

# 측정치를 이용한 시간영역 모드 특성 규명 기법 및 잡음에 대한 민감도 분석

Time Domain Modal Identification Method by using Measured  
Signals and its Sensitivity to Measurement Noise

최 형 진<sup>1)</sup> · 이 학 은<sup>2)</sup>  
*Choi, Hyung Jin Lee, Hak Eun*

**요 약** : 측정치를 이용하여 구조계를 규명하는 경우에 일반적으로 측정치를 주파수 영역으로 변환하고 이를 도식적으로 파악하는 방법이 주로 이용된다. 이러한 방법은 신뢰도가 낮고 토목구조물 특히 교량 구조물과 같이 근접한 모우드의 특성을 가지는 구조계의 규명에 불리한 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 시간영역에서의 데이터를 직접 이용하여 구조계의 모우드 특성을 규명하는 일련의 방법에 대한 적용성을 검토하였으며 이 때 발생할 수 있는 왜울에 대한 문제를 극복하기 위하여 최소자승법을 시간영역 규명기법에 중복하는 방법을 선택하였다. 제안된 방법의 타당성을 검토하기 위하여 현가계 모델을 이용하여 모의 해석을 수행하였다. 또한 실질적인 상황에서의 이용성을 검토하기 위하여 인위적인 잡음을 게재시켜 잡음에 대한 방법의 민감도를 검토하였다.

**ABSTRACT** : The first procedure to identify structural system by using measured data is transformation of data to frequency domain and try to recognize modal characteristics in graphical condition. Those methods are doubted about the reliability to the civil structures, especially bridges which has coupled and close modal characteristics. In this paper, feasibility of time domain modal identification methods were examined and applied double least square method to overcome bias characteristics of the identification methods. To show the advantage of proposed method, simulation were carried out for mass-spring model. And to examine the usage of the method in realistic case, sensitivity of the methods to noise was performed.

**핵심용어** : 모우드 규명, 시간영역, 자유감쇠응답, 잡음, 민감도, 최소자승법

**KEYWORDS** : modal identification, time domain, free decay response, noise, sensitivity, least square method

1) 공학박사, 대림산업(주) 기술연구소  
2) 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2000년 8월 31일까지 학회로 보내  
주시면 토의 회답을 게재하겠습니다

## 1. 서 론

원칙적으로 동적 구조계 모우드 특성 파악은 구조계에 가해지는 입력과 입력이 시스템을 통과한 결과로 나타나는 출력을 이용하여 수행된다. 따라서 구조계의 파악을 위해서는 가급적 정확한 입력과 이에 따르는 출력의 취득이 요구된다. 그러나 일반적으로 공용되는 상태에서의 토목 구조물에서는 입력의 산정이 매우 어려우며 입력값을 측정할 수 있다 하더라도 자연하중 등과 같은 백색성이 강한 잡음으로 인해 정확도가 크게 저하된다. 따라서 입력의 측정이 없는 상태에서의 해석이 가능한 구조계 파악 기법이 요구되었으며 이에 따라 몇 가지 가정을 포함한 이론들이 제시되었다.

대표적으로 1960년대에 주파수 영역에서의 파악기법인 FFT 이론의 이용이 제시되었으며 비교적 간단한 알고리즘과 빠른 계산속도로 인하여 하중이 불분명한 구조계의 모우드 특성 파악에 넓게 이용되었다. 그러나 입력치를 측정하지 못하는 상태에서의 주파수 영역 구조계 파악기법은 무리한 기본가정과 늦은 연산속도 그리고 특히 도식적 표현에 의한 판단이 큰 비중을 차지하는 등의 이유로 인하여 극복해야 할 문제점이 드러났다.

잡음 성향의 입력이 많은 토목 구조물에서는 대부분의 경우에 가진 되는 입력이 충분히 넓은 주파수 대역을 포함하고 있어 구조물의 거동에 영향을 미칠 수 있는 구조적으로 의미 있는 모우드를 포괄적으로 발현할 수 있도록 한다.

