

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 “분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축” 과제의
보고서로 제출합니다.

2016. 02. 04.

주관연구기관명 : 서울대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 박 문 서

연 구 원 : 황 성 주

“ : 최 민 지

“ : 이 슬 비

“ : 지 동 훈

“ : 박 찬 용

공동연구기관명 : University of Michigan

협동연구책임자 : Sanghyun Lee

연 구 원 : Joonoh Seo

“ : Richmond Starbuck

보고서 요약서

과제고유번호	14TRPI-C06 4106-03	해 당 단 계 연 구 기 간	2012.11.21. ~ 2015.11.20	단 계 구 분	3년/3년
연 구 사 업 명	국토교통기술촉진연구사업				
연 구 과 제 명	최상위 과제명	분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축			
	단위 과제명	구분	기관	(세부) 과제명	
		공동	University of Michigan	상위체계구조(HLA)기반 분산형 재난 시뮬레이션 오픈 플랫폼 구축 및 시각화 모듈 개발	
연 구 책 임 자	박문서	총 연구기간 참여 연구원수	총 : 22명 내부 : 22명 외부 : 0 명	총 연 구 비	정 부: 560,000천원 기 업: 187,000천원 상대국: 60,000천원 계: 807,000천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	서울대학교 산학협력단		참여기업명	두올테크	
국제공동연구	상대국명 : 미국		상대국연구기관명 : University of Michigan		
요 약				보고서면수	105
본 연구의 분산형 재난 시뮬레이션 오픈 플랫폼은 상위체계구조(High Level Architecture)를 기반으로 재난 대응과 관련된 시뮬레이션 소프트웨어 간의 데이터 호환 및 상호연동을 지원하는 미들웨어로 하위 시뮬레이션 소프트웨어 간의 상호운용성, 각 하위 시뮬레이션 소프트웨어가 다양한 종류의 시설물과 피해 유형에 적용될 수 있는 재사용성, 새로운 재난에 신속히 대응할 수 있는 확장성을 제공하도록 하는 것을 목적으로 함. 또한 본 연구는 주요 시설물에 대한 재난 대응 및 관리시스템을 구축하고 향후 개발 기술의 활용방안 및 확장전략을 제시함으로써, 전 방위적 시설물 재난 대응 및 관리를 위한 ‘Hazard Map’ 제공 및 ‘Control Tower’의 역할을 수행할 수 있는 기술적인 기반을 마련함.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	재난관리, 분산형 시뮬레이션, 상위체계구조, 오픈소스 플랫폼, 시설물관리			
	영 어	Disaster Response, Distributed Simulation, High Level Architecture, Open Source Platform, Facility Management			

요 약 문

I. 제목

분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축

II. 연구개발과제 개요

지진, 화재 등 재난의 발생 빈도가 증가하고 그로 인한 피해 범위가 광역화됨에 따라 재난 예측 및 대응 단계의 중요성이 강조됨과 동시에 재난 관리의 선진화를 기술적으로 뒷받침할 수 있는 다수의 재난 시뮬레이션 소프트웨어들이 개발되었음. 이러한 재난 시뮬레이션 소프트웨어들은 특정 재난 요소들이 대상 지역 및 시설물에 미치는 영향을 효과적으로 분석함으로써 관련 연구 분야에서 우수성을 인정받음. 그러나 최근의 재난은 지진과 같은 단일 재난이 구조물 붕괴, 화재, 폭발 등의 연쇄재난으로 이어지며 복합적으로 발생하는 것을 특징으로 하기 때문에 기존의 단일 시뮬레이션 소프트웨어를 통해 복합 재난 상황을 예측하는 것에는 한계가 있음. 이처럼 복합 재난에 대한 사전 대비가 필요한 현실이나, 이를 위해 개별 시뮬레이터들을 하나로 통합하게 되면 프로그램이 비대해지고 새로운 유형의 재난이 발생할 경우 프로그램의 활용능력 및 확장성이 떨어짐.

따라서 본 연구는 재난 대응과 관련된 하위 시뮬레이션 소프트웨어들 간의 데이터 호환 및 상호연동을 지원하는 상위체계구조(High Level Architecture, HLA) 기반 분산형 시뮬레이션 오픈 플랫폼 기술을 개발하는 것을 목적으로 함. 본 연구의 오픈 플랫폼 기술은 재난 시뮬레이션 소프트웨어 간의 상호운용성, 다양한 종류의 시설물과 피해 유형에 활용될 수 있는 재사용성, 새로운 재난에 신속하게 대응할 수 있는 확장성을 제공할 수 있을 것임.

또한 본 연구는 주요 시설물에 대한 재난대응(피난, 기능복구 및 비상운영, 구조체복구) 시뮬레이션 모듈을 자체 개발하고 분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템을 구축하여 시설물 재난 취약 요소를 개선하고 재난 대응 매뉴얼 및 확산 방지 대책을 수립하는데 활용하고자 함.

추가적으로 시각화 기술의 활용, BIM 정보모델 및 DB 연동체계 구축 등 향후 개발기술의 타 연구 분야 확장방안을 제시함으로써 국제협력을 통해 구축된 기술이 사장되지 않고 지속적으로 개발·보완될 수 있도록 함.

III. 연구개발 수행 내용 및 결과

본 연구는 건설 시뮬레이션 관련 전문성을 갖춘 서울대학교와 HLA기반 분산형 시뮬레이션 기술 역량을 보유한 University of Michigan의 체계화된 연구협력을 바탕으로 다음과 같은 연구 수행 결과를 도출함.

- ◆ 복합적 재난 발생 및 대응 시나리오 개발

본 연구는 전문기관과의 협의를 통해 1차 재난 유형을 지진과 화재로 선정하고 그에 따른 시설물 구조체 붕괴, 폭발 등 연쇄 재난의 발생과 피해양상을 반영한 대응 시나리오를 개발함. 이와 같은 복합 재난 발생 및 대응 시나리오는 각 재난 단계별 분석 대상 시설물, 시뮬레이션 소프트웨어, 분석 시점, 분석 결과 활용 시점, 분석 요구사항을 포함함. 추가로 본 연구는 관련분야 전문가들을 대상으로 해당 시나리오의 세부 항목에 대한 적정성 평가를 수행함.

- ◆ 분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 프레임워크

본 연구는 재난 관련 기존 기술을 분석하여 실시간 지진정보 센싱기술(USGS), 시설물 구조체 거동 시뮬레이션 기술(OpenSees), 시설물 내 화재 확산 시뮬레이션 기술(FDS)을 분석모듈로 선정함. 또한 3가지 재난대응 분석 하위 모듈을 포함한 Anylogic 재난 대응활동 시뮬레이션 기술을 개발함. 이를 바탕으로 본 연구는 시뮬레이션 모듈 간 데이터 교환 요구사항 및 데이터 송수신 맵을 구축하고 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션의 프레임워크를 도식화 함.

- ◆ 분산형 시뮬레이션 테스트 및 검증 방법 수립

본 연구는 타당성 있는 분산형 시뮬레이션 기술을 개발하고자, 시설물 재난 대응 및 관리 목적에 따른 분산형 재난 시뮬레이션 테스트 방법 및 체계를 정의함. 동시에 본 연구에서 활용하는 하위 시뮬레이션 모듈 및 분산형 시뮬레이션 플랫폼 기술의 상호연동 검증을 수행하여 연구 개발의 신뢰성을 확보함.

- ◆ 재난대응/관리 시뮬레이션 모듈개발 및 테스트

본 연구는 앞서 개발한 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 프레임워크를 바탕으로 재난 대응 분석을 위한 단계별 시뮬레이션 모듈을 개발하고 모델구조 및 주요 함수, 테스트 결과 등을 제시함. 각 시뮬레이션 모듈은 1)재실자 피난행태 시뮬레이션(유독가스영향 산정모듈/재실자 피난행태 예측모듈), 2)시설물 기능 긴급복구 비상운영 시뮬레이션(전력계통 피해산정모듈/발전시설 비상운영 분석모듈/변전시설

기능회복 분석모듈), 3)시설물 구조체 복구공사 시뮬레이션(시설물 주변지역피해 산정모듈, 시설물 구조체피해 산정모듈, 외부 복구환경 제약 분석모듈, 시설물 복구공사 프로세스 분석모듈)로 구성됨.

- ◆ 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 객체모델 개발 및 플랫폼 구축

본 연구는 CERTI-RTI를 활용하여 하위 시뮬레이션 모듈 간의 상호연동을 구현하기 위한 시뮬레이션 객체모델(Federation Object Model)을 개발함. 상위체계구조 기반 분산형 시뮬레이션에서 객체모델은 시뮬레이션 간 실시간으로 교환되는 데이터의 종류 및 속성을 객체화하고 정의한 것으로, 시뮬레이션 상호연동은 이 객체모델에 기반하여 개발됨. 또한 본 연구는 해당 객체모델을 바탕으로 개발한 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 플랫폼의 구동과정, 주요 기능, 상호호환성 확인결과를 함께 제시함.

- ◆ 분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리 시스템 구축

본 연구는 주요 시설물을 대상으로 지진, 화재 후 피해를 신속하게 산정하고 피난/비상운영/복구 등 시설물 재난관리에 유용한 정보를 분석 및 시각화하는 개별 모듈과 이러한 모듈의 구동을 지원하는 시스템인 분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리 시스템을 구축함. 본 시스템은 각 모듈별 GUI (Graphical User Interface)를 포함하며, 연쇄 재난 시 시설물의 피해와 피난 및 복구 프로세스의 변화를 고려하여 개발됨.

- ◆ 분산형 시뮬레이션 기반 재난 대응/관리 시스템 활용 및 확장

본 연구는 분산형 시뮬레이션의 가장 큰 장점인 상호연동성, 재사용성, 확장성을 바탕으로 향후 타 분야로의 확장방안을 제시함. 해당 기술의 활용분야로는 실시간 재난 피해 분석및 대응을 위한 센싱 기술, 시설물 단위 BIM 데이터 연동기술, 지역 단위 GIS 데이터 연동 기술, 시각화 기술 등이 있음.

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

본 연구의 주요 성과는 ‘시설물 재난 대응을 위한 분산형 시뮬레이션 플랫폼’, ‘분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템’, ‘분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 활용 및 확장 방안’임. 이와 같은 세 가지 주요 성과는 각각 세부 요소기술인 1)시설물/지역정보 DB 연동형 재난 시뮬레이터 간 데이터 프로토콜 및 데이터 맵, 2)HLA 기반의 하위 재난 시뮬레이터 간 상호연동 환경, 3)재난 대응

하위 시뮬레이션 모듈, 4)분산형 시뮬레이션을 위한 객체 모델, 5)HLA-based Run-Time Infrastructure, 6)재난 시뮬레이션 시각화 모듈을 일부 포함함. 또한 본 연구는 전체 연구기간 동안 총 2건의 SCI 학술지 게재, 6건의 국내 학술지 게재, 12건의 국내외 학술회의 발표와 같은 학술적 성과를 거두었으며, 동시에 2건의 특허 출원과 3건의 소프트웨어 등록을 수행함.

V. 연구목표 달성 및 효과

본 연구를 통해 개발된 최종 핵심기술은 국내 재난·재해 분야의 국가기술수준을 평균 13.85% 증가시키고 관련 분야 최고기술국인 미국과의 기술격차를 평균 2.5년 감소시킬 수 있을 것으로 예상됨. 또한 본 연구는 재난 후 시설물 피해 분석 및 구조 진단시간을 단축하고, 시설물 복구 자원 분배 공정을 개선하여 복구계획 수립의 지연을 최소화하기 위한 유용한 정보를 제공하기 때문에 재난·재해 복구비용을 10% 이상 절감할 것으로 평가할 수 있음. 추가적으로 본 연구는 변화된 재난환경에 대응하는 맞춤형 전문 인력을 양성하고, 재난정보의 공동 활용체계를 구축함으로써 예방중심의 선제적 재난관리 및 재난 대응 컨트롤 타워 기능을 강화하려는 국가 재난관리 국정 과제의 정책적 노력의 효과를 극대화 할 수 있음.

VI. 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

본 연구의 결과물인 ‘분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템’은 개별 시스템의 사용자뿐만 아니라 재난관리 기관, 시설물 관리자, 지역 안전관리본부 등의 정보 공유체계 구축을 위해 활용 가능함. 특히, ‘국가안전관리정보시스템 (NDMS)’의 기술적 지원을 수행할 수 있으며, 재난 유형에 따른 맞춤형 피난계획 및 행동매뉴얼의 개발의 기초 자료로써 사용될 수 있음. 향후 추가 연구를 통해 본 연구의 개발 기술을 시설물 정보 연동기술(BIM) 또는 지역 정보 연동기술(GIS)과 상호 연동할 경우 보다 현실성 높은 지역 범위의 재난 대응 분석을 수행할 수 있을 것으로 기대됨.

SUMMARY

I . Title

Disaster Preparedness and Response System for Facility Management Using a Distributed and Open Simulation Platform

II . Research Overview

The increasing frequency and damage scale of disasters such as fire and earthquakes has enlarged the damaged area, and necessitated improved forecasting, which lead to development of various disaster related simulations. The disaster simulation softwares affectively analyzes disaster factors and possible impacts on facilities or the surroundings, therefore they are considered reliable in related research areas. However, the recent disaster patterns show the disastrous initiatives to cause chain reactions, which causes limitations for single disaster simulation to forecast the complex condition and consequences. The complex situation necessitates proactive recovery plans using various simulation softwares which inefficiently enlarge the program size and have difficulties in interoperability and extendability for future uses.

The research objectives are to develop a High Level Architecture(HLA) based distributed open platform, which enables seamless data exchange among different disaster simulation modules. The open platform based distributed simulation for disaster preparedness and response system includes interoperability among various simulation modules, reusability for numerous facilities and disaster types, and expandability for new types of disaster as its overarching benefits.

The disaster preparedness and response system incorporates different types of modules that are developed through this research including evacuation, emergency restoration, and structural recovery simulation. Furthermore, the application of visualization techniques and Building Information Modeling (BIM) to the proposed system is expected to maximize the benefits of the research outcome through international collaboration and to provide expanded research scope for construction industry as well as other industries.

III. Research Development and Results

The research is conducted by performing cooperative research collaboration between the Seoul National University with its expertise in construction simulation, and the University of Michigan with its confidence in the High Level Architecture based distributed simulation capability. The research outcome can be summarized as below:

- ◆ Development of Disaster Preparedness and Response Scenario

The research selects earthquake and fire as the main research scope and developed scenarios including possible chain effect damage such as structural collapse and explosion. The scenarios include facilities to be analyzed in each steps in disaster management, related simulation software, required time and criteria for the analysis. Last, the research perform evaluation on detailed scenario with experts on related study areas.

- ◆ Disaster Preparedness and Response Simulation Framework

The research incorporates the modules of disaster related technologies such as immediate earthquake data sensing (USGS), structural behavior simulation (OpenSees), and fire simulation (FDS) for generating appropriate disaster information. Furthermore, various simulation modules are developed to illustrate and to analyze the disaster response activities in different facilities. In order to establish interoperability among modules, the requirements and protocols for data exchange between simulation modules and simulation framework is proposed.

- ◆ Verification and Validation Methods for Distributed Simulation

In order to develop a feasible distributed simulation platform, the research summarizes verification and validation methods for proposed system with respect to existing studies. The result maximizes credibility of simulation modules developed in this research and interoperability among different modules.

- ◆ Development of Disaster Preparedness and Response Simulation Modules

The research develops simulation modules serving its own purposes of analyzing disaster preparedness and response procedure. Each simulation module contains 1)

building evacuation simulation (toxic gas effect estimation module/evacuation behavior analysis module) 2) emergency facility function recovery and management simulation (lifeline) 3) structural facility recovery simulation.

- ♦ Development of Disaster Preparedness and Response Simulation Object Model

The research uses the CERTI-RTI to establish interoperable simulation environment which requires federation object model. The model defines the types and formats of data exchange between different modules. Based on the object model, the research demonstrates the main function, procedures, and interoperability test results of distributed simulation platform.

- ♦ Development of Disaster Preparedness and Response System for Facility Management

The research establishes a system which supports in data exchange among different modules that analyze and visualize the various process of disaster preparedness and response for facility management after earthquake and fire. The system includes graphic user interfaces in each module, and considers the chain effects of disastrous events.

- ♦ Extension and Application of Disaster Preparedness and Response System for Facility Management

The research proposes possible applications of research outcome based on its outstanding abilities, extendability, reusability, and interoperability. The future application of the technology may include sensing technology for disaster damage estimation, integration with the BIM data for facility management, the GIS technology for regional management, and visualization technology.

IV. Final Research Results and Application

The key results of the research includes ‘distributed simulation platform for facility disaster preparedness and response’, ‘distributed simulation based disaster preparedness and response system for facility management’, and ‘application and extension plans for the disaster preparedness and response system’. The three

main results include 1) protocols or exchange maps that interconnect simulation modules with facility/region DB, 2) interoperable environment for the High Level Architecture based distributed simulation for the system, 3) disaster preparedness and response simulation modules, 4) object model for distributed simulation, 5) HLA-based Run-Time Infrastructure, and 6) disaster simulation visualization module. The research outcome also includes academic achievements including 2 SCI journal papers, 6 journal papers, 12 international conference presentation, 2 patent rights, and 3 software developments.

V. Research Objective Accomplishments

The final results from the research are expected to increase the national disaster prevention technology standard by 13.85% in average and reduce the gap between the US, which has the best technology, by 2.5 years. Also, the research reduces the damage analysis on the facility as well as the structural evaluation after the disastrous events, and improve the scheduling for facility recovery to provide information to eliminate the delay. As a result, the disaster recovery resource can be reduced by 10%. The research will produce workers that specialize disaster response, and the system for information sharing. Last, the forecasting system for disaster prevention will increase governmental project's effect to maximize control tower functions

VI. Application of Results and Future Studies

The 'distributed simulation based disaster preparedness and response system' is applicable for not only individual system users, but also disaster prevention institutes, facility manager, and regional safety management organizations for information sharing. The research supports technologies from 'National Management Disaster System', and can be used as essential information for manuals which plans the evacuation according to disaster types. With the future studies, the developed technology can be used in linking technology such as the BIM and the GIS for more practical disaster preparedness and response analysis.

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
Section 1. Research Background and Necessity	1
1. Research Background	1
2. Research Necessity	3
Section 2. Research Objectives	4
1. Final Research Development Objectives	4
2. Annual Objectives	6
Section 3. Research Scope	8
Section 4. Related Current Technology	9
1. Related International Technology and R&D Trends	9
2. International Simulation Developments	11
3. International Related Patents	13
Section 5. Unique Contributions and Differences	14
1. Research Uniqueness	14
2. Research Differences	15
 Chapter 2 Research Developments and Results	 17
Section 1. Research Strategy	17
1. Research Process and Annual Research Contents	17
2. Research Steps	19
Section 2. Research Methodology	23
1. Distributed Simulation	23
2. High level Architecture	23
3. Run-Time Infrastructure (RTI)	24
Section 3. Research Results	26
1. Overall Disaster Response Scenario Development	26
2. Distributed Disaster Response/Management Simulation Framework	32
3. Distributed Simulation Testing and Verification Method	44
4. Disaster Response/Management Simulation Module Development	49
5. Distributed Simulation Object Simulation Model and Platform Development	63
6. Distributed Simulation based Facility Disaster Response and Manage System	69
7. Application of Distributed Simulation based Disaster Response/Management	73

Chapter 3 Final Results and Application	79
Section 1. Final Research Results	79
1. Key Results	79
2. Detailed Technical Results	79
Section 2. Detailed Descriptions of Research Results	80
1. Distributed Disaster Simulation Platform	80
2. Facility Disaster Response and Management	81
3. Distributed Disaster Response/Management Simulation Application	82
Section 3. Research Output Chart	83
1. Research Overall Outputs	83
2. Qualitative Outputs	85
3. Quantitative Outputs	86
Chapter 4 Research Objectives Achievement	87
Section 1. Final Results Achievement	87
1. Research Progress Rate	87
2. Research Objective Achievement Rate	88
Section 2. Technical Research Result Analysis	91
1. Direct Effects	91
2. Indirect Effects	91
Section 3. Economic Research Result Analysis	92
1. Direct Effects	93
2. Indirect Effects	93
Section 2. Political Research Result Analysis	94
1. Direct Effects	94
2. Indirect Effects	95
Chapter 5 Application and Future Studies	96
Section 1. Future Application	96
1. Construction Site Application	96
2. Method for Manufacturing	98
3. Ways of Public Relations	100
Section 2. Future Studies	101
Chapter 6 Resource Reference	103

목 차

〈제목 차례〉

제 1 장 연구개발과제 개요	1
제 1 절 연구의 배경 및 필요성	1
1. 연구의 배경	1
2. 연구의 필요성	3
제 2 절 연구의 목적	4
1. 연구개발 최종목표	4
2. 연차별 세부 목표	6
제 3 절 연구의 범위	8
제 4 절 관련분야 기술개발 현황	9
1. 국내외 관련 기술 및 R&D 동향	9
2. 국내외 시뮬레이션 개발 동향	11
3. 국내 관련 특허 동향	13
제 5 절 연구의 우수성 및 차별성	14
1. 연구의 우수성	14
2. 연구의 차별성	15
 제2장 연구개발 수행 내용 및 결과	 17
제 1 절 연구수행 전략	17
1. 연구 추진 체계 및 연차별 주요 연구 내용	17
2. 연구 수행 방법	19
제 2 절 연구방법론	23
1. 분산형 시뮬레이션	23
2. 상위체계구조 (High Level Architecture)	23
3. Run-Time Infrastructure (RTI)	24
제 3 절 연구수행결과	26
1. 복합적 재난 발생 및 대응 시나리오 개발	26
2. 분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 프레임워크	32
3. 분산형 시뮬레이션 테스트 및 검증 방법 수립	44
4. 재난대응/관리 시뮬레이션 모듈개발 및 테스트	49
5. 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 객체모델 개발 및 플랫폼 구축	63
6. 분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리 시스템 구축	69
7. 분산형 시뮬레이션 기반 재난 대응/관리 시스템 활용 및 확장	73

제 3 장	최종 연구성과 및 적용실적	79
제 1 절	최종 연구성과	79
1.	핵심연구성과	79
2.	핵심요소기술 성과	79
제 2 절	핵심 연구성과 세부 설명	80
1.	분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼	80
2.	시설물 재난 대응 및 관리시스템	81
3.	분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 활용 및 확장 방안	82
제 3 절	성과 총괄표	83
1.	전체 연구기간 총괄성과	83
2.	전체 연구기간 질적성과	85
3.	전체 연구기간 양적성과	86
제 4 장	연구목표 달성 및 효과	87
제 1 절	연구개발 최종목표 달성도	87
1.	연구개발 수행 진도율	87
2.	연구개발 목표의 달성도	88
제 2 절	연구개발 성과의 기술적 효과분석	91
1.	직접효과	91
2.	간접효과	91
제 3 절	연구개발 성과의 경제적 효과분석	92
1.	직접효과	92
2.	간접효과	93
제 4 절	연구개발 성과의 정책적 효과분석	94
1.	직접효과	94
2.	간접효과	95
제 5 장	연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	96
제 1 절	연구성과 향후 활용방안	96
1.	현장 적용 방안	96
2.	실용화 · 제품화 방안	98
3.	시장 홍보 방안	100
제 2 절	추가연구 필요성	101
제 6 장	참고문헌	103

〈표 차례〉

[표 1-1] 재난 발생 및 피해요소	1
[표 1-2] 연구과제의 분석 범위	8
[표 1-3] 주요 5개국의 국가전략기술수준	9
[표 1-4] 재난대응 및 분석 관련 국내외 R&D	10
[표 1-5] 분산형 시뮬레이션 및 상위체계구조 관련 국내외 연구 동향	11
[표 1-6] 재난 요소 및 시설물 피해 분석 시뮬레이션 활용성 분석	12
[표 1-7] 본 연구과제와 관련한 국내 특허 등록 현황	13
[표 1-8] 본 연구과제의 유사과제 검색 결과	15
[표 1-9] 재난 시뮬레이션 관련 향후 활용 가능한 하위 시뮬레이터	16
[표 2-1] 분산 시뮬레이션의 특징 및 장점	23
[표 2-2] HLA의 구성요소	24
[표 2-3] RTI(Run-Time Infrastructure)의 주요 관리 기능	25
[표 2-4] RTI 소프트웨어 분류	25
[표 2-5] 개별 재난별 피해 유형 및 특징	26
[표 2-6] 복합적 재난 발생 및 피해 유형	26
[표 2-7] 분석 대상 시설물 특성 체계화	27
[표 2-8] 재난 단계 별 시설물 별 대응 시나리오	28
[표 2-9] 재난 발생/대응 시나리오 적정성 평가	30
[표 2-10] 재난 관련 기존 시뮬레이션 및 센싱 기술	33
[표 2-11] USGS 지진정보 센싱모듈의 입출력 데이터	35
[표 2-12] USGS 지진정보 센싱모듈의 입출력 데이터 예시 (쿼리 파라미터)	35
[표 2-13] OpenSees 시설물 구조체 거동 시뮬레이션 모듈의 입출력 데이터	36
[표 2-14] FDS 시설물 내 화재 확산 시뮬레이션 모듈의 입출력 데이터	38
[표 2-15] 활용기술의 저작권 내용	39
[표 2-16] 시뮬레이션 모듈 간 간 교환되는 데이터	41
[표 2-17] 페더레이트 간 Interaction 생성과 교환	42
[표 2-18] 재난 대응활동 분석 시뮬레이션 개발 요구사항	43
[표 2-19] 분산형 재난 시뮬레이션의 하위 시뮬레이션 모듈 요약	44
[표 2-20] 하위 시뮬레이션 모듈 별 Conceptual Validation 체계	45
[표 2-21] 하위 시뮬레이션 모듈 별 Calibration/Validation 체계	46
[표 2-22] 분산형 시뮬레이션 검증 체계	47
[표 2-23] 분산형 재난 시뮬레이션 테스트/검증 절차 타당성 평가	48
[표 2-24] 피난 행태 예측 모듈 테스트 시나리오	51
[표 2-25] 시뮬레이션 결과와 실제 데이터 비교(정전가구 수)	56

[표 2-26] 시설물 구조체피해 산정모듈 테스트 결과	60
[표 2-27] 하위 지역별 피해 및 기능회복 현황	61
[표 2-28] 외부 복구환경제약을 반영한 시설물 복구공사 분석모듈 테스트 결과 ----	61
[표 2-29] 분산형 시뮬레이션 플랫폼 상호운용성 및 상호호환성 테스트 결과	68
[표 2-30] 본 연구에서 활용 가능한 GIS 데이터 속성정보	76
[표 4-1] 본 연구의 재난·재해 분야 국가기술수준 기여도	91
[표 4-2] 대표 시설물의 교체비용 예시	93
[표 4-3] 복구비용 산정을 위한 시설물 구성 예시 (부산)	93
[표 4-4] 기대되는 시설물 복구비용 절감	93
[표 4-5] 핵심기술 최종 사용자별 사용 매뉴얼 구성	94
[표 5-1] 시스템 성숙 단계에 따른 실용화 및 제품화 방안	99

〈그림 차례〉

[그림 1-1] 국내 지진 현황	1
[그림 1-2] 연구 개발 이슈 및 목적	4
[그림 1-3] 상위체계구조 기반 분산형 시뮬레이션 기술 개념도	5
[그림 1-4] 연차별 연구내용 및 주요 성과물	7
[그림 1-5] 최고기술국 대비 재난·재해 세부 기술격차	9
[그림 1-6] 분산형 시뮬레이션으로의 패러다임 전환	14
[그림 2-1] High Level Architecture의 구조	24
[그림 2-2] 단계별 재난 대응 시나리오	29
[그림 2-3] 연구의 시나리오에 따른 분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 기본구조 ---	34
[그림 2-4] USGS 지진정보 센싱모듈의 지진 정보 표현	36
[그림 2-5] 지반 진동 가속도 데이터 예시	37
[그림 2-6] OpenSees 모델 예시	37
[그림 2-7] FDS 시뮬레이션 실행 예시	38
[그림 2-8] 유독가스 확산 화면 예시	38
[그림 2-9] 분산형 재난 대응 및 관리 시뮬레이션 프레임워크	40
[그림 2-10] 재실자 피난 행태 시뮬레이션	49
[그림 2-11] 재실자 피난 행태 예측 모듈 주요 개념	50
[그림 2-12] 피난 행태 예측 시뮬레이션 시나리오 예시 (노인시설)	52
[그림 2-13] 피난 행태 예측 시뮬레이션 시나리오 예시 (복합 쇼핑시설)	53
[그림 2-14] 피난 행태 예측 시뮬레이션 시나리오 예시 (오피스)	53
[그림 2-15] 시설물 기능(전력계통 중심) 긴급복구/비상운영 시뮬레이션	54
[그림 2-16] 발전시설 비상운영 분석 모델	55
[그림 2-17] 발전시설 비상운영 단계	55
[그림 2-18] 변전시설의 상호의존성 및 연쇄피해 평가	56
[그림 2-19] 분석대상 지역 정전가구 수 분석	56
[그림 2-20] 시설물 구조체 복구공사 시뮬레이션	57
[그림 2-11] 시설물 주변지역 피해 산정 프로세스	58
[그림 2-22] 과거 데이터를 활용하여 시설물 피해를 산정하는 개념도	58
[그림 2-23] 지역레벨의 시설물 복구 및 기능회복 개념도	59
[그림 2-24] 시설물 복구공사 프로세스 분석 모델	59
[그림 2-25] 시설물 피해가 크고, 주변지역의 피해가 큰 경우	62
[그림 2-26] 주변지역의 피해가 크나, 시설물 피해가 상대적으로 적은 경우	62
[그림 2-27] 분산형 재난대응/관리 시뮬레이션의 커뮤니케이션 아키텍처	64
[그림 2-28] CERTI 기반 HLA 시뮬레이션 수행 프로세스	64

[그림 2-29] DPRS 페더레이션의 클래스 구조	64
[그림 2-30] 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 플랫폼 구동	66
[그림 2-31] DPRS 실행 시 OpenSees 페더레이트의 구조체 정보 제공화면	67
[그림 2-32] 피난 시뮬레이션을 위한 Damage 페더레이트 실행	67
[그림 2-33] FDS 페더레이트의 유독가스 정보 제공화면	67
[그림 2-34] FDS 페더레이트에서 Damage 페더레이트로 전달된 유해가스 데이터 --	67
[그림 2-35] 재실자 피난행태 시뮬레이션 모듈 실행화면	70
[그림 2-36] 단일 및 연쇄 재난 발생 시뮬레이션 비교	70
[그림 2-37] 시설물 기능 긴급복구/비상운영 시뮬레이션 모듈 실행화면	71
[그림 2-38] 연쇄재난(본진과 여진) 발생에 따른 지역 내 정전가구 시뮬레이션 ----	71
[그림 2-39] 시설물 구조체 복구공사 시뮬레이션 모듈 실행화면	72
[그림 2-40] 여진발생 시뮬레이션에 따른 피해 재산정 및 복구 프로세스 수정 ----	72
[그림 2-41] 분산형 시뮬레이션 기반 재난 대응/관리 시스템 활용 및 확장	73
[그림 2-42] 스마트폰 가속도계측기를 활용한 가속도데이터 출력 및 활용	74
[그림 2-43] OpenSees 구조체 거동 시뮬레이션에서 활용하는 시설물 정보	75
[그림 2-44] FDS 화재확산 시뮬레이션에서 활용하는 시설물 정보	75
[그림 2-45] 시설물 정보모델 클래스 다이어그램 예시	75
[그림 2-46] 시각화 기술을 활용한 모듈별 분석 결과	77
[그림 2-47] 분산형 재난 시뮬레이션의 재조합을 통한 확장 및 재사용 개념도 ----	78
[그림 2-48] OpenSees 시뮬레이션의 다양한 재난 영향 반영	78
 [그림 4-1] 시설물 피해 복구비용 산정 프로그램 실행화면	 93
 [그림 5-1] 분산형 재난 시뮬레이션의 예시	 97
[그림 5-2] 연구 결과의 활용 방안	97
[그림 5-3] 연구 결과의 정부/민간 최종 수요자	98

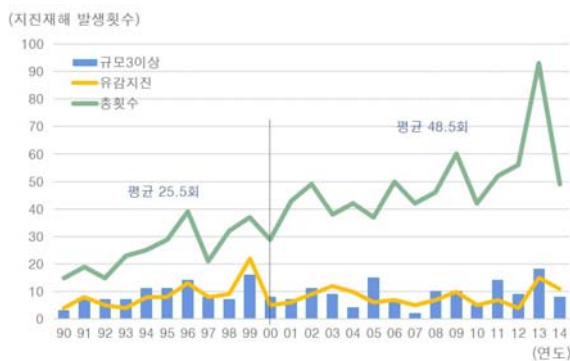
제1장 연구개발과제 개요

제1절 연구의 배경 및 필요성

1. 연구의 배경

가. 국내외 자연환경 및 사회적 여건의 변화

- 지구온난화에 따른 기후 변화로 인해 전 세계는 태풍, 지진, 해일 등 예측 불가능한 거대 자연 재난에 노출되어 있으며, 상대적으로 그 영향이 작았던 우리나라 또한 기상이변, 지진발생빈도 증가 등으로 인해 재해위험성이 높아지고 있는 추세임. 특히, 지난 2013년에는 총 93차례의 지진이 국내에서 발생하여 관측 이래 최고 수치를 기록하며 지진 발생에 따른 재산 및 인명 피해 감소를 위한 사전 대비의 필요성을 재조명함 [그림 1-1].



[그림 1-1] 국내 지진 현황 (기상청, 2014)

[표 1-1] 재난 발생 및 피해요소

구분	내용
자연 재난	지진, 해일, 이상고조, 화산폭발, 산사태, 토석류, 태풍, 강풍, 폭설, 폭우, 우박, 홍수, 범람, 가뭄, 황사, 산불, 낙뢰, 한파, 폭염 등
인적 재난	화재, 붕괴, 폭발, 구조물 손상, 침수, 정전, 환경오염, 가스폭발, 원전사고, 전쟁, 테러, 유독성 물질 유출 등

- 이러한 자연 재난 외에도 화재, 가스폭발, 테러 등 인적 재난은 인명 및 재산 피해를 초래함과 동시에 안전에 대한 국민의 불안감을 증폭시킴. 실제로 2012년 구미에서는 화학물질이 누출되어 발생한 폭발 사고로 인해 23명의 사상자가 발생하였고, 신속한 조치의 부재로 산업단지 인근 지역 일대의 주민과 환경에 엄청난 피해를 초래함.
- 뿐만 아니라, 원전 가동중단으로 인한 전력대란(2013년 5월), 세월호 사고(2014년 3월) 등 인적 재난들이 연속적으로 발생함에 따라 재난의 사전대응 및 사후관리의 필요성이 더욱 강조되고 있으며, 미흡한 초동 대응으로 인한 2차 피해 문제가 논의되고 있음.
- 결과적으로 주요 시설물에 자연적·인적 재난의 발생 가능성이 점점 증대되고 있는 상황에서 재난 위험도를 제대로 인지하고, 재난 예측 및 예방에 있어 정책적·기술적으로 적극적인 태도를 고수하여 재난 발생 시 피해의 발생과 확산을 최소화하는 것이 시급함.

나. 사전 예측 및 대응계획 수립 중심의 재난 관리체제로의 변환

- 최근 10년간 자연재해로 인한 재산 피해는 약 6조 944억 원이며, 이로 인한 총 피해 복구비는 약 1조 581억 원으로 재난재해로 인해 막대한 재정이 소요됨 (국민 안전처 2014). 이에 따라 안전과 관련된 재정 운용에 대해 국가적 차원에서의 관리와 검토가 요구됨.

- 방재 정책이 잘 갖추어진 외국의 경우를 살펴보면 이러한 재난 관리 재정 운용에 있어 재난 예방비용이 피해 복구비용보다 높은 비중을 차지하고 있음. 특히, 미국 국토 안보부는 재난 예방·보호 분야에 전체예산의 75% 이상을 투자하고 있으며, 일본의 경우도 방재예산의 86.6% 이상을 예방·국토보전 등 재난예방 활동에 투자하고 있음.
- 이러한 재난 예방 활동은 단순히 재난 방어시설 구축 뿐 아니라, 재난 상황을 사전에 시뮬레이션 함으로써, 피난, 구조, 복구의 대응 계획을 수립하는 방안을 포함함.
- 우리나라 역시 근래의 재난 사고를 교훈으로 단순 피해 복구에 초점을 맞추었던 2000년대 초반과 달리 사전 예측 및 대응에 우선순위를 두는 재난관리체제 패러다임으로 변화하고 있음. 행정자치부의 국가재정운용계획에 따르면, 국가 차원 재난관리를 위한 재정투자계획의 경우 풍수해, 해일, 가뭄 등 자연재난 재해 예방 사업에 연 평균 약 6.1조원 전체 방재 예산의 약 62.3%를 투입할 예정임.
- 즉, 전체 재난 관리단계에서 재난, 재해에 선제적으로 대응하여 국민과 사회 경제에 미치는 피해를 최소화할 수 있는 재난 예방 및 대응의 단계가 무엇보다도 중요하다는 체제 변화의 흐름에 따라 재난 피해 상황, 대응 및 복구 상황 등 다양한 정보를 정확하고 신속하게 예측하고 의사결정을 지원할 수 있는 도구의 개발이 뒷받침 되어야 하는 상황임.

다. 재난·재해 예방 기술의 고도화와 컴퓨터 시뮬레이션의 발전

- 과학적이고 효율적인 재난·재해 예방 기술의 필요성이 대두됨에 따라 첨단 IT기술을 활용한 방재 시스템의 구축이 활발하게 논의되고 있으며, 국가 주요기반시설 안전관리분야에서는 재난 재해 예측 및 감시 기술, 재난 관리 시뮬레이션 등을 활용한 재난 대응 및 상황지원 기술 개발이 계속되고 있는 상황임.
- 특히 컴퓨터 시뮬레이션의 발전은 모의 재현 및 실험에 어려움이 있는 재해 예측의 정확성을 크게 향상시켰으며, 분석적 방법을 통해서도 다수의 문제를 해결하기에 어려운 재난 관리 분야의 문제를 효과적으로 해결하기 위한 실마리가 되었음.
- 보다 구체적으로 재난 발생 시 컴퓨터 시뮬레이션은 1) 시설물의 복합 피해에 대한 신속한 예측과 파악을 가능하게 하고, 2) 피난, 구조, 복구, 비상시 시설물 운영 등 효율적인 재난 대응을 지원하며, 이를 통해 3) 2차 피해를 사전에 방지할 수 있도록 도움.
- 2011년 동일본 대지진으로 인한 일본 후쿠시마 원전 사고의 경우에 있어서도 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 원전 피해를 사전에 예측하고 신속한 복구 작업계획을 수립했다면 방사능 누출을 방지하고, 주변 시설물을 빠른 시간 내에 재가동함으로써 도십지 전반의 방사능 및 정전 피해 등을 예방할 수 있었을 것으로 분석됨.
- 이미 주요 선진국들은 재난 시뮬레이션 관련 중·장기적인 연구개발 추진에 역점을 두고, 재해 원인규명 및 예측, 재해위험 평가, 재난 대응 지원 프로그램, 비상경보시스템 운영 등 예방 중심의 통합적인 관리체계를 확립하였음.
- 결론적으로 과학적 재난관리에 대한 사회적 요구가 커지는 시점에서, 예상되는 문제점을 사전에 인지하여 전 방위적인 재난 대응책을 수립하고, 재난 발생 시 신속하게 대응 계획을 수립하기 위한 다양한 연구개발이 진행되고 있으며, 특히 관련 연구 분야 중 재난 관리 선진화를 도모할 수 있는 재난 시뮬레이션의 중요성이 커지고 있음.

2. 연구의 필요성

- 지진, 태풍, 화재 등 재난의 발생 빈도가 증가하고 그로 인한 피해 범위도 대형화, 광역화됨에 따라 재난 예측 및 대응 단계의 중요성이 강조되고 있으며 이를 기술적으로 뒷받침할 수 있는 다수의 재난 피해 예측 시뮬레이터들이 개발되었음. 이러한 재난 시뮬레이터들은 각종 재난 요소들이 대상 지역 및 시설물에 미치는 영향을 효과적으로 분석함으로써 그 활용성을 인정받고 있음.
- 현재 지진, 태풍 등 각 재난 발생요소 종류별로는 다양한 시뮬레이션 소프트웨어가 존재하며, 그에 따른 피난, 구조 등의 재난 대응요소 또한 각각의 시뮬레이션 소프트웨어가 개발되고 있음. 예를 들면, 미국의 HAZUS-MH 는 지진, 허리케인, 홍수 등의 영향을 사전에 평가하며, 일본의 DIS는 지진 피해를 조기에 시뮬레이션하기 위해 개발되었음.
- 이러한 상용 및 연구용 재난 시뮬레이션 소프트웨어들은 지진, 태풍 등 특정 상황의 재난 상황에 맞게 구축되었으며, 그 분석에 최적화 되어 있음. 그러나 최근의 재난은 지진과 같은 단일 재난이 구조물 붕괴, 화재, 폭발 등의 연쇄적 재난으로 이어지며 서로 관계하여 복합적으로 일어나는 것을 특징으로 하고 있고 재난 발생 시 주요 시설물에서는 부수적인 2차 재해가 발생하여 이에 따른 대응요소 또한 복합적으로 이루어짐.
- 즉, 기 개발된 재난 시뮬레이션 소프트웨어들은 단일 재난요소에 대한 분석력은 뛰어나지만, 1) 여러 재난이 복합적으로 발생하는 경우, 2) 새로운 재난 유형이 발생하는 경우, 3) 새로운 시설물 유형의 피해를 분석하는 경우, 4) 재난 발생과 동시에 다양한 종류의 재난 대응작업이 발생하는 경우 활용능력 및 확장성이 부족함.
- 따라서 단편적인 피해 예측을 넘어선 복합 재난에 대한 사전 대비가 필요한 현실이나, 이를 위해 개별 시뮬레이터들을 하나로 통합하게 되면 프로그램이 비대해져 시뮬레이션 시간이 오래 걸리고, 새로운 유형의 재난 및 대응요소에 대한 프로그램 확장성이 떨어짐.
- 분산형 시뮬레이션은 위와 같은 통합형 시뮬레이션의 단점을 보완할 수 있는 개념으로 Dahmann (1998)에 의하면, 분산형 시뮬레이션 개발의 필요성으로는 1) 통합형 시뮬레이션은 재난 발생 및 대응요소 등 다양한 구성요소가 존재하고, 2) 복잡한 문제에 대한 시뮬레이션의 모든 기능적 요구사항을 만족할 수 없으며, 3) 재난 시뮬레이션의 목적이 시간에 따라 변하기 때문에 단일한 시뮬레이션 플랫폼을 지속적으로 업그레이드하거나 확장할 필요가 있고, 4) 각 재난 및 대응요소들이 어떠한 조합으로 구동 및 분석되어야 하는 지 예측할 수 없어 단일한 시뮬레이션의 재사용이 불투명하다는 것임.
- 이에 복합 재난에 효과적으로 대응하고 안전한 사회 환경을 구축하기 위해 재난 관련 시뮬레이션을 분석 필요성에 따라 조합 및 구성할 수 있고, 현재 개발된 우수한 기술 수준의 개별 시뮬레이터의 장점을 활용할 수 있는 분산형 시뮬레이션의 도입이 요구됨.
- 보다 구체적으로 1) 개별 시뮬레이터간의 데이터 교환을 용이하게 하고, 2) 개별 시뮬레이터가 서로 다른 구동 환경에서도 상호 작용하며 시뮬레이션 됨으로써 전체 시뮬레이션 시간을 단축하며, 3) 새로운 재난 시나리오에 따라 개별 시뮬레이터의 재사용을 가능하게 함과 동시에, 4) 다양한 종류의 재난에 즉각적으로 대응하기 위한 확장성을 지닌 ‘분산형 재난 시뮬레이션 오픈 플랫폼’ 구축 및 이를 재난의 사전 파악 및 대응계획 수립에 활용하기 위한 ‘시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리 시스템’ 개발이 필요함.

제2절 연구의 목적

1. 연구개발 최종목표

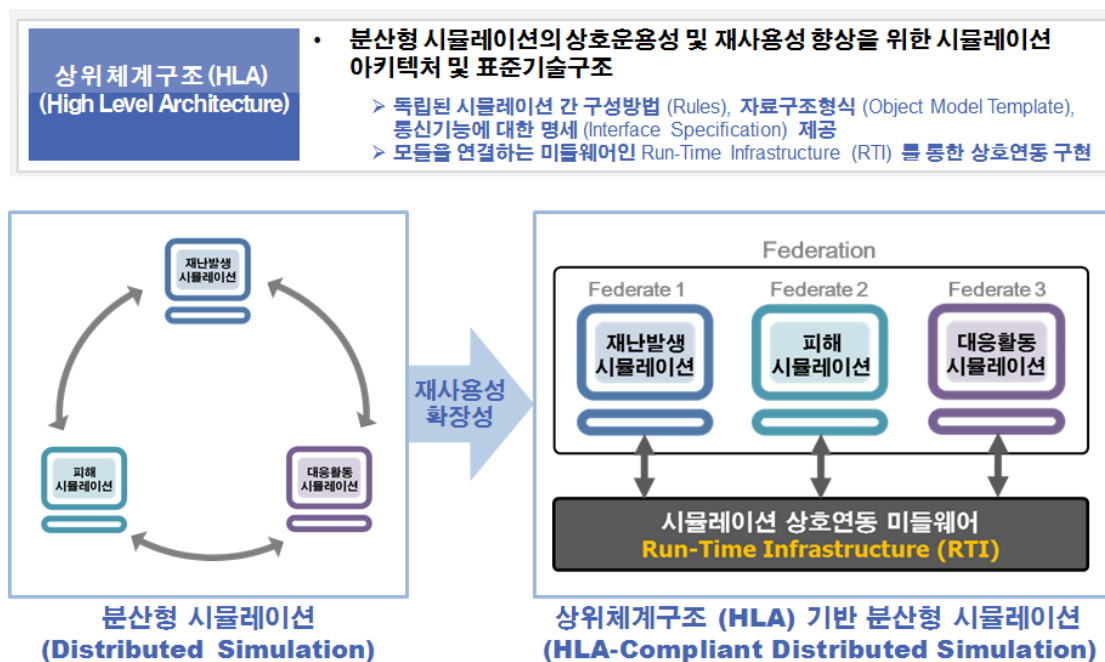
- 본 연구는 대형 재난과 그에 따른 붕괴·화재 등 복합적 피해 발생 시 주요 시설물의 영향을 분석하고, 이에 따른 위기 대응을 보다 신속하고 효율적으로 지원하기 위한 ‘분산형 재난 시뮬레이션 오픈 플랫폼’이라는 기반기술 개발 및 ‘시뮬레이션 기반의 시설물 재난 대응 및 관리시스템’ 구축을 목표로 함.



[그림 1-2] 연구 개발 이슈 및 목적

- 재난 발생 후에는 정확한 피해 분석을 통해 신속한 대응계획 수립 및 대응활동이 요구됨. 그러나 재난의 복합적이고 연쇄적인 특성과 건축물의 고층화·대형화로 인한 피해 규모의 확대 가능성이 상존하여 재난 대응의 분석 요구사항이 증가하고 있음.
- 즉, 재난 피해 및 대응상황의 다양성·불확실성 등의 특성에 따라, 재난 시뮬레이션은 자연재난, 인적재난 등의 재난 발생 유형 뿐 아니라 화재·붕괴 등의 복합적 시설물의 피해 유형 및 그에 따른 피난, 피해 복구, 비상 시 시설물 운영 등 다양한 재난 대응 유형을 포함한 포괄적 분석이 요구됨.
- 이에 따라 본 연구의 오픈 플랫폼 기반의 분산형 재난 시뮬레이션은 수많은 종류의 재난 발생 및 재난대응 시뮬레이터 간의 상호운용성, 각 하위 시뮬레이터가 다양한 종류의 시설물에서 수많은 재난 상황에 적용될 수 있는 재사용성, 새로운 재난 상황에 신속히 대응할 수 있는 확장성을 제공하도록 하는 것을 목적으로 함.
- 본 연구에서는 이러한 시뮬레이션 환경을 제공하기 위해 미 국방부가 제안한 분산 시뮬레이션 표준기술구조인 상위체계구조(High Level Architecture, HLA)에 기반하여 분산형 재난 시뮬레이션 오픈 플랫폼을 구축하고 재난 발생 및 대응과 관련된 모든 하위 시뮬레이터들 간의 데이터 호환체계 및 실시간 상호운용체계를 제공함.

