

내장재의 발화시간, 열방출율 및 최대화염 높이의 예측을 위한 반응표면방법론의 활용성 고찰

The Applicable Investigation of Response Surface Methodology(RSM) for the Prediction of the Ignition Time, the Heat Release Rate and the Maximum Flame Height of the Interior Materials

하 동 명[†]

Dong-Myeong Ha[†]

세명대학교 보건안전공학과
(2006. 3. 9. 접수/2006. 5. 22. 채택)

요 약

본 연구의 목적은 건축내장재의 발화시간과 열방출율을 예측하고자 한다. 반응표면방법론(RSM)과 문헌 자료를 사용하여 건축내장재의 새로운 발화시간과 열방출율의 예측식을 제시하였다. 재료의 두께와 밀도에 의한 발화시간의 예측값과 문헌값의 A.A.P.E.는 4.35초, A.A.D.는 1.57초 그리고 상관계수는 0.987이었다. 버너의 폭과 열량에 의한 순열방출율의 예측값과 문헌값의 상관계수는 0.983이었으며, 버너의 폭과 열량에 의한 총열방출율의 예측값과 문헌값의 상관계수는 0.999였다. 또한 버너의 폭과 열량에 의한 최대 화염높이의 상관계수는 0.999로서, 제시한 예측식들에 의한 예측값은 문헌값과 일치하였다.

ABSTRACT

The aim of this study is to predict the ignition times and the HRR(heat release rate) for building interior materials. By using the literature data and RSM(response surface methodology), the new equations for predicting the ignition time and the HRR of building interior materials are proposed. The A.A.P.E.(average absolute percent error) and the A.A.D.(average absolute deviation) of the reported and the calculated ignition times by means of the thickness and the density were 4.35 sec and 1.57 sec, and the correlation coefficient was 0.987. The correlation coefficient of the reported and the calculated the net HRR by means of burner width and power was 0.983. Also the correlation coefficient of the reported and the calculated the total HRR by means of burner width and power was 0.999. The correlation coefficient of the reported and the calculated the maximum flame height by means of burner width and power was 0.999. The values calculated by the proposed equations were in good agreement with the literature data.

Keywords : Building interior materials, Ignition times, Heat release rate(HRR), RSM(response surface methodology), Maximum flame height

1. 서 론

최근 화재에 관련된 위험성 평가는 어떤 연구 분야보다 연구자들의 많은 관심사가 되고 있다. 화재 위험성 평가는 화재 위험으로 발생하는 인명과 재산 손실 등의 결과 확률을 계산하는 것으로 구성된다. 화재위험성평가 모델은 핵 발전 산업에서 사용되기 시작하여

화학산업 등 다양한 분야로 전개되었고, 최근에는 건물 화재의 성능위주설계(PBD : performance-based design)에 많이 응용되고 있다. 정확한 성능위주설계를 위해서 화재공학 기술자들은 항상 물리, 화학 그리고 독성 연구뿐만 아니라, 성능위주설계에 관여되는 많은 변수들에 대한 연구를 진행하고 있다.

일반적으로 화재위험성 평가를 위한 화재 시나리오에 관련되는 매개변수(parameter)는 수 없이 많지만 대표적으로 화재지연특성, 열방출율(HRR), 연소생성물의

[†]E-mail: hadm@semyung.ac.kr(www.chollian.net/~hadm)

특성, 플래시오버, 발화시간, 화염전파속도(flame spread rate) 등을 들 수 있다. 그러나 화재 시나리오에서 출화기에 관련된 매개변수로는 방화설비의 특성, 점화원, 연료의 특성 및 조건, 환기조건, 입주자의 특성 및 위치, 구조물과 기타 장비의 조건 등을 들 수 있다.¹⁾

