

# 댐핑력 응답특성을 고려한 ER 현가장치의 반능동제어

한 상 수\* · 최 승 복\*\*

## Semi-Active Control of ER Suspension System Incorporating with Dynamic Characteristics of Damping Force

Sang-Soo Han and Seung-Bok Choi

**Key Words :** Electro-Rheological Fluid(전기유동유체), Damping Force Responce(댐핑력 응답), Semi-Active Control(반능동제어), Sky-hook Control(스카이훅 제어),  $H_{\infty}$  Control( $H_{\infty}$  제어)

### Abstract

This paper presents control response of a semi-active electro-rheological(ER) suspension. After showing dynamic characteristics of the ER damper, 1/4 car model is formulated by incorporating with the time constant of the damping force.  $H_{\infty}$  controller compensating mass and time constant uncertainties is then designed in order to suppress vibration level of the suspension. The control responses such as vertical acceleration are presented.

### 1. 서 론

전기유동(Electro-Rheological :이하 ER)유체는 전기장 인가에 의해 항복응력과 가점성이 변화하며 그 반응이 매우 빠른 것으로 알려져 있다. 또한, 인가되는 전기장의 크기에 따라 연속적인 가변 제어 특성과 낮은 전력 소모 등의 장점을 지니고 있어 차량의 현가장치, 제진대, 엔진 마운트, 클러치 및 브레이크, 벨브, 지능 구조물 등 다양한 응용 분야에서의 연구가 활발히 진행 중이다. 특히, 이 중 차량의 조향 안정성 확보 및 승차감 향상을 위한 반능동형 현가장치에 대한 연구는 이미 상용화 단계에 이르고 있다.

미국의 Petek 등<sup>(1)</sup>은 실제 차량의 앞쪽과 뒤쪽 모두 ER 댐퍼를 장착한 현가장치 시스템을 구성한 후, 차체의 피치(pitch), 히브(heave), 그리고 롤(roll) 운동을 고려한 스카이훅(Sky-hook) 제어 알고리즘을 적용하여 진동절연성능 향상을 고찰하였다. 한편, 국내에서도 ER 댐퍼에 관한 연구가 활발히 진행 중이며, 실시간 실험 모의 실험(HILS : hardware-in-the-loop simulation)을 통하여 ER 현가장치의 제어성능을 고찰한 바 있다.<sup>(2)</sup>

지금까지 진행되어온 대부분의 ER 현가장치에 대한 연구는 일반적으로 ER 유체의 응답속도가 수 ms 이내로 매우 빠르므로, ER 댐퍼의 댐핑력 또한 제어 성능에 영향을 미치지 않을 정도로 매우 빠르다는 가정 하에 제어 알고리즘을 설계해왔다. 그러나, 이는 ER 댐퍼의 댐핑력 응답 시정수(time constant)가 매우 작은 경우에만 타당한 가정이며, 시정수가 큰 경우에는 요구되는 적절한 댐핑력을 발생시킬 수 없으므로 ER 댐퍼의 진동절연성능을 보장할 수 없다.<sup>(3)</sup> 따라서, 댐핑력 응답 시정수가 큰 경우 이를 고려한 제어 알고리즘의 설계는 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 자체 개발된 ISS50 ER 유체와 일반적으로 상온에서의 응답속도가 상대적으로 매우 느리게 나타난 독일 Bayer 사의 TP AI 3566 ER 유체를 각각 동일한 ER 현가장치에 적용하여 범프(bump) 입력에 대한 1/4 차량 모델의 제어 성능을 고찰하였다. 이를 위해, 우선 댐핑력 응답 시정수를 고려한 ER 댐퍼의 모델링을 수행하고, 5 차의 1/4 차량 모델을 구성하였으며, 이러한 차량 모델에 대한  $H_{\infty}$  제어 알고리즘을 적용하여 성능을 분석하였다. 댐핑력 응답 시정수를 고려한  $H_{\infty}$  제어 알고리즘 설계에는 McFarlane 등<sup>(4)</sup>이 제안한 루우프 형상 기법(LSDP: loop shaping design procedure)을 적용하였다. 일반적으로 루우프 형상 기법은 요구되는 성능을 확보하기 위해 가중 함수를 선정하여 주파수 대역에서 개루우프(open

