

감쇠력 가변댐퍼를 이용한 반능동 현가장치의 실차실험 특성에 관한 연구

A Study on the Field Test Characteristics of Semi-Active Suspension System with Continuous Damping Control Damper

이광헌 · 이춘태 · 정헌술

K. H. Lee, C. T. Lee and H. S. Jeong

Key Words : Damper(감쇠기), Semi-Active Suspension(반능동 현가장치), Continuous Damping Control(연속 감쇠력제어), Field Test(실차시험)

Abstract: A semi-active suspension is an automotive technology that controls the vertical movement of the vehicle while the car is driving. The system therefore virtually eliminates body roll and pitch variation in many driving situations including cornering, accelerating, and braking. This technology allows car manufacturers to achieve a higher degree of both ride quality and car handling by keeping the tires perpendicular to the road in corners, allowing for much higher levels of grip and control. An onboard computer detects body movement from sensors located throughout the vehicle and, using data calculated by opportune control techniques, controls the action of the suspension. Semi-active systems can change the viscous damping coefficient of the shock absorber, and do not add energy to the suspension system. Though limited in their intervention (for example, the control force can never have different direction than that of the current speed of the suspension), semi-active suspensions are less expensive to design and consume far less energy. In recent time, the research in semi-active suspensions has continued to advance with respect to their capabilities, narrowing the gap between semi-active and fully active suspension systems. In this paper we are studied the characteristics of vehicle movement during the field test with conventional and semi-active suspension system.

1. 서 론

최근, 감쇠력 가변댐퍼를 장착한 반능동 현가장치에 의해 차량의 주행안정성과 승차감이 획기적으로 개선되어 이 분야의 연구에 대한 관심이 커지고 있다. 감쇠력 가변댐퍼를 장착한 반능동 현가장치는 주로 고급 차종에 장착되는 첨단 현가장치로서 이 분야의 연구는 1970년 경 부터, 기존(conventional) 댐퍼의 한계를 탈피하기 위하여 시작되었다. 즉, 기존 댐퍼는 감쇠력을 결정하는 유로의 크기가 한가지로 고정되어 있어 감쇠력을 소프트(soft)하게 제작할 경우는 승차감은 향상되지만 이와 함께 고속

과 선회 시 주행안정성이 저하되고, 감쇠력을 하드(hard)하게 제작 할 경우는 주행안정성은 향상되지만 승차감이 악화되는 특성을 가지고 있다.¹⁻³⁾ 따라서 차량의 승차감과 주행안정성을 동시에 만족시키기 위하여 감쇠력을 차량의 주행상황에 따라 가변시킬 수 있는 현가장치의 개발이 필요하게 되었다.

이 필요성은 Karnopp⁴⁾에 의해 제안된 스카이훅(sky-hook) 감쇠제어 알고리즘에 근거하여 연구, 개발이 추진되어 왔고 1999년 최초로 연속 감쇠력 가변댐퍼를 장착한 차량이 출시되었다. 그러나 이러한 기존의 연구는 대부분 이론적인 내용⁵⁻⁸⁾이 주를 이루며, 반능동 현가장치를 장착 한 차량 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 반능동 현가장치를 장착한 차량을 이용한 실차시험 결과를 제시하고, 반능동 현가장치가 차량운동 특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

접수일 : 2010년 8월 30일

수정일(1차) : 2010년 10월 19일

게재확정일 : 2010년 10월 20일

이광헌(책임저자) : 국립군산대학교 기계자동차공학부 대학원

E-mail : charity@silla.ac.kr, Tel : 051-999-5468

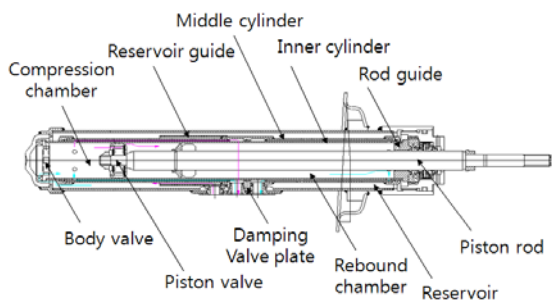
이춘태 : 신라대학교 자동차기계공학과(교신저자)

