



자동차 엔진마운팅 시스템의 개발 개요

이 민 섭*

(*현대 · 기아자동차)

1. 머리말

엔진은 자동차에서 가장 중요한 가진원이며, 엔진마운팅 시스템은 차체를 엔진 가진으로부터 절연하는 매우 중요한 NVH 시스템 중 하나다. 이 글은 여러 운전조건에서 발생하는 엔진 가진에 대한 절연 시스템으로서의 엔진마운팅 시스템 요구 특성과 평탄하지 않은 노면을 주행할 때 발생하는 파워트레인 거동 등의 대변위 제어 관점의 엔진마운팅 시스템 요구 특성과 개발 개념을 정리한다.

또한, 마운트 구조와 간략한 모델을 통해서 물리적 관점의 단품 및 시스템 특성을 설명하고, 종류별 특성과 장단점도 비교하고자 한다. 공회전 시 차체 진동 등의 성능을 확보하기 위해서 마운팅 시스템을 어떻게 개발하는지 소개하고, 최근 차량개발 환경 변화에 따라 중요성이 증대되고 있는 연관 신기술과 그에 따른 시스템 개발 기술도 간략하게 소개한다.

2. 엔진마운팅 시스템 개발기술

2.1 엔진마운팅 시스템의 역할

엔진은 가스폭발력에 의한 토크 변동과 피스톤 크랭크 기구에 의한 관성력 변동으로 진동과 소음을 발생시키는 주 가진원이다. 엔진마운팅 시

스템은 엔진의 불평형 가진력이 차체로 전달되는 것을 최소화하는데 그 근본 목적이 있다. 동시에 엔진과 변속기의 결합인 파워트레인을 엔진룸 내 정해진 위치에서 큰 변위가 발생하지 않도록 지지하고 노면이나 급격한 엔진 토크 변동에 의해 발생하는 충격을 흡수하여 차체로 전달되는 진동을 최소화하는 역할도 한다.

엔진 가진력 절연에는 공회전 시 차체, 스티어링 휠, 시트로 전달되는 진동의 절연과 가속시 마운트를 통해 차체로 전달되는 구조 전달소음 및 진동 절연 등이 있다.

대변위 제어에는 시동시 및 순간 가·감속시 급격한 엔진 토크 변동에 의한 충격(시동 on/off 진동, tip in/out shock and jerk 등) 제어와 험로 및 평탄하지 않은 노면 주행시 파워트레인 거동으로 인한 차체 진동(engine shake)의 제어가 있다.

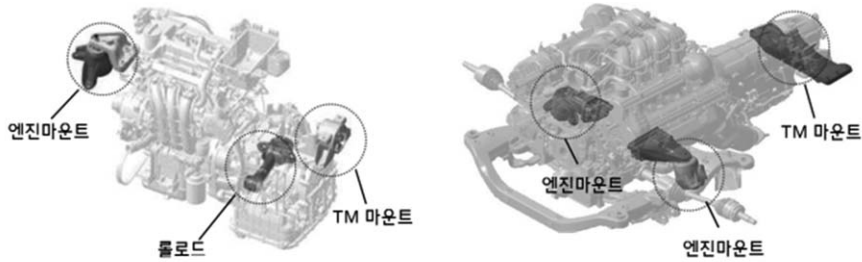
일반적으로 절연 성능 확보를 위해서는 마운트 강성과 댐핑이 낮은 것이 유리하나, 대변위 거동 제어는 마운트 강성과 댐핑이 높은 것이 유리하다. 따라서, 엔진마운팅 시스템 개발은 절연과 거동 제어간에 상반된 요구 특성을 만족시키기 위한 부품과 시스템의 최적화 과정이라 할 수 있다.

