

<응용논문>

# HILS 기반 상용 전기차용 MR 댐퍼 제어에 가속도 센서 노이즈 영향 분석

김용진<sup>1)</sup> · 정준영<sup>1)</sup> · 윤순표<sup>2)</sup> · 강경호<sup>2)</sup> · 이치범<sup>\*1)</sup>

서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과<sup>1)</sup> · 현대로템 전동화시스템팀<sup>2)</sup>

## Analysis of Acceleration Sensor Noise Impact on MR Damper Control for Commercial Electric Vehicle Using HILS

Yongjin Kim<sup>1)</sup> · Junyoung Jung<sup>1)</sup> · Soonpyo Youn<sup>2)</sup> · Kyongho Kang<sup>2)</sup> · Chibum Lee<sup>\*1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

<sup>2)</sup>Electrification System Team, Hyundai Rotem, 37 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi 16082, Korea

(Received 26 November 2024 / Revised 9 December 2024 / Accepted 10 December 2024)

**Abstract** : HILS(Hardware-in-the-Loop Simulation) was designed to validate the dynamic behavior of commercial electric vehicles that are equipped with MR dampers. By integrating MATLAB/Simulink and TruckSim, a comprehensive, real-time co-simulation environment was established to create an MR damper model and control its damping force through current signals generated by control algorithms. Sensor noise was introduced based on real-world data by using white noise generated through bilateral filtering. The Speedgoat real-time target machine facilitated the interaction between the control algorithms and the MR damper model. This setup enables an accurate pre-testing evaluation of control performance and system robustness, thus providing a reliable basis to reduce Sim-to-Real discrepancies before actual vehicle implementation.

**Key words** : MR damper(MR 댐퍼), HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation, 힐스), Controller(제어기), WhiteNoise(백색 소음), Speedgoat(스피드고트)

### 1. 서론

전기 상용차는 친환경 교통수단의 대표적인 예로, 배출가스가 없고 운영비용이 낮아 상용 차량 시장에서 빠르게 확산되고 있다.<sup>1,2)</sup> 상용 전기 버스는 배터리(Battery)가 천장에 위치하여 차체 무게 중심이 높아, Roll 방향 진동에 취약하다. 또한, 다양한 주행환경에서 승차감이 중요하므로 서스펜션 시스템의 성능 검증이 필수적이다.

MR 댐퍼(Magneto-Rheological damper)는 전류 제어를 통하여 유체의 점도를 변화시켜 감쇠력을 조절할 수 있어, 다양한 도로 조건에서 차량의 진동을 효과적으로 제어할 수 있다. MR 댐퍼는 상용 전기차에 적용되어 진동 저감과 승차감 개선의 솔루션(Solution)으로 제시되고 있다.<sup>3)</sup>

기존 연구에서는 MR 댐퍼를 활용한 서스펜션 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 MR 댐퍼를 수학적으로

모델링하고 센서 입력에 기반하여 평가하는 방식을 사용한다. 이는 초기 설계 단계에서 유용하지만 센서 노이즈(Sensor noise)나 통신 지연 등 실시간 제어 시스템에서 발생하는 문제를 고려하지 않는 경우, 시뮬레이션(Simulation)과 실차 성능 간의 괴리가 발생할 수 있다.

Real-time simulation은 실제 세계의 동일한 속도로 물리적 시스템을 실행하여 신뢰도 높은 실험 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 Speedgoat real-time machine을 사용하여 TruckSim 차량 모델을 실제 감쇠력을 추종하는 MR 댐퍼 모델과 MATLAB/Simulink 환경에서 Co-Simulation 하여 실제 MR 액추에이터(Actuator)와 연동한 HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation) 환경을 구성하였다.<sup>4,6)</sup> 이 과정에서 CAN(Controller Area Network) 통신을 통하여 제어 신호가 전송되며, 제어기의 전류 출력 Analog 신호가 Simulink 기반 MR 댐퍼 모델로 전달되어

\*Corresponding author, E-mail: [chibum@seoultech.ac.kr](mailto:chibum@seoultech.ac.kr)

<sup>\*</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

감쇠력을 제어하여 MR 댐퍼와 제어기의 특성을 확인할 수 있다.

