

민감도행렬을 사용한 구조물의 손상추정법

Structural Damage Detection Method Using Sensitivity Matrices

윤 정 방*
Yun, Chung-Bang

김 두 기**
Kim, Doo-Kie

요 약

구조물의 손상추정법은 정적방법과 동적방법으로 나눌 수 있다. 정적방법은 정적하중과 정적변위의 관계를 이용하여 구조물의 손상위치와 손상정도를 추정하는 방법으로 동적방법에 비해 수식이 간단하나, 정적하중과 정적변위의 관계만을 사용하여 구조물의 손상을 추정하므로 정적변위에 대한 오차에 매우 민감하다. 동적방법은 구조물의 고유한 진동특성을 나타내는 고유진동수와 진동모우드를 구하여 구조물의 손상을 추정하는 방법으로, 정적방법에 비해 동일한 측정에서 많은 양의 시간기록자료를 계측할 수는 있으나, 신뢰성이 높은 많은 수의 고유진동수와 진동모우드를 구하기가 어렵다.

본 연구에서는 구조물의 정적변위, 고유진동수와 진동모우드에 대한 민감도행렬을 사용하여 구조물의 정적 및 동적특성을 동시에 고려할 수 있는 구조물의 손상추정법을 제시하였다. 제시한 방법은 구조물의 손상 전·후의 정적변위와 진동모우드의 변화량을 부동구속조건식으로 한 최적화기법을 사용하므로, 제한된 계측절점과 오차를 고려할 수 있으며 정적변위와 모우드 민감도행렬이외의 다양한 구조적 특성에 대한 민감도를 구속조건식으로 사용할 수 있다. 트러스구조물에 대한 모의수치예제를 통해 제안한 방법의 정확성과 효율성을 수치적으로 검증하였다.

Abstract

Damage detection methods using structural tests can be divided into two methods, i.e., static and dynamic. The static methods which use the stiffness properties of the structure are simpler than the dynamic methods. However, static approaches are very sensitive to the displacement measurement noises and modeling errors. The dynamic methods also have limitations in acquiring the natural frequencies and mode shapes of the high frequencies.

In this study, a method for the structural damage assessment using sensitivity matrices is developed, in which the drawbacks of the static and dynamic methods can be compensated. Based on the measurement data for the static displacements and dynamic modal properties, the damage locations and the degree of damage are determined using the presented sensitivity matrix method. The ef-

* 정희원 · 한국과학기술원 토목공학과 교수
** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 1997년도 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1997년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

efficiency of the proposed method has been examined through numerical simulation studies on truss type structures.

Keywords : structural damage detection, sensitivity matrix, static displacement, optimization technique

1. 서 론

교량, 건물, 해양구조물, 발전소 등의 여러 토목 구조물들은 사회기간 시설로서, 구조적 노후, 예기치 못한 사고 등으로 사용이 중단되는 사태가 발생될 때, 경제적, 사회적으로 큰 손실과 혼란이 야기될 수 있는 매우 중요한 구조물이다. 따라서, 기존 토목구조물의 손상도를 추정하는 것은 구조물의 안전성과 유지관리를 위하여 매우 중요하며, 근래에 들어 노후구조물의 급증에 따라, 대형 시설구조물에 대한 손상도 추정방법의 개발과 필요성은 더욱 증대하고 있다.

구조물의 손상을 추정하는 방법 중에서 구조실험을 통한 구조물의 손상추정방법은 구조물의 정적변위, 고유진동수, 진동모우드 등을 계측하여 구조성능을 직접적으로 조사하는 방법으로 구조물의 전체적인 구조적 성능파악과 국부적인 구조적 손상을 추정하는 방향으로 연구, 개발되어왔다.

구조물의 손상추정방법은 정적방법과 동적방법으로 나눌 수 있다. 정적방법은 정적하중과 정적변위의 관계를 이용하여 구조물의 손상위치와 손상정도를 추정하는 방법으로, 80년대 초반 Sheena 등에 의해 제시된 이후 Sanayei를 위시한 여러 학자들에 의하여 발전되어 왔다.^{1,3)} 이 방법은 동적방법에 비해 수식이 간단하다는 장점은 있으나, 정적하중과 정적변위의 관계만을 사용하여 구조물의 손상을 추정하려 하였으므로 정적변위의 계측오차와 모델링오차에 매우 민감하다. 동적방법은 구조물의 고유한 진동특성을 나타내는 고유진동수와 진동모우드를 측정하여 구조물의 손상을 추정하는 방법으로, 정적방법에 비해 동일한 측정에서 많은 양의 시간기록자료를 계측할 수는 있

나, 신뢰성이 높은 많은 수의 고유진동수와 진동모우드를 구하기가 어렵다는 단점이 있다.^{4,7)}

본 논문에서는 구조물의 민감도행렬을 사용하여 구조물의 정적 및 동적특성을 동시에 고려할 수 있는 구조물의 손상추정법을 제시하였다. 제안된 방법은 구조물의 손상 전·후의 정적변위와 진동모우드의 변화량을 부등구속조건식으로한 최적화기법을 사용하므로 제한된 계측절점과 오차를 고려할 수 있으며, 정적변위와 모우드 민감도행렬 이외의 다양한 구조적 특성에 대한 민감도를 구속조건식으로 사용할 수 있다.

