

# 머신러닝 기법을 활용한 철골 모멘트 골조의 화재 취약도 분석

박성월<sup>1†</sup> · 김은주<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 건설환경공학과 박사과정, <sup>2</sup>서울대학교 건축학과 교수

## Fire Fragility Analysis of Steel Moment Frame using Machine Learning Algorithms

Xingyue Piao<sup>1†</sup> and Robin Eunju Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

### Abstract

In a fire-resistant structure, uncertainties arise in factors such as ventilation, material elasticity modulus, yield strength, coefficient of thermal expansion, external forces, and fire location. The ventilation uncertainty affects the factor contributes to uncertainties in fire temperature, subsequently impacting the structural temperature. These temperatures, combined with material properties, give rise to uncertain structural responses. Given the nonlinear behavior of structures under fire conditions, calculating fire fragility traditionally involves time-consuming Monte Carlo simulations. To address this, recent studies have explored leveraging machine learning algorithms to predict fire fragility, aiming to enhance efficiency while maintaining accuracy. This study focuses on predicting the fire fragility of a steel moment frame building, accounting for uncertainties in fire size, location, and structural material properties. The fragility curve, derived from nonlinear structural behavior under fire, follows a log-normal distribution. The results demonstrate that the proposed method accurately and efficiently predicts fire fragility, showcasing its effectiveness in streamlining the analysis process.

**Keywords** : steel moment frame, fire hazard, fragility analysis, machine learning algorithm, decision tree

### 1. 서론

구조물의 내화 설계는 보, 기둥과 같은 구성 요소 수준에서 설계되기 때문에 재료, 하중, 화재와 같은 변수의 불확실성은 설계 과정에 명시적으로 포함되지 않는다. 그러나 실제 구조물과 화재에서는 불확실성이 존재하며 구조물의 거동에 영향을 미친다. 예를 들어 화재 하중(JCSS, 2001; Khorasani *et al.*, 2014)과 고온에서 재료의 기계적 특성(Khorasani *et al.*, 2015)이 있다. 따라서 화재 구조 안전성에 대한 확률론적 분석이 필요하다.

화재 구조 해석(Hwang and Kwak, 2015; Kang *et al.*, 2023)에 대한 연구는 많이 진행되어 왔지만, 최근 확률론적 화재 구조 해석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Lange 등(2014)은 내진 구조물의 확률론적 프레임워크에 기반한 화재 취약성

분석 절차를 제안했고, Shrivastava 등(2019)은 화재 취약성 분석에 대한 개요를 제공했다.

특히 구조 부재의 화재 취약성에 대한 연구는 계속 진행되고 있다. 목재 보(Vaidogas and Juocevičius, 2008), 콘크리트 복합 보(Shi *et al.*, 2013), 콘크리트 복합 기둥(Gernay *et al.*, 2019b; Van Coile *et al.*, 2021), 철골 기둥(Guo and Jeffers, 2015; Qureshi *et al.*, 2022) 등 다양한 재료의 부재를 예로 들 수 있다.

하지만 이러한 연구들은 전체 구조물의 화재 거동을 고려하지 않아 화재 하중을 받는 구조 부재가 전체 구조물과 상호 작용한다는 단점이 있다. 따라서 전체 구조물의 화재 거동을 포함한 구조 시스템의 화재 취약성 평가가 필요하다. Chaudhary 등(2020)과 Ni와 Gernay(2021)는 콘크리트 건물의 취약성을 계산하고 콘크리트 교량의 불확실성을 포함한 화재 취약성을 예측한 바 있다(Zhu *et al.*, 2023). 그러나 철골 구조물의 화재

<sup>†</sup>Corresponding author:

Tel:\*\*\* - \*\*\*\* - \*\*\*\* E-mail: seongwol@hanyang.ac.kr

Received November 27 2023; Revised December 13 2023;

Accepted December 14 2023

© 2024 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

취약성은 Gernay 등(2016) 및 Gernay 등(2019a)에 의해 연구되었다. 여기서는 Eurocode 3의 단순 해석 방법을 사용하여 보와 기둥 사이의 핀 연결이 있는 구조물에 대한 강구조 시스템의 화재 취약성을 계산하여 화재 구조 거동을 예측하였다.

기존 연구들은 철골 모멘트 골조에 대한 화재 취약성 연구가 부족하며, 참고 논문과 같이 화재 취약성 연구를 위해서는 유한요소해석을 통해 구조물의 붕괴 여부를 판단해야 한다. 그러나 구조물 화재 해석은 많은 해석 시간이 소요된다. 또한, MCS는 구조물 화재 해석 시간이 길기 때문에 많은 해석 시간이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 유한요소해석 모델을 이용하여 전체 철골 모멘트 골조 구조물의 붕괴를 포함한 구조물을 해석하고, 화재 구조물의 취약성을 분석하여 효율적인 모델을 제안하고자 한다. 구조 재료의 불확실성, 하중의 불확실성, 화재로 인한 기온의 불확실성을 포함하고, 화재 발생 위치에 따라 전체 구조물의 취약성을 평가하였다. 이를 위해 먼저 아바쿠스 해석 프로그램을 이용한 화재 구조 모델의 해석 결과를 기존 실험 연구의 실험 결과와 비교했다. 그 결과로부터 해석 모델의 적정성을 검토하였다. 화재 구조 해석의 비선형성 때문에 철골 모멘트 프레임 건물의 화재 취약성 곡선을 계산하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션(MCS)을 수행했다. 해석 결과는 다양한 화재 위치에서 전체 구조물의 화재 취약성을 평가하는데 활용되었다. 최종적으로 머신러닝 기법을 기반으로 제안한 모델이 기존 MCS 방법보다 효율적임을 검증했다.

