

부분구조추정법을 이용한 대형구조물의 효율적인 구조안전도 모니터링

Efficient Structural Safety Monitoring of Large Structures Using Substructural Identification

윤 정 방*
Yun, Chung Bang

이 형 진**
Lee, Hyeong Jin

국문요약

본 논문에서는 대형구조물에서 구조물의 안전성 평가와 관련하여 구조물의 국부손상도를 추정하기 위한 효율적인 부분구조추정(Substructural Identification) 기법에 대하여 연구하였다. 먼저, 부분구조 추정법을 위한 모형식을 설정하기 위하여 운동방정식으로부터 부분구조에 대한 계속오차를 처리하기 위한 모형을 포함한 추계론적 자동회귀-이동평균(ARMAX) 모형을 유도하였다. 추정된 모형식의 계수는 유도된 관계식을 이용하면, 구조손상 평가에 이용될 수 있는 강성행렬로 환산될 수 있다. 본 논문에서 유도된 부분구조 추정법의 가장 큰 장점은 매우 안정되고 정확도가 우수한 구조추정법인 ARMAX 모형식에 기반한 순차적 예측오차 방법을 사용함으로써 다른 방법에 비해 추정의 안정성 및 정확도가 뛰어나는 것이다. 다음으로는 개발된 부분구조 추정법을 이용하여 구조손상도 추정이 수행되었다. 손상도 추정을 위하여 앞서 순차적 예측오차 방법을 이용하여 추정된 구조계 현상태의 강성행렬을 바탕으로, 최소자승법을 이용하여 구하는 간접법이 제시되었다. 제시된 방법들의 검증은 위하여 예제해석이 수행되었다. 트러스 및 연속교 모형 그리고 실험적 예제에 적용하여 구조의 강성행렬 및 감쇠행렬을 추정하였다. 이를 바탕으로 손상도 추정방법이 검증되었다. 해석결과로부터, 개발된 방법이 효율적이고 정확도 및 안정성의 측면에서 우수한 성질이 있음을 확인할 수 있었다.

주요어 : 부분구조추정법, 손상도 추정, 구조물의 안정성 평가, 자동회귀-이동평균 모형, 순차적 예측오차방법, 구조안전도 모니터링

ABSTRACT

This paper presents substructural identification methods for the assessment of local damages in complex and large structural systems. For this purpose, an auto-regressive and moving average with stochastic input (ARMAX) model is derived for a substructure to process the measurement data impaired by noises. Using the substructural methods, the number of unknown parameters for each identification can be significantly reduced, hence the convergence and accuracy of estimation can be improved. Secondly, the damage index is defined as the ratio of the current stiffness to the baseline value at each element for the damage assessment. The indirect estimation method was performed using the estimated results from the identification of the system matrices from the substructural identification. To demonstrate the proposed techniques, several simulation and experimental example analyses are carried out for structural models of a 2-span truss structure, a 3-span continuous beam model and 3-story building model. The results indicate that the present substructural identification method and damage estimation methods are effective and efficient for local damage estimation of complex structures.

Key words : substructural identification, damage assessment, ARMAX model, sequential prediction error method, structural safety monitoring

* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 강원대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

1. 서 론

실제 구조물의 구조특성(강성이나 동적 모우드 특성 등)은 시공상에서의 변동요인이나 시공오차, 장기간의 사용에 따른 구조물의 노후화나 각종 자연재해로 인한 구조손상 등의 원인으로, 최초 설계 당시와는 많이 다른 것이 보통이다. 따라서, 실제 구조물의 정확한 거동분석을 위해서는 이러한 실제 상태에 대한 분석이 수반되어야 한다. 그 중에서도 특히, 교량이나 빌딩, 발전소 등의 대형 사회기간 토목구조물에 발생한 구조손상은 커다란 사회적 손실로 이어질 수 있으므로, 이에 대한 정확한 진단이 요구된다. 이러한 관점에서 최근 대형 사회기간 구조물에 대한 구조안전도 진단의 연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다.⁽¹⁻¹³⁾ 기설 구조물의 구조적 안전도 평가 및 모형화와 관련하여, 구조물의 정적, 동적 계측 시간이력 자료를 이용하여 구조물의 구조특성을 구하는 방법으로 구조추정법(Structural Identification Method)⁽¹⁴⁻²⁴⁾이 있다.

일반적으로 구조물의 안전진단방법으로 가장 널리 사용되고 있는 방법은 육안조사와 비파괴 검사 방법(Nondestructive Test)⁽¹³⁾이다. 특히, 비파괴 검사방법(NDT)은 구조손상에서 육안으로 관찰되지 않는 부분까지 상세히 조사할 수 있다는 측면에서 매우 유용한 방법이다. 그러나, 대형 기간시설물에서 구조물내의 상세한 부위까지 조사하여 구조물내의 손상을 빠트리지 않고 모두 찾아낸다는 것은 지나치게 시간과 경비를 소모하는 일이 될 수 있다. 또한, 비파괴 검사법은 접근이 용이하지 않은 구조영역에 대한 손상추정의 경우에는 많은 어려움이 있다. 반면에 구조추정법은 접근이 용이한 몇 개소에서 구조물 거동계측을 수행하고, 이를 구조추정법으로 분석하여 구조물 전체의 구조특성치를 구해내는 것이므로, 비파괴 검사법에서의 단점들을 보완할 수 있는 방법 중의 하나가 될 수 있다. 또한, 구해진 추정값이 강성 등의 구조물의 물리적 특성치를 구해내므로 다양한 구조해석에 적용할 수 있다는 장점도 있다. 그림 1은 구조추정법을 이용한 구조안전진단방법의 개념도를 보인 것이다.

구조추정법은 크게 시간영역방법⁽¹⁴⁻¹⁷⁾과 주파수영역방법⁽¹⁸⁻²¹⁾으로 분류된다. 주파수영역방법은 계측된 시간이력을 주파수영역으로 변환하여 주파수응답함수를 구하고, 그로부터 모우드 계수를 구해내는 방

법이다. 이 방법은 달리 모우드실험(Modal Test)이라고도 불린다. 주파수영역의 구조추정법에 의한 구조물의 손상도 추정은 구해진 모우드 계수를 다시 한번 처리하여 구해지게 된다. 따라서, 이와 같은 접근방법을 구조손상도 추정에서는 보통 간접법(Indirect Method)이라 불린다. 반면에, 시간영역의 방법은 계측된 시간이력을 직접 처리하여 구조손상을 구해내게 된다. 이러한 접근 방법은 또한 직접법(Direct Method)이라 불린다. 이 방법들에서 사용되고 연구되는 다양한 기법들은 표 1에서 정리되었

