

FRF를 이용한 동적 구조 시스템의 구조추정 및 재해석

Reanalysis for Correlating and Updating Dynamic Systems Using Frequency Response Functions

한경봉*
Han, Kyoung-Bong

박선규**
Park, Sun-Kyu

ABSTRACT

Model updating is a very active research field, in which significant efforts has been invested in recent years. Model updating methodologies are invariably successful when used on noise-free simulated data, but tend to be unpredictable when presented with real experimental data that are-unavoidably-corrupted with uncorrelated noise content. In this paper, Reanalysis using frequency response functions for correlating and updating dynamic systems is presented. A transformation matrix is obtained from the relationship between the complex and the normal frequency response functions of a structure. The transformation matrix is employed to calculate the modified damping matrix of the system. The modified mass and stiffness matrices are identified from the normal frequency response functions by using the least squares method. One simulated system is employed to illustrate the applicability of the proposed method. The result indicate that the damping matrix of correlated finite element model can be identified accurately by the proposed method. In addition, the robustness of the new approach uniformly distributed measurement noise is also addressed.

1. 서론

구조물의 손상추정을 위해서나 구조물의 효율적인 변경위치를 찾기 위해서는 구조계 원래의 특성을 찾아내는 것이 중요하다. 그러나, 실제 구조계의 동적 거동을 예측하는데 수학적인 모델이 실제 실험에서 측정된 결과와 비교하여 그 거동양상을 정확하게 예측하지 못하는 문제에 자주 접하게 된다. 불일치는 시스템 모델의 부정확한 변수의 원인이 된다. 그래서 구조모델의 정확한 질량, 강성, 감쇠 행렬을 찾아내는 것은 매우 중요하며 정확한 구조 변수들을 찾아내는 것은 구조추정이나 손상추정 그리고 구조설계 등의 분야에 널리 활용될 수 있을 것이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 최근 들어 실구조물의 계측 데이터를 이용하여 해석모델을 재구성하는 방법이 활발히 연구되고 있다. 대부분의 방법들은 계측데이터에서 노이즈가 포함되어 있지 않으면 그 방법이 정확하나, 임의의 노이즈가 데이터에 포함이 되면 이러한 방법들은 그 효용성에 문제를 발생시켰다. 특히, 구조계의 모델링에 특별히 감쇠가 그리 크지 않은 복잡한 구조물에서 노이즈가 섞인 실험데이터로부터 감쇠행렬을 추정하는 것은 매우 어려운 일이다. 기존에는 계측데이터로부터 질량과 강성행렬을 찾아내는 방법에 초점을 맞추어 연구를 진행해 왔으나 최근 들어 구조물의 감쇠에 대한 영향을 고려하고자하는 노력이 많이 진행되고 있다.

* 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, 학생회원

** 성균관대학교 토목환경공학과 부교수, 정회원

이에 본 연구에서는 구조물의 진동수응답함수(FRFs)를 이용하여 보정된 상관유한요소모델(Correlated Finite Element Model)을 구하는 구조재해석(Structural Reanalysis) 방법을 제시하였다. 변환행렬의 개념을 도입하였고, Least Square Method에 의해 노이즈가 제거된 FRFs를 이용하여 상관유한요소모델의 응답수정 감쇠행렬을 질량 및 강성행렬과 무관하게 독립적으로 추정하였다. 또한 상관유한요소모델의 응답수정 질량, 강성행렬도 응답수정 감쇠행렬과 무관하게 독립적으로 추정할 수 있었다. 본 논문에서 제시된 재해석 기법의 효용성을 증명하기 위해 두 가지 경우의 수치실험을 실시하였고, 그 결과 제안된 방법이 기존의 방법에 비하여 보다 높은 정밀도를 갖는 상관유한요소모델을 추정하였다. 그리고, 본 논문에서 제안된 방법이 노이즈가 섞인 상태의 측정 데이터를 이용하여도 보다 높은 정확도를 갖는 상관유한요소모델 추정이 가능함을 알 수 있었다.

