

PSC교량의 구조건전성 모니터링을 위한 모델기반 손상검색기법

Model-Based Damage Detection Methods for Structural Health Monitoring of PSC Bridges

박재형* 이병준** 김정태***
Park, Jae-Hyung Lee, Byung Jun Kim, Jeong-Tae

ABSTRACT

In this paper, structural damage in PSC bridges is monitored by using model-based damage detection methods. First, numerical experiments on the test structure are described. Dynamic responses of the test structures are obtained for several damage scenarios. The change in natural frequency and the change in mode shape curvature are selected as features to represent the states of the structure. Next, a damage localization algorithm from monitoring the changes in natural frequency is outlined. Also, the damage localization algorithm from monitoring the changes in mode shapes is outlined. Finally, the damage localization algorithms are used to predict damage in the test structure. The results of the analysis indicate that the model-based damage detection methods correctly predicted damage in the test structure.

1. 서 론

PSC 교량과 같은 구조물의 붕괴는 인명 피해와 막대한 경제적 손실을 초래하게 된다. 이에 따라 PSC 교량의 안전성을 확보하고, PSC 교량에 예상되는 손상을 조기에 발견하는 것이 중요하다. 이와같은 PSC 교량과 같은 구조물의 위험유형들로는 휨 균열, 크리프, PC 긴장력 감소, 피로파괴 등에 의한 구조전역, 국부위치 및 하부구조계의 구조특성의 변화, 구조물의 기하학적 형상 변화, 지점 및 연결점 등 경계조건에 변화로 인해 구조계의 안전이 위협받는 상태로 정의할 수 있다. 이러한 위험유형으로부터 PSC교량의 안전성을 확보하기 위해서는 구조물의 상태를 정확하게 진단하고 구조상태를 안전하게 유지하기 위해 구조 건전성 모니터링체계가 확보되어야 한다. 이에 최근 교량 및 건물 등 대형구조물에 대한 건전성 감시 및 상태 평가와 관련하여 진동시험과 이에 따른 다양한 건전성 모니터링 기법이 활발하게 연구되고 있다[4-6].

모델기반 모니터링 기법은 센서로부터 취득된 신호를 분석하여 추출된 진동특성 등의 특징정보를 구조물의 형상과 재료 그리고 경계조건을 반영하는 구조모델에 입력하고 구조모델의 거동변화를 감지하여 구조상태의

* 부경대학교 해양공학과 박사과정

** 부경대학교 해양공학과 석사과정

*** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수

변화를 모니터링하는 방법이다.

본 연구에서는 PSC 교량의 모델기반 모니터링을 하기 위해 다음과 같은 연구를 수행하였다. 첫째, 대상 구조물을 실제교량에서 많이 볼 수 있는 PSC교량을 고려하여 PSC보 구조물을 선택하였다. 다음으로 PSC보 구조물의 수치모형을 결정하고, 충격하중에 대한 가속도 동적 응답을 측정하였다. 둘째, 일련의 동적 응답을 분석하여 구조의 동적특성을 추출하였다. 마지막으로, 구조물의 동적특성을 이용하여 고유치 변화율과 곡률 변화율로부터 손상의 유무를 확인하고 고유진동수 기반 손상검색과 모드형상 기반 손상검색기법을 이용하여 손상 위치를 검색하였다.

2. 손상검색 알고리즘

2.1 고유진동수 기반 손상검색(FBDD) 알고리즘

고유진동수 기반 손상검색 알고리즘을 요약하면 다음과 같다. 첫 번째로, 고유진동수를 검출할 가속도계 위치를 선정한다. 두 번째로, 대상구조체에 대한 고유진동해석으로부터 모드 i 의 모드형상(ϕ_i)를 구하여, 모드 i 와 위치 j 의 모드민감도(F_{ij})를 식(1)과 같다. 세 번째로, 손상 전후의 고유진동수를 계측하여 모드 i 의 고유치의 변화율(Z_i)은 식(2)로 표현된다. 네 번째로, 모드 i 와 위치 j 에서 손상위치지수(e_{ij})를 식(3)과 같이 계산하고 손상위치지수(e_{ij})로부터 손상지수(β_j)는 식(4)와 같다.[1]

$$F_{ij} = \frac{\{\phi_i\}^T [C_j] \{\phi_i\}}{\{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\}} \quad (1)$$

