내화성능 평가를 위한 화재모델 비교 및 분석에 관한 연구

A Study on Comparison and Analysis of Fire Models for Evaluating Fire Performance

양승조* · 이재승**

Yang, Seung Cho*, and Lee, Jae Sung**

Abstract

To evaluate the fire resistance performance of the buildings, it's necessary to determine the fire model for the post-flashover stage, which is classified into the standard fire model and parametric fire model. Currently, fire design and evaluation mostly use the standard fire curve in consideration of variable input parameters and complex calculation, which however may result in over/under-design because it predicts the fire severity based on conservative requirements. In this study, fire models are compared and analyzed which is followed by analysis of prediction formula of parametric fire model. It appears desirable to use parametric model that considers the characteristics of the zone in a bid to evaluate the fire resistance performance.

Key words : Parametric Fire Curve, Standard Fire Curve, Fire Resistance Performance

요 지

건축물의 내화성능을 평가하기 위해서는 포스트-플래시오버 단계에 해당하는 화재모델을 선정해야 하며 이는 크게 표준 화재모델과 파라메트릭 화재모델로 구분할 수 있다. 표준 화재모델은 온도-시간의 변수를 통해 화재심각도를 예측하고, 파라메트릭 화재모델은 구획의 특성을 고려하여 화재심각도를 예측한다. 현재 내화설계 및 평가의 대다수는 다양한 변수 입력 및 계산의 복잡성으로 인해 표준 화재곡선을 주로 사용한다. 그러나 이는 보수적인 화재심각도를 기반으로 화재심각도를 예측하기 때문에 과다/과소 설계될 가능성이 높다. 본 연구에서는 각 화재모델에 비교 분석하고 이를 통해 파라메트릭 화재모델의 예측식을 분석하였다. 또한 각 화재모델을 통해 강구조물의 내화성능을 평가/비교하였으며 평가 결과, 각 화재 모델에 따라 내화성능의 오차를 보였다. 따라서 보다 합리적으로 내화성능을 수행하기 위해서는 구획의 특성을 고려한 파라메트릭 화재모델을 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 파라메트릭 화재곡선, 표준화재곡선, 내화성능

1. 서 론

건축물 화재 발생시 다양한 인자로 인해 화재 성상이 발달 또는 쇠퇴하게 된다. 플래시오버 이전 화재 시나리오는 소방, 피난 등 인명의 안전과 직결되기 때문에 t^2 Fire 및 FDS를 통해 화재시나리오가 결정한다. 플래시오버 이후 화재 시나리오는 포스트-플래시오버라 하며 인명의 안전보다는 급격한 온도상승으로 인한 건축물의 붕괴를 방지하는

데 사용된다. 따라서 주요 관점에 따라 플래시오버 이전 또는 이후의 자연화재를 선택하여 사용하는 것이 바람직하다(Feasey, 2002). Table 1은 구획 화재의 성상을 예측하기 위한 화재 모델의 종류에 따른 입력 변수, 관련 코드 등을 나타내고 있다.

건축물 화재시 구조물에 영향을 주는 포스트-플래시오버 화재모델은 크게 표준 화재(공칭화재)와 파라메트릭 화재로 구분할 수 있다. 표준화재는 자연화재(실제 화재)를 시간-온

*정회원, 한남대학교 건축공학과 박사과정(E-mail: trppp@nate.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering, Hannam University

**교신저자, 정회원, 한남대학교 건축공학과 교수(Tel: +82-42-629-7528, Fax: +82-42-629-7552, E-mail: jaesung@hnu.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Architectural Engineering, Hannam University

Table 1. Input Variables and Related Criteria According to Fire Model Types

Fire Model	Nominal fires	Time equivalences	Compartment fires		Zone Models		CFD / field models
			Parametric	Localised	One-zone	Two-zone	
Complexity	Simple	Intermediate			Advanced		
Fire Behaviour	Post-flashover fires			Pre-flashover fires	Post-flashover fires	Pre-flashover /localised fires	Complete temperature-time relationships
Temperature distribution	Uniform in whole compartment			Non-uniform along plume	Uniform	Uniform in each layer	Time and space dependent
Input parameters	Fire type Nophysical parameters	Fire load Ventilation conditions Thermal properties of boundary Compartment size		Fire load & size Height of ceiling	Fire load Ventilation conditions Thermal properties of boundary Compartment size Detailed input for heat & mass balance of the system		Detailed input for solving the fundamental equations of the fluid flow
Design tools	BS EN1991-1-2				COMPF2 OZone SFIRE-4	CCFM CFAST OZone	FDS SMARTFIRE SOFIE
	PD7974-3	-	PD7974-3	-			
	Simple equations for hand calculations		Spreadsheet	Simple equations	Computer models		

