

# 긴 게이지길이 광섬유 FBG센서를 이용한 교각상부 거동 측정

## Displace Measurement of the Top of Bridge Pier Using Long gauge Fiber Optic Sensor

김기수\*  
Ki, Ki-Soo

### ABSTRACT

In this paper, a long gauge Fiber Bragg Grating (FBG) sensor system is described and long gauge FBGs are well-suited for measuring the upper parts of the bridge piers under the extremely severe movement conditions. In the experiments, we used more than 30m long FBG sensors to measure the movement of top part of the bridge piers which are separated from the main bridge by cutting the decks. With the actuator, the deck and girders were pushed and released. We checked the movement of the top of the pier while releasing the pressure of the actuator with the long gauge fiber sensor.

In order to measure the movement of the upper part of the pier, the reference point must be outside of the pier. Using the optical fiber sensors, one end of the sensor is attached to the top of the pier and the other end is attached to the bottom of the next pier.

The fiber sensors showed good response to the release loading and we could calculate the movement of the top part of the pier.

### 1. 서론

20세기 초부터 시작된 현재의 강성에 기초한 내진설계 개념은 20세기 말, 대규모의 지진재해로 인하여 유연성 또는 지진거동제어에 기초한 새로운 내진설계 개념으로 그 흐름이 바뀌어가고 있다. 최근에 대두된 새로운 내진설계 개념중 가장 주목받고 있는 내진설계 방법은 지진격리구조이다.

본 연구는 실 교량에 지진격리장치를 적용하여 거동하는 교량의 교각을 측정하는 과정에서 긴게이지 길이를 가진 FBG Sensor를 이용하여 교각상부의 거동을 측정할 예정이다.

본 실험은 고속도로 직선화에 따라 폐기된 실제 교량에 대해 교각의 거동을 실험한 것으로 교각과 교각 사이에 FBG Sensor를 설치하여 거동을 측정하였으며, 임의의 거동을 가하기 위하여 4개의 교각과 3개 span의 상판과 거더를 전체교량에서 분리하여 실험하였으며, 교대와 접촉되는 부분에 유압식 액츄에이터를 설치하여 교량 상부 전체를 계속 밀어낸 후 액츄에이터를 급속 개방하여 교량 상부의 흔들림을 유도하였다.

\* 정회원 · 홍익대학교 재료공학부 교수 E-mail: kisookim55@paran.com

광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg Grating Sensor)는 각 교각에 각각의 방식대로 측정을 달리하여 교각에 가해지는 변위를 측정하고자 하였다. 교대에서 1교각 사이에는 직선으로 설치하였고, 1교각, 2교각 그리고 3교각은 대각선으로 설치하여 좀 더 다양한 데이터를 얻고자 하였다.

현재 활발히 진행되고 있는 교량의 내진설계에 있어 측정은 매우 어려운 실정이나, 본 실험으로 인한 광섬유 센서의 적용으로 정밀한 측정을 할 수 있게 되었다.

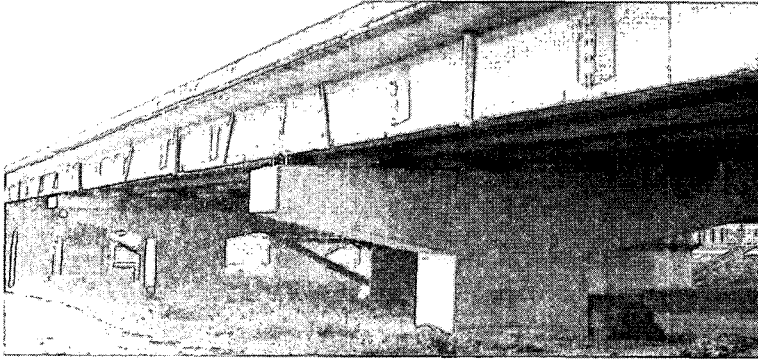


그림 1. 실험에 사용된 고속도로 직선화에 따라 폐교량

최근 미국 및 유럽의 선진국에서는 통신용 광섬유를 이용한 FBG센서를 계측분야에 적용하려는 노력이 활발히 이루어지고 있는데 이는 FBG센서가 빛을 source로 이용하기 때문에 전자기적 노이즈가 없고 전자식 센서에 비해 정확도 및 신호안정성이 뛰어나기 때문이다. 또한 광섬유는 250 $\mu$ m직경의 소형경량이므로 구조물에 결합을 주지 않고 설치가 가능하고 80km까지 손실 없이 전송할 수 있어 장거리 계측에 매우 유용하기 때문이다. 본 실험에서는 FBG센서 중에서 양산이 쉽고 정확도가 높아 최근 들어 가장 널리 활용되고 있는 FBG (Fiber Bragg Grating)센서를 이용하여 교량 상부의 변형량을 계측하는 기법을 적용하였다.