$$Z_i = \delta w_i^2 / w_i^2 \quad (2)$$

$$e_{ij} = Z_m / \sum_{k=1}^{NM} Z_k - F_{mq} / \sum_{k=1}^{NM} F_{kq} \quad (3)$$

$$\beta_j = \left[\sum_{i=1}^{NM} e_{ij}^2 \right]^{-1/2} \quad (4)$$

2.2 모드형상 기반 손상검색(MBDD) 알고리즘

모드형상 기반 손상검색은 고유진동수 기반 손상 검색보다 국부 손상에 대해 매우 민감하다. 그러나 모드형상 이용시에는 몇가지의 배경이 필수적이다. 먼저 손상은 국부적으로 저차모드의 형상에만 영향을 미친다. 둘째로 추출된 모드형상은 센서의 위치와 하중에 의한 영향을 받는다. 셋째로 센서의 수와 종류에 따라 손상 검색 과정과 정확도에 결정적인 영향을 미친다.

모드형상기반 손상검색 알고리즘을 요약하면 다음과 같다. 먼저, 비손상 구조체의 i 모드와 j 요소의 모드 민감도(F_{ij})와 손상구조체의 모드민감도(F_{ij}^*)는 식(6), (7)과 같다. 두 번째로 모드민감도의 변화(dF_{ij})는 아래의 식(8)과 같으며, 이는 근사적으로 i 번째 모드의 고유치의 상대적 변화율로서 식(9)와 같이 표현된다. 세 번째로, 식(6)과 (7)을 식(9)에 대입하면 식(10)과 같은 i 모드와 j 요소의 손상위치지수(β_{ij})로 정의된다. 손상위치지수(β_{ij})는 i 모드와 j 요소의 강성변화율을 의미하며 $\beta_{ij} > 1$ 은 요소강성의 감소를 의미한다.[3]

$$F_{ij} = \frac{\{\phi_i\}^T [C_j] \{\phi_i\}}{\{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\}} \quad (6)$$

$$F_{ij}^* = \frac{\{\phi_i^*\}^T [C_j^*] \{\phi_i^*\}}{\{\phi_i^*\}^T [C^*] \{\phi_i^*\}} \quad (7)$$

$$dF_{ij} = F_{ij}^* - F_{ij} \quad (8)$$

$$dF_{ij} = \frac{\delta k_{ij}}{k_{ij}} \cong \frac{1}{n_d} \left(\frac{\delta \omega_i^2}{\omega_i^2} \right) \quad (9)$$

$$\beta_{ij} = \frac{\{\phi_i^*\}^T [C] \{\phi_i^*\}}{\{\phi_i^*\}^T [C] \{\phi_i^*\} g_i + \{\phi_i^*\}^T [C] \{\phi_i^*\}} \quad (10)$$

3. 수치실험

3.1 수치모델

수치실험에 사용된 PSC교량의 치수와 형상, 손상의 위치는 Fig. 1에 보여지며 Sensor의 위치, 가진위치 ($x/L=0.8$), 가진력은 Fig. 2에 도시되었다. 유한 요소 모델은 Solid 요소로 작성되었으며, 총 2844개의 node와 1950개의 element로 구성되었다. 적용한 재료의 물성치는 Table 1에 보는 바와 같다. 손상 시나리오는 Table 2에 요약하였으며 각 손상시나리오별로 수치실험을 수행하였다. 먼저 휨균열의 최대 위험부인 $x/L=0.5$ 인 위치에 손상된 것으로 가정하여 신호를 획득하였으며, 다음으로 사인장균열의 위험단면 부근인 $x/L=0.078$ 인 위치에 추가적으로 손상 되었다고 가정하여 손상을 주고 신호를 획득하였다. 대상구조물의 손상 시나리오에 대하여 가속도센서로부터 손상 시나리오 별로 각각 응답신호를 계측하였다. 계측된 동적신호는 4/10000sec 간격으로 0.8192sec간 취득하였다.

