

디지털트윈 시스템 적용을 위한 공동구 복합재난 시나리오 구축

Establishment of Complex Disaster Scenario on the Utility Tunnel
Study for Digital Twin System Application정연하¹ · 김소담² · 서현정³ · 이호준⁴ · 송태정^{5*}Yon Ha Chung¹, So Dam Kim², Hyun Jeong Seo³, Hojun Lee⁴, Tae Jung Song^{5*}¹Junior Research Engineer, Department of Research Planning Division, KIT Valley, Seoul, Republic of Korea²Research Engineer, Department of Research Planning Division, KIT Valley, Seoul, Republic of Korea³Senior Research Engineer, Department of Research Planning Division, KIT Valley, Seoul, Republic of Korea⁴Lead Professional, Department of Research Planning Division, KIT Valley, Seoul, Republic of Korea⁵Principal Research Engineer, Department of Research Planning Division, KIT Valley, Seoul, Republic of Korea

*Corresponding author: Tae Jung Song, tjsong73@gmail.com

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study was to establish a complex disaster scenario that can comprehensively consider various disaster situations that may occur in the utility tunnel. **Method:** In order to comprehensively consider the correlation between disasters, a composite disaster scenario was derived from a combination of damage factors, respectively. A risk assessment was performed in order to derive the priorities of the scenarios. And based on the results, the priorities of complex disaster scenarios were set. **Result:** Based on the disaster cases in the utility tunnel, a plan was prepared for complex disaster scenarios centered on damage. A complex disaster scenario was specified using a semi-quantitative evaluation method for single and multiple disaster factors such as fire, flooding, and earthquake. **Conclusion:** The composite disaster scenario derived from this study can be used for the prevention and preparation of damage when the precursor symptoms of a disaster are detected. In addition, the results of this study are expected to be used as basic data for preparing strategic plans and preparing complex disaster response technologies to induce rapid response and recovery in case of emergency disasters.

Keywords: Utility Tunnel, Complex Disaster, Disaster Scenario, Cascading Effect, Preliminary Response, Damage Spread

요약

연구목적: 본 연구에서는 공동구에서 발생 가능한 다양한 재난 상황을 종합적으로 고려할 수 있는 복합 재난 시나리오를 구축하는 데 목적을 두었다. **연구방법:** 재난 간 상관관계를 포괄적으로 고려하기 위해 재난 원인요소와 피해요소의 조합으로 복합재난 시나리오를 도출했고, 위험성 평가 기반의 시나리오 우선순위를 도출했다. **연구결과:** 공동구 재난사례를 기반으로 피해 중심의 복합재난 시나리오 방안을 마련하였다. 화재, 침수, 지진 등 단일재난요소 및 다중재난요소들을 준정량 평가 방법을 활용하여 복합재난 시나리오를 구체화했다. **결론:** 본 연구에서 도출된 복합재난 시나리오는 재난의 전조증상이 감지된다면 피해 예방·대비에 활용될 수 있다. 또한, 본 연구에서의 결과물은 긴급 재난 발생 시 신속한 대응·복구를 유도할 수 있도록 전략 방안 마련과 복합재난 대응 기술 마련의 기초자료로써 활용이 기대된다.

핵심용어: 공동구, 복합재난, 재난 시나리오, 연쇄효과, 사전대응, 피해확산

Received | 17 November, 2022

Revised | 15 December, 2022

Accepted | 20 December, 2022

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

연구배경 및 필요성

“공동구”는 전기, 수도, 통신, 가스 등의 라이프라인을 지하에 공동으로 수용하여 지역사회의 주민생활과 산업시설운영 등 도시기능을 유지하기 위한 핵심시설이다. [국토의 계획 및 이용에 관한 법률 제2조 9항]에서는 공동구를 전기·가스·수도 등의 공급설비, 통신시설, 하수도시설 등 지하매설물을 공동 수용함으로써 미관의 개선, 도로구조의 보전 및 교통의 원활한 소통을 위하여 지하에 설치하는 시설물로 정의하고 있다. 해당 법률에서 제시된 바와 같이 도시핵심기반시설로써 기능하는 공동구에 재난이 발생하여 서비스가 중단된다면 도시기능을 정상적으로 유지할 수 없게 되고 치명적인 사회·경제적 손실을 초래된다. 공동구 재난으로부터 2차 피해를 방지하기 위해 공동구에서 발생 가능한 재난을 관리하는 기술에 대한 수요가 증가하고 있다.

공동구에서 발생 가능한 재난은 지진, 화재, 침수 등이 있으며 각 재난 분야에 대한 공동구 피해 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 선행 연구에 의하면 공동구의 경우 수용시설을 유지·관리하기 위한 케이블 등이 밀집되어 있어(Kim et al., 2022) 화재, 폭발사고 등의 잠재적 위험요소가 있으며 화재 시 유독 성분을 방출해서 초기 진압이 어려운 실정이다(Lee, 2010; Park et al., 2002). 공동구의 화재환경과 관련하여 국외에서는 화재감지시스템 개발, 연기온도 계측, 화염확산 및 연기 유동성, 연기 독성 평가, 그리고 제연시설에 관한 연구(Ishii et al., 1997; Zhang et al., 2016; Zhao et al., 2018a; Zhao et al., 2018b)가 진행 중이다. 지진에 의한 공동구의 피해는 단층운동(Faulting)에 의한 지반 변위와 관련성이 있어 지반 변위 산정에 관한 연구들이 주로 진행되고 있었다(Kim et al., 2021; O'Rourke et al., 2001; Owen et al., 1981; Rowe, 1992; Ueng et al., 2001; Yu et al., 2016). 침수의 경우 상수도관 파손으로 인한 침수 사례(여의도공동구 침수, 2000)가 있어 공동구 침수 관련 연구의 수요도 증가하고 있다. 국외에서는 유압모델시험을 통한 도심지역 지하공간 침수위험도를 산정한 연구(Toda et al., 2005)가 있으며, 국내에서는 수리모형실험 기반의 침수방지대책 영향 평가에 대한 연구(Shin et al., 2012)가 있으나 공동구 침수에 관한 연구는 미흡한 상황이다.

