

2차 모드 섭동법에 의한 구조물의 손상도 추정

Damage Estimation of Structures by Second Order Modal Perturbation

홍 규 선* 윤 정 방** 류 정 선***
 Hong, Kyu Seon Yun, Chung Bang Ryu, Chung Son

요 약

교량, 발전소, 해양구조물과 같은 토목구조물은 사용기간중에 지진, 바람, 파랑하중등에 의해 구조적 손상을 받기 쉽다. 장기간에 걸쳐 구조물에 손상이 누적되면 구조물 전체의 파괴를 초래할 수도 있다. 따라서 현존하는 구조물의 안전성을 분석하기 위한 구조물의 손상도를 추정하는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 Inverse Modal Perturbation 기법을 이용하여 구조물의 손상도를 추정하는 방법에 대하여 연구하였다. Perturbation 식은 구조물의 강성 및 질량행렬의 변화량과 구조물의 고유진동수와 모드형상의 변화량의 식으로 구성된다. 또한, 구조물의 손상은 강성행렬의 변화량으로 표현하였다. 본 연구에서는 구조물의 손상도추정의 효율성을 증대시키기 위하여 2차-Perturbation 식을 구성하고, 이것을 반복적인 절차를 거쳐 해를 구하는 방법에 대하여 연구하였다. 제안된 방법의 효율성은 일련의 예제해석을 통하여 검증하였으며, 추정된 결과로부터 본 방법이 구조물의 손상을 적절히 산정함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Most civil engineering structures such as bridges, power plants, and offshore platforms are apt to suffer structural damages over their service lives caused by adverse loadings, such as earthquakes, wind and wave forces. Accumulation of structural damages over a long period of time might cause catastrophic structural failure. Therefore, a methodology for monitoring the structural integrity is essential for assuring the safety of the existing structures. A method for the damage assessment of structures by the second order inverse modal perturbation technique is presented in this paper. Perturbation equation consists of a matrix equation involving matrices of structural changes(stiffness and mass matrix changes) and matrices of modal property changes(natural frequency and mode shape changes). The damages of a structure are represented as changes in the stiffness matrix. In this study, a second order perturbation equation is formulated for the damage assessment of structures, and solved by an iterative procedure. The effectiveness of the proposed method has been investigated through a series of example analysis. The estimated results for the structural damage indicated that the present method yields reasonable estimates for the structural changes.

* 정회원, 한국과학기술원 박사과정
 ** 정회원, 한국과학기술원 교수
 *** 정회원, 동신대학교 토목공학과 전임강사

이 논문에 대한 토론을 1992년 12월 31일까지 본학회에 보내주시면 1993년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

교량이나 발전소, 해양구조물과 같은 토목구조물은 사용중에 지진이나 바람, 파랑하중등에 의해 구조적 손상을 받기 쉽다. 장기간에 걸쳐 구조물에 손상이 누적되면 구조물 전체의 파괴를 초래할 수도 있다. 따라서 현존하는 구조물의 안전성을 조사하기 위한 구조물의 손상을 추정하는 방법이 필요하다. 이와 같은 구조적 안전성 분석과 관련하여 기존 구조물의 강도 및 강성에 대한 현재 상태의 추정에 관한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다[1-4].

구조물이 심각한 손상을 입었을 경우에는 외관조사(Visual Inspection)만으로 구조물의 손상을 찾는 일이 충분할 수도 있다. 그러나, 대형구조물에서 한두개의 부재가 손상을 입었을 때, 구조물의 복잡성 때문에 외관조사만으로 손상의 유무나 손상위치를 찾는 것은 상당히 어려운 일이다. 또한 재료의 노후화에 의한 손상은 외관상 변화가 거의 없기 때문에 외관조사에 의해서는 발견하기가 어렵다. 구조적 손상의 결과로써 나타나는 현상은 국부적인 부재의 강성행렬의 감소로 나타나고, 강성행렬의 감소는 고유진동수의 감소나 모우드형상의 변화를 초래하며, 손상전후의 강성행렬의 차이가 구조물의 손상상태를 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 구조물의 동특성을 추정하는 것이 구조물의 손상도를 평가하는데 필요하며, 이러한 개념에 기초하여 구조물의 동특성을 측정하여 구조물의 손상도를 추정하는 방법들이 개발되어 왔다[5-9].

