

회전형 MR 댐퍼를 이용한 반능동 현가장치의 퍼지 스카이-훅 제어

Fuzzy Sky-hook Control of Semi-active Suspension System Using Rotary MR Damper

조정목 · 조종선

Jeongmok Cho and Joongseon Joh

창원대학교 제어계측공학과

요 약

최근 고층건물의 방진시스템 및 자동차의 현가장치 분야에 MR 유체를 이용한 반능동 진동제어에 관한 연구가 활발히 진행되면서 MR 유체의 밸브모드 특성을 이용한 선형 MR 댐퍼가 널리 사용되고 있다. 그러나 전단모드를 이용한 회전형 MR 댐퍼에 관한 연구는 초기단계에 머물고 있다.

본 연구에서는, 주행로봇의 무한회전형 액추에이터용 회전형 댐퍼의 진동제어에 관한 연구를 수행하였으며, 퍼지 로직을 기반으로한 회전형 MR 댐퍼용 진동제어 알고리즘을 제안하였다. 퍼지제어기의 입출력 이득과 멤버십 함수의 모양은 유전자 알고리즘을 이용하여 조정하였다. 시뮬레이션 결과는 MR 댐퍼에 충격력이 가해질 때 퍼지 스카이-훅 제어의 제어 성능을 보여준다.

키워드 : 반능동, 퍼지 스카이-훅, MR(Magnetorheological), 댐퍼, 역모델

Abstract

Recently, a number of researches about linear magnetorheological(MR) damper using valve-mode characteristics of MR fluid have sufficiently undertaken, but researches about rotary MR damper using shear-mode characteristics of MR fluid are not enough.

In this paper, we performed vibration control of shear-mode MR damper for unlimited rotating actuator of mobile robot. Also fuzzy logic based vibration control for shear-mode MR damper is suggested. The parameters, like scaling factor of input/output and center of the triangular membership functions associated with the different linguistic variables, are tuned by genetic algorithm. Simulation results demonstrate the effectiveness of the fuzzy-skyhook controller for vibration control of shear-mode MR damper under impact force.

Key Words : Semi-active, Fuzzy Sky-hook, MR(Magnetorheological), Damper, Inverse Model

1. 서 론

외부로부터 시스템에 가해지는 진동에 의한 영향을 최소화하기 위한 진동제어기법은 수동형, 능동형, 그리고 반능동형 진동제어 기법으로 분류된다.

수동형 진동제어 기법의 경우 구조가 가장 단순하며 가장 저렴하다. 그리고 수동 장치들(passive devices)은 에너지를 흡수 또는 변환할 뿐 에너지를 시스템 또는 구조물에 가하지 않기 때문에 안정되고 가장 신뢰성이 높은 장점을 가지고 제어기의 오동작에 따른 문제가 발생하지 않는 장점을 가진다. 그러나 수동형 진동제어 기법의 경우, 제어의 개념이 없으

로 특정 시스템 설계 조건에 대해서만 우수한 성능을 보여주며, 설계 조건과 동일하지 않을 경우에는 성능이 크게 저하되는 단점을 가지고 있다.

수동형 진동제어 기법의 성능을 향상시키기 위해 제안된 것이 능동형 액추에이터를 채용한 능동형 진동제어 기법이다. 능동형 진동제어 기법의 경우 진동 형태에 따라 적극적인 제어가 가능하므로 진동 제어성능을 크게 향상시킬 수 있지만 능동형 진동 시스템을 구현하기 위해서는 능동형 액추에이터를 구동하기 위한 추가적인 파워시스템이 필요하게 되며, 이로 인해 시스템이 복잡해지고 사이즈 및 무게도 크게 증가하는 문제를 가지게 된다. 또한 센서 및 제어기의 오동작시 시스템의 성능을 보장 할 수 없는 문제가 발생하는 단점을 가지고 있다.

반능동 진동제어 기법의 경우, 수동형 진동제어기법의 안정성을 유지하며 보다 성능을 개선하고 능동형 현가시스템의 단점을 해결하기 위해 추가적인 파워시스템이 필요 없는 지능형 유체(smart fluid)를 사용한 감쇠력 가변 댐퍼를 이용하여 진동에 따라 적극적인 제어가 가능하도록 구현한 진동제어 기법이다.

