

# 승용차용 전자제어식 가변댐퍼의 개발 동향



허 승 진  
생산기술연구원 연구개발본부 교수

● 1956년생  
● 차량조향 및 현가시스템 설계, 차체 안전도 설계에 관심이 있다.

## 1. 머리말

충격흡수기(shock absorber) 또는 댐퍼(damper)의 감쇠력은 차량의 주행특성(driving characteristic) 즉, 주행안전도(ride safety)와 승차감(ride comfort) 측면에서 매우 중요한 영향을 미친다. 오늘날 종래의 차체 현가 시스템인 댐퍼와 스프링은 현대적인 바퀴 현가 시스템과 연결되어 상기 두가지 측면의 차량 주행특성을 매우 우수하게 향상시켜 왔기는 하나, 아직도 오직 한가지로 고정된 댐퍼 특성만으로는 설계 상충(design conflict) 요소인 주행안전도와 승차감 특성의 최적화를 그림 1에서 표시한 바와 같이 단지 상호 보완적인 차원에서만 가능하게 한다. 따라서 종래의 댐퍼의 경우, 감쇠력은 오직 댐퍼 피스톤의 압축 및 인장 속도에만 비례하기 때문에 각종 주행도로 상태, 주행 상황, 적재상태등에 대하여 가장 적합한 감쇠력 제공은 부분적으로만 가능하게 된다. 그러나 이러한 설계 상충 문제를 해결하기 위하여 지난 2~3년전 부터 세계 자동차 시장에는 두가지 이상의 감쇠 특성곡선을 갖고 수동적 또는 자동적으로 특성변화가 가능한 감쇠시스템이 장착된 차량이 제공되기 시작하였다.

여러가지 종류의 이러한 감쇠시스템의 해석 및 개발은 이미 수십년전에 유럽에서 시작되었

는데, 1960년도에 최초의 특허가 유럽에서 제출되었다. 그럼에도 불구하고 이러한 가변 댐퍼 시스템(variable damper system)의 실용화 단계는 매우 긴 시간을 요구하였으며, 아직도 부분적으로 지속적인 실용화 연구단계에 있다. 그런데 공식적으로 최초로 실용화된 전자제어식 가변 댐퍼시스템은 일본의 도요타(Toyota), 마쯔다(Mazda), 미쯔비시(Mitsubishi) 자동차 회사에서 제공되기 시작하였다. 초기의 전자제어식 가변 감쇠시스템은 수동적으로 조절 가능한 차속 감응형으로서 약 300 msec의 긴 반응시간을 요구하였다. 점차적으

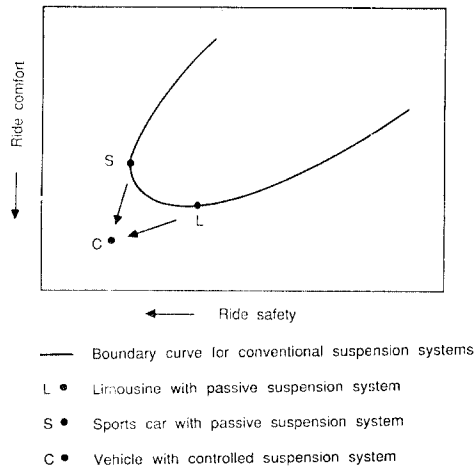


그림 1 주행안전도와 승차감 특성 사이의 상충곡선(conflict diagram)

로 더욱 개발되어 최근에는 아래와 같은 다양한 요구조건을 모두 충족시키는 자동 전자제어식(electronic-controlled) 가변댐퍼시스템이 실용화 단계에 있다(그림 1, C점).

