한국방재학회논문집
제9권 5호 2009년 10월
pp. 9 ~ 13

사용중 시간영역응답을 이용한 손상탐지이론의 검증

Verification of Damage Detection Using In-Service Time Domain Response

최상현* · 김대혁** · 박남회***
Choi, Sanghyun · Kim, Daehyork · Park, Nam-Hoi

Abstract

Modal parameters including resonant frequencies and mode shapes are heavily utililized in most damage identification throries for structural health monitoring. However, extracting modal parameters from dynamic responses needs postprocessing which inevitably involves errors in curve-fitting resonants as well as transforming the domain of responses. In this paper, the applicability of a damage identification method based on free vibration responses to the in-sevice responses is experimentally verified. The experiment is performed via applying periodic and nonperiodic moving loads to a simply supported beam and displacement responses are measured. The moving load is simulated using steel balls and a downhill device. The damage identification results show that the in-service response may be applicable to identifying damage in the beam.

Key words : Damage detection, In-service response, Time domain, Health monitoring

요 지

현재까지 구조건전성 모니터링과 관련하여 제안된 대부분의 손상인식기법은 모달영역응답을 이용하고 있으나, 모달영역응답은 별도의 후처리가 필요하며 추출과정에서 오차를 포함하게 되므로 손상인식의 정확성을 저하시키는 요인이 되어왔다. 본 논문에서는 이동하중응답을 직접 이용하는 손상인식기법의 적용성을 실내 실험을 통하여 검증하였다. 실험은 강재로 만든 보에 이동하중을 재하시켜 수행하였으며, 보의 응답은 변위계를 이용하여 측정하였다. 이동하중은 쇠구슬과 활강장치를 이용하여 모사하였으며, 주기성과 비주기성 이동하중으로 구분하여 재하하였다. 계측된 응답을 이용한 손상인식 결과, 이동하중을 이용한 손상인식기법은 구조물의 손상을 성공적으로 탐지하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 손상인식, 사용중응답, 시간영역, 구조건전성

1. 서 론

교량, 건물, 터널 등 토목구조물의 합리적인 유지관리를 위하여 가장 기본적인 육안검사 외에 초음파 측정법, 반발경도법, 자분탐상법 등의 비파괴검사기법을 비롯하여, 내하력시험 등이 사용되어 왔으며, 주요 구조물의 경우 계측을 통한 모니터링시스템을 적용하여 구조적 건전성이 감시되기도 한다 (박철 등, 2007). 이러한 모니터링시스템은 구조물에서 계측된 응답을 해석하고 손상인식이론(Sohn et al., 2003)의 적용을 통해 구조물의 건전성을 판단하는 과정으로 구성된다. 구조물에서 측정될 수 있는 응답은 정적응답과 동적응답이 있으나, 정적응답의 측정을 위해서는 구조물의 사용을 통제해야 하므로 구조물의 건전성을 지속적으로 모니터링하기에는 적절하지 않아 동적응답이 주로 이용되고 있다 (최상현 등, 2009). 1970년대 이후부터 토목구조물에 본격적으로 적용되기 시작한 손상인식이론(Vandiver, 1975)은 다양한 이론적 배경을 기반으로 수많은 기법으로 분화하였으나 대부분 고유진동수, 모드형상 등의 모달응답을 이용하여 왔다 (Sohn et al., 2003). 그러나 이러한 모달응답은 구조물에서 직접 측정될 수 없고 가속도, 변위 등의 후처리를 통해 추출되므로 이 과정에서 오차가 개입될 수 있으며, 실제 구조물에서 측정될 수 있는 개수가 제한적이라는 단점을 가지고 있다 (Nam et al., 2005). 이러한 문제는 시간영역의 응답을 직접 이용함으로써 해결될 수 있으나, 현재까지 제안된 방법은 계측하기 어려운 초기조건 및 하중이력에 대한 정보를 필요로 하거나 (Kang et al., 2005; Park et al., 2008), 통행 통제가 필요한 충격하중에 의한 자유진동응답을 이용하는(Choi and Stubbs, 2004) 단점이 있다. 최근 최상현 등(2009)은 이동하중응답을 직접 이용한 손상인식이론의 적용성을 수치해석을 통하여 검토한 바 있다. 이 방법은 이동하중에 의한 응답을

*정회원 · 한국철도대학 철도시설토목과 조교수 (E-mail: schoi@krc.ac.kr)
**한국철도대학 철도시설토목과 전문학사과정
***한국건설교통기술평가원 건설2실 선임연구원

이용하므로 자유진동응답을 이용한 방법과 같이 구조물에 대한 통제나 하중이력에 대한 정보가 필요없는 장점이 있으나, 실제 실험을 통해 적용성이 검증되지 않은 단점이 있다.

