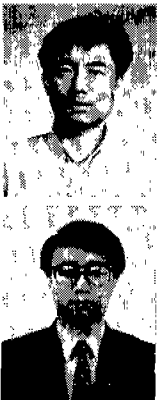


차량 시스템 개발에 있어 실시간 HITL 시뮬레이션의 적용

Application of Real-Time HITL Simulation in Vehicle System Development

김 대 영*, 이 성 철**
D. Y. Kim S. C. Lee



김 대 영
• 1961년 2월생
• 차량동력학, 능동현가설계
• 기아기술센터 차량연구실

이 성 철
• 1953년 10월생
• Structural Dynamics, System Engineering
• 기아기술센터 차량연구실

1. 서 론

기존의 차량 시스템 개발은 개념적 모델(conceptual model)의 구성, 모델링을 통한 수치 해석, 그리고 시제품(prototype) 제작을 통한 실험 평가에 의해 이루어졌다. 과거나 지금이나 시제품 제작을 통한 시스템 설계는 많은 시간과 예산을 필요로 할 뿐 아니라 이 시제품들은 설계 요구 성능이 만족될 때까지 많은 제작, 실험, 평가 단계를 통해 개선되고 개조되어야 했다. 최근 시뮬레이션 컴퓨터(simulation computer)의 하드웨어 및 소프트웨어의 발달은 보다 빠르고 정확한 수치 해석과 신호 처리를 가능케하여 시스템 설계(system design)에 있어서 과거보다 훨씬 현실

적이며, 세부적인 영역에 까지 응용이 가능하게 되었다.

실시간 HITL(Hardware-In-The-Loop) 시뮬레이션은 항공 우주 분야에서 부터 개발되어 최근에는 자동차 개발에도 일부 적용되고 있으며, 개발 초기 단계에서 시스템 하드웨어와 동력학 모델을 신호 처리부를 통해 시뮬레이션하고, 발생될 문제점을 미리 파악하여 대책을 조기 강구함으로써 고부가 가치 차량 시스템의 개발에 있어서 성능 향상과 개발 기간의 단축을 이룩할 수 있다.

본 고에서는 실시간 Hardware-in-the-loop 시뮬레이션의 기술 현황 및 적용 분야를 알아보고, 차량 동력학 분야에 있어서, 실시간 시뮬레이션의 구현을 위해 확보되어야 할 하드웨어 및 소프트웨어 환경에 대한 고찰과 이를 이용한 시스템 설계를 소개하고자 한다.

1.1 기술 개발 현황 및 적용 분야

실시간 시뮬레이션(real time simulation) 기술은 항공 우주 분야, 원자력 발전 분야, 화공플랜트 분야등 사고 발생 위험이 높고, 사고가 발생할 경우 인명 피해가 발생하거나 경제적 피해가 막대한 분야에서 주로 개발되어 각 분야 요원들의 훈련에 폭 넓게 활용되고 있다. 이 기술은 최근 가속화 되고 있는 전자 및 컴퓨터 기술 발전과 더불어 적용 범위가 확대되어 가고 있으며, 최근

자동차 산업에서도 실시간 시뮬레이션 기술이 도입되어 전자화된 고성능 차량 시스템 설계 분야에까지 적용할 수 있는 단계에 이르렀다.

이제까지 차량 샤시 시스템을 설계할 때에는 주로 범용 시스템 동력학 S/W(ADAMS, DADS 등)를 이용하여 실시간이 아닌 차량 시뮬레이션 기술이 활용되었다. 이 설계 과정에서는 주어진 운전 조건에 대한 차량의 거동 해석을 통해 성능 예측과 이에 따른 설계 변경, 개선하는 주로 한정된 기계적인 변수를 조절하는 방식이 사용되어 왔다. 그러나 ABS, TCS, 능동 현가 장치 등 고부가가치의 시스템은 주어진 운전 조건에 대한 차량의 수동적인 거동 뿐만 아니라 신호 처리부를 통한 제어력의 발생과 이에 따른 주행 특성 변화를 감지, 능동적으로 피드백(feedback)하여 차량 거동을 향상시킬 수 있는 설계가 요구된다. 차량 특성의 변화가 동반되기 때문에 이와 같이 고려해야 할 변수가 대폭 증가하고 기술의 난이도가 높아져 차량 설계에 필요한 시간과 투자가 급격히 증가하게 되므로, 실시간 차량 시뮬레이션은 이를 효과적으로 해결하기 위한 수단이 될 수 있다. 한편 초기의 실시간 차량 시뮬레이션 기술은 컴퓨터 상에서의 시뮬레이션만을 주로 처리하였으나 최근에는 차량의 운전 조건 발생 및 제어력 발생 장치와 기타 성능 평가에 필요한 하드웨어들을 신호 처리부를 통해 연결, 실시간으로 특성을 파악할 수 있는 HITL 시스템을 구성하여 종합적인 차량 시스템 설계 및 테스트 장비로

