

FLC를 이용한 전기유전유체를 사용한 차량현가장치의 제어에 관한 연구

김학균* · 허 훈**

A Study on the Control of Vehicle Suspension by using Electro-Rheological Fluid via FLC Technique

Haak-Kyun Kim, Hoon Heo

ABSTRACT

This paper consider the control for the vehicle suspension system using electro-rheological damper. The study is performed by using of FLC(Fuzzy Logic Controller). The model used in the simulation is quarter car and the road disturbance is regarded as white noise random process with zero mean. Proposed control technique shows good agreement compared with the result from the conventional on-off/bang-bang type control technique.

기호설명

- M : 차량의 질량(상질량)
- m : 바퀴의 질량(하질량)
- k_s : 현가장치의 탄성계수
- b_s : 전기유동유체의 감쇠계수
- k_t : 타이어의 탄성계수
- z : 차량의 변위
- y : 바퀴의 변위
- r : 지면의 변위 (불규칙 노면)

등을 적절히 조절하여 좋은 성능을 가지는 현가장치를 설계하는 것이다. 이러한 수동제어는 평상시엔 어느정도 양호한 승차감을 가지지만 예기치 못한 불규칙 노면에 대해서는 좋은 승차감을 보장할 수 없다. 두 번째는 능동제어로서 스프링, 감쇠기 혹은 액츄에이터, 질량으로 구성되며 불규칙 노면에 대해서도 좋은 승차감이 보장되며 제어방법 또한 매우 다양하다. 그러나 복잡한 구조를 가지며 고가이어서 실용적이라 할 수 없다. 세 번째는 반능동 제어(Semi-Active Control)로서 스프링, 질량, 가변의 감쇠계수를 갖는 감쇠기로 구성되며 능동제어에 비해 저가이고 보다 단순한 구조를 갖는다. 기존에 소개되어있는 현가장치의 반능동 제어 방법은 감쇠기 내의 피스톤의 오리피스 크기를 조절하는 것과 전기 유동(Electro-Rheological : ER)유체를 사용하는 것이 있다. ER유체란 전장을 걸어줌에 따라서 흐름에 대한 저항을 조율할 수 있는 유체이고 매우 빠른 응답을 나타낸다. 1939년에 Willis M. Winslow에 의해 처음 발견되었으나 발견당시에는 학자들의 관심을 모으지 못했고 최근에 들어서 많은 관심을 모으고 있는 물질이다. ER 유체는 부가된 전장(electric field)에 의해서 유

1. 서론

현가장치는 차량의 부품에서 매우 중요한 역할을 한다. 불규칙한 노면으로 인한 진동과 충격을 감쇠시켜 편안한 승차감을 유지시켜주고 차량의 다른 부품들을 진동과 충격으로부터 보호해 주는 역할을 한다. 현가장치의 제어는 다음과 같이 세가지로 나뉘어 있다⁽¹⁾. 첫 번째는 수동제어로서 현가장치의 스프링, 감쇠기, 질량

* 고려대학교 기계공학과 대학원
** 정희원, 고려대학교 제어계측공학과

체의 특성이 제어되고 빠른 응답속도를 갖기 때문에 차량의 능동형 제어시스템의 감쇠기에 매우 적합하다. 본 논문에서는 ER유체를 사용한 차량 현가장치를 퍼지제어기법을 통하여 불규칙 노면에 대한 능동형 제어를 수행하였다. Krasnicki⁽²⁾,와 Margolis와Goshtasbpour⁽³⁾가 사용한 on-off 제어기법과 bang-bang type⁽⁷⁾의 제어와 비교를 하였고 기존의 수동 감쇠기를 사용한 시스템에 비하여 승차감이 개선되었음을 보인다.

