

디지털 댐퍼의 지능제어 특성

송준호*, 이육형#

Intelligence Control Characteristics of a Digital Damper

Joon-Ho Song*, Yuk-Hyung Lee#

ABSTRACT

The objective of this paper is to investigate the Intelligence control characteristics of a digital damper. This paper deals with a two-degree-of-freedom suspension using the damper with ER fluid for a quarter vehicle system. The control law for semi-active suspensions modeled in this study is developed using passive and ANFIS control method. Computer simulation results show that the semi-active suspension with ER damper has good performances of ride quality.

Key Words : ER Damper(ER 댐퍼), Cylinder(실린더), Damping Force(감쇠력), Sky-Hook Control(스카이훅 제어), Semi-Active Suspension(반능동현가장치), ANFIS(적응뉴로퍼지추론시스템)

1. 서 론

현대인들의 다양한 욕구에 충족되기 위한 최근의 자동차들은 더욱더 복잡해지고 정밀한 제어가 요구된다. 그 중에서 현가장치는 자동차가 주행시 노면불규칙성 외란에 대한 진동을 흡수하여 운전자로 하여금 승차감을 좋게 하고 안정성 확보차원에서 매우 중요하다. 현가장치는 제어입력에 따라 크게 댐퍼 내부의 오리피스가 고정되어 감쇠력을 내는 수동 현가장치와 비례제어 밸브 등을 통한 가변오리피스를 조절하여 감쇠력을 발생시키는 반능동 현가장치 및 외부동력으로 바로 감쇠력을 발생시켜주는 능동현가장치로 구분된다.

종래의 대부분의 연구에서의 댐퍼는 오일 또는 가

스를 매체로 하는 감쇠력 제어를 수행하였다. 이는 기계적 매카니즘 또는 전자제어시스템으로 이루어져 있기 때문에 성능향상을 위해서는 그 구조가 매우 복잡하고 작동시 마찰이나 마모 등으로 소음이 발생하는 원인이 된다. 이와같은 문제들을 해결할 수 있는 새로운 시스템을 실현하기 위해서는 종래의 성능을 뛰어넘는 새로운 기능재료를 이용한 액츄에이터의 개발이 필요하다. 일반적으로 지능유체로 알려져 있는 전기유변유체(이하 ER유체라 칭함)는 부하되는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 일반적으로 비전도성 유체 속에 강한 전도성 입자를 분산시킨 콜로이드 용액이다. ER유체는 외부에서 가해지는 전단력에 대해 전기장 부하시 ER 유체는 저항을 갖는다. 그러므로 외부 조건에 따라 ER유체에 부하되는 전기장의 크기만을 변화시키면 연속적인 제어가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 차량 적용 가능성을 제시하기위한 ER유체 댐퍼^[1-3]특성연구를 통하여 1/4차량에서의 지능제어 진

* 울산과학대학 디지털기계학부

교신저자 : 울산과학대학 디지털기계학부

E-mail : lyh426@chol.com

동 감쇠력 성능 향상에 관한 연구이다.

