

화재시나리오 예측을 위한 Linear, Power Law 그리고 Exponential 화재곡선 모델식 비교

박정욱*, 고권현** 유우준*
*동양대학교 건축소방안전학과
**동양대학교 안전공학부

† Corresponding author. Email: wjyou@dyu.ac.kr

Comparison with Model Formula of Linear, Power Law and Exponential Fire Curve for Prediction of Fire Scenario

Jung Wook Park*, Gwon Hyun Ko**, You Woo Jun*
*Dept. of Architecture & Fire Safety, DongYang University
**School of Safety Engineering, DongYang University

요약

본 연구에서는 화재시나리오 예측을 위한 Linear, Power law 그리고 Exponential 화재 곡선 모델식을 비교하였다. 이를 위해서 길이 1.2m, 폭 0.8m 그리고 높이 0.8m의 내화보드로 구성된 구조물을 제작하였으며, 폴리에틸렌 폼 가연물의 시간 변화에 따른 발열량을 산출하였다. 화재 곡선 모델에 따라서 화재시나리오를 예측한 결과 Exponential 모델식은 Linear 모델식과 Power law 모델식에 비해서 최소 약 30% 정도 향상된 결과를 확인하였다. 하지만, Gamma Exponential 모델식은 α 와 γ 가 임의의 값으로 결정되기 때문에 화재 조건에 따른 추가적인 연구가 필요하며, H. Ingason이 제시한 Exponential 모델 식은 retard index에 값에 의존하여 화재시나리오를 보다 정확히 예측할 수 있는 것으로 사료된다.

1. 서론

화재 곡선은 가연물의 연소 시간 변화에 따른 발열량을 예측하여 화재시나리오를 구성하는데 가장 중요한 인자 중 하나이다[1]. 고체 가연물의 경우 연소 시간 동안 주변의 열적 현상에 의해서 연소면적이 실시간 변하는 특징을 갖고 있기 때문에 화재 확산 현상을 정확히 분석하기 위해서는 화재 곡선이 실제 현상에 적합한 발열량 시간 곡선을 나타내야 한다.

현재까지 많은 연구자들에 의해서 화재 곡선에 관한 모델식이 제시되었으며, 기존 연구사례에 따르면 화재가 성장하는 예측 모델은 크게 Linear, Power Law 그리고 Exponential로 구분할 수 있다.

화재 곡선에 관한 연구 사례로 D. Lacroix[2]은 발열량이 선형적으로 증가하는 화재성장률에 대하여 최대 발열량 도달 시간까지의 성장, 일정한 최대 발열량 그리고 발열량이 0까지 감소하는 3구간으로 나누어 모델식을 제시하였다.

Power Law 예측 모델과 관련된 대표적인 연구사례로 R.P. Schifilliti[3]은 가연물의 연소에 의해서 화재가 성장하는 크기를 계수로 정의하여 Slow, Medium, Fast 그리고 Ultra-fast로 적용하고 있으며, Heskestad[4]는 점화원의 열원에 의해서 가연물이 연소하기 시작하는 시

간과 성장계수를 고려하여 수정된 Power law의 관계식을 도출한 바 있다. 이러한 Power Law 예측 모델은 관계식의 형태가 간단하고 최대 발열량에 도달하기까지 화재곡선을 비교적 근사하게 표현할 수 있는 장점을 갖고 있지만 화재가 지속되는 전체 시간에 대해서 발열량의 변곡점을 나타내는 데에는 한계가 있다.

Exponential 예측 모델과 관련된 대표적인 연구사례로 Numajiri and Furukawa[5]은 $t=0$ 에서 $t=t_{\text{flan}}$ 까지 변곡점이 하나만 존재하는 화재성장률을 화재곡선에 대한 Exponential 모델식을 제시하였으며, Ingason[6]은 최대 발열량, 총 열량 그리고 n (retard index)을 주요 매개 변수로 정의하여 임의로 선정되는 n 과 연소 시간의 상관관계를 분석하였다.

현재까지 연구사례에 따르면 화재 곡선에 관한 많은 모델식이 제시되어 왔으나, 각각의 모델식이 갖고 있는 주요 인자에 따라서 실제 현상을 예측하는데 발생할 수 있는 한계성에 관한 기초 연구는 부족한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 Linear, Power Law 그리고 Exponential 모델식의 주요 인자를 조사하여 구획 공간의 체적 0.768m^3 이고 가연물인 폴리에틸렌 폼의 체적이 0.019m^3 이 연소하는 경우 발열량 측정값과 각각의 예측 모델에 따라서 발생할 수 있는 화재시나리오의 차이점을 비교 분석 하고자 한다.

