

실시간 Hardware-in-the-Loop 시뮬레이션을 이용한 반능동 현가시스템 특성 평가

A Strategy to Evaluate Semi-Active Suspension System using Real-Time Hardware-in-the-Loop Simulation

최규재*, 노기환*, 유영면*, 김혁**
G. J. Choi, K. H. Noh, Y. M. Yoo, H. Kim

ABSTRACT

To meet the challenge of testing increasingly complex automotive control systems, the real-time hardware-in-the-loop(HIL) simulation technology has been developed. In this paper, a strategy for evaluation of semi-active suspension systems using real-time HIL simulation is presented. A multibody vehicle model is adopted to simulate vehicle dynamic motions accurately. Accuracy of the vehicle simulation results is compared to that of the real vehicle field test and proven to be very accurate. The controller and stepping motor to adjust semi-active damper stage are equipped as external hardwares and connected to the real-time computer which has vehicle dynamic model. Open and closed loop test methods are used to evaluate a controlled suspension system and the system's operations are verified.

It is found that the proposed evaluation methods can be used well for the verification of semi-active suspension systems.

주요기술용어 : Real-time simulation(실시간 시뮬레이션), HILS(hardware-in-the-loop simulation), Semi-active suspension(반능동 현가시스템), Vehicle dynamics(차량동역학)

1. 서론

자동차의 성능과 안전도 향상을 위한 차량 전자제어 시스템의 개발은 소비자의 요구에 부응하여 엔진, 동력 전달계, 현가, 조향, 제동 및 ITS 분야 등 자동차의 거의 모든 분야에서 급속도로 적용범위가 확대되고 있다. 과거 차량 전자제어 시스템 개발시에는 시제품 개발 후 시작 차량에

탑재하여 수많은 실차 실험을 통하여 시스템을 평가하고 제어로직을 보완하는 방법을 사용하였다. 그러나 이와 같은 방법은 시간과 비용이 많이 소요되는 문제점이 있으며, 실차시험시 입력조건을 동일하게 유지하는 것은 거의 불가능하여 시험의 반복성 확보가 어려웠다. 또한 각 전자제어 시스템 상에 발생할 수 있는 오동작은 실차 시험시 위험한 상황을 초래할 수 있어 시험의 한계성도 존재한다. 이상과 같은 문제점을 해결하고 전체 개발기간의 단축 및 개발비용을 절

* 회원, 자동차부품연구원

** Mechanical Dynamics Inc. USA

감하기 위한 방법으로 실시간 hardware-in-the-loop (HIL) 시뮬레이션 기술이 도입되고 있다. 실시간 HIL 시뮬레이션 기술을 차량 전자제어 시스템 개발에 적용하게 되면 비용이 많이 드는 실차 시험을 줄일 수 있으며 시스템의 성능 향상, 각 부시스템 사이의 명확한 상호작용 평가 및 실차 시험에 앞서 심각한 안전성 문제 해결 등의 효과를 얻을 수 있다.¹⁾

이와 같은 장점을 가진 HIL 시뮬레이션 시스템은 각종 차량 전자제어 시스템 개발에 적용되고 있으나 사용하는 차량모델이 단순하여(¼차량모델 혹은 lumped parameter 차량모델) 실제 차량의 운동 특성 재현에 한계가 있거나,^{2,4)} 단순히 ECU만을 하드웨어로 설정하고 시스템을 구성하여 다른 하드웨어 부품(스텝 모터, 힘 작동기 등)의 응답 특성에 대한 정확한 반영이 안 되는 문제점이 있다.^{5,6)}

본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 정확한 다물체 동역학 이론을 바탕으로 한 차량모델을 사용하고 해석의 정확도를 실차 실험과 비교 검증하여 정확한 차량 운동 특성 재현이 가능하도록 하였으며 반능동 현가시스템의 제어기(ECU) 뿐만 아니라 가변 댐퍼를 구동시켜 주는 스텝 모터를 실제 하드웨어로 설치한 HIL 시뮬레이션 시스템을 구성하여 반능동 현가시스템 평가를 위한 기술을 개발하였다.

