

화재성상 그래프를 이용한 필요내화시간 산정에 관한 연구

Estimation of the Required Fire Resistance Time Using a Fire Characteristics Graph

김윤성* · 한지우** · 김혜원*** · 이병흔**** · 진승현***** · 권영진*****
Kim, Yun-Seong* , Han, Ji-Woo** , Kim, Hye-Won*** , Lee, Byeong-heun**** ,
Jin, Seung-Hyun***** , and Kwon, Young-jin*****

Abstract

In actual fires, the nature of fires varies from compartment to compartment. However, the domestic standard utilizes a uniform fire resistance of 60 min. Therefore, in this study, the required fire time was calculated by predicting the temperature of the compartment to check whether the domestic fire resistance standards are safe. The results show that, even if the facilities are divided into the same use, they all require different fire-resisting times and are at risk. In addition, simple calculations are proposed by recalculating the complex formula required to determine the fire resistance time.

Key words : Required Fire Resistance Time, Predicting the Temperature, Simple Calculation

요 지

실제 화재에서는 구획실마다 모두 다른 화재 성상을 보이지만 국내 기준은 내화시간을 일률적이게 60분으로 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 내화기준이 화재에 대해 안전성을 갖고 있는지를 확인하기 위하여 구획실의 온도예측을 통해 필요내화시간을 산정하였다. 그 결과 서로 같은 용도로 구분되어 있는 시설일지라도 모두 다른 내화시간을 필요로 하여 위험성이 있는 것으로 나타났다. 또한 내화시간 산정 시 사용되는 공식은 복잡하여, 이를 간략화한 간이식을 제안했다.

핵심용어 : 필요내화시간, 온도예측, 간이식

1. 서 론

방화구획은 화염 및 연기의 확산을 제어하고 화재를 국소의 공간에 고립을 시키기 위해 건축물 공간의 구성 및 구획을 설정하는 것이다. 이를 통해 재실자의 원활한 피난활동을 제공하여 인명피해 저감의 효과와 소방관이 소화활동에 있어 동선 및 거점 확보 등의 효과를 기대할 수 있다. 이를 통해 대형화재로 확대되는 것을 억제할 수 있도록 한다.

건축물에서 화재가 발생했을 때 화염이 발화지점에 고립되지 않고 분출화염이나 폭발 등으로 인해 주변의 다른 공간으로 화재가 확산되면 위험성이 최대 10배까지 증가하는 것으로 조사되었다.

그래서 화재확산의 위험을 최소화하기 위한 대책으로 국내를 비롯한 여러 나라에서는 방화구획 설계를 시행하고 있다(Han, 2020).

Fig. 1과 같이 소방청 화재통계에 따르면 건축물에서 발생

*정회원, 호서대학교 소방방재학과 석사과정(E-mail: kys800174@gmail.com)

Member, Master's Course, Department of Fire&Disaster protection of Hoseo University

**정회원, 호서대학교 소방방재학과 공학석사

Member, Master of Engineering, Department of Fire&Disaster protection of Hoseo University

***정회원, 호서대학교 소방방재학과 공학석사

Member, Master of Engineering, Department of Fire&Disaster protection of Hoseo University

****정회원, 호서대학교 소방방재학과 박사과정

Member, Ph.D. Candidate, Department of Fire&Disaster protection of Hoseo University

*****정회원, 호서대학교 소방방재학과 박사과정

Member, Ph.D. Candidate, Department of Fire&Disaster protection of Hoseo University

*****교신저자, 정회원, 호서대학교 소방방재학과 교수(Tel: +82-41-540-5497, Fax: +82-41-540-5738, E-mail: jungangman@naver.com)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Fire&Disaster prevention of Hoseo University

한 화재건수는 최근 5년 기준으로 연 평균 약 27,000여건으로 집계되고 있으며, 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 이 중 발화지점 연소에서 종료되지 않고 발화층, 다수층, 인접건물 등으로 확대되는 경우는 2017년을 기준으로 했을 때 2013년 대비 약 10.6% 증가한 것으로 집계된다(Fire Department, 2017).

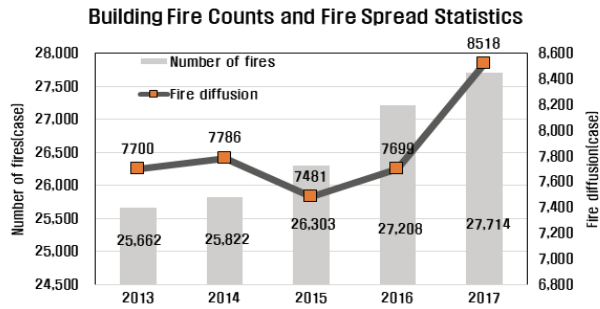


Fig. 1. Building Fire Counts and Fire Spread Statistics

실제 화재사례를 살펴보면, 2014년 5월에 발생한 고양 종합터미널 화재는 1층에서 용접작업의 불씨가 우레탄폼에 착화하면서 화재가 발생했다. 당시 방화구획 공사로 인해 기존 방화구획이 철거되어 있어, 1층에서 화재가 급격히 층 전체로 확산되었으며 그 과정에서 방화스크린과 방화셔터가 손상으로 인해 작동하지 않아 연기 및 화염이 상층부로 빠르게 확산되었다.

