

## 수정된 스카이훅 제어기를 적용한 회전형 현가장치 차량의 차체진동 저감

정사무엘\* · 유 완 석\*†

\*부산대학교 기계공학부

### Vibration Reduction Technique for Rotating Suspension Vehicles with a Modified Skyhook Controller

Samuel Jung\* and Wan-suk Yoo\*†

\* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received June 18, 2012 ; Revised September 6, 2012 ; Accepted September 10, 2012)

**Key Words:** Traction Control(구동력 제어), Semi-Active Suspension(반능동 현가장치), Skyhook(스카이훅), SH-ADD(SkyHook-Acceleration Driven Damper)

**초록:** 군용 견마로봇차량은 전시 임무수행간 야지를 주행하게 되는데, 이때 발생하는 지속적인 충격에 의한 차체의 진동은 내부 구성품에 손상을 초래할 수 있다. 현재 차체 진동저감을 위한 제어의 수단으로 능동 또는 반능동 현가장치를 사용한 많은 연구가 진행 되고 있다. 본 연구에서는 기존의 반능동 현가장치와 더불어 6x6 차량의 회전형 현가장치와 독립적인 구동제어에 의한 진동저감 기법을 제안한다. 진동 제어기로는 스카이훅의 수정기법 중의 하나인 SH-ADD 를 적용하였다. ISO E 등급의 노면을 주행노면으로 선정하였으며, 시뮬레이션은 ADAMS Control 과 Matlab Simulink 를 연동하여 수행하였다. 야지에서 서의 내부장비의 피로누적에 초점을 두어 주행 제어조건에 따른 RMS 수치로서 결과를 비교 및 분석하였다.

**Abstract:** In military vehicles moving over poor roads, severe vibration of the chassis can damage internal components. Currently, many studies have focused on active and semi-active suspensions to reduce the vibration of the chassis. In this study, a vibration reduction technique is suggested by applying a unique rotating suspension structure. SH-ADD, a type of modified Skyhook, was selected as a controller for vibration reduction. A random ISO class E road was selected as the driving road. The simulation was performed using ADAMS Control and Matlab Simulink. The control result was compared with the RMS acceleration with a focus on the cumulative fatigue of the internal equipment.

- 기호설명 -

$V_{tracting}$  : 추종 주행속도

$y_s, y_u$  : 상,하질량(차체) 수직방향 좌표

$L, \theta$  : 팔길이, 팔과 차체의 상대각도

$R, \omega$  : 타이어 반경, 바퀴 각속도

$c_{sky}^{trans}, c_{sky}^{rev}$  : 변진,수직방향 스카이훅 계인

$f_d, c_d$  : 목적감쇠력, 감쇠계수

$c_s, c_*$  : 수동감쇠계수, 최종제어 감쇠계수

$T_p$  : 속도추종 P 제어에 의한 바퀴토크

$T_{sky}$  : 진동제어 Skyhook 제어에 의한 바퀴토크

### 1. 서 론

군용 견마로봇차량은 미래전 상황시 근거리 감시정찰 및 지뢰의 탐지와 제거를 목적으로, 정해진 경로를 자율적으로 주행하여 임무수행할 수 있는 차량형 무인 로봇이다. 군용 견마로봇차량의 임무수행 환경은 시가지 또는 야지로서 노면 상태를 예측하여 경로와 속력을 제어하며 운행하게 된다.

예측을 벗어난 상태의 노면을 주행하게 될 때 진동저감능력을 넘어서는 충격이 차체에 가해지게 되고, 충격에 의해 발생하는 차체의 진동은 내부 구성품에 심각한 손상을 초래하여 운행지

† Corresponding Author, wsyoo@pusan.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers



Fig. 1 6x6 autonomous vehicle

속이 불가능하게 될 수 있다. 따라서, 차체 진동을 저감을 위한 제어의 수단으로 능동 또는 반능동 현가장치를 사용한 많은 연구<sup>(1,2)</sup>가 현재 진행되고 있으며, 특히 군임무수행 특성상 제어 불능상황을 대비하여 반능동 현가장치의 적용에 집중되고 있다.