1경간과 2경간 부정정 트러스구조물에 대한 모의수치예제를 통해 제안한 방법의 정확성과 효율성을 검증하였다. 구조물의 고유진동수, 진동모우드와 정적변위는 제안된 절점에서의 계측을 가정한 모의측정자료를 사용하였으며, 1경간 트러스구조물의 경우에는 오차의 영향을 고려하였다. 모우드섭동법과의 비교와 다양한 수치예제를 통하여 본 논문에서 제시한 정적 및 동적 민감도행렬을 사용한 손상추정법이 매우 우수한 추정결과를 보임을 알 수 있었다.

2. 목적함수의 구성

구조물이 손상을 입었을 경우, 손상전·후 구조물의 고유진동수는 다음과 같다.

$$\omega_i^2 = \omega_i^2 + \delta\omega_i^2 \quad (i=1, \dots, N_j) \quad (1)$$

여기서 ω_i , ω_i^* , $\delta\omega_i$ 는 손상전·후의 구조물의 i 번째의 고유진동수와 그 변화량이며, N_j 는 계측된 구조물의 고유진동수의 갯수이다.

고유진동수 자승값의 변화량 $\delta\omega_i^2$ 은 구조계수들

의 변화량 δp_j 의 함수로 다음과 같다.

$$\delta \omega_i^2 = \sum_{j=1}^{N_b} (\bar{S}_{ij} \delta p_j + \varepsilon_j(\delta p_j)) \quad (i=1, \dots, N_f) \quad (2)$$

여기서 δp_j 는 손상전·후의 j 번째 구조계수의 변화량이고, \bar{S}_{ij} 는 구조계수의 변화량 δp_j 에 대한 고유진동수 차승값의 변화량 $\delta \omega_i^2$ 의 민감도이며, N_b 는 구하고자하는 구조계수의 갯수이고, $\varepsilon_j(\delta p_j)$ 는 오차항이다.

고유진동수에 관한 민감도 행렬에 관한식의 정의는

$$\bar{S}_{ij} = \frac{\partial \omega_i^2}{\partial p_j} \quad (3)$$

이며, 뒷 식과 구조물의 고유치방정식을 사용하면 민감도행렬 $[\bar{S}]$ 를 아래와 같이 구할 수 있다.⁸⁻¹⁰⁾

$$\bar{S}_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^{N_{of}} \sum_{m=1}^{N_{of}} \left(\phi_l \phi_m \frac{\partial K_{lm}}{\partial p_j} \right) - \omega_i^2 \sum_{l=1}^{N_{of}} \sum_{m=1}^{N_{of}} \left(\phi_l \phi_m \frac{\partial M_{lm}}{\partial p_j} \right)}{\sum_{l=1}^{N_{of}} \sum_{m=1}^{N_{of}} \left(\phi_l M_{lm} \phi_m \right)} \quad (i=1, \dots, N_f) \quad (4)$$

계산상의 효율을 높이기 위해 식(4)를 요소별 계산형태를 취하면 다음과 같다.

$$\bar{S}_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^{N_{of}} \sum_{m=1}^{N_{of}} \sum_{n=1}^N \left(\phi_l \phi_m \frac{\partial K_{lm}^n}{\partial p_j} \right) - \omega_i^2 \sum_{l=1}^{N_{of}} \sum_{m=1}^{N_{of}} \sum_{n=1}^N \left(\phi_l \phi_m \frac{\partial M_{lm}^n}{\partial p_j} \right)}{\sum_{l=1}^{N_{of}} \sum_{m=1}^{N_{of}} \sum_{n=1}^N \left(\phi_l M_{lm}^n \phi_m \right)} \quad (i=1, \dots, N_f) \quad (5)$$

여기서 N_n 는 구조물의 총 요소의 갯수이며, M^n 과 K^n 는 구조물의 요소질량과 강성행렬이다.

식(2)을 식(1)에 대입한 후 오차항에 관하여 정리하면 식(6)과 같이 되며, 오차항의 값을 사용하여 식(7)과 같은 목적함수를 구할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^{N_b} \varepsilon_j(\delta p_j) = \omega_i^2 - \omega_i^{*2} - \sum_{j=1}^{N_b} (\bar{S}_{ij} \delta p_j) \quad (i=1, \dots, N_f) \quad (6)$$

$$J(\delta p_j) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{N_b} \varepsilon_i(\delta p_j) \right)^2 \quad (7)$$

3. 구속조건식의 구성

3.1 진동모우드에 의한 구속조건식

손상전·후 제한된 절점에서의 진동모우드 계측을 가정하여 구속조건식을 구성하였으며, 부등 구속조건식을 취함으로써 오차를 고려할 수 있도록 하였다.

