건축물 화재조건을 고려한 구획공간의 온도 예측 사례 연구

Case Study on Prediction of Temperature in Compartment Considering Fire Conditions in Buildings

조규환* · 안재권**

Cho, Gyuhan*, and Ahn, Jaekwon**

Abstract

Current fire resistance standards for major structural members of buildings require uniform fire resistance performance (in hours). However, buildings may be vulnerable to various local-fire conditions, depending on the industry or business, so it is necessary to examine their differences through simulations. In this study, the existing room corner test (KSF ISO 9705) and simulation results were compared to verify the reliability of the simulations. Next, the similarity of the results was identified. Simulations of actual buildings were performed based on local-fire conditions, and it was verified that the temperature varies by location. Based on the results, it is necessary to focus on performance-based fire resistance design rather than the specification-based design, which requires uniform fire resistance performance in hours. Simulation case studies should be conducted to reflect the diversity of the fire and structural member conditions.

Key words : Fire, Simulation, Temperature, Case Study

요 지

현행 건축물 주요 구조부재의 내화기준은 확실적인 내화성능(시간)을 확보하도록 요구하고 있으나 건축물은 업종/업태에 따라 다양한 국부적인 화재조건을 가질 수 있으므로 시뮬레이션을 통해 그 다양성을 검토할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 우선, 시뮬레이션의 신뢰성 검증을 위해 기존에 수행되었던 룸코너테스트(KS F ISO 9705) 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 그 유사성을 확인하였으며 이후, 실사용 건축물을 대상으로 한 국부 화재조건별 시뮬레이션을 수행하여 위치별로 온도가 상이함을 확인하였다. 이와 같은 결과들을 비취 볼 때, 확실적인 내화성능(시간)을 요구하는 사양적 내화설계에서 성능위주로의 내화설계 지향이 필요함은 물론 화재 및 구조부재 조건들의 다양성을 보다 종합적으로 고려할 수 있는 시뮬레이션 사례 연구가 적극적으로 이루어져야 할 것으로 생각된다.

핵심어 : 화재, 시뮬레이션, 온도, 사례 연구

1. 서 론

건축물의 주요 구조부재는 화재 시 구조적 성능을 유지하기 위한 목적에서 반드시 내화성능을 확보해야 한다. 현재 우리나라는 Table 1과 같이 ‘건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙’에서 구조부재별로 요구 내화성능(시간)이 제시되어 있으며, ‘내화구조 인정 및 관리기준’에 따라

내화성능의 확보 여부를 판단하게 된다. 이는 필연적으로 지켜져야 하는 사양적 내화설계의 일환으로, 화재 상황을 비교적 가혹한 조건(표준시간-온도화재곡선)인 Full Fire로 감안해 안전성의 확보를 최우선시한 전통적인 내화설계라고 볼 수 있다.

다만, 건축물 전반에 걸쳐 상기 내화성능(시간) 기준에 따라 내화설계/시공이 이루어졌다고 하더라도 준공 이후

*정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원(E-mail: jgh1023@kict.re.kr)

Member, Senior Researcher, Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원(Tel: +82-31-369-0509, Fax: +82-31-369-0670, E-mail: jaekwonahn@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Table 1. Required Maximum Fire Resistance Performance of Major Structural Members of Buildings

Member	Wall						Beam column	Floor	Roof
	Outer wall			Inner wall					
	Bearing wall	Non bearing wall		Bearing wall	Non bearing wall				
		Areas with a risk of burning	Areas without a risk of burning		Partition wall	Shaft room compartment wall			
Required fire resistance performance (hour)	3	1	0.5	3	2	2	3	2	1

사업주의 사업 목적별 업태/업종에 따라 화재 시 그 상황은 매우 다양해 질 수 있다. 예를 들어, 독서실과 일반 오피스, 치과 등의 화재 상황은 분명 다를 것이므로 확실적인 내화성능(시간)을 적용하는 현행 기준은 추후의 실사용 단계에서의 세부 용도들을 감안해 보다 상대적이면서도 세밀하게 가늠해 볼 필요가 있다. 이와 관련하여 Lee et al. (2003)은 건축물 용도별 화재하중의 차이를 조사하였고 그 결과로 공동주택, 숙박, 의료시설, 문화 및 집회시설 등에 대한 평균 화재하중을 도출하여 요구 내화성능(시간)의 합리적인 변화를 주장하였다.

