

신개념의 승용차 서스펜션 기술

New Conceptual Suspension Technology

이 언 구 / 현대자동차 이사
Unkoo Lee / Hyundai Motor Company

최근 21C를 맞이하여 자동차의 기술발전은 급격한 증가세를 이루고 있다. 그러나 되돌아보면 현재의 자동차의 성능을 극대화시키기 위한 많은 설계이론 및 신기술 등의 개발은 아직도 기존의 개념을 답습한 상태에서 방법론적인 측면에서만 주로 개선을 거듭하고 있다고 할 수 있겠다. 그러나, 이러한 형태의 개선과 발전은 이미 상당한 연구개발에도 불구하고 그다지 효율적이지 못하여 어느 정도 한계에 이른 것이 아닌가 판단되어 진다. 따라서 서스펜션 기술이 더욱 혁신적으로 향상되기 위해서는 기본개념부터 대폭 개선시켜 나가야 할 것이고 그 시점은 바로 지금이 아닌가 생각된다.

또한 혹자는 '차량의 서스펜션 기술이 이제는 대중 거의 발전할 만큼 발전해서 앞으로는 원가절감 및 경량화 그리고 품질개선 등에 초점을 맞추면 될 것이다' 라고 말하기도 한다. 그러나, 실제로 수준 높은 고객들의 더 고차원적인 성능에 대한 욕구와 더불어 더욱더

완벽한 설계를 위한 설계이론의 필요성에 의해 아직도 연구개발 되어야 할 여지는 무한하다고 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 측면에서 앞으로 서스펜션 기술이 발전해야 할 방향을 기능해 보고 그 중에서 가장 현실적이고도 필히 지향해야 할 기술개발의 방향에 대해서 대표적인 몇가지 기술사례 형식으로 언급해봄으로써 관련 연구자들에게 연구방향을 제시해 보고자 한다.

1. 전륜 멀티-링크 서스펜션

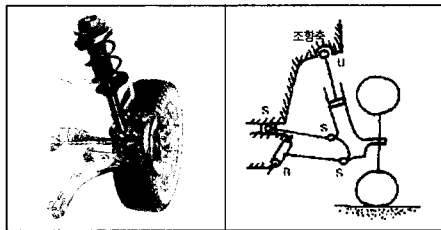
일반적으로 독립 현가장치는 (Independent Suspension) 기구학적으로 자유도가 '1' 인 Mechanism으로(때로는 자유도 '0' 인 것도 많음) 구성되어 있다. 예로서, 가장 보편적이고 대표적인 서스펜션인 McPherson Type과 Double-Wishbone Type 은 <그림 1>에서처럼 3개의 링크로 구성되어 있는데

반해 멀티-링크 서스펜션은 4개 이상의 링크로써 이루어진 서스펜션을 일컫고 있다. 전륜의 특성상 조향축은 실제 조인트들을 연결한 선으로 표시할 수 있다. 그리고 이러한 조향축에 의해서 결정되는 Kingpin축 경사각, Caster 각, Kingpin Offset(휠 센터로부터 노면과 만나는 점 그리고 타이어 접지 중심점과의 거리는 각각 휠 센터에서의 Kingpin Offset, 노면에서의 Kingpin Offset으로 표현), Caster Trail 등은 조타감의 경중, 정교함의 대소 그리고 Shimmy, Kick-back, Torque Steer 등의 조향계 관련 진동특성과 직진 주행성 및 제동안정성 등 조종안정성능에 직접적인 영향을 미치고 있는 중요한 설계인자라 할 수 있다.

