

ER댐퍼를 이용한 차량의 진동제어

주동우*, 이육형**, 박명관***

Vibration Control of a Vehicle using ER Damper

Dong Woo Joo*, Yuk Hyung Lee**, and Myeong Kwan Park***

ABSTRACT

A semi-active suspension system for a vehicle using an Electrorheological Fluid damper has been studied. Apparent viscosity of ERF(Electrorheological Fluid) can be changed rapidly by applying electric field. The damping force of ER damper can be selectively controlled by employing electric field to the ER fluid domain. This paper deals with a two-degree-of-freedom suspension using the ER damper for a quarter car model. An intelligent control method using fuzzy control with genetic algorithm has been employed to control the damping force of the ER damper. The GA designs the optimal structure and performance of Fuzzy Net Controller having hybrid structure. The designed fuzzy net controller has been compared with the skyhook type controller for a quarter car model. The computer simulation results show that the semi-active suspension with ER damper has a good performance in the sense of ride quality with less vibration for ground vehicle.

Key Words : Electrorheological Fluid(전기유변유체), Semi-active Suspension(반능동 현가장치), ER Damper(ER댐퍼), SkyHook Control(스카이훅 제어), Fuzzy control(퍼지 제어), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘)

1. 서론

최근 자동차의 고급화, 고기능화가 급속히 진행되면서 자동 변속기를 장착한 자동차의 비율이 늘고 있고 동력 조향 장치의 설치가 보편화 되고 있으며, 고급차에 있어서는 충격소바(Shock absorber)의 감쇠율을 차량의 운동 상태에 따라 적절히 선택

할 수 있는 반능동 현가장치(semi-active suspension)와 복수개의 센서를 이용하여 유압 액츄에이터를 제어함으로써 차량의 자세 제어 및 승차감을 향상시키는 능동형 현가장치(active suspension)등 새로운 고부가 가치 상품이 계속 개발되고 있다. 이러한 움직임과 관련하여, 기존 유압 액츄에이터 보다 차량의 운동 성능, 안전성, 편리성의 향상을 목적으

* 양산대학 자동차과
** 부산대학교 대학원
*** 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

로 하는 새로운 고기능의 액츄에이터 개발이 요구되고 있다. 장래형 액츄에이터는 경량, 단순화되며 내충력 발생이 가능하고, 아울러 고속응답 및 제어가 가능하든 종래의 기술과는 다른 새로운 시스템이 요구된다. 이러한 새로운 시스템을 실현하기 위해서는 종래의 성능을 뛰어넘는 새로운 기능재료를 이용한 액츄에이터의 개발이 필요하다. ER(electro-rheology) 유체를 이용한 가변 댐퍼(혹은 완충기)의 연구 개발은 1980년대 중반부터 본격적으로 시작되어, 미국과 일본 및 유럽 등지에서 자동차에의 적용을 위한 연구가 진행 중이다^(1,2,3). 그러나 ER 유체 메카니즘의 복잡성 때문에 이를 이용한 댐퍼의 모델링 기법과 제어기법이 아직 정립되어 있지 않은 상태이다. 이에 본 연구에서는 ER 유체를 이용한 연속형 반능동식 가변 댐퍼(이하 ER 댐퍼라 칭함)를 제안하여 이론적 모델링과 제어기법을 기술함으로써 기존의 것과는 전혀 다른 새로운 차원의 댐퍼에 대한 정량적 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 댐퍼는 ER 유체가 채워진 실린더 형태로서 속도 대 힘의 관계는 전기장의 부하에 의해서만 제어되는 것으로 고려하였다. 시뮬레이션에 사용된 현가 장치는 차체의 질량과 바퀴의 질량을 고려한 2-DOF 시스템을 설정하였고, 타이어의 강성이 지면과 바퀴 질량 사이에 적용되고 ER 댐퍼와 기존의 스프링과 점성(viscous)댐퍼가 차체질량과 바퀴질량 사이에 병렬로 연결되어 있는 것으로 모델링하여 해석하였다⁽⁴⁾. ER 유체는 전기장에 의해 유체 자체의 고유한 특성인 점도를 가변할 수 있고 그 반응 속도 또한 빠른 장점이 있다. 이러한 ER 유체의 고유특성을 이용하여 ER 댐퍼의 감쇠력을 제어하면 현가 장치의 진동을 기존 시스템보다 줄일 수 있을 것이다. 본 연구에서는 ER 댐퍼의 감쇠력의 제어를 스카이훅제어(Skyhook control)를 이용하여 반능동 제어를 수행하고, 유전자 알고리즘에 의해 설계된 최적 구조를 가진 퍼지 제어기^(5,6,7,8,9)에 의해 ER 댐퍼가 설치된 반능동 현가장치를 제어하여 차량의 진동 제어 성능과 효과를 고찰하여 본다.

