

반능동 ER댐퍼의 스카이훅 제어

이육형*, 박명관**

Skyhook Control of a Semi-Active ER Damper

Yuk Hyung Lee*, Myeong Kwan Park**

ABSTRACT

In this paper, skyhook control of a semi-active ER(Electro-Rheological) damper is investigated. The strength of the ER damper is controlled by a high voltage power supply. This paper deals with a two-degree-of-freedom suspension using the damper with ERF for a quarter vehicle system. The control law for semi-active suspensions modeled in this study is developed using skyhook and Linear Quadratic Regulator(LQR) optimal control method. Computer simulation and experimental results show that the semi-active suspension with ERF damper has good performances of ride quality.

Key Words : Electro - Rheological Fluid(ER 유체), ER damper(ER 댐퍼), Skyhook Control(스카이훅 제어) Semi-Active Suspension(반능동 현가장치), Linear Quadratic Regulator(LQR)

1. 서론

최근의 급속한 산업 정보화로 인간에게 많은 편리함을 주고 있는 것 중 하나인 자동차는 현대인들의 필수품으로 자리잡고 있다. 그러므로 자동차가 주행시 운전자의 피로 및 안정성 확보차원에서 현가장치는 매우 중요하다. 현가장치는 일반적으로 새시 스프링, 댐퍼 및 타이어로 구성되고 그 기능은 차량의 무게를 지지하고, 노면의 불규칙성에 대한 진동을 차단하며, 바퀴의 노면 접지력을 유지하는등 중요한 역할을 한다. 현가장치는 제어입력에 따라 크게 수동 현가장치와 능동/반능동 현가장치로 구분된다. 종래의 대부분의 연구는 기존 오일 및 가스댐퍼를 이용한 제어법칙이며, 또한 기계적 장치로 이루어져 있기 때문에 그 구조가 매우 복잡

하고 작동시 마찰이나 마모 등으로 소음이 발생하게 되는 원인이 되기도 한다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 액체의 유동 특성이 외부 전기장 부하시 특성이 변화는 ER유체를 이용하여 새로운 개념의 ER댐퍼를 설계 및 제작하여 1/4 차량 모델을 이용하여 차량에서의 진동을 제어하고자 한다. ER댐퍼는 유로에 전극을 부가하기 때문에 댐퍼의 구조가 간단하고 응답속도가 빠르기 때문에 전기장 만으로 제어가 가능하다.

2. 서스펜션 모델

Fig. 1은 현가장치의 모델링을 위해 4분주 차량 2자유도 모델을 제시하였다. 반능동⁽⁶⁾ 현가 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

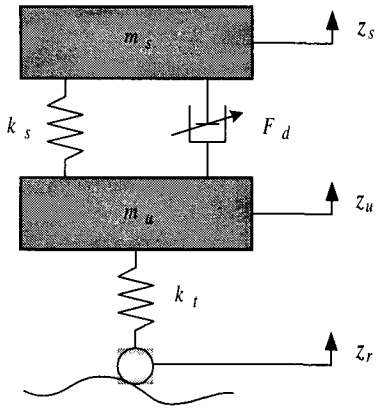


Fig. 1 1/4 Car Model

$$m_s \ddot{z}_s = -k_s(z_s - z_u) - F_d$$

$$m_u \ddot{z}_u = k_s(z_s - z_u) - k_t(z_u - z_r) + F_d \quad (1)$$

여기서, z_s 은 차체의 변위, z_u 은 차륜의 변위, z_r 은 지면으로부터 들어오는 입력 변위이고 F_d 는 ER 댐퍼 감쇠력이다. 시뮬레이션을 위한 파라미터 들은 Table 1과 같다.

