

# ER 현수장치를 갖는 궤도차량의 $H_{\infty}$ 제어

°한 상 수\*, 최 승 복\*\*

## $H_{\infty}$ Control of a Tracked Vehicle with ER Suspension Units

°Sang-Soo Han\*, Seung-Bok Choi\*\*

### ABSTRACT

This paper presents dynamic modeling and controller design of a tracked vehicle installed with the double-rod type ERSU(electro-rheological suspension unit). A 16 DOF(degree-of-freedom) model for the tracked vehicle is established by Lagrangian method. After showing the spring and damping characteristics of the proposed ERSU, equivalent 2 DOF 1/12 tracked vehicle model is then formulated by regarding the spring and viscous damping coefficients under the static state as constant values. A robust LSDP(loop-shaping design procedure)  $H_{\infty}$  controller compensating spring and damping parameter variations is then designed in order to suppress unwanted vibration of the vehicle. The control responses such as vertical and pitch acceleration are presented in time domain.

### 1. 서론

대표적인 지능재료(smart material) 중 하나인 전기유동유체(electro-rheological fluid: 이하 ER 유체)는 가해지는 전기장의 세기에 따라 그 특성이 변하는 유체를 총칭하는 말로서, 기본적으로 비전도성 용매에 강한 전도성 입자를 분산시킨 콜로이드 용액이다. ER 유체는 전기장 무부하시 비전도성 용매에 분산된 입자가 자유로이 운동하지만, 전기장 부하시에는 두 전극 사이에 체인(chain)을 형성하여 유체 유동을 방해하게 된다. 이러한 ER 효과에 의하여 ER 유체는 전기장 무부하시 뉴토이언 유체(Newtonian fluid)와 같은 거동을 하며, 전기장 부하시에는 빙햄 거동(Bingham behavior)을 한다.

이러한 ER 유체의 특성을 이용하여 여러 산업분야에서 활발한 응용 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 자동차 관련 산업에서의 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다. Morishita, Petek, Choi 등에 의해 자동차 현가장치에 대한 연구가 수행된 바 있으며, 자동차의 엔진마운트나 시트댐퍼에 관한 연

구도 계속되고 있다.<sup>(1-5)</sup> 그러나, 이들 대부분의 연구는 소형 혹은 중형 승용차에 초점을 맞춘 연구들이며, 각종 궤도차량을 위한 ER 응용장치에 관한 연구는 매우 드른 상황이다.<sup>(6,7)</sup>

잘 알려진 바와 같이, 궤도차량의 운전 및 환경 조건은 일반 승용차의 경우에 비하여 매우 까다롭고 가혹하다. 따라서, 궤도차량의 현수장치는 승무원의 승차감을 향상시키고 차량 내의 장비를 보호하며, 원하는 방향으로의 조향에 필요한 마찰력을 충분히 발생시키는 데 있어 필수적이라 할 수 있다. 나아가서, 궤도차량의 현수장치는 차량의 내구성과 안전성에 중대한 영향을 미친다. 궤도차량용 현수장치에는 여러 종류의 스프링과 댐퍼들로 이루어진 조합이 사용되고 있다. 최근에 사용되기 시작한 유기압현수장치(hydro-pneumatic suspension unit; HSU)는 스프링과 댐퍼를 하나로 결합한 형태로서 우수한 댐핑특성을 나타내며, 이를 사용함으로써 현가장치의 구조를 단순화시킬 수 있는 장점을 지닌 반면, 수동형 현수장치의 특성상 변화하는 노면의 상황에 즉각적으로 대응하지 못하므로 성능 향상에는 한계점을 지니고 있다.<sup>(8,9)</sup>