도의 변수로 정량화 한 곡선으로 건축 재료 및 주요 구조부의 내화성을 상대적으로 평가하는데 사용되고 있다. 그러나 표준화재를 통한 내화성 평가는 구획의 특성 및 가연물의 조건 등을 고려하지 않고 시간에 따른 정형화된 화재 심각도를 부여하기 때문에 과다/과소 설계 될 가능성이 높다. 여기서 말하는 화재 심각도란 화재시 부재의 내력 손실에 영향을 주는 상승하는 온도(화재 강도)의 정도를 의미한다.

파라메트릭 화재는 구획 공간의 자연화재 중 포스트-플래시오버의 화재 성장만 고려하는 것으로써 가연물의 발열량, 환기계수, 소방 시스템 등 구획 공간 내 존재하는 여러 인자들을 고려하여 자연화재 성장을 예측하게 된다. 따라서 표준화재에 비해 보다 합리적인 화재 심각도를 예측할 수 있으며 다양한 조건을 고려하여 내화성을 평가할 수 있는 장점이 있다.

건축물의 주요구조부 내화성을 평가하기 위해서는 파라메트릭 화재 및 표준 화재로 평가할 수 있다. 그러나 내화설계 및 평가의 대다수는 다양한 변수 입력 및 계산의 복잡성으로 인해 표준 화재곡선을 주로 사용하고 있으며 이로 인해 특정 조건에 따라 비합리적인 내화설계가 적용되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 콘크리트 구조 및 강구조의 주요구조부에 대한 합리적인 내화설계 및 평가를 수행하기 위해 포스트-플래시오버 화재모델의 종류 및 특징에 대해 분석하고 등가화재심각도의 개념을 이용하여 각 화재 모델에 따라 주요구조부의 온도 상승을 예측하여 결과 값을 비교·분석하였다.

2. 포스트-플래시오버 화재 모델

2.1 표준 화재곡선

표준화재곡선은 실제 화재를 정량화 한 곡선이며 건축 자재 및 주요 구조부 등의 내화성을 상대적으로 평가하는데 사용되고 있다. 대부분 표준 화재의 온도는 시간이 지남에 따라 계속 상승하지만 실제 화재는 성장, 유지, 냉각 단계를 나타낸다. 이러한 실제 화재 성장을 시간-온도에 따른 등가적 개념을 도입하여 현재 사용되고 있는 표준 화재곡선이 제시되었으며 사양적 기준에 따라 현재 다양한 건축 자재 및 부재에 대한 성능 평가에 사용되고 있다.

표준 화재곡선의 대부분은 실제 화재 중 포스트-플래시오버 단계에 해당한다. 또한 자연화재곡선과 달리 냉각기 없이 지속적으로 온도가 상승·유지되는 것이 특징이다. 표준화재곡선의 주요 단점과 한계점을 정리하면 다음과 같다.

표준 화재곡선은 실제 구획 안에서 발생하는 자연화재를 나타내지는 않는다. 실제 구획 안 화재 성상은 가열 속도, 화재 강도에 따라 달라짐으로 표준화재곡선과는 큰 오차가 발생할 가능성이 높다. 예를 들어 단기간에 구획 온도가 급상승 한 경우, 열충격으로 인해 콘크리트의 표면이 파손될 가능성이 높다. 또한 장기간 저온으로 유지되는 화재는 콘크리트 부재의 평균온도가 높아져 콘크리트의 강도를 크게 감소시킬 수 있다.

표준 화재곡선은 항상 보수적으로 화재성상을 구현하지 못한다. 다시 말해 표준화재에 비해 자연화재의 화재 심각도

가 높은 경우가 발생할 가능성이 높다. 예를 들어 반도체, 전기 공장 등 화재하중 밀도가 높은 건축물 용도의 경우 표준화재보다 화재강도가 더욱 심각해진다.

이러한 단점에도 불구하고 표준화재곡선은 현재 가장 보편적으로 사용하고 있는 화재 곡선이며 성능적 내화설계 중 가장 단순한 형태로 실험 및 평가에 사용되고 있다.

