

# 평균변형률을 이용한 3경간 이상 연속 철골보의 안전성 평가 기법

## Mathematical model for assessment of the safety of over three-span steel beams based on average strains from long gage optic sensor

정 성 문\* · 이 흥 민\*\* · 박 효 선\*\*\*

Jung, Seong-Moon · Lee, Hong-Min · Park, Hyo-Seon

### ABSTRACT

Although the strain distribution along the length of a beam in buildings or infrastructures is non-uniform, most fiber optic sensors are point sensors that can measure the strain only at a local point of a beam. Long gage fiber optic sensors that measure integrated strain over a relatively long length can consider strain variation. This type of sensor was found to be efficient and useful for monitoring large-scale structures. On the other hand, the maximum strain or stress in a beam can not be measured with long gage optic sensors. However, for the assessment of the safety of multi-span steel beams subjected to various vertical loads, the maximum strain or stress measured during monitoring is required for comparison with the allowable stress of the beam calculated by a design code. Therefore, in this paper, mathematical models are presented for determination of the maximum values of strains in more three-span steel beams based on the average strains measured by long gage optic sensors.

**Keywords:** Average Strain, Long gage fiber optic sensor, Health monitoring

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경

고층 건물이나 교량과 같은 대형 구조물이 노후화하거나 장시간 외부의 영향을 받게 되면 구조물에 광범위한 손상이 발생하므로 시기적절한 보수와 유지를 위해서는 구조물의 모니터링 시스템이 필요하다. 외국에서는 이미 교량의 보수 등과 관련하여 안전성 모니터링 기술에 대한 연구가 상당수 진행 중에 있으며, 구조물의 내부 또는 외부에 센서와 작동기를 설치하여 구조물 스스로 외부의 환경 변화 및 구조물 내부의 상태 변화를 감지하고 요구되는 동작을 행할 수 있도록 하는 스마트 구조물(smart structure)에 관한 연구 역시 미국 등을 중심으로 활발히 수행되고 있다. 우리나라에서도 다양한 안전성 모니터링 시스템이 연구 개발 중에 있지만 대부분 센서 자체의 성능과 Point Sensor라는 한계로 구조물의 상태를 모니터링하기가 쉽지 않았다. 이

\* 연세대 대학원 석사과정 E-mail: iam\_jsm@hanmail.net

\*\* 연세대 대학원 박사과정

\*\*\* 연세대 건축도시공학부 부교수

에 기존의 전기 저항식센서와 Point Sensor의 한계를 극복할 수 있는 새로운 센서가 필요하고 이를 활용한 새로운 안전성 평가 기법의 개발이 절실하다.

### 1.2 전기 저항식센서의 한계와 광섬유센서

전기 저항식센서는 전자기파에 의한 간섭과 외부 환경으로부터의 영향 때문에 측정의 신뢰성에 문제가 있으며, 내구성이 낮아 장기 측정이 불가능하다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 광섬유센서가 대안으로 떠오르고 있다. 광섬유센서는 화학적으로 안정하고 부식이 되지 않는 재질로 장기측정에 적합하다. 그리고 전자기적으로 중성이므로 전자기파의 영향을 받지 않아 안정성이 높고, 구조물의 여러 장소에 분포되어 원하는 물리량을 동시에 감지해낼 수 있기 때문에 대형구조물의 변형을 측정하기에 적합하다.

### 1.3 Point Sensor의 한계와 Long Gauge Sensor

기존에 사용되던 안전성 평가기법들은 대부분 국부적인 점에서의 최대변형률에 의존하고 있다. 하지만 구조물의 크기에 비해 사용되는 센서가 미소하기 때문에, 안전성 평가의 적절성이 센서의 위치 및 개수에 의해 좌우되는 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 센서의 수를 증가시키면 동시에 처리해야 하는 데이터의 양 역시 많아지므로, 국부적인 데이터만으로 대형 구조물의 거동을 실시간으로 모니터링하고 안전성을 평가하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 보다 객관적인 안전성 평가 기준의 정립을 위해서는 이러한 한계를 극복할 수 있는 센서의 도입이 필요하다.

