

이동하중응답을 이용한 손상인식기법의 실험적 검증

Experimental Verification of Damage Identification Method using Moving Load Response

최상현†
Choi, Sanghyun

김대혁*
Kim, Daehyork

ABSTRACT

Most damage identification methods for structural health monitoring developed to date utilize modal domain responses which require postprocessing and inevitably contain errors in transforming the domain of responses. In this paper, the feasibility of a damage identification method based on dynamics responses from moving loads is experimentally verified. The experiment is performed via applying periodic and non-periodic moving loads to a steel beam and acceleration and displacement responses of the beam is measured. The moving loads is applied using steel balls and the damage of a structure is simulated by saw-cutting the beam. The damage identification results using the measured responses show that the moving load response based damage identification method successfully identify all damages in the beam.

1. 서론

1970년대 해상구조물에 대한 초창기 연구(Vandiver, 1975; 1977)를 시작으로 동적응답 특성변화를 이용하여 교량, 터널, 건물 등 주요 구조물의 건전성을 평가하기 위한 노력이 활발히 진행되어 왔으며, 그 결과 수많은 기법이 개발되어 왔다 (Sohn et al., 2003). 개발된 기법들은 각기 상이한 이론적인 기반을 가지고 있으며 대표적으로는 모달 변형 에너지를 이용한 방법 (Stubbs et al. 1992), 신경망을 이용한 방법 (Elkordy et al. 1994), 패턴 인식에 의한 방법 (Stubbs and Garcia 1996), 민감도 해석을 이용한 방법 (Cawley and Adams 1979), 퍼지 이론에 의한 방법 (Yao 1980), 최적화를 이용한 방법 (Chen and Garba 1988) 등이 있다. 현재까지 개발된 대부분의 기법은 주로 모달응답을 이용하여 왔으나(Sohn et al., 2003), 이러한 모달응답의 경우 가속도, 변위 등 측정된 응답의 후처리를 통해 추출되므로 이 과정에서 시의 오차를 피할 수 없으며; 실제 구조물에서 측정될 수 있는 모달응답의 개수가 제한적이라는 단점을 가지고 있다 (Nam et al., 2005).

이러한 단점을 극복하기 위하여 정적응답(Sanayei and Onipede, 1991), 시간영역응답(Choi and Stubbs, 2004) 등 다른 형태의 응답을 이용하는 손상인식방법을 개발하기 위한 연구가 수행된 바 있다. 그러나 정적응답을 이용한 방법의 경우 수치해석 및 실험을 통하여 적용성이 검증된 바 있으나, 구조물의 사용에 통제가 요구되므로 구조물의 건전성을 지속적으로 모니터링하기에는 적절하지 않다. 시간영역응답의 경우는 구조적 건전성의 모니터링에 적합하며 모달응답 추출 시의 오차를 피할 수 있다는 장점이 있으나, 현재까지 제안된 방법은 계측하기 어려운 초기조건 및 하중이력에 대한 정보가 필요하거나

† 책임저자 : 정회원, 한국철도대학, 철도시설토목과, 조교수
E-mail : schoi86@nate.com
TEL : (031)460-4262 FAX : (031)462-2944
* 비회원, 한국철도대학, 철도시설토목과, 전문학사과정

(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 주기성이 강한 철도교의 활하중 특성을 감안하여 이동하중응답을 직접 이용한 손상평가이론의 적용성을 수치해석을 통하여 검토한 바 있다. 이 연구에서는 이동하중응답을 이용한 손상평가이론의 적용성을 실험을 통하여 검증하였다. 손상평가이론의 타당성은 일차적으로 정적 변형형상을 이용하여 검토하였다. 동적실험은 강관으로 제작된 단순보를 이용하여 수행되었으며, 이동하중응답은 레이저변위계를 이용하여 측정하였다. 이동하중은 단순보 위에 쇠구슬을 이동시켜 재하하였으며, 손상은 강관에 커터로 인위적인 균열을 조성하여 모사하였다. 변위계를 통해 측정된 응답을 이용하여 손상지수를 산정하였으며, Stubbs의 방법(Stubbs et al., 1992)을 이용하여 손상의 위치를 탐지하였다.

