



최근의 현가장치 기술 발전 및 개발 동향

Development Trend of Recent Suspension Technology



이언구 · 현대자동차
Unkoo Lee · Hyundai Motor Company

1. 서론

오늘날 자동차 기술은 하루가 다르게 급격히 발전하고 있으며 전 세계적으로 보면 그 생산량이 포화 상태에 이르고 있는 실정이다. 이런 상황에서 자동차 업체들은 생존을 위해 더 싸고, 더 멋있고, 성능이 더 우수한 자동차를 만들기 위해 치열한 경쟁을 벌이고 있다.

특히, 현가장치는 자동차의 주행 성능을 결정짓는 중요한 시스템으로서 고성능 / 경량화 측면, 저가화 측면, 능동형 현가장치 개발 등 최근의 기술 발전 및 개발 동향을 알아보는 것은 매우 의미 있는 일로 생각된다.

현가장치의 기술적인 측면은 이미 본 저의 논문인 '승용차 현가장치에 대하여' (1997년) 및 'Steering & Suspension Geometry 특성이 차량 성능에 미치는 영향' (1999년)에서 많은 내용들을 언급하였다.

본 논문에서는 그 이후의 최신의 현가장치 기술 발전 동향들을 내용별로 분류하여 설명하고 최근의 현대-기아자동차 상품화에 관하여 언급하기로 한다.

2. 현가장치 기술 개발 동향

2-1. 고성능 현가장치 개발

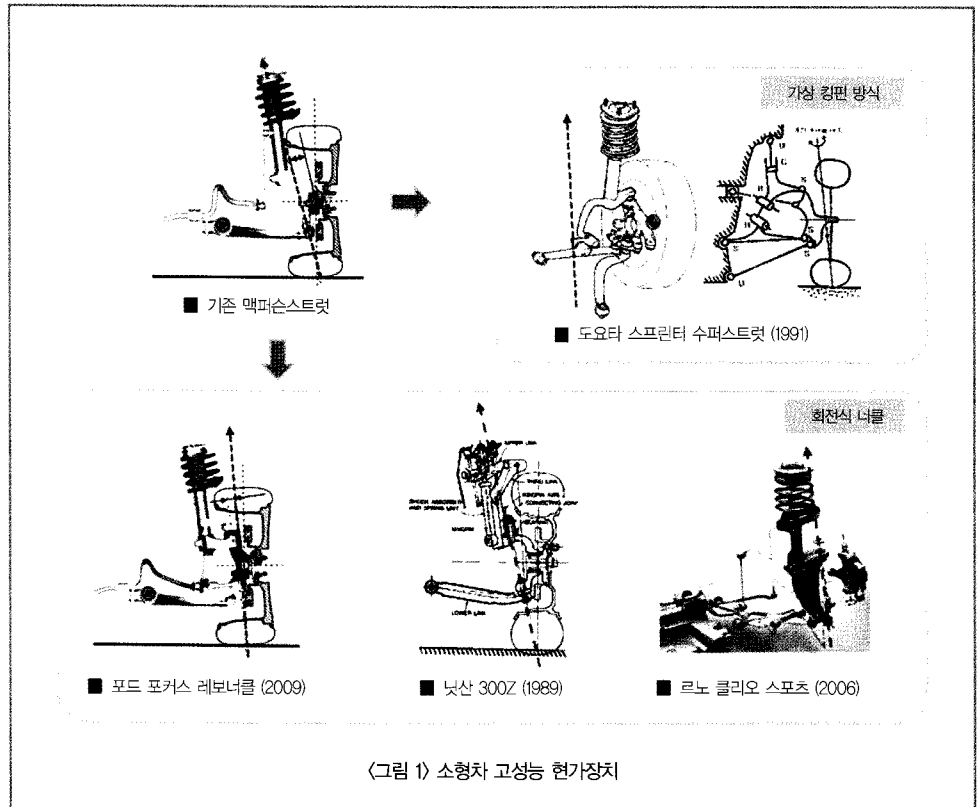
과거 소형차량의 전문 현가장치는 맥퍼슨스트럿 타입이 주를 이루었다. 그러나 최근에 들어서 소형차

에도 고출력 엔진이 탑재되기 시작하면서 이에 대응하기 위한 고성능 현가장치가 요구되기 시작하였다.

도요타에서는 일찍부터 기존의 맥퍼슨스트럿 타입 현가장치에 대한 대안으로써 1991년도 Sprinter에 적용한 '슈퍼 스트럿' (Super Strut) 타입이라는^{3,4)} 멀티링크 현가장치를 개발하였다. 슈퍼스트럿 현가장치는 가상 Kingpin 축을 최적화 시킬 수 있어 킹 핀 읍셋 최소화가 가능하고 이를 통하여 조종 안정성 및 슈미(Shimmy)성능을 향상시킬 수 있다. <그림 1>

근래에는 포드에서 '레보너클(Revoknuckle)'⁵⁾ 이라는 독특한 디자인의 멀티링크 현가장치를 선보였다. 레보너클을 이용하면 기존 맥퍼슨스트럿 현가장치의 단점인 스트럿 내부의 마찰을 최소화 할 수 있고 큰 캠버 및 킹핀 설계 자유도를 얻을 수 있다.

