



대형 상용차량 하이브리드 전동식 조향 시스템 주행 성능평가를 위한 HILS 시스템 개발

유 춘 식 · 최 규 재*

군산대학교 기계자동차공학부

Development of HILS System for Performance Evaluation of a Heavy Commercial Vehicle Hybrid Electric Power Steering System

Chunsik Yoo · Gyoojae Choi*

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk 54150, Korea

(Received 12 January 2016 / Revised 5 July 2016 / Accepted 11 December 2016)

Abstract : Most commercial vehicles have adopted the hydraulic power steering system. To reduce fuel consumption and to improve steering controllability, a hybrid electric power steering system is being developed for commercial vehicles. In this study, the HILS (Hardware In the Loop Simulation) system equipped with a commercial vehicle hybrid electric power steering system was developed and the vehicle dynamic performance of a truck with the steering system was evaluated. The hybrid electric power steering system is composed of the EHPS motor pump, column mounted EPS system, and ball nut steering gear box for heavy commercial vehicles. The accuracy of vehicle models equipped with the HILS system was verified with comparisons between the simulation results and field test results. The road reaction forces of the steering system were generated from the vehicle model and verified using field test results. Step steering tests using the verified HILS system were carried out and the performance of a newly developed commercial vehicle hybrid electric power steering system was evaluated.

Key words : HILS(Hardware In the Loop Simulation), Hybrid electric power steering system(하이브리드 전동식 조향시스템), Electric power steering(EPS) system(전동식 조향시스템), Electro Hydraulic Power Steering(EHPS) system(전동유압식 조향시스템), Commercial vehicle(상용차량)

1. 서 론

중대형 상용차량의 경우 기존에는 조향력 보조를 위하여 엔진부하를 이용하여 유압을 발생시키는 유압식 조향시스템(HPS)이 사용되어 왔다. 그러나 연비향상 요구에 따라 모터로 유압펌프를 구동시켜 유압을 발생시키는 전기 유압식 동력 조향시스템(EHPS)을 적용하여 왔으나¹⁾ 기본적으로 유압을 사

용하여 조향력을 보조하기 때문에 능동조향제어 등에 어려움이 있었다. 이에 따라 연비 향상 뿐만 아니라 능동 조향 제어 성능 확보 등을 위하여 전기 유압식 조향시스템(EHPS)과 전동식 조향시스템(EPS)을 복합적으로 구성한 하이브리드 전동식 조향시스템이 개발 중이다.²⁾ EHPS와 EPS와 같은 조향시스템은 차량의 안전과 직접적으로 연관되어 있기 때문에 자동차 업체에서는 개발 단계에서 시스템을 실차에 장착하여 테스트하기 전에 시뮬레이터를 이용하여 가상환경에서 주행 시험을 실시하는 HILS (Hardware in the Loop Simulation)를 채택하고 있다.

*A part of this paper was presented at the KSAE 2015 Annual Conference and Exhibition

*Corresponding author, E-mail: gjchoi@kunsan.ac.kr

HILS를 이용하여 시스템을 검증하는 경우 설계에서 실차 적용 단계에 이르는 많은 비용 절감과 개발 시스템 적용에 따른 실차 시험의 위험요소를 배제할 수 있다는 장점이 있다.^{3,4)}

본 연구에서는 HILS를 활용하여 상용차량 하이브리드 전동식 조향시스템 성능평가를 위해 실시간 차량 모델 생성 및 검증, EHPS 및 EPS H/W 시스템 구성, 노면 반력 재현시스템 구축, 통합 실시간 시뮬레이션 환경 구축 등을 수행하였다. 구축된 HILS 시스템의 수학적 모델을 수립하여 실차, 수학적 모델, HILS 시스템을 비교함으로써 정확도를 검증하였으며 HILS를 이용하여 주행시뮬레이션을 실시하여 상용차량 하이브리드 전동식 조향시스템의 특성을 평가하였다.

2. 하이브리드 전동식 조향시스템 HILS

2.1 하이브리드 전동식 조향시스템

하이브리드 전동식 조향시스템은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 모터로 유압을 발생시켜 상용차량의 바퀴를 조향시키는 전기 유압식 조향시스템(EHPS)과 운전자의 조향력을 보조하기 위하여 모터로 직접 스티어링 컬럼을 보조하는 전동식 조향시스템(EPS)으로 구성된다.

