논문 2001-10-6-05

광섬유 간섭계 센서를 이용한 콘크리트 구조물의 내부 스트레인 측정

이경진*, 박재희**, 강신원***

The measurement of the internal strain of a concrete specimen using optical fiber interferometric sensors

Kyungjin Lee*, Jaehee Park**, Shin-Won Kang***

요 약

콘크리트 구조물의 내부 변형률을 측정할 수 있는 광섬유 간섭계 센서가 개발되어졌다. 광섬유 간섭계 센서는 11 ㎜ 길이의 광섬유 Fabry-Perot 간섭계를 2 ㎜ 지름의 스텐레스 강관 내부에 접착제로 고정하여 만들었다. 제작된 변형률 센서들은 100×100×500 ㎣ 크기의 콘크리트 구조물 내부에 삽입되어 외부에서 구조물에 압력을 인가했을 때 구조물 내부의 변형률을 측정하였다. 센서들의 출력은 변형률 변화에 따라 선형적으로 변화하였다. 이를 바탕으로 실제 교량에 적용하여 변형률 센서의 광출력 특성을 살펴본 결과 우수한 변형 감지 특성을 보였으며, 실제 구조물에서 원거리측정에 이용도 가능하였다.

Abstract

A Fiber optic strain sensor for the measurement of the internal strain of a concrete specimen was developed. This sensor was a 11 ㎜ Fiber-optic Fabry-Perot interferometer attached inside a stainless steel pipe of 2 ㎜ diameter. The fabricated strain sensors were embedded in a reinforced concrete structure of 100×100×500 ㎣ size and were measured the internal strain of a concrete structure when the external pressure was applied to the structure. For a field application, the strain sensors were attached on the bottom of a real bridge and dynamic loading test were executed. In the test, they showed good sensitivity as a deformation sensor and capability of remote monitoring.

Keyword : Fabry-Perot interferometer, Optical fiber sensor, Strain remote monitoring

I. 서 론

기간시설이나 군사시설 등에는 상시 위험을 예지할 수 있는 능력이 필요하다. 현재 구조물의 안전 진단에 사용되는 기술로는 대표적으로 비파괴 검사가 있다. 이러한 비파괴 검사[1]를 이용하여 지속적인 구조물의 상태 파악을 구조물의 전역에 걸쳐 검사하는 것은 한계가 따르고 실시간으로 지속적인 구조물의 상태를 파악할 수 없다. 이런 문제점들을 해결하기 위해 구조물 자체에 센서를 내장시켜 구조물의 변형 상태나 파손 여부를 감지하는 지능형 구조물 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 지능형 구조물에서 사용되는 센서는 압전재료, 금속박막 센서 등의 전기 신호를 사용하는 센서와 광신호를 사용하는 광섬유 센서들이 있다. 광섬유를 이용한 센서는 광의 물리적 현상을 이용하기 때문에 전기적 센서가 사용되기 어렵고 안정성이 요구되는 댐, 교량, 빌딩, 항공기, 수중탐사, 엔진 등과 같은 곳에서 필요성이 크게 증가하고 있다.

* 경북대학교 센서공학과 (Dept. of Sensor Eng., Kyungpook National Univ.)
** 계명대학교 전자공학과 (Dept. of Electric Eng., Keimyung Univ.)
*** 경북대학교 전자전기공학부 (School of Electronic & Electrical Eng., Kyungpook National University)