- (1) 도로상태, 적재상태, 운전자의 취향(sport/comfort)등에 알맞는 차량의 안락감 및 주행안전도
- (2) 저온에서의 안락감 향상과 고온에서의 주행안전도 향상
- (3) 커브 주행 또는 급격 핸들 작동시의 롤링 안정성(rolling stability) 향상
- (4) 제동 및 발진시의 피칭운동 방지(anti-dive & anti-squat)

## 2. 가변댐퍼시스템의 개념적 분류

가변댐퍼시스템은 감쇠력 특성 및 제어 주파수 범위에 따라 그림 2와 같이 분류하여 포로 나타낼 수 있다.

종래의 수동적 댐퍼시스템은 오직 한 종류의 감쇠특성이 그림 2에서와 같이 고정되어 있다. 반면에 적응식(adaptive) 가변댐퍼시스템은 여러가지의 감쇠특성을 갖고 있는데, 개방 회로

제어(open-loop control)의 개념에 의하여 각 가변댐퍼는 동시에 현재 주행상황에 적합하도록 정해진 감쇠특성으로 적응 변환된다.

따라서 차량의 전체적인 운동을 파악할 수 있는 간단한 센서들(예; 제동 페달센서, 드로틀 밸브 포지션 센서(throttle-valve position sensor), 조향 핸들각 센서)만이 필요로 한다. 적응식 가변 시스템에 비하여 반능동식(semi-active) 가변댐퍼 시스템은 거의 실시간(real time)의 폐쇄회로 제어(close-loop control) 개념에 의하여 각 가변 댐퍼에 적합한 감쇠 특성이 독립적으로 결정되며, 이러한 작동이 매우 빠르게 반복된다. 제어 주파수 영역은 대체적으로 차체 및 차축의 각 고유진동수 주위를 포함한다. 그런데 그림 2에서도 나타냈듯이, 감쇠력의 가변 특성에 따라 이산적(discrete) 또는 연속적(continuous) 방법으로 또다시 분류될 수 있다. 이산적 가변댐퍼의 경우 3~4개의 특정한 가변 감쇠특성을 보유하고 있는 반면에, 연속적 가변댐퍼의 경우 힘-속도 관계도의 첫째와 셋째 사분면내에서 임의의 감쇠력을 발생시킬 수 있다.

적응식과 반능동식 가변댐퍼는 종래의 수동




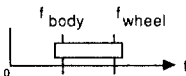



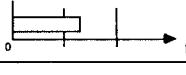


System	Forces	Frequency range	Actuator operation	Energy demand	Sensor demand
passive		—	—	—	—
adaptive		Open loop control	synchronous	low	low
semiactive (discrete)			individual	low	medium
semiactive (continuous)			individual	low	medium
partially active fast load leveling			individual	medium	high
fully active			individual	high	high

그림 2 가변댐퍼시스템의 개념적 분류

식 댐퍼와 기본적으로 동일한 작동형식을 갖게 되므로 제어 시스템 자체가 차량에 에너지를 입력시킬 수 없다. 그러나 제어요소들의 작동을 위한 미미한 에너지는 소요될 것이며, 반응동식은 적응식에 비해 대체로 더 많은 센서들이 추가로 요구된다.

이제까지는 기존의 스프링-댐퍼에 의한 현가 시스템을 기반으로 하였으나, 한 단계 더 나아가서 차량에 임의로 에너지를 가해줄 수 있는

시스템을 생각할 수 있다. 즉, 그림 2에서와 같이 힘-속도 관계도의 둘째 및 넷째 사분면 역시 사용가능한 능동식 현가시스템(active suspension system)으로서 자동차의 정적 및 동적 특성에 모두 영향을 줄 수 있다. 이 시스템은 기존 시스템에 부분적으로 능동식 현가 시스템을 추가 사용하는 경우(예, 공기 및 유공압(hydro-pneumatic) 현가시스템 등)와 완전한 능동적 현가시스템(예, hydraulic force