이러한 점에 착안하여 random decrement technique이 개발되었으며 Ibrahim<sup>(1)</sup>은 시험에 의해 이를 입증하였다. 또한 Vandiver<sup>(2)</sup>는 해상 기지의 진동 측정치로부터 획득한 응답 신호로부터 random decrement 신호를 추출하고 이를 난진동 해석 이론상의 자기상관관계와의 함수관계를 입증하였다. 이후에 Huan<sup>(3)</sup>에 의해 다자유도 계에 일괄적으로 적용될 수 있도록 수학적으로 정식화되었으며 상시계측에 의한 지속적인 분석의 절차를 제안하였다.

본 논문에서는 random decrement 신호를 이용하여 구조계 모우드의 특성을 파악해 내는 과정에서 이용되는 최소자승법에 의한 오차를 줄이기 위하여 중복하여 최소자승법을 적용하고 실제 측정시 게재될 수 있는 잡음에 대한 민감도를 수치 해석에 의해 파악하였다.

## 2. 자유감쇠신호 도출

일반적인 구조계에서  $n_{ms}$ 개의 측정으로부터 동시에 측정된 시간에 따른  $n_{np}$ 개의 난진동성 응답을  $x_{ij}$  ( $i=1, \dots, n_{ms}; j=1, \dots, n_{np}$ )라 가정할 때 서로 다른 종류의 신호 중 어떠한 신호라도 초기조건을 제한하는 측정으로 설정할 수 있다. 여기서 모든 측점이 동시에 측정되어 있는 것으로 가정할 수 있을 정도의 작은 시간차에 의해 측정되었을 때 도출되는 자유감쇠신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{ik} = \frac{1}{N_n} \sum_{i=1}^{N_n} x_{i(r+k)} \quad (1)$$

여기서,  $r$  : 제한된 초기조건의 기준치 번호  
 $k$  :  $r$ 의 초기로부터의 데이터 순서

구조물의 상관관계를 표현할 수 있는 자유감쇠신호는 위에서 도출한 식에 의해 연속적인 구조물에 대한 한 개 측정에서의 초기조건을 설정하여 유도될 수 있다.

## 3. 모우드 특성 규명

기존 연구<sup>(4)</sup>에 의하면 입력치의 성질 혹은 성향을 알지 못하는 상태에서 한 단위의 자유감쇠신호로부터 다수의 모우드에 대한 계수를 파악할 수 있는 시간영역 모우드 특성 규명에 대한 기법은 일반적으로 충분한 정보를 요구하는 다른 종류의 방법으로 구한 모우드 특성에 관한 정보와 매

우 잘 일치하거나 개선된 결과를 보이는 것으로 알려져 있다.

m개의 가진 모우드를 가지고 있는 것으로 가정되는 선형 다자유도 구조계에서 측정 i번째의 자유감쇠 응답은 시간  $t_j$ 에서 각 모우드( $\phi$ )에 발현되는 응답의 중첩에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$x_i(t_j) = x_{ij} = \sum_{k=1}^{2m} \phi_{ik} e^{\lambda_k t_j} \quad (2)$$

여기서, i : 측정 번호

j : 한 측정 내에서의 시간

k : 모우드 번호

모우드 m개에 대한 중첩의 개수는 특성치가 각각 두 개의 근을 가지게 되므로 2m개가 되며 이들의 시간에 따른 측정 s개에 대한 중첩은 다음과 같이 행렬식 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1s} \\ x_{21} & \cdots & x_{2s} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{2m,1} & \cdots & x_{2m,s} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} \phi_{11} & \cdots & \phi_{1s} \\ \phi_{21} & \cdots & \phi_{2s} \\ \vdots & & \vdots \\ \phi_{2m,1} & \cdots & \phi_{2m,s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{\lambda_{1t_1}} & \cdots & e^{\lambda_{1t_s}} \\ e^{\lambda_{2t_1}} & \cdots & e^{\lambda_{2t_s}} \\ \vdots & & \vdots \\ e^{\lambda_{2mt_1}} & \cdots & e^{\lambda_{2mt_s}} \end{bmatrix}$$

식 (3)은 다음과 같은 간단한 행렬식으로 표시할 수 있다.

$$[\Psi] = [\Phi] [A] \quad (4)$$

(2m × s)      (2m × 2m) (2m × s)

