

# 궤환 모델 개선법 : 부정정 구조물에서의 적용

## Feedback Model Updating: Application to Indeterminate Structure

정 훈상\*, 박 영진\*\*, 박 윤식\*\*

Jung Hunsang, Park Youngjin, Park Younsik

**Key Words:** Model Updating, Feedback Exciter, Finite Element Model, Eigenvalue Sensitivity Matrix, Parameter Identification

### ABSTRACT

The parameter modification of the initial FEM model to match it with the experimental results needs the modal information and the modal sensitivity matrix to the parameter change. There are two cases this methodology is ill-equip to deal with; the deficiency of the necessary modal information and the ill-conditioning of the sensitivity matrix. In this research, a novel concept of the feedback exciter that uses the summation of the white noise and the signals from the measurement sensors multiplied with feedback gains as the reference signal is proposed. There are 2 advantages using this external feedback excitation. First, we can use the change of the system response such as modal data by the active energy path from the sensor to the exciter. This change of the system response can be additional clues to the system dynamics that we want to know. Secondly, the external energy path alternates the effect of the parameter change to the system response. That means the modal sensitivity of the parameters becomes different from the original sensitivities by the feedback excitation. Through the feedback loop, we can change the similar modal sensitivities of some updating parameters and consequently discriminate the parameters using the closed-loop modal data. To demonstrate the discrimination performance, the parameter estimation of an indeterminate structure by use of the feedback method is introduced.

### 기호설명

- $M, C, K \in R^{n \times n}$ : 시스템 행렬
- $x \in R^{n \times 1}$ : 변위 벡터
- $f \in R^{n \times 1}$ : 힘 벡터
- $b \in R^{n \times 1}$ : 가진 위치 벡터
- $f_a$ : 힘 입력
- $k_F, m_F \in R^{1 \times n}$ : 궤환 이득값
- $S \in R^{m \times l}$ : 고유치 민감도 행렬
- $\Phi \in R^{n \times m}$ : 측정 고유 벡터 행렬
- $\Lambda \in R^{m \times m}$ : 측정 고유치 행렬
- $W^L \in R^{n \times n}$ : 좌 고유 벡터
- $W^R \in R^{n \times n}$ : 우 고유 벡터

### 1. 서론

진동 구조물의 신뢰할 수 있는 모델을 만드는 문제는 직접 방법론과 민감도 기반 방법론으로 나눌 수 있다. 직접 방법론은 측정된 모달 데이터를 이용하여 시스템 행렬을 직접적으로 구성하는 방법이다. 이 방법을 통해 얻어진 시스템 행렬은 부가적인 에너지 통로를 수반하고 불완전한 측정 모달 데이터를 사용함으로써 시스템 행렬의 정정성이 보장되지 않는 등의 문제점이 있다. 이런 문제점들을 극복하기 위해서 모달 데이터나 주파수 응답 함수의 특정 모델 계수에 대한 민감도를 이용하여 실험 결과와 모델의 차이를 줄이도록 모델 계수들을 보정해

주는 방법론이 개발되었다. 이 방법론에는 측정 정보의 부족과 민감도 행렬의 악조건이라는 두가지 문제점이 있다<sup>(1)</sup>.

본 논문은 이 두가지 문제점 중에서 악조건 문제에 중점을 두고 이것을 해결하는 것에 초점이 맞추어져 있다. 민감도 행렬의 악조건은 특정 모델 계수들에 대한 모달 데이터나 주파수 응답 함수의 민감도가 서로 유사해서 측정 정보를 이용해서 모델 계수들을 추정할 때 모델 계수들의 차이를 구분하지 못하기 때문에 발생하는 문제이다. 이런 상황은 안전상의 문제로 부가적인 프레임들이 사용된 부정정 구조물(indeterminate structure)등에서 쉽게 발견되는 현상이다. 이런 부가적인 프레임들은 구조물의 모달 데이터 변화에 거의 같은 영향을 미치기 때문에 어떤 프레임의 물성치 변화가 구조물의 모달 데이터 변화를 유발했는지 알 수 없게 된다. 이 경우 측정 모달 데이터에 포함된 오차는 상대적으로 모델 계수의 추정값에 큰 영향을 미치게 된다. 이 문제는 특정 모델 계수들의 유사한 민감도를 바꾸어 주지 않으면 해결될 수 없다. 가상 변수법(instrument variable), 최소 분산법(minimum variance method)과 같은 여러가지 추정 알고리즘들을 사용하면 추정 변수에 포함되는 측정 오차의 영향을 줄여줄 수는 있지만 비슷한 모델 계수들을 구분하여 정확한 값을 추정해 주지는 못한다.

