

모델링 오차를 고려한 교량의 손상추정 Damage Detection for Bridges Considering Modeling Errors

윤정방* 이종재 ** 이종원*** 정희영****
Yun, Chung-Bang Lee, Jong-Jae Lee, Jong-Won Jung, Hee-Young

ABSTRACT

Damage estimation methods are classified into two groups according to the dependence on the FE model : signal-based and model-based methods. Signal-based damage estimation methods are generally appropriate for detection of damage location, whereas not effective for estimation of damage severities. Model-based damage estimation methods are difficult to apply directly to the structures with a large number of the probable damaged members. It is difficult to obtain the exact model representing the real bridge behavior due to the modeling errors. The modeling errors even may exceed the modal sensitivity on damage. In this study, Model-based damage detection method which can effectively consider the modeling errors is suggested. Two numerical example analyses on a simple beam and a multi-girder bridge are presented to demonstrate the effectiveness of the presented method.

1. 서론

구조물의 손상도를 추정하는 방법은 크게 데이터에 근거한 방법과 모델에 근거한 방법으로 나눌 수 있다. 전자는 구조물의 모델에 대한 정보를 사용하지 않고, 건전상태 혹은 초기상태의 구조물의 거동과 손상상태 또는 사용상태에서의 거동을 비교함으로써 구조물의 손상도를 추정하는 기법이다. 이 방법에서는 구조물의 주파수 응답함수 또는 모드계수를 직접 이용하여 손상지수를 구하고 손상도를 추정한다. 후자인 모델기반 손상도추정기법은 구조물의 손상이 모드계수의 변화를 초래하며, 이는 구조물의 강성의 감소와 관계가 있으므로, 적절한 구조모델의 수정을 통하여 손상도를 추정하는 방법이다. 추정된 모드계수로부터 강성의 변화를 추정하는 방법으로는 수학적인 수학적 모델에 근간을 둔 calculus-based 방법 (또는 hard computing 방법)과 가능한 해의 모든 가능성을 탐색하는 enumerative scheme, 그리고, 미분을 사용하지 않고 오직 함수값만을 이용하는 랜덤 탐색 방법으로 나눌 수 있다. 최근에는 Calculus-based 방법과 enumerative scheme의 단점들에 대한 대안으로 신경망 기법이나 유전자 알고리즘과 같은 soft computing 방법이 많이 제안되고 있다.

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수
** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정
*** 한국기계연구원 연구원
**** 서울시립대학교 토목공학과 교수

데이터기반 손상추정기법은 일반적으로 손상유류 및 손상위치 추정에 적합한 반면, 손상의 정도를 판별하는데에는 효과적이지 않다. 반면, 모델기반 손상추정기법은 손상의 정도추정이 가능하나, 구조물이 복잡한 경우 직접 적용하기에 쉽지 않은 단점이 있다. 구조물의 거동을 정확히 모사할 수 있는 모델을 구현하는 것이 어렵고, 모델링 오차에 의한 영향이 손상에 의한 모드특성의 민감도보다 큰 경우에는 모델기반 손상추정기법을 적용할 수 없다.

본 연구에서는 모델기반 손상추정기법에서 모델링 오차를 효과적으로 고려할 수 있는 기법을 제안하였다. 단순보와 여러 개의 주형을 갖는 교량에 대한 수치해석을 통하여 제안한 기법을 검증하고 복잡한 실제문제에 대한 적용성을 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 모델링오차를 가지는 구조물의 모드특성

초기의 손상이 발생되기 전·후의 구조물의 모드방정식으로부터 식 (1-c)와 같은 1차 섭동식을 얻을 수 있다. 여기서 아래첨자 0은 모델링 오차가 없는 건전상태를, d는 손상을 나타낸다.

