

변형률 센서를 이용한 구조물의 동적 모니터링

Dynamic monitoring of structures using strain sensors

최성훈† 은종필* 강동훈**
Choi, Sunghoon Eun, Jong-Pil Kang, Donghoon

ABSTRACT

Measurement of dynamic characteristics are widely used to detect defects in mechanical or civil structures. The most common approach is to measure changes in frequency spectrum or mode shapes using accelerometers. An alternative to using mode shapes is using strain modes. Strain is more sensitive to local defects than displacement, and hence strain modes measurement is an efficient in structural health monitoring. This paper deals with dynamic monitoring of a beam structure using strain sensors. Resistive strain gages and FBG strain gages are used and their characteristics are compared. It has been known that resistive strain gages are weak to EMI environment and suffers from noise at high frequency range. It has been shown that the FBG sensor is a good alternative that overcomes such difficulties.

1. 서 론

많은 기계나 토목구조물에서 거동을 모니터링하고 손상을 감지하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 모니터링 방법으로는 육안검사를 포함하여 음향파(탄성과 또는 초음파)나 에디커런트, 전자기장, 또는 방산선 사진 등을 이용한 비파괴 검사 등이 활용되고 있다. 이러한 방법으로 손상의 위치를 찾아내는 방법은 재료의 특성에 대한 정확한 이해가 필요하고 미세 균열 등은 감지하기 힘들며 특히 대형 구조물에서는 적용이 쉽지 않다. 이렇게 국부적인 결함을 직접 탐지하는 방법과 함께 구조물의 동적 특성 변화를 측정하는 간접적인 방법도 널리 활용되고 있다. 즉, 구조물의 동적거동 변화를 관찰하여 손상을 검출하는 것이다. 구조물의 동적거동 모니터링에 가장 많이 사용되는 방법은 주파수 특성의 변화 또는 모드형상의 변화를 감지하는 방법으로 가속도 센서를 주로 이용하고 있다. 이 방법은 교량 등의 대형 구조물에서 고유진동수, 모드 형상, 감쇄계수 등의 진동 특성값을 모니터링 하면서 구조 손상을 비파괴적으로 검출하기 위해 사용되어 왔다. 모드 형상을 측정하는 방법 대신 구조물의 변형률을 측정하는 방법도 사용되는데 이로부터 구조물에 가해지는 응력 변화를 구하여 상태를 감시하는 것이다. 변형률로부터는 정적인 응력뿐만 아니라 동적인 특성인 변형률 모드를 구할 수 있는데, 변형률 모드 변위 모드에 비해 국부적인 결함에 민감하기 때문에 손상 감지에 유리한 점이 있다 [1, 2]. 변형률 모드 시험은 시스템의 취약점을 찾아내는 것뿐만 아니라 변형률과 응력을 구함으로써 피로수명을 예측

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 차세대고속철도사업단, 선임연구원
E-mail : schoi@krti.re.kr
TEL : (031)460-5209 FAX : (031)460-5649
* (정)비회원, 한국철도기술연구원, 차세대고속철도사업단, 연구원
** 정희원, 한국철도기술연구원, 철도산업지원실, 선임연구원

하는데 활용될 수 있다. 변형률 센서는 가속도 센서보다 저렴하기 때문에 적용에 유리하지만 외부 환경에 민감하고 노이즈가 많은 단점도 있다.

