

# 모형교량의 모드특성 분석 및 차량시험에 의한 손상추정

## Experimental Modal Analysis and Damage Estimation of Bridge Model Using Vehicle Tests

이종원\*      이진학\*\*      심종민\*\*\*      윤정방\*\*\*\*      김재동\*\*\*\*\*  
Lee, Jong-Won      Yi, Jin-Hak      Shim, Jong-Min      Yun, Chung-Bang      Kim, Jae-Dong

### ABSTRACT

Damage estimation of a bridge structure is presented using ambient vibration data caused by the traffic loadings. The procedure consists of identification of the modal properties and assessment of the damage locations and severities. An experimental study is carried out on the bridge model subjected to vehicle loadings. Vertical accelerations of the bridge deck are measured at a limited number of locations. The modal parameters are identified from the free vibration signals extracted using the random decrement method. Then, the damage assessment is carried out based on the estimated modal parameters using the neural networks technique. The identified damage locations and severities agree reasonably well with the inflicted damages on the structure.

### 1. 서론

본 연구에서는 차량하중에 의한 상시진동 데이터로부터 Random decrement 방법(Cole, 1968)을 사용하여 자유진동신호를 구하였으며, 이것으로부터 구조물의 모드특성을 구하였다. 손상이 없는 구조물의 유한요소모델을 구성할 때에는 차량의 영향을 배제하기 위하여 충격시험결과를 이용하였으며, 모드섭동법(Yun and Hong, 1992)을 이용하여 유한요소모델을 개선하였다. 차량시험으로부터 추정된 모드특성에 기초하여 손상 위치 및 손상정도를 추정하기 위해서는 입력자료와 출력자료 사이의 패턴매칭기능이 뛰어난 신경망기법(Haykin, 1994)을 사용하였다.

제안기법을 검증하기 위하여 단순지지 합성형 모형교량을 제작하였으며, 차량하중은 서로 연결된 3대의 모형차량으로 모사하였다. 차량운행에 의한 교량의 수직가속도를 여러 위치에서 측정하였다. H형강의 단면을 감소시키는 것으로 구조물의 손상을 모사하였으며, 각각의 손상경우에 따라 20번의 차량시험을 수행하였다. 추정된 손상위치는 실제 손상위치와 잘 일치하였고, 손상정도 역시 합리적인 추정이 가능하였다.

\* 한국기계연구원 선임연구원  
\*\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정  
\*\*\* 한국과학기술원 토목공학과 석사과정  
\*\*\*\* 한국과학기술원 토목공학과 교수  
\*\*\*\*\* 한국기계연구원 책임연구원

## 2. 이론적 배경

### 2.1 Random Decrement 방법

Random decrement 방법(Cole, 1968; Yang et al., 1985; Asmussen and Brincker, 1996)의 기본개념은 구조물의 불규칙하중에 의한 응답은 확정적성분(deterministic part)과 불규칙성분(random part)로 이루어져 있다는 것이다. 임의의 초기조건에 맞는 여러 개의 불규칙응답을 평균하면, 불규칙하중에 의한 불규칙성분은 사라지고, 구조물의 특성을 나타내는 확정적성분만이 남게 된다. 이렇게 하여 얻어진 확정적성분은 자유진동신호와 같고, 이를 randomdec 신호라 하며, 이로부터 고유주파수, 모드형상, 감쇠 등의 모드특성을 쉽게 구할 수 있다. Randomdec 신호  $z(\tau, x)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$z(\tau, x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(\tau + t_i, x) \quad (1)$$

여기서,  $y(t, x)$ 는  $x$ 의 위치에서 측정된 신호,  $t_i$ 는 특정 조건을 만족하는 시작시간,  $N$ 은 시작시간의 전체 개수이다.  $t_i$ 를 얻기 위한 조건으로는 (1) 일정한 값을 기준으로 하는 level crossing 방법, (2) 0을 지나면서 시간에 따른 값이 커지는 것을 기준으로 하는 zero crossing 방법, (3) 0을 지나면서 시간에 따른 값이 작아지는 것을 기준으로 하는 zero crossing 방법 등이 있으며, 본 연구에서는 두 번째 방법을 사용하여, 양의 기울기를 갖는 zero crossing을 초기조건으로 하였다.