2. 반능동 현가시스템

반능동 현가시스템은 차량의 주행상태에 따라 현가시스템의 감쇠특성을 비연속적으로 조절하여 차량의 조종안정성과 승차감을 향상시킬 수 있는 시스템으로 댐퍼의 구조와 제어특성에 따라 연속형, 가변형, interrelated 형(HH-SS 댐퍼), semi-independent 형(HS-SH 댐퍼) 등으로 구분할 수 있다.⁷⁾

본 논문에서는 가변 semi-independent 형 반능동 현가시스템에 대하여 HIL 시뮬레이션 기술을 이용하여 평가하는 방법을 기술하였다. Fig. 1

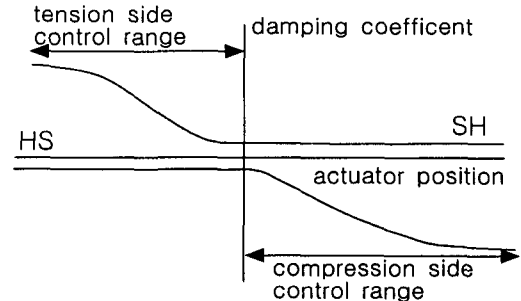


Fig. 1 HS-SH damper(semi-independent type)

은 HS(신축 hard, 압축 soft)-SH(신축 soft, 압축 hard) 댐퍼 특성곡선을 나타낸 것으로 제어구간이 신장영역과 압축영역으로 나누어져 있다. 이와 같은 HS-SH 댐퍼는 댐퍼 자체의 구조는 HH(신축 hard, 압축 hard)-SS(신축 soft, 압축 soft) 댐퍼에 비하여 복잡해지나 작동방향에 따라 댐핑 계수가 hard로부터 soft로 혹은 soft에서 hard로 기계적으로 전환되기 때문에 상대속도 측정을 위한 센서나 고응답 절환기구가 필요 없으며 감쇠력 절환빈도가 작으면서도 HH-SS 댐퍼와 동일한 효과를 낼 수 있다.⁷⁾

댐퍼 내부의 로터리 밸브를 회전시킬 수 있는 스텝 모터가 댐퍼 상단에 장치되어 있으며 제어기에 의해 이 모터를 회전시켜 적절한 감쇠력을 얻을 수 있다. 본 연구에서 사용하는 댐퍼의 절환단수는 총 22단으로 구성되어 있다. Fig. 2에는 각 단수에 따른 댐핑력과 댐퍼 상대속도와의 관계를 실험적으로 구한 것으로 차량 주행 상황에 따라 제어기에 의해 각 댐퍼를 독립적으로 1단에서 22단까지 제어하여 원하는 조종안정성과 승차감 특성을 얻을 수 있다. 또한 사용자의 개성에 따라 auto 모드와 sport 모드로 설정할 수 있으며 auto 모드인 경우 승차감 위주, sport 모드인 경우 조종안정성을 강조할 수 있도록 하였다.

3. Hardware-in-the-loop 시뮬레이션 시스템 구성

본 연구에서는 실시간 HIL 시뮬레이션 시스템을 구성하고 가변형 반능동 현가시스템의 특

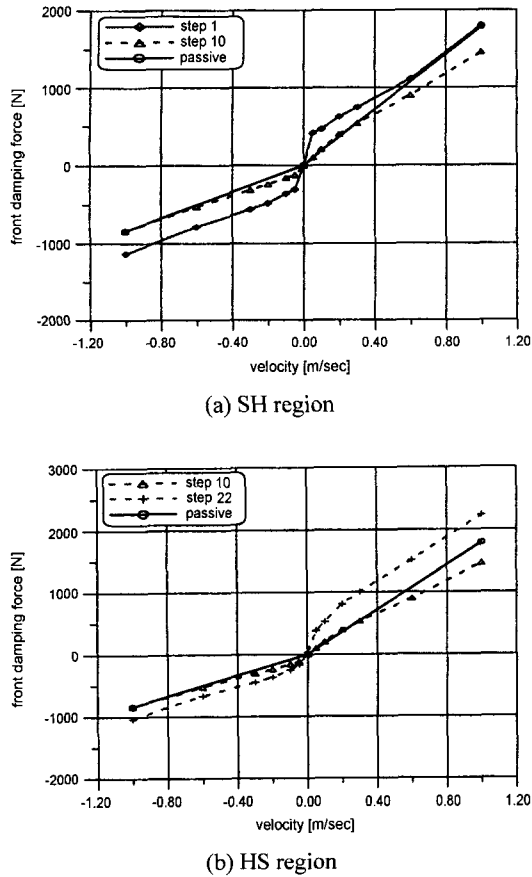


Fig. 2 Characteristic curve for front shock absorber

성을 평가하였다. Fig. 3에는 실시간 시뮬레이션 컴퓨터, 각종 하드웨어 인터페이스, 반능동 현가 시스템 제어기(ECU), 댐퍼 절환을 위한 스텝 모터, 모터 위치 측정을 위한 위치센서 등으로 구성된 HIL 시뮬레이션 시스템의 개요도를 도시한 것이다.