2. 이론

가연물의 열량과 점화원의 열량을 고려한 총괄 발열량은 식 (1)과 같은 관계를 갖게 된다.

$$Q \tag{1}$$

여기서 t 는 연소시간을 의미하며, 식 (1)의 총괄발열량과 가연물의 발열량은 연료 표면적에 의해서 시간에 종속되어 변하게 된다. Lacroix는 발열량이 선형적인 경우를 가정하여 Linear 모델을 식 (2)와 같이 제시하였다.

$$Q_f(t) = a_{g,L}t \tag{2}$$

여기서 $a_{g,L}$ 는 단위 시간 동안의 발열량을 의미하며, $a_{g,L}$ 은 최대 발열량과 최대 발열량 도달시간으로 산출할 수 있다. 또한, 화재 곡선의 변곡점 이후부터 곡선 기울기가 변하기 때문에 발열량이 최대값에 도달한 이후 식 (3)과 같이 계산된다.

$$Q_f(t) = Q_{\max} - \alpha_{D,L}(t - t_D) \tag{3}$$

여기서 $a_{D,L}$, t_D 그리고 Q_{\max} 는 최대 발열량 이후의 단위 시간 동안의 감소하는 발열량, 최대 발열량 이후의 시간 그리고 발열량의 최대값을 의미하며, $a_{D,L}$ 은 최대 발열량에서 0까지의 시간 동안의 발열량이 감소하는 곡선의 기울기이다.

G. Heskestad는 구획 공간에서의 화재 시나리오를 보다 정확히 예측하기 위해서 식 (4)와 같이 수정된 Power Law 모델을 제시하였다.

$$Q_f(t) = a_{g,q}t^p \tag{4}$$

여기서 $a_{g,q}$ 은 단위 시간 제곱 동안의 발열량을 의미하며, $a_{g,q}$ 은 식 (2)와 같이 최대 발열량과 최대 발열량 도달시간에 의하여 산출되며, p 는 점화 이후의 구획 공간 내부의 자유 흐름에서 발생하는 대류열에 의하여 결정되는 실험적 상수이다. Power law 식은 발열량이 지속적으로 증가하여 변곡점을 나타낼 수 없는 한계가 있기 때문에 H. Ingarson은 $Q_f(t_{final}) = 0$ at $t_{final} \rightarrow \infty$ 인 경계 조건을 고려한 최대 발열량 도달 이후의 화재 시나리오 예측 모델을 식 (5)와 같이 제시하였다.

$$Q_f(t) = Q_{\max}e^{-a_{D,q}(t-t_D)} \tag{5}$$

여기서 $a_{D,q}$ 는 단위 시간 제곱 동안의 발열량 감소율을 의미하며, $a_{D,q}$ 은 연소효율과 총괄 열량의 관계를 고려한 식 (6)과 같은 관계를 갖게 된다.

$$\alpha_{D,q} = \frac{1}{\chi E} \tag{6}$$

여기서 χ 그리고 E 은 연소 효율 그리고 총 열량을 의미하며, 연소 효율은 개구부의 크기에 따라서 산출할 수 있다.

H. Ingarson은 Numajiri 와 Furukawa의 Exponential 모델 식과 에너지 평형 관계를 분석하여 수정된 Exponential 모델

을 식 (7)와 같이 제시하였다.

$$Q_f(t) = Q_{\max}nr(1 - e^{-kt})^{n-1}e^{-kt} \tag{7}$$

여기서 n , r 그리고 k 는 retard index, amplitude 그리고 time width을 의미하며, $t=t_{\max}$ 인 경우에는 $Q_f(t_{\max})=Q_{\max}$ 이기 때문에 r 과 k 는 식 (8)와 (9)을 만족해야 한다.

$$k = Q_{\max}/E \tag{8}$$

$$r = (1 - 1/n)^{1-n} \tag{9}$$

식 (7)에서 $t=t_{\max}$ 인 경우 $dQ(t)/dt=0$ 이 되어야 하므로 식 (10)에 의해서 t_{\max} 는 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$n = e^{kt} \tag{10}$$

$$t_{\max} = \frac{\ln(n)}{k} \tag{11}$$

식 (7)은 화재가 확산되는 동안 변곡점이 최대값에서 1개만 존재한다고 가정하는 경우에 적용 가능하며, 시간 변화를 고려한 가연물의 발열량에 대해서 식 (12)과 같은 수정된 감마 함수 형태의 관계식 적용이 가능하다.