또한 2018년 1월 밀양 세종병원 화재는 병원 1층에서 전기배선의 절연과괴로 인해 화재가 시작되었다. 당시 병원에는 방화문이 중앙에 설치되어 있지 않았으며 방화문의 차연, 차염성능이 미비하여 설치되어있는 방화문 틈새로

연기가 확산되었다. 또한 계단실 구획과 승강기 문의 차염성능이 미비하여 연기가 빠른 속도로 상층부로 확대 되어 많은 인명피해가 발생했다. 이처럼 건축물 화재에서 방화구획이 제대로 작동하지 않으면 화재확산이 극대화 되는 경향이 있어 피해가 확대된다. 따라서 본 논문에서는 건축물의 구획 부재 중 취약한 부분(이하 방화구획 개구부)에 대한 성능적인 방화구획 설계를 진행함에 있어 등가화재가속도 및 선형중첩법을 사용하여 건축물의 설계조건에 따른 필요내화시간을 산정한다. 그리고 건축물에 대한 성능적인 설계를 위해 건축 설계조건에 따른 필요내화시간 산정 간이식을 제시함으로써 화재확산 방지를 위한 대책을 마련하는 것을 목적으로 한다.

2. 국내외 방화구획 기준현황

방화구획은 건축물 내 재실자의 안전을 확보하고 건축적인 요소를 이용하여 화재를 국소부위에 고립시켜 화재확산을 방지하는 것을 목적으로 한다. 이는 주요구조부가 내화 또는 불연재로 된 건축물로서 바닥면적별, 층별, 용도별, 관통부별로 분류되며 열에 내성이 있는 바닥·벽, 방화셔터를 포함한 감중방화문으로 구획하는 것을 의미한다. 본 장에서는 국내의 방화구획에서 취약한 부분인 방화문과 방화셔터에 요구되는 화재성능을 국외의 기준과 비교하여 Table 1에 나타내었다(Choi et al., 2014).

2.1 한국

건축물에 설치되는 모든 방화문 및 방화셔터에 대한 차염성능을 1시간으로 일률적인 규정을 하고 있다. 또한 방화문에 대한 차염성만 고려하고 차열성은 따로 규정하지 않고 있다.

Table 1. Fire Door and Fire Shutter Performance Comparison

Division	Korea · Japan (min)		U.S (min)		U.K (min)	Canada (min)
			IBC	NFPA		
Firewall	60*		180*	180*	60*, 120+	120*, 60+
			90*	90*		90*, 30+
			90*	-	60*, 90+	60*, 30+
			60*		60*, 60+	45*, 30+
Fire-retardant compartmentalized shafts, stairs, elevator lifts, evacuation rooms, evacuation corridors, lamps	60*		90*	90*	30*, 60+	90*, 60+
			30+	30+		90*, 45+
			60*	60*		
			30+	30+		
A corridor divided into refractory partitions.	60*		-	20*	30*, 30+	45*, 30+
			20*	-		-
			20*	20*		
Other fire-fighting walls	60*		45*	-	20*	45*, 30+
			20*	-		20*
An outer wall	60*	20*	90*	-	30*	-
			45*			

*: flame cut-off

+: thermal blocking

2.2 일본

건축물에 설치되는 모든 방화문 및 방화셔터에 대한 차열 성능을 1시간으로 일률적인 규정을 하고 있다. 그러나 일본은 구획부재 설계 시 화재확산을 방지하기 위한 구획부재, 방화설비, 수직관통부 등에 대한 방화구획 설계를 특수하게 규정하여 안전대책을 제시한다.

2.3 미국

IBC와 NFPA에서 각각 다르게 규정하고 있으나 전반적인 내용을 살펴보면 건축물에 설치되는 모든 방화문 및 방화셔터에 대한 차열성, 차열성을 180분에서 20분 까지 필요 정도에 따라 세분화 하고 있다. 또한 벽체의 내화성능에 따라 방화문이 요구하는 내화성능도 세분화하고 있다.

2.4 캐나다

건축물에 설치되는 모든 방화문 및 방화셔터에 대한 차열성, 차열성을 120분에서 20분 까지 필요 정도에 따라 세분화 하고 있다. 또한 벽체의 내화성능에 따라 방화문이 요구하는 내화성능도 세분화하고 있다.

2.5 영국

영국의 방화구획 기준은 방화구획의 벽, 방화벽으로 구획된 샤프트 공간, 피난계단, 승강기, 피난복도, 방화칸막이 벽으로 구획된 피난로 등을 차열성, 차열성을 구분하여 화재 확산방지 대책을 강구하고 있다. 또한 벽체의 내화성능에 따라 방화문의 내화성능을 구체적으로 규정하고 있다.

