

## ER 현수장치를 갖는 궤도 차량의 진동제어 (II) - 궤도차량의 모델링 및 제어 -

박동원\* · 최승복\*\* · 강윤수\*\*\* · 서문석\*\*\* · 신민재\*\*\* · 최교준\*\*\*  
(1998년 12월 3일 접수)

### Vibration Control of a Tracked Vehicle with ER Suspension Units (II) - Modeling and Control of a Tracked Vehicle -

Dong-Won Park, Seung-Bok Choi,  
Yun-Soo Kang, Mun-Suk Suh, Min-Jae Shin and Kyo-Jun Choi

**Key Words :** ER Suspension Unit (ER 현수장치), Tracked Vehicle (궤도차량), Vibration Control (진동 제어), Fuzzy Sky-Ground Hook Controller (퍼지 스카이-그라운드 훅 제어기)

#### 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 degree-of-freedom model for the tracked vehicle is established by Lagrangian method followed by the formulation of a new sky-ground hook controller. This controller takes account for both the ride quality and the steering stability. The weighting parameter between the two performance requirements is adopted to adjust required performance characteristics with respect to the operation conditions such as road excitation. The parameter is appropriately determined by employing a fuzzy algorithm associated with the vehicle motion. Computer simulations are undertaken in order to demonstrate the effectiveness of the proposed control system. Acceleration values at the driver's seat are analyzed under bump road profile, while frequency responses of vertical acceleration are investigated under random road excitation.

#### 1. 서론

제 (I)편에서 언급된 바와 같이 차량에 장착된 현수장치는 차량의 승객과 장비 및 화물을 보호하는 데 매우 중요한 역할을 한다.<sup>(1,2)</sup> 따라서 지난 십여년 동안 현수장치에 대한 새로운 메커니즘 개발은 물론, 이를 차량에 장착하였을 경우의 제어 기법에 대해서도 활발한 연구가 진행되어오고 있다.<sup>(3-6)</sup> 또한 ER 댐퍼를 장착한 차량의 진동제어효과를 얻기 위한 HILS (hardware - in - loop simulation) 연구도 진행되고 있다.<sup>(7)</sup> 그러나 지금까지 제안된 모든 ER 댐퍼는 중,소형의 승용차 적용을 목적으로 연구되어 왔으며, 보다 높은 댐핑력

을 요구하는 각종 대형 궤도차량을 적용대상으로 연구된 보고는 국내외적으로 없다.

일반적으로 궤도차량은 하중에 비해 지면에 가해지는 하중을 여러 개의 바퀴와 궤도에 의해 분산시킨다. 따라서 지면과의 접촉면적을 증대시킴으로써 접지압을 감소시켜 비포장도로와 같은 험한 지형과 장애물이 있는 곳에서 기동성능을 향상시킬 수 있는 장점을 갖고 있다. 이러한 특성을 갖고 있는 궤도차량의 운동을 해석하기 위한 모델링이 여러가지 방법으로 시도되고 있다.<sup>(8)</sup> 나아가서 가혹한 운전 및 환경조건 하에서의 승차감과 주행 기동성능들을 향상시키기 위한 반능동형 혹은 능동형 현수장치의 제어기법에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>(9-11)</sup> 그러나, 지금까지 ERSU (electro-rheological suspension unit)를 장착한 궤도차량의 모델링과 제어성능 해석에 관한 연구는 국내외적으로 전무한 실정이다.

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 인하대학교 기계공학과

\*\*\* 국방과학연구소

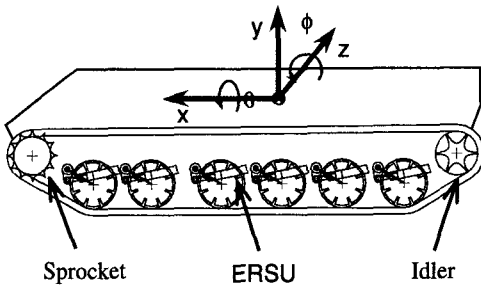


Fig. 1 Schematic configuration of the tracked vehicle with ERSU.

본 연구에서는 제 (I)편에서 설계된 복동형 ERSU를 장착한 궤도차량의 모델링과 제어성능 분석을 통하여 제안된 반능동형 현수시스템의 우수성과 실용가능성을 입증하고자 한다. 이를 위해 우선 16 자유도의 궤도차량 모델을 라그랑지안 방법(Lagrangian method)을 이용하여 구축하였다. 이 모델에 근거하여 궤도차량의 승차감과 조정안정성을 향상시키기 위해 새로운 형태의 스카이-그라운드 훅 제어기(sky-ground hook controller)를 제안하였다. 특히 제어로직 구성시 운전조건에 따라 승차감과 조정안정성의 가중치 결정을 위하여 퍼지 알고리즘을 채택하였다. 제안된 제어시스템의 성능해석을 위해 범프(bump)입력과 랜덤(random)입력에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 범프 입력에 대해서는 운전석에서의 최고 수직가속도가 1g 미만으로 넘을 수 있는 최고 범프 높이를 고찰하였으며, 랜덤 입력에 대해서는 가속도에 대한 주파수응답특성 등을 분석하였다.

