

[Research Paper]

화재시 열방출 급상승 구간의 수치모형 개발에 관한 연구 (로지스틱 함수 및 역함수 곡선)

김종희 · 송준호* · 김건우** · 권오상*** · 윤명오****†

서울시립대학교 재난과학과 대학원생, *서울시립대학교 수학과 명예교수, **서울시립대학교 기계정보공학과 대학원생,
한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원, *서울시립대학교 재난과학과 교수

Development of a Numerical Model for the Rapidly Increasing Heat Release Rate Period During Fires (Logistic function Curve, Inversed Logistic Function Curve)

Jong-Hee Kim · Jun-Ho Song* · Gun-Woo Kim** · Oh-Sang Kweon*** · Myong-O Yoon****†

Graduate Student, Dept. of Disaster Science, University of Seoul,

*Emeritus Professor, Dept. of Mathematics, University of Seoul,

**Graduate Student, Dept. of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul,

***Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology,

****Professor, Dept. of Disaster Science, University of Seoul

(Received November 20, 2019; Revised December 2, 2019; Accepted December 2, 2019)

요 약

본 연구는 화재 시 열출력 급상승 구간에 대한 정확한 열방출율을 예측하기 위한 새로운 함수를 개발하여 제안하는 것을 목적으로 하였다. 현재 화재공학에서 사용되고 있는 ‘ αt^2 ’ 곡선은 화재시스템 공학 관점에서 비효율적이며 실효성 저하를 초래하므로 열방출율의 예측오차를 최소화시킬 필요가 있다. ‘ αt^2 ’ 과 비교하여 보다 논리적인 배경과 형태적으로 유사성을 가진 로지스틱 함수 이론을 기반으로 화재 급성장 구간은 물론 화재 초기 단계까지 적용 가능한 새로운 예측 함수를 개발하였다. 개발된 함수는 더 넓은 화재성장 구간에서 정확도 높은 예측결과를 갖는 것으로 본 연구에서 증명되었다. 이 연구결과는 향후 화재성장패턴 연구의 개발과 함께 화재공학의 발전을 위해 적용될 것이다.

ABSTRACT

In this study, a new function with higher accuracy for fire heat release rate prediction was developed. The ‘ αt^2 ’ curve, which is the major exponential function currently used for fire engineering calculations, must be improved to minimize the prediction gap that causes fire system engineering inefficiency and lower cost-effectiveness. The newly developed prediction function was designed to cover the initial fire stage that features rapid growth based on logistic function theory, which has a more logical background and graphical similarity compared to conventional exponential function methods for ‘ αt^2 ’. The new function developed in this study showed apparently higher prediction accuracy over wider range of fire growth durations. With the progress of fire growth pattern studies, the results presented herein will contribute towards more effective fire protection engineering.

Keywords : Heat release rate (HRR), Logistic function curve, Inversed logistic function curve, FDS simulation, Fire protection system detection sensor

†Corresponding Author, E-Mail: u2u21976@naver.com. TEL: +82-2-6490-5376, FAX: +82-2-6490-5380

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

1. 서론

화재 성장구간의 열방출율(Heat Release Rate ; HRR) 산출에 사용되는 이차함수($Q = at^2$)는 수계산이 용이하고 직선대비 오차율이 작기 때문에 소방시스템 설계 및 화재시물레이션(Fire Dynamics Simulator)에 일반적으로 사용되고 있다. ‘ at^2 ’ 함수의 기본취지는 엔지니어링 목적하에 화재 초기 성장패턴을 예측하기 위해 제안된 함수이기 때문에 열출력에너지가 1.055 MW를 초과하지 않은 구간에 한하여 제한적으로 적용하기 위해 개발된 함수이다. 즉 현실적으로 열출력에너지가 최대치에 이르는 급상승 구간에 대하여 적용할 만한 정량화된 함수식이 없다 보니 소방시스템 설계 및 화재시물레이션에서는 ‘ at^2 ’ 성장곡선의 연장선으로 하여 HRR을 산출하고 있어 결과값에 오차가 발생하는 것을 감수할 수밖에 없는 실정이다.

또한 소방시스템의 작동은 화재감지에서부터 시작되는 바 소방시스템의 감지센서에 영향을 미치는 주변 제반요소 중 하나인 HRR을 정확히 예측하고 이를 기반으로 하여 화재감지에 영향을 미치는 주변 요소를 사전에 판단하여 소방시스템 설계에 적용함으로써 소기의 목적을 달성할 수 있을 것으로 본다.

이러한 문제의식에 입각하여 소방시스템의 작동에 영향을 줄 수 있는 제반요소 중 하나인 열출력 급상승 구간에 대한 정확한 예측이 가능하도록 HRR 결과값 산출의 범용화를 위한 정량화된 모형 개발이 필요하다.

본 연구는 소방시스템 설계의 기반이 되는 주변 열온도 환경을 보다 정확히 예측하기 위하여 화재특성에 따른 ‘HRR-예측곡선’을 도출함으로써 현재 일반적으로 사용되고 있는 열방출에너지 곡선 및 이차함수식($Q = at^2$)의 오차를 획기적으로 줄이고자 하는데 있으며, 최근 화재시물레이션이 널리 사용되고 있는바, 열방출에너지 입력값을 결정함에 있어서도 보다 정확한 함수식을 확보한다는 것은 매우 중요한 의미가 있다 하겠다.

이와 같이 본 연구에서는 새로운 HRR 도출을 위한 함수식을 제안하는 것을 목적으로 하되 궁극적으로는 화재시물레이션에 적용과 소방시스템의 주변 열환경에 대한 정확도를 소

명한 본 연구 결과를 후속 연구에 반영함으로써 실효성 있는 소방시스템 설계를 위한 방법론을 제안하고자 하는데 있다.

