

타이어 공기압에 따른 ER 댐퍼 장착 승용차의 승차감분석

Ride Comfort Analysis of Passenger Vehicle Featuring ER Damper with Different Tire Pressure

성 금 길[†]·최 승 복^{*}
Kum-Gil Sung and Seung-Bok Choi

(Received February 15, 2016 ; Revised March 18, 2016 ; Accepted April 11, 2016)

Key Words : ER(Electrorheological Fluid, 전기유변유체), Electric Field(전기장), Damper(댐퍼), ECS(Electronic Control Suspension, 전자제어 현가장치), Ride Comfort(승차감), Tire Pressure(타이어 공기압)

ABSTRACT

In this work, performance analysis to improve ride comfort of an ER (electrorheological) fluid damper for a mid-sized passenger vehicle in terms of tire pressure is presented. An ER damper by considering specification for a mid-sized commercial passenger vehicle is proposed and mechanically designed. After manufacturing and assembling the proposed ER damper with design parameters, their performance such as field-dependent damping forces are experimentally measured. A quarter-vehicle ER ECS (Electronic Control Suspension) system consisting of the ER damper, sprung mass, spring, sky-hook controller and tire is constructed to analysis the ride comfort performances. Vertical tire stiffness with different tire pressure is experimentally measured and investigated. In addition, ride comfort analysis such as vertical acceleration root mean square (RMS) of sprung mass is investigated under bump road using quarter-vehicle test equipment.

1. 서 론

자동차에서 승차감을 향상시키기 위해서는 감쇠력이 저하된 현가장치가 필요로 하나, 이 경우 승차감은 향상되지만 급제동, 급선회 및 급가속 등의 경우에는 심한 자세변화로 인하여 주행안정성이 감소되게 된다. 반면에, 감쇠력이 높은 현가장치의 경우 주행안정성이 향상될 수 있으나, 노면의 진동이 흡수되지 않고 차체에 직접 전달되므로 운전자 및 승객의 승차감이 저하된다. 이러한 이유로 인하여 승차감과 주행안정성 두 가지를 동시에 만족하는 자동

차 현가장치 개발에는 어려움이 있다.

차량의 승차감, 안정성 및 조향특성을 동시에 향상시키기 위하여 최근에 연구되고 있는 것이 전자제어 현가장치(ECS, electronic control suspension)이다. ECS는 도로조건 및 주행속도에 따라 감쇠력을 가변시켜 차체의 자세를 제어하고, 이를 통하여 승차감과 주행안정성을 동시에 향상시키는 것을 목적으로 하는 전자제어 시스템이다. 기존의 상용 ECS는 모터 및 유압장치 등을 사용하여 감쇠력의 변화를 다단으로 조절하는 방식이나, 현재는 고가의 차량에만 적용되고 있다.

이 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여

[†] Corresponding Author; Member, Div. of Mechanical Engineering Technology, Yeungnam University College
E-mail : kgsung@gmail.com

^{*} Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University

[‡] Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

ER(electro-rheological) 유체를 이용한 댐퍼를 적용하여 새로운 ECS를 제안하고자 한다.

