

LGFOS를 이용한 보-기둥 부재의 부재력 계측 기법 개발

Stress Measuring Method for Beam-Column Members with Long Gauge Fiber Optic Sensors

박 효 선* / 백 재 민** / 이 흥 민***
Park, Hyo Seon / Baek, Jae Min / Lee, Hong Min

Abstract

In structural health monitoring, the safety of structural members are assessed by the level of stress measured by various strain sensors based on different sensing mechanisms. Since most existing strain sensors used for health monitoring system can cover a relatively small range of structural members, it is very difficult to measure the maximum value of the member subjected to varying amount and types of loads with those point sensors. The reliability of assessed safety of a member may be improved by increasing the number of sensors. It may not be also realistic to increase the number of sensors to overcome these drawbacks. In this paper, a stress measuring method for beam-column members is developed by estimating the maximum stress based on the average strains obtained from long gauge sensor. The average strain from long gage fiber optic sensor is transformed into the maximum strain by multiplication of the modification factor derived in this research.

key words : Health monitoring, safety evaluation, average strain, long gauge fiber optic sensor

요 지

기존 대부분의 구조물 건전도 모니터링 시스템에서는 제한적인 위치와 범위에서의 변형을 계측이 가능한 국부 변형률 센서를 이용하여 구조물 또는 구조 부재의 부재력을 계측하고 이에 기반하여 구조 안전성을 평가하고 있다. 그러나 실 구조물의 부재력 계측을 통한 안전성 평가는 하중의 크기 및 분포에 대한 불확실성 등의 다양한 이유로 부재 내 최대응력 작용점을 정확하게 파악하기 어렵다. 이러한 경우 구조물의 사이즈에 비하여 센서의 길이가 미소한 국부 변형률 센서를 이용한 안전성 평가의 적절성은 센서의 위치 및 개수에 좌우되는 한계를 가지게 된다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 센서의 수를 증가시키면 처리해야하는 데이터의 양과 비용이 증가하게 되므로 현실적인 적용성에 문제점을 가지게 된다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 한계와 문제점을 극복할 수 있는 대안으로 장대광변형률센서에 의한 평균변형률을 이용한 보-기둥의 부재력 계측 기법을 제시하였다.

핵심용어 : Health monitoring, 안전성 평가, 평균변형률, 장대광변형률센서

* 정회원 · 연세대학교 건축도시공학부 부교수 (e-mail : hspark@yonsei.ac.kr)

** 포스코건설 건축설계팀 사원

*** 연세대학교 대학원 건축공학과 박사과정

1. 서론

최근 센서 기술의 발전과 리모델링의 활성화는 구조물의 객관적 건전성 평가에 대한 관심을 불러 일으켰고 이로 인해 객관적 계측 기법의 필요성이 날로 증대되고 있다. 이러한 추세에 따라 건축 및 토목 분야에서는 구조물의 사용성 및 안전성을 객관적으로 모니터링 할 수 있는 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 주로 교량, 댐 등의 토목 구조물을 대상으로 다양한 센서를 이용한 장기계측이 이미 실용화 단계에 있다.

구조 모니터링 및 계측 기술은 시공 중인 구조물뿐만 아니라 완공되어 사용 중인 구조물의 변위 및 응력 등의 구조반응 계측을 통한 구조 안전성 및 사용성 평가에 적용되고 있다. 특히 구조 부재의 안전성 평가는 계측된 최대 응력 또는 부재력 수준과 설계 기준에 의한 부재의 허용응력 또는 설계 강도의 비교에 의하여 이루어 질 수 있다. 이러한 계측된 응력 또는 부재력에 기반한 구조 안전성 평가기법의 신뢰성과 객관성은 기본적으로 변형률 계측을 위한 센서의 성능과 한계에 따라 영향을 받게 된다.

변형률 계측 센서의 성능과 한계는 계측된 데이터의 신뢰성, 센서 위치 및 구조 부재의 크기를 고려한 센서부 길이 (Gage length)의 적합성, 센서의 내구성 등으로 평가 될 수 있다. 현재 사용되고 있는 대부분의 전기저항식 또는 진동현식 변형률 센서들은 전자기파에 의한 영향, 구조물의 내구성 보다 현저하게 낮은 센서의 내구성, 센서부의 길이의 한계 등 센서 자체의 성능에 여러 가지 문제점들을 가지고 있다.