최근에서는 공동구 시설물의 안전관리를 통한 대형재해 예방을 위하여 재난 발생 가능성을 파악하여 위험성을 판단할 수 있도록 시나리오 기법을 적용하는 연구들이 수행되고 있다(Jung et al., 2019; Seo et al., 2019; Zhou et al., 2020). 구체적으로 화재 발생 시나리오를 구축하여 위험을 평가하는 연구(Seo et al., 2019), 베이지안 네트워크 기반 공동구 하수관로 복합재난 유발 메커니즘에 관한 연구(Zhou et al., 2020), 재난 빅데이터를 활용한 대형복합재난 피해확산예측 시스템 구현에 관한 연구(Jung et al., 2019)가 진행되고 있었다. 공동구를 대상으로 단일재난을 고려한 연구는 다양한 방법론이 적용되어 수행되고 있으나 2개 이상의 재난이 복합적으로 발생하는 통합적인 상황이 고려된 연구는 미흡한 실정이다. 공동구는 통신구, 전력구, 상수도 등 다양한 Lifeline으로 구성된 핵심기반시설로써 단일재난 피해 뿐만 아니라 다중피해가 발생될 우려가 높은 시설로 판단되며 화재, 지진, 침수 등의 피해가 어떻게 진행될 수 있는지에 대한 구체적인 위험 시나리오 구축 연구수행이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 복합재난 시나리오와 디지털트윈 시스템을 활용하여 공동구 재난상황을 통합하고자 했다. 공동구 및 지하시설 관련 재난 연구는 Table 1에 정리했다.

연구범위 및 목표

공동구에서는 수용시설 간 상호연계성에 따라 재난이 연쇄적 또는 동시다발적으로 발생할 수 있으므로 복합적인 재난 상

Table 1. List of previous studies related to disasters in utility tunnels

구분	선행연구	주요 결과
지진	• Kim et al.(2021)	• 국내 지진환경에 부합하는 지반변위 예측 방법 제안
	• O'Rourke et al.(2001)	• 다양한 지반 및 지지 조건에서 터널의 지진성능 평가 방법 제안
	• Owen et al.(1981)	• 대규모 지하구조물의 내진성능 평가 방법 제안
	• Rowe(1992)	• 지진대 터널공사에서 단층운동에 의한 지반변위의 영향 확인
	• Ueng et al.(2001)	• 대만 치치 지진(1999)으로 인한 터널 등 시설의 영향 확인
	• Yu et al.(2016)	• 중국 쓰촨성 지진으로 인한 롱시 터널의 피해와 단층대의 영향
화재	• Lee(2010)	• 공동구 화재 특수성 및 특징, 공동구 화재예방활동 및 진압대책 제안
	• Park et al.(2002)	• 지하공간 사고 조사 및 위험 요인 도출을 통한 위험성평가 시스템 제안
	• Ishii et al.(1997)	• 광섬유를 이용한 공동구 화재 감지 시스템 제안
	• Zhang et al.(2016)	• 공동구 화재위험 분석 및 예방 방법 제안
	• Zhao et al.(2018a)	• 공동구 단면 형상에 따른 화재 온도대 분석
	• Zhao et al.(2018b)	• 다양한 화재 조건에 따른 공동구 연기 온도 분포 실험
침수	• Toda et al.(2005)	• 유압모델시뮬을 통한 도심지역 지하공간 침수위험도를 산정
	• Shin et al.(2012)	• 수리모형실험 기반의 침수방지대책 영향 평가 방법 제안
복합재난 및 시나리오	• Jung et al.(2019)	• 재난 빅데이터를 활용한 대형복합재난 피해확산예측 시스템 구현 방법 제안
	• Seo et al.(2019)	• 화재 발생 시나리오 구축을 통한 위험 평가 방법 제안
	• Zhou et al.(2020)	• 베이지안 네트워크 기반 공동구 하수관로 복합재난 유발 메커니즘 제안

황을 종합적으로 대응할 수 있는 연구 및 기술에 대한 논의가 필요하다. 복합재난에 대한 피해 중심의 단편적인 정보(Cho et al., 2020)들을 연계하여 시나리오로 구축한다면 공동구 관리자가 직관적으로 상황을 인식하고 적절하게 대응할 수 있도록 유도할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공동구의 재난 예방·대비·대응·복구를 지원하기 위한 복합재난 시나리오 자동생성 및 우선순위 선정을 연구목표로 설정했다. 해당 목표 달성을 위해 위험성 평가 기법 기반의 복합재난 시나리오 자동생성 및 우선순위 선정 알고리즘을 개발하고자 했다.

공동구 재난사례 분석 및 복합재난 시나리오 구성요소 도출

국내·외 공동구 재난 발생사례

국내·외 공동구에서 발생하는 사고 원인을 산정하기 위해 사례 조사를 실시하고 대표사례를 Table 2에 정리했다. 국내 공동구의 경우 사고 15건(KFS-1252 : 2019) 중 화재 12건, 침수 3건이 조사되었으며, 국외 공동구는 영국 Holborn 공동구 사례(Mann, 2015)와 같이 화재 사고가 다수 발생한 것으로 확인되었다.