구조물의 손상전·후의 진동모우드는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\Phi^*\} = [\tilde{L}](\{\Phi\} + \{\delta\Phi\}) \quad (8)$$

여기서 $\{\Phi\}$, $\{\Phi^*\}$, $\{\delta\Phi\}$ 는 손상전·후의 진동모우드와 그 변화량이며, $[\tilde{L}]$ 는 제한된 계측절점을 고려하기 위한 변환행렬이다.

윗식에서의 진동모우드의 변화량 $\{\delta\Phi\}$ 은 민감도 행렬을 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\delta \phi_k \cong \sum_{j=1}^{N_b} (\tilde{S}_{kj} \delta p_j) \quad (k=1, \dots, N_{mod}) \quad (9)$$

여기서 \tilde{S}_{kj} 는 j 번째 구조계수의 변화량 δp_j 에 대한 k 번째 진동모우드의 변화량인 $\delta \phi_k$ 의 민감도 ($\tilde{S}_{nkj} = \partial \phi_{nk} / \partial p_j$)이며, N_{mod} 는 계측된 진동모우드의 갯수이다.

민감도 행렬 는 구조물의 고유치 방정식으로부터 유도하면 다음과 같다.⁸⁻¹⁰⁾

$$\tilde{S}_{nkj} = \sum_{a=1}^{N_{eps}} \frac{\sum_{l=1}^{N_{of}} \sum_{m=1}^{N_{of}} \left(\phi_{lq} \phi_{mk} \phi_{na} \frac{\partial K_{lm}}{\partial p_j} \right)}{\left(\omega_k^2 - \omega_a^2 \right) \sum_{l=1}^{N_{of}} \sum_{m=1}^{N_{of}} \left(\phi_{lq} M_{lm} \phi_{mq} \right)} (1 - \delta_{ak}) \quad (n=1, \dots, N_{dof}) \quad (10)$$

$$- \sum_{a=1}^{N_{eps}} \frac{\left[\omega_k^2 \sum_{l=1}^{N_{of}} \sum_{m=1}^{N_{of}} \left(\phi_{lq} \phi_{mk} \phi_{na} \frac{\partial M_{lm}}{\partial p_j} \right) (1 - \delta_{ak}) \right]}{\left(\omega_k^2 - \omega_a^2 \right) \sum_{l=1}^{N_{of}} \sum_{m=1}^{N_{of}} \left(\phi_{lq} \phi_{lm} \phi_{mq} \right)}$$

$$+ \left. \frac{\sum_{l=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{of}}} \left(\phi_{lk} \phi_{mk} \phi_{nq} \frac{\partial M_{lm}}{\partial p_j} \right) (\delta_{qk})}{2 \sum_{l=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{of}}} \left(\phi_{lk} M_{lm} \phi_{mk} \right)} \right]$$

또한, 윗식을 요소별로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{nkj} = & \sum_{q=1}^{N_{\text{ps}}} \frac{\sum_{l=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{e=1}^{N_e} \left(\phi_{lq} \phi_{mk} \phi_{nq} \frac{\partial K_{lm}^e}{\partial p_j} \right)}{\left(\omega_k^2 - \omega_q^2 \right) \sum_{l=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{e=1}^{N_e} \left(\phi_{lq} M_{lm}^e \phi_{mq} \right)} (1 - \delta_{qk}) \\ - & \sum_{q=1}^{N_{\text{ps}}} \left[\frac{\omega_k^2 \sum_{l=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{e=1}^{N_e} \left(\phi_{lq} \phi_{mk} \phi_{nq} \frac{\partial M_{lm}^e}{\partial p_j} \right) (1 - \delta_{qk})}{\left(\omega_k^2 - \omega_q^2 \right) \sum_{l=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{e=1}^{N_e} \left(\phi_{lq} M_{lm}^e \phi_{mq} \right)} \right. \\ & \left. + \frac{\sum_{l=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{e=1}^{N_e} \left(\phi_{lk} \phi_{mk} \phi_{nq} \frac{\partial M_{lm}^e}{\partial p_j} \right) (\delta_{qk})}{2 \sum_{l=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{of}}} \sum_{e=1}^{N_e} \left(\phi_{lk} M_{lm}^e \phi_{mk} \right)} \right] \end{aligned} \quad (n=L, \dots, N_{\text{dof}}) \quad (11)$$

식(8), (9)과 (10)을 연립하여 구속조건식을 구성하면 다음과 같다.

$$[\tilde{L}][\tilde{S}]\{\delta p\} \cong \{\Phi^*\} - [\tilde{L}]\{\Phi\} \quad (12)$$

윗 식은 계측이나 모델링시 생길 수 있는 오차를 고려한 부등구속조건식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\tilde{L}][\tilde{S}]\{\delta p\} - \{\Phi^*\} + [\tilde{L}]\{\Phi\} \leq \{\epsilon_1\} \quad (13)$$

여기서 $\{\epsilon_1\}$ 는 진동모우드에서의 허용오차이다.

