

Hardware-in-the-loop 시뮬레이션을 이용한 연속 가변식 반능동 현가 시스템의 차량 동역학적 해석

Vehicle Dynamic Analysis of Continuously Controlled Semi-active Suspension using Hardware-in-the-Loop Simulation

°황 성호*, 허 승진[†], 김 홍석[‡], 이 교일*

*서울대학교 기계설계학과 (Tel: 880-7143; FAX: 883-1513; E-mail: lki@fapa.snu.ac.kr)

[†]국민대학교 자동차공학과 (Tel: 910-4713; FAX: 910-4718)

[‡]생산기술연구원 (Tel: 850-9255; FAX: 850-9244; E-mail: r6169@intech.kaitech.re.kr)

Abstracts A semi-active suspension system with continuously variable damper is greatly expected to be mainly used in the future as a high-performance suspension system due to its cost-effectiveness, light weight, and low energy consumption. To develop the suitable control logic for the semi-active suspension system, the hardware-in-the-loop simulation is performed with the experimental continuously variable damper combined with a quarter-car model. The hardware-in-the-loop simulation results are compared for passive, on/off controlled, and continuously controlled dampers in the aspects of ride comfort and driving safety, assuming each damper to be installed on a vehicle.

Keywords Semi-active suspension, Hardware-in-the-loop simulation, Continuously variable damper, Skyhook control

1. 서론

전자 기술의 발달에 힘입어 승용차용 현가 시스템도 점차 전자화되어 가고 있으며, 저가 고품질의 시스템에 대한 요구가 증가하고 있다. 승용차용 전자 제어식 현가 시스템은 개회로 개념의 제어 방식을 갖는 적응식 가변 댐퍼 시스템(adaptive variable damper system)이 가장 오래 전부터 개발되기 시작하여 최근에는 이미 많은 대형 승용차에 실용화되고 있다. 그러나, 이 시스템은 기존 수동 댐퍼 시스템과 적어도 동일한 주행 안정성(driving safety)을 유지하면서 승차감(ride comfort)을 향상시키고자 하는 전자 제어식 현가 시스템의 기본적인 성능 목표에 도달하기가 어려울 뿐만 아니라, 일반적으로 숙련되지 않은 운전자는 실제적으로 성능 향상을 느끼기가 쉽지 않았다.

이와 함께 병행되어 개발되기 시작한 능동형 현가 시스템(active suspension system)의 경우, 차체 및 바퀴 사이에 유압 작동기를 장착하여 차체 운동 제어 및 승차감 제어 측면에서 혁신적인 향상을 기대할 수 있었으나, 외부로부터 3~10kW의 에너지 공급 및 고가의 유압 부품의 사용으로 인하여 궁극적인 부품 비용 대비 성능 향상 지수가 결코 만족할만하지 못하다. 더욱이 주행 안정성과 직결되는 바퀴의 운동을 제어하기 위해서는 더욱 많은 비용과 에너지 소모가 요구됨으로써 실용화 기술개발에는

많은 한계성을 보이고 있는 실정이다.

이에 따라서 최근들어 초기의 개회로 제어 개념을 갖는 가변 댐퍼 시스템을 개선하고자 하는 노력의 일환으로 외부로부터의 에너지 공급이 불필요하며 폐회로 제어 개념을 갖는 이른바 반능동형 현가 시스템(semi-active suspension system)이 크게 주목받기 시작하고 있다. 반능동형 현가 시스템의 초기 개발 단계에서는 기존의 3~4단 가변 댐퍼를 그대로 적용하고 제어 개념만을 변환시키고자 하였으나, 종래의 적응식 가변 댐퍼 시스템에 비하여 뚜렷한 성능 향상을 보일 수 없었다. 따라서, 가변 댐퍼 제작 기술이 아울러 개선되기 시작하여 오늘날에는 연속 가변 댐퍼(continuously variable damper)가 초기 실용화 단계에 이르렀다. 그러나, 연속 가변 댐퍼가 반능동형 현가 시스템으로서 승차감 및 주행 안정성 측면에서 최적의 성능을 발휘하기 위해서는 이에 상응하는 효과적인 제어 로직의 개발이 절실하다.