## 2. 취약도 함수 및 제안한 방법론

### 2.1 구조물 화재 취약도 함수

화재 취약성 함수는 특정 화재 강도 측정값(IM)이 특정 한계 피해 상태에 도달한 화재에 대한 피해 초과 확률로 정의된다. 일반적으로 구조적 응답과 한계 피해 상태는 로그 정규 분포 함수로 나타낼 수 있으며(Baker, 2015), 이는 방정식 (1)로 표현할 수 있다.

$$P(CIM=x) = \Phi\left(\frac{\ln(x/\theta)}{\beta}\right) \quad (1)$$

여기서,  $P(CIM=x)$ 는  $IM=x$ 의 화재 크기에서 구조물의 붕괴 확률이다.  $\Phi(\ )$ 는 정규누적분포함수(standard normal cumulative distribution function)이고,  $\theta$ 는 취약성 곡선의 중간값(median of the fragility function)이며,  $\beta$ 는  $\ln IM$ 의 표준편차(standard deviation)이다.

### 2.2 제안한 모델의 프레임워크

구조물의 화재 취약성 분석을 위한 몬테카를로 시뮬레이션(MCS)의 효율성을 높이기 위해 머신러닝 기법을 기반으로 한 모델을 제안했다. MCS는 무작위 추출을 통해 불확실성 변수를 선정한 후 이를 화재 구조 해석의 변수로 사용한다. 얻어진 결과는 구조물의 한계 상태를 판단하고 취약성 분석을 수행하는데 사용된다. 취약성 결과가 수렴될 때까지 화재 구조를 분석해야 하므로 많은 시간이 소요된다. 하지만 보다 효율적인 결과를 얻기 위해 제안한 모델에서는 다음과 같은 분석 절차를 제안한다.

- 1단계: 화재 구조를 분석하여 학습 데이터를 구축한다.
- 2단계: 모델 학습을 진행한다. 화재 구조 분석에 사용된 불확실성 변수를 학습 모델의 입력으로 설정하고, 붕괴 상태를 출력으로 지정한다. 여기서 붕괴가 발생하면 1로 표시하고, 구조물이 붕괴되지 않으면 0으로 표시한다.
- 3단계: 학습 모델의 하이퍼파라미터를 최적화한다.
- 4단계: 학습 모델의 유효성을 검사한다.
- 5단계: 10,000개의 불확실성 변수를 생성하고 학습된 모델을 사용하여 붕괴를 계산한다.
- 6단계: 취약성 곡선을 도출한다.

제안된 모델은 5장에서 검증했다.

## 3. 화재 구조물 모델링 대상

### 3.1 해석 대상구조물

제안된 방법론의 모멘트 프레임에 대한 적용 가능성을 검증하기 위해 본 연구에서는 Sun 등(2012)이 분석한 철골 모멘트 프레임을 선정하였다. 이 연구의 모멘트 골조는 Fig. 1과 같이

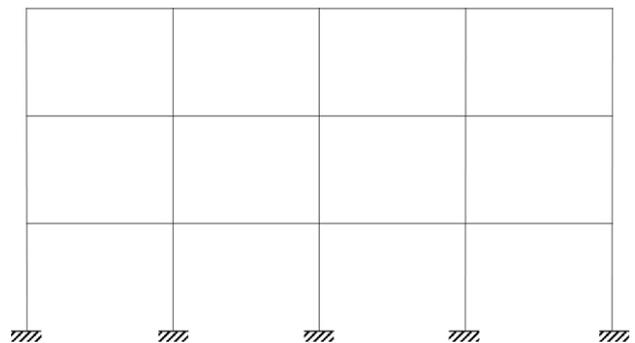


Fig. 1 Configuration of steel moment frame building

각각 5.6m와 3.2m이다. 그림에서 3층(3.2m) 4구역(5.6m) 골조이고, 보는 UB 305 × 165 × 54이고, 기둥은 UC 254 × 254 × 73이다. 재료는 S235 grade를 사용하였고, 탄성계수는 210GPa이며, 항복강도는 275MPa이다.

### 3.2 구조물의 화재 하중

화재 하중은 환기(ventilation)의 크기를 기준으로 유로코드 파라메트릭(parametric) 화재 온도 계산 모델(Eurocode 1, 2002)을 사용하여 계산했다. 이 방법에서 최대 화재 온도는 화재 하중 밀도(MJ/m<sup>2</sup>)와 환기에 의해 결정된다. 이 모델에는 가열 단계, 냉각 단계, 상온 단계가 있다.

화재 모델의 가열 단계(Heating phase)에서 화재 온도( $T$ )는 식 (2)와 같다.

$$T = 20 + 1325 \left( 1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*} \right) \quad (2)$$

여기서,  $t^*$ 는  $t^* = t\Gamma$ 로 정의되고,  $t$ 는 시간이며,  $\Gamma$ 는 환기 계수(ventilation factor)  $O$ 와 열관성(thermal inertia)  $b$ 에 의해 결정되며 식 (3)과 같다.

$$\Gamma = \frac{(O/b)^2}{(0.04/1160)^2} \quad (3)$$

또한,  $\Gamma$ 는 무차원 매개변수(a dimensionless parameter)이다. 환기 계수는 식 (4)와 같이 정의한다.

$$O = \frac{A_v h_{eq}^{0.5}}{A_t} \quad (4)$$

여기서,  $A_v$ 는 수직 방향 환기 면적(vertical opening area),  $h_{eq}^{0.5}$ 는 수직 환기의 가중 평균(weighted average of the vertical openings),  $A_t$ 는 공간의 총면적(total area of the enclosure)이다. 최대온도가 발생하는 시간  $t_{max}^*$ 는 식 (5)와 같다.

$$t_{max}^* = \max(0.2 \times 10^{-3} \frac{q_{t,d}}{O}, t_{lim}) \quad (5)$$

$$q_{t,d} = q_{f,d} \frac{A_f}{A_t} \quad (6)$$

$$q_{f,d} = q_{f,k} m \delta_{q1} \delta_{q2} \delta_n \quad (7)$$

식 (5)와 (6)에서  $q_{t,d}$ 는  $A_t$ 와 관련 있는 화재하중밀도이고, 식 (6)과 (7)에서  $q_{f,d}$ 는  $A_f$ 와 관련 있는 화재 하중 밀도이며,  $q_{f,d}$ 는 실제 화재 하중 밀도이다. 본 연구에서 화재를 중간 화재 성장으로 선택하여 Eurocode에 의해  $t_{lim}$ 은 20분이다.