이 연구에서는 이동하중응답이 작용하는 단순보 시험체에서 측정한 응답을 이용하여 최상현 등(2009)이 제안한 손상인식이론의 적용성을 검증하였다. 단순보는 강판을 이용하여 제작하였으며, 이동하중은 쇠구슬과 활강장치를 이용하여 모사하였다. 손상인식이론의 손상탐지 능력을 검증하기 위하여 시험체에 인위적인 균열을 만들어 손상을 모사하였으며, 손상 전과 후의 이동하중에 의한 응답을 측정하였다. 변위계를 통해 측정된 응답을 이용하여 손상지수를 산정하였으며, 손상지수를 통하여 손상의 위치를 탐지하였다. 손상 위치 탐지는 Stubbs et al.(1992)이 제안한 통계적 기법을 이용하였다.

2. 손상인식 이론

주요 구조물에 대한 유지관리의 중요성이 커짐에 따라 동적계측을 통한 모니터링시스템의 필요성이 더욱 높아지고 있다. 일반적으로 동적응답을 이용한 구조건전성평가는 동적거동의 계측을 통한 원응답(primitive response) 획득, 응답의 후처리를 통한 목적응답 (objective response) 추출, 손상인식기법 적용을 통한 손상인식, 손상인식 결과를 이용한 구조물의 건전성평가라는 일련의 과정으로 구성되며 모니터링시스템은 이러한 구조건전성 평가를 시스템화하여 지속적인 감시가 가능하도록하는 목적으로 구축된다. 이러한 모니터링시스템에 적용되는 손상인식기법은 목적응답을 이용하여 구조물 내에 존재하는 손상 정보를 인식하게 함으로써 구조건전성평가의 핵심요소 중 하나이다. 일반적으로 원응답으로는 계측의 용이성 때문에 가속도가 가장 흔히 채택된다. 이러한 원응답은 적용되는 손상인식기법의 이론적 배경에 따라 요구되는 목적응답으로 변환되는데 고유진동수, 모드형상 등의 모달응답에 기초한 손상인식이론이 가장 지배적으로 개발되어 왔다. 하지만 가속도 응답에서 모달응답을 추출하기 위해서는 모달해석(modal analysis)이라는 후처리가 필요하며 또한 실제 구조물에서 추출할 수 있는 모달응답의 개수가 제한된다는 단점이 있다. Choi et al.(2004)의 손상인식이론은 목적응답으로의 변환없이 시간영역에서 변형에너지의 기대치의 변화를 이용하여 손상지수를 산정하는 방법이다. 목적응답으로의 변환과정, 즉 모달응답 추출과정이 없으므로 변환과정에서 발생할 수 있는 오류를 배제할 수 있는 장점이 있다. Choi et al.(2004)의 손상인식이론에 적용되는 손상지수 β_j, 즉 손상전·후 강성비는 다음과 같다. m개의 요소로 구성된 구조물의 n개의 위치에서 동적응답, υ_i, 를 t_1=t_1 부터 t_{NT}까지 Δt 간격으로 측정하였을 때,

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} \approx \frac{f_j^* + 1}{f_j + 1} \tag{1}$$

여기서, k_j는 요소 j의 강성파라메터, *는 손상후 구조물의 파라메터,

$$f_j \approx \frac{E_{i=1}^{NT}[\upsilon_i^T C_j \upsilon_i]}{\sum_{p=1}^{m} E_{i=1}^{NT}[\upsilon_i^T C_p \upsilon_i]} \tag{2}$$

를 나타낸다. 식 (2)에서 E는 기댓값, υ_i는 시간 i에서의 응답벡터, C_j는 기하학적 요소로만 구성된 행렬이며 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$C_j = \frac{1}{k_j} K_j \tag{3}$$

여기서, 는 j 번째 요소의 국부강성행렬이다.

식(1)의 손상지수를 이용하여 손상의 위치를 결정할 수 있다. 손상의 발생은 식(1)의 손상지수값이 1보다 클 경우이나, 계측오차, 수치해석 등에 따른 오류로 인하여 통계적 수법이 사용되기도 한다 (Stubbs and Garcia, 1996). 손상 위치 결정에 적용될 수 있는 통계적 수법은 여러 가지가 있으나, 이 논문에서는 가설테스트(hypothesis testing)를 적용하였다. 손상 인식을 위하여 다음과 같은 두가지의 가설을 설정할 수 있다.

