

# 반지능형 현가시스템에 의한 차량의 능동적인 동적거동제어

김대원\*, 배준영\*, 신중호\*\*

## Active Dynamic behavior Control of Vehicle by Using Semi-intelligent Suspension System

D.W.Kim\*, J.Y.Bae\*, J.H.Shin\*\*

### ABSTRACT

Mostly, a ride comfort and handling performance of vehicle is influenced by dynamic behavior control of vehicle. We are focusing on development of a semi-intelligent suspension system with continuously variable damper(HS-SH type), only using absolute velocity of sprung mass without using the relative velocity besides having lower system prices and a little energy requirement. In this paper, the system is realized in consideration to control strategy (sky-hook control, hybrid filter, etc.) and has been proved to have improvement of behavior control of vehicle by Quarter car and Vehicle test, respectively.

**Key Words** : Sky-Hook control(스카이훅 제어), HS-SH Variable Damper(반독립형 가변댐퍼), Hybrid Filter(혼합 필터), Time Delay(시간 지연), Step motor(스텝 모터)

### 1. 서론

일반적으로 차량의 현가 시스템은 스프링(spring)과 댐퍼(damper)로 구성되는데 차체 중량에 대한 차고 유지와 노면으로부터 전달되는 충격을 완화시켜 승차감(ride comfort)을 개선시키는 것과 아울러 차량의 주행에 적합한 자세를 유지시켜 조종 성능(handling)을 향상 시킴을 주목적으로 하고 있다. 그중, 댐퍼는 차량의 승차감과 조종 성능의 두 가지 역할에 서로 상반되는 특성을 가지고 있으며 이에 따른 댐퍼의 감쇠력값을 결정하는 데에는 많은 어려움이 따른다. 이를 개선하기 위해 대부분

의 차량 Maker에서는 시행착오(trial error)법과 주행 시험(driving test)방법을 적절하게 이용하여 조정(tuning)하고 있는 실정에 있다.

최근, 이러한 상반된 특성을 동시에 만족시키기 위해 차량 Maker에서는 지능형<sup>1)</sup> 및 반지능형<sup>2)</sup> 현가 시스템의 개발을 활발히 추진하고 있다. 지능형 현가 시스템은 주행 노면의 상태에 따른 주행 조건 및 차체의 자세 변화를 능동적으로 교정하여 주행 및 조종 안정성과 승차감 개선을 동시에 향상시키고 있으나 에너지 소모성과 고가격등의 한계성을 가지고 있어 현실적으로는 많은 문제점을 드러내고 있다. 반면에, 반지능형 현가 시스템은 기존

\* 정희원, (주) 기아정기 기술 연구소  
 \*\* 정희원, 국립 창원대학교 기계설계과

수동형(passive) 현가시스템에서 개선된 적응형<sup>(4)</sup> 현가 시스템의 문제점을 개선하고 지능형 현가 시스템과 비동한 성능을 발휘할 수 있도록 개발된 시스템으로 가격 및 성능적 측면에서 보다 현실적인 시스템으로 크게 부각되어 상품화<sup>(5)</sup> 등의 많은 연구가 급속하게 추진되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 승차감 제어에 효과적인 스카이훅 제어알고리즘(sky-hook algorithm)<sup>(3)</sup>을 기초로, 차체의 1차공진점을 최소화하고 제어 주기 및 지연현상등을 대폭 절감할 수 있는 반독립형(HS-SH형, semi-independent type)의 연속 다단 가변댐퍼를 채용한 반지능형 현가 시스템(semi-intelligent suspension)<sup>(6)</sup>의 구성과 아울러 이에 따른 제어 수행 결과 및 성능을 승차감의 측면에서 그 효과를 밝히고자 한다.

## 2. 반지능형 시스템 제어

### 2-1. 스카이 훅 제어

D.C. Karnopp<sup>(2)</sup>에 의해 고안된 스카이 훅(Sky-hook) 이론은 그림1과 같이 차체의 상부에 가상적인 댐퍼를 이용하여 노면으로부터 전달되는 차체의 진동 절연을 이상적으로 제진 한다는 것으로 이를 현실적으로 구현하기 위해 차체 절대속도값과 비례하도록 차체와 차축사이에 설치된 가변댐퍼의 감쇠력을 제어하도록 함으로써