또한 점차 성능위주로의 설계가 중요시되면서, 다양한 화재 상황을 고려한 주요 구조부재의 내화성능 검토가 중요해지고 있다. 대표적인 연구 사례로 Ryu et al. (2015)과 Lee et al. (2015)는 일반강도와 고강도 RC 보부재를 대상으로 화재 후의 잔존강도 실험 및 열해석과 구조거동해석을 수행하여 구조부재 조건에 따른 내화성능을 검토하였으며, Choi et al. (2012)은 화재로 손상된 콘크리트 구조물의 구조적 거동을 설명하기 위해 변수해석을 수행하였으며 구조부재의 열해석을 바탕으로 구조안전성을 평가할 수 있다고 주장하였다. 이처럼 다양한 화재 상황 및 구조부재의 조건들을 가정하는 연구들이 수행되어 왔으며 더 많은 데이터의 축적을 위해서라도 앞으로도 많은 사례 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 실사용 건축물을 대상으로 다양한 국부 화재 시나리오를 가정한 시뮬레이션을 수행하고 이를 통해 도출된 공간 위치별 온도를 바탕으로 주요 구조부재의 잠재적인 위험성을 가늠해 보고자 한다. 이는 사례 연구의 일환으로서 본 연구의 결과가 추후 성능위주로의 내화설계를 유도하는 데 있어 한 가지의 좋은 예시로서 참고가 되길 기대한다.

2. 시뮬레이션 검증

본 연구에서는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)과 Navier-Stokes 방정식(저속 열유동장) 이론을 기본으로

하는 Fire Dynamic Simulator (이하, FDS) version 6.7.4를 사용하였다. 시뮬레이션은 다수의 시나리오들을 검토할 수 있는 장점은 있으나 도출된 결과들의 검증이 이루어지지 않는다면 결과의 신뢰성이 떨어질 수 있는 단점이 있다. Kim et al. (2019)은 FDS의 신뢰성을 검증하고자 목재 클립을 화원으로 한 시뮬레이션과 실제 실험 결과를 서로 비교하여 그 유사함을 밝혔다. 또한 Wen et al. (2007)은 FDS의 결과 값이 실제 화재 시의 공간 온도와 유사함을 밝히고 있다.

본 연구에서도 FDS의 신뢰성 검증을 위해, Kweon (2016)이 수행한 실험을 FDS로 재현하여 그 결과를 비교하였다. Kweon (2016)은 KS F ISO 9705 (2009)의 룬코너테스트를 기준으로, 화원(Heptane)의 크기에 따른 열방출을 및 위치별 온도 특성을 확인하였다. 다만 기준에서는 화원의 위치를 모서리로 제시하고 있으나 Kweon (2016)은 중앙부에 위치시켜 실험을 수행하였다. Fig. 1은 당시 실험 사진과 이를 FDS로 모델링 한 것을 나타낸 것이며, Table 2는 Kweon (2016)이 수행한 실험 조건들을 나타낸 것이다. 실험을 시뮬레이션으로 재현하기에 앞서 Mesh 조건에 따른 결과 값들의 민감도를 비교 분석하기 위해 3종의 Mesh 조건(Mesh A: $0.08 \times 0.11 \times 0.02$ m, 19,200 EA Cell / Mesh B: $0.1067 \times 0.1073 \times 0.1091$ m, 27,060 EA Cell / Mesh C: $0.08 \times 0.08 \times 0.0828$ m, 63,800 EA Cell)을 변수로 예비 시뮬레이션을 실시하였다. Fig. 2는 3종의 Mesh 조건별로 도출된 온도와 열방출율의 결과를 나타낸 것이다. Kim (2019)의 연구결과에 따르면 Mesh 수에 따른 영향은 화재의 성장속도와 발열량 및 온도의 최대값에 영향을 미치는 것으로 설명하였다. 그러나 본 민감도 분석 결과에서는 그 차이가 명확히 나타나지 않았으므로 이후의 시뮬레이션에서는 Mesh 3종 중에 가장 해석이 용이한 Mesh A 조건을 시뮬레이션에 적용하는 것으로 하였다. Table 3은 최종적인 시뮬레이션의 조건을 정리한 것이다.

