

비선형근사필터에 의한 강구조시험체의 지진응답추정 및 동특성식별

Seismic Response Estimation and System Identification of Test Steel Structure Using Approximate Nonlinear Filter

배기환* 김두영**
Bae, Gi Hwan Kim, Doo Young

국문요약

대상으로 하는 시스템의 입출력신호에 근거하여, 시스템의 수학적 모델을 결정하는 것을 총칭하여 시스템식별이라 한다. 본 논문에서는 지진외란과 지진응답 관측치를 입출력신호로 하여 조건부기대치를 최적치로 판단하는 비선형근사필터법을 사용한 건축구조물의 지진응답추정 및 파라미터식별에 관하여 논한다. 비선형근사필터법에 의한 건축구조물식별의 유효성 및 적용성을 판단하기 위해, 진동대를 사용하여 강구조시험체의 진동실험을 행하고, 결과적으로 얻어진 시험체의 수학적 모델에 대한 지진응답 수치해석결과와 진동실험에서의 관측기록을 비교하여 본 식별법의 타당성을 보인다.

주요어 : 시스템식별, 비선형근사필터, 조건부기대치, 진동실험

ABSTRACT

System identification is to determine mathematical models of target system based on input-output signal data. In this paper, we identified the parameters and estimated the seismic responses of building structure using approximate nonlinear filter method, in which optimal parameter are taken as the values to minimize the errors of measured and estimated responses. Particularly, in order to verify the efficiency of this method, the vibration experiments on a steel structure were conducted and the simulated seismic responses of the estimated structure model were compared with the observed ones under the same excitation. It was observed that the experimental results coincided with the analyzed ones proposed in this paper.

Key words : system identification, approximate nonlinear filter, conditional mean, vibration experiment

1. 서론

기존건물의 지진응답관측기록에 근거하여 미관측된 부분의 지진응답추정 및 구조물의 동적파라미터 즉 강성계수와 감쇠계수를 추정하는 파라미터식별은 지진이 자주 발생하는 지역의 구조물안전성평가와 지진응답제어시스템⁽¹⁾의 설치에 중요한 문제로 부각되어지고 있다. 그러나, 일반적으로 구조물의 지진응답관측에 있어서, 관측점이 제한되어 있는 것, 관측기록에 관측잡음이 포함되어 있는 것 그리고 절대가속도응답을 관측하는 것 등에 의해, 구조물의 안전성평가와 지진응답제어에 필요한 상태량을 직접적으로 얻는 것이 곤란하다. 그러므로 보다 적합한 구조물의 상태량을 얻기 위해 확률론적 관점으로부터의 파라미터식별 및 지진응답추정이 요구되어진다.

구조물의 파라미터식별문제를 해결하는 방법으로는 周波數領域에서의 식별法, 확장카르만필터法⁽²⁾, 비선형근사필터법⁽³⁾ 등이 있다. 周波數領域에서의 식별法은 관측잡음을 고려하는 것이 곤란하고 지진응답制御에 필요한 실시간 상태량이 얻어지지 않는 문제점을 갖고 있으며, 확장카르만필터

法은 구조물의 파라미터를 變數로 취급하는 과정에서 필연적으로 생기는 시스템의 비선형성을 等價線形化하기 때문에 解의 精度가 떨어진다. 한편 비선형근사필터법은 이론의 어려움 때문에 건축구조물의 식별문제에 대한 연구에 많이 적용되지 않았다.

본 논문에서는 비선형근사필터법에 근거하여, 관측위치가 한정되고 관측잡음을 포함하고 있는 입출력데이터를 이용해 건축구조물의 동적 파라미터 및 지진응답을 추정하는 이론식을 전개하며, 또한 日本 京都大學 防災研究所에 설치되어 있는 진동대를 이용한 강구조시험체의 진동실험을 행하여 본 이론의 타당성을 검증한다.

2. 非線型近似필터법에 의한 파라미터식별의 定式化

일반적인 非線型動力學의 확률론적 推定문제의 기초방정적인 시스템방정식과 관측방정식은 Ito型확률미분방정식으로 다음과 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$dZ_t = F_t(Z_t)dt + G_t dW_t \quad Z_{t_0} = Z_0 \quad (1)$$

$$dY_t = H_t(Z_t)dt + R_t dV_t \quad Y_{t_0} = Y_0 \quad (2)$$

여기서,

Z_t : 狀態벡터변수

* 정회원 · 경동대학교 건축공학부, 전임강사(대표저자 : hwan@kyungdong.ac.kr)

** 경동대학교 건축공학부, 조교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

Y_t : 出力벡터변수
 F_t, H_t : 状態변수 Z_t 에 관련된 비선형벡터함수
 R_t, G_t : 잡음의 크기를 나타내는 행렬함수
 W_t, V_t : 잡음을 나타내는 브라운운동過程

단, 브라운운동過程의 증분 dW_t 와 dV_t 는 정규확률변수이고, 초기치 Z_0 와 Y_0 는 서로 독립인 것으로 가정한다.

