

# 연소물의 질량증가와 연소시간의 상관관계를 고려한 화재곡선 예측

남은준<sup>1</sup>, 이태일<sup>2</sup>, 지광습<sup>3\*</sup>

## Prediction of Fire Curves Considering the Relationship between Mass Increase and Combustion Time of Combustibles

Eun-Joon Nam<sup>1</sup>, Tae-Il Lee<sup>2</sup>, Goang-Seup Zi<sup>3\*</sup>

**Abstract:** In this paper, we aimed to convert the fire curve in volume units to a fire curve per unit area for application in the Fire Dynamic Simulator (FDS) surface heat release rate method. The fire curve was expressed dimensionlessly considering the total combustion characteristic time, and improvements were made to represent the appropriate ratios for the growth, steady, and decay phases concerning the fire intensity. Additionally, a correction function for combustion characteristic time varying with mass increase was derived. Also to control the growth time values according to the increase in mass, a function to correct the growth phase ratio was derived. Consequently, utilizing existing data, a formula was established to determine the reference mass for combustion materials and predict the fire curve based on mass increase.

**Keywords:** Combustion time, Fire curves, Fire dynamic simulator, Mass increase

### 1. 서론

최근 국내 도심부의 교량 하부는 체육시설, 주차장, 야적장 등으로 활용되고 있다. 과거의 교량 하부에는 어떠한 점용물도 불허하였으나 지자체를 중심으로 방치되었던 유휴공간을 활용하도록 조치하는 것이다(Shim and Jang, 2016). 그러나 이러한 점용시설은 교량 구조물의 안정성에 직·간접적인 영향을 미칠 수 있는 화재 발생 위험성을 가지고 있다(Baek et al., 2016). 2010년 부천교가고 하부에서 발생한 유조차에 의한 화재는 약 150억 원의 복구비용과 사회적·경제적 손실이 약 2,190억 원 발생한 것으로 추산된다(Hong et al., 2011). 이처럼 교량 하부 공간은 유용하게 사용할 수 있는 장소인 동시에 화재 발생 리스크를 떠안고 있는 곳이다. 따라서 교량 하부 공간에서의 화재를 예방하기 위한 적극적인 관리가 요구되고 있다. 실험을 통한 평가는 많은 인력과 시간이 소요되는 단점으로 인해 보다 경제적인 전산 해석으로 교량 하부의 점용시설에 대한 화재 안정성을 검토하여 평가하고 있다(Kodur et

al., 2010; Kodur and Phan, 2007; Najjar and Burgess, 1996; Shim et al., 2010; Zi et al., 2011).

전산 해석은 대표적인 화재 해석 프로그램으로 미국 표준 기술연구소(NIST)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator) 프로그램을 사용한다. Fig. 1과 같이 FDS 프로그램은 열분해법과 표면열방출율법 두 가지 방법으로 해석된다. 열분해법은 연소 대상 물체를 구성하는 각 연소물의 연소 특성을 입력하여 계산하는 것이고, 표면열방출율법은 기존에 계산된 시간에 따른 열방출율인 화재곡선을 기입하여 해석하는 것이다. 입력된 연소특성치를 통해 화재곡선을 계산하며 화재 해석하는 열분해법이 표면열방출율법에 비해 시간이 오래 소요된다는 단점이 있다. 따라서 비교적 시간이 적게 소모 되는 표면열방출율법을 활용하여 교량 구조물의 피해 평가를 신속하고 간편하게 수행하고 있다.

하지만 표면열방출율법은 실물화재 시험 또는 화재 해석 프로그램으로 화재곡선이 미리 계산되어 있는 데이터만 사용할 수 있다는 한계가 존재한다. 기존 실물화재 시험 데이터

<sup>1</sup>정회원, 고려대학교 미래건설환경융합연구소 박사 후 연구원

<sup>2</sup>정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수, 교신저자

\*Corresponding author: g-zi@korea.ac.kr

The Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, 145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

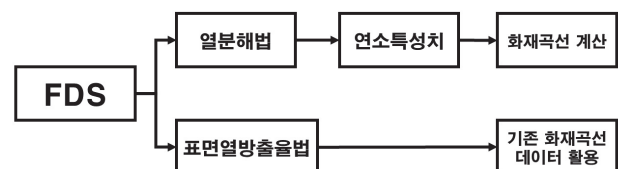


Fig. 1 Workflow for fire analysis using FDS program

(Hurley et al., 2015)의 경우에는 부피단위 화재곡선과 면적단위 화재곡선이 혼용되어 사용되고 있다. 표면열방출율은 면적 단위의 화재곡선을 입력하여야 한다. 따라서 혼용되어 있는 단위를 정리하고, 부피단위의 화재곡선을 입력할 수 있도록 개선하여야 한다. 또한 여러 연소물의 화재곡선을 정리해놓은 선행연구(Hurley et al., 2015; Kim and Lilley, 2015)를 살펴보면 연소물의 질량은 명시하지 않고 있어 점용시설의 화재 해석에 활용 시 어려운 점이 있다.