최근에는 ER 유체를 이용한 반능동형 현가장치에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. ER 유체는 전기장(electric field) 부하에 의하여 상변화가 일어나는 지능유체로서 반응속도가 비교적 빠르기 때문에 축압쇼버 등에 적용하려는 연구가 지속적으로 진행되고 있다. ER 댐퍼는 전기장의 가함에 따라 높은 감쇠력 응답특성과 연속적인 감쇠력 변화를 보이며, 이에 따라 실시간 제어에 적합하다. 이러한 ER 댐퍼에 대한 연구로서 Petek⁽¹⁾은 기존의 상용화된 축 압쇼버와 같은 수준의 감쇠력을 발생시키는 단일 실린더 형상의 ER 댐퍼를 제안하여 실험적으로 성능을 검증하였다. 그 결과, 전기장 부하량 증가에 따라 감쇠력이 증가됨을 입증하였고, 매우 낮은 전력이 소비됨을 고찰하였다. 또한, 자동차의 후륜 현가장치에 ER 댐퍼 장착하여 범프(bump) 및 도로 노면 시험 시, 전기장 적용에 의해 진동이 감소됨을 연구하였다. 그러나, 이 결과는 단지 비제어 시에 전기장을 단순 부하시의 감쇠력 변화만을 연구한 것이다. Petek 등⁽²⁾은 상용화된 자동차의 전륜 및 후륜 모두 ER 댐퍼를 장착한 현가장치 시스템을 구성한 후, 차체의 롤(roll), 허브(heave) 및 피치(pitch) 운동이 고려된 스카이훅(sky-hook) 제어를 적용하여 현가장치의 성능변화를 연구하였다. Sturk 등⁽³⁾은 상용화된 자동차의 배터리에서도 원활한 동작이 가능한 ER 댐퍼용 파워서플라이(power supply)를 제안하고, 이것의 실현여부에 대한 가능성을 실험을 포함한 다양한 방법으로 연구하였다. 이를 위해 실험실에서 평가할 수 있는 ER 댐퍼를 제작하고, 이를 현가장치에 적용하여 그 성능을 고찰하였다. 제어알고리즘으로 스카이훅 및 온-오프(on-off) 제어 알고리즘을 적용하여, 진동절연성능이 개선됨을 연구하였다. 또한, 국내에서도 전기장 적용에 따라 감쇠력을 연속적으로 가변할 수 있는 ER 댐퍼를 제작하고, 이를 진동 절연이 요구되는 응용분야에 적용한 후 다양한 성능평가를 지속적으로 수행하고 있다⁽⁴⁻⁶⁾.

ER 댐퍼를 장착한 현가장치의 전자제어 현가장치 적용을 위한 성능평가를 위하여 타이어의 공기압을 변화시키는 등 다양한 노면조건을 적용한 실차실험이 수행되어야 하나, 이는 경제적 측면에서 비효율적 이므로 1/4 자동차에 대하여 실험을 진행하였다.

실제 상용차량에 장착할 수 있는 ER 댐퍼를 제안하고 ER 댐퍼의 감쇠력에 대한 지배방정식을 도출하며, 이를 이용하여 승용차에 장착이 가능한 감쇠력을 갖는 ER 댐퍼를 설계 및 제작하였다. 이러한 ER 댐퍼를 통하여 입력 변화에 따른 감쇠력을 실험을 통하여 구한다. 그 후 선정된 타이어의 강성실험을 수행하고, ER 댐퍼를 이용한 전제제어 현가장치의 제어를 위하여 시스템 모델링 및 스카이훅 제어를 적용한 후 타이어의 공기압에 따른 주행안정성 및 승차감 개선을 실험을 통하여 제시한다.

2. ER 댐퍼

이 연구에서는 ER 유체의 고유한 특성인 항복응력을 통한 실린더형 ER 댐퍼를 제안하고 설계를 수행 하였으며, 그 구조를 Fig. 1에 나타내었다. ER 댐퍼는 기존의 패시브(passive) 타입 댐퍼와 달리 전기장에 따라 연속적으로 감쇠력을 발생시킬 수 있는 반능동(semi-active) 타입 댐퍼이다.

ER 댐퍼의 모델링을 위해 ER 유체는 비압축성 유체로 가정하였고, 댐퍼와 가스챔버를 이어주는 유압관의 직경이 크고 길이는 짧으므로 이로 인한 유체저항은 고려하지 않았다. 따라서, ER 유체의 유체저항(R_e)과 컴플라이언스 (compliance, C_g)는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_e = 12\eta \frac{L}{bh^3}$$

$$C_g = \frac{V_0}{P_0\kappa}$$
(1)

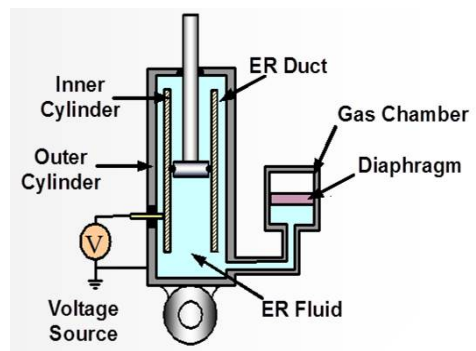


Fig. 1 Proposed electro-rheological damper

여기서, η 는 ER 유체의 점성계수, L 는 내측 전극의 길이를 나타내며, b 는 전극부의 원둘레, h 는 전극의 간극이다. 또한 P_0 , V_0 는 초기 작동점에서 가스챔버의 압력과 부피를 나타내며, κ 는 비열비로 정적 및 정압 비열의 비를 나타낸다. ER 유체의 항복응력 변화에 따른 댐퍼의 압력 강하는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{ER} = \frac{c \cdot L}{h} \tau_y(E) \tag{2}$$