확률론적추정문제는 최적추정치를 구하는 것이기 때문에 미지파라미터와 추정치와의 오차에 대한 평가규범인 평가함수가 필요로 된다. 이런 평가함수에는 여러 가지가 생각되어질 수 있으나 본 논문에서는 오차노름(norm)을 평가함수로 하는 最小誤差分散法을 채용한다. 오차노름은 다음 식처럼 정의되어 진다.

$$L(\xi) = \xi^T S \xi \tag{3}$$

여기서, S 는 가중치行列을 나타낸다.

최적추정치는 오차노름(norm)의 평균값을 최소로 하는 것이기 때문에, 다음식을 최소로 하는 추정치가 최적추정치로 정의될 수 있다.

$$E\{L\} = E\{E\{(Z_t - \mu_t + \mu_t - \hat{Z}_t)^T S (Z_t - \mu_t + \mu_t - \hat{Z}_t) / Y_t\}\} \tag{4}$$

여기서, $\mu_t = E\{Z_t / Y_t\}$

μ_t 와 추정치 \hat{Z}_t 는 관측데이터 Y_t 를 조건으로 하는 조건부 여평균값에 대하여 일정하기 때문에 다음식이 성립한다.

$$\begin{aligned} E\{(Z_t - \mu_t)^T S (\mu_t - \hat{Z}_t) / Y_t\} \\ = (\mu_t - \hat{Z}_t)^T S E\{(\mu_t - \hat{Z}_t) / Y_t\} \\ = (\mu_t - \hat{Z}_t)^T S (\mu_t - \mu_t) = 0 \end{aligned} \tag{5}$$

또한 $E\{(Z_t - \mu_t)^T S (Z_t - \mu_t)\}$ 가 추정치 \hat{Z}_t 에 독립이기 때문에 오차노름의 평균치는 다음 식과 같이 된다.

$$E\{L\} = const + E\{(\mu_t - \hat{Z}_t)^T S (\mu_t - \hat{Z}_t)\} \tag{6}$$

위식에서 S 가 가중치行列이기 때문에 오차노름의 평균치는 추정치 \hat{Z}_t 이 μ_t 와 같을 때 최소가 됨을 알 수 있다. 결국, 시간구간 $[t_0, t]$ 에서의 관측데이터 Y_t 가 주어질 때의 상태변수 Z_t 의 최적추정치는 最小誤差分散法에 의해 다음식과 같은 조건부여 기대치로 주어진다.

$$\hat{Z}_t = E\{Z_t / Y_t\} = \langle Z_t \rangle_t = \int_{R^n} dZ_t Z_t p_t(Z_t / Y_t) \tag{7}$$

그러나, 위 식의 조건부여 확률밀도함수를 직접 결정하는 것이 어렵기 때문에 본 논문에서는 확률모멘트방정식을 수치적으로 풀음으로서 최적추정치를 구하도록 한다. 상태벡터

변수 Z_t 로 이루어진 2계미분 가능한 임의의 함수 $\Phi(Z_t)$ 의 조건부여평균은 확률모멘트를 나타내는 일반식으로 표현될 수 있다.

$$\langle \Phi(Z_t) \rangle_t = \int_{R^n} dZ_t \Phi(Z_t) p_t(Z_t / Y_t) \tag{8}$$

한편, 상태벡터변수 Z_t 가 Markov벡터過程 이기 때문에 상태벡터변수 Z_t 의 임의의 함수 $\Phi(Z_t)$ 의 조건부여기대치가 다음식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} d_t \langle \Phi(Z_t) \rangle_t &= \langle L_Z \Phi(Z_t) \rangle_t dt \\ &+ \langle \Phi(Z_t) \{ H_t^T(Z_t) (R_t(Z_t) R_t^T(Z_t))^{-1} \\ &+ \{ H_t^T(Z_t) (R_t(Z_t) R_t^T(Z_t))^{-1} \} \}_t dv_t \\ &+ \left\langle \frac{\partial}{\partial Z_t} \left\{ \Phi(Z_t) G_t(Z_t) J_t R_t^T(Z_t) (R_t(Z_t) R_t^T(Z_t))^{-1} \right\} \right\rangle_t dv_t \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} L(\cdot) &= \sum_{i=1}^n F_i \frac{\partial}{\partial Z_i} (\cdot) \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2}{\partial Z_i \partial Z_j} [(\cdot) (GG^T)_{ij}] \\ &= \left\{ \frac{1}{2} \left((GG^T) \frac{\partial}{\partial Z_t} (\cdot) \right)^T + F_t(Z_t)^T \right\} \frac{\partial}{\partial Z_t} (\cdot) \end{aligned} \tag{10}$$