2.6 소결

화재는 건축물의 모든 부분에서 발생할 수 있기 때문에 방화구획은 건축물의 일정 부분만을 중심으로 하는 것은 적합하지 않다. 또한 건축물은 사용자의 특성에 따라 구획실 크기, 화재하중, 피난요건 등이 모두 상이하다. 구획실의 조건이 다르면 각 시설별로 필요내화시간도 다르게 나타날 수 있다. 따라서 모든 시설의 필요내화시간을 똑같이 규정하면 숙박시설, 업무시설, 의료시설 등 고위험 건축물은 더 많은 내화시간이 필요할 수 있어 화재 시 피난시간을 최대한으로 하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 또한 저위험 건축물에 대해서는 내화시간에 대한 과잉설계를 할 우려가 있어 경제적 손해를 야기할 수 있다고 생각된다. 따라서 국내에서도 화재공학적 분석을 통해 건축물의 각 구획실 조건별로 방화문 등 방화구획 부재에 대한 필요내화시간을 계산하여 모든 시설의 건축물에 대한 화재안전성을 확보할 필요가 있다.

3. 구획실 필요내화시간 산정

건축물 설계 시 방화구획 부재의 내화성능은 ISO 834

(1980) 표준화재곡선을 적용하고 있다. 표준화재 곡선은 시간에 따른 화재 온도 성상에 대한 곡선으로서 화재의 감쇄기는 고려하지 않는다. 또한 전술한 바와 같이 국내에서는 건축물의 방화구획 부재 중 방화문과 방화셔터의 내화시간을 60분으로 일괄 적용하고 있다. 하지만 실제화재는 구획실의 가연물, 설계조건 등에 따라 서로 다른 화재성상을 보인다. 따라서 건축물의 각 조건별로 구획실의 화재온도를 예측하는 것은 화재확산을 방지하는 것에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 ISO 834 표준 화재온도곡선과 실제 화재온도곡선에 따른 위험성 분석을 위하여 등가화재 가혹도와 선형중첩법을 이용하여 화재온도를 예측하고 방화구획 부재의 내화시간을 산정하는데 적합한 간이식을 제안한다.

3.1 구획화재온도 예측식

화재실의 구획조건에 따라 화재의 성상은 계속해서 변화하는 특성을 갖고 있다. 현재로서 화재성상파악을 위해 다양한 연구를 진행하고 있으며 본 논문에서는 열방출율이 일정한 경우에서 사용되는 예측식을 통해 구획화재의 온도를 예측한다.

구획실 화재는 구획실의 개구조건 및 가연물의 총량에 따라 성상이 변화한다. 크게 환기지배형 화재와 연료지배형 화재로 분류할 수 있는데, 여기서 환기지배형 화재란 가연물의 양은 충분한 것에 반해 조연성가스의 양이 부족하여 조연성가스의 양에 지배되어 화재의 성상이 변화하는 것을 말하며 Eq. (1)과 같은 구획화재온도 예측식을 사용하여 값을 계산할 수 있다(Matsuyama et al., 1995).

$$T_f - T_\infty = 3.0T_\infty (A\sqrt{H}/A_t\sqrt{\lambda\rho c})^{1/3}t^{1/6} \quad (1)$$

그리고 연료지배형 화재란 조연성가스의 양은 충분한 것에 반해 가연물의 양은 부족하여 가연물의 양에 따라 화재의 성상이 변화하는 것을 말하며 Eq. (2)와 같은 예측식을 사용하여 값을 계산할 수 있다(MaCaffrey et al., 1981).

$$T_f - T_\infty = 0.022T_\infty \left(\frac{Q^{2/3}}{(A_t\sqrt{\lambda\rho c}A\sqrt{H})^{1/3}} \right) t^{1/6} \quad (2)$$

여기서, A는 개구부의 면적(m²) H는 개구부 높이(m), Q는 열 방출률(kW), T_f는 화재실 온도(°C), T_∞는 외기온도(°C), $\sqrt{\lambda\rho c}$ 는 열관성(J/s⁻¹m²K)이다.

전술한 바와 같이 구획실 화재는 해당 화재실의 가연물의 총량과 개구부 크기에 따른 환기량에 따라 성상이 변화한다. 이것은 가연성 가스의 발생량과 환기량의 상대적 크기에 영향을 받는 변수인 χ 값(연소형 지배인자)을 이용하여 예측할 수 있으며 가연물이 목재일 때 $\chi > 0.07$ 일 경우에는 연료

지배 영역이며, $\chi < 0.07$ 일 경우에는 환기지배 영역이다. χ 값은 Eq. (3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\chi = \frac{A\sqrt{H}}{A_{fuel}} \quad (3)$$

여기서 A는 개구부의 면적(m²), H는 개구부 높이(m), A_{fuel} 은 가연물 표면적(m²)이다. 그리고 본 연구에서는 가연물의 연소속도를 목재로 가정하였으며 이에 대한 근사식은 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다(Thomas, 1961).

$$\frac{m_b}{A_{fuel}} = \begin{cases} 0.1\chi & (\chi \leq 0.07) \\ 0.007 & (0.07 < \chi < 0.1) \\ 0.12\chi e^{-11\chi} + 0.003 & (0.1 < \chi) \end{cases} \quad (4)$$

또한 건축구조 내화성검토를 진행함에 있어 화재지속시간은 왕성한 화재가 계속되는 시간이며 t_D 로 표현한다. 화재지속시간은 Eq. (5)로 계산할 수 있다.