동역학 소프트웨어의 시뮬레이션에서는 이상적인 센서 모델을 사용하기 때문에, 실제 주행 환경에서 발생할 수 있는 노이즈나 측정 오차를 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 본 HILS 시스템을 이용하기 위하여 실차 데이터(Data)에서 추출한 센서 노이즈 특성을 바탕으로 화이트 노이즈(White noise)를 생성하여 시뮬레이션에 적용하여 현실적인 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 이를 통하여 기존의 이상적인 모델 기반 연구와 달리 실시간 제어기와 MR 댐퍼의 상호 작용을 검증할 수 있는 환경을 제안하였다.

## 2. 차량 모델

TruckSim은 다축 차량, 군용 차량, 그리고 고중량 차량의 시뮬레이션이 가능한 상용 프로그램(Program)이다. 본 연구에서는 수소 상용차의 신뢰도 높은 시뮬레이션을 위하여 TruckSim을 사용하여 차량 동역학 모델을 구현하였다. 제어 시스템의 개발 및 서스펜션 시스템 설계를 위하여 다양한 요소를 고려하여 차량 모델을 세부적으로 설정할 수 있다.<sup>7,8)</sup>

### 2.1 TruckSim Vehicle Model

본 연구에서는 TruckSim을 이용하여 2축 상용 전기 버스 모델을 설정하였다. Table 1은 차량의 제원이다. Fig. 1은 차량 모델의 구성 창이다.

모델링에 필요한 질량, 축거, 윤거, 무게중심, 조향 특

Table 1 Specification of vehicle

Parameter	Sprung mass	Unsprung mass	Length	Width
value	13,950	2,150	10,995	2,490
unit	kg	kg	mm	mm

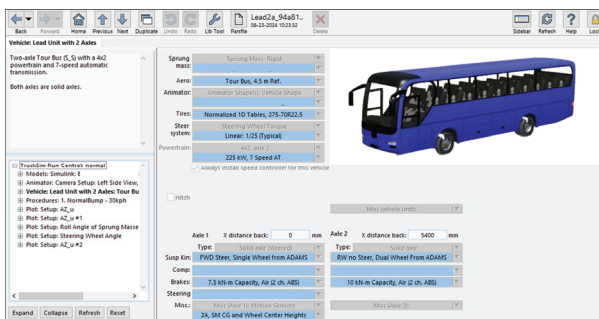


Fig. 1 Configuration of two axle bus in TruckSim

성, K&C(Kinematic & Compliance) 데이터 등의 정보를 차량 제원과 MSC Adams/Car 프로그램에서 얻은 서스펜션 테스트 결과를 통하여 얻었다.

### 2.2 차량용 MR 댐퍼 모델

차량 서스펜션 시스템은 반 능동, 능동, 수동 댐퍼로 나뉜다. MR 댐퍼는 반 능동 현가 장치로, MR 유체에 가해지는 자기장 세기에 따라 감쇠력이 가변하여, 차량의 진동 저감에 활용된다.

MR 댐퍼의 비선형, 감쇠 특성은 유체의 전단률-전단 응력 데이터에 Herschel-Burkley, Bi-plastic Bingham 모델 등을 사용하여 얻은 유체의 특성과 댐퍼 설계인자를 이용하여 예측된다. 하지만 이는 댐퍼단일의 감쇠력을 예측하기에는 적합하지만, 차량의 거동에 따른 동적 특성이나 히스테리시스(Hysteresis)를 표현하기에는 한계가 있다.<sup>9)</sup>

MR 댐퍼의 동적 특성을 나타내기 위해서는 실험 데이터를 기반으로 하는 Hyperbolic Tangent, Modified Bouc-Wen 모델 등이 많이 이용된다. Hyperbolic Tangent 모델은 Modified Bouc-Wen 모델 등에 비하여 정확도가 다소 부족하다는 평가를 받지만 실시간 제어에 큰 이점이 있어, 본 연구에서는 Hyperbolic Tangent 모델을 사용하였고 식 (1)로 표현된다.

$$F(t) = c_0 \dot{x} + k_0 x + \alpha z + f_0 \quad (1)$$

$$z = \tanh[\beta \dot{x} + \delta \operatorname{sgn}(x)]$$

여기서  $\alpha, \beta, \delta$ 는 히스테리시스 형상,  $k_0, f_0$ 는 플로팅 피스톤(Floating piston) 강성, 초기 작용력,  $c_0$ 는 감쇠 성분,  $x, \dot{x}$ 는 댐퍼의 변위, 속도이다. 해당 계수들은 선행 연구를 통하여 선정되었으며 전류가 0, 1, 2, 3 (A)일 경우의 계수들은 상이하다.<sup>10,11)</sup> Fig. 2는 차량에 작용하는 식 (1)의 댐퍼 변위와 감쇠력의 방향을 보여준다.