상용차량 하이브리드 전동식 조향시스템을 개발하는 이유는 일반적인 주행 상황에서는 차량 속도와 조향 각속도에 따른 속도 맵을 기반으로 EHPS 시스템을 상시 구동하고 회피 조향과 같은 급조향시, 노면저항을 많이 받는 저속 또는 정차 시, 그리고 조향력이 커지는 조향 끝단에서는 EPS를 이용하여 추가적인 토크를 발생시켜 조향력을 보조하기 위해서이다. 이와 같이 조향시스템을 구성함으로써 EHPS 시스템 유압펌프 용량을 작게 하여 경량화할 수 있으며 EPS를 이용하여 조향력 보조 기능을 수행할 수 있다. 특히 EPS를 이용하여 조향함으로써 차선유지제어나 자율주행제어와 같은 능동조향제어 시스템 개발 시 활용할 수 있다는 점이 하이브리드 조향시스템 개발의 주된 목적이라고 할 수 있다.

시스템 구성을 보면 하이브리드 전동식 조향시스템은 EPS와 EHPS가 병행 작동되기 때문에 토션바가 두 곳에 장착되어 있는데 하나는 EPS측에 장착

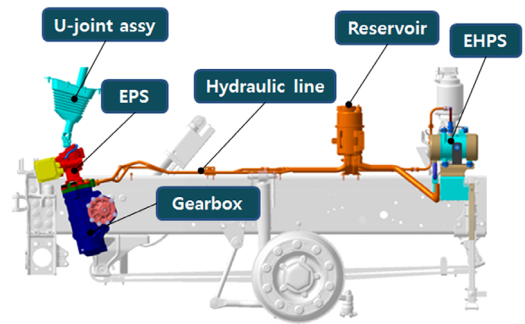


Fig. 1 Components of hybrid electric power steering system of a commercial vehicle

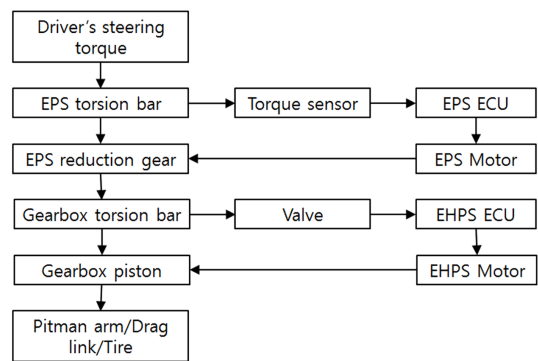


Fig. 2 Steering signal flow of a hybrid electric power steering system²⁾

되어 토크 센서를 통해 운전자 조향 모멘트를 감지하고, 또 다른 하나는 볼&너트 스티어링 기어박스 측에 장착되어 유로 밸브를 개폐하여 EHPS 모터 펌프로부터 전달된 기어박스 내 유체의 흐름을 조절하는데 이용된다.

시스템 작동 메커니즘²⁾은 Fig. 2와 같으며 운전자의 조향에 의해 모멘트가 발생하면 EPS 토션바에 비틀림이 발생하게 된다. 토크센서에서 토션바 비틀림각 정보를 ECU에 전달하게 되면 ECU에서는 운전자 조향 모멘트를 계산한다. ECU에서는 토크, 차속, 조향각 신호를 토대로 상황에 적절한 모터 토크를 발생시키고 감속기를 통해 보조 토크가 부가되어 최종 볼&너트 기어박스 토크가 전달된다. 이 토크가 볼&너트 기어박스의 토션바를 회전시켜 볼&너트 기어박스 내 유로 밸브 개폐량을 조절하여 피스톤을 밀어내는 힘을 조절한다. 이때 EHPS ECU에서는 차속, 조향각속도의 신호를 토대로 상황에

따라 적절한 유량을 공급하여 피스톤을 밀어내는 압력을 조절하게 되고 최종적으로 조향기구를 작동시키는 힘을 발생시킨다. 이와 같이 EPS와 EHPS의 제어를 통해 발생한 힘의 합이 피트먼 암, 드래그 링크, 스티어링 암, 타이로드를 통해 타이어를 회전시킨다. 따라서 하이브리드 조향시스템의 작동이 원활하게 이루어지기 위해서는 EPS ECU와 EHPS ECU가 동시에 상호 작용을 해야 하며 두 ECU 사이의 최적 제어 전략 수립이 필요하다.