표 1 가변댐퍼의 개발 단계 및 주요 응용 사례

단계	원 리	응용 사례	특 징
1	피스톤 밸브에서의 바이패스에 의한 감쇠력 조절 방식; 서보 모터 구동, 회전밸브	Mitsubishi Galant Royal, Porche 959 (Bilstein), Opel Omega (Delco), VW Golf (Koni)	가장 단순한 형식, 수동 또는 반자동, 적응식 가변댐퍼 실시 간의 감쇠특성 변화 불가
	제어시간: 약 100~300 ms		
2	(a) 2중 밸브시스템에 의한 2~3단계 감쇠력 조절방식; 2개의 독립된 감쇠 특성 곡선; 서보모터 구동, 회전 밸브	BMW-7 Series (Fichtel & Sachs)	수동 및 자동, 큰 변화폭을 갖고 실시간의 감쇠특성 조절가능, 이산적 반응동식 가변댐퍼
	제어시간: 약 40~100 ms		
3	(b) 추가로 전자기 밸브 (solenoid valve) 병렬 연결에 의한 감쇠력 조절 방식; 2~5단계 감쇠력 특성 곡선; 전자기에 의한 on/off식 유량제어	BMW-M3 (Boge/VDO), Lancia Thema 8.32 (Boge), BMW-635CSi (Boge), Mitsubishi Galant GTi 16V	(a)와 동일 단, 각종 차체 진동을 감쇠시키기에 충분히 빠른 반응속도 제공
	제어시간: 약 20~100 ms		
3	(a) 2단계 (b)와 유사하나, 비례 전자기 밸브(proportional magnetic valve)를 사용하여 연속적인 감쇠력 조절 방식; characteristics field control	개발단계(Boshe & Monroe, Fichtel & Sachs, Boge)	연속적 반응동식 가변댐퍼, 매우 빠른 반응속도, 다양한 감쇠특성 변화 제공, 최적화된 제어 알고리즘의 규명 요구
	제어시간: < 20 ms		
3	(b) 전 하 유 체 (electrorheological fluid)의 점성도 변화특성을 응용하여 유체저항력 제어에 의한 감쇠력 조절방식; characteristics field control	초기 개발 단계	(a)와 동일, 현재까지 가장 빠른 시스템; (문제점) 유체의 운동 및 내구성 특성 규명, 고전압의 절연문제, 에너지 소모량
	제어시간: < 5 ms		

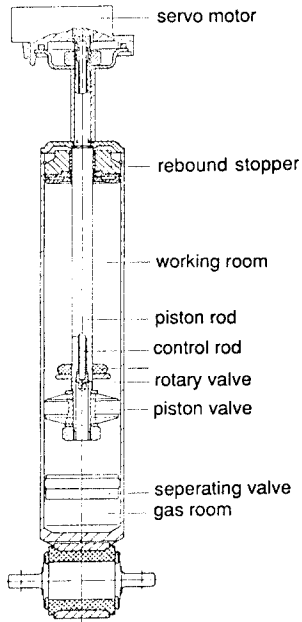


그림 3 Bilstein 단일튜브 가변댐퍼 (Porsche 959)

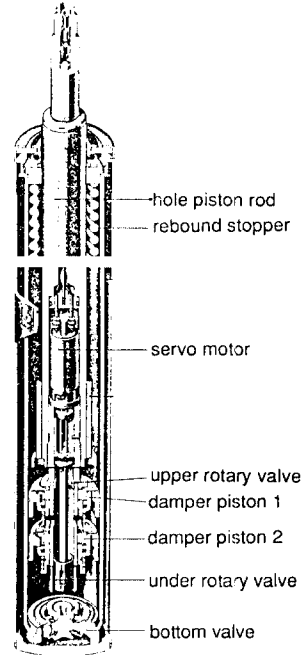


그림 5 F & S 이중 피스톤 시스템 (BMW 7-series)

