

가동변형형상을 이용한 철도구조물의 손상인식

Damage identification in a railroad structures using operational deflection shape

최상현*
Choi, Sanghyun

ABSTRACT

To maintain effectively the functionality of major railroad facilities such as bridges, identifying and evaluating damage in a structure and taking appropriate action via continuous structural health monitoring are very important. However, most damage identification methods for structural health monitoring developed to date utilize modal domain responses which inevitably contain errors in transforming the domain of responses. In this paper, a damage identification method using time-domain operational deflection shapes is proposed. Since the proposed method utilizes time-domain responses, the error in the process of transformation to response domain can be avoided, and the accuracy of structural health evaluation can be improved. The feasibility of the proposed method is verified via a numerical example of a simple bridge structure.

1. 서론

외력에 의한 구조물의 응답을 둘 이상의 위치에서 측정할 경우 구조물의 진동형상(vibration shape)이 결정될 수 있다. 이러한 진동형상은 자유도 간 운동의 크기와 위상각의 상대차로 정의될 수 있다. 가동변형형상(ODS, operating deflection shape)이란 사용 중인 구조물에서 측정된 진동형상을 나타낸다. (Richardson and Schwarz, 2003) 이러한 가동변형형상은 특정 진동수 또는 특정 시간의 진동형상으로 정의될 수 있다. 그러므로 가동변형형상은 랜덤(random), 충격 또는 사인파 등 다양한 형태의 시간영역응답으로부터 결정될 수 있으며, 선형스펙트럼, 교차 및 자기파워스펙트럼(cross and auto-power spectrum), 주파수응답함수(frequency response function), 전달율(transmissibility)과 ODS 주파수응답함수로 불리는 특수한 형식의 응답을 포함한 주파수영역응답으로부터도 구해질 수 있다. (Richardson, 1997) 고유진동수, 모드형상 등의 모달응답은 이러한 가동변형형상을 이용하여 추출될 수 있다.

현재까지 응답측정을 통해 교량, 터널, 건물 등 주요 구조물의 건전성을 평가하여 기능성과 안전성을 유지하기 위한 연구는 주로 모달응답을 이용하여 왔으나(Sohn 등, 2003), 이러한 모달응답의 경우 (1) 가속도, 변위 등 측정된 응답의 후처리를 통해 추출되므로 이 과정에서의 오차를 피할 수 없으며; (2) 실제 구조물에서 측정될 수 있는 모달응답의 개수가 제한적이라는 단점을 가지고 있다. (Nam 등,

* 한국철도대학, 철도시설토목과 조교수, 정회원
E-mail : schoi@krc.ac.kr
TEL : (031)460-4262 FAX : (031)462-2944

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.

철도교량은 열차들이 시격을 가지고 고정된 궤도 위를 주행하므로 도로교와 달리 하중이 이산적이며 경로가 일정하나, 활하중의 비율이 높아 변동응력에 의한 피로의 위험성이 상대적으로 높은 특징이 있다. (阿部允, 경갑수, 1996) 이 논문에서는 시간영역의 가동변형응답을 이용하여 철도교량의 손상을 인식할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 Choi와 Stubbs(2004)의 시간영역 손상탐지기법에 기초하여 가동변형응답의 변형에너지(strain energy)의 변화를 이용하여 유도하였다. 제안된 방법의 적용성은 판형교에 대한 수치 모델을 이용하여 검토하였다.

2. 손상인식 이론

m개의 요소로 구성된 구조물의 n개의 위치에서 동적응답을 $t_i = t_1$ 부터 t_{NT} 까지 Δt 간격으로 측정하였다고 가정할 때, 임의의 시간 t_i 에서 j번째 요소의 변형에너지, u_{ij} 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u_{ij} = \frac{1}{2} v_i^T K_j v_i \quad (1)$$

여기서 v_i 는 시간 t_i 에서 측정된 가동변형형상 $1 \times n$ 의 벡터이며, K_j 는 j번째 요소의 강성행렬이다. K_j 는 다음과 같이 요소 j의 강성, k_j 와 기하학적 요소로만 구성된 행렬, C_j 로 표현될 수 있다.

