FBG센서를 이용한 다경간 강재 보 구조물의 안전성 모니터링을 위한 변형률 분포 추정 기법

Estimation Method of Strain Distribution for Safety Monitoring of Multi-span Steel Beam Using FBG Sensor

오 병 관¹⁾ 이 지 훈²⁾ 최 세 운³⁾ 박 효 선⁴⁾ 김 유 석^{5)*}
Byung-Kwan Oh Ji-Hoon Lee Se-Woon Choi Hyo-Seon Park You-Sok Kim

Abstract

This study proposes an estimation method of strain distribution for multi-span steel beam structure under unspecific loading conditions. The estimation method in this paper employs the curve fitting using the least square method from measured strain data, not analytical method. To verify the proposed estimation method, a static loading test for multi-span steel beam on which distributed and concentrated loads act was conducted. The strain data for verification was measured by FBG sensors that have multiplexing technology. The analysis of the accuracy of strain estimation for distributed and concentrated loads and the errors by considering the number of measured points used in the estimation were conducted. In the maximum strain points, the strains could be estimated with the errors of 5.89% (loading step 1) and 6.26% (loading step 2). In case of decreasing the number of sensors, it was also confirmed that the errors increased (0.26~0.37%). Through the curve fitting method, it is possible to estimate the strain distribution (maximum strains and their locations) of multi-span beam for unspecific loads and go over the limit of the analytical estimation method which is suitable for specific distributed loads.

Keywords : Structural health monitoring, Strain estimation, Curve fitting, Multi-span beam, FBG sensors

1. 서 론

구조물에 작용하는 각종 하중 (상시하중, 풍하중, 지진하중)에 의한 구조물의 사용성 및 안전성 평가를 위해서 구조물 건전도 모니터링 (Structural Health Monitoring, SHM)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 실제 건물에 적용되는 사례가 늘고 있다 (Lioe and Wong, 2012; Tam et al., 2011; Park et al., 2013). 실제 구조물에 각종 계측 센서 (가속도계, 변위계, 변형률계)를 설치하여 정기적으로 혹은 실시간으로 계측을 수행하게 되며, 대표적인 구조 응답으로는 가속도, 변위 그리고 변형률 등을 들 수 있다. 특히, 변형률의 계측을 통해서 산출되는 최대응력은 설계기준 (AISC, 2000)에서 제시된 허용응력과 비교를 통해서 구조물의 안전성 평가 지

표로 널리 활용되고 있으며, 이를 추정하기 위한 변형률 기반의 구조 건전도 모니터링 연구가 부재 단위로 활발히 진행되고 있다 (Hampshire and Adeli, 2000; Park et al., 2006; Park et al., 2007; Park et al., 2001; Lee and Park, 2013; Choi et al., 2013). 또한, 변형률 계측 데이터의 신뢰성을 확보하고 변형률 기반 모니터링 기법을 적용함에 있어서 실용성을 증대시키기 위해 다양한 종류의 변형률 센서가 개발, 모니터링에 적용되어 왔다. 전자기파 영향에 민감하고 내구성이 떨어지는 초창기 변형률 센서인 전기저항식 센서 (Electric strain gauge, ESG)의 한계를 극복하기 위해 광변형 센서 (Fiber optic sensor, FOS), 진동현식 센서 (Vibrating wire strain gauge, VWSG)가 개발되었다. 이들 센서는 다시 부재 내 계측 범위에 따라 상대적으로 게이지 길이가 긴 센서와 포인트

1) 정회원, 연세대학교 건축공학과 박사과정

2) 정회원, 대림산업(주) 기사

3) 정회원, 연세대학교 건축구조헬스케어연구단 연구원

4) 정회원, 연세대학교 건축공학과 교수

5) 정회원, 연세대학교 건축구조헬스케어연구단 연구교수, 교신저자

* Corresponding author : yskim1220@yonsei.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2014년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

센서로 분류할 수 있다. 기존 전기저항식 센서와 같은 포인트 센서는 국부적인 변형률 계측만이 가능하여 시공 중 또는 후에 발생할 수 있는 작용하중 크기 및 위치가 변화할 경우 구조물 안전성 평가를 합리적으로 수행할 수 없다. 이에 대한 보완으로서 센서의 수를 늘리게 되면 데이터 량의 증가로 인해 계측 데이터의 저장 및 분석의 어려움이 발생한다. 이런 단점을 극복하기 위해 수cm에서 수m에 이르는 게이지 길이를 갖는 장대광변형률센서 (Long gauge fiber optic sensor, LGFOS)와 진동현센서 (Vibrating wire strain gauge, VWSG)가 개발되었다 (Park et al., 2006; Park et al., 2007; Lee and Park, 2013; Yu and Gupta, 2005). 이들 센서들은 부재에 부착되는 상대적으로 긴 게이지 길이만큼의 구간에서 평균변형률을 계측한다. 그러나 긴 게이지 길이 구간에서의 변형률 평균값을 계측하기 때문에 부재 내 특정 위치에 발생하는 최대 변형률을 직접 계측할 수 없다. 한편, 광섬유 브래그 격자 센서 (Optical fiber bragg grating sensor, FBG)는 비록 포인트 센서이지만, 멀티플렉싱 기술 (Choi et al., 2013; Grattan and Sun, 2000; Li et al., 2004; Majumder et al., 2008; Chan et al., 1999)이 적용됨으로써 적은 수의 센서를 이용하여 부재의 최대 변형률을 직접 계측할 수 있다. 멀티플렉싱은 하나의 신호 안에 여러 신호를 담을 수 있는 기술로, 여러 개의 센서를 하나의 선으로 연결하여 각 센서에서 계측한 다수의 데이터를 단일 신호로 전달할 수 있다. 이외에도 FBG 센서는 가격, 시공성 등 그 장점 때문에 모니터링 분야에서 가장 널리 이용되고 있는 변형률 센서이다 (Choi et al., 2013; Majumder et al., 2008; Chan et al., 1999).