본 논문에서는 Inverse Modal Perturbation 기법을 이용하여 구조물의 손상도를 추정하는 방법에 대하여 연구하였다. Perturbation 식은 구조물의 강성 및 질량행렬의 변화량과 구조물의 고유진동수와 모우드형상의 변화량의 식으로 구성된다. 구조물의 손상은 강성행렬의 감소로 표현하여, 각 요소행렬에 대한 손상을 요소손상도계수를 사용하여 나타내었다. 구조적 손상과 이에 기인한 고유진동특성의 변화량과의 관계를 Perturbation 방정식으로부터 구한 후, 이로부터 요소손상도계수와 고유진동특성의 변화량과의 관계를 유도하였다. 따라서 손상전후에 구조물의 고유진동수와

모우드형상을 측정하여 Perturbation 식의 해를 구함으로써 구조물의 강성행렬의 감소로 나타나는 구조물의 손상도를 추정하게 된다. Stetson[10, 11]은 변화된 새로운 구조계(손상후)의 모우드형상이 초기의 모우드형상의 선형조합으로 표현할 수 있다는 가정에 기초하여 1차-Perturbation 식을 제안하였으며, 이것을 이용하여 터빈 날개의 재설계에 적용하였다. 이후로 여러 사람들에 의해 Inverse Modal Perturbation 방법은 개선되어져 왔으며, 주로 구조물의 재설계 분야에 응용되었다 [12-15]. 최근에 문헌16에서 Inverse Modal Perturbation 기법을 구조물의 손상도를 추정하는데 적용하였다.

본 연구에서는 구조물의 손상도추정에 사용될 2차-Perturbation 식을 구성하고, 이것을 반복적인 절차를 거쳐 해를 구하는 방법에 대하여 연구하였다. 즉, 처음에 1차-Perturbation 식을 사용하여 근사적인 강성행렬의 변화량을 구하고, 이 강성행렬의 변화량에 대한 모우드형상을 다시 계산하여 2차-Perturbation 식을 구성한다. 구성된 2차-Perturbation 식의 해를 구함으로써 더 정확한 강성행렬의 변화량을 구하게 되며, 위의 과정을 강성행렬의 변화량이 수렴할 때까지 반복적으로 계속한다. 제안된 방법의 효율성은 일련의 수치모의실험방식의 예제해석을 통하여 검증하였다. 가정한 손상도에 따른 고유진동특성의 변화량을 바탕으로 손상도를 역으로 추정한 후, 이를 최초에 가정한 값과 비교하는 방법을 사용하였다. 예제해석 결과, 본 논문에서 제시한 방법이 구조물의 손상도를 적절히 산정함을 알 수 있었다.

2. Inverse Modal Perturbation 이론

초기의 손상이 발생되기 전의 구조계에 대한 n 차원 고유치 문제는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K\Phi = M\Phi\Lambda \quad (1)$$

여기서 K 는 강성행렬이고, M 은 질량행렬이며, Λ 와 Φ 는 각각 고유치(고유진동수의 제곱)와 모우드형상행렬이다. 모든 행렬은 크기가 각각 $n \times n$ 이다.

손상을 받은 후의 새로운 구조계의 강성행렬, 질량행렬, 고유치 및 모우드형상행렬은 손상전의 초기의 구조계에 대한 것에 미소의 변화량을 더한 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K' = K + \Delta K \quad (2)$$

$$M' = M + \Delta M \quad (3)$$

$$\Lambda' = \Lambda + \Delta\Lambda \quad (4)$$

$$\Phi' = \Phi + \Delta\Phi \quad (5)$$

여기서 K' , M' , Λ' , Φ' 는 각각 손상후의 강성행렬, 질량행렬, 고유치 및 모우드형상행렬이며, Δ 는 손상에 의한 구조계의 변화량(Perturbation)을 나타낸다.

