

전기유변유체댐퍼의 유전자알고리즘에 의해 설계된 퍼지 제어 Fuzzy Control Designed GA of a Electro-Rheology Fluid Damper

배종인, 박명관*, 주동우**

*부산대학교 (Tel:+82-051-510-3089;Fax:+82-051-514-0685;E-mail:museopji@hyowon.pusan.ac.kr)

**양산전문대학교 (Tel:+82-0523-370-8287;Fax:+82-0523-387-0325)

Abstract This paper studies a semi-active suspension with ER damper controlled Fuzzy Net Controller designed GA(Genetic Algorithm). Apparent viscosity of ERF(Electro-Rheological Fluid) can be changed rapidly by applying electric field. Semi-active suspension for ground vehicles are expected to improve ride quality with less vibration. This paper deals with a two-degree-of-freedom suspension using the ER damper for a quarter vehicle system. In this paper, the GA is applied for generating Fuzzy Net Controllers. The GA designs the optimal structure and performance of Fuzzy Net Controller having hybrid structure. Computer simulation results show that the semi-active suspension with ER damper has good performances of ride quality.

Keyword : Electro-Rheology Fluid, Fuzzy Net Controller, Genetic Algorithm(GA), ride quality, ER Damper, Semi-active Suspension

1. 서론

최근에 승용차의 승차감에 대한 요구가 커지면서 능동식 또는 반능동식 현가장치에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 본 논문에서는 ER유체(Electro-Rheology Fluid)를 이용하여 반능동식 현가장치를 지능알고리즘으로 제어하려고 한다. ER유체는 전기장에 의해 유체 자체의 고유한 특성인 점도를 가변할 수 있고 그 반응속도 또한 빠른 장점이 있다.

이러한 ER유체의 고유특성을 이용하여 ER 댐퍼의 감쇠력을 제어하면 현가장치의 진동을 기존 시스템보다 줄일 수 있을 것이다. 본 논문에서는 ER 댐퍼의 감쇠력의 제어를 유전자 알고리즘에 의해 설계된 최적 구조를 가진 퍼지 제어기에 의해 제어할 것이다. 본 논문에 제시된 fuzzy net controller는 유연한 구조를 가지게 되며 fuzzy net controller의 최적의 파라미터값을 유전자 알고리즘에 의해 빠른 속도로 찾아낼려고 한다.

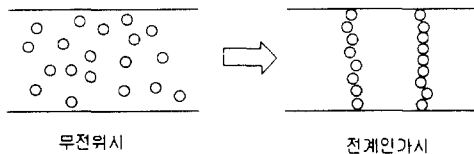


Fig. 1 Mechanism of ERF

2. ERf의 특성

ER유체는 전기장 부하시 유체입자의 전하는 체인형 구조를 형성하게 되며 이방향의 물리적성질을 갖게 된다.(Fig. 1) 이 체인형 구조로 인해 유체의 운동이 제한되며 따라서 유체의 모든 유동성질이 변화하고 항복응력을 가지게 되어 비행유체의 유동을 하게 된다. 전기장이 무부하상태로 될 때 유체는 다시 본래의 램덤 구조를 갖게 된다. 일반적으로 ER유체의 상변화를 위해 요구되는 전기장의 크기는 약1~9kV/mm이나 전류밀도가 약10μA/cm² 이하이기 때문에 상변화를 위해 요구되는 전력은 매우 낮다.

3. 시스템 모델링

3.1 현가장치 모델

본 논문에서는 4분주차량모델을 시뮬레이션기본모델로 제시하였다.(Fig. 2) 본 4분주 모델은 2자유도를 가지며 가변ER댐퍼모델이 포함되어 있다. 이 가변ER댐퍼모델에서 차체진동에 따른 감쇠력을 발생하게 되어 있다. 모델에서부터 본 시스템의 지배방정식은 아래와 같이 도출된다.