<접수일자 : 2001년 2월 16일>

지능형 구조물에 사용되는 광섬유 센서들은 주로 구조물 내부에 매설되어 구조물 내부의 변형률을 측정하여 구조물의 상태를 파악 할 수 있는 정보를 제공한다. R. Claus는 Extrinsic Fabry-Perot 간섭계 센서를 구조물의 변형률을 측정하기 위해 사용하였다[2]. 그러나 Extrinsic Fabry-Perot 간섭계는 다중화가 어려워 규모가 큰 구조물인 경우 사용이 불편하다. T. Kurashima는 ODTR(optical time domain reflectometer)[3]과 BOTDR (Brillouin optical time domain reflectometer)[4]을 사용하여 구조물 내부의 변형률의 변화를 조사하였다. 그러나 이런 방식들은 원하는 지점의 변형률을 측정할 수 있으나 센서 감도가 낮아 변형률을 정확하게 측정하기가 매우 힘들다. S. Lloret는 white interferometric system을 사용하여 구조물의 동적 및 정적 변형률을 측정하였다[5]. 이 방식도 원하는 지점의 변형률을 정확하게 측정하기가 매우 힘들다. 그 외 교각에 유입되는 염소의 양을 감지하여 교량의 상태를 감지하는 연구[6]와 Bragg Grating 센서[7]-[8] 혹은 Intrinsic Fabry-Perot 간섭계 센서[9]를 이용하여 구조물의 상태를 조사하려는 연구가 많이 진행되고 있다.

본 논문에서는 측정을 원하는 지점의 변형률을 정확하게 측정할 수 있는 센싱 감도가 우수한 Intrinsic 광섬유 Fabry-Perot 간섭계(FFPI) 변형률 센서를 연구하였다. FFPI 변형률 센서들을 구조물 응고시 발생하는 열화 현상, 백화현상, 수축 현상, 온도 변형 등으로부터 최대한 보호하기 위하여 스텐레스 강관 내부에 삽입하여 고정시키고 구조물의 3지점에 매설하여 구조물 외부에 가해지는 하중 변화에 따른 매설된 지점들의 내부 변형률 변화를 측정하였다.

II. 광섬유 Fabry-Perot 간섭계 센서

1. 광섬유 Fabry-Perot 간섭계 원리

광섬유 Fabry-Perot 간섭계는 그림 1에서와 같이 광섬유에 일정한 간격을 두고 두 개의 반사막을 단일모드 광섬유 내에 나란히 배치하여 용융 접합시켜 제작한다. 광섬유 선로 내에 두 개의 반사막으로 사용된 TiO_2는 가시광 및 적외선 영역에서 높은 광 투과율, 높은 굴절율을 가지며 광 손실이 적고 광 투과도가 크다. 또한 광섬유 단면에 증착될 때 광섬유와의 부착성이 좋으며 광섬유 용융 접합시 굴절률 조절이 가능하므로 광섬유 Fabry-Perot 간섭계 반사막으로 자주 사용되고 있다[10]-[11]. 첫 번째 반사막에서 반사되는 광과 첫 번째 반사막을 투과하여 두 번째 반사막에서 반사되는 광 사이의 경로차이가 발생하고, 발생된 경로차이에 의해서 반사되는 광의 간섭현상이 생기게 된다.

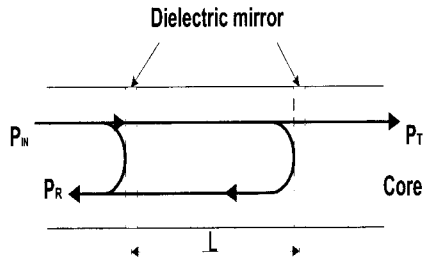

그림 1. 광섬유 Fabry-Perot 간섭계.
Fig. 1. Fiber-optic Fabry-Perot interferometer (FFPI).

광섬유 사이의 내장된 두 반사막의 반사율이 동일하며 반사율이 10% 이하이고 반사된 두 빔 사이의 공간 거리 차가 레이저의 가간섭 길이보다 작다고 가정을 하였을 때 광 반사막을 통하여 되돌아 나온 광출력은 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{OUT} \cong P_{IN} \cdot 2R(1+\cos\Phi) \qquad (1)$$

그러므로 광섬유 Fabry-Perot 간섭계의 광출력은 광 경로 차이의 여현파 형태를 가진다. 여기서 P_{IN} 은 광 입력이며, n은 광섬유 유효 굴절률, L은 반사막 사이의 길이이며, λ은 파장이다. 그리고 Φ는 간섭계에서의 왕복 광 위상차이며 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Phi = 4\pi nL/\lambda \qquad (2)$$

