

EHB 시스템을 위한 Hardware-in-the-Loop 시뮬레이터 개발

허승진*(국민대학교), 박기홍(국민대학교)
이해철(국민대학교), 김태우(국민대학교), 김형수(국민대학교)

Development of Hardware-in-the-Loop Simulator for EHB Systems

S.-J. Heo(School of Mech. & Auto. Eng., KMU), K. Park(School of M&A Eng., KMU)
H. C. Lee(Graduate School of Auto. Eng., KMU), T. Kim(GSAEK, KMU), H. S. Kim(GSAEK, KMU)

ABSTRACT

HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation) is a scheme that incorporates hardware components of primary concern in the numerical simulation environment. Due to its advantages over actual vehicle test and pure simulation, HILS is being widely accepted in automotive industries as test benches for vehicle control units. Developed in this study is a HILS system for EHB(Electro-Hydraulic Brake) systems that include a high pressure generator and a valve control system that independently modulates the brake pressures at four wheels. An EHB control logic was tested in the HILS system. Test results under various driving conditions are presented and compared with the VDC logic.

Key Words : Hardware-in-the-loop simulation (HIL 시뮬레이션), Electro-Hydraulic brake (EHB, 전기유압식 제동장치), Brake-by-wire (전자식 제동장치), Vehicle dynamics control (차량동역학 제어)

1. 서론

차량의 사시 전자제어기술이 발달하고 제어시스템이 복잡해짐에 따라, 기존 실차시험보다 효율적인 제어기의 시험 방법이 요구되고 있다. 실차시험에 대한 대안으로 수치 시뮬레이션을 들 수 있지만, 제동장치의 비선형적 동특성을 정확히 모델링하기가 어렵기 때문에, 시험결과에 대해 높은 신뢰도를 기대하기 어렵다. 이와 같은 실차시험과 수치 시뮬레이션의 단점을 보완할 수 있는 시험방법이 HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation) 기법이다.^{1,2)} HILS란, 수치적으로 시뮬레이션되는 시스템의 일부 요소를 실제 하드웨어로 대체하여, 수학적 모델과 하드웨어가 혼합된 폐루프 시스템을 구성하고, 이들을 실시간으로 수치적분하는 기법을 의미한다. 이렇게 함으로써 시뮬레이션의 신뢰도는 순수 시뮬레이션에 비해 대폭 향상된다. HILS를 통한 시험은 실차시험에 비해 시간과 비용면에서 많은 절감을 가져다 줄 뿐 아니라, 실차시험에서 수행하기 힘든 위험한 상황을 구현 가능하게 하며, 동일한 시험을 반복하는 것을 가능하게 한다.

제동관련 제어기술의 개발은 1970년대 말에 도입된 제동시 바퀴의 잠김방지 장치인 ABS 기술로부터, 구동시 바퀴의 미끄럼 방지 장치인 TCS를 거쳐, VDC 기술까지 발전되어 왔다. VDC는 차량 선회시 횡방향의 차량 안정성을 확보하는 기술로서,^{3,4)} 차량의 횡방향 거동이 운전자의 조향 의도대로 반응하는지를 감지하고 필요한 경우 한 바퀴에만 제동압력을 가하여 보상 요모멘트를 발생시킴으로써 차량의 안정성을 회복시키는 장치이다.

앞에서 본 제동시스템 제어기술들은 모두 유압식 제동시스템에 바탕을 두고 있다. 향후 전자식 제동장치나 혹은 유압식에서 전자식으로 가는 중간단계인 전자유압식 제동장치가 도입이 되면 앞서의 제동시스템 기술들은 이에 맞게 변화 및 개선되어야 한다. 이와 관련하여 현재 초기 기술개발 단계에 있는 주요 기술로 EHB(Electro-Hydraulic Brake) 방식의 brake-by-wire 시스템을 들 수 있다. EHB 시스템은 기존의 유압식 제동시스템과 달리 제동페달에 대한 느낌을 모사하는 페달 시뮬레이터와 자체적으로 고압의 제동압력을 낼 수 있는 압력발생장치를 가진다. EHB 시스템은 현재 유압식 제동시스템에서 수

행되는 VDC 제어로직을 기본적으로 수행하지만, 이 보다 한단계 나아가 각 바퀴에 독립적인 제동압력을 공급하며, 고압의 압력을 항상 가지고 있기 때문에 VDC에 비해 큰 제동압력을 빠르게 공급할 수 있다는 장점을 지닌다.