2. FRFs를 이용한 상관해석모형의 작성

2.1. 응답수정행렬의 산정 방법

n -DOF의 선형 동적 시스템의 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t), \quad t \geq 0 \quad (1)$$

여기에서 $x(t) \in R^n$ 는 일반화된 변위 벡터, $f(t) \in R^n$ 는 하중 벡터, $M \in R^{n \times n}$ 는 Symmetric, Positive-Definite 질량 행렬, $C \in R^{n \times n}$ 는 Symmetric, Semi-Definite 감쇠 행렬 그리고, $K \in R^{n \times n}$ 는 Symmetric, Positive-Definite 강성 행렬이다. 조화하중 상태에서 식 (1)은 식 (2)와 같이 진동수영역으로 표현할 수 있다.

$$(-\omega^2 M + K)\hat{x}(\omega) + i\omega C\hat{x}(\omega) = \hat{f}(\omega) \quad (2)$$

여기에서 ω 는 조화하중의 진동수, $f(t) = \hat{f}(\omega) e^{i\omega t}$ 그리고, $x(t) = \hat{x}^C(\omega) e^{i\omega t}$ 이다. 식 (2)와 같이 구성 되는 동적 시스템은 초기에 가정된 기준해석모델이라고 볼 수 있다. 초기에 가정된 모델의 정확한 동적구조 변수들을 찾기 위해서는 실제 계측 실험을 실시하여 얻은 데이터를 이용하여 초기 기준해석모델을 수정하여야만 한다. 초기 기준해석모델의 동적방정식 (2)에 질량 그리고, 감쇠, 강성에 대한 응답수정행렬을 추가하면 식 (3)과 같다.

$$[-\omega^2(M + \Delta M) + (K + \Delta K)]\hat{x}(\omega) + i\omega[C + \Delta C]\hat{x}(\omega) = \hat{f}(\omega) \quad (3)$$

여기에서, ΔM , ΔC 그리고, ΔK 는 질량 그리고, 감쇠, 강성에 대한 응답수정변수행렬이다. 그런데 ΔM , ΔC 그리고, ΔK 는 동적 시스템의 계측 실험시 얻을 수 있는 실험 차수에 의존하게 되어 결국, 전체 구조계도 실험차수와 동일한 차수로 응축할 수 있다. 현실적으로 구조물의 자유도와 동일한 차수의 계측은 불가능하며 주로 동적 시스템을 대표하는 저차 모드에 대한 응답만을 측정하게 된다. 이는 전체 구조계의 응답특성을 모두 계측하지 못하고 실험에서 얻은 저차 모드만의 값을 이용하는 것이므로 근사해에 불과하다. 그러나, 일반적으로 토목 구조물의 경우 저차 모드의 값이 구조물을 대표하고, 저차 모드 값이라도 만족할 만한 계측값을 알 수 있다면 이는 보다 많은 모드를 포함한 정밀 값에 크게 차이가 나지 않을뿐더러 오히려 해석 구조물의 차수를 효과적으로 줄일 수 있으므로, 계산량의 감소와 더불어 효율적인 계산으로 인한 계산오차의 감소효과가 발생할 수 있다. 이러한 관계를 이용하면 식 (3)은 식 (4)로 표현 가능하다.

$$[(-\omega^2 M + K) + (-\omega^2 \Delta M + \Delta K)] \hat{x}(\omega) + i\omega(C + \Delta C) \hat{x}(\omega) = \hat{f}(\omega) \quad (4)$$

(4)식에서 내부항을 감쇠를 포함하지 않은 FRFs의 역행렬로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$[H^N(\omega) + H^{*N}(\omega)]^{-1} \hat{x}(\omega) + i\omega(C + \Delta C) \hat{x}(\omega) = \hat{f}(\omega) \quad (5)$$

