

모드분해기법을 이용한 변위응답추정 알고리즘의 실교량 적용

Applications of Displacement Response Estimation Algorithm Using Mode Decomposition Technique to Existing Bridges

장성진* · 김남식**

Chang, Sung-Jin · Kim, Nam-Sik

Abstract

Generally, estimations on the displacement as an important factor in evaluating the safety of large structures could be a barometer assessing whether the condition of the structure is deteriorating. Practically, it is not easy how to measure the displacement response to large structures like suspension bridges. In this study, as a method for estimation displacement response from strain signals, mode decomposition technique is proposed. Total displacement response is estimated by superposing quasi-static displacement response and modal displacement responses in dominant modes with larger contributions after estimating the modal displacement responses. If foiled strain gauges are used to measure strain signals, there would likely to generate electric noise, what's more, the more measuring points there are the more economic burden it could be. In order to solve such problems, fiber optic bragg-grating(FBG) sensors were used, which have multi-point measurements with no effect on electric noises. Therefore, the experiment was performed through dynamic load test of suspension bridge and plate-girder bridge to review the possibility for using mode decomposition technique.

Keywords : mode decomposition technique, fiber optic bragg-grating(fbg), displacement response estimation, application of existing bridges

요 지

일반적으로 대형구조물의 건전성평가에 있어 중요한 인자인 변위를 추정함으로써 구조물의 성능 저하 및 노후도를 판단하는 근거가 된다. 그러나 변위응답의 계측이 중요함에도 불구하고 계측 방법의 부재로 말미암아 현수교와 같은 대형구조물의 변위응답을 측정하는 방법이 용이치 않은 것이 현실이다. 본 논문에서는 변형률신호로부터 변위응답을 추정하는 방법인 모드분해기법을 제시하였다. 모드분해기법은 등가정적 변위응답과 구조물의 주요거동을 나타내는 저차모드의 변위응답을 합하여 최종변위응답을 추정하는 방법이다. 변형률신호의 계측시 전기저항식 변형률센서를 사용할 경우 전기적 노이즈 문제가 발생할 소지가 크며, 측점이 많아질수록 경제적 부담감이 커진다. 이런 문제점을 극복하기 위하여 전기적 노이즈의 영향이 없고 다중측정이 가능한 광섬유 브래그 격자 센서를 사용하였다. 현수교와 플레이트거더교의 동재하실험을 통하여 모드분해기법의 사용성을 검토하였다.

핵심용어 : 모드분해기법, 광섬유 브래그 격자센서, 변위응답 추정, 실교량 적용

1. 서 론

일반적으로 구조물의 전체적인 거동을 나타내는 변위응답의 이력은 구조물의 건전성 평가에 있어서 중요한 자료이며, 구조물의 성능 저하 및 노후도를 판단하는 근거가 된다. 이렇게 변위응답이 중요함에도 불구하고 계측 또는 추정방법의 부재로 말미암아 공용중인 교량에 대한 변위응답을 측정하는 방법이 용이치 않은 것이 현실이다. 실내모형실험의 경우 변위센서(레이저변위계, LVDT등)를 이용하여 비교적 정확한 변위응답의 계측이 가능하다. 그러나 실교량의 변위응

답을 계측하기 위하여 접촉식 변위계를 사용할 경우 센서나 부가물의 설치가 용이하지 않으며, 광학식변위계는 기상조건에 따라 계측응답의 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 또한 측량을 이용하여 변위를 계측할 경우는 측량자의 숙련도에 따라 계측결과가 좌우되며 일관성을 유지하기 힘들다. 이렇게 변위응답을 직접 계측하는 것은 신뢰성이 떨어지므로 간접적인 방법을 이용하여 변위응답을 추정하는 연구가 활발히 진행 중이다.

간접적으로 변위응답을 추정하는 연구로는 디지털 카메라를 활용한 image processing technique을 사용하여 변위응

*부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (E-mail : jinimax@pusan.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 부교수 (E-mail : nskim@pusan.ac.kr)

답을 예측하는 연구(J.J. Lee 등, 2006)와 가속도신호로부터 정규화 기법을 이용하여 변위응답을 추정하는 연구(홍운화 등, 2006)가 수행되었으며, 구조물의 진동특성과 변형률의 관계를 이용하여 변위를 추정하는 연구(신수봉 등, 2008) 또한 진행되었다. 그리고 광섬유센서(FBG sensor : Fiber optic Bragg-grating sensor)를 이용하여 현수교의 정적 처짐형상을 추정하는 연구(조남소 등, 2008)가 진행된 바 있다. 또한 정적하중에 대한 보의 처짐을 추정하는 연구(Kim, N.S. 등, 2004)와 동적하중에 대한 보의 처짐을 추정하는 연구(최은수 등, 2006)가 수행되었다. 본 논문에서는 기존에 제시되었던 변형률신호로부터 변위응답을 추정하는 방법인 모드분해기법(장성진 등, 2008)을 공용중인 교량에 적용함으로써 모드분해기법의 사용성을 검증하였다.

변형률신호의 계측시 전기저항식 변형률센서를 이용할 경우 계측 위치가 많아질수록 비경제적이며, 계측 케이블이 길어짐에 따라 전기적 노이즈가 크게 발생한다는 단점이 있다. 이런 문제점을 보완하기 위하여 다중측정이 가능하여 계측 케이블을 간소화 할 수 있고 빛을 매개체로 하기 때문에 전기적 노이즈의 영향이 없으며 소형·경량이므로 설치가 간편한 FBG센서를 사용하였다.

