

MR댐퍼를 이용한 의자 서스펜션 시스템의 퍼지 제어

전도영[†] · 공경철^{*}

Fuzzy Control of a Seat Suspension System with an MR Damper

Doyoung Jeon and Kyoung-chul Kong

Key Words: MR fluid damper(자기유변유체 댐퍼), fuzzy control(퍼지 제어), seat suspension system(의자 진동감쇄 시스템)

Abstract

This paper applies the fuzzy logic controller to a semiactive seat suspension system in order to obtain the better ride comfort in constraint of specific rattle space. The seat suspension system used for this research is a scissors-type one with the MR (Magnetic Rheological) fluid damper. Since a seat suspension system with a driver can not be exactly modeled, it is effective to control with the fuzzy logic controller. The rule was carefully tuned to effectively reduce the vibration transmitted to a driver. The on-road ride was realized on a hydraulic excitor and the result shows that the fuzzy controller has reduced the vibration of a seat suspension system compared to the continuous skyhook controller.

1. 서론

운전조건을 향상시키기 위하여 노면과 차체로부터 발생하는 진동을 차단시키는 서스펜션 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 서스펜션 시스템은 크게 현가장치 서스펜션과 의자 서스펜션으로 나눌 수 있는데 현가장치 서스펜션은 노면으로부터 전달되는 진동을 감쇠시킬 수 있는 반면, 의자 서스펜션은 운전자가 느낄 수 있는 모든 진동을 효과적으로 감쇠시킬 수 있는 장점이 있다. 최근에는 의자 서스펜션에 지능형물질을 이용한 진동흡수장치를 장착하고 이를 제어하여 승차감을 향상시키려는 연구가 활발히 진행 중이다[1][2][3].

의자 서스펜션 시스템은 운전자 신체의 동역학적 특성이 크게 나타나고 많은 불규칙성을 가지므로 정확한 모델에 기반하는 제어기로는 성능향상에 한계가 있다. 본 논문에서는 수학적 모델

없이 제어기 설계가 가능한 퍼지논리를 이용하였다. 시스템을 크게 의자 서스펜션과 운전자의 조합으로 가정하고 퍼지 제어기의 입력변수로 의자의 수직방향의 속도와 운전자의 머리부분에서의 수직방향의 가속도를 사용하였다. 퍼지논리는 수학적 접근에 비해 제어기 설계에 많은 자유도가 있으므로[4][5] 보다 구체적인 제어기 구성이 가능하였다.

본 연구에 사용된 의자 서스펜션은 일반적인 가위형태를 사용하였으며 MR댐퍼를 수직으로 장착하였다. 실험은 유압식 가진기를 통하여 실험실 내에서 이루어졌으며 차체의 진동은 멀미가 가장 쉽게 일어나는 4Hz의 사인파[6]와 불규칙 진동으로 모사하였다. 설계된 퍼지 제어기는 시뮬레이션과 실험을 통하여 성능을 검증하였으며 연속 스카이훅 제어기와 비교하여 우수성을 확인하였다. 실험결과는 가진기와 의자의 진동 전달률을 통하여 분석하였고, 운전자의 머리에서 가속도 데이터를 측정하여 SEAT 값을 구하고 이를 통해 승차감을 평가하였다[6].