본 논문은 구조물이 비내화(unprotected) 철골이라고 가정하여 화재 불확실성과 재료 불확실성에 대한 연구에 중점을 둔다. 전체 구조물의 거동을 관찰하기 위해 모멘트 프레임을 여러 가지 화재 시나리오에 노출시켰다. 화재가 발생한 구획(compartment)에서는 구획의 보와 기둥 두 개가 화재에 노출된다. 따라서 화재 모델과 열전달 해석을 통해 구조물의 온도를 계산한다. 이 온도는 화재 구조 해석의 경계 조건이다. 강철의 높은 열전도율로 인해 단면 온도는 균일하다. 따라서 열전달 해석은 철골 빔의 해석을 위해 Eurocode 3(2005) 방정식을 사용한다. 이 모델은 단계별(step-by-step) 계산 방법을 기반으로 하며, 노출된 표면적에서 짧은 시간 동안 구조물에 유입되는 열이 구조물 온도를 높이는데 필요한 열과 같다는 원리를 기반으로 한다.

### 3.3 불확실성 변수

이 연구에서는 불확실성 변수를 학습 모델의 입력으로 사용했다. 사용된 불확실성 변수는 열팽창 계수, 재료 강도, 탄성 계수 및 환기 계수 등이 있다.

본 연구에서는 JCSS(2001)에 정의한 화재모델 환기계수  $O$ 의 불확실성 분포를 사용하여 Table 1에 정리하였다.  $m$ ,  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$ ,  $\delta_n$ 는 각각 연소 인자, 공간 크기에 의한 화재위험도 관련 계수, 사용 용도에 의한 화재위험도 관련 계수, 적극적인 소방 조치 관련 계수이다. Fig. 2 불확실성 변수  $O$ 를 사용하여 계산한 화재 온도 곡선이다.

또한 하중은 정규분포이다. 표의 식에서  $\epsilon$ 는 표준 정규분포를 의미한다. 온도에 따른 탄성계수 및 극한강도의 분포가 표의 식을 사용하였다. 이 분포를 그림으로 표시하면 Fig. 3과 같다. 온도에 따른 열팽창의 불확실성도 포함하였다. 실제 상황을 고려하여 모든 불확실성 변수는 2배의 표준편차보다 크거나 작은 값은 사용하지 않았다.

## 4. 수치 예제

화재 취약성 곡선을 계산하기 위해서는 화재 구조물에 대한 비선형 해석 결과가 필요하다. 따라서 본 장에서는 구조물의 비선형 유한요소해석 모델을 검증하고, 취약성 분석의 대상인 모멘트 프레임의 거동을 관찰하였다.

Table 1 Uncertainty parameters

	Discription
Ventilation	$O = O_{max}(1 - \zeta)$ with a truncated lognormal distribution with mean 0.2 and standard deviation 0.2 and cut off at 1.
Dead load	Normal distribution with mean: $1.0G_{norm}$ and COV: 0.1
Elastic modulus	$k_{E,T} = 1.1 \times \frac{\exp(2.54 - 2.69 \times 10^{-3} \times T - 2.83 \times 10^{-6} T^2 + 0.36 \times \epsilon)}{\exp(2.54 - 2.69 \times 10^{-3} \times T - 2.83 \times 10^{-6} T^2 + 0.36 \times \epsilon) + 1}$
Yield strength	$k_{y,2\%,T} = 1.7 \times \frac{\exp(\text{logit}(\hat{k}_{y,2\%,T}) + 0.412 - 0.81 \times 10^{-3} \times T + 0.58 \times 10^{-6} T^{1.9} + 0.43 \times \epsilon)}{\exp(\text{logit}(\hat{k}_{y,2\%,T}) + 0.412 - 0.81 \times 10^{-3} \times T + 0.58 \times 10^{-6} T^{1.9} + 0.43 \times \epsilon) + 1}$
Thermal expansion	$\frac{\hat{\Delta}L}{l} = \begin{cases} 1.2 \times 10^{-5} T + 0.4 \times 10^{-8} T^2 - 2.416 \times 10^{-4} & T < 750^\circ\text{C} \\ 1.1 \times 10^{-2} & 750^\circ\text{C} \leq T < 860^\circ\text{C} \\ 2 \times 10^{-5} T - 6.2 \times 10^{-3} & 860^\circ\text{C} \leq T < 1,200^\circ\text{C} \end{cases}$ $\frac{\Delta L}{l} = \begin{cases} \left( \sqrt{\frac{\hat{\Delta}L}{l}} - 1.28 \times 10^{-3} + 3.96 \times 10^{-6} T + 0.0039 \times \epsilon \right)^2 & T < 750^\circ\text{C} \\ \left( \sqrt{\frac{\hat{\Delta}L}{l}} + [1.69 + 0.64(T - 750) - 1.7(T - 750)^{0.81} + 3.7 \times \epsilon] \times 10^{-3} \right)^2 & 750^\circ\text{C} \leq T < 860^\circ\text{C} \\ \left( \sqrt{\frac{\hat{\Delta}L}{l}} - 2.32 \times 10^{-3} + 0.173 \times 10^{-6} \times (T - 860) + 0.0037 \times \epsilon \right)^2 & 860^\circ\text{C} \leq T < 1,200^\circ\text{C} \end{cases}$