화재는 여러 가지 특성들이 복합적으로 작용하는 복잡한 현상이다. 그럼에도 불구하고 화재의 위험성을 평가하는 전통적인 화재 시험은 총괄적인 화재위험성을 평가하기보다는 화염전파특성, 발화성(연소성), 소화의 용이성, 내화성, 연기의 특성, 독성 등의 개별적 측정에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이렇게 단순히 개별적인 화재 특성만을 파악하다 보면 한 가지 시험에서 측정된 특성이 다른 시험에서는 정반대의 부정적인 작용을 하는 모순이 발생하기도 한다. 그러므로 화재에 관련된 특성을 파악하기 위해서는 단일 매개변수에 의해서도 특성 예측이 가능할 경우도 있으나, 일반적으로 매개변수간의 상호작용에 의한 영향도 알아야만 보다 정확한 위험성평가가 이루어질 수 있다. 최근에는 화재 위험성평가를 위해 매개변수 각각의 연구뿐만 아니라, 변수들 간의 상호 작용에 대한 연구도 진행되고 있으며, 또한 위험성평가에 사용된 화재모델의 불확실성에 대한 연구도 함께 진행되고 있다.^{2,3)}

본 연구에서는 여러 가지 독립변수가 변화함으로 해서 응답(종속변수)에 미치는 영향을 고찰하는 방법인 반응표면방법론(RSM : response surface methodology)^{3,5)}을 이용하여, 건축 내장재의 발화시간, 열방출율 그리고 최대화염 높이를 예측할 수 있는 모델을 제시하여 정량적 위험성평가를 하고자 한다. 제시한 방법론을 이용하여 아직까지 밝혀지지 않는 다른 물질의 화재 특성 예측에 도움을 주고, 새로운 내장재의 연소 특성에 대해 실험을 통해 얻고자 하는 경우 실험의 효율성을 높일 수 있는 방법론으로 제시하고자 한다. 또한 제시된 반응표면방법론을 통해 모델의 불확실성(uncertainty) 연구에 이용하여 성능위주설계에 적용하는데 목적이 있다.

2. 발화시간 및 열방출율에 영향을 주는 인자

2.1 발화시간에 영향을 주는 인자

가연성물질의 잠재적 위험성은 많은 인자, 즉 발화성, 표면 화염전파속도(rate of surface flame spread), 열방출율(peak, average, total), 질량손실율, 연기평가, 독성가스 평가 등을 들 수 있다. 이들 자료는 실험을 통하거나 이론식을 통해 직·간접적으로 얻을 수 있는

데 특히 외부 열 유동(external heat flux)의 함수로서 열방출율과 발화시간을 얻을 수 있다.^{6,7)} 일반적으로 화재시나리오를 위해 알아야 할 매개변수들로는 발화시간, 피크(peak) 열방출율 및 시간, 2차 피크 열방출율 및 시간, 평균 열방출율, 총 열방출율, 평균 유효연소열(average effective heat of combustion), 질량손실율, 화염의 온도, 속도 및 높이, 플래시오버 시간, 화재하중, 평균 연기광도범위(SEA), 평균 일산화탄소 및 이산화탄소 수득률 그리고 한계산소지수(limiting oxygen index) 등을 들 수 있다.

최근 내장재의 다양화로 인해 화재 예측에 대한 새로운 연구가 활발히 진행되고 있으며, 화재시나리오 작성에 필요한 여러 매개변수들 가운데 하나인 발화시간은 정량적 위험성평가에 반드시 필요한 자료로서, 발화시간에 영향을 주는 인자들은 열전도도, 밀도, 비열, 발화에서 표면온도, 주위온도, 복사율, 방사율, 증발열 등을 들 수 있다.

2.2 발화시간 예측 식

화재의 위험정도를 나타내기 위한 화재성능지수(FPI: fire performance index)는 Peak 열방출율(peak HRR)과 발화시간의 함수로 나타내고 있다.⁸⁾

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

따라서 발화시간은 위험정도를 나타내는데 중요한 역할을 하고 있다.