2. ER유체의 특성

ER유체의 특성을 간략히 설명하면 다음과 같다. ER유체는 실리콘 오일(silicon oil)과 같은 비 전도성 매체(non-conducting medium)를 함유하며, 초기의 것은 규소(silica)와 전분(starch) 입자가 부유하는 광물성 기름(mineral oil)과 이들 입자를 활동적으로 해주는 물(water)로 구성된다. 이러한 ER유체는 많은 연구를 통하여 여러 가지의 조합이 발견되었고⁽⁹⁾ 가장 두드러진 특성은 전장을 걸어주면 액체상태에서 고체상태로 변한다는 것이다. 또한 전장을 걸었을 때 전극판을 좌우로 움직이는 데에 대한 저항이 생기는 전단응력모드(shear mode)와 전극판 내를 흐르는 유체가 저항을 받아 잘 흐르지 못하게 되는 흐름모드(flow mode)가 있다.⁽⁵⁾ ER유체는 종류마다 다르겠지만 일반적으로 액상에서 고상으로 변하는 데 필요한 전력은 매우 낮다. 그리고 전장부하에 대한 ER유체의 반응속도는 1ms이하이고 최대 반응주파수는 약 12kHz이어서 제어요소로서 적합하다.⁽⁴⁾⁽⁶⁾

3. ER유체를 사용한 감쇠기

지금까지 ER유체를 이용한 지능 구조물에 대한 연구는 초기 단계로서 구조물의 정확한 정적 및 동적 모델링, 그리고 제어기 설계 등의 명확한 정립이 없는 상태다. 특히 능동 제어기의 설계에 대한 많은 연구가 있으나 매우 부진한 실정이고 많은 연구자들이 ER유체의 메카니즘에 대한 여러 가지 이론과 모델을 제안하고 있으나 지금까지 이렇다할 만한 확연한 해석은 없으며 견해조차 다양하다.

본 논문에서는 ER유체의 비선형성을 고려하여 FLC(Fuzzy Logic Controller)를 설계하고자 한다.⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾ ER유체는 비선형 특성을 갖고 있는바 실제실험을 통하여 전기유동유체의 전압에 대한 감쇠계수를 알 수 있다. 이러한 비선형 특성을 고려하여 5장에서는 ER유체의 bang-bang/FLC에로의 적용에 대하여 설명한다.

4. 모델링

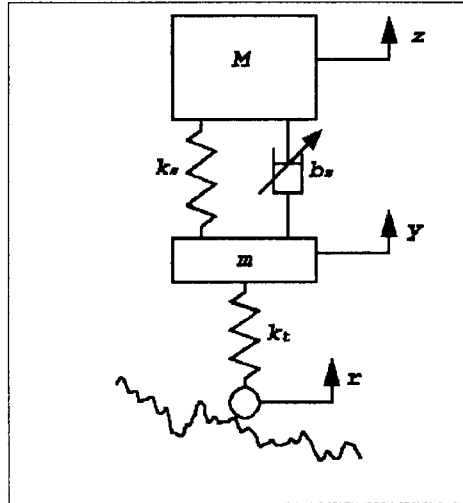


Fig.1 Quarter car model.

본 논문에서는 1/4 모델 차량의 능동 현가 장치에 대해 고찰하였다. 모델의 개략도는 Fig.1과 같고 모델의 운동방정식을 구하면 다음과 같다. (단 여기서 타이어의 감쇠효과는 무시한다.)

$$\begin{aligned} M\ddot{z} &= -k_s(z-y) - b_s(\dot{z}-\dot{y}) \\ m\ddot{y} &= -k_s(y-z) - b_s(\dot{y}-\dot{z}) - k_t(y-r) \end{aligned} \quad (1)$$

상태변수를 아래와 같이 정의하면,

$$\begin{aligned} x_1 &= z-y \\ x_2 &= \dot{z} \\ x_3 &= y \\ x_4 &= \dot{y} \end{aligned}$$

식(2)와 같은 상태 방정식이 얻어진다.

$$\dot{x} = Ax + Br$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ \frac{-k_s}{M} & \frac{-b_s}{M} & 0 & \frac{b_s}{M} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_r}{m} & \frac{b_r}{m} & \frac{-k_r}{m} & \frac{-b_r}{m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_r}{m} \end{bmatrix}$$

여기서 각각의 상수들은 $M = 170 \text{ kg}$, $m = 45 \text{ kg}$, $k_s = 16000 \text{ N/m}$, $k_r = 160000 \text{ N/m}$ 로 가정한다.