정헌술 : 국립군산대학교 기계자동차공학부

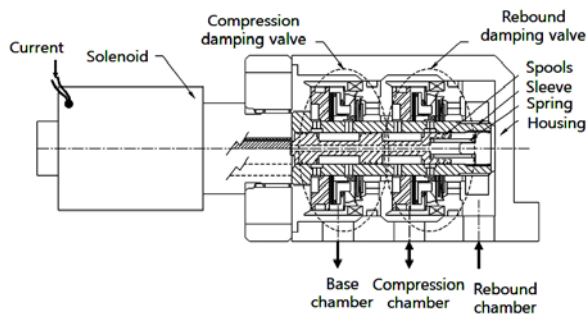
2. 감쇠력 가변댐퍼

2.1 구조 및 작동원리

기존 댐퍼는 댐퍼의 피스톤에 설치된 피스톤밸브(piston valve)와 댐퍼 내의 안쪽 실린더의 한쪽 끝에 장착되는 바디밸브(body valve)에 흐르는 오일의 유동 저항에 의해 감쇠력이 결정되나, 감쇠력 가변댐퍼는 감쇠력을 조절하는 감쇠력 가변밸브가 댐퍼 외부에 있으므로 가변밸브로 오일이 흐르도록 하는 유로를 만들어 주어야 하고, 가변밸브가 댐퍼의 외부에 고정되어 장착될 수 있도록 해야 한다. 이러한 감쇠력 가변댐퍼의 구조를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 감쇠력 가변밸브는 Fig. 1(b)와 같이 파일럿 밸브(pilot valve)의 원리를 구현한 인장, 압축 가변밸브부와 오리피스 개도를 제어하기 위한 스푼(Spool), 슬리브(Sleeve) 및 비례 솔레노이드로 구성되어 있다. 감쇠력 가변댐퍼는 감쇠력 가변밸브에 의해 각 챔버를 통과하는 오일을 제어하여 Fig. 2와 같이 인장행정 감쇠력이 하드하고 압축행정 감쇠력이 소프트한 H-S구간과 둘 다 소프트한 S-S구간과 인장행정 감쇠력이 소프트하고 압축행정 감쇠력은 하드한 S-H구간을 갖는 특성을 가지고 있다.⁹⁻¹²⁾ 그리고 Fig. 3에 감쇠력 가변댐퍼의 외형을 나타내었다.



(a) damper main body



(b) variable damping control valve

Fig. 1 Configuration of continuous damping control damper

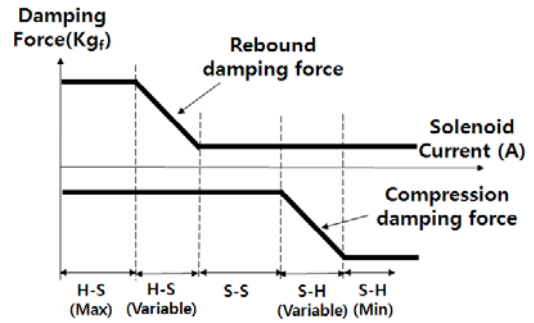


Fig. 2 Characteristic of continuous damping control damper



Fig. 3 Continuous damping control damper

2.2 감쇠력 가변댐퍼와 스카이훅 로직

감쇠력 가변댐퍼는 감쇠력 가변 상태에 따라 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 댐퍼의 인장행정 시나 압축행정 시 모두 큰 감쇠력을 내거나 모두 작은 감쇠력을 내는 노멀(normal) 가변댐퍼 그리고 인장행정 시에는 큰 감쇠력을 내고 압축행정 시에는 작은 감쇠력을 내거나 인장행정 시에는 작은 감쇠력을 내고 압축행정 시에는 큰 감쇠력을 내는 리버스(reverse) 가변댐퍼가 그것이다. 리버스 가변댐퍼는 스카이훅 로직에 매우 적합한 댐퍼로서 Fig. 4와 같이 인장행정 감쇠력이 부드럽고, 압축행정 감쇠력은 딱딱한 S-H구간, 두 가지 모두 부드러운 S-S구간과 인장행정 감쇠력이 딱딱하고 압축행정 감쇠력이 부드러운 H-S구간으로 구성되어 있다. 이러한 감쇠력 가변댐퍼를 제어하기 위한 스카이훅 제어로직의 개념은, 센서로부터 측정하여 계산한 값이 $\dot{z}_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \geq 0$ 이면 감쇠력은 하드모드를 유지하고, $\dot{z}_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) < 0$ 이면 감쇠력은 소프트모드를 유지한다. 여기서, \dot{z}_s 은 차체질량(sprung mass)의 수직속도이고, \dot{z}_u 은 차륜질량(unsprung mass)의 수직속도이다. 즉, \dot{z}_s 이 양수일 때 피스톤 속도 $\dot{z}_s - \dot{z}_u$ 가 양수이면 하드모드 이어야 하고 음수이면 소프트모드이어야 한다. 반대로 \dot{z}_s 이 음수일 때 $\dot{z}_s - \dot{z}_u$ 가 양수이면 소프트모드 이어야 하고 음수이면 하드모드가 되어야 한다. 그러므로 \dot{z}_s 가 양수이면 H-S모드가 적용되고 \dot{z}_s 가

