

차량용 서브프레임의 동특성 해석

Dynamic Analysis of Vehicle Sub-frame

이 봉 현† · 김 찬 중* · 김 기 훈**

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

(2005년 5월 10일 접수 ; 2005년 11월 30일 심사완료)

Key Words : Sub-frame(서브 프레임), Modal Analysis(모달 해석), 실차시험(Vehicle Test), FEM Analysis(유한요소해석), Dynamic Analysis(동적 해석)

ABSTRACT

The vibration of Powertrain are one of the import design characteristics of a vehicle. Powertrain is mostly mounted to the front subframe and powertrain mounting has an important role in determining the vehicle vibration characteristics. In this paper, the accuracy of the vibration analysis for the front subframe is discussed. The dynamic characteristic of subframe are measured from vehicle test and the finite element model updating are performed that natural frequency, mass and MAC of the experimental and theoretical modal analysis are compared. The subframe mounting stiffness are obtained the iteration method based on the vibration of subframe from vehicle test. Finally, the result of dynamic analysis which is operated dynamic load is compared with experimental one of vehicle test.

1. 서 론

차량 경량화는 경쟁이 심화되고 있는 자동차 시장에서 매우 중요한 기술인자로, 승차감 향상 및 연비 절감 효과를 위해서는 필수적으로 요구되는 기술이다. 하지만, 경량화로 인한 차량 내구성능의 저하, 강성문제, 차량 NVH 특성의 변화로 인해 이에 대한 정확한 예측 및 설계기준의 마련이 시급히 요구되고 있다.

차량용 서브프레임은 차량의 전면부에 부착되어 충돌 시 충격을 완화하고, 노면으로부터 전달되는 진동 성분을 지지하는 역할을 담당하고 있다. 서브 프레임의 경우 구조해석, 내구해석, 충돌 해석, NVH 해석

등 설계단계에서 고려해야할 사항들이 많기 때문에 많은 시간이 소요되며, 각각의 특성들이 서로 상반되기 때문에 정확한 예측을 하기에는 많은 어려움이 있다. 현재 서브 프레임과 관련하여 개발단계에서는 충돌특성에 대한 시험 및 해석을 위주로 진행되고 있으나 서브 프레임의 동특성에 대한 연구는 상대적으로 진행되고 있지 못한 실정이다.

일부 연구자들에 의해서 서브 프레임에 대한 동특성 연구가 시도되었는데, 박영배⁽¹⁾ 등은 보강재를 없애고, 메쉬 심 용접판재를 이용하여 서브프레임의 경량화 연구를 수행하였고, 구자석⁽²⁾ 등은 유한요소를 이용하여 피로수명을 예측하였다. Xiaoming chen⁽³⁾ 등은 알루미늄 서브프레임에 대하여 충돌해석을 수행하였으며, 허덕재⁽⁴⁾ 등은 유한요소모델의 상관관계를 정의하고 개선하는 방법을 정의하였다. 서브프레임의 경우 다양한 동적 하중에서 복합적인 특성을 나타내는데, 이 연구에서는 동역학적인 특성과 진동특성을 바탕으로 서브 프레임의 동특성에 대한 연구를 수행하였다.

† 책임저자 : 정희원, 자동차부품연구원 구조특성연구센터
E-mail : bhlee@katech.re.kr

Tel : (041) 559-3121, Fax : (041) 559-3286

* 정희원, 자동차부품연구원 구조특성연구센터

** 자동차부품연구원 구조특성연구센터

이 연구에서는 실차주행시험을 통해 차량용 서브프레임에 작용하는 동적하중 및 진동특성을 분석한 후, 유한요소해석 및 동역학 해석을 통해 서브프레임의 동특성을 분석하였다.

2. 서브 프레임 진동 측정시험

2.1 계측 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 하중이 전달되는 부품으로 실차 상태에서 작용하는 가진 하중을 측정하여 해석 시 서브 프레임의 입력조건으로 설정하였다.

