

내장재 발화시간의 정량적 위험성 평가

하동명

세명대학교 안전공학과

Quantitative Risk Assessment of Time to Ignition of Interior Materials

Dong-Myeong Ha

Dept. of Safety Engineering, Semyung Univ., Jecheon 390-711, Korea

1. 서론

일반적으로 화재 시나리오에 관련되는 매개변수는 수 없이 많지만 대표적으로 화재 지연특성, 열방출률, 연소생성물의 특성, 플래시오버(flashover), 발화시간, 화염전파속도(flame spread rate) 등을 들 수 있다. 그러나 화재시나리오에서 출화기에 관련된 매개변수(parameter)를 서술하면 방화설비의 특성, 점화원, 연료의 특성 및 조건, 환기조건, 입주자의 특성 및 위치, 구조물과 기타 장비의 조건 등을 들 수 있다¹⁾. 화재의 성장기, 감지, 억제, 공정도 화재 시나리오 상에서의 변화의 가능성에 생성되는 것에 상관관계가 있다. 즉, 여러 매개변수에 따라 화재 특성에 의해 결과(인명 피해나 재산 피해)를 예측 할 수 있다²⁾.

본 연구에서는 표면응답방법론(Response Surface Methodology : RSM)^{3,4)}을 이용하여 화재특성에 영향을 주는 인자들과 인자들간의 상호작용을 고려하여 발화시간에 대한 여러 경험적 관계와 예측 모델을 제시하여 정량적 위험성 평가를 하고자 한다.

제시한 방법론을 이용하여 아직까지 밝혀지지 않는 화재특성 예측에 도움을 주고, 실험에서 얻고자 하는 화재특성 자료에 이용하고자 한다. 또한, 제시된 방법론을 통해 PBD(performance based design)에 적용하므로 보다 정확한 성능설계기준에 이용되기를 기대한다.

2. 발화시간 영향을 주는 인자 및 예측식 고찰

2-1. 발화시간에 영향을 주는 인자

최근 내장재의 다양화로 인해 화재 예측에 대한 새로운 연구가 활발히 진행되고 있으며, 화재 예방을 위한 중요한 자료인 Flashover 연구를 위해 여러 화재위험 특성 가운데 발화시간(time to ignition)에 대한 정보는 무엇보다 중요하다.

그 동안 발화시간에 영향을 주는 인자를 여러 문헌에서 고찰한 결과 다음과 같은 인자에 영향을 받는다.

- ①열전도도(Thermal conductivity)
- ②밀도(Density)
- ③비열(Specific heat capacity)
- ④발화에서 표면온도(Surface temperature at ignition)
- ⑤주위온도(Ambient temperature)
- ⑥복사율(Emissivity)
- ⑦방사률(Irradiance)
- ⑧증발열(heat of vaporization)

2-2. 발화시간 예측 관련 식

화재의 위험정도를 나타내기 위한 화재성능지수(FPI: fire performance index)를 Peak 열방출률(Peak HRR)과 발화시간으로 다음과 같이 나타내고 있다⁵⁾.

$$FPI = \frac{t_{ign}}{HRR_{pk}} \quad (1)$$

따라서 발화시간은 화재 지수에 중요한 역할을 하고 있다.

Silcock 등⁶⁾은 Bench Scale 시험으로부터 발화시간 자료 분석을 위해 다음과 같은 발화시간 예측식을 사용하였으며, 열적으로 두꺼운 재료는 다음식을 적용하였고,

$$t_{ig} = \frac{\frac{\pi}{4} k \rho C_p (T_i - T_o)^2}{(\dot{q}'')^2} \quad (2)$$

또한 두께(Lo) 얇은 재료에 대해서는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$t_{ig} = \frac{\rho C_p L_o (T_i - T_o)}{(\dot{q}''_{\neq t})^2} \quad (3)$$

Tawarson 등⁷⁾은 고분자 물질의 발화시간 예측 식으로 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$1/(t_{ig})^{1/2} = \dot{q}''_n / (\Delta T_{ig})(\pi k \rho C_p / 4)^{1/2} = \dot{q}''_n / TRP \quad (4)$$

$$\sqrt{\frac{1}{t_{ig}}} = \frac{\sqrt{4/\pi}(\dot{q}'' - CHF)}{TRP} \quad (5)$$

따라서 발화시간은 임계열흐름(CHF : Critical Heat Flux), 열전도도, 비열, 밀도, 발화온도 등에 의존한다. 또한 발화시간은 화염전파속도와 상관관계를 갖고 있으며, 발화시간이 증가하면 화염전파속도는 감소하면서 화재성장을 감소시킨다. 한편 TRP는 재료의 두께에 의존하면 재료의 두께가 감소할 수록 TRP는 감소하나다.