식 (2)와 유사하게 신호규모의 시점이 원래의 초기 시간으로부터  $(\Delta t)_1$ 만큼 지난 시간에 위치하는 경우 동일한 측정에서의 자유감쇠 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_i [t_j + (\Delta t)_1] = \sum_{k=1}^{2m} \phi_{ik} e^{\lambda_k [t_j + (\Delta t)_1]} = \sum_{k=1}^{2m} \hat{\phi}_{ik} e^{\lambda_k t_j} \quad (5)$$

식 (3)과 식(4)에서와 같이 식(5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\hat{\Psi}] = [\hat{\Phi}] [A] \quad (6)$$

(2m × s)      (2m × 2m) (2m × s)

측정되는 시간 s는 모우드 특성치 개수인 2m보다 항상 크므로  $[\Phi]$ 와  $[\hat{\Phi}]$ 는 식 (4)와 식 (6)으로부터 다음과 같은 관계로 표현할 수 있다.

$$[A] [\Phi] = [\hat{\Phi}] \quad (7)$$

(2m × 2m)(2m × 2m)    (2m × 2m)

$$\text{여기서, } [\Psi]^T [A]^T = [\hat{\Psi}] \quad (8)$$

(s × 2m)    (2m × 2m)      (s × 2m)

행렬  $[\Phi]$ 와  $[\hat{\Phi}]$ 의 열벡터간의 관계로부터 전체 시스템은 다음과 같이 한 개의 고유치 문제로 귀착된다.

$$[A] \{\phi\}_k = e^{\lambda_k (\Delta t)_1} \{\phi\}_k \quad (9)$$

식(9)에서 행렬  $[A]$ 는 구조계 모우드 특성 계수를 포함하고 있는 상태가 되며 이로부터 고유진동수와 감쇠 그리고 복소수 형태의 모우드 형상을 구할 수 있다.

#### 4. 최소자승법의 중복 적용

구조계 규명의 정확도를 높이기 위한 목적으로 측정된 데이터로 구성되는 방정식을 풀기 위해 대부분의 기법 절차에서는 근접성 추적 방법으로 최소자승법을 이용하고 있으나 한편으로는 만족할 만한 결과를 도출하지 못하는 경우도 있는 것으로 알려져 있다. 이를 극복하기 위하여 IVM<sup>(7)</sup>이나 MLE<sup>(9)</sup> 혹은 제한된 정보하의 MLE를 선택적으로 이용하는 방법이 제안되었으나 이상의 방법들은 일상적인 계산과정에서 이용하기에는 너무 많

은 계산량을 요구하게 되며 구조계 계수 규명법의 정확도에 영향을 미치는 미지수의 수보다 많은 수의 방정식을 푸는 특정한 방법의 영향은 극히 일부분에 대해 해당된다. 따라서 결국 규명 기법의 신뢰되는 측정 잡음에 대한 전체적인 민감도의 문제로 귀착된다.

규명된 감쇠계수의 오차와 필연적으로 존재하는 최소자승법에서의 확률적으로 왜곡된 수치적 오차 사이에 있는 상관관계가 Goodwin<sup>(10)</sup>에 의해 발견되었으며 이에 따라 최소자승법을 중복으로 적용하여 오차의 일방적 왜곡을 줄일 수 있는 방법이 제안되었다. Goodwin에 의해 제안된 중복최소자승 개념은 Vold<sup>(11)</sup>에 의해 Poly-reference Method로 발전되었으며 다시 Juang에 의해 ERA(eigen realization algorithm)가 제안되었다. 본 논문에서는 전술한 시간영역 모우드 규명법에 최소자승법을 중복하여 적용하여 Goodwin등에 제안한 방법이 시간영역의 모우드 규명에 유용함을 보였다. 또한 Ibrahim<sup>(12)</sup>은 이를 ITD의 확장에 이용하여 특히 감쇠의 신뢰도를 높일 수 있도록 하였다.