여기에서, $H^C(\omega)$ 는 감쇠를 포함하지 않은 기준해석모델의 FRFs이고, $H^{*N}(\omega)$ 응답수정 감쇠를 포함하지 않은 수정 FRFs이다. 또한 식 (5)는 식 (6)과 같이 표현 가능하다.

$$\hat{x}(\omega) = [I + i\omega B(\omega)]^{-1} [H^N(\omega) + H^{*N}(\omega)] \hat{f}(\omega) \quad (6)$$

$$\text{여기에서 } B(\omega) = \omega[H^N(\omega) + H^{*N}(\omega)](C + \Delta C) \quad (7)$$

이고, 변환 행렬이라 정의한다. $B(\omega)$ 는 실수항만 존재하게 된다. 식 (6)에서 I 는 독립 행렬이고, 전체 동적 구조시스템의 감쇠를 고려한 FRFs로 표현하면 식 (8)과 같다.

$$\hat{x}(\omega) = H^{TC}(\omega) \hat{f}(\omega) \quad (8)$$

여기에서 $H^{TC}(\omega)$ 는 전체 동적 구조시스템의 감쇠를 고려한 FRFs이다. 식 (6)과 (8)에서 감쇠를 고려한 전체 구조계의 FRFs와 감쇠를 고려하지 않은 상관해석모델의 FRFs를 비교하면 식 (9)와 같이 정리하여 표현 할 수 있다.

$$H^N(\omega) + H^{*N}(\omega) = [I + iB(\omega)] H^{TC}(\omega) \quad (9)$$

$H^{TC}(\omega)$ 는 감쇠를 고려한 전체 구조시스템을 표현하며, 실제 전체 구조시스템에서 실험을 통해 산정될 수 있는 값이며 수치적으로 정방행렬이 된다. $H^{TC}(\omega)$ 는 실수와 허수영역으로 나누어 생각할 수 있으며, 이를 식 (9)에 적용하여 정리하면 식 (10)과 같다.

$$H^{*N}(\omega) = [H_R^{TC}(\omega) - B(\omega)H_I^{TC}(\omega) - H^N] + i[B(\omega)H_R^{TC}(\omega) + H_I^{TC}(\omega)] \quad (10)$$

여기에서, $H_R^{TC}(\omega)$ 는 전체 구조시스템에서 감쇠를 고려한 FRFs의 실수영역이고, $H_I^{TC}(\omega)$ 는 전체 구조시스템에서 감쇠를 고려한 FRFs의 허수영역이다. 식 (10)에서 좌측항은 감쇠를 고려하지 않은 수정 FRFs이므로 실수항이 된다. 그러므로, 식(10)의 우측항에서 허수항은 모든 진동수영역에서 0이 되어야 하며, 그때 변환행렬 $B(\omega)$ 는 식 (11)처럼 실험에서 얻을 수 있는 FRFs의 $H_R^{TC}(\omega)$ 와 $H_I^{TC}(\omega)$ 만으로 산정 할 수 있다.

$$B(\omega) = -H_I^{TC}(\omega) [H_R^{TC}(\omega)]^{-1} \quad (11)$$

$$H^{*N}(\omega) = H_R^{TC}(\omega) - B(\omega)H_I^{TC}(\omega) - H^N \quad (12)$$

식 (11)을 식 (10)에 대입하게 되면 식 (12)처럼 수정 FRFs 역시 전체 구조시스템의 실험에서 얻을 수 있는 FRFs의 $H_R^{TC}(\omega)$ 와 $H_I^{TC}(\omega)$ 항으로 표현 할 수 있다. 결국 전체 구조시스템의 실험을 통해 얻은 FRFs를 이용하여 기준해석모델을 수정한 상관해석모델을 재구성할 수 있게 되며 이는 일반 동적 해석과는 달리 실제 구조물의 거동을 보다 정확하게 표현 할 수 있는 모델이 구성되었음을 의미한다. 식 (11)와 (12)에서 변

환 행렬 $B(\omega)$ 와 감쇠를 고려하지 않은 수정 FRFs $H^{*N}(\omega)$ 이 계산되면, 식 (7)을 통해 질량과 강성이 포함되지 않은 상관해석모델의 감쇠행렬을 독립적으로 산정 할 수 있다.

