

CAD/CAE을 이용한 승용 Jeep의 Key-off시 진동 해석

The vibration Analysis in Case of Key-off of a Jeep by Using CAD/CAE

안 가 원*, 송 상 기**
(Gie Won An*, Sang Kee Song**)

요 약

엔진의 가진력으로 인해 발생하는 차량의 진동은 승차감에 큰 영향을 미치며, 또한 엔진 마운트 계의 동역학적 특성은 차량의 진동 및 소음에 직접적인 영향을 준다. 본 논문에서는 승용 지프차의 엔진 key-off시 엔진 가진력으로 인한 차체 흔들림(body shake)을 실험을 통하여 측정함과 동시에 매카니즘해석 전용 프로그램인 DADS를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 모델은 엔진, 후레임이 포함된 차체, 앞 액슬 그리고 뒤 액슬로 구성되며, 각 액슬은 좌우에 타이어를 고려하였다. 차체와 현가계 사이의 힘요소는 스프링과 댐퍼의 조합으로 모델링 하였으며, 현가계는 롤링과 피칭을 고려하였다. 실험에서 얻은 차체 흔들림의 실험결과와 컴퓨터 시뮬레이션한 결과를 비교 검토하였으며, 검증된 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 통하여 엔진 마운트 고무의 강성, 엔진마운트의 설치각도 및 마운트 위치를 변경하여 key-off시 차체 흔들림을 고찰함으로써 엔진 key-off시의 차체 흔들림의 감소를 확인하였다.

ABSTRACT

The vibration of a vehicle, which is caused by and transmitted from the engine, has significant effect on the ride comfort and the dynamic characteristics of the engine mount system has direct influence on the vibration and noise of the vehicle. This paper examines the body shake caused by the engine excitation force on engine key-off of a jeep by experiment and computer simulation using a general purpose mechanical system program, DADS. The computer simulation model consists of the engine, body including frame, and front and rear axles and each axle has right and left tires. The force element between body and suspension is modeled as a combination of suspension spring and damper, and the unsprung mass has roll and pitch motion. The body shake obtained from experiment was compared with the result of computer simulation. Parametric study of the body shake on engine key-off is performed with changing the stiffness of engine mount rubber, the engine mount installation angle and position of engine mounts by using the verified computer simulation model.

1. 서 론

차량의 엔진 진동에 의한 차체 흔들림은 운전자의 승객에게 불쾌감을 줄뿐만 아니라 차량의 수명을 단축시킬수 있다. 차량에서 일어나는 진동중 엔진에 의

한 진동을 크게 3가지 형태로 나누어 볼 수 있다. 첫째 엔진을 시동하기 위한 key-on의 상태, 둘째 아이들링(idling) 및 엔진 회전수(rpm) 변화에 의한 경우 그리고 세번째는 key off시에 의한 경우가 있다. 일반적으로 엔진 구동으로 인하여 발생하는 힘과 모멘트는 피스톤 질량과 컨넥팅 로드와 상부 질량을 합한 왕복질량으로 인해 발생하는 관성력과 실린더 내의 가스압력이 크랭크 축(crank shaft)에 비틀림 모멘

*아사아 자동차 기술연구소 CAE 연구실

**인하대학교 기계공학과 대학원

접수일자 : 1991. 12. 24

트를 발생시켜 엔진을 진동시키며 이들 관성력과 비틀림 모멘트들은 엔진 마운트를 거쳐 차체진동을 유발시키게 된다. 특히 엔진 구동시 엔진 회전수의 2배에 해당하는 주파수에서 진동과 소음이 심하게 발생됨을 알 수 있다. 따라서 엔진 구동으로 인하여 발생하는 진동을 줄이기 위하여 엔진 진동 절연은 필수적이며 이에 대한 연구가 이루어지고 있다^{1,4}. 그러나 대부분 종전의 연구는 엔진진동에 관계된 엔진의 가진력을 엔진 회전수가 일정하다는 가정하에서 이론식에 의해 구했으며^{5,6}, 이러한 방법은 엔진 진동 절연 모델링에 중요한 엔진의 작용력을 계산할때 아이들링 상태를 포함하여 엔진 회전수가 일정하다는 가정에 적용되기 때문에⁷ 엔진 key-on과 key-off시 등 천이구역(transient region)에서는 적용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 천이구역에서 발생하는 엔진 가진력을 동역학적 모델에 적용하여 차체진동 현상을 파악하였으며, 이를 실제 연구대상 차량의 차체진동의 실험값과 비교함으로써 모델의 타당성을 확인하였다. 검증된 컴퓨터 모델을 이용하여 엔진 마운트 고무의 강성과 엔진 마운트 설치 각도 및 위치를 변경하여 그 결과를 연구함으로써 엔진 key-off시 차체흔들림 양상을 고찰하였다.