$$[K_0]\{\phi_0\} = \omega_0^2 [M]\{\phi_0\} \quad (1-a)$$

$$[K_0 + \Delta K_d]\{\phi_0 + \Delta\phi_d\} = (\omega_0^2 + \Delta\omega_d^2)[M]\{\phi_0 + \Delta\phi_d\} \quad (1-b)$$

$$\Delta K_d\phi_0 + K_0\Delta\phi_d = \omega_0^2 M\Delta\phi_d + \Delta\omega_d^2 M\phi_0 \quad (1-c)$$

모델링오차가 있는 구조계의 모드방정식은 모델링 오차가 없는 구조계의 모드방정식과 유사하게 다음과 같이 나타난다. 여기서 아래첨자 m은 모델링 오차를, d는 손상을 나타낸다.

$$[K_m]\{\phi\}_m = \omega_m^2 M\{\phi\}_m \quad (2-a)$$

$$[K_m + \Delta K_d]\{\phi_m + \Delta\tilde{\phi}_d\} = (\omega_m^2 + \Delta\tilde{\omega}_d^2)[M]\{\phi_m + \Delta\tilde{\phi}_d\} \quad (2-b)$$

$$\Delta K_d\phi_m + K_m\Delta\tilde{\phi}_d = \omega_m^2 M\Delta\tilde{\phi}_d + \Delta\tilde{\omega}_d^2 M\phi_m \quad (2-c)$$

$$\Delta K_d\phi_m + K_0\Delta\tilde{\phi}_d = \omega_0^2 M\Delta\tilde{\phi}_d + \Delta\tilde{\omega}_d^2 M\phi_m \quad (2-d)$$

식 (2-d)는 식 (2-c)에 $K_m = K_0 + \Delta K_m$, $\omega_m^2 = \omega_0^2 + \Delta\omega_m^2$ 을 대입하고 2차항 이상을 소거하여 얻을 수 있다. 식 (1-c)와 식 (2-d)를 살펴보면, 모델링 오차에 의한 영향은 계측값인 고유주파수와 모드형상에 대해서 나타낼 수 있고, 만약 $\Delta\omega_d^2 \approx \Delta\tilde{\omega}_d^2$ 이라고 가정하면 모델링 오차가 없는 구조계의 손상 전·후의 모드형상의 비는 모델링 오차가 있는 구조계의 값으로부터 구할 수 있다.

$$\left\{ \phi'_d / \phi'_0 \right\}_{i^{th} mode} = \left\{ \tilde{\phi}'_d / \phi'_m \right\}_{i^{th} mode} \quad (3)$$

2.2 신경망 기법

본 연구에서는 가장 많은 분야에 적용되고 있는 정적 신경망 모델인 다층퍼셉트론을 사용하여 손상추정을 수행하였다. 다층퍼셉트론은 그림 1과 같이 입력층, 은닉층, 및 출력층의 다층으로 구성되어 있다. 다층 퍼셉트론은 다입력/다출력의 사상관계를 표현할 수 있는 일종의 비선형 함수로 간주할 수 있다. 그 입/출력 관계를 결정짓는 신경망의 내부 파라미터는 두 인접한 층의 뉴런을 연결한 연결강도로 표현되므로, 연결강도가 바뀌면 신경망의 입출력관계가 바뀌는 것이다. 이러한 연결강도를 주어진 훈련패턴으로 학습시키는 일련의 과정을 학습이라 하고, 일반적으로 역전파 학습알고리즘이 가장 유명하다. 본 연구에서도 이 기본적인 알고리즘을 사용하였다. 구조물의 손상추정을 위한 신경망 기법의 기본 개념은 고유진동수 및 모드형상 등의 측정자료가 입력층에 제시되었을 때, 대응하는 구조물의 강성계수를 출력하도록 다층퍼셉트론을 학습시키는 것이다. 본 연구에서는 모델링 오차를 효율적으로 고려하기 위한 방법으로 입력자료에서 모드형상 자체를 사용하지 않고 모드형상의 비를 사용하였다.