2. 본론

2.1 실물화재 기초자료 선정

본 연구에서는 가연물 성상에만 영향을 받는 개방공간에서의 목재 파렛트 연소와 가연물 성상 및 공간형태 모두 영향을 받는 차량 및 업무공간 화재를 대표 기본유형으로 선정하였다.

2.1.1 목재 파렛트 연소

‘화염전파 등에 관한 연구1)’에 사용된 데이터 결과를 목재 파렛트 연소 기초자료로 활용하였다. 목재 파렛트 더미의 실물화재 조건 및 열방출율은 다음과 같다. 실험에 사용된 목재 파렛트 더미의 규격은 1.2 m (L) × 1.0 m (W) × 1.22 m (H)이며, 최대 열방출율은 3.675 MW로 확인되었다. 점화 후 100 s에 발화가 시작되어 200 s부터 400 s 구간에서 열에너지방출이 급상승하고 있음을 확인하였다. Figure 1 (좌측 그래프)은 목재 파렛트 더미의 열방출율 실측결과 및 열출력 급상승 구간을 도시한 그래프이다.

2.1.2 차량화재

‘차량화재특성 평가를 위한 Large Scale Calorimeter 연구2)’에 사용된 데이터 결과를 차량화재 기초자료로 활용하였다. 측정결과 최대 열방출율은 약 2.3~3.4 MW로 확인되었다. 점화 후 110 s에 발화가 시작되어 120 s부터 270 s 구간에서 열에너지방출이 급상승하고 있음을 확인하였다.

Figure 1(중앙 그래프)은 차량화재의 열방출율 실측결과 및 열출력 급상승 구간을 도시한 그래프이다.

2.1.3 업무공간화재

‘업무공간의 화재모델 산정을 위한 실물화재 실험3)’에 사용된 데이터 결과를 업무공간화재 기초자료로 활용하였다. 실물화재 조건 및 열방출율은 다음과 같다. 업무공간 크기는 2.4 m (L) × 3.6 m (W) × 2.4 m (H)이며, 업무공간에는

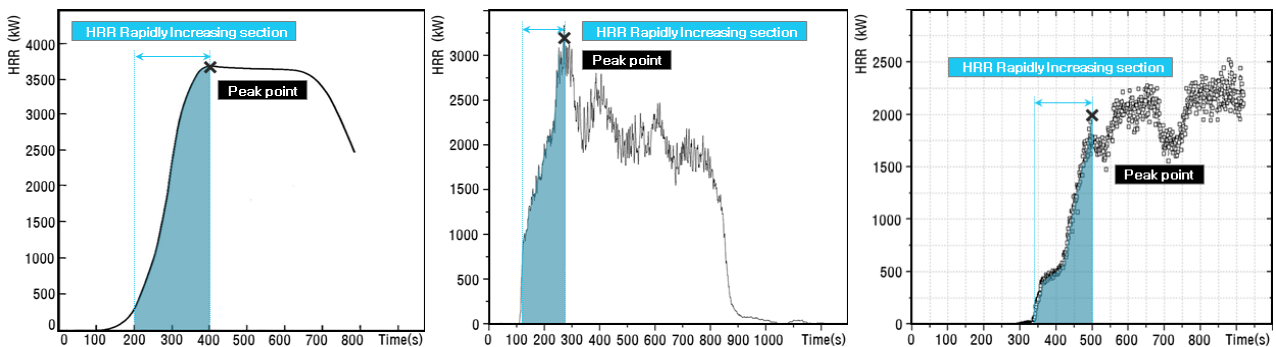


Figure 1. Real fire Heat release rate measurement result graph : wood pallet (left), vehicle (middle) & office compartment fire (right).

164 kg의 가연물이 배치되었다. 최대 열방출율은 약 2.5 MW로 확인되었으며, 점화 후 300 s에 발화가 시작되어 350 s부터 500 s 구간에서 열에너지방출이 급상승하고 있음을 확인하였다. Figure 1(우측 그래프)은 업무공간화재의 열방출을 실측결과 및 열출력 급상승 구간을 도시한 그래프이다.

2.2 함수식의 도출

2.2.1 화재특성에 따른 형태적 및 원리적 패턴분석과 로지스틱 함수

모든 화재에는 패턴의 전환기가 있다. 전환기는 변곡점을 중심으로 정체기(연료공급 및 산소공급 부족)와 상승기(산소공급으로 인한 재성장)로 구분되는데 전환기에 영향을 주는 요소로는 연료지배적인 요소와 환기지배적인 요소가 있다. 일반적으로 화재는 초기에 연료지배적인(연료 소모) 특성을 보이며 성장하지만 일정 성장 이후에는 환기에 영향을 받는 환기지배적인 특성으로 성장패턴이 전환된다.

이를 기반으로 하여 대표유형 3가지(목재화재, 차량화재, 업무공간화재)로부터 화재성장패턴(HRR)을 형태적 및 원리적으로 분석하였다. 형태적인 패턴변화를 분석한 결과 변곡점을 중심으로 S-커브(목재화재) 또는 역 S-커브(차량화재, 업무공간화재) 2가지 형태로 화재가 성장 및 수렴되고 있음이 확인되었다. 또한 발화에서 성장기까지의 열방출율에 대하여 원리적으로 패턴 변화를 분석한 결과 목재 파렛트 연소의 경우 발화 후 제1성장기까지는 지수 성장하다가 제2성장기에는 로그 성장하는 모습으로 로지스틱 성장곡선인 S-커브 형태와 유사함을 보여준 반면 차량 및 업무공간 화재의 경우 제1성장기까지는 로그 성장하다가 제2성장기에는 지수 성장하는 형태로 이는 로지스틱 성장곡선의 역함수인 역 S-커브 형태와 매우 흡사한 형태를 보여주었다. Figure 2에는 대표 기본유형 3가지의 화재성장패턴을 형태적 및 원리적으로 분석한 결과를 도시하여 나타내었다.