2.2 HILS 시스템 구성

상용차량 하이브리드 전동식 조향시스템 평가를 위해 Fig. 3과 같이 HILS 시스템을 구축하였다. 차량 모델은 현재 양산되고 있는 상용차량을 TruckSim⁵⁾으로 모델링 하였으며 27 자유도를 가지고 있다. 운전자가 조향휠을 이용하여 조향 입력을 전달하면 반력모터를 이용하여 차량모델로부터 계산된 킥핀 모멘트를 생성하도록 하여 노면 반력을 재현하였다. 운전자가 직접적으로 조향을 할 수 있도록 차량의 운전석 환경을 구축하고 모니터를 이용하여 차량 주행 전방 환경을 디스플레이하여 차량을 주행하면서 필요한 조향을 할 수 있도록 구성하였다.

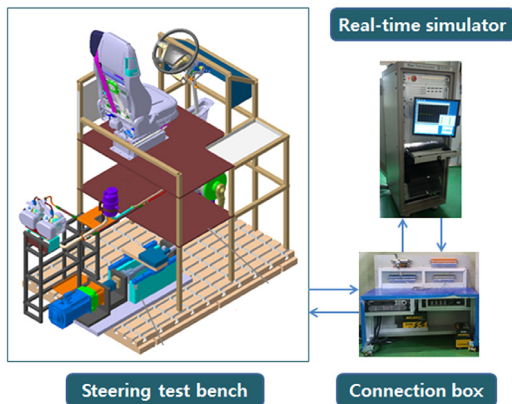


Fig. 3 HILS system for a commercial vehicle hybrid electric power steering system

2.2.1 노면 반력 재현 시스템 설계

HILS를 이용하여 조향시스템의 성능을 평가하기 위해서는 주행 중 발생하는 노면에서의 반력이 조향시스템으로 입력되는 노면 반력 재현시스템을 구

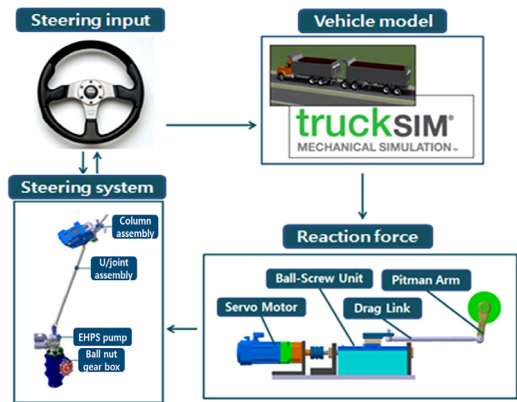


Fig. 4 Road load reaction system

축하는 것이 중요하다. 구성한 노면 반력 재현 시스템은 Fig. 4에서 보는 것과 같이 조향휠에서부터 드래그 링크까지 실제 차량에 쓰이는 부품을 사용하였으며 서보모터가 볼 스크류에 토크를 가하여 드래그 링크를 밀도록 설계하였다. 피트먼 암과 기어박스 사이에 토크미터를 장착하여 피트먼 암 토크를 측정하였다. 노면 반력은 TruckSim에서 차량동역학 해석을 통해서 구한 킥핀 축에 작용하는 토크 값을 피트먼 암에 작용하는 힘으로 환산하여 입력하였다.

2.2.2 실시간 시뮬레이션 소프트웨어 구성

HILS 소프트웨어 구성도는 Fig. 5와 같다. 실시간 연산 처리를 위해서 RT-LAB⁶⁾ 소프트웨어를 사용하였고 타겟 PC의 운영체제인 QNX 환경에서 실행된다. 호스트 PC에는 TruckSim 소프트웨어가 설치되어 입력된 조향 등 주행조건과 차량모델을 조합하여 차량거동을 계산하고 시뮬레이션 결과를 애니메이션 형태로 나타낸다. TruckSim을 RT-LAB과 동

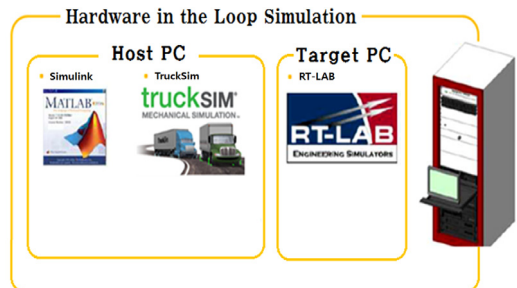


Fig. 5 Software components of the HILS system

시 시뮬레이션하기 위해서 Matlab/Simulink를 사용하여 실시간으로 차량의 주행 입력 조건을 변경시킬 수 있으며 ECU와 센서 등의 디지털, 아날로그 신호처리가 가능하도록 구성하였다.

2.2.3 차량 모델 검증

본 연구에서 사용한 차량은 국내 생산 대형 트럭으로 형상을 Fig. 6에 도시하였으며 기본 재원은 Table 1에 기술하였다.