구조계의 모우드 특성을 포함하는 행렬  $[A]$ 는 수치해석적 절차에 의하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[A] = ([\hat{\Psi}][\Psi]^T)([\Psi][\Psi]^T)^{-1} \quad (10)$$

또한 식(4)와 식(6)까지의 관계에서 다음과 같은 조건을 만족하는 행렬  $[B]$ 를 정의할 수 있다.

$$[B][\hat{\Psi}] = [\Psi] \quad (11)$$

식(10)과 식(11)에서 알 수 있듯이 측정치에 잡음이 없는 이상적인 경우에  $[B]$ 는  $[A]$ 의 역행렬이 되며 공히 방정식보다 많은 수의 미지수를 포함하고 있으므로 최소 자승법에 의해 최적해를 구하게 된다.

행렬  $[B]$ 에 관련하여 식(10)과 식(11)로부터 다음과 같은 방정식의 정의가 가능하다.

$$[B] = ([\Psi][\hat{\Psi}^T])([\hat{\Psi}][\hat{\Psi}^T])^{-1} \quad (12)$$

식(11)과 식(12)는 또 고유치 문제의 관점에서 각각 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$[A_1]\{\psi_1\} = \alpha_1\{\psi_1\} \quad (13)$$

$$[B_1]\{\psi_1\} = \beta_1\{\psi_1\} \quad (14)$$

여기서,  $\beta_1 = 1/\alpha_1$

위의 식에서  $[A]$ 와  $[B]$ 는 동일한 시험에 의한 행렬  $[\Psi]$ 와  $[\hat{\Psi}]$ 에 의해 구해지는 행렬이므로 각각의 행렬에 포함되어 있는 오차는 동일한 정도로 게재되어 있으며 동일한 성향의 왜곡을 보이는 것으로 간주할 수 있다.

잡음에 의한 오차를 고려할 때 다음과 같은 식이 구성된다.

$$\beta_2 = \beta(1 + \epsilon) = \frac{1}{\alpha}(1 + \epsilon) \quad (15)$$

여기서,  $\alpha$  :  $\alpha_1$ 의 이론적인 값

$\beta$  :  $\beta_1$ 의 이론적인 값

위의 식(14)와 마찬가지로  $\alpha_2 = \alpha/(1 + \epsilon)$ 로 설정하고  $\alpha_1 = \alpha(1 + \epsilon)$ 의 관계로부터  $\alpha_n = \alpha_1 + \alpha_2$ 로 정의할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_n = \alpha(1 + \epsilon^2/2 - \epsilon^3/2 - \epsilon^5/2 \dots) \quad (16)$$

위 식으로부터  $\epsilon \ll 1$ 일 때 고차항은 무시될 수 있으며 고유치의 평균값은 이론적인 목적치에 근접하게 된다. 행렬  $[B]$ 의 역행렬을  $[A_2]$ 라 할 때 행렬  $[A_2]$ 는 다음과 같다.

$$[A_2] = ([\Psi][\Psi^T])([\Psi][\Psi])^{-1} \quad (17)$$

$$\text{혹은 } [A_2]\{\Psi\} = \alpha_2\{\Psi\} \quad (18)$$

이상의 식에서 보인 행렬  $[A_1]$ 과 행렬  $[A_2]$ 에 대한 각각의 고유치  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 보다  $1/2([A_1] + [A_2])$ 의 고유치  $1/2(\alpha_1 + \alpha_2)$ 가 보다 정확한 값에 근접하게 수렴하게 되며 이를 일체의 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$[A] = \frac{1}{2} \left( ([\Psi][\Psi^T])^{-1}([\Psi][\Psi^T]) + ([\Psi][\Psi^T])([\Psi][\Psi^T])^{-1} \right) \quad (19)$$

위 식에 의해 정확도가 개선된 시스템 행렬을 계산할 수 있으며 이에 따라 고유치 및 고유치 벡터의 정확도가 개선된다. 본 논문에서는 예제를 통해 고유치 및 고유치 벡터의 잡음에 대한 정확도를 검증하였다.

## 5. 수치해석

본 논문에서 제안한 절차를 검증하기 위하여 수치해석 모델로는 그림 1에 보이는 것과 같은 reciprocal형 진동기초의 현가계 모델을 이용하였으며 그 특성치는 표 1에 보인 것과 같다. 하중은 동작시와 정지시의 회전하중이 거의 난진동성 하중과 유사하므로 1번 자유도에 난진동성 하중이 작용하는 것으로 가정하였다.