II. 차량의 동역학적 모델

2-1. 엔진 마운트계의 동역학적 모델

차량의 흔들림을 해석하기 위한 동역학적 모델에 사용된 엔진은 4실린더, 4행정 디젤 엔진(2184cc,

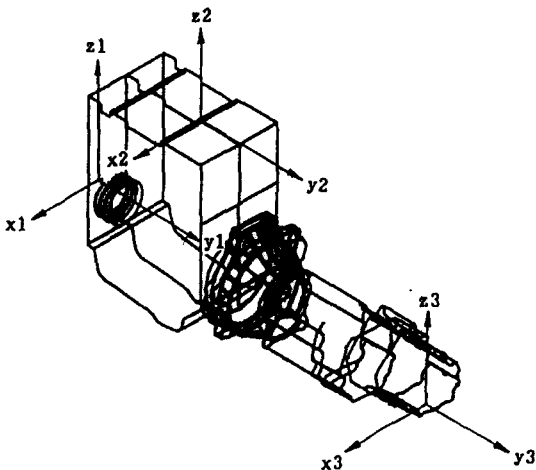


Fig. 1. Engine dynamic model with coordinates based on front left(1), front right(2), and rear(3) mounts

72ps)이며, 엔진과 트랜스미션(transmission) 어셈블리는 Fig.1과 같다.

차량의 전체 좌표계는 x축이 운전자 방향, y축은 차량의 뒷쪽 방향, z축은 차량의 수직방향으로 정의된다. Fig.1에서 처럼 엔진 마운트계는 프론트레프트 마운트(front left mount), 프론트 라이트 마운트(front right mount) 그리고 리어 마운트(rear mount)의 강체들로 구성되며, 각각은 병진과 회전운동을 할 수 있도록 하였고 18개의 자유도를 갖는다. 3점의 마운트계에 엔진 가진력을 각각 적용시키기 위해 엔진 질량중심에서의 관성모멘트를 3점 마운트 위치에서의 관성모멘트로 변환시켰다. 관성모멘트 값은 CAD(Computer Aided Design) 전용 소프트웨어인 CATIA를 이용하여 계산하였다. 엔진 마운트 고무의 모델링은 Fig.2와 같이 3개의 병진 스프링 상수, 회전 스프링 상수, 감쇠계수가 고려되도록 부쉬(bush)요소를 사용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 필요한 파라메타 값들을 구하기 위하여 병진 스프링 상수는 UTM(universal testing machine), 회전 스프링 상수는 torsional fatigue tester, 감쇠계수는 vibration damper tester를 이용하여 각각의 값들을 구하였다.

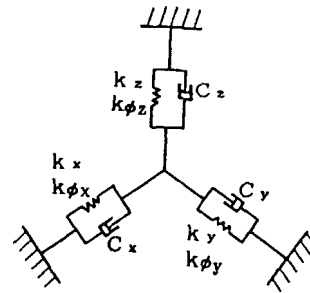


Fig. 2. Bushing model

2-2. 새시의 동역학적 모델

새시의 동역학적 모델은 프론트 액슬, 리어 액슬 및 차체로 구성되며 각각을 강체로 가정하였다. 따라서 엔진과 새시는 6개 즉, 프론트 레프트 마운트, 프론트 라이트 마운트, 리어 마운트, 프론트 액슬, 리어 액슬 그리고 차체로 모델링 되었으며 각 좌표계를 강체의 질량중심을 기준으로 하여 Fig.3에 모델링하였다.

각 좌표의 방향은 전체 좌표계의 방향과 동일하다. 엔진은 3개의 마운트로 나누었으며, 각각의 엔진 마운트는 부쉬를 통하여 차체와 연결되어 있다. 차체의

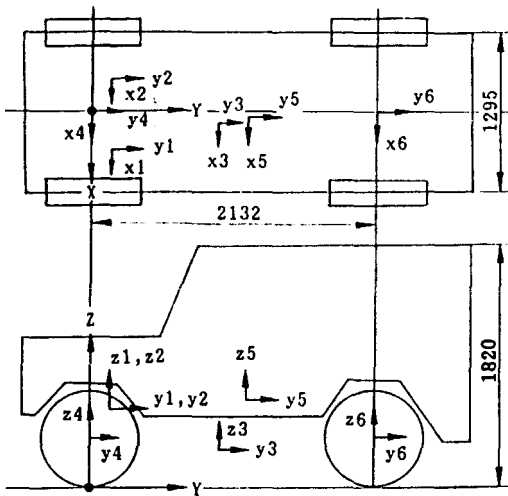


Fig. 3. Reference frames of rigid body elements(1. front left mount, 2.front right mount, 3.rear mount, 4.front axle, 5.body, 6.rear axle)

프론트 액슬, 리어 액슬은 스프링과 댐퍼로 연결되어 있으며, 앞 뒷쪽에 롤링과 피칭의 자유도를 갖도록 병진 조인트와 회전 조인트를 사용하였다. 프론트 액슬과 리어 액슬에는 각각 2개씩의 타이어가 붙어있다. 타이어는 시면과 접촉되어 있으며, 현가 스프링과 속업소바(shock absorber)의 모델은 Fig.4와 Fig.5에 도시된 것처럼 차체 프론트 액슬, 차체 리어 액슬에 각각 연결되어 있다.

