

FBG센서 응답을 이용한 단순보의 동적 변위 및 동특성 추정

Estimation of Dynamic Displacement and Characteristics of A Simple Beam from FBG Sensor Signals

최은수^{1)†}

강동훈²⁾

정원석³⁾

김학수⁴⁾

Choi, Eun Soo Kang, Dong Hoon Chung, Won Seok, Kim, Hak Soo

요약 : FBG 센서는 기존의 전기저항식 게이지에 비해 구조물의 변형률 계측이 용이하고, 내구성이 우수하여 구조물의 응답 모니터링이나 비파괴손상평가 분야의 적용성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 구조물 단면의 상·하부에서 측정된 변형률 값으로부터 곡률로의 치환이 가능하며, 이 곡률을 이용하여 수직변위를 계산할 수 있다. 본 연구에서는, FBG 센서를 이용하여 I형의 강재 단순보에서 충격에 의한 동적 변형률을 측정하고, 이를 이용하여 동적 변위를 추정하여 측정된 동적 변위와 비교·평가하였다. 또한, 추정된 변위와 측정된 변위 및 변형률 시간이력을 이용하여 단순보의 동특성(고유진동수, 감쇠비 및 모드형상)을 추정하여 해석모델의 동특성과 비교하였다. 변형률을 이용한 변위의 추정은 측정 변위보다 최대 약 10% 정도 크게 나타났다. 그러나 추정된 변위 또는 변형률 이력을 사용하여 추정한 동특성은 측정된 변위를 사용하여 추정한 동특성과 거의 일치하였고, FBG 센서를 이용한 동특성 추정 결과는 양호한 것으로 나타났다. 특히, FBG 센서 변형률은 변위에 비해 고주파 특성이 증폭되기 때문에 고차모드의 동특성 추정에 유리하였다.

ABSTRACT : FBG sensors are capable of measuring the strain of structures easily and more durably than electric resistance gauges. Thus, many researches are dedicated to the application for the response monitoring or non-destructive evaluation of structures using FBG sensors. Additionally, the measured strains at the top and bottom of a cross-section can be transformed into the curvature of the section, which can be used to calculate its vertical displacement. Hence, this study aims to measure the dynamic strain signals of a steel I section simply supported beam and to estimate the dynamic displacement from the strain signals, after which the estimated displacement is compared with the measured displacement. The dynamic characteristics (natural frequency, damping ratio and mode shape) of the beam are predicted from both the estimated and measured displacement signals, and from the strain time history of the FBG sensors. The predicted properties are compared with those of an analytical model of the beam. The estimated displacement from the strain was greater than the measured displacement. However, the predicted dynamic properties from both the estimated displacements and the measured strains are well-correlated with those from the measured displacement. It is therefore appreciated that the estimation of the dynamic properties of FBG sensor signals is reasonable. Especially, the strain signal of the FBG sensor was amplified at a higher-frequency region in comparison with the displacement signal, and, thus, FBG sensor strains are more preferable than estimation with higher-mode properties.

핵심 용어 : FBG 센서, 변형률, 곡률, 추정된 변위, 동특성

KEYWORDS : FBG sensor, strain, curvature, estimated displacement, dynamic properties

1. 서론

구조물의 건전성을 유지하는 것은 건전한 시공만큼이나 중요한 일로서, 구조물의 건전성 확보를 위해 다양한 모니터링 기법들이 개발되고 실행되어 왔다. 또한 모니터링에 의해서 얻어진 자료를 이용하여 구조물의 건전도를 평가하는 비파괴 손상

평가기법들도 계속적으로 발전하여 왔으며, 공용기간 중 안전한 구조물의 사용을 위하여 비파괴 손상평가기법은 매우 중요하다. 그러나 모니터링 기법을 효과적으로 운용함에 있어 가장 큰 장애요인 중의 하나는 각 센서의 내구성 및 설치의 어려움이다. 일반적으로 전기저항식의 변형률 게이지는 내구성에 문제가 있어 장기 사용에 어려움이 있으며, 구조물의 변위 측정

1) 교신저자. 정회원. 한국철도기술연구원 선임연구원. 공학박사
(Tel. 031-460-5324, Fax. 031-460-5649, Email: eunsoochoi@krri.re.kr)

2) 한국철도기술연구원 선임연구원. 공학박사

3) 정회원. 한국철도기술연구원. 선임연구원. 공학박사(wschung@krri.re.kr)

4) 정회원. 호남대학교 토목공학과. 부교수(hskim8937@paran.com)

본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

을 위한 변위계는 고정 지지점을 확보해야하는 어려움이 있다. 구조물의 장기 거동측정에서 이러한 문제들을 극복하기 위한 대안으로 선호되고 있는 센서가 광섬유 센서 (Fiber optics sensor, FOS)이며, 그 중 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating, FBG) 센서가 최근 가장 폭넓게 연구되고 있는 대상이다. FBG센서는 광섬유의 코어(core) 부분에 굴절률이 주기적으로 변하는 격자(grating)를 형성함으로써 입사된 빛의 파장이동량으로부터 구조물의 변형 및 온도팽창에 의한 변형율을 측정할 수 있도록 고안된 센서이다. FBG센서는 내구성면에서 전기저항식 게이지에 비해 매우 우수하며, 간단한 수학적 계산을 통해서 구조물의 변위도 추정가능하다. 아울러 FBG센서는 변위 추정에서 고정 지지점이 필요하지 않기 때문에 사용성이 매우 뛰어나다. 또한, 전철화된 철도교에서 발생 가능한 전자기파 간섭(electro-magnetic interference, EMI)으로부터 자유로워 전기식 센서에 비해 안정적인 사용이 가능하다.

FBG센서의 토목 분야에 대한 응용 연구는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 그 중 하나는 FBG센서의 매립(implementation) 또는 보호(protection)에 관한 것으로 FBG센서를 CFRP 플레이트 등에 매립하여 구조물의 장기거동 계측에서 센서의 내구성을 확보하려는 연구이다. Leng et al. (2005)은 콘크리트 타설 시에도 사용가능한 센서 보호시스템을 개발하여 실험적으로 증명하였다. 다른 하나는 FBG센서의 응답을 이용하여 비파괴 손상평가를 실시하는 연구로서 기존의 비파괴손상평가 기법 또는 새로운 평가기법에 FBG센서의 응답을 적용하는 것이다. Hayano와 Mita (2005)는 변형율과 가속도를 동시에 측정할 수 있는 FBG센서를 개발하였으며, 이를 이용하여 2차원 프레임 구조물의 손상도 평가를 실시하였다.

국내에서는 김남식 등이 단순보에서 FBG센서를 이용하여 정적 재하에 의한 변형율을 측정하고, 이를 전기저항식 게이지를 이용하여 측정한 변형율 및 계산된 변형율과 비교하였다 (김남식, 2002). 또한, FBG센서의 변형율에서 정적 변위를 추정하여 측정변위 및 계산변위와 비교하였다. 김남식 등이 수행한 연구는 FBG센서를 보의 하단부에만 부착하여 상부의 변형율을 측정하지 않아 하부의 변형율만을 이용하여 변위를 추정하였다. 또한 정적 재하에 의한 변위만을 추정·비교하여 교량 상을 주행하는 차량과 같이 동적 하중에 대한 변위의 추정은 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 FBG센서를 이용하여 강재로 된 단순보의 충격에 의한 동적 변형율을 측정하고, 이를 이용하여 동적 변위를 추정하고자 한다. 추정된 동적 변위는 변위계에 의해서 직접 측정된 동적 변위와 비교하여 추정된 변위의 정확도를 평가하고자 한다. 또한, FBG센서에서 추정된 동적 변위와 변형율을 이용하여 단순보의 동특성(고유진동수, 감쇠비 및 모

드형상)을 추정하여, 직접 변위에서 추정한 동특성 및 해석적으로 얻어진 동특성과 비교할 것이다.

