

〈논 문〉

## 능동적 점성감쇠를 이용한 차량용 동적 흡진기의 모델링과 제어에 관한 연구

A Study about Modeling and Control of Dynamic Absorber for Vehicle  
by Using Active Viscous Damping

김 대 원\* · 배 준 영\*\*

D.W. Kim and J.Y. Bae

(1998년 9월 26일 접수 : 1998년 12월 26일 심사완료)

**Key Words** : Sky-Hook Control(스카이훅 제어), Continuously Variable Dynamic Absorber(가변형 동적 흡진기), Hybrid Filter(복합형 필터), Estimator(절대 속도 추정기), Variable Device of Viscous Damping(점성 감쇠 변환기), Control Apparatus of Dynamic Absorber(동적 흡진기 제어 장치)

### ABSTRACT

Generally, A Dynamic Absorber by using Active viscous Damping is highlighted for effective suspension system, such as improved ride comfort and handling in the market. Lately, this system based on the Sky-Hook damper theory is introduced by the name of "Active Dynamic Absorber" to us. This system has an excellent performance in contrast to Passive, Adaptive Dynamic Absorber, besides having low cost components of system, low energy consumption, light weight of system. In this viewpoint, most of car-maker will adopt this system in the near future. For this reason, we developed Dynamic Absorber by using Active viscous Damping which is equipped with continuously variable Dynamic Absorber and Control logic consisting Filter and Estimator, control apparatus of Dynamic Absorber operated by 16-bit microprocessor of high performance, variable device of viscous Damping, G-sensor so on. In this paper, several important points of development procedure for realizing this system will be described with results in which is obtained from experiment by simulation and Full car test in Proving ground, respectively.

### 1. 서 론

관객에 들어 자동차의 보다 안락한 승차감과 안정된 조종성능을 실현하기 위한 연구가 자동차 및 부

품 maker를 중심으로 활발히 추진되고 있다. 그 중, 차량 주행시 동적 변화에 따른 차체의 거동을 능동적으로 감지하여 차량에 부착된 동적 흡진기와 스프링을 통해 차량의 거동 상태를 조정하는 능동적 점성감쇠를 이용한 동적 흡진기가 크게 부각되고 있으며 또한, 일부 고급 차량에 채택되어 소비자로부터 많은 주목을 받고 있는 실정이다. 일반적으로 능동적 동적 흡진기를 구현하기 위한 것으로는 크게 적

\* 정회원, 장흥대학 자동차전장과

\*\* (주)기아정기 기술연구소

능형, 반능동형, 능동형 동적 흡진기등의 3분류로 구분할 수 있으며 적응형(adaptive)의 경우, 가격이 비교적 저렴하고 시스템의 구성이 단순하지만 조종 성능 이외에는 별다른 큰 효과를 기대하기 힘들며 능동형(full active)의 경우, 가격이 고가이고 시스템 구성이 다소 복잡하며 에너지 소모가 큰 반면, 최상의 조종성능과 승차감을 동시에 실현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 한편, 반능동형(semi-active) 시스템은 능동형 시스템의 우수한 성능과 함께 적응형 시스템이 가지는 저렴한 가격과 단순한 구성을 동시에 갖추고 있기 때문에 향후, 지능형 동적 흡진기의 주류가 될 것으로 전망된다. 최근, 자동차 부품 업체를 중심으로 가격을 낮추고 구성 부품의 사양을 다소 완화하면서도 기존 반능동형 시스템과 동등한 성능을 발휘할 수 있는 능동형 동적 흡진기(active damper system)<sup>(1)</sup>가 개발되어 시판 중에 있다.

따라서, 본 연구에서는 Sky-Hook 댐퍼이론<sup>(2)</sup>에 기초하여 구성된 가변형 동적 흡진기와 필터<sup>(3)</sup> 및 동적 흡진기 절대 속도 추정기<sup>(4)</sup>를 기초로 구성된 차량 거동 제어 시스템, 차량의 동적 특성을 신속하게 판단하고 제어처리를 수행하기 위해 고성능 16bit  $\mu$ -COM으로 구성된 동적 흡진기 제어장치, 동적 흡진기의 점성 감쇠력을 연속적인 단계로 전환하기 위한 고응답성의 점성감쇠 변환기, 차량의 거동을 감지하기 위한 일련의 센서 및 switch로 구성된 능동적 점성 감쇠를 이용한 동적 흡진기 시스템에 대한 모델링과 제어기법을 제시하고 시뮬레이션 실험과 실차 실험을 통해 결과를 검증한다.

## 2. 모델링과 제어

### 2.1 모델링

Fig. 1(a)와 같이 노면으로부터의 가진 진동량에 대한 차량의 절연 구조를 2자유도로 모델링했다. 차체( $M_1$ )와 unsprung mass( $M_2$ )를 집중 질량화 하고 또한 현가 스프링( $K_s$ )과 동적 흡진기( $C$ )를 모델링하고 타이어의 경우는 완전탄성체( $K_t$ )로 고려했다. 이러한 차량의 진동 절연 모델링에서 차체의 동적거동을 효과적으로 제어하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 능동적 점성 감쇠를 이용한 가변형 동적 흡진기를 채택했다.