교신저자 : 조 종 선

접수일자 : 2007년 4월 24일

완료일자 : 2007년 8월 5일

감사의 글 : 본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업 및 2005년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음

스카이훅 제어 알고리즘은 KARNOPP [1]에 의해 1974년 처음으로 소개된 이후 능동 및 반능동 제어 기법으로 가장 널리 사용되는 제어 알고리즘이다. 스카이훅 제어 알고리즘의 경우 상질량(sprung mass)의 진동을 최소화하기 위해 하질량(unsprung mass)의 진동은 무시하고 상질량의 진동만 제어하기 위해 가상의 공간과 상질량 사이에 가상의 댐퍼가 위치하는 것으로 가정한 제어 알고리즘이다. LIU [2]와 AHMADIAN [3]은 현가시스템의 성능을 향상시키기 위해 스카이훅 제어기법에 기반한 퍼지 스카이-훅 제어기법을 제안하였다.

ER(electrorheological) 유체와 MR(magnetorheological) 유체 같은 지능형 재료(smart materials)들이 발견되면서 반능동 진동제어에 관한 주목할 만한 연구결과들이 발표되었다. ER 유체의 경우 고전압 전원장치가 필요하고 MR 유체에 비해 상대적으로 낮은 항복응력 그리고 좁은 온도 동작영역 등으로 인해 상업적으로 큰 성공을 거두지 못하였다. ER 유체의 이러한 단점으로 인해 많은 연구자들의 ER 유체 대신 MR 유체에 대한 관심이 크게 증가하였다.

MR 유체는 마이크론 크기의 자화되기 쉬운 입자들을 미세 알 또는 실리콘 오일과 같은 유체 속에 분산시켜놓은 형태의 구조이다. 외부에서 자기장이 인가되면 입자들은 체인형태로 정렬함으로써 유체는 Semi-Solid 상태가 되며 ER 유체에 전기장이 인가되었을 경우와 유사한 Viscoplastic 거동을 나타낸다. 이때 유체에서 Semi-Solid 상태로의 변화는 수 ms 내에 이루어진다. MR 유체의 경우 ER 유체보다 항복응력의 크기가 크며, 동작 온도 범위도 $-40^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 로 ER 유체보다 넓은 동작 온도 범위를 갖고 있다. 또한 MR 유체는 가공 및 사용하는 도중에 발생하는 불순물에 대해 덜 민감하고, 입자와 유체가 분리되는 현상도 훨씬 적게 발생한다.

본 연구에서는 회전형 MR 댐퍼를 내장한 무한회전형 액추에이터를 이용하여 주행로봇의 반능동 진동제어를 구현하기 위한 연구를 수행하였다. 무한회전 액추에이터와 일반적인 선형 댐퍼를 이용하여 시스템을 구현할 경우, 시스템의 구조가 복잡해질 뿐만 아니라 시스템의 크기 및 무게가 증가하는 문제점이 발생한다. 이를 해결하기 위해 회전형 MR 댐퍼를 이용한 현가장치가 제안되었다.

회전형 MR 댐퍼를 이용한 반능동 현가장치 시스템을 시뮬레이션 하기 위해서는 회전형 MR 댐퍼에 대한 비선형 댐퍼 모델과 역댐퍼 모델이 필요하다. 일반적으로 MR 댐퍼의 동적특성은 아주 비선형적이며 Bouc-Wen 히스테리시스 모델로 표현 된다 [4]. 댐핑력, 변위, 속도, 그리고 입력전압 값의 관계는 수치해석 기법에 의해 구해진다.

동적 시스템에 사용되는 MR 댐퍼의 경우, 요구되는 댐핑력을 생성하기 위해 필요한 전압 값을 미리 예측하기 위해 역댐퍼 모델이 사용된다. CHOI [5]는 자기장의 영향을 1차 선형 식으로 표현된 MR 댐퍼 모델을 제안하였다. 이렇게 함으로써 MR 댐퍼의 역댐퍼 모델을 간단한 계산에 의해 쉽게 구할 수 있게 된다. XIA [6]와 CHO [7]는 Multi-layer Perceptron을 이용하여 역댐퍼 모델을 구하였다. WANG [8]은 Feed-Forward와 Recurrent Neural Network를 이용하여 Modified Bouc-Wen 모델에 대한 역댐퍼 모델을 제안하였다. TSE [9]는 회전형 MR 댐퍼의 히스테리시스 거동을 표현하기 위해 Bouc-Wen 모델을 사용하였으며, 댐핑력이 전압입력에 비례하는 역댐퍼 모델을 제안하였다.