이와 같은 배경을 바탕으로 본 연구에서는 EHB를 위한 HILS 시스템을 개발하였다. 이를 위해 본 연구에서는 EHB 제어로직을 설계하였으며, 이들을 HILS 환경에서 PC제어기로 구현하였다. 본 HILS 시스템은 각 바퀴의 휠실린더와 함께 유압장치를 포함하며, 여기에는 운전자의 제동의지와 관계없이 고압의 제동압력을 신속하게 발생할 수 있는 압력발생장치가 포함된다. 압력발생장치에서 나온 제동압력이 각 바퀴에 독립적으로 분배될 수 있는 있도록 본 연구에서는 PWM솔레노이드 밸브를 사용하여 유압제어장치를 제작하였다. 본 연구에서는 다양한 주행시험 상황에 대해 EHB HIL 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시험을 통해 EHB 제어로직의 성능을 검증하였으며, VDC 제어로직과 성능을 비교하였다.

2. 운동방정식

2.1 차량모델

본 연구에서 사용된 차량 모델은 종방향과 횡방향의 병진운동과 요 회전운동을 갖는 차체와, 회전운동을 하는 4바퀴로 이루어진다. Fig. 1은 이러한 차량모델을 보여준다.

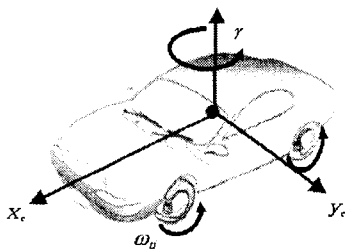


Fig. 1 Vehicle model

식(1)은 차량모델의 운동방정식을 나타낸다.

$$M_c(\ddot{x}_c - \gamma \dot{y}_c) = \sum F_{xz} \quad (1a)$$

$$M_c(\ddot{y}_c + \gamma \dot{x}_c) = \sum F_{yz} \quad (1b)$$

$$I_c \dot{\gamma} = l_f \sum_{1,2} F_{yfi} - l_r \sum_{3,4} F_{yfi} - \frac{l_w}{2} (\sum_{1,3} F_{xzi} - \sum_{2,4} F_{xzi}) \quad (1c)$$

$$I_i \dot{\omega}_i = T_{bi} + T_{VDCi} + r_i F_{xzi} \quad (1d)$$

위 식에서 M_c 는 차체 질량을, I_c 와 I_i 는 각각 차체와 타이어의 관성모멘트를, F_{xi} 와 F_{yi} 는 각각 타이어의 종방향과 횡방향 힘을 나타내며, 첨자 i 는

타이어의 위치를 FL, FR, RL, RR 순으로 나타낸다.

T_{bi} 는 제동입력을 나타내며, T_{VDCi} 는 보상 요모멘트로부터 계산된 각 타이어의 제동토크 값이다.

2.2 타이어모델

본 연구에서는 타이어 모델로 브러쉬 타이어모델을 사용하였으며³⁾ 그 수학식은 아래와 같다.

when $\epsilon_i \geq 0$

$$F_{xz} = -K_{\lambda i} \lambda_i \epsilon_i^2 + 6\mu_i F_{zxi} \cos \theta_i f(\epsilon_i) \quad (2a)$$

$$F_{yz} = K_{\alpha i} (1 + \lambda_i) \epsilon_i^2 \tan \alpha_i - 6\mu_i F_{zxi} \sin \theta_i f(\epsilon_i) \quad (2b)$$

when $\epsilon_i < 0$

$$F_{xz} = \mu_i F_{zxi} \cos \theta_i \quad (2c)$$

$$F_{yz} = -\mu_i F_{zxi} \sin \theta_i \quad (2d)$$

where

$$\epsilon_i = 1 + \frac{K_{\lambda i} \eta_i}{3\mu_i F_{zxi}} \cdot f(\epsilon_i) = \frac{1}{6} - \frac{1}{2} \epsilon_i^2 + \frac{1}{3} \epsilon_i^3$$

$$\eta_i = \sqrt{\lambda_i^2 + \left(\frac{K_{\alpha i}}{K_{\lambda i}} (1 + \lambda_i) \tan \alpha_i \right)^2}$$

$$\sin \theta_i = \frac{K_{\alpha i} \tan \alpha_i (1 + \lambda_i)}{K_{\lambda i} \eta_i}, \quad \cos \theta_i = \frac{\lambda_i}{\eta_i}$$

위 식에서 K_{α} 와 K_{λ} 는 타이어의 특성 계수들을 나타낸다.