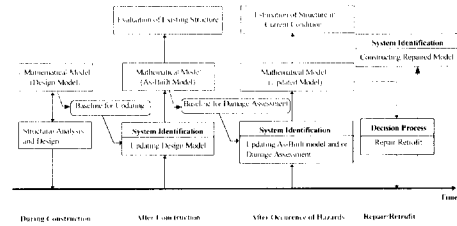


그림 1 손상도 평가와 수리 및 개보수에 대한 결정의 흐름도

본 논문에서는 최근에 특히 주목 받고 있는 구조물의 모니터링 기법과 관련하여 시간영역에서의 구조물의 손상도 추정방법이 연구되었다. 보통 구조추정법에서는 방법의 수렴성과 계측과 관련된 구조물의 자유도수가 문제가 된다. 특히, 이 개념을 교량이나 고층건물 그리고 산업기반시설과 같은 대규모 토목구조물에 직접 적용하는 데에는 자유도와 미지 계수의 수가 방대하게 되어 많은 어려움이 존재한다. 본 논문에서는 이러한 제약 극복하기 위하여 관심영역을 제한하고, 이 영역에 대해서만 구조추정 기법을 적용하는 부분구조추정법에 대하여 연구하였다.⁽²²⁻²⁴⁾ 부분구조, 즉 구조물중의 일부분(부구조)에서의 구조계수만을 독립적으로 추정하게 되므로 고려해야 할 자유도의 수가 줄어들게 된다. 따라서, 추정이 용이해지고 추정의 정확도가 높아진다. 또한, 구조추정의 수렴성을 증대하기 위한 방안으로, 시간영역에서의 수렴성이 가장 우수한 ARMAX모형식에 기초한 순차적 예측오차 방법을 적용하였다.

표 1 교량구조의 안전진단에 사용되는 손상도 추정방법들

	기법명	사용되는 물리량	수치계산방법	참고문헌
간접법	(1) 역섭동법	모우드 계수	최적화 방법	20-21,25-26
	(2) 민감도 행렬법	모우드 계수/정적변형	비선형 최적화 방법	27-28
	(3) 최소자승법	모우드 계수/정적변형	최소자승법	29
	(4) 손상지표법	모우드 계수	손상지표식	30
	(5) 변형률 모우드법	변형률모우드 계수 /변형률 주파수응답함수	최적화 방법 등	31
	(6) 신경망 법법	모우드 계수/ 변형률모우드 계수	학습된 신경망	32
	(7) 패턴인식법	모우드 계수 /주파수응답함수	패턴인식 알고리즘	33
직접법	(8) 배치알고리즘	계측된 입력/응답의	최소자승법/비선형 최적화 방법	34
	(9) Extended Kalman Filter	시간이력을 직접사용	Extended Kalman Filter	35-37

2. 운동방정식

일반적으로 그림 2와 같은 구조물의 전체 구조계에 대한 운동방정식은 다음과 같이 분할된 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} M_{0,mm} & M_{0,ms} & 0 \\ M_{0,sm} & M_{0,ss} & M_{0,sr} \\ 0 & M_{0,rs} & M_{0,rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_s \\ \xi_r \end{Bmatrix} \\
 + & \begin{bmatrix} C_{0,mm} & C_{0,ms} & 0 \\ C_{0,sm} & C_{0,ss} & C_{0,sr} \\ 0 & C_{0,rs} & C_{0,rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\xi}_m \\ \dot{\xi}_s \\ \dot{\xi}_r \end{Bmatrix} \\
 + & \begin{bmatrix} K_{0,mm} & K_{0,ms} & 0 \\ K_{0,sm} & K_{0,ss} & K_{0,sr} \\ 0 & K_{0,rs} & K_{0,rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_s \\ \xi_r \end{Bmatrix} \\
 = & \begin{bmatrix} L_{0,mm} & L_{0,ms} & 0 \\ L_{0,sm} & L_{0,ss} & L_{0,sr} \\ 0 & L_{0,rs} & L_{0,rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_m \\ u_s \\ u_r \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 ξ 와 u 는 응답과 입력을 나타내고 M, C, K 와 L 은 미지의 구조계수를 나타내며, m 은 고려되는 부구조의 자유도를 뜻하고, s 는 이 부구조의 경계자유도를 뜻한다.

따라서, 부구조에 대한 운동방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & M_{0,mm} \ddot{\xi}_m + C_{0,mm} \dot{\xi}_m + K_{0,mm} \xi_m = \\
 & L_{0,mm} u_m + L_{0,ms} u_s + L_{0,ms} u_s - \\
 & [M_{0,ms} \ddot{\xi}_s + C_{0,ms} \dot{\xi}_s + K_{0,ms} \xi_s]
 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)로부터 경계면에서 측정된 응답은 해당된 부구조의 입력성분과 같이 취급됨을 알 수 있다. 따라서, 부구조에 관련된 자유도 m 과 s 에 입력성분이 작용하지 않는 경우에는, 입력성분을 계측하지 않고 응답성분만을 계측하여도 부구조에 관련된 미지계수의 추정이 가능하다. 일반적으로 구조추정 (System Identification)과정에서는 입력과 응답성분의 계측이 모두 필요하며, 입력성분의 계측은 응답성분의 계측에 비하여 매우 어렵고 부정확한 작업이다.

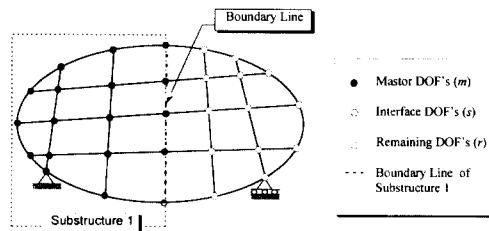


그림 2 부구조의 분할과 자유도

3. 부구조에 대한 ARMA 모형식

일반적으로 계측된 입력과 응답성분은 이산시간

영역에서 표현되므로, 주어진 운동방정식을 이산시간영역에서의 관계식으로 표현하는 것이 편리하다.

본 논문에서는 ARMA (auto-regressive and moving average) 모형식을 사용하였는데, 이는 계측데이터에 포함된 계측오차의 영향을 고려하기에 매우 편리한 관계식으로 알려져 있다. ARMAX모형식(ARMA모형식에 계측오차를 처리하기 위한 항을 포함한 형태)의 가장 커다란 장점은 계수 추정법의 적용이 매우 쉽고 그 결과가 매우 안정적이라는 것이다. 운동방정식과 ARMA 모형식과의 일반적인 관계는 그림 3에 상세히 기술되어 있다.⁽¹⁴⁻¹⁷⁾ 본 논문에서는 부구조 운동방정식으로부터 ARMA 관계식을 유도한 내용만을 기술한다.