현재 철도기술연구원에서는 차세대고속철도기술개발사업을 통해 400km/h급 분산형고속열차 개발을 추하고 있으며, 이 고속열차를 시험운행 하면서 성능을 평가하기 위한 안전모니터링 시스템 구축을 위한 연구를 수행하고 있다. 지금까지는 가속도 센서를 위주로 하여 차량의 동적 안전성에 중점을 두고 모니터링을 해 왔으나, 본 연구에서는 차량이 고속화되면서 차체나 대차의 용접부위 등 취약부위에서 발생할 수 있는 손상을 검지하기 위한 기초 연구를 다루고 있다. 대차 및 차체에 변형률 센서를 적용하여 손상을 검지하고 및 피로수명을 예측하기 위한 시스템 개발을 준비하고 있는데, 본 논문에서는 이를 위한 준비 단계로 간단한 빔 구조물의 동적 거동을 모니터링 하는데 있어서 변형률 센서를 적용할 때의 특성과 문제점에 대해서 다루었다. 변형률 센서를 적용하여 구조물의 주파수 특성을 측정하여 이를 가속도를 이용한 시험 결과와 비교하였다. 일반적인 전기저항식 센서와 함께 FBG 변형률 센서도 사용하여 결과를 비교하였다. FBG 센서는 광섬유 코어에 격자를 만들고 여기서 반사되는 레이저 파장을 측정하여 물리량을 구하는 센서이다. 격자에서 반사되는 브래그(Bragg) 파장은 유효 굴절율과 격자 간격에 의하여 결정되며 온도나 변형 등에 의해 파장이 변화하는 원리를 이용한다 [3]. 전기저항식 센서의 경우에는 EMI 등 환경에 의한 영향뿐만 아니라 고주파 영역에서 잡음이 많기 때문에 적용에 제약이 있었고, FBG 변형률 센서를 적용함으로써 이러한 문제점을 해결할 수 있음을 확인하였다.

2. 변형률 주파수함수

시스템의 k 위치에 가해진 가진력과 j 위치의 변위사이의 관계는 다음과 같은 변위 주파수응답 함수(Displacement Frequency Response Function: DFRF)로 나타낼 수 있다.

$$H_{jk}(\omega) = \sum_r \frac{\Phi_{r,j} \Phi_{r,k}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i 2\eta_r \omega_r \omega} \quad (1)$$

이 식에서 ω_r 과 η_r 은 각각 r 번째 모드의 고유진동수와 감쇠비율, Φ_r 은 정규화된 변위모드(displacement mode)로 아랫첨자 j 및 k 는 각각 해당위치에서의 성분을 나타낸다. 마찬가지로 변형률 주파수응답 함수(Strain Frequency Response Function: SFRF)는 가진력과 변형률 사이의 관계를 나타내는데 변형률 모드(strain mode) Ψ_r 를 이용하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다 [4].

$$S_{jk}(\omega) = \sum_r \frac{\Psi_{r,j} \Phi_{r,k}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i 2\eta_r \omega_r \omega} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 비교하면 DFRF와 SFRF는 동일한 형태를 가지며 모드상수인 분자항만 다르다는 것을 알 수 있다. 하지만 SFRF는 DFRF와는 달리 대칭이 아니기 때문에 가진점과 응답점에 대한 상반원리(reciprocity theorem)가 적용되지 않는다.

3. 외팔보에 대한 시험

3.1 시험 개요

변형률 센서를 이용한 주파수 응답 비교를 위해 외팔보에 대하여 끝단에서 110mm 떨어진 지점에 가속도센서와 변형률센서를 부착한 후 충격 가진 시험을 실시하였다. 변형률 센서는 외팔보의 길이 방향의 변형률을 측정할 수 있도록 부착하였다. 외팔보에 사용된 빔의 재질 및 형상은 표 1과 같다. 이론적인 고유진동수와 비교를 위해 가장 많이 쓰이고 있는 가속도 센서를 SmartOffice 프로그램과 NI-9233을 이용하여 주파수 응답함수를 구하였다.

표1. SUS304의 재질 및 형상

Density (ρ)	8000 kg/m ³
Young's modulus (E)	193 GPa
Size	220×15.1×1.9mm

변형률센서는 일반적인 전기저항식 변형률센서와 FBG 변형률센서를 각각 빔의 앞면과 뒷면에 부착하여 주파수 특성을 구하였다. 전기저항식 변형률 센서는 NI SCXI-1000 새시와 SCXI-1314/SCXI-1520을 이용하여 시험하였으며 FBG 변형률센서는 전용데이터 처리기인 Micro Optics사의 sm130과 Enlight프로그램을 이용하여 데이터를 획득하였다.