본 연구에서는 현가장치 이외의 제어수단, 즉 휠토크로 차체 진동저감이 가능함을 보이고, 기존의 반능동 현가장치와 더불어 6x6 차량의 특징인 현가장치의 회전형 구조와 독립적인 구동능력에 의한 진동저감 기법을 제안한다.

진동제어 기법으로는 Karnoop 가 제안한 Skyhook 제어기법<sup>(3)</sup>의 수정기법인 ADD(Acceleration Driven Damper)제어<sup>(4)</sup>를 적용하여 운행간 차체에 지속적으로 발생하는 수직가속도응답을 저감하였다.

시뮬레이션 주행노면은 야지기준에 적합한 ISO 기준 E 등급의 랜덤노면<sup>(5)</sup>을 선정하였다. 시뮬레이션은 ADAMS Control 과 Matlab Simulink 를 연동<sup>(6)</sup>하여 수행하였으며, 내부장비의 피로누적에 초점을 두어 제어조건에 따른 RMS 수치로서 결과를 비교 분석하였다.

## 2. 차량 모델링

본 연구에 사용된 차량모델은 다족형 견마로봇(Quadruped Legged Robot)의 형상으로 6 개의 팔과 6 개의 바퀴로 구성되어 있으며 연결관계를 나타내는 Topology 는 Fig. 2 과 같으며, 각 부분 질량은 Table 1 과 같다.

현가장치는 차체와 팔간의 회전형 스프링 및 반능동 댐퍼로 구성되어 있다. 선형강성계수는 8021.41Nm/rad, 수동감쇠계수는 286.48Nms/rad 이다. 차량의 구동력원은 In-wheel motor 이며 타이어는 MF-Fire 모델을 선정하였다.

Table 1 Weights of parts

Part	Chassis	Dummy	Arm	Wheel
Mass(kg)	833	140	61	45

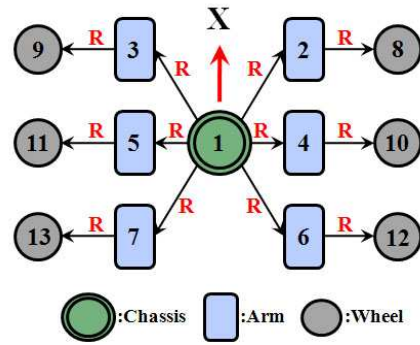


Fig. 2 Topology of vehicle

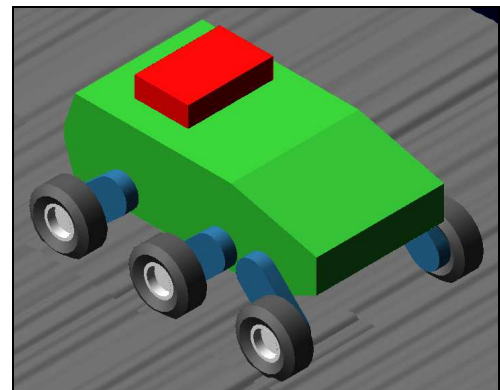


Fig. 3 6x6 vehicle model with ADAMS

### 2.1 ADAMS modeling

다물체동역학 해석프로그램인 ADAMS 를 이용하여 견마로봇 차량을 Fig. 3 과 같이 모델링하였다.

