

상용차용 ABS ECU의 성능분석을 위한 HILS 시스템 구축

조정목* · 황돈하* · 박도영* · 김용주* · 조종선** · 박성경***
한국전기연구소 메카트로닉스연구그룹* · 창원대학교 제어계측공학과** · (주)동진전기***

Implementation of HILS System for Performance Test of the ABS ECU for Commercial Vehicles

J-M Cho* · D-H Hwang* · D-Y Park* · Y-J Kim* · J-S Joh** · S-K Park***
Mechatronics Reseach Group, KERI* · Changwon National Univ.** · Dong-Jin Electric Co.***

Abstract - HILS(Hardware In-the-Loop Simulation) is an effective tool for design, performance evaluation and test of developed vehicle sub-systems such as ABS(Antilock Brake System), suspension, and steering systems.

This paper describes a HILS model for an ABS/ASR application. Also the implementation of HILS system for performance test of the ABS ECU(Electronic Control Unit) for commercial vehicles is presented.

1. 서 론

ABS(Antilock Brake System)는 고속으로 주행중인 차량이 급제동할 때, 또는 눈길과 같이 미끄러운 노면에서 제동할 때 바퀴의 잠김현상(wheel locking)을 방지함으로써, 바퀴와 노면사이의 견인력을 최대가 되도록 하여 제동효율과 조향성을 향상시키기 위한 장치이고, ASR(Acceleration Slip Regulation) 시스템은 차량이 가속할 때 바퀴의 슬립현상(wheel slip)을 방지하여 추진력을 향상시키기 위한 장치이다.

ABS/ASR 시스템은 주행중인 차량의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있는 장치이기 때문에 개발하는 과정에서 다양한 노면조건과 운전조건, 그리고 초기조건 등을 설정하여 실차시험을 수행해야 한다. 그러나 ABS가 동작하는 조건들을 항시 재현할 수 없고, 반복시험이 어려운 뿐만 아니라 실차시험을 위한 환경을 갖추는 데 많은 시간과 연구비 투자가 요구된다. 이러한 경우 대부분 시뮬레이션이라는 방법을 선택하여 보다 효율적이고 경제적인 연구를 수행하고, 최근에는 기존의 시뮬레이션 루프에서 부분적으로 실제의 하드웨어를 대체하는 HILS(Hardware In-the-Loop Simulation) 기법이 각광을 받고 있다[1-3].

기존의 시뮬레이션 루프에 부분적으로 실제 하드웨어로 대체하는 HILS 기법을 ABS/ASR 시스템 개발에 도입함으로써 실차시험의 횟수를 줄일 수 있고, 균일한 조건으로 반복시험을 가능하게 하여 시험의 효율성을 향상시킬 수 있다.

현재 국내의 ABS관련 기술은 승용차의 경우 많은 연구[4]를 통해 국산화되어 제품을 생산하고 있으나, 상용차의 경우에는 ABS 기술연구가 미비하여 유럽으로부터의 수입에 전적으로 의존하고 있는 상황이다. 이러한 여건에서 현재 생산되고 있는 국내 상용차의 경우 ABS 장치가 의무화되어 상용차용 ABS/ASR 시스템의 국산화 개발이 시급히 요구되고 있다.

본 논문에서는 상용차용 ABS/ASR 시스템의 ECU(Electronic Control Unit) 개발에 있어서 ECU의 성능분석을 위한 HILS 시스템 구축 방법을 제안한다. 제안된 HILS 시스템의 실제 하드웨어는 성능분석을 위한 ECU와 Full Air Brake용 ABS/ASR 시스템으로 구성하였으며 상용차 모델을 실시간으로 연산하기 위한 프 로세서 보드는 Alpha 프로세서 보드를 사용하였다.