제 i -번째 모우드형상의 변화량, $\Delta\phi_i$ 는 손상전 구조계의 모우드형상의 선형조합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} \phi_j \quad (6)$$

여기서 C_{ij} 는 손상후 i -번째 모우드에 대한 손상전 j -번째 모우드의 기여도이다. 따라서 손상후의 구조계의 모우드형상행렬은 초기의 모우드형상행렬과 행렬 C 로 다음과 같이 간단히 표현된다. 구조물의 손상이 작으면, C_{ij} 의 값은 작은 값을 갖게 된다.

$$\Phi' = \Phi(I + C^T) \quad (7)$$

본 논문에서는 행렬 C 에서 대각선 항을 포함시켰다. 이제까지 다른 문헌[10-15]에서의 Perturbation 식에서는 이 대각선 항들을 0으로 가정하였다. 그러나 이것은 손상전 고유벡터에 의한 선형공간에 제한을 가한 결과가 되어, 손상후의 고유벡터를 수학적으로 완전히 표현하지 못하는 단점을 갖게 된다. 이 대각선 항은 손상후 모우드형상의 직교조건을 적용하여 구하였다.

손상된 구조계의 고유치 식은 손상전의 것과 유사하게 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K'\Phi' = M'\Phi'\Lambda' \quad (8)$$

식 (2)-(5)와 식(7)을 사용하면 식(8)은 아래와 같이 변형된다.

$$(K + \Delta K)\Phi(I + C^T) = (M + \Delta M)\Phi(I + C^T)(\Lambda + \Delta\Lambda) \quad (9)$$

구조적인 손상의 형태가 재료의 노후화나 혹은 균열발생에 의한 것이 대부분이므로 손상전후에 질량의 변화는 없는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 식(9)에 Φ^T 를 선승하고, $\Delta M = 0$ 인 조건을 적용하면, 식(9)는 다음과 같이 변형된다.

$$\Phi^T \Delta K \Phi(I + C^T) = \mathcal{M}(C^T \Lambda - \Lambda C^T + \Delta\Lambda + C^T \Delta\Lambda) \quad (10)$$

여기서 \mathcal{M} 은 일반질량행렬(Generalized Mass Matrix)로서 $\mathcal{M} = \Phi^T M \Phi$ 이다. 그런데 $\Phi' = \Phi(I + C^T)$ 이고, $\Lambda' = \Lambda + \Delta\Lambda$ 이므로 식(10)은 다음과 같은 2차-Perturbation 식으로 다시 쓸 수 있다.

$$\Phi^T \Delta K \Phi' = \mathcal{M}(C^T \Lambda' - \Lambda C^T + \Delta\Lambda) \quad (11)$$

구조물의 강성변화량과 이로 인한 동특성의 변화량인 $\Delta\Lambda$ 와 C 행렬의 값이 작아서, 이들 간의 2차 이상의 항들을 무시할 수 있다면 식(11)은 다음과 같이 1차-Perturbation 식이 된다.

$$\Phi^T \Delta K \Phi = \mathcal{M}(C^T \Lambda - \Lambda C^T + \Delta\Lambda) \quad (12)$$

1차와 2차의 Perturbation 식 사이의 차이는 식(11)의 좌변에서 Φ' 이 Φ 로, 우변에 Λ' 이 Λ 로 각각 바뀐 것이다. 1차-Perturbation 식은 좌변에서 강성행렬의 변화량만으로 구성되어 있고, 식의 우변에는 고유진동수와 모우드형상의 변화량만으로 구성되어 있어, 손상전후의 구조물의 동특성의 변화를 측정하여 식(12)의 해를 구하면 강성행렬의 변화량, 즉 구조물의 손상도를 알 수 있게 된다. 그러나 1차-Perturbation 식은 강성변화량과 동특성의 변화량이 작은 경우에만 적용할 수 있는 단점을 갖고 있다.