화재성장패턴을 형태적으로 분석한 결과 자연계에서 존재하는 제한적인 번식모델인 개체군의 생태패턴 모델과 논리적으로 매우 유사한 성향을 보여 이를 함수에 적용한 결

과 일반화된 로지스틱 함수 패턴과 매우 흡사함을 확인하였다. 따라서 화재 성장패턴을 일반화된 로지스틱 방정식에 적용할 경우 현재 알려진 지수함수($y(t) = aK^{at} + b$), 다항식($y(t) = P_n(t)$), 로그함수($y(t) = aLn(g(t)) + b$)로 산출할 때 보다 그 의미가 있으며 오차를 현저히 줄일 수 있다는 기대감을 준다.

2.2.2 열방출율 함수 유도 및 오차 분석

실물화재 유형이 다양함으로 설계자가 선택할 수 있는 함수식의 폭을 넓혀 함수의 패턴을 결정함에 있어서 열방출 특성에 보다 높은 일치성을 보일 수 있는 관점에서 함수식을 선별한 결과 로지스틱 기본 함수식(S-커브 또는 역 S-커브)에 적용하였을 경우 열방출을 실측값과 가장 유사한 결과값이 산출됨이 확인되었다.

도출된 로지스틱 방정식에서 결과값에 영향을 미치는 미지수는 차수(ν), 함수 기울기(Υ), 상수(C) 3가지이며, 열방출율(HRR) 근사식 산출과정 및 기본식은 다음과 같다.

$$y(t)^\nu = \Upsilon \times \text{Ln} \frac{t-l}{L-t} + C,$$

$$y(t) = \frac{L}{\left(1 + \left(\frac{L}{y_0} - 1\right) \exp^{-\alpha \nu (t - t_0)}\right)^{\frac{1}{\nu}}}$$

로지스틱 기본 방정식에 차수($\nu = 1, 2, 3 \dots n$)를 변형시켜가며 표준오차가 가장 적은 차수식을 선별한 후 경계값(L, l)을 변형시켜 실측데이터와 표준편차가 가장 작은 근사식을 찾아 열출력 급상승 구간에 대한 근사식을 도출하였다. 상기와 같은 방식으로 앞서 선정한 각각의 유형에 적용한 결과 다음과 같은 열방출을 산출 근사식이 도출되었다. 열방출율은 kW단위로 정리하였으며, 소수점 3자리 이하의 숫자는 계산 결과값에 영향을 미치지 않는 것으로 판단하여 소수점 이하 3자리까지를 유효숫자로 보기로 하였다.

Table 1~3에는 도출된 로지스틱 함수식(또는 역함수식)과 기존의 ‘ αt^2 ’으로부터 산출된 열방출율과 그 오차값을

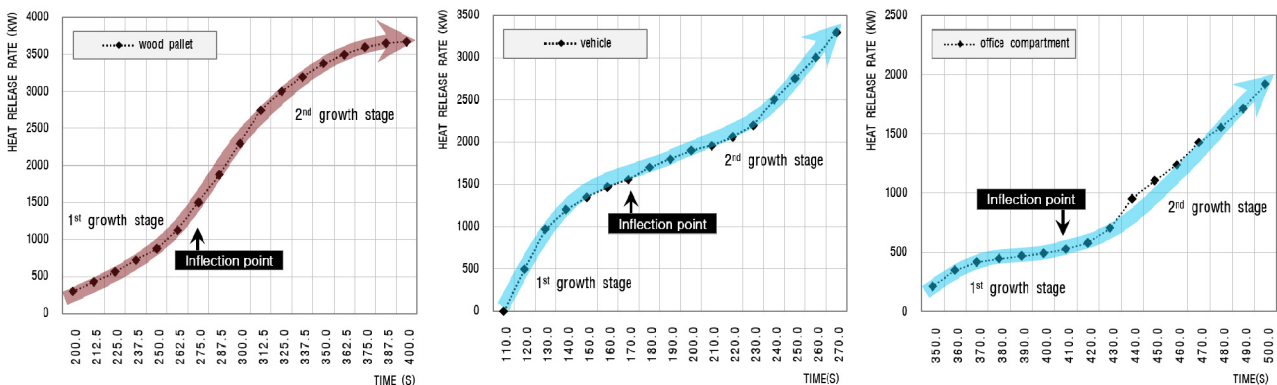


Figure 2. Analysis of Real fire Heat release rate pattern graph : S-curve (wood pallet fire : left), Inversed S-curve (vehicle : middle & office compartment fire : right).

Table 1. Comparison of HRR Goodness-of-fit by Logistic and Exponential Functions : Wood Pallet Fire