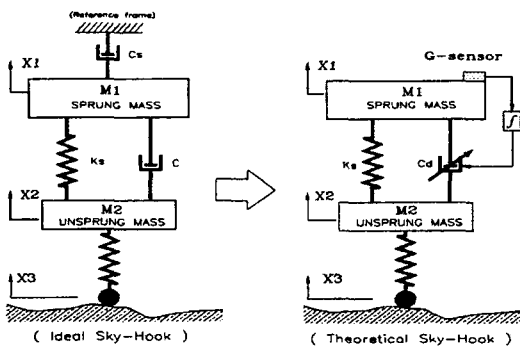


Fig. 1 Schematic Diagram of Sky-Hook Theory

효과적인 진동 절연을 구현할 수 있게 된다. 따라서, 식(2-1), 식(2-2)의 조건에 따라 감쇠력을 제어하게 되며 이를 최종적으로 구현하게 되는 제어 알고리즘은 그림 2와 같다. 또한 그림 3은 스카이 훅이론을 적용한 반지능형 현가 시스템 제어 상태를 나타내는 것으로 각사분면(quadrant)중 1,3사분면을 제어 대상으로 하고 있는 것을 나타내고 있다.

$$\dot{X}_1 \cdot (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) > 0, F = C_d \cdot \dot{X}_1 \quad (C_d = \max \sim \min) \quad (2-1)$$

$$\dot{X}_1 \cdot (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) \leq 0, F = 0 (C_d = \min) \quad (2-2)$$

여기서,  $\dot{X}_1, \dot{X}_1 - \dot{X}_2$  : 차체 절대, 상대 속도(%),  $F$ : 감쇠력(kgf),  $C_d$ : 감쇠계수 (min=soft, max=hard)

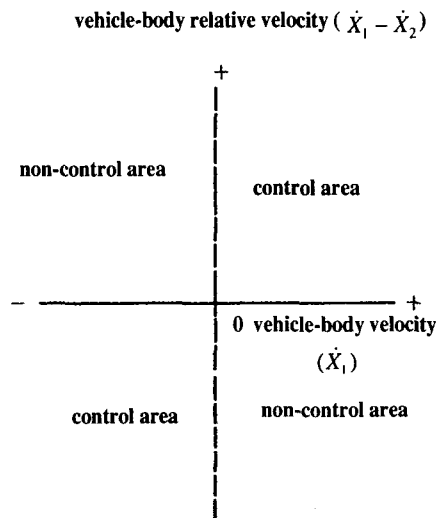


Fig. 3 Schematic Diagram of Semi-intelligent Control

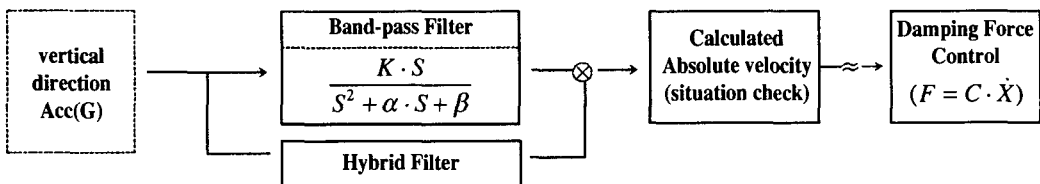


Fig. 2 Control Logic Block Diagram

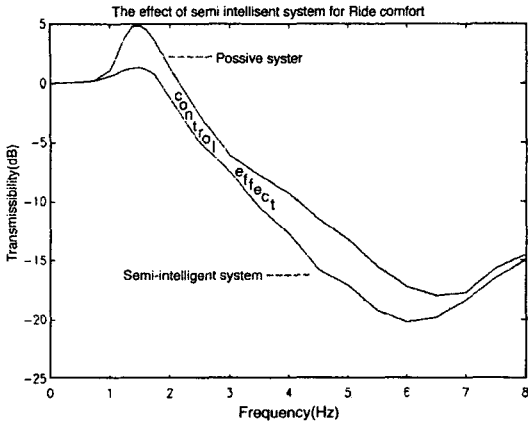


Fig. 4 Semi-intelligent Control Effect

2-2. 신호 처리

1) 적분 처리

스카이 훅(Sky-Hook)이론에 기초하여 구성된 제어 알고리즘을 구현하기 위해서는 우선, 차체의 절대속도값을 측정하는 것이 필요하며 이를 위해 본 연구에서는 차체에 수직 방향 가속도 센서(TI社 CAS)를 부착하여 차체 절대 가속도를 측정하였고 이 값을 적분 처리 과정을 통해 절대속도로 치환하였다. 적분 처리 과정은 직류 오프셋(DC offset)을 최소화하고 실시간 적분산출이 가능하도록 식(2-3)과 같은 적분 처리용 디지털 밴드 패스 필터(Digital Band-pass Filter)를 설계하였으며 필터의 특성은 그림 5와 같다.