2.2 시스템 구성 및 단품 특성

(1) 엔진마운팅 시스템의 구성

그림 1과 같이 전륜 구동 차량의 엔진마운팅 시

* E-mail : minsup@hyundai.com / Tel : (031)368-8751



경차 파워트레인의 엔진 마운트

중차 파워트레인의 엔진 마운트

그림 1 엔진마운팅 시스템 구성

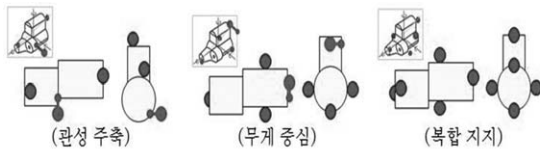


그림 2 마운팅 시스템 방식

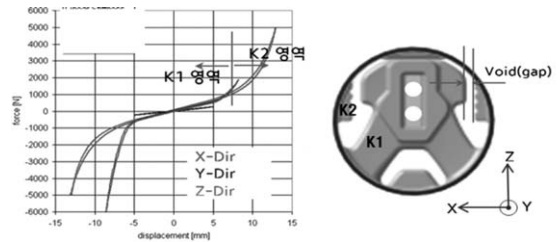


그림 3 고무 마운트의 형상 및 특성

스텝은 보통 3~4개의 마운트로 구성하고 토크가 큰 엔진이 탑재된 차량이나 개발 방향이 거동 제어가 더 중요한 차량에서는 1~2개의 마운트를 추가하여 개발하기도 한다. 후륜 구동 차량은 엔진 좌우에 엔진 마운트를, 변속기 끝 부근에 변속기 마운트를 설치하는 것이 보통이다.

마운트 위치를 어떤 관점에서 결정하는지에 따라 마운팅 지지 방식을 나눌 수 있는데, 이것은 차량 개발 개념, 탑재 파워트레인 특성 및 비용 등을 고려하여 회사마다 다르게 채택하고 있다. 대체로 그림 2와 같이 관성주축 지지, 중심 지지, 복합 지지 방식으로 구분할 수 있다. 관성주축 지지 방식은 토크에 대한 응답 회전축을 지지하는 방식으로 진동 절연에 유리하고, 중심 지지 방식은 프레임 위에 파워트레인을 올려 놓고 중심을 지지하는 방식으로 서브프레임 절연을 동반하여 엔진 투과음과 조립에 유리한 특징이 있다. 복합지지 방식은 기본적으로 관성지지 방식에 토크제어 마운트를 추가하는 방식이다.

(2) 엔진 마운트 특성

가장 단순한 마운트는 부시형 고무 마운트로 부시 형태의 고무와 고무를 싸고 있는 케이스와

브라켓으로 구성되는데 고무의 물성치와 형상에 따라 마운트의 기계적 특성이 결정된다.

정특성(k_s)은 정적 상태에서 단위 하중을 가했을 때의 변위로 규정되며, 대체로 마운트 위치에서의 분담하중에 의해 결정된다. 그림 3에서 예시한 것과 같이, 공회전 조건이나 부분 부하 조건에서는 스톱퍼(stopper)에 닿지 않도록 설계하여 스프링 상수가 낮은 영역(k_1)에서 작동하게 하고, 큰 하중이 작용하는 운전조건에서는 스톱퍼로 마운트의 과도 변위를 제한할 수 있도록 마운트와 스톱퍼 형상을 설계한다. 인슐레이터(insulator)가 스톱퍼에 닿게 되면 스프링 상수가 급격하게 커지게 되고(k_2 영역) 절연 성능은 현저하게 낮아지게 된다. 고무 마운트에서는 제한된 공간에서의 스톱퍼 형상 설계가 매우 중요하고 많은 노하우가 필요하다.

고무는 하중의 크기, 주파수에 따라 스프링 상수가 증가하는 특성이 있다. 따라서, 동적 하중 상태의 스프링 상수인 동특성(k_d)계수는 정특성계수보다 크다. 정특성에 대한 동특성계수의 비를 동배율이라고 하는데 자동차에서 사용하고

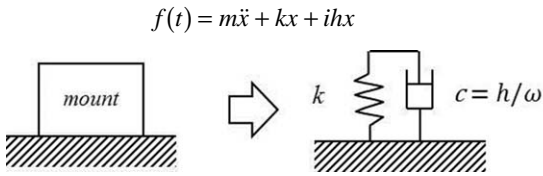


그림 4 마운트의 수학적 모델

있는 고무 마운트의 동배율은 약 1.5정도이며 낮을수록 절연에 유리하여 동배율을 낮추기 위한 고무배압 연구 및 형상 최적화를 실시한다.