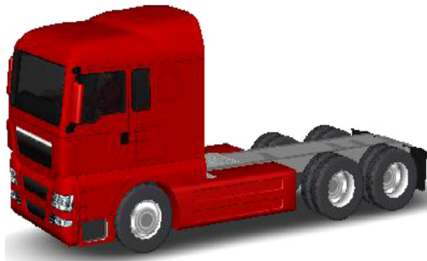


Fig. 6 6×2 tractor

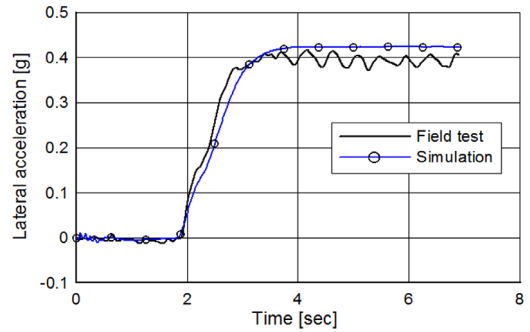
Table 1 Vehicle specification

Description	Specifications
Vehicle weight	6,921 kg
Vehicle height	3,200 mm
Vehicle width	2,070 mm
Roll inertia	4,002.2 kg·m ²
Pitch inertia	52,264.0 kg·m ²
Yaw inertia	50,641.1 kg·m ²

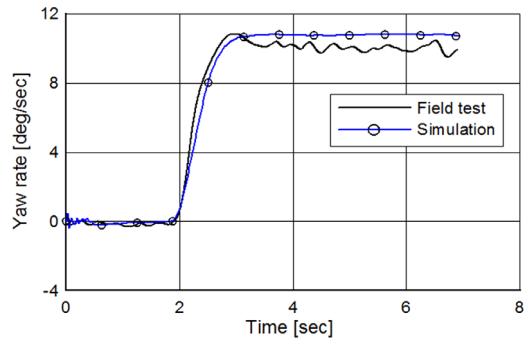
구성한 TruckSim 차량 모델의 정확도를 검증하기 위하여 주행시험장에서 스텝조향입력시험(step steering test)을 실시하였다(자동차부품연구원). 차량 모델 해석 결과와 측정값을 비교하기 위하여 측정된 조향각을 TruckSim의 조향 조건으로 입력하였다. 일반적으로 차량의 주행 특성 분석 시 사용하는 항목인 횡 가속도, 요 각속도, 롤 각을 비교하였으며 Fig. 7에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 해석 및 실차 시험 비교 결과 차량 모델의 정확도는 90% 이상으로 나타났다.

2.3 HILS 시스템 수학적 모델링

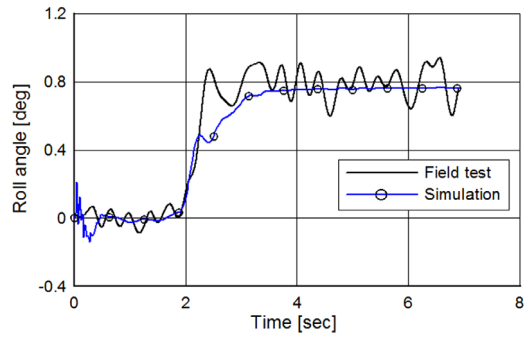
구성한 HILS 시스템의 수학적 모델을 생성하였으며 상용차량 주행 시험 결과와 비교하였다. 조향



(a) Lateral acceleration



(b) Yaw rate



(c) Roll angle

Fig. 7 Comparisons between field test (KATECH) and TruckSim simulation results

시 바퀴에서 발생하는 힘의 관계는 Fig. 8과 같다. 반시계 방향의 슬립각 β_f 에 따라 코너링 힘이 발생하게 되며 작용 위치는 뉴메틱 트레일(ξ_n)만큼 떨어진 위치이다. 코너링 힘, 캐스터 트레일과 뉴메틱 트레일의 합, 슬립각에 의해 킹핀에 모멘트(kingpin aligning moment)가 발생하고 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

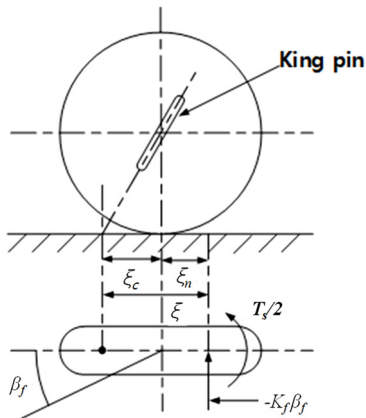


Fig. 8 Kingpin moment of a front wheel

$$T_s = (\xi_n + \xi_c) K_f \beta_f = \xi K_f \beta_f \quad (1)$$

여기에서 T_s 는 킹핀모멘트, ξ_n 은 뉴메틱 트레일, ξ_c 는 캐스터 트레일, K_f 는 코너링 포스 계수를 나타낸다. 이 킹핀모멘트에 의해 바뀌는 직진상태로 돌아가도록 하는 힘을 받게 되고 스티어링 휠이 원래 위치로 복원하게 된다.

