

승용차용 반능동형 가변댐퍼시스템의 개발

허 승진, 심 정수**, 이 광기**, 김 홍석***, 황 성호***

(Development of the semi-active controlled variable damper system for passenger vehicles)

(S.J.Heo, J.S.Shim, K.K.Lee, H.S.Kim, S.H.Hwang)

1.서론

충격 완충기 (shock absorber)의 감쇠력은 차량의 주행 특성 즉, 주행 안정성 (driving safety)과 승차감 (ride comfort) 측면에서 매우 중요한 영향을 미친다. 오늘날 종래의 차체 현가 시스템인 댐퍼와 스프링은 기술적으로 매우 진보된 바퀴 현가기구 (wheel suspension)와 함께 상기 두가지 측면의 차량 주행 특성을 매우 우수하게 향상시켜 왔기는 하나, 오직 한가지로 고정된 댐퍼 특성만으로 설계 상충 (design conflict) 요소로 나타나는 주행 안정성과 승차감의 최적화를 단지, 상호 보완적인 차원에서만 가능하게 한다.

이에 반하여, 지난 수년 전부터 차량의 각종 주행 상황, 주행도로의 상태, 차량의 상태 등을 고려하여 승차감 및 주행 안정성 측면에서 최적의 성능을 제공하고자 하는 전자제어식 가변 댐퍼 시스템 (electronic controlled variable damper system)의 실용화가 다각적으로 이루어지고 있다. [1][2]

초기의 전자제어식 가변 댐퍼 시스템은 수동 또는 반자동의 적응제어식 가변댐퍼

(adjustable variable damper)로서 약 100-300 msec의 비교적 느린 응답속도를 갖고 있으며, 주로 커브 주행, 제동 및 가속 상황, 고속 주행 등의 상황에서 차체 자세 제어에 대한 역할을 수행하였다. 최근에 들어서는 반능동형 가변 댐퍼 시스템 (semi-active variable damper system)의 개발 및 부분적인 실용화가 적극적으로 추진되고 있다. 이는 종래의 승차감과 주행 안정성 측면의 성능을 크게 향상시킬 수 있을 뿐 아니라, 성능면에서 우수하나 가격과 소요 에너지 측면에서 많은 문제점을 갖고 있는 전기 유압식 능동형 현가 시스템 (electro-hydraulic active suspension system)의 대체 기술로서 크게 부각되고 있다.

본 연구에서는 기존에 널리 사용되고 있는 스카이훅 제어 알고리즘 (skyhook control algorithm)[3]을 바탕으로 확장 개발된 모드 스카이훅 제어 (mode skyhook control) 개념 및 주파수 감응식 제어 (frequency dependent control) 개념[4][5]을 실용화하기 위하여 응답속도가 20msec 이하의 비교적 빠른 응답 속도를 갖는 전자기식 작동기 (electro-magnetic actuator)에 의해 가변되는 4단 반능동형 가변 댐퍼 시스템을 개발한 후, 다음과 같은 성능의 향상을 시험결과를 통하여 보이고자 한다.

* 국민대 자동차공학과

** 만도기계 중앙연구소

*** 생산기술 연구원

- 저속에서의 승차감 향상과 고속에서의 주행 안정성 향상
- 커브 주행 또는 급격한 핸들 작동시의 불안정성 (rolling stability) 향상
- 제동 및 급발진시의 차체 피칭 운동 방지 (anti-dive, anti-squat)

2. 반능동형 가변 댐퍼 제어 알고리즘

본 연구에서 개발하고자 하는 차량의 제어로직은 첫째, 최근의 반능동형 현가장치에서 일반화되고 있으며 차체 공진을 제어하기에 효과적인 스카이훅 제어로직을 승차감 기본 제어 알고리즘으로 사용한다. 여기에 부가적으로 차량의 주행 안정성의 확보를 위해 차축 공진 영역을 감지하여 바퀴 접지력을 향상시키는 차축 공진 제어로직을 추가로 적용하여 4바퀴 독립제어를 수행한다. 둘째, 차량 전체의 자세 제어 측면에서는 숙련된 운전자들의 실제 경험을 토대로 하여 실제로 발생하는 급박한 여러 가지 주행상황 (운전자의 조향핸들조작, 급가속, 급제동 등)에서도 차량에 최적의 주행조건을 줄 수 있도록 인간의 언어적인 표현을 수식화하여 제어 법칙을 구성할 수 있는 퍼지 제어 알고리즘을 적용한 제어로직을 개발한다. 이상의 제어로직을 정리해보면 표 1과 같다.

