

머리 가속도를 고려한 의자 서스펜션의 퍼지제어

Fuzzy Control of the Seat Suspension System Considering the Acceleration of a Driver's Head

공 경 철, 전 도 영*
(Kyoung-chul Kong and Doyoung Jeon)

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 (Magneto 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.

Keywords : magneto rheological fluid damper, fuzzy control, seat suspension system

I. 서론

운전조건의 향상을 위하여 노면과 차체로부터 발생하는 진동을 감소시키는 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[1-3].

의자 서스펜션 시스템은 운전자 신체의 동역학적 특성이 크게 나타나고 많은 불규칙성을 가지므로, 운전자를 질량-스프링-댐퍼로 구성된 모델로 근사하거나 운전자를 무시하고 의자 서스펜션을 단순 2자유도 모델로 분석하여 그 수학적 모델에 기반하는 방식의 제어기로는 성능향상에 한계가 있다. 본 논문에서는 수학적인 모델 없이 제어기 설계가 가능한 퍼지논리를 이용하였다. 시스템을 크게 의자 서스펜션과 운전자의 조합으로 가정하고 퍼지 제어기의 입력변수로 의자의 수직방향 속도와 운전자의 머리부분에서의 수직방향 가속도를 사용하였다. 본 논문에서는 가속도계가 부착된 헬멧을 착용하여 머리 가속도를 측정함으로써 승차감을 향상시킬 수 있는 지를 검증하는데 중점을 두었다. 퍼지 제어기에 사용된 제어규칙들은 머리의 가속도가 줄어들도록 조절하였다. 퍼지논리는 수화적인 접근에 비해 제어기 설계에 많은 자유도가 있으므로[4,5] 보다 구체적인 제어기 구성이 가능하였다.

본 연구에 사용된 의자 서스펜션은 일반적인 가위형태를 사용하였으며 자기유변유체 댐퍼를 수직으로 장착하였다. 실험은 유압식 가진기를 통하여 실험실 내에서 이루어졌으며 차체의 진동은 떨림이 가장 쉽게 일어나는 4Hz의 사인파[6]와 불규칙 진동으로 하였다. 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 (Seat Effective Amplitude Transmissibility)값을 구하고 이를 통해 승차감을 평가하였다[6].

II. 퍼지 제어기 설계

1. 제어 구조 설정

Fig. 1은 의자 서스펜션 시스템의 구성을 보여준다. 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 수직

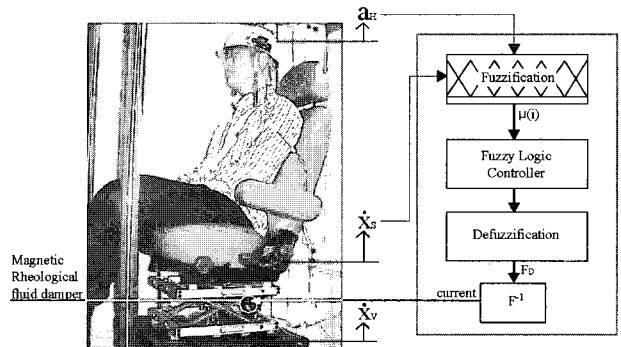


그림 1. 의자 서스펜션 시스템과 제어 방법.
Fig. 1. Seat suspension system and control scheme.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2004. 11. 11., 채택확정 : 2005. 3. 18.
공경철, 전도영 : 서강대학교 기계공학과
(kkc@sogang.ac.kr/dyjeon@sogang.ac.kr)
※ 이 연구는 2004년도 서강대학교 교내 연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

속도와 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 에러로써 정의하고 퍼지 논리를 이용하여 되먹임 하였다.