\* 인하대학교 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

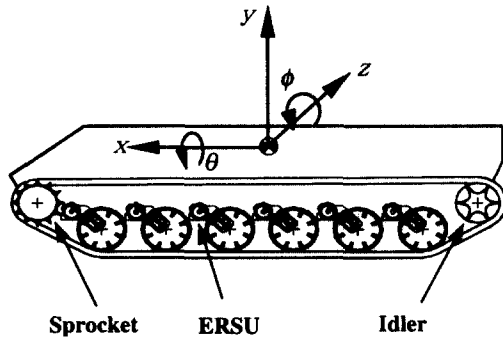


Fig.1 Schematic configuration of the tracked vehicle with ERSU

본 연구에서는 기존의 수동형 HSU 가 갖는 한계성의 극복을 위하여 ER 유체를 이용한 반능동형의 ERSU(electro-rheological suspension unit)를 제안하고, 궤도차량의 승차감과 조정 안정성을 향상시키기 위해 강건한  $H_\infty$  제어알고리즘을 적용하여 그 제어성능의 고찰을 수행하였다. 이를 위해 우선 16 자유도의 궤도차량 모델을 라그랑지안 방법(Lagrangian method)을 이용하여 구축하였으며, ERSU 가 장착된 1/12 궤도차량에 대한 등가 2 자유도 독립현가 시스템을 고려하여 변수 불확실성에 강건한  $H_\infty$  제어알고리즘을 설계하였다. 마지막으로,  $H_\infty$  제어알고리즘이 적용된 궤도차량의 진동절연성능을 고찰하기 위해 범프(bump) 입력에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 제안된 제어알고리즘의 성능을 입증하였다.

## 2. 궤도차량의 모델링

ERSU 가 장착된 궤도차량 시스템을 16 자유도로 가정하고 라그랑지안 방법을 이용하여 운동방정식을 유도하였다. Fig.1 은 ERSU 를 장착한 궤도차량을 도시한 것이다. 여기서  $\theta$  와  $\phi$  는 각각 롤과 피치 각운동을 나타내며, 차량의 z 축 방향 직선운동과 y 축을 중심으로 한 회전운동은 모델링에 고려하지 않았다. 차체와 차륜에 모두 ERSU 가 장착되었다고 가정하였다. Fig.2 는 하나의 차륜에 작용하는 작용력을 도시한 그림이다. ERSU 는 가

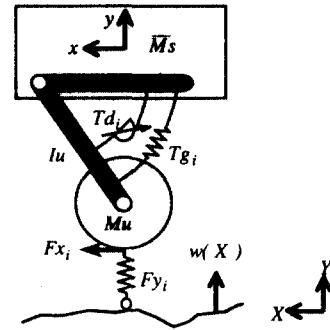


Fig.2 Mechanical model of the wheel and body

스에 의한 스프링력과 전기장의 크기로 조절이 가능한 가변댐퍼로 모델링하였으며, 궤도에서는 차량 전진방향의 힘과 수직방향으로 작용하는 스프링력을 고려하였고, 바퀴들간의 상관관계는 고려하지 않았다. 각 차륜은 지면과 항상 접촉한다고 가정하였으며, Fig.2 에서  $\bar{M}s$  는 하나의 차륜에 작용하는 차체 질량을 나타낸 것이다. 본 논문에서 고려한 궤도차량 시스템의 운동에너지 T 와 위치에너지 V 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 T = & \frac{1}{2} M_s \dot{x}^2 + \frac{1}{2} M_s \dot{y}^2 + \frac{1}{2} I_{s_x} \dot{\theta}^2 \\
 & + I_{s_z} \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} I_{s_x} \dot{\phi}^2 \\
 & + \sum_{i=1}^{12} \left\{ \frac{1}{2} (I_u + I_{oa}^2 M_u) \dot{\alpha}_i^2 \right\} \\
 V = & M_s g z + \sum_{i=1}^{12} \left\{ M_u g l_{oa} \sin(\alpha_i - \phi) \right. \\
 & + \frac{1}{2} k t_i (-l_{oa} \sin(\alpha_i)) \\
 & \left. + \int_0^{\alpha_i} T g_i(\varpi) d\varpi \right\}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $M_s$ ,  $M_u$  는 각각 차체와 차륜의 질량이며,  $I_{s_x}$ ,  $I_{s_z}$ ,  $I_{s_x}$  는 차체의 관성모멘트,  $I_u$  는 차륜의 관성모멘트이다.  $g$  는 중력가속도,  $l_{oa}$  는 차륜암의 길이,  $k t_i$  는 궤도의 스프링상수,  $T g_i(\cdot)$  는 ERSU 에서 발생하는 스프링 토크이다. 본 논문에서는 차륜의 직선방향 운동에너지는 고려되지 않았다. 위의 운동에너지와 위치에너지를 이용하여 라그랑지안 방법으로부터 다음과 같은 운동방정식을 유