$$u_j = k_j C_j \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터 $t_i = t_1$ 부터 t_{NT} 까지 j번째 요소의 변형에너지의 기대치는 다음과 표현될 수 있다.

$$\overline{u_j} = E[u_{ij}] = \frac{1}{2NT} k_j E[v_i^T C_j v_i] \quad (3)$$

구조물 전체의 변형에너지에 대한 j번째 요소의 변형에너지의 분율, F_j 의 기대치는 다음과 같다.

$$F_j = E[u_{ij} / \Sigma u_{ij}] = \frac{\overline{u_j}}{\overline{\Sigma u_j}} = k_j f_j \quad (4)$$

손상이 발생한 구조물의 경우 식 (4)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_j^* = E[u_{ij}^*/\Sigma u_{ij}^*] = \frac{\overline{u_j^*}}{\Sigma u_j^*} = k_j^* f_j^* \quad (5)$$

여기서 위첨자 *는 손상후 구조물에 대한 파라미터를 나타낸다.

손상 전·후의 분율은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_j^* = F_j + dF_j \quad (6)$$

식 (6)의 dF_j 는 일차 전개를 통해 다음과 같이 근사될 수 있다. (Choi and Stubbs, 2004)

$$dF_j \approx -F_j \alpha_j \quad (7)$$

여기서 강성의 분차 α_j 는 다음 식과 같다.

$$\alpha_j = \frac{dk_j}{k_j} = \frac{k_j^* - k_j}{k_j} = \frac{1}{\beta_j} - 1 \quad (8)$$

여기서 β_j 는 손상지수이다. 식 (4), (5), (7), (8)을 식 (6)에 대입하면 다음과 같은 손상지수에 대한 표현식을 얻을 수 있다.

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} = \frac{1}{2} \left(\frac{f_j^*}{f_j} + 1 \right) \quad (9)$$

손상의 위치는 가설테스트(hypothesis testing)를 통해 구할 수 있으며, 손상 인식을 위하여 다음과 같은 두가지의 가설을 설정할 수 있다.

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

가설테스트는 식 (9)의 손상지수를 이용하여 수행할 수 있으나, 식 (9)의 경우 분차를 이용하므로 지점 부 등 변형에너지가 작은 부분에서 오차가 크게 증폭될 수 있어 분자와 분모에 각각 1을 더하여 정리하면 다음과 같은 손상지수식을 구할 수 있다.

$$\beta_j \approx \frac{f_j^* + 1}{f_j + 1} \quad (10)$$

가설테스트를 수행하기 위하여 식 (10)으로부터 구한 손상지수를 다음과 같이 표준화한다.

$$z_j \approx \frac{\beta_j + \mu_\beta}{\sigma_\beta} \quad (11)$$

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. 수치해석 예제

수치해석 예제에 사용된 구조물은 황원섭 등(2007)의 연구에 적용된 관형철도교를 참조한 2차원 교량으로 그림 1과 같이 18개의 보요소로 모델링하였다. 침목(0.55ton/m) 및 레일(0.203ton/m)의 질량은 각 절점에 집중질량으로 고려하였으며 (김현호, 2005), 지지조건은 양단 단순지지로 가정하였다. 시간이력해석은 0.001초 간격으로 5개의 굽힘모드를 이용한 모드중첩법을 이용하여 수행하였으며, 감쇠비는 일반적인 강교량의 감쇠비가 1~2% 임을 참조하여 1%로 가정하였다. (한유진, 1999)

