

기여도 분석 방법을 이용한 서브프레임의 동특성 해석 Contribution Analysis on a Sub-frame of Vehicle

김찬중† · 이봉현* · 김기훈*

Chan-Jung Kim, Bong-Hyun Lee, Ki-Hoon Kim

Key Words : Contribution Analysis(기여도 분석), 서브프레임(Sub-frame), 구조 동적 변경(Structural Dynamic Modification),

ABSTRACT

Sub-frame is a key component to damp the vibration of engine-born and isolate the input force from a ground. To enhance the performance of the sub-frame of vehicle, its structure should be designed to be a high performing mechanical filter that exclude the low frequency vibration elements. In this paper, a contribution analysis based on the frequency response function(FRF) is introduced to detect a high sensitive position of the target sub-frame and its results are validated with a SDM(structural dynamic modification) analysis.

1. 서 론

서브프레임은 엔진 마운트로부터 입력되는 order 성분 형태의 가진 요소를 받아들이는 뿐만 아니라 도로에서부터 발생하여 로우암(low arm)으로 전달되는 가진 요소에 대해서도 노출되어 있다. 2가지 형태의 가진은 모두 저주파에 속하는 주파수 특징을 가지고 있기 때문에 운전자 입장에서 정숙함을 느끼기 위하여 서브프레임은 구조적으로 기계적 저 대역 필터(low pass filter) 역할을 수행해야 한다[1].

서브프레임을 생산하기 위한 설계 과정은 다른 자동차 부품의 경우와 마찬가지로 설계에서부터 제품이 생산되기까지의 기간이 점점 더 줄어들고 있는 추세이기 때문에 설계 단계에서부터 최적화의 과정이 필수적이다. 서브프레임의 경우 진동 및 내구 관점에서 모두 기대수준 이상의 성능 치를 나타내야 하기 때문에 시제품 제작 단계에서 충분한 검증 단계를 거친 다음 양산에 들어가야 한다.

본 논문에서는 시제품 제작 후 검증을 거치는 여러 가지 과정 중, NVH 성능 관점에서 최적의 설계 사양을 얻어내기 위해 기여도 분석(contribution analysis) 방법을 제시하였다. 이를 바탕으로 분석 대상의 서브프레임이 관심 있는 주

파수 대역에서 원하는 동적 성능을 발휘하기 위해 가장 민감도(sensitivity)가 높은 부분을 식별하였다. 기여도 분석 방법을 통해 얻어진 정보를 검증하기 위해 모달 해석 기법인 SDM(structural dynamic modification)을 이용하여 서로 다른 민감도를 가진 부분에 대해 공진점 예측 분석을 수행하여 민감도에 따른 공진점 변화를 살펴보았다. 이 결과를 바탕으로 본 논문에서 도입한 기여도 분석 방법이 타당성이 있음을 증명하였다.

2. 모달 테스트

2.1 대상 부품의 선정

본 논문에서 연구 대상으로 선정한 서브프레임은 2700cc의 상용 승용차에 장착되는 서브프레임이다. 그림 2.1은 대상 부품 사진이다.

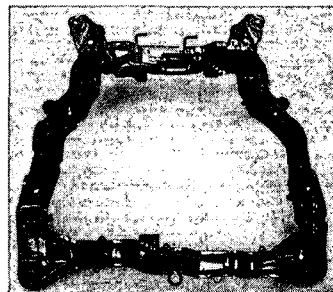


그림 2.1 대상 서브프레임

† 김찬중, 자동차부품연구원
E-mail : cjkim@katech.re.kr
Tel : (041) 559-3124, Fax : (041) 559-3285

* 자동차부품연구원

2.2 모달 테스트 수행

본 논문에서 철로 만들어진 서브프레임(Subframe)의 모달 테스트를 수행하기 위해서 각각 26개의 노드 점을 선택하여, 임팩트 해머를 이용하여 가진하고 응답을 3축 가속도계를 이용하여 측정하였다. 측정된 가진과 응답의 신호는 이동식 해석 시스템(SignalCalc ACE Dynamic Signal Analyzer)을 이용하여 실시간으로 FFT 처리를 하여 전달함수를 얻어내었다.

아래 그림 2.2는 26개의 노드로 구성된 모달 모델이다.

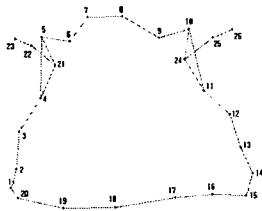


그림 2.2 모달 모델

모달 해석을 수행한 결과 공진점 및 모달 형상에 대한 정보를 얻었다. 이와 관련된 결과는 표 2.1과 표 2.2에 각각 나타내었다.