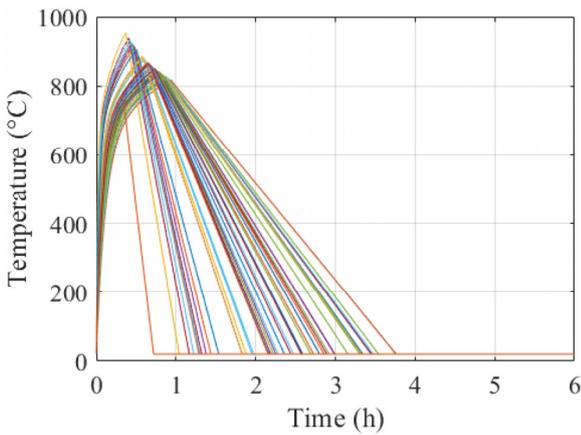


Fig. 2 Eurocode parametric fire including uncertain ventilation factor

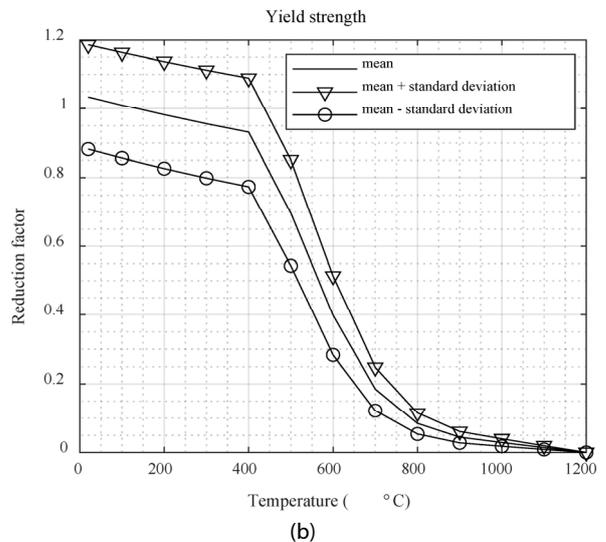
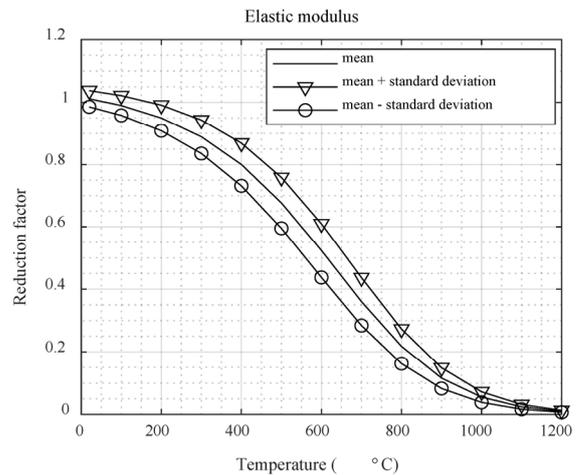


Fig. 3 Eurocode parametric fire including uncertain ventilation factor

4.1 화재-구조물 유한요소해석 모델 검증

본 연구에서 화재-구조물 유한요소해석 모델을 검증하기 위해 많은 연구자들이 검증에 사용한 실험 및 모델링 결과와 비교하였다. 검증에 사용한 구조물은 Fig. 1과 같이 폭과 1층 2구역의 핀 경계 조건인 적용된 모멘트 골조이다(Izzuddin *et al.*, 2000). 높이와 길이가 각각 1.18m와 1.2m × 2인 모멘트 골조이다. 이 모멘트 골조에 집중 하중 세 개를 재하하고 그림과 같이 화재에 노출된 1개 보와 2개 기둥에 균일한 화재온도를 발생시켰다. 나머지 두 부재는 상온을 유지하였다. 집중하중의 크기는  $F_1 = 74,000\text{N}$ ,  $F_2 = 2,850\text{N}$ 이다.

강재의 열물성 및 역학적 물성은 온도가 증가함에 따라 변화한다. 따라서 본 연구에서는 강재 모멘트 골조의 구조물 화재해석을 위해 Eurocode 3, 즉 3장에서 요약한 강재의 재료 열

물성 및 역학적 물성을 기반으로 한 모델을 사용하였다. 강재의 응력-변형율은 Eurocode 3관계식을 기반으로 한다. 이는 선형탄성구간, 탄성한계후의 비선형 구간, 완전소성 구간, 변형연화 구간으로 구성된다.

해석 모델은 화재 시 구조물 붕괴를 포함한 비선형 구조 해석을 수행하기 위해 유한요소해석 Abaqus/Explicit을 사용하여 해석을 진행하였다. 모멘트 골조의 2차원 유한요소모델은 Abaqus를 사용하여 구축되었다. 이 모델은 재료 및 기하 비선형을 모두 포함하며 보 요소(B21)를 사용하였다. 단면에 13개의 인터그레이션 포인트(integration point)이 선택되었고, 재료는 combined hardening 소성 모델을 사용하였다. 구조물의 붕괴를 포함하기 위해 정적 해석으로는 수렴이 어렵기 때문에 비선형 동적 해석을 수행하였다. 동적 에너지와 내부(internal) 에너지를 비교하여 동적거동의 영향이 작은 것으로 나타났다.

실험 데이터의 경우 해석 결과와 실험 결과를 비교하였다. 구조해석을 수행하여 모든 시간 단계마다 처짐을 얻었다. 해석 모델을 검증하기 위해 선행 연구의 실험결과를 비교하였다. 이를 위해 Fig. 4와 같은 Rubert와 Schaumann(1986)이 수행한 철골 모멘트 골조의 실험을 선택하였다. Fig. 5는 본 모델의 해석 결과와 Chaboki 등(2021), Heshmati와 Aghakouchak(2020), Izzuddin 등(2000), Jiang 등(2014; 2015), Memari와 Mahoud(2014; 2018), Qin와 Mahmoud(2019) 실험 및 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 구조물의 거동은 400°C까지 정확하며, 400°C에서 520°C까지는 오차가 존재한다. 하지만, 전반적으로 구조물의 붕괴 온도를 잘 예측하였다. 따라서 해석 모델링은 화재 구조물 해석에 적합하며, 본 연구의 취약성 평가에 사용되었다.

#### 4.2 취약도 해석 및 결과

구조물의 화재 취약도 해석을 위해 변수의 불확실성을 포함한 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구의 목적을 위해 사용한 화재 모델, 열전달 모델, 선택한 구조물 및 불확실성은 모두 앞장에서 설명한 모델을 사용하였다. 또한 화재 구