그림에서 실시간 시뮬레이션 컴퓨터는 다양한 입출력(I/O) 모듈을 가진 Applied Dynamics Real Time Station(RTS)으로 차량모델 시뮬레이션과 입출력을 담당하는 별도의 프로세서를 장착하고 있다. 이 컴퓨터는 Power PC604 133MHz 프로세서를 주 계산 프로세서로 사용하여 다물체로 구성된 차량모델의 다양한 주행 특성 해석을 위한 차량 동역학 해석을 수행한다. 또한 입출력 모듈에는 A/D 변환기, D/A 변환기, 디지털 입출

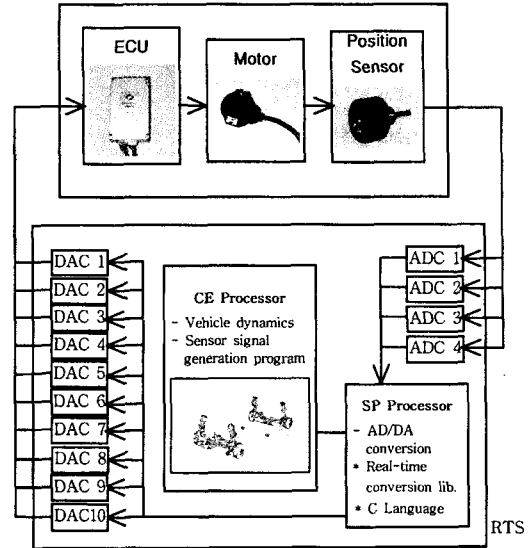


Fig. 3 ECU-in-the-loop simulation system

력 등의 모듈이 모토롤라 68040 프로세서에 의해 제어되며 각 인터페이스 작업을 병렬적으로 처리하기 때문에 입출력 신호수의 증가에도 소요되는 시간이 증가하지 않는 장점이 있다. 사용자는 Ethernet에 연결된 워크스테이션 혹은 PC에서 RTS를 접속 운용하며 RTS의 주 프로세서는 C, FORTRAN 및 ADSIM 등의 언어를 이용하여 실시간 시뮬레이션에 필요한 작업을 프로그램할 수 있다.

3.1 실시간 차량동역학 해석 프로그램

Fig. 3에 도시한 반능동 현가시스템 개발 및 평가를 위한 HIL 시뮬레이션 시스템이 정확하게 작동하기 위해서는 각종 주행 상황에 따라 차량의 운동 특성을 실제 차량과 근접한 결과를 얻을 수 있는 차량모델이 필요하다. 본 연구에서는 오늘날 가장 정확하게 차량 전체의 운동을 해석할 수 있는 다물체 동역학 이론을 바탕으로 한 실시간 차량 동역학 해석 프로그램을 이용하여 HIL 시뮬레이션 시스템을 구성하였다. 이 프로그램은 상대좌표계와 recursive Kane의 방정식을 이용하여 일반 다물체 동역학 해석이 가능하도록 개발되어 각종 다물체 시스템 해석에 적용

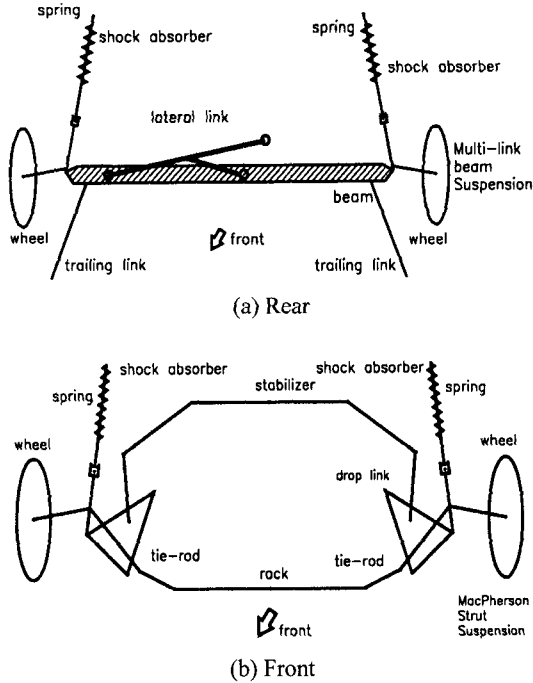
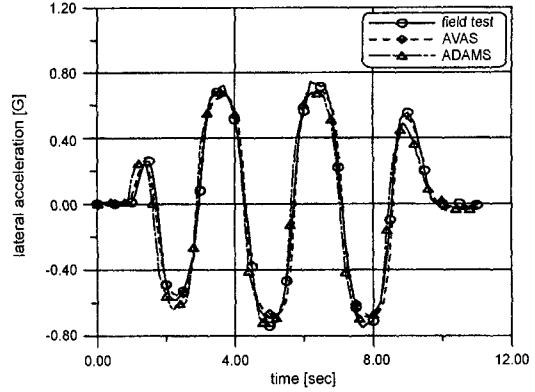


