

# 건축물 지진화재위험도 평가기법의 국산화 전략

## Localization Strategy of Building Fire Following Earthquake Risk Assessment Method

강 태 옥\*      김 수 빈\*\*      김 예 은\*\*\*      강 재 도\*\*\*\*      김 혜 원\*\*\*\*\*      신 지 옥\*\*\*\*\*  
Kang, Taewook      Kim, Subin      Kim, Ye-eun      Kang, Jaedo      Kim, Haewon      Shin, Jiuk

### Abstract

In this study, in order to establish a strategy for developing an fire following earthquake risk assessment method that can utilize domestic public databases(building datas, etc.), the method of calculating the ignition and fire-spread among the fire following earthquake risk assessment methodologies proposed by past researchers is investigated After investigating and analyzing the methodology used in the HAZUS-MH earthquake model in the United States and the fire following earthquake risk assessment methodology in Japan, based on this, a database such as a domestic building data utilized to an fire following earthquake risk assessment method suitable for domestic circumstances (planned) was suggested.

**Keywords :** Fire Following Earthquake, Fire Following Earthquake Assessment Method, Ignition, Fire-Spread

## 1. 서론

2017년 11월 발생한 포항지진에서 대규모 건축물의 피해와 인명피해가 발생하였고, 또한 행정안전부의 보고자료[1]에 따르면 5건의 출화가 발생하여 지진 발생 후 대규모 화재 발생의 가능성을 보여주었다. 미국 연방재난관리청(Federal Emergency



〈Fig. 1〉 Damage by Fire Following Earthquake

- \*      학생회원, 경상국립대학교 건축공학과, 석사과정  
Department of Architectural Engineering,  
Gyeongsang National University
- \*\*     학생회원, 경상국립대학교 건축공학과, 석사과정  
Department of Architectural Engineering,  
Gyeongsang National University
- \*\*\*    학생회원, 경상국립대학교 건축공학과, 석사과정  
Department of Architectural Engineering,  
Gyeongsang National University
- \*\*\*\*    정회원, 서울기술연구원 지진방재센터 수석연구원, 공학박사  
Seismic Research Center,  
Seoul Institute of Technology
- \*\*\*\*\* 정회원, 국립재난안전연구원 지진방재센터, 공학박사  
Earthquake Hazard Reduction Center,  
Disaster Management Research Institute
- \*\*\*\*\* 교신저자, 경상국립대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
Department of Architectural Engineering,  
Gyeongsang National University  
Tel: 055-772-1754  
E-mail: jiuksin@gnu.ac.kr

Management Agency, FEMA) HAZUS-MH의 보고서[2]에 따르면 지진 발생 이후 수반되는 2차 피해 중 가장 많은 피해를 초래하는 것이 지진화재라고 명시하고 있으며, 이를 대비하기 위해 미국, 일본 등 지진 관련 선진기술을 보유한 국가는 실제 데이터를 기반으로 지진화재위험도에 대한 평가방법론을 개발 및 보유하고 있으나 국내의 지진 위험도 평가방법은 지진화재 등 2차 피해에 대해 고려할 수 있는 방법론이 현재까지 존재하지 않는다.

미국과 일본에서는 지진화재 위험도 평가를 위하여 출화율(Ignition Ratio)과 소실율(Fire Burned Ratio) 평가를 공통적으로 구성하고 있다. 출화율이란 지진 발생 후 건축물 면적 또는 단위 면적당 출화

횃수를 추정하는 것으로, 출화 및 지진 데이터의 회귀분석 모델과 지진 및 화재 관련 데이터를 활용하여 산정하는 모델이 존재한다. 이 중 미국 HAZUS 모델의 경우 실제 데이터와 회귀식을 통해 출화율을 추정한다. 일본은 계절, 건축물 용도 등의 여러 요인들의 출화원인을 구분하여 이들에 의해 발생하는 전체 출화 건수를 계산하고, 이 중 초기 소화율(거주 주민이 초기 진압이 가능한 상황)을 제외하고 출화건수(출화율)를 산정한다. 소실율이란 도시/지역 단위 건축물 배치, 건축물 사이 인접거리, 건축물의 내화성능 등을 반영하여 화재확산 정도를 산정하는 것으로, 미국의 HAZUS-MH 모델은 Hamada 모델[3-4]을 기반으로 완전 연소 구조물의 수를 판정하는 방식이다. 일본 동경소방청(Tokyo Fire Department, TFD)의 TOSHO 모델은 데이터 기반 동적 화재연소 시뮬레이션을 활용하여 연소한계거리 산정 후, 건물 간 인접거리와 비교하여 클러스터를 구성하여 연소 구조물의 수를 판정한다. 이 외에도 건축물의 내화구조유형별 연소저항률(Covering Volume Fraction,

CVF)를 산정하여 소실율을 산정하는 방식이 존재한다.

본 연구의 목적은 국내 공공 데이터베이스(건축물 대장 등)를 활용할 수 있는 지진화재 위험도 평가법에 대한 개발 전략을 구축하는 것이다. 이를 위하여 과거 연구자들에 의해 제안된 지진화재 위험도평가 방법론 중 출화율 및 소실율의 산정 방법을 조사하고, 미국의 HAZUS-MH 지진 모델에서 활용 중인 방법론과 일본의 지진화재 위험도평가 방법론을 조사 및 분석한 뒤, 이를 기반으로 국내건축물대장 등 전국단위 데이터베이스를 활용하여 국내 실정에 적합한 지진화재 위험도 평가기법을 제안하는 것이다.

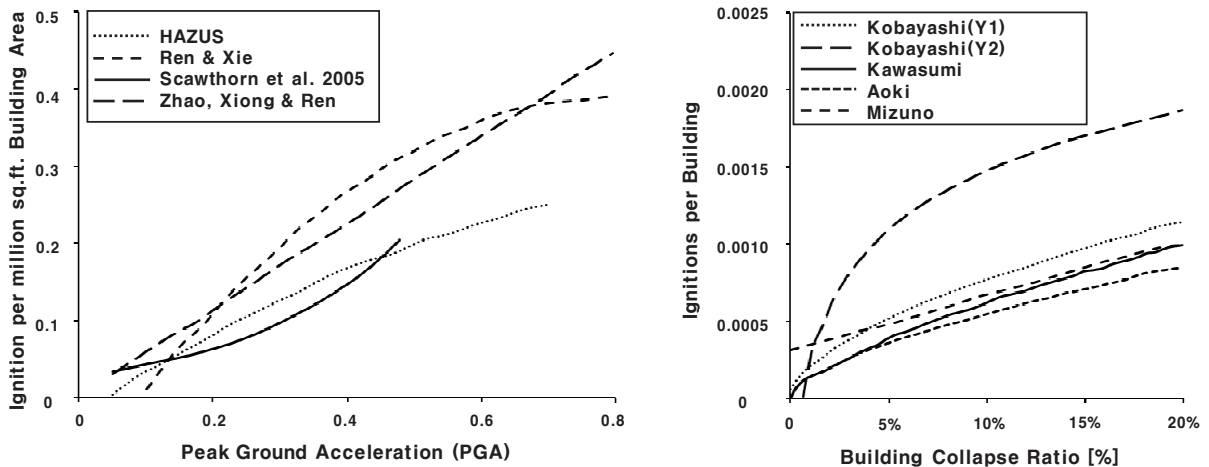
## 2. 출화율 및 소실율 산정 방법론

### 2.1 과거 연구 현황

출화율 모델의 목적은 지진 발생 후 건축물 면적 또는 단위면적당 출화 횃수를 추정하는 것이다. 해외의 출화율 모델은 출화 횃수 관련 데이터(y)와 지진