따라서 본 연구에서는 두 가지의 목적을 가지고 연구를 제안한다. 부피단위의 화재곡선을 단위 면적당 화재곡선으로 구하여 화재곡선 식을 FDS 표면열방출율법에 대입할 수 있도록 하였다. 또한 기수행된 데이터를 활용하여 연소물의 기준 질량을 선정하고, 질량 증가에 따른 화재곡선을 예측할 수 있는 식을 확립하고자 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 표면열방출법을 이용한 이차 화재곡선 식의 개선

화재해석 시, 표면열방출율법에 의거하여 연소 대상 물체의 열방출 특성을 입력하여 화재곡선을 도출한다. 표면열방출율법이란 실험 등을 통해 도출된 열방출율 곡선을 연소특성으로 입력하는 해석법을 뜻하며, 시간별 열방출율(HRR; Heat release rate)을 단위 면적당 표면열방출율(HRRPUA; Heat release rate per unit area)로 환산하여 산정한다. 단위 면적당 표면열방출율(HRRPUA)의 산정과정은 식 (1)~(3)와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{Q}_{m_0} = \frac{1}{m} \dot{Q} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{V_0} = \rho_m \dot{Q}_{m_0} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{A_0} &= h \dot{Q}_{V_0} \\ &= \frac{\rho_m h}{m} \dot{Q} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $m$ 은 질량,  $\dot{Q}$ 은 측정된 시간별 열방출율,  $\dot{Q}_{V_0}$ 는 단위 부피당 열방출율,  $\rho_m$ 은 질량 밀도,  $\dot{Q}_{m_0}$ 은 단위 질량당 열방출율,  $\dot{Q}_{A_0}$ 는 단위 면적당 열방출율,  $h$ 는 연소물의 높이이다.

이때 시간별 열방출(HRR)을 도출하는 방법은 2가지가 있다. 1) 실물화재 시험을 통해 열방출율을 실제로 측정하거나, 2) 연소과정을 프로그램으로 구현하여 예측되는 열방출율을 도출하는 방법이다. 시뮬레이션을 활용할 때에는 대상 물체를 구성하는 각 연소물의 연소 특성을 입력하며, 열분해법에 의거하여 산정한다.

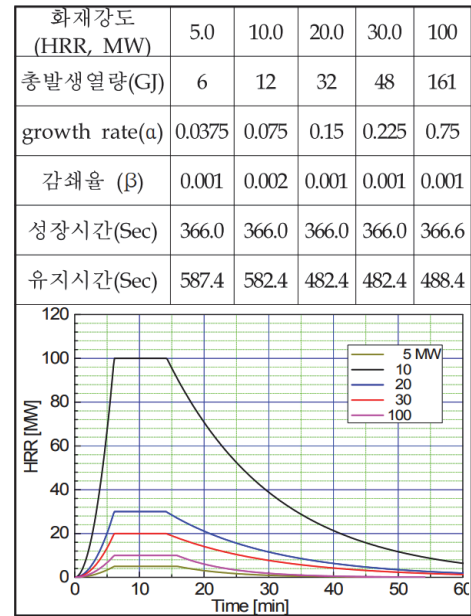


Fig. 2 Vehicle fire curve in the road design manual (2012) of the ministry of land, transport and maritime affairs

복잡한 실제 열방출율을 간소하여 국토교통부 도로설계편람(Ministry of land, transport and maritime affairs, 2012)에서는 Fig. 2와 같이 차량별로 열방출율을 보수적이고 간소화한 화재곡선을 적용할 수 있도록 하고 있다. 이 화재곡선은 화재의 발현 특성을 크게 성장시간 ( $\Delta t_i$ ), 유지시간 ( $\Delta t_s$ ), 감쇄시간 ( $\Delta t_d$ )인 세 단계로 구분하여 간소화하였다. 성장시간과 감쇄시간의 화재곡선을 이차항으로 표현하고 계수를 각각 성장률  $\alpha$ 와 감쇄율  $\beta$ 로 하였다. 즉, 화재곡선은 최대 열방출율(화재강도; HRR,  $\dot{Q}_{max}$ )과 총 열발생량 (THR; Total heat release rate,  $Q$ )를 매개변수로 하여 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\dot{Q} = \begin{cases} \alpha t^2 & \text{성장시간} \\ \alpha \Delta t_i^2 & \text{유지시간} \\ \alpha \Delta t_i^2 - \beta(t - \Delta t_i - \Delta t_s)^2 & \text{감쇄시간} \end{cases} \quad (4)$$

화재 해석 프로그램에서는 화재강도 (HRR,  $\dot{Q}_{max}$ )를 기준으로 할 때 각 시간별 화재곡선의 비율을 사용하도록 하고 있다. 즉, 화재강도 값에 해당하는 시간 위치에 1.0을 부여하고, 나머지 화재강도에 대해서는 화재강도 대비 비율을 이용하여 해당 시간대에 기재한다. 식 (4)를 화재 해석 프로그램에서 사용하기 위해서는 화재강도 값으로 각 식을 나누어야 한다.

화재곡선을 시간에 따른 이차항으로 표현하는 경우에 성장률  $\alpha$ 와 감쇄율  $\beta$ 를 추가적으로 부여할 필요는 없으며, 화재강도와 성장시간, 유지시간, 감쇄시간에 따라 자동으로 결정되는 값이다. 위 고찰을 바탕으로 식 (4)를 식 (5)와 같이 개선할 수 있다.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\max} \begin{cases} \left(\frac{t-t_0}{\Delta t_i}\right)^2 & \text{for } t_0 < t < t_1 \\ 1 & \text{for } t_1 < t < t_2 \\ \left(\frac{t-t_f}{\Delta t_d}\right)^2 & \text{for } t_2 < t < t_f \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $\dot{Q}_{\max}$ 는 화재강도,  $t_0$ 은 연소 시작시간,  $t_1$ 은 초기 성장시간,  $t_2$ 는 감쇄가 시작되는 시간,  $t_f$ 는 연소가 종료되는 시간이다. 성장시간은  $\Delta t_i = t_1 - t_0$ , 유지시간은  $\Delta t_s = t_2 - t_1$ , 감쇄시간은  $\Delta t_d = t_f - t_2$ 으로 측정된다. 연소가 진행되는 총 연소 특성시간(characteristic time)  $\Delta t_{ch}$ 는 초기 연소가 시작되는 시간  $t_0$ 과 연소가 종료된 시간  $t_f$  사이의 시간인  $\Delta t_{ch} = t_f - t_0$ 으로 정의할 수 있다. 식 (5)는 열방출율로서 열방출율  $\dot{Q}$ 를 적분하면 총 열발생량  $Q$ 와 같아야 한다. 그러므로, 식 (6)과 같이 표현된다.