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 인하대학교 기계공학과

loop) 시스템의 형상을 조정한 후, 시스템의 강건성(robustness)을 확보하는 구조로 구성되어 진다. 따라서, 본 연구에서는 루우프 형상 조정을 위한 가중함수로서 ER 댐퍼의 댐핑력 응답 시정수를 고려하여 시스템응답 속도 향상을 위한 앞섬 보상기(lead compen-sator)를 선정하였다. 또한, 일반적으로 차량의 진동 제어에서 가장 우수한 성능을 보이는 것으로 알려져 있는 스카이hook 제어 알고리즘을 응답 시정수가 고려된 시스템과 고려되지 않은 시스템에 각각 적용하여 제안된  $H_\infty$  제어 알고리즘과의 성능 비교를 통해 제안된 제어 알고리즘의 우수성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

## 2. 시스템 모델링

### 2.1 ER 댐퍼의 모델링

본 연구에서 사용된 실린더형 ER 댐퍼의 구조를 Fig.1에 도시하였다. ER 댐퍼는 크게 외측 실린더, 내측 실린더 및 피스톤으로 구분할 수 있으며, 내·외측 실린더 사이에는 ER 유체가 유동하도록 원형 덕트(duct)가 구성되어져 있다. 또한 내측 실린더에는 고전압의 (+)전원이 연결되어 있고, 외측 실린더에는 (-)전원으로 연결되어 ER 유체에 전기장을 부하하는 두 전극판으로 작동하게 된다. 피스톤을 중심으로 위쪽을 상부 챔버(chamber), 아래쪽을 하부 챔버(chamber)로 정의하였고, 이 두 챔버에 ER 유체는 완전히 채워지게 된다. 따라서, 고전압이 내측 실린더와 외측 실린더에 인가되면 원형 덕트 사이에는 전기장이 형성되어 덕트 사이를 유동하던 ER 유체는 순간적으로 뉴토니언 유동에서 빙햄(Bingham) 플라스틱 유동으로 전환되게 된다. 즉, 전기장이 인가됨에 따라 원형 덕트 사이의 ER 유체의 항복 전단 응력이 증가하게 되어 유체의 유동 저항을 상승시킨다. 이는 피스톤 상·하부 챔버의 압력차를 증가시키며, 이로 인하여 피스톤 상하 운동에 저항하는 방향의 댐핑력이 증가하게 된다. 결과적으로, ER 댐퍼는 전기장을 인가하지 않을 때는 속도에 따른 유체 점성으로 인한 유체 댐핑력만을 발생시키게 되나, 전기장 인가 시에는 유체 점성으로 인한 댐핑력에 ER 유체의 항복전단 응력으로 인한 댐핑력이 더해지므로 더 큰 댐핑력을 발생시키게 된다. 따라서, 기존의 수동식 댐퍼와는 달리 피스톤 속도에만 의존적이지 않고, 전기장에 따라 연속적이고 가변적인 제어가 가능한 댐핑력을 발생시킬 수 있으며, 이러한 ER 댐퍼의 댐핑력은 다음과 같이 주어진다.<sup>(5)</sup>

$$F = k_c x_p + c_c \dot{x}_p + F_{ER} \quad (1)$$

여기서,  $k_c$ 와  $c_c$ 는 각각 가스압력으로 인한 유효 강성계수와 유체점성에 기인한 유효감쇠계수를 의미하며,  $x_p$ 와  $\dot{x}_p$ 는 피스톤의 가진변위와