## 2. 궤도차량의 모델링

ERSU가 장착된 궤도차량 시스템을 16 자유도로 가정하고 라그랑지안 방법을 이용하여 운동방정식을 유도하였다. Fig. 1은 ERSU를 장착한 궤도차량을 도시한 것이다. 여기에서  $\theta$ 와  $\phi$ 는 각각 롤과 피치 각운동을 나타내며 차량의 z축 방향 직선운동과 y축을 중심으로 한 회전운동은 모델링에 고려하지 않았다. 차체와 차륜은 각각 강체로 해석하였고, 각각의 차륜에 모두 ERSU가 장착되었다고 가정하였다. Fig. 2는 하나의 차륜에 작용하는 작용력을 도시한 그림이다. ERSU는 가스에 의한 스프링력과 전기장의 크기로 조절할 수 있는 가변 댐퍼로 모델링 하였으며, 궤도에서는 차량 전진방향의 힘과 수직방향으로 작용하는 스프링력을 고려하였고, 바퀴들간의 상관관계는 고

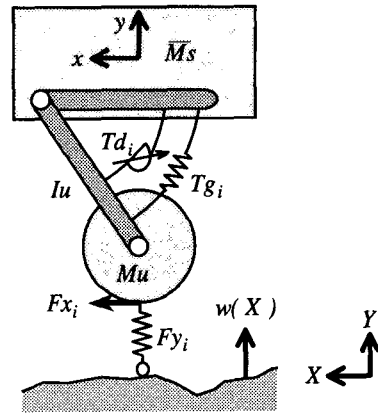


Fig. 2 Mechanical model of the wheel and body.

려하지 않았다. 각 차륜은 지면과 항상 접촉한다고 가정하였다. Fig. 2에서  $\overline{Ms}$ 는 하나의 차륜에 작용하는 차체질량을 나타낸 것이다.

본 논문에서 고려한 궤도차량 시스템의 운동에너지  $T$ 와 위치에너지  $V$ 는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} Ms \dot{x}^2 + \frac{1}{2} Ms \dot{y}^2 + \frac{1}{2} Is_x \dot{\theta}^2 + Is_{xz} \dot{\phi} + \frac{1}{2} Is_z \dot{\phi}^2 + \sum_{i=1}^{12} \left\{ \frac{1}{2} (Iu + I_{oa}^2 Mu) \dot{\alpha}_i^2 \right\} \quad (1)$$

$$V = Ms g z + \sum_{i=1}^{12} \left\{ Mu g l_{oa} \sin(\alpha_i - \phi) + \frac{1}{2} kt_i (-l_{oa} \sin(\alpha_i)) + \int_0^{\alpha_i} Tg_i(\omega) d\omega \right\}$$

여기서  $Ms$ ,  $Mu$ 는 각각 차체와 차륜의 질량이며,  $Is_x$ ,  $Is_z$ ,  $Is_{xz}$ 는 차체의 관성모멘트,  $Iu$ 는 차륜의 관성모멘트이다.  $g$ 는 중력가속도,  $l_{oa}$ 는 차륜암의 길이,  $kt_i$ 는 궤도의 스프링상수,  $Tg_i(\cdot)$ 는 ERSU에서 발생하는 스프링 토오크이다. 본 논문에서는 차륜의 직선방향 운동에너지는 고려되지 않았다. 위의 운동에너지와 위치에너지를 이용하여 라그랑지안 방법으로부터 다음과 같은 운동방정식을 유도할 수 있다.

$$\ddot{x} = \frac{1}{Ms} \sum_{i=1}^{12} Fx_i$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{Ms} \sum_{i=1}^{12} Fy_i$$

$$\ddot{\theta} = Msum1 / I_s_x + (I_s_{xz} (I_s_{xz} Msum1 - I_s_x Msum2)) / (I_s_x (I_s_x I_s_z - I_s_{xz}^2)) \quad (2)$$

$$\ddot{\phi} = (I_s_x Msum2 - I_s_{xz} Msum1) / (I_s_x I_s_z - I_s_{xz}^2)$$

$$\ddot{\alpha}_i = (-l_{oa} \cos(\alpha_i - \phi) Fy_i + Tg_i(\alpha_i) + Td_i(\alpha_i)) / (Iu + l_{oa}^2 Mu), \quad i = 1, \dots, 12$$

여기서,

$$Msum1 = \sum_{i=1}^{12} l_{z_i} Fy_i$$

$$Msum2 = \sum_{i=1}^{12} \{-l_{x_i} Fy_i + (l_{y_i} - l_{oa} \sin(\alpha_i) - r_w) * Fx_i + Tg_i(\alpha_i) + Td_i(\alpha_i)\}$$

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

### 3. 제어기 설계

ERSU에 공급되는 전기장이 과도하게 들어갈 경우 과도한 댐핑에 의해서 공진주파수 이후의 비교적 높은 주파수를 갖는 가진이 차량에 들어오게 되며 이로 인하여 차량의 성능이 저하될 수 있다. 따라서 우수한 진동 절연 성능을 얻기 위해서는 적절한 제어 알고리즘에 의한 진동제어가 필요하다. 반능동형 댐퍼 시스템의 진동제어를 위하여 가장 많이 사용되는 것이 스카이 혹은 알고리즘이다. 이는 Karnopp에 의하여 제안되었으며 구조가 간단하며 실용성이 뛰어나다.<sup>(12)</sup> 스카이 혹은 알고리즘은 차체 윗 쪽의 공간상에 절대고정변위를 갖는 천정과 차체사이에 가상의 댐퍼를 설치하고 이때 발생하는 가상댐퍼의 댐핑력을 요구 댐핑력으로 사용하는 것이다. 일반적으로 알려진 스카이 혹은 제어 알고리즘은 차량의 승차감에 중점을 두어 설계가 수행되었다. 그러나, 궤도 차량의 경우는 승차감 뿐만 아니라 조향안정성과 연계한 기동성의 성능 향상이 절대적으로 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 차량의 승차감과 주행안정성을 동시에 고려하는 새로운 형태의 퍼지 스카이-그라운드 훅 (fuzzy sky-ground hook) 제어알고리즘을 제안하였다.

