구조물의 자유진동특성 추정을 위한 실험적 연구

Experimental Study on Modal Parameter Estimation of Structures

윤 정 방*
Yun, Chung-Bang
이 형 진**
Lee, Hyeong-Jin

요 약

기존 대형구조물의 안전진단에 관련하여 구조계의 동적계수를 실험적으로 추정하는 방법이 연구되었다. 시간영역방법인 순차적 예측오차방법과 주파수영역의 방법인 주파수응답함수 추정법이 비교검토되었다. 기법의 검증은 2 Bay 3층 구조물 모형에 대해서 수행되었는데, 각 실험적 방법에 의한 추정결과는 일관된 추정치를 보이었다. 그러나, 유한요소법에 의한 결과와는 차이를 보이었다. 이 차이는 구조해석시 절점조건에 대한 부적절한 모형화에 기인한 것으로 사료된다.

Abstract

As for the safety evaluation of existing large-scale structures, methods for the estimation of structural and dynamic properties are studied. Sequential prediction error method in time domain and frequency response function estimators in frequency domain are examined. For this purpose, impact tests are performed on a steel frame structure with 2 bays and 3 floors. Results from both methods are found to be consistent to each others. however those from the finite-element analysis are slightly different from the experimental results. The discrepancies may be caused by the improper modeling of the complex behavior at the connection joints of the model structure.

1. 서 론

실제구조물의 구조적 특성은 여러가지 원인으로 인하여, 최초 설계당시의 특성과 많이 다른 것이 보통이다. 실험적 방법을 통해 이러한 변화된 동특성을 찾아내고, 그 결과를 구조해석 및 진단에 응용하는 방안을 연구하는 분야가 System Identification이다. 이 방법은 크게 주파수영역에서의 방법과 시간영역에서의 방법으로 대별해 볼 수 있다. 주파수영역의 방법은 수치적인 안정성이나 정확도가 시간영역의 방법에 비해 우수한 편이나, 응용의 범위가 제한되어 있고 매우 많은 계측기록을 요구하는 방법이다. 이에 비해 시간영역의 방법은 실시간(On-line) 추정이 가능하고, 비교적 적은 계측기록으로도 계수추정이 가능하다는 장점이 있다. 본 논문에서는 새로이 개발된 주파수

* 한국과학기술원 토목공학과 교수
** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

이 논문에 대한 토론을 1995년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 1995년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

영역과 시간영역에서의 동특성추정방법을 실험적으로 검증하고, 각 방법이 가지는 특징을 고찰하려 한다.

주파수 영역의 방법으로는 기존의 $H_0(f)$, $H_1(f)$, $H_2(f)$[4]외에 비교적 새로인 개발된 $H_3(f)$[8]와 $H_4(f)$[5]를 고차하였고, 시간영역에서의 방법으로는 순차적 예측오차방법(Sequential Prediction Error Method)[1, 2]을 사용하여 구조물의 동특성을 추정하는 방법을 고찰하였다. 일반적으로 시간영역방법은 그 수행방식에 따라 일괄처리방법(Batch 또는 Off-line Process)과 순차적 처리방법(Sequential 또는 On-line Process)의 2가지로 나누어 생각할 수 있다. 일괄처리방법은 입력과 응답의 계측기록을 한꺼번에 처리하는 방법으로, 이 방법에 속하는 것은 LS(Least Square), IV(Instrumental Variable), ML(Maximum Likelihood)등의 방법이 있다. 순차적처리방법은 계측기록을 매시점마다 한단계씩 읽어가며 이를 이용하여 미지계수의 추정을 개선시키어 가는 방식으로, 실시간(On-Line)방법이라고도 불리운다. 이 방법에는 순차적예측오차방법외에 RLS(Recursive Least Square)방법과 EKF(Extended Kalman Filter)방법이 있다. 일괄처리방법에 비해 순차적 방법은 적은 데이타량으로도 비교적 우수한 계수추정결과를 얻을 수 있다는 효율성의 측면과 중간계산과정에서 비정상상태로 인한 확률적 특성의 변화를 고려할 수 있는 장점이 있다.