3.2 정적변위에 의한 구속조건식

손상전·후 동일한 정적하중에 대한 구조물의 정적변위는 다음과 같다.

$$\{u'\} = [L]\{u\} + \{\delta u\} \quad (14)$$

여기서 $\{u\}$ 와 $\{u'\}$ 는 손상전·후의 구조물의 정적변위이며, $[\hat{L}]$ 는 제한된 계측절점을 나타내는 변환행렬이다.

식(14)에 나타난 구조물의 정적변위의 변화량 $\{\delta u\}$ 는 정적변위에 대한 민감도행렬을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\delta u\} \cong [S]\{\delta p\} \quad (15)$$

여기서 $[S]$ 는 구조계수의 변화량 $\{\delta p\}$ 에 대한 정적변위의 변화량 $\{\delta u\}$ 의 민감도행렬이다.

위에서 나타난 민감도행렬 $[\hat{S}]$ 는 구조물의 정적하중과 정적변위의 관계식에서 아래와 같이 유도할 수 있다.^{1,3)}

$$[S] = \left[\frac{\partial u}{\partial p} \right] = -[K]^{-1} \left[\frac{\partial K}{\partial p} \right] \{u\} \quad (16)$$

식(14), (15)와 (16)를 연립하여 구속조건식을 구성하면 다음과 같다.

$$[L][S]\{\delta p\} \cong \{u'\} - [L]\{u\} \quad (17)$$

윗식을 계측오차와 모델링오차를 고려하여 부등구속조건식으로 나타내면 다음과 같다.

$$[L][S]\{\delta p\} - \{u'\} + [L]\{u\} \leq \{\epsilon_2\} \quad (18)$$

여기서 $\{\epsilon_2\}$ 는 정적변위에서의 허용오차를 나타낸다.

3.3 SQP 최적화기법을 사용한 계산

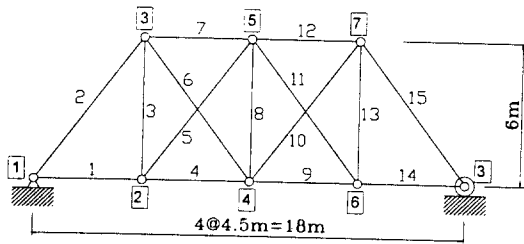
고유진동수의 변화량으로 구성된 목적함수와 진동모우드와 정적변위의 변화량으로 구성된 부등구속조건식을 SQP(Sequential Quadratic Programming) 최적화기법^{11,13)}을 반복적으로 사용하여 구조계수의 변화량을 구하였다. SQP 최적화기법은 Feasible Direction 방법의 일종으로 KKT 최적조건(Karush-Kuhn-Tucker Optimality Condition)을 만족시키기 위해 Newton방법을 사용한다. 본 논문의 SQP 최적화기법에 사용된 1차원 탐색방법은 황금분할법(Golden Section Method)이며, 구성함수들의 Gradient행렬과

Hessian행렬은 유한차분법을 사용하여 구하였다. 본 논문에 사용된 모의수치예제의 경우에는 10번 내외의 SQP 최적화기법의 반복으로 구조계수의 최종적인 수렴값들을 구할 수 있었다.

4. 모의수치예제

4.1 1경간 트러스구조물

그림(2)에 보인 15개의 부재와 8개의 절점으로 이루어진 1경간 부정정트러스구조물에 대하여 본 연구의 손상추정법을 적용하였다.



$E = 2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ $w = 8.000 \text{ kg/m}^3$

부재	단면적($\times 10^{-3} \text{ m}^2$)
3, 8, 13	0.9
5, 6, 10, 11	1.2
1, 4, 9, 14	1.5
7, 12	1.8
2, 15	2.4

그림 2 1경간 트러스 예제구조물

표(1)에 나타난 2가지의 구조물의 손상경우에 대하여 모의수치실험을 수행하였다. 각각의 손상경우에 대하여, 구조물의 동적특성자료로는 동적수치해석을 통하여 구한 3번, 4번, 7번 절점에서의 구조물의 손상전·후의 첫번째 진동모우드와 2개의 고유진동수를 모의계측자료로 사용하였고, 정적특성자료로는 정적수치해석을 통하여 구조물의 손상전·후의 구조물 하현의 2번, 4번, 6번 절점에 각각 1t의 하중을 가한 후 구한 구조물 하현부에서의 변위변위를 사용하였다.

구조물의 손상을 추정하는 과정에서 모든 부재의 손상도를 고려하지 않고, 손상이 입었을 가능성이 있는 부재를 택하여 이들 부재에 대해서만

표 1 경간 트러스구조물의 손상경우

손상경우	손상부재와 손상의 정의
1	7번, 9번부재의 10%, 20% 강성감소와 5번부재의 15% 질량감소
2	2번, 7번, 9번, 12번, 14번부재의 15%, 10%, 25%, 5%, 20% 강성감소

손상추정을 실시하여 추정과정의 효율성을 높였다. 구조물의 손상추정결과를 그림(3)과 (4)에 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 구조물의 탄성계수, 질량밀도를 구조물의 강성과 질량을 대표하는 구조계수로 보고 구조물의 손상을 추정한 결과, 대부분 정확해(◀로 표시)에 수렴하였다.