### 2.2. 신경망기법

본 연구에서는 1개의 입력층, 2개의 은닉층 그리고 1개의 출력층으로 구성된 다층퍼셉트론신경망(Haykin, 1994)을 사용하였다(그림 1). 입력층은 측정된 데이터로부터 얻은 고유주파수와 모드형상 등의 모드특성을, 출력층은 추정할 부재강성지수로 각각 구성하였다. 일반적으로 고유주파수는 그 자체가 입력자료로 사용되지만(Yun et al., 1998), 본 연구에서는 손상이 없는 상태에서의 고유주파수에 대한 감소비율을 입력자료로 사용하였으며, 이에 대하여 5장에 다시 설명하고자 한다. 신경망의 훈련을 위하여 역전파학습알고리즘을 사용하였고, 측정오차의 영향을 최소화하기 위하여 노이즈첨가학습(Matsuoka, 1992)을 수행하였다.

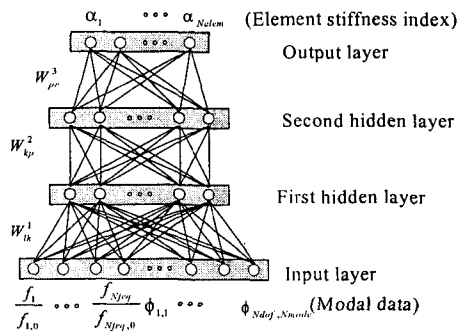


그림 1. 본 연구에서 사용된 다층퍼셉트론 신경망

### 3. 모형 실험

#### 3.1 모형교량과 실험구성

제안기법을 검증하기 위하여 단순지지 모형교량을 제작하였다. 실험구성의 개략도를 그림2에 보였으며, 모형교량은 두개의 H형강 거더와 콘크리트 슬래브로 구성된 합성단면이다(그림3). 지간거리는 6m, 총중량은 1030kgf 이며, 3개의 모형차량이 그림2에서와 같이 굽은 와이어로 서로 연결되었다. 모형차량은 모형교량 아래쪽에 설치된 모터에 의해서 상판의 가이드 레일을 따라 왕복 운행하였다. 그림4는 H형강 거더(H 100x100x6x8)의 플랜지 수직방향으로 붙인 가속도계의 위치를 보여준다.

#### 3.2 실험 과정

차량시험은 8개의 손상경우에 따라 각각 20회 수행되었으며(표1), 그림5는 각 부재의 번호를 나타낸다. H형강 거더(H 100x100x6x8)의 플랜지 아래부분을 잘라냄으로써 부재손상을 주었다. 무게가 각각 80, 40, 80kg인 차량 3대가 사용되었고, 차량간격은 각각 4m와 2m로 하였으며(그림2), 왼쪽 지점으로부터 지간의 1/4, 2/3 지점에 턱(bump)을 설치하였다. 차량이 왕복 운행하는 중 1kHz로 30초 동안 수직가속도 응답을 계측하였다.

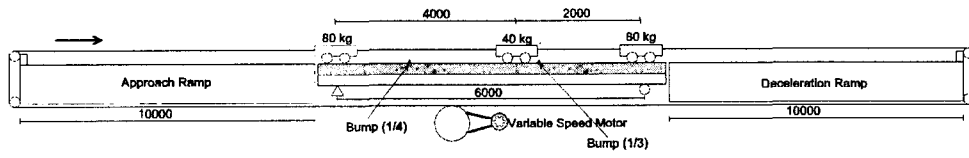


그림 2. 실험구성의 개략도 (mm)