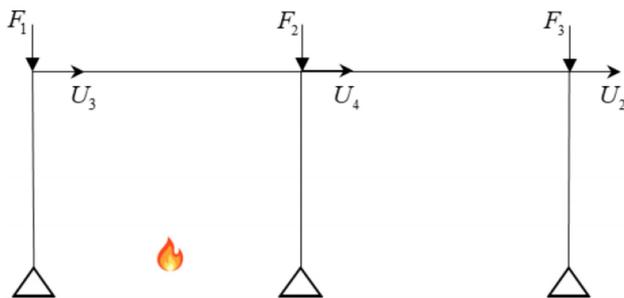


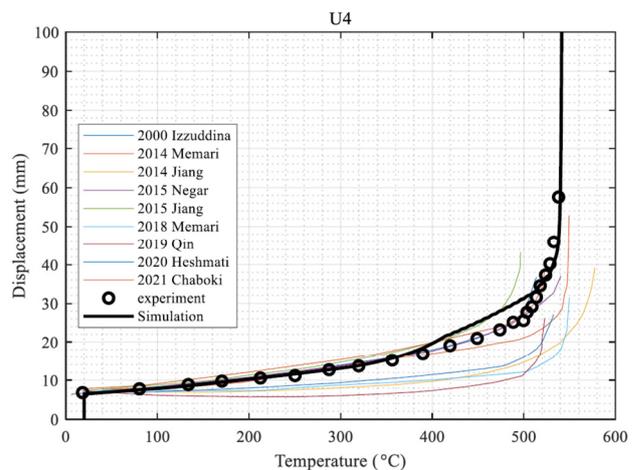
Fig. 4 Configuration of ZSR

조물해석은 검증된 모델을 기반으로 한다.

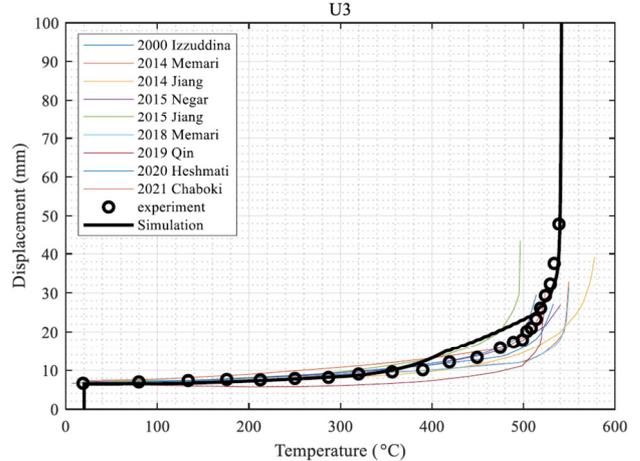
화재 구조물 비선형 유한요소해석 모델은 3장에서 검증한 모델을 사용하였다. 즉, 불확실성은 같은 재료의 성질 즉, 탄성계수(elastic modulus), 항복강도(yield strength), 열변형(thermal strain)은 Table 1과 같은 분포를 사용하였고, Khorasani 등(2015)을 참고하였다. 그중에서  $\epsilon$ 는 표준정규분포이다. 화재 구조물에서 하중의 불확실성은 Table 1과 같이 Jovanović 등(2021)에서 제안 모델을 사용하여 계산하였다.

해석은 세 단계(step)로 나누어 진행하였다. “initial step”에서는 경계조건을 설정하고, “predefined field”를 20도(상온)로 지정하였다. 두 번째 step에서는 온도 상승하중 조건을 지정하며, 마지막 step에서는 온도 하강조건을 20도로 설정하였다. 여기서는 열전달 해석에서 얻은 절점의 온도 데이터를 온도하중으로 적용하였다. 마지막 단계 후 구조물의 변위를 확인하여 붕괴여부를 판단하였다.

Fig. 6과 같이 구조물 화재가 발생한 3위치를 선택하였다. 3가지 시나리오는 각각 1층, 2층 및 3층에서 발생하는 화재이



(a)



(b)

Fig. 5 Results of ZSR for validation

다. 구조물의 취약성을 계산하기 위해 1000개의 시뮬레이션을 진행하였다.

구조물의 화재 취약성을 계산하기 위해 강도 측정(intensity measure, IM)는 화재 하중밀도(Fire load density(MJ/m<sup>2</sup>))를 사용하였다. 화재 후 구조물의 손상을 분석하기 위해 본 연구에서는 붕괴 손상상태를 사용하였다. 즉 온도 하강 후, 전체 시스템의 변위가 한계상태에 도달할 때를 붕괴로 정의하였다. 또한, 화재 모델의 화재 크기  $q_{t,d}$ 의 적용 범위는 50~1,000MJ/m<sup>2</sup>이다. 따라서 본 연구에서  $q_{t,d}$ 가 250MJ/m<sup>2</sup> 이하인 화재는 포함하지 않았다. 수치모델링을 통해 화재 취약성 곡선은 Fig. 7와 같다. 파란색, 블랙, 빨간색 곡선은 각각 1층, 2층과 3층 화재일 때 취약도 곡선 결과이다.

화재 취약도 곡선의 적합도를 확인하기 위해 Kolmogorov-Smirnov Test를 사용하여 취약성 곡선의 적합도 검증(goodness-of-fit test)를 진행하였다. 그 결과, 화재 취약도 곡선의 수렴 및 로그 정규분포가 확인되었다. Eurocode 1에서 오피스 건물의