3. EHB 제어기 설계

3.1 VDC 제어기

EHB 시스템은 기본적으로 차량동역학제어(VDC)로직을 구현한다. 이 절에서는 VDC 로직에 대해 살펴본다.

VDC 로직에서는 먼저 현재의 차속과 조향각으로부터 목표 요레이트 γ_{des} 를 계산한다. 이 값은 정상상태 도달 후 차량의 각속도에 해당하며, 다음과 같다.

$$\gamma_{des} = \frac{v_x}{(l_f + l_r) \left(1 + \frac{v_x^2}{v_c^2} \right)} \delta_f \quad (3)$$

위 식에서 v_x 는 차속을, δ_f 는 전륜의 조향각을, v_c 는 차량의 특성속도를 나타낸다.

Table 1은 VDC 로직을 도식적으로 나타낸다.³⁾ 선회시 차량이 understeer 경향을 보이면, VDC 로직은 안쪽 뒷바퀴에 제동력을 가한다. 이렇게 하면 두 뒷바퀴의 제동력의 비대칭성으로 인해 oversteer 방향의 보상 요모멘트가 발생한다. 여기에 덧붙여 안쪽 뒷바퀴의 횡력이 줄어들므로 인해 oversteer 방향

의 보상 요모멘트는 더욱 커진다. 위와 반대로 차량이 oversteer 경향을 보이면 VDC 로직은 차량의 바깥쪽 앞바퀴에 제동력을 가한다. 이렇게 하면 두 앞바퀴의 제동력의 비대칭성으로 인해 understeer 방향의 보상 요모멘트가 발생하며, 여기에 덧붙여 바깥쪽 앞바퀴의 횡력이 줄어들므로 인해 understeer 방향의 보상 요모멘트는 더욱 커진다.

Table 1 Control schemes of VDC and EHB ($\delta > 0$)

condition	VDC	EHB
understeer ($\gamma < \gamma_{des}$)		
oversteer ($\gamma > \gamma_{des}$)		

3.2 EHB 제어기

EHB 제어기는 VDC 제어기와 마찬가지로 식(3)에 의해 목표 요레이트를 계산하고, Table 1과 같은 로직에 따라 보상 요모멘트를 발생시킨다.

Table 1로부터 VDC는 한 바퀴에만 제동력을 가함으로 보상 요모멘트를 발생시키는데 반해, EHB는 왼쪽 또는 오른쪽의 앞뒤 두 바퀴에 제동력을 가해 보상 요모멘트를 발생시키는 것을 알 수 있다. 즉 VDC가 좌우륜의 비대칭 제동력에 따른 보상 요모멘트 외에도 제동되는 바퀴가 있는 쪽의 앞뒤 두 바퀴 사이의 횡력의 차이로 보상 요모멘트를 얻는데 반해, EHB는 후자의 효과를 얻을 수 없다. 그러나 EHB에서는 VDC에 비해 매우 큰 제동압력을 각 바퀴에 가할 수 있어 결과적으로 VDC에 비해 보다 큰 보상 요모멘트를 얻을 수 있다. 또한 EHB는 고압의 제동압력을 항상 준비하고 있기 때문에 VDC에 비해 제동압력의 반응시간이 빠르다는 장점도 가진다.

VDC나 EHB 작동시 제동력이 특정한 바퀴에 과도하게 가해지면, 그 바퀴는 잠גיע 되며 제동력은 오히려 떨어지게 된다. 이러한 현상을 막기 위해 본 연구에서는 VDC와 EHB 제어기에 ABS 로직을 결합시켜, VDC와 EHB 작동시 각 바퀴의 미끄럼율이 적절한 범위에서 유지될 수 있도록 하였다.