표 2.1 각 모드별 모달 형상(Modal Assurance Criterion)

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.02	0.07
2	0.00	1.00	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.09
3	0.00	0.05	1.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02
4	0.00	0.01	0.03	1.00	0.01	0.03	0.00	0.02
5	0.05	0.01	0.02	0.01	1.00	0.04	0.03	0.03
6	0.01	0.00	0.00	0.03	0.04	1.00	0.06	0.01
7	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	1.00	0.04
8	0.07	0.09	0.02	0.02	0.03	0.01	0.04	1.000

표 2.2 모델 해석 결과

Mode	Frequency[Hz]	Damping[%]
1	55.75	0.42
2	105.80	2.8
3	113.75	0.61
4	133.33	0.71
5	169.24	0.22
6	209.07	0.38
7	244.89	0.34
8	281.82	0.41

표 2.1의 결과를 통해 각 모드별 모드 형상이 서로에 대해 독립적인 관계를 가지는 것을 알 수 있으며 모달 해석 결과의 신뢰성을 보여주는 근거이다.

표 2.2의 결과에서는 서브프레임의 동특성이 주변의 가진 요소들과 연관성을 지닐 개연성이 크다는 사실을 알 수 있다. 즉, 노면에서 올라오는 가진 요소의 주요 주파수 대역이나 엔진 회전으로부터 발생하는 order 성분의 진동 성분들이 100Hz 이하에서 존재하기 때문에 서브프레임의 동특성이 이러한 가진 요소들에 의해 공진으로 응답이 나타날 가능성이 있다.

3. 기여도 분석 방법

3.1 기여도 관련 서론

일반적으로 자동차 내부의 진동/소음을 해석해내는 과정은 수많은 자동차 부품이 복합적인 관계를 가지고, 외부의 가진 요소가 다양하기 때문에 어려움이 많다. 그러므로 어느 주요한 진동/소음 원을 알아내기 위해서는 광범위한 부분의 추정에서부터 세부적인 요소로 범위를 좁혀가는 것이 바람직하다. 현장에서는 지금까지도 담당 엔지니어의 직감에 의존하는 경우가 대부분으로 시행착오를 거쳐야 하기 때문에 시간이 많이 걸리는 것은 물론이며, 도출된 해석 결과에 대한 신빙성이 떨어진다. 이와 관련되어 최근 추출된 모달 벡터들의 내적이 0의 값에 가까워질수록 연관성이 떨어지며 그 반대의 경우에는 두개의 모드 간에 연관성이 커진다는 관계(MAC)를 이용하여 기여도 정도(modal participation factor)를 수치화하고 있다. 이 방법은 일단 모달 해석이 끝난 경우에 계산이 가능하기 때문에 바로 산업 현장에서 적용하기가 용이하지 못하며, 모달 파라미터를 추출하는 과정 중 간략화에 따른 오차가 그대로 계산식에 반영되게 된다.

본 논문에서는 측정된 전달함수를 이용하여 각 부품 혹은 단품에서의 기여도 정도를 수치적으로 계산해내는 기여도 방법을 고안하였다. 이 방법은 측정 데이터를 그대로 사용하기 때문에 신뢰성이 높으며 각 주파수별 기여도 정도를 알 수 있기 때문에 관심 주파수에 따른 기여도 정도를 빠르게 계산한다.

3.2 기본 개념

단품의 모달 해석을 수행하기 위해 정해진 각 측정 노드 점을 이용하여 그림 3.1과 같이 진동 전달 경로를 계 루프로 구성한다.

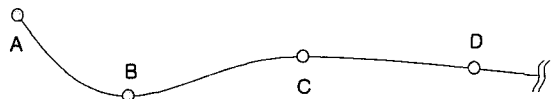


그림 3.1 진동 전달 개 루프(open-loop)

각 노드 점을 모든 방향에 대해 측정하여 전달함수를 얻어 내므로 각 주파수별로 벡터를 구성할 수 있다. 만약 어느 한 노드 점에서의 응답이 인접한 노드 점으로 진행하면서 변화량이 크다면 그 부분에서의 노드 점은 진동 전달 경로의 측면에서 기여도가 큰 것이다. 이와 같은 기본 개념을 이용하여 아래의 판별식(Contribution factor)을 구성하였다. 계산된 결과가 1에 가까워질수록 해당 노드 점은 구성된 진동 경로에 대해 기여도가 작으며, 반대의 경우에는 기여도가 큰 것이다.