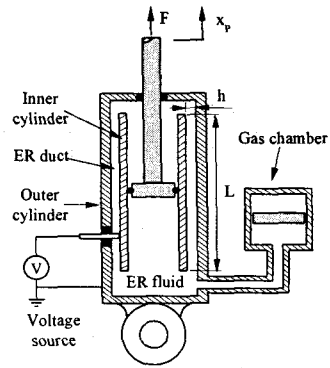


Fig. 1 Schematic diagram of the ER damper

가진속도를 나타낸다.  $F_{ER}$ 은 인가되는 전기장의 크기에 따라 제어 가능한 ER 댐퍼의 가변 댐핑력으로 다음과 같이 주어진다.

$$F_{ER} = (A_p - A_r) 2 \frac{L}{h} \alpha E^\beta \operatorname{sgn}(\dot{x}_p) \quad (2)$$

여기서,  $A_p$ 와  $A_r$ 은 각각 피스톤 면적과 피스톤로드의 면적을,  $L$ 과  $h$ 는 전극의 길이와 전극 간극을 의미한다.  $E$ 는 전극 사이에 인가한 전기장이며,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 빙햄특성 실험에 의하여 측정되는 ER 유체의 고유 특성치이다. 본 연구에서 사용된 TP AI 3566 ER 유체의 전기장에 의한 항복응력은  $565.2E^{1.55}$ 로 얻어졌으며, 15S50 ER 유체의 경우는  $878.1E^{1.42}$ 이다.

한편, 식(2)에 주어진 ER 유체의 항복응력에 의한  $F_{ER}$ 은 전기장 인가 시 ER 유체의 반응속도가 매우 빠르다는 가정 하에서 얻은 식이므로, 실제 ER 댐퍼의 댐핑력 응답이 느리게 나타날 경우 과도 상태에서는 올바른 댐핑력 값을 예측할 수 없게 된다. 따라서, 전기장에 의한 댐핑력 값인  $F_{ER}$ 은 다음과 같이 응답 시정수  $\tau$ 를 갖는 1차 시스템의 거동으로 다시 표현할 수 있다.

$$\tau \frac{d}{dt} F_{ER} + F_{ER} = (A_p - A_r) \alpha E^\beta \operatorname{sgn}(\dot{x}_p) \quad (3)$$

Fig.2(a), (b)는 식(3)으로 주어진 응답 시정수를 고려한 ER 댐퍼 모델의 댐핑력 응답에 대한 시뮬레이션 결과와 실제 ER 댐퍼의 댐핑력 응답을 시간 영역에서 비교 도시한 결과이다. TP AI 3566 ER 유체와 15S50 ER 유체를 적용한 경우 모두 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 댐핑력 예측치와 응답 동특성이 실제 전기장 인가에 의해 발생한 댐핑력 및 응답 동특성과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 실험적 측정에 의해 구해진 TP AI 3566 ER 유체와 15S50 ER 유체의 응답 시정수는 각각 380msec과 12msec로 얻어졌다. 한편, TP AI 3566 ER 유체를 적용한 경우 전기장이 제거되면서 시뮬레이션 결과