이러한 기술개발 동향을 바탕으로 본 논문에서는 가장 경제성 있는 전자 제어식 현가 시스템으로 부각되고 있는 반능동형 연속 가변식 댐퍼의 제어 로직에 대한 이론적 연구를 수행하고 나아가서, 수학적 모델의 어려움이 제기되는 연속 가변식 댐퍼를 실험용으로 제작하여 실시간 차량 시뮬레이션 프로그램과 결합하여 시험 분석하는 이른바 'Hardware-in-the-Loop(HWIL)' 개념의 시험 시스템을 구축, 응용하고자 한다[1][4].

2. Hardware-in-the-Loop 시뮬레이션 시스템

2.1 HWIL 시스템의 개요

HWIL 시스템은 차량 동역학 시뮬레이터, 센서 시뮬레이터로 구성되는 소프트웨어부 (software part)와 시험 대상 및 부하 시뮬레이터로 구성되는 하드웨어부 (hardware part), 그리고 이를 연결시켜 주는 인터페이스부 (interface part)로 이루어진다. 차량 동역학 시뮬레이터는 주어진 운전 조건 및 노면 입력 조건에 따른 차량의 거동을 해석하는 부분으로 차량 시스템의 모델 및 이론적 계산을 위한 소프트웨어를 의미한다. 센서 시뮬레이터는 차량 시스템 제어를 위하여 사용되는 각종 센서들을 모델링하여 차량의 거동에 대한 센서의 응답을 계산하며, 차량 모델에 의해 출력되는 제어 신호를 실제 하드웨어 구동을 위한 신호로 변환시키는 기능을 한다. 하드웨어부의 부하 시뮬레이터는 시험 대상 하드웨어에 가상의 부하를 부가함으로써 실제에서와 같은 작동 조건을 구현시키는 역할을 한다. 인터페이스부는 센서 시뮬레이터로부터 출력되는 데이터를 차량 시스템을 포함한 하드웨어 구동에 필요한 신호로 변환시키고, 하드웨어로부터 발생된 출력 신호를 다시 차량 동역학 시뮬레이터에 피드백 (feedback)시킴으로써 하드웨어와 소프트웨어의 중간 접속 역할을 한다[6]. 그림 1 은 HWIL 시뮬레이션 시스템의 구성도를 나타낸다.

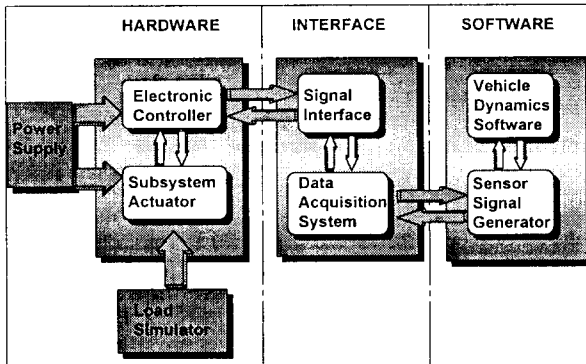


그림 1. Hardware-in-the-loop 시뮬레이션 시스템의 개요
Fig. 1. Configuration of HWIL simulation system

2.2 반능동 현가 시스템용 HWIL 실험 장치

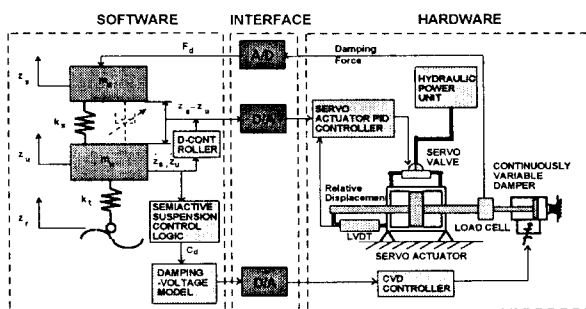


그림 2. 반능동 현가 시스템의 HWIL 실험 장치 구성도
Fig. 2. HWIL testing apparatus for semi-active suspension