2. ER 댐퍼

2.1 모델링

액체의 유동 특성이 외부전기장으로 인해 유체의 걸보기 점탄성이 변화하는 현상을 ER(Electror-heological)효과라고 하며, 그와 같은 성질을 나타내는 유체를 ER유체라고 부른다^[4-5]. 일반적인 ER유체는 실리카 등의 미립자를 절연유에 분산시킨 유체가 유변이 변하게 되는 입자계 ER유체이다. 전기장 부하시 입자간의 전기 분극 현상으로써 입자 자체가 사슬구조를 가지게 되고, 무 부하시에는 유체입자가 양극 또는 음극으로 자유로이 운동하는 뉴토니안(Newtonian) 유체 상태로 변화는 물질이다. 따라서 본 연구에서는 ER유체를 댐퍼에 적용한 감쇠력 변환기구인 압력 유동모드를 이용하여 ER댐퍼를 구성 하였다. 제작사양은 양 로드 실린더 형태로서 피스톤은 $\varnothing 30$, 내측실린더 $\varnothing 30$, 외측실린더 $\varnothing 36$, 축 $\varnothing 22$, 오리피스구멍 $\varnothing 3 \times 4EA$ 로 구성 되었다. 분산형 ER유체로 분산매로는 전기절연유인 플루오르 오일과 실리콘 오일을 혼합한 용액을 사용하고, 플루오르 오일은 입자의 분산 안정성을 양호하게 하고 무전기장 시 용액의 점도를 낮게 하는 특성이 있다. 분산입자로는 슬폰화된 폴리머 입자를 이용하고 있으며 흡습성이 있다. 플루오르 오일은 증기압이 200°F 에서 2.2mmHg 로 매우 낮으므로 쉽게 기화하는 성질이 있다. ER댐퍼에 적용된 압력유동모드는 고정된 전극사이의 유로를 ER유체가 유동하는 경우에 인가되는 전압을 변화시키면 유동 저항이 가변되고 유로간의 압력강하를 변화시킬 수 있어 가공부가 없는 밸브형태를 구성 할 수 있다. 진동물체의 운동에 따라 전극 간에 유동이 발생하는 댐퍼 기구를 채택하면 인가되는 전압에 의해 진동물체에 작용하는 감쇠력이 가변된다. 입자계 ER유체에서는 압력강하 Δp 는 전기장을 인가하지 않았을 때의 뉴우튼 유변에 의한 압력강하 성분 Δp_0 와 ER효과에 의한 압력강하 성분 Δp_{ER} 의 2 성분으로 나눌 수 있다. 전극간의 ER유체의 평균속도를 U 라 하고 항복

전단응력을 τ_{ER} , 이동전극의 길이를 L , 유로의 높이를 h , 점성계수 μ 라 하면 전극간의 압력강하는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta p = \Delta p_0 + \Delta p_{ER} \quad (1)$$

$$\Delta p_0 = (12\mu L/h^2)U \quad (2)$$

$$\Delta p_{ER} = (3L/h)\tau_{ER} \quad (3)$$

이 압력유동모드에서 항복전단응력 τ_{ER} 은 전기장 세기의 제곱에 거의 비례하여 증가하지만 평균속도 U 에 대해 강한 의존성을 나타내고, U 의 증대에 따라 감소한다.

ER유체 가변댐퍼 내의 유동 해석 모델링에 앞서 ER유체는 비압축성 유체이고, 빙햄유체 특성을 가지며, 댐퍼 작동 중에 ER유체의 온도와 밀도는 일정하며, 댐퍼 내의 유동은 완전발달유동이고, 댐퍼의 작동 중에 로드와 오일 쉘 그리고 피스톤과 실린더 튜브 사이에는 누설이 없는 것으로 한다. 댐퍼의 피스톤이 작동함에 따라 유동실 내의 ER유체는 오리피스를 통하여 저장실 내로 유입되고, 저장실로 유입된 유체는 다시 오리피스를 통하여 피스톤 반대측의 유동실로 되돌아가게 된다. 댐퍼의 작동에 따라 피스톤의 양단에 작용하는 압력차가 댐퍼의 감쇠력(damping force)으로 나타나게 된다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F_d = (p_1 - p_2)(A_p - A_r) + F_{fric} \quad (4)$$

여기서, F_d 는 댐퍼의 감쇠력을 나타내고 F_{fric} 는 댐퍼 작동 시 로드와 피스톤, 피스톤과 실린더 튜브 벽면에서 발생하는 마찰력이다. 피스톤 양단의 압력차는 ER유체가 오리피스를 지나면서 발생하는 압력강하와 내부 실린더와 외부 실린더 사이의 저장실을 지나면서 발생하는 압력강하에 의해 결정된다. 압력강하 $p_{ij} = p_i - p_j$ 라 하면 위 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_d = (p_{13} + p_{34} + p_{42})(A_p - A_r) + F_{fric} \quad (5)$$

댐퍼의 감쇠력은 외부에서 인가되는 전기장의 세기에 따라 저장실을 통과하면서 발생하는 압력차 p_{34} 가 변하면서 가변된다. 댐퍼의 감쇠력은 유동실에서 저장실을 통과할 때 오리피스를 지나면서 발생하는 감쇠력과 저장실 내의 압력손실에 의해 발생됨을 알 수 있다. Fig. 1은 ER유체 댐퍼 해석 모델을 나타내고 있다.