5. 제어기 설계

퍼지제어의 성능 비교를 위해 Krasnicki⁽²⁾와 Margolis · Goshtasbpour⁽³⁾가 사용한 on-off 제어기법의 결과와 bang-bang type 제어⁽⁷⁾의 결과와 비교하였다. 비선형 특성을 가진 ER유체를 각 제어기의 제어요소로 사용하기 위해 다음과 같은 가정을 한다.

ER유체는 Fig.2와 같은 특성을 갖는다고 한다. Fig.2 (a)에서 a,b,c,d에 대한 b_s 의 값은 각각 980, 1176, 1764, 1960 (N.sec²)/m이고 on-off와 bang-bang에서는 이와 같이 제한된 4개의 값만을 사용한다. 각 제어성능을 비교하기 위해 퍼지제어에서는 전압이 e에서 f까지 변한다고 가정한다. ER유체는 전압에 따라 비선형적으로 변하기 때문에 각 ER유체에 따라 동일한 제어를 할 수 없다. Fig.2 (b)의 과정을 통해 전압에 대한 ER유체의 감쇠계수를 도식화(tabulation)할 수 있고 이와 같은 이산화 과정을 통하여 퍼지제어에 적용한다.

Fig.3은 시뮬레이션에 사용된 PSD(Power Spectral Density)가 1인 백색잡음을 가진 불규칙 노면(random disturbance with white noise)

을 나타낸다.

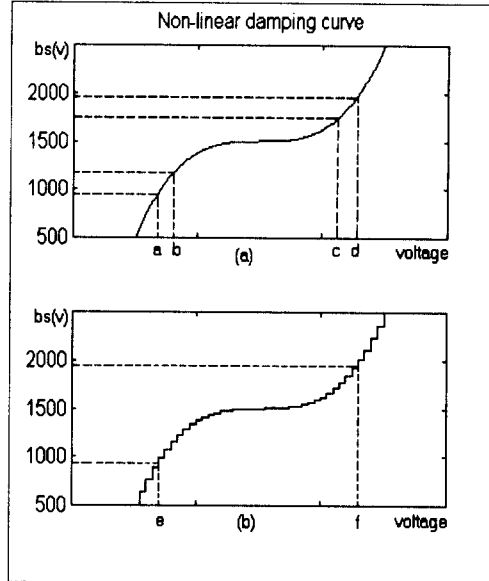


Fig.2 Non-linear damping coefficient via voltage used in (a) bang-bang type control (b) FLC

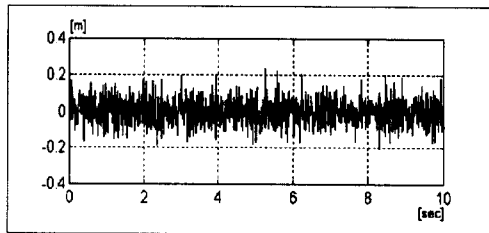


Fig.3 Random disturbance with white noise

다음은 각각 on-off 제어 및 bang-bang 제어와 퍼지제어의 알고리즘 및 그에 대한 설명이다.

5.1 On-off 제어

$$\begin{cases} \dot{z}(\dot{z} - \dot{y}) > 0 \text{ 이면 } v=a \text{ 이고} \\ \dot{z}(\dot{z} - \dot{y}) < 0 \text{ 이면 } v=d \text{ 이다.} \end{cases} \quad (3)$$

식(3)에서 a,d는 Fig.2 (a)의 전압을 나타낸다. 즉, 바퀴에 대한 차체의 상대속도가 차체의 속도와 같은 방향일 때는 차체의 수직방향 가속도 \dot{z} 를 줄이기 위해 최대의 감쇠를 가지고, 만일 이 두 속도가 서로 반대방향일 때는 차체의 수직방향 가속도를 최소화하기 위해 최소의 감쇠를 가진다.