Silcock 등⁹⁾은 Bench Scale 실험으로부터 얻은 발화시간 자료 분석을 통해 다음과 같은 발화시간 예측식을 제시하였는데, 두꺼운 재료의 발화시간 예측식은 다음과 같다.

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

또한 두께가 얇은 재료에 대해서는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$t_{ig} = \frac{\rho C_p L_o (T_i - T_o)}{q''} \quad (3)$$

여기서 t_{ig} 는 발화시간, k 는 열전도도, ρ 는 밀도, C_p 는 비열, T_i 는 발화온도, T_o 는 주위온도, q'' 는 복사열유속 그리고 L_o 는 자료의 두께이다.

Tawarson 등¹⁰⁾은 고분자 물질의 발화시간 예측 식으로 다음과 같은 식을 제시하였다.

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

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

여기서 $TRP = \Delta T_{ig} \sqrt{k \rho c_p}$ 로 표현된다.

따라서 발화시간은 임계열흐름(CHF : critical heat flux), 열전도도, 비열, 밀도 그리고 발화온도에 의존함을 알 수 있으며, 화염전파속도와 상관관계를 갖고 있다. 발화시간이 증가하면 화염전파속도는 감소하면서 화재성장을 감소시킨다. 한편 TRP는 재료의 두께에 의존하면 재료의 두께가 감소할수록 TRP는 감소한다.

Harada는¹¹⁾ 목재에 대한 발화시간 예측 식을 다음과 같이 제시하였다.

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

여기서 δ 는 복사율(emissivity), I 는 방사율(irradiance)이다.

최근 Hakkarainen 등¹²⁾은 외관 나무 내장재에 대한 중간규모(intermediate scale)와 큰 규모(large scale) 시험을 통해 평균화염전파속도(V_{ave}), 평균화염 높이($x_{f,ave}$), 평균열방출율(HRR_{ave}) 그리고 발화시간(t_{ig})을 다음과 같은 관계식으로 나타내었다.

$$x_{f,ave} \text{ (cm)} = 0.28 HRR_{ave} \text{ (kW)} + 8 \quad (7)$$

$$t_{ig} = \frac{x_{f,ave}}{V_{ave}} \quad (8)$$

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

$$t_{ig} = \Psi \{ \Delta q'', \rho, c_p, k, T_{ig}, T_0, L, \text{flame height} \} \quad (9)$$

2.3 내장가구의 열방출율에 관련된 인자

발화 후 화재성장, 감지, 억제 과정의 화재위험성평가를 수행하기 위해서는 각 과정에서 고려되는 각각의 개별 변수뿐만 아니라, 그들 간의 상호작용도 고려되어야 한다.

내장가구의 변수들은 가구의 물질특성과 발화원으로 나눌 수 있는데, 물질의 특성으로 발화 지연성, 열방출 속도, 연소 생성물의 특성 등을 들 수 있다. 이 가운데 열방출 속도는 내장가구 화재연구를 위해 실시하는 화재위험성평가에 매우 중요한 변수이다. 일반적으로 변수들은 실험적으로 결정하고 있으나, 정확하지 않은 경우가 많다.

그 동안 여러 문헌을 검토한 결과 열방출율에 관련된 변수들로는 밀도, 열전도도, 비열, 대기 중에서 산소의 질량 비율, 연료량론비에서 산소량, 증발율, 연소열, 외부 열흐름 등을 들 수 있다.

3. 화재위험성평가를 위한 반응표면방법론

3.1 다중회귀분석을 이용한 반응표면방법론

자연현상은 여러 가지 변수(독립변수)가 변화함으로써 응답(종속변수, response 혹은 solution variable)에 미치는 영향이 여러 가지 상태로 나타난다.^{3,5)} 이러한 변수와 응답의 관계를 구명하기 위해서 학문이 발달해 왔고, 우리는 화재의 잠재적 위험성평가를 위해 변수와 응답의 관계를 응용하고자 한다.

