

교통하중에 의한 상시진동기록을 이용한 교량의 손상추정기법

Damage Estimation of Bridge Using Vibration Data Caused by Ordinary Traffic Loadings

윤정방* 이진학** 이종원*** 김재동**** 정환욱*****
Yun, Chung-Bang Yi, Jin-Hak Lee, Jong-Won Kim, Jae-Dong Chung, Hwan-Wook

(논문접수일 : 2000년 9월 15일 ; 심사종료일 : 2001년 3월 12일)

요지

본 연구에서는 차량하중에 의한 상시진동기록을 이용한 교량의 손상추정기법을 연구하였다. 즉, 차량진행 중 측정된 신호로부터 구조물의 모드특성을 구하고, 이를 이용하여 손상위치 및 손상정도를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 제안기법의 검증을 위하여 차량하중을 재현할 수 있는 모형교량을 제작하여 손상실험을 수행하였다. 차량진행 중 교량의 수직가속도를 계측하였으며, 측정된 가속도시계열로부터 random decrement(RD) 기법을 사용하여 자유진동신호를 구한 후, 이로부터 구조물의 모드특성을 추정하였다. 추정된 모드특성을 기초로 신경망기법을 적용하여 손상위치 및 손상정도를 추정하였으며, 추정된 결과는 실제 손상과 비교적 잘 일치하였다.

핵심용어 : 상시진동기록, 손상평가, 모형교량, random decrement 기법, 신경망기법

Abstract

Damage estimation of bridge structure is presented using ambient vibration data caused by ordinary 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 are measured at a limited number of locations. The modal parameters are identified from the free vibration signals extracted using the random decrement(RD) 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.

Keywords : *ambient vibration data, damage estimation, bridge model, random decrement method, neural networks technique*

* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과, 교수
** 한국과학기술원 토목공학과, 연수연구원
*** 한국기계연구원, 선임연구원
**** 한국기계연구원, 책임연구원
***** 금호산업 기술연구소, 과장

· 이 논문에 대한 토론을 2001년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2001년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

교량과 같은 국가기반시설물의 건전성감시를 위해서는 사용 중 계측자료를 이용한 구조물의 모드특성추정 및 이를 이용한 손상추정에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 차량운행 중 계측된 자료를 이용한 교량의 손상평가기법을 제안하였으며 그 내용은 다음과 같다.

차량하중에 의한 상시진동기록에는 각종 잡음성분이 포함되어 있으므로 random decrement(RD) 기법¹⁾을 사용하여 불규칙성분을 제거하고 자유진동신호를 구하며, 이를 이용하여 구조물의 모드특성을 구한다. 손상이 없는 구조물의 초기 유한요소모델은 설계도면을 바탕으로 작성한다. 실제 교량의 경우 개통 전 또는 건전성감시 초기에 충격실험이 가능하므로, 충격실험에 의한 모드특성 결과를 바탕으로, 모드섭동법²⁾을 이용하여 초기의 유한요소모델을 개선한다. 차량실험으로부터 추정되는 모드특성은 차량의 영향으로 인하여 충격실험에 의한 결과와 차이를 나타낸다. 따라서 차량실험에 의한 모드특성을 사용하여 손상위치 및 손상정도를 추정하는 단계에서는 손상상태에 따른 모드특성의 패턴만을 비교하기 위하여 패턴인식능력이 뛰어난 역전과 학습 신경망기법³⁾을 사용한다.

제안된 기법을 검증하기 위하여, 모형차량 주행이 가능한 단순지지 합성형 모형교량을 제작하여 손상실험을 수행하였다. 차량하중은 서로 연결된 3대의 모형차량을 주행시킴으로써 모사하였고, 차량운행에 의한 교량의 수직가속도를 여러 위치에서 측정하였다. 합성형 모형교량의 주거터로 제작된 H형강의 단면을 감소시킴으로써 구조물의 손상을 모사하였으며, 각각의 손상경우에 따라 20회의 차량실험을 수행하였다. 추정된 손상위치는 실제 손상위치와 잘 일치하였고, 손상정도는 약간 과도한 평가가 이루어졌으나 만족할 수준으로 추정되었다.