본 연구에서는 Point Sensor의 한계를 극복하기 위하여 Long Gauge Fiber Optic Sensor(이하 LGFOS)를 이용하였다. LGFOS는 기존의 센서에 비해 길이의 제약은 거의 받지 않고 쉽게 구부러 사용할 수 있으므로 다양한 형태의 구조물에 적용가능하다. 또한 구조물의 표면에 부착하거나 콘크리트 속에 매립하여 사용할 수 있다. 현재 LGFOS는 토목구조물에서 활용범위를 넓혀가고 있으나, 건축물에서의 적용은 활발히 이루어지지 않고 있다.

### 1.4 연구의 목적 및 방법

본 연구에서는 LGFOS로부터 획득된 평균변형률을 이용하여 구조물의 최대변형률을 계산할 수 있는 기법을 제시하고자 한다. LGFOS를 이용한 교량 처짐에 관한 연구가 실용화 단계에 있지만, 본 연구에서는 평균변형률로부터 직접 최대변형률을 계산해 낼 수 있는 기법을 개발, 수식으로써 확인하고, 측정을 위해 요구되는 센서의 수를 최소화할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 따라서 필요로 하는 데이터와 계산량, 측정 시간, 측정 장비, 소요 비용 등을 대폭 감소시키고, 따라서 보다 효율적인 장기적 구조물 안전성 모니터링을 가능하게 함을 연구의 목적으로 한다.

## 2.. LGFOS의 원리 및 구성

### 2.1 센서의 변형률 측정 원리

LGFOS는 빛의 간섭현상을 이용하여 센서에 발생한 총 변위를 측정하는 것으로, 기본적인 개념은 그림 1과 같다. 다이오드로부터 나온 빛은 커플러에서 두 갈래로 분할되는 데 그 중에서 1개는 구조물에 부착된 센서로, 나머지 1개는 기준광섬유로 입사된다. 끝단에서 거울을 만나 반사되어 돌아온 2개의 빛은 포토디텍터에서 다시 합쳐지게 되고, 서로 다른 길이의 경로를 돌아온 빛은 서로 간섭현상을 일으키게 된다. 이 패턴이 포토디텍터에 의해 감지되면 기준광섬유에 부착된 Mechanical Actuator가 움직이면서 이 두 빛이 이동한 경로

가 오차범위 10 $\mu$ m내로 같아지게 만들며, 이 때 측정된 값은 센서 전체에 발생한 총 변위가 된다.

## 2.2 시스템의 구성

시스템의 구성은 LGFOS(FT Sensor)와 광수신기(FTI-3000)로 이루어지며 상세설명은 아래와 같다.

### 2.2.1 FT Sensor

광섬유센서는 쉽게 구부러 사용할 수 있으므로 형태의 제약을 받지 않고 구조물의 표면에 부착하거나 콘크리트 속에 매립하여 사용할 수 있다. 또한 기존의 전기 저항식 센서에 비해 전자기의 영향을 거의 받지 않으며, 화학적으로 안정하고 내구성이 뛰어나 대상물의 장기계측에 가장 적합하다. 이 시스템을 구성하는 FT 센서는  $\pm 10\mu$ m의 해상도로 최대  $\pm 4,000\mu$ strain 또는  $\pm 20$ mm까지 측정이 가능하며, 5cm에서 100m이상까지 필요에 따른 길이로 제작이 가능하다.

### 2.2.2 FTI-3000 Sensor Scanner

광수신기는 총 8개의 채널을 갖추고 있으며, 각 채널당 하나씩의 센서 부착이 가능하다. 파장변화 감지방식으로 센서 전체에 발생한 변위를 계산하며, 이를 센서의 길이로 나누어주는 간단한 작업만으로 센서 전체에 발생한 평균변형률을 손쉽게 구할 수 있다. 광수신기 외부에 LCD창을 갖고 있어 데이터의 직접 획득이 가능하며, 자체적으로 시리얼포트를 내장하고 있어 컴퓨터를 이용한 원격제어 및 데이터 송수신 또한 가능하다.