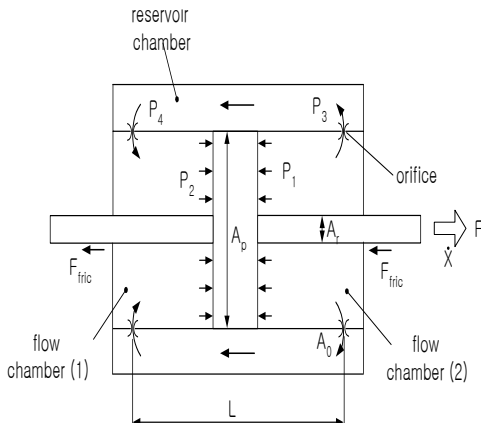


Fig. 1 ERF damper modeling

2.2 실험 및 시뮬레이션

Fig. 2는 실험장치를 나타내었다. 압력유동모드 형태의 ER댐퍼를 이용한 전기장 비인가 시 댐퍼의 감쇠력과 전기장 부하시 감쇠력을 각 속도별 변위감쇠력을 인장행정과 압축행정 변화에 대한 실험 데이터와 시뮬레이션 하였다. Fig. 3, 4, 5에서 실선이 시뮬레이션 값들이고, 특수 심벌이 실험값들이다. Fig. 3은 최대 가진속도 0.050m/s, Fig. 4는 0.10m/s, Fig. 5는 0.25m/s일 때의 감쇠력 결과 그래프이다. 실험 결과를 살펴보면 각 속도에서의 감쇠력은 댐퍼에 전기장을 인가하면 전기장 비인가 시에 비해 감쇠력이 증가하고 있음을 알 수 있다. 댐퍼의 가진 속도가 낮을 때는 전기장의 증가에 따른 감쇠력 증가 효과가 뚜렷이 나타나지만, 가진 속도가 높을 때는 전기장에 의한 감쇠력이 줄어드는데 이는 ER유체 가변 댐퍼에 가해지는 전기장의 세기에 비해 ER유체의 유동속도가 클 때에는 ER효과의 감소로 인하여 항복응력의 증가가 거의 생기지 않으므로 감쇠력의 변화를 또한 작아진다. 감쇠력과 변위 선도로 나타낸 가진 속도별 감쇠력 측정결과는 ER유체 가변댐퍼의 유동해석에

의한 수치 시뮬레이션 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 ER유체 가변댐퍼의 가진 속도가 증가하면서 가진 변위 끝부분에서의 감쇠력 측정값이 시뮬레이션 한 결과 값보다 작아지는 경향이 나타남을 알 수 있다.

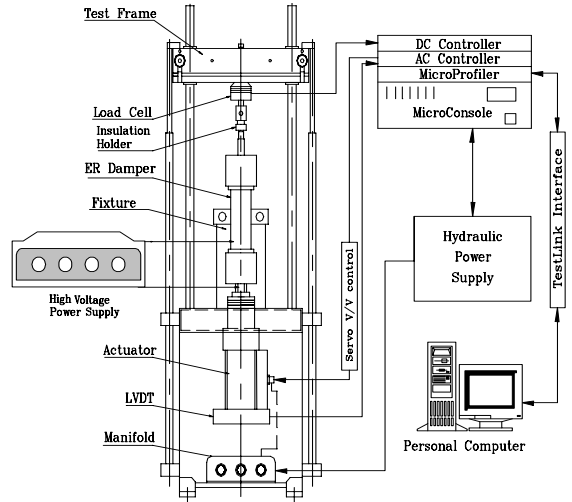


Fig. 2 ER damper test system

이는 ER유체를 비압축성 유체로 가정하였고, 점도가 크기 때문에 댐퍼의 가진 속도가 빨라지면 오일의 유동속도가 가진 속도를 추종하지 못한 현상으로 보여진다. 그러므로 댐퍼 설계시 구조적인 개선이 필요하다고 생각된다. 이와같이 전기장만의 조절을 통하여 원하는 감쇠력을 낼 수 있는 댐퍼 구조를 이용하여 다양한 플랜트에 적용이 가능하다.