Fig. 4 Vehicle model

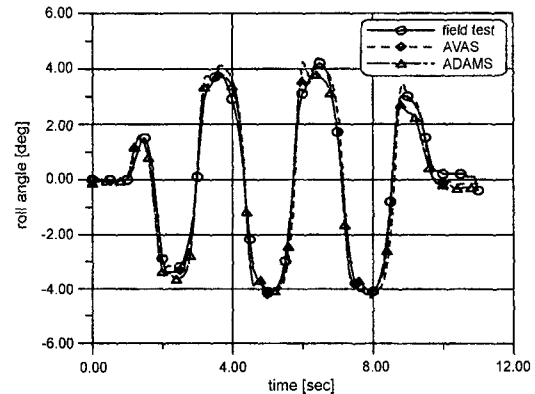
할 수 있으며 현가장치 복합 조인트, 타이어 모델, 각종 노면 자료 등을 포함하고 있어 차량의 정확한 주행 특성 해석에 활용할 수 있다. 참고 문헌에 이 실시간 다물체 차량 동역학 해석 프로그램(AVAS)에 대해 상세히 기술하였으며 정확도를 실차실험을 통하여 검증하였다. Fig. 4에는 본 연구에서 사용하는 반능동 현가장치가 장착된 차량 시스템을 도시한 것이며 Fig. 5에는 실차실험 및 ADAMS와의 비교결과를 나타낸 것이다. 실험조건은 80km/h의 정속 주행 차량에 최대 95°의 연속 사인파형 조향각을 입력한 경우로 그림에서 보는 바와 같이 실험 결과에 대해 약 90% 이상의 정확도를 나타내고 있다. 따라서 본 프로그램을 이용하여 구성한 HIL 시뮬레이션 시스템은 반능동 현가시스템 특성평가에 잘 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 반능동 현가시스템 제어기(ECU) 및 스텝 모터

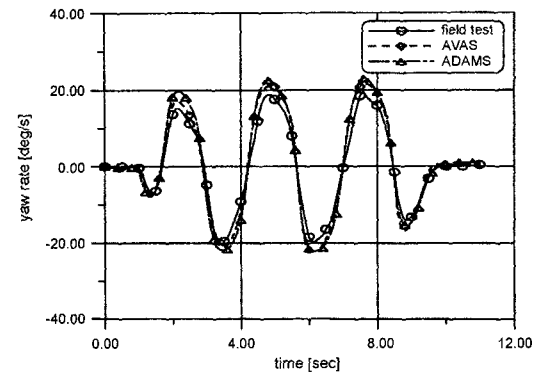
본 연구에서 사용하는 반능동 현가시스템은



(a) Lateral acceleration



(b) Roll angle



(c) Yaw rate

Fig. 5 Validation between simulation and experiments

진술한 바와 같이 가변형 HS-SH형 댐퍼를 사용한다. ECU에서는 차량에 장착된 각종 센서(조향 센서, 가속도 센서, 브레이크 센서, 엔진 회전

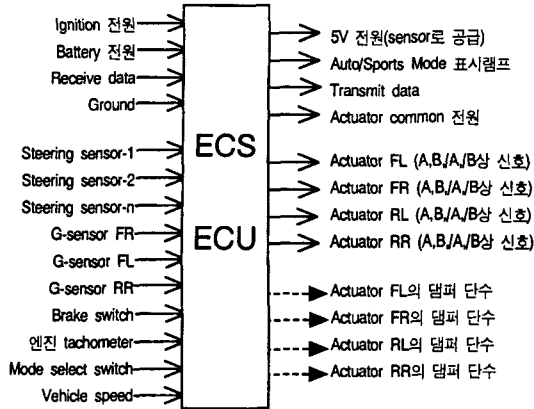


Fig. 6 I/O signals of ECS ECU

속도 센서, 차량 속도 센서 등)를 통해 차량의 주행 운동 특성 정보를 받아 댐퍼 위에 설치된 스택 모터를 제어하여 단수를 조정한다. 따라서 차량모 델과 외부 하드웨어인 ECU 및 스택 모터를 연결하는 인터페이스 시스템은 실제 차량에 설치되어 있는 것과 동일한 전자기적 환경을 구축하여야 하며 이상적으로는 외부 하드웨어(ECU 및 스택 모터)가 실제 차량에 장착되어 있는 것과 실험실 내에 설치되어 있는 것을 구별할 수 없어야 한다. Fig. 6에는 ECU 입력 및 출력 신호를 도시하였다.