포드는 2009년 중 레보너클을 장착한 고성능 차량인 포커스 RS를 출시할 예정이다. 포드는 레보너클이 포커스 RS의 고성능 엔진에 의한 토크 스티어를 획기적으로 줄여주고 스티어링 외란에 대한 보다 강건한 특성을 제공하여 차량의 조종 안정성을 크게 향상시켜 줄 것으로 기대하고 있다.

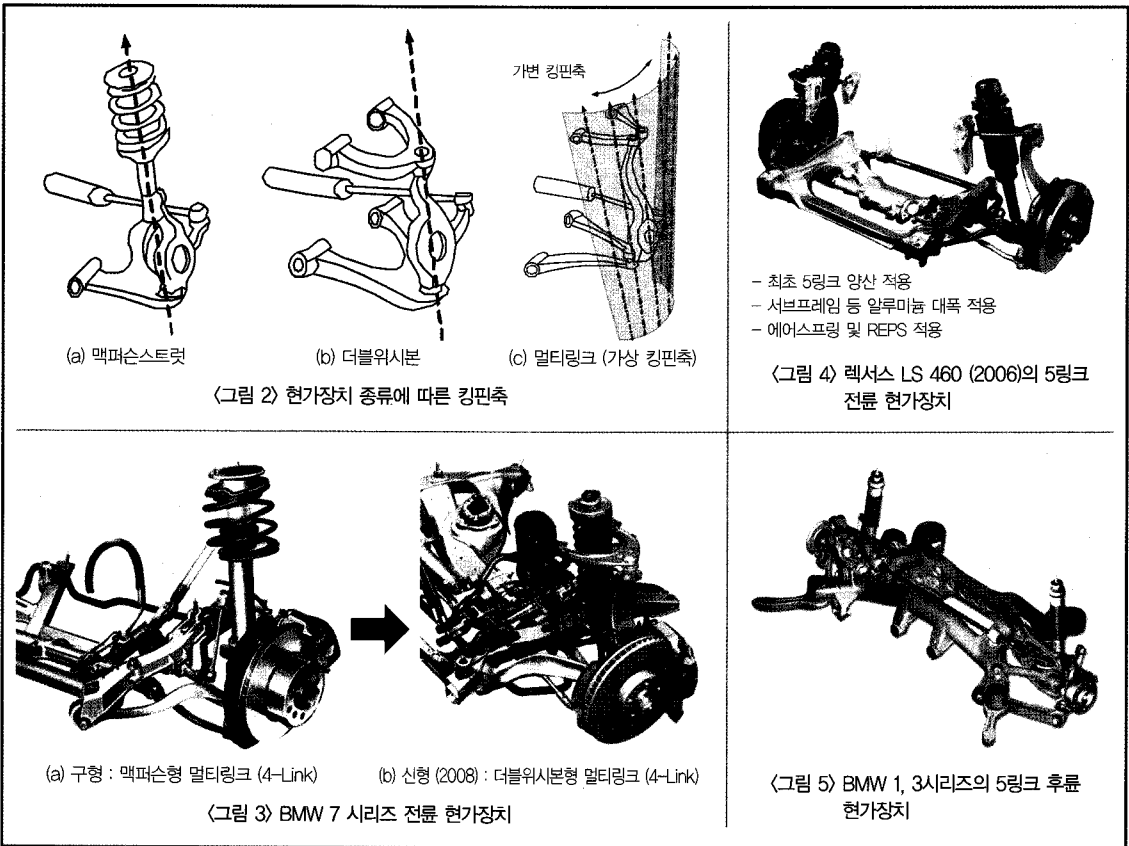


<그림 1> 소형차 고성능 현가장치

벤츠나 BMW와 같은 프리미엄 브랜드의 고급 승용차들의 전륜에는 로워암이 두 개의 링크로 분리된 멀티링크 현가장치가 장착이 되었다.^{9, 7)} 로워암이 분리된 멀티 링크의 경우 <그림 2>과 같이 가상 볼조인트와 킹핀축의 개념을 사용하여 전륜 킹핀 지오메트리를 효과적으로 최적화 할 수 있다.⁸⁾

특히, BMW는 2008년도에 전통적으로 적용해 오던 맥퍼슨 타입이 아닌 더블위시본 타입의 멀티링크를 장착하였다. 이는 기존의 전륜 맥퍼슨 스트럿과 후륜 더블위시본의 조합이 보다 민첩하고 스포티한 승차감을 제공할 수 있는 반면, 럭셔리 세단이 추구하는 보다 부드럽고 안락한 승차감을 제공하는 면에서는 부족함이 있기 때문일 것이다.