[†] 서강대학교 기계공학과

E-mail : dyjeon@sogang.ac.kr

TEL : (02)705-8634 FAX : (02)712-07□□

^{*} 서강대학교 기계공학과 대학원

2. 퍼지 제어기 설계

2.1 시스템 분석

Fig. 1은 의자 서스펜션 시스템의 구성을 보여 준다. 서스펜션에 널리 사용되는 연속 스카이훅 제어기는 의자와 차체의 속도를 사용하여 감쇠기의 감쇠력을 결정한다. 그러나 연속 스카이훅 제어기는 운전자 신체의 진동 정보가 제어기에 반영되지 않는 단점이 있다. 본 연구에서는 의자의 수직속도와 함께 운전자 머리에서의 가속도를 제어기의 입력으로 사용하였다. 의자의 진동상태를 측정하기 위해 의자의 위치, 속도, 가속도를 사용할 수 있지만 사람의 무게에 따라 평형위치가 다르고 절대위치를 측정하기 어렵기 때문에 위치 정보는 사용에 어려움이 따르고 기계적인 미세한 진동에 의하여 많은 노이즈가 포함되는 가속도 정보 또한 사용에 어려움이 따랐다. 따라서 가장 효과적으로 진동 상태를 측정할 수 있는 의자의 속도 \dot{x}_S 를 입력변수로 사용하였다. 또한 떨미를 발생시키고 피로가 쌓이도록 하는 변수가 운전자의 머리에서의 가속도이므로[6] 머리부분에서의 가속도 a_H 를 입력변수로 사용하였다. 각 입력변수(\dot{x}_S , a_H)가 모두 0이 되도록 하는 것이 본 제어기 설계의 목표이므로 측정된 \dot{x}_S 와 a_H 를 예러로써 정의하고 퍼지 논리를 이용하여 되먹임하였다.

2.2 퍼지 논리 제어기

Fig. 2와 같이 \dot{x}_S 와 a_H 를 각각 퍼지화하는 멤버쉽 함수를 구성하였다. 측정된 센서신호는 -1에서 1사이의 값을 갖도록 크기를 조절하였으며 각각의 입력변수는 절대값에 대해 매우작음(VS), 작음(S), 조금작음(LS), 조금큼(LB), 큼(B), 매우큼(VB)의 6단계의 퍼지 집합으로 구분하였다. 멤버쉽 함수는 계산 속도가 가장 빠른 삼각형 형태를 사용하였다. 각 퍼지 집합은 0에서 1까지의 연속적인 값을 가지며 그 값은 측정된 센서신호가 각 퍼지 집합에 포함되는 비율을 의미한다. \dot{x}_S 는 LVDT의 신호를 미분하는 과정에서 노이즈가 증폭되어 매우작음(VS) 집합과 작음(S) 집합의 값이 급격하게 떨어지는 문제가 발생하였다. 따라서 \dot{x}_S 의 멤버쉽 함수를 Fig. 2(b)와 같이 변형하여 퍼지

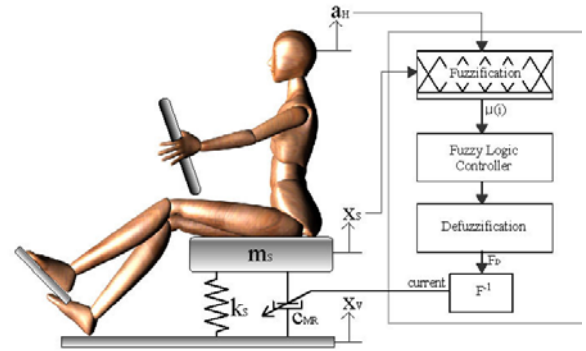
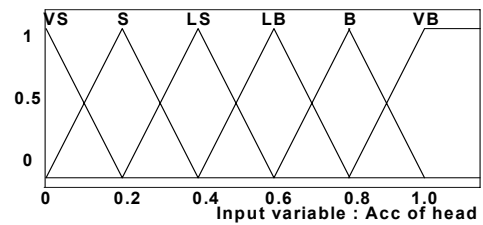
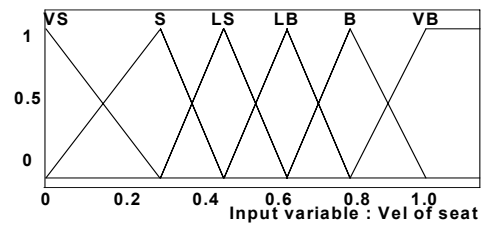


Fig. 1 Seat suspension system and control scheme



(a) Acceleration of a driver's head a_H



(b) Velocity of a seat \dot{x}_S

Fig. 2 Scaled Membership functions

제어기가 노이즈 영역에서 둔감하도록 하였다. 또한 센서신호가 절대값에 의해 크기가 결정되고 부호에 의해 방향이 결정되는 대칭성을 가지므로 계산과정을 줄이기 위하여 다음과 같은 부호 변수를 설정하고 절대값으로 멤버쉽 함수를 구성하였다.

$$S1 = \text{sgn}(\dot{x}_S) \tag{1}$$

$$S2 = \text{sgn}(a_H) \tag{2}$$

따라서 측정된 센서신호는 6단계의 퍼지 집합과 2단계의 부호변수로 표현된다. 멤버쉽 함수를 통하여 얻어진 각 퍼지 집합을 이용하여 효과적으로 출력값을 결정하기 위한 제어규칙들을

