



工學碩士 學位論文

회전식 MR 댐퍼를 이용한 차량용 SEAT 제어기설계에 관한 연구



制御計測工學科

金 鉉 運

工學碩士 學位論文

회전식 MR 댐퍼를 이용한 차량용 SEAT 제어기설계에 관한 연구



2008年 12月

釜慶大學校 産業大學院

制御計測工學科

金 鉉 運

이 論文을 金鉉運의 工學碩士 學位論文으로 認准함



목 차

I. 서 론1
I-1 연구 배경1
I-2 연구 목적3
Ⅱ. 본 론4
Ⅱ-1 MR 유체의 특성4
Ⅱ-2 회전식 MR 댐퍼의 구조
Ⅱ-2-1 기본 형상과 부품의 명칭10
Ⅱ-2-2 각 부품의 재질과 설계변수11
Ⅱ-2-3 회전식 MR 댐퍼의 토크12
Ⅱ-3 운전석 모델
Ⅱ-3-1 운전석 모델링16
Ⅱ-4 제어기 설계
II-4-1 Sky-hook 제어
Ⅱ-4-2 Sky-hook 제어기 설계31
Ⅱ-5 실험장치 구성 및 실험 결과33
Ⅱ-5-1 실험장치 구성33
Ⅱ-5-2 실험 결과47
Ⅲ. 결 론

i

그림목차

그림 2.1 MR유체의 현상학적인 성질 그림 2.2 flow mode에서의 MR 유체 그림 2.3 direct shear mode에서의 MR 유체 그림 2.4 MR 댐퍼의 단면도와 각 부 명칭 NIVE 그림 2.5 로터리 MR 댐퍼의 설계변수 그림 2.6 수동형 운전석 Model 그림 2.7 반능동형 1/4 Car Model 그림 2.8 이상적인 Skyhook 구성 그림 2.9 반능동형 suspension 그림 2.10(a) 속도와 속도차에 따른 댐핑력 방향 그림 2.10(b) 속도와 속도차에 따른 댐핑력 방향 그림 2.11 sky-hook 이론에 따른 시트모델 평가 그림 2.12 기존의 댐퍼와 Skyhook 제어 댐퍼의 진동 전달 특성 비교

- 그림 2.13 실험 장비 Block Diagram
- 그림 2.14 SCA620 가속도 센서 회로
- 그림 2.15 SCA620 가속도 센서 설계도
- 그림 2.16 Rotary MR 댐퍼의 설계도
- 그림 2.17 Rotary MR 댐퍼의 Torque 곡선
- 그림 2.18 Analog Intergrator 회로
- 그림 2.19 Analog Intergrator의 주파수 반응
- 그림 2.20 Dspace MicroAutoBox 1401
- 그림 2.21 Dspace MicroAutoBox 1401의 Block Diagram
- 그림 2.22 Current Driver 회로
- 그림 2.23 가진된 진동에 대한 Seat 진동 특성 해석을 위한 구성도
- 그림 2.24 Sweep 가진 주파수에 대한 Seat 진동 특성 해석을 위한 MATLAB/Simulink 블록 선도
- 그림 2.25 가진된 Sweep 주파수에 대한 주파수 응답, 댐핑계수 500[Ns/m](노란 파형은 가진 주파수 파형, 보라색 파형은 Seat의 주파수 응답 파형)

- 그림 2.26 가진된 Sweep 주파수에 대한 주파수 응답, 댐핑계수 1,500[Ns/m](노란 파형은 가진 주파수 파형, 보라색 파형은 Seat의 주파수 응답 파형)
- 그림 2.27 가진된 Sweep 주파수에 대한 주파수 응답, 댐핑계수 2,000[Ns/m](노란 파형은 가진 주파수 파형, 보라색 파형은 Seat의 주파수 응답 파형)
- 그림 2.28 가진된 Sweep 주파수에 대한 주파수 응답, 댐핑계수 2,500[Ns/m](노란 파형은 가진 주파수 파형, 보라색 파형은 Seat의 주파수 응답 파형)
- 그림 2.29 가진된 Sweep 주파수에 대한 주파수 응답, 댐핑계수 4,000[Ns/m](노란 파형은 가진 주파수 파형, 보라색 파형은 Seat의 주파수 응답 파형)
- 그림 2.30 가진된 Sweep 주파수에 대한 주파수 응답, 댐핑계수 6,800[Ns/m](노란 파형은 가진 주파수 파형, 보라색 파형은 Seat의 주파수 응답 파형)
- 그림 2.31 가진된 Sweep 주파수에 대한 주파수 응답, 댐핑계수 14,700[Ns/m](노란 파형은 가진 주파수 파형, 보라색 파형은 Seat의 주파수 응답 파형)
- 그림 2.32 실험에 사용된 차량용 Seat 구조물(스프링-로터리 MR댐퍼 장착)

표 목 차

- 표 1 SCA620 Series의 전기적 특성
- 표 2 SCA620 가속도 센서 핀 연결

v

표 3. Rotary MR 댐퍼의 전기적 설계사항



A Study on the Design of Seat Controller Using Rotary MR Damper for a Commercial Vehicle

Hyun-Woon Kim

Department of Telematics Engineering Graduate School of Industry, Pukyong National University

Abstract

In this paper, We design a SEAT controller using spring and rotary MR(magnetorheological) damper for a semi-active seat suspension system. Then this paper considers vibration isolation charactistic of a seat suspension system applied a SEAT controller using rotary MR damper by performing vibration control.

Simulation and experimental results of a seat suspension system using rotary MR damper shows that vibration isolation is effective. On the basis of simulation and experimental results, this paper presents commercial service of a SEAT controller using rotary MR damper

I. 서 론

I.1 연구 배경

운전자들이 자동차 성능에 대한 기대치가 높아지면서 출력이나 스타일 외에 승차감에 대한 관심도가 높아지고 있다.[1] 차량의 승차감은 주행 시 노면의 요철변화에 의한 차량의 진동에 의하여 탑승자의 좌석을 통해 전달되는 느낌을 나타내는 척도로서 차량의 품질을 좌우하는 중요한 요소 중 하나이다. 특히 상용차 운전자는 장시간의 운행, 거친 도로 등 열악한 운전 환경으로 심한 진동이 운전자에게 직접 전달되어 피로에 의한 능률의 감퇴와 허리 디스크와 같은 질병을 초래할 수 있고 안전 운행에 악영향을 끼칠 수 있다. 따라서 진동 억제의 필요성이 절실히 요구된다.