Table 1 simulation parameter

parameter	value
sprung mass	200 kg
suspension stiffness	12,000 N/m
unsprung mass	33 kg
tire stiffness	160,000 N/m

2.1 ER댐퍼의 특성 및 제작

액체의 유동 특성이 외부전기장으로 인해 유체의 걸보기 점탄성이 변화하는 현상을ER(Electrorheological) 효과라고 하며, 그 와 같은 성질을 나타내는 유체를 ER유체라고 부른다⁽¹⁾. 일반적인 ER유체는 실리카등의 미립자를 절연유에 분산시킨 유체가 점성이 변화게 되는 입자계 ER유체이며, 전기장 부하시 입자간의 전기 분극 현상으로써 입자 자체가 사슬구조를 가지게 되고, 또한 전기장이 가해짐에 따라 유체의 전단응력이 변화되는 것으로 전기장 무

부하시에는 유체입자가 양극 또는 음극으로 자유로이 운동하는 뉴토니안(Newtonian)유체 상태이지만 전기장 부하시에는 유체 중에 분산된 입자가 체인형 구조를 형성하여 유체가 항복응력을 갖는 빙햄 유체⁽⁵⁾와 같이 거동하며 외관상 점성 등의 역학적 성질이 수 ms이내 빠른 응답과 가역적인 성질로 변한다. ER유체를 이용한 실험에서는 NIPPONSHOKU BAI의 유체를 사용하여 실험하였다. 유체의 점도는 25℃에서115mpa·s, 밀도는25℃에서 1.6g/cm³, 체적 탄성계수 8.3×10⁻⁴cc/ cc/℃이다. Table 2.에서는ER 가변댐퍼의 제작에 사용된 사양을 나타내었고, Fig. 2는 ER가변댐퍼의 구조를 나타내었다.

Table 2 Specification of the ERF Damper

No.	Components	Dimensions
①	Piston	∅27
②	Inner Cylinder	ID ∅27
③	Outer Cylinder	ID ∅32
④	Rod	∅13
⑤	Orifice Hole	∅2× 3EA

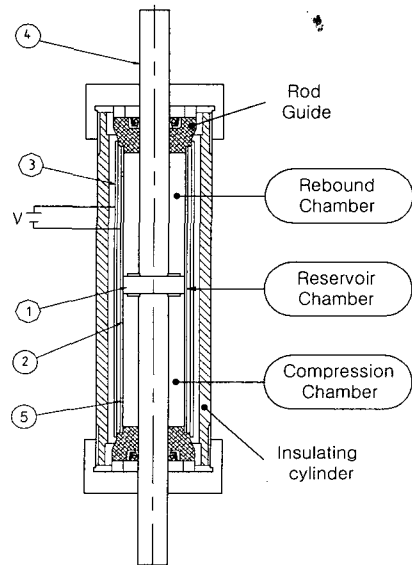


Fig. 2 Schematic of the ERF damper

제작된 ER댐퍼는 피스톤이 압축실로 이동하면 압축실의 유체는 하단부 오리피스를 통하여 저장실로 유입되어 유동하게 된다. 저장실의 유체는 다시 상단부의 오리피스를 통하여 인장실로 유입된다. 피스톤이 작동시 내경, 외경실린더 튜브로 구성된 전극에 고전압을 부하하면 저장실내 유동되는 유체는 전기장의 영향으로 항복응력이 발생하여 저장실 양단에 압력차가 생긴다. 이로인해 피스톤이 작동시 전기장만으로 감쇠력을 가변시킬 수 있다..

2.2 ER댐퍼 모델

ER댐퍼^(2,4)의 스트로크 속도와 감쇠력과와의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 여기에 나타난 반능동 ER댐퍼 측정 데이터 값으로서 제어범위가 1, 3사 분면에서 제어가 가능함을 알 수 있다. ER댐퍼 감쇠력 측정은 Fig. 4에 표시된 MTS사의 충격흡수기 전용시험장비인 MTS 850을 사용하였다. 측정방법은 먼저 ERF 댐퍼의 로드는 장치에 설치된 로드셀(load cell)에 고정하고 ER댐퍼의 몸체는 측정장비인 유압실린더에 설치된다. 측정장비에 설치된 ER댐퍼는 유압액츄에이터에 의하여 사인파형으로 ±30mm의 스트로크로 가진시키고 외경실린더에(-)의 전극을, 내경 실린더에(+)의 전극을 연결시켜 전기장을 0~3KV/mm의 범위에서 가변시키면서 감쇠력 측정을 하였다. 가진시 발생하는 데이터는 로드셀로부터 하중을 구한 후 Micro Console에 전해지면 인터페이스된 컴퓨터를 통해서 결과를 얻었다.