본 논문에서는 가속도 신호와 같은 구조물의 출력에 궤환 이득값을 곱해주어 가진 입력 신호와 더해줌으로써 구조물에 인위적인 궤환 루프를

\* 한국과학기술원, 기계공학과,  
E-mail : elrond@kaist.ac.kr, Tel : (042) 869-3076  
\*\* 정희원, 한국과학기술원, 기계공학과

걸어주고 원래 모달 데이터 뿐만 아니라 페 루프 시스템의 모달 데이터도 사용하는 방법을 통해 약조건 문제를 해결하고자 한다. 이 방법에는 2 가지 장점이 있다. 우선 측정 센서와 가진기 사이의 외부 에너지 통로인 페 루프를 시스템에 인가했을 때 시스템 특성의 변화는 시스템 특성에 대한 새로운 정보로서 이용될 수 있다. 두번째로 구조물에 페 루프를 걸어줌으로써 구조물 동특성에 대한 특정 모델 계수들의 영향을 바꿔 줄 수 있다는 것이다. 이것은 페 루프 시스템의 특정 모델 계수들에 대한 모달 민감도가 원래 시스템으로부터 바뀌게 된다는 것을 의미한다. 특정 모델 계수들의 비슷한 모달 민감도를 페 루프를 통해 바꿔줌으로써 제한제어 미사용시 비슷한 모달 민감도를 가지는 모델 계수들을 정확하게 추정할 수 있다. 본 논문에서는 페 루프 모달 데이터를 이용하는 모델 계수 추정법에 대해 간략하게 설명하고 페루프 데이터를 이용한 약조건 문제 해결에 대해 다룬다.

## 2. 시스템 구성 및 모델 계수 추정<sup>(1)</sup>

### 2.1 시스템 구성

선형 시불변 시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f} = \mathbf{b}f_i, \quad (1)$$

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

여기서  $a$ 는 가진기 위치를 나타낸다. 이 시스템의 고유치 및 고유 벡터는 다음의 특성을 만족한다.

$$\mathbf{K}\mathbf{W} = \mathbf{M}\mathbf{W}\Lambda, \quad (3)$$

$$\mathbf{W}^T \mathbf{M} \mathbf{W} = \mathbf{I}, \mathbf{W}^T \mathbf{K} \mathbf{W} = \Lambda, \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{W}$ 와  $\Lambda$ 는 각각 고유 벡터 및 고유치를 나타낸다.  $\mathbf{W}$ 는 식 (4)와 같이 직교성을 만족한다.

### 2.2 모델 계수 추정법

개선하고자 하는 시스템 행렬  $\mathbf{M}$ 과  $\mathbf{K}$ 는 초기 모델과 추정하고자 하는 모델 계수들의 섭동으로 표현된다.

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_0 + \sum_{j=1}^l \delta\theta_j \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \theta_j}, \quad (5)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 + \sum_{j=1}^l \delta\theta_j \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \theta_j}, \quad (6)$$

여기서  $\theta_j$ 와  $l$ 은 각각 모델 계수 및 모델 계수의 개수를 나타낸다.  $\partial \mathbf{M} / \partial \theta_j$ 와  $\partial \mathbf{K} / \partial \theta_j$ 는 시스템 행렬의 모델 계수에 대한 민감도를 나타낸다. 이 경우 시스템 고유치의 모델 계수에 대한 민감도는 다음과 같이 표현된다<sup>(1)</sup>.