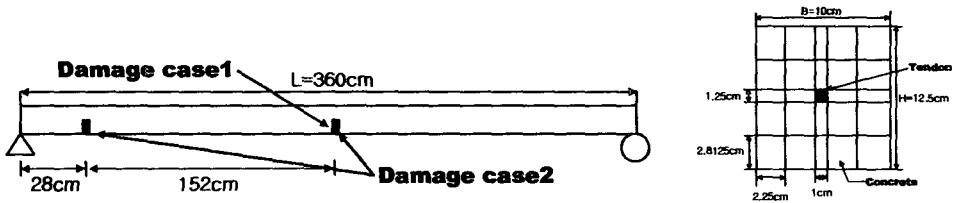


Fig. 1 PSC교량의 유한요소 모델

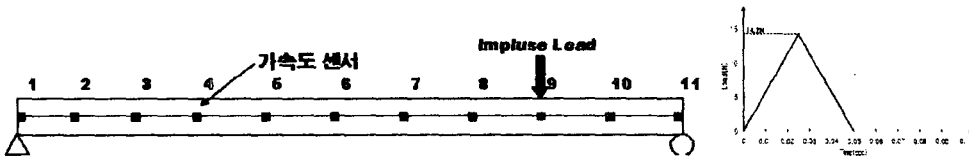


Fig. 2 PSC교량의 센서의 위치와 가진위치,가진력

Table 1 재료의 물성치

	steel	concrete
Modulus of Elasticity	$E = 2.1 \times 10^7 \text{tonf/m}^2$	$E = 2.5 \times 10^6 \text{tonf/m}^2$
Mass Density	$\rho = 7.85 \text{tonf/m}^3$	$\rho = 2.3 \text{tonf/m}^3$
Poisson's ratio	$\nu = 0.3$	$\nu = 0.18$

Table 2 손상 시나리오

Damage Case	Inflicted damage Location (x/L)	Crack-size(a/H)
Damage case 1	0.5	0.025
Damage case 2	0.5, 0.078	0.025, 0.025

3.2 고유치 변화율

대상구조물의 손상 시나리오에 대하여 가속도 센서로부터 손상 시나리오 별로 각각 응답신호를 계측하였다. 4/10000sec 간격으로 0.8192sec간 계측된 동적신호를 FFT로 변환하여 손상 시나리오별 주파수응답함수의 변화를 살펴 보았다. 그 결과는 Fig. 3과 같이 FRF의 변화가 나타났다.

가속도계 신호의 고유치 변화율은 구조계의 전역적인 이상상태를 감지할 수 있는 모니터링 항목으로 가진 응답신호로부터 구조물 초기상태의 주파수응답함수를 계측한다. 이로부터 구조물 초기 고유치 $\lambda_i = (2\pi f_i)^2$ 을 계산한다. 다음으로, 손상 발생 후의 고유치 변화율 $\Delta\lambda_i/\lambda_i$ 을 구한다. 이로부터 구조 시스템 강성의 변화를 예측하고 손상발생 유무를 모니터링 하였다.

가진해석 결과의 정확도를 비교해 보기 위하여 고유치 해석도 동시에 수행하였다. 손상 시나리오별 고유진동수의 고유치 변화율이 Table 3에 나타난다. 그 결과 고유치 해석의 경우는 손상 시나리오에 따라 고유치 변화가 있으나 가진해석의 경우에는 Damage case 1의 경우에는 2,4번 모드의 변화가 발생하지 않았으며, Damage case 2의 경우에는 4번 모드를 제외하고 변화가 발생하지 않았다.

