

실내 모형실험을 통한 수평재하 말뚝의 거동측정을 위한 FBG 센서의 적용성 평가 Application of FBG Sensors on a Cantilever Beam for Analyzing Behavior of Laterally Loaded Piles

이태희¹⁾, Tae-Hee Lee, 정원석²⁾, Wonseok Chung, 정영훈²⁾, Younghoon Jung, 목영진³⁾, Young-Jin Mok

¹⁾ 경희대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyunghee University

²⁾ 경희대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Kyunghee University

³⁾ 경희대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Kyunghee University

SYNOPSIS : Analysis of the behavior of a laterally loaded pile is important in the design of critical civil structures. Recently, the electric strain gauge has been widely used to measure the strains along the pile. The electric strain gauge, due to lack of durability, is inappropriate in the use of long-term measurements. Herein, the feasibility of implementing the FBG sensor was investigated using a cantilever-type calibrator in laboratory. A special calibrating tool called "cantilever-calibrator" was used to calibrate the FBG sensors. The calibrator consists of a special calibration beam, a holding-clamp at one end of the beam, and a micrometer on the other end. Three FBG sensors were installed on the calibration beam. The strains measured by FBG sensors were compared with those calculated theoretically using cantilever beam theory. The calibration factor of FBG sensors were suggested to compensate the difference between measured and calculate strains.

Key words : FBG sensor, Cantilever Calibration, Calibration beam, Cantilever beam, Laterally loaded pile

1. 서 론

Fiber Bragg Grating(FBG) 센서는 뛰어난 내구성과 전자기적 간섭을 받지 않는 높은 감도로 인하여 기존의 스트레인 게이지를 적용할 수 없는 곳이나 고감도의 측정을 요구하는 곳에서 광범위하게 사용되고 있다. 또한 하나의 광섬유에 여러 개의 센서를 배치할 수 있는 다중화가 가능하여 배선작업을 간소화 할 수 있으며, 구조물 전반의 건전성을 평가하는 계측시스템 개발에 유리하다. 이러한 FBG 센서의 장점은 구조물의 장기거동측정에 적합한 특징으로 현재 교량등과 같은 상부구조물에서는 FBG 센서를 적용한 장기적인 유지관리 시스템의 개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나 FBG 센서를 적용한 말뚝의 거동측정에 대한 연구는 미진한 상태이며, 특히 구조적으로 취약한 수평방향 하중을 받는 말뚝에 대해 FBG 센서의 적용을 연구한 사례는 찾아보기 힘들다.

본 연구에서는 FBG 센서를 적용한 말뚝의 거동분석에 앞서 FBG 센서의 검증을 하고자 내민보 Calibrator를 이용한 시험을 수행하였다. 내민보 Calibrator는 고정단을 구현할 수 있는 클램프(clamp)장치, 변위조절이 가능한 마이크로미터(micrometer), Calibration beam으로 구성되었다. 시험 수행을 위하여 Calibration beam의 상부표면에 3개의 FBG 센서를 설치하였으며, 동일한 위치에 일정간격을 두고 스트레인게이지를 설치하였다. 센서 설치가 완료된 Calibration beam에 마이크로미터를 이용하여 수직처짐

을 가하였으며, 센서가 설치된 지점에서 수직처짐에 따른 변형률을 각 센서를 통하여 측정하였다. FBG 센서와 스트레인 게이지의 측정값을 이론값과 비교분석하였으며, 이를 통하여 FBG 센서의 측정값을 검토하였다.

2. Fiber Bragg Grating 센서

2.1 Fiber Bragg Grating 센서의 이용

FBG 센서는 GeO_2 가 함유된 광섬유 코어에 자외선 레이저를 조사시켜 만들어진다. 이렇게 형성된 FBG 센서는 조사되는 레이저의 에너지 분포에 따라 각기 다른 파장의 빛에 반사특성을 지니게 되며, 식 (1)의 브래그 조건에 해당하는 파장의 빛은 브래그 격자를 통과하지 못하게 되고 다른 파장의 빛은 통과하게 된다(Udd, 1995).

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

여기서,

λ_B = 브래그 격자에서 반사되는 파장

n_e = 광섬유 격자의 유효 굴절률(Effective refractive index)

Λ = 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격

브래그 파장의 변화량을 정밀하게 측정한다면 온도 변화를 고려한 광섬유 격자의 변형률을 식 (2)를 통하여 계산할 수 있다.