본 연구에서는 회전형 MR 댐퍼를 채용한 현가시스템용 반능동 퍼지-스카이훅 제어 알고리즘을 제안하였으며, 주행로봇의 1/4 차량모델에 대한 진동제어 시뮬레이션을 수행하

였다. 회전형 MR 댐퍼는 Bouc-Wen 히스테리시스 모델을 사용하였으며, TSE의 역댐퍼 모델링 기법을 이용하였다.

2. 회전형 MR 댐퍼의 모델링

2.1 회전형 MR Damper 모델

빙햄 모델은 MR 유체의 거동을 표현하는 가장 일반적인 방법으로, 이상적인 빙햄 모델은 최소 항복응력 τ_y 를 초과할 때까지는 고체(solid)와 같은 거동을 나타내지만 이를 초과할 경우 응력과 전단변형률 사이에 선형적인 관계를 나타낸다. 빙햄 모델의 MR 유체의 전단응력은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\tau = \tau_y \cdot \text{sgn}(\dot{\gamma}) + \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서 $\dot{\gamma}$ 는 Shear Strain Rate, μ 는 Shear Strain Rate의 함수로서 유체의 Plastic Viscosity를 나타낸다.

빙햄 모델로부터 얻어진 식이 설계목적으로 아주 유용하게 사용되지만, 제어 시뮬레이션 등에 사용되기에는 모델링 오차가 크기 때문에 MR 유체의 거동을 보다 정확하게 표현하는 모델링이 필요하다. DYKE [10, 11]는 전단모드 댐퍼를 표현하기 위해 Bouc-Wen 히스테리시스 모델을 사용하였다. Bouc-Wen 히스테리시스 모델은 다음의 5개식으로 표현된다.

$$f = c_0 \dot{x} + k_0 x + \alpha z \quad (2)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| |z|^{n-1} - \beta x |z|^n + A \dot{x} \quad (3)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u + \alpha_c u^2 \quad (4)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} u \quad (5)$$

$$u = -\eta (u - v) \quad (6)$$

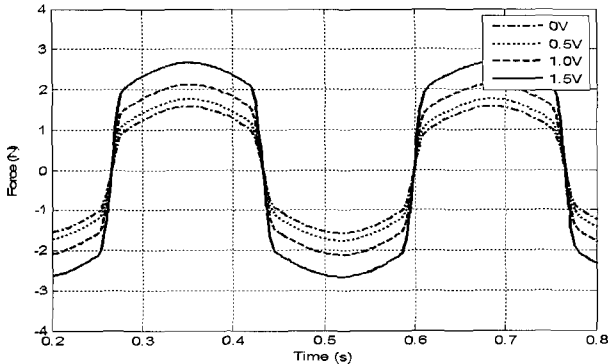
여기서 c_0 와 k_0 는 각각 빠른 속도에서 Viscous Damping과 Stiffness를 나타내며, α 는 Evolutionary Variable z 와 관련된 파라미터이며, γ 와 β 그리고 A 는 히스테리시스 파라미터이다. 그리고 η 는 댐퍼의 시상수이며 v 와 u 는 각각 입력전압과 출력을 나타낸다. 이러한 11개의 모델 파라미터들은 회전형 댐퍼를 특성을 분석하기 위해 반드시 필요하다. 이러한 파라미터들은 실험 데이터를 이용하여 비선형 식의 최적화 문제를 풀어 구할 수 있다. TSE에 의해 얻어진 파라미터는 표 1과 같다 [9].

표 1. 회전형 MR 댐퍼의 파라미터
Table 1. Parameters for Rotary MR Damper

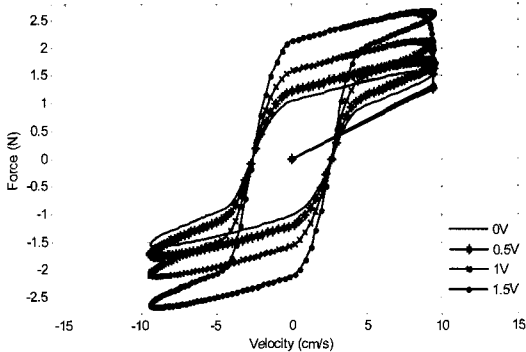
Parameters	Value
k_0	0.5 N/cm
γ	60 cm^{-2}
β	60 cm^{-2}
A	20
n	2
α_a	1.915 N/cm
α_b	0.43 N/cm V
α_c	0.9 N/cm V ²
c_{0a}	0.08 N s/cm

$$\begin{matrix} c_0 & 0 \\ \eta & 150 \text{ s}^{-1} \end{matrix}$$

그림 1은 진폭이 0.5 cm인 3Hz 사인과 변위로 댐퍼를 가진 시켰을 때 4개의 전압레벨 값(0, 0.5, 1, 그리고 1.5V)에 대한 댐핑력 시뮬레이션 결과를 보여준다.