### 2.2 제어 알고리즘

D. C. Karnopp에 의해 고안된 Sky-Hook이론은

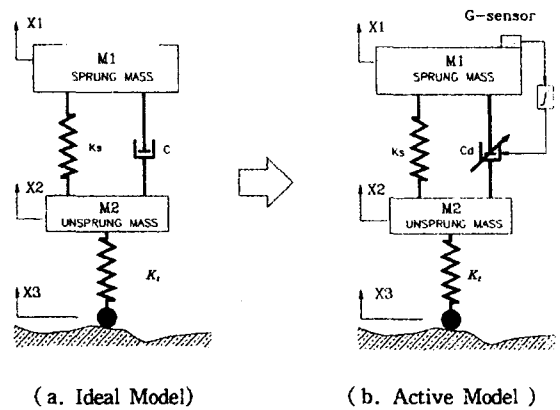


Fig. 1 Modeling of dynamic absorber system about vehicle

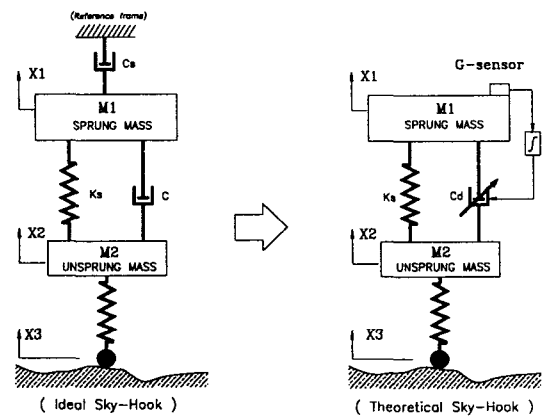


Fig. 2 Schematic diagram of sky-hook theory

Fig. 2와 같이 차체 상부에 가상의 동적 흡진기를 설치하여 노면으로부터 전달되는 차체의 진동을 이상적으로 제진 한다는 것으로, 이를, 현실적으로 구현하기 위해 차체 절대속도와 비례하여 차체와 차축 사이에 설치된 가변형 동적 흡진기의 감쇠력을 제어 하도록 하므로써 효과적인 진동 절연을 구현할 수 있게 되며 따라서, 식 (1), 식 (2)의 조건에 따라 감쇠력을 제어하게 된다. Fig. 3은 Sky-Hook이론을 적용한 능동적 점성감쇠를 이용한 동적 흡진 시스템 제어 상태를 나타내는 것으로 식 (1,2)를 이용하여 종축은 차체 상대속도(동적 흡진기 속도)로 횡축은 차체 절대속도로 설정하여 나타내고 있다. 각 사분면(quadrant)중 1, 3사분면은 감쇠력을 제어(soft~hard)하는 구간이며 나머지 구간은 낮은 감쇠력(soft)을 유지하므로써 제어가 가능한 것으로 이는 Fig. 1의 가변형 동적 흡진기의 감쇠력 특성치와 유사함을 알 수 있다.

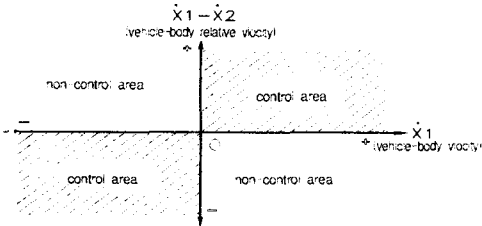
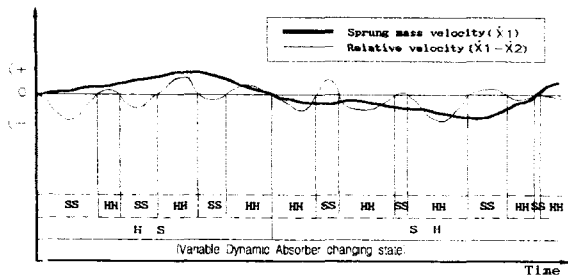


Fig. 3 Schematic diagram of sky-hook control

$$K_1 \cdot (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) > 0, \tag{1}$$

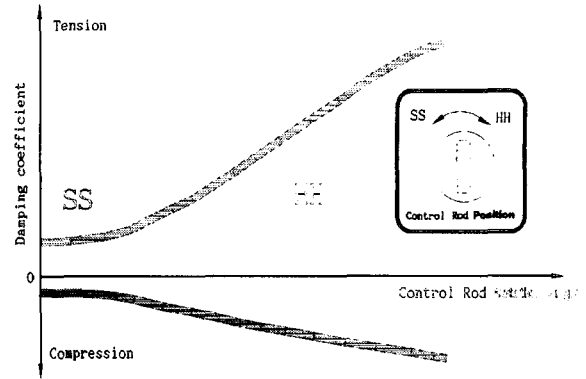
$$F = C_s \cdot \dot{X}_1 \quad (C_s = \max \sim \min)$$

$$K_1 \cdot (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) \leq 0, \tag{2}$$

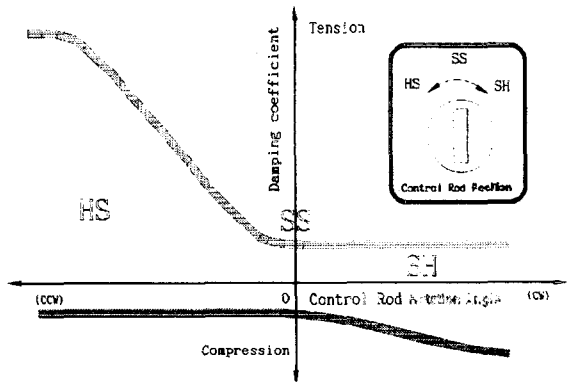
$$F \approx 0 \quad (C_d \approx \min)$$

### 2.3 가변형 동적 흡진기

일반적으로 점성 감쇠력은 동적 흡진기 내부에 채워진 유체 흐름의 저항에 의해 발생하는 것으로서 유로면적의 크기를 가변기구에 의해 조정하므로써 점성감쇠계수를 변경할 수 있도록 한 것이 가변형 동적 흡진기이다. 가변기구를 구성하는 방식으로는 크게 오리피스(orifice)와 감쇠밸브 조정형이 있으며 연속적으로 오리피스조정이 되는 경우, 감쇠밸브 조정형에 비해 고속영역의 감쇠력 특성이 다소 떨어지는 점을 제외하고는 가격, 기간, 구조등 여러가지 측면에서 유리하다. 한편, Fig. 4는 가변형 동적 흡진기의 특성을 나타낸 것으로 일정한 피스톤(piston) 속도에서 동적 흡진기의 감쇠력 조정자(control rod)를 회전하면 방향과 크기에 따라 신축(rebound) 및 압축(compression) 감쇠력이 함께 변화하는 종래의 가변형 동적 흡진기(interrelated type or HH-SS)와 독립적으로 신축 및 압축 감쇠력중의 한 부분만이 변화하는 가변형 동적 흡진기(serin-independent type or HS-SH)로 구분할 수 있다. 종래에 비해 가변형 동적 흡진기는 Sky-Hook



( Interrelated type or HH-SS )



( Variable type or HS-SH )

Fig. 4 Dynamic absorbers by using viscous damping

댐퍼이론에서 차체 상대속도(동적 흡진기 속도)영역을 기계적인 절환에 의해 구현하도록 한 것이 특징이며 따라서, Sky-Hook 제어를 적용할 경우, 차체 상대속도(=댐퍼속도)의 정보없이 차체 절대속도 값만으로 구현이 가능하게 된다. 본 연구에서 개발된 연속형 오리피스 가변 방식의 가변형 동적 흡진기는 피스톤을 중심으로, 좌우측에 충만된 작동유를 신축 및 압축상태에 따라 별도의 유로를 형성하도록 하는 체크(check)밸브와 가변 유로인 오리피스를 이용하여 유로 면적을 연속적으로 개폐하도록 구성되어 있으며 오리피스면적을 조정하는 조정자가 피스톤 로드(piston rod)의 상단부까지 연장되어 이 조정자의 회전각도에 따라 감쇠력이 다르게 발생 (soft~hard)될 수 있도록 구성되어 있다.