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 반응표면방법론(RSM)라 한다. 이 방법론은 그 동안 최적조건(optimum condition)을 구하는 방식 또는 최적화(optimization)로 널리 이용되어 왔다.

여러 인자 x_1, x_2, x_3, \dots 이 반응(response) Y 에 미치는 영향을 함수 관계로 나타내면 다음과 같다.

$$Y = \Phi(x_1, x_2, x_3, \dots) \quad (10)$$

이를 다항식의 일반적인 형태로 표시하면 다음과 같은데,

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

여기서 각 변수 x_1, x_2, x_3, \dots 에 대해서 a, b, c, d, e 를 회귀파라미터(regression parameter)라 한다.

만일 반응 Y 가 두 개의 변수 x_1 과 x_2 의 함수 관계일 때 각 독립변수와 상호작용변수를 고려한 경우에는 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$Y = a + bx_1 + cx_2 + dx_1^2 + ex_2^2 + fx_1x_2 + gx_1^2x_2 + hx_1x_2^2 + kx_1^2x_2^2 + lx_1^3x_2 + mx_1x_2^3 + nx_1^3 + px_2^3 + \dots \quad (12)$$

여기서 x_1, x_2, x_1^3, x_2^2 그리고 x_1^3, x_2^3 등은 각 x_1 과 x_2 에 의한 독립변수 변화를 나타내고 $x_1x_2, x_1^2x_2, x_1x_2^2, x_1^2x_2^2$ 등은 변수간의 상호작용(interaction)을 나타낸다.

예측값 Y 와 실험값 y 와의 차이를 오차(error) e 로서 표시한다면 다음과 같다.

$$Y = y + e = \Phi(x_1, x_2, x_3 \dots) + e \quad (13)$$

여기서 단지 e 로 표시된 오차를 보다 정확히 규정지면 각 성분 에 의한 랜덤오차(random error)로 분리할 수 있다.

제시한 모델의 각 매개변수 a, b, c, d, e, \dots 를 추산하기 위해 최소화 방법을 이용하였다. 이 방법은 S.S.D.(sum of square of deviation)를 구하기 위해 각 매개변수를 편미분하여 이를 영(zero)으로 두어서 얻어지는 정규식(normal equation)의 해를 구하면 된다.

최근 H_a^3 는 화재의 잠재위험성을 평가하기 위해 위험성평가에 필요한 여러 인자들을 조사하여 원인 결과 선도(cause-effect diagram)로 나타내었으며, 이는 화재위험성에 대해 각 위험 특성에 고려하고 각 위험 특성에 관여되는 각각의 입력 매개변수들을 파악하여 도표로 나타냄으로서 화재 위험성을 이해할 수 있다.³⁾

3.2 예측값과 문헌값의 비교 방법

제시한 모델들에 의해 계산된 예측값과 문헌값의 차이 정도를 알기 위해 통계학에서 많이 이용하는 A.A.P.E.(average absolute percent error)와 A.A.D.(average absolute deviation)를 사용하였으며, 구하는 식은 다음과 같다.^{3,4,14)}

$$A.A.P.E. = \frac{\sum \frac{|H_{est.} - H_{ref.}|}{H_{ref.}}}{N} \times 100 \quad (14)$$

$$A.A.D. = \frac{\sum |H_{est.} - H_{ref.}|}{N} \quad (15)$$

여기서 $H_{est.}$ 는 예측식에 예측된 연소특성값, $H_{ref.}$ 는 문헌값, N 은 자료(data)수이다.

또한 측정값과 예측값의 통계 분석을 위해 표준편차, 표본 결정계수 그리고 상관계수를 사용하였다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - y_i)^2}{n - 1}} \quad (16)$$

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (17)$$

$$r = \pm \sqrt{\frac{SSR}{SST}} \quad (18)$$

여기서 S 는 결정값의 표준오차, r^2 는 표본 결정계수, r 은 상관계수, SSR 은 회귀에 의한 제곱합(sum of squares due to regression), SST 는 총 제곱합(total sum of squares)이다.