2. 상용차용 ABS/ASR System

2.1 ABS/ASR System의 개요

눈길과 같이 미끄러운 노면에서 주행하는 차량에 제동을 가하면, 바퀴는 제동력에 의해 정지하지만 차량은 관성의 법칙에 의해 계속 노면을 미끄러지면서 진행하게 된다. 이와 같이 바퀴는 완전히 멈추었으나 차량은 차체의 관성 때문에 계속 미끄러지면서 진행하는 상태를 바퀴의 잠김현상이 발생했다고 한다. 이렇게 바퀴의 잠김현상이 발생하게 되면 바퀴와 노면사이의 점착계수(adhesion coefficient)가 감소하여 제동거리가 길어짐은 물론 횡방향 마찰계수(lateral force coefficient)가 크게 감소하여 장애물을 피할 수 있는 조향성도 상실하게 된다. ABS는 바퀴의 잠김현상이 발생하지 않도록 제동력을 조절함으로써 제동 마찰계수와 횡방향 마찰계수를 적절하게 유지하도록 하여 제동거리를 단축하고, 조향성을 제공하기 위한 장치이다.

ASR 시스템은 일반적으로 ABS에 포함되어 제공되는 시스템으로서 가속하는 차량에 추진력을 제공하는 기능을 한다. 차량의 한쪽바퀴가 진흙길에 빠졌을 때와 같이 양쪽 바퀴의 노면 점착계수에 큰 차이가 있을 경우 가속을 하게 되면 차동장치의 특성에 따라 점착계수가 낮은 바퀴, 즉, 진흙길에 빠진 바퀴에만 추진력이 전달되어 바퀴가 계속 헛돌게 된다. 이 경우 헛도는 바퀴에 제동력을 가함으로써 점착계수가 높은 바퀴에 추진력이 전달 되도록 하여 주는 장치가 ASR 시스템이다.

2.2 상용차용 ABS/ASR 시스템의 구성

상용차용 ABS/ASR 시스템은 제동시스템의 종류에 따라 Full Air Brake용 ABS/ASR 시스템과 Air Over Hydraulic Brake용 ABS/ASR 시스템으로 구분된다. 국내에서 생산되는 상용차(버스)의 경우 대부분 Full Air Brake용 ABS/ASR 시스템이 장착되어 생산되고 있으며, 본 논문에도 마찬가지로 Full Air Brake용 ABS/ASR 시스템을 대상으로 한 HILS 시스템을 구축하였다.

상용차 Full Air Brake용 ABS 시스템은 그림 1과 같이 구성되어 있다. ABS/ASR 시스템의 주요 구성부품으로는 펄스 링(pulse ring), 바퀴 속도센서(wheel speed sensor), PCV(Pressure Control Valve), ASR 밸브, 그리고 ECU가 있다. 펄스 링은 100개의 이빨(teeth)로 만들어져 있으며, 바퀴 속도센서는 펄스 링과 결합하여 장착되며 바퀴의 회전속도에 비례하는 교류 전압값을 출력시켜주는 센서이다. PCV는 2개의 슬레노이드 밸브, ASR 밸브는 1개의 슬레노이드 밸브로 구성되어 있으며 ECU의 전류지령에 따라 바퀴에 가해지는 제동력을 제어하는 장치이다. 그리고, ECU는 바퀴 속도센서로부터 속도정보를 가진 4개의 교류 전압값을 입력받아 각각의 바퀴에 대한 속도 및 가속도를 계산하고 차량의 기준속도를 추정하고, 슬립율(slip-rate)을 계산한 뒤 제어알고리즘에 따라 각각의 PCV와 ASR 밸브의 동작을 조절하는 제어기이다.

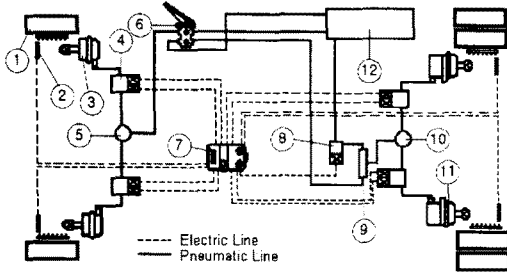


그림 1. Full Air Brake용 ABS 구성도
 1-Pulse ring, 2-Speed sensor, 3-Power chamber, 4-PCV, 5-Quick release 밸브, 6-Brake pedal, 7-ECU, 8-ASR 밸브, 9-2way 밸브, 10-relay 밸브, 11-Service chamber, 12-Brake tank

3. Dynamics Model

3.1 상용차 Dynamics Model

차량의 제동은 현가장치(suspension system)와 조향장치(steering system)에 의해 영향을 받기 때문에 HILS 시스템에서 시뮬레이션의 신뢰성을 보장하기 위해서는 정확한 차량의 수학적 모델이 필요하다.