2. 주파수영역 동특성추정법

주파수영역에서 동특성을 추정하는 과정은 먼저 주파수응답함수(Frequency Response Function : FRF)를 추정한 후, 이를 바탕으로 모우드계수(자유진동수, 감쇠계수 및 모우드형상)를 추정하는 방법이 사용된다. 이 방법에서 주파수응답함수는 기본적으로 식(1)과 같이 구해진다.

$$H_0(f) = Y(f) / X(f) \qquad (1)$$

여기서, X(f)와 Y(f)는 각각 계측된 입력과 응답의 Fourier 변환함수를 나타낸다. 입력과 응답기록에 계측오차가 포함되지 않은 경우에 $H_0(f)$는 정확한 주파수응답함수 H(f)의 추정치가 되지만, 계측오차성분의 존재로 인하여 정확한 주파수응답함수를 구할 수 없다. 따라서, 일반적으로는 식(2)나 식(3)과 같은 추정함수를 사용한다[4].

$$H_1(f) = S_{xy}(f) / S_{xx}(f) = H(f) / (1 + S_{mm}(f) / S_{uu}(f)) \qquad (2)$$

$$H_2(f) = S_{yy}(f) / S_{yz}(f) = H(f) / (1 + S_{nn}(f) / S_{vv}(f)) \qquad (3)$$

여기서 m과 n은 입력과 응답의 계측오차이고, x=u+m, y=v+n이다. 또한 $S_{uu}(f)$, $S_{vv}(f)$, $S_{xx}(f)$, $S_{yy}(f)$, $S_{mm}(f)$과 $S_{nn}(f)$는 Power Spectra Density(PSD)함수 : $S_{xy}(f)$과 $S_{yx}(f)$는 Cross Spectral Density 함수이다. $H_1(f)$과 $H_2(f)$는 공진주파수영역과 비공진주파수영역에 대해 다른 성질을 가진다. 공진영역에서는 $H_2(f)$의 추정치가 정확한 반면, 비공진주파수 영역에서는 $H_1(f)$이 우수한 편이다. 따라서, 이러한 성질을 조합하여 제안된 주파수응답추정함수가 아래의 $H_3(f)$와 $H_4(f)$이다[5, 8].

$$H_3(f) = \frac{H_2(f)[\gamma_{xy}^2(f)F(f) / |H_1(f)|^2 + 1]}{F(f) / |H_1(f)|^2 + 1} \qquad (4)$$

$$H_4(f) = (1 - W(f))H_1(f) + W(f)H_2(f) \qquad (5)$$

여기서, F(f)와 $\gamma_{xy}(f)$는 각각 Normalizing 함수와 Coherence 함수이고, W(f)는 가중함수이다[5].

3. 시간영역 동특성추정법

순차적 예측오차 방법[1, 2, 3]은 선형 다자유도계의 시간영역에서의 구조계수 추정 및 모우드계수 추정방식으로 사용되어 왔다. 이 방식은 기존의 RLS 방법에 비하여 더 우수한 수렴성을 갖는 특성과 함께, EKF 방법에서 야기될 수 있는 문제점들(추정값의 편기, 추정과정의 발산)을 극복

했다는 점에서 높이 평가될 수 있는 방법이다.

구조계의 동특성은 질량, 감쇠 및 강성행렬로 이루어진 구조적 특성계수와 자유진동수, 자유진동 모우드, 모우드 감쇠계수로 구성된 모우드 특성계수로 나누어 고려할 수 있다. 구조계의 운동은 다음절에서와 같이 연속시간영역에서의 운동방정식 또는 이산시간영역에서의 입력과 응답간의 관계식으로 표현된다. 이러한 관계식은 순차적 예측오차방법을 사용하기위해 ARMAX (Auto-Regressive and Moving Averge Model with Auxiliary Input) 모형식으로 변환되어 ARMAX 모형의 계수가 추정된 후, 이 계수들로부터 원래의 구조계 특성계수나 모우드 특성계수가 구해진다. 이때, 구조계수행렬의 추정을 위해서는 전 자유도에 대한 응답기록이 필요하게 되는데, 이는 실제 실험에서는 다소 부적절하다. 따라서, 본 연구에서는 모우드 계수의 추정에 대하여 중점을 두었다.

3.1 운동방정식

일반적으로 n 차원의 자유도를 가진 선형구조계의 운동방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_0\ddot{\xi}(t)+C_0\dot{\xi}(t)+K_0\xi(t)=L_0\,u(t) \qquad (6)$$

여기서, $\xi(t)$, $\dot{\xi}(t)$와 $\ddot{\xi}(t)$는 n 차원의 응답벡터이고, u(t)는 m 차원의 입력벡터이다. 또한 M_0, C_0와 K_0는 각각 질량, 감쇠, 강성행렬이고, L_0는 입력 계수행렬이다.