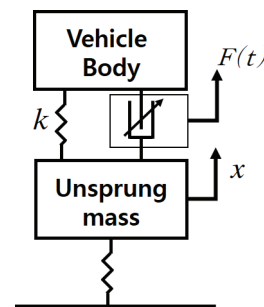


Fig. 2 Direction of damping force and displacement

### 2.3 TruckSim & MATLAB/Simulink 연동

본 연구에서는 Simulink real-time을 사용하여 HILS 환경을 구축하였다. 해당 HILS 환경은 TruckSim과 MATLAB/Simulink 그리고 Speedgoat 실시간 장비를 연동하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Simulink real-time은 일반적인 Simulink 환경과 달리, 실시간으로 동작할 수 있는 Realtime PC를 사용한다. Fixed step solver 설정, Configuration 설정 등의 최적화를 통하여 실시간 제어를 구현하였다.

TruckSim 모델은 Simulink real-time 환경에서 S-function으로 동역학 해석을 수행한다. 차량의 각축 댐퍼 변위, 속도를 식 (1)의 MR 댐퍼 Simulink 모델로 전달하여 감쇠력을 실시간으로 계산한다. 이를 기반으로, TruckSim 모델의 기존 댐퍼를 대체한다.

### 3. 실시간 시뮬레이션

일반적인 컴퓨터 환경에서 차량 동역학 모델과 같은 복잡한 물리 시스템은 실제 시간과 동일한 속도로 시뮬레이션하기에는 어려움이 있다. 예를 들어, 현실 세계에서 5분이 걸리는 차량의 동작을 컴퓨터로 시뮬레이션할 때, 실제 시간과 다른 시간이 걸릴 수 있다. 이는 시뮬레이션과 실제 환경에서 물리 시스템과의 차이를 발생시켜, 제어 시스템의 신뢰도와 정밀도를 낮춘다.

본 연구에서는 실시간 시뮬레이션 환경을 구축하여 시뮬레이션과 실제 시간이 동일하게 진행되도록 하였다. 이를 통하여 HILS 환경에서 제어기와 시스템 간의 상호작용을 정확하게 모사할 수 있다. 이 접근 방식은 메카트로닉스(Mechatronics) 시스템의 설계 검증에서 신뢰성을 높이는 데 필수적이며, 실차 테스트 없이도 다양한 조건에서 시스템의 성능을 평가할 수 있는 장점이 있다.

#### 3.1 HILS 환경 구성

실시간 시뮬레이션 환경을 구성하기 위해서는 일반적으로 Windows PC(Host PC)와 Real-Time Target PC의 이중 구조가 사용된다.

Host PC는 사용자가 시뮬레이션 환경을 설정하고, 실시간 시뮬레이션 결과를 모니터링(Monitoring)하는 역할을 담당한다. 일반적인 Windows 운영 체제를 사용하며, MATLAB/Simulink 환경에서 제어 알고리즘을 설계하고 파라미터(Parameter)를 조정할 수 있다.

Target PC는 FPGA(Field Programmable Gate Array)와 Multi-Core CPU를 탑재한다. FPGA란 환경을 프로그래밍(Programming)을 할 수 있는 반도체이며 신호를 하드웨어로 전달하여 실시간 처리를 통하여 논리 연산을 한다. 이를 통하여 Simulink real-time 소프트웨어(Software)

가 설치된 Speedgoat 또는 OPAL-RT와 같은 실시간 시뮬레이터를 사용한다. Fig. 3은 Host PC와 Target PC 간의 Ethernet 연결 구성과 주요 역할을 나타낸다.

실시간 시뮬레이터는 I/O 모듈을 지원하며 CAN 통신 아날로그 DAQ(Data Aquisition)와 같은 연결을 통하여 하드웨어를 연결할 수 있다. 본 연구는 Speedgoat P3 시뮬레이터를 사용하여 실시간 시뮬레이션 환경을 구성하였다.