2. 이론적 배경

2.1 Random decrement(RD) 기법

RD 기법의 기본개념^{1),4),5)}은, 불규칙하중에 의한 선형 구조계의 응답이 초기조건에 의한 확정적 성분(deterministic part)과 불규칙 입력하중에 의한 불규칙 성분(random part)의 합으로 구성되어 있으므로, 동일

한 초기조건을 가지는 충분히 많은 수의 샘플들을 조합하면 불규칙 성분은 소멸되고 확정적 성분만을 구할 수 있다는 것이다. 따라서, 최종적으로 구해진 확정적 성분은 상기의 초기조건을 가지는 자유진동응답(randomdec 신호)이며, 이로부터 모드특성을 쉽게 추정할 수 있다.^{4),5)} 계측데이터 $y(t, x)$ 에 대하여 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 측정위치 x 에서의 계측데이터이고, t_i 는 y 의 기록에서 특정의 초기조건(triggering condition)을 만족하는 시점이며, N 은 그 시점의 개수이다. 흔히 사용되는 초기조건은 level crossing, local extremum 및 zero crossing등이며⁶⁾ 본 연구에서는 양의 기울기를 갖는 zero crossing 조건을 적용하였다.

2.2 모드섭동법

설계단면을 기준으로 작성된 초기 유한요소모델은 제작오차, 지지조건 등으로 인하여 실제 제작된 모형교량과 차이가 있으며, 모형교량의 충격실험으로부터 구한 모드특성을 이용하여 유한요소모델을 개선함으로써, 실제 모형교량의 거동을 개선된 유한요소모델을 이용하여 해석할 수 있게 된다. 초기 유한요소모델에 대한 고유치(자유진동수의 제곱)와 고유벡터(자유진동모드)를 각각 λ^0, ϕ^0 라 하면, 구조강성계수를 수정하여 구한 개선된 유한요소모델의 고유치와 고유벡터 λ', ϕ' 는 다음과 같이 모드섭동법^{2),7)}에 의하여 구한 모드특성의 구조강성계수에 대한 민감도행렬 S_λ, S_ϕ 를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\lambda'_k = \lambda_k^0 + S_{\lambda,k} \Delta \alpha, \quad \phi'_k = \phi_k^0 + S_{\phi,k} \Delta \alpha \quad (2)$$

본 연구에서는 구조강성계수 α 를 다음과 같이 부재의 휨강성에 관한 부재강성계수(α_e)와 경계조건에서의 회전강성에 관한 회전강성계수(α_j)로 구분하여 사용하였다.

$$(EI)'_e = \alpha_e (EI)_e^0, \quad (k_r)'_j = \frac{\alpha_j}{1 - \alpha_j} (k_r)_j^0 \quad (3)$$

여기서, 뒀첨자 '0'와 ''는 각각 개선 전과 개선 후의 상태를 나타낸다. 경계조건의 경우 회전강성의 범위가 휨강성의 경우와는 달리 영(힌지단의 경우)에서 무한대(고정단의 경우) 사이의 값을 가질 수 있기 때문에, 위와 같은 식을 이용하여 회전강성계수가 0에서 1사이의 값을 갖도록 하였다. 이와 같이 개선 전후의 모드특성과 실험에 의하여 구한 모형교량의 고유치(λ^m)와 고유벡터(ϕ^m)를 이용하여 다음과 같은 목적함수와 제약조건을 얻을 수 있다.

$$J = \min \sum_{k=1}^{N_{mode}} \{(\lambda_k^0 - \lambda_k^m) + S_{\lambda,k} \Delta \alpha\}^2 + \beta \|\mathbf{K}^0 - \mathbf{K}(\Delta \alpha)\|_F \quad (4)$$

$$\text{subjected to } |\phi_{k,i}^m - \phi_{k,i}(\Delta \alpha)| \leq \epsilon_{k,i} \quad (i=1,2,K,N_{dof}) \quad (5)$$

여기서, \mathbf{K}^0 는 초기 유한요소모델의 강성행렬, $\mathbf{K}(\Delta \alpha)$ 는 구조강성계수를 $\Delta \alpha$ 만큼 변화시켰을 때의 구조물의 강성행렬을 의미한다. 한편, $\|\cdot\|_F$ 는 행렬의 Frobenius norm을 의미하며, β 는 정규화계수로써 본 연구에서는 Lee 등이 제안한 Variable Regularization Factor Scheme (VRFS)을 사용하여 결정하였다.^{8),9)} 이와 같이 목적함수에 정규화 함수를 도입함으로써 최적화 과정에서 발생할 수 있는 illposedness를 완화시킬 수 있도록 하였다.

