

Hardware In-the Loop Simulation을 이용한 미끄럼방지 제동제어기의 설계

이 기 창* · 전 정 우 · 황 돈 하 · 이 세 한 · 김 용 주
 한국전기연구원 산업전기연구단 기기제어응용연구그룹

An Antilock Brake Controller Design Using Hardware In-the Loop Simulation

Ki-Chang Lee · Jung-Woo Jeon · Don-Ha Hwang · Se-Han Lee · Yong-Joo Kim
 Mechine Control And Applications Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

Abstract - 전자제어식 미끄럼방지 제동장치 (ABS, Antilock Brake System)는 차량의 급제동시 발생할 수 있는 바퀴의 슬립을 방지하여 차량의 제동거리를 단축시키고 주행 성능을 향상시키는 차량 내 안전장치이다. 지난 몇 년 동안 공압식 제동시스템을 사용하는 대형차량에 적합한 미끄럼방지 제동 제어기를 연구해 왔다. 이 제어기는 바퀴의 슬립률과 그 변화량을 이용한 제어 법칙을 유도하여, 제어 파라미터로 사용하고 있다. 이러한 제어 파라미터의 튜닝에는 많은 반복적인 실험이 요구된다. 이러한 요구에 부응하기 위하여 차량의 제동을 실시간으로 모사할 수 있는 HILS (Hardware In-the Loop Simulation) 시스템을 개발, 구축하였다. 개발 HILS는 공압식 브레이크 시스템 및 14 자유도를 가지는 차량 동역학 모델 및 타이어-바퀴 동역학을 소프트웨어 모델로 사용하고, 개발 중인 전자제어식 미끄럼 방지 제동 제어기를 하드웨어로 사용하여, 바퀴속도 센서 신호 모의 장치 및 공압 액추에이터 모의 신호 등의 인터페이스 장치를 사용하여 제동중인 차량의 상태를 실시간으로 시뮬레이션 및 감시할 수 있다. 이 개발 HILS를 이용하여 제동 제어기의 제어 파라미터의 튜닝을 짧은 시간에 성공적으로 끝낼 수 있었을 뿐만 아니라, HILS 실험을 마친 제어기는 미끄럼 방지 제동 시험장에서 실차 주행 시험을 무사히 마침으로써, 개발 기간과 비용을 절감할 수 있는 하드웨어를 이용하는 시뮬레이션의 효율성을 간접적으로 증명하였다.

은 아직 초보적인 수준을 벗어나지 못하고 있다. 더욱이 대형 상용차(Commercial Vehicle)에의 미끄럼방지 제동 시스템 장착 의무화의 법제화가 가시화되면서, 국내 자동차 업계는 외국 선진업체의 미끄럼방지 제동 시스템을 전량 수입하여 장착해야 할 실정에 놓여 있으며, 기술종속의 심화 및 기술력의 차이는 더 커질 것으로 예상됨에 따라 대형 상용차에 대한 미끄럼방지 제동 시스템의 국산화 개발 연구가 절실히 요청되고 있다. 따라서 대형 상용차용 미끄럼방지 제동 시스템의 국산화 개발을 위해, 공압식 제동 시스템(Full-Air Brake System)을 채용하고 있는 대형 버스에 장착할 목적으로 미끄럼방지 제동 시스템을 개발 하였으며, [1][2][3] 본 논문에서는 미끄럼 방지 제어의 새로운 알고리즘 및 전자 제어장치 (ECU, Electronic Control Unit)를 개발하기 위한 가장 단순한 형태의 HIL 시뮬레이션 방법을 소개한다.