변형률신호로부터 변위응답을 추정할 경우 기존에는 구조물의 정적인 변위는 추정이 가능하였으나 동적인 변위응답의 추정은 많은 위치의 계측 변형률 신호를 필요로 하며, 고차모드의 응답으로 인하여 추정변위응답이 부정확하였다. 따라서 본 논문에서는 보다 신뢰성있는 변위응답을 추정하기 위하여 등가정적 변위응답과 구조물의 주요거동을 나타내는 저차모드의 변위응답을 추정하고 추정한 변위응답을 중첩하여 최종변위응답을 예측하는 모드분해기법을 사용하였다.

모드분해기법은 기존에 제시되었던 EMD(empirical mode decomposition)(N.E. Huang 등, 1998), POD(proper orthogonal decomposition)(G. Berkooz 등, 1993) 그리고 변형률신호로부터 변위응답추정 기법(Kim, N.S. 등, 2004)을 적절히 적용한 방법이다. 공용중인 교량의 처짐은 저차모드에 의한 처

짐과 등가정적 처짐이 지배적이기 때문에 모드분해기법을 이용한다면 보다 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 FBG센서를 사용하여 변형률신호를 계측하고 모드분해기법을 이용하여 공용중인 교량의 변위응답을 추정하였다.

2. 모드분해기법

모드분해기법(장성진 등, 2008)은 추정된 모드형상과 분해한 변형률신호를 이용하여 변위응답을 추정하는 방법이므로 POD기법을 사용하여 변형률신호로부터 모드형상을 추정하고 EMD를 이용하여 모드별 변형률신호를 분해한다. 변위응답과 변형률신호의 기하학적인 관계로부터 등가정적 변위응답과 모드별 변위응답을 추정하고, 등가정적변위응답과 기여도가 큰 주요 고유진동수의 변위응답을 중첩하여 최종변위응답을 추정하게 된다. 그림 1은 계측변형률신호로부터 변위응답추정 알고리즘이다.

2.1 EMD(Empirical Mode Decomposition)

본 논문에서는 변형률신호를 모드별 변형률신호로 분해하기 위하여 동적 데이터를 고주파수 성분부터 저주파수 성분까지 순차적으로 분해하는 방법인 EMD(N.E. Huang 등, 1998)를 사용하였다.

$$\varepsilon(x, t) = \sum \varepsilon_i(x, t) + r_n(x, t) \quad (1)$$

변형률신호를 EMD를 이용하여 모드분해하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $\varepsilon(x, t)$ 는 계측위치 x 와 시간 t 에 대한 계측변형률신호이며, $\varepsilon_i(x, t)$ 는 분해한 신호의 i 번째 IMF(intrinsic mode function)이고 $r_n(x, t)$ 은 IMF를 제거한 잔류 변형률신호를 나타낸다.

2.2 POD(Proper Orthogonal Decomposition)

모드분해기법은 구조물의 모드형상으로부터 곡률의 방향이

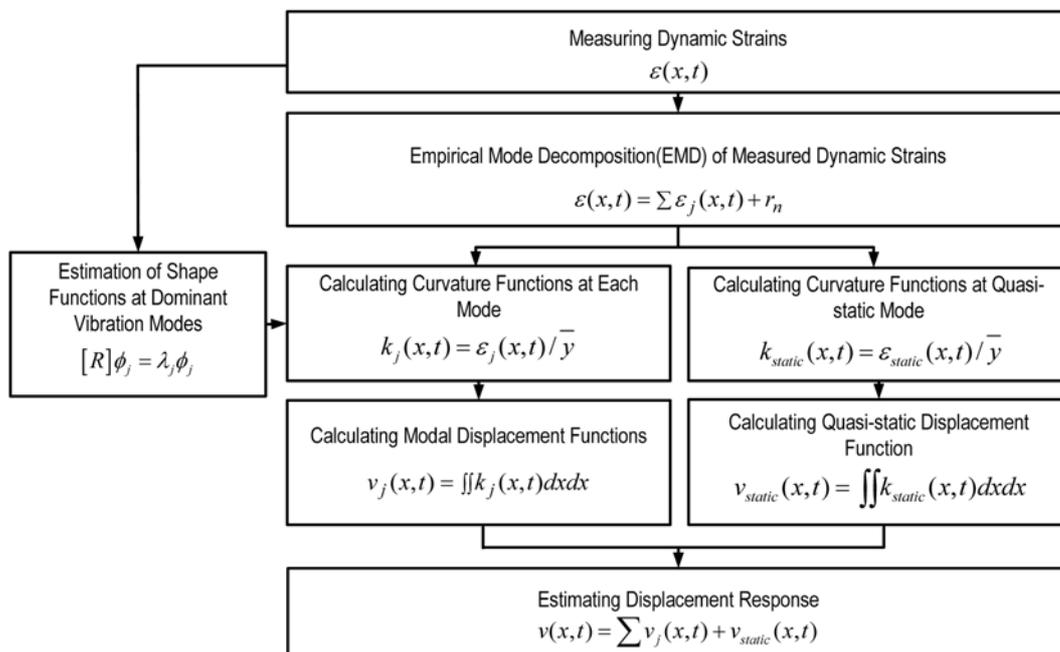


그림 1. 계측변형률신호로부터 변위응답추정 알고리즘

바뀌는 변곡점을 기준으로 구간을 나누어 변위응답을 추정함으로써 모드형상의 추정이 중요한 요소이다. 실내실험의 경우 충격실험을 통하여 구조물의 모드형상을 추정할 수 있으나 공용중인 교량의 경우 충격실험을 통하여 모드형상을 추정하기 용이치 않으므로 본 연구에서는 계측신호로부터 모드형상을 추정하는 방법인 POD기법(G. Berkooz 등, 1993)을 사용하였다.

$$[R]\{\phi\}_i = \frac{1}{N}[X]^T[X]\{\phi\}_i = \lambda_i\{\phi\}_i \quad (2)$$

식 (2)는 POD기법으로 모드형상을 추정하기 위하여 사용하였다. 여기서 $[R]$ 은 계측응답($[X]$)의 상관함수(correlation matrix)이며, λ_i 는 고유치이고 $\{\phi\}_i$ 는 i 번째 모드형상이다.

