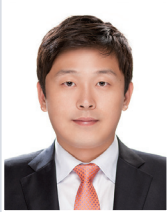


시설물 재난관리를 위한 분산형 시뮬레이션 기술의 확장성 및 재사용성 증진을 위한 연구 동향



황성주 Postdoctoral Research Fellow Department of Civil and Environmental Engineering
Tishman Construction Management Program, University of Michigan

KICEM

I. 서론

재난 발생 시 시설물 재난관리의 목표는 인명피해를 최소화하고, 신속한 복구활동을 통해 정지된 시설물의 기능과 재난지역 전반의 경제·사회활동을 재난 이전 상태로 빠르게 되돌리는 것이다. 그러나 태풍, 지진 등 대형 재난의 경우, 재난 피해지역이 광범위하고 시설물 피해양상 또한 다양하여 신속한 피해산정과 대응/복구계획 수립에 어려움이 따른다(Olshansky et al., 2012). 이러한 상황에서, 컴퓨터 시뮬레이션은 재난발생 시 시설물의 복합적인 피해에 대한 신속한 예측과 파악을 가능하게 하고, 피난, 비상대응, 복구 등 효율적인 재난 대응을 지원하며, 이를 통해 2차 피해를 사전에 예측·방지·대응할 수 있게 한다(Harrison et al., 2007). 하지만 기 개발되어 활용되는 재난대응과 관련한 통합된 단일 시스템 혹은 시뮬레이션만으로는 다양한 재난상황에 대한 복합적인 정보처리가 어렵다. 특히, 여러 재난이 복합적·연쇄적으로 발생하거나 새로운 유형의 재난이 발생하는 경우, 이에 따라 기존에 예측하지 못했던 시설물 피해가 발생하는 경우에는 기존의 재난 시뮬레이션 소프트웨어의 분석 범위를 벗어나기 때문에 새로운 재난 시뮬레이션이 구축이 필요하다 (Hu et al., 2009; Yotsukura and Takahashi, 2009).

이에 서울대학교와 University of Michigan은 국토교통과학기술진흥원의 글로벌협력연구를 통해 “분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축” 과제 (연구책임자: 서울대학교 박문서, 공동연구책임자: University of Michigan 이상현)를 공동으로 수행하였다. 2012년부터 2015년까지 총 3년간 진행된 연구를 통해, 기 개발된 다양한 재난 관련 시뮬레이션이 High Level Simulation Architecture (상위체계구조, 이하 HLA) 분산형 시뮬레이션 아키텍처를 통해 상호연동하여 시뮬레이션

모듈 각각의 분석 범위 넘어 복합적·연쇄적 재난 상황에 대응할 수 있도록 하였다 (Schulze et al., 1999; AbouRizk 2010).

그림 1의 개념도와 같이, 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼은 Run-Time Infrastructure(RTI)라는 분산형 시뮬레이션 미들웨어(middleware)를 활용하여 시뮬레이션 모듈 간 정보 교환 및 동기화를 가능하게 한다. 필요에 따라 서로 다른 재난요소/재난 피해/재난대응 시뮬레이션과 시설물정보모델 등을 각각 필요에 맞게 재조합함으로써, 기존의 모듈을 재활용하면서 새로운 재난 상황과 새로운 시설물에 맞춰 시뮬레이션을 구성할 수 있는 확장성과 재사용성을 도모할 수 있다 (Dahmann 1998).

본고에서는 지진 및 화재 상황 시 시설물 피난 및 복구 분석이란 연구범위 내에서 수행된 글로벌협력 연구과제 결과를 간략히 설명하고, 향후 분산형 재난 시뮬레이션의 활용성 증진을 위해 수행 중인 추가연구에 대한 내용을 소개하고자 한다. 현재 수행중인 추가연구는 실시간 센싱기술의 연동과 추가적인 재난 시뮬레이션 기술의 연계를 통해 실시간 피해분석과 재난대응, 그리고 다양한 재난 유형으로의 확장을 목표로 한다. 이와 함께 구축기술의 사용성 증진을 목표로 다양한 시설물 적용을 위한 시설물 정보모델의 활용, 지역 단위의 재난대응으로의 확장, 시각화 기술의 구현에 대해 간략히 소개한다.