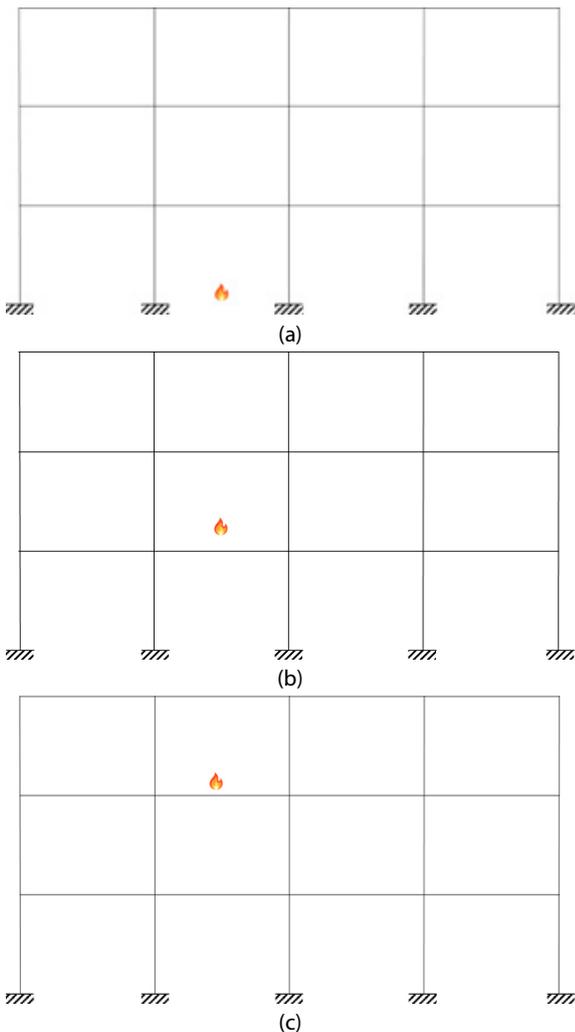


Fig. 6 Fire scenarios (a) Fire1; (b) Fire2; (c) Fire3

평균 화재 크기는 420MJ/m<sup>2</sup>이고, 80% Fractile는 511MJ/m<sup>2</sup>이다. 화재 하중이 420MJ/m<sup>2</sup>일 때, 두 화재 시나리오의 붕괴 확률은 각각 46%과 11%이다. 또한, 화재 하중이 511MJ/m<sup>2</sup>일 때, 1층에서 발생한 화재와 3층에서 발생한 화재에서 붕괴 확률이 각각 73%와 27%이다. 따라서 건물 내 화재 위치에 따라 위험도가 달라진다.

### 5. 제안한 모델의 검증 및 성능

이 장에서는 제안된 방법을 사용하여 계산된 취약성 곡선을 기존의 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 계산된 곡선과 비교한다. 입력값은 구조물과 화재의 불확실성 변수인 탄성 계수, 강도, 열팽창 계수, 강철의 최고 온도이다. 출력값은 붕괴 여부이다. 이 모델은 철골 모멘트 프레임에 적용되었다. 하지만 화재 취약성 곡선 계산을 위해 모든 구조물에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안한 방법은 모든 대상 구조물에 대해 다시 시뮬레이션을 수행해야 한다. 하지만 MCS 방법보다 훨씬 많은 시간을 절약할 수 있다. 25개의 화재 밀도 하중 각각에 대해 50회씩 분석을 수행하고 그 결과를 머신러닝에 사용한 다음, 무작위로 생성된 10,000개의 입력을 학습된 모델에 입력하여 출력을 도출했다. 훈련 데이터의 개수는 50개, 취약성 곡선 도출에 사용된 데이터의 개수는 정규 분포 데이터 10,000개이다. MCS에 사용된 데이터의 수는 25개의 화재 밀도 하중 각각에 대해 1,000회의 시뮬레이션을 수행했다.

본 연구에서는 머신러닝 모델을 학습시키기 위해 모든 화재 밀도 하중(25개)에서 50개의 화재 구조물을 분석했다. 통계적 특성은 표와 같이 분포되어 있다. 훈련 모델은 의사 결정 트리이다. 정확도를 결정하기 위해 K-Fold 교차 검증을 수행했다. 결과는 Table 2에 요약되어 있다. 그 결과 1층 화재의 네 가지 화재 밀도 부하에 대해 0.49와 0.55의 낮은 정확도를 보였다.

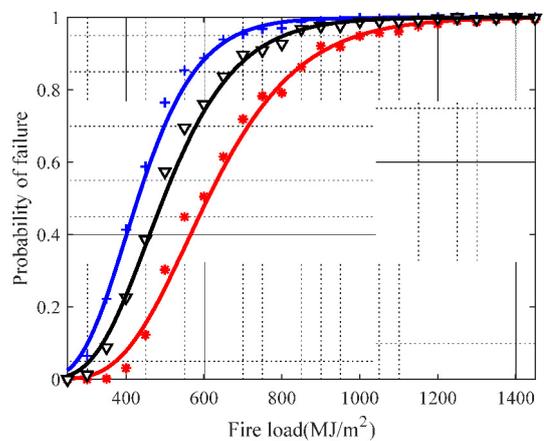


Fig. 7 Fragility results

Table 2 Accuracy with 10-fold validation

No.	Fire 1		Fire 2		Fire 3	
	Train	Test	Train	Test	Train	Test
1	1	1	1	1	1	1
2	0.88	0.95	1	0.95	1	1
3	0.79	0.7	0.85	0.7	1	1
4	0.49	0.55	0.77	0.8	1	0.95
5	0.57	0.75	0.68	0.6	0.94	0.85
6	0.58	0.75	0.68	0.65	0.71	0.55
7	0.92	1	0.68	1	0.57	0.55
8	0.92	0.95	0.74	0.95	0.82	0.6
9	0.95	0.9	0.83	0.6	0.65	0.75
10	0.94	1	0.85	1	0.78	0.8
11	0.97	0.95	0.95	0.95	0.71	0.6
12	1	0.95	0.97	0.9	0.88	0.65
13	0.97	1	0.97	0.95	0.87	0.85
14	0.97	1	0.82	1	0.78	1
15	1	1	1	1	0.91	1
16	1	1	1	1	0.91	1
17	1	1	1	1	0.97	1
18	1	1	1	1	1	0.95
19	1	1	1	1	1	0.95
20	1	1	1	1	0.97	0.95
21	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	0.97	0.95
23	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1

하지만 나머지 사례는 높은 결과를 보였기 때문에 훈련 모델을 사용하여 취약성 곡선을 계산했다.

제안한 모델은 먼저 10,000개의 샘플링 변수를 무작위로 선정하고 학습된 모델을 사용하여 붕괴를 분류한다. 결과를 통계적으로 분석하고 각 화재 밀도 하중에서 피팅을 수행했다. Fig. 8에서 점선은 제안한 방법의 결과이고 실선은 4장의 몬테카를로 시뮬레이션으로 계산한 결과이다. 제안한 방법의 결과는 MCS의 결과와 유사하며, MCS와 제안한 모델을 사용하여 계산한 취약성 곡선의 평균값은 각각 440MJ/m<sup>2</sup>, 499MJ/m<sup>2</sup>, 610MJ/m<sup>2</sup> 및 441MJ/m<sup>2</sup>, 510MJ/m<sup>2</sup>, 616MJ/m<sup>2</sup>이다.