음수이면 S-H모드로 전환 되도록 로직을 설계한다.

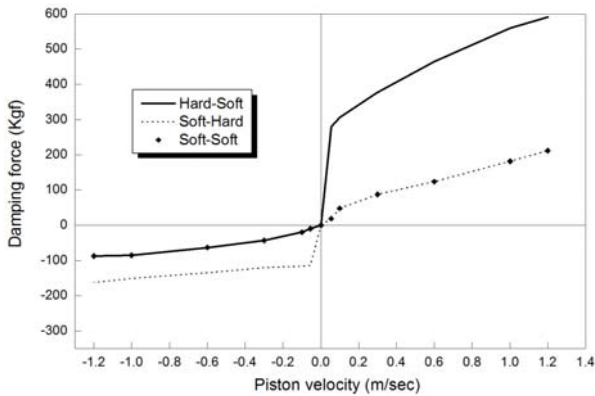


Fig. 4 Characteristic curve of variable damping damper

3. 반능동 현가장치 제어로직

반능동 현가장치에 적용되는 제어는 승차감 제어(ride control), 차속감응 제어(speed sensitive control), 안티롤 제어(anti-roll control), 안티다이브 제어(anti-dive control), 안티스쿼트 제어(anti-squat control)로 구성된다. Fig. 5는 시스템에 장착되는 센서와 로직 사이의 구성도를 나타내었다. 수직가속도 센서와 조향각 센서, 차속 센서, 브레이크 온/오프 센서, 트로틀 위치 센서 등의 센서가 사용된다.

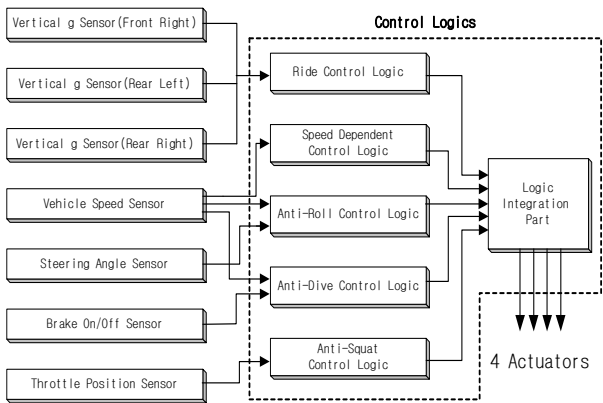


Fig. 5 Configuration of semi-active suspension system control logics

Fig. 5에서 승차감 제어 로직(Fig. 6)은 차체 공진 영역의 노면 입력에 대해 공진을 억제함으로써 차량 운동을 제어하고 승차감 영역의 노면 입력에서 감쇠력을 부드럽게 함으로써 승차감을 향상시키고자 함이 목적이다. 이 로직은 각 차륜에 독립적으로

적용되며 차체에 장착된 3개의 수직가속도 센서를 사용한다. 수직가속도 센서를 장착하지 않은 한 부분은 3개의 차체 수직가속도로부터 추정(estimation)하여 구한다. 센서로부터 출력된 신호를 적분기를 사용하여 속도를 계산하고, 속도의 RMS(root means square)을 이용하여 승차감 지수(ride value)를 계산한다. 댐퍼 감쇠력의 결정은 스카이훅 로직을 기본으로 하며 승차감 지수는 차체의 수직속도에 곱하여져 노면의 주파수와 크기에 따라 변화하는 인자로 작용하고, 스카이훅 로직에 적용되는 차체 수직속도는 주파수에 대한 가중치가 적용된다.