## 3. 제어 알고리즘

### 3.1 제어 알고리즘

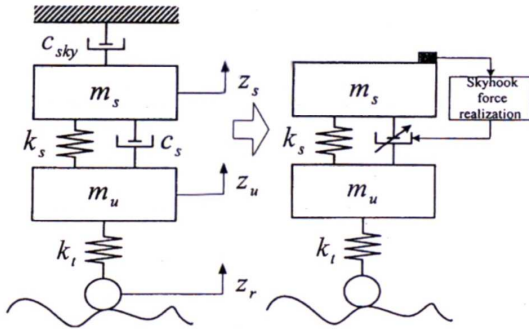
본 연구에서는 차체 진동제어 알고리즘으로 스카이훅(Skyhook)제어의 수정기법인 SH-ADD 를 적용하였으며 Simulink 로 ADAMS 와 연동하였다.

#### 3.1.1 반능동 스카이훅<sup>(3)</sup>

반능동 스카이훅 제어는 Fig. 4 와 같이 차체 고유진동영역의 공진현상을 억제하기 위하여 차체와 천정간에 가상의 감쇠기(관성감쇠기)가 설치된 것

**Table 2** Control scheme of Skyhook

If	Then
$\dot{y}_s(\dot{y}_s - \dot{y}_u) < 0$	$c_* = c_s$
$c_* \geq c_{\max}$	$c_* = c_{\max}$
$f_d \geq f_{\max}$	
Else	$c_* = c_d$

**Fig. 4** Skyhook control concept

과 동일한 진동감쇠가 이루어지도록 현가장치의 감쇠력을 제어하는 알고리즘이다.

Fig. 4의 좌측 1/4 차량에 대한 운동방정식은 식 (1)과 같으며, 감쇠력에 대해서만 정리하면 식 (2)와 같다.

$$-m_s \ddot{y}_s - k_u(y_s - y_u) - c_{sky} \dot{y}_s - c_s(\dot{y}_s - \dot{y}_u) = 0 \quad (1)$$

$$f_d = -c_{sky} \dot{y}_s - c_s(\dot{y}_s - \dot{y}_u) \quad (2)$$

식 (2)에 상질량과 하질량의 상대속도를 나누면 능동현가장치의 목적감쇠계수를 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$c_d = -f_d / (\dot{y}_s - \dot{y}_u) \quad (3)$$

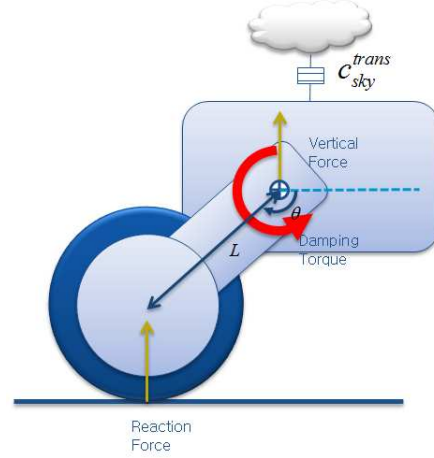
반능동 현가장치의 물리적 불용영역을 전환조건으로 표현하면 Table 2과 같다.

### 3.1.2 회전형 반능동현가장치의 SH-ADD 적용

SH-ADD(SkyHook-Acceleration Driven Damper) 제어기법은 기본 스카이훅 제어 기법에 비해 야지노면에서의 고속주행시에 더욱 효과적인 제어기법<sup>(2)</sup>으로, 구동력 제어를 위한 제어기로서 이를 선정하였다.

SH-ADD 제어는 스카이훅 제어에서 차체 가속도 성분을 고려한 전환조건 식 (4)를 추가하여 고주파수 영역에서의 감쇠능력을 향상 시킨 제어기법으로 변형 스카이훅 기법이다.

$$\text{If } \ddot{y}_s(\dot{y}_s - \dot{y}_u) < 0 \text{ Then } c_* = c_s \quad (4)$$

**Fig. 5** Skyhook concept of rotating arm suspension

### 3.2 회전형 현가장치에서의 제어 적용

Fig. 5과 같이 차량의 수직응답을 회전형 현가장치의 감쇠토크로서 제어하기 위해 차량의 기구학적 특징을 이용하여 관계식을 유도하였다. 차고와 팔각도의 관계식 (5)를 미분하면 차체의 수직속력과 팔각속도의 관계식 (6)을 구할 수 있다.

