

전동식 동력 조향 장치 시험을 위한  
**HILS(Hardware-In-the-Loop simulation) 시스템 개발**  
**Development of a Steering HILS System**

류 제 하\*, 노 기 한\*\*, 김 종 협\*\*\*, 김 회 수\*\*\*  
J. H. Ryu, K. H. Noh, J. H. Kim, H. S. Kim

**ABSTRACT**

This paper presents development of a Hardware-In-the-Loop Simulation (HILS) system for the purpose of testing performance, stability, and reliability of an electronic power steering system (EPS). In order to realistically test an EPS by the proposed HILS apparatus, a simulated uniaxial dynamic rack force is applied physically to the EPS hardware by a pneumatic actuator. An EPS hardware is composed of a steering wheel & column, a rack & pinion mechanism, and a motor-driven power steering system. A command signal for a pneumatic rack-force actuator is generated from the vehicle handling lumped parameter dynamic model (software) that is simulated in real time by using a very fast digital signal processor. The inputs to the real-time vehicle dynamic simulation model are a constant vehicle forward speed and front wheel steering angles driven through a steering system by a driver. The output from a real-time simulation model is an electric signal that is proportional to the uniaxial rack force. The vehicle handling lumped parameter dynamic model is validated by a fully nonlinear constrained multibody vehicle dynamic model. The HILS system simulation results show that the proposed HILS system may be used to realistically test the performance, stability, and reliability of an electronic power steering system in a repeated way.

주요기술용어 : HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation), Real-time Dynamic Simulation(실시간 동력학 시뮬레이션), Vehicle Dynamics(차량 동력학), EPS(Electronic Power Steering System, 전동식 동력 조향 장치)

\* 정회원, 광주과학기술원 기전공학과

\*\* 정회원, 자동차 부품연구원

\*\*\* 광주과학기술원 기전공학과 대학원

## 1. 서론

자동차에 장착되는 자동차 메카트로닉스 부품의 개발과정은 설계 및 제작, 제작된 시작품의 성능시험, 시험결과의 피드백을 통한 재설계로 이루어진다. 보통 자동차 메카트로닉스 부품의 성능 검증은 많은 시간과 경비가 소요되는 실차 시험을 통해 이루어진다. 따라서, 성능시험을 효율적으로 할 수 있다면 제품 개발 기간을 단축하여 많은 경비를 절약 할 수 있다. 또한, 실차 환경에서는 차량동력학의 복잡성과 비선형적 요소들에 의해 시험과정에서 측정하기 어려운 부분이 있으며 반복적인 시험이 불가능할 수 있다. 그리고, 시험을 수행하는 시험자가 위험에 노출되는 경우도 있어 시험에 제약이 있을 수 있다. 따라서, 이에 대한 대안으로 컴퓨터만을 이용한 모의 시험을 이용하기도 하는데 이것은 정확한 모델링의 어려움 등으로 인해 실차의 거동을 반영하는 데 충분하지 못한 경우가 있다.

위에서 언급된 문제들의 대안으로 제시된 것이 Hardware-In-the-Loop Simulation(HILS) 기법이다.<sup>1)2)</sup> 이 기법은 전자산업의 발달로 인해 매우 빠른 계산 능력을 가진 Digital Signal Processor(DSP)가 등장하여 실시간 시뮬레이션이 가능하게 되자, 성능시험의 대상이 되는 부분을 하드웨어 상태로 존재하게 하고 그 외의 나머지 부분은 수학적으로 모델링된 소프트웨어로 대체하고 이 두 부분을 인터페이스 장치를 이용해 연결함으로써 폐회로를 구성(Fig.1)하여 모의 시험을 수행하는 것이다. 따라서, HILS 기법은 실차 시험의 실제성과 모의 시험의 안전성, 반복성, 경제성의 장점을 동시에 취할 수 있어 시간적, 경제적으로 절약된 시험을 가능하게 한다. 이러한 HILS기법을 적용한 연구 사례에는 ABS ECU, 반 능동 현가장치,