반능동 현가 시스템의 HWIL 시뮬레이션을 위한 실험 장치 구성도는 그림 2와 같다. 차량 모델은 스프링상 질량 (sprung mass), 스프링하 질량 (unsprung mass), 현가 스프링 (suspension spring), 타이어로 구성되며, 관심 부분인 댐퍼 요소는 빠진 1/4차 모델을 사용하였다. 시험 조건에 따라 차량 모델로부터 계산된 댐퍼 변형량 (damper deflection)은 유압 서보 액츄에이터 (hydraulic servo actuator)에 입력 신호로 작용하여 시험대상인 댐퍼에 속도를 발생시키게 되는데, 이것은 LVDT에 의해 상대 변위 (relative displacement)가 측정되어 유압 서보 액츄에이터 제어기에서 독립적인 PID 제어 루프가 형성된다. 시험대상인 가변 댐퍼는 전자 비례식 드로틀 밸브 (proportional throttle control valve)를 사용하여 실험용으로 제작하여 사용하였다. 이 댐퍼는 컴퓨터에서 반능동 현가 시스템 제어 로직에 의해 계산된 제어 신호를 연속 가변 댐퍼 제어기에 입력시킴으로써 감쇠력이 가변되도록 되어 있다. 가변 댐퍼의 작동에 의해 발생하는 감쇠력은 로드셀로 측정되어 인터페이스 시스템을 거친 후 차량 동역학 모델로 피드백되어 HWIL 시뮬레이션을 수행하게 된다. 그림 3은 구성된 HWIL 시뮬레이션 실험 장치를 보여준다.

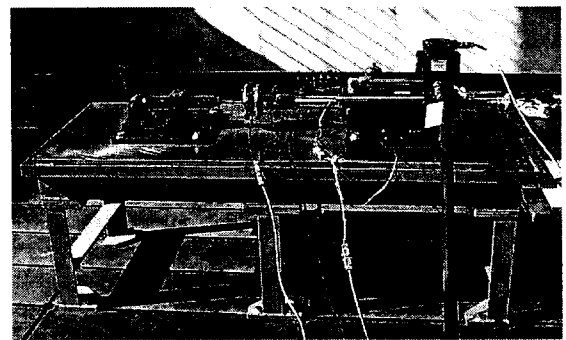


그림 3. HWIL 실험 장치
Fig. 3. HWIL test stand

2.3 1/4 차량 현가 시스템 모델

반능동 현가 시스템의 차량 모델은 1/4차 2자유도 모델을 사용하였으며, 이 모델에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + B_1 f_d + B_2 u \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & 0 & -\frac{k_t}{m_u} & 0 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m_s} \\ 0 \\ \frac{1}{m_u} \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

여기서, m_s 는 스프링상 질량, m_u 는 스프링하 질량, k_s 는 현가 스프링 상수, k_t 는 타이어 스프링 상수를 나타내고 있다. 또한 f_d 는 댐퍼의 감쇠력을 의미하며 실제 댐퍼로부터 측정된 하중이 1/4차 모델에 작용하게 된다.

본 논문에서 사용된 모델 파라미터는 국내 중형급 승용차에

해당하는 수치로서 다음과 같이 설정하였다.

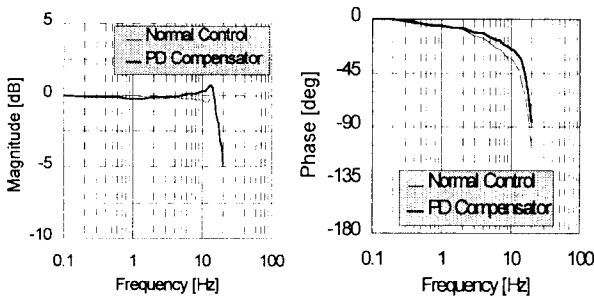
$$\begin{aligned} m_s &= 337\text{kg}, & m_u &= 55\text{kg}, \\ k_s &= 22,750\text{N/m}, & k_t &= 245,000\text{N/m} \end{aligned}$$

