

## 다중화된 FBG센서를 이용한 중공 내민보의 정적 거동 분석

### Static Behavior of Hollow Cantilever Beam Using Multiplexed FBG Sensors

이태희\*, 강동훈\*\*, 정원석\*<sup>†</sup>, 목영진\*

Tae-Hee Lee\*, Donghoon Kang\*\*, Wonseok Chung\*<sup>†</sup> and Young-jin Mok\*

초 록 본 연구는 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG)센서를 이용하여 캔틸레버의 수직 처짐을 산정하고 이를 통하여 횡방향 하중을 받는 말뚝기초 거동 분석을 위한 사전연구를 수행하는데 목적이 있다. 말뚝기초를 모형화한 길이 1.7 m의 정방 중공 형강 내민보를 실험실에 설치하고 실험체 측면의 상하부 표면에 4개의 센서로 다중화된 2쌍의 FBG 센서를 설치하였다. 결과 비교를 위해 FBG 센서가 설치된 동일 위치에 전기식 게이지를 설치하였다. 하중은 고정단에서 1.47m 지점에 액츄에이터를 통한 변위 제어 방법으로 재하 하였다. 실험을 통해 측정된 FBG 센서의 파장변화로부터 변형률과 곡률을 산정하였고 기하학적 처짐-곡률 관계와 회귀분석을 통하여 처짐을 유추하였다. FBG 센서를 통해 산정된 변형률과 처짐을 각각 전기식 게이지의 변형률 측정값, 이론 처짐값과 비교분석 하였다. 측정된 FBG 센서와 전기식 게이지의 변형률은 근사한 결과를 나타내었으며, 이론적으로 산출한 처짐과 FBG 센서로부터 도출한 처짐도 우수한 상관관계를 보였다. 실험결과를 통하여 FBG 센서를 도입한 말뚝 기초 거동분석을 성공적으로 이루어내기 위해서는 FBG 센서로 측정 가능한 한계 변위의 산정 및 증대 방안이 필요하며, 센서 오작동시 대처 방법에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

주요어: 광섬유 브래그 격자, 횡하중, 말뚝 기초, 중공 내민보, 변형률, 처짐, 재하실험

**Abstract** This paper presents a preliminary study to monitor the lateral behavior of pile foundation using multiplexed fiber Bragg grating(FBG) sensors. In the preliminary study, an 1.7 meter long cantilever beam with the shape of square hollow box was fabricated and tested under the static loading. Four FBG sensors were multiplexed in a single optical fiber and installed into the top and bottom of the cantilever beam. The strains are directly measured from FBG sensors followed by curvature calculations based on the plane section assumption. Vertical deflections are then estimated using the regression analyses based on the geometric relationships. It has been found that excellent correlation with conventional sensing system was observed. The success of the test encourages the use of the FBG sensing system as a monitoring system for pile foundations. However, further consideration should be given in the case of the sensor malfunction for the practical purpose.

**Keywords:** Fiber Bragg Gating, Lateral Behavior, Pile Foundation, Hollow Cantilever, Strain, Deflection, Load Test

#### 1. 서 론

지반 내에 설치되는 기초구조물은 상부구조물에

비해 구조물의 변형률 측정이 용이하지 못하다. 상부구조물의 경우, 구조물이 공기 중에 노출되어 있어 원하는 지점과 시점에 센서를 설치하여 그에 대

한 평가를 내릴 수 있으며 센서의 오작동에 대하여 신속히 대처 할 수 있다. 하지만 기초구조물의 경우, 구조물이 토사로 밀폐되어 있어 센서의 설치와 유지관리가 자유롭지 못하며 센서를 설치하는 시점에도 제약이 따른다.

