

# HILS를 활용한 전투차량의 반능동 현수장치 적용에 관한 연구

## A Study on the Application of Semi-Active Suspension Units for a Combat Vehicle by Using HILS

김지웅\*      김문준\*      이은준\*      이경훈\*      우관제\*  
Chi-Ung Kim      Moon-June Kim      Eun-Jun Rhee      Kyoung-Hoon Lee      Kwan-Je Woo

### Abstract

There have been a lot of efforts on the improvement for the ride comfort and handling stability of the combat vehicles. Especially most of vehicles for military purpose have bad inertial condition and severe operating condition such as the rough road driving, and need a high mobility in the emergency status. It is necessary to apply the controlled suspension system in order to improve the vehicle mobile stability and ride comfort ability of crews. A feasibility study is performed on the application of the semi-active suspension system with a magneto-rheological controlled shock absorber for a 6×6 combat vehicle. First, the dynamic simulation model of the vehicle including the control model for the semi-active suspension system was executed. Based on this model, a hardware-in-the-loop simulation(HILS) system which has a semi-active suspension controller hardware was constructed. After full vehicle simulations were performed in virtual proving courses with this system, the semi-active suspension system was proven to give better ride comfort and handling stability in comparison with the conventional passive suspension system.

Keywords : Hardware-In-the-Loop Simulation(하드웨어인더루프 시뮬레이션), Plant Model(플랜트 모델), 6×6 Combat Vehicle(6륜구동 전투차량), Semi-Active Controlled Suspension(반능동 현수장치), Magneto-Rheological Damper(자기유변 댐퍼), Sky Hook Control(스카이훅 제어), Seat Acceleration(좌석 가속도), Roll Angle(롤 각), Pitch Angle(피치각)

### 1. 서론

전투차량의 경우 비포장 및 야지 등의 가혹한 노면

조건에서 운용하는 비율이 높은 이유에 의해 상용 차량에 비해 운용신뢰도가 높은 댐퍼 하드웨어가 채용되어야 한다. 또한 일반 차량에 비해 높은 무게중심 위치에 의해 고속에서의 조향 안정성 등에서 극히 불리한 조건에 있고 상대적으로 빈약한 개발경험 등으로 비추어 보았을 때 전투차량의 반능동 현수장치를 개발함에 있어서 이러한 조건에 대응하기 위하여 제어기

† 2010년 7월 16일 접수~2010년 10월 22일 게재승인

\* 현대로템 주식회사(Hyundai Rotem Company)

책임저자 : 김지웅(kjw73@hyundai-rotem.co.kr)

개발에 충분히 대책을 반영하여야 한다. 반능동 현수 차량 시스템에 대한 HILS 기술은 관련 기술의 M&S 기반을 확보하고, 차량 체계 수준에서의 검증 작업의 기술적 위험을 최소화하며 향후 실제 체계 개발 단계에서 차량 설계 및 개발 비용의 절감 및 개발 기간을 단축하는데 큰 기반을 제공할 것으로 판단된다.

능동현수 장치에는 차량의 댐핑 특성을 제어함으로써 차체의 진동을 조절하는 반능동 제어(Semi-active Control)방식과 스프링을 포함하는 감쇠장치를 대체하며 차량에 에너지를 가하는 액츄에이터를 통하여 차체의 진동을 조절하는 완전 능동 제어(Fully Active Control)방식으로 나눌 수 있다. 완전 능동제어 방식은 반능동 제어 방식에 비해서 탁월한 승차감 제어와 자세제어(Attitude Control)가 용이하다는 특징이 있으나, 고비용 및 고에너지 소모, 낮은 내구 신뢰성 등의 이유로 실 적용 예는 거의 없는 실정이다<sup>[1,2]</sup>. 현재까지 반능동 현수장치를 이용한 차량의 승차감 및 주행안정성을 향상시키기 위하여 현수제어 알고리즘에 대한 이론적 연구<sup>[3~5]</sup>와 전자차량 해석모델 기반의 HILS를 이용하여 현수 제어기에 대한 검증 시스템을 구축하고자 하는 많은 연구가 진행되어 오고 있다<sup>[1,6~8]</sup>.

본 연구에서는 6륜 구동 전투차량의 반능동 현수 장치를 제안하고, 실시간 동역학 해석모델을 기반으로 현수 제어기를 대상으로 하는 HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation) 시스템을 구축하고, 기존 수동형 댐퍼 및 반능동 모드의 제어 시스템에 대한 현수장치 제어기의 실험실 수준에서의 성능 시험을 수행하여 상호 특성을 비교하고, 특히 군용 차량의 현수 제어기 개발에 있어서의 HILS 시스템의 활용 가치를 확인해보고자 한다.

## 2. 반능동 제어 현수장치

### 가. MR 댐퍼

Fig. 1은 MR댐퍼의 구조와 작동원리를 보여주고 있다. MR 댐퍼는 크게 MR효과를 나타내기 위한 전자석을 포함한 MR밸브 부분과 디스크형 스프링으로 구성된 수동 밸브 부분으로 나뉜다.