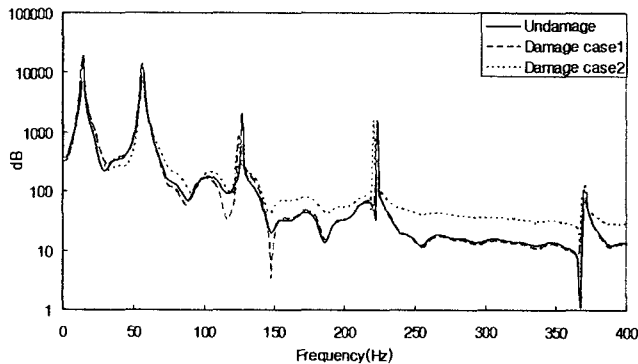


Fig. 3 주파수응답

Table 3 고유치 변화율

	Mode 1		Mode 2		Mode 3		Mode 4	
	고유치해석	가진해석	고유치해석	가진해석	고유치해석	가진해석	고유치해석	가진해석
Undamage(w)	14.2351	14.6556	56.7226	56.1798	126.7858	127.0151	223.4169	223.4978
Damage1(w_1^*)	14.0107	13.4343	56.7217	56.1798	124.8753	124.5726	223.4028	223.4978
Damage2(w_2^*)	13.9974	13.4343	56.5148	56.1798	123.9815	124.5726	220.9870	221.0552
고유치변화율 ($\Delta\lambda_1/\lambda$)	-0.031283	-0.159722	-0.000032	0.000000	-0.029910	-0.038092	-0.000125	0.000000
고유치변화율 ($\Delta\lambda_2/\lambda$)	-0.033113	-0.159722	-0.007316	0.000000	-0.043747	-0.038092	-0.021633	-0.021738

3.3 곡률 변화율

가속도계 신호의 곡률변화율은 국부 센서 영역의 이상상태를 감지 할 수 있는 모니터링 항목이다. 먼저, 곡률변화율을 검출할 가속도계 위치를 선정한다. 다음으로, 진동가진 실험으로부터 구조물 초기상태의 가속도응답을 제측하고 주파수응답함수를 분석한다. 이로부터 구조물 초기상태의 기본 모드(진동모드 1)의 모드형상(ψ_1)을 추출한다. 수치적인 방법을 통해 각 센서위치의 모드형상 곡률(ψ_1'')을 계산한다. 임의 시간 경과 후, 손상 발생 후의, 기본 모드의 모드형상 및 곡률을 구한다. 손상 전후의 모드형상의 곡률변화를 감지하여, 국부 센서영역의 이상상태 및 손상발생 유무를 식별하였다. Fig.4는 각 센서 위치에서의 곡률을 나타낸다. Fig.5는 Undamage와 Damage Case 1의 곡률변화에서는 5번센서와 7번센서에서 이상상태가 감지된다. Fig.6은 Damage Case 1과 Damage Case 2의 곡률변화에서는 2번센서에서의 이상상태가 감지됨을 알 수 있다.

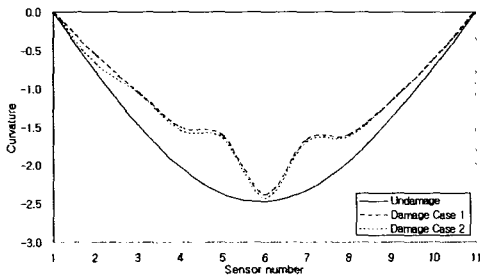


Fig.4 Damage Case 별 곡률

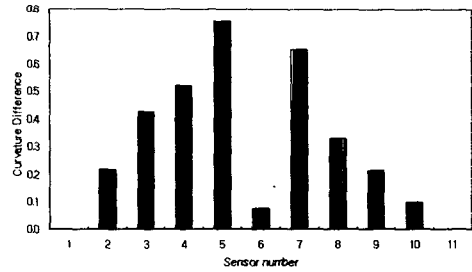


Fig.5 Undamage 와 Damage Case 1의 곡률 변화

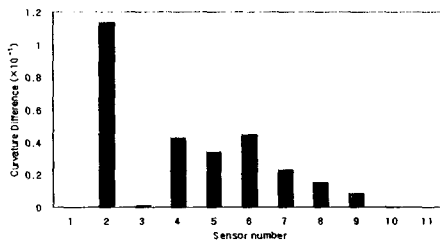


Fig.6 Damage Case 1와 Damage Case 2의 곡률 변화

4. 손상위치검색

4.1. 고유진동수 기반 손상위치 검색(FBDD)

대상구조물의 손상 시나리오에 대하여 가속도 센서로부터 손상 시나리오 별로 각각 응답신호를 계측하였다. 4/10000sec 간격으로 0.8192sec간 계측된 동적신호를 FFT를 이용하여 주파수 영역으로 변환하였다. 그리고 모드진감도는 고유모드형상으로부터 모드변형에너지법을 이용하여 구하였으며 1-4모드를 고려하여 FBDD(frequency-based damage detection)를 수행하였다.