스카이 혹은 제어알고리즘에서는 차체와 천정 사이에만 가상의 댐퍼가 부착되었다고 가정하여 요구 댐핑력을 도출한다. 그러나, 본 연구에서 제안된

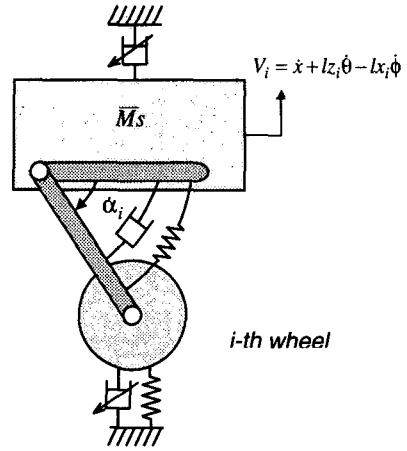


Fig. 3 Concept of the proposed sky-ground hook controller.

퍼지 스카이-그라운드 훅 알고리즘은 Fig. 3에 도시된 것과 같이 차체와 천정 사이 뿐만 아니라 차륜과 지면 사이에도 가상의 댐퍼가 구성되었다. Fig. 3에서  $V_i$ 와  $\alpha_i$ 는 각각 차체의 수직방향 속도와 휠암의 가속도이다.  $V_i$ 는 다음과 같이 차체의 수직방향 속도, 롤 각속도, 피치 각속도의 함수로 표현된다.

$$V_i = \dot{x} + l_{z_i} \dot{\theta} - l_{x_i} \dot{\phi} \quad (3)$$

이렇게 구성된 가상의 댐퍼에서 발생하는 댐핑력을 현가장치에 입력되는 요구댐핑력으로 사용하였다. 이때 요구댐핑력은 차체의 진동을 제어하기 위한 댐핑력과 차륜의 진동을 제어하기 위한 댐핑력으로 나뉘어 질 수 있다. 이 두 댐핑력을 적절히 조합한다면 승차감과 주행안정성을 동시에 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 제어기 구현시의 용이성을 위하여 전체 차량을 Fig. 3에 도시된 바와 같이 각 차륜이 독립적으로 운동한다고 가정하고  $i$  번째 차륜에 대한 새로운 형태의 제어기를 다음과 같이 설계함으로써 앞에서 설명한 두 댐핑력을 조합하는 방법을 사용한다.

$$u_i = -\sigma_i C_{si} V_i - (1 - \sigma_i) C_{gi} l_{oa} \ddot{\alpha}_i \quad (4)$$

여기서  $C_{si}$ 는 스카이 혹은 제어제인이며,  $C_{gi}$ 는 그라운드 훅 제어제인이다.  $\sigma_i$ 는 제어입력에서의 스카이 훅에 대한 가중치이며  $0 \leq \sigma_i \leq 1$ 이다. 만일  $\sigma_i$ 가 0 이라면 승차감 보다는 주행안정성에 중점을 둔 제어입력이 현가장치에 공급되게 된다. 반대로  $\sigma_i$ 가 1 이라면 승차감에 중점을 둔 제어



Table 1 Fuzzy rule base of sky-ground hook control.

$\tilde{\sigma}$		$\tilde{\nu}$				
		VS	SM	ME	LA	VL
$\tilde{\alpha}$	VS	P3	P5	P5	P6	P6
	SM	P1	P3	P4	P5	P5
	ME	P1	P2	P3	P4	P5
	LA	P1	P1	P2	P3	P4
	VL	ZO	P1	P2	P2	P3

3

Table 2 Parameters for fuzzy sky-ground hook control.

Parameter	Value	Parameter	Value
$C_{si}$	10000	$C_{gi}$	1000
ZO	0.0	P1	0.15
P2	0.35	P3	0.55
P4	0.75	P5	0.9
P6	1.0		

#### 4. 제어성능 해석

본 연구의 시뮬레이션에서 고려된 궤도차량은 총 중량 30톤급이며, 복동형 ERSU가 모든 바퀴에 장착되었다고 가정하였다. 전극의 길이는 270mm이며, 전극의 간극은 1mm이다. 정적평형을 이룰 때의 차륜 압의 각도  $\alpha$ 는 32°로 가정하였으며, 이 때 가스챔버의 압력은 8.225Mpa (82.26bar) 이 된다. 사용된 ER 유체는 제 (I)편에서 ER B라고 가정하였으며, ER B의 전기장 무부하시의 점도는 67mPa s이며, 항복응력은 유동모드 하에서  $\tau_y(E) = 724 E^{1.629}$  Pa의 관계를 갖고 있다. 또한 비교 대상으로 설정된 수동차량은 기존의 단로드형 HSU를 장착한 차량으로 가정하였다. ERSU를 장착한 궤도차량의 제어성능을 고찰하기 위하여 단일범프(single-bump) 입력을 가한 경우와 랜덤 가진(random excitation) 입력을 가한 두 경우로 나누어 응답특성을 고찰하였다.

##### 4.1 범프가진

Fig. 6은 차량이 반지름이 16inch인 반원형의 범프를 20km/h의 속도로 통과할 때 첫 번째 바퀴의 중심이 움직이는 궤적을 도시한 것이다. 시뮬

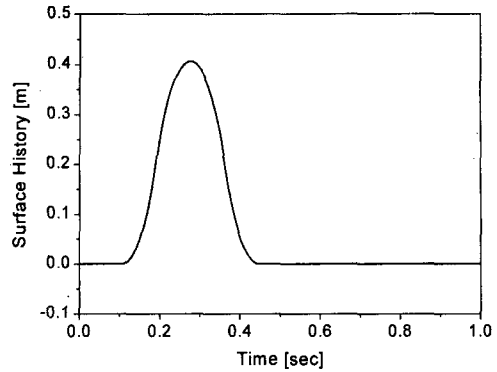


Fig. 6 Surface history of the bump input (1<sup>st</sup> wheel, 16 inch bump, speed=20km/h).

