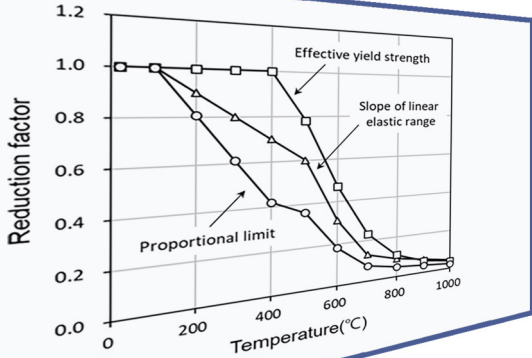


건축물 화재취약요인을 고려한 해석적 내화성능평가 사례 연구

A Case Study on Analytical Evaluation of Fire Resistance Considering Fire Vulnerability Factors of Buildings



1. 서론

최근 주목받고 있는 성능기반 내화구조설계는 신재료 및 신공법의 적용에 있어서 가장 합리적인 방법으로 알려져 있지만 현행의 국내 내화설계절차와 비교하여 기술적 수준이 높고, 설계 단계별로 요구되는 평가항목이 많기 때문에 상당히 까다로운 내화설계법이라 할 수 있다. 특히 이 설계방식에서는 표준화재시험의 온도곡선과 같이 일률적인 화재조건 외에도 건축물에 실제 발생 가능할 것으로 추정되는 화재성상을 설계 조건으로 포함하기 때문에 구조부재의 보다 정확한 내화성능평가가 가능하다(그림 1 참조). 이는 건축물에 예상되는 다양한 화재시나리오에 대응이 가능하게 할 뿐만 아니라 대규모 건축물이나 특수한 내화공법이 적용된 건축물의 경우 일반적 사양적 설계결과와 더 큰 차이를 보임으로써 건축물의 내화성능에 대한 대안적 설계법의 역할을 할 수도 있다. 이러한 설계법에서 다루어지는 기본적인 건축물 화재취약요인은 실내 가연물의 특성(종류 및 양, 형상 및 성상, 분포 상황), 실내로 유입되는 환기 조건(개구부의 크기와 형상), 화재 발생 가능 구획의 건축적 특성(실의 규모 및 형상, 구성 부재의 열적 특성)이다.

2. 건축물의 화재취약요인을 고려한 화재조건

앞서 언급한 바와 같이 건축물에 발생 가능한 실제 화재(real fire)를 모사하는 다양한 방법이 있으나 가장 적극적으로 활용되는 것은 구획 내의 가연물과 환기



안 재 권

한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원



조 규 환

한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원

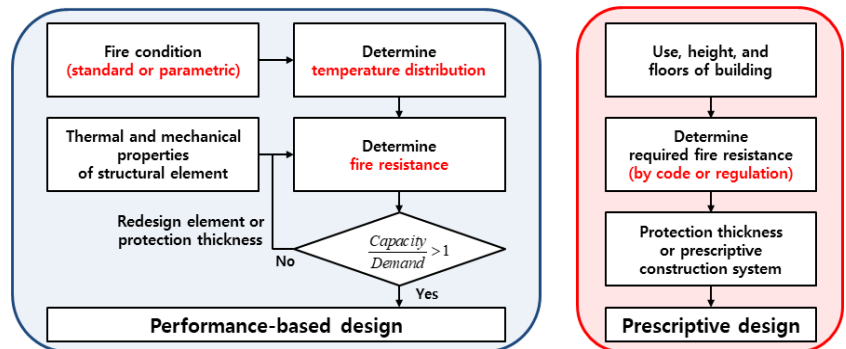


그림 1 성능기반 내화설계와 사양적 내화설계의 기본 절차 비교

조건에 대한 화재취약요인을 반영한 변수화재곡선(parametric fire curve)이다. Eurocode의 내화구조설계기준에 변수화재의 설정 절차가 가장 구체적으로 제시되어 있는데, 건축물 단위 구획의 용도 및 규모에 따른 가연물과 환기에 대한 기본 조건을 감안할 경우 기존의 표준화재곡선을 유사하게 따르게 되고, 그렇지 않을 경우 변화된 화재곡선을 활용할 수 있다.

