

계환 모델 개선법을 위한 모드 분리 제어기

Mode-decoupling Controller for Feedback Model Updating

정 훈 상* · 박 영 진†

Jung Hunsang and Park Youngjin

(2004년 3월 30일 접수 : 2004년 7월 27일 심사완료)

Key Words : Model Updating(모델 개선법), Output Feedback(출력 계환 제어), Closed-loop Natural Frequency(폐루프 공진 주파수)

ABSTRACT

A novel concept of feedback loop design for modal test and model updating is proposed. This method uses the closed-loop natural frequency information for parameter modification to overcome the problems associated with the conventional method employing the modal sensitivity matrix. To obtain new modal information from closed-loop system, controllers should be effective in changing modal data while guaranteeing the stability of closed-loop system. But it is very hard to guarantee the stability of the closed-loop system with non-collocated sensor and actuator set. In this research, we proposed a controller called mode-decoupling controller that can change a target mode as much as the designer wants guaranteeing the stability of closed-loop system. This controller can be computed just using measured open-loop modeshape matrix. A simulation based on time domain input/output data is performed to check the feasibility of proposed control method.

1. 서 론

대상으로 하는 진동 시스템의 진동 특성을 수학적으로 모델링하고 이런 초기 모델과 실험 결과의 차이를 줄이도록 모델의 매개 변수들을 보정해 주는 일련의 방법론을 모델 개선법(model updating)이라고 하며 이는 구조 시스템 규명의 중요한 분야이다.^(1,2) 모델 개선을 하기 위한 실험 측정치는 시스템의 공진 주파수와 모드형상이 되는데 이런 측정값은 측정 기기의 주파수 한계와 잡음의 영향으로 그 개수와 신뢰도에 한계가 있게 되고 이런 측정값을 이용하여 모델

의 매개 변수들을 보정하게 되면 정확한 값으로 수렴하지 못하는 문제가 발생하게 된다.^(1,3)

이 때 Fig.1과 같이 시스템의 측정 센서로부터 나온 신호에 계환 이득값을 곱해 주어 입력에 넣어주게 되면 계환 루프를 통해 시스템을 변화시킬 수 있고 새롭게 구성된 폐루프 시스템의 출력으로부터 시스템에 대한 변화된 고유치 정보를 얻을 수 있게 된다. 개선하고자 하는 모델은 원래 시스템의 고유치 정보뿐만 아니라 변화된 시스템의 고유치 정보도 만족해야 하고 결과적으로 모델의 설계 변수들은 더 많은 구속 조건을 만족하면서 개선되게 되어 설계 변수의 개선이 더욱 효과적으로 된다.^(4,5)

이 경우 폐루프 시스템을 원래 시스템으로부터 많이 변화시켜 주지 못하면 폐루프 모드 정보는 원래 시스템의 모드 정보와 거의 유사하기 때문에 새로운 구속 조건을 만들어 내지 못하게 된다. 때문에 시스템의 모드를 변화시키는데 효과적인 제어기를 구성할

† 책임저자 : 정희원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : yjpark@mail.kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3036, Fax : (042) 869-8220

* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

필요가 있다. 이 연구에서는 기존의 고유치 민감도를 이용한 모델 개선법을 가장 적게 수정하면서 가진기 위치 및 센서 위치 그리고 케환 이득값에 대한 페루프 모드의 근사적인 특성을 파악하기 용이한 이유로 센서 출력에 케환 이득값을 곱해서 제어 입력에 더해 주는 정적 출력 제어기(static output control)가 사용되었다. 구조물에 이런 종류의 제어기를 구성할 경우 가장 큰 문제는 바로 페루프 시스템의 안정성 보장에 관한 것이다.^(6, 7)

센서와 구동기가 같은 위치에 붙어 있는 경우(collocated sensor and actuator)에는 페루프 시스템의 안정성을 보장할 수 있지만 본 논문에서 다루고 있는 경우와 같이 다수의 센서들이 구조물에 분포되어 있고 구동기의 힘은 특정 위치에서만 작용하는 경우(non-collocated sensor and actuator)에는 정적 출력 제어기를 사용하여 시스템을 안정하게 하는 케환 이득값을 찾는 문제는 해의 존재성 자체가 증명되지 않은 문제로 현재의 방법론들로는 풀기가 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 정훈상 등⁽⁵⁾은 페루프 시스템의 안정성을 보장하면서 모드 변화에 효과적인 케환 이득값을 구성하는 방법을 제안하였는데 시스템 안정성을 유지하면서 대상 모드의 변화를 지속적으로 증대시키기 위해서는 케환 이득값을 실험 중에 수정해야만 하는 단점이 있었다. 때문에 설계 단계에서 페루프 시스템의 안정성을 보장할 수 있는 제어기의 설계 방법이 필요하게 되었다.

