수직하중 계측을 위한 FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치의 개발

Development of Smart Seismic Device Using FBG Sensor for Measuring Vertical Load

장 성 진*. 김 남 식†. 백 준 호**

Sung-Jin Chang, Nam-Sik Kim and Joon-Ho Baek

(Received July 31, 2012 ; Revised September 13, 2012 ; Accepted September 13, 2012)

Key Words : Bridge Bearing(교량받침), Fiber Optic Bragg-grating Sensor(광섬유 브래그 격자센서), Vertical Load(수직하중), Vertical Displacement(수직변위)

ABSTRACT

A faulting could be occurred at the end of deck by unexpected loads to bridge bearing after a bridge completion. Serviceability of bridges could be impaired by the faulting which is caused structural damage. Therefore, smart bridge bearing which can continuously observe the supporting points is needed. Some of bridge bearings have been developed for measuring vertical load and vertical displacement by installing sensors in the bearing. In those systems, however it is not easy to be replaced with new sensors when repairs are needed. In this study, the smart bridge bearing of which sensors can be replaced has been developed to overcome such a problem. In this study, strain signals were used for measuring both of vertical displacements and loads. FBG sensors(fiber optic Bragg-grating sensors) have been used for measurement of the strain signals since it is prevented from electronic noise by mediating light, enables the simplification of the measuring cable by multiple measurement, and is easy to place by lightweight and small size. The possibility of use was reviewed for smart bridge bearing based on FBG sensors through tests.

1. 서 론

국내에서는 지진재해대책법 시행령이 2008년 3월에 공포되었으며 2009년 3월에 개정되어 내진보강 대책 및 내진설계기준과 관련된 법규(제정 2009. 3. 26 소방방재청령 제72호)에 의해 기존시설물의 내진보강이 의무화되고 있다. 그러므로 기존의 선진국 제품에 비해 열위인 내진장치들의 주요 재료성능,

설계, 제작기술 등에 대한 연구가 진행되고 있는 추세이다. 재료성능, 제작기술과 같은 내진장치의 기술적인 문제 이외에도 교량의 완공 후 부등침하, 시공 오차 등 여러 요인으로 단부에 단차가 발생할 수 있으며, 설계하중과는 다른 하중이 교량받침에 작용하여 사용성을 크게 떨어뜨릴 수 있다. 그러므로 상시적으로 교량받침에 작용하는 하중의 계측이 가능한 받침형 스마트 교량 내진장치의 개발이 필요할 것으

† Corresponding Author ; Member, Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University
E-mail : nskim@pusan.ac.kr

Tel : +82-51-510-2352, Fax : +82-51-513-9596

* Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

** Department of Engineering Research, ESCO RTS

‡ Recommended by Editor Moon Kyu Kwak

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

로 판단된다.

받침형 내진장치를 이용하여 교량의 변위응답과 하중을 계측하는 연구가 국내외 적으로 많이 진행되고 있다. 로드셀을 받침에 적용하여 하중을 계측하는 연구⁽¹⁾가 진행된바 있으며, 승강식받침으로 받침에 유압장치 등을 설치하여 필요시에 간단한 작업을 통해 상부구조를 승강시킬 수 있도록 한 교량받침이 개발된바 있다⁽²⁾. 또한 LVDT를 이용하여 교량받침의 수직변위 및 수평변위를 계측하는 연구와 광섬유 센서를 로드셀 형식으로 제작을 하여 받침에 적용한 연구가 진행된바 있다⁽³⁾. 압력센서를 이용하여 받침의 하중을 계측하는 연구가 진행된바있으며, 변형률 센서나 가속도센서를 받침에 부착하여 교량의 변위응답을 계측하는 연구가 수행되었다⁽⁴⁾. 기존에 제시된 방법들은 센서를 매립하는 방법으로써 센서의 오작동시 교체가 불가능하다는 단점이 있다. 따라서 이 논문에서는 탈부착이 가능한 변위센서를 적용하여 계측 변위응답으로부터 수직하중을 계측할 수 있는 내진장치를 개발하였다.