(a) 댐핑력과 시간의 관계
(a) Damping Force vs. Time



(b) 댐핑력과 속도의 관계
(b) Damping Force vs. Velocity

그림 1. 댐핑력 시뮬레이션 결과
Fig. 1. Simulation Results of MR Damper

그림 1로부터 회전형 MR 댐퍼는 비선형 특성을 가짐을 확인할 수 있으며, 그림 1(b)의 댐핑력과 속도의 관계 그래프를 보면 Bouc-Wen 모델의 경우 각각의 입력 전압 값에 대해 히스테리시스특성이 나타남을 확인할 수 있다.

2.2 회전형 MR Damper의 역모델

회전형 MR 댐퍼는 식 (2)~식 (6)과 같이 비선형 특성을 보여준다. 이러한 비선형적 특성으로 인해 요구되는 댐핑력을 현가시스템에 인가해주기 위한 댐퍼의 입력 전압 또는 전류를 계산하는 것이 상당히 어려운 문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위해, DYKE는 가속도 피드백에 기반한 Clipped Optimal 제어 알고리즘을 제안하였다. Clipped Optimal 제어 알고리즘은 실제 댐핑력과 목표하는 댐핑력을 비교함으로써 인가전압을 결정하는 제어 알고리즘이다. 만약 현재 댐핑력이 목표 댐핑력 보다 작은 경우에는 인가전압을 최대 값으로 설정하고 그 외의 경우에는 인가전압을 최소 값으로 설정

한다.

본 연구에서는 TSE의 Bouc-Wen 모델에 기반한 근사모델을 사용하였다. MR 댐퍼가 동작하고 있는 동안에는 MR 유체가 Post-yield 영역에 존재한다고 가정하였다. 이 경우 Evolutionary Variable z 는 식 (7)의 Ultimate Hysteresis Strength z_u 와 같게 된다.

$$z \cong z_u = gm(\dot{x}) \left(\frac{A}{\gamma + \beta} \right)^{1/n} \quad (7)$$

식 (2)와 같이 표현된 댐핑력 f 는 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$f \cong (c_0 + c_0) \dot{x} + k_0 x + (\alpha_a + \alpha_b u + \alpha_c u^2) z_u \quad (8)$$

식 (8)을 u 의 2차함수로 표현하면 다음과 같다.

$$(\alpha_c z_u) u^2 + (\alpha_b z_u + c_0 \dot{x}) u + (\alpha_a z_u + c_0 \dot{x} + k_0 x - f) = 0 \quad (9)$$

여기서, 식 (9)에서 어느 순간의 힘, 속도, 변위가 주어지면 u 는 계산을 통해 얻어짐을 알 수 있다. 이렇게 구해진 u 로부터 다음 식 (10)을 이용하여 요구되는 입력전압 값을 얻을 수 있다.

$$v = u + \dot{u}/\eta \quad (10)$$

본 연구에서는 MR 댐퍼의 역댐퍼 모델의 성능을 검증하기 위해 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 댐퍼는 진폭이 0.5cm인 3Hz의 정현파 변위신호에 의해 가진 된다고 가정하였다. 여기서 목표 댐핑력은 댐퍼 속도의 4.5 Ns/m로 가정하였다.

그림 2는 시뮬레이션 결과를 보여준다. 실선은 요구되는 기준 댐핑력을 나타내며, 점선은 역댐퍼 모델을 통해 얻어진 댐퍼의 입력전압에 대해 출력되는 댐퍼모델을 출력을 나타낸다. 시뮬레이션 결과를 통해 근사 역댐퍼 모델을 이용하여 얻어진 요구되는 댐핑력을 시스템에 인가하기 위한 MR 댐퍼의 입력 전압이 만족스러운 성능을 보여줌을 확인할 수 있다.