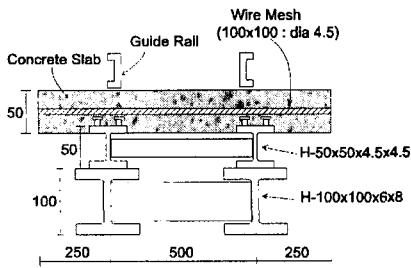


그림 3. 모형교량의 단면 (mm)

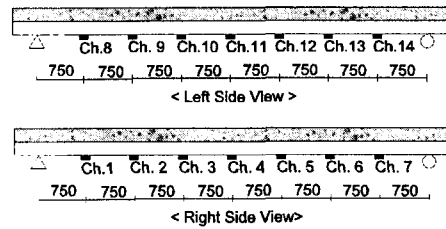


그림 4. 측정위치 (mm)

표 1. 손상 시나리오 : 휨강성 (EI) 의 손실

El. No.	3	5	7
Case 1	-	-16.6%	-
Case 2	-	-16.6%	-9.5%
Case 3	-	-16.6%	-16.9%
Case 4	-	-16.6%	-25.4%
Case 5	-15.8%	-16.6%	-25.4%
Case 6	-15.8%	-31.0%	-25.4%
Case 7	-22.1%	-31.0%	-25.4%
Case 8	-32.1%	-31.0%	-25.4%

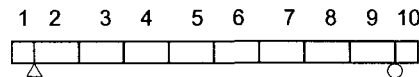


그림 5. 유한요소 모델과 부재번호

## 4. 모드특성 추정

### 4.1 Randomdec 신호의 추정

차량의 왕복진행으로부터 얻어진 특정 가속도 시계열을 그림6에 보였으며, 많은 차량으로 인한 실제 차량하중을 모사하기위해서 20개의 왕복 시계열을 그림7에서와 같이 불규칙한 시간간격으로 합성하였다. 20개의 합성된 시계열로부터, 첫번째와 세번째 모드에 대해서는 지간의 중앙을, 두번째 모드에 대해서는 지간의 1/4 지점을, 네번째 모드에 대해서는 지간의 1/8 지점을 각각 선도측정점(leading station)으로 정하였고, 그 측정점에서 양의 기울기를 갖는 zero crossing을 초기조건으로 하여 randomdec 신호를 얻어냈다. 11번 채널에서 얻어진 randomdec 신호(그림8)의 FFT 결과(그림10)는 random decrement 기법을 적용하기 이전의 FFT 결과(그림9)보다 노이즈성분이 많이 제거됨을 보여준다. 공진주파수와 모드형상은 FFT 결과로부터 peak-picking 방법으로 구하였다.

### 4.2 유한요소모델의 기저구조 개선

유한요소모델의 기저구조를 확정하기위해서 설계 단면을 기준으로 초기 유한요소모델을 구성하였다. 합성형 모형교량은 환산단면적으로 간략화 하였으며, 초기 단면치수로부터 구한 보의 휨강성( $EI$ )은  $6.34 \times 10^6 \text{ Nm}^2$  으로 계산되었다. 유한요소모델의 양쪽 지점(그림11)에 실제 경계조건을 고려하기 위해서 회전강성이 있는 스프링요소를 사용하였다. 유한요소모델을 개선하기 위하여 표2와 그림 12에서 정리한 충격시험결과를 이용하였다. 보의 휨강성과 지점에서의 회전강성을 동시에 고려하였으며, 모드섭동법을 이용하여 유한요소모델을 개선하였다. 최종적으로 추정된 보의 휨강성은  $6.28 \times 10^6 \text{ Nm}^2$  이며, 지점의 회전강성은  $1.72 \times 10^6 \text{ Nm/rad}$  이다.

### 4.3 추정된 모드특성

손상이 없는 구조물에 대한 충격시험, 차량시험, 개선된 유한요소모델로부터 얻어진 공진주파수 및 모드형상을 표2와 그림12에서 비교하였다. 움직이는 차량의 질량효과로 인한 공진주파수는 충격시험으로부터 얻은 고유주파수보다 작는데 비하여 모드형상의 경우에는 세가지 모두 잘 일치하였다.