레이션에서는 이와 같은 범프 형상을 각각의 바퀴가 차례로 넘게 되는 상황을 고려하였다. Fig. 7은 16inch 범프를 20km/h의 속도로 통과할 때의 궤도차량의 응답특성을 나타낸다. Fig. 7(a)는 궤도차량의 무게중심점에서의 수직방향 운동을 도시한 것으로, 이 그림을 통하여 ER SU를 장착하고 퍼지스카이-그라운드 혹 제어기를 사용하여 제어한 경우 정착성능이 매우 우수함을 알 수 있다. Fig. 7(b)의 피치 각운동의 변화와 Fig. 7(c)에 있는 첫 번째 바퀴의 각운동의 변화에서도 제어를 한 경우 각운동의 변화가 처음에는 가장 크지만 가장 빨리 감쇠하는 것을 알 수 있다. Fig. 7(d)는 세 번째 바퀴의 각운동을 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 ERSU를 장착한 궤도차량의 제어성능에 의한 승차감과 조향안정성(기동성)의 향상을 가져올 수 있다는 것을 명확히 알 수 있다. 또한 이 그림을 통하여 첫 번째 바퀴에 비하여 세 번째 바퀴의 각변위가 같은 범프를 통과할 때에도 현저히 작은 것을 알 수 있다. 따라서 전체 차량의 운동에 미치는 영향이 첫 번째 바퀴가 월등하게 큰 것을 알 수 있다. Fig. 7(e)는 운전석에서의 수직가속도를 비교한 것으로 제어를 수행하지 않은 경우와 퍼지스카이-그라운드 혹 제어기를 사용한 경우의 그래프가 가속도가 최대가 되는 지점에서 겹쳐 있음을 알 수 있다. 따라서 제안된 퍼지스카이-그라운드 혹 제어기는 범프 통과시 가속도에 악영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(f)는 첫 번째 바퀴에 가해진 전기장을 나타내고 있다. 본 연구에서는 Fig. 7(f)에서 알 수 있는 바와 같이 과도한 전기장이 가해지는 것을 방지하기 위하여 최고 5kV/mm에서 전기장이 포화되도록 하였다.

Fig. 8은 Fig. 6과 같은 범프를 지날 경우의 각 바퀴의 기여도를 도시한 것이다. Fig. 8(a)는 바퀴가 위치한 순서에 따라 각 ERSU에서 작용한 댐핑도