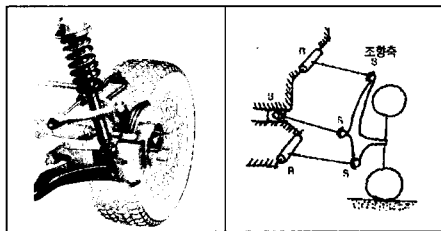
그러나, 현재의 Conventional Type인 McPherson, Double-wishbone에서는 휠 센터의 Kingpin Offset

하게 되며, 보다 정교한 타이어 운동학적 특성의 구현이 가능하다. 따라서 후륜 서스펜션에 대해서는 1980년대 중반 이후로 Benz를 시작으로 BMW, Volvo, Nissan, Mazda 등 많은 회사의 자동차에 적용되기 시작하여 이후 최근에는 준중형급(Ford Focus 등)에 까지 확대 적용되기 시작하여 성능 개선을 하려는 노력을 계속 진행하고 있다.(그림 2 참조) 그러나 조향운동이 수반되는 전륜에 대해서는 여러 측면에서 설계상의 어려운 점이 많아 적용속도가 훨씬 느려 최근에서야 비로서 확대 적용하기 시작하고 있다.

또한, 멀티-링크의 조향축은 각 링크의 연장선(단지 개념상임)과의 교점인 가상 조인트에 의해 만들어지는 가상 킹핀축이 되어(Imaginary Kingpin Axis) 조향축의 설정자유도가 대폭 증대된다. 이것은 휠-센터



(a) McPherson

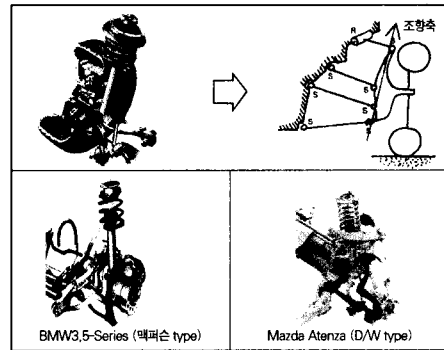


(b) Double-wishbone

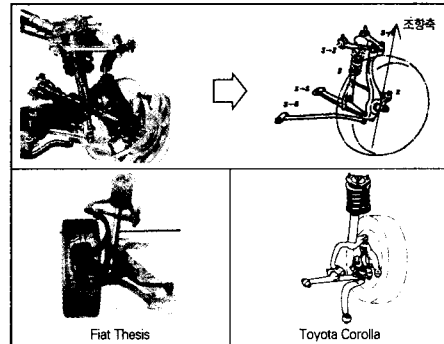
<그림 1> Conventional Type 서스펜션

등의 크기를 작게 하는데 한계가 있어 엔진 출력이 높은 차일수록 구동 토크에 의한 영향, 선회 가속시 조타감 모호해짐 등 많은 문제점이 있을 수 있다.

멀티-링크는 링크수가 늘어나 설계 자유도가 증가



(a) 4-Link Multi



(b) 5-Link Multi

<그림 2> 멀티-링크 서스펜션

의 Kingpin Offset 등을 최소화(25mm 이내) 시킬 수 있어서 조향축 주위로 들어오는 입력들에 의해 생기는 회전 모멘트가 줄어들어 제반 성능들을 개선시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 조향시 조향축이 움직이면서 조타가 되므로 타이어의 전후방향 이동량을 대폭 삭감시킬 수 있어 휠-아치의 전후크기를 줄이게 되어 Overhang도 작게 할 수 있는 등 많은 이점이 있으므로 관련연구가 필요한 실정이다.

2. 능동형 사시 제어 시스템

수동형 서스펜션이 가질 수 밖에 없는 성능상의 한계를 극복하기 위하여 많은 서스펜션 엔지니어들은 제어기술을 통하여 성능욕구를 충족시키기 위해 수많은 노력을 해왔으며 이러한 노력들의 결과로써 4WS, Semi-active, Slow-active(1889년, Nissan Infiniti Q45 및 Toyota Lexus에 최초 적용되고, 현재는 Benz S-class에 적용되는 ABC 시스템), Full-Active(Lotus 경비용 차량으로 20 Hz까지 제어가능 시스템) 등 많은 능동 제어 시스템들을 개발하여 성능을 개선시키려는 많은 시도가 이루어져 왔다. 그러나 결과적으로 판단해 보면 상기 시스템들은 선진이론으로 무장한 상태인데다가 초기 데뷔시의 엄청난 선전과 노력이 있었음에도 불구하고 상기 시스템들은 가격대비 성능 및 효과 등 여러가지 이유에 의해 그다지 성공적이지 못하였으며 제어시스템 측면에서도 바람직한 제어개념이 아니었던 것으로 생각된다.