- 이러한 시뮬레이션 환경에서 서로 다른 모듈 간 데이터 교환을 포함한 원활한 상호연동을 지원하기 위해 핵심기술인 RTI (Run-Time Infrastructure) 활용이 필수적임. RTI는 분산형 시뮬레이션을 구성하는 개별 모듈을 연결하는 미들웨어 (Middleware)로써 아래 [그림 1-3]과 같이 각 구성요소들의 정보 송수신 설정 및 관리, 시간 진행 관리, 모듈 참여 및 탈퇴 관리 등 원활한 상호연동을 위한 기능을 담당함.
- 본 연구는 오픈소스 HLA RTI를 통한 분산형 시뮬레이션 플랫폼을 구현하여 분석 대상인 건축물·시설물 별로 상이한 특징을 반영한 각 시설물 정보 DB와 재난 시뮬레이션 간의 데이터 호환체계를 구축함. 이는 향후 새로운 분석 목적에 따른 DB 및 시뮬레이터 추가 적용에 대한 확장성을 가질 것으로 기대됨.



[그림 1-3] 상위체계구조(HLA) 기반 분산형 시뮬레이션 기술 개념도

- 분산형 재난 시뮬레이션을 기반으로 본 연구는 주요 시설물에 대한 재난 대응 및 관리시스템을 구축하고, 이를 재난 발생 전에 사전 시뮬레이션을 통한 취약 요소 개선, 재난 대응 매뉴얼 개발, 재난 발생 후 대응 계획 수립 및 확산 방지 대책 수립에 활용하고자 함.
- 또한, 시설물 구조변화, 재난 대응작업 프로세스 등 재난 시뮬레이션의 시각화 기술 개발을 통해 시각적 재난정보를 재난 대응 및 관리정보와 함께 제공함으로써 시설물 재난 대응 및 관리시스템의 활용성을 극대화 할 수 있도록 함.
- 결론적으로 본 연구는, 분산형 시뮬레이션, 시설물 BIM모델, 시각화 모듈의 상호운용 기술을 개발하고, 향후 개발 기술의 활용방안 및 확장전략을 제시함으로써, 전 방위적 시설물 재난 대응 및 관리를 위한 ‘Hazard Map’ 제공 및 ‘Control Tower’의 역할을 수행할 수 있는 기술적인 기반을 마련할 수 있음.

2. 연차별 세부 목표

가. 1차년도 연구개발 목표

- 본 연구의 “분산형 시뮬레이션 기반 재난대응 및 관리 시스템”은 시설물에 큰 영향을 미치는 재난 발생 유형 뿐 만 아니라 붕괴, 화재 등 시설물의 피해 유형 및 그에 따른 피난, 복구, 비상 시 시설물 운영 등의 재난 대응 유형을 포함해야 함.
- 이를 위해, 1차년도에는 재난 발생 및 대응 유형을 정의한 후, 관련된 재난 시뮬레이션 간 요구 데이터를 분석함으로써 데이터 송수신 맵을 구축하고, 시설물 및 지역 정보를 포함하는 재난 시뮬레이터 간 데이터 호환 라이브러리를 구축하는 것을 목표로 함.
- 특히 앞서 개발된 재난 발생 및 시설물 피해예측 관련 시뮬레이터가 다수 존재하므로 이에 대한 기술동향을 우선적으로 실시하고 기존 시뮬레이터들의 활용 가능성을 분석함.
- 반면 시설물 재난 대응 시뮬레이터들은 그 목적이 본 연구 목적과 상이하거나 상용 소프트웨어 인 경우가 많은 것으로 조사되었으므로 본 연구는 시설물의 재난 대응 단계에서 효율적인 피난, 복구 분석 등의 목표달성을 위해 이에 대한 시뮬레이터를 자체 개발함.
- 추가적으로 재난 발생, 시설물 피해, 시설물 대응과 관련된 하위 재난 시뮬레이터 간 상호 연동을 위해 분산형 시뮬레이션의 핵심 요소인 상위체계구조기반에서의 데이터 호환 체계를 구축하고, 하위 시뮬레이터 간 상호 연동 환경을 구축하는 것을 목표로 함.

나. 2차년도 연구개발 목표

- 재난 발생 후 시설물의 단계별 재난 대응 및 관리를 위해 본 연구는 시설물에 큰 영향을 미치는 재난 유형, 구조체 붕괴, 화재, 시설물 운영·가동 중단 등 시설물의 피해 유형 및 그에 따른 피난, 복구, 비상 시 시설물 운영 등의 재난 대응 유형을 포함하여 분석함.
- 이를 위해, 2차년도에는 앞서 1차년도에 수행한 상위체계구조기반에서의 데이터 호환 맵을 바탕으로 재난 관련 시뮬레이션 모듈 간 상호연동을 구현함.
- 또한 분산형 재난 대응 및 관리 시뮬레이션의 활용성을 증진시키고자, 먼저 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼 기술의 활용체계를 정립함. 이는 실제 재난 대응 및 관리 체계 분석 및 활용방안을 도출하고, 이를 바탕으로 본 연구에서 분석할 복합적 재난 발생 및 대응 시나리오를 개발하는 것을 포함함.
- 특히 2차년도에는 1차년도에 수행한 기존 시뮬레이션 기술 조사 결과 및 실제 재난 대응 및 관리 체계 분석 결과를 바탕으로, 지진 발생 후 시설물 붕괴와 화재 발생 등의 복합적 피해가 발생하였을 때, 시설물 재난 대응 단계별로 (피난-시설물 기능 긴급복구 및 비상 운영-구조체 복구) 분석을 수행하는 시나리오를 구축하고자 함.
- 또한 본 연구에서는 범용성 및 향후 확장성을 고려하여 주요 분석 대상 시설물을 일반건축물 및 전력계통으로 선정하였으며 이를 바탕으로 분산형 재난 시뮬레이션 프레임워크를 구축하고, 오픈 아키텍처 기반 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼을 개발하며, 최종적으로 분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 프로토타입을 구축하는 것을 목표로 함.
- 본 분산형 시뮬레이션 프레임워크는 기존 개발 기술인 지진정보센싱기술, 구조체 거동(피해) 시뮬레이션 기술, 화재 시뮬레이션 기술과 2차년도에 자체적으로 개발 및 테스트를

완료한 단계별 재난 대응활동 분석 시뮬레이션 모듈 (재실자 피난 시뮬레이션, 비상시 시설물 기능 (전력계통 중심) 기능복구 및 운영 시뮬레이션, 시설물 구조체 복구공사 시뮬레이션)이 상호 연동됨.

다. 3차년도 연구개발 목표

- 본 연구의 마지막 단계인 3차년도에서는 앞서 개발된 개별 시뮬레이션 모듈, 분산형 시뮬레이션 플랫폼, 시설물 재난 대응/관리시스템을 바탕으로 “분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼” 및 “시설물 재난 대응 및 관리 시스템”을 최종적으로 구축 및 보완을 완료함.
- 또한 타 분야에서의 활용성 및 적용성, 확장성을 극대화할 수 있는 방안을 제시하는 것을 목표로 함. 이러한 것에는 시각화 기술의 활용, BIM등 정보모델 및 DB등과의 연동체계 제시를 통한 시스템 활용 극대화 등을 포함함.
- 특히 3차년도에는 국제협력을 통해 구축된 기술이 사장되지 않고, 향후 지속적인 개발 및 보완을 위해 현실세계에서 재난 관리에 유용하게 활용될 수 있도록 본 기술이 지속적으로 보완되어 활용될 수 있는 “분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 활용 및 확장 방안”을 제시하는 것을 궁극적인 목표로 함.
- 추가적으로 본 연구의 개발 기술 결과물에 대한 수요자의 요구 만족도 조사와 더불어 연구개발 성과의 기술적, 경제적, 정책적 효과를 분석하여 본 연구개발의 최종 목표 달성도와 과학기술 및 경제사회의 기여도를 평가함.

		1차년도		2차년도		3차년도				
주요 연구 내용	재난 대응 관리 시스템	재난 발생 및 대응유형 정의		분산형 재난시뮬레이션을 위한 오픈 소스 플랫폼 구축		시설물 재난 시뮬레이션 시각화 모듈 연계				
		재난 시뮬레이션 요구 데이터 정의		복합적 재난 대응 및 발생 시나리오 개발		분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 테스트 및 보완				
		재난 발생/대응 시나리오 기반 재난 시뮬레이션 송수신 데이터 맵 구축		분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 프레임워크		분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 활 용 및 확장 방안 제시				
		하위 시뮬레이션 간 데이터 상호호환성 확보		재난대응 시뮬레이션 모듈 개발 및 테스트						
		시설물/지역정보 DB 연동형 재난 시뮬레이션 데이터 프로토콜		분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축						
	요소 기술	하위 시뮬레이터 간 상호연동체계 구축		분산형 시뮬레이션 객체모델 개발		오픈 아키텍처 기반 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼 개발 완료/보완				
		시뮬레이터 간 시뮬레이션 시간 동기화 기술		상위체계구조 (HLA) 기반 분산형 재 난 시뮬레이션 미들웨어 RTI 개발		재난 시뮬레이션 시각화 및 데이터 연 동기술 활용체계 구축				
최종 성과물	기술	재난 시뮬 레이터 간 데이터 프로토콜	시뮬레이터 시간동기화 기술	하위 시뮬레이터 상호연동 체계 및 방법	분산형 시뮬레이션 객체모델	BIM모델 포함한 각 DB와 재난 시뮬레이션 간 상호연동 체계 및 방법	오픈 소스 기반 분산형 시뮬레이션 플랫폼	시각화 모듈과 BIM모델 연동체계 및 방법	재난 시뮬레이션 시각화기술 활용체계 및 방법	시설물 재난대응 및 관리 시스템 및 활용방안/ 확장전략
	확률									

[그림 1-4] 연차별 연구내용 및 주요 성과물

제3절 연구의 범위

- 본 연구의 “분산형 시뮬레이션 기반의 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축”은 전문가 자문, 전문기관과의 협의 등을 통해 향후 확장성과 활용성을 극대화시킬 수 있도록 연구하며 다음 [표 1-2]와 같이 연구과제의 분석범위를 설정함.

[표 1-2] 연구과제의 분석 범위

분석 유형	분석 범위
재난 요소	지진, 화재
피해 유형	시설물 구조체 붕괴, 시설물 운영중단, 시설물 내 유독가스 확산
대응 유형	비상 대응 (재실자 피난), 기능복구 및 비상운영, 구조체 복구
대상 시설물	일반 건축물, 전력계통

- 특히 주요 분석 대상 시설물을 일반 건축물 및 전력계통으로 선정함에 따라 이와 연계성이 있는 지진 및 시설물 구조체 붕괴, 화재에 보다 초점을 맞추어 연구를 진행함.
- 재난 대응 유형의 경우 재실자 피난, 전력계통 중심 시설물 기능 긴급복구 및 비상운영, 구조체 복구로 한정하며 분석하고자 하는 시설물 유형에 따라 각 재난 대응 시뮬레이션을 다양하게 조합하여 적용할 수 있는데, 전력계통은 주로 기능복구 및 비상운영 시뮬레이션, 일반 건축물은 재실자 피난 및 구조체 복구 시뮬레이션을 활용할 수 있음.

제4절 관련분야 기술개발 현황

1. 국내외 관련 기술 및 R&D 동향

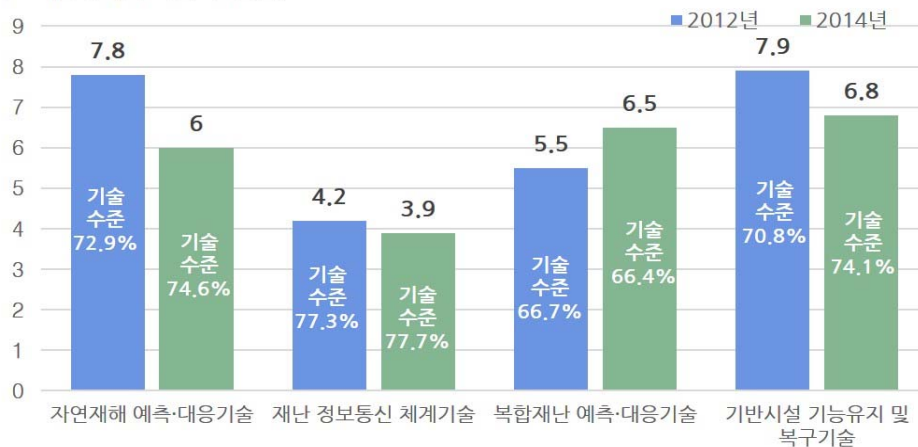
가. 국내외 재난·재해 기술수준분석

- 2014년 우리나라의 재난·재해·안전 분야 국가전략기술 수준은 최고기술국인 미국을 기준으로 기술수준 73.0%, 기술격차 6.0년으로 10대 국가전략기술 평균 기술수준 78.4%, 기술격차 4.4년 대비 낮은 편임. (미래창조과학부, 2014년 기술수준격차 보고서)
- [표 1-3]은 한국, 미국, 유럽(EU), 일본, 중국 등 주요 5개국의 재난·재해·안전 분야 국가전략기술 수준을 나타내며, 이를 통해 우리나라는 중국을 제외한 나머지 국가 대비 재난·재해 기술 수준이 상대적으로 부족함을 확인할 수 있음.

[표 1-3] 주요 5개국의 국가전략기술수준 (미래창조과학부 2014)

분야	한국		미국		유럽(EU)		일본		중국	
	기술 수준	기술 격차	기술 수준	기술 격차	기술 수준	기술 격차	기술 수준	기술 격차	기술 수준	기술 격차
국가 전략 기술	78.4%	4.4년	100%	0년	95.5%	1.1년	93.1%	1.6년	69.7%	5.8년
재난·재해·안전	73.0%	6.0년	100%	0년	92.4%	2.2년	94.3%	1.8년	65.8%	7.6년

최고기술국 대비 기술격차 (년)



[그림 1-5] 최고기술국 대비 재난·재해 세부 기술격차

- 재난·재해·안전 분야 국가전략기술의 8가지 세부 항목 중 본 연구와 관련이 높은 기술은 ‘자연재해 예측·대응기술’, ‘재난 정보통신 체계기술’, ‘복합재난 예측·대응기술’, ‘기반시설 기능유지 및 복구기술’의 4가지로 각 세부기술의 최고기술국(미국) 대비 기술수준 및 기술격차는 [그림 1-5]와 같음.
- 이 중 특히 ‘복합재난 예측·대응기술’의 2014년 기술 수준은 66.6%로 타 세부항목기술에 비해 상대적으로 낮으며 최고기술국 대비 기술격차 2012년 기준 5.5년, 2014년 기준 6.5년으로 기술격차가 더욱 벌어지고 있는 상황임.

나. 국내외 재난 대응 및 분석 관련 R&D

- 국가 과학기술을 활용한 재난안전망 구축에 재난안전 R&D의 역할의 중요성이 강조됨에 따라 다양한 연구기관 및 중앙 부처에서 재난 대응 및 분석 관련 연구가 진행되고 있으며, 현실적으로 재현하는데 한계가 있는 재난·재해 분야의 특성으로 인해 컴퓨터 시뮬레이션 기반의 연구 개발이 특히 활발함.
- 그러나 아직까지 국내에서는 발생 빈도가 상대적으로 빈번한 태풍 및 홍수와 같은 단일 재난요소 분석 시뮬레이션, 화재 및 피난 시뮬레이션 관련 연구가 주를 이루어 새롭게 제기되고 있는 미래형 재난이나 복합 재해 대응 역량강화에 집중할 필요가 있음.
- 방재 선진국인 미국은 과학기술 예산 편성 시 재난·재해 관련 R&D 기술예산을 우선 배정하고 재난관리 시뮬레이션, IT기술을 활용한 첨단 방재장비 개발 등을 주요 방재산업으로 육성하고 있음.
- 일본 또한 재난 예측부터 발생, 복구에 걸친 전주기 R&D 계획을 수립하여 재난 예방 및 대응 관련 연구개발 확대를 진행하고 있음. 그 밖에도 영국은 Go Science Foresight Project(2011년)를 통해 공공 및 민간부문의 재난 예측과 데이터 공유방안 및 비상사태 발생 시 초기대응 방안 수립을 추진하는 등 대부분의 국가에서 재난정보시스템 및 서비스 구축을 통해 재난 재해의 예측성 향상, 대응 효율성 향상을 공동의 목표로 하고 있음.
- 재난 대응 및 분석 관련 국내외 R&D 동향은 다음 [표 1-4]와 같음.

[표 1-4] 재난대응 및 분석 관련 국내외 R&D

과제명	연구기관	주요 내용	한계점
재난 위험도 평가 및 대응 기반기술 구축	국립 재난안전 연구원	통합적 재난 위험도 평가를 위한 한국형 손실편가 체계 및 수요자 맞춤형 방재 기술정책 지원 제도 구축	재난 피해에 대한 경제적 손실 추정에만 초점을 맞추어 진행
재난기술·정보 공유를 위한 글로벌 체계 구축	인하대학교 산학협력단	국내 및 해외 선진방재기술을 도출하고 이들 기술 정보를 공유할 수 있는 운영체계 구축	방재기술의 s/w적인 특성을 공유할 수 있는 체계 구축 미흡
건축 구조물의 상시모니터링 기술과 재해, 재난피해 예측기술 동향에 관한 연구	국토진흥원	재난 시 건축물의 거동에 지배적인 하중 및 지진하중에 대한 건축구조 안전성 평가를 중심으로 건축 구조물의 상시모니터링, 내진성능 평가, 피해 예측기술 동향을 파악	모든 재해 모니터링 정보를 통합하여 관리함으로써 재난에 대한 신속한 대응이 어려움
A Disaster Relief Simulation Model of a Building Fire	Manabu Ichikawa et al.	지진으로 인한 진동, 충격 및 화재에 의한 온도 상승을 감지하여, 가능한 위험인자 조기 발견 및 최적 조치를 가능하게 하는 시뮬레이션 모델 개발	데이터 재사용성과 교환 체계의 미 확립으로 타 시뮬레이터와 상호호환성 및 연동성 부족
A Multi-agent based simulation Model for evacuees escaping from Tsunami disaster	Fujioka et al.	방재분야에 3차원 공간정보를 활용하여 지진 해일, 화재, 피난의 3가지 위험도를 시뮬레이션하고, 재해정보DB 등과 연계하는 멀티 에이전트 기반의 재난 예방 시뮬레이션 프로그램 개발	인간에 대응되는 에이전트의 대피 과정이 단순하며 에이전트 간의 상호작용 결여

2. 국내외 시뮬레이션 개발 동향

가. 분산형 시뮬레이션 및 상위체계구조(HLA) 관련 기술

- 분산형 시뮬레이션은 기 개발된 수준 높은 시뮬레이터들을 분석 목적에 맞게 조합하여 활용하고자 하는 의도에서 출발한 것으로 새로운 분석 목적에 따라 재활용되고 확장될 수 있는 장점이 있음.
- 그러나 각각의 서로 다른 시뮬레이션 환경에서 개발된 시뮬레이터들 간의 상호연동 및 데이터교환에는 기술적 한계가 발생하기 때문에 시뮬레이터 간 공통의 링크를 통해 이를 연계하려는 노력이 지속되었으며, 최근에는 미 국방성에서 제시한 개념인 상위체계구조(HLA)라는 분산 시뮬레이션 아키텍처를 통해 기술 구현이 진행됨.
- 국내에서는 분산형 시뮬레이션 및 HLA와 관련하여 교통, 수송 분야에서 한정적으로 기술 개발이 진행 중이며, IT 분야에서 일부 분산형 시뮬레이션 적용을 위한 연구를 수행 중이나 연구개발 결과의 적용성은 떨어지는 것으로 판단됨.
- 국외에서는 재난 관리 분야에서 기존 통합 시뮬레이션 개발을 넘어 지진, 태풍 등 재난요소 시뮬레이션과, 피난, 구조 등 재난 대응 시뮬레이션 각각을 상호 연동하는 분산형 재난 시뮬레이션 연구가 진행되고 있으나, 이 또한 특정 재난발생 및 대응 분석을 목적으로 개발되었거나, 단일 플랫폼에서 구동되어 확장성 및 재사용성에 다소 제약이 있음.
- 분산형 시뮬레이션 및 HLA관련 국내외 연구동향은 다음 [표 1-5]와 같음.

[표 1-5] 분산형 시뮬레이션 및 상위체계구조 관련 국내외 연구 동향

과제명	연구자	주요 내용	한계점
HLA/RTI 기반의 페트리 넷 분산 시뮬레이션 모델	임동순	RTI를 이용하여 각 단위 시뮬레이션 모델간의 메시지 송수신 방법, RTI 인터페이스 서비스 사용에 대한 연구	IT 분야의 분산형 시뮬레이션 개발 연구로 타 분야로 적용 필요
HLA기반 시뮬레이션 소프트웨어 개발을 위한 분산객체 통신 프레임워크 설계 및 구현	심준용, 위성혁, 김세환	HLA기반 분산형 시뮬레이션 개발 시 기술적 문제점 해결을 위한 연구로 코드 생성 기술을 활용한 인터페이스 구현 방법과 RTI 기능에 대한 API 제공	타 분야로의 적용이 요구되며 재사용성, 확장성 구현이 어려움
Framework of an Emergency Management System Using Different Rescue Simulators.	Yotsukura and Takahashi	재난 시 구조작업에 대한 시뮬레이션 툴 간의 링크를 통해 상호운용 될 수 있는 프레임워크 및 프로토 타입 개발	구조작업에 초점을 맞추며, 단순한 시뮬레이션 간 연계에 가까움
Research in Modeling and Simulation for Improving Construction Engineering Operations	Abourizk et al	HLA를 기반으로 한 분산형 시뮬레이션 프레임워크인 COSYE (CONstruction SYNthetic Environment)를 개발, 건설 프로세스 분석 등 다양한 분야에 적용	분산형 시뮬레이션을 구현하였으나 단일 플랫폼으로 구성
A Distributed Disaster Simulation System That Integrates Sub-simulators	Koto, and Takeuchi	도시에서의 재난 예측을 위한 시스템을 제시하고 재난 응답 훈련 등을 위한 지진, 화재와 같은 하위 시뮬레이터들의 통합 시스템 개발	하위 시뮬레이터 간 완전한 상호운용성을 구현하는데 제한

나. 재난피해분석 및 대응활동 시뮬레이션 관련 기술

- 재난 분야 시뮬레이션의 경우 지진, 화재, 붕괴 등 재난요소의 발생 예측과 그로 인한 시설물 피해 분석을 목적으로 하는 재난 발생 시뮬레이터와 재난 발생 이후 재실자의 피난, 구조, 시설물 복구 등을 목적으로 하는 재난 대응 시뮬레이터로 분류됨.
- 이러한 재난 발생 시뮬레이터에는 지진해일 예측 및 피해 산정을 위한 Tunami-N2, 홍수 사전영향평가를 위한 HAZUS-MH, 지진으로 인한 구조체 거동 분석을 위한 OpenSees, 화재 발생 및 유독가스 확산 시뮬레이션을 위한 FDS 등이 있으며 각각의 소프트웨어에 대한 활용성은 다음 [표 1-6]과 같음.
- 본 연구에서는 적용 가능한 재난요소와 소스 코드 접근 가능 여부 등의 기준으로 OpenSees(지진/구조체 붕괴)와 FDS(화재)의 분산형 시뮬레이션에서의 활용성이 우수한 것으로 평가함.

[표 1-6] 재난 요소 및 시설물 피해 분석 시뮬레이션 활용성 분석

Software	Main Objectives	Analysis Coverage			Source code	Additional Features
		Earth -quake	Structural Change	Fire		
Tunami N2	Tsunami and Earthquake	◎	-	-	Closed	Scenario Database
SAHANA	Tsunami and Earthquake	◎	-	-	Open (Javascript)	-
HAZUS-MH	Natural Disaster	○	-	-	Commercial	GIS
OpenSees	Structural Changes / Earthquake	◎	◎	-	Fully-Open (C++, Tcl)	Visualization Structure Library
CADCE	Structure Collapse	-	○	-	Closed	-
FDS	Fire	-	-	◎	Fully-Open (C++)	Visualization
LS-DYNA	Structural Change (Seismic Collapse)	△	◎	-	Commercial	Material and Element Library 3D Module

- 또한 재난 대응 시뮬레이터에는 재실자의 피난 과정 시각화를 위한 Simulex, Building EXODUS, Pathfinder, DBES와 구조 및 소방 활동을 지원하는 Robocup Rescue, USARSim, 시설물 복구 매니지먼트 소프트웨어인 ClientRunner 등이 있음.
- 그러나 개별 소프트웨어의 활용성 분석결과, 피난 및 복구 시뮬레이터의 경우 비개방성으로 인해 분산형 시뮬레이션 환경에의 적용이 어려우며, 시설물 재난 대응 및 관리 방안 도출을 주목적으로 하는 본 연구 목적과의 상이함으로 재난대응활동 관련 소프트웨어의 자체 개발이 요구됨.

3. 국내 관련 특허 동향

- 본 연구과제와 관련한 기술 개발 동향을 검토하기 위하여 재난 시뮬레이션 또는 분산형 시뮬레이션 플랫폼이 산업에 적용된 기술에 대한 특허를 [표 1-7]과 같이 조사함.
- 그 결과 본 연구의 성과물과 직접적으로 연관된 특허는 존재하지 않았으며, 특히 본 연구의 핵심 요소기술인 ‘오픈소스 기반 시뮬레이션 상호연동환경’ 및 ‘상위체계구조(HLA) 기반 오픈 RTI기술’과 관련한 특허는 아직 존재하지 않음을 확인함.
- 이에 본 연구는 각각의 핵심 요소 기술과 관련하여 2차년도에서 “지진 정보를 실시간 센싱하여 지진 피해 산정에 활용하는 방법”에 대한 특허를 출원 완료하였으며, 3차년도에서 “Fire Dynamics Simulator(FDS) 데이터를 건물 피난 시뮬레이션에 활용하는 방법”에 대한 특허를 출원 완료함.

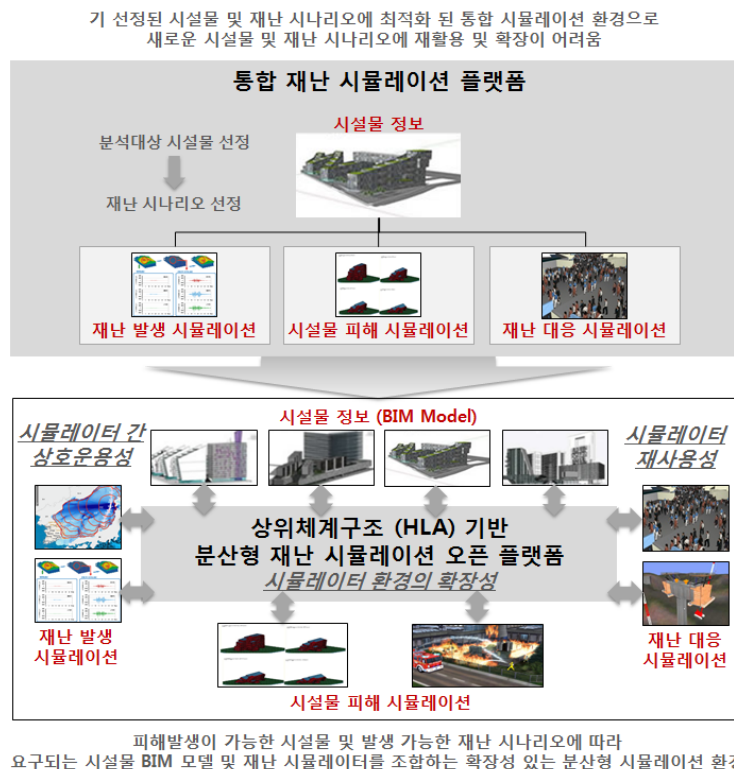
[표 1-7] 본 연구과제와 관련한 국내 특허 등록 현황

등록번호	발명의 명칭	발명 내용
1011522390000	공간정보체계 모바일 서비스시스템 및 그 방법	시설물 공간정보 DB를 구축하여 실시간으로 주요시설물을 검색하고, 위험지역에 대한 정보를 사전에 안내받으며, 있으며, 사용자에게 내 가장 근접한 탈출구를 모바일기기로 제공함으로써, 신속한 비상탈출을 돕는 공간정보체계 모바일 서비스시스템 및 그 방법.
1010255500000	재난 관리 시스템 및 그 방법	고층 건물에 발생한 재난을 감지하는 감지부, 재난 피해를 예측하는 예측부, 발생한 재난에 대응할 수 있는 대응정보를 제공하는 대응부를 포함하고, 재난대응 여부를 모니터링하는 재난 관리 시스템 및 그 방법.
1011450030000	재해 판단을 위한 퍼지 시뮬레이터 시스템 및 방법	재해 판단을 위한 퍼지 시뮬레이터 시스템 및 방법에 관한 특허. 판정 범위 내에 있는 환경에 있어서 화재 가능성, 폭발 가능성, 질식가능성을 동시에 판정.
1011752020000	실시간 화재 감지 및 모니터링 시스템	건축물의 화재감지장치와 네트워크 연결을 통해 실시간 화재정보 및 상황 정보를 수신하여 홈페이지에 출력하는 실시간 화재 감지 및 모니터링 시스템에 관한 특허. 화재정보 및 상황정보를 분석하여 상기 경고레벨에 따라 현장의 위치 및 상태 상세정보를 자동으로 통지.
1020100067741	표준화된 긴급 구조 시스템과 화재 감지 수신기 간의 데이터 연동 시스템 및 방법	ARS 자동응답 시스템을 갖는 표준화된 긴급 구조 시스템과 화재 감지 수신기의 사이에 설치되는 데이터 연동 시스템 제공과 관련한 특허.
1020110133254	건설 구조물 화재에서 개인별 대피 행동 및 사상자를 시뮬레이션하는 화재 위험 평가 시스템, 화재 위험 평가 방법 및 그 기록 매체	건설 구조물 화재에서 시간 및 위치별 화연에 영향을 받는 개인의 생태적 특성을 고려하여 대피 행동 및 사상자를 시뮬레이션하는 시스템, 방법 및 기록 매체에 관한 특허로 화재 시뮬레이션 수행 후, 이를 해석하고 결과 정보의 저장 등이 가능한 컴퓨터 단말을 구비하는 것을 특징으로 함.

제5절 연구의 우수성 및 차별성

1. 연구의 우수성

- 분산형 시뮬레이션은 기존 호스트 시뮬레이션에 반대되는 개념으로 여러 개의 프로세서 또는 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션을 구동하는 것으로, 복잡도와 규모가 큰 시뮬레이션에 대한 필요성이 증가함에 따라 기존의 한계를 극복하고자 하는 요구에 따라 개발됨.
- 이러한 분산형 시뮬레이션은 국방 분야에서 그 확장성 및 성능의 효과를 인정받아 일반 사회분야 연구개발에 활용되기 시작하였으나 건설 및 방재 분야의 경우, 오랜 기간 동안 시뮬레이션 연구가 수행되어 왔으나, 분산형 시뮬레이션의 도입을 노력은 미흡하였음.
- 본 연구는 건설 산업 내 시뮬레이션 연구에 분산형 시뮬레이션이라는 새로운 개념을 도입하여 재난 시뮬레이터, 시설물 정보 DB, 재실자 피난 모듈의 상호 연동이라는 목적 달성과 동시에 오랜 기간 산·학계에서 우수성을 인정받은 재난 시뮬레이터와 자체 개발한 재난 대응 모듈을 연동함으로써, 기존 시뮬레이터의 사용성을 극대화 함.
- 또한 본 연구의 핵심 기술인 ‘분산형 재난 시뮬레이션 오픈 플랫폼’ 및 ‘분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템’은 대형 재난의 증가로 인하여 빠르게 성장하고 있는 재난 기술 관련 시장에서 수요가 높을 것으로 예상됨.
- 또한 본 연구는 분산형 시뮬레이션 오픈 플랫폼 내 지진 센싱, 구조체 피해 분석, 화재 시뮬레이션, 재난 대응 모듈의 상호 연동 요구 사항을 포함하는 객체 모델을 제공함으로써 이기종 시뮬레이터 간 상호 운용성을 현실화시키기 위한 토대를 제공할 수 있음.



[그림 1-6] 분산형 시뮬레이션으로의 패러다임 전환

- 결론적으로, 재난 예측 및 대응을 위한 시뮬레이션과 관련하여 다양한 요소 기술들이 개발되고 있으나 기존 재난 시뮬레이터는 각각의 재난 상황에 최적화되어 있어 여러 가지 요인이 복합적으로 맞물리는 거대 재난에 적용하기에 무리가 있는 상황에서 본 연구는 재난 발생요소 시뮬레이터, 시설물 피해 시뮬레이터, 피난, 구조, 복구 등 재난 대응요소 시뮬레이터 간의 데이터 교환 체계 및 구동 환경을 구축하여 상호 호환성 및 연동성의 수준을 끌어올린 오픈 플랫폼을 개발하여 통합 시뮬레이션에서 분산형 시뮬레이션으로의 패러다임 전환을 가능하게 함.

2. 연구의 차별성

가. 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토

- [표 1-8]은 본 연구의 연구 목표, 연구 내용, 기대효과 등을 기준으로 현재 수행중이거나 수행이 완료된 타 연구과제와 유사도 검색을 한 결과임. 그 결과, 중복과제 선정 기준인 유사도 60%이상의 과제는 발견되지 않았으며, 최고 유사도 수준 35.3%에서 분석됨.
- 본 연구와 가장 유사도가 높은 복합 재난 모델링 & 시뮬레이션 기반 체계 연구는 복합, 연쇄 재난 대응을 지원한다는 점에서 본 연구의 배경과 유사하나 통합 연동형 모델링 및 시뮬레이션 기술을 구현하는 것을 목적으로 하고 있어 본 연구와 차별됨.
- 그 외에 명시된 기존 연구 역시 주로 재난 대응 요소 중 대피 또는 모니터링, 피해 측정 등 단일 요소에 관한 하위 시뮬레이터 개발 연구이므로 본 연구의 목적에 부합하지 않음.

[표 1-8] 본 연구과제의 유사과제 검색 결과

관리기관	사업명	년도	과제명	유사도(%)
한국연구재단	공공복지 안전연구사업	2011	복합 재난 모델링 & 시뮬레이션 기반 체계	35.3
한국연구재단	지역혁신 창의인력 양성사업	2014	상황인식 기반 스마트 응용 재해 모니터링 네트워크 플랫폼 정보 시스템	34.7
한국연구재단	공공복지 안전연구사업	2011	시뮬레이션 기반 재난 대응 및 대비 기술	34.0
국토교통과학기술진흥원	건설기술 연구사업	2014	다중시나리오 기반 재난대응 의사결정지원체계(DRiMSS)기술 개발	31.5

나. 연구개발과제의 차별화 방안

(1) 실제 재난 사례 및 시설물 DB 기반의 시설물 피해 분석

- 본 연구는 보다 현실적인 연구 진행을 위해 다양한 재난 발생 및 대응 유형에 관한 복합 작용 시나리오를 개발하였으며, 지난 동일본대지진 중 피해 및 복구 Timeline을 분석하고 DB화하여, 시나리오의 신뢰성을 검증하였으며 향후 모델 개발 및 검증에 활용 가능함.
- 또한 재난 대응 및 복구 작업의 중심이 되는 국가 정책 요소를 반영한 시설물 생애주기별 재난대응 관리 프레임워크를 구축함으로써 국내 현실에 적용 가능성을 확보하고자 함.

(2) 자체 개발한 시물레이션 모듈

- 본 연구는 재난 발생 및 대응을 위한 기존의 상용 시물레이터들을 장점을 극대화하여 활용함과 동시에, 기존 모듈의 활용이 어려운 하위 시물레이터들을 직접 개발함.
- 개발된 모듈은 재난대응(피난)단계 및 복구(기능회복 및 구조체복구)단계에서 필요한 작업들을 분석하기 위해 개발되었으며, 분산형 시물레이션의 하위 페더레이트로 활용하기 위해 데이터 송수신을 위한 입출력 데이터 맵을 작성하고 그 역할을 분담함.
- 해당 모듈은 분산형 시물레이션의 하위 시물레이터로서의 역할과 동시에 재난 대응과 관련한 독립적 분석 도구로서의 역할 또한 수행 가능함.

(3) 통합형 시물레이션 환경 프로토타입 구축

- 본 연구는 하위 시물레이터들의 초기 통합 환경을 조성하기 위해 재난 시나리오 별 시물레이터 조합을 결정하고 이들의 데이터 상호연동을 가능하게 하는 프로토타입을 구축함.
- 개발된 프로토타입은 상이한 목적의 시물레이터들을 연결할 뿐만 아니라, 모델링 방법론, 분석단위, 인간행동특성 등의 조합을 통해 분석적 다양성을 추구하고 구현함.
- 이는 분산형 시물레이션 플랫폼 내 데이터 교환 접속규약의 정확성을 사전 검증하기 위한 도구뿐 아니라, 분산형 시물레이션의 필요성을 반증할 수 있는 자료로써 활용 가능함.

(4) 상위체계구조(HLA)를 활용한 분산형 시물레이션 오픈 플랫폼 개발

- 본 연구는 서로 다른 재난 시나리오에 따라 요구되는 재난 발생요소 및 대응요소, 시설물 피해요소에 관한 각 하위 시물레이터들이 분석 목적에 맞게 조합되어, 상호 운용될 수 있도록 하는 분산형 재난 시물레이션 오픈 플랫폼을 구축함.
- 분산형 재난 시물레이션은 분석 시나리오에 따라 하위 시물레이터들이 목적에 맞게 조합되어 상호 운용 될 수 있는 재사용성 및 확장성을 갖고 있음을 의미하며, 향후 [표 1-9]의 시물레이터들을 활용함에 따라 추가적인 재난의 분석이 가능한 기술적 환경을 제공함.

[표 1-9] 재난 시물레이션 관련 향후 활용 가능한 하위 시물레이터

구 분	내 용
재난 발생요소	지진, 해일, 산사태, 태풍, 홍수, 산불, 폭발, 전쟁, 테러, 유독성 물질 유출
시설물 피해요소	시설물 붕괴, 시설물 화재, 시설물 구조 손상, 시설물 정전, 시설물 운영
재난 대응요소	재난 대응 훈련, 재실자 피난, 구조, 시설물 복구, 비상시 시설물 운영

(5) 시설물 재난 시물레이션을 위한 통합 데이터베이스 연계

- 재난 시물레이션 중 특히 시설물 붕괴, 손상, 화재 등과 관련하여 시설물의 구조정보, 공간좌표정보, 재료정보, 방재시설정보 등이 요구되는데, 이에 따라 본 연구는 주요 시설물에 대한 속성정보와 지역 및 재해정보를 포함한 통합 데이터베이스를 재난 시물레이션과 연동하여 구조·공간·재료 등의 속성정보 변화를 교환할 수 있는 연동체계를 제시함.
- 시설물 속성정보 및 지역/재해정보를 DB로부터 수신 받은 재난 시물레이터는 재난에 따른 시설물 구조변화, 공간좌표변화 등을 정보화하여 다시 DB로 전송함.

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 연구수행 전략

1. 연구 추진 체계 및 연차별 주요 연구내용

- 본 과제는 건설 시뮬레이션 관련 전문성을 갖춘 주관연구기관 서울대학교의 주도 아래, 공동연구기관인 University of Michigan의 HLA기반의 분산형 시뮬레이션의 기술적 역량 및 연구 경험을 바탕으로 본 연구의 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼 기술개발 및 시설물 재난 대응/관리 시스템 구축을 수행함. 또한 향후 활용성 극대화를 위해 시각화 기술 및 데이터 입력 모듈 (지진 센싱 등) 과의 연동체계를 제시함.
- 이와 동시에 참여기업인 (주)두울테크는 보유하고 있는 건설 관련 기술 및 시스템 개발 기술을 바탕으로 시뮬레이션 플랫폼 및 시설물 재난 대응 및 관리시스템을 테스트하고, 본 기술의 향후 활용성과 확장성 증진을 위한 방안을 도출에 기술적 제공을 수행함.
- 국제협력을 통한 각 기관 간 긴밀한 교류에 기초하여 본 연구의 목표인 ‘분산형 시뮬레이션 기반의 시설물 재난 대응/관리시스템 구축’ 의 체계화 된 진행을 도모함.

연 차	주관연구기관 (서울대학교)	공동연구기관 (University of Michigan)	참여기업 (주) 두울테크)
1차년도 (재난 시뮬레이션 데이터 맵 및 상호연동환 경 구축)	분산형 재난 시뮬레이션 개념 정립 ■ 재난발생 및 대응유형 정의 ■ 상위체계구조 (HLA) 기반 분산형 시뮬레이션 활용성 분석 시설물/지역정보 DB 연동형 시뮬레이션 데이터 호환체계 구축 ■ 재난 발생/대응 시나리오에 따른 재난 시뮬레이션 요구 데이터 정의 ■ 재난 발생/대응 시나리오 기반 재난 시뮬레이션 송수신 데이터 맵 구축 ■ 시설물/지역정보 DB 연동형 시뮬레이터 간 데이터 프로토콜 정의 ■ 데이터 송수신 맵 및 데이터 프로토콜 적정성 평가	재난 발생/대응 시뮬레이터 역할 정의 및 개발 ■ 하위 시뮬레이터 역할 정의 ■ 재난대응 시뮬레이터 개발 상위체계구조 (HLA) 기반 시뮬레이션 상호연동체계 구축 ■ 상호연동 페더레이션 프로토타입 개발 ■ 시뮬레이터 참여시점 정의 및 시간 동기화 모듈 개발	시설물/ 지역정보 DB 호환체계 개발 지원 하위 시뮬레이션 상호연동체계 구축 지원

2차년도 (분산형 재난 시물레이션 오픈 플랫폼 및 시설물 재난 대응/관리시스템 구축)	분산형 재난 시물레이션 플랫폼 활용체계 정립 ■ 재난 대응/관리 체계 분석 및 활용 방안 도출 ■ 복합적 재난 발생 및 대응 시나리오 개발 분산형 재난대응/관리 시물레이션 프레임워크 개발 ■ 분산형 재난대응/관리 시물레이션 프레임워크 ■ 분산형 시물레이션 테스트 및 검증 방법 수립 재난 대응 시물레이션 모듈 추가 개발 및 보완 ■ 재난대응 (피난, 긴급복구 및 비상운영, 구조체 복구) 시물레이션 모듈 개발 ■ 재난대응 시물레이터 보완 및 테스트 분산형 시물레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축 ■ 분산형 시물레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축	분산형 시물레이션을 위한 객체모델 개발 ■ 분산형 시물레이션을 위한 객체모델 개발 오픈 아키텍처 기반 분산형 재난 시물레이션 플랫폼 구축 ■ 상위체계구조 (HLA) 기반 분산형 재난 시물레이션 미들웨어 RTI 개발 ■ 분산형 재난 시물레이션을 위한 오픈 소스 플랫폼 구축	분산형 시물레이션 기반의 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축 및 템플릿 개발 지원
3차년도 (시설물 재난 대응/관리시스템 테스트 및 향후 활용/확장방안 제시)	분산형 시물레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 시각화 모듈 연계 및 테스트 ■ 시설물 재난 시물레이션 시각화 모듈 연계 ■ 분산형 시물레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 테스트/보완 분산형 재난대응/관리 시물레이션 활용 및 확장 방안 제시 ■ 분산형 재난대응/관리 시물레이션의 미래 활용방안 제시 ■ 분산형 재난대응/관리 시물레이션의 확장분야 제시	오픈 아키텍처 기반 분산형 재난 시물레이션 플랫폼 개발 완료 및 보완 ■ 분산형 재난 시물레이션을 위한 오픈 소스 플랫폼 최종 구축 재난 시물레이션 시각화 및 데이터 연동 기술 활용체계 구축 ■ 시설물 재난 시물레이션을 위한 시각화 기술 활용체계 구축 ■ 시각화 기술과 BIM모델 연동체계 구축	시각화 기술 및 BIM모델 활용체계 및 방법 지원 시스템 수정 및 테스트 지원

2. 연구 수행 방법

연구수행결과	연구 내용	연구수행방법 (이론적·실험적 접근 방법)
복합적 재난 발생 및 대응 시나리오 개발	재난발생 및 대응유형 정의	- 기존 재난 사례의 피해, 복구, Timeline에 대한 분석 및 DB화 (국립방재연구원 방문 현장조사보고서 분석) - 각 시뮬레이터의 활용성에 대해 기술적 우수성 및 개방성 중심으로 분석 (Source Code 자체 분석 실시 및 참여기업 (주)두올테크의 활용성 분석에의 협력) - 실제 재난 사례에 적용된 대응 정책 분석 (일본 Reconstruction Agency 복구 진행상황 보고서 분석) - 정형화된 재난 대응 매뉴얼을 통해 정책요소를 반영한 자체적인 재난 대응 프레임워크 개발 (World Vision 등 국제 구호단체의 재난대응 프레임 분석)
	복합적 재난 발생 및 대응 시나리오 개발	- 과거 사례 분석을 통해, 국내 환경에 있어 분석 중요성이 대두되는 재난 및 피해사례 선정 (지진-화재-붕괴) - 문헌 및 사례 분석을 통해 단계별, 시설물 별 중점관리 대상을 도출하여 재난 대응 시나리오 선정 (피난, 전력 계통 기능복구/비상운영, 시설물 구조체 복구) - 국립재난안전연구원 및 건설관리 분야 전문가를 대상으로 시설물 재난 대응 및 관리의 요구사항을 확인하고, 작성한 시나리오의 적정성 평가 수행 (3회 이상)
분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 프레임워크	재난 시뮬레이션 요구 데이터 정의	- 재난 시뮬레이터에서 활용하는 입출력데이터 분석 - 재난 대응 관련 문헌조사를 통해 재난 대응/관리에서 중요한 이슈들을 토대로 데이터 정의 및 구조화
	BIM모델 연동형 재난 시뮬레이션 송수신 데이터 맵 구축	- 기존 BIM모델에서 활용하는 데이터 속성 및 표현방식 분석 (“초고층 연구단” 실무진으로부터 자문 수행) - 시설물 재난대응에서 요구되는 필수정보와 기존 BIM 모델에서 활용하는 정보 시설물정보 DB 구성 정의 - 각 분석 목적별 요구데이터를 분석하고, 데이터 호환이 필요한 경우를 재난 발생/대응 시나리오를 통해 정의
	실시간 시뮬레이션 환경에서의 하위 시뮬레이터 간 데이터 상호 호환성 확보	- 각 데이터가 가질 수 있는 표현방식을 조사 분석하여 상호호환이 용이한 표현방식을 채택 및 구조화 - 각 시뮬레이터별 표현방식이 상이한 경우 표현방식 변환체계 정의 (실제 관련 사용 프로그램을 통해 프로토타입을 구축하면서 표현방식을 확인하고 속성 및 표현 방식변환 가능성 분석) - 기 작성된 데이터 호환 시나리오와 비교함으로써 구축한 데이터 호환 라이브러리의 성능 분석

	재난 발생 및 대응 하위 시뮬레이터 역할 정의	▪ 본 연구의 시설물 재난대응/관리 시스템에 대한 프레임워크 구성하고, 시스템의 다양한 목적 정의 ▪ 분석 목적별 시뮬레이션 조합을 정의 후 조합된 시뮬레이션 모듈 내 각각의 개별 시뮬레이터 역할 정의 ▪ 기존 시뮬레이터 활용이 본 연구 목적과 상이한 경우 시뮬레이터 자체 개발 수행 (관련 시뮬레이터에 대해 공동개발 후 개발 내용을 국내/국외 학술발표대회에서 발표함으로써 그 타당성 확인) (시뮬레이터별 실제 사례 및 시나리오 기반 분석 타당성 검증을 개별 수행)
	하위 시뮬레이터 간 상호연동체계 구축	▪ 상위체계구조(HLA)기반 분산형 시뮬레이션 개념 정립 및 관련 기술동향조사/활용성 분석 수행 ▪ 각 HLA-RTI Software를 조사하며, 기 정립된 상호연동체계 조사 및 활용 (공동연구기관에 기 개발된 CERTI 활용성 상세 분석 및 자문. 또한 Pitch RTI를 대체 후보군으로 선정하여 관련 회사에 문의 결과 비용 측면에서의 활용성이 떨어짐을 확인) (CERTI를 이용한 분산형 시뮬레이션 예시 모듈을 개발하고, 이를 Windows 와 Linux 환경에서 구동하여 플랫폼 구축 가능성 확인) ▪ 분산형 시뮬레이션 모듈에서 분석 목적에 따른 페더레이션에 대한 프로토타입을 통합환경에서 개발하여 개발한 데이터 호환체계 및 접속규약의 정확성을 분석하고, 분산형 시뮬레이션의 필요성 역설
	분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 프레임워크	▪ 기존 재난 사례의 재난 대응 프레임워크 분석 ▪ 실제 재난발생/피해분석/대응분석 시뮬레이션 툴에 대한 분석을 수행하고, 분산형 시뮬레이션 철학 및 본 연구목표에 부합하는 시뮬레이션 모듈 선정. 특히 USGS, OpenSees, FDS를 본 연구의 구현 기술로 선정하고, 시설물 재난 대응 시뮬레이션 모듈 자체 개발 ▪ 전문가 자문을 지속적으로 수행하고, 공동연구기관과의 주기적인 회의를 통해 프레임워크 보완. ▪ 특히, 사용하고자 하는 기존의 시뮬레이션 및 센싱 기술의 입출력 데이터를 분석한 후 프레임워크 개발을 진행하며, 다음과 같은 4단계로 프레임워크 구축. [1단계] 연구 시나리오에 따른 기초프레임워크 [2단계] 시뮬레이션 모듈 입출력데이터 분석 보완 [3단계] 전문가 자문에 따른 보완사항 반영 [4단계] 기술개발 완료 후 프레임워크 수정사항 도출