맥퍼슨 스트럿 타입 현가장치는 스트럿 내부 슬라이드 조인트에서 필연적으로 발생하는 마찰력으로 인하여 차량 전체의 승차감을 저하시킬 수 있다. 이와 달리 더블위시본 타입 현가장치는 지오메트리의 변화가 상대적으로 작기 때문에 맥퍼슨스트럿 타입 대비 보다 부드럽고 고급스러운 승차감을 제공할 수 있다. 더 나아가, 근래에는 고급 차종을 중심으로 더블위시본 타입 현가장치에 더블 조인트를 사용한 멀티링크 현가장치의 장착이 확대되고 있다. 일반적으로 멀티링크 현가장치는 휠 센터에서 킹핀 옵셋을



작게 설정할 수 있어 외란에 대하여 보다 강건한 특성을 가질 수 있다. 그러므로, 멀티링크 현가장치는 기존의 맥퍼슨스트럿 및 더블위시본 타입 현가장치에 비해 임팩트 필이나 쉬미를 상당량 개선시킬 수 있으며, 선회 시 킹핀축을 변화시켜 캐스터각, 캐스터트레일 등 스티어링 지오메트리 특성을 폭넓게 최적화시킬 수 있다. 실례로 2006년 도요타는 업계 최초로 전문 현가장치에 5링크로 구성된 멀티링크를 적용하여 자사 렉서스 브랜드의 플래그쉽 차량인 LS 460의 고급 조향감 및 승차감을 구현한 바 있다.

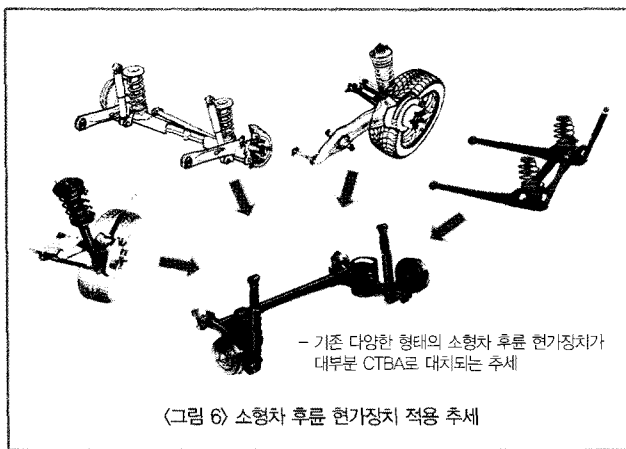
또한 대형 승용차의 후륜 현가장치로 주로 사용되었던 멀티링크 현가장치가 점차 소형차에도 확대 적용되고 있다. 특히, BMW도 소형 승용차인 1, 3시리즈에도 고성능 5링크 멀티링크를 적용하고 있는 추세이다. 후륜의 멀티링크 현가장치는 차량 주행 시 타이어의 거동을 보다 정교하게 제어 할 수 있고, 여러개의 링크를 통하여 지면으로부터 입력되는 하중을 효과적으로 차체에 분산 전달할 수 있다.

2-2. 저가형 현가장치 개발

치열한 경쟁을 넘어 생존 경쟁에 들어선 자동차 업계는 저가차 개발을 통한 신형 시장 선점에 박차를 가하고 있다. 품질이 보증되지 않는 저가차는 미래에 기업의 브랜드 이미지를 악화시킬 수 있다. 그러므로, 저가차 개발에 있어서 가장 중요한 관건은 품질과 성능을 유지하면서 원가를 최소화 해야 하는 것이다.

먼저 2000년 초반까지는 소형차의 후륜 현가장치는 듀얼 링크 및 트레일링암 타입 등 다양한 형태의 현가장치가 적용되어 왔으나, 2000년 후반부터는 저가이면서 성능이 우수한 CTBA 타입 현가장치가 주로 사용되고 있다. 전문 현가장치에서도 우물 정 서브프레임을 가지고 있는 맥퍼슨스트럿 타입이 I형 서브프레임을 갖는 맥퍼슨스트럿 타입으로 바뀌는 추세이다. 그 대표적인 사례로서는 르노 CLIO, 오펠 Corsa를 들 수 있다.

특히 신형 시장을 타깃으로 개발된 로간은 전형적인 저가 소형차라 할 수 있다. 로간의 현가장치는 기



<그림 6> 소형차 후륜 현가장치 적용 추세

본적으로 르노의 구형 클리오(CLIO)의 것을 단순화하여 사용하였다. 후륜 현가장치는 르노의 B 세그먼트에서 공통으로 사용하고 있는 CTBA (Coupled Torsion Beam Axle)을 사용하였다. 로간은 먼저 현가장치 부품의 수를 최소화 할 수 있는 단순화된 형상을 가진 부품을 사용하였고, 제조 및 개발비를 절감할 수 있도록 이미 성과와 내구가 검증된 기존 차량의 부품을 공용화할 수 있도록 설계되었다. 또한 원가, 중량 및 차량 유지비용을 줄이기 위하여 요구 성능을 충족시키기 위한 최소한의 부품만을 사용하였다.