Fig. 9에는 2륜 모델을 나타낸 것으로 전륜 슬립각 β_f 는 식 (2)와 같다.

$$\beta_f = \beta + \frac{l_f}{V} \delta \quad (2)$$

여기에서 β , l_f , V , δ 는 각각 차체 슬립각, 무게중심과 앞 차축과의 거리, 차속, 전륜 조향각을 의미한다.

식 (1)과 (2)를 이용하여 킹핀 모멘트 T_s 는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_s = 2\xi K_f (\beta + \frac{l_f}{V} r - \delta) \quad (3)$$

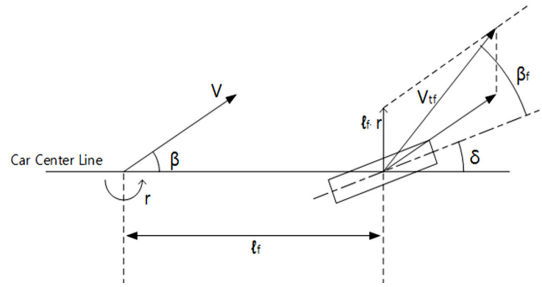


Fig. 9 Slip angle of a bicycle model

식 (3)에서 계산된 모멘트를 HILS 시스템 노면반력 재현을 위한 반력 모터의 구동 전압으로 환산하여 입력하였다. Fig. 10은 반력모터의 Simulink model을 나타낸 것으로 교류 3상 비동기 서보 모터를 모델링하여 노면 반력 재현 토크가 출력되도록 하였다.

모터가 볼 스크류를 회전시켜 드래그 링크를 밀어 노면 반력을 재현하게 되는데 식 (4)를 이용하여 볼 스크류 발생 축력 F_a 를 계산하였다. 여기에서 발생 축력은 드래그 링크를 미는 힘으로 피트먼 압 구조를 고려하여 피트먼 압에 작용하는 토크를 계산할 수 있으며 이 토크는 노면 반력에 의해서 조향시스템에 작용하게 되는 자기복원모멘트(self aligning moment)를 의미한다.

$$F_a = \frac{2\pi\eta_1 T}{P_h} \quad (4)$$

여기에서 F_a , η_1 , T , P_h 는 각각 볼 스크류 발생 축력, 이송나사 정효율, 반력모터 출력토크, 이송나사 리드를 의미한다.

HILS 모델 계산 결과와 실차 계측 값을 Fig. 11과 같이 도시하였으며 시험 조건은 Table 2에 나타낸

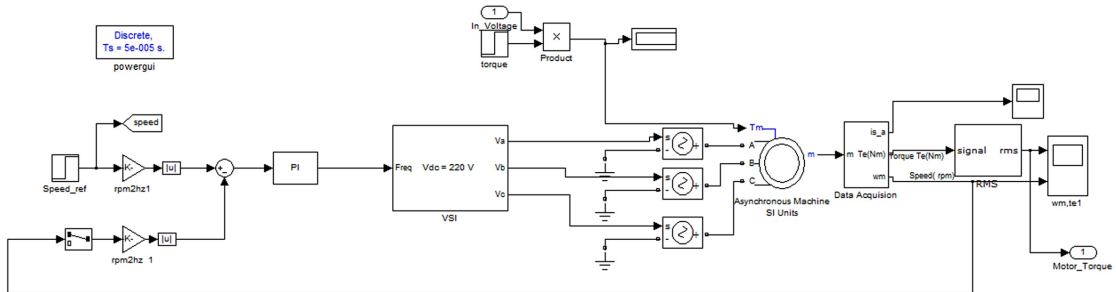
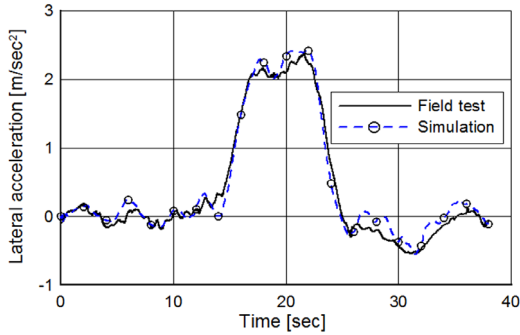


