

KICEM

HLA(High Level Architecture) 기반의 분산형 시뮬레이션 기술과 시설물 재난 대응 및 관리 분야로의 적용 연구 동향

박문서 서울대학교 건축학과 교수
이상현 Assistant Professor
 Department of Civil and Environmental Engineering
 Tishman Construction Management Program, University of Michigan



I. 서론

태풍, 지진, 해일 등 예측이 힘든 거대 자연재난 (Mega-Disaster) 의 발생가능성이 상존하는 상황에서 급속한 도시화로 인한 인구의 집중화, 시설물의 고층화·대형화, 원자력 발전소 같은 위험 시설물의 증가 등으로 인해 재난 피해 규모가 지속적으로 증가 추세에 있다. 실제로 2011년 3월에 발생한 동일본 대지진의 경우, 2만 명 이상이 사망하였으며, 피해액은 약 17조엔 (한화 약 240조원) 이상으로 추정되었다. 이에 따라 재난의 위협과 피해에 대처하기 위한 사전예측 및 신속한 대응계획 수립이 중요한 화두로 떠오르고 있다. 건축분야에서도 대형화·고층화 된 시설물 재난대응 및 관리의 중요성이 대두되고 있는 상황이다 (Hu et al, 2004).

이러한 상황에서, 컴퓨터 시뮬레이션은 재난 발생 시 시설물의 복합적인 피해에 대한 신속한 예측 및 파악을 가능하게 하고, 피난, 복구 등 효율성 및 신속성 있는 재난 대응을 지원하며, 이를 통해 2차 피해를 사전에 예측·방지·대응할 수 있게 한다 (Harrison et al, 2007). 이미 주요 선진국들은 재난 관련 중·장기적인 연구개발 추진에 있어 시뮬레이션 개발을 중점 사항으로 두고, 재해 원인규명 및 예측, 재해위험 평가, 재난대응 지원 프로그램, 비상 경보시스템 운영 등 통합적인 재난 관리체계를 확립 중에 있다.

그러나 기 개발된 통합된 단일 시스템 혹은 시뮬레이션만으로는 다양한 재난 상황에 대한 복합적인 정보처리가 어렵다. 또한 상이한 목적에 따라 개발된 재난 시뮬레이션 소프트웨어는 앞서 언급한 복합적·연쇄적 특징을 갖는 다음의 재난 상황을 분석하기에 어려움이 있다.

- 1) 여러 재난이 복합적으로 발생하는 경우
- 2) 새로운 재난 유형이 발생하는 경우
- 3) 새로운 시설물의 피해를 분석하는 경우
- 4) 다양한 재난 대응 작업이 발생하는 경우

최근에는 미 국방성 (Department of Defense: DOD)에서 제시한 개념인 High Level Simulation Architecture (상위체계구조, 이하 HLA) 분산형 시뮬레이션 아키텍처가 다양한 연구 분야에 활용되고 있다. HLA는 분산된 시뮬레이션 모듈 간 개발 언어 및 운영체계, 구동 방법이 서로 다르더라도 연동이 가능하도록 함으로써 상호운용성과 재사용성을 향상시키는 개념이다 (Schulze et al, 1999; AbouRizk 2010). 방재 분야에도 이를 적용하기 위한 노력이 진행 중에 있는데, 특히, 서울대학교와 University of Michigan은 HLA 기반의 분산형 시뮬레이션 기술을 시설물 재난 대응 및 관리에 활용하기 위한 연구를 공동으로 진행하고 있다. 이에 본고에서는 재난 시뮬레이션과 HLA 관련 연구동향 및 진행 중인 국제협력 연구과제를 간략히 소개하고자 한다.