2-3. 능동형 현가장치 개발

최근 센서 및 IT 기술의 발전으로(소프트웨어, 컴퓨터 등) 전자부품을 이용한 능동 제어시스템이 차량

에 점차 많이 적용되고 있는 추세이다. 이것은 기존의 기계식 현가장치에 전자기술을 활용하여 차량의 운동 성능을 개선시키기 위한 것으로 본 절에서는 최근의 기술 사례를 통해 향후의 발전방향에 대해서 논의하고자 한다.

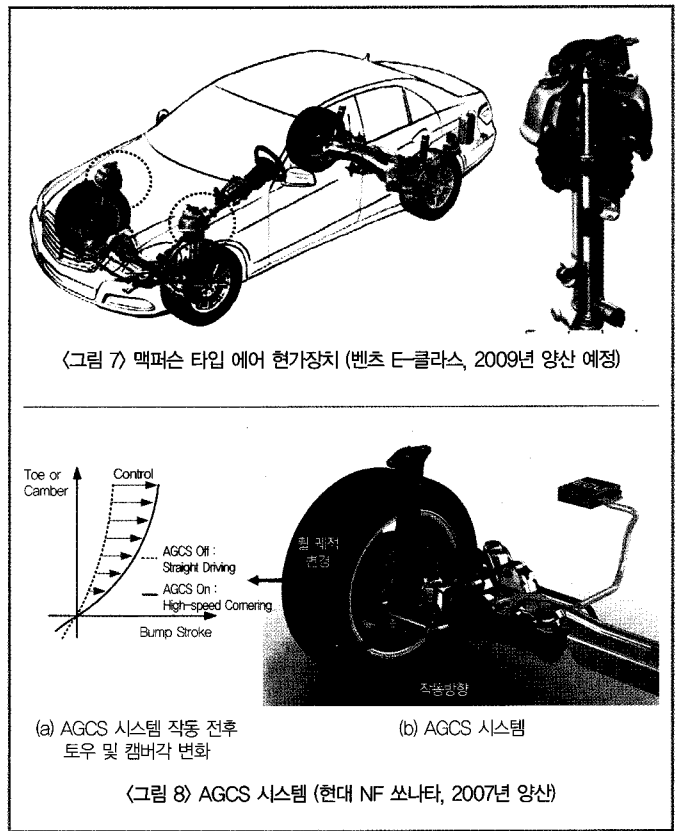
차고 조절 및 승차감 향상을 위해 주로 럭셔리 차량에 장착되고 있는 에어 현가 시스템(벤츠 S-클래스, 1998년 양산) 주로 멀티링크 타입 현가장치에 적용되어 왔다.

반면, 맥퍼슨스트럿 타입의 경우는 범프 혹은 선회 시에 스트럿에 발생하는 횡력에 의한 마찰력이 발생되어(내구와 NVH에 불리) 이런 횡력을 보상하는 설계가 필요하다. 과거에는 이러한 횡력을 보상시킬 수 있는 기법이 전무하였지만, 최근에는 이 기술이 양산 할 수 있는 수준으로 발전되었다. <그림 7>

1990년대 들어오면서 승차감과 조종안정성 양립을 위해 능동형 현가장치, 4WS와 같은 전자제어 시스템을 개발하여 일부 차량성능의 개선을 가져왔으나 지금까지는 아쉽게도 부품(유압구동에서 모터구동) 및 로직(오픈 제어에서 피드백 제어) 개선 정도의 수준에서 크게 벗어나지 못하고 있는 실정이다. 현재의 능동형 현가장치는 닛산 Infinity Q45, 벤츠 S-클래스(ABC, 1999년)에 적용된 2~3 Hz 이내의 차체 거동 즉 롤, 피치 등을 제어할 수 있는 시스템이다. 그러나 이러한 시스템은 힘이 가해지는 반대방향으로 새로운 힘을 주어서 차량의 거동을 잡아주는 개념으로 제어에 필요한 에너지 소비가 크고 자연스런 운동제어의 느낌을 얻기 힘들다.

4WS의 경우도 초기 혼다 Prelude 등에 유압식이었던 것이 최근에 닛산 Skyline/Infiniti G35, BMW 7-시리즈⁹⁾에 적용된 경우는, 전동식으로 어느 정도 소형화, 경량화되었지만 개념적으로는 동일한 시스템이다.