ER 댐퍼에 사용된 ER유체의 특성은 전압을 비인가시 뉴토니안 유체로, 전압인가시 빙햄 유체로 나타나게 된다. 결국 ER댐퍼의 감쇠력은 점성저항과 ER효과의 향으로 나타나게 된다. 감쇠력을 출력으로 하는 식을 전기장 비인가시 및 인가시를 모델화 하면 다음과 같다.

$$F_d = C_{min}(\dot{z}_s - \dot{z}_u)$$

$$F_d = C_{min}(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + sgn(\dot{z}_s - \dot{z}_u)C_{ER} \times V_d \quad (2)$$

여기서, C_{min} 은 전압 비인가시 값이며, 모델화한 ER 댐퍼 전압은 0KV에서 3KV의 범위에서 감쇠력이 발생한다.

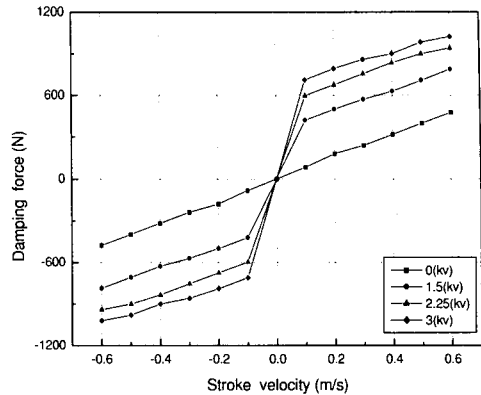


Fig. 3 Damping force of ER damper

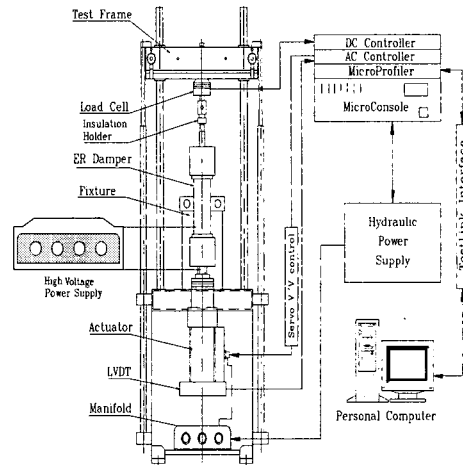


Fig. 4 ER damper test system

3. 제어기 설계

3.1 스카이훅 감쇠 제어기

능동/반능동 현가 장치에서 많이 쓰이는 스카이훅 모델은 Karnopp⁽⁷⁾에 의해서 제안되었으며, 최적 제어 이론에 근거하여 노면 외란에 의한 차체의 가속도를 줄이기 위하여 가상적인 기준면(reference frame)에 감쇠기를 설치하는 방법이다. 이 모델을 이용하여 ER 댐퍼에서 나오는 감쇠력을 전기장의 세기를 조절하여 제어한다. 가상적인 스카이 훅 모델 제어는 차체의 속도와 차륜의 속도가 같은 방향으로 움직일 때 스카이 훅 모델과 같은 감쇠력을 가지도록 실제 댐퍼에서의 감쇠력을 조절하는 방법이다. Fig. 5는 스카이 훅 모델을 표시한 것이다. 수

학적인 모델링은 다음과 같다.

$$F_{sky} = C_{sky} \cdot \dot{z}_s + C_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \quad (3)$$

스카이훅 이론에 의한 감쇠력을 구해 보면 다음과 같다. 실제적으로 차륜의 속도와 차체의 속도가 같은 방향으로 움직일 때 작용되어야 할 ER 댐퍼의 감쇠력은 다음과 같다.

$$F_d = C_{min}(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + \text{sgn}(\dot{z}_s - \dot{z}_u)C_{ER} \times V_d$$

$$F_d = F_{sky} = C_{sky} \dot{z}_s + C_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \quad (4)$$