II. HLA 및 관련 연구 동향

1. 분산형 시뮬레이션 및 HLA

분산형 시뮬레이션은 하나의 프로세서 또는 컴퓨터에서 작동하는 기존 호스트 시뮬레이션에 반대되는 개념으로 여러 개의 프로세서 또는 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션을 구동하는 개념이다. 이는 시뮬레이션 기술의 발전 및 보급과 함께 복잡

도와 규모가 큰 시물레이션에 대한 필요성이 증가함에 따라, 기존의 한계를 극복하고자 하는 요구에 의해 개발되었다. 한 대의 컴퓨터에서 실행되는 호스트 시물레이션과 달리 분산 시물레이션은 각 시물레이션 모듈 간 네트워크를 통해 정보교환이 이루어지며, 유기적 연결을 통해 실행된다.

Dahmann (1998) 이 제시한 분산형 시물레이션 개발의 필요성으로는 단일한 통합형 시물레이션은 1) 복잡한 문제(예: 재난 피해 및 대응의 포괄적 분석)에 대한 시물레이션의 모든 기능적 요구사항을 만족할 수 없고, 2) 시물레이션의 목적이 너무 다양하고 시간에 따라 변하기 때문에(예: 다양한 종류의 재난유형 분석) 단일한 시물레이션 플랫폼을 지속적으로 업그레이드하거나 확장할 필요가 있으며, 3) 복잡한 문제에 활용되는 각 시물레이터들이 어떠한 조합으로 구동 및 분석되어야 하는 지 예측할 수 없기 때문에(예: 다양한 재난유형의 연쇄적·복합적 발생) 단일한 시물레이션의 재사용이 불투명하다는 것이다.

따라서 분산형 시물레이션은 복잡적이고 연쇄적인 재난상황 예측 및 파악, 다양한 재난대응활동 분석에 높은 활용성을 보일 수 있는데, 필요에 따라 다양한 시물레이션 모듈(예: 태풍 시물레이션, 지진 시물레이션, 붕괴 시물레이션, 복구 시물레이션 등)을 조합·구성하여 기존 시물레이터를 재사용하고, 각각의 장점을 최대한 활용할 수 있게 한다.

다만, 분산형 시물레이션의 가장 큰 장점으로 대두되고 있는 이기종 시물레이션의 상호운용성 구현을 위해 각 시물레이션 모듈 간 표준화 작업이 필수적이며, 정보전달 협약 및 표준에

부합한 모듈 간 연계 및 데이터교환이 요구된다. HLA는 시물레이션 체계 간 정보교환 및 상호운용성을 촉진하고 각 시물레이션 모듈의 재사용성 향상을 위해 개발한 분산 시물레이션의 표준기술구조이다(Zhang et al. 2011). HLA 개념 하에서 분산형 시물레이션에 참여하는 각각의 하위 시물레이터는 페더레이트(Federate)라 칭하며, 특정 시물레이션 목적을 달성하기 위해 상호작용하는 시물레이션 집합을 페더레이션(Federation)이라 한다. 페더레이션을 구성하는 모든 페더레이트들은 HLA 표준 및 규칙에 따라 동일한 라이브러리의 사용이 요구된다(AbouRizk 2010). 그림 1은 HLA 기반 분산형 시물레이션의 구조를 설명한 것으로, 단순 분산형 시물레이션은 각 시물레이션이 그물망 구조를 형성하는 데 반해 HLA는 Run-Time Infrastructure(RTI) 라는 분산 시물레이션 미들웨어(middleware)를 활용하여 시물레이션 모듈 간 정보를 교환하는 차이점을 갖는다.

2. 상위체계구조 (HLA) 관련 기술개발 및 연구 동향

앞서 설명한 HLA 기반의 분산형 시물레이션은 국방, 우주, 에너지, 철도, 제조 분야 등에서 다양하게 적용되고 있는데, 최근에는 방재 및 건설 분야에서도 지속적으로 연구되고 있다. 다음 표 1은 방재 및 건설관리 분야 관련 분산형 시물레이션 및 HLA 적용 연구를 보여주고 있다.