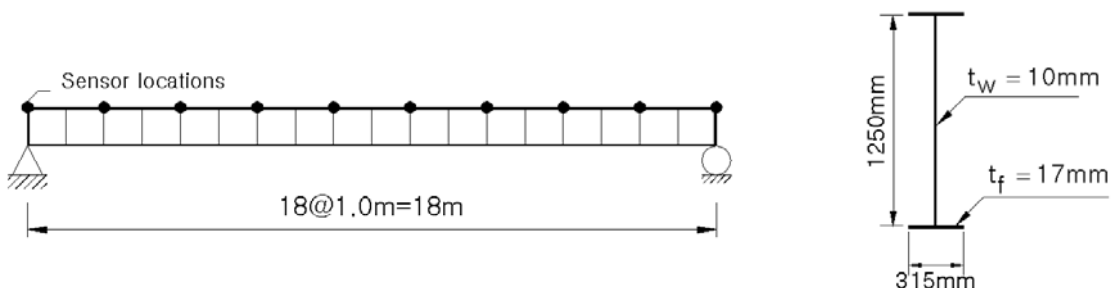


그림 1. 수치해석 모델 (관형교)

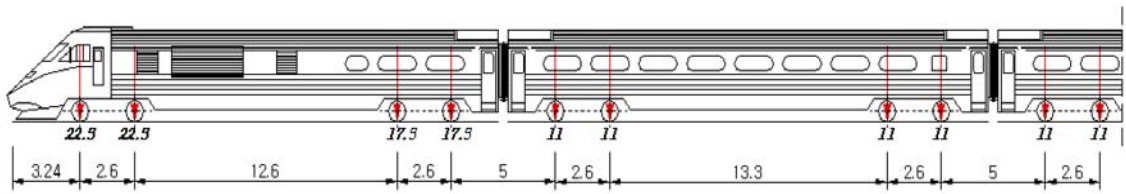


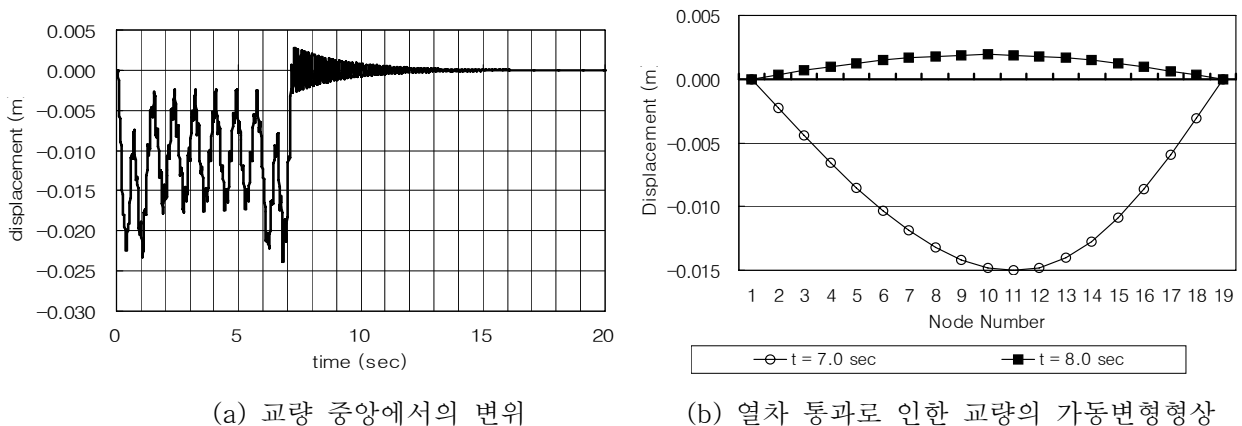
그림 2. 새마을 PMC 열차의 축중 배치도 (황원섭 등 2007)

동적해석에 사용된 하중은 황원섭 등(2007)의 연구를 참조하여 새마을 PMC 8량 열차로 하였으며 80km/hr, 100km/hr 및 120km/hr의 세가지 속도로 교량을 통과하는 것으로 가정하였다. 교량의 응답은 연직방향으로 19개의 위치에서 20초 간 측정된 것으로 가정하였다. 참고로 열차의 속도별 교량 통과 시간은 80km/hr, 100km/hr 및 120km/hr에 대하여 각각 9초, 7.2초 및 6초이다. 그림 3은 열차가 100km/hr로 통과 시 (a) 교량 중앙에서의 응답의 시간이력 및 (b) 열차 통과중 (7초) 및 열차 통과후(8초) 교량의 가동변형형상이다.