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \theta} = \mathbf{W}_i^T \left[ \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \theta} - \lambda_i \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \theta} \right] \mathbf{W}_i, \quad (7)$$

$$\mathbf{S} = \left[ \frac{\partial \lambda_i}{\partial \theta} \right], \quad (8)$$

여기서 아래 첨자  $i$ 는 대상 모드를 표현하기 위해 사용되었다. 시스템과 초기 모델의 차이가 식 (5) 및 (6)과 같이 선형적인 관계를 만족할 경우 모델과 시스템의 모달 데이터의 차이는 다음과 같이 선형 근사식으로 표현가능하다.

$$\delta \mathbf{z} = \mathbf{S} \delta \mathbf{p}, \quad (9)$$

$$\delta \mathbf{p} = \mathbf{p}_r - \mathbf{p}, \quad (10)$$

$$\delta \mathbf{z} = \mathbf{z}_r - \mathbf{z}, \quad (11)$$

여기서  $\mathbf{p}$  및  $\mathbf{z}$ 는 각각 모델 계수 벡터 및 모델의 고유치 벡터이다. 아래 첨자  $r$ 이 사용된 기호는 시스템의 특성을 나타내기 위해 사용되었다. 아래의 목적 함수를 이용하여  $\mathbf{z}$ 과  $\mathbf{z}_r$ 의 차이가 최소화되도록 모델 계수들이 추정되게 된다.

$$J(\delta \mathbf{p}) = \{ \delta \mathbf{z} - \mathbf{S} \delta \mathbf{p} \}^T \{ \delta \mathbf{z} - \mathbf{S} \delta \mathbf{p} \}. \quad (12)$$

이 문제의 기본해는 일반 역함수를 이용하여 구해진다.

$$\delta \mathbf{p} = \mathbf{S}^+ \delta \mathbf{z}. \quad (14)$$

일반적으로 반복 계산을 통해 모달 데이터와 모델 계수 사이의 비선형성을 보상해준다. 측정 오차에 대한 분산 정보가 사용가능하다면 확률에 기반한 최소분산법과 같은 방법들을 사용하여 추정된 모델 계수에 대한 측정 오차의 영향을 보다 더 줄여줄 수 있다.

## 3. 부정정 구조물의 약조건 문제

부정정 구조물이란 말은 구조물에 가해진 외력만으로 구조물의 정적 변형을 구할 수 없는 구조물을 표현하기 위해 사용된다. 본 논문에서 주로 다루고 있는 시스템은 부정정 구조물 중에서 안전상의 이유로 부가적인 프레임들이 사용된 구조물이다. 이런 부가적인 프레임들을 사용할 경우 각각의 프레임의 물성치 변화가 구조물 동특성의 변화에 미치는 영향이 매우 유사하기 때문에 구조물의 모달 데이터 측정만을 사용해서는 정확한 모델 계수의 추정이 어렵게 된다. 예를 들어, 그림 1의 트러스 구조물에서 17 번 요소와 18 번 요소 중 하나만 있어도 구조물의 안정성은 만족되지만 안전의 문제로 두 요소가 모두 사용되었다. 17 번 요소의 강성 변화와 18 번 요소의 강성 변화는 구조물 동특성 변화에 같은 효과를 가진다.

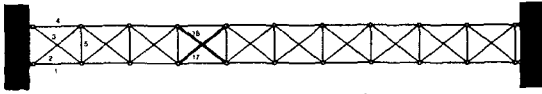
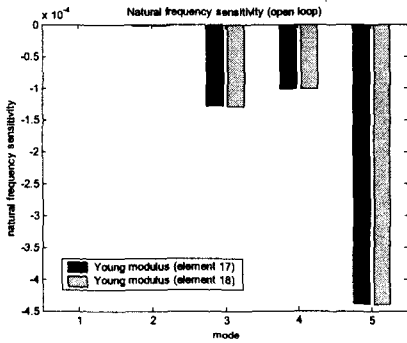
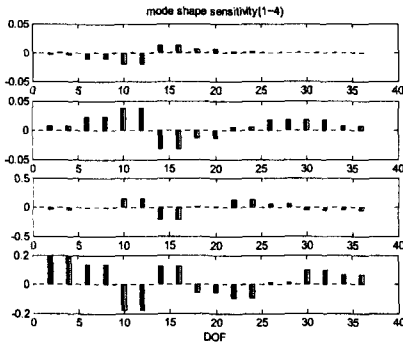


그림 1 부정정 트러스

그림 2 는 요소 17 및 18 의 영스 모듈러스의 모달 민감도를 나타낸다. 그림 2(a)는 5 번째 모드까지의 공진 주파수 민감도를 나타내고 그림 2(b)는 4 번째 모드까지의 모드 형상 민감도를 나타내고 있다. 두 모달 민감도는 거의 같다. 만약 구조물의 모달 데이터만을 이용하여 요소 17 및 18 의 영스 모듈러스를 추정하게 되면 요소 17 및 18 을 구분하여 추정하는 것은 불가능하게 된다.