국내·외 공동구 재난 발생사례를 분석한 결과 화재사고가 대부분을 차지하며, 침수사고가 일부 발생한 것으로 확인되었다. 먼저 화재의 경우 부대시설로부터 발생한 화재가 수용시설까지 확산된 것으로 나타났다. 침수의 경우 상수관로를 수용하는 공동구에서 시설 노후화에서 기인된 것으로 확인되었다. 조사된 사례 모두 공동구 중단으로 인해 서비스를 공급받는 이해관계자에게 막대한 사회·경제적 피해가 발생한 것으로 파악되었다.

최근 국내에서도 경주 지진(2016), 포항 지진(2017) 등 지진 발생 위험이 증가하고 있어 공동구 내진성능의 수요 또한 높아지고 있다. 국내 공동구설계기준(KDS 11 44 00 : 2018)상 내진성능수준은 기능수행수준과 붕괴방지수준을 만족하도록 설계되어야 하며 내진설계일반(KDS 17 10 00 : 2018)에서의 내진1등급에 해당한다. 설계기준 상에서 제시된 기준 이상의

지진지반운동이 발생한다면 공동구 구조요소와 내진설계가 적용되지 않은 일부 부대시설 및 비구조요소에 피해가 발생할 수 있을 것으로 예측된다.

Table 2. Case of disaster occurrence in urban utility tunnels (KFS-1252 : 2019; Mann, 2015)

구분	사고명	원인	피해	공동구 재난 발생상황	내·외부 이해관계자 영향
1994.03.10.	종로 통신구 화재 (국내)	화재	부대시설, 통신수용시설	배수펌프 자동분전반 화재 발생 및 통신수용시설 중단	<ul style="list-style-type: none"> 수도권 통신 두절 인론사(KBS 등) 방송 송출 중단 30분~1시간 해화우체국 등 금융기관 업무 차질
2000.02.18.	여의도 공동구 화재 (국내)	화재	부대시설, 수용시설	송전선 구간 절연접속함 화재 발생 및 통신수용시설 중단	<ul style="list-style-type: none"> 인명피해(부상 4명) 내·외부 재산피해 (약 16억 원 이상)
2000.11.20	여의도 공동구 침수(국내)	침수	상수도 수용시설	노후 상수도관 파손 발생 및 상수도수용시설 중단	-
2018.11.24	KT 아현지사 통신구 화재 (국내)	화재	부대시설, 통신수용시설	화재로 인해 통신수용시설 중단	<ul style="list-style-type: none"> 내·외부 재산피해 (약 80억 원 이상) 수도권 1/4 통신 마비로 인한 간접피해 발생
2015.04.01.	Holborn 공동구 전기화재 (국외)	화재	전력수용시설, 통신수용시설	화재로 인해 전력수용시설 및 가스수용시설 중단	<ul style="list-style-type: none"> 인근 지역 정전 발생 가스공급 중단 등

공동구 발생 가능한 재난의 개념

수용시설의 성능이 보호목표를 만족하지 못하는 경우 공동구 이해관계자에게 막대한 사회·경제적 피해가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 공동구의 기능 및 서비스가 보호목표를 충족하지 못하는 경우를 재난으로 정의했다. 재난에 따른 피해자 범위는 수용시설이 제공하는 서비스에 대한 1차 수혜자로 설정했으며 주택가 또는 공업단지의 라이프라인 공급망 등이 피해자에 해당한다. 조사된 사례를 참고하여 재난을 유발하는 물리적인 원인으로 화재, 침수를 고려했고, 근 수년간 우리나라에서 발생 빈도가 증가하고 있는 지진(진동)을 추가로 고려해서 공동구 재난요소라고 설정했다. 공동구 내 수용시설(전력, 통신, 상수도 등)과 유지·관리·운영을 위한 부대시설 중 기능적으로 연계된 모든 시설을 피해요소로 설정했다. 공동구 외부 이해관계자로부터 발생한 중단상황은 고려하지 않았다.

복합재난 시나리오 설계

복합재난 시나리오 구성요소

Table 2에서 제시한 “공동구 재난 발생상황”과 같이 원인과 피해의 단편적 정보의 조합으로 상황을 표현한다면 공동구 관리자는 점점이 필요한 시설을 신속하게 판단할 수 있고, 재난에 따른 관리방법에 대한 적절한 계획 수립이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 재난요소 간 상관관계를 복합재난 상황의 합집합으로 표현하고자 했다. 재난의 발생 계기 및 영향에 따른 재난요소 간의 상관관계를 분류하고, 발생 가능한 복합재난 상황을 모두 포괄하도록 재난 원인요소와 피해시설의 조합으로 시

나리오를 구성했다. 시나리오에서 고려하는 재난요소, 원인요소, 피해요소의 종류에 따라서 복합재난의 특성을 구분하고 매트릭스로 표현했다. 피해 중심의 복합재난 시나리오를 도출하기 위해 복합재난 시나리오 매트릭스의 조합방식으로 시나리오를 구축했다. 단일재난부터 최악의 복합재난까지 공동구에서 발생 가능한 복합재난 시나리오를 도출함으로써 시설 관리자가 재난 상황별 적절한 의사결정을 할 수 있도록 했다.

복합재난 시나리오 구축 시 동시 또는 순차적인 재난 발생상황을 모두 포함하기 위해 독립관계(Independent Relations), 배타관계(Exclusive Relationship), 평행관계(Parallel Relationship), 연쇄관계(Cascading Relationship) 등의 상관관계를 고려했다. 재난요소 간 상관관계에 대한 설명은 Table 3에 제시했다.