또한, 고무는 점탄성 물질로 일정한 하중 하에서 시간에 따라 천천히 변형되는 크립(creep) 특성이 있으며, 동일한 변형 조건 하에서 내부 하중이 시간에 따라 서서히 감소하는 릴렉세이션(relaxation) 특성도 있다. 고무의 댐핑 특성은 점성 댐핑 보다는 히스테리시스 댐핑에 더 가깝다. 따라서, 릴렉세이션 특성을 제외한 고무 특성을 표현할 수 있는 그림 4와 같은 Voigt모형을 이용하는 것이 효과적이다.

복소수 형태의 동적 스프링 상수, \tilde{k} , 탄성 스프링 상수, k' 와 점성 스프링 상수, k'' , 그리고 동특성 계수, k^* 를 정의하면 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\tilde{k} = k' + ik'' = k'(1 + i \tan \phi) \quad (1)$$

$$k^* = \sqrt{(k'^2 + k''^2)}$$

손실각, ϕ 는 입력에 대한 전달력의 위상차를 의미하며 손실각이 클수록 댐핑값이 커진다. 고무 마운트의 댐핑은 아주 작기 때문에 탄성 스프링 상수항만을 고려해도 되지만, 비선형 특성이 큰 유압 마운트는 주파수와 가진폭에 따라 동특성이 다르기 때문에 마운트에 가해지는 다양한 가진 조건의 특성을 파악하고 그 조건에 대한 마운트의 특성을 측정하고 원하는 방향으로 튜닝하는 것이 필요하다. 유압 마운트의 경우, 투과음 절연을 위해서는 관심 주파수 대역의 k^* 값을 확인하고 일정 수준 이하로 관리해야 한다.



그림 5 엔진 마운트의 종류

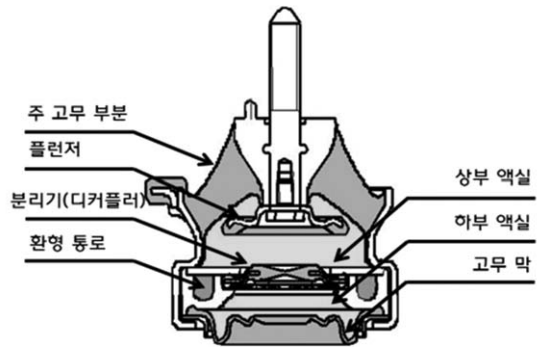


그림 6 유압 마운트의 구조

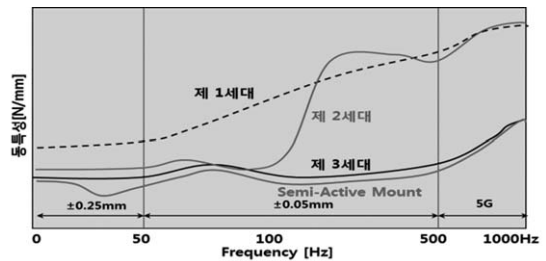


그림 7 유체 마운트 특성 비교

(3) 엔진 마운트의 종류

일반적으로 사용하고 있는 마운트는 크게 고무 마운트와 유압 마운트로 나눌 수 있다. 또한, 그림 5와 같이 형태와 적용 위치에 따라 분류하기도 한다.

고무 마운트는 비선형성이 크지 않아 거동 제어와 절연이라는 상충된 요구특성을 만족시키기 어렵다. 이런 고무 마운트의 단점을 보완하기 위해 고안된 마운트가 유압 마운트이다. 유압 마운트는 유압 응답력을 이용하여 마운트에 비선형 특성을 부여하여 절연과 거동 제어를 동시에 만족시킬 수 있도록 고안되었다.

유압 마운트는 그림 6과 같이 상단에 고무가 있으며 상하로 나뉘어진 두 개의 액실은 anti-freeze mixture로 채워져 있다. 두 개의 액실 사이에는 짧