이 연구에서는 정훈상 등^(4, 5)이 제안한 제어기 설계 방법에 특수한 제한 조건을 주는 경우에 대상 모드를 원하는 만큼 변화시키면서 페루프 시스템의 안정성을 유지할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 구조물에 정적 출력 제어기를 붙였을 때 페루프 시스템의 특정 모드들이 불안정해지는 이유는 정적 출력 제어기로 인해 모드들 사이에 커플링이 발생하였기 때문이다. 이 연구에서 제안된 설계 방법을 통해 얻어진 케환 이득값 벡터는 변화시키고자 하는 대상 모드

를 제외한 모드들에 들어가는 제어 파워를 없앴으로써 모드들 사이의 커플링을 제거해 주고 이를 통해 모든 모드들의 안정성을 보장해주는 특성이 있다. 본 논문에서는 페루프 시스템의 안정성을 보장하기 위해서 모드 분리의 특성이 있는 제어기를 제안하였고 시뮬레이션을 통해 이 제어기의 특성을 보였다.

2. 시스템 모델링 및 모델 계수 추정

시불변의 진동 구조물의 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f = bf_a, \quad (1)$$

$$b(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } i = a \\ 0 & \text{if } i \neq a. \end{cases} \quad (2)$$

여기서 f_a 는 가진력을 나타내고 a 는 가진기가 놓여진 노드의 위치를 나타낸다. 이 시스템 모델의 모달 데이터는 다음의 특성을 가진다.

$$KW = MW\Lambda \quad (3)$$

$$W^T MW = I, W^T KW = \Lambda, \quad (4)$$

$$W = [W_1 \ W_2 \ \dots \ W_n], \Lambda = \text{diag}[\lambda_i], \quad (5)$$

여기서 Λ 와 W 는 각각 $n \times n$ 의 고유치 및 고유벡터 행렬이다. W 는 질량 및 강성 행렬에 대해 정규직교성을 가진다. 이런 시스템 모델 행렬들에 사용된 물성치 및 모델 계수들은 실제 시스템의 값들과 차이가 있고 이런 차이는 시스템과 모델 사이의 모달 데이터의 차이로 나타나게 된다. 이 경우 시스템 모델을 개선하고자 하는 모델 계수와 초기 모델의 섭동으로 표현하게 되면 모델 계수에 대한 모달 데이터의 민감도를 이용하여 시스템과 모델의 모달 데이터의 차이를 줄이는 방향으로 모델 계수들을 수정할 수 있게 된다. 일반적으로 모델 계수와 모달 데이터 사이의 비선형성을 보상하기 위해 반복 계산이 사용된다.

3. 페루프 시스템 구성^(4, 5)

페루프 시스템을 구성하기 위해서 케환 이득값이 곱해진 출력 신호들을 시스템 가진 신호와 합쳐서 가진기 입력 신호로 사용하면 가진력 f_a 는 다음과 같

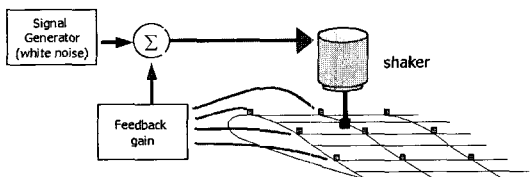


Fig. 1 Concept of control loop addition

이 표현된다.

$$f_a = \mu_f(r - \mathbf{k}_f \mathbf{x} - \mathbf{c}_f \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{m}_f \ddot{\mathbf{x}}) \quad (6)$$

