

# 전자제어 현가장치를 위한 전기유변유체 속 업소버의 설계 및 성능평가

## Design and Performance Evaluation of Electro-rheological Shock Absorber for Electronic Control Suspension

성 금 길\* · 최 승 복\* · 박 민 규\*\*

Kum-Gil Sung, Seung-Bok Choi and Min-Kyu Park

(2009년 11월 19일 접수 ; 2010년 1월 13일 심사완료)

**Key Words** : Electro-rheological Fluid(전기유변유체, ER 유체), ER Shock Absorber(ER 속 업소버), Electronic Control Suspension(전자제어현가장치, ECS), Quarter-vehicle(1/4차량), Sprung Mass(현가질량), Skyhook Control(스카이훅 제어)

### ABSTRACT

This paper presents design and performance evaluation of electro-rheological(ER) shock absorber for electronic control suspension(ECS). In order to achieve this goal, a cylindrical ER shock absorber that satisfies design specifications for a mid-sized commercial passenger vehicle is designed and manufactured to construct ER suspension system for ECS. After experimentally evaluating dynamic characteristics of the manufactured ER shock absorber, the quarter-vehicle ER suspension system consisting of sprung mass, spring, tire and the ER shock absorber is constructed in order to investigate the ride comfort and driving stability. After deriving the equations of the motion for the proposed quarter-vehicle ER suspension system, the skyhook controller is implemented for the realization of quarter-vehicle ER suspension system. In order to present control performance of ER shock absorber for ECS, ride comfort and driving stability characteristics such as vertical acceleration and tire deflection are experimentally evaluated under various road conditions and presented in both time and frequency domain.

### 1. 서 론

자동차의 현가장치는 승차감과 주행안정성을 결정하는 주요한 장치로서 자동차를 구성하는 중요한 부분이다<sup>(1,2)</sup>. 일반적으로 승차감을 향상시키기 위해서는 부드러운 현가장치가 필요로 하나, 이 경우 승

차감은 뛰어나지만 급가속, 급제동, 급선회 등의 경우에는 자동차의 자세변화가 심하게 일어나게 된다. 또한, 딱딱한 현가장치의 경우 각종 운전상황에서 발생하는 자동차의 자세변화는 노면점착(ride holding)을 통하여 최대한 억제할 수 있으나, 노면의 진동이 흡수되지 않고 운전자에게 직접 전달되므로 피로 및 불쾌감이 조성된다. 이러한 이유로 인하여 승차감과 주행안정성 2가지를 동시에 만족하는 자동차 현가장치 개발에는 어려움이 있다. 현재 주로 사용되고 있는 기계식 현가장치는 속 업소버(shock absorber)의 댐핑력(damping force)이 일정

† 교신저자 ; 정희원, 영남이공대학 기계자동차학부  
E-mail : kgsung@ync.ac.kr  
Tel : (053)650-9214, Fax : (053)625-0861

\* 정희원, 인하대학교 기계공학부

\*\* 정희원, 영남이공대학 기계자동차학부

값으로 고정되어 있어, 상반된 요구를 동시에 만족시킬 수 없는 한계가 있다. 이 두가지 특성을 동시에 만족시키기 위해서는 차량의 주행조건 및 노면조건에 적합하도록 현가장치의 특성을 변화시켜야 하며, 이를 위하여 최근에 연구되고 있는 것이 전자제어 현가장치(electronic control suspension, ECS)이다. ECS는 주행속도와 도로조건에 따라 속 업소버의 댐핑력 등을 가변시켜 차체의 자세를 제어하고, 이를 통하여 승차감과 주행안정성을 동시에 향상시키는 것을 목적으로 하는 전자제어 시스템이다. 기존의 상용 ECS는 모터 및 유압장치 등을 사용하여 댐핑력의 변화를 2~4단으로 조절하는 방식 혹은 연속적으로 조절하는 방법이나, 에너지소비, 구조의 복잡성 및 가격적인 측면의 한계 등을 이유로 아직은 고가의 차량에만 장착되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 ER(electro-rheological) 속 업소버를 이용하여 새로운 ECS를 제안하고자 한다.

