

차량용 서브프레임의 동특성 해석 Dynamic Analysis of Vehicle Sub-Frame

백경원* · 김찬중** · 이봉현** · 김기훈**

G. W. Baek, C. J. Kim, B. H. Lee and G. H. Kim

Key Words : Sub-Frame(서브 프레임), Modal Analysis(모달 해석), FEM Analysis(유한요소해석)

ABSTRACT

In recent years, vehicle accessories substitute steel for aluminum. But, subframe play a important role of vehicle safety. Therefore, dynamic characteristic of steel subframe is understood at real vehicle. And this is able to apply dynamic characteristic of Aluminum. At this paper, we confirm dynamic load that is operated Steel subframe with experiment. And result of finite element analysis which is operated dynamic load is compared with result of experiment.

1. 서 론

차량 경량화는 최근 경쟁이 심화되고 있는 자동차 시장에서 매우 중요한 기술인자로 부상하고 있는데, 이는 경량화가 자동차의 주요 성능을 향상시키는데 필수적이기 때문이다. 이를 위하여 현가계 부품과 같은 구조부품을 알루미늄으로 대체한 차량이 높은 기술력을 가진 것으로 인정되어 시판되고 있다. 차량용 서브프레임은 차량의 전진부에 부착되어 있으며 충돌 시 충격을 완하하고, 현가장치와 조향장치가 부착되어 있다. 서브프레임의 경우 경량화에는 크게 2가지가 있으며 첫 번째 방법은 보강재를 없애는 방법, 두 번째 방법은 알루미늄과 같은 경량화 재질을 사용하는 방법이다. 하지만 이러한 방법들은 몇가지 문제점을 가지고 있다. 첫 번째 방법은 보강재를 없애고 충돌에너지를 70% 이상 흡수할 수 있어야 한다. 이르기 위해서는 많은 시간과 구조해석 및 실험이 병행되어야한다. 그리고 두 번째 방법은 새로운 재질에 대하여 구조해석, 내구해석, 충돌 해석 등 다양한 검증작업이 필요하고, 많은 연구가 이루어지고 있다. 박영배^[1] 등은 보강재를 없애고, 매쉬 심 용접판재를 이용하여 서브프레임의 경량화 연구를 수행하였고, 구자석^[2] 등은 유한요소를 이용하여 피로 수명을 예측하였다. Xiaoming chen^[3] 등은 알루미늄 서브프레임에 대하여 충돌해석을 수행하였으며, 허덕재^[4] 등은 유한

요소모델의 상관관계를 정의하고 개선하는 방법을 정의하였다. 하지만 선행된 연구들은 단순 내구 해석 및 구조 해석만 이루어졌다. 하지만 서브프레임의 경우 다양한 동적 하중에서 동역학적인 특성과 진동특성을 가지게 된다. 이러한 특성들이 서브프레임에 장기적으로 커다란 영향을 준다.

본 연구에서는 차량용 서브프레임에 대하여 작용하는 동적하중을 정의하고, 진동특성을 파악하며, 유한요소해석을 통하여 전반적인 서브프레임의 동적인 특성을 파악하고자 한다. 또한 알루미늄 서브프레임에서도 적용될 수 있을 것이 다.

2. 서브 프레임 진동 측정시험

2.1 측정 시스템

서브프레임의 경우 엔진 및 변속기에서 발생된 진동과 노면으로부터 전달되는 진동이 동시에 가진되어 복잡한 형태의 진동특성을 나타내므로 외부 가진 조건 및 서브 프레임의 진동특성을 시험을 통해 명확히 규명하여야 한다. 컨트롤 암의 경우 서브 프레임과 연결되어 노면으로부터 전달되는 진동과 하중을 전달하는 역할을 하므로 하중에 의한 내구특성이 중요하게 요구되는 부품으로 실차 상태에서 작용하는 가진 하중을 측정이 이루어져야 한다.