Fig. 5는 개발된 가변형 동적 흡진기의 조정자를 HS영역에서 SH영역으로 회전시켜 얻은 감쇠력 특성값으로, 신축 감쇠력 조정시, 신축의 감쇠력이 hard에서 soft영역으로 변화하는 반면, 압축은 일정 영역(soft)을 유지하는 HS특성을 가지며 압축 감쇠력 조정시, 그 반대의 현상(SH)이 나타나고 신·압

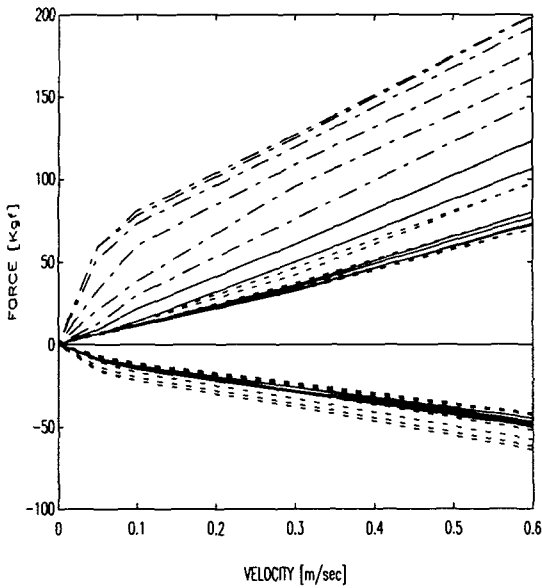


Fig. 5 Characteristics of variable dynamic absorber

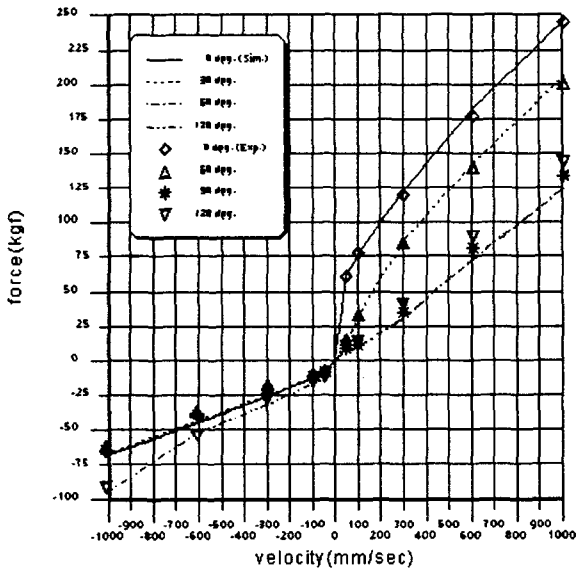


Fig. 6 Comparison of theoretical result and experimental result about variable dynamic absorber

측 모두 soft한 감쇠력을 유지(SS)하는 특징을 가지고 있음을 알 수 있다. 한편, 개발된 가변형 동적 흡진기의 기본적인 감쇠력변화는 내부 유로저항을 조정하는 유로면적의 변경이 핵심 과제이며 본 연구에서는 여러개의 관통 구멍을 통해 유입되는 작동유를 직사각형상의 슬릿(slit)을 통해 그 면적을 제한하도록 하는 가변기구를 적용하고 있다.

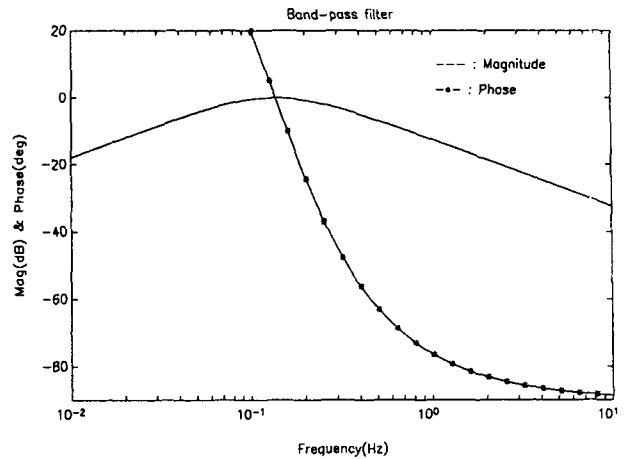


Fig. 7 Intergrated filter characteristic

한편, 가변형 동적 흡진기의 감쇠력 조정(tuning) 시간을 단축하고 내부 부품의 조립사양을 용이하게 결정하기 위해 가변형 동적 흡진기를 13개의 유실(oil chamber)과 그 유실을 통과하는 19개의 유로(orifice)로 규정하고 모델링(modeling)해석기법을 수행하여 감쇠력을 산출하였다. Fig. 6은 가변형 동적 흡진기의 조정자 각도를 0~120deg 구간을 3등분하여 실험과 비교한 해석 결과로 감쇠력값이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 감쇠력 설계시의 시행오차(trial error)를 최소화 할 수 있었다.

#### 2.4 차체의 절대 속도 변환과 주파수 분석

Sky-Hook이론에 기초하여 구성된 제어 알고리즘(algorithm)을 구현하기 위해서는 우선, 차체의 절대속도값을 산출하는 것이 필요하며 이를 위해 본 연구에서는 차체부에 수직방향 가속도센서(TI社, CAS)를 부착하여 차체의 절대 가속도를 측정하였고 이 값을 적분처리 과정을 통해 절대속도로 변환하였다. 적분과정은 가속도 신호값의 DC offset을 최소화하고 식 3과 같은 형태의 적분기를 통과시켜 실시간 적분 산출이 가능하도록 설계된 적분기의 특성은 Fig. 7과 같다.

$$G(s) = \frac{K_0 \cdot S}{S^2 + \alpha_0 \cdot S + \beta_0} \quad (3)$$

또한 차체로 유입되는 가속도값의 주파수 성분을 파악하기 위해 2종류의 하이브리드 필터(hybrid filter)와 차체 가속도를 이용한 동적 흡진기의 속도 산출기로 구성되는 estimator를 각각 설계하였다. Fig. 8은 유입되는 가속도를 이용하여 각 주파수성