최근에는 ER 유체를 이용한 반능동형 현가장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. ER 유체는 전기장(electric field)에 의하여 상변화가 일어나는 지능유체로서 반응속도가 매우 빠르기 때문에 차량용 속 업소버<sup>(3-7)</sup>를 비롯하여 엔진마운트, 브레이크/클러치, 밸브 등 각종 응용장치에 적용하려는 시도가 활발히 진행되고 있다. ER 속 업소버는 전기장의 부하에 따라 빠른 댐핑력 응답특성과 연속적인 댐핑력 변화를 나타내어 실시간 제어에 적합하다. 이러한 ER 속 업소버에 대한 연구로서 Petek<sup>(3)</sup>은 기존의 상용속 업소버와 같은 수준의 댐핑력을 발생시키는 단일 튜브 형태의 ER 속 업소버를 제작하여 그 성능을 실험적으로 고찰하였다. 그 결과, 전기장 증가에 따라 댐핑력이 증가됨을 입증하였고, 4W 이하의 낮은 전력 소모가 필요함을 고찰하였다. 또한, ER 속 업소버를 자동차 뒤쪽 현가장치에 장착하여 도로 노면시험과 범프(bump)시험 시, 전기장 부하에 의해 진동절연 성능이 향상됨을 발표하였다. 그러나, 이 결과는 단지 제어기의 적용 없이 전기장 부하시의 댐핑력 변화만을 고찰한 것이다. 그 후 Petek 등<sup>(4)</sup>은 실제 자동차의 앞쪽과 뒤쪽 모두 ER 속 업소버를 장착한 현가장치 시스템을 구성한 후, 차체(body)의 피치(pitch), 히브(heave) 및 롤(roll)운동이 고려된 스카이훅(skyhook) 제어 알고리즘을 통하여 현가장치의 성능향상을 고찰하였다.

Sturk 등<sup>(5)</sup>은 자동차 전원에서 작동이 가능한 ER 속 업소버용 고전압공급장치를 제안하고, 이것의 실현가능성을 실험적으로 고찰하였다. 이를 위해 실험실수준의 ER 속 업소버를 제작하고, 현가장치에 적용하여 그 성능을 고찰하였다. 제어알고리즘으로 스카이훅 및 개폐(on-off) 제어기를 사용하여, 진동절연성능이 향상됨을 고찰하였다. 한편, 국내에서도 전기장 부하에 따라 댐핑력을 연속적으로 가변할 수 있는 ER 속 업소버를 제작하고, 이를 다양한 응용분야에 적용한 후 성능시험을 수행한 연구가 진행되고 있다<sup>(6,7)</sup>.

ER 속 업소버를 장착한 현가장치의 ECS 적용을 위한 성능평가를 위해서는 다양한 조건 하에서의 실차실험이 요구되나, 이는 시간적 및 비용적 측면에서 비효율적인 문제가 있어 1/4차량에 대하여 실험을 진행하였다. 이를 위하여 이 연구에서는 실제 중형차에 장착이 가능한 ER 속 업소버를 제안하고 전기장의 함수인 ER 속 업소버의 댐핑력에 대한 지배방정식을 도출하였으며, 이를 근거로 하여 승용차에 적합한 댐핑력을 갖는 ER 속 업소버를 설계 및 제작하였다. 제작된 ER 속 업소버를 이용하여 전기장 부하에 따른 댐핑력 성능시험을 수행하였으며, 이를 통하여 제안된 ER 속 업소버의 ECS를 위한 현가장치 적용 타당성을 검증하였다. 그 후 ER 속 업소버를 1/4차량 현가장치에 적용한 후, 이에 대한 모델링 및 지배방정식을 도출하였다. ER 속 업소버를 이용한 ECS의 제어를 위하여 스카이훅 제어기를 구성한 후 여러 주행 조건에 따른 차량의 승차감 및 주행안정성 향상을 실험을 통하여 입증하였다.

## 2. ER 속 업소버

### 2.1 ER 속 업소버의 설계

이 연구에서는 ER 유체가 가지고 있는 항복응력을 이용한 실린더형 ER 속 업소버를 제안하고 모델링 하였으며, 그 구조를 Fig. 1에 도시하였다. ER 속 업소버는 크게 내측실린더와 외측실린더, 가스챔버(gas chamber) 및 부동피스톤(floating piston)으로 구분할 수 있다. 내·외측실린더 사이에는 ER 유체가 유동하도록 원형의 덕트(duct)가 구성되어 있으며 내측실린더에는 (+)전원이 연결되고 외측실린

더는 (-)전원이 연결되어 ER 유체에 전기장을 인가하는 두 전극 판으로써 작동하게 된다. 내측실린더는 외측 실린더와 절연되어 있어 외측실린더로 고전압이 흐르는 것을 방지한다. 피스톤을 중심으로 위쪽을 상부챔버, 아래쪽을 하부챔버로 정의하였고, 이 두 챔버에 ER 유체가 가득 채워지게 된다. 노면에 의한 가진으로 피스톤이 상하운동을 하게 되며, 이에 따라 ER 유체는 내·외측 실린더 사이의 덕트(duct) 사이를 통과하며 인가되는 전압에 대한 ER 효과를 나타낼 수 있도록 되어있다. 속 업소버의 하부에는 부동피스톤을 이용한 가스챔버가 있으며, 가스챔버는 속 업소버 내부의 급격한 압력변화를 흡수하고, 피스톤의 운동에 따른 피스톤로드의 부피변화, 열팽창에 따른 ER 유체의 부피변화 등을 수용하기 위한 축압기(accumulator)로 작동하게 된다.