$$G(s) = \frac{K \cdot S}{S^2 + \alpha \cdot S + \beta} \quad (2-3)$$

여기서,  $G(s)$  : 전달 함수,  $S$ : Laplace인자,  $K$ : 비례상수,  $\alpha, \beta$  : 필터상수

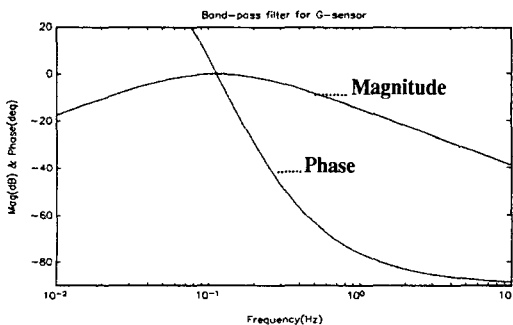


Fig. 5 Intergrated Filter Characteristic

2) 혼합 필터<sup>(6)</sup>

스카이 훅 제어 이론을 이용한 승차감 제어시, 1/4차 및 실차상태에서의 선형적 해석 프로그램에서 발생하지 않던 제어 지연 현상이 실제 실험을 수행하여 성능을 평가해 본 결과, 그림 16과 같이 약 2~4Hz 영역에서 수동적 속압소마(Passive S/A)보다 오히려 커지는 등의 악영향이 발생하였다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 6과 같이 차체로 전달되는 수직 방향 가속도값(input signal)이 유입될 경우, 이 신호값의 주파수 영역을 실시간 적으로 판정하기 위해 입력 신호의 주파수 변동에 따라 필터출력값이 일정값으로 수렴하도록 혼합 필터를 구성하였다. 혼합 필터는 그림 7에서와 같이 하이패스 필터(high pass filter), 절대값연산기(rectifier), 로우패스 필터(low pass filter)로 구성되며 차체부의 상하 가속도값을 앞서, 제시된 필터 및 연산기를 순차적으로 통과함으로써 그림 6에서와 같은 결과를 얻을 수

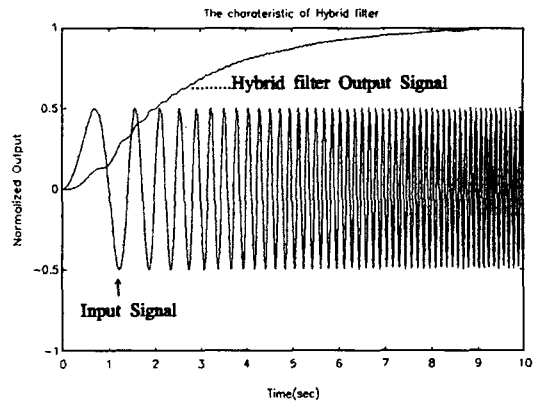


Fig. 6 Hybrid Filter Characteristic

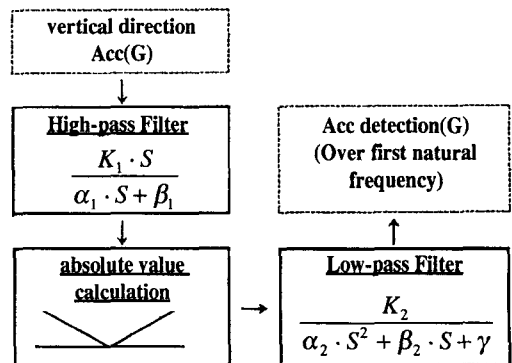


Fig. 7 Hybrid Filter Construction

있도록 구현되어져 있다. 따라서, 이러한 Filter기법을 이용하여 스카이 훅 제어시, 약 2~4Hz 영역의 제어값은 혼합 필터를 통과한 결과값의 크기를 참조하여 제어를 수행하도록 함으로써 앞서 유발된 문제점을 최소화하고 제어 성능을 향상시켜 우수한 제진 성능을 확보하게 되었다.