2.3 MAC(Modal Assurance Criteria)

POD기법으로 추정한 모드형상의 직교성을 판단하는 방법으로 MAC을 사용하였다. MAC은 식 (3)과 같이 정의되며, 구조물의 질량과 강성을 모르더라도 정규화 된 두 벡터 간의 상관관계를 평가할 수 있다. 여기서 x_i 는 i 번째 기준모드형상을 의미하며, ϕ_j 는 j 번째 비교모드형상을 의미한다. MAC으로 얻어진 값이 0에 가까우면 두 벡터간의 낮은 상관관계를, 1에 가까우면 높은 상관관계를 가짐을 의미한다.

$$MAC_{ij} = \frac{[\{x_i\}^T\{\phi_j\}]^2}{[\{x_i\}^T\{x_i\}][\{\phi_j\}^T\{\phi_j\}]} \quad (3)$$

2.4 변형률신호를 이용한 변위응답 추정기법

본 논문에서는 변위응답을 추정하기 위하여 변형률과 변위의 기하학적인 관계를 이용하였다. 변형률신호($\varepsilon(x, t)$)와 곡률함수($k(x, t)$) 그리고 변위응답($v(x, t)$)의 관계를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 \bar{y} 는 보 단면의 중립축으로부터 연단거리이고, x 는 지점에서 센서부착위치까지의 거리이며, t 는 시간이력이다(Kim, N.S. 등, 2004).

$$-y \frac{\varepsilon(x, t)}{\bar{y}} = k(x, t) = \frac{d^2 v(x, t)}{dx^2} \quad (4)$$

모드분해기법은 모드형상에서 곡률의 방향이 바뀌는 변곡점을 기준으로 나누고, 분해한 부분의 변형률신호를 일차식으로 가정한다면 식 (4)의 관계로부터 식 (5)와 같은 변위응답을 추정할 수 있게 된다.

$$v_{ji}(x, t) = -\frac{Ax^3}{6y} - \frac{Bx^2}{2y} + A_1x + A_2 \quad (5)$$

상수 A 와 B 는 변형률신호의 일차식으로부터 추정이 가능하고 경계조건 $v(0, t)=0$, $\dot{v}(0, t)=0$ 이므로 $A_1=0$, $A_2=0$ 이다. 그러므로 식 (5)로부터 식 (6)을 도출할 수 있다. 여기서 j 는 POD기법으로 추정한 모드형상의 번호이고, i 는 곡률의 방향이 전환되는 변곡점을 기준으로 나누었을 때 변형률신호를 회귀분석한 일차식의 번호이다.

$$v_{ji}(x, t) = -\frac{Ax^3}{6y} \quad (6)$$

2.5 이동하중에 의한 등가정적 처짐형상 추정기법

공용중인 교량의 처짐에 가장 많은 비중을 차지하는 것이

차량하중이므로 교량의 변위응답 추정 시 차량하중에 의한 처짐을 배제할 수 없는 것이 현실이다. 또한 교량의 고유진동수 보다 높은 주기로 차량이 이동하므로 변형률신호의 계측 시 고유진동수 보다 낮은 주파수의 응답을 계측할 수 있게 된다. 본 논문에서는 차량에 의한 변위응답을 추정하기 위하여 고유진동수보다 낮은 주파수를 가지는 응답을 등가정적 처짐 응답이라고 가정하였다.

모드별 변위응답 추정 시 변형률신호를 일차식으로 가정하여 모드별 변위응답을 추정한다. 그러나 차량에 의한 등가정적 처짐은 모드형상의 형태로 나타나는 것이 아니므로 일차식으로 가정하는 것은 부적절하다. 그러므로 식 (7)과 같은 다항식의 형태로 가정하여 변위응답을 추정하는 방법을 사용하였다.

$$\varepsilon_{static}(x, t) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_{n-1}x^{n-1} \quad (7)$$

n 개의 계측점에서 변형률신호를 계측할 경우 식 (7)과 같이 $n-1$ 차 다항식으로 가정하여 변위응답을 추정하는 기법(최은수 등, 2006)을 사용하였다. 여기서 $\varepsilon_{static}(x, t)$ 는 1차 모드보다 낮은 주파수 부분의 변형률신호이다. 식 (7)을 식 (4)와 같이 두 번 적분하면 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$v_{static}(x, t) = \iint \varepsilon_{static}(x, t) dx dx = \frac{c_{n-1}x^{n+1}}{n \times (n+1)} + \dots + \frac{c_2x^4}{3 \times 4} + \frac{c_1x^3}{2 \times 3} + \frac{c_0x^2}{1 \times 2} + A_1x + A_2 \quad (8)$$

$c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n-1}$ 은 센서의 개수가 n 개이므로 계산이 가능하며, 경계조건은 $v_{static}(0, t) = 0$ 이며, 교량길이가 L 인 경우 $v_1(L/2, t) = v_2(L/2, t)$ 이므로 A_1 과 A_2 를 구할 수 있다. 여기서 $v_1(x_1, t)$ 은 1번 지점으로부터 x_1 까지 떨어진 위치의 추정 변위응답이고, $v_2(x_2, t)$ 은 2번 지점으로부터 x_2 까지 떨어진 위치의 추정 변위응답이다.

