

# FBG 센서를 이용한 철골 보의 변형률 분포 추정 모델

## Estimation Models for Strain Distribution of Steel Beams using FBG Sensors

오 병 관\* · 박 효 선\*\*

Oh, Byung-Kwan · Park, Hyo-Seon

### 요 약

구조 건전성 모니터링에 사용되는 기존 센서들의 문제점을 극복하고 높은 분해능과 동특성 모니터링에 대한 이점을 지닌 FBG 센서는 구조물 모니터링에 있어 큰 이점을 지니고 있다. FBG 센서는 점 센서라는 한계 때문에 구조물의 전체적인 변형률 및 응력 평가에 어려움이 있을 수 있다. 본 연구에서는 FBG 센서로부터 측정한 변형률 값들로부터 임의의 하중조건에서 철골 보의 변형률 분포를 추정하는 기법을 제시하였다. 임의의 개별 하중조건에 대해 FBG 센서로 측정한 값을 통해 센서의 부착 위치와 최소 필요 개수를 결정하고 변형률 추정식을 유도함으로써 FBG 센서의 측정 기법에 대한 기준을 세웠다. 나아가 임의의 조합 하중이 작용하는 실제의 경우를 고려하여 철골 보의 변형률 분포를 추정하는 보다 일반화된 수학적 모델을 제시하였다. 그리고 예제를 통하여 본 연구에서 제시한 변형률 분포 추정 모델을 검증하였다.

**keywords** : FBG sensor, strain sensing, Health monitoring

### 1. 서 론

기존의 구조 모니터링에 사용된 센서(LGFOS, VWSG)의 단점을 극복하기 위한 방안으로 FBG 센서가 널리 사용되어 왔다. LGFOS가 갖는 시공상의 문제점, VWSG로 측정한 평균변형률 값의 신뢰성에 대한 의문 등이 제기되어 왔으며, 두 센서 모두 동적 모니터링에 사용하기에는 성능이 크게 떨어진다. 이런 문제점들에 대한 대안으로 FBG 센서가 이용되고 있다. 그러나 FBG 센서는 포인트 센서이며, 포인트 센서는 측정의 한계성(정성문 등, 2006)을 내재하고 있다. 구조물의 전체적인 변형률 분포를 측정함으로써 최대변형률을 알 수 있고 이를 통해 응력을 평가한다는 점을 생각하면, 포인트 센서로부터 측정한 구조물 특정 점들에서의 변형률 값들은 구조물 전체의 변형률 분포를 예측할 수 없고 따라서 최대변형률을 구할 수 없게 된다.

본 연구에서는 FBG 센서로부터 측정한 변형률 값들로부터 임의의 하중 조건에서 구조물의 변형률 분포를 추정하는 기법을 제시한다. 임의의 하중에 대한 구조물의 변형률 분포는 일반적인 하중 조건에서의 변형률 분포의 합이라는 가정 하에, 일반적인 하중 조건에서 구조물의 변형률 분포를 추정하기 위해 필요한 FBG 센서의 최소 개수 및 부착 위치 등의 측정 기법을 제시한다. 나아가 FBG 센서를 이용하여 임의의 조합하중을 받는 철골 보의 변형률 측정값을 통해 부재 전체의 변형률 분포를 추정하기 위한 수학적 모델을 제시한다. 예제를 통해 제시한 수학적 모델을 검증함으로써 FBG 센서를 이용한 구조물 전체의 변형률 분포

\* 학생회원 · 연세대학교 건축공학과 석사과정

\*\* 정회원 · 연세대학교 건축공학과 정교수 hspark@yonsei.ac.kr

와 응력을 평가하는 이론적 토대를 마련한다.