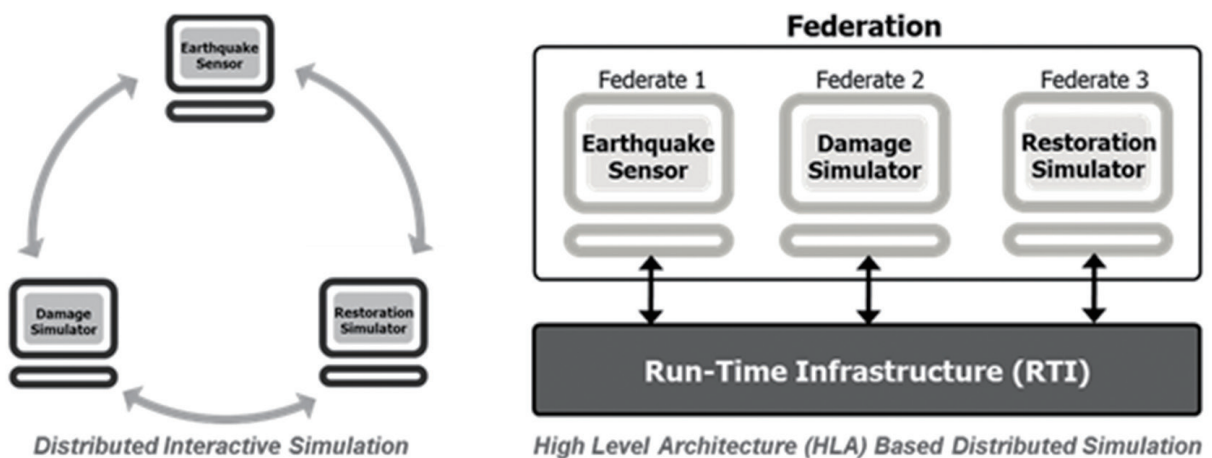


그림 1. HLA 기반 분산형 시물레이션의 특징

표 1. 분산형 시뮬레이션 관련 연구 동향 (방재 및 건설관리 분야)

연구명	연구자	주요 내용
A Distributed Disaster Simulation System That Integrates Sub-simulators	Koto and Takeuchi (2003)	도시에서의 재난 예측과 대응을 위한 시뮬레이션 시스템을 제시, 재난 예방 계획, 재난 응답 훈련 등을 위해 통합 시뮬레이션 시스템 사용
HLA-Based Emergency Response Plan Simulation and Practice over Internet	Hu et al. (2004)	재난 후 긴급 상황 시 Grid를 이용한 HLA/RTI 기반 분산형 시뮬레이션 프레임워크 제시, 시뮬레이션 간 상호운용성과 재사용성을 향상
Open Source Software for Disaster Management	Curion et al. (2007)	2004년 인도양 쓰나미 이후 스리랑카에서 오픈소스 재난 매니지먼트 정보 시스템인 How Sahara 개발.
Framework of an Emergency Management System Using Different Rescue Simulators	Yotsukura and Takahashi (2009)	재난 시 구조작업에 대한 시뮬레이션 툴 간의 링크를 통해 상호운용 될 수 있는 프레임워크 및 프로토타입 개발
Distributed Building Evacuation Simulator for Smart Emergency Management	Dimakis et al. (2010)	분산형 시뮬레이션 기반 재난 등 긴급 상황 시 피난, 구조작업 지원 시뮬레이션
Research in Modeling and Simulation for Improving Construction Engineering Operations	Abourizk et al. (2011)	HLA 기반 분산형 시뮬레이션 프레임워크인 COSYE (COstruction SYnthetic Environment)를 개발, 건설 프로세스 분석 등 다양한 분야에 적용.
Conceptual Framework to Optimize Building Energy Consumption by Coupling Distributed Energy Simulation and Occupancy Models	Menassa et al. (2014)	HLA 기반 분산형 시뮬레이션을 활용하여 시설물 에너지 소비 관리를 위한 시뮬레이션 프레임워크 제시.