차량 주행시 요구되는 적절한 감쇠력의 조절 작용은 MR밸브 부분에서 이루어지며 큰 충격이나 감쇠력 발생에 의해 댐퍼 양단에 설정치 이상의 차압이 발생할 경우 수동 밸브에서 크래킹이 발생하여 유체 유동이

증가하여 차압을 급격히 감소시키게 된다. 따라서 만약 MR밸브의 동작에 문제가 발생한다 하더라도 수동 밸브의 작동으로 인해 차량의 기본적인 성능이 유지되며 특히 과도한 하중에 따른 충격을 완화시켜 차량에 탑재된 정밀장비의 보호나 안정적 주행에 효과를 나타낸다. MR(Magneto-Rheology) 댐퍼는 자기 특성을 지닌 댐퍼 매체를 통하여 자기장을 변경시켜 감쇠 계수를 자유자재로 제어함으로써 승차감 제어를 가능케 하는 현수장치의 하드웨어 역할을 수행한다. MR 유체는 두 도체 사이에 자기장을 통과시 미세한 MR 입자가 자기장을 따라 정렬함으로써 점성을 가지는 반응고 상태로 바뀌는 특성을 가지며, 이는 자기장의 세기에 따라 그 점도가 변화하는 특성을 보이게 된다. 이를 댐퍼의 작동유체로 사용하여 자기장의 세기를 조절함에 따라 댐퍼의 오리피스를 통과시 점도의 변화를 유도하여 같은 댐퍼 속도에서 각기 다른 감쇠력을 작용시키게 된다.

MR유체의 다른 특성으로서 그 응답속도를 들수 있는데 기존의 오리피스 비례제어 타입에 비해 응답속도가 매우 빠른 장점을 가진다. 대략 그 응답속도 수 ms에서 수십 ms에 이른다.

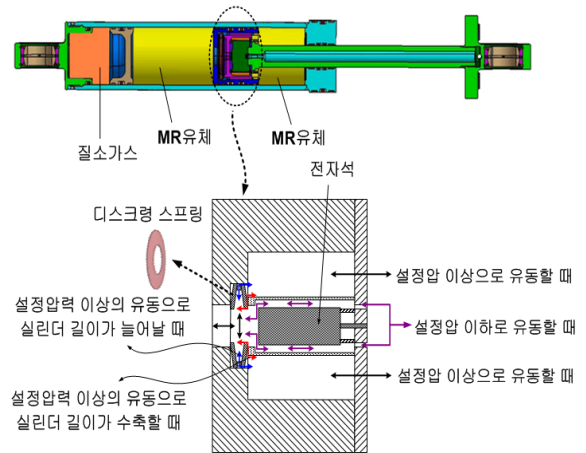


Fig. 1. 반능동현수장치에 적용되는 MR 댐퍼<sup>[9]</sup>

### 나. 댐퍼 특성곡선

MR 댐퍼는 입력되는 전류의 세기를 조절함으로써 자기장에 변화를 일으키게 되는데, Fig. 2는 당 연구에서 사용한 MR 댐퍼 특성 곡선으로서, 전자기 유동 모델 해석에 의해 얻어진 데이터이다. 댐퍼에 입력하는 전류의 크기에 따라 변화하는 감쇠력의 변화를 보여주

고 있다. 그림에서 보는 것처럼 MR댐퍼는 댐퍼속도가 거의 0인 영역에서 전류의 세기에 따라 큰 감쇠력의 변화를 유도할 수 있기 때문에 저주파 영역에서 비교적 효과적인 진동제어를 가능케 한다.

Fig. 2의 자기유변 해석 결과를 통해 얻어진 특성 결과 그래프를 이용한 룩업 테이블(Look-up Table)을 작성하고 시뮬레이션에 활용하여 본 해석에 사용하였다. MR 유체 응답시간 지연은 일반적인 MR유체의 응답 지연시간인 0.01 sec를 반영하도록 시뮬레이션에 반영하여 실시간 해석의 신뢰도를 높이고자 하였다. 기존 수동형 감쇠 특성 곡선은 본 MR 댐퍼의 감쇠력 범위 안에 위치하는 형태를 취하고 있다.

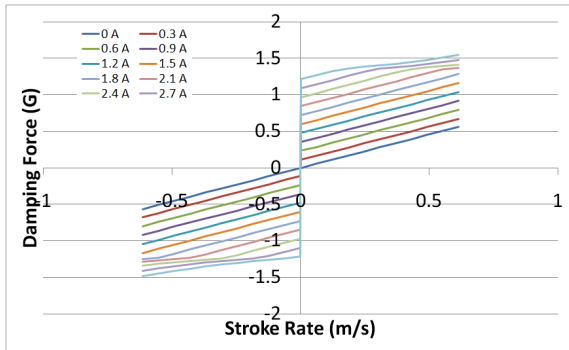


Fig. 2. MR 댐퍼 특성곡선

### 3. 제어 해석 모델

#### 가. 스카이훅 제어 이론

본 연구의 반능동 현수장치에 기본적으로 적용된 제어 이론은 스카이훅 제어 이론으로서 차체와 휠 사이에 감쇠력을 조절하여 차체와 허공 사이에 마치 댐퍼가 설치되어 있는 것처럼 제어해주는 알고리즘이다. Fig. 3과 같은 일반적인 능동제어 현수장치에 대한 1/6 차량의 수학적 모델은 다음과 같이 2자유도 시스템에 대한 운동방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} m_s \ddot{z}_s &= -k_s(z_s - z_u) - b_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + F_a \\ m_u \ddot{z}_u &= k_s(z_s - z_u) + b_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - F_a - k_t(z_u - z_r) \end{aligned} \quad (1)$$

이때, 스카이훅 제어 이론에 의하여 능동 제어력  $F_a$  는 가상의 스카이훅 감쇠계수( $b_{sky}$ )와 현가상질량의 수직속도의 곱으로 치환할 수 있다<sup>[10]</sup>.

