

고신뢰 SW 개발을 위한 M&S 기술 동향

Trends in Modeling & Simulation Technologies for High-Confidence Software Development

이해영 (H.Y. Lee) CPS연구실 선임연구원
전재호 (J.H. Jeon) CPS연구실 연구원
전인결 (I.G. Chun) CPS연구실 선임연구원
김원태 (W.T. Kim) CPS연구실 실장

* 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음(10035708, 고신뢰 자율제어 SW를 위한 CPS(Cyber-Physical Systems) 핵심 기술 개발).

최근 임베디드 제어 시스템의 규모와 복잡도가 폭발적으로 증가함에 따라, 단일 시스템을 대상으로 하는 기존 M&S(Modeling & Simulation) 기반의 SW 개발 기술은 한계에 부딪히게 되었다. 이에 본고에서는 네트워크 기반 복합 임베디드 제어 시스템의 고신뢰 SW 개발을 위한 M&S 기술 동향을 소개한다. 먼저 모델링 단계에서 복합 시스템의 이중성을 다루기 위한 모델링 기술과 대표적인 도구를 소개하고, 다음으로 대규모 하이브리드 시스템 모델의 검증을 위한 시뮬레이션 및 정형 검증 기술과 관련 도구를 소개한다.

임베디드 소프트웨어 &
시스템반도체 기술 특집

- I. 서론
- II. 모델링 기술
- III. 모델 검증 기술
- IV. 결론

I. 서론

고신뢰성이 요구되는 임베디드 제어 시스템(embedded control system)은 M&S(Modeling & Simulation)를 기반으로 SW를 설계, 개발 및 검증하는 모델-기반 설계(model-based design)를 통하여 개발되어 왔다. 그러나 최근 임베디드 제어 시스템이 다수의 임베디드 컴퓨터가 네트워크와 물리 환경을 통해 연동되는 가상-물리 시스템(Cyber-Physical System: CPS) 형태로 발전됨에 따라, 단일 임베디드 제어 시스템의 M&S 기반 개발을 고려했던 과거의 기술만으로는 고신뢰성을 보장하기 어렵게 되었다. 모델링 측면에서는 시스템의 이종성(heterogeneity) 증대에 따라 단일 모델링 기술만으로 전체 시스템을 기술하기가 어려워졌으며, 모델의 검증 측면에서는 대규모 하이브리드 시스템 모델의 실행이 요구되었다.

본고에서는 대규모 이종 시스템의 고신뢰 SW 개발을 위한 M&S 기술 동향을 정리한다. 모델링 측면에서는 다수의 이종 시스템으로 구성된 대규모 시스템의 이종성을 다루기 위한 기술로 메타-모델(meta-model) 기반 기술, 다중-형식론(multi-formalism) 기반 기술, 그리고 혼합형 기술을 소개한다. 모델 검증 측면에서는 대규모 하이브리드 시스템(hybrid system) 모델의 검증을 위한 기술로, 분산 시뮬레이션 기술, 모델 체킹(model checking) 기술, 그리고 정리 증명(theorem proving) 기술을 소개한다. 각 세부 기술별로 대표적인 도구도 함께 소개한다.

II. 모델링 기술

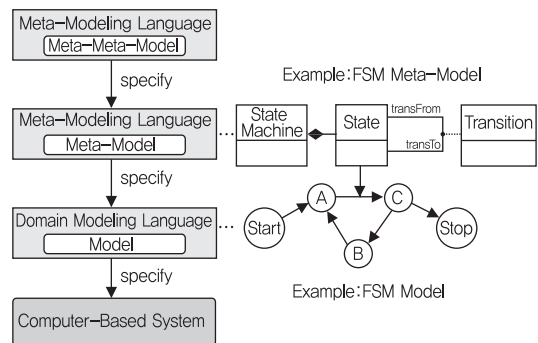
기존 소규모 임베디드 제어 시스템의 경우, 단일 모델링 기술(또는 도구)만으로도 전체 시스템에 대한 모델을 어려움 없이 작성할 수 있었다. 그러나, 최근 임베디드 제어 시스템의 규모와 이종성이 급증함에 따라, 전체 시

스템을 단일 기술로 모델링하는 것은 현실적으로 불가능하게 되었다. 본 장에서는 이러한 대규모 이종 시스템의 고신뢰 SW 개발을 위한 모델링 기술 동향을 살펴본다.