사례 연구에서는 표준화재곡선을 따르는 가연물/환기 기본조건을 기준으로 각 취약 요인이 -20%, -10%, 0%, 10%, 20% 씩 변화할 때의 변수화재곡선을 화재조건으로 상정하였다(그림 2 참조). 이는 Eurocode의 화재취약 변수 조건의 고려 범위를 참조한 것으로 일반적으로 기준값을 기본으로 80~120%를 취하고 있다. 일반적으로 Q1이 가연물의 양이 가장 적으므로 화재에 덜 취약하고, Q5는 가연물의 양이 가장 많으므로 화재에 가장 취약하다고 볼 수 있으며(Q1: -20%, Q2: -10%, Q3: 기준값, Q4: +10%, Q5: +20%), 마찬가지로 O1이 환기조건이 가장 유리하므로 화재에 덜 취약하고, O5는 환기조건이 가장 불리하여 화재에 가장 취약하다고 볼 수 있다(O1: -20%, O2: -10%, O3: 기준값, O4: +10%, O5: +20%). 이러한 정보만을 기반으로 구조 부재의 내화성능을 정성적으로 추정할 수도 있지만, 내화구조의 내화성능을 정량적으로 판단하기 위해서는 각 변수조건에 따른 해석적 접근을 통한 구조적 성능평가가 필요하다.

3. 화재 조건을 고려한 강구조 부재의 내화성능평가

이번 사례 연구에서는 강구조 건축물의 철골 기둥을 대상으로 화재취약 수준에 의한 내화성능의 변화를 분석하였다. 화재 및 구조해석을 위해 범용 유한요소해석프로그램인 ABAQUS의 열-구조 연성해석기법(fully coupled thermal-stress analysis)을 활용하였고, 구조부재의 모델링에는 쉘 요소인 S4RT(coupled temperature-displacement element)를 적용하였다. 구조용 강재는 온도가 상승함에 따라 열적 성질과 기계적 성질이 변화하게 된다. 열적 성질과 관련해서는 재료의 비열(C_p), 열전도율(λ_a)과 열팽창률($\Delta l/l$)이 변화하게 되는데, 본 연구에서는 Eurocode의 고온재료모델을 해석에 적용하였다(표 1). 기계적 특성과 관련해서도 Eurocode가 항복강도, 탄성한계, 탄성계수의 각 온도별 저감계수를 적절히 권고하고 있으므로 이를 해석에 적용하였다(그림 3).

화재해석에서 경계면의 가열조건은 Eurocode의 권장값을 적용하여, 대류열전달계수는 $25(W/m^2K)$, 복사 경계조건으로 방사율 0.7, 스테판-볼츠만 상수(σ)는 $5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$ 로 적용하였다. 특히, 형강재의 경우 열린 단면임을 감안하여 형상계수(view factor)를 고려하여 음영효과(shadow effect)가 구획에서 부재로의 열전달에 반영되도록 하였다. 그림 4는 기둥의 해석 후 변형 사례이며, 종국지점에 도달한 기둥 부재의 경우 모두 유사하게 변형하였다.