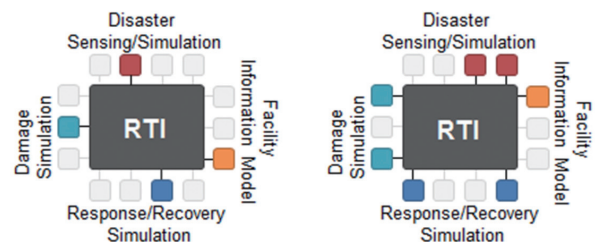


그림 1. 분산형 재난 시뮬레이션의 시뮬레이션 재조합을 통한 확장 및 재사용 개념도

II. HLA 기반 시설물 재난 대응/관리 국제협력연구 결과 소개

그림 2는 본 연구의 시설물 재난 대응 및 관리를 위한 HLA 기반 분산형 시뮬레이션 프레임워크이다. 이는 오픈아키텍처 기반의 HLA RTI 플랫폼을 통해 재난유형 및 피해 시뮬레이터(예: 지진, 화재피해)와 재난대응 시뮬레이터(예: 피난, 복구) 간 데이터교환 및 상호운용을 지원함으로써 이루어진다. 본 연구는 지진에 따른 시설물 구조체 피해 및 화재 상황에 초점을 맞춰, 관련된 기존 상용 시뮬레이션 소프트웨어를 활용하거나 자체적으로 재난대응 시뮬레이션 모듈을 개발하였다. 먼저, 본 연구에서 활용하는 OpenSees 시뮬레이션 소프트웨어는 시설물의 구조체 정보(구조요소, 노드, 재료, 하중 등)를 모델링 한 후, 태풍에 의한 횡하중이나 지진에 의한 지표면 진동 등의 변동하중이 구조체에 영향을 주었을 때 변위나 밀면 전단력 등 구조체의 거동 및 피해를 분석한다(McKenna et al. 2000). 본 시뮬레이션 기술은 지진 피해를 분석하기 위해 시설물이 위치한 지반의 진동을 가속도데이터(Accelerograms)로 입력받아 시간에 따른 구조체 변동을 수행한다. 한편, FDS는 시설물 화재 시뮬레이션 소프트웨어로서, 화재 발생, 화재 및 유독가스의 확산을 시설물 정보에 따라 분석한다(McGrattan et al., 2013). OpenSees 와 FDS 소프트웨어는 분석력이 우수할 뿐 아니라 소스코드 및 병렬네트워크를 개방하거나 대규모 프로젝트의 컴퓨팅 능력을 제공하기 때문에 HLA 분산형 시뮬레이션 내에서 상호연동을 구현하기에 적합하다. 더불어 HLA 분산형 시뮬레이션 환경에는 RTI 소프트웨어를 통해 실시간 재난 정보를 입력받을 수 있는데, 본 연구는 U.S. Geological Survey (USGS) 웹사이트에서 제공하는 실시간 지진정보피드기능을 연동하였다. 이로써 재난 발생 직후 재난정보를 받아 신속하게 시뮬레이션을 수행함으로써 피해분석 및 대응활동 분석이 가능하도록 한다(USGS 2014).

이와 함께, 본 연구는 재난대응 시뮬레이션 모듈들을 개발하였다. 재실자 특성을 반영한 피난 시뮬레이션 모듈은 HLA 환경에서 OpenSees 및 FDS와 연동된다. 먼저, OpenSees 시뮬레이터에서 구조체 거동 정보를 받아 구조체 붕괴 및 화재 발생 가능성을 파악한다. 이후 구조체 붕괴에 따른 화재 발생 시 FDS 화재 시뮬레이터에서 유독가스 확산 정보가 RTI를 통해 지속적으로 피난 시뮬레이션 모듈에 반영된다. 이러한 구조체 변동 및 화재발생에 따른 재실자의 피난행태 변화를 시뮬레이션 함으로써 효율적인 피난계획 수립에 유용한 정보를 제공할 수 있다.