1. 메타-모델 기반 통합 기술

메타-모델 기반 통합 기술은 이종의 모델링 기술로 작성된 모델(이종 모델)의 추상화를 통해 이종 모델 간의 결합을 지원하는 기술이다. 메타-모델은 모델링 언어(모델링 기술)에 대한 모델로, 모델링 언어의 특성(property)을 메타-모델링 언어(meta-modeling language)로 기술한 모델이다. 대표적인 메타-모델링 표준으로는 OMG(Object Management Group)의 MOF(Meta-Object Facility)[1]가 있다. (그림 1)은 유한 상태 기계(Finite State Machine: FSM) 모델과 FSM에 대한 메타-모델을 보인다. 그림에서와 같이 FSM 메타-모델은 FSM이 상태의 집합으로 구성되며 상태 간에는 전이로 연결될 수 있음을 기술한다.

(그림 1)에서 알 수 있듯이, 메타-모델은 대상 모델링 언어를 특성 중심으로 추상화한 표현이다. 이종의 모델링 언어를 추상화된 메타-모델이나 메타-메타-모델(meta-meta-model)로 표현하면 많은 부분들이 공통 요소로 기술될 수 있으며, 이를 통해 이종 모델 간의 결합이 가능하다. 예를 들어, Simulink의 블록 다이어그램과 OMG UML(Unified Modeling Language)의 컴포



(그림 1) FSM 모델과 FSM 메타-모델[2]

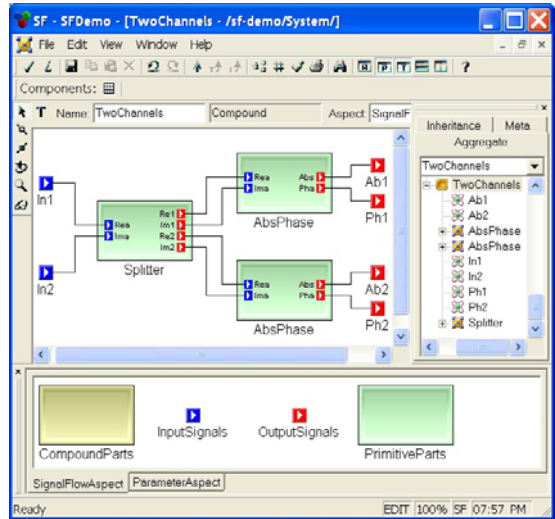
먼트 다이어그램은 표현 측면에서 서로 다르지만, 이를 추상화한 메타-모델 수준에서는 많은 요소들이 공통으로 기술될 수 있다. 극단적인 추상화 수준에서 보면, 다이어그램은 모두 컴포넌트의 집합으로 구성되며, 각 컴포넌트는 입출력 포트의 집합을 가질 수 있고, 입출력 포트 간에는 연결로 결합될 수 있다고 기술될 수 있다. 그러므로, 메타-모델의 작성을 통하여 Simulink 모델의 포트와 UML 컴포넌트 다이어그램의 포트 간의 논리적인 연결이 가능하며, 이를 기반으로 이종 모델 간의 결합이 이루어질 수 있다.

메타-모델 기반 이종 모델 통합 기술의 가장 큰 장점은 기존 모델링 언어에 대한 메타-모델의 작성만으로 이종 모델을 상대적으로 손쉽게 통합할 수 있다는 점이다. 그러므로 대규모 이종 시스템을 구성하는 다수의 서브시스템에 대한 모델이 이미 작성된 경우, 기존 모델을 신속히 통합하기에 가장 적합한 기술이라고 할 수 있다.

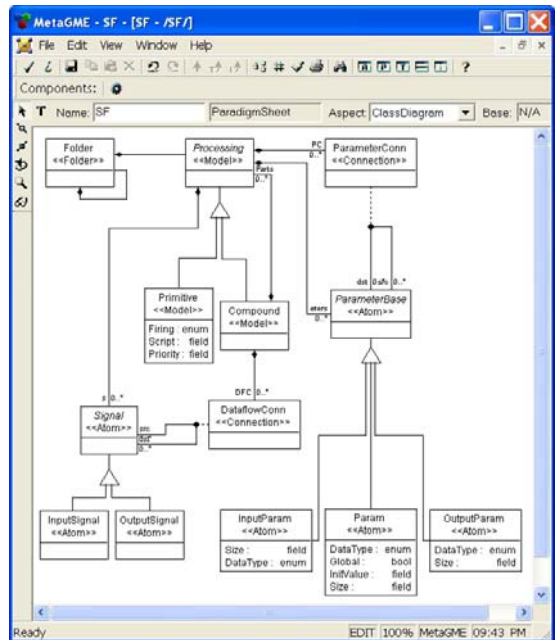
그러나 메타-모델은 대상 모델링 언어의 구조적 특성을 기술하기는 용이하나, 행위적 특성을 기술하는 것은 매우 어렵다. 현재 대부분 메타-모델 기반 통합 기술은 통합 모델을 실행(시뮬레이션)하는 것은 지원하지 않으며, 이에 모델링 기술별로 지원하는 시뮬레이터를 실행하고, 이를 연동하여 분산 시뮬레이션을 수행하는 것이 일반적이다. 또한, 다수의 기존 모델링 기술에서 실행 의미가 명확하지 않은 경우가 많기에, 시뮬레이터 간의 연동 과정에서 어느 정도의 가정이 수반될 가능성이 높으며, 이로 인해 시뮬레이션 결과의 신뢰도가 저하될 수도 있다. 물론, 이는 메타-모델 기반 기술 자체의 문제라기 보다는, 기존 모델링 기술로부터 기인한 문제이지만, 메타-모델 기반 기술 사용자가 해결해야 할 문제이다.