$$t_D = \frac{W}{m_b} \quad (5)$$

여기서, W는 구획실 내 총 가연물의 중량(kg), m_b (kg/s)는 연소속도다. 여기서 연소속도는 환기인자 $A\sqrt{H}$ 와 비례관계를 나타낼 수 있으며 Eq. (6)으로 계산할 수 있다(Kunio, 1954).

$$m_b = (5.5 \sim 6) A\sqrt{H} \approx 0.1A\sqrt{H} \quad (6)$$

3.2 표준화재 온도 곡선

표준화재곡선이란 건축물의 부재 등에 대하여 내화성능을 검증할 때 사용되는 그래프이며 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다(ISO 834, 1980).

$$T_{f,\infty} - T_\infty = 345 \log_{10}(8t/60 + 1) \approx 230t^{1/6} \quad (7)$$

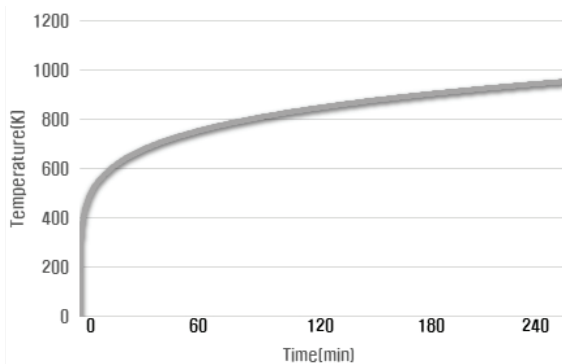


Fig. 2. Standard Temperature-time Curve (ISO 834)

3.3 선형 중첩법

선형 중첩법은 왕성한 화재가 계속되는 시간을 나타내는 ‘화재지속시간’ 이후 화재의 감쇄기를 나타내기 위한 것으로서 설정한 화재지속시간 이후에 화재지속시간 그래프의 역수를 취해 상승 곡선과 같은 기울기의 하강곡선을 얻을 수 있다(Yoshinaka et al., 1997; ASJ, 2017).

이것은 실제화재에서 발생하는 화재의 감쇄기까지 고려하여 더욱 정확한 화재온도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 선형 중첩법 이론식은 Eq. (8)과 같으며 화재지속시간을 60분으로 설정했을 경우 Fig. 3과 같은 그래프로 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_f(t) = \begin{cases} \Delta T_{f(dm)}(t) \\ \Delta T_{f(dm)}(t) - \Delta T_{f(dm)}(t - t_D) \end{cases} \quad (8)$$

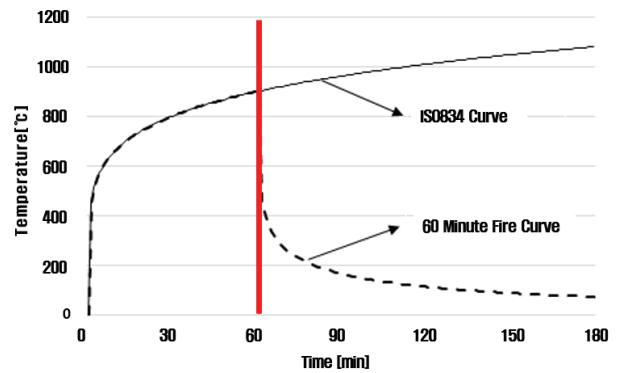


Fig. 3. Standard Temperature-time Curve (ISO 834) and 60 Minute Fire Curve

3.4 등가화재가혹도

등가화재가혹도란 화재지속시간까지의 표준화재곡선 부분의 면적과 선형중첩법으로 감쇄기를 고려한 설계화재곡선 부분의 면적을 등가치환하여 동일시하게 나타내는 것이다. 다시 말해 필요내화시간을 산정하기 위해서는 표준화재곡선과 실제 화재곡선에 대한 그래프를 이용하여 등가화재가혹도를 계산하는 것이다(Aburano et al., 1999).

본 연구에서는 등가화재가혹도를 사용하여 건축물의 방화구획 부재에 대한 필요내화시간을 계산하였다. 등가화재가혹도를 계산하기 위해서는 적분을 통한 그래프의 면적 계산이 필요하다. 필요내화시간을 계산하는 과정은 다음과 같으며 이해를 돕기 위해 표준화재부분은 진회색, 실제화재부분은 연회색으로 표현하였다.

먼저, 표준 화재곡선의 면적 산정 공식은 Eq. (9)와 같다. 화재지속시간을 60분으로 가정하고 그래프로 표현하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

$$E(t) = \int_0^{t_D} k_{(std)} t^{1/6} dt \quad (9)$$

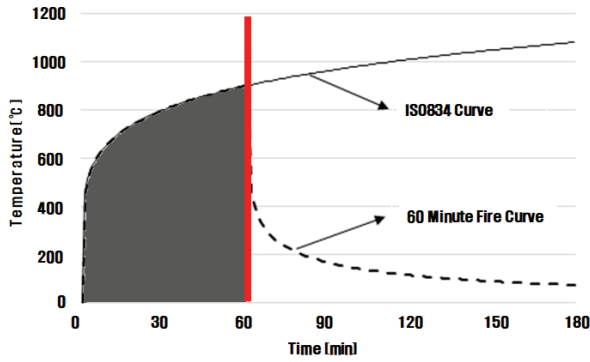


Fig. 4. Area of ISO 834 Curve

그리고 설계화재곡선을 적분하여 화재발생부터 화재지속시간까지의 면적을 산정하는 식은 Eq. (10)과 같다.