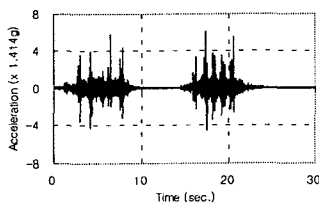


그림 6. 가속도 시계열 (Ch.11)

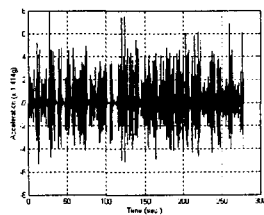


그림 7. 불규칙하게 합성한 시계열 (Ch.11)

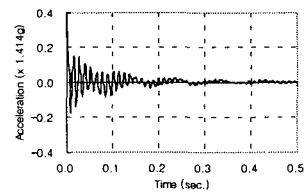


그림 8. Randomdec 신호 (Ch.11)

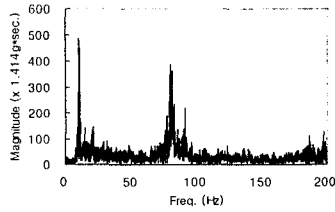


그림 9. FFT 결과  
(Ch.11)

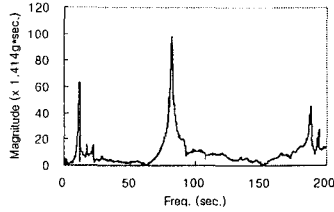


그림 10. Randomdec 신호의 FFT 결과  
(Ch.11)

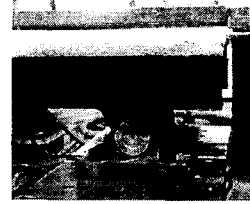


그림 11. 지점에서의 경계조건

표 2. 손상없는 구조물의 공진 주파수 (Hz)

모드	충격시험	차량시험	유한요소모델
1 <sup>st</sup>	11.40	10.43	11.51
2 <sup>nd</sup>	41.00	40.47	39.32
3 <sup>rd</sup>	81.80	81.37	85.00
4 <sup>th</sup>	137.4	137.6	147.8

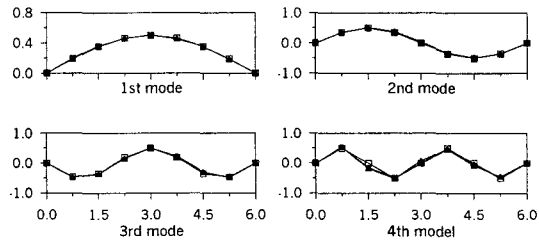


그림 12. 손상없는 구조물의 모드형상  
(●:충격시험, △:차량시험, □:유한요소모델)

## 5. 손상추정

### 5.1 손상 모형교량의 모드특성

표1의 손상경우와 같이 모형교량의 거더를 잘라냄으로써 손상을 모사한 후 각 손상경우에 대하여 20번의 차량시험을 수행하였다. 손상이 없는 모형교량에 대한 차량시험의 결과로부터 모드특성을 얻은 과정과 동일한 과정으로 각 손상경우에 대한 모형교량의 공진주파수와 모드형상을 구할 수 있었다. 표 3에서는 모형교량의 손상시나리오에 대한 공진주파수를 정리하였으며, 그림 13에서는 손상경우 4번과 8번의 경우에 대한 모드형상을 제시하였다. 표3을 통하여 손상정도가 커짐에 따라 공진주파수가 감소하는 것을 쉽게 알 수 있다.