$$y_s = -L \sin \theta + R \quad (5)$$

$$\dot{y}_s = -L \cos \theta \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

식 (6)에 수직방향의 스카이훅 계인을 곱하여 식 (8)과 같이 회전형 현가장치에 적용할 수 있는 값을 구할 수 있다.

$$c_{sky}^{trans} \dot{y} = -c_{sky}^{trans} L \cos \theta \cdot \dot{\theta} \quad (7)$$

$$c_{sky}^{rev} = c_{sky}^{trans} L \cos \theta \quad (8)$$

스카이훅 제어제인과 수동감쇠계수에 의한 감쇠력을 식 (9)과 같이 표현할 수 있으며, 팔의 각속도를 나누면 최종적으로 댐핑계수를 식 (10)과 계산할 수 있다.

$$f_d = -c_{sky}^{rev} \dot{\theta} - c_s^{rev} \dot{\theta} \quad (9)$$

$$c_d^{rev} = -f_d / \dot{\theta} = c_s^{rev} + c_{sky}^{rev} \quad (10)$$

## 4. 구동력 제어

### 4.1 Anti-dive mechanism

본 연구에서는 기존 회전형 현가장치를 장착한 승용차량에서의 제동 및 출발시 Dive/Squat 현상을 방지하는 기법<sup>(7,8)</sup>에서 착안하여 구동력을 이용한

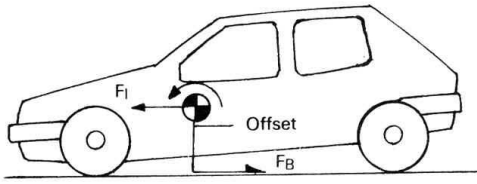


Fig. 6 Nose down while braking

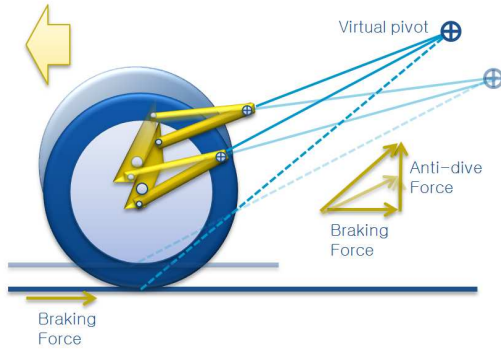


Fig. 7 Anti-dive mechanism in passenger car

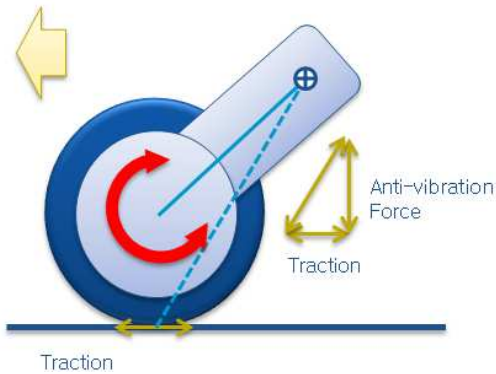


Fig. 8 Anti-dive mechanism with rotating arm

차체 진동 제어기법을 제안한다.

Fig. 6 과 같이 제동시에 제동력과 무게중심간의 Offset 으로 인해 Diving moment 가 발생하고 이로 인해 Nose down 현상이 발생한다. Nose down 현상을 억제하기 위하여 상용차량에 적용되는 현가장치 링크구조는 Fig. 7 과 같으며 Virtual pivot point 위치에 Anti-dive Force 가 작용하게 된다.

4.2 구동력 제어를 통한 차체 진동저감 기법

4.1 절에서의 제동력 제어를 통한 차체자세 제어 기법에서 착안하여 Fig. 8 과 같이 Pivot 단이 고정된 형태로써 구동력 제어를 통하여 차체 진동저감이 가능할 것을 예상할 수 있다.