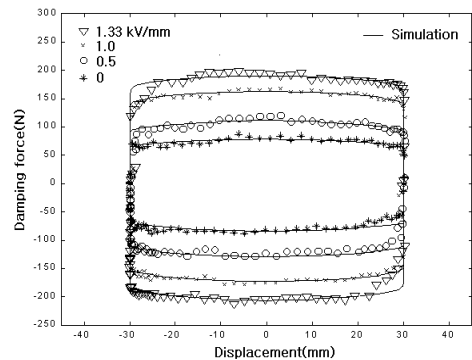


Fig. 3 Damper force characteristics of ERF damper

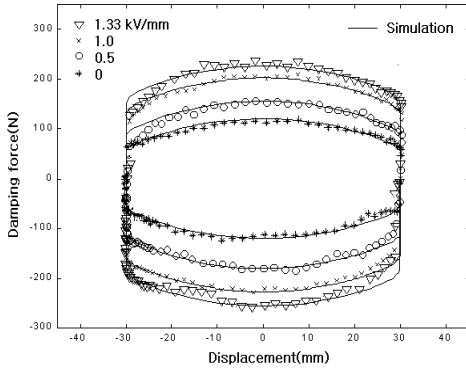


Fig. 4 Damper force characteristics of ERF damper

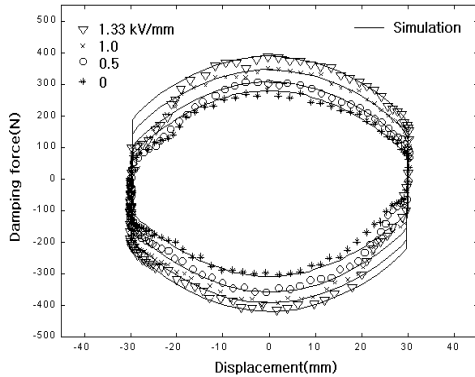


Fig. 5 Damper force characteristics of ERF damper

3. 서스펜션 모델 및 제어기 설계

Fig. 6은 1/4차량에 대한 모델이다. ER 댐퍼의 효과를 바탕으로 자동차 현가장치의 모델링을 위해 4분주 차량 2자유도 모델을 제시하였다. 반능동 현가 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_s \ddot{z}_s &= -k_s(z_s - z_u) - F_d \\ m_u \ddot{z}_u &= k_s(z_s - z_u) - k_t(z_u - z_r) + F_d \end{aligned} \quad (6)$$

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

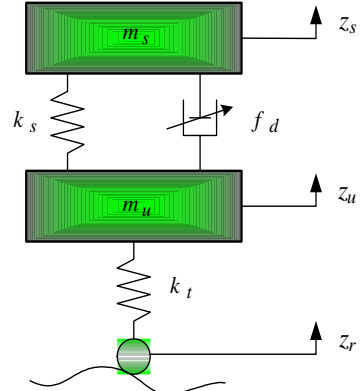


Fig. 6 1/4 Car model

시뮬레이션을 위한 파라미터들은 차축 질량은 210kg이고, 현가시스템 강성은 12,500N/m이며, 차체 질량은 35kg이며, 타이어 강성은 161,000N/m이다. 제어기 설계에서는 ANFIS 지능제어의 효과를 보기위해 실제 자동차 현가장치에서 가장 많이 쓰이고 있는 스카이훅 감쇠 제어기와 수동과의 비교를 통하여 수행하였다.

3.1 스카이훅 감쇠 제어기

자동차 능동/반능동 현가장치에서 많이 쓰이는 스카이 훅 모델은 Karnopp^[6]에 의해서 제안되었으며, 최적 제어 이론에 근거하여 노면 외란에 의한 차체의 가속도를 줄이기 위하여 가상적인 기준면에 감쇠기를 설치하는 방법이다. 수학적인 모델링은 다음과 같다.

$$F_{sky} = C_{sky} \cdot \dot{z}_s + C_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \quad (7)$$

스카이훅 이론에 의한 감쇠력을 구해 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_d &= C_{\min}(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + \text{sgn}(\dot{z}_s - \dot{z}_u) C_{ER} \times V_d \\ f_d &= f_{sky} = C_{sky} \times \dot{z}_s + (\dot{z}_s - \dot{z}_u) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, C_{\min} 은 전기장을 가하지 않은 상태시 계수, C_{ER} 은 ER 댐퍼 실험에서 구한 계수이다.