$$E(t) = \int_0^{t_D} k_{(design)} t^{1/6} dt \quad (10)$$

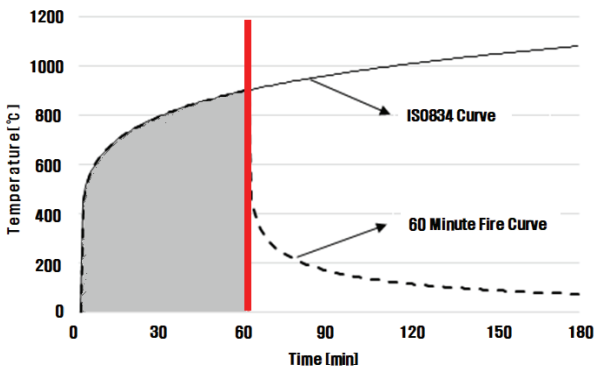


Fig. 5. Area of Design Fire Curve

다음은 화재지속시간 이후의 온도감소를 나타내기 위해 선형중첩법을 이용하여 나타낸 것이며 식은 Eq. (11)과 같다.

$$E(t) = \int_{t_D}^t k_{(design)} (t - t_D)^{1/6} dt \quad (11)$$

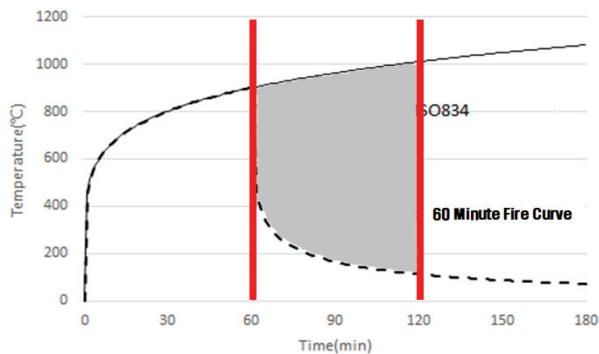


Fig. 6. Temperature Reduction After Fire Duration Time

실제화재에서 등가화재가속도를 계산하기 위해서는 전 체면적과 선형중첩법을 통해 온도 감소를 고려한 부분의 차이를 사용하며 식은 Eq. (12)와 같다.

$$E(t) = \int_0^t k_{(dn)} t^{1/6} dt - \int_{t_D}^t k_{(dn)} (t - t_D)^{1/6} dt \quad (12)$$

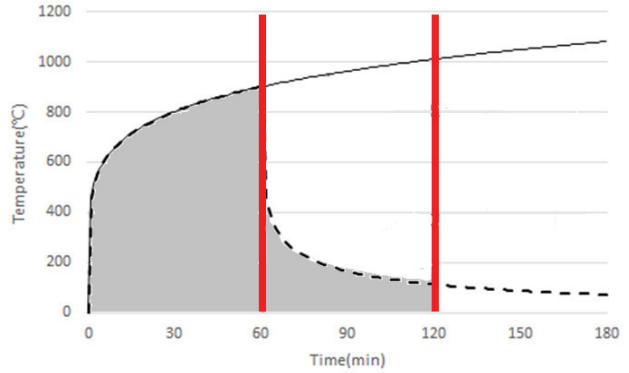


Fig. 7. Required Fire Resistance Time Calculation Graph

4. 건축물의 필요내화시간 산정 Case Study

본 논문에서는 건축물 구획실의 화재온도에 따른 필요내화 시간을 산정하기 위해 전술한 내용을 바탕으로 Case Study를 실시했다. 공학적 수 계산은 실측을 통한 데이터 및 기존 문헌에 기술된 데이터를 사용했다. 그러나 본 논문에서는 이해를 돕기 위해 화재 성상의 차이가 뚜렷하게 나타나는 두 가지 Case만 기술했다. Table 2는 호텔과 사무실 용도로 사용 중인 두 곳을 측정된 결과를 나타낸 것이며 실측은 적재가연물만을 고려하였으며 측정 장비는 줄자, 레이저 거리 측정기 및 이동식 전자저울을 사용했다. 다만, 중량이 큰 물체는 직접 측정하는 것이 불가능하여 해당 제품의 출고 당시 카탈로그를 참고하였으며, 불가피하게 하중 측정이 불가능한 경우에는 기존 문헌의 화재하중 연구 결과를 인용했다.