$$dv_t = dY_t - \langle H_t(Z_t) \rangle_t dt \tag{11}$$

여기서,

L_Z : 상태벡터변수 Z_t 에 대한 後退演算子
 dv_t : 이노베이션過程
 J_t : dW_t 와 dV_t 의 共分散行列

본 논문에서는 시스템의 입력잡음과 관측잡음이 서로 독립적이라고 가정하기 때문에 식 (9)의 마지막 항이 생략되어 진다. 또한 임의의 함수 $\Phi(Z_t)$ 을 Z_t 라 하면 상태벡터변수 Z_t 의 최적추정치는 다음식처럼 유도되어 진다.

$$d_t \langle Z_t \rangle_t = \langle F_t(Z_t) \rangle_t dt + K_t dv_t \tag{12}$$

여기서,

$$\begin{aligned} K_t &= \langle \hat{Z}_t \hat{H}_t^T(Z_t) \rangle_t (R_t R_t^T)^{-1} \\ \hat{Z}_t &= Z_t - \langle Z_t \rangle_t \\ \hat{H}_t(Z_t) &= H_t(Z_t) - \langle H_t(Z_t) \rangle_t \end{aligned}$$

최적치에 대한 확률미분방정식이 식 (12)와 같이 주어지나 고차의 共分散행렬이 포함되므로, 2次이상의 조건부여 중앙모멘트함수를 정의하여 조건부여 확률모멘트방정식을 유도한다. 식 (13)은 고차의 조건부여 중앙모멘트함수를 나타내며, 식 (14)는 유도되어진 조건부여 확률모멘트방정식이다.

$$\tilde{M}_t(l_1, l_2 \dots l_n) = \left\langle \prod_{i=1}^n \tilde{Z}_t^{l_i} \right\rangle_t, \quad \prod_{i=1}^n l_i \geq 2 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} d_t \tilde{M}_t(l_1, l_2 \dots l_n) &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n l_i l_j Q_t^* \left\langle \tilde{Z}_t^{-1} \tilde{Z}_t^{-1} \prod_{s=1}^n \tilde{Z}_t^{l_s} \right\rangle_t dt \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n l_i (l_i - 1) Q_t^* \left\langle \tilde{Z}_t^{-2} \prod_{s=1}^n \tilde{Z}_t^{l_s} \right\rangle_t dt \\ &+ \sum_{i=1}^n l_i \left\langle F_t^*(Z_t) \tilde{Z}_t^{-1} \prod_{s=1}^n \tilde{Z}_t^{l_s} \right\rangle_t dt \\ &+ \sum_{i=1}^k \left\langle \tilde{H}_t(Z_t) \prod_{s=1}^n \tilde{Z}_t^{l_s} \right\rangle_t (R_t R_t^T)^{-1} dv_t \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,

$$Q_t^* = G_t G_t^T + K_t R_t R_t^T K_t^T$$

$$F_t^* = \tilde{F}_t(Z_t) - K_t \tilde{H}_t(Z_t)$$

$$K_t = \left\langle \tilde{Z}_t \tilde{H}_t^T(Z_t) \right\rangle_t (R_t R_t^T)^{-1}$$

위의 summation 기호의 n과 k는 각각 전 상태변수벡터 및 관측벡터의 次元을 나타낸다.