그 결과 Fig.7과 같이 Damage case 1의 경우 손상지수(Damage Index)가 2(기각영역의 98.7%)이상인 zone은 179-182번 요소이고 peak는 180번 요소로 나타났다. 따라서 위치오차는 0%이다. 또한 Fig.8과 같이 Damage case 2의 경우 손상지수가 2이상인 zone은 1-11번 요소이고 peak는 1번 요소로 나타났다. 따라서 위치오차는 4.72%이다. 그리고 가진해석으로부터 구한 FBDD의 정확성 비교를 위해 고유치해석 결과인 고유진동수 사용하여 손상시나리오를 검토하였다. 그 결과 Fig.9와 같이 Damage case 1의 경우 손상지수가 2 이상인 zone은 173-188번 요소이고 peak는 180번 요소로 나타났다. 따라서 위치오차는 0%이다. 또한 Fig.10과 같이 Damage case 2의 경우 손상지수가 2이상인 zone은 30-34번 요소이고 peak는 32번 요소로 나타났다. 따라서 위치오차는 0.5%이다.

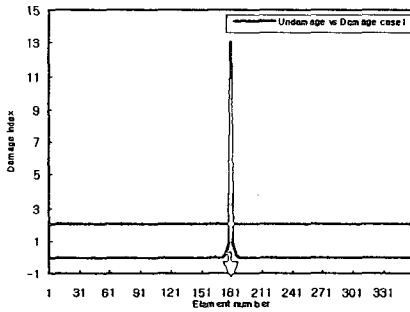


Fig.7 FBDD - 가진해석

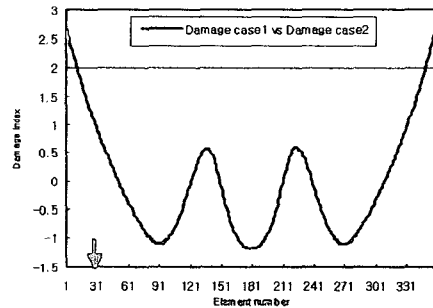


Fig.8 FBDD - 가진해석

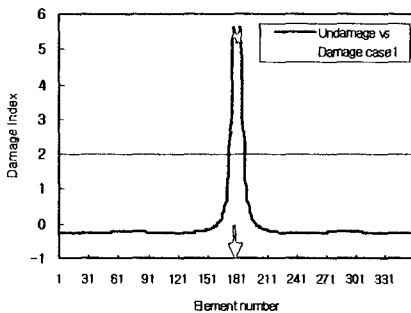


Fig.9 FBDD - 고유치해석

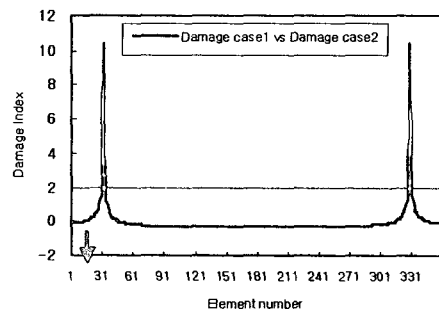


Fig.10 FBDD - 고유치해석

4.2. 모드형상 기반 손상위치 검색(MBDD)

대상 구조물에 11개의 가속도센서를 등간격으로 배열하여 각 시나리오별로 신호를 취득한 후 FFT를 이용하여 mode shape을 구하였다. 이를 통해 MBDD(mode-shape-based damage detection)를 수행하였다. 그 결과 Fig.11과 같이 Damage case 1의 경우 손상지수(Damage Index)가 3(기각영역 99.8%)이상인 zone은 173-189번 요소이고 peak는 182번 요소로 나타났다. 따라서 실제 Damage 위치가 180번 요소이므로 위치오차는 0%이다. 또한 Fig.12와 같이 Damage case 2의 경우 손상지수가 3이상인 zone은 21-30번 요소이고 peak는 25번 요소로 나타났다. 따라서 실제 Damage 위치가 28번 요소이므로 위치오차는 0%이다. 그리고 가진해석으로부터 구한 MBDD의 정확성 비교를 위해 고유치해석 결과인 고유진동수 사용하여 손상시나리오를 검토하였다. Fig.13과 같이 Damage case 1의 경우 손상지수가 3이상인 zone은 172-188번 요소이고 peak는 180번 요소로 나타났다. 따라서 실제 Damage 위치가 180번 요소이므로 위치오차는 0%이다. 또한 Fig.14와 같이 Damage case 2의 경우 손상지수가 3이상인 zone은 20-36번 요소이고 peak는 28번 요소로 나타났다. 따라서 실제 Damage 위치가 28번 요소이므로 위치오차는 0%이다.