버스나 트럭과 같은 대형 차량의 경우, 차체 현가장치에서 진동을 흡수하기에는 근본적인 한계가 있으므로 운전석에 부가적인 현가장치를 장착하고 이를 적절히 제어할 수 있는 제어기를 장착함으로서 승차감을 개선할 수 있다. 승차감을 개선키 위한 운전석 현가장치에는 수동형과 능동형, 반능동형 현가장치가 있는데 종래의 수동형 운전석 현가장치는 감쇠성능이 일정한 범위에서만 진동완화가 가능하도록 고정된 특성을 가지고 있어 다양한 진동 입력에 대한 에너지의 효율적인 분산에 한계를 갖게 된다.[2]

능동형 현가장치는 소비전력이 매우 크고, 액츄에이터와 외부 동력 장치에 의해 에너지가 공급되어야 하며 고가의 유압 부품 사용으로 인해 경제적이지 못하고 복잡한 시스템 구성으로 본격적으로 실용화 되지

못하고 있다. 반능동형 현가장치는 능동형 현가장치처럼 부가적인 에너지가 요구되지 않고 적은 동력만 필요하며 충분한 힘과 빠른 주파수 응답 특성을 제공할 수 있을 경우 능동형 현가장치와 유사한 진동 제어 성능을 갖고 있어 반능동형 현가장치에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 반능동형 현가장치를 제어하기 위해서 초기 Karnopp 은 스카이-훅 제어 법칙을 발전시켰다. 이러한 스카이-훅 제어법칙은 하드웨어 수행을 단순화하고 비용을 절약하기 위하여 많은 수의 단순화된 ON/Off 제어방법이 발전되었다.[1]

본 논문에서는 적은에너지 소비율로 높은 감쇠력을 발생하며 제어하기에 용이한 장점을 갖고 있는 MR(magnetorheological)댐퍼에 전류제어를 함으로써, 노면으로부터 전달되는 진동 전달률을 제어하여 운전석의 승차감 개선을 모색하고자 한다.

Ot J

I.2 연구 목적

본 논문은 스프링과 로타리 MR(magnetorheological) 댐퍼로 구성된 현가식 운전석을 위한 SEAT 제어기를 제안하고, 진동 제어를 수행하여 회전식 MR 댐퍼를 이용한 SEAT 제어기가 적용된 현가식 운전석의 제진 특성을 고찰한다.

회전식 MR 댐퍼는 현가식 운전석의 크로스 링크 중심축의 위치에 조립되기 때문에 비틀림 강성이 선형댐퍼를 장착했을 때보다 작다. 또한 전류가 회전식 MR 댐퍼에 인가 되지 않았을 때 토크가 거의 발행 하지 않기 때문에 스카이훅 제어이론에서 상부속도와 상대속도의 부호가 반대일 때 제어 토크를 거의 '0'으로 구현할 수 있다. 즉, 이상적인 스카이훅 제어를 할 수 있다.[3]

현가식 운전석에 회전식 MR 댐퍼가 장착된 대한 제어결과, 진동절연이 시뮬레이션을 통해 우수함을 보인다. 이러한 결과를 바탕으로 회전식 MR 댐퍼를 이용한 SEAT 제어기의 제진 성능이 우수함을 보이는 것이 이 논문의 목적이다. ot u

Н

Ⅱ. 본 론

Ⅱ-1 MR 유체의 특성

MR유체란 낮은 투자율(permeability)의 용매에 1~10µm 크기의 상자성 입자를 분산시킨 안정한 비콜로이드 용액을 말하며, 유체에 자기장이 가해짐에 따라 유체의 항복 저단 응력이 변화되는 특성을 가지고 있다. MR유체는 자기장이 인가되지 않았을 때에는 용매내에 분산된 입자들이 자유로이 운동하는 뉴토니안(Newtonian) 유체의 거동을 나타내지만, 자기장이 인가되었을 때에는 유체내에 분산된 입자가 체인형의 구조를 형성하여 유체가 항복 응력을 갖는 빙햄(Bingham) 유체의 거동을 나타내게 된다. 그림 2.1에 이러한 현상을 나타내었다.

최근들어 가제어성 유체에 대한 관심이 고조되면서 이에 대한 연구가 진행되고 활발히 이런 가제어성 있으며, 유체에는 MR(magnetorheological) 유체외에도 ER(electrorheological) 유체가 있다. ER유체는 1947년 Winslow에 의해 처음으로 발표된 이후 1980년대 반능동형 댐퍼에 대한 연구가 활발히 진행되면서 ER유체의 거동은 위에서 언급한 MR유체의 거동에서 자기장 대신에 전기장이 인가된다는 것만을 제외하고는 같은 특성의 거동을 나타낸다. ER유체는 반응속도가 빠르고 시스템의 안정성이 보장되며 소비전력이 낮다는 장점을 가지고 있는 반면에 운용시 유입되는 불순물에 매우 최약하고 최대 항복응력이 3kPa정도이며 고전압 공급장치가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 그러므로 최근들어 ER유체가 가지고 있는 장점을 그래도 유지하면서 단점을 보완한 MR유체가 발표되어 미국과 일본을 중심으로 활발하게

연구되어 지고 있다.

MR유체는 유체내의 불순물에 둔감하며 최대항복응력이 80kPa 이상이므로 보다 큰 감쇠력이 발생되고 고전압 장치가 필요없는 등, ER 유체가 가지고 있는 단점을 크게 보완할 수 있으므로 향후 보다 많은 분야에 활용되어 질 것으로 예상된다.[4]



그리고 MR 유체는 항복 강도를 가지는 빙햄 고체로써 모델 되어진다. 이 모델에 대해서 유체 유동은 식 (1)과 (2)로 나타내어지는 빙햄 방정식에 의해서 지배된다.

