

가상주행시험장(SVPG) 개발: 가상주행시험장의 시스템 구성 및 운영

Development of the SVPG(Sungkyunkwan Univ. Virtual Proving Ground) : System Configuration and Application of the Virtual Proving Ground

서명원*, 구태윤**, 권성진**, 신영수***, 조기용**, 박대유**
Myungwon Suh, Taeyun Koo, Seongjin Kwon, Youngsu Shin, Kiyong Cho, Daeyu Park

ABSTRACT

By using modeling and simulation, today's design engineers are simultaneously reducing time to market and decreasing the cost of development, while increasing the quality and reliability of their products. A driving simulator is the best example of this method and allows virtual designs of control systems, electronic systems, mechanical systems and hydraulic systems of a vehicle to be evaluated before costly prototyping. The objective of this paper is to develop the virtual proving ground using a driving simulator and to show its capabilities of an automotive system development tool. For this purpose, including a real-time vehicle dynamics analysis system, the PC-based driving simulator and the virtual proving ground are developed by using VR(Virtual Reality) techniques. Also ABS HIL(Hardware-In-the-Loop) simulation is performed successfully.

주요기술용어 : Driving simulator(주행 시뮬레이터), HILS(Hardware-In-the Loop Simulation), MILS(Man-In-the-Loop Simulation), Vehicle dynamics(차량 동역학), Virtual reality(가상현실), SVPG(Sungkyunkwan Univ. Virtual Proving Ground, 성균관대학교 가상주행시험장)

1. 서론

최근의 차세대 자동차 개발에서는 첨단 차량 제어 시스템(Advanced Vehicle Control System) 및 지능형 교통 시스템(Intelligent Transportation System) 등과 같이 차량에 전자, 통신, 센서, 제어 장치 등을 개발하여 장착하는 연구가 활발히 진행

되고 있다. 이와 같은 전기, 전자 제어 모듈을 적용한 차량은 개념설계, 상세설계, 시제품설계, 실차시험, 양산으로 이어지는 순차적 개발과정을 통하여 개발되며, 이 과정에서 시작차 제작 및 시험 운전자에 의한 실차 주행시험과 이를 통해 파악된 문제점에 따른 설계변경, 시작차 재제작 등을 거치면서 많은 시간과 비용이 필요하게 된다. 이에 차량의 개발 계획 단계에서부터 기계적인 성능과 전자 제어 모듈의 성능을 동시에 고려한 설계를 구현하고, 운전자와 차량의 상호작용이 고려될 수 있는 설계방법이 요구되어 진다.

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

** 회원, 성균관대학교 대학원

*** 회원, 현대기아자동차 연구개발본부

본 연구에서 개발하는 주행 시뮬레이터(Driving Simulator) 및 가상주행시험장(Virtual Proving Ground, VPG)은 이러한 문제를 해결 할 수 있는 종합적인 차량 개발 도구이다. 운전자의 운전 조작을 입력받은 주행 시뮬레이터는 차량의 동역학적 거동을 실시간으로 해석한 후, 그 결과를 가상현실(Virtual Reality, VR)을 이용한 3차원 그래픽 영상 및 적절한 오디오 효과음으로 운전자에게 피드백 시킴으로써 MILS(Man-In-the-Loop Simulation)를 구현한다. 또한 실제 하드웨어 및 전자 제어 모듈을 시뮬레이션 과정에 직접 포함해 HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation)를 구현하는 기능을 갖고 있다. 현재 자동차 선진국인 미국, 일본 등에서는 다양한 성능과 규모를 갖는 주행 시뮬레이터¹⁻³⁾가 개발되어 신차 개발에 활용되고 있으나, 전자 제어 모듈 개발에 활용하여 신차 개발의 경제성과 효율성을 확대하는 연구는 미진한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 실시간 주행 시뮬레이터를 개발하고 이를 가상주행시험장에 응용함으로써, 향후 신차 개발의 기간을 단축하고 개발비의 경제성을 확보하여 국내의 시장에서 경쟁력을 갖춘 신차 개발의 기반을 마련하고자 한다.