2.2. 응답수정 감쇠 행렬의 산정

만약 계측데이터가 노이즈가 없이 완벽한 구조물의 거동을 표현한다면 기준 해석모델에서 산정 할 수 있는 감쇠를 고려하지 않은 FRFs $H^N(\omega_j)$ 와 식 (7)로부터 식 (13)과 같이 응답수정 감쇠행렬을 바로 구해 낼 수 있다.

$$\Delta C = \frac{1}{\omega_j} [H^{*N}(\omega_j) + H^N(\omega_j)]^{-1} B(\omega_j) - C \quad (13)$$

그러나, 실제에 있어서 FRFs에는 측정 오차들이 반드시 포함될 수밖에 없다. 본 논문에서는 이러한 오차를 없애는 방법으로 Least Square Method를 사용하여 수정 감쇠행렬을 추정하였다. 이를 자세히 설명하면, 식 (7)에서 $[H^N(\omega) + H^{*N}(\omega)] = H^{**N}$, $(C + \Delta C) = C^*$ 이라 치환하고, H^{**N} 과 C^* 의 대칭성을 이용하면 식 (7)은 식 (14)와 같이 변환이 가능하다.

$$B^T(\omega) = \omega C^* H^{**N}(\omega), \quad (14)$$

여기에서 $B^T(\omega)$ 는 $B(\omega)$ 의 Transpose 행렬이다. 식 (14)를 i th 행으로 표시하면

$$b_i(\omega) = \omega C^* h_i^{**N}(\omega) \quad (15)$$

여기에서 $b_i(\omega)$ 와 $h_i^{**N}(\omega)$ 는 $B^T(\omega)$ 와 $H^{**N}(\omega)$ 의 i th 행이다. 여러 개의 진동수들 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ 에서 식 (15)를 계산하면 식 (16)과 같다.

$$C^* V^T = Q^T \quad (16)$$

여기에서

$$V^T = [\omega_1 h_i^{**N}(\omega_1) \dots \omega_m h_i^{**N}(\omega_m)]$$

$$Q^T = [b_i(\omega_1) \dots b_i(\omega_m)]$$

식 (16)을 Transpose하면 식 (17)과 같다.

$$V C^* = Q \quad (17)$$

식 (17)에서 C^* 행렬에서 맨 밑의 열을 $\overline{c^*}$ 라 하면

$$\overline{c^*} = [c_{11}^* \ c_{21}^* \ c_{22}^* \ c_{31}^* \ \dots \ c_{ij}^* \ \dots \ c_{m1}^*]^T \quad i \geq j \quad (18)$$

여기에서, c_{ij}^* 는 C^* 행렬의 (i, j) 요소이다. 식 (18)은 식 (19)와 같이 표현할 수 있으며,

$$\overline{V} \overline{c^*} = \overline{q} \quad (19)$$

식 (19)에서 Least Square Method를 적용하면 식 (20)과 같이 표현된다.

$$\overline{V}^T \overline{V} \overline{c}^* = \overline{V}^T \overline{q} \quad (20)$$

벡터 \overline{c}^* 의 해는 식 (14)에서 C^* 행렬의 해가 되며 $C^* = (C + \Delta C)$ 이므로 기준해석모델의 감쇠 행렬 C 를 이용하여 응답수정 감쇠행렬을 산정 할 수 있다. 이는 기존의 방법들이 질량과 강성을 동시에 고려하여 감쇠 행렬을 산정하는 것이 과는 다르게 질량과 강성행렬과 독립적으로 응답수정 감쇠행렬을 추정하게 된다.