식 (2)은 다음과 같은 질량행렬에 대하여 정규화된 운동방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\xi}_m + J_{mm}\dot{\xi}_m + K_{mm}\xi_m = L_{mm} u_m + L_{ms} u_s - [J_{ms} \dot{\xi}_s + K_{ms} \xi_s] \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} J_{mm} &= M_{0,mm}^{-1} C_{0,mm}, & K_{mm} &= M_{0,mm}^{-1} K_{0,mm} \\ J_{ms} &= M_{0,mm}^{-1} C_{0,ms}, & K_{ms} &= M_{0,mm}^{-1} K_{0,ms} \\ J_{mm} &= M_{0,mm}^{-1} L_{0,mm}, & L_{ms} &= M_{0,mm}^{-1} K_{0,ms} \end{aligned}$$

식 (3)로부터 각 응답의 계측성분에 따라 Laplace 응답함수를 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$Y_m(s) = s^k G_m^{-1}(s) [L_{mm} U_m(s) - G_m(s)^{-1} G_s(s) Y_s(s)] \quad (4)$$

위에서 $Y(s)$ 와 $U(s)$ 는 계측된 응답 $y(t)$ 와 입력 $u(t)$ 의 Laplace 변환이며, $G_m(s) = [s^2 I_{mm} + s J_{mm} + K_{mm}]$ 이고, $G_s(s) = [s J_{ms} + s K_{ms}]$ 이다. 계측된 응답성분이 변위(ξ)이면 $k=0$ 이고, 속도 ($\dot{\xi}$)이면 $k=1$ 이며, 가속도 ($\ddot{\xi}$)이면 $k=2$ 이다. 식 (4)은 다음과 같은 형태로 정리될 수 있으며,

$$Y_m(s) = \{ G_m(s)^{-1} [s B_1 + B_2] + D \} \begin{Bmatrix} U_m(s) \\ U_s(s) \\ Y_s(s) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

따라서, 이 형태의 식에 그림 3의 관계를 적용하면 간단히 부구조 운동방정식의 계수와 ARMA 모형식

의 계수의 관계식을 유도할 수 있다. 이는 나중에 추정된 ARMA 모형식의 계수로부터 운동방정식의 계수를 환원할 때에 이용된다.

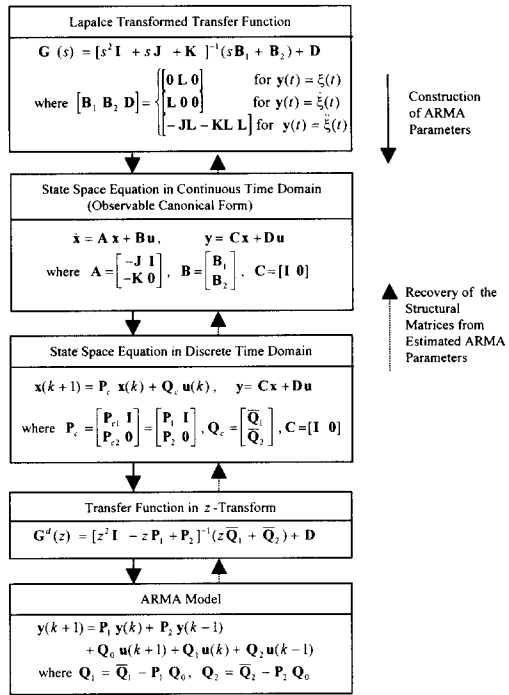


그림 3 ARMA 모형식의 계수와 Laplace 방정식의 계수와 상관관계

최종적으로 식 (6)와 같은 ARMA 관계식을 얻을 수 있다.

$$y(k+1) = P_1 y(k) + P_2 y(k-1) + Q_0 u(k+1) + Q_1 u(k) + Q_2 u(k-1) \quad (6)$$

응답과 입력의 계측치($y(k), u(k)$)로부터 ARMA모형식의 계수행렬(P_i, Q_i)을 추정할 수 있으며, 이 결과로부터 부구조의 강성행렬과 감쇠행렬을 산정할 수 있다.

4. ARMAX 모형식과 순차적 예측오차방법

ARMA 모형식의 계수행렬을 추정하는 과정에서 계측오차의 영향을 고려하기 위하여, 예측오차항 $e(k)$ 이 포함된 아래와 같은 ARMAX (auto-regressive and moving average with stochastic input) 모형식을 이용하였다.⁽¹⁴⁻¹⁷⁾

$$y(k+1) = P_1 y(k) + P_2 y(k-1) + Q_0 u(k+1) + Q_1 u(k) + Q_2 u(k-1) + e(k+1) + H_1 e(k) + H_2 e(k-1) \quad (7)$$

본 연구에서는 식 (7)의 미지계수(P_i, Q_i, H_i)를 추정하기 위하여 식 (8)과 같은 순차적 예측오차방법이 사용되었는데, 이 방법은 기존의 다른 방법에 비해 수치적으로 매우 유리한 특성을 가지고 있다. (14-17).

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k+1) &= \hat{\theta}(k) + F(k+1)\Psi(k)(y(k+1) - \hat{y}(k+1)) \\ F(k+1)^{-1} &= F(k)^{-1} + \Psi(k)\Psi(k)^T, \quad F(0) := \beta I, \quad \beta > 0 \\ \Psi_i(k) &= \frac{dy_i(k+1, \theta)}{d\theta_i} \quad | \quad \theta = \hat{\theta}(k) : \text{민감도 행렬} \\ \Psi(k)^T &= \hat{H}_1(k)\Psi(k-1)^T + \hat{H}_2(k)\Psi(k-2)^T \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $\hat{\theta}(k+1)$ 는 추정된 계수벡터로서 미지계수 행렬들의 모든 요소를 포함한 벡터이며, $\hat{y}(k+1)$ 은 추정된 계수행렬을 이용하여 예측된 응답이고, $\hat{H}_i(k)$ 는 예측오차항에 관련된 계수행렬의 추정치이다.

ARMAX 모형식에 기초한 순차적예측오차방법의 적용은 그림 4에 기술되었다.

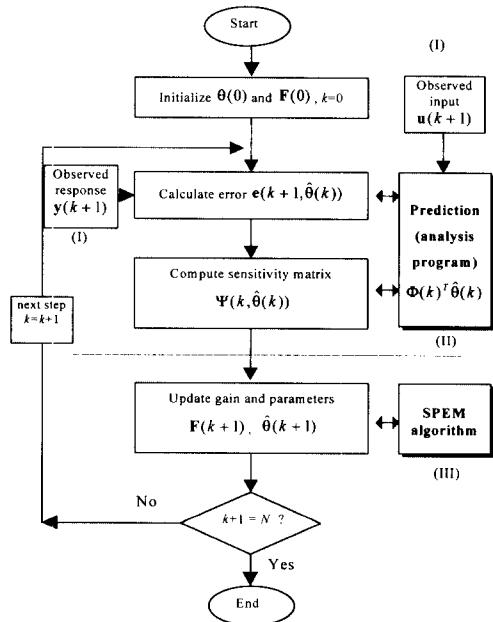


그림 4 순차적 예측오차 방법을 이용한 구조추정법의 흐름도

5. 순차적 예측오차방법의 결과를 이용한 손상도 추정법

순차적 예측오차 방법을 이용하여 구해진 강성행렬을 이용하여 손상도를 추정하는 방법은 일반적인 간접법에서 모우드 계수를 구해 이로부터 손상도를 구하는 방법에 비하여 손상도 추정이 보다 정확하다는 장점이 있다. 이는 이미 구해진 물리량이 강성행렬이므로 모우드 계수에서와 같은 손상도로의 복잡한 변환과정이 필요 없기 때문이다. 손상발생 후에 구해진 구조의 강성행렬(K_0)은 다음과 같이 부행렬식을 이용하여 표현될 수 있다.

$$K_0 = \sum_c^n \alpha_c \hat{K}_0^c \quad (9)$$

여기서 \hat{K}_0^c 는 손상전의 기지의 요소(e) 강성행렬이고, α_c 는 구해낼 손상도를 나타내는 값이다. 일반적으로 구조물의 손상도를 나타내기 위한 기준 값인 요소 강성행렬은 설계도면상에서 구하거나 손상전에 실험적으로 구해진 값을 이용하여 구해진다. 손상도가 $\alpha_c < 1$ 이면 손상의 발생, $\alpha_c = 1$ 이면 무손상 그리고 $\alpha_c > 1$ 이면 설계상의 값과의 차이나 보강으로 인하여 강성이 추가된 경우를 나타낸다. 이 손상도 값을 통해 손상의 위치(e)나 손상정도(severity; α_c)를 표현하게 된다. 여기서 주목해야 할 점은 보통 손상도 추정의 방법에서 손상 위치나 손상정도를 동시에 추정하기에는 정확도가 떨어질 수 있고, 따라서 이 경우 추정된 손상도는 그 위치에서의 손상의 존재유무에 대한 확실적인 지표로 해석되는 경우가 많다.