3.2 실험적 모우드식

식(6)으로 부터 유도되는 진동모우드는 감쇠의 특성에 따라 비례감쇠의 경우와 비비례감소의 경우로 나눌 수 있다. 비비례 감쇠의 경우는 모우드식이 연계되며, 감쇠효과를 포함한 복소모우드형상(Complex Mode Shape)에 의해 표현된다. 일반적으로 실험에서 얻은 계측기록이 이산시간영역에서의 값이므로, Z-변환을 사용하여 운동방정식(6)은 식(7)과 같은 이산계의 관계식인 실험적 모우드식(Experimental Modal Equation)으로 변환될 수 있다.

$$y(k)=\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\gamma_i\Psi_i\Psi_i^T}{z-\mu_i}+\frac{\gamma_i^*\Psi_i^*\Psi_i^{*T}}{z-\mu_i^*}\right]L_0u(k)+Du(k) \qquad (7)$$

여기서, Ψ는 복소모우드 형상이고, μ는 자유진동수와 관계있는 이산시간영역의 극점이다. 그리고 z는 Forward operation을 나타내는 Z-변환의 연산자이고(즉 ; $z\,u(k)=u(k+1)$,)(*)는 공액복소수를 나타낸다. 또한 $\mu=\exp(\lambda_i\Delta t)$이고 γ_i는 y(k)가 $\xi(t)$이면 $(\mu_i-1)/\lambda_i$, y(k)가 $\dot{\xi}(t)$이면 (μ_i-1), 그리고 y(k)가 $\ddot{\xi}(t)$이면 $(\mu_i-1)\lambda_i$의 관계를 가지는데 λ_i는 연속시간영역에서의 고유치를 나타내고, Δt는 Sampling Time을 나타낸다.

식(7)에 계측오차를 고려하면 ARMAX 모형식을 구성할 수 있고, 이는 식(8)과 같은 예측오차모형식으로 나타낼 수 있다[1,2,3].

$$y(k) = \Phi(k)^T\theta + e(k,\theta) \qquad (8)$$

여기서 $\Phi(k)$는 계측된 데이타로 구성된 기지의 회귀행렬(Regression Matrix)이고, θ는 구해야 할 미지의 ARMAX 계수로 구성된 벡터이며, $e(k,\theta)$는 예측오차벡터이다.

3.3 순차적 예측오차방법

순차적 예측오차방법의 유도는 식(9)와 같은 추계론적 구조계를 가정하여 시작한다.

$$y(k) = \hat{y}(k,Y(k-1),\,U(k),\theta)+e(k) \qquad (9)$$

여기서, y(k)는 n 차원의 측정응답벡터 ; u(k)는 m 차원의 측정입력벡터 ; Y(k-1)는 집합 {y(k-1), y(k-2),…,y(0)} ; U(k)는 집합 {u(k), u(k-1), …,u(0)} ; θ는 p차원의 계수벡터 ; e(k)는 E{e(k)/Y(k-1), U(k)}=0을 만족하는 n 차원의 예측오차벡터이다. 식(9)에서 y(k, Y(k-1), U(k),θ)는 주어진 Y(k-1)과 U(k)에 대한 $\hat{y}(k)$의 조건부 기대치(Conditional Expectation) 또는 최적예측치(Optimal Predictor)이다.

모든 시간에 대하여 예측오차 e(k)가 영이 되는 계수벡터 θ를 구하는 것은 불가능하다. 그러므로

다음 식(10)과 같이 예측오차의 자승의 합을 목적함수로 정하여 이를 최소화하는 θ를 구하는 방식을 사용하였다.

$$V_N(\theta)=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{N}\{y(k)-\hat{y}(k,\theta)\}^T\{y(k)-\hat{y}(k,\theta)\}$$
$$=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{N}\{e(k,\theta)\}^T\{e(k,\theta)\} \quad (10)$$

여기서, N은 데이타의 갯수이다. 위의 최소화 과정을 순차적으로 수행할 때, 아래와 같은 순차적 계수추정방법이 유도된다.

$$\hat{\theta}(k+1-=\hat{\theta}(k)+F(k+1)\Psi(k)\{e(k+1,\hat{\theta}(k))\}$$

$$F(k+1)^{-1}=F(k)^{-1}+\Psi(k)\Psi(k)^T$$
$$\text{with } F(0)=\beta\cdot I_p(\beta>0)$$

여기서 $\Psi(k)=-\frac{de(k+1,\theta)}{d\theta}\Big|_{\theta=\hat{\theta}(N)}$ (11)