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

여기서,

$\Delta\lambda_B$ = 브래그 격자에서 반사되는 파장의 변화량

α_f = 광섬유의 열팽창 계수(Thermal expansion coefficient)

ξ_f = 광섬유의 열광학 계수(Thermo-optic coefficient)

ΔT = 온도 변화

p_e = 광탄성 상수(Photoelastic constant)

ϵ = 변형률

식 (2)는 FBG 센서를 사용하는 기본원리이며, 본 논문에서 수행한 실험에서는 센서자체와 주변의 온도변화가 없음을 감안하여 $\Delta T = 0$ 로 가정하였다. 따라서 식 (3)과 같이 표현 할 수 있다.

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

위 식을 통하여 광탄성상수(p_e)값을 알면, 브래그 파장의 변화량($\Delta\lambda_B$)으로부터 변형률(ϵ)을 산정할 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 광섬유재료의 고유값인 광탄성상수(p_e)를 0.229로 하여 실험을 수행하였고 이를 통하여 브래그 파장의 변화량으로부터 변형률을 얻어냈다.

2.2 Fiber Bragg Grating 센서를 이용한 거동 분석

내민보의 수직처짐의 변화에 따른 각 센서의 변형률을 식 (3)을 통하여 산정할 수 있으며, 내민보의 중립축을 중심으로 한 쌍의 센서를 설치한 후 식 (4)를 적용하면 센서가 설치된 지점(x)에서의 곡률을 산정할 수 있다(Vurpillot, 1998).

$$\kappa(x) = \frac{\epsilon_i^e - \epsilon_i^c}{h} \quad (4)$$

여기서,

ϵ_i^e = FBG 센서로 산정된 i 번째 인장측 변형률

ϵ_i^c = FBG 센서로 산정된 i 번째 압축측 변형률

h = 마주보는 센서의 거리

말뚝의 곡률함수식($\kappa(x)$)은 x 방향에 대해 연속함수로 가정하면, 식 (5)와 같이 고차 다항식의 형태로 표현 할 수 있다(정원석 등, 2005).

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

여기서,

$\kappa(x)$ = 임의의 종단면 x 에서의 곡률

c_0, \dots, c_n = 곡률 함수의 상수

x = 임의의 종방향 위치

식 (4)를 통하여 센서가 설치된 각 지점에서 얻어진 곡률들은 종방향 위치에 대해서 식 (5)와 같은 관계를 가지며, 회귀분석을 수행하면 곡률함수식을 추정할 수 있다.

회귀분석을 수행하기 위해서 식 (5)의 다항식의 차수를 가정해야 하며, 산정된 FBG 센서의 곡률 분포와 측정점의 개수를 참고하여 이를 결정할 수 있다. 또한 구조물의 변형 형상을 고려하여 식 (5)의 곡률함수식을 가정하면 보다 타당한 곡률함수식을 추정 할 수 있다. 본 논문에서는 내민보의 자유단부근에 연단 집중하중으로 하중이 작용되었으므로 곡률함수식을 식 (6)과 같이 1차식의 형태로 가정하였다.

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

한편, 구조물의 회전변위-곡률의 관계식과, 수직처짐-곡률의 관계식을 Euler-Bernoulli이론에 근거하여 각각 식 (7), 식 (8)과 같이 표현 할 수 있다.

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

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

여기서,

$\theta(x)$ = 임의의 종단면 x 에서의 회전변위

$w(x)$ = 임의의 종단면 x 에서의 수직 처짐

앞서 가정한 식 (6)의 곡률함수식에 식 (7), 식(8)을 대입하면 회전변위 및 수직처짐은 다음의 식 (9), 식(10)으로 정리된다.

$$\theta(x) = \frac{c_1}{2}x^2 + c_0x + b_0 \quad (9)$$

$$w(x) = \frac{c_1}{6}x^3 + \frac{c_0}{2}x^2 + b_0x + b_1 \quad (10)$$

여기서,

b_0, b_1 = 적분 상수

식(9), 식(10)에 내민보의 경계조건인 $x=0$ 일 때 $\theta=0, w=0$ 을 적용하여 적분상수 b_0 와 b_1 을 산정하면 내민보의 회전변위 및 수직처짐에 대한 함수식을 구할 수 있다.