2. 손상인식 이론

Choi et al.(2004)의 손상인식이론은 시간영역에서 변형에너지의 기대치의 변화를 이용하여 손상지수를 산정하는 방법이다. m 개의 요소로 구성된 구조물의 n 개의 위치에서 동적응답, v_i , 를 $t_i = t_1$ 부터 t_{NT} 까지 Δt 간격으로 측정하였다고 가정할 때, 손상지수 β_j 는 다음과 같이 표현될 수 있다 (최상현 등, 2009).

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} \approx \frac{f_j^* + 1}{f_j + 1} \quad (1)$$

여기서, k_j 는 요소 j 의 강성파라미터, $*$ 는 손상후 구조물의 파라미터,

$$f_j \approx \frac{E_{i=1}^{NT} [v_i^T C_j v_i]}{\sum_p^m E_{i=1}^{NT} [v_i^T C_p v_i]} \quad (2)$$

C_j ($K_j = k_j C_j$)는 기하학적 요소로만 구성된 행렬, K_j 는 j 번째 요소의 국부강성행렬이다. 손상의 위치는 가설테스트(hypothesis testing)를 통해 구할 수 있으며, 손상 인식을 위하여 다음과 같은 두가지의 가설을 설정할 수 있다.

- H_0 : 부재 j 에 손상이 없음
- H_1 : 부재 j 에 손상이 있음

가설테스트는 식 (1)으로부터 구한 손상지수를 다음과 같이 표준화하여 수행한다.

$$z_j \approx \frac{\beta_j + \mu_\beta}{\sigma_\beta} \quad (3)$$

여기서 μ_β 와 σ_β 는 각각 손상지수 β_j 의 평균과 표준편차이다. One-tailed test로 요소 j 의 손상유무를 다음과 같이 결정할 수 있다.

- 만일 $z_j < z_\eta$ 이면 가설 H_0 을 선택
- 만일 $z_j \geq z_\eta$ 이면 가설 H_1 을 선택

여기서, z_η 는 가설테스트의 기준값이며 이 기준값은 가설테스트의 중요도(significance level)에 따라 달라진다. 예를 들어 기준값을 1.5라고 결정하면 가설테스트는 93%의 신뢰도를 가지게 된다.

3. 실험장치

손상평가이론을 증명하기 위하여 실내실험을 수행하였다. 그림 1은 실험을 수행하기 위한 장치이다. 그림 1(a)의 좌측은 단순보 모형과 레이저변위계를 우측은 쇠구슬을 이용하여 이동하중을 모사하기 위한 가속경사로장치를 보여주고 있으며, 그림 1(b)는 데이터수집을 위한 데이터로거와 컴퓨터를 보여주고 있다. 단순보는 폭 10cm, 길이 180cm(지간 150cm), 두께 4.5mm의 강판이다. 지지대는 H형강, 강판 및 원형봉으로, 가속경사로장치는 높이 90cm, 반경 90cm로 강판 및 H형강으로 제작하였다. 레이저 변위계는 Keyence사의 LK-081로 기준거리 80mm, 측정거리 ± 15 mm, 분해능 $3\mu\text{m}$, 샘플링주기 $1.024\mu\text{sec}$ 이다. 컨트롤러는 LK-2101이며, 데이터로거는 Kyowa사의 EDX-100A이다. 데이터 수집을 위한 프로그램은 Kyowa사의 DCS-120A이다. 실험에 적용된 실험 파라미터는 표 1에 정리하였다.