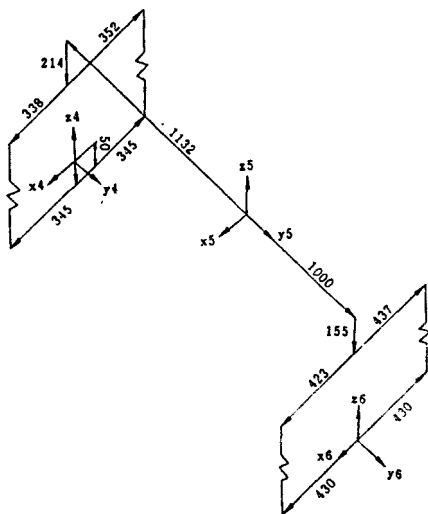


Fig. 4. Dynamic model for suspension spring

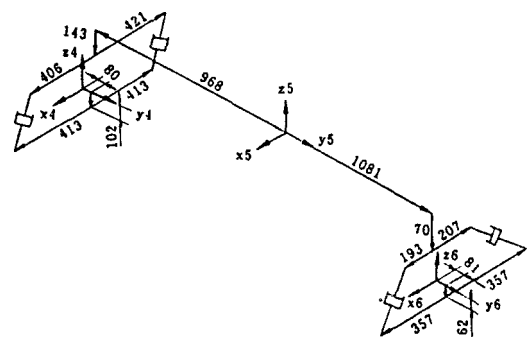


Fig. 5. Dynamic model for shock absorber

III. 실험방법및 결과

3-1. 실험방법

엔진 key-off시 엔진 가진력과 흔들림을 측정하기 위한 실험 절차를 Fig.6에 나타내었다.

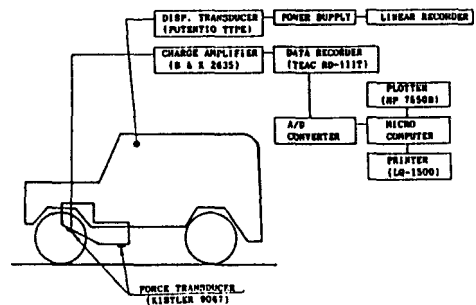
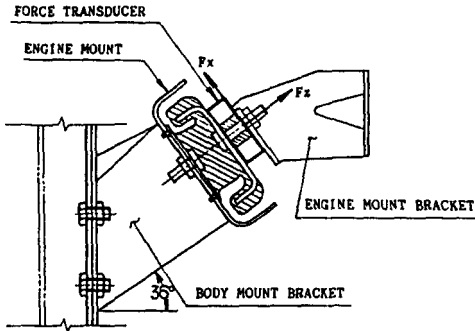


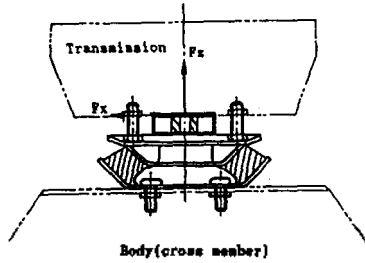
Fig. 6. Experimental setup for data acquisition

프론트 마운트의 엔진 가진력은 Fig.7(a)처럼 엔진 마운트 브라켓(engine mount bracket)과 엔진 마운트 사이에 piezoelectric type의 3-component force transducer를 장착하여 엔진 마운트에 가해지는 힘을 측정하였다. Force transducer가 엔진 마운트 브라켓과 엔진 마운트 사이에 장착되며 엔진이 force transducer 부재만큼 상승하기 때문에 이를 보상하기 위해서 차체 마운트 브라켓을 수정하였다. 또한, 리어 마운트 즉 Fig.7(b)처럼 크로스 멤버(cross member)를 수정 보완하였다. 엔진 가진력은 3방향의 force transducer에서 신호 증폭기(charge amplifier)를 통하여 데이터 저장기에 저장된다. 이 데이터는 A/D 변환기에서 1/200초 간격으로 컴퓨터를 통하여 출력된다. 차체 흔들림의 측정위치는 운전자 미

리 높이 근처의 A-필라(pillar)이며 전위형(potential) 형태의 선형 변위계(linear displacement transducer, 비접촉식)을 통하여 선형 저장기(linear recorder)를 거쳐 출력하였다.