(a) 공진 주파수 민감도



(b) 모드 형상 민감도

그림 2 모달 민감도 : 개루프 경우

#### 4 페루프를 이용한 모델 계수 추정

##### 4.1 페루프 시스템의 구성

그림 3 은 제안된 페 루프 방법의 개념을 나타내고 있다. 기존의 모달 데이터 측정은 그림 4 의 (b) 및 (c) 지점의 입력힘과 출력 가속도를 얻음으로써 이루어지지만 페 루프가 걸린 후에는 입력값이 가진기에 들어가는 기준 신호로 바뀌게 된다. 페 루프 시스템은 궤환 이득값과 가진기 동특성을 포함하게 된다.

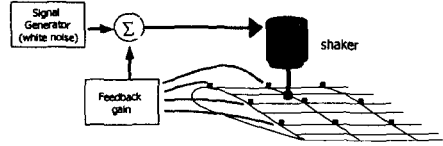


그림 3 궤환 루프 개념도

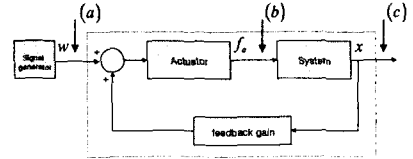


그림 4 궤환 루프 블락 다이어그램

전자기 가진기의 기계적 동특성은 아마튜어의 질량, 강성 및 댐핑을 고려하여 다음과 같이 표현된다<sup>(2)</sup>.

$$m_a \ddot{x}_a + c_a \dot{x}_a + k_a x_a + f_a = f_e, \quad (15)$$

여기서  $m_a, k_a, c_a$  와  $x_a$  는 각각 아마튜어 질량, 스프링 강성, 댐핑 및 아마튜어 변위를 나타낸다. 전자기 힘  $f_e$  는 아마튜어를 진동하게 하고 이를 통해 구조물에 가진력  $f_a$  가 전달된다. 식(15)는 시스템의 변위 벡터를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{m}_a \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{c}_a \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{k}_a \mathbf{x} + \mathbf{f}_a = \mathbf{f}_e, \quad (16)$$

여기서  $\mathbf{m}_a$  는  $a$  번째 요소가  $m_a$  이고 나머지 요소는 0 인 행벡터이다.  $\mathbf{c}_a$  와  $\mathbf{k}_a$  도 같은 형태이다. 페루프가 걸리면 가진기 입력 신호는 기준 신호와 가속도계와 같은 센서의 신호가 더해진 값이 된다.

$$f_e = \mu_F (w - \mathbf{k}_r \mathbf{x} - \mathbf{c}_r \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{m}_r \ddot{\mathbf{x}}), \quad (17)$$

여기서  $w, \mathbf{k}_r, \mathbf{c}_r$  와  $\mathbf{m}_r$  은 각각 백색 잡음과 변위, 속도, 가속도 측정값에 해당하는 궤환 이득값들이다.  $\mu_F$  는 가진기의 전기부 특성을 나타내기 위해서 사용되었다. 전기부의 동특성이 기계부에 비해 빠르기 때문에  $\mu_F$  는 사용 주파수 영역내에서 일정한 값으로 가정할 수 있다. 식 (16) 및 (17)을 식 (1)에 더해 정리하면 페 루프 시스템의 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(\mathbf{M} + \mathbf{b}\mathbf{m}_a + \mu_F \mathbf{b}\mathbf{m}_r) \ddot{\mathbf{x}} + (\mathbf{C} + \mathbf{b}\mathbf{c}_a + \mu_F \mathbf{b}\mathbf{c}_r) \dot{\mathbf{x}} + (\mathbf{K} + \mathbf{b}\mathbf{k}_a + \mu_F \mathbf{b}\mathbf{k}_r) \mathbf{x} = \mathbf{b}\mu_F w \quad (18)$$

페루프 구성 후에 시스템 행렬들은 가진기 동특성 행렬과 궤환 이득값 행렬들이 더해지게 된다. 페 루프 구성후에 시스템 행렬들의 대칭성이 깨진 것을 확인할 수 있다. 페루프 데이터를 이용해서 모델 계수들을 추정할 때는 시스템 행렬의 비대칭성을 고려해서 모달 민감도를 수정한 후 사용해야 한다<sup>(3)</sup>.