이 식을 부분구조의 강성행렬에 대하여 표현하면 아래와 같다.

$$\hat{K}_{0,mm} = K_{0,mm}^1 \alpha_1 + K_{0,mm}^2 \alpha_2 + \dots + K_{0,mm}^n \alpha_n \quad (10)$$

여기서 $\hat{K}_{0,mm}$ 는 추정된 부구조의 강성행렬이고, $K_{0,mm}^c$ 는 이 부구조에 관계된 손상전의 요소강성행렬이다.

손상도를 구하기 위하여 식 (10)을 다음과 같이 재배열된 행태로 나타낸다.

$$\{\hat{K}\}_{dimmed} = [K]\{\alpha\} \quad (11)$$

여기서

$$\{\widehat{K}\}_{damaged} = \begin{Bmatrix} \{\widehat{K}_{0,mm}^2\}_1 \\ \{\widehat{K}_{0,mm}^2\}_2 \\ \vdots \\ \{\widehat{K}_{0,mm}^2\}_{n_m} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} \{K_{0,mm}^2\}_1 & \{K_{0,mm}^2\}_1 & \cdots & \{K_{0,mm}^2\}_1 \\ \{K_{0,mm}^2\}_2 & \{K_{0,mm}^2\}_2 & \cdots & \{K_{0,mm}^2\}_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \{K_{0,mm}^2\}_{n_m} & \{K_{0,mm}^2\}_{n_m} & \cdots & \{K_{0,mm}^2\}_{n_m} \end{bmatrix}$$

이고 $\{\widehat{K}_{0,mm}\}_i$ 과 $\{K_{0,mm}^e\}_i$ 는 각각 $\widehat{K}_{0,mm}$ 과 $K_{0,mm}^e$ 의 j 번째 열을 나타낸다. 또한, $\{a\}$ 는 요소손상도의 벡터이고, n_m 은 이 부구조의 주(master)자유도의 수를 나타낸다. 이 식은 간단히 최소사승법 계열의 유사역행렬법(pseudo-inverse method)를 이용하여 다음과 같이 풀 수 있다.

$$\{a\} = [K]^+ \{\widehat{K}\}_{damaged} \quad (13)$$

여기서 $[K]^+$ 는 $[K]$ 의 유사역행렬이고, 이 행렬은 $[K]^T$ 의 차원과 동일한 $[K][K]^+[K]=[K], [K]^+[K][K]^-[K]^-$ 및 $[K][K]^+=[K]^+[K]=[I]$ 의 조건을 만족하는 행렬이다.

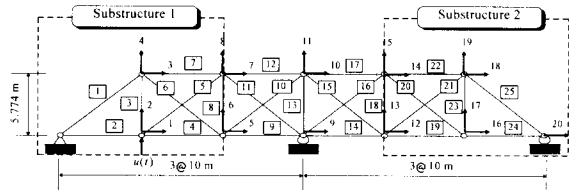
6. 예제해석 및 토의

이 방법의 검증을 위해 예제해석이 수행되었다. 예제는 2경간 트러스 구조와 3경간 연속교에 대한 수치예제 해석이 수행되었고, 3층전단빌딩 구조물을 대상으로 하여 실험적 예제해석 또한 수행되었다.

2 경간 트러스 구조

먼저 그림 5와 같은 트러스 구조물을 대상으로 전체 구조에 대한 경우와 두개의 부분 구조로 나타낸 경우로 나누어 예제 해석이 수행되었다. 가해지는 하중은 단주기와 장주기에 대한 특성을 비교하기 위하여 그림 6과 같은 입력시간이력 사용되었다. 이 경우 전체 구조계에 대한 강성추정의 경우에서의 미지수는 1660개, 부분구조의 경우는 부분구조1, 2의 각각에 대해 112개와 160개의 미지수로 나타내어 졌다. 전체 구조계에 대한 강성행렬의 추정 은 과다한 미지수의 존재로 인하여 추정결과가 수

렴하지 않음을 알 수 있었다. 반면에 표 2와 3에 나타낸 부분구조에 대한 추정결과는 상당히 우수한 결과를 보여 주었다. 또한, 그림 7에 보여진 추정된 미지계수를 이용한 재해석 시간이력은 계측된 시간이력과 매우 유사(부구조 1에 대해, \hat{y}_2 과 \hat{y}_4 의 추정오차는 0.0462, 0.0319, 부구조 2에 대해, \hat{y}_{17} 과 \hat{y}_{19} 의 추정오차는 0.0219, 0.0309; 여기서 사용된 오차식은 $\|\hat{y}-y_{ex}\|/\|y_{ex}\|$ 이다.)함을 알 수 있었다. 또한, 강성행렬의 추정결과를 이용하여 손상도 추정이 수행되었다. 이 결과는 표 4에 나타내었다. 또한, 순차적 예측오차방법의 수립성을 보이기 위하여 순차적 예측오차방법에서의 각각의 반복과정에서 구해진 강성행렬을 손상도로 변환하여 그림 8에 나타내었다. 여기서 볼 수 있듯이 순차적 예측오차방법은 미지계수의 초기가정치 벡터가 제로벡터라는 매우 부정확한 값에서부터 출발하였 음에도 훌륭히 수립하고 있음을 알 수 있었다.



$E = 2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $w = 7900 \text{ kg/m}^3$

member number	section area (10^{-3} m^2)
1, 25	2.5
2, 4, 9, 14, 19, 24	1.5
3, 8, 13, 18, 23	1.2
5, 6, 10, 11, 15, 16, 20, 21	1.0
7, 12, 17, 22	2.0