여기서, $\Psi(k)$는 Negative Gradient 행렬로서 θ에 대한 예측오차 $e(k,\theta)$의 민감도를 나타내는 행렬이고, F(k)는 Adaptation Gain행렬로서 매시점에서 θ의 추정치를 개선시킬 때 $\Psi(k)\{e(k+1,\hat{\theta}(k))\}$의 값을 어느 정도 반영시킬 것인가를 결정하는 행렬이다. 순차적 예측오차 방법에서 F(k)는 수렴성에 매우 크게 영향을 미치는 값이다. k번째 Step에서 계측치의 오차가 큰 경우는 F(k)의 값이 작아 $e(k+1,\hat{\theta}(k))$를 작게 고려하고, 계측치의 오차가 작은 경우는 F(k)의 값이 커서 $e(k+1,\hat{\theta}(k))$를 크게 고려하는 것이 좋다. 따라서, 다음 절에 논의될 계수추정의 수렴성 향상방법들은 결과적으로 F(k)값을 개선시키는 효과를 나타낸다.

3.4 계수추정의 개선을 위한 기법

추정값의 정확도는 초기치 특성이나 실측자료의 길이에 따라 수렴의 정도가 달라지게 된다. 이러한 순차적 예측오차방법의 수렴성을 향상시키기 위하여, 여러가지 방법이 사용되었다. 이 방법들은 결과적으로 식(11)으로 Adaptation Gain값을 구하는 방식을 적절히 보완함에 의해 이루어진다.

Exponential Data Weighting[1,2,3]

미지계수추정의 실행초기에는 추정된 계수값들이 오차가 상당히 큰 반면, 추정이 상당히 진행된 후에는 추정오차가 줄어든다. 따라서, 식(10)에서 현단계의 예측오차에 더 큰 비중을 두어 목적함수를 구성함으로써 부정확한 과거의 오차의 영향을 줄일 수 있다. 이는 식(12)과 같이 Adaptation Gain행렬을 구하는 식을 변경하는 것으로 나타난다.

$$F(k+1)^{-1}=a(k+1)F(k)^{-1}+\Psi(k)\Psi(k)^T \quad (12)$$

이때, $a(k)=1-\alpha_0(1-a(k-1))<1$이고, 일반적으로 $a(0)=0.95\sim1.0$, $\alpha_0=0.99$가 사용된다.

Global Data Weighting[1,2,3]

실험자료의 길이가 짧아서 순차적 추정값이 충분히 수렴하기에 부족할 때, 마지막 단계에서의 추정치를 초기값으로 사용하여 계수추정을 재차 수행시키는 방법이다. 이 때, Exponential Data Weighting방법과 같이 전단계에서 얻은 Adaptation Gain행렬에 1보다 작은 상수(a)를 곱하는 기법을 사용하면, 아래와 같은 식을 얻게된다.

$$F(N_0+1)^{-1}=aF(N_0)^{-1}+\Psi(N_0)\Psi(N_0)^T \quad (13)$$

여기서 N_0는 실측자료의 길이이다.

Square Root Estimation[1, 2, 3]

순차적 방법에서 Adaptation Gain Matrix의 계산은 식(12)에 따르며, 이 방법에서는 매 시간마다 차원이 큰 행렬(p×p)의 역행렬을 구하는 것이 요구된다. 따라서, F(k)의 수치특성이 나빠져 이 행렬의 정치성(Positive Definiteness)이 상실될 수 있고, 결과적으로 순차적 기법이 발산될 수 있다. 본 논문에서는 이를 극복하기 위하여 Square Root Estimation방법을 사용하였다. 이 방법은

Cholesky Decomposition과 역행렬공식(Matrix Inversion Lemma)을 사용하여, 역행렬의 계산과정을 Scalar양의 역수계산으로 전환시킨 것이다. 이 방법은 F(k)의 정치성을 유지시켜서 순차적 예측오차방법의 수렴을 보장하도록 만든다.

4. 실험적 검토

4.1 실험 모형과 방법

대형구조물에 대한 동특성 추정방법을 실험적으로 검증하기 위하여 3층이고 2 Bay를 가진 철골구조를 선택하였다. 실험체는 강재로 제작됐으며, 형상과 제원은 그림 1과 표 1과 같다.