이러한 이유로 구조물의 건전성 또는 안전성 모니터링에 대한 신뢰성과 실용성을 향상시킬 수 있는 새로운 센서의 개발과 분석 기법의 개발에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그 중 기존 전자기형 센서들의 문제점들을 해결하기 위한 대안으로 전자기파의 영향을 거의 받지 않으면서 구조물의 여러 장소에 분포되어 원하는 물리량을 동시에 감지해낼 수 있는 특성을 가지고 있는 광변형 센서가 개발되어 구조물의 모니터링에 적용되고 있다. 이러한 광변형 센서는 정확하게 안정하며 뛰어난 내구성을 가지고 있어 장기 구조물의 모니터링에 적합한 센서로 평가 받고 있다.

광섬유센서는 측정 방식에 따라서 마이켈슨 (Michelson), 페브리-페롯 (Fabry-Pérot) 등의 간섭형센서 (Interferometric sensor)와 광섬유 브래그 격자센서 (Fiber bragg grating, FBG), 광학적 시간

영역반사시스템 (Optical time domain reflectometry, OTDR), 부릴리언 광학 시간영역반사 시스템 (Brillouin optical time domain deflectometry, EOTDR) 등으로 구분된다 (Wu and Xu, 2002). 현재 FBG 또는 간섭형센서를 이용한 구조물의 안전성 모니터링에 관한 연구가 다양하게 진행되고 있다 (Leung, 2001; Casas and Cruz, 2003).

그러나 FBG 센서 역시 기존의 전기저항식센서와 같이 센서부의 길이에 제약이 있는 국부센서 (Local sensor)의 한계를 가지고 있다. 구조 부재의 특정한 위치에서 제한된 범위 내에서만 변형률 계측이 가능한 국부센서로는 작용하중의 크기와 위치의 변화, 설계 도면과 실 시공된 구조물 간의 불가피한 시공 오차 등의 예상치 못한 이유 등으로 구조물 또는 부재의 최대 응력 발생 지점이 정확치 않거나 변화하는 경우 합리적으로 안전성을 평가하기 어렵다. 이러한 이유로 구조물 전체의 거동 또는 부재의 합리적 안전성 평가를 위하여 센서의 수를 증가시키면 데이터 량의 증가에 따른 계측된 데이터의 저장 및 분석의 어려움 그리고 계측기의 유지관리의 어려움 등의 문제가 발생하게 된다 (Leung, 2001).

국부 센서에 대한 대안으로 센서부의 길이가 기존 센서와는 달리 수십 미터 이상에 이르는 장대광변형센서 (Long gauge fiber optic sensor, LGFOS)가 개발되어 구조물의 안전성 모니터링에 이용되고 있다 (Inaudi et al, 1999; Inaudi and Glisic, 2002). 이러한 LGFOS에 의한 구조 안전성 모니터링은 실 구조 부재의 길이에 해당하는 센서부를 갖는 하나의 센서로 부재 내 최대 변형률 발생지점의 변화, 변형률 분포의 변화 등을 고려할 수 있다. 그러므로 장대광변형센서를 이용한 안전성 모니터링은 국부 센서에 의한 안전성 모니터링의 단점을 극복할 수 있으며 또한 기존 광변형센서의 장점을 가지게 된다.

그러나 장대광변형센서에 의하여 계측된 변형률은 센서부 내에서 발생한 변형률의 평균값이므로 안전성 모니터링에서 요구되는 부재 내 최대 변형률의 값은 직접 계측할 수 없는 단점을 또한 가지게 된다. 그러므로 장대광변형센서에서 계측된 평균변형률을 이용하여 부재 내에 발생하는 최대 변형률의 값을 계산할 수 있는 기법이 개발되면 계측된 데이터의 신뢰성, 구조 부재의 크기를 고려한 센서부 길이 (Gage length)의 적합성, 센서의 내구성 등이 확보된 구조물의 안전성 평가가 가능하게 된다. 이러한 측면에서 순수 힘을 받는 보 부재의 안전성 평가 모델이 장대광변형센서에 의하여 계측된 평균변형률을 이용하여 최대 변형률의

값을 평가 할 수 있는 평균변형률과 최대변형률의 수학적 모델 형식으로 개발되었다(Park et al., 2006).

