

<논 문>

승용차용 반능동형 가변댐퍼 시스템의 개발

Development of the Semi-Active Controlled Variable Damper System for Passenger Vehicles

허 승 진* · 심 정 수** · 황 성 호***

Seung-Jin Heo, Jung-Soo Shim and Sung-Ho Hwang

(1998년 3월 27일 접수 ; 1998년 6월 29일 심사완료)

Key Words : Semi-Active Suspension(반능동 현가 시스템), Electronic Controlled Variable Damper (전자제어식 가변댐퍼), Mode Skyhook Control(모드 스카이훅 제어), Frequency Dependent Control(주파수 감응식 제어)

ABSTRACT

A control algorithm for multi-stage dampers is developed based on the mode skyhook control concept, and implemented on the full vehicle system environment. The test vehicle system is equipped with the real time controller, four-stage variable dampers and sensors. The real time controller is developed using a digital signal processor(DSP), digital I/O, A/D and D/A converters. The dampers are driven by the electromagnetic actuators of less than 20 msec response time. The sensors include accelerometers, relative displacement transducers, and steering wheel rate sensors, etc. Through a series of tests in laboratory and proving ground, the performance of the semi-active suspension system is evaluated and it is shown that the vehicle dynamic characteristics is improved with the developed damping system. Furthermore, the parameter tuning methods to enhance vehicle dynamic performance are proposed.

1. 서 론

차량의 주요 현가 요소인 댐퍼와 스프링은 오늘날 기술적으로 매우 진보된 바퀴 현가 기구(wheel suspension)에 장착되어 차량의 주행특성 즉, 승차감(ride comfort)과 주행 안전성(driving safety) 측면에서 성능 향상에 크게 기여하여 왔다. 그러나, 기존의 수동 현가 시스템은 주행특성에

매우 중요한 영향을 미치는 댐퍼의 감쇠력이 오직 한가지로 고정되어 있기 때문에 설계 상충(design conflict)요소로 나타나는 승차감과 주행 안전성의 최적화를 단지 상호 보완적인 차원에서만 가능하게 한다. 이에 반하여, 지난 수년 전부터 차량의 각종 주행 상황, 주행 도로의 상태, 차량의 상태 등을 고려하여 승차감 및 주행 안전성 측면에서 최적의 성능을 제공하고자 하는 전자제어식 가변 댐퍼 시스템(electronic controlled variable damper system)의 실용화가 다각적으로 이루어지고 있다^(1~2).

초기의 전자제어식 가변댐퍼 시스템은 수동 또는 반자동의 적응제어식 댐퍼(adjustable variable

* 정회원, 국민대학교 기계·자동차공학부

** 만도기계 중앙연구소

*** 정회원, 한국생산기술연구원

damper)로서 약 100~300 msec의 비교적 느린 응답 속도를 갖고 있으며, 주로 커브 주행, 제동과 가속 및 고속 주행 등의 상황에서 차체 자세 제어에 대한 역할을 수행하였다. 최근 들어서는 반능동형 가변댐퍼 시스템 (semi-active variable damper system)의 개발 및 부분적인 실용화가 적극적으로 추진되고 있다. 이는 종래의 승차감과 주행 안전성 측면의 성능을 크게 향상시킬 수 있을 뿐 아니라, 성능 면에서 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 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 응답 속도가 20msec 이하의 비교적 빠른 응답속도를 갖는 전자기식 작동기 (electromagnetic actuator)에 의해 가변 되는 4단 반능동형 가변댐퍼 시스템을 개발한 후⁽⁶⁾, 다음과 같은 성능 향상을 목표로 시험을 수행하고자 한다.

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

2. 반능동형 가변댐퍼 제어 알고리즘

본 연구에서 개발하고자 하는 차량의 제어 로직은 첫째, 최근의 반능동형 현가 시스템에서 일반화되고 있으며 차체 공진을 제어하기에 효과적인 스카이훅 제어로직을 승차감 기본 제어 알고리즘으로 사용한다. 여기에 부가적으로 차량의 주행 안전성을 위해 차축 공진 영역을 감지하여 바퀴접지력을 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 주행 상황 (운전자의 조향핸들 조작, 급가속, 급제동 등)에서도 차량에 최적의 주행 조건을 줄 수 있도록 인간의 언어적인 표현을 수식화하여 제어 법칙을 구성할 수 있는 퍼지제어 알고리즘을 개발한다. 이상의 제어로직을 정리해 보면 Table 1과 같다.