분산형 시뮬레이션 테스트 및 검증 방법 수립	분산형 시뮬레이션 테스트 및 검증 방법 수립	▪ 먼저, 컴퓨터 시뮬레이션 및 분산형 시뮬레이션에 대한 개념을 정립하고, 기존 연구를 바탕으로 시뮬레이션 연구절차(검증과정 포함)에 대한 체계화 수행 ▪ 건설관리 분야에서 적용된 시뮬레이션 연구 사례 및 검증방법을 바탕으로, 본 연구의 시뮬레이션 검증 방법 도출하고 전문가 평가 후 보완사항 반영 [1단계] 개별 시뮬레이션 모듈의 구조적 타당성 검토 [2단계] 개별 시뮬레이션 모듈 분석결과 테스트 [3단계] 테스트 된 개별 시뮬레이션 모듈의 상호연동을 구현하고, Martinez (2010)에 의해 제안된 검증 방법에 따라, 이러한 상호연동의 정확성 판단
재난대응/ 관리 시뮬레이션 모듈개발 및 테스트	재난대응 (피난, 긴급복구 및 비상운영, 구조체 복구) 시뮬레이션 모듈 개발	▪ 단계별 시설물 재난 대응 시뮬레이션 모듈로써 시설물 피난, 비상시 전력계통 기능복구 및 비상운영, 시설물 구조체 복구 시뮬레이션 모듈 자체 개발 ▪ 이러한 시뮬레이션 모듈은 USGS, OpenSees, FDS와 상호연동이 가능하도록 구축한 시뮬레이션 프레임워크에 따라 개발되며, 모듈 간 데이터 호환 가능성을 분석
	재난대응 시뮬레이터 보완 및 테스트	▪ 피난 시뮬레이션 모듈은 예전 화재 피해를 입은 건축물 피난상황에 대한 상황적 분석을 통해 검증 ▪ 전력계통 및 구조체 복구 시뮬레이션은 2011 동일본 대지진 시 시설물 및 지역의 피해/복구사례와 비교 ▪ 위의 테스트는 시뮬레이션 검증절차에 따라 진행
분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 객체모델 개발 및 플랫폼 구축	시뮬레이터들 간 시뮬레이션 시간 동기화	▪ 기존 시뮬레이션 시간 동기화 방법론 연구조사 ▪ 해외연구기관에서 기 개발한 시간 동기화 모듈을 토대로 본 연구 목적에 맞게 수정 및 개발 (본 시간 동기화 모듈 및 간단한 데모를 통해 이산형 시뮬레이션과 연속형 시뮬레이션의 상호연동 분석을 수행)
	분산형 시뮬레이션을 위한 객체모델 개발	▪ CERTI를 활용하여 분산형 시뮬레이션 프레임워크에 따라 상호연동을 구현하기 위한 객체모델 개발. ▪ HLA 기반 분산형 시뮬레이션에서 객체모델은 시뮬레이션 간 실시간으로 교환되는 데이터의 종류 및 속성을 객체화하고 정의한 것으로, 시뮬레이션 상호연동은 이 객체모델에 기반하여 개발
분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리 시스템 구축	상위체계구조 (HLA) 기반 분산형 재난 시뮬레이션 미들웨어 RTI 개발	▪ 본 분산형 재난 시뮬레이션을 구현하기 위해, USGS, OpenSees, FDS, 재난대응시뮬레이션 모듈이 미들웨어를 통해 상호연동 가능하도록 하는 RTI를 구현함. ▪ 이는 CERTI-RTI 미들웨어에서 제공하는 시뮬레이션 상호연용 관리기능을 구현하도록 개발

분산형 시물레이션 기반 재난 대응/관리 시스템 활용 및 확장	분산형 재난 시물레이션을 위한 오픈 소스 플랫폼 구축	▪ 분산형 재난 시물레이션을 위한 오픈소스 플랫폼은 RTI 미들웨어와 재난 대응 시물레이션 소프트웨어 (Anylogic)와의 상호연동을 Java언어를 기반으로 구현 ▪ 이를 Base Module로 하여, Query 기반의 USGS, Open Sees, FDS를 C++기반으로 연동함. ▪ 이에 따라 구축된 모델의 테스트를 기 작성한 시물레이션 검증절차에 따라 시물레이션 상호호환성 확인
	분산형 시물레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축	▪ 프레임워크 구축 및 이를 구현하는 시스템 프로토타입의 개발을 국제협력을 통해 병렬적으로 수행함으로써, 분산형 시물레이션 기술을 활용한 시설물 재난 대응 및 관리시스템을 피난, 전력계통 기능복구 및 비상운영, 구조체 복구분석을 기반으로 구축
	분산형 시물레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리 시스템 테스트/보완	▪ 앞서 본 연구에서 정의한 분산형 시물레이션 테스트 및 검증 방법 수립에 기초하여 분산형 시물레이션 플랫폼의 상호연동 정확성 및 원활성을 테스트하고, 개별 모듈 및 조합별 방법론 및 데이터 특성을 고려한 검증을 수행 및 추가 보완 수행
	재난 대응/관리 체계 분석 및 활용 방안 도출	▪ 기존 연구문헌 및 보고서를 통해 과거 재난 사례의 피해, 긴급 재난 대응 현황 및 복구 현황, 관련 정책 및 매뉴얼 분석을 수행 ▪ 소방방재청 등 국가부처에서 활용되는 재난 대응 매뉴얼을 분석함으로써, 국내실정을 시나리오에 반영 ▪ FEMA 및 ISO/WD22351 등 해외 재난 대응 매뉴얼을 참고하고, 이를 국내 체계와 비교 분석함으로써, 개발 기술의 범용성 확대 시도
	시각화 기술 활용체계 구축 및 모듈 연계	▪ 시각화 기술 적용을 통한 사용자 편의성 증진을 위해 차별화 된 인터페이스가 필요한 분석 과정 정의 (예: 피난 시물레이션의 병목 및 정체 구간 시각화, 지역 및 시설물 내 지진으로 인한 피해 데이터)
	시각화 기술과 BIM모델 연동체계 구축	▪ Pedestrian library를 활용하여 시물레이션 과정을 시각화하고 다양한 인터페이스를 통해 결과값 도출 ▪ OpenSees와 FDS에서 평면, 재료, 구조 등의 BIM 시설물 정보를 입력받아 활용하는 체계 구축
	분산형 재난대응/관리 시물레이션의 미래 활용방안 및 확장방안 제시	▪ 관련 선행 연구 및 전문가 자문을 통해 도출했던 내용에 기반하여 실시간 재난 및 다양한 재난/시설물 특성 고려, 지역 단위로의 확장, 사용성 증진 등의 향후 확장 및 활용 방안을 실시간 센싱, BIM 데이터 연동, 시각화 기술과 연계하여 제시

제2절 연구방법론

1. 분산형 시뮬레이션

- 분산 시뮬레이션은 하나의 프로세서 또는 컴퓨터에서 작동하는 기존 호스트 시뮬레이션에 반대되는 개념으로 여러 개의 프로세서 또는 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션을 구동함. 이는 시뮬레이션 기술의 발전 및 보급과 함께 점차 복잡도와 규모가 큰 시뮬레이션에 대한 필요성이 증가함에 따라 기존의 한계를 극복하고자 하는 요구에 따라 개발됨.
- Dahmann (1998) 에 의하면, 분산형 시뮬레이션 개발의 필요성으로는, 단일한 통합형 시뮬레이션은 1) 복잡한 문제에 대한 시뮬레이션의 모든 기능적 요구사항을 만족할 수 없고, 2) 시뮬레이션의 목적이 너무 다양하고 시간에 따라 변하기 때문에 단일한 시뮬레이션 플랫폼을 지속적으로 업그레이드하거나 확장할 필요가 있으며, 3) 복잡한 문제에 활용되는 각 시뮬레이터들이 어떠한 조합으로 구동 및 분석되어야 하는 지 예측할 수 없기 때문에 단일한 시뮬레이션의 재사용이 불투명하다는 것임.
- 한 대의 컴퓨터에서 실행되는 호스트 시뮬레이션과 달리 분산 시뮬레이션은 각 시뮬레이션 모듈 간 네트워크를 통해 정보교환이 이루어지며, 유기적 연결을 통해 실행됨. 이를 구현하기 위해 네트워크 통신, 보안, 시간 동기화와 관련된 기술 등의 고려가 필수적임.
- 그러나 다양한 고도의 기술 요구에도 불구하고, 분산 시뮬레이션은 빠른 수행 속도, 분산 설계, 광범위한 시뮬레이션 시스템 구축 등의 가능성을 가지며 지속적인 기술발전을 이룸. 이를 통한 분산 시뮬레이션의 대표적 특징 및 장점은 아래의 [표 2-1]과 같음.

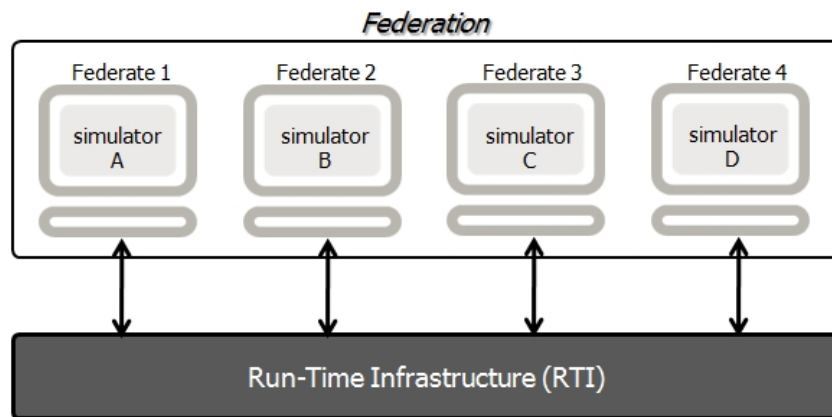
[표 2-1] 분산 시뮬레이션의 특징 및 장점

특징 및 장점	내용
수행 시간의 단축	하나의 커다란 시스템을 여러 개의 하위 모듈로 구분하고, 이를 여러 대의 컴퓨터상에 분산시킴으로써 시뮬레이션 수행 시간의 단축 가능
지리적 분산	지리적인 거리의 제약이 가지는 환경 내에서도 동시 시뮬레이션 진행 가능
이기종 시뮬레이션의 상호 운용 및 통합	변환 과정 없이 이기종 시뮬레이션을 연계하여 공동 진행 가능하며, 대규모 시뮬레이션 개발 시 본 개념을 이용, 전체 시뮬레이션을 세분화하여 각 모듈의 보다 전문적 특화 가능
재활용 및 확장성	시뮬레이션 모듈이 목적에 따라 조합되어 재사용 및 확장이 가능함

2. 상위체계구조 (High Level Architecture)

- 상위체계구조 (High Level Architecture: HLA)는 미 국방부가 시뮬레이션 체계 간 상호운용성을 촉진하고 각 시뮬레이션 모듈의 재사용성 향상을 위해 개발한 분산 시뮬레이션의 표준기술구조임.
- 미 국방성을 중심으로 국방 관련 모든 향후 시뮬레이션 개발에 HLA 표준을 준수하도록 규정되었으며, 국제전기전자공학회(Institute for Electrical and Electronics Engineers, IEEE)의 표준인 IEEE 1516으로 채택되어 관련 연구가 민간산업분야로 확산되고 있는 실정임.

- HLA는 구성요소 [표 2-2] 는 독립된 시뮬레이션 모듈의 구성 방법(HLA Rules), 모델링을 위한 자료 구조 형식(Object Model Templates) 및 각 모듈을 서로 연결하는 미들웨어(middleware)인 RTI(Run-Time Infrastructure)와의 통신을 위한 기능들의 명세(Run-Time Interface Specification)로 이루어짐.
- HLA 개념 하에서 분산 시뮬레이션에 참여하는 각각의 하위 시뮬레이터는 페더레이트(Federate)라 칭하며, 특정 시뮬레이션 목적을 달성하기 위해 상호작용하는 시뮬레이션 집합을 페더레이션(Federation)이라 함. 페더레이션을 구성하는 모든 페더레이트들은 동일한 RTI 라이브러리의 사용이 요구됨.



[그림 2-1] High Level Architecture의 구조

[표 2-2] HLA의 구성요소

구성요소	기능
HLA Rules	HLA 시뮬레이션의 구성요소들의 역할과 상호관계에 관한 기본 규칙
Object Model Templates	각 페더레이트 간 공유 정보인 Federation Object Model의 자료 구조 형식
Run-Time Interface Specification	페더레이트와 RTI 사이 정보교환을 위한 인터페이스 명세

3. Run-Time Infrastructure (RTI)

- RTI는 페더레이트의 시뮬레이션 로직과 RTI 라이브러리 사이의 두 가지 인터페이스를 정의함. 이는 RTI ambassador interface와 Federate ambassador interface로, 전자는 LRC에 의해 수행되며 페더레이트가 RTI에서 불러올 수 있는 서비스들을 정의하며, 후자는 시뮬레이션 로직에 의해 RTI가 페더레이트에 신호를 보낼 수 있는 이벤트들을 정의함.
- 보다 상세하게 RTI는 Federation, Declaration, Object, Ownership, Time, Data Distribution 등의 주요 관리 기능을 제공하며 이와 관련한 내용은 [표 2-3]과 같음.

[표 2-3] RTI(Run-Time Infrastructure)의 주요 관리 기능

관리기능	내용
Federation Management	Federation 생성/소멸, Federate 참여/탈퇴 관리
Declaration Management	Federate의 정보 송신설정, 수신설정 관리
Object Management	Federate의 정보 송수신 관리
Ownership Management	Object Instance 속성의 소유권 변경 관리
Time Management	Federate의 시뮬레이션 시간 진행 관리
Data Distribution Management	Federate 간 정보의 효과적인 분배 기능 관리

- 최근 개발된 RTI 관련 소프트웨어들은 DMSO(Defense of Modeling and Simulation Office)에서 정의한 HLA 1.3 인터페이스 명세 혹은(또는) 이에 기초하여 새롭게 개발된 IEEE 1516 표준에 부합함. 그러나 페더레이트들이 RTI와 연결되기 위해서는 반드시 하나의 동일한 명세를 준수하여야 하므로, 개발 목적에 따라 알맞은 표준을 선정하는 것이 중요함.
- 본 연구에서는 [표 2-4]와 같이 다양한 개발 도구들의 분석을 수행하였으며, 이 중 소스 코드가 누구에게나 공개될 뿐만 아니라 지속적인 업데이트가 가능하며, 우수한 구동성능으로 인해 활용성이 높게 평가된 1996년 프랑스의 Onera 社에서 개발된 CERTI를 활용함.

[표 2-4] RTI 소프트웨어 분류

이름	개발자	기술표준	개발 언어	공개여부
CAE RTI	CAE Inc.	1.3, IEEE 1516	C++,	commercial
Chronos RTI	Magnetar Games	IEEE 1516	C++, .NET	
MÄK High Performance RTI	MÄK Technologies	1.3, IEEE 1516-2000, IEEE 1516-2010	C++, Java	
Pitch pRTI	Pitch Technologies	1.3, IEEE 1516-2000, IEEE 1516-2010	C++, Java, Web Services	
SimWare RTI	Nextel Aerospace Defence & Security S.L.	1.3, IEEE 1516-2000	C++,	
CERTI	ONERA	1.3 partial, IEEE 1516 partial	C++, Fortran90, Java, Matlab, Python	GPL, LGPL
EODiSP HLA	P&P Software	IEEE 1516	partial Java	GPL
Open HLA		1.3, IEEE 1516-2000, IEEE 1516-2010	Java	Apache License
RTI-S	US JFCOM J9 Directorate	1.3 partial	C++, Java	US Government
The Portico Project (formerly jaRTI)	littlebluefrog labs	1.3, IEEE 1516	C++, Java	CDDL

※ GPL: General Public License, LGPL: Lesser General Public License

제3절 연구수행결과

1. 복합적 재난 발생 및 대응 시나리오 개발

가. 개발 개요

- 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션은 복합적이고 연쇄적인 재난 상황에 맞춰 시뮬레이션 모듈을 재조합하여 피해분석 및 대응활동을 가능하게 하는 확장성을 가지고 있음.
- 본 연구에서는 이러한 복합·연쇄 재난 상황의 분석력과 확장성을 보여줌과 동시에, 실제로 활용도가 높은 시뮬레이션 모듈 개발을 위해, 국내외 사례를 바탕으로 시설물 재난 관리에 큰 영향을 주는 복합적 재난 발생/피해 유형을 선정하고, 주요 분석대상 시설물에 대한 특성을 분석한 뒤 단계별 재난 대응 시나리오를 구축함.

나. 국내 복합적 재난 발생/피해 유형 선정

- 현재까지 국내에서 발생한 복합적 재난 중 발생 가능성 및 대규모 피해 가능성을 수반하는 재난 유형인 지진, 붕괴, 화재를 본 연구의 재난 유형으로 선정하였으며, 해당 재난의 피해 유형 및 특징은 [표 2-5]와 같음. 이에 기초하여 단일 재난의 발생이 후속 재난의 시발점이 되는 복합적 재난의 발생 및 피해 유형을 도출함.
- 또한 개별 재난의 연쇄, 복합 재난으로의 확장 가능 단계를 [표 2-6]과 같이 분류함.

[표 2-5] 개별 재난별 피해 유형 및 특징

구분	내용	피해유형 및 특징
자연 재난	지진	구조물 파괴, 붕괴, 화재, 폭발, 정전으로 인한 시설/인명피해
인적 재난	화재	화염 및 연기에 의한 인명피해 화염으로 인한 구조물의 파괴 등 2차적인 시설/인명피해
	붕괴	구조물의 파괴로 인한 시설 및 인명피해

[표 2-6] 복합적 재난 발생 및 피해 유형

1차 재난	2차 재난	3차 재난	4차 재난
지진	파괴	붕괴	화재
		화재	-
		-	-
	붕괴	화재	-
		-	-
화재	폭발	폭발	-
		-	-
	붕괴	붕괴	-
		-	-

다. 주요 분석 대상 시설물 선정 및 특성 정의

- 본 연구는 최종 성과물의 현장 적용성 증진을 위해 분석 대상물을 일반 건축물과 전력 계통으로 선정하고, 본 연구 범위에 부합하는 시설물 별 재해 발생 유형을 정의함.
- 국내 시설물 유형 중 대부분을 차지하는 일반 건축물의 경우, 재난 후 시설물의 복구를 위한 가용 자원의 제약으로 인해 복구 계획 착수에 상당한 시간이 소요되는 현실임. 이는 재난 발생 시 소수의 국가 주요 시설의 복구를 위한 자원이 우선적으로 투입되는 것과 비교되며, 주변 상황에 따라 향후 복구 계획이 수시로 변경될 여지가 있음을 시사 함.
- 따라서 일반 건축물의 경우 재난으로 인한 자원 수급의 지연 및 장애 등의 현실적 사안들에 재난 안전 및 대응 관리가 막대한 영향을 받으며, 정부 정책 및 주변 환경의 변화에 따른 불확실성을 포함함에 따라 특히 시뮬레이션을 활용한 다양한 시나리오의 예측 및 분석을 수행하는 본 연구의 분석 대상으로써의 타당성을 가짐.
- 또한 대규모의 인원이 사용하는 일반 건축물은 재난 발생 시 신속한 재실자 피난 및 인명 구조 지원을 통한 인명피해 감소 노력의 책임을 가지며, 재난 대응 및 안전 관리에 있어 성공적인 피난 수행이 다른 시설물 보다 특히 중요함.

[표 2-7] 분석 대상 시설물 특성 체계화

재난 대응	시설물 특징	일반 건축물	전력계통시설
피난	재실자 수	많음	적음
	친숙도	적음	많음
비상운영 및 복구	비상운영 중요성	낮음 (구조 안정성 확보가 우선)	높음 (방재성능에 따라 비상운영 필요)
	구조안정성	낮음	높음
	복구 우선순위	낮음	높음
	주변 환경 영향	많음	적음
	복구 자원 수급	어려움	쉬움
	복구 포인트	구조체	전력계통 (기능)
	상호의존성	낮음	높음
시사점	피난	재실자의 유형이 다양하고 시설물에 대한 정보가 낮음에 따라 사전 피난 예측 및 분석에 대한 필요성이 매우 높음	재실자의 수가 적고 대부분 재실 직원으로 구성되어 시설물에 대한 정보가 높아 피난 예측에 대한 중요도가 상대적으로 낮음
	비상운영 및 복구	복구 자원 수급에 어려움이 따르며, 주변 환경의 영향이 복구 작업 진행에 주요 변수로 작용함. 장기적으로 시설물의 구조적인 복구공사 계획이 중요	복구 자원의 수급이 용이하며, 주변 환경의 제약 없이 독자적인 복구 작업 진행이 가능함. 구조체 보다 단기적으로 손실된 기능 복구 및 비상운영을 통한 신속한 기능 회복이 우선

- 이에 반해 전력계통시설의 경우 일반 건축물과 달리 재난 이후 복구 시간의 단축을 최우선 시 함에 따라, 자원 배분의 우선순위를 가져 수급에 제약이 존재하지 않음. 이에 따라 주변 환경의 영향을 크게 받지 않으므로, 과거 유사 재난 사례의 참고가 가능하며 이를 통해 복구에 소요되는 대략적 기간과 비용의 산출을 예측 가능함.

- 그러나 복구의 의미에 있어, 구조적 회복에 초점을 맞추는 일반 시설물에 비해 전력계통 시설에서의 복구는 재난 이전의 기능적 상태로 복원하기 위한 절차들을 수립함.
- 이와 같이, 전력계통시설은 기능적 측면이 구조적 측면 보다 더욱 큰 비중을 가짐에 따라 전력계통의 이상으로부터 발생할 수 있는 각종 대형 사고들을 미연에 방지하고, 신속한 정상화를 위해 필요에 따라 재난 발생과 같은 비상시 운영 정지, 운영 및 기능 복구 비상 운영 등의 추가적인 대응 요소의 고려가 필수적임.
- 또한, 전력계통시설은 재난 이후 붕괴 혹은 기능 손상이 발생할 경우 단일 시설의 복구만으로는 그 기능을 완전하게 회복할 수 없으며, 해당 시설과 연결이 되어있는 타 전력계통 시설의 복구까지 완료되어야만 완전한 정상화가 가능함. 이는 일반 건축물과는 달리 기능적으로 다수의 타 시설들과 연결이 되어있는 전력계통시설의 상호의존적인 특징으로 인해 발생하는 현상으로 특정 시설의 기능 회복을 위한 필수 조건으로 작용함.
- 본 연구의 분석 대상 시설물인 일반 건축물과 전력계통시설은 재난 대응 단계에서 매우 대조되는 특징을 가짐에 따라 본 연구에서 개발한 분석 기술의 타당성을 더욱 넓은 범위에서 검증할 수 있을 뿐만 아니라, 향후 유사한 건물로의 확장 및 재사용이 가능한 장점을 가짐.

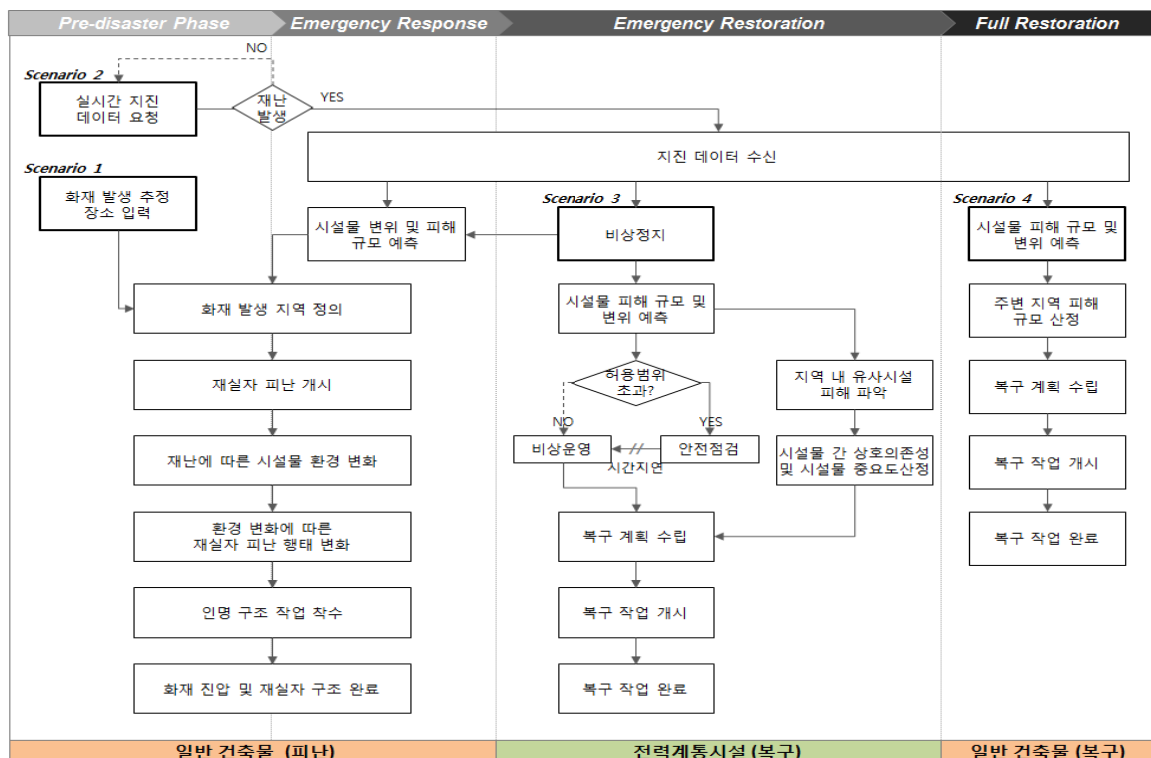
라. 복합적 재난 발생 유형에 따른 시설물 별 대응 시나리오 구축

- 복합적 재난의 발생 유형에 따라 이에 대응하기 위한 다양한 예측 및 계획 작업들이 각 시설물 별로 수립되어야 하며, 재난 진행 단계에 따라 대응 작업에 착수해야 할 시설물 유형, 시뮬레이션 수행 시점 등의 사항 또한 변화하게 되므로 이를 반영한 시나리오를 개발하고, 이에 기반을 두어 본 연구를 수행함.
- 이와 같은 시나리오의 기본적 개요는 아래 [표 2-8]과 같으며, 각 재난 단계별로 분석 대상 시설물, 해당 시뮬레이션, 분석 시점, 분석 결과 활용 시점, 분석 요구사항을 정의함.

[표 2-8] 재난 단계 별 시설물 별 대응 시나리오

재난 단계	Emergency Response (e.g., Evacuation)	Emergency Operation and Emergency Restoration	Full Restoration
분석 대상	일반 건축물	전력계통시설	일반 건축물
시뮬레이션	Evacuation Behavior Simulation Module	Lifeline System Recovery Simulation Module	Facility Restoration Simulation Module
분석 시점	재난 시나리오에 기반하여 재난 발생 이전 분석 또는 재난 직후 신속한 분석	실시간 지진 데이터 활용 재난 발생 직후 분석	지진 데이터 활용 재난 발생 이후 분석
분석 결과 활용 시점	재난 발생 이후 한 시간 이내	재난 발생 직후부터 수일 이내	재난 발생 이후부터 수개월 이내
분석 요구사항	• 건축물 구조 피해 정도 • 건축물 내 발화점/시점 • 시설물에 따른 재실자 특성 및 행태	• 지역 단위의 전력계통시설 피해정도 (전력계통 간 상호의존성 고려)	• 지역 단위 피해와 그에 따른 복구환경의 제약 (자원수급/작업지연요소) • 건축물 구조 피해 정도

- 일반 건축물에서는 재난으로 인한 인명 손실을 최소화하기 위해 재난 발생 전 (Pre-disaster Phase)부터 긴급 상황 예측 및 사전 대응의 중요성이 강조됨. 특히, 화재 및 피난 과정의 특성상 사건 발생 및 종료 기간이 매우 짧으므로 평상 시 다양한 재난 시나리오에 기반하여 수차례 분석을 시행하고, 실제 재난 상황과 일치하는 분석의 결과를 재난 발생 이후 빠른 시간 내에 활용 하는 것이 중요함 ([그림 2-2]의 시나리오 1).
- 반면, 지진이 발생할 경우 몇 분 이내(Emergency Response)에 지진 데이터를 수신하여, 이에 따른 건축물의 피해 정도 및 변위를 예측하고 발화 지점을 신속하게 도출하는 등 진입이 어려운 화재 건물 내 재실자 피난행태에 기초한 병목 구간을 분석하고, 효과적인 인명 구조 작업에 착수하는 방식의 재난 대응 또한 가능함 ([그림 2-2]의 시나리오 2).
- 재난 발생 직후부터 수일 이내(Emergency Restoration)에는 국가 주요 시설들의 복구 작업이 우선적으로 진행되며, 전력계통시설의 복구 또한 이 단계에 속함. 시설물의 기능적 안전성 및 회복이 구조적 복구보다 중요한 전력계통시설의 경우 지진 발생에 따른 비상정지 이후 전력계통의 비상 운영 혹은 점검 여부를 결정하여 손실된 기능을 만회하기 위한 과정을 거침. 이후, 지역 내 유사시설의 피해 및 해당 시설과의 상호의존성을 산정하여 복구 작업 여부를 결정하고 복구 작업에 착수하게 됨 ([그림 2-2]의 시나리오 3).
- 그러나 일반 건축물의 복구의 경우 재난 발생 이후부터 수개월까지의 시간이 소요되며 (Full Restoration) 주변 지역의 상황에 따라 복구 자원 수급의 여부가 결정되는 등 외부 환경의 영향에 따라 시설물의 구조체 복구가 수행됨. 이는 일반 건축물의 효율적인 복구 계획 수립 및 작업 수행을 위해 재난에 따른 주변 지역을 포함한 각종 외부 환경의 변화에 대한 분석 및 예측의 필요성을 의미함 ([그림 2-2]의 시나리오 4).



[그림 2-2] 단계별 재난 대응 시나리오

마. 재난 발생/대응 시나리오 적정성 평가

- 본 연구에서 설정한 분석대상 시설물 및 재난 발생/대응 시나리오는 재난/시설물 관리 분야 전문가들을 통해 그 적정성을 확인하고, 개선 방안 등에 대한 의견 수렴 과정을 거침.
- 본 자문의 목표는 재난 발생/대응 시나리오 적정성 평가이며, 본 연구에서 수립한 전체 시나리오 및 대상 시설물 선정의 전반적인 타당성을 시작으로, 일반 건축물(피난), 전력계통시설(복구), 일반 건축물(복구)의 세부 항목에 대한 적정성 평가를 수행함 [표 2-9].

[표 2-9] 재난 발생/대응 시나리오 적정성 평가

평가대상	전문가	평가 의견	의견 수렴 결과 및 방안
재난 발생/대응 시나리오 (전체)	한국건설 산업연구원 K 연구위원	• 초고층 건축물과 같은 특수한 상황은 좀 더 복잡하고 집중적인 재난 대응 프로세스가 존재 • 본 연구결과 활용의 범용성을 위해 좀 더 일반적인 건축물 또는 시설을 대상으로 할 필요가 있음.	• 연구 결과물의 범용성 및 적용성 확장을 위해 분석 대상 시설물을 10층 미만의 일반 건축물 및 일반적인 전력계통시설로 변경하여 각종 대응 시나리오를 수립함.
일반 건축물 (피난)	국립재난 안전연구원 P 공업연구사	• 피난의 경우 단일 재난 요소뿐만 아니라 복합 재난으로 인해 발생하는 연쇄적인 피해들을 고려하여 시나리오를 수립. • 모든 재실자가 동시에 재난 상황을 감지할 수 있는 지진 경우 피난 개시에서 완료까지 신속하게 진행되어 시뮬레이션의 실효성을 찾기 어렵다고 여겨질 수 있으나, 대형 시설물에서의 화재는 실시간 모니터링을 동반한 시뮬레이션이 진행될 경우 피난 안내 등과 같은 활용이 가능하여 높은 사용성을 가짐.	• 재난에 따른 시설물 붕괴 및 화재 발생 등 연쇄적인 피해 상황들을 반영한 시나리오를 수립하고, 재난 피해 시뮬레이터들을 피난 모듈과 연동하여 연쇄 피해에 따른 피난 행태 분석 기술개발. • 실시간 재난 데이터 센싱을 통한 모니터링을 통해 화재 발생 가능 지역을 산정하고, 화재 상황 시뮬레이터를 활용하여 화재 진행에 따른 유독 가스 생성 정도를 지속적으로 파악하여 재난 진행 상황에 부합하는 피난 정보의 제공이 가능할 것으로 예상됨.
	국립재난 안전연구원 S 연구원	• 시설물의 동선 및 출입구 배치 효율성을 검토하기 위해 재난 발생 이전 단계에서의 피난 시뮬레이션은 매우 중요. • 지진과 같은 재난 발생 시 건물 내 주요 전력 계통들을 중심으로 실제 화재들이 발생되며, 이들 주변의 구조물의 변위 및 피해 정도를 산정하여 화재 발생 위험도를 산정하고 예상 발화지점을 찾는 것 필요	• 재난 시나리오 DB를 구축하여 피난 행태를 사전 분석하고, 실시간 지진 데이터 센싱 모듈을 활용하여 실제 지진 데이터를 활용한 분석이 가능한 재난 사전 및 사후 대응 시나리오 수립. • 지진 데이터 센싱 모듈과 구조물 피해 시뮬레이터의 연동을 통해 지진 이후 시설물에 발생하는 구조체 변위 및 피해정도를 산정

평가대상	전문가	평가 의견	의견 수렴 결과 및 방안
전력 계통 시설 (복구)	San Jose State University P 교수	- 미국 FEMA 등에서 발표한 재난관리체계를 참고하여 현실적인 재난 발생 및 대응 시나리오의 수립이 필요함. - 미국에서 개발된 HAZUS 시뮬레이션 프로그램 참고 고려.	- 국내 각종 재난 대응 매뉴얼 및 미국 FEMA, 일본 재난관리청의 재난 대응 체계 및 매뉴얼 등을 참고하여 기능 복구 및 비상운영 등과 관련 사항을 대응 시나리오에 포함. - HAZUS에서 제공하는 응급 대응/복구 계획 수립, 피해 및 손실 규모 추정 등의 기능들을 참고하여 전력계통의 피해 단계를 slight / moderate / extensive/ complete 로 구분하였으며 개발 모듈에 반영함.
	국립재난 안전연구원 P 공업연구사	원자력발전소를 포함한 전력계통시설의 경우 광역적 범위에서 부족한 자원 수급에 대한 우선순위를 정하는 과정이 필요하며, 일반 시설물 복구와는 차별화 된 시나리오 수립 및 접근이 필요함.	전력계통시설의 특수성을 고려하여 구조적 측면보다 기능적 측면의 복구에 초점을 맞추며, 복구 우선순위와 관련하여 관련 시설물들 사이에 상호의존성을 산정하고, 이에 따라 복구 계획을 수립하는 과정을 시나리오 및 개발 모듈에 포함함.
일반 건축물 (복구)	서울대학교 토목공학과 J 교수	연구결과의 장점을 분석하고, 이러한 장점이 현실에 적용될 수 있도록 대상지역, 대상재난 등 구체적인 상황을 설정하고, 시나리오를 구체화할 필요가 있음.	대상 재난 및 시설물을 포함한 구체적인 시나리오를 수립하였음 (예: 지진 상황, 지진에 따른 추가적 해일은 없다고 가정, 도심지에 있는 일반 시설물 및 전력 계통 시설 초점, 외관으로는 재난에 따른 피해를 쉽게 판단하기 어려운 시설물 등)
	University of Texas Austin H 박사	설정한 재난 시나리오는 현실을 반영하며 적합하다고 판단되나 해당 내용의 신뢰성에 대한 고려가 필요함.	수립한 시나리오와 유사한 실제 사례를 바탕으로 각 모듈별 테스트를 수행하며, 실제 상황과 유사성에 대한 정량적 접근과 이론 제시 등의 정성적 자료를 통한 상황검증을 병행함.
	San Jose State University P 교수	실재 재난 발생 시 지역별로 복구 지연의 차이가 존재하며, 일반 시설물의 복구 프로세스는 시설물의 중요성 및 피해산정 등의 작업으로 인한 지연이 수반됨. 이를 시나리오에 반영하고 추가적 복구 계획 지연 요소에 대한 고려가 필요함.	실제 피해산정 및 복구 계획 프로세스를 연구 문헌 및 동일본 대지진, 허리케인 카트리나와 리타 등의 실제 자료를 통해 파악하였으며 이를 통해 발생하는 지연 요소들을 일반 건축물 피해 산정 및 복구 시뮬레이션에 추가하였음.

2. 분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 프레임워크

가. 프레임워크 개발 개요

- 본 연구는 HLA 기반 분산형 시뮬레이션 환경에서 재난 발생 및 피해·재난 대응 시뮬레이션 모듈 간 데이터호환 및 상호운용을 도모하며, 재난 지역정보 및 각 시설물 별 특징을 반영하고자 관련 DB를 연계함으로써 시설물 재난 대응 및 관리를 지원하고자 함.
- 분산형 시뮬레이션에 있어 가장 중요한 이슈는 상호연동 및 데이터교환에 대한 정의와 이를 포함하는 시뮬레이션 프레임워크 임 (Alvanchi et al. 2011). 이러한 프레임 워크는 “모델링 요소 및 컨셉에 대한 정의의 일체”이며, 이는 개발 과정에서 모델링 목적이나 모델의 범위에 벗어나지 않도록 함.
- 특히, 본 연구의 프레임워크는 앞서 개발한 단계별 재난 시나리오에 따라 구축되는데, 지진 발생 후 구조체 붕괴 또는 화재 등의 피해가 발생하였을 때, 시설물 내 재실자 피난, 단기적인 시설물 기능의 긴급복구 및 비상운영, 장기적인 시설물 구조체 복구공사에 대한 단계별 재난 대응 활동 분석의 목표를 달성하고자 구축되었으며 향후 분석 목적의 확장이나 변경에 따라 수정될 수 있도록 재사용성 및 확장성을 고려하여 개발됨.

나. 분산형 재난대응/관리 시뮬레이션에 활용할 시뮬레이션 기술 분석

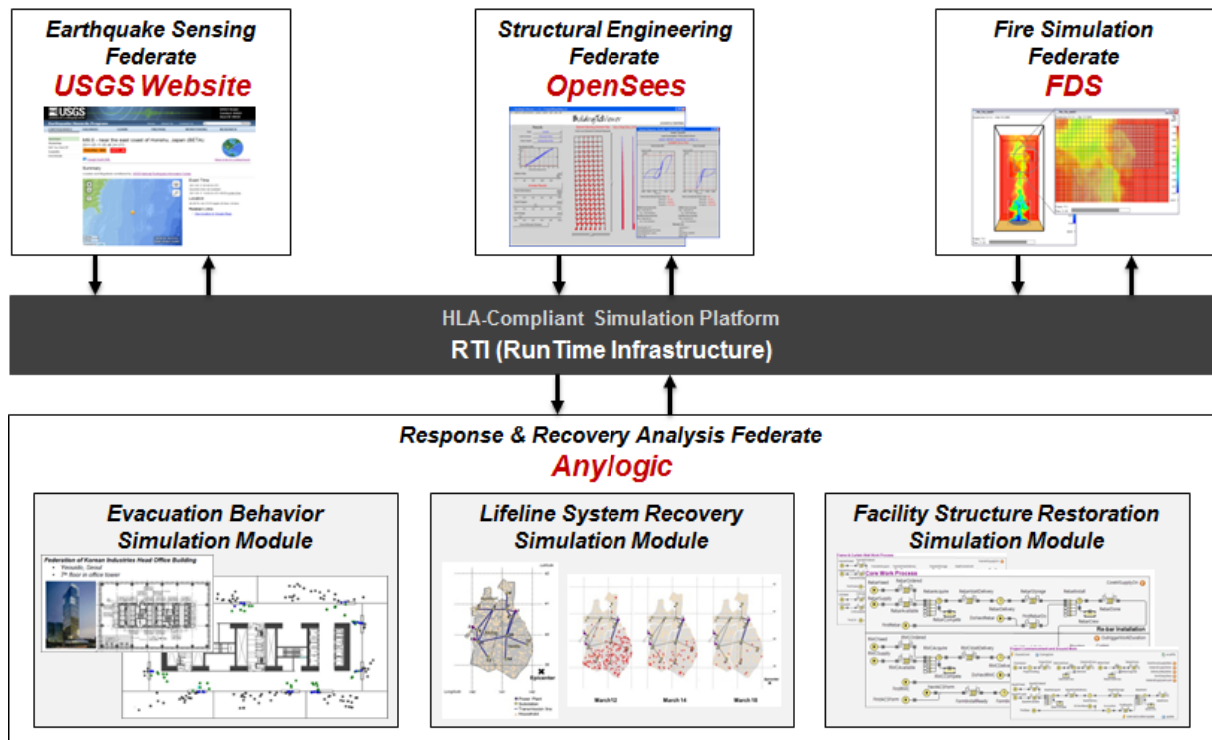
- 본 연구는 재난 발생/피해/대응 시뮬레이션 기술 간 상호연동을 통해 시설물 재난 대응 및 관리를 지원할 수 있는 기술 개발을 목표로 함. 이에 따라, 본 연구는 1차년도에 재난 관련 기술에 대해 상세한 분석을 수행하였음.
- 특히, 재난 발생 후의 피난-긴급복구/비상운영-구조체복구 등 단계별 재난 대응활동 분석을 수행하기 위해서는, 사전에 재난을 예측하고 분석하는 것도 의미가 있지만 더욱 정확한 분석을 위해 실제 발생한 재난정보를 센싱하고, 센싱한 정보를 바탕으로 피해분석 및 대응활동 분석을 수행하는 것 또한 유의미한 것으로 판단됨.
- 이에 본 연구는 재난 센싱기술, 재난 예측 및 피해 시뮬레이션 기술, 재난 대응 시뮬레이션 기술 등의 축으로 기존 기술을 분석하였으며, 그 결과는 아래와 같이 요약됨.
 - 1) 본 연구는 지진정보를 센싱하고, 이에 따른 화재 및 구조체 붕괴 피해를 분석한 후, 피난-긴급복구/비상운영-구조체 복구 등의 대응활동 지원을 목표로 하는데, 기존 기술은 각각의 분석 목적은 뛰어나나 단계적이고 포괄적인 분석에 대응하는 데 한계가 있음.
 - 2) 따라서 각각 특정한 활용분야가 있는 기술을 선정하여 개별 모듈 간 상호연동을 구현하고자 하며 특히 향후 확장성 등을 고려하여 오픈소스 기술을 활용하고자 함.
 - 3) 특히, 지진센싱 기술은 웹 기반의 실시간 지진정보 제공 모듈인 USGS (U.S. Geological Survey, 미 지질조사국)를 활용하여 보다 현실적인 재난대응 및 관리를 도모 함.
 - 4) 화재, 붕괴 등 재난에 따른 피해 분석 모듈로는 OpenSees (The Open System for Earthquake Engineering Simulation) 구조체 거동(피해) 시뮬레이션 기술을 활용함. 또한 FDS (Fire Dynamic Simulator) 화재 시뮬레이션 기술을 활용함.
 - 5) 재난 대응 시뮬레이션 모듈의 경우, 상업용 소프트웨어가 주를 이뤄 시뮬레이션 간 상호운용을 위한 프로그램 적 접근이 어렵고, 각 분석목적의 제한으로 인해 본 연구에서 수행하고자 하는 단계별 재난 대응활동 분석을 모두 포함하기에 한계가 있음.

6) 반면, 대부분의 재난 대응 분석 연구의 경우, Agent-Based Modeling, Discrete Event Simulation 등 시뮬레이션 방법론을 활용하여 개발하는 경우가 많고, 이에 따라 활용할 수 있는 방법론적 접근에 대한 지식이 많이 축적되어 있는 바, 본 연구는 재난 대응 시뮬레이션 모듈을 재난 대응 단계별로 (1) 시설물 내 재실자 피난행태 시뮬레이션 모듈, (2) 라이프라인(전력계통 중심) 기능의 긴급복구 및 비상운영 시뮬레이션 모듈, (3) 시설물 구조체 복구공사 시뮬레이션 모듈의 세 가지 모듈로 자체 개발하고자 함. 특히, 이러한 방법론 간의 통합 시뮬레이션을 지원하는 Anylogic 소프트웨어는 재난 대응 분석 시뮬레이션 개발에 장점이 있음.

[표 2-10] 재난 관련 기존 시뮬레이션 및 센싱 기술

Categories	Techniques	Main Objectives	Features
Disaster Sensing	USGS	Real-time data feed for seismic events	Closed source code, Scenario database
	Earthquake-Report	Real-time data feed for seismic events	Open source code (Javascript)
Disaster Simulation	Tunami N2	Tsunami and earthquake simulation	Geographic information system (GIS)
	SAHANA	Tsunami and earthquake simulation	Fully-open source code (C++ and Tcl), structure library, visualization
	HAZUS-MH	Natural disaster simulation (hurricanes and earthquakes)	Commercial, 3D module, material and element library,
Damage Simulation	OpenSees	Earthquake engineering (structural behavior analysis)	Web-based, commercial
	LS-DYNA	Structural change simulation (seismic collapse)	Closed source code, 3D visualization
	FDS	Building fire simulation	Fully-open source code, visualization
Response Simulation/ Recovery Simulation	Building EXODUS	Building fire & evacuation simulation	Commercial
	Pathfinder	Evacuation simulation in fire	Commercial (free 30 days trial), 3D visualization
	Robocup Rescue	Rescue simulation	Fully-open source code, Interwork with traffic simulator
	ClientRunner	Facility restoration management	Web-based, commercial
	MEETSIM	Transportation system and resource allocation planning	Closed, 3D visualization

다. 분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 기본 구조 및 하위 시뮬레이션



[그림 2-3] 연구의 시나리오에 따른 분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 기본구조

- [그림 2-3]은 앞서 분석한 재난 대응 및 관리체계, 시나리오, 기존 기술 분석결과를 바탕으로 구축한 본 연구의 분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 기본 구조임.
- 구체적으로 본 시뮬레이션 모듈은 개발한 시나리오에 따라 분석 대상 시설물에서 재난 대응 및 관리를 지원하고자, USGS 지진정보 센싱모듈, OpenSees 구조체 거동(피해) 시뮬레이션 모듈, FDS 화재 시뮬레이션 모듈과, 3가지 재난대응 분석 하위 모듈 (시설물 내 재실자 피난행태 시뮬레이션, 라이프라인(전력계통 중심) 기능의 긴급복구 및 비상운영 시뮬레이션, 시설물 구조체 복구공사 시뮬레이션)을 포함한 Anylogic 재난 대응활동 시뮬레이션 모듈이 상위체계구조 (HLA) 기반의 분산형 시뮬레이션에서 상호연동되며, 미들웨어인 RTI는 이들 간의 상호운용 및 데이터 교환을 지원함.
- 특히 본 연구에서는 분석대상 시설물로 일반 건축물 및 전력계통을 선정하고, 일반 건축물은 재실자 피난활동, 시설물 구조체 복구 중심으로, 전력계통은 손실된 기능의 긴급복구 및 비상운영 중심으로 대응 활동을 지원함.
- 또한 본 연구에서는 프레임워크를 구체화하기에 앞서, 사용하는 기존 시뮬레이션 모듈의 입출력 데이터를 분석하고, 재난관리에 필요한 정보를 제공하고자, 개발하는 재난대응활동 시뮬레이션 모듈에서 요구되는 입출력 데이터를 정의함.

라. 활용하는 기존 재난 센싱 및 시뮬레이션 기술 분석

(1) USGS (US Geological Survey, 미 지질조사국) 실시간 지진정보 센싱기술

- 미 지질조사국 (USGS: US Geological Survey) 웹사이트에서는 전 세계에서 발생하는 지진에 대한 정보 (발생 시간, 규모, 진앙지의 지리적 위치 및 진원의 깊이 등)을 실시간으로 제공함. 본 지진정보 센싱 모듈은 관심 있는 지역 등에 대한 지진정보쿼리를 요청하면, 요청한 쿼리에 관련된 지진정보를 제공해 줌. 예를 들면 위도 30-40° 사이, 경도 130-150° 사이의 규모 8 이상의 정보를 알고 싶을 때, 이를 쿼리파라미터로 요청하면, 해당하는 위치에 규모 8 이상의 지진이 발생했을 때 이를 실시간으로 알려줌.
- 이러한 쿼리는 다양한 방식으로 제공될 수 있는데 HTTP GET METHOD 또는 프로그래밍적 접근을 통해 이루어짐. 다음 [표 2-11]은 USGS 지진정보 센싱 모듈에서 요구되는 입출력 데이터를 분석한 것임.