HILS는 앞서 설명했듯이 제어 시스템 설계 및 검증 과정에서 실제 하드웨어를 시뮬레이션 모델과 연동하여 테스트할 수 있기 때문에 실시간 시뮬레이션에서는 복잡한 물리 시스템과의 연동을 위하여 HILS 환경을 구축한다. 본 연구에서는 차량 동역학 모델과 MR 댐퍼 제어기를 연결하여 HILS 환경을 구성하였으며 전체적인 개요는 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

CAN 통신은 하나의 인터페이스로 여러 장치를 통신, 모듈을 제어하여 효율적인 시스템 제어를 위하여 널리 사용된다. 특히 기술의 발전으로 많은 전자 장치를 가진 자동차 산업에서 무게 감소, 원가 감소를 위하여 활용되고 있다. 본 연구의 MR 제어기는 차량 정보를 Chassis CAN으로 전송 받을 뿐만 아니라, 가속도 측정값을 별도의 Local CAN으로 전송받는다.<sup>12)</sup>

차량 모델의 가속도, 속도 등 TruckSim 결과값이 CAN 통신을 통하여 제어기로 전달되며, 제어기에서 산출한 전류 신호가 댐퍼 모델로 전달된다. 본 실험에서 MR 댐퍼는 실제로 기계적으로 운동하지 않으며, 코일에 발생한 신호만 다시 제어기로 전달된다.

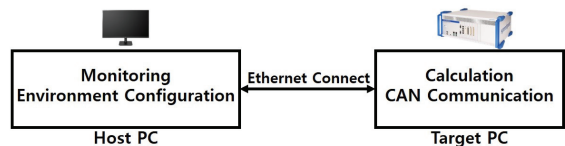


Fig. 3 Ethernet connection environment and role

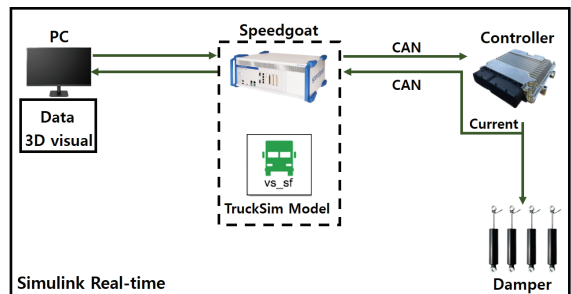


Fig. 4 Schematic diagram of HILS

Speedgoat은 PC에서 코드 형태로 전송된 시뮬레이션 모델을 실시간으로 실행한다. 이는 TruckSim 모델과 MR 댐퍼 모델을 포함하고 있으며, 차량의 가속도, 속도, 서스펜션 변위 등의 데이터를 계산하고 이를 제어기로 전송한다.

제어기의 전류 신호는 Simulink real-time 내부의 MR 댐퍼 모델로도 전달되어, 감쇠력을 조절한다. MR 댐퍼 모델은 0, 1, 2, 3 (A)의 데이터 기반으로 선형 보간법을 통하여 감쇠력을 생성한다.

#### 4. 차량 실시간 HILS 시뮬레이션

본 연구에서는 앞서 설명했듯이 차량 시뮬레이션을 위하여 Simulink와 TruckSim 그리고 Speedgoat 장비를 연동하여 실시간 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 도로 환경, 차량 모델링, 주행 조건은 TruckSim이 제공하며 차량의 주행 특성 및 거동을 제어기로 전달하여 효과적으로 제어 전류 신호를 생성한다. 제어 전류는 MR 댐퍼의 모델링에 전달되어 HILS가 구성된다. Fig. 5는 Simulink real-time 기반 차량 시뮬레이션 구성이다.

제어기의 주요 통신 신호는 Sprung mass 가속도, Unsprung mass 가속도, 조향각, Accelerator pedal 등으로 구성되었다. 이 신호들은 앞서 설명했듯이 CAN 신호로 실시간으로 제어기에 전달된다. 제어기는 연산을 통하

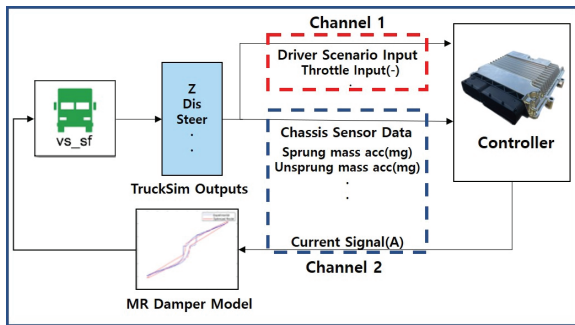


Fig. 5 Configuration of simulink real-time system

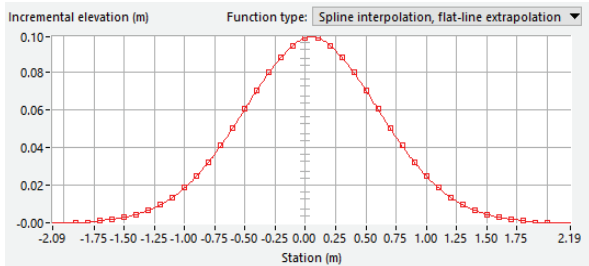


Fig. 6 Bumpy road profile of simulation(Capture of TruckSim)

여 MR 댐퍼의 전류 제어 신호를 생성하며 차량의 진동 저감을 목표로 하며, 도로의 불규칙한 입력에 대응하여 감쇠력을 조정한다.