2. 주행 시뮬레이터 개발

2.1 주행 시뮬레이터 구성

본 연구에서 개발한 주행 시뮬레이터의 전체 구성은 Fig. 1과 같이 크게 소프트웨어부와 하드웨어부로 나누어진다. 실제 차량의 운전석에서 운전 조작을 입력받는 실시간 차량 시뮬레이션 시스템은 차량의 수학적 모델을 토대로 동역학적 거동을 해석하며 또한 관심있는 하드웨어 및 제어장치들의 HILS를 구현한다. 이와 동시에 Ethernet을 통해 시각 및 음향 시스템과 Host PC로 시뮬레이션 결과 값을 전달하게 된다. 시각 및 음향 시스템은 운전자에게 운전 현실감을 제공하며, Host PC에서는 차량의 속도와 RPM 등의 정보를 표시함으로써 MILS를 구현한다.

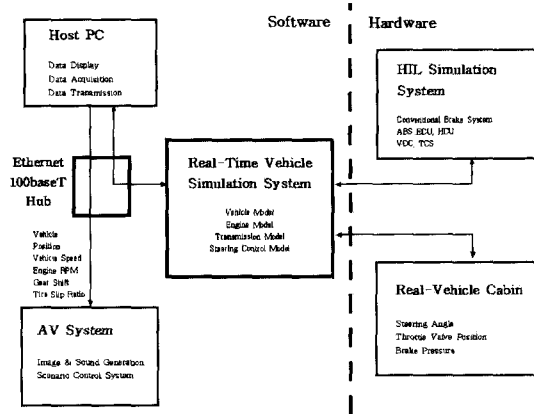


Fig. 1 Vehicle simulator overview

2.2 주행 시뮬레이터의 작동원리

주행 시뮬레이터는 VR 기술을 이용한 3차원 공간의 가상주행시험장에서 시뮬레이션이 수행된다. 이 때, Fig. 2와 같이 운전자의 가속페달 조작에 따른 쓰로틀 개도와 핸들 조향각, 브레이크 조작 압력이 센서에 의해 검출되며, 이 값들은 실시간 차량 시뮬레이션 시스템의 A/D 변환기를 통해 차량 모델에 입력된다.

차량 모델은 쓰로틀 개도를 엔진 모델에 입력하여 엔진 토크의 변화를 연산하고, 핸들 조향각

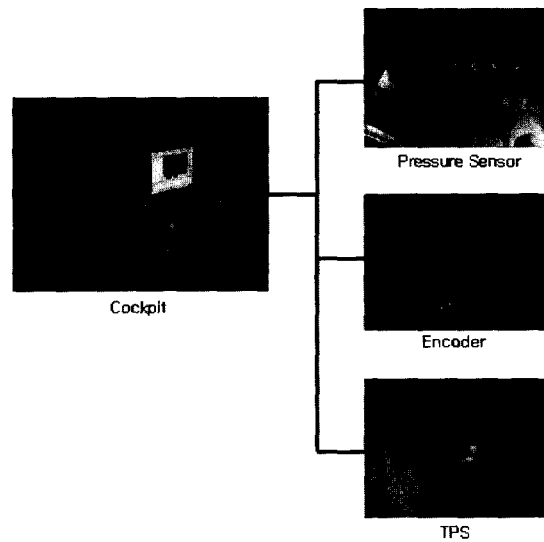


Fig. 2 Sensor composition

은 차량 모델에 입력되어 차량의 선회 거동을 연산한다. 또한, 브레이크 페달 조작에 따른 브레이크 압력은 차량 모델의 차륜 동역학 모델에 입력되어 주행중인 차량의 각 차륜에 가해진 제동토크를 연산함으로써 차량 동역학 해석을 수행하게 된다. 차량 동역학 해석 결과는 시각 및 음향 시스템과 운전자 정보제공을 위한 Host PC로 실시간 전송되어 운전자에게 적절한 시각 및 음향 효과로 피드백 된다.

2.3 실시간 차량 동역학 해석

Fig. 3과 같이 운전자의 운전 조작이 센서를 통해 동력전달계 모델에 입력되면 견인토크 값이 계산되어지며, 타이어 모델을 토대로 각 타이어에 발생하는 타이어 힘이 계산되어 차륜 동역학 해석이 이루어지게 된다. 차량 동역학 해석부에서는 이를 근거로 전체 차량의 종방향 힘의 성분과 횡방향 힘의 성분을 계산하여 차량의 주행 결과를 출력하게 된다.