서브 프레임의 진동을 측정하기 위하여 Fig.1과 같이 센서를 부착하여 실차주행시험을 수행하였다. 측정위치 #1, #5는 로우 컨트롤 암, #2, 3은 서브 프레임을 나타내며, #4는 엔진마운트 부분의 측정 위치를 나타낸다. 특히 #4 부분은 시험 환경이 고온이기 때문에 가속도 센서의 마운팅 클립을 170도까지 견뎌낼 수 있는 특수 센서장착 지그를 사용하였다. 그리고 24채널의 DAQ 장비인 LMS Pimento를 이

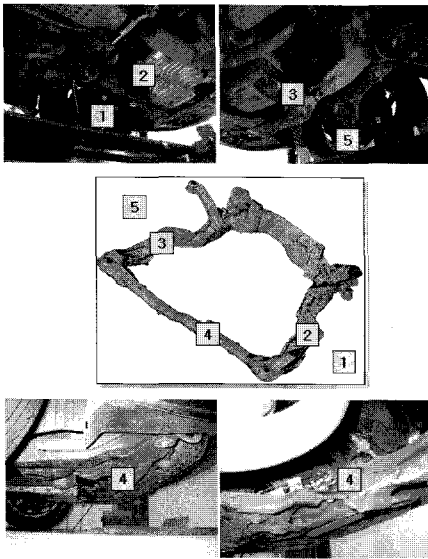


Fig. 1 Sensor location

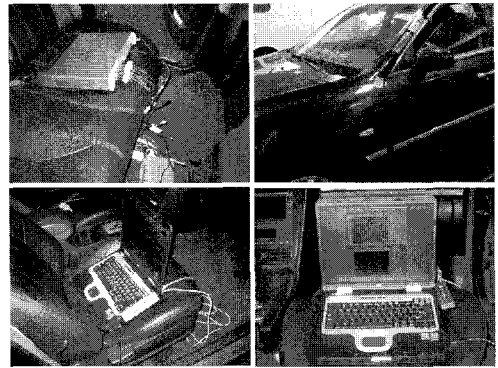


Fig. 2 Data acquisition system [LMS Pimento]

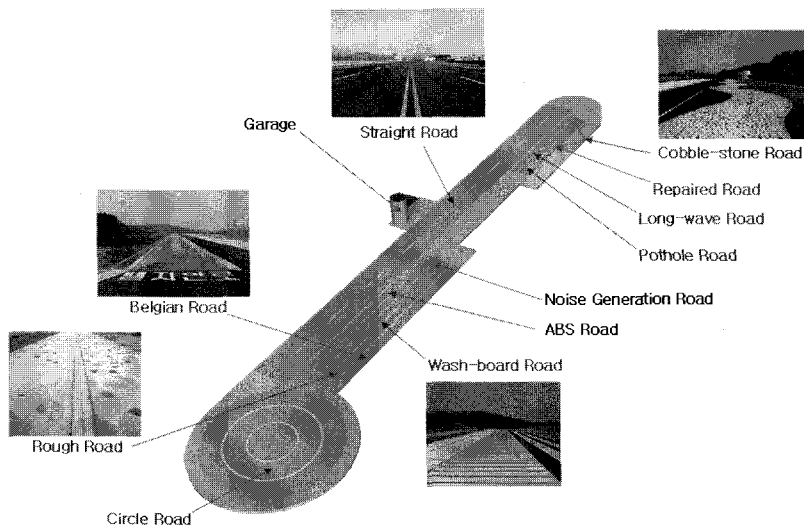


Fig. 3 Proving ground

용하여 데이터 저장 및 분석을 수행하였다.