Table 1. Fuzzy control rule bases

		\dot{x}_S													
		S1 is -1							S1 is 1						
		1	2	3	4	5	6	7	8	□	10	11	12		
j		i	VB	B	LB	LS	S	VS	VS	S	LS	LB	B	VB	
a_H	S2 is 1	1	VB	ZE	ZE	NVS	NVS	NS	NS	NS	NLS	NLB	NB	NVB	NVB
		2	B	PVS	ZE	ZE	NVS	NVS	NS	NS	NLS	NLB	NLB	NB	NVB
		3	LB	PVS	PVS	ZE	ZE	NVS	NVS	NVS	NLS	NLS	NLB	NB	NVB
		4	LS	PS	PVS	PVS	ZE	ZE	NVS	NVS	NS	NLS	NLB	NLB	NB
		5	S	PS	PS	PVS	PVS	ZE	NVS	NVS	NS	NS	NLS	NLB	NB
		6	VS	PLS	PLS	PS	PVS	PVS	ZE	ZE	NVS	NVS	NS	NLS	NLS
	S2 is -1	7	VS	PLS	PLS	PS	PVS	PVS	ZE	ZE	NVS	NVS	NS	NLS	NLS
		8	S	PB	PLB	PLS	PS	PS	PVS	PVS	ZE	ZE	NVS	NVS	NS
		□	LS	PB	PLB	PLB	PLS	PS	PVS	PVS	PVS	ZE	ZE	NVS	NVS
		10	LB	PVB	PB	PLB	PLS	PLS	PS	PS	PVS	PVS	ZE	ZE	NVS
		11	B	PVB	PB	PLB	PLB	PLS	PS	PS	PS	PVS	PVS	ZE	ZE
		12	VB	PVB	PVB	PB	PLB	PLS	PS	PS	PS	PS	PVS	PVS	ZE

Table 1과 같이 표 형식으로 구성하였다. Table 2는 제어규칙들에 사용된 출력변수에 대한 정의를 보여준다. 이때 출력은 MR댐퍼가 서스펜션 시스템에 가하고자 하는 힘을 나타내며 부호는 힘의 방향을 나타낸다. S1과 S2가 작은 노이즈에 반응하여 1과 -1을 급격하게 왕복하는 것에 대비하여 Table 1의 색칠된 영역인 매우작음(VS) 집합은 S1과 S2에 상관없이 같은 출력값을 갖도록 설정하였다. 특히 \dot{x}_S 와 a_H 가 모두 매우작음(VS) 집합일 때 노이즈의 영향이 가장 많이 나타나므로 이 경우의 출력값을 출력 없음(ZE)으로 설정하였다.

각각의 퍼지 집합에 대해 결정된 출력값은 집합의 형태로 표현되므로 MR댐퍼의 출력값을 스칼라 값으로 결정하기 위하여 (3)과 같은 비퍼지화 과정이 필요하다.

$$f_D = \frac{\sum_i^N \sum_j^N F(i, j) \mu(i) \sigma(j)}{\sum_i^N \sum_j^N \mu(i) \sigma(j)} \quad (3)$$

여기서 i 와 j 는 각 퍼지 집합을 숫자로 표현한 것이며 Table 1에 표시되었다. $\mu(i)$ 와 $\sigma(j)$ 는 각각 \dot{x}_S 와 a_H 가 각 퍼지 집합에 포함되는 비율을 나타낸다. N은 각 변수에 대한 퍼지 집합의 개수를 나타내며 12이다. $F(i, j)$ 는 각 경우가 갖는 출력값을 의미한다.

MR 유체는 빙햄유체의 특성을 나타내므로[8] MR 댐퍼의 감쇠력은 제어가 불가능한 전단력과 전류로써 제어가 가능한 점성감쇠력으로 나눌 수 있다. MR 댐퍼의 감쇠력은 (4)와 같이 표현된다.

$$\bar{f}_D = \alpha u \operatorname{sgn}(\dot{x}_S - \dot{x}_V) \quad (4)$$

여기서 α 는 전류에 따른 MR댐퍼의 감쇠력의 비를 나타내는 상수이고 u 는 전류신호이다. \dot{x}_S 와 \dot{x}_V 는 각각 의자와 차체(가진기)의 수직방향 속도이고 $\operatorname{sgn}(\dot{x}_S - \dot{x}_V)$ 은 MR댐퍼가 장착된 두 프레임의 상대속도의 방향을 나타낸다.