〈Table 1〉 Comparison of Ignition Model: Modeling Approach

Ignition Model	Output Data (y)	Input Data (x)	Ignition Regression Model	R <sup>2</sup>
Kawasumi (1961)	Ignition Ratio of Timber Building	Collapsed Timber Building Ratio	$\ln y = 0.684 \ln x - 5.807$	0.885
Mizuno (1978)	Probability of Ignition per Building	probability of Total Collapse Building	$y = 0.00289x^{0.575}$	0.724
Kobayashi (1984)	Number of Ignition per 10,000 m <sup>2</sup>	Ratio of Collapsed Building	$y = 0.00356x - 0.00031$ or $y = 0.00056 \ln x - 0.00275$	0.756 or 0.751
Scawthorn (1986)	Number of Ignition per 1000 SFED	MMI	$y = 0.015x^2 - 0.185x + 0.61$	0.2
HAZUS (1999)	Number of Ignition per Total Floor Area MMSF	PGA	$y = -0.025 + 0.59x - 0.29x^2$	0.34
Ren and Xie (2004)	Number of Average Ignition per MMSF	PGA	$y = -0.11749 + 1.3453x - 0.8476x^2$	-
Scawthorn (2005)	Number of Ignition per Total Floor Area MMSF	PGA	$y = 0.028 \exp(4.16x)$	0.2
Cousins and Smith (2004)	Number of Average Ignition per MMSF	MMI	$y = x - 8.5$	-
Zhao et al. (2006)	Number of Ignition per 10,000 m <sup>2</sup>	PGA	$y = 0.0042 + 0.5985x$	-



〈Fig. 2〉 Comparison of Ignition Ratio-Related Models Composed of Similar Data

강도 관련 데이터(x)의 회귀 분석한 모델(〈Table 1〉 참고)과 지진 및 화재 관련 데이터를 활용하여 산정하는 모델이 존재한다.

회귀식을 활용한 출화율 모델에 사용된 데이터와 상관관계에 관한 정보를 나타낸 것이다.  $R^2$ 값은 실제 데이터와 회귀식을 통해 산정된 데이터 사이의 상관관계를 나타내는 값으로, FEMA의 HAZUS 모델의 경우 0.34이며, 이외에도 Zhao et al 모델[5]은 점화 시간이 Weibull 분포를 따른다고 가정하며, Ren & Xie 모델[6]은 화재 위험을 상대적으로 추정한다는 특성을 보인다. 〈Table 1〉에 제시된 모델중 유사한 입력데이터와 출력데이터를 반영한 출화율 모델의 결과는 〈Fig. 2〉에 나타내었다. 그림에 제시된 모델 사이의 결과 차이는 입력데이터에 반영된 이미지와 모델 형성 시 고려된 면적 단위의 차이로 인해 발생한다. 예를 들어 넓은 도시를 지역단위로 측정한 Scawthorn 모델[7]의 경우 다른 모델에 비해 평균 출화 횟수를 낮게 평가하는 것을 볼 수 있다.

지진 및 화재 관련 데이터를 활용하여 출화율을 산정하는 모델은 분석 데이터 관련 정보 제공이 미흡하여 관측치의 기준이 매우 크거나 일치하지 않는다. 예를 들어 Li et al 모델[8]은 화재 관련 데이터는 명확하나 지진 관련 데이터는 명시하지 않는다.

해외 출화율 모델 중 추가 조사를 위한 모델을 결정하기 위해 일차적으로  $R^2$ 값을 통한 상관관계가 존재하는 모델을 고려하였다. Scawthorn 모델[9]은  $R^2$ 값이 0.2로 다른 모델에 비해 낮아 제외하였으며, 그 외 모델

중 상관관계는 높지만 적합도와 관련된 데이터 전처리에 관련한 자세한 내용이 제시되지 않은 모델은 추후 연구에 제한될 수 있어 제외하였다. 또한 Kawasumi 모델[10]은  $R^2$ 값이 0.885로 높게 나타났지만, 입력데이터와 출력데이터의 대상을 목조 건축물만을 분석하였다. 이는 국내의 경우 다른 구조재료 건축물에 비하여 목조 건축물의 비율이 적기 때문에 본 국산화 전략 구축에서 제외하였다. 데이터를 활용한 모델의 경우 데이터 관련 정보가 부족한 모델은 추후 조사를 위한 모델에서 제외하였으며, 이는 〈Table 2〉에 요약되어 있다.

## 2.2 해외 소실율 현황

화재확산 모델은 초기 출화 위치가 주어졌을 때 억제 조치 유무와 관계없이 각 단위면적(예: 건물, 격자모양)에 대한 지리적 확산 또는 상태(예: 연소 여부, 연소율)를 시간 함수로 추정하는데 사용된다. 미국, 일본 등 지진 관련 선진국들은 자체적으로 화재확산 모델 산정 방법론(〈Table 3〉 참고)을 개발 및 보유하고 있다. FEMA의 HAZUS 모델의 기반이 되는 Hamada 모델[3-4]은 간격이 같은 동일 블록의 구조로 구성되어 있고, 화재가 타원형으로 확산된다고 가정한다. 건물 간 화재확산은 풍향의 확산 속도, 평균 건물 크기 및 간격, 내화건물의 비율로 정의하는 경험식을 제공한다. Hamada 식은 비교적 이해하기 쉽고 적용하기 쉬운 접근방식을 제공하며, 화재 확산에