손상은 보요소의 탄성계수 감소를 통해 모사하였으며, 다음과 같은 3가지 손상 시나리오로 손상 인식을 수행하였다.

- 손상 시나리오 [1] : 요소 9번에 10% 손상 발생
- 손상 시나리오 [2] : 요소 5번에 10% 손상 발생
- 손상 시나리오 [3] : 요소 5번과 9번에 각각 10% 손상 발생

가동변형형상을 이용한 손상의 인식 가능성을 확인하는 연구임을 감안하여 손상 시나리오는 비교적 간단하게 구성하였다.



(a) 교량 중앙에서의 변위

(b) 열차 통과로 인한 교량의 가동변형형상

그림 3. 열차 속도 100km/h 시 시간이력해석 결과

표 1. 손상인식 방법

방법	응답 종류	응답 시간 구간	응답 비교 방법
1	자유진동	80km/hr : 8.95초 ~ 9.945초	손상 전·후 구조물의 같은 속도응답 비교
2	자유진동	100km/hr : 7.16초 ~ 8.155초	
3	강제진동	3초 ~ 3.995초	손상 전·후 구조물의 같은 속도응답 비교
4	강제진동		손상 전·후 구조물의 다른 속도응답 비교

손상 인식은 표 1과 같이 열차 통과 중의 강제진동응답과 열차 통과 후의 자유진동응답 이용하여 수행하였다. 손상 인식 방법은 방법 1, 3의 경우 같은 속도의 열차가 통과 시 손상 전·후 구조물에서 측정된 응답을 적용하였으나, 열차의 속도가 일률적이지 않음을 감안하여 방법 2, 4의 경우는 다른 속도의 열차가 통과 시 손상 전·후 구조물에서 측정된 응답을 적용하여 수행하였다.