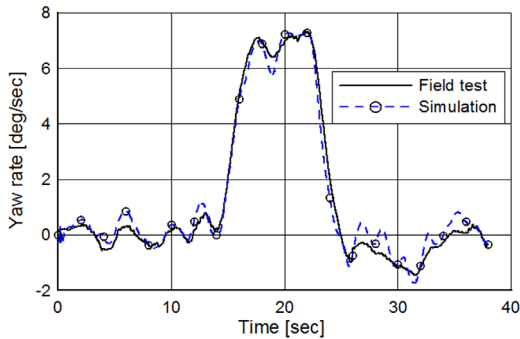
Fig. 10 Simulink model of road load reaction motor

Table 2 Test conditions (right turn)

Description	Value
Vehicle speed	60 km/h
Steering input	40 °
Road friction coefficient (μ)	0.8



(a) Lateral acceleration



(b) Yaw rate

Fig. 11 Comparisons of field test and HILS model simulation results

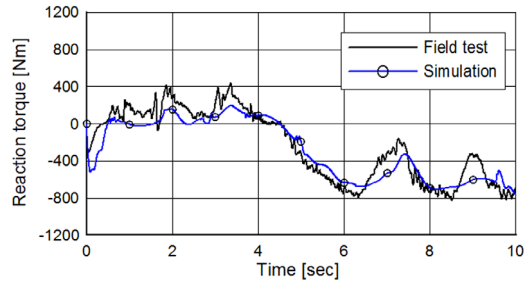
바와 같이 시속 60 km에서 오른쪽 방향으로 조향휠을 회전시킨 조건이다.

그림에서 보는 바와 같이 조향 입력에 따라 발생하는 차량 거동(lateral acceleration, yaw rate)을 비교하였으며 해석결과가 실차와 유사한 동역학적 거동을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

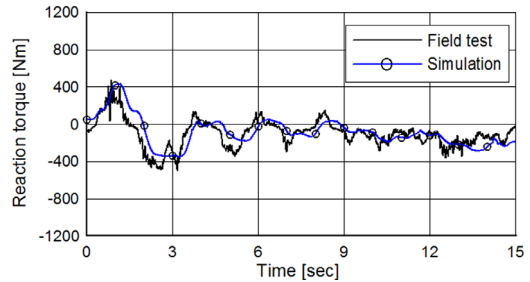
3. 상용차량 하이브리드 전동식 조향시스템 HILS 성능평가

3.1 조향 반력 재현 시험

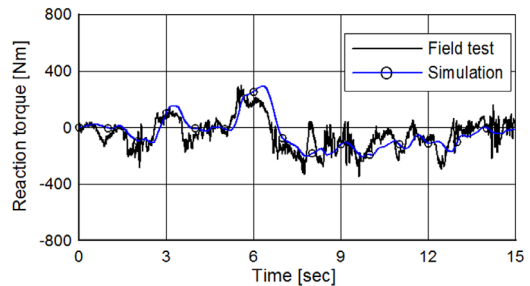
구성한 HILS 시스템에서 차량 주행 시험 시 조향 반력 재현의 정확도를 검증하였다. 이것은 상용차



(a) 30 ~ 40 km/h



(b) 60 ~ 70 km/h



(c) 80 ~ 90 km/h

Fig. 12 Comparisons of steering reaction torque between field test(KATECH) and HILS results

량 하이브리드 전동식 조향시스템 HILS에서 주행 상황에 따라 적절하게 조향 반력을 생성할 수 있어야 HILS를 이용한 조향시스템 개발이 가능하기 때문에 필수적인 사항이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 TruckSim에서 제공하고 있는 Pacejka 타이어 모델을 사용하였으며 이 모델은 거의 모든 속도 구간에서 정확한 타이어 발생력을 계산할 수 있는 것으로 알려져 있다.⁷⁾

Fig. 12에서 보는 바와 같이 저속, 중속, 고속 구간에서 실차시험 시 측정된 피트먼 암 토크와 HILS에서 계산한 반력 토크를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실차 실험과 HILS 결과가 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

3.2 HILS를 이용한 시스템 특성 평가

HILS 시스템을 이용하여 상용차량 하이브리드 전동식 조향 시스템의 성능평가를 수행하였다.⁸⁾ 조향 입력 조건은 스텝 조향 입력 시험(step steering test, J-turn)으로 HILS 시스템에 장착되어있는 조향 휠을 시험자가 직접 회전시키면서 가상주행 시험을 실시하였다.