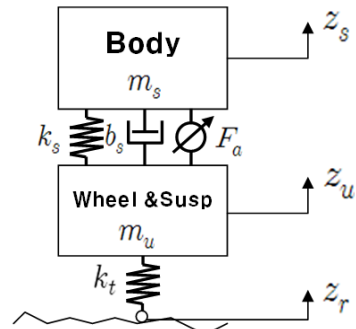


Fig. 3. 1/6차량 해석 모델

$$F_a = -b_{sky} \cdot \dot{z}_s$$

반능동 현수장치는 그림에서 수동 현수장치( $b_s$ )는 삭제되고, 능동 현수장치( $F_a$ )가 댐퍼로 대체된 형태로 치환된다. 일반적으로 승차감을 제어하는 것은 1Hz 근방의 현가상질량의 진동모드를 감소시키는데 있는데 스카이훅 제어 모드의 경우 수동 댐퍼의 결과에 비해 현가상 질량의 진동이 줄어들어 승무원의 승차감 개선의 큰 효과가 있음이 알려져 있다<sup>[10]</sup>. 이에 비해 현가하질량의 진동크기는 증가하는데 이것은 휠센터의 진동이 증가하여 주행 안정성은 다소 악화되는 결과를 보인다. 스카이훅 감쇠계수는 그 값이 커질수록 현가상질량 및 현가하질량의 진동이 동반 감소되는 현상을 보이는데 본 연구에서는 20,000Nsec/m값을 취하였다.

#### 나. 전차량 제어 모델

전차량(Full Vehicle) 제어 모델은 앞서 1/6차량 모델에서 응용된 스카이훅 제어 알고리즘을 6개의 각각의 차륜으로 독립적으로 확대 적용하고, 추가적으로 차체의 피치(Pitch) 및 롤(Roll) 운동에 대한 제어 알고리즘으로 이루어지도록 MATLAB/Simulink를 사용한 제어 해석 모델을 수립하였다.

Fig. 4는 차량의 피치 제어 모델로서 피치 속도(Pitch Rate)의 역방향으로의 모멘트를 유도하기 위해 수직(2)와 같이 차량의 전/후륜의 감쇠력을 제어하도록 구성되어 있다. 중륜은 피치운동에 영향을 미치지 못하므로 전륜과 후륜 댐퍼의 감쇠력만을 액추에이터로 사용하여 제어하도록 구성되었다. 롤제어 모델 또한 피치제어 모델과 동일한 방식의 알고리즘으로 구성된다.

이상의 제어 모델과 함께 TruckSim을 이용하여 만들어진 차량 동역학 해석모델과 상호 연동해석을 수

행하도록 전차량 제어/동역학 연동해석 모델을 수립하였다(Fig. 5).

$$\begin{aligned}
 & i) \text{pitch} < 0 \\
 & \quad b_{frr} = b_{\max} \text{ if } (\dot{z}_s - \dot{z}_u)_{frr} < 0 \\
 & \quad \quad \text{else, } b_{frr} = b_{\min} \\
 & \quad b_{rear} = b_{\min} \text{ if } (\dot{z}_s - \dot{z}_u)_{rear} < 0 \\
 & \quad \quad \text{else, } b_{rear} = b_{\max} \\
 & ii) \text{pitch} > 0 \\
 & \quad b_{frr} = b_{\min} \text{ if } (\dot{z}_s - \dot{z}_u)_{frr} < 0 \\
 & \quad \quad \text{else, } b_{frr} = b_{\max} \\
 & \quad b_{rear} = b_{\max} \text{ if } (\dot{z}_s - \dot{z}_u)_{rear} < 0 \\
 & \quad \quad \text{else, } b_{rear} = b_{\min}
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기에서  $b_{frr}$  : 전륜측 댐핑계수  
 $b_{rear}$  : 후륜측 댐핑계수  
 $b_{\max}$  : 최대 댐핑계수  
 $b_{\min}$  : 최소 댐핑계수

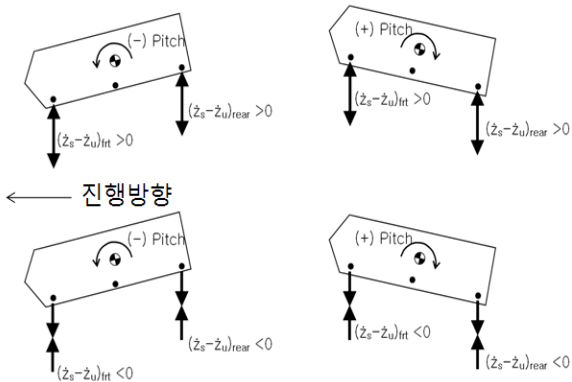


Fig. 4. 피치 운동 제어 모델

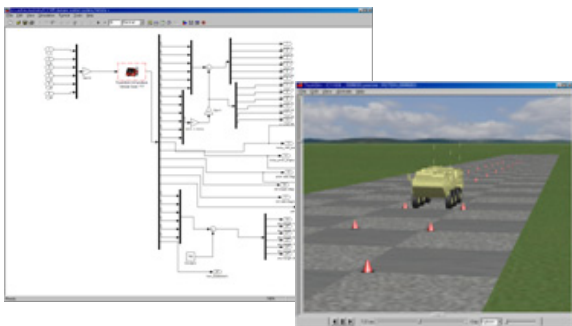


Fig. 5. 전차량 제어/차량 연동 해석 모델링

이와 같이 Simulink에서 개발된 전차량 제어 알고리즘은 실제 반응동 현수제어기 하드웨어에 입력되어 운용된다.