이를 위해 계측시스템을 구성하여 실차상태에서 발생하는 진동신호를 측정하였다. Fig. 1에서 측정위치 #1, #5는 로우 컨트롤 암, #2, 3은 서브프레임을 나타내며, #4는 엔진마운트 부분의 측정 위치를 나타낸다. 특히 #4 부분은 시험 환경이

* 자동차부품연구원 구조특성연구센터
E-mail : gwbaek@katech.re.kr
Tel : (041) 559-3121, Fax : (041) 559-3286

** 자동차부품연구원 구조특성연구센터

고온이기 때문에 가속도 센서의 마운팅 클립을 170도까지 견뎌낼 수 있는 특수 센서장착 지그를 사용하였다. 그리고 16채널의 DAQ 장비인 LMS PIMENTO를 이용하여 데이터 저장 및 분석을 수행하였다.

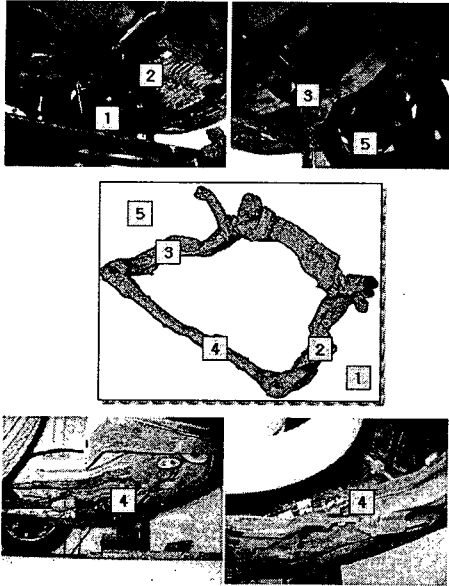


Fig. 1 Sensor location

2.2 실차주행 시험모드

서브프레임 관련 진동 특성을 파악하기 위해 직선로 및 특수로에 대해 주행 조건을 설정하여 주행 중 발생하는 가속도 신호를 측정하였다. 실차주행 시험모드의 경우 엔진 회전수는 40 Hz 이하의 성분들을 나타내며 정속 주행 조건을 이용하였기 때문에 하나의 주파수 성분으로 나타난다. 각 단의 변화가 있는 경우에는 rpm이 변화하는 관계로 입력 가진 성분이 달라질 수 있으나 정속 주행이기 때문에 주행 속도에 의한 가진성분을 명확히 정의할 수 있다. 그러나 50km/h의 등속 주행의 경우 3단과 4단의 경계 위치에 존재하기 때문에 쉽게 단이 바뀌어서 진동 성분들이 달라지고 주행 속도에 차이를 보이는 문제점이 발생하기 때문에 시험 시 세심히 운전이 요구된다. 그러므로 운전자는 가능 주행 조건의 rpm 및 변속기의 단을 동시에 체크하면서 동일한 조건을 유지해야 한다. 본 연구에서는 직선로, 자갈로(Cobblestone), 그리고 벨지안로(Belgian)의 실차 주행 조건 중 2단 1500[rpm]에 대해 시험모드를 수행하였다.

2.3 시간역 분석

실차 시험에서 획득한 신호를 시간역에서 분석하면 대체적

으로 주행조건을 확인할 수 있다. 자갈길로의 경우에는 다른 여타의 특수로 및 직선로에 비해 차량의 좌우방향 및 전후방향의 입력 성분이 입력 가진으로 들어오게 된다. 이 시험의 경우에는 로우 컨트롤 암에서 서브프레임으로 들어오는 입력 하중/진동이 여타의 조건보다 가혹하기 때문에 이들간의 상호 관련성을 파악하는데 중요한 데이터를 제공한다. 벨지안로의 경우 주파수 입력 가진의 관점에서 다양한 주파수 성분을 입력 성분으로 가질 수 있는 장점을 가지고 있다. 크기 성분을 시간 영역의 데이터를 통해 살펴볼 때 각 측정 위치에 따라 x, y, z 방향 성분 중 어느 한 방향의 성분이 큰 가속도를 나타낸다고 보기 힘들며 측정 위치에 따라서 가속도가 상이한 결과를 보여주고 있다. 그러므로 시간 영역에서의 데이터를 통해 데이터 상호간의 연관성을 찾기는 어렵다.