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 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)의 신호를 미분하는 과정에서 노이즈가 증폭되어 매우작음(VS) 집합과 작음(S) 집합의 값이 급격하게 떨어지는 문제가 발생 하였다. 따라서 \dot{x}_S 의 멤버쉽 함수를 Fig. 2(b)와 같이 변형하여 퍼지 제어가 노이즈 영역에서 둔감하도록 하였으며 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 표 1과 같이 표 형식으로 구성하였다. 표 2는 제어규칙들에 사용된 출력변수에 대한 정의를 보여준다. 이때 출력은 자기유변유체 댐퍼가 서스펜션 시스템에 가하고자 하는 힘을 나타내며 부호는 힘의 방향을 나타낸다. S1과 S2가 작은 노이즈에 반응하여 1과 -1을 급격하게 왕복하는 것에 대비하여 표 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 자기유변유체 댐퍼의 출력값을 스칼라 형태로 결정하기 위하여 비퍼지화 과정이 필요하다. (3)에 의해 4개의 집합으로 구성된 출력값 집합을 하나의 값으로 결정하게 된다. 비퍼지화 방법은 계산시간이 가장 빠른 보간방법을 사용하였다.

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

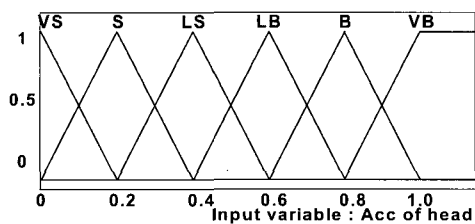
여기서 i 와 j 는 각 퍼지 집합을 숫자로 표현한 것이며 표 1에 표시되었다. $\mu(i)$ 와 $\sigma(j)$ 는 각각 \dot{x}_S 와 a_H 가 각 퍼지 집합에 포함되는 비율을 나타낸다. N은 각 변수에 대한 퍼지 집합의 개수를 나타내며 12이다. $F(i,j)$ 는 각 경우가 갖는 출력값을 의미한다.

자기유변유체는 방햐음유체의 특성을 나타내므로[8] 자기유변유체 댐퍼의 감쇠력은 입력 전류의 변화에 따라 제어의 효과가 작게 나타나는 점성감쇠력(viscous damping force)과 제어의 효과가 크게 나타나는 전단력(shear force)으로 구분할 수 있다. 자기유변유체 댐퍼의 전단력은 (4)와 같이 표현된다.

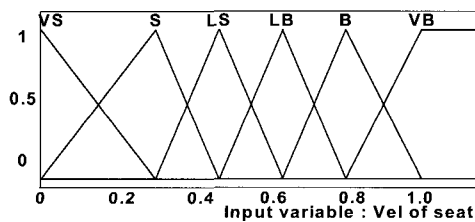
$$f_{MRdamper} = \alpha u \text{sgn}(\dot{x}_S - \dot{x}_V) \tag{4}$$

여기서 α 는 전류에 따른 자기유변유체 댐퍼의 감쇠력의 비를 나타내는 상수이고 u 는 전류신호이다. \dot{x}_S 와 \dot{x}_V 는 각각 의자와 차체(가진기)의 수직방향 속도이고 $\text{sgn}(\dot{x}_S - \dot{x}_V)$ 은 자기유변유체 댐퍼가 장착된 두 프레임의 상대 속도의 방향을 나타낸다.

자기유변유체 댐퍼는 진동에너지를 흡수하는 것만 가능



(a) Acceleration of a driver's head a_H



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

그림 2. 측정된 멤버쉽 함수.

Fig. 2. Scaled membership functions.

표 1. 퍼지 제어 규칙 요소들.

Table 1. Fuzzy control rule bases.

i j		x_S													
		S1 is -1						S1 is 1							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
		VB	B	LB	LS	S	VS	VS	S	LS	LB	B	VB		
a_{H1}	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
		9	LS	PB	PLB	PLB	PLS	PS	PVS	PVS	PVS	ZE	ZE	NVS	NVS
		10	LB	PVB	PB	PLB	PLS	PS	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

표 2. 변수 정의.

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			

을 선택하여 출력값을 결정하는 반능동 규칙으로써 다음과 같이 구성되었다.

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

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

여기서 α 는 (4)에서 정의된 자기유변유체의 감쇠력상수[감쇠력/전류]이다. u 는 제어기의 출력이며 전류를 의미한다. 위의 (6)과 (7)을 이용하여 Fig. 3과 같이 앞에서 결정된 f_D 가 자기유변유체 댐퍼의 반능동 특성에 적합한지를 판단하여, 결정된 퍼지 제어기의 출력값과 0의 출력값 중 선택하게 된다.

