

화재안전의 성능위주설계(Performance-based Design)를 위한 RSM의 응용

하동명 · 이수경*

세명대학교 안전공학과 · *서울산업대학교학교 안전공학과

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.

본 연구에서는 표면응답방법론(Response Surface Methodology : RSM)을 이용하여 화재특성에 영향을 주는 인자들과 인자들 간의 상호작용을 고려하여 열방출률과 화염높이의 예측 방법을 연구하고자 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. 화재위험성 평가에 관련된 인자

우리가 취급하는 재료의 화재 위험성 평가에 있어, 중요한 점은 특정한 화재 조건에서 재료의 인화성, 착화성, 열방출량, 열방출속도, 연기의 특성, 독성 등의 변수 등에 대해 각 각의 특성뿐만 아니라 상호관계를 검토하여 종합적으로 평가해야하는 것이다.

그러나 이는 간단히 해결할 수 없는 경우가 허다하다. 왜냐하면, 우리가 취급하는 물질은 너무나 다양하고, 복잡하기 때문이다.

방화공학에서 열화학적 파라미터인 연소열, 열방출량, 질량손실율, 연소에 필요한 산소량은 다른 특성치에 비해 매우 중요하다. 가연성 물질 가운데 고분자 물질에 관련된 특성치를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 연소열
- 2) 열방출량
- 3) 질량손실율
- 4) 연소에 필요한 산소량
- 5) 연소속도
- 6) 기화열
- 7) 분해온도

- 8) 비열
- 9) 최소발화온도
- 10) 발화시간
- 11) LOI(limiting oxygen index)
- 12) 최소폭발농도
- 13) 최소발화에너지
- 14) 화재민감도
- 15) 화재가혹도
- 16) 화염온도
- 17) 화염높이
- 18) Flashover 시간 및 온도
- 19) 고온층 온도
- 20) 화재 하중

최근 내장재의 다양화로 인해 화재 예측에 대한 새로운 연구가 활발히 진행되고 있으며, 화재 예방을 위한 중요한 자료인 Flashover 연구를 위해 여러 화재위험 특성 가운데 열방출률에 대한 정보는 무엇보다 중요하다.

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.

일반적으로 화재시나리오를 위해 다음과 같은 파라미터를 계산해야한다.

- ① Time to ignition
- ② Peak HRR and time to peak
- ③ Addition peak for HRR and time to second peak
- ④ Average HRR at 60s, 180s and 300s
- ⑤ Total heat release
- ⑥ Average effective heat of combustion
- ⑦ Mass loss in percentage
- ⑧ Average smoke specific extinction area(SEA)
- ⑨ Average carbon monoxide(CO) and carbon dioxide(CO₂) yields

3. 화재위험성 평가를 위한 원인결과 선도 분석

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.

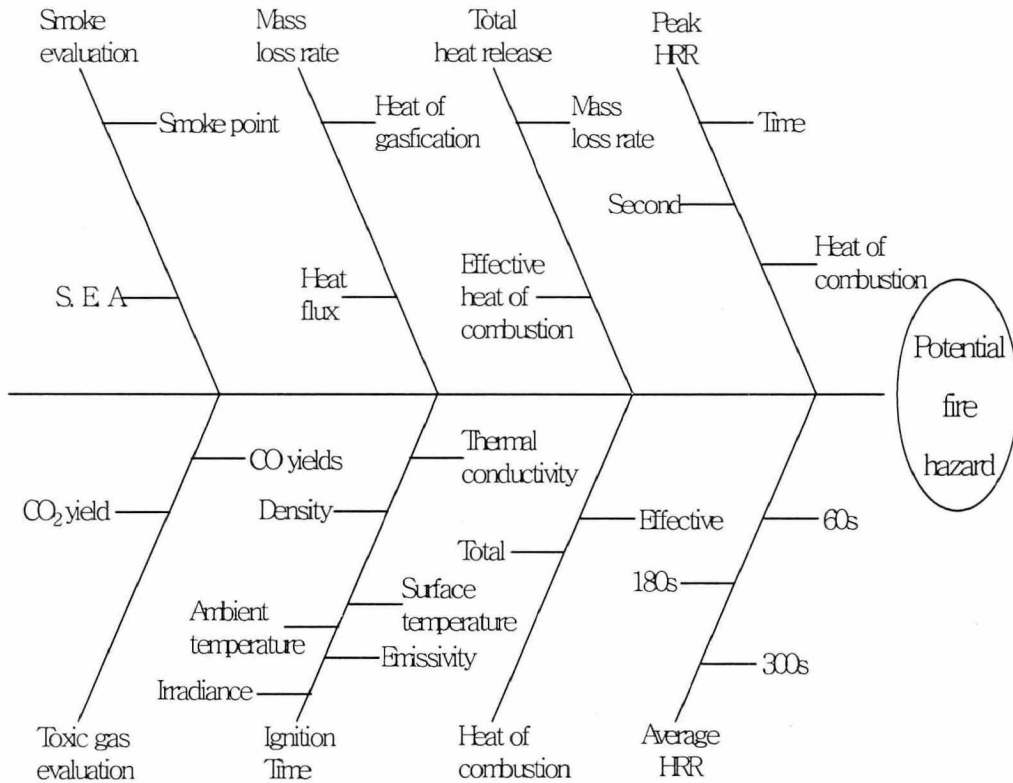


Fig. 1. A cause-effect showing the various parameters affecting the potential fire hazard.