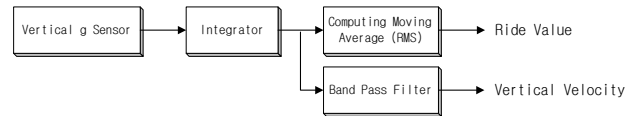


Fig. 6 Configuration of ride control logic

안티롤 제어 로직(Fig. 7)은 차량 조향 시에 댐퍼의 감쇠력을 높임으로서 차량의 롤(roll) 운동을 억제하기 위함이다. 조향각 센서로부터 운전자의 조향 입력을 감지하고 차체 거동의 과도영역을 제어한다. 조향각 센서로부터의 신호를 처리하여 조향 각속도를 구하고 이를 차속을 고려하여 롤 지수(roll value)를 구한다.

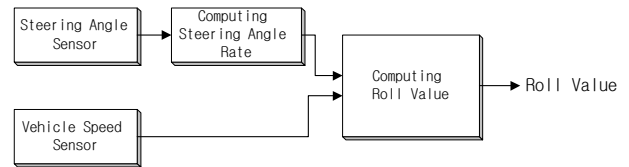


Fig. 7 Configuration of anti-roll control logic

안티스쿼트 제어 로직(Fig. 8)은 엔진의 스로틀 각도(throttle angle)의 변화를 감지하여 이 때 발생하는 차량의 피치(pitch) 운동을 제어하기 위한 것이다. 스로틀위치 센서(TPS)로부터의 신호를 미분하고 이를 이용하여 스쿼트 지수(squat value)를 계산한다.

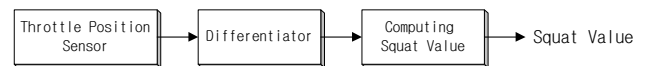


Fig. 8 Configuration of anti-squat control logic

안티다이브 제어 로직(Fig. 9)은 차량의 급제동 시 발생하는 피치운동을 제어하기 위하여 브레이크

온/오프 센서, 차속 센서로부터 차량의 급제동을 감지하여 차량이 설정 감속도 이상으로 감속 시 감쇠력을 강하게 조절하여 차량의 안정성을 확보함이 목적이다.

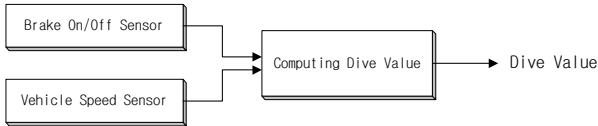


Fig. 9 Configuration of anti-dive control logic

차속감응 제어 로직(Fig. 10)은 차량의 주행 속도에 따라서 제어 특성을 변화시켜 차속과 차량의 특성에 맞는 승차감을 얻기 위함이다. 차속 센서로부터의 신호를 이용하여 속도의존 지수(speed dependent value)를 계산하고 이 값은 승차감 지수를 튜닝하는 게인(gain)의 역할을 한다.

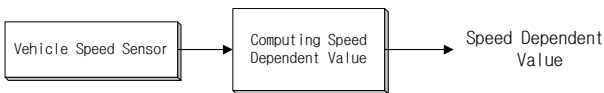


Fig. 10 Configuration of speed sensitive control logic

로직 통합부는 각 로직의 결과 값들을 종합하여 각 차륜에 적용되어야 할 댐퍼의 감쇠력을 결정하는 부분이다. 이 로직 통합부에서는 각 로직으로부터 계산된 값에 따른 0.2A~1.2A까지의 전류가 솔레노이드에 적용될 수 있도록 PWM구동 신호로 환산되어 진다.

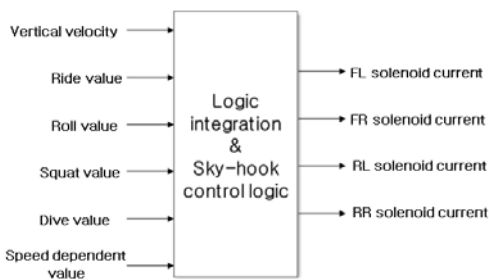


Fig. 11 Configuration of logic integration part

4. 반능동 현가장치의 실차시험

4.1 계측장비 및 시험항목

실차시험은 고속도로와 굴곡도로, 콘크리트 도로에서 실시되었으며 각 도로에서의 실험속도는 60~100kph이다. 그리고 범프 통과시험은 규정의 범프