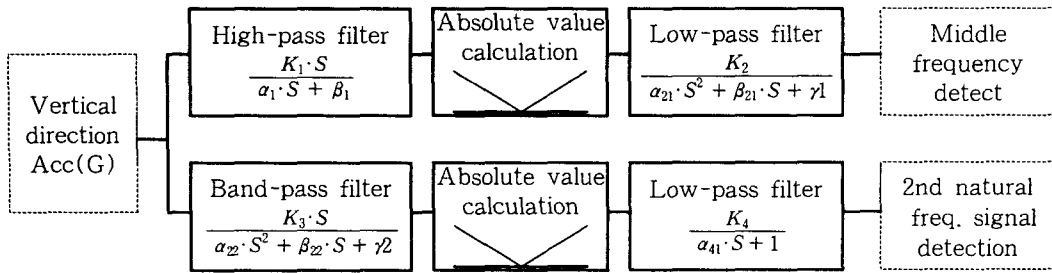


Fig. 8 Hybrid filter construction

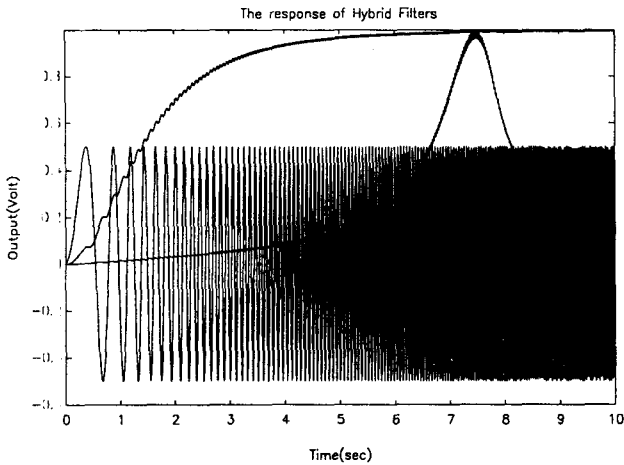


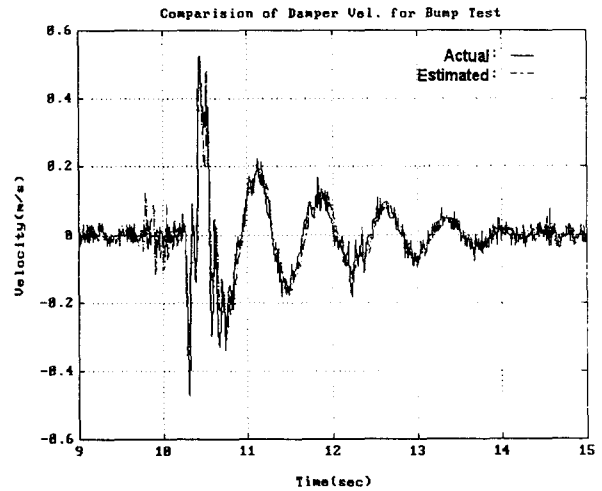
Fig. 9 Hybrid filter of characteristic

분값을 추정할 수 있는 하이브리드 필터의 구성도를 나타내고 있다. Fig. 9는 sine sweep 식 (4)을 이용하여 시험신호(0.01~15 Hz 성분)를 통과시켜 얻은 각 필터의 출력결과를 나타낸 것으로 이는 입력 주파수의 변화에 따라 일정 영역으로 수렴하는 출력값과 일정 영역에 순간적으로 임의의 값으로 귀착되는 출력결과가 발생됨을 알 수 있다. 따라서, 수차례 반복 시행된 실차 및 시뮬레이션 시험을 통해, 입력신호값의 크기값이 규정되면 그 신호값의 주파수 성분을 추적하는 것이 가능함을 알 수 있다.

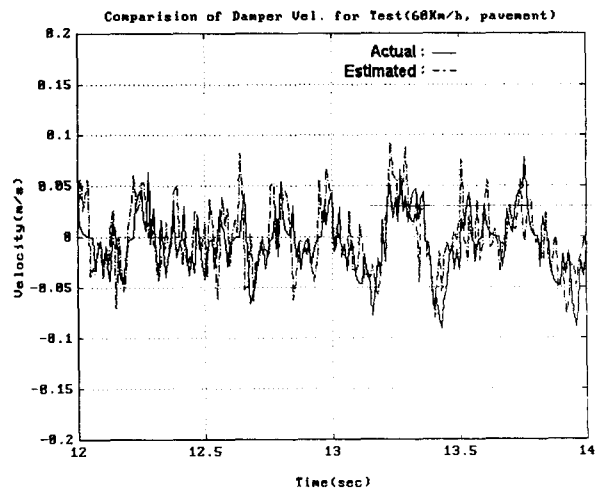
$$Y(t) = \sin \left[ \left( \pi \times \frac{F_{\max} - F_{\min}}{T_{\text{end}}} \times t + 2 \cdot \pi F_{\max} \right) \times t \right] \quad (4)$$

### 2.5 동적 흡진기의 절대 속도 추정

동적 흡진기 속도를 산출하기 위한 추정기의 경우, 식 (5)과 같이 구성된 차체와 차축간의 상관식으로 부터 라플라스변환(laplace transform)을 이용하면 쉽게 유도가능하며 식 (6)과 같은 형태로 산출된다 동적 흡진기를 적용한 상태에서의 estimator를



(a) Bump traverse test



(b) General road traverse test

Fig. 10 Comparison of actual result and estimated result about absolute velocity of dynamic absorber

통한 동적 흡진기의 속도 산출은 이미, table화하여 작성된 가변형 동적 흡진기의 신·압축 감쇠계수값을 기초로 실시간적으로 이를 근사화(interpolation)하여 수행되었다. Fig. 10은 차량 주행(3인 승차기준)시,

estimator를 통해 추정된 동적 흡진기 속도와 차체에 취부된 동적 흡진기의 속도 검출센서에 의해 계측된 출력 결과를 비교하여 나타내고 있으며 그 결과, 국소부위를 제외하고는 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

$$\therefore M_1 \cdot \ddot{X}_1(t) + K_s \cdot [X_1(t) - X_2(t)] + C_d \cdot [\dot{X}_1(t) - \dot{X}_2(t)] = 0 \quad (5)$$

$$\therefore \frac{\ddot{X}_1(t) - \ddot{X}_2(t)}{\dot{X}_1(t)} = \int_0^t \left[ \frac{-M_1 \cdot S}{K_s + C_d \cdot S} \right] \quad (6)$$