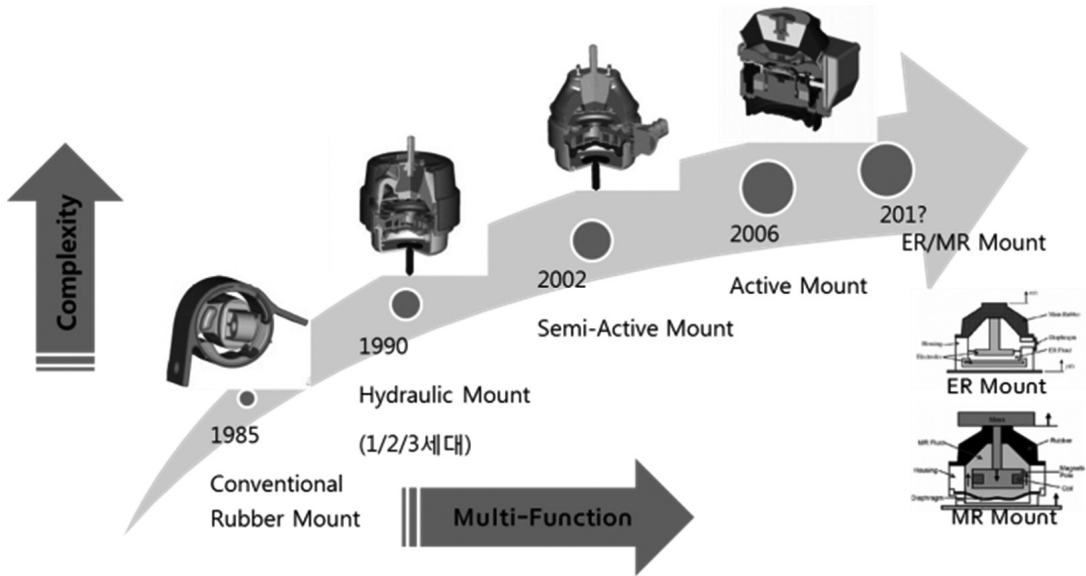


그림 8 마운트의 발전 과정

은 오리피스관의 디커플러(decoupler)가 있고 또 하나의 긴 오리피스 관(inertia track)이 설치되어 있다.

마운트 상단의 고무는 일반적인 압축 전단 특성을 갖는 고무 마운트의 역할을 하며, 디커플러의 특성에 의해 마운트의 비선형성이 결정된다. 이너셔(inertia) 트랙은 헬름-홀츠 레조네이터의 원리와 동일한 방법으로 특정 주파수에 대해 튜닝이 가능하다.

그림 7에서 예시한 것과 같이 1세대는 높은 감쇠값과 동강성을 가지고 있었으나, 2세대로 가면서 100 Hz까지의 동특성 계수는 하향되었고 3세대에서는 플러저를 추가함으로써 100 Hz 이상에서도 동특성 계수가 하향할 수 있게 되었다.

유압 마운트는 일반적으로 고무 마운트에 비해 가격이 비싸기 때문에 비교적 큰 원가의 상승없이 댐핑을 증가시킨 공압 마운트를 사용하기도 한다. 공압 마운트는 유압 마운트 댐핑값의 약 40%까지 확보한 사례도 있다. 또한, 유압 마운트의 특성을 운전조건에 따라 더 최적화하기 위하여 ECM(electronically controlled mount) 등과 같은 여러 가지의 제어기를 장착한 마운트도 개발되어 사용되고 있다.

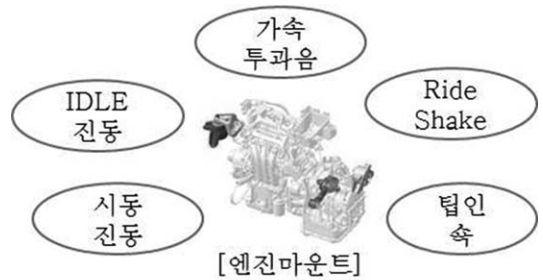


그림 9 엔진마운팅 시스템 연관 성능

2.3 마운팅 시스템의 실차 개발

(1) 엔진마운팅 시스템 관련 차량성능

엔진마운팅 시스템은 차량의 NVH성능에 가장 영향이 큰 시스템 중 하나라고 할 수 있다. 공회전시 및 시동시 진동, 부밍, 주행시 라이드(ride) 셰이커, 가속 투과음, 급가감속 조건시 충격과 저크(shock & jerk) 등이 엔진마운팅 시스템이 차량의 안락감에 밀접한 영향을 주고 있으므로 차량 개발 시 파워트레인 가진 특성과 관성특성을 정확하게 이해하고 그에 따라 엔진마운팅 시스템을 개발하는 것이 필요하다.