2. ER유체의 특성 및 댐퍼의 구조

ER유체는 전기장 부하시 유체입자의 전하는 체인형 구조를 형성하게 되며 이방향의 물리적 성질을

갖게 된다. 이 체인형 구조로 인해 유체의 운동이 제한되고 따라서 유체의 유동 성질이 변화하고 항복전단응력을 가지게 되어 빙햄 유체적인 유동을 하게 되며^(10,11,12) 전기장이 무부하 상태로 될 때 유체는 다시 본래의 랜덤 구조를 갖게 된다. 일반적으로 ER유체의 상변화를 위해 요구되는 전기장의 크기는 약 1~9kV/mm이나 전류밀도가 약 10 μ A/cm² 이하이기 때문에 상변화를 위해 요구되는 전력은 매우 낮다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 ER댐퍼의 구조이다. Fig. 2 ER유체의 기본특성을 나타낸 것이다. 본 논문에 사용된 ER유체는 일본의 브릿지스톤(Bridgestone)사에서 제작된 것이며, ER유체의 기본 물성은 점도가 93 mPa·s[25℃]이고, 항복응력 1052 Pa[3kV/mm, 25℃]이며, 전류밀도 10 μ A/cm²[3kV/mm, 25℃]이다. 시뮬레이션에서는 감쇠력 제어를 위해 댐퍼의 감쇠력-속도 특성 모델을 이용하여 제어를 수행하기로 한다. 감쇠력-속도 특성을 모델을 구하기 위해서 각 압력손실을 구하면 점성에 의한 압력손실과 전기점성효과에 의한 압력손실로 나타난다. ER 유체를 이용하여 제작한 ER댐퍼의 감쇠력-속도와와의 관계를 Fig. 3에 나타내었다⁽¹³⁾.