(a)Front mount system



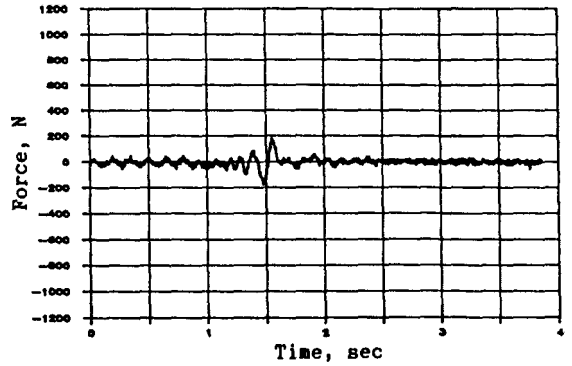
(b)Rear mount system

Fig. 7. Installation of the force transducer

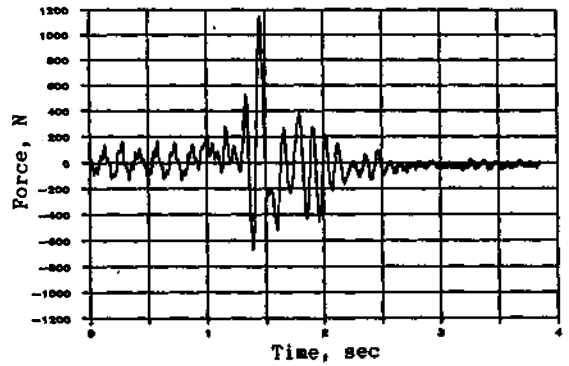
3-2. 실험결과

먼저 엔진 key-off시 3축에 대한 가진력 결과를 Fig.8(a)~(i)에 나타내었다.

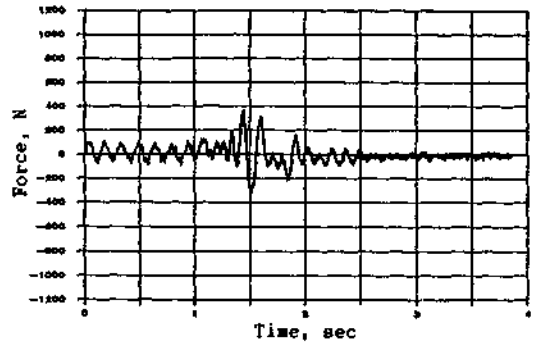
각 그림에서 x, y, z는 작용하는 힘 방향을 나타낸다. 프론트 마운트에서 엔진 가진력은 엔진 마운트에



