

시뮬레이션 기반 피난 안전성 평가 Simulation-Based Evacuation Safety Evaluation

1. 머리말

현대 사회에서 건축물의 규모와 복잡성이 증가함에 따라, 화재 및 비상 상황 발생 시 안전한 피난의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 특히, 다중 이용 건축물, 고층 건축물, 그리고 특수 건축물에서는 화재 발생 시 다수의 인명 피해가 발생할 수 있어, 효과적인 피난 계획이 재실자들의 생명 안전과 직결된다. 따라서 건축물의 설계 단계부터 피난 안전성을 철저히 검토하고 평가하는 것이 필수적이다. 피난 안전성 평가는 화재와 같은 비상 상황에 대비해 재실자들이 안전하게 대피할 수 있도록 다양한 요소를 분석하고 개선하는 과정을 포함한다. 이 과정에서는 단순히 건축물의 구조적인 면만 고려하는 것이 아니라, 재실자의 행동 패턴, 화재의 확산 속도, 비상 시스템의 작동 여부 등 여러 요소를 종합적으로 고려해야 한다. 또한 화재 시뮬레이션과 피난 시뮬레이션을 활용해 예측 가능한 모든 시나리오를 검토하고, 피난 경로, 피난 시간, 혼잡 구역 등을 분석해 최적의 피난 계획을 수립해야 한다. 이러한 과정을 통해 화재 발생 시 인명 피해를 최소화하고, 신속하고 안전한 피난을 가능하게 하는 것이 피난 안전성 평가의 궁극적인 목표이다. 본 기술 기사에서는 화재 및 피난 시뮬레이션의 개요와 함께 피난 안전성을 평가하는 방법, 그리고 평가 결과를 통해 개선안을 제시하는 방법을 다루고자 한다. 이를 통해 건축물의 설계 및 운영에서 피난 안전성을 과학적이고 체계적으로 강화하는 데 기여하고자 한다.



할리오나

서울시립대학교 건축학부 박사후연구원



최 승 호

서울시립대학교 방재공학과 조교수



허 인 옥

서울시립대학교 도시방재안전연구소 박사후연구원



김 강 수

서울시립대학교 건축학부 교수

2. 화재 시뮬레이션 개요

화재 시뮬레이션은 대상 건축물의 특성을 고려하여 건축물 내에서 발생할 수 있는 화재 상황을 컴퓨터 모델을 통해 예측하고 분석하는 기술이다. 이를 통해 화재의 발생 및 확산 경로, 화재 온도와 연기의 이동 및 화재 시 인명 피해를 최소화하기 등의 다양한 전략을 평가할 수 있다.

화재 시뮬레이션은 주로 National Institute of Standards and Technology (NIST)에서 개발한 Fire Dynamic Simulation(FDS)을 활용하여 복잡한 화재 현상을 정밀하게 재현하며, 다양한 시나리오를 설정하여 화재 대응 방안을 연구하는 데 활용된다.

화재 시뮬레이션의 주요 목적은 다음과 같이 정리할 수 있다:

- 가) **화재 확산 예측:** 화재가 건축물 내에서 어떻게 확산 되는지 시뮬레이션을 통하여 화재 위험을 사전에 예측한다.
- 나) **화재 온도 및 연기 이동 분석:** 화재로 인해 발생하는 화재 온도 증가, 연기 및 유독가스의 이동 경로를 분석하여 인명 피난 경로를 최적화한다.
- 다) **허용피난시간(Available Safe Egress Time, ASET) 평가:** 건축물 내 재실자들이 안전하게 피난할 수 있는 시간을 평가하여 피난 안전성을 검토한다.
- 라) **소방 시스템 평가:** 스프링클러, 소화기, 배연 시스템 등 소방 설비의 효율성을 검토하고 개선 방안을 제시한다.

화재 시뮬레이션을 기반으로한 건축물의 화재 안전성 평가는 다음과 같은 절차를 통해 이루어진다.