특히, 최근 건설분야에서는 COSYE Framework (Construction Synthetic Environments, University of Alberta 개발)란 HLA 분산형 시뮬레이션 환경을 개발하였는데 (AbouRizk et al. 2011), 건축시공간의 각 정보를 하나로 통합하여 시공계획에 따른 공정상황 분석등을 HLA 플랫폼 기반으로 수행할 수 있게 한다. 이처럼, 건설분야에서도 분산형 시뮬레이션은 다양한 개별 프로그램을 연계함으로써 그 현실성과 적합성을 확보하기 위해 노력 중에 있다.

한편, 분산형 시뮬레이션 환경에서 프로그램의 상호연동을 위해서는 객체지향 프로그래밍과 프로그램의 소스코드 확보가 필수적인데, C++ 및 JAVA 프로그램의 특징적 프로그래밍 방법론인 객체 (Object), 클래스 (Class) 중심의 프로그래밍법이 각 프로그램간의 데이터 연결에 핵심적이기 때문이다. 그러므로 소스코드를 제공하지 않는 상업적 프로그램과 폐쇄적 프로그램은 직접적으로 연결, 사용하는데 많은 어려움이 따른다.

최근에는, 분산형 시뮬레이션의 개방성을 확보하고자 많은 연구가 시도되고 있는데, University of Michigan에서 오픈 소스형 RTI 중 하나인 CERTI-RTI (프랑스 Onera社 개발)를 적용하여 시설물 에너지 관리 분야에 적용한 연구가 이러한 노력의 예시이다 (Menassa et al. 2014).

III. 재난 시뮬레이션 관련 기술 및 연구동향

재난 시뮬레이션 소프트웨어는 다양한 연구단체 및 관련기관에서 다양한 목적을 가지고 개발되어 왔다. 이 중 재난 상황에서 재난에 따른 피해를 평가하거나 재난 대응활동을 지원하기 위해 개발된 주요 시뮬레이션은 표 2와 같다. 재난 시뮬레이션 소프트웨어 주요기능으로 각각의 프로그램은 피해 원인 규명과 피해규모 예측에 목적을 두고 있는 1차 피해 산출 프로그램과 예상 시나리오에 따른 피해상황 산출, 수송, 구조, 복구, 피난 대책 등의 복구 시나리오를 제공해 주는 2차 의사결정 보조 프로그램으로 구분할 수 있다.

표 2. 재난 시뮬레이션 관련 기술 동향

프로그램	개발기관	목적	주요기능
OpenSees	Univ. of California, Berkeley	지진 시뮬레이션	- 지진 등 하중에 따른 구조물 영향 평가 - 건축물, 구조체 반응 시뮬레이션
HAZUS-MH	FEMA (미국 재난관리청)	풍수해 피해예측평가	- 지진, 허리케인, 홍수 사전 영향 평가 - 응급 대응/복구 계획 수립 - 피해 및 손실 규모 추정 / 피해 경감 대책 수립
Tsunami N2	Tohoku University (일본)	지진해일 예측 시뮬레이션	- 인도양에서 발생하는 지진·해일의 발생 원인, 최고 높이 및 이동 경로를 파악
DIS (Disaster Information System)	일본 소방청	지진 피해조기평가	- 지진피해 조기평가 및 시뮬레이션 - 수송, 구조, 의료대책 및 피난대책 수립 - 지진피해상정, 복구 및 재건 대책 수립
XDExSim	이지스사	초고층, 피난 시뮬레이션	- 고층 건물 화재 시 피난 상황 시뮬레이션 - 피난 출구 안내 및 피난 유도 - 분석 결과 리포트
FDS-SMV	NIST (미국 국립 표준기술 연구소)	화재 시뮬레이션	- 화재 및 연기 유체 시뮬레이션 - 시간대별 온도분포 변화 - 다양한 서드파티 프로그램: CAD 연동, 피난 시뮬레이션 연동 (FDS-EVAC)
SIMULEX	ES 사 (영국)	피난 시뮬레이션	- CAD 연계 피난모델 시뮬레이션 - 화재 시 재실자의 위치, 방향, 보행 속도 등의 특성을 반영한 피난 경로, 피난시간 예측
ClientRunner	ClientRunner 사	시설물 복구 매니지먼트	- 웹 기반으로 개발 - 시설물 정보, 복구 일정, 예산 등의 실시간 관리를 통한 효과적인 복구계획 수립을 목적