[표 2-11] USGS 지진정보 센싱모듈의 입출력 데이터

기술	입력 데이터	출력 데이터
지진정보센싱모듈 (USGS)	■ Query Request Parameters ■ The minimum and maximum values of interest event time ■ Min. and max. values of both longitude, latitude of locations ■ Min. value of interest magnitude	■ Earthquake information ■ Event time ■ Event location ■ (Longitude,latitude) ■ Magnitude of events ■ Focal depth of events

- 다음 [표 2-12]는 HTTP GET METHOD를 활용하여 지진 정보에 대한 쿼리를 요청하는 예를 나타냄. 본 예시는 2011년 3월에 발생한 규모 9.0의 동일본 대지진 정보를 센싱하기 위한 것이며, 다음과 같이 관심 시간, 관심 위치, 관심 규모가 다음 표와 같이 요청됨.

[표 2-12] USGS 지진정보 센싱모듈의 입출력 데이터 예시 (쿼리 파라미터)

Query Method Parameters	Descriptions (예시)
Start time	2011-03-07T00:00:00
End time	2011-03-14T00:00:00
Minimum magnitude	39.0
Minimum latitude	37.0
Minimum longitude	141.0
Maximum latitude	39.0
Maximum longitude	143.0

- 이러한 쿼리 파라미터는 다음과 같이 URL로 제공될 수 있으며, 본 URL을 통해 접근하면 XML 파일 형식으로 지진 정보를 제공 받을 수 있음.

- URL:

<http://comcat.cr.usgs.gov/fdsnws/event/1/query?minmag=8.0&starttime=2011-03-07T00:00:00&endtime=2011-03-14T00:00:00&minlatitude=37.0&maxlatitude=39.0&minlongitude=141.0&maxlongitude=143.0>



[그림 2-4] USGS 지진정보 센싱모듈의 지진 정보 표현

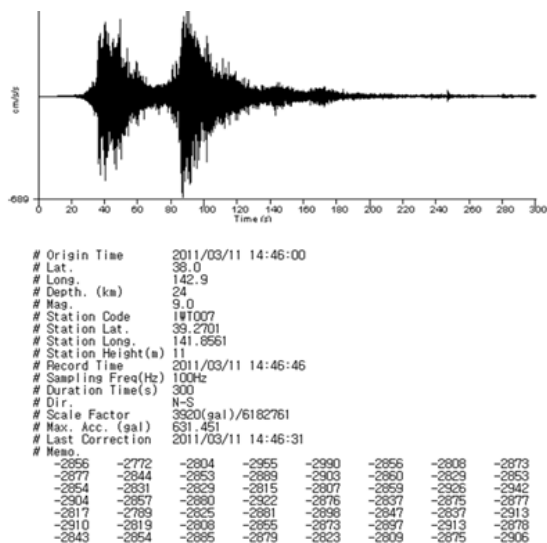
(2) OpenSees 시설물 구조체 거동(피해) 시뮬레이션 기술 분석

- OpenSees 구조체 거동(피해) 분석 시뮬레이션 기술은 시설물의 구조체 정보 (구조요소, 노드, 재료, 하중 등)를 모델링 한 후, 태풍 등에 따른 횡하중이나, 지진에 따른 지표면 변동하중이 구조체에 영향을 주었을 때 변위나 밀면 전단력 등 구조체의 거동을 분석함.
- 특히, OpenSees 시뮬레이션은 객체 기반으로 구조체의 재료, 구조요소, 분석정보 등에 대한 라이브러리를 제공하며, 이러한 라이브러리의 함수를 활용하여 시설물 구조를 모델링 하고, 재난 등 입력되는 변동하중에 따른 분석을 수행함.
- 다음 [표 2-13]은 OpenSees 모듈에서 요구되는 입출력 데이터를 분석한 것임.

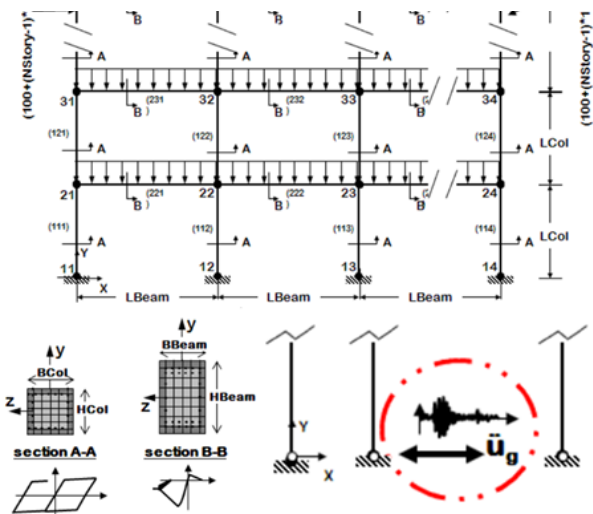
[표 2-13] OpenSees 시설물 구조체 거동(피해) 시뮬레이션 모듈의 입출력 데이터

기술	입력 데이터	출력 데이터
시설물 구조체 거동(피해) 시뮬레이션 모듈 (OpenSees)	- Structure Information - Node and element - Materials - Nodal coordinates - Transformation - Boundary Conditions - Element connectivity - Nodal masses - Seismic information - Ground motions: Acceleration	- Structure Responses - Displacement - Node velocity and acceleration - Incremental displacement - Eigenvector - Damping forces

- 특히, OpenSees 시뮬레이션 모듈에서는 입력되는 지진 정보로써 구조체가 위치한 지반의 진동을 가속도 데이터 (Accelerograms)으로 입력받아, 시간에 따른 구조체 변동을 수행함.
- 본 연구에서는 프로토타입으로, 구조체 거동 중 노드의 변위 정보를 기반으로 시설물 피해를 분석하고자 하며, 향후 좀 더 구체적인 구조 거동 분석에 따라 실제 현실에서의 활용성을 높일 수 있을 것임.
- 다음 [그림 2-5]는 지반진동 가속도데이터를 시계열데이터 파일로 입력받아 분석을 수행하는 예시이며 [그림 2-6]과 같이 정의한 시설물 구조체 모델에서는 구조체의 고정하중 및 지진에 따른 변동하중에 따라 분석을 수행함.



[그림 2-5] 지반 진동 가속도 데이터 예시



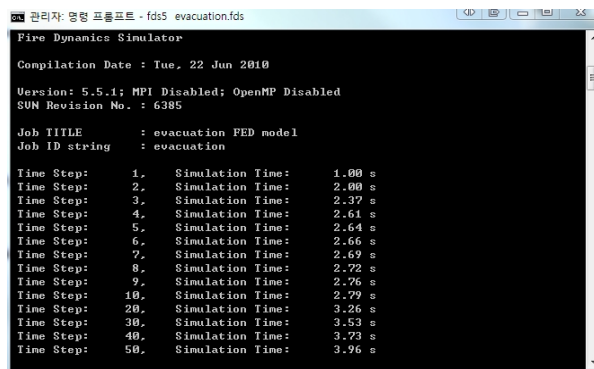
[그림 2-6] OpenSees 모델 예시

(3) FDS 시설물 내 화재 확산 시뮬레이션 기술 분석

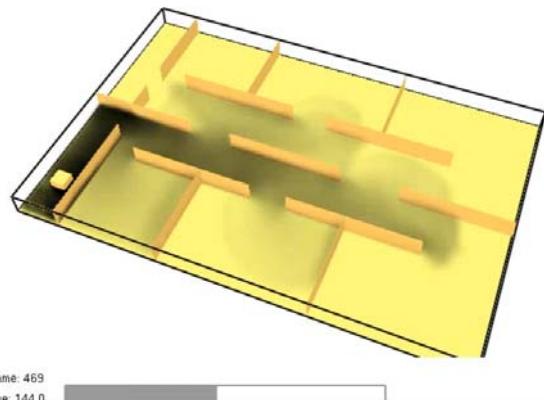
- FDS 는 시설물 화재분석 시뮬레이터로써, 화재 발생, 화재 및 유독 가스의 확산을 시설물 정보에 따라 시뮬레이션하며, C++ 및 Fortran 프로그래밍 언어 기반의 프로그램으로 오픈 소스 소프트웨어이며, 이러한 장점을 통해 분산형 시뮬레이션 환경 내에서 본 연구진이 자체 개발한 피난 시뮬레이션 모듈과 데이터 교환을 포함한 상호연동이 가능함.
- FDS 는 특정 시설물의 구조 정보를 반영한 가상의 공간의 발화 지점과 발화 물질의 정보를 입력 받아 시간에 따른 화염 및 유독 가스의 생성 정도 및 이동 양상을 표현하며, 사용자의 분석 목적에 따라 .csv 파일 형태로 출력하여 추가적 분석이 용이함.
- 본 연구에서는 재난 발생 직후 화재로 인해 생성되는 유독 가스가 일반 건축물 내 피난 중인 재실자에게 미치는 영향을 분석하기 위한 목적으로 FDS를 활용하며, 이러한 영향은 사람에 대한 유해가스의 영향을 표현하는 지표인 Fractional Effective Dose (FED) 의 값으로 변환하여 피난 시뮬레이션 모듈에 입력하게 됨.
- 따라서, 사용자가 원하는 발화 정보를 FDS 에 입력하면 FED를 산정하기 위한 일산화탄소, 이산화탄소, 산소 등의 농도 및 유독 가스 이동 속도 등을 결과값으로 제시함.

[표 2-14] FDS 시설물 내 화재 확산 시뮬레이션 모듈의 입출력 데이터

기술	입력 데이터	출력 데이터
시설물 내 화재 확산시뮬레이션 모듈 (FDS)	Spatial Information ▪ Floor plan coordinates ▪ Obstructs (furnitures) ▪ Output quantities Fire Information ▪ Ignition point ▪ Heat Release Rate Per Unit Area	Fractional Effective Dose ▪ FDS simulation time ▪ Carbon monoxide ▪ Carbon dioxide ▪ Oxygen ▪ Gas velocity



[그림 2-7] FDS 시뮬레이션 실행 예시



[그림 2-8] 유독가스 확산 화면 예시

(4) 활용기술의 저작권 항목 검토

- 본 연구에서는 이와 같이 USGS 지진정보 센싱기술, OpenSees 구조체 거동 시뮬레이션 기술, FDS 화재 확산 시뮬레이션 기술을 활용하고 있는데, 해당 소프트웨어들의 공통적인 특징은 Open Source이며, 학술기관에서 만들어 비교적 자유롭게 복제, 수정, 배포가 가능하다는 것임.
- [표 2-15]는 보다 구체적인 활용기술의 저작권 내용이며, OpenSees 구조체 거동 시뮬레이션 기술을 제외하고 소스코드를 수정해 배포하는 경우 개발 기관에서 제시한 라이선스 또는 저작권 내용과 수정된 소스코드 명시 시 상업적 이용이 가능한 것으로 조사됨.
- OpenSees 구조체 거동 시뮬레이션 기술의 경우에는 연구용, 교육용이 아닌 상업적 이용 필요 시 해당 기술을 개발한 Univ. of California와 사전 협약이 필요함. 따라서 본 연구진은 추후 해당 기술의 Third Party Program 또는 그를 기반으로 개발된 프로그램을 추가 조사하고 상용화 단계에서 Univ. of California와의 연계방안을 도출할 예정임.
- 추가적인 각 세부 기술의 라이선스 코드 등 자세한 관련사항은 서울대학교 산학협력단 내 지식재산관리본부와 논의하여 추진할 예정임.

[표 2-15] 활용기술의 저작권 내용

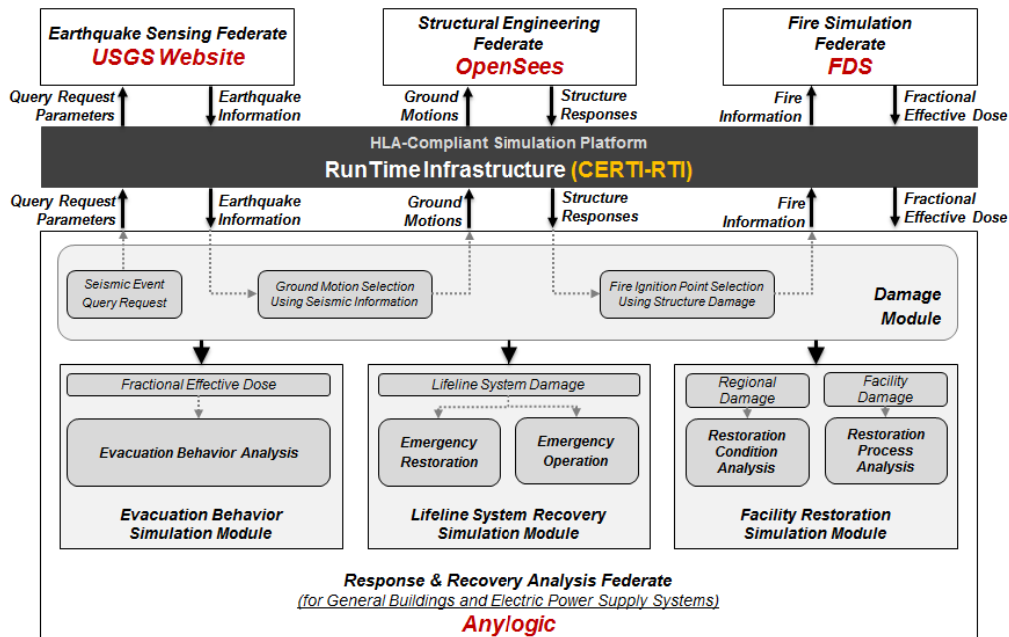
기술	Copyright
지진정보센싱모듈 (USGS)	Most U.S. Geological Survey (USGS) information resides in the public domain and may be used without restriction. <u>When using information from USGS</u> information products, publications, or Web sites, <u>we ask that proper credit be given.</u> (Example: data compiled by the U.S. Geological Survey)
시설물 구조체 거동(피해) 시뮬레이션 모듈 (OpenSees)	- The Regents grants permission, without fee and without a written license agreement, for (a) use, reproduction, modification, and distribution of this software and its documentation by <u>educational, research, and non-profit entities for noncommercial purposes only</u>; and (b) use, reproduction and modification of this software by other entities for <u>internal purposes only</u>. - Permission to incorporate this software into <u>commercial products may be obtained by contacting the University of California.</u>
시설물 내 화재 확산시뮬레이션 모듈 (FDS)	FDS and Smokeview are free and open-source software tools provided by the National Institute of Standards and Technology (NIST) of the United States Department of Commerce. Pursuant to Title 17, Section 105 of the United States Code, <u>this software is not subject to copyright protection</u> and is in the public domain.

마. 시뮬레이션 모듈 간 상호연동 요구사항 분석

- 앞서 본 연구에서 활용하는 재난 관련 센싱 및 시뮬레이션 기술에 대한 입출력 데이터 분석 결과, 각 모듈 간 요구되는 입출력 데이터 종류의 차이로 인해 상호연동 시 데이터 교환에 어려움이 발생할 수 있음을 확인하였으며, 이는 다음과 같음.
 - 1) USGS 모듈: 입력데이터로 필요한 지진 정보 쿼리 파라미터를 요청하는 모듈이 요구됨.
 - 2) OpenSees 모듈: 본 모듈에서 지진정보 입력 데이터는 지반 진동 가속도 데이터임에 반해, USGS 모듈에서는 지진 규모 및 진원지 위치 등의 정보를 받아들임. 이에 따라, USGS 정보에서 센싱한 지진 정보를 지반 진동 가속도 데이터로 변환하는 모듈이 요구됨.
 - 3) FDS 모듈: 본 모듈에서는 입력받은 화재 발화점에 대한 정보를 바탕으로, 화재 및 유독가스 확산 정보를 출력하여 제공함. 지진 발생 시 시설물 화재는 주로 위험시설물이 위치한 곳에 발생하는 경우가 빈번하므로, OpenSees에서 입력받은 구조체 거동 결과를 통한 구조체 피해 정보 및 위험시설물 정보를 바탕으로 발화점을 예측하는 모듈이 요구됨.
- 이러한 모듈은 본 연구에서 Anylogic 시뮬레이션 소프트웨어를 활용하여 개발하는 재난 대응 분석 시뮬레이션 모듈에 탑재되어 추가 개발되었으며, “피해산정 모듈”로 정의함.

마. 분산형 재난 대응 및 관리 시뮬레이션 프레임워크 개발

(1) 프레임워크 개요 및 하위 시뮬레이터 역할 정의



[그림 2-9] 분산형 재난 대응 및 관리 시뮬레이션 프레임워크

- USGS 지진 센싱 (Earthquake Sensing Federate)
: Anylogic 시설물 재난대응 분석 모듈 (Response & Recovery Analysis Federate)의 하위 모듈인 Damage Module 의 Seismic Event Query Request 기능으로부터 관심지역에 대한 지진정보쿼리 파라미터 (Query Request Parameters)를 받아 분석하고자 하는 지진의 규모, 진원지 위치 등 지진정보 (Earthquake Information)를 제공.
- OpenSees 구조체거동(피해) 시뮬레이션 (Structural Engineering Federate)
: Anylogic 시설물 재난대응 분석 모듈 (Response & Recovery Analysis Federate)의 하위 모듈인 Damage Module 의 Ground Motion Selection로부터 지반 가속도데이터 (Ground Motion)를 받아 구조체 거동 분석 후 구조체 변위 정보 (Structural Responses)를 제공함.
- FDS 화재 확산 시뮬레이션 (Fire Simulation Federate)
: Anylogic 시설물 재난대응 분석 모듈 (Response & Recovery Analysis Federate) 내 Damage Module 의 Fire Ignition Point Selection으로부터 화재 위치정보(Fire Information)를 받아 시간에 따른 화재 및 유독가스 확산정보 (Fractional Effective Dose)를 제공함.
- Anylogic 재난 대응활동분석 시뮬레이션 모듈(Response & Recovery Analysis Federate)
: 지진발생 및 그에 따른 구조체 피해/화재 발생 등에 의한 단계별 재난 대응활동 분석을 수행하고, 분석결과를 바탕으로 시설물 재난 대응 및 관리를 지원함. 뿐만 아니라, 하위 모듈인 Damage Module을 통해 USGS 지진 센싱 모듈 (Earthquake Sensing Federate), OpenSees 구조체거동(피해) 시뮬레이션 모듈 (Structural Engineering Federate), FDS 화재 확산 시뮬레이션 모듈 (Fire Simulation Federate) 간 원활한 상호연동을 지원함.

- 이 중 Anylogic 내 하위 모듈인 Damage Module 의 기능은 다음과 같음.

1) Seismic Event Query Request

이 기능은 재난 대응 시뮬레이션이 진행됨에 따라, USGS 지진정보센싱 모듈 (Earthquake Sensing Federate)에 쿼리 파라미터를 통하여 지진의 발생 시간, 위치, 규모 등을 요청함.

2) Ground Motion Selection Using Seismic Information

이 기능은 USGS 지진 센싱 모듈 (Earthquake Sensing Federate)을 통해 얻은 지진정보를 OpenSees 구조체 거동(피해) 시뮬레이션 모듈 (Structural Engineering Federate)에서 활용할 수 있는 지반진동 가속도데이터(Accelerograph)로 변환함.

3) Fire Ignition Point Selection Using Structure Damage

이 기능은 OpenSees 구조체 시뮬레이션 모듈 (Structural Engineering Federate)에서 분석한 구조체 변위 정보와 시설물 내 위험원 위치 정보를 활용하여, 가능한 화재 발생 포인트에 대한 정보를 생성시켜 FDS 화재 시뮬레이션 모듈 (Fire Simulation Federate)에 전달함.

(2) 시뮬레이션 모듈 간 데이터 교환 요구사항 및 데이터 송수신 맵

[표 2-16] 시뮬레이션 모듈 간 교환되는 데이터

Interactions (Parameters)	Explanations (Data Type)
USGSRequest - Start Time - End Time - MinMagnitude - MinLatitude - MaxLatitude - MinLongitude - MaxLongitude	- Minimum time of events to download (long) - Maximum time of events to download (long) - Minimum magnitude of events to download (double) - Minimum origin latitude of events to download (double) - Maximum origin latitude of events to download (double) - Minimum origin longitude of events to download (double) - Maximum origin longitude of events to download (double)
Earthquake - EventID - Time - Longitude - Latitude - Depth - Magnitude	- A unique ID for the event (string) - The time at which the event occurred (long) - The longitudinal location of the event's origin (double) - The latitudinal location of the event's origin (double) - The depth from ground level of the event's origin (int) - The magnitude of the event (double)
GroundMotion - Scale Factor - Acceleration FilePath	- A scaling factor for normalizing data (double) - The file path for appropriate acceleration file determined by Damage (string)
Structural Displacement Displacements	The nodal displacements (C++: vector<double>, Java:ArrayList<double>)
Fire Information - IgnitionPoint - HeatReleaseRate	- Coordinates of the place where fire first started in the facility (double) - Heat release rate per unit area of the burning object (double)
FED - FDSSimulation Time - CarbonMonoxide - CarbonDioxide - Oxygen - GasVelocity	- The time after fire simulation has been started (double) - Concentration of carbon monoxide at the ignition point (double) - Concentration of carbon dioxide at the ignition point (double) - Concentration of oxygen at the ignition point (double) - Velocity of gas traveling inside buildings from the ignition point (double)

- 위에 정의한 시뮬레이션 모듈 간 데이터는 다음과 같이 생성되고, 교환됨.

[표 2-17] 페더레이트 간 Interaction 생성과 교환

Interactions (Parameters)	USGS Seismic Sensing	OpenSees Structure Engineering	FDS Fire Simulation	Anylogic Response & Recovery Simulation
USGSRequest				
- Start Time - End Time - MinMagnitude - MinLatitude - MaxLatitude - MinLongitude - MaxLongitude	Subscribe Subscribe Subscribe Subscribe Subscribe Subscribe Subscribe			Publish Publish Publish Publish Publish Publish Publish
Earthquake				
- EventID - Time - Longitude - Latitude - Depth - Magnitude	Publish Publish Publish Publish Publish Publish			Subscribe Subscribe Subscribe Subscribe Subscribe Subscribe
GroundMotion				
- Scale Factor - AccelerationFilePath		Subscribe Subscribe		Publish Publish
Structural Displacement				
Displacements		Publish		Subscribe
Fire Information				
- IgnitionPoint - HeatReleaseRate			Subscribe Subscribe	Publish Publish
FED				
- FDSSimulationTime - CarbonMonoxide - CarbonDioxide - Oxygen - GasVelocity			Publish Publish Publish Publish Publish	Subscribe Subscribe Subscribe Subscribe Subscribe

(3) 재난 대응활동 분석 시뮬레이션 개발 요구사항

- 본 연구에서 시설물 재난 대응 및 관리 지원의 목표를 위해 개발되는 Anylogic 시설물 재난 대응활동 분석 모듈(Response & Recovery Analysis Federate)은 앞서 타 시뮬레이션 모듈에서 생성된 재난 및 피해 정보를 바탕으로 단계별 재난 대응활동 분석을 수행하며, 이는 1)재실자 피난 행태 시뮬레이션 모듈(Evacuation Behavior Simulation Module), 2) 시설물 기능(전력계통 중심) 긴급복구 및 비상운영 시뮬레이션 모듈(Lifeline System Recovery Simulation Module), 3) 구조체 복구공사 시뮬레이션 모듈(Facility Restoration Simulation Module)을 포함함.
- 이와 같은 실제 재난 관리에 적용하기 위한 단계 별 재난 대응활동 분석 시뮬레이션 모듈 개발을 위해 우선 모듈 간 요구되는 정보, 분석 요구사항을 정의할 필요가 있으며, 이는 다음 [표 2-18]과 같음.

[표 2-18] 재난 대응활동 분석 시뮬레이션 개발 요구사항

Simulation Module	분석 요구사항	요구되는 기능
재실자 피난 행태 시뮬레이션 모듈 (Evacuation Behavior Simulation Module)	• 시설물 재실자 특성 • 시설물 공간 정보	• 시설물 정보 DB 연계
	• 화재 및 유독가스 확산정보	• FDS 시뮬레이션의 정보로부터 유독가스 영향 산정 모듈
	• 화재 및 시설물에 따른 재실자 피난 행태	• 재실자 피난 행태 시뮬레이션 모듈
시설물 기능(전력계통 중심) 긴급복구 및 비상운영 시뮬레이션 모듈 (Lifeline System Recovery Simulation Module)	• 지역 전력계통의 구조/기능/상호의존성 정보	• 지역 전력계통 DB 연계
	• 전력계통 피해정보	• USGS 센싱모듈에서의 지진정보를 기반으로 한 전력계통 피해 산정 모듈
	• 발전시설의 비상운영	• 발전시설 비상운영 분석 모듈
	• 복구자원 분배에 따른 기능복구	• 변전시설 기능 복구 분석 모듈
구조체 복구공사 시뮬레이션 모듈 (Facility Restoration Simulation Module)	• 시설물 특성 및 시설물 주변지역 특성 • 시설물 복구 공정 정보	• 시설물 및 지역정보 DB 연계
	• 외부환경제약 분석을 위한 주변지역 피해 정보	• USGS 센싱모듈에서의 지진정보를 기반으로 한 지역 피해 산정 모듈
	• 시설물 구조체 피해정보	• OpenSees 시뮬레이션의 구조체 변위정보를 활용한 시설물 구조체 피해 정도 산정 모듈
	• 복구환경의 제약 (자원수급 제약 및 작업지연 요소)	• 주변지역 피해 및 복구과정 분석을 통한 시설물 복구공사 외부환경 분석 모듈
	• 시설물 복구공사 프로세스분석	• 시설물 피해 및 복구환경 제약에 따른 시설물 복구공사 분석 모듈

3. 분산형 시뮬레이션 테스트 및 검증 방법 수립

가. 개요

- 본 장에서는 최종 성과물에 대한 타당성을 검증하기 위해 이에 대한 절차서를 개발함. 이를 위해, 먼저 기존 연구를 바탕으로 시뮬레이션의 개념 및 연구 절차를 확립하고, 분산형 시뮬레이션 기술에 대해 소개한 후 개발 단계별 검증 절차를 확립 함.
- 구체적인 시뮬레이션 테스트 및 검증 방법은 분산형 재난 시뮬레이션 테스트/검증 방법 및 절차서(2차년도 성과물)에서 확인할 수 있음.

나. 분산형 재난 시뮬레이션 테스트/검증

(1) 개별 시뮬레이션 모듈 검증 방법 및 체계

- 분산형 시뮬레이션 환경에서의 시설물 재난 대응 및 관리를 위해 본 연구는 앞서 정의한 프레임워크에 따라 다음 [표 2-19]와 같은 하위 시뮬레이션 모듈을 구성하였으며, 본 단계에서는 자체 개발한 시뮬레이션 모듈 ([표 2-19]의 (3)-(6)에 대한 검증 수행.

[표 2-19] 분산형 재난 시뮬레이션의 하위 시뮬레이션 모듈 요약

이름	목적	세부목적	구분	개발 환경/방법
Earthquake Sensing (1)	지진정보를 실시간 센싱	지진 정보를 센싱하여 재난피해/복구시뮬레이션에 활용	기존모듈 활용	USGS Real-time Data Feed
Structure Damage/Collapse (2)	재난 피해 분석	지진에 따른 재난 영향분석	기존모듈 활용	OpenSees Software
		구조체 손상 및 붕괴분석		
Fire (3)	재난 피해 분석	화재에 따른 시설물 영향 분석	기존모듈 활용	FDS Software
Evacuation Behavior (4)	시설물 단위 재난 대응활동 분석	재실자 피난 행태 분석	자체개발	Anylogic Software (ABM)
Lifeline System Recovery (5)	Lifeline 재난 대응활동 분석	Lifeline 기능회복 분석	자체개발	Anylogic Software (ABM/DES)
		Lifeline 비상운영 분석		
Facility Restoration (6)	시설물 단위 재난 대응활동 분석	개별시설물 복구환경 영향 분석	자체개발	Anylogic Software (SD/DES)
		개별시설물 복구 프로세스 분석		

(1단계) Conceptual Validation

- Conceptual Validation 은 개념화 된 모델이 현실세계를 올바르게 반영하는 지 여부를 판단하는 것으로, 시스템 구성요소, 구조, 상호관계에 대한 가정의 적절성, 입력계수/데이터에 대한 가정의 적절성 등을 판단하는 것임.
- 각 재난 대응활동 분석 시뮬레이션 모듈들은 각각 SD, ABM, DES 시뮬레이션 방법론을 통해 개발되며, 시뮬레이션 방법론 별 검증 요구사항에 따라 수행됨.

- 특히, SD 및 ABM 방법론을 통해 개발되는 모듈은 모델 구조에 대한 이론적 검증 및 안면타당도 분석을 집중적으로 수행하며, DES모듈의 경우 입력된 데이터(주로 확률분포로 구성)의 타당성과 작업 간 관계정의의 적합성 분석에 초점을 맞춤.

[표 2-20] 하위 시뮬레이션 모듈 별 Conceptual Validation 체계

목적	방법	세부절차	시뮬레이터 별 분석 요구사항
시스템 구성요소, 구조, 상호관계에 대한 가정의 적절성 분석 (안면타당도 분석)	이론적 검증	- 기존 문헌 및 이론을 통한 시스템 구성요소 도출 - 시스템 구조/구성요소 간 상호 관계에 대하여 기존 문헌/이론을 통한 구조적 검증 (구성 타당도 검증) - 또한, DES모듈은 실제 프로세스를 분석함으로써 작업 특성 및 작업 간 관계를 분석	<u>피난 행태 시뮬레이션</u> - 인간행태 이론/실제 피난행태 <u>Lifeline 긴급복구/비상운영 시뮬레이션</u> - Lifeline System 상호의존성/자원배분/실제복구 및 정책 - 실제 발전시설 전력공급 프로세스 <u>개별시설물 복구공사 시뮬레이션</u> - 시설물 복구공사의 외부환경 분석을 위한 지역단위 복구활동에 대한 시뮬레이션을 수행하며 시설물 간 기능의존성/자원배분특성/실제복구패턴 및 정책을 분석 - 실제 건축물 재건축과 관련한 건설계획/프로세스
	전문가 자문	관련분야 전문가를 대상으로 개념 모델의 적절성에 대한 자문 및 의견반영 수행	<u>공통</u> 시스템 구성요소, 구조 및 출력 값의 행태에 대한 적합성
	민감도 분석	시스템 내 변수 변화에 따른 출력값의 변화를 확인하기 위해 민감도 분석을 수행	<u>공통</u> 중요 변수에 따른 출력값의 변화에 대한 Reference Mode를 작성하고, 실제 출력값의 분포(민감도)와 비교분석
입력계수 및 데이터에 대한 검증	외부 (정책) 변수의 적합성 분석	모델에 입력되는 외부 (정책)변수의 적합성을 분석하고자, 정책효과의 Ref.Mode를 작성하고, 실제 정책효과변수를 반영하여 나온 출력값과 비교분석	<u>피난 행태 시뮬레이션</u> - 피난지원 구조작업, 피난경로개선, 피난훈련 효과 <u>Lifeline 긴급복구/비상운영 시뮬레이션</u> - 정부차원의 복구정책 (자원배분 등) - 개별시설물 복구공사 시뮬레이션 - 정부차원의 복구정책 (자원배분 등)
	입력된 실패데이터 적합성 분석	- 입력된 데이터 입력값 및 확률 분포 적합성을 통계적 적합성 검정 - 실제 액티비티의 수행시간을 기반으로 하는 이산사건 시뮬레이션 기반 모델에서 집중 수행	<u>공통</u> - 재난정보, 지역정보, 시설물정보 반영의 적합성 - Lifeline 비상운영 시뮬레이션 - 시설물 가동 액티비티 별 소모자원/기간 - 개별시설물 복구공사 시뮬레이션 - 건설 액티비티 별 소모자원/기간

(2단계) Verification

- 본 연구에서 개발되는 재난 대응활동 분석 관련 하위 시뮬레이션 모듈들은 각 시뮬레이션 방법론을 구현하는 Anylogic을 통해 개발되며, 해당 소프트웨어는 모델 검사 및 디버깅, 코드의 문서화, 시각화 기능을 탑재하고 있어 이를 통해 모델 검사를 수행함.

(3단계) Calibration & Validation

- 본 연구에서 활용하는 하위 시뮬레이터들의 타당성 검증은 실제 발생했던 재난 사례를 바탕으로 진행되며, 실제 재난 사례에서의 대응 패턴과 모델의 출력값을 비교 분석함.
- 특히 재난 대응 시뮬레이션의 경우 모의재현을 하는 것이 비현실적이기 때문에 검증이 어려울 수 있으나, 과거 재난에 대한 데이터 및 행태 분석을 활용하여 검증을 진행함.

[표 2-21] 하위 시뮬레이션 모듈 별 Calibration/Validation 체계

목적	관련자료	모델 행태 분석
피난 행태 시뮬레이션		
• 시설물 내 재실자 피난행태 현실성 반영	• 실제 건축물 화재 시 피난행태 관련 자료	• 실제 화재상황 시 재실자의 피난행태와 비교 분석 (행태분석 및 설명)
• 시설물 유형별 피난행태 분석	• 각 시설물 별 재실자 피난행태 자료	• 시설물 유형별 재실자 피난행태 차이점 분석 (행태분석)
Lifeline 긴급복구 및 비상운영 시뮬레이션		
• 지역 내 Lifeline System 피해현황/복구과정 현실성 반영	• 동일본대지진(2011) 재난정보, 피해지역 Lifeline System 정보, 피해현황, 복구정책, 복구패턴 (RA 2011; e-Stat 2013; NPA 2013; RA 2013)	• 지역별Lifeline System 피해규모 비교 • 지역별Lifeline System 복구진행 비교 (오차율 10% 이내/행태 설명)
• Lifeline System 복구정책 (자원배분 등) 효과 분석	• 동일본대지진(2011) 복구정책 효과 분석자료 (RA 2011; RA 2013)	• 정책적용에 따른 지역별 Lifeline System복구진행 및 기능회복 비교분석
• 전력시설 운영 현실성 반영	• 실제 발전시설 전력공급 프로세스	• 실제 전력공급 과정과의 비교 분석 (오차율 10% 이내/행태 설명)
개별시설물 복구공사 시뮬레이션		
• 복구프로젝트 외부환경 분석을 위한 지역 내 시설물 유형별 피해현황/복구과정 현실성 반영	• 동일본대지진(2011) 재난정보, 피해지역 시설물정보, 시설물별 피해현황, 복구정책, 복구패턴 (RA 2011; e-Stat 2013; NPA 2013; RA 2013)	• 시설물 위치별 주변지역 피해규모분석 • 시설물 위치별 주변지역 복구진행상황 비교 • 시설물 유형별 피해규모 비교분석 • 시설물 유형별 복구진행상황 비교 (오차율 10% 이내/행태 설명)
• 개별 시설물 복구작업 현실성 반영	• 실제 건축물 복구 프로세스	• 실제 복구기간과의 비교분석 (오차율 10% 이내)

(2) 분산형 재난 시뮬레이션 테스트 방법 및 체계

- 본 단계에서는 시설물 재난 대응 및 관리 목적에 따른 분산형 재난 시뮬레이션 테스트 방법 및 체계를 정의함.
- 먼저 본 연구는 시뮬레이션 기반의 시설물 재난 대응 및 관리 시스템 구축을 위해 다음의 연구 프로세스와 같이 진행됨.
 - 1) 재난 발생/대응 시나리오에 따른 시뮬레이터 간 데이터 호환체계 구축
 - 2) 시뮬레이터 간 상호연동 프로토타입 개발
 - 3) 분산형 시뮬레이션 플랫폼 구축
 - 4) 분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응/관리시스템 구축
- 이는 [표 2-22]와 같은 검증 절차를 통해 타당성을 확인할 수 있을 것으로 기대됨.

[표 2-22] 분산형 시뮬레이션 검증 체계

단계	목적	방법	목표
Conceptual Validation	재난 발생/대응 시나리오 및 데이터 송수신 요구사항 적정성 확인	- 실제 재난 발생/피해/대응 유형 및 시설물 특성 체계화하고, 복합 재난 시나리오 개발한 후 재난 및 시설물 관리 전문가를 대상으로 적정성에 대한 평가, 자문, 반영 - 국내외 재난 대응/관리 체계 및 매뉴얼을 분석하고 이에 대한 적합성을 관련 전문가를 대상으로 평가, 자문, 의견 반영	- 전문가 3인 이상 적합 및 의견반영 - 전문가 3인 이상 적합 및 의견반영
	데이터 프로토콜의 적정성 확인	시뮬레이터 간 또는 시뮬레이터와 DB간 데이터 교환 시 데이터 호환 가능 여부를 데이터 속성을 분석함으로써 조사함	교환 가능한 데이터 중 95% 이상 호환가능
Verification	상호연동 시뮬레이션 프로토타입의 적정성 확인	시설물 재난 대응 및 관리 목적에 따라 (실제 재난 발생/피해/대응 시나리오 3가지 선정) 하위 시뮬레이터 간 상호연동을 통합환경 (Anylogic Software)에서 구현하는 프로토타입을 개발하고 이에 대한 상호연동 접속규약의 정확성 분석	가능한 조합의 상호 연동 시뮬레이션 수행하여 데이터 교환 수행여부 확인
	분산형 시뮬레이션 플랫폼 구동성능 분석	- 교환되는 데이터 값, 시기의 정확성 추적 - 위의 3가지 시나리오에 대한 프로토타입을 분산형 시뮬레이션 환경에서 구현하고, 통합환경에서 구현된 결과 (Intermediate Model)와 비교분석 (오차분석)	분석결과 값 별 오차 5% 미만 또는 카이제곱검정 (유의수준 5%)
Validation	재난 시나리오 별 재난발생/피해/대응과정 현실성 반영	- 위의 3가지 사나리오에 대해 실제 데이터와 모델 출력값 비교 분석 (오차분석) - 위의 3가지 사나리오에 대해 실제 재난 발생/피해/대응상황과 비교 분석 (행태분석)	- 분석결과 값 별 오차 10% 미만 및 오차에 대한 행태분석 - 전문가 자문 수행

마. 분산형 시뮬레이션 테스트 및 검증 방법/절차 타당성 평가

- 본 연구에서는 개발된 검증 절차서의 개선사항에 대한 전문가 의견수렴을 거쳐 타당성 평가를 진행하였으며, 자세한 내용은 다음 [표 2-23]과 같음.
- 본 자문은 자체 개발하는 개별 시뮬레이션 모듈 검증 및 분산형 시뮬레이션 플랫폼 기술의 상호연동 검증을 확인하기 위한 것임.

[표 2-23] 분산형 재난 시뮬레이션 테스트/검증 절차 타당성 평가

평가대상	평가 의견	의견 수렴 결과 및 방안
재난 대응 시뮬레이션 모듈 검증/테스트	재난 상황에서는 불확실성을 증대시키는 요소가 산재해 있기 때문에 사례를 바탕으로 정확하게 데이터를 비교하는 것은 한계가 있으며, 오히려 왜 이러한 결과를 도출되었는지에 대한 구체적인 상황분석을 수행하는 것이 의미가 있음.	실제 재난 사례 데이터를 통한 분석 시 실제사례와의 유사성을 데이터 결과 값 및 행태 분석을 통해 설명하고, 결과 값의 차이가 발생할 때 오차가 발생하는 것에 대한 설명하는 것을 절차서 상에 “행태분석”으로 설정함.
	재난 시뮬레이션 결과는 평균값에 대해 설명하는 것도 의미가 있으나 최악의 상황에 대해 잘 설명할 수 있어야 함.	복구시뮬레이션의 경우, 효율적인 분석을 수행하는 것을 목표, 인명과 관련된 피난시뮬레이션의 경우 최악의 상황에 대한 분석자료/사례를 기반.
	재난 상황은 사례를 통한 검증이 어렵기 때문에 구조적 검증이 어려우며, 이에 따라 Construction Validity (Cronbach and Meehl 1955) 및 Face Validity (Banks et al. 2005)에 대한 검토 필요.	각 모듈별 설계에 있어, 모델 구조에 대한 구조적 타당성 검증의 중요성을 확인하고, 모델에 대한 Conceptual Validation을 주요 과정으로 설정. 본 단계는 기존문헌 분석 및 사례 분석을 통해 수행됨.
	본 연구에서는 Agent Based Modeling, Discrete Event Simulation, System Dynamics 등 다양한 시뮬레이션 방법론을 사용하는 데 각 시뮬레이션 방법론 별 목표, 분석력 등이 상이함으로 각 방법론에 적합한 검증방법을 설정.	기본적으로 모든 모델에 대한 구조적 타당성 및 행태적 타당성, 수치적 정확성을 추구하되, Agent Based Model은 모델 내 Rule 설정 등에 대한 구조적 타당성에 초점을 더 맞추고, System Dynamics는 행태분석에 초점을 맞추며, Discrete Event Simulation은 분석결과의 정확도에 중점.
분산형 시뮬레이션 테스트	분산형 시뮬레이션을 테스트하는 방법 중 하나로, 시뮬레이션 중간중간 교환되는 데이터의 교환시기 및 값을 미리 설정하고, 이를 통합환경에서 인위적으로 해당 시간에 해당값을 입력함으로써 결과를 얻는 모델을 만들고 (Intermediate Model), 이를 실제 상호연동되는 시뮬레이션과 비교하는 방법을 사용할 것 (J. Martinez 2010).	본 방법에 대한 연구를 통해, Intermediate 모델을 사용하여 모델을 검사하는 것을 시뮬레이션 검증 절차에 삽입함.
	분산형 시뮬레이션에서 교환되는 데이터값의 정확성도 중요하나, 무엇보다 교환되는 데이터의 교환이 적시에 되는지 확인할 필요가 있음. 이게 정확하지 않으면, HLA 기능인 Time Management가 올바르게 작동하지 않는 것임.	분산형 시뮬레이션 상호연동 테스트 시 교환되는 데이터 값의 정확성 뿐 만 아니라, 데이터교환시기가 올바른지 파악함으로써 테스트를 수행할 예정.

4. 재난대응/관리 시뮬레이션 모듈개발 및 테스트

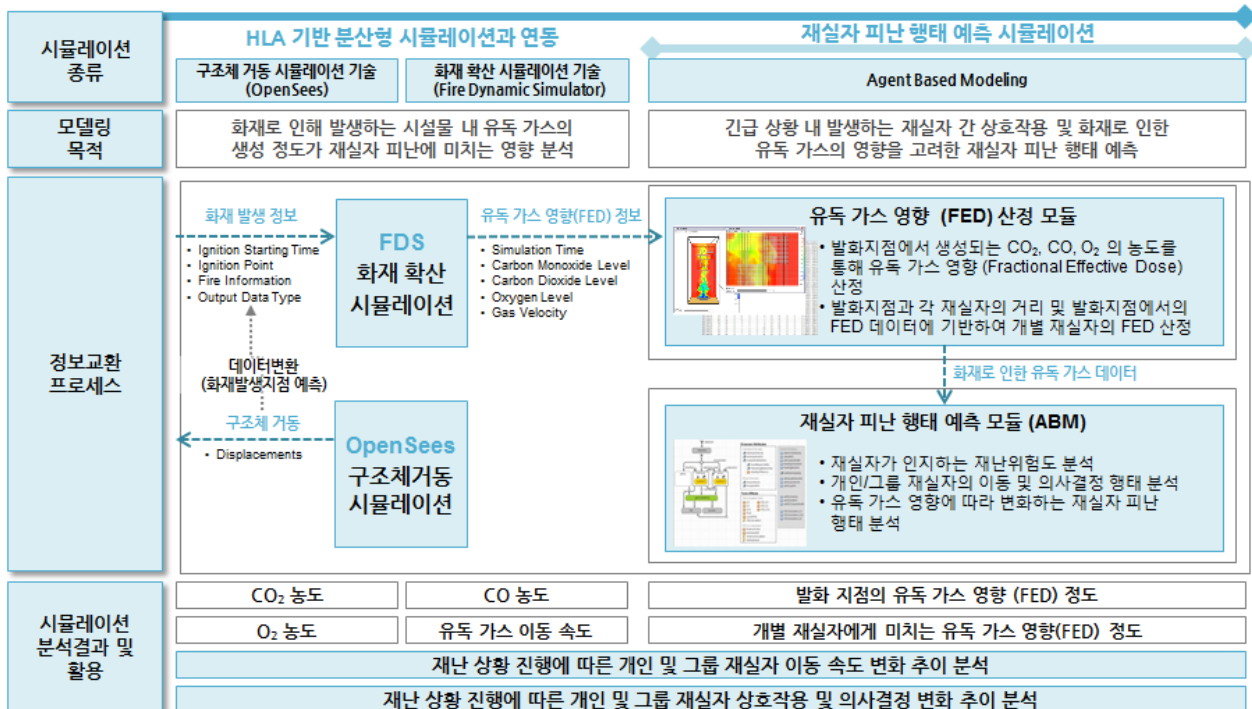
가. 개요

- 본 장에서는 앞서 개발한 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 프레임워크 및 시뮬레이션 요구사항 분석결과를 바탕으로, 재난 대응을 위한 단계별 시뮬레이션 모듈을 개발함.
- 본 연구에서 개발하고자 하는 시뮬레이션 모듈은 분석 목적에 따라 각각의 하위 모듈을 구성하고 있으며, 본 장에서는 개별 모듈의 모델구조 및 주요함수 등에 대해 설명하고, 각 모듈별 분석력 뿐 아니라 테스트 결과 등을 제시하고자 함.

나. 재실자 피난행태 시뮬레이션 (Evacuation Behavior Simulation)

(1) 모델 개발 개요

- 피난 계획은 일반 건축물 및 공공시설의 설계에서 간과할 수 없는 중요한 요소 중 하나이며, 국내외에서 발생한 다양한 사고 사례를 통해 피난 계획의 중요성이 재조명되었음.
- 시뮬레이션을 활용한 피난 예측 시 재실자 성별, 나이 등 개인적 특성 뿐 만 아니라 인간 행태로 인해 발생하는 상호작용, 그룹 형성 등은 피난 행태를 결정하는 중요한 요소임.
- 또한, 재난 발생에 따른 시설물 내 환경 변화는 재실자의 피난 행태에 영향을 미치게 되며, 구조체 붕괴 및 유독 가스 확산과 같은 현실적인 상황들이 포함되어야 함.
- 본 연구는 재난 진행에 따라 변화하는 시설물 환경이 재실자의 피난 행태에 미치는 영향을 분석하기 위해 시설물 단위의 피난 행태 시뮬레이션 모델을 개발하고자 함. 개발된 모델은 다수의 실과 출입구를 가진 일반 건축물에서 화재 상황을 감지한 후 재실자의 피난 행태를 예측 및 분석하는 것을 목표로 함.



[그림 2-10] 재실자 피난 행태 시뮬레이션

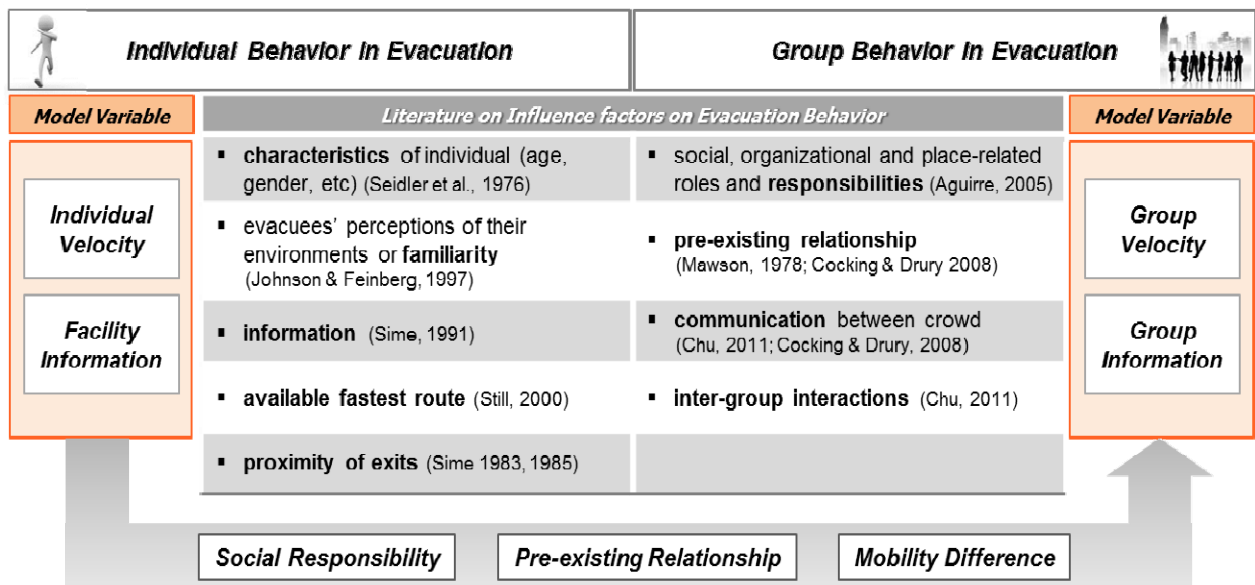
(2) 하위 모듈 설명

① 유독 가스 영향 (FED) 산정 모듈 (Fractional Effective Dose calculation)

- 화재로 인한 유독 가스는 재실자의 행태에 영향을 미칠 뿐만 아니라 심한 경우 의식 불명 및 사망을 초래하는 원인이 될 수 있어 피난 예측에 있어 이에 대한 고려는 필수적임.
- FED는 Purser 이 제안한 시간에 따른 유독 가스의 복용량의 총합 계산식으로 화재로 인한 유독 가스의 독성의 위험성을 평가함. 일산화탄소 (CO), 이산화탄소(CO₂), 산소(O₂) 등 질식성 가스의 농도를 활용하며, 개별 재실자의 FED 값이 1이 넘을 경우 점차 무력화되며 결국 정지 및 다른 피난 인원과 아무런 상호작용을 하지 않는 상태에 이름.
- 본 연구에서는 Purser 의 FED 산정식을 활용하여 Anylogic 환경 에서 유독 가스 영향 산정 모듈을 개발하였으며, FDS를 통해 입력받은 발화점에서의 일산화탄소, 이산화탄소, 산소 농도를 활용하여 FED_{CO}, V_{CO2}, FED_{O2} 값을 산정하고, 해당 위치에서 FED_{IN}을 계산함.