2.3. 응답수정 질량, 강성 행렬의 산정

응답수정 질량과 강성 그리고, 수정 FRFs와는 식 (21)과 같은 관계를 가지고 있다.

$$(-\omega^2 \Delta M + \Delta K) H^{*N}(\omega) = I \quad (21)$$

여기에서 $H^{*N}(\omega)$ 는 식 (12)에 의해 계산되어지며, $H^{*N}(\omega)$ 의 i 번째 열과 여러 개의 스펙트럴 라인으로 나누게 되면 식 (22)와 같이 확장 가능하다.

$$\Delta M A^T + \Delta K B^T = E^T \quad (22)$$

여기에서 $A^T = -[\omega_1^2 h_i^{*N}(\omega_1) \dots \omega_m^2 h_i^{*N}(\omega_m)]$, $B^T = [h_i^{*N}(\omega_1) \dots h_i^{*N}(\omega_m)]$, 그리고, E^T 는 i 번째 행은 1 이고 나머지 행들은 모두 0인 행렬이다. 식 (22)의 행렬을 Transpose 시키고, ΔM 과 ΔK 의 대칭성을 이용하면 식 (23)과 같이 표현 할 수 있다.

$$[A \ B] \begin{bmatrix} \Delta M \\ \Delta K \end{bmatrix} = E \quad (23)$$

응답수정 질량, 강성 행렬 또한 응답수정 감쇠행렬을 산정하는 방법과 동일하게 Least Square Method를 적용할 수 있으며, 응답수정 감쇠행렬과 무관하게 독립적으로 응답수정 질량, 강성 행렬을 산정할 수 있다.

3. 제안된 재해석 기법의 검증을 위한 수치실험

3.1. 측정 데이터와 노이즈 모델

일반적으로 수치 실험 데이터에 노이즈를 섞는 방법은 FRFs에 임의의 비례적인 Gaussian 노이즈를 추가 하는 방법을 주로 사용한다. 수식으로 표현하면 FRFs에 식(24)를 계수배 함으로써 표현이 가능하다.

$$\alpha(\omega) = \alpha(\omega) (1 + \alpha \cdot s) \quad (24)$$

여기에서 α 는 정규분포함수이고, s 는 표준편차이다. 본 논문에서는 노이즈를 고려한 수치실험을 수행하기 위해서 임의의 노이즈 범위가 5%인 경우를 사용하였다.

3.2 수치 실험

본 논문에서는 앞 절에서 제시된 구조 재해석 방법의 효용성을 입증하기 위하여 수치실험을 실시하였고, 그 결과를 비교하였다. 수치 실험에 사용된 예제 구조물은 Roemer [1992]가 제안한 모델로서 총 4개의 자유도를 갖는 구조물이다. Roemer는 동적 구조시스템의 구조 Parameter를 산정하는데 수치적인 반복방법을 통

하여 산정하였다. 그리고, Roemer는 본 논문에서 제시한 응답수정행렬의 개념이 아닌 전체 구조계의 동적 구조 Parameter를 직접 산정하는 방법을 제시하였다. 그러므로, 본 논문에서 제시한 재해석 기법과는 직접적인 비교는 불가능하나 최종적으로 산정되는 동적 구조시스템의 전체 구조 Parameter를 비교하는 것을 가능하므로 본 논문의 효용성을 상대적으로 입증하기 위해서 Roemer의 모델을 비교 대상으로 선정하였다. 구조물의 형상은 그림 1과 같고, 구조계의 동적 Parameter들은 식 (25)와 같다.