복구 시뮬레이션 모듈의 경우, 전력시설의 전력수급력과 같은 시설물의 기능복구와 손상된 구조체 복구를 포함한다. 이를 위해 지진 발생 후 지진정보를 USGS 웹사이트에서 실시간으로 받아들이고, OpenSees 시뮬레이터에서 분석된 구조체 피해 정보를 RTI를 통해 다른 시뮬레이션 모듈과 공유한다. 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 복합적인 피해가 발생하는 경우 신속하게 재난 정보를 받아들이고 피해를 분석하고 대응계획 수립에 유용한 정보를 제공한다. 또한, 여진과 같은 연쇄재난이 발생하는 경우, 추가적으로 여진에 대한 정보를 받아들이고, 시뮬레이션 재수행을 통해 피해를 재산정하며, 이를 바탕으로 기 산정된 재난 대응 프로세스를 갱신한다.

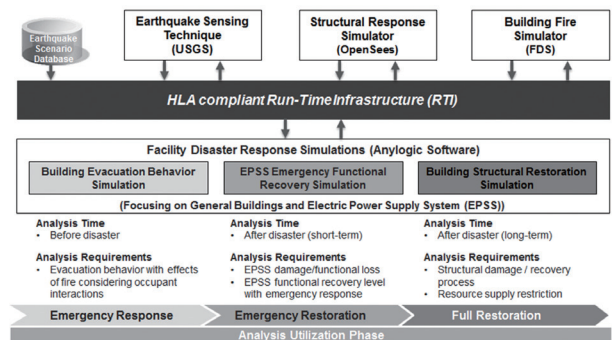


그림 2. HLA 기반 재난 시뮬레이션 프레임워크

III. 분산형 시뮬레이션 활용 및 확장을 위한 추가연구 동향

현재 개발된 분산형 시뮬레이션 기반 재난대응 및 관리 시스템은 지진과 화재상황에 초점을 맞춘 프로토타입 성격의 기술로 정의할 수 있으며, 향후 분산형 시뮬레이션의 가장 큰 장점인 상호연동성, 재사용성, 확장성을 바탕으로 범용성을 확보하기 위해서는 몇 가지 보완사항이 요구된다. 이를 위해 수행중인 추가연구를 간략히 소개하고자 한다.

1. 실시간 재난 피해분석 및 대응: 센싱기술의 활용

시뮬레이션을 통해 재난을 사전에 예측하고 대응한다 하더라도 그 피해 규모와 양상이 예측 치와 상이한 경우가 대부분이며, 이에 따라 재난발생 이후에 신속한 피해분석 및 대응이 요구되는 경우가 대다수이다. 실제로 동일본 대지진 이후 수십만 채의 건축물이 피해를 입었으며, 이에 따라 시설물 피해분석 및 구조

진단에 6개월 이상의 시간이 소요되었다. 시설물 복구계획 수립을 위해서는 이러한 피해분석이 우선적으로 이루어져야 하는데, 이를 위해 현재 구축된 시스템은 지진규모, 진앙지 위치 등 기본적인 지진정보를 바탕으로 시설물 위치의 지반진동을 예측한 후 피해를 예측한다. 이러한 지반진동 예측 방법은 지진가속도계측기가 설치되어 있지 않은 대부분의 일반 건축물에 대한 활용성을 증진시키기 위한 방안이었다. 하지만, 지진가속도계측기를 활용하여 각 시설물이 위치한 지반의 실제 지반진동을 센싱할 경우, 더욱 정확한 피해분석을 수행할 수 있다. 현재, 지진가속도계측기는 주요건물에만 설치되어 있는 경우가 많지만, 최근 기술의 발전에 따라 가속도계측기가 실생활에 널리 사용되고 있다. 예를 들면 최근 대다수의 스마트폰에도 가속도계측기가 장착되어 있어, 사람이나 구조체의 움직임을 스마트폰에서 얻어진 가속도데이터를 통해 분석하는 연구가 증가하고 있다.