2.4 가진용 유압 서보 액츄에이터의 성능

가진용 유압 서보 액츄에이터는 컴퓨터에서 계산된 차량 모델의 해석 결과인 스프링상 질량과 스프링하 질량의 상대 속도 즉, 댐퍼에 작용하는 속도를 구현시키기 위한 장치이다. 따라서 동적인 속도를 충분히 구현할 수 있도록 유압 동력원과 가진 실린더를 설계하는 것이 중요하며, 본 논문에서는 스트로크 228mm, 최대 이동 속도 1.5m/s, 최대 하중 1600 kgf (공급 압력: 100 kgf/cm²)로 설계하였다. 차량 동역학 해석에 있어서 관심 주파수는 20Hz까지의 영역이며, 따라서 유압 액츄에이터의 응답 속도는 통상 이것의 5배 즉, 10msec 정도는 되어야 한다. 그러나 빠른 응답 특성을 갖는 유압 시스템 선정에는 한계가 있으며, 따라서 본 논문에서는 주어진 유압 시스템의 응답 속도를 높이기 위하여 식 (2)와 같이 댐퍼의 상대 속도뿐만 아니라 댐퍼의 지령 속도를 고려하여 제어 입력신호 (command signal)를 생성시킨다[5].

$$\dot{x}_r = \dot{x}_s - \dot{x}_u + K_D(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \quad (2)$$

이렇게 함으로써 서보 액츄에이터는 진폭(amplitude) 측면에서는 오버 슈트(overshoot)가 증가하지만, 위상각(phase) 측면에서 약 20% 정도의 이득 효과를 보이고 있다. 그림 4는 가진용 서보 액츄에이터의 주파수 특성을 나타낸다.



(a) magnitude (b) phase

그림 4. 가진용 서보 액츄에이터의 주파수 특성

Fig. 4. Frequency characteristics of exciting servo actuator

3. 실험용 연속 가변 댐퍼의 성능 검증

3.1 실험용 연속 가변 댐퍼 설계 및 제작

본 논문에서는 실제적으로 적용 가능한 연속 가변 댐퍼의 제어 로직을 개발하기 위하여 전자 비례 드로틀 밸브, 이규물레이터, 유압 실린더를 이용하여 실험용 연속 가변 댐퍼를 제작하였다. 양로드형과 편로드형의 유압 실린더 양단에 외부로 유로를 형성시킨 후 이 유로를 가변 가능하도록 전자 비례 드로틀 밸브를 장착하였다. 그림 5는 실험용 연속 가변 댐퍼의 구조도를 보여준다.

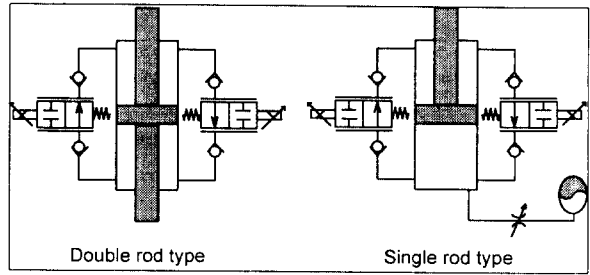


그림 5. 실험용 연속 가변 댐퍼의 개략도

Fig. 5. Schematic diagram of experimental damper

3.2 댐퍼의 특성

그림 6은 실험용 가변 댐퍼의 제어 전압에 따른 속도-하중 특성 곡선을 나타내고 있다. 이것은 현재 많이 통용되고 있는 digressive 유형의 댐퍼와는 달리 전형적인 progressive 유형의 댐퍼 특성을 갖게 되나 속도-하중 특성 곡선의 1, 3사분면의 모든 영역에서 제어가 가능하기 때문에 연속 가변 댐퍼의 제어로직 개발 및 응용에 충분히 적용 가능하다.

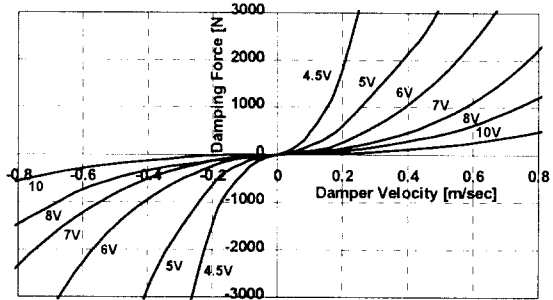


그림 6. 실험용 연속 가변 댐퍼의 특성 곡선

Fig. 6. Characteristics of experimental damper

가변 댐퍼 시스템을 차량에 적용할 경우 감쇠력 변화에 소요되는 시간이 중요한 인자로 작용하게 된다. 따라서 본 연구에서 개발한 prototype의 가변 댐퍼에 대한 제어 전압별 상승과 하강에 따른 감쇠력 변화 특성을 살펴보았다.