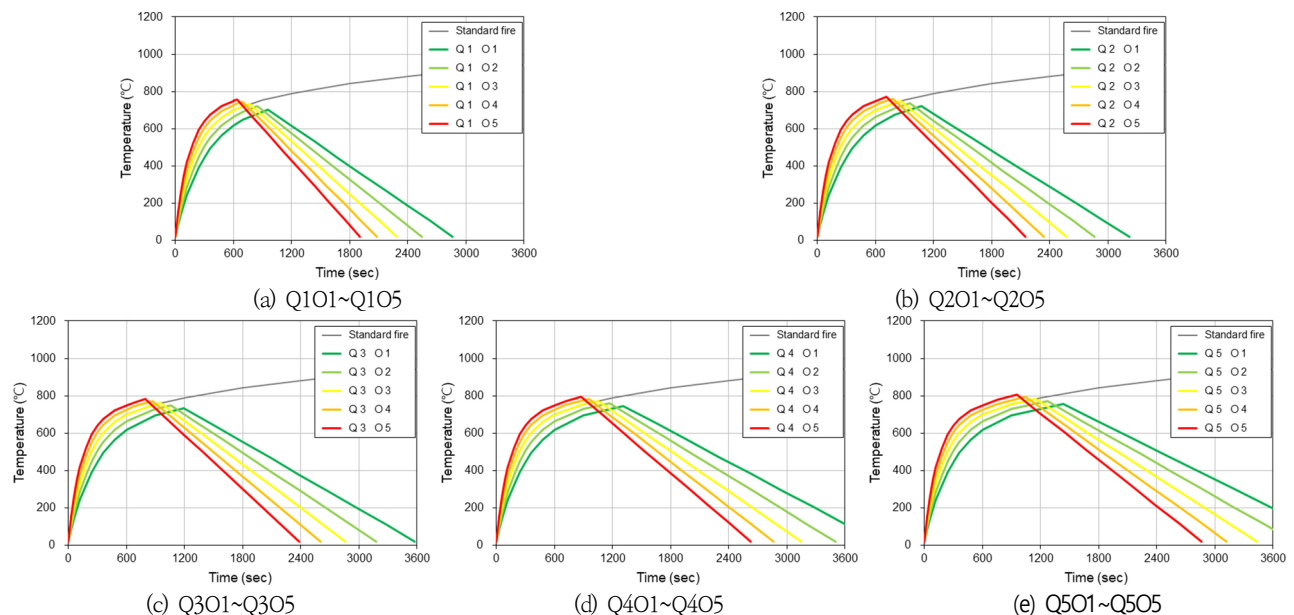


그림 2 건축물의 화재취약요인 변화에 따른 변수화재곡선

표 1 강재의 고온 열적 물성 변화 (비열, 열전도도, 열팽창률)

Thermal properties (specific heat, thermal conductivity, thermal elongation)		
C_a (J/kgK)	$425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta_a^3$	$20 \leq \theta_a \leq 600$ (°C)
	$666 - 13002 / (\theta_a - 738)$	$600 < \theta_a \leq 735$ (°C)
	$545 + 17820 / (\theta_a - 731)$	$735 < \theta_a \leq 900$ (°C)
	650	$900 < \theta_a \leq 1200$ (°C)
λ_a (W/mK)	$54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_a$	$20 \leq \theta_a \leq 800$ (°C)
	27.3	$800 < \theta_a \leq 1200$ (°C)
$\Delta l / l$ (mm/mm)	$-2.416 \times 10^{-4} + 1.2 \times 10^{-5} \theta_a + 0.4 \times 10^{-8} \theta_a^2$	$20 < \theta_a \leq 750$ (°C)
	11×10^{-3}	$750 < \theta_a \leq 860$ (°C)
	$6.2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} \theta_a$	$860 < \theta_a \leq 1200$ (°C)