여기에서 r 은 시스템 가진 신호이며 \mathbf{k}_f , \mathbf{c}_f 와 \mathbf{m}_f 는 각각 변위, 속도, 가속도 측정값에 해당하는 계환 이득값 벡터이다. μ_f 는 구동기(actuator)의 특성을 나타내는 값으로 관심 주파수 영역에서 그 특성이 주파수에 따라 변하지 않는다고 가정하여 상수로 생각할 수 있다. 식 (1)에 식 (6)을 넣어서 정리하면 다음과 같이 페루프 시스템에 대한 모델을 구할 수 있다

$$\begin{aligned} & (\mathbf{M} + \mu_f \mathbf{b} \mathbf{m}_f) \ddot{\mathbf{x}} + (\mathbf{C} + \mu_f \mathbf{b} \mathbf{c}_f) \dot{\mathbf{x}} \\ & + (\mathbf{K} + \mu_f \mathbf{b} \mathbf{k}_f) \mathbf{x} = \mu_f \mathbf{b} r \end{aligned} \quad (7)$$

원래 질량, 감쇠, 강성 행렬에 계환 이득값 행렬들이 더해지는데 중요한 점은 계환 루프에 의해 시스템 행렬의 대칭성이 깨진다는 점이다. 이런 비대칭성은 센서와 가진기가 같은 위치에 놓여져 있지 않음으로 인하여 발생하는 특성이다. 통상적인 고유치 민감도의 유도는 시스템 행렬들의 대칭성에 바탕하고 있기 때문에 페루프 데이터를 사용하기 위해서는 고유치 민감도를 수정해 주어야만 한다. 식 (7)로부터 페루프 시스템 모델의 행렬을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\mathbf{M}_f = \mathbf{M} + \mu_f \mathbf{b} \mathbf{m}_f, \quad \mathbf{K}_f = \mathbf{K} + \mu_f \mathbf{b} \mathbf{k}_f, \quad (8a,b)$$

위의 비대칭의 시스템 행렬들에 대해서는 좌/우 고유 벡터가 따로 존재하는 부직교성(biorthogonality)이 성립하게 된다. 통상적으로 모달 데이터의 민감도는 시스템 행렬의 대칭성에 바탕하여 유도되기 때문에 페루프 민감도를 구하기 위해서는 페루프 시스템의 부직교성을 이용하여 기존 방법을 수정하여야 한다. 이 페루프 모달 데이터의 민감도를 이용하면 원래 시스템과 모델 사이의 모달 데이터 차이뿐만 아니라 페루프 시스템과 페루프 모델 사이의 차이 역시 줄이도록 모델 계수를 수정할 수 있게 된다. 페루프 모달 데이터라는 새로운 정보를 추가로 사용함으로써 더 낮은 모델 계수 추정 성능을 얻을 수 있다.

4. 모드 분리 제어기 설계

페루프의 모달 데이터가 모델 계수 추정을 위한 새

로운 데이터로 사용되기 위해서는 페루프 모달 데이터가 원래로부터 많이 바뀌어서 새로운 모달 데이터를 얻을 수 있어야만 한다. 각각의 제어기에서 모든 모드들을 변화시키는 것은 안정성 면에서 힘들기 때문에 각각의 제어기는 특정 모드 하나만을 변화시키는데 주력하도록 한다. 모든 노드에 센서를 놓을 수 없기 때문에 특정 위치에만 센서들이 부착되어 측정이 되는 경우에 식 (6)에서 정의한 계환 이득값 벡터 \mathbf{m}_f 는 다음과 같이 센서가 부착된 위치에 해당하는 계환 이득값 벡터로 축약할 수 있다.

$$\mathbf{m}_f = \mathbf{G}^T \mathbf{D}_s, \quad (9)$$

여기서 \mathbf{G} 는 센서가 부착된 위치들에 해당하는 계환 이득값 벡터이고 \mathbf{D}_s 는 센서 위치를 나타내는 불리안(Boolean) 행렬로서 \mathbf{D}_s 의 번째 j 열은 j 번째 센서 위치에서만 1이고 나머지는 0이다. 이 때 센서가 부착된 위치에서의 모드형상은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{\mathbf{W}}_i = \mathbf{D}_s \mathbf{W}_i, \quad (10)$$

여기서 $\hat{\mathbf{W}}_i$ 는 센서들이 놓여진 위치에서의 모드형상벡터를 의미한다. 이 경우 적은 제어파워로 원하는 만큼의 모드 변화를 유발하는 계환 이득값은 다음의 성능 지수를 최소화하여 구할 수 있다.