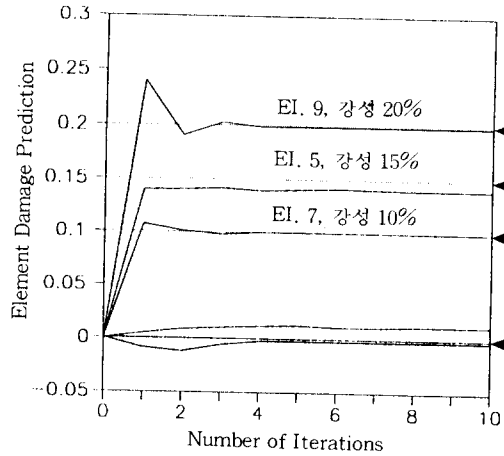


그림 3 구조물 강성과 질량의 감소

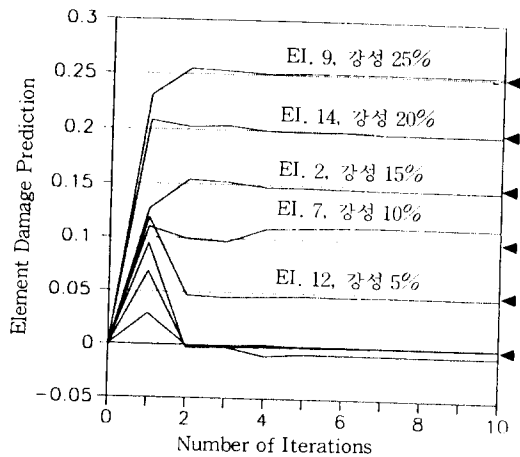


그림 4 구조물 강성의 감소

구조물의 손상추정결과를 비교하기 위하여 추정오차, E_r 를 다음과 같이 무차원량으로 정의하였다.

$$E_r = \frac{\sum_e (\alpha_e^{exact} - \alpha_e^{estimated})^2}{\sum_e (\alpha_e^{exact})^2} \times 100(\%)$$

여기서

$E_r^{estimated}$ = 구조물의 손상추정 오차(%)

α_e^{exact} = e번째 부재의 실제 손상정도를 나타내는 손상지수

$\alpha_e^{estimated}$ = e번째 부재의 추정된 손상정도를 나타내는 손상지수

그림(2)에 주어진 트러스구조물의 2번, 5번, 7번, 8번, 11번 부재가 각각 20%, 10%, 30%, 10%, 20% 강성의 손상을 입었을 경우에 대하여, 모우드섭동법과 민감도방법¹⁾을 사용하여 표(2)에 보인 5가지 해석경우에 대하여 수치해석을 수행하여 구조물의 손상추정결과를 비교하였다. 구조물의 동적특성자료는 전절점에서 연직방향으로 모의계측된 진동모우드를, 정적특성자료는 구조물의 하현에서 모의계측된 연직변위를 사용하였다.

표 2 구조물의 해석경우

해석경우	손상추정방법	실험 자료
1	1차 모우드 섭동법	고유진동수 5개 진동모우드 1개
2	2차 모우드 섭동법	고유진동수 5개 진동모우드 1개
3	민감도 방법	고유진동수 5개 진동모우드 1개
4	정적실험자료를 고려한 민감도 방법	고유진동수 2개 진동모우드 1개 정적변위형상 3개
5	정적실험자료를 고려한 민감도 방법	고유진동수 5개 진동모우드 1개 정적변위형상 3개

추정결과를 표(3)에 보였다. 2차 모우드섭동법이 정적실험자료를 사용하지 않은 민감도방법보다 좋은 결과를 보여주었으나, 정적실험자료를 사용한 민감도방법과 비교했을때, 정적실험자료를

사용한 민감도방법이 정적실험자료를 사용하지 않은 모우드 섭동법보다 우수한 추정치를 보여주었다. 이러한 추정결과의 차이는 정적실험자료의 양적 증가 때문인 것으로 사료된다. 정적실험자료를 첨가하여 구조물의 손상을 추정했을 경우, 계측한 고유진동수의 갯수가 5개에서 2개로 감소하였을지라도 정적실험 자료의 증가로 매우 좋은 추정결과를 얻을 수 있음을 해석경우 3에서 알 수 있다.

