

구조물 손상의 추정을 위한 Inverse Modal Perturbation 기법

Estimation of Structural Damages by Inverse Modal Perturbation Method

민진기* · 김형기** · 홍규선*** · 윤정방****
Min, Jin Ki · Kim, Hyeong Ki · Hong, Kyu Seon · Yun, Chung Bang

Abstract

A method for the damage assessment of a structure by an inverse modal perturbation technique is studied. The first few natural frequencies and mode shapes of the damaged structure are assumed to be known. Then, the perturbation equation is formulated for the changes of the modal properties due to the stiffness changes. The stiffness changes due to damages are evaluated, using optimization techniques. Example analyses are carried out for several cases of stick models and a truss model. Results indicate that the present method yields very reasonable estimates for the element stiffness changes.

· 要 旨

구조물의 손상도를 Inverse Modal Perturbation 기법을 이용하여 추정하는 방법에 대하여 연구하였다. 손상된 구조물에 대하여 측정된, 제한된 수의 고유진동수와 고유진동모우드로 이루어진 Perturbation 식에 최적화기법을 적용하여, 손상된 구조물의 부재강성의 감소량을 추정하였다. 예제해석은 기둥모형과 트러스구조의 여러가지 경우에 대하여 수행하였는데, 가정한 손상도에 따른 자유진동특성의 변화량을 바탕으로 추정한 손상도를 가정한 값과 비교하는 수치모의 실험방법을 통하여 본 기법의 효율성을 입증하였다.

1. 서 론

최근 국내외적으로 자연재해, 과도한 사용하중, 구조적 노후 등 여러가지 원인에 의하여 손상을 입은 구조물의 수가 증가되고 있으며, 따라서 이러한

구조물에 대한 구조적 안전성의 검토가 시급히 요구되고 있다. 구조물이 손상을 입게될 때 손상초기에는 구조물 전체에 미치는 영향이 크지않다 하더라도 시간의 경과에 따라 그 손상의 정도가 더욱 커져서 구조물 전체의 파괴를 가져올 우려가 있다.

*정회원 · 대우엔지니어링(주) 해양사업본부
**정회원 · 동부건설(주) 연구개발부
***정회원 · 한국과학기술원 박사과정
****정회원 · 한국과학기술원 교수

그러므로, 손상발생초기에 손상부분을 찾아내어, 수리 및 보강 등의 대책을 수립하는 것은 매우 중요한 일이다. 이같은 구조적 안전성 분석에 관련하여 기존 구조물의 강성 및 강도에 관한 현재상태의 추정치에 관한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다^(1~7).

본 논문은 손상이 발생되어 안전성의 검토가 요구되는 구조물에 대하여 자유진동 특성을 측정하여, 이를 손상전의 값과 비교함으로써 손상도를 추정하는 Inverse Modal Perturbation 방법에 대하여 연구하였다^(8~10). 구조물의 손상을 구조계의 강성행렬의 감소로 이상화하였으며, 각 요소에 대한 손상을 요소손상도계수를 사용하여 나타내었다. 구조적 손상과 이에 기인한 자유진동특성의 변화량과의 관계를 Perturbation 방정식으로부터 구한 후, 이로부터 요소손상도계수와 자유진동특성의 변화량과의 관계를 유도하였다. 실제상황에서는 자유진동특성에 대한 측정자료가 매우 제한되게 되므로, 미지의 요소손상도계수벡터를 구하는데 최적화기법을 사용하였다. 예제해석으로는 기동모형과 트러스 구조에 대해 여러가지 경우의 손상을 가정하여 해석하였는데, 제한된 수의 고유진동수와 또한 제한된 절점에서 얻은 고유진동모우드를 바탕으로 하여도 구조물의 손상도를 상당히 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

2. 구조물 손상의 모형화

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

$$[K] - [K] = \sum \alpha_e [K_e] \quad (1)$$

여기서, $[K]$ 와 $[K]$ 는 손상발생 전후의 구조계의 강성행렬; $[K_e]$ 는 크기는 $[K]$ 와 같되 한 요소(e)에 대한 강성행렬값만을 가지고 그 외의 요소는 영(0)의 값을 가지는 행렬; 그리고 α_e 는 요소손상도계수 ($-1 \leq \alpha_e \leq 0$)이다.