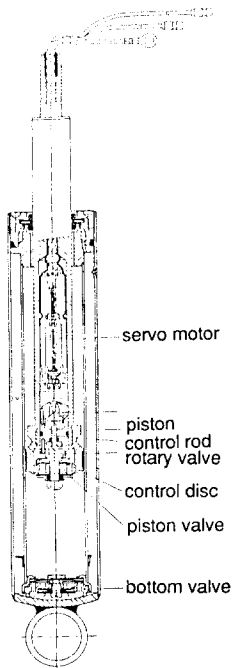


그림 4 Koni twin-tube 가변 가스댐퍼 (VW Golf-GTi16V)

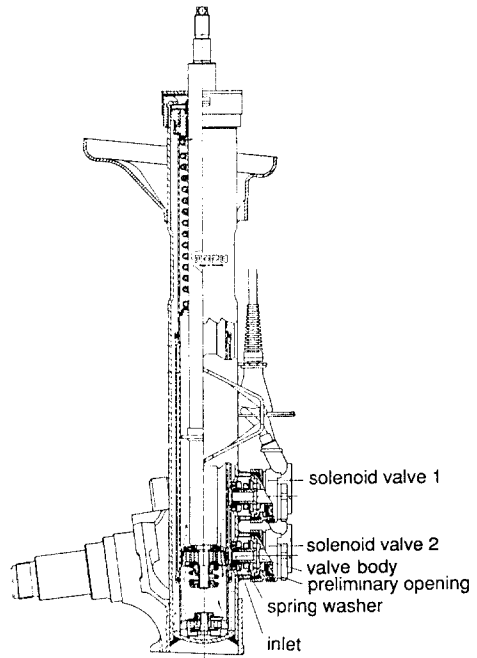


그림 6 2개의 전자기 밸브를 지닌 boge twin 튜브 가변 댐퍼 (BMW-M3)

generator)의 경우로 또 다시 분류할 수 있다. 전자의 경우 후자에 비하여 제어 주파수 영역이 차체 고유진동수 이하 범위에 한하나, 에너지 소모도는 줄일 수 있다.

### 3. 가변댐퍼의 형식 및 개발단계

앞절에서 설명한 가변 댐퍼시스템의 여러가지 개념을 바탕으로 개발된 가변 댐퍼의 원리 및 주요특징을 정리하여 보면 개발 단계별로 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 또한, 실용화된 대표적인 각종 가변댐퍼의 부품구성도 및 작동 개념을 그림 3, 4, 5, 6에서 보여주고 있다.

### 4. 가변댐퍼를 이용한 전자제어식 현가 시스템의 개발 예

본 장에서는 이상에서 알아본 가변댐퍼를 이용하여 실제 차량의 현가 시스템을 전자 제어식으로 개선함으로써 승차감과 조향 안전성을 향상시킨 사례를 간략히 요약하기로 한다.

#### 4.1 자체(Body)의 진동제어

승차감을 향상시키고자 오랫동안 많은 노력을 기울여 왔는데, 무엇보다도 1974년도 Kar-nopp에 의하여 제시된 Sky-hook 댐퍼개념이

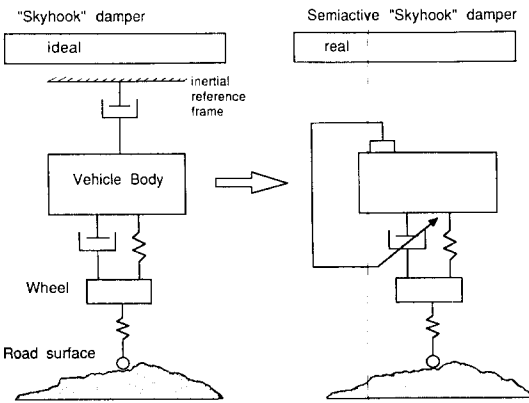


그림 7 Sky-hook 댐퍼의 기본 개념도 및 반응동형 가변댐퍼

대표적으로 응용되고 있다. 본격적인 아이디어는 그림 7에서 나타낸 바와 같이 차체의 고유진동을 저지하기 위하여 추가로 관성댐퍼(inertial damper)를 설치하는 개념이다. 그러나, 실제적으로 구현하기 위하여는 가변댐퍼를 종래의 수동적 댐퍼 대신에 센서와 함께 사용함으로써 가능하다.