따라서 위 식 (2)에서 Φ의 인자 중 광섬유에 하중을 가할 때 광섬유가 변형을 일으키면 굴절률과 길이 변화로 인하여 빛의 위상차로 광출력 변화가 일어난다. 이때 위상차는 물리적인 요소인 온도와 굴절률의 변화는 간섭계의 길이 변화에 비하여 급격한 변화가 없어 무시 할 수 있고 광 주파수가 일정 하다고 가정하면 식 (3)과 같

이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi n L \nu}{c}\varepsilon\left\{1-\frac{1}{2}n^2(P_{12}-\mu P_{11}-\mu P_{12})\right\} \quad (3)$$

III. 실험 및 결과

1. 광섬유 간섭계 센서와 철근 콘크리트 구조물 제작

하나의 광섬유 끝 단면에 TiO_2 박막이 증착된 광섬유 거울들을 이용하여 광섬유 Fabry-Perot 간섭계 센서[12]를 다음과 같은 방법으로 제조하였다. 먼저 광섬유의 피복을 제거하고 광섬유 절단기를 사용하여 광섬유를 수직으로 절단하고 아세톤, 메탄올, 탈 이온수의 순서로 광섬유 단면의 불순물을 제거한 다음 용융 접착기로 아크 (arc) 클리닝(cleaning)을 하였다. 그리고, 광섬유 거울의 TiO_2가 증착된 단면과 TiO_2가 증착 되지 않은 수직으로 절단된 광섬유의 단면을 정렬한 후 용융 접착기로 용융 접합하여 첫 번째 반사막을 형성한다. 두 번째 반사막은 첫 번째 반사막에서 일정한 거리를 가진 지점을 수직으로 절단하고 다시 TiO_2 가 증착된 단면과 정렬한 후 용융 접합하여 두 번째 반사막을 형성하여 광섬유 Fabry-Perot 간섭계를 제조한다. 이와 같이 제작된 광섬유 간섭계를 제작한 콘크리트 구조물에 매설할 경우 구조물 경화시 발생하는 열화 현상이나 압착에 의한 균열 등으로부터 광섬유 간섭계를 보호하기 위하여 반경 1 ㎜와 두께가 0.2 ㎜ 금속관(stainless-steel pipe)에 센서를 삽입하고 폴리머 성분 접착제(resin/epoxy)로 고정시켜 광섬유 간섭계 센서(그림 2)를 제작한다. 즉 금속관에 센서를 삽입하기전 센서를 광섬유 피복과 유사한 폴리머로 1차로 감싸 보호하고 이를 금속관 원하는 지점에 정렬시킨다. 다시 금속관에 폴리머 성분의 접착제로 완전 충전시켜 센서를 보호하는 방법을 이용하였다. 위에 설명한 방법에 따라 11 ㎜ 길이의 광섬유 센서를 제작하였다.

제작된 광섬유 센서를 지능형 구조물로 적용 가능성을 알아보기 위하여 센서가 매설된 철근 콘크리트 구조물(그림 3)을 제작하였다. 콘크리트 구조물은 일정비율로 자갈, 모래를 물에 배합하여 지름 6 ㎜의 철근 3개를 구조물의 인장측에 넣어 100×100×500 ㎣의 크기로 제작하였다. 그리고 콘크리트 내부 변형률을 조사하기 위해 상부에서 10 ㎜, 50 ㎜, 90 ㎜ 아래 위치 중앙에 3개의 광섬유 간섭계 센서와 변형률 게이지를 매설하였다. 콘크리트 시편 상부에 매설된 광섬유 센서를 FFPI1, 중간에 매설된 센서를 FFPI2, 아래에 매설된 센서를 FFPI3라고 한다.