또한 가연물의 재질 및 연소특성은 성장기 화재성상을 예측하는데 있어 중요한 인자로 작용한다. 하지만 다양한 종류의 소재가 많이 사용되고 있는 현재로서 이를 정확히 파악하기에는 한계가 있다. 따라서, 이를 간략히 계산하기 위해 가연물의 소재는 목재계열의 연소열 18.9 (MJ/kg)과 합성고분자계열의 연소열 37.8 (MJ/kg)의 연소열을 이용하여 Eq. (13) 과 같이 계산한다.

$$w = \frac{\left(\sum_i W_W \cdot H_W + \sum_i W_P \cdot H_P \right)}{H_W \cdot A_r} \quad (13)$$

여기서, w 는 화재하중(kg/m²), W_W , W_P 는 각각 목재계열, 합성고분자계열의 중량(kgf), H_W , H_P 는 각각 목재계열,

Table 2. Basic Building Information

Content	Case A	Case B
Floor Area (m ²)	92.4	142.74
Door Size (W×H) (m)	2.16 × 0.8	2.16 × 0.8
Window Size (W×H) (m)	2 × 0.8	3 × 1.5
Combustible Quantity (ea)	92	77
Total weight of Combustible Material (kg)	540	1615.68
Total Surface area of Combustible Material (m ²)	32.4	70.00257107
Fire Load (kg/m ²)	27	44
χ	0.044169	0.078730707

합성고분자계열의 연소열(MJ/kg), A_r 은 바닥면적(m²)을 의미한다(Harmathy, 1972a, 1972b; Lee, 2017; Lee, Jin, Kim, et al., 2020; Lee, Jin, Kwon, 2020).

4.1 화재온도예측을 통한 위험성 분석

먼저, A건축물의 전체 면적은 92.4 m²이며 개구부의 가로, 세로 폭은 각 2 m, 3 m로 조사되었다. 또한 가연물의 전체 중량은 540 kg, 가연물 전체 노출 표면적은 32.4 m²로 조사되었으며 화재하중은 27 kg/m²로 설정했다.



Fig. 8. Measurement of Building Room Size

위 조사 데이터를 바탕으로 연소형 지배인자 χ 를 도출한 결과 0.044169로서 기준값인 0.07보다 작게 나타나 환기 지배형 화재로 구분되었다. 따라서 환기 지배형 화재의 온도예측 식을 사용하여 위험성을 분석했다.

그 결과 화재지속시간 t_{d_1} 는 약 63분이며, 필요내화시간은 약 76분으로 나타났다. 또한 구획실화재의 최대온도는 약 856 °C로 예측되어 표준화재와 비슷하게 나타났다. 분석결과에 따르면 A건축물은 국내에서 규정하고 있는 방화구획 부재에 대한 내화성능 60분 보다 더 많은 필요내화시간을 요구하고 있어 화재확산에 대한 위험성이 있다고 나타났다.

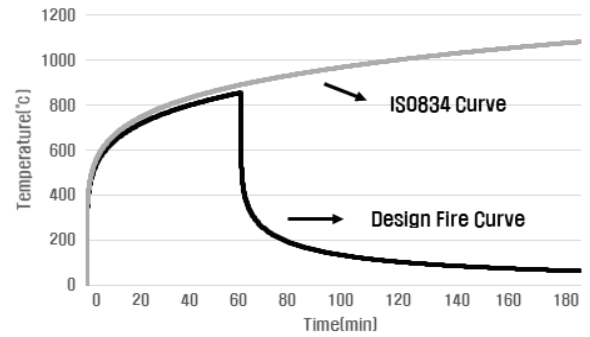


Fig. 9. Case A

다음으로 B건축물의 전체 면적은 142.74 m²이며 개구부의 가로, 세로 폭은 각 3 m, 1.5 m로 조사되었다. 또한 가연물의 전체 중량은 1,615.68 kg, 가연물 전체 노출 표면적은 70 m²로 조사되었으며 화재하중은 44 kg/m²로 설정했다. 위 조사 데이터를 바탕으로 연소형 지배인자 χ 를 도출한 결과 0.078730707로서 기준 값인 0.07보다 크게 나타나 연료지배형 화재로 구분되었다. 따라서 연료지배형 화재 온도예측 식을 사용하여 위험성을 분석했다. 그 결과 화재지속시간 t_{d_1} 는 약 54분이며, 필요내화시간은 약 85분으로 나타났다. 또한 구획실화재의 최대온도는 약 1,198 °C로 예측되었다. 분석결과에 따르면 B건축물은 국내에서 규정하고 있는 방화구획 부재에 대한 내화성능 60분 보다 더 많은 필요내화시간을 요구하고 있어 화재확산에 대한 위험성이 있을 것으로 나타났다.

