

동특성 변화를 이용한 구조물의 손상 탐지 해석

이정윤*(경기대 기계시스템디자인공학부), 이정우, 이준호(경기대 대학원 기계공학과)

Analysis of a Structural Damage Detection using the Change of Dynamic Characteristics

J. Y. Lee(Mech. Eng. Dept., Kyonggi University),
J. W. Lee and J. H. Lee(Graduate school., Kyonggi University)

ABSTRACT

This study proposed the analysis of damage detection due to the change of the stiffness of structure by using the original and modified dynamic characteristics. The method is applied to examples of a cantilever and 3 degree of freedom by modifying the stiffness. The predicted damage detections are in good agreement with these from the structural reanalysis using the modified stiffness.

Key Words : Damage detection(손상 탐지), Sensitivity Analysis(감도해석), Dynamic characteristic(동특성), Sensitivity Coefficient Matrix(감도계수행렬), Mass matrix(질량행렬), Stiffness Matrix(강성행렬)

1. 서론

자동차, 공작기계, 비행기, 발전소, 해양구조물 등은 사용 중에 운전하중이나 충격, 부식, 지진, 바람, 파랑하중에 의해서 구조물에 손상이 발생되며 이들로부터 구조물의 손상위치를 정확하게 찾아내는 일은 구조물의 수명 연장과 안전성에서 매우 중요하게 되었다.

구조물의 손상을 평가하는 방법이 많은 연구자들에 의해 활발히 수행되고 있다. 오병환 등¹은 정적변위 및 동특성 측정자료를 이용하여 구조물의 변형도를 추정하였으며, 김기봉 등²은 모우드 해석을 이용하여 구조물의 손상탐지에 관한 연구를 하였고, 조병완³은 모우드 섭동 기법을 이용하여 항만구조물의 손상부위 측정하였고 김남인등⁴은 평판 구조물의 구조손상 규명기법에 대해 연구하였다. 국외에서는 구조물의 안전성에 대한 중요성의 증대로 시스템 규명이 많이 사용되고 있다. 이에 대한 연구로는 Liu 등⁵이 구조물의 규명을 위해 사용한 이래로 손상 발견과 기존 구조물의 안전진단에 중요한 연구가 되었다. 최근 들어 Stubbs 등⁶은 항공 우주구조물의 손상 발견에 진동 특성치의 변화를 사용할 수 있는지의 적용성을 조사하였고, 특히 Shephens 등⁷은

교량구조물의 진동형상의 변화를 측정하고 이 변화를 유한요소 모델에 적용하여 손상을 발견하려는 연구를 수행하였다. 그동안 다양한 연구 노력에도 불구하고 구조물의 손상을 정확히 예측하는데 어려움이 있었다. 왜냐하면 지금까지 대부분의 연구가 구조물이 손상을 받은 후 변경된 강성 행렬을 구할 때 모드의 변화가 없다고 가정하여 구조 변경량이 많으면 오차가 증가하기 때문이다.

본 연구에서는 구조물의 손상 전의 고유진동수, 진동모드, 강성행렬, 질량행렬과 구조 손상 후 고유진동수, 진동모드만을 가지고 구조물의 손상 위치와 크기를 예측하고 외팔보와 3자유도계에 적용하여 유효성을 검증한다.

2. 이론

구조물이 손상을 받으면 동특성이 변하게 된다. 이때 구조물 손상 전 후의 동특성은 다음과 같이 된다.

$$(K_0 - \omega_0^2 M) \{u_0\} = 0 \quad (1)$$

$$(K_0 - \omega_0^2 M) - [K_0 - K_1] - [K_2 - K_3] \quad (2)$$

여기서 K_0, M, K_1, K_2, K_3 와 ω_0 는 각각 변

경 전 강성 및 질량 행렬, 변경 후 강성 및 질량 행렬, 강성 및 질량 행렬의 변화량이며 $\phi_0, \bar{\phi}_0, \phi_1, \bar{\phi}_1$ 와 $\Delta\phi$ 는 각각 구조 변경 후 고유치, 고유벡터, 변경 전 고유치, 고유벡터, 고유치 및 고유벡터 변화량이다.

2.1 기존의 감도해석 방법

Fox⁸는 감도해석에 필요한 감도계수를 다음과 같이 구하였다.

$$\alpha_0 = -\frac{\Delta M_0}{2} \quad (3)$$

$$\alpha_1 = -\frac{\Delta M_1 \omega_1^2 + \Delta K_1}{\omega_1^2 - \omega_0^2} \quad (4)$$

여기서 $\Delta M_0 = \{\phi_0\}^T [\Delta M] \{\phi_0\}$, $\Delta K_0 = \{\phi_0\}^T [\Delta K] \{\phi_0\}$ 이다.

