

## 特輯

## 광섬유 스마트 구조물의 개념을 이용한 교량상부 내진거동 측정

김기수\*, 한인동\*\*

## Earthquake Movement Measurement of the Top of Bridge Pier Using Fiber Optic Smart Structure Concept

Ki-Soo Kim<sup>\*</sup>, In-Dong Han<sup>\*\*</sup>

## 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.

**Key Words** : Smart Structure, Optical Fiber Sensor, FBG, Bridge Application

## 1. 서론

복합재료에서부터 시작된 스마트구조에 관한 개념이 점차 토목건축구조물로 확산되어 광섬유센서를 적용하여 구조물의 움직임을 계측하려는 사례가 늘고 있다.[1-5]

우리나라도 점차 지진에 안전한 지역이 아니라는 개념이 확산되면서 새로운 재료와 새로운 공법에 의한 지진에 견딜 수 있는 교량의 설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 교량에 있어서 20세기 초부터 시작된 강성에 기초한 내진설계 개념은 20세기 말, 대규모의 지진재해로 인하여 유연성 또는 지진거동제어에 기초한 새로운 내진설계 개념으로 그 흐름이 바뀌어가고 있다.[6-9] 그중에서도 새로운 내진설계 개념중

가장 주목받고 있는 내진설계 방법은 지진격리구조이다.

본 연구는 실 교량에 지진격리장치를 적용하여 거동하는 교량의 교각을 측정하는 과정에서 긴계이지 길이를 가진 FBG Sensor를 이용하여 교각상부의 내진거동을 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, 지진하중과 유사한 하중을 부과하기 위하여, 교대와 접촉되는 부분에 유압식 액추에이터를 설치하여 교량 상부 전체를 계속 밀어낸 후 액추에이터를 급속 개방하여 교량 상부의 흔들림을 유도하였다.

\*+ 홍익대학교 재료공학부 교수, 교신저자(E-mail:kisoo@hongik.ac.kr)

\*\* 홍익대학교 재료공학부 석사과정

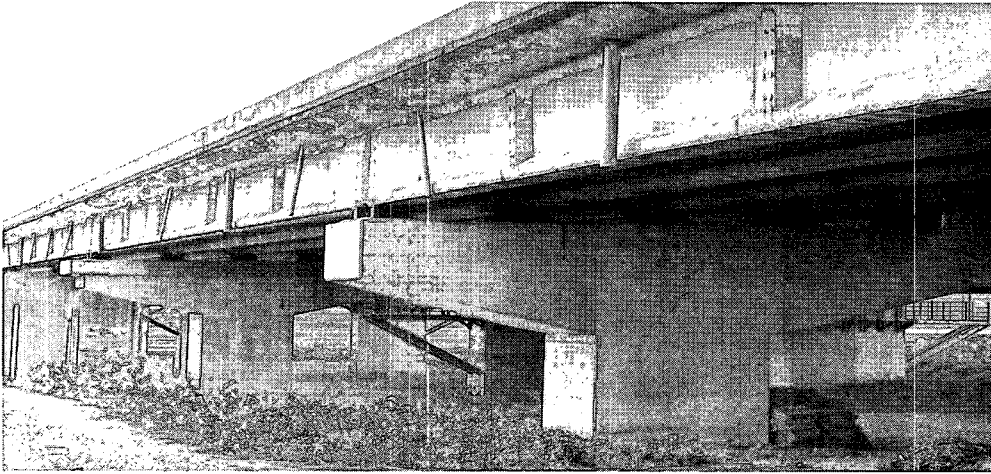


Fig. 1 실험에 사용된 고속도로 직선화에 따라 폐기된 폐교량.

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

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 기본이론

아래의 Fig. 2는 FBG센서의 구조를 나타낸다. Figure에서와 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.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

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,

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon \quad (2)$$

여기서,  $P_e$ 는 광탄성 상수(photo-elastic constant)로 게르마늄 실리카 유리(germano-silicate glass)의 경우 대략 0.22의 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 있으며, 광섬유 전체의 길이를 곱하면 발생된 변위의 크기가 된다.