현재 상부구조물의 변형을 측정에 주로 이용되고 있는 전기식 변형률 게이지는 기초구조물의 변형률 측정에 한계를 가지고 있다. 전기식 변형률 게이지는 일반적으로 각 센서당 하나의 리드선을 연결해야 한다. 따라서 계측 규모가 커질수록 복잡한 계측선을 구성해야 하며, 기초구조물의 경우 이러한 복잡한 계측선의 구성이 내구성의 결함 및 센서의 오작동으로 이어질 가능성이 있다. 또한 센서로의 접근이 용이 하지 못해 센서 이용 중에 생길 수 있는 문제를 대처하기가 난해하다. 이 밖에 센서의 재설치가 어려운 기초구조물에서 자기열 효과로 인한 수명단축으로 장기적인 관측이 어려우며 일회성 측정에 머무를 수 있다는 점에서 전기식 변형률 게이지 적용이 적합하지 않다는 것을 알 수 있다.[1]

그 외에 구조물의 변위 측정에 이용되는 처짐계(LVDT)를 적용하려면 처짐계를 지지할 수 있는 지점과 계측기와 계측 지점 간의 일정간격이 요구된다. 그러나 말뚝 기초의 횡방향 거동을 측정할 경우에는 이러한 조건을 충족시키기가 불가능하여 처짐계의 적용이 어렵다.

최근 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있는 FBG 센서는 광원을 이용한 측정으로 센서 자체결합에 의한 문제가 발생할 소지가 적어 장기적인 측정이 가능하며, 직경이 작은 하나의 광섬유에 여러 개의 센서를 배치하는 다중화가 가능하여 센서 설치로 인한 기초 구조물의 내구성 저하의 영향을 무시할 수 있다. 이러한 FBG 센서의 특징은 앞서 언급한 구조물이 밀폐됨에 따라 생기는 센서 설치의 제한 사항 및 기존 센서들의 설치에 따른 문제점을 감소시킬 수 있다.

이러한 여러 가지 장점으로 인해 토목 교량 및 철도 분야에서는 다양한 적용이 이루어지고 있으나 [2-7] 기초구조물에 대한 FBG 센서의 적용은 활발히 진행되고 있지 않고 있다. 특히 횡방향 하중을 받는 말뚝 기초에 FBG 센서를 도입한 사례는 전무하다. 말뚝 기초에서의 횡방향 거동은 기술적으로 가장 취약한 부분이며 상부구조물에 영향이 큰 핵심 거동이다. 축하중을 받는 말뚝 기초의 FBG 센서 적용은 매입말뚝의 축하중 하중전이와 같은 연

구 결과가 도출되었지만[1], 공학적으로 간단하며 취약성과 상부구조물에 미치는 영향으로 볼 때, 모니터링의 우선순위에서 많이 떨어진다. 따라서 FBG와 같은 첨단 센서를 적용하여 말뚝 기초의 수평 거동을 예측하고 모니터링하는 기술의 연구에 초점이 모아져야 한다.

본 연구에서는 상부구조물의 안정성에 큰 영향을 미치는 횡방향 하중을 받는 말뚝 기초의 거동을 분석하기 위하여 FBG 센서를 도입한 말뚝 모형의 정방 중공형 내민보 실험체를 제작하였으며, 기존의 전기식 변형률 게이지와 비교 분석을 통해 향후 실제 현장의 말뚝 기초에 FBG 센서를 도입할 때 생기는 문제점을 도출해내고자 한다. 또한 말뚝 기초의 횡방향 변위 측정을 위한 처짐 유추법을 적용하여 그 타당성을 검토하고자 한다.

## 2. 광섬유 센서의 이용

FBG 센서의 격자에서 반사되는 브래그 파장은 브래그 격자 간격의 함수로써 식 (1)과 같이 알려져 있으며[8], 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률 등의 물리량을 식 (2)를 통하여 계산 할 수 있다. 식 (2)는 FBG 센서가 사용되는 기본 원리이며, 본 연구에서는 센서 자체 및 주변의 온도변화가 없다는 것을 감안하여  $\Delta T = 0$ 로 가정하였다. 따라서 식 (2)는 브래그 파장의 변화량( $\Delta \lambda_B$ )으로 구조물의 변형률( $\epsilon$ )을 산정할 수 있는 식 (3)과 같이 표현 할 수 있다.