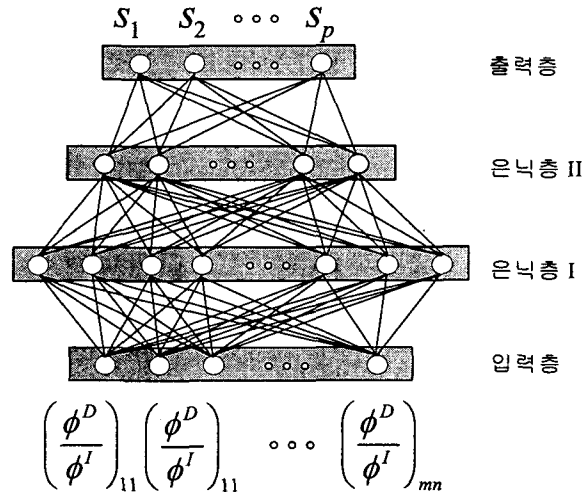


그림 1. 다층퍼셉트론의 구조

3. 수치예제

3.1 단순보

본 절에서는 단순보에 대한 수치예제를 통하여 모델링 오차를 고려한 손상추정기법의 타당성을 살펴보았다. 그림 2와 같이 8개의 보요소로 구성된 단순보에서 그림 3과 같이 각 요소별로 교란된 모델을 사용하여 모델링 오차를 고려하였다. 해석에 고려한 모델링 오차는 rms 레벨 10%와 30%이며, 각각 5개의 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 그림 4에서는 손상과, 모델링 오차에 따른 첫번째 모드형상을 나타내었다. 3번 요소에 손상이 있는 경우, 모델링 오차가 10%인 경우에는 손상에 의한 모드형상의 변화가 모델링 오차의 영향과 비슷하게 나타나지만 모델링 오차가 30%인 경우에는 모델링 오차에 의한 모드의 변화가 손상에 의한 영향보다 크게 나타남을 알 수 있다.

식 (3)의 타당성을 살펴보기 위하여 다음의 식 (4)와 같이 모드비에 대한 근사화 오차를 정의하였다.

$$J = \frac{1}{M} \sum_i J_i / \|J_i\|, \quad J_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_j \left(1 - \frac{(\phi^D / \phi^I)_{ji}^{FE}}{(\phi^D / \phi^I)_{ji}^{True}} \right)^2} \quad (4)$$

여기서, 윗첨자 True는 교란되지 않은 모델(또는 실험값)을 나타내고, FE는 교란된 모델(또는 해석

값)을 나타낸다. 아래첨자 i 는 모드번호를 j 는 절점을 나타낸다. M, N 은 각각 모드와 절점의 수이다 그림 5에서는 각 요소에 실제 손상을 가하고, 교란된 해석 모델의 각 요소에 손상이 있을때의 근사화 오차를 구하여 5개의 경우에 대한 평균오차를 나타내었다. 임의의 요소에 실제 손상이 있는 경우, 해석에서 해당 요소에 손상이 있는 경우에 근사화 오차가 가장 작게 나타남을 알 수 있다.

4개의 모드를 이용하여 손상 전·후의 모드형상의 비를 신경망의 입력자료로 활용하여 손상추정을 각 경우에 대하여 수행하였다. 손상 추정결과, 표 1에 나타낸 바와 같이 손상의 위치와 정도가 잘 추정되었음을 알 수 있다.

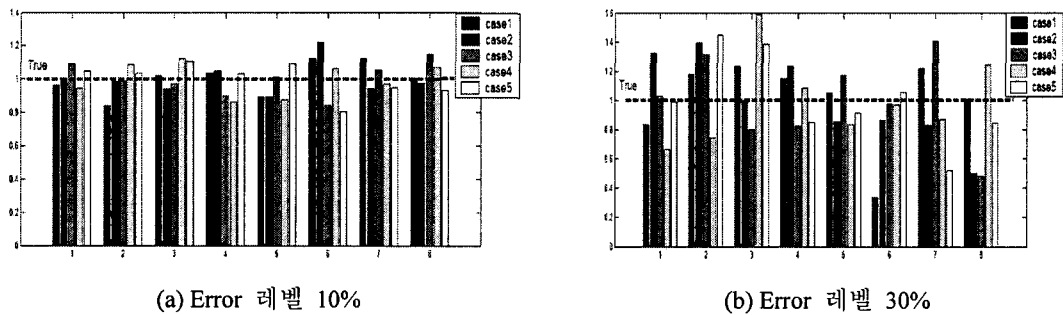
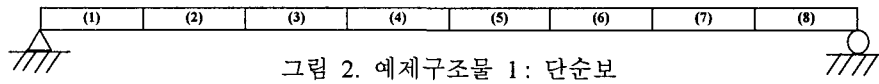