τ	$=\tau_{y}(h)+\eta\gamma$
τ	$> \tau_v \cdots \cdots$

식 (1)과 (2)에서 유동응력,,자기장이 가해졌을 때의 항복응력, 자계강도(magnetic field intensity), 유동 전단률(fluid shear rate) 그리고 점성을 나타낸다. 유체의 항복 응력(전 항복 상태)아래에서 유체는 점단성 거동을 한다. 이 점탄성 거동은 식 (3)에 의해서 표현되어 진다.

MR 유체를 사용한 대부분의 장치들은 유동모드(flow mode) 장치와 전단모드(direct shear mode)장치로 분류된다. 유동모드와 전단모드는 아래와 같이 설명할 수 있다.

유동모드에 사용된 MR 유체 장치의 압력 변화는 식 (4)에 나타난다. 여기서 압력변화 점성요소와 자기장에 의해 발생된 항복응력 요소의 합으로 가정된다.

 $\Delta P = \Delta P_{\eta} + \Delta P_{\tau} = \frac{12\eta QL}{g^3 \omega} + \frac{c\tau_y L}{g} \qquad (4)$

식 (4)에서 Q 는 MR 유체 유동에 의한 압력을 나타내고, L.g 그리고 w 는 그림 2.2 에 보이는 것처럼 각각 고정된 자기 폴(magnetic poles) 사이의 길이, 유체 간격, 그리고 유동 오리피스의 너비를 각각 나타낸다.



있다.

하나의 극판(pole plate)이 다른 극판에 상대운동을 하고 유체 간격에 평행하게 움질일 때 두 극판사이에 힘이 발생한다. 발생된 총 힘은 점성 전단력 요소와 자기장에 의해 발생된 전단력 요소의 합으로 가정된다. 식 (5)에서 F 는 두 극판 사이에 발생된 힘을 나타내고, Fn 은 점성 전단력, Ft 는 자기장에 의해 발생된 전단력, A 는 A=LW 로 정의된 극판의 단면적을 나타낸다.



식 (6)에서 V 는 요구되는 제어 가능한 기계적인 에너지 손실의 단계에서 원하는 제어비를 얻기 위해서 필요한 최소 활성 유체 체적이라고 간주될 수 있다. 이 체적은 자기장에 노출된 MR 유체의 양을 나타낸다. 유동모드에 대해서 식 (6)의 파라미터들은 식 (7)로 계산될 수 있다.



Ⅱ-2 회전식 MR 댐퍼의 구조

Ⅱ-2-1 기본 형상과 부품의 명칭

본 연구에서 초기에 고려된 단일 디스크를 가지는 로터리 MR 댐퍼의 단면도와 각 부품의 명칭은 그림 2.4에 나타내었으며, 설계의 편의를 위해 단순화된 형상을 고려한다.



그림. 2.4 MR 댐퍼의 단면도와 각 부 명칭

로터리 MR 댐퍼의 토크는 플럭스 가이드(flux guide)와 디스크(disk) 사이의 상대 회전운동으로 인하여 발생하며, MR 유체의 항복응력 크기에 따라 토크가 변화한다. MR 유체의 항복응력은 코일에서 발생한 자속이 플럭스 가이드를 통해 MR 유체로 유도되는 자계강도의 세기를 통해 조절할 수 있다.

로터(rotor)와 플럭스 가이드는 베어링(bearing)으로 결합되어 로터가 자유롭게 회전운동을 할 수 있으며, 서포터(supporter)는 디스크의 위치와 MR 유체의 공극을 일정하게 유지하기 위해 로터와 결합된다.

Ⅱ-2-2 각 부품의 재질과 설계변수

그림 2.5에 로터리 MR 댐퍼를 구성하는 부품의 재질을 나타내었다. 자속이 통과하는 플럭스 가이드와 디스크는 강자성체(ferromagnetic material)이며. 않는 자속이 통과하지 서포터와 로터는 상자성체(paramagnetic material)로 상대 투자율이 1보다 크지만 1에 매우 가까운 값을 갖는다. 코일은 구리(copper)로서 상대 투자율이 1보다 작지만 1에 매우 가까운 값을 가지고 있다. 강자성체는 투자율(permeability)이 상수가 아니고, 자계강도에 의존하기 때문에 비선형 특성을 나타낸다. 또한 자속밀도와 자계강도의 관계가 닫힌 형태의 곡선으로서 이력곡선(hysteresis curve)을 나타낸다. 강자성체의 상대투자율(relative permeability)이 높을수록 로터리 MR 댐퍼의 체적을 줄일 수 있다.

그림 2.5는 로터리 MR 댐퍼의 주요 설계변수를 나타내었다. 제약된 공간에서 MR 유체로 자속을 최대한 전달시키기 위해 각 설계변수들의 균형이 필요하다.



그림 2.5에 표기한 설계변수에서 γ_i 는 회전중심으로부터 MR 유체가 노출되기 전까지의 반경, R_i 는 플럭스 가이드의 반경방향 길이, L은 로터리 MR 댐퍼의 목이다. t_a 는 MR 유체가 자기장에 노출되는 길이, t_b 는 반경방향으로 자속이 통과하는 폭, t_c 는 축방향으로 자속이 통과하는 면적의 폭, h_c 는 코일의 높이, ω_c 는 코일의 폭이다.

Ⅱ-2-3 로터리 MR 댐퍼의 토크

그림 2.5를 참조하여 MR 유체의 항복응력에 지배를 받는 디스크 옆면에 미소면적 *dA* 를 고려하면 전단응력에 의해 미소면적에서 발생하는 힘은 식 (9)와 같다. $dF = \tau dA \cdots \cdots \cdots \cdots (9)$

식 (9)에 상응하는 미소토크는 식 (10)과 같다.

여기서, r은 미속면적 dA에 대한 회전 중심으로부터의 거리이다. 식(10)의 미소면적 dA를 극좌표로 변환하면 식 (11)과 같다.



식(12)는 각 디스크 면 위의 MR 유체의 항복응력에 의한 토크이다. 그러므로 양면에서 항복응력이 발생하는 단일 디스크형 로터리 MR 댐퍼에서의 총 토크는 식 (13)과 같다.

축대칭 문제에 있어서 식 (13)은 식 (14)와 같이 간략화 될 수 있다.