2.2 실차주행 시험모드

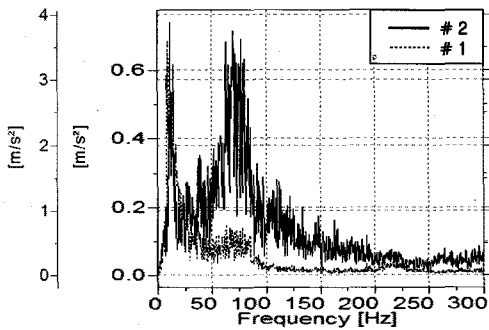
서브프레임 관련 진동 특성을 파악하기 위해 직선로 및 특수로에 대해 주행 조건을 설정하여 주행 중 발생하는 가속도 신호를 측정하였다. 실차주행 시험모드의 경우 정속 주행 조건을 이용하였기 때문에 주행속도에 의한 가진성분을 명확히 정의할 수 있었으며, 운전자는 주행 조건의 회전수 및 변속단이 동일한 조건을 유지하도록 실차주행을 수행하였다. 이 연구에서는 직선로, 자갈로(Cobblestone), 그리고 벨지안로(Belgian)의 실차 주행 조건 중 2단 1,500 rpm에 대해 분석을 수행하였다. Fig. 3은 이 연구에 활용된 자동차부품연구원 주행시험장을 나타낸 그림이다.

2.3 시간역 분석

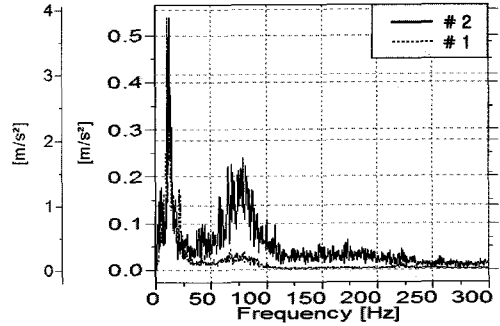
실차 시험에서 획득한 신호를 시간역에서 분석하면 주행조건을 확인할 수 있다. 자갈길로의 경우에는 다른 여타의 특수로 및 직선로에 비해 차량의 좌우방향 및 전후방향의 입력 성분이 입력 가진으로 들어오게

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. 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.

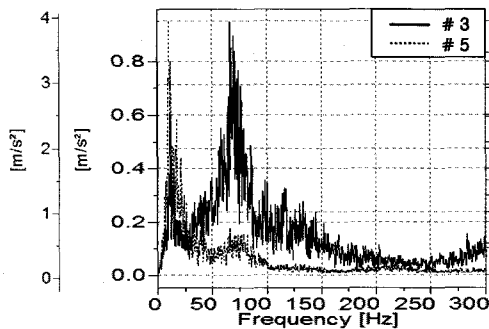
정의된 시험모드에 의해 실차주행데이터를 분석한 결과 직선로의 경우 2 m/sec^2 의 영역에서 대부분의 신호가 측정되었지만, 자갈길로의 경우는 100 m/sec^2 의 범위까지 나타나는 것을 알 수 있었다. 이것을 통해 각 도로 주행의 특성에 대해 응답 가속도가 상당히 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. 그러나 동일한 도로주행 조건에서 서로 다른 채널간은 연관성 혹은 차이점을 찾아내기 쉽지 않으며 동일한 측정 위치에 대해서도 각 방향별로 다른 응답 특성을 보여주고 있다. 그러나 이 값은 실제 특성을 그대로 포함하는



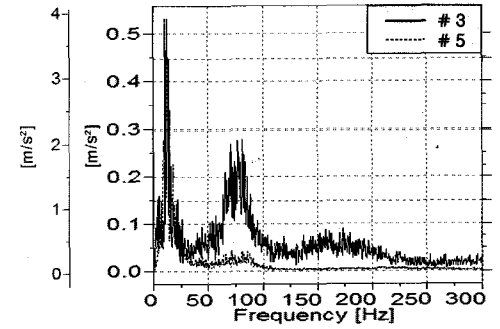
(a) LH (#1, 2)



(a) LH (#1, 2)



(b) RH (#3, 5)



(b) RH (#3, 5)

Fig. 4 Acceleration at cobble-stone road

Fig. 5 Acceleration at belgian road

데이터로 되도록 왜곡하지 않는 범위 내에서 주파수 분석을 수행하였다.

2.4 주파수역 분석

실차주행시험을 통해 측정된 가속도신호에 대해서 주파수 분석을 수행하였다. 서브프레임의 진동 특성을 파악하기 위해서는 구속 조건에 해당되는 로우암의 진동 특성을 서브프레임과 함께 분석하였다.