III. 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. 시뮬레이션 결과는 다음과 같은 방법으로 SEAT (Seat Effective Amplitude Transmissibility) 값을 구하여[6] 분석하였다.

그림 3. 제어기 흐름도와 반능동 규칙.

Fig. 3. Control flow and semiactive rule.

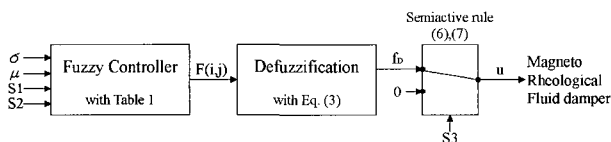
하므로 일부 구간에서 원하는 감쇠력 f_D 는 유효하지 않다. 자기유변유체 댐퍼의 상대속도와 원하는 감쇠력 f_D 의 방향이 일치할 때에만 제어가 유효하며 이 조건을 퍼지 규칙으로 만들기 위하여 부호변수 $S3$ 를 설정하였다.

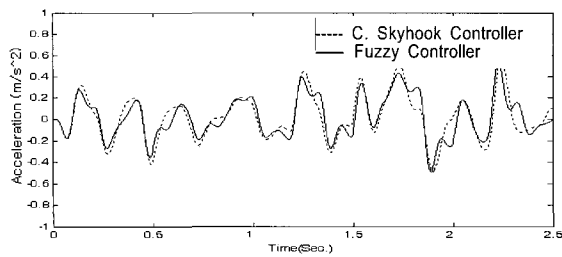
$$S3 = \text{sgn}(\dot{x}_S - \dot{x}_V) \quad (5)$$

(5)는 자기유변유체 댐퍼의 상대속도의 방향을 나타내며 1과 -1로 표현된다. 마지막 제어규칙은 제어가 유효한 구간

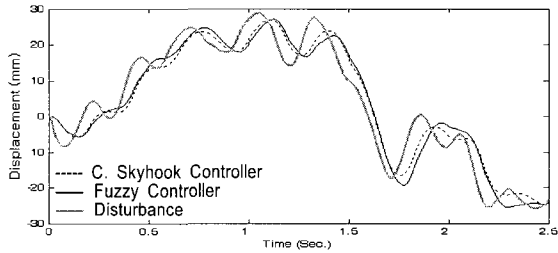
$$SEAT\% = \left[\frac{\int G_{ss}(f) W_i^2(f) df}{\int G_{ff}(f) W_i^2(f) df} \right]^{1/2} \times 100 \quad (8)$$

여기서 $G_{ss}(f)$ 과 $G_{ff}(f)$ 는 각각 의자와 가진기에서 측정된 가속도를 주파수로 나타낸 함수이다. $W_i(f)$ 는 각 주파수에 대한 가중치를 나타내는 함수이며 4-8Hz에서 가장 큰 값을 갖는다.