#### 4.2 페루프 모델 계수 추정

$$\mathbf{M}_r = \mathbf{M}_0 + \mathbf{b}m_r + \mu_r \mathbf{b}m_r, \quad (19)$$

$$\mathbf{K}_r = \mathbf{K}_0 + \mathbf{b}k_r + \mu_r \mathbf{b}k_r, \quad (20)$$

여기서  $\mathbf{M}_r$  과  $\mathbf{K}_r$  은 페루프 구성후의 질량 및 강성 행렬을 나타낸다. 비 대칭인 질량 및 강성 행렬에 대해 다음과 같이 좌/우 고유 벡터가 다르게 존재하고 좌/우 고유 벡터들은 같은 고유치를 공유하고 서로 직각이다.

$$\mathbf{K}_r \mathbf{W}^R = \mathbf{M}_r \mathbf{W}^R \Lambda, \quad (21)$$

$$\mathbf{K}_r^T \mathbf{W}^L = \mathbf{M}_r^T \mathbf{W}^L \Lambda, \quad (22)$$

$$\mathbf{W}^{L^T} \mathbf{K}_r \mathbf{W}^R = \Lambda, \quad \mathbf{W}^{L^T} \mathbf{M}_r \mathbf{W}^R = \mathbf{I}, \quad (23)$$

여기서  $\mathbf{W}^L$  와  $\mathbf{W}^R$  은 좌/우 고유치 벡터이고 식 (23)과 같은 부직교성(biorthogonality)을 가진다. 부직교성을 이용한 페루프 고유치 민감도는 다음과 같이 구해진다<sup>(3)</sup>.

$$\frac{\partial_c \lambda_i}{\partial \theta_j} = \mathbf{W}_i^{L^T} \left[ \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \theta_j} - c \lambda_i \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \theta_j} \right] \mathbf{W}_i^R. \quad (24)$$

보정된 민감도 행렬에 대해 모델 계수와 모달 데이터 사이에 다음의 선형 관계가 만족된다.

$$\mathbf{z}_i^i - \mathbf{z}^i = \mathbf{S}^i \delta \mathbf{p}, \quad (25)$$

여기서 위첨자  $i$  는  $i$  번째 페루프 제어기에 해당하는 모달 데이터 및 민감도 행렬을 나타내기 위해 사용되었다.  $k$  개의 페루프 제어기가 구성되었을 때 식 (12)의 목적 함수는 다음과 같이 변형된다.

$$\begin{aligned} J(\delta \mathbf{p}) &= \{ \delta \mathbf{z}^0 - \mathbf{S}^0 \delta \mathbf{p} \}^T \{ \delta \mathbf{z}^0 - \mathbf{S}^0 \delta \mathbf{p} \} + \\ & \{ \delta \mathbf{z}^1 - \mathbf{S}^1 \delta \mathbf{p} \}^T \{ \delta \mathbf{z}^1 - \mathbf{S}^1 \delta \mathbf{p} \} + \dots \\ & + \{ \delta \mathbf{z}^k - \mathbf{S}^k \delta \mathbf{p} \}^T \{ \delta \mathbf{z}^k - \mathbf{S}^k \delta \mathbf{p} \} \\ & = \{ \delta \mathbf{z} - \mathbf{T} \delta \mathbf{p} \}^T \{ \delta \mathbf{z} - \mathbf{T} \delta \mathbf{p} \}. \end{aligned} \quad (26)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}^0 \\ \mathbf{S}^1 \\ \vdots \\ \mathbf{S}^k \end{bmatrix}, \quad \delta \mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_r^0 - \mathbf{z}^0 \\ \mathbf{z}_r^1 - \mathbf{z}^1 \\ \vdots \\ \mathbf{z}_r^k - \mathbf{z}^k \end{bmatrix}, \quad (27)$$

$$\mathbf{T} \delta \mathbf{p} = \delta \mathbf{z}. \quad (28)$$

여기서  $\mathbf{T}$  는 통합 민감도 행렬이다. 페루프를 걸어주면 측정값의 개수는 늘어나지만 얻고자 하는 모델 계수의 수는 변하지 않기 때문에 측정 정보의 수를 늘릴 수 있다. 식 (24)를 보면 페루프 고유치 민감도는 식 (7)의 원래 고유치 민감도와 많이 달라짐을 확인할 수 있다. 즉 적절한 페루프 제어기 구성을 통해 특정 모델 계수들의 비슷한 고유치 민감도를 서로 달라지도록 구성할 수 있다<sup>(4)</sup>. 위에서 예를 든 트러스 구조물에 페루프 제어기를 붙이게 되면