그러나 보-기둥 부재는 순수 휨을 받는 보 부재와는 달리 축력과 휨을 동시에 받기 때문에 부재 내 변형률 또는 부재력은 축력과 부재의 양단에 작용한 모멘트의 영향을 받게 된다(Chen and Lui, 1987). 그러므로 장대광변형 센서의 장점을 활용한 보-기둥 부재의 안전성 평가를 위해서는 LGFOS에 의하여 계측된 보-기둥 부재의 평균변형률을 이용하여 최대변형률을 평가할 수 있는 계측기법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 보-기둥에 작용하는 축력과 양단 모멘트의 3가지 하중 조건을 고려한 최대 변형률 또는 부재력 계측 기법을 평균변형률과 최대변형률의 관계를 이용하여 개발하고자 한다. 본 논문의 계측기법에서는 보-기둥 부재의 최대변형률을 계측된 평균변형률에 수정계수를 곱하여 예측하는 형식으로 개발하고자 하며 각각의 하중 조건에 해당하는 수정계수는 평균변형률과 최대변형률의 관계에서 유도한다. 이러한 계측기법에 의한 최대 부재력 및 응력은 부재의 허용응력 또는 설계강도와 비교함으로써 구조물의 안전성을 평가하게 된다. 그리고 제시된 기법의 정확성과 실효성을 H형강 보-기둥 부재를 이용하여 검증하였다. 그리고 개발된 장대광변형센서를 이용한 보-기둥 부재의 안전성 평가를 위한 부재력 계측 기법은 철골 보-기둥 부재의 구조실험을 통하여 검증하고자 한다.

2. LGFOS의 원리 및 구성

LGFOS는 빛의 간섭현상을 이용하여 센서에 발생한 총 변위를 측정하는 것으로 기본적인 개념도는 그림 1과 같다. 다이오드로부터 나온 빛은 커플러에서 두 방향으로 분할되며 그 중에서 1개는 구조물에 부착된 센서로, 나머지 1개는 기준 광섬유로 입사된다. 끝단에 부착된 거울에 반사되어 돌아온 2개의 빛은 포토디텍터에서 다시 합쳐지게 되고 서로 다른 길이의 경로를 돌아온 빛은 서로 간섭현상을 일으키게 된다. 이 패턴이 포토디텍터에 의해 감지되면 기준 광섬유에 부착된 기계 장치가 움직이면서 이 두 빛이 이동한 경로가 오차범위 $10 \mu m$ 내로 같아지게 만들며 이 때 측정된 값은 센서 전체에 발생한 총 변위가 된다(Tennyson, 2001; Inaudi and Glisic, 2002; Park et al., 2006).

시스템의 구성은 센서에 해당하는 광섬유센서와 광수신기로 이루어지며 광섬유센서는 쉽게 구부러 사용할 수 있으므로 형태의 제약을 받지 않고 구조물의 표

면에 부착하거나 콘크리트 속에 매립하여 사용할 수 있다. 그리고 기존의 전기저항식 센서에 비해 전자기의 영향을 거의 받지 않으며, 화학적으로 안정하고 내구성이 뛰어나 대상물의 장기계측에 가장 적합하다. 이 시스템을 구성하는 FT 센서는 $\pm 10 \mu m$ 해상도로 최대 $\pm 4000 \mu \epsilon$ 또는 $\pm 25 mm$ 까지 측정이 가능하며, $5 cm$ 에서 $100 m$ 이상까지 필요에 따른 길이로 제작이 가능하다(FOX-TEC, 2003). 광수신기는 복수의 채널을 갖추고 있으며, 각 채널당 하나씩의 센서 부착이 가능하다. 과장변화 감지방식으로 센서 전체에 발생한 변위를 계산하며, 이를 센서의 길이로 나누어 주는 간단한 작업만으로 센서 전체에 발생한 평균변형률을 구할 수 있다.

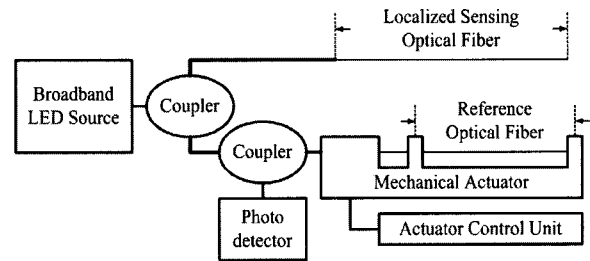


그림 1. LGFOS의 개념도

3. 최대 변형률 예측을 위한 수정 계수 α

본 연구에서는 양단 모멘트와 축방향력이 작용하는 일반적인 보-기둥 부재의 최대응력 및 부재력을 계측하기 위한 방법을 LGFOS에 의한 평균 변형률을 이용하여 개발하고자 한다. 보-기둥 부재의 최대변형률은 계측된 평균변형률에 수정계수를 곱하여 예측하는 형식으로 개발하고자 하며 각각의 하중 조건에 해당하는 수정계수는 평균변형률과 최대변형률의 관계에서 유도한다.