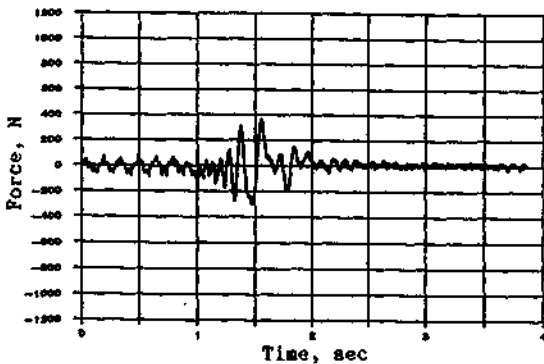
(b)Force at front left mount, F_y



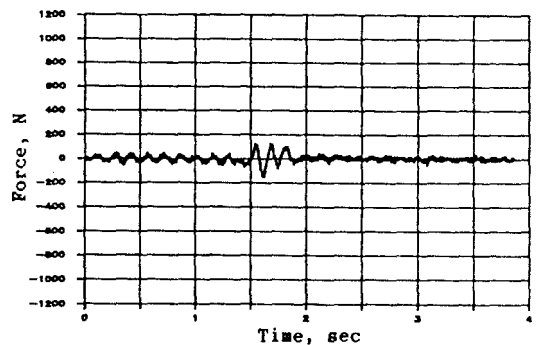
(c)Force at front left mount, F_z , F_z



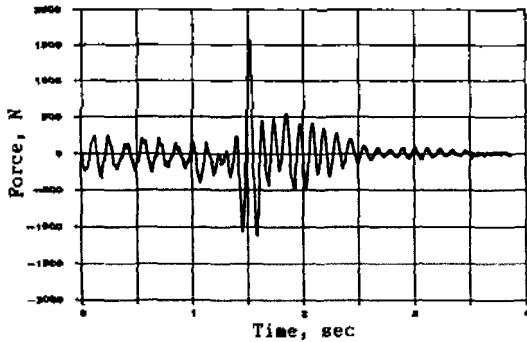
(d)Force at front right mount, F_x



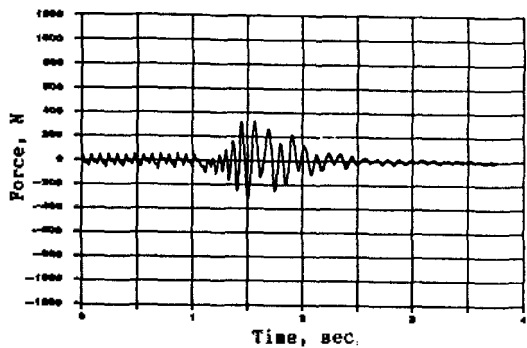
(a)Force at front left mount, F_x



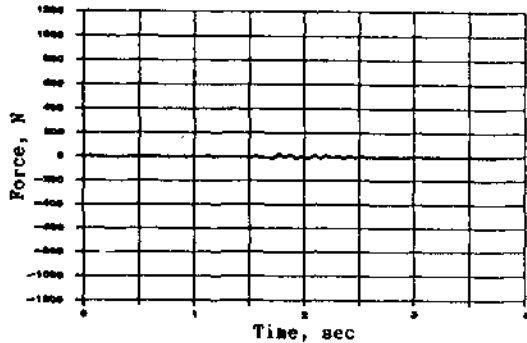
(e)Force at front right mount, F_y



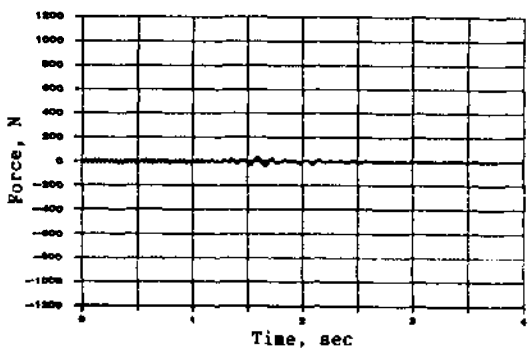
(f) Force at front right mount, F_z



(g) Force at rear mount, F_x



(h) Force at rear mount, F_y



(i) Force at rear mount, F_z

Fig. 8. Measured force-time history at engine mounts on engine key off.

수직인 휨(F_z)이 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 리어 마운트는 좌우(lateral) 방향의 가진력(F_x)이 크다. 또한 가진력은 0.3초 이내의 짧은 시간에 차체에 전달되며, 프론트 마운트의 결과에서 가진력은 차량의 수직방향으로 가장 크게 작용됨을 알 수 있고, 리어 마운트의 결과에서 차량의 좌우 방향으로 가장 큰 힘을 받는 것을 알 수 있다.

다음으로 차체 흔들림의 실험결과를 살펴보면, 운전자 머리 근처에서 측정된 차체 흔들림은 변위계를 통하여 recorder에 기록된다. 엔진 key off시 측정된 변위, 시간 관계를 Fig.9에 나타내었다. 좌우, 상하, 전후 방향 변위에 대해 각각 3.5(mm), 2.4(mm), 0.9(mm)를 얻었으며, 전후 방향 변위가 가장 작은 값을 나타냄을 알 수 있다.

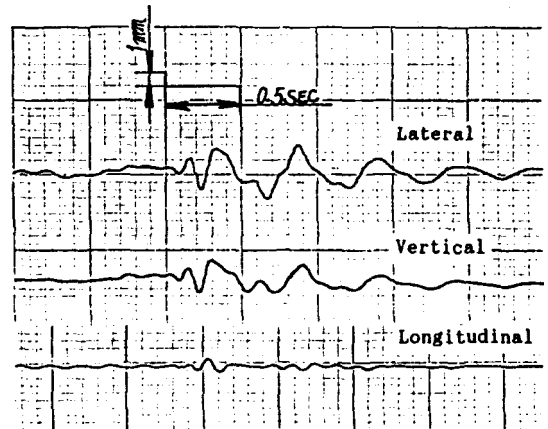


Fig. 9. Measured body displacement-time history on engine key-off

IV. 차체 흔들림에 대한 컴퓨터 시뮬레이션

차량의 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 Fig.10에 도시하였으 며 28자유도를 갖는다. 엔진 마운트 시스템 (front left mount, front right mount, rear mount) 이 18개의 자유도를 갖고, 차체가 6개, 프론트 액슬과 리어 액슬의 롤링, 피칭 운동의 자유도를 갖도록 하였다. 엔진 마운트에 가해지는 엔진 가진력은 컴퓨터 모델이 정적 평행인 상태일때 실험에서 구한 엔진 가진력인 Fig.8(a)~(i)의 값들이 각각 적용되도록 하였다.

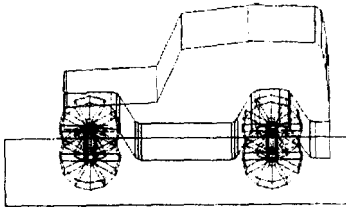


Fig. 10. Computer model of the vehicle

Fig.11은 좌우 방향의 차체 흔들림 결과로서 최대(peak-peak) 변위는 3.75(mm)이고, Fig.12는 수직 방향의 결과로서 최대변위는 2.39(mm)이다. 길이(longitudinal) 방향의 변위는 실험값에서 알 수 있듯이 작은 값이기 때문에 컴퓨터 시뮬레이션에서는 고려하지 않았다.

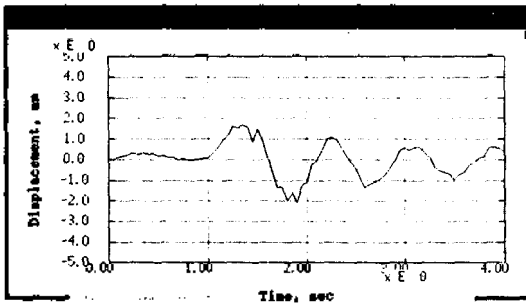


Fig. 11. Lateral body displacement-time history on engine key-off

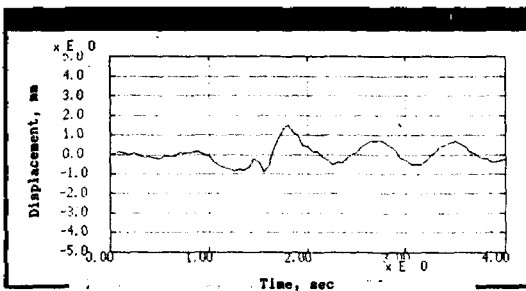


Fig. 12. Vertical body displacement-time history on engine key-off

또한 차체 흔들림에 영향을 미치는 엔진 마운트 고무의 강성과 엔진 설치각도 및 위치변화를 설계변경 가능한 범위내에서 바꾸어 차체 흔들림의 경향을 고