(a) 단순보와 이동하중장치



(b) 데이터수집장치

그림 1. 실내실험 장치

표 1. 실험 파라미터

parameter	setting	notes/units
sampling length	periodic load: 30sec nonperiodic load: 40sec	samples per channel
resolution	1024	Hz

그림 2는 실험장치의 개요이다. 레이저 변위계에서 측정된 신호는 컨트롤러를 거쳐 데이터로거로 수집되고 디지털신호로 변환되어 컴퓨터로 저장되도록 하였다. 측정은 4개의 변위계를 이용하여 수행하였다. 실험은 변위계 및 이론의 일차검증을 위한 정적실험과 이동하중을 이용한 동적실험으로 나누어 수행하였다.

3.1 정적실험

손상평가 이론을 일차적으로 검증하기 위하여 정적하중을 이용한 실험을 수행하였다. 정적인 하중 재하로는 하나의 변형형상만을 구할 수 있으나, 동적응답이 이러한 변형형상의 연속이라고 간주할 때 변

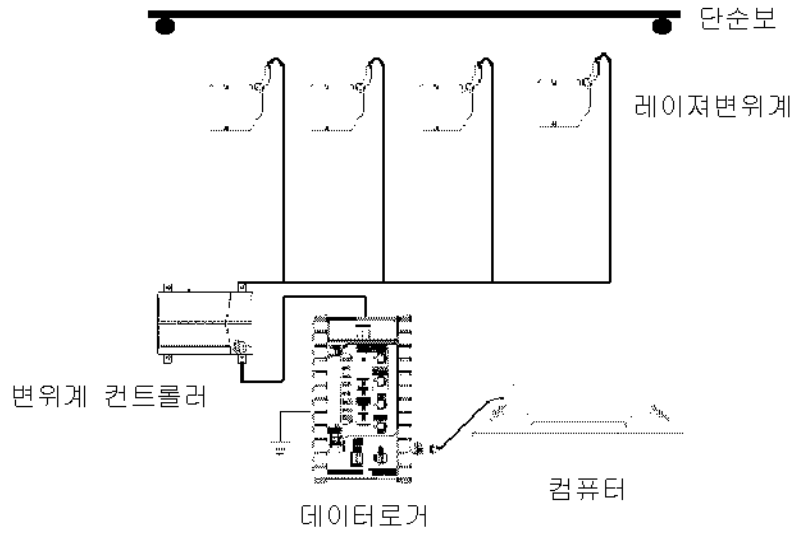


그림 2. 실험장치 개요

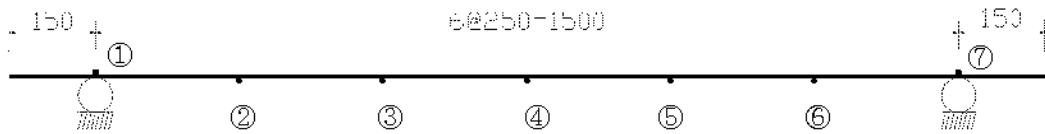


그림 3. 정적실험을 위한 변위계의 배치

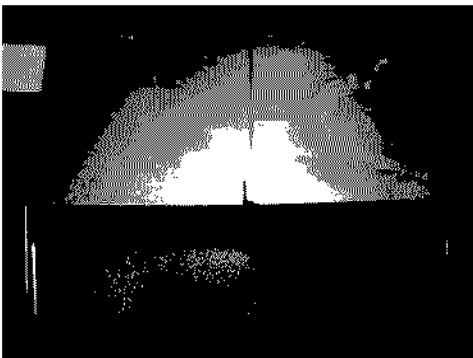


그림 4. 시험체에 가해진 손상

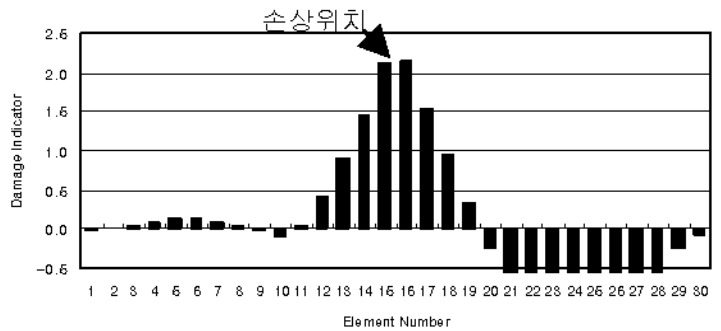


그림 5. 정적응답을 이용한 손상탐지 결과

형에너지의 기대치의 변화를 이용한 손상평가기법의 이론적인 타당성에 대한 기본적인 검토로 가장 용이한 방법이다. 그림 3은 정적실험을 위한 변위계 배치도이다. 그림의 ①부터 ⑦의 위치에 변위계를 설치하였으며, 변위계가 4개 뿐이므로 ④의 위치에 설치한 변위계는 고정하고 ① ~ ④의 위치에서 변위를 1차 측정, ④ ~ ⑦의 위치에서 2차 측정하여 ④의 위치에서 측정한 값으로 보정하였다. 하중은 위치