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

$$\Delta \Lambda = \lambda_B [(\alpha_f + \xi_f) \Delta T + (1 - p_e) \epsilon] \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{1}{1 - p_e} \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \quad (3)$$

여기서,  $n_e$ 는 광섬유 격자의 유효 굴절률 (effective refractive index),  $\Lambda$ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격,  $\alpha_f$ 는 광섬유의 열팽창 계수 (thermal expansion coefficient),  $\xi_f$ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수 (thermo-optic coefficient),  $p_e$ 는 광탄성 상수 (photoelastic constant)로 본 연구에서는 0.229를 사

용하였다.

본 연구에서는 4쌍의 다중화 된 FBG 센서를 2열로 내민보의 측면 상·하부에 설치하였으며, 각각의 FBG 센서를 통해 측정된 브래그 파장 변화율식 (3)에 대입하여 변형률을 유추하였다. FBG 센서를 종단면에 중립축과 평행하게 설치하였으므로 유추된 변형률로부터 식 (4)을 사용하여 곡률을 산정할 수 있다[2, 9].

$$k_i = (\epsilon_i^b - \epsilon_i^t)/h \quad (4)$$

여기서,  $\epsilon_i^b$ 와  $\epsilon_i^t$ 는 실험에서 사용된  $i$ 번째 종방향 FBG 위치에서의 상하부 변형률이며  $h$ 는 FBG 센서간의 수직 거리이다. 한편 구조물의 곡률은 식 (5)와 같이 수학적으로 고차 다항식의 형태의 함수로 표현할 수 있다.

$$k(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_nx^n \quad (5)$$

여기서,  $c_0, c_1, \dots, c_n$ 는 곡률함수 계수이며,  $x$ 는 구조물의 종방향 위치이다. 본 연구에서는 작용 하중이 연단 집중 하중이므로 곡률함수가 1차식으로 나타날 것으로 예측하여, 다항식을 식 (6)과 같이 사용하였다. 현장 말뚝 기초의 지중압력은 흙과 구조물의 상호작용에 의해 비균질한 분포하중의 형태로 작용될 가능성이 크므로 FBG 센서의 측정값에서 유추한 곡률로부터 적합한 고차 다항식의 적용을 고려해야 한다. 식 (6)의 곡률함수 계수는 실험에서 측정된  $k_i$ 를 이용하여 회귀분석을 수행하면 결정할 수 있다.

$$k(x) = c_0 + c_1x \quad (6)$$

구조물의 회전 변위 및 수직 처짐과 곡률과의 관계는 Euler-Bernoulli이론에 근거하여 식 (7), 식 (8)과 같이 표현 할 수 있다.

$$k(x) = \frac{d\theta(x)}{dx} \quad (7)$$

$$k(x) = \frac{d^2w(x)}{dx^2} \quad (8)$$

여기서  $\theta$ 는 곡률이며,  $w$ 는 수직 처짐이다. 식 (6)의 곡률함수를 식 (7), 식 (8)에 대입하면 회전변위 및 수직 처짐은 식 (9), 식 (10)으로 정리 된다.

$$\theta(x) = b_0 + \int k(x)dx \quad (9)$$

$$w(x) = b_0 + b_1 + \iint k(x)dx dx \quad (10)$$

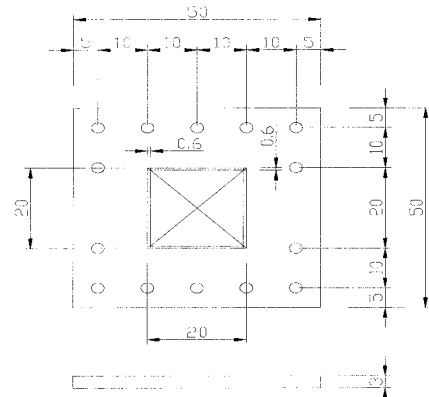
경계 조건인  $x = 0$ 일 때  $\theta = 0, w = 0$ 을 적용하여 적분상수  $b_0$ 와  $b_1$ 를 산정하면 구조물의 회전 변위 및 수직 처짐에 대한 함수식을 구할 수 있다.