- H_0 : 부재 j에 손상이 없음
- H_1 : 부재 j에 손상이 있음

가설테스트를 적용하기 위하여 식(1)을 이용하여 구한 손상지수를 다음과 같이 표준화하면,

$$z_j = \frac{\beta_j + \mu_\beta}{\sigma_\beta} \tag{4}$$

여기서, μ_β와 σ_β는 각각 손상지수 β_j의 평균과 표준편차이다. 가설테스트의 기준값을 z_η로 설정할 때, 손상의 발생유무를 다음과 같이 결정할 수 있다.

- $z_j < z_\eta$ 일 경우 H_0을 선택
- $z_j \geq z_\eta$일 경우 H_1을 선택

가설테스트의 기준값은 가설테스트의 신뢰도에 따라 결정할 수 있다. 일례로 기준값이 1.5일 경우 가설테스트의 신뢰도, 즉 가설테스트의 적용으로 손상이 발생한 곳으로 예측된 부분의 손상발생 확률은 93% 이상이 된다.

3. 검증실험

3.1 실험 장치

실내실험을 통하여 2장에 소개된 손상인식이론을 검증하였다. 실내실험은 폭 10 cm, 길이 180 cm(지간 150 cm), 두께 4.5 mm의 강판으로 제작한 단순보(그림 1(a))를 이용하여 수행하였다. 단순보는 H형강, 강판 및 원형봉으로 제작한 지지대(그림 1(a))에 의해 지지하였다. 이동하중은 단순보 상면에 쇠구슬을 굴려 모사하였으며 쇠구슬의 초기속도를 제어하기 위하여 그림 1(b)와 같이 높이 90cm, 반경 90cm의 사분원

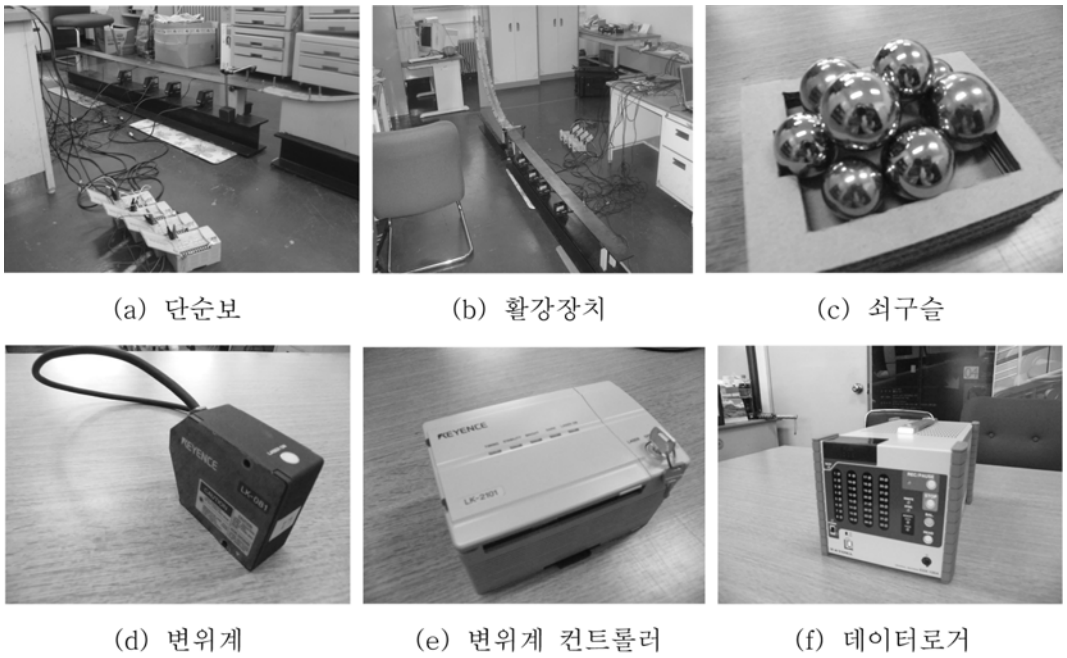


그림 1. 실험에 사용된 장치.