앞서 언급한 바와 같이, 변형률 기반 모니터링은 구조부재의 최대 응력을 통해서 안전성을 평가하게 되며, 이를 위해서는 구조물에 발생하는 최대 변형률의 정확한 계측은 필수 조건이라 할 수 있다. 따라서, 초기 설계 시 계획한 부재의 하중 정보를 통해 최대 변형률의 발생 위치와 그 크기를 이론적으로 예측하여 변형률 센서의 계측 위치와 개수를 선정하는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 그러나 부재의 시공상 오차, 예상 하중의 오차, 시공 중 또는 후의 하중 조건 변화 등으로 최대 변형률 위치를 사전에 정확히 예측하기에는 어려움이 있다. 따라서, 계측한 변형률을 통해 최대 변형률을 추정하기 위한 연구들이 진행되어 왔다. Park et al. (2006), Park et al. (2011)은 각각 LGFOS와 VWSG를 이용하여 보 구조물의 최대 변형률을 추정하는 기법을 제시하였다. 이들 연구는 집중 하중, 분포 하중 등 그 크기를 모르는 다양한 하중을 받고 있는 보 구조물의 평균변형률을 계측하

여 최대 변형률을 추정하였다. 그러나 긴 게이지 길이로 보 특정 구간의 평균변형률 계측을 통해 최대 변형률 값을 추정할 뿐 최대 변형률이 발생하는 위치까지는 제시하지 못하고 있다. Choi et al. (2013)은 FBG센서를 통해 계측한 변형률로 다양한 하중 조건에 있는 보 구조물의 변형률 분포를 추정하는 기법을 제시하였다. 보 구조물 전체의 변형률 분포를 추정함으로써 최대 변형률 값뿐만 아니라 그 발생 위치도 알 수 있는 기법이다. 그 외에 Hahn and Ahn (2012)은 집중하중을 받는 보 구조물을 포인트 변형률 센서로 계측하여 변형률-변위 관계 등의 해석적인 방법을 통해 변형률 분포 (모멘트 분포), 하중, 변위 등을 추정하였다.

이상의 연구들에서 제시한 최대 변형률 추정 기법들은 보 구조물의 구조 역학 이론에 근거한 해석적 방법에 기초하고 있다. 다양한 하중 조건에서 그 크기를 모르는 경우에도 최대 변형률 추정이 가능하지만 하중의 형상은 몇 가지의 경우로 제한하고 있다. 특히 분포하중에 있어서 등분포 혹은 삼각분포 하중으로 그 형상을 제한하고 있다. 보에 재하되는 분포 하중의 형상을 정확하게 예측하는 것은 불가능하며, 분포 하중의 형상을 몇 가지 경우로 제한하여 국한된 형상의 하중 조건에 대해서만 최대 변형률을 추정하는 기법은 현실적인 구조물 모니터링에 적합하지 않다. 이에 Lee et al. (2013)은 집중하중뿐만 아니라 형상을 알지 못하는 분포하중에 대해서도 단일 보 구조물의 변형률 분포를 추정하는 기법을 제시하였다. 보 구조물의 전 길이방향의 변형률 분포를 추정함으로써 최대 변형률과 그 발생 위치를 추정한다. 이 연구에서는 기존의 해석적 추정 기법을 벗어나 계측한 변형률 데이터로부터 회귀 분석적 접근을 통해 어떠한 형상의 분포 하중을 받고 있는 단일 보 구조물에도 적용 가능한 최대 변형률 추정 기법을 제시하였다.

그러나 건물과 토목 구조물의 대부분 주요 보 구조물은 다경간, 부정정 구조물이다. 부정정인 여러 경간의 보 구조물은 각 경간마다 다른 값의 최대 변형률이 발생하며, 이에 따라 변형률 센서 계측 기법과 최대 변형률 추정 기법 또한 수정 및 보완이 필요하다. 각 경간마다 발생하는 정모멘트 외에도 다경간 보 구조물에서 발생하는 부모멘트 또한 최대 변형률 추정을 위한 고려대상이 된다. 따라서, 단일 경간 보 구조물에 대해 수행되어 온 변형률 기반 모니터링 연구는 다경간 보 구조물로 확장시킬 필요가 있다. Park et al. (2007)은 LGFOS를 이용하여 다경간 보 구조물의 최대 변형률 추정 기법을 제시하였다. 하지만 이 연구 또한 해석적 방법에 기초한 연구로서 분포 하중의 형상이 예측 가능한 경우에만

적용 가능하다.

따라서, 본 연구에서는 불특정 분포하중에 대한 다경간 연속보 구조물의 변형을 분포 추정 기법을 제시하였다. 본 추정 기법은 해석적 방법이 아닌 계측한 변형을 데이터로부터 최소제곱법을 이용한 커브 피팅을 통해 변형을 분포를 추정한 기존 연구 (Lee et al., 2013)를 보완하여 다경간 보 구조물로 그 적용 대상을 확장하였으며, 변형을 추정 범위를 부재의 탄성 거동까지로 제한하였다. 제시한 다경간 연속보 구조물의 변형을 추정 기법은 멀티플렉싱이 가능한 FBG 센서를 이용하여 다경간 연속 강재 보 정적 가력 실험을 통해 검증하였다. 실험을 통해서 분포 하중과 집중하중에 의한 변형을 분포의 추정 정확성 및 변형을 추정에 사용되는 계측점수에 따른 추정 오차에 대한 검토를 수행하였다.

2. 다경간 연속보 부재의 변형을 분포

2.1 다경간 연속보에 작용하는 실제 하중

다경간 연속보에서 하나의 보 부재에 작용하는 하중은 해당 경간 내에 작용하는 하중과 인접 부재로부터 보 양단의 접합부에서 전달되는 모멘트가 존재한다. 본 연구는 Fig. 1과 같이 다경간 연속보의 임의의 한 경간의 보를 단순보로 치환하고 양단모멘트를 포함한 불확실한 하중들이 이 치환된 단순보에 재하된다는 가정에서 시작한다. 경간 사이에 발생하는 모멘트는 치환된 단순보의 양단에 작용하는 모멘트로 수직하중의 정보를 알 경우 이론적인 해석에 의해 구할 수 있으나, 하중의 불확실성과 구조물의 실제 거동의 이론과의 불일치를 고려하여 본 연구에서는 미지의 값으로 간주하고 있다. Fig. 1과 같이 실제 보 구조물에 작용하는 중력방향 하중은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 형상과 크기를

알지 못하는 분포하중이다. 구조해석 및 설계 과정에서 분포하여 작용하는 형태의 하중은 일반적으로 그 형상 및 크기를 예상하여 가정된 값을 해석에 반영한다. 그러나 분포된 하중의 형상과 크기의 불확실성은 언제나 존재하며 이를 정확히 예측하는 것은 힘든 일이다. 둘째는 집중하중이다. 보에 접합된 작은 보 혹은 재하 면적이 작아 한 점으로 치환하여도 무방한 하중이 집중하중으로서 보에 작용하게 된다. 비록 집중하중은 그 작용점의 위치는 예측할 수 있지만 그 크기는 마찬가지로 불확실성을 내포하는 미지의 인자로 간주할 수 있다.