Fig. 4, 5는 자갈길로와 벨지안로의 LH 부분(# 1, 2)과 RH(# 3, 5) 부분에 대한 주파수 분석결과이다. 로우암의 진동 특성은 지면에서 올라오는 가진 요소를 그대로 반영하기 때문에 45 Hz 이하의 요소에서 큰 응답 특성을 보여준다. 그러나 이 주파수 성분은 서브프레임에서는 크게 저감되는 것을 알 수 있다. 45 Hz 부근에서 발생하는 진동 특성은 서브프레임의 1차 고유진동수인 55 Hz 근방이기 때문에 외부 요소에서의 가진에 의한 응답특성보다 서브프레임 자체의 동적 거동에 의한 응답특성이 더욱 커질 가능성이 존재하게 되므로, 설계 시 이 범위를 벗어나는 영역에 고유진동수가 존재하도록 설계하여야 한다는 것을 알 수 있었다.

3. 강제 서브 프레임 진동 해석모델

3.1 유한요소모델

차량의 서브 프레임은 각기 다른 두께를 가지는 판재로 구성되어 있으며, 내부에 충돌 시 에너지를 흡수할 수 있도록 보강재를 사용하고 있다. 이 연구에서는 서브 프레임 CATIA 3D surface 모델을 이용하

여 각각 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 변환한 후, 기하학적인 형상을 편집하고 요소화 작업을 수행하여 질점(node)과 요소(element)를 생성하였다. 생성된 질점과 요소를 점검하고, 편집한 후 재료의 물성치 및 물리량 등을 입력하여 유한요소해석을 위한 전처리 과정을 완료하였다.

유한요소 모델은 용접 전 분리된 단품과 보강재로 총 28 부분으로 나누어 모델링하고, 요소화하였다. Fig. 6은 모델링 프로세스를 나타낸 그림이며, Table 1에 유한요소모델의 재료 물성치 및 요소정보를 나타내었다. 또한 단품별 용접부위를 Fig. 7과 같이 RBE2로 연결하여 구성하였다.

3.2 모달해석

서브프레임의 유한요소 모델에 대하여 모달 해석을 수행하였다. 모달 해석은 유한요소 모델에 대하여 고유진동수와 모달 벡터를 구하고, 이를 실험적 모달 결과와 비교하여 해석모델을 수정 및 보완하는 방법을 이용하였다. 해석모델의 검증은 질량과 고유진동

Table 1 Information of finite element model

Finite element 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

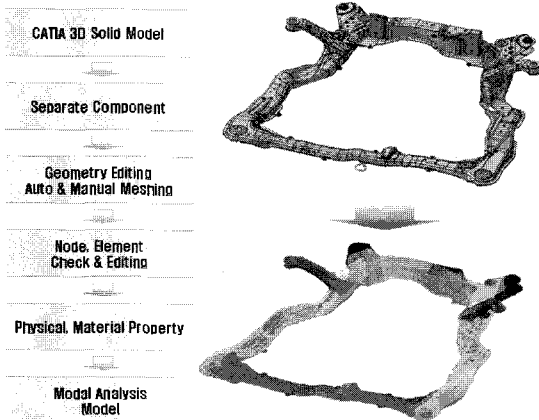


Fig. 6 Process of CAE modeling

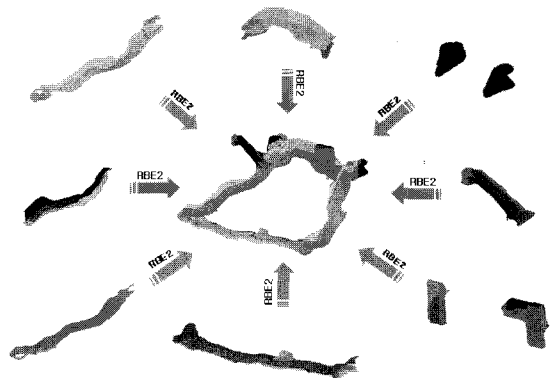


Fig. 7 Finite element model of sub-frame

수, 그리고 MAC(modal assurance criterion) 값을 비교하였으며, MSC/NASTRAN을 이용하여 normal mode 해석을 수행하였다. Fig. 8은 서브 프레임 유한 요소모델에 대한 모달 해석결과로 고유진동수에 따른 모우드 형상을 나타낸 그림이다.