3. 현장실험을 통한 알고리즘 검증

3.1 플레이트거더교의 변위응답 추정

3.1.1 대상교량(삼승교)

본 논문에서는 모드분해기법을 이용한 변위응답의 추정 가능성을 알아보기 위하여 그림 2의 플레이트거더교(삼승교)를 대상교량으로 하여 동적재하실험을 실시하였다. 삼승교는 중부내륙고속도로에 위치한 교량으로서 제원은 표 1과 같다.



그림 2. 삼승교

표 1. 삼승교 주요 제원

Structure type	Span	Design load	Design speed
Plate girder bridge	40 m	DB24	110 km/h

표 2. 삼승교 동적재하실험 Load Case

Load case	Travel velocity	Average velocity	Vehicle sizing
LC1	5 km/h	6.5 km/h	1
LC2	5 km/h	6.5 km/h	2-parallel
LC3	80 km/h	69 km/h	1
LC4	80 km/h	69 km/h	2-parallel
LC5	80 km/h	69 km/h	2

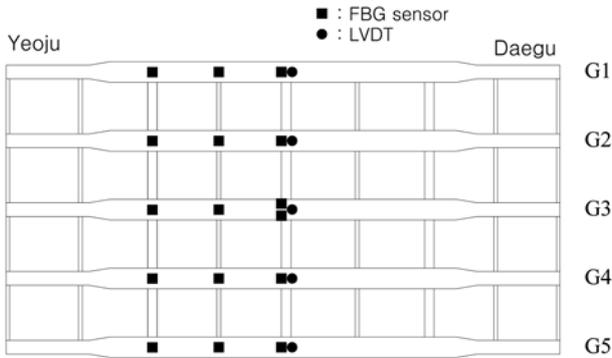


그림 3. 삼승교의 센서부착 위치

3.1.2 동적재하실험

공용중인 교량의 동적재하실험을 통하여 모드분해기법의 사용성을 검증하였다. 표 2는 동적재하실험의 Load case이며, 실험에 사용한 차량의 무게는 39.89 ton과 13.75 ton이다. 1대의 차량하중재하시의 차량속도는 5 km/h와 80 km/h로 하였고 2대의 평행하게 주행 할 경우 차량속도를 5 km/h, 80 km/h로 하였으며 2대의 차량이 연행일 경우는 80 km/h로 주행하였다. 그러나 계측신호로부터 속도를 추정한 결과 LC1-2는 6.5 km/h이고 LC3-5는 69 km/h였다. 센서의 부착위치와 개수는 그림 3에서 확인할 수 있듯이 FBG센서는 지점으로부터 L/4, 3L/8, L/2 떨어진 위치에 설치하였으며, LVDT는 L/2지점에 설치하였다. 그림 4와 같은 FBG센서를 설치하였으며, 브래그격자 각각의 중심파장은 1515.990, 1525.960, 1536.250, 1546.050, 1556.160, 1566.034, 1576.194, 1586.056 nm으로 브래그격자 간격은 10 nm이다. 또한 파장

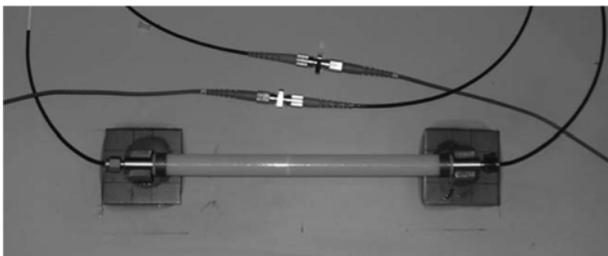
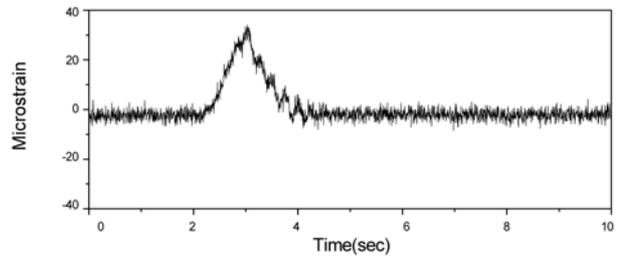


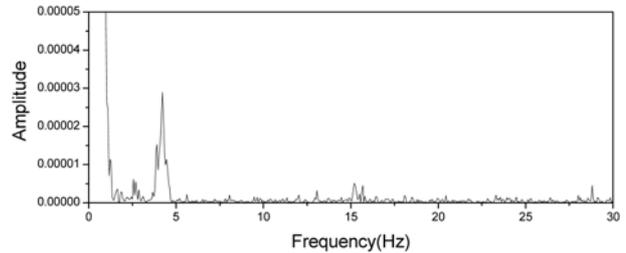
그림 4. FBG센서

표 3. 삼승교의 추정 동특성(고유진동수, 모드형상)

	Frequency(Hz)	Mode shape
1 st mode	4.23	
2 nd mode	15.20	



(a) 시간이력



(b) PSD 함수

그림 5. FBG센서로 계측한 변형률신호

을 간격을 주어 서로의 파장이 겹치지 않게 하기 위하여 2 채널 16개소에 설치하였으며, 사용한 로거의 해상도는 0.05 pm(=0.04 με)이다.