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

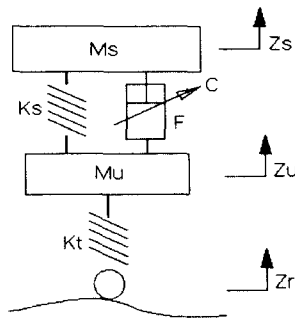


Fig. 2 Semi-Active Model

여기서, z_s 은 차체의 변위, z_u 은 바퀴의 변위, z_r 는 지면으로부터 들어오는 입력 변위이고 F 는 ER 댐퍼 감쇠력이다.

3.2 ER valve 특성

본 논문에서는 일반적인 댐퍼에 ER valve를 부착하여 댐퍼의 필요감쇠력을 생성시켰다. 여기서 ER유체를 병행유체로 가정하고 실험하여 밸브특성을 파악하였다. 병행유체의 기본 유동특성은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{du}{dy} &= \frac{\tau + \tau_y}{h} & \text{if } \tau < -\tau_y \\ \frac{du}{dy} &= 0 & \text{if } |\tau| \leq \tau_y \\ \frac{du}{dy} &= \frac{\tau - \tau_y}{h} & \text{if } \tau > \tau_y \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 τ 는 전단응력, τ_y 는 항복전단응력이고 h 는 전극의 간극, l 은 전극의 길이를 나타낸다. 위와 같은 특성에서 아래의 식이 유도되어 진다.

$$\begin{aligned} \tau &= h \frac{\Delta P}{2l} \\ \tau_y &= h_y \frac{\Delta P}{2l} \end{aligned} \quad (3)$$

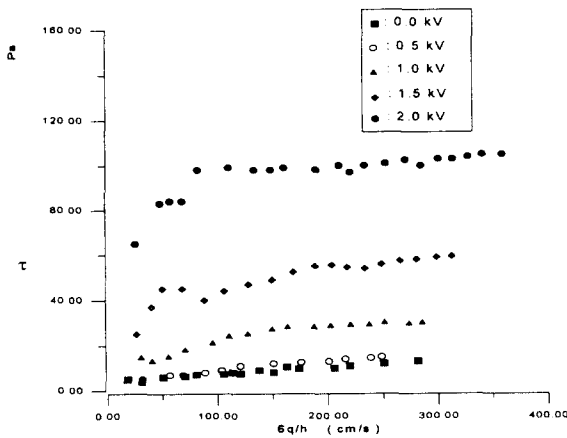


Fig. 3 Shear Stress

아래 Fig.3은 일정 전기장 부하시의 ER valve에 흐르는 유체의 속도에 따른 전단응력의 변화량을 나타낸 것이다. 여기서 상기 ER유체를 병행유체 거동으로 보고 전단응력식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\tau = 5.15 \times 10^{-2} \times \frac{q}{h^2} + 2.09 \times 10^{-5} \times E^2 + 3.77 \times 10^{-4} \times E \quad (4)$$

위 식의 q 는 ER 밸브에서의 유량, E 는 밸브에 걸린 전기장의 크기이다.

3.3 ER damper의 감쇠력

앞 절에서 설명했던 것과 같은 ER 밸브를 부착한 ER 댐퍼의 감쇠력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F &= A_1 P_1 - A_2 P_2 \\ &= A(P_1 - P_2) = A \Delta P \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, F 는 ER 댐퍼의 감쇠력, ΔP 는 ER 밸브에서의 차압이다. 앞의 두식을 이용하여 본 논문에서는 ER 댐퍼의 감쇠력 모델을 다음과 같이 제시하였고 아래의 감쇠력을 이용하여 제어기를 설계할 것이다.

$$F = \frac{2lA}{h} (5.15 \times 10^{-2} \times \frac{q}{h^2} + 2.09 \times 10^{-5} \times E^2 + 3.77 \times 10^{-4} \times E) \quad (6)$$

여기서 A 는 ER 댐퍼의 피스톤의 단면적이다. 위의 식을 다시 정리하면,

$$F = 1145.6 \dot{x} + \text{sgn}(\dot{x}) (6.48 \times 10^{-5} \times E^2 + 1.17 \times 10^{-3} \times E) \quad (7)$$

여기서 x 는 로드의 변위이다.