도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \ddot{x} &= \frac{1}{M_s} \sum_{i=1}^{12} F_{x_i} \\
 \ddot{y} &= \frac{1}{M_s} \sum_{i=1}^{12} F_{y_i} \\
 \ddot{\theta} &= M_{sum1} / I_{s_x} + (I_{s_x} (I_{s_x} M_{sum1} - I_{s_x} M_{sum2})) / (I_{s_x} (I_{s_x} I_{s_z} - I_{s_x}^2)) \\
 \ddot{\phi} &= (I_{s_x} M_{sum2} - I_{s_x} M_{sum1}) / (I_{s_x} I_{s_z} - I_{s_x}^2) \\
 \ddot{\alpha}_i &= (-l_{oa} \cos(\alpha_i - \phi) F_{y_i} + T_{g_i}(\alpha_i) + T_{d_i}(\alpha_i)) / (I_{u_i} + l_{oa}^2 M_{u_i}), \quad i = 1, \dots, 12
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 M_{sum1} &= \sum_{i=1}^{12} l_{z_i} F_{y_i} \\
 M_{sum2} &= \sum_{i=1}^{12} \{-l_{x_i} F_{y_i} + (l_{y_i} - l_{oa} \sin(\alpha_i) - r_w) * F_{x_i} + T_{g_i}(\alpha_i) + T_{d_i}(\alpha_i)\}
 \end{aligned}$$

상기식에서  $(l_{x_i}, l_{y_i}, l_{z_i})$ 는  $i$  번째 차륜 크랭크축의 기준좌표,  $r_w$ 는 차륜의 반지름이다. 그리고,  $F_{x_i}$ 는  $i$  번째 차륜에 작용하는  $x$  방향 힘,  $F_{y_i}$ 는  $i$  번째 차륜에 작용하는  $y$  방향 힘,  $T_{d_i}(\cdot)$ 는  $i$  번째 ERSU에 작용하는 댐핑 토크이다.

### 3. 제어 알고리즘 설계

본 연구에서는 외란 및 변수 불확실성에 강건한  $H_\infty$  제어 알고리즘의 설계를 위하여 루우프-형상화 설계기법(loop-shaping design procedure: LSDP)을 적용하였다. 일반적으로 LSDP를 이용한  $H_\infty$  제어 알고리즘의 설계는 가중함수(weighting function)의 적절한 선정을 통하여 시스템의 요구되는 제어 성능을 확보할 수 있으며, 이러한 가중함수와 결합된 시스템의 좌소인수 건설안정화(left coprime factor robust stabilization) 작업을 통하여 변수 불확실성에 대한 강건성을 얻을 수 있도록 설계된다.<sup>(10)</sup>

우선, 이러한 제어 알고리즘의 설계에 앞서 본 연구에서는 Fig.3에 제시한 바와 같이 1/12 궤도차량에 대한 2 자유도의 등가 독립현가 모델을 구축