결국 최적추정치는, 최적추정치에 대한 식 (12)의 조건부여 확률모멘트미분방정식과 推定誤差共分散에 관한 식 (14)의 조건부여 확률모멘트미분방정식을 연립하여 수치적으로 풀음으로 해를 구하는 것이 가능하게 되어진다. 위의 방법에 의해 최적치를 구하는 추정법을 非線型近似필터법이라 한다. 그러나, 구조물의 동특성을 나타내는 파라미터를 확률변수로서 취급하는 식별문제에 있어서는 구조물의 운동방정식을 선형영역에서 정의하여도 전체시스템방정식과 관측방정식이 비선형의 형태로 존재하고 식 (14)의 조건부여 확률모멘트미분방정식에 고차의 統計量이 연속적으로 발생하기 때문에 직접적으로 연립미분방정식을 푸는 것이 불가능해진다. 이때문에 고차의 統計量에 대한 近似化를 행할 필요가 있다. 본 논문에서는 조건부여 확률미분방정식의 상태변수를 가우스분포로 가정하여, 2차이상의 高次統計量을 2차의 共分散으로 近似化한다.⁽⁵⁾ 자세한 식의 전개는 참고문헌에 맡긴다.

$$E[\tilde{Z}_1 \tilde{Z}_2 \dots \tilde{Z}_{2m+1}] = 0 \quad (15)$$

$$E[\tilde{Z}_1 \tilde{Z}_2 \dots \tilde{Z}_{2m}] = \sum E[\tilde{Z}_j \tilde{Z}_k] E[\tilde{Z}_l \tilde{Z}_s] \quad (16)$$

3. 鋼構造骨組試驗體의 식별實驗

본 논문에서는 1자유도의 鋼構造骨組試驗體를 대상으로 지진과 가진실험을 행하여, 시험체의 지진응답관측기록과 추정치를 비교하였으며, 관측기록에 근거하여 비선형근사필터에 의해 강성계수와 감쇠계수를 추정하였다(단위는 공학단위를 사용함). 시험체의 높이와 기둥 간격은 100cm로 하였고, 실건물과 어느 정도 유사한 진동주기를 갖도록 하기 위해

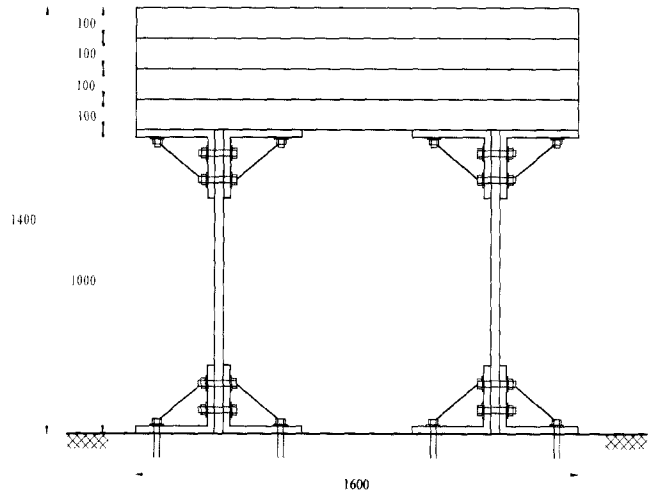


그림 1 강구조시험체의 외관

2tonf 중량의 강판을 4개 겹쳐서 올려놓았다. 시험체 기둥의 치수로부터 구한 기둥 한 개의 강성은 강축(3.93tonf/cm), 약축(2.28tonf/cm) 이었다. 시험체의 상세는 그림 1에 보이고 있다. 지진과 가진실험은 일본의 京都大學 防災研究所에 설치되어 있는 테이블 사이즈 5.0m×3.0m, 최대지지중량 15tonf의 전기·유압서버방식의 진동대를 이용하였다. 계측시스템으로서의 진동대 및 강판에 반도체형의 소형가속도계를 설치하여 입력 및 출력데이터로 이용할 가속도를 관측하였으며, 추정응답값과 실험값의 비교를 행하기 위해 可視光레이저센서를 강판에 설치하여 변위를 측정하였다.

위의 실험체를 단자유도모델로 가정하여 다음과 같은 시스템방정식을 도출한다.⁽⁶⁾ 여기서, 상태변수 Z_t 는 변위, 속도, 감쇠계수, 강성계수이다.

$$\dot{Z}_t = F_t(Z_t) + G_{te} N_t \quad (17)$$

$$Z_t = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ c \\ k \end{Bmatrix}, \quad F_t(Z_t) = \begin{Bmatrix} -\frac{c}{m} y - \frac{k}{m} x - \ddot{x}_g \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$G_t = \begin{Bmatrix} \sqrt{e Q_t} r_t \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

한편, 시험체의 절대가속도를 관측값으로 취급할 경우 다음과 같은 관측방정식이 얻어진다.

$$\dot{Y}_t = H_t(Z_t) + R_{t0} N_t \quad (18)$$

$$H_t(Z_t) = \begin{Bmatrix} y \\ -\frac{1}{m}(cy + kx) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad R_t = \begin{Bmatrix} \sqrt{0 Q_t} r_t \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

여기서, $e N_t, 0 N_t$ 는 단위스펙트럼강도를 갖는 白色雜音이고 $e Q_t, 0 Q_t$ 는 잡음의 크기를, r_t 는 포물선함수를 나타낸

다. \ddot{x}_g 는 지진외란을 의미하고 \dot{Y}_t 는 관측되어진 시험체의 절대가속도이다. m 은 시험체의 질량을 나타낸다.