실험방법으로는 충격햄머를 이용하여 3개의 가진점(1,2,3)을 가진하고, 각각의 경우에 대하여 4개의 계측점($y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$, $y_4(t)$)에 가속도계를 설치하여 수평방향의 가속도를 측정하는 방식을 택하였다. 아울러, 유한요소 해석을 수행하여 실험적 결과와 해석적 결과를 비교하였다. 그림 2는 유한요소 해석모형의 절점을 보이고 있으며, 이로부터 얻어진 자유진동 해석결과는 3번째 모우드까지를 표2와 3에 보이었고, 6번째까지의

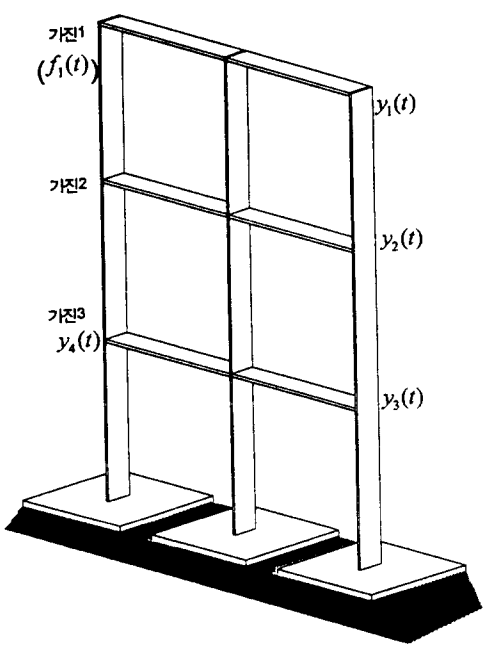

그림 1. 실험모형과 가진 및 응답계측지점

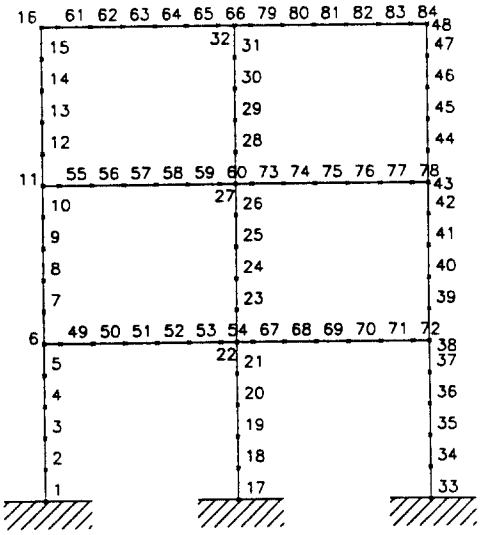

그림 2. 유한요소해석을 위한 절점

표 1. 실험모형의 제원

제원	A(cm^2)	1(cm^4)	M(kg/cm)
기둥	6.00	0.180	0.0471
휨부재	9.00	0.6075	0.0707

표 2. 구조해석결과－자유진동수

모우드	자유진동수(Hz)
1	5.462
2	16.521
3	26.440

표 3. 구조해석결과－모우드 형상

계측점	Φ_1	Φ_2	Φ_3
1	1.000	1.000	1.000
2	0.798	−0.423	−1.609
3	0.4033	−1.041	1.355
4	0.4033	−1.041	1.355

모우드를 그림 3에 나타내었다. 시간이력의 계측은 Sampling Frequency를 1000Hz로 선택하였으며, 6초까지 계측하였다(총 6000개의 데이타). 주파수 영역추정법에서의 Ensemble Average를 위해 5번 실험을 수행하여 5 set의 시간이력을 계측하였다. 계측된 시간구간내에서 응답이 충분히 감쇠하지 않았으므로, 구조계의 감쇠계수를 효율적으로 추정하기 위하여 지수감쇠가중(Exponential