대표적인 메타-모델 기반 도구로는 미국 Vanderbilt University의 Janos Sztipanovits 교수가 개발한 GME (Generic Modeling Environment)[2]가 있다(그림 2) 참

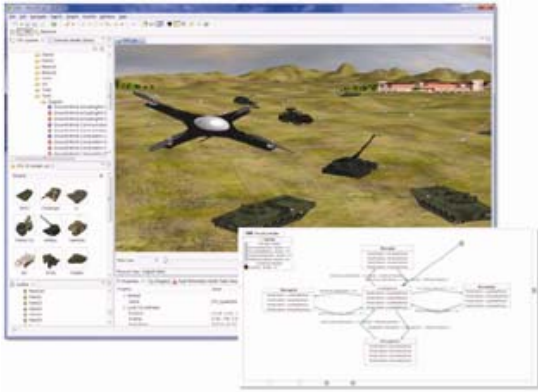
조). GME의 가장 큰 특징은 별도의 프로그래밍 없이 GUI 환경을 통해 기존 모델링 언어에 대한 메타-모델을 작성할 수 있는 편집기인 MetaGME가 제공된다는 점이다(그림 3) 참조). 메타-모델에서 구성 지점(component point)을 지정함으로써 GME에서 이종 모델 간의 결합이 이루어질 수 있다. GME는 이종 모델의 연동



(그림 2) 대표적인 메타-모델 기반 모델링 도구인 GME[2]



(그림 3) GME의 메타-모델 편집기인 MetaGME[2]



(그림 4) 메타-모델 기반 CPS 모델링 도구인 EcoPOD

시뮬레이션을 위하여 시뮬레이션 미들웨어인 HLA/ RTI (High-Level Architecture/Run-Time Infrastructure) 기반 분산 시뮬레이션을 지원하며, 이를 위한 스템브 코드(stub code)를 자동 생성하는 기능도 제공한다.

국내의 경우, 한국전자통신연구원(ETRI) CPS연구실에서 개발 중인 EcoPOD(ETRI CPS Open Platform Developer)가 있다(그림 4 참조)[3]. EcoPOD는 대규모 CPS 모델링 도구로, 기본적으로 미국의 University of Arizona의 Bernard P. Zeigler 교수가 개발한 DEV & DESS(Discrete Event and Differential Equation System Specification)[4] 형식론 기반의 하이브리드 시스템 모델링 언어를 지원하지만[5], ISO/IEC 19470 기반의 메타-모델 프레임워크를 제공하여 각 분야에서 사용 중인 기존 모델의 재사용도 지원한다. 향후에는 이중 모델의 실행 의미를 고려한 메타-모델 기반 통합 기술과 MetaGME와 같은 메타-모델 작성 환경도 개발할 계획이다.

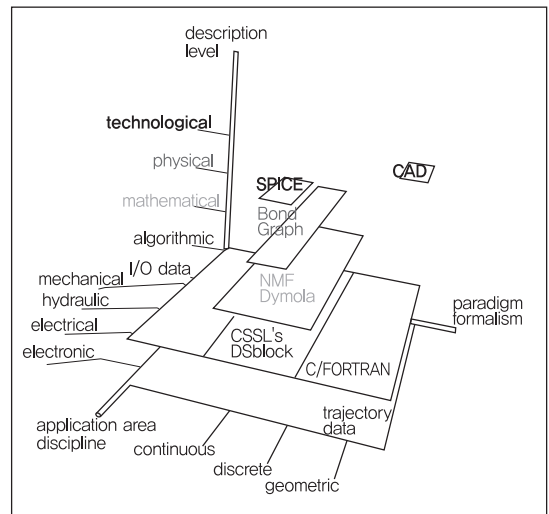
2. 다중-형식론 기반 모델링 기술

다중-형식론 기반 모델링은 다수의 수학적 형식론(mathematical formalism)을 사용하여 이중 시스템을 명세(specification)하는 기술이다. 수학적 형식론에서는 대상 시스템이 논리, 집합 등의 수학 기반으로 엄격하게