| Wood Pallet Fire, HRR Unit : kW | | | | | | | |
|---|----------------|-----------|------------------------|--------------|---------------------------|------------------------|---------------|
| 200 ≤ t ≤ 400, ν=3 | | | | | y''(t) = αt² = 0.015 × t² | | |
| y'(t) = $\frac{3.675}{(1 + 1837.266 \times \exp(-0.061 \times (t - 200)))^{\frac{1}{3}}}$ | | | | | | | |
| t (sec) | y(t) : Measure | y'(t) | y(t) - y'(t) | y(t) - y'(t) | y''(t) | y(t) - y''(t) | y(t) - y''(t) |
| 200.0 | 300.000 | 300.000 | 0.000 | 0.000 | 600.000 | -300.000 | 300.000 |
| 212.5 | 425.000 | 386.736 | 38.264 | 38.264 | 677.344 | -252.344 | 252.344 |
| 225.0 | 562.500 | 498.431 | 64.069 | 64.069 | 759.375 | -196.875 | 196.875 |
| 237.5 | 725.000 | 640.060 | 82.940 | 82.940 | 846.094 | -121.094 | 121.094 |
| 250.0 | 875.000 | 826.187 | 48.813 | 48.813 | 937.500 | -62.500 | 62.500 |
| 262.5 | 1125.000 | 1060.700 | 64.300 | 64.300 | 1033.594 | 91.406 | 91.406 |
| 275.0 | 1500.000 | 1355.342 | 144.658 | 144.658 | 1134.375 | 365.625 | 365.625 |
| 287.5 | 1875.000 | 1715.366 | 159.634 | 159.634 | 1239.844 | 635.156 | 635.156 |
| 300.0 | 2300.000 | 2132.127 | 167.873 | 167.873 | 1350.000 | 950.000 | 950.000 |
| 312.5 | 2750.000 | 2570.482 | 179.518 | 179.518 | 1464.844 | 1285.156 | 1285.156 |
| 325.5 | 3000.000 | 2968.838 | 31.162 | 31.162 | 1584.375 | 1415.625 | 1415.625 |
| 337.5 | 3200.000 | 3270.876 | -70.876 | 70.876 | 1708.594 | 1491.406 | 1491.406 |
| 350.0 | 3375.000 | 3462.975 | -87.975 | 87.975 | 1837.500 | 1537.500 | 1537.500 |
| 362.5 | 3500.000 | 3569.800 | -69.800 | 69.800 | 1971.094 | 1528.906 | 1528.906 |
| 375.0 | 3600.000 | 3624.401 | -24.401 | 24.401 | 2109.375 | 1490.625 | 1490.625 |
| 387.5 | 3650.000 | 3651.046 | -1.046 | 1.046 | 2252.344 | 1397.656 | 1397.656 |
| 400.0 | 3675.000 | 3663.747 | 11.253 | 11.253 | 2400.000 | 1275.000 | 1275.000 |
| Sum | 36437.500 | 35699.115 | - | 1246.582 | 23906.250 | - | 14396.875 |
| Average | 2143.382 | - | Average Relative Error | 3.421% | - | Average Relative Error | 39.511% |

실측데이터와 비교하여 나타내었다. Figure 3에는 Table 1 ~3의 산출결과와 실측데이터의 열방출을 변화를 시간의 경과에 따라 비교하여 나타내었다.

1) 목재 파렛트 연소

발화에서 성장기까지 1개의 변곡점을 중심으로 화재 지속성장 구간을 2구간으로 나누어 근사식을 도출하였다. 최초로 발화를 인지하는 시각에 따라 t구간을 150 ≤ t ≤ 400 구간과 200 ≤ t ≤ 400 구간으로 나누어 적용하였으며, 200 ≤ t ≤ 400 구간에서 ‘ν’값이 ‘3’일 경우 가장 표준편차가 적은 것으로 나타났다.

따라서 개방공간에서 연료지배적인 특성을 보이며 화재가 성장하는 목재 파렛트 연소의 경우 S-커브 형태의 화재 성장패턴을 갖는 것으로 확인되었으며, 그로부터 다음과 같은 근사식이 도출되었다.

$$y'(t) = \frac{3.675}{(1 + 1837.266 \times \exp(-0.061 \times (t - 200)))^{\frac{1}{3}}}$$

도출된 로지스틱 함수식으로부터 목재 파렛트 연소의 열방출을 산출한 결과 Table 1에서 나타난 바와 같이 실물화재 대비 96.579% (오차 : 3.421%)의 일치율을 보여주고 있다.

2) 차량화재

발화에서 성장기까지 1개의 변곡점을 중심으로 화재 지속성장 구간을 2구간으로 나누어 근사식을 도출하였다. 최초로 발화를 인지하는 시각에 따라 t구간을 110 ≤ t ≤ 190 구간과 110 ≤ t ≤ 270 구간으로 나누어 적용하였으며, 110 ≤ t ≤ 270 구간에서 ‘ν’값이 ‘2’, ‘L’값이 ‘278’일 경우 가장 표준편차가 적은 것으로 나타났다.

따라서 차량화재처럼 차량내부 및 엔진 등과 같이 폐쇄 공간에서 화재가 발생되어 외부로 확산되는 특성을 보이며 성장하는 화재의 경우 역 S-커브 형태의 화재성장패턴을 갖는 것으로 확인되었으며, 그로부터 다음과 같은 근사식이 도출되었다.

$$y'(t) = (2762231.923 \times (\text{Ln} \frac{t}{278 - t}) + (\text{Ln} \frac{168}{110}))^{\frac{1}{2}}$$

Table 2. Comparison of HRR Goodness-of-fit by Logistic and Exponential Functions : Vehicle Fire