이중, FDS 화재 시뮬레이션은 화재발생, 화재 및 유독가스의 확산을 시설물 정보에 따라 시뮬레이션 한다. 그림 2는 FDS 화재 시뮬레이션의 구동 예이다. 건물의 도면 정보를 받아 시뮬레이션에 사용할 건물 구조를 시각화 하고 지정한 지점에서의 발화시 건물내부의 온도변화, 구조체 변형, 연기의 흐름을 예측할 수 있다.

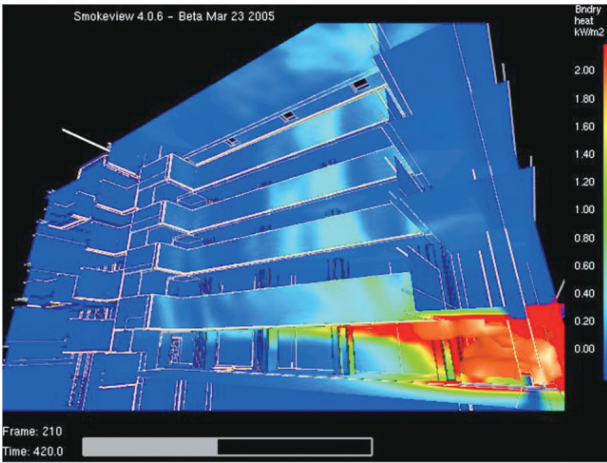


그림 2. 화재 시뮬레이션 (FDS-SMV) 구동 예시

또한, 지진 태풍 등 외부 힘에 의한 시설물 피해를 분석하기 위해 다양한 시뮬레이션 소프트웨어가 개발되고 있는데 오픈소스기반의 프로그램 OpenSees는 그중 한 예시이다. 그림 3은 OpenSees를 기반으로 지진시 고층건물 응력 변화를 구조 해석한 것이다. OpenSees는 소스코드 및 병렬네트워크를 개방하여 대규모 프로젝트의 컴퓨팅 능력을 제공하기 때문에 다양한 분야에서 프로그램을 개발하여 지진의 영향을 평가하고 있다.

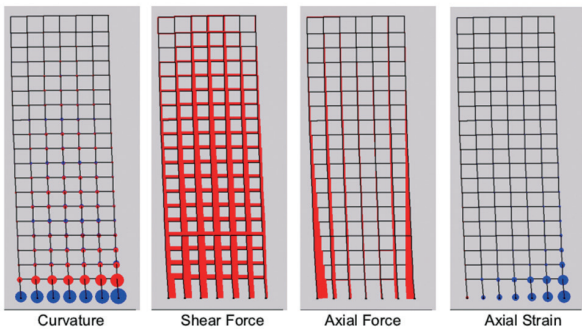


그림 3. 지진 시뮬레이션 (OpenSees) 활용 예시

IV. HLA 기반 시설물 재난 대응/관리 국제협력연구 소개

서울대학교와 University of Michigan은 “분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축” (국토교통과학기술진흥원 국제협력연구)이라는 연구과제를 통해 기 개발된 재난 시뮬레이션 소프트웨어를 활용하여 시설물 재난 대응 및 관리를 지원할 수 있도록 HLA 분산형 시뮬레이션 기술을 적용하는 연구를 수행 중에 있다. 이는 오픈아키텍처 기반의 HLA RTI 플랫폼을 통해 재난유형 및 피해 시뮬레이터와 재난대응 시뮬레이터 간 데이터교환 및 상호운용을 지원함으로써 이루어진다.