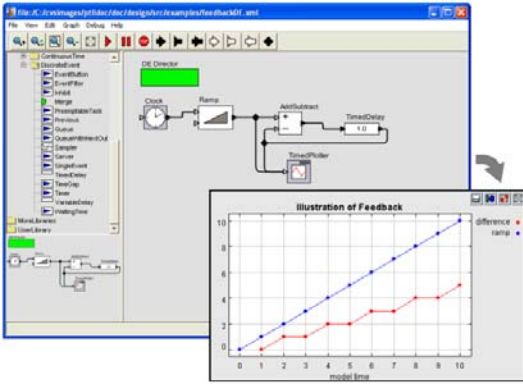
명세되고, 이에 대한 명확한 실행 의미가 정의된다. 대규모 시스템의 경우, 서브시스템별로 적합한 형식론이 다르다. 예를 들어, SW의 경우는 비결정적인(nondeterministic) FSM이 적합한 형식론일 수 있으나, 운동하는 물리 시스템은 상미분 방정식(Ordinary Differential Equation: ODE)으로 명세하는 것이 적합할 것이다. 다중-형식론 기반 모델링에서는 다양한 형식론을 기반으로 서브시스템을 명세하고, 실행 측면에서 형식론 간의 관계를 정의함으로써, 이중 모델에 대한 통합 시뮬레이션을 수행할 수 있다. (그림 5)는 벨기에 University of Antwerp의 Hans Vangheluwe 교수가 제안한 다중-형식론 기반 M&S 기술의 예이다[6].

다중-형식론 기반 모델링 기술의 가장 큰 장점은 M&S 측면에서의 수학적 완전성이다. 형식론 기반으로 기술된 모델은 해석과 실행에 있어 애매모호함이 없기에, 사용자 간의 모델을 통한 분명한 의미 전달이 가능하며, 시뮬레이션 결과의 신뢰도도 보장할 수 있다. 그러므로 모델의 명확한 표현과 정확한 실행이 요구되는 시스템의 모델링에 적합한 기술이라고 할 수 있다.

그러나 다중-형식론 기반 모델링 기술은 서브시스템에 대한 기존 모델이 존재하는 경우, 이의 재활용이 어



(그림 5) 다중-형식론 기반 M&S 기술[6]



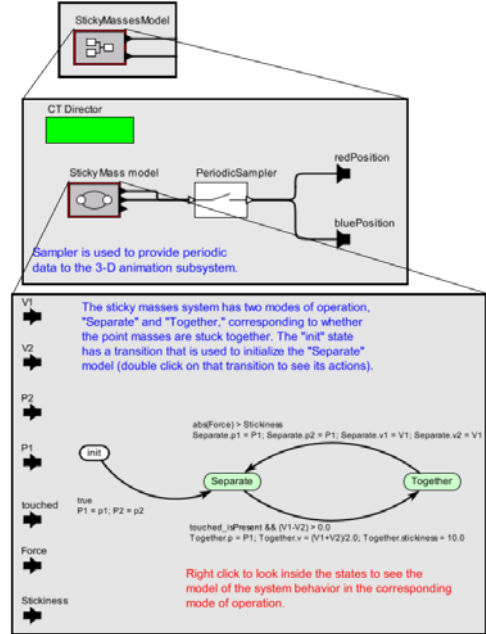
(그림 6) 대표적인 다중-형식론 기반 모델링 도구인 Ptolemy II[8]

려운 큰 문제점을 가진다. 이의 재활용을 위해서는 수작업으로 모델을 재작성하거나, 변환 도구를 개발하여 모델을 변환하는 것이 일반적으로, 많은 비용이 소요된다. 또한 새로운 형식론이 추가된 경우, 사용자가 새로운 형식론을 학습해야 한다는 문제점도 가진다.