#### 4. HILS 시스템 기반 구축

##### 가. 시스템 구성

본 연구에서의 HILS 시스템은 Fig. 6에서 보는바와 같이 크게 실제 하드웨어와 제어 대상이 되는 가상의 플랜트 모델을 시뮬레이션하는 실시간 시뮬레이터로서의 타겟 컴퓨터, 타겟 컴퓨터를 제어하고 시뮬레이션을 실시간으로 모니터링하도록 GUI를 제공하는 호스트 컴퓨터로 나뉜다. 현수제어기는 센서 신호의 모니터링의 용이성과 제어 알고리즘의 원활한 수정을 위해 NI PXI 장비를 범용제어기(Rapid Control Prototype)로 사용하였다. Table 1에는 각각의 HILS 구성요소에 대한 상세 H/W, OS 및 S/W를 표시하였다.

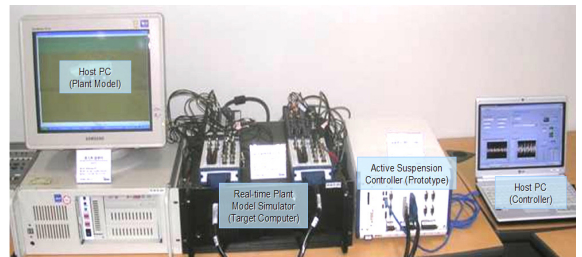


Fig. 6. HILS 시스템

Table 1. HILS 시스템 구성요소

	HOST (Plant Model)	Real-time Plant Model Simulator	Active Suspension Controller (Prototype)	HOST (Controller)
H/W	Industrial Computer	Industrial Computer DAQ/AO (PCI type)	NI PXI DAQ/AO	Notebook
OS	Windows XP	QNX RT	LabVIEW RT	Windows XP
S/W	RT-Lab MatLAB/Simulink TruckSIM	Generated C-code by RT-Lab	Generated C-code by LabVIEW	LabVIEW

나. 제어기-가상플랜트 데이터 인터페이스

반능동 현수제어 시스템은 MR댐퍼의 전류 제어 기능, 각 센서들의 신호를 검출하기 위한 A/D 변환 기능, 입출력 I/O 기능 등을 사용하여 가상 차량의 진동 제어를 수행한다. 가상플랜트 시뮬레이터는 실제 제어기가 실제 차량과의 입출력을 그대로 모사하여 제공하도록 하는데, 제어기 하드웨어와 시뮬레이션 모델 사이에는 DAQ와 Analog Output Board를 통한 전압신호에 의하여 데이터 교환이 이루어진다(Fig. 7).

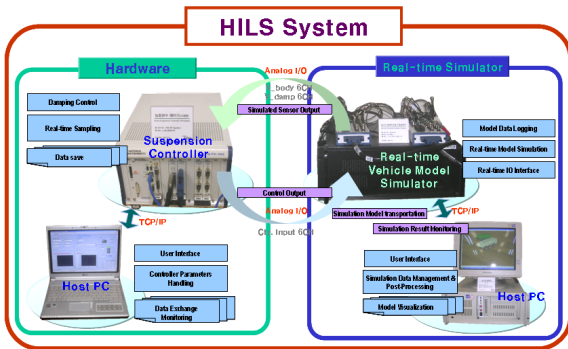


Fig. 7. 하드웨어-시뮬레이터 데이터 인터페이스

HILS 환경에서는 모든 액추에이터 및 센서 신호가 실제 전기신호로 구현되어야 하므로 단위 전압에 대한 물리량으로 변환하는 이득을 곱하여 제어 알고리즘에 사용한다. 또한 각각의 노드에 설치되는 여러개의 I/O 보드와 제어기들 간의 복잡한 와이어링 작업이 수반하기 때문에 이것이 신호 잡음(Noise)이 많이 발생하는 실험환경에서는 이 잡음에 의해서 정확한 데이터 획득이 어렵고 이로 인해 제어기의 오동작을 유발할 수 있으므로 각 신호선마다 잡음 제거를 위한 필터를 설치해야만 하는데 당 실험에서도 고주파 잡음을 제어하기 위해 센서 신호로부터 저주파 통과 필터(Low Pass Filter)를 통해서 입력하였다.

Fig. 8은 HILS 시스템의 신호 입출력 관계를 나타낸다.

다음 그림에서 반능동 현수제어기는 차량 모델로부터 계산된 차량 현수장치 상하의 상대속도( $z_s - z_u$ ) 및 차체측 가속도( $\ddot{z}_s$ ) 데이터, 차체 피치각속도( $\dot{\theta}$ ), 차체 롤각속도( $\dot{\phi}$ )로부터 스카이훅 알고리즘을 활용하여 전류 출력값( $i$ )을 내보내어 시뮬레이션 모델에 전달하고 이것은 시뮬레이션 모델의 댐퍼맵(Damper Map)으로부터 댐핑력을 얻어내어 다시 차량 모델에 현수장

치 입력으로 전달되어 차량 해석이 수행되는 형태의 폐루프를 이루며 반복 계산이 수행된다.