서브 프레임의 동특성을 분석하기 위하여 이론적 모달해석과 실험적 모달해석을 수행하여 해석모델의 타당성을 검증하였다. 먼저 실험적 모달 해석을 수행한 후, 유한요소 모델에 대해 이론적 모달 해석을 수행하여 Mass, 고유진동수, MAC 값을 비교하였다. MAC 값은 실제모델과 유한요소 모델의 상관관계를 검토하기 위하여 실험모드와 해석모드간 모달벡터의 직교성을 이용하여 나타낸 것으로, 모달 실험과 유한요소 해석에서 얻어진 모달 벡터가 동일하다면 MAC 값의 대각항이 1을 가지며, 다른 벡터를 가지게 된다면 0의 값을 나타내게 된다. Table 2는 해석결과를 나타낸 것으로 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 요구된다. 이 연구에서는 서브프레임 정규모드의 특성변화를 목적으로 모델수정 및 최적화를 수행하였다. 수정 모델의 목표를 정규 모드에서 고유진동수의 오차가 10%이내에 있고, MAC값이 0.8 이상으로 설정하였으며, 서브프레임 수정인자들은 서브프레임의 두께, 밀도, 탄성계수를 설정하였다. 두께의 경우 질량과 강성의 변화가 동시에 발생하지만, 밀도 및 탄성계수의 변화는 질량과 강성만이 변화하게 된다. 그리고 최적 두께를 찾는 데에

소요시간이 길고, 모델의 용접과 접판, 단품에 대한 허용두께 등 많은 오차가 존재하기 때문에 이런 특성을 고려하기에는 어려운 점이 많다. 따라서 이 연구에서는 최적의 유한요소 모델을 찾는 데 소요시간이 짧으며, 질량 및 무게중심의 변화가 없는 탄성계수를 수정인자로 하여 Hyper-Mesh에서 유한요소 모델의 물성치를 수정하였다.