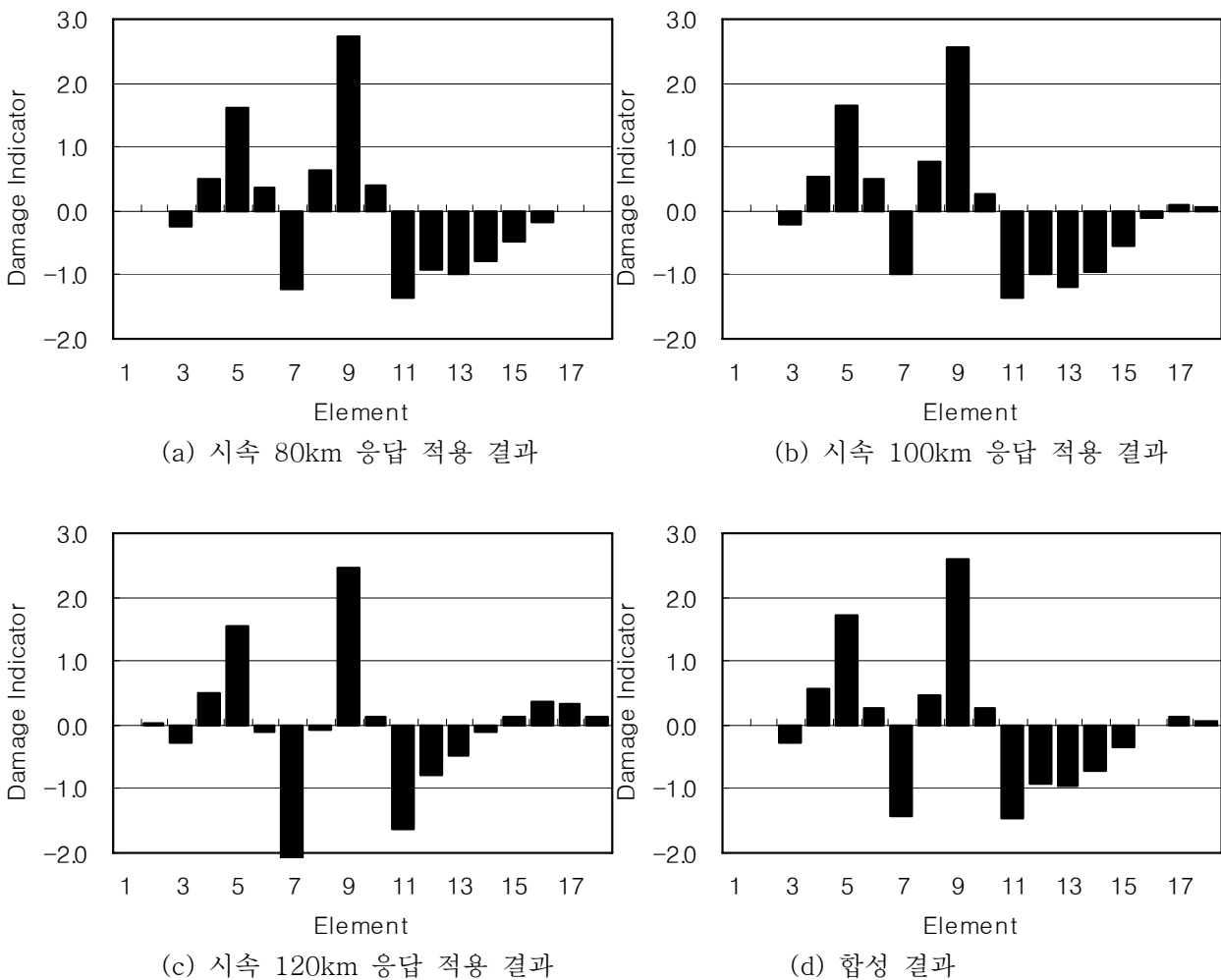


그림 4. 손상인식해석 결과 (시나리오 [3])

그림 4는 손상 시나리오 [3]의 손상 인식 결과이다. (a), (b), (c)는 각각 시속 80km, 100km, 120km에서의 응답을 이용한 결과이며, (d)는 다음 식으로 응답을 합성한 손상지수를 이용한 결과이다.

$$\beta_j \approx \frac{\sum_{r=1}^{nm} f_{rj}^* + 1}{\sum_{r=1}^{nm} f_{rj} + 1} \quad (12)$$

여기서 nm은 합성에 적용된 응답의 개수이다. 식 (12)의 합성식은 변형에너지가 상대적으로 작은 곳에서 발생할 수 있는 오차의 영향을 희석시켜 손상 인식의 정확도를 제고시키는 효과가 있는 것으로 보고된 바 있다. (Choi et al. 2006) 그림에서 5번과 9번의 손상이 성공적으로 인식되었음을 알 수 있다. 모든 손상 시나리오에 대한 손상인식 결과를 그림 5~7에 제시하였다. 참고로 모든 결과는 식 (12)의 손상지수를 이용하였으며, 손상인식 방법 1, 3의 경우 시속 80km, 100km, 120km에서의 손상 전·후 응답을 비교를 통해 구한 총 3개의 손상지수를 합성하였다. 손상인식 방법 2, 4의 경우 손상 전 시속 80km 응답과 손상 후 시속 100km, 120km 응답을 비교하는 식으로 총 6개의 손상지수를 합성하였다. 손상인식 결과 모든 손상시나리오에 대하여 손상 위치를 성공적으로 찾아내는 것으로 나타났다. 특히 손상인식 방법 2, 4의 경우와 같이 다른 속도의 응답을 비교했을 경우도 거의 동일한 결과를 보여 손상인식방법의 적용성이 뛰어남을 알 수 있었다. 또한 열차 통과 후의 자유진동응답을 이용한 손상인식 방법 1, 2와 열차 통과 중의 강제진동응답을 이용한 손상인식 방법 3, 4 모두 성공적으로 손상을 인식하는 것으로 나타났다.