3. Inverse Modal Perturbation 방정식

구조물의 특정부위가 손상을 입어 발생한 질량이나 강성의 변화가 그리 크지 않다면, 손상후의 질량, 강성, 그리고 구조계의 동적특성인 고유진동수

와 고유진동모우드의 값은 손상전의 값에 미소의 변화량을 더한 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K] = [K] + [\Delta K] \quad (2)$$

$$[M] = [M] + [\Delta M] \quad (3)$$

$$[\omega'^2] = [\omega^2] + [\Delta \omega^2] \quad (4)$$

$$[\phi] = [\phi] + [\Delta \phi] \quad (5)$$

여기서, $[K]$, $[M]$, $[\omega'^2]$ 와 $[\phi]$ 는 손상된 구조물의 강성, 질량, 고유치(자유진동수의 제곱)와 모우드의 행렬을 나타내며; $[K]$, $[M]$, $[\omega^2]$ 와 $[\phi]$ 는 변화전 구조물에 대한 특성들을 나타낸다.

손상후 고유진동모우드는 손상전 고유진동모우드의 선형조합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\phi] = [\phi] ([I] + [C])^T \quad (6)$$

여기서 C_i 는 손상후 i번째 모우드 변화량에 대한 손상전 j번째 모우드의 기여도로서, $i=j$ 일때 그 값이 영(0)이 되도록 정규화(Normalization)한 것이다. 구조물의 손상이 작으면 C_i 의 절대값이 매우 작은 값을 갖게된다.

손상이 발생되기 전후의 구조계에 대한 주파수 방정식을 도입하면 아래와 같다.

$$[k] = [\mu] [\omega^2] \quad (7)$$

$$[k] = [\mu] [\omega'^2] \quad (8)$$

여기서 $[k]$, $[k]$ 와 $[\mu]$, $[\mu]$ 는 각각 손상발생전후의 구조계에 대한 일반모우드강성행렬 및 일반모우드질량행렬로서 아래와 같다.

$$[k] = [\phi]^T [K] [\phi] \quad (9)$$

$$[\mu] = [\phi]^T [M] [\phi] \quad (10)$$

$$[k'] = [\phi']^T [M'] [\phi'] \quad (11)$$

$$[\mu'] = [\phi']^T [M'] [\phi \Delta] \quad (12)$$

식 (2)와 (6)을 사용하면, 식 (11)은 아래와 같이 변형되며,

$$[k] = ([I] + [C]) [\phi]^T ([K] + [\Delta K]) [\phi] ([I] + [C])^T \quad (13)$$

또한 식 (3)과 (6)을 사용하면 식 (12)는 아래와 같이 고쳐쓸 수 있다.

$$[\mu] = ([I] + [C]) [\phi]^T ([M] + [\Delta M]) [\phi] / ([I] + [C]^T) \quad (14)$$

대부분의 구조물에 있어서 손상발생시 강성의 감소 보다는 질량의 감소가 작으므로, 질량변화의 영향을 포함시키지 않은 식 (14)와 식 (13)을 식 (8)에 대입하면 아래와 같은 관계식을 얻게 된다.

$$([I]+[C]) [\phi]^T ([K]+[\Delta K]) [\phi] ([I]+[C]^T) = ([I]+[C]) [\phi]^T [M][\phi] ([I]+[C]^T) ([\omega^2]+[\Delta\omega^2]) \quad (15)$$

식 (15)의 양변에 $([I]+[C])^{-1}$ 을 선승(pre-multiply)하고, 식 (7)의 관계를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$[\phi]^T [\Delta K] [\phi] + [\phi]^T [\Delta K] [\phi] [C]^T = [\phi]^T [M] [\phi] ([C]^T [\omega^2] - [\omega^2] [C]^T) + ([I]+[C]^T) [\Delta\omega^2] \quad (16)$$

구조물의 강성변화 $[\Delta K]$ 와 이로인한 동특성의 변화량인 $[\Delta\omega^2]$ 과, $[C]$ 가 미소한 값이므로, 이들간의 2차 이상의 항들을 제외하면 식 (16)은 다음과 같이 변형된다.

$$[\phi]^T [\Delta K] [\phi] = [\phi]^T [M] [\phi] ([C]^T [\omega^2] - [\omega^2] [C]^T + [\Delta\omega^2]) = [\mu] ([C]^T [\omega^2] - [\omega^2] [C]^T) + [\mu] [\Delta\omega^2] \quad (17)$$