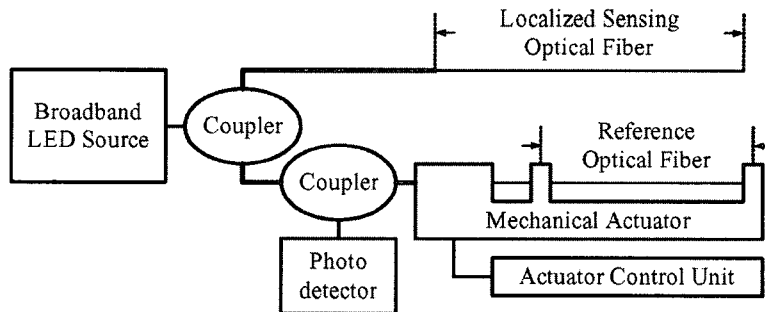


그림 1. Schematic of LGFOS

## 3. 평균변형률을 이용한 구조물의 해석

본 연구에서는 구조물의 안전성을 평가하기 위한 평균변형률의 활용방법을 개발하기 위하여, 3경간 연속철골보에서의 평균변형률과 최대변형률과의 관계를 수식으로 확인하였다.

### 3.1 부재에 발생한 최대변형률과 최대응력

부재의 x지점에서 휨 응력 관계식은 아래와 같다.

$$\sigma_x = \frac{M_x}{Z_x} = \epsilon_x E \tag{1}$$

where,  $\epsilon$  : 변형률 (Strain)  
 $E$  : 탄성계수 (Modulus of Elasticity)  
 $Z$  : 단면계수 (Elastic Section Modulus)  
 $M$  : 모멘트 (Moment)  
 $\sigma$  : 응력 (Stress)

위의 식 (1)을 통해 최대변형률을 구할 수 있다.

$$\epsilon_{\max} = \frac{M_{\max}}{EZ} \tag{2}$$

where,  $\epsilon_{\max}$  : 최대변형률

$x_1, x_2$  지점 사이의 평균변형률은

$$\epsilon_{\text{ave}} = \frac{\int_{x_1}^{x_2} \epsilon(x)}{l_{x_2-x_1}} \tag{3}$$

where,  $l$  : 보의 길이 (Length of a member)

$\epsilon_{\text{ave}}$  : 평균변형률

식 (1)과 (2), (3)의 관계를 통해 최대변형률과 평균변형률과의 관계를 수식으로 유도할 수 있다.

### 3.2 집중하중이 작용하는 3경간 연속보의 경우

임의의 지점에 각각의 집중하중이 작용하는 3경간 연속보는 그림 2와 같다.

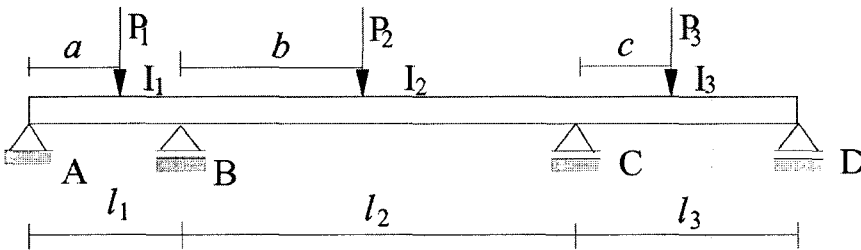


그림2 3경간 연속보에서 서로 다른 집중하중이 작용

이 때, 각 스패의 자유물체도를 나타내면 그림3, 그림4, 그림5로 나타낼 수 있다. 이 때 각 스패의 최대변형률과 평균변형률과의 관계를 구해보면 아래와 같다. 3경간 이상의 연속보의 경우에도 양끝 스패의 경우 한 쪽에만 모멘트가 작용하는 그림 3, 그림 5처럼 표현할 수 있고, 나머지 스패의 경우에는 그림 4와 같이 표현 가능하다. 그러므로 3경간 이상의 연속보에서도 이 기법이 적용 가능하다.

