작게 하면 할수록 D 는 점점 커져 더욱 정밀한 측정이 가능하게 되며 이는 센서의 정밀도 향상에 영향을 준다.

결국, 두 격자판 사이의 무아레 프린지 패턴의 변화를 측정함으로써 두 격자판 사이의 상대변위는 측정된다. 그러나 이 상대 변위의 방향 변화에 대한 정보는 얻기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 상대변위의 크기와 방향을 동시에 검출하기 위해, y 방향으로 $D/4$ 만큼의 사이 간극을 갖는 두 지점에서 동일한 무아레 프린지 패턴의 변화를 동시에 검출하도록 센서 감지부를 설계하였다. 이를 위해 Fig. 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

로 본 논문에서 제안한 신호처리 알고리즘을 이용해 측정된 두 개의 신호를 진동자의 상대 변위 크기와 방향 정보로 변환시킨 후, 식 (4)를 이용해 최종의 정적 가속도를 구할 수 있게 되고 마지막으로 이를 이용해 경사각을 측정하게 된다.

3. 신호 처리 원리

Fig. 3에서 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 Fig. 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 간극은 무아레 프린지 간극의 4분의 1이 되도록 설계하기 때문에 두 광섬유를 통해 취득된 두 신호는 위상차가 90도 만큼 발생하는 동일한 신호가 된다. 결과적으로 두 신호는 다음의 식(5)와 같이 광격자판의 피치간극 d 와 x 방향의 상대 변위 $u(t)$ 를 이용해 사인(sine)과 코사인(cosine) 함수로 표현 된다.

$$\begin{aligned} s_1(t) &= C_1 \sin\left(\frac{2\pi u(t)}{d}\right) + C_2 \\ s_2(t) &= C_3 \sin\left(\frac{2\pi u(t)}{d} + \frac{\pi}{4}\right) + C_4 = \\ &C_3 \cos\left(\frac{2\pi u(t)}{d}\right) + C_4 \end{aligned} \quad (5)$$

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

$$\begin{aligned} \bar{s}_1(t) &= \frac{s_1(t) - C_2}{C_1} = \sin\left(\frac{2\pi u(t)}{d}\right) \\ \bar{s}_2(t) &= \frac{s_2(t) - C_4}{C_3} = \cos\left(\frac{2\pi u(t)}{d}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

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

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

여기서 함수 unwrap은 arctangent 함수 결과의

위상각 불연속점들을 서로 연결해 주는 역할을 하게 된다. 결국, 식 (7)을 통해 얻어진 상대변위 $w(t)$ 는 식 (4)에 나타난 것과 같이, 센서의 동적 인자(parameter)인 고유진동수와 감쇠 계수를 이용해 외부의 가속도를 구할 수 있게 되고 최종적으로 경사각을 측정할 수 있게 된다.

4. 광섬유 경사계 센서 시스템 개발

Fig. 4는 본 연구에서 개발 성공한 광섬유 경사계 센서 시스템을 보여준다. 그림에서와 같이, 개발된 광섬유 경사계 센서 시스템은 센서 감지부, 광/전자 조절부 그리고 신호 처리부로 구성되며 기존의 광섬유 가속도계 센서 시스템과 동일하게 구성된다[6,7].

광섬유 경사계 센서 시스템 시제품의 센서 감지부(sensor head)는 크기가 33*33*48 mm이며 무게는 대략 150g 정도이다. 센서의 내부에는 유리(quartz)로 제작된 두 개의 광격자판($d=0.02$ mm, 18.0*5.0*0.8 mm)이 1.0 mm 이하의 간극을 두고 서로 마주하도록 설계하였다. 그리고 이들 광격자판에 의해 발생하는 무아레 프린지의 변화를 추적하기 위해 4개의 광섬유 수신부를 Fig. 1에서와 같이 광격자판과 서로 1.0 mm 이하의 간극을 갖고 서로 마주하도록 설치하였다. 또한 단 자유도 시스템의 구성을 위해 판 스프링(spiral type)과 감쇠기(air damper)를 사용하여 센서 감지부를 설계하였다. 마지막으로 센서 감지부로부터 나온 네 가닥의 광섬유(corning, 다중모드광섬유, 62.5/125 μ m) 라인은 광/전자 조절부와 연결하였다. 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.

5. 광섬유 경사계 센서 시스템의 성능 검사 실험

본 연구에서는 광섬유 경사계 센서를 이용해 경사각을 측정하기 위해 우선 해당 센서의 주요 사양인 고유진동수를 측정하였고 이를 이용해 경사각 측정 실험을 수행하였다. 그리고 본 실험을 통해 광섬유 경사계 센서의 오차 범위 및 선형성에 대해 심도 있는 고찰을 수행하였다.