식 (17)의 우변에 있는 첫번째 항은 대각요소들이 모두 영(0)이고, 두번째 항은 비대각 요소들이 영이므로 식 (17)은 대각요소와 비대각 요소에 대하여 각각 다음과 같이 된다.

$$[\phi]^T [\Delta K] [\phi] = [R] \quad (18)$$

여기서,

$$R_{ji} = \begin{cases} \mu_j \Delta\omega_i^2 & j=i \\ \mu_j C_{ij} (\omega_i^2 - \omega_j^2) & j \neq i \end{cases} \quad (19)$$

식 (18)에서 구조계의 강성의 변화량 $[\Delta K]$ 를 식 (1)에서 처럼 요소강성행렬 감소의 함으로 나타내면, k차 모드에 관련된 동특성의 변화량 $(\Delta\omega_k^2, \{\phi\}_k)$ 에 대하여, 아래와 같은 식을 얻게된다.

$$[P^k] \{a\} = \{r\}_k \quad (20)$$

여기서 $\{a\}$ 는 미지의 요소손상계수(α)로 구성된 벡

터이며, $[P^k]$ 는 k번째 모드에 대한 Perturbation 영향행렬로서 이의 i-번째 요소는 아래와 같다.

$$[P^k]_{ij} = \{\phi\}_i^T [K_{ij}] \{\phi\}_k \quad (21)$$

그리고

$$\{r\}_k = \begin{bmatrix} \mu_k (\omega_k^2 - \omega_1^2) C_{k1} \\ \vdots \\ \mu_{k-1} (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) C_{k, k-1} \\ \mu_k \Delta\omega_k^2 \\ \mu_{k+1} (\omega_k^2 - \omega_{k+1}^2) C_{k, k+1} \\ \vdots \\ \mu_n (\omega_k^2 - \omega_n^2) C_{kn} \end{bmatrix} \quad (22)$$

식 (21)의 양변에 다음과 같은 변환행렬을 선승(premultiply)하면,

$$[T^k] = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \{\phi\}_1 & \dots & \{\phi\}_{k-1} \\ \mu_k (\omega_k^2 - \omega_1^2) & \dots & \mu_{k-1} (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) \\ 1 & \dots & 0 \\ \{\phi\}_k & \dots & \{\phi\}_n \\ \mu_k \Delta\omega_k^2 & \dots & \mu_n (\omega_k^2 - \omega_n^2) \end{bmatrix} \quad (23)$$

아래와 같이 모드드기여도계수 C_{kj} 가 소거된 식을 얻을 수 있다.

$$[T^k][P^k]\{a\} = \begin{Bmatrix} \mu_k \Delta\omega_k^2 \\ \{\phi\}_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mu_k \Delta\omega_k^2 \\ \beta_k \{\phi\}_k \end{Bmatrix} \quad k=1, 2, \dots, n \quad (24)$$

여기서 β_k 는 손상후 구조물의 모드행렬의 측정값 $\{\psi\}_k$ 와 식 (6)과 같이 정규화된 모드행렬 $\{\phi\}_k$ 사이의 미지의 비례상수이다. 식 (23)과 (24)에서 $\{a\}$ 와 β_k 를 제외한 모든양은 손상발생전의 기지의 양이거나 손상발생후 측정치를 통하여 얻을 수 있는 값이다.

4. Inverse Modal Perturbation 방정식의 해

실제 구조물의 자유진동특성은 제한된 수(n_k)의 자유진동수와 또한 각 진동모우드벡터에 대하여 제한된 수(m_k)의 요소에 대해서만 측정될 수 있다. 따라서 식 (28)에서 미지수 ($\{a\}$, β_k)의 갯수와 측정값을 사용하여 얻을 수 있는 관계식의 수는 일정하지 않은 것이 보통이며, 그러므로 추정오차를 최소

화하는 최적화기법을 적용하여 근사적 해를 구해야 한다. 본 논문에서는 자유진동수의 변화량에 대한 관계식과 미지수인 요소손상도계수 $\{\alpha\}$ 의 범위 ($-1 < \alpha_k < 0$)를 구속조건으로 택하여 아래와 같은 최적화 문제^(15,16,17)를 구성하였다.