4. 지능 제어 알고리즘

실제로 퍼지 컨트롤러를 설계할 때는 전문가적인 관점에서 파라미터들을 설정해야 시스템의 출력이 사용자가 요구하는 대로 나온다는 특징이 있었다. 여기서는 퍼지 컨트롤러가 가지는 이러한 문제점을 유전자 알고리즘을 이용하여 퍼지 컨트롤러 파라미터들을 학습하면서 최적화하려고 한다.

4.1 Fuzzy Net Control

Fig. 4은 Fuzzy Net Control의 구조를 나타낸 그림이다. 여기서 보면 Fuzzy Net Control의 가장 큰 특징은 ANFIS와는 달리 Fig. 5에서의 3층과 4층을 연결하는 링크가 고정되어있지 않는 것으로 결국 퍼지를 자체가 결정되어 있지 않은 장점이 있고 퍼지룰을 자기 학습의 과정에 의하여 결정된다. 결국 ANFIS에서의 퍼지파라미터만을 학습시키는 게 아니라 퍼지룰까지도 학습하여 최적의 Network을 구성하는 장점이 있다. 결국 Fuzzy Net Control는 가변구조의 형태를 가지면서 시스템에 적합한 제어기를 자기구성하는 특징을 가진 것이다.

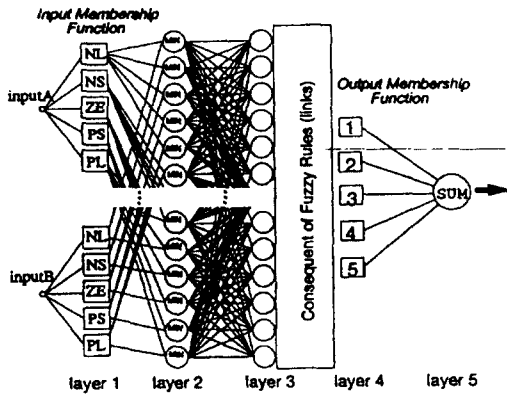


Fig. 4 Fuzzy Net control

앞에서 제시한 1/4차량의 현가장치를 제어하기 위해 퍼지콘트롤러의 입력변수으로는 z_s , $z_s - z_u$ 를 사용할려고 한다. 퍼지콘트롤러의 두 입력변수는 일반적인 반동 현가장치제어인 Sky-hook제어나 On-off제어에서의 입력신호로 쓰인다.

Fuzzy net controller의 출력의 ER 댐퍼에서의 valve에서 걸리는 전압이다.

4.2 Genetic Algorithm

Fig. 5는 유전자의 교배와 돌연변이를 생성시키는 기본적인 유전자 연산자를 표현한 것이다. Fuzzy Net Controller의 각 층간의 링크와 각 층의 파라미터, 여기서는 퍼지룰과 멤버쉽함수의 파라미터값들이 2진수형태의 유전자로 표현되어 있다.

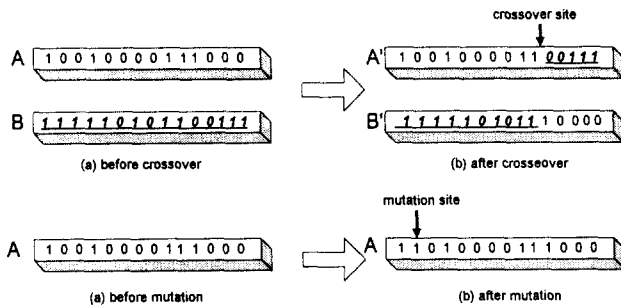


Fig. 5 Genetic Operator

ER댐퍼를 가진 현가장치의 성능을 최적화시키기 위해선 퍼지룰과 멤버쉽함수로 표현된 2진수 유전자를 최적화시켜야 하고 그러기 위해선 우리가 원하는 성능에 적합한 성능지수(P.I : Performance Index)를 선택해야 하고 본 논문에서 차체속도성분에 중점을 두었기 때문에 다음과 같은 성능지수를 선택하였다. 성능지수를 각 학습시기 때 마다 GA Optimizer에서 받아서 들여서 최적의 유전자를 찾는데에 이용하게 된다.

$$P.I. = \frac{1}{T} \int \sqrt{z_b^2} dt + \frac{1}{T} \int \sqrt{\dot{z}_b^2} dt \quad (8)$$

4.3 Simulation Algorithm

최적의 퍼지룰과 멤버쉽함수의 파라미터값을 학습하기 위해 Fig. 6과 같은 계산과정으로 학습시킨다. 아래에서 보면 Genetic Algorithm Optimizer에서 퍼지룰과 멤버쉽함수를 생성시키고 생성 퍼지 제어기가 필요 감쇠력을 만들고 모든 과정을 마친 다음 fitness value를 계산하여 GA Optimizer로 보내고 다시 그 과정을 반복시킨다.