### 3. 다단 가변 가변댐퍼

#### 3-1. 댐퍼구조

본 연구에 적용한 가변댐퍼의 내부 구조는 그림 8과 같으며 유로 면적을 연속적으로 가변할 수 있는 오리피스(orifice) 조정형 댐퍼로 조정 로드(Rod)의 회전각에 대해 다단(8단 이상) 혹은 거의 무단으로 감쇠력을 변화시킬 수 있도록 구성되어 있다. 또한, HS-SH형(반독립형)을 구현하기 위해 유로 흐름을 신축(rebound stroke) 조정시, 압축유로를 개방시키고 압축(compression stroke) 조정시, 신축유로를 개방시키며 조정 로드 중앙 위치에서 댐퍼의 신축 및 압축유로를 모두 개방시키는 형태로 구성되어지며 이를 위해 신축 및 압축 확인(Check) 밸브를 각각 별도로 구성하도록 개발된 가변 댐퍼이다.

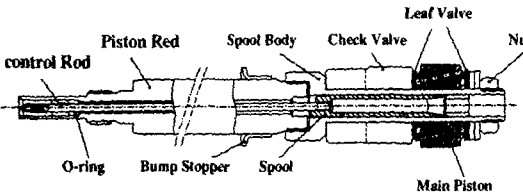


Fig. 8 Construction of Variable Shock Absorber(HS-SH Type)

#### 3-2. 다단 가변 댐퍼의 성능 특성

기존 가변댐퍼의 경우, 감쇠력을 하드(hard)측으로 조정(조정로드를 시계 방향 회전)하면 신축 및 압축이 모두 하드하게 조정되며 소프트(soft)측으로 조정(조정로드를 반시계방향회전)시, 신축 및 압축이 모두 소프트측으로 조정되는 그림 9와 같은 형태의 H(신축 하드)H(압축 하드) - S(신축 소프트)S(압축 소프트)의 댐퍼이다. 그러나, 본 연구에 적용된 가변댐퍼는 신축을 소프트에서 하드 혹은 그 반대로 조정(조정로드를 SS영역↔HS영역으로 회전)시 압축은 항상 소프트로 유지되고 압축을 조정(조정로드를 SS영역↔SH영역으로 회전)시 신축은 항상

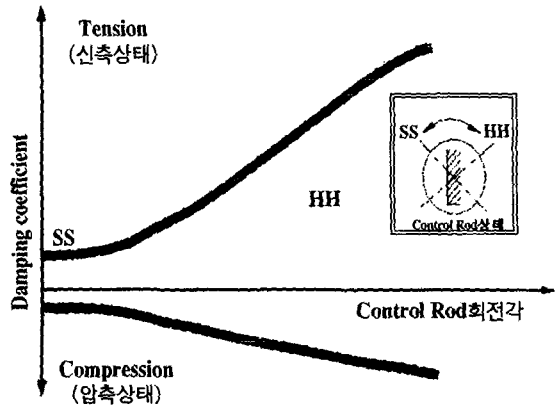


Fig. 9 Used Variable Shock Absorber(HH-SS)

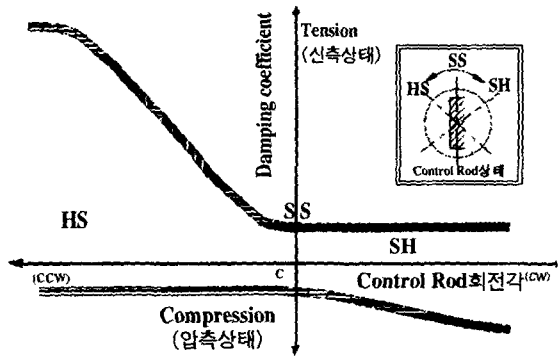


Fig. 10 Semi-independent type Variable Shock Absorber Characteristic(HS-SH)