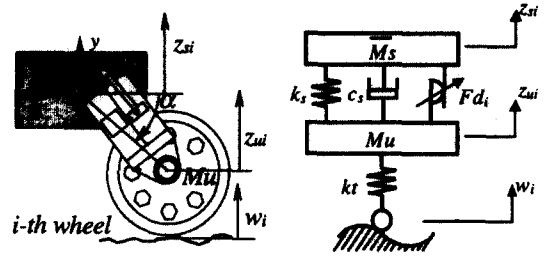


Fig.3 Equivalent 2 DOF model of 1/12 tracked vehicle

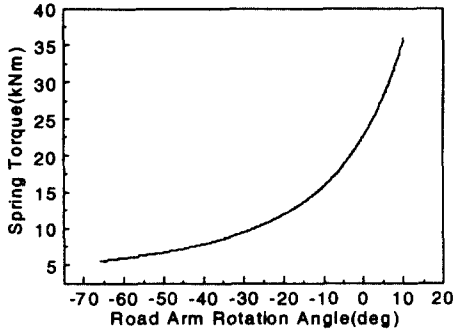
하고 이에 대한 모델링을 수행하여 다음과 같은 수학적 상태공간 모델을 도출하였다.

$$\dot{x} = Ax + Bu_i + Lw_i \tag{3}$$

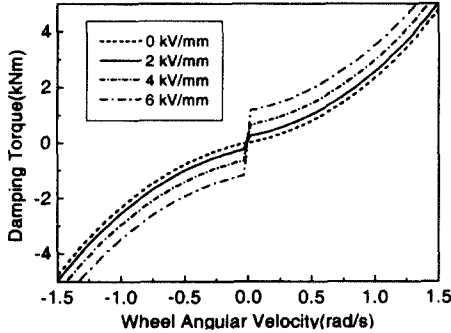
여기서,

$$\begin{aligned}
 x &= [z_{si} \quad \dot{z}_{si} \quad z_{ui} \quad \dot{z}_{ui}]^T \\
 A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{M_s} & -\frac{c_s}{M_s} & \frac{k_s}{M_s} & \frac{c_s}{M_s} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_s}{M_u} & \frac{c_s}{M_u} & -\frac{kt+k_s}{M_u} & -\frac{c_s}{M_u} \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M_s} & 0 & -\frac{1}{M_u} \end{bmatrix}^T, \quad u_i = F_{d_i} \\
 L &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{kt}{M_u} & 0 \end{bmatrix}^T
 \end{aligned}$$

상기식에서,  $k_s$ 와  $kt$ 는 각각 ERSU와 궤도의 스프링상수를 나타내며,  $c_s$ 는 ER 유체의 점성에 의한 점성감쇠계수를 의미한다. 그러나, 실제 ERSU의 경우 이러한 스프링상수나 점성감쇠계수의 값은 고정된 값을 갖지 않으며, Fig.4의 스프링특성 곡선과 댐핑특성 곡선에서 알 수 있는 바와 같이 로드휠의 변위와 속도에 따른 비선형적인 거동으로 인해 변화하는 값을 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 ERSU의 정적평형상태(차륜암 각  $\alpha$ 가  $-36^\circ$ 인 상태)에서의 스프링계수와 댐핑계수를 제안된 2 자유도 모델의 공칭값(nominal value)으로 선정하였으며, 이러한 변수들에 대한 비선형적인 섭동(perturbation)을 고려하여 제어알고리즘을 설계하였다. 따라서, 이러한 변수 섭동을 갖는 2 자유도 현가시스템의 제어 알고리즘 설계를 위해 제안된



(a) Spring characteristics of ERSU



(b) Damping characteristics of ERSU

Fig.4 Mechanical characteristics of ERSU

등가 2 자유도 모델을 정규화된 좌소인수요소 (normalized left coprime factor)의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$G(s) = \tilde{M}^{-1} \tilde{N} = \frac{z_n(s)}{u_i(s)} = \frac{kt + \bar{M}s \cdot s^2}{D(s)} \quad (4)$$

여기서,

$$D(s) = \bar{M}s \mu s^4 + c_s(\bar{M}s + \mu)s^3 + (\bar{M}s kt + (\bar{M}s + \mu)k_s)s^2 + c_s kt s + k_s kt$$

$u_i$ 는 제어입력으로 전기장에 의해 가변적인 제어 가능한 ERSU의 댐핑력  $Fd_i$ 를 의미한다.