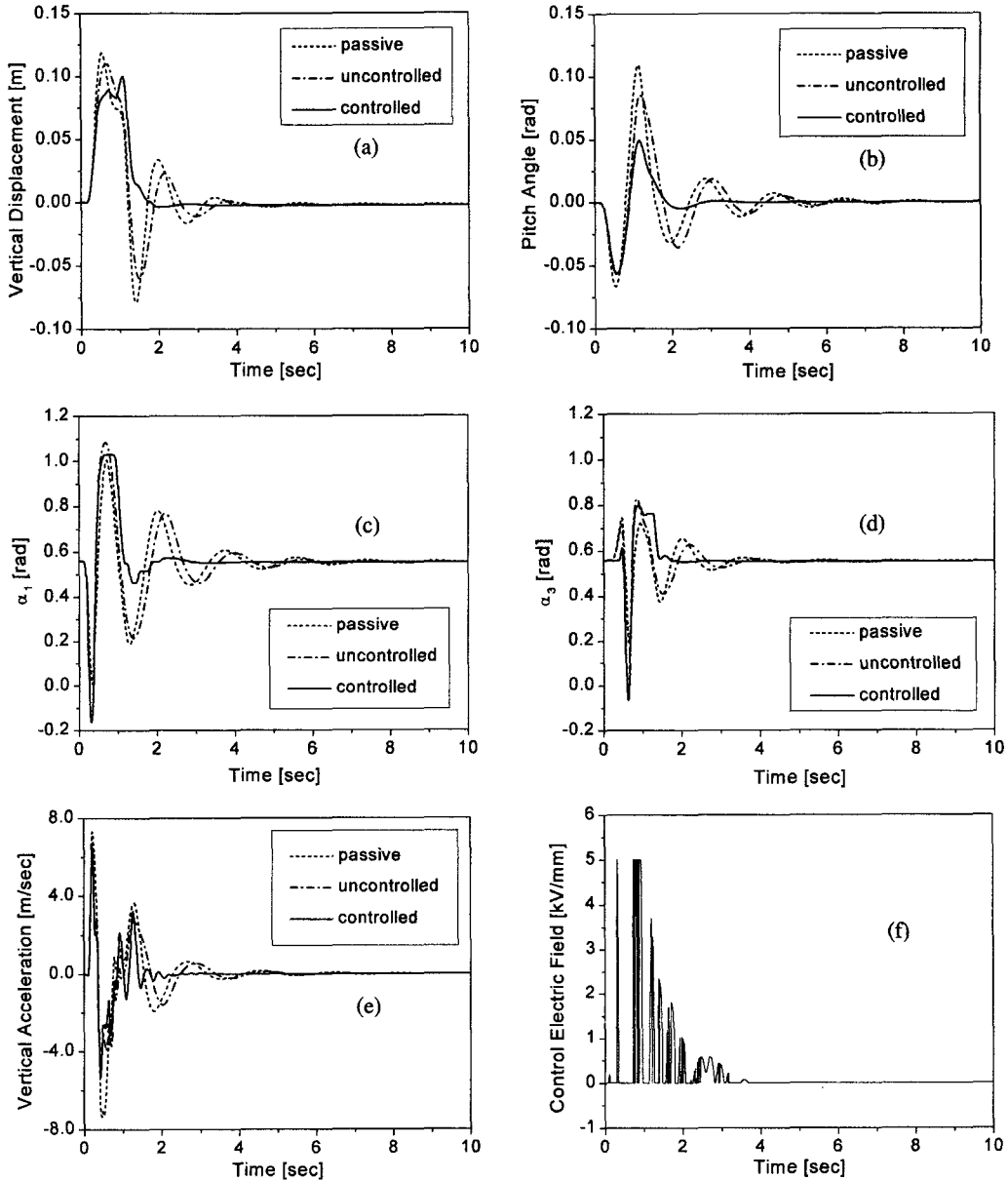


Fig. 7 Bump responses of the tracked vehicle (16 inch bump, speed = 20 km/h).

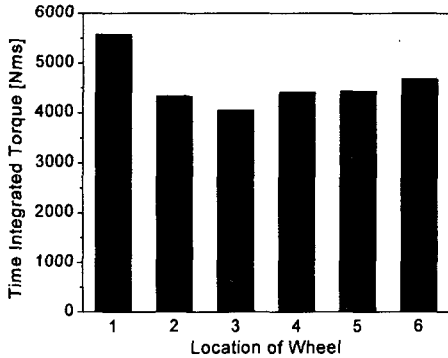
크의 절대값을 적분한 것을 도시하였으며, Fig. 8(b)는 가해진 전기장의 적분치를 도시한 것이다. Fig. 8을 통하여 범프를 통과할 경우에는 앞부분과 뒷부분에 위치한 ERSU의 기여도가 중심부에 위치한 ERSU의 기여도에 비하여 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 이것은 범프 통과시에는 피치운동이 크게 발생하기 때문에 피치운동을 제어하기 위한 제어력이 많이 작용하기 때문이다.

Fig. 9는 댐핑 특성에 영향을 주는 중요한 인자

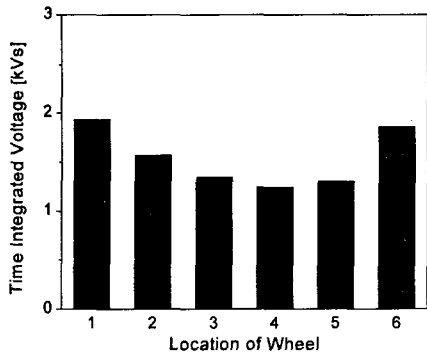
중 하나인 ERSU의 오리피스 반경을 변화시켰을 때의 궤도 차량의 전진속도에 대하여 운전석에서의 최고 수직가속도가 1g 미만인 상태로 통과할 수 있는 범프의 최고 높이가 도시되었다. 이로부터 제안된 ERSU를 장착한 궤도차량의 경우 기존의 수동형 HSU를 장착한 차량보다 우수한 기동성을 가져온다는 것을 명확히 알 수 있다. 오리피스 반경이 클수록 전기장 무부하시의 댐핑토오크는 감소한다.<sup>(14)</sup> 범프 통과시의 최대 가속도는 이

무부하시의 댐핑토크에 의해 결정되므로, 저속 (50 km/h 이하)에서는 오리피스 반경이 클수록 고속(50 km/h 이상)에서는 오리피스 반경이 작을수록 통과할 수 있는 범프의 높이가 증가하는 경향을 보이고 있다. 차량의 속도가 10 km/h 일 때의 가진 주파수는 약 3.5 Hz 가 되어 차체질량의 공진 주파

수들 보다 높은 영역이므로, 고려한 주파수 범위 내에서 차량 속도에 따른 통과가능 범프 높이의 변화에 주는 영향은 거의 없었으며 이는 계가 갖고 있는 일반적인 특성이다.



(a) Time integrated torque



(b) Time integrated voltage

Fig. 8 Contribution effect of each ERSU for the bump responses (16 inch bump, speed = 20 km/h).

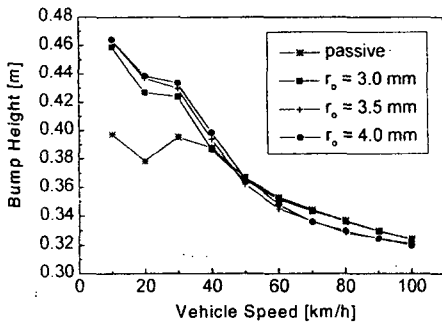


Fig. 9 Maximum bump height with respect to the vehicle speed.

4.2 랜덤가진

Fig. 10 은 궤도차량이 72km/h 로 거칠기 상수가 0.45 인 야지를 주행할 경우 노면의 궤적을 나타낸다. Fig. 11 은 궤도 차량이 Fig. 10 과 같은 노면을 지날 때의 시간영역에서의 응답특성을 나타낸다. Fig. 11(a)는 궤도차량의 수직방향 운동을 기록한 것으로, 이 그림을 통하여 수직방향의 진폭이 많이 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 궤도차량의 피치 각운동을 나타낸 것으로, 피치 각운동 역시 진폭이 많이 감소한 것을 알 수 있다. Fig. 11(c)는 롤 각운동을 비교한 것이며, 롤 각운동 역시 제어를 수행하였을 경우 진폭이 감소하였음을 알 수 있다. Fig. 11(d)는 첫 번 째 바퀴의 각운동을 도시한 것으로 바퀴의 운동 역시 제안된 제어기를 사용하여 감소시켰음을 알 수 있다. Fig. 11(e)는 운전석에서의 수직방향 가속도를 도시한 것으로 가속도의 크기 역시 감소하였음을 알 수 있으며, Fig. 11(f)는 첫 번 째 바퀴에 가해진 전기장을 도시한 것이다.