표 3 모우드섭동법과의 비교

부재 번호	정확해	모우드 섭동법		민감도 방법		
		1차 (5)*	2차 (5)*	동적 (5)*	동적 + 정적 (2)*	정적 (5)*
1	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
2	0.20	0.00	0.20	0.20	0.19	0.20
3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.05	-0.03	0.00	0.00
5	0.10	0.00	0.10	0.13	0.10	0.10
6	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.02	0.02
7	0.30	0.00	0.30	0.26	0.31	0.30
8	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.09
9	0.00	1.00	0.07	0.02	0.00	0.00
10	0.00	0.06	0.00	-0.01	-0.02	-0.01
11	0.20	0.17	0.20	0.21	0.20	0.21
12	0.00	0.00	0.00	0.08	0.06	0.00
13	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	-0.02
15	0.00	0.01	0.00	-0.04	-0.05	0.00
오차(%)	0.00	602.42	3.89	6.58	5.10	0.58

Note : (1)*, ..., (5)*은 손상추정시 사용된 고유진동수의 수

정한 후, 모의수치실험을 통하여 계측된 구조물의 하현에서 구한 정적변위자료를 증가시켜가면서 구조물의 손상추정결과의 향상을 관찰하였다. 추정결과는 표(4)에 보였으며, 정적변위자료의 양적인 증가와 추정오차와의 관계를 그림(5)에 보였다. 정적변위자료의 증가는 추정오차의 급격한 감소를 가져왔다.

정적변위와 민감도방법의 손상추정결과간의 관계를 알아보기 위해, 동적특성자료로 고유진동수 2개와 전절점에서 연직방향으로 모의계측된 진동모우드 1개의 경우에 대하여 구조물의 손상을 추고유진동수, 진동모우드와 정적처짐에서의 받

표 4 정적변위자료의 사용효과

부재 번호	정확해	민감도 방법			
		(0)*	(1)*	(2)*	(3)*
1	0.00	-0.03	0.04	0.00	0.00
2	0.20	0.20	0.21	0.23	0.19
3	0.00	0.10	0.01	0.00	0.00
4	0.00	0.07	-0.07	-0.03	0.00
5	0.10	0.05	0.12	0.09	0.10
6	0.00	-0.04	-0.01	-0.01	-0.02
7	0.30	0.28	0.25	0.23	0.31
8	0.10	0.06	0.11	0.10	0.11
9	0.00	-0.08	-0.01	0.05	0.00
10	0.00	0.04	0.08	0.06	-0.02
11	0.20	0.18	0.23	0.18	0.20
12	0.00	-0.03	-0.02	-0.01	0.06
13	0.00	-0.04	-0.01	-0.02	0.00
14	0.00	-0.03	-0.01	0.01	0.05
15	0.00	0.05	0.05	-0.01	-0.05
오차(%)	0.00	19.05	10.68	7.42	5.10

Note : (1)*, ..., (3)*은 손상추정에 사용된 정적변위자료의 수

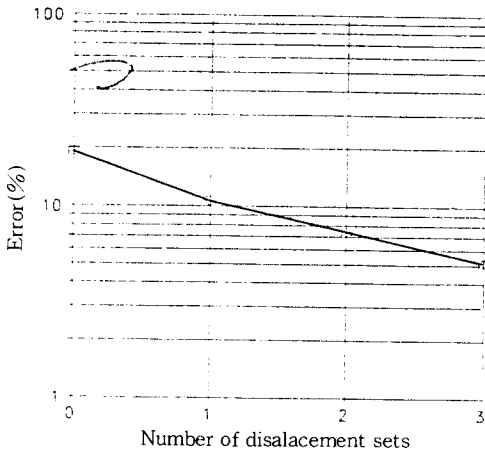


그림 5 정적변위자료와 추정오차와의 관계

생가능한 오차를 변화시켜가면서 추정결과를 비교하여 보았다. 5개 부재가 강성의 감소가 있을 때, 손상가능부재 8개를 택하여 구조물의 손상을 추정하였다. 동적특성자료로는 고유진동수 2개와 3개의 절점(3번, 4번, 7번 절점)에서의 연직방향으로의 진동모우드 1개를, 정적변위자료는 전 절점에서 연직방향으로의 3개의 모의계측자료를 사용하였다. 고유진동수, 진동모우드와 정적처짐의 경

우에 $\alpha\%$ 의 오차를 다음과 같이 정의하였다.

1) 계측오차를 포함한 i번째 고유진동수

$$\dot{w}_i = w_i \left\{ 1 + \frac{\alpha}{50} |\epsilon_i| \right\}$$

2) 계측오차를 포함한 j번째 절점에서의 i번째 진동모우드

$$\dot{\phi}_{ij} = \phi_{ij} \left\{ 1 + \frac{\alpha}{100} \epsilon_j \right\}$$

3) 계측오차를 포함한 j번째 절점에서의 i번째 정적변위

$$\dot{u}_{ij} = u_{ij} \left\{ 1 + \frac{\alpha}{100} \epsilon_j \right\}$$

여기서 ϵ 은 -0.5와 0.5사이에서 평균값 0을 갖는 등분포 랜덤수로서 IMSL의 부함수를 사용하여 자동생성하였다.

추정결과를 표(5)에 보였으며, 오차의 증가는 구조물 추정오차의 증가를 가져왔으나, 전반적으로 좋은 추정결과를 보였다.