3.2 주파수 응답신호 특성

가속도센서로 5회 측정된 데이터를 산술평균하여 그림 2와 같이 좋은 응답특성을 나타 낼 수 있었으며 그림 3과 같이 PSD함수를 구하여 주파수 영역에서의 극대점을 보이는 고유주파수를 구할 수 있었다. 전기저항식 변형률센서와 FBG 변형률센서 시험에서도 PSD 함수를 구하여 고유주파수를 구하였다.

외팔보의 이론적인 고유주파수와 충격 가진 시험으로 측정된 고유주파수를 표 2에 비교하였다. 외팔보의 길이방향 변형률은 굽힘 방향 변위의 2차 미분 형태로 나타내지기 때문에 주파수 특성은 이론적으로 동일하며 표 2의 결과에서 이를 확인할 수 있다. 전기저항식 변형률 센서의 경우 그림 4와 같이 1차 모드는 잘 나타났으나 200Hz 근처에서 2차 모드 신호가 약하게 나오며 3차 모드부터는 고유노이즈의 영향으로 인해 측정을 할 수 없었다. 반면에 FBG변형률센서의 경우 그림 5와 같이 1차 모드와 2차 모드의 극대점이 뚜렷이 나타났다. FBG 변형률 센서의 신호를 측정하는 interrogator는 최대 1kHz 까지 데이터를 취득할 수 있기 때문에 FFT를 통해 구할수 있는 유효 주파수는 500Hz 까지이다.

그림 6과 같이 전기저항식 변형률센서의 고유노이즈는 $\pm 5\mu\epsilon$ 수준이며, FBG 변형률센서의 경우 그림 7과 같이 $\pm 0.0004\mu\epsilon$ 으로 신호대 잡음비가 전기저항식 변형률센서에 비해 높았으며 그림 8과 같이 신호의 감쇠특성에서도 가속도센서 보다는 좋지 않지만 전기저항식 변형률센서에 비해 좋은 특성을 나타내었다.

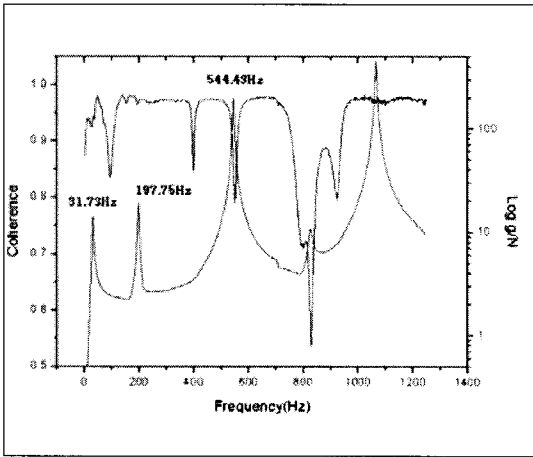


그림2. 평균 FRF/Coherence(가속도센서)

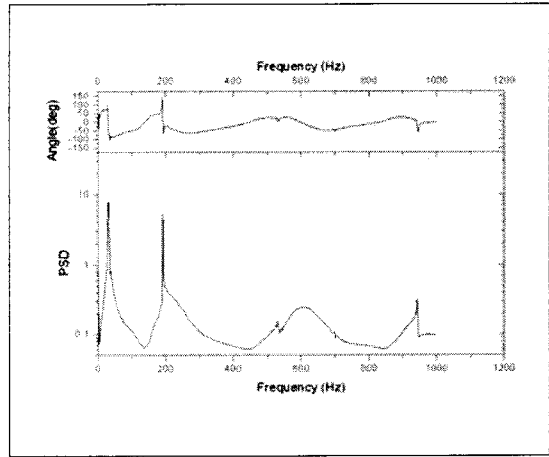


그림3. PSD(가속도센서)