정의된 시험모드에 의해 실차주행데이터를 분석한 결과 직선로의 경우 2 m/sec^2 의 영역에서 대부분의 신호가 표현 가능한데 반해 자갈길로의 경우는 100 m/sec^2 의 범위까지를 포함해야 대부분의 신호를 표현할 수 있었다. 이것을 통해 각 도로 주행의 특성에 대해 응답 가속도가 상당히 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. 그러나 동일한 도로주행 조건에서 서로 다른 채널간은 연관성 혹은 차이점을 찾아내기 쉽지 않으며 동일한 측정 위치에 대해서도 각 방향별로 다른 응답 특성을 보여주고 있다. 그러므로 시간 영역에서의 비교는 응답의 크기에 의해 측정된 주행 조건이 어느 정도의 가속도를 가지고 있는지를 판단할 수 있는 간접적인 자료이다. 그러나 이 값은 실제의 특성을 그대로 지니고 있는 데이터이므로 이러한 성질을 되도록 왜곡하지 않는 범위 내에서 주파수 영역이나 혹은 다른 영역에서의 분석을 시도하게 된다.

2.4 주파수역 분석

서브 프레임과 로우 컨트롤 암의 주파수 분석을 통해 동적 특성을 분석하였다. 서브프레임의 진동 특성을 파악하기 위해서는 구속 조건에 의해 영향을 미치는 로우암의 진동 특성을 서브프레임과 비교 분석하는 것이 필요하다. Fig. 2에서 Fig. 5은 자갈길로와 벨지안로에서 차량 LH 부분의 # 1, 2와 RH 부분의 # 3, 5를 각각 같은 그래프에 도시하여 주파수 대역에서의 진동 특성을 비교하였다. 로우 컨트롤 암에서의 진동 특성은 지면에서 올라오는 가진 요소를 그대로 반영하기 때문에 50 Hz 이하의 요소에서 큰 응답 특성을 보여준다. 그러나 이 주파수 요소는 로우암과 인접한 서브프레임에서는 크게 감소된 양상을 보이고 있다. 50 Hz 부근에서 발생하는 진동 특성은 서브프레임의 1차 고유진동수인 55 Hz 근방이기 때문에 외부 요소에서의 가진에 의한 응답 특성보다 서브프레임 자체의 동적 거동에 의한 응답특성이 더욱 커질 가능성이 존재하게 된다.

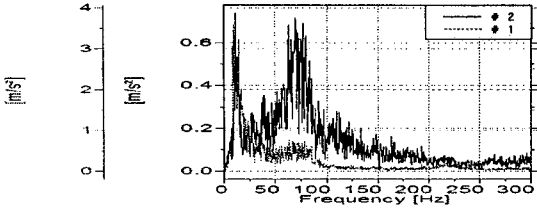


Fig. 2 Acceleration at LH (Cobble-stone)

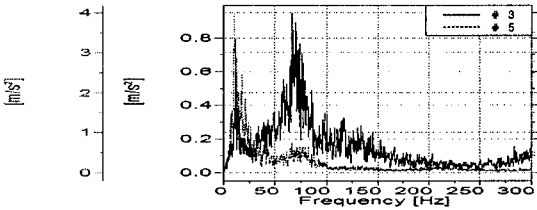


Fig. 3 Acceleration at RH (cobble-stone)