이상과 같은 상태에서의 자유도 2와 자유도 3에서의 응답으로 각각 random decrement 신호를 도출하고 이에 대하여 시간영역 모우드 계수 규명법을 적용하였다. 또 측정시 필연적으로 게재되는 잡음성분을 모사하기 위하여 rms 개념에서 5%, 10%, 25%, 50% 그리고 100%의 5가지 잡음 상태를 인위적으로 첨가하였다. 본 논문에서 이용된 잡음의 정의는 다음과 같다.

$$\sqrt{\frac{\sum(x_n(t) - x_o(t))^2}{\sum x_o^2(t)}} \times 100(\%) \quad (20)$$

여기서  $x_o(t)$ 는 잡음이 없는 신호이며  $x_n(t)$ 는 백색잡음이 포함된 신호이다.

표 1. 해석 구조물 특성

구분번호	1	2	3	4	5
질량(N sec <sup>2</sup> /m)	20	40	120	80	80
감쇄(N sec/m)	50	100	150	200	300
강성(N/m)	5000	10000	15000	20000	30000

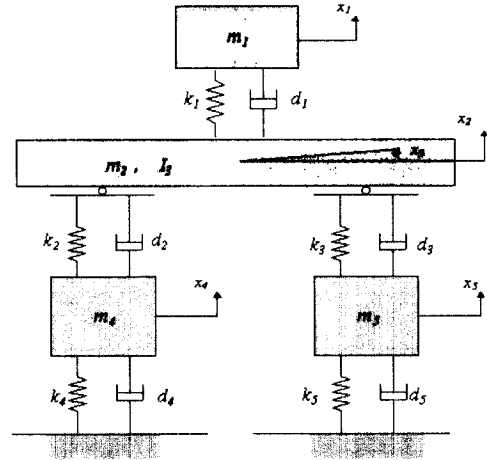


그림 1. 해석모델

해석 모델에서의 병진 자유도인 자유도 2와 자유도 4 그리고 자유도 5에서의 응답을 잡음비 0%, 5%, 10%, 25%, 50% 그리고 100%에 대하여 계산되었으며 그림 2와 그림 3에 잡음비 0%에 대한 결과와 잡음비 25%에 대한 각각의 자유도에서의 응답과 RDS(random decrement signal)를 나타내었다.

수치해석을 위한 총 4500개의 측정치에서 500개의 random decrement 신호를 추출하기 위하여 잡음비 0%인 경우에 65개, 5%인 경우에 82개 10%인 경우에 108개 25%인 경우에 197개 50%인 경우에 284개 그리고 100%인 경우에 341개의 초기치에 부합하는 ensemble 신호 단위가 채택되었다. 따라서 잡음비가 커지더라도 난진동성 잡음의 제거는 잡음비가 낮은 경우와 유사하게 되나 정상적 신호의 파워가 낮아지게 되어 신호의 크기가 희석된다.