② 재실자 피난 행태 예측 모듈

- 재실자 피난 행태 예측 모듈은 재난과 같은 긴급 상황에서 개인의 이동 능력, 피난 정보, 타인과의 친밀도 등에 기반하여 비상구까지 이동하는 재실자의 행태를 분석 및 예측하는 모듈로써, 사회과학분야의 주요 피난 이론들을 적용하여 그룹 내 상호작용을 포함하여 현실에 가까운 피난 행태를 나타내는 것을 목표로 함.
- 이를 위해 Agent-based Modeling 방법론을 사용하여 모듈을 구축함. 해당 방법론은 지능적인 에이전트들의 활용을 통해 환경을 인지하고, 의사결정이 가능하며, 서로 다른 에이전트들 간 상호작용이 가능하여 현실적인 인간 행동을 표현할 수 있는 장점을 가짐.



[그림 2-11] 재실자 피난 행태 예측 모듈 주요 개념

- 개별 재실자는 그들의 인간 특성 (나이, 성별 등) 에 따라 이동 속도 (Individual Velocity) 를 가지며, 시설물에 대한 친숙도 및 기존 정보를 통해 시설물 정보 (Facility Information) 을 정의함. 이러한 정보를 통해 알고 있는 출입구들과 재실자의 현재 위치 사이의 거리를 산정하여 가장 가까운 출구를 찾기 위한 의사결정을 내림.
- 이동 속도 및 시설물 정보와 같은 재실자의 특성과 더불어 사회적인 책임감 (Social Responsibility), 다른 재실자들과의 친밀도 (Pre-existing Relationship) 및 속도 차이 (Mobility Difference)를 통해 타인을 돕고 정보를 공유하는 그룹 형성의 여부가 결정되며, 상호 작용 의지 (Cooperative Intention) 으로 이를 표현함.
- 이러한 재실자의 각 특성의 정도 및 확률에 따라 개별 재실자는 타인과의 상호 작용 없이 혼자 피난을 수행하거나 그룹을 형성하여 상호 작용을 통해 그룹 속도 (Group Velocity) 및 그룹 정보 (Group Information)에 기반 하여 탈출구를 찾게 됨.
- 그룹 속도 (Group Velocity)는 이동 속도가 빠른 재실자와 느린 재실자 사이에 신체적 도움을 제공함으로써 특정값으로 수렴하게 되며, 그룹 정보 (Group Information)는 다수의 재실자가 탈출 동선 및 탈출구에 대한 서로의 정보를 교환하며 점차 증가함.

(3) 모델 테스트 결과

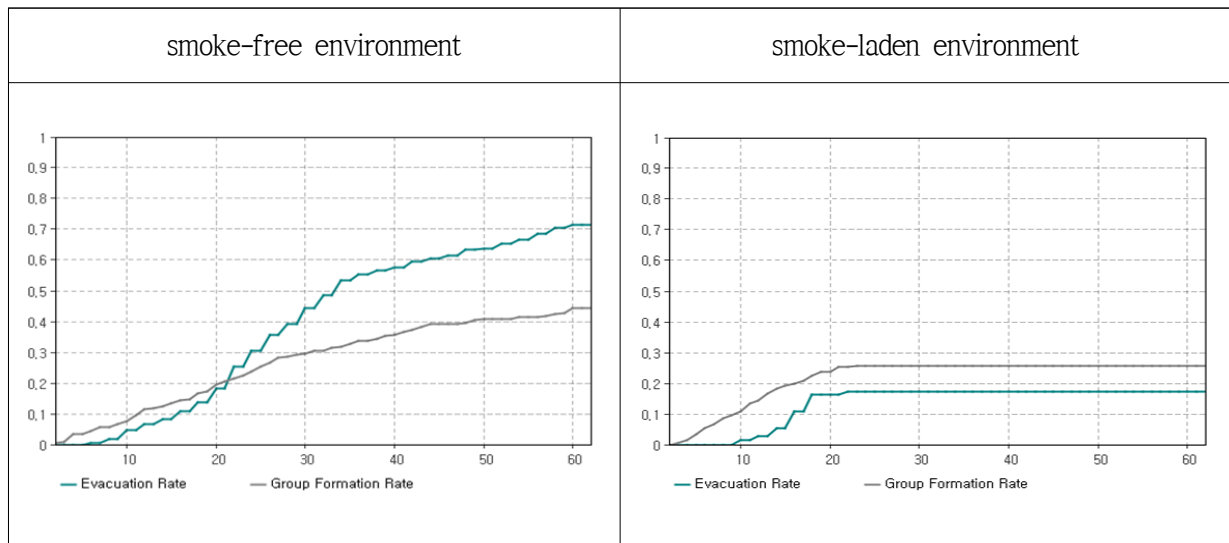
- 피난 시뮬레이션 연구의 특성 상 실제 데이터를 활용한 모델의 검증에는 데이터 수집 및 타당성과 관련한 한계점이 따름에 따라, 다양한 유형별 시나리오를 수립하고 이에 따른 모델의 분석 결과를 비교하여 현실성 반영 여부를 테스트함.
- 시뮬레이션 시나리오는 아래 [표 2-24]와 같이 수립하였으며, 단순 지진 경보 이후의 피난과 같이 유독성 물질의 영향이 없는 환경과 시설물 내 동일한 층에 화재로 인한 유독 가스의 영향이 있는 환경으로 구분하여 피난 성공률 및 그룹 형성을 비교함.
- 분석 결과 모든 시나리오에서 화재 발생 이후 피난 개시 17초부터 FED 값이 1보다 커져 대부분의 재실자의 신체 능력이 유독 가스로 인해 점차 무력화 되며, 피난 성공률이 smoke-free environment 대비 현저하게 떨어지는 결과가 나타남.
- 더불어 화재로 인한 FED 값의 증가는 재난 상황에 대한 재실자가 느끼는 위험도의 증가로 인해 타인과의 상호 작용 의지를 저하시켜 그룹 형성률을 감소시키는 영향을 미침.
- 기타 본 시뮬레이션 결과 타당성 검증을 위한 행태분석 내용은 다음 (4) 모델 분석의 분석결과 설명을 통해 확인할 수 있음.

[표 2-24] 피난 행태 예측 모듈 테스트 시나리오

Fixed Conditions	Control Variables		Example Facility Types (Scenario Number)
• Individual Information (0.6) • Cooperative Intention (0.6)	Individual Velocity	triangular (10,20,11)	Elderly Hospital (1)
• Individual Velocity (0.75) • Cooperative Intention (0.6)	Individual Information	uniform (0, 0.35)	Theater (4)
		uniform (0.35, 0.7)	Office (5)

(4) 모델 분석

- 앞서 테스트한 모델을 바탕으로, 본 연구에서 개발한 유독 가스 영향 산정 모듈 및 재실자 피난 행태 모듈의 분석을 통해 도출한 결과를 분석하고, 이를 통해 제공할 수 있는 정보는 무엇이며, 어떻게 활용할 수 있는지 간략히 정리함.
- 또한 본 연구의 시설물 분석 범위 확장을 위해 국내에서 발생 가능성이 높은 화재와 피난을 예시로 다양한 재실자 유형이 존재하는 3종류의 시설물에서의 결과를 제시함.
- 예를 들어, 개별 재실자가 가진 시설물 정보와 사회적 책임 및 재실자와의 친밀도를 통해 산정되는 상호 작용 의지가 동일하고, 소수의 병원 관리자들을 제외한 대부분의 재실자(노약자)들의 이동 능력이 매우 낮은 노인 병원을 대상으로 한 시나리오 (1)을 유독 가스가 없는 환경과 있는 환경으로 구분하여 분석한 결과는 아래 [그림 2-12]와 같음.
- 이를 통해 노인시설에서는 주요 재실자들의 이동성을 높일 수 있는 보조 이동 기구들의 효율적인 배치를 통해 화재가 발생하고 개별 재실자들의 FED 레벨이 1에 도달하는 시점 이전에 최대한 많은 재실자가 신속히 움직일 수 있는 방안을 마련함과 동시에 느린 이동 속도로 인해 단기간 내에 이동 거리가 길지 않은 재실자들을 위해 유독 가스 및 화염으로부터 안전한 피난 구역 등의 설치 계획 등이 필요함을 알 수 있음.

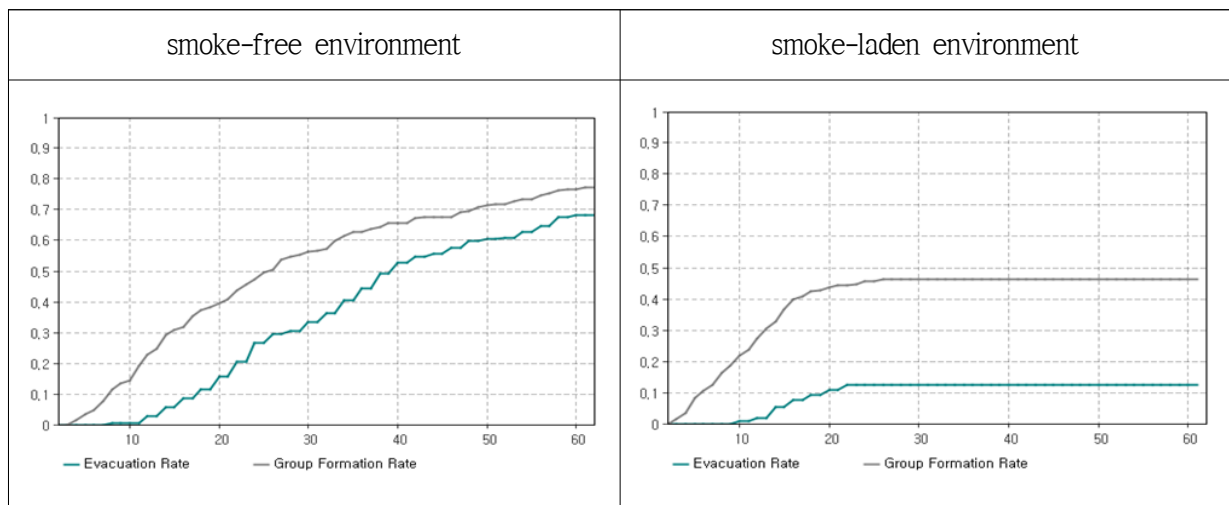


[그림 2-12] 피난 행태 예측 시뮬레이션 시나리오 예시 (노인시설)

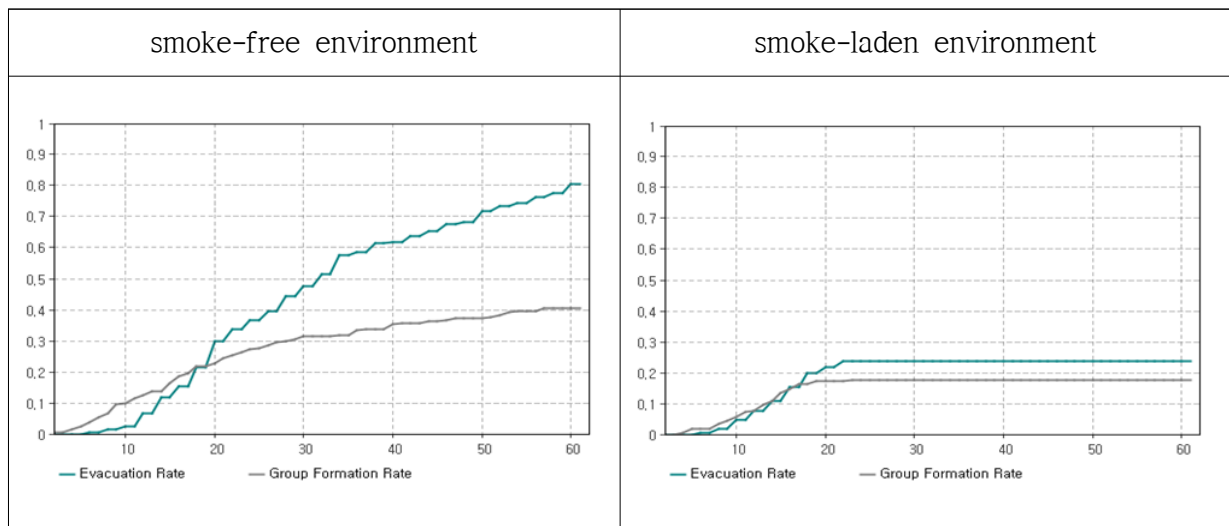
- 반면, 복합 쇼핑시설의 경우 재실자의 이동 속도 및 상호 의지 정도가 유사하며, 낮은 방문 빈도 및 특정 장소만을 이용하기 때문에 재실자 대부분의 시설물 정보가 낮음.
- 따라서 [그림 2-13]과 같이 유독 가스의 영향이 없는 경우 한정된 시설물 정보로 인해 재실자 간 상호 작용이 증가하여 높은 그룹 형성률을 보임 (0.78). 그러나 피난 동선 정보의 부정확성으로 인해 탈출구 도착까지 오랜 시간이 소요되어 그룹 형성률 대비 낮은 피난 성공률(0.6)을 보이며, 피난 시 정보 활용의 중요성을 강조함.
- 특히, 화재로 인한 유독 가스의 영향이 발생할 경우 높은 그룹 형성률(0.47)에도 불구하고, 공유할 수 있는 정보의 한정으로 인해 그룹의 제 기능을 못하는 상황이 발생하며, 그

를 상호 작용이 적은 피난 초기에는 탈출 성공 인원이 거의 없이 시설물 내에 갇혀있는 상황이기 때문에 적절한 시설물 정보의 제공이 피난 성공률을 높일 수 있음.

- 또한 개별 재실자가 가진 이동 능력 및 상호 작용 의지가 동일하고, 다수의 직원이 상주하는 오피스 건물은 [그림 2-14]와 같이 분석되며, 해당 시설물과 같이 재실자들이 피난 동선 정보를 비교적 많이 인지하고 있는 경우 안전 관리자의 배치보다는 피난 개시 초기에 개별 재실자들이 활용할 동선 정보가 유용한 것인지 여부를 알려줄 수 있는 직관적인 정보를 제공함에 따라, 그들이 알고 있는 정보에 대한 확실성을 부여하는 것이 필요함.
- 이는 본 연구의 FDS 화재 시뮬레이션 모듈과의 연동을 통해 유독 연기의 이동 상황을 감지하고 활용 가능한 정보를 신속하게 제시한다면 재실자들이 가진 초기 정보에 기반한 신속한 의사결정을 내리는데 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 예상됨.



[그림 2-13] 피난 행태 예측 시뮬레이션 시나리오 예시 (복합 쇼핑시설)

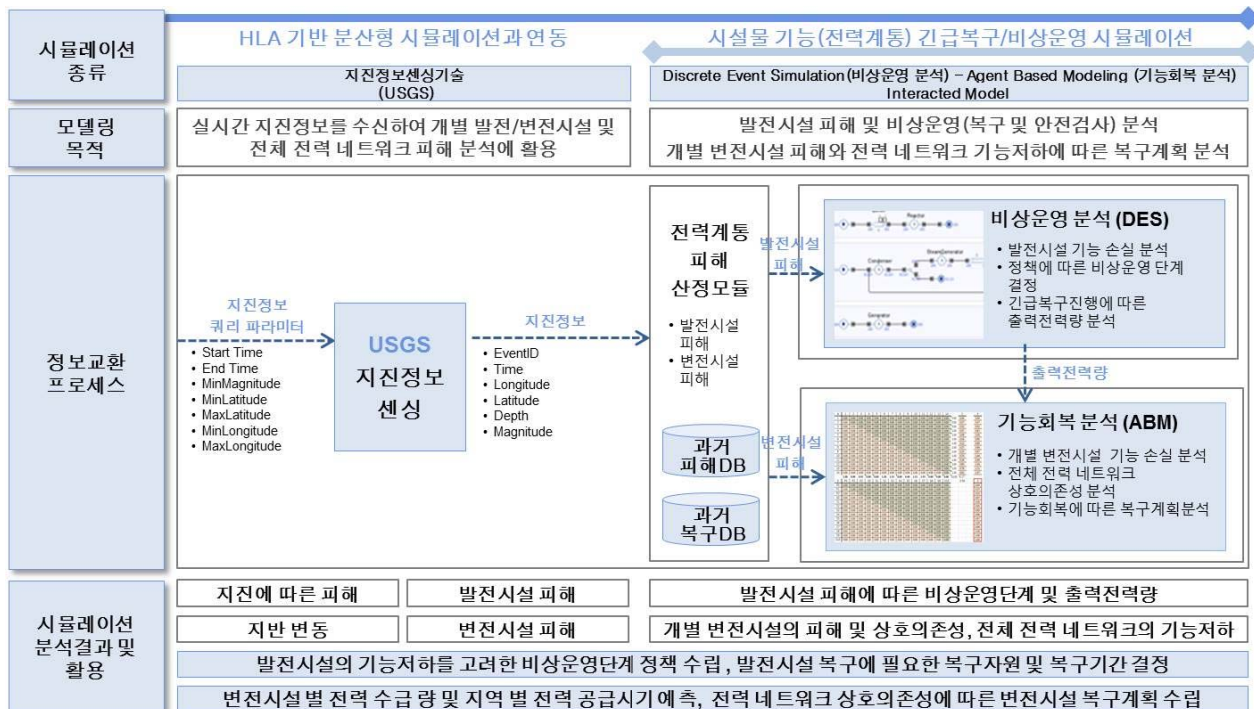


[그림 2-14] 피난 행태 예측 시뮬레이션 시나리오 예시 (오피스)

다. 시설물 기능 긴급복구/비상운영 시뮬레이션 (Lifeline Recovery Simulation)

(1) 모델 개발 개요

- 건축물의 밀도가 높은 도심지에서의 전력시설과 같이 지역주민의 기본 생활을 유지하는데 필요한 Lifeline System이 재난으로 인해 가동중지될 경우 해당 시설에서 제공하는 서비스를 필요로 하는 다른 시설물의 2차 피해를 야기함.
- 따라서 Lifeline System의 복구는 가장 우선시 되어야 하나 광범위한 지역의 네트워크 형태이기 때문에 전체 시스템의 기능 저하를 판단하는 데 어려움이 있음.
- 본 연구는 재난 대응 초기단계에서의 Lifeline System의 연쇄피해를 산정하기 위해 피해 지역의 공간적 특성 및 상호의존성을 고려한 시설물 기능 긴급복구/비상운영 시뮬레이션을 개발하는 것을 목적으로 함.



[그림 2-15] 시설물 기능(전력계통 중심) 긴급복구/비상운영 시뮬레이션

(2) 하위 모듈 설명

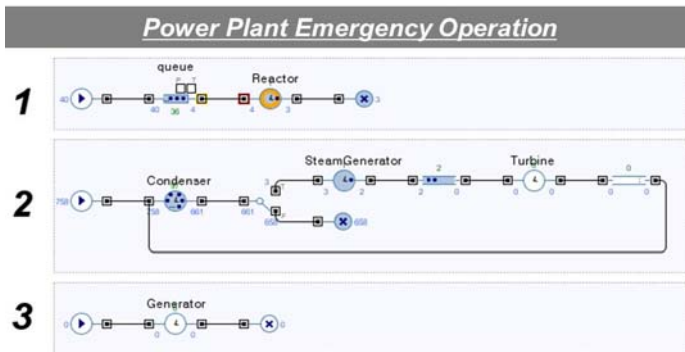
① 전력계통 피해 산정모듈 (Lifeline System Damage Assessment)

- 일반적으로 지진에 의한 시설물 손상도 평가의 경우 시설물이 위치한 지점에서 계측된 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 이용하여 직접적인 피해를 평가함.
- 본 연구의 전력계통 피해 산정모듈 또한 USGS를 통해 센싱한 지진정보를 활용하여 PGA를 계산하며, 비교적 간단한 계산방식인 Kanno et al(2006)의 회귀모형을 적용함.
- 개별 전력 시설의 PGA가 산정되면, 시설물 특성에 따른 손상도 평가를 실시함. 본 모듈에서는 FEMA(2003)의 보고서에서 제시한 전력 계통의 손상 알고리즘을 적용하여 발전소와 변전소의 기능 저하를 계산함. 해당 알고리즘은 미국 지역의 재난 사례를 기반으로 구축되었으나 다수의 선행 연구를 통해 미국 외 지역에서의 적용성을 확인 받았음.

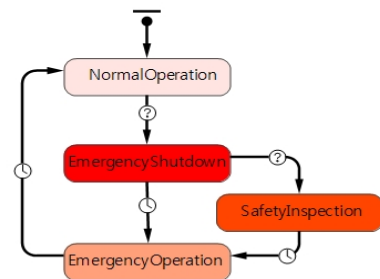
- 지진 발생으로 인한 전력계통의 피해가 산정되면 대수정규누적확률분포 형태의 전력계통의 기능저하곡선을 도출할 수 있으며 이를 기반으로 특정한 수준의 PGA에서 발전소와 변전소의 기능저하를 확인할 수 있음.

② 발전시설 비상운영 분석모듈 (PowerPlant Emergency Operation)

- 본 연구의 시설물 기능 긴급복구/비상운영 시뮬레이션은 전력계통 중 발전시설에 한정하여 비상운영 분석 모듈을 개발하였으며, 본 발전시설 비상운영 분석모듈은 다음 [그림 2-16]과 같이 발전시설을 크게 반응기(Reactor), 응축기(Condenser), 증기 발생기(Steam Generator), 터빈(Turbine), 발전기(Generator)의 5부분으로 나누어 모델링함.
- 각 공정 1(반응기), 2(응축기-증기 발생기-터빈), 3(발전기)은 각각의 상위 공정이 완료되는 시점에 시작되며 마지막 3번째 공정이 끝나면 전력이 생산됨.
- 이 때 지진 계측기는 공정 1의 반응기에 설치되어있다 가정함. 따라서 위의 전력계통 피해 산정 모듈에서 지진정보가 수신되면 공정 1의 프로세스가 자동으로 중단되며 단계적으로 후속 공정들이 비상 정지함.
- 국내 발전시설의 비상 정지 기준은 PGA 0.01중력가속도 이상이며, 비상운영(Emergency Operation, PGA 0.1 중력가속도 이상), 안전 점검(Safety Inspection, PGA 0.2 중력가속도 이상)단계 등으로 분류됨. [그림 2-17]은 발전시설 비상운영 단계의 흐름을 나타냄.



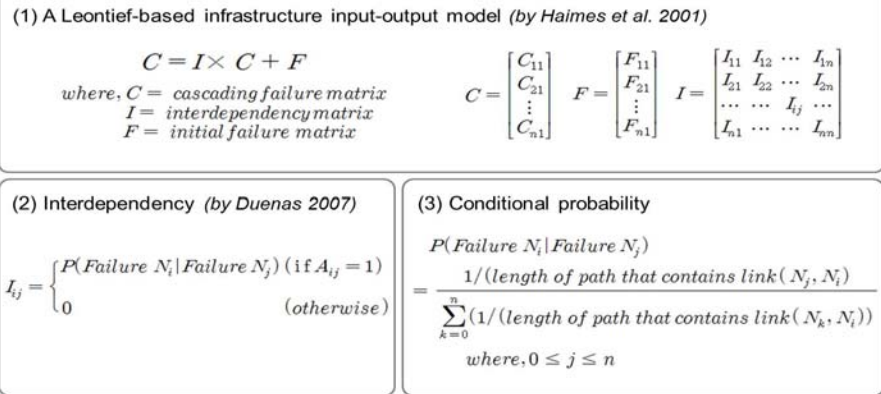
[그림 2-16] 발전시설 비상운영 분석 모델



[그림 2-17] 비상운영 단계

③ 변전시설 기능회복 분석모듈 (Lifeline System Emergency Restoration)

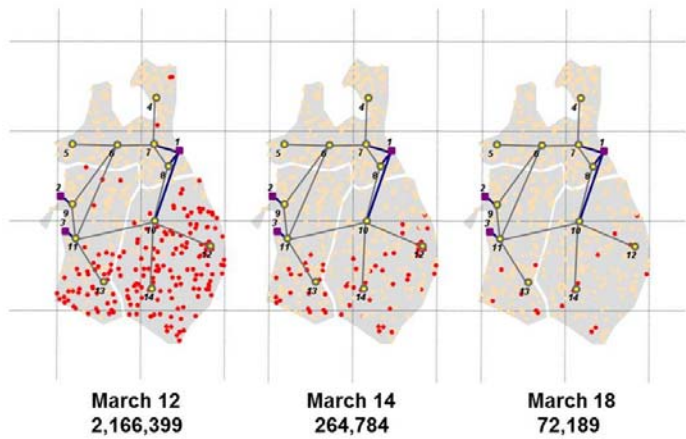
- 재난 후 개별 변전시설 피해 평가는 단일 시설의 기능저하 뿐만아니라 상위단계의 전력계통의 손상으로 인해 2차적으로 발생하는 연쇄 기능저하 추정이 필수적임.
- 따라서 본 변전시설 기능회복 분석모듈은 Haimes(2001)가 제안한 레온티에프의 사회기반 시설 투입-산출모형을 활용하며 이는 다음 [그림 2-18]의 (1)과 같음.
- 이 때 n개의 발전시설 및 변전시설로 구성된 전력계통 네트워크에서 C와 F는 각 개별 전력시설의 연쇄 피해와 초기 피해를 나타내는 $n \times 1$ 행렬을 의미함.
- 개별 전력시설 간의 상호의존성은 상위 전력시설의 초기 피해가 하위 전력시설로 전이될 확률을 의미하며, [그림 2-18]의 (2)와 (3)과 같은 조건부 확률로 예측할 수 있음.



[그림 2-18] 변전시설의 상호의존성 및 연쇄피해 평가

(3) 모델 평가 및 분석

- 본 연구에서 개발한 지진 후 시설물 기능(전력계통 중심) 긴급복구 및 비상운영 시뮬레이션의 타당성을 검증할 위해 실제 재난사례를 대입한 실험을 진행하였음.
- 현재까지 국내에는 지진으로 인해 전력 네트워크가 손상된 사례가 없기 때문에 본 모델의 분석에서는 일본의 2011 도호쿠(Tohoku) 지역 대지진을 사례로 선정하였음.
 - 1) 지진은 2011년 3월 11일 오후 2시 46분에 발생함.
 - 2) 진앙지의 위치는 (142.37E, 38.82N)이며, 규모 9.0, 진원깊이 24km임.
 - 3) 분석 지역 내에는 화력 발전소 3곳과 변전소 11곳이 전력 네트워크를 구성함.



[그림 2-19] 분석대상 지역 정전가구 수 분석

[표 2-25] 시뮬레이션 결과와 실제 데이터 비교 (정전가구)

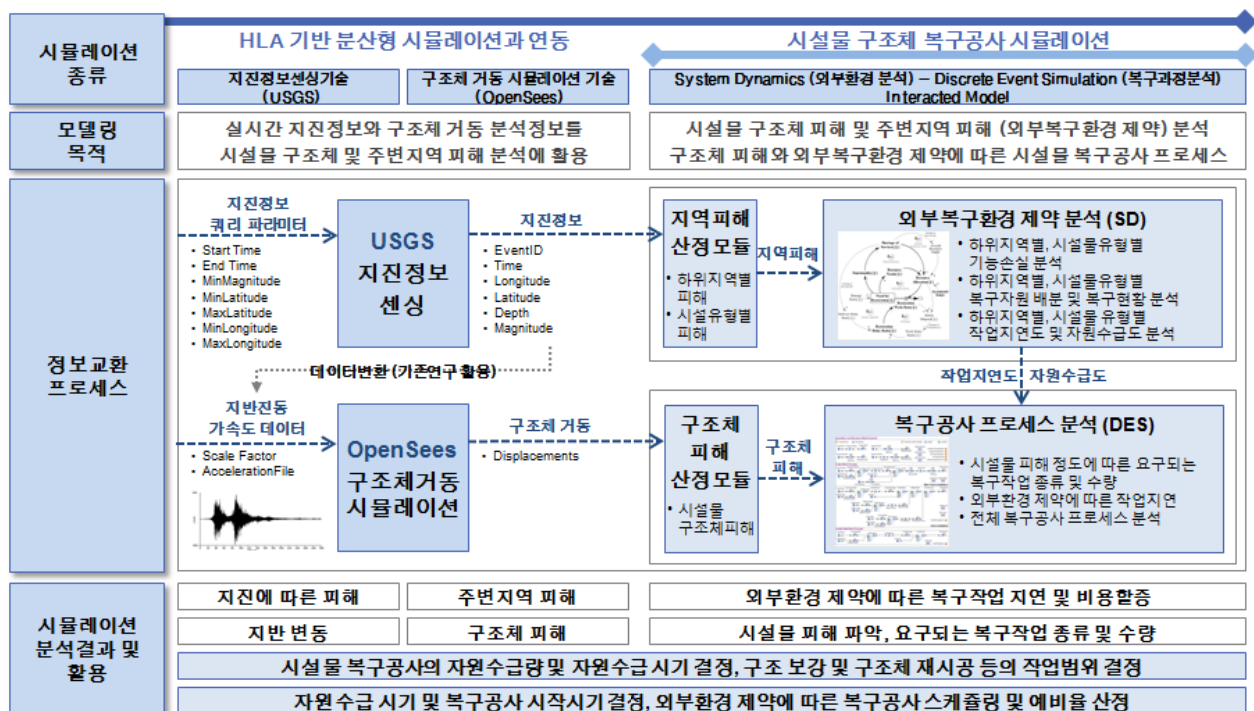
% of Households in Blackout		
	Actual Data (%)	Simulation (%)
after 1day	89.1	92.7
after 3days	6.1	11.3
after 7days	2.2	3.1

라. 시설물 구조체 복구공사 시뮬레이션 (Facility Restoration Simulation)

(1) 모델 개발 개요

- 재난 발생 후 구조체 복구 시뮬레이션은 자원 수급을 고려한 공정계획 수립에 필수적인 요소임. 특히, 재난 발생 후에는 각 시설물 종류 및 위치 별로 손상 정도 및 유형이 복잡하고 다양하며, 시설물 피해가 어느 정도인지 육안으로 확인하기 어려워 이에 따라 복구 계획 수립에 어려움이 발생함.

- 또한 주변지역 시설물들의 피해가 수반되는 재난 상황에서, 지역단위의 동시다발적 복구 진행은 복구공사를 위한 자원수급에 어려움을 가중시키며, 주변도로피해, 과도한 잔해더미 등 작업지연요소에 의해 작업효율이 저하되는 상황이 발생함.
- 본 연구는 재난 발생 후 개별 시설물 복구 계획 수립에 도움이 되고자 시설물 단위 구조체 복구 시뮬레이션 모델을 개발하고자 함. 특히, 활용성 증진을 위해 일반 건축물을 중심으로 수행하며, 재난 후 시설물 피해 정도를 알기 어렵고, 복구프로젝트의 외부환경 제약 (자원수급 제약, 작업지연 요소 발생)에 따라 복구공사의 불확실성이 클 때, 이에 대한 유용한 정보를 제공함으로써 프로젝트 복구계획 수립을 지원하는 것을 목표로 함.



[그림 2-20] 시설물 구조체 복구공사 시뮬레이션

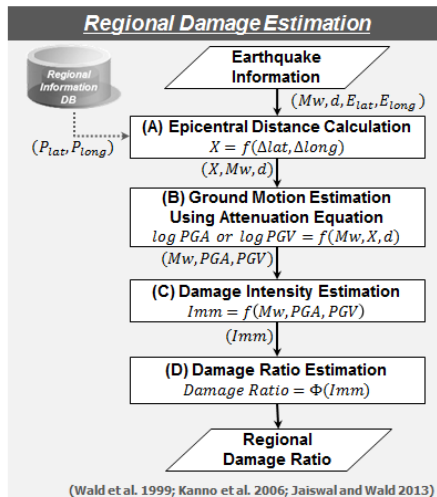
(2) 하위 모듈 설명

① 시설물 주변지역피해 산정모듈 (Regional Damage Estimation)

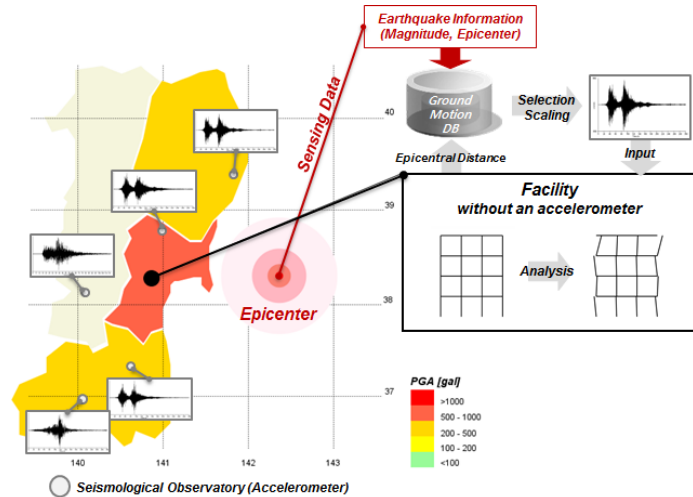
- 먼저, 시설물 주변지역 피해 산정 모듈은 시설물 복구공사를 위한 외부환경제약 분석을 위한 유용한 정보를 제공함. 시설물 주변지역의 피해를 산정하는 목적은 시설물 복구공사에 대한 외부환경제약 분석을 위해 주변지역의 전체시설물 피해 및 기능 손실이 어느 정도이며, 어느 정도의 자원이 요구되는지를 파악해야 하기 때문임.
- 따라서, 시설물 주변지역 피해 산정모듈은 USGS를 통해 센싱한 지진정보를 활용하여, 주변지역의 피해를 개략적으로 파악하며, 이는 관련 기존문헌들의 피해 및 기능 손실 산정식을 기반으로 개발됨 (Wald et al. 1999; Kanno et al. 2006; Jaiswal and Wald 2013).
- 또한 분석하고자 하는 시설물 주변지역에 대한 위치 정보 및 지진 정보를 활용하여, 시설물 주변지역에 대한 지진의 영향을 관련 지표인 PGA를 예측함. ([그림 2-21]의 B)
- 지역의 피해는 수정 메르칼리진도 계급 (IMM) 지표를 통해 산정되는데, 이는 지역 내 피

해규모를 산정하는 데 유용한 것으로 입증되어 널리 활용되고 있음 (Wald et al. 1999). 이는 최대지반가속도 및 지반속력을 활용한 회귀분석을 통해 구해짐([그림 2-21]의 C).

- 마지막으로, 지역 내 전체 시설물에 대한 피해정도 (%)를 산정하는 방법은 수정 메르칼리 진도 계급을 활용한 경험적 접근으로 인해 산정하며 (Jaiswal and Wald 2013), 이를 통해 지역 내 시설물 유형 별 피해규모를 산정할 수 있음 ([그림 2-21]의 D).



[그림 2-21] 시설물 주변지역 피해 산정 프로세스



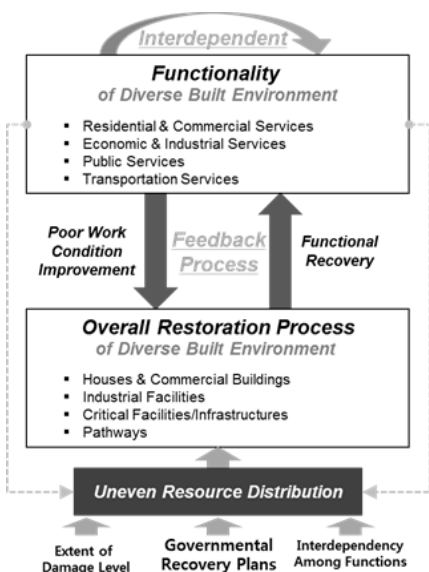
[그림 2-22] 과거 데이터를 활용하여 시설물 피해를 산정하는 개념도

② 시설물 구조체피해 산정모듈 (Facility Damage Assessment)

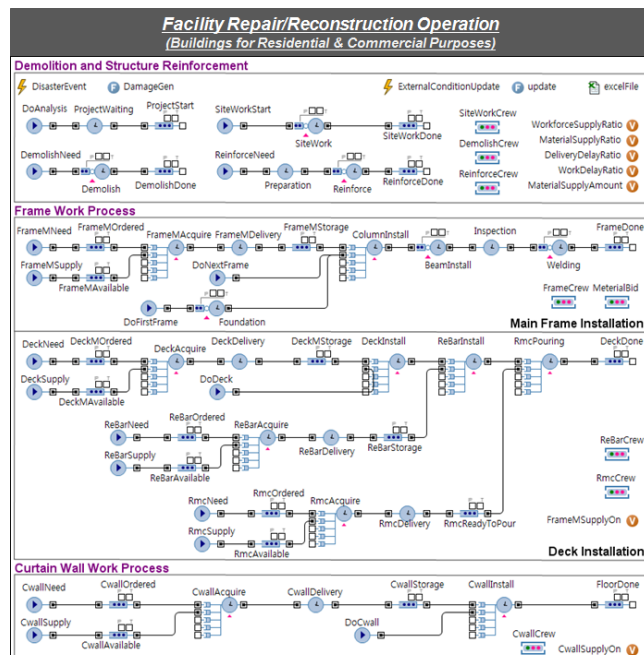
- 시설물 구조체피해 산정모듈은 신속하게 구조체 피해를 산정하고 복구에 요구되는 작업 수량 및 종류를 조기에 파악하도록 도움. 본 모듈은 USGS 모듈과 OpenSees 모듈과 연동되어, 실시간 지진정보를 바탕으로 한 구조변동 분석 결과를 통해 피해를 산정함.
- 그러나, 시설물 피해 산정을 위해서는 경험적인 방법의 접근보다는 실제로 지진발생에 따른 구조체 거동을 분석하는 것이 더욱 신뢰성 있고 구체적인 결과를 제공할 수 있음.
- 이에 따라, 본 연구에서는 OpenSees 구조체 거동 시뮬레이션 기술을 연동하여 분석을 수행하나, USGS 지진정보 센싱기술에서 제공받은 지진정보는 지진의 규모나 진앙지 위치 등 지진 자체에 대한 정보임에 반해, OpenSees 구조체 거동 시뮬레이션 기술에서 입력값으로 요구하는 지진 정보는 시설물이 위치한 곳의 지반진동 가속도 데이터임.
- 따라서 본 연구에서는 다음 [그림 2-22]의 개념도와 같이 지진이 발생하였을 때 지진의 규모 및 시설물과 진앙지까지의 거리를 파라미터로 하여 가장 적합한 지반진동 가속도데이터를 축적된 데이터에서 찾고, 실제 값과 과거 값의 차이를 보정하기 위해 스케일링 하는 방법을 제안함 (Bommer and Acevedo 2004; Watson-Lamprey and Abrahamson 2006).
- 본 연구에서는 특히, Katsanos et al. (2010)이 제안한 방법을 활용하여, 현재발생한 지진의 규모 및 진앙지까지의 거리를 활용하여 과거 데이터 중 가장 유사할 것으로 예측되는 지반진동 가속도데이터를 찾은 후, 그 차이만큼 보정하는 모듈을 개발하고, 이를 OpenSees 구조체 거동 시뮬레이션에서 입력값으로 활용할 수 있도록 제공함.

③ 외부 복구환경 제약 시뮬레이션 모듈 (Restoration Condition Simulation)

- 재난 발생 후 시설물 복구공사 프로세스는 주변지역에 피해에 따른 복구자원 수요 증대, 또는 해당 시설물의 중요성에 따른 자원배분 변화 등의 특성에 따라 결정되는 자원수급 정도에 따라 달라질 수 있음. 또한 주변지역 시설물들의 기능 (예: 교통시설)에 의존하는 바, 주변 지역 피해에 따른 작업지연이 발생할 수 있고, 또한 재난 후 주변 지역 내 잔해의 규모에 따라 작업 지연이 발생할 수 있음.
- 이에 본 시뮬레이션 모듈은 인과 관계 기반으로 시스템의 동태적 변화를 분석하는 System Dynamics 시뮬레이션 방법론을 적용하여 시설물 복구환경 제약을 분석하기 위해서는 주변지역의 피해정도, 시간에 따른 지역별, 시설물 유형별 자원배분 특성 및 복구작업 진행, 복구작업에 따른 기능회복 정도를 동태적이고 포괄적으로 분석함.



[그림 2-23] 지역레벨의 시설물 복구 및 기능회복 개념도



[그림 2-24] 시설물 복구공사 프로세스 분석 모델

- 예를 들어, 지역 내 시설물의 피해로 인해 요구되는 복구공사가 다수이며 이에 따라 전체적으로 복구자원의 부족이 발생함. 특히, 같은 피해정도에서도 피해형태에 따라 자원부족의 패턴은 다르게 나타나는데, 소수의 시설물이 심하게 파손된 경우 복구프로젝트의 수는 적게 되어 요구 노무량이 상대적으로 적으나, 다수의 시설물이 (경미하더라도) 파손된 경우 동시다발적인 복구프로젝트 발생으로 인해 요구 노무량이 일시에 증가하는 경우가 생김. 이러한 자원부족은 시간의 흐름에 따라 복구작업이 완료되어 갈수록 점차 해소됨.
- 한편, 시설물의 구조적 피해로 인해 시설물 기능의 손실 및 중단이 발생하며, 이에 따라 시설물 기능에 의존하는 지역 내의 해당 시설물 기능이 부족하여 복구작업에 문제가 발생함. 따라서 이러한 문제를 최소화하고자, 지역 내 복구자원의 배분은 시설물 피해 정도 또는 기능의 중요성 및 부족정도, 전체 복구자원량 또는 관련 정책적용에 따라 이루어지며, 이로 인해, 지역별, 시설물 유형별 복구정도가 달라짐.

④ 시설물 복구공사 프로세스 분석 모듈 (Restoration Operation Simulation)

- 본 모델은 주요 Event를 중심으로 공정 간 선 후행 관계 및 자원 활용에 대한 모델링을 수행함으로써 세부 분석을 가능케 하는 Discrete Event Simulation 방법론을 통해 개발됨.
- 각 공정을 표현하는 이벤트들은 요구되는 자원이 투입되었을 때 시작하고, 실제 공사에서 소요되는 시간만큼의 시간 진행 후에 종료되며, 이후 후속공정이 진행.
- 본 모델은 Anylogic Software의 Discrete Event Simulation 개발 툴에서 제공하는 객체 라이브러리를 활용하여 개발한 일반 건축물 재건축 프로세스이며, 시설물 철거, 구조보강, 골조공사, 커튼월공사의 프로세스를 모델링한 것임 [그림 2-24].

(3) 모델 테스트 결과

- 본 장에서는 시설물 구조체 복구공사 시뮬레이션의 하위 모듈인 지역피해 산정모듈, 구조체피해 산정모듈, 외부 복구환경제약 분석모듈, 복구공사 프로세스 분석모듈 개발 결과를 바탕으로, 실제 재난 사례 및 데이터를 활용하여 모듈별 분석을 수행함.
- 특히, 지역피해 산정모듈은 동일본 대지진 이후 피해지역의 지역별 피해 정도를 관련 데이터 입력 후 출력결과를 비교하여 검증함.
- 외부 복구환경제약 분석모듈 또한 동일본 대지진 이후 피해지역 별 자원배분 현황 및 복구현황, 기능손실 및 기능회복도를 비교 분석함으로써 타당성 검증을 수행함.
- 시설물 복구공사 프로세스 분석모듈의 경우, 실제 해체 및 구조보강, 재시공을 수행한 8층 규모의 건축물을 대상으로 재건축 프로세스에 대한 모델을 구현하고, 실제결과와 비교 분석함으로써 타당성 검증을 수행하였음.

[표 2-26] 시설물 구조체피해 산정모듈 테스트 결과

Facilities	Peak Ground Acceleration (PGA)		Damage Status (0.0-1.0)	
	Actual Data (NPA 2013)	Simulation Results	Actual Data (RA 2013)	Simulation Results
A Facilities in the coastal area of Tohoku -Lat.: 38.9 -Long.:141.5	500-1000 gal (cm/sec ²)	<u>PGA of selected Ground Motion Data (A):</u> 998 gal (cm/sec ²) <u>Scale Factor (SF) (B): 0.839</u> <u>Estimated PGA (C=A*B):</u> 837 gal (cm/sec ²)	Very heavy (0.8-1.0)	1.0
B Facilities in the inland area of Tohoku -Lat.: 39.7 -Long.:141.2	200-500 gal (cm/sec ²)	<u>PGA of selected Ground Motion Data (A):</u> 591 gal (cm/sec ²) <u>Scale Factor (SF) (B): 0.569</u> <u>Estimated PGA (C=A*B):</u> 336 gal (cm/sec ²)	Moderate (0.4-0.6)	0.5

[표 2-27] 지역 내 하위 지역별 피해 및 기능회복 현황

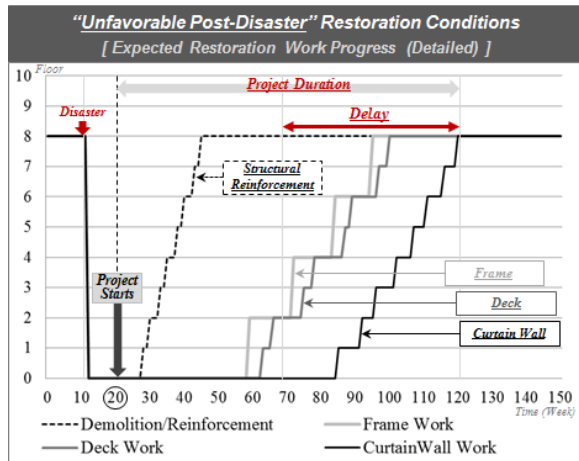
Restoration Type	(a) Relative Damage (Damage / Total Damage)		(b) Restoration Progress (90 Weeks After Disaster)	
	Actual Data (NPA 2013)	Simulation Results	Actual Data (RA 2013)	Simulation Results
Iwate Prefecture	14 %	16 %	3.5 % Recovered	3.8 % Recovered
Miyagi Prefecture	62 %	58 %	5.0 % Recovered	4.4 % Recovered
Fukushima Prefecture	24 %	26 %	4.6 % Recovered	4.0 % Recovered

[표 2-28] 외부 복구환경제약을 반영한 시설물 복구공사 프로세스 분석모듈 테스트 결과

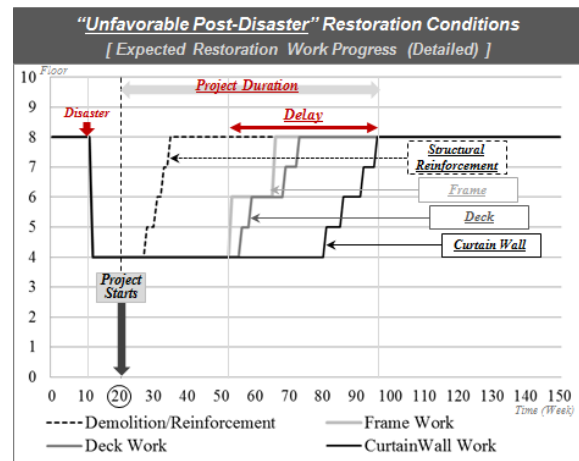
Measurement	Intermediate DES Model (A)*	SD-DES Interacted Model (B)**	Comparison (A/ B)
Sample Size	100	100	1.00000
Min	98.742 weeks	99.920 weeks	0.98821
25% Quartile	100.709 weeks	101.565 weeks	0.99157
Mean	101.638 weeks	102.279 weeks	0.99373
Median	101.833 weeks	102.305 weeks	0.99539
75% Quartile	102.517 weeks	103.004 weeks	0.99527
Maximum	104.255 weeks	104.427 weeks	0.99835
Standard Deviation	1.237 weeks	1.010 weeks	1.22534

(4) 모델 분석

- 앞서 테스트 한 모델을 바탕으로, 지진 후 상황에 따라 시설물 복구공사 분석 모듈을 시뮬레이션 함으로써 어떠한 분석 결과를 제공할 수 있는지 실험을 진행하였음.
- 본 시뮬레이션을 수행하기 위한 가정은 다음과 같음.
 - 1) 지진은 시뮬레이션 시작 후, 10주 후, 즉, 10 번째 시뮬레이션 시간 (Week)에 발생함.
 - 2) 현장 정리를 포함한 복구공사는 시뮬레이션 시작 후 20 주 후시작됨.
 - 3) 재난 후 주변지역의 피해에 따라 시설물 복구환경의 제약이 발생하고 지연될 수 있음.
 - 4) 재난 후 시설물이 위치한 지역에 따라, 시설물 피해 정도가 다를 수 있음.
 - 5) 긴급복구 등을 요하지 않는 8층 규모의 일반건축물 복구공사 상황을 가정하고 분석.