본 연구에서는 일반적인 2차-Perturbation 식으로 구조물의 손상도를 구하는 방법에 대하여 연구하였다. 즉, 식(11)의 2차-Perturbation 식은 좌변에 있는 손상후의 모우드형상을 구조물의 전 자유도에 대해 완전하게 측정할 수 없기 때문에 강성행렬의 변화량을 바로 구할 수는 없다. 그래서 반복적인 절차를 거쳐 해를 구하는 방법을 고안하였다. 즉, 먼저 1차-Perturbation 식을 이용하여

근사적으로 강성행렬의 변화량을 구한다. 다음에 이 강성행렬의 변화에 대한 새로운 모드형상을 다시 계산하고, 이 모드형상을 2차-Perturbation 식에 사용하여 해를 구하게 된다. 구해진 해는 식에 사용한 모드형상이 손상후의 모드형상을 정확하게 나타내지 못하기 때문에 정확한 해는 아니나, 1차-Perturbation에 의하여 구한 결과보다는 정확하다고 할 수 있다. 따라서 모드형상을 새로 계산하고, 이것을 2차-Perturbation 식에 사용하여 강성행렬의 변화량을 다시 구하는 과정을 반복하여, 강성행렬의 변화량이 수렴할 때까지 계속하면 정확한 해에 도달하게 된다.

3. 구조물 손상의 모형화

구조물에 발생한 손상을 구조계의 강성행렬의 감소로 나타낼 때, 이것은 요소강성행렬의 감소의 합으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta K = \sum_{e=1}^{\ell} K_e \alpha_e \tag{13}$$

여기서, K_e 는 요소 e에 대한 요소강성행렬이고, α_e 는 요소손상도계수($-1 \leq \alpha_e < 0$)이며, ℓ 은 손상을 받은 요소의 수이다. 요소손상도계수가 0인 경우는 전혀 손상을 받지않은 상태를 의미하며, -1인 경우는 손상을 받아 그 요소가 완전히 파단된 상태를 나타낸다.

4. Inverse Modal Perturbation 방정식

식(11)의 2차-Perturbation 식은 아래와 같이 대응하는 요소에 대한 식의 형태로 다시 쓸 수 있다.

$$\phi_j^T \Delta K \phi_k = \begin{cases} \mathcal{M}_k(1+C_{kk})\Delta\lambda_k & j=k \\ \mathcal{M}_j C_{kj}(\lambda_k - \lambda_j) & j \neq k \end{cases} \tag{14}$$

여기서 j와 k는 각각의 행렬의 j-번째, k-번째 요소(혹은 벡터)를 나타낸다. 1차-Perturbation에 대한 식은 식(14)중에서 ϕ_k 과 λ_k 을 ϕ_k 과 λ_k 로 바꾸고, $C_{kk}=0$ 으로 하면 된다. 1차-Perturbation 식은 다음과 같은 특성을 갖는다. 즉 $j=k$ 에 해당되는 식은 구조물의 강성변화가 모드형

상의 변화와는 관계없이 고유진동수의 변화에만 관계되며, $j \neq k$ 에 해당되는 식은 강성변화가 오직 모드형상의 변화에만 관계되고 있다.

구조계의 강성의 변화량을 식(13)과 같이 요소 강성행렬의 변화량의 합으로 나타내면, k-번째 모드에 관련된 Perturbation 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_k \alpha = Q_k \tag{15}$$

여기서 α 는 미지의 요소손상도계수(α_e)로 구성된 벡터이며, P_k 와 Q_k 는 각각 다음과 같다.

$$P_k = \begin{bmatrix} \phi_1^T K_1 \phi_k & \phi_1^T K_2 \phi_k & \dots & \phi_1^T K_l \phi_k \\ \phi_2^T K_1 \phi_k & \phi_2^T K_2 \phi_k & \dots & \phi_2^T K_l \phi_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_n^T K_1 \phi_k & \phi_n^T K_2 \phi_k & \dots & \phi_n^T K_l \phi_k \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$Q_k = \begin{Bmatrix} \mathcal{M}_1 C_{k1}(\lambda_k - \lambda_1) \\ \vdots \\ \mathcal{M}_{k-1} C_{k,k-1}(\lambda_k - \lambda_{k-1}) \\ \mathcal{M}_k(1+C_{kk})\Delta\lambda_k \\ \mathcal{M}_{k+1} C_{k,k+1}(\lambda_k - \lambda_{k+1}) \\ \vdots \\ \mathcal{M}_n C_{kn}(\lambda_k - \lambda_n) \end{Bmatrix} \tag{17}$$