시험 방법은 차속에 따라 직진주행 중인 대형 트럭터에 스텝 함수 형태의 조향 입력을 가하여 정상 상태 도달 시 횡가속도가 약 0.2 g가 되도록 주행하여 차량 응답 특성과 하이브리드 전동식 조향시스템 구성 부품에서의 동작 특성을 분석하였다. 조향 입력은 Fig. 13과 같이 입력하였으며 Table 3에는 시험조건을 기술하였다. Fig. 14는 HILS 시스템을 이용한 주행 시험 시 (a)횡가속도, (b)EPS에서 발생하는 토크, (c)EHPS 펌프 회전속도를 각각 도시한 것이다.

횡가속도가 0.2 g에 도달하기 위해서는 Fig. 13에서 보는 바와 같이 저속인 경우에 더 큰 조향각을 입력해야 하며 40 km/h의 속도에서 약 85°조향각을 입력하였다. Fig. 14(b)에는 조향 칼럼에 연결된 EPS 모터 토크를 도시한 것으로 과도구간에서 토크 값이 급격히 증가하였으며 정상상태구간에서는 조향각을 유지하기 위해 일정한 토크 값이 출력되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 조향 중 토크 값이 급

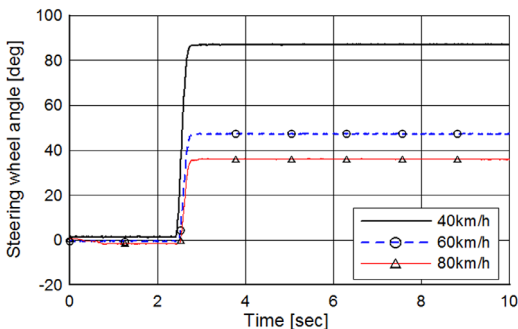
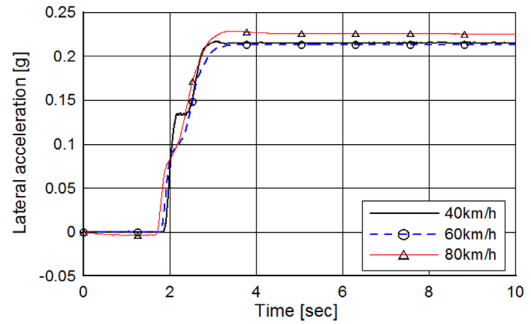


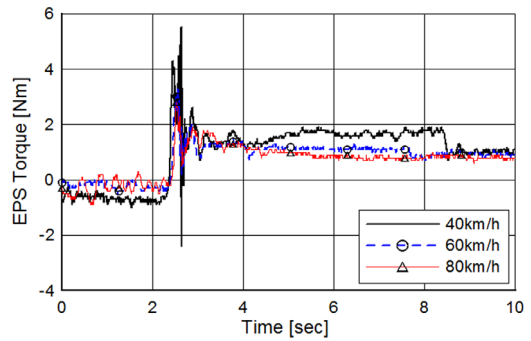
Fig. 13 Steering wheel angle in step steering input test

Table 3 Test conditions (step steering input test)

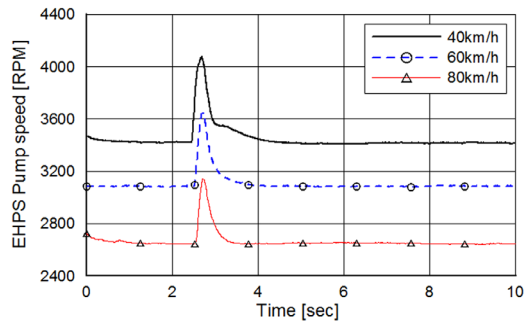
Description	Value
Vehicle speed [km/h]	40, 60, 80
Steering input [deg]	85, 47, 35
Road friction coefficient (μ)	0.8



(a) Lateral acceleration



(b) EPS torque



(c) EHPS pump speed

Fig. 14 HILS test results in step steering input test

격히 변동하는 구간이 발생하였으며 이와 같은 토크 변화는 운전자에게 조향 이질감을 줄 수 있다. 또한 저속 정상 상태 구간에서도 토크 변동이 발생하여 로직 개선이 필요하다고 할 수 있다. Fig. 14(c)에는 EHPS 모터 회전수를 도시한 것이다. EHPS 펌프 회전수는 차량의 속도에 따라 변화하는데 차속이 낮은 경우 펌프 회전수가 높고 차속이 높은 경우 펌프 회전수가 낮음을 알 수 있다. 이것은 저속의 경우 조향 시 비교적 큰 힘이 필요하기 때문에 펌프 회전