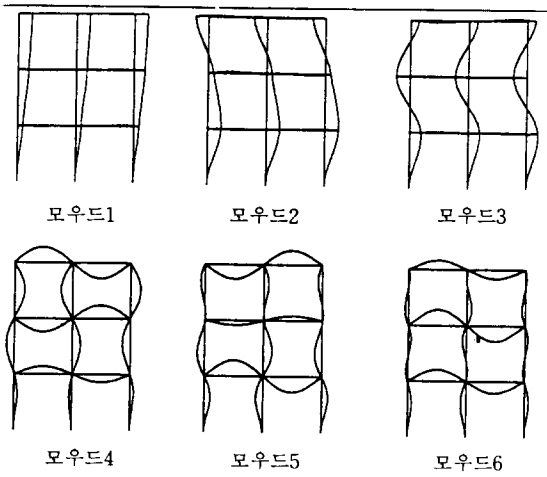

그림 3. 구조해석으로 부터 구해진 모우드 형상

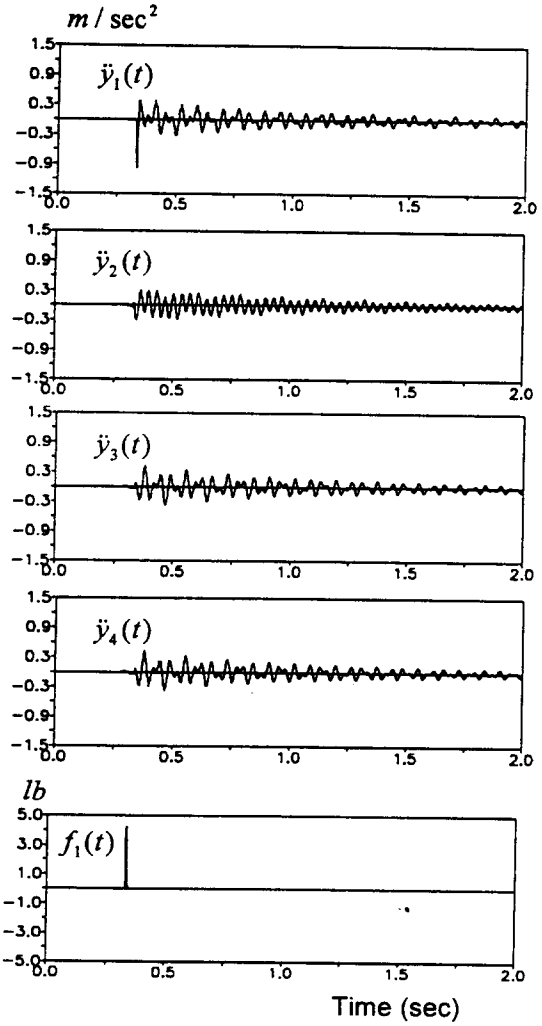

그림 4. 계측된 입력 및 응답의 시간이력
(가진 1:지수감쇠함수로 가중된 시간이력)

Windowing)방법[10]이 사용되었다. 지수감쇠함수로 가중된 계측시간이력의 한 경우를 그림 4에 보이었다.

주파수영역에서의 동특성추정법을 위해서는 계측된 5 set의 계측이력을 모두 사용하였으며, 시간영역에서는 1 set의 이력을 선택하여 그중 1000개의 데이타만을 이용하였다. 두 방법의 결과를 비교하기 위하여 주파수영역에서만이 아니라 시간영역에서도 지수감쇠함수로 가중된 계측시간이력을 사용하였다.

4.2 실험결과분석 및 토의

4가지의 주파수응답함수추정법으로 구한 주파수응답함수는 그림 5에 보이었고, 이를 이용하여

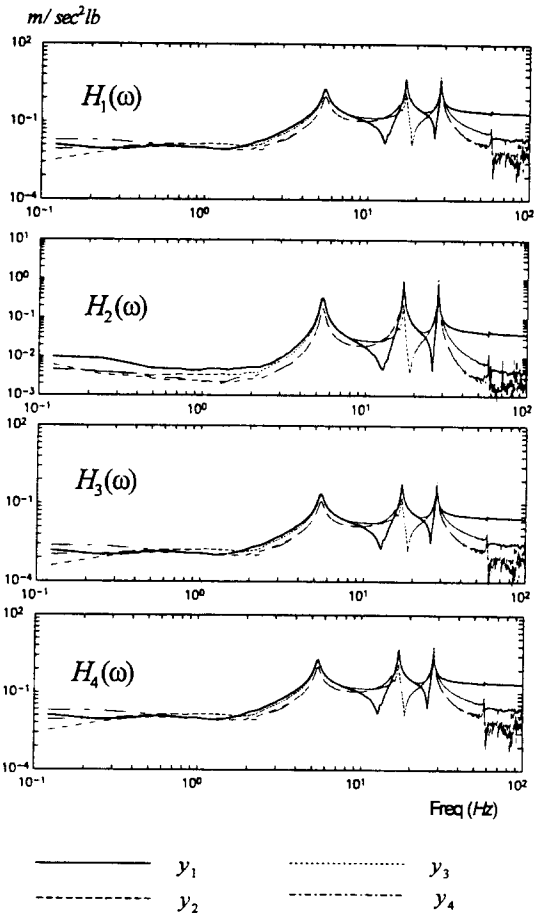

그림 5. 추정된 주파수응답함수의 비교(가진1)

표 4. 각FRF에 대하여 추정된 자유진동수와 감쇠비(가진 1)