## 2. FBG센서의 일반이론

아래의 그림 2는 FBG센서의 구조를 나타낸다. 그림에서와 같이 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 아래에 주어진 식(1)과 같은 브래그 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 grating에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다.

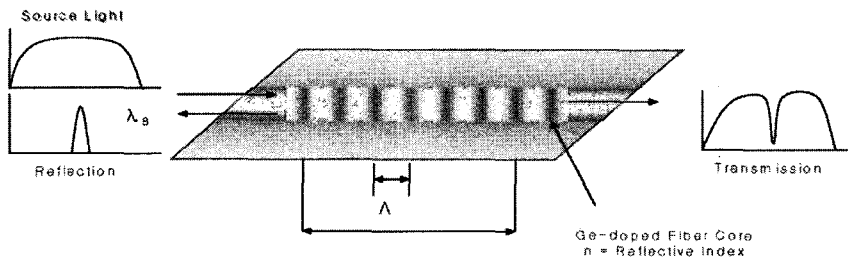


그림 2. Fiber Bragg Grating센서 구조

$$\lambda_B = 2n\Lambda \tag{1}$$

위의 식에서  $n$ 은 광섬유 코어의 유효 굴절률(effective refractive index)이며,  $\Lambda$ 는 grating 과 grating 사이의 간격(grating period)이다.

Grating에서 반사되는 브래그 파장은 식(1)과 같이 유효 굴절률과 grating간격의 함수이며, FBG센서에 온도나 압력 등의 외부 물리량을 인가할 경우 브래그 파장이 달라진다. 그러므로 브래그 파장의 변화를 측정한다면 FBG에 인가된 물리량을 구할 수 있다. strain 변화에 대한 브래그 중심 파장의 변화는 아래의 식 (2)과 같으며,

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon \tag{2}$$

여기서,  $P_e$ 는 광탄성 상수(photo-elastic constant)로 게르마늄 실리카 유리(germano-silicate glass)의 경우 대략 0.22 의 값을 가지며,  $\epsilon$ 은 광섬유 grating에 가해진 strain이다.

상기 식에서 알 수 있듯이 광섬유 브래그 격자는 스트레인에 의해 FBG센서의 값이 변화하므로 반사되는 브래그 파장의 변화를 측정한다면 광섬유 브래그 격자에 가해진 미지의 스트레인을 구할 수 있다.

### 3. FBG센서의 교량에의 설치 및 교각의 거동에 대한 실험

교량의 내진 성능에 대한 실험적 연구로서는 많은 준정적 실험이나 유사동적 실험이 수행되고 있으나, 대부분의 장비의 규모나 성능에 의해 축소모형 실험에 국한되고 있다. 이러한 실험은 극히 제한적이어서 설계기준의 자료로는 불충분하며, 특히 비선형 등의 복잡한 구조계 거동을 보이는 지진력리교량의 경우, 실교량에 대한 동적실험이 필요하며 또한 실교량의 동적실험을 위한 장치개발이 필요하다.

본 연구는 지진력리장치의 성능을 보기위한 지진력리교량의 동적실험의 일환으로 수행되었으며, 최대 용량 180ton, 최대스트로크 150mm, 0.1초이내의 급속 유압해제 및 유·무선 원격조정제어가 가능한 급속해방장치를 사용하여 연속교량의 순간적인 가진을 통한 실교량 실험을 하였다. 이 실험에 부가적으로 교각마다 가해지는 변위량을 측정하고자 하여 본 연구팀에서 교각과 외부 지점에 긴 길이의 Optical Fiber Sensor를 설치하고 측정하였다.

광섬유센서는 데이터를 측정하기 위한 부가적인 목적이었으며, 원래 실험의 주목적인 지진분리용 교좌장치를 그림 3과 같이 설치하였다.