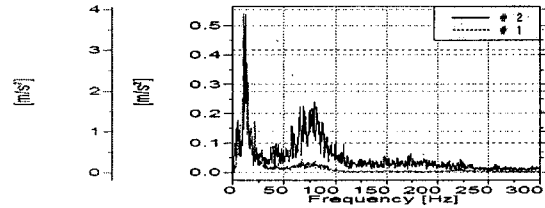


Fig. 4 Acceleration at LH (Belgian)

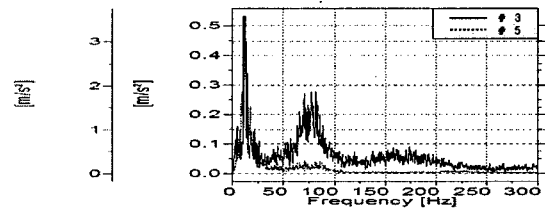


Fig. 5 Acceleration at RH (Belgian)

3. 강제 서브 프레임 진동 해석모델

3.1 유한요소모델

차량의 서브 프레임은 각기 다른 두께를 가지는 판재로 구성되어있으며, 내부에 충돌시 충분히 에너지를 흡수할 수 있도록 보강재를 사용하고 있다. 본 연구에서는 서브 프레임 CATIA 3D surface 모델을 이용하여 각각의 일정한 두께를 가지는 mid surface 모델로 편집하였다. 이는 해석과정에서의 해석시간을 줄일 수 있어 효율적인 작업 수행이 가능하게 한다. mid surface 모델을 Hyper Mesh 파일 형식으로 변환하여 각각의 부품들의 기하학적인 형상을 편집하고 이를 요소화 작업을 수행하여 질점(node)과 요소(element)를 생성하였다. 이와 같이 생성된 질점과 요소를 점검하고, 편

집한 후 재료의 물성치 및 물리량 등을 입력하여 유한요소 해석을 위한 전처리 과정을 완료하였다.

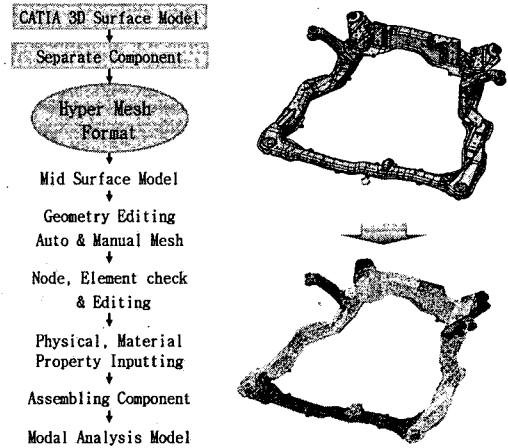


Fig. 6 Process of CAE Modeling

유한요소 모델은 용접 전 분리된 단품과 보강재로 총 28 부분으로 나누어 모델링하고, 요소화 하였다. Fig. 8은 해석 과정을 도표화한 것이다. 그리고 Table 1은 FE 모델을 구성하는 재료 물성치 및 요소정보를 나타낸 것이다.

각각의 단품에 대하여 용접부위를 RBE2로 연결하여 Fig. 9와 같이 구성하였다.

Table 1. Information of FE Model

Fe model	Node	CQUAD4 Element	CTRIA3 DATA	RBE2 Element
	72,117	64,475	8,539	2,375
Material Property	Young's modulus	Poisson's ratio	Density	Yield strength
	206.8 GPa	0.28	7,800 kg/m ³	250 MPa