2.1 승차감 제어 알고리즘

본 연구에서 제시하는 모드 스카이훅 감쇠제어는 기존의 스카이훅 감쇠 제어 이론의 차체 운동과 차륜 운동시의 강하고(hard), 약한(soft) 감쇠 특성을 다단 댐퍼의 특성중 선택적으로 조합하여 사용함으로써 기존의 수동형 댐퍼의 튜닝에서 가지는 승차감과 주행 안전성의 상충관계의 한계를 극복하고자 하는 것이다. 이 경우에 강하고(hard), 약한(soft) 감쇠 특성중 약한(soft) 감쇠 정도를 더욱 약하게(soft) 할수록 승차감 측면에서의 향상을 보이나, 반면에 차축 공진 영역에서의 차륜 운동의 크기가 증가됨에 따른 바퀴의 동적 접지력 감소에 의한 차량의 주행 안전성이 악화되는 경향을 갖는다.

따라서 본 연구에서는 4단 댐퍼를 채용함으로써 Table 2와 같은 강하고(hard), 약한(soft) 감쇠

Table 1 Control logic of vehicle motions

제어항목	제어 목적	특징
Ride comfort	승차감 향상을 위한 차체 공진 영역 제어	차축 공진 영역 크기에 따라 가변 되는 수정된 모드 스카이훅 제어로서 차체와 차축의 공진을 모두 제어 퍼지 제어에 의한 숙련된 운전자의 운전 방법을 인간의 언어적인 표현을 통하여 구현
Anti-wheel resonance	조종 안정성 향상을 위한 차축 공진 영역 제어	
Velocity dependent	저속, 중속, 고속에 따른 댐퍼 제어	
Anti-dive	중속, 고속에서 브레이크 작동에 의한 다이브방지 제어 (anti-dive)	
Anti-squat	저속에서 급박한 가속 페달조작에 의한 스퀷방지제어 (anti-squat)	
Anti-roll	중속, 고속에서 운전자의 조향핸들조작에 대한 선회 안정성 확보	

Table 2 Control map of mode skyhook control logic

Damping control mode	Skyhook damping state	Soft	Hard
		$V_s * V_r < 0$	$V_s * V_r > 0$
0		Very soft	Soft
1		Very soft	Medium
2		Soft	Medium
3		Soft	Hard
4		Medium	Hard
5		Hard	Hard

*) V_s : Absolute velocity of sprung mass
 V_r : Relative velocity between sprung and unsprung mass

특성의 조합을 사용하여 적은 승차감 손실에서 큰 주행 안전성을 확보하고자 한다. 여기에서 주행 상황의 판단을 위한 별도의 판정기준이 필요하며 두 가지 측면에서 생각해 볼 수 있다. 먼저 차축의 공진현상에 의한 접지력 저하 경향의 판단과 운전자에 의한 조향, 제동 및 가속 상황의 판단이다. 이제 까지 설명한 모드 스카이크록 감쇠 제어 로직은 1/4 차량에서 적용되는 것으로 본 연구에서는 각 바퀴에 독립적으로 적용한다.

2.2 차축 공진 제어 알고리즘

1/4 차량에 대하여 모드 스카이크록 감쇠 제어로직을 응용하는 경우 승차감 향상 뿐 아니라 주행 안전성 확보를 위해서는 차축의 공진 상태를 판별하여야 한다. 차축의 공진 상태에서 댐퍼의 감쇠 계수를 강한(hard) 특성으로 제어하여 차축 공진의 크기를 감소시키고자 하는 제어 알고리즘을 적용한다.

상대 변위 센서에서 얻어진 신호를 이용하여 차축공진을 대표해 주는 값을 정의하고, 이 값을 근거로 감쇠 계수를 선택적으로 제어한다.

이 대표값을 본 연구에서는 '차축 공진 계수(wheel resonance quantifier)'로 정의한다.

차축공진 계수는 상대 변위 센서에서의 신호를 미분기를 통과시킨 상대 속도를 이용하여 계산한다. 계산된 상대 속도 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 각각의 차축에서 구해지며, 모드 스카이크록 감쇠 제어로직에서 주행 안전성을 고려한 적절한 모드를 결정해 주어 승차감 로직의 적용을 가능하게 해준다.

2.3 차체 자세 제어 알고리즘

속련된 운전자들의 실제 경험을 토대로 실제로 발생하는 급박한 여러 가지 주행 상황 (운전자의 조향핸들 조작, 급가속, 급제동 등)에서도 최적의 주행 조건을 유지하기 위하여 인간의 언어적인 표현을 수학적으로 표현하는 기법인 퍼지제어 알고리즘을 사용한다.