여기서, E 는 전극에 적용되는 전기장을 의미하며, c 는 유체속도와 관련된 계수이다. 또한 ER 댐퍼의 동적 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$F_D = k_e x_p + C_e \dot{x}_p + F_{ER} \tag{3}$$

여기서,

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

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

$$= (A_p - A_r) \text{sgn}(\dot{x}_p) \frac{cL}{h} \tau_y(E)$$

이다. 여기서, x_p , \dot{x}_p 는 피스톤의 가진 변위와 가진 속도를 나타내고, A_p , A_r 은 피스톤 및 피스톤로드의 면적을 나타낸다. 제안된 수학적 모델을 통하여 ER 댐퍼를 제작하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 3은 전기장을 0 kV/mm ~ 3 kV/mm 범위에서 1 kV/mm씩 증가시켰을 때의 ER 댐퍼의 감쇠력을



Fig. 2 Manufactured ER damper

가진속도에 따라 나타낸 것이다. 도시한 바와 같이 감쇠력은 각각의 속도에서의 최대 감쇠력으로 얻어지며, 피스톤 가진 속도는 가진 진폭을 ± 20 mm로 고정시키고, 주파수를 0.5 Hz ~ 4.0 Hz 범위에서 0.5 Hz씩 증가시키면서 구하였다. 전기장 증가에 따라 ER 댐퍼의 감쇠력이 연속적으로 증가되며, 저속의 피스톤 속도에서뿐만 아니라 고속의 피스톤 속도에서도 높은 감쇠력을 발생됨을 확인할 수 있다.

Fig. 3과 같이 피스톤 속도 0.0628 m/s 가진조건에서 전기장 0 kV/mm 적용 시 58.0 N의 감쇠력이 발생하고, 전기장 3 kV/mm 적용 시 896.4 N으로 크게 증가되는 것을 확인된다. 그리고, 피스톤 속도 0.5027 m/s 가진조건에서 전기장 0 kV/mm 적용 시 299.3 N의 감쇠력이 발생하고, 전기장 3 kV/mm 적용 시 1138.0 N으로 크게 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 피스톤 가진 속도와 무관하게 전기장의 적용만으로도 제어가 가능함을 확인할 수 있다.

이 연구에서는 ER 댐퍼에 사각파형의 전기장을 적용하여 감쇠력이 요구 감쇠력의 63.2%가 될 때까지의 시간인 시상수를 통하여 응답시간을 구하였고, 적용되는 사각파형 입력의 주파수를 증가할 때의 감쇠력과 연속적으로 전기장을 적용했을 때 발생하는 감쇠력의 비를 통하여 댐퍼가 지닌 고유한 가진 대역폭을 측정하였다. 따라서, 이 연구에서는 시상수 τ 를 적용하기 위해 F_{ER} 을 다음과 같이 수정하였다.

$$\tau \frac{d}{dt} F_{ER} + F_{ER} = (A_p - A_r) \text{sgn}(\dot{x}_p) 2 \frac{L}{h} \tau_y(E) \tag{4}$$

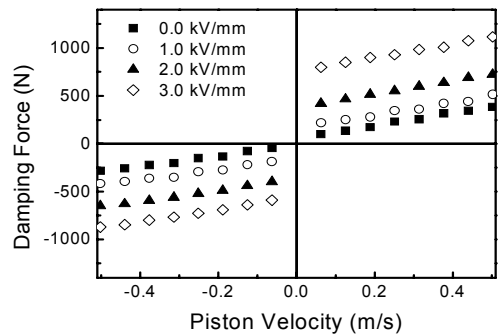


Fig. 3 Damping forces of the ER manufactured damper

3. 시스템 모델링

3.1 타이어 강성시험

ER 댐퍼를 장착한 1/4(quarter-car) 자동차의 지배 방정식을 도출하기 위하여, 자동차는 강체로 가정하고, 실제 타이어의 댐핑은 타이어의 강성과 비교하여 무시하여 차량에 대한 단순화된 모델을 사용하였다. 따라서, 차륜은 강성과 비현가질량만을 갖는 모델로 가정하였다.