### 2.6 동적 흡진기 제어 장치

능동적 점성 감쇠를 이용한 동적 흡진 시스템을 구현하기 위해 필요한 각종 센서(상하가속도, 조향각, 차속) 및 switch(brake, parking, selector)신호를 입력받아 개발된 제어 logic을 기초로 내부 연산처리를 수행한 후, 최종적으로 고응답성의 점성 감쇠 변환기를 기동시켜 가변형 동적 흡진기의 감쇠력을 절환해 줄 수 있도록 하는 동적 흡진기 제어장치는 Fig. 11과 같다. 이러한 동적 흡진기 제어장치는 센서 및 점성 감쇠 변환기 동작상태의 이상유무를 판단(fail-self)하고, 내부처리 상태를 통신선로(RS232C)를 통해 외부에서 진단(diagnosis)할 수 있는 기능도 함께 갖추고 있으며 실차시험시, 조정(tuning)에 따른 제어값 변경이 용이하도록 monitor program(IBM PC 동작)을 개발하여 구성하였고 외부 Clock 16 MHz로 구동되는 고속 16 bit Single chip microprocessor(H8/300H, Hitachi社)를 [ROM(64 KB), RAM(2 KB), Timer(5 ch, PWM),

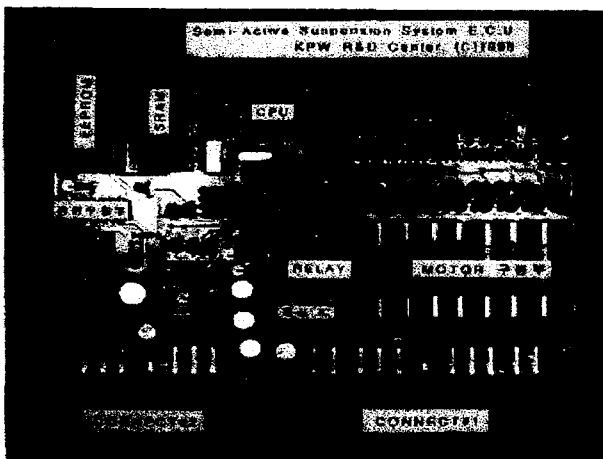


Fig. 11 Control apparatus of dynamic absorber

A/D(10 bit/8 ch), PIO(55 pin)] CPU로 하여 PWM 구동방식의 고응답성의 점성 감쇠 변환기 구동회로와 통신, 전원회로로 구성되어 있다. 특히, OTP(one time program) type CPU를 사용하여 외부에 별도의 Flash ROM을 설치함으로써 기록장비(ROM writer)없이, 직접 노트북 PC등의 통신선로를 직접 이용하여 처리함으로써 개발기간 및 소요 경비를 최소화하는 방향으로 동적 흡진기 제어 장치를 개발하였다.

### 2.7 고응답성의 점성감쇠 변환기

차량내 장치가 용이하고 위치제어 및 고속절환이 용이하도록 회전 토크가 비교적 큰, stoper 내장형 bi-polar 고응답성의 점성감쇠 변환기를 채택하였으며 통상의 지능형 현가시스템이 요구하는 5단 이상의 감쇠력 절환이 될 수 있도록 절환각이 7.5 deg/step인 모터를 사용하여 감쇠력을 16단계로 발생될 수 있도록 하였다. 한편, 점성감쇠 변환기를 사용할 경우, 회전위치에 대한 초기 정보를 얻기가 곤란하기 때문에 시스템의 최초 동작시 1회에 한하여, stopper내에서 회동할 수 있는 최대의 위치이동값을 시계방향으로 인가한 후, 다시금 반시계방향으로 이동시키는 등의 위치 초기화 동작을 수행하도록 하였다. 그러나, 점성감쇠 변환기 내부의 회전자가 stopper를 만나게 될 때, 打音과 反動이 발생되므로 인해 위치오차가 발생된다. 이러한 문제를 해소하기 위해 Fig. 12와 같이 차량 장착 상태와 동일하게 구성된 점성감쇠 변환기 구동 시험기내에서, 점성감쇠 변환기 구동신호값에 PWM신호를 합성시켜 이때의 PWM duty값을 점진적으로 감소시켜주

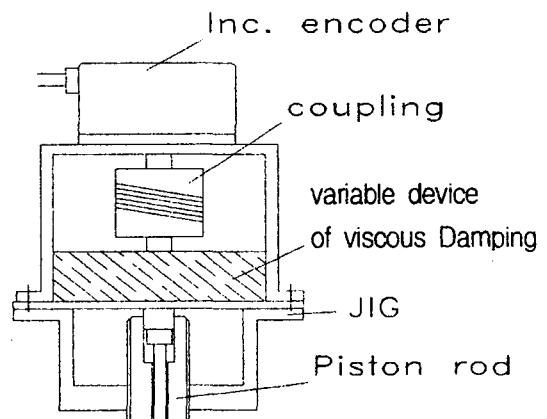
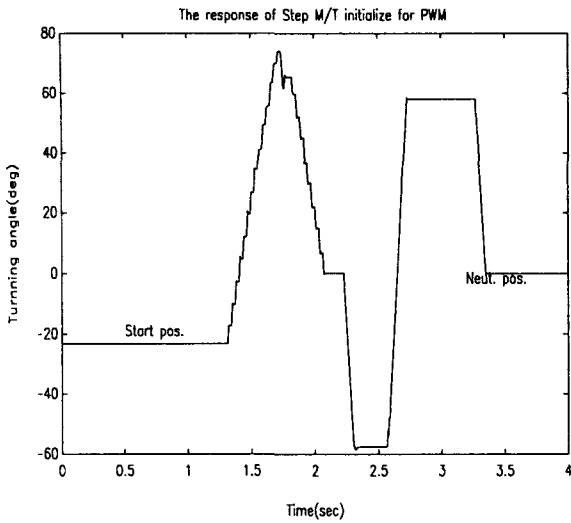
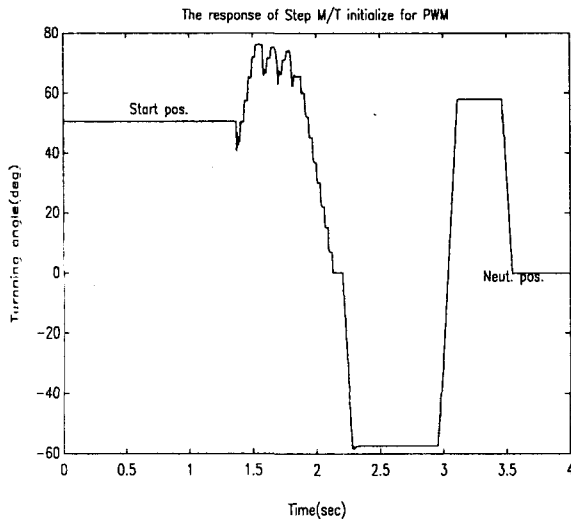


Fig. 12 Driving test apparatus for variable device of viscous damping.