Fig. 12 는 궤도차량이 Fig. 10 과 같은 노면을 지날 때의 주파수 영역에서의 응답특성을 도시한 것이다. Fig. 12 에서는 제안된 퍼지 스카이-그라운드 혹 제어기와 더불어 기존의 스카이 혹 제어기의 성능도 같이 도시되었다. 잘 알려진 바와 같이 좌측과 우측 바퀴에 전달되는 노면 입력의 상관도 (correlation)는 저주파수 영역(5Hz 이하)에서는 높

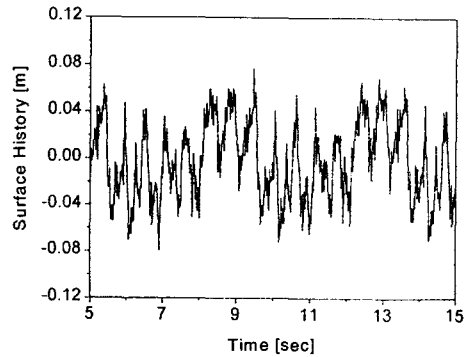


Fig. 10 Surface history of the random input (1<sup>st</sup> wheel, roughness = 0.45, speed = 72 km/h).

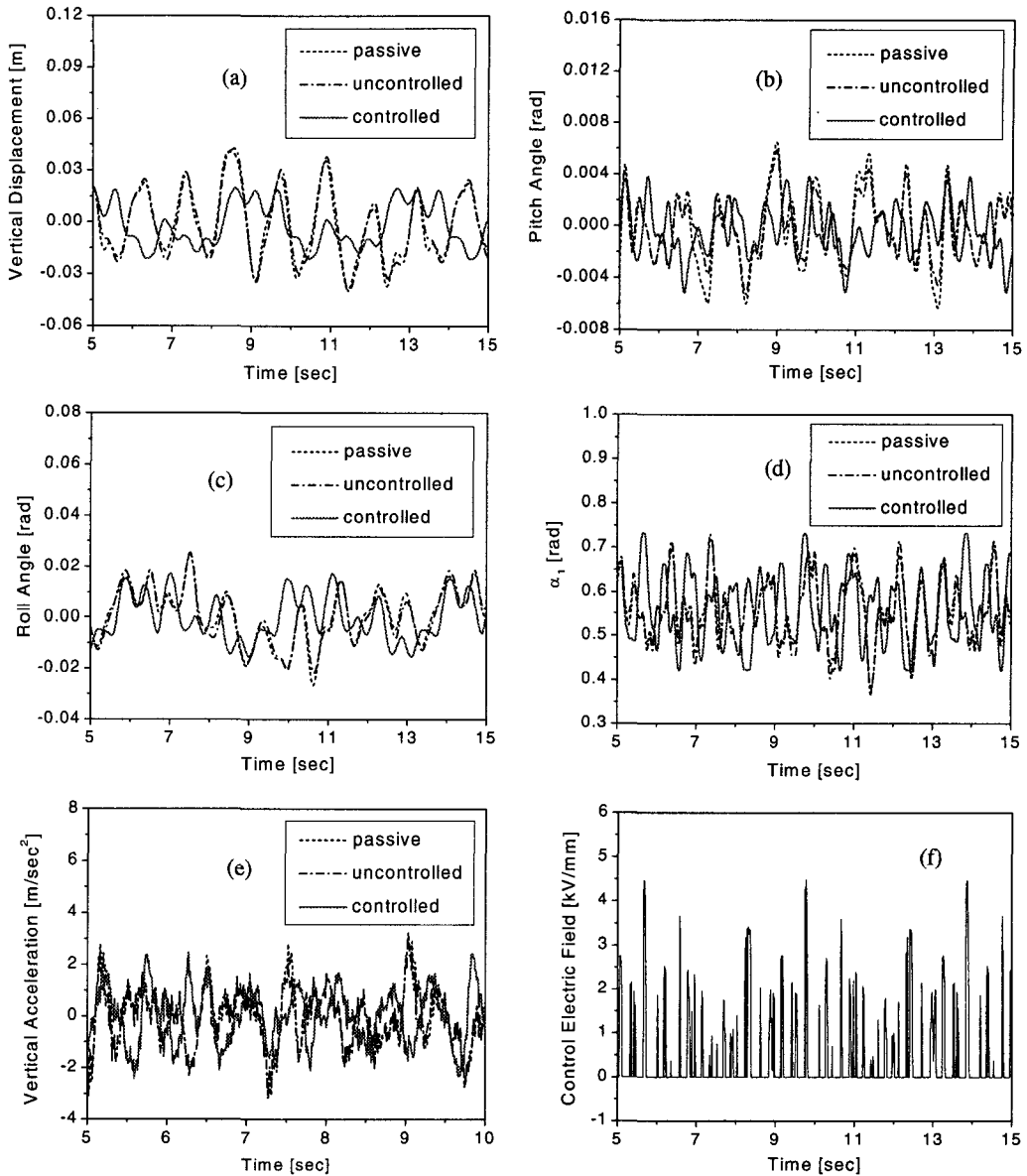


Fig. 11 Random responses of the tracked vehicle in the time domain (roughness = 0.45, speed = 72km/h).