$$Q_f(t) = at^\alpha e^{-bt^\gamma} \tag{12}$$

여기서 a , α , b 그리고 γ 는 모두 분포상수를 의미하며, 서로 종속적인 관계를 갖고 있어야 하므로 경계조건에 의해서 식 (13) ~ (15)와 같은 관계를 갖게 된다.

$$b = \frac{\alpha}{\gamma t_{\max}^\gamma} \tag{13}$$

$$\alpha = \frac{N\gamma b^{(\alpha+1)/\gamma}}{\Gamma((\alpha+1)/\gamma)} \tag{14}$$

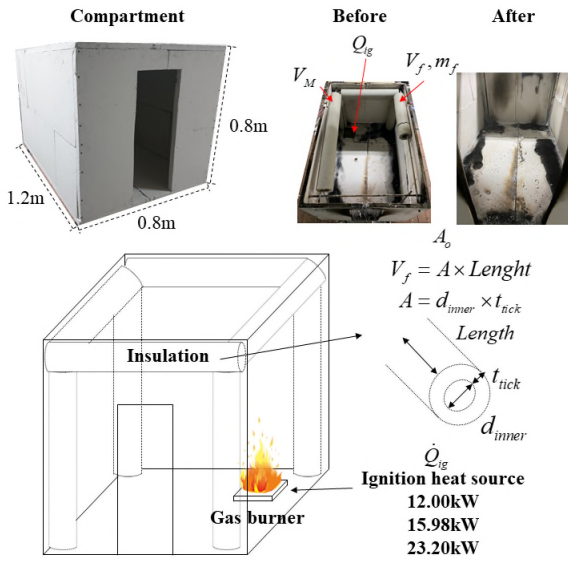
$$C_0 = \frac{N\gamma b^{(\alpha+1)/\gamma}}{\Gamma((\alpha+1)/\gamma)} \tag{15}$$

여기서 Γ 는 감마함수이며, C_0 는 실험상수로 가연물의 발열량에 따라서 결정되는 값을 의미한다. 특히, 점화원의 열원이 증가할수록 기준온도에 도달하는 고체 표면적의 크기(A_f)가 시간에 따라서 달라지기 때문에 가연물의 발열량도 비례하여 변하게 된다. 따라서 Linear, Power Law, exponential 모델식을 통하여 산출된 화재 곡선과 점화 조건 변화에 따른 화재 곡선을 비교하고자 한다.

3. 실험 장치 및 조건

그림 1은 구획 공간에 설치된 보온재의 발열량을 측정하기 위한 실험 장치를 나타낸 것으로 구조물의 크기는 길이 1.2m, 폭 0.8m, 높이 0.8m 인 내화보드 25mm두께를 사용하여 제작하였다. 가연물은 폴리에틸렌 폼 보온재를 사용하였으며, 가연물이 발화되는 기준 온도 (744K)이상에 해당하는 점화원의 열량을 고려하여 12.00 kW, 15.98 kW, 23.20 kW로 정하여 보온재의 체적이 0.019m³인 조건에 대해서 콘칼로리미터 실험 장치에 의해서 발열량을 산출하였다. 본 연구에서 사용한 콘칼로리미터 실험 장치는 95% 신뢰수준에서 k(coverage

factor)=1.95일 때 ± 5 % 정도의 신뢰도를 갖고 있는 것으로 나타났다.



[그림 1] 실험 장치 구성 및 점화 조건

3. 결과

그림 2은 구획 공간에서 점화 열량이 23.20 kW인 조건에서 실험 결과와 Linear 및 Power law 모델식의 화재 곡선을 나타낸 결과이다. Linear에서 $\alpha_{g,L}$ 와 $\alpha_{D,L}$ 의 값이 각각 1.49kW/s와 0.802kW/s 이며, Power law에서 $\alpha_{g,q}$ 와 $\alpha_{D,q}$ 의 값이 각각 0.0109kW/s²와 0.021s⁻¹로 산출되었다. 그림에서 보듯이 발열량은 Power law 모델식 상승 곡선에서 오차율이 약 평균 280% 정도이며, 감소 곡선에서 약 42% 정도이다. Linear 모델식 상승 곡선과 감소 곡선에서 오차율이 약 평균 517% 정도로 나타났다.