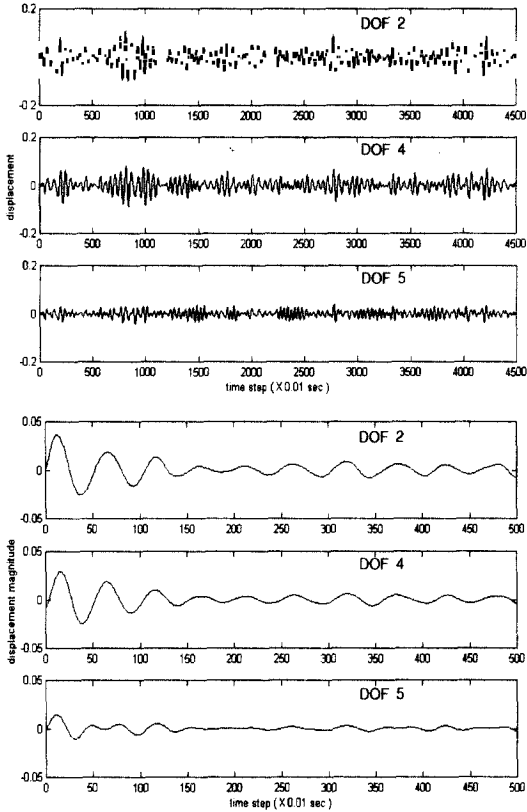


그림 2. 잡음비 0%인 경우의 응답 및 RDS

주파수 평면상에서 잡음과 분리하여 탁월 주파수를 찾아내기 위해서는 각 주파수에서 발현하는 파워를 육안에 의해 판별하는 방법을 이용하거나 구조계에 대한 충분한 사전정보를 이용하여 계산상의 탁월 주파수와 인근에 위치하는 탁월 주파수를 고유진동수로 선정하는 방법을 이용한다.

그러나 이는 잡음비가 높은 경우에 주관적인 판단이나 분석자의 편견이 작용할 수 있기 때문에 신뢰도가 낮은 결과를 도출할 수 있다.

구조물의 거동에 의한 모드와 잡음에 의해 발현되는 모드를 구분하기 위해 시간영역 모드 파악기법에서는 추정된 모드( $\hat{Q}$ )와 기대되는 모드( $Q_{exp}$ )와의 관계로부터 정의되는 MCF(modal confidence factor)를 이용한다.

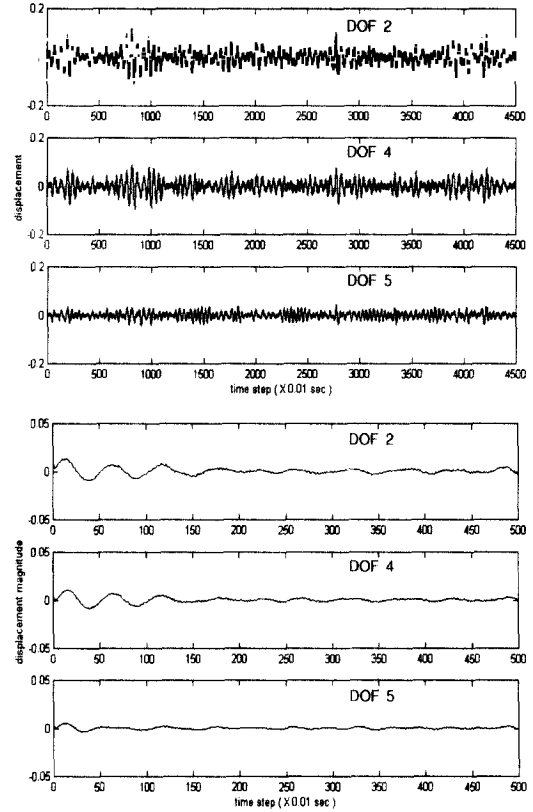


그림 3. 잡음비 25%인 경우의 응답 및 RDS

$$(MCF) = \begin{cases} \left| \frac{Q_{exp}}{\hat{Q}} \right| \times 100(\%), \hat{Q} > Q_{exp} \\ \left| \frac{Q_{exp}}{Q} \right| \times 100(\%), Q_{exp} > \hat{Q} \end{cases}$$

위의 정의에 의해 각 측정별 모드들의 MCF가 높은 경우에는 구조계의 모드로 그리고 상대적으로 낮은 경우에는 잡음에 의해 발현되는 주파수로 간주할 수 있다. 본 논문의 수치해석에서는 단수의 최소자승법을 이용한 경우와 복수의 최소자승법을 이용한 경우에 각각 잡음비 0%, 25%에 대하여 그림 4와 그림 5에 보인 것과 같다.

그림에서 보이는 것과 같은 MCF를 근거로 판단한 모드 형상은 잡음에 따라 그림 6과 그림 7에 보인 것과 같고 고유진동수는 모드 별로 그림 8에 보인 것과 같다.