소프트로 유지되는 H(신축 하드)S(압축 소프트) - SS(신압축 모두 소프트) - S(신축 소프트)H(압축 하드)의 댐퍼로 그림 10과 같은 형태의 가변댐퍼이다. 그림 9, 10은 모두 댐퍼의 동일 속도내에서 조정로드를 회동하였을 때의 감쇠력 가변 특성을 도시하고 있다. 한편, 본 연구에 사용된 HS-SH특성의 가변댐퍼의 특징은 그림 3에서의 스카이 훅이론을 기초로 동작하는 것으로 식(2-1)의 경우, 차체 절대속도가 상방향(+)이고 댐퍼 속도상태가 신축(+)일 때 차체 절대속도에 따라 감쇠력을 제어하게 된다. 하지만 댐퍼의 속도는 차체 절대속도에 비해 상당히 빠르므로 갑자기 댐퍼속도가 압축(-)방향으로 동작되면 댐퍼감쇠력을 낮게(소프트) 만들어 주어야 한다. 그러나, 기존 댐퍼는 이를 댐퍼부근의 상대센서값을 이용하여 감쇠력을 조정하게 되는 데 비해 HS-SH 댐퍼는 신축 감쇠력 조정시, 그 반대인 압축감쇠력은 기계적으로 소프트

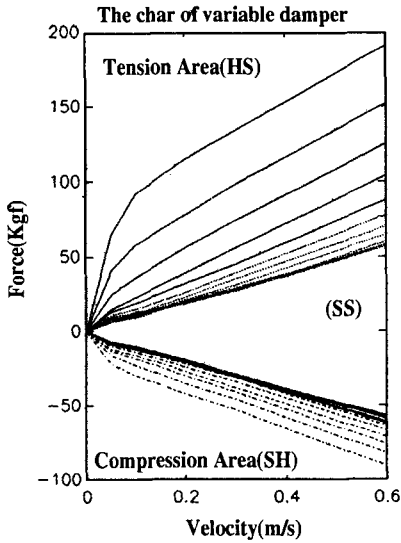


Fig. 11 Damping force Characteristic

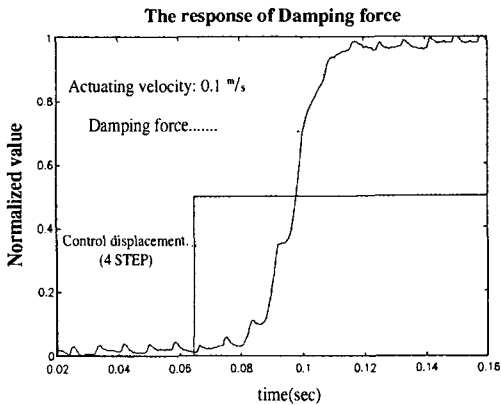


Fig. 12 Damping force delay Characteristic

트하게 조정되므로 이러한 동작이 필요 없게 되어 빈번한 감쇠력 제어 및 제어 신호에 따른 감쇠력 지연 등의 문제가 해소되며 아울러 댐퍼속도 적용이 필요 없게 되는 것이다. 그림 11은 개발된 가변 댐퍼의 특성을 속도 구간별로 약 8단의 구간으로(신,압축) 감쇠력을 나타낸 것으로 신,압축시 각 소프트구간에서 중첩된 상태를 나타내는 데 이는 HS-SH 특성을 제대로 만족함을 단편적으로 예시하고 있다. 한편, 일정한 댐퍼 속도범위내에서 감쇠력 조정(4 step 범위)시 그림 12에서와 같이 감쇠력이 1차시 지연(1st time delay) 형태로 발생되며 약 20ms 정도의 시정수(time constant)를 나타내고 있다. 이로 인

해 본 연구에서 구현한 시스템이 이상적인 스키프 폭을 발휘할 수 없게 되는 문제점임을 단편적으로 알 수 있으며 이러한 현상이 최소화 될수록 보다 효과적인 성능 개선을 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 스텝 모터 구동

다단 가변댐퍼의 감쇠력을 제어 알고리즘에 의해 조정할 수 있도록 댐퍼 상단 부의 조정 로드와 연결된 스텝 모터(Step Motor)를 그림 13과 같은 구동 회로를 이용하여 PC(E.C.U.)와 연결된 D/O port의 신호에 따라 시계 혹은 반시계방향으로 회전할 수 있도록 구성하였다. 또한, 스텝 모터 구동시, PWM신호(pulse width modulation, 정전류 chopping)를 모터 출력 단에 부가하여 장기간의 동작에 따른 과열 및 동력소모등을 최소화하도록 구성하였다. 그림 14는 무부하시, 입력 신호에 따른 스텝 모터의 회전 상태를 나타내고 있으며 각 스텝 단계를 10ms 이내로 하여 스텝 위치를 조정 하도록 처리하고 있다.