그림 2에서와 같이 균일 축하중과 양단부에서 크기가 다른 휨모멘트가 작용하는 보-기둥 부재의 임의의 두 점 a와 b 사이의 길이 L에 걸쳐 부착된 LGFOS를 이용하여 계측하는 평균변형률, ϵ_{ave} , 는 두 지점 사이의 변형률, ϵ_x ,를 적분하고 그 값을 두 지점 사이의 길이로 나누어 식 (1)과 같이 얻을 수 있다.

$$\epsilon_{ave} = \frac{\int_a^b \epsilon(x) dx}{L} \quad (1)$$

이러한 평균변형률을 이용한 최대 변형률, $\epsilon_{max.}$ 예측 기법은 식 (2)와 같이 일반화하여 표현할 수 있으며 계측 대상 부재의 지점 조건 및 하중 조건 등을 고려한 평균변형률과 최대변형률의 관계에서 수정계수 α 는 유도된다.

$$\epsilon_{max} = \alpha \cdot \epsilon_{ave} \quad (2)$$

여기서,

$$\alpha = f(M_1, M_2, P) : \text{수정계수}$$

M_1 : 양단 모멘트 중 크기가 작은 모멘트

M_2 : 양단 모멘트 중 크기가 큰 모멘트

P : 축방향력

식 (2)의 수정계수는 양단 모멘트 및 축방향력의 함수이므로 보-기둥부재에 작용하는 최대 3가지 하중을 미지수로 하여 유도할 수 있다. 각 경우 미지수의 개수에 해당하는 LGFOS가 필요하게 되며 미지수가 각각 1, 2, 3개 인 경우 수정계수는 다음과 같이 유도 된다.

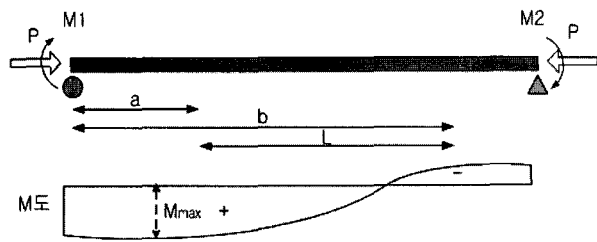


그림 2. 일반적인 보-기둥의 하중 조건

3.1 축하중 또는 양단 모멘트 중 미지수가 1 개인 경우

축하중, 양단 모멘트 중 임의 2개의 작용하중 크기를 알고 있는 경우에는 최대 변형률과 평균 변형률의 관계 결정을 위해서는 미지수에 해당하는 1개의 광센서가 필요하다. 그림 3과 같이 보-기둥에 양단 모멘트와 축하중이 작용하는 경우 부재 길이에 해당하는 계측부 길이를 가지는 광센서로 측정되는 평균변형률과 최대 변형률은 보-기둥 이론 (Chen and Lui, 1987)에 의하여 다음과 같은 식 (3), (4)로 나타낼 수 있다.

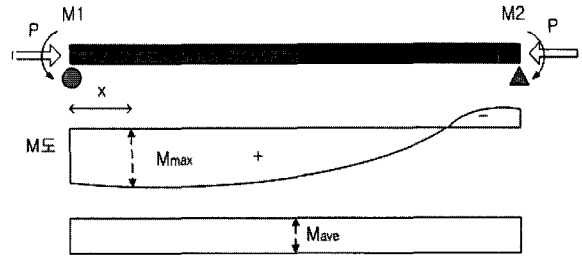


그림 3. 미지수가 1개인 보-기둥

$$\epsilon_{ave} = \frac{\int_a^b \epsilon(x) dx}{L} = \frac{(M_1 + M_2)(1 - \cos kL)}{EZkL \sin kL} \quad (3)$$

$$\epsilon_{max} = \frac{|M_2|}{EZ} \times \left[\sqrt{\frac{(M_1/M_2)^2 - 2(M_1/M_2)\cos kL + 1}{\sin^2 kL}} \right] \quad (4)$$

여기서,

$$k^2 = \frac{P}{EI}$$

E : 탄성계수 (Modulus of Elasticity)

Z : 단면계수 (Modulus of Section)

L : 보의 길이

식 (3)과 (4)를 식 (2)의 관계로 정리하여 표현하면 미지수가 1개인 축방향력과 양단 모멘트가 작용하는 보-기둥 부재의 최대 변형률은 식 (5)와 같이 유도된 수정계수를 이용하여 예측할 수 있다.