[그림 2-25] 시설물 피해가 크고,
주변지역의 피해가 큰 경우



[그림 2-26] 주변지역의 피해가 크나,
시설물 피해가 상대적으로 적은 경우

① 시설물 피해도 심하고, 주변지역의 피해가 큰 경우 (재난 후 상황)

- 본 시뮬레이션 결과는 재난 후 주변지역의 피해로 복구공사 제약요소가 클 때, 이에 따른 시설물 복구공사 프로세스의 영향 (공사지연 등)을 파악하기 위한 유용한 정보를 제공함.
- 위의 [그림 2-25]와 같은 시뮬레이션 결과를 통해, 재난 후 상황에서는 복구공사의 상하가 평소와 다르게 때문에 경험적 방법으로 프로젝트 스케줄링을 수행하였을 때는 비용할증 및 공기지연 등이 발생할 수 있으며, 주변지역피해에 따른 자원수급도 및 작업지연도, 프로젝트 지연요소 및 불확실성이 복구 작업 별로 얼마나 증가할지에 파악 가능함.

② 주변지역의 피해는 크나 시설물 피해가 크지 않은 경우 (재난 후 상황)

- 본 시뮬레이션 결과는 시설물 피해가 상대적으로 적으나 정확한 피해를 알 수 없을 때 유용한 정보를 제공함. 특히, 시설물 피해 진단완료 이전에 개략적인 피해정도를 예측하는 것은 복구작업 범위를 결정하는 데 도움을 줌.
- 시뮬레이션 결과에서는 재난 발생 후 시설물 피해를 빠르게 산정하는데, 본 시나리오에서는 시설물 변위에 따라 50% 정도의 구조체 보강 및 복구를 요하는 것으로 분석됨. 이러한 피해 정보 및 복구작업 범위에 대한 개략적인 정보는 복구공사계획 초기 단계에서의 개략적인 스케줄링 및 개략적인 자원수급량을 판단하는 데 큰 도움이 될 것으로 기대됨.

5. 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 객체모델 개발 및 플랫폼 구축

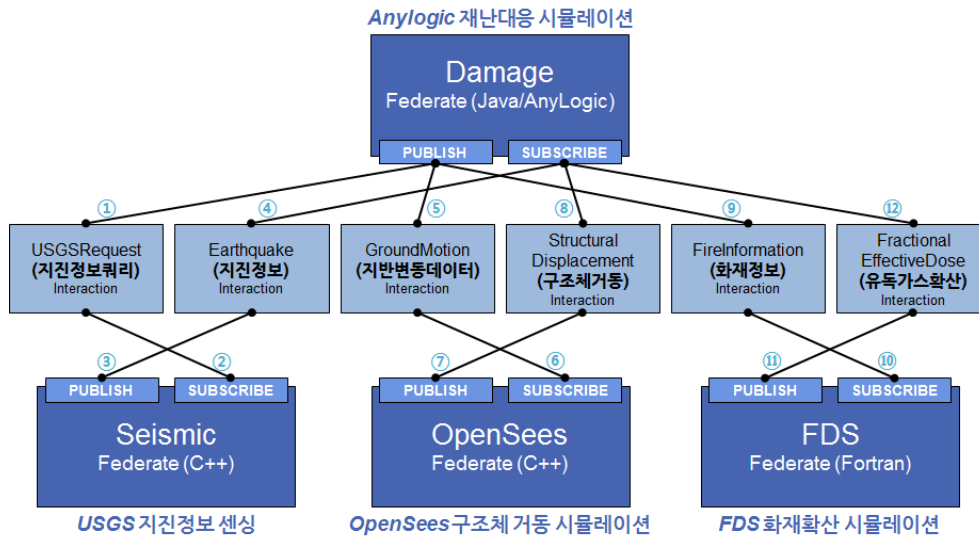
가. 개발 개요

- 본 장에서는 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션에서 각각의 시뮬레이션 모듈의 상호연동 개발 내용 및 구동을 설명함. 분산형 시뮬레이션에서는 시뮬레이션에 참여하는 각각의 하위 시뮬레이터를 페더레이트 (Federate)라 칭하며, 특정 시뮬레이션 목적을 달성하기 위해 상호작용하는 시뮬레이션 집합을 페더레이션 (Federation)이라 함. 또한 페더레이션을 구성하는 모든 페더레이트들은 동일한 RTI 라이브러리의 사용이 요구되며, 이에 따라 데이터 교환 및 상호연동이 가능하게 됨. 자세한 기술개발명세서는 부록으로 첨부함.

나. 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션을 위한 페더레이션 개요

- 본 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션에서는 UGSS지진정보 센싱기술 OpenSees 구조체 거동 시뮬레이션 기술, FDS 화재확산 시뮬레이션 기술, Anylogic 재난 대응활동 분석 시뮬레이션 모듈간 상호작용하는 페더레이션을 설계함. 본 페더레이션은 Disaster Preparedness and Response Simulation Federation (DPRS)라 칭함.
- 다음 [그림 2-27]은 본 연구에서 설계하는 DPRS 페더레이션의 시뮬레이션 간 커뮤니케이션 아키텍처임. 본 프레임워크에서 각 페더레이트 간 교환되는 데이터 집합을 Interaction이라 칭하는데, 각 Interaction은 실제 데이터의 내용인 Parameter로 구성되고, 시뮬레이션 진행에 따라 다음과 같이 생성되고, 교환됨.

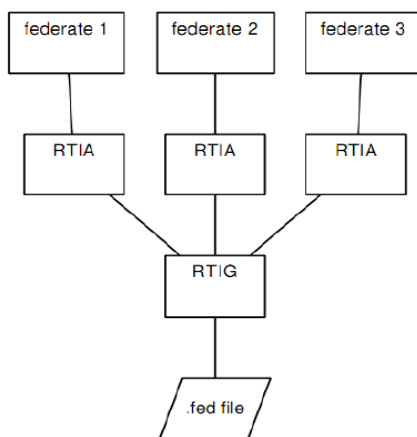
- ① Damage Federate에서 USGSRequest Interaction 생성되고 HLA RTI 미들웨어로 전달.
- ② HLA RTI 미들웨어가 USGSRequest Interaction을 Seismic Federate로 전달, 정보 요청.
- ③ Seismic Federate가 USGSRequest Interaction에 해당하는 Earthquake Interaction를 HLA RTI 미들웨어로 전달.
- ④ HLA RTI 미들웨어는 전달받은 Earthquake Interaction을 Damage Federate로 전송.
- ⑤ Damage Federate는 Earthquake Interaction을 통해 GroundMotion Interaction 생성, 전달.
- ⑥ HLA RTI 미들웨어는 전달받은 GroundMotion Interaction을 OpenSees Federate로 전송.
- ⑦ OpenSees Federate는 GroundMotion Interaction으로 StructureDisplacement Interaction 생성하여 전달.
- ⑧ HLA RTI 미들웨어는 StructuralDisplacement Interaction을 Damage Federate로 전송.
- ⑨ Damage Federate는 제공받은 StructuralDisplacement Interaction을 바탕으로 FireInformation Interaction 생성하여 전달.
- ⑩ HLA RTI 미들웨어는 FireInformation Interaction를 FDS Federate로 전송.
- ⑪ FDS Federate는 제공받은 FireInformation Interaction으로 FED Interaction 생성, 전달.
- ⑫ HLA RTI 미들웨어는 전달받은 FED Interaction을 Damage Federate로 전송.



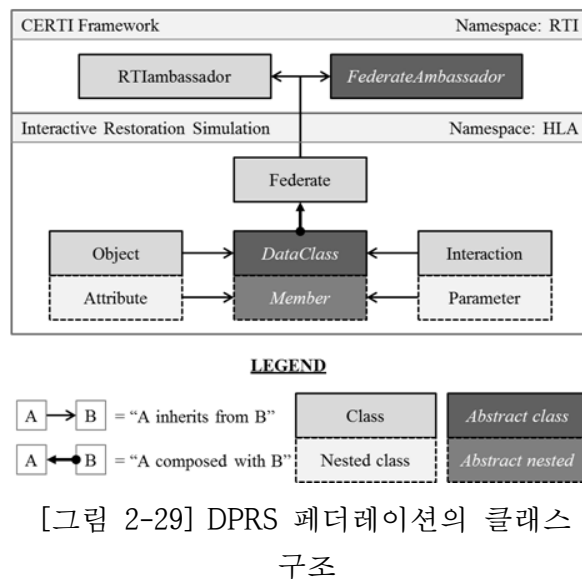
[그림 2-27] 분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 (DPRS) 페더레이션의 커뮤니케이션 아키텍처

다. 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 페더레이션 설계 및 개발

- 앞서 정의한 DPRS 페더레이션의 커뮤니케이션 아키텍처를 바탕으로, 본 연구에서는 실제 DPRS 페더레이션을 설계 및 개발함.
- 상위체계구조 기반 분산형 시뮬레이션에서 본 연구는 특히, CERTI-RTI 미들웨어를 활용하여 개발하는데, 본 미들웨어에서는 페더레이션의 생성 및 참여, Interaction의 생성 및 교환, 정보 송수신 등을 위한 Call Back 함수 라이브러리를 제공함.
- [그림 2-28]은 CERTI를 활용한 HLA 수행 프로세스로, 각 하위 페더레이트는 RTIA (RTI Ambassador)와 연결되며, 페더레이트 실행 시 RTIA가 자동으로 생성됨.
- RTIG는 HLA를 수행시키는 프로세서로 각 RTIA간의 Coordination을 통해 페더레이션을 생성 (.fed file) 함. 따라서 분산형 시뮬레이션은 RTIG 실행 후 모든 자료 교환이 가능함.



[그림 2-28] CERTI 기반 HLA 시뮬레이션 수행 프로세스



[그림 2-29] DPRS 페더레이션의 클래스 구조

(1) 클래스 구조

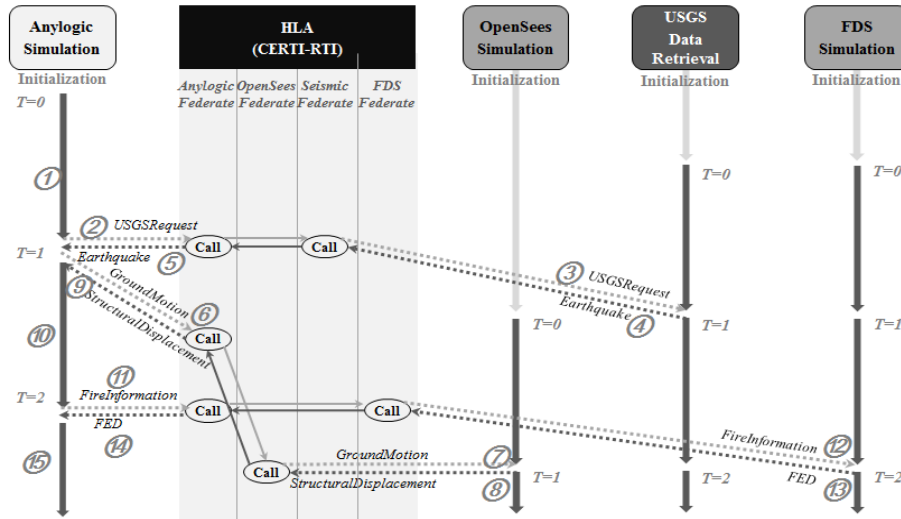
- 본 DPRS 페더레이션은 시뮬레이션 간 상호연동을 위해 CERTI-RTI 미들웨어를 통한 객체 지향형 프로그래밍 기술을 활용하기 때문에, 클래스 구조에 대한 이해가 가장 중요함. 다음 [그림 2-29]는 DPRS에서 활용하는 클래스 구조를 나타낸 것임.
- 본 클래스 구조에서는 두 종류의 Namespace로 구성되어 있는데, 하나는 RTI, 하나는 HLA로 칭함. RTI namespace는 CERTI API에서 사용하는 것으로, CERTI RTI 미들웨어에서 제공하는 클래스 및 메소드는 모두 이 namespace의 멤버임. HLA namespace는 본 DPRS의 페더레이션의 페더레이트에서 사용됨.
- 위 그림의 각 클래스에 대한 설명은 다음과 같음.
 - ① RTI::RTIambassador: Federate로부터 RTI 미들웨어로 전달되는 데이터 교환을 다룸.
 - ② RTI::FederateAmbassador: RTI 미들웨어에서 Federate로 전달되는 데이터 교환을 다룸.
 - ③ HLA::Federate: RTI namespace로부터의 모든 Functional call을 취급하며, Object 및 Interaction의 생성을 담당함.
 - ④ HLA::DataClass: 추상클래스로서, RTI와의 정보송수신을 다룸. DataClass의 자식 클래스로 Object와 Interaction이 있는데, 교환되는 데이터가 영속성이 있는 경우에는 Object를 사용하며 (HLA::Object), 소멸될 수 있는 경우 Interaction을 사용함 (HLA::Interaction). 본 연구의 DPRS에서 상호연동은 모두 Interaction을 활용하여 이루어짐.
 - ⑤ HLA::DataCalss::Member: HLA::DataCalss에 상속되어 있으며, 데이터필드에 데이터를 저장함. 영속성있는 Object의 멤버는 Attribute라 하고 (HLA::Object:: Attribute), Interaction의 멤버는 Parameter라 정의함 (HLA::Interaction::Parameter).

(2) 페더레이션 객체모델 (Fedration Object Model (FOM)) 개발

- 모든 페더레이션의 상호연동을 위해서는 객체모델 (Fedration Object Model (FOM))이 필수적인데, 이는 페더레이션 내 페더레이트들 간 교환되는 데이터에 대한 객체모델로 정의할 수 있고, 교환되는 Interaction이나 Parameter들 간 명칭의 표준화를 위해 생성되는 것이며, “.fed file”의 형태임.
- 본 파일은 어떠한 데이터가 CERTI RTI 미들웨어를 통해 주고 받아지는지 표현하고 있으며, 각각 페더레이트들이 새로운 페더레이션을 생성하거나 기존 페더레이션에 참여할 때 요구됨.
- 본 DPRS 페더레이션에서의 객체모델인 FOM은 총 6개의 Interaction (USGSRequest, Earthquake, GroundMotion, StructuralDisplacement, FireInformation, FrationalEffectiveDose)과 각 Interaction에 대한 Parameter들의 정의로 구성됨.

라. 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 플랫폼 구동

- 본 장에서는 앞서 설계한 DPRS 페더레이션을 바탕으로 한 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 플랫폼 구동과정을 설명함. 구동과정과 함께, 시뮬레이션 구동을 위한 주요 기능과 구동 화면을 함께 제공함. 다음 [그림 2-30]은 FDS 시뮬레이션 모듈을 제외한 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 플랫폼 구동과정을 요약한 내용임.



[그림 2-30] 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 플랫폼 구동

- ① Damage Federate는 실행과 함께 시뮬레이션 시간 (Week)을 하나씩 증가시킴.
- ② 매 시간마다 Damage Federate는 USGSRequest Interaction을 생성해 RTI 미들웨어로 전송.
- ③ Seismic Federate는 USGSRequest Interaction를 전달받고, 이를 USGS 서버에서 쿼리로 활용함. 앞서 시뮬레이션 시간은 Week이기 때문에, 최근 일주일 에 해당하는 지진을 검색.
- ④ 만약, 쿼리정보에 상응하는 지진이 검색되면, Seismic Federate는 검색된 지진정보, 즉 EarthquakeInteraction을 생성하고 이를 RTI 미들웨어로 전송함.
- ⑤ Damage Federate는 EarthquakeInteraction을 전달받고, OpenSees Federate로 전달하기 위한 지반진동 가속도데이터를 계산하여 전력계통 피해 및 지역피해를 산정.
- ⑥ Damage Federate는 이를 기반으로 GroundMotionInteraction을 생성하고, 이를 RTI 미들웨어에 전달함.
- ⑦ OpenSees Federate는 RTI 미들웨어로부터 GroundMotionInteraction을 전달받고, 이를 바탕으로 구조체 변동 시뮬레이션을 수행함.
- ⑧ OpenSees Federate는 구조체 변동 시뮬레이션 결과로부터 StructuralDisplacement interaction를 생성하여 이를 RTI 미들웨어로 전달함.
- ⑨ Damage Federate는 RTI 미들웨어로부터 StructuralDisplacement interaction를 전달받고, 이를 통해 시설물 구조체 피해를 계산함.
- ⑩ Damage Federate는 구조체 피해 정보를 바탕으로 시설물 복구과정 분석을 수행함.
- ⑪ 화재 발생시 Damage Federate는 FireInformation interaction을 생성하고, 이를 RTI 미들웨어에 전달함.

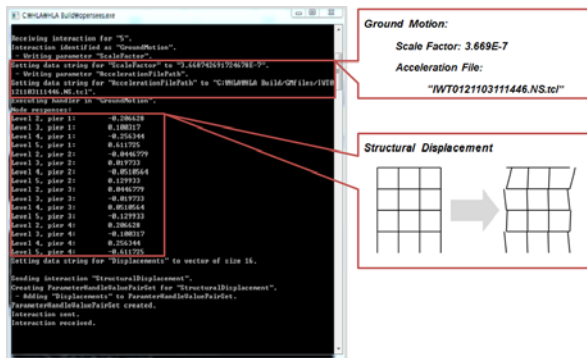
⑫ FDS Federate는 RTI 미들웨어로부터 FireInformation interaction을 전달받고, 이를 바탕으로 화재 확산 시뮬레이션을 수행함.

⑬ FDS Federate는 발화점 정보를 바탕으로 FractionalEffective Dose(FED) interaction을 생성하고 이를 RTI 미들웨어에 전달함. 본 정보는 유독가스 확산과 관련하기 때문에, 한번 FED interaction을 생성하면, 매 시뮬레이션 시간에 유독가스 정보를 갱신하여 전달함.

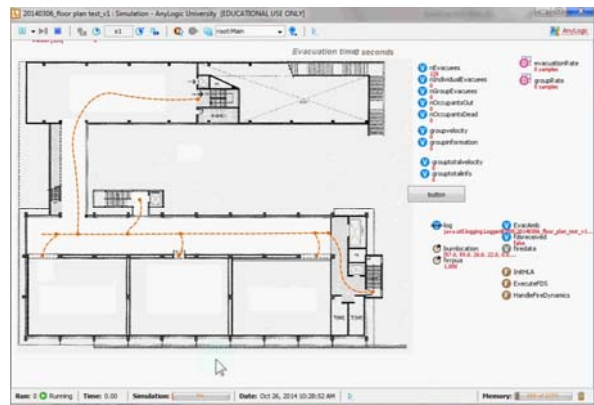
⑭ Damage Federate는 RTI 미들웨어로부터 FED interaction을 전달받고, 이를 통해 각 재실자의 시설물 내 위치에 따른 유독가스의 영향을 계산함.

⑮ Damage Federate는 이후 화재 및 유독가스 확산에 따른 피난 시뮬레이션을 수행함.

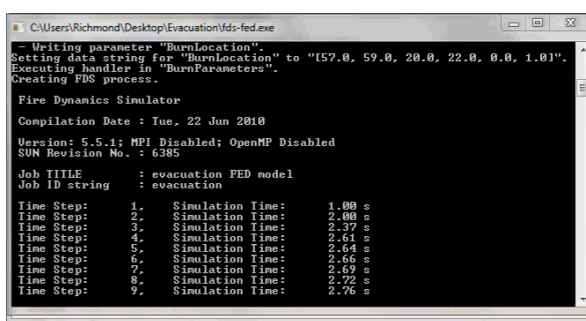
- 위 체계 중 ①-③은 매 시뮬레이션 시간마다 실행되며, ④-⑩은 지진정보가 센싱될 때마다 실행됨. 또한, ⑪-⑮의 경우 화재 생성 이후 매시간 실행되며 변수값을 갱신함.



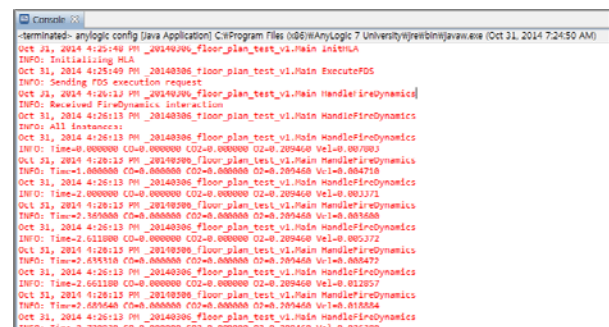
[그림 2-31] DPRS 실행 시 OpenSees 페더레이트의 구조체 거동 정보 제공화면



[그림 2-32] 피난 시뮬레이션을 위한 Damage 페더레이트 실행



[그림 2-33] FDS 페더레이트의 유독가스 정보 제공화면



[그림 2-34] FDS 페더레이트에서 Damage 페더레이트로 전달된 유해가스 데이터

- Damage 페더레이트 실행시 HLA 기반 상호연동환경에서 FDS 페더레이트가 DPRS 페더레이션에 참여하며, Damage 페더레이트에서는 화재 정보를 생성하여 RTI 미들웨어로 전달하는데, Damage 페더레이트 실행 및 화재정보 생성은 다음 [그림 2-32]와 같음.

- FDS 페더레이트에서는 주어진 화재 정보에 따라 유독가스 확산 정보에 대한 Interaction 을 생성하며, 유독가스 관련 파라미터 값을 다음과 [그림 2-33]과 같이 매 시물레이션 시간에 갱신하여 RTI 미들웨어로 전달함.
- 이러한 기능을 통해 Damage 페더레이트의 재실자 피난 시물레이션 모듈에서는 다음과 같은 유독가스 확산정보를 받아들이고, 각 재실자의 현재 위치에 따라 유독가스의 영향도인 FED 값을 계산하여 피난 시물레이션을 수행함. 다음 [그림 2-34]는 FDS를 통해 받아들이는 각 유독가스의 시간별 정보를 나타냄.

마. 분산형 재난 대응/관리 시물레이션 플랫폼 상호운용성 및 상호호환성 확인

- 본 장에서는 앞서 개발한 분산형 재난 대응/관리 시물레이션 플랫폼에서 시물레이션 간 상호운용성 및 상호호환성에 대해 검사한 결과이며 교환되어야 하는 파라미터의 교환이 얼마나 잘 이루어졌는지를 분석한 것임.
- 본 테스트를 위한 시나리오는 2011년 3월 11일에 발생한 동일본대지진의 지진정보를 센싱하여 분석하는 것이며, 이를 위해 시물레이션 시작 시간을 아래 [표 2-29]와 같이 변화시키며 테스트를 10회 수행함. 분석결과, 10회 테스트 결과 모두 올바른 시간에 지진정보를 센싱하여 분석을 시작하였음을 확인하여, 시물레이션 상호연동 시 데이터 교환의 시간지연 등의 문제가 발생하지 않음을 알 수 있음.
- 지진 정보에 따라 OpenSees Federate에서는 구조체 변위정보를 제공하며, FDS Federate에서 화재정보에 따른 유독가스 확산정보를 제공하는 데 교환되어야 하는 6개 Interaction 내 23개 Parameter 모두 정확한 시간에 정확한 값으로 교환되었음. 이를 통해, 개발된 객체모델 및 플랫폼의 상호호환성 및 상호운용성을 확인할 수 있음.

[표 2-29] 분산형 재난 대응/관리 시물레이션 플랫폼 상호운용성 및 호환성 테스트 결과

*Simulation Starting Time	**Earthquake Detection Time	***Accuracy of Data Exchange
01-01-2011 (10 weeks before an event)	11 weeks	100%
01-08-2011 (9 weeks before an event)	10 weeks	100%
01-15-2011 (8 weeks before an event)	9 weeks	100%
01-22-2011 (7 weeks before an event)	8 weeks	100%
01-29-2011 (6 weeks before an event)	7 weeks	100%
02-05-2011 (5 weeks before an event)	6 weeks	100%
02-12-2011 (4 weeks before an event)	5 weeks	100%
02-19-2011 (3 weeks before an event)	4 weeks	100%
02-26-2011 (2 weeks before an event)	3 weeks	100%
03-05-2011 (1 weeks before an event)	2 weeks	100%
* Different simulation starts to conduct restoration simulation by subscribing earthquake information of the 2011 earthquake of Tohoku in March 11, 2011.		
** The time of activating restoration simulation in the federate Damage (Anylogic) by detecting earthquake information and subscribing structural response data.		
*** The comparison results of data interactions (23 parameters in 6 interactions) between the intermediate simulation model and the interactive simulation prototype.		

6. 분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리 시스템 구축

가. 개발 개요

- 본 장에서는 앞서 개발한 분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 플랫폼 기술 및 재난대응 시뮬레이션 모듈 개발 결과를 바탕으로 한 분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리 시스템에 대해 소개함.
- 본 시스템은 단계별 재난 대응활동 지원을 위해 재실자 피난 행태 시뮬레이션 모듈, 시설물 기능 긴급복구/비상운영 시뮬레이션 모듈, 시설물 구조체 복구공사 시뮬레이션 모듈을 포함하고 있으며, 각 모듈들에 대한 GUI (Graphical User Interface)를 구현하고 있음 .
- 각 모듈별 분석결과는 앞서 각 하위 모듈별 설명부분에서 제시되어 있으므로, 본 장에서는 시스템 모듈별 분석화면과 기능 위주로 설명을 진행함.

나. 재실자 피난 행태 시뮬레이션 모듈

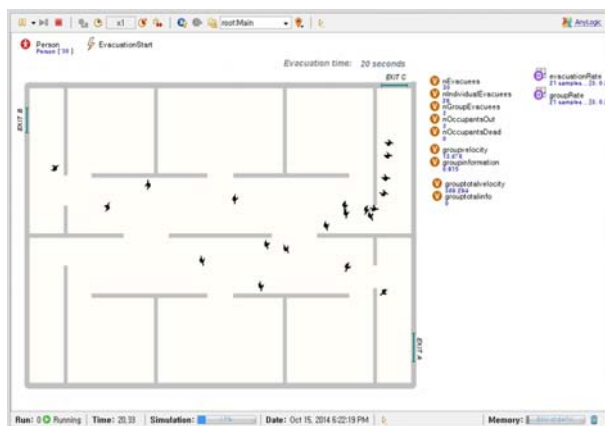
(1) 시스템 구성 및 피난 행태 분석

- 본 시스템의 재실자 피난 행태 시뮬레이션 모듈의 경우, 시설물 구조체 변화 및 화재 확산에 따라 시설물 별 재실자 피난 과정을 시간에 따라 분석함.
- 특히, 시스템의 활용도를 높이기 위해 기존 자체 개발 피난 모듈에 Pedestrian Library 기능을 접목하여 고도화 된 시각화 기술을 통한 재실자의 피난 행태를 표현함.
- [그림 2-35]는 시뮬레이션 진행 20초 후 재실자의 피난 행태를 표현하며, 재실자가 벽이나 타 재실자와 같은 장애물을 인지하여 충돌을 피하고 원하는 출입구까지 가장 가까운 경로를 통해 탈출하는 과정을 확인할 수 있음. 화면 우측에는 전체 재실자 수, 피난에 성공한 재실자 수, 재실자 속도, 탈출 상황 및 개인/그룹 행태 변경에 대한 정보를 제공함.
- 또한, FDS와의 연동을 통해 발화점에서 발생하는 유독가스의 농도와 가스 이동 속도 데이터를 입력받아 재실자 피난 행태에 반영함. 구체적으로, 재실자 별 위치 및 특성을 고려하여 입력받은 유해가스 시간별 농도 변화와 유독가스와 재실자 사이의 거리를 통해 흡입량을 예측하고, 이 값이 재실자의 신체 무능화 정도에 미치는 영향을 산정함. 또한 유해 가스 흡입에 따른 재실자 별 피난 행태 및 의사결정과정을 시각화하여 제공함.

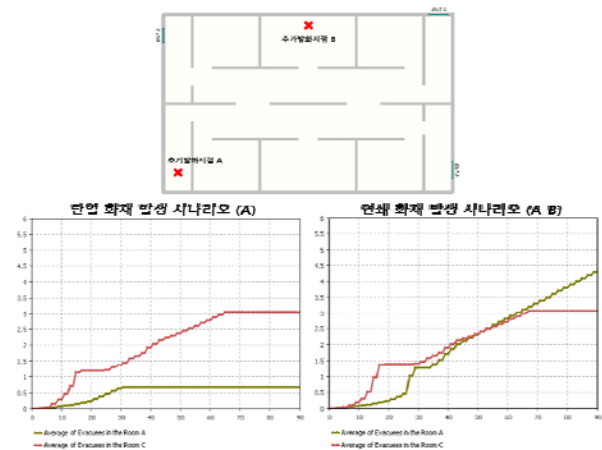
(2) 복합·연쇄 재난에 대한 분석

- 분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응/관리 시스템은 여러 재난관련 시뮬레이션이 상호연동하여 구성되는 데, FDS와 같은 화재 피해 시뮬레이션 모듈이 피난 시뮬레이터와 지속적으로 데이터 교환을 하며 시뮬레이션 하는 경우 연쇄 재난 (예: A 지점 발화-B 지점 추가 발화) 에 따른 피해를 더욱 현실적이고 신속하게 반영할 수 있음.
- 따라서, 분산형 상호연동 재난 시뮬레이션의 장점을 활용하여, 본 장에서는 연쇄재난 시 피난 시뮬레이션의 분석력을 보여주고자 함.
- 이를 위해 [그림 2-36]과 같이 시설물 내 서로 다른 지점인 A와 B에서 25초의 시간차를 두고 화재가 발생하는 시나리오를 활용하여 재실자가 흡입하는 유독가스의 양이 증가로 인한 신체 무능화 정도 (FED 레벨)를 단일 화재가 발생한 상황과 비교함.

- 단일 화재가 발생하는 시뮬레이션 초기에 재실자들은 A 지점에서 발생한 화재 및 연기 발생으로 인해 작동한 화재 알람을 통해 긴급 상황임을 인지하고 피난을 개시하게 됨. A 지점에서 지속적인 연기가 발생함에 따라 근접 지역을 통과하는 재실자들의 FED 레벨은 유독가스의 큰 영향없이 비상구로 탈출이 가능한 타 구역의 재실자보다 높은 값을 보임.
- 그러나 연쇄 화재가 발생하는 시뮬레이션에서는 A 지점에서 화재가 먼저 발생하여 재실자가 피난을 개시하고, 첫 발화 25초 이후 B 지점에서 유사한 화재가 추가적으로 발생하게 됨. 이로 인해 단일 화재 시뮬레이션에서 FED 값이 비교적 낮고 안정적이었던 B 지점 가까이 위치한 재실자들의 신체 무능화 정도는 25초 이후 급격하게 증가하게 되며, 출입구를 통해 나가기 직전까지 지속적으로 연기를 흡입함에 따라 A 지점에서 근접하게 위치한 재실자들에 비해 훨씬 높은 FED 값을 가지게 됨.
- 이와 같이 본 연구의 분산형 상호연동 기술은 연쇄재난이 발생함에 따라 나타나는 추가적 데이터가 재난 대응 과정 (피난)에 미치는 영향을 다양한 시나리오에 기반하여 분석 가능하며, 향후 추가 개발을 통한 지진-폭발-화재 등과 같은 복합 재난이 피난에 미치는 영향 분석에 대한 가능성 역시 제시함.



[그림 2-35] 재실자 피난행태 시뮬레이션
모델 실행화면



[그림 2-36] 단일 및 연쇄 재난 발생
시뮬레이션 비교

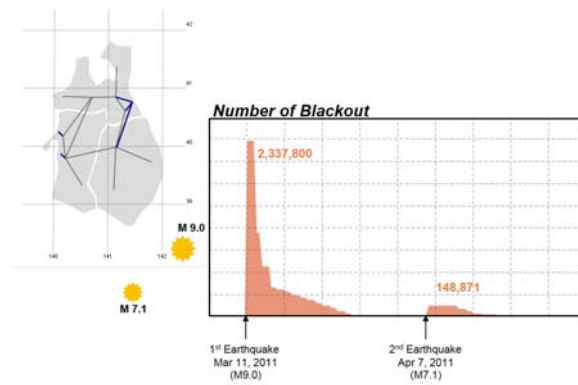
다. 시설물 기능 (전력계통) 긴급복구/비상운영 시뮬레이션

(1) 시스템 구성 및 긴급복구/비상운영 분석

- 본 시스템의 시설물 기능 긴급복구/비상운영 시뮬레이션의 경우, 지진 후 전력계통의 피해를 산정하고 시간에 따른 기능회복 및 비상운영 과정을 분석함.
- 특히 지역 내 전력망의 연결을 시각적으로 표현하고 있으며, 이를 통해 지진으로 인한 직접적인 구조물 손상뿐 아니라 시설물 상호의존성을 고려한 기능 저하 평가 방법을 제시함. 또한 재난 진행에 따른 지역 내 정전 가구 수를 시각 분석 자료를 통해 제공함.
- 추가적으로 [그림 2-37]과 같은 상세 분석 화면을 통해, 지역 내 발전시설의 전력공급 프로세스를 모델링하고, 최대지반가속도(PGA)를 기반으로 한 피해 평가를 통한 운영단계(정상가동/긴급정지/안전점검/비상운영)를 제공함.



[그림 2-37] 시설물 기능 긴급복구 비상운영 시뮬레이션 모듈 실행화면



[그림 2-38] 연쇄재난(본진과 여진) 발생에 따른 지역 내 정전가구 시뮬레이션

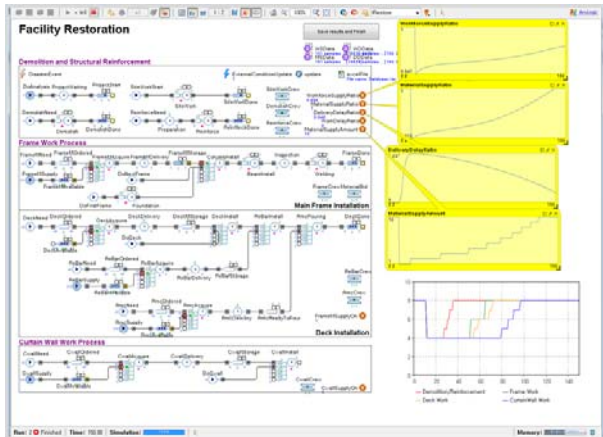
(2) 복합·연쇄 재난에 대한 분석

- 본 시뮬레이션 모듈은 USGS 지진센싱기술을 활용하여 분석 대상 지역의 지진 정보를 지속적으로 요청하고, 특정 규모 이상의 지진 발생 시 해당 지진정보를 읽어 들임.
- 그의 예시로, [그림 2-38]은 2011년 동일본 대지진 사례를 본 시뮬레이션 모듈에 적용 분석한 것이며 2011년 3월 11일 발생한 본진에 이어 같은 해 4월 7일 여진정보를 기반으로 지역 내 정전가구 수를 시뮬레이션한 화면임.
- 해당 지진 사례는 본진(M9.0)에 비해 여진(M7.1)의 규모가 작고 분석대상지역과 비교적 먼 곳에서 발생하였으며, 무엇보다도 전력계통에 있어서는 처음 본진에 대한 피해복구가 완료된 후 여진이 발생하였기 때문에 여진 피해는 비교적 작은 편임.
- 그러나 일반적으로 여진은 본진에 의한 1차 피해가 있는 시설물에 2차 피해를 누적시킨다는 특징을 갖고 있어 같은 규모의 본진에 비해 더 큰 피해를 가져올 수 있고, 피해 재평가 및 복구계획 재수립으로 인해 재해 지역 내 기능회복을 지연시킬 수 있음.
- 따라서 단순 재난 정보를 입력하는 기존 방법과 달리 복합, 연쇄 재난 발생을 반영한 본 시뮬레이션 모듈은 여진으로 인한 피해확산방지대책을 수립하는 것을 지원할 수 있음.

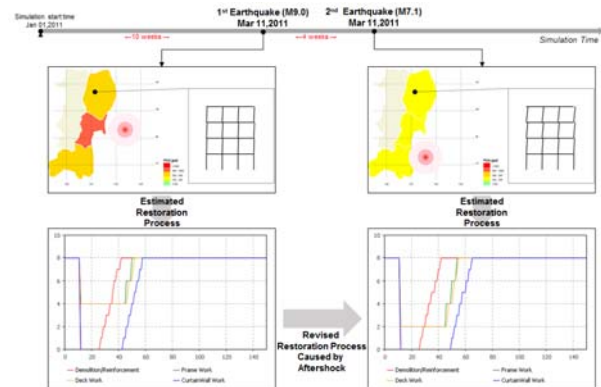
라. 시설물 구조체 복구공사 시뮬레이션

(1) 시스템 구성 및 전력계통 시설물 구조체 복구 프로세스 분석

- 본 시스템의 시설물 구조체 복구공사 시뮬레이션의 경우, 지진 발생에 따라 시설물 주변 지역 피해와 구조체 피해를 분석하고, 시간에 따른 외부 복구환경제약을 분석한 후 이에 따른 복구공사 시뮬레이션 및 분석결과를 제공함.
- 특히, 지역 내 피해 및 구조체 변동을 시각적으로 표현하고 있으며, 시설물 복구공사 시뮬레이션 결과를 요약 제공함. 다음 [그림 2-39]는 시설물 피해가 경미한 경우의 복구공사 작업별 진행 현황을 시각자료 및 분석자료를 통해 제공하는 화면임.
- 이러한 시뮬레이션 모듈은 현재 USGS 지진정보센싱기술, 및 OpenSees 구조체 거동 시뮬레이션 기술과 연동되어 분석을 수행함.



[그림 2-39] 시설물 구조재 복구공사
시뮬레이션 모듈 실행화면



[그림 2-40] 여진발생 시뮬레이션에 따른
피해 재 산정 및 복구 프로세스 수정

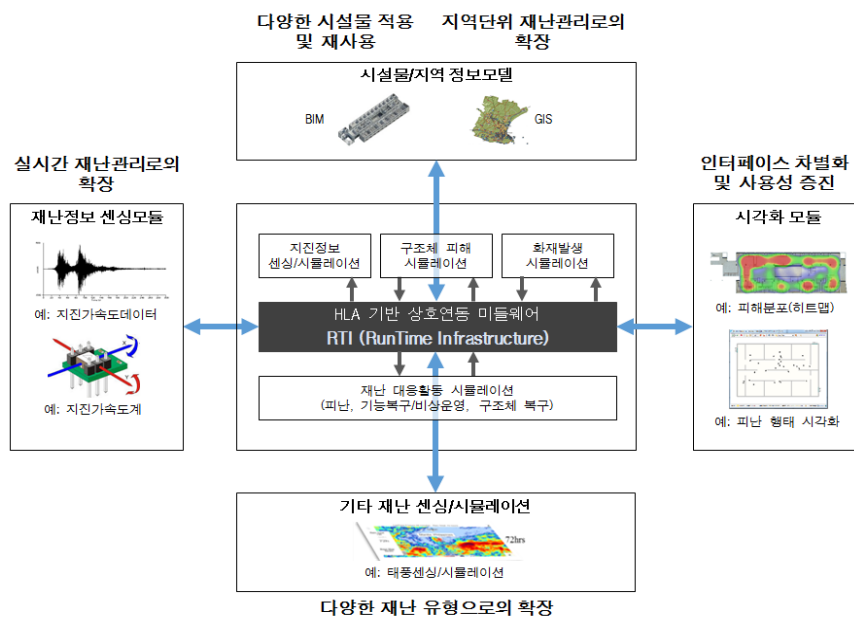
(2) 복합 · 연쇄 재난에 대한 분석

- 본 시스템은 시간에 따라 발생하는 재난의 영향을 반영하여 구조재 피해분석을 수행하고, 복구 프로세스를 산정함. 예를 들어, 연쇄지진이 발생하는 경우 여진에 대한 정보를 받아들이고, 기존 피해정보를 업데이트하며, 이를 바탕으로 복구 프로세스 또한 업데이트함.
- 이를 위해 [그림 2-40]과 같이 연쇄지진이 발생하는 경우의 시설물 복구 프로세스 분석을 수행함. 이는 2011년 3월 11일의 규모 9.0의 대지진 발생 약 1개월 후 실제 큰 추가 피해를 발생시킨 2011년 4월 7일 규모 7.1의 여진을 바탕으로 분석함.
- 첫 지진 발생 후 분석 대상시설물의 구조재 변위를 바탕으로 예상되는 구조재 피해를 예측하고 이를 바탕으로 시설물 복구시간을 시뮬레이션 하였음.
- 이후 4주 후 여진이 발생하는 경우 시뮬레이션 모듈은 여진의 규모 및 위치 정보 등을 USGS 모듈을 통해 받아들이고, OpenSees를 통해 누적되는 구조재 피해를 재 산정함.
- 추가 피해가 발생하는 경우, 시뮬레이션 모듈은 시설물 복구 프로세스를 재산정하여 분석 결과를 제공하는데, 본 시뮬레이션 예시에서는 여진에 따라 기존계획 대비 약 5주 이상의 복구기간 증가가 예상되는 것을 알 수 있음.

7. 분산형 시뮬레이션 기반 재난 대응/관리 시스템 활용 및 확장

가. 개요

- 본 연구의 최종 개발 시스템은 지진과 화재상황에 초점을 맞춰 시설물 관리에 유용한 정보를 제공함. 이러한 정보는 보다 정확한 시설물 피해와 그에 따른 피난행태 및 복구 프로세스의 변화를 포함함.
- 현재 본 기술의 개발 단계는 특정한 재난 상황 및 시설물 유형에 초점을 맞춘 프로토타입이며, 향후 상호연동성, 재사용성, 확장성을 바탕으로 [그림 2-41]과 같이 활용될 수 있으며 구체적인 전략 및 예시는 다음 장에 각 항목별로 제시하고자 함.

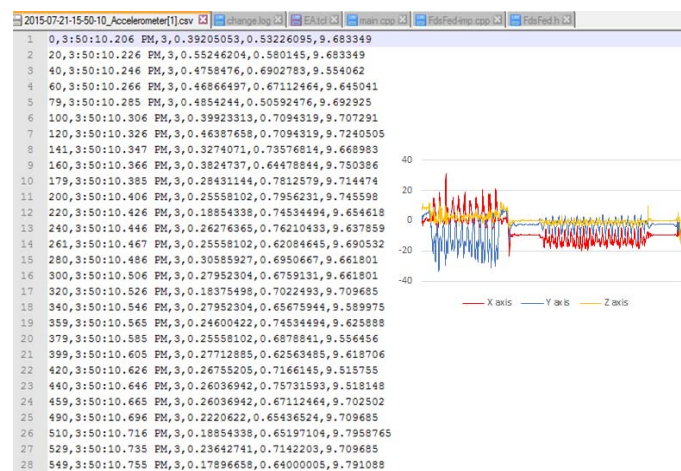


[그림 2-41] 분산형 시뮬레이션 기반 재난 대응/관리 시스템 활용 및 확장

나. 실시간 재난 피해분석 및 대응을 위한 센싱기술의 활용

- 시뮬레이션을 통한 재난 예측 및 대응은 피해 규모 및 양상의 실체가 예측치와 상이한 경우가 대부분이며, 이에 따라 재난 발생 이후에도 신속한 피해 분석이 요구됨.
- 따라서 보다 정확한 예측값 도출을 위해서는 가속도계나 화재감지기를 통해 지반 가속도 또는 발화점 정보를 읽어 들이는 등 실시간 재난 센싱 기술을 활용할 필요가 있음.
- 본 장에서는 이와 같은 재난 센싱기술을 분산형 재난 시뮬레이션에 활용하는 방법을 구체적으로 제시하고자 함. 특히, 본 방법은 지진 시 시설물 구조체 거동/피해를 분석하고자 실제 지반진동 가속도 데이터를 활용하는 방법을 중심으로 제시함.
- 앞서 설명한 대로 본 연구에서 지진에 따른 시설물 구조체 피해를 산정하는 방법은, USGS에서 제공하는 지진정보를 활용하여, 시설물 위치에 따라 과거 지반진동 속도데이터 베이스에서 유사한 지반진동 가속도데이터를 추출하고, 이를 OpenSees 시뮬레이션의 입력정보로 활용하여 시설물 구조체 피해분석에 활용하였음. 본 방법은 지진가속도계측기가 설치되어 있지 않은 대부분의 일반 건축물에 대한 활용성을 증진시키기 위한 방법이었음.

- 하지만 본 방법의 한계는 시설물이 위치한 지반 특성과 같은 추가 정보를 활용하여 스케일링함으로써 더욱 유사한 지반 가속도데이터를 추출할 수 있어야 한다는 것임.
- 하지만, 이보다 더 정확한 방법은 지진가속도계측기를 활용하여 각 시설물이 위치한 지반의 실제 지반진동을 센싱하는 것임. 현재, 지진가속도계측기는 주요건물에만 설치되어 있는 경우가 많지만, 최근 기술의 진보에 따라 스마트폰을 사용한 가속도계측이 가능해지고 있어 사람의 움직임(진동)을 가속도 데이터를 통해 분석하는 데 활용하고 있음.
- 따라서 본 연구에서는 아래와 같이 스마트폰을 통해 가속도데이터를 센싱하고, 이를 .csv 파일 형태로 출력하여 분산형 재난 시뮬레이션에 입력값으로 활용하는 모듈을 제안하며, 이를 통해 출력된 파일은 OpenSees 및 Anylogic 시뮬레이션 등에서 데이터 파일변환 없이 입력값으로 활용될 수 있음을 밝힘.



[그림 2-42] 스마트폰 가속도계측기를 활용한 가속도데이터 출력

- 본 가속도 데이터는 X, Y, Z 3축에 대한 데이터를 모두 포함하여, 지진 시 수평진동 및 수직진동에 대한 분석이 모두 가능함. 본 스마트폰 가속도계는 $\pm 12,800 \text{ cm/s}^2$ 의 범위의 가속도를 측정할 수 있어, 실제 지진 가속도의 범위를 포함할 수 있음.
- 또한, 실제 지진가속도데이터의 경우 100Hz의 계측빈도로 데이터를 제공함. 현재, 본 연구에서 테스트한 지진가속도데이터의 계측빈도는 2-30Hz이나, 이는 향후 기술의 보완을 통해 구현 가능할 것으로 예상됨.