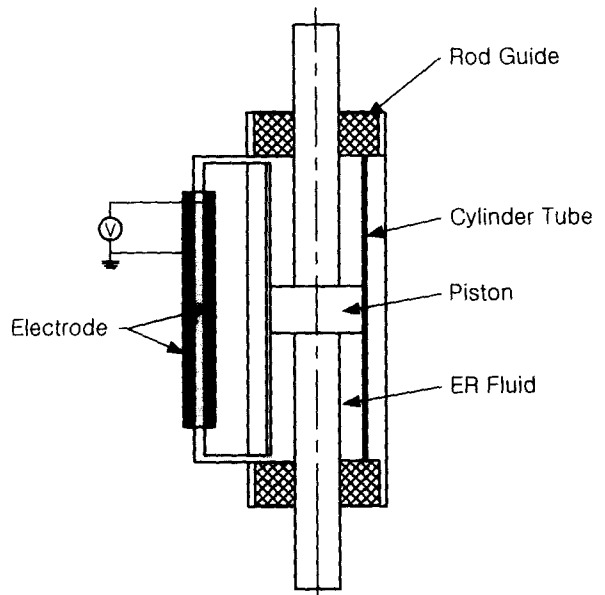


Fig. 1 Structure of the ER Damper

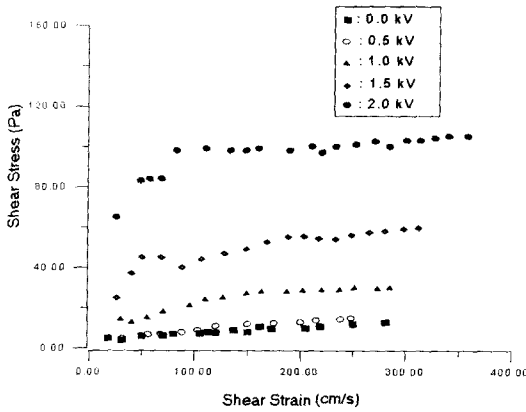


Fig. 2 Shear stress - Shear strain

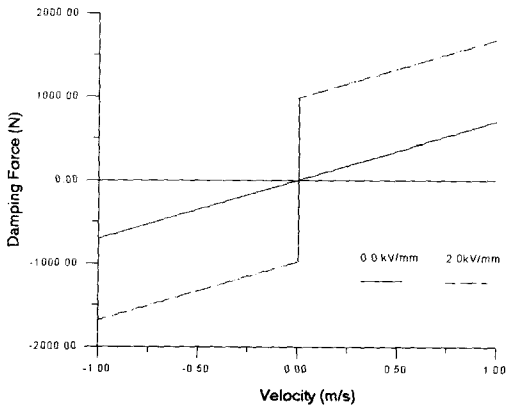


Fig. 3 Characteristic of ER damper

3. 현가 장치 모델링

현가장치의 모델링을 위해 4분주 차량 모델을 시뮬레이션 기본 모델로 제시하였다(Fig. 4). 4분주 차량 모델은 2 자유도를 가지며 ER 댐퍼 모델이 포함되어 있다. 이 ER 댐퍼 모델에서 차체 진동에 따른 감쇠력을 가변할 수 있게 되어 있다. 모델에서부터 본 시스템의 지배방정식은 아래와 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} m_u \ddot{z}_u &= k_s(z_s - z_u) - k_t(z_u - z_r) + F \\ m_s \ddot{z}_s &= -k_s(z_s - z_u) - F \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, z_s 은 차체의 변위, z_u 은 바퀴의 변위, z_r 은 지면으로부터 들어오는 입력 변위이고 F 는 ER 댐퍼 감쇠력이다. 시뮬레이션을 위한 파라미터들은 Table 1과 같다.

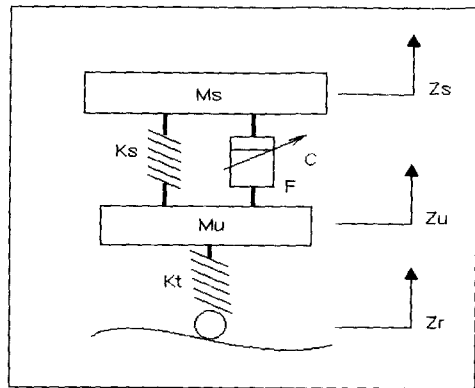


Fig. 4. 1/4 Car model

Table 1 Simulation parameter

parameter	value
sprung mass	200 kg
suspension stiffness	9,000 N/m
damping coefficient	750 Ns/m
unsprung mass	33kg
tire stiffness	200,000N/m

4. 제어기의 설계

4.1 스카이훅 제어기의 설계

반능동 현가 장치에서 많이 쓰이는 스카이훅 모델을 이용하여 ER 댐퍼에서 나오는 감쇠력을 전기장의 세기를 조절하여 제어한다. 가상적인 스카이훅 모델 제어는 차체의 속도와 차륜의 속도가 같은 방향으로 움직일 때 스카이훅 모델과 같은 감쇠력을 가지도록 실제 댐퍼에서의 감쇠력을 조절하는 방법이다.

수학적인 모델링은 다음과 같다.

$$F_{sky} = C_{sky} \cdot \dot{Z}_s \quad (2)$$

스카이하크 이론에 의한 감쇠력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) > 0 \text{ 이면 } F &= F_{sky} \leq F_{max} \\ \dot{z}_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) < 0 \text{ 이면 } F &= F_{min} \end{aligned} \quad (3)$$

실제적으로 차륜의 속도와 차체의 속도가 같은 방향으로 움직일 때 작용되어야 할 ER댐퍼의 감쇠력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_{desired} &= C_{min}(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + \text{sgn}(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u)C_{ER} \times V_{desired}^2 \\ F_{desired} &= F_{sky} = C_{sky} \times \dot{Z}_s \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, C_{min} 은 전기장을 가하지 않은 상태시 계수, C_{ER} ER댐퍼 실험에서 구한 계수이다. ER 댐퍼에 인가되는 전기장의 세기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{desired} = \sqrt{\frac{C_{sky}\dot{Z}_s - C_{min}(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u)}{\text{sgn}(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u)C_{ER}}} \quad (5)$$