## 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 불충분

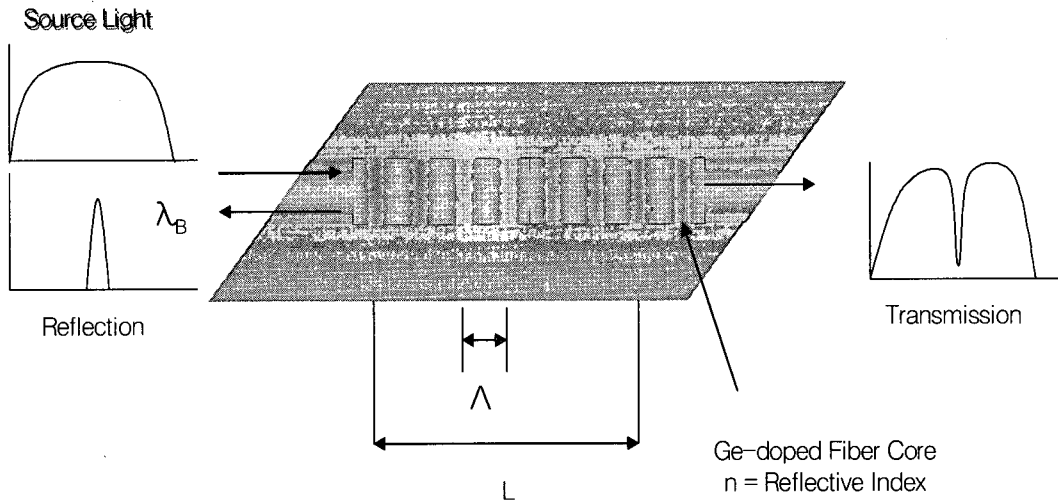


Fig. 2 Fiber Bragg Grating센서 구조.

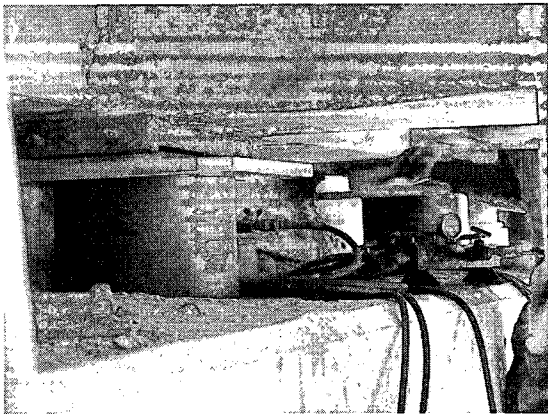


Fig. 3 교각위에 설치된 지진 분리용 교좌장치.



Fig. 4 상판분리작업의 모습.

하며, 특히 비선형 등의 복잡한 구조계 거동을 보이는 지진 격리교량의 경우, 실교량에 대한 동적실험이 필요하며 또한 실교량의 동적실험을 위한 장치개발이 필요하다.

본 연구는 지진격리장치의 성능을 보기위한 지진격리교량의 동적실험의 일환으로 수행되었으며, 최대 용량 180ton, 최대스트로크 150mm, 개방속도 0.1초이내의 급속 유압해제 및 유무선 원격조정제어가 가능한 급속해방장치를 사용하여 연속교량의 순간적인 가진을 통한 실교량 실험을 하였다. 이 실험에 의해 교각마다 가해지는 변위량을 측정하고자 하여 본 연구팀에서 교각과 외부의 고정점을 선정하여 스마트 구조물에 주로 활용되는 Optical Fiber Bragg Grating Sensor를 포함하고 있는 긴 길이의 광섬유를 설치하고 측정하였다.

광섬유는 두 고정점 사이의 길이가 약 30-35미터 정도의 길이가 되게 설치되었으며, 이 두 고정점 사이의 길이변화를 광섬유센서를 이용해 데이터를 측정하였고, Fig. 3과 같이 설치된 지진분리용 교좌 장치가 어떤 역할을 하는지 검토되었다.

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

실제로 지진이 교량을 흔들 경우 교각을 포함한 하부구조가 먼저 흔들리고, 그 하중이 교좌 장치를 통하여 상부구조에 전달되는 메카니즘을 가지고 있고, 차량이 소통되는 상부구조의 붕괴를 막기 위하여 교좌 장치에서 진동을 흡수하거나 흔들림을 저지하여야 한다. 최근에는 스마트 구조의 개념을 적용하여