4. 발화시간, 열방출율 및 최대화염 높이의 예측

4.1 Gypsum Plasterboard의 발화시간 예측

내장재(gypsum plasterboards)의 화재 위험특성 가운데 하나인 발화시간을 예측하기 Tsantraidis 등의 문헌을 이용하였다.¹⁵⁾ 이 문헌에서는 각국에서 사용되고 있는 내장재를 이용하여 Charring 시간과 발화시간에 대한 실험 및 경험식을 제시하였다.

본 연구에서도 이들 자료를 이용하여 발화시간을 정확히 예측할 수 있는 식을 제시하고자 한다. 발화시간을 예측하기 위해 여러 예측 모델을 검토한 결과 다음과 같은 최적화된 예측식을 제시한다.

$$t_{ig} = -107.414 + 4.105X_1 + 0.181X_2 - 3.369 \times 10^{-3}X_1X_2 - 9.758 \times 10^{-8}X_1^2X_2^2 \quad (19)$$

여기서 t_{ig} 는 발화시간, X_1 은 재료의 두께, X_2 는 밀도이다.

Table 1에서 알 수 있듯이 식 (19)를 이용하여 발화시간을 예측한 결과 A.A.P.E.는 4.35%, A.A.D.는 1.57초, 표준 편차는 2.09, 결정계수(r^2)는 0.974 그리고 상관계수(r)는 0.987로서 재료의 상호 특성을 고려한 경우 예측값은 문헌값과 일치하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 반응표면방법론을 이용하여 다른 내장재들의 발화시간 연구에 사용이 가능하다고 본다.

4.2 열방출율(HRR) 및 최대화염 높이 예측

화재에서 초기화재의 특성을 파악하는 것은 화재 예방을 연구하는 데 무엇보다 중요하다. 화재의 잠재위험성을 평가하기 위해서는 화염높이, 천정의 화염도달 시간, 순열방출율(net HRR) 및 총열방출율(total HRR) 그리고 열방출율 도달 시간에 대한 실험 및 경험식 연구가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 ISO 9705의 실험방법에 의한 vinyl ester/glass 마감재의 화재 위험 특성을 예측할 수 있는 식을 제시하고자 한다. 이들 문헌 자료¹⁶⁾를 Table 2에 나타내었다.

문헌자료에서 순열방출율 예측을 위해 버너의 폭과 버너의 열량을 이용하여 다음과 같은 예측식을 제시

Table 1. Comparison between the predicted and the reference values for the ignition time of gypsum plasterboard

Country of origin	Type	Thickness [mm]	Density [kg/m ³]	Average weight [kg/m ²]	Ignition time [s]	Predicted ignition time [s]
Sweden	Floor overlay	12.5	1173	14.7	86	85.9
Sweden	A	12.3	742	9.23	37	38.5
Sweden	F	15.4	864	13.3	53	50.1
Canada	X	13.2	757	10.0	41	40.4
Canada	X	13.1	682	8.9	32	31.9
Canada	X	16.0	721	11.5	37	36.9
Canada	X	15.9	713	11.4	35	36.1
USA	X	15.9	682	10.9	31	33.3
USA	X	24.9	716	17.9	34	33.3
USA	X	15.8	676	10.6	35	32.7
USA	C	12.9	695	9.0	33	33.3
USA	Regular	12.4	638	7.9	27	26.2
USA	Moisture Resistant	12.5	651	8.1	29	27.9
New Zealand	Fire rated	9.5	748	7.1	35	38.1
New Zealand	Fire rated	12.4	787	9.8	43	43.8
New Zealand	Fire rated	16.0	843	13.5	49	47.7
New Zealand	Fire rated	19.0	835	15.9	41	43.7
Japan	Fire proof	9.3	708	6.6	29	32.5
Japan	Fire proof	9.2	705	6.5	37	32.0
Japan	Fire proof	9.2	741	6.8	38	37.0
A.P.P.E	-	-	-	-	-	4.35
A.A.D.	-	-	-	-	-	1.57

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

하였다.

$$HRR_{Net} = -153.180 + 4.044X_1 + 5.792X_2 - 0.104X_1X_2 \quad (20)$$

여기서 HRR은 순열방출율, X_1 은 버너 폭, X_2 는 버너 열량이다.