견마로봇의 구동력원으로 사용되는 In-wheel motor 의 독립구동가능성 및 현가장치의 회전형 구조로 인해 Fig. 9 과 같이 주행 중의 각바퀴의

Table 3 Traction control logic of SH-ADD

IF	Then
$\ddot{y}_s \cdot T_{sky} < 0$	$T_{traction} = T_p$
else	$T_{traction} = T_p + T_{sky}$

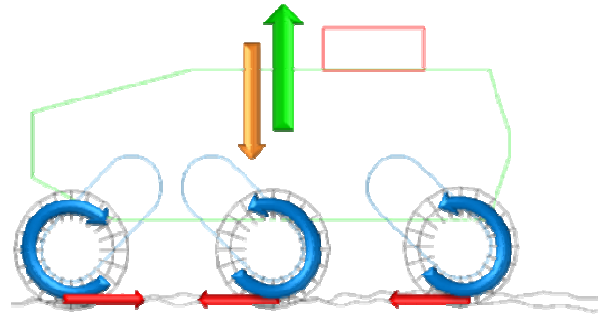


Fig. 9 Vibration control concept with traction

구동력 차이는 차량의 자세에 영향을 미치게 된다. 각 모터의 구동력은 식 (11)에서와 같이 속도 추종을 위한 P 제어력과 진동 감쇠를 위한 Sky-hook 제어력의 합산으로 계산된다.

$$T_{traction} = T_p + T_{sky} \tag{11}$$

$$T_p = P(V_{tracting} - R \cdot \omega) \tag{12}$$

$$T_{sky} = -\frac{c_{sky}^{trans} \dot{y}_s \tan(\theta)}{R} \tag{13}$$

반응동 현가장치와는 달리 모터는 제어 가능조건이 없으므로 SH-ADD 제어조건은 다음과 같다. 반응동 현가장치 특성에 따른 제어불능 조건에서도 마찰력을 넘어서지 않는 범위 내에서 Actuator 와 유사한 제어력을 보충하게 되어 더 나은 차체 진동 저감효과를 이끌어낼 수 있다.

5. 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션 환경 및 조건

차량과 타이어 및 노면을 ADAMS Control 을 이용하여 모델링을 구성하였고, Arm/Wheel torque controller 는 Matlab Simulink 를 이용하여 구성하여 Cosimulation 을 수행하였다.

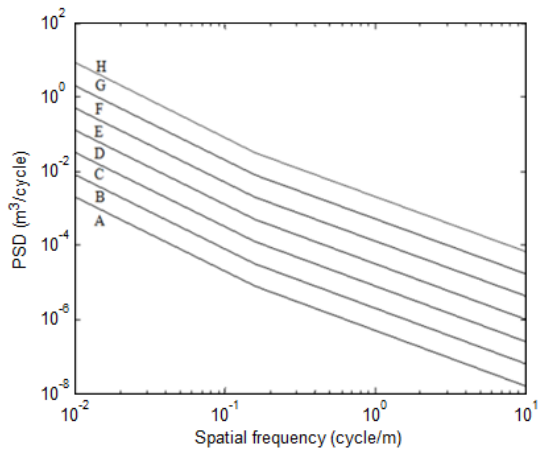
과도응답제어성능 분석을 위한 노면으로 5cm 사다리꼴 범퍼를, 정상응답제어성능 분석을 위한

노면으로는 Fig. 10 에서의 ISO 기준 E 등급의 랜덤노면을 생성하여 적용하였다. 생성된 노면은 Fig. 11 과 같은 길이에 따른 고저형상을 보이며, 좌우측 바퀴에 위상차이를 다르게 주어 차체 롤링이 발생할 수 있도록 하였다. 주행 속력은 군용견마로봇이 정찰모드로써 야지에서 운용되는 것을 가정하여 10KPH 로 선정하였다.