3. 실내 모형실험

FBG 센서를 통한 계측의 정확성을 검토해보고자 그림 1과 같이 내민보 Calibrator, 스트레인 게이지 Data Logger, FBG Interrogator, PC로 구성된 계측 시스템을 구축하였다. 검증에 위해 사용된 내민보 Calibrator는 그림 2와 같으며, 자유단 부근에서 0.1 mm의 미세한 변위조절이 가능한 마이크로미터와 고정단을 구현할 수 있는 클램프(Clamp)로 구성되었다. FBG 센서 부착에 사용된 시험보는 25 mm(W)×6.35 mm(H) 규격의 직사각형 단면을 갖는 310 mm 길이의 Calibration beam을 사용하였다.

내민보 Calibrator에 체결된 Calibration beam의 인장이 발생하는 상부표면의 3점에 표 1의 제원을 갖는 FBG 센서를 그림 3과 같이 일정 간격을 두고 설치를 하였으며, 측정된 데이터의 수집을 위하여 표 2의 제원을 갖는 FBG Interrogator를 사용하였다. 각 FBG 센서를 통해 산정된 값과 비교를 위해 종방향으로 동일한 지점에 5 mm의 간격을 두고 표 3의 제원을 갖는 스트레인 게이지를 설치하였으며, 데이터 수집을 위해 표 4의 제원을 갖는 Data Logger를 사용하였다. 실험에 사용한 센서는 각 센서 당 1개의 채널을 배당하였으며, FBG 센서의 경우 센서 당 1개의 리드선(lead line)이 사용하는데 반해 스트레인 게이지는 4개의 리드선이 사용되므로 FBG 센서를 이용하여 보다 간소한 계측시스템의 구축이 가능하다.

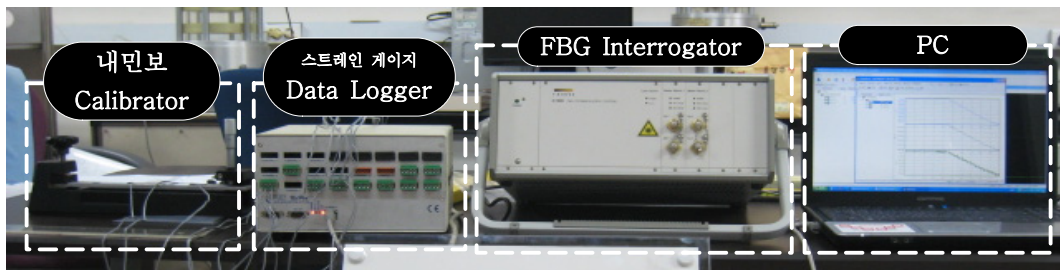


그림 1 FBG 센서 검증 시험 계측 시스템 구성

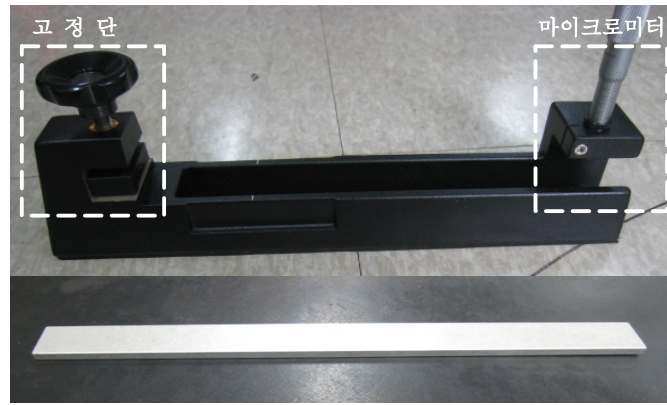


그림 2 내민보 Calibrator, Calibration beam

표 1 FBG 센서 제원

Parameter	Specifications
Manufacturer Wavelength (unit : nm)	FBG-1 1540
	FBG-2 1545
	FBG-3 1550
Optical fiber type	Single mode
Effective refractive index	90%
Grating length	10mm
Coating	Acrylate recoating

표 3 스트레인 게이지 제원

Parameter	Specifications
Gauge Pattern	2-wire system single-element
Gauge Length	5mm
Bridge type	1/4 Full Bridge
Gauge Factor	2
Gauge Resistance	120Ω
Strain Limit	30,000μϵ

표 2 FBG Interrogator 제원

Parameter	Specifications
Wavelength range	38nm
Avg. output power	3 mW
Wavelength accuracy	< 5pm (4.15 μϵ)
Wavelength resolution	< 1pm (0.83 μϵ)
Measurement speed	1 Hz
Max. # of channels	4
Operating temperature	10~40℃