Fig. 1은 n 개의 경간을 가지고 있는 다경간 연속보의 일반적인 하중 재하 상황을 나타내고 있다. k 번째 경간의 변형을 분포는 분포하중 $w_k(x)$ 과 집중하중 P_k 를 받고 있을 때 양 옆 경간에서 전달받는 미지의 모멘트 $M_{k,1}, M_{k,2}$ 를 도입한 단순보에서의 변형을 분포와 같다. 여기서 $w_k(x)$ 의 형상과 크기, P_k 의 크기, 양단 모멘트 ($M_{k,1}, M_{k,2}$)의 크기는 알 수 없는 값이다.

2.2 변형을 분포 함수

본 연구는 변형을 분포 추정을 위하여, 해석적 추정 기법에서 보의 변형을 분포식 유도에서 사용하는 이론적인 보의 휨 이론을 도입하지 않고, 일반적인 다항식 형태의 함수를 통해 보의 변형을 분포식을 직접적으로 유추하고자 한다. 가정의 합리성을 위하여 Fig. 2와 같이 치환된 단순보에 작용하는 3가지 종류의 하중으로 인해 결정되는 변형률의 분포는 집중하중으로 인해 첨점을 유발시키는 분포 (1차 함수)와 분포하중과 양단 모멘트에 의한 부드러운 곡선으로 표현되는 분포 (2차 이상의 다항식)로 나누고 있다. k 번째 경간에서

Fig. 1 Multi-span continuous beam and substituted simple beam

Fig. 2 Decomposition of strain distribution by loading types for substituted simple beam

부드러운 곡선으로 표현되는 변형률 분포성분은 $\varepsilon_{k,dist.}(x_k)$ 으로 정의하며 이는 분포하중과 양단모멘트 작용 시 보에 발생하는 변형률 분포 특성을 고려하여 다차 (2차 이상) 다항식으로 근사화하였다. 가정한 부드러운 곡선 형태의 다항식은 커브 피팅을 이용하여 그 다항식의 계수를 구하게 된다.

커브 피팅은 이산 데이터에 대하여 함수로 표현되는 수학모델의 계수를 조정하여 수학모델과 데이터의 차이를 최소가 되도록 하는 기법이다. 이를 통해 데이터와 가장 잘 일치하는 최적의 계수를 갖는 수학모델을 찾을 수 있다. 본 연구에서 곡선 형태의 변형률 분포에 적용하는 다항 커브 피팅에서의 수학모델은 아래와 같이 표현된다.

$$f(x) = \sum_{j=0}^n a_j x^j \quad (1)$$

여기서 n 은 선택한 다항식의 최고 차수이며, a_j 는 x^j 의 계수이다. 분포하중과 양단 모멘트에 의한 부드러운 곡선 형태를 갖는 변형률 분포 곡선을 나타내기 위한 분포식은 위 커브 피팅의 수학모델 (식 (1))을 이용하여 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_{k,dist.}(x_k) = \sum_{j=0}^t a_{k,j} x_k^j \quad (2)$$

여기서 $a_{k,j}$ 는 k 구간 (k 경간)의 변형률 분포 추정 다항식의 x_k^j 의 계수이며 t 는 변형률 분포 추정식에 사용할 커브 피팅 다항식의 차수이다.

한편, k 번째 경간에서 집중하중으로 인해 유발되는 직선

형태의 변형률 분포는 $\varepsilon_{k,con}(x_k)$ 로 표현하였다. 본 연구에서는 경간 당 하나의 집중하중이 작용하는 것으로 가정하였으며 이에 따라 집중하중에 대한 변형률 분포는 집중하중의 작용점을 경계로 두 개의 구간을 갖는 1차 함수로 표현된다. 그 경계에서 Fig. 2에서와 같이 첨점을 갖는다. 이 두 가지의 변형률 분포식은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_{k,con}(x_k) = \lambda_k x_k^{*k} \quad (3)$$

x_k 는 k 구간의 왼쪽 지점을 0으로 하는 로컬 좌표이다. 한편, 식 (3)은 구간 별로 식의 형태가 다른 함수로서 이를 표현하기 위하여 연산자 *k 를 정의하였으며 그 의미는 식 (4)과 같다.

$$x_k^{*k} = \begin{cases} \frac{x_k}{l_{k,1}} & , \text{for } 0 \leq x_k \leq l_{k,1} \\ \frac{L_k - x_k}{l_{k,2}} & , \text{for } l_{k,1} \leq x_k \leq L_k \end{cases} \quad (4)$$

식 (3)의 λ_k 는 k 구간 $x_k = l_{k,1}$ 에서 집중하중에 의해 발생한 변형률을 추정한 값, $\varepsilon_{k,con}(l_{k,1})$ 이다. 따라서, 집중하중, 분포하중 및 양단모멘트를 받고 있는 k 번째 경간의 변형률 분포 근사 추정식은 위에서 가정한 식 (2)와 식 (3)을 조합하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_k(x_k) &= \varepsilon_{k,dist.}(x_k) + \varepsilon_{k,con}(x_k) \\ &= \sum_{j=0}^t a_{k,j} x_k^j + \lambda_k x_k^{*k} \end{aligned} \quad (5)$$

2장에서 가정한 다경간 연속보의 변형률 분포 근사 추정식은 3장에서 설명할 계측한 변형률 데이터를 입력한 커브 피팅을 통해 구하게 된다.

3. 변형률 분포 추정

본 장에서는 다경간 연속보의 변형률 분포 추정식의 계수를 구하기 위해 커브 피팅 기법을 적용한다. 커브 피팅에 앞서 다경간 연속보의 경계조건을 추정식에 대입하게 되는데 이는 보다 정확한 추정 함수를 구하기 위함일 뿐만 아니라 커브 피팅으로 구해야 할 추정식의 계수의 수를 줄이기 위함이다. 구해야 할 추정식의 계수의 수는 추정에 필요한 계측 변형률 값의 개수에 비례하므로 이를 줄여 변형률 분포 추정을 위해 필요한 센서 수를 줄이기 위함이다. 경계조건을 대입하여 변형된 변형률 분포 추정식은 최소제곱법을 이용한 커브 피팅을 통해 구해진다. 여기서 최소제곱법은 계측한 변형률 위치에서 추정식의 변형률 값과 계측한 변형률 값 사이의 오차를 최소로 하여 미지수 (추정식의 계수)를 찾기 위해 사용된다.