형 활강로로 구성된 활강장치를 제작하였다 (Bilello and Bergman, 2004). 실험에 사용된 쇠구슬은 이동하중의 변동성을 주기위하여 직경 25.4 mm(67.5 g), 28.5 mm(96.2 g), 31.5 mm(132.6 g), 35 mm(176.7 g), 38 mm(228.8 g)의 다섯 종류를 각각 4개씩 사용하였다 (그림 1(c)). 실험에 사용된 레이져 변위계는 Keyence사의 LK-081(그림 1(d))로 기준거리 80 mm, 측정거리 ±15 mm, 분해능 3 μm, 샘플링주기 1.024sec이며, 변위계 컨트롤러는 LK-2101(그림 1(e))이다. 데이터로거는 Kyowa사의 EDX-100A를(그림 1(f)) 데이터 수집을 위한 프로그램은 Kyowa사의 DCS-120A를 사용하였다. 변위는 초당 1024개를 측정하였으며, 측정시간은 주기적 하중재하시 30초, 비주기적 재하시 40초로 하였다. 실험장치는 그림 2와 같이 배열하였다. 레이져 변위계에서 측정된 신호는 컨트롤러를 거쳐 데이터로거로 수집되고 디지털신호로 변환되어 컴퓨터로 저장되도록 하였다. 측정은 그림 2의 ①, ②, ③, ④의 위치에서 4개의 변위계를 이용하여 수행하였다.

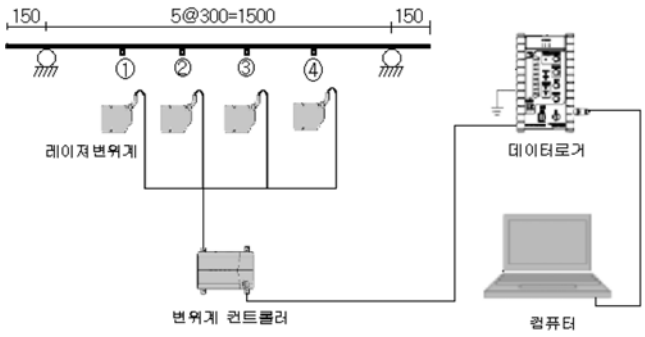


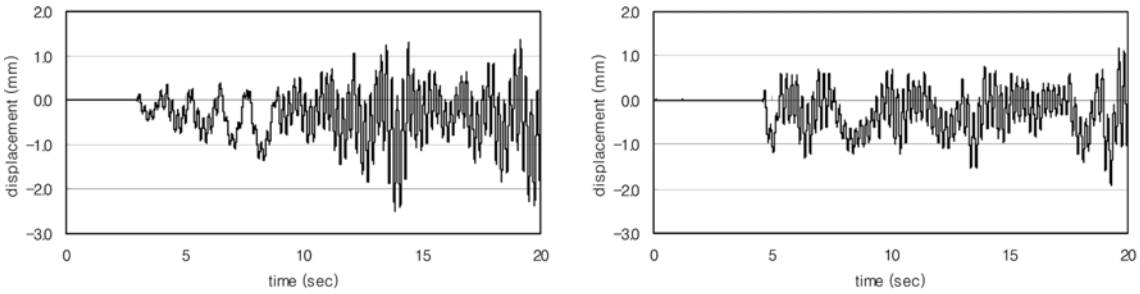
그림 2. 실험장치의 배열.