이런 측면에서 세계최초로 현대자동차에서 개발한 AGCS 시스템^{10), 11)}은 기존의 시스템과 개념적으로 구별된다고 할 수 있다. <그림 8> 먼저 기존의 시스템은 롤, 피치 등의 차량 현상을 직접 제어하여 억제하지만 AGCS는 발생하는 현상의 원인을 제어한다. 즉, 현가장치의 지오메트리 특성을 주행상황에 따라 변경함으로써 롤, 피치가 자연스럽게 바람직한 방향으로 발생하도록 한다. 또한 기존의 시스템은 제어력이 작용하중과 같은 방향이어서 많은 에너지가 소모되지만 AGCS는 제어력이 작용하중에 대하여 직각으로 가해지므로 필요한 에너지가 최소화 된다.



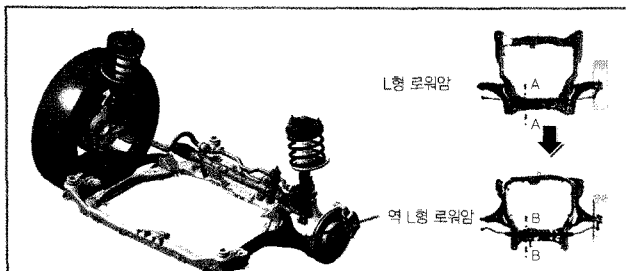
<그림 8> AGCS 시스템 (현대 NF 쏘나타, 2007년 양산)

향후에는 AGCS와 같이 자연의 순리를 따르는 단순한 메커니즘 및 제어 개념을 갖는 효율적인 시스템이 능동형 현가장치의 발전 방향으로 잡혀가지 않을까 생각된다. 현재 AGCS는 추가적으로 모터 소형화, 레이아웃 최적화를 추진하고 있으며 제어 기능도 Toe 뿐만 아니라 캠버, 롤센터 및 킹핀축까지 확대하여 훨씬 다양한 차량 거동을 제어할 수 있는 시스템을 발전되고 있다.

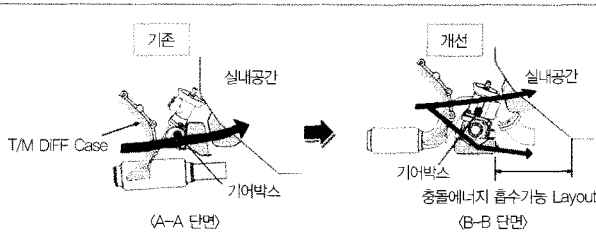
3. 현대-기아차 현가장치 기술 소개

3-1. 전륜 현가장치

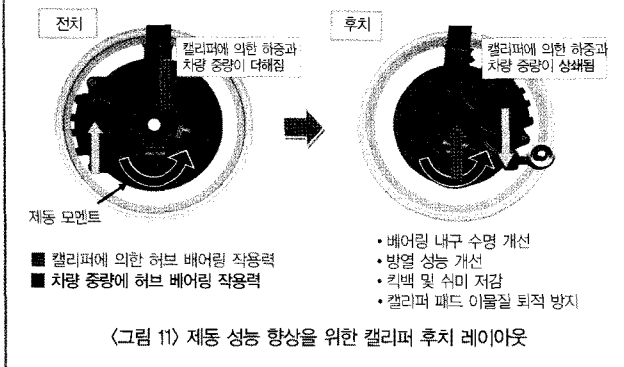
차량이 고성능화 될수록 고객들은 더욱 차량의 충돌 안전성에 관심을 갖게 되었다. 2000년대 들어서면서 현대 자동차는 충돌 안전성을 대폭적으로 향상 시키기 위하여 우물 정(井)자형 서브프레임을 전격



〈그림 9〉 역 L형 맥퍼슨 스트럿 전륜 현가장치 (아반떼 HD)



〈그림 10〉 충돌 에너지 분산을 위한 레이아웃 개선



〈그림 11〉 제동 성능 향상을 위한 캘리퍼 후치 레이아웃

도입하였다. 또한 〈그림 9〉과 같이 기존에 사용되던 L형 로워암을 역(逆) L형 로워암으로 변경하여 타이로드와 로워암에 대한 독립적인 레이아웃 설계를 가능하게 하였고 스티어링 기어박스를 하향 배치하여 차체 멤버 단면을 대폭 증대할 수 있었다. 독립적인 타이로드 및 로워암 레이아웃은 시미(Shimmy)에 대한 대폭적인 개선을 가능케 하였고 선형 조타감을 증대하여 차량의 상품성이 향상 되었으며 강화된 차체 멤버 및 충돌 에너지 분산을 분산시킬 수 있는 레이아웃을 통하여 충돌 성능을 향상시켰다. 〈그림 10〉