지만 고주파수 영역(5Hz 이상)에서는 매우 낮다. 따라서, 피치운동은 저주파수 입력에 큰 영향을 받게 되고 롤 운동은 고주파수 입력에 많은 영향을 받게 된다. Fig. 12(a)는 무게중심에서의 수직 방향 가속도의 PSD (power spectral density)를 나타낸다. Fig. 12(a)의 결과는 거의 모든 주파수에서 제안된 제어기가 수동형 HSU 장착시에 비하여는 물론이고 기존의 스카이-훅 제어기에 비하여 좋은 성능을 나타내었다. Fig. 12(b)는 피치 각가속도의

PSD를 나타낸다. 이 그림을 통하여 피치 각가속도는 제안된 제어기를 사용하여 ERSU를 제어하였을 때의 결과가 특히 저주파수 영역에서 기존의 스카이-훅 제어나 HSU 장착시보다 좋은 것을 알 수 있다. Fig. 12(c)는 롤 각가속도의 PSD를 나타내며, 롤 각가속도는 제안된 제어기를 사용하였을 경우에 고주파 영역에서 다른 경우에 비하여 좋은 성능을 나타내는 것을 알 수 있다. Fig. 12(d)는 운전석에서의 수직방향 가속도의 PSD를 나타낸 것



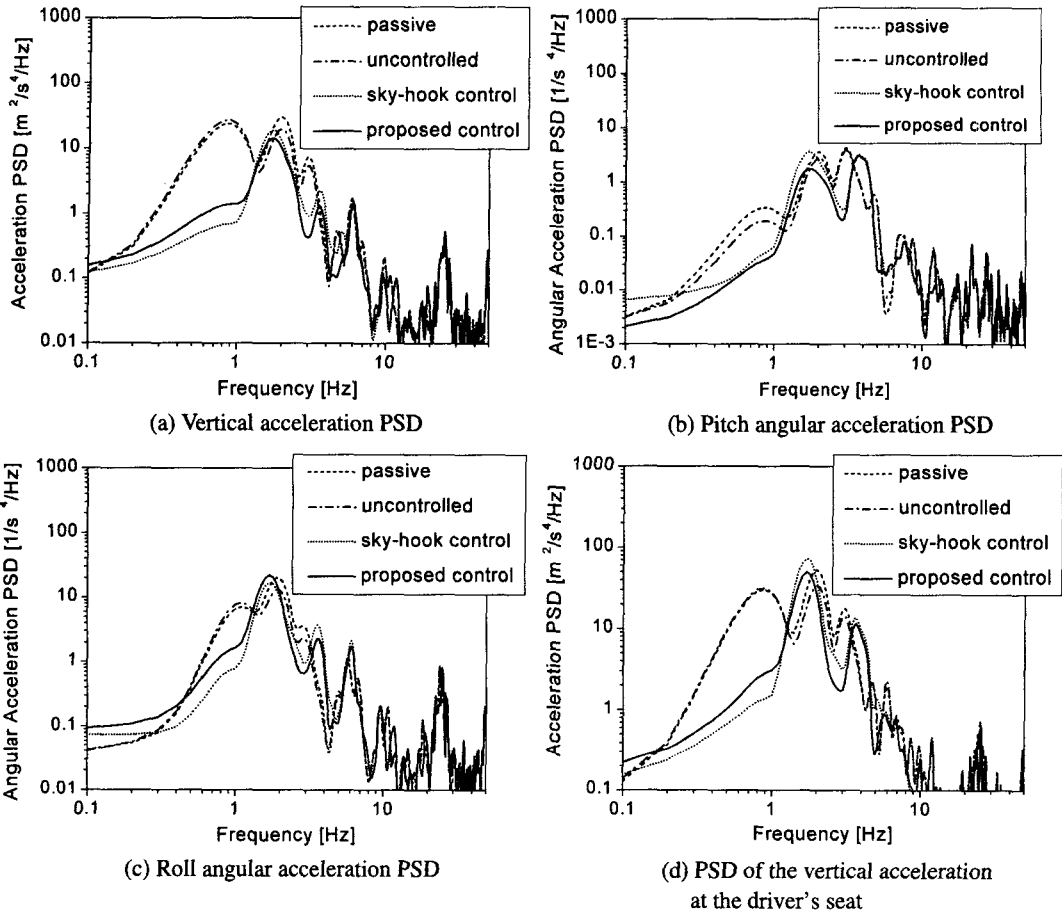


Fig. 12 Random responses of the tracked vehicle in the frequency domain (roughness = 0.45, speed = 72km/h).

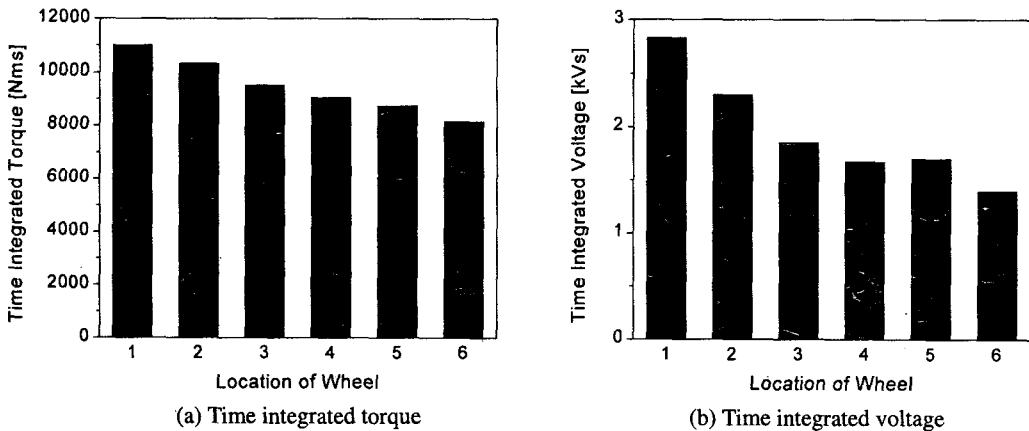


Fig. 13 Contribution effect of each ERSU for the random responses (roughness = 0.45, speed = 72 km/h).