### 3. 실험체 제원 및 실험 프로그램

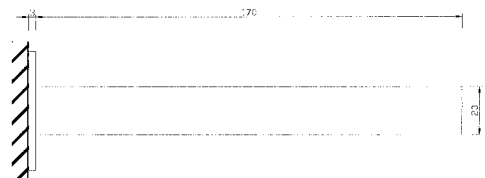
횡방향 하중을 받는 말뚝 기초의 실험을 모형화하기 위하여 중공 정방형 내민보 실험체를 제작하였다. 제작된 실험체는 Fig. 1과 같이 설치하였으며, Fig. 2(a), (b)와 같이 1700 m의 길이에



Fig. 1 Cantilever test specimen



(a) A cross section (unit : cm)



(b) A lateral view (unit : cm)

Fig. 2 Detailed drawing of cantilever

200 mm X 200 mm X 6 mm의 단면을 가진다. 내민보의 고정단을 구현하기 위하여 두께 30 mm의 볼트판을 내민보와 충분히 용접하였으며, 이를 14개 볼트를 이용하여 반력벽과 결합하였다.

Fig. 3과 같이 FBG 센서와 전기식 센서 각 4쌍을 지정된 위치(길이 방향을 기준으로 고정단에서 하중이 가해지는 지점까지의 약 4/4, 3/4, 2/4, 1/4지점)에 설치하였다. 설치된 FBG 센서의 사양은 Table 1과 같다. 2열로 평행하게 배치된 FBG 센서는 내민보 측면의 상하부 표면에 약 150 mm의 수직 간격을 두고 에폭시를 이용하여 부착하였다. 또한 FBG 센서의 변형률 측정 데이터를 검증하기 위하여 Fig. 4와 같이 길이 방향으로 동일한 위치에 FBG 센서와 약 5 mm의 수직 간격을 두고 전기식 변형률 게이지를 설치하였으며, FBG 센서로 유추한 처짐량을 검증하기 위하여 하중 재하 지점(FBG-t4, FBG-b4 지점)에 처짐계(LVDT)를 설치하였다.

각각의 센서 설치가 완료된 후, 액츄에이터(actuator)를 이용하여 고정단으로부터 1.47 m 지점에 변위 제어를 하며 파괴 시까지 하중을 점진적으로 증가 시켰다. 동일 시점을 기준으로 각 센서의 데이터를 측정하였으며, FBG 센서는 상하부의 2채널로 구성하여 1 Hz의 측정 주파수로 기록하고 전기식 변형률 게이지는 센서 수에 따라 8채널로 구성하여 기록하였다. 측정 결과는 광센서의 장점을 이용하여 FBG 측정 시스템으로부터 얻은 값을 별도의 필터링 작업없이 사용하였다. 실험에 사용된 interrogator는 FiberPro사의 IS7000으로 시스템 사양은 Table 2에 제시하였다.

내민보의 자중에 의한 처짐이 충분히 진행된 상태에서 실험을 실시하였으며, 이에 따라 실험 진행 중 자중에 의한 영향을 배제하였다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

실험 결과 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 약 78 kN의 하중에서 고정단으로부터의 파괴가 발생하였다. 본 연구에서는 실제 말뚝 기초의 모니터링 시 관심영역인 선형탄성 구간의 50 kN까지의 하중에서 거동을 분석하였다.

