

다중화된 FBG 센서를 이용한 중공 내민보의 정적 거동 분석

Static Behavior of Hollow Cantilever Beam using Multiplexed FBG Sensors

이태희† 강동훈* 정원석** 목영진***
Lee, Tae-Hee Kang, Donghoon Chung, Wonseok Mok, Young-Jin

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.

1. 서 론

최근 국내 토목분야에서 fiber Bragg grating(FBG) 센서를 적용한 구조물의 모니터링 시스템 구축에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 이러한 연구는 대부분 상부 시설물에 한정되어 진행되고 있으며, 하부구조물에 대한 적용은 미미한 실정이다. 특히, 상부구조물 안정성에 큰 영향을 미치는 횡방향 하중을 받는 말뚝 거동 측정에 FBG 센서를 적용한 연구는 국내는 물론 국외에서도 사례가 전무하다.

FBG 센서는 다중화 기능과 같이 기초의 거동을 관측하기에 적합한 특징을 가지고 있으며, 말뚝 거동 측정에 적용 할 경우 기존의 전기식 센서가 지반 내에 설치됨에 따라 생기는 문제점을 극복할 수 있다. 기존의 전기식 센서는 기초 구조물 내에 각 센서 당 하나의 리드선을 설치해야 하므로 계측 시스템의 규모가 커질 경우 구조물의 내구성을 저하 시킬 우려가 있으며, 센서의 자기열 효과로 인한 파손 가능성이 높아 장기적인 관측이 어렵다. 하지만 FBG 센서는 하나의 광섬유에 여러 개의 센서를 배치가 가능한 다중화가 가능하고 직경이 작아 구조물의 내구성 저하를 유발하지 않으며, 광원을 이용한 측정으로 센서 자체의 파손을 유발하지 않아 영구적인 관측이 가능하다. 지반 내에 설치되는 기초는 센서 설치 및 유지관리에 접근성이 떨어지므로 계측능력이 지속적이며 본 구조물의 내구성에 영향이 적은 FBG 센서의 적용을 고려해 볼 필요성이 있다.

본 연구에서는 이러한 FBG 센서를 실제 현장 적용했을 경우 생길 수 있는 문제점을 파악하기 위하여 정방 중공형강 내민보로 말뚝을 모형화하여 다중화 된 FBG 센서를 적용하였으며, 동일위치에 전기식 게이지를 설치하여 비교 분석하였다.

† 책임저자: 비회원, 경희대학교 일반대학원, 토목공학과, 석사과정
* 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원
** 교신저자: 정회원, 경희대학교 건설환경공학부, 토목공학과, 조교수
E-mail : wschung@khu.ac.kr
TEL : (031)201-2550 FAX : (031)202-8854
*** 정회원, 경희대학교 건설·환경공학부, 토목공학과, 교수

2. FBG 센서 및 처짐 산정법

FBG 센서의 격자에서 반사되는 브래그 파장은 브래그 격자 간격의 함수로써 식(1)과 같이 알려져 있으며, 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정 한다면 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 브래그파장의 변화량($\Delta\lambda_B$)으로 구조물의 변형률(ϵ)을 산정할 수 있는 식(3)과 같이 표현 할 수 있다.

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

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

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

여기서, n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률(effective refractive index), A 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격, α_f 는 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient), ξ_f 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient), p_e 는 광탄성 상수(photoelastic constant)이다.

본 연구에서는 4쌍의 다중화 된 FBG 센서를 2열로 내민보의 측면 상·하부에 설치하였으며, 각각의 FBG 센서를 통해 측정된 브래그파장 변화를 식(3)에 대입하여 변형률을 유추하였다. FBG 센서를 종단면에 증립축과 평행하게 설치하였으므로 유추 된 변형률로부터 식(7)을 사용하여 곡률을 산정할 수 있다.(Vurpillot 등, 1998)

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

여기서, ϵ_i^b 와 ϵ_i^t 는 실험에서 사용된 i 번째 종방향 FBG 위치에서의 상·하부 변형률이며 h 는 FBG 센서 간의 수직 거리이다. 한편 구조물의 곡률은 식(5)와 같이 수학적으로 고차 다항식의 형태의 함수로 표현할 수 있다.

$$k(x) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + \dots + c_n x^n \quad (5)$$

여기서, c_0, c_1, \dots, c_n 은 곡률함수 계수 이며, x 는 구조물의 종방향 위치이다. 본 연구에서는 곡률함수가 1차식으로 나타날 것으로 예측하여, 다항식을 식(6)과 같이 사용하였다. 곡률함수 계수는 실험에서 측정된 k_i 를 이용하여 회귀분석을 수행하면 결정할 수 있다.

$$k(x) = c_0 + c_1 x \quad (6)$$

구조물의 회전변위 및 수직처짐과 곡률과의 관계는 Euler-Bernoulli이론에 근거하여 식(7), 식(8)과 같이 표현 할 수 있다.

