

MR 댐퍼를 이용한 회전형 현가장치의 제어에 관한 연구

Control of Rotary MR Damper Suspension System

*조정목¹, 허남², #조종선¹

*J. M. Cho¹, N. Hur², #J. S. Joh(jsjoh@sarim.changwon.ac.kr)¹

¹ 창원대학교 제어계측공학과, ²주위아

Key words : skyhook, fuzzy skyhook, genetic algorithm, MR damper

1. 서론

최근 고층건물의 방진시스템 및 자동차의 현가장치 분야에 MR 유체(magnetorheological fluid)를 이용한 반능동 진동제어에 관한 연구가 활발히 진행되면서 MR 유체의 밸브 모드 특성을 이용한 선형 MR 댐퍼가 널리 사용되고 있다.

일반적으로 외부로부터 가해지는 진동에 의한 영향을 최소화하기 위한 진동제어기법은 수동형, 능동형, 그리고 반능동형 진동제어 기법으로 나뉜다. 수동형 진동제어 기법의 경우 저렴하고 신뢰성이 높은 장점을 가지는 반면 성능이 떨어지는 단점을 가지고 있으며, 능동형 제어기법의 경우 제어성능은 우수하지만 외부의 추가적인 파워 소스가 필요할 뿐만 아니라 안정성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 반능동형 진동제어 기법의 경우, 가제어성 유체(controllable fluid)를 사용함으로써 수동형 진동제어기법의 안정성을 유지하면서 능동형 현가시스템의 단점을 해결하기 위해 추가적인 파워 시스템이 필요 없게 되었다.

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 최소화 하기 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 스카이훅 제어 기법을 제안하였다.

본 연구에서는 회전형 MR 댐퍼를 내장한 무한회전형 액츄에이터를 이용하여 주행로봇의 반능동 진동제어에 관한 연구를 수행하였다. 시뮬레이션을 위해서는 회전형 MR 댐퍼에 대한 비선형 댐퍼모델과 역댐퍼 모델(inverse model)이 필요하다. 일반적으로 MR 댐퍼의 동적특성은 Bouc-Wen 히스테리시스 모델로 표현된다. 역댐퍼 모델의 경우, 요구되는 댐핑력을 생성하기 위해 필요한 전압 또는 전류값을 미리 예측하기 위해 사용된다. CHOI [4]는 자기장의 영향을 1 차 선형 식으로 표현된 MR 댐퍼 모델을 제안함으로써 MR 댐퍼의 역모델을 쉽게 구할 수 있도록 제안하였다. TSE [5]는 회전형 MR 댐퍼의 히스테리시스 거동을 표현하기 위해 Bouc-Wen 모델을 사용하였으며, 댐핑력이 전압입력에 비례하는 역댐퍼 모델을 제안하였다.

본 연구에서는 Bouc-Wen 히스테리시스 MR 댐퍼모델과 TSE의 역댐퍼 모델을 이용하여 회전형 MR 댐퍼를 채용한 현가시스템용 반능동 퍼지 스카이훅 제어 알고리즘을 제안하였다.

2. 회전형 MR 댐퍼의 모델링

2.1 Bouc-Wen 히스테리시스 모델

MR 유체의 거동을 표현하는 가장 일반적인 방법인 빙햄 모델은 설계목적으로 아주 유용하게 사용되지만 제어 시뮬레이션 등에 사용되기에는 모델링 오차가 크기 때문에 MR 유체의 거동을 보다 정확히 표현하는 Bouc-Wen 히스테리시스 모델을 사용하였다. Bouc-Wen 히스테리시스 모델

은 다음의 5개 식으로 표현된다.

$$f = c_0 \dot{x} + k_0 x + \alpha z \tag{1}$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \tag{2}$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u + \alpha_c u^2 \tag{3}$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} u \tag{4}$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \tag{5}$$

여기서 c_0 와 k_0 는 각각 Viscous Damping 과 Stiffness 를 나타내며, α 는 Evolutionary Variable z 와 관련된 파라미터이다. γ , β , 그리고 A 는 히스테리시스 파라미터이다. 그리고 η 는 댐퍼의 시상수이며 v 와 u 는 각각 입력 전압과 출력을 나타낸다.

2.2 역댐퍼 모델

본 논문에서 MR 댐퍼의 역댐퍼 모델로 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(6)과 같이 된다.

$$z \cong z_u = \text{sgn}(\dot{x}) \left(\frac{A}{\gamma + \beta} \right)^{1/n} \tag{6}$$

식(6)을 Bouc-Wen 히스테리시스 모델에 대입하여 정리하면 입력전압에 관한 식을 유도할 수 있게 된다. 그림 1은 진폭이 0.5cm 인 3Hz의 정현파 변위신호에 의해 가진될 때 기준 댐핑력과 실제 출력 댐핑력을 비교한 시뮬레이션 결과이다. 여기서 목표 댐핑력은 댐퍼 속도의 4.5Ns/m 배로 가정하였다.