다. 다양한 시설물로의 적용을 위한 BIM 데이터 연동

- 현재 본 개발 기술은 일반 건축물을 대상으로 구조체 피해와 화재, 유독가스 확산을 분석하고 있으나, 향후 효과적인 활용을 위해 보다 다양한 시설물로의 확장이 필요함.
- 이에 따라 각 시뮬레이션 모듈은 동일한 건축물의 평면, 입면, 구조재료 등 시설물 정보를 공유해야 하는데, 이러한 정보가 공유/교환되어야 특정 시설물을 위한 상호연동 시뮬레이션 모델 구축 작업을 단축시킬 수 있음.
- [그림 2-44]는 FDS 화재확산 시뮬레이션에서 활용되는 시설물 정보에 대한 예시이며, 특히, 재료정보의 경우 화재확산에 영향을 주는 마감재료 종류가 중요한 요소임.

```

set bc 500 ; # Column depth 400*400
set lb 600 ; # Beam depth 350*500
set L 6000 ; # Span
set H 3600 ; # Height

set NStory 3; # number of stories above ground level --- you can change this.
set NBay 3; # number of bays (max 9) --- you can change this.

node 1 0.0 0.0
node 2 [expr $L] 0.0
node 3 [expr 2*$L] 0.0
node 4 [expr 3*$L] 0.0
node 11 0.0 0.0 [expr $H]
node 12 [expr $L] [expr $H]
node 13 [expr 2*$L] [expr $H]

#columns
element elasticBeamColumn 11 10 11 $colA $colE $colI 1
element elasticBeamColumn 12 20 12 $colA $colE $colI 1
element elasticBeamColumn 13 30 13 $colA $colE $colI 1
element elasticBeamColumn 14 40 14 $colA $colE $colI 1
element elasticBeamColumn 21 11 21 $colA $colE $colI 1
element elasticBeamColumn 22 12 22 $colA $colE $colI 1
element elasticBeamColumn 23 13 23 $colA $colE $colI 1
element elasticBeamColumn 24 14 24 $colA $colE $colI 1
element elasticBeamColumn 31 21 31 $colA $colE $colI 1
element elasticBeamColumn 32 22 32 $colA $colE $colI 1
element elasticBeamColumn 33 23 33 $colA $colE $colI 1
element elasticBeamColumn 34 24 34 $colA $colE $colI 1

#column zeroLength
element zeroLengthSection 130 1 10 2
element zeroLengthSection 120 2 20 2
element zeroLengthSection 130 3 30 2
element zeroLengthSection 140 4 40 2

```

[그림 2-43] OpenSees 구조체 거동 시뮬레이션에서 활용하는 시설물 정보

```

$HEAD CHID="evacuation",TITLE="evacuation FED model" /
$MESH 1 JK=60,60,24,XB=0,60,0,25,0,2,4 /
$TIME T_END=50, DT=1 /
$OBJST XB=57,59,20,22,0,1 /
$SURF ID="fire", HRRPUA=1000 /
$VENT XB=57,59,20,22,1,1, SURF_ID="fire" /

$REAC ID = "POLYURETHANE"
$FUEL = "POLYURETHANE"
$FVI = "C.S.3 H.L.7.1 N 0.2.1, NFPA Handbook, Babrauskas"
$SOOT_YIELD = 0.10
$CO_YIELD = 0.05
$N = 0
$H = 6.3
$O = 2.1 /

$VENT MB="DOWN", SURF_ID="OPEN" /
$VENT MB="DOWN", SURF_ID="OPEN" /
$VENT MB="DOWN", SURF_ID="OPEN" /
$VENT MB="DOWN", SURF_ID="OPEN" /

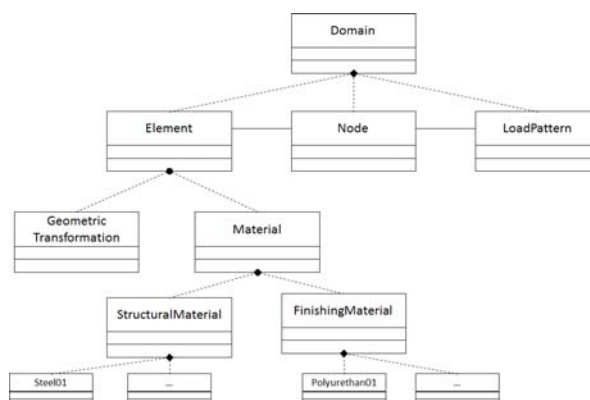
$OBJST XB= 5, 24.5, 14, 14.2, 0, 2.4 / WALL 1
$OBJST XB= 29.5, 25, 14, 14.2, 0, 2.4 / WALL 2
$OBJST XB= 17, 17.2, 0, 14, 0, 2.4 / WALL 3
$OBJST XB= 34, 34.2, 0, 14, 0, 2.4 / WALL 4
$OBJST XB= 51, 51.2, 0, 14, 0, 2.4 / WALL 5
$OBJST XB= 51, 51.2, 16, 25, 0, 2.4 / WALL 6

$SLDF PRX=58,0, QUANTITY="TEMPERATURE" /
$SLDF PRX=58,0, QUANTITY="carbon dioxide", ID="CO2" /
$SLDF PRX=58,0, QUANTITY="oxygen", ID="O2" /
$DEVC XYZ=50,15,1.5, QUANTITY="carbon monoxide", ID="CO" /
$DEVC XYZ=50,15,1.5, QUANTITY="carbon dioxide", ID="CO2" /
$DEVC XYZ=50,15,1.5, QUANTITY="oxygen", ID="O2" /
$DEVC XYZ=50,15,1.5, QUANTITY="VELOCITY", ID="Velocity" /

```

[그림 2-44] FDS 화재확산 시뮬레이션에서 활용하는 시설물 정보

- 뿐만 아니라, 앞서 설명한 각 Element에 대한 정보는 Anylogic 내의 피난 시뮬레이션 및 복구 시뮬레이션에서도 활용되는 정보임. 특히 객체화 되어 있는 각 Element 및 Node 정보는 모든 시뮬레이션에서 공유 가능하며, 객체 기반 데이터의 활용은 향후 BIM 모델과의 연동 시에도 복잡한 데이터 프로세싱을 요구하지 않을 것으로 기대됨.
- 또한 [그림 2-45]는 세 가지 시뮬레이션과 상호호환이 가능한 시설물 정보모델 클래스 다이어그램의 예시로 기본적으로 시설물 구조분석을 위해 필요한 정보를 기반으로 구성되어 있으며, 각 Element를 기본 객체로 하여 각 Element들의 Coordinates 및 재난 피해 분석에 요구되는 Load Pattern이 제공되고, 하위 클래스로 Element 재료정보가 포함.
- 각 Element들의 종류(예: 벽, 기둥 등)와 각 Element들의 Coordinates를 통해 구조 거동 분석을 위한 시설물 기본구조의 형상화가 가능하며, 해당 정보는 시설물 화재확산 시뮬레이션에서 활용되는 시설물 평면 구성 또한 가능하게 함. 각 Element가 가진 구조재 및 마감재 정보는 구조거동 뿐 아니라 화재 패턴을 분석하는 데 필수적인 정보로 활용됨.
- 이러한 기본 정보를 바탕으로, 객체에 더해질 수 있는 추가적인 정보(예: 공정정보 등)는 시설물 복구 프로세스 분석 시 더욱 유용하게 활용될 수 있고, 객체 기반의 시설물 정보모델 활용은 분석목적에 따라 분산형 시뮬레이션과 함께 확장될 수 있을 것으로 기대됨.



[그림 2-45] 시설물 정보모델 클래스 다이어그램 예시

라. 지역 단위 재난대응/관리로의 확장을 위한 GIS 연동

- 본 연구는 주요 시설물을 대상으로 한 재난 피해 평가와 대응활동에 초점을 맞추어 시스템 개발을 하였으나 보다 광역화된 재난 관리를 위해 지역단위 공간분석을 통해 피해 범위와 규모, 확산 지역을 예측하고 이에 대한 유기적인 대응책을 마련하는 것이 필요함.
- 따라서 이번 단계에서는 본 연구 개발기술의 활용 범위를 지역단위로 확장시키기 위한 하나의 방안으로 GIS기술과의 연동 방안을 제시하고자 하며, 우선적으로 전력계통 기능 복구 및 비상운영 시뮬레이션 모듈을 예시로 적용함.
- 현재 국내에서는 국가공간정보통합체계를 통해 토지, 도로, 지하시설물 등 다양한 분야의 GIS 데이터를 구축하고 있으나, 각 기관 및 부처별로 산재하여 그 연계성이 떨어짐.
- 이에 국내외에서 제공하는 GIS 데이터 중 전력계통 기능 긴급복구/비상운영 시뮬레이션 모듈에서 활용 가능한 항목을 다음 [표 2-31]과 같이 정리하였으며, 해당 속성정보는 크게 지반관련정보(토지특성도, 액상화 취약지도 등)와 재난정보(지진이력, 지진관측소정보), 시설물정보(송/변전 지리정보시스템, 지형도 등)으로 분류될 수 있음.

[표 2-30] 본 연구에서 활용 가능한 GIS 데이터 속성정보

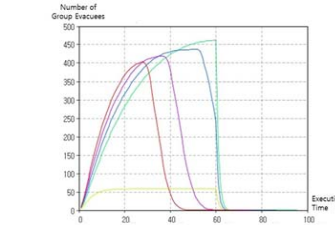
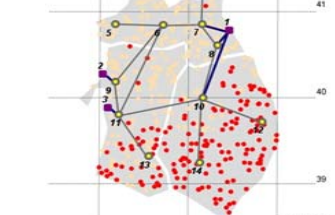
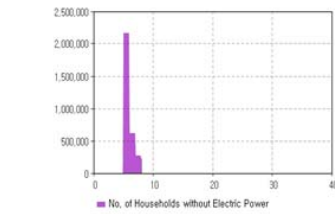
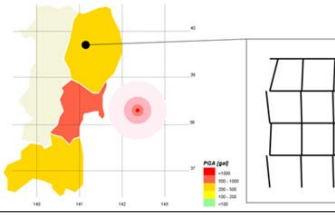
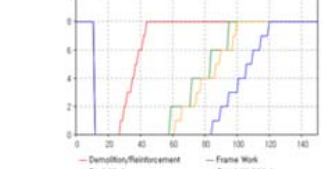
속성정보	관련기관	제공 정보 예시
지형도	국토지리정보원	방위, 거리, 고도, 도로, 산지, 도로
지진이력	지진연구센터, USGS	시간, 진앙위도, 진앙경도, 규모, 깊이
토지특성도	국토지리정보원	필지 경계선, 행정구역코드, 토지이용상황
액상화 취약지도	Iwasaki	Liquefaction Potential Index(0~15)
지진관측소정보	지진연구센터	관측소 위치, 기록, 고장/수리이력
지질도	한국지질자원연구원	암석 분포, 지질구조
지반정보	건설기술연구원	지반침하이력, 지하수도, 지하 매립물 현황
송/변전 지리정보시스템	한국전력	송/변전 설비 위치, 계통 연결 정보, 용량

- 예를 들어, 건설기술연구원에서 제공하는 지반정보 GIS 데이터를 본 연구 모듈에 적용할 경우 같은 최대지반가속도(PGA)에서의 전력계통 기능저하가 더 크게 산정될 것으로 예측할 수 있는데, 이는 일반적으로 최대지반가속도 기반 구조체 피해 평가 시 지하 매립물 또는 지반침하이력이 없는 것을 기준으로 하기 때문임.
- 따라서 지반침하이력이 많은 지역의 전력계통 또는 시설물은 일반 구조체 피해 평가항목에 지반침하이력을 가산하여 산정하는 것이 필요함. 이러한 GIS 데이터의 적용은 암석 분포, 토지이용상황과 같은 기타 지반정보에도 동일하게 적용될 수 있음.

마. 사용성 증진을 위한 시각화 기술 활용 및 인터페이스 차별화

- 본 연구에서 개발한 피난, 전력계통 기능복구, 구조체 복구 모듈은 최종 사용자의 목적에 맞는 시뮬레이션 결과를 도출함과 동시에 결과 분석 및 적용 시 편의를 증진하기 위해 각 시뮬레이션 모듈에서 시각화 기술 및 차별화된 인터페이스를 제시함.

- 특히 [그림 2-46]과 같이 결과 값을 차트, 그래프, 피해 분포도 등의 다양한 인터페이스 형태로 제공하여 재난 대응 및 관리에 유용한 정보를 제공함.
- 이러한 시각화 데이터는 효율적인 피난을 위한 건축물의 출입구 및 복도의 폭 등을 설계하는 과정에서 특히 유용하게 활용 가능하며, BIM 기술과의 접목을 통해 설계 시 피난 안전성 및 대안을 검토하는 등 그 사용성이 극대화 될 것으로 예상됨.

피난 시뮬레이션 모듈	시각화 과정	해당 재실자의 위치 좌표와 타 재실자/장애물과의 위치 좌표 추적 및 비교를 통한 충돌 방지	
		해당 재실자의 현재 위치 좌표와 목적지 (출입구)까지 좌표 비교 후 최단 거리 검색을 통한 이동 경로 설정	
	인터 페이스 표현 결과	- 재실자 특성 및 환경 변화에 따른 피난 성공률 - 재실자 특성 및 환경 변화에 따른 그룹 형성률 - 유독가스 흡입에 따른 이동속도 감소	
전력계통 기능복구 시뮬레이션 모듈	시각화 과정	지진 센싱 데이터 (경도 및 위도, 진원 깊이, 규모) 및 전력계통 정보 (시설물 특성, 위치, 노트 및 링크 정보)를 활용하여 손상 단계 산정	
	인터 페이스 표현 결과	- 손상단계 및 연쇄 재난 피해에 따른 기능 손실률 - 전력 생산량 - 예상 복구 소요 기간	
구조체 복구 시뮬레이션 모듈	시각화 과정	지진 센싱 데이터에 기초하여 시설물 주변 지역 피해 정도 표현 및 시설물 구조체 변위 및 피해 정도 산정	
	인터 페이스 표현 결과	- 자원 수급률에 따른 복구 작업 지연 정도 - 전체 및 공종별 작업 기간 및 지연 정도	

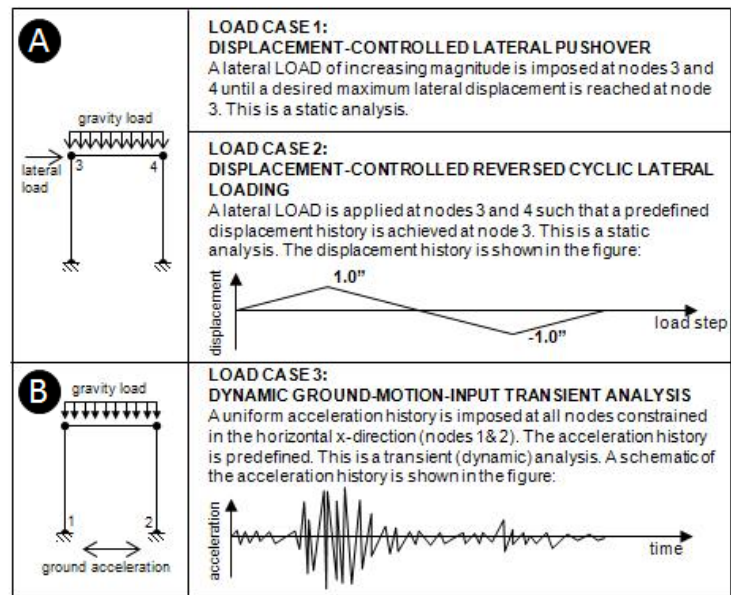
[그림 2-46] 시각화 기술을 활용한 모듈별 분석 결과

바. 추가적인 재난 센싱/시뮬레이션 연계를 통한 다양한 재난 유형으로 확장

- 본 분산형 재난 시뮬레이션은 RTI 미들웨어를 통해 필요에 따라 서로 다른 시뮬레이션을 재조합할 수 있으며, 아래 [그림 2-47]의 개념도와 같이 재난요소/재난피해/재난대응 시뮬레이션과 시설물정보모델 등을 각각 필요에 맞게 구성하면 기존의 모듈을 재활용하면서, 새로운 재난상황과 새로운 시설물에 적용할 수 있음.



[그림 2-47] 분산형 재난 시뮬레이션의 재조합 개념도



[그림 2-48] OpenSees의 다양한 재난 영향 반영 (OpenSees 2014)

- 특히 태풍의 경우 기존의 OpenSees 구조체 거동 시뮬레이션 및 시설물 복구 시뮬레이션 모듈의 재사용이 가장 용이하다고 할 수 있는데, [그림 2-48]과 같이 OpenSees 구조체 거동 시뮬레이션에서는 기 구축된 시설물 구조 모델을 바탕으로 다양한 하중상황 (횡하중, 지진하중)에 따른 구조체 거동을 시뮬레이션 할 수 있음.
- 예를 들면, 본 연구에서는 지진 상황에 따라 지진 가속도 데이터를 입력하여 ([그림 2-48]의 B) 지반진동에 따른 시설물 노드의 변위 등을 분석하는데, 같은 모델을 활용하여 태풍 상황에 따른 횡하중 데이터를 입력하는 경우 ([그림 2-48]의 A) 태풍에 따른 시설물 노드의 변위 등을 분석하는 방식으로 재사용될 수 있음.
- 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 의미함.
- 실제로 태풍의 예상 풍속의 경우 기상청을 통해 손쉽게 제공받을 수 있으며, 시중에서 판매되는 다양한 풍속측정계 또한 활용 가능함. 이러한 센싱 및 예측 기술이 본 연구의 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼에 상호연동되는 경우, 향후 그 확장 범위가 무궁무진 할 것으로 사료됨.

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

제1절 최종 연구성과

1. 핵심연구성과

연번	연구성과명	설명
1	시설물 재난 대응을 위한 분산형 시뮬레이션 플랫폼	분산형 시뮬레이션 환경 하에 재난발생/피해/대응시뮬레이션 모듈이 분석목적에 따라 다른 조합 생성 및 상호연동이 가능한 시뮬레이션 플랫폼 및 각 모듈 간 원활한 데이터 교환을 지원하는 미들웨어
2	분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템	분산형 시뮬레이션을 활용하여 각종 재난 상황에 따라 피해를 신속하게 산정하고 피난/비상운영/복구 등 시설물 재난관리에 유용한 정보를 분석 및 시각화하는 개별 모듈과 이러한 모듈의 구동을 지원하는 시스템
3	분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 활용 및 확장 방안	최종 개발된 분산형 시뮬레이션 프레임워크, 핵심 및 요소 기술, 시스템의 재사용성 및 확장성을 증진하고 다양한 재난 관리 분야로의 적용성을 높이기 위한 타당한 활용방법 및 확장방안

2. 핵심요소기술 성과

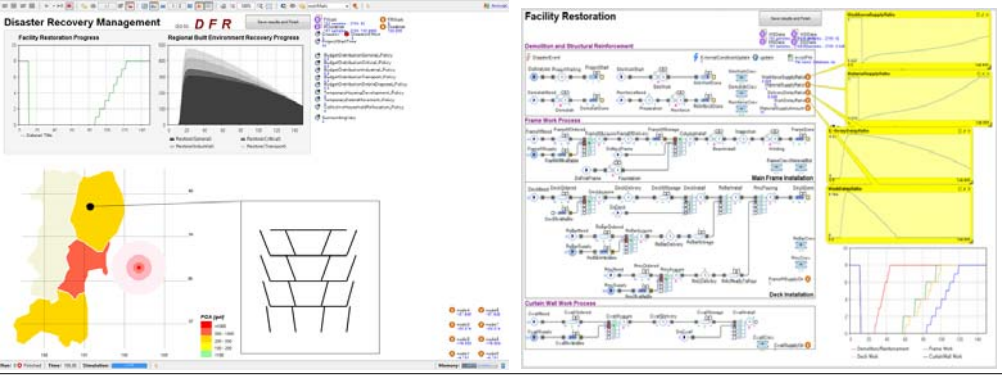
분류	기술명	설명	결과물
핵심 기술	분산형 시뮬레이션 오픈 플랫폼	분산형 시뮬레이션 모듈의 조합 생성 및 상호연동을 지원하는 플랫폼 및 미들웨어	특히 소프트웨어 논문
	분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템	재난 시 피난/비상운영/복구 등 시설물 재난 관리를 위한 분석 및 시각화를 제공하는 개별 모듈 및 시스템	특히 소프트웨어 논문
요소 기술	시설물/지역정보 DB 연동형 재난 시뮬레이터 간 데이터 프로토콜 및 데이터 맵	분석 목적에 부합하는 DB와 하위 재난 시뮬레이터 조합 간 원활한 데이터 송수신을 위한 규정을 포함한 프로토콜 및 데이터 맵	논문
	상위체계구조(HLA) 기반의 하위 재난 시뮬레이터 간 상호연동 환경	하위 재난 시뮬레이터 간 다양한 종류의 데이터 교환이 가능한 시뮬레이션 환경	논문
	재난 대응 하위 시뮬레이션 모듈	재난 시 피난/비상운영/복구 등 시설물 재난 관리를 위한 개별 분석 기술	논문
	분산형 시뮬레이션을 위한 객체 모델	분산형 시뮬레이션의 하위 federate 간 원활한 상호연동을 위한 객체 모델 개발	논문
	HLA-based Run-Time Infrastructure (RTI)	전체 federation의 실행과 하위 federate 간 정보 교환 등의 기능을 담당하는 미들웨어	소프트웨어 논문
	재난 시뮬레이션 시각화 모듈	재난 시뮬레이션의 분석 과정 및 결과 시각화 기술	논문

제2절 핵심 연구성과 세부 설명

1. 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼

관련 그림 / 사진	
정의(설명)	시설물 재난 대응을 위한 분산형 시뮬레이션 플랫폼은 재난발생, 피해, 대응모듈의 분석 목적에 따른 다양한 조합 생성과 함께, 각 모듈 간 원활한 상호연동 및 데이터 교환 수행을 지원하는 운영체제를 의미함. 이러한 플랫폼의 구축을 위해 구성 요소 간 데이터 교환을 지원하는 미들웨어의 개발 및 활용은 핵심적 역할을 하며, 재난 시나리오에 따른 지진센싱 기술, 구조체 거동 시뮬레이션 기술, 화재 시뮬레이션 기술이 자체 개발한 시설물 재난 대응 시뮬레이션 모듈의 상호 연동을 지원함. 또한 향후 필요에 따라 추가적 시뮬레이션 기술과 상호 연동 가능한 확장성있는 시뮬레이션 프레임워크, 미들웨어, 모듈들의 집합체를 의미함.
설정사유	분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼은 다양한 재난 및 피해상황, 시설물에 대한 재난 관리의 특성에 기반하여 향후 분석 목적에 따른 지속적 확장 및 재사용이 가능한 본 연구의 핵심기술임.
목 적	분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼은 각종 시뮬레이션 및 센싱 기술의 상호연동을 통해 재난 시 실시간 분석을 지원할 수 있는 기술이며, 다양한 상황에 따라 필요한 또는 적합한 기술 및 시뮬레이션을 조합하여 사용하는 것을 목적으로 개발됨.
성능목표	(기존기술 수준) 재난발생/피해/대응 시뮬레이션 모듈이 특정상황에 맞게 통합환경에서 시뮬레이션 (개발기술 수준) 상호연동하는 재난발생/피해/대응 시뮬레이션 모듈의 확장성 및 재사용성 확보 (개발기술 수준 설정근거) 재난발생/피해/대응 시뮬레이션 모듈이 상황에 따라 분산된 환경에서 상호연동하며, 개발언어나 환경이 상이하더라도 상호운용 가능. 또한 시뮬레이션 뿐 아니라 데이터 센싱기술도 연동 가능
책임자 (소속기관)	박문서 (서울대학교), SangHyun Lee (University of Michigan)
소요기간	’ 12.11 ~ ’ 15.11 (3년)
핵심성과	학술적 성과 SCI 논문
	비SCI논문 국내 5건 / 국외 3건
	기타
	기술적 성과 특허
질적 성과	성과 기준 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼의 시뮬레이션 상호연동 테스트의 정확성 (오차율 5% 미만)
	달성 확인 시뮬레이션 간 상호연동 및 데이터 교환에 따른 시뮬레이션 결과와 이를 수동으로 입력했을 때의 결과 비교. 상호연동에 대한 동영상 시연.

2. 시설물 재난 대응 및 관리시스템

관련 그림 / 사진					
정의(설명)		분산형 시뮬레이션 기술을 활용하여 재난 상황에 따라 피해를 신속하게 산정하고 피난/비상운영/복구 등 시설물 재난관리에 유용한 정보를 분석하기 위한 재난 발생/피해/대응 시뮬레이션의 개별 모듈 및 이러한 모듈의 시각화 및 구동을 지원하는 시스템을 의미함. 본 성과를 위해 자체 개발된 개별 모듈들은 재난 대응 분석을 위한 독자적 활용이 가능할 뿐만 아니라 분산형 시뮬레이션 플랫폼 하에 재난 센싱, 피해 분석 기술 등과의 조합을 통해 재난 피해 상황을 반영한 현실성 높은 분석 결과를 도출함.			
설정사유		분산형 시뮬레이션을 활용하여 다양한 상황에 시설물 관리자에게 재실자 피난 행태, 시설물 기능복구 및 비상운영, 시설물 구조체 복구분석 결과를 제공하여 재난 및 시설물의 특성을 반영한 신속한 재난대응을 지원할 수 있어 향후 지속적인 보완과 함께 더욱 다양한 재난 상황을 반영한 재난 대응/관리를 수행할 수 있음.			
목 적		분산형 시뮬레이션 기반의 시설물 재난 대응 및 관리 시스템은 확장성 및 재사용성을 가진 재난 시뮬레이션 플랫폼 기술을 기반으로 시설물 재난 대응 및 관리를 다양한 재난상황에서, 다양한 시설물 유형에, 재난 후 실시간으로 지원할 수 있는 개별 기술 및 그 시스템임.			
성능목표		(기존기술 수준) 특정 시설물의 특정 대응 유형에 대한 분석을 통한 재난관리 지원 (개발기술 수준) 다양한 시설물의 다양한 대응 유형에 대한 재난관리 지원 가능 (개발기술 수준 설정근거) 재난 대응 시나리오에 따라 시뮬레이션 기반 시설물 재난대응 및 관리 프레임워크에 따라 다양한 시뮬레이션 모듈의 상호연동을 구현할 수 있고, 이에 따른 다각적 분석이 가능			
책임자 (소속기관)		박문서 (서울대학교)			
소요기간		’ 12.11 ~ ’ 15.11 (3년)			
핵심 성과	양적 성과	학술적 성과	SCI 논문 국외 2건	비SCI논문 국내 5 국외 4	기타 재해재난대응기술1건
		기술적 성과	특허 2건	S/W 3건	기타
	질적 성과	성과 기준	시설물 재난 대응 및 관리시스템 활용을 통해 제공될 수 있는 정보의 유용성 검증 (3건 이상)		
		달성 확인	시스템 활용을 통해 제공될 수 있는 정보가 실제 재난 대응 및 관리에 유용한 지 잠재적인 사용자를 대상으로 확인 (3인 이상)하고, 그 분석결과를 보고서에 첨부		

3. 분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 활용 및 확장 방안

관련 그림 / 사진					
정의(설명)		최종 개발된 분산형 시뮬레이션의 프레임워크, 핵심 및 요소 기술, 시스템이 향후 다양한 재난 관리 분야로 적용되기 위한 타당한 활용 방법 및 확장 방안을 의미함. 본 성과는 분산형 시뮬레이션 기술의 최대 장점인 재사용성 및 확장성에 기반하여 추가적 재난 피해 및 대응 기술과의 상호연동을 통한 향후 활용 가능성 및 그 방법을 제시하고 본 성과물의 적용성을 극대화함.			
설정사유		본 연구에서 개발한 분산형 재난 시뮬레이션 기술은 기술적 기반 구축 목표에 따라 도출된 성과로써, 당장 재난 관리에 적용되기보다 향후 다양한 분야와 상황에 활용되고 확장될 수 있는 잠재력을 가지므로, 이에 대한 미래의 활용방법 및 확장방안 도출은 향후 기술의 진보 및 기술에 대한 현실적응에 도움이 됨.			
목 적		본 연구에서 개발한 분산형 재난 시뮬레이션 기술 및 이를 기반으로 한 시설물 재난 대응 및 관리시스템의 실제 재난관리로의 활용, 다양한 재난상황 등으로의 확장, 관련 기술의 연속성을 도모함.			
성능목표		(기존기술 수준) 분산형 시뮬레이션 기술명세 (개발기술 수준) 향후 확장과 활용방안을 포함한 기술명세 및 방안 (개발기술 수준 설정근거) 기존 분산형 시뮬레이션 기술은 개발 및 사용의 어려움으로 컴퓨터 공학 등 전문분야를 제외하고는 기술의 진보가 지속적으로 이루어지지 않았으나, 이에 대한 기술명세 및 활용/확장 방안의 구체화는 재난관리 및 건설관리 등 분산형 시뮬레이션 기술의 적용 분야에서 활발한 기술 발전 및 적용 확대 가능			
책임자 (소속기관)		박문서 (서울대학교)			
소요기간		’ 14.11 ~ ’ 15.11 (1년)			
핵심 성과	양적 성과	학술적 성과	SCI 논문	비SCI논문	기타
				국내 2건 국외 1건	관리/지침/매뉴얼 1건
	질적 성과	기술적 성과	특허	S/W	기타
		성과 기준	분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 개발 기술 활용/확장 전략의 타당성 검증 (3건 이상)		
달성 확인	본 개발기술의 미래의 활용방안 및 확장전략에 대해 전문가를 대상으로 타당성 자문 및 의견 반영을 수행하고, 그 결과를 보고서에 첨부				

제3절 성과 총괄표

1. 전체 연구기간 총괄성과

	핵심성과 (level1)	단위성과 (level2)	최종 성과점검기준					해당 기관	예산 (백만원)	양적 성과			
			질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치						
구분 총괄	A	분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼	1	BIM 모델 연동 시뮬레이션 송수신 데이터 맵	①	BIM모델 및 시뮬레이터 간 데이터 호환체계를 반영한 시뮬레이션 송수신 데이터 맵 구축	1건	재난 발생/시나리오 반영의 적정성 여부를 전문가 자문 (3인 이상)을 통해 (적합/부적합 여부) 평가 및 전문가 의견 수렴 (3건 이상) 완료 시 1건으로 간주	보고서 발표자료 (캡처화면)	5%	서울 대학교	120	기술 특허출원 1건 특허등록 1건 소프트웨어 1건 학술 국외SCI 1건 국외비SCI 3건 국내비SCI 5건
			2	분산형 시뮬레이션 데이터 송수신 정확성	①	재난요소 복합 작용 시 필요한 하위 시뮬레이터 간 데이터 송수신 요구사항 만족 여부	95% 이상	데이터 호환 라이브러리에서 구현되는 하위 시뮬레이터들 간 데이터 및 속성 호환 경우의 수/ 재난 발생/대응 시나리오에서 분석된 하위 시뮬레이터들 간 필요한 데이터 및 속성 호환 경우의 수 (%)	보고서 (데이터/ 라이브러리 설계도/ 측정결과)	35%	서울 대학교	50	
			3	BIM모델과 재난 시뮬레이션 간 데이터 호환 체계	①	BIM 모델 속성정보 호환성능	1건	BIM 모델 데이터와 시뮬레이터 간 데이터 교환 시 데이터 속성 변경 발생이 없는 데이터 호환 라이브러리를 1건으로 간주	보고서 (데이터/ 라이브러리 설계도/ 측정결과)	10%	University of Michigan	100	
			4	분산형 시뮬레이션을 위한 접속규약의 정확성	①	시뮬레이터 간 상호연동을 위해 구축한 접속규약의 정확성 (오차율)	3% 미만	하위 시뮬레이터 간 가능한 조합의 상호 연동 시뮬레이션 수행 (조합별 5개 시뮬레이션 시나리오) 오차율 (상호연동 오류 발생 시뮬레이션 횟수/전체 시뮬레이션 횟수)	보고서 (시뮬레이션 캡처 화면/ 분석결과)	40%	서울 대학교	80	
			5	시뮬레이터 간 시뮬레이션 시간 동기화	①	이산형 시뮬레이션과 연속형 시뮬레이션의 상호연동	1건	시간진행 메커니즘이 다른 두 시뮬레이터 간의 시뮬레이션 중 데이터 교환 조건 설정 시 조건에 따른 데이터 교환 수행 여부 (설정 조건 수행 오차율 5% 미만 시 1건으로 간주)	보고서 (시뮬레이션 캡처 화면/ 분석결과)	10%	University of Michigan	30	
			6	복합적 재난 발생 및 대응 시나리오 개발	①	재난 발생 및 대응 시나리오의 적정성	3건	재난 및 시설물 관리 전문가를 대상으로 적정성에 대한 자문 및 의견 반영	보고서 (전문가 의견 및 반영내용)	20%	서울 대학교	45	
			7	분산형 시뮬레이션 테스트 및 검증방법 수립	①	분산형 시뮬레이션 테스트 및 검증 방법 및 절차 타당성	2건	분산형 시뮬레이션 테스트 및 검증 방법 및 절차서 개발 후 전문가를 대상으로 방법 및 절차의 타당성 자문 및 의견 반영	보고서 (전문가 의견 및 반영내용)	20%	서울 대학교	35	

	B	시설물 재난 대응 및 관리시스템	1	재난 대응 시뮬레이터 테스트	①	재난 대응 시뮬레이터 분석결과 타당성 검증	10%	피난, 복구 등 개발된 개별 재난 대응 시뮬레이터에 실제 사례를 적용하여 분석 오차 10% 미만이 되도록 시뮬레이션 또는 시뮬레이션 결과에 대한 행태설명	보고서 (분석자료)	30%	서울 대학교	67.5	기술 특허출원 2 건 특허등록 1 건 소프트웨어 3 건
			2	페더레이션 객체모델 및 시뮬레이션 객체모델 개발	①	개발된 객체모델 및 플랫폼의 상호호환성 및 상호운용성 확인	1건	개발된 객체모델 별 RTI와의 정보교환 및 연동을 분석하여 상호오차 없이 작동 시 1건으로 간주	보고서 (결과 요약) 시연 (동영상)	30%	University of Michigan	126	학술 국외SCI 2 건 국외비SCI 4 건 국내비SCI 5 건
			3	분산형 시뮬레이션 내 시뮬레이션 모듈 간 상호연동	①	시뮬레이션 상호연동 테스트	5% 미만	시뮬레이션 간 상호연동 및 데이터 교환에 따른 시뮬레이션 결과와 이를 수동으로 입력했을 때의 결과값 비교	보고서 (분석자료) 시연 (동영상)	30%	University of Michigan	60	
	C	분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 활용 및 확장 방안	1	시설물 재난 대응 및 관리시스템 활용성	①	시스템 활용을 통해 제공될 수 있는 정보의 유용성 검증	3건 이상	시스템 활용을 통해 제공될 수 있는 정보가 실제 재난 대응 및 관리에 유용한 지 잠재적인 사용자를 대상으로 확인 (3인 이상)	보고서 (분석자료)	40%	서울 대학교	63.5	기술 특허출원 1 건 특허등록 1 건 소프트웨어 1 건
			2	분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 개발 기술 활용/확장 전략 타당성	①	개발 기술 활용/확장 전략의 타당성 검증	3건 이상	본 개발기술의 미래의 활용방안 및 확장전략에 대해 전문가를 대상으로 타당성 자문 및 의견 반영	보고서 (분석자료)	30%	서울 대학교	30	학술 국외SCI 1 건 국외비SCI 1 건 국내비SCI 2 건
계										300		807	기술 특허출원 2 건 특허등록 1 건 소프트웨어 3 건 학술 국외SCI 2 건 국외비SCI 8 건 국내비SCI 12 건

2. 전체 연구기간 질적성과

핵심성과명	질적성과	계획	실적	비고
재난 시뮬레이터 간 데이터 호환 라이브러리	BIM모델 및 시뮬레이터 간 데이터 호환체계를 반영한 시뮬레이션 송수신 데이터 맵 구축	1건	1건	
	재난요소 복합 작용 시 필요한 하위 시뮬레이터 간 데이터 송수신 요구사항 만족 여부	95% 이상	97.9%	
	BIM 모델 속성정보 호환성능	1건	1건	
재난 시뮬레이터 간 상호연동 체계	시뮬레이터 간 상호연동을 위해 구축한 접속규약의 정확성 (오차율)	3% 미만	2.8%	
	이산형 시뮬레이션과 연속형 시뮬레이션의 상호연동	1건	1건	
분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼 활용체계 정립	재난 발생 및 대응 시나리오의 적정성	3건	3건	
	분산형 시뮬레이션 테스트 및 검증 방법 및 절차 타당성	2건	2건	
재난 대응 시뮬레이터 추가 개발/보완	재난 대응 시뮬레이터 분석결과 타당성 검증	10%	평균 10% 미만	
분산형 시뮬레이션을 위한 객체모델 개발	개발된 객체모델 및 플랫폼의 상호호환성 및 상호운용성 확인	1건	1건	
분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼	시뮬레이션 상호연동 테스트	5% 미만	0%	
시설물 재난 대응 및 관리시스템 테스트/보완	시스템 활용을 통해 제공될 수 있는 정보의 유용성 검증	3건 이상	3건	
분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 활용 및 확장 방안	개발 기술 활용/확장 전략의 타당성 검증	3건 이상	3건	

3. 전체 연구기간 양적성과

구분	양적성과		주관 (서울대학교)		공동 (Univ. of Michigan)		합계	
			계획	실적	계획	실적	계획	실적
공공적 성과	법 제정 및 개선							
	설계기준, 시방서, 지침에 제안							
	설계기준, 시방서, 지침에 반영							
	정책제안							
	정책채택							
기술적 성과	특허	출원	2	2			2	2
		등록						
	실용신안	출원						
		등록						
	디자인	출원						
		등록						
	소프트웨어(S/W)		3	3			3	3
	기타 성과(상표, 서비스 등)							
학술적 성과	신기술 지정							
	국내외 학술지 게재	일반학술지	5	6			5	6
		SCI(E)학술지	2	2			2	2
	국내외 학술회의 발표		9	14			9	14
경제적 성과	기술실시계약							
	사업화/제품화							
	현장적용에 의한 비용절감							
연구개발비		정부출연금	560,000				560,000	
		기업부담금	187,000				187,000	
		상대국부담금			60,000		60,000	
		합계	747,000		60,000		807,000	

제4장 연구목표 달성 및 효과

제1절 연구개발 최종목표 달성도

1. 연구개발 수행 진도율

구분 개발내용	연구개발기간												진도율 (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1 차 년 도	분산형 재난 시뮬레이션 개념 정립	→											100
	재난 발생/대응 시뮬레이터 역할 정의 및 개발		→										100
	시설물/지역정보 DB 연동형 시뮬레이션 데이터 호환체계 구축		→		→								100
	하위 시뮬레이터 간 상호연동체계 구축			→									100
	상위체계구조 (HLA) 기반 시뮬레이션 상호연동체계 구축									→	→		100
2 차 년 도	분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼 활용체계 정립	→	→										100
	분산형 시뮬레이션을 위한 객체모델 개발		→			→							100
	분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 프레임워크 개발		→										100
	재난 대응 시뮬레이션 모듈 추가 개발 및 보완			→		→							100
	오픈 아키텍처 기반 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼 구축			→						→			100
	분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축							→		→	→		100
3 차 년 도	분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 시각화 모듈 연계 및 테스트							→					100
	오픈 아키텍처 기반 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼 개발 완료 및 보완							→					100
	재난 시뮬레이션 시각화 및 데이터 연동 기술 활용체계 구축							→		→	→		100
	분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 활용 및 확장 방안 제시								→	→	→		100
총 진도율													

..... 당초계획

———— 실 적

2. 연구개발 목표의 달성도

가. 1차년도 세부 목표 달성도

목표	세부목표	달성도(%)	내 용
분산형 재난 시뮬레이션 개념 정립	재난발생 및 대응유형 정의	100	- 재난 발생 요소 정의 복합 재난 시나리오 개발 - 실제 재난사례 (동일본대지진) 피해 및 복구 관련 자료를 DB화하여, 향후 모델개발/검증에 활용 - 재난 발생 및 대응관련 상용 시뮬레이터 조사 및 활용성 분석
	상위체계구조 (HLA)기반 분산형 시뮬레이션 활용성 분석	100	상위체계구조(HLA)기반 분산형 시뮬레이션 개념 정립 및 관련 기술동향조사/활용성 분석
재난 발생/대응 시뮬레이터 역할 정의 및 개발	하위 시뮬레이터 역할 정의	100	- 재난 시뮬레이터 조사 및 분석 결과를 토대로 재난 발생 및 대응각 시뮬레이터 간의 페더레이션 구성/역할에 대한 프레임워크 개발 - 하위 시뮬레이터들의 입출력 데이터 분류체계 구축 - 재난 발생 및 대응 하위 시뮬레이터들의 입출력 데이터 맵 구축
	재난대응 시뮬레이터 개발	100	기존 모듈의 활용이 어려운 재난 대응 시뮬레이터 (재설자 피난, 지역단위 시설물 및 Lifeline 복구, 시설물 구조체 복구)를 자체 개발하였으며, 기존계획 대비 추가 연구를 수행
시설물/지역 정보 DB 연동형 시뮬레이션 데이터 호환체계 구축	재난 발생/대응 시나리오 기반 재난 시뮬레이션 송수신 데이터 맵 구축 및 적정성평가	100	하위 시뮬레이터 별 분석된 요구 데이터 및 복합 재난 시나리오를 토대로 하위 시뮬레이터 간 데이터 송수신 맵을 구축하고 전문가 평가를 통해 적정성을 확인
	시설물/지역정보 DB 연동형 시뮬레이터 간 데이터 프로토콜 정의	100	- 데이터 속성, 표현방식, 확보경로, 호환체계를 포함한 시설물/지역정보 DB 연동형 데이터 호환 라이브러리 구축 및 데이터 프로토콜 정의 - 작성된 시나리오와 비교를 통해 데이터 호환 라이브러리 및 프로토콜 성능 분석
하위 시뮬레이터 간 상호연동체계 구축	시뮬레이션 환경에서의 하위 시뮬레이터 간 데이터 상호 호환성 확보	100	- 시뮬레이터 상호연동 프레임워크 제시 및 재난 대응 프레임 워크에 따라 데이터 교환시점 정의 - 데이터 표현방식 변환체계 및 사용될 데이터의 속성, 표현방식, 확보경로 정의 - 시설물 재난대응 단계에서의 시설물 정보를 반영한 피난행태 시뮬레이터 프로토타입 개발 - 시설물 복구단계에서의 지역단위의 복구환경의 영향 및 다른 시설물과 상호작용을 반영한 시설물 구조체 복구 시뮬레이터 프로토타입 개발
상위체계구조 (HLA) 기반 시뮬레이션 상호연동체계 구축	시뮬레이터들 간 시뮬레이션시간 동기화	100	기존 시뮬레이션 시간 동기화 방법론 연구를 토대로 혼합형 시뮬레이션에서의 시뮬레이션 시간 동기화 모듈을 제시하고 이를 테스트

나. 2차년도 세부 목표 달성도

목표	세부목표	달성도(%)	내 용
분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼 활용체계 정립	재난 대응/관리 체계 분석 및 활용 방안 도출	100	- 국내 실정을 반영한 재난 시나리오 설정 및 활용 방안 도출을 위해 국내외(국민안전처, FEMA) 재난 대응 관리 체계 및 매뉴얼 분석 수행 - 재난 발생 대응/관리 체계의 활용방안 도출
	복합적 재난 발생 및 대응 시나리오 개발	100	- 국내 환경을 반영한 복합적 재난 발생/피해 유형을 지진-붕괴-화재로 선정하고, 일반건축물 및 전력계통을 주요 분석대상 시설물로 선정. - 복합적 재난 발생 유형에 따른 시설물 별 대응 시나리오 구축을 수행 하고, 자문을 통해 평가.
분산형 시뮬레이션을 위한 객체모델 개발	분산형 시뮬레이션을 위한 객체모델 개발	100	- 국제협력을 통해 각 시뮬레이션 모듈의 상호작용을 구현할 수 있는 객체모델 개발. - 본 객체모델은 각 시뮬레이션 간 교환되는 데이터를 객체화하고, 데이터 교환에 대한 표준화하는 것임.
분산형 재난 대응/관리 시뮬레이션 프레임워크 개발	분산형 재난대응/관리 시뮬레이션 프레임워크	100	기존의 지진데이터 센싱, 구조체 피해 시뮬레이션, 화재 시뮬레이션 기술을 분석하고, 자체 개발하는 단계 별 재난 대응 시뮬레이션 모듈과 상호연동체계에 대한 프레임워크를 구축함.
	분산형 시뮬레이션 테스트 및 검증 방법 수립	100	프레임워크를 바탕으로, 각 모듈별 및 상호연동 시뮬레이션 검증 방법에 대한 절차를 개발하고, 전문가 자문을 통해 적정성을 평가함.
재난 대응 시뮬레이션 모듈 추가 개발 및 보완	재난대응 (피난, 긴급복구 및 비상운영, 구조체 복구) 시뮬레이션 모듈 개발	100	단계별 시설물 재난 대응 시뮬레이션 모듈로써 시설물 피난 시뮬레이션 모듈, 비상시 전력계통 기능복구 및 비상운영 시뮬레이션 모듈, 시설물 구조체 복구 시뮬레이션 모듈(해체작업 포함) 개발
	재난대응 시뮬레이터 보완 및 테스트	100	- 동일본 대지진 등 과거사례를 통해 각 재난대응 시뮬레이션 모듈을 테스트하고, 테스트 결과를 바탕으로 각 시뮬레이션 모듈을 검증함. - 시뮬레이션 모듈 개발에 대해서, 세미나를 통해 적정성을 검토하고 논문게재를 통해 그 활용 가능성을 타진하였음.
오픈 아키텍처 기반 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼 구축	상위체계구조 (HLA) 기반 분산형 재난 시뮬레이션 미들웨어 RTI 개발	100	- 기존 RTI 소프트웨어인 CERTI-RTI를 활용하여 분산형 재난 시뮬레이션 미들웨어를 개발함. - 본 RTI는 시뮬레이션 모듈간 원활한 상호운용 및 데이터 교환을 위한 관리기능을 Call-Back 함수로 포함하고 있음.
	분산형 재난 시뮬레이션을 위한 오픈 소스 플랫폼 구축	100	기존 시뮬레이션 모듈인 지진센싱모듈 (USGS) 및 구조체 거동 시뮬레이션 모듈 (OpenSees), 자체 개발한 재난 대응 시뮬레이션 모듈, 개발된 RTI를 활용하여 분산형 재난 시뮬레이션을 위한 오픈 소스 플랫폼을 구축함.
분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축	분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축	100	재난 대응 시뮬레이션 모듈을 베이스로 하여, 각 시뮬레이션 모듈이 상호연동하는 분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축하고, 향후 보완사항을 마련함.

다. 3차년도 세부 목표 달성도

목표	세부목표	달성도(%)	내 용
분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 시각화 모듈 연계 및 테스트	시설물 재난 시뮬레이션 시각화 모듈 연계	100	- Anylogic 소프트웨어의 시각화 기술과 연동을 통해 개별 시뮬레이터 (피난, 전력계통 복구, 시설물 복구)의 분석 과정을 시각화하여 화재 인지 후 재실자의 이동 과정, 지진 발생에 따른 지역 및 시설물의 피해/손상정도를 표현함. - 그래프, 차트, 피해분포도 등 차별화 된 인터페이스에 기반하여 각 시뮬레이션의 분석 결과값을 표현함.
	분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 테스트/보완	100	- 보행 시뮬레이션 관련 사회과학 이론 (Social Force Model 등)에 기초한 Anylogic Pedestrian Library와의 연동을 통해 피난 시뮬레이션의 기초 검증 및 시각화 기술의 적정성을 테스트함. 2차년도에 제시한 시뮬레이션 검증 절차, 전문가 자문 등을 활용하여 개별 모듈 및 전체 시스템 타당성을 개발단계에서 지속적으로 테스트하고 보완함.
오픈 아키텍처 기반 분산형 재난 시뮬레이션 플랫폼 개발 완료 및 보완	분산형 재난 시뮬레이션을 위한 오픈 소스 플랫폼 최종 구축	100	- 사용자 분석 목적에 따른 화재 시뮬레이션 (FDS)-피난 시뮬레이션, USGS 서버-전력계통 긴급복구/비상운영 시뮬레이션, USGS 서버-OpenSees-구조체 복구 시뮬레이션 연계가 가능한 플랫폼 최종 구축을 완료함. - 개별 시뮬레이터들간의 연동뿐만 아니라 USGS 서버의 실시간 지진 센싱 기술과의 연동을 통해 향후 다양한 재난 데이터 센싱이 가능한 확장 가능 플랫폼을 구축함.
재난 시뮬레이션 시각화 및 데이터 연동 기술 활용체계 구축	시설물 재난 시뮬레이션을 위한 시각화 기술 활용체계 구축	100	피난, 전력계통 복구, 시설물 복구 시뮬레이션에서 제공하는 시각화 된 분석 과정을 통해 병목 및 정체구역 예측, 전력계통 기능 손실 및 복구 현황, 시설물 구조 변위 정도 및 위치 등을 파악하고 이를 인명 구조, 대응 및 복구 계획 수립 등에 활용하는 방안을 제시함.
	시각화 기술과 BIM모델 연동체계 구축	100	BIM을 통해 OpenSees, FDS 등의 시뮬레이터에서 더욱 현실적인 지진 및 화재 피해 추측을 위해 활용 가능한 데이터의 종류와 예측되는 효과를 제시함으로써 향후 연동의 필요성과 가능성을 설명함.
분산형 재난대응/관 리 시뮬레이션 활용 및 확장 방안 제시	분산형 재난대응/관리 시뮬레이션의 미래 활용방안 제시	100	- BIM 및 GIS 데이터와의 연동을 통해 특정 시설물 및 지역에 대한 분석을 넘어 다양한 시설물과 지역의 특성정보에 기반한 미래 활용방안을 제시함. - 분석 내용의 시각화 및 결과 제공 인터페이스를 통해 높은 사용성을 기반으로 설계 피난 안전성 사전 검토, 복구 계획 수립등을 위한 활용방안을 제시함.
	분산형 재난대응/관리 시뮬레이션의 확장분야 제시	100	가속도계측기를 포함한 실시간 센싱 기술을 사용하여 시설물 단위의 실시간 재난 피해 분석 및 대응과 더불어 추가적 시뮬레이터를 이용한 시스템 확장을 통한 다양한 유형의 재난 피해 및 대응이 가능한 분야를 제시함.