엔진, 동력전달계의 HILS 장치가 있다.<sup>3)~7)</sup>

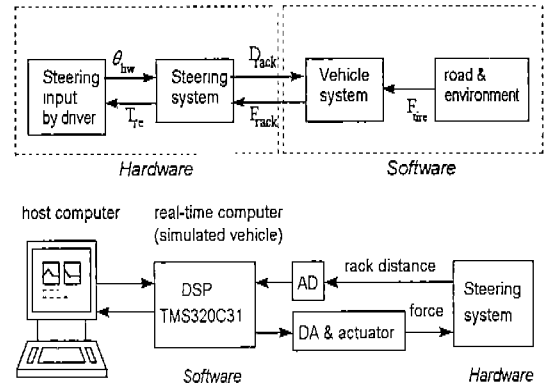


Fig.1 Schematic diagram of proposed HILS

본 연구에서는 전동식 동력 조향 장치 (Electric Power Assist Steering System, EPS)의 시험을 위한 HIL Simulation 환경을 개발하는 것을 목표로 한다. 전동식 동력 조향 장치는 랙, 피니언, 조향 휠, 칼럼, 전기 모터 구동형 동력 장치 및 ECU로 구성되어 있다. 성능 시험의 대상이 되는 것으로는 조향장치의 성능 및 내구성과 ECU 제어 알고리즘이 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 우선, HILS 장치의 구성에 대해 설명하였고, 다음으로 실시간 모의 시험을 위한 차량 동력학 모델에 대해 기술하였으며, 마지막으로 개발된 HILS 시스템의 성능시험과 결과, 그리고 결론을 맺었다.

## 2. 조향 HILS 장치의 구성

Fig.2는 랙 구동형 EPS 장치의 구성도이다. 서론에서 밝힌 바와 같이 HILS 장치에서는 소프트웨어와 하드웨어가 동시에 존재한다. HILS 장치를 구성하기 위해서 본 연구에서는 시험 대상인 조향휠, 조향 칼럼, 랙, 모터는 하드웨어로 시뮬레이션 루프에 포함 시키고 차량의 나머지 부분(타이로드,

스티어링 링크지, 샤프트 및 타이어 등)은 소프트웨어로 모델링하고 이 두 부분을 변위 센서와 공압 액추에이터로 연결하였다. 여기서 변위 센서는 랙에서 발생된 변위 정보를 소프트웨어로 전달하고, 소프트웨어에서 계산된 힘은 전기적 신호로 바뀌어 랙과 연결된 공압 액추에이터로 지령되어 타이로드에서 랙으로 전달되는 힘이 구현되도록 구성되었다(Fig.3).

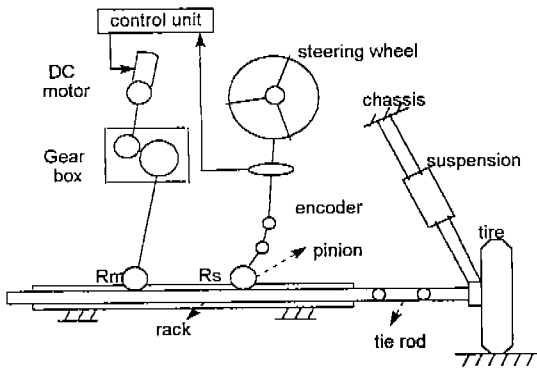


Fig.2 Physical rack-assist type electronic power-assist steering and vehicle systems