그림 3. 해석에 고려한 모델링 오차

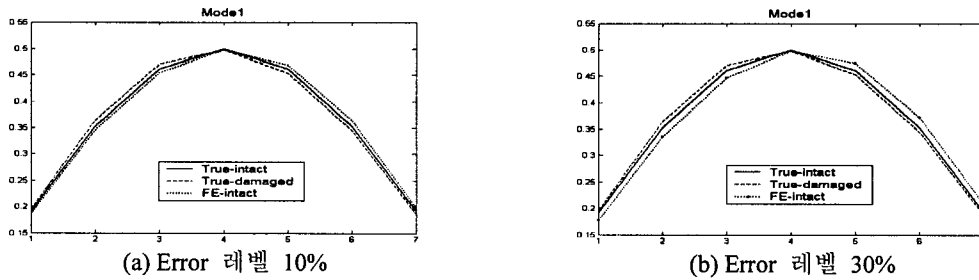
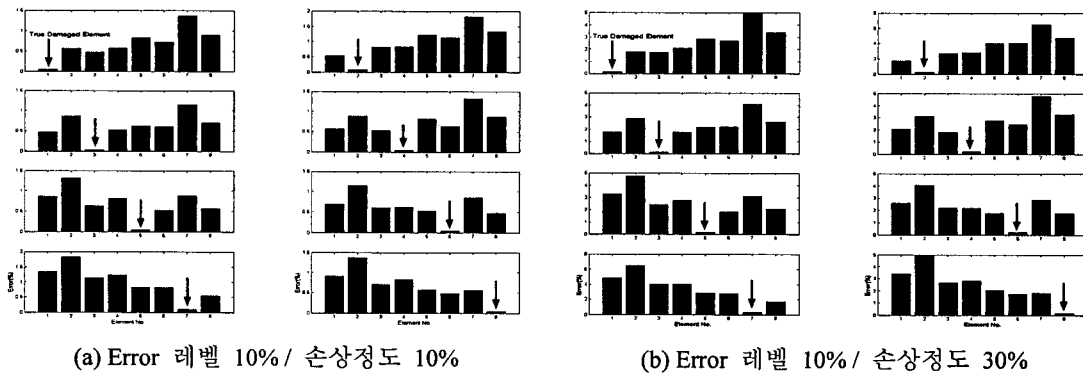
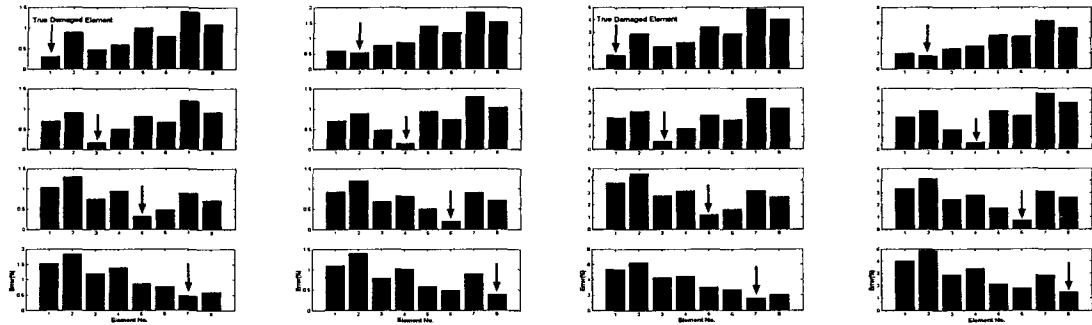