이에 그림 3과 같이 스마트폰을 통해 가속도데이터를 센싱하고, 분산형 재난 시뮬레이션에 입력값으로 활용하는 모듈을 개발하고 있으며, 이러한 센싱모듈과 분산형 시뮬레이션 플랫폼의 상호연동은 지진에 따른 지반진동정보를 실시간으로 피해분석 및 재난대응 시뮬레이션에 활용할 수 있는 방안이다. 본 가속도 데이터는 X, Y, Z 3축에 대한 데이터를 모두 포함하기 때문에 지진 시 수평진동 및 수직진동에 대한 분석이 모두 가능하다. 본 스마트폰 가속도계는 ±12,800 cm/s²의 범위의 가속도를 측정할 수 있어 실제 지진 가속도의 범위를 포함할 수 있다(예: 동일본 대지진의 경우 최대 ±3,000 cm/s² 미만).

추가적으로, 발화점에 대한 정보를 화재감지기를 통해 센싱하고 이를 분산형 시뮬레이션 플랫폼과 상호연동하는 경우, 화재확산 시뮬레이션을 더욱 정확하고 신속하게 수행할 수 있으며 이를 토대로 더욱 정확한 재실자 피난행태 분석 정보가 활용될 수 있다.

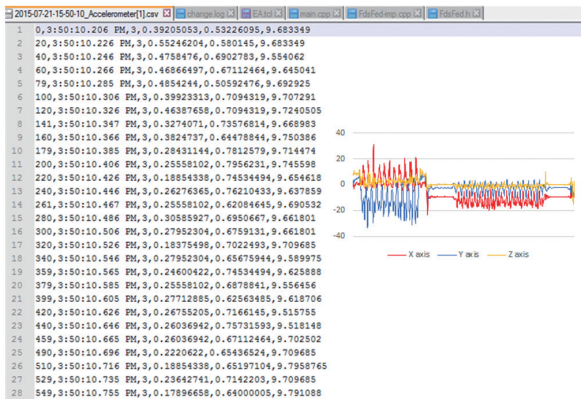


그림 3 스마트폰 가속도계측기를 활용한 가속도데이터 출력 및 활용

2. 다양한 재난 유형으로의 확장: 추가적인 재난 센싱/시뮬레이션 연계

본 연구의 재난 시뮬레이션은 HLA 기반 분산형 시뮬레이션 아키텍처의 장점인 상호연동성 및 확장성에 기반하여, 지진, 화재 뿐만 아니라 기타 재난유형에 대한 센싱/시뮬레이션 모듈을 쉽게 연동시킬 수 있다. 예를 들면, 태풍 센싱/시뮬레이션 모듈과의 연동 시 현재 개발한 기술 및 시뮬레이션 모듈을 그대로 재활용하여 태풍에 따른 구조체 피해분석 및 복구 프로세스 분석을 수행할 수 있다. 구체적으로, OpenSees 소프트웨어를 통한 구조체 거동 시뮬레이션은 기 구축된 시설물 구조 모델을 바탕으로 다양한 하중상황(횡하중, 지진하중)에 따른 구조체 거동을 분석한다. 만약 지진 상황에 따른 시설물 구조체 거동을 시뮬레이션하는 경우, 시설물 구조 모델을 구축한 후 지진가속도데이터를 입력하여 지반진동에 따른 시설물 노드의 변위 등을 분석한다. 이와 동일한 모델을 활용하여 태풍 상황에 따른 횡하중데이터를 입력하는 경우 태풍에 따른 시설물 노드의 변위 등을 분석하고 피해를 산정하는 용도로 재사용될 수 있다.

이는 현재 지진상황에 맞춰 개발된 모듈에서 지진정보 센싱 모듈을 태풍정보 센싱 모듈로 교체하기만 하면, 개발된 시뮬레이션 시스템이 태풍 상황에 대한 시설물 재난 대응/관리로 손쉽게 대체될 수 있음을 의미한다. 실제로 태풍의 예상 풍속의 경우 기상청을 통해 손쉽게 제공받을 수 있으며, 시중에서 판매되는 다양한 풍속측정계 또한 활용 가능한데 현재 이러한 센싱 및 예측 기술과 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼의 상호연동에 대한 연구를 진행 중에 있다. 이러한 연구결과를 통해 향후 분산형 재난 시뮬레이션의 무궁무진한 확장성을 보여줄 수 있을 것으로 기대된다.