$$\min_{\{\alpha\}} J = \sum_{k=1}^m (\sum_i \{\phi\}_i^T [K_k] \{\phi\}_i \alpha_k - \mu_k \Delta \omega_k)^2 \quad (25)$$

$$G_i^k(\{\alpha\}) = \langle T^k \rangle_{i+i} [P^k] \{\alpha\} - \beta_k \psi_{ik} = 0 \quad (26)$$

구속조건 :

$$-1 < \alpha_k < 0 \quad (27)$$

위에서 $\langle T^k \rangle_{i+i}$ 는 행렬 $[T^k]$ 의 $(1+i)$ 번째 행벡터, $G_i^k(\{\alpha\})$ 는 측정된 진동모우드 $\{\psi\}^k$ 의 i 번째 요소에 대한 구속조건이다. $\{\psi\}^k$ 중 m_k 개의 성분만 측정하였다면, β_k 가 미지수이므로 k 번째 모우드에 대하여 $(m_k - 1)$ 개의 독립된 구속조건식을 얻게된다. 식 (25) - (27)은 $\{\alpha\}$ 에 대하여 목적함수는 2차식이며, 구속조건은 1차식과 부등식으로 주어지는 최적화 문제이다. 본 논문에서는 Wolfe기법⁽¹⁵⁾을 사용하였다.

위에서 $\langle T^k \rangle_{i+i}$ 는 행렬 $[T^k]$ 의 $(1+i)$ 번째 행벡터, $G_i^k(\{\alpha\})$ 는 측정된 진동모우드 $\{\psi\}^k$ 의 i 번째 요소에 대한 구속조건이다. $\{\psi\}^k$ 중 m_k 개의 성분만 측정하였다면, β_k 가 미지수이므로 k 번째 모우드에 대하여 $(m_k - 1)$ 개의 독립된 구속조건식을 얻게된다. 식 (25) - (27)은 $\{\alpha\}$ 에 대하여 목적함수는 2차식이며, 구속조건은 1차식과 부등식으로 주어지는 최적화 문제이다. 본 논문에서는 Wolfe기법⁽¹⁵⁾을 사용하였다.

5. 예제해석 및 분석

앞에서 서술한 이론에 대한 타당성의 검증을 위하여 그림 1에서 보인 바와 같은 3개의 간단한 구조물을 예제로 선택하였다. 예제 구조물에 여러경우의 다른 손상을 가한 후, 이 값과 손상발생 후의 자유진동특성을 바탕으로 추정한 구조물의 손상도를 비교하는 수치모의실험(computer simulation) 방법으로 검증을 수행하였다. 예제구조물 A, B는 기둥모형으로 각각 7개 및 14개의 집중질량과 수평방향의 요소강성을 가진 구조물이며, 구조물 C는 트러스 구조로 6개의 절점과 10개의 부재를 갖고 있는 부정정 구조물이다.

두개의 기둥모형에 대하여, 손상된 부재수를 1개

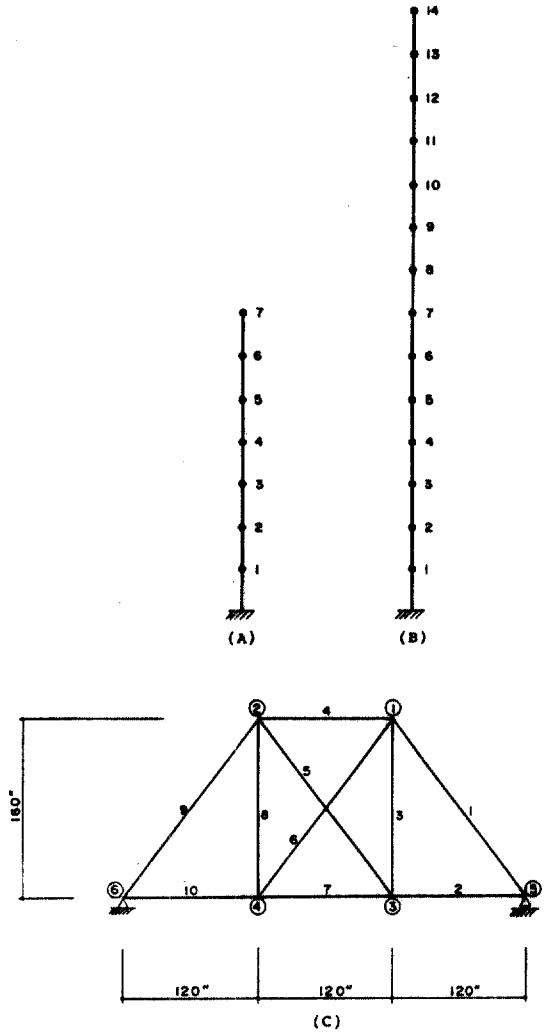
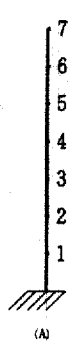