위의 행렬함수를 식 (13)과 식 (14)에 대입하는 것에 의해 본 시험체에 대한 최적치의 확률미분방정식과 조건부여 확률모멘트방정식이 얻어진다. 상태변수를 가우스분포로 가정하고 있기 때문에 조건부여 확률모멘트방정식은 2차의 통계량만으로 정리되어 진다. 두 식의 연립미분방정식을 실시간으로 풀어서 상태변수 즉 변위와 속도, 감쇠계수와 강성계수를 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle \dot{Z}_t \rangle_t &= \langle F_t(Z_t) \rangle_t + \\ &\langle \dot{Z}_t \hat{H}_t^T(Z_t) \rangle_t (R_t R_t^T)^{-1} (\dot{Y}_t - \langle H_t(Z_t) \rangle_t) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \langle \dot{Z}_t \cdot \dot{Z}_t^T \rangle_t &= \{ \langle \dot{F}_t(Z_t) \dot{Z}_t^T \rangle_t + \langle \dot{Z}_t \hat{F}_t(Z_t)^T \rangle_t G_t G_t^T \\ &- \langle \dot{Z}_t \hat{H}_t(Z_t)^T \rangle_t (R_t R_t^T)^{-1} + \langle \hat{H}_t(Z_t) \dot{Z}_t^T \rangle_t \} \\ &+ \langle \dot{Z}_t \dot{Z}_t^T \hat{H}_t(Z_t)^T \rangle_t (R_t R_t^T)^{-1} (\dot{Y}_t - \langle H_t(Z_t) \rangle_t) \end{aligned} \quad (20)$$

본 식별實驗에서는 일본 Hasin-Awaji 지진시 일본의 기상청에서 관측한 지진파(이하 JMA Kobe 波라 명함)를 최대가속도가 50gal이 되도록 스케일 다운하여 진동대의 入力波로 사용하였다.⁷⁾ 加振시간은 40.96초로 하였고 샘플링 시간간격은 0.01초로 하여 각 채널당 4096개의 데이터를 얻었다. 비선형근사필터에 의한 구조물의 파라미터식별에서는 각 파라미터에 대한 초기값이 필요함으로 부재사이즈로부터 구한 값을 기준치로 하였다. 표 1에 시험체의 질량, 강성계수 및 감쇠계수를 표기한다. 단 질량은 정확히 구할 수 있으므로 확정치로 사용하였다. 시험체의 파라미터 값이 기준치보다 작거나 클 수 있으므로 각각의 값을 과대평가한 경우와 과소평가한 경우에 대해서도 해석을 하여 각 경우에 대한 推定경향을 비교하였다. 강성계수는 기둥부재의 사이즈와 탄성계수로부터 어느 정도 추측이 가능함으로 기준치에 ± 5 를 더하여 과대평가 및 과소평가에 대한 초기값으로 사용하였다. 한편 감쇠정수는 일반적으로 부재치수로부터 그 값을 추정하는 것이 곤란하기 때문에 1차모드의 감쇠정수를 2%로 가정한 강성비례형감쇠계수를 초기값으로 사용하였다. 표 2에 각 경우의 해석에서 이용한 파라미터의 초기값을 보인다.

표 1 부재사이즈로부터 구한 시험체의 계수값

	질량 (tonf · sec ² /cm)	강성계수 (tonf/cm)	감쇠계수 (tonf · sec/cm)
강축	0.0091	15.7	0.015
약축	0.0091	9.22	0.012