3.1 다경간 연속보의 경계조건을 적용한 변형률 분포 추정식

먼저, 본 연구에서 대상으로 하는 다경간 연속보의 특성을 반영하여 식 (5)로 표현된 근사 추정식을 변형한다. 다경간 연속보의 경계조건을 대입하여 보다 정확한 변형률 추정식을 설정하고 이를 구하기 위함이다. 다경간 연속보의 구조 특성상 두 경간의 경계점에서의 변형률 분포는 연속이어야 한다는 특징이 반영된다. 이를 식으로 표현하면 식 (6)과 같다. n 개 경간에서 변형률 분포식은 식 (6)의 $n-1$ 개의 경계조건을 만족해야 한다.

$$\varepsilon_k(L_k) = \varepsilon_{k+1}(0), \text{ for } k = 1 \text{ to } n-1 \quad (6)$$

한편, 식 (5)는 집중하중과 양단 모멘트에 의한 항과 집중하중에 의한 항으로 구분된다. 여기서 집중하중에 의한 변형률 추정식에 집중하중의 변형률 분포 특성을 반영하기 위해, 단순보에서 집중하중에 의한 변형률 분포식의 양단에서의 변형률 값이 0인 경계조건을 대입할 수 있다. $\varepsilon_{k,con}(x_k)$ 은 $x_k = 0$ 과 $x_k = L_k$ 에서 모두 0을 가지기 때문에 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_{k,con}(0) = \varepsilon_{k,con}(L_k), \text{ for } k = 1 \text{ to } n \quad (7)$$

식 (6)과 (7)의 경계조건 정보를 변형률 분포 추정식인 식 (5)에 대입하면 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

for $k = 1$ to $n-1$

$$\sum_{j=0}^t a_{k,j}(L_k)^j = \sum_{j=0}^t a_{k+1,j}(0)^j \quad (8)$$

식 (8)을 정리하여, 추정 다항식의 0차수에 대한 계수를 분리하여 나머지 계수들과의 관계를 표현하면 식 (9)와 같다.

for $k = 1$ to $n-1$

$$\begin{aligned} a_{k,0} - a_{k+1,0} &= - \sum_{j=1}^t a_{k,j}(L_k)^j + \sum_{j=1}^t a_{k+1,j}(0)^j \\ &= - \sum_{j=1}^t a_{k,j}(L_k)^j \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)는 다경간 연속보의 모든 경계점에 대하여 위에서 언급한 두 가지 경계조건이 모두 대입된 관계식으로서 아래의 식 (10)과 같은 행렬식으로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{1,0} \\ a_{2,0} \\ a_{3,0} \\ \vdots \\ a_{n-1,0} \\ a_{n,0} \end{bmatrix} \\ \text{[n by n]} \quad \text{[n by 1]} \\ = \begin{bmatrix} -L_1 - L_1^2 \cdots - L_1^t & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -L_2 - L_2^2 \cdots - L_2^t & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{1,1} \\ a_{1,2} \\ \vdots \\ a_{1,t} \\ a_{2,1} \\ a_{2,2} \\ \vdots \\ a_{n,t} \\ a_{n,0} \end{bmatrix} \\ = [\Phi] \{A\} = [\Psi] \{B\} \quad (10) \end{aligned}$$

위의 식 (10)은 $\{A\}$ 로 정의된 추정 다항식의 0차수 계수인 $a_{1,0}, a_{2,0}, \dots, a_{n,0}$ 와 $\{B\}$ 로 정의된 $\varepsilon_{1,dist.}(x_1), \varepsilon_{2,dist.}(x_2), \dots, \varepsilon_{n,dist.}(x_n)$ 의 나머지 계수들의 관계를 보여준다. $\{A\}$ 와 $\{B\}$ 의 관계는 식 (10)으로 부터 식 (11)과 같이 얻을 수

있다.

$$\{A\} = [\Phi]^{-1}[\Psi]\{B\} = [R]\{B\} \quad (11)$$

여기서 $[R]$ 은 $[\Phi]^{-1}[\Psi]$ 으로 정의되며 $\{A\}$ 와 $\{B\}$ 의 직접적인 관계를 설명한다. $R_{i,j}$ 를 R 행렬의 i 행 j 열 성분(element)을 가리키는 것으로, B_i 를 벡터 B 의 i 행 원소로 정의하면, 식 (11)로 부터 다항식의 0차수 계수들인 $a_{k,0}$ 은 다음 식 (12)와 같이 주어진다.

for $k = 1$ to n

$$a_{k,0} = \sum_{i=0}^{nt+1} R_{k,i} B_i \\ = \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^t (R_{k,t(\alpha-1)+\beta} a_{\alpha,\beta}) + R_{k,nt+1} a_{n,0} \quad (12)$$

따라서 경계조건을 통해 계수간의 관계를 적용한 새로운 형태의 변형률 분포함수는 식 (12)를 식 (5)에 대입하고 I 단 위행렬을 이용함으로써 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

for $k = 1$ to n

$$\varepsilon_k(x_k) = \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^t a_{\alpha,\beta} (R_{k,t(\alpha-1)+\beta} + I_{k,\alpha} x_{\alpha}^{\beta}) \\ + R_{k,nt+1} a_{n,0} + \lambda_k x_k^{*k} \quad (13)$$

3.2 최소제곱법을 이용한 변형률 분포 추정식

3.1절에서 다경간 연속보의 경계조건을 대입하여 변형시킨 변형률 분포 추정식에서 미지수인 계수들의 값을 구하면 다 경간 연속보의 변형률 분포 추정식을 구할 수 있다. 본 연구에서는 다경간 보에서 측정한 변형률을 통해 실제의 변형률 분포에 가장 근접한 분포 추정식의 계수를 찾기 위해 최소제곱법을 이용한 커브 피팅 기법을 적용한다. 최소제곱법을 이용하여 측정한 변형률 값과 같은 위치에서의 변형률 분포식의 변형률 값 간의 차이를 최소화하는 계수의 값을 구한다.

k 경간의 i 번째 측정 변형률, $y_{k,i}$ 을 $x_k = x_{k,i}$ 에서 얻었을 때, 분포 추정식의 오차함수 E 는 다음 식 (14)로 주어진다.

$$E = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{m_k} \left\{ \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^t a_{\alpha,\beta} (R_{k,t(\alpha-1)+\beta} + I_{k,\alpha} x_{k,i}^{\beta}) \right.$$

$$\left. + R_{k,nt+1} a_{n,0} + \lambda_k (x_{k,i})^{*k} - y_{k,i} \right\}^2 \quad (14)$$