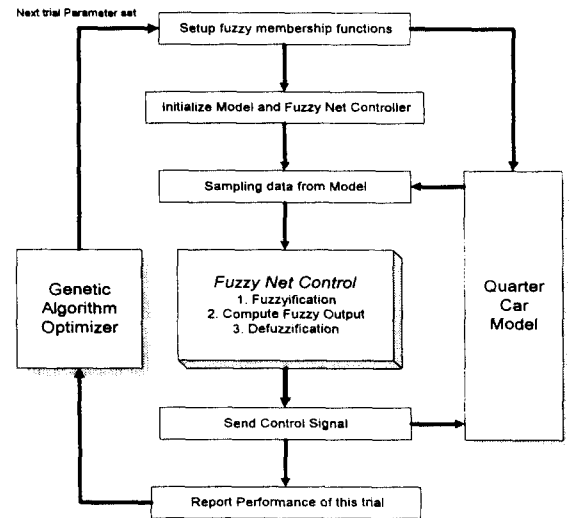


Fig. 6 Computation Process

5. 시뮬레이션

본 연구에서는 ER 댐퍼에 전기장이 걸리지 않는 경우(soft), 최대의 항복용력이 걸린 경우(hard), 그리고 최적화된 파라미터를 가진 퍼지제어를 수행시의 출력 결과를 비교분석하려고 한다.

5.1 ER 댐퍼에 최대 항복용력이 걸린 경우

본 ER 댐퍼에서 최대로 걸릴 수 있는 전압은 3kV이다. 이 전압이 연속적으로 걸린 경우일 때는 아래와 같은 감쇠력이 작용하게 된다.

$$F = 1145.6 \dot{x} + \text{sgn}(\dot{x}) (6.48 \times 10^{-5} \times 3000^2 + 1.17 \times 10^{-3} \times 3000) \quad (9)$$

전기장이 걸리지 않는 경우(soft)와 위와 같이 감쇠력이 기본적으로 걸린 경우(hard)의 시뮬레이션을 시행하고자 한다.

5.2 시뮬레이션 결과

현 시스템의 성능과 퍼지 제어기 자기 학습을 위해서 지면으로부터 들어오는 입력신호를 speed bumper의 형태로 입력한다. (Fig. 7) 일반적으로 현가장치의 성능을 평가하기 위해서 아래 그림과 같은 지면의 속도 입력을 인가하여 성능 및 설계를 하기 때문에 본 논문에서도 동일한 입력을 사용하도록 한다.

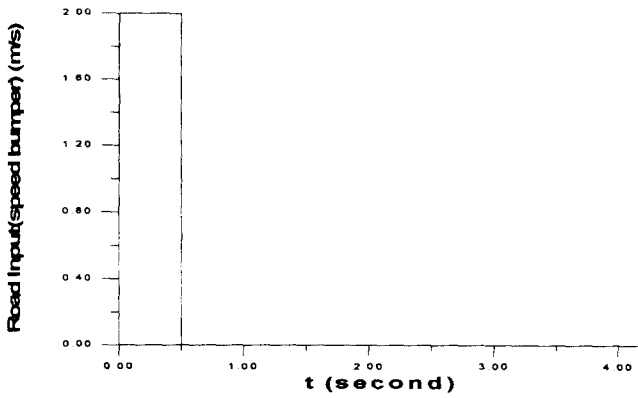


Fig. 7 Input signal (z_u)

여기서 사용한 GA에서의 교배율과 돌연변이율을 각각 0.3, 0.3으로 두고 멤버십 파라미터와 퍼지물을 최적화시켰다.