2.3 신경망기법

본 연구에서는 1개의 입력층, 2개의 은닉층 그리고 1개의 출력층으로 구성된 다층퍼셉트론 신경망³⁾을 사용하였다(그림 1). 입력층은 측정된 데이터로부터 얻은 자유진동수와 진동모드 등의 모드특성을, 출력층은 추정할 부재강성지수로 각각 구성하였다. 일반적으로 자유진동수는 그 자체가 입력자료로 사용되지만,¹⁰⁾

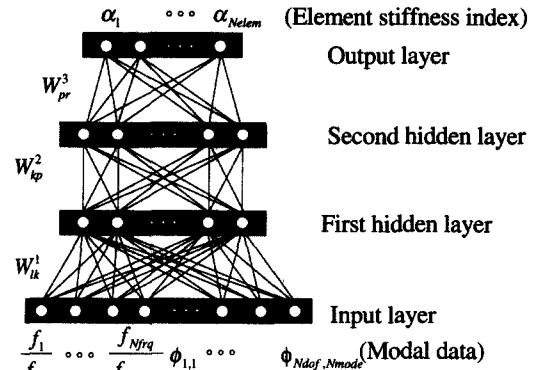


그림 1 본 연구에서 사용된 다층퍼셉트론 신경망

본 연구에서는 손상이 없는 상태에서의 자유진동수에 대한 감소 비율을 입력자료로 사용하였으며, 이에 대하여 5절에서 다시 설명하고자 한다. 신경망의 훈련을 위하여 역전파학습 알고리즘을 사용하였고, 측정오차의 영향을 최소화하기 위하여 노이즈첨가학습¹¹⁾을 수행하였다.

3. 모형교량 실험

3.1 모형교량 및 실험구성

제한기법을 검증하기 위하여 단순지지된 1경간 모형교량을 제작하였다. 실험구성의 개략도를 그림 2에 보였으며, 모형교량은 H형강 거더와 콘크리트 슬래브로 구성된 합성형교이다(그림 3). 시간거리는 6m, 총 중량은 1030kgf이며, 3개의 모형차량이 그림 2에서와 같이 와이어로 서로 연결되어 모형교량 하부에 설치된 모터에 의해서 상판의 가이드 레일을 따라 왕복 운행할 수 있도록 제작하였다. 그림 4는 H형강 거더(H-100×100×6×8)의 플랜지에 수직방향으로 부착한 가속도계의 위치를 보여준다.

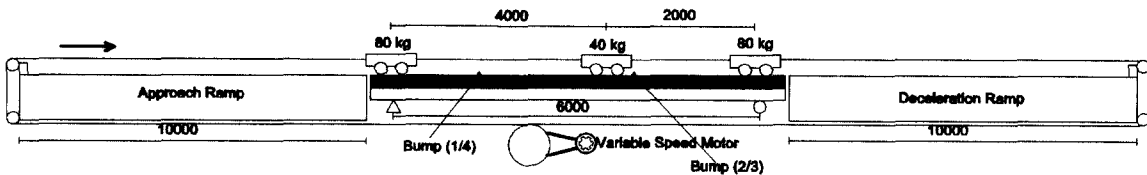


그림 2 실험구성의 개략도

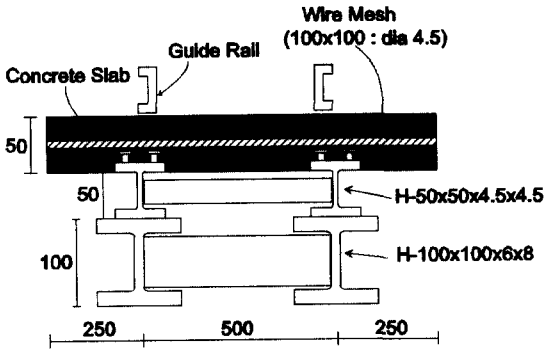


그림 3 모형교량의 단면

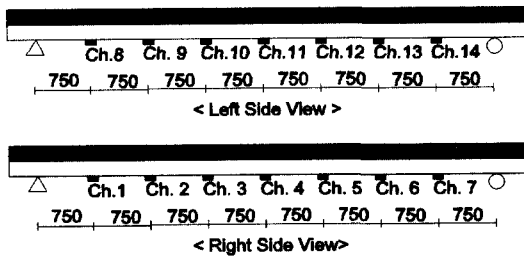


그림 4 가속도 측정위치

3.2 실험절차

차량주행실험에 앞서 충격실험을 수행하였다. 충격해머로 가격함으로써 충격하중을 가하였는데 이때, 1차와 3차모드에 대해서는 중앙점($x=L/2$), 2차모드에 대해서는 1/4지점($x=L/4$), 4차모드에 대해서는 3/8지점($x=L/8$)을 가격하였다. 각각의 가격위치에 대해 10회씩 실험을 수행하였으며, 1kHz로 10초 동안 수직가속도응답을 측정하였다.

차량실험은 손상이 없는 경우와 표 1과 같은 8개의 손상경우에 따라 각각 20회 수행되었다. 손상부재는

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%

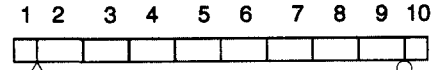


그림 5 유한요소 모델과 부재번호

그림 5에서 제시한 부재의 위치와 같으며, H형강 거더(H-100×100×6×8)의 하부플랜지 양단을 절단함으로써 부재손상을 가하였다. 무게가 각각 80, 40, 80kgf인 차량 3대가 사용되었고, 차량간격은 각각 4m와 2m로 하였으며(그림 2), 왼쪽 지점으로부터 지간의 1/4, 2/3 지점에 턱(bump)을 설치하였다. 차량이 왕복 운행하는 중 1kHz로 30초 동안 수직가속도응답을 계속하였다.