효율성을 확인하기 위해 50개의 화재 구조 유한요소해석, 머신러닝을 통한 모델 학습, 10,000개의 학습된 모델을 사용하여 학습 모델이 사용한 시간과 MCS 방법으로 계산한 시간을 비교했다. 여기서 제안한 모델이 하나의 화재하중에서 유한요소해석, 모델훈련 및 훈련된 모델을 사용한 계산 시간은 각각 60s × 50 = 3,000s, 1s와 1s이다. 모든 화재 하중크기, 즉 25가지

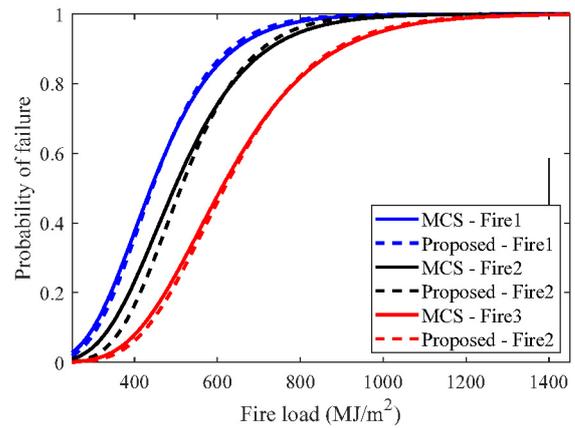


Fig. 8 Performance of proposed method

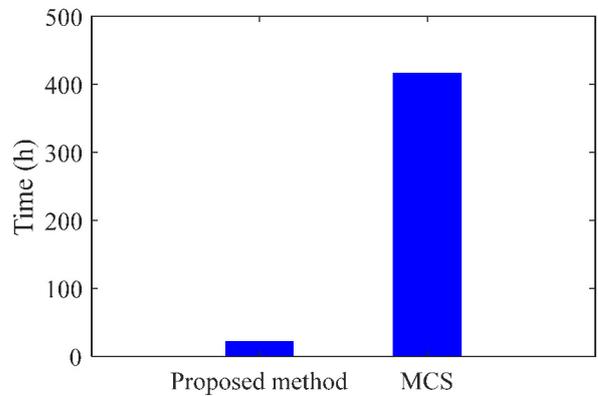


Fig. 9 Computational time

화재 케이스에서 총 3,002s × 25 = 20.85h을 소모했다. 또한 몬테카를로 시뮬레이션은 1,000개의 화재구조물 해석의 시간 (60s × 1000 × 25 = 416h = 17.36days)이다. 이것을 Fig. 9로 표시하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법의 정확성과 효율성을 검증하였다.

## 6. 결론

본 연구에서는 머신러닝 기법에 기반한 화재 취약성 해석 모델을 제안하고, 몬테카를로 해석을 통해 철골 모멘트 프레임의 화재 시 거동을 분석하여 구조물의 화재 취약성 해석 결과와 비교함으로써 그 정확성과 효율성을 검증한다. 이를 위해 비선형 유한요소해석을 이용하여 철골 모멘트 프레임에 대한 해석 모델을 개발하고, 과거에 수행된 다른 연구의 실험 및 해석 결과와 비교하여 해석 모델의 타당성을 검토하였다. 비교 결과, 해석 모델이 실험 결과보다 붕괴 온도를 더 잘 예측하는 것으로 나타났다. 구조물 화재를 해석하기 위해 파라메트릭 Eurocode 화재 모델을 사용하여 화재의 불확실성을 포함하고, Eurocode 3의 열전달 모델을 사용하여 구조물 온도를 계산

하고 이를 비선형 유한요소해석의 열 부하로 사용했다. 또한 화재로 인한 손상 상태와 한계 손상 상태를 결정하여 취약성을 도출하였다. 화재 하중 밀도를 화재 하중으로 고려하고, 구조물에 대한 비선형 동적 해석을 수행하여 얻은 구조 응답을 기록하였다. 구조 응답을 이용하여 피해 초과 확률을 구하고 화재 취약성 곡선을 도출했다.

그 결과 철골 모멘트 프레임에 대한 구조해석 모델의 화재 취약성 분석은 철골 모멘트 프레임의 화재 위치에 따라 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구는 붕괴 및 내화 성능을 고려한 구조물 설계에 참고할 수 있다. 또한 제안한 모델을 기존의 몬테카를로 방법과 비교하여 정확성과 효율성을 모두 확인하였다. 본 연구는 2차원으로 가정한 철골 구조물 해석의 한계에도 불구하고 머신러닝 기법을 기반으로 한 화재 취약성 분석의 타당성과 효율성을 검증하였다.

### References

**Baker, J.W.** (2015) Efficient Analytical Fragility Function Fitting using Dynamic Structural Analysis, *Earthq. Spectra*, 31(1), pp.579~599.

**Chaboki, M., Heshmati, M., Aghakouchak, A.A.** (2021) Investigating the behaviour of Steel Framed-Tube and Moment-Resisting Frame Systems Exposed to Fire, *Struct.* 33, pp. 1802~1818.

**Chaudhary, R.K., Roy, T., Matsagar, V.** (2020) Framework for Fragility Assessment of Reinforced Concrete Portal Frame Subjected to Elevated Temperature, *Struct.*, 28, pp.2785~2800.

**Eurocode 1** (2002) Eurocode 1: Actions on Structures - Part 1-2: General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire, EN 1991-1-2. CEN, Brussels.

**Eurocode 3** (2005) Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design, EN 1993-1-2. CEN, Brussels.

**Gernay, T., Khorasani, N.E., Garlock, M.** (2019a) Fire Fragility Functions for Steel Frame Buildings: Sensitivity Analysis and Reliability Framework. *Fire Technol.*, 55(4), pp.1175~1210.

**Gernay, T., Khorasani, N.E., Garlock, M.** (2016) Fire Fragility Curves for Steel Buildings in a Community Context: A Methodology, *Eng. Struct.*, 113, pp.259~276.

**Gernay, T., Van Coile, R., Khorasani, N.E., Hopkin, D.** (2019b) Efficient Uncertainty Quantification Method Applied to Structural Fire Engineering Computations, *Eng. Struct.*, 183, pp.1~17.

**Guo, Q., Jeffers, A.E.** (2015) Finite-Element Reliability Analysis of Structures Subjected to Fire, *J. Struct. Eng.*, 141(4),

p.04014129.