( HS area reference )



( SH area reference )

Fig. 13 Initial position calibration for variable device of viscous damping

따라서 초기위치를 보정하는 구동방법을 개발하였다. Fig. 13은 이러한 구동방법을 통해 나타난 초기위치 보정결과로 임의의 위치에서도 항상, 일정하게 최종 위치오차( $\pm 1$  step)범위내로 귀착됨을 확인할 수 있다.

### 2.8 차량 거동 제어 시스템

능동적 점성감쇠를 이용한 동적 흡진 시스템을 구성하는 기본적인 제어전략(strategy)은 차체에서 발생하는 6 D.O.F 운동 중, bounce, roll, pitch운동을 최소화하기 위한 것이며, 일반적으로 Fig. 14에서

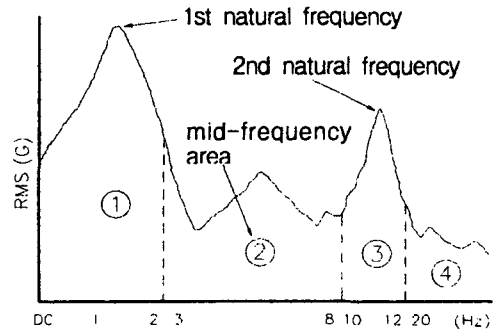


Fig. 14 Frequency characteristic of car body vibration

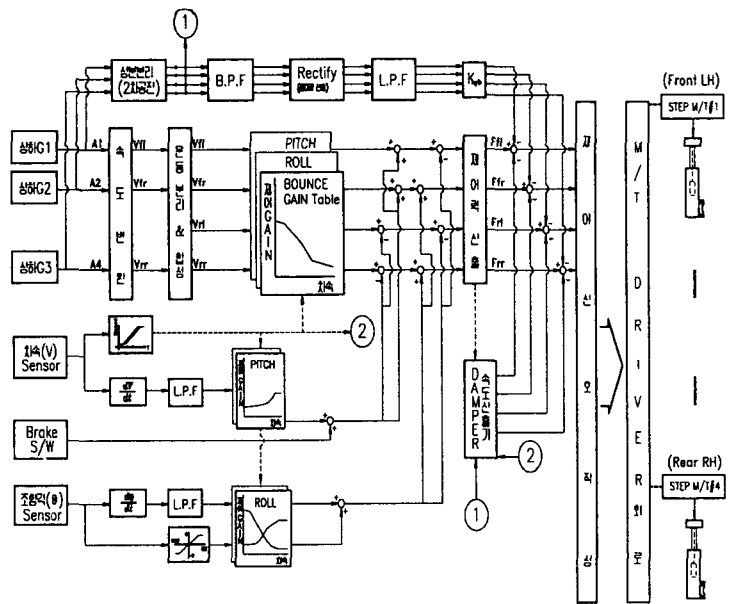


Fig. 15 Block diagram of automobile behavior control system

나타난 것과 같이 차체부 상가속도값의 주파수 응답 영역<sup>(5)</sup>에서, 차량의 자세(roll, pitch)와 1차공진부(bounce)인 ①영역(DC~1차공진)은 강한 감쇠력(hard)을, 승차감(bounce)에 민감한 영향을 주는 ②영역(중주파수)은 부드러운 감쇠력(soft)을, Tire의 노면접지력 및 조종성과 관련된 ③영역(2차공진)은 강한 감쇠력(hard)을, NVH와 관련된 ④영역(harshness)은 부드러운 감쇠력(soft)을 유지시키는 방향으로 설계되었다. Fig. 15는 본 연구에서 개발된 차량거동 제어 시스템의 블록선도를 나타낸 것으로 Sky-Hook제어기를 기초로 각 바퀴부의 차체상하 운동을 bounce 및 roll, pitch 운동으로 각각 분리하여 각 부의 가변형 동적 흡진기를 독립적으로 제어하도록 구성하였고 특히, 급속한 roll 및 pitch운

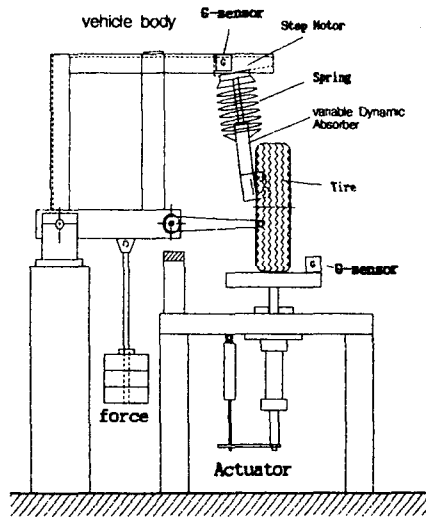
동을 발생에 따른 입력신호값(차속 및 조향각속도 센서)을 직접 이용하여 이를 억제하도록 하는 feedforward 제어를 적용하였다. 또한, 주파수 의존적인 필터의 특성값을 기초로, 감쇠력 제어값의 상태를 제한하고 estimator에 의해 추정된 동적 흡진기의 속도를 이용하여 각 제어 gain값들의 조정에 따른 설정 자유도를 높여 줌으로써 시스템 성능을 보다 효과적으로 구현할 수 있도록 추진하였다.