⑤와 ⑥ 사이의 중앙부에 3kgf의 추를 올려 가하였으며, 손상은 ④의 위치에서 양단으로 10mm씩 커터로 조성하였다. 그림 4는 커터로 조성된 손상이다. 손상해석에 적용된 변위는 하중 재하로 인한 탄성 변위가 완전히 발생한 이후의 응답을 이용하였다. 손상해석은 7개의 위치에서 측정된 변위와 다항식 보간법(polynomial interpolation)을 이용하여 측정개소 사이를 4점씩 보간하여 총 30개의 요소로 수행하였다. 식 (1)의 수치미분은 유한차분법을 이용하여 수행하였다. 손상탐지 결과는 그림 5에 나타내었으며, 손상의 위치가 성공적으로 탐지되었음을 볼 수 있다.

3.2 동적실험

동적실험은 그림 6에서와 같이 4개의 변위계를 배치하고 이동하중을 가하여 손상을 가하기 전과 가한 후의 응답을 측정하는 방법으로 수행하였다. 이동하중은 이동하중장치로부터 주기적과 비주기적의 두가지 시나리오로 쇠구슬을 낙하시켜 가하였다. 실험에 사용된 쇠구슬은 이동하중의 변동성을 주기위하여 직경 25.4mm(67.5g), 28.5mm(96.2g), 31.5mm(132.6g), 35mm(176.7g), 38mm(228.8g)의 다섯 종류를 각각 4개씩 사용하였다. 주기적 이동하중은 쇠구슬을 1초 간격으로 낙하시키는 방법으로, 비주

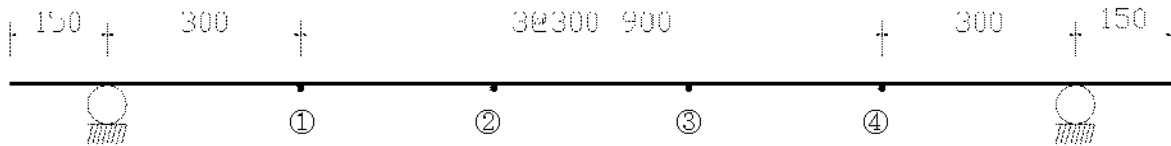


그림 6. 동적실험을 위한 변위계의 배치

표 2. 손상 시나리오

손상 Case	손상 위치 및 크기	이동하중
1	시편 중앙, 길이 20mm	주기적
2	시편 중앙, 길이 20mm	비주기적
3	시편 중앙, 길이 40mm	주기적
4	시편 중앙, 길이 40mm	비주기적