엔진의 고출력화 및 차량의 고속화가 진행됨에 따라 차량의 제동 성능이 새로운 화두로 떠오르게 되었다. 특히 제동 시 발생하는 발열, 소음 및 진동은 고급 차량 개발을 위해서는 필수적으로 해결해야 할 문제이다. 이를 개선하기 위하여 캘리퍼의 위치를 휠 센터 후방에 위치하도록 하고 있으며 이러한 캘리퍼 배치는 제동 시 휠 허브 베어링에 작용하는 하중을 감소시켜 〈그림 11〉 베어링 수명을 증가시켜 주고, 스티어링 킥백 감소에 효과적이며 브레이크 디스크 냉각 성능 향상에 큰 효과가 있다. 이러한 캘리퍼 후치는 하향된 스티어링 기어박스 레이아웃에 의하여 가능하였다. 현대 기아자동차는 2000년대 초반 이러한 브레

이크 시스템 레이아웃을 적극적으로 적용하여 효과적으로 차량의 상품성을 대폭 향상시켰다.

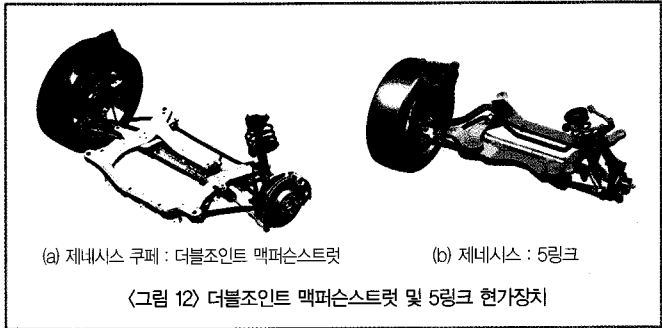
한편, 과거 사이드 멤버에 주로 의존하던 것과 달리 근래에 들어 충돌 에너지에 대한 흡수 및 전달 경로를 다양화 할 수 있는 차체 기술이 비약적으로 발전함에 따라 충돌안전 성능을 최고 수준으로 유지 하면서 다시 T 형 서브프레임과 L 형 로워암을 사용하여 차량원가와 중량을 동시에 줄이려는 노력을 기울이고 있다. 높아진 차체 강성은 T 형 서브프레임 만으로도 현가장치를 통하여 입력되는 하중을 적절히 지지하고 분산 시킬 수 있다.

최근에는 맥퍼슨 스트럿 타입 현가장치의 컴팩트한 레이아웃 및 스포티한 특성을 유지하며 기존에 존재하던 단점을 개선하기 위한 더블 조인트 맥퍼슨 스트럿 타입 현가장치를 개발하였다. 이 현가장치는 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 로워암을 두 개로 분리하고 액슬 측에 더블 조인트를 장착한 구조를 가지며 가상 킹핀축을 이용하여 킹핀 옵셋 최소화, 캐스터 각 최적화가 가능하다. 이러한 구조는 전륜에서 들어오는 모든 하중에 대하여 둔감한 특성을 가지기 때문에 임팩트 필링이나 쉬미가 상당량 개선될 수 있다. 또한 핀 축 변화에 의하여 최적 캐스터 각 및 트레일을 구현할 수 있기 때문에 차량의 선회 성능이 대폭 향상될 수 있다. 더블 조인트 맥퍼슨스트럿은 제네시스 쿠페 전륜 현가장치에 적용되고 있으며 이를 통하여 제네시스 쿠페는 보다 역동적인 동시에 외란으로부터 강건한 주행 특성을 가지게 되었다. <그림 12-a>

이와 동시에 보다 고급스러운 승차감 및 부드러운 조향감을 구현하기 위하여 어퍼암까지 더블 조인트를 적용한 5-링크 전륜 현가장치가 개발이 되었다. 5-링크 전륜 현가장치는 더블위시본 타입의 장점을 모두 유지하며 조향

시 휠의 거동을 최소화하여 전륜 패키지를 컴팩트하게 유지하고 가상킹핀축을 이용하여 킹핀 지오메트리를 최적화 할 수 있다. 특히 5링크 현가장치는 조향 시 휠의 전후 방향 이동량이 20~30mm 정도로 매우 작기 때문에 전륜 현가장치와 주변부품 개발 시 기존 현가장치 대비 훨씬 많은 설계 자유도를 제공한다.

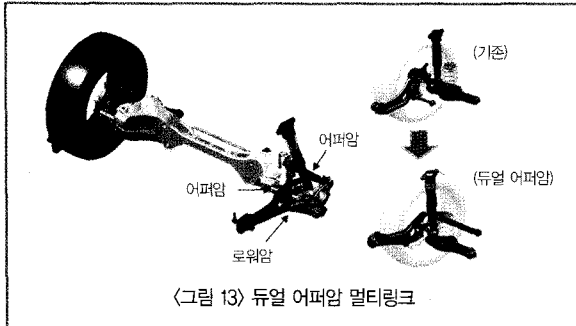
5링크 타입은 제네시스, 에쿠스 등의 프리미엄급 럭셔리 세단에 장착이 되어 차량의 조종 안정성을 극대화 하는 동시에 고급스러운 승차감 구현을 가능하게 해 주었다. <그림 12-b>