$$Q = \int_0^{\infty} \dot{Q} dt = \dot{Q}_{\max} \left[ \frac{1}{3} \Delta t_i + \Delta t_s + \frac{1}{3} \Delta t_d \right] \quad (6)$$

추가적으로 성장시간, 유지시간, 감쇄시간을 전체 연소시간인 특성시간으로 나누면, 성장, 유지, 감쇄 기간을 무차원으로 표현한 성장구간비  $\beta_i$ , 유지구간비  $\beta_s$ , 감쇄구간비  $\beta_d$ 로 정의할 수 있다. 따라서 식 (7)과 같이 표현된다.

$$Q = \dot{Q}_{\max} \Delta t_{ch} \left[ \frac{1}{3} \beta_i + \beta_s + \frac{1}{3} \beta_d \right] \quad (7)$$

이때 성장시간, 유지시간 및 감쇄시간 비율을 모두 더하면 1.0이 되어야 한다. 즉,  $\beta_i + \beta_s + \beta_d = 1$ 이다. 이때 화재곡선 식을 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\max} \begin{cases} \left(\frac{t-t_0}{\beta_i \Delta t_{ch}}\right)^2 & \text{for } t_0 < t < t_0 + \beta_i \Delta t_{ch} \\ 1 & \text{for } t_0 + \beta_i \Delta t_{ch} < t < t_f - \beta_d \Delta t_{ch} \\ \left(\frac{t-t_f}{\beta_d \Delta t_{ch}}\right)^2 & \text{for } t_f - \beta_d \Delta t_{ch} < t < t_f \end{cases} \quad (8)$$

식 (8)의 매개변수는 화재강도  $\dot{Q}_{\max}$ , 성장구간비  $\beta_i$ , 감쇄구간비  $\beta_d$ , 전체 연소 특성시간  $\Delta t_{ch}$ 이다.  $t_1 = t_0 + \beta_i \Delta t_{ch}$ ,  $t_2 = t_f - \beta_d \Delta t_{ch}$ 이다. 위 식 (8)에는 성장률이나 감쇄율을 따로 기재할 필요가 없다. 총 열발생량  $Q$ , 총 연소특성시간  $\Delta t_{ch}$ , 각 시간 구간비율을 측정하면, 식 (7)을 이용해서 화재강도  $\dot{Q}_{\max}$ 를 결정할 수 있다.

화재곡선 식 (8)을 화재 해석 프로그램에서 사용할 때는 특정 질량에 대한 화재강도  $\dot{Q}_{\max}$ 를 식 (3)을 이용해서 단위면적

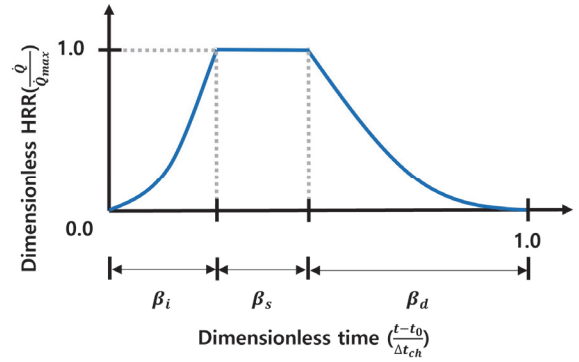


Fig. 3 Dimensionless quadratic fire curve

당 화재강도로 변환한 다음 화재 해석 프로그램에 입력해서 사용한다. 식 (8)의 화재곡선 식은 Fig. 3와 같이 무차원으로 표현된다. 또한, 물리법칙을 나타내는 화재곡선 식은 양변의 차원이 일치한다. 이를 이용해 구하고자 하는 물리량의 차원인 총 열발생량 및 화재강도와 그 물리량에 영향을 주는 변수와 상수들의 차원인 총 연소특성시간, 성장구간, 유지구간, 및 감쇄구간을 안다면 변수와 상수들의 관계를 파악할 수 있으므로 무차원 화재곡선 식으로 표현하였다.

## 2.2 연소물의 질량증가에 따른 연소시간 보정함수 도입

동일 연소물질이라도 연소 대상 질량의 크기에 따라 열방출율과 연소 특성 시간은 변화한다. 연소시간은 주변 환경 조건에 따라 감소할 수도 있으며, 증가할 수도 있다. 모든 화학반응은 주변 환경의 온도 특성에 민감하게 영향을 받으며, 온도가 상승하면 화학반응이 더 빠르게 진행된다. 즉, 연소 대상 질량의 크기가 증가하여 온도가 크게 상승하는 조건에서는 화재 성장구간비가 감소하는 상황을 기대할 수 있다. 또한 온도가 높은 조건에서 화재는 천천히 진화(鎮火)되므로, 높은 온도 상에서 화재 감쇄구간비가 증가하는 것도 기대할 수 있다.

연소물의 질량 증가 시 화재 성장구간비나 화재 감쇄 구간비가 감소 및 증가와 동시에 연소 특성 시간도 변화하므로 식 (7)의 열평형식에 의해 화재강도도 변화한다. 순차적으로 단위 면적당 열방출율도 보정되어야 한다. 식 (8)의 화재곡선은 연소물의 물성치로 인정될 수는 없으며, 연소 대상 연소물의 질량과 외부환경에 따라 모델 매개변수가 결정된다. 특히 동일 연소물라고 하더라도 화재곡선을 측정했던 질량에서 변동이 발생하면, 식 (8)의 화재곡선은 적절하게 수정되어야 한다. 또한, 식 (8)의 화재곡선 식은 연소 대상 연소물의 연소 특성이 기준 질량인  $m_0$ 에 대한 화재곡선 식으로 이해되어야 한다.