계측점	계측점 1(y_1)	
FRF	f_i(Hz)	ξ_i
$H_0(\omega)$	5.481	0.0247
	17.078	0.0089
	28.162	0.0054
$H_1(\omega)$	5.481	0.0247
	17.078	0.0089
	28.088	0.0072
$H_2(\omega)$	5.481	0.0247
	17.078	0.0089
	28.162	0.0054
$H_3(\omega)$	5.481	0.0245
	17.078	0.0089
	28.162	0.0054
$H_4(\omega)$	5.481	0.0228
	17.078	0.0087
	28.162	0.0054

표 5. 각FRF에 대하여 추정된 모우드 형상계수(가진 1)

FRF		모우드 1	모우드 2	모우드 3
$H_0(\omega)$	y_1	1.000	1.000	1.000
	y_2	0.856	−0.274	−1.543
	y_3	0.503	−1.100	1.100
	y_4	0.500	−1.098	1.091
$H_1(\omega)$	y_1	1.000	1.000	1.000
	y_2	0.855	−0.274	−1.544
	y_3	0.503	−1.100	1.100
	y_4	0.500	−1.098	1.091
$H_2(\omega)$	y_1	1.000	1.000	1.000
	y_2	0.856	−0.274	−1.544
	y_3	0.503	−1.100	1.100
	y_4	0.501	−1.098	1.090
$H_3(\omega)$	y_1	1.000	1.000	1.000
	y_2	0.853	−0.272	−1.544
	y_3	0.490	−1.100	1.100
	y_4	0.488	−1.098	1.090
$H_4(\omega)$	y_1	1.000	1.000	1.000
	y_2	0.856	−0.274	−1.543
	y_3	0.503	−1.100	1.100
	y_4	0.501	−1.098	1.090

구한 모우드 계수는 표 4와 5에 정리하였다. 그림 6의 Coherence함수를 보면, 추정하려는 3번째 모우드까지의 주파수영역(약 30Hz이하)에 대하여 계측기록의 상태는 비교적 양호한 것으로 판단된다. 시간영역에서는 계측된 신호로부터 모우드 계수가 직접 구해졌으며, 이를 표 6에 보이엇다. 표 4, 5와 6에서 보인 주파수영역과 시간영역에서의

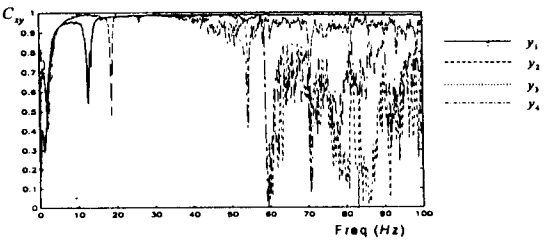

그림 6. 추정된 Coherence 함수(C_{xy}) (가진1)

표 6. 시간영역의 방법에 의해 추정된 모우드 계수들의 비교

		가진 1		가진 2		가진 3	
f_1	ξ_1	5.432	0.0271	5.455	0.0206	5.413	0.0350
f_2	ξ_2	17.097	0.0093	17.067	0.0119	17.077	0.0091
f_3	ξ_3	28.135	0.0054	28.134	0.0053	28.140	0.0054
모우드1	y_1	1.000	(0)	1.000	(0)	1.000	(0)
	y_2	0.897	(1)	0.785	(2)	0.846	(2)
	y_3	0.565	(2)	0.457	(4)	0.552	(7)
	y_4	0.499	(7)	0.476	(1)	0.593	(10)
모우드2	y_1	1.000	(0)	1.000	(0)	1.000	(0)
	y_2	0.265	(178)	0.278	(184)	0.278	(181)
	y_3	1.180	(174)	1.082	(183)	1.092	(182)
	y_4	1.153	(171)	1.058	(185)	1.101	(184)
모우드3	y_1	1.000	(0)	1.000	(0)	1.000	(0)
	y_2	1.569	(178)	1.550	(182)	1.552	(179)
	y_3	1.100	(4)	1.094	(3)	1.092	(5)
	y_4	1.112	(6)	1.082	(6)	1.111	(7)

(*) 1. 자유진동수의 단위는 Hz이다.
2. ( )안의 값은 복소모우드의 위상각을 나타낸 값으로, 단위는 Degree이다.