4. 실시간 시뮬레이션 수행

HIL 시뮬레이션 시스템은 각 개발 단계에서 개발하고자 하는 전자제어 시스템이 각종 요구 조건을 만족하는지 여부를 평가할 수 있는 유용한 도구이다. 이 시스템을 이용한 평가 방법으로는 개회로 시험방법(open-loop test, ECU input swing test)과 폐회로 시험방법(closed-loop test, ECU-in-the-loop test)으로 나눌 수 있다. 개회로 시험방법은 실시간 시뮬레이션 컴퓨터 내에서 차량 동역학 모델을 사용하지 않고 특정한 형태를 가진 일련의 입력을 센서 에뮬레이션 모듈을 통하여 직접 생성하여 외부 입출력 보드에 공급하고 ECU에서는 이 신호를 받아 동작하면서 ECU 제어 특성을 평가하는 방법이다. 이때 생성되는 일

련의 센서 신호는 차량의 운동 특성에 기초로 하여 만들어지며 이와 같은 시험 하에서는 차량의 응답을 고려하지 않고 정해진 센서 신호에 대한 ECU의 동작을 평가하고 보완하기 위하여 사용된다. 폐회로 시험방법은 실시간 시뮬레이션 컴퓨터 상에서 운전자의 운전조건에 따라 차량 동역학 해석 프로그램을 풀어 얻은 차량의 운동 특성을 각 센서 특성에 맞추어 ECU에 입력하고 ECU를 동작시킨 후 결과를 다시 차량 동역학 해석 프로그램에 입력하는 방법이다. 이 방법의 장점은 수치적으로 모델링된 차량모델과 실제 하드웨어인 ECU 및 부품 등을 통합하여 유기적으로 운영될 수 있도록 구성하는 것으로 실제 차량 주행시험과 동일한 시험 환경을 구축할 수 있다. 이때 조향조건, 노면조건, 구동조건, 제동조건, 바람 등 외부 환경 조건 등과 같은 다양한 형태의 주행조건을 모듈로 구축하여 적절하게 활용할 수 있으며 다물체 동역학 이론에 기초한 차량 모델을 사용하는 경우 현가, 조향 시스템 등의 연결점 정보(hard point)의 변경에 따른 영향을 시뮬레이션해 볼 수 있다.

본 논문에서는 주로 개회로 시험방법에 대한 시뮬레이션 내용을 기술하였으며 일부 폐회로 시험방법에 의한 평가방법을 기술하였다.

4.1 개회로 시험방법(ECU input swing test)

본 논문에서는 반능동 현가시스템의 다양한 개회로 시험방법 중 대표적으로 가속시험, 감속 시험, 조향입력시험 내용에 대하여 기술하였다. 개회로 시험방법은 차량 동역학 모델을 사용하지 않고 차량의 운동 특성에 기초하여 생성한 일련의 입력을 센서 에뮬레이션 모듈을 통하여 직접 외부 입출력 보드에 공급하고 ECU에서는 이 신호를 받아 동작하면서 ECU 제어 특성을 평가하는 방법이다.

4.1.1 가속시험

Fig. 7에는 정지상태에서 가속하여 속도를 20

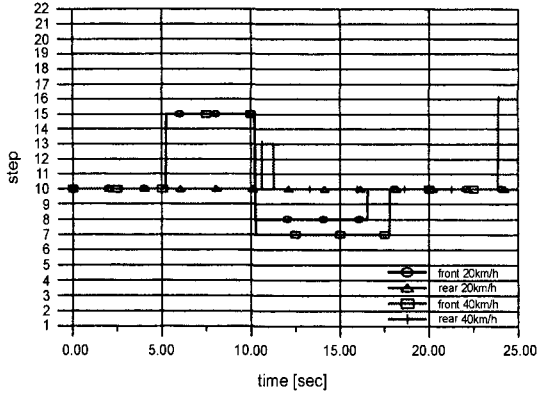


Fig. 7 Motor steps at auto mode (acceleration)

km/h와 40km/h로 증가시킨 경우 ECU의 제어로 직에 의해 결정되는 댐퍼단수를 도기한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 5초 이후에 전륜은 HS (15단), 후륜은 SS(10단) 경향을 유지하여 앞쪽이 들리는 현상을 방지하는 제어가 이루어지고 있으며 속도의 크기가 클수록 단수 변화가 큼을 알 수 있다.