활용되고 있다.

표 1은 전형적인 실시간 시뮬레이터의 적용 분야를 보여주며, 기술된 적용 예는 향후, 실시간 시뮬레이션이 많은 영역의 공학적 설계 및 분석에 적용될 수 있음을 예측케 한다.

1.2 실시간 HITL의 기본 구성

그림 1은 실시간 HITL 시뮬레이터의 기본 구성 개념을 나타내고 있으며 크게 주처리 CPU(host), 연산 전담 CPU, 외부 하드웨어 접속 전용 CPU, 결과 처리 전용 CPU, 그리고 운동 발생 장치와 분석 및 제어 대상(SUT : system under test)으로 나뉘어 저서 종합적인 차량 시스템 제어를 위한 루프를 이루게 된다. 주처리 CPU는 실시간 OS, 컴파일러(compiler), 에디터(editor), 그리고 디버거(debugger) 등의 시스템 소프트웨어를 가지고 실시간 시뮬레이션을 위한 환경 설정과 대상 동력학 시스템에 대한 데이터 베이스(data base) 및 모델링 과정을 처리하며, 연산 전담(compu-

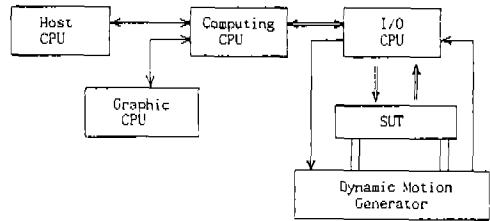


그림 1 실시간 HITL 시뮬레이터의 구성개념

표 1 실시간 시뮬레이션의 적용 분야

분 야	적 용 예
항공/우주/방위산업	* Missile System Design/Evaluation, * Shuttle Engine/Shuttle Hydraulic System, * Helicopter Dynamics/Flight Simulation, * High-Performance Fighter Aircraft Subsystem, 등
자동차산업	* Engine Control(Ignition, Emission), * Anti-skid Braking Control. * Directional Control/Stability, 등
원자력/화학산업	* Nuclear Power Plant/Power Conversion/Storage, * Plant Process Dynamics/Heat Exchange Analysis, 등

ting) CPU는 실제 차량에 주어지는 운전 조건 및 입력 조건에 따른 차량의 거동해석과 제어 로직 처리 등이 주목적이며, 이러한 계산 결과를 바탕으로 실제 차량 시스템과의 제어 신호와 센서 신호를 처리하는, 즉 하드웨어와 소프트웨어간의 접속을 유지시키는 것이 I/O 전용 CPU이다. 또, 결과 처리(graphic)전용 CPU는 제어 결과나 과정을 실시간으로 처리하여 사용자가 원하는 순간에 검색할 수 있도록 하여 시스템의 전반적인 응답(response)을 효율적으로 파악 분석할 수 있도록 한다. 운동 발생 장치는 실 시스템의 운동 조건을 구현하기 위한 장치로써 적용 목적에 따라 그 구성은 달라질 수 있으며, 전체 차량 시뮬레이터는 다른 전산 네트워크와 연결되어 활용의 극대화를 이룰 수 있다.

1.3 실시간 시뮬레이션의 중요성

하드웨어를 포함한 동력학 시스템에 대한 실시간 시뮬레이션은 시스템 개발, 실험, 그리고 사용자 훈련 등을 목적으로 사용되어 왔으며, 이를 이용한 시스템 개발은 기존의 개발 방식과 비교하여 다음과 같이 이점을 가지고 있다.