2.1 화재 시뮬레이션 모델 구축

FDS User's Guide[1]를 참조하여 건축물의 내부 배치를 정확히 반영한 3D 모델을 생성한다. 이를 위해 건축 도면과 설계 자료를 바탕으로 상세한 모델링을 수행하며, 건축물 구획 내에 있는 가구들을 모두 모델링하거나 모든 가구의 발열량을 종합하여 1m²인 하나의 가연물로 단순화할 수 있다. FDS의 주요 입력 변수는 격자 크기, 열방출율(Heat Release Rate, HRR) 및 연소 특성이다. FDS User's Guide에서 제시하고 있는 바와 같이 먼저 화원의 특성 직경(D^*)을

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

으로 구하고, 격자(mesh)의 크기(dx , in meter)는 D^*/dx 이

$$4 \leq D^*/dx \leq 16 \quad (2)$$

으로 되도록 설정한다. 여기서, \dot{Q} 는 열방출율, ρ_{∞} 는 주변 공기의 밀도(1.204 kg/m³), c_p 는 주변 공기의 비열(1.005

kJ/kg-K), T_{∞} 는 주변 공기의 온도(293 K), g 는 중력가속도(9.81 m/s²)를 의미한다. 다양한 가연물의 열방출율을 기존 연구, 다양한 데이터베이스 및 실제 실험을 통해 얻을 수 있으며, 연소 특성 값은 SFPE(Society of Fire Protection Engineers handbook)[2]을 참조하여 설정할 수 있다.

2.2 화재 시나리오 설정

다양한 화재 시나리오를 설정하여 각각의 상황에 따른 화재 확산 경로, 화재 온도, 연기 및 유독가스의 이동을 예측할 수 있다. 화재의 발생 위치, 화재 연료 종류, 화재 하중, 환기 조건 및 배연 설비 종류 등 다양한 변수를 고려하여 화재 시나리오를 설정할 수 있다.

여기서 중요 변수 중 하나가 화재하중인 열방출율이며, 이는 화재 구획 내 가연물의 발열량의 종합으로 설정된다. 열방출율 화재 곡선 중 가장 단순한 모델은 열방출율이 시간의 제곱에 비례한다고 가정하는 t-square 화재곡선[3]이며,

$$t = \sqrt{\frac{Q}{\alpha}} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, t 는 점화 후 경과 시간(s), Q 는 열방출률 (kW) 및 α 는 화재성장계수(kW/s²)이다. 그림 1과 표 1에 나타낸 바와 같이 t-square 화재 곡선에서 화재 성장률을 4종류(Ultrafast, Fast, Medium, Slow)로 구분할 수 있다.

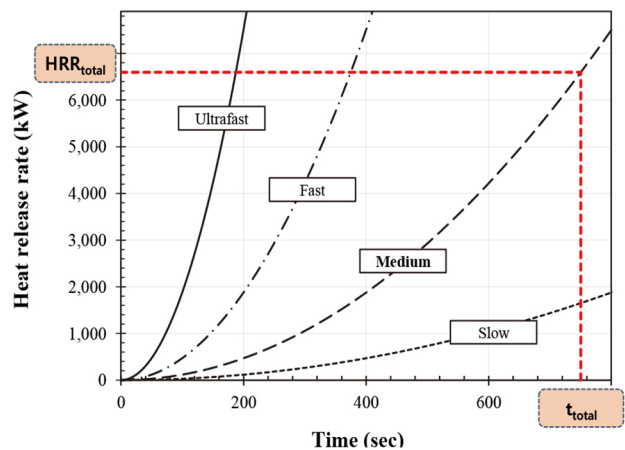


그림 1 t² 화재 성장 곡선

표 1 t^2 화재에서 화재선장계수(British Standard Institute, BSI)[5]

	$\alpha(kW/s^2)$	$t_g(s)$
Slow	0.002931	600
Medium	0.01127	300
Fast	0.04689	150
Ultrafast	0.1878	75

t_g : 1MW에 도달하는 시간

2.3 화재 시뮬레이션 실행 및 분석

설정된 화재 시나리오를 기반으로 화재 시뮬레이션을 실행한다. FDS 소프트웨어를 통해 인명안전에 영향을 미치는 5가지 요소에 대해서 평가하며, 5가지 요소는 화재 온도, 가시거리, 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂) 및 산소(O₂)이다. 각 요소의 농도가 표 2의 National Fire Protection Association(NFPA)[4]에서 제시하는 인명안전기준에 도달하는 시점을 산정하며, 이 시간이 각 요소별 재실자의 안전을 확보할 수 있는 시간인 허용피난시간(ASET)이 된다. 또한, 5개의 허용피난시간 중 가장 짧은 시간을 대상 건축물의 허용피난시간으로 평가한다.