그림 4는 본 연구의 시설물 재난 대응 및 관리를 위한 HLA 기반 분산형 시뮬레이션 프레임워크이다. 본 연구는 신속한 시설물 재난 대응을 위해 관련된 기존 상용 시뮬레이션 소프트웨어를 활용하거나, 자체적으로 관련 시뮬레이션 모듈을 개발함으로써 이루어진다. 특히, 지진 발생 후의 상황에서 시설물 내의 피난 계획 및 복구 계획 수립을 지원하고자 전력발전시설 및 초고층 건축물을 중심으로 연구를 진행 중에 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해 먼저 지진에 따른 구조물 변화 및 2차 피해 (예: 화재 발생)가 발생하는 경우에 대한 분석이 요구되는데, 앞서 설명한 수많은 상용프로그램들은 소스코드의 비 개방성으로 인해 HLA 분산형 시뮬레이션 개발에 적합하지 않은 경우가 많다. 이중 OpenSees 구조변화분석 시뮬레이션 소프트웨어 및 FDS 화재 시뮬레이션 소프트웨어는 활용성이 우수할 뿐 아니라 소스코드의 개방성으로 인해 HLA 분산형 시뮬레이션의 하위 모듈로 활용하기에 적합하다. 뿐만 아니라, HLA 분산형 시뮬레이션 환경에서 RTI 소프트웨어를 통해 실시간 재난 정보를 센싱할 수 있는데, 본 연구는 U.S. Geological Survey (USGS) 웹사이트에서 제공하는 Real Time Data Feeds기능을 연동하도록 구축하였다. 이로써 재난 발생 후 실시간으로 재난 정보를 받아 신속하게 시뮬레이션을 수행함으로써 피해분석 및 대응활동 분석 가능하도록 한다.

이러한 시뮬레이션 및 센싱모듈과 함께, 본 연구는 재난 대응 (피난 및 복구) 시뮬레이션 모듈을 Anylogic 소프트웨어를 통해 개발하였다. 먼저, 재실자 특성을 반영한 피난 시뮬레이션 모듈은 HLA 환경에서 OpenSees 및 FDS와 연동된다. 즉, OpenSees 시뮬레이터에서 구조물 변화 정보를 받아 구조체 붕괴 및 화재 발생 가능성을 파악한다. 이후 구조체 붕괴에 따른 화재 발생 시 FDS 화재 시뮬레이터에서 유독가스 확산 정보가