연소물의 기준 질량은 질량 증가에 따라서 변화하는 화재곡선을 도출하기 위해 기준으로 정한 연소 질량이다. 화재곡선은 일정 질량 이상이 되어야 연소구간의 추세를 확인할 수

있다. 한국도로공사 보고서(Shim et al., 2016)의 의류 실험 결과를 예시로 표 Table 1과 같이 변수들을 도출 하였으며, 1,488kg 이상일 때 화재 성장 구간 감소하고, 화재 감쇄 구간 증가 경향이 보인다. 또한 화재 감쇄 구간 증가 폭이 화재 성장 구간 감소 폭보다 크므로 연소 특성 시간이 증가하는 경향이 다. 이에 따라서 본 연구에서는 기준 질량  $m_0$ 으로서 1,488kg 을 선정하였다.

### 2.2.1 연소물의 질량증가에 따라 연소 특성시간이 감소하는 경우

질량 증가 시 화재 성장구간비가 화재 감쇄구간비 보다 작은 경우에는 연소 특성시간이 감소할 수 있는데, 이때 보정함수는 실험적으로 측정된 연소 특성 시간을 고려해서 유도할 수 있다. 식 (8)의 연소 특성시간  $\Delta t_{ch}$  에 질량비  $m/m_0$ 가 변수인 보정함수  $\gamma(m/m_0)$  를 도입하여 연소 특성시간을  $\Delta t_{ch}\gamma(m/m_0)$ 로 수정할 수 있다. 이 보정함수는 실험적으로 결정되어야 하는데, 만약 질량이 무한대로 증가하는 경우에는  $m/m_0 = \infty$  이며, 기준 질량과 같은  $m/m_0 = 1$ 이면 기준 연소 특성시간과 같은 결과인  $\gamma(1) = 1$ 이기 때문에 지수함수 형태로 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서,  $\alpha_a$ 는 연소물적 특성을 고려하기 위한 상수이며, 실험적으로 결정될 수 있다.

$$\gamma(m/m_0) = \exp\left[\alpha_a\left(1 - \frac{m}{m_0}\right)\right] \quad (9)$$

### 2.2.2 연소물의 질량증가에 따라 연소 특성시간이 증가하는 경우

한국도로공사 보고서의 실험 결과를 살펴보면 의류는 질량 증가에 따라 화재 성장구간비가 화재 감쇄구간비 보다 증가 하므로, 연소시간이 증가하는 경향을 보인다. 따라서 질량증가 시 연소시간이 증가하는 경우를 고려하여 보정함수를 사용 해야한다. 보정함수는 실험적으로 측정된 연소 특성시간 을 분석해서 구성할 수 있다. 식 (8)의 연소 특성시간  $\Delta t_{ch}$  에 질량비  $m/m_0$ 가 변수인 보정함수  $\gamma(m/m_0)$  를 도입하여 연소

**Table 1** Combustion section and dimensionless combustion section

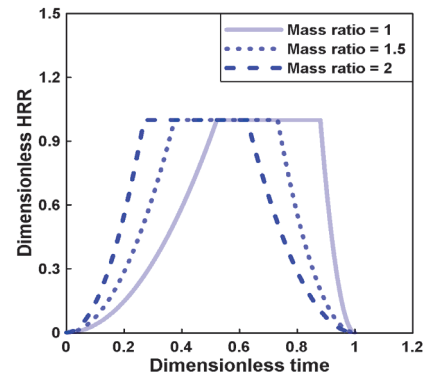
Material	Mass		Combustion section					Dimensionless combustion section		
	$m$ (kg)	$\Delta t_{ch}$ (sec)	$t_i$ (sec)	$t_s$ (sec)	$t_d$ (sec)	$\beta_i$	$\beta_s$	$\beta_d$		
	744	1,519	1,079	379	61	0.710	0.249	0.040		
Example (Clothing)	1,488	1,548	807	552	189	0.521	0.356	0.122		
	2,232	1,677	545	576	556	0.324	0.343	0.331		
	2,976	1,691	488	636	567	0.288	0.376	0.335		

특성시간을  $\Delta t_{ch}\gamma(m/m_0)$ 로 수정할 수 있다. 만약 질량이 무한대로 증가하는 경우에  $m/m_0 = \infty$  이며, 연소 특성시간이 무한대로 증가하는 경우에  $\gamma(\infty) = \infty$  이다. 기준 질량과 같은  $m/m_0 = 1$ 이면 기준 연소 특성시간과 같은 결과인  $\gamma(1) = 1$ 이기 때문에 식 (10)과 같은 선형함수 형태를 연소 특성시간의 보정함수로 도입할 수 있다. 여기서,  $\alpha_a$ 는 연소물적 특성을 고려하기 위한 상수이며, 실험적으로 결정될 수 있다.

$$\gamma(m/m_0) = \alpha_a\left(\frac{m}{m_0} - 1\right) + 1 \quad (10)$$

### 2.3 연소물의 질량 증가에 의해 감소하는 화재 성장구간 비율의 보정

의류 화재 결과를 Fig. 4와 같이 무차원 이차 화재곡선을 작 도한 결과, 각 연소물의 질량비  $m/m_0$  증가에 따라 성장구간 비  $\beta_s$ 가 감소하고, 감쇄구간비  $\beta_d$ 가 증가한다. 이때 Table 2 와 같이 유지구간비  $\beta_s$  경우에는 의류는 질량비별 약 0.35~0.40 이내이 므로 유지구간비  $\beta_s$  를 변하지 않는 상수로 가정하고자 한다.



