

구조물의 손상 탐지를 위한 시스템 축소 및 주자유도 선정과 강성도 평가

Structural Stiffness Estimation and Optimum Sensor location for Structural Damage Detection

이 숙* 우 경 식**
Lee Sook Woo, Kyeongsik

ABSTRACT

Damage detection is a very active research field, in which significant efforts have been invested in recent years. In this paper, analysis using structural stiffness estimation for damage detection is presented and compared to other methodologies. By using a cantilever analytical beam model, it is shown here that not only location but also the amount of damage in structure can be predicted from the ratio of change in stiffness. Damage detection experiment in real beam specimen is also performed and the results are compared.

1. 서 론

최근에 구조물의 손상 탐지(damage detection)와 상시 진단(health monitoring)에 관한 연구가 토목공학, 해양 및 항공우주 등의 분야에서 활발히 진행되고 있다. 손상탐지는 전체적인 구조물을 대상으로 손상 초기에 결함의 위치와 크기를 검출할 수 있는 방법으로서, 손상 전의 기준 모델로 정확한 유한요소 모델을 사용한다¹⁾. 시스템 검증 및 손상탐지는 실험 정보의 획득 단계에서 모든 자유도에 대하여 특정치를 정의할 수 없다는 어려움이 발생한다. 따라서 매개변수의 적절한 제한이 필요하며, 이에 대한 해결로써 매개변수에 참여하는 부자유도를 시스템 축소에 사용하는 변환관계식으로 추정하는 방법을 사용한다. 일반적으로 실험에서는 유한요소모델의 자유도에 비해 매우 적은 수의 센서가 사용되므로 실험모델의 절점과 유한요소의 절점은 서로 일치하지 않는다. 그러므로 노드간의 불일치를 해결하기 위해서 시스템 축소 및 이의 역과정인 모드 확장(mode expansion)을 수행한다. 주자유도의 선정에 있어서 어려운 점은 어느 자유도를 선정해야 하는가 하는 문제이다. 이에 관한 기초적인 전제는 축소된 시스템의 저차 주파수 특성이 원래의 시스템에 가능한 가깝도

* 충북대학교 구조시스템공학과 석사과정

** 정회원 · 충북대학교 구조시스템공학과 부교수

록 변환하는 것이다.

본 연구에서는 구조물의 손상판단을 위해 최적측정위치에서 강성도 평가를 수행하고 그 결과를 기존의 손상탐지 방법과 비교 평가하였다. 또한 실험을 통하여 고유진동수와 모드형상을 이용한 강성도의 연산 방법을 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1 손상탐지

일반적으로 구조 동역학적인 관점에서 손상탐지에 관한 연구는 이론적 정식화 방법에 따라 다음과 같이 분류된다.

- 측정된 진동 주파수의 변화
- 측정된 진동 모드의 변화
- 측정된 유연도 행렬의 변화
- 유한요소 모델의 보정기법

이 분류는 Doebling²⁾ 등이 제안한 것으로 현재까지 진동실험을 이용한 대부분의 손상탐지 방법을 범주화 한 것이다.

본 연구에서는 강성도 평가 방법으로 손상탐지를 수행하고, 이를 측정된 진동 주파수의 변화와 진동 모드의 변화 방법에 의한 결과와 비교해보았다. 그리고 각 방법의 평가를 위해서 다음의 Rytter가 제시한 이론³⁾을 이용하였다.

- Level 1 : 구조물의 손상 여부 판단
- Level 2 : 구조물의 손상 위치 파악
- Level 3 : 구조물의 손상 크기 파악
- Level 4 : 구조물의 잔존 수명 예측

이것은 다양한 손상탐지 기법간의 성능 평가에 이용할 수 있다.

2.2 주자유도의 일괄선정

강성도 매트릭스를 감소시킬 수 있는 현실적인 방법은 압축시킬 자유도를 종속(dependent) 또는 2차(secondary) 자유도로 구분하여 이들을 나머지 독립(independent) 또는 1차(primary)자유도의 향으로 표현하는 것이다. 2차 자유도와 1차 자유도 사이의 정적 관계식으로부터 강성도 매트릭스를 감소시킬 수 있다.