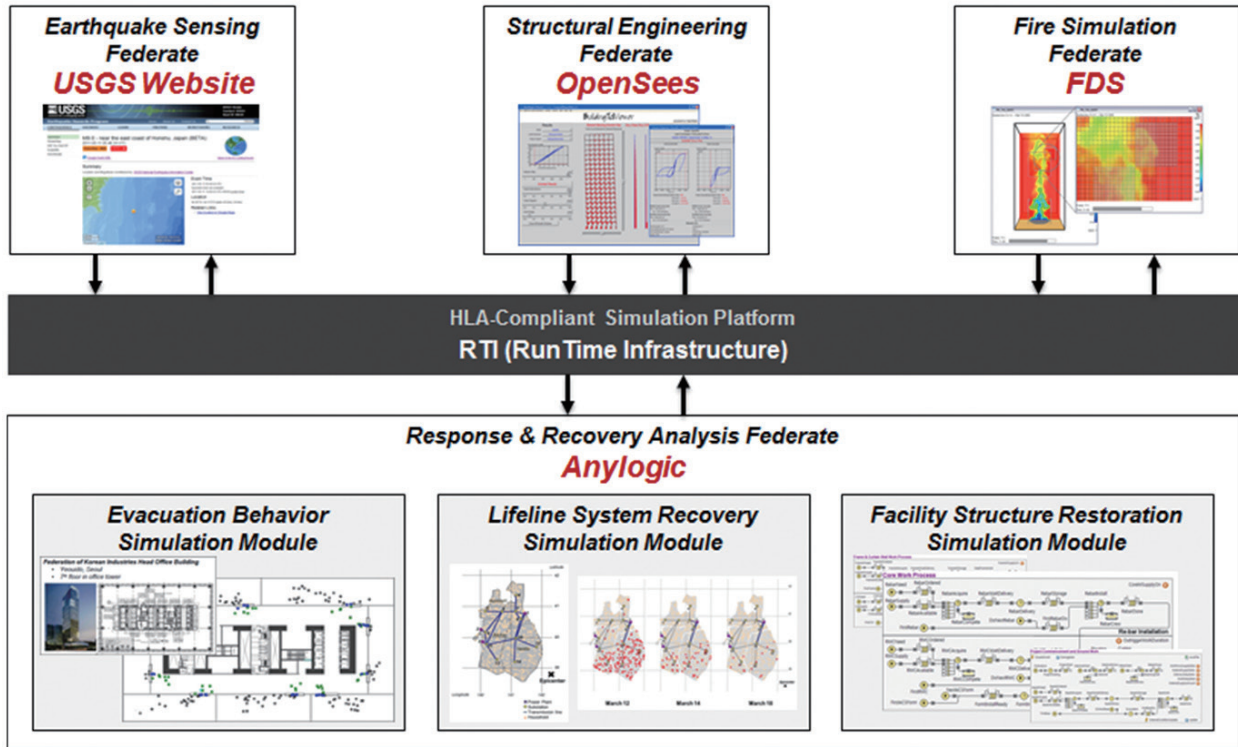


그림 4. HLA 기반 재난 시뮬레이션 프레임워크

RTI를 통해 지속적으로 피난 시뮬레이션 모듈에 반영된다. 이러한 구조변화 및 화재발생에 따라 피난행태가 어떻게 변화하는 지 시뮬레이션 함으로써 효율적인 피난계획을 수립하거나 피난 동선을 확보하는 데 활용할 수 있게 한다.

전력계통 및 구조체 복구 시뮬레이션 모듈의 경우, 지진이 발생한 이후 지진정보를 USGS 웹사이트에서 실시간으로 센싱 하면 OpenSees 시뮬레이터를 통해 분석된 구조체 피해 정보를 RTI를 통해 받아들인다. 분석된 피해 정도에 따라 복구 작업 범위를 결정하고, 전력계통 복구 시뮬레이션 및 구조체 복구공정 시뮬레이션을 수행하여 신속하고 효율적인 복구 계획 수립을 지원할 수 있게 한다.

이처럼 본 연구는 분산형 시뮬레이션을 통해 지진 발생 후, 또한 그에 따른 화재 등 2차 피해가 발생하는 경우 신속하게 재난 정보를 받아들여 피해를 분석하고 대응계획 수립에 유용한 정보를 제공할 수 있도록 국제협력을 통해 진행되고 있다.

V. 결론

경제적 측면만을 한정하여 고려할 때, 재난 예측 및 대응, 복구 기술 관련 시장은 대형 재난의 증가로 인하여 그 비중이 지

속적으로 증가하고 있다. 특히, 재난 발생 시 천문학적 금액이 투입되는 재난 복구 보다 적은 비용으로 높은 효율을 기대할 수 있는 재난 예측 및 사전 대응책 수립에 대한 기술적 수요가 증가하고 있다.

또한, 국제사회에서는 이미 범지구적인 노력을 통해 재난 대응관련 지식 및 솔루션의 공유를 확대하고 있으며, 선진국들은 재난 예방에 많은 예산을 투입함으로써 거대 재난에 대한 피해를 최소화하고, 복구에 드는 시간과 비용을 절감하고자 하는 노력을 투입하고 있다. 사후 복구 위주의 재난 대응에서 예측을 통한 사전 대응으로 패러다임의 변화를 주고, 이를 통해 국내 방재 체계를 선진화하여 방재산업 전반의 효율을 개선시킬 필요가 있으며, 지속적인 연구개발로 국제 경쟁력을 강화하고 관련기술과 시장에 대한 선점이 필요한 시점이다. 이러한 상황에서 HLA 분산형 시뮬레이션 기술은 수많은 종류의 재난발생 및 대응 시뮬레이션 간 상호운용성, 각각의 시뮬레이터가 다양한 종류의 시설물과 재난 상황에 적용될 수 있는 재사용성, 새로운 재난 상황에 맞춰 신속히 업데이트 될 수 있는 확장성을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 현재까지 수행중인 “분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축”의 프로토타입은 향후