MR 댐퍼는 진동에너지를 흡수하는 것만 가능하므로 일부 구간에서 원하는 감쇠력 f_D 는 유효하지 않다. MR댐퍼의 상대속도와 원하는 감쇠력 f_D 의 방향이 일치할 때에만 제어가 유효하며 이

Table 2. Variable definitions

변수	의미	출력, F	변수	의미	출력, F
NVS	매우 작은 음의 출력	-100N	PVS	매우 작은 양의 출력	100N
NS	작은 음의 출력	-300N	PS	작은 양의 출력	300N
NLS	조금 작은 음의 출력	-600N	PLS	조금 작은 양의 출력	600N
NLB	조금 큰 음의 출력	-1000N	PLB	조금 큰 양의 출력	1000N
NB	큰 음의 출력	-1500N	PB	큰 양의 출력	1500N
NVB	매우 큰 음의 출력	-2500N	PVB	매우 큰 양의 출력	2500N
ZE	출력 없음	0			

조건을 퍼지 규칙으로 만들기 위하여 부호변수 S3을 설정하였다.

$$S3 = \text{sgn}(\dot{x}_S - \dot{x}_V) \quad (5)$$

위의 변수는 MR댐퍼의 상대속도의 방향을 나타내며 1과 -1로 표현된다.

마지막 제어규칙은 반능동규칙으로써 다음과 같이 구성되었다.

$$\text{If } f_D \times S3 \text{ is Positive, then } u = \frac{f_D}{\alpha} \quad (6)$$

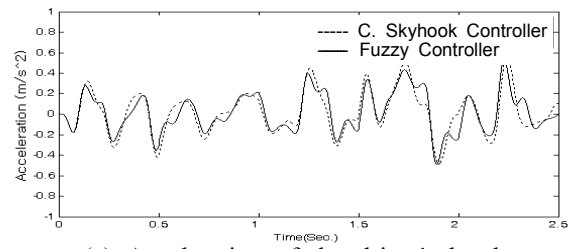
$$\text{If } f_D \times S3 \text{ is Negative, then } u = 0 \quad (7)$$

3. 시뮬레이션

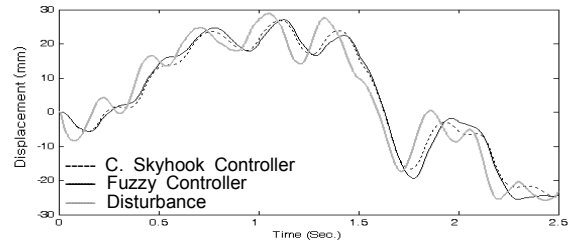
인체 진동연구 분야에서 널리 이용되는 인체모델링을 기반으로 운전자를 4자유도[6], 운전석을 2자유도로 하여 Fig. 1과 같은 의자 서스펜션 시스템을 구성하였다. 차체는 4Hz의 사인파와 0.5Hz~10Hz의 성분을 갖는 불규칙 진동을 갖도록 하였다. 또한 센서의 노이즈와 기계적 노이즈를 고려하여 센서 출력값에 가우시안 노이즈를 포함시켰다.

Fig. 3는 불규칙 외란에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 3(a)에 나타낸 운전자 머리에서의 가속도에 대해 SEAT 값을 구해보면 연속 스카이훅 제어기를 사용했을 경우 61.2%, 퍼지 제어기를 사용했을 경우 56.7%가 나타났다. Fig. 3(c)의 PSD를 보면 1~2Hz에서는 연속 스카이훅 제어기를 사용했을 때에 비해 성능이 다소 떨어지지만 사람이 가장 피로감을 느끼는 4~8Hz 주파수 대역에서는 성능이 향상되었음을 알 수 있다.