식(15)의 해를 구하기 위해서는 식(17)에 포함된 모드기여도계수 C_{kj} 가 구해져야 하나, 명확하게 구해지는 물리적인 양이 아니므로 다음과 같은 변환행렬을 이용하여 수거한다.

$$T_k = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \frac{\phi_1}{\mathcal{M}_1(\lambda_k - \lambda_1)} & \dots & \frac{\phi_{k-1}}{\mathcal{M}_{k-1}(\lambda_k - \lambda_{k-1})} \\ 1 & \dots & 0 \\ \frac{\phi_k}{\mathcal{M}_k \Delta\lambda_k} & \dots & \frac{\phi_n}{\mathcal{M}_n(\lambda_k - \lambda_n)} \end{bmatrix} \tag{18}$$

식(15)의 Perturbation 식의 양변에 변환행렬 T_k 를 선승하면 다음과 같은 변환된 Perturbation 식을 얻게 된다.

$$P_k^o \alpha = Q_k^o \quad (19)$$

여기서 $P_k^o = T_k P_k$ 이며, $Q_k^o = T_k Q_k$ 이다. Q_k^o 는 모두드기여도계수가 소거되어 다음과 같은 식으로 변형된다.

$$Q_k^o = \begin{Bmatrix} M_k(1+C_{kk}) \Delta \lambda_k \\ \phi_k^o \end{Bmatrix} \quad (20)$$

식(20)에는 아직도 모두드기여도계수, C_{kk} 가 나타난다. 이 항은 1차-Perturbation 식에는 나타나지 않는 항이다. 이것은 손상된 구조계에 대해 모두드형상의 직교조건을 적용하여 구할 수 있다. 손상후에 질량행렬의 변화는 없는 것으로 가정하였으므로, 손상된 구조계의 일반질량행렬은 다음과 같다.

$$M^* = \Phi^T M \Phi \\ = (I+C) M (I+C^T) \quad (21)$$

질량정규화된 모두드형상(Mass Normalized Mode Shape)을 사용하면 일반질량행렬은 단위행렬이 되고, 따라서 식(21)의 k-번째 식으로 부터 C_{kk} 는 다음과 같이 계산된다.

$$1+C_{kk} = \sqrt{1 - \sum_{j=1}^n C_{kj}^2} \quad (22)$$

여기서 C_{kj} 는 식(14)로 부터 다음과 같이 계산된다.

$$C_{kj} = \frac{\phi_k^T \Delta K \phi_j}{M_k(\lambda_k - \lambda_j)} \quad (23)$$

이제까지 2차-Perturbation 방정식을 유도하였다. 1차-Perturbation 식의 경우에는 이제까지의 2차-Perturbation 식의 유도과정에서 ϕ_k^o 를 ϕ_k 로, λ_k^o 를 λ_k 로 각각 바꾸면 유사한 식들을 구하게 된다. 손상전후의 구조물의 동특성의 변화를 측정하여 식(19)의 해를 구하면 강성행렬의 변화량, 즉 구조물의 손상도를 알 수 있게 된다. 본 논문에서는 먼저 1차-Perturbation 식을 이용하여 근사적으로 강성행렬의 변화량을 구한 다음에, 이 강성행렬의 변화에 대한 새로운 모두드형상을 다시 계산하고, 그 결과를 2차-Perturbation 식에 이용하는 반복적인 과정으로 해를 구하였다.

5. Perturbation 방정식의 해

Perturbation 식의 해는 3가지 경우로 구분할 수 있다. 즉, 미지항에 비해 조건식이 많은 경우 같은 경우, 적은 경우이다. 일반적으로 3가지 경우 모두 오차를 최소화하는 최적화 문제로 해결할 수 있다. 실제 구조물의 고유진동특성은 보통 제한된 수의 고유진동수와 각 모두드형상벡터에 대해 제한된 수의 절점에 대해서만 측정이 가능하다. 따라서 미지수(α)의 갯수에 비해 측정값을 사용하여 얻을 수 있는 방정식의 수가 적은 것이 보통이다. 본 논문에서는 식(19)에서 고유진동수의 변화량에 대한 관계식의 제공한 오차를 목적함수로 하고, 모두드형상과 관련된 식을 구속조건식으로 하여 Quadratic Programming 기법[17]을 사용하여 해를 구하였다. 목적함수에 대한 식은 다음과 같다.

$$\min. J = \sum_{k=1}^n \left\{ \sum_{\ell=1}^l \phi_k^T K_\ell \phi_k^o \alpha_\ell - M_k(1+C_{kk})\Delta \lambda_k \right\}^2 \quad (24)$$

여기서 n_k 는 측정된 모두드 수이며, l 은 손상부재의 수를 나타낸다.