플러그를 통해 내측 실린더에 고전압이 인가되면 덕트 사이에 전기장이 형성되며, 덕트 사이를 유동하던 유체는 순간적으로 뉴토니언 유동에서 병행 유동으로 전환하게 된다. 이때 인가되는 전기장의 크기에 따라 원형 덕트 사이를 유동하는 ER 유체의 항복응력도 변하게 되며, 이로 인하여 유체 유동저항도 변하게 된다. 이것은 피스톤 상·하부 챔버의 압력차를 변화시키며, 이로 인하여 피스톤의 상하 운동에 저항하는 방향의 댐핑력이 변화한다. 결과적으로 ER 속 업소버는 전기장을 부하하지 않을 때는 속도에 따른 유체 점성으로 인한 유체 댐핑력만을 발생시키게 되나, 전기장을 부하할 때는 ER 유체의 항복 응력으로 인한 댐핑력이 가해지므로 더 큰 댐핑력을 발생시키게 된다. 따라서 ER 속 업소버는 기존의 수동 속 업소버와는 달리

전기장에 따라 연속적으로 제어 가능한 댐핑력을 발생시킬 수 있다.

ER 속 업소버의 모델링을 위해 ER 유체는 비압축성 유체로 가정하였고, 속 업소버와 가스챔버를 이어주는 유압관의 길이는 짧고 직경이 크므로 이로 인한 유체저항은 무시하였다. 따라서, ER 유체의 유동으로 인한 유체저항( $R_e$ )과 가스챔버의 가스압력에 의한 컴플라이언스 (compliance,  $C_g$ )는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_e = 8\eta \frac{L}{\pi \left[ R_o^4 - R_i^4 - \frac{(R_o^2 - R_i^2)^2}{\ln(R_o/R_i)} \right]} \quad (1)$$

$$C_g = \frac{V_0}{P_0\kappa}$$

여기서,  $\eta$ 는 전기장 무 부하 시 ER 유체의 점성계수,  $L$ 은 내측 전극의 길이,  $b$ 는 내측 전극의 바깥원둘레,  $h$ 는 전극 간극을 나타낸다. 또한  $V_0$ ,  $P_0$ 는 초기 작동점에서 가스챔버의 부피와 압력을 나타내며,  $\kappa$ 는 비열비(specific heat ratio)로 정적 비열과 정압 비열의 비를 나타낸다.

ER 유체의 항복응력 변화에 따른 속 업소버 내의 압력 강하는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$P_{ER} = \frac{cL}{h} \tau_y(E) = \frac{cL}{h} \alpha E^\beta \quad (2)$$

여기서,  $E$ (kV/mm)는 전극에 부하된 전기장이고,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 ER유체의 항복응력을 결정하는 고유 특성 값이다.  $c$ 는 유체의 속도와 관계된 계수이며, 일반적으로 2에서 3사이의 값이 사용된다. 또한 ER 속 업소버의 동적 지배 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F = k_e x_p + C_e \dot{x}_p + F_{ER} \quad (3)$$

여기서,

$$k_e = \frac{A_r^2}{C_g}, \quad C_e = (A_p - A_r)^2 R_e$$

$$F_{ER} = (A_p - A_r) P_{ER} \operatorname{sgn}(\dot{x}_p)$$

$$= (A_p - A_r) \frac{cL}{h} \alpha E^\beta \operatorname{sgn}(\dot{x}_p)$$

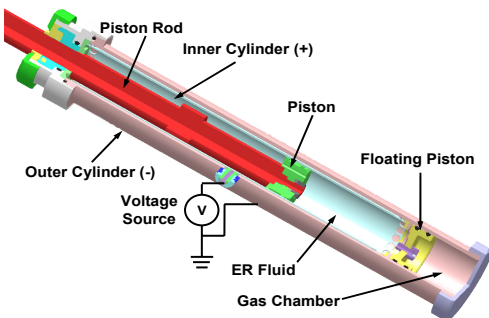


Fig. 1 Schematic configuration of the proposed ER shock absorber

이다. 여기서,  $x_p$ ,  $\dot{x}_p$ 는 피스톤의 가진 변위와 가진 속도를 나타내고,  $A_p$ ,  $A_r$ 은 피스톤과 피스톤로드의 면적을 나타낸다.

제안된 모델을 근거로 하여 ER 속 업소버를 제작하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었고, 그 사양을 Table 1에 나타내었다. 설계된 ER 속 업소버의 간극은 0.88 mm, 전극의 길이는 292.4 mm이며, 속 업소버 내부에 장착하기 용이하게 하기 위해 내부 전극을 실린더형으로 제작하였다.