〈Table 2〉 Summary of Previous Ignition Model

Method	Regression Model		Data-based Model	
	Model	$R^2$	Description	Model
Kawasumi (1961)	0.885	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consider only Timber Building</li> <li>Unpredictable Number of Ignition and Time</li> </ul>	Li et al (1992-2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Theorem based on Real Incident</li> <li>Predictable Fire according to Time</li> <li>Lack of Related Data</li> <li>Unclear Scope of Investigation</li> </ul>
Mizuno (1978)	0.724	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lack of Related Data</li> <li>Unpredictable Number of Ignition and Time</li> </ul>	SERA (1995-2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lack of Related Data</li> <li>Unclear Scope of Investigation</li> <li>Unpredictable Number of Ignition and Time</li> </ul>
HAZUS (1999)	0.34	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilization of Regression Equation based on Real Earthquake and Fire Data</li> </ul>	TOSHO (1997,2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>A lot of Variable Data Considered</li> <li>Utilization in Data of Real Fire Department</li> <li>Prepare Simulation Model</li> </ul>
Scawthorn (2005)	0.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lack of Fire-Related Data</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Formation Data through Ignition Ratio</li> </ul>

대한 합리적인 추정치를 산출한다. 그럼에도 불구하고 도시는 가정한 것보다 불규칙하며, 화재는 일반적으로 초기에는 타원형 형태로 구성되지만 추가적인 출화, 억제 조치 등에 의하여 타원형 형태가 지속되지 않는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 평가 모델이 개발되어 왔다.

Himoto/Tanaka 모델[11-12]에서 지진화재는 인접한 건물 화재의 열에 의한 영향으로 진화하는 개별 구획 화재의 집합으로 취급한다. 건물 내 화재 진화를 결정하기 위해 질량, 에너지, 화학물질 종류 등을 포함한 보존 방정식을 동시에 풀어서 각 시간 단계에서 화학물질 종류의 가스 온도, 밀도, 질량

〈Table 3〉 Comparison of Fire-Spread Model

Model Related to Fire Burned Ratio	Determination of Fire Burned Ratio Type	Fire Condition	Method of Modeling	Unit of Analysis
Hamada (1951, 1975)	Combusted Area	Completely, Partially, Few, Not Combusted	Spread Ellipse-Shaped	Same Blocks with an Specially Spaced Structure
TOSHO (1997, 2001)	Velocity of Fire Spread	n/a	Simulation in Real Time	Building
System Earthquake Risk Assessment (SERA) (1995-2003)	Probability of Fire Spread	n/a	Simulation	n/a
HAZUS (1997)	Not a Serious Ignition, Area of Total Combustion, Abutment of Population and Building	Completely, Partially, Few, Not Combusted	Simulation and GIS	n/a
Himoto/Tanaka (2000-2006)	Non Combustion Building, Combustion Building according to Time	n/a	Simulation based on Physical Equation	Building

\* n/a: Not used

〈Table 4〉  $k, r$  coefficients according to building structure and slope of flame

Degree	Timber Construction		Fire Prevention Construction		Quasi Fire-Resistive Construction	
	$\kappa$	$\gamma$	$\kappa$	$\gamma$	$\kappa$	$\gamma$
$\theta^\circ$						
90	3.79	0.49	2.03	0.46	1.28	0.35
85	4.06	0.48	2.43	0.41	1.82	0.27
80	4.3	0.46	2.84	0.36	2.38	0.21
75	4.54	0.44	3.25	0.32	2.95	0.16
70	4.77	0.42	3.67	0.32	3.25	0.12
65	4.98	0.41	4.11	0.29	4.09	0.08
60	5.14	0.39	4.6	0.24	4.63	0.05
55	5.24	0.37	5.08	0.14	5.07	0.02

등을 결정한다. 또한 개구부를 통해 화재가 확산할 가능성을 고려할 수 있다. 인접한 건물로 확산되는 화재는 (1) 복사에 의한 화재, (2) 대류에 의한 화재, (3) 가연물에 의한 화재로 분류하여 평가할 수 있다. Himoto/Tanaka 모델은 각 건물의 기하학적 구성과 재료에 대한 자세한 정보가 필요하므로 다른 모델에 비하여 화재확산에 대한 단순화 과정이 이루어지지 않는다.

TFD의 TOSHO 모델의 경우 데이터 기반 동적 화재연소 시뮬레이션을 활용하여 연소한계거리 산정 후, 건물간 인접거리와 비교하여 클러스터를 생성한다. 해당 방법을 제안한 Kato(2006)[13]는 클러스터 방법 외에 건물구조와 불꽃의 기울기의 관계를 고려한 연소한계거리 산정식(식 (1))을 제안하였으며, 해당 식은 아래 제시된 바와 같다.

$$d^* = k \times A^r \tag{1}$$

여기서,  $A$ 는 건물폭을 의미하며,  $k$ 와  $r$ 은 연소한계거리에 대한 계수를 나타낸다. 해당 계수에 대한 자세한 정보는 〈Table 4〉를 참고할 수 있다.

Kato가 제안한 방식은 불꽃의 기울기 등을 고려하여 계산하는 방식으로 이를 단순화하기 위한 연구가 수행되었다. 일본의 시가지 연소에 관한 대표적인 연소 속도식인 Hamada[3], Horiuchi[14], 그리고 Murosaki[15]의 연구를 기반으로 건축물의 규모에 따라 연소한계 거리의 증감정도를 보정한 간편한 식

을 식 (2)에서 식(5)에 나타내었으며, 해당 방법은 샷포로를 포함한 일부 지지체에서 사용되고 있다.

$$\text{Timber: } D = 12 \times \left(\frac{a}{10}\right)^{0.442} [m] \tag{2}$$

$$\text{Fire Prevention: } D = 6 \times \left(\frac{a}{10}\right)^{0.322} [m] \tag{3}$$

$$\text{Quasi Fire-Resistive: } D = 3 \times \left(\frac{a}{10}\right)^{0.181} [m] \tag{4}$$

$$\text{Fire-Resistive: } D = 0 [m] \tag{5}$$

여기서,  $a$ 는 건물 한 변의 길이를 의미한다.

화재확산 결과는 화재 지속시간에 걸친 각 건물의 특성, 도시계획, 화재가 발생하는 동안의 환경조건 등과 관련된 많은 요소에 의해 결정된다. 〈Table 5〉에 각 화재확산 모델에서의 주요 정보(가정, 고려 사항 등)를 요약하고 있다.

### 3. 해외 지진화재위험도 평가기법

#### 3.1 FEMA-HAZUS 지진 모델

FEMA의 HAZUS에서는 2.1장에서 언급한 바와 같이 회귀분석을 통한 출화모델을 개발하였고, 모델 개발을 위한 데이터는 아래 3가지 기준을 통해 산정하였다.