아래 식 1은 이러한 관계를 수식으로 표현한 것이다[3].

$$CF(\omega_c, \alpha) = 1 - \frac{\bar{H}_{(\alpha-1)\alpha}(\omega_c) \cdot [\bar{H}_{\alpha(\alpha+1)}(\omega_c)]^T}{\text{norm}[\bar{H}_{(\alpha-1)\alpha}(\omega_c)] \times \text{norm}[\bar{H}_{\alpha(\alpha+1)}(\omega_c)}} \quad (\alpha=B,C,D,\dots)$$

여기서 α 는 해당 노드점이며 ω_c 는 관심 주파수를 나타낸다.

3.3 진동전달 경로의 선정

서브프레임의 설치 위치 및 동적 거동을 파악하여 계 루프의 진동 경로를 설정하는 것이 기여도 분석의 첫째 과정이다. 이러한 계 루프는 주관적이므로 여러 개의 루프를 설정한 후 해석 결과 타당성이 있는 결과를 선택하여 이용한다. 본 논문에서는 그림 3.2와 같이 2개의 계 루프를 선정하여 기여도 분석을 수행하였다.

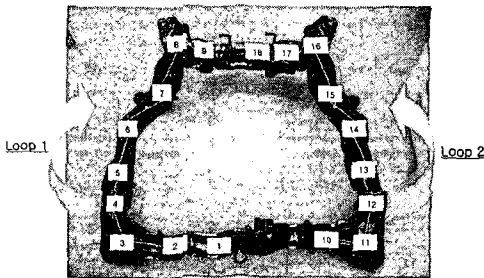


그림 3.2 진동 전달 경로

3.4 관심 주파수 내역 선정

기여도 분석 방법은 관심 주파수에서의 소음/진동 기여도를 수치적으로 나타내는 것이므로 기여도 분석을 수행하기 위해서 관심 주파수를 설정해야 한다. 서브프레임의 진동 특성을 분석하는 것이 본 논문의 목적이므로 안정성에 영향을 줄 것으로 예상하는 공진점에서의 동적 거동을 알아보았다. 일반적으로 지면에서 올라오는 가진 요소는 50[Hz] 이하이며 엔진 rpm이 4000을 넘어서지 않기 때문에 2차 이상의

order 성분이 크게 시스템에 영향을 주지 않는다는 가정 하에서 서브프레임의 1차 및 2차 공진점을 관심 주파수 영역으로 결정하여 55[Hz] 및 105[Hz]에 대해서 기여도 분석을 수행하였다.

3.5 기여도 분석 결과

각 전달 경로에 대해 기여도 분석을 수행한 결과를 그림 3.3과 그림 3.4에 도시하였다.

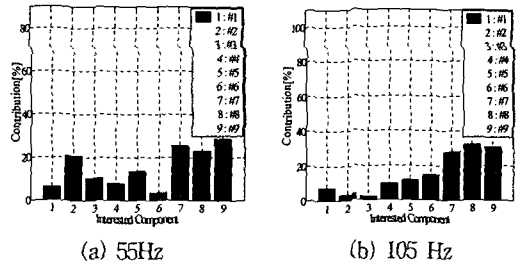


그림 3.3 경로 1에서의 기여도 분석 결과

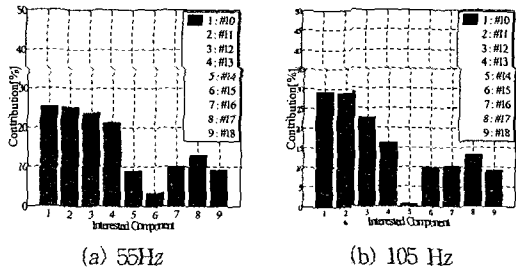


그림 3.4 경로 2에서의 기여도 분석 결과

그림 3과 그림 4의 결과를 바탕으로 관심 주파수에 따른 기여도 해석 결과를 표 3.2에 나타내었다.

표 3.1 기여도 분석 결과

관심 주파수	높은 기여도	낮은 기여도
55Hz	#7, #9, #10, #11	#1, #6, #14, #15
105Hz	#8, #9, #10, #11	#2, #3, #14, #18

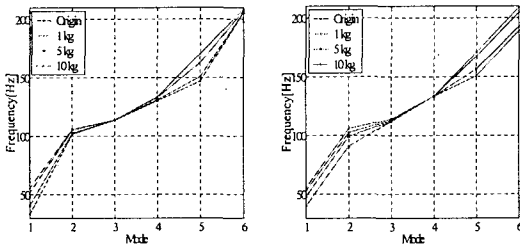
3.6 기여도 분석 결과의 검증

기여도 분석 결과를 검증하기 위해, 모달 해석 결과를 이용하여 측정 노드에서의 질량 혹은 강성 값이 달라졌을 경우를 예측하는 SDM 방법을 이용하였다. 이를 나타내기 위해 표 3.1에서 선정된 기여도가 높은 부분과 기여도가 낮은 부분의 노드 점을 각각 하나씩 선정하여 질량을 증가시켰을 경우에 나타나는 공진점의 변화를 살펴보았다. 강성의 경우