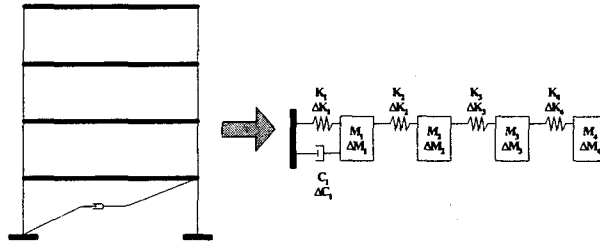


그림 1. Simulated System 4 DOF

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} 10 & -5 & 0 & 0 \\ -5 & 10 & -5 & 0 \\ 0 & -5 & 10 & -5 \\ 0 & 0 & -5 & 10 \end{bmatrix} \quad (25)$$

본 수치실험을 통해 FRFs는 Ratcliffe [1999]가 제안한 방법을 사용하여 산정하였다. 본 논문의 수치실험에서 초기에 가정된 기준해석모델은 식 (26)과 같다. 초기에 가정된 이론적인 기준해석모델을 실제 구조물의 동적 Parameter의 90%로 가정한 것과 같으며 일반적인 동적 구조시스템의 해석과정이라 할 수 있다. 가정된 기준해석모델을 바탕으로 수치실험을 통해 얻은 응답의 FRFs를 이용하여 상관해석모델을 작성하며, 결국 제시된 해석방법으로 산정 되어야할 응답수정행렬은 식 (27)과 같다.

$$M^* = \begin{bmatrix} 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9 \end{bmatrix} \quad C^* = \begin{bmatrix} 1.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad K^* = \begin{bmatrix} 9 & -4.5 & 0 & 0 \\ -4.5 & 9 & -4.5 & 0 \\ 0 & -4.5 & 9 & -4.5 \\ 0 & 0 & -4.5 & 9 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\Delta M = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad \Delta C = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \Delta K = \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & 0 & 0 \\ -0.5 & 1 & -0.5 & 0 \\ 0 & -0.5 & 1 & -0.5 \\ 0 & 0 & -0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

해석 결과 측정데이터에서 노이즈가 섞이지 않은 경우 산정된 상관해석모델의 동적 변수들은 제시된 구조물의 진값과 일치함을 알 수 있었고, 노이즈 범위 5%의 경우에는 본 논문에서 제시된 방법이 Roemer가 제안한 Integrated Method와 비교할 때 질량, 강성 그리고, 감쇠 행렬을 보다 정확히 추정함을 알 수 있었다. 특히 감쇠행렬의 경우는 제시된 방법이 Integrated Method보다 탁월하게 우수함을 알 수 있다.

일반적으로 감쇠행렬을 추정할 때 발생하는 오차는 질량이나 강성행렬을 추정할 때 발생하는 오차보다 상당히 크다. 그 이유는 감쇠값이 일반적으로 질량이나 강성행렬보다 아주 작은 값을 갖고 있기 때문이다. 그러므로, 질량과 강성행렬을 추정하는 방법과는 독립적으로 감쇠행렬을 추정하는 방법이 필요하다. 이에 본 논문에서 제시된 방법은 동적시스템에서 측정된 데이터를 이용하여 구조물의 동적 변수들을 한번에 구하는 방법이 아니라 초기에 가정된 기준해석모델을 보정하기 위한 응답수정행렬을 추정하여 상관해석모델을 제시하는 방법으로 계산 오차를 상당히 줄일 수 있으며, 보다 중요한 것은 기존의 방법들이 질량과 강성을 동시

에 고려하여 감쇠행렬을 산정하는 것이 과는 다르게 질량과 강성행렬과 독립적으로 응답수정 감쇠행렬을 추정하므로 계산시 발생하는 오차의 누적을 현저히 줄일 수 있는 방법임을 알 수 있다. 그림 2는 추정된 상관 해석모델의 동적 변수를 나타내고 있으며, 이에 따른 추정 고유진동수와 감쇠비는 표 1-2와 그림 3-4에 나타내었다. 비교 결과 기존에 제시된 Integrated Method보다 본 논문에서 제시된 방법이 상관해석모델의 고유진동수나 감쇠비를 추정하는데 보다 정확한 방법임을 알 수 있다.