본 연구에서는 해석의 신속성을 위해 최소한의 자유도만을 가지는 차량 모델을 사용하였다. 이를 위해 김태기⁵⁾에 의해 개발된 종방향, 횡방향, 차량 수직축 방향 회전운동, 차량 종축 방향 회전운동 및 각 차륜의 회전운동에 대한 8자유도 차량 동역학 모델을 참고하고, 동력전달계 모델

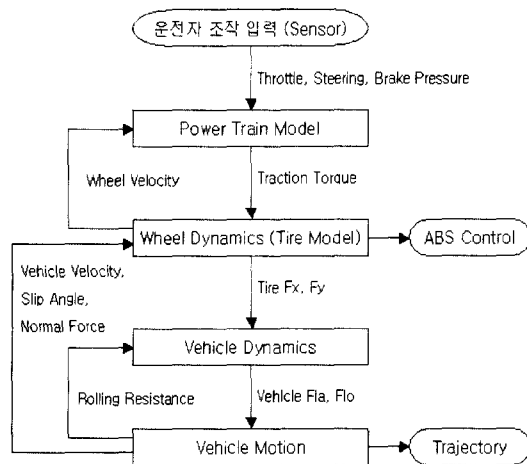


Fig. 3 The flow chart of vehicle simulation program

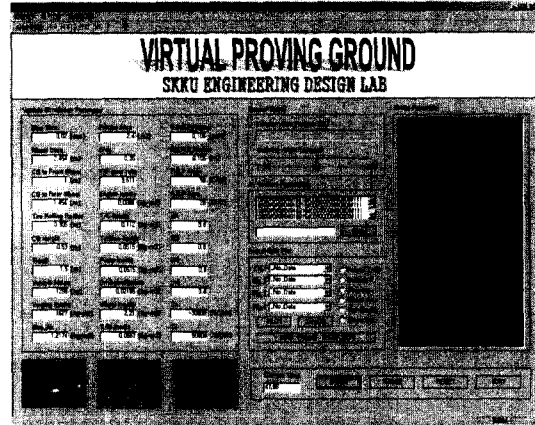


Fig. 4 Real-time vehicle simulation program

을 추가하여 구성하였다. 차량의 비선형성을 증가시키는 가장 큰 요인 중 하나인 타이어 모델은 Pacejka⁶⁾에 의해 제안된 모델을 사용하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 Microsoft Visual C++ 6.0으로 개발된 실시간 차량 시뮬레이션 시스템의 메인 컨트롤 화면이다. 그리고 하드웨어와의 인터페이스를 위하여 실시간 차량 시뮬레이션 시스템에 PCI방식의 12채널 A/D보드 및 8채널 D/A 보드를 장착하였다.

3. 시각 및 음향 시스템 개발

3.1 시각 시스템 개발

주행 시뮬레이터에서 운전자는 시각과 청각을 통해 주행 상황 및 환경을 인지하므로 운전자의 현실적인 반응을 유도하기 위해서 VR 기법을 이용한 주행 영상 및 효과음을 현실감 있게 재현하였다. Fig. 5는 본 연구에서 개발한 시각 및 음향 시스템의 구성도를 나타낸다.

시각 시스템은 3차원 지형지물 데이터 베이스와 3채널 화면 분할 및 시점 자동 이동 구현 프로그램으로 구성되어진다. 지형지물 데이터 베이스는 컴퓨터 그래픽 툴을 이용하여 VRML(Virtual Reality Modeling Language) 형식으로 구성하였으며, 3채널 화면분할 및 시점 자동 이동 구현 프로그램은 Vtree 및 Multivis 그래픽 라이브러리를