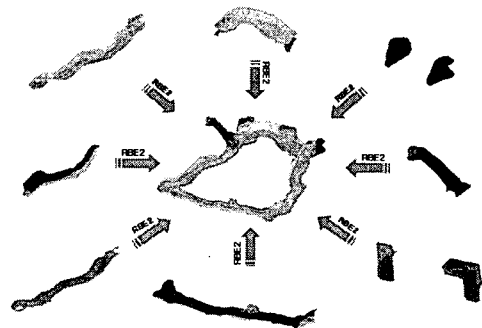


Fig. 7 FE Model of sub-frame

3.2 모달해석

서브프레임의 유한요소 모델에 대하여 모달 해석을 수행하였다. 모달 해석은 유한요소 모델에 대하여 고유진동수와 모달 벡터를 구하고, 이를 모달 실험결과와 비교하여 해석모델을 수정 및 보완하는 방법을 이용하였다. 비교 대상으로는 질량과 고유진동수, 그리고 MAC(Modal Assurance Criterion) 값을 정하였다. 해석은 MSC/NASTRAN를 이용하여 Normal mode 해석을 수행하였다. Fig. 10은 서브 프레임 유한요소모델에 대한 모달 해석결과로 고유진동수에 따른 모드 형상을 나타낸 그림이다.

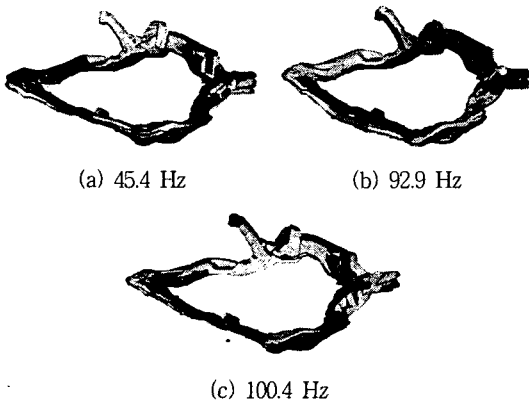


Fig. 8 Mode shape

서브 프레임의 동특성을 분석하기 위하여 이론적 모달해석과 실험적 모달해석을 수행하여 해석모델의 타당성을 검증하였다. 먼저 실험적 모달 해석을 수행하여 모달 파라미터를 구하였고, 유한요소 모델에 대하여 모달 해석을 수행하여 그 결과를 Mass, 고유진동수, MAC 값에 대해 비교하여 Table 2에 나타내었다. MAC 값은 실제모델과 유한요소 모델의 상관관계를 검토하기 위하여 실험모드와 해석모드간의 모달벡터의 직교성을 이용하여 나타낸 것으로, 모달 실험과 유한요소 해석에서 얻어진 모달 벡터가 동일하다면 계산된 MAC 값의 대각항이 1을 가지며, 다른 벡터를 가지게 된다면 0의 값을 나타내게 된다. 따라서 생성된 유한요소모델이 서브 프레임의 동적 변형 특성에 대해서는 잘 일치한다고 할 수 있지만, 고유진동수에서 10%이상의 오차를 발생하고 있다. 또한 질량에서도 오차가 9% 정도 발생하고 있다. 이는 서브프레임을 단순히 mid surface를 중심으로 두께가 일정한 평판으로 모델링 한 것에 대한 오차와 서브프레임 제조상의 허용 오차, 재질 및 표면의 차이에서 오는 오차 등을 포함하고 있다. 따라서 유한 요소 모델의 수정이 꼭 필요하고, 서브프레임의 정규모드의 특성변화를 목적으로 모델수정 및 최적화가 이루어져야 한다. 수정 모델의 목표를 정규 모드에서 고유진동수의 오차가 10%내에 있고, MAC값이 0.8 이상으로 하였다. 서브 프레임에서의 수정인자들은 서브 프레임의 두께, 밀도, 탄성계수가 있으며, 두께의 경우 질량과 강성의 변화가 동시에 발생한다. 반면 밀도 및 탄성계수의 변화는 각각 질량과 강성만이 변화하게 된다. 그리고 최