그러나 위 방법은 구조 변경량이 많으면 감도 계수의 오차가 증가하여 실제 구조물의 적용에는 한계가 있다. 이런 문제점을 개선하기 위해서 새로운 방법이 제안되었다.

$$\alpha_0 = -\frac{1}{2} \left\{ \sum_1 \alpha_k^2 + \Delta M_0 + 2 \sum_1 \alpha_k \Delta M_k + \sum_1 \alpha_k \sum_1 \alpha_k \Delta M_k \right\} \quad (5)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{\omega_1^2 - \omega_0^2} \left\{ \Delta K_1 + \sum_1 \alpha_k \Delta K_k + \sum_1 \alpha_k \Delta K_k + \sum_1 \alpha_k \sum_1 \alpha_k \Delta K_k + \sum_1 \omega_k^2 \alpha_k \alpha_0 \right\} - \frac{\omega_0^2}{\omega_1^2 - \omega_0^2} \left\{ \sum_1 \alpha_k \alpha_0 + \Delta M_0 + \sum_1 \alpha_k \Delta M_k + \sum_1 \alpha_k \Delta M_k + \sum_1 \alpha_k \sum_1 \alpha_k \Delta M_k \right\} \quad (6)$$

2.2 동특성 변화로부터 감도계수의 해석

Fox⁸는 고유 벡터의 변화량을 다음과 같이 가정하였다.

$$\{\Delta\phi\}^T = \sum_1 \alpha_k \phi_k \quad (7)$$

구조물의 동특성 변화로부터 감도계수를 구하는 것은 감도해석의 역변환 문제이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\Delta\phi] = [\alpha]^T [\phi_0] \quad (8)$$

$$[\alpha]^T = [\phi_0]^{-1} [\Delta\phi] \quad (9)$$

여기서 $[\Delta\phi]$, $[\alpha]^T$, 및 $[\phi_0]$ 는 고유벡터 변화량 행렬, 감도계수 행렬 및 변경 전 고유벡터 행렬이다.

2.3 감도계수로부터 구조물의 손상 해석

구조물이 손상을 받는 경우 질량은 변화가 없고 강성만 변한다고 할 수 있으므로 $\Delta M_0 = 0$ 이며 (5), (6)식은 다음과 같이 된다.

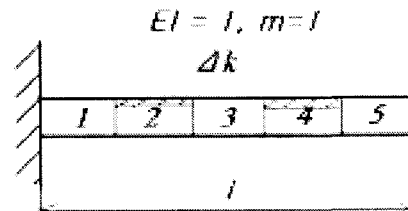
$$\alpha_0 = -\frac{1}{2} \sum_1 \alpha_k^2 \quad (10)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{\omega_1^2 - \omega_0^2} \left\{ \Delta K_1 + \sum_1 \alpha_k \Delta K_k + \sum_1 \alpha_k \Delta K_k + \sum_1 \alpha_k \sum_1 \alpha_k \Delta K_k + \sum_1 \omega_k^2 \alpha_k \alpha_0 \right\} - \frac{\omega_0^2}{\omega_1^2 - \omega_0^2} \sum_1 \alpha_k \alpha_0 \quad (11)$$

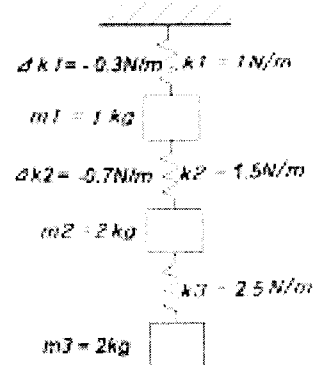
여기서 (9)식에서 구한 감도계수 α_0 를 (11)식에 대입하여 변경된 ΔK_1 을 구한다. 또한 ΔK_0 을 $\Delta K_0 = \{\phi_0\}^T [\Delta K] \{\phi_0\}$ 에 대입하여 $[\Delta K]$ 를 구하고 $[\Delta K]$ 을 (2)식에 대입하여 구조물의 손상 위치 및 크기를 해석한다.

3. 적용 예

Fig. 1은 위에서 해석한 이론을 적용하기 위해 사용한 외팔보 및 3자유도계의 모델을 나타낸다. 변경 전의 외팔보의 질량, 길이, 탄성계수는 1로 하였으며 구조물의 손상을 주기 위해서 2번, 4번 요소에 각각 강성의 15%, 20%를 감소시켜 동특성을 변화시켰으며 3 자유도계는 1번, 2번 요소에 각각 0.3N/m, 0.7N/m을 감소시켜 동특성을 변화시켰다.