표 2 식별해석에 이용된 파라미터의 초기값

	강성계수(tonf/cm)	감쇠계수(tonf · sec/cm)
과소평가	5.87	0.001
기준값	15.7	0.015
과대평가	20.0	0.1

4. 식별實驗結果 및 考察

본 실험에서는 위에서 설명한 것과 같이 시험체의 강성계수와 감쇠계수를 추정하기 위해, 부재사이즈로부터 구한 값(강성계수와 감쇠계수)을 기준값으로 하여 과소평가된 경우와 과대평가된 경우의 강축(X축) 및 약축(Y축) 각각에 대하여 독립적으로 파라미터식별을 행하였다. 강축 및 약축에 대한 해석결과의 정도가 거의 같으므로 여기에서는 강축에 대한 결과만을 보인다. 그림 2는 강축의 강성계수에 대한 추정결과를 그림 3은 감쇠계수에 대한 추정결과를 나타내고 있다. 강성계수와 감쇠계수의 초기값으로서 기준값과 그에 대한 과대평가값과 과소평가값을 설정하여도 각각이 일정한 값에 수렴해 가는 것을 알 수 있다. 표 3에 각 경우에 대한 추정결과값을 표시하였다. 결과값들이 서로 잘 일치하고 있는 것으로부터 강구조골조시험체의 동특성계수에 대한 추정이 올바르게 행해졌다고 판단할 수 있다. 그림 4는 비선형근사필터법에 의해 추정된 변위응답과 실관측기록과의 비교를 보이고 있다. 추정된 변위응답과 관측기록이 잘 일치하고 있음을 그림으로부터 알 수 있다. 위의 직접적인 비교방법에 의해서도 본 파라미터식별법의 타당성을 알 수 있으나, 신뢰성을 더하기 위하여, 추정 되어진 파라미터(강성계수와 감쇠계수)를 이용한 가속도응답의 동적해석결과와 관측기록의 비교를 그림 5에 나타내었다. 반면, 그림 6에는 부재사이즈로부터 구한 파라미터에 근거하여 해석되어진 가속도응답의

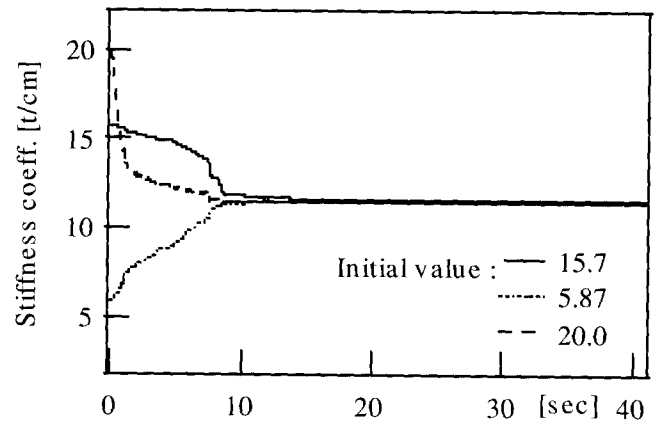


그림 2 강성계수의 추정

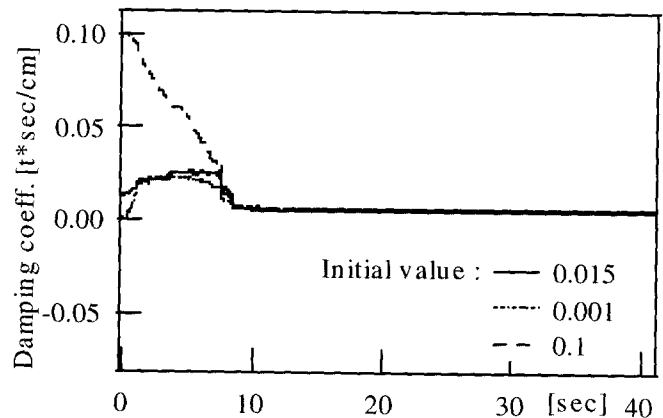


그림 3 감쇠계수의 추정

동적해석결과와 관측기록과의 비교를 보이고 있다. 그림 7은 위의 두 경우에 대한 전달함수를 구하여 관측기록으로부터 구한 전달함수와 비교를 보이고, 표 4에 시험체의 고유진동수를 표기하였다. 그림 5와 그림 6의 비교와 그림 7로부터, 본 파라미터식별법에 의해 얻어진 해석결과가 실험기록을

정도 높게 재현하고 있음을 알 수 있다. 위에서 추정된 파라미터값을 이용한 동적해석이 다른 입력파에 대해서도 정도 높게 재현하는 것을 알아보기 위해 JMA Kobe 200gal 입력에 대한 진동실험을 행하여 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 그림 8은 변위응답에 대한 비교로, 그림 9는 가속도응답에

표 3 초기값으로부터 구해진 파라미터의 추정값

	강성계수(tonf/cm)	감쇠계수(tonf · sec/cm)
과소평가	11.48	0.0057
기준값	11.65	0.0052
과대평가	11.52	0.0059