Figs. 3과 4는 실험과 FDS로 구현한 시뮬레이션의 결과를 온도(높이 1,700 mm 지점), 열방출율 부문에서 비교한 것이다. 화원(Heptane)의 질량감소율을 $0.02 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 으로, 개구

Fig. 1. Experimental Photo (Kweon, 2016) and Simulation Modeling

Table 2. Experimental Conditions

Experimental conditions	Fire source	Type	Heptane (1.0 L)
		Size	0.46(L) × 0.46(W) × 0.15(H) m 0.65(L) × 0.65(W) × 0.15(H) m
	Compartment space size		2.4(L) × 3.6(W) × 2.4(H) m
	Measurement		Atmosphere temperature (2 position)
			HRR (kW)

Fig. 2. Sensitivity Analysis of Mesh (Fire Source Size (0.65(L) × 0.65(W) × 0.15(H) m))

Table 3. Simulation Conditions

Simulation conditions	Fire source	Type	Heptane (Burner)
		Size	0.46(L) × 0.46(W) × 0.15(H) m 0.65(L) × 0.65(W) × 0.15(H) m
		Mass reduction rate	0.01 kg/m ² · s 0.02 kg/m ² · s
	Mesh		0.08 × 0.11 × 0.02 m Cell 19,200 EA
	Compartment space size		2.4(L) × 3.6(W) × 2.4(H) m
	Measurement		Atmosphere temperature (2 position)
			HRR (kW)

(a) Fire Source Size (0.46(L) × 0.46(W) × 0.15(H) m)

(b) Fire Source Size (0.65(L) × 0.65(W) × 0.15(H) m)

Fig. 3. Comparison of Experimental and Simulation Results (Temperature)

Fig. 4. Comparison of Experimental and Simulation Results (HRR)

부는 외기의 유입량과 유입속도를 고려하지 않고 단순 개방 조건으로 적용한 결과, 유사도가 77%로 나타났다. 화재성상의 일반적인 단계(성장(Growth phase), 지속(Steady phase), 감쇠(Decay phase)단계) 중에서 성장단계를 거쳐 도달하는 최대 온도 값은 실험 결과와 비교해 거의 유사하게 재현되었으나 감쇠단계에서의 온도 하락 속도는 다소 차이가 나는 것으로 나타났다. 한편 열방출율을 비교한 결과(Fig. 4)에서는 최대 열방출율의 경우 실험과 해석에 의해 도출된 결과 값이 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 화재성상 단계에 따라 검토할 시에는 앞선 온도 결과의 경향과 유사한 것으로 나타났다. 온도와 열방출율의 결과 모두 감쇠단계에서의 차이는 있으나 구조부재의 내화성능의 경우 구조공학의 관점에서는 구조부재의 최대 수열온도가 가장 중요한 요인으로 고려되므로, 구조부재의 내화 위험성을 가늠하는 측면

Fig. 5. A Building Subject to Fire Scenarios (Performance Verification)

에서는 감쇠단계의 영향을 크게 고려하지 않는 것으로 감안 하였다.