첫째로, 많은 예산과 시간이 소요되는 시제품 제작수를 크게 줄일 수 있다. 예로써, 미사일 성능 파악을 위해서는 시제품을 제작하여, 많은 발사 실험을 통해 이루어져야 하는 반면에 실시간 시뮬레이션에서는 몇 번의 실험 발사를 통해 얻어진 실험 데이터를 이용하여, 미사일 성능 설계를 위한 넓은 의미의 연구가 가능하다. 둘째, 동력학 모델은 실제 시스템의 경우보다 훨씬 다양한 경우(실제 실험이 불가능한 경우까지도)에 대해 시험될 수 있다. 차량에 채용되는 부 시스템(sub-system) 개발의 경우 시험 환경을 사용자가 조절하는 데는 한계가 있는데, ABS(anti-skid braking system)를 예로 들면, 차량의 바퀴가 지나가는 여러가지 노면 조건 모두를 구체적으로 표현하여 실험하는 것은 거의 불가능하지만 시뮬레이션상에서는 가능하며, 또 인공 위성 자세 제어의 경우에는 실제 무중력 상태를 지구상에서 실험할 수는 없지만, 시뮬레이션을 제어 장치와 연결하여 인공 위성의 동적 거동을 해석할 수 있다. 셋째,

안전을 위해 실 시스템을 직접 실험할 수 없는 경우도 실시간 시뮬레이션을 통해 가능하다. 예로써, 방사능 차단벽의 균열이나 냉매 손실 등으로 인해, 회복 불가능한 환경 오염이나 인명 피해를 가져올 수 있는 원자력 발전의 경우를 들 수 있다. 넷째, 상기의 세가지 상황에서 알 수 있듯이 대상 시스템 및 구성 부품에 대한 이해도와 응용성을 향상시킬 수 있기 때문에 보다 우수한 제품 설계가 용이하다.

2. 실시간 시뮬레이션의 정의와 환경

2.1 실시간 시뮬레이션의 정의

실시간 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 시간 증분(time step)과 프레임 타임(frame time), 두 가지 사항이 고려되어야 한다. 여기서, 시간 증분은 동력학 해석 프로그램이 미분 방정식의 해를 구하기 위해 정의한 고정된 시간 간격을 의미하며, 프레임 타임은 각 시간 증분에서 수학적 모델의 모든 식을 풀기 위해서 컴퓨터가 사용하는 시간을 의미하는데, 외부 하드웨어와 연결하기 위한 입출력에 소요되는 시간도 포함된다.

흔히 차량 시뮬레이션에서는 0.001초(1ms)의 시간 증분이 사용되는데, 이는 시스템의 안정성(stability)을 고려한 것이며, 이 시간 증분은 수식의 일부분이 된다. 일반적으로 좀더 작은 시간 증분을 사용할수록 더 정확한 시뮬레이션이 가능해지며, 너무 큰 시간 증분을 사용하면 시뮬레이션은 불안정해지거나, 부정확해진다. 각 시간 증분에서 모델의 모든 운동 방정식이 풀어지고, 매 해석 주기마다 모델의 거동 상태나 그 결과가 계산된다. 따라서, 해석 주기가 반복됨에 따라 모델의 응답이 계산된다. 프레임 타임은 근본적으로 컴퓨터의 속도에 좌우되며 수학적 모델에서 선택한 시간 증분보다 크거나 작을 수도 있다. 계산 시간이 모델에서 정의한 시간 증분보다 작다면 해석은 실시간보다 빨리 수행될 수 있으며, 시간 증분보다 계산 시간이 클 경우 해석은 실시간보다 느리게 수행된다. 따라서 프레임 타임이 시간 증분보다 작거나 같을 경우, 실시간 시뮬레이션이 가능해진다. 즉, 외부 하드웨어와의 입

출력이 포함된 고속 연산 처리가 될 때 실시간 시뮬레이션이 가능하다.