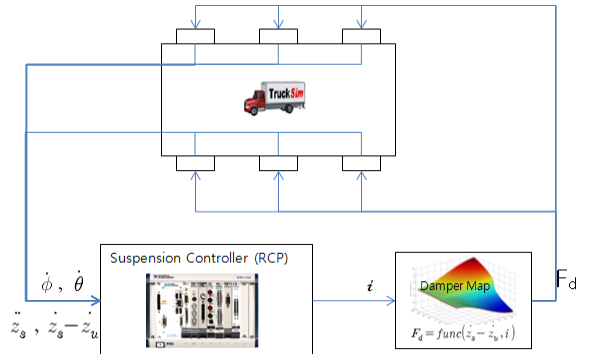


Fig. 8. 제어기 H/W와 차량 시뮬레이션 모델간 데이터 교환

다. 플랜트 모델 및 실시간 시뮬레이션

가상 플랜트 모델은 실시간 시뮬레이션 공간에서의 제어 대상으로서, 차량과 같은 다자유도 시스템의 경우 실시간으로 하드웨어와 해석 모델 사이에 데이터 교환을 하며 시뮬레이션을 수행하는데 있어서 일반 다물체 동역학 해석 소프트웨어로서는 그 내용이 불가능하다. 이에 다축 차량에 대한 동역학 해석 전용 소프트웨어인 TruckSim은 현수장치 및 조향장치 기구와 같은 불필요한 자유도에 대한 계산을 줄여줌으로써 실시간 해석이 가능하도록 한다. 또한 실시간 운영체제 QNX에서 실행 가능한 형태로 변환시켜주는 RT-Lab과 상호 연동하여 MATLAB/Simulink Real-Time Workshop에서 생성된 C코드를 타겟 컴퓨터로 전송시키는 모듈을 제공한다. 또한 실시간 타겟과 연동하여 데이터 모니터링 및 가상 환경에서의 차량 거동을 확인할 수 있도록 하는 가시화 기능을 가지고 있다.

5. 현수 제어기 가상환경 시험

가상환경 시험 모델로 사용된 차량의 제원은 Table 2에 나타난 바와 같이 중량은 16톤의 6×6 구동 휠차량으로서 현가장치는 공압 스프링을 포함하는 MR-HSU(Magneto Rheological Hydro-pneumatic Suspension Unit)를 채용하고 있다. 표에서 스프링 특성치는 공압 스프링의 특성상 비선형 곡선을 취하고 있으며 ±100 mm 범위에서 선형화하여 취하였다.

Table 2. 가상환경 시뮬레이션 차량 모델 제원

구분	사양	비고
기본 제원	6×6 휠 구동 차량	
중량	총중량 : 16톤	차체 중량 : 13톤
현가 장치	MR-HSU	
스프링 특성	900N/mm	±100mm

HILS 시스템을 활용한 현수제어기에 대한 실시간 가상환경 시험을 수행한 결과는 다음과 같다. 해석에 사용된 가상 주행 노면은 좌우 차륜에 교대로 범프 가진을 가해주는 좌우교번 범프 노면, 주파수별로 규칙적인 파형을 가지는 정규 요철노면, 임의의 랜덤한 주파수 파형을 가지는 야지 요철노면과 차량의 조향 성능을 평가하고자 하는 이중차선변경 코스이며, 각각의 노면에 대해서 차량 속도별로 수동 현수시스템과 반능동 현수 시스템에 대해서 각각 비교해석을 수행하였다.

가. 좌우교번 범프 노면 통과

해석시 사용한 범프의 반경은 100mm, 피치가 300mm이며, 좌우로 반대 방향의 위상으로 교대하는 노면으로서 그 통과 속도는 10kph에서 25kph까지 증가시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 9는 속도별로 차량 CG 위치에서의 수직 가속도 값을 비교한 그래프이다. 수동식 댐퍼의 경우는 속도가 증가할수록 차량 최대 수직가속도도 증가하였으나 반능동 댐퍼의 경우는 차량 속도 증가에 따라 최대 수직가속도가 떨어지거나 기준 이하의 값을 보이고 있음을 알 수 있다(최대 수직가속도 기준 : 2.5G). 그림에서 시속 10kph의 비교적 낮은 속도에서도 차량의 수직가속도는 상당히 큰 값을 유지하고 있는데 이는 좌우교번 범프 노면의 경우 비교적 큰 롤 방향의 진동을 유발하며 차량의 비정상적인 상하 방향의 가속도를 증폭시킴에 의해서 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 차량의 최대 롤운동각을 비교한 그래프로써, 수동식 댐퍼 대비하여 반능동 현수 제어를 수행한 결과 차량의 롤 자세가 안정적으로 제어가 되었으며, 결과적으로 차량 최대 수직가속도의 변화도 효과적으로 억제한 결과를 보여주고 있다. 단, 여기에서 롤운동 제어를 한 경우가 일반 스카이훅 제어보다 롤운동 각 감쇠 효과가 없거나 악화되는 경향을 보여 롤운동 제어가 효과적이지 못한 결과를 보여주고 있다. 이는

좌우교번 범프의 경우 전륜 측과 후륜 측의 바퀴가 범프를 지나는 시점에 따라 좌측 또는 우측 바퀴에 동시에 제어력을 가하는 롤 제어의 특성에 따라 역효과를 보일 수 있기 때문으로 판단된다.