그림 1. 예제구조물

내지 3개로 임의로 선택하고 손상이 발생되어 부재강성의 크기가 10-20%로 감소된 여러가지의 가상적인 경우에 대하여 구조물의 손상도를 추정하였다. 해석의 초점은 제한된 수의 고유진동수와 고유진동모우드의 변화량을 바탕으로 추정한 구조손상도의 정확도가 해석과정에서 사용된 고유진동수의 갯수와 진동모우드의 갯수 및 모우드 측정점의 갯수에 따라 어떤 영향을 받는가를 분석하는 것이다. 구조물 A에 대하여는 손상이 발생된 구조물의 첫번째 모우드가 7절점중 4개의 절점에서 가용한 경우에 고유진동수를 1개에서 3개까지 사용하여 손상

표 1. 사용한 고유진동수의 갯수별 손상도 추정결과

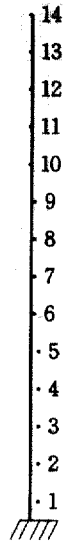
(구조물 A)

예제 경우	부재 번호	가정한부 재손상도	추정된 손상도*			비 고
			(1)	(2)	(3)	
1	1	-0.2	0.000	-0.234	-0.220	각 경우 첫 번째 모드 만 사용
	2	0.0	-0.164	0.000	-0.022	
	3	0.0	-0.072	0.000	0.000	
	4	0.0	0.000	-0.008	-0.001	
	5	0.0	0.000	0.000	0.000	
	6	0.0	0.000	0.000	0.000	
	7	0.0	0.000	0.000	0.000	
2	1	0.0	0.000	0.000	0.000	7 6 5 4 3 2 1 
	2	0.0	-0.050	0.000	0.000	
	3	0.0	0.000	0.000	-0.001	
	4	-0.2	-0.191	-2.242	-0.241	
	5	0.0	0.000	0.000	-0.001	
	6	0.0	0.000	0.000	0.000	
	7	0.0	0.000	0.000	0.000	
3	1	-0.2	0.000	-0.163	-0.230	(A)
	2	0.0	0.000	0.000	-0.005	
	3	0.0	-0.062	-0.269	0.000	
	4	-0.2	-0.411	0.000	-0.229	
	5	0.0	0.000	0.000	0.000	
	6	0.0	0.000	-0.001	-0.001	
	7	0.0	0.000	-0.001	0.000	
4	1	0.0	0.000	-0.059	-0.011	(A)
	2	-0.2	0.000	0.000	-0.216	
	3	0.0	-0.414	-0.359	0.000	
	4	-0.2	0.000	0.000	-0.238	
	5	0.0	0.000	0.000	0.000	
	6	0.0	0.000	0.000	0.000	
	7	0.0	-0.001	-0.001	-0.001	

주: (*)괄호속의 숫자는 해석에 사용한 고유진동수의 갯수

표 2. 사용한 고유진동모우드수별 손상도 추정결과

(구조물 B)