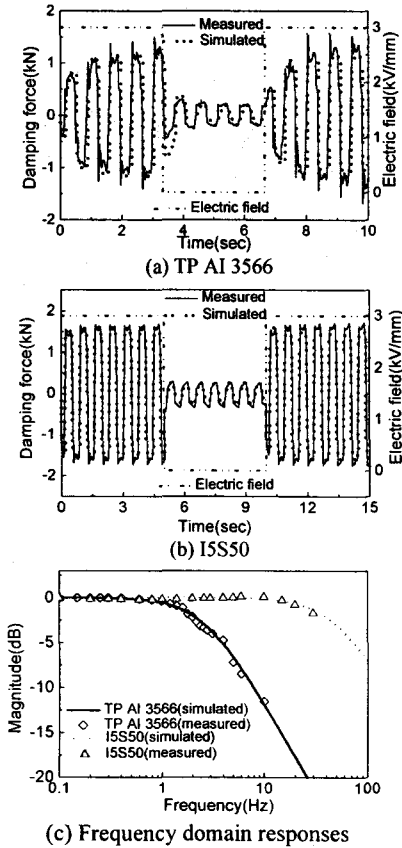


Fig. 2 Damping force dynamic characteristics

에 비하여 빠르게 댐핑력이 감소한 것을 볼 수 있는데 이는 실제로 TP AI 3566 ER 유체의 응답특성이 전기장 인가 시와 전기장 제거 시에 각기 다른 응답 시정수를 가짐에 기인하는 문제이나, 일반적으로 전기장 인가 시 댐핑력 상승 시간의 시정수가 전기장 제거 시의 시상수보다 크게 나타나며 ER 댐퍼의 성능은 이러한 상승 시정수에 더욱 의존적이므로 본 연구에서는 전기장 인가 시 댐핑력 응답에 의해 측정된 시정수만을 고려하였다.

Fig.2(c)는 각각 TP AI 3566 ER 유체와 ISS50 ER 유체를 적용한 경우 ER 댐퍼의 동특성을 주파수 영역에서 비교 도시한 결과이다. 인가되는 전기장의 세기는 3kV/mm로 하고 입력 주파수를 증가시켜가며 댐핑력 응답을 측정하였으며, 가진 입력은 1.4Hz의 삼각파를 사용하였다. 두 경우 모두 식(3)에 의한 시뮬레이션 결과와 실험에 의한 결과가 잘 일치함을 볼 수 있으며 이로서 제안된 모델의 타당성을 검증할 수 있다.

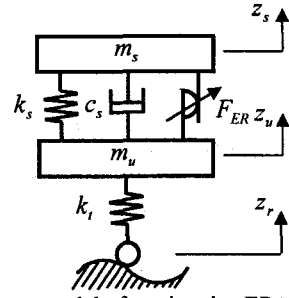


Fig. 3 1/4 car model of semi-active ER suspension system

## 2.2 ER 현가장치를 장착한 1/4 차량의 모델링

본 연구에서는 ER 댐퍼의 동적응답특성을 고려한 제어 알고리즘의 설계에 앞서 1/4 차량에 대한 모델링을 수행하였다. 1/4 차량 현가시스템의 모델은 Fig.3에 도시한 바와 같이 2자유도계로 구성되며, 차체에 해당하는 스프링상 질량(sprung mass)  $m_s$ 와 바퀴 및 차축부의 스프링하 질량(unsprung mass)  $m_u$  사이에 현가 스프링과 가변 ER 댐퍼로 연결되어 있다. 현가장치에 사용된 스프링은 선형으로 가정하였으며, 타이어는 강성계수  $k_t$ 를 갖는 감쇠계수가 무시된 선형 스프링 요소로서 모델링하였다. 이와 더불어, 타이어는 항상 노면과 접촉하고 있으며 ER 댐퍼에서 발생하는 댐핑력의 이력현상(hysteresis)은 무시하였다. 따라서, 이상의 가정들로부터 식(3)으로 주어진 응답 시정수가 포함된 ER 댐퍼의 모델을 고려하면 다음과 같이 5차의 1/4 차량에 대한 수학적 상태공간 모델을 도출할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Lz, \quad (4)$$

여기서,

$$x = [z_s, \dot{z}_s, z_u, \dot{z}_u, F_{ER}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} & \frac{1}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_t + k_s}{m_u} & -\frac{c_s}{m_u} & -\frac{1}{m_u} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}^T, \quad u = F_{ER}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{k_t}{m_u} & 0 \end{bmatrix}^T$$

$c_s$ 는 ER 현가장치의 전체 댐핑계수로 ER 댐퍼의 댐핑계수  $c_e$ 와 같은 값을 갖는 것으로 가정하였

으며,  $k_s$ 는 ER 댐퍼의 강성계수  $k_s$ 를 포함한 현 가장치의 전체 강성계수를 의미한다.