적의 두께를 찾는 데에 소요시간이 길고, 모델의 용접과 접판, 단품에 대한 허용두께 등 많은 오차가 존재하기 때문에 이런 특성을 고려하기에는 어려운 점이 많다. 따라서 본 연구에서는 최적의 유한요소 모델을 찾는 데 소요시간이 짧으며, 질량 및 무게중심의 변화가 없는 탄성계수를 수정인자로 하여 Hyper-Mesh에서 유한요소 모델의 물성치를 수정하였다. Fig. 11은 유한요소 모델의 수정 전·후의 각각의 모델에 대한 고유진동수를 비교한 그래프로 Adjusted FE Model 1의 경우가 실험결과와 거의 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 이용하여 최적의 유한 요소 모델에 대한 모달해석 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Verification of FE Model

No	Experiment [Hz]	FEM [Hz]	Error [%]	MAC (X-dir)	MAC (Y-dir)	MAC (Z-Dir)
1	55.8	45.4	18.4	0.62	0.88	0.99
2	105.8	92.9	12.1	0.78	0.48	0.99
3	113.8	100.4	11.7	0.97	0.97	0.47
4	133.3	125.0	6.0	0.94	0.98	0.99
5	169.2	151.3	10.5	0.95	0.95	0.97
6	209.1	184.4	11.8	0.90	0.79	0.84
7	244.9	225.4	8.0	0.50	0.83	0.91
Mass	32.2 kg	29.1 kg	9.5 kg	-	-	-

Natural Frequency of each mode

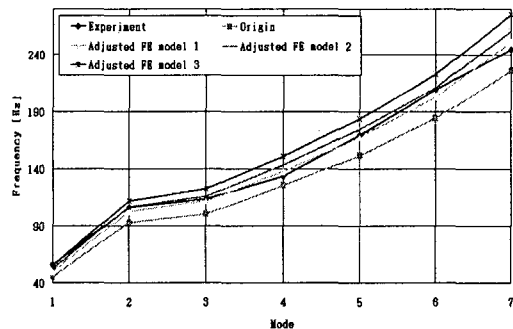


Fig. 9 Comparison of natural frequency

Table 4. Verification of Adjusted FE Model

#	Experiment [Hz]	FEM [Hz]	Error [%]	MAC (X-dir)	MAC (Y-dir)	MAC (Z-Dir)
1	55.8	50.1	10.0	0.54	0.90	0.91
2	105.8	102.4	3.2	0.81	0.41	0.94
3	113.8	111.7	1.7	0.85	0.98	0.34
4	133.3	137.6	3.1	0.95	0.90	0.86
5	169.2	167.8	0.9	0.89	0.94	0.82
6	209.1	203.2	2.8	0.83	0.84	0.93
7	244.9	251.1	2.5	0.73	0.83	0.87

3.3 경계조건 및 가진조건

본 연구에서는 서브 프레임의 동특성을 해석하기 위하여 다물체 동역학(multibody system dynamics) 상용 소프트웨어인 ADAMS VIEW 12.0을 사용하였다. ADAMS를 이용한 동특성 해석을 위하여 동역학적인 구속 조건이 적용된 유연체(flexible body) 모델을 생성하였다.

서브 프레임의 정확한 동특성 해석을 위해서는 타당한 경계조건(boundary condition)과 가진 조건(excitation condition)이 주어져야한다. 엔진에서 발생한 진동신호가 마운트(mount)를 거쳐 로우 암, Bush를 통하여 서브 프레임에 전달된다. 또, 서브프레임은 차체, 엔진 그리고 코너모듈과 각각에 대하여 Bush로 연결되어 있으므로 각 자유도에 대한 Bush의 강성이 정의되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 Bush에 대해 3자유도에 대하여 강성을 가지는 스프링으로 경계조건을 설정하였으며, 가진 신호는 실차주행시험으로부터 얻은 신호를 바탕으로 서브프레임에 가진력으로 작용되는 부분인 마운트와 로우 암에 3자유도에 대하여 변위성분을 주었다. Fig. 12는 ADAMS에서 동역학 해석을 위한 모델을 나타내고 있다. 여기서 로우 암은 서브프레임의 두 부분에 Bush로 연결되어 있기 때문에 차륜에서 발생하는 가진 성분은 로우 암을 거쳐 서브프레임 연결부위 각각에 작용한다. 따라서 본 연구에서는 로우 암을 강체로 모델링하고, 가속도 센서가 부착된 위치를 가진위치(exciting location)로 선정하였다.