구조물의 강성도 방정식은 분할 매트릭스를 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sp} \\ K_{ps} & K_{pp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_s \\ y_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_p \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $\{y_s\}$ 는 감소시켜야 할 s 자유도에 대응하는 변위벡터이며 $\{y_p\}$ 는 나머지 p 독립자유도에 대응하는 변위벡터이다. 식 (1)에서 종속 자유도에서 작용외력은 0으로 가정되었다. 위의 식을 정적압축⁴⁻⁵⁾하면 다음의 감소강성도 방정식을 얻을 수 있다.

$$[\bar{K}]\{y_p\} = \{F_p\} \quad (2)$$

여기서 감소 강성도 매트릭스 $[\bar{K}]$ 는 구조계 강성도 매트릭스 $[K]$ 의 변환식으로 표현될 수 있음을 다음의 식으로부터 알 수 있다.

$$[T]^T[K][T]\{y_p\} = \begin{bmatrix} [\bar{T}]^T & [I] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{F_p\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

단,

$$\begin{aligned} [\bar{T}] &= -[K_{ss}]^{-1}[K_{sp}] \\ [\bar{K}] &= [T]^T[K][T] \end{aligned} \quad (4)$$

본 연구에서는 자유도의 관성력 대 탄성력의 비를 고려하여 주자유도를 선정하였다. 이 방법은 핵심은 구조행렬의 대각항의 비 m_{ii}/k_{ii} 를 조사하여 이 값이 큰 자유도를 순위별로 선정하는 것이다. 이 방법은 매우 직관적이고 경험적인 방법으로 출발했으며, 특정자유도가 구조물에 얼마나 유연하게 부착되어 있는가를 나타내고 있는데 이것은 또한 진동의 변위가 큰 지점을 의미하기도 한다.

2.4 손상검출기법

본 연구에서는 손상검출기법으로 1994년 Zimmerman과 Kaouk의 강성도 행렬에 변화에 기반을 둔 손상검출기법을 적용하였다⁶⁾.

손상이 없는 비감쇠 구조물의 진동방정식은 다음과 같다.

$$([K] - \omega_i^2[M])\{\phi_i\} = \{0\} \quad (5)$$

여기서 첨자 i 는 모드번호를 ω^2 은 고유진동수의 제곱을 ϕ 는 고유벡터를 나타낸다. i 번째 모드에 대한 손상 벡터 $\{D_i\}$ 는 손상이 있는 손상에 의한 질량 변화량(ΔM_d)과 강성도 행렬의 변화량(ΔK_d)을 이항시킴으로써 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\{D_i\} = ([K] - \omega_i^{2*}[M])\{\phi_i\}^* = ([\Delta K_d] - \omega_i^{2*}[\Delta M_d])\{\phi_i\}^* \quad (6)$$

본 연구에서는 손상이 강성도 행렬에만 영향을 미친다고 가정하였다. 따라서 손상 벡터는 다음과 같이 축소할 수 있다.

$$\{D_i\} = [\Delta K_d]\{\phi_i\}^* \quad (7)$$

손상 전후의 강성도 행렬⁷⁾을 구하기 위해서는 모드 매개변수로부터 아래의 식과 같이 근사할 수 있다.

$$[K] \approx \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \phi_i \phi_i^T \quad (8)$$

$$[K]^* \approx \sum_{i=1}^n \omega_i^{*2} \phi_i^* \phi_i^{*T} \quad (9)$$

여기서 ϕ 는 모드형상벡터를 의미한다. 손상 모드 변위는 아래의 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\{\phi_i\}^* = \{\phi\}[M_i]^{1/2} \quad (10)$$

여기서 $[M_i]$ 은 일반화된 질량(generalized mass)으로 모드질량(modal mass)을 나타낸다.