를 대상으로 차속 20~40kph에서 실시하였다. 이러한 실차시험 조건을 Table 1에 나타내었다. 또한, 실차시험을 위한 시스템 구성을 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서와 같이 차체에 장착된 3개의 수직가속도 센서를 사용하여 센서를 장착하지 않은 부분의 가속도를 추정한다. 그리고 차량의 내부에는 차량의 성능을 평가하기 위하여 시트(seat), 댐퍼 상단 및 차륜에 추가의 수직가속도 센서를 장착하였다. 그리고 차량의 롤(roll)을 측정하기 위하여 차량 중앙에 롤 센서를 장착하였다. 측정 장치의 사양을 Table 2에 정리하였다.

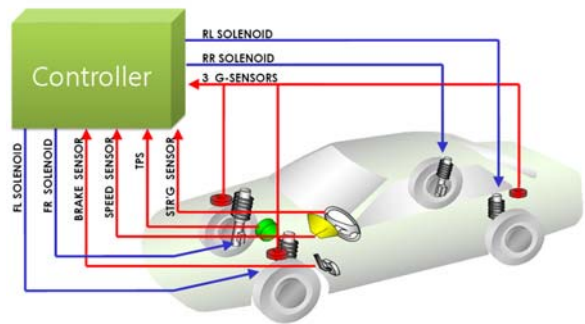


Fig. 12 Schematic illustration of semi-active suspension system

Table 1 Conditions of field test

No	Test items	Velocity(kph)	Test road
1	Road test	100	Highway
		70	Wave road
		60	Concrete road
2	Bump test	20, 30, 40	Bumper

Table 2 Data acquisition system and sensors

No.	Sensors	Measuring data	Specification
1	Rate gyro	Roll rate	Range : ± 180 deg, resolution : 12 bits, digital filter : IIR, resolution 0.1deg
2	Accelerometer(1)	Seat acceleration	General ICP type, frequency 0.3~8kHz, voltage sensitivity : 100 mV/g, measuring range : 50g
3	Accelerometer(2)	Wheel acceleration	
4	Accelerometer(3)	S/A acceleration	
5	Data recorder	Data acquisition	16 bit, 200kHz A/D converter, analog input 16 ch, analog output 4 ch, etc.

4.2 일반도로 주행시험

시스템의 성능을 검증하기 위해 다양한 주행 상황에서 계측시험을 수행하였고, 비교 평가를 위하여 감쇠력이 일정한 기존댐퍼를 장착한 경우와 감쇠력 가변댐퍼를 장착한 경우에 대하여 비교 시험을 수행하였다. Fig. 13은 고속도로(100kph), 굴곡로(70kph), 콘크리트도로(60kph)에서의 차량 주행 시, 운전석에서의 수직가속도 계측 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 차체 공진영역인 1Hz 근방에서는 차체의 상하운동이 작은 고속도로보다 상하 굴곡이 있는 굴곡로(wave road)와 콘크리트 도로에서 제어 효과가 우수함을 알 수 있다. 또한, 중주파수 영역(2~8Hz)에서는 기존댐퍼를 장착한 경우에 비해 유사하거나 부분적으로 성능이 저하됨을 알 수 있다. 이는 가변댐퍼를 장착한 차량에서 발생할 수 있는 과다제어로 인한 부분적인 승차감 저하 현상이 나타난 것으로 사료된다. 그리고 차륜 공진영역인 10Hz 근방에서의 진동특성은 기존댐퍼를 장착한 경우와 감쇠력 가변댐퍼를 장착한 경우가 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 14에서 Fig. 16까지는 Fig. 13과 같은 주행조건에서, 댐퍼 상단에 설치한 센서로부터 측정된 수직가속도의 값을 나타내었다. 그림에서와 같이, 댐퍼 상단에서의 가속도 특성은 Fig. 13에서 보인 시트에서의 진동특성과 거의 유사함을 알 수 있다.