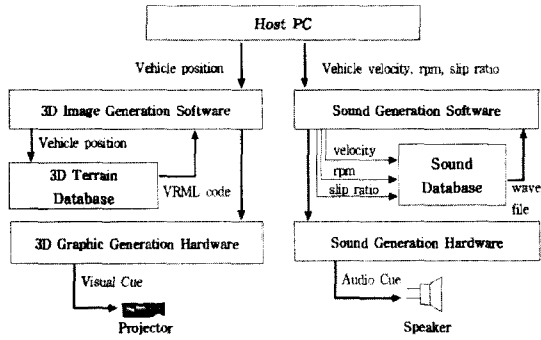


Fig. 5 The functional block diagram of AV system

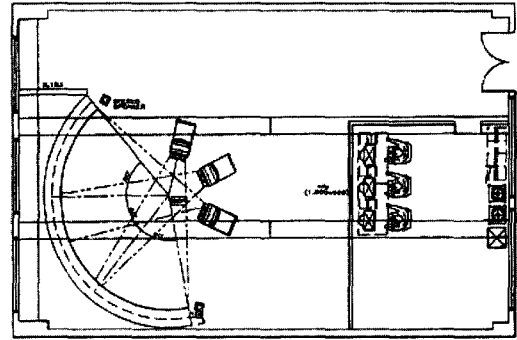


Fig. 8 3-channel visual image projection system



Fig. 6 3-channel visual image generation system

이용하여 Fig. 6과 같이 구성하였다.

Fig. 7은 본 연구에서 구축한 SVPG의 모습으로 중앙에 제동 시험을 위한 주행 시험로가 위치하고 있으며, 이 주위에는 차량의 가속 성능 및 선회

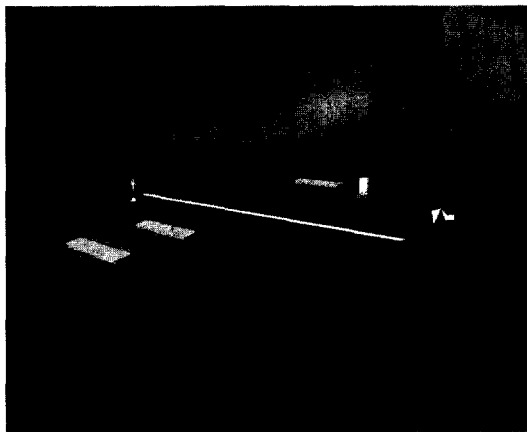


Fig. 7 Sungkyunkwan univ. virtual proving ground

성능 시뮬레이션을 구현할 수 있도록 실제 차량 종합 주행시험장의 고속주회로를 모사하였다.

시각 이미지의 투사는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 운전자로부터 수평거리 3.65미터 지점에 Spherical 스크린을 설치하고 Barco사의 808s 프로젝터 3대로 투사하여 좌우 150°, 상하 40°의 가시영역을 확보하였다.

3.2 음향 시스템 개발

음향 시스템은 음원 데이터 베이스와 음향재생 프로그램으로 구성되어진다.

차량의 엔진음과 타이어 슬립음은 실제 차량의 음원을 디지털 녹음하여 채집하였으며, 상용 음원 편집 프로그램인 Sound Forge 4.0을 사용하여 노이즈 제거 및 반복재생을 위한 구간선택 작업을 진행하였다. 음향재생 프로그램은 실시간 차량 시뮬레이션 시스템에서의 엔진회전수와 슬립률의 데이터를 전달받아 실시간으로 음향 효과를 재생한다. 본 연구에서 개발한 음향 재생 프로그램은 DirectX의 Direct Sound 라이브러리를 이용하여 시간지연이 없는 사운드 재생을 구현하였으며, 엔진회전수 변화에 따라 음원 샘플의 주파수를 변조하여 재생함으로써 효과음의 연속성을 확보하였다. 이에 따라 6,000rpm에서는 44,100 Hz가, 공회전시인 800rpm에서는 5,880Hz로 재생되게 된다.