도로는 TruckSim에서 제공하는 폭 3.5 m, 높이 0.1 m의 방지턱 프로파일(Profile)을 주행하였고 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 본 연구의 서스펜션 시스템 모델은 기존의 패시브 댐퍼 모델을 MR 댐퍼 모델로 대체하여, 다양한 도로 조건에서 제어기의 성능을 평가할 수 있는 환경을 구성하였다.

#### 4.1 가속도 센서 노이즈 경량화

여러 산업에서 실제 실험과 시뮬레이션은 차이를 보인다. 차량 동역학 시뮬레이션에서 나타나는 차이는 주로 시뮬레이션에서 사용하는 단순화된 수학적 모델과 실제 환경에서 발생하는 비선형성, 노면의 불규칙성 그리고 센서의 측정 오차 등에서 비롯된다. 본 연구에서는 이러한 차이를 줄이기 위해 센서 노이즈의 영향을 검토하였다. 또한, 본 연구의 제어기는 Robust control 이론에 의해 설계되지 않았으며, 가속도 신호에 포함되는 노이즈에 대한 제어 로직(Logic)의 강건성을 평가할 필요가 있다.

시뮬레이션에서는 이상적인 센서 모델을 사용하지만 실제 센서에서는 물리적 한계, 제조 공정 오차, 전자적 노이즈 등으로 인해 다양한 측정 오차가 발생할 수 있다. 이러한 노이즈를 시뮬레이션에 반영하기 위하여 본 연구에서는 실차 실험에서 수집된 CAN Log 데이터를 기반으로 화이트 노이즈를 생성하였다.

화이트 노이즈는 모든 주파수 대역에서 일정한 파워 스펙트럼(Power spectrum)을 가지며, 시뮬레이션에서 실제 환경의 불확실성을 모델링하는 데에 유용하다는 장점이 있다. 이 과정에서 실차 데이터에서 양방향 필터링(Filtering)을 통하여 표준편차( $\sigma$ )값을 추출하였다. 이 방법은 시뮬레이션에서 노이즈 특성을 보다 현실적으로 반영할 수 있다. 양방향 필터링은 위상 왜곡을 최소화할 수 있고 실제 데이터의 노이즈 특성을 보다 정확하게 반영할 수 있는 장점이 있다. Fig. 7(a), (b)는 전방 좌측의 상질량과 하질량의 가속도 신호에서 추출한 노이즈 신호이다. 모든 축의 데이터는 같은 과정으로 얻는다.

Table 2는 각축에서 추출한 표준편차 값이다. 실제 동일한 사양의 가속도 센서를 동일한 위치에 부착하여도 다른 노이즈 특성을 보이므로, 축에 따른 경향성은 나타나지 않는다.