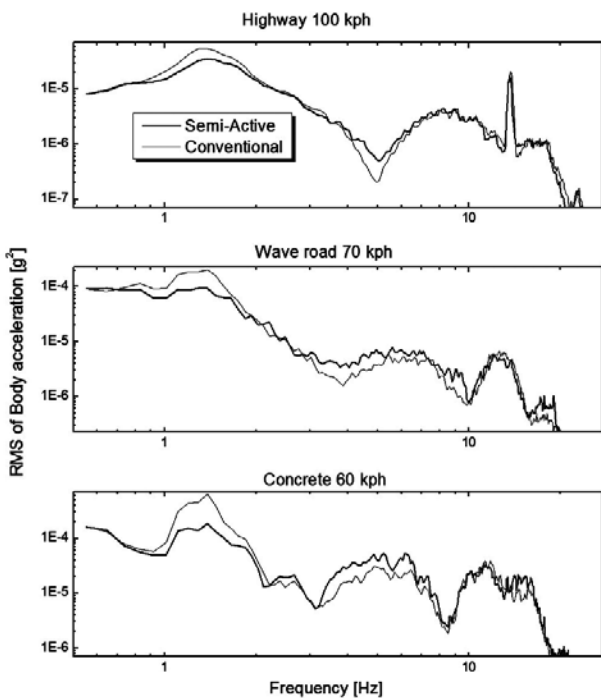


Fig. 13 Test results of vertical seat acceleration at the various conditions

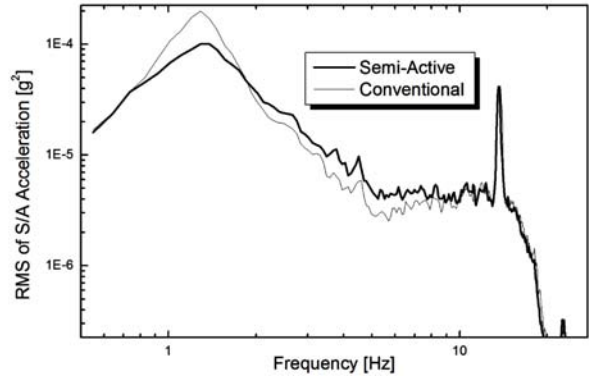


Fig. 14 Test result of vertical damper(S/A) acceleration (highway 100kph)

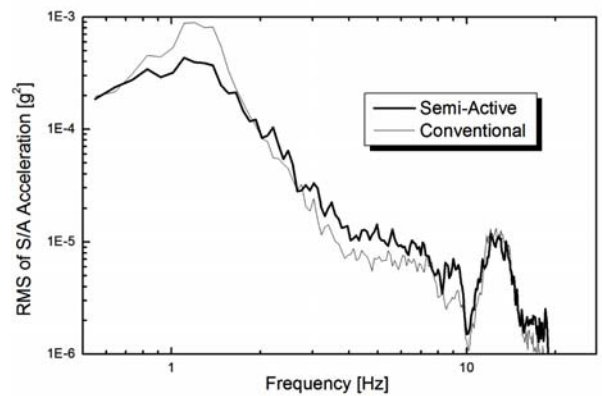


Fig. 15 Test result of vertical damper(S/A) acceleration (wave road 70kph)

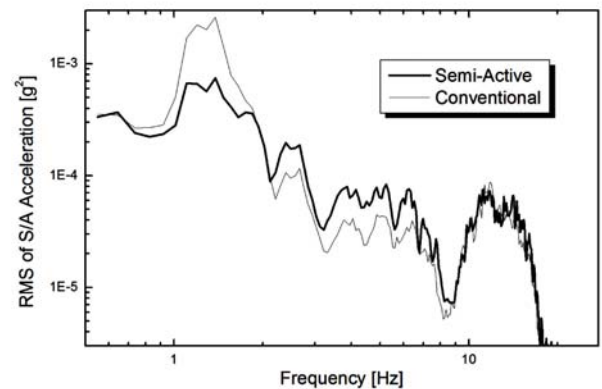


Fig. 16 Test result of vertical damper(S/A) acceleration (concrete road 60kph)

또한, Fig. 17에서 Fig. 19까지는 Fig. 13과 같은 주행조건에서, 차륜에서 측정된 수직가속도의 값을 나타내었다. 그림에서와 같이 차륜에서의 가속도 특성은, 차체의 공진영역인 1Hz의 공진현상이 발생하지 않고, 차륜의 공진영역인 10Hz에서의 특성이 잘 나타나 있음을 알 수 있다. 그림에서와 같이 10Hz

근방에서 기존댐퍼를 장착한 경우에 비하여 감쇠력 가변댐퍼를 장착한 경우가 진동특성이 크게 향상됨을 알 수 있다. 또한 차륜에서의 가속도 값이 차체에서의 가속도 값 보다 상대적으로 매우 큰 것을 알 수 있다. 그리고 노면 조건이 변화하여도 기존댐퍼와 감쇠력 가변댐퍼를 장착한 차량의 차륜에서의 가속도 차이는 거의 비슷함을 알 수 있다.