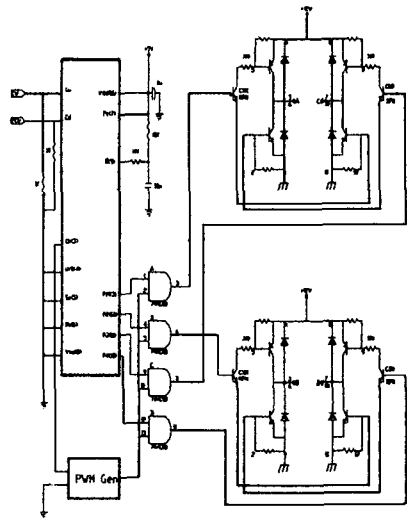


Fig. 13 Driving circuit of Step Motor

#### 5. 실험 및 고찰

본 연구에서 개발된 제어기와 구현된 시스템의 효과를 검증하고 성능을 파악하기 위해 차량의 1/4부분을 떼어 내어 구성된 1/4차 시험기내에서 벤치 평가(bench test)와 이를 실제 차량에 탑재하여 실차 테스트(ground test)를 병행하였다.

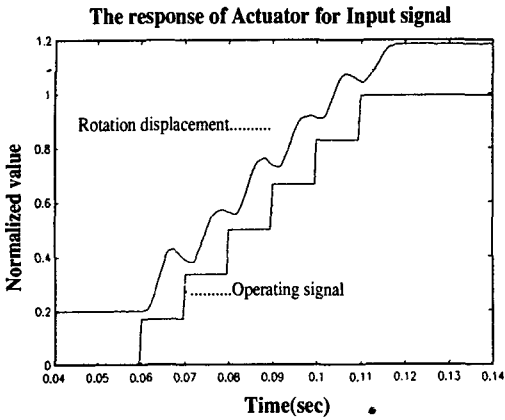


Fig. 14 Driving Characteristic of Step Motor

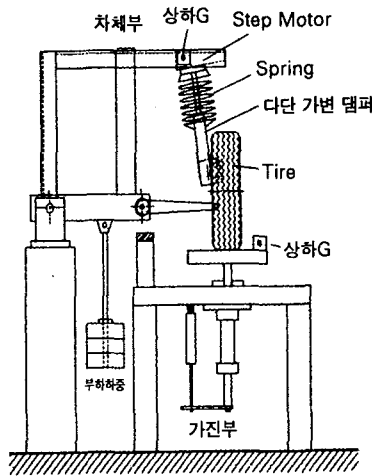


Fig. 15 Experimental apparatus of 1/4 Vehicle Model

5-1. 1/4차 실험

그림 15의 1/4차 시험기로 가진부를  $\pm 10\text{mm}$  변위 및 사인 변조(Sine sweep:  $0.1 \sim 8\text{Hz}$ )로 가진하여 차체 가속도/가진부 가속도값을 FFT장비(B&K社)를 이용하여 특성 분석하였으며 실험 결과, 그림 16과 같이 기존(passive) 시스템에 비해 우수한 제진 성능을 발휘함과 아울러 혼합 필터에 의한 제어 성능의 효과를 검증할 수 있었다.

5-2. 실차 실험

차량을 주행 시험장의 일반 노면(ISO64 C등급 수준) 위를 정속 주행시킨 상태에서 운전석 부근(seat floor)에 설치된 상하 방향 가속도(G) 센서값을 계측하여 이를

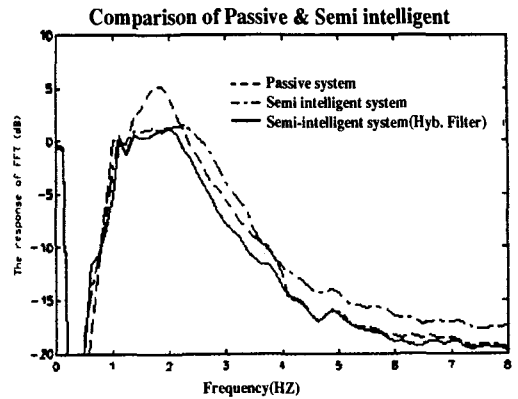


Fig. 16 Experimental Result of 1/4 Vehicle Model

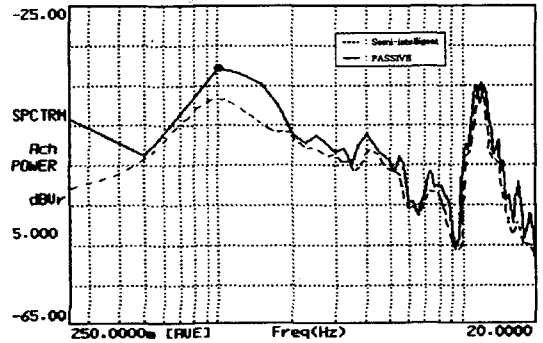


Fig. 17 Experimental Result of Driving Vehicle(Driving Speed 40km/h)

