구조물 동특성 변경 관련 연구 분야 및 동향 (I)

박 윤 식 · 박 용 화

(한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터)

이 글은 앞으로 4~6회에 걸쳐 우리 학회지(소음 · 진동)에 게재될 기획연재의 제 1 편입니다. 이 기획연재는 우리학회 1999년도 춘계학술대회(무주)에서 박윤식 교수(KAIST)의 특별강연을 기초로 하고 있습니다. 이 내용을 체계적으로 다루어 주었으면 좋겠다는 많은 회원들의 뜻에 따라 본 호부터 기획연재합니다.

(편집위원회)

1. 연구 배경

자동차, 항공기, 토목 구조물 및 공작기계 등 다양한 기계 구조물이 경량화 되면서 구조물의 동특성을 개선하고자 하는 노력이 광범위하게 연구되고 시도되고 있다. 구조물 동특성 변경법(SDM : Structural Dynamics Modification)은 기계 구조물의 동특성 개선을 목적으로 구조물의 첨가, 삭제 그리고 형상 및 물성치 변경을 얻기 위한 광범위한 연구를 지칭한다. 구조물 동특성 변경법은 구조진동학(structural vibration)의 한 분야로서 최적설계(structural optimization), 진동 저감을 위한 동감쇄기 설계(dynamic absorber design), 유한요소 모델 보정(FE model adjustment), 구조 합성법(CMS : Component Mode Synthesis), 구조변수규명(structural parameter identification), 기계 이상 진단(fault diagnosis) 등에 관한 유사 분야를 총괄한다. 즉 이와 같은 분야에서 사용하는 방법, 문제 정의 등이 상호 유사한 점이 많으므로 구조 변경법과 다른 관련 분야를 엄밀하게 구분하기는 어렵다. 그러나 광범위한 정의로서 구조물의 모드 영역(modal domain) 또는 응답 영역(response domain)의 정보와 공간 영역(spatial domain) 정보의 연관관계를 이용하여 원하는 동특성을 얻기 위한 구조물 재설계 안을 도출하는 방법론으로 정의할 수 있다. 대부분의 연구는 구조물의 수학적 모델로부터 구조 변경후의 동특성을 계산하는 해석 문제(forward problem)와 원하는 동특성을 얻기 위한 구조물 개선을 도출하는 설계 문제(inverse problem)로 크게 대별할 수 있다. 본 글에서는 편의상 설계 문제에 주안점을 두고 상기의 광범위한 연구분야 중 구조물 재설계에 관한 방법론을 논문조사를 통해 선별하고 그 장단점을 비교 검토하여 관련 분야의 연구자에게 필요한 정보를 제공하고자 한다.

2. 구조 변경법의 분류

구조물 동특성 변경법은 여러 가지 기준으로 분류 될 수 있다. 첫번째로, 개선하려는 동특성에 따라 두 가지로 분류될 수 있다. 즉 모드 영역(modal domain)의 정보를 개선할 것인가 또는 주파수 응답 함수를 개선할 것인가 하는 것이다. 고유진동수와 모드 형상은 가진력에 의하여 발생하는 구조물의 진동량을 결정하는 주요 인자이므로 모드 정보의 개선으로 효율적인 동특성 개선을 얻을 수 있다. 둘째는 모드 정보 대신에 응답 영역(response domain)의 특성치인 주파수 응답함수를 개선하는 것이다. 이는 진동량 자체를 개선한다는 점에서 특정 위치에서의 진동 저감 문제에 효율적으로 적용할 수 있는 동특성 개선법이 될 수 있다.

두번째로, 구조물 동특성 변경법 시 사용되는 정보의 취득 방법에 따라서 구조 변경법을 구별할 수 있는데 이는 해석적 방법과 실험적 방법으로 구분하는 것이다. 해석적 방법은 구조물의 수치모델을 사용하여 공간 영역(spatial domain) 상에서 구조변경을 수행하며 수치모델 해석법의 장점인 다양한 설계 변경안을 시뮬레이션 할 수 있다는 장점이 있다. 이 방법에서는 민감도 해석을 바탕으로 한 최적설계 기법이 일반적으로 사용된다. 반면에 실험적 방법은 수치모델 대신 측정된 주파수 응답 함수 또는 고유진동수, 모드형상을 사용하여 구조 변경안을 도출하는 것이며 이 방법은 유한 요소 모델 같은 해석적인 모델 수립 과정이 필요하지 않으므로 설계 변경안 도출 시간 및 비용을 절약할 수 있는 장점이 있다. 이 실험적 방법은 구조물의 구성이 복잡한 경우에 수치모델이 갖는 부정확성을 극복한다는 장점이 있지만 구조변경의 종류가 제한된다는 점이 단점에 될 수 있다. 한편 이 두 방법의 상호 단점을 보완하여 실험적 방법과 해석적 방법이 적절히 혼용된 방법도 많이 연구 발표되고 있다.