(a) cantilever



(b) 3 d.o.f

Fig. 1 Model of cantilever and 3 d.o.f

4. 결과 및 고찰

4.1 고유진동수 변화 검토

Table 1은 외팔보의 4차까지 고유진동수 변화를 나타낸 표로 1차는 22.3%, 2차는 3.4%, 3차는 6.4%, 4차는 3.5%가 감소하였다.

Table 2은 3자유도계의 3차까지 고유진동수 변화를 나타낸 표로 1차는 22.3%, 2차는 14.2% 감소하였으며, 3차는 11.4% 감소하였다.

Table 1 Comparison of natural frequencies by modifying structure in cantilever beam

mode	modification		remark
	before	after	
1	3.516	3.424	
2	22.046	21.290	
3	61.918	57.952	
4	122.319	118.012	

Table 2 Comparison of natural frequencies by modifying structure in 3 d.o.f

mode	modification		remark
	before (Hz)	after (Hz)	
1	0.3730	0.2898	
2	1.4070	1.2076	
3	1.9080	1.6904	

4.2 모드변화 검토

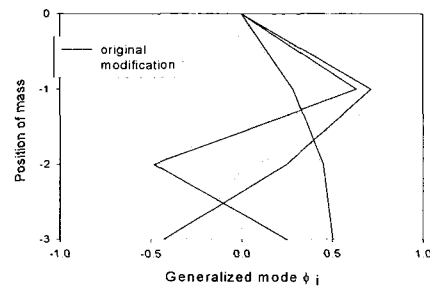
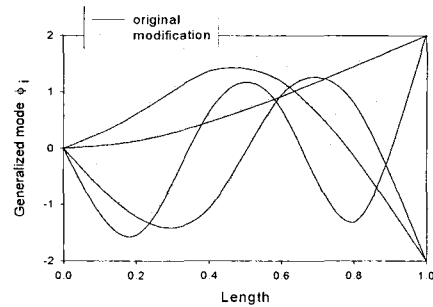
Fig. 2는 외팔보 및 3자유도계의 구조물 손상 전후의 진동해석을 하여 구한 고유벡터이다. 외팔보의 경우는 3 자유도계 보다 강성이 조금 변화하였기 때문에 고유벡터의 변화가 적었다. Fig. 3은 고유벡터 변화량을 나타낸 그림으로 Fig. 2에서 변경후 와 변경전 고유 벡터의 차로 구하였다.

4.3 감도계수의 해석

Fig. 4은 외팔보 및 3자유도계의 구조물 변경 후 (9)식을 이용하여 동특성 변화로부터 감도계수를 해석한 결과이다. ϕ_i 모드가 가까울수록 감도계수의 크기가 대체적으로 크게 나타났다. 이는 구조 변경 시 가까이 있는 모드가 멀리 떨어진 모드보다 고유벡터의 변화에 더 많은 기여를 하기 때문이며 (6)식에서 두 모드가 가까울수록 분모가 작아지기 때문이다.

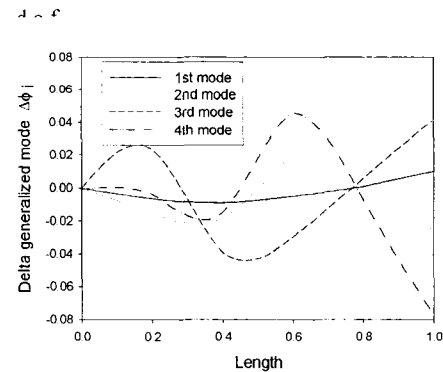
4.4 구조물의 변경된 강성 위치 및 크기 해석

Table 3는 외팔보 및 3자유도계에 구조물을 손상시킨 후 동특성 변화로부터 역으로 구조물의 손상된 위치와 크기를 예측하여 나타낸 표이다. 외팔보의 경우 2, 4번 요소에 감소시킨 강성 15%, 20 %를 정확히 예측하였고 3자유도계의 경우도 1, 2번 요소

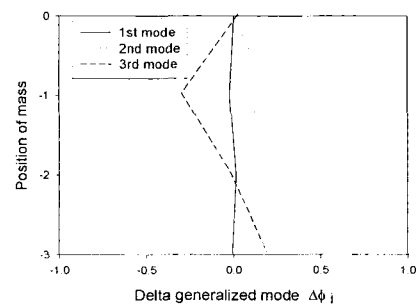


(b) 3 d.o.f

Fig. 2 Comparison of mode shapes in cantilever and 3



(a) cantilever



(b) 3 d.o.f

Fig. 3 Comparison of delta mode shapes in cantilever and 3 d.o.f

에 감소시킨 강성 0.3N/m, 0.7N/m도 정확히 찾아냈음을 알 수 있다.