**Fig. 4** Example of dimensionless quadratic fire curves

**Table 2** Example of combustion section and dimensionless combustion section according to increase in mass

Type	Mass $m$ (kg)	Combustion section				Dimensionless combustion section			Note
		$\Delta t_{ch}$ (sec)	$t_i$ (sec)	$t_s$ (sec)	$t_d$ (sec)	$\beta_i$	$\beta_s$	$\beta_d$	
$m/m_0 = 0.5$	744	1,519	1,079	379	61	0.710	0.249	0.040	Except
$m/m_0 = 1$	1,488	1,548	807	552	189	0.521	0.356	0.122	$\beta_s$ is constant
$m/m_0 = 1.5$	2,232	1,677	545	576	556	0.324	0.343	0.331	
$m/m_0 = 2$	2,976	1,691	488	636	567	0.288	0.376	0.335	

무차원 시간은  $\beta_i + \beta_s + \beta_d = 1$ 로서 유지구간비  $\beta_s$  상수를 제외한 기준 성장구간비  $\beta_i$  또는 감쇄구간비  $\beta_d$ 를 변수로 하여 화재곡선을 결정한다. 열역학 제1법칙에 따르면 총 열발생량  $Q$ 는 변하지 않는데, 완전연소가 이루어지지 않는다는 실험적인 한계로 감쇄구간비  $\beta_d$ 의 정확한 값을 측정할 수 없다. 따라서 질량비가 증가함에 따라  $\beta_d$ 보다는  $\beta_i$ 를 제어하여 값을 보정하는 함수가 필요하다. 기준 질량의 성장구간비 및 총 연소 특성시간을 기준 성장구간비  $\beta_{i0}$  및 기준 총 연소 특성시간  $\Delta t_{ch0}$ 로 정의한다. 성장구간비  $\beta_i$ 를 변수로 선택할 경우에는 기준 성장구간비  $\beta_{i0}$ 에 질량비  $m/m_0$ 를 변수로 하는 보정 함수  $\alpha_i(m/m_0)$ 를 도입하여  $\beta_i = \beta_{i0}\alpha_i(m/m_0)$ 로 수정할 수 있으며, 감쇄구간비  $\beta_d$ 는  $1 - [\beta_s + \beta_{i0}\alpha_i(m/m_0)]$ 로 결정된다.

질량비  $m/m_0$ 의 변화와 성장구간비  $\beta_i$ 를 회귀분석하여 성장구간비의 보정함수  $\alpha_i$ 를 식 (11)와 같이 정의할 수 있다. 여기서,  $k$ 는 연소물별 특성을 고려하기 위한 상수이며, 실험적으로 결정될 수 있다. 식 (11)에 따르면, 질량비가 매우 커질수록 화재가 급격히 진행된다.

$$\alpha_i(m/m_0) = \exp \left[ k \left( 1 - \frac{m}{m_0} \right) \right] \quad (11)$$

실험적으로 결정한 보정함수 식 (9)~(11)을 통해 알 수 있듯이 총 연소시간은 질량이 증가함에 따라서 지수적 증가 효과 보다는 선형적 증가 효과로 보는데 합리적일 것으로 사료된다. 질량증가에 따라서 증가하는 시간이 지수적으로 감소하지만 감쇄구간이 선형적으로 증가하기 때문이다.

## 2.4 보정함수를 적용한 이차 화재곡선

이차 화재곡선을 최종적으로 결정하기 위해 화재강도를 결정해야 한다. 보정함수 식 (10) 및 식 (11)을 활용하여, 식 (8)의 성장구간비  $\beta_i$ 를  $\beta_{i0}\alpha_i(m/m_0)$  및 연소 특성시간  $\Delta t_{ch}$ 를  $\Delta t_{ch0}\gamma(m/m_0)$ 로 수정하고 식 (7)의 열평형식에 의해 화재강도를 식 (12)과 같이 결정한다.

$$\dot{Q}_{\max} = \frac{Q \frac{m}{m_0}}{\left[ \frac{1}{3} \beta_{i0} \alpha_i \left( \frac{m}{m_0} \right) + \beta_s + \frac{1}{3} \beta_d \right] \Delta t_{ch0} \gamma \left( \frac{m}{m_0} \right)} \quad (12)$$

## 2.5 이차 화재곡선 적용 예

이차 화재곡선은 식 (3)에 따라 단위 면적당 화재강도를 활용하여 결정하고자 한다. 여기서,  $m$ 은 질량,  $\dot{Q}$ 은 측정된 시간별 열방출율,  $\dot{Q}_V$ 는 단위 부피당 열방출율,  $\rho_m$ 은 질량 밀도,  $\dot{Q}_A$ 는 단위면적당 열방출율,  $h$ 는 연소물의 높이이다.

하지만 면적이 달라지면 동일 질량이라도 화재강도가 달라질 수 있으므로 대상 면적이 존재한다고 가정하여 동일 면적에서 기준 질량이 증가할 때를 고려하였다. 한국도로공사 보고서에서 실시한 의류, 고무 및 목재 실험을 보면 16 m<sup>2</sup>을 면적으로 고정하여 적치높이 증가에 따라 실험을 실시하였다. 따라서 본 연구에서도 여기에서도 16 m<sup>2</sup>를 기준 질량 산출 시 사용하여 1, 2, 3 및 4 m 적치 높이 증가에 따라 질량이 증가하는 것으로 선정하였다.