4. 모드특성 추정

4.1 충격실험에 의한 모드특성 추정

충격실험에 의한 모드특성을 추정하기 위하여 다음과 같은 가속도의 cross spectral density(CSD) 함수를 이용하였다.

$$\hat{S}_{ij}(f) = \frac{\mathcal{F}(y_i)\mathcal{F}(y_j)^*}{T} \quad (6)$$

여기서, $\hat{S}_{ij}(f)$ 는 i 위치에서 측정된 가속도신호 $y_i(t)$ 와 j 위치에서의 가속도신호 $y_j(t)$ 사이의 추정된 CSD 함수이며, $\mathcal{F}(\cdot)$ 는 Fourier 변환을 의미한다. T 는 Fourier 변환에 사용된 시계열의 총 시간이며, 윗첨자 *는 공액복소수를 나타내고 있다.

자유진동수는 각 모드의 기준이 되는 power spectral density(PSD)의 peak를 찾는 방법으로 구하였으며, k 번째 모드의 모드벡터는 다음과 같이 CSD함수의 비를 이용하여 추정하였다.

$$\phi_{k,i} = \frac{\text{Re} \hat{S}_{ri}(f_k)}{\hat{S}_{rr}(f_k)} \quad (i=1,2,K, N_{dof}) \quad (7)$$

여기서, 아래첨자 'r'은 기준이 되는 위치이며, 1차와 3차 모드의 경우 지간의 중앙을 기준으로 사용하였으며, 2차 모드와 4차 모드의 경우에는 지간 중앙에서 응답이 거의 발생하지 않으므로, 응답이 발생하는 지간의 1/4지점과 1/8지점을 각각 기준으로 사용하였다.

4.2 차량실험에 의한 모드특성 추정

모형차량의 왕복진행으로부터 계측된 11번 채널 가속도시계열 및 FFT결과를 그림 6과 7에 각각 보였으며, 많은 차량으로 인한 실제 차량하중을 모사하기위해서 20개의 왕복 시계열을 그림 8과 같이 불규칙한 시간간격으로 합성하였다. 10개의 합성된 시계열로부터 RD 기법을 적용하여 randomdec 신호를 추정하였는데, 1차와 3차 모드에 대해서는 지간의 중앙을, 2차 모드에 대해서는 지간의 1/4 지점을, 4차 모드에 대해서는 지간의 1/8 지점을 각각 선도측정점(leading station)으로 설정하여, 그 측정점에서 양의 기울기를 갖는 zero crossing을 초기조건으로 하여 randomdec 신호를 구하였다. 11번 채널에서 구한 randomdec 신호를 그림 9에 나타내었고 이의 FFT결과를 그림 10에 나타내었는데, RD 기법을 적용하기 이전의 FFT 결과(그림 7)보다 잡음성분이 많이 제거됨을 알 수 있다. 공진주파수와 진동모드는 추정된 randomdec 신호를 이용하여 충격시험에서와 마찬가지로 peak-picking방법으로 구하였다. 손상이 없는 경우 차량실험에 의한 공진주파수를 추

격실험에 의한 결과 및 차량실험에 의한 가속도시계열의 자유진동부분에서 구한 공진주파수와 비교하여 표 2에 나타내었는데, 이동하는 차량의 질량효과로 인하여 공진주파수는 충격실험으로부터 구한 자유진동수보다 작은 값으로 추정되었다.

한편, 차량실험에 의한 진동모드를 충격실험에 의한 결과와 비교하여 그림 11에 보였는데, 양자가 잘 일치함을 알 수 있다.

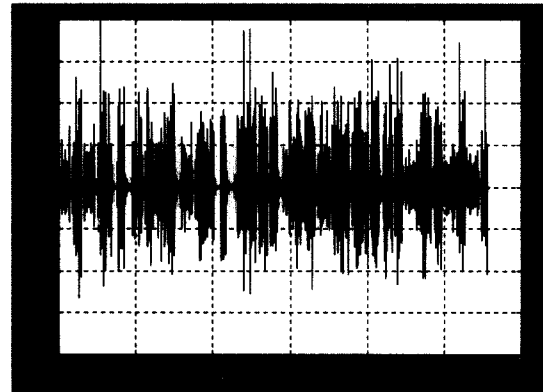


그림 8 불규칙하게 합성한 시계열(Ch.11)