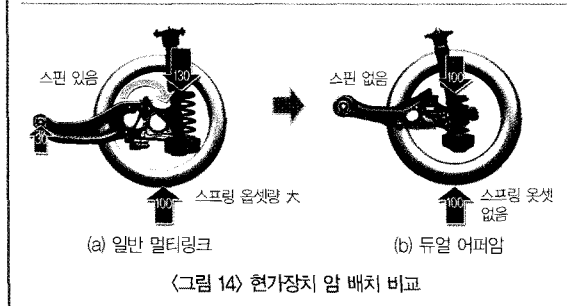
3-2. 후륜 현가장치

1) 듀얼 어퍼암 멀티링크 현가장치

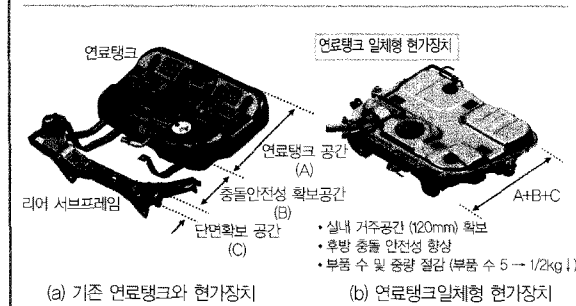
차량의 후륜은 승객이나 화물에 의한 하중변동이 크다. 이러한 하중변동에 의한 휠 거동의 컴플라이언스 특성을 고려한 현가장치 레이아웃은 차체의 실내 공간을 결정짓게 된다. 신형 아반떼에 적용되고 있는 “듀얼 어퍼암 멀티링크 현가장치” (현대자동차 고유기술)은 스프링을 휠 센터 상에 위치시켜 차량 하중 변화에 의한 휠의 자세 변화를 최소화 함으로써 승차감 및 주행 안정성을 높여 준다. 또한, 어퍼암



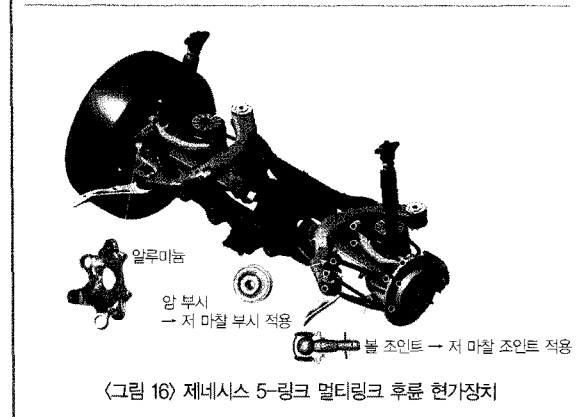
〈그림 13〉 듀얼 어퍼암 멀티링크



〈그림 14〉 현가장치 암 배치 비교



〈그림 15〉 연료탱크 일체형 현가장치 구조



〈그림 16〉 제네시스 5-링크 멀티링크 후륜 현가장치

을 하향 배치시켜 차체 사이드 멤버를 50mm 하향할 수 있어 실내 거주 공간을 극대화하고 후방 충돌 성능을 개선하였다. 또한 트렁크 용량을 증대하여 화물 적재 성능 향상을 실현하였다.

2) 연료탱크일체형 서브프레임

최근 안전 법규가 강화되어 후방 충돌 안전성 향상이 필요하고 실내 거주성, 특히 RV 차량의 후석 3열 거주성 및 연료탱크 용량 증대에 대한 요구가 커지고 있다. 연료탱크일체형 서브프레임은 연료탱크 모듈과 리어 현가장치 모듈을 일체화시켜 후륜 샤시모듈로 통합한 것으로 현대자동차가 세계최초로 고유의 독자기술로 개발하여 뉴캐렌스(2006년 6월~) 차량에 양산 중이다.

주요 효과로는 동일 플랫폼 차량에서 최대의 실내 거주공간 확보는 물론 부품 수 감소 및 조립 공정 단순화를 실현하고 후방 충돌 시 연료탱크일체형 서브프레임이 차체의 멤버와 동시에 변형함으로써 연료탱크 자체의 변형이 발생하지 않아 안전성이 획기적으로 개선되었다. 또한 일체화하여 서브프레임 강성 보강 및 NVH 성능도 향상되었고 부품 수는 5개에서 1개로, 라인 작업 공수는 절반 수준으로 줄일 수 있게 되었다.