이 연구에서는 중형차에 사용되는 타이어 중에서 205-65-R15를 선정하고, 이에 대한 타이어 강성실험을 수행하였다. 1/4차량의 실험에서는 타이어의 종강성, 횡강성 및 비틀림 강성 중 수직성분인 종강성만을 고려하였고, 이러한 종강성은 차량의 승차감과 관련이 있다. 강성실험은 타이어에 주입되는 공기의 양을 늘리면서 124 kPa ~ 227 kPa(18 psi ~ 33 psi)의 범위에서 6단계를 측정하였으며, 이러한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 207 kPa(30 psi)의 경우 타이어 제조사에서 권장하는 표준 공기압을 의미하며, 124 kPa는 저압 227 kPa는 고압 충전을 의미한다.

3.2 1/4차량 모델링

2자유도로 가정된 1/4 자동차 전자제어 현가장치의 모델을 Fig. 5에 나타내었으며, 시상수를 고려를 통하여 다음과 같이 운동방정식을 설정하였다.

$$\begin{aligned}
 m_s \ddot{z}_s &= -k_s z_s - c_s \dot{z}_s + k_s z_u + c_s \dot{z}_u - F_{ER} \\
 m_u \ddot{z}_u &= k_s z_s + c_s \dot{z}_s - (k_s + k_t) z_u - c_s \dot{z}_u + F_{ER} + k_t z_r \\
 \dot{F}_{ER} &= -\frac{1}{\tau} F_{ER} + \frac{1}{\tau} u
 \end{aligned} \tag{5}$$

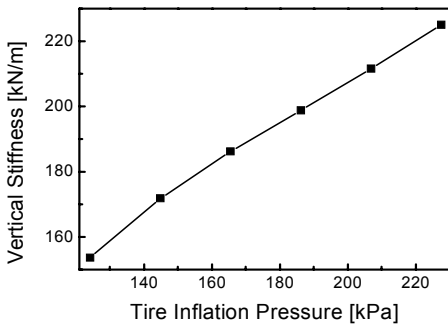


Fig. 4 Vertical stiffness of tire (205-65-R15)

여기서, m_s 와 m_u 는 현가질량 및 비현가질량을 이며, k_s 와 k_t 는 현가장치의 스프링 및 타이어의 강성을 나타낸다. 타이어의 강성은 Fig. 4에서 실험결과와 같이 타이어의 공기압에 따라 변화되는 값이다. c_s 는 현가장치의 댐핑계수를 나타내며, τ 는 ER 댐퍼의 시상수를 의미하며, 실험을 통하여 구한 값을 사용한다.

제안된 1/4 자동차의 상태방정식은 식 (5)의 방정식을 통하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 m_s \dot{x}_2 &= -k_s x_1 - c_s x_2 + k_s x_3 + c_s x_4 - x_5 \\
 m_u \dot{x}_4 &= k_s x_1 + c_s x_2 - (k_s + k_t) x_3 - c_s x_4 + x_5 + k_t z_r \\
 \dot{x}_5 &= -\frac{1}{\tau} x_5 + \frac{1}{\tau} u
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x} &= [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5]^T \\
 &= [z_s \quad \dot{z}_s \quad z_u \quad \dot{z}_u \quad F_{ER}]^T \\
 \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} & -\frac{1}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_s+k_t}{m_u} & -\frac{c_s}{m_u} & \frac{1}{m_u} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/\tau \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ k_t/m_u \\ x_5 \end{bmatrix} z_r
 \end{aligned}$$

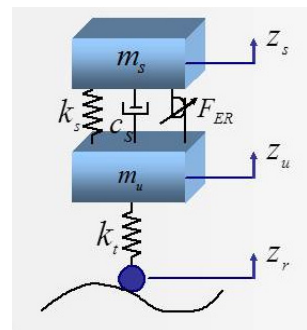


Fig. 5 Quarter-vehicle model of the proposed ER ECS system

이다. 상태변수는 순서대로 현가질량의 변위, 속도, 비현가질량의 변위, 속도, 부하 전기장에 의한 감쇠력이다.