본 연구에서 수행하는 FBG센서를 이용한 동적 변위의 추정은 structural health monitoring (SHM)을 위한 기본적인 정보를 제공하여 유용하게 사용될 수 있으며, 구조물의 동특성 추정은 비파괴 손상평가 (nondestructive evaluation, NDE)에 이용되는 모드 특성을 제공할 수 있다. 따라서 FBG 센서 응답을 활용하여 SHM과 NDE를 수행하는 것이 기존의 변위계 및 가속도계를 사용하여 수행하는 것에 비해 월등히 수월할 것이다.

2. FBG센서의 제작 및 원리

광섬유 센서는 외부 패브리-페로 간섭계(Extrinsic Fabry-Perot interferometer, EFPI), 광섬유 브래그 격자 센서 및 다중모드 광섬유 센서 (multimode FOS) 등 여러 형태로 개발되었다 (Gandhi and Thompson; 1992). 여러 광섬유 센서 중에서 FBG센서는 하나의 광섬유에 여러 개의 센서를 배치할 수 있는 다중화 (multiplexing)가 용이하여 사용성이 다른 센서에 비해 우수하다.

FBG센서를 제작하는 방법은 Meltz (1989) 등에 의해서 제안된 transverse holographic method 등을 포함하여 여러 방법들이 개발되었다. 그러나 Hill (1993)에 의해서 고안된 위상 마스크 (phase mask) 방법이 대량생산과 취급용이성 때문에 현재에 가장 널리 활용되고 있다. 위상 마스크는 일종의 광학적 회절요소 (diffractive optical element)로서 자외선을 통과시킬 때, 광섬유 내부에서 일정한 간섭패턴 (interference pattern)을 형성하며 광섬유 브래그 격자를 형성한다.

그림 1에는 제작과정이 도식적으로 설명되어 있으며, 그림 2는 본 연구에서 사용된 FBG센서를 제작하는 장면을 보여주고 있다.

FBG는 그림 3에서 보듯이 자외선 레이저에 의해서 광섬유 코어에 형성된 굴절률 변화가 주기적인 연속적인 층을 의미한다. 이러한 격자구조는 광섬유에 광대역 광원(broadband source)이 입사될 경우 식 (1)과 같이 브래그 조건(Bragg condition)에 해당되는 파장 성분만을 반사시키는 특성을 보인다. 여기서, λ_B 는 Bragg 파장, n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이다.

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

브래그 조건에 의해 결정되어 반사되는 브래그 파장(Bragg wavelength)은 유효 굴절률과 격자의 간격의 함수이며 광섬유

격자에 온도나 변형률 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다.

변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률 등의 물리량을 식 (2)를 통하여 계산할 수 있으며,

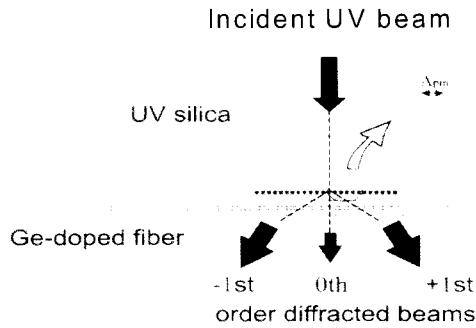


그림 1. 위상 마스크를 이용한 FBG센서 제작원리

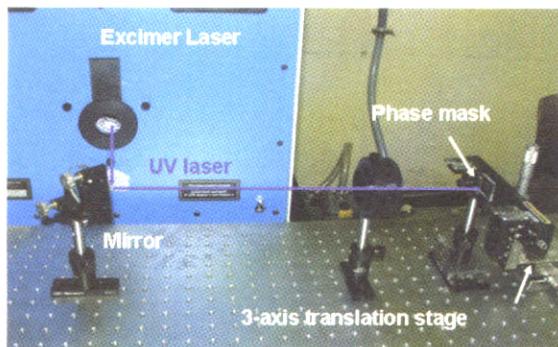


그림 2. FBG센서의 제작 모습

이것이 광섬유 Bragg 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha_f + \xi_f)\Delta T + (1 - p_e)\epsilon] \quad (2)$$

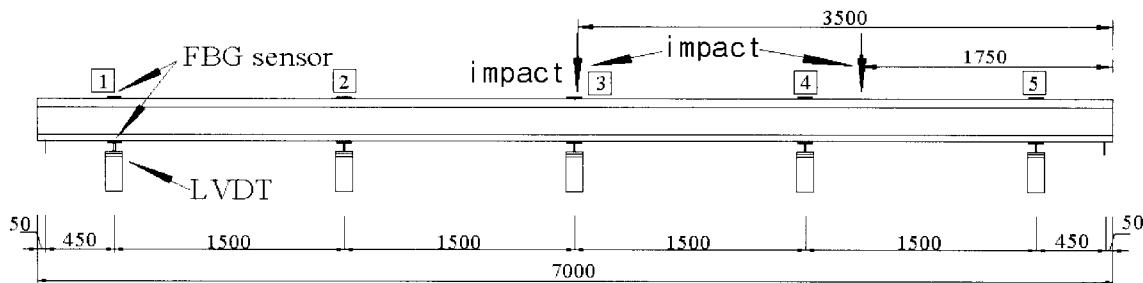


그림 5. KBG 센서 및 변위계의 부착 위치

여기서, α_f 는 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고 ξ_f 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다. p_e 는 광탄성 상수(photoelastic constant)이다.

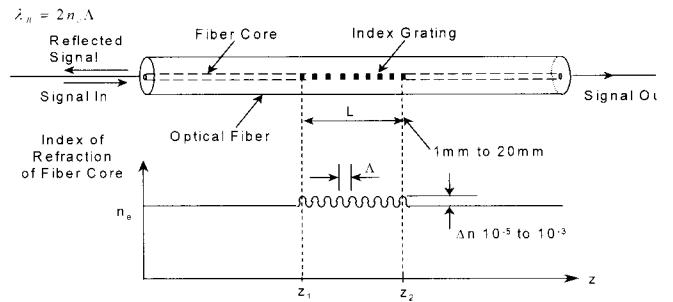


그림 3. 광섬유에서의 FBG 및 굴절률 변화

3. 단순보의 충격실험 및 계측

본 연구에서 사용한 단순보는 길이 7.0m의 I형강으로 그림 4와 같다. FBG센서는 보의 5개의 상·하면에 부착되었으며, 동일한 위치에 변위계(LVDT)를 설치하였다.



그림 4. 실험을 위한 단순보 설치 전경

FBG센서 및 변위계의 부착 위치와 보의 단면 및 단부의 설치조건은 그림 5 및 6과 같으며, 단부는 충격에 의한 처짐의 발생 및 회전이 원활히 이루어지도록 받침의 상·하부에 두께 1.5mm, 길이×넓이가 100mm × 100mm 인 고무패드를 설

치하였다 (그림 6 참조)

충격의 위치는 그림 5에서 보듯이 보의 1/2 지점과 1/4 지점으로 하였으며, 충격은 일반적인 고무망치로 실시하였다. 1/2 지점의 충격은 단순보의 1 및 3차 모드의 진동을 유발하고, 1/4 지점의 충격은 단순보의 2차 모드 진동을 발생시키기 위한 것이다. 그림 7에는 FBG센서 및 변위계의 설치 모습과 각 센서를 위한 계측기가 나타나 있다.