제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

1. 직접효과

- 본 연구의 최종 핵심기술은 ‘분산형 시뮬레이션 오픈 플랫폼’과 ‘분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템’이며, 세부 요소기술인 1)시설물/지역정보 DB 연동형 재난 시뮬레이터 간 데이터 프로토콜 및 데이터 맵, 2)HLA 기반의 하위 재난 시뮬레이터 간 상호연동 환경, 3)재난 대응 하위 시뮬레이션 모듈, 4)분산형 시뮬레이션을 위한 객체 모델, 5)HLA-based RTI, 6)재난 시뮬레이션 시각화 모듈을 일부 포함함.
- 상기 기술을 기반으로 본 연구에서는 총 8건의 학술 논문이 창출되었으며, 14건의 국내외 학술회의 발표를 통해 관련 연구자들의 연구를 활성화시켜 국가기술수준 증진을 도모함.
- [표 4-1]은 본 연구의 착수시점(2012년)과 완료 후(2016년)를 기준으로 국가기술수준의 향상을 추정함으로써 본 과제가 국가 기술력 향상에 기여한 정도를 평가한 것임.
- 해당 평가는 본 연구의 최종 수요자인 재난 연구자 및 연구단체, 시설물 구조 및 안전 연구자 및 연구 단체, 개별 시설물 관리자재난 및 시설물 관리 분야의 전문가 4인을 대상으로 한 수요자 만족도 조사 항목 중의 하나임. [3차년도 양적성과 9-2]
- 조사 결과, 본 연구의 개발 기술을 통해 국내 재난·재해 분야의 국가기술수준이 평균 13.85% 증가하고 최고기술국과의 기술격차가 평균 -2.5년 감소할 수 있을 것으로 예상되었으며 특히 복합재난 예측 대응기술의 국가기술수준이 가장 크게 신장될 것으로 기대됨.

[표 4-1] 본 연구의 재난·재해 분야 국가기술수준 기여도

분야	최고기술품	본 연구 착수 당시		본 연구 완료 후		국가기술수준 기여도	
		수준	격차	수준	격차	수준	격차
자연재해 예측·대응기술	미국	72.9%	7.8년	81.8%	5.1년	8.90%	-2.7
재난 정보통신 체계기술	미국	77.3%	4.2년	85.8%	2.4년	8.50%	-1.8
복합재난 예측·대응기술	미국	66.7%	5.5년	89.0%	2.6년	22.30%	-2.9
기반시설 유지 및 복구기술	미국	70.8%	7.9년	86.5%	5.3년	15.70%	-2.6

2. 간접효과

- 본 연구는 다양한 재난 시뮬레이터들의 집합을 구성하고 이들 사이의 상호운용성을 확보하는 플랫폼을 개발하여 개발자 측면에서 분산형 시뮬레이션 오픈 플랫폼을 통한 호환성을 확보할 수 있게 함으로써 개별 시뮬레이터의 활용도를 극대화하며 향후 재난 발생 및 대응 요소에 확장될 수 있는 가능성을 가진 시뮬레이션 환경 아키텍처가 될 수 있음.
- 또한 본 연구에서 구축된 데이터베이스는 향후 국가재난관리시스템 고도화 및 건물 방재 시스템 등에도 확장 적용 가능하며, 분산형 시뮬레이션 기법은 건물 유지관리 및 환경성 분석 등의 시뮬레이션을 필요로 하는 타 분야에 활용 가능할 수 있을 것으로 기대됨.

제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석

1. 직접효과

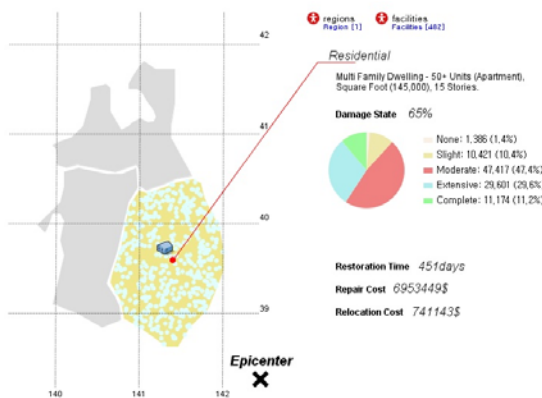
- 단일 시뮬레이터를 통한 재난 피해 분석은 정보의 양이 제한적이고, 또한 요구되는 다양한 정보를 처리할 수 있는 시뮬레이터라 하더라도 처리 속도가 늦어져 신속한 대응이 요구되는 재난 상황에 적합하지 않음.
- 본 연구는 시간의 흐름에 따른 재난양상의 변화 등을 수용하여 1차, 2차, 3차 로 이어지는 연쇄적인 재해 특성을 반영하는 시뮬레이션을 구현 함. 따라서 단일 시스템을 통한 구현 보다 많은 정보를 기반으로 한 신뢰성 높은 분석이 가능하며 이러한 결과를 바탕으로 인명피해 및 재산피해를 경감시킬 수 있음.
- 특히 본 연구는 재난 후 시설물 피해 분석 진단시간을 단축하고, 시설물 복구 자원 분배 공정을 개선하여 복구계획 수립의 지연을 최소화하기 위한 유용한 정보를 제공할 수 있는데 본 연구의 소프트웨어 등록 성과 중 하나인 ‘시설물 피해 복구비용 산정 프로그램’을 기반으로 본 연구를 통해 기대되는 재난·재해 복구비용 절감을 평가할 수 있음.
- ‘시설물 피해 복구비용 산정 프로그램’은 시설물 특성별(재료/구조/유형), 재실자 특성별(인원/구성), 재난 피해 단계별(slight/moderate/extensive/complete) 단위복구비용을 산정하는 것을 목적으로 하며 총 복구비용은 단위복구비용과 면적, 복구기간을 곱해 계산됨.
- 단위복구비용은 파손된 시설물을 복구하는데 필요한 직접비용인 수리비용(Repair Cost)과 시설물 복구가 완료될 때 까지 발생하는 간접비용인 이주비용(Relocation Cost)로 구성됨.
- 다음 [표 4-2]는 주거시설, 상업시설, 산업시설의 대표 시설물 유형을 완전히 새로 지을 때 발생하는 교체비용(Replacement Cost)의 예시이며(RSMeans Square Foot Costs, 2010), 이러한 교체비용과 시설물 피해 단계별 수리비용/교체비용 비를 통해 시설물 수리비용을 산출할 수 있음(FEMA HAZUSMH Technical Manual, 2003).
- 이를 기반으로 2011년 동일본 대지진 당시 Iwate 지역의 피해복구비용을 산정한 ‘시설물 피해 복구비용 산정 프로그램’의 결과는 다음 [그림 4-1]과 같음.
- 이 때 본 연구를 통해 시설물의 피해정도나 지역 내 기반시설 피해로 인한 자원 수급의 지연 (본 연구에서는 전기로 한정함)을 고려하여 복구 지연을 약 9주가량 개선시켰다고 가정하면, 각각의 시설물 유형별 복구비용 절감은 다음 [표 4-4]와 같음.
- 예시 지역인 Iwate는 전체 시설물 중 주거시설 56.9%, 상업시설 16.5%, 산업시설 26.6%로 구성되어있기 때문에 전체 복구비용 절감은 약 11.37%임. **[3차년도 양적성과 20-1]**
- 이 밖에도 본 연구개발 성과의 국내 적용성을 높이기 위해 통계청 자료를 기반으로 국내 지역 시설물 구성 DB를 구축하였으며, 이를 통해 재난으로 인한 피해 평가가 진행된 지역의 복구비용 도출을 용이하게 함.
- 다음 [표 4-3]은 부산지역의 시설물 구성이며, 각 주거, 상업, 의료, 공공시설은 대표적으로 주택(호), 유통업체(점포수), 종합병원(개소), 학교(개소)를 나타냄.
- 향후 관련 피해평가 데이터가 추가적으로 확보되어 복구비용 절감 사례가 다수 축적된다면 복구비용 산정에 있어 정량적인 수치의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 사료됨.

[표 4-2] 대표 시설물의 교체비용 예시

Type	Structure	Stories	SF	Means Cost/SF (\$)
RES	Concrete Shear Walls	15	145,000	208.7
COM	Concrete Shear Walls	8	80,000	165.65
IND	Steel Moment	3	90,000	123.35

[표 4-3] 복구비용 산정을 위한 시설물 구성 예시 (부산)

Area (km ²)	Population	Type	
769.86	3,563,578	RES	1,268,724
		COM	31,812
		MED	27
		PUB	573



[그림 4-1] 시설물 피해 복구비용 산정 프로그램 실행화면

[표 4-4] 기대되는 시설물 복구비용 절감

Type	Damage (%)	Simulation Result			Restoration Cost Reduction
		Repair Cost	Relocation Cost	Restoration Time	
RES	63.54	8,702,320	871,246	530	12.6
COM	71.49	5,538,368	629,191	694	9.44
IND	17.04	1,032,933	161,499	158	9.96

2. 간접효과

- 본 연구의 개발 성과는 별도의 시뮬레이션 프로그램을 하나의 플랫폼에서 구동함으로써, 프로그램간의 호환 및 데이터 공유와 관련한 문제점을 최소화하며 데이터 교환의 표준 체계를 제공하여 재난 관리의 정확성, 일관성, 객관성 확보를 도움.
- 따라서 관련 기술업무의 품질을 상향평준화하고 기존 업무방식에 비해 효율성을 향상시킬 수 있으며, 이는 기술 인력의 투입시간 감소로 이어져 절약된 시간과 자원을 다른 고부가가치 업무에 활용하여 경제적 이익을 창출해낼 수 있음.
- 또한 재난 예측/대응/복구와 관련한 소프트웨어의 시장 규모는 국내 약 1,100 억 원, 세계 약 29,000 억 원에 달함 (소방방재청 2012). 이에 본 연구의 신규시장 창출이 기존 시장의 30% 규모라고 가정하고, 재난 관련 SW 시장의 연간성장률을 5%, 본 기술의 국내 시장점유율을 20%, 국외 시장점유율을 10%로 가정하면, 2018년 시장창출효과는 다음과 같음.
 국내: $1,100\text{억원} \times (1+0.05)^6 \times 30\% \times 20\% = 88 \text{ 억 원}$
 세계: $29,000\text{억원} \times (1+0.05)^6 \times 30\% \times 10\% = 1,166 \text{ 억 원}$
- 이 밖에도 미국 국립건물과학연구소에서는 사고 예방에 1\$ 투자 시 약 3.65\$의 사고 예방 효과가 있다 주장하므로, 이를 본 연구에 투자된 연구개발비용(80,7000,000원)을 기준으로 산정한다면 총 2,945,550,000원의 사고 예방 효과가 있을 것으로 추정할 수 있음.

제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

1. 직접효과

- 현행 국내 재난 관리체계는 국민안전처를 중심으로 각종 재난관련 조직이 분산되어 일부 재난대응을 하고 있는 형태로, 재난 발생 시 개별 기관에 분담된 상황처리에만 주력하고 있는 실정이기 때문에 효율적인 재난 관리가 이루어지지 않고 있음.
- 재난 대응 매뉴얼 역시 신속한 초동 대응 체계 구축을 목적으로 하고 있으나 중앙정부와 지방자치단체를 동시에 관리할 수 있는 연계방안 부족해 대응 체제의 재정비가 요구됨.
- 따라서 국내에서도 현장 중심의 재난대비시스템을 구축하고 표준화된 중앙지휘체계가 필요하며 더불어 지역단위 재난대비활동을 통한 방재역량강화가 요구됨.
- 이에 본 연구는 분산형 재난대응/관리 시뮬레이션의 미래 활용방안 제시 전략 중 하나로 본 연구의 핵심기술인 ‘분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템’의 최종 사용자별 사용 매뉴얼 구성을 아래 [표 4-5]와 같이 구축함.

[표 4-5] 핵심기술 최종 사용자별 사용 매뉴얼 구성

구분	항목	설명
공통	사용자 인터페이스 구성	시스템의 개요 및 주요 기능 (예시: 시뮬레이션 실행방법, 분석화면 등)
	연동 소프트웨어 목록	시스템과 연결되는 소프트웨어 목록 (예시: OpenSees, FDS, Anylogic 등)
	연동 데이터베이스 목록	시스템과 연결되는 데이터베이스 목록 (예시: 재난정보, 시설물정보, 복구비용 등)
	입출력 데이터 유형	시스템에서 입출력되는 데이터 목록 및 유형 (예시: 스프레드시트, HTML, 이미지 등)
정부, 공공기관	유관기관별 재난 재해 대응정보	시스템의 최종 입출력데이터 중에서 관련기관별로 사용할 수 있는 재난 재해 대응정보 (예시: 지자체별 주거시설 복구기간 추이 등)
소프트웨어 개발자	소프트웨어 구동환경	시스템과의 연동을 위한 소프트웨어 개발 환경 (예시: Java, C++, Fortran 등)
일반사용자	시설물 단위 재난 재해 대응정보	시스템의 최종 입출력데이터 중에서 일반 사용자가 사용할 수 있는 재난 재해 대응정보 (예시: 시설물 유형별 복구비용 등)

- 해당 매뉴얼은 재난 관리에 대한 새로운 자료 및 지식의 축적, 보급 활동의 일환이며 상호협력 행정을 위한 기초자료임. 또한 재난 대응 매뉴얼을 통해 재난관리 조직 및 구성원의 전문성을 강화할 수 있으며 지역주민의 재난대응 및 훈련 참여를 유도할 수 있음.
- 이 밖에도, 재난관리자나 일반 시설 거주자 대상 교육 훈련 프로그램 개발에 활용될 수 있으며 특히 국내 재난 대응 대책 중 지진방재 종합훈련 프로그램 개발 및 훈련 실시, 다중이용시설 등 취약시설에 대한 예방 및 경계활동 강화, 대형 화재·폭발사고 예방을 위한 제도 기준 제정 및 정비, 유치원/초/중/고등학교 등 대국민 소방안전프로그램 운영 등에서 활용성이 극대화 될 것으로 예상됨.

2. 간접효과

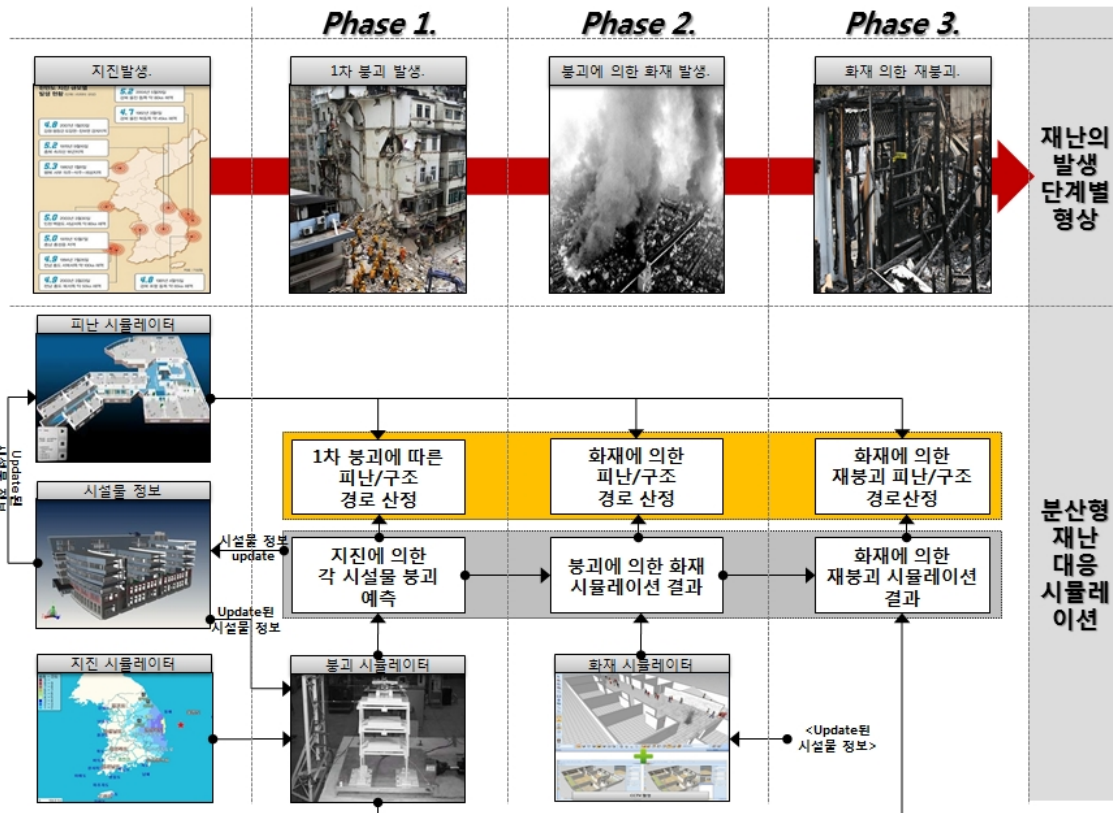
- 우리나라는 1995년 성수대교 및 삼풍백화점 붕괴사고를 계기로 국가안전관리정보화기본계획을 수립하였으며, 국가안전관리사업, 국가안전관리 고도화를 위한 정보화 발전계획 등을 통해 ‘국가재난관리정보시스템(National Disaster Management System)’을 구축하고, 이를 지속적으로 발전시키고 있음.
- ‘국가재난관리정보시스템(NDMS)’은 재난 예방, 대비, 대응, 복구 등의 전 과정을 정보화하여 대국민 재난안전 서비스를 제공하는 것을 목적으로 하고 있으며, 이는 국가차원의 안전관리를 위한 정보망 구축을 위한 계획의 토대를 제공하였음. 그러나 이와 같은 정부차원의 지속적인 R&D 투자 확대에도 불구하고, 첨단기술을 접목한 사전예방 중심의 재난관리기술의 절대량은 미미한 수준임.
- 따라서 본 연구는 변화된 재난환경에 대응하는 맞춤형 전문 인력을 양성하고, 재난정보의 공동 활용체계를 구축하여 긴급 상황 발생 시 신속한 의사결정을 지원하기 위한 핵심기술 및 요소기술을 개발하여 예방중심의 선제적 재난관리 및 재난 대응 컨트롤 타워 기능을 강화하려는 국가 재난관리 국정 과제의 정책적 노력의 효과를 극대화 함.
- 이는 국가차원의 위기대응능력을 향상시키는 데 기여함과 동시에 종합적이고 안전 성능 확보 중심적인 재난 대응으로의 사회 구조로의 전환을 지원함.

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

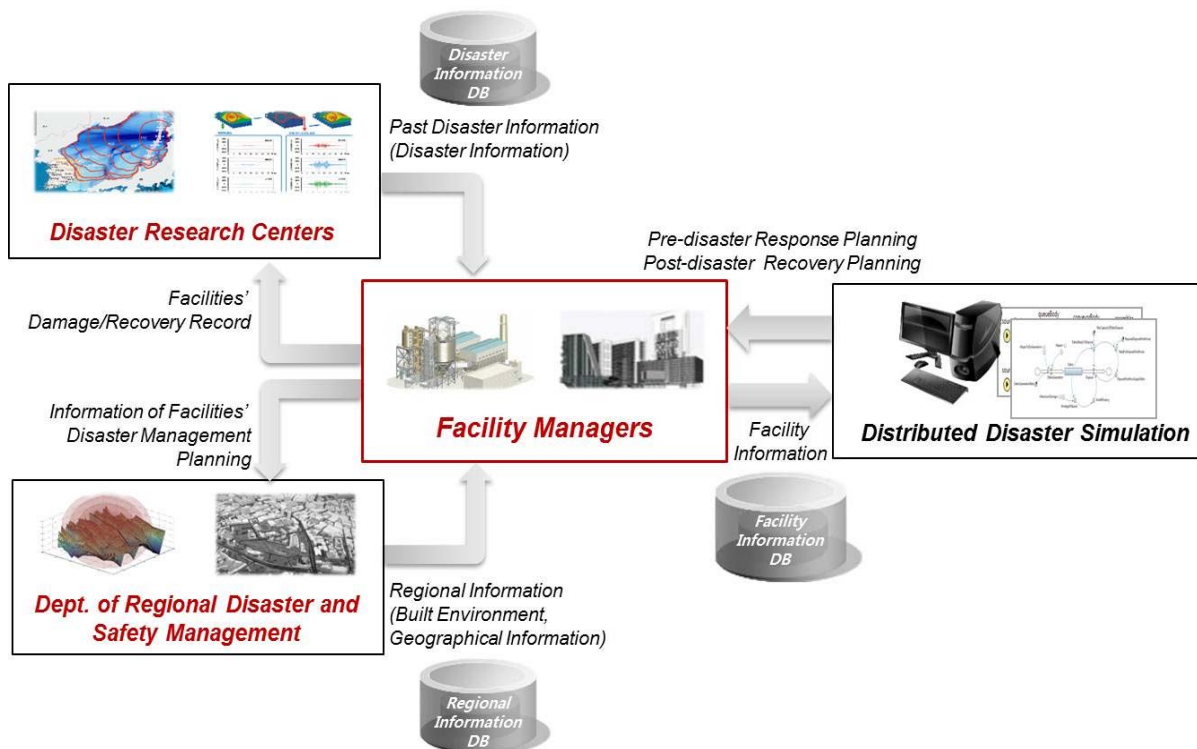
제1절 연구성과 향후 활용방안

1. 현장 적용 방안

- 본 연구 성과인 ‘분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템’은 최근 증가하고 있는 자연 및 인적 재난 발생 시 다양한 재난 피해 분석 기술 및 시뮬레이션들을 조합하고 분석 목적에 맞게 활용하여 기 개발된 우수한 기술들의 장점을 극대화하고 전천후 재난 대응 시스템으로 발전될 수 있음.
- 특히 향후 BIM 기술 및 센싱 기술과의 접목을 통해 개별 시설물의 속성정보에 기초한 맞춤형 재난 대응 기술을 개발하고 폭 넓은 현장 적용이 가능함.
 - 1) 사전예측 및 대응계획 수립: BIM 내 포함된 시설물의 속성정보를 활용하여 건축물의 현황정보 및 재난 상황, 재난 발생 시 피해양상을 통합 관리함으로써 재난에 따른 시설물 피해 예측을 효율적으로 수행하고, 재난 발생에 대비한 시나리오를 통해 재난 발생 시 신속한 대응책 수립이 가능함. 또한, BIM모델 연동형 시뮬레이션을 통해 구조물 변화를 사전에 예측함으로써, 피난, 구조, 복구계획에 대한 매뉴얼을 제공하고, 재실자의 피난 및 대응 훈련을 실시할 수 있음.
 - 2) 실시간 재난 대응: 화재, 지진, 태풍 등의 발생여부 및 강도를 감지하는 센싱 기술을 활용함으로써 실시간 재난 데이터에 기초한 신속하고 효율적인 피난 탈출 구 및 동선 안내 등을 지원하여 인명 피해를 최소화하는데 사용 가능함. 또한 연쇄재난으로 인해 발생 가능한 피해를 예측하고 사전 대응하여 인명 피해뿐만 아니라 각종 재산 피해를 최소화하는데 유용하게 활용 가능함.
 - 2) 사후 대응: 재난 정도에 따른 시설물의 피해를 빠르게 시뮬레이션 함으로써 구호 자원 및 장비를 효율적으로 조달할 수 있으며, 재난확산 방지대책을 수립할 수 있음. 또한, 시설물의 변위 및 붕괴 양상에 따라 긴급 인명구조가 필요한 장소를 선정하여 신속한 구조작업을 지원함.
 - 3) 복구 및 원인분석: 복구작업시 부족한 복구자원에 대한 최적 사용이 가능하게 하고, 복구비용을 절감할 수 있으며 재난의 원인 및 재난상황의 확인결과를 분석하여 추후 발생 가능한 재난의 예방책을 수립하기 위한 자료로 활용 가능.
- [예시] 지진이 발생할 것으로 예상되는 경우, 지진의 강도를 예측하여 1차적인 피해 수준을 예측함. 이를 바탕으로 1차 붕괴의 정보를 다음 시뮬레이터로 전송하여 피난 경로를 제공. 1차 붕괴의 결과로 화재가 발생 할 수 있으며, 화재 발생 시 화재 관련 시뮬레이터를 구동하여 2차적인 피난 경로를 제공함. 화재의 결과로 약해진 구조물의 재붕괴가 발생할 경우 1차 붕괴 및 화재에 대한 정보를 지진 및 구조해석 시뮬레이터를 통해 분석함. 이러한 순차적인 정보의 상호 교환을 통해 시간의 흐름에 따라 변하는 재난의 형태에 대응할 수 있음. 또한 최종적으로 통합된 정보를 기반으로 복구 시나리오를 설정 할 수 있으며, 일련의 과정이 종료된 후에는 모든 정보를 저장하여 재난의 예방책을 수립하는 자료로 활용 가능함 [그림5-1].



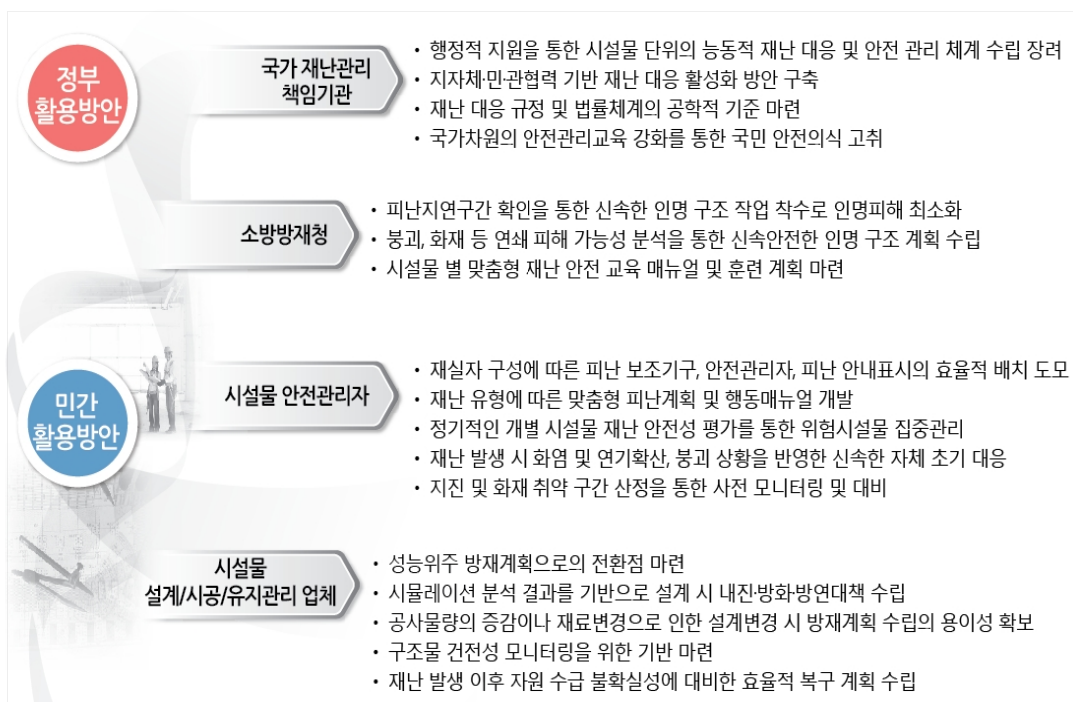
[그림 5-1] 분산형 재난 시뮬레이션의 예시



[그림 5-2] 연구 결과의 활용 방안

2. 실용화 · 제품화 방안

- 본 연구의 결과물인 ‘분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리 시스템’은 대형 재난의 발생 시 요구되는 신속한 대응을 위해 기존에 개발된 다양한 목적의 시뮬레이션 소프트웨어의 상호 연동성 및 호환성을 확보할 수 있음.
- 따라서 이는 개별 시스템의 사용자뿐 만 아니라 [그림 5-3]과 같이 복합 재난관리 기관, 시설물 관리자, 지역 안전관리본부 등의 협력을 위해 향후 활용 가능하며, 각 시스템 간 신속한 데이터 교환 및 플랫폼 확장을 통해 주요 시설물을 넘어 지역 단위의 재난 대응 및 복구를 위해 활용 가능할 것으로 예상됨.
- 이러한 기술적 지원은 재난 유형에 따른 맞춤형 피난계획 및 행동매뉴얼 개발의 기초 자료로도 활용될 수 있으며, 특히 국가차원의 안전관리규정이나 재난대응 법률체계의 공학적 기준을 마련하는데 활용될 수 있음.
- 본 연구에서 개발된 기술은 특정 데이터베이스 및 모듈의 활용에 그치지 않고, 향후 확장된 시뮬레이션 플랫폼과의 추가 연동을 통해 국내에서 수행한 우수 연구 성과 및 기술들의 활용성을 증진시킬 수 있음. 또한, 기상청에서 제공하는 실시간 지진데이터, 한국수력원자력 중앙연구원 및 한국 원자력안전기술원에서 제공하는 원전 인근 지역의 지진 감시 데이터를 활용하여 더욱 신뢰성 높은 국내 데이터를 수신하고, 분석하는데 활용 가능함.
- 또한 본 연구의 결과물은 시스템 기술의 성숙 정도에 따라 출시-확장의 단계로 구분되며 단계별 수요자, 시뮬레이션 결과물의 최종 사용자의 정의, 시스템 활용 정도의 차별화를 두어 다음 [표 5-1]과 같이 활용 가능함.
- 특히 본 연구의 최종 수요자 중심 사용성 평가는 실용화를 위한 현실적이고 구체적인 계획 및 접근법을 수립하는데 중요한 자료로 활용 가능함.



[그림 5-3] 연구 결과의 정부/민간 최종 수요자

[표 5-1] 시스템 성숙 단계에 따른 실용화 및 제품화 방안

분류	시스템 출시 단계	시스템 확장 단계
정의	일차적으로 시스템이 완성된 상태이며, 재난의 예측 및 발생 후 대응이 가능한 시스템	구축 및 출시 단계의 기능을 모두 포함하며, 시스템의 사용자의 범위가 확장된 단계이며, 대부분의 재난에 대한 분석 및 대응이 가능한 시스템
기술 특성	개별 페더레이트의 완성을 통한 재난 시나리오에 따른 페더레이션 조합 옵션 제공 BIM을 통한 재난 발생 시 시설물 사용자에게 대한 대응 지침 제공 기능 시각화 정보를 포함한 직관적 재난 상태 확인 가능	[이전단계의 기능을 포함] 다양한 시나리오 추가기능 신속한 재난 대응 및 복구를 위한 시뮬레이션 기능 복구 및 원인 분석 기능 개별 시설물과 광역구역을 동시에 발생하거나 시나리오로 추가된 재난 시나리오의 데이터화를 통한 예방책 수립 자료 제공
실용화 방안	출시 단계의 시스템은 예상되는 다양한 재난에 대한 시나리오를 포함하고 있으며, 각 시나리오의 설정 목적에 따른 분석이 가능함 숙련된 전문가 층이 아니더라도 시스템이 가지고 있는 시나리오를 통해 재난의 경과를 예측하거나 대응할 수 있으며, 보다 쉬운 이해를 위해 BIM기반의 시설물 정보와 시각화된 정보 제공 또한 재난의 예측이라는 측면에서 전문가들에게 오픈 플랫폼을 제공하여 다양한 시뮬레이터들을 동시에 조합함으로써 제품화	분산형 시스템을 통해 개별 건물로 이루어진 구역의 집합을 구성하여 대규모 분석이 가능함을 제시하고, 이를 바탕으로 지자체 등의 방재 관련 부서에 제공 다양한 시나리오를 기반으로 발생한 재해 및 발생이 예상되는 거대 재해를 예측할 수 있는 시스템을 기반으로 정부에서 운영하는 대형 방재 관리 단체의 시스템 플랫폼으로 제공함 축적된 자료를 기반으로 재난 대응 매뉴얼을 작성할 수 있음. 이를 바탕으로 재난에 대한 일반 국민들의 교육 및 인식 제고에 활용
수요자	재난 연구자 및 연구단체 시설물 구조 및 안전 연구자 및 연구 단체 개별 시설물 관리자	[이전단계의 수요자를 포함] 소방방재청 등의 재난 대응 관리자 및 기관 광범위한 구역 혹은 국가 차원의 재난 관리자
최종 사용자	일반 재난/방재 연구자 및 연구 단체 재난/방재 예측 및 대응 관리자 및 관리 단체 재난 대응 관리자 시설물 설계/시공/유지관리 업체	시설물 사용자 모니터링 및 대응 관리자 방재 관련 연구자
협력 대상자	재난 연구자 및 연구 단체 개별 시뮬레이션 개발자 및 사용자 지자체 및 국가 재난관리 책임기관 기후 및 지진 등의 자연재해 예측 및 관측 연구소	[이전단계의 사용자를 포함] 국가 단위의 방재청

3. 관련 시장 홍보 및 수출 방안

- 본 연구진은 국제협력연구 및 연구개발 성과물을 홍보할 수 있는 장을 마련하고자 연구 기간동안 총 3회의 국제 회의 및 국제 워크숍을 진행하였음.
- 이를 통해 국내외 학계에는 본 국제협력연구의 내용을 알림으로써 분산형 시뮬레이션 기술 분야의 연구를 선점하는 기회가 되었으며, 본 연구의 추가적인 진행을 위해 첨단 IT와 건설기술을 융합한 연구를 수행할 수 있는 다수의 전문가를 요함에 따라 요소기술인 시뮬레이터 분석, RTI 객체모델 개발, BIM 활용기술 및 시각화 기술을 보유한 전문가들에게 다양한 조언을 받을 수 있는 자리가 되고자하였음.
- 또한 당해연도에는 국민안전처 주최의 ‘대한민국 안전 산업박람회’ (2015년 11월 26일)에 참가하여 분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템에 대한 동영상 시연을 수행했으며, 개별 시뮬레이션 모듈의 연계방안과 시각화 기술의 도입 등에 대해 발표하였음.
- 이를 통해 건설 분야 뿐 아니라 재난 관리 분야의 유관기관 연구진들에게 연구 협력과 융합의 통로 역할을 수행할 수 있었음으로 사료되며, 특히 화재 시 유독가스 확산과 피난 모델 관련하여 활용성을 인정 받고 연구 개발 진행의 대내외적 신뢰도를 증대시켰음.
- 추가적으로 본 과제의 사전점검회의에서 연구개발 최종 성과물인 ‘분산형 재난 시뮬레이션 오픈 플랫폼’은 시뮬레이션 분야의 표준기술명세를 기반으로 구축되었기 때문에 현재 기관들이 보유하고 있는 다양한 목적의 시뮬레이션 도구를 사용할 수 있어 경제성, 유지보수성, 운용성 등의 측면에서 수요가 높을 것이라는 의견이 있었으며, 관련 시장에 수익을 창출할 수출 모델이 될 수 있을 것으로 평가 받았음.
- 따라서 국내 뿐만 아니라 해외의 경우, 특히 국제공동연구기관인 Univ. of Michigan 과 근접한 USGS 미시간 주 앤아버 지사와의 협력을 통해 그들이 제공하는 데이터를 활용한 지진 피해 산정 및 복구 시뮬레이션의 필요성을 알리고, 향후 분석 범위 및 활용성 확장에 대한 검토가 이루어질 경우 통한 연구 성과의 해외 수출 가능성 분석이 가능할 것으로 예측함.

제2절 추가연구 필요성

- 본 연구는 분산형 시뮬레이션 기반 재난대응 및 관리 시스템의 세부 모듈 및 상호연동, 재사용, 확장이 가능한 기술적 플랫폼을 제공함으로써 연구 계획 단계에서 설정한 목표를 달성하였으나, 추가 연구를 통해 연구 개발 성과의 적용성을 한 단계 넓힐 수 있을 것으로 사료됨.
- 개발된 시스템의 본 연구에서 제안한 시스템 활용 및 확장 방안에 기반한 추가 연구를 통해 향후 더 다양한 단계 및 유형의 재난 대응 관리를 위해 적용되고, 더욱 넓은 범위의 분석 대상을 고려할 수 있음.

가. 재난 유형 및 단계 확장을 고려한 추가 연구

- 본 연구에서는 주요 재난 유형을 지진 및 화재로 설정하고, 이로 인한 피해가 시설물 및 지역 미치는 영향을 대응 시뮬레이션과 연동하여 결과물로 도출하나, 최근 다양한 유형의 자연 및 인적 재난이 존재하여 이에 따른 피해를 사전 예측하고 대응 방안을 마련하는 것이 필요함.
- 따라서, 확장이 가능한 본 연구의 시뮬레이션 플랫폼을 활용하여 추가 연구에서는 태풍, 산사태, 홍수 등 재난 피해 시뮬레이터의 연동을 통해 더욱 다양한 재난 유형을 고려한 피난, 전력계통 손상, 시설물 복구 등의 분석을 수행할 필요가 있음.
- 또한, 본 연구에서는 지진 규모, 진원지의 위치 등의 기초 정보를 토대로 센싱한 지진 데이터 및 사용자가 설정한 발화지점, 열방출율 등에 기반한 화재 시뮬레이션 데이터를 통해 지진 및 화재 피해를 예측하고, 이를 피난, 전력계통 및 시설물 복구 시뮬레이션에 활용함.
- 그러나 지진 발생 시 해당 지역 또는 시설물에 영향을 미치는 지진에 대한 개략적 정보가 실시간으로 제공되지 않을 경우 정확한 센싱을 통한 계획 수립에 한계를 가질 수 있음. 화재의 경우 특히 본 연구에서 활용하는 사용자 설정 발화지점, 열 방출율의 정보는 실시간 정보가 아닌 재난 발생 이전 단계에서 사전 대비용으로 활용 가능한 한계를 가짐.
- 이에 향후 시설물 차원에서 실시간 재난 데이터를 감지하는 가속도계 및 화재감지기 등을 연동하는 추가 연구를 수행할 경우, 재난 발생 직후 신속하게 시스템을 자동 가동하고 이동 가능 경로 및 시설물/지역 피해 정도를 제공함으로써 재난 대응 및 관리 시스템의 정확성 및 사용성을 증진할 수 있음.

	본 연구 범위	추가 연구 범위	기대효과
재난 유형	지진 및 화재 피해 분석	태풍, 산사태, 홍수 등 추가 시뮬레이션 연동	다양한 재난 유형을 고려한 재난 대응 관리 가능
재난 데이터 입력 방식	지진: USGS 서버 센싱 데이터 기반 화재: 사용자 입력 발화정보 기반	가속도계, 화재감지기 연동	시설물 차원에서 실시간 재난 데이터 감지 및 신속한 분석 결과 도출 가능

나. 분석 대상 확대를 위한 추가 연구

- 본 연구에서 개발한 지역 및 개별 시설물 대상의 피난, 전력계통 및 시설물 피해 산정/복구 시뮬레이션 모듈 역시 향후 BIM, GIS 등의 DB와의 연동을 고려한 추가 연구를 통해 더욱 다양한 시설물과 현실적 상황을 반영한 지역 범위의 분석을 수행할 수 있음.
- 현재 화재-피난 시뮬레이션의 경우 사용자가 좌표값으로 사전 설정한 시설물 내 평면 정보에 의해 시뮬레이션이 구동되며 FDS 및 Anylogic 소프트웨어에서 각각 시설물 정보를 입력해야 하는 한계점을 가짐.
- 이러한 본 연구의 한계점은 BIM 데이터와 재난 피해 및 대응 시뮬레이터와의 상호 연동을 통해 극복 가능하며, 본 연구에서 제안한 데이터 연동 체계를 기반으로 실질적인 데이터 교환 및 시뮬레이션 내 표현과 관련한 추가 연구의 진행이 가능함.
- 이를 통해 시설물마다 상이한 속성 정보를 가진 평면, 재료, 구조 등의 변환이 BIM 내 이루어질 경우 연동된 재난 피해 및 대응 시뮬레이터까지 자동으로 반영되어 다양한 설계 대안의 검토가 용이할 것으로 예측되며, 단일 시스템에서 여러 가지 시설물의 재난 대응 관리 체계 구축을 지원할 수 있음.
- 또한, GIS 데이터와 전력계통 피해 및 복구 분석 시뮬레이션을 연동하는 추가 연구를 통해 전력계통의 위치 및 용량의 고려를 넘어 지형, 인구밀도, 전력 수요 등 지역 자체의 속성 데이터를 분석에 반영하여 더욱 현실성 높은 대응 방안을 도출할 것으로 기대됨.
- 이와 같은 추가 연구는 다양한 지역의 특성을 고려하여 지자체 단계에서 각종 재난 유형으로 인한 피해를 사전 예측하고, 이에 대한 자원 수급 및 비상 운영과 같은 계획을 효율적으로 수립하는 효과를 가짐.

	본 연구 범위	추가 연구 범위	기대효과
분석 대상	사용자가 미리 정보를 입력한 개별 시설물	BIM과 FDS, 피난 시뮬레이션, OpenSees, 구조체 복구 시뮬레이션 간 상호연동을 통한 자유로운 데이터 교환	시설물 정보를 수동 입력하지 않고 다양한 시설물의 정보 입력 및 활용 가능
	지진으로 인한 피해가 예측되는 지역 및 시설물	GIS와 지진, 전력계통 복구 시뮬레이션 간 상호연동을 통한 지역 특성 정보 입력	지역의 다양한 속성 정보 (인구밀도, 지형 등) 를 포함한 비상 운영, 및 복구 계획 수립 가능

제6장 참고문헌

- [1] 국가과학기술위원회(2013). 재난 및 안전관리기술개발 종합계획
- [2] 국민안전처(2015). 소방행정자료 및 통계
- [3] 기상청 (2014). 국내 및 세계 지진발생 현황
- [4] 미래창조과학부(2014). 2014년 기술수준평가 보고서
- [5] 심준용, 위성혁, 김세환 (2011). “HLA기반 시뮬레이션 소프트웨어 개발을 위한 분산객체 통신 프레임워크 설계 및 구현”, 한국시뮬레이션학회 논문지, 20(4), 97-104.
- [6] 이상헌, 이영구 (2002). “상위체계구조에 근거한 수송이동관리 시제 모형”, 한국시뮬레이션학회 논문지, 11(2), 31-43.
- [7] 임동순 (2005). “HLA/RTI 기반의 페트리 넷 분산 시뮬레이션 모델”, 한국시뮬레이션학회 논문지, 14(1), 19-32.
- [8] 한국과학기술기획평가원 (2009). 국가연구개발사업의 파급효과 추정방안에 대한 제언
- [9] 한국과학기술기획평가원 (2014). ISSUE PAPER - 국민안전처 신설에 따른 재난안전 R&D 추진체계 개선방향
- [10] AbouRizk, S. (2010). “Role of Simulation in Construction Engineering and Management.” Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 136(10), pp. 1140-1153.
- [11] Adelantado, M. (2004). “Rapid Prototyping of Airport Advanced Operational Systems and Procedures through Distributed Simulation.” Simulation, 80(1), 5-20.
- [12] Alvanchi, A., Lee, S., and AbouRizk, S. M. (2009). “Modeling Architecture for Hybrid System Dynamics and Discrete Event Simulation.” Proceedings of the 2009 Construction Research Congress, ASCE, Reston, VA, 1290-1299.
- [13] Anylogic Company Website. “Anylogic Help.” < <http://www.anylogic.com/anylogic/help/>> (Jun. 22, 2014)
- [14] Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., and Nicol, D. M. (2005). Discrete-event System Simulation, 4th ed, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 367-398.
- [15] Cooke, D. L. (2003). “A System Dynamics Analysis of the Westray Mine Disaster.” System Dynamics Review, 19(2), 139-166.
- [16] 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.
- [17] 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
- [18] Dimakis, N., Filippoupolitis, A., and Gelenbe, E. (2010). “Distributed Building Evacuation Simulator for Smart Emergency Management.” The Computer Journal, 53(9), 1384-1400.
- [19] Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2003). “HAZUS-MH MR4 Technical Manual.” <http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1716-25045-6422/hazus_mr4_earthquake_tech_manual.pdf> (Jan., 19, 2014)
- [20] Fujimoto, R. M. (1998). “Time Management in the High Level Architecture.” Simulation, 71(6), 388-400.

- [21] Fujioka, M., Ishibashi, K., Kaji, H. and Tsukagoshi, I. (2001). "A Multi-agent based simulation Model for evacuees escaping from Tsunami disaster : evaluate the evacuees escaping program in Fujisawa city, Japan", 한국시뮬레이션학회 논문집, 306-312.
- [22] Haimes, Y. and Jiang, P. (2001). "Leontief-Based Model of Risk in Complex Interconnected Infrastructures." J. Infrastruct. Syst., 7(1), 1 - 12.
- [23] 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.
- [24] Hu, W., Liu, H. and Yang, Q. (2009), "HLA-Based Emergency Response Plan Simulation and Practice over Internet", Lecture Notes in Computer Science, 1203-1211.
- [25] Ichikawa, M., Tanuma, H., Koyama, Y. and Deguchi, H. (2005), "A Disaster Relief Simulation Model of a Building Fire", Lecture Notes in Computer Science, 33-41.
- [26] Kanno, T. et al. (2006). "A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data." Bulletin of the Seismological Society of America, 96(3), 879 - 897.
- [27] Katsanos, E. I., Sextos, A. G., and Manolis, G. D. (2010). "Selection of Earthquake Ground Motion Records: A State-of-the-art Review from a Structural Engineering Perspective." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(4), 157-169.
- [28] 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.
- [29] Kovel, J. P. (2000). "Modeling Disaster Response Planning." Journal of Urban Planning and Development, ASCE, 126(1), 26-38.
- [30] Law, A., and Kelton, W. D. (2006). Simulation Modeling and Analysis, 3th, McGraw-Hill, pp. 1-11.
- [31] Lee, S., Han, S., and Pena-Mora, F. (2009). "Integrating Construction Operation and Context in Large-Scale Construction Using Hybrid Computer Simulation." The Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 23(2), 75-83.
- [32] McLean, C., Riddick, F., and Lee, Y. T. (2005). "An Architecture and Interfaces for Distributed Manufacturing Simulation", Simulation, 81(1), 15-32.
- [33] Munich Reinsurance Company (2004), Megacities - Megarisks: trends and challenges for insurance and risk management, Munich Reinsurance Company, pp. 76-77.
- [34] Noulard, E., Rousselot, J., and Siron, P. (2009). "CERTI, an Open Source RTI, why and how.", Spring Simulation Interoperability Workshop, 23-27.
- [35] National Institute for Research Advancement of Japan (NIRA) (2013). "Status of Recovery and Current Problems in Three Disaster-hit Prefectures: What the Data Tells Us Indexes for Recovery and Reconstruction following the Great East Japan Earthquake (IV)." <http://www.nira.or.jp/pdf/1301english_summary.pdf>(Jul.08,2014).
- [36] National Police Agency of Japan (NPA) (2013). "Damage Situation and Police Countermeasures associated with 2011Tohoku district-off the Pacific Ocean Earthquake." <http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo_e.pdf>(Aug.12,2013).

- [37] Noulard, E., Rousselot, J., and Siron, P. (2009). "CERTI, an Open Source RTI, Why and How." Spring Simulation Interoperability Workshop, 23-27.
- [38] OpenSees Website. "OpenSees Example Manual." <http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Examples_Manual> (Aug.28,2013)
- [39] Pachakis, D. and Kiremidjian, A. S. (2003), "The Use of Simulation in Disaster Response Planning and Risk Management of Ports and Harbors", TECHNICAL COUNCIL ON LIFELINE EARTHQUAKE ENGINEERING MONOGRAPH, ASCE, 425-434.
- [40] Peña-Mora, F., Han, S. Lee, S., and Park, M. (2008). "Strategic-Operational Construction Management: Hybrid System Dynamics and Discrete Event Approach." Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 134(9), 701-710.
- [41] Petty, M. D., and Windyga, P. S. (1999). "A High Level Architecture-Based Medical Simulation system." Simulation, 73(5), 281-287.
- [42] Portal Site of Official Statistics of Japan (e-Stat). "Statistics of Japan." <<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/eStatTopPortalE.do>> (Aug. 12, 2013)
- [43] Reconstruction Agency of Japanese Government (2011). "Basic Guidelines for Reconstruction in response to the Great East Japan Earthquake." <http://www.reconstruction.go.jp/topics/basic_guidelines_reconstruction.pdf> (Aug. 12, 2013)
- [44] Reconstruction Agency (RA) of Japanese Government (2013). "Current Status and Path Toward Reconstruction." <http://www.reconstruction.go.jp/english/130328_CurrentStatus_PathToward_FINAL.pdf>(May20,2013)
- [45] RS Means Company (2010). Square Foot Costs 31th Annual Edition, RS Means Company, Inc., Kingston, MA.
- [46] 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.
- [47] Steingart, D., Wilson, J., Redfern, A., Wright, P., Romero, R. and Lim, L. (2005), "Augmented Cognition for Fire Emergency Response: An Iterative User Study", In 1st International Conference on Augmented Cognition.
- [48] Taranath, B. S. (2005). Wind and Earthquake Resistant Buildings: Structural Analysis and Design, Drift Limitation, CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL.
- [49] Tohoku Electric Power Company(2011). "Annual Report 2011." <<https://www.tohoku-epco.co.jp/ir/report/pdf/ar2011.pdf>> (Jan., 13, 2014)
- [50] U.S. Defense Modeling and Simulation Office (DMSO) (2001). RTI 1.3-Next Generation Programmer's Guide Version 4. U.S. Department of Defense.
- [51] U.S. Geological Survey (USGS) Website. Real Time Data Feeds <<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/?source=sitenav>>(Mar.3,2014).
- [52] Williams, T. (2002). Modelling Complex Projects, Wiley, New York, NY.
- [53] Yotsukura, S. and Takahashi, T. (2009), "Framework of an Emergency Management System Using Different Rescue Simulators", Advanced Robotics, 23(9), 1233-1246.
- [54] Zhang, Y. et al. (2001). "Design and Implementation of Loose-coupling Visualization Components in a Distributed Construction Simulation Environment with HLA." Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, accepted April 15, 2011.