즉, 기본적인 속도 감응 제어로직에 다이브 방지(anti-dive), 스쿼트방지(anti-squat), 롤방지(anti-roll)와 같은 여러 가지 제어로직을 퍼지 로직으로 결합하여 앞에서 서술한 4바퀴 독립 제어로직들의 결과와 비교하여 주행 조건에 따른 주행 안정성을 확보함으로써 항상 최적의 승차감 및 핸들링(handling) 특성을 동시에 유지하도록 한다. 이를 위해서 Fig. 1에서와 같이 차체에서는 조향각속도, 제동상황, 주행속도의 신호가 측정되며, 측정된 신호는 퍼지 제어 법칙에 의한 계산 과정을 통하여 최적의 댐퍼 특성을 제시하는 주행 모드의 판별에 사용된다. 퍼지 입력 함수는 Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이 차량의 롤제어를 위한 롤방지(anti-roll) 판정값(arl), 차속(velocity), 트로틀 위치 센서(tps), 브레이크 신호(brake)등 4개이다. 각각의 소속함수는 롤방지, 트로틀위치센서, 브레이크 신호에 대하여는 각각 1개의 함수로 구현하였으며, 차속의 경우에는 저속(vl), 중속(vm), 고속(vh)과 스쿼트방지(vas) 속도 및 급제동 다이브방지(vad)속도등의 총 5가지함수로 구성하였다. 퍼지 출력 함수는 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 가변댐퍼의 상태를 결정해 주는 약함(dsl), 보통(dsm), 강함(dsh)의 3가지로 소속함수를 정의하고 있다.

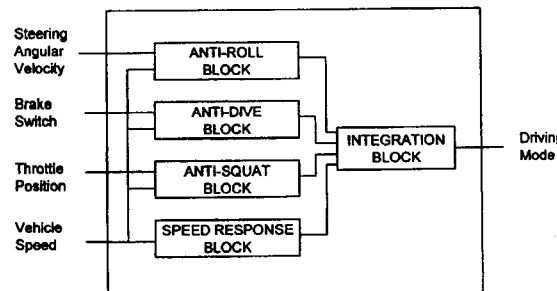


Fig. 1 Body motion control logic

차체의 자세 제어 블록을 통하여 결정된 주행 모드는 1/4 차량의 차속 공진 제어 블록에서 계산된 차속 공진 계수 관련 주행 모드와 비교되어 각 1/4 차량의 스카이록 댐퍼 제어를 위한 최종적인 주행 모드가 선정된다.

3. 실차 시험 환경 구축

앞에서 서술된 각종 제어 알고리즘은 DSP (digital signal processor)를 이용한 제어기로 구현한 후, 전자기식 작동기(electro-magnetic actuator), 12개의 센서, 4단 가변 댐퍼와 함께 Fig. 3과 같이

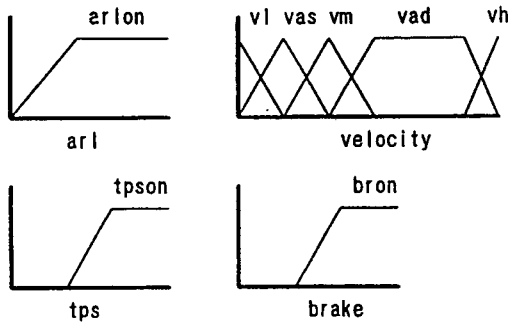


Fig. 2(a) Membership function of fuzzy input variables

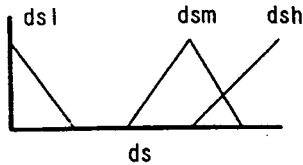


Fig. 2(b) Membership function of fuzzy output variables

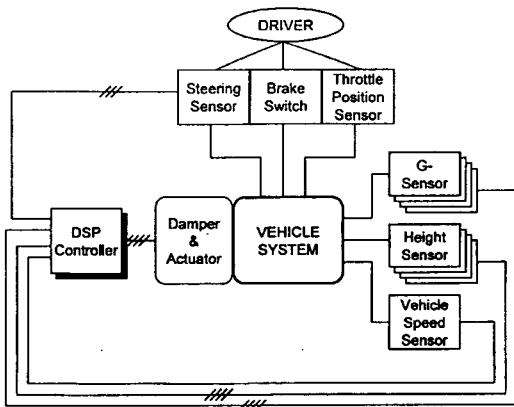


Fig. 3 Configuration of real vehicle environment

실차에 장착하여 반능동형 가변댐퍼 시스템을 구축하였다.