표 4 Data Logger 제원

Parameter	Specifications
Range	± 20,000μϵ
Linearity	0.02%
Gain Accuracy	0.1%
Resolution	0.05μϵ
Excitation	2.5V

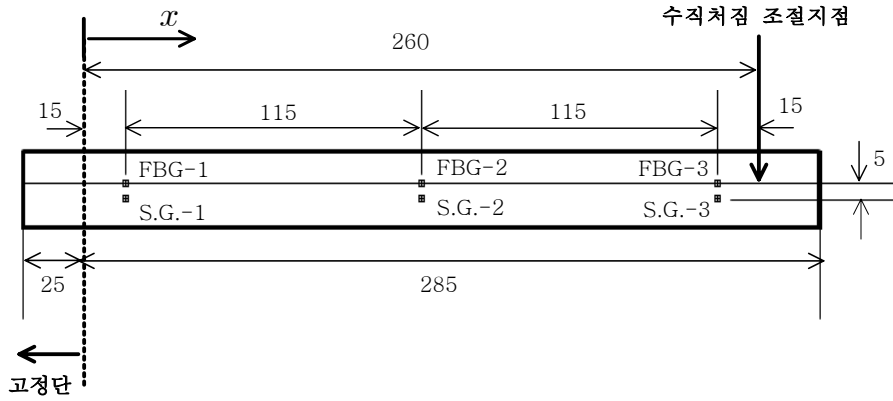


그림 3 FBG 센서, 스트레인 게이지 설치 상세도(unit:mm)

모든 센서의 설치가 완료된 후 마이크로미터를 이용하여 1 mm 간격으로 13 mm까지 수직처짐을 조절하면서 각 센서의 응답을 측정하였다. FBG 센서는 별도의 필터링 없이 계측데이터를 사용하였으며, 시험 중 온도변화는 일어나지 않아 $\Delta T=0$ 으로 가정하고 식 (3)을 통하여 변형률을 산정하였다.

내민보 Calibrator의 마이크로미터를 통하여 자유단에 수직하중을 가하였고 내민보의 축방향 재하를 하지 않았으므로 재하에 따른 중립축의 변화가 없다고 가정하였다. 따라서 인장축과 압축축의 변형률크기가 서로 같다고 가정하여 내민보의 인장축에서 측정된 변형률의 크기를 압축축에 동일하게 적용하였으며, 인장축의 측정값으로부터 각 하중에 대한 곡률, 회전변위, 수직처짐을 식 (4), (9), (10)을 이용하여 산정하였다.

4. 실험 결과 및 분석

시험을 통하여 마이크로미터의 수직처짐이 1 mm 변화될 때 각 FBG 센서의 파장 변화가 그림 4, 5, 6과 같이 측정되었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 화살표로 표시된 파장 부근에서 이상적인 파장 변화가 아닌 복굴절이 나타나기 시작하였으며, 수직처짐이 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타났다.