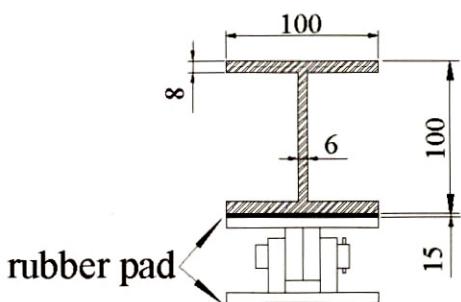


그림 6. 단순보의 단면형상, 지점부 및 고무패드

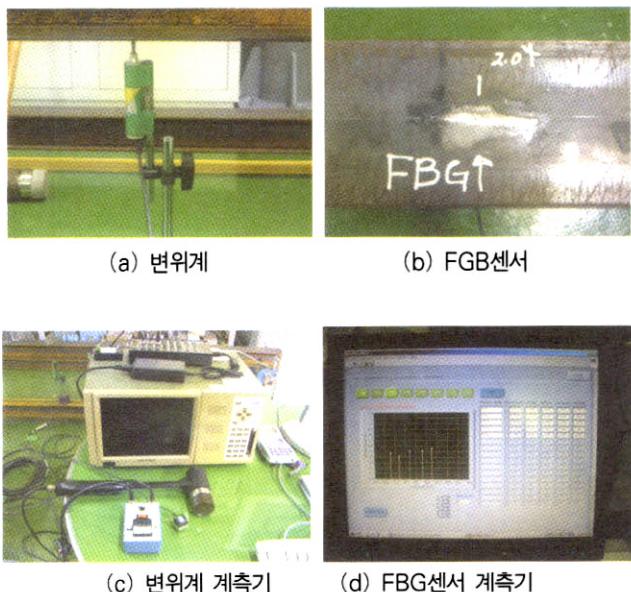


그림 7. 계측을 위한 센서 및 계측기

4. 단순보의 변형율 측정 및 변위 추정

단순보의 수직처짐은 보의 휨 변형 하에서 기하학적 비선형을 고려하여 식 (3)과 같은 관계로 표현될 수 있다. 이는 “평면은 휨 변형 후에서도 평면을 형성한다”는 Bernoulli 가정에 근거한 식이다.

$$\kappa(x) = \frac{\frac{d^2 w(x)}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (3)$$

여기서, $\kappa(x)$ 는 임의의 종단면 x에서의 곡률, $w(x)$ 는 임의의 종단면 x에서의 수직처짐이다.

한편, 단순보의 곡률은 식 (4)와 같은 n차 다항식의 형태로 표현할 수 있다 (정원석 외, 2005).

$$\kappa(x) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + \dots + c_n x^n \quad (4)$$

여기서, $c_0 \dots c_n$ 는 곡률함수의 상수이다.

위의 곡률은 변형율과 식 (5)와 같은 선형관계를 가지므로, FBG 센서를 통해서 측정한 변형율을 통해서 단순보의 곡률추정이 가능하다.

$$\kappa_i = (\varepsilon_i^b - \varepsilon_i^t)/h \quad (5)$$

여기서, ε_i^t 와 ε_i^b 는 각각 단순보 상·하부의 변형율을 나타내며, h는 FBG센서 사이의 거리를 나타내며, 본 연구의 경우 100mm이다. 본 연구의 단순보에서는 5개의 위치에서 변형율을 측정하였으므로 곡률함수식은 4차 다항식을 사용하였다. 즉, 4차 다항식은 5개의 미지 상수를 가지게 되므로 실험을 통해서 측정한 5개의 곡률을 이용하여 회귀분석을 통해 곡률함수의 상수를 결정할 수 있다. 미소변형 문제를 고려하여 식 (3)을 단순화시키고 구조물의 처짐과 곡률관계로부터 이중적분을 취하면 식 (6)과 같이 수직처짐을 결정할 수 있으며 적분에서 발생되는 2개의 적분상수는 단순보의 경계조건인 $w_{(x=0)} = 0$ 과 $w_{(x=L)} = 0$ 을 고려하면 결정할 수 있다.

$$w(x) = \int \int \kappa(x) dx dx \quad (6)$$

그림 8에는 1/2지점(그림 5에서 3번 위치)에 충격을 가했을 경우의 상·하부의 변형을 시간이력을 비교하여 나타내었다. 하부의 변형율 시간이력의 위상은 상부의 위상과 180° 차이가 있으나, 비교의 편의를 위해서 하부의 변형율에 -1을 곱하여 표시하였다. 또한, 각 위치에서의 최대 변형율을 표 1에 나타내었다. 그림에서 보듯이 각 위치에서 상부 및 하부의 변형율 시간이력의 위상은 일치하고 있으나, 피크치는 약간의 차이가 있으며 특히 2번 위치에서는 상·하부의 피크치의 차이가 상대

적으로 크게 나타나고 있다. 표 1의 최대 변형율에서도 2번 위치에서 오차가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

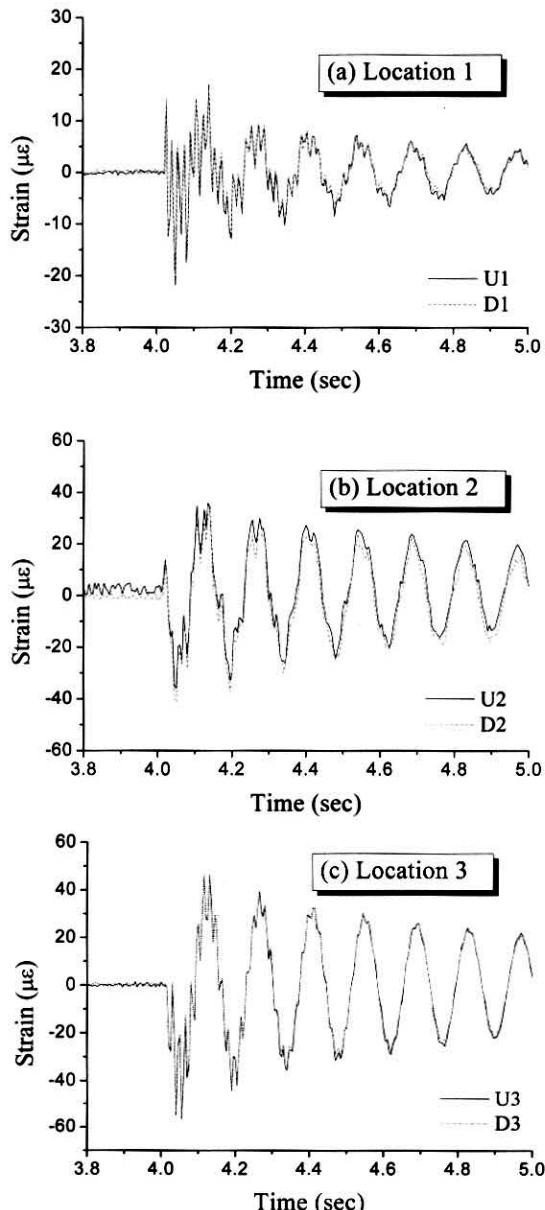


그림 8. FBG센서의 변형율 시간이력 (계속)

표 1. 각 위치에서 최대 변형율 비교

위치	1 ($\mu\epsilon$)	2 ($\mu\epsilon$)	3 ($\mu\epsilon$)	4 ($\mu\epsilon$)	5 ($\mu\epsilon$)
Up	max.	16.96	35.84	46.32	39.66
	min.	-21.75	-35.93	-56.51	-40.65
Down	max.	16.04	33.33	46.33	37.49
	min.	-19.98	-41.12	-55.43	-39.74
오차	8.9%	14%	1.9%	2.3%	1.6%