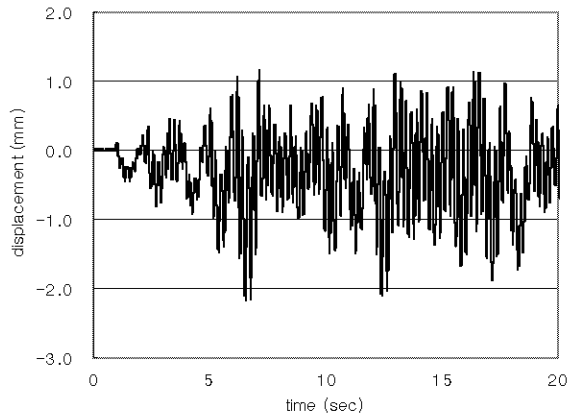


(a) 실험에 사용된 쇠구슬

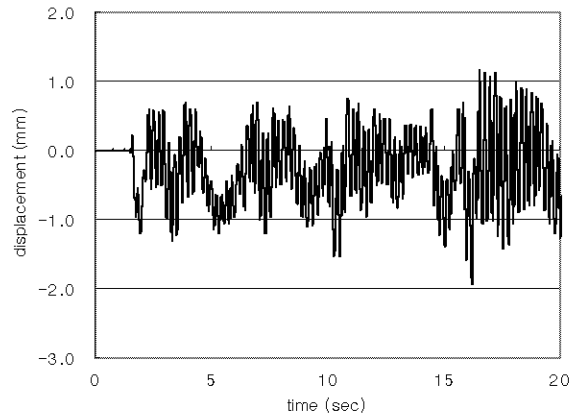


(b) 낙하되는 쇠구슬

그림 7. 이동하중장치를 이용한 하중재하



(a) 주기적 하중에 의한 응답

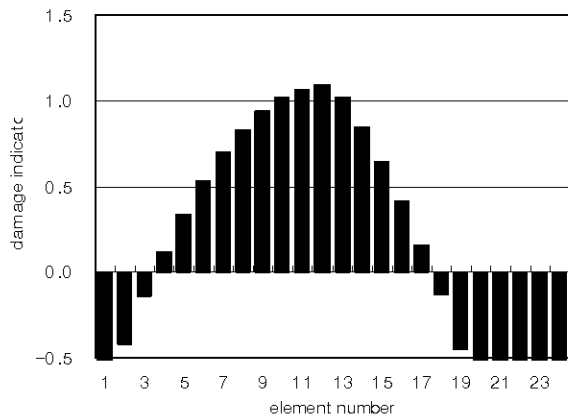


(b) 비주기적 하중에 의한 응답

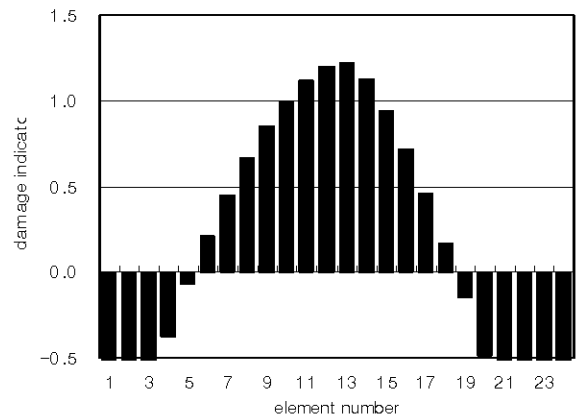
그림 8. 이동하중에 의한 응답

기적 이동하중은 임의의 직경의 쇠구슬을 1초에서 2초 사이의 임의의 시간간격으로 낙하시키는 방법으로 가하였다. 그림 7(a) 및 7(b)는 각각 쇠구슬과 쇠구슬이 가속경사로장치로부터 낙하되는 장면을 보여주고 있다. 그림 8(a)와 8(b)는 각각 주기적 및 비주기적 이동하중에 의한 변위응답이다. 손상 시나리오의 시편의 중앙, 즉 그림 6의 위치 ②와 ③사이에서 시편 양단으로부터 10mm씩 20mm의 균열을 조성한 경우 및 20mm씩 40mm 길이의 균열을 조성한 경우와 주기적 및 비주기적 이동하중을 재하했을 경우의 조합으로 구성하였다. 손상의 종류 및 이동하중의 성격에 따른 손상시나리오를 표 2에 정리하였다. 동적 응답은 손상이 없는 경우와 손상 Case 1 ~ 4에 대하여 각각 측정하였으며, 측정된 응답을 식 (2)에 대입하여 손상지수를 산정하고 식 (3)과 2절의 가설테스트를 이용하여 손상의 위치를 탐지하였다. 변위계의 개수가 제한되어 있어 손상의 위치는 한 곳으로 한정하였으며, 다만 손상의 크기와 이동하중의 성격에서 변동을 주었다.