변위응답의 계측 시 변위센서(레이저변위계, LVDT, 영상처리기법⁽⁵⁾ 등)를 이용한다면 비교적 정확한 변위응답의 계측이 가능하다. 또한 변형이 큰 재료의 변형을 계측할 수 있는 Clip gauge⁽⁶⁾가 개발되었다. 그러나 기존의 변위센서들은 이 논문에서 계측하고자 하는 위치에 적용성이 떨어진다는 단점이 있다. 따라서 교량 내진장치에 적용이 가능한 변위센서를 개발하였다. 개발한 변위센서는 변형률신호를 계측하여 변형률신호로부터 수직변위를 계측하는 센서이다. 전기저항식 변형률센서를 이용하여 변형률신호를 계측할 경우 계측 위치가 많아질수록 비경제적이며, 계측 케이블이 길어짐에 따라 전기적 노이즈가

크게 발생한다는 단점이 있다. 이런 문제점을 보완하기 위하여 빛을 매개체로 하기 때문에 전기적 노이즈의 영향이 없고 다중측정이 가능하여 계측 케이블을 간소화할 수 있으며 소형·경량이므로 설치가 간편한 광섬유 브래그 격자 센서(FBG sensor: fiber optic Bragg-grating sensor)를 사용하였다.

이 논문에서는 기존에 상용화 되어있는 EQS (Eradl quake system)에 FBG센서 기반 변위센서를 적용하여 FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치를 개발하였다. FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치는 이 논문에서 개발한 FBG센서 기반 변위센서로부터 계측한 변위응답과 폴리우레탄 디스크의 응력-변형률 곡선으로부터 수직하중의 추정이 가능한 내진장치이다. 수직변위 및 수직하중의 계측이 가능한 FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치의 사용성을 검증하기 위하여 실내실험 및 실외실험을 수행하였다.

2. FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치의 개발

이 논문에서는 기존에 상용화 되어 있는 교량받침 중 EQS에 FBG센서 기반 변위센서를 적용하여 수직변위 및 수직하중의 계측이 가능한 FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치를 개발하였다. EQS는 상, 하부구조물 사이에서 복원력을 제공하며 회전을 수용하는 하중전달 베어링과 같은 기능을 수행하는 교량받침이다. EQS에는 상시 상부 구조물의 수직하중 및 회전변위를 수용하는 폴리우레탄 디스크가 내장되어있다. 그러므로 수직하중을 수용하는 폴리우레탄 디스크의 수직변위응답을 계측한다면 EQS에 작용하는 수직하중의 추정이 가능할 것으로 판단된

Fig. 1 Smart seismic device using FBG sensor

다. 따라서 이 논문에서는 폴리우레탄 디스크의 수직변위응답의 계측이 가능한 변위센서를 개발하였다. 개발한 변위센서를 EQS에 적용하여 수직변위응답의 계측 및 수직하중의 추정이 가능한 FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치를 개발 하였다.

Fig. 1은 개발한 FBG센서 기반 스마트 교량 내진 장치이다. Fig. 1과 같이 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유격자에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다. 광 스펙트럼 분석기에 나타난 파장의 변화를 이용하여 변형률신호를 계측한다. 여기서 P 는 파장의 크기, λ 는 파장, n_{eff} 는 유효굴절률, 그리고 A 는 격자 간격이다.

2.1 FBG센서를 적용한 변위센서의 개발

폴리우레탄 디스크의 수직변위를 계측하기 위하여 Fig. 2와 같은 FBG센서를 사용한 변위센서를 개발하였다. FBG센서는 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 하중작용 시 변형이 발생하는 빔의 중앙에 설치한다. FBG센서를 적용한 변위센서에 수직변위가 발생하게 되면 변위센서의 중앙에 설치되어 있는 빔에 곡률이 발생하게 된다. 발생한 곡률을 FBG센서를 이용하여 계측함으로써 변위응답을 계측하게 된다.