그림 5 2경간 트러스 모형

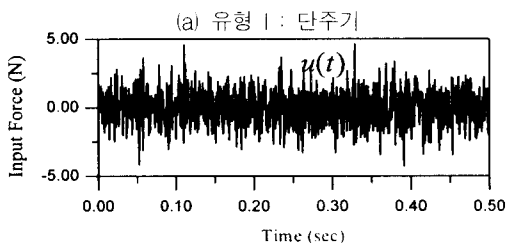
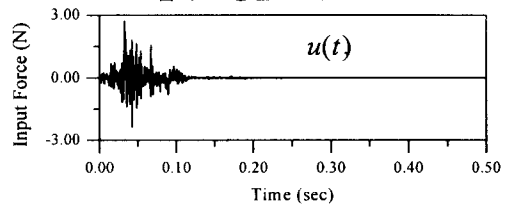
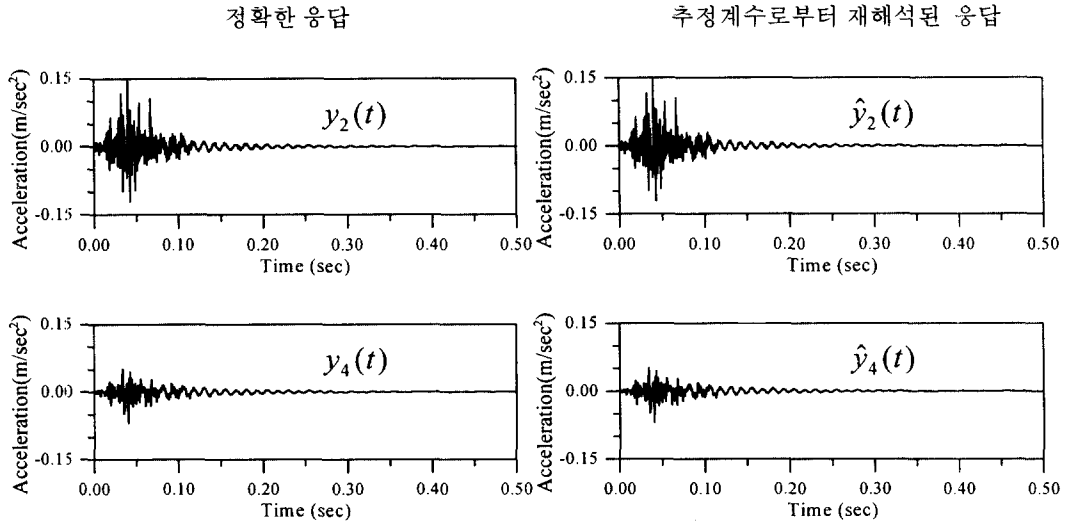
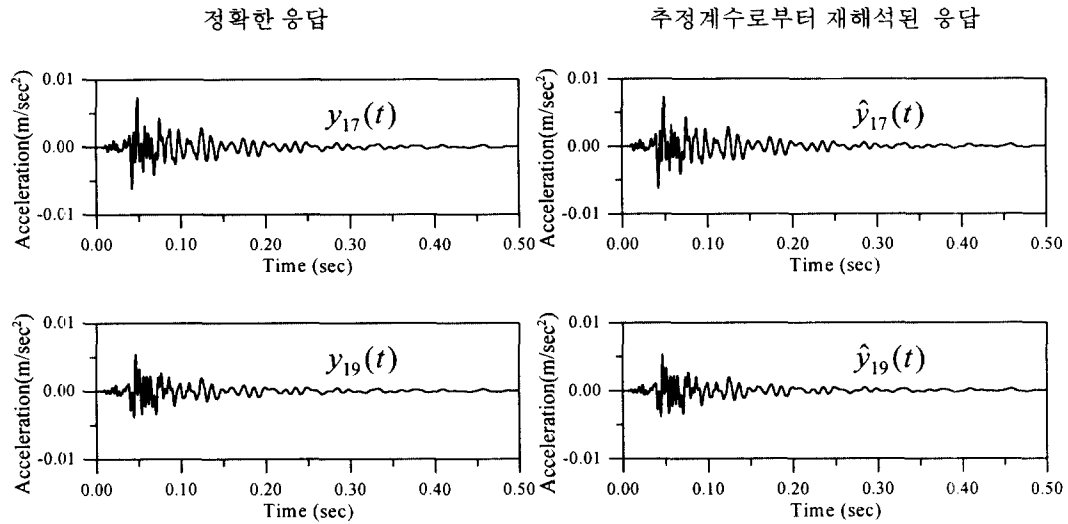


그림 6 자유도 2에 가해지는 입력하중



(a) 부구조 1에서의 가속도응답



(b) 부구조 2에서의 가속도응답

그림 7 유형 1의 하중 작용시 트러스 모형의 정확한 응답과 추정응답의 비교

표 2 추정된 감쇠 및 강성행렬 (트러스 모형 -부구조 1 : 하중유형 1)

	Damping Matrices($\times 10^{-3}$)			
Exact Value	0.058	-0.007	-0.000	0.001
	-0.019	0.190	0.018	-0.118
	-0.000	0.001	0.052	-0.003
	0.024	-0.188	-0.015	0.144
Estimated Value (w/o noise)	0.105	-0.005	0.040	-0.024
	0.003	0.195	0.032	-0.131
	0.048	0.005	0.084	-0.030
	0.013	-0.191	-0.025	0.152
Estimated Value (w/5% noise)	0.069	-0.002	0.006	0.004
	-0.036	0.162	0.022	-0.103
	0.014	0.007	0.071	-0.021
	0.021	-0.172	-0.016	0.153

	Damping Matrices($\times 10^{-3}$)			
Exact Value	0.714	-0.086	-0.003	0.019
	-0.237	2.390	0.223	-1.493
	-0.002	0.014	0.639	-0.038
	0.307	-2.371	-0.186	1.805
Estimated Value (w/o noise)	0.717	-0.057	0.020	-0.001
	-0.234	2.419	0.232	-1.514
	0.008	0.058	0.658	-0.072
	0.308	-2.397	-0.197	1.824
Estimated Value (w/5% noise)	0.717	-0.122	-0.015	0.049
	-0.223	2.201	0.148	-1.371
	-0.022	0.036	0.648	-0.051
	0.322	-2.235	-0.159	1.719

Note : $F(0) = 100I$, $\theta(0) = 0$ and $\Delta t = 0.0004$ set : No. of Global Iteration = 30

표 3 추정된 감쇠 및 강성행렬 (트러스 모형-부구조2 : 하중유형 1)

	Damping Matrices($\times 10^{-3}$)				
Exact Value	0.067	0.012	0.007	-0.013	-0.042
	0.007	0.084	-0.007	-0.059	-0.010
	0.010	0.008	0.060	-0.011	-0.047
	-0.018	-0.088	-0.001	0.086	0.034
	-0.042	-0.032	-0.028	0.045	0.076
Estimated Value (w/o noise)	0.105	-0.029	0.021	-0.001	-0.064
	-0.014	0.113	-0.017	-0.046	-0.004
	0.075	-0.060	0.087	-0.034	-0.074
	0.003	-0.088	0.007	0.090	0.008
	-0.071	-0.014	-0.040	0.059	0.095
Estimated Value (w/5% noise)	0.066	-0.022	0.009	0.008	-0.031
	-0.001	0.116	-0.017	-0.069	-0.013
	0.020	-0.059	0.069	0.013	-0.035
	-0.017	-0.118	0.009	0.110	0.038
	-0.050	-0.003	-0.038	0.048	0.076

	Damping Matrices($\times 10^{-3}$)				
Exact Value	0.826	0.154	0.090	-0.161	-0.528
	0.085	1.040	-0.086	-0.750	-0.120
	0.129	0.097	0.742	-0.133	-0.598
	-0.226	-1.110	-0.014	1.077	0.425
	-0.525	-0.407	-0.359	0.572	0.946
Estimated Value (w/o noise)	0.893	0.249	0.115	-0.253	-0.640
	0.056	0.987	-0.093	-0.697	-0.072
	0.230	0.241	0.777	-0.284	-0.764
	-0.201	-1.058	-0.008	1.028	0.380
	-0.558	-0.450	-0.372	0.616	1.002
Estimated Value (w/5% noise)	0.849	0.132	0.110	-0.147	-0.551
	0.070	1.037	-0.097	-0.740	-0.101
	0.155	0.067	0.772	-0.107	-0.630
	-0.216	-1.144	0.004	1.095	0.414
	-0.529	-0.414	-0.361	0.576	0.953