| Vehicle Fire, HRR Unit : kW | | | | | | | |
|--|------------------|-----------|------------------------|------------------|--|------------------------|-------------------|
| $110 \leq t \leq 270, \nu = 2, L = 278$ | | | | | $y''(t) = \alpha t^2 = 0.055 \times t^2$ | | |
| $y'(t) = (2762231.923 \times (\ln \frac{t}{278-t}) + (\ln \frac{168}{110}))^{\frac{1}{2}}$ | | | | | | | |
| t (sec) | $y(t)$: Measure | $y'(t)$ | $y(t) - y'(t)$ | $ y(t) - y'(t) $ | $y''(t)$ | $y(t) - y''(t)$ | $ y(t) - y''(t) $ |
| 110.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 665.500 | -665.500 | 665.500 |
| 120.0 | 500.000 | 640.204 | -140.204 | 140.204 | 792.000 | -292.000 | 292.000 |
| 130.0 | 970.000 | 900.866 | 69.134 | 69.134 | 929.500 | 40.500 | 40.500 |
| 140.0 | 1200.000 | 1099.775 | 100.225 | 100.225 | 1078.000 | 122.000 | 122.000 |
| 150.0 | 1350.000 | 1268.016 | 81.984 | 81.984 | 1237.500 | 112.500 | 112.500 |
| 160.0 | 1470.000 | 1418.037 | 51.963 | 51.963 | 1408.000 | 62.000 | 62.000 |
| 170.0 | 1560.000 | 1556.565 | 3.435 | 3.435 | 1589.500 | -29.500 | 29.500 |
| 180.0 | 1700.000 | 1687.948 | 12.052 | 12.052 | 1782.000 | -82.000 | 82.000 |
| 190.0 | 1800.000 | 1815.438 | -15.438 | 15.438 | 1985.500 | -185.500 | 185.500 |
| 200.0 | 1900.000 | 1941.829 | -41.829 | 41.829 | 2200.000 | -300.000 | 300.000 |
| 210.0 | 1960.000 | 2069.892 | -109.892 | 109.892 | 2425.500 | -465.500 | 465.500 |
| 220.0 | 2060.000 | 2202.799 | -142.799 | 142.799 | 2662.000 | -602.000 | 602.000 |
| 230.0 | 2200.000 | 2344.748 | -144.748 | 144.748 | 2909.500 | -709.500 | 709.500 |
| 240.0 | 2500.000 | 2502.139 | -2.139 | 2.139 | 3168.000 | -668.000 | 668.000 |
| 250.0 | 2750.000 | 2686.446 | 63.554 | 63.554 | 3437.500 | -687.500 | 687.500 |
| 260.0 | 3000.000 | 2923.316 | 76.684 | 76.684 | 3718.000 | -718.000 | 718.000 |
| 270.0 | 3300.000 | 3300.000 | 0.000 | 0.000 | 4009.500 | -709.500 | 709.500 |
| Sum | 30220.000 | 30358.017 | - | 1056.080 | 35997.500 | - | 6451.500 |
| Average | 1777.647 | - | Average Relative Error | 3.495% | - | Average Relative Error | 21.348% |

도출된 로지스틱 역함수식으로부터 차량화재의 열방출율을 산출한 결과 Table 2에서 나타낸 바와 같이 실물화재 대비 96.505% (오차 : 3.495%)의 일치율을 보여주고 있다.

3) 업무공간화재

업무공간 화재의 경우 가연물의 다양성으로 인해 화재가 급성장하기 전 단계까지는 다수의 변곡점이 존재하였다. 그러므로 열출력이 급상승 되는 특정 구간을 선정한 뒤 1개의 변곡점을 중심으로 화재 지속성장 구간을 2구간으로 나누어 근사식을 도출하였다. 최초로 발화를 인지하는 시각에 따라 t 구간을 $300 \leq t \leq 500$ 구간과 $350 \leq t \leq 500$ 나누어 적용하였으며, $350 \leq t \leq 500$ 구간에서 ‘ ν ’값이 ‘1’, ‘ L ’값이 ‘515’일 경우 가장 표준편차가 적은 것으로 나타났다.

따라서 업무공간화재의 경우도 차량화재와 마찬가지로 화재 초기에는 연료지배적인 특성을 보이며 성장하지만 일정 성장 이후에는 환기에 영향을 받는 환기지배적인 특성으로 성장패턴이 전환되어 역 S-커브 형태의 화재성장패턴을 갖는 것으로 확인되었으며, 그로부터 다음과 같은 근사식이 도출되었다.

$$y'(t) = 476.505 \times (\ln \frac{t-290}{515-t}) + 687.628$$

도출된 로지스틱 역함수식으로부터 업무공간화재의 열방

출율을 산출한 결과 Table 3에서 나타낸 바와 같이 실물화재 대비 90.209% (오차 : 9.791%)의 일치율을 보여주고 있다.

2.3 로지스틱 함수의 화재시뮬레이션 적용

화재상황의 재현이 가능한 시뮬레이션에는 전산유체역학 프로그램인 CFD Tool (Computational fluid dynamics)과 전산유체역학 화재코드인 FDS Tool이 있다. CFD는 유체와 기체의 상호작용으로 시뮬레이션을 수행하기 때문에 온도 및 연기의 거동상태만으로 화재를 재현한다. 반면 FDS는 연기 및 화염의 거동까지 재현 가능하므로 CFD에 비해서 정확하게 화재를 모사할 수 있다.

그러나 FDS에서 화염의 거동상태를 모사하기 위해서는 여러 매개변수의 입력값이 필요하다. 그 중 HRR 값의 결정은 실측데이터 등을 활용하여 수치를 직접 입력하거나 또는 프로그램 내에 내장되어 있는 ‘ αt^2 ’을 이용하여 계산한다. ‘ αt^2 ’을 이용할 경우 앞서 검증된 바와 같이 오차율이 상당히 크게 발생하기 때문에 정확한 결과값을 예측하기는 어렵다. 또한 수치 입력방식의 경우에도 실측데이터 확보가 불가능할 경우 정확한 결과값을 예측하기는 어렵다.