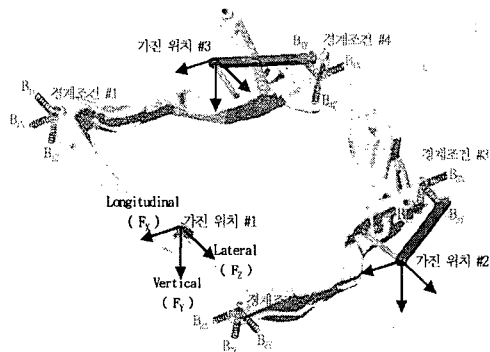
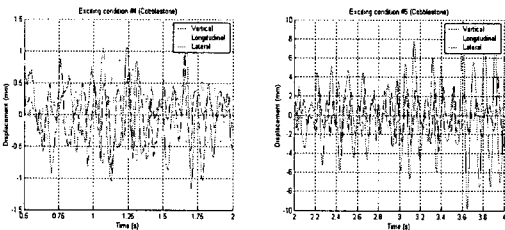
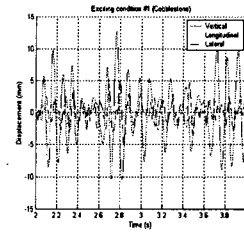


Fig. 10 ADAMS Model



(a) Exciting Condition 1 (b) Exciting Condition 2



(c) Exciting Condition 3

Fig. 11 Exciting signal (Cobble-stone)

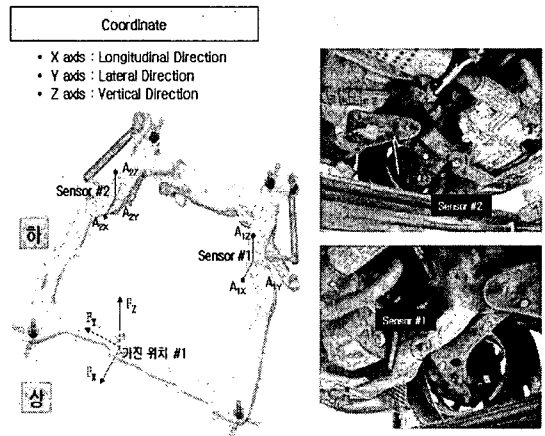
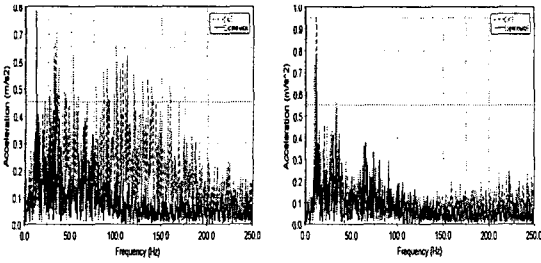