#### 4.2 차축 및 바퀴의 진동제어

차축(Axle) 및 바퀴(Wheel) 즉, 스프링밀 질량(unsprung mass)의 진동은 차량의 지면과 동적 접촉 특성을 나쁘게 한다. 결국 차량의 핸들링(handling) 또는 주행안전도에 나쁜 영향을 주게 된다. 이를 방지하기 위해서는 스프링밀 질량의 고유진동수 영역에서 감쇠특성을 강하게 함으로써 동적 타이어 접지력을 최소화시켜야 한다. 이러한 개념을 실현하기 위하여 주파수 감응식 가변댐퍼가 최근에 응용되기 시작하고 있다.

여기에서는 차체 진동제어를 위한 Sky-hook 가변댐퍼 개념에 부가하여 스프링 밀 질량의 진동이 고유진동수 영역에서 주어진 한계치를 초과하는 경우 순간적으로 강한 감쇠력이 작용되도록 댐퍼특성을 가변시킨다.

#### 4.3 센서(Sensor) 및 제어흐름도(Control Flow Diagram)

4.1절과 4.2절에서 설명한 차체와 차축 및 바퀴의 진동을 실제적으로 가변댐퍼를 이용하

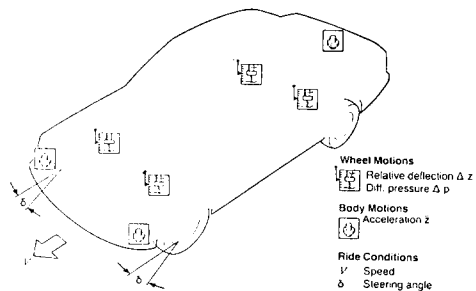


그림 8 전자제어식 현가시스템을 위한 각종 센서들

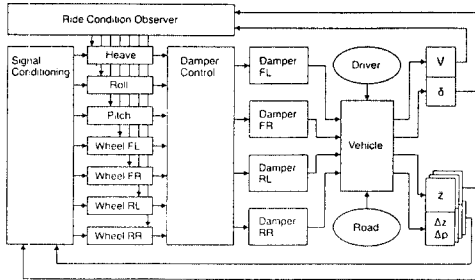


그림 9 전자제어식 현가시스템의 제어흐름도

여 제어하기 위해서는 여러가지 센서가 자동차에 장착되어야 한다. 그림 8에서 나타냈듯이, 차체 진동측정을 위해 3개의 가속도 센서가 사용되며, 스프링 및 질량의 진동측정을 위해서는 4개의 상대 변위 센서 또는 4개의 댐퍼 압력 변화 센서가 각 댐퍼에 장착되어야 한다. 더 나아가서, 전체 차량의 주행상황을(예, 급제동, 급발진, 급조향 등) 확인하기 위하여 속도 및 조향각 측정센서가 아울러 요구된다.

이상의 각종 센서들이 각종 하부 시스템(sub-system)들과 연결되어 현가시스템을 제어하는 블록 다이어그램(block diagram)을 그림 9와 같이 나타낼 수 있다.

#### 4.4 종합적 연구 개발 방법

전자제어식 가변댐퍼의 기본 아이디어 개념이 정립된 후, 구체적으로 개발과정에 들어간다.

각종 구성부품(가변댐퍼, 센서, ECU 등)의 개발은 차량의 전체 시스템 해석과정과 결부되어 그림 10과 같은 종합적 연구 개발과정을 통하여 이루어진다.