Note : $F(0) = 100l$, $\theta(0) = 0$ and $\Delta t = 0.0004$ set : No. of Global Iteration = 30

표 4 트러스 모형에서 추정된 손상도 계수

Cases		Exact	Estimated			
			w/o noise	w/5% noise	w/o noise	w/5% noise
Substruct. 1	α_1	1.000	0.984	1.175	0.978	1.037
	α_2	1.000	1.000	0.996	0.993	0.996
	α_3	0.850	0.858	0.740	0.859	0.757
	α_4	1.000	1.000	0.996	0.993	1.073
	α_5	0.800	0.855	0.778	0.855	0.764
	α_6	0.900	0.940	0.902	0.950	0.958
	α_7	1.000	1.044	0.923	1.041	1.054
Substruct. 2	α_{19}	1.000	1.009	1.306	1.145	1.257
	α_{20}	0.900	0.986	0.966	0.883	0.931
	α_{21}	0.850	0.862	0.961	0.778	0.670
	α_{22}	1.000	1.051	0.988	0.981	1.086
	α_{23}	0.800	0.794	0.800	0.989	0.752
	α_{24}	1.000	1.018	1.016	1.032	1.042
	α_{25}	1.000	1.018	1.005	1.002	0.973
Remarks			Under Input Type I		Under Input Type II	

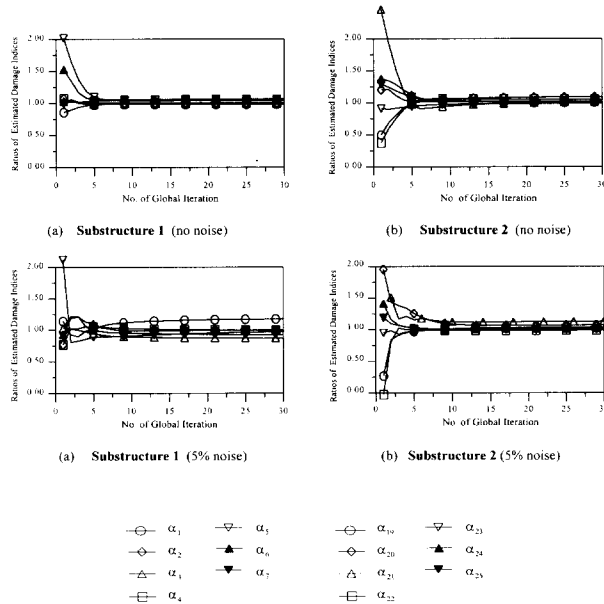


그림 8 트러스 모형에서 추정된 손상계수의 수렴성(하중유형 1)

3 경간 연속교

다음은 회전자유도의 존재에 따른 특성을 검토하기 위하여 그림 3과 같은 3경간 연속교 구조물을 대상으로 전체 구조에 대한 경우와 두개의 부분 구조로 나타낸 경우로 나누어 예제 해석이 수행되었다. 이 경우에도 전체 구조계에 대한 강성행렬의 추정은 과도한 미지수의 존재로 인하여 추정결과가 수립하지 않음을 알 수 있었다. 다음으로는 부분구조 추정법을 적용하여 각 부구조에 대한 강성행렬이 추정되었고, 추정된 강성행렬을 이용하여 손상도 추정이 수행되었다. 추정된 손상도의 결과는 표 5에 나타내었다. 이 예제에서는 회전자유도가 있는 경우에는 추정의 정확도가 약간 저하될 수 있다는 점이 관찰되었다. 그러나, 표 5에서 보이듯이 구조 손상도의 정량적인 값에 대한 정확도는 어느 정도 떨어지지만 이 경우에도 구조물에서 손상이 발생한 위치를 파악하는 데에는 충분히 도움이 될 수 있음을 알 수 있었다.

표 5 3 경간 연속교 모형에서 추정된 손상계수

		Exact Value	Estimated Value
Substructure 1	α_1	1.0000	0.9891
	α_2	1.0000	0.8274
	α_3	0.7000	0.4078
Substructure 2	α_4	0.7000	0.5025
	α_5	1.0000	1.1775
	α_6	1.0000	0.8123
	α_7	1.0000	1.1668
	α_8	0.8000	0.6513
Substructure 3	α_9	0.8000	0.6302
	α_{10}	1.0000	0.8100
	α_{11}	1.0000	0.9688

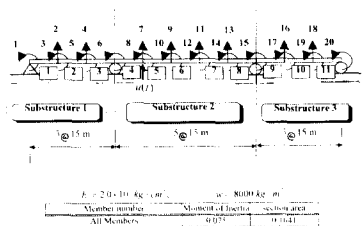


그림 9 3경간 연속교

3층 전단빌딩에 대한 실험적 예제해석

다음은 실제 구조물에 대한 적용성을 검토하기 위하여 실험적 예제해석이 수행되었다. 실험예제로는 그림 10과 같은 3층 전단빌딩에 대한 실험결과가 이용되었다. 하층은 빌딩저면에 가력기(Exciter)를 이용하여 가해졌고, 각층에서의 수평방향 가속도가 계속되었다. 계속된 입력 및 응답시간이력은 그림 11에 나타내었다. 이 경우에 대해서도 전체 구조에 대한 경우와 두개의 부분 구조로 나타낸 경우로 나누어 예제 해석이 수행되었다. 이 경우 전체 구조계에 대한 강성행렬의 추정과 부분구조에 대한 추정결과를 표 6과 7에 나타내었다. 이 결과는 가정된 값과는 약간의 차이를 보이나 전체 구조계에 대한 추정치와 각각의 부분구조에 대한 추정치가 매우 유사하여, 상당히 우수한 정확도를 보이고 있음을 알 수 있었다. 이 결과는 구조추정법을 이용하여 설계상의 가정된 구조의 강성값에 비해 보다 엄밀한 정확도를 가지는 값을 추정할 수 있음을 의미한다. 또한 이 예제에 대해서도 구해진 구조강성행렬을 값으로부터 손상도 추정이 수행되었다. 이 결과는 표 8에 나타내었다. 이때, 손상도의 기준에 대한 값으로는 각 층의 질량 6 kg, 강성이 1.67×10^4 N/m인 경우로 가정하였다. 이러한 가정은 설계상의 값으로부터 대략적으로 산출된 값으로, 추정된 결과는 대략 80%정도까지도 낮은 강성을 보일 수 있음을 알 수 있었다.