$$\epsilon_{max} = \alpha \epsilon_{ave} = \frac{kL \sqrt{(M_r - \cos kL)^2 + \sin^2 kL}}{(M_r + 1)(1 - \cos kL)} \times \epsilon_{ave} \quad (5)$$

여기서 $M_r = M_1/M_2$ 이다. 그리고 미지수가 1개인 경우이므로 식 (3)과 같이 측정된 평균 변형률 값을 이용해서 미지 하중을 계산해 낼 수 있게 된다. 그리고 모멘트 M_1 이 작용하는 보의 왼쪽 끝단에서 최대 모멘트가 발생하는 지점까지의 거리 \bar{x} 는 다음과 같이 식 (6)으로 계산할 수 있다.

$$\tan k\bar{x} = \frac{-(M_1 \cos kL + M_2)}{M_1 \sin kL} \quad (0 < \bar{x} < L) \quad (6)$$

3.2 $M_1 = M_2$ 이면서 작용 축하중이 미지수 일 때 (미지 하중이 2개인 경우)

양단에 작용하는 모멘트의 크기가 동일하고 축하중과 양단 모멘트의 크기를 알 수 없는 경우 즉 수학적으로 미지수가 2개인 경우 미지수에 해당하는 광센서 2개가 필요하고 광센서를 통해서 얻어진 평균 변형률을 통해서 하중과 양단 모멘트 값을 구할 수 있게 된다. 이 때 광센서는 식의 단순화와 센서 적용의 용이성을 고려하여 부재 길이 전체와 부재 길이 절반에 그림 4와 같이 부착할 수 있다. 평균 변형률의 값은 센서의 길이에 따라 임의로 유도될 수 있으며 그림 5와 같이 부재 길이 전체와 절반에 센서가 부착된 경우의 평균 변형률은 각각의 식 (7), (8)이 유도 된다.

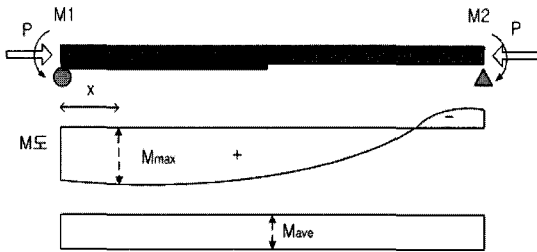


그림 4. 미지수가 2개인 보-기둥

$$\epsilon_{ave}^{total} = \frac{\int_0^L \epsilon(x) dx}{L} = \frac{(M_1 + M_2)(1 - \cos kL)}{EZkL \sin kL} \quad (7)$$

$$\epsilon_{ave}^{half} = \frac{\int_0^{L/2} \epsilon(x) dx}{L/2} = \left(\frac{M_2 - M_1 \cos kL}{EZk \sin kL} \right) \left(1 - \cos \frac{kL}{2} \right) + \frac{M_1}{EZk} \sin \frac{kL}{2} \quad (8)$$

축방향력과 동일 양단 모멘트가 작용하는 보-기둥 부재의 최대 변형률은 식 (7)과 (8)의 관계를 이용하여 유도된 식 (9)의 수정 계수를 이용하여 예측할 수 있다.

$$\alpha = \frac{kL \sqrt{2(1 - \cos kL)}}{2(1 - \cos kL)} \quad (9)$$

이 경우 $M_r = M_1/M_2 = 1$ 이 된다.

3.3 모든 작용하중이 미지수이면서 크기가 다른 경우

일반적인 경우로 작용하는 3개 하중이 모두 미지수이고 양단 모멘트의 크기가 임의로 다른 경우 최대 변형률과 평균 변형률의 관계 결정을 위해서는 미지수에 해당하는 3개의 식이 필요하다. 그러므로 미지수 결정을 위해 필요한 광센서의 수도 3개가 된다. 그림 5와 같이 광센서를 부재 전체와 부재의 한 쪽 절반 그리고 나머지 한 쪽 절반에 부착하는 것으로 고려한 경우 식 (7), (8)과 같은 평균 변형률과 그림 5의 부재 오른쪽 다른 절반에 대한 평균 변형률은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