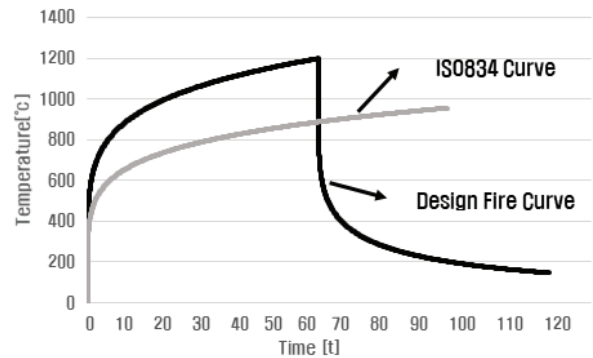


Fig. 10. Case B

본 연구를 위해 조사한 호텔, 식당, 도서관, 사무실, 주거시설을 대상으로 Case Study를 실시한 결과 총 5곳 중 국내에서 규정하고 있는 방화문에 대한 내화시간보다 더 많은 내화시간을 요구하는 곳은 호텔, 사무실, 도서관으로 절반 이상을 차지했다. 이것은 점차 복잡해지고 다양해지는 건축물을 대상으로 일률적인 내화시간을 적용하는 것은 위험성이 있다고 분석된다. 따라서 방화구획 설계 시 방화문 및 방화셔터의 내화성능을 무조건 60분으로 설계하지 않고 화재 공학적 분석을 통해 각 건축물의 구획설계 조건마다 필요한 내화시간을 산정해야 건축물을 사용하는 재실자 및 이용객에 대한 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 같은 용도의 시설 내 세부용도의 위험성을 알아보기 위해 주거시설의 거실과 주방에 대해 계산한 결과 각 70분, 51분으로 다르게 나타났다. 이것은 하나의 시설 내 세부 용도에 따라서도 화재발생위치에 따라 화재확산의 위험성이 모두 다를 것으로 생각되며 향후 연구를 통해 개선해나가야 할 사항이라고 생각된다.

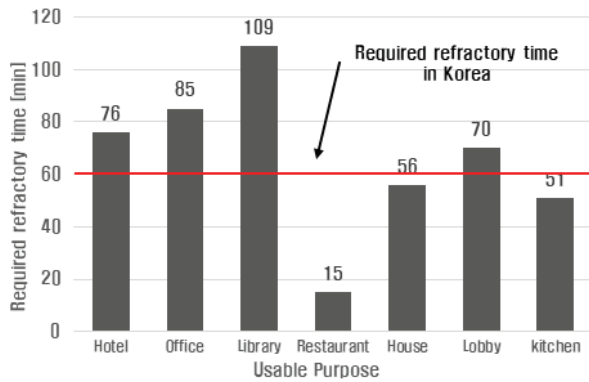


Fig. 11. Case Study Results by Building Use

4.2 내화시간산정 간이식 계산과정

본 연구에서는 등가화재 가혹도 및 선형중첩법을 이용하여 필요내화시간을 산정하고 공학식을 풀이하여 간이식을 제안했다.

필요내화시간 산정을 위한 간이식을 도출하기 위한 과정은 다음과 같이 풀이된다. 먼저, Eq. (14)는 설계 화재곡선 부분(좌변)과 표준 화재곡선 부분(우변)에 대한 상관관계를 나타낸 것으로서, 오차범위를 설정하여 간이식을 도출하는 개념이다.

$$E(t) = \int_0^t k_{(design)} t^{1/6} dt - \int_{t_D}^t k_{(design)} (t-t_D)^{1/6} dt = t_D \times T_{t_D} + x_{(design)} \quad (14)$$

Eq. (14)에서 표준화재곡선 부분(우변)은 ISO 834곡선에 의하여 도출되는 부분으로서 Eq. (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t_D \times T_{t_D} + x_{(design)} = k_{(std)} \times \frac{6}{7} \times t^{7/6} \quad (15)$$

$$(k_{(std)} = 230)$$

Eq. (16)은 본 연구에서 요구하는 t값을 도출하기 위해 표준화재곡선 Eq. (15)를 t값으로 나타낸 것이다.

$$t = \{197.14 \times (t_D \times T_{t_D} + x_{(design)})\}^{6/7} \quad (16)$$

여기서 오차범위는 표준화재와 설계화재 사이의 오차범위를 나타낸다. 이것을 도출하기 위한 식은 Eq. (17)로 나타낼 수 있다. 이 식은 화재성장 그래프의 전체면적에서 화재지속 시간 이후 설계화재곡선 부분의 면적과 표준화재곡선 부분의 면적을 제외한다는 개념이다.

$$x_{(design)} = \int_0^t kt^{1/6} dt - \int_{t_D}^t k(t-t_D)^{1/6} dt - t_D T_{t_D} \quad (17)$$

위 과정을 순차적으로 계산하여 화재실 설계조건에 따른 필요내화시간 산정을 위한 간이식을 Eq. (18)과 같이 제안한다.

$$t = (5.41 \times 10^{-3} \times t_D \times T_{t_D})^{6/7} \quad (18)$$

4.3 내화시간산정 간이식 검증결과

건축물을 대상으로 등가화재 가혹도와 선형중첩법을 사용하여 산정한 구획실의 필요내화시간 값과 간이식을 이용하여 계산한 값은 Table 3과 같다. 이론식과 간이식의 오차를 분석한 결과 모든 경우에서의 오차율이 5% 내외로 적은 오차범위를 나타냈다.

Table 3. Theoretical-Comparison of the Error Rate of Simple Calculated Value

	Hotel	Office	Library	Restaurant	House	Lobby	Kitchen
Theoretical value (min)	55	85	109	15	56	70	51
Calculated value (min)	52	81	103	14	53	67	49
Error range (min)	3	4	6	1	3	3	2
Error rate (%)	5.4	4.7	5.5	6.66	5.3	4.2	3.9

5. 결론

본 연구에서는 건축물의 방화구획 개구부의 내화시간을 선형중첩법과 등가화재 가혹도를 사용하여 위험성을 분석했다. 그리고 필요내화시간을 산정하는 이론식을 공학적인 분석 방법을 통해 간이식을 제안했다.