표준화재 곡선은 ASTM E119, ISO 834, KS 2257-1 등에서 제시하고 있으며, 각 코드에서 제시하고 있는 표준화재곡선은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. Standard Fire Curves for Each Codes

ASTM E119에서 제시하고 있는 표준화재 곡선은 미국과 그 주변 국가에서 가장 활발하게 사용되고 있는 건축물 화재 시나리오이며 Eq. (1)과 같다. 이 시간-온도 곡선은 구조물의 내화성능 실험에 주로 사용되고 있으며 보, 기둥, 벽, 지붕, 슬라브에 대한 평가를 수행할 수 있다. Eq. (1)에서 θ_g 는 가열 온도이며 t_h 는 시간 (sec)를 나타내고 있다.

$$\theta_g = 750(1 - e^{-3.79553\sqrt{t_h}}) + 170.41\sqrt{t_h} + 20 \quad (1)$$

ISO에서도 ASTM과 유사한 형태로 표준화재곡선에 대해 제시하고 있다. ISO 834에서 제시하고 있는 표준 화재곡선은 ASTM에서 제시하고 있는 표준 화재곡선 Eq. (1)과는 다르나 시간에 따른 온도 상승은 유사한 형태를 보인다. 또한 이는 유럽 내화관련 건축기준인 유로코드의 EN 1991-1-2 및 국내의 KS F 2257-1에서 제시하는 식과 동일하다. ISO 834에서 제시하는 표준 화재곡선은 Eq. (2)와 같다. Eq. (2)에서 θ_g 는 가열 온도이며 t 는 시간(min)을 나타내고 있다.

$$\theta_g = 20 + 345\log_{10}(8t + 1) \quad (2)$$

2.2 등가 화재심각도

등가 화재의 개념은 시간-온도에 대한 자연화재의 심각도를 표준화재와의 관계로 연관시키는데 사용된다. 다시 말해, 구획 화재의 실제 화재를 표준화재로 나타낸 뒤 시간 또는

온도의 개념으로 표현하는 것을 말한다. 본 연구에서는 등가 화재심각도를 통해 자연화재 및 표준화재의 심각도를 동일하게 설정한 뒤 부재의 내화성능을 평가하는데 사용하였다.

자연화재를 표준화재로 등가 치환하는 방법은 크게 3가지로 구분된다. 첫 번째, 등가면적에 의한 치환방법은 시간-온도 그래프에서 자연화재에 의한 면적과 표준화재에 의한 면적을 같게 하여 등가화재 심각도를 예측하는 것이다. 두 번째는 상승 온도에 따른 치환방법으로 자연화재에 노출된 부재의 상승온도를 계산한 뒤 표준화재에 노출된 부재가 자연화재에 노출된 부재의 상승온도에 도달하는 시점을 계산하는 방법이다. 세 번째는 강도 저감에 따른 치환방법으로 자연화재에 의한 부재의 강도저감율을 계산한 뒤 표준화재에 노출된 부재가 자연화재에 노출된 부재의 강도 저감율에 도달하는 시점을 계산하는 방법이다. 그러나 이러한 등가 화재심각도 예측 방법은 피복을 적용한 강재 및 콘크리트 구조에만 적용이 가능하며, 무피복 강재에는 높은 열전도율에 의해 적용이 불가능하다(Buchanan, 1997). Fig. 2는 화재 곡선에 따른 등가 면적을 계산하여 동일한 화재심각도를 예측한 것이며, 임계점(Threshold Temperature)은 표준화재 곡선과 자연화재곡선의 온도 차이가 급격히 발생하는 온도 (150°C 또는 300°C)를 의미한다.

Fig. 2. Equivalent Standard Fire Resistance Time

2.3 파라메트릭 화재곡선

파라메트릭 화재곡선은 구획 내 존재하는 화재 영향 인자를 고려하여 보다 합리적으로 성능적 내화설계를 수행할 수 있게 하는 중요한 인자로서 성능설계가 도입된 세계 각국에서 다양한 방식으로 자연화재곡선에 대한 식을 제시하고 있다. EN 1991-1-2에서 제시하는 파라메트릭 화재곡선은 구획의 열균형에 기반하여 제안되었다. 구획 화재시 온도는 개구부로 인한 열손실 $\dot{q}_R$ (복사), 개구부를 통한 연기 및 가스의 열손실 $\dot{q}_L$ (대류), 구획 벽을 통한 열손실 $\dot{q}_W$ (전도), 가연물에 의한 열방출 $\dot{q}_c$ 의 열균형에 기반한다. Fig. 3은 구획화재 공간에서의 열균형을 도식화 한 것이다.