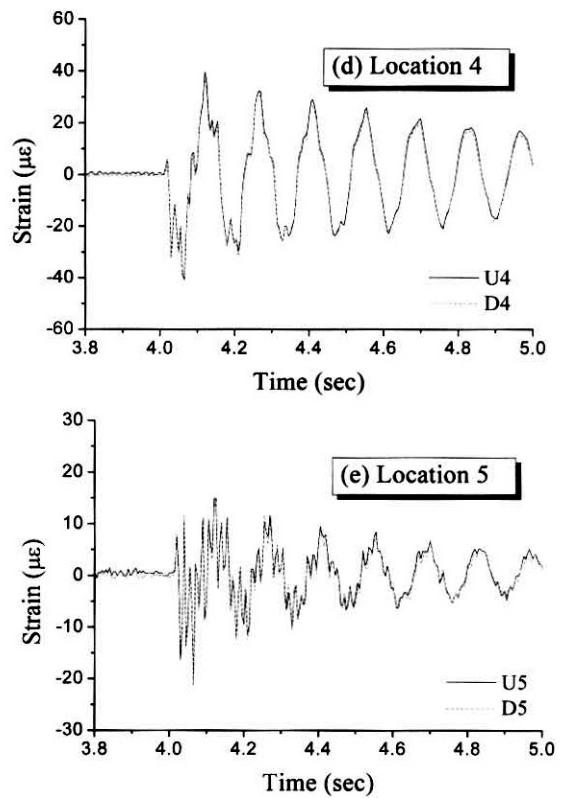


그림 8. FBG센서의 변형율 시간이력

각 위치에서 상·하부 변형율의 최대값 및 피크치는 단면이 중립축에 대하여 대칭이므로 동일하게 발생하여야 한다. 그러나 상부와 하부의 FBG센서 부착 위치 또는 부착 방향의 오차로 인하여 차이가 발생된다고 판단된다. 이러한 오차는 변위를 추정하는데 오차발생 원인으로 작용할 수 있으나, 단면의 중립축을 간단히 알 수 있는 경우가 아니면 상·하부의 변형율을 동시에 측정해야 곡률을 계산할 수 있다.

그림 9는 1/2지점 충격에 의한 FBG센서를 통해서 추정된 단순보의 동적 처짐 시간이력과 변위계를 통해서 직접 측정한 처짐의 시간이력이 비교되어 있으며, 표 2에는 1/2 및 1/4지점에 충격을 가했을 경우 측정된 최대처짐과 FBG 센서에 의해 추정된 최대처짐을 비교하였다. 그림 9를 보면, 추정된 변위 시간이력곡선은 측정된 시간이력 곡선과 위상은 정확히 일치하고 있으나, 최대치 및 피크치에서는 약간의 차이를 보이고 있다.

특히, 그림 9(c)의 경우와 같이 고차모드 진동이 크게 나타나는 부분에서는 피크의 크기에서 차이가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 전체적으로 추정된 변위의 시간이력곡선은 거칠게 나타나고 있는 것을 관찰할 수 있으며, 이러한 원인은 본 연구에서 사용된 FBG 센서 측정장비의 최대 샘플링 비율이 200Hz로 고차모드를 정확하게 표현하기에는 부족하다고 판단된다.

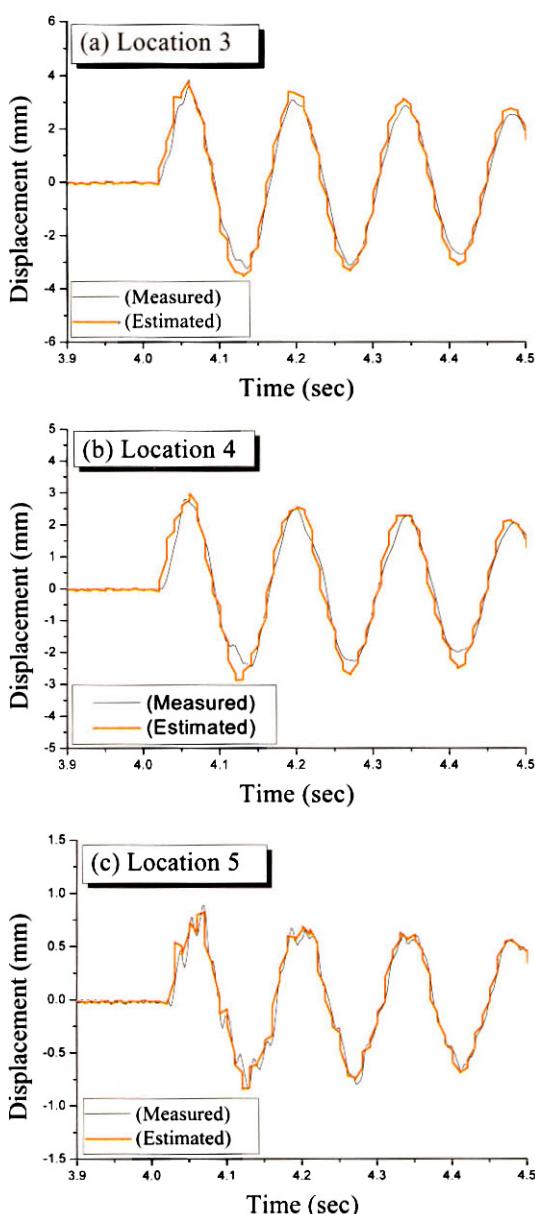


그림 9. 측정 및 추정된 변위의 시간이력

이러한 이유로 표 2의 충격에 의한 최대값 비교에서 추정치가 1/2 지점에 충격을 가했을 경우, 중앙주변에서는 5.83%의 오차 발생하였으나, 단부주변에서는 10.4%오차가 발생하여 중앙부보다 오차가 상대적으로 크게 나타났다. 표 1에서 보면 상·하부의 최대 변형율의 오차는 2번 위치에서 14%로 가장 크게 발생하였으나, 변위 추정에서는 1번 위치에서 10.4%로 가장 크게 발생하였다. 상·하부의 최대 변형율의 발생하는 시간이 상이하기 때문에 최대 변형율의 오차와 추정된 변위의 최대값의 오차와는 상관관계가 없다고 판단된다.

1/4 지점에 충격에 가했을 경우, 변위 추정에서 발생하는 오차는 1/2 지점에 충격을 가했을 경우보다 더 크게 발생하였다. 이러한 오차경향은 다른 충격실험에서도 오차의 정도차이는 있

으나 유사한 경향을 보였다.

김남식 등이 수행한 연구결과를 보면 중앙의 정적 하중에 의한 FBG센서 추정변위와 측정 변위와 차이가 4% 발생하고 있다 (김남식 외, 2002). 본 연구의 결과는 5.83%로 정적 재하에 의한 변위 추정 시 보다 오차가 약간 크게 발생하고 있다. 이러한 원인은 상부와 하부의 FBG센서 부착 위치가 상이하여 발생할 수 있다. 또한, 동적 변위 추정의 최대값은 피크치에서 발생하는데, 피크치는 고차모드의 진동에 영향을 받기 때문에 정적 재하의 경우 보다 오차가 크게 발생할 가능성이 크다. 위에서 언급한 것과 같이 본 연구에서 사용한 FBG센서의 계측기는 샘플링 비율 (sampling rate)이 200Hz로 고차모드를 정확하게 표현하기에는 충분하지 않다.

표 2. 각 위치의 최대 변위 비교

위치	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	5 (mm)
1/2 지점 충격					
측정치	0.785	2.71	3.60	2.87	0.885
추정치	0.867	2.87	3.81	2.97	0.833
오 차 (%)	10.4	5.90	5.83	3.48	-5.84
1/4 지점 충격					
측정치	0.866	2.71	2.85	2.87	1.02
추정치	0.939	3.09	3.17	2.83	0.851
오 차 (%)	8.38	14.0	11.2	-1.39	-16.5

5. 고유진동수 및 감쇠비 추정

구조물의 동특성인 고유진동수 및 감쇠비를 추정하기 위해서는 일반적으로 변위 및 가속도 시간이력을 사용한다. 본 연구에서는 측정된 변위 및 추정된 변위 시간이력을 사용하였으며, 추가적으로 FBG 센서의 변형율 시간이력을 사용하여 고유진동수 및 감쇠비를 추정하여 비교하였다.