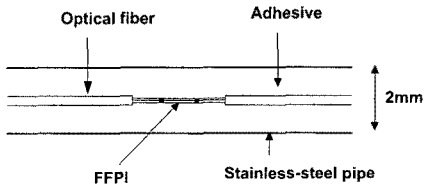

그림 2. 광섬유 간섭계 센서와 보호막.
Fig. 2. guard.

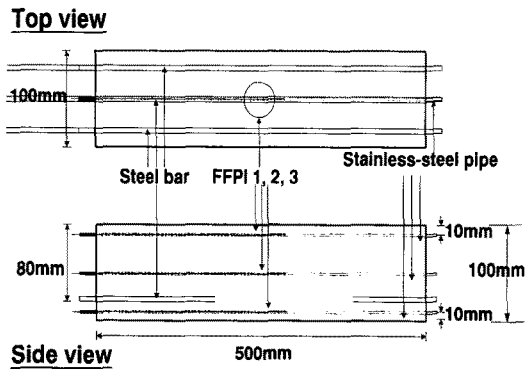

그림 3. 3개의 FFPI 센서가 매설된 콘크리트 시편.
Fig. 3. A specimen with three FFPI sensors.

2. 내부 변형률 측정 실험

구조물 내부의 변형률 측정을 하기 위한 실험장치를 그림 4와 같이 제작하였다. 실험장치는 레이저 다이오드 모듈(QLM 3S855-002, Lasertron Co.), 광검출기(RTZ-565-395-005, PCO), 펄스 발생기, 유압식 만능 재료 시험기 (UTM : Universal Testing Machine), 3개의 센서가 매설된 철근 콘크리트 구조물, 성형결합기, 디지털 오실로스코프, 퍼스널 컴퓨터(PC)로 구성되어 있다. 3개의 구조물에 매설된 광섬유 센서들은 각각 성형 결합기의 아암(arm)에 연결되었다. 광섬유 센서들의 출력이 시간적으로 중복되지A fiber optic interferometer sensor and 않도

록 하기 위해 하나의 성형 결합기 아암에는 300 m(L_d=300 m) 길이의 광섬유 지연코일을 두고 다른 하나의 아암에는 600 m길이의 광섬유 지연코일을 두었고 변조용 펄스의 진폭은 2μsec로 하였다. 펄스 발생기에 의해 변조된 빛이 레이저 다이오드에서 나와 성형 결합기로 간다. 성형결합기는 레이저에서 나온 빛을 나누어서 결합기 아암들에 연결된 광섬유 센서들로 보낸다. Fabry-Perot 간섭계 센서에 도착한 빛은 간섭계 센서에서 간섭을 일으켜 다시 성형 결합기를 거쳐 detector로 가서 전기신호로 변환한다. 전기신호로 변환된 센서의 출력 파형들은 디지털 오실로스코프와 GPIB카드를 통해 PC로 데이터를 측정 및 분석하였다. 그림 5는 detector에서 검출되어 디지털 오실로스코프에 나타난 센서의 출력 파형이다. 첫 번째 파형은 FFPI1의 출력 파형이고, 두 번째는 FFPI2의 출력 파형, 마지막 파형은 FFPI3의 출력 파형이다. UTM으로 제작한 철근 콘크리트 시편에 수직으로 하중을 인가하면서 구조물 내부 3 지점의 변형률을 매설된 변형률 게이지들과 광섬유 센서를 사용하여 조사하였다. 하중 변화에 따른 센서의 변화를 읽기 위해 UTM에 일정한 속도로 5 kg 씩 변화를 가하면서 250 kg 까지 센서 신호 변화량을 측정하여 감도를 계산하였다.

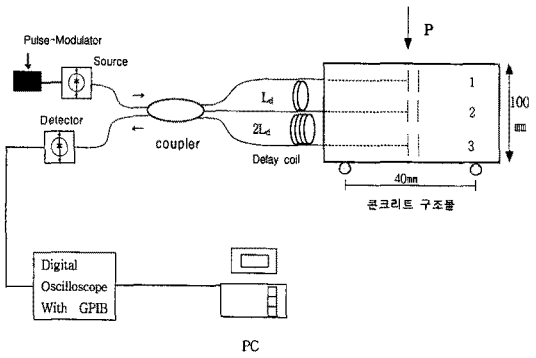

그림 4. 실험장치.
Fig. 4. Experimental setup.