(2) 엔진마운팅 시스템 기본특성 결정

엔진마운팅 시스템 기본 특성은 각 마운트 설

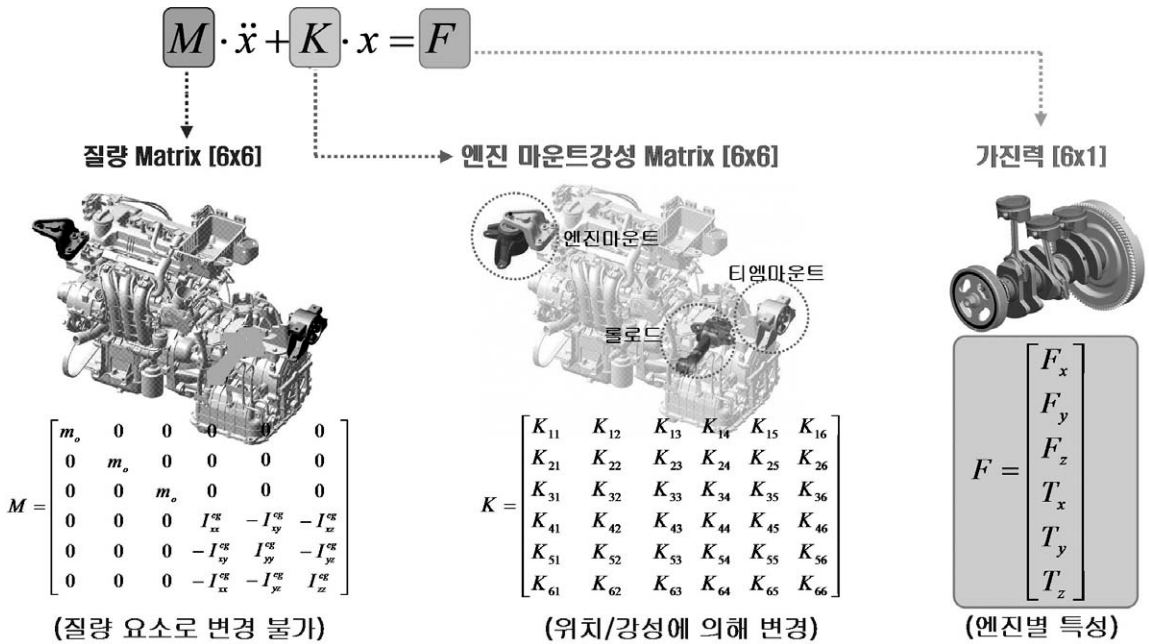


그림 10 엔진마운팅 시스템의 강체 모델

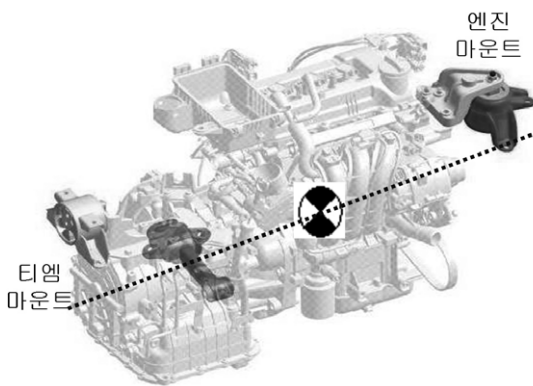


그림 11 TRA와 엔진 마운팅

치 위치와 특성이다. 이들을 결정하기 위해서는 그림 10의 엔진마운팅 시스템 강체 모델에서 보는 바와 같이, 파워트레인의 관성 제원과 가진원인 엔진의 가진 특성을 정확하게 파악해야 한다.

하중을 지지하는 주 마운트인 엔진마운트와 티엠(transmission) 마운트의 위치는 파워트레인의 무게중심을 지나고 토크 가진에 대한 강체 회전 응답축인 TRA(torque roll axis) 상에 위치시키는

방식이 관성 지지방식이라고 한다. 이 지지방식을 채용하면 동일한 토크 가진에 대하여 주 마운트 위치에서의 가진력을 최소화하는데 유리하며 가장 많이 채택되고 있는 개념이다.