토크에 대한 식 (14)에서 r_i와 t_a는 로터리 MR 댐퍼의 설계변수이고, τ 는 τ=τ_y+τ_μ에 의해 정의되며 식 (14)에 대입하여 정리하면 식 (15)가 유도된다.



두께이다. 식 (16)을 식 (15)에 대입하면 토크에 대한 식 (17)을 유도할 수 있다.

선속도는 v=@r의 관계에 따라 각속도에 의해 대체될 수 있고, 식 (18)과 같이 유도 된다.

식 (18)은 자계장도 *H*와 디스크의 각속도 ω의 함수로서 토크를 표현하고 있다. 다른 모든 값들은 MR 댐퍼의 설계변수 (*r_i*,*t_a*,*g*)와 MR 유체 (κ,β,μ) 의 특성으로 알려져 있다. 또한, 식 (18)은 점성과 자기장에 의한 두 토크 *T_μ*와 *T_r*로 나눠질 수 있다. 식 (19)는 점성에 의한 토크이며, 식 (20)은 자기장에 의한 토크이다.

$$T_{\mu} = 4\pi \int_{r_{i}}^{r_{i}+t_{a}} \mu \frac{\omega r}{g} r^{2} dr \dots (19)$$
$$T_{\tau} = 4\pi \int_{r_{i}}^{r_{i}+t_{a}} \kappa H^{\beta} r^{2} dr \dots (20)$$
$$(20)$$

식 (18)에서 μ,ω, 그리고 g 큰 적문면수 r 에 폭립이기 때문에 적 (21)을 유도할 수 있다.

식 (20)에서 H를 상수로 가정하면, 식 (22)을 얻을 수 있다.[5]

Ⅱ-3 운전석 모델

Ⅱ-3-1 운전석 모델링

차량의 모델을 구성하는데 있어서 1/4 Car, 1/2 Car, Full Car 등의 모델 구성이 가능하다. Full Car는 전후 좌우의 모든 부분의 시스템을 모델링 함으로 승차감에 직접적인 영향을 주는 히브(Heave), 주행안전성의 요인의 하나인 피치(Pitch), 롤(Rol1) 등을 평가할 수 있다. 여기서 히브(Heave)는 차량이 위, 아래로 진동하는 것을 나타내며, 피치(Pitch)는 차량이 앞, 뒤로 흔들리는 것, 롤(Rol1)은 차량이 좌우로 흔들리는 것을 나타낸다. 그리고, 1/2 Car(Half-Car)는 히브(Heave)와 피치(Pitch) 또는 히브(Heave)와 롤(Rol1)을 평가할 수 있다.

여기서는 승차감에만 영향을 주는 히브(Heave)만을 평가하기 위해 1/4 Car 모델링을 사용하였다.



그림 2.6 수동형 운전석 Model

1/4 Car 현가 시스템의 모델은 그림 2.6와 같이 2 자유도계로 구성되며,차체에 해당하는 스프링상 질량(Sprung mass) M_1 과 바퀴 및 차축부의 스프링 하 질량(Unspring mass) M_2 사이에 현가 스프링과 감쇠력 가변 댐퍼로 연결되어 있다. 타이어는 강성 계수 K_i 를 갖는 감쇠계수가 무시된 선형 스프링 요소로서 모델링 한다.

Ⅱ-3-1-1 단순화한 수동형 운전석 모델링



우선, 위 그림과 같은 수동형 현가 시스템에 대한 수학적 모델은 식 (24)과 같다.

$$\begin{cases} M_1 \overset{\circ}{Z}_s + C_s (\overset{\circ}{Z}_s - \overset{\circ}{Z}_u) + K_s (Z_s - Z_u) = 0 \\ M_2 \overset{\circ}{Z}_u - C_s (\overset{\circ}{Z}_s - \overset{\circ}{Z}_u) - K_s (Z_s - Z_u) + K_t (Z_u - Z_t) = 0 \end{cases} \dots \dots \dots \dots (24)$$

식(24)를 M_1 , M_2 으로 정리하면,

식 (25)을 다음과 같이 식(26)로 치환한다.



식 (27)의 모델링 식을 사용하여, 1/4 Car 현가 시스템의 운동 방정식을 행렬 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \cdot \\ x_1 \\ \cdot \\ x_2 \\ \cdot \\ x_3 \\ \cdot \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_s}{M_1} & -\frac{C_s}{M_1} & \frac{K_s}{M_1} & \frac{C_s}{M_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_s}{M_2} & \frac{C_s}{M_2} & -\frac{(K_s - K_t)}{M_2} & -\frac{C_s}{M_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_t \end{pmatrix} Z_t \dots \dots (28)$$

위 모델링에서 보듯이, 수동형 현가 시스템은 하나로 고정된 감쇠 계수를 갖기 때문에, 최적의 승차감과 주행 안정성을 얻기 위해서는 수동형 현가 시스템 중 최적의 감쇠 계수를 구해야 한다.

Ⅱ-3-1-2 단순화한 반능동형 운전석 모델링

여기서는, 차축질량 M_2 과 타이어의 탄성 계수 K_t 를 제외한 좀 더 간략화된 시스템을 구성하고, 모델링을 하였다. 그리고, 수동형과는 달리 가변 댐퍼를 사용하여 제어하게 됨으로써, 로드 입력에 대해 차체에 전달되는 힘을 줄일 수 있다. 그림 2.7는 간략화한 반능동형 1/4 Car 모델을 나타내 주고 있다. 그림 2.6의 M_2 와 K_t 가 생략되고 스프링상 질량 M_1 만이 고려되고 있음을 알 수 있다.



여기서,
$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$
이다.

우선, 위 그림과 같은 수동형 현가 시스템에 대한 수학적 모델은 다음 식 (30)과 같다.

위 식 (30)을 Z_s에 대해 정리하면,



식 (32)과 같이 정의한 상태 변수들을 사용하면 식 (31)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

위 식 (33)로 주어진, 1/4 Car 현가 시스템의 상태 방정식을 행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.