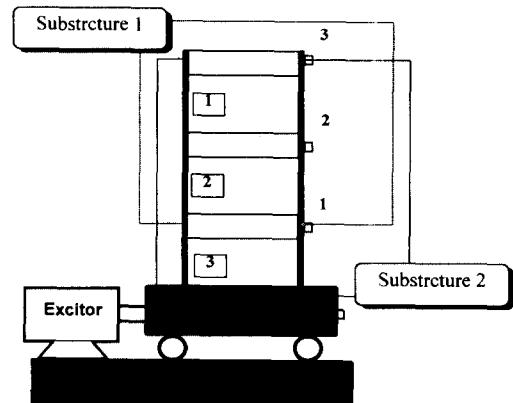


그림 10 3층 전단빌딩 실험모형

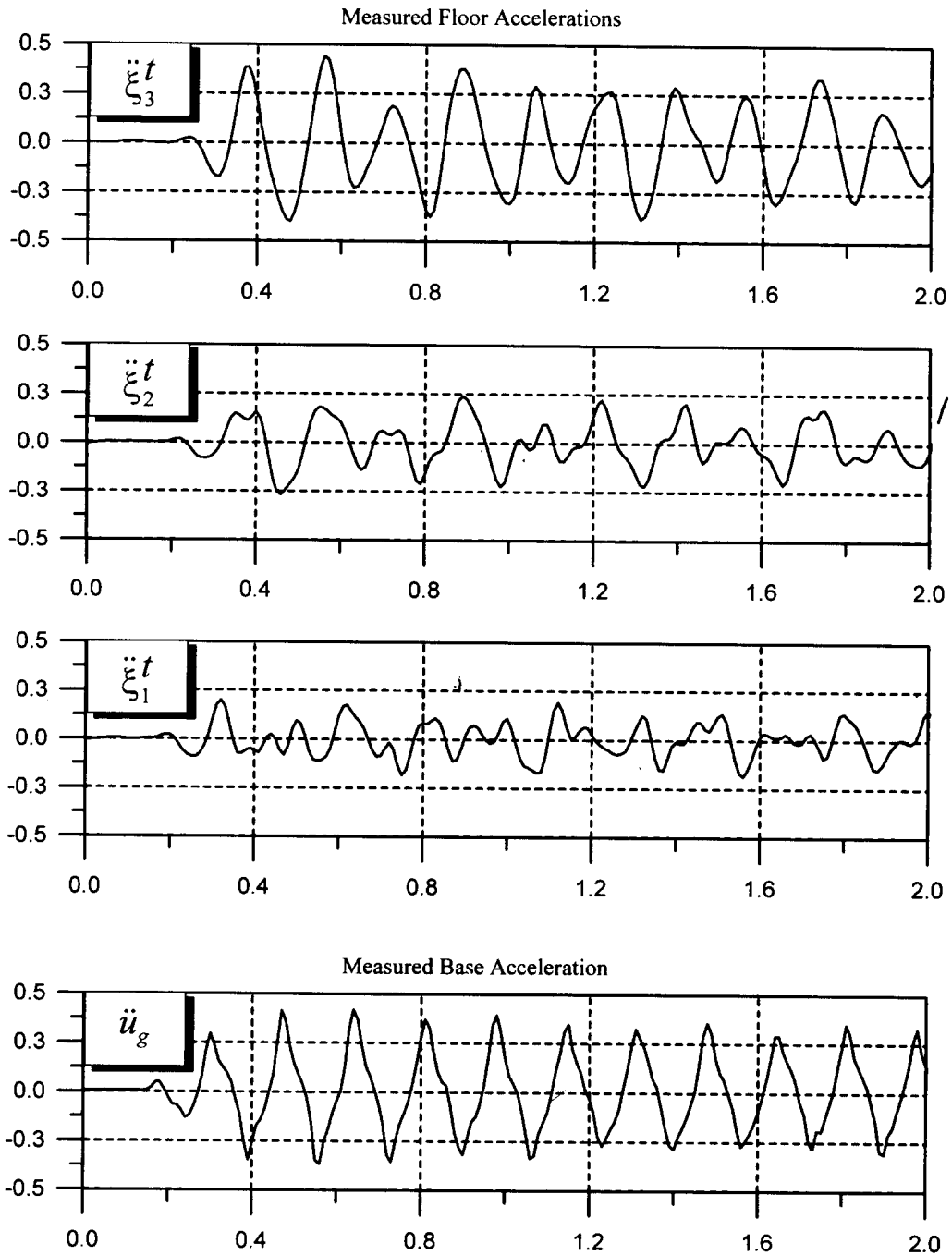


그림 11 계측된 입력/응답의 시간이력
($\Delta t=0.01$: decimated; original $\Delta t = 0.002$)

표 6 실험모형에 대한 전체구조 추정 결과

DOF	$K \times 10^{-3}$		
	3	2	1
3	2.6929	-2.7905	0.4029
2	-2.6156	5.1341	-2.3518
1	0.3449	-2.7936	4.5618

Note: Used Data Points=200; No. of Global Iteration=20

표 7 실험모형에 대한 부분구조 추정 결과

Cases	DOF	$K_{mm} \times 10^{-3}$	
Substructure 1	3	2.6700	-2.7069
	2	-2.6688	5.1362
Substructure 2	2	5.0802	-2.5507
	1	-2.5161	4.8153

Note: Used Data Points=200; No. of Global Iteration=20

표 8 실험모형에 대한 손상도 계수 추정 결과

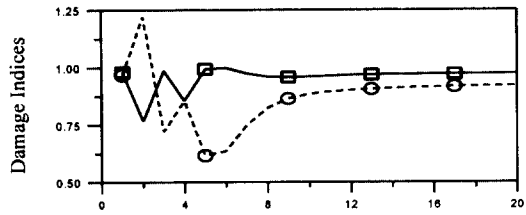
	α_1	α_2	α_3
Exact	1.0000	1.0000	1.0000
Substructure 1	0.9752	0.8925	--
Substructure 2	0.9261	0.9212	0.8298
Whole Structure	0.9726	0.9218	0.7370

Note: The Assumed Lumped Mass=6kg Stiffness= $1.67 \times 10^4 N/m$

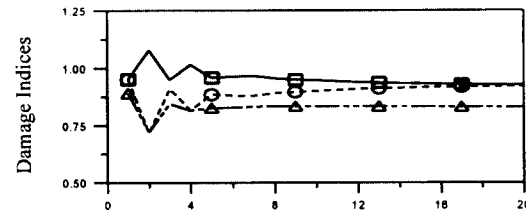
7. 결 론

본 논문에서는 부분구조 추정법을 이용하여 대형 구조계에서 효과적으로 구조손상도를 모니터링할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 구조추정법으로 순차적 예측오차방법을 적용하였으며, 이에 따른 손상도 추정방법이 개발되었다. 또한 이 방법의 효율성을 검증하기 위하여 다양한 수치모형의 실험 예제와 실험모형에 적용되었다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 유도할 수 있었다.

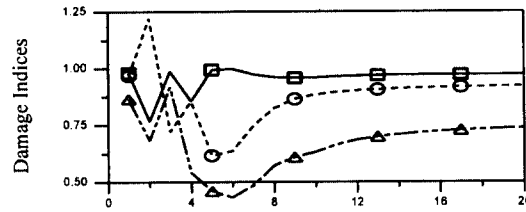
1. ARMAX 모형식에 기초한 순차적 예측오차방법은 수렴성이 매우 뛰어나 초기 가정치가 상당히 부정확한 경우에도 훌륭히 수렴함을 볼 수 있었다.