5.1. 경사계 센서의 고유진동수 측정

제 2절의 수식 (4)에서와 같이 광섬유 경사계 센서를 통해 경사각을 측정하기 위해서는 경사각 변화에 따른 정적 가속도를 측정해야 한다. 또한 가속도의 측정을 위해서는 경사계 센서의 고유진동수(ω_0)와 감쇠계수(ζ)를 알아야 한다. 그러나 본 연구에서는 경사각 변화 속도가 거의 0에 가까운 상태의 정적 가속도만을 측정하기 때문에 고유진동수만을 측정하면 된다. 따라서 다양한 속도(ω)에 따른 센서의 반응 특성을 알아볼 수 있는 진동 테이블 검사(shaking table test)를 생략하였다. 대신 경사계 센서의 가속도 반응 축을 중력 가속도 방향과 평행하게 설치할 때 경사계로부터 측정되는 가속도가 중력 가속도와 일치해야 한다는 점을 착안하여 해당 경사계 센서의 고유진동수를 측정하였다. 실험은 5회 반복적으로 실시되었으며 측정된 변위량을 수식 (4)에 대입하여 해당 경사계 센서의 고유진동수를 계속하였다. 본 연구에서는 위에 언급한 실험을 통해 사용된 광섬유 경사계 센서의 고유진동수가 22.2 Hz임을 확인하였다.

5.2. 경사계 센서의 성능 분석

본 연구에서 개발한 광섬유 경사계 센서의 경사각 측정 여부를 확인하고 이를 통해 센서의 오차

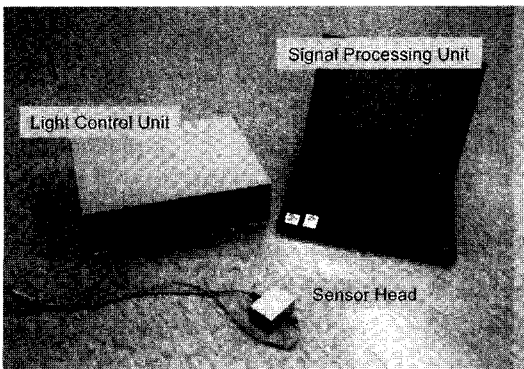


Fig. 4 Prototype of fiber optic tiltmeter system

범위 및 선형성을 파악하고자 한다. 이를 위해 Fig. 4와 같이 광섬유 경사계 센서를 특수 지그 (jig)에 부착하고 센서를 15도 간격으로 회전시키며 정적 가속도를 측정하였다. 본 실험에 앞서 측정기를 이용해 기저판 (base stage)의 수평을 확인 하였으며 실제 각도 측정 실험은 5회 반복 실시되어 평균 값을 취하였다.

Fig. 5는 15도 간격으로 광섬유 경사계를 회전시키며 정적 가속도를 측정된 결과를 보여준다. 실

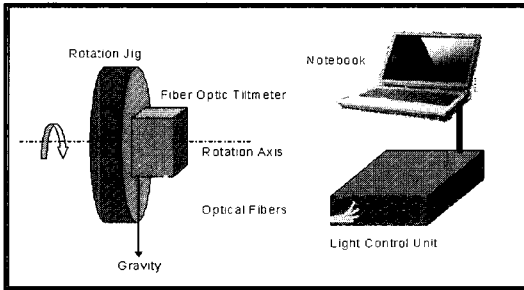


Fig. 5 Experimental set-up for measurement of tilting angle using fiber optic tiltmeter