3.1.3 삼승교의 동특성 추정

계측된 변형률신호로부터 구조물의 동특성(고유진동수, 모드형상)을 추정하였다. 그림 5는 LC4의 이동하중 적용 시 G3 거더의 3L/8지점에서 FBG센서로 계측한 변형률신호와 PSD함수(power spectral density function)이다. 고유진동수는 그림 5(b)와 같이 PSD함수를 통하여 예측하고 POD기법을 이용하여 모드형상을 추정하였다. 실험을 통하여 추정된 동특성은 표 3과 같다.

MAC을 이용하여 추정된 모드형상의 직교성을 검증하였으며, 표 4와 같이 0에 가까운 값을 얻을 수 있으므로 모드형상 간에 직교성이 큰 것으로 판단할 수 있다.

3.1.4 이동하중에 의한 삼승교의 변위응답 추정

이동하중 LC1-5의 실험을 통하여 변형률신호와 변위응답을 계측하였으며 모드분해기법을 이용하여 계측된 변형률신호로부터 삼승교 중앙부의 변위응답을 추정하였다. 추정 변위응답과 계측된 변위응답을 비교분석 함으로써 공용중인 교

표 4. MAC을 이용한 삼승교 추정모드형상의 상관성 검토

i/jth mode shape	ith mode shape	
	1 st mode	2 nd mode
1 st mode	1	0.00017
2 nd mode	-	1

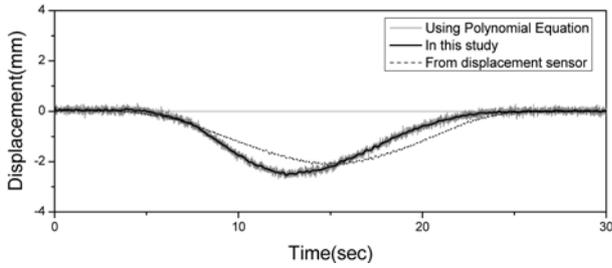


그림 6. G3 중앙경간의 추정변위응답과 계측변위응답의 비교 (LC1)

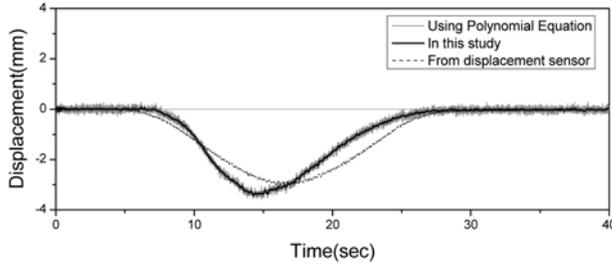


그림 7. G3 중앙경간의 추정변위응답과 계측변위응답의 비교 (LC2)

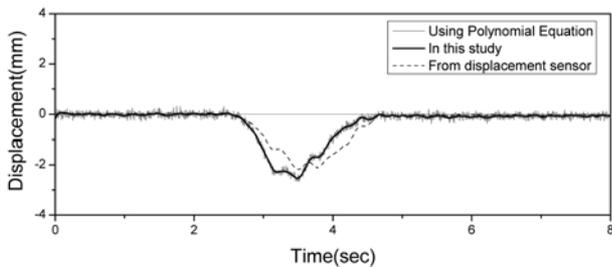


그림 8. G3 중앙경간의 추정변위응답과 계측변위응답의 비교 (LC3)

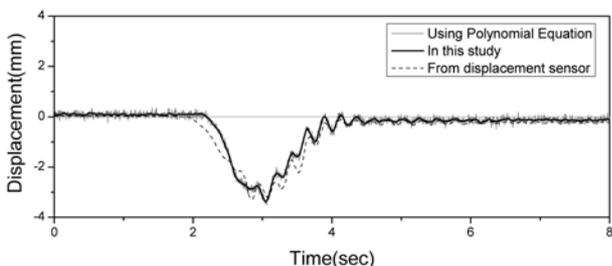


그림 9. G3 중앙경간의 추정변위응답과 계측변위응답의 비교 (LC4)

량에서 모드분해기법의 사용성을 검증하였다.

그림 6-10은 계측변위응답과 추정변위응답을 비교한 그래프이며, 표 5는 G3 중앙경간의 최대변위를 비교한 것이다. 추정변위응답이 계측변위응답보다 크게 추정되었으며 차량속도가 5 km/h인 그림 6-7에서 확인 할 수 있듯이 변위응답의 형상이 계측변위응답은 좌우대칭이나 추정변위응답은 좌우대칭이 아닌 것을 확인 할 수 있다. 변형률신호의 계측이 교량전체경간을 계측한 것이 아니라 한쪽측면만을 계측함으로써 등가정적변위응답이 정확하게 추정되지 않은 것으로 판

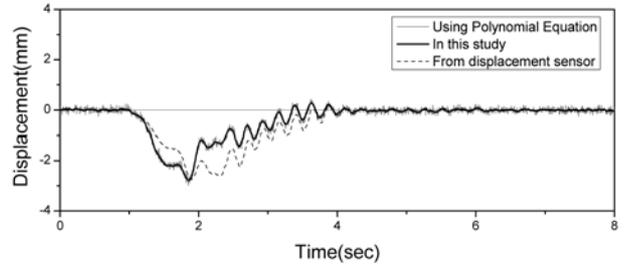


그림 10. G3 중앙경간의 추정변위응답과 계측변위응답의 비교 (LC5)