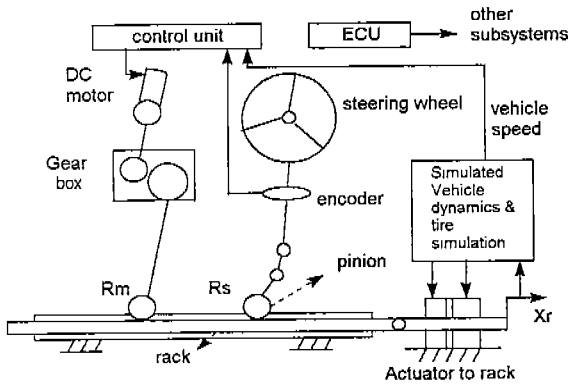


Fig.3 The proposed HILS system

### 3. 실시간 차량 동력학

HILS 시스템에서는 시뮬레이션의 정확도를 보장하는 정확한 차량동력학 모델과 함께 제한된 샘플링 시간 내에서 실시간 시

뮬레이션을 가능하게 하기 위한 신속한 적분방법이 필요하다. 차량 거동 분석을 위한 차량동력학 모델에는 집중 질량 모델<sup>(8)-10)</sup> 또는 다물체 모델<sup>(11)12)</sup> 등이 있다. 일반적으로 다물체 차량 모델은 정확도면에서는 뛰어나지만, 적분 시간이 많이 걸려 실시간 시뮬레이션에서는 부적합한 면이 있다. 따라서, 본 연구에서는 실제 차량의 거동을 충분히 반영하면서도 빠른 계산이 가능한 집중질량 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 있다. 본 연구에서 이용되는 집중질량 모델은 DADS(Dynamic Analysis and Design System)<sup>(13)</sup> 프로그램을 이용한 다물체 모델의 시뮬레이션 결과와 비교를 통하여 그 정확도를 보장하였다.

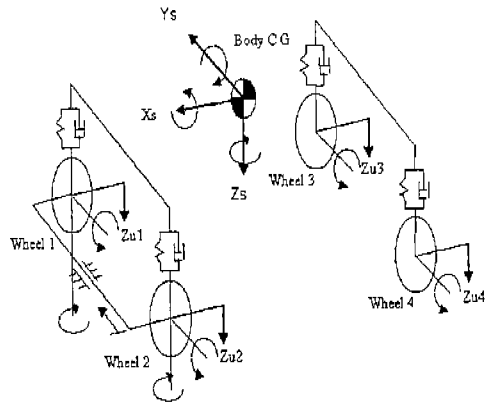


Fig.4 17-dofs vehicle handling dynamic model

Fig.4는 차량 동력학 모델로 쓰인 17자유도 모델을 나타낸 것이다. 이 모델은 샤프트의 6자유도, 바퀴의 수직운동 4자유도, 바퀴의 회전 운동 4자유도, 앞바퀴의 조향 2자유도, 랙의 병진 운동 1자유도를 가지고 있다. 랙의 병진운동은 변위 센서인 LVDT로 측정되어 조향기구시스템의 기구학모델(Fig.5)을 통해 좌우 앞 바퀴의 조향각이 산출된다. 타이어 모델은 MAGIC FORMULA를 이용하였다.

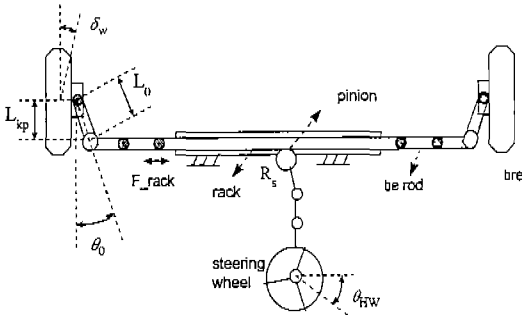


Fig.5 Kinematic diagram of steering mechanism

선회/직진 주행 등에서의 차량동역학 시뮬레이션에서 계산된 타이어의 힘과 모멘트는 Fig.5에 나타낸 조향기구학 모델을 통해 최종적으로 랙으로 전달되는 힘으로 다음의 관계식과 같이 계산된다.