4.1.2 감속시험

Fig. 8에는 40km/h의 속도로 주행중 급격히 제동을 한 경우의 댐퍼 단수를 도기한 것으로 auto 모드인 경우 SS(10단) 경향을 그대로 유지하며 변동이 없다. 이것은 전륜 쪽을 hard하게 하여 피치 운동을 줄일 수 있으나 운전자에게 충격을 줄 수 있어 hard하게 제어하지 않음을 나타낸 것이다.

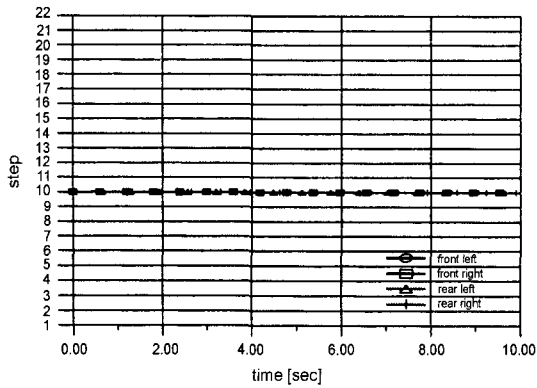


Fig. 8 Motor steps at auto mode (braking)

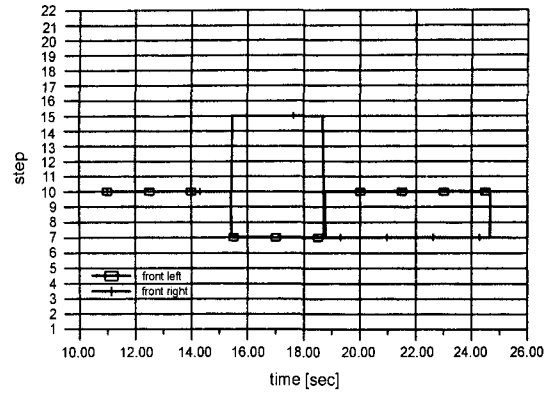


Fig. 9 Motor steps at auto mode (steering)

4.1.3 조향입력시험

Fig. 9에는 40km/h의 속도로 주행하고 있는 차량에 15초에서 18초 사이에 우측으로 45°의 조향을 실시한 결과 댐퍼의 단수 변화를 도기한 것으로 좌측 댐퍼는 SH(7단) 경향을 우측 댐퍼는 HS (15단) 경향을 나타내어 조향시뮬 제어가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 개회로 시험방법을 더욱 세분화하여 다양한 시험을 실시함으로써 ECU 제어로직 특성을 파악할 수 있다. 이 경우 각 주행시나리오에 대하여 자동적으로 시험을 수행할 수 있도록 시스템을 설정할 수 있으며 제어로직 개선 및 평가에 크게 도움이 될 수 있다.

4.2 폐회로 시험방법 (Hardware-in-the-loop test)

4.2.1 폐회로 시험

폐회로 시험은 Fig. 3에 도기한 바와 같이 실시간 차량 동역학 해석 프로그램을 탑재하고 있는 시뮬레이션 컴퓨터, 외부 하드웨어와의 신호 전달을 위한 인터페이스 시스템, 외부 하드웨어인 반응동 현가시스템 ECU 및 스텝 모터, 모터의 단수 측정을 위한 위치센서 등을 상호 유기적으로 연결시켜 반응동 현가시스템을 평가할 수 있는 방법이다. 이 방법은 실시간 시뮬레이션 컴퓨터 상에서 운전자의 운전조건에 따라 차량 동

역학 해석 프로그램을 풀어 얻은 차량의 운동 특성을 각 센서 특성에 맞추어 ECU에 입력하고 ECU를 동작시킨 후 이 신호를 다시 차량 동역학 해석 프로그램에 입력하여 차량운동을 계산한다. 따라서 실제 차량이 주행하는 것과 동일한 연속차량 운동과 ECU의 동작을 구현할 수 있으며 시스템의 작동 흐름은 다음과 같다. 먼저 차량동역학 모델에서 노면조건, 구동조건, 제동조건, 조향조건, 외부 외란조건 등을 이용하여 차량의 주행 특성을 해석한다. 이 해석한 자료를 토대로 반응동 현가장치 제어기(ECU)에서 필요로 하는 신호를 센서 에뮬레이션 모듈을 이용하여 생성하고 이 신호를 D/A 변환기, 디지털 신호 출력기를 이용하여 ECU에 전달한다. ECU에서는 입력된 각종 센서 신호를 토대로 자신이 가지고 있는 제어 로직을 이용하여 조종안정성과 승차감을 향상시킬 수 있도록 차량에 장착된 4개의 가변형 댐퍼의 절환단수를 결정한다. 이 신호는 스텝 모터에 전달되고 모터는 자체의 동특성에 따라 지정한 단수로 이동한다. 이때 이동된 단수는 회전위치를 검출할 수 있는 4개의 위치 센서를 이용하여 측정하며 이 위치정보가 A/D 변환기를 통하여 작동기 에뮬레이션 모듈로 입력된다. 입력된 4개의 단수에 따라 작동기 에뮬레이션 모듈에서는 가변 댐퍼의 각 단수에서 발생하는 작용력을 계산한다. 이 작용력은 차량 동역학 해석 모델에 입력되어 다음 순간의 차량 주행특성을 해석하며 이 해석결과는 각 센서 신호로 형성되어 다시 ECU로 전달되는 과정을 반복하여 반응동 현가장치가 장착된 차량에서의 각종 주행조건에 따른 차량 동역학 시뮬레이션을 수행한다. 이에 따라 하드웨어로 구성된 ECU와 스텝 모터는 마치 차량에 탑재되어 있는 것과 동일한 상태에서 자신이 가지고 있는 제어 로직과 모터 특성에 따라 차량의 운동을 제어하게 된다.