다음으로 3장 화재조건별 시뮬레이션에서는 2장에서 검증이 이루어진 화원 조건들을 적용하되 화원의 크기만을 변수로 하여 시뮬레이션을 진행하였다.

3. 화재 시나리오 가정

3.1 대상 건축물

Fig. 5는 화재 시나리오를 적용할 대상 건축물을 나타낸 것이다. 본 건축물은 다세대주택 구조로 전체 4층(높이 15.6 m), 연면적 235 m² 규모의 철근콘크리트 구조이며 다양한 화재안전 기술들을 검증하기 위해 지어진 성능검증장이다. 특히, 우리나라의 건축물 통계를 분석한 2018년도 세움터

Table 4. Simulation Conditions

Simulation conditions	Fire source	Type	Heptane
		Size	2.7(L) × 2.7(W) m 5.4(L) × 5.4(W) m
		Mass reduction rate	0.01 kg/m ² · s 0.02 kg/m ² · s
	Mesh		0.08 × 0.11 × 0.02 m Cell 19,200 EA
	Sub-compartment		Yes / No
	Measurement		Atmosphere temperature (3 position)
	Compartment space size		25.4(L) × 9.6(W) × 4.0(H) m

자료에 따르면, 층수는 1층이 61.3%, 2~4층이 33.2%, 5층이 2.4% 비율이며, 용도는 주거용(단독주택, 다가구주택, 아파트, 연립주택, 다세대주택, 기타)이 64.3%, 상업용(제1종근생, 제2종근생, 판매시설, 업무시설, 숙박시설, 기타)이 17.6% 비율이므로, 본 성능검증장의 경우 가장 일반적인 조건들이 반영된 건축물이라고 여겨도 무방할 것으로 생각된다. 화재는 3층에서만 발생하는 것으로 가정하였으며, 3층의 모든 개구부는 외기의 유입이 없는 단순 개방 조건으로 하였다.

3.2 화원

본 연구에서는 다양한 업태/업종에 따른 화재 시나리오를 가정하기 위해 화원의 크기와 화원의 질량감소율을 변수로 설정하였다. 화원은 앞서 신뢰성 검증에서 사용했던 헵탄(Burner type)으로 하고 화원의 크기는 발생 가능한 국부 화재의 다양성을 가정하기 위해 2.7(L) × 2.7(W)과 5.5(L) × 5.5(W) 2종류로, 화원의 질량감소율을 0.01 kg/m² · s과 0.02 kg/m² · s으로 설정하였다. 화재 시뮬레이션을 통해 도출되는 공간 온도 데이터는 화재안전성을 확인하고자 하는 주요 구조부재의 인접한 곳에서 높이별로 측정되는 것으로 하였다. 공간의 온도는 최저 높이 1,000 mm에서 최고 3,000 mm 높이까지 1,000 mm 간격으로 측정하였다. Table 4는 시뮬레이션 조건을 정리한 것이며, Fig. 6은 시뮬레이션 모델링과 온도 측정 위치를 나타낸 것이다.

4. 결과 및 분석

Figs. 7과 8은 각각 화원 크기 2.7(L) × 2.7(W)와 5.4(L) × 5.4(W)에서의 위치별 온도를 나타낸 것이다. 일반적으로 화원에서의 거리 및 높이에 따라 온도가 상이함을 확인할 수 있으며 특히 거리별 차이는 화원 크기 5.4(L) × 5.4(W)가 2.7(L) × 2.7(W)에 비해서 경향성이 더 두드러지는 것으로 나타났다. 높이별 차이에 대해서는 높은 위치일수록 온도가 높게 측정되는 것으로 나타났으며 화원과의 수평적 거리가 가까울수록 그 경향성은 더욱 확연히 나타나고 있다.