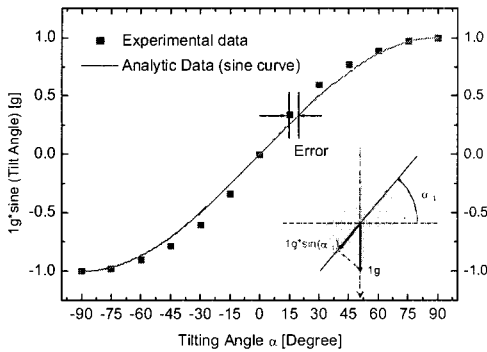


Fig. 6 Measurement of static acceleration according to the tilting angle

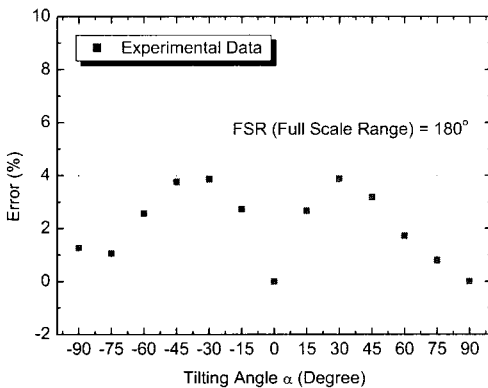


Fig. 7 Relative error according to the tilting angle

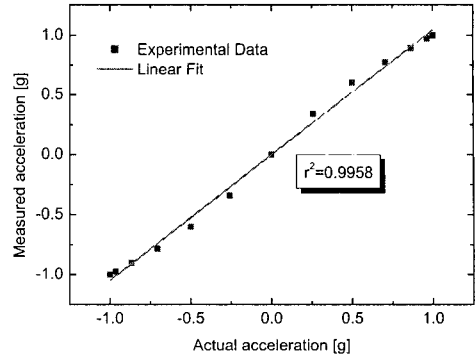


Fig. 8 Linearity between measured and actual acceleration

험은 -90도에서 90도 까지 총 180도의 구간에 대해 수행되었다. 그림에서와 같이 측정된 정적 가속도는 각도 변화에 따라 사인(sine) 함수 형태로 변화함을 확인할 수 있었으며 이 같은 결과는 Fig. 2에서 설명한 결과와 일치한다. 또한 Fig. 5에 나타난 것과 같이, 계측 오차를 실제 측정된 정적 가속도를 이용해 측정된 경사각과 실제 경사각과의 차이라고 정의할 수 있다. 그리고 전체 측정 영역 (FSR, full scale range)을 180도로 정의하여 오차의 정도를 계산해 보았다. 그 결과는 Fig. 6에서와 같이 각도 마다 약간의 편차를 보이거나 전반적으로 4% 이하의 오차를 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 오차는 -1g ~ +1g ($g: 9.81 \text{ m/s}^2$)의 가속도 측정 범위 내에서 센서 내부의 스프링과 감쇠기가 비선형적으로 반응하기 때문인 것으로 예측된다.

그리고 개발한 광섬유 경사계 센서 시스템의 계측 결과의 선형성을 확인해 보기 위해 Fig. 7과 같이 선형 상관 계수 (r^2)을 계산하였다. 그림은 센서를 통해 측정된 정적 가속도와 실제 정적 가속도 사이의 선형 상관관계를 보여준다. 그림에서와 같이 상관 계수 값이 0.9958로서 개발된 경사계 센서 시스템의 선형성이 보장됨을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문은 토목 기간구조물의 건전성 모니터링을 위해 개발된 새로운 개념의 광섬유 경사계 센서 시스템을 제안하였다. 제안된 신개념의 광섬유 경사계 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 구성하였다. 개발된 광섬유 경사계 센서 시스템은 정확한 경사각의 측정을 위해 단자유도 시스템의 고유진동수를 실험을 통해 직접 측정하였으며 이를 이용한 각도 측정 실험을 성공적으로 수행하였다. 본 실험을 통해 개발된 광섬유 경사계 센서 시스템은 4% 이하의 계측 오차를 가지면서 -90도에서 90도 범위에서 선형성을 유지하며 성공적으로 경사각을 측정할 수 있음을 확인하였다. 향후 개발된 센서 시스템을 기존의 전자기반 센서가 접근하기 어려운 현장에 적용해 보다 실질적인 적용 연구들이 활발히 진행 될 수 있을 것이라 예상된다.

후 기

저자는 본 연구에 협조해 주신 University of California Irvine 의 Maria Q. Feng 교수에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] M. Q. Feng and J. M. Kim. "Identification of a dynamic system using ambient vibration measurements," *Journal of Applied Mechanics (ASME)*, Vol. 65, No. 2, pp. 1010-1023, (1998)
- [2] Hong-Nan Li, Dong-Sheng Li and Gang-Bing Song, "Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering," *Engineering Structures*, Vol. 26, pp. 1647-1657, (2004)
- [3] 박상욱, 김대현, 김천근, "광섬유 EFPI 센서를 이용한 나노 이송장치의 개발", *센서학회지*, 제 14권, 제5호, pp. 302-307, (2005)
- [4] Hyun-Kyu Kang, Chi-Young Ryu, Dae-Hyun Kim, Dong-Hoon Kang, Chang-Sun Hong and Chun-Gun Kim, "Simultaneous measurement of strain and temperature of structures using fiber optic FBG/EFPI sensor," *The Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 29, No. 3, pp. 38-45, (2001)
- [5] 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)
- [6] 김대현, Maria Q. Feng, "토목구조물 건전성 모니터링을 위한 무아레 프린지 기법 광섬유 가속도계 시스템 개발", *한국센서학회지*, 제15권, 제1호, pp. 40-46, (2006)
- [7] 김대현, "Ambient vibration-measurement of real building structure by using fiber optic accelerometer system," *한국비파괴검사학회지*, 제26권, 제6호, pp. 373-379, (2006)
- [8] Daniel Post, Bongtae Han and Peter Ifju, *High Sensitivity Moire* (New York : Springer-Verlag.), (1994)