세번째로, 사용되는 구조물의 수학적 모델을 기준으로 구조 변경법을 분류할 수 있다. 구조 변경안 도출을 위해서는 기존 구조물과 부가 구조물의 수학적 모델이 필수적이며 이를 근간으로 구조 변경안을 도출할 수 있다. 수학적 모델을 사용하여 구조물의 첨가, 삭제, 연결 위치 선정 그리고 형상 및 물성치 변경 등의 각종 구조 변경을 시도할 수 있으며 또한 변경량, 실제 구조물에 구현 가능성 등 구조물의 제한 조건을 결정할 수 있다. 이 분류법은 일반적으로 사용되는 구조 변경법의 구분법에 해당되며 기본적으로 다음과 같이 나눌 수 있다. 미소 변경(small modification)을 위한 섭동법(perturbation method), 레이라이(rayleigh) 지수법, 민감도 해석법(sensitivity analysis) 등이 여기에 속하며, 국부 변경법(local modification)은 점질량과 선강성의 엄밀해를 구하는데 광범위하게 사용된다. 모드 영역의 방법은 주로 기존 구조물의 저차 모드 특성을 사용해 변경 후의 고유치 문제를 정식화하는 모드 합성법(modal synthesis)이 주류를 이루고 있으며 구조 변경을 구조물 합성법(structural synthesis) 관점에서 다룬 방법도 최근에 제시되고 있다. 이때 주파수 응답 함수의 결합을 이용하는 방법, 라그랑지 승수를 이용하는 방법 등을 통해 구조 변경 및 연결점 선정, 조인트 설계 문제 등에 적용한 논문들도 있다. 실험치를 이용하여 수치모델을 세우는 전형적인 역문제는 보의 구조 변경에 적용된 논문이 있으며 수치모델과 실험치를 비교하여 수치모델을 보정하는 연구도 역문제의 하나로서 유한요소 모델 보정, 국부적인 구조물 손상 색출 등의 방법론에 광범위하게 적용되고 있다. 한편, 구조물의 형상설계 분야에서는 Homogenization Method와 에너지 방법 등이 연구되고 있으며 이를 이용한 구조물 재설계 방법론도 제시되고 있다.

네번째로, 구조변경 과정에서 사용되는 정보의 종류에 따라 방법을 구분할 수 있다. 진동공학에서는 크게 모드 영역(modal domain)/응답 영역(response domain)/공간 영역(spatial domain)의 세가지 영역에 해당하는 정보를 사용한다. 이 세가지 정보는 각기 취득 방법과 정확도가 다르므로 구조 변경의 목적에 따라 적절하게 선정할 필요가 있다. 따라서 구조 변경 시에 사용하는 입력과 출력 정보가 어느 영역에 속해 있는지에 따라 구조 변경 방법의 적용상의 장단점이 구별될 수 있다. 대개 모드 영역과 응답 영역의 정보는 실험을 통해 얻을 수 있으므로 실험과 연계된 구조 변경법 적용이 가능하며 공간 영역 정보는 유한요소법 등의 수치모델로부터 얻어지므로 해석적 방법에서 주로 쓰이고 있다.

본 글에서는 이와 같은 네 가지 분류법 중 마지막의 네 번째 기준으로 구조물 동특성 변경법을 분류하고 각 방법의 특징을 비교 검토하고자 한다. 이 구분법은 구조 변경에 관한 포괄적인 구분법으로서 나머지 세가지 구분법을 포함하며 구조변경 방법의 장단점 및 그 원인을 비교적 체계적으로 비교할 수 있다. 이렇게 정의된 분류법을 통하여 지금까지 연구 발표된 방대한 양의 구조 변경법에 관한 논문을 일목요연한 기준으로 분류, 파악하도록 노력하였다. 그리고 각기 세부 분류에 대하여 사용된 방법들의 장단점 및 그 개선 방향을 설명하고자 한다.