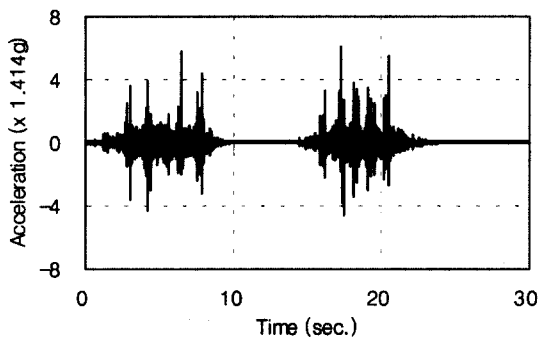


그림 6 가속도시계열(Ch.11)

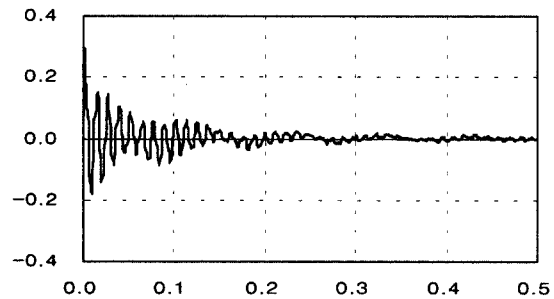


그림 9 Randomdec 신호(Ch.11)

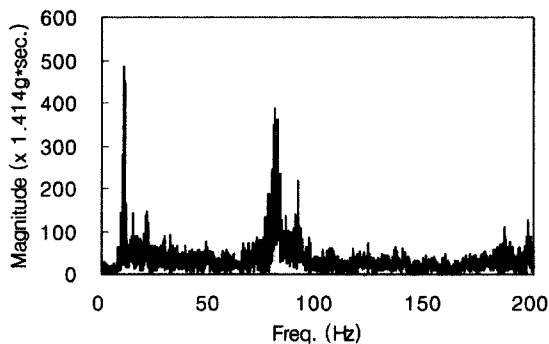


그림 7 가속도시계열의 FFT 결과(Ch.11)

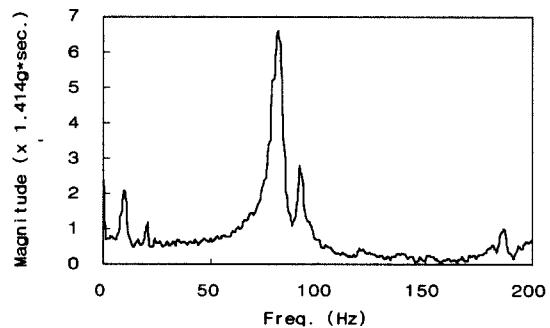


그림 10 Randomdec 신호의 FFT 결과(Ch.11)

표 2 손상없는 구조물의 공진 주파수(Hz)

모드	충격실험	차량실험	유한요소모델
1 st	11.40	10.43 (11.29)	11.51
2 nd	41.00	40.47 (41.36)	39.32
3 rd	81.80	81.37 (81.37)	85.00
4 th	137.4	137.6 (137.5)	147.8

주) 괄호 안의 값은 차량실험 가속도 시계열의 자유진동부분으로부터 구한 값임

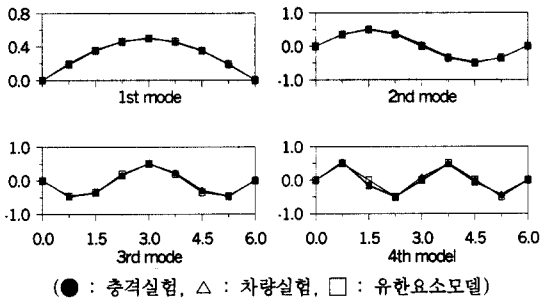


그림 11 손상없는 구조물의 진동모드

또한, 표 1의 손상시나리오에 따라 각 손상경우별로 20회씩 수행한 차량실험의 결과를 이용하여, 손상이 없는 경우와 동일한 과정으로 모드특성을 추정하였다. 표 3에 손상경우별로 추정한 공진주파수를 정리하였으며, 그림 12에는 손상경우 진동모드의 예를 나타내었다. 표 3을 통하여 손상정도가 커짐에 따라 공진주파수가 감소함을 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

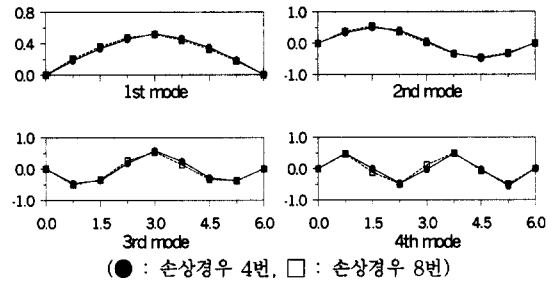


그림 12 손상경우 4번과 8번에 대한 진동모드

5. 손상추정

5.1 유한요소모델의 개선

모형교량의 설계도면을 기준으로 균일단면을 가진 단순보로 초기 유한요소모델을 구성하였다.