따라서 실험실 내에서 다양한 운전조건과 각 변수의 세밀한 변동에 따른 ECU의 동작특성 평가, 오동작 검증 등을 통하여 반응동 현가시스템을 평가할 수 있으며 위험성으로 인하여 실차시

험에서는 실시할 수 없는 극한 시험 환경 설정이 가능하여 다양한 평가가 가능하다.

4.2.2 승차감 시험

본 논문에서는 폐회로 시험방법 중 임의의 랜덤 노면을 주행하는 경우의 주행 시뮬레이션을 실시하여 반응동 현가시스템 장착차량의 승차감 특성에 대한 평가결과를 기술하였다. 시뮬레이션에 사용한 랜덤 노면은 좌우 불규칙 노면형상 생성 프로그램을 이용하여 생성하였으며, ISO 거칠기 64 노면을 이용하였다. 시뮬레이션 조건은 반응동 현가시스템이 장착된 차량을 시속 80 km/h의 속도로 15초 동안 주행시킨 후 차체 CG 점의 수직 방향 가속도 PSD(power spectral density)를 계산하였다. Fig. 10에는 결과 PSD를 도시하였으며 Fig. 11에는 반응동 현가시스템의 설정모드를 auto 모드와 sport 모드로 설정하는 경우 각 댐퍼에서의 단수 절환 상태를 나타낸 것이다. 이 반응동 현가시스템은 조종안정성 향상을 목표로 하고 있는 sport 모드의 경우 passive 차량에 비해 중주파수(3-8Hz) 영역에서 높게 나타나고 있으며 승차감 향상을 목표로 하는 auto 모드인 경우 passive 차량에 비해 PSD값이 다소 감소하는 특성을 나타내고 있다. 따라서 이와 같은 HIL 시뮬레이션 시스템을 이용하면 동일한 주행 조건 입력 시 제어 이득 등 각종 파라미터의 세밀한 변경에 의한 특성 검토나 동일 파라미터에 의해 다양한 주행조건 하에서의 특성평가가 가능

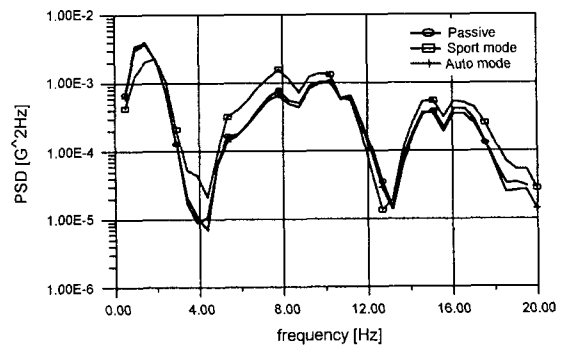
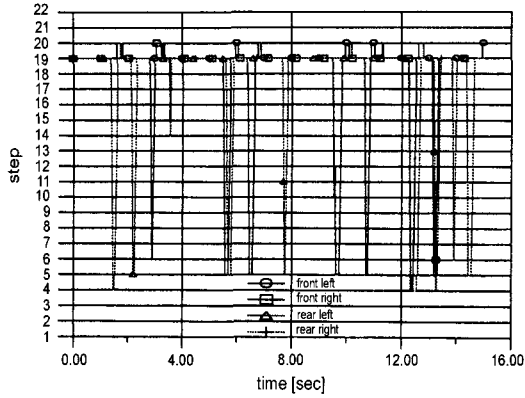
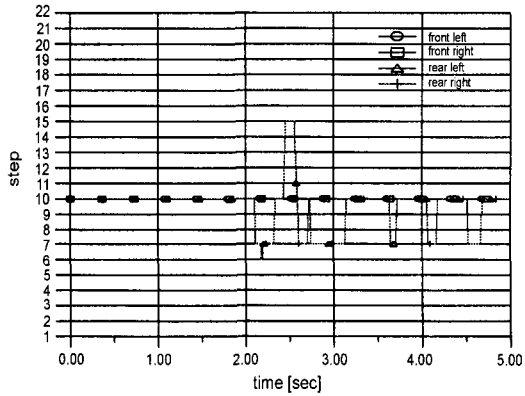