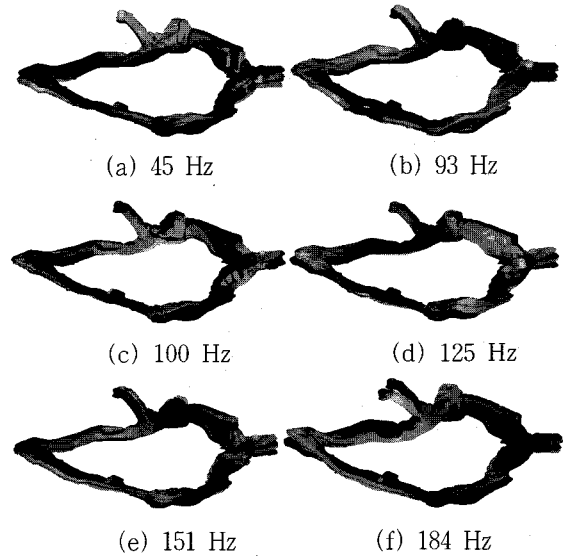


Fig. 8 Mode shape

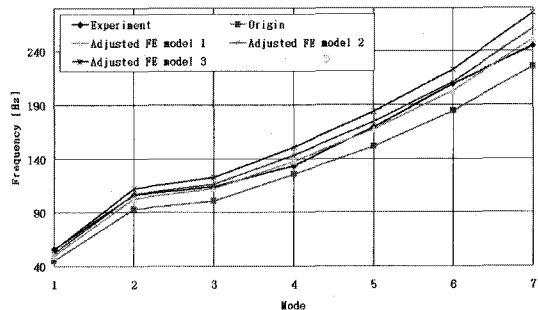


Fig. 9 Comparison of natural frequency

Table 2 Verification of finite element model

No.	Exp. [Hz]	FEM [Hz]	Error [%]	MAC (X-dir)	MAC (Y-dir)	MAC (Z-dir)
1	56	45	18.4	0.62	0.88	0.99
2	106	93	12.1	0.78	0.48	0.99
3	114	100	11.7	0.97	0.97	0.47
4	133	125	6.0	0.94	0.98	0.99
5	170	151	10.5	0.95	0.95	0.97
6	210	184	11.8	0.90	0.79	0.84
Mass[kg]	32.2	29.1	9.5	-	-	-

Table 3 Verification of adjusted finite element model 1

#	Experiment [Hz]	FEM [Hz]	Error [%]	MAC (X-dir)	MAC (Y-dir)	MAC (Z-dir)
1	56	50	10.0	0.54	0.90	0.91
2	106	103	3.2	0.81	0.41	0.94
3	114	112	1.7	0.85	0.98	0.34
4	133	138	3.1	0.95	0.90	0.86
5	170	168	0.9	0.89	0.94	0.82
6	210	203	2.8	0.83	0.84	0.93

Fig. 9는 수정 전·후의 유한요소 모델에 대한 고 유진동수를 비교한 결과로 Adjusted FE Model 1의 경우가 실험결과와 거의 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. Table 3은 이 모델에 대한 모달해석 결과로 시험결과와 유사한 것을 알 수 있다. 그러므로 Adjusted FE Model 1이 실제 서브 프레임 현상과 유사한 특성을 나타낸다는 결론을 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 동특성 해석을 수행하였다.

3.3 경계조건 및 가진조건

서브 프레임의 동특성 해석을 위해 동역학적인 구속 조건이 적용된 유연체(flexible body) 모델을 생성한 후, Fig. 10과 같이 다물체 동역학 상용 소프트웨어인 ADAMS를 사용하여 서브 프레임 동특성 해석을 수행하였다.

서브 프레임의 정확한 동특성 해석을 위해서는 경계조건(boundary condition) 및 가진 조건(excitation condition)에 대한 정확한 정의가 선행되어야 한다. 엔진에서 발생한 진동신호가 엔진마운트(mount)를 거쳐 서브프레임에 전달되고, 차체, 엔진 그리고 샤시 모듈에 대해 서브프레임은 bush로 연결된다.

그러므로 이 연구에서는 bush에 대해 3자유도에 대하여 강성을 가지는 스프링으로 경계조건을 설정하였으며, 가진 신호는 실차주행시험으로부터 얻은 엔진마운트 부근의 신호를 이용하여 가진력을 정의하였다. Fig. 11은 가진력의 시간역데이터를 보여주는 그림으로 (a)는 엔진마운트, (b), (c)는 로우암 부위를 나타낸다.

Fig. 12는 ADAMS에서 동역학 해석을 위한 모델을 나타내고 있다. 여기서 로우암은 서브프레임의 두 부분에 bush로 연결되어 있기 때문에 차륜에서 발생

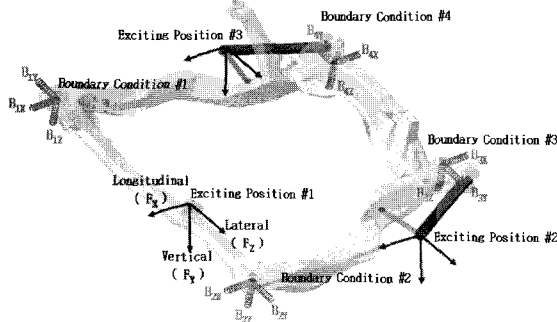
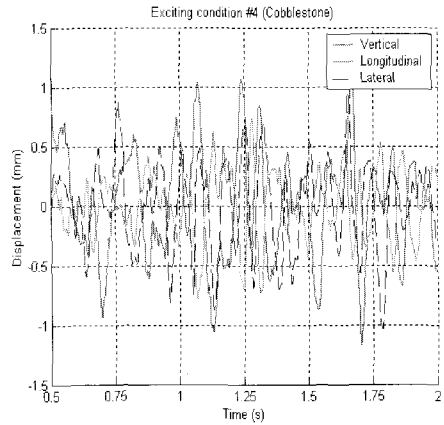
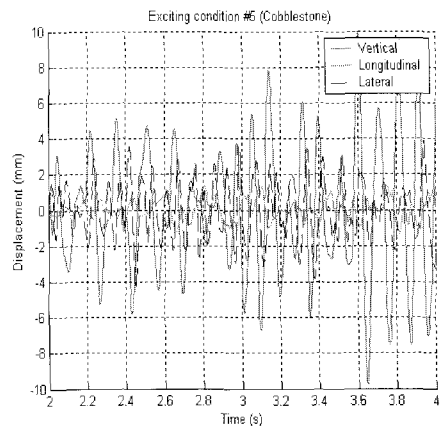