제작된 4단 가변 댐퍼의 개념도와 감쇠모드별 로타리 밸브(rotary valve)의 오리피스 위치 변화는 Fig. 4와 같다. 각 오리피스 구성 크기에 따른 매우 약함(very soft), 약함(soft), 보통(medium), 강함(hard)의 4단계 감쇠 특성 곡선은 Fig. 5에 나타내고 있다. 전자기식 작동기와 결합된 상태에서의 동적 응답 특성으로서는 Fig. 6에서와 같이 대략 20 msec의 응답 시간을 보이고 있다. 센서로서는 각 1/4 차량에 차체 가속도 센서 및 차체와 바퀴사이의 상대변위 센서가 설치되며, 차체에는 차속 센서, 조향 각속도 센서, 제동 페달 센서, 가속 페달 센서가 부착되어 진다.

4. 실차 시험 및 성능 평가

개발된 반능동형 가변댐퍼 시스템의 승차감 및 주행 안전성을 평가하기 위하여 다음과 같은 주요 실차 시험을 수행하였다.

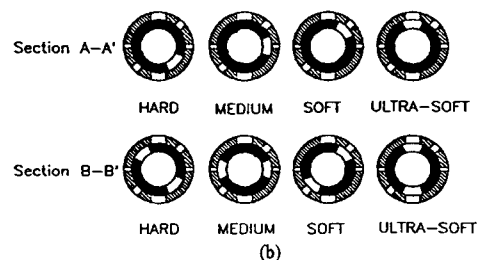
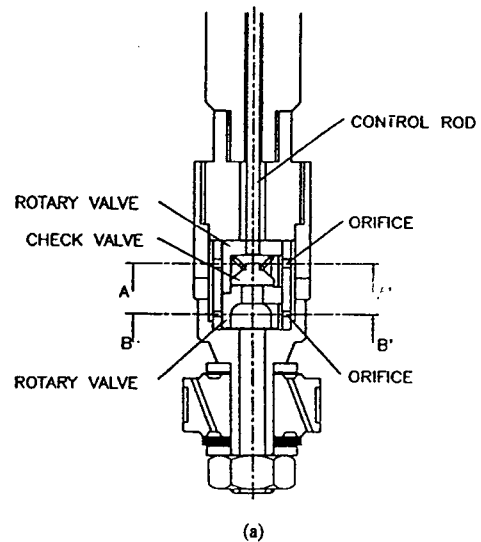
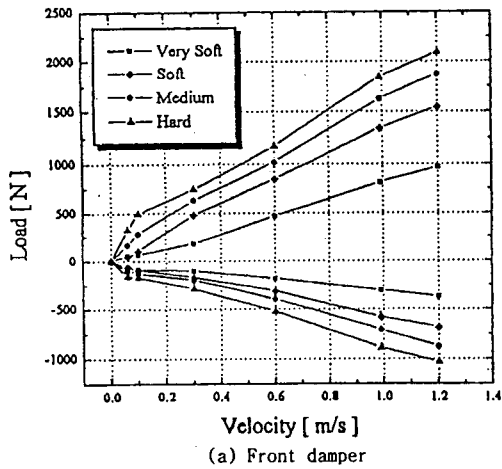
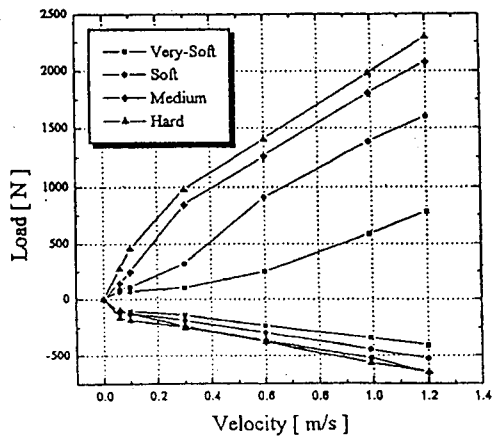