따라서, 식(4)로부터 소인수요소섭동(coprime factor perturbation)을 고려한 섭동(perturbed) 모델은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$G_\Delta(s) = \tilde{M}_\Delta^{-1} \tilde{N}_\Delta = (\tilde{M} + \Delta_M)^{-1} (\tilde{N} + \Delta_N) = \frac{kt + \bar{M}s \cdot s^2}{D_\Delta(s)} \quad (5)$$

여기서

$$D_\Delta(s) = \bar{M}s \mu s^4 + (c_s + \Delta c_s)(\bar{M}s + \mu)s^3 + (\bar{M}s kt + (\bar{M}s + \mu)(k_s + \Delta k_s))s^2 + (c_s + \Delta c_s)kt s + (k_s + \Delta k_s)kt$$

식(5)에서 나타난 소인수요소섭동  $[\Delta_N, \Delta_M]$ 은 ERSU의 스프링상수  $k_s$ 와 점성댐핑계수  $c_s$ 의 비선형적 변화를 고려하여 설정하였으며 다음과 같은 조건을 갖는다.

$$\Delta = [\Delta_N, \Delta_M] \in RH_\infty, \|A\|_\infty < \gamma^{-1} \quad (6)$$

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

한편, ERSU가 장착된 레도차량의 제어 알고리즘의 설계를 위하여 다음과 같은 앞섬 보상기(lead compensator)형태의 가중함수  $W$ 를 선정하여 시스템의 과도 응답 속도 및 외란에 대한 성능을 확보하고, 변수 변동에 대한 강건성을 보장할 수 있도록 하였다.

$$W = 700000 \times \frac{s+2}{s+38} \quad (7)$$

선정된 가중함수는 최종적인 제어게인의 차수를 고려하여 1차의 함수로 설정하였다. 이렇게 선정된 가중함수를 시스템의 전달함수와 결합한 후 형상화 작업이 끝나게 되면 다음 단계로서 좌소인수견실안정화(left coprime factor robust stabilization)가 수행된다. 식(6)에서 정의한 소인수요소섭동을 갖는 시스템의 견실안정화는 잘 알려진 바와 같이 small gain theorem에 의해 주어진 시스템을 안정화시키는 제어게인  $K$ 에 대하여 다음의 관계로 주어진다.

$$\left\| \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I - GK)^{-1} \tilde{M}^{-1} \right\|_\infty \leq \gamma \quad (8)$$

따라서, 형상화된 시스템을  $G_s$ 라 할 때, 좌소인수요소 견실안정화를 위한 최적해  $\gamma_{\min}$ 은 McFarlane 등이 제안한 다음의 관계를 적용하여 반복적인 계산 없이 얻을 수 있다.<sup>(10)</sup>