표 3. 손상경우별 공진주파수 (Hz)

Mode	1	2	3	4
Intact	10.43	40.47	81.37	137.6
Case 1	10.10	40.20	79.70	136.0
Case 2	9.80	40.10	78.80	136.0
Case 3	9.70	38.67	77.70	135.0
Case 4	9.63	38.50	77.83	134.1
Case 5	9.43	37.20	76.60	132.4
Case 6	8.93	35.63	71.40	130.2
Case 7	8.90	35.37	70.00	130.4
Case 8	8.57	34.90	67.80	130.1

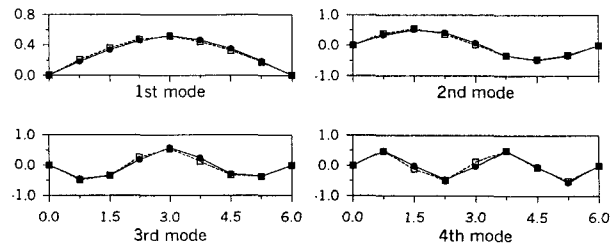


그림 13. 손상경우 4번과 8번에 대한 모드형상  
(●:손상경우4번, □:손상경우8번)

## 5.2 신경망기법에 의한 모형교량의 손상추정

신경망의 출력자료로는 구조물 부재의 부재강성지수를 사용하였다. 본 연구에서 손상추정을 위해 사용된  $j$  번째 부재의 부재강성지수( $\alpha_j$ )와 부재손상정도( $d_j$ )는 다음과 같다.

$$\alpha_j = \frac{(EI)_j^d}{(EI)_j^0}, \quad d_j = 1 - \alpha_j \quad (2)$$

여기서,  $EI$ 는 휨강성, 위첨자 '0'와 'd'는 각각 손상이 없는 상태와 손상된 상태를 나타낸다. 손상된 경우의 부재강성지수는 차량시험으로부터 구한 저차 네 개의 모드특성에 기초하여 신경망기법으로 구했다. 신경망은 차량이 없는 구조물의 모드특성의 관계로부터 학습된 반면에 차량의 질량효과로 인해 공진주파수가 변하므로(표2), 차량시험으로부터 얻어진 공진주파수를 직접 신경망의 입력값으로는 사용할 수 없었다. 따라서 신경망의 입력값으로 손상전후의 공진주파수의 비율이 사용되었다. 차량 영향의 유무에 관계없이 구조물과 움직이는 차량의 모드질량이 다음 식(3)과 같이 손상 전과 후에 큰 차이가 없다고 가정하면,

$$\mu_{S+V,i}^d \approx \mu_{S+V,i}^0, \quad \mu_{S,i}^d \approx \mu_{S,i}^0 \quad (3)$$

다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{\omega_{S,i}^{d^2}}{\omega_{S,i}^{0^2}} = \frac{\kappa_{S,i}^d / \mu_{S,i}^0}{\kappa_{S,i}^d / \mu_{S,i}^0} \approx \frac{\kappa_{S,i}^d}{\kappa_{S,i}^0} \approx \frac{\kappa_{S,i}^d / \mu_{S+V,i}^0}{\kappa_{S,i}^d / \mu_{S+V,i}^0} = \frac{\omega_{S+V,i}^{d^2}}{\omega_{S+V,i}^{0^2}} \quad (4)$$

여기서 아래첨자 'S'와 'V'는 각각 구조물과 차량을 나타내고,  $\kappa_i$  와  $\mu_i$  는 각각  $i$  번째 모드강성과 모드질량을 나타낸다. 즉, 좌측의 두 등식을 이용하여, 신경망을 학습시켰으며, 우측의 두 등식을 이용하여 모형교량의 손상을 추정하였다.

손상을 추정한 후, 이를 모형교량의 유한요소모델에 적용하여 재해석하여 손상추정의 결과를 검증하였다. 표 4는 모든 손상경우에 대하여 차량시험으로 구한 모드형상과 재해석으로 구한 모드형상 사이의 MAC(Modal Assurance Criterion)값을 비교한 것이다. 모든 경우에 대하여 MAC값이 0.98이상으로 재해석 결과가 실험모드해석결과와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 그림14에서는 실제 손상정도와 추정된 손상정도를 비교하였다. 대부분의 경우 손상위치는 잘 일치하였으나, 손상정도는 약간 과도하게 추정되었다. 손상정도를 과도하게 평가한 원인으로는, 첫째 식(4)에서 사용된 가정사항에 의한 원인과 둘째, 모드섭동법으로 얻은 손상 없는 구조물에 대한 유한요소모델과 실제 모형교량 사이의 차이에 의한 것으로 생각할 수 있다.