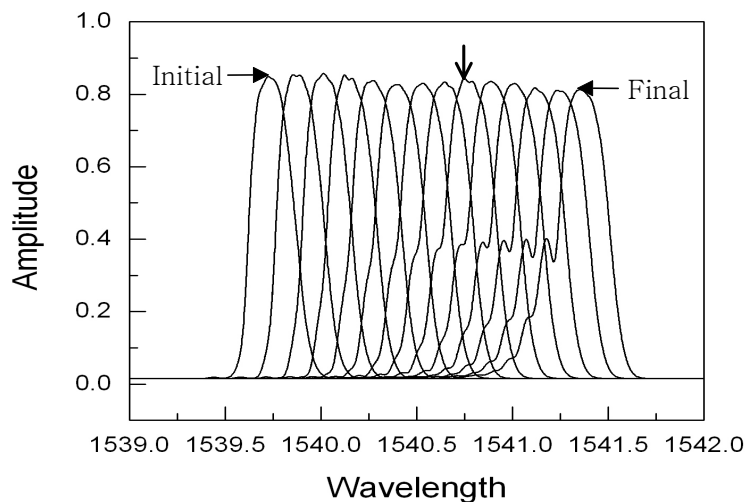


그림 4 FBG-1 파장 변화

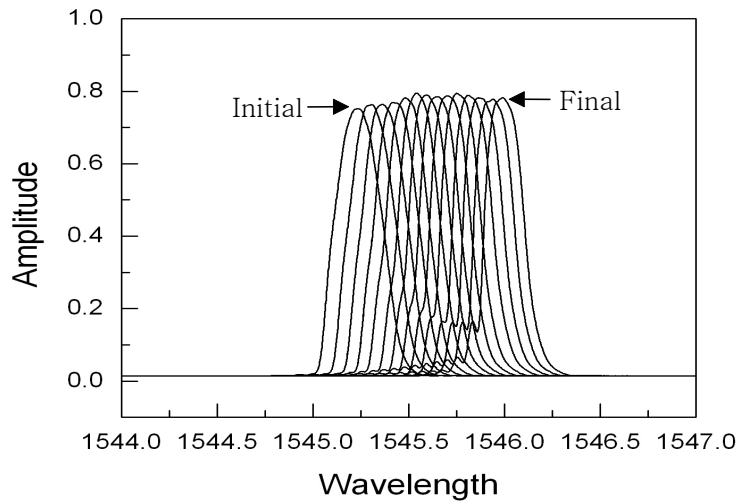


그림 5 FBG-2 파장 변화

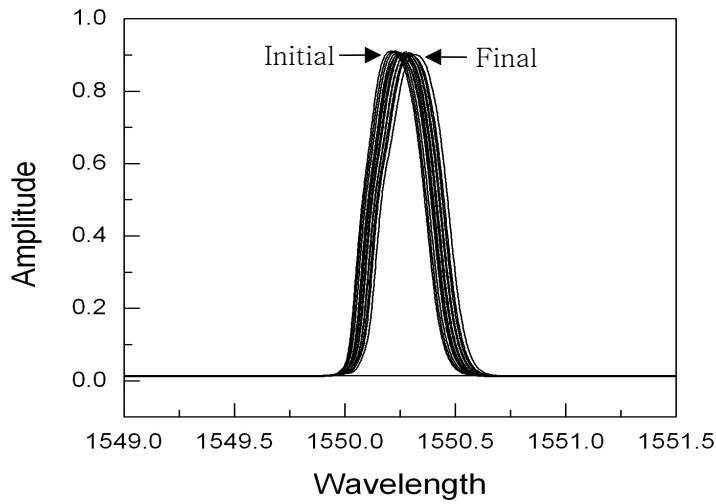


그림 6 FBG-3 파장 변화

식 (3)을 이용하여 FBG 센서의 측정값으로 변형률, 곡률, 수직처짐 등을 계산하기 위하여 FBG 센서의 파장변화량을 그림 4, 5, 6을 통하여 얻어냈다. 각 센서의 파장변화량을 식 (3)에 대입하여 표 5와 같이 각 센서의 변형률을 산정하였다.

표 5 FBG 센서로 산정된 변형률

수직처짐(mm)	0	1	2	3	4	5	6
$\mu\epsilon_{FBG-1}$	0	109.51	244.29	336.11	462.46	567.76	681.48
$\mu\epsilon_{FBG-2}$	0	62.95	109.96	156.96	209.84	258.53	303.01
$\mu\epsilon_{FBG-3}$	0	15.90	25.94	30.96	30.96	41.83	51.87
수직처짐(mm)	7	8	9	10	11	12	13
$\mu\epsilon_{FBG-1}$	775.82	863.43	978.83	1083.29	1172.58	1270.29	1374.75
$\mu\epsilon_{FBG-2}$	349.18	394.50	433.95	484.31	530.48	594.27	635.40
$\mu\epsilon_{FBG-3}$	54.38	64.42	66.10	72.79	72.79	80.32	87.85

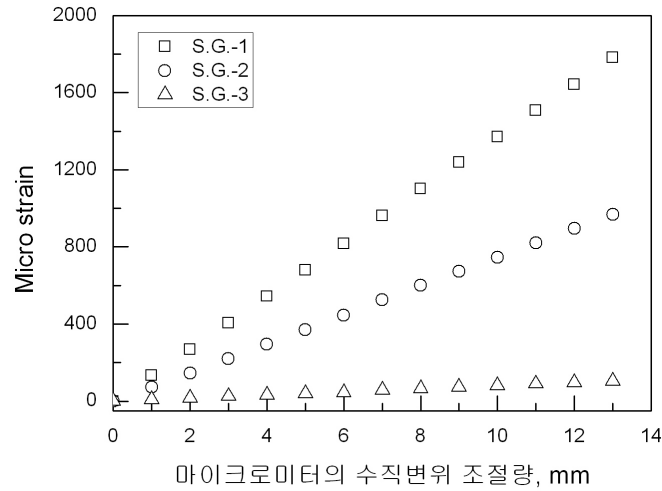


그림 7 스트레인 게이지를 통해 측정된 변형률 변화

그림 3에 표시한 바와 같이 FBG 센서와 함께 5 mm의 간격을 두고 설치한 스트레인 게이지를 통하여 측정된 변형률은 그림 7과 같다. FBG 센서와 스트레인 게이지를 통하여 얻어낸 변형률로 각 센서가 설치된 위치에서의 곡률을 산정하였으며, 각 센서가 설치된 위치에서의 곡률로부터 곡률함수식과 수직 처짐함수식을 추정하여 수직처짐을 산정하였다.