(a) 부구조 1에 대한 추정에서의 결과



(b) 부구조 2에 대한 추정에서의 결과



(c) 전체구조계에 대한 추정에서의 결과

그림 12 실험모형에서의 손상도 계수 추정의 오차
(\circ α_1 \diamond α_2 \triangle α_3)

2. 부분구조 추정법은 미지계수의 수를 대폭 줄일 수 있어, 대형구조계에 대해서도 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.
3. 또한, 부분구조 추정법은 부분구조 내부에 하중이 작용하지 않는다면, 입력하중을 계속하지 않더라도 구조추정법을 적용할 수 있음을 볼 수 있었다.
4. 일반적인 병진자유도만의 구조계에서의 계측결과를 이용하는 경우에 비해, 병진자유도와 회전자유도가 공존하는 경우에는 정확도가 다소 떨어질 수 있음을 알 수 있었다. 그러나, 이 경우에서도 구조계의 손상도 위치추정에는 사용될 수 있음을 알 수 있었다.
5. 다양한 실험오차가 존재하는 경우에 대한 실험 모형에 대해 적용한 결과에서도 이 추정방법이 상당히 우수한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. "Inspection of Fracture Critical Bridge Members," *Report No. FHWA-HI-88-038*, 1986.
2. Tanaka, T., Jono, M., and Komai, K., "Current Research on Fatigue Cracks," *Current Japanese Materials Research*, Vol. 1, 1987.
3. Tanaka, T., Nishijima S., and Ichikawa, M., "Statistical Research on Fatigue and Fractures," *Current Japanese Materials Research*, Vol. 2, 1987.
4. 鋼橋の維持管理のための設備, 鋼構造シリーズ 1, 日本土木學會, 1987.
5. 鋼土版の疲勞, 鋼構造シリーズ 4, 日本土木學會, 1990.
6. Nowak, A. S., "Diagnostic Procedures for Bridges," *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation*, Baltimore, Maryland, U.S.A., 1990.
7. "교량내하력조사(구조물안전도연구)", 건설부 국립건설시험소, 1985, 12.
8. Nishimura, A., "Examination of Bridge Substructure for Integrity," *Japanese Railway Engineering*, No. 114, June 1990.
9. 龜田弘行 外, "土木構造物の診断", 山海堂, 1991.
10. "남해대교의 안전진단", 건설부, 1993, 10.
11. "진도대교의 안전진단(최종보고서안)", 한국건설기술연구원, 1993, 9.
12. "돌산대교 안전진단 용역(최종보고서)", 연세대학교 산업기술연구소, 1993, 9.
13. Nichols, R. W., "Non-destructive Examination in Relation to Structural Integrity," *Applied Science Pub.*, London, 1979.
14. Goodwin, and Payne, R. L., *Dynamic System Identification*, Academic Press, 1977.
15. Goodwin, and Sin, K. S., *Adaptive Filtering, Prediction and Control*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1984.
16. Lee, and Yun, C. B., "Parameter Identification of Linear Structural Dynamic Systems," *J. of Computers and Structures*, 1991.
17. Yun, C.-B., Lee, H.-J., and Lee, C.-G., "Sequential Prediction Error Method for Structural Identification," *J. of Eng. Mech.*, Vol. 123, No. 2, ASCE, 1997.
18. Wilson, J. C., and Liu, T., "Ambient Vibration Measurements on a Cable-Stayed Bridge," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.20, 1991.
19. Bao, Z.W., and Ko, J.M., "Determination of Modal Parameters of Tall Buildings with Ambient Vibration Measurements," *The Int. J. of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 6(1), 1991, 57-68.
20. 민진기, 김형기, 홍규선, 윤정방, "구조물 손상의 추정을 위한 Inverse Modal Perturbation", 대한토목학회 논문집, 제10권 제4호, 1990.12.
21. Hong, K-S., and Yun, C-B., "Improved Methods for Frequency Domain Identifications of Structures," *Eng. Struct.*, Vol. 15, No. 3, 1993.
22. Koh, C. G., See L. M., and Balendra, T., "Estimation of Structural Parameters in Time Domain : A Substructure Approach," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol.20, 1991, 787-801.
23. Andres, W. C. Oreta, and Tanabe, T., "Localized Identification of Structures by Kalman Filter," *Str. Eng./Earthquake Eng.* JSCE, Vol.9, No. 4, Jaunary, 1993, 217s-225s.
24. Wang, D., and Haldar, A., "Element-Level System Identification with Unknown Input," *J. of Eng. Mech.*, ASCE, Vol.120, No.1, January, 1994, 159-176.
25. Stetson, K.A. and Harrison, I.R., "Redesign of Structural Vibration Modes by Finite-Element Inverse Perturbation," *J. of Eng. for Power*, ASME, 103, 1981, 319-325.
26. Kim, K.-O., Anderson, W. J., and Sandstorm, R.E., "Nonlinear Inverse Perturbation Method in Dynamic Analysis," *AIAA Journal*, 21(9), 1983, 1310-1316.
27. Natke, H.G., *Identification of Vibrating Structures*, Springer-Verlag, N. Y., 1982.
28. Hagiwara, I., Arai, A., and Nagabuchi, K., "Study of a Structure Identification Method Using Sensitivity Analysis for a Vibration," *Finite Elements in Analysis and Design*, 14,

- 1993, 111-126.
29. Torkamani, M.A.M., and Ahmadi, A.K., "Stiffness Identification of a Tall Building during Construction Period Using Ambient Test," *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, 16, 1988, 1177-1188.
 30. Kim, J. T., "Assessment of Relative Impact of Model Uncertainty on the Accuracy of Nondestructive Damage Detection in Structures," Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engrg., Texas A & M University, 1993.
 31. Yao, G.C., Chang, K.C., and Lee, C.C., "Damage Diagnosis of Steel Frames Using Vibrational Signature Analysis," *J. of Engrg Mech., ASCE*, 118(9), 1992, 1949-1961.
 32. Tsou, P., and Shen, M.-H. Herman, "Structural Damage Detection and Identification Using Neural Networks," *AIAA Journal*, 32(1), January 1994.
 33. Samman, M. M., and Biswas, M., "Vibration Testing for Nondestructive Evaluation of Bridges. I : Theory," *J. of Struct. Engrg, ASCE*, Vol. 120, No. 1, 1994, 269-289.
 34. Hjelmstad, K.D., and Banan, M.R., "Time-Domain Parameter Estimation Algorithm for Structures. I : Computational Aspects," *J. of Engrg Mech., ASCE*, 121(3), 1995, 424-434.
 35. Hoshiya, M., and Sutoh, A., "Kalman Filter-Finite Element Method in Identification," *J. of Engrg Mech., ASCE*, 119(2), 1993, 197-210.
 36. Straser, E. G., and Kiremidjian, A. S., "Monitoring and Evaluating Civil Structures Using Measured Vibration," *Proc. of IMAC96*, Feb. 12-16, 1996, Dearborn.
 37. Yun, C.B., Kim, W. J., and Ang, A.H-S., "Damage Assessment of Bridge Structures by System Identification," *Proc. of the 5th ICOSSAR*, San Francisco, CA., 1989.