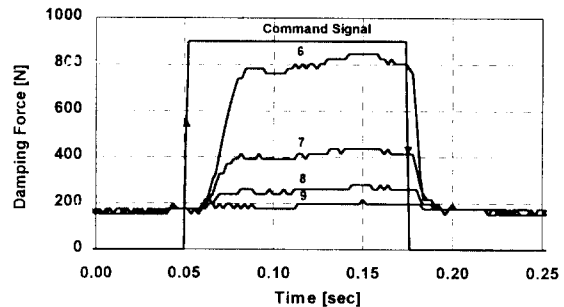


그림 7. 댐퍼의 과도 응답 특성

Fig. 7. Transient response of experimental damper

그림 7은 과도 응답 상태를 나타낸 것으로 상승시 약 15-30msec 하강시는 약 10-15msec의 시간 지연이 있는 것을 볼 수 있으며, 상승시와 하강시 다른 특성을 보이는 것은 유동력(flow force)에 의해 감쇠력이 발생되는데 기인한다.

이러한 가변 댐퍼를 적절히 제어하기 위해서는 원하는 감쇠력을 발생시키기 위하여 어떤 제어 전압을 입력으로 주어야 하는지를 알아야 한다. 따라서 감쇠계수-제어 전압의 곡선으로부터 이를 근사적으로 모델링함으로써 원하는 제어를 수행할 수 있게 된다. 그림 8은 실험용 가변 댐퍼의 감쇠력-제어 전압 곡선을 나타내며, 최소 자승법 (least squares method)을 이용하여 이블식(1)과 같이 모델링하였다.

$$v_c = 5.02149 + \frac{1842.37}{C_d} \quad (1)$$

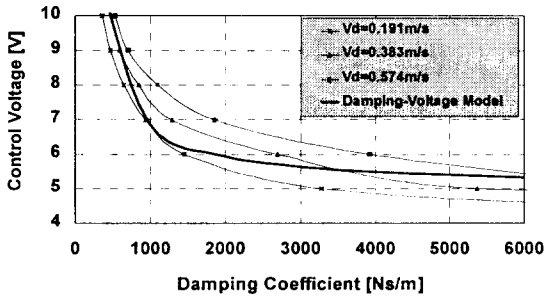


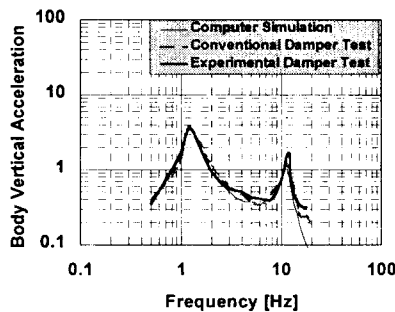
그림 8. 감쇠 계수-제어 전압 모델
Fig. 8. Damping coefficient-control voltage model

3.3 실험용 연속 가변 댐퍼의 검증

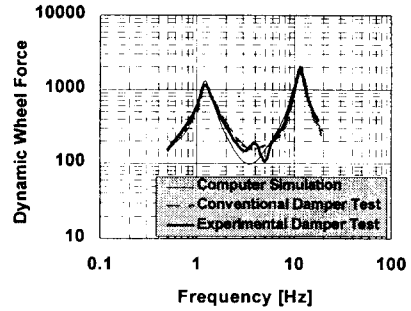
실험용 연속 가변 댐퍼의 댐퍼로서의 성능을 검증하기 위하여 다음과 같은 3가지 댐퍼에 대한 주파수 응답을 살펴보았다.

- 1) 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 상용 댐퍼 모델
- 2) HWIL 시뮬레이션을 통한 상용 수동식 댐퍼
- 3) HWIL 시뮬레이션을 통한 튜닝된 실험용 연속 가변 댐퍼

그림 9는 튜닝된 연속 가변 댐퍼가 다른 2가지 댐퍼의 응답과 유사한 주파수 응답을 나타내고 있음을 보여준다. 즉, 컴퓨터 시뮬레이션에서는 보이지 않는 실제 댐퍼의 마찰력과 히스테리시스 등에 의한 차이를 제외하고 2가지 댐퍼에 대한 실험 결과는 상당히 일치하고 있음을 보이고 있다.