Fig. 10 ADAMS model.

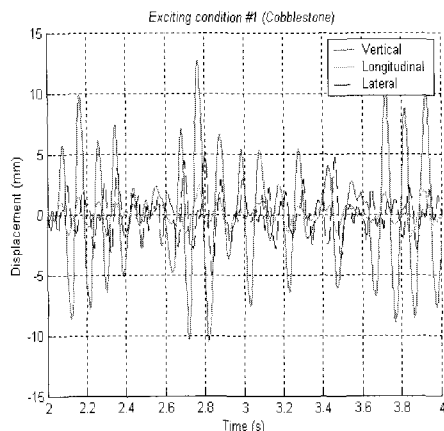
하는 가진 성분은 로우 암을 거쳐 서브프레임 연결부 위 각각에 작용한다. 따라서 이 연구에서는 로우 암을 강체로 모델링하고, 가속도 센서가 부착된 위치



(a) Exciting condition 1



(b) Exciting condition 2



(c) Exciting condition 3

Fig. 11 Exciting signal (cobble-stone)

를 가진위치(exciting location)로 선정하였다.

서브 프레임 동특성 해석을 수행하기 위해 기존 차량에 대한 데이터를 바탕으로 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.

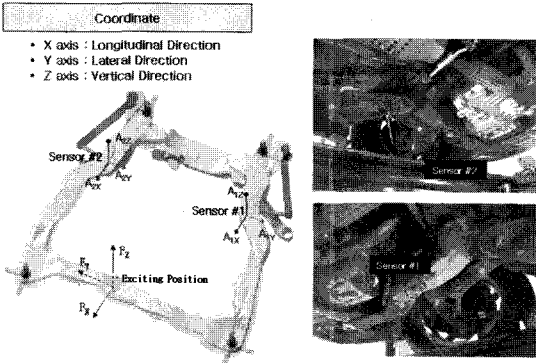
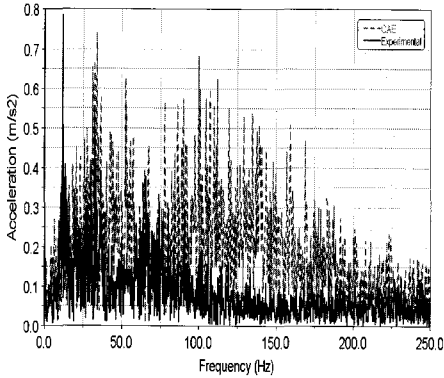
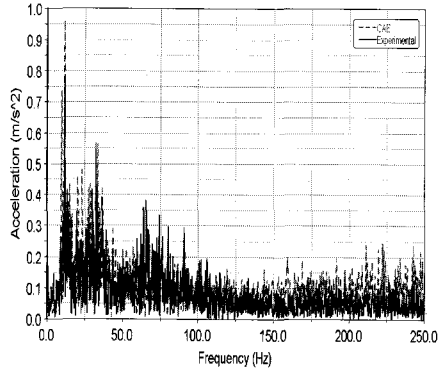