최종적으로 정리된 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) > 0 \text{ 이면 } V &= V_{desired} \leq V_{max} \\ \dot{z}_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) < 0 \text{ 이면 } V &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

4.2 퍼지 제어기의 설계

실제적으로 퍼지 제어기를 설계할 때는 전문가적인 관점에서 룰들을 결정해야 시스템의 출력이 사용자가 요구하는 대로 나오는 특징이 있다. 퍼지 제어기가 가지는 이러한 문제점을 유전자 알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기의 룰들을 학습하면서 최적화하기로 한다. 유전자알고리즘을 자연계의 적자생존의 방법을 이용하여 짧은 시간안에 최적화시키는 방법으로서 퍼지 제어기의 룰을 최적화킨다. 그리고 최적화된 룰을 가진 퍼지 컨트롤러를 이용하여 ER 댐퍼가 설치되어진 서스펜션 모델을 제어한다. Fig. 5는 퍼지네트제어의 구조를 나타낸 것이며, Fig. 6은 전체적인 퍼지시스템 및 유전자알고리즘의 기본연산을 표현한 것이다.

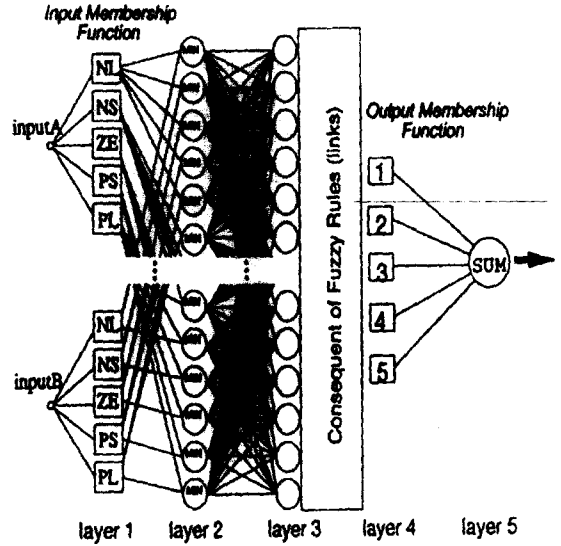


Fig. 5 Fuzzy net controller

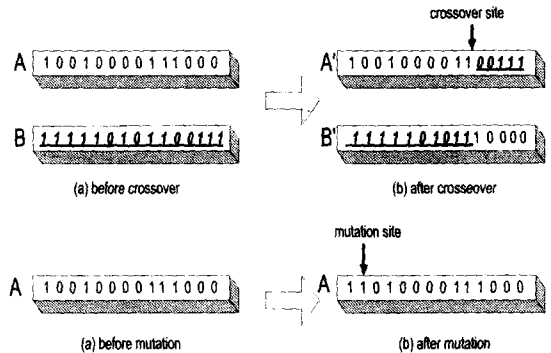
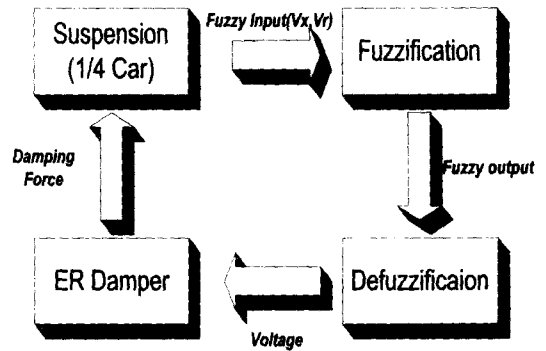