Table 1. Control logic of vehicle motions

제어 항목	제어 목적	특징
Ride Comfort	승차감 향상을 위한 차체 공진 영역 제어	차축 공진 영역 크기에 따라 가변되는 수정된 Mode
Anti-wheel Resonance	조종 안정성 향상을 위한 차축 공진 영역 제어	Skyhook 제어로서 차체와 차축의 공진을 모두 제어
Velocity Dependent	저속, 중속, 고속에 따른 댐퍼 제어	
Anti-dive	중속, 고속에서 브레이크 작동에 의한 dive 제어	퍼지 제어에 의한 숙련된 운전자의 운전 방법을 인간의 언어적인 표현을 통하여 구현
Anti-squat	저속에서 급박한 가속 페달 조작에 의한 squat 제어	
Anti-roll	중속, 고속에서 운전자의 조향핸들 조작에 대한 선회 안정성 확보	

승차감 제어 알고리즘 :

본 연구에서 제시하는 모드 스카이훅 감쇠 제어는 기존의 스카이훅 감쇠 제어이론의 차체 운동과 차륜 운동시의 hard 및 soft한 감쇠 특성을 다단 댐퍼의 특성중 선택적으로 조합하여 사용함으로써 기존의 수동형 댐퍼의 튜닝에서 가지는 승차감과 주행 안정성의 상충관계의 한계를 극복하고자 하는 것이다. 이 경우에 hard 및 soft한 감쇠 특성중 soft 감쇠 정도를 soft하게 할 수록 승차감 측면에서의 향상을 보이나, 반면에 차축 공진 영역에서의 차륜 운동의 크기가 증가됨에 따른 바퀴의 동적 접지력 감소에 의한 차량의 주행안정성이 악화되는 경향을 갖는다.

따라서 본 연구에서는 4단 댐퍼를 채용함으로써 표 2와 같은 hard 및 soft한 감쇠 특성의 조합을 사용하여 적은 승차감 손실에서 큰 주행 안정성을 확보하고자 한다. 여기에서 주행상황의 판단을 위한 별도의 판정 기준이 필요하며 두가지 측면에서 생각해 볼 수 있다. 먼저 차축의 공진 현상에 의한 접지력 저하 경향의 판단과 운전자에 의한 조향, 제동 및 가속 상황의 판단이다. 이제까지 설명한 모드 스카이훅 감쇠 제어로직은 1/4차에서 적용되는 것으로 본 연구에서는 각 바퀴에 독립적으로 적용한다.

Table 2. Control map of mode skyhook control logic

주행모드	차체 운동	차륜 운동
0	Soft	Very Soft
1	Medium	Very Soft
2	Medium	Soft
3	Hard	Soft
4	Hard	Medium
5	Hard	Hard

차축 공진 제어 알고리즘 :

1/4 차량에 대하여 모드 스카이훅 감쇠 제어 로직을 응용하는 경우 승차감 향상 뿐 아니라 주행 안정성 확보를 위해서는 차축의 공진 상태를 판별하여야 한다. 차축의 공진 상태에서 댐퍼의 감쇠계수를 hard한 특성으로 제어하여 차축 공진의 크기를 감소시키고자 하는 제어 알고리즘을 적용한다.

상대 변위 센서에서 얻어진 신호를 이용하여 차축 공진을 대표해주는 값을 정의하고, 이 값을 근거로 감쇠계수를 선택적으로 제어한다. 이 대표값을 본 연구에서 '차축 공진 계수 (wheel resonance quantifier)'로 정의한다. 이 차축 공진 계수는 상대 변위 센서에서의 신호를 미분기를 통과시킨 상대속도를 이용하여 계산한다. 계산된 상대속도 신호를 고주파 통과 필터 (high pass filter)를 통과시켜 차축 공진역에 해당하는 신호만을 얻는다. 또한, 이 신호를 절대값화하여 저주파 통과 필터 (low pass filter)를 통과시켜 차축 공진 계수를 구한다. 이 계수는 각 차축에서 각각 구해지며, 모드 스카이훅 감쇠 제어로직에서 주행 안정성을 고려한 적절한 모드를 결정해 주어 승차감 로직의 적용을 가능하게 해준다.