측정값중 변형률이 가장 많이 발생하는 고정단 근처의 FBG 센서(FBG-t1, FBG-b1)에서 오류가 발생하였고, 전기식 센서의 1개소(S-t3)에서 설치 부주의로 인한 부정확한 값이 측정되었다. Fig. 6(a),

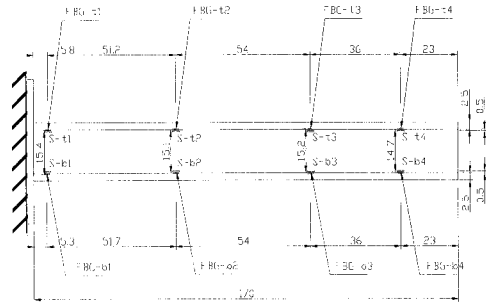


Fig. 3 Sensor layout (unit : cm)

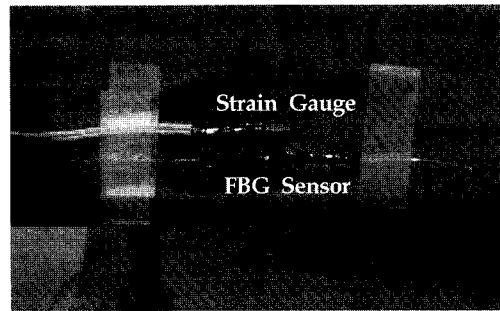


Fig. 4 Installation of FBG sensors and strain gauge

Table 1 FBG sensor specification

Center Wavelength (unit : nm)	FBG-t1	1536
	FBG-t2	1547
	FBG-t3	1551
	FBG-t4	1555
	FBG-b1	1536
	FBG-b2	1547
	FBG-b3	1552
	FBG-b4	1556
Optical fiber type	Single mode	
Refractivity	90%	
Grating length	10 mm	
Coating material	Acrylate	

Table 2 FBG interrogator system specification

Parameter	Specifications
Wavelength range	38nm(1532~1570nm)
Avg. output power	3 mW
Wavelength accuracy	< 5 pm (4.15 με)
Wavelength resolution	< 1 pm (0.83 με)
Measurement speed	< 200 Hz
Max. # of channels	8
Operating temperature	10 ~ 40 °C

(b)는 고정단 근처를 제외한 FBG 센서의 상부 측정 채널과 하부 측정 채널의 하중 재하 초기 신호 형상과 변형이 발생하여 파장이 천이되는 모습을 나타낸 것이다.

Fig. 7은 FBG 센서와 전기식 센서간 변형률을 비교한 결과이며 서로 비슷한 양상을 나타내었다. 이를 통하여 FBG 센서의 측정 결과를 검증할 수 있으며, 또한 각 센서 변형률 데이터에서 인장과 압축 양단의 변형률의 크기가 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 이는 광섬유 센서의 취약점인 압축 부에서의 측정이 불리하다는 점을 해소할 수 있는 결과로서 해당 실험체에 적합한 중립축을 설정한다면 인장부분의 측정만으로도 전체적인 처짐 양상을 도출해 낼 수 있음을 확인할 수 있다.

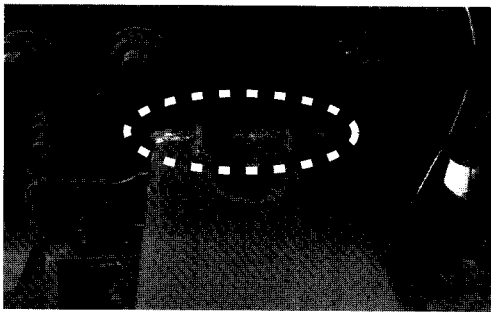
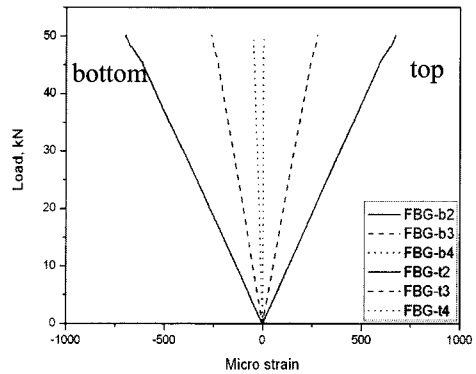
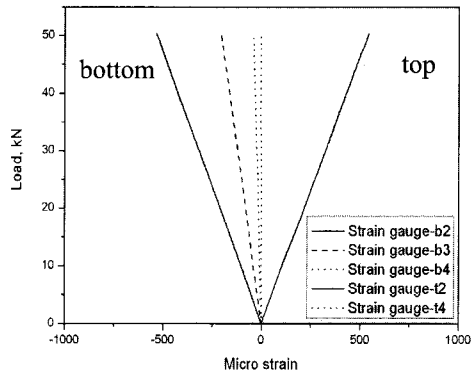