Fig 6. Fuzzy control and Genetic Algorithm

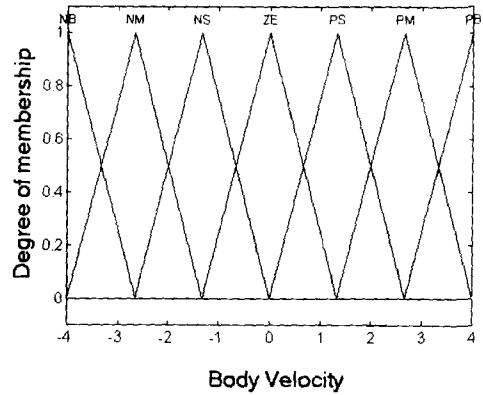
앞에서 제시한 1/4차량의 현가 장치를 제어하기 위해 퍼지 컨트롤러의 입력 변수로는 \dot{z}_s , $\dot{z}_s - \dot{z}_u$ 을 사용하고, 퍼지컨트롤러의 두 입력 변수는 일반적인 반능동 현가 장치 제어인 스카이hook 모델의 입력 신호로 쓰인다. 퍼지제어의 출력은 ER 댐퍼에서 밸브에 걸리는 전압이다. \dot{z}_s , $\dot{z}_s - \dot{z}_u$ 의 멤버쉽 함수는 7가지의 언어적인 표현으로 표현되고 전기장출력은 6가지의 언어적인 표현으로 표현된다. Fig. 7은 퍼지 컨트롤러에 대한 멤버쉽 함수들을 표현한 것이다. ER댐퍼를 가진 현가장치의 성능을 최적화시키기 위해선 퍼지룰과 멤버쉽함수로 표현된 2진수 유전자를 최적화시켜야 하고 그러기 위해선 원하는 성능에 적합한 성능지수(P.I : Performance Index)를 선택해야 한다. 본 연구에서는 차체 속도 성분에 중점을 두었기 때문에 다음과 같은 성능 지수를 선택하였다. 성능지수를 각 학습 시기 때 마다 유전자 알고리즘최적화기(GA Optimizer)에서 받아서 들어서 최적의 유전자를 찾는 데 이용하게 된다.

$$P.I. = \frac{1}{T} \int \sqrt{z_s^2} dt + \frac{1}{T} \int \sqrt{\dot{z}_s^2} dt \quad (7)$$

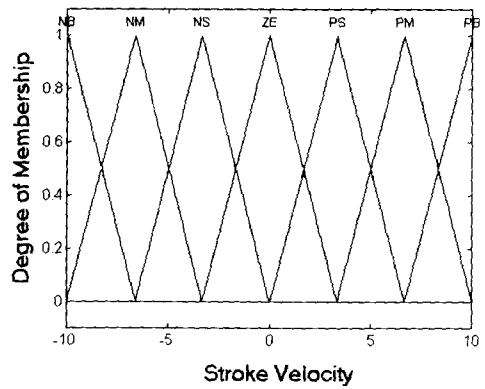
최적화된 룰은 table 2와 같다.

Table 2 Optimized rules

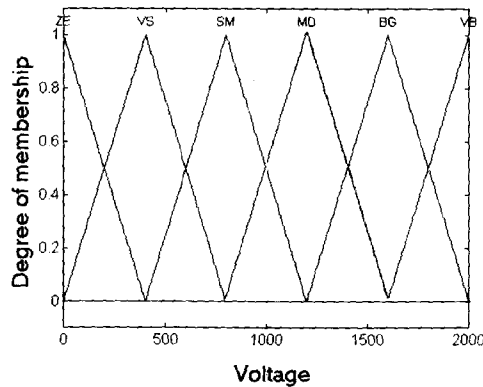
		Piston Velocity						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Body Velocity	PB	ze	ze	ze	ze	bg	vb	vb
	PM	ze	ze	ze	ze	md	md	bg
	PS	ze	ze	ze	ze	vs	sm	sm
	ZE	ze	ze	ze	ze	ze	ze	ze
	NS	sm	sm	vs	ze	ze	ze	ze
	NM	bs	md	md	ze	ze	ze	ze
	NB	vb	vb	bg	ze	ze	ze	ze



a) sprung mass velocity



b) piston velocity



c) output voltage

Fig. 7 Membership function

현 시스템의 성능과 퍼지 제어기 자기 학습을 위해서 지면으로부터 들어오는 입력 신호를 스피드범퍼의 형태로 입력한다. 여기서 사용한 GA에서의 교배율과 돌연 변이율을 각각 0.7, 0.2으로 두고 멤버십 파라미터와 퍼지룰을 최적화시켰다.