차체 자세 제어 알고리즘 :

숙련된 운전자들의 실제경험을 토대로 실제로 발생하는 급박한 여러 가지 주행상황 (운전자의 조향핸들 조작, 급가속, 급제동 등)에서도 최적의 주행조건을 유지하기 위하여 인간의 언어적인 표현 (제어법칙)을 수학적으로 표현하는 기법인 퍼지 제어 알고리즘을 사용한다. 즉, 기본적인 속도감응 제어로직 (저속, 중속 및 고속)에 anti-dive, anti-squat, anti-roll과 같은 여러 가지 제어로직을 퍼지 로직으로 결합하여 앞에서 서술한 4바퀴 독립 제어로직들

의 결과와 비교하여 주행 조건에 따른 안정성을 확보함으로써 항상 최적의 승차감 및 주행 안정성을 유지하도록 한다. 이를 위해서 그림1에서와 같이 차체에서는 조향각속도, 제동상황, 가속상황, 주행속도의 신호가 측정되며, 측정된 신호는 퍼지 제어법칙에 의한 계산 과정을 통하여 최적의 댐퍼 특성을 제시하는 주행모우드의 판별에 사용된다.

차체의 자세제어 블럭을 통하여 결정된 주행모우드는 1/4 차량의 차축 공진 제어 블럭에서 계산된 차축 공진 계수 관련 주행모우드와 비교되어 각 1/4 차량의 스카이훅 댐퍼 제어를 위한 최종적인 주행모우드가 선정된다.

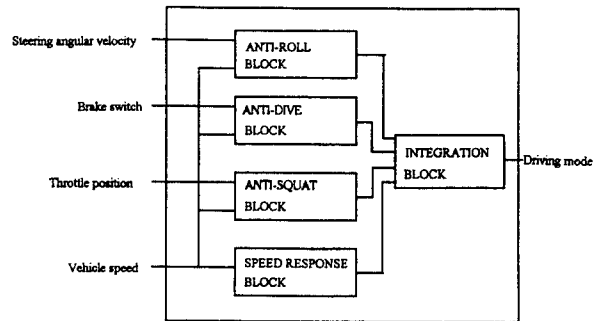


Fig.1. Body motion control logic

3. 실차 시험 환경 구축

앞서 서술된 각종 제어 알고리즘은 DSP(digital signal processor)를 이용한 디지털 제어기로 구현된 후, 전자기식 작동기, 12개의 센서, 4단 가변 댐퍼와 함께 그림2와 같이 실차에 장착하여 반응동형 가변 댐퍼 시스템을 구축하였다.

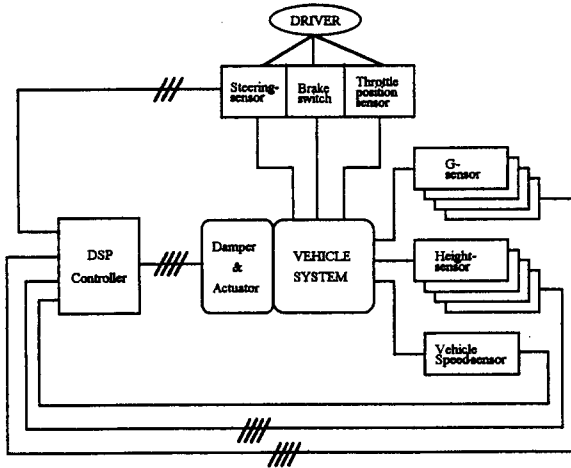
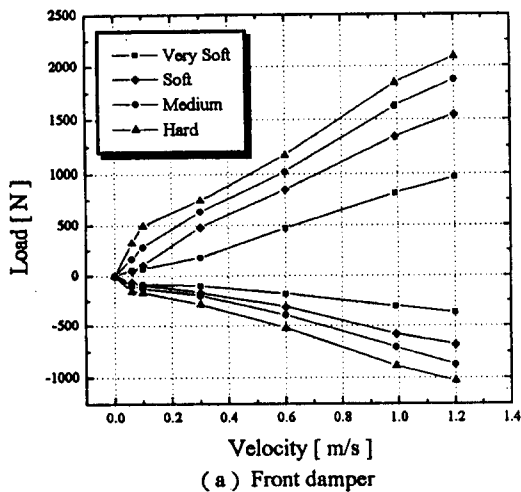


Fig.2. Configuration of real vehicle environment

4단 가변 댐퍼는 그림3에서와 같이 'very soft', 'soft', 'medium', 'hard'의 4단계 감쇠 특성을 나타내며, 전자기식 작동기와 결합된 상태에서의 동적 응답 특성으로서는 그림4에서와 같이 대략 20ms의 응답시간을 보이고 있다. 센서로서는 각 1/4차량에 차체 가속도 센서 및 차체와 바퀴사이의 상대 변위 센서가 각각 설치되며, 차체에는 차속 센서, 조향각속도 센서, 제동 페달 센서, 가속 페달 센서가 부착되어 진다.



