

# 변형률 센서 기반 구조부재의 안전성 평가에 관한 기초 연구

## A Study on the Safety Evaluation of Structural Members based on Strain Sensors

이 홍 민\* · 오 병 관 · 박 효 선\*\*

Lee, Hong Min · Oh Byung Kwan · Park, Hyo Seon

### 요 약

일반적으로 구조부재의 안전성 평가는 계측된 센서의 변형률로부터 부재의 최대응력 또는 부재력 수준을 결정하고 설계기준에 의한 부재의 허용응력 또는 설계 강도와 비교에 의해서 이루어진다. 그러나 이러한 설계기준은 건물의 설계단계에서 미리 가정된 하중 및 부재의 강도에 대한 여러 확률분포 또는 안전율을 반영하여 작성된 것으로 실질적으로 센서로부터 측정된 데이터를 직접 설계기준에 반영하는 것은 합리적이지 못하다. 본 연구에서는 실제 센서로부터 측정되는 변형률을 이용하여 합리적으로 구조부재의 안전성 평가를 수행하기 위한 방법을 모색하고자 한다. 설계기준을 고려한 변형률 제한치, 저감계수가 도입되었으며 이에 추가적으로 센서와 관련한 계수를 도입하여 구조부재의 안전성 평가를 위한 방향을 제시한다.

**keywords** : 구조 건전도 모니터링, 변형률 센서, 안전성 평가

### 1. 서 론

구조물의 안전성 평가를 위해서 주로 변형률 기반의 구조반응 모니터링이 수행된다. 변형률로부터 부재의 최대응력 또는 부재력 수준을 결정하고 설계기준에 의한 부재의 허용응력 또는 설계 강도와 비교에 의해서 구조물의 안전성을 평가한다. 그러나 현재 일반적으로 적용하고 있는 한계상태설계법 또는 허용응력설계법과 같은 설계기준은 건물이 시공 또는 완공되기 이전의 상황에 대해서 미리 하중 및 부재의 강도에 대한 여러 확률분포 또는 안전율을 반영하여 작성된 것으로 실질적으로 센서로부터 측정된 데이터를 직접 설계기준에 반영하는 것은 합리적이지 못하다. 또한 한계상태설계법의 경우 설계기준에 의한 부재의 성능은 작용하중 및 공칭강도로 표현되기 때문에 부재의 안전성 평가를 위해서는 센서로부터 측정되는 구조부재의 변형도를 하중으로 치환해야 하는 번거로움이 있다. 구조물의 상시 모니터링을 위해서는 이러한 문제가 반드시 해결되어야 한다.

본 연구에서는 실제 센서로부터 측정되는 변형률을 이용하여 합리적으로 구조부재의 안전성 평가를 수행하기 위한 방법을 모색하고자 한다. 센서로부터 계측된 변형률로부터 구조부재의 안전성 평가에 있어서 설계기준의 여러 가정 사항을 확인하고 이로부터 변형률 제한치 및 저감계수를 도입하였다. 추가적으로 센서의

\* 정희원 · 연세대학교 건축공학과 박사후과정 idislee@yonsei.ac.kr

\* 정희원 · 연세대학교 건축공학과 석사과정 obk01@hanmail.net

\*\* 정희원 · 연세대학교 건축공학과 교수 hspark@yonsei.ac.kr

정밀도를 포함한 센서 설치에 대한 오차를 고려한 계수를 도입하여 안전성 평가를 위한 방향을 제시하였다.

## 2. 구조부재의 안전성 평가를 위한 변수 도입

센서로부터 계측된 변형도로부터 구조부재의 안전성 평가를 위해서 사전에 부재의 재료, 단면, 길이가 정해져야 하고 이에 추가적으로 부재 제작에 따른 재료 및 단면의 오차, 센서의 정밀도를 포함한 센서 설치에 대한 오차 등이 고려되어야 한다. 본 장에서는 이에 대해서 부재 사양에 따른 변형률 제한치, 부재의 재료 및 단면의 저항 성능을 고려한 저감계수, 그리고 센서 설치에 대한 오차를 고려한 안전계수를 도입한다.