- ① “출화”로 인정할 수 있는 기준에 만족하는 데이터만 고려(“출화”란, 소방서의 대응 이전 거주자가 화재 진압이 가능한 경우를 제외한 화재를 의미)
- ② 국가별 건축물 구조 및 인구 분포의 차이를 고려하여 미국의 데이터를 고려
- ③ 시대에 따른 가전제품 사용의 빈도, 산업안전기준 변화 등을 고려하여 1970년 이후의 데이터만 고려.

FEMA-HAZUS의 지진 모델[2]은 출화율 평가를 위해 1970년 이후 출화가 발생한 미국 지진 데이터〈Table 6〉에 제시된 지진 정보를 분석하였으며, 지진 규모 및 인구밀도를 반영한 데이터 전처리 과정



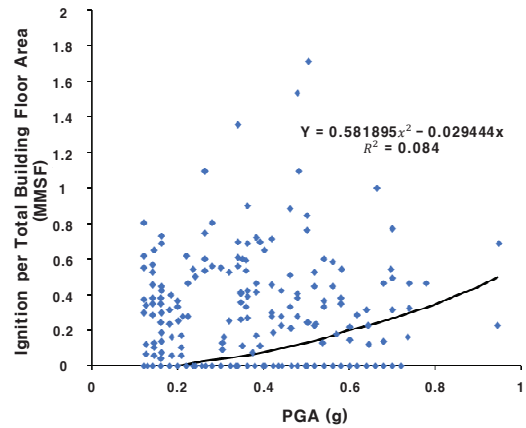
〈Table 5〉 Summary of Previous Fire Burned Models

Model	Description
Hamada (1951, 1975)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Detailed Classification of Fire Condition</li> <li>▪ Fire Spread of Ellipse-Shaped</li> </ul>
Hitomi/Tanaka (2000-2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Not Defined Fire Condition</li> <li>▪ A lot of Variable Data Considered</li> </ul>
HAZUS	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Classification of Fire-resistance Timber and Not Combusted Tomber</li> <li>▪ Based on Hamada’s Model</li> </ul>
Scawthorn (2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Consider only Timber Building</li> </ul>
SERA (1995-2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lack of Related Data</li> <li>▪ Not Consider Information and Environment of Building</li> </ul>
TOSHO (2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Utilization of Dynamic Simulation based on Data</li> </ul>

을 통해 데이터의 정확도를 높여 회귀분석에 적합한 데이터를 분류하였다. 이를 통해 얻은 155개의 출화 관련 데이터를 이용하여 적합한 회귀식을 산출하기 위해 회귀분석을 시행한 결과 PGA(Peak Ground Acceleration)에 따른 1,435개 구역의 총바닥면적의 1,000,000 평방 피트(MMSF) 당 출화량에 관한 회귀식(식 (6))을 추출하였으며 이 식을 이용한 회귀

〈Table 6〉 Ignition Data in HAZUS

Earthquake	Number of Ignition Data	Raw Data
San Fernando (1971)	91	Unpublished data
Coalinga (1983)	3	Scawthorn 1984
Morgan Hill (1984)	6	Scawthorn 1985
N.Palm springs (1986)	1	EERI 1986
Whittier Narrows (1987)	20	Wiggins 1988
Loma Prieta (1989)	36	Mohammadi et al. 1992; Scawthorn 1991
Northridge (1994)	81	Scawthorn et al. 1997
Number of Total Ignition Data	238	



〈Fig. 3〉 Ignition Model for PGA according to Input Data in FEMA-HAZUS

분석의  $R^2$  값은 0.084로 나타났다. 〈Fig. 3〉은 FEMA-HAZUS에서 활용중인 입력데이터 (PGA)에 따른 출화율을 보여준다.

$$\frac{Ign}{TFA} = 0.581895(PGA)^2 - 0.029444(PGA) \quad (6)$$

여기서, Ign/TFA(Ignition per Total Building Floor Area)는 건축물 총바닥면적의 백만 평당 피트 당 출화수를 의미하며, PGA(Peak Ground Acceleration)은 최대지반가속도를 의미한다.

FEMA-HAZUS의 소실율 산정 모델은 Hamada 모델 기반으로 화재확산 모델을 구축하였다. Hamada 모델은 지정 도시/지역단위의 건물 간격, 바람 방향 등을 반영하여 완전 연소 구조물의 수를 판정하는 방식이다. 도시지역 내 건축물을 동일한 정사각형 구조로 가정하고 구조물 사이의 평균 이격거리를 산정하여 반영한다. 최종적으로 건물 밀집도 비율, 이격거리, 내화 구조 등을 반영하여 완전 연소 구조물의 수(소실율)을 산정한다. 완전 연소 구조물의 수를 계산하는 식은 다음 같다.

$$N_{tV} = \frac{1.5\delta}{a^2} \times K_s \times (K_d + K_u) \quad (7)$$

여기서,  $N_{tV}$ 은 완전연소된 구조물의 수를 의미하며,  $t$ 는 초기 출화 후의 시간(min)을,  $V$ 는 풍속(m/s)을,  $\delta$ 는

건물의 밀집도 비율을,  $K_s$ 는 측면에서 측면까지 화재 폭의 절반(m)을,  $K_u$ 는 초기 출화 위치에서 바람이 부는 방향의 화재 길이(m)를,  $K_d$ 는 초기 출화 위치에서 맞바람 방향의 화재 길이(m)를 나타낸다.

〈Fig. 4〉은 일정한 풍속과 함께 화재가 확산되는 타원형 형태의 확산 과정을 보여준다. 실제 도시 화재에서 초기에는 타원형 형태를 화재확산 모델은 다음과 같은 변수를 고려하여 화재의 진행속도를 설명한다.

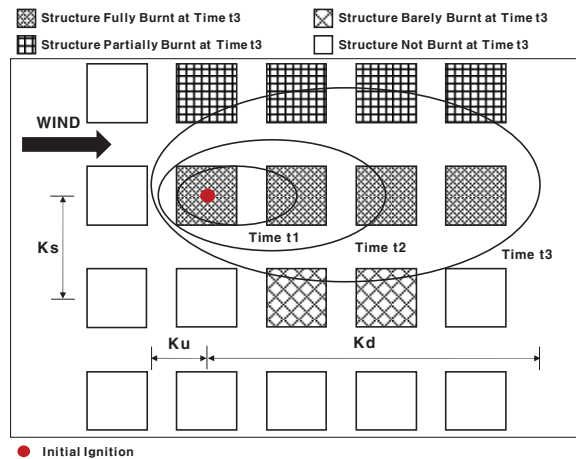
- ① 확산 방향 : 화재의 진행 속도는 downwind방향 > side wind방향 > upwind방향
- ② 풍속 : 풍속의 제곱에 따라 화재의 진행 속도가 증가
- ③ 구조물의 내화성 : 목재 구조물을 통한 확산 속도는 내화 구조물을 통한 확산속도의 약 2배이다.

