

## 단위 가진을 활용한 브레이크 시스템 기여도 분석

### Contribution analysis of a brake system based on virtual unit-excitation

김찬중†·권성진\*·김완수\*·이봉현\*·김현철\*

C.J. Kim, S.J. Kwon, W.S. Kim, B.H. Lee and H.C. Kim

**Key Words** : Contribution analysis(기여도 분석), Virtual unit-excitation(가상의 단위 가진), Modal participation factor(모드 기여 인자), Squeal noise(스켈 노이즈), Brake system(브레이크 시스템)

#### ABSTRACT

Modal participation factor (MPF) is a widely used in a mode-coupling squeal noise problem for finding the most sensitive component over a complex brake system in a vehicle using eigenvectors of sub-components. This methodology requires the problematic total response of system by the unstable squeal noise at a specific frequency as well as eigenvectors of each component belonging to brake system. In this paper, a unit-force response analysis is performed for intact total system to obtain eigenvectors of each component and then such data is directly used for the contribution analysis of a squeal noise problem. Since the eigenvectors of each component induced from virtual unit-excitation is most reliable owing to the intact boundary condition, it can be expected that the corresponding contribution analysis with MPF also provides a trustworthy result.

#### 1. 서론

자동차 브레이크 시스템의 진동 및 소음 문제에서 스켈 노이즈의 비중은 많은 연구 성과의 도출에도 불구하고 적지 않은 부분을 차지하고 있다. 브레이크 시스템의 복잡한 구조 속에서 발생하는 스켈 노이즈를 해석하기 위해서 해석의 방법론과 별도로 어떠한 단품이 노이즈 자체에 영향을 주는지를 해석해내는 기여도 분석 방법은 해석 방법론을 간략화하고 디자인 변경안의 효율적인 도출에 필수적인 과정이다. 단품간의 모드 형상에 의해 스켈 노이즈가 발생한다는 가정 아래 해석을 진행하는 경우 각 단품의 모드 형상을 활용한 MPF 기반 기여도 분석이 자주 사용되고 있다. MPF 방법은 각 단품들의 모드 형상에 대한 정보들이 충분히 준비되어야 하기 때문에 복잡한 브레이크 시스템을 구조적으로 분해한 다음 각 단품에 대한 모드해석 과정을 거쳐야 한다.

본 논문에서는 스켈 노이즈 해석을 수행하기 위해 구성된 전체 브레이크 시스템 모델을 그대로 활용하여 각 단품의 모드 형상을 얻어낼 수 있는 방법을 제안하였다. 모달해

석과 동일하게 백색 잡음(white noise)을 활용하여 전체 시스템을 강제 진동하면서 각 단품들의 모드 정보를 얻어내도록 하였다. 본 방법은 각 단품들의 선형적인 관계로부터 도출된 브레이크 시스템으로부터 직접 얻어진 정보이기 때문에 신뢰성이 높다. 도출된 각 단품들의 모달 정보를 활용하여 MPF 기반 기여도 분석을 하였으며, 스켈 노이즈에 영향을 주는 주요 단품들을 도출하였다.

#### 2. 단위 가진 방법을 활용한 기여도 분석

##### 2.1 기여도 분석 방법

각 단품의 모드 형상이 주요한 문제인 경우 MPF 기법을 활용한 기여도 분석 방법이 이용된다. 이 경우 각 단품에 대한 모달 정보가 필요하기 때문에 단품별 모드해석을 수행하여 모드 정보들을 수집하는 것이 요구된다. 전체 시스템에 대한 부분 구성물의 모드 형상을 정확하게 알아내기 위해서는 모드해석을 진행하기 전 주변 부품간의 경계 조건을 이행하고 구현하는 것이 필요하며 전체 기여도 분석 과정에서 주요 부분을 차지한다. 새로운 기여도 분석 방법은 각 단품별 모드 정보를 효율적으로 얻어내기 위해 전체 유한요소 모델에 가

† 김 찬 중; 자동차부품연구원  
E-mail : cjkim@katech.re.kr  
Tel : (041) 559-3124, Fax : (041) 559-3070