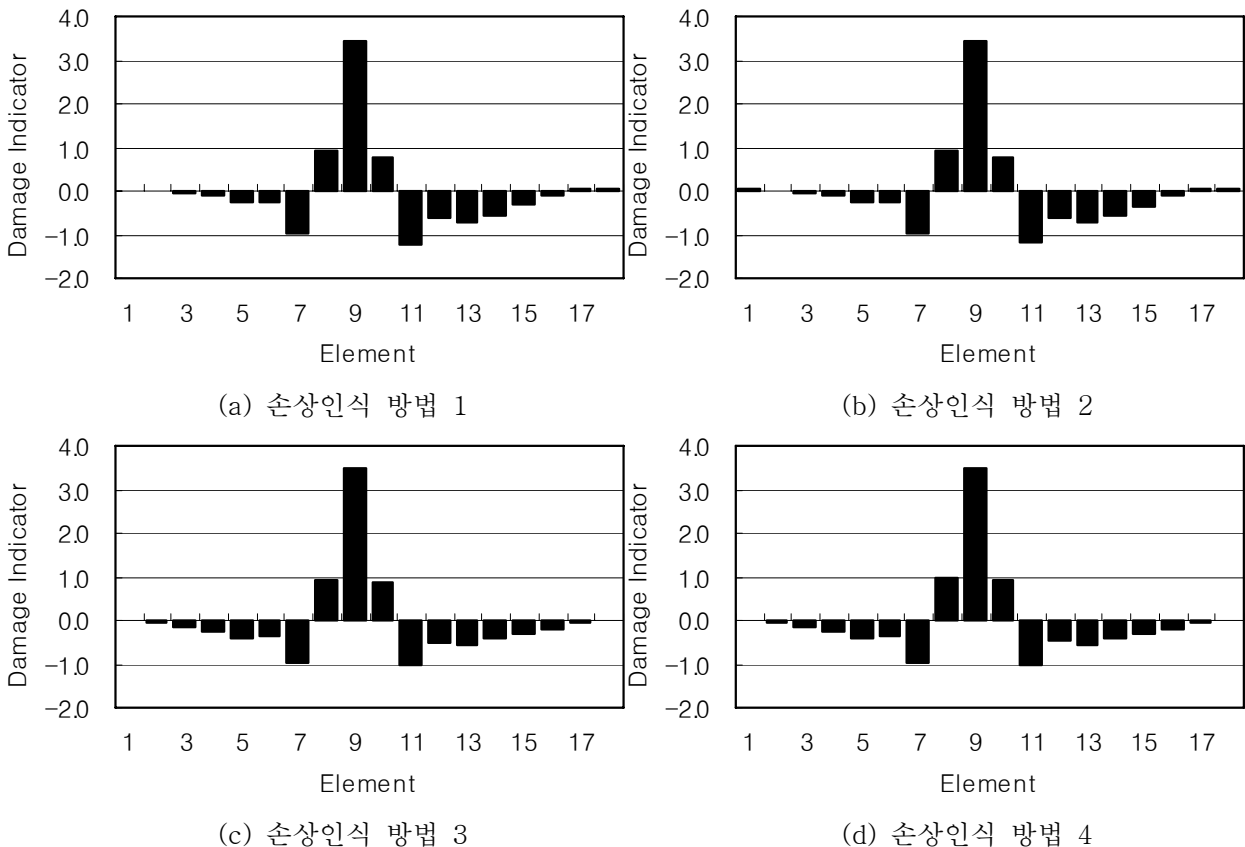
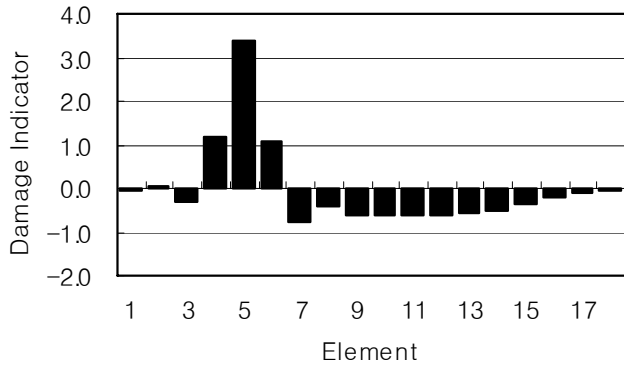
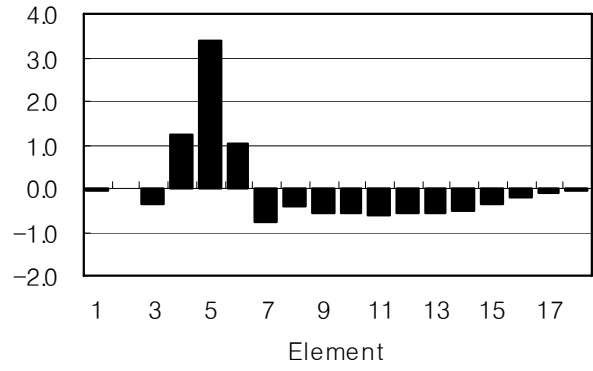