그림 10에는 1/2 위치의 충격에 의한 각 응답의 시간이력과 그림 11에는 각 응답의 FFT (Fast Fourier Transform) 분석에 의한 PSD (Power Spectral Density)가 나타나 있다. 측정된 변위이력의 PSD에서는 3차 모드의 고유진동수까지 확인할 수 있으나, FBG 센서의 변형율에서 추정한 변위이력의 PSD에서는 3차 모드의 특성이 미미하여 확인하는데 어려움이 있다. 그러나 FBG 센서의 변형율 시간이력의 PSD에서는 3차 모드의 고유진동수에서 측정된 변위이력의 PSD보다 확연히 크게 발생하여 인지가 용이하다. 이러한 현상은 그림 10(c)의 변형율 시간이력에서 3차 모드 성분이 크게 증폭되어 나타나는

것과 일치하고 있다.

그림 12와 13에는 1/4 위치의 충격에 의한 각 응답의 시간 이력 및 그에 상응하는 PSD를 나타내고 있다. 그림 13을 보면, 2차 모드의 고유진동수는 모든 응답의 PSD를 통해서 인지할 수 있다.

각 응답의 종류와 측정위치에 따른 1, 2 및 3차 모드의 고유진동수를 표 3에 나타내었다. 감쇠비는 PSD곡선을 이용하여 Half Power Band Width (Clough and Penzien, 1993) 방식을 사용하여 추정하였으며, 표 4에 감쇠비를 나타내었다. 2, 3차 모드에서는 PSD의 곡선이 매끄럽지 않아 Half Power Band Width 방식을 적용하기 위하여 smoothing 기법을 적용하여 감쇠비를 추정하였다.

측정된 변위 및 FBG 센서의 변형률로부터 추정한 고유진동수는 측정위치별로 거의 동일한 값을 보여 대표값을 선정할 수 있었다. 그러나 추정된 변위로부터 추정한 고유진동수는 위치 별로 약간의 차이가 있어 대표값 선정에 어려움이 있었다. FBG 센서 변형율로부터 추정한 1차 모드 고유진동수가 7.18 Hz로 측정변위로부터 추정한 고유진동수 7.2Hz와 차이가 발생하는 것은 FFT분석의 resolution 차이에 의해서 발생한다고 판단된다.

그림 10(b) 및 12(b)의 추정된 변위이력 및 그림 10(c) 및 12(c)의 변형율 이력곡선이 부드럽지 않지만, 고유진동수 및 감쇠비 추정에는 어려움이 없었다. 본 연구에 사용된 FBG 센서 시스템의 샘플링 비율 (sampling rate)은 200 Hz이며, 이 경우 Nyquist 진동수는 100 Hz이다. 2차 및 3차 모드의 고유진동수는 27.5 및 60.4Hz이므로 일반적으로 측정하고자 하는 진동수의 10배의 진동수를 샘플링 비율로 설정하는 것을 고려할 때, 100Hz의 Nyquist 진동수는 2차 및 3차 모드의 진동을 표현하기에는 상당히 작은 진동수임을 알 수 있다. 이러한 부분은, FBG 센서 시스템의 샘플링 비율을 향상시킬 경우 해결될 수 있는 부분이다.

감쇠비의 추정에서는, 측정변위와 추정변위 모두로 부터는 거의 동일한 결과를 얻었으나 변형율 값으로부터 추정한 감쇠비는 측정된 변위로부터 추정한 감쇠비에 비해 약 5% 정도 크게 나타났다.

측정 및 추정된 변위는 2 및 3차 모드의 진동크기가 미약하여 감쇠비 추정에 어려움이 있었으나, 변형율은 고차모드에서도 진동크기가 크게 발생하여 3차 모드까지 감쇠비를 추정할 수 있었다.

표 3. 고유진동수의 추정

응답종류	위치 모드					
		1	2	3	4	5
측정변위	1차 (Hz)	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20
	2차 (Hz)	27.5	27.5	-	27.4	27.5
	3차 (Hz)	60.4	60.5	60.4	60.4	60.7
추정변위	1차 (Hz)	7.23	7.23	7.23	7.18	7.18
	2차 (Hz)	27.6	27.5	-	27.6	27.6
	3차 (Hz)	-	-	-	-	-
FBG 변형율	1차 (Hz)	7.18	7.23	7.18	7.18	7.18
	2차 (Hz)	27.4	27.4	-	27.5	27.5
	3차 (Hz)	60.4	60.4	60.4	60.4	60.4

표 4. 감쇠비의 추정

응답종류	위치 모드					
		1	2	3	4	5
측정변위	1차 (%)	2.46	2.47	2.46	2.48	2.48
	2차 (%)	2.47	2.30	-	2.41	2.41
추정변위	1차 (%)	2.47	2.47	2.48	2.50	2.51
	2차 (%)	2.16	2.17	-	2.18	2.14
FBG 변형율	1차 (%)	2.54	2.48	2.53	2.49	2.58
	2차 (%)	2.07	2.14	-	2.15	1.97
	3차 (%)	1.23	1.85	1.34	1.36	1.34

6. 단순보의 모드형상 추정

각 응답의 FFT분석에 의한 위치별 PSD의 피크값을 이용하여 모드형상을 추정하였다. 모드형상의 추정은 고유진동수의 추정과는 달리 오차를 포함할 가능성이 상당히 크다. 따라서 어떠한 추정된 모드형상도 참값으로 단정하기 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 추정된 모드형상을 해석적으로 얻어진 모드형상과 비교하였다. 해석적인 모델은 전장에서 추정한 고유진동수를 이용하여 SI (System Identification) 기법을 사용하여 확정하였다 (Stubbs et al., 2000). 위에서 언급한 것과 같이 단순보는 고무폐드 위에 거치되어 있으므로, 정확히 단순지지 상태가 아니라 그림 14와 같이 탄성지지 상태이다. 여기서, 보의 영율 (Young's modulus, E)과 스프링상수 (k)를 변수로 SI기법을 실행하여 해석모델을 확정하였고, 해석모델의 고유진동수와 추정된 고유진동수를 표 4에 나타내었다. 또한, 표 4에는 일반적으로 사용되는 강재의 영율과 단순지지 상태의 고유진동수를 나타내었다. 고유진동수 옆의 팔호 안에는 측정치와의 오차를 표시하였다. 표 5에서 볼 수 있듯이 단순지지 상태의 고유진동수는 1차 모드를 제외하고,

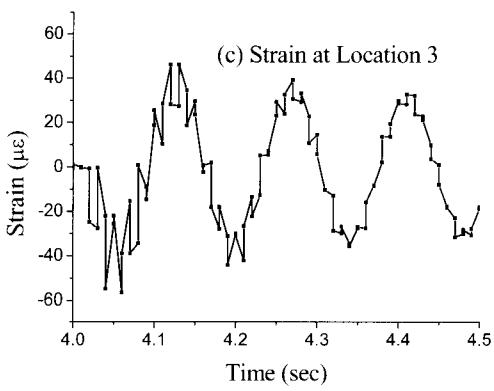
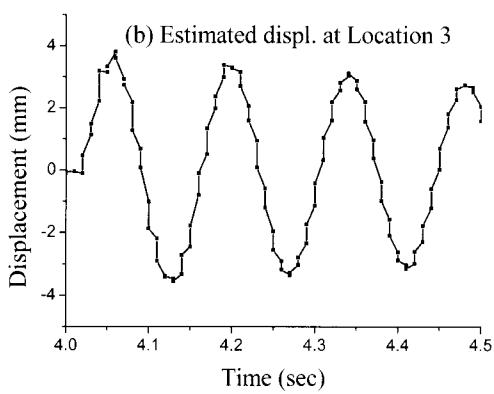
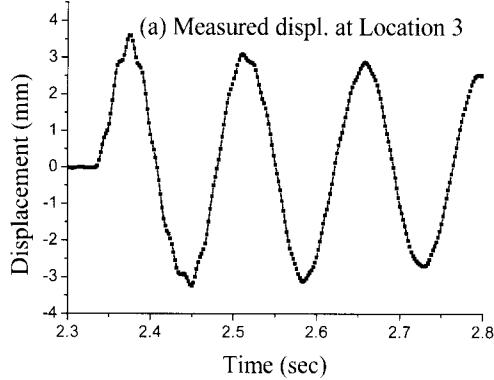


그림 10. 1/2 충격에 의한 각 응답에 대한 시간이력

2차 및 3차 모드의 진동수에서 측정된 고유진동수와 오차가 크게 발생하고 있다.