추정결과는 서로 매우 유사한 방면, 표 3의 유한요소 해석결과와는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 실험체 접합부에서의 조건이나 모형제작상의 제반조건을 유한요소해석에서 적절히 나타내지 못한 이유로 판단된다. 시간영역의 방법으로 구해진 결과가 사용된 측정데이타가 매우 적었음에도 불구하고 주파수영역의 결과와 비교할 때 상당히 정확함을 알 수 있는데, 이는 다른 시간영역의 방법으로는 매우 구하기 어려운 우수한 결과이다. 또한, 비교적 좋은 계측기록과 지수감쇠가중으로 인한 계측오차의 감소로 인해, 새로운 주파수영역방법($H_4(f)$)이 가지는 우수성을 뚜렷하게 관찰할 수는 없었으나, $H_4(f)$의 결과가 안정된 예측치를 주고 있음은 관찰할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 주파수영역방법에서는 여러 set의 시간이력 데이타가 필요한 반면, 안정되고 정확도가 우수한 계수추정결과를 보이었다.

(2) 시간영역방법에서의 순차적 예측오차방법은 짧은 시간이력 데이타로도 비교적 우수한 계수추정결과를 줌을 알 수 있었다.

(3) 지수감쇠가중기법은 주파수영역추정결과만이 아니라 시간영역에서의 추정결과도 상당히 개선시킨다.

(4) 실험적으로 추정된 모우드 계수는 방법에 상관없이 일관성이 있는 반면, 유한요소해석결과와는 다소 차이가 있었다. 그 이유는 유한요소해석에서는 실제모형의 기하학적 요인이나, 접합부의 복잡한 특성, 초기 비틀림등이 정확히 모형화되기 어렵기 때문인 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문의 내용은 1993년도 학술진흥재단의 자유공모과제의 연구지원으로 수행된 연구결과의 일부이다. 동 재단의 지원에 깊은 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. Lee, C-G. and Yun, C-B. "Parameter Identification of Linear Structural Dynamic Systems", *Comput. Struct.*, Vol.40, No.6, 1991.
2. Yun, C-B., Lee, C-G. and Lee, H-J., "Parameter Estimations of Structural Dynamic Systems" *ASCE Specialty Conference on Probabilistic Methods in Civil Engineering*, Denver, USA., 1992.
3. 윤정방, 이형진, "구조물의 동특성 추정을 위한 순차적 기법의 수렴성 향상에 관한 연구", 대한토목학회 추계학술발표회, 1993.
4. Bendat, J.S. and Piersol, A.G., *Random Data : Analysis and Measurement Procedures*, John Wiley & Sons, New York, 1971.
5. Hong, K-S. and Yun, C-B., "Improved Method for Frequency Domain Identifications of Structures", *Eng. Struct.*, Vol.15, No.3, 1993.
6. Shinozuka, C.B. Yun and H. Imai, "Identification of Linear Structural Dynamic Systems", *ASCE J. Eng. Mech.* 108, 1372-1390, 1982.
7. Kozin, F. Natke, H. G. "System Identification Techniques." Structural Safety, v3, 1986.
8. Fabunmi, J.A. and Tasker, F.A., "Advanced Techniques for Measuring Structural Mobilities", *J. Vib. Acous. Stress Reliability in Design*, ASME, Vol.110, 1988.
9. Goodwin, C. and Sin, K.S., *Adaptive Filtering, Prediction and Control*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1984.
10. R.B. Randall, B. Tech., B.A., *Frequency Analysis*, B & K, 1987.
11. 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.
12. 윤정방, Shinozuka, M. "구조물의 동특성 추정방법에 관한 연구", 한국전산구조공학회 논문집, 제2권 제2호, 1989.
13. 이창근, "순차적 예측오차 방법을 이용한 구조물의 동적계수 추정법", KAIST 박사학위논문, 1991.
14. 홍규선, "동특성 추정에 의한 구조물의 손상도 추정", KAIST 박사학위논문, 1991.
15. L. Ljung, *System Identification*, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, 1987.
16. Kailath, T. and Frost, P.A., "An Innovations Approach to Least-Squares Estimation. Part 2 : Linear Smoothing in Additive White Noise" IEEE Trans. on Automatic Control, AC-13, 1968.
17. Soderstrom, T., *An On-line Algorithm for Approximate Maximum Likelihood Identification of Linear Dynamic Systems Report 7308*, Lund Ins. Tech., Dept. Auto. Control., 1973.
18. Phillips, C.L. and Nagle, H.T., *Digital Control System Analysis and Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1984.
19. Chen, C.T., *Linear System Theory and Design*, Holt, Rinehart & Winston, N.Y., 1984.

(접수일자 1994. 12. 1)