Fig. 3. Heat Balance in Compartment Fire Space

본 연구에서 사용한 유로코드의 파라메트릭 화재곡선은 스웨덴에서 수행한 개구부 및 화재 하중에 따른 화재 시나리오 실험(Magnusson & Thelandersson, 1970) 결과를 토대로 제시한 것이며, 파라메트릭 화재곡선을 화재하중 밀도, 환기 계수, 면적 등 여러 매개변수를 고려하여 크게 3가지 식으로 제시하고 있다.

첫 번째, 가열구간에 관한 식은 1981년 Wickstrom에 의해 처음 제안되었다. 「구획 내 화재가 발생한 경우, 가열 온도는 개구부 면적과 구획 경계면의 열관성(Thermal inertia)에 의해 결정된다.」라는 가정으로 1970년 Magnusson & Thelandersson에 의해 수행되었던 “Swedish Fire Curve”의 실험 데이터를 활용하였으며, 이를 통해 현재 제안되고 있는 파라메트릭 화재곡선을 제시하게 되었으며 Eq. (3)과 같다. Eq. (3)에서 θ_g 는 구획의 가스 온도이고 t^* 는 구획 경계 및 환기조건에 의한 시간이다.

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*}) \quad (3)$$

두 번째, 유지 구간에 관한 식은 가연물의 종류 및 발열량에 따른 화재하중밀도 및 최고온도 도달시간에 따라 결정된다. 화재하중밀도는 가연물의 발열량 및 소화시스템의 종류 및 유/무 등에 의해 결정되고 최고온도 도달시간은 환기계수 및 구획의 크기에 의해 결정되며 Eq. (4)와 같다. Eq. (4)에서 $q_{t,d}$ 는 설계화재하중밀도, O 는 개구부계수, t_{lim} 는 화재성장률에 따른 최소 화재지속시간이다.

$$t_{max}^* = \max[(0.2 \times 10^{-3} \times \frac{q_{t,d}}{O}); t_{lim}] \times \Gamma \quad (4)$$

세 번째, 냉각 구간에 관한 식은 앞선 언급한 구획의 열관성, 환기계수 등에 의해 결정되나 유로코드에서 제시한 냉각 구간의 식은 최고온도에서 일정 조건에 따라 선형적으로 감소하는 것으로 가정하였으며 Eq. (5)와 같다. Eq. (5)는 $0.5 \leq t_{max}^* < 2$ 인 경우의 냉각구간을 나타내고 있다.

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^* \times x) \quad (5)$$

Fig. 4는 EN1991-1-2에 따른 전형적인 파라메트릭 화재곡선 및 주요 변수를 나타내고 있다. 이러한 화재 곡선은 최대 온도 θ_{max} 까지의 지수 곡선으로 표시되는 가열 단계와 상온까지 선형적으로 감소하는 냉각 단계를 구분된다. 화재 강도(θ_{max})와 화재 지속 시간(t_{max}^*)은 화재시 건물의 강도에 영향을 미치는 주요 요소이다. 결과적으로 이러한 변수는 파라메트릭 화재의 설계 공식에서 지배 매개 변수로 적용된다.

Fig. 4. Parametric Fire Curves and Key Variables

단, 파라메트릭 화재곡선으로 모든 구획 화재성상을 예측하는 것이 불가능하다. (Swedish Fire Curve 실험 조건은 개구부의 크기 및 화재하중에 따라 극히 제한적) 파라메트릭 화재곡선을 사용하기 위해서는 지붕에 개구부가 없으며 구획의 최고 높이가 4 m이며 바닥면적이 최대 500 m² 이하인 화재 구획에 적용이 가능하다. 또한 구획의 화재하중은 완전 연소된 것으로 가정한다. 만약 연소 거동에 대한 특별한 사항이 없이 화재하중 밀도가 명시되었다면 본 계산법은 주로 셀룰로오스 유형의 화재하중이 있는 화재 구획에만 한정해야 한다. 이러한 가정 사항은 다음과 같다.

- 최대 구획 바닥 면적: 500m²
- 최대 구획 높이: 4m
- 지붕에 개구부가 없어야 함
- 셀룰로오스 유형의 화재 하중이 지배해야 함
- 열관성: 100 ~ 2200 J/m²s^{1/2}K

3. 화재모델 별 구조물의 내화성능 평가

본 연구에서는 표준 화재곡선과 파라메트릭 화재곡선을 적용하여 내화성능을 평가하였다. 표준 화재곡선은 ISO 834의 표준 화재곡선을 적용하였으며, 파라메트릭 화재곡선은 EN 1991-1-2의 화재곡선을 적용하였다. 구조물의 내화성능은 화재곡선의 종류에 따라 내부 또는 외부 표면 온도

상승을 통해 평가하였다. 대상 부재는 강구조 건축물이며, EN 1993-1-2의 한계온도법을 이용하여 부재의 온도 상승을 예측하였다.