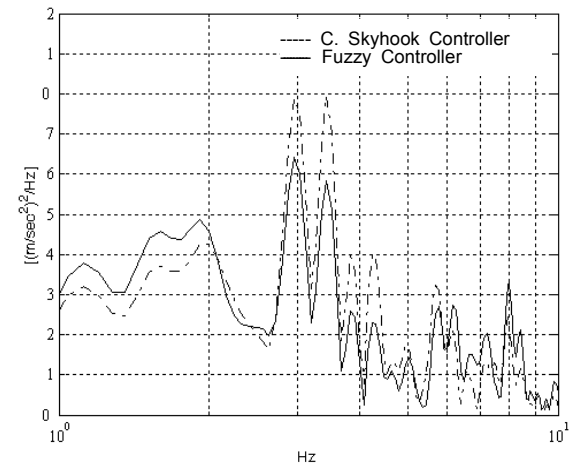
Fig. 4는 4Hz의 사인파 진동에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 4(a)는 퍼지 제어를 사용했을 때 연속 스카이훅 제어를 사용했을 때에 비하여 운전자가 느끼는 가속도가 감소하였음을 나타낸다. 각각에 대해 SEAT 값을 구해본 결과 연속 스카이훅 제어기를 사용했을 경우 51.5%, 퍼지 제어기를 사용했을 경우 47.8%를 나타냈다.



(a) Acceleration of the driver's head

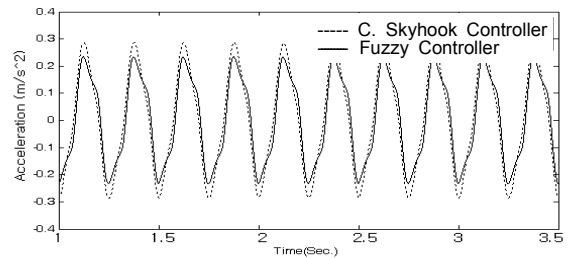


(b) Displacement of the seat

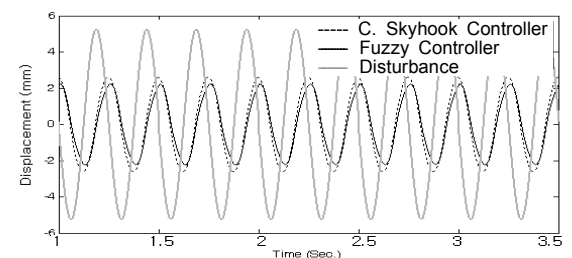


(c) Power spectral density of head acceleration

Fig. 3 Simulation results for random vibration



(a) Acceleration of the driver's head



(b) Displacement of the seat

Fig. 4 Simulation results for 4Hz sine vibration

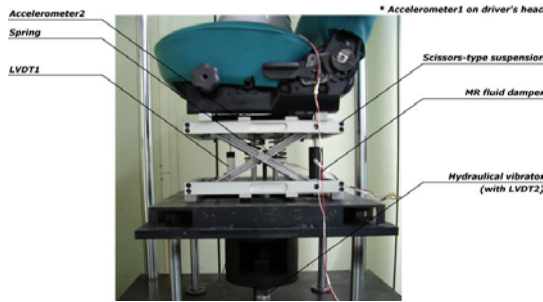
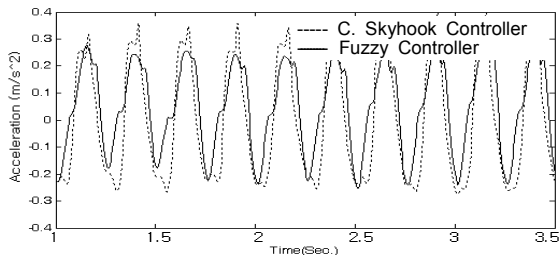
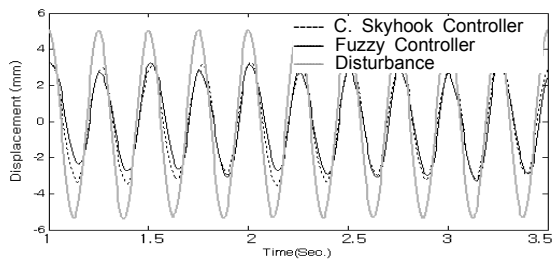