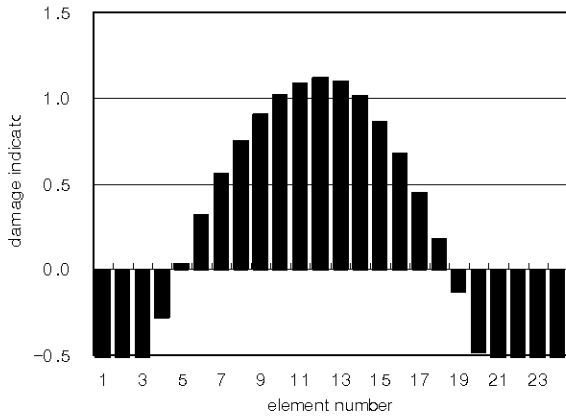
손상 해석은 측정된 손상 전의 응답과 손상 후의 응답을 이용하여 수행하였으며, 응답 측정위치가 4곳에 불과하므로 다항식 보간법을 이용하여 측정개소 간에 7점의 응답을 보간하였다. 결과적으로 총 24개의 요소에 대하여 2절의 절차를 적용하여 손상해석을 수행하였다. 손상위치 탐지를 위한 가설테스트



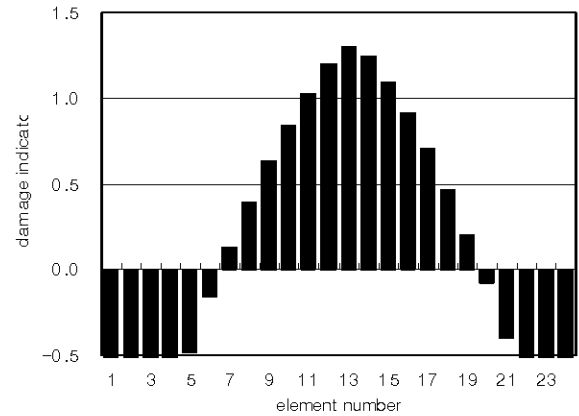
(a) 손상 Case 1



(b) 손상 Case 2



(c) 손상 Case 3



(d) 손상 Case 4

그림 9. 손상탐지 결과

의 기준값은 실험응답임을 고려하여 1.0(84% 신뢰도)으로 하였다. 손상해석은 모든 손상 case에 대하여 일률적으로 측정 시작시간으로부터 10초간의 응답 만을 이용하였다. 손상지수 산정을 위한 수치미분은 유한차분법을 이용하여 수행하였다.

손상 탐지 결과는 그림 9에 나타내었다. 그림에서 손상의 위치는 요소 12번과 13번에 해당한다. 그림에서 모든 손상 case에 대하여 성공적으로 손상의 위치를 탐지한 것을 볼 수 있으나, 실측정 개소의 부족을 보완하기 위한 수치적 보간으로 인하여 손상의 영향이 인접한 요소로 넓게 퍼져 나타난 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 응답의 측정 개소를 증가시킴으로서 보완될 수 있을 것으로 판단되나,

이 실험에 사용된 것과 같은 레이저 변위계가 상대적으로 고가이며 다른 형태의 변위계로는 실제 구조물의 변위를 측정하기 용이하지 않은 현실을 감안할 때 비교적 가격이 저가이며 측정이 용이한 가속도응답을 용이하게 이용할 수 있는 기법의 개발이 필요할 것으로 판단된다. 손상 Case 1과 3 및 Case 2와 4를 비교할 때 손상의 크기가 커짐에 따라 탐지도는 크게 변화하지 않았으며, 이 또한 실제 측정개소의 부족과 이에 따른 수치적 보간으로 인한 영향으로 판단된다.