3.2 ANFIS 지능제어

본 연구에서는 앞서 ER댐퍼의 실험 결과를 바탕으로 ANFIS^[7-10] 지능제어를 이용하여 반동현가장치 제어를 통하여 승차감 향상에 관한 특성을 고찰하고자 한다. 실제적으로 퍼지 제어기를 설계할 때는 전문가적인 관점에서 룰들을 결정해야 시스템의 출력이 사용자가 요구하는 대로 나오는 특징이 있었다. 이와 같이 퍼지제어기가 가지는 이러한 문제점들을 ANFIS시스템을 이용하여 퍼지 제어기의 룰들을 학습하면서 최적화 한다. 그리고 최적화된 룰을 가진 퍼지컨트롤러를 이용하여 ER댐퍼가 설치되어진 서스펜션 모델을 제어하려고 한다. 앞에서 제시한 1/4차량의 현가장치를 제어하기 위해 퍼지컨트롤러의 두 입력변수로는 \dot{z}_s , $\dot{z}_s - \dot{z}_u$ 를 사용한다. 퍼지컨트롤러의 두 입력변수는 일반적인 반동현가장치제어인 스카이훅 모델제어이다. 결국 입력은 차체 속도 및 상대속도가 된다. \dot{z}_s , $\dot{z}_s - \dot{z}_u$ 의 멤버쉽 함수는 5가지의 언어로 표현되고, 출력은 ER댐퍼에 걸리는 밸브 전압이 된다. Fig. 7은 제어계의 블록선도를 표시한 것이다. Fig. 8은 ANFIS 지능제어의 구조를 나타낸 그림이다. 그리고 앞에서 제시한 1/4차량의 현가장치를 제어하기 위해 퍼지컨트롤러의 두 입력변수로는 \dot{z}_s , $\dot{z}_s - \dot{z}_u$ 를 사용한다. Fig. 9는 ANFIS 트레이닝 수행과정에서 에러 값이 점점 줄어들고 있는 것 또한 볼 수 있다.

3.3 시뮬레이션

자동차 현가장치의 성능을 향상시키기 위해서 가장 이상적이며, 실제 차량에 적용하고 있는 제어기는 스카이훅 제어기를 많이 사용하고 있다. 따라서 스카이훅 제어기를 통한 들어오는 입력 데이터를 ANFIS를 이용해 수동과 ANFIS지능제어와 성능을 비교 한다. Fig. 10는 범퍼의 노면 외란을 나타내었다. 노면 외란은 높이 10cm의 돌기를 타고 넘는 외란이다. Fig. 11은 입력 전압 값을 나타낸 것이다. Fig. 12는 범퍼 입력에 대한 ANFIS지능제어와 수동 및 스카이훅 제어기의 결과이다. 수행결과 기존의 수동과 스카이훅 제어특성보다 감쇠력이 뛰어난을 알 수 있었다.