Ⅱ-4 제어기 설계

Ⅱ-4-1 sky-hook 제어

그림 2.8와 같이 가상의 관성 기준(inertial reference)과 질량에 댐퍼를 장착한다. 이 댐퍼를 스카이-훅 댐퍼라고 한다. 그러면 질량의 절대 속도인 x에만 관계되는 감쇠력이 발생된다.

하지만 이상적인 스카이-훅 댐퍼를 실제 시스템에 적용할 수가 없다. 그래서 그림 2.9과 같은 가변 댐퍼를 가져와 질량사이에 장착하고 댐핑계수 c값을 식(35)과 같이 변화해서 스카이-훅 댐퍼와 같은 감쇠력을 발생시킬 수 있다. 이것이 스카이-훅 제어이다. 그림 3.1의 스카이-훅 댐퍼에서 발생하는 감쇠력은 다음과 같다.



그림 2.8 이상적인 Skyhook 구성

그림 2.9의 가변 댐퍼에서 발생하는 감쇠력은 다음과 같다.



그림 2.10(a)(b)에서는 절대속도 x와 상대속도 (x-y)의 부호에 따른

감쇠력의 방향을 나타내었다. 그림 2.10(a)과 같이 절대속도 x 와 상대속도 (x-y) 의 부호가 같으면 같은 방향의 감쇠력이 작용한다. 그러나 그림 2.10(b)와 같이 절대속도 x 와 상대속도 (x-y) 의 부호가 반대이면 감쇠력도 반대방향으로 나타나게 된다. 이 경우에는 스카이-훅 댐퍼의 감쇠력과 같게 하기 위해 사용되어진 가변댐퍼에서 같은 크기의 감쇠력은 발생하게 할 수 있으나 같은 방향의 감쇠력을 발생시키는 것은 불가능하게된다. 따라서 이 경우의 가변댐퍼에서의 감쇠력은 스카이-훅 댐퍼의 감쇠력과 가장 가깝게 하기 위해 감쇠력을 0으로 한다. 이것을 다음의 식과 같이 정리할 수 있다.

 $x \cdot (x-y) \ge 0$ $F_{SA} = c_{sky} \cdot x$

ot il



그림 2.10(a) 속도와 속도차에 따른 댐핑력 방향



그림 2.10(b) 속도와 속도차에 따른 댐핑력 방향

그러나 실제 차량에 장착된 댐퍼의 감쇠력이 0이 되는 것은 어렵다. 그래서 식(39)를 다음과 같이 수정하였다.

$$F_{SA} = c_{sky} \cdot x \qquad x \cdot (x - y) \ge 0$$

$$F_{SA} = \frac{1}{2} c_{sky} \cdot x \qquad x \cdot (x - y) < 0 \qquad (40)$$

식(37)과 식(40)을 등가 댐핑계수를 나타낸 식과 정리하면,

이를 다시 기저 가진 $y(t) = Y \sin \omega t$ 를 대입하여 다시 x 에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

 mx+c_{sky} x+k_{eq}x = k_{eq}Y sin ωt
 (42)

 즉, 질량에 기저 가진으로 인해 발생된 힘들 중에 댐퍼에 의해 발생된

 힘
 c_{sky}ωY sin ωt

 가 사라진다.
 그러므로

 그림
 2.11와

 같이
 1자유도

 모델에서 질량에 가진을 받는 시스템으로 등가할 수 있다.



그림 2.12은 일반적인 1자유도 모델의 진폭전달율과 스카이-훅 제어를 사용한 1자유도 모델의 진폭전달율을 비교하여 나타내었다. 두 시스템에서 감쇠율 (가 작을 때 공진주파수보다 큰 입력에 대해 두 시스템의 응답은 모두 진동절연이 되고 있다. 하지만, 공진주파수 근처에서 입력에 대한 큰 진폭전달율은 바람직하지 못한 결과를 보인다. 이를 개선하기 위해 감쇠계수 (을 크게 하면 일반적인 시스템은 공진주파수보다 큰 주파수영역에서의 진동 절연이 나빠지게 된다.



그러나, 스카이-훅 제어를 적용한 시스템은 공진주파수의 진동절연을 위하여 감쇠율 ζ 를 크게 하여도 공진주파수보다 큰 주파수영역에서의 진동 절연도 같이 향상된다.[7]

Ⅱ-4-2 sky-hook 제어기 설계

앞서 설명한 것과 같이 스카이-훅 제어 알고리즘은 절대고정변위를 갖는 천정과 운전석 사이에 가상의 댐퍼를 설치하고 이때 발생하는 가상 댐퍼의 댐핑력을 요구 댐핑력으로 사용하는 것으로 구조가 간단하고 실현이 용이하다. 스카이훅 제어 알고리즘의 요구 댐핑력은 운전석의 수직변위와 관련하여 다음과 같이 정의한다.

여기서 C_g 는 스카이-훅 제어 알고리즘의 제어게인값을 나타내며 물리적으로는 댐핑계수를 나타내고, q_1 는 운전석 바닥면의 수직방향의 속도를 나타낸다. 운전석용 MR댐퍼는 반능동형이므로 식(43)으로부터 얻어진 제어입력은 다음과 같은 반능동 조건을 만족해야 한다.

.

식(43)와 식(44)으로부터 운전석용 MR댐퍼에 부하되는 제어자기장을 다음과 같이 얻을 수 있다.[8]



Ⅱ-5 실험장치 구성 및 실험 결과

Ⅱ-5-1 실험장치 구성

그림 2.13는 실험 장비의 Block Diagram을 보여준다. 실험 장비는 크게 가속도 센서, Analog Intergrator, Dspace, Current Driver로 구성되어 있다. 그림에서 보듯이 2개의 가속도 센서에서는 차체와 차축의 가속도 신호를 측정하고 측정된 신호는 MATLAB/SIMULINK에서 구성한 제어블록을 Dspace 장비인 DS11103보드를 이용하여 실시간으로 제어한다. 그리고 Current Driver는 MR 댐퍼를 적절히 동작시키기 위한 전류를 공급하게 된다. 그럼 각 실험 장비에 대해 구체적으로 살펴보자.



Driver

그림 2.13 실험 장비 Block Diagram

Ⅱ-5-1-1 가속도 센서

가속도 센서는 물체에 작용하는 가속력, 진동력 및 충격력등의 동적인 힘을 순간적으로 감지할 수 있으므로 자동차, 기차, 항공기 및 선박 등 운송기기와 FA(Factory Automation)관련 장비 등에 폭 넓게 활용할 수 있다.