3. 피난 시뮬레이션 개요

피난 시뮬레이션은 화재 발생 시 건축물 내 재실자들의 피난 경로와 시간을 분석하는 기술이다. 에이전트 기반 모델에 근거하여 재실자의 행동특성을 고려할 수 있는 피난 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 재실자들의 행동과 움직임을 예측하며, 건축물 구조와 화재의 확산 경로를 고려하

표 2 인명안전기준 (NFPA)

구분	상능기준	
열에 의한 영향	60℃ 이하	
가시거리에 의한 영향	용도	허용가시거리 한계
	기타시설	5 m
	집회시설, 판매시설	10 m
독성에 의한 영향	CO	1,400 ppm 이하
	O ₂	15% 이상
	CO ₂	5% 이하

여 모든 재실자가 피난을 완료하는 시간인 요구피난시간(Required Safe Egress Time, RSET)을 도출하는 목적으로 사용된다. 피난 시뮬레이션의 주요 목적은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 가) **피난 경로 최적화**: 건축물 내 재실자들이 화재 발생 시 가장 빠르고 안전하게 피난할 수 있는 경로를 분석한다.
- 나) **요구피난시간(RSET) 산출**: 재실자들이 건축물을 완전히 피난하는데 필요한 시간을 도출한다.
- 다) **혼잡 구역 식별**: 피난 과정에서 발생할 수 있는 혼잡 구역을 식별하고, 피난 속도가 정체되는 병목현상을 해결하기 위한 방안을 모색한다.
- 라) **피난 안전성 검증**: 건축물 설계와 피난 계획이 적절한지 검증하고, 필요한 개선 사항을 도출한다.

피난 시뮬레이션은 주로 다음과 같은 요소들을 고려하여 수행된다.

- 재실자 특성: 연령, 성별, 신체, 이동 속도 등 재실자의 다양한 특성을 반영한다.
- 건축물 구조 특성: 출입구, 계단, 복도 등 건축물 내부의 구조적 요소를 반영한다.
- 행동 모델: 재실자들의 피난 행동과 반응을 모델링하여 시뮬레이션에 반영한다. 여기서, 피난 지연시간, 도움이 필요한 사람의 행동, 도움 주는 사람의 행동 등 다양한 변수들이 포함된다. 피난 지연시간은 화재 발생 후 재실자들이 실제로 피난을 시작하기까지 필요한 시간이며, 표 3에 나타난 바와 같이 BSI에서는 건축물 용도에 따라 피난지연시간을 제시하고 있다.

피난 시뮬레이션을 기반으로 한 건축물 화재 피난 안전성 평가는 다음과 같은 절차를 통해 이루어진다.

3.1 피난 시뮬레이션 모델 구축

건축물의 도면을 바탕으로 상세한 모델링을 수행하며, 피난 경로, 출입구, 계단 및 엘리베이터 등의 피난구를 모델링한다. 또한, 건축물 내에 있는 재실자의 행동 및 재실자의 특성을 설정한다.

표 3 피난지연시간기준 (BSI)

용도	W1	W2	W3
사무실, 상업 및 산업건축물, 학교, 대학교 (재실자는 건축물의 내부, 경보, 탈출로에 익숙하고, 상시 깨어 있음)	< 1	3	> 4
상점, 박물관, 레저스포츠센터, 그 밖의 문화집회시설 (재실자는 상시 깨어 있으나, 건축물의 내부, 경보, 탈출로에 익숙하지 않음)	< 2	3	> 6
기숙사, 중/고층 주택 (재실자는 건축물의 내부, 경보, 탈출로에 익숙하고, 수면상태일 가능성 있음)	< 2	4	> 5
호텔, 하숙용도 (재실자는 건축물의 내부, 경보, 탈출로에 익숙하지도 않고, 수면상태일 가능성 있음)	< 2	4	> 6
병원, 요양소, 그 밖의 공공 숙소 (대부분의 재실자는 주변의 도움이 필요함)	< 3	5	> 8

(비고)

W1 : 방재센터 등 CCTV 설비가 갖춰진 통제실의 방송을 통해 육성 지침을 제공 할 수 있는 경우 또는 훈련된 직원에 의하여 해당 공간 내의 모든 재실자들이 인지할 수 있는 육성지침을 제공할 수 있는 경우

W2 : 녹음된 음성 메시지 또는 훈련된 직원과 함께 경고방송 제공할 수 있는 경우

W3 : 화재경보신호를 이용한 경보설비와 함께 비 훈련 직원을 활용할 경우

3.2 피난 시나리오 설정

건축물 특성 및 평가 목적에 따라 다양한 피난 시나리오를 설정하여 각각의 상황에 따른 피난 경로와 요구피난시간(RSET)을 평가한다. 이때, 화재 발생 위치, 재실자 특성 및 재실자 밀집도 등 다양한 변수를 고려할 수 있다.

3.3 피난 시뮬레이션 실행 및 분석

설정된 피난 시나리오를 기반으로 피난 시뮬레이션을 실행하여 시간에 따른 재실자들의 이동 경로와 요구피난시간(RSET) 등의 결과를 분석한다. 시뮬레이션 결과를 통해 피난 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 파악하고, 혼잡 구역을 식별할 수 있다.