1. 서 론

2. 미끄럼방지 제동 시스템의 HILS 설계

미끄럼방지 제동 시스템은 차량의 급제동 시 차륜의 잠김 현상(wheel locking)을 방지하여 차륜과 노면사이의 마찰력을 최적으로 유지시킴으로써 제동거리의 단축 및 조향성의 향상을 이루는 차량의 안전장치이다. 이 장치는 착륙거리 감소를 위해 1947년 항공기에 처음으로 도입되었으며, 자동차용으로는 1969년 미국의 Kelsey-Hayes 사에 의해 Ford의 Thunderbird에 최초 장착되었다. 초창기의 미끄럼방지 제동 시스템은 고가의 장비로 고급차를 중심으로 채용되었지만, 운전자의 안정성에 대한 관심이 증대하고 있는 최근에는 제어기술의 진보, 특히 마이크로프로세서의 발달로 전자제어장치 (ECU, Electronic Control Unit)의 저가격화가 이루어지고 있어, 경차, 소형차, 4륜구동 자동차, 트럭, 버스 등으로 보급이 증가하고 있으며, 소형 이륜 자동차에까지 적용되고 있는 실정이다. 현재 세계 자동차 ABS 시장은 거대 차종과 우수한 기술력을 가진 Bosch, Bendix, Wabco 등의 일부 업체가 기술을 독점하고 있는 상황이며, 국내 미끄럼방지 제동 시스템 시장도 상용차의 경우 버스는 Bosch 사에게 트럭은 Wabco 사에게 대부분을 장악 당한 상태이다. 국내에서도 승용차 부분에서는 지난 수년 동안 ABS에 대한 연구가 활발히 진행되어 국내 M사를 중심으로 국내 및 세계 시장에서 판매되고 있지만, 상용 대형 차량을 대상으로 한 미끄럼방지 제동 시스템 기술

대형 차량에 장착되는 미끄럼방지 제동시스템은 차량의 완전 공압식 제동시스템에 대하여 각 바퀴의 제동 압력을 조절하기 위한 압력조절밸브(PCV, Pressure Control Valve)와 바퀴 속도를 검출하기 위한 속도 센서 및 미끄럼방지 제동 제어를 담당하는 전자제어장치로 구성된다. 그림 1에 미끄럼 방지 제동시스템의 구성도를 나타내었다. 이러한 대형 차량의 미끄럼 방지 제동시스템을 시뮬레이션해서 전자제어장치를 개발하기 위한 HILS를 그림 2에 나타내었다. 미끄럼 방지 제동 제어기인 전자제어장치를 제외한 모든 하드웨어 구성품은 Matlab의 Simulink 모델의 형태로 소프트웨어 모델로 변경되었다. 이러한 소프트웨어 모델들은 집파일 되어 실시간 시뮬레이션을 위하여 DS1003 및 DS1004 콤포실시간 보드에 다운로드 되어, 제동 중인 버스와 그 제동시스템을 모의한다.