3. 유한요소 모델 및 수치실험

3.1 적용 모델

그림 1은 본 연구에서 고려한 캔틸레버보의 유한요소 모델을 나타낸다. 강재의 종류는 SS41(포스코 PN-A02420)이다. 본 연구에서는 회전 자유도는 고려하지 않고 수직 자유도만을 주자유도로 선정하였다.

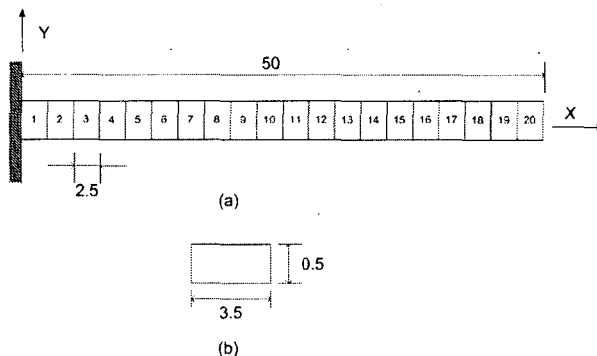


Figure 1. Dimensions and finite element model of a cantilever: (a) finite element model, and (b) cross-section of the cantilever. ($E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, all dimensions in cm)

그림 2와 3은 각각 40자유도에서 회전 자유도를 압축했을 때와 20개의 수직자유도를 관성력 대 탄성력의 비를 통해 12개의 자유도로 압축한 경우의 MAC값을 나타낸다. 이 두 그림을 통해 압축이 신뢰성 있게 이루어졌음을 확인할 수 있다.

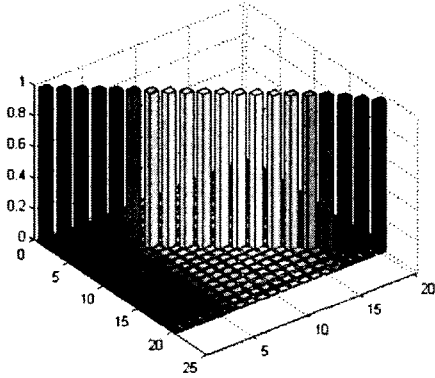


Figure 2. MAC graph for 40 and 20 DOFs.

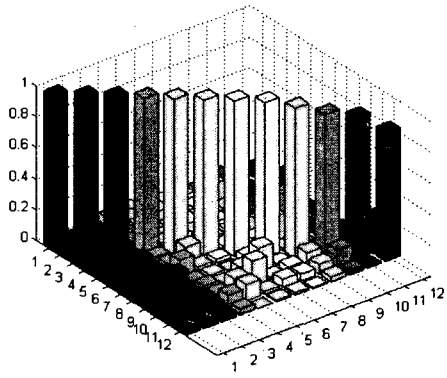


Figure 3. MAC graph for 20 and 12 DOFs.

3.2 손상탐지 기법간의 비교 및 고찰

그림 4는 손상 전후의 고유 진동수를 비교하여 손상탐지를 수행한 결과이다. 이를 통해 캔틸레버보의 경우 손상의 위치가 고정단에 가까울수록 고유 진동수의 감소에 더욱 지배적임을 볼 수 있다. 또한 고정단에 가까울수록 저차 모드의 고유 진동수 변화에 더 영향을 끼치고 이와는 반대로 고정단에서 멀어질수록 고차의 고유 진동수의 감소에 관계가 있음을 알 수 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 고유진동수의 변화를 통해서 손상의 유·무뿐만 아니라 캔틸레버의 경우 손상위치까지 대략적인 추정이 가능하나, 실험을 통하여 얻을 수 있는 고유 진동수의 모드는 저차모드에 국한 되고 이 또한 1%의 측정 오차를 갖기에 손상위치와 그 크기에 따라 손상의 유·무를 판별하기에 상당한 무리가 따르게 된다. 그리고 그림 4의 (d)에서와 같이 손상이 동시에 발생한 경우에는 손상의 정보를 얻어내기란 많은 어려움이 있다고 보여 진다.