4. HILS 시스템

본 연구에서는 EHB와 VDC 시스템을 시험하기 위한 HILS 시스템을 구축하였다. HILS 시스템은 크

게 하드웨어, 소프트웨어, 인터페이스의 세 부분으로 구성되며, Fig. 2는 이러한 HILS 시스템의 구성을 보여준다.

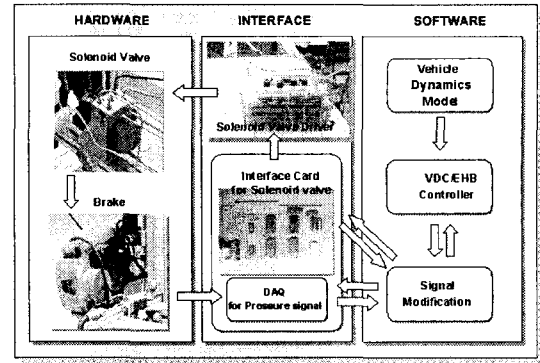


Fig. 2 Configuration of EHB HILS system

HILS 시스템을 구성하는 세 부분에 대해 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 하드웨어 부분은 유압장치로 구성된다. 유압튜브, 휠실린더 및 각 바퀴의 브레이크 디스크가 있으며, 고압의 압력발생장치가 포함된다. 압력발생장치는 PC에서 나오는 명령에 따라 압력을 발생시키며 이 장치는 제동페달과 부스터를 대치한다.

소프트웨어 부분은 차량모델, EHB/VDC 제어기, 실시간 시뮬레이션부, 후처리부로 구성된다. 실시간 시뮬레이션을 위한 샘플링 시간은 5[ms]로 선정하였다. 후처리부에서는 시험결과를 그래프로 가시화하는 작업을 하는데, 본 연구에서는 빠른 실시간 적분을 위해, 많은 연산을 요구하는 가시화를 후처리로만 수행하였다.

세번째, 인터페이스 부분은 소프트웨어 부분과 하드웨어 부분을 연결하는 부분으로서, 본 연구의 HILS시스템에서는 유압장치와 수치 차량모델을 연결하기 위해 필요하다. 인터페이스는 양 방향으로 필요한데, 먼저 소프트웨어로부터 하드웨어로의 인터페이스는 고압발생장치를 위한 제어장치와 솔레노이드 밸브 구동을 위한 유압제어장치로 이루어진다. 유압제어장치는 모두 8개의 솔레노이드 밸브로 구성되는데, 각 바퀴의 브레이크 압력은 Sol-Sol 방식, 즉 한 개의 입력 솔레노이드 밸브와 한 개의 출력 솔레노이드 밸브에 의해 조절된다. 하드웨어로부터 소프트웨어로의 인터페이스는 휠 실린더의 압력을 제동토크로 바꿔주는 변환 모듈에 의해 이루어진다. 이 모듈에서는 각 휠실린더에 설치된 4개의 압력센서를 통해 압력을 측정하고, 이를 A/D 변환을 거쳐 PC로 입력한 다음, 제동압을 제동토크로 환산하여, 동역학 모델에 입력신호로 전달한다.

5. HIL 시뮬레이션

이 장에서는 본 연구에서 구축한 HILS 환경에서 수행한 HIL 시뮬레이션 시험 결과를 소개한다.

5.1 스텝조향 시험

먼저 마찰계수 1의 고마찰 노면과 마찰계수 0.4의 저마찰 노면에 대해 스텝조향 시험을 수행하였다. 초기 차량속도는 100km/h로 놓았으며 전륜조향 각은 5도를 변화하도록 하였다.

Fig. 3-5는 VDC와 EHB 로직을 대상으로 고마찰 노면에서 행해진 스텝조향 시험결과이다. Fig. 3은 차량의 궤적과 자세를 보여준다. EHB가 VDC에 비해 차량의 understeer 경향을 보다 잘 보정해주는 것을 볼 수 있다. Fig. 4는 스텝조향시 요레이트를 보여준다. EHB가 VDC에 비해 보다 빠르게 목표 요레이트에 도달하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 두 제어기에서 4바퀴에서의 제동력의 변화를 보여준다. VDC는 understeer를 보정하기 위해 안쪽 뒷바퀴에 선택적으로 제동력을 가하는 반면, EHB는 안쪽의 앞뒤 바퀴 모두에 제동력을 가하는 것을 볼 수 있다.