Table 3. Types of correlation among disaster factors

구분	설명	예시
독립관계 (Independent Relations)	재난 A와 B의 발생 계기가 서로 다른 경우	공동구 화재 발생 직후 지진이 발생한 경우 ※ 동시/독립적으로 볼 수 있으며, 인과관계 규명이 불가함
배타관계 (Exclusive Relationship)	재난 A와 B가 상호 배타적인 경우	공동구 완전 침수 상황과 화재 발생
평행관계 (Parallel Relationship)	재난 A가 여러 다수의 이벤트를 동반하는 경우	지진으로 인해 공동구 부대시설의 중단과 수용시설의 중단이 발생한 경우
연쇄관계 (Cascading Relationship)	재난 A가 B의 발생 계기에 변화를 주는 이벤트인 경우	지진으로 인해 공동구 내부 시설에서 화재가 발생하는 경우

복합재난 시나리오 매트릭스 설계

공동구 복합재난을 유발하는 원인요소는 선행연구와 사례를 통해 조사된 재난요소의 조합으로 구성된다. 재난요소들은 Table 3에 제시된 각각의 관계를 반영하여 단일요소와 다중요소로 분류하여 적용하였다. 단일재난의 경우 지진, 화재, 침수 등 단일재난요소로 설계했고, 두 종류 이상의 재난 발생의 경우는 지진·화재, 지진·침수, 지진·화재·침수 등으로 재난요소간의 조합을 구성하여 다중재난 요소로 설계했다. 구체적으로 시나리오 구성에서 하나의 재난요소만 고려된 경우 해당 요소를 단일원일요소로 설정하고 두 종류 이상의 재난요소가 고려된 경우 재난요소의 상관관계를 포괄할 수 있도록 재난요소들의 조합을 다중원일요소로 설정하여 복합재난 시나리오 구성에 반영했다.

공동구 복합재난 시나리오를 작성하기 전 대상 공동구의 시설 현황에 대해 상세조사 및 목록화가 필요하다. 본 연구에서 고려하는 공동구 단위시설은 전력수용시설(Electric Power Line), 통신수용시설(Communication Line), 상수도 수용시설(Water Supply Line), 그리고 공동구의 유지·관리·운영에 필요한 부대시설(Maintenance & Operating Facility)로 설정했다. 한 종류의 단위시설에만 피해가 발생하더라도 공동구에 중단이 발생할 수 있다. 따라서 단위시설을 피해요소로 설정하고, 피해 대상이 단위시설 한 종류인 경우 단일피해, 두 종류 이상의 경우 다중피해로 설계했다.

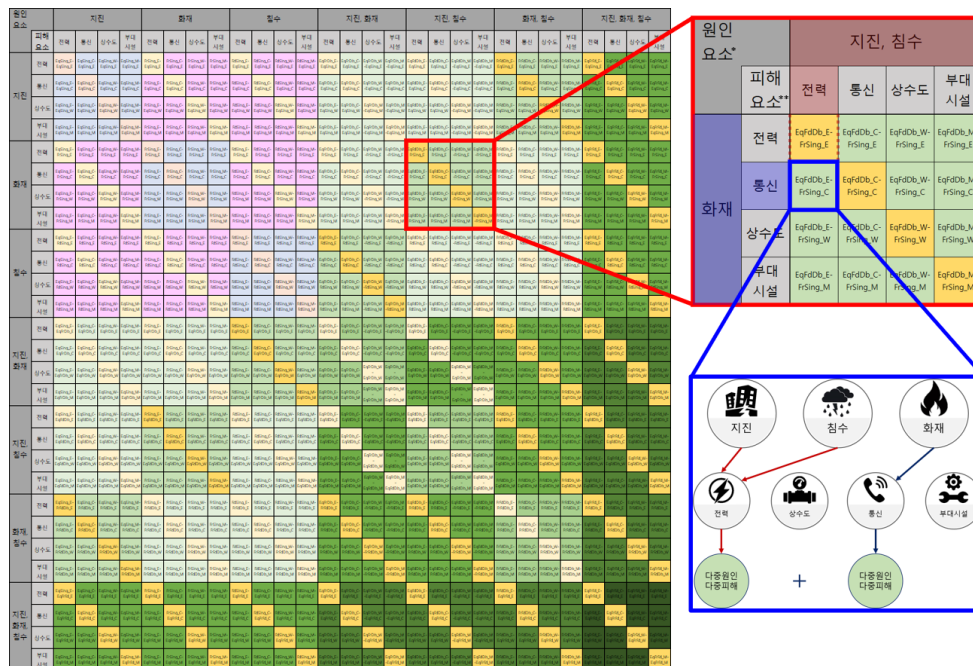
공동구 복합재난은 원인요소와 피해요소의 조합에 따라 관리자의 재난 대응 방법이 달라질 수 있다. 조합된 시나리오에서 고려된 전체 재난요소의 종류, 원인요소에서 고려하는 재난요소의 종류, 피해요소의 종류, 원인요소 조합에서 공통되는 재난요소와 피해요소의 종류를 기준으로 Table 4와 같이 복합재난을 분류하여 공동구 관리자의 적절한 대응을 유도하고자 했다.