특히,최근 자동차의 안정도에 관한 관심이 높아지면서 정면 충돌시 운전자와 승객을 보호하기 위한 안전장치로 에어백의 설치를 법규화 하면서 에어백(airbag)에 들어가는 핵심소자인 자동차용 가속도 센서에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 또한 자동차의 안정성, 신뢰성, 안락성, 편의성 향상을 위하여 가속도 센서는 전자식 엔진제어시스템, ABS(auto-lock braking system), 지능형 현가장치(smart suspension system), 조향 시스템(steering system), 자동잠금장치(auto-door lock system)등의 핵심부품으로서 사용되고 있다.

기계식 가속도 센서는 구조가 복잡하고 크고 무거우며 양산이 힘들어 신뢰성이 낮고 가격이 높아 그 활용이 제한된다. 반면에 실리콘 가속도 센서는 실리콘의 기계적 성질이 우수하고 기존에 확립된 반도체 집적회로 공정기술을 이용함으로써 신뢰성과 양산성이 우수하며, 소자의 소형화, 경량화 및 저가격화가 가능하다는 장점이 있다.

그럼 가속도 센서의 종류와 특징에 대해서 살펴보면, 첫번째 기계식 가속도 센서이다. 기계식 가속도 센서는 정지계를 기준으로 관성 가속도를 측정하는 형식으로, 질량에 작용하는 가속도에 의한 반력, 즉 관성력을 이용한다.

두번째로 실리콘 가속도 센서이다. 실리콘 가속도 센서는 크게 3가지 부분으로 나누어진다. 가속도 즉, 힘을 받아들이는 실리콘 미세 기계구조부와 힘을 전기적 신호로 바꾸어 주는 변환소자부, 정격출력을 만들어 주는 신호처리부로 구성되어 진다. 미세기계구조물 제작을 위한 마이크로 머시닝 기술은 집적회로 제조기술을 기반으로 하고 있으나, 공정자체가 반드시 일치하는 것은 아니다. 특히, 영점, 감도, 온도보상 및 자기진단회로가 센서부와 같이 단일 칩에 집적화 되는 On-chip 센서의 개발추세에 따라 기존의 Bipolar, CMOS, BiCOMS 공정기술과 마이크로 머시닝 기술의 호환성, 재현성 및 안정성을 유지하는 상호 보완적인 공정기술이 강조되고 있다. 양산을 위한 가장 중요한 기술은 실리콘 미세구조를 만드는 미세가공기술이며, 웨이퍼 단위에서 얼마나 균일하고 재현성 있는 실리콘 구조물을 제작할 수 있느냐 하는 것이 기술의 관건이라 할 수 있다.

변환소자부는 감지원리에 따라 압전형, 압저항형, 용량형 등으로 나눌 수 있다. 압전형은 ZnOrhk 같은 압전물질의 응력에 대한 전기 분극을 이용하며, DC가속도의 측정이 불가능한 단점이 있다. 압저항형은 확산에 의한 저항만 형성하면 되므로 다른 센서에 비하여 공정이 간단하며, 선형성 및 주파수 특성이 좋으며 DC가속도의 측정이 가능하다. 정전용량형은 미세구조부의 변위에 의한 정전용량변화를 측정하며, 감도가 높은 반면에 공정이 상대적으로 복잡하다. 주파수 변환 회로가 하나의 칩 내에 실장 되어야 하며, 선형성이 나쁜 단점이 있다.

지금까지 가속도 센서에 대한 기본적인 사항에 대해서 알아봤고 이제는 본 연구에서 사용된 가속도 센서에 대해 살펴보자.

본 연구에서는 "VTI TECHNOLOGIES"사의 SCA620 Series의 가속도 센서를 사용하였다. 이 가속도 센서는 매우 뛰어난 정밀도, 신뢰성 및 높은 온도에서도 안전성이 뛰어나다. 그리고 과부하나 충격에 대해 내구성이 좋다.

Parameter	Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
Supply Voltage	TION	4.75		5.25	V
Vdd	NATION	40	1		
Current	Vdd=5V:No load		2.0	4.0	mA
Consumption			1	1	
Operating				125	°C
Temperuture			19	2	
Resistive output	Vout to Vdd or Vss	-40	1	/	Kohm
load		1	$\langle \rangle$		
Capacitive load	Vout to Vdd or Vss	20	2	20	nF
Output noise	DC4kHz			5	mVrms

SCA620 Series의 전기적 특성은 표 1로 대신한다.

표 1 SCA620 Series의 전기적 특성

그림 2.14는 SCA620 Series의 회로도를 나타낸 것이고 표 2은 SCA620 Series 각 핀의 전기적 연결을 나타내었다. 그리고 그림 2.15에서는 SCA620 Series의 설계도를 나타내었다.



Pin #	Pin Name	Connection		
1	/	Open or Capacitively Connected to GND		
2		Open or Capacitively Connected to GND		
3		Open or Capacitively Connected to GND		
4	GND	Negative Supply Voltage(Vss)		
5		Open or Capacitively Connected to GND		
6	ST	Self-test control		
7	Vout	Sensor analog Output		
8	VDD	Positive Supply Voltage(VDD)		

표 2 SCA620 가속도 센서 핀 연결



그림 2.15 SCA620 가속도 센서 설계도

II-5-1-2 MR Damper

MR 댐퍼는 앞에서 언급했듯이 반능동형 운전석 모델링을 하기 위해서는 댐핑계수를 변화시킬 수 있는 가변형 댐퍼가 필요하다. 따라서 빠른 항복응답 때문에 더 넓은 주파수의 진동 영역에서도 충분하고 빠른 진동 감쇠 특성을 얻을 수 있는 Rotary MR 댐퍼를 사용하였다.

본 실험에서 Rotary MR 댐퍼는 자계내에서 매우 빠른 응답속도를 가지며, 엄격한 설계와 구조를 가지고 있어 내구성이 뛰어나다. 그림 2.16은 Rotary MR 댐퍼의 설계도이고, 전기적/기계적인 설계사항은 표 3과 표 4에 나타내었다. 그리고 그림 2.17은 Rotary MR 댐퍼의 전류에 따른 토크 곡선을 나타낸 것이다.