그러므로 로지스틱 함수에 의해 계산된 결과값을 FDS의 수치 입력방식의 입력값으로 활용함으로써 ‘ αt^2 ’과 비교하여 ‘HRR-예측곡선’의 정확도를 검증하고 ‘FDS 수치입력 방식의 표준 계산식’으로 응용 가능성을 검토하기 위해 시뮬레이션을 시행하였다. 또한 CFD Tool은 얻을 수 있는 결과값이 제

Table 3. Comparison of HRR Goodness-of-fit by Logistic and Exponential Functions : Office Compartment Fire

| Office Compartment Fire, HRR Unit : kW | | | | | | | |
|--|------------------|-----------|------------------------|------------------|--|------------------------|-------------------|
| $350 \leq t \leq 500, \nu = 1, L = 515$ | | | | | $y''(t) = \alpha t^2 = 0.005 \times t^2$ | | |
| $y'(t) = 476.505 \times (\text{Ln} \frac{t-290}{515-t}) + 687.628$ | | | | | | | |
| t (sec) | $y(t)$: Measure | $y'(t)$ | $y(t) - y'(t)$ | $ y(t) - y'(t) $ | $y''(t)$ | $y(t) - y''(t)$ | $ y(t) - y''(t) $ |
| 350.0 | 214.700 | 214.700 | 0.000 | 0.000 | 612.500 | -397.800 | 397.800 |
| 360.0 | 351.400 | 351.994 | 35.406 | 35.406 | 648.000 | -296.600 | 296.600 |
| 370.0 | 420.900 | 409.599 | 11.301 | 11.301 | 684.500 | -263.600 | 263.600 |
| 380.0 | 449.300 | 498.071 | -48.771 | 48.771 | 722.000 | -272.700 | 272.700 |
| 390.0 | 471.200 | 583.307 | -112.107 | 112.107 | 760.500 | -289.300 | 289.300 |
| 400.0 | 492.800 | 666.847 | -174.047 | 174.047 | 800.000 | -307.200 | 307.200 |
| 410.0 | 528.800 | 750.055 | -221.255 | 221.255 | 840.500 | -311.700 | 311.700 |
| 420.0 | 581.900 | 834.264 | -252.364 | 252.364 | 882.000 | -300.100 | 300.100 |
| 430.0 | 705.200 | 920.909 | -215.709 | 215.709 | 924.500 | -219.300 | 219.300 |
| 440.0 | 954.300 | 1011.678 | -57.378 | 57.378 | 968.000 | -13.700 | 13.700 |
| 450.0 | 1105.700 | 1108.750 | -3.050 | 3.050 | 1012.500 | 93.200 | 93.200 |
| 460.0 | 1238.400 | 1215.191 | 23.209 | 23.209 | 1058.000 | 180.400 | 180.400 |
| 470.0 | 1428.000 | 1335.728 | 92.272 | 92.272 | 1104.500 | 323.500 | 323.500 |
| 480.0 | 1557.200 | 1478.495 | 78.705 | 78.705 | 1152.000 | 405.200 | 405.200 |
| 490.0 | 1718.600 | 1659.777 | 58.823 | 58.823 | 1200.500 | 518.100 | 518.100 |
| 500.0 | 1921.400 | 1921.400 | 0.000 | 0.000 | 1250.000 | 671.400 | 671.400 |
| Sum | 14139.800 | 14924.766 | - | 1384.397 | 14620.000 | - | 4863.800 |
| Average | 883.738 | - | Average Relative Error | 9.791% | - | Average Relative Error | 34.398% |

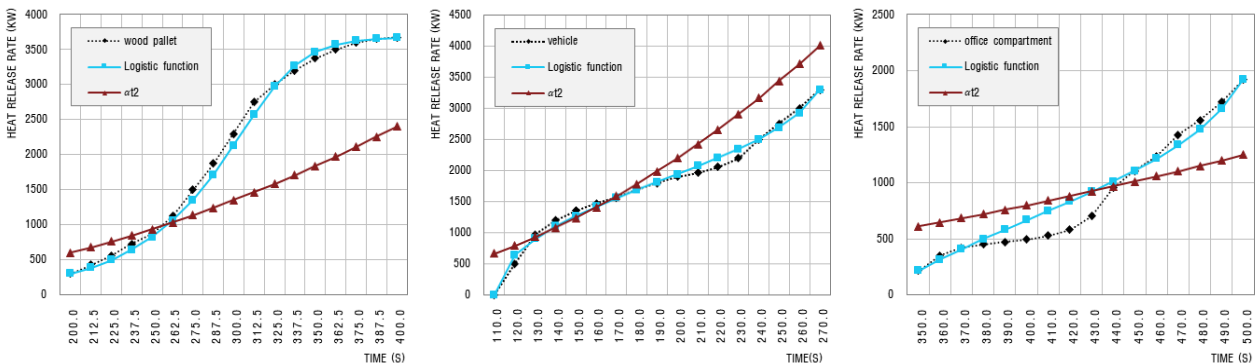


Figure 3. Heat release rate curve error analysis : wood creep (left), vehicle (middle) & office compartment fire (right).

한적이지만 함수식을 프로그램에 직접 입력하여 열·연기를 비롯한 유체의 흐름을 예측할 수 있기 때문에 로지스틱 함수를 사용할 경우 정확도를 높일 수 있는 방법이 될 것이다.

2.3.1 화재시뮬레이션 모델링 조건

6.0 m (L) × 8.0 m (W) × 3.2 m (H) 주차공간에 주차되어 있는 차량 내부에서 화재가 발생하여 외부로 확산되는 시나리오로 화재발생을 가정하였다. 화재발생 기본 입력조건 및 성장조건은 다음과 같다.

- 가연물 : 폴리우레탄(GM27)
- 화원(자동차) 크기 : 2.0 m (L) × 4.0 m (W), 화재발생 후 110 s에 발화가 시작되어 120 s부터 270 s 구간까지

화재가 급성장하다 270 s에 이르러 열방출을 최대값인 3.4 MW에 도달한 이후 400 s까지 화재가 지속되는 조건으로 설정.