여기서, C_{min} 은 전기장을 가하지 않은 상태시 계수, C_{ER} 은 ER 댐퍼 실험에서 구한 계수이다. ER 댐퍼에 인가되는 전기장의 세기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_d = \frac{C_{sky}\dot{z}_s + C_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - C_{min}(\dot{z}_s - \dot{z}_u)}{\text{sgn}(\dot{z}_s - \dot{z}_u)C_{ER}} \quad (5)$$

식 (1)과 식 (3)에서 상태변수를 다음과 같이 정의한다.

$$x \equiv \begin{bmatrix} z_s - z_u \\ \dot{z}_s \\ z_u - z_r \\ \dot{z}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{현가장치의 변위} \\ \text{차체의 절대속도} \\ \text{타이어의 변위} \\ \text{차축의 절대속도} \end{bmatrix} \quad (6)$$

그러므로, 아래와 같은 상태방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bf_d + \Gamma \dot{z}_r \\ y &= Cx + Df_d + F\theta \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ \frac{-k_s}{m_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & 0 & \frac{-k_t}{m_u} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{m_s} \\ 0 \\ \frac{1}{m_u} \end{bmatrix},$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} \frac{-k_s}{m_s} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_s}{m_s} & 0 & \frac{-k_t}{m_u} & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{-1}{m_s} \\ \frac{1}{m_u} \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.05 \end{bmatrix}$$

이다.

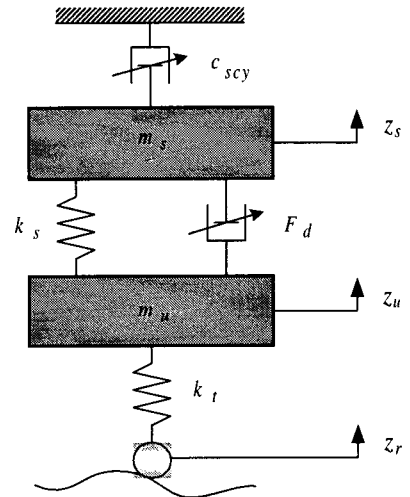


Fig. 5 Skyhook control of the 1/4 car model

3.2 LQ 제어기(Linear Quadratic Regulator : LQR)

승차감 향상을 위한 최적의 제어게인 K 를 선정하는데 있어서 LQR 제어이론을 도입하였다. LQR 제어의 개념은 아래와 같이 정의되어지는 성능지수(Performance Index) J 를 최소로 하는 제어입력 $f_d = -Kx$ 에서 K 를 구하는 것이 목적이다. 여기서, 성능지수는 다음과 같이 정의한다.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T Q_x + f_d^T R f_d] dt \quad (8)$$

최소의 성능지수를 만족하기 위해서는 아래에서 주어지는 리카티 방정식(Riccati Equation)을 만족시켜야만 한다.

$$\begin{aligned} \dot{P}(t) &= -P(t)A(t) - A^T(t)P(t) - Q(t) \\ &\quad + P(t)B(t)R^{-1}(t)B^T(t)P(t) \quad (9) \\ u &= -DB^T R^{-1}x = -Kx \end{aligned}$$

그러므로 우리가 상태가중행렬 Q와 제어가중행렬 R을 제한조건을 만족시키면서 적절하게 선정하여 주면, 위의 리카티 방정식을 만족시키는 제어입력 K가 구해지게 된다. 이때, Q는 상태가중행렬 (state weighting matrix)로서 대칭이며 positive semi-definite 행렬이고, R은 제어가중행렬(control weighting matrix)로서 역시 대칭이며 positive definite 행렬이 되어야만 공칭안정성을 만족한다. 여기서, LQR을 이용한 제어기의 설계에 있어서 상태가중행렬 Q와 제어가중행렬 R행렬을 정의하기 위해서 Bryson's Method를 이용하였고, 다음과 같이 정의하였다. 행렬Q의 선정기준은 현가장치의 변위는 8cm이내가 되게 하고, 타이어의 변형은 0.05cm 이내가 되도록 한다. 또한 물리적으로 구하기 힘든 각 가속도와 같은 경우는 개루프 응답을 기준으로 하여 최대값보다 다소 낮게 설정한다.