표 3. Rotary MR 댐퍼의 전기적 설계사항

Parameter	Condition
최대 신장 부하	=4448N(1000 POUNTS)
최대 동작 온도	=71°C(160°F)
한계 축전 온도	=-40°C TO 100°C(-40°F TO 212°F)

표 4 Rotary MR 댐퍼의 기계적인 설계사항



그림 2.17 Rotary MR 댐퍼의 Torque 곡선

II-5-1-3 Analog Intergrator

그림 2.18는 Analor Intergrator 회로를 보여준다. 다음과 같이 주어진 식에 의해 회로의 이송함수를 알 수 있다.

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{-sC_iR_i}{C_iC_fR_iR_fs^2 + (C_iR_i + C_fR_f)s + 1}$$

Op-Amp의 입력은 회로가 동작중 일 때 출력이 0 ~ 5Volt 범위내에서 유지되도록 DC offset을 추가하였다. 설계값은 다음고 같다.

 $C_{i} = 1\mu F$ $C_{f} = 0.1\mu F$ $R_{i} = 1M\Omega$ $R_{f} = 5.6M\Omega$

그리고 그림 2.19 처럼 Analog Intergrator 의 주파수 반응을 확인 할 수 있다. 그림 2.19 은 Intergrator 회로가 거의 -90°에 가까운 위상변화에 의해 1.5Hz 이상의 신호를 적분하는 동안 DC 성분을 차단함을 보여준다. 그리고 기울기는 -20dB/decade 에서 반응하고 0.8Hz 근처 주파수에서 위상변화는 -90°에 가깝고 이런 위상변화는 주로 1 ~ 4Hz 범위내에서 동작하는 Seat 제어기를 만족시킨다.





Ⅱ-5-1-4 Dspace 장비

본 실험에서 사용한 Dspace 장비는 MATLAB/SIMULINK에서 구성한 제어블록을 실시간으로 제어하는 역할을 한다. 이번 실험에 사용된 Dspace 보드는 MATLAB 환경을 지원하는 Dspace사의 MicroAutoBox 1401을 사용하였다. 그림 2.20은 Dspace MicroAutoBox 1401을, 그림 2.21는 MicroAutoBox 1401의 Block Diagram을 보여준다.



그림 2.20 Dspace MicroAutoBox 1401



그림 2.21 Dspace MicroAutoBox 1401의 Block Diagram

II-5-1-5 Current Driver

본 연구에서 사용한 Current Driver는 MR 댐퍼 공급전압에 비례하는 전류 i_0 를 공급한다. 그림 2.22 처럼 Current Driver 회로는 MR 댐퍼를 통해 흐르는 전류 양을 감지하는 0.25Ω 짜리 저항 R_f 를 사용한다.

저항을 통해 떨어진 전압은 op-amp로 피드백된다. 그리고 나서 op-amp는 MR 댐퍼를 통과하여 흐르는 전류를 조절하는 MOSFET에 출력 신호를 내보낸다. Current Driverdhk 필터의 종합적인 게인은 대략 5volt의 입력전압에 대해 1Amp의 출력을 나타낸다.



그림 2.22 Current Driver 회로

Ⅱ-5-2 실험 결과

이 장에서는 3 장에서 구성한 스프링과 로터리 MR 댐퍼가 장착된 차량용 Seat 하부로부터 인가되는 진동에 대하여 Seat 상부에서의 응답 특성을 시물레이션과 실험을 통하여 고찰하여 보았다.

그림 2.23 에서 나타난 바와 같이 코일 스프링과 로터리 MR 댐퍼로 이루어진 Seat 에 하부로부터 가진되는 진동의 주파수와 Seat 의 상부에 전달되는 진동의 주파수를 가속도 센서로 감지하여 Controller 에서 결정하게 되는 MR 댐퍼에 인가할 전류 값을 결정하기 위하여 다음과 같은 시물레이션을 실행하였다.



그림 2.23 가진된 진동에 대한 Seat 진동 특성 해석을 위한 구성도

시물레이션은 MATLAB/Simulink 를 사용하여 그림 2.24 와 같이 구성하였고, 질량(M)= 75[Kg], 스프링 상수(K) = 14,700[N/m], 댐핑계수(C) = 500[Ns/m]로 두었을 때 Seat 의 주파수 응답은 그림 2.25과 같이 된다.



그림 2.24 Sweep 가진 주파수에 대한 Seat 진동 특성 해석을 위한 MATLAB/Simulink 블록선도



이 그림에서 보는 바와 같이 가진 주파수가 1~3[Hz]의 저주파 대역에서는 오히려 증폭된 주파수 응답을 보이다가 3[Hz]이상의 가진 주파수에 대하여는 감쇠된 주파수 응답 특성을 보이고 있다.

그림 2.26 에서는 질량(M)= 75[Kg], 스프링 상수(K) = 14,700[N/m], 댐핑계수(C) = 1,500[Ns/m]로 두었을 때 Seat 의 주파수 응답을 시물레이션한 결과를 보여주고 있다. 가진 주파수가 1.5[Hz]이상의 가진 주파수에 대하여는 감쇠된 주파수 응답 특성을 보이고 있다.



그림 2.27 에서는 질량(M)= 75[Kg], 스프링 상수(K) = 14,700[N/m], 댐핑계수(C) = 2,000[Ns/m]로 두었을 때 Seat 의 주파수 응답을 시물레이션한 결과를 보여주고 있다. 가진 주파수가 1~3[Hz]의 저주파 대역에서는 오히려 증폭된 주파수 응답을 보이다가 3[Hz]이상의 가진 주파수에 대하여는 감쇠된 주파수 응답 특성을 보이고 있다.



그림 2.27 가진된 Sweep 주파수에 대한 주파수 응답, 댐핑계수 2,000[Ns/m](노란 파형은 가진 주파수 파형, 보라색 파형은 Seat 주파수 응답 파형)

그림 2.28 에서는 질량(M)= 75[Kg], 스프링 상수(K) = 14,700[N/m], 댐핑계수(C) = 2,500[Ns/m]로 두었을 때 Seat 의 주파수 응답을 시물레이션한 결과를 보여주고 있다. 1.5[Hz]이상의 가진 주파수에 대하여는 감쇠된 주파수 응답 특성을 보이고 있다.