### 3. 실험 및 고찰

#### 3.1 시뮬레이션 시험

본 연구에서 개발된 제어기와 구현된 시스템의 효

과를 검증하고 성능을 파악하기 위한 주행 시험에 앞서, Fig. 16과 같이 구성된 1/4차 시험 모델과 1축 가진 시험기를 통해 시뮬레이션 시험을 수행하였다. 1/4차 모델 시험의 경우, 시험기의 가진부를 ±10 mm 변위 및 0.125~12 Hz의 sine파형으로 상하가진 상태에서 차체부로 유입되는 가속도값을 FFT장비(B&K社)를 통해 특성분석을 수행하였으며 그 결과, Fig. 17과 같이 기존(passive) 시스템에 비해 중주파수(3~8 Hz)는 낮아지며 2차공진부(10~12 Hz)에서는 상승하는 우수한 제진 효과를 얻을 수 있었다. 한편, Fig. 18은 실차상태에서의 성능평가를 위한 것으로, 1축가진 시험기를 통해 전륜 좌측바퀴 부를 ±10 mm 변위 및 1.4 Hz(1차공진)의 주파수로 가진 한 결과이며 1/4차 시험과 마찬가지로 우수한



(a) Experimental apparatus of 1/4 vehicle model



(b) One axle actuating experimental apparatus

Fig. 16 Schematics of bench tester

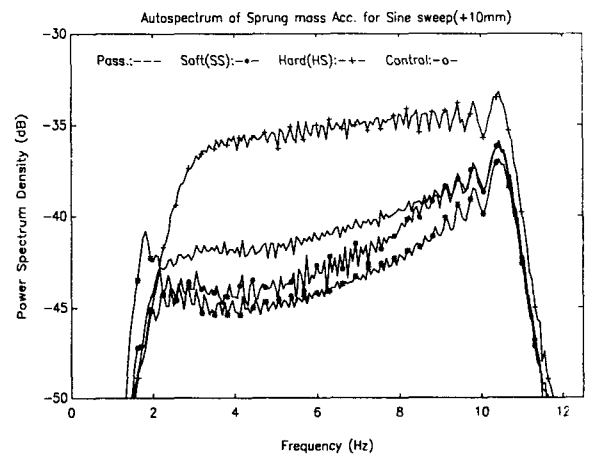


Fig. 17 Test results of frequency characteristic (1/4 Model)

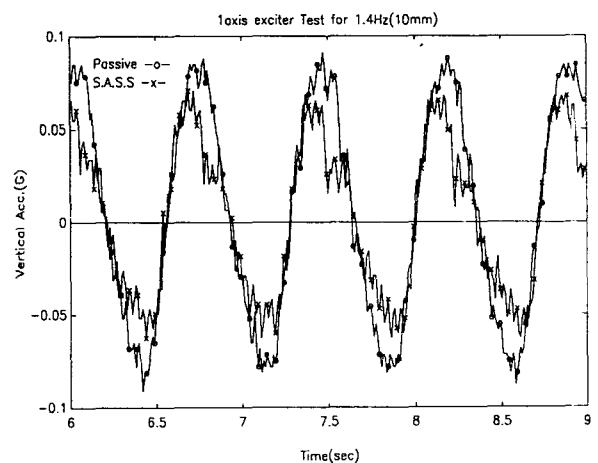


Fig. 18 Actuating results of time area (One-axle actuating)



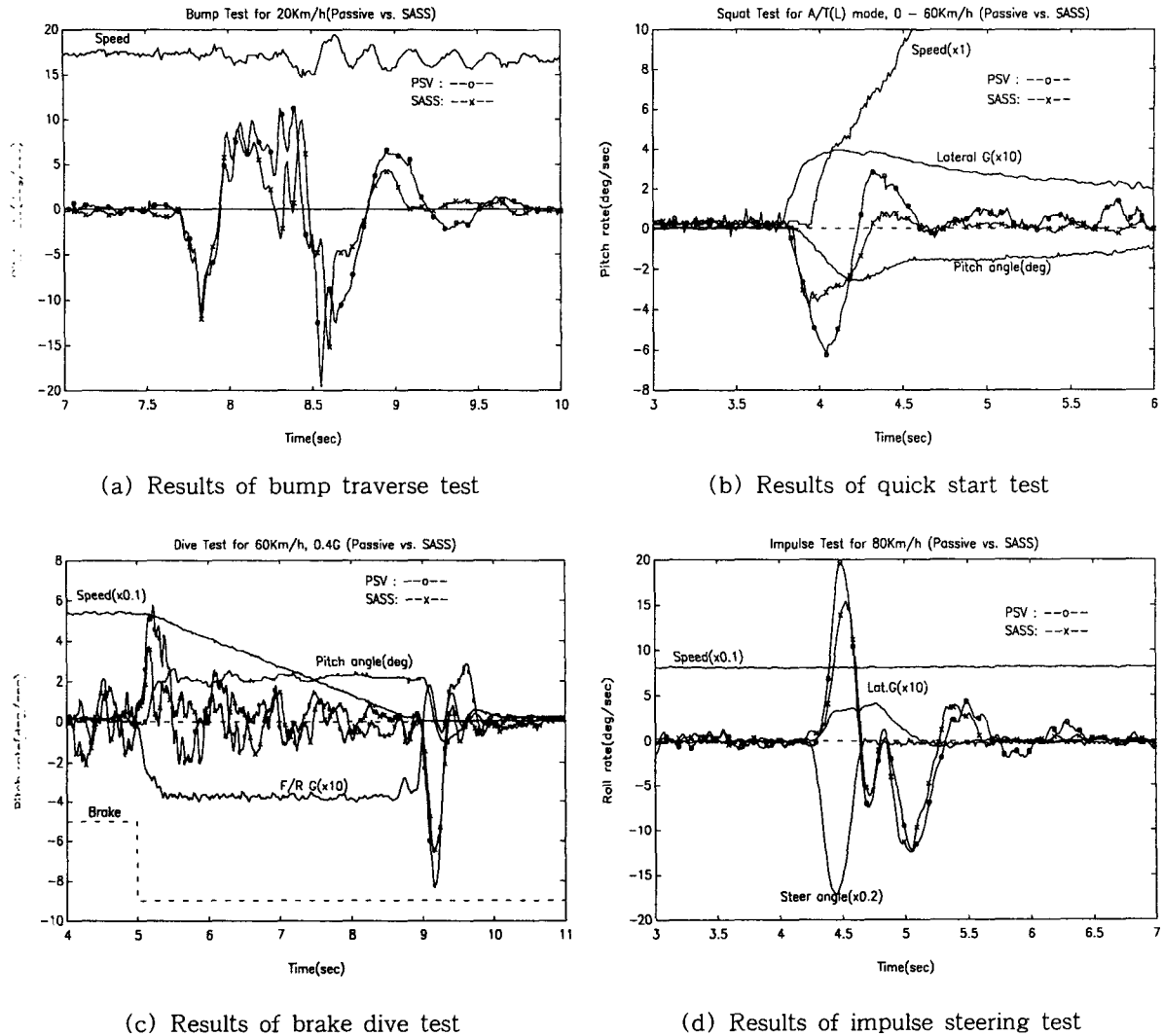


Fig. 19 Results of handling performance test

제진효과를 얻을 수 있었다.