그리고 이러한 결과들에 대한 근본적인 요인은 기존의 모든 시스템의 제어개념이 현상제어라는데 그 원인을 찾을 수 있지 않을까 생각된다. 현상제어라 함은 내, 외부로부터의 입력에 의해 야기되는 결과에 대해 차량의 부적절하거나 바람직하지 못한 현상들을 초기에 센서로 감지하여 신속하게 억제내지는 흡수하여 성능을 개선시키고자 하는 방법이라 할 수 있겠다. 그러

나, 아쉽게도 현상이라는 것은 동일입력에 의해 차량에 있어 다양한 형태로 동시에 발생하는 일이기 때문에 이것들을 모두 다 동시에 제어하여 개선시킨다는 것은 너무나도 어렵고도 많은 노력이 필요하다.

따라서, 진정으로 효율적인 제어를 하기 위해서는 현상보다는 「현상에 대한 원인을 제어」하는 것이다. 또한, 제어를 위해 필요한 에너지도 현존하는 시스템은 대부분 작용하중과 동일 축선상에서 제어력을 가해 주기 때문에 $(\dot{W} = \dot{F} \cdot S = F \cdot S)$ 엄청난 에너지가 소비될 수 밖에 없었다. 작용 하중 선상에 수직방향으로 제어력을 가해줄 수 있다면 제어를 위한 에너지는 대폭적으로 감소되며 제어후에도 역방향으로 들어오는 입력에 전혀 영향을 받지 않을 수 있는 아주 안정된 상태를 유지할 수 있을 것이다. 이러한 시스템의 한 사례를 들어 보겠다.

원인제어형 지오메트리 콘트롤 서스펜션인 AGCS (Active Geometry Control Suspension) 시스템은 기존의 시스템과는 다르게 즉 억제제의 개념보다는 에너지 흐름에 대한 제어의 개념을 바탕으로 하여 자연의 순리를 따를 수 있도록 설정되었으며 그 기본개념의 차이는 <표 1>에서 몇가지 측면에서 요약 비교하여 보았다.

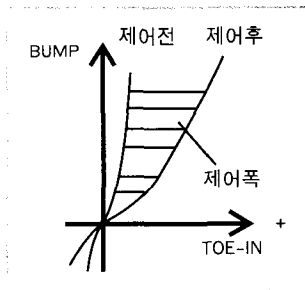
AGCS 시스템의 기본개념은 액추에이터를 이용하

<표 1> AGCS와 기존 능동사시시스템의 제어개념 비교

항목	기존	AGCS
제어대상	발생하는 현상 (Roll, Yaw 등)	발생하는 현상의 원인
제어 힘 방향 및 에너지소비	작용하중 방향과 동일 → 에너지과대 → 중량 및 원가에 불리	작용하중 방향에 수직 → 에너지 최소 → 중량 및 원가에 유리
Fail 발생시	차량거동이 위험해짐	단지 지오메트리만 변경될 뿐 위험과는 무관
비고	제어시 이질감 가능성	원인제어후 기계적인 움직임으로 자연스런운동구현

여 차체쪽의 링크 절점위치를 작용하중의 수직방향으로 움직여 서스펜션 지오메트리 특성을 변하게 함으로써 각 주행조건에 따라 최적의 서스펜션 지오메트리를 만들어 내는 것이다. 후륜 범프 토우(Bump Toe) 제어를 예로들면 기존의 4WS 시스템과는 다른 개념으로 고속 직진 주행시나 저속 선회시는 후륜 범프 토우의 크기를 작게하여 직진성을 향상시키며, 차체의 Roll 거동이 수반되는 고속 선회시나 횡풍시 혹은 급조타에 의한 고횡G 발생시에는 범프 토우의 크기를 크게 제어하여, 언더스티어(Understeer) 경향을 증대시켜 한계 선회안정성을 향상시킨다.