그림 2.29 에서는 질량(M)= 75[Kg], 스프링 상수(K) = 14,700[N/m], 댐핑계수(C) = 4,000[Ns/m]로 두었을 때 Seat 의 주파수 응답을 시물레이션한 결과를 보여주고 있다. 1.5[Hz]이상의 가진 주파수에 대하여는 감쇠된 주파수 응답 특성을 보이고 있다.



그림 2.30 에서는 질량(M)= 75[Kg], 스프링 상수(K) = 14,700[N/m], 댐핑계수(C) = 6,800[Ns/m]로 두었을 때 Seat 의 주파수 응답을 시물레이션한 결과를 보여주고 있다. 1.5[Hz]이상의 가진 주파수에 대하여는 감쇠된 주파수 응답 특성을 보이고 있다.



그림 2.31 에서는 질량(M)= 75[Kg], 스프링 상수(K) = 14,700[N/m], 댐핑계수(C) = 14,700[Ns/m]로 두었을 때 Seat 의 주파수 응답을 시물레이션한 결과를 보여주고 있다. 1.5[Hz]이상의 가진 주파수에 대하여는 감쇠된 주파수 응답 특성을 보이고 있다.



시물레이션 결과(그림 2.23~2.31)로부터 나타난 바와 같이 가진 주파수에 따른 진동의 감쇠는 댐퍼의 댐핑계수에 따라 매우 민감하게 응답하는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과를 이용하여 MR 댐퍼에서 발생하게 될 댐핑계수와 전류와의 관계를 설정하게 된다. Seat 의 진동감쇠 실험은 먼저, Seat 하단의 가속도 센서로부터 읽게 되는 가진 주파수를 마이크로 프로세서로 판단하게 되며, Seat 상단의 가속도 센서값과 함께 Seat 의 상하운동 크기를 결정하여 스카이 훅 제어이론에 의하여 MR 댐퍼에 적절한 댐핑계수를 발생할 전류를 출력하게 된다.



본 실험에서 사동된 스프링-댐퍼가 장착된 Seat 의 구조물을 그림 2.32 과 같이 제작하였다.

그림 2.32(a) 측면 사진



그림 2.32(b) 윗면 사진

S

그림 2.32 실험에 사용된 차량용 Seat 구조물(스프링-로터리 MR 댐퍼

CH OL V

2

장착)

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 장시간 운전석에 앉아 있는 운전자에게 전달되는 진동을 효과적으로 개선하기 위하여 현가식 운전석에 회전식 MR 댐퍼를 이용하였고, 회전식 MR 댐퍼를 제어하기 위해 Sky-hook 제어 알고리즘을 사용해 SEAT 제어기를 제안하고 설계하였다.

설계한 회전식 MR 대퍼를 이용한 SEAT 제어기의 진동 저감 성능을 고찰하기 위하여 진동제어 시뮬레이션을 수행하였다. 진동 시뮬레이션 결과 회전식 MR 대퍼를 이용한 SEAT 제어기를 장착한 현가식 운전석의 진동 절연 성능이 우수함을 확인 할 수 있었다. 향후 다양한 설계변수 값에 대한 해석을 수행하여 최적화된 SEAT

제어기를 설계하여 현가식 운전석의 진동제어 실험을 수행할 계획이다.

A S H PI M

參考文獻

- [1] Performnce of a vehicle Seat/Chassis Suspension System Using a Magnetorheological Damper. O-Jae In, p.1 2003.
- [2] Ride Analysis of Driver's Seat with A Magneto-Rheological Damper. Young-Ki Yoon, p.3~4 2003.
- [3] Vibration control of Seat Suspension System Using Rotary Magnetorheological Damper. Dong-Kyu Kim, p.4 2007.
- [4] A semi-Active Seat Damper Using MR Fluids for a commercial Vehicle. Dong-Kyu Lee. P.4~5 2000.
- [5] Design and Performance Evaluation of Rotary MR Damper and Damper Driver. 백운경, 변기식, 이지웅. P.42~46 2008.
- [6] Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids. Mark R Jolly Jonathan W Bender, and J David Carlson. P.1~2
- [7] A Study on the Application of Fuzzy Controller for Automotive continuous Variable Damper. Sung-Bae Kwak. P.22~29 2003
- [8] Ride Analysis of Semi-Active Suspension with Sky-Hook Control. T.H. Kang, J.S. Lee, H.K. Jeong and Y.K. Baek. 한국동력기계공학회 2001 추계학술대회 논문집 pp.284

[9] Performance Characteristics of Seat Damper Using MR Fluid. Moo-Ho Nam. 한국공학기계학회지 제 9 권 5 호. pp.132. 2000



감사의 글

이 학위 논문이 있기까지 모든 면에서 자상한 지도와 보살핌을 주신 변기식 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 본 논문이 책으로 출판되기까지 아낌없는 충고와 조언을 주신 김남호 교수님과 김만고 교수님께도 깊이 감사드립니다.

사회생활과 학업을 병행하면서 짧고도 긴 2 년의 석사과정을 무사히 잘 마무리할 수 있게 많은 배려를 해주신 윤종호 부장님, 박용재 과장님, 김덕용 과장님, 박용각 과장님, 찬득이형 외 직장동료 여러분께 감사의 말을 전합니다.

항상 아낌없는 사랑과 용기를 주시고 제 삶의 원천인 부모님과 누나 그리고 항상 아들처럼 따뜻하게 잘 챙겨주시는 장모님과 사회생활은 물론 앞으로 인생을 살아가는데 있어 아낌없는 조언을 해주시는 장인어른께 감사드립니다.

마지막으로 이제 곧 결혼합니다. 2009 년 2 월 7 일 제 인생의 동반자가 될 사랑하는 경영이에게도 고마움을 전합니다. 경영아 사랑한다.

2009 년에는 하시고자 하는 일 다 성취하는 한 해가 되시길 바랍니다.

2008년 12월 김 현 운