(a) Parts



(b) Assembly

Fig. 2 Photograph of the manufactured ER shock absorber

Table 1 Design parameters of the ER shock absorber

Parameter	Value
Electrode gap( $h$ )	0.88 mm
Electrode length( $L$ )	253 mm
Piston head area( $A_p$ )	1335.76 mm <sup>2</sup>
Piston rod area( $A_r$ )	380.13 mm <sup>2</sup>
Maximum stroke	164 mm
Electrode width( $b$ )	148.03 mm
Initial volume of gas chamber( $V_0$ )	73.14e <sup>-6</sup> m <sup>3</sup>

## 2.2 ER 속 업소버의 성능평가

전기장에 따른 댐핑력을 분석하기 위해 유압 서보장치로 ER 속 업소버를 가진 하였으며, 가진 변위는 LVDT(linear variable differential transducer)를 통해 측정하였다. 전기장은 고전압증폭장치(high voltage amplifier)를 통해 속 업소버에 부하하게 되며, 이때 발생하는 댐핑력은 로드셀(load cell)로 측정하였다. 그리고 ER 속 업소버가 인장 운동을 할 때의 댐핑력을 (+)값으로, 반대방향인 압축 운동일 때의 댐핑

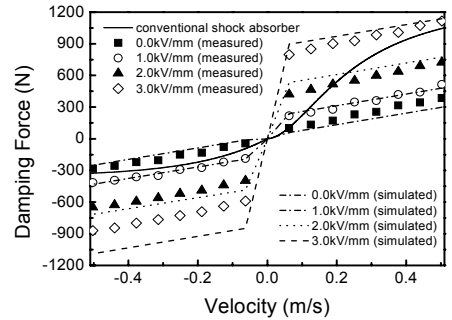
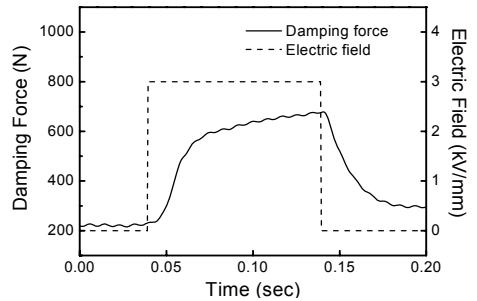
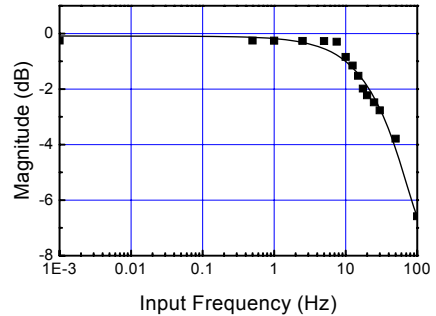


Fig. 3 Field-dependent damping force of the ER shock absorber



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 4 Damping force responses of the ER shock absorber

력을 (-)값으로 표시하였다.

Fig. 3은 전기장 크기를 0, 1, 2, 3 kV/mm로 증가시켰을 때의 ER 속 업소버의 성능을 속도에 따라 나타낸 것이다. 이때의 댐핑력은 각각의 속도에서의 최대 댐핑력으로 구해지며, 피스톤 속도의 변화는 가진 진폭을 ±20 mm로 고정시키고 가진 주파수를 0.5 Hz에서 4.0 Hz까지 변화시켜 얻었다. 전기장 증가에 따라 ER 속 업소버의 댐핑력이 연속적으로 증가됨을 알 수 있으며, 낮은 피스톤 속도에서 뿐만 아니라 높은 피스톤 속도에서도 높은 댐핑력을 발생시킴을 알 수 있다. 그림에서와 같이 피스톤 속도 0.0628 m/s 가진 및 전기장 0 kV/mm 부하 시 58.0 N의 댐핑력이 발생되며, 전기장 3 kV/mm 부하 시 896.4 N으로 크게 증가되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 피스톤 속도 0.5027 m/s 가진 시 299.3이 1138.0 N으로 증가됨을 확인할 수 있다. 이로부터 피스톤 속도에 관계없이 전기장의 제어만으로도 넓은 제어영역을 가짐을 알 수 있다.

이 연구에서는 ER 속 업소버에 사각파형(step wave)의 전기장을 공급하여 댐핑력이 정상상태의 댐핑력에 63.2%가 될 때의 시간, 즉 시상수를 구하여 응답시간을 도출하였고, 부하되는 사각파형 입력의 주파수를 증가시켰을 때의 댐핑력과 연속적으로 전기장을 부하했을 때 발생하는 댐핑력의 비를 구하여 속 업소버가 지닌 대역폭을 측정하였다. Fig. 4(a)는 사각파형 입력전압 3 kV/mm가 1초간 부하되는 경우의 댐핑력 응답을 측정한 결과이며, 이 경우 댐핑력의 응답속도는 18 msec로 측정되었다. 댐핑력이 하강할 때보다 상승할 때가 빠른 응답성을 보였다. 또한 ER 속 업소버의 응답성을 주파수영역에서 평가하기 위하여 사각파형 입력전압의 주파수를 증가시키는데 따른 댐핑력 변화를 Fig.