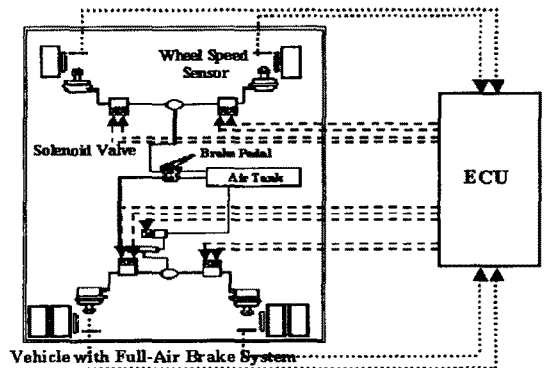


그림 1. 대형차량의 ABS 시스템 구성

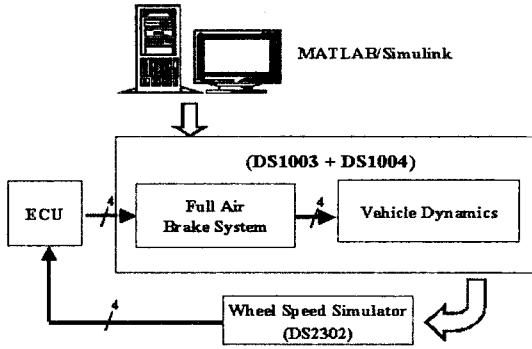


그림 2. 미끄럼방지 제동제어기(ECU) 개발을 위한 HILS 설계

2.1 HILS 시스템의 하드웨어 구성

하드웨어를 이용하여 미끄럼방지 제동 시스템을 시뮬레이션 하기 위한 일반적인 형태의 HIL Simulation 구성을 그림 2에 나타내었다.[4][5] 시뮬레이션의 구성은 호스트 컴퓨터와 실시간 시뮬레이션 시스템, I/O 인터페이스 및 ABS ECU와 공압식 제동시스템으로 구성된다. 미끄럼방지 제동 제어기를 개발하기 위한 HIL 시뮬레이션은 공압을 이용하는 제동 시스템과 공압 모듈레이터인 솔레노이드 밸브 등의 실제 하드웨어를 가능한 한 많이 포함할 수 있다. 이렇게 하드웨어를 많이 사용함으로써 시스템의 잘못된 모델링에 따른 비선형 성을 극복하여 시뮬레이션의 신뢰도를 향상시킬 수도 있다. 하지만, 이러한 하드웨어 중심 설계는 시스템 설계에 따른 시간적, 금전적인 비용을 증가시킨다. 반면 소프트웨어만을 이용한 시뮬레이션은 쉽게 구현할 수 있는 반면 그 결과를 무조건 신뢰할 수 없는 단점이 있다. 본 연구에서는 개발 대상품인 전자제어식 미끄럼방지 제동 제어기만을 실제의 하드웨어로 설계하여 구성하고, 나머지 시뮬레이션 시스템의 구성품은 모두 소프트웨어 모델로 대체하였다. 시스템 구성을 위해 제어기의 입력 센서 및 제어기의 출력 전류는 임의의 신호 발생기와 정밀 AD 컨버터를 이용하여 아날로그 신호와 디지털 신호로 변환하였다. 호스트 컴퓨터에서는 주행 중인 차량 및 제동시스템 전반의 동역학을 모델링 하였으며, DSP 보드 및 알파 칩 보드로 구성되는 시뮬레이터에 이 모델을 다운로드하여 실시간 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 임의의 신호 발생 보드는 4개의 차량 바퀴 속도 센서를 모의하는데 사용하였으며, 아날로그 및 디지털 입출력 보드는 각 바퀴의 제동 압력과 솔레노이드의 출력을 디지털 값으로 변환하는 데에 사용하였다.

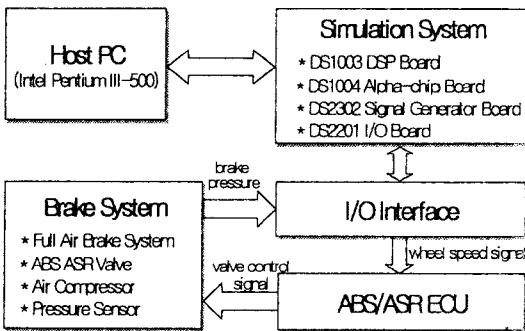


그림 3. 일반적인 미끄럼방지 제동시스템의 HIL Simulation

2.2 HILS 시스템의 소프트웨어 구성

구축된 HIL Simulation의 소프트웨어는 Matlab/Simulink 소프트웨어 패키지와 ControlDesk 패키지로 구성된다. Matlab 내의 Simulink와 Real-Time Workshop 소프트웨어를 사용하여 14 자유도의 차량 동역학 모델을 작성하여 실시간 시뮬레이션 코드를 생성하였다. 또한 Real-Time Interface, Cockpit, MTRACE 및 MLIB 등의 ControlDesk 패키지를 이용하여, 생성된 시뮬레이션 코드는 실시간 시뮬레이터로 다운로드 되어 시뮬레이션 된다. 그림 4에 나타난 Control panel은 실시간 시뮬레이션 결과 및 파라미터들을 모니터링 할 수 있다. 이러한 현시 프로그램을 사용하여 차량의 속도, 각 바퀴의 제동 압력, 바퀴 속도, 바퀴 가·감속도 및 슬립 등의 소프트웨어 값들을 실시간으로 확인할 수 있다.

2.3 HILS 시스템의 소프트웨어 구현

실제 차량의 제동시스템의 공압 배관들과, 공압 모듈레이터인 압력조절밸브 및 차량과 타이어 모델 등은 소프트웨어 모델로 구현되었다. 실시간 시뮬레이터는 공압 모듈레이터의 입력 밸브와 출력 밸브의 솔레노이드를 대표하는 두 개의 저항에서 입력 받은 전류 명령을 감지하여, 각 바퀴에 인가되는 제동압력 및 제동 토크를 계산한다. 공압 모듈레이터는 바퀴의 제동 압력을 유지시키거나, 증가 혹은 감소시키는 3가지 동작 모드로 작동한다. 미끄럼방지 제동제어기를 개발하기 위한 HIL Simulation 구성을 그림 5에 나타내었다. 이 실험에서 미끄럼방지 제동 전자제어장치는 실시간 시뮬레이터에서 생성된 바퀴 속도 신호에 의해서 압력조절밸브의 입력 및 출력 밸브의 솔레노이드를 대표하는 저항을 구동함으로써 소프트웨어 공압 채임버 모델의 제동압력을 제어하고 궁극적으로 바퀴의 잠김 및 슬립을 방지한다.