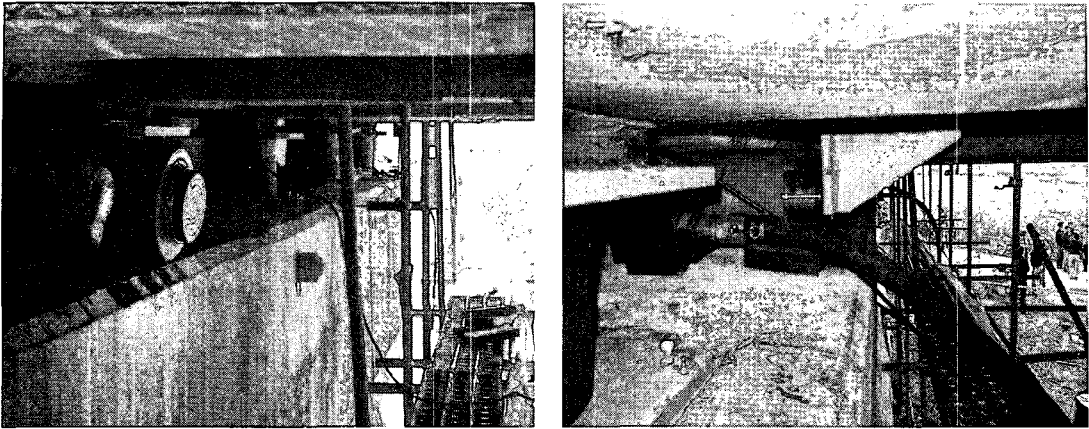


Fig. 6 설치된 급속개방 액추에이터와 상판에 힘을 가할 수 있게 연결된 액추에이터.

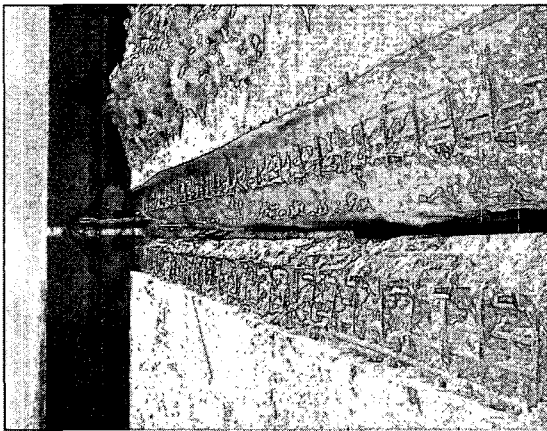


Fig. 5 분리된 상판의 모습.

먼저 진동을 감지하고 그 진동을 분석하여 순간적으로 진동을 억제하는 방향으로 액추에이터가 움직여 진동을 감쇄하는 방식을 채택하고자 하는 연구가 진행되고 있기는 하나, 아직 큰 교량의 교좌장치에 적용되고 있지는 못한 실정이다. 본 실험에서 채택한 교좌장치는 아직 피드백 개념을 적용하지 못한 단계의 수동형 교좌 장치이나, 이 장치의 성능을 보기 위하여 액추에이터로 실제로 가력하는 방법을 채택하였다.

본 연구에서는 교량하부구조는 실제의 지진이 아니면 진동을 주기 어려우므로 상부를 흔들고 그에 따라 발생하는 교각의 움직임을 측정하여 지진 분리장치의 성능을 평가하고자 하였는데, 교량이 너무 크면 교량상부를 움직이게 하기가 어려우므로 교량을 3경간만 사용할 수 있도록 분리하였다. 상부구조에 힘을 가하기 위해 한쪽 교대와 분리된 3경간 교량의 상부 거더 사이에 Fig. 6과 같이 급속개방형 유압 액추에

이터를 2개소에 설치하였는데, 액추에이터는 교대에 고정되어 설치되었으며 액추에이터의 축이 밀어낼 수 있도록 삼각형 모양의 고정물을 보와 상판에 고정시켜 액추에이터의 헤드 부분이 닿아서 밀면 3경간으로 연속된 상판과 보 전체가 움직일 수 있도록 고정되었다.

실험이 시작된 후 유압액추에이터로 상부구조를 계속 밀어서 6cm 정도를 이동시킨 후 하중을 급속히 제거하여 흔들림을 유발하고 상부 구조의 흔들림이 교좌장치를 통하여 하부에 전달될 때, 전달된 하부구조 진동을 광섬유센서를 이용하여 측정하였다. 유압 액추에이터는 최대 용량 180ton, 최대 스트로크 150mm, 0.1초이내의 급속 유압해제 및 유·무선 원격조정제어가 가능한 모델을 선정하였으며, 잘못되었을 경우 교량붕괴의 위험이 있어 교량으로부터 약간의 거리가 있는 곳에서 원격제어를 하였다.

교각의 움직임을 측정하기 위해서는 움직이지 않는 기준점이 있어야 하는데, 교량은 거더와 상판은 액추에이터에 의하여 밀리는 부위이고 교각은 측정대상이기 때문에 교량 내부에서 기준점을 구하기가 곤란하므로 교량 외부에서 기준점을 구할 수밖에 없는 데 기준점과 측정점과 상당한 거리가 존재하기 때문에 LVDT등의 기존의 짧은 거리측정용 변위계로는 측정할 수가 없고 레이저 변위계 등의 원거리 측정용 변위계를 사용해야 하는데, 정밀도에 문제가 발생하므로 현재로는 FBG 광섬유센서가 가장 좋은 방법이라 할 수 있다. 그래서 Fig. 7과 같이 교각 상부에 한 쪽 끝을 고정하고 지반에 고정되어 움직임이 거의 없으리라고 예상되는 다른 교각의 하부의 한 지점에 다른 한 쪽 끝을 고정하도록 연결하여 긴 게이지 길이의 광섬유센서를 설치하였다.