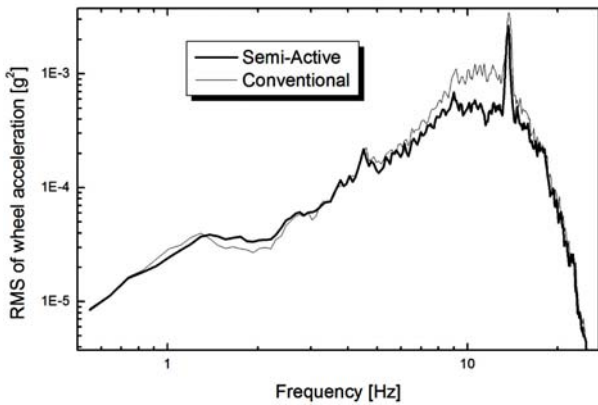


Fig. 17 Test result of vertical wheel acceleration (highway 100kph)

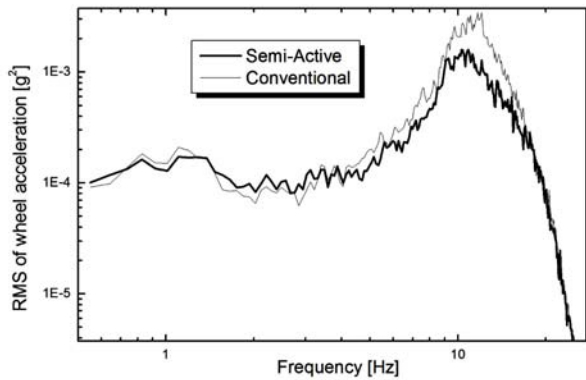


Fig. 18 Test result of vertical wheel acceleration (wave road 70kph)

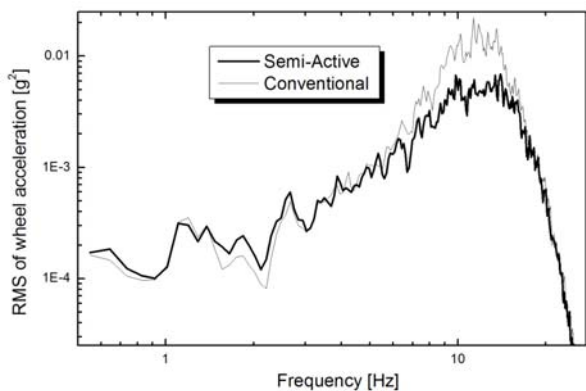


Fig. 19 Test result of vertical wheel acceleration (concrete road 60kph)

4.3 범프 통과 시험

범프 통과 시의 감쇠력 가변댐퍼의 제어성능을 살펴보기 위해 폭 1.5m, 높이 0.08m의 범프를 각각 20, 30, 40kph로 통과하는 시험을 수행하였다. 이와 같은 실험결과를 Fig. 20에 나타내었다. 그림에서와 같이, 기존댐퍼를 장착한 경우에 비해 감쇠력 가변댐퍼를 장착한 경우가 차량의 피칭운동이 급속히 감소함을 알 수 있다. 즉, 기존댐퍼를 장착한 경우는 범프 통과 후 차량의 앞부분이 상하로 크게 진동하는 반면에 감쇠력 가변댐퍼를 장착한 차량은 범프 통과 후에도 적절한 자세를 유지함을 알 수 있다.