그림 4. 잡음비 0%인 경우의 MCF

(a) 단일적용 (b) 중복적용

그림 5. 잡음비 25%인 경우의 MCF

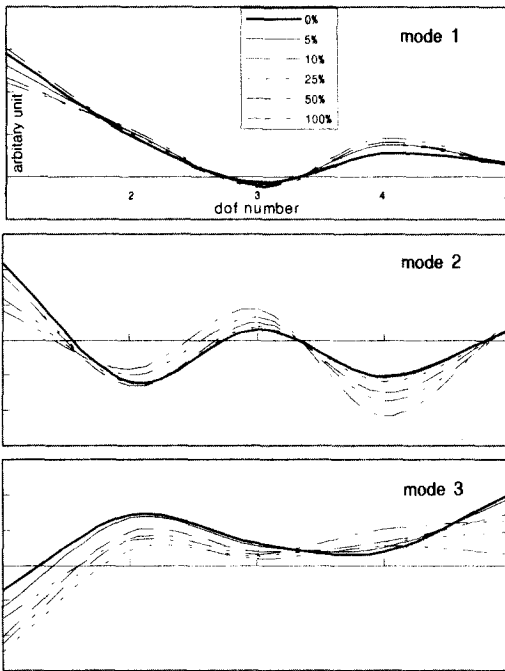


그림 6. 단일 최소자승법에 의한 모우드 형상

모우드 형상을 단일최소자승법에 의한 결과와 중복최소자승법에 의한 결과에서 잡음이 게재되지 않은 상태에서의 모우드 형상 rms를 기준으로 하여 잡음에 대한 민감도를 분석하기 위하여 이를 다시 추정된 모우드의 rms 값과 비교하여 표 1에 수록 하였다.

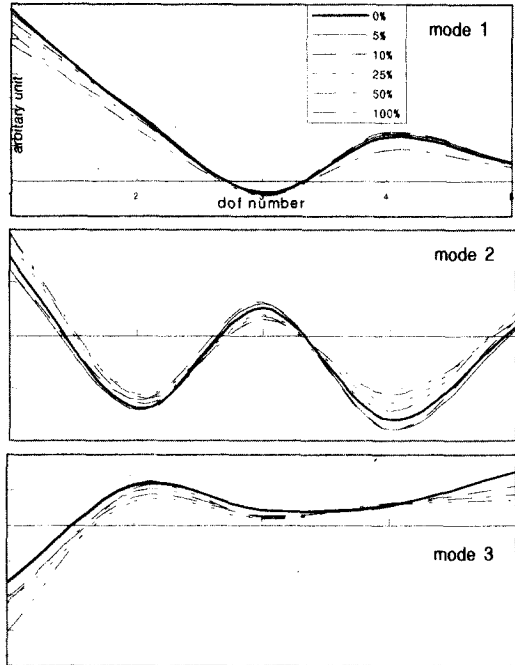


그림 7. 중복 최소자승법에 의한 모우드 형상

그림 8. 모우드별 추정 고유진동수

표 2에서 MCF는 선정된 고유진동수에 대한 값으로 최소자승법의 접근도로 간주될 수 있다.

표 2. 잡음에 따른 모우드 rms 및 추정오차

mode	S/N (%)	단일 최소 자승			중복 최소 자승		
		rms	오차 (%)	MCF (%)	rms	오차 (%)	MCF (%)
1	0	0.63	0.0	68.0	0.54	0.0	87.1
	5	0.59	5.7	75.3	0.53	0.9	88.3
	10	0.54	12.7	84.9	0.52	3.7	91.9
	25	0.54	14.2	87.3	0.50	6.3	94.9
	50	0.65	-4.0	67.2	0.45	15.7	92.1
	100	0.53	14.7	87.4	0.45	16.7	92.1
2	0	0.54	0.0	85.7	0.53	0.0	88.9
	5	0.55	-1.0	84.3	0.53	-0.8	87.9
	10	0.55	-1.7	82.7	0.52	2.5	92.1
	25	0.53	1.8	87.9	0.50	5.6	95.2
	50	0.51	6.5	87.4	0.51	3.2	93.2
	100	0.49	10.5	66.8	0.55	-4.5	93.2
3	0	0.54	0.0	86.7	0.52	0.0	91.3
	5	0.54	-0.7	85.7	0.52	-0.5	89.2
	10	0.56	-3.6	78.6	0.51	1.9	89.2
	25	0.55	-2.3	81.2	0.51	1.6	88.3
	50	0.57	-5.9	63.9	0.53	-0.8	87.1
	100	0.36	34.0	73.8	0.67	28.4	88.4