### 3.2 실차 실험

차량의 주행시험은 ISO, JASO에서 규정한 시험 조건을 기초로 일반 노면(ISO64 C등급 수준) 및 proving ground를 기준으로 동일한 차량에 기존 (passive) 동적 흡진기를 부착하거나 혹은 능동적 점성감쇠를 이용한 동적 흡진기를 부착한 상태로 동일한 시험을 반복하여 시행되었다. Fig. 19는 bump노면 통과, 급출발, 급정지, impulse조향에 따른 특성 결과를 나타낸 것이며 전반적으로 기존 차량에 비해 20~30%정도의 개선 효과를 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 20은 일반 asphalt노면을 40, 60, 80 km/h로

정속 주행한 상태에서 운전석 floor부에 위치한 상하 가속도값을 FFT (AND社)장비를 이용, 주파수 특성분석(PSD)을 수행한 결과로, 노면으로부터 전달되는 가속도 신호값의 크기가 감소하므로써 승차감 개선에 우수한 효과가 나타남을 알 수 있다. 하지만, 중주파수의 일부 영역(2~4 Hz)에서는 다소 미흡한 효과가 나타나며 향후, 이에 따른 보완적 연구가 필요하리라 사료된다. 한편, Fig. 21은 일반주행시험로에서 차속을 30~120 km/h 구간으로 각각 정속주행시킨 상태에서 최적의 제어 gain값을 조정하여 얻은 roll angle값(최대치 비교)의 결과로, 기존 차량 (passive)에 비해 개발된 시스템은 적어도 22% 이상의 개선효과가 있음을 알 수 있다.

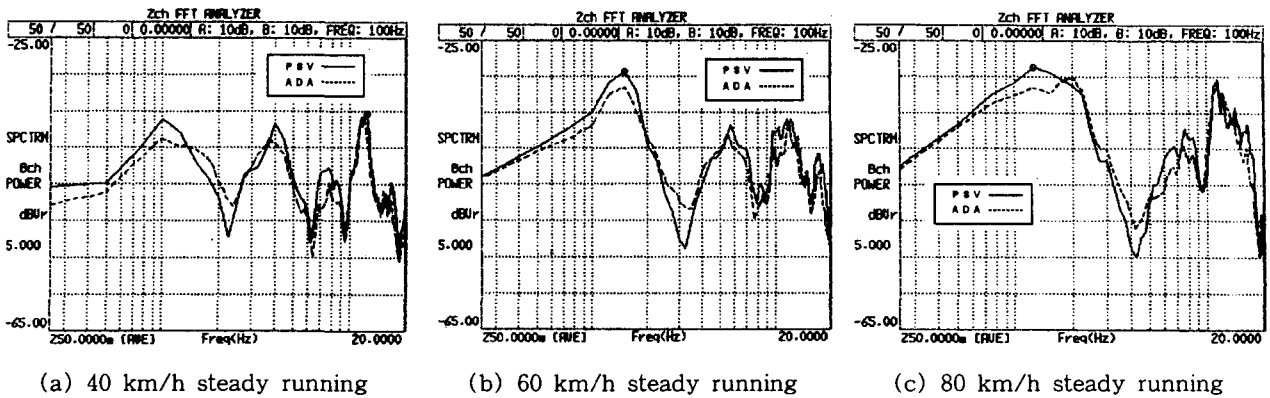


Fig. 20 Evaluation results of ride comfort

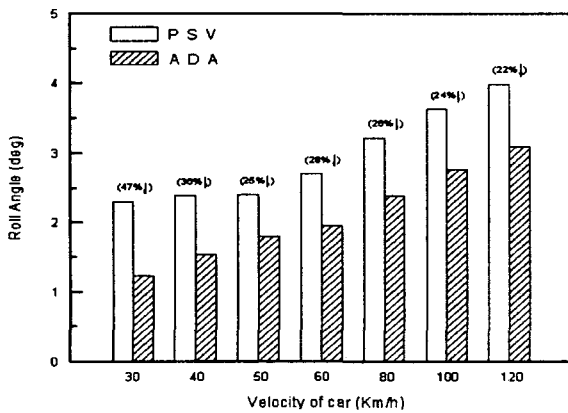


Fig. 21 Results of handling performance evaluation

#### 4. 결 론

능동적 점성감쇠를 이용한 동적 흡진 시스템을 구성하여 승차감 및 조종성능을 향상시키기 위한 일련의 수행과정을 추진한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 능동적 점성감쇠를 이용한 동적 흡진 시스템에 적용된 가변형 동적 흡진기의 성능을 실험(1/4차, 1축가진, 실차)을 통해 그 타당성을 입증하고 우수한 제어성능을 확보할 수 있었다.

(2) Sky-Hook 제어를 구현하기 위한 적분기와 필터 및 동적 흡진기의 절대속도 추정기로 구성된 차량거동 제어 시스템을 개발하였고 제어시스템의 성능을 시뮬레이션 및 실차 주행실험을 통해 이를 검증하였다.

(3) 가변형 동적 흡진기의 절환에 필요한 고응답성의 점성감쇠 변환기에 있어서, 초기동작에 따른 위치오차 및 이음을 최소화 할 수 있는 PWM 구동기를 개발하였다.

(4) 유체저항에 의해 점성 감쇠력을 발생시키는 동적 흡진기의 가변기구와 그 구조를 해석기술을 통해 모델링하고 이를 실험값과 근사화함으로써 성능 예측이 가능하며 설계변경에 따른 개발기간을 최소화할 수 있는 동적 흡진기 해석기술을 확보하였다.

(5) 동적 흡진기 제어 장치 내부 구동 프로그램의 각 제어변수값들을 외부 PC의 통신선로를 통해 모니터링하면서 조정(tuning)할 수 있는 조정 프로그램을 개발함으로써 보다 신속한 시스템의 성능확보가 가능하였다.

#### 참 고 문 헌

- (1) M. Lizell, 1988, "Semi-Active Damping", IMechE, pp. 83~91.
- (2) Kyoungsu Yi et al, 1996, "An Investigation into the Control and Performance of Vehicle Semi-Active Suspension", International Symposium on Advanced Vehicle Control, pp. 47~61, AVEC '96.
- (3) M. Lizell, 1993, "Dynamic Leveling a Low Power Active Suspension with Adaptive Control", Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- (4) D. C. Karnopp, M. J. Crosby, R. A. Harwood, 1974, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", Journal of Engineering for Industry, ASME, pp. 619~626.
- (5) J. Emura et al, 1994, "Development of the Semi-active Suspension System Based on the Sky-hook Damper Theory", SAE940863, pp. 17~26.