우선 구성부품들의 시제품이 제작되기 이전에 그림 11과 같은 수학적 차량 모델을 이용하여 각종 대표적인 주행시험(예: 직진주행, 범퍼통과, 급제동, 급가속, 급조향, 선회중 급제동, 선회중 범퍼통과 등)을 수치적으로 시뮬레이션 할 수 있다.

이와 병행하여 구성부품들에 대한 설계과정

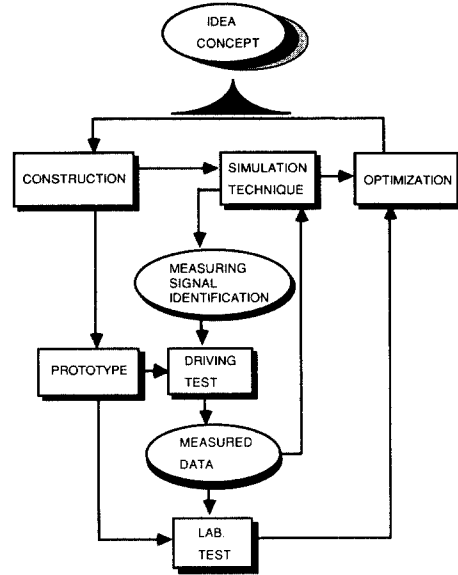


그림 10 연구 개발과정의 상호 흐름도

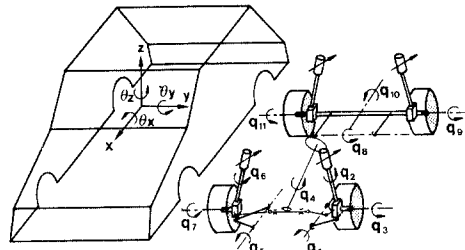


그림 11 가변댐퍼가 장착된 차량의 수학적 모델

을 거쳐 시제품을 제작하게 된다. 부분적으로 시제품이 제작되면 적용될 차량에 장착하여 각종 주행시험을 수행한다. 이때 적용될 차량의 이용이 어려운 경우 동일한 차량동역학적 특성을 갖는 시험용 차량을 아울러 별도 제작하여 사용할 수 있다. 주행시험 결과는 분석되어 제작된 시제품의 성능평가 및 시뮬레이션을 위한 수학적 모델의 타당성을 검토하기 위하여 이용된다.

또한, 실험실에서 구성부품의 내구성 및 동특성 시험을 위한 그림 12와 같은 시험장치의

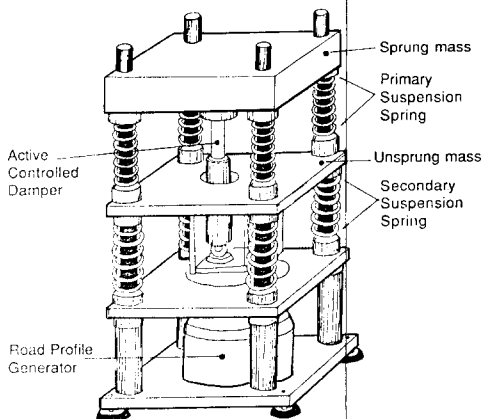


그림 12 가변댐퍼 개발을 위한 시험 장치

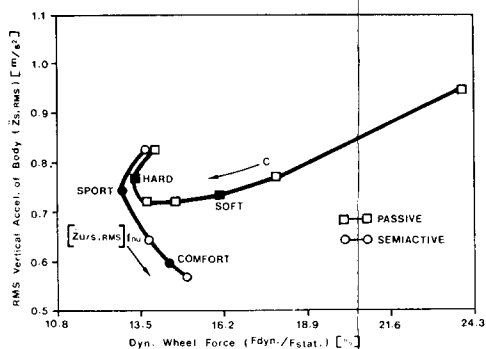


그림 13 주파수 감응식 가변댐퍼를 이용한 전자제어식 현가시스템의 장악차량에 대한 승차감과 주행안전도의 상충 다이어그램

기준 신호로서 이용되어 제작된 시험설비의 시험적 오차를 최소한도로 줄일 수 있다.