찰하였다. Fig.1에 나타낸 엔진 마운트계의 동역학적 모델에 대하여 Fig.13은 프론트 마운트 축강성(axial stiffness, k_z)을 $1 \sim 12 \times 10^5$ (N/m) 변화시킨 결과로서 강성이 증가할때 변위는 감소하여 최대치의 차이는 1.09(mm)임을 알 수 있다. 수직방향의 변위 역시 감소하며 그 차이는 0.37(mm)이다.

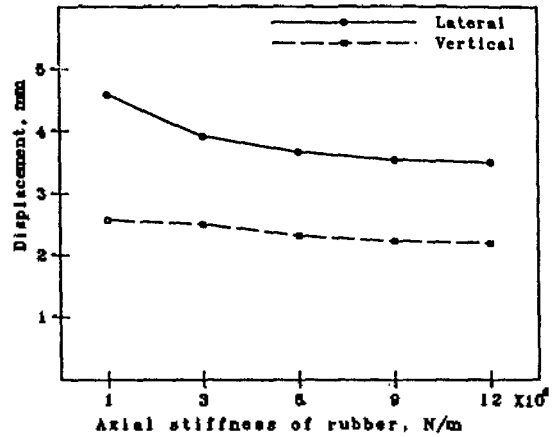


Fig. 13. Body displacement for varying axial stiffness of front mount rubber

Fig.14는 프론트 마운트 전단(shear) 강성(k_x)를 $2 \sim 10 \times 10^4$ (N/m) 변화시킬때 좌우 변위(lateral displacement)는 미소하게 증가하며 최대치의 차이는 0.17(mm)이고, 수직 방향의 변위는 미소하게 증가하고 그 차이는 0.12(mm)이다.

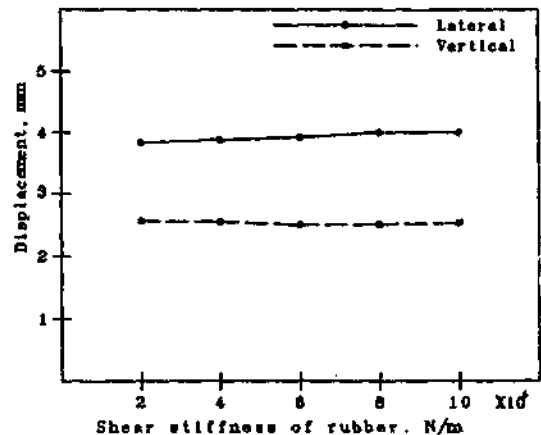


Fig. 14. Body displacement for varying shear stiffness on front mount rubber

Fig.15는 리어 마운트 고무의 축강성을 $1\sim 4 \times 10^5$ (N/m)로 변화시킬때 좌우변위는 증가하며 최대치의 차이는 0.28(mm)이고, 수직 방향의 변위도 비소하게 증가하며 그 차이는 0.17(mm)이다.

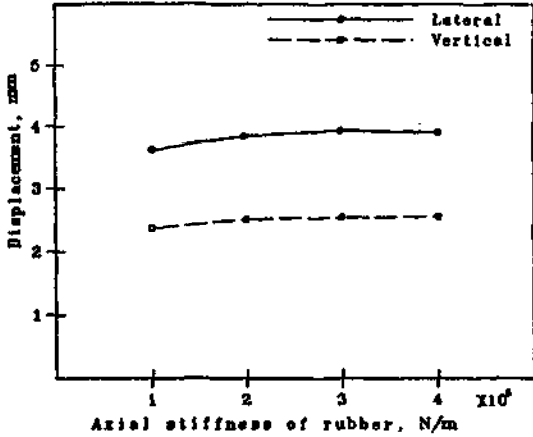


Fig. 15. Body displacement for varying axial stiffness of rear mount rubber

Fig.16은 리어 마운트 고무의 전단 강성계수를 $1\sim 4 \times 10^5$ (N/m)로 변화시킬 때 좌우, 수직 방향의 변위이고 최대 차이는 각각 0.12(mm), 0.2(mm)씩 감소함을 알 수 있다.