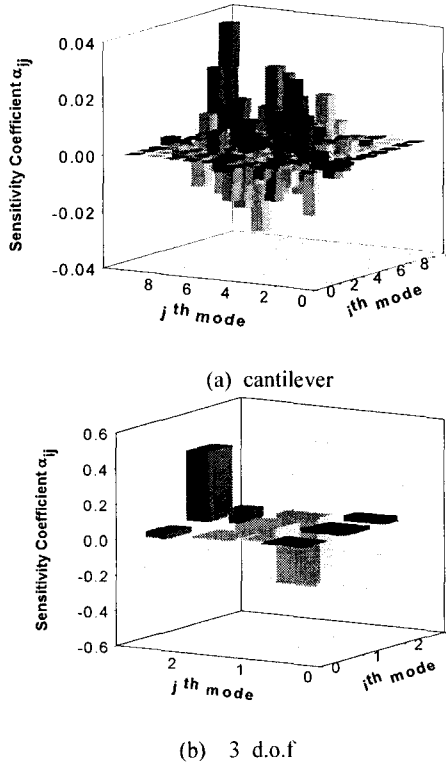


Fig. 4 Model of cantilever and 3 d.o.f

Table 3 Predicted stiffness in cantilever and 3 d.o.f

(a) cantilever

Element No.	stiffness			ratio (%)
	original (k)	changed (Δk)	predicted (Δk _p)	
1	1.0	0	0	100.00
2	1.0	-0.15	-0.1500	100.00
3	1.0	0	0	100.00
4	1.0	-0.20	-0.2001	100.05
5	1.0	0	0	100.00

(b) 3 d.o.f

Spring No.	stiffness(N/m)			ratio (%)
	original (k)	changed (Δk)	predicted (Δk _p)	
1	1.0	-0.30	-0.3000	100.00
2	2.0	-0.70	-0.7000	100.00
3	2.5	0	0	100.00

5. 결론

구조물의 손상전, 후의 동특성을 이용하여 구조물의 손상 위치와 크기를 정확히 예측하는 알고리즘을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구조물 손상 전후의 진동모드를 가지고 감도 계수를 해석하는 방안을 제안하였다.

(2) 감도 계수로부터 강성 행렬 변화량을 해석하는 알고리즘을 개발하였다.

(3) 유한요소법의 강성행렬을 이용하여 강성 행렬 변화량으로부터 구조물의 손상 위치 및 크기를 해석하는 방안을 제안하였다.

(4) 본 방법을 외팔보와 3자유도계에 적용한 결과 구조물 손상 위치 및 크기를 정확히 예측하므로 제안된 방법이 타당함을 알 수 있었다.

참고문헌

- 오병환, 정범석, "정적변위 및 동특성 측정 자료를 이용한 구조물의 손상도 추정", 대한토목학회논문집, 제17권, 제1-3호, pp. 383-396, 1997.
- 김기봉, 김성중, 성여중, "모우드 해석을 이용한 구조물의 손상탐지에 관한 연구", 중앙대학교 건설환경논문집, 제 11권, 1호, pp. 27-46, 1999.
- 조병완, "Modal perturbation 기법을 이용한 항만구조물의 손상부위 측정", 전산구조공학학회논문집, 제9권, 제4호, pp. 209-218, 1996.
- 김남인, 이우식, 권오양, "FRF를 이용한 평판 구조물의 구조손상 규명기법", 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 2, pp. 204-212, 2001.
- Liu, S. C. and James, T. P., "Structural identification concept", J. of Structure Engineering, ASCE, Vol. 104, No. 12, pp. 1845-1858, 1978.
- Stubbs, N., Broome, T. H. and Osegueda, R., "Nondestructive Construction Error Detection in Large Space Structures", AIAA J., Vol. 28, No. 1, pp. 146-152, 1988.
- Stephens, J. E. and Yao, J. T., "Damage Assessment Using Response Measurement", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 4, pp. 787-801, 1987.
- Fox, R. S. and Kapoor, M. P., "Rates of Change of Eigenvalues and Eigenvectors", AIAA J., Vol. 6, No. 12, pp. 2426-2429, 1968.
- 이정윤, "설계파라미터 변경에 따른 구조물의 동특성 변화 해석", 대한기계학회 논문집 A권 제26권, 제4호, pp. 739-744, 2002.