Fig. 4 Schematic diagram of the 4-mode variable damper



(a) Front damper



(b) Rear damper

Fig. 5 Damping force characteristic curve

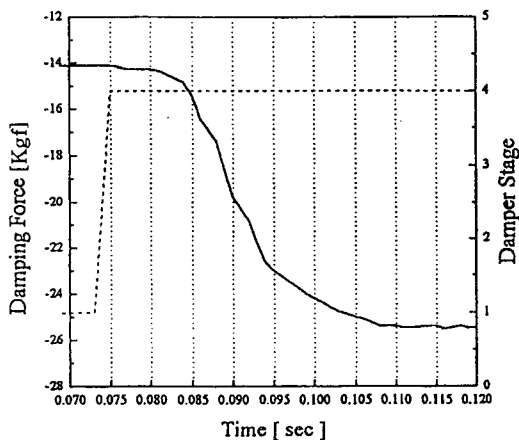


Fig. 6 Response characteristic of assembled damper system

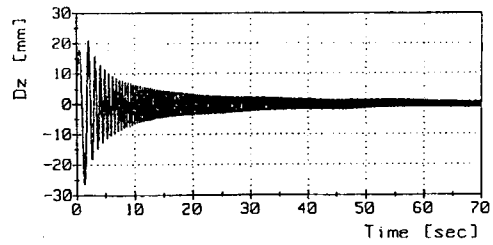


Fig. 7 Sinusoidal sweep input signal

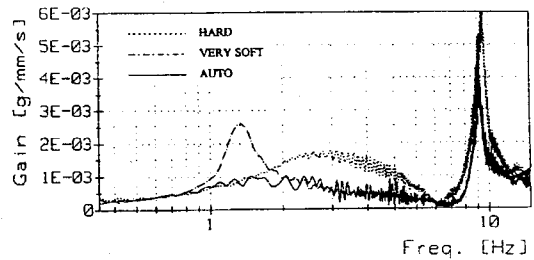


Fig. 8 Frequency response of body vertical acceleration

4.1 연속 정현파 입력 시험

차량이 불규칙한 노면위를 직진 주행시에 주파수 영역에서의 제어 특성을 알아보기 위해 주파수에 따라 크기가 역비례적으로 변하고 주파수가 선형적으로 변하는 연속 정현파 함수 입력을 생성시켜 전기 유압식 도로면 시뮬레이터(road simulator) 시험을 수행하였다. 여기에서 사용된 연속 정현파 입력함수는 Fig. 7과 같으며, 이는 실제 도로면과 매우 유사한 주파수 특성을 갖는다. 제어 특성을 알기 위해 노면 입력 속도에 대한 차체의 상하 가속도를 주파수 전달 함수 형태로 나타내었다. Fig. 8은 전륜에 대한 결과와 자동 모드(auto mode) 댐퍼의 시험 결과를 대비시켜 보여주고 있다. 차체 공진 주파수 (1~2 Hz) 근처에서 스카이록 제어로직에 의한 차체 운동의 제어 효과가 자동 모드에서 나타나고 있다. 또한 중주파수 (3~10 Hz) 영역에서 노면 신호의 차단을 위해 차체 상하 속도를 감지하여 약한(soft) 모드를 유지하는 제어 효과를 확인할 수 있다. 마지막으로 차륜의 공진 영역 (10~15 Hz)에서는 차륜 공진 제어의 효과에 의해 강한(hard)모드 경향이 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 주파수 감응식 반응동형 댐퍼 제어 알고리즘의 기본 성능이 확인될 수 있다.

4.2 범프 통과 시험

시간 영역 제어 특성을 알아보기 위하여 Fig. 9

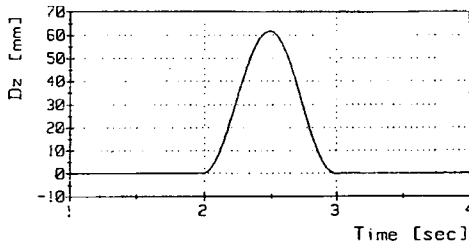


Fig. 9 Bump profile input signal

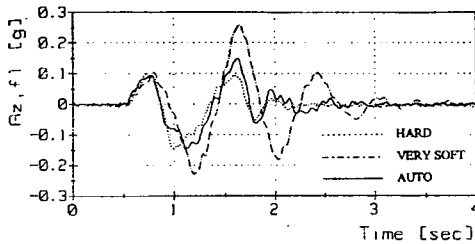


Fig. 10 Results of bump traverse test

와 같은 반정현파 형태의 범프 신호를 도로면 시뮬레이터(road simulator) 제어기에서 생성시켜 약하고(soft), 강한(hard) 그리고 자동 모드에서 각각 시험하였다. Fig. 10은 차체 전방 좌측 댐퍼 상단에서의 수직 가속도 신호를 3가지 모드에 대해 대비시켜 보여주고 있다.