FBG센서를 적용한 변위센서는 곡률과 변위의 관

계식으로부터 수직변위를 계측하는 센서이다. 곡률과 변형률의 관계는 식 (1)과 같다. 여기서 r 은 길이가 L 인 빔의 곡률반경, δ 는 빔 단면의 중립축으로부터의 연단거리 그리고 ε 는 표면부분의 변형률이다.

$$r = \frac{\delta}{\varepsilon} \quad (1)$$

단순보에 하중이 작용하면 볼러부분이 이동하면서 Fig. 3과 같이 휨이 발생하게 된다. 이와 같이 Fig. 2에서 센서의 빔 부분을 단순보로 가정한다면 센서에 압축하중이 작용할 경우의 수직변위를 추정할 수 있다. 식 (2)와 같이 θ 를 알기 위하여 $\sin\theta$ 를 구하고, $r\theta = L/2$ 이므로 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\sin\theta = \frac{L - \Delta x}{2r} \quad (2)$$

$$\sin\left(\frac{L}{2r}\right) = \frac{L - \Delta x}{2r} \quad (3)$$

식 (3)을 수직변위(Δx)에 대하여 정리를 하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 빔 단면의 중립축으로부터의 연단거리와 빔의 길이는 변위센서의 설계과정에서 정해진다. 그러므로 식 (4)로부터 계측변형률 신호와 수직변위의 관계식을 구할 수 있다. 식 (4)에서 변형률이 0이면 발산하게 된다. 그러나 수직변형이 발생한 상태로 센서를 제작함으로써 변위응답이 발산하지 않도록 제작하였다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= L - 2r \sin\left(\frac{L}{2r}\right) \\ &= L - 2 \frac{\delta}{\varepsilon} \sin\left(\frac{\varepsilon L}{2\delta}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 FBG센서를 적용한 변위센서의 검증

(1) 계측변위응답의 비교분석

이 논문에서 개발한 FBG센서를 적용한 변위센서의 정밀도를 검증하기 위하여 기존의 변위센서로 계측한 변위와 비교분석을 하였다. 수직변위를 1 mm 씩 증가 시켰을 경우 계측변위의 오차분석을 통하여 정밀도를 검증하였다. Fig. 4는 이 논문에서 개발한 FBG센서를 적용한 변위센서의 정밀도를 검증하기 위하여 기존의 변위계(레이저변위계)로 계측한 변위와 FBG센서를 적용한 변위센서로 계측한 변위를 비교한 것이다. FBG센서를 적용한 변위센서의 신뢰

Fig. 2 Displacement sensor using FBG sensor

Fig. 3 Bending shape of simple beam

도를 확인하기 위하여 4개의 센서를 제작하여 정밀도 분석을 실행하였다.

FBG센서를 적용한 변위센서의 정확도와 정밀도를 확인하기 위하여 식 (5)의 percent error와 식 (6)의 RMS(root mean square) error를 사용하여 오차 분석을 수행하였다. 여기서 n 은 계측 데이터 수, δ_m 는 변위계로 계측한 변위응답이며, δ_c 는 이 논문에서 제안한 FBG센서를 적용한 변위센서로 계측한 변위응답이다.

$$\text{Percent error} = \frac{\sum_{i=1}^n (\delta_m - \delta_c)^2}{\sum_{i=1}^n (\delta_m)^2} \quad (5)$$

$$\text{RMS error} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_c - \delta_m)^2}{n}} \quad (6)$$

Table 1은 개발한 센서의 정밀도에 대한 오차분석 결과이다. Table 1에서 확인할 수 있듯이 percent error는 0.01 % 이하이며, RMS error는 0.05 mm 이하이다. 따라서 개발한 FBG센서를 적용한 변위센서를 이용한다면 신뢰성있는 변위응답의 계측이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 4 Accuracy analysis

Table 1 Errors of developed sensors

	Percent error(%)	RMS error(mm)
Sensor 1	0.0094223	0.051201
Sensor 2	0.00019205	0.007382
Sensor 3	0.010042	0.053329
Sensor 4	0.0081303	0.048195