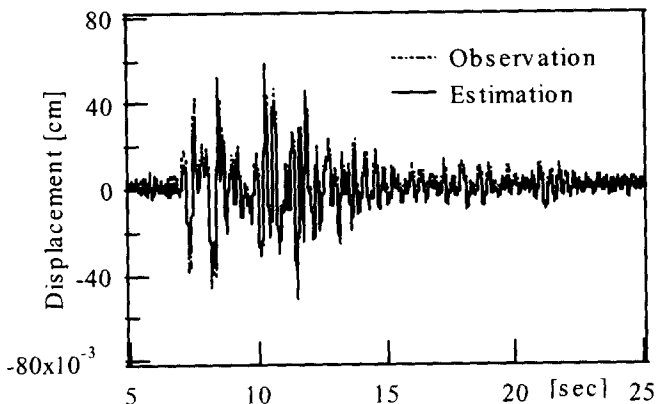


그림 4 변위응답에 대한 관측치와 추정치의 비교

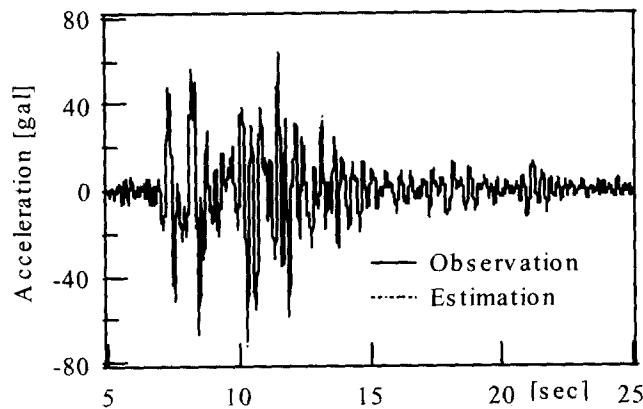


그림 5 가속도응답에 대한 관측치와 추정치의 비교

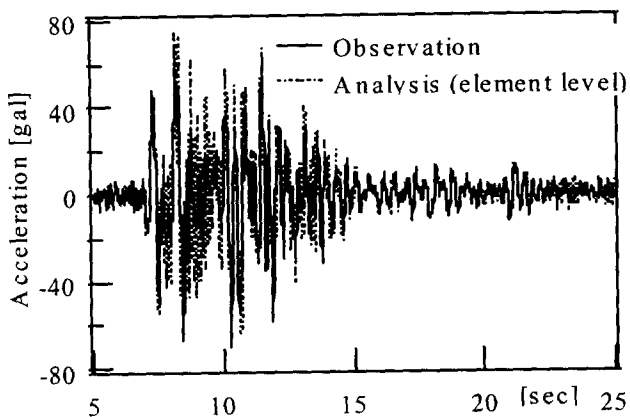


그림 6 가속도응답에 대한 관측치와 부재 사이즈로부터 구한 동적 해석결과와의 비교

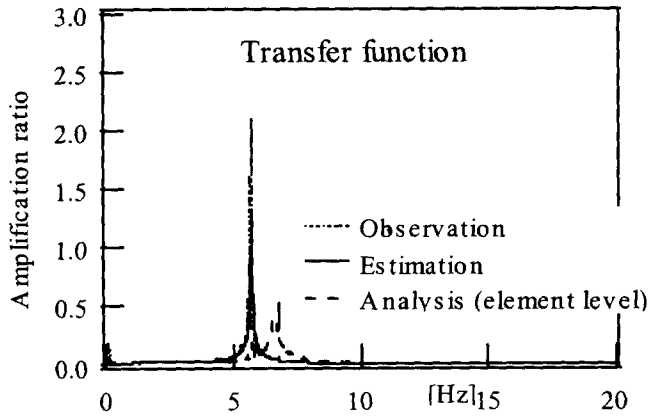


그림 7 각 경우에 대한 전달함수의 비교

표 4 시험체의 고유진동수

	실험결과	부재사이즈	추정결과
강축	5.69Hz	6.61Hz	5.71Hz
약축	3.76Hz	5.06Hz	3.76Hz

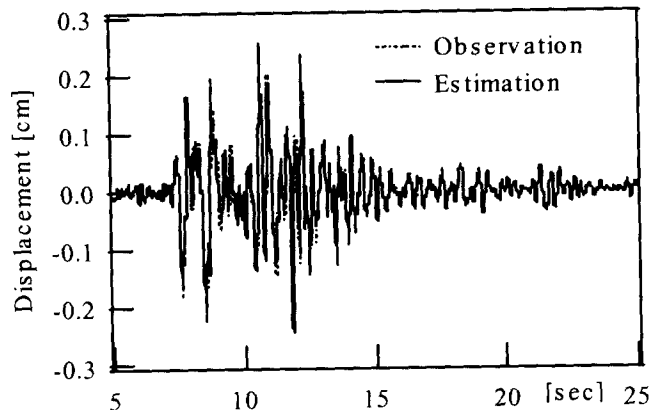


그림 8 JMA Kobe 200gal 입력시의 변위응답에 대한 관측치와 추정치의 비교

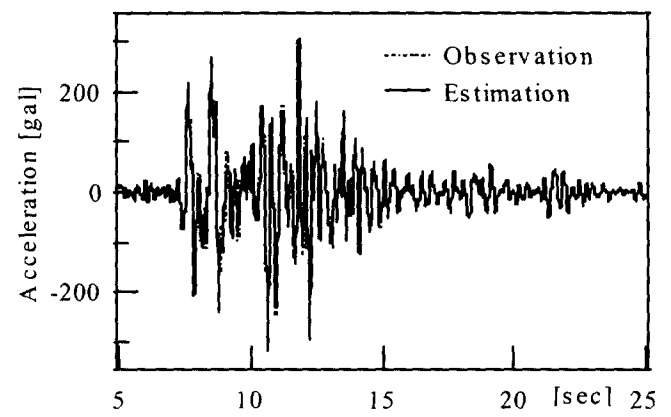


그림 9 JMA Kobe 200gal 입력시의 가속도응답에 대한 관측치와 추정치의 비교

대한 비교로서 관측기록과 해석결과가 잘 일치하고 있음을 보인다. 이러한 결과들은 비선형근사필터법이 구조물의 파라미터식별 및 지진응답추정에 매우 유력한 방법임을 보이고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 비선형근사필터법을 이용하여 강구조시험체의 지진응답추정 및 동특성파라미터의 식별을 행하였다. 우선 JMA Kobe 50gal 波를 입력한 진동실험에서 관측된 가속도응답기록을 이용하여, 미관측된 변위와 속도응답을 추정하였고 시험체의 동특성을 나타내는 강성계수와 감쇠계수를 추정하였다. 이의 결과로부터 시험체의 모델링을 행하였고 JMA Kobe 200gal 波를 입력으로 하는 진동실험으로부터 시험체 모델의 정확성을 검증하였다. 위의 실험결과에 대한 검증으로부터 알 수 있듯이, 추정된 지진응답이 실관측된 응답기록을 정도 높게 재현하였고, 동특성파라미터의 초기치를 기준치에 비해 과대 또는 과소평가하여도 추정하고자 하는 파라미터값이 모두 일정치에 수렴하였다. 또한 추정되어진 파라미터에 의해서 구한 시험체모델의 수치해석결과는 JMA Kobe 200gal 波 입력시의 진동실험관측결과를 거의 정확히 재현하고 있는 것을 보였다. 