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

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

여기서 θ 는 곡률이며, w 는 수직 처짐이다. 식(6)의 곡률 함수를 식(7), 식(8)에 대입하면 회전변위 및 수직 처짐은 식(9), 식(10)으로 정리 된다.

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

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

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

3. 실험체 제원 및 실험 프로그램

말뚝 모형실험을 실시하기 위하여 정방 중공형 내민보를 그림 1과 같이 설치하였다. 내민보는 그림 2와 같이 1700mm의 폭과 200mm×200mm×6mm의 단면을 가지고 있으며, 고정단을 구현하기 위하여 두께 30mm의 볼트 판을 내민보와 충분히 용접한 후 반력보에 볼트로 결합하였다.

FBG 센서와 전기식 센서의 설치한 위치는 그림 3에서 보여지는바와 같다. 2열로 배치된 4쌍의 다중

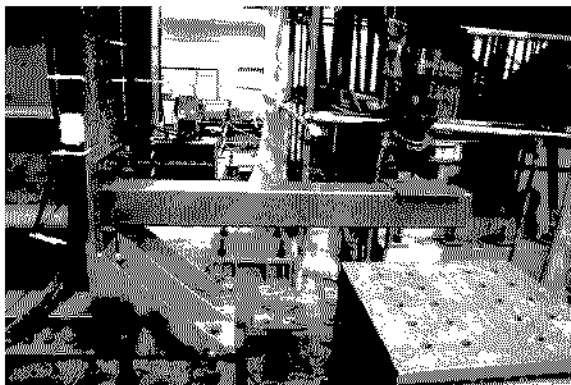
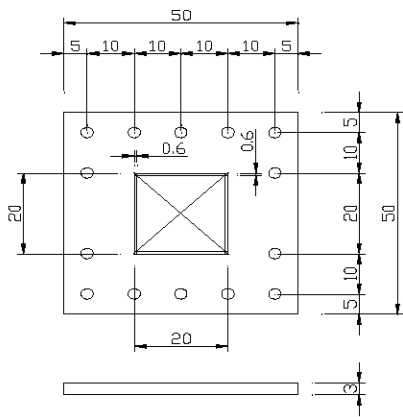
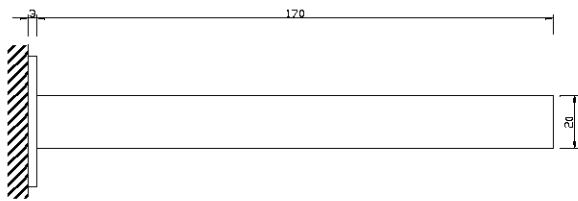


그림 1. 실험 전 캔틸레버 실험체 전경

화 된 FBG 센서를 내민보 측면의 상·하부표면에 에폭시를 이용하여 평행하게 부착하고, FBG 센서를 적용한 결과와 비교하기 위하여 종방향으로 동일한 위치에 FBG 센서와 5mm의 수직 간격을 두고 전기식 센서를 설치하였다. 또한 FBG 센서의 측정데이터로부터 유추해낸 변위값을 검증하기 위해 하중재하지 점(FBG-t4, FBG-b4 지점)에 처짐계를 설치하였다. 실험에 필요한 모든 센서를 설치 한 후, 그림 4와 같이 액추에이터의 변위제어를 이용하여 하중을 점진적으로 증가시켜 상·하부 2채널로 데이터를 기록하였다.



(a) 단면도



(b) 측면도

그림 2. 재하실험을 위한 캔틸레버 실험체 상세도

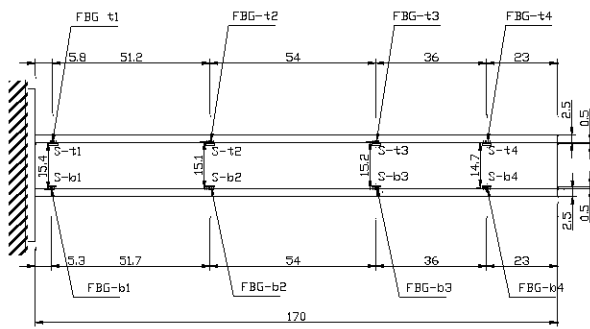


그림 3. FBG 센서 및 Strain Gauge 부착 위치



그림 4. 액츄에이터를 이용한 하중 재하

4. 실험 결과

실험결과 약 78kN의 하중에서 고정단으로부터 파괴가 발생하였으나 본 연구에서는 실제 모니터링 시의 관심영역인 선형탄성 구간의 50kN까지의 하중에서 거동을 분석하였다. 변형률이 가장 큰 고정단근처의 FBG 센서(FBG-t1, FBG-b1)에서 측정값의 오류가 발생하였고 전기식 센서의 1개소(S-t3)에서 설치 부주의로 인한 부정확한 값이 측정되었다. 나머지 5개소에서 측정된 FBG 센서와 전기식 센서 간 변형률의 비교결과 그림 5과 같이 비슷한 양상을 나타내었다. 그림 6은 하중 재하지점에서의 처짐을 비교한 것이다. FBG 센서로부터 유추해낸 처짐은 Bernoulli 보 이론에 근거하여 산출된 처짐과 직접 LVDT로부터 측정된 처짐과 하중 축에 대하여 근사한 값을 나타내었다.