그러나 본 논문에서는 현가장치와 조향장치에 대한 영향을 고려하지 않고, 차량을 그림 2 및 식 (1)~(5)와 같이 5자유도 모델로 단순화하여 사용하였다.

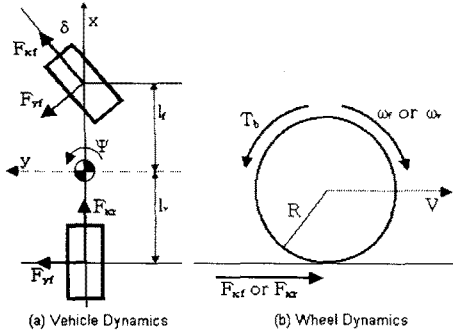


그림 2. 5자유도 Vehicle & Wheel Model

x방향의 운동방정식

$$m(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\psi}) = F_{xf}\cos\delta - F_{yf}\sin\delta + F_{xr} \quad (1)$$

y방향의 운동방정식

$$m(\ddot{y} - \dot{x}\dot{\psi}) = F_{yf}\sin\delta - F_{xf}\cos\delta + F_{yr} \quad (2)$$

요(yaw) 방향 운동방정식

$$I_z\ddot{\psi} = l_f(F_{xf}\sin\delta + F_{yf}\cos\delta) - l_r F_{yr} \quad (3)$$

전륜 회전 운동방정식

$$I_w\dot{\omega}_f = -R \cdot F_{xf} - T_{bf} \quad (4)$$

후륜 회전 운동방정식

$$I_w\dot{\omega}_r = -R \cdot F_{xr} - T_{br} \quad (5)$$

여기서, x는 직진방향, y는 횡방향, m은 차량 전체의 질량, δ 는 조향각, ψ 는 요잉각(yaw angle), 그리고 l_f 와 l_r 는 각각 차량의 무게중심으로부터 전륜과 후륜까지의 거리를 나타내고, T_{bf} 는 제동토크, R은 바퀴의 반지름, 그리고 ω_f 와 ω_r 는 각각 전륜과 후륜의 각속도를 나타낸다.

3.2 Tire Model

타이어는 차량 시스템의 비선형성을 증가시키는 가장 중요한 인자 중의 하나이며, 타이어에서 발생하는 힘이 차체의 운동을 발생시키므로 차량의 주행궤적을 예측하는데 있어서 매우 중요하다.

본 연구에서 사용한 Dugoff 모델은 각각의 타이어에서 발생하는 힘을 슬립율(λ), 슬립각(α), 수직하중(F_z), 그리고 속도(V_x) 등에 대한 비선형 함수관계로 나타내고, 종방향과 횡방향 구동력 F_x 및 F_y 는 식 (6)과 같다.

$$F_x = -\frac{C_l\lambda}{1-\lambda} f(S), \quad F_y = \frac{C_a \tan\alpha}{1-\lambda} f(S) \quad (6)$$

여기서, C_l 는 직진방향의 강성(longitudinal stiffness), C_a 는 선회강성(cornering stiffness)이고, $f(S)$ 는 다음 식 (7)과 같다.

$$f(S) = \begin{cases} S(2-S), & \text{if } S < 1 \\ 1, & \text{if } S > 1 \end{cases} \quad (7)$$

식 (7)에서 S는 식 (8)로 나타내어진다.

$$S = \frac{\mu F_z [1 - \epsilon_r V_x \sqrt{\lambda^2 + \tan^2\alpha}](1-\lambda)}{2V C_l^2 \lambda^2 + c_a^2 \tan^2\alpha} \quad (8)$$

여기서, μ 는 도로의 마찰계수이고, ϵ_r 은 도로의 점착계수이다.

4. HILS System 구성

HILS란 시뮬레이션 루프의 일부분을 실제 하드웨어로 대체하여 전체 시스템을 구성하는 기법으로서, 실제 시스템을 통한 시험이 불가능하거나 시험비용이 고가인 분야에서 사용되기 시작하여 현재는 항공기 및 자동차 분야에서 많이 채택되고 있는 시뮬레이션 기법이다.