3) 5-링크 멀티링크

제네시스에 적용된 5-링크 멀티링크 후륜 현가장치는 현가장치 암의 배치를 최적화하여 범프/선회/제동 시 토우 변화 최소화 및 캠버각 적용으로 주행안정성 및 든든감을 확보하였다. 또한 설계 자유도가 높아 각종 외란에 대해 타이어가 지면과 안정적으로 접지력을 유지할 수 있으며 선회 시 안정성을 향상시키는 방향으로 타이어가 거동하게 된다. 또한, 구동력 변화에 대해서는 타이어의 거동이 없도록 강건하게 설계되어 직진 안정성을 확보시켰으며, 제동 시에는 전방으로 쏠리는 것을 방지하고 타이어 앞쪽이 약간 안쪽으로 모이게 만듦으로써 제동 안정성을 향상시킨다.

노면에서 차체로 들어오는 충격이 현가장치의 5개의 링크와 속업소버를 통해 분산되어 전달되고 전륜과 마찬가지로 무거운 부품인 너클을 경량화 소재인 알루미늄으로 만들어 우수한 승차감 및 정숙성을 구현하였다. 특히, Low Friction 부시, 볼조인트 적용으로 현가장치 전체의 Friction을 대폭적으로 저감하여 저속 주행 시 고급스러운 주행감을 구현하였다.

4. 결론

현가장치 성능의 기본은 차량 거동이 물 흐르듯 자연스럽게 외부의 입력에 대해 순발력 있게 움직여 주는 즉, 운전자의 의지대로 움직여 주는 것이라 할 수 있으며 동시에 어떠한 노면에서도 주행감과 승차감을 만족시켜 주어야 한다. 향후에는 이와 더불어 값싸고 가벼운 현가장치만이 경쟁력을 가질 수 있을 것이다. 또한, 고급감과 성능을 극대화 할 수 있는 기술 개발이 필요하게 될 것이다.

능동제어 시스템은 우수한 현가장치의 기계적 특성이 전제 되어야 그 효과가 극대화 될 수 있다. 그러므로 현가장치 개발 부분에 있어서 보다 중요한 것은 기계적인 측면에서의 발전이다. 현가장치의 기계적 시스템의 상당부분은 아직까지는 복잡하고 기능적으로 제한된 부분들이 존재한다. 이러한 부분들은 당연히 개선되어야 하고, 보다 단순화된 형태로 개발되어 현존하는 시스템의 한계를 넘어설 수 있게 하여야 한다. 이러한 바탕 위에 다양한 전자 장치를 이용한 능동제어 시스템을 적용 한다면 가까운 미래에 현존하는 현가장치의 성능을 한 단계 업그레이드 시킬 수 있는 기회를 가질 수 있을 것이다.

(이연구 부사장 : uklee@hyundai-motor.com)

〈참고문헌〉

- ① "승용차 현가장치에 대하여(1)," 한국자동차공학회 학술강연회 논문집, pp.29, 1997.
- ② "steering & suspension geometry 특성이 차량 성능에 미치는 영향", 한국자동차공학회 학술강연회 논문집, 1999.
- ③ "Toyota의 chassis technology를 본다(2)", 일본 Car & maintenance, 1994. 7
- ④ "Toyota, "Super-Strut의 효용" 日本 Car-Graphic 1991. 9
- ⑤ "Methodic Development of Driver Front Suspensions for reduced steering Disturbance", Aachen Colloquium, pp. 1541~1557, 2008
- ⑥ "Mercedes-Benz E-Class", ATZ January, pp.128-143, 2009.
- ⑦ "The new BMW 7 Series chassis and Dynamic Drive Control", ATZ, 2008.
- ⑧ "Integral Active Steering; The New Steering System from BMW", ATZ, 2008.
- ⑨ "A Method to Analyze "The Imaginary Kingpin Axis" in Multi-Link Type Suspension Systems", SAE 930262, 1993
- ⑩ "Active Geometry Control Suspension System for the Enhancement of Vehicle Stability", Journal of Automobile Engineering, Proceedings of IMechE, Vol. 222, pp. 979-998, June 2008
- ⑪ "Active Geometry Control Suspension", ATZ February, pp.90-96, 2009.
- ⑫ "Suspension Analysis with Instant Screw Axis Theory", SAE 910017 pp. 143~151, 1991.
- ⑬ "Synthesis and Analysis of Suspension Mechanisms with Use of Displacement Matrices," SAE 890098, pp. 171~182, 1989
- ⑭ Kinematic Geometry of Mechanisms, Oxford University Press, pp. 30~52. pp.375~402, 1978
- ⑮ Computer-Aided Design of Mechanisms, Part A and B, Department of Mechanical Engineering, University of Colorado Boulder, 1990
- ⑯ "Fundamentals of vehicle dynamics", SAE, 1992.
- ⑰ "The Automotive Chassis: Engineering Principles", SAE, 1996
- ⑱ Rudolf Limpert, "Brake Design and Safety", Second edition, SAE, 1999.
- ⑲ "ステアリングキックバックの原因に関する力學的解析", HONDA R&D Technical Review, Vol.11 No.1, 1999.