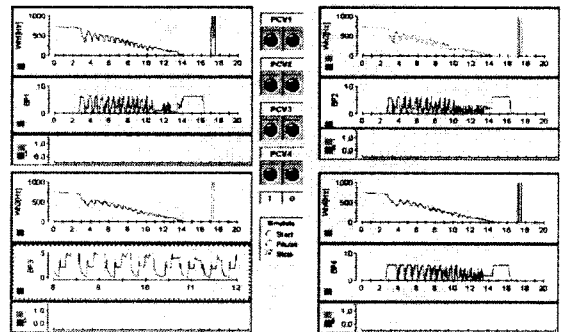


그림 4. Control Panel의 구성

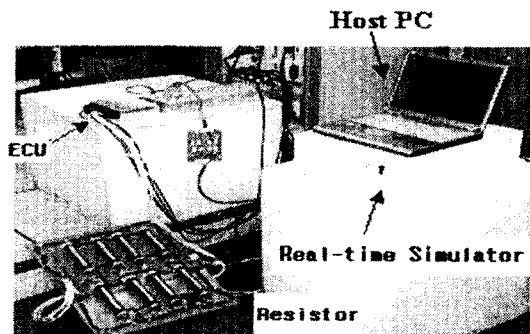


그림 5. ABS ECU 테스트를 위한 실험의 구성

3. 미끄럼방지 제동 제어 HIL Simulation 결과

개발 미끄럼방지 제동제어기의 성능을 파악하기 위하여 전체 질량이 9,584 kg 인 버스가 60 km/h의 초기속도로 비대칭 노면 및 균일하게 미끄러운 노면에서 제동하는 상황을 가정하여 실시간 시뮬레이션 하였다. 비대칭 노면은 $\mu_{left} = 0.3$ 및 $\mu_{right} = 0.7$ 임을 가정하였고, 균일하게 미끄러운 노면은 바퀴와 노면의 점착계수가 $\mu = 0.3$ 임을 가정하였다.

그림 6과 그림 7에 미끄럼방지 제동 제어기를 이용한 HIL Simulation 제동 성능 시험 결과를 나타내었다. 그림에서 V1, V2, V3 및 V4는 각각 왼쪽 앞바퀴, 오른쪽 앞바퀴, 왼쪽 뒷바퀴 및 오른쪽 뒷바퀴의 바퀴속도를 나타낸다. 또한 BP1, BP2, BP3 및 BP4는 각각 왼쪽 앞바퀴, 오른쪽 앞바퀴, 왼쪽 뒷바퀴 및 오른쪽 뒷바퀴의 제동압력을 나타낸다. 그림 6에서처럼 비대칭 노면에서 미끄럼 방지 제동 제어를 하지 않았을 때에는 미끄러운 노면의 바퀴가 쉽게 고착되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 바퀴의 고착은 바퀴와 노면사이의 마찰력을 감소시켜 차량의 주행을 불안정하게 만든다. 반대로 그림 7에서처럼 균일하게 미끄러운 노면에서라도 미끄럼 방지 제동 제어를 하게 되면 쉽게 고착되려던 바퀴가 속도를 회복하여 바퀴와 노면사이의 마찰력이 높은 값으로 유지됨을 알 수 있다.