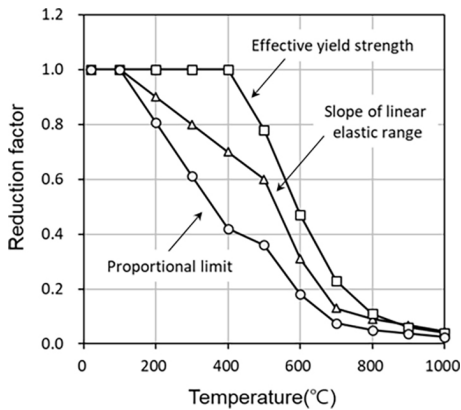


그림 3 구조용 강재의 고온 항복강도, 탄성한계, 탄성계수 저감 변화

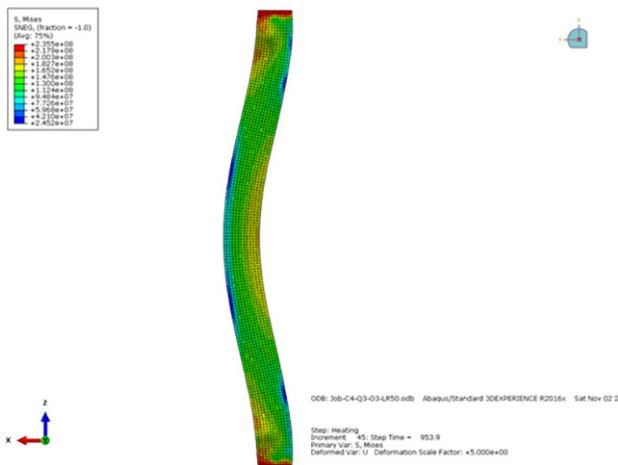


그림 4 화재해석에 의한 철골기둥 변형 형상

이번 사례 연구에서는 표준화재곡선을 따르는 기본 가연물의 양과 환기조건을 기준으로 각 위험요인이 -20%,

-10%, 0%, 10%, 20%씩 변화할 때를 고려하여 총 25가지의 화재취약특성 조합엔 대한 내화성능을 해석적으로 도출하였다. 그림 5는 철골 기둥 부재가 앞서의 화재취약특성에 따른 25가지 변수화재에 따른 거동이 어떻게 변하는지에 대한 해석결과이다. 모든 해석에서 부재의 변형량 혹은 변형속도가 허용 범위를 초과하는 종국지점을 내화시간으로 정의하였다(KS F 2257 & ISO 834). 화재취약성이 어느 정도 감소한 일부의 경우에는 부재가 종국에 이르지 않고 구조적 위험성을 회피할 수 있는 것으로 파악되었다.

해석 결과를 바탕으로 화재조건별로 상대적인 내화성능을 비교하기 위하여 화재취약 기본 조건(Q3O3)에 대한 내화시간을 내화성능 기준값으로 설정한 다음, 나머지 화재취약조건에 대한 내화시간을 상대값으로 정리하였다(표 2~3). 여기서 1보다 큰 값을 가지는 경우 기본 조건에 비해 내화시간이 길고, 내화성능의 여유도가 더 확보될 수 있다는 것을 의미하며, 1보다 작은 값을 가지는 경우는 반대를 의미한다고 할 수 있다. 내화시간 비교 결과에 의하면 이번 사례 연구에서 가정한 화재조건 적용 범위(기준값 대비 -20~20%)에서는 가연물의 양 변화에 비해 환기 조건의 변화가 내화시간에 더욱 지배적인 요인임을 알 수 있었다. 또한 화재조건에 따라 내화시간에도 상당한 증감이 발생할 수 있음을 확인하였다. 이는 건축물의 화재위험도 예측 측면에서 표준화재에 근거한 구조부재의 일률적 내화성능평가에 비해 다양한 화재취약요인을 고려할 경우 합리적 성능평가 및 효율적 설계 결과를 유도할 수 있음을 기대하게 한다.