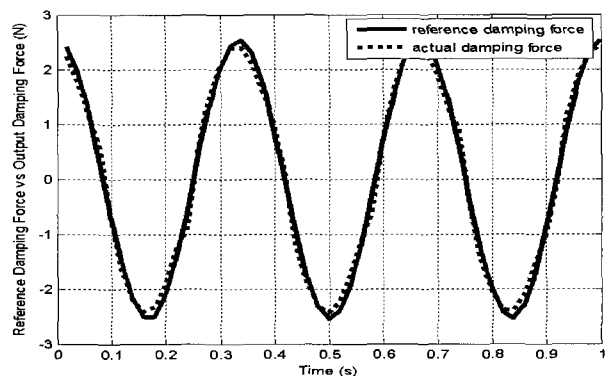


그림 2. 기준 댐핑력과 실제 댐핑력

Fig. 2. Reference damping force vs. Actual damping force

3. 댐퍼 입력에 대한 퍼지 스카이-훅 제어

3.1 퍼지 스카이-훅 제어

퍼지 스카이-훅 제어 알고리즘에서는 가상의 공간과 상절

량 사이에 댐퍼 양단의 속도와 댐핑력의 관계가 비선형적인 특성을 가지는 가변댐핑을 연결하였다. 퍼지 스카이-훅 제어 알고리즘의 댐핑력은 식 (11)에 의해 결정된다.

$$f_d = \begin{cases} 0 & \text{if } V_s \cdot (V_s - V_u) \leq 0 \\ FLC(V_s, a_s) & \text{if } V_s \cdot (V_s - V_u) > 0 \end{cases} \quad (11)$$

LIU [2]와 AHMADIAN [3]에 의해 제안된 퍼지 스카이-훅 제어기의 경우, 퍼지 제어기의 입력으로 상질량의 속도만을 사용 그리고 7개 또는 9개의 퍼지 제어 규칙만을 사용한 아주 단순한 형태의 퍼지 제어기로 구현을 하였다. 본 연구에서는 상질량의 진동성능에 큰 영향을 미치는 상질량의 가속도를 퍼지 제어기의 입력으로 추가함으로써 2개의 퍼지 제어 입력을 사용하였으며 49개의 퍼지 제어 규칙을 사용하였다. 49개의 퍼지 제어 규칙은 표 2와 같다. 퍼지 제어기의 입력으로 사용된 상질량의 속도와 상질량의 가속도 그리고 퍼지 제어기의 출력으로 사용된 댐핑력은 각각 PB(positive big), PM(positive medium), PS(positive small), ZR(zero), PS(positive small), PM(positive medium), 그리고 PB(positive big)으로 7개의 언어적 변수로 정의되었으며, 각각의 언어적 변수에 대한 멤버십 함수(membership function)로는 일반적으로 널리 사용되는 삼각형 멤버십 함수를 사용하였다.

표 2. 퍼지제어규칙
Table 2. Fuzzy logci control rules

		a_s						
		NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PM
V_s	NB	PB	PB	PM	ZR	ZR	ZR	NS
	NM	PB	PB	PM	ZR	ZR	NS	NM
	NS	PB	PM	PS	ZR	ZR	NS	NM
	ZR	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
	PS	PM	PS	ZR	ZR	NS	NM	NB
	PM	PM	PS	ZR	ZR	NM	NB	NB
	PB	PS	ZR	ZR	ZR	NM	NB	NB

3.2 퍼지 스카이-훅 제어기의 조정

본 여구에서 퍼지 스카이-훅 제어기의 입출력 이득과 삼각형 멤버십 함수의 중앙값을 유전자 알고리즘을 이용하여 튜닝 하였다. 유전자 알고리즘을 이용한 튜닝은 다음과 같다. 첫 번째 단계(GA1)에서는 상질량의 속도와 가속도 입력의 이득 그리고 댐핑력을 얻기 위한 출력 이득을 결정하게 되며, 두 번째 단계(GA2)와 세 번째 단계(GA3)에서는 각각 퍼지 제어기의 전건부와 후건부의 멤버십 함수를 튜닝을 통해 결정하게 된다.

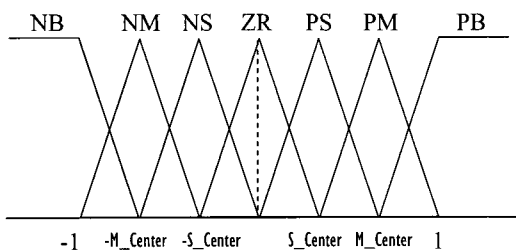


그림 3. 초기 멤버십 함수
Fig. 3. Initial membership function

그림 3은 GA2와 GA3에서 튜닝 하고자 하는 멤버십 함수의 초기형태를 보여준다.

멤버십 함수를 조정할 때, 시스템이 진동 방향에 따라 대칭적인 특성을 가지므로 삼각형 멤버십 함수가 '0'을 기준으로 대칭적이 되도록 하였으며, 삼각형 멤버십 함수의 중심 값 2개를 조정하여 원하는 멤버십 함수를 결정하였다.

