

성능 위주 소방설계를 위한 반응표면방법론(RSM)의 응용에 관한 연구

하동명

세명대학교 보건안전공학과

A Study on Application of RSM(Response Surface Methodology) for Performance-based Fire Protection Design

Dong-Myeong Ha

Dept. of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University

1. 서론

최근 화재에 관련된 위험성 평가는 어떤 연구 분야보다 연구자들의 많은 관심사가 되고 있다. 화재 위험성평가는 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^{1,2)}.

본 연구에서는 어떤 현상을 규명하기 위해 공학 전반에 걸쳐서 사용되고 있는 방법 중하나인 반응표면방법론(RSM : response surface methodology)^{3,4)}을 이용하여, 건축 내장재의 발화시간, 열방출량 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 성능 위주설계에 적용하는데 목적이 있다.

2. 발화시간 및 열방출량에 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 있는데 특히 외부 열 유동(external heat flux)의 함수로서 열방출률과 발화시간

을 얻을 수 있다⁵⁾.

일반적으로 화재시나리오를 위해 알아야 할 매개변수들로는 발화시간, 피크(peak) 열 방출량 및 시간, 2차 피크 열방출량 및 시간, 평균 열방출량, 총 열방출, 평균 유효연소열(average effective heat of combustion), 질량손실량, 화염의 온도, 속도 및 높이, 플래시오버 시간, 화재 하중, 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 자료이다.

그 동안 여러 문헌에서 고찰한 결과 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 열방출량(peak HRR)과 발화시간의 함수로 나타내고 있다⁶⁾.

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

따라서 발화시간은 위험정도를 나타내는데 중요한 역할을 하고 있다.

Tawarson⁷⁾은 발화 개념을 이용하여 열이 전달되는 속도인 열적반응파라미터(TRP : thermal response parameter)를 발화온도, 주위온도, 열전도도, 비열 그리고 밀도에 함수로 다음과 같이 나타내었다.

$$TRP = \Delta T_{ig} \sqrt{k\rho c_p} \quad (2)$$

여기서 $\Delta T_{ig} (= T_{ig} - T_a)$ 는 주위 온도보다 높은 발화온도이며, TRP는 발화나 화염전파를 평가하는데 있어 공학 계산에 매우 유용한 매개변수이다.

Harada는⁸⁾ 목재에 대한 발화시간 예측 식을 다음과 같이 제시하였다.

$$t_{ig} = \pi k\rho c_p \left(\frac{T_{ig} - T_0}{2\delta I} \right)^2 \quad (3)$$

$$t_{ig} = \frac{14.4k\rho c_p}{I^3} + 8.64 \quad (4)$$

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

최근 Hakkarainen 등⁹⁾은 외관 나무 내장재에 대한 중간규모(intermediate scale)와 큰 규모(large scale) 시험을 통해 평균화염전파속도(V_{ave}), 평균화염 높이($x_{f,ave}$), 평균열 방출량(HRR_{ave}) 그리고 발화시간(t_{ig})을 다음과 같은 관계식으로 나타내었다.

$$x_{f,ave}(cm) = 0.28HRR_{ave}(kW) + 8 \quad (5)$$

$$t_{ig} = \frac{x_{f,ave}}{V_{ave}} \quad (6)$$

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

$$t_{ig} = \psi\{\Delta q', \rho, c_p, k, T_{ig}, T_o, L, \text{flame height}\} \quad (7)$$

3. 화재위험성평가를 위한 반응표면방법론

3.1 다중회귀분석을 이용한 반응표면방법론

자연현상은 여러 가지 변수(독립변수)가 변화함으로 해서 응답(종속변수, response 혹은 solution variable)에 미치는 영향이 여러 가지 상태로 나타낸다. 이러한 변수와 응답의 관계를 구명하기 위해서 학문이 발달해 왔고, 우리는 화재의 잠재적 위험성 평가를 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^{2,3,4,10}.

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

$$Y = \Phi(x_1, x_2, x_3, \dots) \quad (8)$$

이를 다항식의 일반적인 형태로 표시하면 다음과 같은데,

$$Y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + \dots + px^p + \dots \quad (9)$$

여기서 각 변수 x_1, x_2, x_3, \dots 에 대해서 a, b, c, d, e, \dots 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.

$$Y = a + bx_1 + cx_2 + dx_1^2 + ex_2^2 + fx_1x_2 + gx_1^2x_2 + hx_1x_2^2 + kx_1^2x_2^2 + lx_1^3x_2 + mx_1x_2^3 + nx_1^3 + px_2^3 + \dots \quad (10)$$

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 $x_1x_2, x_1^2x_2, x_1x_2^2, x_1^2x_1^2$ 등은 변수간의 상호작용(interaction)을 나타낸다.