표 5 계측오차의 영향

부재 번호	정확해	w, ϕ, u 의 계측오차(%)			
		(0,0,0)	(+0.5,2,2)	(+0.5,5,5)	(+2,2,2)
1	0.00	0.00	-0.04	0.01	-0.01
2	0.15	0.15	0.15	0.12	0.15
7	0.10	0.11	0.10	0.04	0.02
8	0.00	-0.01	-0.01	0.08	0.10
9	0.25	0.25	0.30	0.21	0.23
12	0.05	0.05	-0.01	0.11	0.10
13	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00
14	0.20	0.20	0.20	0.17	0.20
오차(%)	0.00	0.14	5.74	13.09	14.11

Note : 괄호속의 숫자는 w, ϕ 와 u 에 대한 오차

진동모우드만을 사용하여 구속조건식을 구성하여 구조물의 손상을 추정한 경우와, 진동모우드 대신 정적변위만을 사용하여 구속조건식을 구성하여 구조물의 손상을 추정한 경우를 서로 비교하였다. 2개의 고유진동수와 1개의 진동모우드, 3개의 정적변위가 사용되었으며, 진동모우드는 3개(2번, 5번, 6번)의 측정점에서 연직방향으로만 모의계측되며, 정적변위는 전 절점에서 연직방향으로 모의계측되었다.

구조물의 손상추정결과를 그림(6)과 (7)에 보

였다. 정적변위자료 만을 사용하여 구속조건식을 구성했을 경우가 진동모우드 만을 사용해 구속조건식을 구성한 경우보다 더 좋은 추정결과를 보였으며, 이것은 정적변위자료에 관한 모의실험자료의 양이 진동모우드에 관한 모의실험자료의 양보다 많기 때문으로 사료된다.

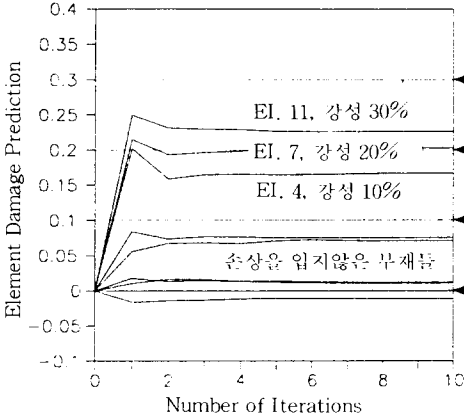


그림 6 진동모우드만으로 구성된 구속조건식의 경우

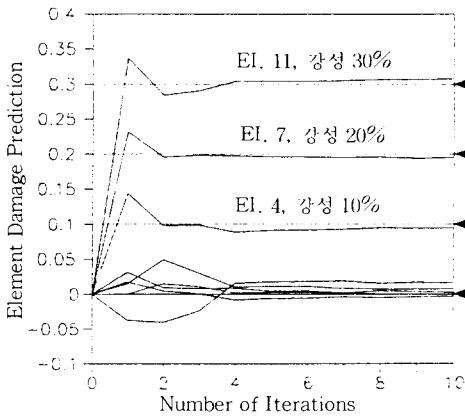
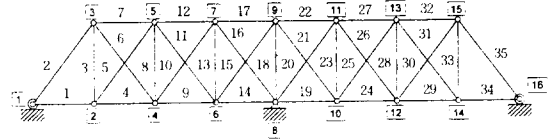


그림 7 정적변위자료만으로 구성된 구속조건식의 경우

4.2 2경간 트러스구조물

그림(8)에 나타낸 바와 같은 35개의 부재와 16개 절점으로 이루어진 2경간 트러스 구조물에 대하여 민감도행렬을 사용한 손상추정법을 적용하였다.

모의실험자료로는 2개의 고유진동수, 1개의 진



$E = 20 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ $w = 8.000 \text{ kg/m}^3$

부재	단면적($\times 10^3 \text{ m}^2$)
수직재	1.0
경사재	1.5
하현재	2.0
상현재	2.0
양끝부재	4.0

그림 8 2경간 트러스 예제구조물

동모우드와 2개의 정적처짐자료가 사용되었다. 정적특성자료는 4번과 12번 절점에 정적하중 1ton을 가하였을때 측정된 절점에서의 모의연직처짐이며, 동적특성자료는 6개 절점(2, 5, 6, 10, 13, 14번절점)에서의 모의계측된 진동모우드이다.

그림(9)에 보인 바와 같이 6번, 7번, 15번, 24번 부재에 각각 40%, 10%, 30%, 20%의 강성감소가 있다고 가정했을 때, 16개의 손상가능부재를 선택하여 구조물의 손상을 추정하였으며, 손상추정결과를 표(6)에 보였다. 정적특성자료를 추가적으로 사용한 경우가 동적특성자료만을 사용한 경우보

표 6 정적실험자료의 사용효과

부재 번호	정확해	해석방법 2	
		동적	동적 + 정적
4	0.00	0.35	0.06
5	0.00	0.02	0.02
6	0.40	0.19	0.41
7	0.10	0.08	0.13
9	0.00	-0.31	-0.10
10	0.00	0.11	-0.01
11	0.00	0.18	-0.05
12	0.00	0.33	-0.04
14	0.00	0.27	0.05
15	0.30	0.15	0.32
16	0.00	-0.01	-0.01
17	0.00	0.34	0.04
24	0.20	0.07	0.19
25	0.00	0.25	0.01
26	0.00	0.12	0.00
27	0.00	0.25	0.01
오차(%)	0.00	261.43%	8.03%