(a) Body vertical acceleration



(b) Dynamic wheel force

그림 9. 연속 가변 댐퍼의 주파수 응답 특성
Fig. 9. Frequency response of experimental damper

4. HWIL 시뮬레이션 결과

4.1 제어 알고리즘

- On/off 제어 개념

이상적인 스카이훅 제어 개념[2]을 실현하기 위하여 그 동안 많은 연구가 진행되었다. 그 중 가장 대표적인 방법이 on/off 제어 개념으로서 스프링상 질량의 속도와 스프링상 질량과 스프링하 질량 사이의 상대 속도 즉, 댐퍼의 속도에 따라 감쇠 계수를 설정한다는 원리이다.

$$\begin{cases} C_d = C_H, & \dot{z}_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) > 0 \\ C_d = C_S, & \dot{z}_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 C_H 는 hard상태의 감쇠 계수를, C_S 는 soft상태의 감쇠를 나타내며, \dot{z}_s 는 스프링상 질량의 절대속도, $\dot{z}_s - \dot{z}_u$ 는 댐퍼의 속도를 의미한다.

- 연속 가변 제어 개념

이상적인 스카이훅 시스템의 감쇠력은

$$F = C_{sh} \dot{z}_s \quad (7)$$

이며, 가변 댐퍼 시스템의 감쇠력은

$$\Gamma = C_d(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \quad (8)$$

와 같다. 따라서 두 시스템이 같은 감쇠력을 갖기 위한 조건으로부터 가변 댐퍼 시스템의 감쇠 계수는

$$C_d = C_{sh} \frac{\dot{z}_s}{\dot{z}_s - \dot{z}_u} \quad (9)$$

이며, 여기서, C_{sh} 는 가정한 스카이훅 감쇠 계수를 나타낸다.

즉, 연속적으로 감쇠 계수가 변하는 댐퍼가 사용 가능하다면 감쇠 계수를 다음과 같이 설정함으로써 이상적인 스카이훅 댐퍼 시스템과 유사한 효과를 얻을 수 있게 된다.

$$C_d = \begin{cases} C_H & , C_{sh} \frac{\dot{z}_s}{z_s - z_u} > C_H \\ C_{sh} \frac{\dot{z}_s}{z_s - z_u} & , C_S < C_{sh} \frac{\dot{z}_s}{z_s - z_u} \leq C_H \\ C_S & , C_{sh} \frac{\dot{z}_s}{z_s - z_u} \leq C_S \end{cases} \quad (10)$$

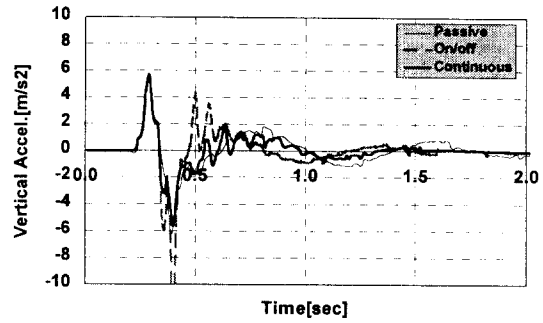
여기서, C_H 와 C_S 는 실제 시스템에서 변할 수 있는 감쇠 계수의 최대값과 최소값을 각각 의미한다[3].

4.2 HWIL 시뮬레이션 결과

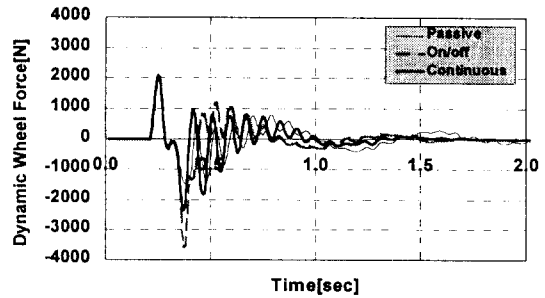
수동식, on/off 제어식과 연속 가변식 댐퍼의 응답을 비교하기 위하여 범프 통과에 대한 HWIL 시뮬레이션을 수행하였다. 가상 차량이 20km/h의 속도로 0.05m높이, 1.2m폭의 범프를 통과한다고 가정하였다. 연속 가변식 댐퍼가 on/off댐퍼보다 특히 rebound영역에서 차체 가속도가 훨씬 낮게 나타남을 보이고 있다. 또한 연속 가변 댐퍼가 soft하게 튜닝된 수동식 댐퍼보다 훨씬 빠르게 정상 상태에 도달함을 보이고 있다. 타이어 동적력은 on/off와 연속 가변식 2가지 모두에서 거의 같은 수준을 보이고 있다. 현가 장치의 변형 결과로부터 on/off제어식 댐퍼가 주행 안정성에서 좋은 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