이러한 평가기법에 따라 산정된 출화율과 소실율을 기반으로 화재확산면적 및 화재에 의해 노출된 건축물의 동수 등이 산출되며, 지진화재위험도 평가 시에 이를 평가지표로 활용하고 있다.

### 3.2 TOSHO 평가기법

일본 내각부에서 운영하는 중앙방재회의(이하 내각부로 명시)에서는 출화원인을 일반 화기기구, 전열기구, 전기기구/배선, 가스, 화학약품 등으로 구분하며, 이들에 의해 발생하는 출화율을 계산한다.

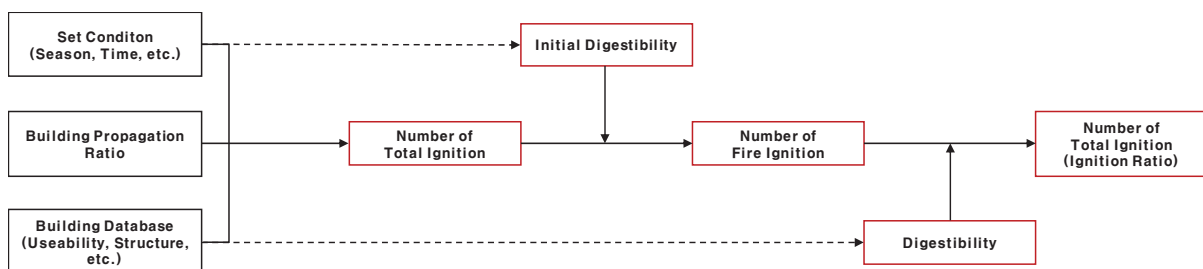
〈Fig. 5〉는 내각부에서 발표한 지진화재 평가흐름도 중 출화율 평가 방법에 대한 과정을 나타낸 것으로,



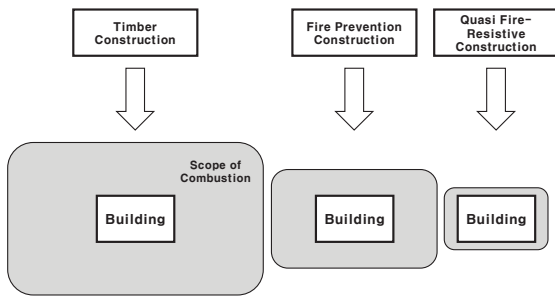
〈Fig. 4〉 Scenario of Seismic Model in FEMA-HAZUS

여러 요소(건물 용도, 구조, 계절, 시간 등)를고려하여 전체 출화건수를 산정하고, 초기소화율(거주 주민이 초기 진압 가능한 상황)을 제외하고, 소방력을 고려하여 전체 출화건수를 산정하게 되며 이를 출화율로 결정한다. 일본 내각부에 이용하는 출화율은 실제 일본에서 발생한 고베지진의 데이터(전파율, 건물, 날씨 등)와 출화의 관계를 바탕으로 설정한 표준 출화율이다. 해당 모델은 다양한 요소를 고려하였기 때문에 해당 지역에 정확한 결과를 예측할 수 있다는 장점이 있다.

일본에서 소실율을 평가하는 방법은 동적 평가법과 정적 평가법으로 구분할 수 있다. 동적 평가법은 동경소방청에서 제시한 화재확산 모델을 활용한 화재확산해석을 통해 소실율을 구하는 방법이다. 이 방법은 동경도 지진위험도 평가에 사용되는 방식이다. 정적 평가법 [16]은 지표를 이용하여 소실율을 평가하는 방법으로, '불연영역률', '목방건폐율', '목방건폐율', '연소저항율(CVF)'이 사용된다. 불연영역율이



〈Fig. 5〉 Assessment Process of Ignition Ratio in Japanese Cabinet Office



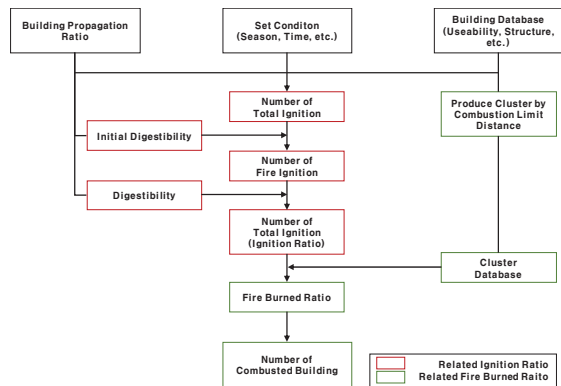
〈Fig. 6〉 Expansion of Building Shape according to Dissipation Resistance

70% 이상의 지구에 대해서는 연소 확대는 발생하지 않는다고 판단하여 소실율을 0.0%라고 예측한다. 목방건폐율이 40%를 넘는 범위의 경우 위험하다고 판단하고 목방건폐율이 20% 미만의 범위인 경우 안전하다고 판단한다. 하지만 불연영역률과 목방건폐율은 작은 지역을 대상으로 할 수 없으며 준내화조 등의 불타기 어려운 건물의 효과가 반영되지 않다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 개발된 것이 연소저항율을 활용한 평가법이다. 이는 불연영역률과 목방건폐율 등 기존 지표가 갖는 문제점을 해소하고 합리적으로 평가하기 위해 연소저항율을 사용한다. 연소저항율은 건물 간 연소한계 거리의 절반 범위에 대한 면적과 대규모 공터한계 거리의 절반 범위에 대한 면적과 대규모 공터를 제외한 지구 면적 비율을 의미한다.

〈Fig. 6〉은 연소저항율의 개념을 설명하는 그림이다. 건축물의 내화구조유형에 따라 화재를 확산되는 거리가 정해지므로 이 면적과 건축면적을 포함한 화재영역을 정의하고, 이 화재영역을 제외한 영역이 연소저항 영역이 된다. 내화구조 유형에 따른 화재영역 범위가 달라짐을 볼 수 있는데 목조는 건폐율 대비 3.293배를 적용하며, 방화조는 건폐율 대비 2.136배를 적용하고, 내화조는 건폐율 대비 1.340배를 적용한다.

연소저항율을 구하는 식 (8)은 다음과 같다.

$$CVF = 1 - (3.293 \times \text{Building Coverage of Timber Construction} + 2.136 \times \text{Building Coverage of Fire Prevention Construction} + 1.340 \times \text{Building Coverage of Quasi Fire-Resistive Construction}) \quad (8)$$



〈Fig. 7〉 Fire Following Earthquake Risk Assessment Process in Japan

연소저항율은 내화구조 유형에 따라 다르게 산정되는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 내화구조 유형의 분류는 건축물 소실을 산정에 중요한 요소임을 알 수 있다.