각축의 시뮬레이션에서 얻은 Sprung mass 가속도, Unsprung mass 가속도에 화이트노이즈를 추가하여 실제



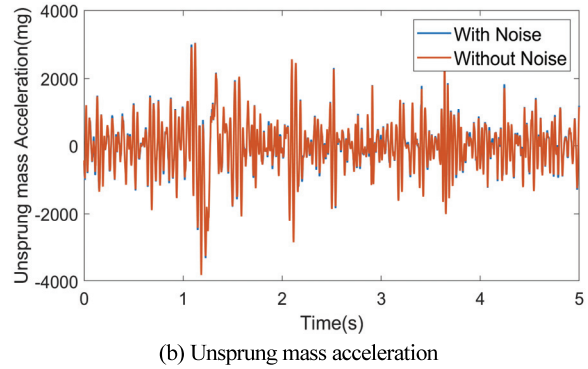
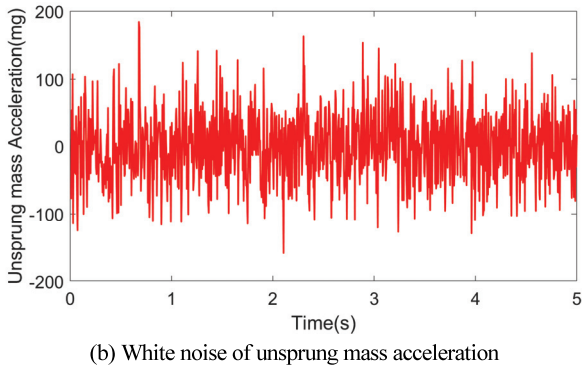
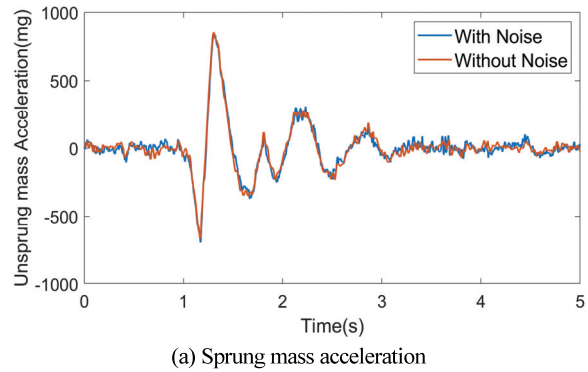
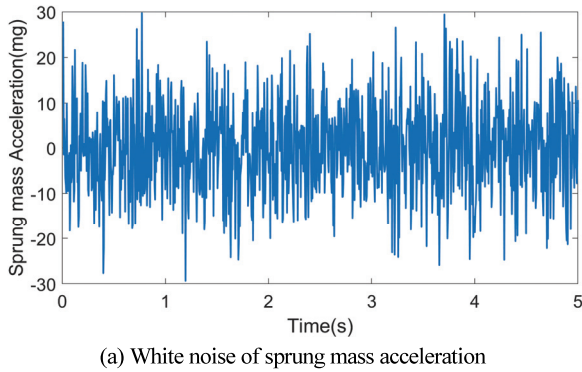


Fig. 7 White noise of acceleration

Fig. 8 White noise implementation on vertical acceleration

Table 2 Selected standard deviation of each axle,  $\sigma$  (mg)

Type	Front left	Front right	Rear left	Rear right
Sprung mass	9.78	16.54	9.41	13.24
Unsprung mass	51.56	49.73	60.04	45.87

제어기 입력 조건을 보다 현실적으로 반영하였다. Fig. 8은 전방 좌측축의 방지턱을 통과하는 시뮬레이션 결과 가속도와 화이트노이즈 반영 가속도를 비교 도시한 것이다.

위의 노이즈를 포함한 데이터는 제어기로 전달되어 MR 댐퍼 제어 알고리즘의 성능을 평가하는 데 사용되며, 화이트 노이즈는 가속도 신호에 무작위한 변동을 나타낸다. 이는 실제 주행 환경에서의 센서 노이즈를 효과적으로 재현한다.

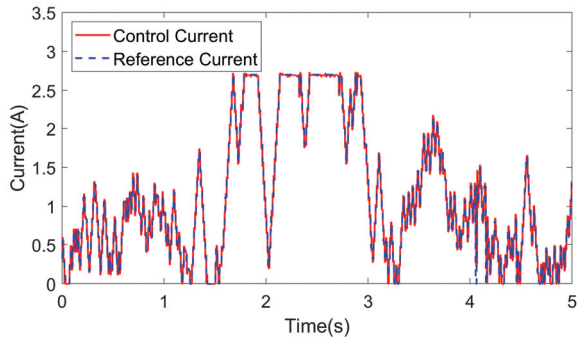
#### 4.2 가속도 센서 노이즈 영향 분석

Fig. 9는 화이트노이즈 세기를  $1\sigma$ 부터  $3\sigma$ 까지 변화하였을 때 MR 댐퍼 제어 전류 신호와 레퍼런스(Reference) 신호를 비교하였다. 레퍼런스 신호는 제어기의 알고리즘에 의한 이상적인 전류 신호이며 실제 전달 신호는 센서 노이즈, 시스템 지연 등의 영향을 받은 신호이다.