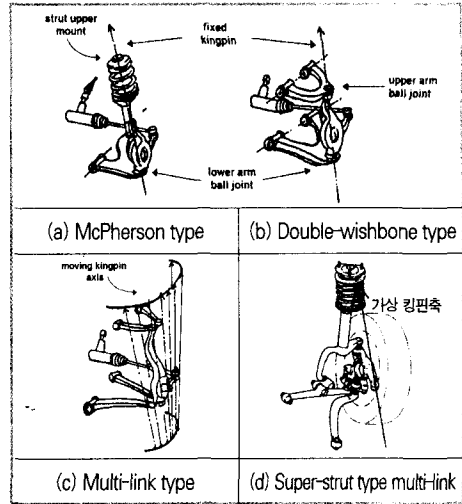
범프 토우제어의 개념도를 나타내며 Assist Link 마운팅 점(b1)을 제어 필요시에 상향이동(b2) 시킴으로써 지오메트리가 변경된다. 그러면, 휠이 범프를 하면서 변경된 지오메트리에 의해 Toe-in의 크기가 증대된다.(그림 3 참조)



〈그림 3〉 범프시 타이어 토우변화 비교

3. Screw Axis Theory(순간 나선축 이론)를 이용한 서스펜션 지오메트리 설계이론

1장에서 언급한 전륜 멀티-링크와 같은 형태의 고성능 서스펜션 시스템의 경우, 조향륜에서 킹핀축을 정확하게 구하는 것은 어렵다. 〈그림 4〉의 (a), (b)에서 보는바와 같이 맥퍼슨이나 더블-위시본 서스펜션의 경우에 지면에 대한 조향축(킹핀축)은 고정되어 있



〈그림 4〉 서스펜션별 킹핀축 결정방법

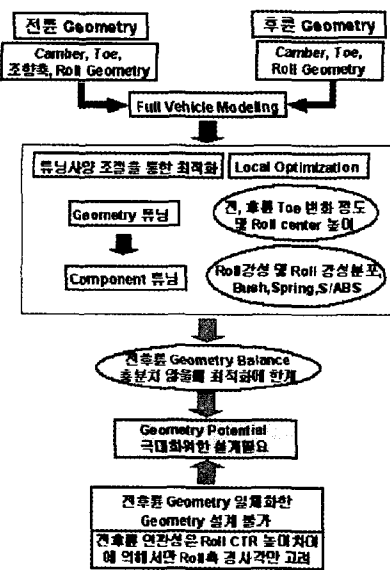
어서(실제로는 미세하게 움직이지만 고정으로 간주해도 무관) 기존의 다양한 기구 해석 프로그램 등을 이용하면 쉽게 구할 수 있다.

그러나, 〈그림 4〉의 (c), (d)에서와 같은 멀티-링크 서스펜션의 경우는 조타와 더불어 조향축의 계속 위치가 계속적으로 변하기 때문에 고정 킹핀축이 아니라 공간상에 가상의 조향축(Imaginary Kingpin Axis)이 이루는 곡면이 존재하며 이것은 기존의 해석방법으로는 정확히 구하기가 힘들다. 이 경우는 순간 스크류축 이론을 적용하면 다음과 같이 정확하게 구할 수 있다.