한국도로공사 보고서(Shim et al., 2016)의 실험 결과 중 의류, 고무 및 목재를 예시로 활용하여 검토하였다. 밀도  $\rho_m$ 은 각각 46.5, 1,200, 800 및 부피  $V_0$ 을 16, 32, 48, 64 m<sup>3</sup>를 대상으로 하였으며, 질량  $m$ 은  $\rho_m \times V_0$ 로 구할 수 있다. 이때, 의류의 실험 결과를 예로 들면 Table 3과 같다. 실험은 예시 별도 4개를 실시하였으며, Table 2와 같이 질량증가에 따라 구분하여 연소구간을 산정하였다.

질량증가에 따른 연소구간과 무차원 연소구간을 보면, 의류, 고무 및 목재의 화재 성장 구간  $\beta_i$ 가 감소하고, 화재 감쇄 구간  $\beta_d$ 가 증가하는 경향이 보인다. 4개의 질량으로 구분하였을 경우에는 첫 번째인 작은 질량에서는 다른 세 개의 질량하고 비교하여 경향성을 확인할 수 없었다. 하지만 다른 세 개는 유지구간  $\beta_s$ 가 동등 수준으로 경향성이 서로 부합하였다. 질량이 너무 작으면 완전 연소에 이르지 못하는 것으로 판단된다. 그리고 의류, 고무 및 목재 사례와 마찬가지로 질량이 작은 경우에는 불완전 연소가 있을 수 있으며, 질량이 크면 불완전 연소되는 양은 큰 질량 대비해서 작다. 따라서 질량이 너무 작으면 안 좋다는 것을 알 수 있다. 질량이 너무 작을 경우에는 이차 화재곡선의 적용 예시에서 제외한다.

또한 화재 감쇄 구간 증가 폭이 화재 성장 구간 감소 폭보다 크므로 연소 특성시간이 증가하는 경향이다. 이에 따라서 본 연구에서는 의류, 고무 및 목재의 기준 질량  $m_0$ 을 선정하였으며, 이때 질량비를  $m/m_0 = 1$ 로 고려하였다.

Table 2와 같이 기준질량  $m_0$ 의 연소대상 연소물의 총 열발생량  $Q$ , 연소 특성시간  $\Delta t_{ch}$ , 성장구간비  $\beta_i$ , 유지구간비  $\beta_s$ 를

**Table 3** Example of maximum fire intensity and total heat release according to mass ratio(Shim et al., 2016)

Type	Mass		Stack height (m)	Maximum fire intensity $\dot{Q}_{\max}$ (MW)	Total heat release $Q$ (MJ)	Note
	$m$ (kg)	$m/m_0$				
Mass ratio ( $m/m_0$ )	0.5	744	1	14.5	8,725.7	Except
	1	1,488	2	23.1	22,396.1	
	1.5	2,232	3	38.3	35,734.3	
	2	2,976	4	47.9	48,451.2	



한국도로공사 보고서를 통해 조사하였다. 감쇄구간비는  $\beta_d = 1 - (\beta_i + \beta_s)$ 의 관계에서 자동으로 결정된다.

Table 2와 같이 실험이나 문헌조사 자료를 통해 얻은 연소 구간을 식 (10) 및 식 (11)의 연소 특성시간 보정함수  $\gamma(m/m_0)$  및 성장구간비 보정함수  $\alpha_i(m/m_0)$ 를 사용하여 Fig. 5 및 Fig. 6과 같이  $\alpha_a$ 와  $k$ 를 결정한다.

이와 같은 과정을 통하여 Table 4와 같이 의류, 고무 및 목재의 무차원 변수를 결정하였으며, 검토대상 질량  $m$ 에 대한 화재강도  $\dot{Q}_{max}$ 를 식 (12)을 이용하여 계산하였다. 계산된 화재강도  $\dot{Q}_{max}$ , 성장구간비  $\beta_i$ , 유지구간비  $\beta_s$ 를 이용해서 이차 화재곡선을 작도한다.

Fig. 7~9과 같이 이차 화재곡선을 비교 대상 화재곡선과 비교하여 질량증가에 따른 보정함수 값의 정확도를 확인한다.

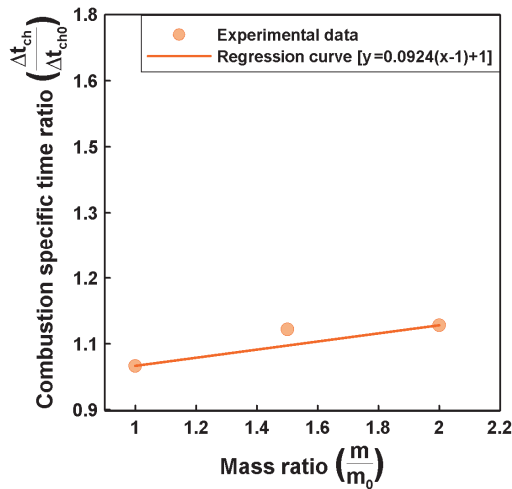


Fig. 5 Example of the relationship between mass ratio and combustion characteristics time ratio

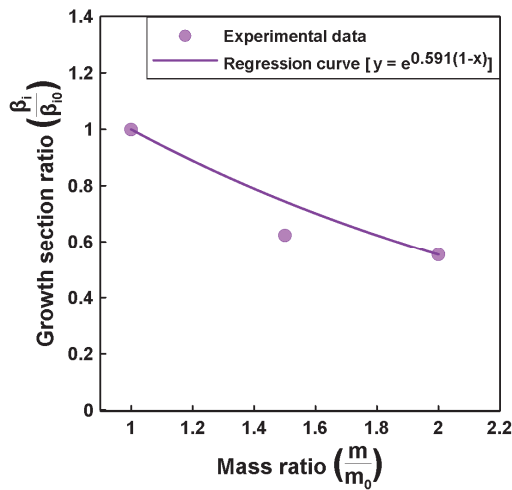


Fig. 6 Example of the relationship between mass ratio and growth section Ratio ratio