특히, 감쇠행렬의 경우에는 그 양상이 확연하게 드러나는데, Roemer가 제안한 Integrated Method의 경우에는 감쇠행렬을 산정 하는데 많은 오차를 포함하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 본 논문에서 제시한 구조 재해석 방법으로 찾은 감쇠행렬의 경우는 실제 구조물의 감쇠행렬과 거의 유사한 양상을 보이고 있다.

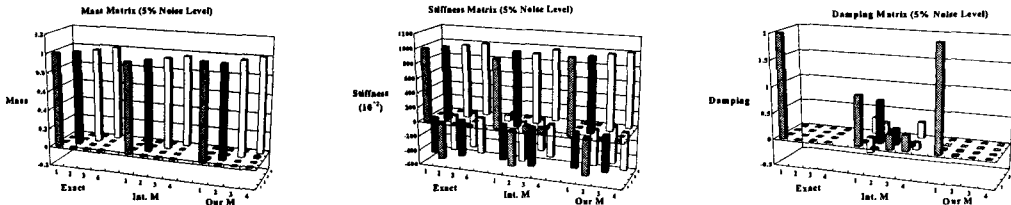


그림 2. Identified Dynamic System Matrices for 5% Noise Level

표 1. Natural Frequency for 5% Noise level

Modes	Exact	Integrated Method	Our Method
1	1.43	1.38	1.43
2	2.74	2.66	2.73
3	3.42	3.47	3.42
4	4.18	4.19	4.19

표 2. Damping Ratio for 5% Noise level

Modes	Exact	Integrated Method	Our Method
1	9.44	2.01	9.57
2	16.67	0.89	16.98
3	10.06	26.76	9.42
4	1.54	0.81	1.55

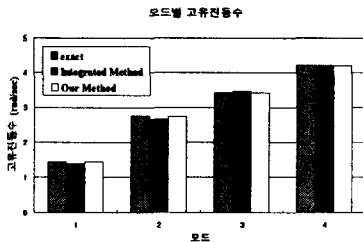


그림 3. Natural Frequency for 5% Noise level (Numerical Test I)

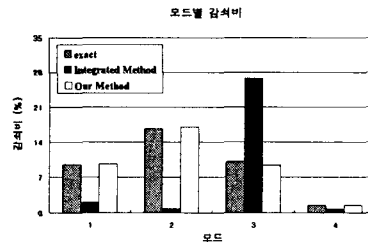


그림 4. Damping Ratio for 5% Noise level (Numerical Test I)

Noise Level이 5%인 경우에 수치실험에 대하여 초기에 가정된 기준해석모델의 변화에 따라 상관해석모델의 정확도가 어떻게 변화하는지 그림 5-7에 나타내었다. 초기에 가정된 기준해석모델이 실제 구조계의 동적 구조 Parameter에 가까워질수록 응답수정행렬의 산정값이 비교적 정확하게 일치함을 알 수 있었고, 최종적으로 산정되는 상관해석모델의 정확도 역시 높아짐을 알 수 있다. 이는 결국 본 논문에서 제시된 방법은 동적시스템에서 측정된 데이터를 이용하여 구조물의 동적 변수들을 한번에 구하는 방법이 아니라 초기에 가정된 기준해석모델을 보정하기 위한 응답수정행렬을 추정하여 상관해석모델을 제시하는 방법으로 계산 오차를 상당히 줄일 수 있으며, 보다 중요한 것은 기존의 방법들이 질량과 강성을 동시에 고려하여 감쇠행렬을 산정

하는 것이 과는 다르게 질량과 강성행렬과 독립적으로 응답수정 감쇠행렬을 추정하므로 계산시 발생하는 오차의 누적을 현저히 줄일 수 있는 방법임을 알 수 있다.