5.2 Bang-bang제어

$$A = (z - y)(\dot{z} - \dot{y})$$

$$B = (\dot{z} - \dot{y})^2 + (z - y)(\ddot{z} - \ddot{y})$$

- ① $A \geq 0$ 이고 $B > 7$ 이면, $v = b$ 이다.
- ② $A \geq 0$ 이고 $7 \geq B > -1$ 이면, $v = a$ 이다.
- ③ $A \geq 0$ 이고 $B < -1$ 이면, $v = b$ 이다.
- ④ $A < 0$ 이고 $B > 7$ 이면, $v = c$ 이다.
- ⑤ $A < 0$ 이고 $7 \geq B > -1$ 이면, $v = d$ 이다.
- ⑥ $A < 0$ 이고 $B < -1$ 이면, $v = c$ 이다.

a,b,c,d는 Fig.2의 전압을 나타낸다. A가 양의 값을 가질때는 차체에 작용하는 탄성력과 감쇠력이 같은 방향일때이고 이때는 차체의 수직방향 가속도를 줄이기 위해 감쇠력은 작아야 한다. 반대로 A가 음의 값일때는 탄성력과 감쇠력이 반대방향일 때이고 이때는 큰 감쇠력을 가져야 한다.

5.3 FLC(Fuzzy Logic Controller)

Bang-bang 제어에서는 현가장치의 승차감을 향상시키고 수직 변위를 감소시키기 위하여 강성력과 감쇠력의 부호만으로 제어 전압의 크기를 결정하였고 강성력과 감쇠력의 크기는 고려하지 않았다. 본 논문의 퍼지제어에서는 기본적인 구상은 bang-bang 제어와 동일하지만 힘의 크기를 비교하여 그에 필요한 전압을 가하는 퍼지 추론 법칙을 사용하였다. 즉, 강성력의 방향과 감쇠력의 방향이 동일하면 제어전압을 감소시킴으로써 감쇠계수를 줄이고, 역으로 강성력의 방향과 감쇠력의 방향이 반대이면 감쇠계수의 크기를 조절함으로써 두 힘이 서로 상쇄되도록 한다. Fig.4의 (a)는 강성력과 감쇠력의 퍼지 소속함수 이고 (b)는 제어 전압의 소속함수이다. Table 1.은 퍼지 추론 법칙이다.

		Spring Force				
		NM	NS	ZE	PS	PM
Damper Force	NM	XS	S	M	L	ZE
	NS	ZE	ZE	L	ZE	XL
	ZE	XXL	XL	ZE	XL	XXL
	PS	XL	ZE	L	ZE	ZE
	PM	ZE	ZE	M	S	XS

Table 1. Fuzzy inference rules

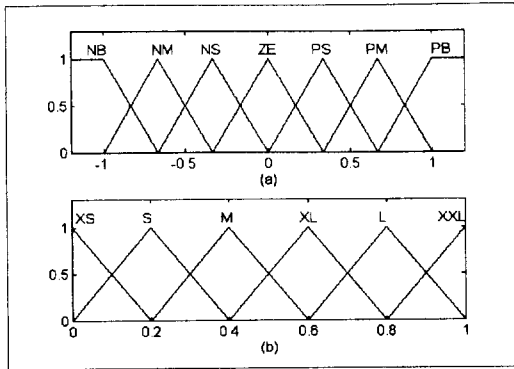


Fig.4 (a) Fuzzy membership functions of spring force & damper force
(b) Fuzzy membership functions of control output

6. Simulation과 결과

Simulation은 불규칙노면에 대한 on-off, bang-bang 그리고 퍼지제어의 결과를 각각 비교하였다. Fig.5에서 점선은 개루프 계의 z의 수직변위를 나타내고 실선은 페루프 계의 z의 수직변위를 나타낸다. 이들 응답에 대한 rms (root mean square)값을 비교하면 on-off 제어가 가장 좋고 bang-bang제어가 다소 성능이 떨어짐을 알 수 있다.