### 3. $H_\infty$ 제어 알고리즘 설계

본 연구에서는 ER 댐퍼의 댐핑력 응답 시정수를 고려한 제어 알고리즘의 설계를 위하여 Glover 등이 제안한 루우프형상  $H_\infty$  제어기법을 적용하였다. 일반적으로 루우프형상기법을 이용한  $H_\infty$  제어기는 가중함수(weighting function)의 적절한 선정을 통하여 요구되는 시스템의 제어성능을 확보할 수 있으며, 이러한 가중함수와 결합된 시스템의 좌소인수 견실안정화(left coprime factor robust stabilization)를 통하여 변수 불확실성에 대한 강건성을 얻을 수 있도록 설계된다.<sup>(4)</sup>

우선, 앞서 제시한 1/4 차량 모델을 정규화된 좌소인수요소(normalized left coprime factor)의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$G(s) = \tilde{M}^{-1}\tilde{N} = \frac{z_s(s)}{u_h(s)} = \frac{k_t + m_s s^2}{(\tau s + 1) \cdot D(s)} \quad (5)$$

여기서,

$$D(s) = m_s m_u s^4 + c_s (m_s + m_u) s^3 + (m_s k_t + (m_s + m_u) k_s) s^2 + c_s k_t s + k_s k_t$$

$u_h$ 는 제어입력으로 전기장에 의해 가변적인 제어가 가능한 댐핑력  $F_{ER}$ 을 의미한다.

따라서, 식(5)로부터 소인수요소섭동(coprime factor perturbation)을 고려한 섭동(perturbed) 모델은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$G_\Delta(s) = \tilde{M}_\Delta^{-1}\tilde{N}_\Delta = (\tilde{M} + \Delta_M)^{-1}(\tilde{N} + \Delta_N) = \frac{k_t + (m_s + \Delta m_s) s^2}{((\tau + \Delta \tau) s + 1) \cdot D(s)} \quad (6)$$

여기서

$$D_\Delta(s) = (m_s + \Delta m_s) m_u s^4 + c_s ((m_s + \Delta m_s) + m_u) s^3 + ((m_s + \Delta m_s) k_t + ((m_s + \Delta m_s) + m_u) k_s) s^2 + c_s k_t s + k_s k_t$$

식(6)에서 나타난 소인수요소섭동  $[\Delta_N, \Delta_M]$ 은 1/4 차량의 스프링상 질량  $m_s$ 와 ER 댐퍼의 댐핑력 응답 시정수  $\tau$  등을 고려하여 설정하였으며 다음과 같은 조건을 갖는다.

$$\Delta = [\Delta_N, \Delta_M] \in RH_x, \quad \|\Delta\|_x < \gamma^{-1} \quad (7)$$

여기서,  $RH_x$ 는 모든 안정한 전달함수로 이루어진 공간을,  $\gamma^{-1}$ 는 최대 안정도여유(maximum stability margin)를 의미한다.

한편, ER 댐퍼의 댐핑력 응답 시정수를 고려한

제어 알고리즘의 설계를 위하여 다음과 같이 앞섬 보상기(lead compensator) 형태의 가중함수를 각각 선정하여 시스템의 과도 응답 속도를 개선하도록 하였다.

$$W_B = 250000 \times \frac{s+3}{s+900}, \quad W_I = 30000 \times \frac{s+6}{s+900} \quad (8)$$

여기서,  $W_B$ 와  $W_I$ 는 각각 TP AI 3566 ER 유체와 ISS50 ER 유체를 ER 댐퍼에 적용한 경우에 대하여 선정된 가중함수이며, 두 경우 모두 최종적인 제어게인의 차수를 고려하여 1차의 함수로 설정하였다. 이렇게 선정된 가중함수를 시스템의 전달함수와 결합한 후 형상화 작업이 끝나게 되면 다음 단계로서 좌소인수 견실안정화(left coprime factor robust stabilization)가 수행된다. 식(7)에서 정의한 소인수요소섭동을 갖는 시스템의 견실안정화는 잘 알려진 바와 같이 small gain theorem에 의해 주어진 시스템을 안정화시키는 제어게인  $K$ 에 대하여 다음의 관계로 주어진다.