그림 4. 모드형상





(c) Error 레벨 30% / 손상정도 10%

(d) Error 레벨 30% / 손상정도 30%

그림 5. 모드비에 대한 근사화 오차

표 1. 손상추정결과

손상 Case 1 : (El.1 - 30%)		손상 Case 2 : (El.3 - 30%)	
Error 레벨 10%	Error 레벨 30%	Error 레벨 10%	Error 레벨 30%

3.2 여러 개의 주형을 갖는 교량

본 절에서는 여러 개의 주형을 갖는 교량에 대한 수치예제를 통하여 모델링 오차를 고려한 손상추정기법의 실제 적용성을 검토하였다. 그림 6와 같이 5개의 주형과 가로보, 슬라브로 구성된 예제교량에서 각 주형의 휨강성을 교란시켜 모델링 오차를 고려하였다. 해석에 고려한 모델링 오차는 rms 레벨 10%와 30%이며, 각각의 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 그림 7에서는 식 (4) 및 그림 5와 같이 모드비에 대한 근사화 오차를 살펴보았다. 실제 손상이 있는 경우에 대한 오차의 값으로 정규화하여 오차를 나타낸 결과, 실제 손상이 있는 경우에 근사화 오차가 가장 작게 나타남을 알 수 있다. 그림 8에서는 손상 추정 결과(2번거더 3번부재 30% 손상)를 나타내었다. 모델링 오차가 작은 경우, 손상의 위치 및 정도가 거의 정확히 추정되었다. 반면, 모델링 오차가 큰 경우에는 몇몇 부재에 대해서 잘못된 손상정도를 나타내고 있으나, 실제 손상이 있는 부재에 대해서는 비교적 잘 추정하고 있음을 알 수 있다.

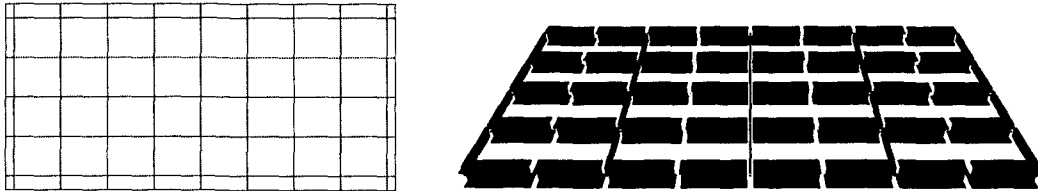
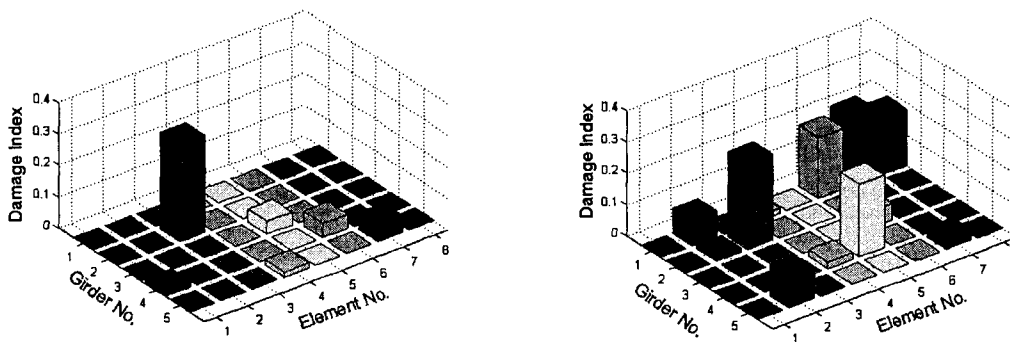


그림 6. 예제구조물 2: 여러 개의 주형을 갖는 교량

1.84	6.46	6.95	5.1	4.58	5.88	4.26	1.44
1.97	1.19	(1.0)	1.94	2.5	2.06	1.76	2.08
2.36	2.21	손상부재	2.39	2.91	3.17	2.9	2.61
2.95	4.27	4.96	4.52	4.69	5.23	4.46	3.0
3.73	7.89	9.68	7.9	7.85	9.62	7.84	3.7