제시한 모델의 각 매개변수 a, b, c, d, e, \dots 를 추산하기 위해 최소화(minimization) 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.

4. 발화시간, 열방출량 및 최대화염 높이의 예측

4.1 Gypsum Plasterboard의 발화시간 예측

내장재(gypsum plasterboards)의 화재 위험특성 가운데 하나인 발화시간을 예측하기 Tsantraidis 등의 문헌을 이용하였다¹¹⁾. 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.

$$t_{ig} = -107.414 + 4.105X_1 + 0.181X_2 - 3.369 \times 10^{-3}X_1X_2 - 9.758 \times 10^{-8}X_1^2X_2^2 \quad (11)$$

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

4.2 열방출량(HRR) 및 최대화염 높이 예측

화재에서 초기화재의 특성을 파악하는 것은 화재 예방을 연구하는 데 무엇보다 중요하다. 화재의 잠재위험성을 평가하기 위해서는 화염높이, 천정의 화염도달시간, 순수 열방출율(net HRR) 및 총 열방출율(total HRR) 그리고 열방출율 도달 시간에 대한 실험 및 경험식 연구는 반드시 필요하다.

본 연구에서는 문헌자료¹²⁾를 이용하여 ISO 9705의 실험방법에 의한 vinyl ester/glass 마감재의 화재 위험 특성을 예측할 수 있는 식을 제시하고자 한다.

문헌자료에서 순열방출량 예측을 위해 버너의 폭과 버너의 열량을 이용하여 다음과 같은 예측식을 제시하였다.

$$HRR_{Net} = -153.180 + 4.044X_1 + 5.792X_2 - 0.104X_1X_2 \quad (12)$$

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

식 (12)를 이용하여 순열방출량을 예측한 결과, 예측값과 문헌값의 차이에 있어 A.A.P.E.는 21.10kw, A.A.D.는 5.01kw, 표준편차는 7.80, 결정계수는 0.966 그리고 상관계수는 0.983으로서 문헌값과 예측값은 일치함을 보여주고 있다.

총열방출량 예측 역시 버너의 폭과 버너의 열량을 이용하여 다음과 같은 최적화된 예측식을 얻었다.

$$HRR_{Total} = -153.180 + 4.044X_1 + 5.792X_2 - 0.104X_1X_2 \quad (13)$$

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

식 (13)을 이용하여 총열방출량을 예측한 결과, A.A.P.E.는 7.10kw, A.A.D.는 5.01kw, 표준편차는 7.80, 결정계수는 0.997 그리고 상관계수는 0.999로서 예측값은 문헌값과 일치하고 있다.

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

$$Flame_{Height} = -403.752 - 12.855X_1 - 4.000X_2 + 0.305X_1X_2 - 2.519 \times 10^{-5}X_1^2X_2^2 \quad (14)$$

여기서 X_1 은 버너 폭, X_2 는 버너 열량이다.

식 (14)을 이용하여 화염높이를 예측한 결과, A.A.P.E.는 0.85cm, 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 응답표면방법론을 사용하여 발화시간, HRR, 최대 화염높이 등의 화재 위험특성 평가가 가능해졌으며, 문헌에 제시된 실험 자료의 불확실 고찰이 가능해짐으로서 신뢰도가 높은 자료의 사용이 가능해 졌다.

참고문헌

1. M. Brandyberry and G.E. Apostolakis, "Response Surface Approximation of Fire risk Analysis Computer Code", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 29, pp.154-184(1990).
2. 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).
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(2001).
5. J.H. Koo et al., "Flammability Studies of Thermally Resistant Polymers Using Cone Calorimetry", Fire and Materials, Vol. 24, pp.209-218(2000).
6. G. Gallina et. a, "Application of Cone Calorimeter for the Assessment of Class of Flame Retardents for Polypropylene", Fire and Materials, Vol. 22, pp.15-18(2000).
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 Reekase 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. 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).
11. T.D. Tsantraidis et al., " fire Protection of Wood by Different Gypsum Plasterboards", Fire and Materials, Vol. 23, pp.45-48(1999).
12. T. Ohlemiller et al., " Effect of Ignition Condition on Upward Flame Spread on a Composite Material in a Conner Configuration", Fire Safety Journal, Vol. 31, pp.331-344(1998).