(2) 피로실험을 통한 내구성 검증

이 논문에서 개발한 FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치는 교량에 설치되는 장비로서 야외에 설치되는 것과 동시에 피로하중을 전달 받는 장치이다. 수직하중은 크게 고정하중과 이동하중으로 나눌 수 있는데 도로교에서 고정하중은 구조물의 사하중이고 이동하중은 차량하중이다. 차량의 교량통과 시 교량에 처짐이 발생하게 되고 이 처짐은 교량내진장치에 피로하중으로 작용하게 된다. 그러므로 교량에 작용하는 피로하중에 의한 FBG센서기반 스마트 교량내진장치의 내구성을 검증할 필요성이 있다. 그러나 EQS는 기존에 상용화되어 사용되어지고 있는 제품이므로 피로하중에 대한 검증이 완료된 상태이다. 그러므로 FBG센서기반 스마트 교량내진장치에 내장되는 FBG센서를 적용한 변위센서의 피로하중에 대한 내구성 검증이 필요하다.

피로실험의 장비는 Fig. 5의 피로시험기를 사용하였으며, 개발한 FBG센서를 적용한 변위센서를 설치하기 위하여 Fig. 6과 같이 폴리우레탄 디스크에 위아래로 철판을 삽입하여 피로실험을 수행하였다.

Fig. 5 Test machine

Fig. 6 Developed sensor test

개발한 FBG센서를 적용한 변위센서의 설치위치는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7 Locations of developed sensors in fatigue test

Fig. 8 Load curve for fatigue test

Fig. 9 Measured displacement response using developed sensor

AASHTO LRFD(2007)에 근거해서 설계 규정을 채택한 국내 도로교설계기준(2005)은 200만회 수준의 반복횟수에서 다른 설계기준들보다 보수적인 응력변동폭을 제시하고 있다. 이 논문에서 개발한 변위-하중센서는 교체가 가능하며, 계측 필요시에만 센서의 설치가 가능함으로 20만회의 피로실험에 대한 내구성을 검토하였다. 피로실험은 고정하중이 500 kN 이고, 200 kN의 하중이 반복적으로 가력된다고 가정하여 Fig. 8과 같이 500~700 kN의 하중을 3.0 Hz로 20만회 반복하는 피로실험을 수하였다.

피로실험을 수행한 결과 FBG센서를 적용한 변위센서로부터 Fig. 9와 같은 변위응답을 계측할 수 있었다. Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 최대변위와 최소변위의 차가 일정함을 확인할 수 있다. 그러므로 20만회의 피로하중 이후에도 충분히 변위응답을 계측할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 FBG센서를 적용한 변위센서는 피로에 대한 내구성이 우수함을 확인할 수 있었다.

3. FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치의 성능검증실험

3.1 실험내용

FBG센서 기반 스마트 교량내진장치의 성능검증 실험으로 수직하중 재하실험을 수행하였다. 시험방법 및 기준은 건설교통부 제정 도로교 표준시방서 및 미국도로환경안전협회규격의 디스크 받침 재하시험 기준에 명시된 바에 준하여 실시하였다. Fig. 10의 실험은 수직하중 재하실험이다. 성능검증실험의 실험방법은 시험 최대수직하중은 EQS의 최대하중보다 50 % 가산하여 설정하고, 최대수직하중을 5구간으로 나누어 구간별로 2분간 하중유지 후 최대수직하중에서 60분간 유지하며, 5구간으로 나누어 구간별로 2분간 하중을 제거하는 실험이다.