(a) Front damper

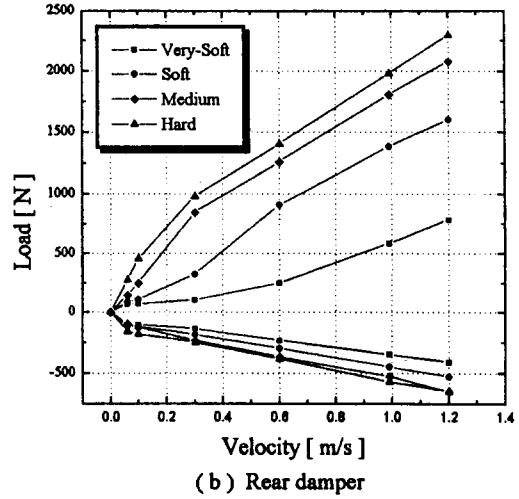


Fig.3. Damping force characteristic curves

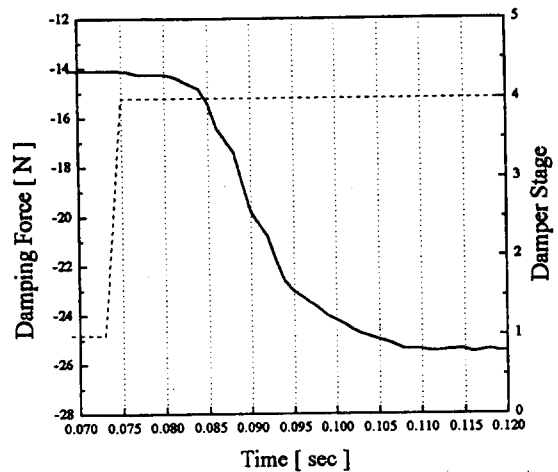


Fig.4. Response characteristics of assembled damper system

4. 실차시험 및 성능평가

개발된 반응동형 가변댐퍼 시스템의 승차감 및 주행안정성을 평가하기 위하여 다음과 같은 주요 실차 시험을 수행하였다.

정현파 sweeping 시험 :

주파수 영역에서의 제어특성을 알아보기 위해 주파수에 따라 크기가 역비례적으로 변하고 주파수가 선형적으로 변하는 연속 정현파 합수 입력을 생성시켜 시험을 수행하였다.

제어특성을 알기 위해 노면 입력속도에 대한 차체 (뎀퍼 장착 상단)의 상하 가속도를 주파수 전달함수 형태로 나타내었다. 그림 5는 전륜에 대한 연속 정현파 입력 가진 시험 결과이다. very soft와 hard 상태로 고정된 수동식 뎀퍼에 대한 결과와 자동 모드 (auto mode) 뎀퍼의 시험 결과를 대비시켜 보여주고 있다. 차체 공진 주파수 (1-2Hz) 근처에서 스카이크 제어로직에 의한 차체 운동의 제어효과가 자동 모드에서 나타나고 있다. 또한 중주파수 (3-10Hz) 영역에서 노면 신호의 차단을 위해 차체 상하 속도를 감지하여 soft 모드를 유지하는 제어효과를 확인 할 수 있다. 마지막으로 차륜의 공진영역 (10-15Hz)에서는 차륜 공진 제어의 효과에 의해 hard한 경향이 나타남을 알 수 있다. 이와같이 주파수 감응식 반응동형 뎀퍼 제어 알고리즘의 기본 성능이 확인될 수 있다.

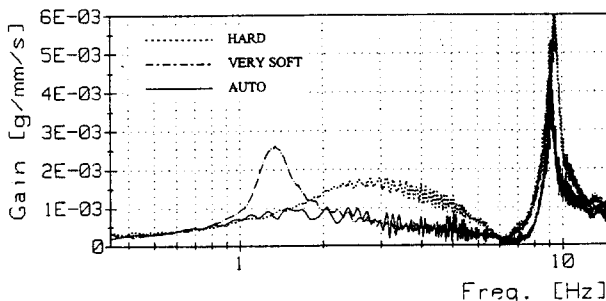


Fig.5. Frequency response of body vertical acceleration

범프 통과 시험 :

시간영역 제어 특성을 알아보기 위하여 cosine 형태의 범프 신호를 시뮬레이터 제어기에서 생성시켜 soft, hard, 그리고 자동 모드에서 각각 시험하였다. 그림 6은 차체 수직 가속도 신호를 3가지 모드에 대해 대비시켜 보여주고 있다.

범프 통과 초기에는 부분적으로 soft 뎀퍼 특성을 유지하다가 범프 통과 후에는 전체적으로 hard 뎀퍼 특성과 유사한 감쇠 특성을 보여줌으로써 차체의 신속한 피칭 운동에 대한 제어 효과를 확인할 수 있다.