적합도 함수(fitness function)는 각각의 Chromosome을 평가하는 가장 중요한 기준이며 시스템의 성능을 결정하게 된다. 현가시스템에서 상질량의 가속도는 승객이 느끼는 승차감을 결정하는 중요인자로서, 가속도의 크기가 클 경우 승차감은 나쁘다고 판단된다. 현가시스템의 성능은 승차감과 주행안정성으로 판단할 수 있으며, 승차감과 주행안정성의 관계는 승차감을 최적으로 하면 주행안정성은 떨어지고 주행안정성을 최적으로 하면 승차감은 나빠지는 관계가 있다. 본 연구에서 차량의 주행안정성은 고려하지 않고 차량의 승차감만을 고려한 적합도 함수를 식 (12)와 같이 사용하였다.

$$J = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \alpha_s^2 dt} \quad (12)$$

여기서 T는 시뮬레이션 시간이며, α_s 는 상질량의 수직방향 가속도를 의미한다.

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

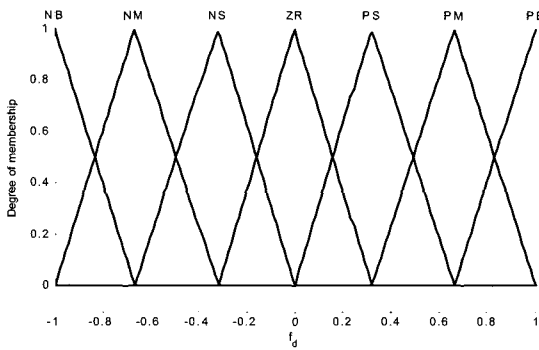
거친 노면을 주행하는 주행로봇의 경우, 주행 조건을 아주 큰 범퍼입력이 많은 상황으로 고려할 수 있다. 이 범퍼입력은 현가시스템의 상질량에 가해지는 충격력(impact force)로 모델링할 수 있으며, 본 연구에서는 1.7kg의 질량이 30cm의 높이에서 자유낙하 하여 상질량에 가해지는 충격량으로 표현하였다. 주행로봇에 대한 운동방정식은 식 (13)과 같으며 상질량(m_s)는 6.8 Kg, 하질량(m_u)는 3.9 Kg, 스프링상수(k_s)는 490 N/m, 그리고 타이어상수(k_t)는 510 N/m 이다.

$$\begin{aligned} m_s a_s + k_s(z_s - z_u) + f_{ext} &= -f_d \\ m_u a_u + k_s(z_u - z_s) + k_t z_u &= f_d \end{aligned} \quad (13)$$

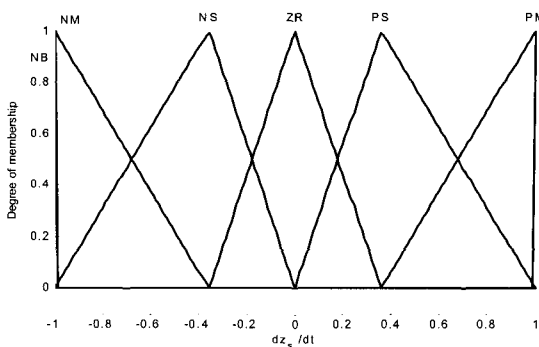
여기서 z_s 와 z_u 는 각각 상질량과 하질량의 변위를 의미하며, f_d 는 현가시스템에서 반능동 현가장치의 댐핑력을 의미한다. 그리고 f_{ext} 는 외부에서 가해지는 충격력을 나타낸다.

GA1에서 Chromosome의 길이는 44 bit로 설정하였으며, GA2에서는 각각 28 bit의 Chromosome을 사용하였다. 각각의 유전자 알고리즘에서 Population의 크기는 30으로 설정하였으며, 세대수는 50으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다.

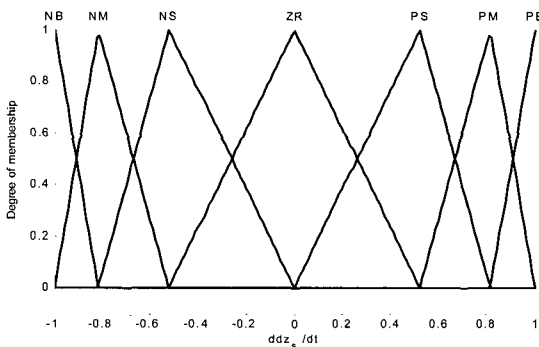
Mutation Rate와 Crossover Rate는 각각 0.5%와 25%로 설정하였다. 그리고 우수한 Chromosome의 선택을 위한 선택방법으로 Sorting Method를 사용하였다. GA1을 이용한 입출력 이득의 튜닝결과로부터 얻어진 값은 5.8280, 0.3446, 그리고 48.7800이다. 그리고 GA2와 GA3를 이용하여 얻어진 멤버십 함수는 그림 4와 같다.