$$J = \sum_{i=1}^l P_i + \alpha(G^T \mathbf{G}) + L(\hat{\mathbf{W}}_i^T \mathbf{G} - \varepsilon), \quad P_i = (\mathbf{G}^T \hat{\mathbf{W}}_i)^2 E[\hat{\eta}_i^2], \quad (11a,b)$$

여기서 P_i 는 모드별 제어 파워를 나타내고 Lagrange multiplier L 에 곱해진 항은 목표 모드 변화량을 나타낸다. 아래첨자 t 는 변화시키고자 하는 대상모드를 나타내고 l 은 관심 주파수 영역내의 모드 개수를 나타낸다. $E[\hat{\eta}_i^2]$ 은 각 모드의 진동 파워로서 사용자가 조정할 수 있는 값이며 이 값을 조정하여 페루프 시스템의 안정성을 유지하면서 대상 모드의 변화를 얻을 수 있다. 페루프 시스템이 불안정해지는 것은 특정 모드들의 감쇠가 줄어들기 때문인데 시스템 안정성을 유지하면서 대상 모드의 변화를 지속적으로 증대시키기 위해서는 $E[\hat{\eta}_i^2]$ 값을 시스템의 응답 특성에 따라 실험 중에 수정해 주어야만 한다. 즉 이 방법은 페루프 스템의 안정성을 처음부터 보장할 수 없다는 단점이 있다.

이런 문제점을 보완하기 위해서는 제어기 설계단계에서 페루프 시스템의 안정성을 보장할 수 있는 제한 이득값 선정법이 필요하다. 대상 모드를 제외한 다른 모드들의 감쇠가 줄어드는 것을 방지하는 한 방법은 변화시키고자 하는 대상 모드를 제외한 모든 모드들에 전파되는 제어 파워를 최대한 줄여주는 것이다. 이렇게 되면 그 모드들의 변화 자체가 없어지게 되어 감쇠가 줄어들어 안정성이 깨지는 현상도 방지할 수 있다. 대상 모드를 제외한 모든 모드들에 대한 제어 파워가 0이 될 경우의 조건은 식 (11b)에서 이 되는 경우이므로 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{m}_i \mathbf{W}_i = G^T \hat{\mathbf{W}}_i = 0, \text{ for } i \neq t. \quad (12)$$

주파수 영역내의 모드 개수와 같은 수의 센서를 사용하는 경우에 식 (12)를 만족하는 제한 이득값 벡터 G 는 다음과 같이 비대칭 모드들의 모드형상 벡터 $\hat{\mathbf{W}}_i$ 들의 영벡터(null vector)로 구해진다.

$$G = \mathbf{N} \left(\left[\hat{\mathbf{W}}_1 \quad \dots \quad \hat{\mathbf{W}}_{t-1} \quad \hat{\mathbf{W}}_{t+1} \quad \dots \quad \hat{\mathbf{W}}_n \right]^T \right), \quad (13)$$

여기서 \mathbf{N} 은 영벡터를 나타낸다. 식 (13)에 의하면 G 는 측정 모드형상만을 이용하여 구해지는 것을 확인할 수 있다. 이 제한 이득값을 사용하였을 때 페루프 시스템의 안정성을 살펴보자. 식 (7)의 페루프 시스템을 식 (3)과 (4)의 원래 시스템의 고유벡터 정보를 이용하여 모달 영역으로 전환하면 다음과 같다.

$$\left(I + \mu_F \begin{bmatrix} W_{1a} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_1 & \dots & W_{1a} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_n \\ W_{2a} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_1 & \dots & W_{2a} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_n \\ \vdots & & \vdots \\ W_{na} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_1 & \dots & W_{na} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_n \end{bmatrix} \right) \ddot{\eta}(t) + \mathbf{C} \dot{\eta}(t) + \Lambda \eta(t) = \begin{bmatrix} W_{1a} \\ W_{2a} \\ \vdots \\ W_{na} \end{bmatrix} \mu_F r, \quad (14)$$