(a) Fire Source Size (2.7(L) × 2.7(W))

(b) Fire Source Size (5.4(L) × 5.4(W))

(c) Sub-Compartments

Fig. 6. Fire Source and Temperature Measurement Location

질량감소율 0.01 kg/m² · s과 0.02 kg/m² · s의 차이는 화원 크기 5.4(L) × 5.4(W)가 2.7(L) × 2.7(W)에 비해 그 경향성이 두드러지는 것으로 확인되었으며, 화재성상의 일반적인 단계

Fig. 7. Temperature by Location (Fire Source Size (2.7(L) × 2.7(W)))

(성장(Growth phase), 지속(Steady phase), 감쇠(Decay phase) 단계) 중에서도 성장과 지속 단계의 도달/유지 시간이 매우 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 경향을 비취 볼 때, 구조부재별로 요구되는 내화성능(시간)을 화원 조건에 따라 상대적으로 검토할 필요가 있음을 가늠케 한다.

한편, 화원에서 거리가 가깝거나 높을수록 도출되는 온도의 분포가 다소 불안정한 것을 알 수 있다. 대표적으로 Figs. 6(a)와 6(d)에서 나타나는 변동(Fluctuation)을 볼 때 화원에서 분출되는 화염의 영향이 작용된 것으로 생각되며, 특히 화원 크기 5.4(L) × 5.4(W)가 2.7(L) × 2.7(W)에 비해 화원과 온도 측정 위치 THCP A의 거리가 약 0.25배 짧아 화염의 영향을 더욱 많이 받는 것으로 추정된다. 이와 같은 경향을 볼 때, 구조부재별로 요구되는 내화성능(시간)을 화원의 위치에 따라 상대적으로 검토할 필요가 있음을 알 수 있다.

Figs. 7과 8(g), 8(h), 8(i)는 벽의 설치로 인해 구획이 세부적으로 나뉘어 있을 경우의 위치별 온도를 나타낸 것이다.

화원에서의 거리가 멀어짐에 따라 온도가 낮아지는 일반적인 경향을 보이고 있으나 벽의 존재로 인해 급격한 온도 하락이 발생된 것으로 볼 수 있다. 벽이 없는 Figs. 8(d)와 8(e)와 벽이 있는 Figs. 8(g)와 8(h)를 비교하면 그 경향성이 보다 확연히 나타난다.

지금까지의 시뮬레이션 결과들을 종합적으로 검토해 볼 때, 전실의 표준 화재에 의거한 획일적인 내화성능(시간)을 요구하는 현행 기준들은 다양한 화재 시나리오들의 검토를 통해 국부적인 내화성능도 검토해 볼 필요가 있음이 보여진다.

또한, 화재가 발생한 상황 즉, 화재의 성상 및 구조부재의 위치 등이 내화성능에 영향을 미치므로 건축물 주요 구조부재의 내화성능 취약요인을 설정할 때는 다양한 화재 시나리오 및 구조부재 조건(구조형식, 규격, 위치, 화재노출면 등) 등을 종합적으로 검토할 필요가 있다. 특히, 업종/업태에 따라 세부적인 구획화가 이루어질 수 있으므로 이를 고려한

Fig. 8. Temperature by Location (Fire Source Size (5.4(L) × 5.4(W)))

화재 확산 및 공간 온도 분포를 고려한 구조부재의 내화 위험성을 미리 가늠할 수 있다면 큰 장점이 될 수 있다.

건축물의 화재안전성능 검토에 있어서 본 연구의 다양한 화재조건에 따른 구획공간의 온도 예측은 구조부재의 내화 성능평가를 위한 수열온도 파악에 앞서 필수적으로 수행되어야 할 절차이다. 유로코드를 비롯한 국내외 내화구조설계 기준에서는 화재시 구조부재의 온도변화를 바탕으로 내화 성능을 평가하도록 하고 있다. 일반적으로 구획공간 및 구조 부재의 온도변화를 바탕으로 철근콘크리트 구조의 경우 500 °C 등온선법이 활용 가능하며, 강구조의 경우 부위별 수열온도에 따른 강재의 강도 및 강성 저감을 바탕으로 내화성능을 평가하도록 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 실사용 건축물을 대상으로 다양한 국부

화재 시나리오를 가정한 시뮬레이션을 수행하고 이를 통해 도출된 공간 위치별 온도를 바탕으로 건축물 주요 구조부재의 잠재적 위험성을 가늠해 보고자 하였다. 결론은 아래와 같다.