여기서 m_k 는 k 번째 경간에서 측정한 변형률 데이터의 총 개수이다. 오차함수에서 볼 수 있듯이 경계조건을 적용한 변형률 분포 추정식은 3가지 형태의 계수가 존재한다. $a_{\alpha,\beta}$, $a_{n,0}$, and λ_k . 구하고자 하는 각 계수들에 대해서 식 (14)를 편미분하여 정리한 후, 측정한 변형률과 변형률 분포 추정식의 차이를 최소로 하기 위해 편미분한 값이 0이 되도록 하면 식 (15)~(17)과 같이 나타낼 수 있다.

for $g = 1$ to n and $h=1$ to t

$$\frac{\partial E}{\partial a_{g,h}} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_{n,0}} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \lambda_k} = 0, \text{ for } k = 1 \text{ to } n \quad (17)$$

식 (15)~(17)로 주어지는 방정식은 총 $nt+1+t$ 차 연립 방정식으로 Fig. 3과 같이 선형 행렬시스템으로 나타낼 수 있다. Fig. 3에서 X 는 각 계수에 곱해진 성분을 의미한다. X 의 상첨자는 오차함수를 편미분한 계수를 의미하며, 하첨자는 X 에 곱해지는 계수를 나타낸다. Y 는 측정한 변형률 값을 포함한 3가지 편미분 방정식의 우변성분인 상수항을 나타내며, Y 의 상첨자는 X 의 상첨자와 마찬가지로 편미분한 계수를 나타낸다. 따라서 식 (15)~(17)은 Fig. 3에서 정의

		coefficient of				
		$a_{\alpha,\beta}$	$a_{n,0}$	λ_k		
		↑				
Equation of	$\frac{\partial E}{\partial a_{\alpha,\beta}}$	$\left[\begin{array}{cccc} X_{a_{1,1}}^{a_{1,1}} & \dots & X_{a_{n,1}}^{a_{1,1}} & X_{a_{n,0}}^{a_{1,1}} & X_{\lambda_1}^{a_{1,1}} & \dots & X_{\lambda_n}^{a_{1,1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{a_{1,t}}^{a_{n,t}} & \dots & X_{a_{n,t}}^{a_{n,t}} & X_{a_{n,0}}^{a_{n,t}} & X_{\lambda_1}^{a_{n,t}} & \dots & X_{\lambda_n}^{a_{n,t}} \\ X_{a_{1,0}}^{a_{n,0}} & \dots & X_{a_{n,0}}^{a_{n,0}} & X_{a_{n,0}}^{a_{n,0}} & X_{\lambda_1}^{a_{n,0}} & \dots & X_{\lambda_n}^{a_{n,0}} \end{array} \right] \begin{Bmatrix} a_{1,1} \\ \vdots \\ a_{n,t} \\ a_{n,0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Y^{a_{1,1}} \\ \vdots \\ Y^{a_{n,t}} \\ Y^{a_{n,0}} \end{Bmatrix}$				
	$\frac{\partial E}{\partial a_{n,0}}$					
	$\frac{\partial E}{\partial \lambda_n}$					
		[X]		{C} = {Y}		
		↓		↓		
		Dimension :		(nt+1+n) × (nt+1+n) (nt+1+n) × 1		

Fig. 3 Linear matrix system simultaneous equations

된 바와 같이 식 (18)로 표현할 수 있다.

$$[X]\{C\} = \{Y\} \quad (18)$$

3.3 축소된 연립방정식 (reduced system equation)

만약 i 번째 경간에서 집중하중이 작용하지 않아 직선형 변형률 분포식인 $\varepsilon_{i,con}(x_i)$ 가 존재하지 않는다면, 그에 해당하는 λ_i 를 결정할 수 없기 때문에 식 (18)에 나타난 추정식의 계수를 구하는 연립방정식의 해는 존재하지 않게 된다. 이러한 경우 $[X]$ 행렬에서 λ_i 에 해당하는 열, $[X]$ 행렬과 $\{Y\}$ 벡터에서 $\partial E / \partial \lambda_i$ 에 해당하는 행에서 원소는 모두 0을 갖는다. 따라서, Fig. 4와 같이 해당 열과 행을 삭제하여 축소된 연립방정식을 구성할 수 있다. 집중하중이 작용하지 않는 모든 경간에 대해 Fig. 4의 행렬과 벡터에서 해당되는 모든 행과 열의 원소들이 삭제된다. 만약 모든 경간에서 집중하중이 없다면 행렬의 $nt+2$ 부터 $nt+1+t$ 까지의 모든 행과 열이 삭제되어 연립방정식에 λ 에 관한 항이 존재하지 않게 된다. 이 같은 과정을 거쳐 축소된 연립방정식은 식 (19)와 같이 표현할 수 있다.

$$[X_R]\{C_R\} = \{Y_R\} \quad (19)$$

여기서 하첨자 R 은 축소된 (reduced) 행렬 혹은 벡터를 나타낸다.

식 (19)를 통해 분포 추정식의 계수를 식 (20)과 같이 결정할 수 있다.

$$\{C_R\} = [X_R]^{-1} \{Y_R\} \quad (20)$$

하지만 식 (20)을 통해 얻은 분포 추정식의 계수는 다항함수의 0차수 계수들인 $a_{1,0}, a_{2,0}, \dots, a_{n-1,0}$ 을 포함하고 있지 않다. $\{C_R\}$ 의 1부터 $nt+1$ 까지의 행에 해당하는 $a_{1,1}, a_{1,2}, \dots, a_{n,t}, a_{n,0}$ 은 식 (11)에서 정의된 $\{B\}$ 이며, 식 (20)의 $\{C_R\}$ 에 포함되지 않은 분포 추정식의 계수는 식 (11)의 $\{A\}$ 에 해당되므로, $[R]$ 행렬에 식 (20)으로 부터 구한 행렬 $\{B\}$ 를 대입하여 $\{C_R\}$ 에 포함되지 않은 분포 추정식의 나머지 계수인 $\{A\}$ 를 구할 수 있다. 마침내 3장에서 설명한 기법을 통해 분포 추정식의 모든 계수를 구할 수 있게 되었다. 이와 같이 구한 모든 계수들을 식 (5)에 대입함으로써 다경간 연속보의 변형률 분포 추정식을 얻을 수 있다. 3장에서 언급한 변형률 분포 추정 기법에 대한 전체 과정을 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다.