3. 사용성 증진을 위한 추가연구: BIM/GIS 연동 및 시각화 기술의 활용

분산형 재난 시뮬레이션에서는 시설물의 피해 및 재난대응 분석을 위해 다수의 시뮬레이션이 상호연동하기 때문에, 각 시뮬레이션 모듈은 동일한 건축물의 평면, 입면, 구조재료 등 시설물 정보를 공유하고 교환해야 시뮬레이션 모델 구축 작업을 단축시킬 수 있다. 모든 시설물 정보가 각각 시뮬레이션 모듈에 따로 입력되는 경우, 모델 구축 시 동일한 정보가 활용되지 못할 가능성에 의해 분석 정확성에 영향을 미칠 수 있다.

개발된 분산형 재난 시뮬레이션 모듈 중 OpenSees에서는 각 Element(벽, 기둥 등) 객체의 속성정보(Coordinates, Material

등)가 활용되는 데, Material의 경우 구조거동 특성 분석을 위한 구조재료 (철근, 철골 등)가 주로 활용되며, FDS 시뮬레이션 또한 시설물의 각 Element 정보 (Coordinates, Material 등)가 화재확산에 영향을 미치기 때문에 중요한 입력 정보로 활용된다. 이러한 기본 정보를 바탕으로, 객체에 더해질 수 있는 공정 등의 추가적인 정보는 시설물 피해분석 후 복구 프로세스 분석 시 유용하게 활용될 수 있다. 이처럼 BIM 모델이 분산형 시뮬레이션 플랫폼과 상호연동 되는 경우, 동일한 시설물 정보가 이를 활용하는 다수의 시뮬레이션 모듈에 신속하고 정확하게 입력될 수 있어 분석 정확성을 높임과 동시에 모델 구축 작업의 효율성을 높일 수 있다.

한편, 본 연구에서는 분산형 재난/대응 관리 시뮬레이션의 활용 분야 중 하나로, 전력계통 피해 분석 및 복구 프로세스 분석에 대한 모듈을 구축하였다. 향후에 보다 광역화된 재난 관리를 위해서는 지역단위의 공간분석을 통해 피해 범위와 확산 지역, 피해 규모 등을 예측하고 이에 대한 유기적인 대응책을 마련을 지원할 수 있어야 한다. 이러한 분석을 더욱 효율적으로 하기 위해서는 GIS기술과의 연동을 통해 방대한 양의 지역정보 (예: 지형, 인구밀도, 전력계통도, 전력수요 등)를 신속·정확하게 활용할 필요가 있다. 예를 들면, 현재 연구에서는 최대지반 가속도(PGA)를 기반으로 한 전력계통의 피해산정을 수행하고 있는데, 지반관련정보(토지특성도, 액상화 취약지도 등)의 부재로 인해 피해산정이 부정확할 가능성이 있다. 따라서 지반정보 GIS를 통해 지반침하이력 등을 가산하여 산정할 경우 더욱 정확하게 전력계통의 기능 저하를 파악하고, 전력계통도 및 전력수요 데이터를 활용하여 긴급복구 및 비상운영 계획수립을 지원할 수 있다.

이러한 BIM 및 GIS의 적용은 분산형 재난 시뮬레이션의 보다 효율적인 시각화를 지원할 수 있는데, 향후 실용화 및 사용성 증진을 위해 피난, 복구 등 각각의 재난 대응 모듈별로 각필요한 정보를 차트, 그래프, 피해분포도 등을 활용하여 보다 효과적으로 제공할 수 있게 한다. 특히 피난 시뮬레이션에서는 시설물 구조정보를 활용하여 병목현상, 정체현상과 같은 현실적인 상황이 시각화 된 형태로써 표현된다. 결과적으로, BIM과 피난 시뮬레이션의 연동은 효율적인 피난을 위한 건축물의 출입구 및 복도의 폭 등을 설계하는 과정에서 특히 유용하게 활용 가능하며, 설계 시 피난 안전성 및 대안을 검토하는 데 있어 그 사용성이 극대화 될 수 있을 것을 예상된다.