3.2.1 A-B구간에서의 최대변형률과 평균변형률과의 관계

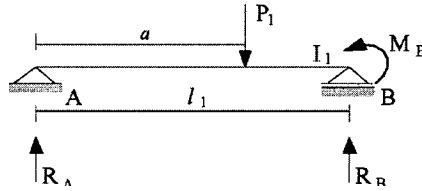


그림 3. A-B의 자유물체도

A-B구간에서의 평균변형률은 아래의 식(4)으로부터 구할 수 있다.

$$\epsilon_1(x) = \frac{1}{EZ_1} \left( P_1 - \frac{a}{l_1} P_1 + \frac{M_B}{l_1} \right) x \tag{4}$$

$$\epsilon_{ave(1)} = \frac{1}{a} \int_0^{l_1/4} \epsilon(x) dx = \frac{1}{8EZ_1} (P_1 l_1 - aP_1 + M_B) \tag{5}$$

where,  $\epsilon_{ave(1)}$  : 지점A에서 스패길이의 1/4지점까지의 평균변형률  
이 구간에서의 최대변형률과 평균변형률과의 관계는

$$\epsilon_{max(1)} = \frac{1}{8EZ_1} (P_1 l_1 - aP_1 + M_B) \frac{8a}{l_1} = \frac{8a}{l_1} \epsilon_{ave(1)} \tag{6}$$

where,  $\epsilon_{max(1)}$  : A-B구간에서의 최대변형률

3.2.2 B-C구간에서의 최대변형률과 평균변형률과의 관계

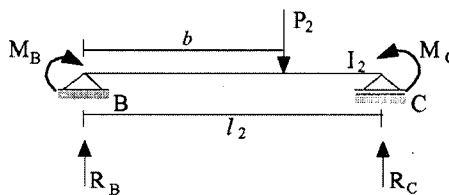


그림 4. B-C의 자유물체도

B-C구간에서의 평균변형률은 아래의 식(7)으로부터 구할 수 있다.

$$\epsilon_2(x) = \frac{1}{EZ_2} \left( M_C + \frac{P_2 b + M_B - M_C}{l_1} x \right) \tag{7}$$

$$\epsilon_{ave(2)} = \frac{1}{\frac{l_2}{4}} \int_{\frac{3l_2}{8}}^{\frac{5l_2}{8}} \epsilon(x) dx = \frac{1}{2EZ_1} (P_2 b + M_B - M_C) \tag{8}$$

where,  $\epsilon_{ave(2)}$  : 스패길이의 1/4지점까지의 평균변형률

이 구간에서의 최대변형률과 평균변형률과의 관계는

$$\epsilon_{\max(2)} = \epsilon_{ave(2)} - \frac{1}{EZ_2} \left\{ (8EZ_1\epsilon_{ave(1)} - (l_1 - a)P_1 + P_2b) \left( \frac{1}{2} + \frac{b}{l_2} \right) + \left( 1 - \frac{1}{l_2} \right) (8EZ_3\epsilon_{ave(3)} - cP_3) \right\} \quad (9)$$

3.2.2 C-D구간에서의 최대변형률과 평균변형률과의 관계

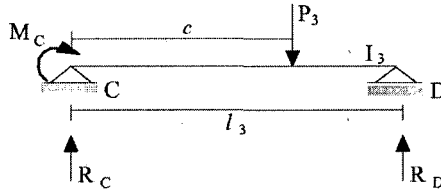


그림5. C-D 의 자유물체도

C-D구간에서의 평균변형률은 아래의 식(10)으로부터 구할 수 있다.