여기서 W_{ia} 는 i 번째 모드의 구동기 위치에서의 모드형상값이다. 주목할 점은 제한 제어에 의해 모든 모드들에 커플링이 발생하면서 서로의 감쇠 및 공진 주파수에 영향을 미치게 되고 경우에 따라 특정 모드의 안정성이 깨질수 있다는 점이다. 식 (13)의 제어기를 적용할 때 식 (12)의 특성에 따라 모달 영역의 페루프 시스템은 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$\left(I + \mu_F \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & W_{1a} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_t & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & W_{2a} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_t & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & W_{ta} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_t & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \right) \ddot{\eta}(t) + \mathbf{C} \dot{\eta}(t) + \Lambda \eta(t) = \begin{bmatrix} W_{1a} \\ W_{2a} \\ \vdots \\ W_{na} \end{bmatrix} \mu_F r, \quad (15)$$

위의 식을 모드별로 분리하여 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{\eta}_t + \frac{2\zeta_t \omega_t}{1 + W_{ta} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_t} \dot{\eta}_t + \frac{\omega_t^2}{1 + W_{ta} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_t} \eta_t = \frac{W_{ta}}{1 + W_{ta} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_t} r \quad (16)$$

$$\ddot{\eta}_k + 2\zeta_k \omega_k \dot{\eta}_k + \omega_k^2 \eta_k = W_{ka} r - \mu_F W_{ka} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_t \dot{\eta}_t \text{ for } k \neq t \quad (17)$$

식 (16)으로부터 대상 모드의 공진 주파수 및 감쇠율의 변화는 다음과 같이 얻어진다.

$$\omega_{ct}^2 = \frac{\omega_t^2}{1 + W_{ta} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_t}, \quad \zeta_{ct} = \frac{\zeta_t}{\sqrt{1 + W_{ta} \mathbf{m}_1 \mathbf{W}_t}}. \quad (18)$$

식 (17)에서 대상 모드가 아닌 모드들은 공진 주파수나 감쇠의 변화가 없고 대상 모드의 진동이 외부 힘으로서 작용하는 것을 확인할 수 있다. 즉 제안된 제어기는 대상 모드를 제외한 모드들에 가해지는 제어력을 없앴으로써 모드간의 커플링을 제거하고 대상 모드를 제외한 모드들이 변하지 않도록 해 주었다. 이를 통해 전체 시스템의 안정성을 보장하면서 대상 모드를 설계자가 원하는 대로 변화시킬 수 있게 된다.

5. 시뮬레이션 결과

Fig. 2와 같은 빔에 대해 8개의 가속도계를 이용하여 페루프를 구성하는 경우에 대해 살펴보자. 대상 모드를 4번째 모드로 잡고 제안된 방법을 통해 제한 이득값 벡터를 구성하였다. Fig. 3의 root-locus는 제어기 구성에 사용된 모드형상 벡터들에 오차가 포함되지 않았을 때 페루프 시스템의 폴(pole)들의 변화를 보여준다. 대상 모드를 제외한 나머지 모드들의 폴들이 움직이지 않음을 확인할 수 있다. 이는 제안된 제한 이득값 벡터에 의해 폴의 위치에 영점(zero)이 놓여지면서 stable pole-zero cancellation이 발생하여 폴(pole)들이 움직일 수 없게 되었기 때문이다. 하지만 실험을 통해 구해지는 모드형상에는 항상 오차가 포함되고 이 오차로 인해 제어기가 만들어 주는 영점들은 폴의 위치에 정확하게 놓여지지 않

게 된다.

이런 경우 페루프 시스템의 모드들의 변화를 살펴 보기 위해서 측정 오차가 포함된 시간 영역 입출력 데이터로부터 ERA(eigenstructure realization algorithm)⁽⁸⁾와 CBSI(common basis-normalized structural identification)⁽⁹⁾ 방법을 사용하여 모드형상을 구하였다. 모드형상들의 MAC(modal assurance criterion) 값이 0.89~0.94 정도의 값을 가지는 경우에 대상 모드인 4번째 모드가 5번째 모드에 근접하기 전까지의 폴들의 움직임을 보여주는 Fig. 4(a)의 root-locus 결과를 살펴보자. 대상 모드를 제외한 나머지 모드들의 폴들이 거의 움직이지 않고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)는 같은 경우에 FRF(frequency response function)의 변화를 나타내고 있다. 4번째 공진 주파수의 위치만이 변화하고 있음을 확인할 수 있다. 즉 대상 모드의 폴이 근접한 다른 모드의 폴에 접근하기 전까지는 측정 모드형상에 오차가 있어도 이론적으로 유도한 경우와 거의 같은 특성을 보임을 확인할 수 있다.