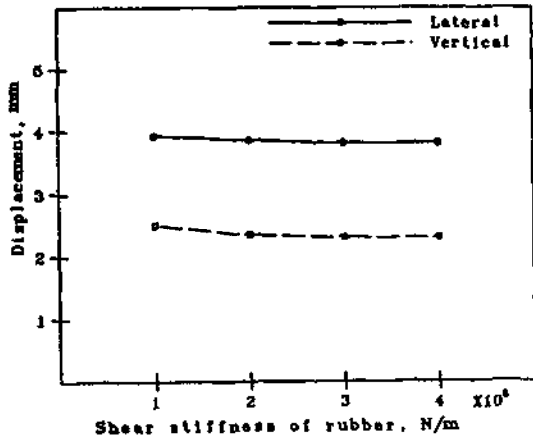


Fig. 16. Body displacement for varying shear stiffness of rear mount rubber

Fig.17은 엔진 설치각도를 $25^\circ\sim 50^\circ$ 로 변경하였을 때 좌우방향의 변위는 증가하며 최대치 차이는 0.56 (mm)이고 수직 방향의 변위는 0.24(mm)로 약간 증가함을 알 수 있다.

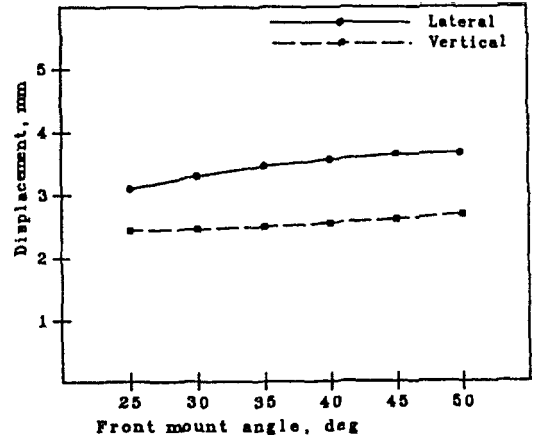


Fig. 17. Body displacement for varying front mount angle

Fig.18은 3점의 엔진 마운트 위치를 안쪽 좌우방향으로 $-10\sim 40$ (mm)이동 시켰을 때의 차체 흔들림을 나타내며 안쪽방향으로 갈수록 차체진동이 감소하며 좌우 변위의 차이는 0.577(mm) 수직변위의 차이는 0.434(mm)이다.

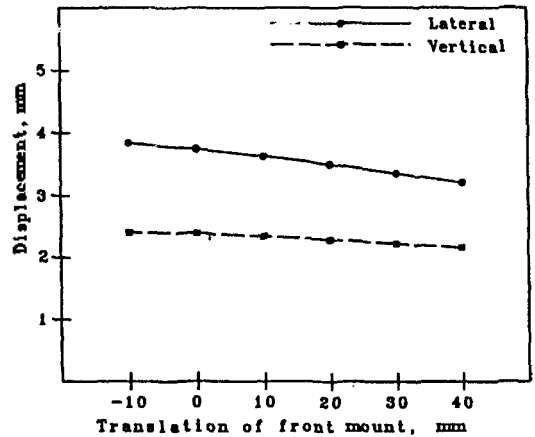


Fig. 18. Body displacement on moving front mounts in lateral direction

Fig.19은 3점의 엔진 마운트 위치를 전후방향으로 $-40\sim 40$ (mm) 이동시킨 때 변위로서 좌우방향으로 0.025(mm)감소하고 수직방향은 0.047(mm)감소한다.

Fig.20은 3점의 엔진 마운트 위치를 수직방향으로 $-40\sim 40$ (mm)이동시킬 때 좌우방향으로 0.05(mm) 증가하고 수직방향으로 0.1026(mm) 각각 증가함을 알 수 있다.