Harada⁸⁾ 목재에 대한 발화시간 예측 식을 다음과 같이 제시하였다.

$$t_{ig} = \pi k \rho C_p \left(\frac{T_{ig} - T_0}{2\delta I} \right)^2 \quad (6)$$

$$t_{ig} = \frac{14.4 k \rho C_p}{I^3} + 8.64 \quad (7)$$

여기서 δ 는 복사(emissivity), I 는 방사(irradiance)이다.

최근 Hakkarainen 등⁹⁾은 외관 나무내장재에 대한 중간규모(Intermediate Scale)와 큰 규모(Large Scale) 시험을 통해 평균화염전파속도(V_{ave}), 평균화염 높이($X_{f,ave}$), 평균열방출량

(HRR_{ave}) 그리고 발화시간(t_{ig})를 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$x_{f,ave}(cm) = 0.28HRR_{ave}(kW) + 8 \quad (8)$$

$$t_{ig} = \frac{x_{f,ave}}{V_{ave}} \quad (9)$$

이와 같이 여러 문헌들을 고찰하였을 때 발화시간에 영향을 인자를 함수로 표시하면 다음과 같다.

$$t_{ig} = \psi(\Delta q'', \rho, c_p, k, T_{ig}, T_o, L) \quad (10)$$

이상에 자료들을 이용하여 발화 온도를 예측할 수 있는 식을 제시 하고자 한다.

3. 응답표면방법론(RSM) 및 원인결과 선도

3-1. 다중회귀 (Multiple Regression)

자연현상은 여러 가지 변수(독립변수)가 변화함으로 해서 응답(종속변수, response 혹은 solution variable)에 미치는 영향이 여러 가지 상태로 나타난다. 이러한 변수와 응답(response)의 관계를 구명하기 위해서 학문이 발달해 왔고[3,4], 우리가 여기서 연구하고자 하는 화재의 잠재적 위험성 평가도 이러한 변수와 응답의 관계를 구명하는 연구분야이다.

이러한 관계를 보다 정량적으로 표시하기 위해서 사용된 방법으로 수학과 통계학적인 방식에 의거해서 종속변수와 독립변수의 관계식을 구하는 방법을 다중회귀(multiple regression)이라 하며, 선이 아니고 면으로 표시되는 함수관계를 구하는 방식을 응답표면방법론(RSM, response surface methodology)라 한다. 이 방법론은 그 동안 최적 조건을 구하는 방식 또는 최적화(optimization)에 널리 이용되어 왔다.

제시한 모델을 다항식의 일반적인 형태로 표시하면 다음과 같은데,

$$Y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + \dots + px^p + \dots \quad (11)$$

여기서 각 매개변수 a, b, c, d, e, \dots 을 추산하기 위해 최소화(Minimization) 방법을 이용하였다.

본 연구에서는 위에서 제시한 방법론을 이용하여 화재잠재위험성에 영향을 주는 인자들을 이용하여 위험성 평가를 연구하고자 한다.

제시한 모델들 가운데 추산식에 의해 추산된 추산값과 실험값의 차이 정도를 알고 가장 정확한 추산식을 찾기 위해 A.A.P.E.(average absolute percent error)와 A.A.D.(average absolute deviation)를 사용하였으며 구하는 식은 다음과 같다. 또한 통계 분석을 위해 결정값의 표준편차와 표본 결정계수를 사용하였다¹⁰⁾.

3-2. 원인 결과 선도

화재의 잠재위험성을 평가하기 위해 필요한 여러 인자들에 대해 원인 결과 선도(cause-effect diagram)로 나타낼 수 있으며, 또한 각 위험 특성에 대해 각 입력 파라미터를 선정할 수 있다. Fig. 1에서 선도를 나타내었다.

원인 결과 선도를 이용하면 화재의 잠재 위험성평가를 위한 각 각의 위험성 고찰뿐만 아니라 각 위험성 인자들의 상호 관계도 용이하게 고찰할 수 있다.