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

4.3 임펄스 조향 입력 시험

Fig. 11에서는 일정한 주행속도 80 km/h의 직진 주행 중에 0.3~0.5 초 사이의 임펄스 조향 작동의 주행 시험을 수행한 후 측정된 차체의 횡가속도

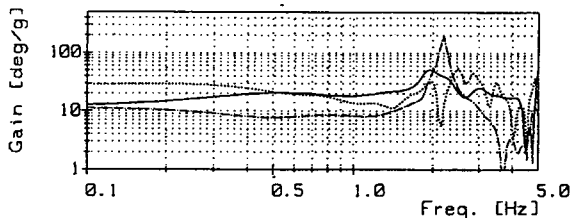


Fig. 11 Frequency response function of roll w.r.t. lateral acceleration
(..... : Hard, ____ : Very Soft, ____ : Auto)

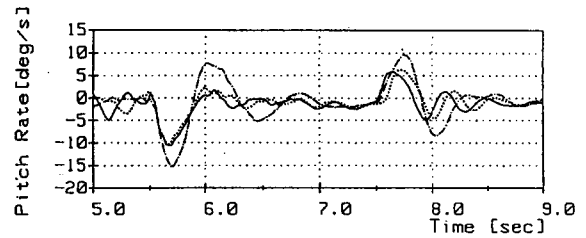


Fig. 12 Results of brake dive test
(..... : Hard, ____ : Very Soft, ____ : Auto)

(lateral acceleration)에 대한 롤각 (roll angle)의 주파수 응답 특성을 보여주고 있다.

그림으로부터 반응동형 가변 댐퍼 시스템에서 기대했던 롤방지(anti-roll) 성능을 확인할 수 있다.

4.4 급제동 시험

본 시험은 차속 60km/s로 주행중에 급제동하는 경우에 차체의 자세 제어 효과를 분석하기 위한 것이다. 제어로직상으로는 제동 페달 스위치를 통해 제동상태를 판단하고 감쇠력 특성을 강하게(hard) 변화시키는 제어 거동을 한다.

Fig. 12에서와 같이 다이브방지(anti-dive)효과 즉, 차체 피칭 운동의 제진 효과가 뚜렷이 나타나고 있음을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결과를 정리하여 보면 다음과 같다.

(1) 전자기식 작동기에 의해 밸브 오리피스 구멍의 조절로 매우약함(very soft), 약함(soft), 보통(medium), 강함(hard)의 감쇠 특성을 갖는 4단 가변 댐퍼를 제작하였으며, 개발된 가변댐퍼는 20 msec 이하의 응답 속도를 보여주었다.

(2) 스카이록 제어 이론을 기반으로 차축 공진 제어 알고리즘과 피치 이론을 통한 차체 자세 제어 알고리즘을 결합시킨 이른바, 모드 스카이록 제어 알고리즘을 개발하였으며, DSP를 이용하여 실시간 제어기로 구현하였다.

(3) 제작된 4단 가변댐퍼, 센서 및 액츄에이터, DSP를 이용한 제어기가 종합적으로 장착된 시험 차량에 대한 주행 시험의 수행 결과, 개발 시스템의 최종 성능 목표로 설정된 직진 주행 및 범프 통과시의 승차감(ride) 및 주행 안전성(safety) 향상

과 동시에 각종 커브 주행 상황에 대한 차체의 자세 제어를 통한 핸들링(handling) 특성 유지의 목표성능을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 만도기계(주)의 지원을 받아 수행 되었으며 이에 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Hennecke, D., Jordan B. and Ochner, U., 1987, "Electronic Damper Control - a Fully Automatic Adaptive System for Damping Force Adjustment to the BMW 635 CSi," ATZ 89, pp. 471~479.
- (2) Heyer, G., 1988, "Trend of the Shock Absorber Development", Automobil-Industry, No. 6.
- (3) Karnopp, D., Crosby M.J. and Harwood R.A., 1974, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators," J. of Engineering for Industry, pp. 619~626.
- (4) Lizell, M., 1988, "Semi-Active Damping," International Conference on Advanced Suspension, IMechE, C429/88.
- (5) Voy, C., 1988, "Implementation of Frerquency-Modulated Damping of Chassis Oscillations," Automobile-Industry, No. 6, pp. 697~708.
- (6) 허승진 외, 1995, "승용차용 전자제어식 현가 장치의 제작기술 개발", 공기반 기술 개발 보고서, 통상 산업부