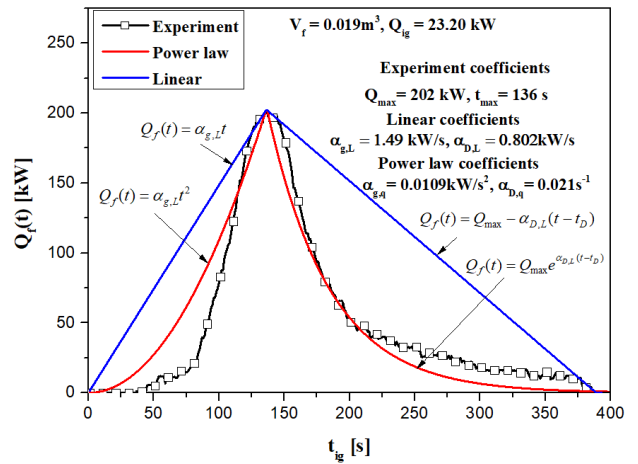
그림 3은 구획 공간에서 점화 열량이 23.20kW인 조건에서 실험 결과와 Ingason's exponential 및 Gamma exponential 모델식의 화재 곡선을 나타낸 결과이다. Ingason의 exponential에서 n, r 그리고 k가 각각 51, 2.69 그리고 0.0287로 오차율이 약 평균 35% 정도이며, Gamma exponential에서 α 와 γ 는 각각 7과 5로 오차율이 약 평균 71% 정도로 산출되었다.

그림 4은 구획 공간에서 점화 열량이 12.00kW, 15.98kW 그리고 23.20kW 인 조건에서 실험 결과와 각각의 모델식의 화재곡선을 나타낸 결과이다. 그림에서 점화 열량 12kW인 경우

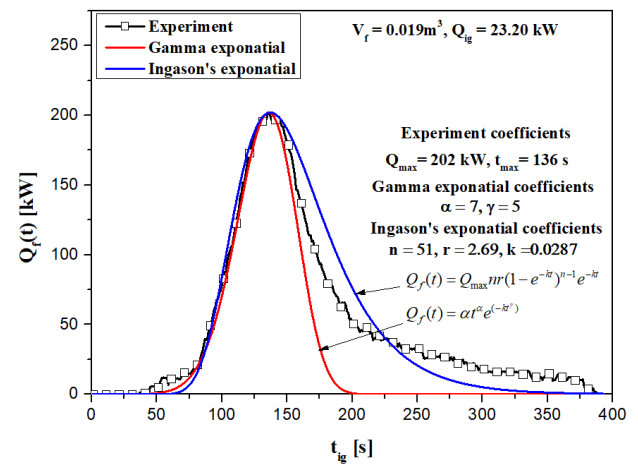
[표 1] 실험 조건 및 실험 결과

Test Num.	V_f [m ³]	Δm_f [kg]	Q_{ig} [kW]	Q_{max} [kW]	t_{max} [s]	$\alpha_{g,L}$ [kW/s]	$\alpha_{D,L}$ [kW/s]	$\alpha_{g,q}$ [kW/s ²]	$\alpha_{D,q}$ [s ⁻¹]	α [-]	γ [-]	n [-]
#1	0.019	0.495	12.00	227.52	589	0.390	0.844	6.61×10^{-4}	8.88×10^{-3}	28	15	13.5×10^7
#2	0.019	0.500	15.98	199.78	203	0.984	0.839	4.84×10^{-3}	2.90×10^{-2}	9	6	88
#3	0.019	0.503	23.20	202.00	136	1.490	0.802	1.09×10^{-2}	2.10×10^{-2}	7	5	51

보온재가 약 490s에서 점화되었으며, 최대 발열량 도달 시간



[그림 2] 실험 결과에 대한 Linear 및 Power law 곡선 비교



[그림 3] 실험 결과에 대한 Ingason's Exponential 및 Gamma Exponential 곡선 비교

이 589s로 식 (11)에 의해 n이 13.5×10^7 로 증가하였다. Linear 및 Power law 모델식은 모든 실험조건에서의 발열량 산출값과 유사한 경향이 확인되지 않으며, Ingason's exponential와 Gamma exponential 모델식에서는 근사한 결과를 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 구획 공간 내부에 설치된 보온재에 대하여 점화 조건 변화에 따른 실험 결과인 발열량과 모델식에 따른 화재 곡선을 비교하였다. 그 결과 각각의 모델식에서 주요 변수인 $\alpha_{g,L}$, $\alpha_{D,L}$, $\alpha_{g,q}$, $\alpha_{D,q}$, α , γ 그리고 n에 의해서 화재 곡선이 결정되었다. Linear 모델식은 발열량의 변곡점이 발생하는 화