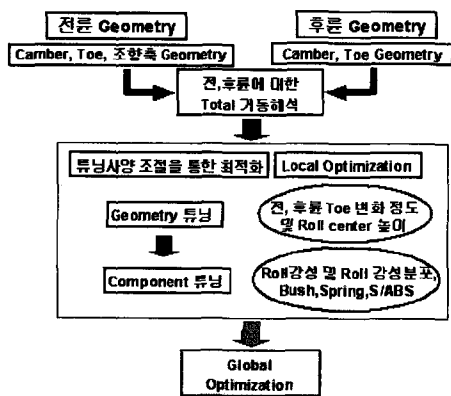
- 1) 각 서스펜션 시스템의 Kinematic Model 구성
- 2) 변위행렬과 서스펜션 구속방정식 수립
- 3) 휠의 상하운동과 조타운동에 대한 변위해석
- 4) 각 조타위치에서 순간 스크류 운동축 해석

또한, Roll, Yaw, Pitch 등 차체의 거동특성을 올바르게 해석하기 위해 스크류축 이론을 이용한 서스펜션 지오메트리 설계원리에 대해 알아보기로 한다. 기존의

서스펜션 설계과정은 <그림 5-1>에서처럼 전, 후륜 서스펜션 지오메트리를 분리해 독립적으로 설계한 후, 전차량 상태의 동특성 해석에서 서스펜션 튜닝부품들의 특성치를 조절해가면서 성능에 대한 최적작업을 피한다.



<그림 5-1> 기존의 서스펜션 지오메트리 설계과정



<그림 5-2> 스크류축 이론에 의한 지오메트리 설계과정

이 방법은 목표성능에 대해 Local Optimization만이 가능하고 개선시킨다고 해도 튜닝 파라미터들에 의해서만 할 수 있기 때문에 근본적으로 한계가 있다.

반면, 스크류축 이론을 이용한 설계기법은 <그림 5-2>에서처럼 전, 후륜의 지오메트리 특성이 하나의 새로운 설계 파라미터로 동시에 포함되어 만들어지며, 이것으로써 설계 초기단계에서부터 지금까지는 할 수 없었던 실질적인 Total 지오메트리 특성의 최적화, 그리고 경우에 따라서는 전, 후륜 서스펜션 형태의 조합까지도 결정할 수 있는 새로운 서스펜션 지오메트리 설계기법이라 할 수 있다.

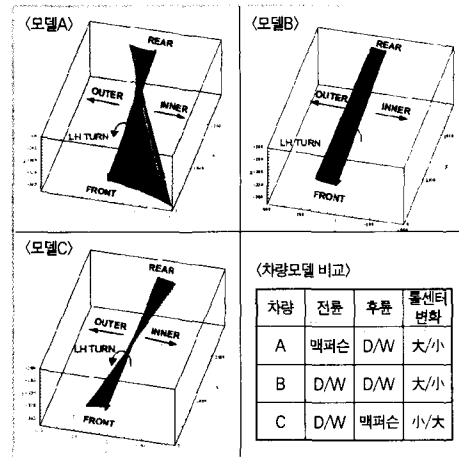
차량이 롤(Roll) 할 때의 운동특성은 차체의 롤센터 위치의 이동특성(Roll Center Migration)과 깊은 관계가 있는데 기존 차량의 롤축(선회 운동축)은 전, 후륜 서스펜션 각각의 롤센터를 구하여 연결한 직선으로 (<그림 7>의 위쪽 그림) 가정하였으나 이것은 실제의 것이 아니며, 정확한 차량의 선회운동축을 정확히 구하기 위해서는 순간 스크류축 이론을 이용하여야 할 것이다. 즉, 3차원 공간상에서 차량 선회시의 차체 움직임은 <그림 6>에서 보여주듯이 전, 후륜의 서스펜션 지오메트리에 의해 결정되는 롤축과 (정확히는 스크류축) 이러한 연속적인 롤축들에 의해 생기는 스크류축 곡면(Screw Axes Surface)상을 미끄럼없이 선접촉인 상태로 나선형태로 굴러다니는 것이라고 말할 수 있다. 다시말하면, 차체의 롤 운동은 차량 서스펜션 시스템에 의해 정의되는 고정 스크류축 곡면 위를 차체와 동일 강체에 속하는 이동 스크류축 곡면이 미끄러짐 없이 굴러가는 것을 의미한다.