그림 11의 주파수 응답으로부터, 연속 가변 댐퍼의 경우 차체 가속도가 상당히 감소되어 승차감 측면에서 뚜렷한 향상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 타이어 동적력 변화 (그림 11(b))는 거의 같은 수준을 보이고 있으며, 특히 12Hz이상의 차체 공진 주파수 영역에서는 변화가 없음을 나타내고 있다. 이것은 반응동 현가 시스템이 주행 안정성 측면에서 적어도 수동식 댐퍼 시스템과 비교하여 거의 같은 수준을 유지할 수 있음을 나타낸다. 그러나 반응동 현가시스템은 연속식 스카이록제어 알고리즘과 함께 차체 공진 제어 알고리즘을 결합시킴으로써 주행 안정성과 승차감을 동시에 향상시킬 수 있는 잠재력을 갖고 있다. 반응동 가변 댐퍼를 갖는 차량의 전체 성능을 감쇠 계수 변화 동작에 의해서 크게 영향을 받는다.

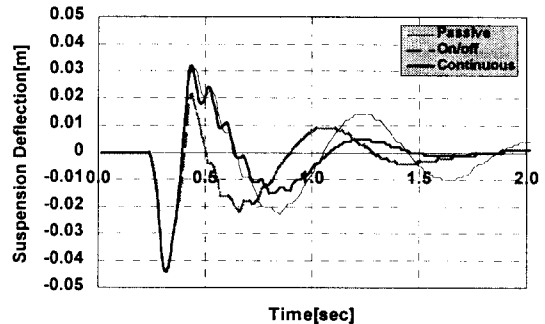
그림 12는 HWIL시뮬레이션과 컴퓨터 시뮬레이션에 대한 soft에서 hard로의 반응동 현가 시스템의 전환 동작을 보여준다. 컴퓨터 시뮬레이션에서는 soft에서 hard로 바로 변환되어 감쇠력이 계산되는 반면에 HWIL시뮬레이션에서는 약 40msec의 전환 시간 동안 서서히 감쇠력이 변함을 보여준다. 따라서, 컴퓨터 시뮬레이션의 댐퍼는 전환 시간 동안 실제의 반응동 댐퍼보다 더 hard한 댐퍼로서 작용하게 되며, 이것은 차량의 거동에 실제적이지 못한 경로를 제공하게 해준다. 게다가, 전환 동작에 의한 비선형성과 댐퍼의 히스테리시스는 HWIL 시뮬레이션에서는 그대로 반영되어, 시뮬레이션 단계에서 보다 실제적인 상황을 만들어 줄 수 있게 된다.



(a) Body vertical acceleration



(b) Dynamic wheel force



(c) Suspension deflection

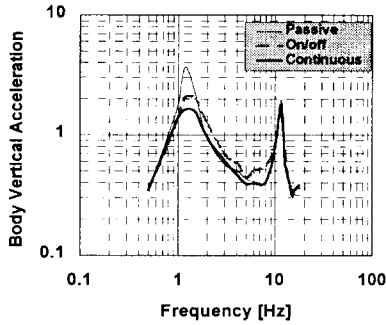
그림 10 HWIL 시뮬레이션 결과 (범프 통과 시험)

Fig. 10. HWIL simulation results of bump traverse test

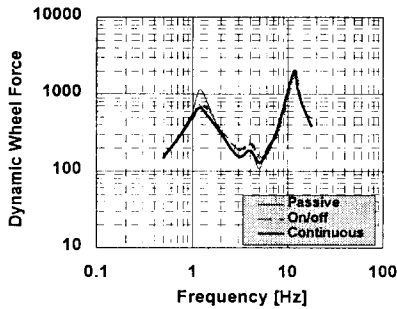
5. 결론 및 전망

본 연구를 통하여 얻어진 결론 및 추후 연구 전망을 요약하여 보면 다음과 같다.