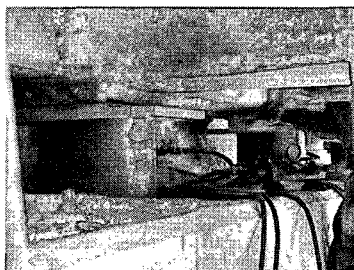


그림 3. 교각위에 설치된 지진 분리용 교좌장치



그림 4. 상판분리작업의 모습

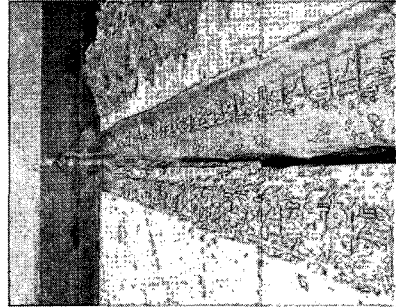


그림 5. 분리된 상판의 모습

이후 액추에이터로 가력하여 실험을 하기 위하여 그림 4, 5와 같이 교각 3개와 2개 경간의 상판과 거더를 원래 교량에서 분리하였다.

이후 교량상부에 힘을 가하기 위해 한쪽 교대와 분리된 3경간 교량의 상부 거더 사이에 그림 6과 같이 급속개방형 유압 액추에이터를 설치하였다.

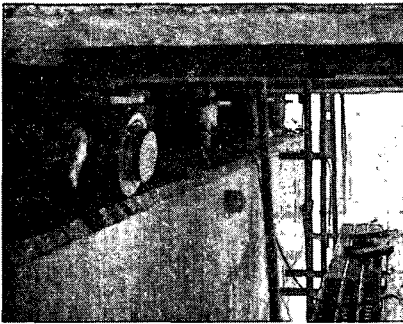


그림 6. 설치된 급속개방형 액추에이터 와 상판에 힘을 가할 수 있게 연결된 액추에이터

이후 그림 7과 같이 교각 상부에 한 쪽 끝을 고정하고 다른 교각의 하부의 한 지점에 다른 한 쪽 끝을 고정하도록 연결하여 긴 게이지 길이의 광섬유센서를 설치하였다.

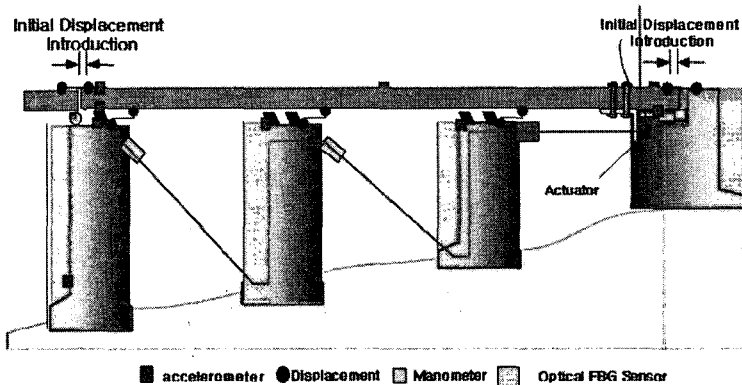


그림 7. Instrument and position that is used in an experiment

그리고 측정시스템은 그림 8과 같이 인근의 차량 내부에 설치해 부착된 광섬유센서로부터 데이터를 획득하였다.

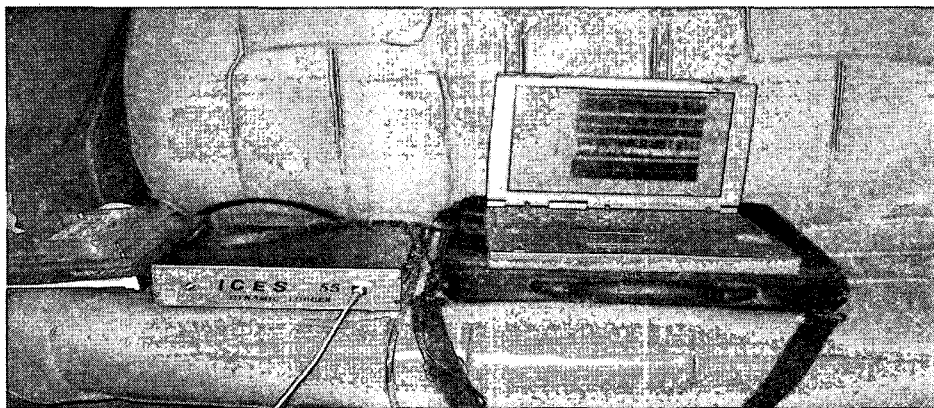


그림 8. 광섬유 데이터 측정을 위한 시스템

#### 4. 실험 결과

##### 4.1. 광섬유센서의 설치 위치 및 파장

측정장비와 차량이 있던 곳에서부터 1번센서로 1번교각이며, 총3회의 실험 데이터를 얻을 수 있었다. 아래 사항은 FBG Sensor의 파장별 적용한 예로 각 교각별로 정리하였다.