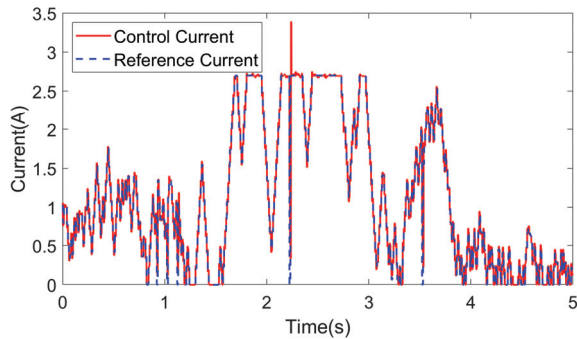
레퍼런스 전류 신호와 실제 전달 전류 신호가 약간의 차이를 확인할 수 있다. 이는 권선의 전자기 간섭 등으로 인한 영향이다.

Fig. 9의 제어 전류 기반으로 MR 댐퍼는 점도 변화를 통하여 감쇠력을 조절한다. 이 감쇠력은 차량 모델에 적용하여 차량의 진동 특성을 제어하게 된다. Fig. 10(a), (b)는 각각 차량 무게중심의 수직 가속도, Pitch 각도이며 Table 3, Table 4를 통하여 RMS, Peak to Peak 결과를 확인할 수 있다.

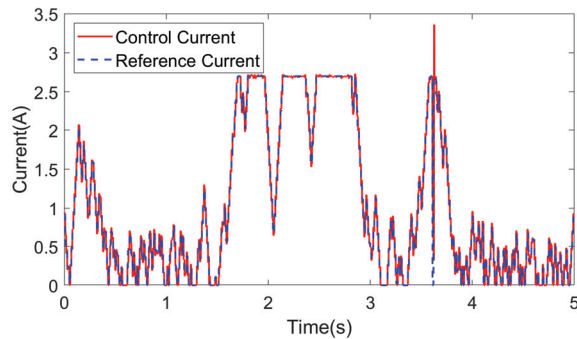
Fig. 10(a)에서 화이트노이즈의 세기가 증가함에 따라 수직 가속도 신호는 약간의 변동이 나타남을 확인할 수 있다. 하지만 세기의 차이가 수직 가속도의 경향성이나 패턴의 변화에는 영향을 미치는 것을 확인할 수 없었다. Fig. 10(b)의 Pitch 각도 또한 노이즈 세기에 따른 큰 차이를 보이지 않은 것을 확인할 수 있었다.



(a) With white noise ( $1\sigma$ )



(b) With white noise ( $2\sigma$ )



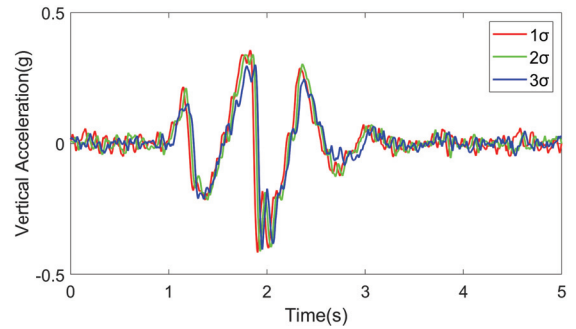
(c) With white noise ( $3\sigma$ )

Fig. 9 Current signal of controller with white noise

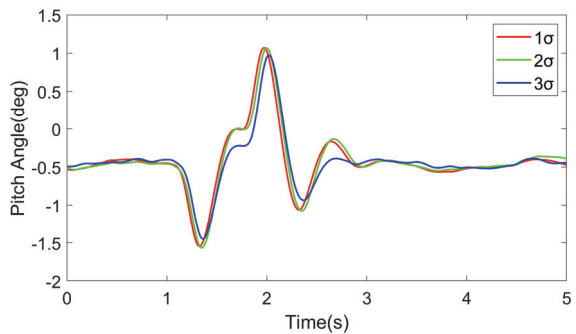
### 5. 결론

본 연구는 수소 상용 전기차의 MR 댐퍼 기반 서스펜션 시스템과 제어기를 평가할 수 있는 HILS 환경을 구축하고 실시간 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통하여 실차 평가에 앞서 다양한 주행 조건에서의 시스템 응답을 분석할 수 있을 것이다.