$$\left\| \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I - GK)^{-1} \tilde{M}^{-1} \right\|_x \leq \gamma \quad (9)$$

따라서, 형상화된 시스템을  $G_s$ 라 할 때, 좌소인수요소 견실안정화를 위한 최적해  $\gamma_{\min}$ 는 McFarlane 등이 제안한 다음의 관계를 적용하여 반복적인 계산 없이 얻을 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$\inf_K \left\| \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I - G_s K)^{-1} \tilde{M}_s^{-1} \right\|_x = \left\{ \sqrt{1 - \|\tilde{N}_s, \tilde{M}_s\|_H^2} \right\}^{-1} = \gamma_{\min}$$

여기서  $\tilde{N}_s$ 와  $\tilde{M}_s$ 는 가중함수와 결합하여 형상화된 시스템의 정규화 좌소인수요소를 나타낸다. 이 단계에서  $\gamma$ 는 설계 지표로서 사용되어지며, 성공적인 설계가 이루어진 경우 충분히 적은  $\gamma_{\min}$ 를 얻을 수 있게 된다. 본 연구에서 TP AI 3566 ER 유체와 ISS50 ER 유체를 적용한 ER 현가 시스템의 최종적인 제어게인 설계를 위하여 얻어진  $\gamma$ 의 값은 각각 2.34와 1.69이다.

한편, 제안된 1/4 차량의 진동제어를 위한  $H_x$  제어 알고리즘에 의한 제어입력  $u_h$ 는 시스템의 출력을 스프링상 질량의 변위로 정의하였으므로, 다음과 같이 주어진다.

$$u_h = K e = -K z_s \quad (11)$$

여기서  $e$ 는 오차신호를 의미한다.