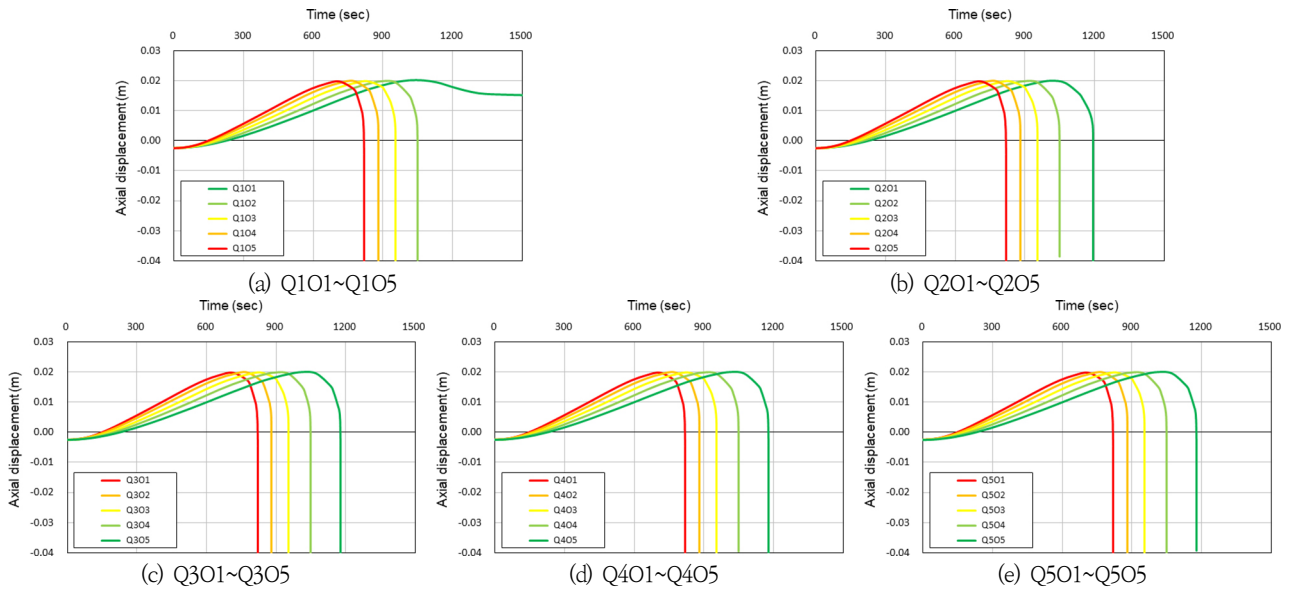


그림 5 건축물의 화재취약요인에 따른 기둥부재 시간-수축량 곡선 변화

표 2 화재취약특성에 따른 기둥부재 내화시간(sec) 변화

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
O1	10800	1194	1178	1178	1178
O2	1050	1050	1050	1050	1050
O3	954	954	954	954	954
O4	879	879	879	879	879
O5	820	820	820	820	820

표 3 Q303 대비 화재취약특성에 따른 기둥부재 내화시간 증감 비교

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
O1	11.32	1.25	1.23	1.23	1.24
O2	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
O3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
O4	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
O5	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86

4. 맺음말

건축물의 화재안전성능 확보와 관련하여 구조부재 내화 성능의 정확한 설계 및 평가는 간과할 수 없는 중요한 문제이다. 국내와 달리 유럽의 경우 오래 전부터 기존 상온구조 설계의 철학 및 기법들을 고온 조건으로 확장하고 구조 및 화재공학의 기본적 이론에 근거하여 내화구조의 설계절차를 개선시켜 왔다. 북미의 경우 유럽과는 다소 다른 방향으로 내화설계를 실무적으로 운영해 왔지만 최근에는 기존

구조설계기준에 내화설계를 적극적으로 포함시켜 나아가고 있다. 또한 성능기반 내화설계를 기존 설계법의 대안으로 제시하여 실제적 화재조건을 반영하여 내화성능을 평가 혹은 설계할 수 있도록 유도하고 있다.

이번 사례 연구에서와 같이 화재 발생시 예상되는 화재 시나리오와 화재노출조건, 구조부재의 열 및 구조적 특성을 반영할 경우 건축물 주요구조부의 정량적이고 실효적인 화재위험성 평가가 가능하며 이를 통해 실제 화재 발생에 대비한 건축물의 잠재적 붕괴 가능성 예측 및 방지가 가능하다. 다만, 실제 건축물 설계 현장에서의 실무적 활용을 위해서는 기존 내화구조설계절차와의 연계성 확보 및 운영에 관한 제도적 근거 마련이 필요한 상황이며, 이를 뒷받침할 보다 활발한 연구와 논의가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 한국표준협회 (2019) KS F 2257-1: 건축 구조 부재의 내화시

- 험 방법-일반요구사항, 한국표준협회.
2. 한국표준협회 (2014) KS F 2257-7: 건축 구조 부재의 내화시험 방법-기둥의 성능조건, 한국표준협회.
 3. ABAQUS (2010) ABAQUS Analysis User's Manual, SIMULIA.
 4. American Institute of Steel Construction (2016) Specification for Structural Steel Building, AISC 341-16, AISC, USA.
 5. American Society of Civil Engineers (2016) Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-16, ASCE, USA.
 6. American Society of Civil Engineers (2018) Structural Fire Engineering, ASCE manuals and reports on engineering practice, No. 138, ASCE, USA.
 7. British Standards Institution (1990) Structural Use of Steelwork in Building-Part 8: Code of Practice for Fire Resistant Design, BS 5950-8, UK.
 8. European Committee for Standardization (2002) Eurocode 1. Actions on Structures, Part 1.2: General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire, BSI, London, UK.
 9. European Committee for Standardization (2005) Eurocode 3. Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules-Structural Fire Design, BSI, London, UK.
 10. International Standards Organization (1999) ISO 834-1: Fire Resistance Test-Elements of Building Construction, ISO, Geneva, Switzerland.
 11. National Fire Protection Association (2019) Guide on Alternative Approaches to Life Safety, NFPA 101A, NFPA, USA. 