평균 소실 건축면적 비율(소실율)은 전 건축물 면적 중 소실 가능성이 있는 범위에 대한 비율을 평균적으로 나타내는 것이다. 연소저항율과 소실율의 관계를 바탕으로 개발된 회귀모델은 아래 식에 제시되어 있다.

$$\text{Ratio of Avg Combustion to Tot Bldg Area} = 1 - \exp\left(-\frac{0.01307}{CVF^{3.036}}\right) \quad (9)$$

여기서, Ratio of Avg Combustion of Tot Bldg Area(Ratio of Average Combustion to Total Building Area)는 전체 건축물 면적에 대한 평균 소실 비율을 의미한다.

〈Fig. 7〉는 일본의 지진화재위험도 평가기법 절차를 요약한 것이다. 이 중 소실율에 대한 평가흐름도는 초록색으로 표기되어있는 부분이다. 건축물의 정보(용도, 구조 등)와 환경 등을 고려하여 연소한계 거리를 산정하여 클러스터를 생성한다. 생성한 클러스터에 대해 출화율을 고려하여 소실율을 산정하여 소실 동수를 추출한다. 클러스터는 화재가 확산 가능한 거리(확산거리)와 건축물 간의 거리를 평가하여 확산거리 이내에 있는 건물은 화재에 노출되는 위험도가 동일하다고 가정하여 그룹화하는 방법이다. 확



률적 계산방식을 이용하여 클러스터 내의 소실 동수를 구할 수 있다.

이러한 평가기법에 따라 산정된 출화율과 소실율을 기반으로 지진화재위험도를 평가하는데, 이때 6시간 기준 특정 면적당 화재 소실건수를 화재위험순위로 표기하여 평가지표로 활용하고 있다.

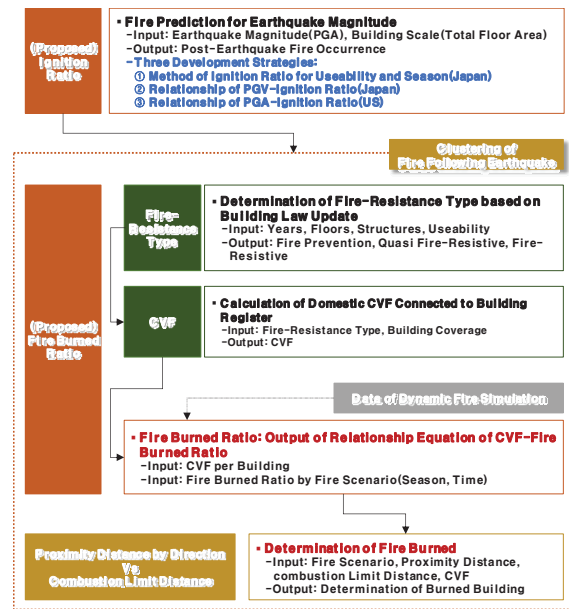
#### 4. 국내 지진화재 평가방법론(안)

FEMA-HAZUS의 지진 모델과 일본의 지진화재 평가법을 기반으로 본 논문은 국내 데이터베이스와 연계할 수 있는 한국형 지진화재 평가방법론을 제안하였다.

기존 미국, 일본 등에서 적용 중인 건축물 지진화재위험도 평가 방법은 공통으로 지진 규모(PGA 등)에 따른 출화율을 산정하고 도시/지역 단위 건축물 배치, 건축물 사이 인접 거리, 건축물의 내화성능 등을 반영하여 화재확산 정도(소실율)를 산정하는 것을 볼 수 있다. 이를 바탕으로 국내 공공 데이터베이스(건축물대장 등)를 활용하여 적용 가능한 건축물 지진화재위험도 평가기법(안)을 <Fig. 8>과 같이 제시하였다.

<Fig. 9>는 클러스터 기반의 국내 지진화재위험도의 평가(안) 흐름도를 나타낸 것이며, 출화율 산정, 클러스터 기반 소실율 산정을 통하여 지진화재위험도를 평가하는 방법이다. 출화율은 지진 시나리오에 따른 출화 발생률을 산정한다. 클러스터 기반 화재 소실율을 산정하기 위하여 건축물의 내화구조유형(내화조, 준내화조, 방화조 등)을 분류하기 위한 방법론을 구축하고, 국내 데이터베이스와 연계한 한국형 연소저항율을 산정하여 건축물 단위의 연소한계 거리를 산정한다. 이를 GIS 내에 구축된 데이터를 활용하여 건축물 사이의 거리를 비교하여, 각 클러스터를 구성하여 지진 시나리오에 따른 클러스터 단위의 소실율을 산정하는 방식이다.

<Fig. 10>은 GIS 기반으로 산정된 GIS 기반 인접거리와 연소한계 거리를 비교하여 구축하는 클러스터 방법의 예시를 보여준다. 그림에 제시된 것과 같이 다양한 유형의 내화구조 유형이 존재하며, 각 내화구조 유형에 따라 연소 범위가 다른 것을 볼 수 있다.

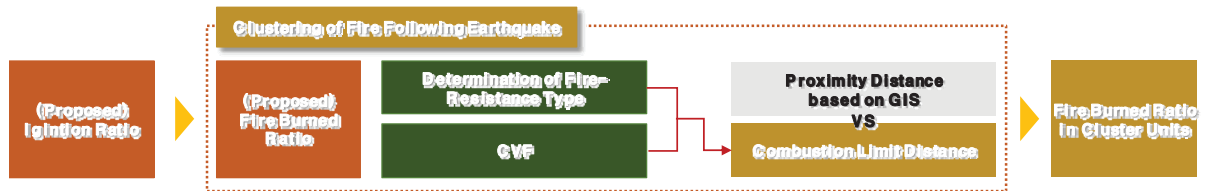


<Fig. 8> Proposed Korean Fire Following Earthquake Risk Assessment Methodology

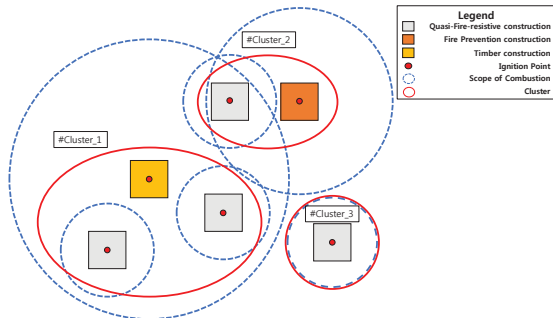
각 건축물은 모두 출화점이 존재할 수 있는 것으로 가정하여 각 출화점에 따라 화재가 확산될 수 있는 범위(연소저항율 기반 연소한계 거리)와 GIS를 통하여 자동 추출된 건축물 사이의 인접 거리와 비교하여 건축물 사이의 인접거리와 비교하여 클러스터를 구성할 수 있다. 이를 바탕으로 해당 예제에서 5개의 건축물이 배치된 지역은 총 3개의 클러스터로 구성할 수 있다.