4.1 HILS 시스템의 Hardware 구성

상용차용 ABS/ASR 시스템의 ECU 성능분석을 위한 HILS 시스템의 하드웨어 구성은 그림 3과 같다. 5자유도 동역학 모델을 실시간으로 시뮬레이션하기 위한 HILS 시스템은 상용차 Full Air Brake용 ABS/ASR 시스템 부분과 DS1004 보드(Alpha AXP-21164, Alpha Board), DS1003 보드(TMS320C40, DSP Board), 그리고 DS2201 보드(I/O Board)로 구성되어 있는 dSPACE사 하드웨어 부분과 각종 소프트웨어 구성을 위한 PC부로 구성하였다. Alpha 보드는 상용차의 동역학 모델을 실시간으로 연산하는 기능을 담당하고, DSP 보드는 바퀴 속도센서를 모사하고, 그리고, I/O 보드는 외부의 다른 장치들과의 인터페이스를 담당하도록 구성하였다.

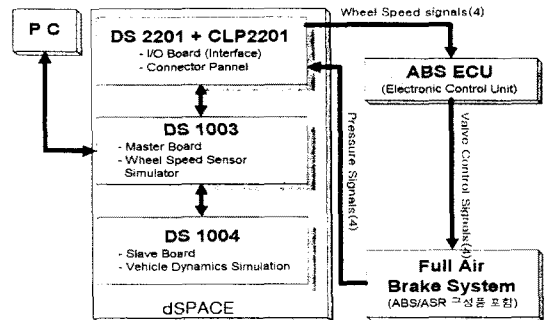


그림 3. ABS HILS의 Hardware 구성도

상용차의 동역학 모델에 Full Air Brake용 ABS/ASR 시스템을 포함시키기 위해서는 공압시스템에 대한

Modeling과 솔레노이드 밸브에 대한 모델링이 반드시 필요하다. 그러나, 공압시스템과 솔레노이드 밸브의 비선형적인 특성으로 인해 수학적 모델을 수립하기 어렵기 때문에, 본 논문에서는 Full Air Brake용 ABS/ASR 시스템을 HILS 시스템에 실제 하드웨어의 형태로 대체하여 적용하였다.

HILS 시스템을 구축함에 있어 제동동작에 가장 큰 영향을 미치는 PCV와 Power/ Service Chamber 사이의 공압라인(pneumatic line)의 연결은 실물과 같은 사양으로 제작하였으며, 그 외의 공압라인 연결은 제동동작에 영향을 주지 않도록 축소하여 제작하였다. 브레이크 드럼 및 라이닝은 설치하지 않았지만, Power/ Service Chamber의 작동하중인 1000~1500 [kgf]에서 견딜 수 있는 구조로 제작하였으며, 압력센서로부터 PCV의 출력압력을 측정하여 제동력을 구하도록 하였다.

4.2 HILS System의 Software 구성

HILS 시스템의 소프트웨어 부분은 그림 4와 같이 Matlab과 ControlDesk Package를 이용하여 구성하였다. Matlab에서는 기본함수, Simulink, 그리고 Real-Time Workshop을 사용하였으며, Control Desk Package에서는 RTI(Real-Time Interface), MLIB, 그리고 MTRACE를 사용하였다.

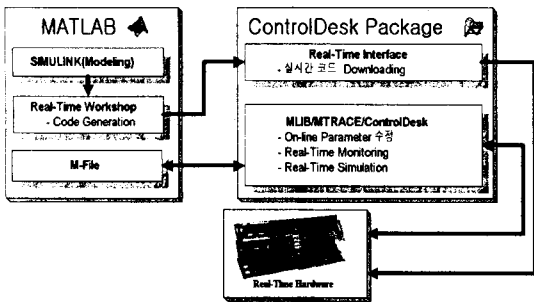


그림 4. ABS HILS의 Software 구성도

Matlab의 Simulink를 이용하여 상용차의 수학적 모델을 수립한 뒤 Real-Time Workshop을 이용하여 상용차 모델에 대한 실시간 C-Code를 생성한다. 생성된 시뮬레이션 모델의 실시간 코드는 RTI에 의해 dSPACE 하드웨어로 다운로드된다.