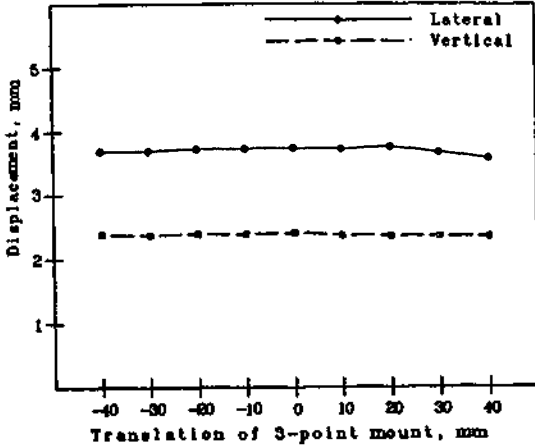


Fig. 19. Body displacement on moving all mounts in longitudinal direction

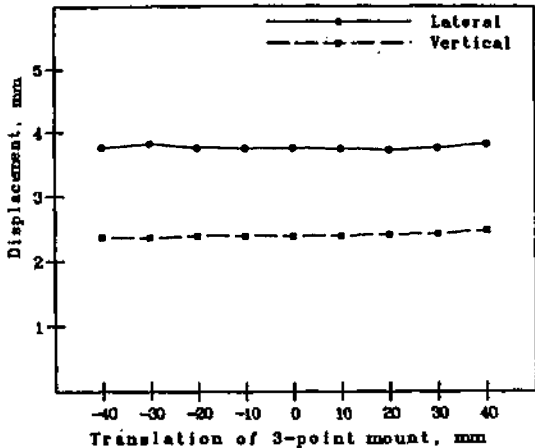
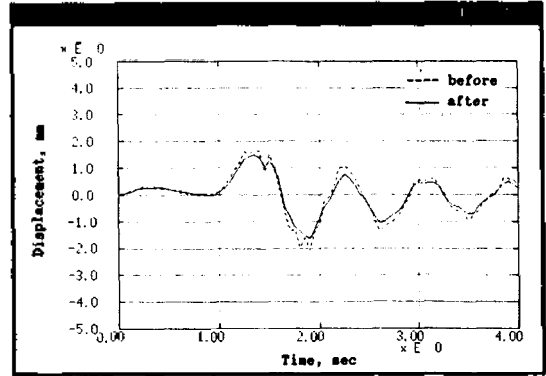
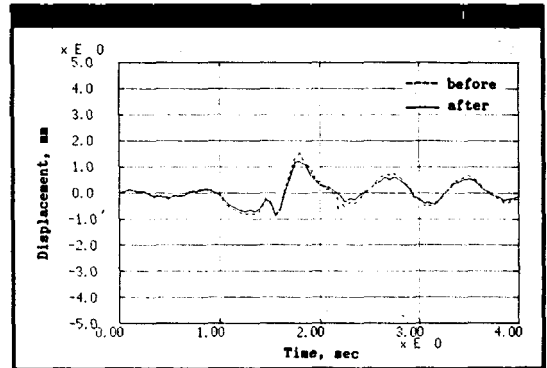


Fig. 20. Body displacement on moving all mounts in vertical direction

Fig.21(a)~(b)은 프론트 마운트 축 강성계수(kz)를 3.2×10^5 (N/m)에서 12.2×10^5 (N/m)로, 리어 마운트 전단 강성(kx)을 1.2×10^5 (N/m)에서 3.2×10^5 (N/m)로, 엔진 마운트의 위치를 안쪽 lateral 방향으로 40(mm) 이동시켰을 때 컴퓨터 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 것으로서 좌우 방향의 변위는 3.75 (mm)가 3.12(mm)로 0.63(mm) 감소하고, 수직방향의 변위는 2.39(mm)에서 2.06(mm)로 0.33(mm) 감소함을 보여주고 있다.



(a) Lateral displacements



(b) Vertical displacements

Fig. 21. Comparison of body displacements before / after modification of dynamic model.

IV. 결 론

엔진 key-off시 전이구역에서 가진력을 3방향의 force transducer를 이용하여 구하였다. 또한 컴퓨터 모델의 타당성을 실험을 통하여 입증하였으며, 이 모델을 기준으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 연구대상차량의 차체 흔들림은 실험치와 컴퓨터 시뮬레이션 결과가 대체로 같은 경향을 보이고, 실험에서의 좌우방향 변위가 3.5(mm), 수직방향 변위가 2.4(mm)이고 컴퓨터 시뮬레이션 결과로 인한 좌우방향 변위는 3.75(mm), 수직방향의 변위는 2.39(mm)를 얻었다.
- 2) 프론트 마운트 고무의 축 강성 증가는 차체 흔들림을 감소시킨다. 그러나 프론트 마운트 고무의 전단 강성, 리어 마운트 고무의 축 강성 및 전단 강성 변화에 따른 차체 흔들림의 영향은 미소함

을 알 수 있다.

- 3) 프론트 마운트의 설치 각도의 증가에 따라 차체 흔들림은 커진다.
- 4) 프론트 마운트의 좌우 방향에서 마운트 위치가 각각 안쪽으로 이동할때 차체 흔들림은 감소한다. 그러나 엔진 마운트 위치의 길이방향과 수직 방향 변화에 따른 차체 흔들림의 영향은 아주 적다.
- 5) 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 엔진 마운트 고무의 강성, 설치각도 및 위치를 조절함으로써 최적 엔진 마운트를 고찰할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Toshio Sakata, "Analysis of the Transmission of Engine Vibration to the Body by the Mechanical Impedance Method," SAE Paper 740163.
2. Regis. V. Schmitt and Charles J. Leingang, "Design of Elastomeric Vibration Isolation Mounting System for Internal Combustion Engines," SAE Paper 760431.
3. James E. Bernard and John M. Starkey, "Engine Mount Optimization," SAE Paper 830257.
4. David M. Ford, "An Analysis and Application of a Decoupled Engine Mount System for Idle Isolation," SAE Paper 850976.
5. Taylor, C. F., *The Internal Combustion Engine in Theory and Practice*, Vol. 2, Chapter 8, MIT press, 1968.
6. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill Book Company, Inc, 1956.
7. Akinori Matsuda, Yasutaka Hayashi and Junzo Hasegawa, "Vibration Analysis of a Diesel Engine at Cranking and Idling Modes and Its Mounting System," SAE Paper 870964.
8. DADS Users Manual, Computer Aided Design Software, Inc., Oakdale, IA, U.S.A.
9. Edward J. Haug, *Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems. Volume 1: Basic Methods*(DADS Theoretical Manual).

▲안 기 원

1983년 2월 : 조선대학교 기계공학과 졸업(공학사)

1985년 8월 : 안하대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)

1986년 ~ 현재 : 아시아 자동차 기술연구소 CAE 연구실 근무

▲송 상 기 : 10권 6호 참조