3.1 구획 화재모델

평가에 활용된 화재모델은 Fig. 2와 같다. 각 화재곡선의 같은 화재강도는 발열 임계온도(threshold temperature)를 기준으로 AREA 1과 AREA 2의 면적이 동일한 51분으로 선정하였다. 발열 임계온도는 가연물이 플래시오버를 발생하기 위한 최저 온도로 ASTM에서 발간한 「Manual on Flash Point Standards and Their Use」에서 제시하는 발열 임계온도 값(300°C)을 적용하였다. 파라메트릭 화재곡선의 주요 변수로인 개구부 계수는 $0.055 \text{ m}^{1/2}$, 화재하중밀도는 181.753 MJ/m^2 , 구획의 열관성은 $1,234 \text{ J/m}^2 \text{ s}^{1/2} \text{ K}$ 를 적용하였다.

3.2 강구조 부재의 내화성능 평가

구획의 화재에 의한 강구조 부재의 온도 상승 예측은 EN 1993-1-2에서 제시하는 한계온도법을 활용하였다. 한계온도법은 평가 대상 부재가 화재시 구조적인 성능을 발휘할 수 있는 한계온도를 예측하고 가열되는 화재곡선에 의해 한계온도까지 도달하는 시간을 계산하는 평가방법이다 (Yang, 2014). 따라서 화재 모델에 따라 상승하는 부재의 온도가 한계온도를 초과하는 경우 구조적인 성능을 손실한 것으로 평가할 수 있다. 화재모델에 따라 평가되는 대상 부재의 형상 및 온도 상승 주요 변수는 다음과 같다.

- 대류계수: $35 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (표준)
 $25 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (파라메트릭)
- 단면형상계수: 131 m^{-1}
- 한계온도: 518°C
- 밀도: $7,850 \text{ kg/m}^3$
- 비열: 439.80 J/kg°C
- 피복 적용: 뿔칠

EN 1993-1-2의 한계온도법을 통해 강구조 건축물의 내화성능을 평가 한 결과는 Fig. 5와 같다. 뿔칠을 15 mm 적용한 강구조 부재의 경우 부재의 최대온도 및 최대온도 도달 시간이 화재곡선에 따라 동일한 것으로 예측되었다.

두께를 1/2 줄인 7.5 mm 뿔칠을 적용한 강구조 부재의 경우 Fig. 5(b)와 같다. 등가 면적에 의한 등가화재심각도를 통해 예측된 내화성능을 비교한 경우, 표준화재곡선에 의한 온도 상승이 약 100°C 높은 것으로 예측되었다. 또한 최고온도 도달 시간에 의한 등가화재심각도를 통해 내화성능을 비교한 경우, 파라메트릭 화재곡선에 의한 최대온도 도달 시간이 약 6분 이상 빠른 것으로 예측되었다.

상기 두 예제 조건과 같이 특정 구획 및 가연물의 종류

등 다양한 화재 영향 인자를 고려하지 않고 기존에 제시된 표준 화재곡선을 통해서만 내화성능을 평가할 시 과다/과소 설계될 가능성이 있으며(ASCE, 2003), 이러한 결과 화재안전성 미확보 및 경제적 손실이 발생할 가능성이 존재한다. 따라서 보다 합리적인 내화설계를 수행하기 위해서는 반드시 표준 화재곡선 및 파라메트릭 화재곡선을 함께 고려하여 하는 것으로 판단된다.

(a) Fire Spray: 15mm

(b) Fire Spray: 7.5mm

Fig. 5. Fire Resistance Evaluation Results According to Fire Model

4. 결 론

본 연구에서는 구조물의 내화성능 평가에 사용되는 포스트-플레시오버 화재모델의 종류 및 특징을 비교하였으며 구획특성을 고려한 파라메트릭 화재의 예측식을 분석하였다. 또한 파라메트릭 화재곡선 및 표준 화재곡선의 화재심각도를 동일하게 하여 화재 모델에 따라 강구조 건축물의 내화성능을 평가하고 결과 값을 비교하였다.