수를 높게 유지하고 고속 시에는 조향력이 크게 필요하지 않아 펌프 회전수를 낮게 유지하고 있음을 알 수 있다. 급격하게 스텝 조향이 이루어지고 있는 구간에서는 빠른 속도로 조향력을 보조해주기 위하여 펌프 회전수가 일시적으로 약 700 RPM 상승함을 알 수 있다. EPS와 EHPS 하이브리드 조향시스템의 경우 급격한 스텝 조향이 이루어지는 영역에서 EPS와 EHPS가 동시에 작동하여 조향력을 보조하고 있으며 이에 따라 단일 시스템을 사용하는 경우에 비해 개별 시스템 최대 용량을 작게 할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

이와 같이 HILS 시스템을 활용하여 안전하고 재현성 높은 시험이 가능하기 때문에 개발 중인 상용차량 하이브리드 조향시스템 장착 차량의 주행 특성 뿐만 아니라 EPS와 EHPS 시스템 구성 부품의 응답특성 및 제어로직 튜닝을 통하여 원하는 특성의 조향시스템 개발에 활용할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 상용차량의 연비 개선과 능동 조향제어가 가능한 하이브리드 전동식 조향시스템 개발을 위하여 HILS 시스템을 구축하고 이를 이용하여 상용차량 주행 특성 및 하이브리드 전동식 조향시스템 구성 부품의 성능평가를 실시하였으며 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 대형 트랙터 하이브리드 전동식 조향시스템 구성 부품인 EPS와 EHPS 시스템, 피트먼 암, 드래그 링크, 볼너트 기어박스 등으로 테스트 벤치를 구축하고 조향 반력을 생성하기 위하여 노면 반력 재현 시스템을 개발하였다.
- 2) 실시간 해석을 위한 TruckSim 차량 모델의 정확도를 검증하기 위하여 대형 트랙터 실차 시험 데이터와 비교 검증하였다.
- 3) HILS를 활용하여 차속 변화에 따른 조향 반력 재현시험을 실시하였으며 실차시험 결과와 비교를 통해 잘 일치함을 확인하였다.
- 4) 직진 주행 중 급격한 조향이 이루어지는 스텝 입력 조향 주행시물레이션을 실시하여 하이브리드

전동식 조향시스템이 장착된 트랙터의 주행 특성 분석과 구성부품의 특성을 실험실 내에서 실차와 유사한 환경을 구축하여 평가할 수 있음을 확인하였다.

이상과 같이 HILS를 활용하여 개발 단계인 대형 상용차량 하이브리드 전동식 조향시스템의 성능평가를 수행함으로써 조향시스템 및 차량의 동역학적 특성을 평가하여 부품 성능 및 제어 로직 보완 등 시스템 개선 방향을 제시할 수 있음을 확인하였다.

References

- 1) B. H. Gu, H. Y. Lee, Y. K. Park, S. W. Cha, W. S. Lim, B. C. Jang and J. S. Bang, "Steering Consuming Energy and Fuel Efficiency Analysis Depending on Steering System Model," Transactions of KSAE, Vol.24, No.4, pp.401-407, 2016.
- 2) S. B. Park, S. J. Mun and J. M. Kim, "A New Concept of Steering for Commercial Vehicle Fuel Saving," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.814-820, 2012.
- 3) J. J. Kwon and K. H. Park, "Development of the Hardware-in-the Loop Simulator for Evaluating Performance of EPS System," SAE Technical Paper 2011-28-0139, 2011.
- 4) K. H. Kim, C. J. Kim, H. S. Sin and C. S. Han, "Development of R-MDPS Control Algorithm Using HILS," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.800-805, 2007.
- 5) TruckSim 8.2 User's manual, Mechanical Simulation Corporation, USA.
- 6) RT-LAB 8.3.7 User's manual, OPAL-RT TECHNOLOGIES, Corporation, Canada.
- 7) Hans B. Pacejka, Tire and Vehicle Dynamics, Third Edition, SAE International and Butterworth Heinemann, Massachusetts, 2012.
- 8) C. S. Yoo, G. J. Choi and H. J. Moon, "Commercial Vehicle Hybrid Electric Steering System Performance Evaluation Using HILS," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.454-455, 2015.