예제 경우	부재 번호	가정한부 재손상도	추정된 손상도*		비 고
			(1)	(2)	
1	1	-0.2	0.000	-0.164	각 경우 3 개의 고유 진동수 사 용
	2	0.0	-0.307	0.000	
	3	0.0	0.000	-0.002	
	4	-0.1	-0.036	-0.123	
	5	0.0	0.000	0.000	
	6	0.0	0.000	0.000	
	7	0.0	0.000	0.000	
	8	0.0	-0.025	-0.039	
	9	0.0	0.000	0.000	
	10	0.0	0.000	-0.006	
	11	0.0	0.000	0.000	
	12	0.0	0.000	-0.049	
	13	0.0	0.000	0.000	
	14	0.0	0.000	0.000	
2	1	0.0	-0.032	0.000	14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 
	2	0.0	0.000	0.000	
	3	0.0	0.000	0.000	
	4	0.0	0.000	0.000	
	5	0.0	-0.035	-0.013	
	6	-0.1	0.000	-0.099	
	7	0.0	-0.233	0.000	
	8	-0.2	0.000	-0.235	
	9	0.0	0.000	0.000	
	10	-0.1	-0.107	-0.106	
	11	0.0	0.000	0.000	
	12	0.0	0.000	0.000	
	13	0.0	0.000	0.000	
	14	0.0	0.000	0.000	

주: (*)괄호속의 숫자는 해석에 사용한 고유모우드의 갯수

표 3. 손상부재의 갯수별 예제해석결과 (구조물 B)

손상부재 의 수	예제해석 의 수	구 분	결 과 등 급			(A)+(B)
			전부일치(A)	부분일치(B)	전부불일치(C)	
1	10	I	10	-	0	10
2	25	I	18	7	0	25
		II	25	0	0	25

손상부재 의 수	예제해석 의 수	구 분	결 과 등 급			(A)+(B)	
			전부일치(A)	부분일치(B)			전부불일치(C)
3	10	I	4	2개	1개	1	9
		2		3			
		II	5	4	1	0	10
계	45	I	32	12		1	44
		II	40	5		0	45
백 분 율 (%)	100	I	71.1	26.7		2.2	97.8
		II	88.9	11.1		0.0	100.0

(주) I : 미지수를 제한하지 않은 경우

II : 미지수를 제한한 경우를 포함.

표 4. 손상부재수 별 추정된 손상도 (구조물 C)

손상부 재의 수	예제 경우	구분	부 재 번 호										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	가	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		나	-0.240	0.000	-0.015	0.000	-0.010	-0.006	-0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001
	2	가	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		나	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.236	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	3	가	0.0	0.0	-0.2	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		나	0.000	0.000	-0.244	0.000	-0.197	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	4	가	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
		나	0.000	0.000	0.000	-0.006	-0.102	-0.005	-0.234	0.000	-0.001	0.000	
	5	가	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.2	-0.2	0.0
		나	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.278	0.000

(주)가 : 정확한 손상도 나 : 추정된 손상도

(측정한 고유진동수 및 진동모우드의 갯수 : 각각 1개)

도를 추정하였다. 표 1에서 보인 몇가지 예의 경우와 같이 첫번째 자유진동수만을 사용하여 추정된 손상도는 만족스러운 경우도 있으나 대체적으로 만족스럽지 못한 결과를 보이고 있다. 그러나 해석에 사용된 고유진동수가 증가함에 따라 추정된 손상도가 현저히 개선됨을 알 수 있었으며, 3차 고유진동수까지 사용했을 때 손상부재의 위치를 정확하게 찾고 추정된 손상도도 참값에 상당히 가까움을 알 수 있었다. 구조물 B에서는 3개의 고유진동수를 사용하고, 고유진동모우드를 1차모우드만을 사용한 경우와 2차모우드까지 사용한 경우에 대해 손상도를 추정하였다. 이때 모우드형상은 14개의 절점중 7개 절점에서만 측정되었다고 가정하였다. 표 2에 예시한 결과를 보면 1차모우드만을 사용한 경우, 손상

된 부재의 위치를 잘못 찾는 경우가 있으나 2차모우드까지 사용했을 경우에는 상당히 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있다. 이는 부재의 수가 많아짐에 따라 미지의 요소손상도계수가 증가되고, 따라서 최적화 문제에 있어서 정확한 손상도를 추정하기 위해서는 구속조건의 수가 증가되어야 함을 의미한다.