4(b)에 나타내었다. ER 속 업소버에 연속적인 전기장을 입력하였을 때 얻은 정상상태의 댐핑력을 기준으로 각 전기장 입력 주파수에서 얻은 댐핑력의 크기를 정리한 결과 -3 dB일 때 33 Hz의 대역폭을 보였다. 일반적으로 차량설계 시 안정성을 위한 차체의 공진주파수는 1~2 Hz로 설계되며, 주행안정성을 위한 차륜의 공진주파수는 10~13 Hz로 설계된다. 따라서 이 연구에 사용된 속 업소버는 두 공진영역에서 충분한 제어성능을 발휘할 수 있으며, 이를 통하여 ECS에서 요구하는 승차감 및 주행안정성 2가지의 목표를 동시에 만족하기 위하여 ER 속 업소버가 충분한 제어성능을 발휘할 수 있음을 예측할 수 있다.

또한, Fig. 3의 댐핑력 실험결과를 실시간으로 추정하기 위하여 보다 정확한 댐핑력 모델이 요구된다. 따라서, Fig. 5와 같은 bi-viscous fit을 제안하였으며, 이를 통하여 다음과 같은 ER 속 업소버의 댐핑계수와 제어댐핑력을 구할 수 있다.

$$C_e = \begin{cases} c_{e,pr} & \text{for } -\dot{x}_{p,t} \leq \dot{x}_p \leq \dot{x}_{p,t} \\ c_{e,pr}\dot{x}_{p,t} / \dot{x}_p + c_{e,po} & \text{for } \dot{x}_p \geq \dot{x}_{p,t} \text{ or } \dot{x}_p \leq -\dot{x}_{p,t} \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{ER} = \begin{cases} a_p E^{b_p} \cdot \dot{x}_{p,t} & \text{for } \dot{x}_{p,t} \leq \dot{x}_p \\ a_p E^{b_p} \cdot \dot{x}_p & \text{for } 0 \leq \dot{x}_p \leq \dot{x}_{p,t} \\ a_n E^{b_n} \cdot \dot{x}_p & \text{for } -\dot{x}_{p,t} \leq \dot{x}_p \leq 0 \\ a_n E^{b_n} \cdot \dot{x}_{p,t} & \text{for } \dot{x}_p \leq -\dot{x}_{p,t} \end{cases} \quad (5)$$

따라서, 이 연구에서는 시상수  $\tau$ 를 적용하기 위해 식 (5)의  $F_{ER}$ 을 다음과 같이 수정하였다.

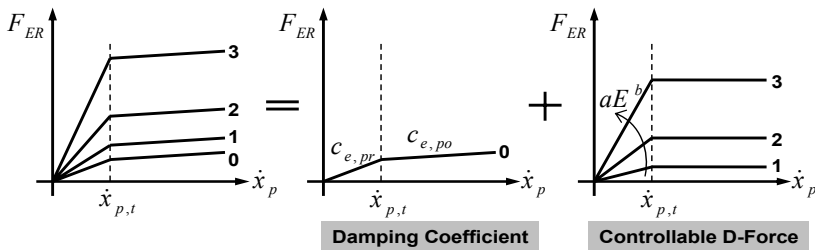


Fig. 5 Biviscous fit of damping force for the ER shock absorber

$$\tau \frac{d}{dt} F_{ER} + F_{ER} = \begin{cases} a_p E^{b_p} \cdot \dot{x}_{p,t} & \text{for } \dot{x}_{p,t} \leq \dot{x}_p \\ a_p E^{b_p} \cdot \dot{x}_p & \text{for } 0 \leq \dot{x}_p \leq \dot{x}_{p,t} \\ a_n E^{b_n} \cdot \dot{x}_p & \text{for } -\dot{x}_{p,t} \leq \dot{x}_p \leq 0 \\ a_n E^{b_n} \cdot \dot{x}_{p,t} & \text{for } \dot{x}_p \leq -\dot{x}_{p,t} \end{cases} \quad (6)$$

### 3. 1/4차량의 모델링 및 제어기

ER 속 업소버를 장착한 1/4차량의 지배방정식을 도출하기 위하여, 차량의 차체는 강체로 가정하고, 실제 자동차에서 발생할 수 있는 타이어의 댐핑은 타이어강성에 비하여 무시할 만큼 작으므로 고려하지 않는다는 가정을 통하여 차량에 대한 모델을 단순화 하였다. 따라서, 차륜은 비현가질량(unsprung mass)과 강성만을 갖는 모델로 하였다. 또한, 보다 정확한 제어를 위하여 현가질량(sprung mass, SM)에서 부가적으로 승차 인원의 질량을 시스템 불확실성으로 고려하였으며, ER 유체의 응답시간을 고려한 1/4차량을 모델링 하였다. 2자유도로 가정한 1/4차량 현가장치 시스템의 모델을 Fig. 6에 도시하였으며, 시스템 불확실성과 시상수를 고려하여 다음과 같이 운동방정식을 설정하였다.