$$L_{kp} = L_0 \cos(\theta_0 - \delta_w) \quad (1)$$

$$M_{kp} = (F_{zfl} + F_{zfr})d \sin \lambda \sin \delta_w - (F_{zfl} - F_{zfr}) + (F_{yfl} + F_{yfr})r \tan \nu + (F_{zfl} - F_{zfr})d + (M_{zfl} + M_{zfr}) \cos \nu \sqrt{\lambda^2 + \nu^2} \quad (2)$$

$$F_{rack} = M_{kp} / L_{kp} \quad (3)$$

여기서,  $M_{kp}$ 는 킹핀 축에 대한 랙 모멘트이고,  $F_{z_f}$ 는 타이어에서의 수직력,  $d$ 는 킹핀 오프셋,  $\lambda$ 는 횡방향 정사각,  $\nu$ 는 캐스터각,  $r$ 는 타이어의 반경이다.<sup>9)</sup>

표1에 제시된 차량 변수를 이용한 차량 모델은 DSP(TMS320C31)에서 시뮬레이션된다. 여기서 얻어진 시뮬레이션 결과는 DADS를 이용한 비선형 다물체 동역학 모델의 결과와 비교되었다.

Table 1 Vehicle Dynamic Model Parameters

Parameter	Value
Weight of sprung mass	1412.8 kg
Weight of front unsprung mass	37.6 kg
Weight of rear unsprung mass	40 kg
Pitch moment of inertia	1240.1 kg · m <sup>2</sup>
Roll moment inertia	209.6 kg · m <sup>2</sup>
Yaw moment inertia	1396 kg · m <sup>2</sup>
Front axle location from C.G.	1.17 m
Rear axle location from C.G.	1.34 m
Left/Right tread	1.5524 m
Front spring stiffness	38600 N/m
Rear spring stiffness	38600 N/m
Passive front damper coefficient	1500 Ns/m
Passive rear damper coefficient	2000 Ns/m
Front roll stiffness	30000 N/m
Rear roll stiffness	10000 N/m
Tire vertical stiffness	180000 N/m
Kingpin offset	0.0 m
Lateral inclination angle	13.6 deg
Caster angle	7.5 deg
Initial camber angle	0.5 deg
$\theta_0$	24.4 deg
Effective length of $L_0$	0.21 m

Fig.6에서 Fig.10까지는 각각 40Km/hr의 등속도 운동에서 J턴 조향 입력하에서의 조향 입력각, 랙에 작용되는 힘, 요 각속도, 요 각가속도, 왼쪽 타이어의 슬립각을 나타낸 것이다. 실선은 실시간 차량 모델의 결과를 점선은 다물체 동역학 모델의 결과를 나타낸다. 이 결과에서 짐중 질량 차량 모델의 결과와 다물체 동역학 모델의 결과와 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

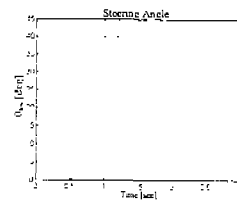


Fig.6 Input steering angle history

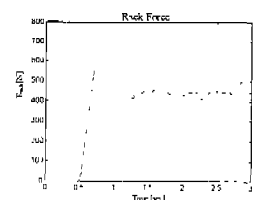


Fig.7 Rack force histories

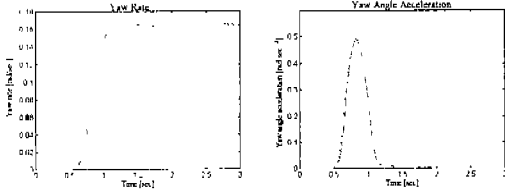


Fig 8 Yaw rate histories      Fig 9 Yaw angle acceleration histories

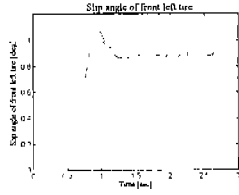


Fig 10 Slip angle of front-left tire

Km/hr의 등속도 운동에서 J턴 조향 입력하에서의 결과를 각각 나타낸다. 이 그림들로부터 전체적으로 빠르고 정확한 HILS결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