<그림 7>의 아래 그림은 전체차량의 롤축을 3차원의 Kennedy Theorem(3축 정리)에 의해 차체의 노면에 대한 스크류축으로 정의한 것이다.

따라서 이러한 스크류축 평면의 형상에 따라 설계자는 차량의 롤 거동특성을 쉽게 판단할 수가 있으며 이러한 롤 거동특성은 차량의 조종안정성에 지대한 영향

을 미친다. 또한, 그 형상은 스크류축을 구성하는 스크류 인자(Screw Parameter) 값과 그 변화율에 의해 표현될 수 있으므로 이러한 스크류 인자들에 의해서 차량의 조종안정성을 예측할 수가 있다. 따라서 이러한 성능 예측기법은 동력학 해석을 행하지 않고서도 차량 동특성을 예측할 수 있는 판단기준이 될 수 있으므로 서스펜션 지오메트리 설계 초기단계에서 대단히 효율적인 설계 도구가 될 수 있다.

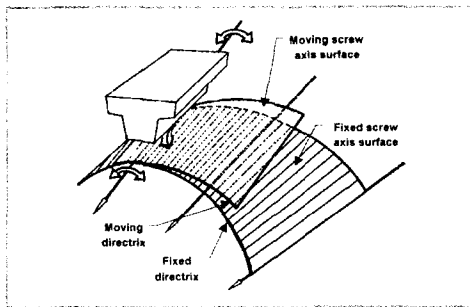
스크류축 곡면의 해석사례로 <그림 8>은 실제 차량의 지오메트리를 가지며 다른 물 거동을 보일 수 있는 비교모델을 만들어 준 정적해석을 수행하여 각 스크류축 곡면을 비교한 그림이다. 참고로 모델 A는 전륜에는 롤센터 변화가 큰 맥퍼슨 Type을 후륜은 변화가 적은 Double-wishbone Type을 장착하였고, 모델 B는 전, 후륜 모두 D/W Type이며 모델 C는 A와 대치되는 개념으로 전륜은 D/W, 후륜은 맥퍼슨으로 구성된 차량이다.



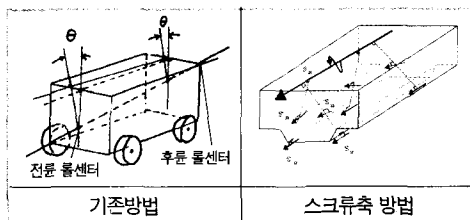
<롤센터 변화 형상과 차체 거동의 관계>

Type	롤센터 변화형상	CG 상하거동	CG 횡거동
1	선회내측으로 아래방향	Lift down	CG 횡방향 변위 소
2	선회외측으로 아래방향	Lift up	CG 횡방향 변위 소
3	선회내측으로 윗방향	Lift down	CG 횡방향 변위 대
4	선회외측으로 윗방향	Lift up	CG 횡방향 변위 대

<그림 8> 차량 스크류축 곡면 해석사례



<그림 6> 차량의 거동특성과 screw axis surface



<그림 7> 차량 선회 운동속 비교

해석방법은 3개의 모델에 대하여 횡력(약 0.5G)을 받는 조건을 가정하여 준 정적해석을 수행하여 지면에 대한 차체의 강체변위를 이용하여 유한 스크류축 해석을 하였다. 스크류축 곡면의 형상을 참고하면 모델 A는 선회시 롤센터가 선회내측 그리고 아래방향으로 크게 변화되며 이것으로 전륜의 무게중심은 낮아지고(Lift Down) 후륜은 높아지는(Lift Up) 경향을 보일 것으로 예측된다. 그리고 모델 B는 전, 후륜의 무게중심이 모두 높아지는 경향을 나타낼 것이고, 모델 C는 후륜 롤센터가 선회 내측 아래방향으로 변화되어 무게중심은 후륜쪽이 낮아지고 전륜쪽이 높아지는 경향을 예측할 수 있다.