**Heshmati, M., Aghakouchak, A.A.** (2020) Collapse Analysis of Regular and Irregular Tall Steel Moment Frames under Fire Loading, *Struct. Des. Tall & Spec. Build.*, 29(3), p.e1696.

**Hwang, J.Y., Kwak, H.G.** (2015) A Numerical Model of Reinforced Concrete Members Exposed to Fire and After-Cooling Analysis, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(1), pp.101~113.

**Izzuddin, B.A., Song, L., Elnashai, A.S., Dowling, P.J.** (2000) An Integrated Adaptive Environment for Fire and Explosion Analysis of Steel Frames - Part II: Verification and Application, *J. Constr. Steel Res.*, 53, pp.87~111.

**JCSS** (2001) JCSS Probabilistic Model Code - Part 2: Load Models, Joint Committee on Structural Safety, ISBN 978-3-909386-79-6.

**Jiang, J., Li, G.Q., Usmani, A.** (2014) Progressive Collapse Mechanisms of Steel Frames Exposed to Fire, *Adv. Structural Eng.*, 17(3), pp.381~398.

**Jiang, B., Li, G.Q., Usmani, A.** (2015) Progressive Collapse Mechanisms Investigation of Planar Steel Moment Frames under Localized Fire, *J. Constr. Steel Res.*, 115, pp.160~168.

**Jovanović, B., Van Coile, R., Hopkin, D., Khorasani, N.E., Lange, D., Gernay, T.** (2021) Review of Current Practice in Probabilistic Structural Fire Engineering: Permanent and Live Load Modelling, *Fire Technol.*, 57, pp.1~30.

**Kang, J.W., Kang, M.S., Yoon, H.** (2023) Structural Fire Analysis of a Composite Beam Protected by Fire-Resistant Materials, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 36(2), pp.137~145.

**Khorasani, N.E., Gardoni, P., Garlock, M.** (2015) Probabilistic Fire Analysis: Material Models and Evaluation of Steel Structural Members, *J. Struct. Eng.*, 141(12), p.04015050.

**Khorasani, N.E., Garlock, M., Gardoni, P.** (2014) Fire Load: Survey Data, Recent Standards, and Probabilistic Models for Office Buildings, *Eng. Struct.*, 58, pp.152~165.

**Lange, D., Devaney, S., Usmani, A.** (2014) An Application of the PEER Performance Based Earthquake Engineering Framework to Structures in Fire, *Eng. Struct.*, 66, pp.100~115.

**Memari, M., Mahmoud, H.** (2014) Performance of Steel Moment Resisting Frames with RBS Connections under Fire Loading, *Eng. Struct.*, 75, pp.126~138.

**Memari, M., Mahmoud, H.** (2018) Multi-Resolution Analysis of the SAC Steel Frames with RBS Connections under Fire, *Fire Saf. J.*, 98, pp.90~108.

**Ni, S., Gernay, T.** (2021) A Framework for Probabilistic Fire Loss Estimation in Concrete Building Structures, *Struct. Saf.*, 88, p.102029.

- Qin, C., Mahmoud, H.** (2019) Collapse Performance of Composite Steel Frames under Fire, *Eng. Struct.*, 183, pp.662~676.
- Qureshi, R., Van Coile, R., Hopkin, D., Thomas, G.** (2022) Reliability Assessment of the US Prescriptive Standard for Steel Columns under Fire, *Struct.*, 40, pp.711~724.
- Rubert, A., Schaumann, P.** (1986) Structural Steel and Plane Frame Assemblies under Fire Action, *Fire Saf. J.*, 10, pp. 173~184.
- Shi, K., Guo, Q., Jeffers, A.** (2013) Stochastic Analysis of Structures in Fire by Monte Carlo Simulation, *J. Struct. Fire Eng.*, 4(1), pp.37~46.
- Shrivastava, M., Abu, A., Dhakal, R., Moss, P.** (2019) State-of-the-Art of Probabilistic Performance Based Structural Fire Engineering, *J. Struct. Fire Eng.*, 10(2), pp.175~192.
- Sun, R., Huang, Z., Burgess, I.W.** (2012) Progressive Collapse Analysis of Steel Structures under Fire Conditions, *Eng. Struct.*, 34, pp.400~413.
- Vaidogas, E., Juocevičius, V.** (2008) Reliability of a Timber Structure Exposed to Fire: Estimation using Fragility Function, *J. Mech.*, 73(5), pp.35~42.
- Van Coile, R., Hopkin, D., Khorasani, N.E., Gernay, T.** (2021) Demonstrating Adequate Safety for a Concrete Column Exposed to Fire, using Probabilistic Methods, *Fire & Mater.*, 45(7), pp.918~928.
- Zhu, Z., Quiel, S.E., Khorasani, N.E.** (2023) Bivariate Structural-Fire Fragility Curves for Simple-Span Overpass Bridges with Composite Steel Plate Girders, *Struct. Saf.*, 100, p.102294.

## 요 지

내화 구조물에서는 환기 계수, 재료 탄성 계수, 항복 강도, 열팽창 계수, 외력 및 화재 위치에서 불확실성이 관찰된다. 환기 불확실성은 화재 온도에 영향을 미치고, 이는 다시 구조물 온도에 영향을 미친다. 이러한 온도는 재료 특성과 함께 불확실한 구조적 응답으로 이어지고 있다. 화재 시 구조적 비선형 거동으로 인해 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 화재 취약성을 계산하는데, 이는 시간이 많이 소요된다. 따라서 머신러닝 알고리즘을 활용해 화재 취약성 분석을 예측함으로써 효율성을 높이고 정확성을 확보하려는 연구가 진행되고 있다. 이 연구에서는 화재 크기, 위치, 구조 재료 특성의 불확실성을 고려하여 철골 모멘트 골조 건물의 화재 취약성을 예측했다. 화재 시 비선형 구조 거동 결과를 기반으로 한 취약성 곡선은 로그 정규 분포를 따른다. 마지막으로 제안한 방법이 화재 취약성을 정확하고 효율적으로 예측할 수 있음을 보여주었다.

**핵심용어** : 철골 모멘트 골조, 화재재난, 취약도 분석, 머신러닝 기법, 결정 트리