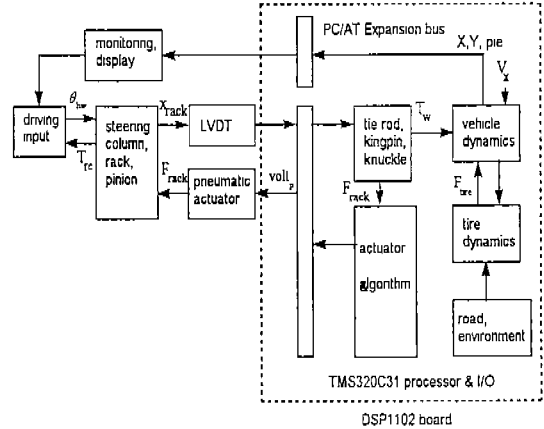


Fig.11 Overall closed loop configuration

#### 4. HIL Simulation과 결과

실시간 차량 모델의 시뮬레이션에서 산출되는 출력은 랙에 작용되는 단축 방향의 힘이다. 이 결과는 DAC(Digital to Analog Converter)를 통해 공압 구동기의 지령 신호로 변환되어 이에 상응하는 힘이 하드웨어인 조향 장치의 랙에 작용된다.

공압 장치는 레귤레이터, 비례 제어 밸브, 공압 실린더로 구성되어 있다. Fig.11과 Fig.12는 HILS 장치의 전체 구성도와 실험 장치의 사진을 보여준다.

실시간 시뮬레이션을 위해서는 적분 스텝이 일정한 수치 적분 방법을 이용해야 한다<sup>11)14)</sup>. 본 연구에서 채택된 적분 방법은 2 msec(500Hz 샘플링 주기)의 적분 스텝을 가진 3차 Adams-Bashforth법이다. 최소한의 적분스텝은 모델의 계산량과 비례되는데, 본 연구에서 사용된 모델은 약 1.68 msec가 소요되므로, 이 보다 큰 2 msec의 적분 스텝을 적용하였다.

Fig.13 에서 Fig.18까지는 HILS결과를 보인 것이다. Fig.13는 조향 입력각, Fig.14는 상응하는 랙의 변위, Fig.15는 랙에 작용되는 힘, Fig.16은 요 각속도, Fig.17은 요 각가속도, Fig.18은 좌측 바퀴의 슬립각을 40

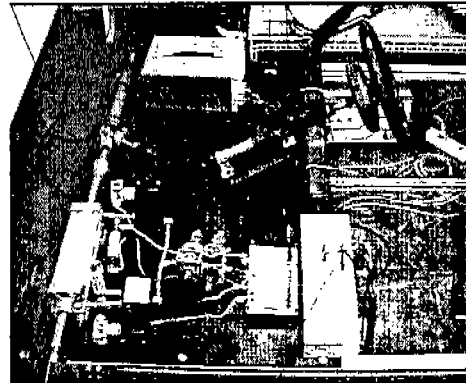


Fig.12 Experimental setup for proposed HILS

조향 장치계는 대부분의 경우 1Hz 미만의 낮은 주파수 영역에서 작동되므로 이보다 10배 높은 10 Hz의 작동 영역을 가진 공압 장치계를 사용하였다. Fig.15를 보면 공압장치에서의 힘의 발생(실선)은 지령신호(점선)에 대해 약 90 msec정도의 시간 지연이 있음을 볼 수 있는데, 이것은 공기의 압축성과 제어 밸브의 데드존 등에 기인하는 것으로 파악된다. 따라서, 1Hz 미만의 운동영역에서 개발된 HILS 시스템이 유용하다고 판단된다.