그림 6은 UTM을 사용하여 콘크리트 구조물의 상부에 천천히 수직 하중을 증가하면서 구조물 내부 변형률 변화에 대한 센서들의 위상변화를 보여주고 있다. 구조물 위에 하중을 가할 때 구조물 하부에 매설된 변형률 게이지에서 측정된 변형률은 증가하였고 하부에 매설된 광섬유 센서의 출력 위상도 증가(센서의 출력 파형이 오른쪽으로 이동)하였으며, 상부에 매설된 변형률 게이지에서 측정된 변형률은 감소하였고 상부에 매설된 광섬유 센서의 출력 위상도 감소(센서의 출력 파형이 왼쪽으로 이동) 하였으며, 중간에 매설된 변형률 게이지에서 측정된 변형률은 거의 변화가 없었으며 하부에 매설된 광섬유 센서의 출력 위상 변화도 거의 없었다. 이 결과들이 구조물 위에 하중을 가할 때 구조물의 하부는 길이가 늘어나고, 상부는 줄어들게 되며, 중앙은 길이변화가 거의 없음을 보여주었다. 그림 6으로부터 보면 FFPI1센서의 감도는 -1.43 °/ε이었고, FFPI3은 1.44 °/ε 이었다. 그리고 변형률과 위상변화의 관계는 선형적이었다.

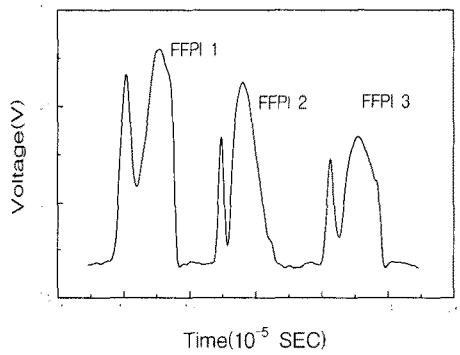

그림 5. 센서의 출력신호.
Fig. 5. Sensor output signals.

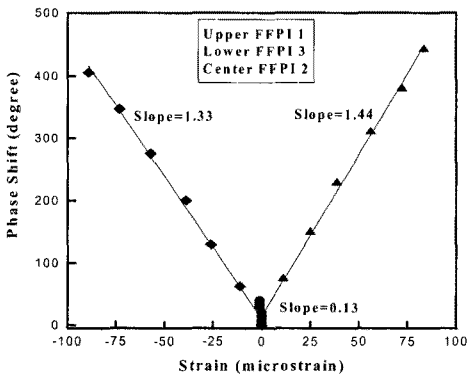

그림 6. 내부 변형률 측정.
Fig. 6. The measurements of internal strain.

V. 결 론

일반 구조물에 삽입하여 내부 변형률을 측정

할 수 있는 광섬유 센서를 제작하여 철근 콘크리트에 삽입시켜 내부 변형률 측정으로 지능형 구조물로 적용을 시도하였다. 실험에 사용된 광섬유 센서는 11 ㎜ 길이의 Fabry-Perot 간섭계를 스텐레스 금속관속에 삽입하여 폴리머 성분의 에폭시로 고정시켜 제작하였다. 그리고 100×100×500 ㎣의 크기의 철근 콘크리트 구조물에 만들어 상부에서 10 ㎜, 50 ㎜, 90 ㎜ 아래 위치 중앙에 3개의 광섬유 간섭계 센서와 변형률 게이지를 매설하여 세 지점의 변형률을 측정하였다. 10 ㎜지점(상부)에 매설된 센서는 -1.43 °/ε의 감도를 가졌으며 90 ㎜ 지점(하부)에 매설된 센서는 1.44 °/ε감도를 가졌으며 50 ㎜지점(중앙)에 매설된 센서는 거의 위상변화를 관찰할 수 없었다. 그리고 세 지점센서의 경우 내부 변형률과 위상변화의 관계가 거의 선형적이었다. 또한 감도는 구조물의 중앙, 상단보다는 하단에 설치하는 것이 높다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 제작된 센서는 일반 구조물에 삽입하여 구조물의 상태를 알려주는 지능형 구조물에 이용할 수 있을 것이다. 차후 과제로는 실제 교량 내부에 센서를 삽입시켜 구조물 환경 변화에 따른 보호막과 센서의 상태 측정이 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] J. Blitz and G. Simpson, *Ultrasonic methods of non-destructive testing*, Chapman & Hall, 1996.