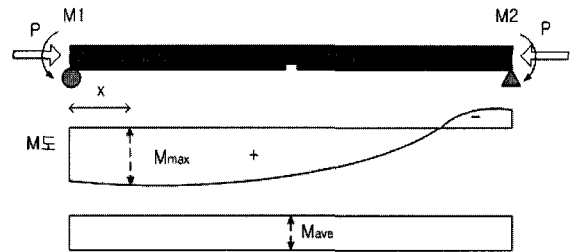


그림 5. 미지수가 3개인 보-기둥

표 1. 가정된 모멘트 값

Case	M_1 (tf · m)	M_2 (tf · m)	M_r
1	10	10	1
2	10	20	0.5
3	11	-12	0.9
4	10	-20	-0.5

표 2. 평균 변형률과 최대 변형률

Case	ϵ_{ave}	ϵ_{max}
1	0.000431	0.000434
2	0.000646	0.001251
3	0.000022	0.002457
4	0.000215	0.003213

표 3. α 값과 평균 변형률과의 곱

Case	α	$\alpha \cdot \epsilon_{ave}$	ϵ_{max}
1	1.01	0.000434	0.000434
2	1.94	0.001251	0.001251
3	114	0.002457	0.002457
4	14.9	0.003213	0.003213

$$\begin{aligned} \epsilon_{ave}^{half} &= \frac{\int_{\frac{L}{2}}^L \epsilon(x) dx}{L} \\ &= \left(\frac{M_2 - M_1 \cos kL}{EZk \sin kL} \right) \left(\cos \frac{kL}{2} - \cos kL \right) \\ &\quad + \frac{M_1}{EZk} \left(\sin kL - \sin \frac{kL}{2} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

이 경우 미지수의 개수만 달라지고 최대변형률 예측을 위한 수정 계수는 식 (5)와 같이 유도 된다.

4. 예제 적용을 통한 수학적 검증

본 연구에서 제안된 평균 변형률을 이용하여 최대 변형률을 예측하는 이론을 객관적으로 4가지 경우를 가정하여 수학적으로 확인해 보았다. 보-기둥에 작용하는 양단 모멘트는 단곡률과 복곡률의 두 가지 경우로 구별하였고 양단의 모멘트 비는 표 1에 나타난 것과 같이 약 1 : 1과 1 : 2의 경우로 나누었다. 작용 축하중은 보-기둥 부재의 순수 압축에 의한 좌굴하중의 10 %를 작용시켰으며 계산에 사용된 부재(SS400, H-400×400×13×21, 유효 좌굴길이 : 500 cm)의 경우 약 30.2 tf 이 된다.

표 1에 나타난 각각의 하중의 경우에 대해서 평균 변형률과 최대변형률을 식 (3)과 (4)에 의하여 계산하면 표 2와 같다. 그리고 식 (5)에 의하여 계산된 수정계수와 이를 평균 변형률에 적용하여 예측한 최대 변형률은 표 3에 나타난 바와 같이 일치함을 알 수 있다.

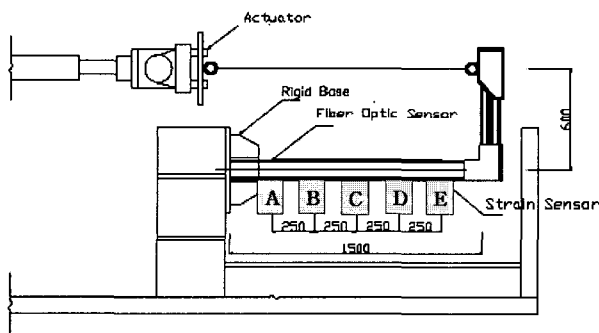


그림 6. 실험체 계획

5. 구조 실험

4장에서 이상적인 예제를 이용하여 검증한 최대 변형률과 평균 변형률의 수학적 관계는 오차 없이 성립

함을 알 수 있으나 부재 사이즈, 지점의 구속정도, 작용하중의 정확성, 도면과 시공과의 상이성 등 다양한 오차 요인이 포함된 실제 보-기둥 부재에서의 제안된 기법의 적용성 평가를 위하여 구조실험을 실시하였다.

5.1 실험 개요

구조 실험은 축하중과 양단에 동일한 모멘트가 단곡률로 작용하는 보-기둥으로 가정하여 실시하였다. 실험체는 1대의 유압가력기를 이용하여 축하중과 양단 모멘트가 동시에 작용하도록 그림 6에서와 같이 1단 고정 1단 자유인 지점 조건을 가지는 부재의 오른쪽 끝단에 수직으로 임의의 길이를 가지는 부재를 강접 후 가력하였다.