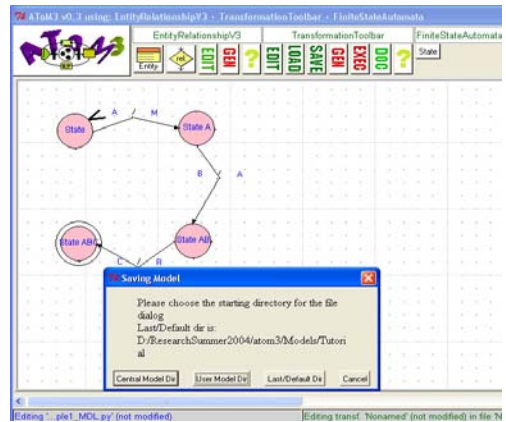
대표적인 다중-형식론 기반 모델링 도구로는 미국 University of California, Berkeley(UCB)의 Edward A. Lee 교수가 개발 중인 Ptolemy II가 있다(그림 6) 참조[7]. Ptolemy II는 CPS M&S 도구로, 17종의 계산 모델(models of computation)이라고 불리는 수학적 형식론을 기반으로 대규모 이종 시스템을 M&S할 수 있다. 계산 모델로 component interaction, continuous time, discrete-event, distributed discrete-event, dynamic data flow, discrete time, FSM, Giotto, graphics, heterochronous dataflow, hybrid systems, process networks, rendezvous, synchronous dataflow, synchronous/reactive, timed multitasking, wireless가 선택 가능하며, (그림 7)과 같은 계층적 다중-모델링(hierarchical multi-modeling)을 통해 이종 모델 간의 통합 모델링이 가능하다.

3. 다중-패러다임 기술

다중-패러다임(multi-paradigm) 기술은 메타-모델



(그림 7) Ptolemy II의 계층적 다중-모델링을 통한 이종 시스템 모델링[8]



(그림 8) 다중-패러다임 기술 기반 모델링 도구인 AToM³[9]

기반 기술과 다중-형식론 기반 기술이 혼합된 기술로, Hans Vangheluwe 교수에 의해 제안되었다. 다중-패러다임 기술은 구성 요소를 그래프 형식으로 표현하는 메타-모델링을 통하여 수학적 형식론을 정의하고, 정의된 다중-형식론을 기반으로 이종 시스템을 명세할 수 있는 기술이다. (그림 8)은 다중-패러다임 기술을 기반으로 개발한 AToM³라는 모델링 도구이다[9].

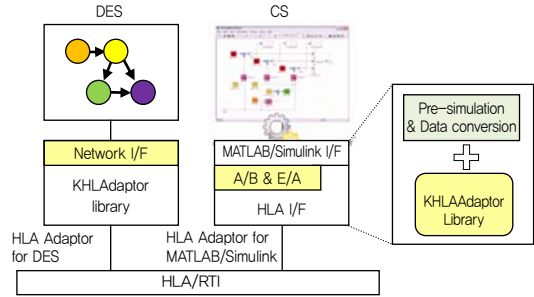
다중-패러다임 기술은 다중-형식론 기반 모델링 기술을 근간으로 한다고 볼 수 있으며, 메타-모델 기반으로 형식론을 추가할 수 있다. 그러나 형식론 자체를 추가하는 것이기에, 기존 모델링 언어로 작성된 모델의 재 활용에는 제약이 있는 것으로 보인다. 또한 OMG의 표준을 준수하지 않고, 독자적인 메타-모델링 프레임워크를 사용한 것도 문제가 될 수 있다. 향후 형식론이 아닌 기존 모델링 언어에 대한 표준 기반 메타-모델링을 통하여 기존 모델과의 결합이 가능하다면, 두 기술의 단점을 상당 부분 극복할 수 있을 것으로 예상된다.

III. 모델 검증 기술

모델의 실행의 관점에서 볼 때, 이중의 모델로 구성된 시스템 모델은 이산 시스템 모델과 연속 시스템 모델이 결합된 하이브리드 시스템 모델이다. 본 장에서는 대규모 하이브리드 시스템 모델의 검증 기술 동향을 살펴본다.

1. 하이브리드 시스템 분산 시뮬레이션 기술

대규모 하이브리드 시스템 모델의 실행에는 많은 컴퓨팅 자원이 필요하다. 이를 위해 분산 시뮬레이션 기술을 접목하여 모델을 실행하게 되는데, 일반적으로 두 가지 방식으로 수행된다. 하나는 이산 모델을 담당하는 시뮬레이터와 연속 모델을 담당하는 시뮬레이터를 연동하여 분산 시뮬레이션을 수행하는 방식이며, 다른 하나는 하이브리드 시스템 모델의 실행이 가능한 시뮬레이터를 연동하여 분산 시뮬레이션을 수행하는 방식이다. 전자의 방식은 메타-모델 기반 통합 기술과 연계될 경우 적합한 기법으로, 별도의 시뮬레이터를 개발할 필요가 없다는 장점을 가진다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 이중 모델 간의 실행 의미 차이 문제가 발생할 수 있다. 후자의 방식은 단일 또는 다중-형식론 기반 모델링 기술과 연계되며, 명확한 실행 의미를 가진 M&S가 가능