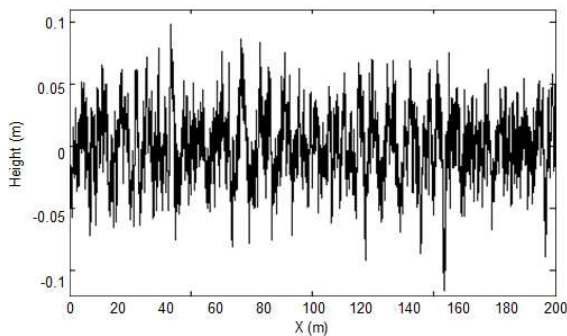
타당한 시뮬레이션을 수행하기 위하여, 현가장치와 모터에 대한 제어한계를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 수치는 Table 4 와 같다.

**Table 4** Damper/Motor Control limits for simulation

Limitations	Damping coefficient	Motor torque
Time delay	5ms	1ms
Control range	100~800Nms/rad 0~1000Nm	0~500Nm
Rate of change	3000Nm/rad	60000Nm/s



**Fig. 10** Classification of road surface roughness by ISO standard



**Fig. 11** ISO D grade road profile

5.2 시뮬레이션 결과

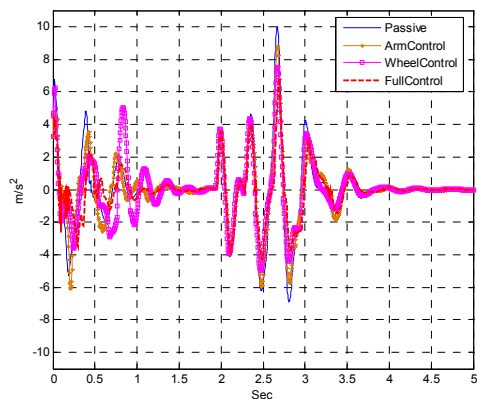
5.2.1 범프 통과 시뮬레이션

범프 통과시 생겨나는 차체의 수직방향 가속도를 Fig. 12 에 나타내었으며, 전체응답에서 가속도가 가장 크게 나오는 부분을 확대한 그림을 Fig 13 에 나타내었다. Fig. 13 을 보면 반응동 현가장치와 구동력을 제어한 결과 모두 Passive 주행에 비해 가속도응답이 10%이상 개선되었으며, Table 5 에서 볼 수 있는 바와 같이 Arm 과 Wheel 을 동시에 제어하면 29%의 저감결과를 얻을 수 있었다.

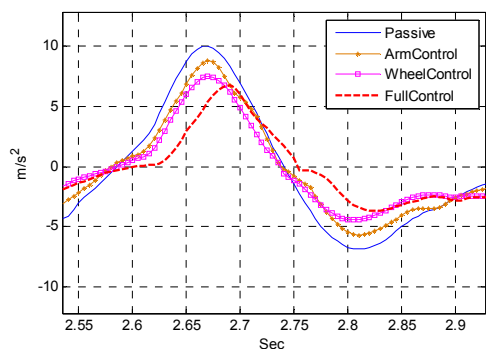
Fig. 13 에서 Wheel 제어와 Full 제어의 경우 Peak 의 위상이동이 다소 발생하는데 이는 자세제어를 위한 구동력이 차량의 속력에 영향을 미쳤기 때문으로 차후 개선되어야 할 부분이다.