양단 모멘트의 크기를 변화시키기 위하여 오른쪽 끝단에 강접된 부재의 길이는 0.86 m, 0.6 m, 0.45 m로 변화를 주었으며 보-기둥 부재는 길이 1.5 m로 제작하였다. 그림 6은 0.6 m의 부재가 접합된 실험체의 전경을 나타낸다.

본 실험의 목적은 장대 광변형 센서를 이용하여 계측된 평균 변형률과 제안된 수정계수를 이용하여 예측된 최대 변형률의 실용성을 확인 하는 데 있다. 그리고 보-기둥에 작용하는 양단 모멘트의 크기가 같고 축하중이 작용하는 경우이므로 양단 모멘트와 축하중이 미지수가 미지수가 2개인 경우에 해당된다. 그러므로 평균 변형률 계측을 위해서 1 m 길이의 장대광변형 센서를 H형강 상부 및 하부 플랜지에 부착하였다. 그리고 최대 및 국부 변형률은 그림 6과 같이 25 cm 간격으로 5군데에 전기저항식 스트레인 게이지를 설치하여 직접 계측하여 비교에 활용하였다.

5.2 실험 결과

실험에 사용된 보-기둥의 부재는 SS400 H-100×100×6×8이며 표면에 1 m 길이의 LGFOS를 에폭시를 사용하여 부착하였다. 에폭시를 통해서 부착된 LGFOS는 광센서 스캐너(FTI-3300)를 이용하여 변형률을 측정하였다. LGFOS에 의하여 계측된 평균변형률을 이용하여 예측된 최대 변형률과 전기저항식 스트레인게이지에 의한 국부 최대 변형률은 축하중의 크기에 따라 표 4, 5, 6과 같이 비교 정리 할 수 있다.

각각의 경우 평균변형률을 이용하여 예측한 최대 변형률과 스트레인 게이지를 이용하여 직접계측한 최대 변형률간의 오차는 작용 축하중의 크기가 적은 0.514 tf의 경우 최대 약 25 %로 나타난다. 그러나

이 경우 변형률 절대값이 약 $500 \mu\epsilon$ 의 범위임을 고려할 필요가 있다. 그리고 축하중의 크기가 1.399 tf 의 경우 최소 약 0.11% 의 오차를 나타내며 이 경우 변형률의 절대값이 약 $1000 \mu\epsilon$ 범위 내외이다.

표 4. 예측 변형률과 계측 변형률 (86 cm의 경우)

축하중 (tf)	LGFOS 에 의한 예측 최대변형률	계측 최대변형률
0.514	369	487
0.801	649	876
1.107	1134	1335

표 5. 예측 변형률과 계측 변형률 (60 cm의 경우)

축하중 (tf)	LGFOS 에 의한 예측 최대변형률	계측 최대변형률
0.518	231	187
0.826	504	434
1.122	800	750
1.429	1147	1091

표 6. 예측 변형률과 계측 변형률 (45 cm의 경우)

하중 (tf)	LGFOS 에 의한 예측 최대변형률	계측 최대변형률
0.51	243	216
0.789	509	446
1.081	769	694
1.399	926	925

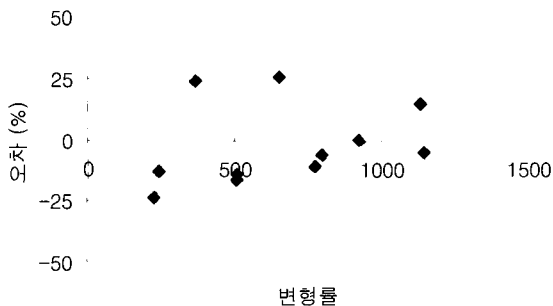


그림 7. 변형률의 크기에 따른 오차

표 4, 5, 6에 나타난 11개의 경우를 변형률 기준으로 정리하여 LGFOS에 의한 예측 최대변형률과 스트레인 게이지에 의한 계측 최대 변형률과의 오차를 정리하여 나타내면 변형률의 크기에 따라 오차가 감소하는 경향이 있으며 이는 그림 7과 같다.

본 논문에서 제시된 평균변형률과 최대변형률의 관계식은 이상적인 지점 조건을 고려하여 유도 되었다. 그러나 실험시 고정단으로 계획된 지점에서 회전각이 발생하였으며 이는 제시된 최대변형률 예측기법의 오차로 반영된 것으로 판단된다. 본 실험의 경우 지점 회전각의 발생량은 작용 모멘트의 크기가 가장 큰 표 4의 경우가 가장 많아 표 5와 6의 경우 보다 예측된 최대 변형률이 계측된 최대 변형률 보다 작아지게 된 것으로 판단한다.