손상 전후의 curvature 모드 형상의 절대값의 차이로 손상의 추정⁸⁾도 가능한데 그림 5는 curvature모드 형상을 이용하여 손상탐지를 한 결과이다. curvature 모드 형상은 유한 요소 해석을 통해 얻어지는 변위 모드 형상을 유한 차분법을 통해서 구하였다. 본 논문에서는 12개의 요소로 압축된 모델을 다시 모드확정을 통하여 압축되었던 부자유도의 변위 모드를 추출하여 20개의 수직자유도의 모델로 손상탐지를 수행하였다.

모드확장에는 Miller의 방법⁹⁾과 Kidder의 방법¹⁰⁾ 등이 있는데, 본 논문에서는 좀 더 정확한 것으로 알려진¹¹⁾ Kidder의 방법을 적용하였다.

$$\phi_{si} = -(K_{ss}^{-1} + \omega_i^2 K_{ss}^{-1} M_{ss} K_{ss}^{-1})(K_{sp} - \omega_i^2 M_{sp}) \phi_{pi} \quad (11)$$

여기서 i 는 모드번호를 의미한다. 그림 5에서 (a)~(c)는 19번 요소에 각각 탄성계수를 10, 30, 50% 감소를

주었을 때 손상탐지가 이루어진 결과를 나타낸다. 그 결과 손상의 위치를 찾아내는데 효과적인 방법임을 확인할 수 있으며 크기 또한 대략적으로 추정할 수 있었다. 그러나 이는 오직 한 요소에 손상이 발생하였을 때만 적용이 가능함을 그림 5의 (d)를 통해 확인할 수 있다.

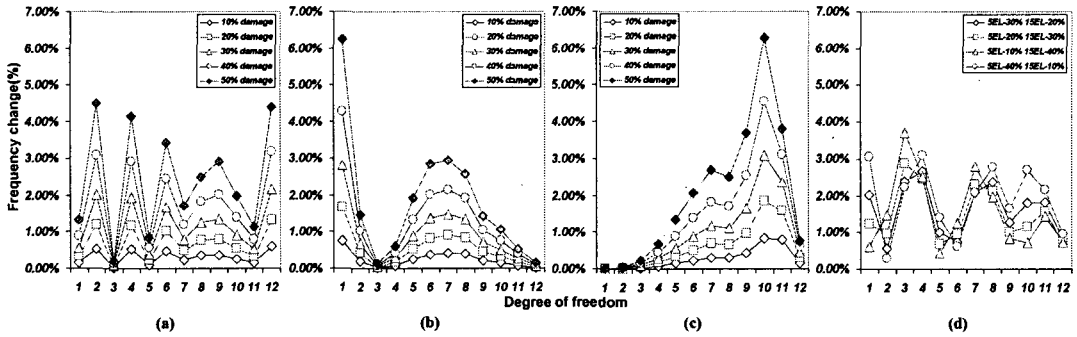


Figure 4. Changes of natural frequencies for intact case and for four typical damage locations: (a) 10~50% reductions in E at 10 EL, (b) 10~50% reductions in E at 3 EL, (c) 10~50% reductions in E at 19 EL, and (d) reduction in E at 5 and 15 EL.