- 1) 우리나라는 건축물 내화성능(시간) 기준 충족을 통해 준공허가를 득하고 있으나 준공 이후의 다양한 업태/업종을 고려한 실사용 단계에서의 내화성능 취약요인은 검토되고 있지 않은 실정이다. 따라서 실사용 단계에서의 내화성능 취약요인 모니터링과 더불어 다양한 화재 시나리오를 가정하는 것은 화재 시 건축물의 잠재적 붕괴 가능성을 미연에 방지하는 차원에서라도 반드시 이루어져야 한다.
- 2) 다양한 화재 시나리오를 가정한 시뮬레이션 결과, 화원의 조건(화원의 크기 및 질량감소율)과 화원에서의 이격거리, 세부 구획 여부에 따라 공간 위치별로 상이한 온도 분포를 확인하였다. 이는 ISO834의 표준화재(구

획공간 내 Full Fire로 가정)를 기본으로 하고 있는 보수적인 내화설계 방식과 비교해 볼 때, 공간의 사용 용도에 따라서 다양한 화재 상황들을 고려하는 합리적이면서도 효율적인 내화설계가 필요할 것으로 사료된다.

- 3) 건축물의 구조와 용도가 점차 다양해짐에 따라 다양한 화재 시나리오를 검토할 수 있는 시뮬레이션 분석을 적극 반영할 필요가 있다. 특히, 실사용 건축물을 대상으로, 다양한 화재 시나리오들을 검토해 보는 보다 현실적인 사례 연구가 더 많이 진행될 필요가 있다고 생각되며, 누적된 사례 연구들은 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 높이는데 근거로서 도움이 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요연구사업인 “(21주요)건축물의 화재취약 특성을 반영한 화재위험 평가기술 개발” 과제의 연구비 지원을 통하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Choi, J.H., Haj-Ali, R.M., and Kim, H.S. (2012). Integrated fire dynamic and thermomechanical modeling of a bridge under fire. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 42, pp. 815-829.
- Kim, J., Lee, J., and Min, S. (2019). Study of the reliability of the FDS fire model by verification experiments. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 1, pp. 197-203.
- Kim, J.J. (2019). *Sensitivity analysis of major input parameters of FDS*. Master's thesis, Semyung University.
- KS F ISO 9705. (2009). *Fire tests - Full-scale room test for surface products*. Korean Agency for Technology and Standard (KATS).
- Kweon, O.S. (2016). An Experimental Study on the Temperature-Time Curve of Compartment. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 3, pp. 171-177.
- Lee, P.G., Choi, I.C., and Kim, H.S. (2003). A study on the Application of Fire Loads for Fire Safety in Buildings. *Journal of Architectural Institute of Korea - Planning*, Vol. 19, No. 1, pp. 259-266.
- Lee, Y.K., Min, H.W., Kang, J.Y., Kim, H.S., and Shin, Y.S. (2015). Deformation characteristics of fire damaged and rehabilitated normal strength concrete beams. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, Vol. 9, No. 7, pp. 855-861.
- Ryu, E.M., An, A.H., Kang, J.Y., Shin, Y.S., and Kim, H.S. (2015). Investigation of rehabilitation effects on fire damaged high strength concrete beams. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, Vol. 9, No. 7, pp. 898-904.
- Wen, J.X., Kang, K., Donchev, T., and Karwatzki, J.M. (2007). Validation of FDS for the prediction of medium-scale pool fires. *Fire Safety Journal*, Vol. 42, pp. 127-138.

Received	June 21, 2021
Revised	June 22, 2021
Accepted	July 2, 2021