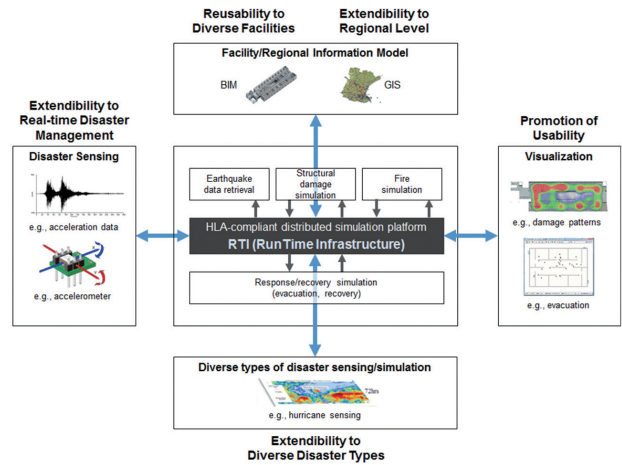


그림 4. 분산형 시뮬레이션 활용 및 확장

V. 결론

재난의 다양성, 복잡성, 그리고 연쇄성으로 인해 재난의 피해는 종종 예측 가능한 범위를 넘어 기존의 예측과 분석을 무용지물로 만든다. 이에, 다수의 재난 시뮬레이션 기술의 재조합 및 상호연동을 통한 분산형 재난 시뮬레이션의 확장성은 수많은 유형의 재난에 대응할 수 있는 새로운 패러다임이 될 수 있다. 뿐만 아니라 HLA 기반의 분산형 시뮬레이션은 시뮬레이션 모듈 뿐 아니라 센싱 모듈 또한 상호연동이 가능한 개념이기 때문에, 센싱기술의 활용은 예측하지 못했던 재난의 복합적·연쇄적 피해에 실시간 대응을 가능하게 하고, 재난 발생 전 뿐만 아니라 재난 발생 이후를 포함하는 재난 관리 전 단계에 걸친 확장성을 제공할 수 있을 것이다.

더불어 다수의 시설물에 대한 재난 대응/관리가 요구되는 경우 각 시설물의 BIM데이터의 활용은 본 개발 기술이 다양한 시설물에 신속하게 적용될 수 있게 하여 분산형 재난 시뮬레이션의 재사용성을 증진시킬 수 있을 것으로 기대된다. 더불어, GIS와의 연동을 통해 시설물 단위를 넘어 지역 전반의 재난 대응/관리로 확장이 가능하며, BIM, GIS 등의 데이터 모델과 시각화 기술의 데이터 호환은 최종 사용자 별 인터페이스를 차별화하고 효율화하는 방안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

결과적으로, 분산형 시뮬레이션의 재사용성과 확장성은 재난 관리 분야의 센싱, 시뮬레이션 등 요소 기술의 진보와 더불어 이러한 기술을 적재적소에 목적에 맞게 다양하게 조합할 수 있게 하여, 보다 복잡한 재난상황에 현실적인 분석을 수행하고 효과적인 대응 및 관리 방안을 제공할 수 있게 할 것으로 기대된다.

VI 참고문헌

AbouRizk, S. (2010). "Role of simulation in construction engineering and management," *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 136(10), 1140–1153.

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.

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. (2009). "HLA-based emergency response plan simulation and practice over internet," *Advances in Neural Networks – ISNN 2009*, 5553, 1203–1211.

McGrattan, K., Hostikka, S., and Floyd, J. E. (2010). "Fire dynamics simulator (version 5), user's guide," NIST special publication, 1019(5), 1–186.

McKenna, F., Fenves, G. L., Scott, M. H., and Jeremic, B. (2000). *Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, U.S.

Olshansky, R.B., Hopkins, L. D., and Johnson, L. A. (2012). "Disaster and recovery: processes compressed in time," *Natural Hazards Review*, ASCE, 13(3), 173–178.

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.

U.S. Geological Survey (USGS) (2014). "Real Time Data Feeds." Retrieved from USGS website: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/?source=sitenav>, accessed on March 3, 2014.

Yotsukura, S., and Takahashi, T. (2009). "Framework of an emergency management system using different rescue simulators," *Advanced Robotics*, 23(9), 1233–1246.

■ 황성주 E-mail: sungjoo@umich.edu