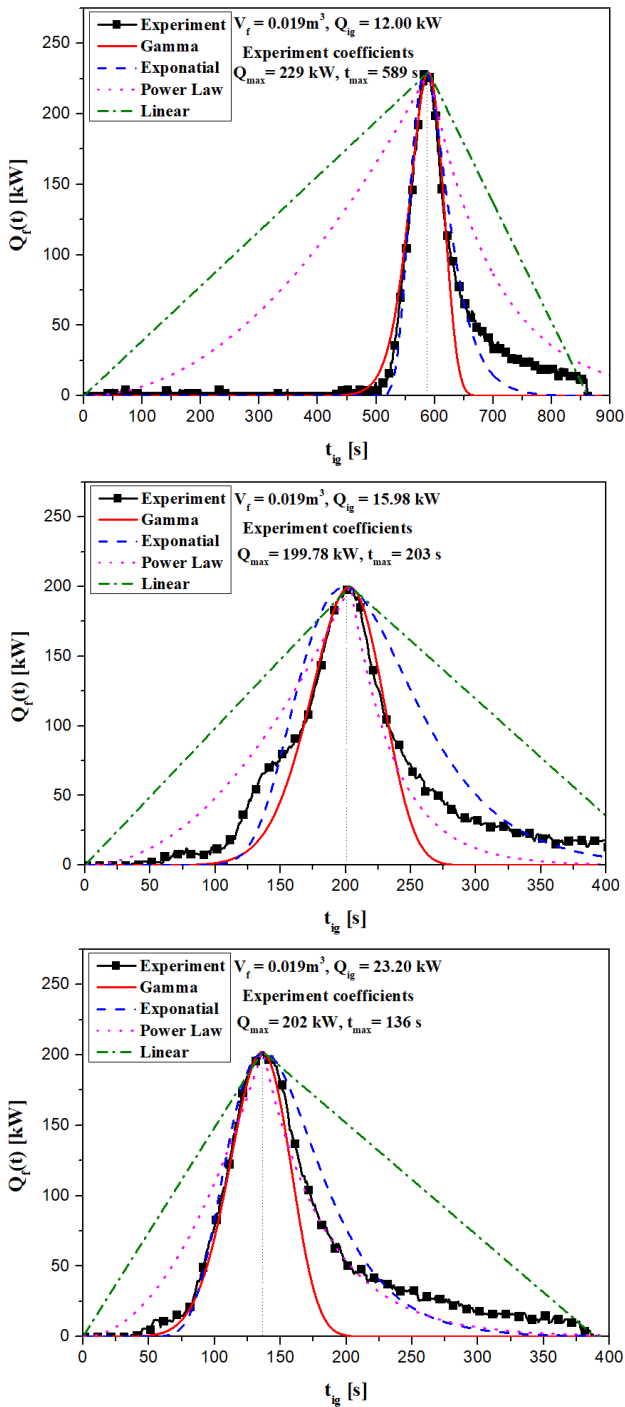
재 시나리오에 대하여 큰 차이를 나타낸다. Power law 모델

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업 (19CTAP-C151893-01)와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2018R1C1B5045686)입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이덕희, 김학범, 박원희 and 정우성, “철도차량 화재시 열 방출률 곡선의 표준화 방안 연구”, 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp. 1577-1581, 10월, 2010년.
- [2] D. Lacroix, “New French recommendations for fire ventilation in road tunnels”, Bhr Group Conference Series Publication, Vol. 27, pp. 103-124, 1997년.
- [3] R.P. Schifilliti, “Use of Fire Plume Theory in the Design and Analysis of Fire Detector and Sprinkler Response”, Worcester Polytechnic Institute, 1986년.
- [4] Heskestad, Gunnar, and Michael A. Delichatsios, “The initial convective flow in fire”, Symposium (International) on Combustion, Vol. 17 No. 1, pp. 1113-1123, 1979년.
- [5] F. Numajiri, K. Furukawa, “Short communication: mathematical expression of heat release rate curve and proposal of ‘Burning Index’”, Fire Mater, Vol. 17 No. 1, pp. 39 - 42, 1998년.
- [6] Ingason, H, “Design fire curves for tunnels”, Fire Safety Journal, Vol. 44 No. 2, pp. 259-265, 2009년.



[그림 4] 점화 열량 12kW, 16kW 그리고 23kW인 조건에서 실험 결과에 대한 곡선 비교

식은 상승 곡선에 대한 예측이 적절하지 않지만 감소 곡선에 대한 예측은 Linear 모델식 보다 적절하게 제시되어 있다. Gamma exponential 모델식은 적절한 예측이 가능하지만 임의의로 선정되는 α 와 γ 에 대한 화재 조건 변화에 따른 연구가 필요한 것으로 판단된다. Ingason이 제시한 Exponential 모델식이 화재 곡선이 실험결과와 오차율이 37% 이내로 정확도가 가남 높게 나타났다. 따라서 약 15kW 이상의 점화 열량을 제외한 화재 시나리오에서는 예측 가능한 것으로 판단된다.