#### 4.1 한국형 출화율 산정 방법(안)

본 논문의 2.1장에 언급한 것과 같이 출화율은 실제 과거 지진 데이터 및 기록을 바탕으로 건축물의 조건을 반영하여 회귀식을 구축하여 산정한다. 일본의 내각부 및 지방정부 등에서 사용 중인 출화율 모델은 기후조건(계절, 풍속, 풍향, 습도 등), 시간대, 한 출화건수 외에 초기소화율, 소방력 등을 반영하여 출화가 화재로 연결되는 비율을 산정하는 방식을 취하고 있다. 해당 출화율 모델은 다양한 조건을 고려하였으므로, 정확도는 높을 수 있으나 국내에서 구축된 데이터베이스(소방청 공개 화재 통계 자료, 건축물대장 정보 등)를 반영했을 때 적용의 한계가 있다. 미국 FEMA-HAZUS의 지진모델에서 적용중인



〈Fig. 9〉 Overview of Cluster-based Fire Following Earthquake Risk Assessment



〈Fig. 10〉 Example of GIS Information and Combustion Limit Distance Based Cluster Configuration

PGA 기반의 출화율은 총 1,435개의 실제 데이터를 바탕으로 구축되었으며, 해당 회귀모델을 활용하여 건축물의 바닥면적당 출화 발생율을 계산한다. HAZUS의 지진모델은 결정계수  $R^2$  값이 0.084 수준으로 PGA와 출화 발생율과의 상관관계가 낮은 것을 볼 수 있다.

상기에 언급한 기존 활용 중인 출화율 산정 방법을 국내에 적용하기 위하여 〈Fig. 8〉에 제시한 출화 발생 예측 모델에 대한 전략을 구축하였다. 본 연구에서 고려하고자 하는 출화율 모델은 아래와 같다.

- ① 일본의 용도/계절별 출화율 모델 적용
- ② 일본의 PGV(Peak Ground Velocity)-출화율 모델 적용
- ③ 미국의 PGA-출화율 모델 개선

①에 언급한 방식은 실제 일본에서 활용하는 방식으로, 풍향, 풍속 및 기온 등을 고려하여 용도별/진도별 출화율을 규정하고 있으며, 실제 출화 관련 데이터를 일부 공개되어 있으나 시뮬레이션 결과도 포함되어 있어, 일본의 화재 통계와 국내 화재 통계 자료를

를 비교하여 합리적 근거를 바탕으로 적용 가능할 것으로 예상된다.

②에 언급한 방식은 일본의 11건의 지진에서 발생한 화재 데이터를 회귀 분석한 결과로, 근래에 연구된 내용인 만큼 국내에 적용하기 위해서는 면밀한 검토가 필요할 것으로 예상된다.

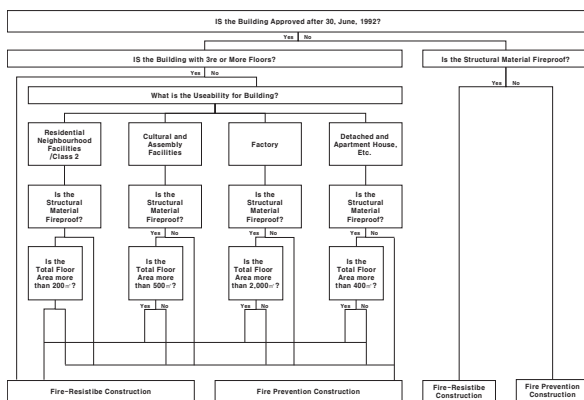
③에 언급한 미국의 PGA-출화율 모델을 개선하는 방안은 국내 2017년 11월 포항지진 발생시 실제 출화가 4건이 보고되었으며, 해당 데이터를 연계하여 기존 FEMA의 PGA-출화율 모델을 개선하는 방안을 제시한다. 복잡한 데이터 특성에 따라 데이터 변환(Data Transformation) 등을 고려한 회귀모델의 업데이트를 고려할 수 있다.

#### 4.2 한국형 소실을 산정 방법(안)

미국 FEMA의 지진 모델에서 활용 중 Hamada 모델은 건축물 형상의 단순 가정 등의 이유로 계산과정은 단순화하고 있으나, 다른 소실을 산정 모델 대비 정확도가 현저히 낮을 것으로 판단되므로, 해당 방식은 국내에 적용하지 않는다. 일본의 경우지역에 따라 불연영역을 또는 목방건폐율 기반 지진화재위험도를 평가하는 방식을 취하고 있으나, 최근 클러스터 또는 연소저항을 기반의 지진화재위험도를 평가하는 방식이 증가하고 있다. 일본의 동경도의 경우 동적 화재 시뮬레이션 방법과 연계되어 구축된 데이터베이스를 활용하고 있으므로, 이를 위하여 동적 화재 시뮬레이션 모듈(Module)을 개발할 필요가 있다. 이는 국내 기후조건, 도시 특성, 건축물 배치 등의 다양한 변수를 반영한 동적 화재 시뮬레이션 모듈 개발부터 해당 모듈의 입력데이터와 GIS 데이터와의 연계를 고려해야 한다. 일본 내각부는 불연영역을 이용하고 있으며, 손해보험과출산출기구의 경우 내화구조 유형에

따른 연소한계거리와 출화가 발생하는 건축물의 인접거리를 비교하여 구축한 클러스터 기반의 지진화재 위험도(소실율)를 판정하는 방식을 따르고 있다.

상기에 언급한 일본의 소실율을 평가하는 방식을 적용하여 국내의 건축물 관련 데이터에 적합한 정적 화재소실 평가방법론을 개발하고자 한다. 이를 위하여 내화구조 유형에 따른 한국형 연소저항율을 산정하고, 연소저항율에 따른 클러스터 단위 평균 소실건축면적을 산정한다. 여기서 건축물 내화구조 유형은 국내에 구축된 데이터베이스가 존재하지 않으므로, <Fig. 11>에 제시된 것과 같이 국내 건축물에 대해 내화구조를 분류할 수 있는 방법론을 제시하였다. 해당 방법론은 건축법 시행령 제56조 “내화구조”의 개정 과정을 역추적하여 사용승인연도, 층수, 용도, 구조재료, 연면적 등을 반영하여 내화구조와 방화구조를 구분할 수 있다. 한국형 연소저항율은 국내의 건축물대장의 정보(연면적, 건축구조유형 등)와 소방청의 화재 통계 데이터베이스(화재 시나리오별 소실면적 등)를 연계하여 산정하며, 국내 적용 대상 지역에 대하여 동적 화재 시뮬레이션을 연구 단계별로 수행하여 연소저항율 대비 소실면적을 반영하여 국내 연소저항율-평균 소실건축면적의 회귀모델을 구축한다.