표 1. 손상시나리오

손상 Case	손상의 크기	이동하중
1	20 mm	주기적
2	20 mm	비주기적
3	40 mm	주기적
4	40 mm	비주기적

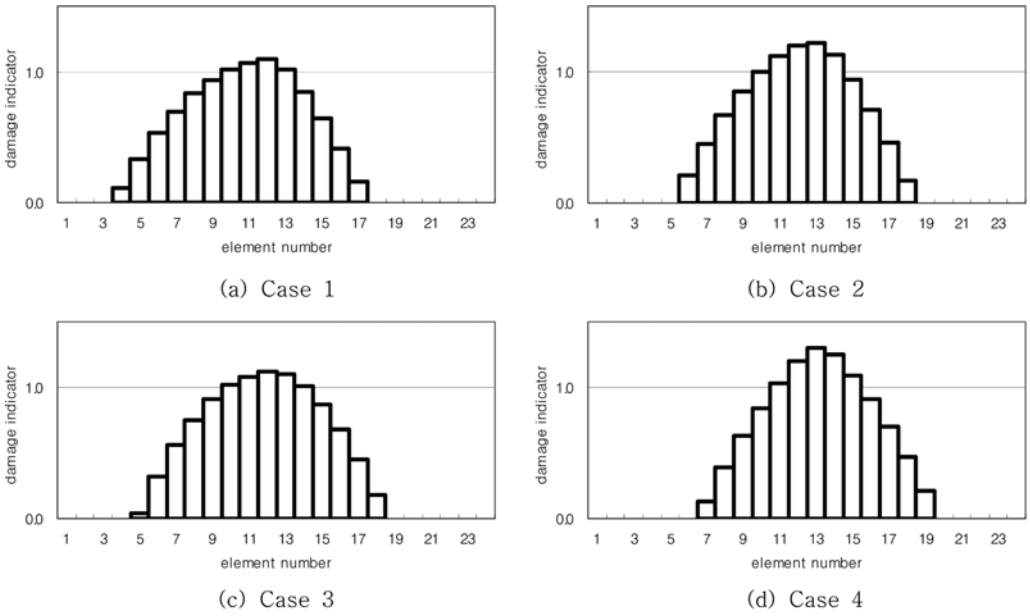
3.2 실험 방법 및 손상해석 결과

실험은 단순보 위에 주기적 및 비주기적으로 쇠구슬을 굴려 이에 따른 보의 변위를 측정하는 방법으로 수행하였다. 주기적 이동하중은 활강장치의 일정한 위치에서 쇠구슬을 1초 간격으로 낙하시키는 방법으로 재하하였으며, 비주기적 이동하중은 활강장치의 임의의 위치에서 쇠구슬을 1초에서 2초 사이의 임의의 시간간격으로 낙하시키는 방법으로 재하하였다. 손상은 커터로 강판 중앙의 가장자리를 자르는 방법으로 모사하였다. 변위계의 개수가 제한되어 있어 손상의 위치는 한 곳으로 제한하였으며, 다만 손상의 크기와 이동하중의 성격에서 변동을 주었다. 손상의 종류 및 재하하중의 성격에 따른 손상시나리오는 표 1에 정리하였다. 손상 시나리오는 시편의 중앙, 즉 그림 2의 위치 ②와 ③사이에 시편 양단으로부터 10 mm씩 20 mm의 균열을 조성한 경우 및 20 mm씩 40 mm 길이의 균열을 조성한 경우와 주기적 및 비주기적 이동하중을 재하했을 경우의 조합으로 구성하였다. 그림 3은 쇠구슬의 이동에 의해 보에 발생한 변위 측정결과이다. 동적응답은 손상이 없는 경우와 손상 Case 1 ~ 4에 대하여 각각 측정하였으며, 측정된 응답을 식 (1), (2)에 적용하여 손상지수를 산정하고 식 (4)를 이용하여 표준화한 후 가설테스트를 이용하여 손상의 발생 여부를 결정하였다. 손상해석은 측정된 손상 전의 응답과 손상 후의 응답을 이용하여 수행하였다.



(a) 주기적하중에 의한 응답 (b) 비주기적하중에 의한 응답

그림 3. 이동하중에 의한 변위.



(a) Case 1 (b) Case 2

(c) Case 3 (d) Case 4

그림 4. 손상인식결과.

손상해석을 위한 손상해석모델은 그림 2의 4개의 위치에서 측정된 변위와 다항식보간법을 이용하여 측정개소 사이를 7점씩 보간하여 총 24개의 요소로 구성하였다. 식 (1)의 수치미분은 유한차분법을 이용하여 수행하였다. 가설테스트의 기준값은 실험응답임을 고려하여 1.0(84% 신뢰도)으로 하였다. 손상해석은 모든 손상 case에 대하여 일률적으로 측정 시작시간으로부터 10초간의 응답 만을 이용하였다.

손상인식 결과는 그림 4에 나타내었다. 손상의 위치는 요소 12번과 13번에 해당한다. 그림에서 이동하중의 특징이 주기적일 경우와 비주기적일 경우 모두에 대하여 성공적으로 손상의 위치가 인식된 것을 볼 수 있으나, 측정개소의 부족을 보완하기 위하여 수행한 수치적 보간으로 인하여 손상의 영향이 인접한 요소로 넓게 퍼져 나타난 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 응답의 측정 개소를 증가시킴으로서 보완될 수 있을 것을 것으로 판단된다. 손상 Case 1과 3 및 Case 2와 4를 비교할 때 Case 1과 3의 경우 손상의 크기가 커짐에 따라 손상지표(damage indicator)에 큰 변화가 없었으나 Case 2와 4의 경우는 손상이 커짐에 따라 손상지표가 약간 증가함을 알 수 있었다. 참고로 손상지표는 식(4)로부터 구할 수 있으며, 손상예측값의 신뢰정도를 나타낸다. 일반적으로 손상의 크기가 커지면 손상지표도 높아지므로 이러한 결과는 실제 측정개소의 부족과 이에 따른 수치적 보간으로 인한 영향으로 판단된다.