그리고 측정시스템은 Fig. 8과 같이 교량에서 약간 떨어진 인근의 차량 내부에 설치해 교량에 부착된 광섬유센서로부터 데이터를 획득하였다.

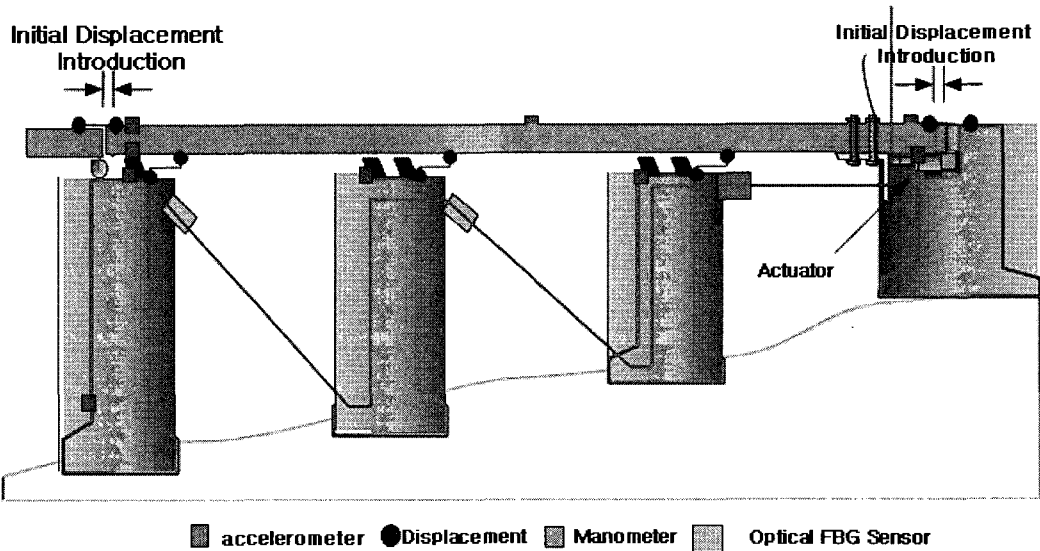


Fig. 7 Instrument and position that is used in an experiment.

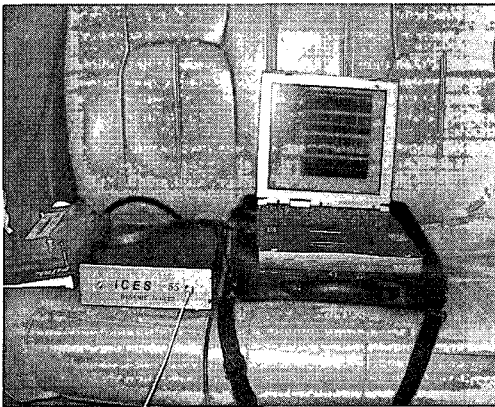


Fig. 8 광섬유 레이터 측정을 위한 시스템.

Table 1 교각에 적용된 광섬유 격자센서의 파장

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 Fig. 9, 10, 11과 같다.

### 4. 실험 결과

#### 4.1 광섬유센서의 설치 위치 및 파장

측정장비와 차량이 있던 곳에서부터 가까운 순서로 번호를 매기면 가장 교대에서 가장 먼 교각이 1번 교각이며, 1번 교각의 거동을 보는 센서가, 1번 센서가 된다. 총3회의 실험 데이터를 얻을 수 있었다. 아래 사항은 FBG Sensor의 파장별 적용한 예로 각 교각별로 정리하였다.

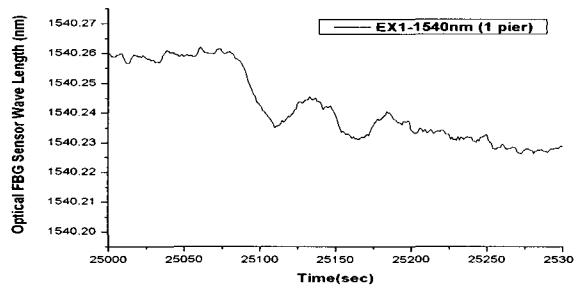


Fig. 9 Wave length of the 1st pier.