- (1) 표준 화재모델은 건축물의 내화성능을 평가하기 위해 실험 및 평가 기법 등의 주요 변수로 적용된다. 그러나 표준 화재모델은 보수적으로 화재 심각도를 예측하여 정형화한 화재모델로써 성능적 내화설계를 평가하기에는 한계점이 많다. 또한 일반적인 구획 화재의 경우

보수적인 결과 값이 예측될 가능성이 높으나, 높은 화재하중밀도를 갖는 구획, 특수한 형태로 구성된 구획의 경우 실제 화재 심각도보다 낮게 예측될 가능성이 존재한다. 따라서 보다 합리적으로 구획의 화재심각도를 예측하고 건축물의 내화성능을 평가하기 위해서는 구획 및 가연물의 특성 등을 고려한 화재 모델을 적용하는 것이 바람직하다.

- (2) 화재모델에 따른 강구조 건축물의 내화성능을 평가한 결과 파라메트릭 화재곡선이 표준 화재곡선에 비해 온도 상승이 약 100°C(동일 시간 기준) 낮은 내화성능을 확보하는 것으로 예측되었다. 또한 등가 시간 및 온도를 통해 내화성능을 평가할 시 약 6분의 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 평가 대상 부재에 적용된 단열재의 종류 및 구획의 형태 등에 따라 예측되는 결과 값은 다르게 예측되나, 화재 공학적인 개념이 도입된 파라메트릭 화재곡선을 함께 고려하여 합리적으로 내화설계 및 평가를 수행해야 할 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구에서는 화재모델에 따른 강구조 건축물에 대한 내화성능을 예측하였다. 강구조의 경우 높은 열전도율로 인해 가열 또는 냉각 온도와 유사한 온도 거동을 나타낸다. 그러나 콘크리트 구조의 경우 약 8~10배 낮은 열전도율로 인해 보다 복잡한 열적 거동을 나타낼 것으로 예측된다. 따라서 특정 구획에 대한 파라메트릭 화재곡선을 적용하여 콘크리트 구조물의 내화성능을 평가하고 이를 통해 성능적 내화설계를 위한 파라메트릭 화재곡선의 적용 가능성을 추가적으로 연구할 필요성이 있는 것으로 판단된다.
- (4) 성능적 내화설계는 확립화된 기준을 배제하고 공학적인 이론 및 방법을 통해 보다 합리적으로 설계를 수행하는 방식이다. 기존에 사용 중인 표준 화재곡선은 화재 안전상 보수적으로 설계가 이루어지도록 제시되어 있다. 따라서 보다 합리적이고 성능적인 내화설계를 수행하기 위해서는 파라메트릭 화재곡선을 함께 고려하여 대상 부재의 내화성능을 보다 합리적으로 평가하는 것이 반드시 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 도시건축연구사업의 연구비지원(17AUDP-B100356-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahmed, G.N., and Hurst, J.P. (1995) Modeling the Thermal Behavior of Concrete Slabs Subjected to the ASTM E119 Standard Fire Condition. *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 125-132.
- American Society for Testing and Materials (1992) *Manual on Flash Point Standards and Their Use*. ASTM International.
- BSI (2003) *Application of Fire Safety Engineering Principles to the Design of Buildings- Part 3: Structural Response and Fire Spread Beyond the Enclosure of Origin (Subsystem3)*. Published Document 7974-3, British Standards Institution, U.K.
- Buchanan, A.H. (1997) Modeling Post Flashover Fires with FASTLite. *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 1-11.
- Buchanan, A.H. (2001) *Structural Design for Fire Safety*. John Wiley & Sons, New York.
- Eurocode 2 (2002) *Design of Concrete Structures —Part 1-2: General Rules —Structural Fire Design*. ENV 1992-1-2, Comité Européen de Normalisation(CEN).
- Feasey, R., and Buchanan, A.H. (2002) Post-flashover Fires for Structural Design. *Fire Safety Journal*, Vol. 37, pp. 83-105.
- ISO 834 (1975) *Fire Resistance Tests —Elements of Building Construction*. International Organization for Standardization.
- Magnusson, S.E., and Thelandersson, S. (1970) Temperature - Time Curves of Complete Process of Fire Development. *Bulletin of Division of Structural Mechanics and Concrete Construction*, Vol. 16.
- Yang, S., Lee, J., Yeo, I., and Na, O. (2014) Development of the Evaluation Program based on Fire Resistance Performance Design of Steel Structures. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 3, pp. 201-207.

Received	September 15, 2017
Revised	September 19, 2017
Accepted	November 7, 2017