4. 승차감 분석

이 논문에서는 Fig. 6과 같은 1/4 자동차를 통하여 ER 현가장치를 이용한 전자제어 현가장치에 대하여 성능 검증을 위한 시험을 실시하였다. 여러 노면조건 하에서도 우수한 승차감을 확보하기 위해서는 적절한 제어알고리즘에 의한 제어가 요구된다. 따라서, 타이어 공기압의 변화에 따른 ER 현가장치를 장착한 차량의 승차감분석을 수행하기 위하여 스카이훅(skyhook) 제어기를 선정하였다.

ER 댐퍼를 적용을 위하여 스카이훅 제어기에서 요구되는 감쇠력은 차체의 수직속도를 고려하여 다음과 같이 정의하였다.

$$u = c_{sky} \cdot \dot{z}_s \tag{7}$$

여기서, c_{sky} 는 스카이훅 제어를 위한 제어게인을 나타낸다. 또한, 반능동형 현가장치의 조건을 만족할 수 있도록 다음과 입력의 경우 반능동형 조건을 만족 시 부하될 수 있도록 설정한다⁽⁷⁾.

$$u = \begin{cases} u, & \text{for } (\dot{z}_s - \dot{z}_u) \cdot u > 0 \\ 0, & \text{for } (\dot{z}_s - \dot{z}_u) \cdot u \leq 0 \end{cases} \tag{8}$$

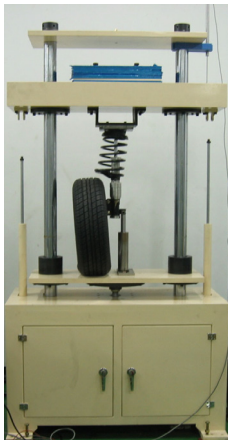
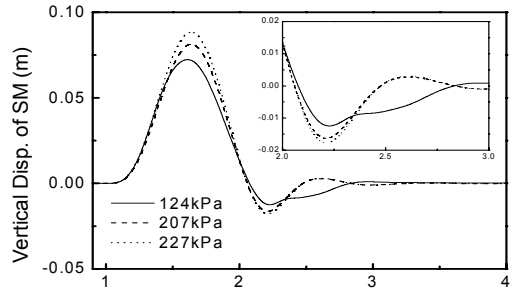
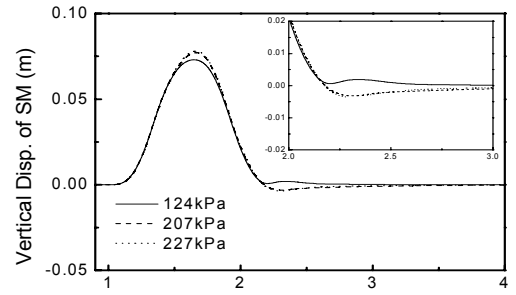


Fig. 6 Experimental equipment for the ER ECS system

ER 현가장치 시스템을 장착한 1/4 자동차의 ECS 성능을 평가하기 위하여 차량에 가진되는 노면조건에 순간적으로 단일범프(bump) 형태의 입력을 가한 경우에 대한 응답특성 실험을 수행하였다. 정현파 형태의 범프를 1/4 자동차가 3.08 km/h로 주행 시를 가정하여 실험 수행하였으며, 실험 결과를 비제어 시와 제어 시로 구분하여 Fig. 7에 도시하였다. 실험 결과에서와 같이 고압 충전일 경우