6. 예제해석 및 분석

앞에서 제안한 방법에 대한 타당성을 검증하기 위하여 그림 1에서 보인 바와 같은 기둥구조와 트러스 구조물을 예제로 선택하여 해석하였다. 예제구조물에 여러경우의 손상이 발생된 것으로 가정된 후, 이에 따른 고유진동특성의 변화량을 바탕으로 추정된 구조물의 손상도를 최초로 가정한 값과 비교하는 수치모의실험을 수행하였다. 기둥구조는 10개의 요소로 모형화하였으며, 트러스 구조물은 8개의 절점과 15개의 부재를 갖고 있는 부정정 구조물이다. 각각의 구조물을 유한요소법을 사용하여 모형화하고 고유치해석을 통하여 고유진동수와 모두드형상을 계산하였다.

기둥구조에 대하여, 손상 부재수를 임의로 선택하고 손상이 발생되어 부재 강성의 크기가 감소된 가상적인 경우에 대하여 구조물의 손상도를 추정하였다. 1차-Perturbation 식을 적용하여 구한

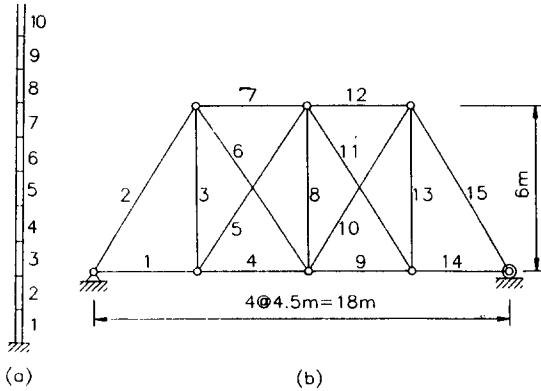


Figure 1. Example Structures

- (a) Stick Model
- (b) Truss Model

Table 1 Estimated Damage Coefficients of Column (Case 1)

member no.	damage coefficients(α)		
	exact	1st order	2nd order
1	0.0	0.000	-0.007
2	0.0	0.000	0.000
3	0.0	-0.043	0.000
4	-0.4	-0.474	-0.380
5	0.0	0.000	0.000
6	0.0	-0.023	0.000
7	0.0	0.000	-0.017
8	0.0	-0.038	0.000
9	0.0	0.000	-0.011
10	0.0	0.000	-0.004

Table 2 Estimated Damage Coefficients of Column (Case 2)

member no.	damage coefficients(α)		
	exact	1st order	2nd order
1	0.0	0.000	-0.011
2	0.0	-0.001	0.000
3	0.0	-0.070	-0.036
4	-0.4	-0.535	-0.402
5	0.0	0.041	0.000
6	0.0	0.000	0.000
7	-0.2	-0.180	-0.177
8	0.0	0.000	0.000
9	0.0	0.000	0.000
10	0.0	0.000	0.000

결과와 본 논문에서 제안한 2차-Perturbation 식을 사용하여 구한 결과를 비교하였다. 구조물의

Table 3 Estimated Damage Coefficients of Truss (Case 1)

member no.	damage coefficients(α)		
	exact	1st order	2nd order
1	0.0	0.000	0.000
2	-0.4	-0.648	-0.421
3	0.0	-0.186	-0.098
4	0.0	0.000	0.000
5	0.0	0.000	0.000
6	0.0	0.000	0.000
7	-0.4	0.000	-0.327
8	0.0	0.000	0.000
9	0.0	0.000	0.000
10	0.0	-0.038	0.000
11	0.0	0.000	0.000
12	0.0	-0.206	0.000
13	0.0	-0.124	0.000
14	0.0	0.000	0.000
15	0.0	-0.018	0.000