- (1) 일본, 미국, 캐나다, 영국의 방화구획 기준을 분석한 결과 방화구획의 벽, 방화벽으로 구획된 샤프트 공간, 피난계단, 승강기, 피난복도, 방화칸막이 벽으로 구획된 피난로의 방화문 등을 차염성, 차열성을 구분하여 화재확산방지 대책을 강구하고 있다. 또한 미국과 캐나다의 경우 벽체의 내화성능에 따라 방화문의 내화성능을 구체적으로 규정하고 있으며, 그 밖의 국가에서도 규정에 약간의 차이는 있으나 방화문에 대한 차열성능을 규정하며 내화시간을 세분화하여 규정하고 있다. 반면에 한국과 일본의 경우 모든 사항에 대한 방화문의 내화성능을 60분으로 일괄 적용하고 있다. 이것은 화재 시 모든 건축물에 대한 화재확산을 방지하기에는 어려움이 있을 것으로 판단된다.
- (2) 건축시설의 용도에 따른 방화구획부재에 대한 성능적인 설계를 위해 ISO 834 표준곡선을 기반으로 국내 규정에 해당하는 60분을 적용하였고 선형중첩법과 등가화재가혹도 방법을 사용하여 필요내화시간 산정 간이식을 제안했다.
- (3) 현장조사를 통해 실측이 이뤄진 5개의 시설을 대상으로 필요내화시간을 산정한 결과 국내에서 규정하고 있는 방화문에 대한 내화시간보다 더 많은 내화시간을 요구하는 곳은 3곳으로 절반 이상을 차지했다. 이것은 점차 복잡해지고 다양해지는 건축물의 방화구획 개구부를 대상으로 일률적인 내화시간을 적용하는 것은 위험성이 있다고 판단된다.

또한 위 간이식을 이론식과 비교하여 필요내화시간을 계산한 결과 오차율이 5% 내외로 비교적 적은 오차범위를 나타냈다.

필요내화시간을 정확히 산정하는 것은 건축물 화재 시 피난시간 확보, 화재확산 방지, 방화구획 강화 등에 매우 중요한 요소로 작용할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 향후 더욱 정확한 내화시간산정 및 피난시간 확보 등을 위한 연구를 진행하여 건축물 화재시의 안전성을 확보할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 소방대응력 향상을 위한 연구개발사업(NFA002-010-01030000-2020)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Aburano, K., Yamanaka, H., Ohmiya, Y., Suzuki, K., Tanaka, T., and Wakamatsu, T. (1999). Survey and analysis on surface area of fire load. *Fire Safety Science and Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 11-25.
- Architectural Society of Japan (ASJ). (2017). *Concept on design and construction of compartment for fire safety*.
- Choi, et al. (2014). *A study on the improvement of related systems for the safety of fire prevention facilities in buildings*. Disaster Prevention Testing Institute.
- Fire Department. (2017). *Fire statistics yearbook*.
- Han, J.W. (2020). *A study on the improvement of domestic fire compartment standards through analyzing building fire cases and fire risks*. Master's thesis, Hoseo University.
- Harmathy, T.Z. (1972a). A new look at compartment fires, part I. *Fire Technology*, Vol. 8, No. 3, pp. 196-217.
- Harmathy, T.Z. (1972b). A new look at compartment fires, part II. *Fire Technology*, Vol. 8, No. 4, pp. 326-351.
- ISO 834. (1980). *Fire-resistance tests - elements of building construction*. International Organization of Standards (ISO).
- Kunio, K. (1954). Fire resistance of fire resistance structure (three major fire experience). *Scholarship of the Japan Fire Society*, Vol. 3, No. 2.
- Lee, B.H. (2017). *A study on the fire load and combustible characteristics for fire safety design related to bim of building structures*. Master's thesis, Hoseo University.
- Lee, B.H., Jin, S.H., and Kwon, Y.J. (2020). A comparative study on the fire load of structures by usage in Korea and Japan. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 20, No. 5, pp. 135-141.
- Lee, B.H., Jin, S.H., Kim, D.E., and Kwon, Y.J. (2020). An experimental study on the combustion characteristics of major combustible materials in office buildings. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 20, No. 1, pp. 273-280.
- MaCaffrey, B.J., Quintiere, J.G., and Harkleroad, M.F. (1981). Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations. *Fire Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 98-119.
- Matsuyama, K., Fujita, T., Kaneko, H., Omiya, Y., Tanaka, T., and Wakamatsu, T. (1995). A simple predictive

method for room fire behavior. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 60, No. 469, pp. 159-164.

Thomas, P.H. (1961). Research on fire using models. *Institute of Fire Engineer*, Quarterly.

Yoshinaka, H., Harada, K., and Wakamatsu, T. (1997). Method of rereading fire resistance test results for

compartment parts. *Japan Architectural Society*, pp. 13-14.

Received ■ December 15, 2020

Revised ■ December 16, 2020

Accepted ■ January 4, 2021