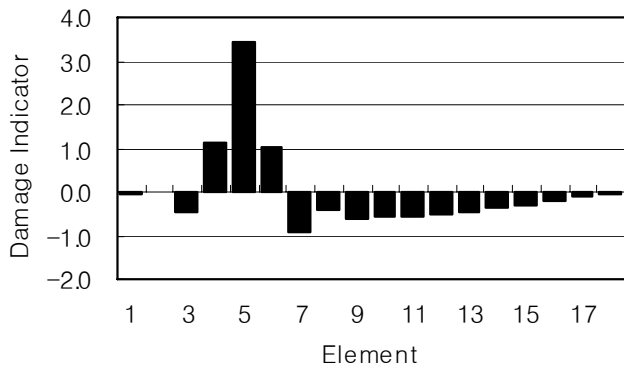
그림 5. 손상인식해석 결과 (손상시나리오 [1])



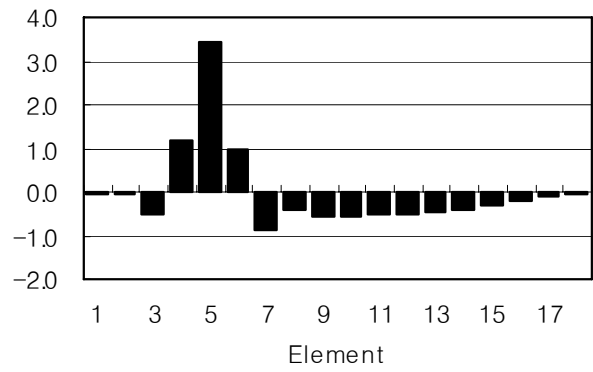
(a) 손상인식 방법 1



(b) 손상인식 방법 2

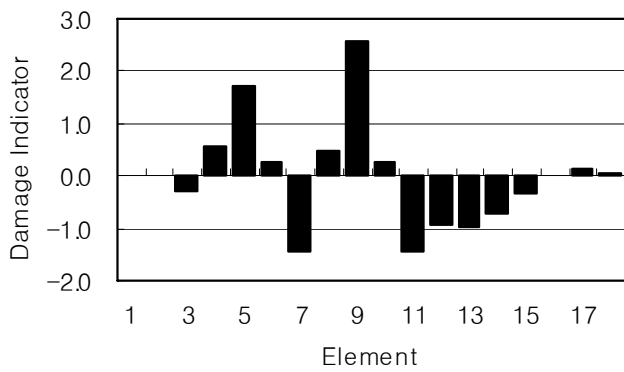


(c) 손상인식 방법 3

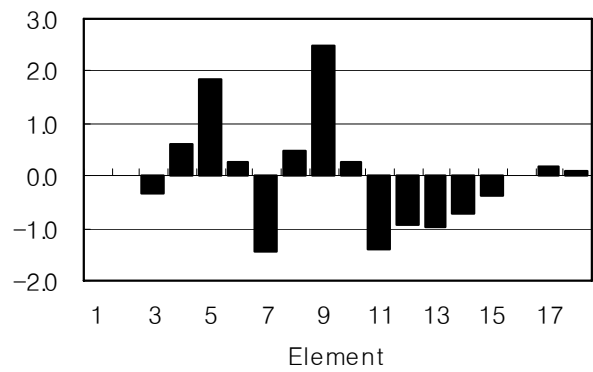


(d) 손상인식 방법 4

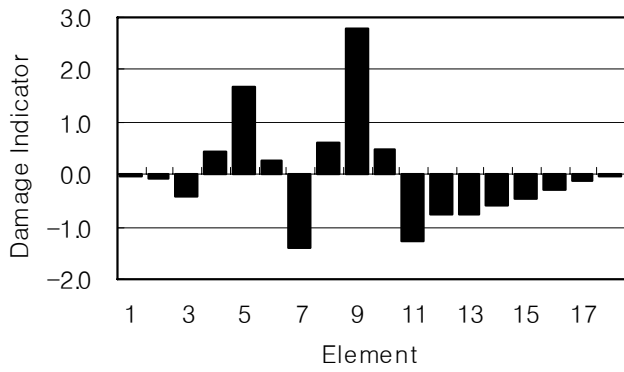
그림 6. 손상인식해석 결과 (손상시나리오 [2])



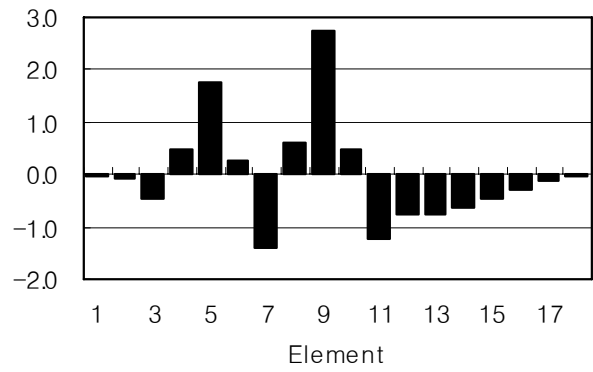
(a) 손상인식 방법 1



(b) 손상인식 방법 2



(c) 손상인식 방법 3



(d) 손상인식 방법 4

그림 7. 손상인식해석 결과 (손상시나리오 [3])

4. 결 론

이 논문에서는 시간영역 가동변형형상을 이용하여 철도교량의 손상을 인식할 수 있는 방법을 제안하였다. 판형철도교에 대한 수치해석모델을 이용하여 방법의 적용성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 시간영역 가동변형형상은 철도교량의 손상 인식에 적용될 수 있음을 확인하였다.
- (2) 제시된 방법은 동일 속도에서 측정된 응답 뿐 아니라 상이한 속도의 응답을 이용해서도 손상을 인식할 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 제시된 방법은 열차 통과 후의 자유진동응답 뿐 아니라 열차 통과 중에 측정된 강제진동응답을 이용해서도 손상을 인식할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. M.H. Richardson, B. Schwarz (2002), "Modal parameter estimation from operating data," *Sound and Vibration*, Jan.