$$\begin{aligned} m_s \ddot{z}_s &= -k_s z_s - c_s \dot{z}_s + k_s z_u + c_s \dot{z}_u - F_{ER} \\ m_u \ddot{z}_u &= k_s z_s + c_s \dot{z}_s - (k_t + k_s) z_u - c_s \dot{z}_u + F_{ER} + k_t z_r \\ \dot{F}_{ER} &= -\frac{1}{\tau} F_{ER} + \frac{1}{\tau} u \end{aligned} \quad (7)$$

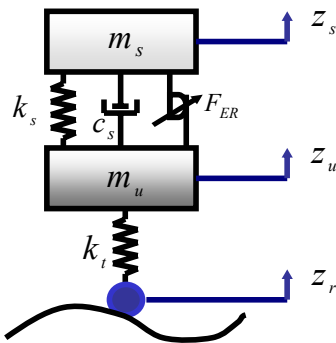


Fig. 6 Quarter-vehicle model of the ER suspension system

여기서,  $m_s$ 와  $m_u$ 는 각각 현가질량과 비현가질량을 나타내며,  $k_s$ 와  $k_t$ 는 각각 현가장치의 스프링 강성과 타이어의 강성을 의미한다.  $c_s$ 는 현가장치의 댐핑계수를 나타내며,  $\tau$ 는 ER 속 업소버의 시상수를 의미한다. 제안된 1/4차량 모델의 상태방정식은 식 (7)의 운동방정식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Lz, \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} x &= [z_s \quad \dot{z}_s \quad z_u \quad \dot{z}_u \quad F_{ER}]^T \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} & -\frac{1}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_t+k_s}{m_u} & -\frac{c_s}{m_u} & \frac{1}{m_u} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T, \\ L &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{k_t}{m_u} & 0 \end{bmatrix}^T, \\ C &= [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \end{aligned}$$

이다. 여기서,  $F_{ER}$ 은 ER 속 업소버의 댐핑력이며, 식 (5)의 결과값이다. 상태변수는 각각 현가질량의 변위와 속도, 비현가질량의 변위와 속도, 인가되는 전기장에 의한 댐핑력이다.

ER 속 업소버를 위한 스카이훅 제어기의 요구 댐핑력은 차륜 위치에서의 차체의 수직속도를 고려하여 다음과 같이 정의된다.

$$u = c_{sky} \cdot \dot{z}_s \quad (9)$$

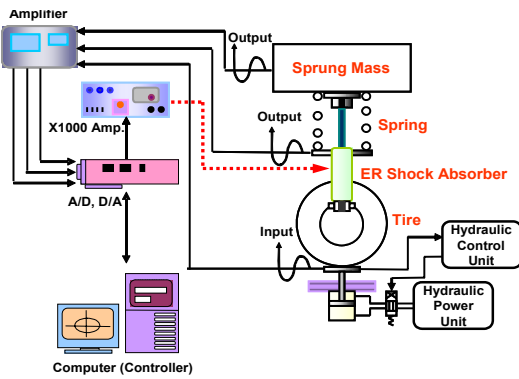
여기서,  $c_{sky}$ 는 스카이훅 제어기의 제어게인이며, 물리적으로는 댐핑계수를 의미한다. 또한, 이 연구에서의 현가장치는 반능동형이므로 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$u = \begin{cases} u, & \text{for } u(\dot{z}_s - \dot{z}_u) > 0 \\ 0, & \text{for } u(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

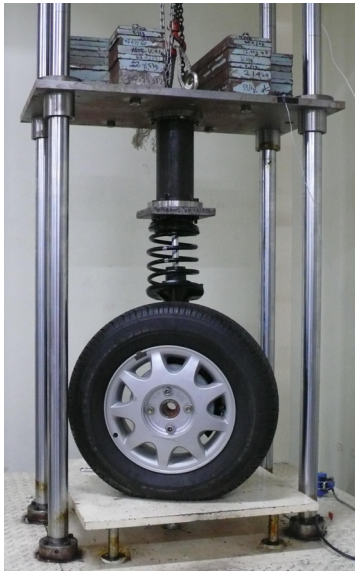
## 4. ECS 성능시험

### 4.1 실험장치

이 연구에서는 Fig. 7과 같은 1/4차량을 구성하여 ER 현가장치 시스템에 대한 ECS 성능시험을 수행하였다. 1/4차량 시험 방법은 ER 속 업소버 외에 차체질량, 스프링 및 타이어를 장착하여 시험하는 방법이기 때문에, 비교적 간단한 방법으로 실차시험과 유사한 성능평가를 얻을 수 있는 장점이 있다. 1/4차량을 가진하기 위한 유압서보시스템은 주행조건에 따라 컴퓨터의 D/A를 통하여 동작되며, 현가