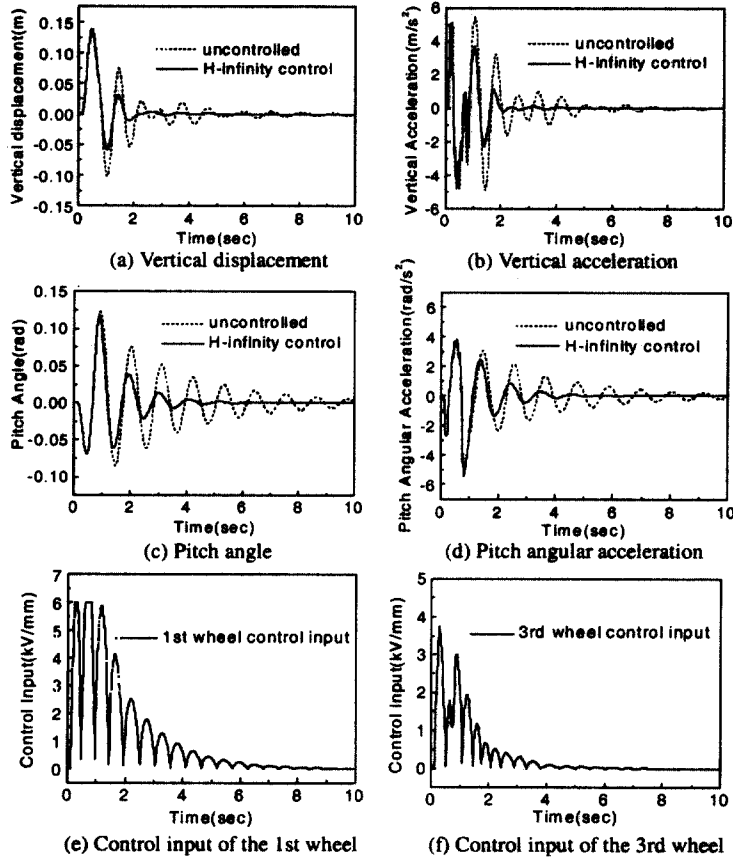


Fig.6 Bump responses of the tracked vehicle(16inch bump, speed : 30km/h)

$$\inf_K \left\| \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I - G_s K)^{-1} \tilde{M}_s^{-1} \right\|_{\infty} = \left\{ \sqrt{1 - \|\tilde{N}_s, \tilde{M}_s\|_H^2} \right\}^{-1} \quad (9)$$

$$= \gamma_{\min}$$

여기서  $\tilde{N}_s$  와  $\tilde{M}_s$  는 가중함수와 결합하여 형성화된 시스템의 정규화 좌소인수요소를 나타낸다. 이 단계에서  $\gamma$  는 설계 지표로서 사용되어지며, 성공적인 설계가 이루어진 경우 충분히 적은  $\gamma_{\min}$  을 얻을 수 있게 된다. 본 연구에서 ERSU 가 장착된 궤도차량의 최종적인 제어게인 설계를 위해  $\gamma$  의 값을 1.77로 설정하였다.

#### 4. 제어성능 분석

본 연구의 시뮬레이션에서 고려된 궤도차량은 총 중량 30 톤급이며, 복동형 ERSU 가 12 개의 모

든 바퀴에 장착되었다고 가정하였다. ERSU 내부에 설치된 전극 길이는 270mm 이며, 전극의 간극은 1mm 이다. 정적 평형을 이룰 때의 차륜암의 각도  $\alpha$  는  $-36^\circ$  로 가정하였으며, 이 때 가스켓머의 압력은 1g 의 하중(약 26kN)을 견딜 수 있도록 10MPa (100bar)로 설정하였다. 사용된 ER 유체는 독일 Bayer 사의 TPAI 3565 로 가정하였으며, 항복용력은 부하되는 전기장에 따라 유동모드 하에서의 측정치인  $\tau_y(E) = 885.21E^{1.533}$  의 관계를 이용하였다.

Fig.6 은 궤도차량이 반지름 16inch 인 반원형의 범프를 30km/h 의 속도로 통과할 때의 응답 특성을 나타낸다. Fig.6(a)는 궤도차량 무게중심점에서의 수직방향 운동을 도시한 것이다. 결과를 통하여 알 수 있듯이 ERSU 를 장착하고 제안된  $H_\infty$  제어