<Fig. 11> Example of Classification of Fireproof Structure Types of Domestic Buildings

## 5. 결론 및 요약

본 연구에서는 지진화재 위험도 평가기법의 국산화 전략을 구축하기 위해 과거 연구자들에 의해 제안된 지진화재 위험도평가 방법론 중 출화율 및 소실율의 산정 방법을 조사하였고, 미국의 HAZUS-MH 지진 모델에서 활용중인 방법론과 일본의 지진화재 위험도평가 방법론을 조사 및 분석한 뒤 이를 기반으로 국내 건축물대장 등 국내 공공 데이터베이스를 활용하여 지진화재 위험도 평가기법(안)을 다음과 같이 제안하였다.

(1) 출화율 산정 모델은 FEMA-HAZUS 및 일본 내각부 모두 실제 데이터를 기반으로 출화율을 산정하지만 FEMA-HAZUS의 지진 모델은 실제 데이터를 기반으로 개발된 회귀분석 모델을 통하여 출화율을 산정하였다. 일본 내각부의 경우 공공 데이터베이스를 활용한 모든 출화건수 중 초기소화율 및 소방력을 고려하여 전체 출화건수를 산정한 것으로 나타났다. 일본의 출화율 산정 방법론은 다양한 화재 요인을 고려하고 있으므로, 보다 정확한 예측이 가능할 수 있지만, 국내 공공 데이터베이스와의 연계가 제한적일 수 있다.

(2) 소실율 산정 모델은 FEMA-HAZUS의 지진 모델은 Hamada 모델을 기반으로 GIS 정보를 간편화하여 완전 연소 구조물의 수를 산정하는 보수적 평가방식을 활용하고 있으며, 일본은 동적 또는 정적 해석을 기반으로 건물 및 소방청 데이터베이스를 활용하여 클러스터를 생성한 후, 각 클러스터에 대한 출화율을 고려하여 소실율을 산정한다. 미국의 소실율 산정 모델은 단순화 과정에 의하여 계산은 간단하지만, 정확도가 낮은 것으로 알려져 있으며, 일본의 동적 화재 해석 방법론은 GIS 등의 플랫폼과 연계에 제한적일 수 있다.

(3) 과거 수행된 연구 결과를 바탕으로 수립된 지진화재위험도 개발의 국산화 전략은 출화율과 소실율 산정을 기반으로 한다. 이 중 출화율은 일본에서 활용 중인 데이터는 국내 공공 데이터베이스와의 연계가 제한적이므로 기존 FEMA- HAZUS의 출화율 산정 모델에서 포항지진의 출화 데이터를 포함한 회귀모델을 방법을 제시하였다. 소실율은 일본에서 활용 중인 클러스터법을 기반으로 국내 건축 관련 법령과 건축물대장 및 소방청 데이터베이스를 활용하여 건축물의 내화구조유형에 따른 연소저항율을 산정하고, 연소저항율에 따른 클러스터 단위의 정적 소실율 산정법을 제시하였으며, 평가지표의 경우 클러스터법을 기반으로 하고 있으므로 6시간 기준 특정 면적당 화재 소실건수를 화재위험순위로 표기하여 활용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 행정안전부 국립재난안전연구원 재난안전공동연구 기술개발사업의 지원에 의해 수행되었습니다 (2022-MOIS63-003(RS-2022-ND641021)).

### References

1. 행정안전부, “2017 포항지진백서”, pp158-159, 2018.
2. FEMA. “Hazard Earthquake model Technical Manual”, Hazus 4.2 SP3, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA, pp2-1, pp9-1 - 9-11 2020.
3. Hamada, M., On Fire Spreading Velocity in Disasters, Sagami Shobo, Tokyo [in Japanese], 1951.
4. Hamada, M., Fire Resistant Construction, Akira National Corporation [in Japanese], 1975.
5. Zhao, S., Xiong, L., and Ren, A., A spatial-temporal stochastic simulation of fire outbreaks following earthquake based on GIS, J. Fire Sci. 24, 313-339, 2006.  
DOI:<https://doi.org/10.1177/0734904106060786>
6. Ren, A., and Xie, X., The simulation of post-earthquake fire-prone area based on GIS. J. Fire Sci. 22, 421-439, 2004.  
DOI:<https://doi.org/10.1177/0734904104042440>
7. Scawthorn, C., Simulation modeling of fire following earthquake, in Proceedings, 3rd National Conference for Earthquake Engineering, Charleston, SC, pp. 676-685, 1986.  
DOI:<https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.1-971>
8. Li, J., Jiang, J., and Li, M., Hazard analysis system of urban post-earthquake fire based in GIS, Acta Seismologica Sinica 14, 448-455, 2001.  
DOI:<https://doi.org/10.1007/s11589-001-0123-2>
9. Scawthorn, C., Fire Following Earthquake, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp. 104-112, 2005.
10. Kawasumi, H., Examination of Earthquake-Fire Damage in Tokyo Metropolis, Tokyo Fire Department, 1961.
11. Himoto, K., and Tanaka, T., A preliminary model for urban fire spread, in Proceedings, 15th Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, S. L. Bryner (editor), vol. 2, pp. 309-319, 2000.
12. Himoto, K., and Tanaka, T., A physically-based model for urban fire spread, in Proceedings, 2nd Workshop of US-Japan Cooperative Research for Urban Earthquake Disaster Mitigation  
DOI:<https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.7-129>

13. Kato, T, Integrated Earthquake Fire Risk Evaluation Based on Single Building Fire Probability Applicable to All Map Scales, Journal of Natural Disaster Science, Vol. 28, Number 2, 2006, pp61-72, 2006.  
DOI:<https://doi.org/10.2328/jnds.28.61>
14. Tokyo Fire Department (TFD),まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発,防災まちづくり総プロ全体委員会, Tokyo Fire Department, Tokyo, PP15-18, 2007.
15. Tokyo Fire Department (TFD),まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発,防災まちづくり総プロ全体委員会, Tokyo Fire Department, Tokyo, PP15-18, 2007.
16. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT),まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発(防災まちづくり総プロ) 報告書, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), Japan, pp11-36., 2005.

- Received : July 5, 2023
- Revised : August 11, 2023
- Accepted : August 11, 2023