이러한 지점의 가정에 대한 오차는 실 구조물에서 항상 존재하는 것으로 고려해야 하므로 본 연구에서 제한된 예측기법의 정확성을 향상시키기 위해서는 보-기둥 부재의 경우 부재 당 최소 3개의 장대광변형센서를 사용해야 한다. 그러나 실 구조물에서의 현장 상황을 고려하여 본 실험과 같이 상하 플랜지에 각 1개씩 2개의 장대광변형센서를 사용하는 경우 지점 조건에 대한 가정에서 발생하는 오차는 피할 수 없다. 그리고 보-기둥 부재에서 양단 모멘트와 축하중 이외에 부재 도중에 작용하는 하중에 의한 영향을 고려할 수 있는 예측기법 또한 개발되어야 평균변형률을 이용한 보-기둥 부재의 안전성 평가에 대한 적용성이 확보될 것으로 판단한다.

6. 결 론

구조물 또는 구조 부재의 안전성은 구조물 또는 부재 내에 발생하는 최대 변형률의 계측을 기반으로 하여 평가되어야 한다. 그러나 기존의 대부분의 센서와 안전성 평가 기법들은 구조물 또는 구조 부재의 국부적인 점에서의 변형률에 기반하여 안전성을 평가하기 때문에 실 구조물에 적용하기에는 여러 가지 문제점들을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 한계와 제반 문제들을 극복하기 위하여 장대광변형센서(Long Gauge Fiber Optic Sensor, LGFOS)를 이용한 부재력 평가를 보-기둥 부재에 적용하여 제시하였으며 구체적인 연구 결과는 다음과 같다.

1. 구조물 또는 구조 부재의 임의의 두 점 사이에서 발생한 변형률을 이용하여 이 구간의 평균 변형

를 정의할 수 있으며, 이 평균 변형률과 최대 변형률 사이에는 일정한 관계가 성립함을 수식으로 확인하였다.

2. 평균 변형률과 최대 변형률의 관계를 이용하여 비교적 긴 길이를 가지는 LGFOS에 의한 평균 변형률을 이용하여 보-기둥의 최대변형률 및 최대응력을 예측할 수 있는 가능성을 확인하였다.
3. LGFOS로 예측된 평균 변형률을 이용하여 보-기둥 부재의 처짐 곡선을 계산하고 이를 이용하여 구조 부재의 사용성을 모니터링할 수 있는 기법 등에 관한 추가적인 연구와 보다 다양한 경우에 대한 추가 실험의 필요성을 확인할 수 있었다.
4. 보-기둥 부재의 보다 합리적 안전성 평가를 위해서는 부재 도중에 작용하는 하중에 의한 영향, 그리고 접합부의 회전 강성이 고려된 평균변형률과 최대변형률의 관계에 대한 보다 심도 있는 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

Chen W.F. and Lui E.M. (1987). *Structural Stability*, Elsevier, pp. 45-170.
 Inaudi D. and Glisic B. (2002). *Crack Monitoring in Concrete Elements using Long-gauge Fiber*

Optic Sensors, SHM ISIS, pp. 227-236.

Inaudi D., Vurpillot S., Martinola G. and Steinmann G. (1999). *Structural Monitoring with Fiber Optic Sensors*, FIB, Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structural, Vienna, Austria.
 Casas J.R. and Cruz J.S. (2003). *Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring*, Journal of bridge engineering, ASCE, Vol. 8 pp. 362-373.
 FOX-TEC (2003). *FTI3300 Operating Manual*, Fiber optic systems technology, Toronto.
 Leung C.K.Y. (2001). *Fiber Optic Sensors in Concrete: The Future?*, NDT&E International, Vol.34, pp. 85-94.
 Park H.S., Jung H.S., Kwon Y.H., and Seo J.H. (2006). *Mathematical Models for Assessment of the Safety of Steel Beams based on Average Strains from Long Gage Optic Sensors*, Sensors and actuators A: Physical, Vol. 125, pp. 109-113.
 Tennyson R.C. (2001). *Installation, Use and Repair of Fiber Optic Sensor*, Pub. ISIS Canada, U.Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, R3T 5V6.
 Wu Z. and Xu B. (2002). *Infrastructural Health Monitoring with BOTDR Fibre Optic Sensing Technique*, SHM ISIS, pp. 217-226.

© 논문접수일 : 2006년 05월 02일

© 심사의뢰일 : 2006년 05월 12일

© 심사완료일 : 2006년 08월 28일