TRA는 마운트가 없는 상태에서 크랭크 축의 롤(roll) 가진만이 있을 때 파워트레인의 회전 응답축이므로 식(2)와 같이 파워트레인 관성 제원의 역수에 롤 가진만 있는 가진 벡터의 곱으로 구할 수 있다. T 를 가진 모멘트 토크, I 를 파워트레인 관성이라고 하면, 회전 중심축, $\dot{\Omega}$ 를 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\Omega}_x \\ \dot{\Omega}_y \\ \dot{\Omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

나머지 마운트는 엔진 토크 제어를 위하여 설치하는데, 3점 마운트 시스템은 파워트레인 하방에 가능하면 무게 중심에서 수직으로 내린 위치에서 수평으로 롤 거동을 제어하도록 롤 마운트

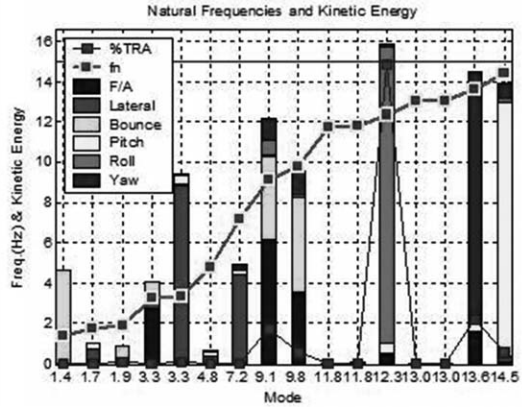
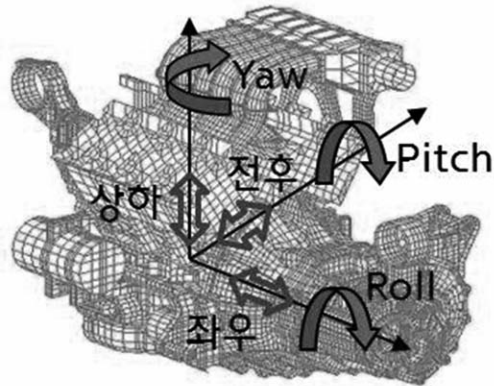


그림 12 강체모드 비연성화 최적화

를 설치하고, 4점 마운트 시스템은 파워트레인 전방과 후방에 각 한 개씩의 롤 마운트를 설치하는 것이 일반적이다.

여기서 볼 수 있듯이 엔진마운트의 최적위치는 파워트레인 관성 제원에 의해서 결정되고 한 플랫폼에 몇 개의 파워트레인이 탑재되기 때문에 이들 모두가 문제없도록 마운트 위치를 선정하기 위해서는 TRA가 유사하도록 파워트레인의 관성 제원이 관리되는 것이 바람직하다.

마운트 위치가 결정되면 각 마운트의 방향별 특성을 결정한다. 우선 마운트별 분담 하중에 적절한 정특성을 설정하고, 파워트레인 강체 모드 분석을 통하여 6개 강체 모드(roll, pitch, yaw, 상하, 전후, 좌우) 비연성화, 공회전 저주파 진동, 라이드 셰이커 가진 주파수와와의 공진 회피 및 시동 진동 & 팁인 속의 거동 제어를 목적으로 한 최적화 해석을 통하여 각 마운트의 방향별 특성을 결정한다. 각 완성차 업체는 그림 12에서 예시한 것과 같이 자체 개발 분석 툴이나 범용 다물체 동역학 해석 툴을 이용하여 시스템 개발에 활용하고 있다.

직렬 4기통 엔진 탑재 차량의 경우 과거에는 공회전 회전수가 토크 변동이 비교적 작은 700 rpm 이상으로 선정 개발하였으나, 최근에는 토크 변동은 불리하지만 연비에 유리하도록 600 rpm까지 하향 설정하는 경우가 늘고 있다. 공회전 폭발 가진 주파수는 파워트레인 강체의 롤 공진 주파

수보다 $\sqrt{2}$ 배 이상이 되어야 절연이 가능하고 보통 2배 보다 커야 충분한 절연이 확보된다. 크랭크 계의 언발란스 등에 의한 회전 1차 성분 가진과도 강체 모드가 최소 2 Hz 정도 이격되는 것이 바람직하므로 공회전 회전수를 하향할수록 강체 모드를 비연성화하면서 적절한 주파수에 설정하기 어렵다. 그렇지만 최소한 롤 모드와 전후, 바운스 및 피치 모드의 비연성화, 엔진회전수 1차 가진과 연관된 모드의 주파수 회피는 확보할 수 있도록 해야 한다.