타이어 슬립음은 일정 슬립 조건이 되면 슬립음을 재생하도록 프로그래밍 하였으며, 스테레

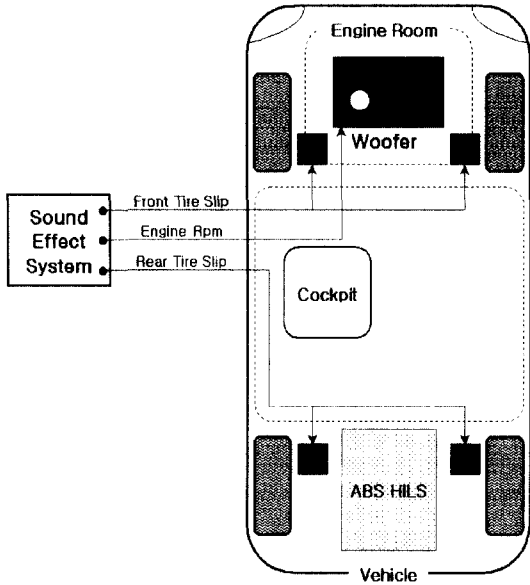


Fig. 9 Sound system layout

오 사운드 재생 기능을 프로그래밍 하여 Fig. 9와 같이 차량의 각 차륜 위치에 총 4대의 스피커를 설치하고, 특정 차륜의 슬립 발생시 위치에 맞는 슬립음을 재현하도록 하였다. 엔진음 재생을 위해 별도의 우퍼스피커를 엔진룸 내에 설치함으로써 음향 효과의 극대화를 도모하였다.

3.3 네트워크 시스템 개발

주행 시뮬레이터는 운전자의 운전조작에 따른 차량 동역학 해석을 수행하고 주행 결과를 시각 및 음향 시스템을 통해 운전자에게 피드백 시켜주게 된다. 이와 같이 차량 시뮬레이션 시스템과 시각 및 음향 시스템은 시스템간의 시간지연 없이 동기화 되어야 한다.

본 연구에서는 시스템간의 Ethernet을 통해 네트워크를 구축하고 TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 통신 소켓 프로그래밍을 통해 전체 시스템의 동기화 및 실시간성을 확보하였다. 실시간 차량 시뮬레이션 시스템은 차량 동역학 해석을 500Hz로 수행하며, 시각 및 음향 시스템으로는 50Hz 간격으로 데이터를 전송한다.

4. ABS HIL 구성

본 연구에서는 HIL 시뮬레이션 적용 예로 ABS (Anti-lock Brake System) 시스템을 HILS로 구성하였다. 주행 시뮬레이터의 브레이크 시스템은 운전자의 페달 조작에 따라 1차적으로 페달비에 의한 답력이 형성되고, 2차적으로 엔진 흡기 시스템의 부압을 이용한 부스터의 배력과정을 거쳐 형성된 유압이 각 차륜에 장착된 캘리퍼에서 실제적인 제동토크를 발생시킨다. 그러나 본 시뮬레이터에서는 엔진을 탈거한 상태이기 때문에 부스터의 배력과정을 조성하기 위해 별도의 진공펌프를 설치하였다. 또한 브레이크 파이프라인, 캘리퍼 등은 실제 중형차량의 전, 후륜 사양을 그대로 사용하였으며, HCU(Hydraulic Control Unit)는 sol-sol 방식의 Bosch사 유압장치를 사용하였다.

본 연구에서는 ABS 제어 방식을 슬립율 기준 Select High-Low 방식 제어 로직을 택하여 이를 실시간 차량 시뮬레이션 시스템의 차륜 동역학 모델에 적용하였다. Select High-Low 방식은 전륜을 마찰력이 높은 차륜의 브레이크력을 기준으로, 후륜을 마찰력이 낮은 차륜의 브레이크력을 기준으로 제어하는 방식이다.

실시간 차량 시뮬레이션 프로그램의 차륜 동역학 해석부에서는 차량의 제동시 계산되어지는 차륜의 슬립율에 따라 ABS HCU의 솔레노이드 밸브를 D/A 변환기를 통해 직접 제어하여 제동 압력의 증압, 유지, 감압 모드를 구현하였다.

5. 가상주행시험장 적용 예

5.1 주행 시나리오

본 연구에서 개발된 주행 시뮬레이터와 가상주행시험장인 SVPG를 이용하여 가속, 선회, 차선변경, 제동 성능 시험을 수행하기 위해 Fig. 10과 같은 주행 시나리오를 구성하였다. Fig. 10에서 ①은 가속 성능 시험, ②는 선회 성능 시험, ③은 차선변경 성능 시험, ④는 제동 성능 시험을 하기 위한 주행로를 나타낸다.