$$Q = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{0.08} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{0.0005} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\sqrt{40} \end{bmatrix}$$

$$R = 10^{-8}$$

그리고 이러한 행렬에 대하여 리카티 방정식을 만족하는 제어 게인 K를 구하면 다음과 같다.

$$K = 10^4 \times [-1.0306 \quad -0.7372 \quad 9.8726 \quad 0.3714]$$

3.3 상태관측기(Kalman Filter)

Fig. 6은 제어계의 블록선도를 표시한 것이다. 차체와 차축에 가속도 센서2개를 이용하여 스카이훅제어를 수행시 차체의 절대속도 및 현가장치의 상대속도를 측정해야한다. 그리고 LQR은 전상태를 알아야구현이 가능하기 때문에 신호처리가 필요하게 된다. 따라서 칼만필터를 사용하면 전상태를 추정하는 것이 가능하다. 전상태를 추정하기 위해서는 차체의 수직가속도신호 뿐만아니라 부가적인 신호를 측정해야 하며, 노면이 백색잡음이라는 가정

이 필요하다. 센서로부터 측정된 신호를 이용하여 나머지 상태변수를 추정하는 칼만필터는 다음과 같은 모델기준 보상기의 구조를 갖는다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bf_d^* + H(y - y) \\ y &= Cx + Df_d^* \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, 오차를 $x = x - \hat{x}$ 으로 정의하고, 오차동역학을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{x} = (A - HC)x + \Gamma \dot{z}_r - H\theta \quad (11)$$

상태추정오차의 분산행렬을 $P = E\{x^T(t)x(t)\}$ 로 정의하고, 이를 최소화하는 필터대수 리카티식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} AP + PA^T + \Gamma \Gamma^T - PC^T \theta^{-1} CP &= 0 \\ H &= PC^T \theta^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

Fig. 7는 식(12)의 필터계인행렬을 이용하여 추정한 현가장치 상대속도와 필터에서 추정된 신호를 비교한 것이다. 칼만필터를 통해 추정된 결과는 초기오차와 센서잡음의 영향에도 불구하고 잘 추정해 가는 것을 알 수 있다.

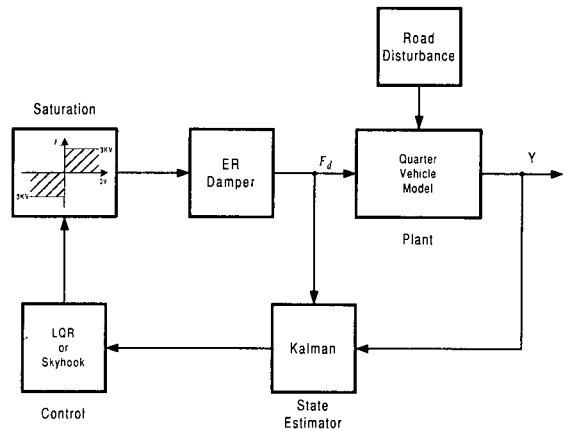


Fig. 6 Block Diagram of Control

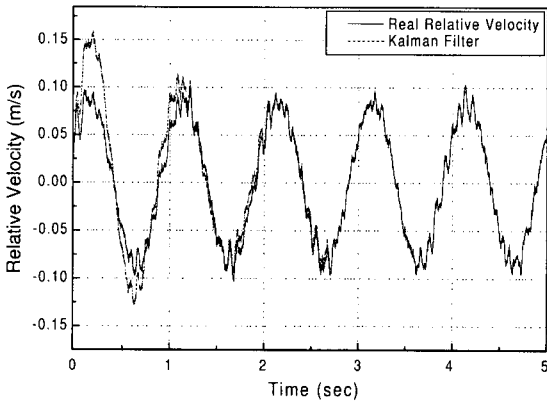


Fig. 7 Suspension velocity with Kaman Filter

4. 시뮬레이션 및 고찰

ER 댐퍼의 성능을 분석하기 위해서 스피드 범퍼와 사이파 형태의 노면을 통과할 때 시간역 응답성과 주파수역 응답특성을 본다.