표 5. G3 중앙부의 최대변위 비교[mm]

	In this study	From displacement sensor
LC1	-2.53	-2.15
LC2	-3.41	-3.02
LC3	-2.53	-2.18
LC4	-3.36	-3.29
LC5	-2.78	-2.76

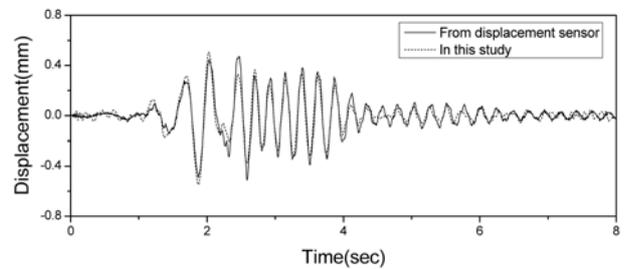


그림 11. LC5에서 G3 중앙경간의 등가정적변위응답을 제외한 변위응답 비교

단된다. 등가정적변위응답을 제거한 모드형상에 의한 변위응답만을 비교한 결과 그림 11에서 확인 할 수 있듯이 등가정적 변위응답이 없을 경우 모드형상에 의한 변위응답은 아주 잘 일치함을 확인 할 수 있다. 그러므로 교량전체경간을 계측한다면 정확한 등가정적 변위응답의 추정이 가능할 것으로 판단된다.

3.2 현수교의 변위응답 추정

3.2.1 대상교량(소록대교)

대상교량인 그림 12는 소록대교는 모노케이블 타입 자정식 강상판 현수교로서 33개의 행어케이블과 1개의 주케이블로 이루어진 교량이며 주요제원은 표 6과 같다.

3.2.2 검증실험

현수교의 추정변위응답과 계측변위응답을 비교분석 하기 위하여 소록대교를 대상으로 동적제하실험을 수행하였으며, 계측변위응답(레이저변위계, GPS)과 모드분해기법을 이용하여 추정한 변위응답을 비교분석하였다.

표 7은 동적제하실험의 제원이다. 1대의 차량하중제하시의 차량속도는 5 km/h와 70 km/h로 하였으며 차량 2대의 연행

표 6. 소록대교의 주요 제원

Structure type	Span	Sag	Design load	Design speed
Suspension bridge	(110+250+110) m	50 m	DB24	80 km/h



그림 12. 소록대교

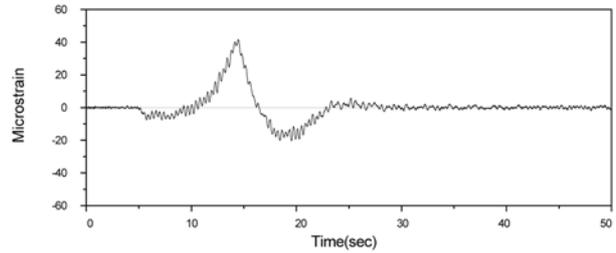
일 경우 차량속도를 60 km/h로 하였으나 계측신호로부터 차량의 정확한 속도를 추정 한 결과 LC1=7.3 km/h, LC2=75.1 km/h, LC3=58.8 km/h였다. 실험에 사용한 차량의 무게는 29.94 ton과 29.87 ton이며, 센서의 부착위치는 그림 13과 같다. 변위계의 부착위치는 교량의 중앙부분이며, FBG센서는 PY1에서부터 5.5, 24, 43, 63, 82, 101, 119.5, 124.5(상), 124.5(하), 130.5, 149, 168, 187, 207, 226, 244.5 m 떨어진 위치에 설치하였다. 설치된 광섬유센서는 전자에 사용하였던 그림 3의 센서를 사용하였다.

3.2.3 소록대교의 동특성 추정

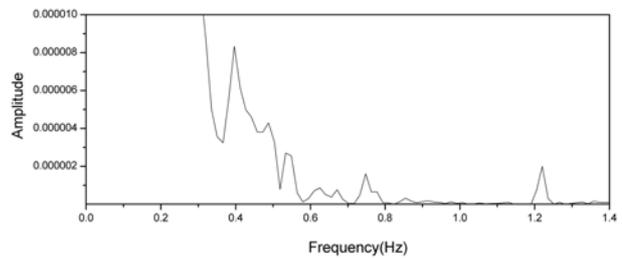
FBG센서로 계측한 변형률신호를 이용하여 소록대교의 고유진동수와 모드형상을 추정하였다. 그림 14는 1대의 차량이 70 km/h로 운행할 경우 PY1에서 82 m 떨어진 위치에 설치된 FBG센서로 계측한 변형률신호와 PSD함수이다. PSD함수를 이용하여 구조물의 고유진동수를 예측하고 표 8에서 확인할 수 있듯이 POD기법을 이용하여 모드형상을 추정하였다. 초기재하실험과 수치해석 그리고 본 연구에서 실험으로

표 7. 소록대교 동적재하실험 제원

Load case	Travel velocity	Average velocity	Vehicle sizing
LC1	5 km/h	7.3 km/h	1
LC2	70 km/h	75.1 km/h	
LC3	60 km/h	58.8 km/h	2



(a) 시간이력



(b) PSD 함수

그림 14. FBG센서로 계측한 변형률신호 (LC2_PY1에서 82 m 떨어진 위치)

부터 추정된 동특성을 표 8과 같이 비교분석 하였다. 현수교의 재하실험 시 차량하중으로는 가진력이 부족하여 추정된 고유진동수가 수치해석으로 얻어진 고유진동수보다 크게 추정된 것으로 판단된다.