$$\epsilon_3(x) = \frac{1}{EZ_3} \left( \frac{c}{l_3} P_3 + \frac{M_C}{l_3} \right) x \quad (10)$$

$$\epsilon_{ave(3)} = \frac{1}{l_3} \int_0^{l_3} \epsilon(x) dx = \frac{1}{8EZ_3} (cP_3 + M_C) \quad (11)$$

where,  $\epsilon_{ave(3)}$  : 지점C에서 하중  $P_3$  작용점까지의 평균변형률

이 구간에서의 최대변형률과 평균변형률과의 관계는

$$\epsilon_{\max(3)} = \frac{1}{8EZ_3} (cP_3 + M_C) \frac{8(l_3 - c)}{l_3} = \frac{8(l_3 - c)}{l_3} \epsilon_{ave(3)} \quad (12)$$

where,  $\epsilon_{\max(3)}$  : B-C구간에서의 최대변형률

위의 식 (6), (9), (12)로부터 3경간연속보에서 하나의 집중하중이 작용할 때, 경간 길이에 관계없이 최대변형률은 평균변형률(각 스패의 1/4 길이)과의 관계식으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 즉 부재에 작용하는 집중하중의 지점을 알 수 있는 경우 작용하는 하중의 크기에 상관없이 LGFOS를 통해 획득된 평균변형률을 이용하여 부재의 최대변형률을 예측할 수 있다.

지점 B와 지점 C에서의 최대변형률은 아래와 같다.

$$\epsilon_{\max(B)} = \frac{M_B}{EZ_1} = 8\epsilon_{ave(1)} - \frac{(l_1 - a)P_1}{EZ_1} \quad (13)$$

$$\epsilon_{\max(C)} = \frac{M_C}{EZ_3} = 8\epsilon_{ave(3)} - \frac{c}{EZ_3} P_3 \quad (14)$$

where,  $\epsilon_{\max(B)}$  : 지점B에서의 최대변형률

$\epsilon_{\max(C)}$  : 지점C에서의 최대변형률

### 4. 실험

#### 4.1. 실험 장치 및 방법

집중하중이 작용하는 2경간 철골 연속보의 평균변형률을 측정하기 위하여 그림 5와 같이 H형강의 표면에 길이 5m의 LGFOS(FT-Sensor)를 각 경간의 끝단에 하나씩 표면부착 후 에폭시 코팅하였다. 최대변형률을 비교하기 위하여 전기식 스트레인 게이지를 그림 5와 같이 설치하였다. 가력은 그림 6에서 구간 A-B에서 100cm인 지점에 구간 B-C에서는 53cm인 지점에 항복용력의 40%~60%까지 단계별로 가력 하였다. 실험데이터는 실시간으로 저장되었으며, 전기식 스트레인 게이지는 10Hz로, LGFOS의 데이터는 각 가력단계별로 획득하며 실험을 진행하였다.