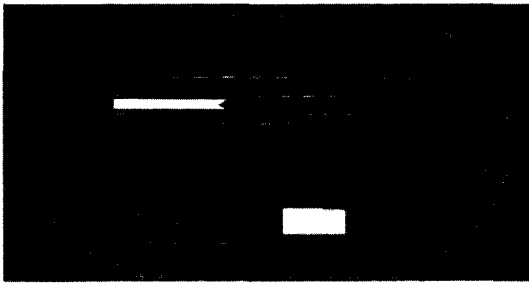


Fig. 10 Driving test scenario



Fig. 11 SVPG using a driving simulator

Fig. 11은 가상주행시험장에서의 주행 시뮬레이터 작동 모습이며, 시험 주행로의 전구간을 마찰계수 0.8인 아스팔트 노면으로 설정하였다.

5.2 가속 성능 시험

시뮬레이션 시작과 동시에 시작되는 직선 주행로에서 운전자의 가속 페달 작동을 통해 차량의 속도를 0KPH에서 80KPH까지 높였다. 이때 시뮬레이터에 탑승한 운전자의 가속 페달 작동에 따른 쓰로틀 개도와 이에 따른 엔진 토크, 차량 속도, 차량의 종방향 가속도의 성분을 Fig. 12에 나타내었다.

5.3 선회 성능 시험

직선 주행로에서의 가속 성능 시험을 마치면 SVPG에서의 곡선 주행로에 진입하여 주행 시뮬레이터에 탑승한 운전자는 핸들을 조작하여 차

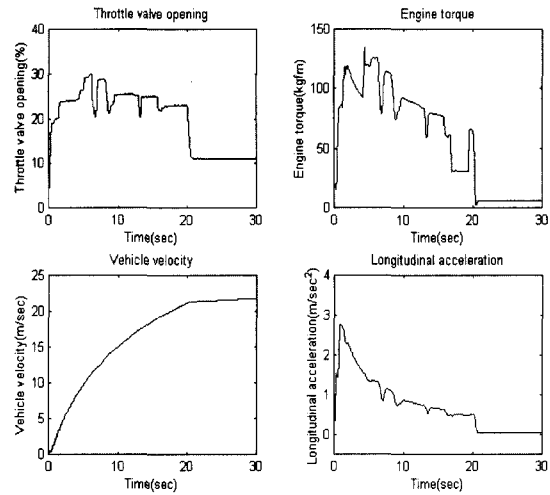


Fig. 12 The simulation result of acceleration

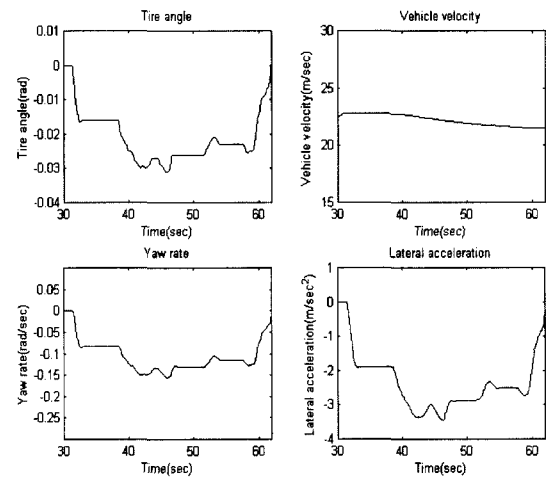


Fig. 13 The simulation result of turning

량은 선회를 하게 된다. Fig. 13은 차량의 선회 시험 결과로 조향 입력각과 차량에 발생한 요율(Yaw rate), 횡방향 가속도, 선회시의 차량 속도 변화를 나타낸다. 조향 입력은 선회로가 차량 진행방향의 왼쪽으로 꺾여 있으므로 (-)각도로 나타나고 있으며, 이에 따른 횡방향 가속도는 차량의 선회 반경 중심에서 바깥쪽 방향을 향하므로 역시 (-)부호를 나타내게 된다. 또한 차량의 선회에 따라 타이어의 횡방향 힘의 성분이 나타나므로 차량 속도는 감소하게 된다.