4. 열방출율(HRR) 및 최대화염 높이 예측

화재의 잠재위험성을 평가하기 위해서는 화염높이, 천정의 화염도달시간, 순수 열방출율(Net HRR) 및 총 열방출율(total HRR) 그리고 열방출율 도달 시간에 대한 실험 및 경험식 연구가 필요하다.

본 연구에서는 ISO 9705의 실험방법에 의한 vinyl ester/glass 마감재의 화재 위험 특성을 예측할 수 있는 식을 제시하고자 한다. 이들 문헌자료를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. 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

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

$$Y = -153.186 + 4.044X_1 + 4.792X_2 - 0.104X_1X_2 \quad (1)$$

여기서 Y는 순수 열방출율, X_1 은 버너 폭, X_2 는 버너 열량이다.

식 (1)를 이용하여 순수 열방출율을 예측한 결과 예측값과 문헌값의 차이에 있어 AAPE가 21.10, AAD가 5.01초, 표준 편차 7.80 그리고 결정계수(r^2)는 0.966으로서 문헌값과 예측값은 일치함을 보여주고 있다.

총열방출율 예측을 위해 버너의 폭과 버너의 열량을 이용하여 다음과 같은 예측식을 제시하였다.

$$Y = -153.180 + 4.044X_1 + 5.792X_2 - 0.104X_1X_2 \quad (2)$$

여기서 Y는 총열방출율, X_1 은 버너 폭, X_2 는 버너 열량이다.

식 (2)를 이용하여 총열방출율을 예측한 결과 AAPE가 7.10, AAD가 5.01초, 표준 편차 7.80 그리고 r^2 은 0.992으로서 문헌값과 예측값은 거의 일치하고 있다.

또한 최대화염 높이를 버너의 폭과 버너의 열량을 이용하여 예측한 결과 다음과 같

은 예측식을 얻었다.

$$Y = -403.752 - 12.855X_1 - 4.000X_2 + 0.305X_1X_2 - 2.519 \times 10^{-5}X_1^2X_2^2 \quad (3)$$

여기서 Y는 최대화염높이, X_1 은 버너 폭, X_2 는 버너 열량이다.

식(3)을 이용하여 총열방출율을 예측한 결과 AAPE가 0.85, AAD가 1.78, 표준 편차 2.38 그리고 r^2 은 0.998으로서 문헌값과 예측값은 정확히 일치하고 있다.

5. 결과 및 고찰

표면응답방법론(Response Surface Methodology : RSM)을 이용하여 화재특성에 영향을 주는 인자들과 인자들간의 상호작용을 고려하여 화재 특성인 열방출량(HRR), 열량, 화염높이 등을 정량적으로 예측할 수 있는 방법론을 제시하여 다음과 같은 종합적인 결론을 얻었다.

건축내장재로 사용되고 있는 Vinyl ester/glass 마감재의 버너의 폭, 버너의 열량, 이들의 상호작용을 이용 하여 순수 열방출량과 최대 열방출량의 예측이 가능해 졌다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법론을 이용하여 PBD(performance based design)에 응용하기를 기대한다.

참고문헌

- 1) NFPA, " SFPE Handbook Fire Protection Engineering", National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 1995.
- 2) D. Drysdale, 'An Introduction to Fire Dynamics", 2nd ed., John Wiley & Sons, 1998.
- 3) T.L. Graham, G.M. Makhvilade and J. P. Roberts, "On the Theory Flashover Development" Fire Safety Journal, Vol. 25, pp. 229-259, 1995.
- 4) R.D. Peacock et. al., " Defining flashover for fire hazard calculation", Fire Safety Journal, Vol. 32, pp. 331-345, 1999.
- 5) 하동명, "화재위험분석을 위한 응답표면방법론(RSM: Response Surface Methodology)의 적용", 제 17소방학술세미나, 행정자치부, 한국소방안전협회, pp. 45-91, 2002.
- 6) 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.
- 7) 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.

- 8) J. Rychly and L. Rychla, " Modelling Heat Release Rate-Time Curves from Cone Calorimeter for Burning of Polymers with Intumescence additive", Polymer Degradation and Stability, Vol. 54, pp.249-254, 1996.