합성형 단면은 환산단면적으로 간략화 하였으며, 초기 단면치수로부터 구한 보의 휨강성(EI)은 $6.34 \times 10^6 \text{Nm}^2$ 으로 계산되었다. 유한요소모델의 양쪽 지점(그림 13)에 실제 경계조건을 고려하기 위해서 회전강성이 있는 스프링요소를 사용하였다.¹²⁾ 표 2와 그림 11에서 정리한 손상이 없는 경우의 충격실험결과를 적용하여 모드섭동법을 이용하여 유한요소모델을 개선하였다. 보의 휨강성과 양쪽 지점에서의 회전강성을 동시에 고려하였으며, 최종적으로 추정된 보의 휨강성은 $6.28 \times 10^6 \text{Nm}^2$ 이며, 지점의 회전강성은 $1.72 \times 10^6 \text{Nm/rad}$ 이다. 개선된 유한요소모델로부터 계산된 모드특성을 충격실험 및 차량실험의 결과와 비교하여 표 2 및 그림 11에 각각 나타내었다.

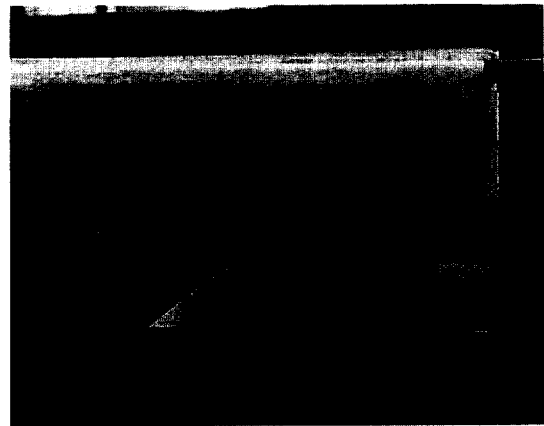


그림 13 지점에서의 경계조건

5.2 모형교량의 손상추정

신경망기법을 이용하여 손상추정을 수행하였으며, 신경망의 출력자료로는 구조물 부재의 부재강성지수를 사용하였다. 본 연구에서 손상추정을 위해 사용된 j 번째 부재의 부재강성지수(α_j)와 부재손상정도(d_j)는 다음과 같다.

$$\alpha_j = \frac{(EI)_j^d}{(EI)_j^0}, \quad d_j = 1 - \alpha_j \quad (8)$$

여기서, EI 는 휨강성, 위치자 '0'와 'd'는 각각 손상이 없는 상태와 손상된 상태를 나타낸다. 손상된 경우의 부재강성지수는 차량실험으로부터 구한 저차 네 개의 모드특성에 기초하여 신경망기법으로 구했다. 이때, 신경망의 입력자료로는 손상전후의 공진주파수 비율과 진동모드를 이용하였다. 즉, 공진주파수의 경우 신경망은 차량이 없는 구조물의 모드특성의 관계로부터 학습된 반면에, 차량의 질량효과로 인해 공진주파수가 변하므로(표 2), 차량실험으로부터 얻어진 공진주파수를 직접 신경망의 입력값으로는 사용할 수 없었다. 따라서 신경망의 입력값으로 손상전후의 공진주파수의 비율을 아래에 근거하여 사용하였다.

교량을 통과하는 어떠한 이동차량하중조건 (V_i)하에서, i 번째 공진주파수의 손상전후의 비율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{f_{S+V,i}^d}{f_{S+V,i}^0} = \frac{\kappa_{S+V,i}^d / \mu_{S+V,i}^d}{\kappa_{S+V,i}^0 / \mu_{S+V,i}^0} = \frac{\kappa_{S+V,i}^d / \kappa_{S+V,i}^0}{\mu_{S+V,i}^d / \mu_{S+V,i}^0} \approx \frac{\kappa_{S+V,i}^d}{\kappa_{S+V,i}^0} \approx \frac{\kappa_{S,i}^d}{\kappa_{S,i}^0} \quad (9)$$

여기서 아래 첨자 'S'와 'V'는 각각 구조물과 차량을 나타내고, κ_i 와 μ_i 는 각각 i 번째 모드강성과 모드질량을 나타낸다. 식(9)에서 첫번째 근사식은 손상발생에 의한 모드질량의 변화는 모드강성의 변화보다 매우 작다는 사실에 근거하고, 두번째 근사식은 그림 11에서 알 수 있듯이 이동차량의 질량에 의한 진동모드의 변화는 거의 없다는 사실로부터 유추된 것이다.