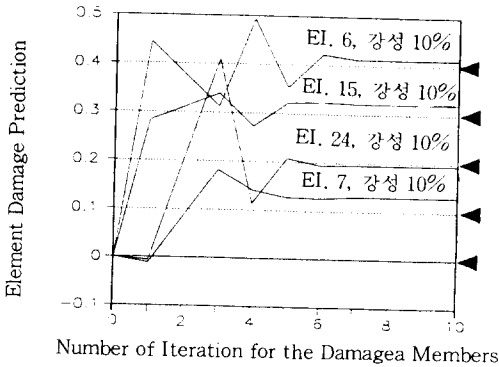


그림 9 손상부재의 손상추정결과

다 매우 좋은 결과를 얻었다.

5. 결 론

본 논문에서는 구조물의 정적변위, 고유진동수와 모우드에 대한 민감도행렬을 사용하여 구조물의 정적 및 동적특성자료를 동시에 고려할 수 있는 구조물의 손상추정법에 대하여 연구하였다. 고유진동수의 변화량으로 구성된 목적함수와 진동모우드와 정적변위의 변화량으로 구성된 부등구속조건식을 SQP 최적화기법의 반복계산으로 구조계수의 변화량을 구하였다. 제시한 방법은 구조물의 손상전·후의 정적변위와 진동모우드의 변화량을 부등구속조건식으로한 최적화기법을 사용하였으므로 제한된 계측절점과 오차를 고려할 수 있었다. 트러스구조물에 대한 모의수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 구조물의 정적 및 동적특성자료를 조합하여 사용함으로써, 기존의 정적 및 동적 구조물의 손상추정법에 비하여 손상추정결과의 향상을 가져왔다.

2. 정적변위자료를 진동모우드 대신 사용하거나 혹은 함께 사용함으로써, 동적 손상추정법을 보완할 수 있었다.

3. 진동모우드와 정적변위를 부등구속조건식으로 사용함으로써 제한된 계측절점과 오차를 고려할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 한국과학기술원의 기본연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. Z. Sheena, A. Zalmanovitch, and A. Unger, "Theoretical Stiffness Matrix Correction by Using Static Test Results," 24th Israel Annual Conference of Aviation and Astronautics, Feb. 1982, 245-253.
2. M. Sanayei, and S. Scampoli, "Structural Element Stiffness Identification From Static Test Data," J. of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 117, No. 5, May 1991, pp. 1021-1036.
3. K. D. Hjelmstad, S. L. Wood and S. J. Clark, "Mutual Residual Energy Method for Parameter Estimation in Structures," J. of Structural Engineering Division, ASCE, Vol. 118, No. 1, Jan 1992, pp. 223-242.
4. K. O. Kim, W. J. Anderson and R. E. Sandstorm, "Nonlinear Inverse Perturbation Method in Dynamic Analysis," AIAA Journal, Vol. 21, No. 9, 1983, pp. 1310-1316.
5. G. Hearn and R. B. Testa, "Modal Analysis Damage Detection in Structures," J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 10, 1991, pp. 3042-3063.
6. J. T. Kim, Assesment of Relative Impact of Model Uncertainty of the Accuracy of Nondestructive Damage Detection in Structures, Ph. D thesis, Texas A&M Univ. , 1993.
7. 민진기, 김형기, 홍규선, 윤정방, "구조물 손상의 추정을 위한 Inverse Modal Perturbation," 대한토목학회 논문집, 제10권 제4호, 1990.
8. R. L. Fox and M. P. Kapoor, "Rates of Change of Eigenvalues and Eigenvectors," AIAA Journal, Vol. 6, No. 12, 1968, pp. 2246-2429.
9. R. B. Nelson, "Simplified Calculation of Eigenvector Derivatives," AIAA Journal, Vol. 14, No. 9, 1976, pp. 1201-1205.

10. W. C. Mills-Curan, "Calculation of Eigenvector Derivatives for Structures with Repeated Roots," AIAA Journal, Vol. 26, No. 7, 1988, pp. 867-871.
11. M. S. Bazarra, H. D. Sherali, and C. M. Shetty, Nonlinear Programming : Theory and Algorithms, John Wiley & Sons, New York, 1993.
12. J. S. Arora, Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill, New York, 1989.
13. D. G. Luenberger, Linear and Nonlinear Programming, Addison-Wesley, Menlo Park, 1984.
14. 김두기, 정적 및 동적실험에 의한 구조물의 손상 추정법-민감도 방법, 석사학위논문, 한국과학기술원, 1995.
15. 윤정방, 이형진, 김두기, "동특성 추정을 이용한 구조물의 손상도 추정," 한국전산구조 공학회 춘계학술발표회 논문집, 제8권 제 1집, 1995.

(접수일자 : 1996. 7. 22)