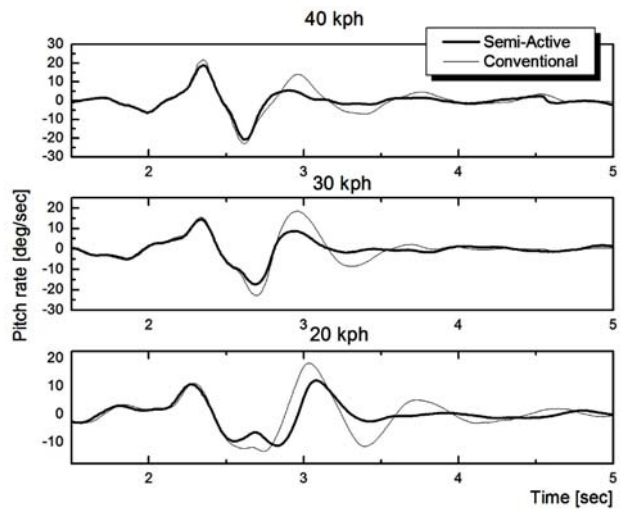


Fig. 20 Test result of bumper road

5. 결 론

본 연구에서는 감쇠력이 일정한 일반 댐퍼와 감쇠력 가변댐퍼를 장착한 차량에서의 실차실험 결과에 대하여 검토하였다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 차량의 승차감을 결정하는 시트에서의 가속도 특성은 차체 공진영역인 1Hz 근방에서는 제어 효과가 월등하지만 중주파수 영역에서는 기존댐퍼를 장착한 경우에 비해 유사함을 알 수 있다.
2. 댐퍼 상단에서 측정된 수직가속도의 특성은 시트에서의 진동 특성과 거의 유사함을 알 수 있다.
3. 차륜에서의 진동은 10Hz 근방에서 기존댐퍼를 장착한 경우에 비하여 감쇠력 가변댐퍼를 장착한 경우가 진동특성이 크게 향상됨을 알 수 있다. 또한, 노면 조건이 변화하여도 기존댐퍼와 감쇠력 가변댐퍼를 장착한 차량의 차륜에서의 가속도 차이는 거의 비슷함을 알 수 있다.

4. 기존댐퍼를 장착한 경우에 비해 감쇠력 가변댐퍼를 장착 한 경우가 차량의 피칭운동이 급속히 감소하여 범프 통과 후에도 적절한 자세를 유지함을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) 최규재, 노기환, 유영면, 김혁, "실시간 Hardware-in-the-Loop 시뮬레이션을 이용한 반능동 현가시스템 특성 평가", 한국자동차공학회논문집, 제9권, 제6호, pp. 186~194, 2001.
- 2) 윤일중, 임재필, "능동과 반능동 현가장치로 된 전차량 모델에 대한 스카이훅 제어기의 비교 평가", 제어·자동화·시스템공학논문지, 제7권, 제7호, pp. 614~621, 2001.
- 3) 박재우, 이동락, 백운경, "연속 가변형 충격흡수기의 감쇠성능 해석", 한국자동차공학회논문집, 제9권, 제2호, pp. 192~201, 2001.
- 4) D. Karnopp, M. j. Crosby and R. A. Harwood, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", J. of Engineering for Industry. Transactions of ASME, pp. 619~626, 1974.
- 5) Iwata, Y., Matsuura, Y., "The Study of semi-Active Suspensions by On-line Control of Damping Parameter", Trans. Of JSME No. 870-3, 1987.
- 6) Felix Woner, Peter Cause mann, "Continuously Adjustable Shock Absorber Comparison Calculation and Optimization", AVEC 923955, 1992.
- 7) Karnopp D. C., "Active Damping in Road Vehicle Suspension Systems", Vehicle System Dynamics pp. 291-316, 1983.
- 8) Chalasani M. R., "Ride Performance Potential of Active Suspension Systems-Part II : Comprehensive Analysis Based on a Full-Car Model", ASME Winter Annual Meeting, pp. 205-234, 1987.
- 9) 박재필, 최창립, 윤영환, 최병근, 정용길, "반능동형현가장치용 리버스 무단연속가변댐퍼의 모델링 및 동특성 해석", 한국소음진동공학회 2004년도 춘계학술대회논문집, pp. 937~941, 2004.
- 10) 허승진, 박기홍, 황성호, "연속 가변식 반능동형 현가시스템의 승차감 및 주행안전성 제어기 설계 해석", 한국소음진동공학회논문집, 제14호, 제1호, pp. 17~23, 2003.
- 11) 박호, 한창수, 이명호, 노병욱, "자동차용 현가장치의 반능동 제어 시스템의 설계파라미터에 대한 연구", 한국공작기계학회논문집, 제11권, 제1호, 2002.
- 12) 윤영환, 최명진, 유송민, "리버스 무단댐퍼용 연속가변밸브의 튜닝 파라미터에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제10권, 제3호, pp. 192~200, 2002.