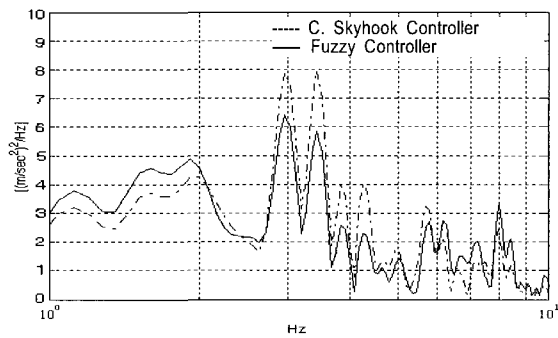




(a) Acceleration of the driver's head

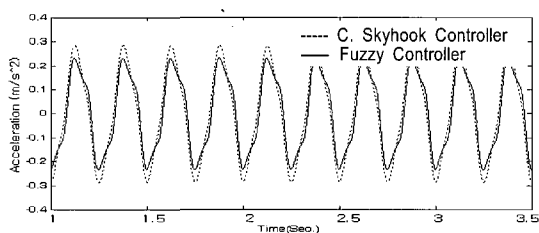


(b) Vertical displacement of the seat

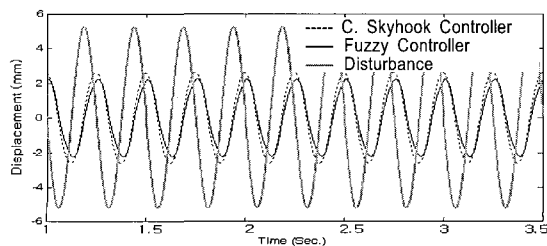


(c) Power spectral density of head acceleration

그림 4. 불규칙 외란에 대한 시뮬레이션 결과.
Fig. 4. Simulation results for random vibration.



(a) Acceleration of the driver's head



(b) Vertical displacement of the seat

그림 5. 4Hz 사인 입력에 대한 시뮬레이션 결과.
Fig. 5. Simulation results for 4Hz sine vibration.

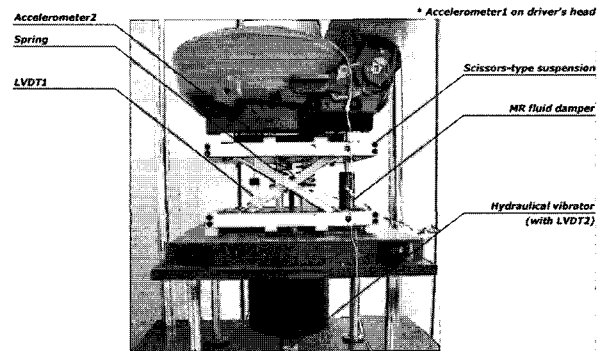
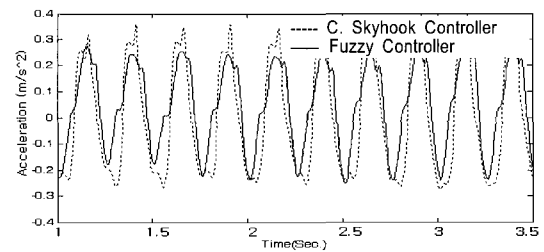
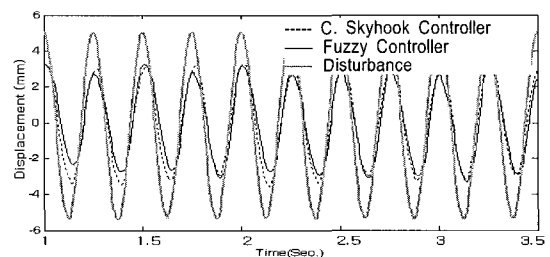


그림 6. 의자 서스펜션 시스템의 사진.
Fig. 6. Photo of seat suspension system.



(a) Acceleration of the driver's head



(b) Vertical displacement of the seat

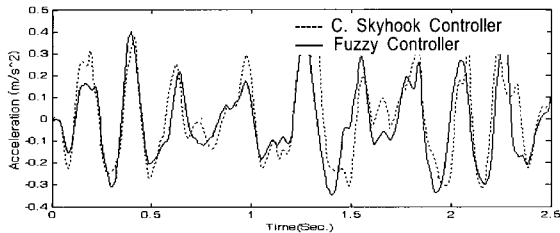
그림 7. 4Hz 정현파에 대한 70Kg 남성의 실험 결과.
Fig. 7. Experimental results of 70Kg man for 4Hz sinusoidal vibration.

Fig. 4은 불규칙 외란에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 4(a)에 나타난 운전자 머리에서의 가속도에 대해 SEAT 값을 구해보면 연속 스카이훅 제어기를 사용했을 경우 61.2%, 퍼지 제어기를 사용했을 경우 56.7%가 나타났다. Fig. 4(c)는 Fig. 4(a)에서 보인 가속도 신호를 주파수 별로 분석한 PSD (Power Spectral Density)를 나타내는데, 1~2Hz에서는 연속 스카이훅 제어기를 사용했을 때에 비해 성능이 다소 떨어지지만 사람이 가장 피로감을 느끼는 4~8Hz 주파수 대역에서는 성능이 향상되었음을 알 수 있다.