17 번 및 18 번 요소 강성에 대한 고유치 민감도가 서로 달라지게 된다.

$$\frac{\partial \lambda_1}{\partial E_{17}} = \frac{\partial \lambda_1}{\partial E_{18}} \Rightarrow \frac{\partial_c \lambda_1}{\partial E_{17}} \neq \frac{\partial_c \lambda_1}{\partial E_{18}}, \quad (29)$$

이런 민감도 변화는 두 요소에 대한 에너지 전달 경로를 다르게 구성함으로써 얻어지는 결과이다.

### 5. 시뮬레이션 결과

#### 5.1 페루프 구성을 통한 모달 민감도 변화

위에서 예를 든 트러스 구조물에 페루프를 적용해 보자. 그림 5 에 나타난 것처럼 노드 15(x 방향)에 붙어있는 가속도계 신호에 제한 이득값을 곱해서 노드 8(y 방향)에 붙어있는 가진기 입력 신호에 더해준다. 이제 노드 15로부터 노드 8 까지의 에너지 경로가 만들어졌고 이 에너지 경로는 요소 17 과 18 에 다른 영향을 미칠 것이다. 그림 6 에 나타난 페루프 구성에 의한 모달 민감도의 변화를 살펴보자. 이제 요소 17 과 18 의 강성값은 모달 데이터 변화에 완전히 다른 영향을 미치게 됨을 확인할 수 있다.

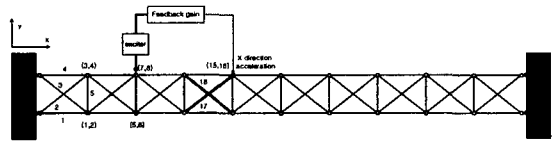
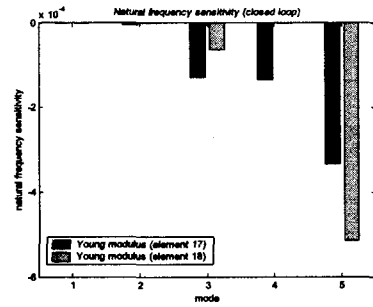
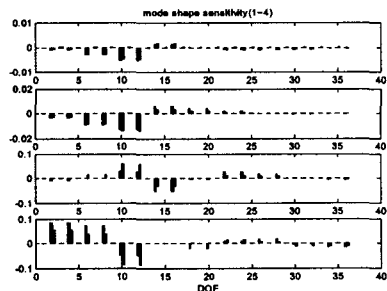


그림 5 페루프가 붙은 부정정 트러스



(a) 공진 주파수 민감도



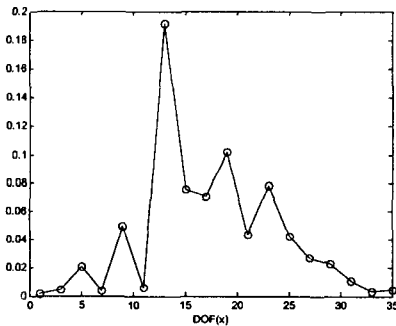
(b) 모드 형상 민감도

그림 6 모달 민감도 : 페루프 경우

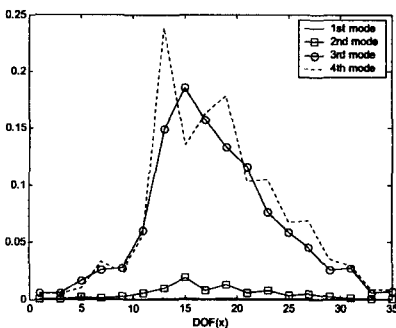
요소 17과 18의 비슷한 모달 민감도를 바꾸는데 적합한 센서 위치를 확인하기 위해서 가진기 위치는 고정하고 센서를 모든 x 방향의 노드에 놓아가면서 모달 민감도의 변화를 살펴보자. 모달 민감도의 독립성(independence)을 확인하기 위해서 다음의 척도를 사용하였다.