Fig.8은 GA에 의해 학습된 퍼지물을 나타낸 것이다. 결과적으로 보면 Sky-hook 제어의 기본적인 형태를 유지하면서 퍼지물이 구성되어짐을 알 수가 있다.

PB				3	3	3
PM				2	2	2
PS				1	1	1
\dot{z}_b ZO						
NS	1	1	1			
NM	2	2	2			
NB	3	3	3			
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
	$\dot{z}_b - z_u$					

Fig. 8 Fuzzy Rule Table (1:sm, 2:md, 3:lg)

다음 그림은 최종적으로 Fuzzy Net Controller가 최적화되었을 때의 자체의 속도, 로드의 속도, 가전되어지는 전압 출력의 순서대로 나타낸 것이다.

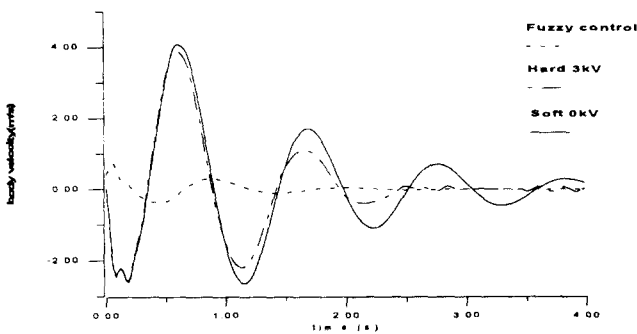


Fig. 9 Output (\dot{z}_b)

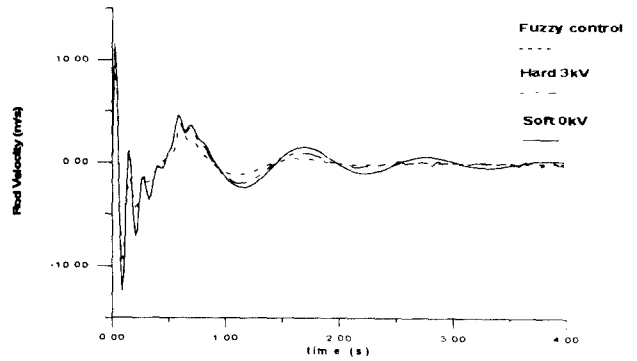


Fig. 10 Output ($z_b - z_u$)

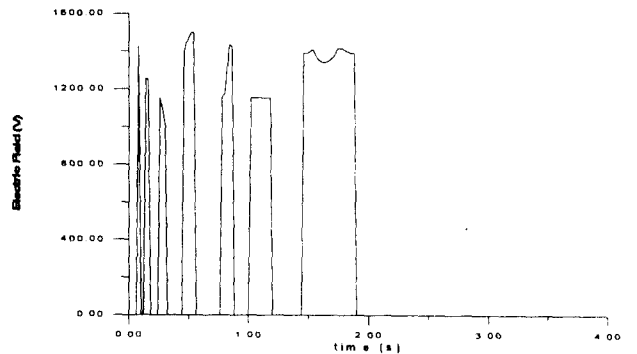


Fig. 11 Output of Electric Field

위의 결과에서 보면 본 제어기의 출력이 Soft, Hard할 때보다 훨씬 뛰어남을 알 수가 있다.

6. 결론

본 논문에서 보면 신기능성유체인 ER유체를 현가장치에 사용했을 때 좋은 성능을 발휘함을 알 수가 있었고 그런 시스템을 제어하기 위해 지능제어적인 방법인 GA와 Fuzzy Net Control을 사용하면 성능을 극대화시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] J.-S. Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems", IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics, vol.23, pp665-685
- [2] J. Kim, Y. Moon, and Bernard P.Zeigler, "Designing Fuzzy Net Controllers Using Genetic Algorithms". IEEE Control Systems, 1995
- [3] Kawamata, S., Goshima, N., Watanabe, I., Kimura, T., The Japen Society of Mechanical Engineers, Proceedings of Second International conference on MOVIC, 1994, p 790
- [4] H. YOSHIDA, M. NAGAI, M. ONDA, S. KAWAMATA, "Semi-active Vibration Control of Vehicle with the Damper Using Electro-Rheological fluid"