\* 자동차부품연구원

상적인 모달해석을 진행하는 방법론을 도입하였다. 모달해석을 구현하기 위해 백색 잡음을 시스템의 가진 절점에 인가한 다음, 관심 절점의 응답을 측정하여 서로 다른 절점 사이의 주파수 응답 함수를 얻어내었다. 얻어진 주파수 응답 함수는 모달시험에서 얻어지는 시스템의 고유한 성질이며 이 값으로부터 각 단품의 모드 정보를 얻어내었다. 이러한 강제진동 해석 방법은 각 단품들의 경계 조건을 최대한 보호한 상태에서 모드 형상이 얻어지기 때문에 실제의 모드 형상에 매우 근접한 결과를 도출시킬 수 있다. 특히, 본 강제진동 해석은 전체 시스템의 각 단품별 경계 조건이 그대로 활용되기 때문에 해석 결과에 대한 높은 신뢰성을 기대할 수 있다. 단위 크기로 주어진 백색잡음의 입력과 각 노드의 응답(가속도)을 활용하여 해당 노드의 주파수 응답 함수를 얻어낸 다음, 모달해석을 통해 각 단품들의 모드 형상을 얻어내었다. 이와 별도로 전체 브레이크 시스템에 대한 정규모드 해석을 수행하여 스킵 노이즈 발생 대역에서의 모드 형상을 얻어냄으로써 전자의 모드 형상들과의 연관성에 의거 기여도 분석을 수행하게 된다.

## 2.2 유한요소 모델 구성

대상 브레이크 시스템을 구성하기 위해 디스크, 브레이크 패드, 너클, 캘리퍼 단품에 대한 유한요소 모델을 구성한 다음 각 단품들간의 기구학적인 구속 조건을 바탕으로 브레이크 시스템의 유한요소 모델을 도출하였다. 다물체 동역학 해석과 같은 대변형의 거동이 없다는 가정아래 부쉬류와 링크 등으로 연결된 경계 조건들은 자유도를 적절히 조절하여 실제에 근사하도록 하였다. 특히, 브레이크 디스크와 패드 사이에는 실험적으로 얻어진 마찰계수를 활용하여 노드 사이에 스프링 요소들의 조합으로 구성하였다. 마찰계수들의 존재에 의거 브레이크 시스템은 특정 주파수에서 불안정성이 발생하게 되어 스킵 노이즈가 발생하게 된다.

## 2.3 스킵 노이즈 및 강제 진동 해석

구성된 브레이크 시스템의 유한요소 모델을 활용하여 시스템 극(pole)값들을 확인한 결과 3,000(Hz)에서 5,000(Hz) 사이의 주파수 대역에서 다수의 불안정성 요소를 발견할 수 있었다. 본 요소들은 구조적인 감쇠 등의 영향으로 불안정성이 대부분 제어되지만 일부 인자는 브레이크 스킵 노이즈 등의 불안정한 응답으로 반응할 가능성이

크다.

강제 진동가진을 주기 위하여 가진 위치를 브레이크 디스크와 패드 사이로 선정하였으며, 각 단품의 모드를 획득하기 위한 노드점을 최소 5개 이상씩 선정하였다. 앞서 수행된 스킵 노이즈 해석과 동일한 브레이크 시스템에 대해 단위 크기의 백색잡음을 활용하여 강제 진동가진 해석을 수행하였다. 각 주파수 대역에 대해 강제 진동해석을 수행한 결과 불안정성이 확인된 부분에서의 진동 응답이 동일하게 크게 발생하였으며, 본 해석 과정을 통해 앞서 수행된 스킵 노이즈 해석 결과를 검증하였다. 또한 본 해석 과정에서 도출된 각 단품의 가속도 데이터를 활용하여 이미 알고있는 가진 성분과 함께 단품의 모드형상을 얻어내도록 하였다.

## 2.3 기여도 분석 결과

각 단품의 모드 형상과 전체 시스템의 모드 형상을 활용하여 MPF 기반 기여도 분석을 수행하였다. 스킵 노이즈가 주요하게 발생하는 주파수 대역에 대해 기여도 분석을 수행한 결과 브레이크 디스크와 패드에서 기여도가 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 그러나 일부 주파수 대역에서는 육안으로 확인하기 어려우나 캘리퍼 안쪽 부분에서 일부 높은 기여도 성분이 도출되기도 하였다. 전체 모드 형상에서 각 단품을 분리하여 확인한 결과 캘리퍼 안쪽 부분에서 과도한 모드 변형이 발생하고 있음을 확인하였으며, 이 결과를 통해 기여도 분석의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

## 3. 결 론

강제 진동해석을 통해 가상의 진동을 시스템에 부여함으로써 전체 유한요소 모델로부터 각 단품의 모드 형상을 도출하였으며, 본 해석 기법을 활용하여 전체 모드에 대한 각 단품의 모드 기여도를 얻어낼 수 있었다. 본 해석 기법을 모드 영향이 지배적인 스킵 노이즈 해석에 적용하였으며 기여도가 높은 브레이크 디스크 및 패드를 확인할 수 있었다. 본 해석은 전체 시스템의 구속 조건을 그대로 둔 상태에서 각 단품의 모드 형상을 얻어내는 과정으로 진행한 바 해석 결과에 대한 신뢰성이 높으며, 결과적으로 기여도 해석 결과에 대한 검증된 결과를 도출할 수 있었다. 본 기여도 분석 방법은 MPF의 기여도 방법론이 적합한 모드 중첩 해석에서 다양하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.