그러나 SI 기법으로 확정된 탄성지지 모델의 고유진동수는 2차 모드에서 오차가 1.33%로 약간 크고, 나머지 두 고유진동수는 측정치와 매우 만족할 범위 내에서 오차를 보이고 있다.

따라서 본 연구에서 확정한 탄성지지 모델은 실험에 사용된 보를 거의 정확하게 모사했다고 판단되며, 이 해석모델의 모드형상을 참고값으로 하여 각 응답에서 추정된 모드형상과 비교하고자 한다.

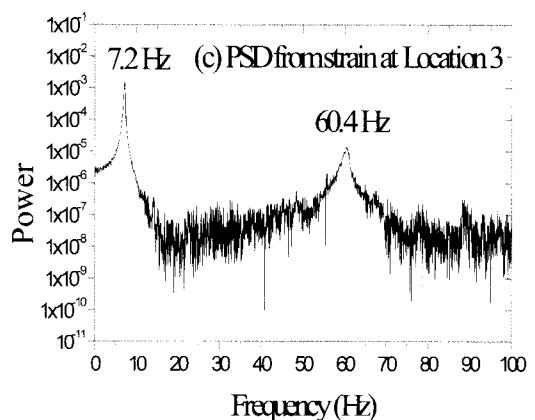
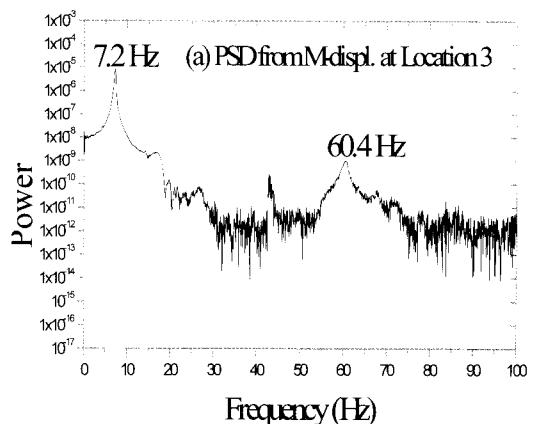
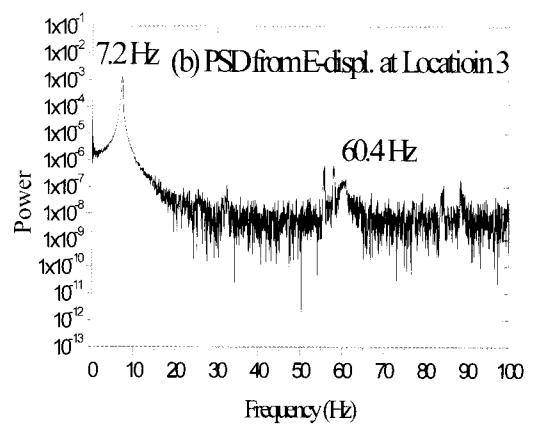


그림 11. 1/2 충격 응답 시간이력에 대한 PSD

그러나 SI 기법으로 확정된 탄성지지 모델의 고유진동수는 2차 모드에서 오차가 1.33%로 약간 크고, 나머지 두 고유진동수는 측정치와 매우 만족할 범위 내에서 오차를 보이고 있다.

따라서 본 연구에서 확정한 탄성지지 모델은 실험에 사용된 보를 거의 정확하게 모사했다고 판단되며, 이 해석모델의 모드형상을 참고값으로 하여 각 응답에서 추정된 모드형상과 비교하고자 한다.

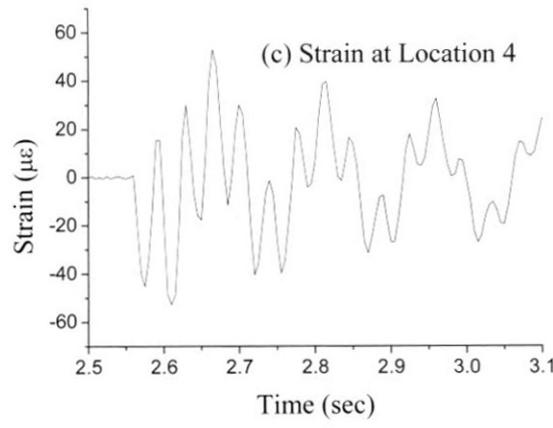
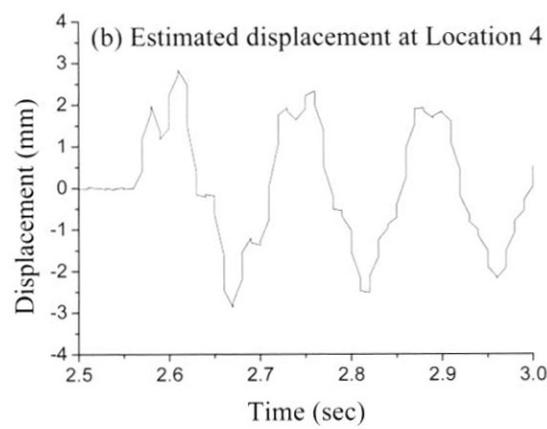
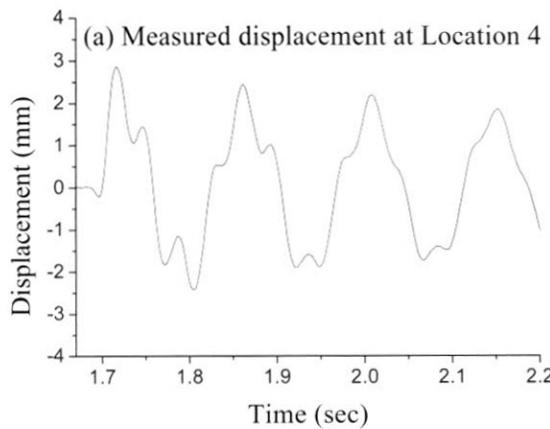


그림 12. 1/4 충격에 대한 각 응답의 시간이력

그림 15에는 각 응답으로부터 추정된 모드형상과 해석모델로부터 얻어진 모드형상이 나타나 있다. 측정된 변위 및 추정된 변위 응답을 이용해서는 2차 모드형상까지 추정하였고, FBG 센서의 변형을 응답으로는 3차 모드형상까지 추정하였다. 그림 상으로는 해석 모드형상과 추정된 모드형상의 일치정도를 정확하게 파악할 수 없기 때문에, MAC (Mode Shape Assurance Criterion)과 COMAC (Coordinate MAC)의 지수를 사용하여 일치정도를 비교하였으며, MAC과 COMAC는 식 (7) 및 (8)과 같이 정의된다.