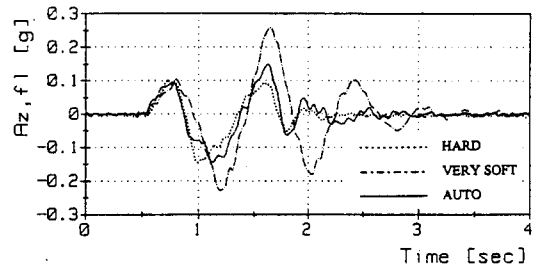


Fig.6. Results of bump test

임펄스 조향 입력 시험 :

그림 7에서는 일정한 주행속도 80 km/h의 직진 주행중에 0.3-0.5초 사이의 임펄스 조향 작동의 주행시험을 수행한 후 측정된 차체의 횡가속도 (lateral acceleration)에 대한 롤각 (roll angle)의 주파수 응답특성을 보여주고 있다. 그림으로부터 반응동형 가변 뎀퍼 시스템의 기대한 anti-roll 성능을 확인할 수 있다.

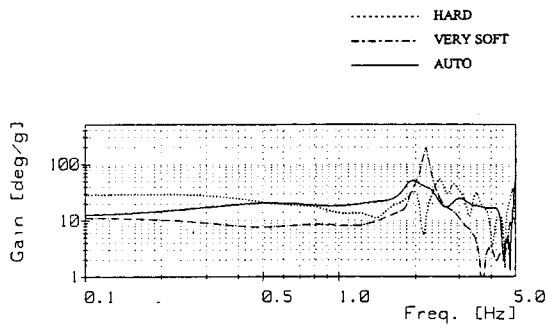


Fig.7. Frequency response function of roll angle w.r.t lateral acceleration

급제동 시험 :

본 시험은 급제동시의 차체자세 제어효과를 분석하기 위한 것이다. 제어로직상으로는 제동 페달 스위치를 통해 제동상황을 판단하고 감쇠력 특성을 hard하게 변화시키는 제어 거동을 한다. 그림과 같이 차체 피치 운동의 제진 효과가 뚜렷이 나타나고 있음을 볼 수 있다.

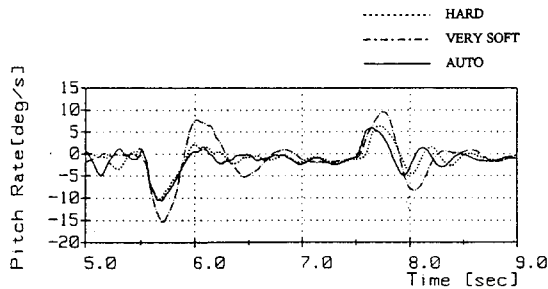


Fig.8. Results of brake dive test

5. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결과를 정리하여 보면 다음과 같다.

- 전기식 로타리 액츄에이터에 의해 밸브 오리피스 구멍의 조절에 의한 very soft, soft, medium, hard 댐핑 특성을 갖는 4단 가변 댐퍼를 제작하였으며, 20msec 이하의 응답 속도를 나타내었다.

- 스카이훅 (skyhook) 제어 이론을 기반으로 스프링하 질량 (unsprung mass) 공진 제어 알고리즘과 퍼지 이론을 통한 차체 자세 제어 알고리즘을 결합시킨 이른바, 'mode skyhook control algorithm'을 개발하였으며, DSP를 이용한 ECU로 구현하였다.

- 제작된 4단 가변 댐퍼, 센서 및 액츄에이터, DSP 이용 ECU가 종합적으로 장착된 시험 대상 차량에 대한 주행 시험의 수행 결과, 개발 시스템의 최종 성능 목표로 설정된 직진 주행 및 범프 통과시의 승차감 향상, 각종 주행상황에 대한 차체의 자세 제어, 코너링시의 주행 안정성 향상 등에 관한 기대성능을 얻을 수 있었다.

6. 참고 문헌

- [1] Heyer, G : Trend in der Stosssdaemper Entwicklung, Automobil-Industrie, Nr. 6, 1988
- [2] Hennecke, D. et al. : Electronic Damper Control - a Fully Automatic Adaptive System for Damping Force Adjustment to the BMW 635 CSi, ATZ 89, 1987
- [3] Karnopp, D. et al. : Vibration Control Using Semi-Active Force Generators, Trans. ASME, No.96, 1974
- [4] Lizell, M. : Semi-Active Damping , Int. Conf. 'Advance Suspensions', IMechE, C429/88, 1988
- [5] Voy, C. : Implementation of Frequency-Modulated Damping of Chassis Oscillations, Automobile-Industrie, Nr. 6, 1988