2.2 실시간 시뮬레이션의 환경 - 하드웨어 및 소프트웨어

실시간 시뮬레이션의 컴퓨팅 하드웨어는 적용 대상과 시뮬레이션의 목적을 고려하여, 처리 장치의 속도, 통신 회선 및 입출력 장치의 사양 등을 결정하여야 한다. 일반적으로, 대용량의 멀티 유저 메인프레임 컴퓨터에서 사용자는 프로그램의 생성 및 편집을 편리하게 처리할 수 있으나 실행은 일반적으로 배치 모드(batch mode)로 수행되며, 실행 과정 또한 시간 공유 모드(time sharing mode)로 처리되는데, 많은 프로그램들이 동시에 수행됨에 따라 메인프레임 컴퓨터의 이점인 빠른 CPU 속도를 충분히 사용하지 못하는 단점이 있다. 반면에 싱글 유저 워크스테이션에서는, 프로그램의 생성 및 편집 작업이 용이할 뿐만 아니라 프로그램의 실행과 결과를 즉시 처리할 수 있으며, 시간 공유 모드의 메인프레임보다 훨씬 빠른 실행이 가능하다. 그러나, 위의 두가지 해서 환경의 경우, 시스템 설계를 수행하기 위해서는 컴퓨터 시뮬레이션과 외부 하드웨어와의 연결성, 그리고 시뮬레이션의 실시간 실행이라는 두가지 한계를 가지게 된다.

하드웨어를 포함한 실시간 시뮬레이션에 사용코자 하는 컴퓨터 하드웨어는 처리 속도면에서 일등히 범용 컴퓨터보다 우수하여야 하므로 CPU (CISC, RISC, DSP, Vector Processor, Graphic Processor)와 전송 라인(BUS : VMEbus, Multibus II, Futurebus+ 등)의 선택은 매우 중요하며, 하드웨어 제어 신호의 입출력을 수행하기 위해 시뮬레이션의 의도적인 중단이 충분히 빠르게 이루어질 수 있어야 하기 때문에 입출력 장치의 구성 역시 시스템의 성능을 고려하여 결정되어야 한다. 그림 2는 실시간 시뮬레이션이 가질 수 있는 세부 구성예이며, 실시간 시뮬레이션 컴퓨터 각부의 명칭과 주요 기능은 다음과 같다.

* User Workstation : 사용자와 실시간 시뮬레이션간의 연결 장치

* Internal, I/O BUS : 64-bit Data/Program 통신

회선

* PIA (Processor Interface Adapter) : 내부 프로세서간의 연결 장치

* ISP (Internal Sequential Processor) : 주처리 장치내에서 Code 처리 전담 프로세서

* ACM (Arithmetic Computation Module) : 기본 산술 연산 처리 장치

* SCM (System Control Module) : 모든 연산 프로세서에 대한 명령 처리 장치

* SIM (SCSI Interface Module) : 컴퓨터 주변 기기와의 연결 장치

* DMM (Data Memory Module) : 추가의 별도 데이터 저장 장치

* A/DIM (Analog/Digital Interface Module) : 외부의 Analog/Digital H/W와의 연결 장치

* PIM (Processor Interface Module) : 외부의 디지털 프로세서와의 연결 장치

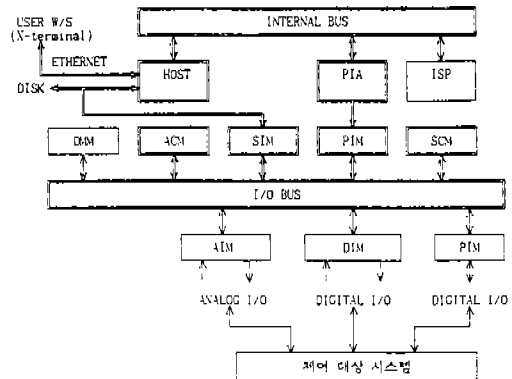


그림 2 실시간 시뮬레이션 컴퓨터의 구성예

실시간 시뮬레이션을 위한 소프트웨어 환경 구성은 실시간 시뮬레이터의 성능을 결정하는 중요한 인자가 된다. 연산 처리 장치나 입출력 장치의 성능이 우수할 지라도 이 장치들을 효율적으로 연결할 수 있는 소프트웨어 환경이 미비하다면 시스템의 동력학 모델을 효과적으로 구성하지 못할 경우, 소프트웨어가 실시간 시뮬레이션의 결과에 미치는 영향은 지대하다고 할 수 있다. 실시간 시뮬레이터의 소프트웨어 환경은 하드웨어의 성능을 최대로 구현할 수 있고, 하