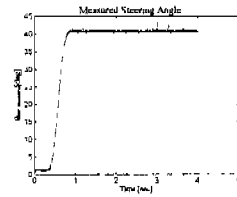


Fig.13 Measured steering angle history

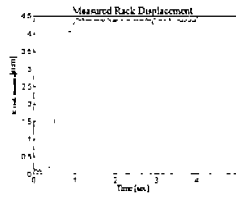


Fig.14 Measured rack displacement history

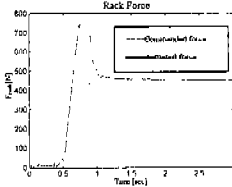


Fig.15 Rack force histories

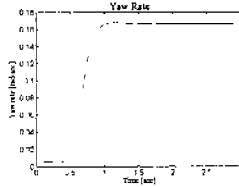


Fig.16 Yaw rate history

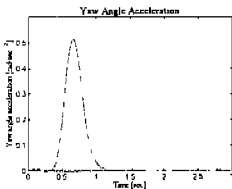


Fig.17 Yaw angle acceleration history

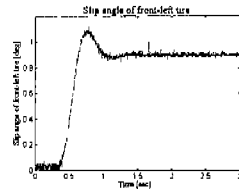


Fig.18 Slip angle of front-left tire

## 5. 결론 및 제안

제안된 HILS 장치를 이용해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- (1) 하드웨어로 존재하는 조향 장치 부품과 실시간 동역학 모델을 결합하여 HILS 장치를 구성할 수 있었다.
- (2) 개발된 HILS 장치를 이용하여, 조향 장치와 같은 부품의 개발 초기 단계에서 실현성과 정확성을 보장하면서 안전하고 반복적인 시험을 실험실내에서 수행할 수 있다.

추후에는 공압구동기의 성능을 개선시키는 연구 및 MDS (Microprocessor Development System)를 이용한 ECU 개발 시스템을 추가하고 실차시험과의 검증에 대한 연구를 수행할 방침이다.

## 참고 문헌

1. Hanselmann, H. "Hardware-in-the-Loop Simulation as a Standard Approach for Development, Customization, and Production Test", SAE paper 930207, 1993.
2. Hanselmann, H. "Hardware-in-the-Loop Simulation as a Standard Approach for Development, Customization, and Production Test of ECU's", SAE paper 931593, 1993.
3. Ludger Dragon, "FADYS Handling Simulations used in a real-time Hardware-in-the-Loop Application with the ESP-Controller", AVEC'96, International Symposium on Advanced Vehicle Control, Aachen Univ. of Tech, pp.559-572, 1996.
4. Seung-Jin Heo, Sung-Ho Hwang, Kyo-il Lee, and Hong-Seok Kim, "Vehicle Dynamic Analysis and Evaluation of Continuously Controlled Semi-Active Suspensions using Hardware-in-the-loop Simulation", AVEC'96, International Symposium on Advanced Vehicle Control, Aachen Univ. of Tech, pp.955-969, 1996.
5. DePoyster, M. R., Hoying, J. F., and Majeed, K. N., "Rapid Prototyping of Chassis Control Systems, Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design", Dearborn, MI, pp. 141-145, 1996.
6. Kimura, A. and Maeda, I., "Development of Engine Control System using Real Time Simulator", Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design,

- Dearborn, MI, pp. 157-163, 1996.
7. Dorey, R. E. and Maclay, D., "Rapid Prototyping for the Development of Powertrain Control Systems, Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design", Dearborn, MI, pp. 135-140, 1996.
  8. Wade Allen, R., Theodore Rosenthal, J., and Henry Szostak, T., "Steady State and Transient Analysis of Ground Vehicle Handling", SAE870495.
  9. Thomas D. Gillespi, "*Fundamentals of Vehicle Dynamics*", SAE, Inc., 1994.
  10. Wong, J. Y., "*Theory of Ground Vehicles*", 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1993.
  11. Lee, Woon-Sung and Kim, Sang Sup, "Real-Time Dynamic Simulation", SAE9438105.
  12. Choi, Gyu-Jae, Lee, Kwan-Ho, and Yoo, Young-Myun, "Development of Real-Time Vehicle Dynamic Simulation Software", SAE 953763.
  13. DADS, Version 8.0, CADSI, Oakdale, Iowa, USA.
  14. Gheorghiu V., Schmitz, H, and Krohm, H, "Real-Time Models for Hardware-in-the-Loop systems", ASIM Symposium Simulationstechnik, Berlin, Germany.