한편, 본 연구에서는 제안된 제어 알고리즘의 성능을 입증하기 위해 일반적으로 차량의 진동 제

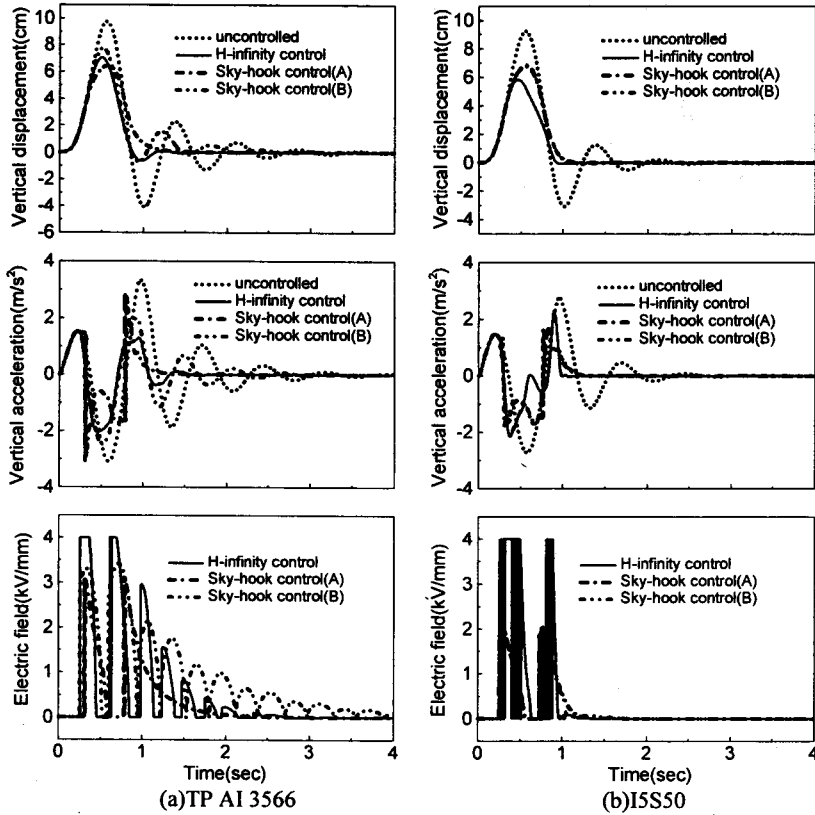


Fig. 4 Bump responses of the sprung mass with different control algorithms

어에 우수한 성능을 보이는 것으로 알려져 있는 스카이훅 제어 알고리즘을 도입하였다. 스카이훅 알고리즘은 Karnopp 에 의하여 제안되었으며, 차체 위의 공간상에 절대고정변위를 갖는 천정과 차체 사이에 가상의 댐퍼를 설치하고 이때 발생하는 가상 댐퍼의 댐핑력을 요구 댐핑력으로 사용하는 것이다.<sup>(6)</sup> 따라서, 스카이훅 알고리즘의 요구 댐핑력은 차륜 위치에서의 차체 수직속도를 고려하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$u_s = C_k \dot{z}_s \quad (12)$$

여기서  $C_k$  는 제어이득치이며, 물리적으로는 댐핑 계수를 의미한다.

한편, 앞서 설계된  $H_\infty$  제어 알고리즘과 스카이훅 제어 알고리즘에 의한 요구 댐핑력  $u_h$  와  $u_s$  는 각각 모두 능동형 제어 신호이나 ER 현가장치는 반능동형이므로 다음과 같은 조건을 만족하도록 하여야 한다.

$$u = \begin{cases} u & \text{for } u(\dot{z}_u - \dot{z}_s) > 0 \\ 0 & \text{for } u(\dot{z}_u - \dot{z}_s) \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

여기서 제어입력 신호  $u$  는  $u_h$  또는  $u_s$  를 의미한다. 따라서, 식(13)의 반능동형 조건을 만족하는 경우 실제로 ER 댐퍼에 인가되는 제어 전기장은 다음의 수식으로 표현된다.

$$E = \left[ u \cdot \frac{h}{2\alpha \cdot L(A_p - A_r)} \right]^{1/\beta} \quad (14)$$

#### 4. 결과 및 고찰

Fig.4(a)는 높이가 7cm 이고 폭이 80cm 인 정현파 범프를 3.08km/h( $\approx 0.86$ m/s)로 주행할 경우, TP AI 3566 ER 유체를 사용한 ER 현가장치를 장착하여 얻은 1/4 차량의 응답특성을 도시한 것이다. ER 댐퍼의 시정수가 고려되지 않은 1/4 차량 모델에 스카이훅 제어 알고리즘을 적용한 경우(A) 매우 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 그러나, ER 댐퍼의 댐핑력 응답 시정수가 고려된 실제 1/4 차량의 모델에 동일한 스카이훅 제어 알고리즘을 적용한 경우(B)에 대해서는 그 성능이 저감되어 범프 통

과 후에도 오랜 시간 동안 잔여 진동이 지속되며 차체 수직가속도 또한 성능이 저감되는 것을 확인할 수 있다. 한편,  $H_{\infty}$  제어 알고리즘을 적용한 경우에는 스프링상 질량의 변위 및 가속도 측면에서 모두 우수한 성능을 나타내었다. 또한, 제어입력 신호를 통해 알 수 있듯이, 스카이훅 알고리즘의 경우 시정수의 크기를 0으로 가정하여 설계되었으므로, 댐핑력 응답 시정수의 크기가 무시할 수 없을 정도로 크게 되면 실제로 차량의 진동제어를 위해 요구되는 제어 입력보다 작은 입력을 발생시키므로 적절한 제어성능을 보장할 수 없게 된다. 반면, 제안된  $H_{\infty}$  제어 알고리즘의 경우에는 느린 댐핑력 응답을 고려하여 충분히 큰 제어 입력 신호를 발생시키도록 설계되었으므로 빠른 시간 내에 진동을 절연시키고 있음을 볼 수 있다. Fig.4(b)는 상대적으로 댐핑력 응답속도가 빠른 ISS50 ER 유체를 적용한 경우에 대한 결과로서, 이 경우에도 역시 제안된  $H_{\infty}$  제어 알고리즘은 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 그러나, 유체의 응답속도가 매우 빠른 경우에는 댐핑력 응답 시정수를 무시하고 설계된 스카이훅 제어 알고리즘의 경우에도 성능 저감이 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 차체 수직 가속도 측면에서 볼 때,  $H_{\infty}$  제어 알고리즘의 경우 스카이훅 제어에 비하여 다소 성능이 떨어지는 것을 볼 수 있는데 이는 제어입력 신호를 통해 알 수 있듯이 시정수를 고려하는 경우 큰 제어 입력이 발생됨에 기인하는 문제로 보인다.