4. 실험

이상에서 제안한 커브 피팅을 이용한 변형률 분포 추정 기법을 검증하기 위해 다경간 연속보의 변형률 계측 실험을 수행하였다.

4.1 실험 개요

실험체는 PL - 150 × 15의 총 길이 6000mm길이의 3경간 강재 보로 한 경간 당 1800mm길이이고 실험체 양 끝단은 300mm씩 내민보 형태를 갖는다. 강재의 재료는 SS400이다.

Fig. 4 Reduced linear matrix system

Fig. 5 Flow chart of strain distribution estimation method

Table 1 Installation location of FBG sensors on multi-span beam

Span	Location (mm)													
	1				2				3					
Measured point	50	300	500	1000	1350	2100	2400	2900	3100	3300	3900	4300	4900	5350
Reference point			800		1750	1850		2700		3550	3650		4650

Fig. 6 Experiment setup and loading process : (a) initial step (b) distributed load (c) adding concentrated load

제안한 기법 검증에 위해 다경간 보에 설치된 FBG 센서는 경간 당 5개로 해당 센서로부터 측정한 변형을 데이터는 변형을 분포 추정을 위해 이용된다. 또한, 추정된 변형을 분포를 검증하기 위해 각 경간에는 reference 센서가 설치되어 있다. 첫번째 경간에 2개, 두번째 경간에 3개, 세번째 경간에 2개의 FBG 센서가 각각 설치되어 있다. 분포 추정을 위해 이용되는 경간 당 5개 FBG 센서의 위치는 비교적 측측 및 설치 시공상 용이한 곳을 선정하였고, 미리 수행한 구조해석을 통해 각 경간의 최대 정모멘트 및 부모멘트 발생 지점을 reference point로 선정하여 해당 위치에 reference 센서를 설치하였다. 최대 부모멘트 발생 예상 지점 (지점)에 대해서는 센서의 손상이 우려되어 해당 지점과 매우 인접 (50mm) 한 양 옆 두 위치에 각각 설치하였다. 센서의 자세한 위치는 Table 1에 정리되어 있다.

하중 재하 과정은 Fig. 6에 나타나 있다. Fig. 6(a)와 같이 다경간 보의 상부에 센서를 설치한 초기 세팅을 측측 시작 상태로 정하였다. 첫번째 하중 단계는 Fig. 6(b)에 표현한 것처럼 강재 보를 뒤집어 형강 자중의 2배의 분포 하중이 재하되도록 설정하였다. 두번째 하중 단계는 집중 하중이 추가되는 단계로, 집중 하중을 구현하기 위해 Fig. 6(c)와 같이 보 상부

에 강재 3개를 놓고 그 위에 2600mm길이의 H-100x100x6/8 형강을 얹어 형강 무게가 강재가 놓인 3점을 통해 집중하중으로 변환되어 다경간 보에 가력될 수 있게 세팅하였다. Photo 1은 센서 설치 및 분포 하중 재하를, Photo 2는 집중 하중 재하를 추가한 최종 하중 단계를 보여주는 실험 전경이다. 추가적으로 모든 하중 단계에서 다경간 보 양단의 내민 보 부분이 실험체에 양단모멘트를 작용하고 있다. 이와 같은

Photo 1 The whole view of experimental test (loading step1)

Photo 2 The whole view of experimental test (loading step2)

단계별 하중 재하를 통해 최종 하중 단계에서 다경간 보가 집중하중, 분포하중 및 양단모멘트를 동시에 받을 수 있도록 고려하였다.

4.2 실험 결과

Table 1에 나타난 위치에 FBG 센서를 설치하여 각 하중 단계별로 다경간 보의 변형률을 계측하였다. 각 경간 당 5개 씩 얻은 변형률 데이터를 통해 다경간 보의 변형률 분포를 추정하였다. 식 (5)에서 변형률 분포 근사 추정식의 분포하중에 대한 항의 다항함수 차수 (t)는 2차로 가정하였다. 또한, 계측 데이터를 경간 당 4개로 감소시켜 기법 적용을 한 경우, 변형률 분포를 추정해 보고 계측 데이터 수에 따른 영향을 분석해 보았다.

각 하중 단계별로 다경간 보의 변형률 분포를 추정하였다. 먼저, 분포 하중을 재하한 하중 단계 1에서의 변형률 분포를

추정하여 reference point에서 계측한 값과 추정한 값의 비교를 Table 2에 정리하였다. 추정한 변형률 분포와 reference point에서의 계측 변형률 값을 Fig. 7에 나타내었다. 다경간 보 한 경간 당 5개의 FBG 센서로부터 계측한 변형률 데이터로 변형률 분포를 추정하여 각 경간에서 최대 정모멘트와 부모멘트 발생 예측지점에서의 계측 변형률과 추정 변형률을 비교하였다. 그 결과, 전체오차는 5.89%가 발생하였다. 추정

Fig. 7 Estimated strain distribution and measured strain at reference points under loading step 1 (distributed load) : (a) strain distribution estimated from 5 strain data per span (b) strain distribution estimated from 4 strain data per span

Table 2 Result of strain estimation under loading step 1 (distributed load)

Location (mm)	Span 1		Span 2			Span 3	
	800	1750	1850	2700	3550	3650	4650
Reference strain ($\mu\epsilon$)	79.96	-36.63	-35.17	46.49	-76.94	-73.87	57.95
Entire error of estimation using 5sensors per span : 5.89%							
Estimated strain ($\mu\epsilon$)	73.28	-34.57	-34.20	44.69	-71.89	-70.87	60.65
Absolute error ($\mu\epsilon$)	6.69	-2.06	-0.96	1.80	-5.05	-3.00	1.46
Relative error (%)	8.36	5.63	2.74	3.88	6.57	4.06	2.52
Entire error of estimation using 4sensors per span : 6.26%							
Estimated strain ($\mu\epsilon$)	73.03	-40.33	-39.84	48.32	-75.53	-74.63	54.53
Absolute error ($\mu\epsilon$)	6.93	3.70	4.68	-1.83	-1.40	0.76	-3.43
Relative error (%)	8.67	10.11	13.30	3.94	1.82	1.03	5.91

Table 3 Result of strain estimation under loading step 2 (distributed load+concentrated load)