FBG 센서로 산정한 변형률과 스트레인 게이지로부터 측정한 변형률의 검증을 위하여 이론적인 접근을 통하여 시험보의 수직처짐함수식을 유도하였다. 시험보의 수직처짐함수식을 유도하기 위하여 식 (11)과 같이 3차 다항식으로 수직처짐함수식을 가정하였으며, 경계조건인 $x=0$ 일 때 $w=0$, $x=260$ (마이크로미터 측정지점) 일 때 $w=$ 수직처짐, $x=0$ 일 때 $\theta=0$, $x=260$ 일 때 $\kappa=0$ 를 이용하여 각 단계별 수직처짐에 대한 수직처짐함수식을 표 6과 같이 얻어냈다.

$$w(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (11)$$

표 6 이론적 접근을 통하여 산정된 수직처짐에 따른 수직처짐함수식

수직처짐(mm)	수직처짐함수식($w(x)$, mm)	수직처짐(mm)	수직처짐함수식($w(x)$, mm)
1	$-0.28 \times 10^{-7}x^3 + 2.2 \times 10^{-5}x^2$	8	$-2.28 \times 10^{-7}x^3 + 1.8 \times 10^{-4}x^2$
2	$-0.57 \times 10^{-7}x^3 + 4.4 \times 10^{-5}x^2$	9	$-2.56 \times 10^{-7}x^3 + 2.0 \times 10^{-4}x^2$
3	$-0.85 \times 10^{-7}x^3 + 6.7 \times 10^{-5}x^2$	10	$-2.84 \times 10^{-7}x^3 + 2.2 \times 10^{-4}x^2$
4	$-1.14 \times 10^{-7}x^3 + 1.1 \times 10^{-4}x^2$	11	$-3.13 \times 10^{-7}x^3 + 2.4 \times 10^{-4}x^2$
5	$-1.42 \times 10^{-7}x^3 + 1.3 \times 10^{-4}x^2$	12	$-3.41 \times 10^{-7}x^3 + 2.7 \times 10^{-4}x^2$
6	$-1.71 \times 10^{-7}x^3 + 1.3 \times 10^{-4}x^2$	13	$-3.70 \times 10^{-7}x^3 + 2.9 \times 10^{-4}x^2$
7	$-1.99 \times 10^{-7}x^3 + 1.5 \times 10^{-4}x^2$		

표 6의 각 단계별 수직처짐에 따른 수직처짐함수식을 두 번 미분하여 곡률함수식을 얻어냈으며, 곡률함수식에 각 센서가 설치된 위치에서의 곡률을 산정하였다. 산정된 곡률을 식 (4)에 대입하였으며, 인장측과 압축측의 변형률이 동일한 크기를 가진다고 가정하여 변형률을 추정하였다. 이론적으로 추정된 변형률을 FBG 센서로 산정된 변형률, 스트레인 게이지로 측정된 변형률과 비교해보면 다음의 그림 8과 같다.