3. 기본이론

기존 구조물(baseline structure)에 변경 구조물(modified structure)이 첨가 혹은 삭제 되면 변경 후 전체 구조물의 동특성이 변하게 된다. 이때 구조 변경 전후의 동특성은 다음과 같은 고유치 문제로 나타낼 수 있다.

$$(K-\lambda M)\phi=0 \tag{1}$$

$$\left[K+\Delta K-\bar{\lambda}(M+\Delta M)\right]\bar{\phi}=0 \tag{2}$$

여기서 K은 강성행렬, M은 질량행렬, ΔK는 변경 구조물의 강성 행렬, ΔM는 변경 구조물의 질량 행렬이다. λ, ϕ는 각각 구조 변경 전의 고유치와 고유벡터이고, $\bar{\lambda}$, $\bar{\phi}$는 각각 변경 후의 고유치와 고유벡터이다. 구조물 동특성 변경법은 공간 영역(spatial domain)/모드 영역(modal domain)/응답 영역(response domain)의 세가지 영역에서의 정보간의 변환 관계를 기본 이론으로 한다. 그림 1과 같이 세 가지 정보는 주어진 관계식[식 (3)~식 (7)]으로 서로 간에 변환이 가능하다. 그 각각의 관계식은 다음과 같다.

변환 (3)의 Explicit Form은 일반적으로 존재하지 않으며 식 (1)에서 정의된 고유치 해석 결과를 통해 다음과 같은 관계식을 갖는다. 여기서 일반적으로 강성/질량 행렬은 고유형상 행렬에 대해서 직교성을 갖도록 정규화(normalization)한다.

$$K\Phi=M\Phi\Lambda$$

$$\Phi^T M\Phi=I,\quad \Phi^T K\Phi=\Lambda \tag{3}$$

고유형상 행렬 Φ의 강성 및 질량행렬에 대한 직교성(orthogonality)을 이용하여 변환 (4)의 수학적 형태를 구하면 다음과 같다.

$$K=\Phi^{-T}\Lambda\Phi^{-1},\quad M=\Phi^{-T}\Phi^{-1} \tag{4}$$

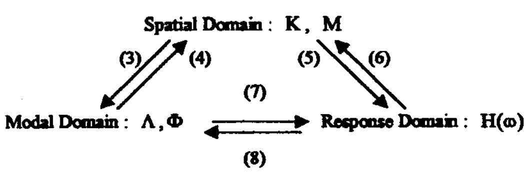

그림 1 Spatial domain/Modal domain / Response domain의 관계

변환 (5)와 변환 (6)은 다음과 같이 동강성 행렬, $D(\omega)$와 주파수 응답 행렬, $H(\omega)$의 관계로 나타낼 수 있다.

$$H(\omega)=D(\omega)^{-1} \tag{5}$$

$$D(\omega)=K-\omega^2 M=H(\omega)^{-1} \tag{6}$$

변환 (7)은 다음과 같이 모드 합(modal summation)으로 나타낼 수 있다.

$$H(\omega)=\Phi\left[\Lambda-diag(\omega^2)\right]^{-1}\Phi^T \tag{7}$$

변환 (8)을 나타내는 explicit form은 일반적으로 존재하지 않으며 curve fitting을 이용한 모드 매개 변수 추출(modal parameter identification) 과정을 통해서 고유진동수와 모드형상을 구한다.

4. 문제 정의 및 논문 개요

본 글에서는 특별히 구조물의 고유진동수, 모드형상 또는 주파수 응답 함수의 개선을 다루는 구조 변경법 또는 관련된 연구에 대해서 종합적으로 서술하고자 한다. 이를 위하여 구조 변경에 필요한 입력 정보와 결과적으로 구하는 출력 정보를 기준으로 구조 변경법을 분류하여 문제 정의를 하였다. 추후에 게재될 본 논문의 후속편에서 각각의 정의에 따라 분류된 구조 변경법의 가정과 핵심적인 수학적 모델 및 풀이 과정을 설명하고자 한다. 그리고 적용 분야를 살펴봄으로써 장단점과 보완책을 정리하여 그 유용성을 비교 검토할 수 있도록 하고자 한다. 또한 회전자유도 측정 문제, 자유도의 축약/확장 문제 등 구조 변경 시에 발생하는 부가적인 문제점들을 해결하기 위한 방법도 별도로 검토하고자 하며 본 논문에서는 다음과 같은 열네 가지 유형의 구조물 변경법에 대해서 개략적으로 설명하고자 한다.