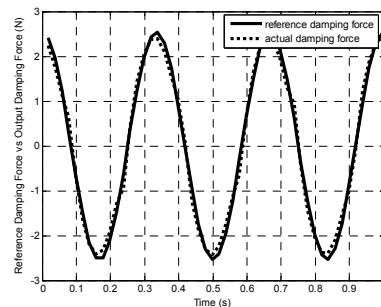


Fig. 1 Reference damping force vs. actual damping force

3. 퍼지 스카이훅 제어

3.1 퍼지 스카이훅 제어

퍼지 스카이훅 제어 알고리즘에서는 가상의 공간과 상질량 사이에 댐퍼 양단의 관계가 선형적인 특성을 갖는 가변 댐퍼를 연결하였다. 퍼지 스카이훅 알고리즘의 출력은 식(7)에 의해 결정된다.

$$f = \begin{cases} 0, & \text{if } V_s \cdot (V_s - V_u) \leq 0 \\ FLC(V_s, a_s) & \text{if } V_s \cdot (V_s - V_u) > 0 \end{cases} \quad (7)$$

기존의 퍼지 스카이훅 제어 알고리즘의 경우 제어 입력을 상질량의 속도만을 고려함으로써 7~9 개의 퍼지 제어 규칙으로 구현되었다. 본 연구에서는 제어기의 성능지수인 승차감에 직접적인 영향을 미치는 상질량의 가속도를 퍼지제어기의 입력으로 사용함으로써 49 개의 퍼지제어규칙으로 퍼지제어기의 성능을 보다 개선하였다. 표 1 은 49 개의 퍼지제어규칙을 보여준다.

Table 1 Fuzzy 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 스카이훅 제어기의 튜닝

퍼지제어기를 구성할 때 가장 어려운 점은 입출력 이득, 멤버쉽 함수의 형태, 그리고 퍼지제어규칙의 구성을 어떻게 하느냐에 따라 성능이 크게 달라진다는 것이다. 제안된 퍼지 스카이훅 제어기의 입출력 이득과 삼각형 멤버쉽 함수의 중앙값을 유전자 알고리즘(genetic algorithm, GA)을 이용하여 결정 하였다. 유전자 알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 튜닝은 3 단계로 이뤄졌다. 첫 번째 단계(GA1)에서는 상질량의 속도와 가속도 입력의 이득, 그리고 댐핑력을 얻기 위한 출력 이득을 결정하였으며, 두 번째 단계(GA2)와 세 번째 단계(GA3)에서는 각각 퍼지 제어기의 전건부와 후건부 멤버쉽 함수를 튜닝 하였다..

유전자 알고리즘을 이용한 튜닝에서 제어성능을 결정하는 적합도 함수(fitness function)는 현가장치에서 승차감을 결정하는 상질량의 가속도의 RMS 값으로 선택하였으며 식 (8)과 같다.

$$J = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_s^2 dt} \quad (8)$$

여기서 T 는 시뮬레이션 시간이며, a_s 는 상질량의 수직방향 가속도를 의미한다.

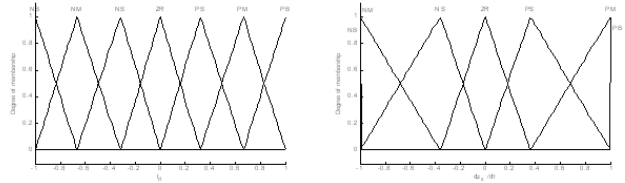
4. 시뮬레이션 및 결과

1/4 차량모델과 범퍼입력을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. GA1 에서 Chromosome 의 길이는 44bit 로 설정하였으며, GA2 와 GA3 에서는 각각 28 bit 의 Chromosome 을 사용하였다. Population 크기는 30 으로 설정하였으며 세대수는 50 으로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. GA1 을 이용하여 튜닝된 퍼지 제어기의 입출력은 이득은 각각 5.8280, 0.3446, 그리고 48.7800 이다. GA2 와 GA3 를 이용하여 얻어진 멤버쉽 함수는 그림 2 와 같다.

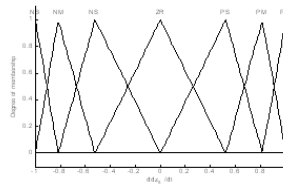
그림 3 은 퍼지 스카이훅 제어기의 상질량 가속도의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 시뮬레이션결과 스카이

훅 제어기의 경우 수동형 진동제어 대비 8.2%의 성능 향상이 이루어졌으며 퍼지 스카이훅 제어기의 경우 수동형 진동제어 대비 약 18%의 성능 개선이 보였다.

시뮬레이션 결과를 통해 제안한 퍼지 스카이훅 제어 알고리즘이 반응동 현가시스템의 제어기로 만족스러운 제어 성능을 보여줌을 확인하였다.



(a) Input membership function 1 (b) Input membership function 2



(c) Output membership function

Fig. 2 Tuned membership functions

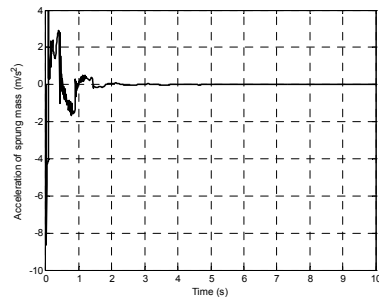


Fig. 3 Simulation results of fuzzy skyhook algorithm

후기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

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. 338-347, 2004.
3. M. Ahmadian, "On development of fuzzy Skyhook control for semiactive magneto rheological Systems", Proceedings of SPIE, Vol. 5760, pp. 268-282, 2005
4. 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.
5. 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.