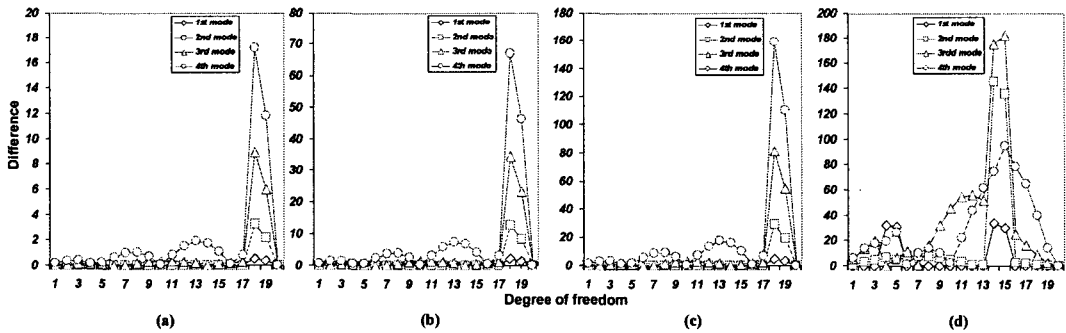


Figure 5. Absolute difference between the curvature mode shapes for the intact and damaged cantilever: (a) 10% reduction in E at 19EL, (b) 30% reduction in E at 19EL, (c) 50% reduction in E at 19EL, and (d) reduction in E at 5 and 15EL.

본 연구에서는 또한 강성도 평가 기법으로 손상탐지를 수행하였다. 그림 6과 7은 손상 전후의 근사강성도의 차와 손상 전 강성도의 비율로 손상의 비율과 손상의 위치를 나타내고 있다. 그림 6의 (a)와 (b)는 10번 요소에 발생한 손상을 탐지한 결과를 나타내고 있다. 그림 6 (b)의 경우 탄성계수의 감소가 그림 6 (a)에 비해 1.6배 크고 강성도의 비율은 약 2배 차이가 있음을 볼 수 있다. 이를 통해 손상의 비율이 증가함에 따라 강성도 비율이 선형적이지는 않지만 증가됨을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용한 강성도 평가 기법은 앞선 두 방법에 비해 손상의 위치를 탐지하는데 효과적이며 손상의 크기를 추정함에 있어서도 좀 더 타당한 근거를 제시한다.

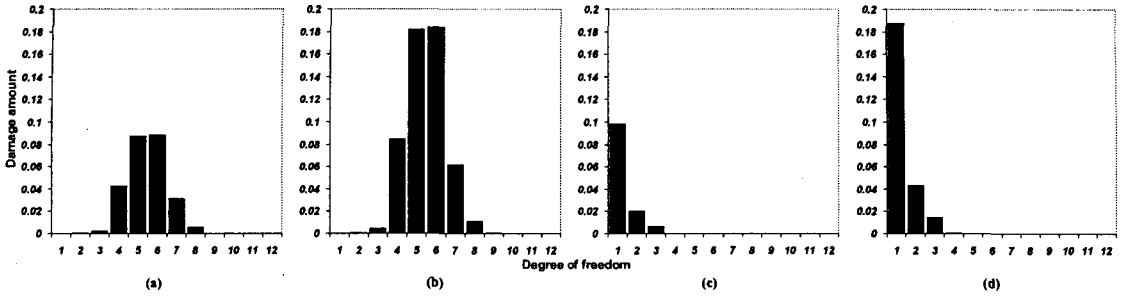


Figure 6. Damage detection using the structural stiffness estimation: (a) 30% reduction in E at 10 EL, (b) 50% reduction in E at 10 EL, (c) 30% reduction in E at 3 EL, and (d) 50% reduction in E at 3 EL.

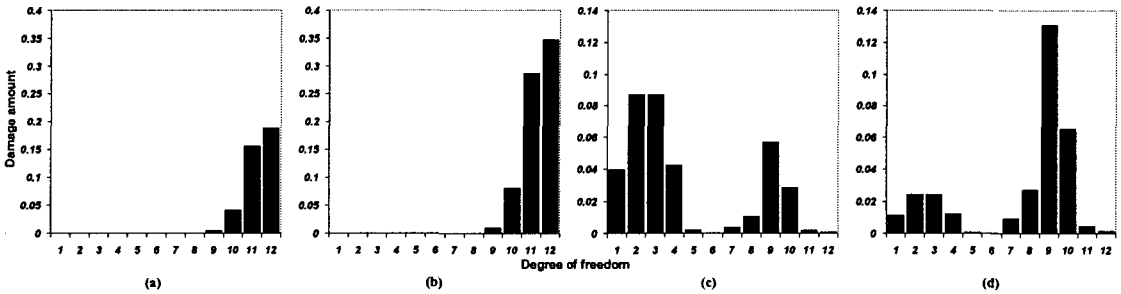


Figure 7. Damage detection using the structural stiffness estimation: (a) 30% reduction in E at 19 EL, (b) 50% reduction in E at 19 EL, (c) 30% and 20% reductions in E at 5 and 15 EL, and (d) 10% and 40% reductions in E at 5 and 15EL.