설정된 원인요소와 피해요소를 조합하여 Table 4에 제시된 기준에 따라 분류하면 Fig. 1과 같은 복합재난 시나리오 매트

Table 4. Classification criteria for complex disaster scenarios

구분	전체 재난요소*	원인요소-피해요소 (1)		원인요소-피해요소 (2)		공통 재난요소*	공통 피해요소***	비고
		원인요소**	피해요소***	원인요소**	피해요소***			
		(1)	(1)	(2)	(2)			
(a)	1	1	1	-	-	-	-	단독재난
(b)	2	1	1	1	1	-	-	독립관계
(c)	1	1	1	1	1	1	-	-
(d)	2	1	1	1	1	-	1	-
(e)	3	3	1	1	1	1	1	-
		2	1	2	1			
(f)	2	2	1	1	1	1	-	-
(g)	3	2	1	1	1	-	-	-
(h)	2	2	1	2	1	1	-	-
(i)	3	3	1	1	1	1	-	-
		2	1	2	1			
(j)	3	3	1	2	1	2	-	-
(k)	3	3	1	3	1	3	-	-

* 재난요소 : 공동구 중단을 유발하는 물리적인 원인(e.g. 지진, 화재, 침수)
 ** 원인요소 : 복합재난을 유발하는 재난요소의 조합(e.g. 지진, 지진·화재, 지진·화재·침수)
 *** 피해요소 : 단위시설(e.g. 전력수용시설, 통신수용시설, 상수도수용시설, 부대시설)



* 원인요소 분류코드

EqFdB : Earthquake & Flooding
 FrSing : Fire

** 피해요소 분류코드

E : Electric Power Line ; C : Communication Line
 W : Water Supply Line ; M : Maintenance & Operating Facility

Fig. 1. Complex disaster scenario matrix

릭스를 구성할 수 있다. 복합재난 시나리오 매트릭스(Fig. 1)는 Table 4에서 제안된 색상을 따른다. Fig. 1의 매트릭스에서 제시된 조합 방법으로 복합재난 시나리오를 생성했고 대표 시나리오를 Table 5에 제시했다. 각각의 시나리오는 공동구 관리자가 적절한 의사결정을 유도할 수 있도록 위험성이 평가되고, 그 결과에 따라 우선순위가 높은 복합재난 상황을 나타낼 수 있도록 했다.

복합재난 시나리오의 자동생성을 위해 구축한 알고리즘을 Fig. 2에 제시했다. 자동생성 알고리즘 작동의 과정은 다음과 같다. 먼저 대상 공동구의 서비스 현황조사를 통해 재난요소 및 단위시설을 설정한다. 재난요소로부터 원인요소를, 단위시설로부터 피해요소를 각각 설정하고 원인요소에 대한 피해요소의 위험성을 평가한다. 해당 요소들의 조합으로 복합재난 시나리오 매트릭스를 작성하여 구체적인 시나리오를 생성한다. 피해요소 위험성 평가 이후 평가결과를 기반으로 복합시나리오의 우선순위를 결정하고 우선순위가 높은 시나리오를 선정하여 공동구 관리자에게 제공한다.

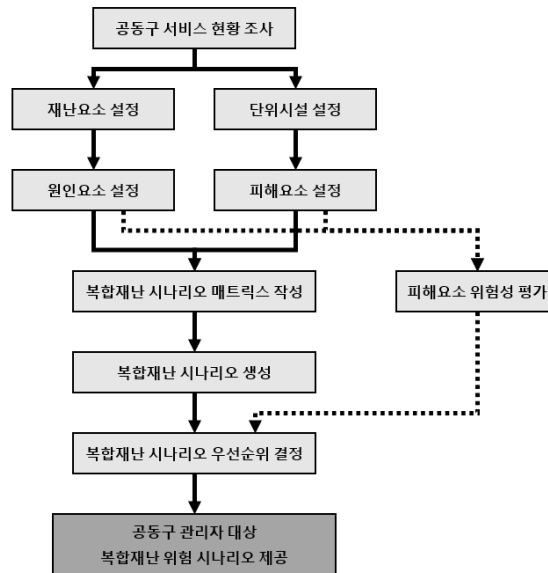


Fig. 2. Flow chart of complex disaster scenario

공동구 시설 위험성 평가 및 복합재난 시나리오 자동생성 기술

공동구 시설 위험성 평가 기법

복합재난 시나리오 우선순위 도출을 위해 재난에 따라 공동구 중단의 원인이 되는 시설들의 위험성 평가를 실시했다. 재난 원인요소 발생 시 단위시설 간의 물리적·기능적 상호연계성을 파악하기 위해 공동구 관리자 및 관련 분야 전문가의 자문을 수행했고 피해요소로 설정된 단위시설들의 위험성을 평가했다. 부대시설의 경우 하위 시설 용도 및 특성이 반영될 수 있도록 세분화하여 UT시설(Utility), 유지관리시설(Maintenance Facility), 관제시스템(Monitoring System) 등으로 구분하고 위험성 평가에 반영했다. 위험성 평가의 방법으로는 준정량 평가 매트릭스를 활용하였으며(Nadim et al., 2010), 해당 기법을 통해 단위시설이 공동구 내에서의 영향정도를 나타내는 시설중요도를 도출했다.

각 시설 간 적용된 준정량 평가 기법의 내용을 Fig. 3(a)에 제시했다. 준정량 평가 매트릭스는 시설가 시설에게 주는 영향

과 시설이 시설로부터 받는 영향에 대한 평가 결과를 입력하는 방식으로 작성한다. 시설 준정량 평가 매트릭스를 활용한 시설중요도 산정 방법은 Fig. 3(b)과 같이 산정할 수 있다. 기준 단위시설이 타 단위시설에 영향을 주는 정도는 매트릭스 상의 횡방향 점수 소계로 산정하고, 기준 단위시설이 타 단위시설로부터 영향을 받는 정도는 종방향 점수 소계로 산정한다. 종방향과 횡방향의 점수를 합하여 각 재난에 대해 시설중요도 점수를 산정할 수 있다. 재난에 따른 시설 간 영향도의 평가기준은 대상 공동구 특성에 따라 설정할 수 있으며 본 연구에서는 Table 5과 같이 5단계로 구분했다.