에는 이론적으로 2개의 노드 사이의 강성을 입력으로 주어 야 하기 때문에 실제의 경우를 대표하지 못한다. 자동차 부품의 연구 추세가 경량화에 있으나 본 해석 방법은 상대적인 모달 행렬 변화에 따른 결과를 예측하는 것이기 때문에 질량을 증가시켰으며 물리적인 값과는 다른 개념이다.

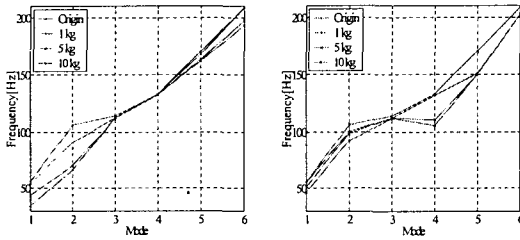
서브프레임의 노드 중 각 루프에 따라 기여도가 큰 노드로 #8, #10을 선정하였으며 비교 대상인 기여도가 작은 노드 점으로 #5, #15를 각각 선정하였다.

아래 그림 3.5 및 그림 3.6은 SDM의 해석 결과이다.



(a) #8 노드점 (b) #5 노드점

그림 3.5 루프 1에서의 공진점 변화



(a) #10 노드점 (b) #15 노드점

그림 3.6 루프 2에서의 공진점 변화

관심 주파수를 55[Hz], 105[Hz]로 한정했을 때 그림 3.5 및 그림 3.6을 비교해 보면 #8,#10에서는 많은 주파수 변화를 보이는 반면 #5,#15는 상대적으로 작은 주파수 변화를 보여 주고 있다. 3차 모드 이상의 결과들은 관심 주파수 대역이 아니기 때문에 결과들의 비교에서 배제하였다. 1차의 공진점이 차량에서 올라오는 가진 주파수 대역을 고려할 때 보다 중요시되고 있으나 2차 공진점도 1차와 크게 차이를 보이고 있지 않으며 엔진의 가진 성분들 같이 서브프레임에 영향을 주는 여타의 가진 요소들을 고려할 때 무시할 수 없는 특성

값이다. 그러므로 기여도 분석을 통해 잠재적으로 큰 sensitivity가 예상되는 #8 및 #10 부분의 응답을 살펴본 바 #8의 경우는 1차 공진점의 변화에는 큰 영향을 주고 있으나 2차 공진점을 거의 변화시킬 수 없기 때문에 #10이 이상적인 위치가 된다.

4. 결 론

기여도 분석 방법을 도입하여 기존에 양산중인 서브프레임 대해 주요한 설계 파라미터를 도출하였다. 기여도 분석의 계산 과정을 수행하기 위해 우선 모달 테스트를 수행한 후 관심 주파수 대역의 선정 및 주파수 응답 함수의 획득 하였다. 또한 기여도 분석 방법의 결과에 대해 신뢰성을 확보하기 위해 모달 응용 해석인 SDM을 이용하여 기여도 정도가 다른 노드 점들에 대해 공진점의 변화 추이를 질량의 변화에 대해 알아보았다. 변화 추세를 살펴본 결과 기여도가 큰 부분에서의 공진점 변화가 그렇지 못한 부분에 비해 큰 것으로 나타났으며 이는 설계 과정에서 어떠한 부분에 대해 설계 변경이 필요한지를 나타내는 중요한 실마리를 제시한다.

본 연구를 통해 설계 단계에서 원하는 동적 거동을 획득한 서브프레임의 설계를 빠른 시간 내에 가능하게 함으로써 기여도 분석 방법은 서브프레임의 설계 과정에서 중요한 해석 방법이다.

후 기

본 연구 내용은 산업자원부가 주관하는 부품소재기술개발사업의 성과물으로써 관계자분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 백경원 등, 2005, "차량용 서브프레임의 동특성 해석", 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. .
- (2) 허덕재 등, 2002, "차량 서브프레임의 유한요소 모델의 개선 및 최적화에 대한 연구", 한국자동차공학회 논문집, pp. 220~227.
- (3) Chan-Jung Kim, Bong-Hyun Lee, Chung-Yeol Lee and Ho-Il Jeong, 2005, Analysis of the Induced Maon Noise in the Coupled Torsional Beam Axle Suspension Module, SAE 2005-01-3920.