이러한 결과들로부터 비선형근사필터법이 구조물의 지진응답추정 및 동특성식별에 매우 유력하게 사용할 수 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 裴起煥, 鈴木祥之, "同定および可變ゲイン制震の振動臺實驗", 日本建築學會構造系論文集, 第527号, 2000, pp. 35-43.
2. Toki, K., Sato, T., and Kiyono, J., "Identification of structural parameters and input ground motion from response time histories," *Proceedings of JSCE Structural Eng.*, Vol. 6, No. 2, 1989, pp. 243-251.
3. Suzuki, Y. and Minami, R., "Stochastic damage and reliability analysis of hysteric multi-degree of freedom structures," *Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo and Kyoto, Vol. 8, 1984, pp. 459-466.
4. Jazwinski, A. H., *Stochastic Processes and Filtering Theory*, Academic Press, New York, 1970.
5. Lin Y. K., *Probabilistic Theory of Structural Dynamics*, McGraw-Hill Book Co., New York 1967.
6. 裴起煥, 鈴木祥之, "多自由度構造物の確率論的同定に関する研究", 日本建築學會近畿支部研究報告書, 第35号, 構造系, 1995, pp. 265-268.
7. Bae, G. H. and Suzuki, Y., "Stochastic identification of building structure using response accelerations of the 1995 hyogoken-nanbu earthquake," *Proceedings of the 27th ISCE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications*, 1995, pp. 19-24.