또한, 스크류축 평면의 형태는 차량의 톨 운동뿐만 아니라 앞에서 언급한 바와 같이 조타 운동 시에서도 독립적으로 형성되므로 역시 조타특성도 스크류 인자로 예측할 수 있는 최고의 조향특성을 낼 수 있는 조향

곡면이 정의될 수 있다.

기타로 스크류축 곡면에 대한 개념은 그동안 개념적으로만 존재해 있었고 실제 현실에 응용되어 적용된 사례는 거의 찾아보기 힘들었다. 그러나 운동자유도가 '1'인 기구나 힌평형 상태에 있는 다자유도 시스템 등에 있어서 어떤 관심에 대상인 강체의 동적거동은 실제로 내, 외부로부터 입력에 의해 새로운 평형상태에 도달할 때까지 일정한 질서에 의해 운동을 하며 이러한 질서는 스크류 곡면의 형태에 의해 강체의 변위, 속도, 가속도 등이 Unique하게 결정될 수 있으므로 (입력의 크기에 비례하여) 진동이나 로보틱스 그리고 일반적인 동역학 등에서도 많은 적용부분이 있으리라 생각되므로 이에 대한 연구여하에 따라 좋은 결과도 예상될 수 있겠다.

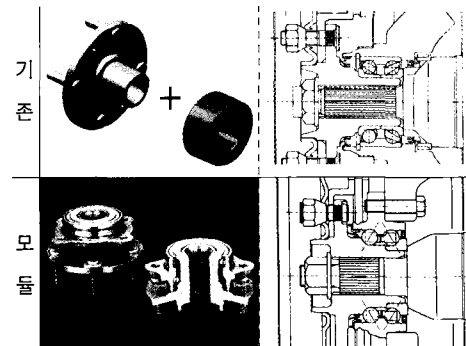
4. 모듈화 동향

마지막으로 최근에 자동차 부품기술 중에 주요 이슈로 거론되고 있는 모듈화 기술에 대해서 잠시 언급하기로 한다. 전세계적으로 특히 유럽쪽부터 강하게 불어닥친 모듈화 바람은 국내에서도 많은 검토와 더불어 전체 차량 시스템의 모듈화 경향으로 유도하고 있는 추세이다. 그러나, 현실정은 모듈화의 근본목적인 원가절감, 양산성 향상과는 다소 일치하지 않고 있다는 것 또한 사실이다. 그 원인중의 대부분은 기존의 생산설비, 원인, 구매시스템, 설계 개발체계를 기본으로 하여 일부 개선, 수정하여 모듈화 체제로 간 것이 때문에 기대했던 시너지 효과를 얻지 못하고 있다는 것은 당연하다 할 수 있겠다.

따라서, 모듈화 효과를 극대화 시키기 위해서는 개발과 공급 측면에서, 모듈화를 전제로 한 설계 및 개발, 그리고 생산기술 및 설비개발 등이 선행되어야 할 것이다.

특히, 설계측면에서는 각 부품들에 대한 모듈화를

행함에 있어서 필요기능 외에 조립 등의 부수기능들을 충족시키기 위한 부품들이 많이 중복되어 있는바, 이러한 중복된 기능들을 제거하고 단순화시켜 여러가지 기능이 통합된 새로운 부품의 개발(즉, 신개념의 e미래형 모듈화 부품u, <그림 9> 참조)이 현실화 되었을 때 모듈화 효과는 극대화 될 수 있을 것이다. 따라서 이것들에 대한 연구개발 여하에 따라 기존의 부품과는 전혀 새로운 개념의 부품들이 나올 수 있으며 이를 위하여서는 이런 측면에서의 연구개발이 많이 수행되어야 할 것이다.



<그림 9> 모듈화 사례 Brake 모듈 (3세대 HUB BEARING)

(이연구 이사 : uklee@hyundai-motor.com)