으로 운전자가 느끼는 승차감 역시 제한된 제어기를 사용하였을 경우에 가장 우수한 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 궤도차량이 Fig. 10과 같은 야지를 주행할 때의 각 바퀴의 기여도를 도사한 것이다. Fig. 13(a)는 바퀴가 위치한 순서에 따라 5초에서 15

초까지 각 ERSU에 작용한 댐핑토크의 절대값의 적분치를 도시한 것이며, Fig. 13(b)는 5초에서 15초까지 각 ERSU에 가해진 전기장의 적분치를 도시하였다. Fig. 13을 통하여 야지를 주행할 경우에는 앞부분에 있는 ER SU가 뒷부분에 있는 ER SU에 비하여 기여도가 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과를 나타내는 이유는 뒤쪽의 바퀴들은 차체가 이미 지형에 의해 운동을 일으킨 다음에 앞 바퀴에 영향을 주었던 노면에 접하게 되기 때문이라고 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 ERSU를 장착한 16자유도의 궤도차량 모델을 제시하였으며, 실용성이 뛰어난 스카이 훅 제어이론을 응용한 퍼지 스카이-그라운드 훅 제어기를 설계하였다. 범프입력과 랜덤입력에 대한 시뮬레이션을 수행하여 각 노면 조건에 대한 성능을 고찰한 결과 두 가지 노면조건하에서 모두 우수한 성능을 나타내었다. 두 가지의 노면 조건에 대한 각 바퀴의 기여도를 도출한 결과 범프입력에 대해서는 앞 쪽과 뒷 쪽의 ERSU들의 기여도가 높았으며, 랜덤입력에 대하여는 앞부분의 ERSU들의 기여도가 높았다. 범프 입력의 경우 운전석의 증력가속도가 1g 미만인 상태에서 통과할 수 있는 최대 범프의 높이를 고찰한 결과 기본 댐핑력을 좌우하는 오리피스스의 반경이 커짐에 따라, 즉 기본댐핑력이 작아짐에 따라 저속에 서는 통과할 수 있는 최대 범프의 높이가 증가하는 경향을 보였다. 랜덤 가진하에서의 주파수 특성분석으로부터 제어를 수행하였을 때 전체적인 운동의 진폭은 감소하였으나 2Hz 부근에서의 진 폭은 약간 증가하였다. 이것은 ERSU의 장착조건이 롤 방향 회전의 제어에 대해서는 불리하기 때문이다. 향후, ERSU의 장착위치와 장착조건에 대한 연구를 계속 수행할 예정이다. 또한, 여러 장비에서 발생하는 시간지연과, 불확실성의 영향들을 고려한 강건 제어기의 설계에 대한 연구와 실험적 구현에 대한 연구가 계속될 것이다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 지원으로 수행된 결과이며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Gillespie, T.D., 1992, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE Inc.
- (2) 허승진, 1992, "자동차의 능동형 샤시 시스템 개발동향," 대한기계학회지, Vol. 32, No. 10, pp. 874~857.
- (3) 이경수, 1996, "자동차 현가 시스템의 능동제어," 대한기계학회지, Vol. 36, No. 7, pp. 679~704.
- (4) ElMadany, M.M. and Abduljabbar, Z., 1989, "On the Statistical Performance of Active and Semi-Active Car Suspension Systems," *Journal of Computers and Structures*, Vol. 33, pp. 785-790.
- (5) Tang, P., Palazzolo, A.B., Kascak, A.F. and Montague, G.T., 1997, "Electromechanical Modeling of Hybrid Piezohydraulic Actuator System for Active Vibration Control," *Transactions of ASME : Journal of Dynamical Systems, Measurement and Control*, Vol. 119, pp. 10-18.
- (6) Yoshimura, T. and Hosokawa, S., 1991, "Active Control with Preview to Railway Vehicles Subject to Irregular Tracks," *Transactions of JSME*, Vol. 57, pp. 2263-2270. (in Japanese)
- (7) 안창섭, 최영태, 최승복, 1998, "HILS를 통한 ER 현가장치의 성능평가," 대한기계학회 논문집(A), Vol. 22, No. 11, pp. 2061~2071.
- (8) 이진철, 1990, "무한궤도차량 현수장치의 동적 응답특성에 관한 연구," 석사학위논문, 연세대학교 산업대학원, 서울.
- (9) Hoogterp, F.B., Saxon, N.L. and Schihl, P.J., 1993, "Semiactive Suspension for Military Vehicles," *SAE Technical Paper No. 930847*.
- (10) 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*.
- (11) Saxon, N.L., Meldrum, J.W.R., 1997, "Semiactive Suspension: A Mobility Case Study," *SAE Technical Paper No. 970386*.
- (12) Karnopp, D.C., Margolis, D.L. and Rosenberg, D.C., 1990, *System Dynamics - A Unified Approach*, John-Wiley & Sons Inc., New-York.
- (13) Terano, T., Asai, K., Sugeno, M., 1987, *Fuzzy Systems Theorem and Its Applications*, Harcourt-Brace, Boston.
- (14) 박동원, 최승복, 강윤수, 서문석, 신민재, 한인식, 1999, "ER 현수장치를 갖는 궤도차량의 진동제어 (I) ER 현수장치의 설계," 대한기계학회 논문집(A), (인쇄중).