Location (mm)	Span 1		Span 2			Span 3	
	800	1750	1850	2700	3550	3650	4650
Reference strain ($\mu\epsilon$)	95.87	-65.17	-68.64	45.43	-114.18	-104.68	64.65
Entire error of estimation using 5sensors per span : 6.95%							
Estimated strain ($\mu\epsilon$)	87.98	-64.63	-71.44	43.02	-107.65	-102.48	75.16
Absolute error ($\mu\epsilon$)	7.89	-0.54	2.79	2.41	-6.53	-2.19	-10.51
Relative error (%)	8.23	0.83	4.07	5.30	5.72	2.10	16.26
Entire error of estimation using 4sensors per span : 7.21%							
Estimated strain ($\mu\epsilon$)	87.57	-70.84	-77.52	46.94	-111.59	-106.53	72.32
Absolute error ($\mu\epsilon$)	8.30	5.68	8.88	-1.52	-2.59	1.85	-7.36
Relative error (%)	8.65	8.71	12.94	3.34	2.27	1.77	11.87

된 변형률 분포의 전체오차는 일반적인 상대오차를 다수의 데이터로 확장시킨 값으로 식 (21)에 의해 계산된다.

$$error(\%) = \frac{\|\varepsilon_{me} - \varepsilon_{es}\|}{\|\varepsilon_{me}\|} \times 100 \quad (21)$$

여기서, ε_{me} 는 계측 변형률로 구성된 벡터, ε_{es} 는 추정된 변형률로 구성된 벡터이다. $\|\ \|$ 는 놈 (norm)을 나타낸다. 각 reference point에서의 절대오차에 대해서 살펴보면, 0.96 $\mu\epsilon$ 에서 6.69 $\mu\epsilon$ 의 범위를 갖으며 첫번째 경간 최대 정모멘트 발생 지점에서 6.69 $\mu\epsilon$ (8.36%)의 최대상대오차가 발생하였다. 보 구조물 모니터링의 핵심인 최대 변형률에 대한 계측값과 추정값의 오차를 경간 별로 살펴보면, 첫번째 경간에서는 6.69 $\mu\epsilon$ (8.36%), 두번째 경간에서는 5.05 $\mu\epsilon$ (6.57%), 마지막 경간에서는 3.00 $\mu\epsilon$ (4.06%)의 오차를 나타내었다. 경간 당 센서 설치개수 5개 중 4개를 선택 (위치 : 50, 300, 1000, 1350, 2100, 2400, 3100, 3300, 3900, 4300, 5200, 5350mm)하여 추출한 계측 데이터로부터 변형률 분포를 추정해 보았다. 전체오차는 6.26%로 5개의 센서 추정시보다 0.37% 증가하였다. 절대오차는 최대 변형률에 대해서 첫번째 경간에서는 6.93 $\mu\epsilon$ (8.67%), 두번째 경간에서는 1.40 $\mu\epsilon$ (1.82%), 마지막 경간에서는 0.76 $\mu\epsilon$ (1.03%)의 오차를 나타낸 바, 경간 당 5개의 센서로부터 최대 변형률 분포를 추정한 결과와 비슷한 결과를 나타내었다. 그러나 최대 절대오차는 경간 당 5개 센서 추정시보다 미세하게 증가 (0.24 $\mu\epsilon$)하였다. 또한, 상대적으로 작은 변형률이 발생한 일부 위치에서 다소 큰 %상대오차를 나타내었다.

다음으로 집중하중을 추가로 재하한 하중 단계 2에서의 변형률 분포를 추정하였다. Table 3에 reference point에서의 계측값과 해당 위치에서의 추정 변형률 값을 비교하였다. 추

Fig. 8 Estimated strain distribution and measured strain at reference points under loading step 2 (distributed load+concentrated load) : (a) strain distribution estimated from 5 strain data per span (b) strain distribution estimated from 4 strain data per span

정한 변형률 분포는 추정시 적용한 센서 수를 5개와 4개인 경우에 대하여 각각 Fig. 8에 나타내었다. 추정시 적용한 센서의 수가 경간 당 5개인 경우, 전체 오차는 6.95%를 나타내었다. 추정한 변형률의 절대오차 범위는 0.54 $\mu\epsilon$ 에서 10.51 $\mu\epsilon$ 로 최대 상대오차는 세번째 경간 최대 정모멘트 발생 점에서 발생하였다. 각 경간 별 최대 변형률 절대오차는 첫번째 경

Fig. 9 Comparison of estimated strain distributions for loading step 1 (distributed load) and loading step 2 (concentrated load)

간에서 $7.89\mu\epsilon$ (8.23%), 두번째 경간에서 $6.53\mu\epsilon$ (5.72%), 마지막 경간에서 $2.19\mu\epsilon$ (2.10%)가 발생하였다. Fig. 9에서 확인할 수 있듯이, 하중 단계 2에서 추정된 변형률 분포는 집중하중이 가력된 위치에서 하중 단계 1의 추정 변형률 분포와는 다른 양상을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 집중하중에 의해 변화한 변형률 분포 양상이 추정한 변형률 분포에 적절히 반영되어 집중하중 점 이후의 변형률 분포 기울기가 변하는 것을 확인할 수 있다. 집중하중에 대한 변형률 분포 추정식인 1차 함수의 기울기를 비교적 정확히 추정함으로써, 최대 부모멘트 발생 지점까지 변형률 분포뿐만 아니라 지점에서의 최대 변형률을 작은 오차 범위 내에서 추정하고 있다. 추정시 적용한 계측 데이터 수를 경간 당 4개로 감소시켜 변형률 분포를 추정한 경우, 전체오차는 7.21%가 발생하였으며 5개의 센서로 추정시 전체오차보다 0.26%증가하였다. 절대오차의 경우, $1.52\mu\epsilon$ 에서 $8.30\mu\epsilon$ 의 오차범위를 보이며 경간 당 5개로 추정한 경우보다 다소 오차가 증가했음을 알 수 있다. 그러나 다경간 보 전체에서 발생한 최대 변형률 (두번째 경간과 세번째 경간 사이 지점)은 상당히 적은 상대 오차 범위 내에서 추정하고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 다경간 연속 강재보의 안전성 모니터링을 위한 변형률 분포 추정 기법을 제시하였다. FBG센서로부터 계측한 변형률 데이터에 최소제곱법을 이용한 커브 피팅을 적용하여 변형률 분포를 추정한 후, 실험값을 통해 제시한