식 (20)을 이용하여 순열방출율을 예측한 결과, 예측값과 문헌값의 차이에 있어 A.A.P.E.는 21.10 kw, A.A.D.는 5.01 kw, 표준편차는 7.80, 결정계수는 0.966 그리고 상관계수는 0.983이므로서 예측값은 문헌값과 일치하였다.

총열방출율 예측 역시 버너의 폭과 버너의 열량을

이용하여 다음과 같은 최적화된 예측식을 얻었다.

$$HRR_{Total} = -153.180 + 4.044X_1 + 5.792X_2 - 0.104X_1X_2 \quad (21)$$

여기서 HRR_{Total} 은 총열방출율, X_1 은 버너 폭, X_2 는 버너 열량이다.

식 (21)을 이용하여 총열방출율을 예측한 결과, A.A.P.E.는 7.10 kw, A.A.D.는 5.01 kw, 표준편차는 7.80, 결정계수는 0.997 그리고 상관계수는 0.999로서 예측값은 문헌값과 일치하고 있다.

Table 3에서는 문헌에 나와 있는 자료 가운데 HRR이나, Non FR을 제외한 9개의 측정 자료를 이용한 최

Table 2. Summary of corner test result for vinyl ester/glass composites

Burner width [cm]	Burner power [kw]	Maximum spread Hgt[cm]	Time to reach top [s]	Average spread rate [cm/s]	Peak HRR [kw]		Time of HRR peak [s]
					Total	Net	
23	31	187	∞	0	—	—	—
23	31	190	∞	0	45	14	1250
23	63	244	410	0.60	152	89	1100
23	62	244	410	0.60	152	90	1350
38	31	116	∞	0	42	11	1000
38	31	114	∞	0	71	40	1200
38	61	244	1280	0.19	112	51	1100
38	62	244	1390	0.175	ca.116	54	1200
38	145	244	167	1.46	271	126	375
38	148	244	168	1.45	266	118	650
38	148, Non FR, coated	minimal	—	—	162	14	1600
38	147, Non FR	244	120	2.0	576	429	175

Table 3. Comparison between the predicted and the reference values for the peak net HRR and the peak total HRR

Burner width [cm]	Burner power [kw]	Maximum spread Hgt[cm]	Peak HRR [kw]		Predicted peak HRR [kw]	
			Total	Net	Total	Net
23	31	190	45	14	45.1	14.1
23	63	244	152	89	153.7	90.7
23	62	244	152	90	150.3	88.3
38	31	116	42	11	57.3	25.3
38	31	114	71	40	57.3	25.3
38	61	244	112	51	112.2	52.4
38	62	244	ca.116	54	114.0	53.3
38	145	244	271	126	266.0	120.7
38	148	244	266	118	271.5	123.0
A.A.P.E.	-	-	-	-	7.09	20.49
A.A.D.	-	-	-	-	5.01	4.98

적화된 모델인 식 (20)과 식 (21)에 의한 예측값과 문헌값을 각각 비교하여 나타내었다.

또한 최대화염 높이를 버너의 폭과 버너의 열량을 이용하여 예측한 결과 다음과 같은 예측식을 얻었다.

$$\text{Flame}_{\text{Height}} = -403.752 - 12.855X_1 - 4.000X_2 + 0.305X_1X_2 - 2.519 \times 10^{-5}X_1^2X_2^2 \quad (22)$$

여기서 X_1 은 버너 폭, X_2 는 버너 열량이다.