Fig. 12 Sensor location of ADAMS model



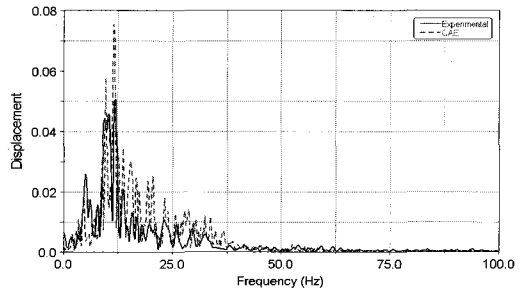
(a) Bush stiffness ($k=106$)



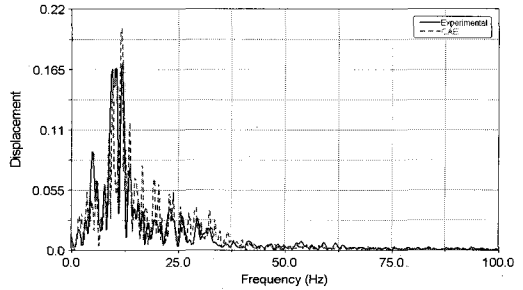
(b) Bush stiffness ($k=108$)

Fig. 13 Effect of various bush stiffness

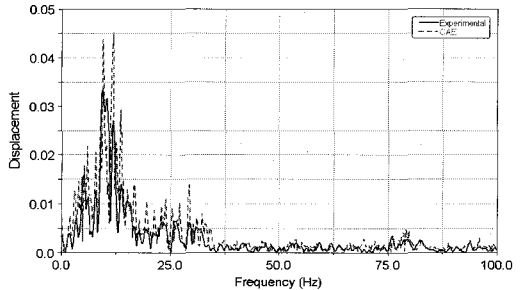
따라서 이 연구에서는 bush의 등가강성을 변화시켜가며 ADAMS 해석결과를 실차주행시험 결과와 비교하였다. Fig. 13은 강성의 변화에 따른 측정위치 #1에서 vertical 방향의 가속도를 주파수 영역에서 비교하였다. Bush의 강성 값에 따른 응답을 비교해 본 결과 강성이 108일 경우 실차주행시험에서의 응답과 비교하여 주파수 영역에서 유사한 성분을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 수정된 강성 값을 경계조건으로 설정하고 ADAMS 해석을 수행하여 Fig. 14와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 변위신호에 대한 주파수 성분이 거의 유사한 결과가 나타나는 것을 알 수 있었으며, 이로부터 서브프레임 동특성 해석을 위한 적절한 해석모델이 유도되었음을 알 수 있었다.



(a) Lateral (sensor #1)



(b) Longitudinal (sensor #1)



(c) Vertical (sensor #1)

Fig. 14 Displacement of subframe

5. 결 론

이 논문에서는 실차주행 시 발생하는 서브 프레임의 진동신호를 측정하고, 이를 재현할 수 있는 동역학 해석모델을 유도하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 서브 프레임 설계 시 노면으로부터 전달되는 45 Hz 이하 가진성분과의 공진을 회피하기 위해서는 서브프레임의 고유진동수가 45 Hz 이상에 존재해야 됨을 알 수 있었다.

(2) 서브프레임 해석 시 로우암을 강체로 가정하고, 실차시험 시 측정한 로우암의 엔진 마운트 부위의 가속도 신호를 가진신호로 설정하여 동역학 해석을 수행한 결과 서브프레임의 실차 진동현상과 거의 유사하게 재현할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 부품소재기술개발사업 “승용차용 알루미늄

늄 사시부품 개발”과제의 위탁연구비에 의해서 수행된 연구로 관련 기관 여러분에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 박영배 등, 2001, “매쉬 심 용접관재를 이용한 경량화된 자동차 서브프레임의 개발”, 한국자동차공학회 춘계학술대회발표집, pp. 449~456.
- (2) 구자석, 최재석, 2002, “유한요소법을 이용한 서브프레임의 피로수명예측”, 한국자동차공학회 춘계학술대회발표집, p. 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.
- (5) 백경원 등, 2005, “차량용 서브프레임의 동특성 해석”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 403~408.