[2] R. O. Claus," Optical fiber instru-mentation and application," Smart Materials, Structures, and Integrated Systems. Vol. 3241, SPIE, 1997.

[3] T. Kurashima, M. Tateda, T. Horiguch, and Y. Koyamada, "Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and optical loss measurement by randomizing the reference light polarization state," *IEEE Photonics Technology Letters*, pp. 360-362, 1997.

[4] T. Kurashima, T. Horiguch, H. Izumita, M. Tateda, and Y. Koyamada," Disrtibuted strain measurement using BOTDR improved by taking account of temperature dependence of Brlllouin scatteriing power," *ECOC'97*, pp. 1119-1122, 1997.

[5] S. Lloret, D. Inaudi, S. Vurpillot, and S. Sa "Static and dynamic bridge monitoring with fiber optic sensors," *Optical and Fiber Optic Sensor Systems*, vol 3555, SPIE. 1998.

[6] P. L. Fuhr, D. R. Huston, B. MacCraith, "Embedded fiber optic sensor for bridge deck chloride penetration measurement," *Optical., Engineering*, Vol. 37, No. 4, pp. 1221-1228, 1998.

[7] Y. Rao, "Recent progress in in-fiber Bragg grating sensors: applications," *Optical and Fiber Optic Sensor Systems*, vol 3555, SPIE. 1998.

[8] Y. Rao, D. Jackson, L. Zhang, and I. Bennion, "Strain sensing of modern composite materials with a spatial/wavelength multiplexed fiber grating network," *Optics Letters*, pp. 683-685, 1996.

[9] 이경진, 이호일, 박재희, 김명규, 강신원, "철근콘크리트 구조물에 매설된 다중화 광섬유 압력센서," *센서학회지*, pp. 232-238, 1999.

[10] C. E. Lee, and H. F. Taylor, "Interferometric optical fiber sensors using internal mirrors," *Electronics Letters*, pp193-194, 1988.

[11] Y. Yeh, Development of Fiber-optic Interferometric Temperature Sensor System, Ph. D dissertation, Texas A&M University, 1991.

[12] J. Park and H. Taylor, "Fabrication of low reflectance optical fiber mirrors," *Electronics Letters*, pp. 2342-2343, 1996.

著 者 紹 介

이 경 진(李京鎭)
1986년 - 1993년 경남대학교 전기전자공학부 졸업(공학사)
1993년 - 1993년 경남대학교 대학원 전기전자공학부 졸업(공학석사)
1997년 - 현재 경북대학교 대학원 센서공학과 박사과정 수료

박 재 희(朴在熙)
1984. 02(졸) 경북대학교 전자공학전공 학사
1992. 08(졸) Texas A & M Univ. 전기공학전공 석사
1995. 08(졸) Texas A&M 대 전기공학전공(컴퓨터통신시스템) 박사
현재 계명대학교 전자공학과 교수
주관심 분야 : 광통신, 광센서, 광학계설계, 광학계평가

강 신 원(姜信元)
1978 경북대학교(공학사-전자공학)
1980 영남대학교(공학석사-전자공학)
1993 게이오대학교(공학박사-생체의공학)
1994 - 현재 경북대학교 전자전기공학부 교수
주관심 분야 : 집적광학 소자 및 센서, 광섬유 센서, 의용센서