지속적으로 개발될 경우, 확장성을 가진 분산형 시뮬레이션 플랫폼, 시설물 BIM모델, GIS 시각화 모듈의 상호운용을 통해 단순한 시뮬레이션을 넘어 전방위적 시설물 재난 대응 및 관리를 위한 ‘Hazard Map’ 및 ‘Control Tower’의 기술적 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 본 연구를 통해 축적된 분산형 시뮬레이션 활용 기술은 기존에 연구되거나 개발된 우수한 소프트웨어, 시스템, 프로그램 등을 목적에 따라 상호연동하여 재사용할 수 있어, 건설 분야의 다양한 문제를 해결하기 위한 솔루션적인 대안으로 그 활용가치가 높을 것으로 사료된다.

(본고의 작성에 도움을 준 황성주 박사과정 연구원(서울대학교)에게 감사의 말을 전합니다.)

(본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 '건설교통기술촉진연구사업' (과제번호: 12TRPI-C064106-01) 연구과제의 일부를 포함하고 있습니다.)

- 박문서 E-mail: mspark@snu.ac.kr
- 이상현 E-mail: shdpm@umich.edu

VI. 참고문헌

- AbouRizk, S. (2010). "Role of Simulation in Construction Engineering and Management.", *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 136(10), pp. 1140–1153.
- AbouRizk, S., Halpin, D., Mohamed, Y., and Hermann, U. (2011). "Research in Modeling and Simulation for Improving Construction Engineering Operations." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 137(10), 843–852.
- Currion, P., de Silva, C. and Van de Walle, B. (2007) "Open Source Software for Disaster Management", *Communications of the ACM*, 50(3), 61–65.
- Dahmann, J. S. (1998). "Standard for Simulation: As Simple As Possible But Not Simpler the High Level Architecture for Simulation." *Simulation*, 71(6), 378–387.
- Dimakis, N., Filippoupolitis, A., and Gelenbe, E. (2010). "Distributed Building Evacuation Simulator for Smart Emergency Management," *The Computer Journal*, 53(9), 1384–1400.
- Harrison, J. R., Lin, Z., Carroll, G. R., and Carley, K. M. (2007). "Simulation Modeling in Organizational and Management Research" *Academy of Management Review*, 32(4), 1229–1245.
- Hu, W., Liu, H., and Yang, Q. (2004). "HLA-Based Emergency Response Plan Simulation and Practice over Internet." *Computer Science*, 5553, 1203–1211.
- Koto, T. and Takeuchi, I. (2003), "A distributed disaster simulation system that integrates sub-simulators", 1st International Workshop on Synthetic Simulation and Robotics to Mitigate Earthquake Disaster, Padova.
- Menassa, C. C., Kamat, V. R., Lee, S., Azar, E., Feng, C., and Anderson, K. (2014). "Conceptual Framework to Optimize Building Energy Consumption by Coupling Distributed Energy Simulation and Occupancy Models" *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 50–62.
- Schulze, T., Strasburger, S., and Klein, U. (1999). "Migration of HLA into Civil Domains: Solutions and Prototypes for Transportation Applications." *Simulation*, 73(5), 296–303.
- Yotsukura, S. and Takahashi, T. (2009), "Framework of an Emergency Management System Using Different Rescue Simulators", *Advanced Robotics*, 23(9), 1233–1246.
- Zhang, Y., AbouRizk, S M., Xie, H., and Moghani, E. (2011). "Design and Implementation of Loose-coupling Visualization Components in a Distributed Construction Simulation Environment with High Level Architecture (HLA)." *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 26(2), 248–258.