4.1 시간역 응답

다음과 같은 범퍼와 사인파 노면 외란에 대한 시간역 응답을 수동식 현가장치와 스카이 훅 제어 방식 현가장치 및 LQG 제어방식 현가장치와 비교한다. Fig. 8은 범퍼의 노면 외란을 표시하였다. 노면 외란은 높이 10cm 돌기를 타고 넘는 외란이다. 이때 시간역 응답 특성을 Fig. 9에 나타내었다. 여기서, 스카이 훅 제어는 수동과 비교해서 오버슈트 값과 정착시간이 줄어들음을 알 수 있다. LQG 제어 또한 수동에 비해 좋아짐을 알 수 있다. 스카이 훅 제어를 하였을 때 반능동 댐퍼의 포화 때문에 피크 값이 약간 떨어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 8은 범퍼 통과 시 스카이 훅 제어를 행할 때 실제적인 제어 입력 전압 값을 Fig. 10에 나타낸 것이다. ER 댐퍼에 추가되는 전압은 차체의 가속도 크기에 따라 변화되고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 11는 1Hz 0.01m의 사인파 입력에 대한 응답을 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 9에서와 마찬가지로 스카이 훅 제어가 가장 좋은 성능을 나타냄을 알 수가 있고, LQG 또한 수동에 비해 성능이 향상됨을 알 수 있다. Fig. 12은 Fig. 11와 같은 노면 외란에 대한 ER 댐퍼의 특성곡선을 나타낸 것이다. 이때 1, 3사 분면에서 제어가 되며, 상대속도와 감쇠력과의 관계를 보면 포화영역 내에서 제어가 이루어짐을 알 수 있다.