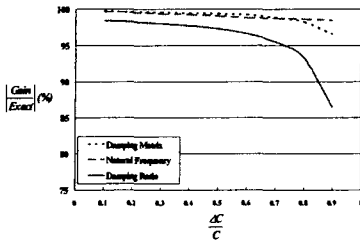


그림 5. 초기 가정 감쇠행렬비에 따른 상관해석모델의 변화

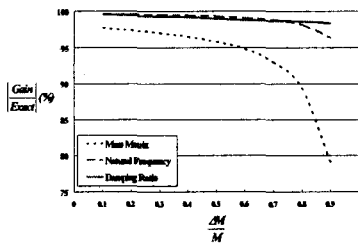


그림 6. 초기 가정 질량행렬비에 따른 상관해석모델의 변화

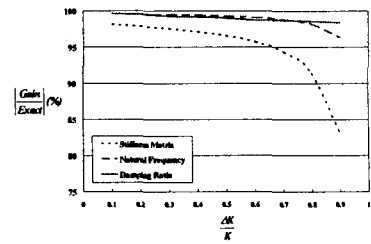


그림 7. 초기 가정 강성행렬비에 따른 상관해석모델의 변화

4. 결론

본 논문에서는 구조물의 FRFs를 이용하여 보정된 상관유한요소모델을 구하는 구조재해석방법을 제시하였다. 그 결과 제시된 방법이 노이즈가 섞인 데이터를 이용하여도 기존의 방법보다 변경된 구조계를 정확히 예측할 수 있었다. 본 논문에서 제시한 구조 재해석 방법은 기존의 System Identification과는 다르게 해석에서 가정된 기준해석모델과 실제모델과의 차이인 응답수정값을 Modal Data가 아닌 동적변수를 직접 산정할 수 있다. 시스템을 정의한 뒤 구조 재해석 과정에서 구조계의 동적인 Parameter들을 직접적으로 찾음으로써 시스템의 현 상황을 알아내고, 우리가 원하는 상태의 시스템이 가져야할 Parameter값과 구조 재해석 과정을 통해 찾아낸 값을 비교 검토하여 Parameter들을 조정할 수 있는 Parametric System Identification Reanalysis 방법이라 할 수 있다. 본 논문의 결과를 이용하여 구조물의 유지관리를 위한 동적 시스템의 상태 평가 방법이나, 구조물에 보수·보강을 행하는 경우 변경된 동특성이 설계자가 원하는 바에 가장 잘 부합하도록 변경부위를 찾는 방법에 적절히 이용 할 수 있으며, 이에 대한 연구를 수행중에 있다.

참고 문헌

1. 나옥진, 효과적인 동특성 변경을 위한 구조물 보강 위치 선정법, 석사학위논문, 한국과학기술원, 1997
2. 최일윤, 이준석, 문도영, 조효남, "시간영역에서의 교량 강성행렬 및 감쇠행렬의 추정에 관한 연구," 대한토목학회논문집, 제21권 5호, 2001, pp.563~571
3. 한국건설기술연구원, 구조물의 내하성능 평가기법 개발, 2000
4. Ratcliffe. K. J & Lieven. N. A, "An Investigation into the Effects of Frequency Response Function Estimators on Model Updating," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.13, 1999, pp.315~334
5. Roemer. M. J & Mook, D. J, "Mass, Stiffness, and Damping Matrix Identification: An Integrated Approach," *Journal of Vibration and Acoustics, ASME*, Vol.114, 1992, pp.358~363
6. Yang. B, "Exact Receptances of Nonproportionally Damped Dynamic Systems," *Journal of Vibration and Acoustics, ASME*, Vol.115, 1993, pp.47~52
7. Zang. C & Grafe. H & Imregun. M, "Frequency-Domain Criteria for Correlation and Updating Dynamic Finite Element Models," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.15, 2001, pp.139~155