식 (22)를 이용하여 화염높이를 예측한 결과 A.A.P.E.는 0.85 cm, A.A.D.는 1.78 cm, 표준편차는 2.38, 결정계수는 0.998 그리고 상관계수는 0.999로서 예측값은 문헌값과 정확히 일치하였다.

따라서 본 연구에서 제시한 반응표면방법론을 사용하여 발화시간, HRR, 화염높이 등의 화재 위험특성 평가가 가능해졌으며, 문헌에 제시된 실험 자료의 불확실성 고찰이 가능해짐으로서 신뢰도가 높은 자료의 사용이 가능해 졌다.

5. 결 론

반응표면방법론(RSM : Response Surface Methodology)을 이용하여 화재특성에 영향을 주는 인자들과 인자들 간의 상호작용을 고려하여 화재특성인 발화시간, 열방출을 그리고 최대화염 높이를 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 내장재의 발화시간에 영향을 주는 인자들은 열전도도, 밀도, 비열, 발화온도, 주위온도, 복사열유속, 재료의 두께, 화염높이 등을 들 수 있다.

2) 내장재(gypsum plasterboards)의 발화 시간 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.

3) Vinyl ester/glass 마감재의 화재특성인 순열방출율, 총열방출율 및 최대화염 높이의 예측식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} HRR_{Net} &= -153.180 + 4.044X_1 + 5.792X_2 - 0.104X_1X_2 \\ HRR_{Total} &= -153.180 + 4.044X_1 + 5.792X_2 - 0.104X_1X_2 \\ Flame_{Height} &= -403.752 - 12.855X_1 - 4.000X_2 \\ &\quad + 0.305X_1X_2 - 2.519 \times 10^{-5}X_1^2X_2^2 \end{aligned}$$

여기서 X₁은 버너 폭, X₂는 버너 열량이다.

4) 반응표면방법론(RSM)을 이용하여 제시한 예측식에 의한 결과는 문헌값과 일치함하였다. 따라서 RSM을 다른 내장재들의 잠재적 화재 위험성평가 방법으로 사용이 가능하다.

참고문헌

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. D. M. Ha, "A Study on the Prediction of Flashover time and Heat Release Rate(HRR) for Building Interior Materials", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 18, No. 3, pp.30-38(2004).
4. G. E. P. Box and N. R. Draper, "Empirical Model-Building and Response Surface", John-Wiley & Sons, Inc.(1987).
5. 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(2001).
6. C. J. Hilado, "Flammability Handbook for Plastics", 3rd ed., Technomic Publishing Company(1982).
7. J. H. Koo *et al.*, "Flammability Studies of Thermally Resistant Polymers Using Cone Calorimetry", Fire and Materials, Vol. 24, pp.209-218(2000).
8. 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).
9. G. W. H. Silcock and T. J. Shields, "A Protocol Analysis of Time-to-Ignition Data from Bench Scale Tests", Fire Safety Journal, Vol. 245, pp.75-95(1995).
10. A. Tewarson *et al.*, "Flammability Evaluation of Clean Room Polymeric Materials for the Semiconductor Industry", Fire and Materials, Vol. 25, pp.31-42(2001).
11. 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).
12. T. Hakkarainen and T. Oksanen, "Fire Safety Assessment of Wooden Facades", Fire and Materials, Vol. 26, pp.7-27(2002).
13. S. L. Thompson and G. E. Apostolakis, "A Response Surface Approximation Bench Scale Peak Heat Release Rate from Upholstered Furniture Exposed to Radiant Heat Sources", Fire Safety Journal, Vol. 22, pp.1-24(1994).
14. 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).
15. T. D. Tsantraidis *et al.*, "Fire Protection of Wood by Different Gypsum Plasterboards", Fire and Materials, Vol. 23, pp.45-48(1999).
16. T. Ohlemiller *et al.*, "Effect of Ignition Condition on Upward Flame Spread on a Composite Material in a Corner Configuration", Fire Safety Journal, Vol. 31, pp.331-344(1998).