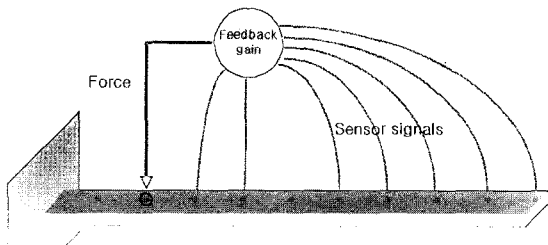


Fig. 2 Sensor and actuator setup for control

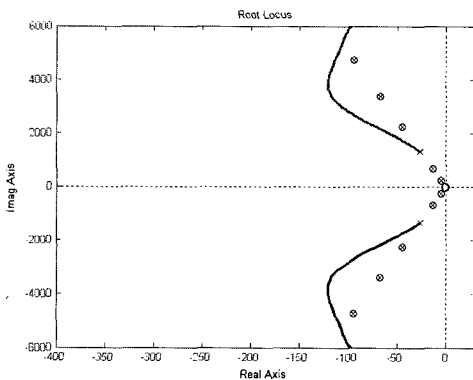
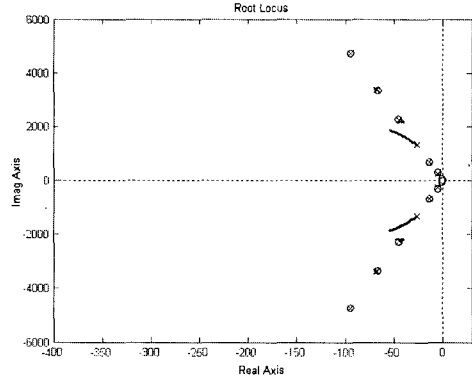
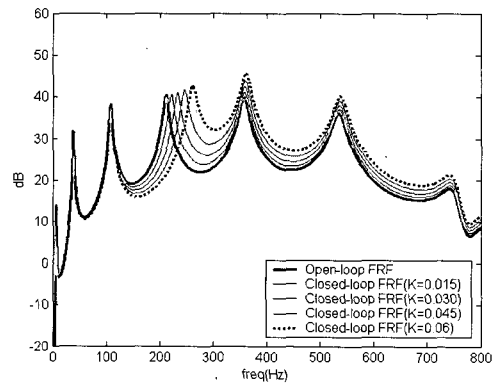


Fig. 3 Root-locus(error-free modeshape)

Fig. 5의 결과는 대상 모드가 근접한 다른 모드에 접근하였을 때 폴들의 변화를 나타내고 있다. 4번째 모드가 5번째 모드에 근접하면서 5번째 모드를 밀어 내고 근접한 zero로 수렴해 간다. 밀려난 5번째 모드



(a) Root-locus



(b) FRF changes

Fig. 4 Mode changes (noisy modeshape)

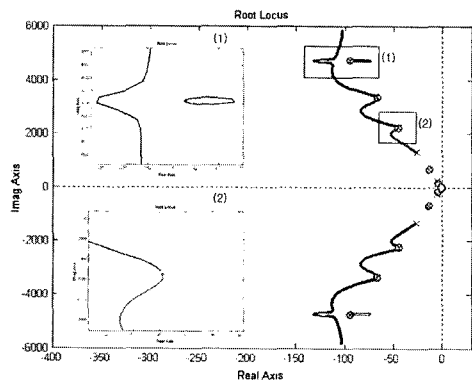


Fig. 5 Root-locus(noisy modeshape)

는 6번째 모드에 근접하여 역시 같은 식으로 6번째 모드를 밀어낸다. 6번째 모드가 7번째 모드에 근접했을 경우에는 조금 다른 결과가 나오는데 7번째 모드의 풀이 6번째 모드의 풀에 의해 밀려났다가 다시 돌아와서 근접한 zero로 수렴하고 6번째 모드의 풀은 7번째 모드를 지나서 8번째 모드를 향해 나아가게 된