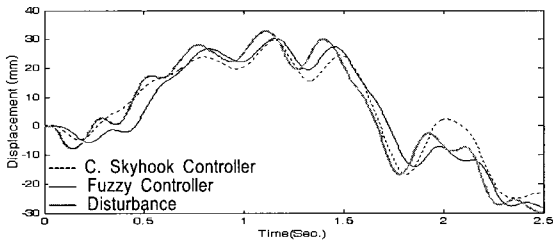
Fig. 5는 4Hz의 사인과 진동에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 5(a)는 퍼지 제어를 사용했을 때 연속 스카이훅 제어를 사용했을 때에 비하여 운전자가 느끼는 가속도가 감소하였음을 나타낸다. 각각에 대해 SEAT 값을 구해본 결과 연속 스카이훅 제어기를 사용했을 경우 51.5%, 퍼지 제어기를 사용했을 경우 47.8%를 나타냈다.

IV. 실험결과 및 분석

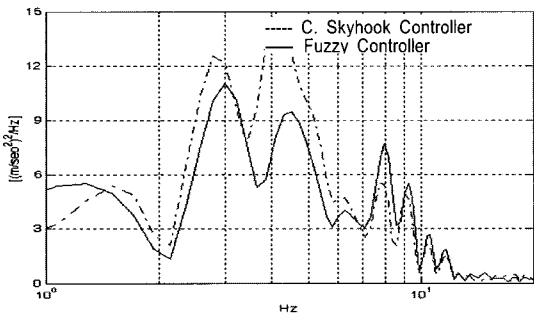
본 연구에 사용된 의자 서스펜션 시스템은 Fig. 6과 같이 두 멤버가 서로 엇갈려 운동하며 50mm의 수직운동을 보장하는 일반적인 가위형태이다. 스프링과 자기유변유체 댐퍼가 각 프레임에 대해 수직으로 장착되었고 위치정보를 획득하기 위하여 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)가 장착되었다.



(a) Acceleration of the driver's head



(b) Vertical displacement of the seat



(c) Power spectral density of head acceleration

그림 8. 불규칙 입력에 대한 70Kg 남성의 실험결과.

Fig. 8. Experimental results of 70Kg man for random vibration.

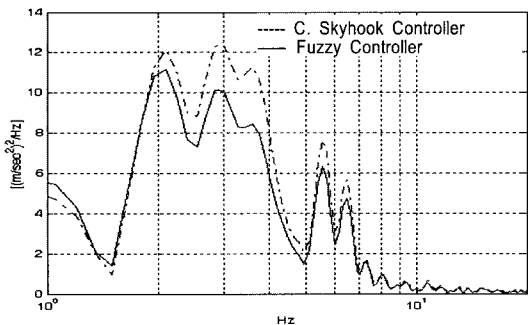


그림 9. 불규칙 입력에 대한 42Kg 여성의 머리가속도에 대한 주파수 분석결과.

Fig. 9. PSD for the acceleration on the head of 42Kg woman for random vibration.

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 스카이크 제어기의 이상적 감쇠계수 C_{SKY} 를 실험을 반복하여 튜닝한 다음 퍼지 제어기와 성능을 비교평가 하였다.

Fig. 7은 70Kg 남성 실험자의 4Hz 사인파 진동에 대한 실험결과를 보여주며 Fig. 7(a)는 퍼지 제어를 사용했을 때 연속 스카이크 제어를 사용했을 때에 비하여 운전자 머리부분의 가속도가 감소한 것을 보여준다. 특히 연속 스카이크 제어를 사용했을 때 나타났던 가속도의 피크가 퍼지 제어를 사용했을 때 사라졌다. 각각에 대한 SEAT 값을 구한 결과 연속 스카이크 제어를 사용했을 때 61.3%, 퍼지 제어를 사용했을 때 57.5%가 평가되었다.