Fig. 5 Photo of seat suspension system



(a) Acceleration of the driver's head



(b) Displacement of the seat

Fig. 6 Experimental results of 70Kg man for 4Hz sinusoidal vibration

4. 실험결과 및 분석

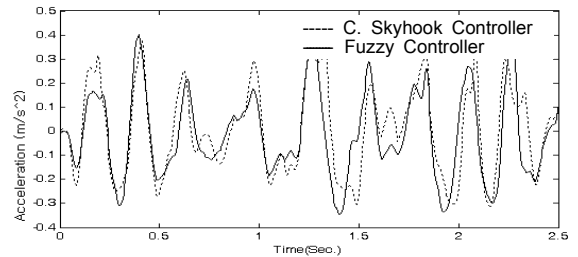
본 연구에 사용된 의자 서스펜션 시스템은 Fig. 5과 같이 두 멤버가 서로 엇갈려 운동하며 50mm의 수직운동을 보장하는 일반적인 가위형태이다. 스프링과 MR댐퍼가 각 프레임에 대해 수직으로 장착되었고 위치정보를 획득하기 위하여 LVDT가 장착되었다. 운전자 머리부분의 가속도를 측정하고 승차감을 평가하기 위하여 실험에 참가한 운전자는 가속도센서가 부착된 헬멧을 착용하였다. 피 실험자는 키 177cm, 몸무게 70kg의 20대의 성인 남성과 키 153cm, 몸무게 42kg의 20대의 성인 여성으로 구성되었다. 또한 동일한 조건하에서 실험을 여러 번 반복하여 중간정도의 성능을 가지는 값을 선택하였다.

4Hz 사인파와 불규칙 신호를 가진기에 입력하여 차체의 진동을 모사하였다. 이때 연속 스카이

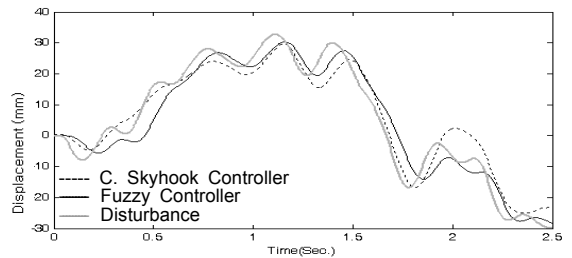
훅 제어기의 이상적 감쇠계수 C_{SKY} 를 실험을 반복하여 튜닝한 다음 퍼지 제어기와 성능을 비교 평가하였다.

Fig. 6은 70kg 남성 실험자의 4Hz 사인파 진동에 대한 실험결과를 보여주며 Fig. 6(a)는 퍼지 제어를 사용했을 때가 연속 스카이훅 제어를 사용했을 때에 비하여 운전자 머리부분의 가속도가 감소한 것을 보여준다. 특히 연속 스카이훅 제어를 사용했을 때 나타났던 가속도의 피크가 퍼지 제어를 사용했을 때 사라졌다. 각각에 대한 SEAT 값을 구한 결과 연속 스카이훅 제어를 사용했을 때 61.3%, 퍼지 제어를 사용했을 때 57.5%가 평가되었다.

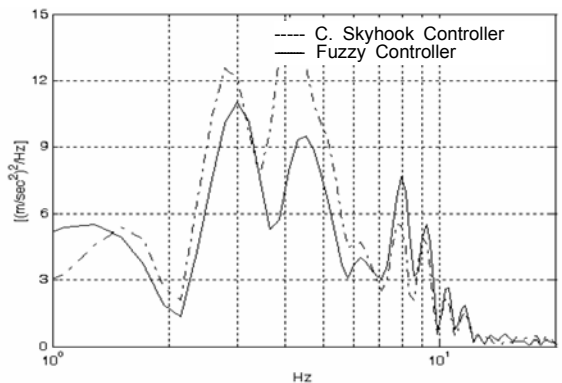
Fig. 7은 70kg 남성의 불규칙 진동에 대한 실험결과를 보여준다. 낮은 주파수 영역에서 퍼지 제어기가 연속 스카이훅 제어기에 비하여 성능이