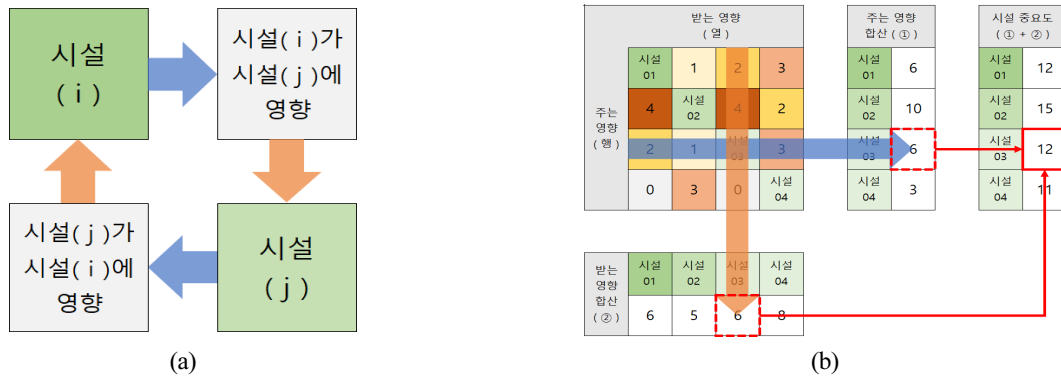


Fig. 3. Method of creating a semi-quantitative assessment matrix for utility tunnel facilities and calculating facility interdependency with complex disaster

Table 5. Semi-quantitative assessment criteria for utility tunnel facilities

평가등급	평가기준
Level 0	재난 발생 시 시설 간 영향 없음
Level 1	재난 발생 시 시설 간 기능 중단이 발생하지 않는 미세한 영향
Level 2	재난 발생 시 시설 간 연계성에 따라 일시적 중단이 발생하나 평상시 유지관리 방안으로 해결 가능한 영향
Level 3	재난 발생 시 시설 간 연계성에 따라 보호목표를 충족하지 못하는 중단상황이 발생하고 보수공사가 필요한 영향
Level 4	재난 발생 시 시설 간 연계성에 따라 공동구 전체 기능이 중단하는 상황이 발생하고 대대적인 보수공사가 필요한 영향

준정량 평가 기법을 통해 지진, 화재, 침수 상황에서의 공동구 단위시설에 대한 위험성을 평가하였고 해당 결과를 기반으로 복합재난 시나리오가 반영된 매트릭스를 작성하여 Fig. 4에 매트릭스 예시를 제시했다.

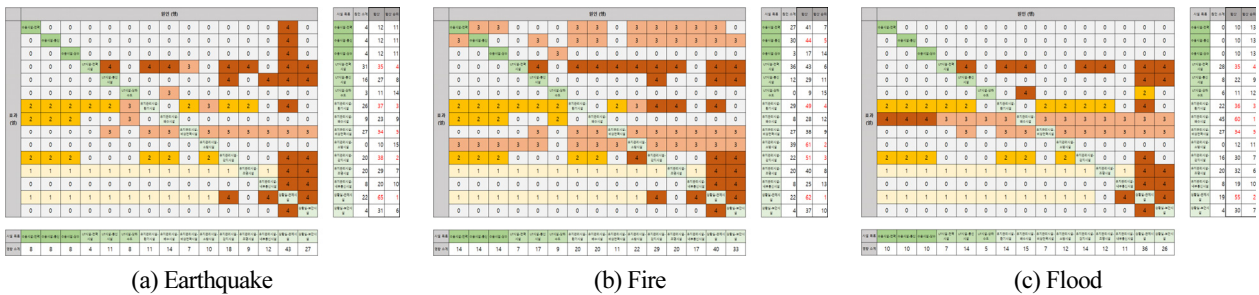


Fig. 4. Semi-quantitative assessment matrix for utility tunnel facilities and calculating facility interdependency with (a) Earthquake, (b) Fire, (c) Flood

복합재난 시나리오 우선순위 도출

시설중요도는 복합재난 시나리오의 우선순위를 결정하기 위해 사용된다. 두 종류의 원인요소-피해요소 조합으로 시나리오를 도출했으며, 시설 준정량 평가 매트릭스를 통해 재난 상황을 고려한 시설중요도를 산정했다. 시설중요도 산정 과정에서 재난요소는 단일요소 및 다중요소 모두 고려했고 피해요소는 부대시설을 포함했다. 피해요소 선정 시 선행연구 분석 결과 및 전문가 의견을 반영하여 전력수용시설, 관제시스템, 강제환기구를 구체적인 시설로 설정 후 분석을 수행하였다. 재난 상황이 고려된 시설중요도를 합한다면 시나리오에서 고려된 원인요소-피해요소의 위험평가 결과를 반영할 수 있다. 두 피해요소에 대한 시설중요도의 합을 시나리오의 영향우선지표로 설정하고, 그 값이 높은 순서대로 복합재난 시나리오의 우선순위를 결정했다.

Table 6에 시설 준정량 평가 및 영향우선지표 산출 결과를 제시했다. 시설 준정량 평가 결과, 화재로 인한 전력수용시설 중단 시 타 시설로의 영향 정도는 시설중요도 41, 지진으로 인한 관제시스템 중단 시 타 시설로의 영향 정도는 시설중요도 65, 침수로 인한 강제환기구 중단 시 타 시설로의 영향 정도는 시설중요도 37로 산정됐다. 세 시설 중 중단에 대한 타 시설로의 영향 정도는 관제시스템이 가장 크고, 전력수용시설, 강제환기구 순서인 것을 확인했다. 복합재난 시나리오 조합 결과, 관제시스템과 전력수용시설 중단의 조합은 영향우선지표 106, 강제환기구와 전력수용시설 중단의 조합은 영향우선지표 78로 산정됐다. 따라서 중단 시 타 시설로의 영향 정도에 따라 강제환기구보다 관제시스템이 조합된 시나리오가 더 높은 영향우선지표를 보이는 것을 확인했고, 영향우선지표를 통해 복합재난 시나리오의 우선순위를 결정할 수 있다.