다. 이런 특성을 페루프 공진 주파수와 모드형상의 변화를 통해 살펴보자. Fig. 6은 제한 이득값이 커짐에 따른 페루프 공진 주파수의 변화를 나타내고 있다. 4번째 페루프 공진 주파수가 커져서 5번째 공진 주파수에 근접함에 따라 5번째 공진 주파수가 밀려 올라가서 두 공진 주파수가 근접했다가 서로 멀어지

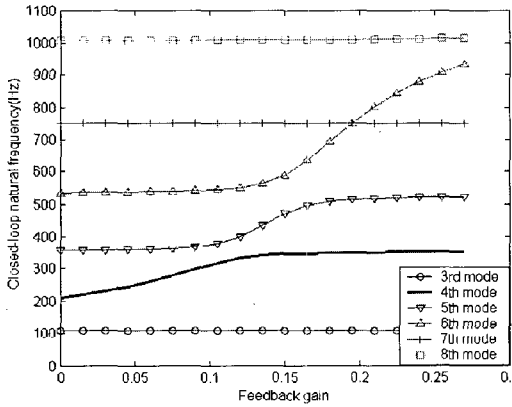
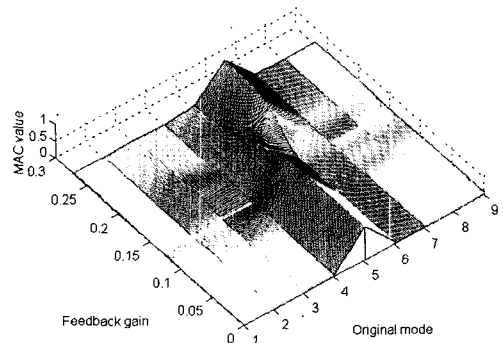
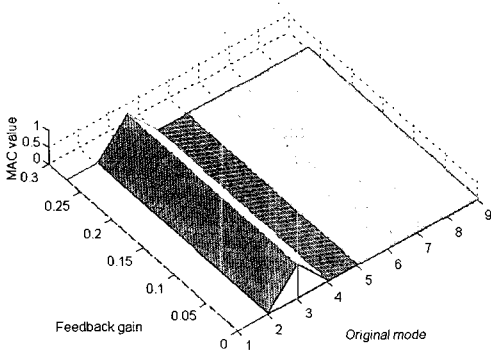


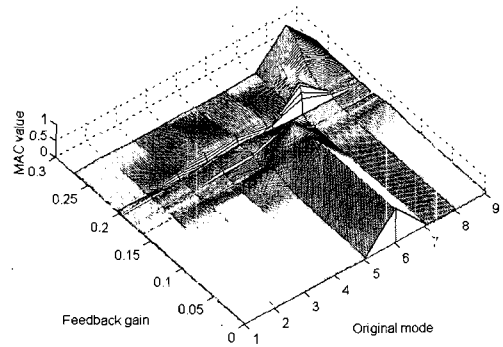
Fig. 6 Closed-loop natural frequency loci