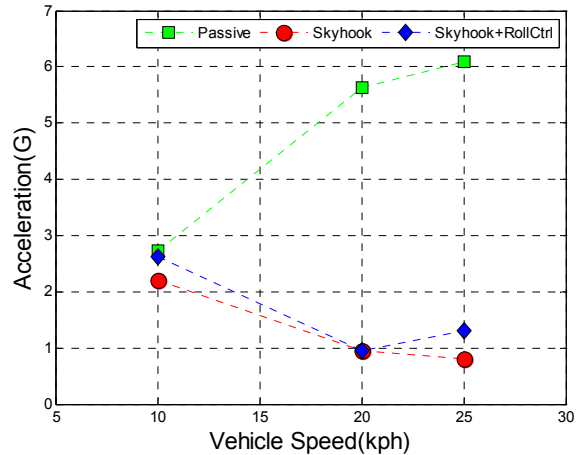


Fig. 9. 차량 최대 수직가속도 비교(좌우 교번범프 코스)

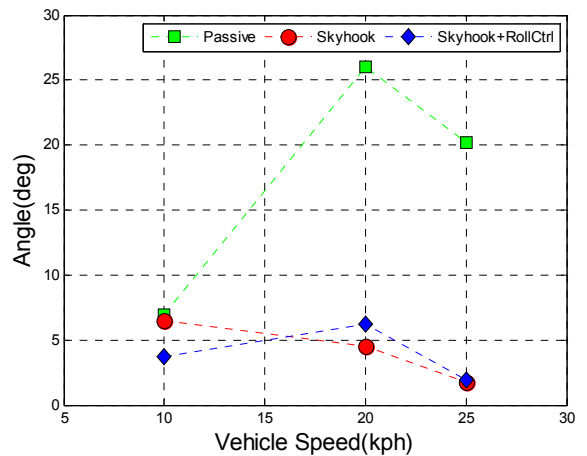


Fig. 10. 최대 롤운동각 비교(좌우교번범프 코스)

나. 정규 요철노면 통과

규칙적인 요철 형상을 가지는 노면을 차속 25~35kph로 통과시 해석한 결과는 다음과 같다.

여기에서의 정규 요철노면은 최대 250~300mm 사이의 연속 범프 구간으로 이루어진 승차감 노면이다. 차량 최대 수직가속도는 수동식 댐퍼에 대비하여 반능동 현수 제어를 수행한 것이 최대 수직가속도를 억제함을 볼 수 있다. 특기할 것은 시속 30kph 이후의

속도에서 수동식 현수장치와 반응동 제어 차량의 수직 가속도가 극명하게 차이를 볼 수 있음을 알 수 있는데 이것은 비교적 큰 크기의 요철을 가진 노면의 특성상 특정 속도 이후에 차량의 휠변위 한계를 넘어서면서 수동식 현수장치의 경우 급격하게 차량 수직 가속도가 증가하였음을 보여준다.

이 경우 차체의 피치각은 스카이훅 제어에 의해 일정부분 억제되는 것을 볼 수 있으며 별도의 피치진동 모드의 제어를 통해 상당부분 억제됨을 알 수 있다.

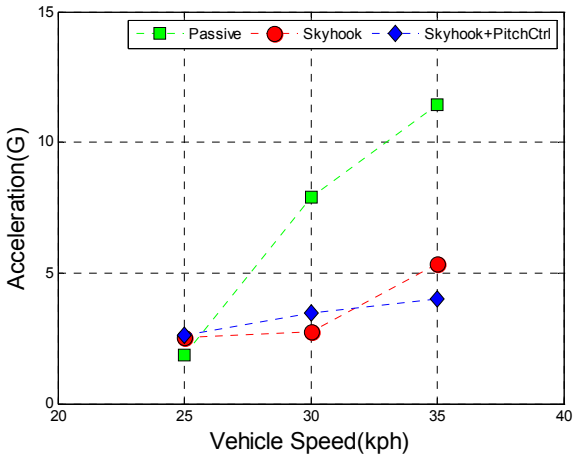


Fig. 11. 차량 최대 수직가속도 비교(정규요철노면)

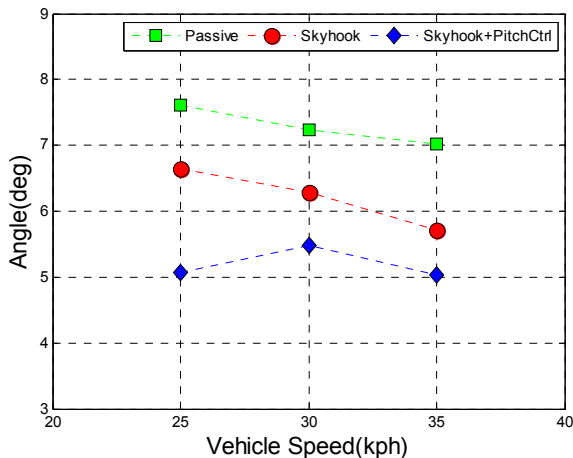


Fig. 12. 피치운동각 비교(정규요철노면)

다. 야지 요철노면 통과

임의의 노면 파형을 가지는 야지 요철노면에 대한 해석을 수행한 결과는 다음과 같다. Fig. 13은 승차감

노면의 PSD 곡선으로서 위의 실제 노면의 주파수 도메인의 PSD 자료를 이용하여 노면의 변위 도메인으로 가상 노면(Virtual Road)을 생성하였다<sup>[11],[12]</sup>.