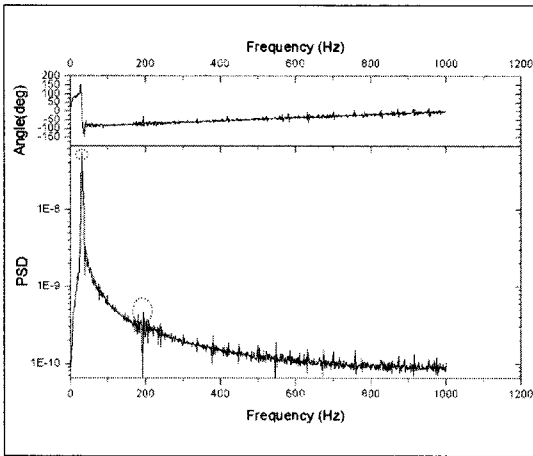


그림4. PSD(일반 변형률센서)

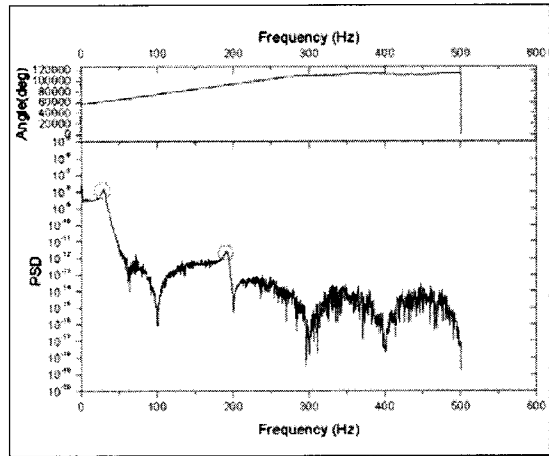


그림5. PSD(FBG 변형률센서)

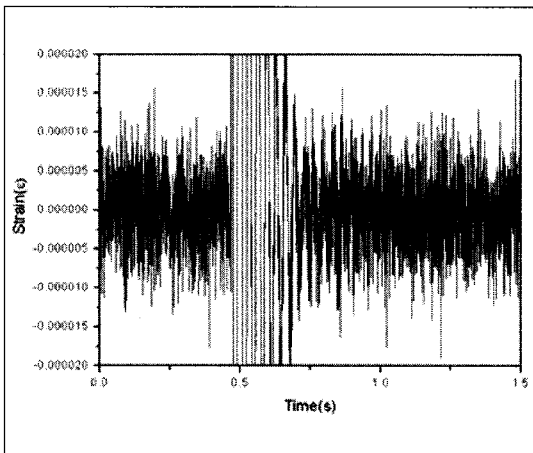


그림6. 고유노이즈(일반 변형률 센서)

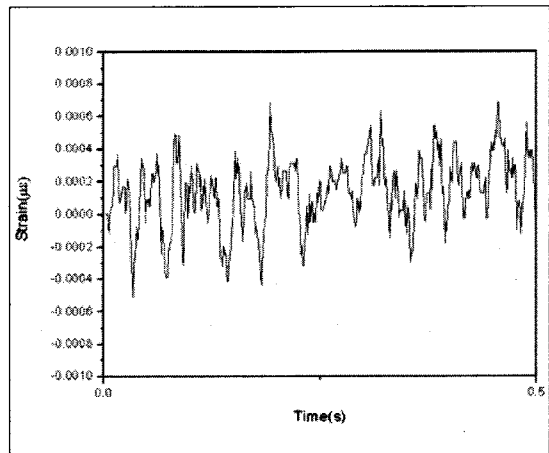


그림7. 고유노이즈(FBG 변형률 센서)