표 2 실시간 시뮬레이터의 시스템 OS의 기능

구 분	세 부 기 능
High-speed Real-Time Performance	* Multi-tasking - H/W의 메모리가 허용하는 한 임의 수의 과제 처리 - 각 과제 수행을 위한 Processer Sourcing * Priority Scheduling - 각 과제에 대한 우선 처리 순위 조절 * Interrupt Handling - 과제 수행중 처리 중단의 필요시 CPU의 상황 인지 * Floating Point Processing * 기타 : System Clock/Timing, Memory Management
Communication	* Network Connections - Ethernet, Backplane, Serial Line Internet Protocol * Communication with UNIX * High Level Protocol * Pipe Line Processing - 독립 입출력 장치를 통한 신호 처리
Development Environment	* Compilers * Symbolic Debugging/Remote Source Language Debugging * Performance Monitoring

드웨어의 변경에도 충분히 대응할 수 있어야 할 뿐 아니라, 효율적이고 저가의 개발 환경을 제공할 수 있어야 한다. 기본적으로, 실시간 시뮬레이터의 소프트웨어 환경은 크게 시스템 OS와 해석 전용 소프트웨어로 나뉘어 질 수 있다.

시스템 OS는 고속 실시간 처리 능력, 데이터 및 프로그램 통신 기능, 개발 환경 제공, 독립적인 입출력 처리 능력이 있어야 하는데 이들의 주요 기능을 살펴보면 표 2와 같다.

시스템 소프트웨어와 함께, 제어하고자 하는 차량이나 차량의 부 시스템을 수학적으로 표현할 수 있는 동력학 프로그램과 제어 규칙의 적용을 위한 제어 모듈의 구성은 실제 하드웨어와 근사할 수 있도록 처리되어야 하며 이를 위해서 해석 전용 프로그램은 다음과 같은 기능을 가져야 한다.

- * Interactive Run-time Environment
- * High-speed I/O Routines
- * Various Numerical Integration Methods

- Runge-Kutta 2nd Order,
- Adams-Bashforth 2nd/3rd Order,
- Real-time Predictor-corrector Method
- Dual Rate Integration Method : Multiple-frame Rate Integration : 동력학 시스템 모델의 구성에 있어서 부 시스템의 특성에 따라 차별화(slow/fast)하여 적분 구간의 크기를 선택적으로 처리
- Libraries/Functions/Data Base
- * User friendly(Low Human intervention)
- * Automatic Optimization
- * Optimized Function Generation
- * Continuous/Discrete Simulation Environment
 - Model Generation & Editing for Dynamic/Control System
- * Performance Evaluation/Validation Method

3. 실시간 시뮬레이션을 이용한 시스템 설계

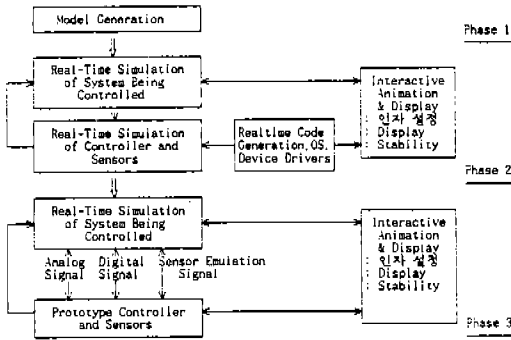


그림 3 하드웨어와 연결된 실시간 시뮬레이션을 이용한 시스템 설계를

실시간 시뮬레이션을 위한 컴퓨터 하드웨어와 동력학 시스템을 처리하기 위한 소프트웨어를 구성한 후 시스템 설계에 응용하기 위한 과정은 다음의 3단계로 나누어 질 수 있다(그림 3).

3.1 Phase 1 : Model Creation, Setup

사용자는 도면 설계 단계(또는 그 이전의)에 있는 제품을 대상으로, 수식과 내장된 표준 프로그램(library)을 이용하여 구성하고 재편성하여 워크스테이션 상에서 초기의 수학적 모델을 만들게 된다. 이후 사용자는 모델을 컴파일(compile)하고 시뮬레이션을 수행하게 되는데 이 단계에서는 시뮬레이션은 실시간 시뮬레이션이 아니지만, 모델의 검색과 오류 파악에 매우 유용하다. 초기 모델의 검증이 완료되면 해석 모델은 하나의 프로그램으로 다시 컴파일되어 실시간 수행을 위해 연산 장치내에 장전(down-loaded) 된다.