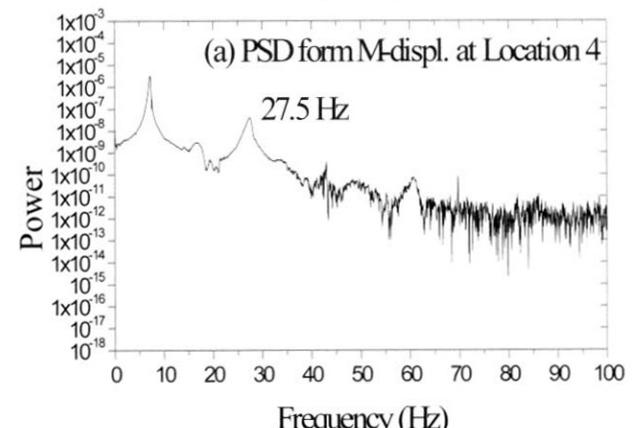
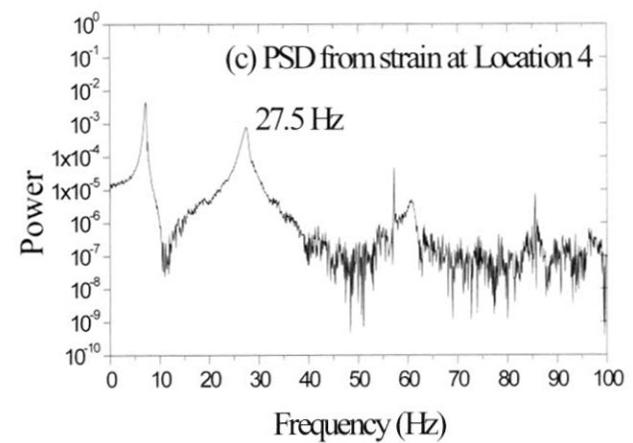
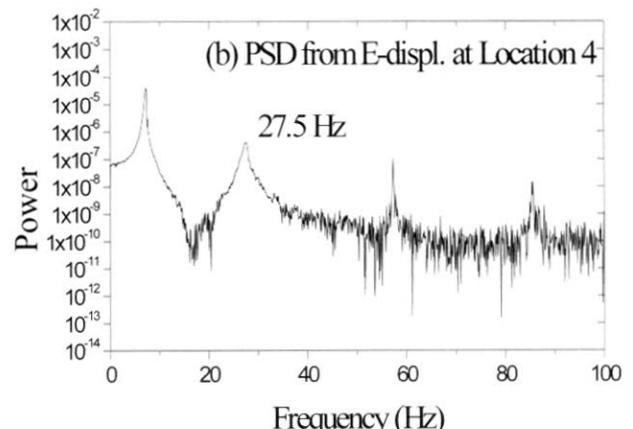


그림 13. 1/4 충격 응답 시간이력의 PSD

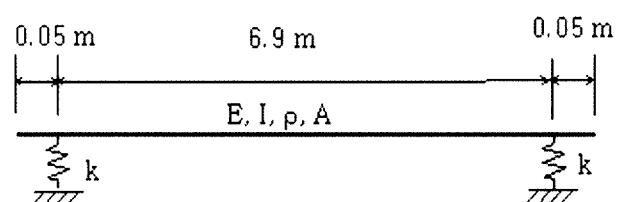


그림 14. 단순보의 해석모델

표 5. 탄성지지 해석모델의 고유진동수

		탄성지지	단순지지	측정치
Young's Modulus, E		$2.1192 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$	$2.10 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$	
Spring Constant, k		$6.4148 \times 10^5 \text{ N/m}$	-	
Density, ρ		7800 kg/m^3	7800 kg/m^3	
Cross Section, A		0.002190 m^2	0.002190 m^2	
Moment of Inertia, I		$3.380 \times 10^{-6} \text{ m}^4$	$3.380 \times 10^{-6} \text{ m}^4$	
Frequency (Hz)	1 st	7.1372 (-0.87%)	7.1592 (-0.57%)	7.20
	2 nd	27.896 (1.33%)	28.634 (4.01%)	27.53
	3 rd	60.129 (0.45%)	64.421 (6.66%)	60.40

$$MAC(A, M) = \frac{|\{\Psi_X\}^T \{\Psi_A\}|^2}{(\{\Psi_X\}^T \{\Psi_X\})(\{\Psi_A\}^T \{\Psi_A\})} \quad (7)$$

여기서, Ψ_A : 모드형상 A의 모드형상 벡터

Ψ_X : 모드형상 X의 모드형상 벡터

$$COMAC(i) = \frac{\left[\sum_{l=1}^L (\Psi_X)_{il} (\Psi_A)_{il} \right]^2}{\sum_{l=1}^L (\Psi_X)_{il}^2 \sum_{l=1}^L (\Psi_A)_{il}^2} \quad (8)$$

여기서, i : 측정위치

L : 비교되는 총 모드수

표 6 및 7에는 MAC과 COMAC의 지수가 나타나 있다. MAC의 값이 1에 가까우면 두 모드의 상관관계는 크고, 0에 가까우면 상관관계가 적다. COMAC의 지수가 1.0에 접근할 수록 선택된 두 위치의 상관관계는 증가하고, 0에 접근할 수록 감소한다.

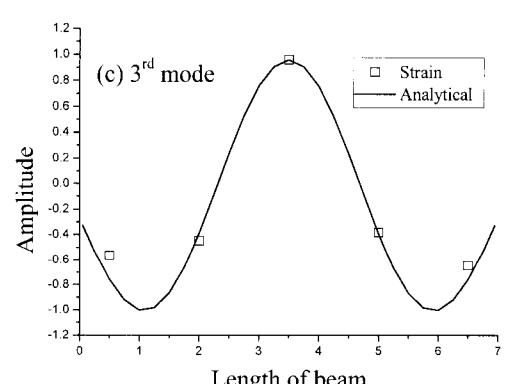
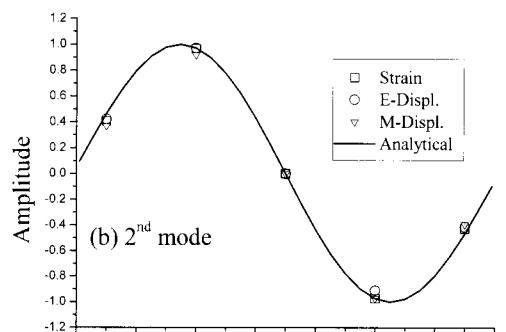
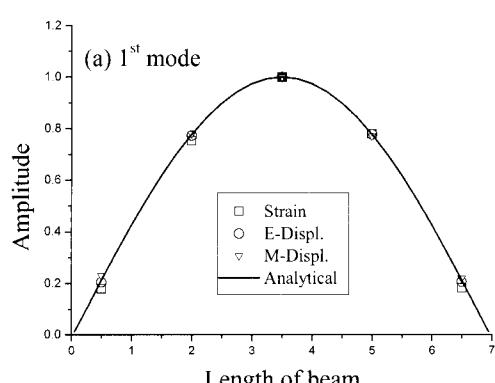


그림 15. 해석 및 추정된 모드형상

표 6.1 변형율 모드형상의 MAC

해석모드 차수	추정된 모드 차수		
	1	2	3
1	0.999	0.040	0.013
2	0.623	0.999	0.023
3	-0.007	0.029	0.984

표 6.2 추정 및 측정된 변위 모드형상의 MAC

해석모드 차수	추정된 변위 모드 차수		측정된 변위 모드 차수	
	1	2	1	2
1	1.000	-0.016	1.000	0.028
2	0.024	0.998	0.054	0.996