5. 시뮬레이션 해석 결과 및 고찰

ER 댐퍼를 이용한 현가 장치에 각 제어기를 적용하였을 때의 성능을 비교하기 위하여 노면의 속도 입력 신호를 Fig. 8과 같은 스피드범퍼(speed bump)입력을 사용하였다. Fig. 9는 노면 입력에 대한 차체의 가속도 성분을 시간 영역에서 나타낸 것이다. ER 댐퍼에 전장을 가하지 않은 수동 모델에서는 노면 입력에 대한 차체 가속도가 빠른 시간 내에 제거되지 못하고 일정 시간 동안 지속되어 나타난다. ER 댐퍼에 전장을 가하여 스카이훅 모델 제어와 퍼지 제어를 수행한 현가 장치 모델에서는 차체의 가속도가 수동 모델에 비해 비교적 빠른 시간에 제거됨을 확인 할 수 있다. 또한 스카이훅 모델 제어를 수행하였을 때와 퍼지 제어를 수행하였을 때는 차체 가속도가 감소되는 시간이 거의 같아 동일한 성능의 진동 감쇠 효과를 나타냄을 알 수 있다.

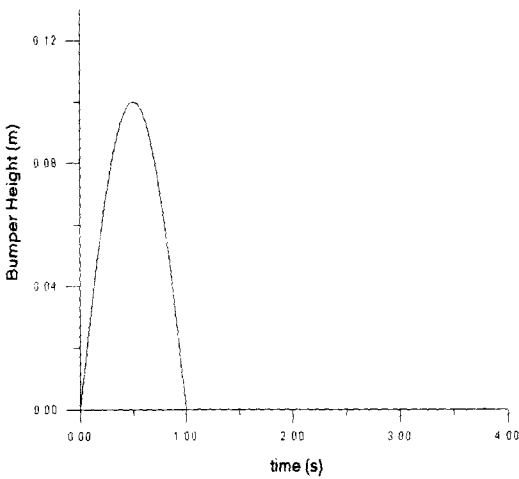
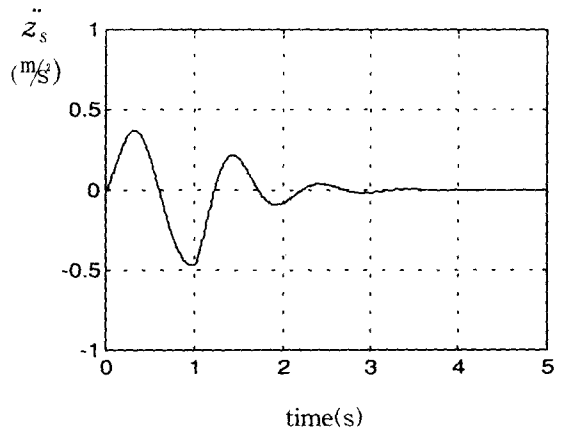
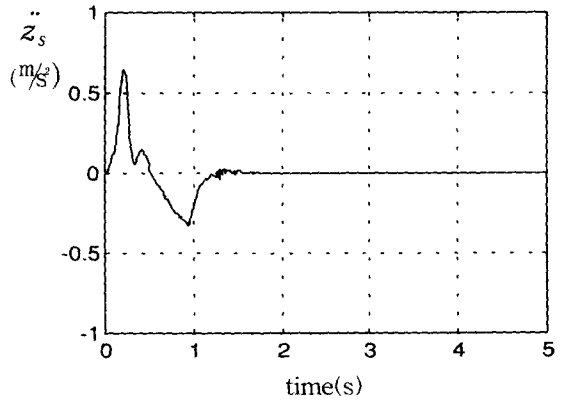