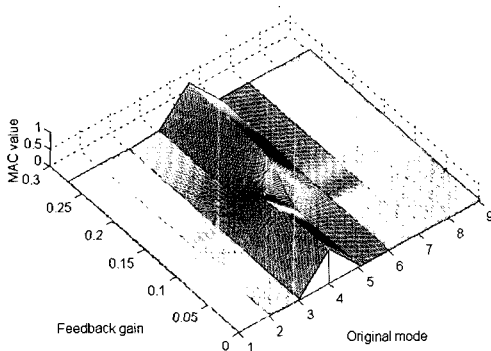
(c) 5th mode



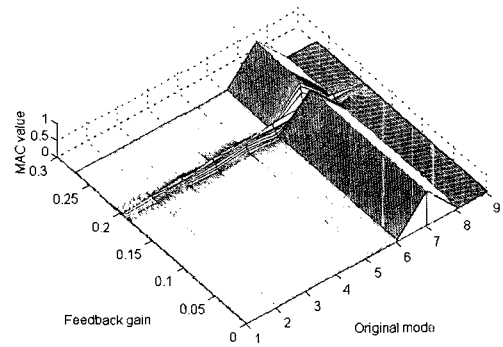
(a) 3rd mode



(d) 6th mode



(b) 4th mode



(e) 7th mode

Fig. 7 Closed-loop modeshape loci

는 주파수 veering 현상이 발생하고 있다. 6번째 페루프 공진 주파수의 경우에는 점차 커져서 7번째 공진 주파수를 지나게 되어 두 모드 사이에 주파수 crossing이 발생한다. Fig. 7은 페루프 모드형상과 원래 시스템의 모드형상간의 상관도를 MAC 값을 이용하여 표현함으로써 페루프 모드형상의 변화를 보이고 있다. 4번째 모드가 5번째 모드에 근접하면서 페루프 모드형상에 전환이 발생함을 확인할 수 있다. Fig. 7(e)의 경우에는 7번째 모드의 폴이 밀려났다가 다시 돌아오면서 모드형상도 변화가 생겼다가 다시 원래로 돌아오는 것을 확인할 수 있다.

이런 모달 데이터의 변화는 pole-zero cancellation 이 되지 않은 상황에서 pole과 zero들의 인력과 척력의 상관 관계에 의해 폴들의 움직임이 결정되면서 발생한다. 이 경우 폴들이 때로는 right half plane으로 넘어갈 수도 있기 때문에 시스템의 안정성을 확실하게 보장할 수가 없게 된다. 하지만 Fig. 4의 결과에서 볼 수 있듯이 대상 모드의 폴이 다른 모드의 폴에 아주 근접하지 않는 한도 내에서는 측정 모드형상에 오차가 있다고 해도 페루프 시스템의 안정성을 확보하면서 대상 모드를 변화시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

6. 결 론

이 연구에서는 시스템에 페루프를 적용하고 페루프 공진 주파수를 이용하여 모델 계수를 추정하는 방법론에 대해 다루었다. 페루프 공진 주파수로부터 새로운 정보를 얻기 위해서는 모드 변화에 효과적인 제어기 설계가 중요하게 된다. 본 연구에서는 대상 모드를 제외한 나머지 모드들에 들어가는 제어 파워를 없애서 나머지 모드들의 변화를 제한함으로써 페루프 시스템의 안정성을 보장하는 모드 분리 제어기를 제안하였다. 모드 분리 제어기를 사용할 경우 모드들 사이의 커플링이 사라져서 각 모드의 안정성이 유지되는 특성이 있었다. 측정된 모드형상에 오차가 포함된 경우에도 모드 교차가 발생하기 전의 쾌환 이득값 범위내에서는 안정적으로 사용할 수 있음을 모의 실험을 통해 보였다.

후 기

이 연구는 국가지정연구사업 “진동저감을 위한 동특성 변경기술(2000-N-NL-01-C-148)”과 2004년 두뇌 한국 사업(Brain Korea 21) 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) Mottershead J. E. and Friswell, M. I., 1993, "Model Updating in Structural Dynamics: A Survey," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.167, No. 2, pp. 347~375.
- (2) Friswell, M. I., 1996, *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*, Kluwer Academic Publishers, London, Chap. 5.
- (3) Dascotte, E., 1990, "Practical Application of Finite Element Tuning Using Experimental Modal Data," *Proceedings of the 8th International Modal Analysis Conference*, Florida, pp. 1032~1037.
- (4) 정훈상, 박영진, 2004, "페루프 공진 주파수를 이용한 모델 개선법," *한국소음진동공학회논문집*, 제 14 권, 제 9 호, pp. 801~810.
- (5) Jung H. S. and Park, Y. J., "Model Updating Using the Closed-loop Natural Frequency," *AIAA Journal of Guidance, Control Dynamics* (to be published).
- (6) Syrmos, V. L., 1997, "Static Output Feedback-a Survey", *Automatica*, Vol. 33(2), pp. 125 ~137.
- (7) Lin C. C. and Lu, K. H., 1996, "Optimal Discrete-time Structural Control Using Direct Output Feedback," *Engineering Structures*, Vol. 18, No. 6, pp. 472~480.
- (8) Juang, J. N., *Applied System Identification*, Prentice Hall, New Jersey, chap. 5.
- (9) Alvin K. F. and Park, K. C., 1994, "Second-order Structural Identification Procedure via State-space-based System Identification," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 2, pp. 397~406.