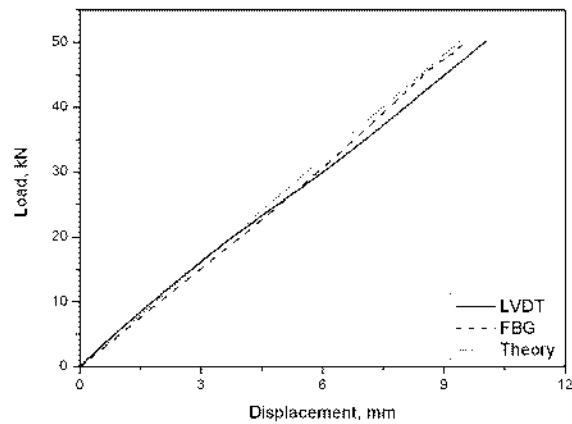
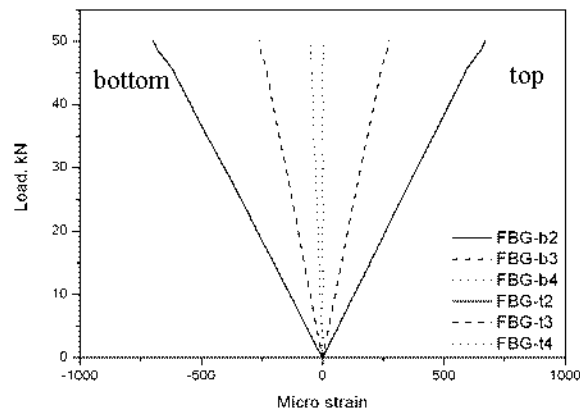
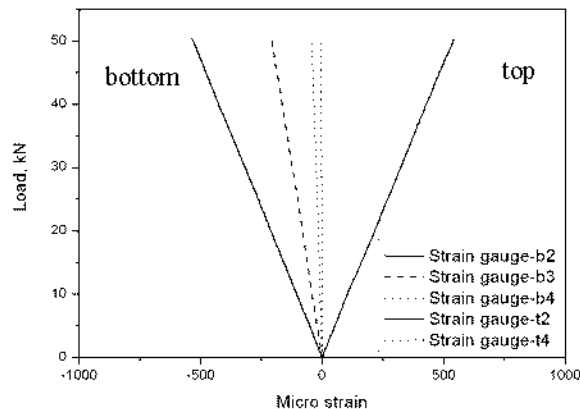


그림 6. 하중 재하지점에서의 LVDT, FBG 센서, 이론추정 변위량 비교



(a) FBG 센서



(b) Strain Gauge

그림 5. FBG 센서 및 Strain Gauge의 측정 변형률

5. 결 론

본 연구는 FBG 센서를 이용하여 횡방향 하중을 받는 말뚝 기초의 거동을 분석하기 위한 사전연구를 목적으로 수행 되었다. 실험결과를 통하여 FBG 센서와 전기식 센서의 변형을 비교분석과 FBG 센서로 추정된 변위량, 이론추정 변위량, LVDT 측정값의 비교분석을 사용하중이 작용하는 탄성영역에서 수행 하였다. 본 실험체는 약 50kN까지를 탄성영역으로 가정하였으며 그림 5와 그림6의 그래프를 얻었다. 각 데이터의 비교 결과 비슷한 양상을 나타내었으며, 변위량 비교에서 최대오차율 5.1%의 우수한 일치율을 나타내었다. 하지만 실험과정에서 FBG 센서 2개소의 측정값 오류가 발생하였고, 향후 FBG 센서의 말뚝 기초 도입 시 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 크다. 따라서 FBG 센서의 측정 가능 변위 산정 및 증대 방안의 마련이 필요하다고 판단된다.

참고 문헌

정원석, 강동훈, 최은수, 김현민 (2005), "광섬유 격자센서를 이용한 철도관형교의 증속 실험", 한국강구조학회 논문집, 제 17권, 제 6호(동권 79호), pp. 681-688.

정원석, 강동훈, 여인호, 이준석 (2008), "FBG센서 기반의 자기부상열차 통합 모니터링 시스템", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집.

Udd E. (1995), "Fiber Optic Smart Structures", John Wiley and Sons, New York.

Vurpillot S, Kreuger, G., Benouaich D, Celment D and Inaudi D (1998), "Vertical deflection of a pre-stressed concrete bridges obtained using deformation sensors and inclinometer measurements", ACI Structural Journal, Vol. 95, No.5, pp. 518-28.

1.