## 2. FBG 센서

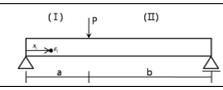
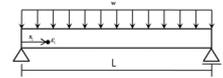
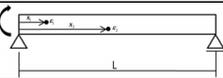
FBG 센서는 광섬유에 주기적으로 굴절률이 변화하는 격자가 설치되어 있다. 이 격자의 주기와 정확히 일치하는 빛만 반사되도록 고안되어 변형률에 의한 길이 변화에 따라 격자의 주기 또한 바뀌어 반사되는 빛의 파장이 변화하고 그 파장 변화량을 측정함으로써 변형률을 측정할 수 있도록 되어 있다(김기수, 2006). 일종의 광학적 회절요소(diffractive optical element)인 위상마스크에 자외선을 통과시키면 섬유 내부에 일정한 간섭패턴(interference pattern)이 형성되며 광섬유 브래그 격자를 형성하게 된다(하대웅, 2006). 이러한 브래그 격자에 광대역 광원이 입사되면 브래그 조건에 의해 결정된 파장 성분만을 반사시키고 나머지 파장 성분을 통과시키게 된다. 유효굴절률과 격자 간격의 함수인 브래그 파장은 온도나 변형률 등의 외력이 가해지는 경우 이 값들이 변화하게 되어 브래그 파장 또한 변하게 되며 변화된 파장을 통하여 온도변화  $\Delta T$ 나 변형률  $\epsilon$ 를 알 수 있다. FBG 센서는 실제 구조물에의 적용에 필수적인 강한 내구성을 지녔다. 또한 다중화(multiplexing)가 가능하여 하나의 광섬유 케이블에 여러 개의 센서를 연결하여 동시에 여러 지점의 변형률 측정이 가능하며 구조물의 동특성 모니터링에 유리한 높은 분해능을 지니고 있다.

## 3. 최대 변형률 추정을 위한 수학적 모델

### 3.1. FBG 센서의 계측 기법

철골 보의 안전성을 위한 FBG 센서의 계측 기법에 대해 알아보았다. 일반적인 하중 조건에 대하여 이미 알고 있는 변형률 분포식과 지점 조건 등을 활용하여 변형률 분포를 추정하는데 필요한 센서의 개수, 부착 위치를 결정하고 변형률 분포 추정식을 유도하였다. 검토한 개별 하중 조건에 따른 센서의 개수, 위치 및 변형률 분포 추정식은 다음과 같다.

표 1 개별 하중 조건에서의 변형률 분포 추정식

하중 조건	센서개수	센서위치	변형률 분포 추정식
	1	임의의 위치 ( $x_1 \neq 0, L$ )	(I) $\epsilon(x) = \frac{\epsilon_1}{x_1}x$ (II) $\epsilon(x) = \frac{\epsilon_1}{x_1} \frac{a}{b}(L-x)$
	1	임의의 위치 ( $x_1 \neq 0, L$ )	$\epsilon(x) = \frac{\epsilon_1}{x_1(x_1 - L)}(x^2 - Lx)$
	2	임의의 위치 ( $x_1 \neq x_2$ )	$\epsilon(x) = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{x_1 - x_2}(x - x_1) + \epsilon_1$

이상의 하중 조건을 검토한 결과 필요한 센서의 개수는 하중의 개수와 동일하다는 예측을 해볼 수 있었다. 그 부착위치는 하중으로 인하여 모멘트가 0이 되는 위치(지점 등)를 제외한 임의의 위치에 부착을 하면 추정식으로부터 변형률 추정이 가능하다.

### 3.2. 변형률 추정을 위한 수학적 모델

이상의 FBG 센서 계측 기법을 통해 임의의 위치에 부착된 하중 개수만큼의 FBG 센서를 통해 계측한 데

이터가 존재한다면 철골 보의 변형률을 추정할 수 있음을 확인하였다. 그러나 실제 구조물은 임의의 조합 하중을 받고 있으며 수많은 상황에 대하여 위와 같은 변형률 분포 추정식을 열거하는 것은 불가능한 일이다. 따라서 본 연구에서는 임의의 조합 하중에 대한 보다 일반화된 변형률 분포 추정식을 추정할 수 있는 수학적 모델을 제시하고자 한다.