(a) Schematic diagram



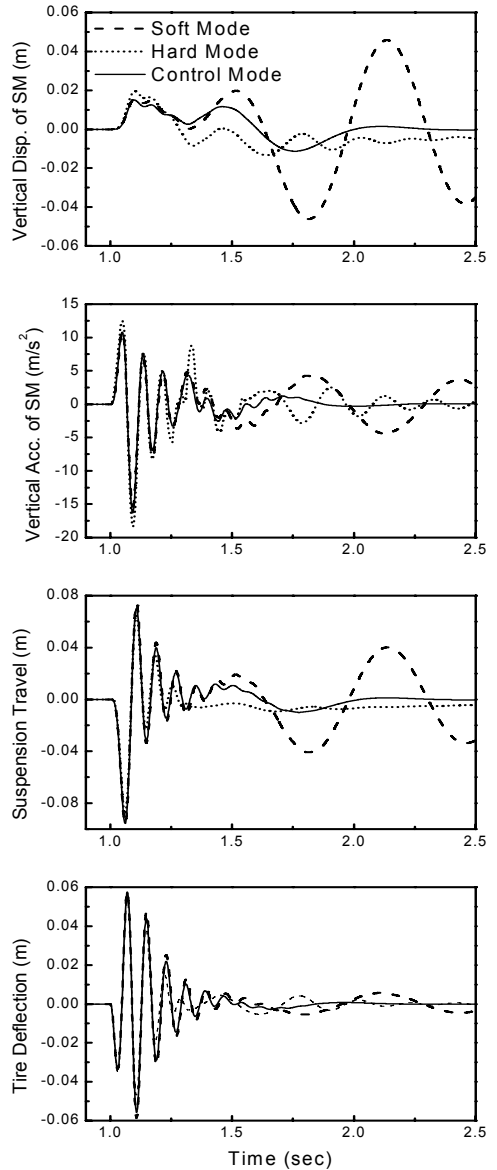
(b) Photograph

**Fig. 7** Experimental set-up for the quarter-vehicle ER suspension system

질량 및 비현가질량에 발생한 변위는 LVDT를 통해 측정되었다. 측정된 데이터는 A/D를 통하여 컴퓨터에 저장되었으며, 컴퓨터를 통하여 계산된 입력 전기장 신호는 고전압장치를 통하여 ER 속 업소버에 부하되었다.

### 4.2 성능고찰

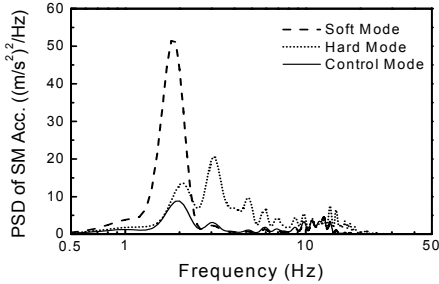
ER 현가장치 시스템을 장착한 1/4차량의 ECS



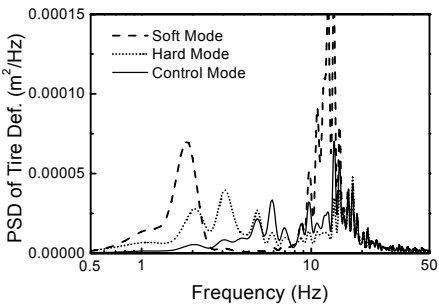
**Fig. 8** Bump road responses of the quarter-vehicle ER suspension system

성능을 고찰하기 위하여 노면에 순간적으로 단일 범프(bump) 형태 및 랜덤(random) 형태의 입력을 가 한 경우에 대한 응답특성 실험을 수행하였다. 우선, 높이가 7 cm이고, 폭이 80 cm인 정현파 모양의 범프를 1/4차량이 40 km/h로 주행할 때의 실험을 수행하였다. Fig. 8은 소프트(soft) 모드, 하드(hard) 모드 및 스카이훅 제어의 경우에 대한 실험결과를 비교한 그래프이며, 소프트 모드는 비제어(0 kV/mm