추정 기법을 검증하였다. 본 연구에서 제안한 추정기법의 특징 및 실험을 통해서 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 다경간 연속보에 재하되는 집중하중, 분포하중 및 양단으로부터의 모멘트에 의해 발생하는 변형률 분포를 직접 n 차 다항함수로 나타내고, 계측한 변형률 데이터 간의 차이를 최소화 하도록 커브 피팅을 적용하여 변형률 분포를 추정하는 기법을 제시하였다. 이는 예측하기 힘든 형상 및 크기를 갖는 분포하중에 대해서도 변형률 분포를 추정하게 됨으로써 보다 현실적인 보 구조물 모니터링이 가능해 질것으로 기대된다.
- (2) 집중하중, 분포하중 및 양단 모멘트를 동시에 받고 있는 다경간 연속 강재 보에 대한 실험을 통해 본 연구가 제시하는 기법을 검증하였다. 최대 변형률 예상점에서의 계측값과 추정한 변형률 분포의 해당 지점에서의 변형률값을 비교한 결과, 분포하중만 작용 시 (하중 단계 1) 5.89%의 전체오차를, 분포하중과 집중하중이 동시에 작용하는 경우 (하중 단계 2) 6.95%의 전체오차를 보였다. 또한, 하중 단계 2에서 집중하중에 의해 변화한 변형률 분포 양상과 이에 따른 영향이 추정한 변형률 분포에 적절히 반영되는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 실험에서 설치된 5개의 센서 중 4개의 센서를 선정하여 계측지점의 감소에 따른 변형률 분포추정값의 정확성을 확인해 본 결과, 5개의 센서로부터 추정한 변형률 분포보다 절대오차가 증가하였으며 기존 변형률 기반 모니터링과 마찬가지로 전반적인 다경간 보의 변형률 추정의 정확도는 센서의 수에 비례하는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0018360).

References

1. AISC (2005), Steel Construction Manual, American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, IL.
2. Chan, P. K. C., Jin, W., Gong, J. M., Demokan, M. S. (1999), Multiplexing of fiber Bragg grating sensors using an FMCW technique, IEEE Photonic Technology Letter, 11, 1470-1472.
3. Choi, S. W., Lee, J., Oh, B. K., Park, H. S. (2013), Analytical models for estimation of the maximum strain of

- beam structures based on optical fiber bragg grating sensors, *Journal of Civil Engineering and Management* (Accepted).
4. Grattan, K. T. V., Sun, T. (2000), Fiber optic sensors technology: an overview, *Sensors and Actuators A: Physical*, 82(1-3), 40-61.
 5. Hahn, H. G., Ahn, H. J. (2012), A Study on Development of Structural Health Monitoring System for Steel Beams Using Strain Gauges, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(1), 99-109 (in Korean).
 6. Hampshire, T. A., Adeli, H. (2000), Monitoring the behavior of steel structures using distributed optical fiber sensor, *Journal of Constructional Steel Research*, 53, 267-281.
 7. Lee, H. M., Park, H. S. (2013), Measurement of maximum strain of steel beam structures based on average strains from vibrating wire strain gages, *Experimental Techniques*, 37, 23-29.
 8. Lee, J. H., Choi, S. W., Park, H. S. (2013), A Regression-based Estimation of Strain Distribution for Safety Monitoring of the Steel Girder Subjected to Uncertain Loads, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(2), 10-20 (in Korean).
 9. Li, H. N., Li, D. S., Song, G. B. (2004), Recent application of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering, *Engineering Structures*, 26(11), 1647-1657.
 10. Lioe, R., Wong, W. (2012), The Sands Hotel and Sands SkyPark, *The Arup Journal*, 1, 17-20.
 11. Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K., Bhattachary, D. K. (2008), Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-Present Status and applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, 147(1), 150-164.
 12. Park, H. S., Jung, H. S., Kwon, Y. H., Seo, J. H. (2006), Analytical models for assessment of the safety of steel beams based on average strains from long gage optic sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 125, 109-113.
 13. Park, H. S., Jung, S. M., Lee, H. M., Kwon, Y. H., Seo, J. H. (2007), Analytical models for assessment of the safety of multi-span steel beams based on average strains from long gage optic sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 137, 6-12.
 14. Park, H. S., Park, K. T., Lee, K. W. (2001), An Experimental Study on Characteristic Analysis of Deflection Response of RC Structures Using Measured Strain, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 5(3), 173-180 (in Korean).
 15. Park, H. S., Shin, Y., Choi, S. W., and Kim, Y. (2013), An Integrated Structural Health Monitoring System for the Local/Global Response of a Large-Scale Irregular Building under Construction, *Sensors*, 13, 9085-9103.
 16. Tam, H., Au, H. Y., Chung, K. M., Liao, W. Y., Chung, W. H., Liu, S. Y., Lai, S. Y., Lai, C. C., Ni, Y. Q., Csipkes, A. (2011), Distribution Optical Sensor System on the 610-m Guangzhou New TV Tower, Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles.
 17. Yu, F., Gupta, N. (2005), An efficient model for improving performance of vibrating-wire instruments, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 37(3), 278-283.

Received : 09/07/2013
 Revised : 10/29/2013
 Accepted : 11/21/2013

요 지

본 연구에서는 불특정 분포하중에 대한 다경간 연속 보 구조물의 변형률 분포를 추정하는 기법을 제시하였다. 본 추정 기법은 해석적 방법이 아닌 계측한 변형률 데이터로부터 최소제곱법을 이용한 커브 피팅을 통해 변형률 분포를 추정하였다. 제시한 다경간 보 연속 구조물의 변형률 추정 기법은 멀티플렉싱이 가능한 FBG 센서를 이용하여 다경간 연속 강재 보 정적 가력 실험을 통해 검증하였다. 실험을 통해서 분포 하중과 집중하중에 의한 변형률 분포의 추정 정확성 및 변형률 추정에 사용되는 계측점 수에 따른 추정 오차에 대한 검토를 수행하였다. 5.89 (하중 step1), 6.26% (하중 step2) 오차로 최대 변형률 지점에서의 변형률을 추정할 수 있었다. 추정을 위한 변형률 계측 센서 수를 감소시킨 경우 오차가 증가 (0.26~0.37%)하는 것 또한, 확인할 수 있었다. 회귀분석적 기법을 통해 다경간 보의 변형률 분포를 추정함으로써 특정 형상의 분포 하중에 대해서만 적용이 가능한 해석적 변형률 추정 기법의 한계를 넘어 불특정 분포 하중에 대한 변형률 분포 추정이 가능해졌고 추정 변형률 분포를 통해 최대변형률 발생 위치까지 확인할 수 있게 되었다.

핵심 용어 : 구조 건전도 모니터링, 변형률 추정, 커브 피팅, 다경간 강재 보, FBG 센서