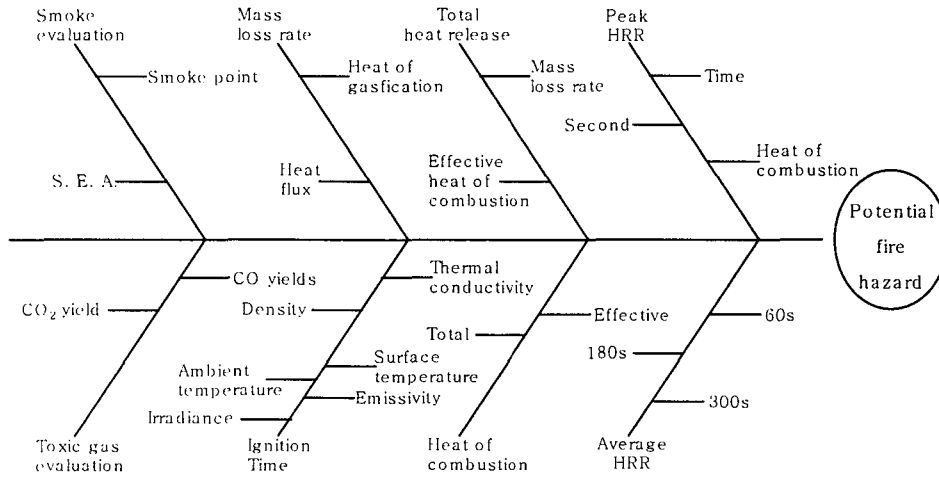


Fig. 1. A cause-effect showing the various parameters affecting the potential fire hazard.

4. 발화시간 예측 결과 및 고찰

4-1. 건축내장재의 발화점 예측

발화시간의 예측은 화재를 예방하기 위해서 중요한 연구가 된다. 최근 Ostman 등¹¹⁾이 연구한 자료를 이용하여 발화시간을 예측할 수 있는 모델을 제시하고자 한다. 발화시간 예측식은 다음과 같다.

$$Y = -3.907 + 2.232X_1 + 0.738X_2 - 2.022 \times 10^{-3}X_3 - 0.115X_1X_2 - 2.111 \times 10^{-3}X_1X_3 + 8.976 \times 10^{-4}X_2X_3 + 1.308 \times 10^{-4}X_1X_2X_3 \quad (12)$$

여기서 Y는 발화시간, X₁는 총열방출율, X₂는 질량손실율, X₃는 평균밀도이다. 식 12)를 이용하여 연소시간에 의한 발화시간을 예측한 결과 AAPE가 10.96, AAD가 1.91 초, 표준 편차 2.89 그리고 결정계수(R²)는 0.920으로서 문헌값과 예측값은 일치하고 있다.

4-2. Gypsum Plasterboard의 발화시간 예측

내장재(gypsum plasterboards)의 화재 위험특성가운데 하나인 발화시간을 예측하기 Tsantraidis 등¹²⁾의 문헌을 이용하였다. 이 문헌에서 각국에서 사용되고 있는 내장재를 이용하여 Charring 시간과 발화시간에 대한 실험 및 경험식을 제시하였다. 본 연구에서도 이들 자료를 이용하여 발화시간을 보다 정확히 예측할 수 있는 식을 제시하고자 한다. 이들 문헌자료를 Table 1에 나타내었다.

발화 시간을 예측하기 위해 여러 예측 모델을 검토한 결과 다음과 같은 최적화된 예측식을 제시한다.

$$Y = -107.414 + 4.105X_1 + 0.181X_2 - 3.369 \times 10^{-3}X_1X_2 - 9.758 \times 10^{-8}X_1^2X_2^2 \quad (13)$$

여기서 Y는 발화시간, X₁은 재료의 두께, X₂는 밀도이다.

식 13)를 이용하여 발화시간을 예측한 결과 AAPE가 4.35, AAD가 1.57, 표준 편차

2.09 그리고 결정계수(R^2)는 0.973으로서 재료의 상호특성을 이용한 경우 문헌값과 예측값은 보다 일치하고 있다.

Table 1. Tested gypsum plasterboard and test result

Country of origin	Type	Thickness [mm]	Density [kg/m^3]	Average weight [kg/m^2]	Time to ignition [s]
Sweden	Floor overiay	12.5	1173	14.7	86
Sweden	A	12.3	742	9.23	37
Sweden	F	15.4	864	13.3	53
Canada	X	13.2	757	10.0	41
Canada	X	13.1	682	8.9	32
Canada	X	16.0	721	11.5	37
Canada	X	15.9	713	11.4	35
USA	X	15.9	682	10.9	31
USA	X	24.9	716	17.9	34
USA	X	15.8	676	10.6	35
USA	C	12.9	695	9.0	33
USA	Regular	12.4	638	7.9	27
USA	Moisture Resistant	12.5	651	8.1	29
New Zealand	Fire rated	9.5	748	7.1	35
New Zealand	Fire rated	12.4	787	9.8	43
New Zealand	Fire rated	16.0	843	13.5	49
New Zealand	Fire rated	19.0	835	15.9	41
Japan	Fire proof	9.3	708	6.6	29
Japan	Fire proof	9.2	705	6.5	37
Japan	Fire proof	9.2	741	6.8	38