이러한 개발과정은 반복되어 최적의 전자제어식 현가시스템이 개발될 수 있을 것이다. 특히, 시뮬레이션 방법을 효과적으로 활용하는 경우 시제품 제작과정의 반복 횟수를 줄임으로써 궁극적으로는 시스템의 최적화에 도달되는 개발시간을 상당히 단축시킬 수 있게 된다.

그림 13에는 개발된 전자제어식 현가시스템의 주행역학적 성능이 차체 가속도(승차감)와 타이어 동적 접지력(주행 안전도)의 상충 다이어그램을 이용하여 대표적으로 예시되고 있다.

기존 댐퍼시스템의 경우에 비교하여 승차감을 현저히 향상시킬 수 있으며, 주행안전도 역시 대체적으로 나아질 수 있음을 알 수 있다.

### 5. 맺음말

전자제어식 가변 댐퍼의 개발을 통하여 차량의 주행시 승차감과 주행안전도의 동시 증대에 획기적 전기가 마련되었다. 그러나, 이러한 주행특성의 증대효과는 단순히 댐퍼 자체에 의존하지 않고 정밀한 센서류, 각종 전자 구성 부품, 전체적인 차량 시스템 등이 최적으로 결합될 때 비로소 기대할 수 있다.

따라서 이러한 가변 댐퍼 시스템이 효과적으로 주어진 차량에 적용될 수 있기 위하여는 차량의 개발 단계에서 이미 해당 자동차 제조 회사와 부품업체들 간의 아주 밀접한 공동 연구 개발이 절실히 요구되고 있다.

세계적으로 이 분야의 연구개발은 주로 대형 고급 차량에 대하여 초기 실용화 단계로서, 부품 업계 및 제조업체들 사이에는 고유 제품의 개발에 경쟁적으로 투자를 하고 있다. 특히, 중형 및 소형차의 경우 짧은 축거, 좁은 운거 그리고 상대적으로 많은 적재량등에 기인되어 차량의 동특성 향상을 위한 감쇠력 특성의 최적화 작업은 다른 설계 변수와 상충되어 기술적으로 한계성을 나타내고 있기 때문에, 능동식 시스템의 응용은 더욱 뚜렷한 효과를 전망하게 한다. 따라서 중형 및 소형차의 수요자에게 경제적으로 큰 부담을 주지 않는 저렴하며 신뢰성 있는 전자제어식 현가시스템의 개발은 매우 시급한 연구 개발 목표가 되고 있다.

국내의 자동차 제조 및 부품업체에서 역시 이 분야에 많은 관심을 갖고 연구개발을 부분적으로 진행중에 있기는 하나, 필자의 의견으로는 좀 더 종합적이고 집중적인 연구 인력 및 연구 개발비의 투자를 하는 경우 국산 차량의 고품질화 및 국제 경쟁력 강화에 매우 결정적인 역할을 할 수 있는 첨단 자동차 부품이 되리라 기대한다.

참 고 문 헌

- (1) Mitzuguchi, M. et al., 1984, Electronic-Controlled Suspension (ECS), SAE-Paper 845051
- (2) Heyer, G., 1988, Trend in der Stosssdaempferentwicklung, Automobil-Industrie Nr. 6
- (3) Decker, H. et al., 1990, A Modular Concept for Suspension Control, SAE-Paper 905124
- (4) Meller, T., 1988, Elektronisch Gesteuerte Daempfung im Kraftfahrzeug, VDI-Ber. 695
- (5) Reimpell, J., 1989, Fahrwerktechnik: Stoss-und Schwingungsdaempfer, Vogel-Verlag
- (6) Shim, J.S., Heo, S.J. and Yoo, Y.M., 1990, Effect of a Semi-Actively Controlled Suspension Unit on the Vehicle Dynamic Characteristics, SAE-Paper 905040