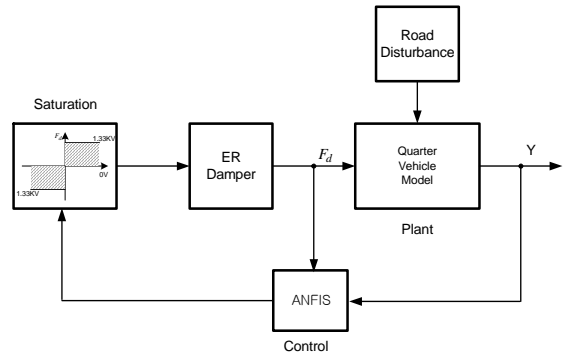


Fig. 7 Block diagram

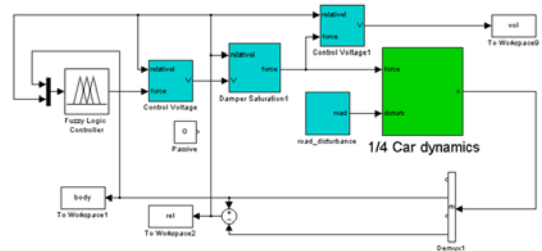


Fig. 8 ANFIS의 구조

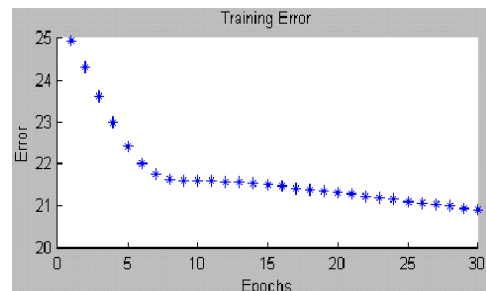


Fig. 9 ANFIS error value

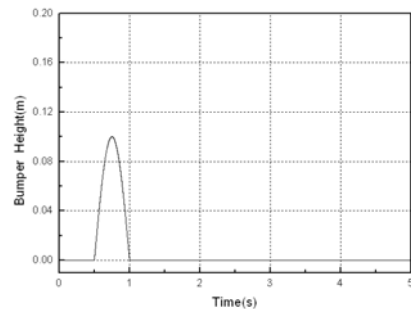


Fig. 10 Road surface input

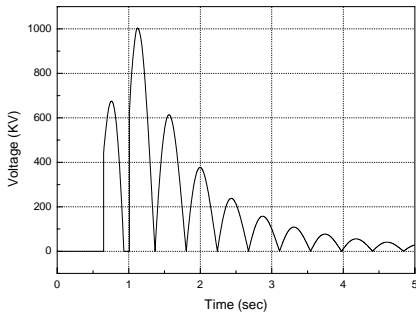


Fig. 11 Input voltage on ER damper

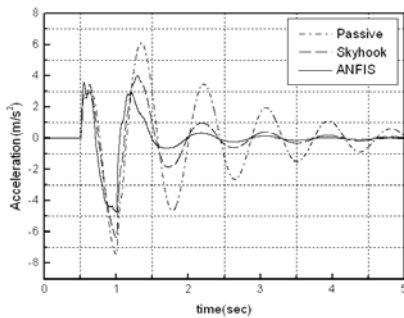


Fig. 12 Acceleration for bump input

4. 결 론

본 연구에서 제안된 ER댐퍼의 특성을 우선 알아보기 위해 가진속도와 전기장의 세기에 따른 감쇠력 차이를 비교 분석하여 제어성을 확인 하였다. 제어특성 확인은 모델링 해석을 통하여 실험과 시뮬레이션을 수행하였고, 이를 바탕으로 반능동 현가장치에 ANFIS 지능제어를 적용하였다. ANFIS 지능제어 성능을 비교하기 위해서 지금 까지 자동차에 가장 이상적 제어기인 스카이훅과 수동 방법과 비교하였다. 시뮬레이션 결과 ANFIS 지능제어기는 수동과 비교해서 오버슈터 값과 정착시간이 많이 줄어들음을 알 수 있다. 특히 스카이 훅 제어기와 비교해서도 초기 정착 값을 제외하고 매우 감쇠효과가 좋음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 ER 댐퍼를 이용하여 ANFIS 지능제어가 차량의 진동 감쇠효과가 있음이 판명되었다.

참고문헌

1. Nakano M. and Yonekawa, T., "Active Damper Using Electrorheological Suspension and Its Application to Vibration Isolation Control," JSME, Vol. 62, No. 593, pp. 33-40, 1996.
2. Petek, N. K., "An Electronically Controlled Shock Absorber Using Electroheological Fluid," SAE 920275, 1992.
3. Wu, X. M. and Wong, J. Y. and Sturk, M., Russell, D. L., "Simulation and Experimental Study of a Semi-Active Suspension with An Electrorheological Damper," Proc. 4th Int. Conf. on ER Fluids, World Scientific, pp. 568-586, 1994.
4. Yoshida, H. and Nagai, M. and Onda, M., "Semiactive Vibration Control of Vehicle with the damper Using Electro-Rheological Fluid," Int. JSME, 1991.
5. Winslow, W. M., "Induced Vibration Suspensions," Journal of Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137-1140, 1949.
6. Karnopp, D. C. and Crosby, M. J., Harwood, R. A., "Vibration control using semi-Active force generators," ASME Journal of engineering for Industry, Vol. 96, no. 2, pp.619-626, 1974.
7. Roger Jang, J. S., Ned Gulley, Fuzzy Logic TOOLBOX For Use with MATLAB, The Mathworks, Inc., pp. 2.24-52, 2.97-98., January 1995.
8. Earl Cox., "Fuzzy fundamentals," IEEE Spectrum, pp. 58-61, October 1992.
9. Timothy J. Ross, Fuzzy Logic with Engineering Applications, McGraw-Hill, pp. 483-490, 1995.
10. Stephen Welstead, Neural Network and Fuzzy Logic Applications in c/c++, John Wylie & Sons, pp. 396-399, 1994.