교량을 통과하는 이동차량이 없을 경우도 위와 유사하게 다음과 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$\frac{f_{S,i}^d}{f_{S,i}^0} = \frac{\kappa_{S,i}^d / \mu_{S,i}^d}{\kappa_{S,i}^0 / \mu_{S,i}^0} = \frac{\kappa_{S,i}^d / \kappa_{S,i}^0}{\mu_{S,i}^d / \mu_{S,i}^0} \approx \frac{\kappa_{S,i}^d}{\kappa_{S,i}^0} \quad (10)$$

표 4 손상전후 공진주파수의 비율

Damage Case		1	2
f ₁	$f_{S,1}^d / f_{S,1}^0$	0.932	0.918
	$f_{S+V,1}^d / f_{S+V,1}^0$	0.938	0.918
f ₂	$f_{S,2}^d / f_{S,2}^0$	0.977	0.945
	$f_{S+V,2}^d / f_{S+V,2}^0$	0.987	0.945
f ₃	$f_{S,3}^d / f_{S,3}^0$	0.954	0.950
	$f_{S+V,3}^d / f_{S+V,3}^0$	0.954	0.955
f ₄	$f_{S,4}^d / f_{S,4}^0$	0.966	0.945
	$f_{S+V,4}^d / f_{S+V,4}^0$	0.966	0.946

주) $f_{S+V,i}^d / f_{S+V,i}^0$ 는 5 경우 차량증량에 대한 평균값

식(9)와 (10)으로부터 각 차량하중조건(V_i)과 i 번째 모드에 대하여 다음의 근사식을 구할 수 있다.

$$\frac{f_{S+V,i}^d}{f_{S+V,i}^0} \approx \frac{f_{S,i}^d}{f_{S,i}^0} \quad (11)$$

식(11)의 검증을 위해 손상경우 1과 2에 대하여 차량의 총증량이 각각 20, 50, 100, 200, 300kgf인 경우, 손상전후의 공진주파수 비율을 표 4에 보였는데, 식(11)의 관계가 적절함을 알 수 있다. 그러나, 실교량의 실험을 통하여 식(11)의 관계를 좀더 검증할 필요가 있다.

손상을 추정한 후, 이를 모형교량의 유한요소모델에 적용, 재해석하여 손상추정의 결과를 검증하였다. 표 5는 모든 손상경우에 대하여 차량실험으로 구한 진동모드과 재해석으로 구한 진동모드 사이의 MAC(Modal Assurance Criterion)값을 비교한 것이다.¹³⁾ 모든 경우에 대하여 MAC값이 0.98이상으로 재해석결과가 실험모드해석결과와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

표 5 진동모드에 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

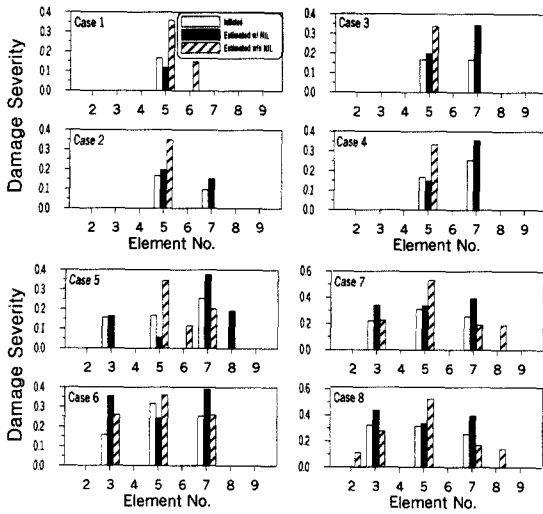


그림 14 손상추정의 결과

그림 14에서는 실제 손상정도와 추정된 손상정도를 노이즈침가학습의 유무에 따라 비교하였는데, 노이즈침가학습에 의해 추정결과가 상당히 개선될 수 있음을 알 수 있다. 손상경우 5의 결과에서, 손상이 없는 8번 부재가 손상된 것으로, 3개의 손상부재 중 한 부재 (5번)의 손상이 과소평가되었다. 그러나 나머지 손상경우에 대해서는 손상위치는 모두 잘 일치하였으며, 손상정도는 약간 과도하게 추정되는 경향을 보였다.

위 결과로부터, 손상추정을 위한 신경망기법의 입력값으로 손상전후 공진주파수 비율의 사용이 타당함을 알 수 있다. 한편, 손상정도를 과도하게 평가한 원인으로, 첫째 식(11)에서 사용된 가정사항에 의한 원인과 둘째, 모드섭동법으로 얻은 손상 없는 구조물에 대한 유한요소모델과 실제 모형교량 사이의 차이에 의한 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 차량운행 중 측정되는 상시진동기록을 이용한 교량의 부재수준 손상추정기법을 제안하였으며, 다음과 같이 정리할 수 있다.