표 9에서 확인할 수 있듯이 POD기법으로 추정된 모드형상의 상관성을 검토하기 위하여 MAC을 이용한 결과 0에 가까운 값을 얻을 수 있었다. 그러므로 모드형상의 분석이 잘된 것으로 판단할 수 있다.

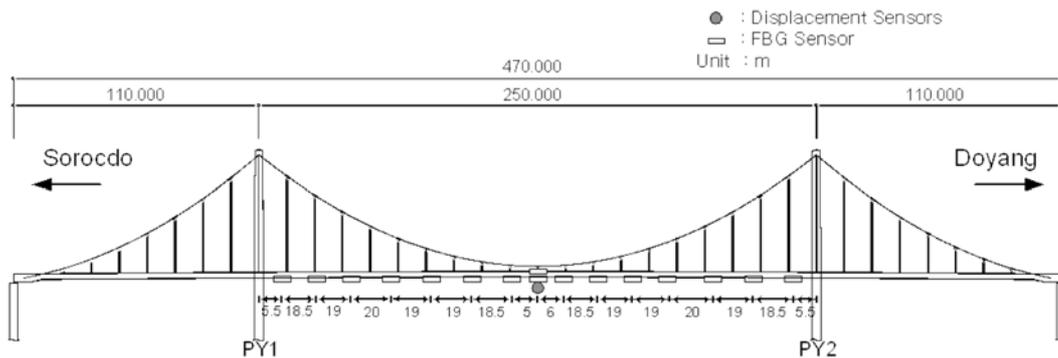


그림 13. 소록대교의 센서부착 위치

표 8. 소록대교의 동특성(고유진동수, 모드형상)

	Frequency(Hz)			Mode shape
	Numerical analysis	In this study	Initial loading test	
1 st mode	0.336	0.397	0.391	
2 nd mode	0.715	0.748	0.830	
3 rd mode	1.024	1.221	1.221	

표 9. MAC을 이용한 소록대교 추정모드형상의 상관성 검토

i th mode shape \ j th mode shape	1 st mode	2 nd mode	3 rd mode
1 st mode	1	3.12×10^{-11}	6.51×10^{-11}
2 nd mode	-	1	1.30×10^{-11}
3 rd mode	-	-	1

3.2.4 이동하중에 의한 교량의 변위응답 추정

플레이트거더교인 삼승교의 변위응답 추정 시 변형률신호의 계측이 교량전체경간을 계측한 것이 아니라 한쪽측면만을 계측함으로써 등가정적변위응답의 정확한 추정이 불가능하여 추정 변위응답이 부정확하였다. 그러므로 현수교인 소록대교의 정확한 변위응답을 추정하기 위하여 교량전체경간의 변형률신호를 계측하였으며, 본 논문에서 제시한 저차모

드의 변형률신호를 이용하여 등가정적변위응답을 추정하는 방법을 사용하였다. 이동하중 LC1-3의 경우에 모드분해기법을 이용하여 소록대교 중앙경간 중앙부의 변위응답을 추정하였다. 모드분해기법으로 추정된 변위응답과 레이저변위계, GPS로 계측한 변위응답을 비교분석 함으로써 모드분해기법의 현수교 적용 가능성을 검증하였다.

그림 15-17에서 추정변위응답과 계측변위응답이 잘 일치함을 확인할 수 있다. 추정변위응답과 계측변위응답의 최대 처짐량을 비교한 결과 표 10과 같다. 표 10에서 확인할 수 있듯이 모드분해기법으로 추정한 변위응답과 계측한 변위응답이 유사함을 확인할 수 있다. 교량의 중앙경간에 전체적으로 FBG센서를 부착하였으므로 등가정적 변위응답 또한 정확한 변위응답을 추정할 수 있었다. 그러므로 교량의 전체적으로 변형률신호를 계측한다면 구조물의 전체적인 변위응답을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

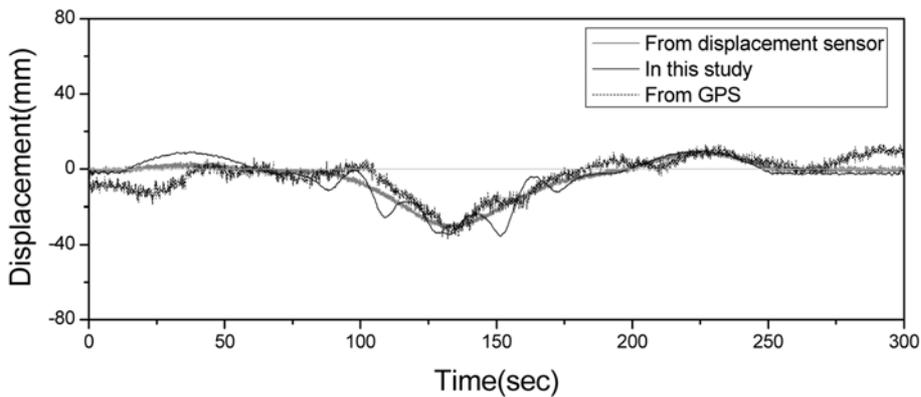


그림 15. 추정변위응답과 계측변위응답의 비교 (LC1)