입력) 상태이고 하드 모드는 3 kV/mm를 입력한 상태이다. 전체적인 결과로부터 스카이훅 제어 시 성능이 매우 우수함을 확인할 수 있으며, 이는 제어를 수행할 경우에 범프 통과 후 잔류진동이 바쁘게 감소되는 것을 통하여 확인할 수 있다. 승차감을 비교할 수 있는 현가질량의 가속도( $\ddot{z}_s$ ) 결과에서는 제어, 소프트 및 하드 모드 순서로 성능이 우수함을 확인할 수 있고, 주행안정성을 비교할 수 있는 타이어 하중편차(deflection,  $z_u - z_r$ ) 결과에서 나타낸 바와 같이 제어, 하드 및 소프트 모드 순서로 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다. 또한, 차량의 주행 시 승차감 및 주행안정성을 비교하기 위하여 노면상태를 포장도로와 유사한 랜덤입력 형태로 만들어 72 km/h로 주행하는 경우에 대한 응답특성 실험을 수행하였다. Fig. 9는 소프트, 하드 및 제어 모드 시 실험결과를 PSD(power spectrum density)로 나타낸 그래프이며, 현가질량 가속도 결과의 차량공진(1~2 Hz) 부근 및 타이어 하중편차 결과의 차륜공진(10~12 Hz) 부근에서 모두 소프트 및 하드 모드의 경우에 비하여 제어를 수행할 경우의 성능이 매우 우수한 것을 확인할 수 있다. 또한, 승차감 향상에 대한 성능을 보다 정확히 분석하기 위하여 현가질량 수직가속도에 대한 WRMS(weighed root mean square)결과를 도출하였다. WRMS는 승차감 평가를 위하여 ISO2631에서 규정한 방법이며, 특정 주파수 값에 가중치를 곱한 RMS값이다<sup>(8)</sup>. Fig. 10의 WRMS결과와 같이 소프트 및 하드 모드의 경우에 비하여 제어를 수행할 경우의 승차감이 매우 우수한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과들을 통하여 ER 속 업소버를 실제차량의 ECS에 적용할 경우 승차감뿐만 아니라, 피치, 히브, 롤 등의 다양한 주행상태 하에서도 안정성이 우수할 것으로 판단할 수 있다.



(a) Acceleration of sprung mass



(b) Tire deflection

Fig. 9 Random road responses of the quarter-vehicle ER suspension system

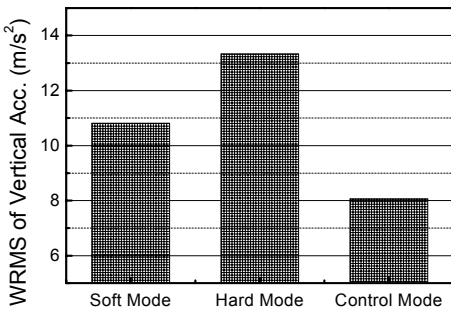


Fig. 10 Ride comfort comparison of vertical acceleration WRMS of the ER suspension system on random road

## 5. 결 론

이 연구에서는 ER 속 업소버를 장착한 현가장치 의 ECS 적용을 위한 성능평가를 수행하였다. 이를 위해 중형 승용차용 ER 속 업소버를 설계 및 제작 하였으며, 전기장 부하에 따른 댐핑력 성능시험을 수행하였다. ER 속 업소버를 1/4차량 현가장치에 적용한 후, 이에 대한 모델링 및 지배방정식을 도출



하였다. ER 속 업소버를 이용한 ECS의 제어를 위하여 소프트 모드, 하드 모드 및 스카이훅 제어기를 이용한 제어 모드를 구성한 후 범프 및 랜덤노면 주행에 따른 차량의 승차감 및 주행안정성을 비교하였으며, 이를 통하여 ER 속 업소버 제어 시 승차감 및 주행안정성 측면에서 ECS 성능의 우수성을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 향후, ER 속 업소버를 ECS에 적용할 경우의 성능을 보다 정확히 분석하기 위하여 실차시험을 수행할 예정이다.

### 참 고 문 헌

- (1) Gillespie, T. D., 1992, "Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers," Warrendale, PA.
- (2) Elbeheiry, E. M., Karnopp, D. C., Elaraby, M. E. and Abdelraouf, A. M., 1995, "Advanced Ground Vehicle Suspension Systems - a Classified Bibliography," Vehicle System Dynamics, Vol. 24, pp. 231~258.
- (3) Petek, N. K., 1992, "An Electronically Controlled Shock Absorber as an Application of Electrorheological Fluid," SAE Technical Paper Series 920275.
- (4) Petek, N. K., Romstadt, D. J., Lizell, M. B. and Weyenberg, T. R., 1995, "Demonstration of an Automotive Semi-active Suspension Using Electrorheological Fluid," SAE Technical Paper Series 950586.
- (5) Sturk, M., Wu, X. M. and Jung, J. Y., 1995, "Development and Evaluation of a High Voltage Supply Unit for Electrorheological Fluid Damper," Vehicle System Dynamics, Vol. 24, pp. 101~121.
- (6) Choi, S. B. and Lee, J. H., 1998, "Vibration Control of Flexible Structures Using ER Dampers," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 313~323.
- (7) Sung, K. G. and Choi, S. B., 2007, "Maneuver Analysis of Full-vehicle Featuring Electrorheological Suspension and Electrorheological Brake," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 464~471.
- (8) Sung, K. G., Lee, H. G., Choi, S. B., Park, M. K. and Park, M. K., 2010, "Performance Analysis with Different Tire Pressure of Quarter-vehicle System Featuring MR Damper," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 249~256.