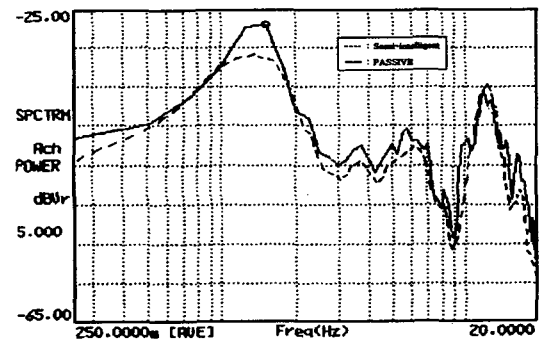


Fig. 18 Experimental Result of Driving Vehicle(Driving Speed 60km/h)

FFT (AND社)장비를 이용, 주파수 특성 분석을 수행하였다. 그 결과는 그림 17, 18, 19와 같으며 승차감에 영향을 주는 1차공진점 주변의 수직 방향 가속도(G)값이  $-2 \sim -3\text{dB}$  정도 크게 개선되는 효과를 얻었으며 아울러 중

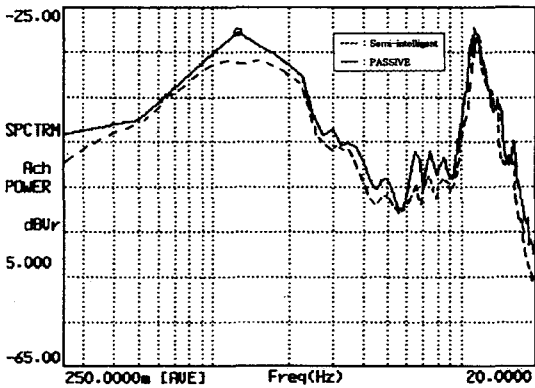


Fig. 19 Experimental Result of Driving Vehicle(Driving Speed 80km/h)

주파수(3~8Hz)영역의 상하 방향 가속도(G)값들도 기존 수동형 속압쇼바(passive shock absorber) 시스템에 비해 상당히 낮아짐으로써 결과적으로 승차감을 개선시키는 우수한 성능 효과를 나타내고 있다.

## 6. 결 론

반지능형 현가 시스템을 구성하여 승차감 향상을 위해 적합한 일련의 과정 및 제어 알고리즘을 적용하여 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 본 연구에 적용된 제어 알고리즘을 통해 차체의 1차 공진(1~2Hz)을 포함한 중주파수(3~8 Hz)의 가속도 값이 기존 시스템에 비해 현저히 저하됨으로써 승차감 개선을 실현
- 승차감 향상을 위해 설계 및 적용된 혼합 필터의 제어 방법을 통해 실험시, 유발된 제어 지연 현상을 최소화

하여 2~4Hz 내의 승차감 악화 방지를 실현.

- 반능동 현가 시스템에 적용된 반독립형(semi-independent type, HS-SH형) 다단 가변 댐퍼의 성능을 실험(1/4차, 실차)을 통해 그 타당성을 입증하고 및 우수한 제어 성능을 확보.

## 7. 참고 문헌

1. J.L.Humar, "Dynamics of Structures," Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey 07632.
2. Yutaka Aoyama, et al. "Development of the Full Active Suspension by Nissan," Society of Automotive Engineers, SAE 901747.
3. D.C.Karnopp, M.J.Crosby, R.A.Harwood, "Vibration Control using Semi-active Force Generators," Journal of Engineering for Industry, ASME, pp. 619-626, 1974.
4. P.Redlich, H. Wallentowitz, "Vehicle Dynamics with Adaptive or Semi-active Suspension Systems Demands on Hardware and Software," AVEC, pp. 379-384, 1994.
5. J.Emura et al. "Development of the Semi-active Suspension System Based on the Sky-hook Damper Theory," SAE940863, pp. 17-26, 1994.
6. M.Lizell, "Dynamic Leveling a Low Power Active Suspension with Adaptive Control," Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1993.