MLIB는 Matlab workspace에서 dSPACE H/W로의 Access를 가능하게 함으로서 Matlab 함수를 이용해 실시간 데이터를 획득하고, 실시간으로 변수를 수정이 가능하게 하였다. 그림 5와 같이 ControlDesk Package를 통해 구성한 Instrument Panel에서 실시간으로 변수를 수정하고, 데이터를 모니터링하고, 그리고 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 하였다.

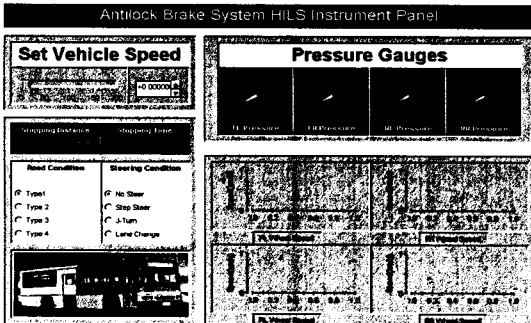


그림 5. ABS HILS의 Instrument Panel

그림 6은 dSPACE Hardware와 ECU, 그리고 Full Air Brake용 ABS/ASR 시스템으로 구성된 상용차용 ABS/ASR 시스템의 ECU 성능분석을 위해 제작한 HILS 시스템의 실물사진을 나타내고 있다.

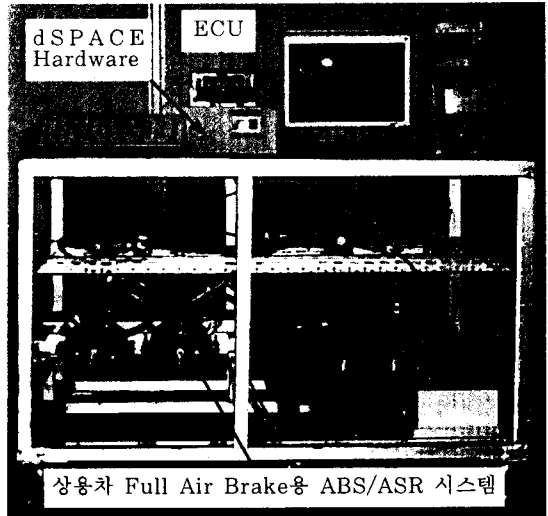


그림 6. ABS HILS 시스템의 실물사진

5. 결 론

본 논문에서는 상용차용 ABS/ASR 시스템의 ECU 개발에 있어서 ECU의 성능분석을 위한 HILS 시스템을 구축하는 방법을 제시하였다.

공압시스템과 솔레노이드 밸브의 비선형성 때문에 수학적 모델을 수립하기 어려운 Full Air Brake용 ABS/ASR 시스템의 실제 하드웨어를 HILS 시스템에 연결하여 운전자의 제동조작에 따라 차량가동 및 ABS 시스템 특성을 실시간으로 해석 가능하도록 개발하였다. 구축된 HILS 시스템에 고성능 프로세서를 적용하여 향후 실제 시스템에 가까운 Dynamics Model에 대해서도 충분히 연산이 가능하도록 하였으며, Instrument Panel을 통해 시뮬레이션 결과를 모니터링하고 On-line 변수설정이 가능하도록 구성하였다. 향후 현가장치와 조향장치의 동역학 모델을 추가한 14자유도 상용차 모델을 HILS 시스템에 적용함으로써 실차시험을 대체할 수 있고, 보다 신뢰성 높은 시뮬레이션 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 민간겸용기술사업(Dual Use Technology Program) 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- (1) D. Kempf, L. Bonderson, and L. Slafer, "Real Time Simulation for Application to ABS Development", SAE Paper No. 870336
- (2) MW Suh, CS Seok, YJ Kim, JH Chung, SM Kim, JC Lee, and SI Lee, "Hardware In-the-Loop Simulation for ABS", SAE Paper No. 980244
- (3) F. Svaricek, "Automatic Valuation and Verification of ABS Controllers by Using a Hardware In-the-Loop Simulation", SAE Paper No. 980241
- (4) 지태수, 천진민, "ABS 전자제어기 개발", Proceeding of the 2nd Next Generation Vehicle Workshop, pp. 389-392, 1994