$$C = 1 - \frac{|a^T \cdot b|}{|a||b|}, \quad (30)$$

여기서  $a$ 와  $b$ 는 요소 17과 18의 고유치 민감도 벡터나  $i$ 번째 모드 형상 민감도 벡터를 나타내기 위해서 사용되었다. 만약 두 벡터가 상호 독립이라면  $C$ 의 값은 1 이고 반대의 경우에는 0 이다. 그림 7 은 센서 위치에 대한  $C$  값의 변화를 나타내고 있다. 주목할 점은 요소 18에 놓여져 있는 노드 13 주위에서 높은 상호 독립성이 얻어진다는 점이다.  $C$  값은 고정되어 있는 트러스의 양 끝단에서 낮은 값을 보인다.



(a) 공진 주파수 민감도의 상호 독립성



(b) 모드 형상 민감도의 상호 독립성

그림 7 모달 민감도의 상호 독립성(페루프 경우)

## 5.2 모델 계수 추정 결과

그림 8의 시스템에서 크랙에 의해 요소 7이나 8의 강성이 줄어든 경우에 크랙의 위치와 그 정도를 파악하도록 요소 5부터 9까지의 영스 모듈러스를 추정하는 경우에 대해 살펴보자. 초기 모델의 특성과 시스템과의 차이는 각각 표 1과

표 2에 나타나 있다. 강성의 감소는 그림 9(a)에 나타나 있듯이 요소 7이나 8의 강성이 급격히 감소한 두가지 경우가 각각 고려되었다. 초기 모델의 영스 모듈러스 값은 200 Gpa로 고정되어 있다. 5개의 공진 주파수값이 측정값으로 이용되었다. 실제 실험 오차를 모사하기 위해서 0.5Hz의 표준 편차를 가지는 랜덤 오차가 측정값에 더해졌다. 최소 분산법<sup>(1)</sup>을 사용하여 측정 오차의 영향을 줄이며 모델 계수들을 추정하였다. 표 3과 같이 5개의 페루프 제어기가 구성되었고 이를 통해 25개의 페루프 공진 주파수가 측정되었다. 원래 시스템의 모달 데이터를 제외한 페루프 공진 주파수만을 이용하여 모델 계수들을 추정하였다. 원래 고유치 민감도 행렬을 사용할 경우 조건수(condition number)가 1.2e15로 매우 높았지만 페루프 구성후에는 9.7까지 떨어져서 모델 계수들의 민감도간의 상호 독립성이 높아졌음을 확인할 수 있다. 그림 9(b)~(d)는 추정 결과를 나타내고 있다. 그림 9(b)는 원래 모달 데이터만을 사용한 결과이고 그림 9(c)와 (d)는 요소 7과 8에 각각 크랙이 발생했을 경우에 모델 계수 추정 결과이다. 원래 모달 데이터만을 사용한 경우 요소 7과 8의 모달 민감도가 같기 때문에 두 요소의 강성을 같은 값으로 추정하지만 페루프 데이터를 사용할 경우 두 요소의 모달 민감도가 달라졌기 때문에 두 요소의 강성을 구분하여 정확하게 추정하게 된다.

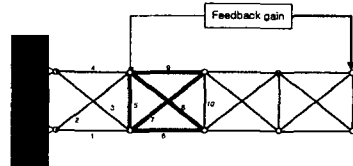


그림 8 대상 시스템

표 1 모델 데이터

Density ( $\rho$ ) <sup>o</sup>	Width ( $A$ ) <sup>o</sup>	Young's modulus ( $E$ ) <sup>o</sup>
7860 kg/m <sup>3</sup> <sup>o</sup>	0.001 m <sup>2</sup> m <sup>o</sup>	200×10 <sup>9</sup> N/m <sup>o</sup>

표 2 시스템과 모델의 공진 주파수 차이

Mode <sup>o</sup>	1 <sup>o</sup>	2 <sup>o</sup>	3 <sup>o</sup>	4 <sup>o</sup>	5 <sup>o</sup>
System natural frequencies (Hz) <sup>o</sup>	20.84 <sup>o</sup>	84.20 <sup>o</sup>	89.87 <sup>o</sup>	194.58 <sup>o</sup>	257.33 <sup>o</sup>
Initial model natural frequencies (Hz) <sup>o</sup>	21.02 <sup>o</sup>	85.00 <sup>o</sup>	91.04 <sup>o</sup>	197.03 <sup>o</sup>	261.52 <sup>o</sup>