### 2.1 변형률 제한치 ( $\epsilon_l$ )

변형률 제한치( $\epsilon_l$ )는 센서로부터 계측한 변형률과 직접 비교 대상이 되는 변형률로서 구조부재 종류 및 부재의 재료 성질, 단면의 형태, 그리고 부재 길이 등이 고려되어 결정된다. 인장재, 압축재, 그리고 휨재를 대상으로 설계기준(대한건축학회, 2006)에 의한 각 공칭강도로부터 변형률 제한치를 결정하면 표 1과 같다. 인장재는 부재의 재료에 의해 결정되는 항복 변형률( $\epsilon_y$ )을 그대로 사용할 수 있다. 압축재의 경우 세장변수, 잔류응력, 초기편심에 의한 영향으로 강도가 결정되는데 이중 초기편심에 대한 영향은 센서로부터 계측되는 값으로 무시할 수 있으며 세장변수와 잔류응력만을 고려하여 표 1과 같이 변형률 제한치를 결정할 수 있다. 휨재의 경우 세장비( $\lambda$ )에 따른 휨 항복과 횡좌굴을 고려하여 표 1과 같이 변형률 제한치를 결정할 수 있다. 표 1에서  $\lambda_c$ 는 세장변수,  $\lambda_b$ 는 휨재의 세장비,  $L_b$ 는 휨재의 횡방향 비지지거리,  $\lambda_p$ 는 비지지 소성한계 세장비,  $\lambda_r$ 은 비지지 탄성한계 세장비,  $\epsilon_c$ 는 탄성 횡좌굴 변형률 제한치, 그리고  $\epsilon_{ic}$ 는 비탄성 횡좌굴 변형률 제한치를 나타낸다.

### 2.2 저감계수 ( $\phi$ )

현재 일반적으로 구조설계에 사용되고 있는 설계법은 식 (1)과 같은 하중저항계수를 이용한 한계상태 설계법이다. 한계상태설계는 구조부재의 한계상태와 신뢰성에 대한 확률론적 결정을 고려하여 하중계수와 저항계수를 적용하여 설계하는 방법으로 하중과 강도의 불확실성의 요인들이 고려되어 결정된다.

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \quad (1)$$

여기서,  $R_n$ 은 공칭강도,  $Q_i$ 는 하중효과를 나타내며, 하중계수,  $\gamma$ , 와 저항계수,  $\phi$ , 는 각각 식 (2)와 (3)으로 정의된다(Ravindra and Galambos, 1978).

$$\gamma = \frac{Q_m}{Q_n} \exp(0.55\beta V_Q) \quad (2)$$

$$\phi = \frac{R_m}{R_n} \exp(-0.55\beta V_R) \quad (3)$$

표 1 부재종류에 따른 변형률 제한치

부재종류	변형률 제한치 ( $\epsilon_l$ )
인장재	$\epsilon_l = \epsilon_y$
압축재	$\epsilon_l = (0.697\lambda_c^2)\epsilon_y, (\lambda_c \leq 1.5), \quad \epsilon_l = \left(\frac{1}{\lambda_c^2}\right)\epsilon_y, (\lambda_c > 1.5)$
휨재	$\epsilon_l = \epsilon_y, (A_b \leq A_p)$ $\epsilon_l = \frac{M_{ie}}{M_y}\epsilon_y, \quad M_{ie} = C_b \left[ M_p - (M_p - M_r) \left( \frac{A_b - A_p}{A_r - A_p} \right) \right] \leq M_y, (A_p \leq A_b \leq A_r)$ $\epsilon_l = \frac{M_{cr}}{M_y}\epsilon_y, \quad M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ + \left( \frac{\pi E}{L_b} \right) I_y C_\omega} \leq M_y, (A_b \geq A_r)$