(a) 상질량 속도의 멤버십 함수
(a) membership function of sprung mass velocity



(b) 상질량 가속도의 멤버십 함수
(b) membership function of sprung mass acceleration



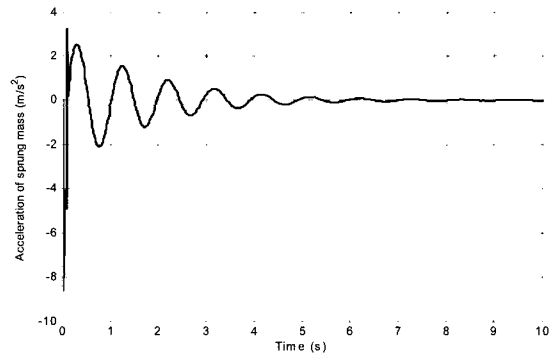
(c) 댐핑력의 멤버십 함수
(c) membership function of damping force
그림 4. 튜닝된 멤버십 함수

Fig. 4. Tuned membership function

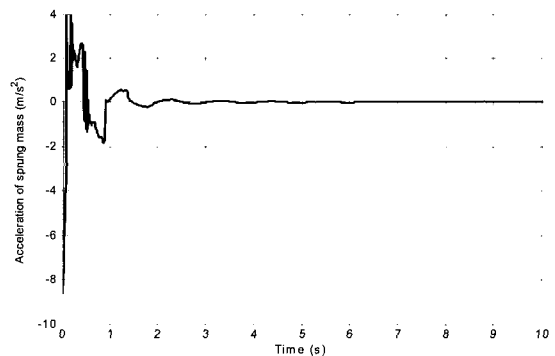
그림 5는 수동, 반능동 스카이-훅 제어, 그리고 반능동 퍼지 스카이-훅 제어기의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 반능동 퍼지 스카이-훅 제어기와 성능비교를 위해 설계된 수동 댐퍼와 반능동 스카이-훅 제어기는 승차감을 결정하는 가장 중요한 요소인 상질량의 가속도의 RMS 값을 최소화하도록 설계하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 스카이훅 알고리즘과 퍼지 스카이-훅 알고리즘이 수동 현가시스템보다 성능이 크게 향상됨을 확인 할 수 있었다. 또한 스카이-훅 알고리즘과 퍼지 스카이-훅 알고리즘은 정상상태에 보다 빨리 도달함을 확인 할 수 있다.

그림 6은 수동현가시스템과 반능동 스카이-훅 제어 현가

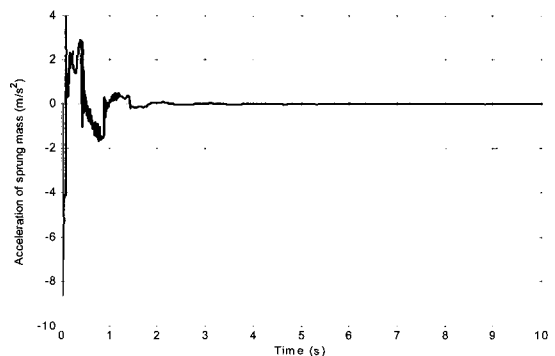
시스템 그리고 반능동 퍼지 스카이-훅 제어 현가시스템의 제어 성능을 비교한 결과이다.



(a) 수동형
(a) Passive



(b) 반능동 스카이-훅 제어
(b) Semi-active Sky-hook control



(c) 반능동 퍼지 스카이-훅 제어
(c) Semi-active Fuzzy sky-hook control

그림 5. 상질량의 가속도
Fig. 5. Acceleration of sprung mass

반능동 스카이-훅 제어기의 경우 수동형 현가시스템에 비해 성능이 8.2% 개선이 되었으며, 퍼지 스카이-훅 알고리즘의 경우 성능이 18% 향상되었음을 확인하였다. 그림 5에서는 스카이-훅 제어와 퍼지 스카이-훅 제어의 성능그래프가 비슷하게 보이지만, 초기 동작부분에서 스카이-훅 제어기의 경우 가속도의 RMS가 4 m/s²의 크기까지 나타나며 전반적으로 가속도의 RMS 크기가 조금씩 크게 나타나고 있다. 반능동 현가장치 시스템에 퍼지 스카이-훅 제어 알고리즘을

적용함으로써, 승차감을 결정하는 상질량의 가속도를 제어기의 입력으로 직접 사용할 수 있었으며 그 결과 현가시스템의 승차감을 크게 개선할 수 있었다. 이상의 시뮬레이션을 통해 제안된 퍼지 스카이-훅 제어기가 반능동 현가시스템의 제어기로 적합함을 보였다.