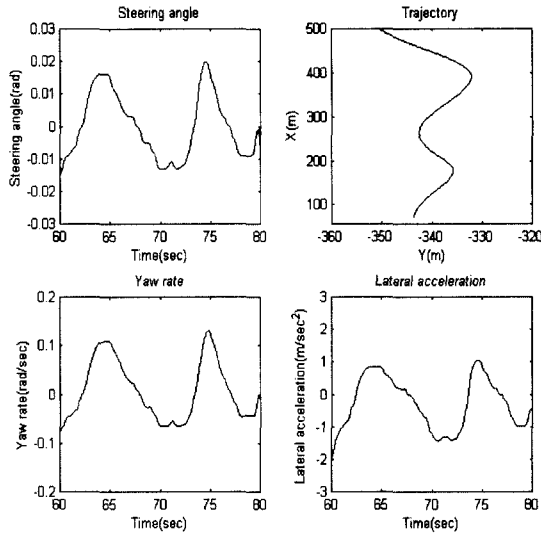


Fig. 14 The simulation result of slalom

5.4 차선변경 성능 시험

SVPG에서의 곡선 주행로가 끝나면 다시 직선 주행로에 들어서며, 이 구간에서는 차량의 조향 특성을 평가하기 위하여 실차시험에서 사용하는 시험기법인 슬라롬(Slalom) 주행을 모사하여, 조향 입력에 따른 요 모멘트의 변화를 분석하였다. Fig. 14는 조향 입력값과 이에 따른 횡방향 가속도, 요율 및 차량 이동 궤적으로 차량의 차선변경 특성을 나타낸다.

5.5 제동 성능 시험

실제 ABS와 연결된 HIL 시뮬레이션 기법을 사용하여 제동 성능 시험을 실시하였다.

Fig. 15는 제동시 차량의 속도와 차륜의 속도를 나타낸 것으로 좌, 우 차륜의 노면 마찰계수가 동일하여 전륜 좌측 휠과 후륜 우측 휠의 결과만을 나타내었다. 제동은 103.55초에 시작되었으며 차량 정지는 108.4초로 제동에 소요된 시간은 4.85초이다. 결과에서 나타나듯이 ABS는 차륜의 잠김현상(Locking)을 방지하기 위하여 브레이크 압력을 감압, 유지, 가압의 방법으로 컨트롤하여 차륜의 속도를 차속의 속도와 일정비율로 유지함을 알 수 있다.

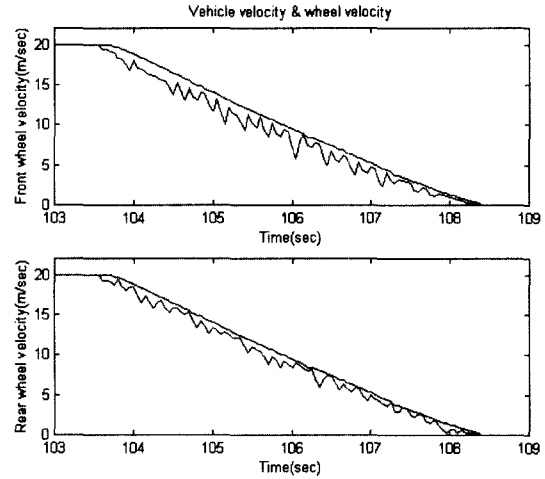


Fig. 15 The simulation result of ABS braking

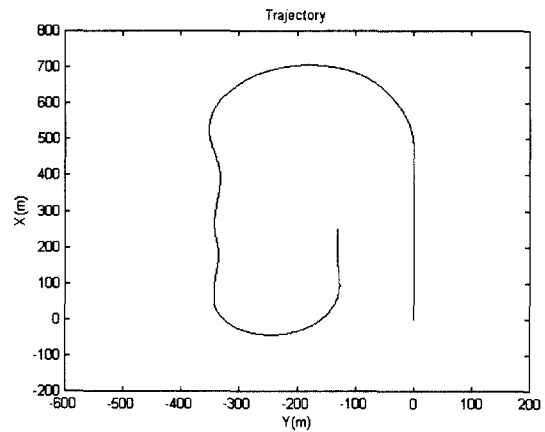


Fig. 16 Vehicle trajectory

Fig. 16은 가상주행시험로에서 주행 시나리오에 따른 시뮬레이션 결과로 차량의 운동 궤적을 나타낸다. 결과에서와 같이 차량은 가속, 선회, 차선변경 시험로를 거쳐 ABS 제동로에서 안정적으로 정지함을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 PC를 이용하여 저렴한 개발비용으로 차량 주행 시뮬레이터 및 가상주행시험장을 개발하였다. 이를 위해 차량의 수학적 모델을 구성하여 실시간 차량 시뮬레이션 시스템과