Table 4 Estimated Damage Coefficients of Truss (Case 2)

member no.	damage coefficients(α)		
	exact	1st order	2nd order
1	0.0	-0.008	0.000
2	-0.2	-0.279	-0.215
3	0.0	0.000	-0.003
4	0.0	0.000	0.000
5	-0.1	-0.107	-0.086
6	0.0	0.000	-0.004
7	-0.3	-0.216	-0.271
8	-0.1	-0.131	-0.064
9	0.0	0.000	0.000
10	0.0	0.000	0.000
11	-0.2	-0.240	-0.190
12	0.0	-0.076	0.000
13	0.0	0.000	-0.017
14	0.0	0.000	-0.003
15	0.0	0.000	0.000

손상은 4번 부재가 40%의 손상을 입은 경우(표 1)와, 4번 부재가 40%, 7번 부재가 20%의 손상을 입은 경우(표 2)에 대해 해석하였다. 목적함수를 구성하기 위한 고유진동수는 처음 5개를 사용하였고, 구속조건식에 사용되는 모드 형상은 상단에서부터 차례로 7개의 절점에서 추정된 수평변위에 대한 첫번째 모드형상만을 사용하였다. 추정된 구조물손상도의 정확도가 해석과정에서 사용된 고유진동수의 갯수와 진동모드의 갯수 및 모드

측정점의 갯수에 따른 영향은 문헌 16에서 분석되었는데, 해석에 사용된 고유진동수가 증가함에 따라 추정된 손상도가 현저히 개선되었으며, 고차의 모드까지 구속조건으로 사용함으로써 손상위치를 정확하게 추정함이 고찰되었다. 표 1과 표 2에서 보인 바와 같이 1차-Perturbation 식을 사용하여 구한 경우는, 손상도를 상당히 과대하게 추정하는 결과를 준다. 이와 같은 특성은 다른 여러 예제의 경우에서도 발견되었는데, 이것은 1차-Perturbation 식을 적용하기 위해서는 구조물의 손상도나 동특성의 변화량이 작은 경우이나 가능하기 때문에, 변화량이 큰 경우에는 손상도추정에 큰 오차를 초래하는 것으로 판단된다. 이에 비하여 2차-Perturbation 식의 결과는 손상도를 상당히 정확하게 추정하고 있음을 보여주고 있다.

표 3와 표 4에서는 그림 1(b)의 트러스구조물에 대한 여러 손상의 경우에 대해 추정한 결과이다. 표 3은 2번 부재와 7번 부재가 같이 40%의 손상을 입은 경우이다. 이 예제에서는 5개의 고유진동수와 수직변위에 대한 첫번째 및 두번째 모드형상을 사용하였다. 기둥구조 예제의 경우와 같이 1차-Perturbation 식의 추정결과는 정확한 값과는 상당한 차이를 보이고 있으며, 또한 손상위치를 잘못 추정하는 결과를 준다. 이에 비하여 2차-Perturbation 식은 손상부재 및 손상도를 아주 정확하게 추정하고 있음을 알 수 있다. 표 4는 부재의 손상이 구조물에 넓게 분포되어 있는 경우에 대한 것으로 앞의 예제의 경우와 같이, 2차-Perturbation 식이 복잡한 구조물에 대하여도 손상부재 및 손상도를 잘 추정함을 알 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 Inverse Modal Perturbation 기법을 사용하여 고유진동수와 모드형상에 대한 제한된 측정자료를 근거로 구조물의 손상도를 추정하는 방법에 대하여 연구하였다. 구조물의 손상은 강성행렬의 감소로 표현하여, 구조적 손상과 이에 의한 고유진동특성의 변화량과의 관계를 Perturbation 방정식으로 유도하였다. 손상도 추정의 효율성을 증대시키기 위하여, 2차-Perturbation 식을 구성하고, 이것을 반복적인 절차를

거쳐 해를 구하는 방법에 대하여 이론적인 고찰을 하였다.