**Table 5** Peak acceleration compared with passive damper

Positions	Arm	Wheel	Arm+Wheel
Reduction in peak acceleration	11%	24%	29%



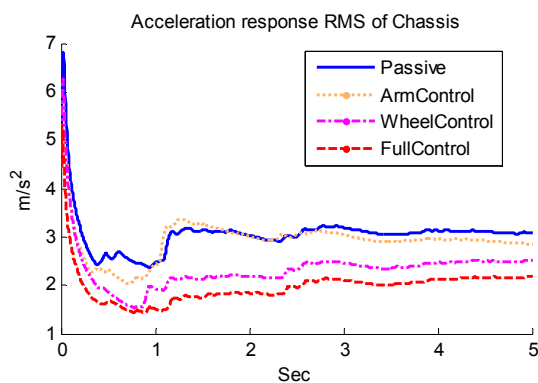
**Fig. 12** Vertical acceleration response with bump test



**Fig. 13** Enlarged figure around peak acceleration

**Table 6** RMS acceleration compared with passive damper

Positions	RMS(m/s <sup>2</sup> )	Reduction rate
Passive	3.279	-
Arm	2.923	11%
Wheel	2.535	22%
Arm+Wheel	2.238	31%

**Fig. 14** RMS acceleration of chassis response on ISO E road

### 5.2.2 랜덤노면 통과 시뮬레이션

랜덤노면에의 정상상태응답 특성을 비교하기 위해 가속도 누적 RMS 를 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 14 와 같이 랜덤노면에서 또한 구동력 제어를 추가한 결과값이 크게 줄어들어 차체 진동저감 성능이 개선됨을 알 수 있다.

동일 ISO 노면에 대한 주행으로 초기 과도응답 이후에는 진동저감 능력에 따라 일정 수치로 수렴하는 것을 확인 할 수 있으며, 그 결과는 Table 6 과 같다.

## 6. 결 론

본 연구에선 수정된 스카이훅의 한 종류인 SH-ADD 기법을 적용하여 기존 반능동 현가장치와 더불어 In-wheel motor 의 구동력을 추가적으로 제어함으로써 차체 진동저감이 가능함을 확인하였다.

반능동 현가장치와 구동력 제어를 각각 적용시 정상상태 및 과도상태에서 모두 효과가 있었으며, 두 제어 수단을 동시에 적용했을 때에는 더 나은

결과를 이끌어 낼 수 있음을 확인하였다.

현재 무인자율로봇의 기본 형태가 견마형태이고 각 바퀴 독립구동이 가능하기 때문에 기존 생산된 차량에서도 하드웨어적인 변경 없이 구동력 제어 알고리즘을 적용 후 실험 수행과 추가적인 개선사항 도출이 가능할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술원 국방무인화기술평화 연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Jeon, S. H., Lee, J. H., Yoo, W. S. and Kim, J. Y., 2011, "Study on Improving Stability of 6×6 Skid-Steering Vehicle by Employing Skyhook Control Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 8, pp. 905~912.
- (2) Cho, Y., Song, B. S. and Yi, K., 1999, "A Road-Adaptive Control Law for Semi-Active Suspensions," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 13, No. 10, pp.667~676.
- (3) Karnopp, D., Crosby, M. J. and Harwood, R. A., 1974, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators," *Journal of Engineering for Industry*, Vol.96, Issue. 2, pp. 619
- (4) Savaresi, S.M., Poussot-Vassal, C., Spelta, C., Sename, O. and Dugard, L., 2010, "Semi-Active Suspension Control for Vehicles," Butterworth Heinemann, Elsevier.
- (5) Kim, K.S. and Yoo, W.S., 1997, "Generation of Road Surface Profile with a Power Spectral Density Function," *The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol.5, No. 1, pp. 136~145.
- (6) Su-hee Jeon, Jeong-han Lee, and Wan-Suk Yoo, 2011, "Improvement of Maneuvering Stability of a 6\*6 Vehicle Using Control Schemes," ECCOMAS, multibody2011, Belgium
- (7) <http://www.tonyfoale.com/Articles/Dive/DIVE.htm> (Tony Foale)
- (8) [http://girishravan.xomba.com/what\\_antidive\\_and\\_antisquat](http://girishravan.xomba.com/what_antidive_and_antisquat) (xomba, GirishRavan)