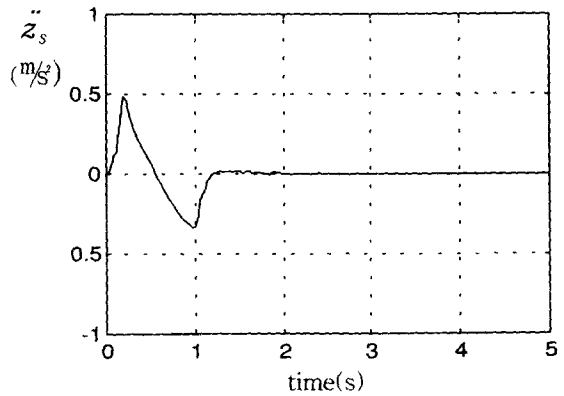
Fig. 8 Road input



(a) Passive model



(b) Skyhook control

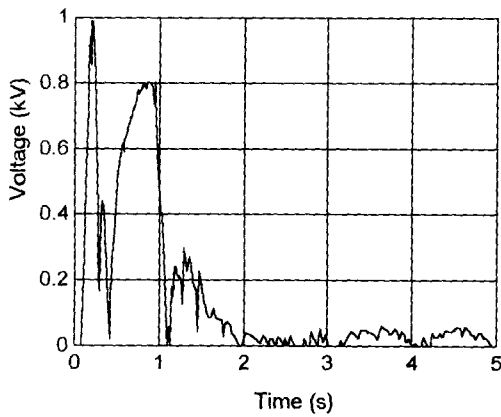


(c) Fuzzy control

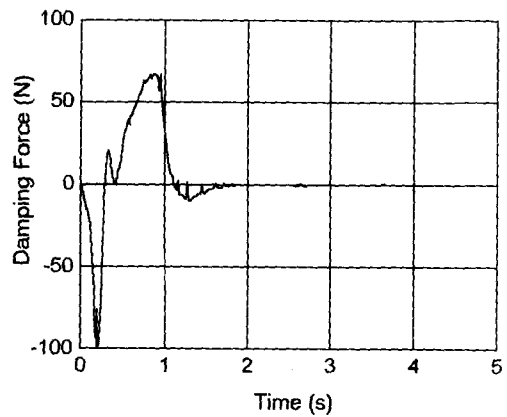
Fig. 9 Body acceleration (\ddot{z}_s)

Fig. 10은 제어를 수행할 때의 ER댐퍼에 인가된 전압을 나타낸 것이다. ER댐퍼에 인가되는 전압은 자체의 가속도 크기에 따라 변화되고 있음을 알 수 있었고, ER댐퍼에서 나타내는 감쇠력의 크기는 ER댐퍼에 가해지는 전압의 크기에 따라 증감되고, ER댐퍼의 감쇠력이 제어를 수행함에 따라 연속적으로 변화되고 있음을 나타낸다. Fig. 11는 ER 댐퍼에서 생성되는 감쇠력 특성을 나타낸 것이다.

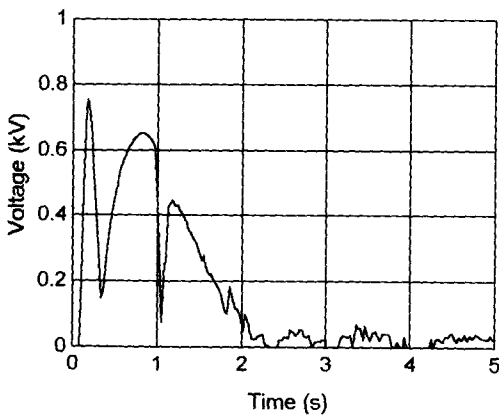
기존의 반능동형 현가 장치에서는 스텝 모터나 솔레노이드 밸브등을 이용한 비연속형 감쇠력 가변 댐퍼를 사용하여 차량의 진동 특성을 제어하는 데 반하여, ER 댐퍼를 사용하는 현가 장치에서는 ER 유체의 빠른 응답성과 연속 감쇠력 가변 성질을 이용하여 더욱 향상된 반능동형 현가 장치의 구현이 가능할 것이다.