임의의 경계 조건을 갖는 철골 보에 임의의 하중이  $n$ 개가 작용한다고 가정하자. 필요한 센서의 개수는  $n$ 개가 될 것이고, FBG 센서에 의해 계측된 값( $x_i, \epsilon_i$ ) 또한  $n$ 개가 된다. 한편, 철골 보에 작용하는 변형률 분포( $\epsilon(x)$ )와 모멘트( $M(x)$ )와의 관계를 나타내면 식 (1)과 같다. 여기서,  $E$ 는 탄성계수,  $Z$ 는 단면계수이다.

$$\epsilon(x) = \frac{M(x)}{EZ} \quad (1)$$

식 (1)의 모멘트 일반식은 식(2)와 같이 보의 길이방향 좌표( $x$ )와 작용하는  $n$ 개의 하중( $L_i$ )에 대한 함수로 표현할 수 있다.

$$\epsilon(x) = f(x, L_1, L_2, \dots, L_n) \quad (2)$$

이제 FBG 센서로부터 얻은  $n$ 개의 변형률 계측값( $x_i, \epsilon_i$ )을 식 (2)에 대입하여 식(3)와 같은 하중과 변형률 계측값 사이의 관계를 나타내는  $n$ 개의 식을 이끌어낼 수 있다.

$$\epsilon(x_i) = f(x_i, L_1, L_2, \dots, L_n) = \epsilon_i \quad (i=1 \text{ to } n) \quad (3)$$

식 (3)를 연립하여 하중에 대하여 정리하면, 하중은 식(4)과 같이 변형률 계측값에 관한 각각의 함수로 표현할 수 있다.

$$L_1 = g_1(x_i, \epsilon_i), L_2 = g_2(x_i, \epsilon_i), \dots, L_n = g_n(x_i, \epsilon_i) \quad (i=1 \text{ to } n) \quad (4)$$

식 (4)에서 구한 변형률 계측값에 대해 정리한 하중을 식 (2)에 대입하면 철골보의 변형률 분포 추정식은 식(5)과 같이 보의 길이방향 좌표( $x$ )와 변형률 계측값( $x_i, \epsilon_i$ )만으로 정리할 수 있다.

$$\epsilon(x) = f(x, L_1, L_2, \dots, L_n) = f(x, g_1(x_i, \epsilon_i), g_2(x_i, \epsilon_i), \dots, g_n(x_i, \epsilon_i)) = F(x, x_i, \epsilon_i) \quad (i=1 \text{ to } n) \quad (5)$$

## 4. 예제 적용을 통한 수학적 검증

### 4.1. 모델링

앞에서 제시한 FBG 센서 계측을 통한 변형률 추정 모델을 검증하기 위하여 그림 1과 같은 임의의 조합하중이 작용하는 철골 보의 예제에 적용시켜 보았다. 그림 1과 같은 철골 보의 속성은 표 2와 같다.

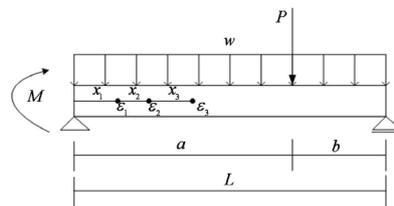


그림 1 임의의 조합하중이 작용하는 철골보 예제

표 2 그림 1 예제 모델 속성

보의 탄성계수	$E = 206 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$	등분포하중	$w = 18 \text{ kN/m}$
보의 단면계수	$Z = 277 \times 10^{-6} \text{ m}^3$	집중하중	$P = 32 \text{ kN}$
보의 길이	$L = 5 \text{ m} (a = 3.5 \text{ m}, b = 1.5 \text{ m})$	모멘트하중	$M = 12 \text{ kN} \cdot \text{m}$

먼저 위 예제 모델의 최대 변형률을 구해보면  $\epsilon_{\max} = 1544.25\mu\epsilon$ 임을 알 수 있다.