- 주차장 내 산소공급은 충분한 것으로 설정.
- HRR 입력은 로지스틱 함수에 의해 산출된 값을 직접 프로그램에 입력하는 방법과 FDS에 내장되어 있는 ‘ αt^2 ’ 계산식에 적용하는 방법으로 구분한 뒤 화재발생 기본 입력조건 및 성장조건은 동일하게 하여 시뮬레이션을 시행하였다.

2.3.2 시뮬레이션 결과 비교분석

시뮬레이션 시행결과 HRR 값을 로지스틱 역함수로 산출

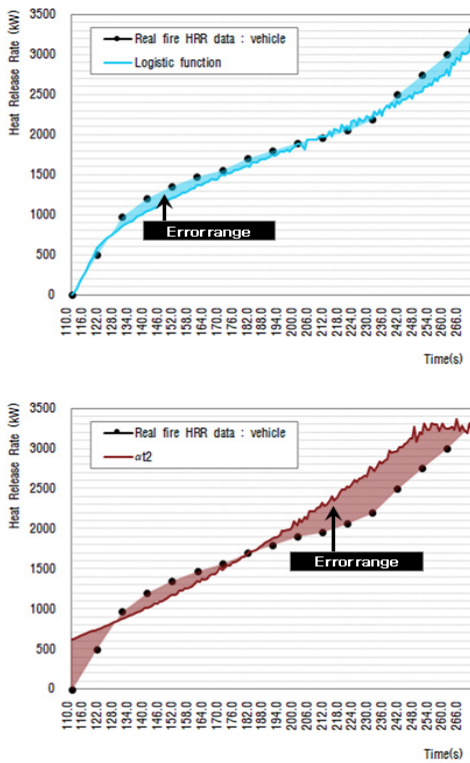


Figure 4. HRR error range compared to vehicle real fire measurement data : Logistic(top) and Exponential(bottom) Function FDS application result.

하여 입력한 경우 실측데이터와 비교하여 오차율이 3.495%로 ‘HRR-예측곡선’이 실측데이터와 거의 일치하고 있음을 Figure 4 상단 그래프를 통해 확인할 수 있다. 반면 αt^2 으로 계산되어진 경우 실측데이터와 비교하여 오차율이 21.348%로 화재성장 전 구간에 있어 실측데이터값에서 상당히 벗어나 분포되어 있음을 Figure 4 하단 그래프를 통해 확인할 수 있다.

따라서 로지스틱 함수(또는 역함수)를 FDS의 ‘HRR 입력값의 표준 계산식’으로 적용한 결과 αt^2 과 비교하여 준용 가능한 오차범위(5% 미만) 내에 들어오는 것을 Figure 4 그래프를 통해 확인됨으로써 로지스틱 함수(또는 역함수)의 FDS 응용 가능성이 검증되었다. 또한 로지스틱 함수(또는 역함수)로부터 무수히 많은 입력 데이터 산출이 가능하므로 시뮬레이션 입력단계에서 효율성과 정확성을 도모할 수 있다는 사실 또한 검증되었다.

2.4 결과 및 고찰

화재특성에 따른 주변 열온도 환경을 정확히 예측하기 위하여 실물화재 데이터를 근거로 화재성장패턴을 분석하고 그로부터 열방출율(HRR) 예측 함수식을 도출하였다. 도출된 로지스틱 함수식(또는 역함수식)은 기존의 이차함수식에 비해 다음과 같은 정확도를 보였다. Table 4에는 로지스틱 함수식(또는 역함수식)과 이차함수식에 의해 산출된 열방출율 결과값에 대한 정확도를 비교하여 나타내었다.

Table 4. Summary of HRR Goodness of Fit

| Classification | Logistic Function | Exponential Function |
|--|-------------------|----------------------|
| Wood Pallet Fire accuracy (error) | 96.579% (3.421%) | 60.489% (39.511%) |
| Vehicle Fire accuracy (error) | 96.505% (3.495%) | 78.652% (21.348%) |
| Office Compartment Fire accuracy (error) | 90.209% (9.791%) | 65.602% (34.398%) |

1) 목재 팔렛트 연소 모델의 경우 로지스틱 함수(S-커브 곡선)를 이용하여 열방출율을 산출한 결과 96.579% (오차 : 3.421%)의 일치율을 보였다. 기존의 이차함수식을 이용하여 산출한 경우에는 60.489% (오차 : 39.511%)의 일치율을 보였다.

2) 차량화재의 경우 로지스틱 역함수(역 S-커브곡선)를 이용하여 열방출율을 산출한 결과 96.505% (오차 : 3.495%)의 일치율을 보였다. 기존의 이차함수식을 이용하여 산출한 경우에는 78.652% (오차 : 21.348%)의 일치율을 보였다.

3) 업무공간화재의 경우 로지스틱 역함수(역 S-커브곡선)를 이용하여 열방출율을 산출한 결과 90.209%(오차 : 9.791%)의 일치율을 보였다. 기존의 이차함수식을 이용하여 산출한 경우에는 65.602%(오차 : 34.398%)의 일치율을 보였다.

기존에 알려진 이차함수식($Q = \alpha t^2$)은 상수값을 조정하여 열방출율을 산출하는 방식으로 수계산이 용이하고 직선 대비 오차율이 적기 때문에 활용성(FDS의 경우 HRR 계산식으로 내장, 성능위주설계 이용) 면에서 우수하나 로지스틱 함수식 대비 산출된 결과값은 약 3.51배~11.55배(목재 : 11.550배, 차량 : 6.108배, 업무공간 : 3.513배) 이상의 오차율이 발생됨이 확인되었다.