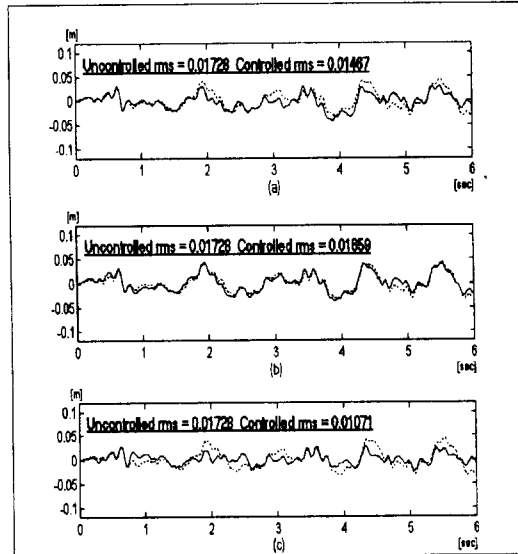


Fig.5 Response for the (a) fuzzy, (b) bang-bang and (c) on-off control

Fig.6은 \ddot{z} 의 응답이다. 마찬가지로 실선은 페루프 응답이고 점선은 개루프 응답이다.

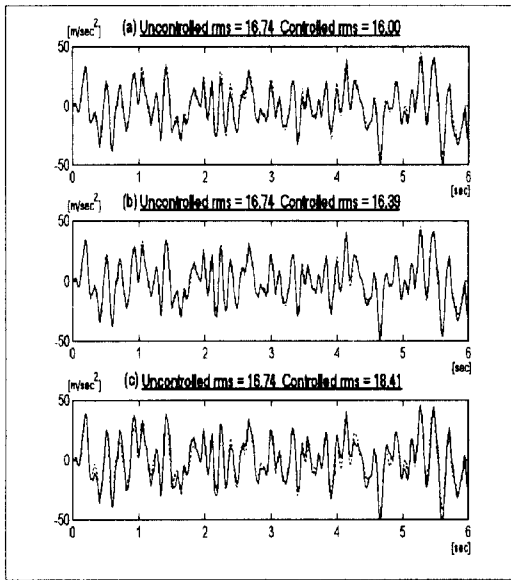


Fig.6 Riding comfort. (a) Fuzzy (b) Bang-Bang (c) On-off

		Uncontrolled rms	Controlled rms
Displacement of body : z	FLC	0.01728	0.01467
	Bang-bang		0.01659
	On-off		0.01071
Acceleration of body : \ddot{z}	FLC	16.74	16.00
	Bang-bang		16.39
	On-off		18.41

Table 2. RMS values for the performance of three controller

Table 2는 각 제어기의 응답의 rms값들을 비교한 것이다. 위의 값들로부터 \ddot{z} 에 대한 응답은 퍼지제어의 결과가 가장 좋은 특성을 보임을 알 수 있다. 즉 상질량의 변위 z 에 대한 응답이 가장 좋았던 on-off제어는 단지 변위의 응답만을 고려하였기 때문에 실제 승차감에서는 오히려 개루프 제어의 응답보다도 성능이 떨어진다. 반면에 퍼지제어는 z 와 \ddot{z} 에 대해 모두 좋은 응답을 보인다. 또한 on-off제어의 알고리즘에서 쓰인 측정값 \ddot{z} 은 정확한 실제 측정이 매우 어렵기 때문에 현실적이지 못하다고 할 수 있다⁽⁶⁾.

7. 결론

ER유체를 사용한 차량 현가장치의 퍼지제어

기에 대한 simulation을 고찰하였고 차량의 수직방향변위 z 와 수직방향가속도 \ddot{z} 의 응답을 on-off 제어 및 bang-bang 제어의 결과와 비교하였다.