시각 및 음향 시스템을 개발하였고, PC간 네트워크 시스템을 구성하여 각 시스템을 동기화 함으로써 전체 시스템의 실시간성을 확보하였다. 이를 이용하여 차량 거동 해석에서 운전자를 고려한 MILS를 실시하였으며, 개발된 시뮬레이터를 실제 ABS와 연결하여 HIL 시뮬레이션을 실시함으로써 ABS 장착차량의 제동성능 해석이 가능하였다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 최근 PC 성능의 급격한 발달로 저렴한 비용으로 주행 시뮬레이터를 이용한 가상주행시험장을 개발할 수 있었다.

2) 주행 시뮬레이터를 이용하여 실제 차량의 운전자 임의조작에 의한 차량의 가속, 선회, 차선변경 및 제동 시험 결과를 예측할 수 있었다.

향후 차량 동역학 모델의 자유도를 추가한다면, 보다 다양한 차량성능 시험을 제공할 수 있을 것이다.

3) ABS가 장착된 차량 주행 시뮬레이터에 HILS 기술을 적용하여 실차 시험에서와 유사한 ABS 제어 알고리즘을 개발할 수 있었다.

4) 개발된 주행 시뮬레이터 및 가상주행시험장을 신차 개발에 활용하면 개발비용의 경제성을 확보하고, 개발 기간을 획기적으로 단축시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) J. S. Freeman, G. Watson, Y. E. Papelis, T. C. Lin, A. Tayyab, R. A. Romano, J. G. Kuhl, "The Iowa Driving Simulator : An Implementation and Application Overview," SAE 950174.
- 2) W. Kading, F. Hoffmeyer, "The Advanced Dimler-Benz Driving Simulator," SAE 950175, 1995.
- 3) D. H. Weir, S. M. Bourne, "An Over-view of the DRI Driving Simulator," SAE 950173, 1995.
- 4) J. C. Dixon, "Tires, Suspension and Handling," pp.431-489, SAE, 1996.
- 5) 김태기, "VDC 장착 차량의 거동 특성에 관한 연구," 성균관대학교 석사학위 논문, pp. 15-32, 1997.
- 6) E. Bakker, H. B. Pacejka, L. Lidner, "A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies," SAE 890087, 1989.
- 7) M. W. Suh, C. S. Seok, Y. J. Kim, J. H. Chung, S. M. Kim, "Hardware-in-the-loop Simulation for ABS," SAE 980244, 1998.
- 8) 이운성, 김정하, 조준희, "실시간 차량 시뮬레이터 개발," 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp.464-469, 1997.
- 9) 조준희, 박경균, 이운성, 김정하, "차량시뮬레이터의 시각 및 음향 시스템 개발," 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp.476-481, 1997.
- 10) D. H. Weir, A. J. Clark, "A Survey of Mid Level Driving Simulators," SAE 950172, 1995.
- 11) R. W. Allen, et. al, "A Low Cost PC Base Driving Simulator for Prototyping and Hardware-in-the-loop Application," SAE 980222, 1998.
- 12) T. D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics," SAE, 1992.
- 13) 여지환, "ABS 장착차량의 제동특성에 관한 연구," 성균관대학교 석사학위 논문, pp.52-55, 1996.
- 14) 신영수, "ABS 장착차량의 주행 시뮬레이터 개발에 관한 연구," 성균관대학교 석사학위 논문, pp.25-36, 1999.
- 15) 서명원, 김태기, 여지환, 석창성, 김영진, 이재천, "ABS차량의 동특성 해석을 위한 차량 모델개발," 한국자동차공학회 논문집, 제7권 제2호, pp.228-241, 1999.
- 16) 이한주, 박윤기, 서명원, "ABS와 TCS를 위한 HIL 시뮬레이터 개발에 대한 연구," 한국정밀공학회지, 제16권 제5호, pp.83-90, 1999.