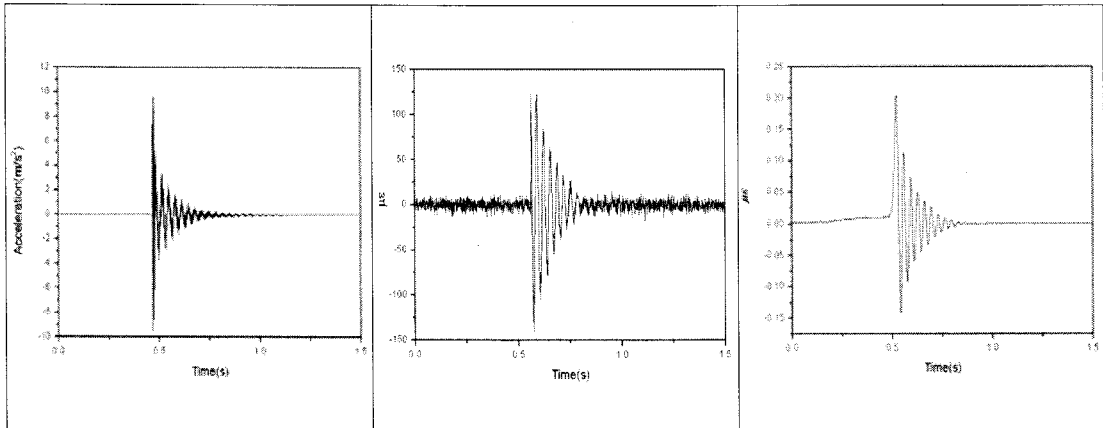


그림8. 가속도/일반 변형률/FBG 시간 이력

표2. 측정 고유진동수 비교

모드	f_i (이론값)	f_i (가속도센서)	f_i (전기저항식 변형률센서)	f_i (FBG 변형률센서)
1차 모드	31.14 Hz	31.73 Hz	31.00 Hz	28.8 Hz
2차 모드	195.19 Hz	197.75 Hz	193.35 Hz	191.4 Hz
3차 모드	546.59 Hz	544.43 Hz	×	×

4. 결론 및 향후 계획

본 연구의 최종 목적은 철도차량의 차체 또는 대차 구조물에서 변형률 센서를 적용한 동적 특성 모니터링 방안을 연구하는 것이다. 변형률 센서는 구조물의 국부적인 결함 탐상에 있어 가속도 센서에 비해 좋은 민감도를 가지고 있다. 이를 위해 간단한 외팔보에 대하여 가속도센서와 전기저항식 변형률 센서, 그리고 FBG 변형률센서를 이용하여 주파수 특성을 비교해 보았다. 시험 결과 변형률 센서는 저주파 대역에서 가속도 센서와 동일한 주파수 특성을 보여준다는 것을 확인하였다. 전기저항식 변형률 센서의 경우에는 노이즈의 영향 때문에 200Hz 이상의 주파수 대역에서는 좋은 응답 특성을 얻을 수 없다는 것을 확인할 수 있었다. 반면 FBG 변형률 센서는 전기저항식 센서에서 가지고 있는 노이즈가 거의 없음을 확인하였다. 다만 현재 보유하고 있는 FBG 장비의 샘플링 레이트가 1kHz 이기 때문에 500Hz 이상의 주파수는 확인할 수 없었다.

FBG 센서는 multiplexing 특성 때문에 다수의 센서를 이용한 계측에 장점이 있다. 철도 차량의 구조물에 전체적인 동적 특성을 측정할 수 있도록 센서를 장착하면 별도의 충격 시험이 없이 운행 중의 데이터를 측정할 수 있고, 동적 특성의 변화를 감지하여 결함 유무를 판단할 수 있다. 이를 위해 먼저 가속도 센서와 변형률 센서를 이용한 변위 모드와 변형률 모드를 측정 비교하고 상시 계측시에 구조물의 동적 특성을 모니터링 할 수 있는 방안에 대하여 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다

참고문헌

1. L. H. Yam, T. P. Leung, D. B. Li, and K. Z. Xue (1996), "Theoretical and experimental study of modal strain analysis," J. of Sound and Vibration, Vol. 191, No. 2, pp 251~260.
2. 주영삼, 이건명 (1999), "변형률 모드시험의 특성 및 미측정 주파수응답함수의 예측", 생산기술연구소 논문집, pp.379-389
3. 박기태, 이규완, 박홍석 (2002), "광섬유센서를 이용한 변형률모드 시험법과 강부재의 손상탐지에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, pp.1381-1390
4. D. G. Fertis (1995), Mechanical and Structural Vibrations, John Wiley & Sons. Inc.