(그림 9) KAIST의 이중 시뮬레이터 연동 기술[10]

하다. 그러나 별도의 ODE 해석기를 가진 하이브리드 시스템 시뮬레이터를 개발해야 한다는 문제를 가진다. 두 방식 모두, HLA/RTI 기반으로는 실시간 시뮬레이션 지원이 어렵다는 문제도 가진다.

국내의 경우, KAIST의 김탁곤 교수가 이산 사건 시스템의 시뮬레이션을 수행하는 DEVS(Discrete Event System Specification) 기반 시뮬레이터인 DEVSIM++와 연속 시스템의 시뮬레이션을 수행하는 Simulink를 HLA/RTI 기반으로 연동하여 하이브리드 시스템 모델의 시뮬레이션을 수행하는 기술을 개발하였다(그림 9 참조)[10]. Simulink 모델의 DEVS 기반 연동을 위하여 연속 모델에 대한 시간 전진 알고리즘을 개발하고, 두 시뮬레이터를 위한 만능 어댑터를 개발하였다.

ETRI CPS연구실의 경우, EcoPOD로 작성된 DEV&DESS 기반의 하이브리드 시스템 모델에 대하여 HLA/



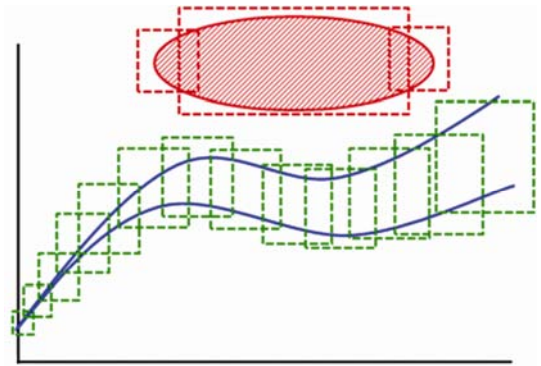
(그림 10) 분산 하이브리드 시스템 시뮬레이터인 ETRI의 EcoSIM

RTI 기반 분산 시뮬레이션이 가능한 EcoSIM(ETRI CPS Open Simulator)을 개발 중이다(그림 10) 참조 [11]. 그림과 같이 EcoSIM은 시뮬레이션 수행 과정이나 결과를 3차원으로 시각화하여 보여주며, 이중의 하드웨어에 대한 HILS 기능도 제공한다. 현재 OMG의 DDS(Data Distribution Service)[12]를 기반으로 실시간 분산 시뮬레이션을 수행할 수 있는 기술도 개발 중에 있다.

2. 하이브리드 시스템 모델 체킹 기술

시뮬레이션 기반 검증 기술은 모델이 사용자가 원하는 대로 동작하는지 확인하는 데는 유용하지만, 원하지 않는 방식으로 동작하지는 않는지 확인하기는 매우 어렵다. 정형 검증(formal verification)은 정형 명세(formal specification)로 기술된 대상 시스템이 어떤 특성을 만족하는지 여부를 수학적 방법으로 확인하는 기술이다. 정형 검증의 한 갈래인 모델 체킹은, 대상 모델의 상태 공간을 알고리즘으로 철저하게 탐색하여 특성의 만족 여부를 확인하는 기술이다. 모델 체킹은 검증을 자동으로 수행할 수 있다는 가장 큰 장점을 가지지만, 모델의 복잡도가 증가함에 따라 상태 폭발 문제가 발생하는 단점도 가진다.