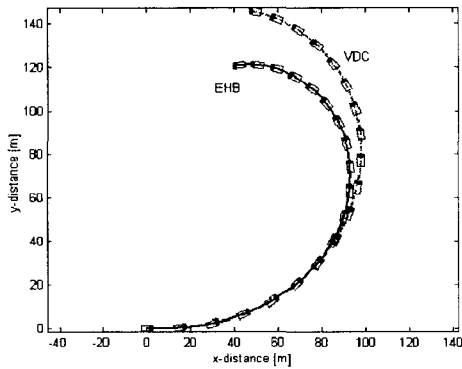


Fig. 3 Vehicle trajectory (step steer, high mu)

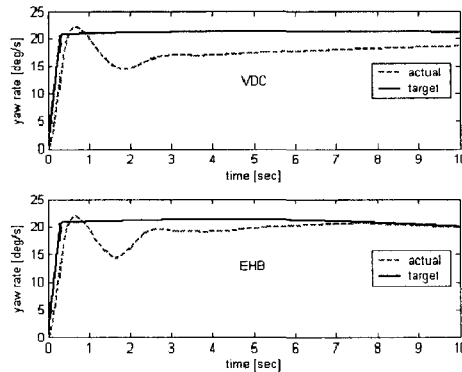


Fig. 4 Yaw rate (step steer, high mu)

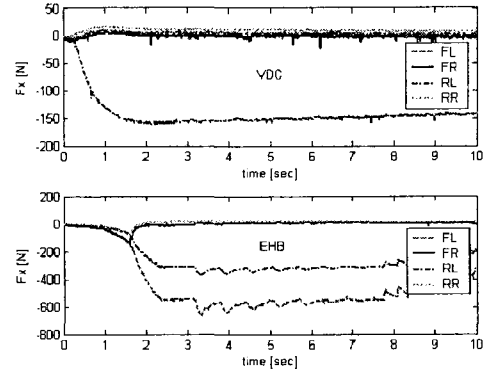


Fig. 5 Tire forces in x-direction (step steer, high mu)

Fig. 6과 Fig. 7은 마찰계수 0.4의 저마찰 노면에서의 스텝조향 시험 결과를 보여준다.

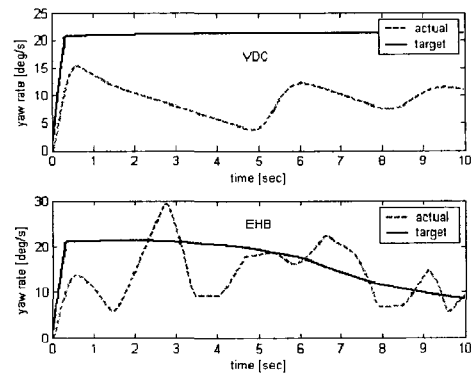


Fig. 6 Yaw rate (step steer, low mu)

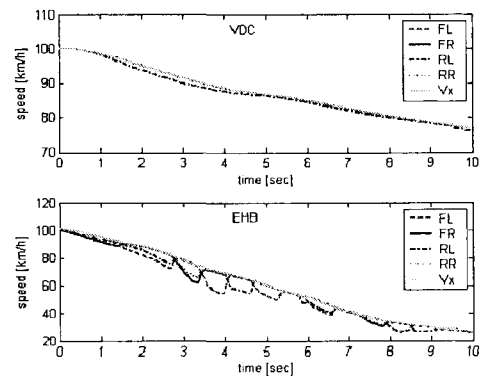


Fig. 7 Velocities (step steer, low mu)

Fig. 6은 저마찰 노면에서 스텝조향시 요레이트를 보여준다. EHB가 VDC에 비해 목표 요레이트를 잘 추적하지만 진동현상이 심한 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 두 제어기에 대한 차속과 4바퀴 휠속을 보

여준다. EHB의 경우 VDC에 비해 보다 큰 제동력을 사용하기 때문에 바퀴가 자주 잠기려는 경향을 보이며, 이에 따라 ABS가 빈번하게 작동하는 것을 볼 수 있다. 또한 이러한 큰 제동력으로 인해 EHB의 경우 차량의 속도가 VDC에 비해 많이 감소되는 것을 볼 수 있다.