4. 결 론

이 논문에서는 손상 등으로 발생하는 구조물의 물리적 특성 변동으로 인한 시간영역 변형에너지의 기대치의 변화를 이용한 손상평가기법의 적용성을 실험을 통하여 검증하였다. 실제 교량의 하중을 모사하기 위하여 이동하중장치를 이용하여 이동하중을 가하였으며, 측정된 응답을 손상평가이론에 적용하여 인위적으로 조성한 손상 위치를 탐색하였다. 손상해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 변형에너지의 기대치의 변화를 이용한 손상평가기법의 이론적 타당성을 검증하기 위하여 정적 하중 응답을 이용하여 손상해석을 수행하였으며, 실제 변형형상에 적용이 가능함을 확인하였다.

(2) 이동하중에 의한 동적응답을 이용하여 손상평가기법의 적용성을 검토한 결과 손상평가기법은 주기적 또는 비주기적 하중을 받는 경우 모두에서 성공적으로 손상을 탐지할 수 있음을 확인하였다.

(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, 레이저 변위계가 상대적으로 고가인 것을 감안할 때, 비교적 가격이 저가이고 측정이 용이한 가속도응답을 용이하게 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

1. 최상현, 임남형, 강영중 (2009). "시간영역 변형형상을 이용한 철도교량의 손상평가." 한국철도학회 논문집, Vol. 12, No. 1, pp. 129-134.
2. P. Cawley, R.D. Adams (1979) "The location of defects in structures from measurements of natural frequencies." *Journal of Strain Analysis*, Vol. 14, No. 2, pp. 49-57.
3. J-C. Chen, J.A. Garba (1988) "On-orbit damage assessment for large space structures." *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 9, pp. 1119-1126.
4. S. Choi, N. Stubbs (2004) "Damage identification in structures using the time-domain response," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 275, pp. 577-590.
5. M.F. Elkordy, K.C. Chang, G.C. Lee (1994) "A structural damage neural network monitoring system." *Microcomputers in Civil Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 83-9.
6. J.S. Kang, S.K. Park, S. Shin, H.S. Lee (2005) "Structural system identification in time domain using measured acceleration," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 288, pp.215-234.
7. D. Nam, S. Choi, S. Park, N. Stubbs (2005) "Improved parameter estimation using additional spectral information," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, pp. 4971-4987.
8. S.K. Park, H.W. Park, S. Shin, H.S. Lee (2008) "Detection of abrupt structural damage induced by an earthquake using a moving time window technique," *Computers and Structures*, Vol. 86, pp.1253-1265.
9. M. Sanayei, O. Onipede (1991) "damage assessment of structures using static test data," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 7, pp. 1174-1179.
10. H. Sohn, C.R. Farrar, F.M. Hemez, D.D. Shunk, D.W. Stinemat, B.R. Nadler (2003) "A review of structural health monitoring literature," *Technical Report LA-13976-MS*, Los Alamos National Laboratory.
11. N. Stubbs, G. Garcia (1996) "Application of pattern recognition to damage localization." *Microcomputers in Civil Engineering*, Vol. 11, pp. 395-409.
12. N. Stubbs, J.T. Kim, K. Topole (1992) "An efficient and robust algorithm for damage localization in offshore platforms." *ASCE 10th Structures Congress '92*, San Antonio, Texas, pp. 543-546.
13. J.K. Vandiver (1975) "Detection of structural failure on fixed platforms by measurement of dynamic response." *Proceedings of the 7th Annual Offshore Technology Conference*, Paper 2267.
14. J.K. Vandiver (1977) "Detection of structural failure on fixed platforms by measurement of dynamic response." *Journal of Petroleum Technology*, pp. 305-310.
15. J.T.P. Yao (1980) "Damage assessment of existing structures." *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 106, No. EM4, pp. 785-799.