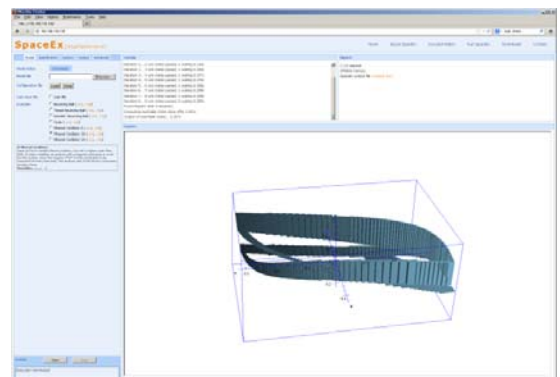
하이브리드 시스템 모델 체킹 기술은 1990년대 말에 최초로 등장하였지만[13], 현재에도 연구실 수준에서 수행되는 초기 단계에 머물고 있다. 획기적 기술 발전이 어려운 근본적인 이유는, 하이브리드 시스템에서는 ODE의 풀이가 필수적이지만 컴퓨터가 이산 시스템이라 실수의 정확한 표현 및 계산이 불가능하고, 대부분의 하이브리드 시스템 모델 체킹 알고리즘이 언젠가는 종료할 것이라는 사실을 보장할 수 없기(결정불가능이기) 때문이다. 이에 초기에는 연속 요소가 시간에 따라 선형적으로 변하고 결정가능한(decidable) 알고리즘이 존재하는, 선형 하이브리드 오토마타(linear hybrid automata)의 모델 체킹을 주로 연구하였으며, 정확한 계산이 가능



(그림 11) 하이브리드 시스템 모델 체킹에서의 과개략화 개념

한 유리수 집합만을 대상으로 하였다.

현재에는 과개략화(overapproximation)를 통하여 일정 수준의 위양성(false positive)을 허용하고, 모델의 시간을 제한함으로써 복잡한 하이브리드 시스템의 모델 체킹이 가능한 기술이 개발되고 있다. 과개략화란 (그림 11)과 같이 하이브리드 시스템에서 연속 요소의 궤적(trajjectory)을 점선과 같이 실제보다 조금 더 넓은 범위로 이산화(discretization)하여, 모델 체킹을 수행하는 것이다. 실제로는 연속 요소의 궤적과 특성이 표현하는 범위가 매우 근접하는 경우가 많지 않으므로(보통 둘은 많이 떨어지거나 겹친다), 실제 하이브리드 시스템의 검증에 충분히 적용이 가능할 것으로 예상된다.



(그림 12) 대표적인 하이브리드 시스템 모델 체킹 도구인 SpaceX[14]

대표적인 하이브리드 시스템 모델 체킹 도구로는 프랑스 University Joseph Fourier의 Goran Frehse 교수가 개발 중인 SpaceX가 있다(그림 12) 참조[14]. SpaceX는 PHAVer 기반의 선형 하이브리드 오토마타의 검증과 지원 함수(support function) 기반의 과개략화를 통한 비선형 하이브리드 오토마타의 검증을 지원한다. 현재 SpaceX는 연속 요소의 수가 200개인 높은 복잡도의 하이브리드 시스템 모델을 2시간 정도에 검증할 수 있다.

3. 하이브리드 시스템 정리 증명 기술

정형 검증 기술의 다른 갈래인 정리 증명은, 수식으로 표현된 모델과 특성에 대하여, 수학 규칙을 차례로 적용하여 모델이 특성을 만족하는지 여부를 증명하는 기술이다. 기본적으로 정리 증명 기술은 모델의 복잡도와 무관하게 상태 폭발 문제가 발생하지 않는다는 장점을 가지므로, 하이브리드 시스템과 같이 복잡도가 높은 시스템의 정형 검증에 적합하다고 할 수 있다.

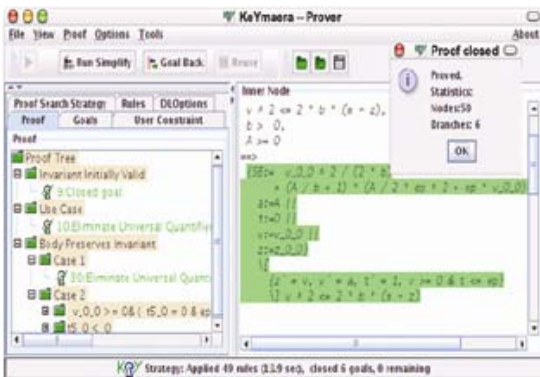
그러나 일반적으로 정리 증명 전문가가 수작업을 통해 규칙을 하나씩 적용하여 결과를 유도해야 한다는 단점을 가진다. 물론 블라인드 검색(blind search)을 기반으로 자동 유도도 가능하지만, 규칙의 수와 모델의 복잡도에 따라 모델 체킹과 같은 상태 폭발이 발생한다는 문

제를 가진다. 또한, 일반적으로 모델 체킹 기술보다 대상 시스템에 대한 모델을 작성하기가 어려운 문제도 있다. 물론, ODE 풀이에서의 정확도 문제는 모델 체킹 기술에서와 동일한 문제를 가진다.