Table 4 Dimensionless parameter

Type	Standard properties			Dimensionless parameter			
	$m_0$ (kg)	$Q$ (MJ)	$\Delta t_{cho}$ (sec)	$\alpha_a$	$\beta_{io}$	$k$	$\beta_s$
Clothing	1,488	22,396.1	1,548	0.0924	0.521	0.591	0.358
Rubber	38,400	17,971.3	1,667	0.2663	0.644	0.16	0.103
Wood	25,600	39,257.2	1,190	0.5960	0.250	1.061	0.427

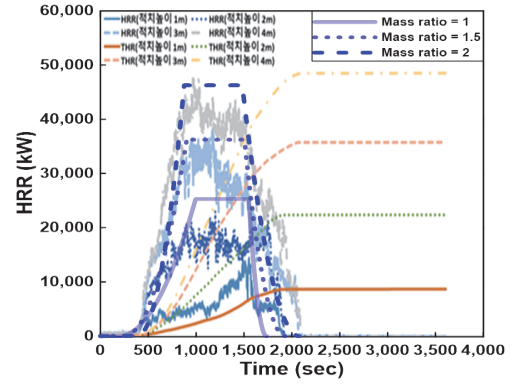


Fig. 7 Fitting results of fire curves data for clothing from the Korea expressway corporation(Shim et al., 2016)

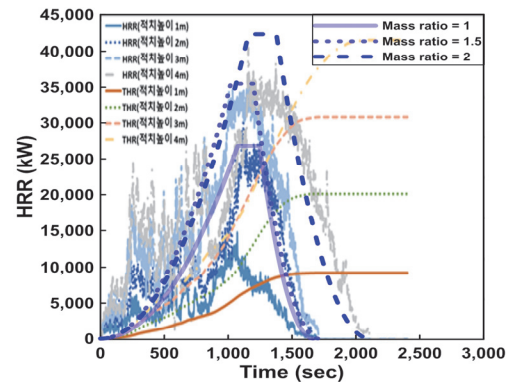


Fig. 8 Fitting results of fire curves data for rubber from the Korea expressway corporation(Shim et al., 2016)

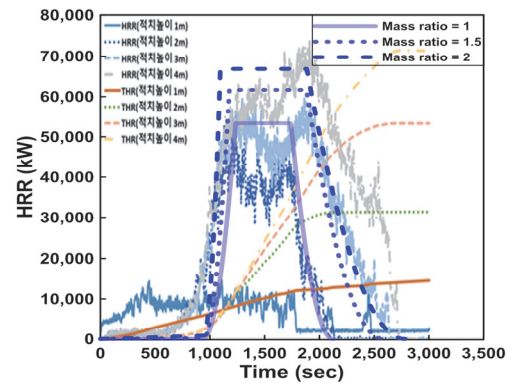


Fig. 9 Fitting results of fire curves data for wood from the Korea expressway corporation(Shim et al., 2016)

**Table 5** Correction function maximum fire intensity and comparison target maximum fire intensity

Type	Mass ratio ( $m/m_0$ )	Correction function maximum fire intensity (MW)	Comparison target maximum fire intensity (MW)	Error rate (%)
Clothing	1	25.3	23.1	9.4
	1.5	36.2	38.3	-5.4
	2	46.3	47.9	-3.4
Rubber	1	26.8	30.9	-13.2
	1.5	35.5	35.7	-0.6
	2	42.4	40.5	4.6
Wood	1	53.4	56.8	-6.1
	1.5	61.7	59.9	2.9
	2	66.9	74.6	-10.3

결과적으로 Table 5와 같이 보정함수를 적용한 화재강도 및 비교 대상 화재강도의 오차율은 약 10% 내외인 것을 확인하였고, 보정함수를 적용하여 특정 질량의 이차 화재곡선 및 화재강도를 결정할 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 기존에 연구된 연소물의 화재곡선 데이터를 활용하여 질량비에 따른 화재곡선 식을 예측하는 식을 확립하고, FDS 표면열방출율법으로 화재 위험도를 구하는데 적용하고자 하였다. 연소물별 화재곡선을 표면열방출율법에 적용할 수 있도록 화재곡선 식에 대한 연구 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 화재 해석 프로그램에서는 화재강도를 기준으로 하여 각 시간별 화재곡선의 비율을 적용한다. 이때, 화재강도 값에 해당하는 시간 위치에는 1.0을 부여하고, 다른 화재강도 값에 대해서는 해당 화재강도 대비 비율을 사용하여 해당 시간대의 값을 계산한다. 이러한 방식은 화재 해석 프로그램에서 화재강도 분석을 위한 기준으로 사용된다. 이를 적용하기 위해 화재곡선은 총 연소특성시간을 고려하여 무차원으로 표현하였으며, 성장구간비  $\beta_i$ , 유지구간비  $\beta_s$ , 감쇄구간비  $\beta_d$ 를 고려하여 화재강도에 대한 적절한 비율을 나타내도록 개선하였다.
- 2) 연소물의 질량이 증가함에 따라 화재의 성장구간비나 화재 감쇄구간비가 동시에 감소 및 증가하며, 이로 인해 연소 특성시간도 변화한다. 이러한 변화는 열평형식에 따라 화재강도에도 변화를 일으킨다. 특히, 연소물의 질량이 일정 이상 증가할 경우에는 연소구간의 추세를 관

찰할 수 있다. 이를 통해 질량증가에 따라 변화하는 연소 특성시간 보정함수  $\gamma(m/m_0)$ 를 도출하였다.