표 3 페루프 제어기 데이터

Closed loop experiment <sup>o</sup>	1 <sup>o</sup>	2 <sup>o</sup>	3 <sup>o</sup>	4 <sup>o</sup>	5 <sup>o</sup>
Sensor location (mode) <sup>o</sup>	7 <sup>o</sup>	5 <sup>o</sup>	9 <sup>o</sup>	3 <sup>o</sup>	11 <sup>o</sup>
Feedback gain <sup>o</sup>	-300 <sup>o</sup>	500 <sup>o</sup>	-470 <sup>o</sup>	-1000 <sup>o</sup>	-500 <sup>o</sup>

## 6. 결론 및 향후 연구

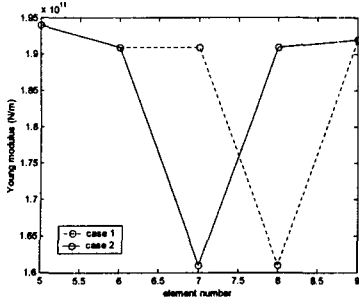
본 연구에서는 시스템에 페루프를 적용하고 페루프 모달 데이터를 이용하여 모델 계수를 추정하는 방법론에 대해 다루었다. 페루프 방법은 기존의 방법에 대해 두가지 장점이 있다. 우선 페루프를 시스템에 인가했을 때 시스템 특성의 변화를 이용함으로써 측정정보를 늘여줄 수 있었다. 두번째로 페루프를 통해 비슷한 모달 민감도를 가지는 모델 계수들의 민감도를 바꾸어 줌으로써 모델 계수 추정을 더욱 정확하게 할 수 있었다. 이를 확인하기 위해서 부정정 구조물의 모델 계수 추정에 페루프 방법론을 적용하였다. 페루프 방법을 실제로 적용하기 위한 실험 과정에 대한 연구가 필요할 것이다.

### 후 기

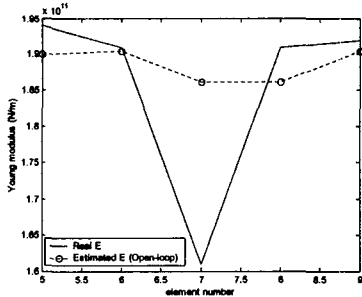
본 연구는 국가지정연구사업 “진동저감을 위한 동특성 변경기술(2000-N-NL-01-C-148)” 과 두뇌 한국 사업(Brain Korea 21) 지원에 의한 것입니다. 제안된 방법론의 적용 분야로 부정정 구조물을 제안해 주신 콜로라도 대학(Colorado university at boulder)의 박 광춘 교수님께 감사드립니다.

### 참고문헌

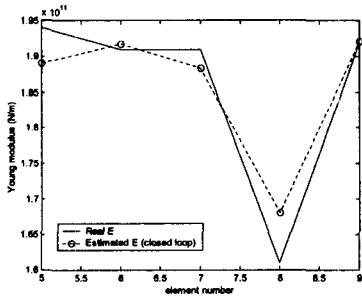
- (1) M. I. Friswell et al., 1996, Finite element model updating in structural dynamics, Kluwer academic publishers, London, chap. 5.
- (2) N. M. M. Maia et al., Theoretical and Experimental Modal Analysis, chap 7.
- (3) H. S., Jung et al., Model updating using the feedback exciter, Asia-Pacific Vibration Conference 2001, Oct.10.2001
- (4) 정훈상, 박영진, "궤환 제어를 이용한 모델 개선법 : 측정 센서 위치와 궤환 이득값 설정", 한국소음진동공학회 춘계학술대회, 2002년 5월



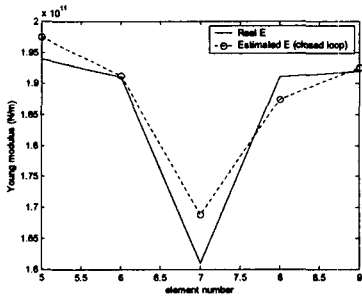
(a) 영스 모듈러스 분포



(b) 영스 모듈러스 추정결과 (개루프)



(c) 영스 모듈러스 추정결과 (페루프, 경우 1)



(d) 영스 모듈러스 추정결과 (페루프, 경우 2)

그림 9 모델 계수 추정 결과