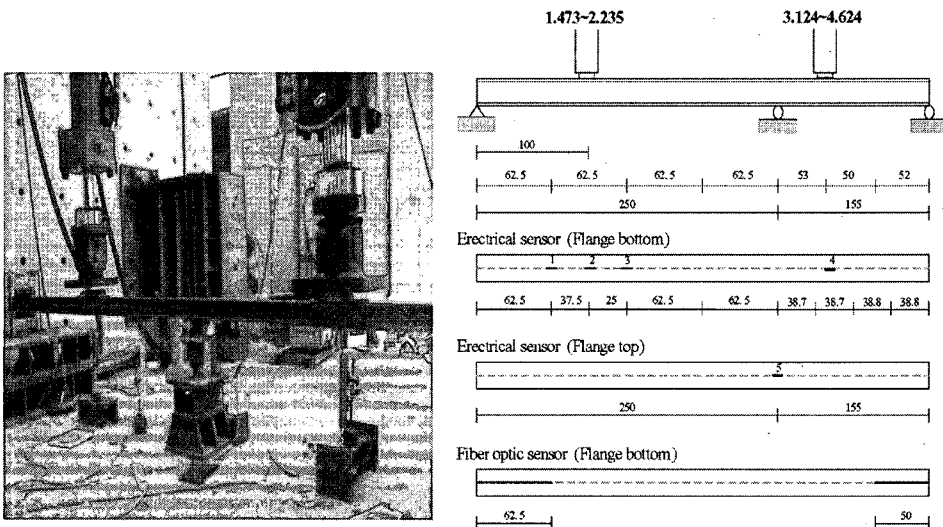


그림6. 실험체

### 5. 실험 결과 및 고찰

#### 5.1. 부재에 발생한 최대변형률 및 최대 용력

표 1은 LGFOS로부터 획득된 평균변형률로 계산된 최대변형률과 스트레인게이지로부터 획득된 최대변형률을 보여준다. 실험결과로부터 평균변형률을 이용하여 쉽게 최대변형률을 찾아낼 수 있다.

표 1 Maximum Strain

Load		Maximum strain						Error[%]		
		From strain gauge[ $\mu\epsilon$ ]			From Long gauge sensor[ $\mu\epsilon$ ]					
A-B	B-C	A-B	B-C	B	A-B	B-C	B	A-B	B-C	B
14.4kN	30.6kN	369	417	-467	367	404	-461	-0.6	-3.2	-1.3
21.9kN	45.3kN	550	615	-699	567	682	-746	3.1	10.9	6.7

## 6. 결론

구조물의 안전성을 감시하기 위한 센서로 LGFOS를 구성하고, 3경간 연속 철골보의 표면에 LGFOS를 부착하여 구조물의 거동을 파악하는 연구를 수행하였다. 이 연구를 통하여 LGFOS를 이용하여 Point Sensor로는 측정할 수 없는 넓은 영역의 평균변형률을 측정할 수 있을 뿐 아니라, 구조물에 발생한 최대변형률을 이용하여 구조물의 안전성을 감시할 수 있는 모델을 제시하였다. 즉 지점조건이 알려진 경우 측정된 평균변형률을 이용하여 최대변형률을 계산, 기준과 비교함으로써 구조물의 안전성을 실시간으로 감시, 경보 발생 및 즉각적인 보수, 보강을 위한 감시시스템을 구축하는데 LGFOS의 활용이 효과적임을 알 수 있다.

- 1) 3경간 연속 철골보에서 평균변형률과 최대변형률 사이의 관계를 수식으로 확인하였다.
- 2) LGFOS에 의해 측정된 평균변형률을 이용하여 최대변형률을 예측 할 수 있다.
- 3) 미지 하중에 대한 최대변형률을 예측하여 구조물의 모니터링이 가능함을 수식으로 확인하였다.
- 4) 3경간 이상의 연속보의 경우에도 평균변형률을 이용하여 최대변형률을 수식으로 나타낼 수 있다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부 특정 연구 개발사업 국가지정연구실(2005-01504) 사업의 연구비 지원으로 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- J.T.DeWolf, M.P.Culmo, R.G.Lauzon,(1998) 'Connecticut's Bridge Infrastructure Monitoring Program for Assessment', Journal of Infrastructure Systems, Vol.4, pp.86-90.
- B.Culshaw, C.Michie, P.Gardiner, and A.McGown,(1996) 'Smart Structures and Applications in Civil Engineering', Proceeding of the IEEE, Vol.84, No.1, pp.78-86.
- Leung C.K.Y.(2001) Fiber optic sensors in concrete: the future? NDT&E International 34:85-94.
- Lou K.A., Yaniv G., Hardtmann D., Ma G. & Zimmermann B.(1995) Fiber optic strain monitoring of bridge column retrofitted with composite jacket under flexural loads. In: Smart structures and materials conference, SPIE 2446: 16-24
- Park H.S., Jung H.S., Kwon Y.H., & Seo J.H.(2005) Mathematical models for assessment of the safety of steel beams based on average strains from long gage optic sensors. Sensors and Actuators, accepted for publication