(3) 대변위 제어

시동시 및 가속페달을 순간적으로 급하게 조작하는 tip-in/out 조건에서는 파워트레인에 충격성의 토크 가진이 가해지게 되는데 엔진마운트 강성이 너무 낮고 동시에 댐핑값이 낮을 경우에는 잔여 진동이 생겨서 승객이 불편을 느낄 수 있다. 엔진마운트 강성과 댐핑값이 너무 크면 여진감은 줄어들지만 충격이 커지게 되기 때문에 충격과 여진감을 모두 만족시킬 수 있도록 마운트 특성을 튜닝하는 것이 필요하다. 일반적인 시동시 및 tip-in/out 가진에 대하여 파워트레인 강체의 롤 모드와 전후 모드를 비연성시키고 가진력의 주기를 파워트레인 롤 모드에 공진이 되지 않게 하거나 가진력 시간 변화를 완만하게 조절하여 응답을 줄이는 방법을 사용하기도 한다.

평탄하지 않는 도로를 주행할 경우, 노면과 휠

이 상하로 거동하는 휠 홉(hop) 모드 응답특성에 의해 차체가 가진되며 파워트레인의 강제모드, 주로 상하모드와 피치모드에 연동하여 승객이 느낄 수 있는 진동으로 전달된다. 이것을 엔진 셰이커라고 부르기도 한다. 타이어의 동반경이 약 30 cm 정도이고 파워트레인 강제모드는 10 Hz부근에 있는 경우가 많으므로 타이어의 회전 2차 성분과 1차 성분이 파워트레인 강제모드를 지나 는 차속, 55 kph와 110 kph부근에서 주행 진동이 발생하는 경우가 생길 수 있다. 또한, 휠 홉 모드 혹은 휠 트랩프(tramp) 모드가 있는 12~20 Hz 사이에서 휠의 강제 모드에 의한 주행 진동이 발생하기도 한다.

(4) 투과음 대역 절연

엔진의 진동은 엔진마운트와 차체를 통하여 엔진 투과음의 성격으로 실내로 전달된다. 대략 200 Hz~800 Hz의 주파수 대역을 엔진 투과음 대역으로 간주하는데, 사시 및 차체의 전달특성을 튜닝하여 엔진마운트 위치에서의 음향감도를 목표하는 음색에 부합하도록 개발한다. 엔진마운트 경로의 소음 기여도를 낮추기 위해서는 엔진마운트의 관심대역의 절연 성능을 높이는 것이 필요하다. 바람직한 절연 확보 방향은 인슐레이터의 기본 특성을 저주파 특성 관점에서 강성을 결정하고 주변의 구조물 강성을 인슐레이터의 동강성 계수보다 최소 5~10배 이상 확보하는 것이다. 보통의 경우 엔진마운트 경로의 소음기여도가 큰 경우는 엔진 측의 서포트 브라켓, 블록 마운팅부의 강성이 부족하거나 차체 측의 마운팅 브라켓이나 차체의 국부 강성이 낮아서 문제 되는 경우가 많으므로 엔진마운트 주변의 구조 강성을 강건하게 개발해야 한다.

3. 현안 대응 현황

3.1 연비 개선 대응

(1) 3기통 엔진 대응

연비 향상을 목적으로 과거에는 4기통 엔진을

탑재 했던 차량에서 3기통 엔진으로 엔진을 축소 탑재하는 사례가 증가하고 있다. 3기통 엔진은 왕복운동 질량에 의한 관성력은 실린더 배열에 의해 상쇄되고, 왕복운동에 의한 불평형 우력은 왕복운동 질량에 의해 엔진 회전1차 성분의 요, 피치 모멘트가 발생한다. 이 불평형 우력은 밸런스 샤프트를 적용하면 상쇄시킬 수 있지만 밸런스 샤프트를 적용할 수 없는 경우에 대하여 엔진 마운팅 시스템을 통해 개선하기 위해 많은 연구를 하고 있다

밸런스 샤프트를 적용하지 않은 3기통 엔진 차량에서는 저 회전수 발진조건에서 엔진회전 1차 성분의 요, 피치 가진에 의한 진동 부밍 문제가 어려운 문제로, 주로 엔진마운트 위치 및 세 방향의 강성 튜닝을 통하여 개선하고 있다. 또한 크랭크 축 상에 의도적인 언밸런스 질량을 부가하여 불평형 우력을 만들어 불평형 요/피치 가진력 비율을 변경하고 그에 따른 엔진마운트 강성을 튜닝하는 방법도 연구되고 있다.