Fig. 8은 70Kg 남성의 불규칙 진동에 대한 실험결과를 보여준다. 낮은 주파수 영역에서 퍼지 제어기가 연속 스카이크 제어기에 비하여 성능이 다소 떨어지지만 이외의 영역에서는 성능향상을 보였다. Fig. 9는 불규칙 진동에 대한 42Kg 여성 실험자의 PSD분석 결과를 보여준다. 남성 실험자와 마찬가지로 1~2Hz의 진동에서는 퍼지 제어가 연속 스카이크 제어에 비해 성능이 향상되지 않았지만 4~8Hz의 영역에서는 성능향상을 보였다.

V. 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 스카이크 제어를 사용했을 때에 비해 운전자 머리부분에서의 가속도의 크기와 SEAT값이 우수하였다.

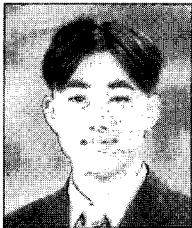
실험실 내에서 피실험자와 함께 이루어진 실제실험 결과, 퍼지 제어가 연속 스카이크 제어에 비해 1~2Hz의 낮은 주파수 영역에서 성능이 향상되지 않았지만 운전자에게 민감한 4~8Hz의 주파수 영역에서 성능이 향상되었다. 특히 4Hz 사인파 진동 실험에서 연속 스카이크 제어를 사용한 의자 서스펜션에서 나타났던 가속도의 피크가 퍼지 제어를 사용했을 때 사라지는 것을 확인하였다.

본 연구를 통하여 의자의 속도와 더불어 머리 가속도를 의자 서스펜션 시스템의 제어에 입력신호로 활용함으로써 승차감을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 운전자가 느끼는 진동이 크지 않은 일반 승용차에 비해 진동이 심하고 그에 대한 범용규제가 강한 중장비 등에서 본 연구 결과가 유용할 것으로 기대된다. 향후 보다 저렴하고 간편한 방법으로

머리 가속도를 측정할 수 있도록 하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

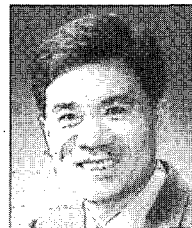
참고문헌

- [1] K. Kim and D. Jeon, "Vibration suppression in an MR fluid damper suspension system," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 10, Oct, 1999.
- [2] C. Park and D. Jeon, "Semiactive vibration control of a smart seat with an MR fluid damper considering its time delay," *Proc. of the 8th International Conf. on ER and MR Fluids*, pp. 243-248, 2001.
- [3] Y. Lee and D. Jeon, "A study on the vibration attenuation of a driver's seat using an MR fluid damper," *Proc. of the 8th International Conference on ER and MR Fluids*, pp. 70-76, 2001.
- [4] C. Nicolas, J. Landaluze, E. Castrillo, M. Gaston and R. Reyero, "Application of fuzzy logic control to the design of semi-active suspension systems," *IEEE Trans. of Sys. Man. Cybern.*, pp. 987-993, 1997.
- [5] B. Ahn and D. Jeon, "A study on the vibration reduction of a driver seat controlling and MR fluid damper," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 10, 2002.
- [6] C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller, part I and II," *IEEE Trans. Sys. Man Cybern.*, pp. 404-434, 1990.
- [7] M. Griffin, *Handbook of Human Vibration*, Academic press, London, 1996.
- [8] Y. Wan and J. Schimmels, "Optimal seat suspension design based on minimum simulated subjective response," *Journal of Biomechanical Engineering*, pp. 409-416, 1997.
- [9] Y. Lee and D. Jeon, "The comparison of properties between ER and MR fluids using a rotational viscometer," *The Korean Journal of Rheology*, vol. 11, 1999.



공경철

2004년 서강대학교 기계공학과, 물리학
과(공학사, 이학사). 2004년~현재 서강
대학교 기계공학과 석사과정. 관심분야
는 지능형 외골격 보행보조기, MR유체
응용 등.



전도영

1984년 서울대학교 기계공학과(공학사).
1986년~1991년 University of California,
Berkeley 기계공학과(공학석사, 공학박
사). 1992년~1994년 University of Miami
조교수. 1994년~현재 서강대학교 기계
공학과 교수. 관심분야는 지능형 외골
격 보행보조기, 지능형 로봇 시스템, 고속 고정밀 서보제어,
MR 유체응용 등.