구조 변경후의 고유치를 계산하기 위한 정방향의 구조 변경법(forward problem)은 다음과 같이 분류하여 서술하고자 한다.

Problem 1 : Given K, M, ΔK and $\Delta M \Rightarrow$ Find $\bar{\Lambda}$ and $\bar{\Phi}$ Eigenvalue Analysis by Numerical Method /

Analytical Method

Problem 2 : Given Λ, Φ, ΔK and $\Delta M \Rightarrow$ Find $\overline{\Lambda}$ and $\overline{\Phi}$ 미소 구조 변경법(Small Modification Method) / 모드 합성법(Modal Synthesis Method) / 국부 구조 변경법(Localized Modification Method) / Lagrange Multiplier Method

Problem 3 : Given $H(\omega)$, ΔK and $\Delta M \Rightarrow$ Find $\overline{\Lambda}$ and $\overline{\Phi}$ Exact Reanalysis Method Using FRF / Local Modification

Problem 4 : Given $H(\omega)$ and $\Delta H(\omega)$ Find $\overline{\Lambda}$ and $\overline{\Phi}$ Modal Force Method / Connection Problem

독립적인 두 구조물의 모드 영역 정보(Λ, Φ)를 이용하여 결합 구조물의 모드 영역정보($\overline{\Lambda}$, $\overline{\Phi}$)를 계산하는 방법은 구조 합성법(component modal synthesis)을 총칭하는 것이다. 이 문제는 구조물의 재설계를 목적으로 하지 않고 주로 효율적인 고유치 해석을 위해서 연구되어 왔으므로 본 논문에서 이 부분은 포함시키지 않는다. 변경후의 주파수 응답 함수(frequency response function)를 구하는 정방향의 구조 변경법(forward problem)을 다음과 같이 분류하여 서술한다.

Problem 5 : Given $H(\omega)$ and $\Delta H(\omega) \Rightarrow$ Find $\overline{H}(\omega)$ FRF Synthesis

Problem 6 : Given $H(\omega)$, ΔK and $\Delta M \Rightarrow$ Find $\overline{H}(\omega)$ Receptance Method / FRF Sensitivity Analysis

또한 원하는 고유진동수/모드 형상, 또는 주파수 응답함수를 만족하는 구조변경을 도출하는 역방향의 구조 변경법(inverse problem)을 다음과 같이 분류하여 기술하고자 한다.

Problem 7 : Given $\overline{\Lambda}$ and $\overline{\Phi}$ Find K and M / Given $\Delta H(\omega) \Rightarrow$ Find K and M Inverse Eigenvalue Problem / Spatial Model Reconstruction

Problem 8 : Given K, M, $\overline{\Lambda}$ and $\overline{\Phi}$ Find ΔK and ΔM Structural Optimization based on FEM / FE Model Updating Using Modal Data / Parameter Identification Using Modal Data

Problem 9 : Given K, M and $\overline{H}(\omega) \Rightarrow$ Find ΔK and ΔM Structural Optimization to Enhance FRF / FE Model Updating Using FRF / Parameter Identification Using FRF

Problem 10 : Given Λ, Φ, $\overline{\Lambda}$ and $\overline{\Phi} \Rightarrow$ Find ΔK and ΔM Structural Modification / Parameter Identification

Problem 11 : Given $H(\omega)$ and $\overline{H}(\omega)$ Find ΔK and ΔM Structural Modification / Parameter Identification / Vibration Isolation

Problem 12 : Given $H(\omega)$, $\overline{\Lambda}$ and $\overline{\Phi}$ Find ΔK and ΔM Local Modication / Modal Force Method / Parameter Identification

Problem 13 : Given $H(\omega)$, $\overline{\Lambda}$ and $\overline{\Phi}$ Find $\Delta H(\omega)$ Modal Force Method / Energy Method Using FRF

Problem 14 : 구조 변경법 관련 부가연구 회전 자유도 간접 계산 방법 / System Expansion, Reduction Method / 주파수 응답 행렬 간접 계산 방법

이와 같이 14가지 유형으로 분류된 문제에 대하여 지금까지의 연구 내용, 사용되는 수식, 적용 예제 등을 종합적으로 분석하고, 관련되는 참고 문헌을 첨부하여 앞으로 연속물로 게재하고자 한다.