4. 피난 안전성 평가 개요

4.1 피난 안전성 평가

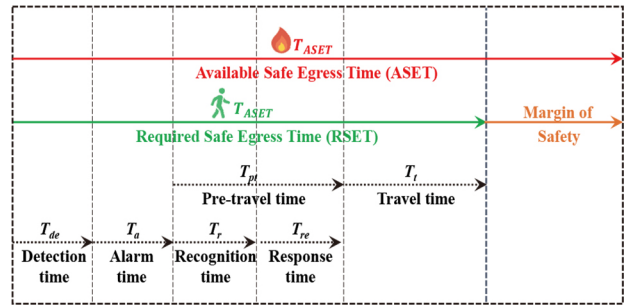


그림 2 피난 시간

화재 및 피난 시뮬레이션 결과를 바탕으로 허용피난시간(ASET)과 요구피난시간(RSET)을 산출한다. 여기서, ASET은 건축물 내 재실자들이 안전하게 피난할 수 있는 시간을 의미하며, RSET은 실제 피난에 필요한 시간을 의미한다. ASET이 RSET 보다 크면, 모든 사람들이 안전하게 피난할 수 있다고 평가한다. 반대로 RSET이 ASET 보다 큰 경우에는, ASET에 도달하는 시점에서 피난을 완료하지 못하고 건물 내부에 있는 재실자들은 사상자로 평가된다. 그림 2에 나타난 바와 같이 ASET에서 RSET을 뺀 결과로부터 안전여유시간(Margin of Safety)이 도출되며, 평가결과를 분석하여 개선 방안을 제시한다.

4.2 개선 방안 제시 및 검증

피난안전성 평가결과를 바탕으로 대상 건축물의 피난 안전성을 개선하기 위한 방안을 제시한다. 여기서, 피난 경로의 재설계, 추가 출입구 설치, 피난 유도 시스템의 개선, 배연 설비 개선 등 다양한 방법이 포함될 수 있다. 제시된 방안의 타당성을 검증하기 위해 추가 시뮬레이션을 수행하여 최적의 피난 안전성을 확보할 수 있다.

5. 맺음말

피난 안전성 평가는 현대 건축물의 설계와 운영에서 필수적인 요소 중 하나이다. 건축물의 대형화와 복잡화로 인해 화재 및 비상 상황 시 다수의 인명을 보호하기 위해서는 철저한 사전 대비와 계획이 요구된다. 화재 시뮬레이션과 피난 시뮬레이션은 이러한 대비와 계획을 과학적으로 뒷받침할 수 있는 중요한 도구로써, 다양한 시나리오를 바탕으로 현실적인 평가를 가능하게 한다.

본 기술기사에서서는 피난 안전성 평가의 중요성과 이를 위한 시뮬레이션 기법 및 절차를 살펴보았다. 화재 발생 시 효과적인 피난 계획을 통해 인명 피해를 최소화할 수 있으며, 이를 위해서는 건축물의 구조적 특성뿐만 아니라 재실자의 행동 패턴, 비상 시스템의 작동 여부 등 다양한 요소를 종합적으로 고려하여야 한다.

피난 안전성 평가를 통해 도출된 결과는 건축물의 설계 단계에서부터 반영되어야 하며, 지속적인 모니터링과 개선을 통해 더욱 안전한 환경을 조성해야 한다. 특히 다중 이용 건축물이나 고층 건물과 같이 많은 인원이 밀집해 있는 특수 공간에서는 피난 안전성을 강화하기 위한 노력이 더욱 중요하다. 피난 안전성 평가는 단순한 규제 준수를 넘어서, 실제로 발생할 수 있는 비상 상황에서 재실자들의 생명을 보호하기 위하여 필수적인 요소이다. 지속적인 연구와 기술 발전을 통해 더욱 정교하고 효과적인 평가방법이 개발되기를 기대하며, 이를 통해 모든 건축물이 보다 안전한 공간으로 거듭나기를 바란다.

참고문헌

1. National Institute of Standards and Technology (NIST) (2013), “Fire dynamics simulator user's guide”
2. Hurley, M.J. (2016), “SFPE handbook of fire protection engineering”, NY, Springer.
3. Buchanan, A.H. (2001), “Structural Design for Fire Safety”, Hoboken, NJ. John Wiley & Sons.
4. National Fire Protection Association. (2018), “NFPA 101 Life Safety Code”, Quincy, MA.
5. British Standard Institute, Guide to the application of Fire Safety Engineering Principles, 1997. 