표 1. Optical FBG Sensor Wave Length per Pier

Optical fiber sensor that is used in an experiment		
1 pier	2 pier	3 pier
1540nm	1548nm	1545nm

##### 4.2. 측정 결과

긴 게이지길이의 FBG센서는 전술한 바와 같이 교각과 교각 사이에 설치되었으며, FBG센서는 변형 측정용 긴 게이지 길이의 센서 3 포인트가 설치되었고, 각 센서로부터 측정되어진 데이터는 그림 9, 10, 11과 같으며, 스트레인변화로 환산한 값은 그림 12와 같다.

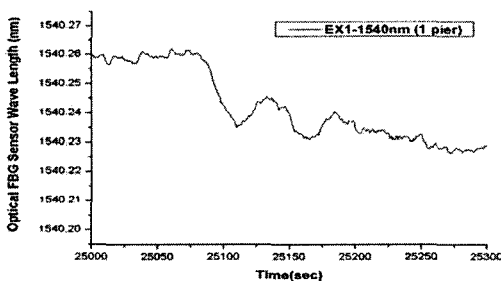


그림 9. Wave length of 1 a pier

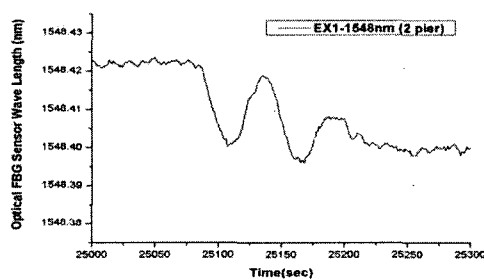


그림 10. Wave length of 2 a pier

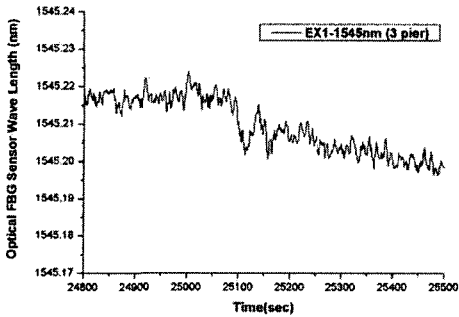


그림 11. Wave length of 3 a pier

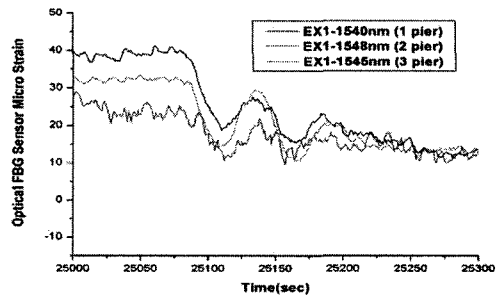


그림 12. 광섬유센서의 스트레인 변화로 환산한 값

### 5. 결론

FBG센서 시스템을 이용하여 성공적으로 긴 길이의 변형을 측정하였고 FBG센서는 긴 게이지 길이를 갖는 교각의 거동을 측정할 수 있는 좋은 수단임을 확인하였다.

광섬유센서는 액추에이터가 개방됨에 따라 교각의 움직임을 정확하게 잘 측정하였으며 약 30m에서 30 마이크로 스트레인의 변위값을 보여 광섬유는 전반적으로 약 0.9mm정도 움직이고 있는 것으로 나타났으며, 기울기를 고려하면 약 0.6mm 정도 수평변위가 있었던 것으로 보여 진다. 이는 가력시 액추에이터의 이동량이 6mm이었음을 감안 할 때 지진 분리장치가 어느 정도 작동되고 있음을 보여준다.

특히 광섬유센서는 데이터에서 보는 바와 같이 교각이 흔들리는 모습이 정확히 보여 지고 있어 교각 상부의 거동을 측정하는데 아주 유효한 것으로 나타났다.

### 후 기

본 연구는 서울대학교 교량사업단의 실험에 추가하여 데이터만 취득한 것이며, 모든 실험은 서울대학교가 주관이 되어 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- [1] R. M. Measures, "Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures" Proc. SPIE, Vol. 1588, pp. 282, 1991.
- [2] Kim, K. S., L. Kollar and G. S. Springer, "A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors", J. of Composite Materials Vol. 27, pp 1618-1662, 1993.
- [3] Kim, K. S., A. Segall and G. S. Springer, "The Use of Strain Measurements for Detecting Delaminations in Composite Laminates", Composite Structures Vol. 23, pp 75-84, 1993.