Fig. 12 Sensor Location of ADAMS Model

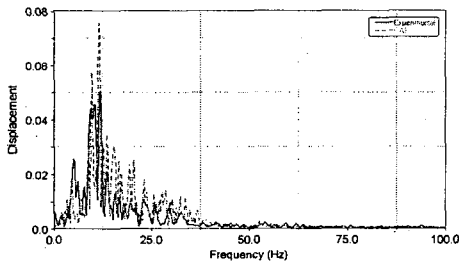
본 연구에서는 서브 프레임에 대해서 동특성 및 내구해석을 수행하기 위해 기존 차량에 대한 데이터를 바탕으로 해석모델을 생성하기 위해서 해석모델에 적용할 수 있는 Bush 강성값을 역으로 계산하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 적절한 강성값을 찾기가 쉽지는 않지만 실차 상태와 가장 유사한 특성을 구현할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 Bush의 등가강성을 변화시켜가며 ADAMS 해석결과를 실차주행시험 결과와 비교하였다. Fig. 12는 강성의 변화에 따른 측정위치 #1에서 Vertical 방향의 가속도를 주파수 영역에서 비교하였다. Bush의 강성 값에 따른 응답을 비교해 본 결과 강성이 10^8 일 경우 실차주행시험에서의 응답과 비교하여 주파수 영역에서 유사한 성분을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 수정된 강성 값을 경계조건으로 설정하고 ADAMS 해석을 수행하여 Fig. 13과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 변위신호에 대한 주파수 성분이 거의 유사한 결과가 나타나는 것을 알 수 있으며, 발생주파수 성분은 거의 일치하나 주파수 성분 크기가 조금씩 차이가 나타나는 것을 알 수 있다.

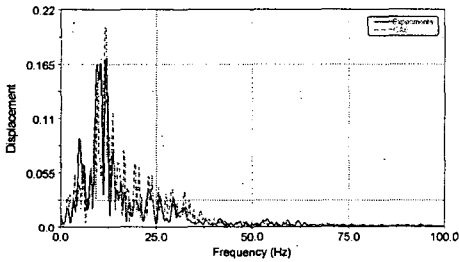


(a) Bush stiffness ($k=10^6$) (b) Bush stiffness ($k=10^8$)

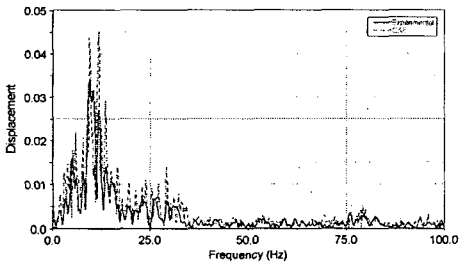
Fig. 13 Results as Bush stiffness variety



(a) Lateral (Sensor #1)



(b) Longitudinal (Sensor #1)



(c) Vertical (Sensor #1)

Fig. 14 Response after stiffness adjustment

5. 결 론

본 연구에서는 실차주행에서 발생하는 서브 프레임(2, 3위치) 및 컨트롤 암(1, 5위치)의 진동신호를 측정하여 주요 진동 성분을 분석하였다. 특히 서브 프레임의 경우 노면으로 전달되는 진동성분이 주요 주파수 성분이므로 설계 시 이를 고려한 설계가 이루어져야 한다는 것을 알 수 있었으며 1st 고유진동수가 45 Hz 이상이 되어야 공진현상을 회피할 수 있는 것을 알 수 있었다.

실제 차량의 서브프레임에 가진되는 신호를 측정하여 가진 신호를 생성하였으며 유한요소 모델에 가진 조건으로 주어졌다. 그리고 실제 서브프레임에 측정된 신호와 유한요소 해석을 통해 나타난 결과를 Fig. 14에서 나타내었다. 이 결과에서 거의 유사한 성분들이 나타남을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문은 부품소재기술개발사업 “승용차용 알루미늄 사시부품 개발”과제의 위탁연구비에 의해서 수행된 연구로 관련 기관 여러분에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 박영배 등, 2001, “매쉬 심 용접판재를 이용한 경량화된 자동차 서브프레임의 개발”, 춘계학술대회 발표집, 한국자동차공학회, pp. 449~456.
- (2) 구자석, 최재석, 2002, “유한요소법을 이용한 서브프레임의 피로수명예측”, 추계학술대회 발표집, 한국자동차공학회, pp. 483.
- (3) Xiaoming Chen, Hikmat F. Mahmood., 2004, “Aluminum Subframe Design for Crash Energy Management,” SAE, 2004-01-1775.
- (4) 허덕재 등, 2002, “차량 서브프레임의 유한요소 모델의 개선 및 최적화에 대한 연구”, 한국자동차공학회 논문집, pp. 220~227.