표 7. 각 위치의 COMAC

위치	1. 2차 모드 사용			1. 2. 3차 모드 사용
	Strain	E-Displ.	M-Displ.	Strain
1	0.9999	0.9995	0.9843	0.9943
2	0.9998	1.0000	0.9992	0.9978
3	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4	1.0000	0.9989	1.0000	0.9999
5	0.9994	0.9988	0.9929	0.9989

표 6.1에서 보면, FBG 센서의 변형율을 이용한 모드형상의 추정은 1차 및 2차 모드에서는 양호하나 3차 모드에서는 약간의 오차가 있는 것으로 나타나고 있다. 표 5.2에서는 추정된 변위 및 측정된 변위로부터 추정한 모드형상이 1차 및 2차 모드에서 모두 양호하게 나타나고 있다. 표 6의 1, 2차 모드를 사용한 COMAC은 전체적으로 양호하나, 측정변위를 이용한 모드형상 추정에서 단부인 1번과 5번 위치에서 약간 오차가 있는 것으로 나타났다. 단부에서는 변위의 크기가 작아 정확히 추정하기에 어려움이 있다고 판단된다. 변형율의 경우 3차 모드까지 사용하면 COMAC의 수치가 1, 2차 모드를 사용한 경우에 비해서 작게 나타나며, 특히 단부인 1번과 5번에서 상대적으로 크게 감소한다. 이것은 MAC에서 나타났듯이 3차 모드에서 오차가 발생하고 있으며. 또한 단부인 1번과 5번 위치에서는 변형율의 크기도 작게 발생하므로 모드형상 추정에서 오차가 크게 발생한다고 판단된다. 변형율을 사용하면 추정된 변위나 측정된 변위보다 더 많은 모드(3차모드 까지)를 추정할 수 있지만, 변형율이 작게 나타나는 위치에서는 오차가 상대적으로 크게 발생함을 알 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 FBG센서를 이용하여 단순보의 동적 변형율을 측정하고, 이를 이용하여 동적 변위를 추정하였다. 추정된

판단된다.

본 연구결과를 보면, 단순보에서 FBG센서의 변형율을 이용

동적 변위는 측정된 동적 변위와 비교하였으며, 추정된 변위 및 측정된 변위로부터 단순보의 동특성(고유진동수, 감쇠비 및 모드형상)을 추정하였고, 또한 FBG 센서의 변형율을 이용하여 동특성을 추정하고 서로 비교하였다.

FBG센서를 이용한 동적 변위의 추정은 위치에 따라 다르게 나타나지만, 중앙부에서 측정 변위와 비교하여 5.83%의 오차가 발생했다. 이러한 오차는 FBG센서와 지점과의 거리를 정확히 파악하기 어렵기 때문에 발생한다고 판단되며, 상부와 하부의 FBG센서 부착위치가 상이하여 발생할 수도 있다. 또한, 본 연구에서는 고무패드로 인하여 탄성지지 조건을 형성하는데 FBG센서 변형율에서 추정한 변위는 탄성체 변형에 의한 강체 운동(rigid body motion)은 표현할 수 없기 때문에 추가적인 오차가 발생한다고 판단된다.

본 연구에서 사용한 FBG센서 시스템은 샘플링 비율이 200 Hz로 2차(27.5 Hz) 및 3차(60.4 Hz) 모드를 정확히 표현하기에는 낮은 샘플링 비율이다. 동적 변위의 추정에서 최대값은 주로 2차 및 3차 모드의 피크값에 의해 결정되므로 낮은 샘플링 비율에 의한 정확하지 않은 피크값은 추정된 변위의 최대값에서 오차를 발생시킬 수 있다. 위에서 설명한 요인들이 복합적으로 작용하여 본 연구에서 FBG센서를 이용하여 추정한 동적 변위가 측정한 동적 변위와 오차가 발생했다고 판단된다.

고유진동수 및 감쇠비의 추정에서는 세 종류(측정변위, 추정변위 및 FBG 변형율)의 시간이력을 사용하여 추정한 값에 큰 차이가 없었다. FBG센서의 변형율은 고주파 성분의 증폭이 측정 변위보다 크게 나타나 고차모드의 고유진동수를 파악하는데 더 유리한 것으로 나타났다. 감쇠비 추정은 사용한 방법이 정확한 수치를 추정할 수 있는 기법이 아니었으나, FBG 센서 변형율이 고차모드 증폭이 양호하므로 역시 고차모드의 감쇠비를 추정하는데 유리하였다.

추정된 모드형상의 비교를 위해서 SI 기법을 사용하여 해석모델을 확정하고, 이 모델의 모드형상을 참조값으로 사용하였다. 추정된 변위 및 측정된 변위에서는 2차 모드까지의 모드형상을 추정하였고, 변형율의 경우 3차 모드까지 추정하여 MAC과 COMAC 지수를 사용하여 비교하였다. 추정 및 측정된 변위의 모드형상은 해석모델의 모드형상과 일치 정도가 양호했으며, 변형율의 모드형상도 2차 모드까지는 해석모델의 모드형상과 일치정도가 양호했다. 그러나 변형율의 3차 모드 형상은 단부에서 약간의 오차를 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 단부의 변형율의 크기가 작아 모드형상 추정이 어렵기 때문이라고

한 변위 추정은 약간의 오차를 발생시키지만, 단순보의 동특성 추정은 매우 양호한 결과를 보여주었다. 따라서 FBG 센서의

변형율 응답은 단순보와 같이 단면이 일정한 구조물의 비파괴 손상평가 (Non Destructive Evaluation, NDE)에 활용성이 매우 높다고 판단된다. FBG센서를 이용한 동적 변위추정은 특히, 차량 등 동적 하중에 의한 교량의 동적 변위를 파악할 수 있다는 점에서 활용성이 매우 크다고 판단된다. 그러나 기존의 연구에서도 정적 변위 추정에서 4%의 오차가 발생하였고, 본 연구에서 수행한 동적 변위 추정에서는 5.83%의 오차가 발생하였다. SHM의 계측기로 FBG센서를 활용하기 위해서는 변위 추정오차를 줄이는 기법에 대한 추후의 연구가 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 정원석, 강동훈, 최은수, 김현민. (2005). “광섬유 격자센서를 이용한 철도 판형교의 증속 실험,” 한국강구조학회 논문집, 17권 6호.
- Clough, R. W. and Penzien, J. (1993). Dynamics of Structural, the second edition, MaGraw-Hill.
- Hayano, H. and Mita, A. (2005). Structural Health Monitoring System Using FBG Sensor for Simulating Detection of Acceleration and Strain, Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil Mechanical, and Aerospace Systems, edited by Masayoshi Tomizuka, Proc. of SPIE Vol. 5765, pp. 624-633.
- Meltz, G., Morey, W.W. and Glenn, W.H. (1989).

Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method, *Optics Letters*, Vol. 14, No. 15, pp. 823-825, 1989.

Hill, K.O., Malo, B. and Bilodeau, F., et al. (1993). Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask, *Applied Physics Letters*, Vol. 62, No. 10, pp. 1035-1037, 1993.

Leng, J.S., Barnes, R.A., Hameed, A., Winter, D., Tetlow, J., Mays, G.C., and Fernando, G.F. (2005). Fibre Optic Sensor Protection System and its practical for structural integrity monitoring of concrete structures, Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil Mechanical, and Aerospace Systems, edited by Masayoshi Tomizuka, Proc. of SPIE Vol. 5765, pp. 528-539.

Gandhi, M.V. and Thompson, B.S. (1992). Smart Materials and Structures, Chapman & Hall, London.

Stubbs, N., Park, S., Sikorsky, C., and Choi, S. (2000). A global nod-destructive damage assessment methodology for civil engineering structures, *International Journal of System Science*, Vol. 31, No. 11, pp. 1361-1373.

(접수일자 : 2006. 1. 6 / 심사일 2006. 2. 3 /
심사완료일 2006. 7. 27)