제안된 방법의 효율성은 수치모의실험방식의 일련의 예제해석을 통하여 검증하였다. 가정된 손상도에 따른 고유진동특성의 변화량을 바탕으로 손상도를 추정한 후, 이를 최종에 가정한 값과 비교하였다. 예제해석 결과, 본 논문에서 제시한 방법이 구조물의 손상도를 적절히 산정함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 포항종합제철주식회사의 1992년도 철강분야 대학연구비 지원과제로 수행되었음을 밝히며, 포항종합제철주식회사의 연구비지원에 깊은 감사를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

- [1] Hong, K-S. and Yun, C-B. "Improved Method for Frequency Domain Identifications of Structures", Engineering Structures, in press.
- [2] Lee, C.G. and Yun, C-B. "Parameter Identification of Linear Structural Dynamic Systems", Comput. Struct., Vol.40, No.6, 1991, pp. 1475-1487.
- [3] Imai, H., Yun, C.B., Maruyama, O. and Shinozuka, M. "Fundamentals of System Identification in Structural Dynamics", J. of Probabilistic Engineering Mechanics, Vol.4, No.4, 1989, pp.162-173.
- [4] 윤정방, Shinozuka, M. "구조물의 동특성 추정 방법에 관한 연구", 한국전산구조공학회 논문집, 제2권 제2호, 1989, pp.113-119.
- [5] Yun, C-B., Kim, W-J. and Ang, A.H-S. "Damage Assessment of Bridge Structures by System Identification", 5th International Conference on Structural Safety and Reliability, CA, USA, 1989, pp.2179-2186.
- [6] Cawley, P. and Adams, R.D. "The Location of Defects in Structures From Measurements of Natural Frequencies", J. of Strain Analysis, Vol.14, No.2, 1979, pp.49-57.
- [7] Yang, J.C.S., Chen, J. and Dagalakis, N.G. "Damage Detection in Offshore Structures by

- Random Decrement Technique", J. of Energy Resources Technology, ASME, Vol.106, 1984, pp.38-42.
- [8] DiPasquale, E. and Cakmak, A.S. "Detection and Assessment of Seismic Structural Damage", NCEER Technical Report NCEER-87-0015, Dept. of Civil Engineering, Princeton University, 1987.
- [9] Chen, J-C. and Garba, J.A. "On-Orbit Damage Assessment for Large Space Structures", AIAA Journal, Vol.26, No.9, 1988, pp.1119-1126.
- [10] Stetson, K.A. "Perturbation Method of Structural Design Relevant to Holographic Vibration Analysis", AIAA Journal, Vol.13, No.4, 1975, pp.457-459.
- [11] Stetson, K.A. and Harrison, I.R. "Redesign of Structural Vibration Modes by Finite-Element Inverse Perturbation", J. of Engineering for Power, ASME, Vol.103, 1981, pp.319-325.
- [12] Sandstorm, R.E. and Anderson, W.J. "Modal Perturbation Methods for Marine Structures", Annual Meeting of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, NY, USA, 1982.
- [13] Kim, K-O., Anderson, W.J. and Sandstorm, R.E. "Nonlinear Inverse Perturbation Method in Dynamic Analysis", AIAA Journal, Vol.21, No.9, 1983, pp.1310-1316.
- [14] Hoff, C.J., Bernitsas, M.M., Sandstorm, R.E. and Anderson, W.J. "Inverse Perturbation Method for Structural Redesign with Frequency and Mode Shape Constraints", AIAA Journal, Vol.22, No.9, 1984, pp.1304-1309.
- [15] Bernitsas, M.M., Hoff, C.J. and Kokarakis, J.E. "Nonlinear Inverse Perturbation in Structural Dynamics Redesign of Risers", J. of Energy Resources Technology, ASME, Vol. 107, 1985, pp.256-263.
- [16] 민진기, 김형기, 홍규선, 윤정방, "구조물 손상의 추정을 위한 Inverse Modal Perturbation 기법", 대한토목학회 논문집, 제10권 제4호, 1990, pp.35-42.
- [17] Kuester, J.L. and Mize, J.H., Optimization Techniques with Fortran, McGraw-Hill, 1973.

(접수일자 : 1992. 9. 2)