대표적인 하이브리드 시스템 정리 증명 도구로는 미국 Carnegie Mellon University의 Andre Platzer가 개발한 KeYmaera가 있다(그림 13) 참조[15]. KeYmaera는 기본적으로 수작업에 의한 정리 증명을 지원하지만, 블라인드 검색 기반의 자동 정리 증명 기능도 제공한다.

IV. 결론

본고에서는 고신뢰 SW 개발을 위한 M&S 기술 동향을 정리하였다. 다수의 이중 시스템으로 구성된 대규모 시스템의 모델링을 위한 메타-모델 기반 통합 기술, 다중-형식론 기반 모델링 기술, 그리고 다중-패러다임 기술을 소개하였으며, 대규모 하이브리드 시스템 모델의 검증을 위한 분산 시뮬레이션 기술, 모델 체킹 기술, 그리고 정리 증명 기술을 소개하였다. M&S의 각 세부 기술의 장단점과 대표적인 도구를 살펴보았다. 메타-모델 기반 기술과 다중-형식론 기반 기술의 결합인 다중-패러다임 기술은 기존 모델의 활용과 수학 근간의 엄격한 M&S를 가능케 하는 기술로 발전할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 하이브리드 시스템 정형 검증 기술은 세계적으로도 초기 단계에 머물고 있기에, 이에 대한 적극적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.



(그림 13) 대표적인 하이브리드 시스템 정리 증명 도구인 KeYmaera[15]

용어해설

Modeling & simulation 현존 또는 미래 시스템의 분석, 개량, 개발 등을 위하여 대상 시스템을 추상화한 모델을 작성하고, 이를 모의 실행하는 기술

Hybrid systems 상태가 유한한 컴퓨터 시스템과 수학 방정식으로 표현되는 물리 시스템이 결합된 시스템으로, 물리 시스템과 상호작용하는 모든 임베디드 시스템은 하이브리드 시스템임.

약어 정리

CPS	Cyber-Physical Systems
DDS	Data Distribution Service
DEV&DESS	Discrete Event and Differential Equation System Specification
DEVS	Discrete Event System Specification
EcoPOD	ETRI CPS Open Platform Developer
EcoSIM	ETRI CPS Open Simulator
FSM	Finite-State Machine
HLA/RTI	High-Level Architecture/Run-Time Infrastructure
M&S	Modeling & Simulation
MOF	Meta-Object Facility
ODE	Ordinary Differential Equation
OMG	Object Management Group
UCB	University of California, Berkeley
UML	Unified Modeling Language

참고문헌

- [1] OGM, Meta Object Facility (MOF™), ver. 2.4.1, 2011.
- [2] GME: Generic Modeling Environment. <http://www.isis.vanderbilt.edu/Projects/gme/>
- [3] J. Jeon, I. Chun, and W. Kim, "Metamodel-Based CPS Modeling Tool," *Lecture Notes Electr. Eng.*, vol. 181, 2012, pp. 285-291.
- [4] B.P. Zeigler, H. Praehofer, and T.G. Kim, *Theory of Modeling and Simulation*, 2nd Ed., 2000.
- [5] H.Y. Lee, I. Chun, and W.-T. Kim, "DVML: DEVS-Based Visual Modeling Language for Hybrid Systems," *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 256, 2011, pp. 122-127.
- [6] H. Vangheluwe, "Multi-Formalism Modelling and Simulation," Ph.D. Dissertation, Ghent University, 2011.
- [7] Ptolemy II. <http://ptolemy.eecs.berkeley.edu/ptolemyII/>
- [8] C. Brooks et al., "Heterogeneous Concurrent Modeling and Design in Java (Volume 1: Introduction to Ptolemy II)," Technical Report, no. UCB/EECS-2008-28, University of California at Berkeley, 2008.
- [9] ATOM3. <http://atom3.cs.mcgill.ca/>
- [10] C.H. Sung and T.G. Kim, "Framework for Simulation of Hybrid Systems: Interoperation of Discrete Event and Continuous Simulators Using HLA/RTI," *Proc. PADS*, 2011, pp. 1-8.
- [11] W.-T. Kim et al., "WiP Abstract: From Design to Operation of a Large-Scale CPS," *Proc. ICCPS*, 2012, pp. 215.
- [12] Data Distribution Service. <http://portals.omg.org/dds/>
- [13] T.A. Henzinger, P.-H. Ho, and H. Wong-Toi, "HyTech: A Model Checker for Hybrid Systems," *Softw. Tools Technol. Transfer*, vol. 1, 1997, pp. 110-122.
- [14] SpaceEx. <http://spaceex.imag.fr/>
- [15] KeYmaera. <http://symbolaris.com/info/KeYmaera.html>