(a) Uncontrolled



(b) Controlled

Fig. 7 Random road responses of ER ECS system

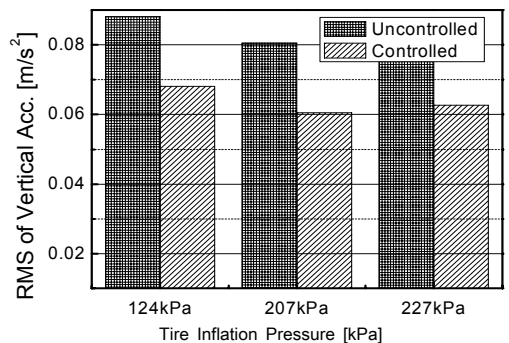


Fig. 8 Ride comfort comparison of RMS of ER ECS system

승차감이 가장 떨어지는 것을 확인할 수 있으며, 3가지 경우 모두 제어 시 진동이 감소됨을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 식 (9)를 이용한 RMS(root mean square) 결과이며, 승차감평가를 위하여 타이어 공기압을 각각 124 kPa, 207 kPa, 227 kPa으로 설정 후 현가장치의 가속도를 측정 아래와 같이 RMS 값을 구한 결과이다. 결과값에서 타이어의 충진압력과 무관하게 ER 댐퍼의 감쇠력 제어를 수행하여 승차감이 향상되는 것을 확인할 수 있다⁽⁸⁾.

$$RMS = \left[\sum_{i=1}^N \ddot{z}_s(i)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

5. 결 론

이 연구에서는 ER 댐퍼를 적용한 현가장치의 전자제어 현가장치 적용을 위하여 타이어 공기압에 따른 승차감 성능평가를 수행하였다. 이를 위하여 중형 승용차의 현가장치에 적용이 가능한 ER 댐퍼를 설계, 제작 및 조립하였으며, 전기장 적용에 따른 감쇠력 성능에 대한 시험을 수행하였다. ER 댐퍼를 1/4 자동차 현가장치에 적용 후, 이에 대하여 수학적 모델링을 구하고 지배방정식을 도출하였으며, 타이어 공기압에 따른 타이어 강성 측정시험을 수행하였다. 1/4 자동차 현가장치의 주행안정성 및 승차감 개선을 분석하기 위하여 제어기를 구성하였으며, 이를 수행할 수 있도록 1/4 자동차 현가장치 시스템을 위한 실험 시스템을 구성하였다. 타이어 공기압을 변화시키며 범프 가진 하에서 승차감 분석을 수행하였으며, 이를 통하여 ER 댐퍼를 차량 ECS에 적용 시 타이어 공기압에 상관없이 승차감이 향상됨을 실험방법을 통하여 고찰할 수 있었다. 향후, ER 댐퍼를 전자제어 현가장치에 적용할 경우 급제동, 급가속 및 급선회 시 차량의 운동성능을 보다 정확히 분석하기 위하여 전체 차량을 고려한 시뮬레이션 및 HILS 시험을 수행하고자 한다.

후 기

이 연구는 2014학년도 영남이공대학교 연구조성비 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

References

- (1) Petek, N. K., 1992, An Electronically Controlled Shock Absorber as an Application of Electrorheological Fluid, SAE Technical Paper Series 920275.
- (2) 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.
- (3) 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, No. 2, pp. 101~121.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Sung, K. G., Choi, S. B. and Park, M. K., 2010, Design and Performance Evaluation of Electro-rheological Shock Absorber for Electronic Control Suspension, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 5, pp. 444~452.
- (7) Gordaninejad, F., Ray, A. and Wang, H., 1997, Control of Forced Vibration Using Multi-electrode Electro-rheological Fluid Dampers, J. Vib. Acoust.-Trnas. ASME, Vol. 119, No. 527, pp. 527~531.
- (8) Lin, K. Y., Hwang, J. R., Chang, S. H., Fung, C. P. and Chang, J. M., 2006, System Dynamics and Ride Quality Assessment of Automobile, Society Automotive Engineering 2006-01-1225.



Kum-Gil Sung received the B.S. degree and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Inha University in 1998 and 2008 respectively. He is now working as an associate professor in

Yeungnam University College. His research interests are smart actuator design and robust control of mechatronic systems using smart materials.



Seung-Bok Choi received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Inha University in 1979, M.S. and Ph.D. degrees from Michigan State University in 1986 and 1990 respectively. He is currently fellow professor and Dean

of the Graduate School in Inha University. He is a fellow of KAST (The Korean Academy of Science and Technology) and NAEK (National Academy Engineering of Korea). His research interests are control of various control systems and robust controller design using smart actuators.