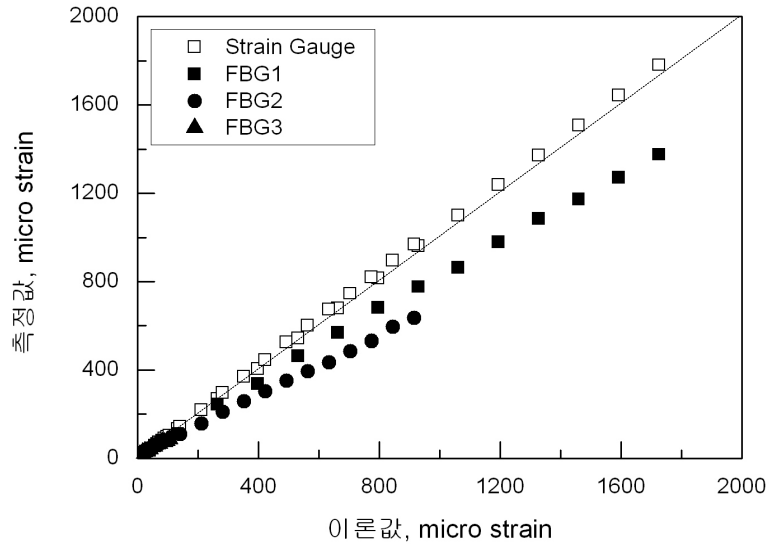


그림 8 변형률 이론값과 측정값 비교

그림 8을 통하여 스트레인 게이지의 변형률 측정값은 이론적인 접근을 통하여 산정된 변형률과의 오차가 평균 3.15%, 최대 8.05%로 모든 센서에서 10% 이내의 오차가 발생하여 신뢰할 수 있는 측정이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 FBG 센서로 산정된 변형률은 이론추정변형률과 $25 \pm 5\%$ 의 큰 오차가 확인되었으며, 센서마다 오차의 차이가 심한 것을 확인할 수 있었다.

FBG 센서를 이용한 변형률 측정에 대한 검증은 이미 많은 연구자들에 의해 입증된 부분이지만 본 검증에서는 이론값과 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 센서제작과 부착과정에서 발생하는 여러 가지 외부요인에 의해 발생된다고 판단되었다. 향후 FBG 센서의 실제 말뚝 적용 시 보다 정밀한 FBG 센서의 검증을 통하여 정확한 계측이 이루어질 수 있는 시험방법에 대한 연구를 진행할 필요성이 있다.

본 논문에서는 동일 시험환경에서 발생할 수 있는 FBG 센서의 오차를 보정하기 위하여 FBG 센서로 측정된 데이터를 추세하였으며, 식 (12)와 같은 FBG 센서로 산정한 변형률과 이론추정 변형률의 관계식을 얻어냈다.

$$\epsilon_m = 0.00004\epsilon_t^2 + 0.7422\epsilon_t \quad (12)$$

여기서,

ϵ_m = FBG 센서로 산정한 변형률 값

ϵ_t = 이론 변형률 값

식 (12)를 ϵ_t 로 정리하면 식 (13)과 같으며, 식 (13)을 이용하여 FBG 센서로 산정한 변형률의 보정을 수행하였다. 보정된 FBG 센서의 측정값을 이용하여 각 센서가 설치된 지점에서의 수직처짐을 이론값과 비교하였으며, 각각 그림 9, 10, 11에 나타내었다.

$$\epsilon_t = -9277.5 + \sqrt{86072006 + 25000 \epsilon_m} \quad (13)$$

그림 9, 10, 11에서 보인바와 같이 FBG 센서의 측정값에 보정식을 적용하여 해석을 수행했을 때, 이론적 해석을 통하여 산정된 수직처짐분포도의 오차를 3% 이내로 줄일 수 있었다.