Fig. 11은 성능검증실험 사진이며, Fig. 12는 실험에 사용된 계측센서로서 이 논문에서 개발한 FBG센서를 적용한 변위센서와 LVDT 사진이다. Fig. 13은 FBG센서를 적용한 변위센서와 LVDT의 설치 위치이다. Fig. 13에서 확인할 수 있듯이 FBG센서를 적용한 변위센서는 폴리우레탄 디스크의 수직변위를 계측할 수 있도록 설치였으며 LVDT는 폴리우레탄 디스크의 수직변위응답의 계측이 불가능하여 EQS

Fig. 10 Load curve for performance verification test

Fig. 11 Performance verification test

(a) Developed sensor

(b) LVDT

Fig. 12 Measurement sensors used in performance verification test

Fig. 13 Locations of sensors in performance verification test

Table 2 Error analysis using performance verification test results

	5000 kN EQS	6000 kN EQS
Percent error(%)	17.054	8.716
RMS error(mm)	3.1198	2.197

전체의 수직변위를 계측하도록 설치하였다. 이 논문에서 개발한 FBG센서를 적용한 변위센서와 LVDT의 계측위치가 다르므로 두 센서의 변위응답의 정확한 비교가 불가능할 것으로 판단되나 변위센서간의 변위응답 형상은 유사하게 나타날 것으로 판단된다.

3.2 실험결과

Fig. 14와 15는 이 논문에서 개발한 FBG센서를 적용한 변위센서와 LVDT의 변위응답을 비교한 것이다. LVDT로 계측한 변위응답과 개발한 FBG센서를 적용한 변위센서로 계측한 변위응답의 오차분석 결과는 Table 2와 같이 percent error는 8% 이상의 오차가 발생하였으며, RMS error는 2 mm 이상의 오차가 발생하여 오차가 크게 발생한 것을 확인 할 수 있다. 오차가 크게 발생한 이유는 LVDT는 Fig. 13과 같이 EQS의 총 높이의 변화량을 계측한 것이고 개발한 FBG센서를 적용한 변위센서로 계측한 변위응답은 폴리우레탄 디스크의 높이 변화를 계측한 것이기 때문이다. EQS에는 폴리우레탄과 강재 이외에도

(a) Comparison of displacement responses

(b) Load-displacement curve

Fig. 14 Test results of 5000 kN EQS

(a) Comparison of displacement responses

(b) Load-displacement curve

Fig. 15 Test results of 6000 kN EQS

윤활 미끄럼판이 삽입되어 있으며, 수직력이 작용할 경우 모든 재료에 압축력이 작용하게 된다. 그러므로 FBG 센서를 적용한 변위센서로 측정한 변위응답이 LVDT로 측정한 것보다 작게 측정한 것으로 판단된다. 그러나 변위응답의 형상은 유사하게 나타나는 것을 Fig. 14와 15를 통하여 확인할 수 있다.

EQS의 총 높이의 변화량을 측정하여 수직하중을 추정하는 것은 EQS내의 많은 재료의 특성을 파악하고 재료적인 특성의 상호작용을 고려하여 하중을 추정하여야 함으로 어려움이 따른다. 그러므로 수직하중을 모두 수용하고 하나의 재료로 구성된 폴리우레탄 디스크의 높이 변화를 이용하여 수직하중응답을 추정한다면 더욱더 명확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

폴리우레탄 디스크는 Fig. 14와 15에서 확인할 수 있듯이 잔류변형이 발생한다. 그러나 잔류변형이

발생한 이후에는 하나의 값으로 수렴하므로 최종변형에 대하여서는 변위와 하중의 관계를 추정할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 잔류변형이 사라진 이후의 변위와 하중의 관계를 통하여 추세선을 추정할 필요성이 있다. 하중이 증가 및 감소할 경우 변위의 수렴 위치로부터 회귀분석하여 Fig. 14(b), 15(b)와 같이 추세선을 예측하였다.

Fig. 14(b), 15(b)의 추세선을 이용하여 응력-변형률 곡선을 그려보면 Fig. 16과 같다. 초기 변형이 발생한 이후이므로 변형률이 영점에서 시작하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그리고 두 개의 실험이 정확히는 일치하지 않으나 유사한 경향으로 변형이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 두 응력-변형률 곡선의 차이는 폴리우레탄 디스크 용량에 따른 형상의 차이 때문인 것으로 판단된다.