4. 결 론

이 논문에서는 구조물에 대한 통제나 하중이력에 대한 정보없이 이동하중에 의한 시간영역응답 만으로 구조물 내의 손상인식 가능성을 검토하였다. 적용된 손상인식기법은 측정된 자유진동응답으로부터 구한 시간영역 변형에너지의 기대치의 변화에 기반한 방법이며, 이동하중에 의한 응답을 구하기 위한 실내 실험을 수행하였다. 이동하중은 강판으로 제작된 단순보의 표면에 쇠구슬을 이동시켜 모사하였으며, 쇠구슬의 초기속도를 제어하기 위하여 활강장치를 제작하였다. 손상의 위치는 손상지수를 기반으로 통계적수법을 적용하여 결정하였다. 이동하중으로 인해 발생하는 변위응답을 이용하여 손상해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 이동하중에 의한 동적응답을 이용하여 손상인식기법의 적용성을 검토한 결과 손상평가기법은 주기적 또는 비주기적 하중을 받는 경우 모두에서 성공적으로 손상을 탐지할 수 있음을 확인하였다.
2) 손상의 크기 변화에 따른 손상지표의 변화를 관찰한 결

과 대체로 큰 차이를 보이지 않았으며, 이는 응답측정 개소의 부족 및 수치해석 오차로 인해 발생한 것으로 판단된다.

3) 손상해석 결과 실측정 개소의 부족을 보완하기 위한 수치적 보간으로 인하여 손상의 영향이 인접한 요소로 확산된 현상이 발견되었으며, 이러한 현상은 응답측정 개소가 증가되면 완화될 수 있을 것으로 판단된다.
4) 실제 구조물에서 변위계를 이용한 응답 측정이 용이치 않으며, 레이져 변위계가 상대적으로 고가인 것을 감안할 때, 비교적 가격이 저가이고 측정이 용이한 다른 형태의 응답을 이용할 수 있는 기법의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2007-331-D00498)결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

박 철, 정지승, 민대홍 (2007) **토목구조물의 안전진단 및 유지관리**. 동화기술.

최상현, 임남형, 강영종 (2009). **시간영역 변형형상을 이용한 철도교량의 손상평가**. 한국철도 학회 논문집, 제12권, 제1호, pp. 129-134.

Bilello, C., Bergman, L.A. (2004). Vibration of damaged beams under a moving mass: theory and experimental validation. Journal of Sound and Vibration, Vol. 274, pp. 567-582.

Choi, S., Stubbs, N. (2004) Damage identification in structures using the time-domain response. Journal of Sound and Vibration, Vol. 275, pp. 577-590.

Kang, J.S., Park, S.K., Shin, S., Lee, H.S. (2005) Structural system identification in time domain using measured acceleration, Journal of Sound and Vibration, Vol. 288, pp.215-234.

Nam, D., Choi, S., Park, S., Stubbs, N. (2005) Improved parameter estimation using additional spectral information. International Journal of Solids and Structures, Vol. 42, pp. 4971-4987.

Park, S.K., Park, H.W., Shin, S., Lee, H.S. (2008) Detection of abrupt structural damage indued by an earthquake using a moving time window technique, Computers and Structures, Vol. 86, pp.1253-1265.

Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemates, D.W., Nadler, B.R. (2003) A review of structural health monitoring literature. Technical Report LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory.

Stubbs, N., Garcia, G. (1996) Application of pattern recognition to damage localization. Microcomputers in Civil Engineering, Vol. 11, pp. 395-409.

Stubbs, N., Kim, J.T., Topole, K. (1992) An efficient and robust algorithm for damage localization in offshore platforms. ASCE 10th Structures Congress '92, San Antonio, Texas, pp. 543-546.

Vandiver, J.K. (1975) Detection of structural failure on fixed platforms by measurement of dynamic response. Proceedings of the 7th Annual Offshore Technology Conference, Paper 2267.

◎ 논문접수일 : 09년 08월 03일
◎ 심사의뢰일 : 09년 08월 05일
◎ 심사완료일 : 09년 08월 19일