2. M.H. Richardson (1997), "Is it mode shape or an operating deflection shape," *Sound and Vibration*, Jan.
3. 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.
4. M. Sanayei, O. Onipede (1991), "damage assessment of structures using static test data," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 7, pp. 1174-1179.
5. S. Choi, N. Stubbs (2004), "Damage identification in structures using the time-domain response," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 275, pp. 577-590.
6. 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.
7. 阿部允, 경갑수 (1996), "철도교의 피로와 유지관리," *강구조학회지*, Vol. 8, No. 3, pp. 92- 102.
8. 황원섭, 조은상, 오지택, 김현민 (2006), "무도상 철도판형교의 동적응답특성 및 보강방안," *한국강구조학회 논문집*, Vol. 19, No. 3, pp. 281-290.
9. 김현호, 오지택, 송재필, 김기봉 (2005), "유한요소프로그램을 이용한 철도판형교의 동적거동," *한국철도학회 논문집*, Vol. 8, No. 3, pp. 228-234.
10. 한유진 (1998), "열차하중을 받는 교량의 수동진동제어," 서울대 토목공학과, 공학석사학위 논문.
11. S. Choi, S. Park, N.H. Park, N. Stubbs (2006), "Improved fault quantification for a plate structure," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 297, No. 3-5, pp. 865-879.