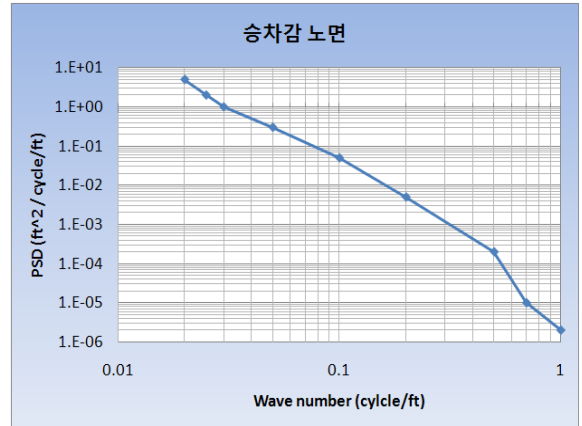


Fig. 13. 야지 승차감 노면 PSD 정보<sup>[12]</sup>

차속은 30~50kph의 속도로 해석을 수행하였다. 마찬가지로 이경우도 수동식 댐퍼 대비 반응동 현수 제어의 경우가 차량의 최대 수직가속도 억제 효과가 있음을 알 수 있다.

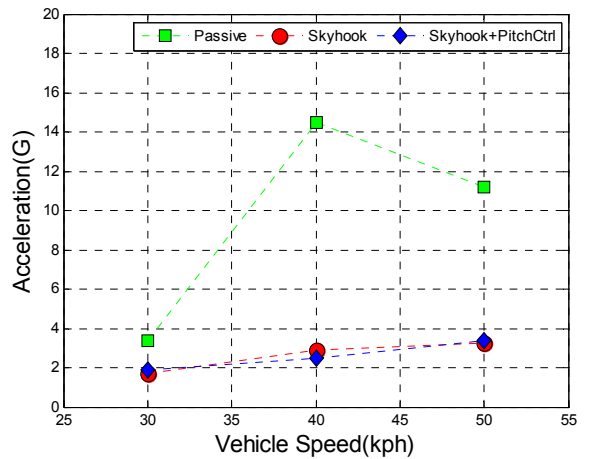


Fig. 14. 차량 최대 수직가속도 비교(야지노면)

수동식 댐퍼의 경우 특히 차속 40kph에서 최대 수직 가속도가 급격히 증대되어 50kph보다 큰 값을 보이게 되는데 이것 역시 Fig. 15의 차량 피치운동의 영향임을 알 수 있으며, 이것은 해석에 사용된 야지 노면의 파형이 시속 40kph에서 차량의 피치 진동모드와 중첩되

어 생기는 현상으로 판단된다. 수동식 댐퍼의 경우는 차량의 피치 진동 모드와 동일한 노면의 가진에 대해 효과적으로 진동을 흡수하기에는 한계가 있음을 보여주며, 이는 차량의 피치운동이 현가상질량의 수직운동에 큰 영향이 있으며, 이것은 역으로 차량의 수직운동 억제에 반능동 현수장치와 같은 감쇠력 제어가 필요함을 말해준다. 단, 별도의 피치운동 제어가 차체 피치 진동 모드 및 차량 수직가속도의 개선효과에 미치는 영향은 제한적이다.

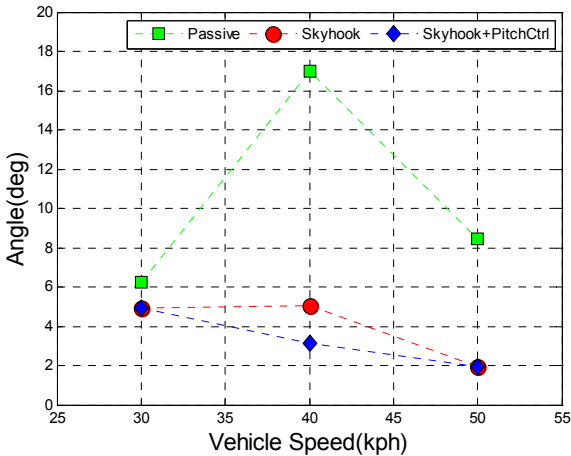


Fig. 15. 피치운동각 비교(아지노면)

라. 차선 변경 코스 통과

Fig. 17은 Fig. 16과 같은 차선 변경 코스를 시속 50 kph로 통과시 차체 최대 롤운동각의 시간에 따른 변화 그래프로 수동식 댐퍼와 반능동 현수 제어의 스카이훅 제어 모드 및 롤제어 모드가 추가된 경우를 비교하였다.

그림에서 특기할 만한 사항은 수동식 댐퍼보다 반능동 제어의 스카이훅 모드의 경우가 롤운동각이 크게 변하는 것을 볼 수 있는데 이것은 차선변경에 따른 차체의 롤운동이 차량의 차선변경 조작이 느린 주기로 이루어짐에 따라 스카이훅 제어 알고리즘에 의한 가상의 제어력이 수동식 댐퍼에 의한 감쇠력에 비해 작아지기 때문이며 이에 대한 보상으로 롤제어 모드가 별도로 추가될 필요가 있음을 알 수 있다. 롤제어 모드가 추가된 제어모드의 경우 그림에서와 같이 차체 롤운동이 효과적으로 억제됨을 볼 수 있다. 즉, 롤제어 모드가 추가된 스카이훅 제어모드가 차량 조향안정성에 긍정적인 영향을 미치고 있다.