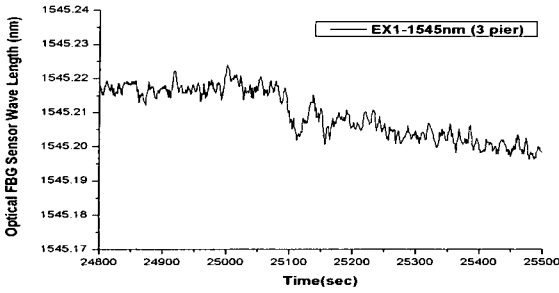


Fig. 10 Wave length of the 2nd pier.

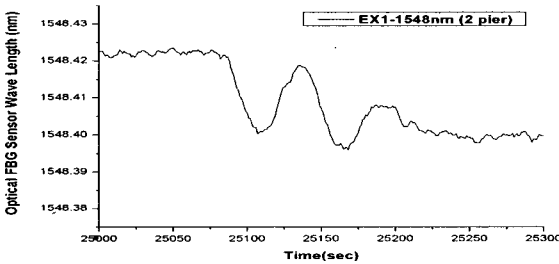


Fig. 11 Wave length of the 3rd pier.

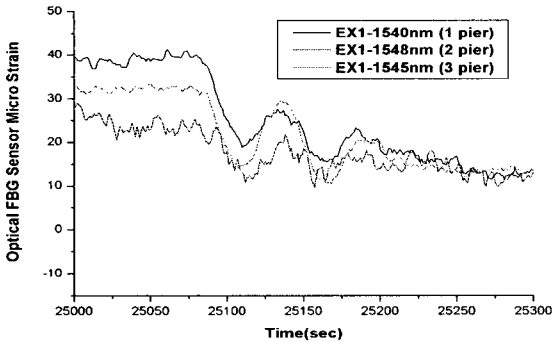


Fig. 12 광섬유센서의 스트레인 변화로 환산한 값.

이 파장 데이터로부터 환산한 스트레인 데이터의 값은 Fig. 12에 나타나 있는데, 30에서 40마이크로 스트레인 정도의 값을 보이고 있다.

### 5. 결론

FBG센서 시스템을 이용하여 성공적으로 긴 길이의 변형

을 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 것이고 있는 것으로 나타났으며, 기울기를 고려하면 약 0.6mm 정도 수평변위가 있었던 것으로 보여진다. 이는 가력시 액추에이터의 이동량이 6cm이었음을 감안 할 때 지진 분리장치가 잘 작동되고 있음을 보여준다.

특히 광섬유센서는 데이터에서 보는 바와 같이 교각이 흔들리는 모습이 정확히 보여지고 있어 스마트구조물의 개념을 적용하여 광섬유센서를 이용, 교각 상부의 거동을 측정하는 방식이 아주 유효한 것으로 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 과학재단 우수연구센터인 “스마트사회기반시설 연구센터”의 지원과 건설교통부의 “사회기반시설물 평가 중점연구단”의 지원 그리고 2006학년도 “홍익대학교 학술연구 진흥비”의 지원으로 이루어진 것입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) R. M. Measures, “Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures,” *Proc. SPIE*, Vol. 1588, 1991, pp. 282.
- 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, 1993, pp. 18-1662
- 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, 1993, pp. 75-84.
- 4) Konig, G., and G. Giegerich, “Identification of Structural Properties Using Dynamic Tests,” *Proc. IABSE Symp. on Durability of Struct.*, IABSE, Lisbon, Portugal, 1989, pp. 835-840.
- 5) Shah P., and Udawadis, F. E.(1978), “A Methodology for Optimal Sensor Locations for Identification of Dynamic Systems,” *J. Appl. Mech.*, 45, 1978, pp. 188-196.
- 6) Toksoy, T., Chuntavan, C. and A. E. Aktan, “Modal Analysis for Damage Detection In Structures,” *Discussion, Journal of Structural Engineering.*, ASCE, February, 1993.

- 
- 7) R. Favre and I. Markey, "Long-Term Monitoring of Bridge Deformation," A.S.Nowak(ed.), *Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation*, Kluwer Academic Publishers, 1990, pp. 85-100.
  - 8) Shushkewick K. W., "Time Dependent Analysis of Segmental Bridges," *Computers & Structures*, Vol. 23, No. 1, 1986, pp. 95-118.
  - 9) M. Saide, Joseph Shields and Rodney Johnson, "Monitoring Prestress Forces in a Box Girder Bridges," *A.S. Nowak(ed.) Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation*, Kluwer Academic Publishers, 1990, pp. 217-228.