Fig. 10 PSD of vertical acceleration at chassis CG



(a) Motor steps at sport mode



(b) Motor steps at auto mode

Fig. 11 Response of semi-active suspension system

하여 최적의 제어로직 개발에 활용될 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 반능동 현가시스템의 특성 평가를 위한 실시간 HIL 시뮬레이션 시스템의 개발과 적용 방법에 대해 기술하였다.

다물체 차량 동역학 이론에 기초한 실시간 차량 동역학 해석 프로그램을 이용하여 전체 차량의 운동을 정확하게 재현할 수 있는 차량모델을 적용하였으며 외부 하드웨어로 반능동 현가시스템의 제어기(ECU)와 가변 댐퍼 구동용 스텝모터를 설치하여 좀더 실제에 근접한 시스템을 개발하였다. 또한 ECU 센서 신호를 생성하고 전

달할 수 있는 센서 에뮬레이션 모듈과 하드웨어 인터페이스 모듈을 구축하여 전체 실시간 HIL 시뮬레이션 시스템을 구성하였으며 이 시스템을 이용하여 반능동 현가시스템 개발을 위한 개회로 시험방법과 폐회로 시험방법 등을 제시하였다. 이와 같은 실시간 HIL 시뮬레이션 시스템은 하드웨어로 설치된 각종 ECU 및 부품들이 마치 차량에 탑재되어 작동하고 있는 것과 동일한 환경을 조성하여 실험실 내에서 다양하고 안전한 실험을 실시할 수 있어 각종 차량 전자제어 시스템의 제어로직 개발에 이용될 수 있으며, 또한 개발목표로 삼은 특정 제어기의 알 수 없는 제어로직을 각종 센서 입력 신호의 체계적인 조정과 변경을 통하여 추정해 볼 수 있다.

본 논문에서 제시한 실시간 다물체 차량 동역학 프로그램에 기초한 HIL 시뮬레이션 시스템은 기존의 단순 차량모델과 ECU만을 사용한 HIL 시뮬레이션 시스템에 비하여 실제시스템 작동상황을 좀더 정확하게 재현할 수 있어 각종 차량 전자제어 시스템 개발에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 1) H. Hanselmann, "Hardware-in-the-Loop Simulation as a Standard Approach for Development, Customization, and Production Test," SAE 930207, 1993.
- 2) F. H. Besinger, D. Cebon, D. J. Cole, "Force Control of a Semi-Active Damper," Vehicle System Dynamics, Vol.24, pp.695-723, 1995.
- 3) S. H. Hwang, S. J. Heo, K. Park, "Design and Evaluation of Semi-Active Suspension Control Algorithms Using Hardware-in-the-loop Simulations," International Journal of Vehicle Design, Vol.19, No.4, pp.540-551, 1998.
- 4) 류제하, 김호수, "브레이크HILs를 이용한 능동요모멘트 제어알고리즘의 평가," 한국자동차공학회논문집, 제7권 제8호, pp.172-179, 1999.
- 5) J. R. Wagner, J. F. Keane, "A Strategy to Veri-

- fy Chassis Controller Software-Dynamics, Hardware, and Automation," IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Human, Vol.27, No.4, pp.480-493, 1997.
- 6) H. Krohm, V. Gheorghiu, "Hardware-in-the - Loop Simulation for an Electronic Clutch Management System," SAE950420, 1995.
- 7) J. Emura, S. Kakizaki, F. Yamaoka, M. Nakamura, "Development of the Semi-Active Suspension System Based on the Sky-Hook Damper Theory," SAE940863, 1994.
- 8) G. J. Choi, Y. M. Yoo, K. P. Lee, Y. S. Yoon, "A Real-Time Multibody Vehicle Dynamic Analysis Method Using Suspension Composite Joints," International Journal of Vehicle Design, Vol.24, Nos.2/3, pp.259-273, 2000.
- 9) 최규재, 유영면, 조영건, 이광표, 윤용산, "승차감 시뮬레이션을 위한 좌우 불규칙 노면 형상 생성," 자동차공학회논문집, 제7권 제1호, pp.305-311, 1999.