폴리우레탄 디스크의 재료특성상 잔류변형이 발생

Fig. 16 Stress-strain curve

Fig. 17 Averaged stress-strain curve

하였으나 하중이 작용한 이후 시간이 지남에 따라 잔류변형이 사라지므로 최종변위로부터 교량의 고정 하중의 계측은 가능할 것으로 판단된다.

성능검증실험을 통하여 Fig. 17과 같은 EQS의 평균 응력-변형률곡선을 추정하였으며 곡선식은 식 (7) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = 0.935 - 11.522x + 3812.548x^2 - 1461.859x^3 \quad (7)$$

4. 현장실험

4.1 실험교량

FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치를 이용하여 실험교량의 고정하중의 계측이 가능한지 알아보기 위하여 강박스교량에 개발한 내진장치를 적용하였다. 실험교량으로 선택한 교량은 기존교량을 확장하는 교량

Fig. 18 Target bridge for field test

Table 3 Dimensions of target bridge

Structure type	Span length	Width
Four-span continuous steel box girder bridge	70@4×4=1120 m	33 m

Fig. 19 Measuring system

Fig. 20 Applications of smart bridge bearing for field test

Fig. 21 Locations of smart bridge bearing for field test

으로써 기존교량에는 EQS를 교체하는 작업을 수행하고, 확장부를 건설하여 연결하는 교량이다. 실험교량은 Fig. 18과 같으며, 교량의 제원은 Table 3과 같다.

4.2 실험내용

강박스교량에 FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치가 설치된 구간은 확장구간이므로 확장구간의 고정하중을 계측하였다. 확장구간의 시공단계는 강박스를 설치한 상태이므로 강박스에 의한 고정하중만을 계측하였다.

실험에 사용된 교량은 시공단계에 있는 교량이므로 하중의 분배가 이루어 지지 않은 상태로 사료된다. 그러므로 교량받침에 작용하는 각각의 하중을 비교하는 것보다 교량의 전체하중을 비교하는 것이 명확할 것으로 판단된다.

Fig. 19는 반력응답 계측장치이며, Fig. 20은 FBG센서 기반 스마트 교량내진장치이다. 실내실험이 아닌 현장실험에서 중요한 계측인자중의 하나가 온도이며, 광섬유센서는 온도에 민감하여 온도센서로도 사용되는 센서이다. 그러므로 이 연구에서는 온도보정을 위하여 FBG센서 기반 스마트 교량내진장치의 센서부에 온도보정을 위한 FBG센서를 설치하여 온도에 대한 오차를 보정하였다. 하중응답의 계측은 Fig. 21과 같이 4경간 연속보에 적용된 FBG센서 기반 스마트 교량내진장치에 작용하는 반력을 계측하였다.

4.3 실험 결과

평균 응력-변형률곡선을 이용하여 Table 4와 같이 교량의 경간별 고정하중을 계측하였다. 계측하중과 설계하중을 비교한 결과 경간별 하중은 오차가 크게 발생하였으나 총하중은 오차가 적은 것을 확인할 수 있다. 실험에 사용된 교량은 강박스를 설치하고 있는 시공단계이므로 하중분배가 정확히 이루어진 상태가 아니라고 할 수 있다. 그러므로 총하중의 오차가 0.5% 미만이므로 개발한 FBG센서 기반 스마트

Table 4 Measurement results from field test

	Span1	Span2	Span3	Span4	Total
Design load(kN)	1687.8	1190.1	1360.8	1845.5	6084.2
Measuring load(kN)	1579.8	1282.8	1451.6	1766.8	6081.1
Error rate(%)	12.80	22.37	11.24	23.34	0.42

교량 내진장치의 사용성이 우수한 것으로 판단된다. 따라서 개발한 FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치를 사용하여 교량의 고정하중을 계측할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 논문에서는 수직변위의 계측이 가능한 FBG센서 기반 변위센서를 개발하였으며, 개발한 FBG센서를 적용한 변위센서를 활용하여 수직변위 및 수직하중의 계측이 가능한 FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치를 개발하였다. 개발한 FBG센서 기반 변위센서의 정밀도를 실내실험을 통하여 검증하였으며, 피로실험을 통하여 내구성을 검토하였다. 개발한 FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치의 사용성을 검증하기 위하여 압축특성실험 및 성능검증실험을 수행하였다. 압축특성실험을 통하여 이 논문에서 개발한 FBG센서를 적용한 변위센서의 성능을 검증한 결과 사용성이 우수함을 확인할 수 있었다. 또한 성능검증실험을 통하여 하중-변위곡선을 예측할 수 있었다.