Type A : Ordinary plasterboard according to prEn 520
 Type F : improved core cohesion according to prEn 520
 Type X : fire rated quality in the USA
 Type C : improved fire rated quality in the USA
 Fire proof, improved paper quality for lower ignitability

5. 결 론

표면응답방법론(Response Surface Methodology : RSM)을 이용하여 화재특성에 영향을 주는 인자들과 인자들간의 상호작용을 고려한 화재 특성인 발화시간(time to ignition)을 정량적으로 예측할 수 있는 방법론을 제시하여 다음과 같은 종합적인 결론을 얻었다.

- 1) 내장재의 총열방출율, 질량손실율, 평균밀도를 이용하여 발화시간을 예측할 수 있는 모델을 제시하였다.
- 2) 발화시간 예측식은 다음과 같다.

$$Y = -3.907 + 2.232X_1 + 0.738X_2 - 2.022 \times 10^{-3}X_3 - 0.115X_1X_2 - 2.111 \times 10^{-3}X_1X_3 + 8.976 \times 10^{-4}X_2X_3 + 1.308 \times 10^{-4}X_1X_2X_3$$

여기서 Y는 발화시간, X₁는 총열방출율, X₂는 질량손실율, X₃는 평균밀도이다.

- 3) 내장재(Gypsum PlasterBoards)의 발화 시간을 예측식은 다음과 같다.

$$Y = -107.414 + 4.105X_1 + 0.181X_2 - 3.369 \times 10^{-3}X_1X_2 - 9.758 \times 10^{-8}X_1^2X_2^2$$

여기서 Y는 발화시간, X₁은 재료의 두께, X₂는 밀도이다.

- 4) 표면응답방법론(Response Surface Methodology : RSM)을 이용하여 화재의 잠재적 위험성평가가 가능해 졌다.

참 고 문 헌

1. NFPA : " SFPE Handbook Fire Protection Engineering", National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts(1995).
2. M. Brandyberry and G.E. Apostolakis : " Response Surface Approximation of Fire risk Analysis Computer Code", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 29, pp.1534-184(1990).
3. G.E.P. Box and N.R. Draper : "Empirical Model-Building and Response Surface", John-Wiley & Sons, Inc.(1987).
4. D.M. Ha and S.K. Lee : "A Study Flash Point of a Flammable Substances - Focused on Prediction of Flash points in Ternary System by Solution Theory-", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., vol. 15, No. 3, pp.14-20(0001).
5. G. Gallina et al. ;"Application of Cone Calorimeter for the Assessment of Class of Flame Retardents for Polypropylene", Fire and Materials, Vol. 22, pp.15-18(2000).
6. G.W.H. Silcock and T.J. Shields : "A Protocol Analysis of Time-to-Ignition Data From Bench Scale Tests", Fire Safety Journal, Vol. 24, pp. 75-95(1995).
7. A. Tewarson et al. : "Flammability Evaluation of Clean Room Polymeric Materials for the Semiconductor Industry", Fire and Materials, Vol. 25, pp. 31-42(2001).
8. T. Harada : " Time to Ignition, Heat Release Rate and Fire Endurance Time of Wood in Cone Calorimeter Test, Fire and Materials, Vol. 25, pp. 161-167(2001).
9. T. Hakkarainen and T. Oksanen : " Fire Safety Assessment of Wooden Facades" Fire and Materials, Vol. 26, pp.7-27(2002).
10. D.M. Ha : "Interrelationship of Fire and Explosion Properties for Chlorinated Hydrocarbons", J. of the Korean Institute for Industrial Safety, Vol. 17, No. 4, pp.126-132(2002).
11. B.A. Ostman and T.D. Tsantraidis : " Correlation between Cone Calorimeter Data and Time to Flashover in the Room Fire Test", Fire and Materials, Vol. 19, pp. 205-209(1994).
12. T.D. Tsantraidis et al. : " Fire Protection of Wood by Different Gypsum Plasterboards", Fire and Materials, Vol. 23, pp.45-48(1999).