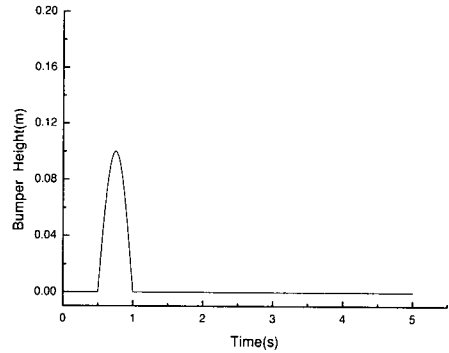


Fig. 8 Road input

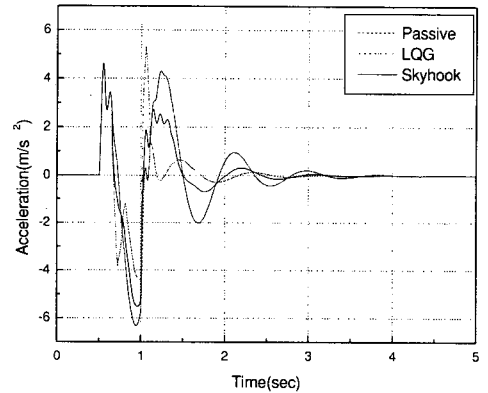


Fig. 9 Time reponse of body acceleration for speed bump

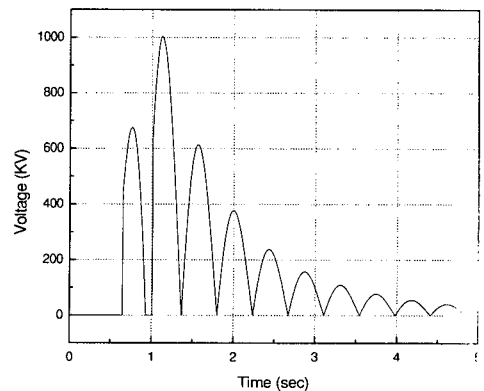


Fig. 10 Input voltage on ER damper

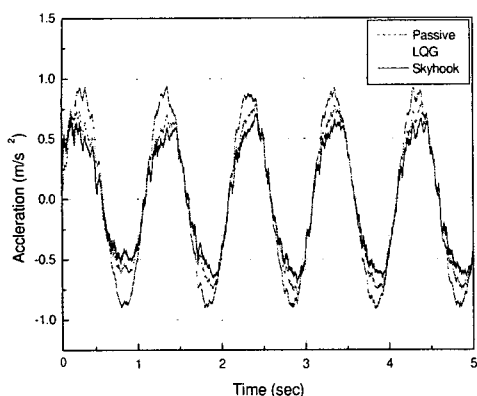


Fig. 11 Time response of body acceleration for sine wave

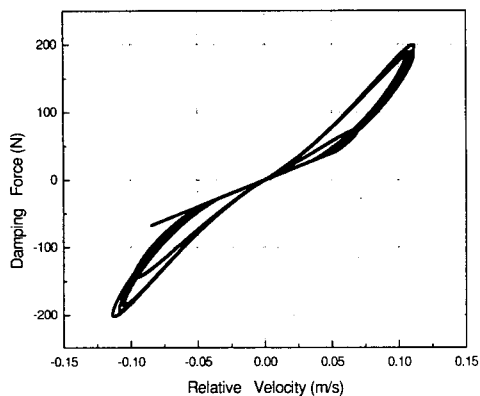


Fig. 12 Damping force for sine wave

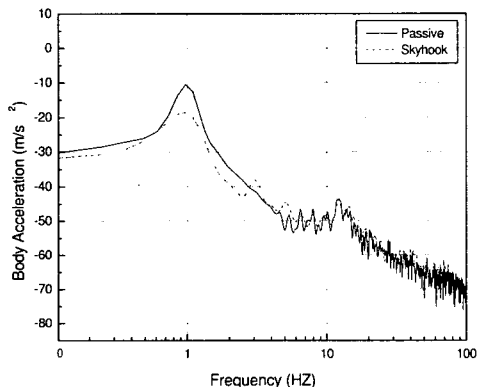


Fig. 13 Frequency response for body acceleration

4.2 주파수역 응답

Fig. 13은 1Hz 사이파 노면을 통과할 때의 주파수 응답을 나타낸 것이다. Fig. 13에서 1Hz와 10Hz 근방에서 차량의 고유진동수를 가지며, 스카이 훅

제어시 공진 값은 수동 현가장치에 비해 공진 주파수대가 줄어들음을 알 수 있다.

5. 결론

실험에 의한 ER 댐퍼의 감쇠력을 이용한 차량용 반능동 ER 댐퍼를 적용 시 노면 외란인 범퍼 및 사인파의 시간역 응답에서 스카이 훅 제어와 LQG 제어는 수동에 비해 정착시간과 오버슈트 값이 명확하게 줄어들었다. 포화영역 내에서 제어가 효과적으로 실행됨을 보여주었다. 또한 주파수역 응답에서도 진동감쇠효과가 나타남이 확인되었다. 따라서 본 연구에서 설계된 반능동 ER댐퍼를 이용한 스카이 훅 제어 및 LQG 제어가 진동감쇠효과가 나타남이 판명되었다.

참고문헌

1. Winslow, W. M., "Induced Vibration Suspensions," Journal of Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137-1140, 1949.
2. Masami NAKANO, Takuya YONEKAWA., "Active Damper Using Electrorheological Suspension and Its Application to Vibration Isolation Control," JSME, Vol. 62, No. 593, pp. 33~40, 1996.
3. 이육형, 박명관, "자동차용 반능동 ER댐퍼의 스카이훅 제어" 한국자동차추계학술대회논문집, 1999.
4. N. k. Petek., "An Electronically Controlled Shock Absorber Using Electroheological Fluid," SAE 920275, 1992.
5. M. Nakano and T. Yonekawa, Trans. of JSME., Series B, Vol. 61, No. 166, 1995.
6. X. M. Wu, J. Y. Wong, M. Sturk, D. L. Russell., "Simulation and Experimental Study of A Semi-Active Suspension with An Electrorheological Damper," Proc. 4th Int. Conf. on ER Fluids, World Scientific, pp. 568-586, 1994.
7. Karnopp, D. C., M. J. Crosby, and R. A. Harwood, "Vibration control using semi-active force generators," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 96, No. 2, pp. 619-626, 1974.