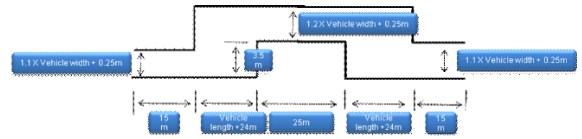


Fig. 16. 차선 변경 코스

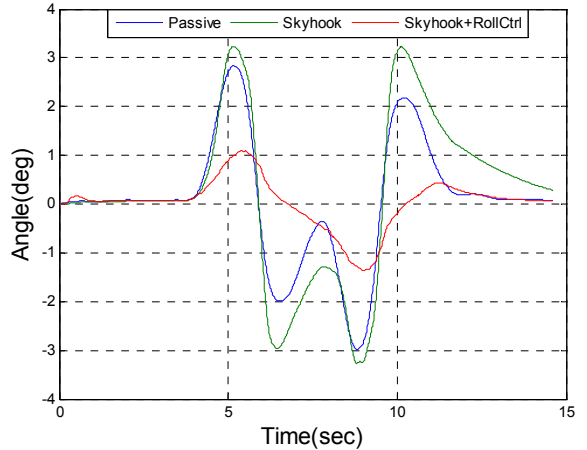


Fig. 17. 롤운동각 변화(50kph, 차선변경코스)

6. 결론

전투차량에 대한 반능동 현수차량 HILS 시스템을 구축하고 차량 체계 단계에서의 검증 작업으로서 실험실 수준의 제어기 가상 시험을 수행함으로써 관련 기술에 대한 M&S 기반을 확보하였다. 이는 상대적으로 실험 기반이 취약하고 기술적 위험도가 높은 전투차량의 체계 수준의 검증 작업에 큰 기여가 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이와 같은 HILS 시스템을 활용하여 전투차량용 반능동 현수 제어기와 기존 수동 현수장치에 대한 실시간 차량 시뮬레이션의 비교 해석을 수행한 결과, 반능동 현수 제어기가 기존 수동 현수장치에 비하여 상대적으로 험로 주행성능 및 조향시 안정적 거동을 이끌어냄을 알 수 있었다. 향후 연구과제로서 HILS 시스템의 타 체계로의 활용도를 높이고, 이의 실제 적용에 있어서 반능동 현수장치 하드웨어의 제어 응답성을 확인하기 위한 단품 시험 데이터 반영 및 해석 모델의 검증을 위해 실제 현수 제어기와 현수장치 하드웨어를 포함하는 더욱 향상된 HILS 시스템을 구축할 것이며 이를 통해 시스템의 신뢰성을 향상시키는데 이바지할 것이다.



Reference

- [1] 백배정, 홍금식, “맥퍼슨형 반능동 현가장치의 노면적응형 스카이크 제어와 HILS”, 한국정밀공학회 지 제17권 제1호, pp. 34~44, Jan. 2000.
- [2] 박보영, 허승진, “차량동역학”, 문운당, pp. 219~267, 2005.
- [3] 박호, 전의식 외, “승차감향상을 위한 자동차 현가장치의 능동제어시스템”, 한국공작기계학회지 제7권 제6호, pp. 102~109, Dec. 1998.
- [4] 손현철, 홍금식 외, “노면 추정을 통한 반능동 현가시스템의 LQG 제어”, Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, Vol. 9, No. 9, pp. 669~678, Sep. 2003.
- [5] 이경수, “자동차 현가시스템의 능동제어”, 대한기계학회지, 제36권 제7호, pp. 679~704, Jul. 1996.
- [6] 최형진, 노기환, “현가시스템용 HILS 평가 시스템 개발”, 한국자동차공학회 30주년기념 학술대회 논문집, pp. 744~750, 2008.
- [7] 손영일, 나혁민 외, “궤도차량 반능동 현수 제어기의 ECU-in-the-loop Simulation”, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 979~984, 2003.
- [8] 이창호, 김성수 외, “지능형 차량 HILS를 위한 실시간 차량 동역학 모델 개발”, Transactions of KSAE, Vol. 14, No. 4, pp. 199~206, 2006.
- [9] 이은준, 이중하, 김종건, “수동 및 반능동 동작이 가능한 현가장치용 자기유변유체 댐퍼”, 특허, 10-0768702, 2007.
- [10] Rajesh Rajamani, Vehicle Dynamics and Control, Springer, pp. 325~385, 2006.
- [11] 김광석, 유완석, “전력밀도 함수를 이용한 노면형상 생성에 관한 연구”, 한국자동차공학회 논문집 제5권 제1호, pp. 136~145, Sep. 1997.
- [12] S. Colin Ashmore, H. C. Hodges Jr., M. J. M. Prebeg, “Terrain Severity Data Generation at Yuma Proving Ground”, NATC 20-17-399, Nevada Automotive Test Center, pp. 18~34, Nov. 1990.
- [13] Thomas D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Inc., pp. 125~193, 1992.
- [14] A. R. Jimenez, A. C. Wray et al., “Magneto-Rheological Fluid Semiactive Suspension System Performance Testing on a Stryker Vehicle”, Tardec Technical Report, No. 15199, pp. 3~29, Jan. 2005.