연구 과정에서 사용된 제어기는 입력 신호에 따른 제어기의 전류 출력 신호가 MR 댐퍼 모델에서 요구하는 감쇠력 특성을 효과적으로 생성하는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Vertical acceleration of C.G point



(b) Pitch angle of C.G point

Fig. 10 Results of vehicle simulation

Table 3 Influence of  $\sigma$  on RMS values

Sensor noise \ Type	RMS value of vertical acceleration (g)	RMS value of pitch angle (deg)
$1\sigma$	0.11429	0.58225
$2\sigma$	0.1142	0.58325
$3\sigma$	0.10225	0.55658

Table 4 Influence of  $\sigma$  on peak to peak values

Sensor noise \ Type	Peak to peak value of vertical acceleration (g)	Peak to peak value of pitch angle (deg)
$1\sigma$	0.77259	2.615
$2\sigma$	0.75224	2.6326
$3\sigma$	0.70706	2.4216

제어기는 다양한 도로 입력과 외부 노이즈 조건에서도 안정적인 제어 신호를 출력하였으며 MR 댐퍼의 가변 감쇠력을 성공적으로 구현할 수 있었다. 노이즈 모델링은 실차 환경에서 발생할 수 있는 센서 노이즈를 효과적으로 반영하여 실제 가속도 데이터를 모사하였다. 이를 통해 제어 시스템의 강건성을 평가할 수 있는 환경을 설계하였다.

결론적으로, 본 연구에서는 HILS의 설계 및 구현 과정에 중점을 두었으며 이를 통해 수소 상용 전기차의 MR 댐퍼 기반 서스펜션 시스템을 실차 환경과 유사한 조건을 구성할 수 있었다. 제어기의 성능에 대한 직접적인 분석보다는 HILS 환경을 활용하여 실시간 제어 시스템이 어떻게 구현되고, 센서 노이즈에 대해 안정적으로 동작하는지를 평가하는 데 초점을 맞추었다. 향후 연구에서는 더 다양한 제어 알고리즘을 적용하거나 하드웨어와의 연동 테스트를 통하여 시스템의 검증 범위를 확장할 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20018369, 수소전기상용차 반능동 현가시스템용 공통요소부품기술 개발).

## References

- 1) S. Kim and D. Seo, "A Study on Developing Verification Scenarios for Heavy-Duty Electric Commercial Vehicles," IEIE Summer Annual Conference, pp.1960-1961, 2023.
- 2) J. P and C. Kim, "Charging Pattern Analysis of Electric Trucks and Policy Implications," Journal of Korean Society of Transportation, Vol.41, No.3, pp.297-307, 2023.
- 3) S. Ha, M. Seong, Q. Heung and S. Choi, "Optimal Design of MR Damper: Analytical Method and Finite Element Method," Transactions of the KSNVE, Vol.19, No.11, pp.1110-1118, 2009.
- 4) A. Delavari, P. Brunelle and I. Kamwa, "Real-Time Closed-Loop PQ Control of NPC Multi-Level Converter Using OPAL-RT and Speedgoat Simulators," IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Toronto, ON, Canada, pp.1-5, 2018.
- 5) L. Rossa and M. Brendike, "EPICS Integration for Rapid Control Prototyping Hardware from Speedgoat," 19th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS'23), Cape Town, South Africa, Oct.9-13, pp.1317-1321, 2023.
- 6) J. Kim, "Excavator Real-Time Simulation and Applications," Journal of Drive and Control, Vol.17, No.3, pp.69-75, 2020.
- 7) J. Jeon, B. Pyun, S. Kim and H. Choi, "Development of AEB Algorithm Based on Forward Collision Prediction for Commercial Vehicles through TruckSim," KSAE Annual Autumn Conference, pp.358-359, 2022.
- 8) D. Ra, B. Cho, J. Kim, D. Lee and H. Cho, "The Development of the HILS for Control Logic Validation of Commercial Vehicle ESC," Transactions of KSAE, Vol.30, No.5, pp.357-362, 2022.
- 9) Y. Kim, J. Jung, J. Park, K. Kang and C. Lee, "Damping Force Prediction Program for MR Dampers Considering MR Fluid Property, Damper Design and Properties," Transactions of KSAE, Vol.31, No.12, pp.995-1002, 2023.
- 10) J. Jung, Y. Kim, K. Kang and C. Lee, "Modeling of MR Damper Equipped Vehicle Using CarMaker and VDBS," KSAE Annual Spring Conference, pp.433-434, 2024.
- 11) L. Gang, L. Hao, O. Na, H. Guoliang, X. Rongxia and G. Ruiheng, "Establishment and Simulating Verification for Hyperbolic Tangent Model of Magneto-Rheological Damper," Journal of Physics: Conference Series, Vol.1486, No.7, 2020.
- 12) H. Oh and M. Hyun, "Data Flow Control of CAN Transmission System Based on Feedback Controller for Resource Efficiency Improvement," Proceedings of Symposium of KICS, pp.787-788, 2021.