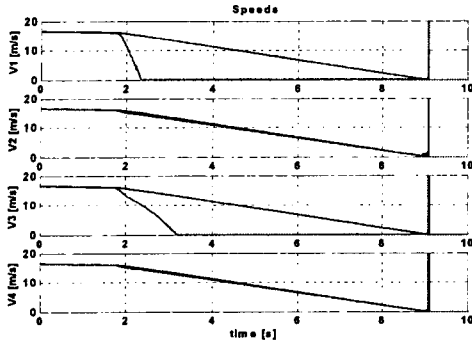
4. 결론

전자제어식 미끄럼방지 제동제어기를 개발하기 위한 HILS 시스템의 설계 및 구현방법을 소개하였다. 미끄럼방지 제동 시스템의 실제적인 구성은 완전 공압식 브레이크 시스템과 차량 속도를 측정하고 제동 압력을 조절하는 제어시스템으로 구성된다. 이러한 하드웨어 구성품들은 그 설계와 제작에 많은 비용을 필요로 하므로 소프트웨어 모델을 사용하여 대체시키고, 개발 제동 제어기만을 HIL Simulation에 사용하였다. 이러한 HIL 시뮬레이션을 통하여 전자제어식 미끄럼방지 제동 제어기를 최단 시간 내에 경제적으로 개발할 수 있었으며, 하드웨어 변경 없이 현장테스트에 그대로 활용함으로써 개발에 필요한 시간과 비용을 절감할 수 있었다.

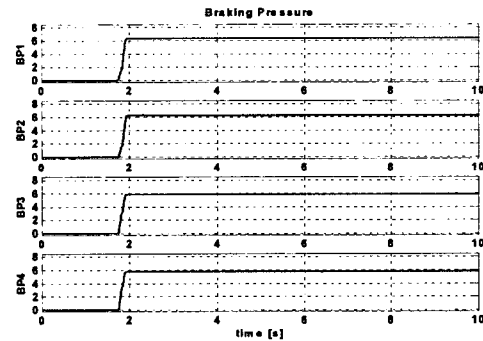
본 연구는 민군경용기술사업(Dual Use Technology Program) 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

[참고 문헌]

- [1] 이기창 외 5명, "상용차용 ABS의 ECU 설계 및 제어 알고리즘에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 612-613, 2000. 11.
- [2] K.C. Lee, M.S. Kim, J.W. Jeon, D.H. Hwang, D.Y. Park, and Y.J. Kim, "A Study on the ECU and Control Algorithm of ABS for a Commercial Vehicle," Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2001), Jeju, Korea, pp.1234-1237, (Paper No. I-SE02-3), October 17-21, 2002.
- [3] K.C. Lee et al., "Implementation and Tests of Antilock Braking Algorithm for a heavy vehicle", International Conference on Control Automation and Systems 2002, Korea, 2002.
- [4] 황돈하 외 5명, "상용차용 ABS ECU 개발을 위한 HILS 시스템 설계 및 구현", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 609-611, 2000. 11
- [5] J.M. Cho et al, "Design and Implementation of HILS System for ABS ECU of Commercial Vehicles", 6th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 2, pp. 1272-1277, 2001. 6.

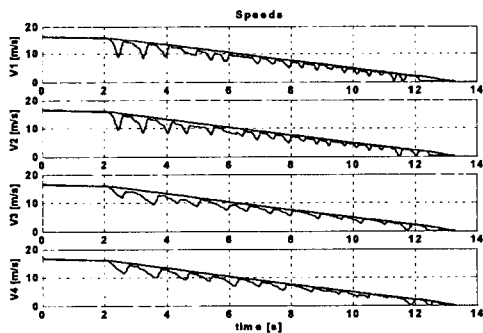


(a) Vehicle and wheel speeds

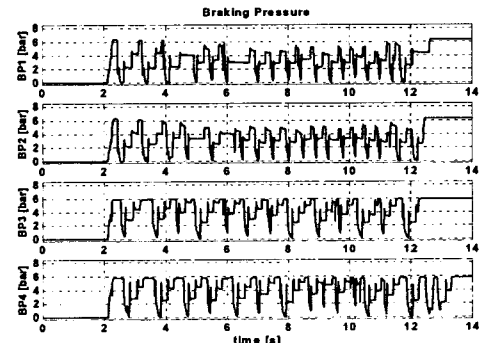


(b) Braking pressure at wheels

그림 6. HIL Simulation 제동시험 결과 (제동제어기 OFF)



(a) Vehicle and wheel speeds



(b) Vehicle and wheel speeds

그림 7. HIL Simulation 제동시험 결과 (제동제어기 ON)