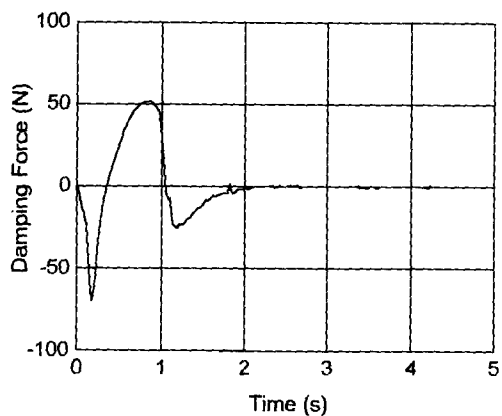
a) Skyhook control



(a) Skyhook control



(b) Fuzzy control



(b) Fuzzy control

Fig. 10 Input voltage on ER damper

Fig. 11 Damping force characteristics of ER damper

6. 결 론

본 연구에서는 ER 유체를 이용한 ER 댐퍼를 이용하여 자동차 현가 장치에 적용 시에 발생하는 차체의 진동 제어 특성을 고찰하였다. 부하되는 전기장에 대한 ER 댐퍼의 특성치를 이용하여 ER 댐퍼를 장착한 현가 장치를 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ER 유체를 이용한 ER 댐퍼는 기존의 수동형 댐퍼에 비해 구조의 단순화는 물론 반능동 현가 장치에의 적용이 가능하였다.
2. 현가 장치의 제어에 따라 ER 댐퍼의 감쇠력이 연속적으로 가변됨이 확인되었고, 이러한 성질을 이용하여 우수한 성능의 반능동 현가 장치의 구현이 가능함을 알 수 있었다.
3. ER 댐퍼를 이용한 현가 장치에 스카이훅 모델 제어와 유전자 알고리즘에 의해 최적화된 퍼지 제어를 도입 하였을 때, 수동 모델에 비해 모두 우수한 차체 진동 감쇠 효과를 얻을 수 있음이 확인 되었다.

본 해석에서 사용된 모델은 실제의 현가 장치를 단순화한 것으로 자동차의 실제 조건에 대하여 정확하게 적용될 수는 없으나 본 연구를 통하여 제안된 ER 댐퍼의 감쇠력과 제어성을 해석하여 실제 자동차의 승차 성능을 향상시키기에 충분하다고 생각된다. ER 댐퍼를 실제 자동차의 현가장치에 장착하는 데는 아직 어려움이 있기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위해 더 큰 항복 응력을 가지는 ER 유체의 개발과 연구가 병행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. H. YOSHIDA, M. NAGAI, M. ONDA, "Semi active Vibration Control of Vehicle with the damper Using Electro-Rheological Fluid," Int. JSME, 1991.
2. Masami Nakano, "ER Effects of an ER Damper and Its Application to Active Vibration Control," JSME, P-SC221, 1996.
3. 최영태, 최승복, 서문석, 여문수, "승용차용 ER 댐퍼의 제어특성," 대한기계학회 춘계학술대회논문

- 문집(A), pp. 415-419, 1996.
4. 우승훈, 류제하, "차륜속도만을이용한 반능동현가 장치의 제어기 설계," 한국자동차공학회 1996년도 춘계학술회의, 96380019, pp. 149-159, 1996.
5. J. S. Jang, "Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems," IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics, vol. 23, pp. 665-685.
6. J. Kim, Y. Moon, and Bernard P. Zeigler, "Designing Fuzzy Net Controllers Using Genetic Algorithms," IEEE Control Systems, 1995.
7. A. Varsek, T.Urbancic and B.Filipic, "Genetic Algorithms in Controller Design and Tuning," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, no. 5, pp.1330-1339, 1993.
8. H. Kim and Y. S. Yoon, "Neuro Controlled Active Suspension with Preview for Ride Comfort," SAE paper, No. 931969, 1993.
9. Y. F. Li and C. C. Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 24-29, 1988.
10. A.R.Johnson, Electro Rheological fluid, p. 424, 1991.
11. W. M. Winslow, "Induced Fibration Suspensions," J. Applied. Physics, vol. 20, pp. 1137-1140, 1949.
12. Petk.N.K., Goudie, J.and Boyle, F.P., roceedings the of 2nd Int. Conf. on ER Fluid., 1989.
13. 박명관, 배종인, "전기유변유체의 빙햄특성과 밸브 및 댐퍼에의 응용," 한국유변학회, 제10권 1호 pp. 31-37, 1998.