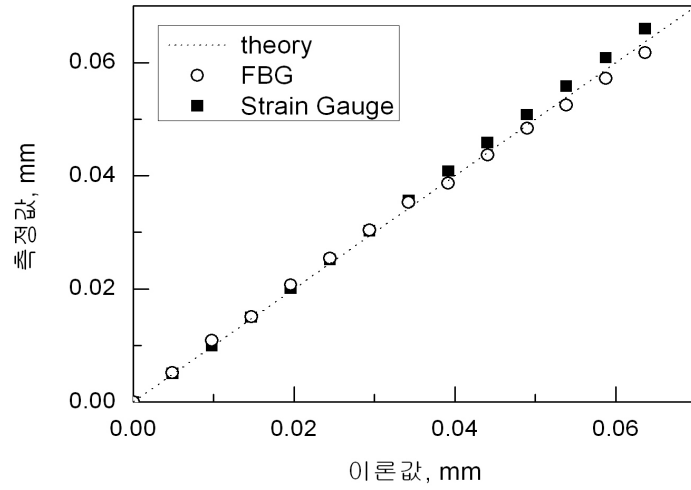


그림 9 FBG-1지점에서 보정식을 적용한 FBG 센서 추정 수직처짐의 비교

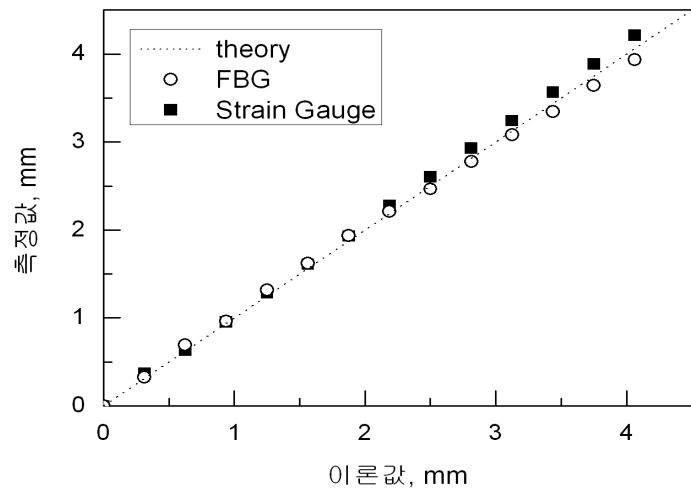


그림 10 FBG-2지점에서 보정식을 적용한 FBG 센서 추정 수직처짐의 비교

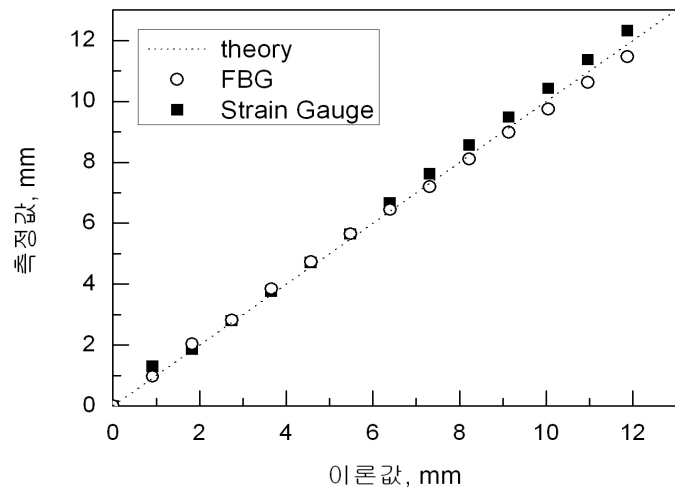


그림 11 FBG-3지점에서 보정식을 적용한 FBG 센서 추정 수직처짐의 비교

5. 결 론

본 논문에서는 FBG 센서를 이용한 말뚝 거동분석의 적용성에 대하여 검토해보고 나아가 말뚝의 장기적인 유지관리 시스템 개발의 기초자료를 제공하고자 내민보 Calibrator를 이용한 시험을 수행하였다. 시험을 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 내민보 Calibrator 시험을 수행하기 위하여 FBG 센서와 스트레인 게이지를 동일한 종방향 위치에서 5 mm간격을 두고 설치하였으며, 각 센서 당 1개의 채널을 배정하여 시험을 수행하였다. 시험환경을 조성하는 과정에서 FBG 센서는 센서 당 1개의 리드선이 사용하는데 반해 스트레인 게이지는 센서 당 4개의 리드선을 사용하여 FBG 센서가 보다 간소한 계측 시스템의 구축이 가능하였다.
- (2) 가장 큰 변형률이 발생한 FBG-1 센서에서 이상적인 파장변화가 아닌 복굴절이 발생하였으며, 수직 처짐이 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타났다.
- (3) 내민보 Calibration에서 스트레인 게이지를 통한 계측데이터가 이론적 해석을 통하여 얻어진 값과 평균오차 3.15%의 우수한 데이터를 얻을 수 있었다. FBG 센서는 평균오차 약 25%로 비교적 큰 오차가 발생하였으며, 센서의 제조와 설치 등과 같은 외부적인 요인에 기인한 것이라고 판단하였다.
- (4) 내민보 Calibration 시험에서 FBG 센서의 측정값에 보정식을 적용하여 해석을 수행했을 때, 이론적 해석을 통하여 산정된 수직처짐분포도와 3% 이내의 오차를 보였다.
- (5) 향후 FBG 센서를 이용한 실제 말뚝의 횡방향 거동을 측정하기 위해서는 FBG 센서의 보정을 유발하는 외부요인에 대한 정밀한 검토가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2009-0090774)

참고문헌

1. 정원석, 강동훈, 최은수, 김현민(2005), “광섬유 격자센서를 이용한 철도 관형교의 증속 실험”, **한국강구조학회논문집**, Vol. 17, No. 6, pp. 681-688.
2. Udd, E.(1995), *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley and Sons, New York
3. 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 Measurement”, *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 5, pp. 518-28