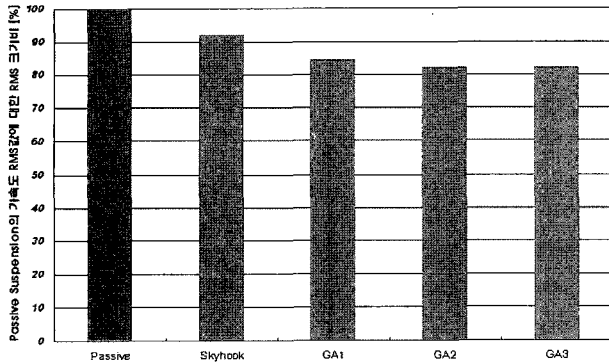


그림 6. RMS 값 비교

Fig. 6. Comparison of RMS value

참 고 문 헌

[1] D. C. Karnopp and M. J. Crosby, "System for controlling the transmission of energy between spaced members," *US Patent* 3807678, 1974.

[2] Y. Liu, F. Gordaninejad, C. Evrensel, S. Karakas, and U. Dogruer, "Experimental study on fuzzy skyhook control of a vehicle suspension system using a magneto-rheological fluid damper," *Proceedings of SPIE*, Vol. 5388, pp. 3380347, 2004.

[3] M. Ahmadian, "On the Development of fuzzy Skyhook control for Semiactive Magneto Rheological Systmes," *Proceedings of SPIE*, Vol. 5760, pp. 268-282, 2005.

[4] B. F. Spencer, S. J. Dyke, M. K. Sain, and J. D. Carlson, "Phenomenological Model of a Magnetorheological Dampers," *Journal of Eng. Mech.*, Vol. 123, No. 3, PP. 230-238, 1997.

[5] S. B. Choi, "A hysteresis model for the field-dependent damping force of a magnetorheological damper," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 245, No. 2, pp. 375-384, 2001.

[6] P. Q. Xia, "An inverse model of MR damper using optimal neural network and system identification," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 266, pp. 1009-1023, 2003.

[7] J. Cho, T. Jung, D. H. Kim, and J. Joh, "Inverse Model Control of An ER Damper System," *International Journal of fuzzy Logic and Intelligent Systems*, Vol. 6, No. 1, pp. 64-69, 2006.

[8] D. H. Wang and W. H. Liao, "Modeling and control of magneto-rheological fluid dampers using neural networks," *Smart Materials and*

Structures, Vol. 14, pp. 111-126, 2005.

[9] T. Tse and C. c. Chang, "Shear-mode Rotary Magnetorheological Damper for Small Scale Structural Control Experiments," *Journal of Structural Engineering*, pp. 904-911, 2004.

[10] L. M. Jansen and S. J. Dyke, "Semiactive control strategies for MR dampers: Comparative study," *Journal of Eng. Mech.*, Vol. 126, No. 8, pp. 795-803, 2000.

[11] S. J. Dyke, B. F. Spencer, M. K. Sain, and J. D. Carlson, "Modeling and control of magneto-rheological dampers for seismic response reduction," *Smart Mater. Struct.* 5, pp. 565-575, 1996.

저 자 소 개



조정목(Jeongmok Cho)

1999년 : 창원대학교 (공학석사)

2000년~현재 : 동 대학원 제어계측공학과 박사과정

관심분야 : 지능제어, MR Fluid 응용 시스템 설계 및 제어
Phone : +82-55-285-7550
E-mail : jmcho@chol.com



조종선(Joongseon Joh)

1991년 : Georgia Institute of

Technology, Department of Mechanical Eng. (공학박사)

1991년~1993년 : 국방과학연구소

1993~현재 : 창원대학교

제어계측공학과 교수

2001년 : IEEE Trans. of Fuzzy Systems 최우수 논문상 수상

관심분야 : 지능 제어, 수중로봇, 이동로봇, 의료용 로봇, MR Fluid 응용 시스템 설계 및 제어
Phone : +82-55-279-7555
Fax : +82-55-262-5064
E-mail : jsjoh@sarim.changwon.ac.kr