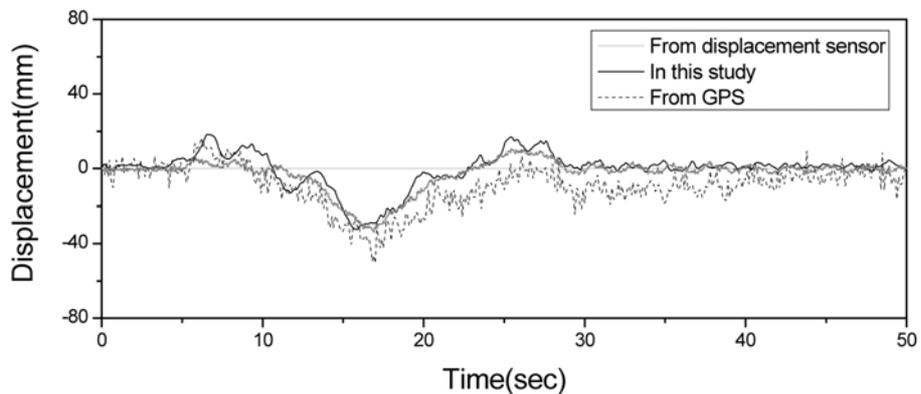


그림 16. 추정변위응답과 계측변위응답의 비교 (LC2)

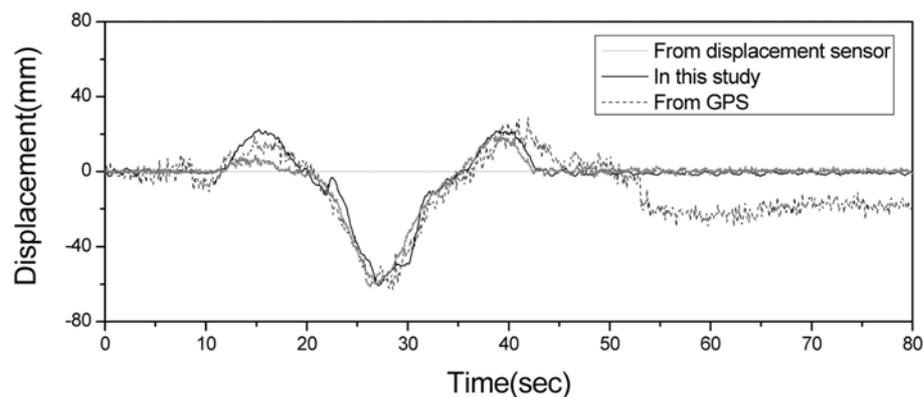


그림 17. 추정변위응답과 계측변위응답의 비교 (LC3)

표 10. 중앙부의 최대변위 비교[mm]

	In this study	From GPS	From displacement sensor
LC1	-35.65	-37	-31.98
LC2	-32.50	-50	-34.03
LC3	-60.60	-63	-60.68

4. 결 론

본 논문에서는 공용중인 교량의 건전성 평가에 있어 주요 인자인 변위응답을 추정하기 위하여 변형률신호로부터 변위응답을 추정하는 모드분해기법을 사용하였다. 또한 실교량의 동적재하실험을 통하여 모드분해기법의 사용성을 검토하였다. 동적재하실험 시 등가정적변위응답이 지배적이므로 교량의 변위응답 추정 시 등가정적변위응답이 구조물 변위응답에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다. 그러므로 등가정적변위응답의 추정이 가능한 모드분해기법을 사용한다면 교량의 변위응답의 추정이 가능할 것으로 판단된다.

모드분해기법을 사용할 경우 적은 위치의 변형률신호를 이용하더라도 변위응답 추정이 가능하며, 모든 위치의 변위응답의 추정이 가능하다는 장점이 있다. 또한 전기적 노이즈의 영향이 없고 다중측정이 가능한 FBG센서를 사용함으로써 현수교와 같은 대형구조물에서 신뢰성 있는 변형률신호를 계측할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비지원(05 지역특성B05)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

신수봉, 윤병구(2008) 측정변형률에서 동적변위 식별, 2008년도 봄 학술발표 논문집, 한국구조물진단유지관리공학회, pp. 447-451.

장성진, 김남식(2008) 모드분해기법을 이용한 동적 변형률신호로부터 변위응답추정, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권 제4A호, pp. 507-515.

조남소, 김남식(2008) FBG 변형률센서를 이용한 현수교의 정적 처짐형상 추정. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권 제5A호, pp. 699-707.

최은수, 강동훈, 정원석, 김이현(2006) FBG센서 응답을 이용한 단순보의 변위 추정. 2006년도 한국강구조학회학술발표논문집, 한국강구조학회, pp. 349-354.

홍윤화, 박현우, 이성욱, 이해성(2006) 구조물의 계측기속도를 이용한 변위 재구성에서의 정규화 기법. 2006년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 338-341.

Lee, J.J. and Shinozuka, M. (2006) Real-time displacement measurement of a flexible bridge using digital image processing techniques. *Experimental Mechanics*, Vol. 46, pp. 105-114.

Kim, N.S. and Cho, N.S. (2004) Estimating deflection of a simple beam model using fiber optic bragg-grating sensors. *Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 4, pp. 433-439.

Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C.C., and Liu, H.H. (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, Vol. 454, pp. 903-995.

Berkooz, G., Holms, P., and Lumley, J. (1993) The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 25, pp. 539-575.

(접수일: 2009.11.10/심사일: 2009.12.14/심사완료일: 2010.4.5)