본 논문에서 제시한 복합재난 시나리오 영향우선지표 산정방법을 활용한다면 공동구 관리자가 가장 우선으로 확인해야 할 시나리오, 중점적으로 모니터링이 필요한 시설 등의 정보를 선택적으로 확인하고 신속한 의사결정 할 수 있다.

Table 6. Development of complex disaster scenarios and calculation of scenario impact factors

시나리오 분류코드*	원인요소-피해요소 (1)			원인요소-피해요소 (2)			영향 우선 지표 ①+②	복합재난 시나리오
	원인 요소	피해 요소**	시설 중요도 ①	원인 요소	피해 요소**	시설 중요도 ②		
EqSing_M -FrSing_E	지진	MS -FM	65	화재	SU -EP	41	106	지진으로 인해 상황실의 관제시설 중 소방관제시스템(Fire Monitoring System) 중단 및 전력수용시설(Electric Power Line)에 화재 발생
EqSing_M -FrSing_E	지진	MS -PM	65	화재	SU -EP	41	106	지진으로 인해 상황실의 관제시설 중 배수관제시스템(Pumping Monitoring System) 중단 및 전력수용시설(Electric Power Line)에 화재 발생
EqSing_M -FrSing_E	지진	MS -VM	65	화재	SU -EP	41	106	지진으로 인해 상황실의 관제시설 중 환기관제시스템(Ventilation Monitoring System) 중단 및 전력수용시설(Electric Power Line)에 화재 발생
FrSing_M -FrSing_C	화재	MF -AE	61	화재	SU -CM	44	105	화재로 인해 유지관리시설의 소방시설 중 자동소화장치(Automatic Extinguisher)와 통신수용시설(Communication Line) 중단
FrSing_M -FrSing_C	화재	UT -PC	43	화재	SU -CM	44	87	화재로 인해 UT시설의 전력시설 중 공동구전력제어시설(Power Control Facility)과 통신수용시설(Communication Line) 중단

Table 6. Development of complex disaster scenarios and calculation of scenario impact factors(Continue)

시나리오 분류코드*	원인요소-피해요소 (1)			원인요소-피해요소 (2)			영향 우선 지표 ①+②	복합재난 시나리오
	원인 요소	피해 요소**	시설 중요도 ①	원인 요소	피해 요소**	시설 중요도 ②		
FrSing_E -FrSing_C	화재	SU -EP	41	화재	SU -CM	44	85	화재로 인해 전력수용시설(Electric Power Line)과 통신수용시설(Communication Line) 중단
FrSing_M -FrSing_E	화재	UT -PC	43	화재	SU -EP	41	84	화재로 인해 UT시설의 전력시설 중 공동구전력제어시설(Power Control Facility)과 전력수용시설(Electric Power Line) 중단
EqSing_M -FrSing_C	지진	MF -EV	37	화재	SU -EP	41	78	지진으로 인해 유지관리시설의 환기시설 중 강제환기구(Exhaust Ventilation) 중단 및 전력수용시설(Electric Power Line)에 화재 발생
FdSing_M -FrSing_C	침수	MF -EV	36	화재	SU -EP	41	77	침수로 인해 유지관리시설의 환기시설 중 강제환기구(Exhaust Ventilation) 중단 및 전력수용시설(Electric Power Line)에 화재 발생

* 시나리오분류코드

EqSing : Earthquake E : Electric Power Line
FrSing : Fire C : Communication Line
FdSing : Flooding W : Water Supply Line
M : Maintenance & Operating Facility

** 피해요소코드

SU : Supply Chain FM : Fire Monitoring System PC : Power Control Facility
UT : Utility PM : Pumping Monitoring System EV : Exhaust Ventilation
MF : Maintenance Facility VM : Ventilation Monitoring System
MS : Monitoring System AE : Automatic Extinguisher

결론

본 연구는 공동구에서 발생 가능한 재난 상황을 종합적으로 대응할 수 있도록 다양한 재난 및 피해요소들을 고려하여 복합 재난 시나리오 생성 기법을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 복합재난 시나리오는 공동구 관리자 및 관계자에게 제공하여 위험 상황 발생 시 직관적으로 상황을 인식하고 적절한 의사결정을 지원할 수 있게 하는 데 목적이 있다.

공동구 재난사례를 통해 발생 가능한 재난 원인요소를 파악하고, 공동구의 정상적인 서비스 제공을 위해 필요한 단위시설을 선정했다. 재난 간 동시 또는 순차적인 발생상황을 고려하기 위해 독립관계, 배타관계, 평행관계, 연쇄관계로 상관관계를 분류했다. 재난 간 상관관계를 포괄적으로 표현하기 위해 재난 원인요소와 피해요소의 조합으로 복합재난 시나리오를 도출했고, 조합 방법에 따라 분류하기 위해 복합재난 시나리오 매트릭스를 작성했다. 재난에 따른 단위시설 위험평가를 실시했고, 복합재난 시나리오의 위험정도를 정량적으로 산출하여 우선순위를 도출했다. 시물레이션 결과물들을 통해 복합재난 발생 시 예상되는 피해요소 정보를 시스템 사용자에게 제공하여 재난의 전조증상이 감지된다면 피해를 예방·대비를 가능하게 할 수 있다. 또한 해당 결과물들을 활용하여 긴급한 재난 상황이 발생하였을 때 신속한 대응·복구를 유도할 수 있도록 전략 방안을 마련할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 공동구 관리자의 신속한 상황 판단을 위해 피해 중심의 복합재난 시나리오를 제안했으며, 재난 간 상관관계를 포괄적으로 고려했다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 몇 가지 한계점이 존재한다. 먼저 발화원 또는 침수원과 같은 재난 발생의 근본적인 원인에 대한 정보, 재난 간 상관관계에 대한 정보는 복합재난 시나리오상에서 명확히 확인할 수 없다는 한계가 있다. 또한 공동구의 구조나 위치, 내부 시설 등이 모두 동일하지 않기 때문에 본 연구에서 도출된 시나리오를 공동구 재난 시뮬레이션 수행 시 바로 적용하기에는 다소 어려움이 존재한다. 본 한계점을 극복하기 위해 실증 연구 단계에서는 재난 원인 시설의 정보와 재난 간 상관관계에 대한 정보를 포함한 복합재난 시나리오를 도출하고자 한다. 향후 연구에서는 재난 간 상관관계를 규명하여 시뮬레이션 기술의 고도화를 위한 실험적 연구를 수행하고자 한다. 본 연구의 결과는 복합재난 대응 기술 마련의 기초자료로써 의미가 있다고 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부, 행정안전부, 국토교통부, 산업통상자원부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020-0-00061, 디지털트윈 기반의 지하공동구 화재·재난 지원 통합플랫폼 기술개발).