표에서 볼 수 있듯이 전체 모우드에서 중복최소자승법의 개념이 포함된 상태에서의 시간영역 규명 기법의 rms오차는 잡음비 10%인 경우를 기준하여 각 모우드에서 1.94%~3.76%로 기존 시간영역 파악기법의 오차범위 3.60%~12.7%에 비하여 크게 작은 양상을 보이고 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 기존의 주파수 영역에서 발생하는 문제점을 극복하기 위하여 시간영역에서 구조계의 모우드별 특성을 규명하는 절차의 이용을 제안하였으며 현가계 모델에 대한 모의해석을 통해 이를 검증하였다. 이산 FFT 기법을 이용하여 해석하는 경우에는 근접한 모우드가 무시될 수 있는

가능성이 있으며 모우드 형상의 추출시 평면변환 오차가 크게 작용할 수 있다. 본 논문에서는 구조물의 공용중에 발현되는 신호를 구조계의 자유감쇠응답으로 유도하였고 이를 다시 시간영역 구조계 규명기법에 적용하였다. 특히 이때 추정되는 모우드별 특성의 왜월에 대한 문제점을 해결하기 위하여 최소자승법을 중복 적용하였다.

방법의 적합성을 판명하기 위해 잡음이 개재된 상태에서의 모의해석에 의한 민감도 분석을 수행한 결과 주파수 평면에서의 방법보다 크게 개선된 결과를 보이고 있으며 특히 현실적으로 나타날 수 있는 신호대 잡음비인 10% 이내의 범위에서는 MCF를 거의 100%에 가깝게 만족하는 모우드 형상의 추출이 가능한 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

- (1) Ibrahim, S. R., "Random Decremental Technique for Modal Identification of Structures," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 14, No. 11, Nov. 1977, pp. 696-700.
- (2) Vandiver, J. K., Dunwoody, A. B., Campbell, R. B. and Cook, M. F., "A Mathematical Basis for the Random Decrement Vibration Signature Analysis Technique," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 104, April 1982, pp. 307-313.
- (3) Huan, S-L, McInnis, B. C. and Denman, "Analysis of the Random Decrement Method," *International Journal of Systems Science*, Vol. 104, April 1982, pp. 307-313.
- (4) Ibrahim, S. R. and Mikulcik, E. C., "The Experimental Determination of Vibration Parameters from Time Responses," *Shock and Vibration Bulletin*, No. 46, Part 5, Aug. 1976, pp. 187-196.
- (5) 최은수, "Random decrement 기법에 의한 모사 구조물의 동특성 추정", 한양대학교 대학



- 원 석사학위 논문, 1995.
- (6) 김학수, "모드형상의 회전변형을 고려한 교량 상부구조의 손상평가," 한양대학교 대학원, 박사학위 논문, 1997.
- (7) Rowe, I. H., "A Bootstrap Method for the Statistical Estimation of Model Parameters," *International Journal of Control*, Vol. 12, No. 5, 1970, pp. 721-738.
- (8) 정범석, "정적변위 및 동특성 측정자료를 이용한 구조물의 손상추정방법에 관한 연구," 서울대학교 대학원, 박사학위논문, 1996.
- (9) Astrom, K. J. and Ohlin, T., "Numerical Identification of Linear Dynamical Systems from Normal Operating Records," *Proceedings of International Federation of Automatic Control Symposium on the Theory of Self-Adaptive Systems*, Tedding, England Sept. 1965.
- (10) Goodwin, G. C. and Payne, R. L., *Dynamic Identification, Experimental Design and Data Analysis*, Academic Press, New York, 1977.
- (11) Vold, H. and Crowley, J., "A Modal Confidence Factor for the Polyreference Method," *Proceedings of 3rd International Modal Analysis Conference*, Union College, Schenectady, NY, Jan. 1985, pp. 305-310.
- (12) Ibrahim S. R., "Double Least Squares Approach for Use in Structural Modal Identification", *AIAA Journal*, Vol. 24, No. 3, 1986, pp. 499-503.

(접수일자 : 1999년 6월 16일)