3.2 실험

본 연구에서는 해석에 사용된 형상과 동일한 시편에 대해 실험을 수행하였다. 시편은 $SS41(E = 210\text{ GPa}, \nu = 0.3, \rho = 7850\text{ kg/m}^3)$ 모델이고 실험은 2개의 센서를 한 조로 각각 ①, ②~⑨, ⑩ 까지 옮겨가면서 총 5개의 요소 위치에서 가진에 대한 응답을 측정하였다. 가진은 임펄스 해머를 이용하였으며 가진위치는 ③으로 고정하였다. 측정된 데이터는 I-DEAS M10을 이용하여 커브피팅을 하고, 모드형상을 측정하였다.

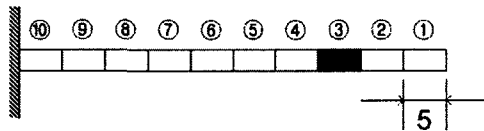


Figure 8. Experimental model. (dimensions in cm)

4. 결론

본 연구에서는 손상탐지를 강성도 평가 기법으로 수행하고 기존의 방법들과 비교를 해보았다. 강성도 평가 기법은 손상의 위치를 탐색하는데 효과적인 방법으로 손상의 크기 또한 추정이 가능하였다. 해석모델에 대한 실험 측정점의 불완전성을 극복하기 위하여 Guyan 축약의 방법을 사용하였으나 오차가 전파되어 재분배됨을 확인할 수 있었다. 오차의 재분배를 최소화한다면 또는 오차가 예측 가능하다면 강성도 평가 기법으로 더 정확한 손상탐지가 가능할 것이다.

참고 문헌

1. 최영재 "구조 동역학적 역해석 문제에서 시스템 축소 및 주자유도 선정", *Ph D. 항공공학과*, 인하대, 2001
2. S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, D. W. Shevitz, "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical System from Changes in Their Characteristics: A Literature Review", *Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS*, 1996
3. A. Rytter, "Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures", *Ph D. Dissertation, Dept. of Building Technology and Structural Engineering*, Aalborg University, Denmark, 1993
4. Guyan, R.J., "Reduction of Stiffness and Mass Matrices", *AIAA Journal*, Vol.3, No.2, 1965, pp.380
5. Mario paz, *Structural Dynamics*, Chapman & Hall, New york, 1997, pp.367~369
6. Zimmerman, D. C. Kaouk, M., "Damage Detection in Structures Using a Minimum Rank Update Theory", *J. Vib. Acoust.*, Vol.116, 1994, pp.222-231
7. Pandey, A.K. and Biswas, M., "Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility", *J. Sound Vib.*, Vol. 169, No.1, 1994, pp.3~17
8. Pandey, A.K. and Biswas, M., "Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes", *J. Sound Vib.*, Vol. 145, No.2, pp.321~332
9. Kidder, R. L., "Reduction of Strucal Frequency Equations," *AIAA Journal*, VOL. 11, NO. 6, 1973, pp. 892
10. Miller, C. A., "Dynamic Reduction of Structural Models" *ASCE Journal of the Structural Division*, Vol. 106, No.10, 1980, pp. 2097~2108
11. Michael Papadopoulos, Ephrahim Garcia, "Improvement in Model Reduction Schemes Using the System Equivalent Reduction Expansion Process", *AIAA Journal*, Vol.34, No.10, 1996, pp.2217~2219