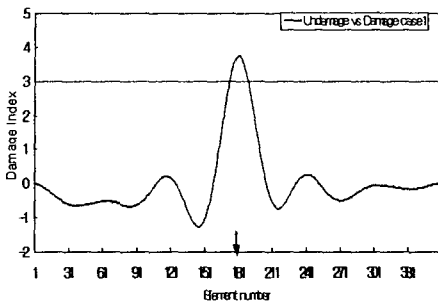


Fig.11 MBDD-가진해석

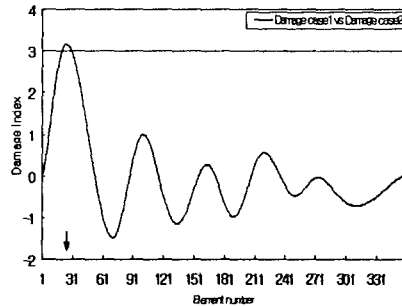


Fig.12 MBDD-가진해석

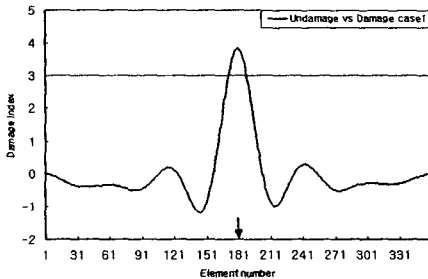


Fig.13 MBDD-고유치해석

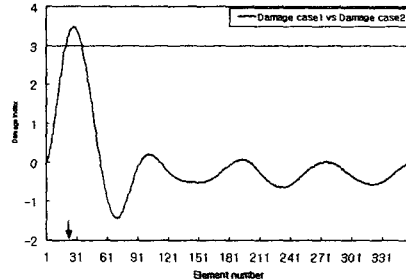


Fig.14 MBDD-고유치해석

5. 결 론

모델기반 손상검색기법을 사용하여 PSC보 구조물의 손상을 모니터링하는 수치실험이 수행되었다. 먼저 PSC보 구조물의 수치모형을 결정하여 impulse 하중에 대한 동적응답을 측정하였다. 동적응답은 각 시나리오별로 가속도 신호를 취득하여 FFT 분석을 하였다. 둘째로 FFT 분석한 결과를 통하여 고유치 변화율, 곡률 변화율, 고유진동수 기반 손상검색, 모드형상 기반 손상검색을 수행하였다. 이를 통해 손상유무를 확인하고

손상위치 검색을 수행하였다.

본 연구에서 수행한 수치해석 및 실험을 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 대상구조물로부터 손상전후의 고유치 해석을 수행하였다. 이로부터 구조강성의 변화를 예측하고 손상유무를 확인하였다.
- 2) 손상 전후의 모드형상의 곡률변화를 감지하여, 국부 센서영역의 이상상태 및 손상발생 유무를 확인하였다.
- 3) FBDD의 검색결과 Damage case2에 대해 가진해석의 위치오차는 4.72%이고 고유치 해석의 위치오차가 0.5%였다.
- 4) MBDD의 검색결과 위치오차는 각 손상시나리오에 대해 위치오차가 0%인 검색 결과를 얻었다.

후 기

이 연구는 2004년도 한국과학재단 지정 스마트사회기반연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 김정태 (1999), "소수의 고유진동수를 사용하는 비파괴 균열발견모델의 유도 및 검증", 한국전산구조공학회, Vol. 12, No. 2, pp. 140-159
2. Kim, J.T. and Stubbs, N. (1999), "Improved Vibration-Based Damage Identification Method", Vol. 12, No. 3, 1999, pp. 331-343
3. Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M., Stubbs, N. (2003), "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method", Engineering Structure 25, pp. 57-67
4. 김정태, 류연선, 박재형 (2004), "고유진동수의 시간이력을 이용한 보 구조물 손상 모니터링 기법", 한국전산구조공학회, Vol. 17, No. 1, pp. 41-47
5. Saadil, M., Douglas, B., and Feng, S. (1994), "Pre-stress Force Effect on Vibration of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 7, 1994, pp. 2233-2241
6. Kim, J.T., Stubbs N. (1996) "Damage Localization in Structures without Baseline Modal Parameters", AIAA Journal, Vol. 34, No. 8, 1996, pp. 1649-1644