지금까지는 부재의 손상도를 추정하기 위한 최적화과정에서 모든 부재에서 손상의 발생이 가능한 것으로 가정하였다. 따라서 구조물이 많은 수의 부재로 구성되어 있고, 또한 여러 부재에서 손상이 발생되었을 경우에는 표 3의 경우 I에서 보는 바와 같이 추정된 손상도의 정확도가 떨어짐을 알 수 있었다. 그러나, 예비적인 현장조사나 과거 경험을

바탕으로 예상손상부재의 수를 적절히 제한할 수 있는 경우에는 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 표 3의 경우 II는 손상발생이 예상되는 부재를 총 14개의 부재중 5개로 제한하고, 3개의 고유진동수의 변화량과 손상발생후 1차 모우드형태를 기지의 양으로 가정하여 손상도를 추정한 것이다. 표 3의 결과는 손상이 발생된 부재수가 3개 이내인 총 45가지의 경우에 대하여, 손상된 부재를 전부 찾아낸 경우가 40개로서, 약 88.9%의 우수한 성공률을 보여주고 있다.

표 4에서는 그림 1(C)의 트러스구조물에 대한 손상도 추정결과를 정리하였다. 여러 손상발생의 경우에 대하여, 첫번째 고유진동수와 진동모우드를 사용하였다. 해석결과 트러스와 같은 복잡한 구조물에 대하여도 대부분의 경우 손상된 부재를 잘 선택함을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 Inverse Modal Perturbation 기법을 사용하여 고유진동수와 진동모우드에 대한 제한된 측정자료를 근거로 구조물의 손상도를 추정하는 방법에 대하여 연구하였다. 몇가지의 다른 예제 구조물에 손상이 발생한 여러경우에 대하여 손상도를 추정한 결과, 본 방법이 구조물의 손상위치 및 손상도를 정확하게 추정할 수 있었다. 구조물이 복잡하여 미지의 요소손상도계수가 많은 경우에도, 해석과정에 사용된 고유진동수와 진동모우드의 갯수가 증가될수록 손상도의 추정결과가 크게 개선되며, 또한 현장조사나 과거경험을 바탕으로 예상손상부재의 수를 적절히 제한할 수 있는 경우에는 손상도를 비교적 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 지원으로 수행된 한미 국제공동연구과제의 연구결과중 일부이다. 동 재단의 지원에 심심한 감사를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

1. 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
2. 윤정방, Shinozuka, M., "구조물의 동특성 추정방법에 관한 연구", *한국전산구조공학회 논문집*, 제2권 제2호, 1989
3. 윤정방, "선형구조계의 동특성 추정법", *한국전산구조공학회 논문집*, 제2권 제4호, 1989
4. 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
5. Shinozuka, M., Yun, C-B., and Imai, H., "Identification of Linear Structural Dynamic Systems", *J. of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 108, No. EM6, 1982, pp. 1371-1390
6. Hart, G. C., and Yao, J. T-P., "System Identification in Structural Dynamics", *J. of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 103, No. EM6, 1977, pp. 1089-1104
7. 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
8. Stetson, K. A., "Perturbation Method of Structural Design Relevant to Holographic Vibration Analysis", *AIAA Journal*, Vol. 13, No. 4, April 1975
9. Sandstorm, R. E., and Anderson, W. J., "Modal Perturbation Methods for Marine Structure", *Proc. of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Nov. 1982.
10. Kim, K-O., Anderson, W. J., and Sandstorm, R. E., "Nonlinear Inverse Perturbation Method in Dynamic Analysis", *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 9, Sept. 1983.
11. Hoff, C. J., Bernitsas, M. M., Sandstorm, R. E., and Anderson, W. J., "Inverse Modal Perturbation Method for Structural Re-

- design with Frequency and Mode Shape Constraints", *AIAA Journal*, Vol. 22, No. 9, Sept. 1984
12. Bernitsas, M. M., Hoff, C. J., and Kokarakis, J. E., "Nonlinear Inverse Perturbation in Structural Dynamics Redesign of Risers", *Transacion of the ASME, Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 107, June 1985.
 13. 김형기, "Modal Perturbation 방법을 이용한 구조물의 손상부위 색출에 관한 연구", 석사학위논문, 한국과학기술원, 1987.
 14. 민진기, "Inverse Modal Perturbation 기법에 의한 구조물 손상의 추정에 관한 연구", 석사학위논문, 한국과학기술원, 1989.
 15. Kuester, J. L., and Mize, J. H., *Optimization Techniques*, Mc. Graw-Hill, 1973.
 16. Arora. J. S., *Introduction to Optimum Design*, Mc. Graw-Hill, 1989.
 17. Haug, E. J., and Arora, J. S., *Applied Optimal Design*, Wiley-Interscience Publication, 1979.

(接受 : 1990. 8. 6)