3.2 Phase 2 : Design

이 단계에서 사용자는 제어 대상, 제어기(controller), 센서들에 대한 시뮬레이션을 실시간으로 수행하게 되고, 요구되는 시스템의 거동을 구현하기 위해 제어기의 구조와 제어 변수들을 변화시켜 가면서 실제 시스템(real system)에서 발생할 수 있는 시스템 응답을 시뮬레이션할 수 있게 된다. 실시간 시뮬레이션은 시스템을 실제처럼 묘사해 낼 수 있기 때문에 실 시스템의 거동을

파악하는데 있어서 매우 중요한 과정이며, 하드웨어와의 연결하여 시험되는 과정(HITL)이전에 수행되어 시스템의 거동에 대한 많은 예측을 할 수 있게 된다.

3.3 Phase 3 : Hardware-in-the-Loop Testing of Prototype Controller

모델 제어기와 모델 센서의 설계가 완료되고 해석적으로 검증된 후, 제어기와 센서들의 시제품이 제작되면 시뮬레이션을 위한 제어기와 센서 모델들은, 제어될 시스템 모델과 아날로그 그리고 디지털 접속 장치(analog & digital interface)를 통해 연결된 시제품들로 교체되어서, 제어 대상과 초기 제어 장치(시제품)의 조합으로 이루어진 시스템의 안정성(stability)를 제어 모델의 제어 변수를 변화시켜 가면서 검증하게 된다.

4. 결 론

이상에서 최근 전자 제어 장치의 발전과 더불어 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어 모델링 기술이 제품 개발에 실시간으로 실험, 검증되는 시스템 구성에 대해 소개 설명하였다. 실시간 HITL(Hardware-In-The-Loop)은 적용 대상에 따라 다양한 구성을 가질 수 있으며, 기본적으로 dynamic model, 제어 로직과 같은 이론적인 분야(system S/W engineering), real-time CPU, I/O channel, signal processing 등의 컴퓨터 하드웨어 및 신호 처리 분야(computer engineering), 그리고 ECU, 부품, subsystem등의 실험 대상(system under test)으로 구성될 수 있는 시스템 설계를 위한 종합적인 실험 평가 수단이라 할 수 있다.

비록 본고에서는 실제 적용 대상을 구체화하지는 않았지만 실시간 HITL 시뮬레이션 기술은 향후 자동차 개발에 있어 상품 경쟁력과 직결되는 고부가 시스템 장착의 필연성, 승객의 안전과 편의를 위한 제반 장치의 지능형화(pro-active & intellegent) 및 신뢰성과 결부된 전자 제어 기술 응용등을 만족시키기 위해 보다 효과적으로 활용될 수 있을 것이다. 2000년의 차량 가격중 20% 이상이 전자 장치에 해당되고, 또한 경량화, 원가

절감, 자체 진단화 등을 위한 시스템 통합 제어 장치 장착률은 전체 차량 생산 대수의 15% 이상이 되리라는 자동차 산업의 예측 자료가 실시간 HITL 시뮬레이션 기술의 필요성을 뒷받침하고 있다.

또한 실시간 HITL의 적용 기술은 제품 개발 기간의 단축과 신뢰성 향상의 효과뿐 아니라 크게는 electro-mechanical 분야의 기술력 및 생산력 증대 효과를 기할 수 있는 핵심 기술이 되리라 전망할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Maurice F. Snyder, "Simulation-Aided Engineering Tools for System Design", ADI Technical Paper, 1993.
2. William O. Grierson, "Real-time Simulation to Support the Development of Electronic Control Systems", ADI, 1993.
3. S.J.Powers, M.E.Sisle, "Design Criteria for HITL Simulation Facilities", Raytheon Company, 1988.
4. EAI, "A Real-time Simulation Multiprocessor for Dynamic System Analysis", 1992.
5. 經濟企劃廳 總合計劃局, "2010年の 技術 豫測 101", 日刊工業新聞社, 日本, 1992.