(a) Acceleration of the driver's head



(b) Displacement of the seat



(c) Power spectral density of head acceleration

Fig. 7 Experimental results of 70Kg man for random vibration

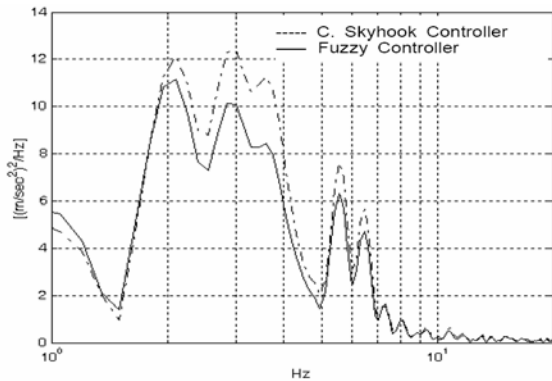


Fig. 8 PSD for the acceleration on the head of 42Kg woman for random vibration

다소 떨어지지만 이외의 영역에서는 성능향상을 보였다. Fig. 8은 불규칙 진동에 대한 42Kg 여성 실험자의 PSD분석 결과를 보여준다. 남성과 마찬가지로 1~2Hz의 진동에서는 퍼지 제어가 연속 스카이훅 제어에 비해 성능이 향상되지 않았지만 4~8Hz의 영역에서는 성능향상을 보였다. 실험에 참가한 실험자들은 불규칙 진동에 대해 연속 스카이훅 제어를 사용했을 때보다 퍼지 제어를 사용했을 때 편하다고 평가했다.

4. 결론

MR댐퍼를 이용한 의자 서스펜션을 제어하기 위하여 퍼지논리를 이용한 퍼지 제어기가 제안되었다. 의자의 진동을 감쇠시키기 위하여 의자의 수직방향의 속도와 운전자의 승차감과 피로도를 결정짓는 머리에서의 가속도를 줄이기 위하여 머리의 가속도를 제어기의 입력으로 사용하였다.

2자유도의 서스펜션 모델과 4자유도의 인체모델을 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. 사람에게 가장 치명적인 4~8Hz 영역의 진동에서 퍼지 제어를 사용했을 경우가 연속 스카이훅 제어를 사용했을 때에 비해 운전자 머리부분에서의 가속도의 크기와 SEAT값이 우수하였다.

실험실 내에서 피실험자와 함께 이루어진 실제 실험 결과, 퍼지 제어가 연속 스카이훅 제어에 비해 1~2Hz의 낮은 주파수 영역에서 성능이 향상되지 않았지만 운전자에게 민감한 4~8Hz의 주파수 영역에서 성능이 향상되었다. 특히 4Hz 사인파 진동 실험에서 연속 스카이훅 제어를 사용한 의자 서스펜션에서 나타났던 가속도의 피크가 퍼지 제어를 사용했을 때 사라지는 것을 확인하

였다. 실험에 참가한 실험자들은 불규칙진동에 대해 연속 스카이훅 제어를 사용했을 때보다 퍼지 제어를 사용했을 때 편하다고 평했다.

참고문헌

- (1) K. Kim and D. Jeon, 1999, "Vibration Suppression in an MR Fluid Damper Suspension System", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 10.
- (2) Chanho Park and Doyoung Jeon, 2001, "Semiactive Vibration Control of a Smart Seat with an MR Fluid Damper Considering Its Time Delay", 8th Int. Conf. On ER and MR Fluids, p. 243-248.
- (3) Yongrok Lee and Doyoung Jeon, 2001, "A Study on the Vibration Attenuation of a Driver's Seat Using an MR Fluid Damper", 8th Int. Conf. On ER and MR Fluids, p. 70-76.
- (4) C.F.Nicolas, J. Landaluze, E. Castrillo, M. Gaston and R. Reyero, 1997, "Application of Fuzzy Logic Control to the Design of Semi-Active Suspension Systems", IEEE, p. 87-93.
- (5) C. C. Lee, 1990, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller, part I and II", IEEE Trans. Sys. Man Cybern, p. 404-434.
- (6) M.J. Griffin, 1990, "Handbook of Human Vibration"
- (7) Y. Wan and J.M. Schimmels, 1997, "Optimal Seat Suspension Design Based on Minimum Simulated Subjective Response", Journal of Biomechanical Engineering, p. 404-416.
- (8) Youngrok Lee, Doyoung Jeon, 1999, "The comparison of Properties between ER and MR fluids Using a Rotational Viscometer", The Korean Journal of Rheology, Vol. 11.