본 연구에서 적용한 로지스틱 함수식(또는 역함수식)의 경우 이차함수식 대비 매우 높은 정확도를 보여 주었다. 또한 화재성장 시 나타나는 변곡을 반영하여 보다 더 논리적으로 접근할 수 있으므로 화재 지속성장 구간에 대하여 최소 10개~20개 정도의 실물화재 데이터만 확보된다면 오차 범위를 현저히 줄일 수 있을 것이다.

3. 결론

본 연구는 화재 시 열출력 급상승 구간에 대한 정확한 열방출율을 예측하기 위한 새로운 함수를 개발하는 것을 목적으로 하였으며 본 논문의 연구결과는 금후 다음과 같은 확장성을 가질 것으로 전망된다.

1) 화재특성별 실물화재 데이터 샘플군에 대한 범위를 확대하여 본 연구에서 도출된 로지스틱 함수(또는 역함수)로부터 ‘HRR-예측곡선’의 분류체계가 완성된다면 함수의 기울기(γ)값 조정만으로 손쉽게 소방시스템 주변의 열온도 환경 예측이 가능해질 것이다. 이로써 기존 αt^2 곡선보다

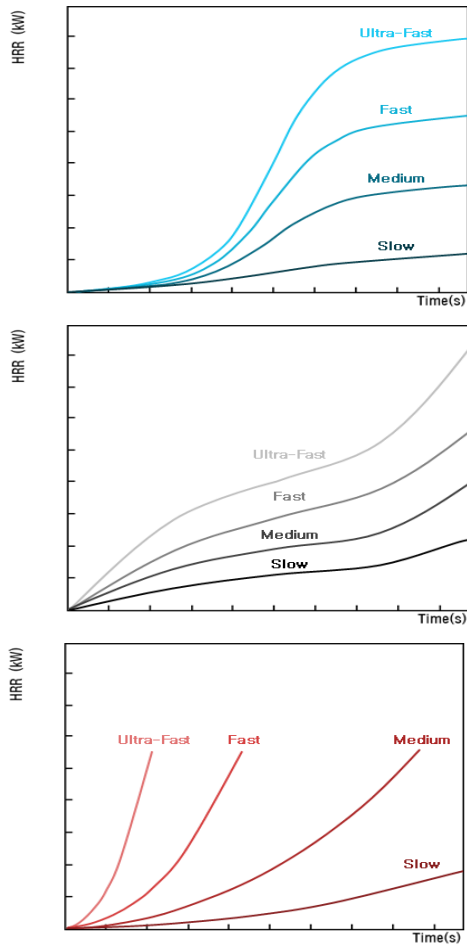


Figure 5. Comparison of Heat release rate curve classification system : Logistic function curve (top), Inversed Logistic function curve (middle) & Exponential function curve (bottom).

방화공학적 관점에서 훨씬 최적화된 초기 화재 성장모델의 제안이 가능할 것으로 전망된다. Figure 5에는 화재성장 구간에 있어 로지스틱 함수(또는 역함수)와 지수함수의 화재 성장 예측 모델(‘HRR-예측곡선’)을 그래프로 비교하여 나타내었다.

2) 당해 용도와 유사한 유형의 ‘HRR-예측곡선’의 선택만으로 현행보다 훨씬 최적화된 소방시스템의 설계가 가능할 것이다.

3) 화재시물레이션에서 ‘HRR 입력 데이터 산출을 위한 표준 계산식’으로 응용할 경우 시물레이션의 신뢰도 향상

은 물론 정온식감지기 뿐만 아니라 차동식감지기의 작동시간의 정확도 높은 예측이 가능해질 것이다.

4) 로지스틱 함수(또는 역함수)를 적용하여 화재감지에 미치는 주변 열온도 환경을 정확히 소명한 결과를 가지고 유인팬 등과 같이 주변 기류에 영향을 미칠 수 있는 요인과 소방시스템과의 상관관계를 평가하는 연구를 병행하여 진행하고 있으므로 후속 연구가 완성되면 소방시스템의 작동지연 또는 작동실패 원인을 사전에 판단할 수 있으므로 보다 실효성 있는 소방시스템 설계방법론의 제안이 가능할 것이다.

References

1. J. S. Lee, D. S. Kim, J. H. Kwak and S. Y. Kim, “A Study on the Flame Propagation and Spread”, Fire Insurers Laboratories of Korea (2006).
2. Y. H. Yoo, H. Y. Kim and H. J. Shin, “A Study on the Vehicle Fire Property using the Large Scale Calorimeter”, Journal of Korean Tunnel and Underground Space, Vol. 9, No. 4, pp. 343-349 (2007).
3. O. S. Kweon, Y. H. Yoo, H. Y. Kim and J. H. Kim, “Real Scale Experiment for Assessing Fire Model of office Compartment”, Journal of Kosham, Vol. 12, No. 6, pp. 61-65 (2012).
4. H. S. Yun and C. H. Hwang, “A Correlation Study for the Prediction of the Maximum Heat Release Rate in Closed-Compartments of Various Configurations”, Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 1, pp. 16-23 (2018).
5. J. C. Viegas, “The use of Impulse Ventilation for Smoke Control in Underground Car Parks”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25, No. 1, pp. 42-53 (2010).
6. Y. Li, “Analysis of Vehicle Fire Statistics in Zealand Parking Buildings”, Fire Technology, Vol. 43, No. 2, pp. 93-106 (2007).
7. K. Okamoto, “Building Behavior of Sedan Passenger Car”, Fire Safety Journal, Vol. 44, pp. 301-310 (2009).
8. P. A. Enright, “Impact of Jet Fan Ventilation System on Sprinkler activation”, Case Studies in Fire Safety, Vol. 1, pp. 1-7 (2014).