- 기존의 on/off 스카이크 제어 개념을 확장하여 연속 가변 댐퍼 시스템에 적용한 결과 승차감 측면에서의 월등한 제어 효과를 확인할 수 있었다. 그러나, 주행 안정성 측면에서는 기존의 수동식 댐퍼를 통한 튜닝의 경우에 비하여 결코 우수한 성능 향상을 기대할 수 없을 뿐 아니라, 연속 가변 댐퍼 제어 로직을 적용하는 경우 부분적인 성능 저하가 예측됨으로써 바퀴 및 차축 부위의 스프링하 질량에 대한 제어 로직이 반드시 아울러 고려될 때만이 실용성 있는 반능동형 가변 댐퍼 시스템의 제어 개념으로서 적용 가능하리라 예측된다.
- 강한 비선형으로 인하여 수학적인 모델링이 어려운 연속 가변 댐퍼를 실험용으로 제작하여 좀 더 실용적인 제어 로직 개발을 꾀하였다. 제작된 실험용 연속 가변 댐퍼의 특성은 실제적인 연속 가변 댐퍼와 유사한 감쇠 특성 변화를 연속적으로 보여 주었다.
- 복잡한 실제 주행 상황을 실험실에서 재현하면서 연속 가변 댐퍼 시스템의 실용적인 제어 효과 및 성능 분석을 위하여 실험용 연속 가변 댐퍼와 실시간 차량 시스템 해석 소프트웨어를 결합하는 이른바 Hardware-in-the-loop 연구 기법을 개발하여 HWIL 시스템을 완성하였다.
- 상기와 같은 연구 결과는 현재 세계적으로 초기 실용화 개발 단계에 있는 차량의 반능동형 가변 댐퍼 시스템의 효율적인 제어 로직의 개발을 위한 지속적인 연구 수행에 기여를 할 수 있으리라 전망된다.



(a) Body vertical acceleration



(b) Dynamic wheel force

그림 11. HWIL 시뮬레이션 결과 (주파수 응답 특성)

Fig. 11. Frequency Response of semi-active suspensions

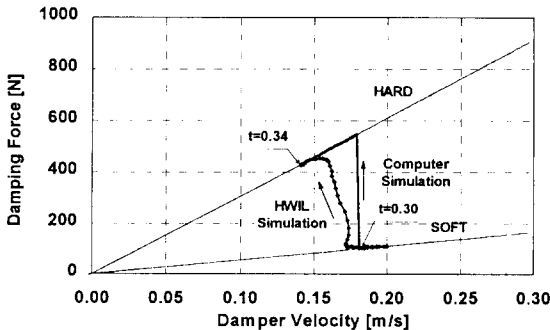


그림 12. HWIL과 컴퓨터 시뮬레이션간의 감쇠력 변화 비교

Fig. 12. Comparison of switching procedure for HWIL and computer simulation

참고 문헌

- [1] F.H.Besinger, D.Cebon, and D.J.Cole, "Force control of a semi-active damper," *Vehicle System Dynamics*, 24, pp.695-723, 1995.
- [2] D.Karnopp, M.J.Crosby, and R.A.Hardwood, "Vibration control using a semi-active force generator," *Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol.96, 1974.
- [3] M.Nagai and T.Shioneri, "Theoretical study on semi-active suspensions by nonlinear feedback control," *SAE891210*, 1989.
- [4] U.Ochner and D.Hennecke, "Hardware in the loop put into practice and applied to the development of suspensions," *VDI, Berichte Nr.974*, 1992.
- [5] Ch.Voy, M.Lemke, and K.Garavy, "Integration realer Fahrwerkelemente in einen Regelkreis zur Analogsimulation vertikaler Fahrzeug-schwingungen," *AI*, Nr.2, S.61-68, 1975.
- [6] J.R.Wagner and J.S.Furry, "A real time simulation environment for the verification of automotive electronic controller software," *Int.J. of Vehicle Design*, vol.13, no.4, 1992.