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT, MOIS, MOLIT, MOTIE) (No. 2020-0-00061, Development of integrated platform technology for fire and disaster management in underground utility tunnel based on digital twin).

References

- [1] Cho, J.-Y., Song, J.-I., Jang, M.-Y., Jang, C.-R. (2020). "A study on the essential information to collect disaster sites for effective disaster management: Focused on Jecheon sports center fire case." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 16, No. 1, pp. 70-78.
- [2] Ishii, H., Kawamura, K., Ono, T., Megumi, H., Kikkawa, A. (1997). "A fire detection system using optical fibres for utility tunnels." *Fire Safety Journal*, Vol. 29, pp. 87-98.
- [3] Jung, W.-S., Oh, S.-H., Lee, Y.-T. (2019). "A study on the system implementation of Mega complex disaster damage evaluation and estimation using disaster bigdata." *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol. 44, No. 7, pp. 1433-1442.
- [4] Kim, D.-H., Lim, Y., Chung, Y.H., Lee, H. (2021). "Hazard-consistent ground displacement estimation for seismic input of underground utility tunnels in Korea." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 37, No. 12, pp. 7-23.
- [5] Kim, J., Park, S., Hong, C., Park, S., Lee, J. (2022). "Development of AI detection model based on CCTV image for underground utility tunnel." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 18, No. 2, pp. 364-373.
- [6] Lee, J.I. (2010). "A study on the fire prevention activities and suppression measures of utility-pipe conduit." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 4, pp. 63-68.
- [7] Mann, S. (2015). "Holborn fire: First pictures of underground damage caused by massive blaze beneath street." *Evening Standard*, <https://www.standard.co.uk/news/london/holborn-fire-first-pictures-of-underground-damage-caused-by-massive-blaze-beneath-street-10292793.html>
- [8] O'Rourke, T.D., Goh, S.H., Menkiti, C.O., Mair, R.J. (2001). "Highway tunnel performance during the 1999 Duzce Earthquake." *Proceeding of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Eotechnical Engineering*,

Istanbul, Turkey.

- [9] Owen, G.N., Scholl, R.E. (1981). *Earthquake Engineering of Large Underground Structures*. Prepared for the Federal Highway Administration, DPST-81-262, National Technical Information Service, US.
- [10] Park, J.K., Roh, S.K., Seo, Y.M. (2002). "A study on the risk assessment system of the underground space." *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 70-74.
- [11] Rowe, R. (1992). "Tunnelling in seismic zones." *Tunnels and Tunnelling*, Vol. 24, No. 12, pp. 41-44.
- [12] Seo, H.J., Choi, H., Lee, M.C., Song, C.G. (2019). "Establishing a risk assessment scenario for fire prevention and safety management in underground urban utility tunnels." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 1, pp. 241-248. doi: 10.9798/KOSHAM.2019.19.1.241.
- [13] Shin, D.S., Park, J.B., Shon, T.S., Jo, D.J. (2012). "Preventive measures assessment to prevent flooding complex underground space through Hydraulic model experiment." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 4, pp. 59-66.
- [14] Toda, K., Inoue, K., Oyagi, R., Nakai, T., Takemura, N. (2005). "Hydraulic model test of inundation water intrusion into complicated underground space." *Journal of hydroscience and Hydraulic Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 13-25.
- [15] Ueng, T.S., Lin, M.L., Chen, M.H. (2001). "Some geotechnical aspects of 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake." *Proceeding of the 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Missouri, U.S.A.
- [16] Yu, H., Chen, J., Bobet, C., Yuan, Y. (2016). "Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan Earthquake." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 54, pp. 102-116.
- [17] Zhang, X., Guan, Y., Fang, Z., Liao, Y. (2016). "Fire risk analysis and prevention of urban comprehensive pipeline corridor." *Procedia Engineering*, Vol. 135, pp. 463-468.
- [18] Zhao, Y., Zhu, G., Gao, Y. (2018b). "Experimental study on smoke temperature distribution under different power conditions in utility tunnel." *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 12, pp. 69-76.
- [19] Zhao, Y., Zhu, G., Gao, Y., Tao, H. (2018a). "Study on temperature field of fire smoke in utility tunnel with different cross sections." *Procedia Engineering*, Vol. 211, pp. 1043-1051.
- [20] Zhou, R., Fang, W., Wu, J. (2020). "A risk assessment model of a sewer pipeline in an underground utility tunnel based on a Bayesian network." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 103, e103473.