수직변위의 응답은 on-off 제어의 결과가 가장 좋은 성능을 보였으나 승차감 측면에서 볼 때는 오히려 제어를 하지 않은 개루프 응답보다도 큰 rms가 측정되었다. 또한 주지해야 할 중요한 점은 on-off 제어의 알고리즘에서는 \ddot{z} 에 대한 측정이 필요하지만, bang-bang 제어의 알고리즘에서는 $z-y$ 와 $\dot{z}-\dot{y}$, 즉 차체와 바퀴의 상대변위와 상대속도가 필요하다는 것이다. 실제적용에 있어서 움직이는 차체에 대한 \ddot{z} 의 정확한 측정은 매우 어렵고 실제적으로 적용되기 어려운 반면에⁽⁶⁾, 차체와 바퀴의 상대변위, 상대속도를 측정하는 것은 LVT(Linear Velocity Transducer), LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 등의 이용⁽¹⁴⁾으로 실제적용이 용이하므로 on-off제어 보다는 bang-bang제어와 퍼지제어의 결과가 더욱 실제적이라고 할 수 있다. 본 논문에선, 아직 정립이 되지않은 ER유체의 제어에 대한 실제 이용 가능한 제어 알고리즘을 소개하였다. 이를 더욱 발전시키기 위해서는 ER유체에 대한 많은 실험이 수행되어야 하고, 또한 본 논문에서 제시한 알고리즘을 바탕으로 개선된 제어기법의 개발에 대하여 현재 많은 연구가 수행되고 있다.

참고문헌

- (1) Petek, Nichols K, "Shock Absorber uses Electrorheological Fluid," *Automotive Engineering*, vol.100, No.6, June, 1992, pp.27-30.
- (2) Kransnicki, E.J., "The Experimental Performance of an 'on-off' Active-Damper," *Shock and Vibration Bulletin*, vol.51, Part 1, pp.125~131, 1981
- (3) Margolis, D.L. and Goshtasbpour, W., "The Chatter of Semi-Active On-Off Suspension and Its Cure," *Vehicle System Dynamics*, vol.13, pp.129~144, 1984
- (4) 최승복, 박용문, 서문석, "전기유동유체를 함유 하는 지능의괄보의 진동특성 및 제어,"

- 대한기계학회논문집, 제17호, 제7권, pp.1649~1657, 1993
- (5) Shin Morishta, Tamaki Ura, "ER Fluid Applications to Vibration Control Devices and an Adaptive Neural-Net Controller," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. vol.4, June, 1993, pp.366~372.
- (6) 최승복, 1992, "지능복합재료의 구성과 특성," 한국항공 우주학회지, 제20권, 제4호, pp.117~129.
- (7) 김학균, 허 훈, "전기유동유체를 이용한 차량현가장치의 반능동제어", 대한기계학회 춘계 학술대회, 1996.
- (8) J.Y.Wong, X.M.Wu, M.Sturk, and C.Bortolotto, "On The Applications of Electro-Rheological Fluids to the Development of Semi-Active Suspension Systems for Ground Vehicles," *Transactions of CSME*, vol.17, No.4B, pp.789~800, 1993.
- (9) M.Whittle, "Computer Simulation of an Electrorheological Fluid," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol.37, pp.233~263, 1990.
- (10) 이광형, 오길록, "퍼지 이론 및 응용", 홍릉과학 출판사.
- (11) 채 석, 오형석, "퍼지이론과 제어", 청문각.
- (12) Wang, "Adaptive Fuzzy Systems and Control", Prentice Hall.
- (13) Klir, Yuan, "Fuzzy Sets and Fuzzy Logic", Prentice Hall.
- (14) Jolly, Miller "The Control of Semi-Active Dampers using Relative Feedback Signals", SAE paper No.892483 pp.9~17, 1989.