(2) 연비 개선 엔진 튜닝 대응 기술

자동변속기 탑재 차량에서는 연비 향상을 위해 토크 컨버터의 유체 커플링을 최소화하고 토크 댐퍼 클러치를 직결시는 영역을 넓히기 위해서 락업 회전수를 지속적으로 낮추고 있다. 보통 락업 부밍, 진동 문제에 대한 엔진마운팅 시스템의 기여도는 크지 않지만 락업 회전수 하향에 의해 발생하는 저주파 진동 저감을 위해 엔진마운트 강성을 추가로 튜닝하는 경우도 있다.

가변 기통 엔진은 CDA(cylinder de-activation) 엔진이라고 하며 부분 부하 조건에서 일부 기통을 휴지시켜 연비를 개선하는 기술이다. 이 기술은 연비는 향상되지만 NVH가 악화되는 특징이 있으며, 이를 해결하기 위하여 능동소음 제어나 능동제어 마운트를 사용하기도 한다. 유압 마운트를 기본으로 하고 전자기력을 이용하여 전달 특성을 제어하는 방식의 능동제어 마운트가 일부 차량에 적용되고 있고 점차 그 용도와 적용이 확대될 것으로 예상된다.

표 1 마운트 관련 현안 과제

항목	목적	가진 특징	마운트 대응
2, 3기통	연비, 중량	가진특성 변화	강성/위치변경
락업 하향	연비	주파수 하향	강성 변경
가변 기통	연비	주파수 하향	ACM*
BSM삭제	연비, 중량	상하가진 증가	ACM*
HEV/EV	연비	주파수 상승	강성/위치 변경
고성능엔진	성능	대변위	MR/ER**

* ACM : active control mount,

** MR : magnetorheological , ER : electrorheological

3.2 고성능 차량 대응

일부 고성능 차량에서는 급가속 조건 혹은 급선회 운전시 마운트의 강성을 높게 하여 엔진의 과도한 변위를 제어함으로써 파워 흡 현상을 줄일 목적으로 ER/MR 마운트를 사용하기도 한다. ER/MR 마운트는 전기적 힘에 의해 강성이 변하는 특성이 있기 때문에, NVH가 중요한 운전조건에서는 마운트를 약하게 하고 급출발가속, 선회 등의 운전조건에서는 마운트 특성을 강하게 하여 NVH와 안정성을 동시에 만족시킨다. 현재는 아주 제한적으로 양산 적용하고 있으나 정숙성과 동시에 뛰어난 운동성능을 필요로 하는 차량에는 점점 더 ER/MR 마운트의 확대 적용이 기대된다.

앞에서 설명한 현안 기술에 대하여 가진의 특징과 마운팅 시스템에서의 대응방안을 표 1과 같이 요약할 수 있다.

4. 맺음말

자동차의 엔진마운팅 시스템은 엔진의 가스

폭발력 및 불평형 가진력을 절연하고, 노면 가진 등의 대변위 거동을 억제하여 승객실을 안락하게 유지하는 역할을 한다. 이를 위해서는 가장 먼저 엔진 가진력에 대한 이해와 노면 가진에 대한 현가계 전달 특성의 올바른 이해가 필요하다. 또한, 차체 및 현가계의 진동 특성을 고려한 파워트레인 강제 모드 튜닝과 더불어 가진 형태에 따라 상충되는 요구 특성을 만족할 수 있는 단품 특성 확보도 수반되어야 한다. 능동 제어 마운트, MR/ER 마운트와 같은 신개념 마운트의 발전과 더불어 기존 마운트에 대한 형상 및 특성 개선에도 많은 기술개발의 여지가 있으므로 많은 연구개발이 필요하다. 엔지니어링은 필요한 성능목표를 정확하게 파악하고 서로 상충하는 성능간에 균형을 맞추어 효율적으로 개발하는 것이 중요하다고 판단된다. 엔진마운팅 시스템은 NVH 시스템 중에서도 연관된 성능이 가장 많고 고려해야 할 것이 많기 때문에 각 성능 별로 균형을 맞추어 개발하는 전략이 매우 중요하다. **KSNVE**