그림 7. 모드비에 대한 근사화 오차



(a) Error 레벨 10%

(b) Error 레벨 30%

그림 8. 손상추정결과 (2번거더 3번부재 30% 손상)

4. 결론

본 연구에서는 모델기반 손상추정기법에서 모델링 오차를 효과적으로 고려할 수 있는 기법을 제안하였다. 손상추정을 위하여 신경망 기법을 이용하였으며, 모델링 오차를 효율적으로 고려하기 위한 방법으로 손상 전·후의 모드형상의 비를 활용하여 손상추정을 수행하였다.

단순보에 대한 수치예제를 통하여 모델링 오차를 고려한 손상추정기법의 타당성을 살펴보았다. 모드비에 대한 근사화 오차를 정의하여 제안한 기법의 타당성을 검증하였다. 단순보에 대한 손상 추정결과, 모델링 오차가 큰 경우에 대해서도 손상의 위치와 정도가 거의 정확히 추정되었다.

여러 개의 주형을 갖는 교량에 대한 수치예제를 통하여 제안한 기법의 실제 적용성을 검토하였다. 모델링 오차가 작은 경우, 손상의 위치 및 정도가 거의 정확히 추정된 반면, 모델링 오차가 큰 경우에는 몇몇 부재에 대해서 잘못된 손상정도를 나타내고 있으나, 실제 손상이 있는 부재에 대해서는 비교적 잘 추정하고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 교육부의 BK21 사업의 연구비지원에 의한 결과로써, 저자들은 이의 지원에 감사한다

참고문헌

1. Y. Zou, L. Tong and G. P. Steven, "Vibration-Based Model-Dependent Damage (Delamination) Identification and Health Monitoring For Composite Structures — A Review", *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 230(2), 357-378
2. M. M. Abdel Wahab and G. De Roeck, "Damage Detection In Bridges Using Modal Curvatures: Application To A Real Damage Scenario", *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 226(2), 217-235
3. R. P. C. Sampaio, N. M. M. Maia and J. M. M. Silva, "Damage Detection Using The Frequency Response-Function Curvature Method", *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 226(5), 1029-1042
4. Z. Y. Shi, S. S. Law and L. M. Zhang "Structural Damage Localization From Modal Strain Energy Change" *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 218(5), 825-844
5. Kim J.T., and Stubb, N., "Model Uncertainty Impact and Damage-Detection Accuracy In Plate Girder", *Journal of Structural Engineering*, Asce, Vol.121, No.10, Pp.1409-1417, 1996.
6. Y.Y. Li and L.H.Yam, "Sensitivity Anaysis of Sensor Locations for Vibration Control and Damage Detection of Thin-Plate Systems", *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 240(4), 623-636
7. Haykin, S., *Neural Networks-A Comprehensive Foundation*, Macmillan, New York, Usa, 1994.
8. Yun C.B., Bahng, E.Y. "Substructural Identification Using Neural Networks." *Computers and Structures* 2000, 77(1): 41-52
9. Yun, C.B., Yi, J.H., Bahng, E.Y., "Joints Damage Assessment of Framed Structures Using Neural Networks Technique", *Engineering Structures*, 2001

10. Yun, C.B., Lee, H.J., "Substructural Identification for Damage Estimation of Structures", *Structural Safety*, Vol. 19, No. 1, pp 121-140, 1997
11. T. Marwala and H. E. M. Hunt "Fault Identification Using Finite Element Models and Neural Networks" *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1999, 13(3), 475-490
12. R. I. Levin and N. A. J. Lieven, "Dynamic Finite Element Model Updating Using Neural Networks", *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 210(5), 593-607
13. C. Zang and M. Imgegun, "Structural Damage Detection Using Artificial Neural Networks and Measured FRF Data Reduced via Principal Component Projection", *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 242(5), 813-827