Fig. 5 Failure configuration of fixed support

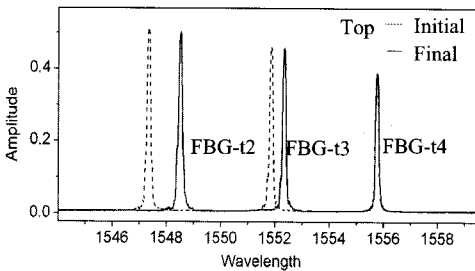


(a) FBG sensor

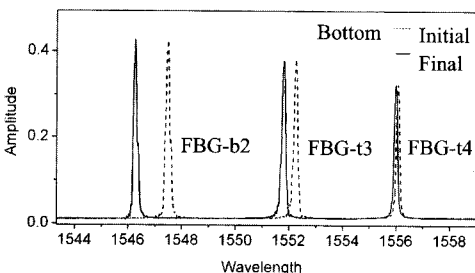


(b) Strain gauge

Fig. 7 Comparisons of strains



(a) Upper channel



(b) Lower channel

Fig. 6 Bragg wavelength shift

Fig. 8은 하중 재하지점에서의 처짐을 도출 방법에 따라 비교한 것이다. FBG 센서와 전기식 strain gauge의 부정확한 측정값으로 인하여 변형률을 비교할 수 있는 지점이 최초의 8개소에서 5개소로 감소하였다. 이로 인해 strain gauge로 유추되는 처짐량과의 FBG센서로 유추한 처짐량의 비교는 신뢰할 수 없다고 판단하였고, LVDT의 처짐량과 Bernoulli 보이론을 통하여 유추한 처짐량과의 비교를 수행하였다. FBG 센서로부터 유추해낸 처짐은 Bernoulli 보이론에 근거하여 산출된 처짐과 직접 LVDT로부터 측정된 처짐과 하중 축에 대하여 근사한 값을 나타내었으며, 이론적으로 산출된 처짐에 일정 크기의 오차가 생기는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 완벽한 고정단 구현이 이루어지지 않아 회전변위가 생겼을 가능성을 나타내며, 이론적으로 산출된 처짐과 FBG 센서로 유추된 처짐의 비교를 통하여 미흡한 고정단 구현으로 하중 재하지점에 생긴 회전변위의 차이( $\Delta\theta$ )를 도출해 냈다.

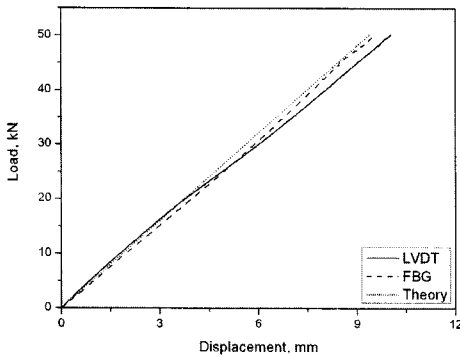


Fig. 8 Comparison of vertical displacement

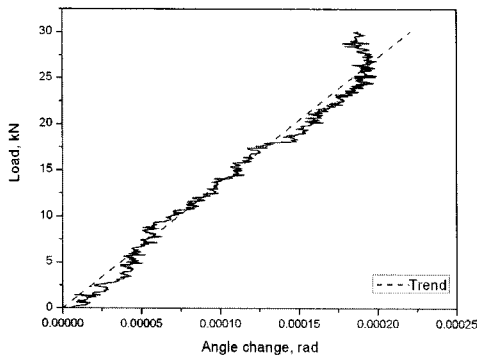


Fig. 9 Estimated support rotation

$\Delta\theta$ 는 FBG 센서로 유추된 처짐과 이론적으로 산출된 처짐 오차( $\Delta w$ )를 미소변형을 가정하여 식 (11)에 대입하여 산출하였다.