폴리우레탄 디스크의 응력-변형률 곡선을 이용하여 강박스교량의 고정하중을 계측한 결과 고정하중의 계측이 가능한 것으로 판단된다. 고정하중을 계측함으로써 교량의 시공 시 시공오차를 줄일 수 있으며 교량에 작용하는 하중의 분석을 통하여 교량의 적절한 보수·보강 시기를 제시하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

향후 FBG센서기반 스마트 교량 내진장치를 교량 관리 시스템(BMS : bridge maintenance system)⁽⁷⁾과 연계한다면 교량의 유지 관리를 최적화하고 비용 감소를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(IT기반 스마트 교량 내진 장치 개발)의 연구비지원에 의한 것이며, 이 실험에 KREONET망 서비스를 이용할 수 있도록 해 주신 KISTI에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Cho, J. R., Kim, Y. J., Park, S. Y., Kim, B. S. and Lee, J. I., 2002, Development of High Performance Bearings for Bridge : Load Measurable Bearing, Proceedings of the KSCE Annual Conference, pp. 380~383.
- (2) Kim, Y. J., Cho, J. R., Park, S. Y., Kim, B. S. and Yoo, M. S., 2002, Development of High Performance Bearings for Bridge II : Injectionable Bearing, Proceedings of the KSCE Annual Conference, pp. 384~387.
- (3) Udd, E., Schulz, W. L., Seim, J. M., Corona-Bittick, K., Dorr, J., Slattery, K. T., Laylor, H. M. and McGill, G. E., 1999, Fiber Optic Smart Bearing Load Structure, Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways III, Steven B. Chase, Editors, pp. 40~48.
- (4) Agrawal, A. K., Subramaniam, K. and Pan, Y., 2005, Development of Smart Bridge Bearings System: a Feasibility Study, Department of Civil Engineering the New York State Department of Transportation, NY 10031.
- (5) Heo, S., Lee, B. H. and Jang, I. Y., 2011, Measurement of Static and Dynamic Displacement by Image Processing and Study for Prediction Method of Velocity and Acceleration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 2, pp. 112~119.
- (6) Fleck, N. A., 1983, Some Aspects of Clip Gauge Design, Strain, Vol. 19, No. 1, pp. 17~22.
- (7) Jang, J. H., Kim, W. J., An, H. H., Lee, S. H.

and Jung, T. Y., 2003, Sensor Based Bridge Monitoring System, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 602~607.

Sung-Jin Chang received a master's degree in Civil Engineering from Pusan National University, 2008. He is a Ph.D. student in the Department of Civil and Environmental Engineering at Pusan National University. His re-

search interests include dynamic properties estimation and maintenance of bridges, smart monitoring system and seismic isolation devices. He has been researched for developing a B-WIM system using FBG sensors based devices.

Nam-Sik Kim is Associate Professor of Civil and Environmental Engineering at Pusan National University. He received his Ph.D. in Structural Engineering from the Civil and Environmental Engineering Department at KAIST in

1994. His expertise includes Structural Health Monitoring and Ambient Vibration Tests of Civil Infrastructures. He has been involved in the Super Long Span Bridge R&D Project. He is also currently involved with the Korean research team to evaluate and assess the seismic isolation systems for nuclear power plants. He is a Fellow of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering.

Joon-Ho Back received Ph.D. degree in Metal Engineering from Chungnam University in 2009. He is currently a department manager with the Department of R&D center at ESCO RTS, Korea. As a project manager, he has accom-

plished more than 15 research projects supported by nation, and subject of the projects were structure isolator, vibration control system, pipe fitting and blade for wind turbine.