여기서,  $Q_m$ 은 평균하중,  $R_m$ 은 평균저항,  $\beta$ 는 신뢰성지수, 그리고  $V_Q$  및  $V_R$ 은 각각 하중 및 저항에 대한 변동계수를 나타낸다. 평균하중  $Q_m$ 과 이에 대한 변동계수  $V_Q$ 는 하중의 불확실성을 반영하는 계수로 센서로부터 직접 구조부재의 변형률 측정으로 무시할 수 있는 값이다. 평균저항  $R_m$ 과 이에 대한 변동계수  $V_R$ 은 재료의 강도의 편차, 제작의 오차, 저항 계산에 있어서의 불명확성 등을 반영하는 계수로 고려되어야 한다. 또한 신뢰성 지수,  $\beta$  결정에 있어서도 평균저항  $R_m$ 과 이에 대한 변동계수  $V_R$ 가 고려되기 때문에 고려되어야 한다. 센서로부터 직접 구조부재의 변형을 측정하면 식 (2)에서의 하중계수는 무시될 수 있으며 식 (2), (3)에서의 신뢰도 지수는 감소하여 현 기준과 비교하여 하중계수는 1에 가깝게 작아지고, 저항계수는 1에 가깝게 증가한다. 설계기준 기반으로 센서로부터 직접 측정되는 변형률 기반으로 구조부재의 안전성 평가를 수행하기 위해서는 저항계수는 저항계수로부터 직접 센서로부터 측정되는 변형률 값 및 방법의 영향을 고려하여 사용되어야 할 것으로 판단된다. 현재 연구 수준에서는 하중의 불확실성에 대한 영향은 없는 것으로 가정하여 하중계수는 1, 저항계수는 안전을 고려해 설계기준(대한건축학회, 2006)에 의한 저항계수를 그대로 존중하여 사용할 수 있다.

### 2.3 안전계수 ( $F_s$ )

센서 설치에 대한 오차를 반영하는 안전계수( $F_s$ )는 사용되는 센서의 정밀도, 내구성, 센서 설치 위치의 정확성, 그리고 부착되는 대상 부재 및 주변 환경 등이 고려되어 결정되어야 한다. 이에 대해서도 각각에 대해서 앞으로 포괄적이고 다양한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 구조부재의 안전성 평가에 있어서 계수만 정의 하는 것으로 연구범위를 한정한다.

### 3. 구조부재의 안전성 평가 식 제안

구조부재의 안전성 평가 식은 변형률 제한치( $\epsilon_l$ ), 저감계수( $\phi$ ), 안전계수( $F_s$ ), 그리고 센서로부터 측정된 변형도( $\epsilon_r$ )로부터 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\phi \epsilon_l}{F_s} - \epsilon_r \geq 0 \quad (4)$$

식 (4)로부터 부재의 재료 및 단면, 길이, 그리고 부재의 종류가 정의 되면 변형률 제한치( $\epsilon_l$ )가 결정되고, 이에 부재 종류에 따른 저감계수( $\phi$ ) 및 센서와 관련한 안전계수( $F_s$ )를 결정하여 부재의 안전성 평가를 수행할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 실제 센서로부터 측정되는 변형률을 이용하여 합리적으로 구조부재의 안전성 평가를 수행하기 위한 방법을 모색하였다. 센서로부터 측정된 변형률로부터 구조부재의 안전성 평가에 있어서 설계기준의 여러 가정 사항을 확인하고 이로부터 변형률 제한치 및 저감계수를 도입하였다. 또한 센서의 정밀도를 포함한 센서 설치에 대한 오차를 고려한 안전계수를 도입하여 안전성 평가를 위한 방향을 제시하였다.

센서로부터 직접 측정되는 변형률 기반으로 구조부재의 안전성 평가를 수행하기 위해서는 직접 센서로부터 측정되는 변형률 값 및 방법의 영향을 고려하여 저항계수를 보정해야 하며 또한 센서의 정밀도, 내구성, 센서 설치 위치의 정확성, 그리고 부착되는 대상 부재 및 주변 환경 등의 센서와 관련한 안전계수를 추가적인 연구를 통해 수립해야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업(과제 코드:07도시재생B03)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

대한건축학회 (2006) 건축구조설계기준 및 해설, 기문당

M. K. Ravindra and T. V. Galambos (1978) Load and Resistance Factor Design for Steel, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 104, No. ST9, Proc. Paper 14008, pp. 1337-1353