우선, 상시진동기록에는 불규칙 성분들이 많이 포함되어있으므로 RD 기법을 적용하여 이를 제거하고, randomdec 신호를 구하여 모드특성을 추정한다. 실교량 개통 전 충격실험이 가능하므로, 차량의 영향이 배제된 모드특성을 이용하여 유한요소모델을 개선한다. 한편,

차량운행 중에는 차량의 영향으로 인하여 공진주파수가 변하며 이를 유한요소모델에서 고려하는 것은 어려우므로, 손상추정시에는 손상에 의한 공진주파수의 변화패턴을 이용한다. 즉, 개통직후 손상이 없는 상태와 손상발생 후의 차량실험에 의한 공진주파수 비율을 신경망의 입력자료로 사용하여 손상을 추정한다. 신경망의 훈련과정에서는 유한요소해석을 통하여 구한 손상과 모드특성간의 패턴을 이용하며, 실제 손상추정과정에서는 차량실험으로부터 구한 손상과 모드특성간의 패턴을 이용한다.

제안된 기법을 검증하기 위하여 모형교량에 대한 손상실험을 수행하였다. 차량실험에 의해 측정된 상시진동기록으로부터 RD 기법을 적용하여 randomdec 신호를 구할 수 있었으며, 이를 이용하여 구조물의 모드특성을 쉽게 추정할 수 있었다. 또한, 추정된 모드특성을 근거로 모형교량에 대한 손상을 추정한 결과, 손상 위치는 잘 일치하였으나 손상정도는 약간 과도하게 추정되었다. 손상정도의 과도추정은 향후 유한요소모델의 개선방법, 가정사항에 의한 오차를 최소화함으로써 해결해야 할 문제이다. 그러나 실교량 유지관리측면에서 생각한다면, 상시진동기록에 의한 손상위치의 정확한 추정이 선행된다면 유지관리의 효율성 증대에 많은 기여를 할 수 있을 것이며, 약간의 손상정도 과도추정은 부수적인 문제가 될 수 있을 것으로 판단된다.

제안된 방법은 추후 실교량 적용을 통한 검증이 요구되며, 차량하중상태를 근사적으로 모니터링 한다면 교량의 진전성감시를 위해 실용적이고 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. Cole, H. A., "On-The-Line Analysis of Random Vibrations," *AIAA Paper*, no. 68-288, 1968
2. Yun, C. B. and Hong, K. S., "Damage assessment of structures by inverse modal perturbation method,"

- Proceeding of the 4th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Seoul, Korea, 1992
3. Haykin, S., *Neural networks—a comprehensive foundation*, Macmillan, New York, 1994
 4. Yang, J.C.S., Chen, J. and Dagalakis, "Damage Detection in Offshore Structures by the Random Decremental Technique," *Journal of Energy Resources Technology*, ASME, Vol. 106, 1985, pp.38~42
 5. Asmussen, J. C. and Brincker, R., "Estimation of Frequency Response Functions by Random Decrement," *Proceedings of International Modal Analysis Conference*, 1996, pp.246~252
 6. Asmussen, J. C., Ibrahim, S. R. and Brincker, R., "Random Decrement : Identification of Structures Subjected to Ambient Excitation," *Proc 16th International Modal Analysis Conference*, Santa Barbara, California, 1998, pp.914~921
 7. Yi, J. H., and Yun, C.B., "Inverse modal perturbation technique for structural joint damage assessment," *Proceedings of International Modal Analysis Conference*, San Antonio, TX, 2000
 8. Lee, H-S, Kim, Y-H, Park, C-J and Park, H-W, "A new spatial regularization scheme for the identification of the geometric shape of an inclusion in a finite body," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 46, No. 7, 1999, pp.973~992
 9. 여인호, "정적응답자료의 Tikhonov 정규화를 이용한 구조물의 확률적 손상진단 방법," 서울대학교 토목공학과 박사학위 논문, 1999.2
 10. Yun, C. B., Bahng, E. Y. and Yi, J. H., "Neural Network Approach to Damage Assessment of Civil Structures," *Proceedings of Structural Engineers World Congress(SEWC)*, San Francisco, U.S.A., 1998
 11. Matsuoka, K., "Noise injection into inputs in back-propagation," *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, 22(3), 1992, pp.436~440
 12. 윤정방, 이종원, 박동욱, 김재동, "교통하중에 의한 상시미진동을 이용한 교량 모드특성 추정기법," 대한토목학회논문집, 제20권, 제4-A호, 2000.7
 13. Ewin, D. J., *Modal Testing: theory and practice*, England: Research Studies Press, 1986