표 4. 모드형상에 대한 MAC값\*

Mode	1	2	3	4
Case 1	0.9997	0.9986	0.9980	0.9822
Case 2	0.9997	0.9980	0.9962	0.9881
Case 3	0.9996	0.9988	0.9953	0.9831
Case 4	0.9997	0.9984	0.9915	0.9970
Case 5	0.9995	0.9984	0.9954	0.9883
Case 6	0.9993	0.9983	0.9961	0.9895
Case 7	0.9994	0.9979	0.9964	0.9846
Case 8	0.9987	0.9974	0.9969	0.9821

\*실험모드해석결과와 재해석결과와의 비교

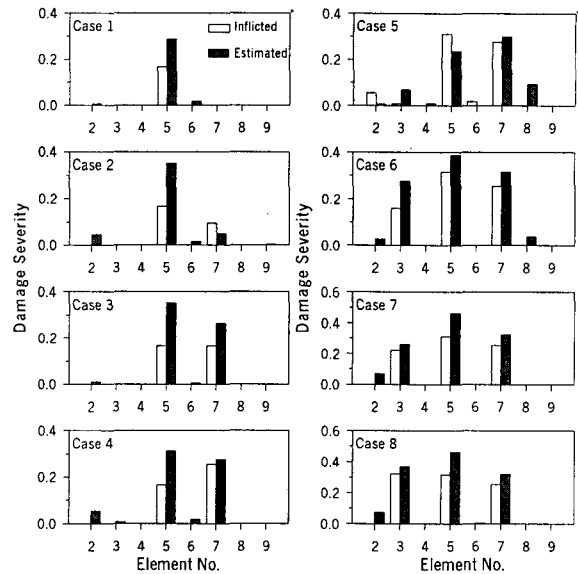


그림 14. 손상추정의 결과

## 6. 결론

차량하중하의 상시진동 데이터로부터 얻어진 모드특성을 이용한 교량의 부재수준 손상추정방법이 제시되었고, 이를 모형교량에 대한 실험으로부터 검증하였다. Random decrement 방법으로 상시진동 데이터로부터 자유진동신호를 잘 얻어냈고, 그것으로부터 모드특성을 쉽게 추정할 수 있었다. 대부분의 경우 손상위치는 잘 일치하였으나, 손상정도는 약간 과도하게 추정되었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부, 한국지진공학연구센터, 한국과학재단의 연구비지원에 의한 결과로써, 저자들은 이의 지원에 감사한다.

## 참고문헌

1. Asmussen, J.C. and Brincker, R. (1996), "Estimation of Frequency Response Functions by Random Decrement," Proceedings of International Modal Analysis Conference, pp.246-252
2. Cole, H.A. (1968), "On-The-Line Analysis of Random Vibrations", AIAA Paper, no. 68-288
3. Haykin, S. (1994), Neural networks-a comprehensive foundation, Macmillan, New York
4. Matsuoka, K. (1992), "Noise injection into inputs in back-propagation, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, 22(3) 436-440
5. Yang, J.C.S., Chen, J. and Dagalakis (1985), "Damage Detection in Offshore Structures by the Random Decremental Technique," Journal of Energy Resources Technology, ASME, Vol. 106, 38-42
6. Yun, C.B. and Hong, K.S. (1992), "Damage assessment of structures by inverse modal perturbation method," Proceeding of the 4th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Seoul, Korea
7. Yun, C.B., Bahng, E.Y. and Yi, J.H. (1998), "Neural Network Approach to Damage Assessment of Civil Structures", Proceedings of Structural Engineers World Congress (SEWC), San Francisco, U.S.A.