5.2 슬라롬 시험

본 절에서는 마찰계수 0.4의 저마찰 노면에 대해 수행한 슬라롬 시험 결과를 소개한다. 초기 차량속도는 100km/h로 놓았으며 전륜조향각은 5도의 진폭과 4초의 주기를 가지는 사인파로 변화하도록 설정하였다.

Fig. 8은 요레이트를, Fig. 9는 각 바퀴에 걸리는 제동압력을 보여준다. EHB가 VDC에 비해 목표 요레이트를 잘 추종하는 것을 볼 수 있다.

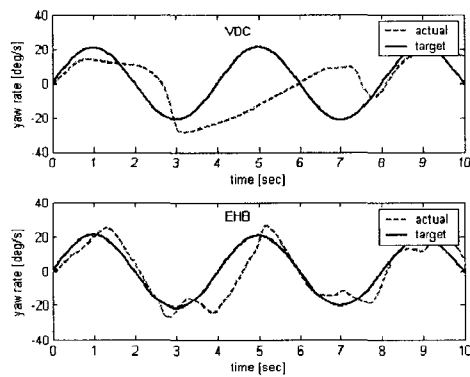


Fig. 8 Yaw rate (slalom)

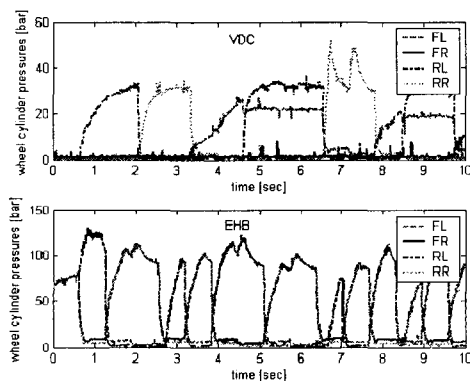


Fig. 9 Wheel cylinder pressures (slalom)

6. 결론

본 연구에서는 EHB를 위한 HILS 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 휠실린더, 고압의 유압발생장치, 4바퀴의 제동압력을 독립적으로 제어할 수 있는

솔레노이드 유압제어장치 등을 실제 하드웨어로 가지며, 차량 모델과 EHB 로직, 그리고 VDC 로직을 소프트웨어적으로 구현한다.

설계된 HILS 환경에서 다양한 주행시험 상황에 대해 HIL 시뮬레이션을 수행하였으며, 이 시험을 통해 EHB와 VDC 로직의 성능을 평가, 비교하였다. 시험 결과 한 바퀴의 제동력으로 보상 요모멘트를 발생시키는 VDC에 비해, 제어되는 쪽의 앞뒤 두 바퀴에 큰 제동력을 발생시켜 보상 요모멘트를 발생시키는 EHB가 목표 요레이트를 잘 추종하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 EHB의 경우 많은 제동력을 사용함으로써车速이 VDC에 비해 많이 감소되는 것을 볼 수 있었다.

참고문헌

1. R. Boot, J. Richert, "Automated Test of ECUs in a Hardware in the Loop Simulation Environment," Proc. of the IEEE ISCAS, pp.587-594, 1999.
2. M. Suh, H. Lee, Y. Park, "Development of Hardware-in-the-loop Simulator for TCS," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.7, No.5, pp.194-205, 1999.
3. A. T. V. Zanten, R. Erhardt, G. Pfaff, F. Kost, U. Hartmann, T. Ehret, "Control Aspects of the Bosch VDC," Proceedings of AVEC, pp.573-607, 1996.
4. K. Park, S. J. Heo, "Design of a Control Logic for Improving Vehicle Dynamic Stability," Proceedings of AVEC, pp.577-584, 2000.
5. W. R. Pasterkamp, H. B. Pacejka, "The Tyre As A Sensor To Estimate Friction", Proceedings of AVEC, pp.839-853, 1996.