#### 4.2. 변형률 분포 추정 모델 검증

앞에서 제안한 수학적 모델을 검증하기 위하여 위 예제에서 임의의 위치에서의 계측 변형률 값을 구하였다. 구해진 변형률은 하중의 개수만큼 3개이고 그 위치는 임의로 선정하였다. 철골 보 왼쪽 지점으로부터  $x_1 = 0.7m$ 에서  $\epsilon_1 = 777.14\mu\epsilon$ ,  $x_2 = 1.2m$ 에서  $\epsilon_2 = 1086.2\mu\epsilon$ ,  $x_3 = 1.9m$ 에서  $\epsilon_3 = 1385.75\mu\epsilon$ 의 값을 추정 모델 검증에 이용하였다.

먼저 위 예제의 하중 조건을 추정 모델에 적용시키면 식 (2)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon(x) = f(x, w, P, M) \quad (6)$$

그리고 변형률 값과 변형률을 얻은 위치좌표를 식 (6)에 대입하면 다음과 같다.

$$\epsilon(x_i) = f(x_i, w, P, M) = \epsilon_i \quad (i = 1 \text{ to } 3) \quad (7)$$

식 (7)에서 얻어진 3개의 식을 연립하여 계측된 변형률 값에 대해 하중을 정리하면 식 (8)과 같다.

$$w = g_1(x_i, \epsilon_i), P = g_2(x_i, \epsilon_i), M = g_3(x_i, \epsilon_i) \quad (i = 1 \text{ to } 3) \quad (8)$$

식 (8)에서 얻어진 계측된 변형률에 대해 정리한 하중을 식 (6)에 대입하면 변형률 계측값과 보의 길이방향 좌표로만 이루어진 변형률 분포 추정식을 구할 수 있다. 위 예제의 변형률 분포 추정식은 식 (9)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\epsilon(x) = f(x, w, P, M) = f(x, g_1(x_i, \epsilon_i), g_2(x_i, \epsilon_i), g_3(x_i, \epsilon_i)) = F(x, x_i, \epsilon_i) \quad (i = 1 \text{ to } 3) \quad (9)$$

위와 같이 유도한 변형률 분포 추정식을 통해 얻은 최대 변형률 값은  $1544.25\mu\epsilon$ 로서 앞에서 계산한 최대 변형률 값( $\epsilon_{\max} = 1544.25\mu\epsilon$ )과 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

FBG 센서로 계측된 변형률을 이용하여 임의의 조합하중이 작용하는 철골 보의 변형률 분포를 추정하는 일반화된 수학적 모델을 제시하였고 이를 예제로 검증하였다. 본 연구에서 제시한 FBG 센서의 계측 기법 및 변형률 추정 모델을 통하여 포인트 센서인 FBG 센서의 계측만으로 임의의 하중이 복합적으로 작용하는 철골 보를 손쉽게 해석하고 안전성을 평가할 수 있는 이론적 토대를 마련하게 되었다.

실제 구조물에 적용하기 위해서는 다양한 구조물에 대한 일반화된 변형률 추정 모델이 제시되어야 한다. 또한 현실적인 철골 구조물의 시공성 및 불확실성이 해석에 반영되기 위해서는 보-기둥 접합부, 구조물 지점 강성 등의 해석 기법 및 수학적 모델에의 적용에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2009년도 첨단도시개발사업(과제번호:09CHUD-A052272-01)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- 김기수 (2006) 스마트 모니터링용 광섬유센서, **한국지진공학회 논문집**, 10(6), pp.137~145.
- 정성문 (2006) 광변형 센서의 평균변형률을 이용한 철골보의 안전성 모니터링 기법, **한국강구조학회학술발표논문집**, pp.240~245.
- 하대용 (2006) 광센서를 이용한 철골 보의 동특성 평가, 석사학위, 연세대학교.