알고리즘을 적용한 경우 정착 성능이 우수함을 알 수 있다. Fig.6(b)에 궤도차량 승차감과 밀접한 관계를 갖고 있는 차체 수직 가속도에 대한 결과를 도시하였다. 이 결과에서도 역시 제안된 제어 알고리즘을 적용한 경우 노면 가진입력으로 인해 발생하는 차체의 진동을 빠른 시간내에 절연시킬 수 있음을 알 수 있으며 제안된 ERSU 와 제어 알고리즘을 적용하여 궤도차량의 승차감과 조향안정성 즉, 기동성을 충분히 확보할 수 있음을 알 수 있다. 또한, Fig.6(c)와 (d)에는 각각 피치 각운동의 결과를 나타내었으며 이 경우에도 수직 운동의 경우와 같이 빠른 진동 절연이 이루어짐을 알 수 있다. Fig.6(e)와 (f)에는 범프 통과 시 각각 첫번째 바퀴와 세번째 바퀴에 장착된 ERSU 에 부하된 전기장을 나타내고 있다. 결과로부터 알 수 있듯이 첫번째 바퀴의 경우가 세번째 바퀴에 비해 보다 큰 제어 전기장이 입력되었는데, 이는 범프 통과시 차체의 피치운동이 크게 발생하므로 이러한 피치운동을 제어하기 위한 제어력이 첫번째 바퀴에서 더욱 크게 요구되기 때문인 것으로 분석되며, Fig.6(e)에 나타난 바와 같이 과도한 제어 전기장이 가해지는 것을 방지하기 위해 최고 6kV/mm 의 입력에서 전기장이 포화되도록 하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 ERSU 를 장착한 16 자유도의 궤도차량 모델을 제시하였으며, 외란 및 변수 불확실성에 강건한  $H_{\infty}$  제어 알고리즘을 적용하고 범프 입력에 대한 시뮬레이션을 수행하여 그 우수성을 입증하였다. 제안된 복동형 ERSU 의 스프링 및 댐핑력 응답 특성에 근거하여 1/12 궤도차량에 대한 2 자유도 동가모델을 구축하고 이에 대한 모델링을 수행하였다. ERSU 가 갖는 비선형적인 스프링 및 댐핑력 응답특성을 정적상태에서의 ERSU 가 갖는 시스템 변수에 대한 섭동으로 간주하여 루우프 형상화 기법을 적용한  $H_{\infty}$  제어 알고리즘을 설계하였으며, 선형화된 2 자유도 모델에 근거한  $H_{\infty}$

제어기를 비선형성을 갖는 궤도차량의 모델에 적용하여 시뮬레이션을 수행함으로써 제안된 제어 알고리즘의 강건성과 우수한 진동절연성을 입증하였다. 향후, 다양한 노면 가진 조건에 대한 성능 분석이 수행되어질 것이며, 차량 승차감 및 조향안정성 측면에서의 보다 심도있는 연구를 진행할 예정이다.

### 6. 참고문헌

- (1) Morishita, S., Mitsui, J. and Kuroda, Y., 1990, "Controllable Shock Absorber as an Application of Electro-Rheological Fluid", Transaction of the JSME, Vol. 56, No. 524, pp. 78~84. (in Japanese)
- (2) Petek, N.K., 1992, "An Electronically Controlled Shock Absorber Using Electro-Rheological Fluid", SAE Technical Paper No. 920275.
- (3) Choi, S.B., Choi, Y.T., Chang, E.G., Han, S.J. and Kim, C.S., 1998, "Control Characteristics of a Continuously Variable ER Damper", Mechatronics, Vol. 8, No. 2, pp. 143~161.
- (4) 최영태, 최승복, 서문석, 여문수, 1996, "승용차용 ER 댐퍼의 제어특성", 대한 기계학회 춘계 학술대회논문집(A), pp. 415~419.
- (5) Choi, S.B., Choi, J.H., Nam, M.H., Cheong, C.C. and Lee, H.G. "A Semi-Active Suspension Using ER Fluids for a Commercial Vehicle Seat", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.9, No.8, 1998.
- (6) 박동원, 최승복, 강윤수, 서문석, 신민재, 한인식, 1999, "ER 현수장치를 갖는 궤도차량의 진동제어(I)", 대한기계학회논문집(A), Vol.23, No.10, pp.1758~1766.
- (7) 박동원, 최승복, 강윤수, 서문석, 신민재, 한인식, 1999, "ER 현수장치를 갖는 궤도차량의 진동제어(II)", 대한기계학회논문집(A), Vol.23, No.11, pp.1960~1969.
- (8) Hoogterp, F.B., Saxon N.L. and Schihl, P.J., 1993, "Semiactive Suspension for Military Vehicles", SAE Technical Paper No. 930847.
- (9) Hoogterp, F.B., Eiler M.K. and Mackie, W.J., 1996, "Active Suspension in the Automotive Industry and the Military", SAE Technical Paper No. 961037.
- (10) McFarlane, D.C., and Glover, K., 1992, "A Loop Shaping Design Procedure Using H Synthesis," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.37, No.6, pp.759~769.