## 5. 결론

본 연구에서는 현재 상용화된 ER 유체인 독일 Bayer사의 TP AI 3566 ER 유체와 자체 개발된 ISS50 ER 유체를 각각 ER 현가장치에 적용하여 응답특성에 따른  $H_{\infty}$  제어 알고리즘의 설계를 수행하였다. 두 ER 유체 중 TP AI 3566 ER 유체를 적용한 경우 ISS50 ER 유체를 적용한 경우에 비해 상대적으로 현저히 느린 댐핑력 응답특성을 보였으며, 실험적 측정을 통해 댐핑력 응답 시정수를 구하고 이를 컴퓨터 시뮬레이션에 적용하여 1/4 차량의 범프 입력에 대한 동특성 분석을 수행하였다. TP AI 3566 ER 유체를 사용한 경우, 전기장 인가 시 상당히 느린 댐핑력 응답으로 인해 일반적으로 차량의 진동제어에 많이 사용되고 있는 스카이훅 제어 알고리즘을 적용하였을 때 그 성능이 상당히 저감됨을 확인할 수 있었다. 한편, 실험적으로 측정된 댐핑력 응답시정수가 고려된 1/4 차량 모델에

근거하여 설계된  $H_{\infty}$  제어 알고리즘의 경우에는 스카이훅의 경우에 비해 우수한 진동절연 성능을 나타내었으며 이로부터 상대적으로 큰 댐핑력 응답 시정수를 갖는 ER 유체를 적용할 경우 ER 현가장치의 적절한 성능 확보를 위해서는 모델에 기초한 제어알고리즘의 설계가 필수적임을 입증하였다. 한편, ISS50 ER 유체와 같이 댐핑력 응답 특성이 우수하게 나타난 경우에는 응답 시정수를 고려하지 않고 설계된 스카이훅 제어의 경우에도 거의 동일한 성능을 유지하는 것으로 나타났으며, 시정수가 고려된  $H_{\infty}$  제어 알고리즘을 적용하였을 경우에는 보다 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) Petek, N. K., Romstadt, D. J., Lizell, M.B. and Weyenberg, 1995, "Demonstration of an Automotive Semi-Active Suspension Using Electrorheological Fluid," *SAE Technical Paper Series*, No.950586
- (2) 안창섭, 최영태, 최승복, 1998, "HILS를 통한 ER 현가장치의 성능평가", 대한기계학회논문집, 제 22 권, 제 11 호, pp.2061~2071
- (3) 황성호, "연속 가변 댐퍼 hardware-in-the-loop 시뮬레이션을 이용한 현가 시스템의 차량 동역학적 해석", 1997년, 서울대학교 박사학위논문
- (4) McFarlane, D.C. and Glover, K., 1992, "A Loop Shaping Design Procedure Using  $H_{\infty}$  Synthesis," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 37, No. 6, pp. 759~769.
- (5) S. B. Choi, Y. T. Choi, E. G. Chang, S. J. Han, C. S. Kim, 1998, "Control characteristics of a continuously variable ER damper," *Mechatronics*, Vol. 8 pp. 143~161.
- (6) Karnopp, D. C., Corsby, M. J. and Harwood, R. A., 1974, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol. 96, No. 2, pp. 619~626.