- 3) 연소물의 각 질량비가 증가함에 따라 성장구간비  $\beta_i$ 는 감소하지만 감쇄구간비  $\beta_d$ 는 증가하는 경향을 보인다. 이 과정에서 유지구간비  $\beta_s$ 는 질량비의 증가에 따른 큰 차이가 없어서 변하지 않는 상수로 가정한다. 무차원 시간은  $\beta_i + \beta_s + \beta_d = 1$ 로서, 유지구간비  $\beta_s$  상수를 제외하면 기준 성장구간비  $\beta_i$  또는 감쇄구간비  $\beta_d$ 를 변수로 삼아 화재곡선을 결정한다. 열역학 제1법칙에 따르면 총 열발생량  $Q$ 는 변하지 않지만, 완전연소가 이루어지지 않는 실험적인 한계로 감쇄구간비  $\beta_d$ 의 값을 측정하기 어렵다. 따라서 질량비가 증가함에 따라 값을 제어하기 위해 성장구간비  $\beta_i$ 를 조절하여 값을 보정하는 함수  $\alpha_i(m/m_0)$ 를 도출하였다.

기존 논문에서는 화재곡선의 개형 자체에 대해 선형과 이차형을 연구한 사례는 있으나 화재곡선 내에 구간별로 수식화 또는 모델링한 연구는 찾아보기 어렵다. 따라서 이차 화재곡선을 최종적으로 결정하기 위해 보정함수를 활용한 열평형식에 의해 화재강도를 결정하고, 결정된 화재강도와 개선된 화재곡선 식을 이용하여 화재곡선을 작도할 필요가 있다. 이를 통해서 기존 실험화재실험 및 FDS 열분해법을 통한 화재 해석 시 소모되는 비용과 시간을 절약할 수 있다. 본 연구에서 제시한 방법은 화재곡선을 효과적으로 예측하고 결정함으로써 화재해석에 기여할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 도로교통공사 연구용역사업(과제번호: 제202303110호)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### References

1. Baik, H. S., Park, C., and Shim, J. W. (2016), Need for confrontational strategy of bridge fire protection with domestic and foreign cases, *Jouran of the Korean Society of Civil Engineers*, 64, 10-12 (in Korean, with English abstract).
2. Hong, S. Y., Jeong, S. Y., Baek, S. K., and Choi, Y. H. (2011), The Social Cost of a Fire Under Bucheon Viaduct on Seoul Ring Expressway, *Transportation Technology and Policy*, 8(1), 83-87 (in Korean).
3. Hurlley, M. J., Gottuk, D. T., Hall Jr, J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., and WIECZOREK, C. J. (Eds.). (2015), *SFPE handbook of fire protection engineering*, Springer.
4. Kodur, V. K. R., and Phan, L. (2007), Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems, *Fire Safety Journal*, 42(6-7), 482-488.

5. Kodur, V., Gu, L., and Garlock, M. E. M. (2010), Review and assessment of fire hazard in bridges, *Journal of the Transportation Research Board*, 2172(1), 2-29.
6. Kim, H. J., and Lilley, D. G. (2002), Heat release rates of burning items in fires, *Journal of Propulsion and Power*, 18(4), 866-870.
7. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2012), Vehicle Fire Curve in the Road Design Manual. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Vol. 11-1611000-002274-01, (707)15. (in Korean).
8. Najjar, S. R., and Burgess I. W. (1996), A nonlinear analysis for three-dimensional steel frames in fire conditions, *Journal of Engineering Structures*, 8(1), 77-89.
9. Shim, J., Jang, T., Lee, J., Kim, N., Gil, H., and Lim, G. (2016), Development of Fire Safety Management Method for Stock-piles under Bridge, Vol. 2016-56-534.9607, 166-173 (in Korean).
10. Shim, J., and Jang, T. (2016), 1P-104: Study on the Combustion Characteristics of Plastic Debris in the Underdeck Space of Bridges, *Proceedings of The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016(1), 157-157 (in Korean).
11. Shim, J., Yoo, B., Cho, J., and Kim, N. (2010), Applicability Analysis of FDS Code Using Heptane and Mock-up Fire Test, *Proceedings of the Korea Concrete Institute Academic Conference*, 345-346 (in Korean, with English abstract).
12. Zi, G., Lee, S., Shin, Y., Shim, J., and Kim, J. (2011), Investigation of the Fire Source in the Warehouse under Bridge using FDS Code, *Journal of the Korea Association for Computational Structural Engineering*, 24(6), 663 (in Korean, with English abstract).

Received : 12/18/2023

Revised : 02/29/2024

Accepted : 03/06/2024

---

**요 지** : 본 논문에서는 부피단위의 화재곡선을 단위면적당 화재곡선으로 구하여 화재곡선 식을 FDS 표면열방출율법에 대입할 수 있도록 하고자 하였다. 화재곡선을 총 연소특성시간을 고려하여 무차원으로 표현하였으며, 성장구간비  $\beta_i$ , 유지구간비  $\beta_s$ , 감쇄구간비  $\beta_d$ 를 고려하여 화재강도에 대한 적절한 비율을 나타내도록 개선하였다. 또한, 질량증가에 따라 변화하는 연소 특성시간 보정함수  $\gamma(m/m_0)$ 를 도출하였으며, 질량비가 증가함에 따라 성장시간 값을 제어하기 위해 성장구간비  $\beta_i$ 를 보정하는 함수  $\alpha_i(m/m_0)$ 를 도출하였다. 이에 따라 기존 데이터를 활용하여 연소물의 기준질량을 선정하고, 질량 증가에 따른 화재곡선을 예측할 수 있는 식을 확립하였다.

**핵심용어** : 연소시간, 화재곡선, 화재 동적 시뮬레이터, 질량증가

---