$$\Delta\theta = \frac{\Delta w}{L} \quad (11)$$

여기서  $L$ 은 처짐이 발생한 위치까지의 거리이며, 이를 통하여 얻어낸 결과를 Fig. 9에 나타냈다.

### 5. 결론

본 연구는 FBG 센서를 이용하여 횡방향 하중을 받는 말뚝 기초의 거동을 분석하기 위한 사전연구를 목적으로 수행되었다. 실험 결과를 통하여 FBG 센서와 전기식 센서의 변형을 비교 분석과 FBG 센서로 추정된 변위량, 이론추정 변위량, LVDT 측정값의 비교분석을 사용하중이 작용하는 탄성영역에서 수행하였다. 본 실험체는 약 50 kN까지를 탄성영역으로 가정하였으며 Fig. 6과 Fig. 7의 그래프를 얻었다. 각 데이터의 비교 결과 비슷한 양상을 나

타내었으며, 변위량 비교에서 최대오차율 5.1%의 우수한 일치율을 나타내었다. 하지만 실험과정에서 FBG 센서 2개소의 측정값 오류가 발생하였고, 향후 FBG 센서의 말뚝 기초 도입시 이러한 센서 오작동에 대처 가능한 시스템의 구축이 필요하다고 판단된다. 또한 말뚝 기초에서 발생 가능한 변위가 내민보에서보다 상대적으로 크므로 FBG 센서 측정이 불가능한 영역이 발생할 가능성이 있다. 따라서 FBG 센서의 측정 가능 변위 산정 및 증대 방안의 마련이 필요하다고 판단되며, 최종적인 현장 적용을 통하여 FBG 센서의 적용성에 대한 연구가 요구된다.

### 감사의 글

이 연구는 2008년도 경희대학교 연구비지원에 의한 결과임 (KHU-20081446).

### 참고문헌

- [1] 이원제, 김대규, 이우진, "광섬유 센서를 이용한 매입 말뚝의 하중 전이 측정", 대한토목학회 논문집, 제 21권, 제 3-C호, pp. 311~319, (2001)
- [2] D. Kang and W. Chung, "Integrated monitoring scheme for a maglev guideway using multiplexed FBG sensor arrays," NDT&E International. Vol. 42, No. 4, pp 260-266, (2009)
- [3] 강동훈, 정원석, 김현민, 여인호. "광섬유 센서를 이용한 경량전철 교량의 사용성 평가", 한국비파괴검사학회지, 제 27권, 제 4호, pp. 305-312. (2007)
- [4] 정원석, 강동훈, 최은수, 김현민. "광섬유 격자 센서를 이용한 철도 관형교의 증속 시험", 한국강구조학회 논문집, 제 17권 제 6호, pp. 681-688, (2005)
- [5] 조남소, 김남식, 이상배, "광섬유 격자 센서를 이용한 남해대교의 처짐 추정", 대한토목학회 학술 발표회 논문집, pp. 1~4, (2001)
- [6] 김남식, 조남소, "광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 교량의 수직 처짐 추정", 대한토목학회 논문집, 제 22권, 제 6-A호, pp. 1357~1366, (2002)

- [7] 광계환, 정현수, 장화섭, 강성진, "광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 연속교의 처짐 추정", 대한 토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 662~667, (2003)
- [8] E. Udd, *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley and Sons, New York, (1995)
- [9] S. Vurpillot, G. Kreuger, D. Benouaich, D. Celment and D. Inaudi, "Vertical deflection of a pre-stressed concrete bridges obtained using deformation sensors and inclinometer measurments," *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 5, pp. 518-28, (1998)