내장재 Flashover 의 정량적 위험성평가

하동명
세명대학교 안전공학과

1. 서 론

최근 대구지하철화재사고와 천안초등학교 축구부 합숙소 화재사고를 계기로 내장재의 화재 위험성에 대한 관심은 매우 증대되고 있다. 화재에 관련된 위험성 평가는 화재연구의 어떤 분야보다 과거 수 십 년 동안 연구자들에 의해 많은 관심사가 되고 있다.

일반적으로 화재 시나리오에 관련되는 매개변수는 수 없이 많지만 대표적으로 (화재지연특성, 열방출률, 연소생성물의 특성, 플래시오버(flashover), 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 있다. 화재에 관련된 특성을 파악하기 위해서 단일 매개변수에 의해서도 특성 예측이 가능 할 경우도 있으나 일반적으로 매개변수간의 상호작용에 의한 영향도 알아야만 포함 정확한 위험성 정량적 평가가 될 수 있다.[1,2)]

연구에서는 Flashover 현상과 Flashover 시간 및 열량에 관한 연구들의 고찰을 통하여 화재안전을 위한 건축 내장재의 정량적 위험성평가에 도움을 주고, 성능 설계 기준(PBD : performance based design)에 적용에 있어 보다 정확한 성능설계기준에 이용하는데 목적이 있다.

2. Flashover와 Flashover 시간에 영향을 주는 인자

2.1 Flashover정의 및 영향을 주는 인자

전실화재(flashover)란 실내화재 시 연소열에 의해 천정류(ceiling jet)의 온도가 상승하여 600℃정도가 되면 천정류에서 방출되는 복사열에 의하여 실내에 있는 모든 가연물질이 분해되어 가연성 증기를 발생하게 됨으로써 실내 전체가 연소하게 되는 상태를 이야기하며, 이러한 현상을 전공간화재(full space involvement : FSI)라고 표현하기도 한다. 전실화재 단계도 다시 구분하게 되면 전실화재전단계(pre-flashover)와 전실후단계(post-flashover)로 구분할 수 있다.[3,4)]

Flashover를 일으키는 열량에 관한 연구는 그 동안 꾸준히 진행되고 있으며, 이 가운데 McCaffery는 실험결과에 의하면 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$Q_{FO} = 610\ (h_k A_T A_W H^{1/2})^{1/2} \qquad (1)$$

Babrauskas는 Flashover 열량 예측식을 다음과 같이 제시하였고,

$$Q_{FO} = 750 A_0 \sqrt{h_0} \quad (2)$$

Thomas는 다음과 같은 열량 예측식을 제시하였다.

$$Q_{FO} = 7.8 A_T + 378 A_0 \sqrt{h_0} \quad (3)$$

또한 H $\ddot{a}$gglund는 Two-zone 컴퓨터 모사(simulation)로부터 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$Q_{FO} = 10508 A_T \left(\frac{1.2}{A_T / A_T \sqrt{H}} + 0.247 \right)^3 \quad (4)$$

여기서 Q_{FO}는 전실화재를 일으키기 위한 발화원의 발열량이다.

Flashover 화재 전 단계(pre-flashover)에서 실내 화재가 Flashover 화재로의 전개 여부는 화재 안전에서 가장 큰 관심이 된다. 또한 이 기간 중에 화재의 탐지 및 거주 인원의 안전 피난이 이루어지게 된다. 따라서 Flashover 전 단계의 화재 위험분석은 거주 인원의 화재 안전을 예측하는데 매우 중요한 역할을 하게 된다. 전실화재까지의 시간 및 Flashover 여부는 방의 크기 및 구조, 건축 자재, 창문의 크기, 연료의 양, 종류 및 배열상태 등에 따라 영향을 받으므로 결정된다. 경우에 따라서는 첫번째 점화된 가연물질만으로도 연소되고 화재가 소멸하는 경우도 있다.

최근 문헌에는 Flashover에 대한 다음과 같은 인자를 이용하여 연구 고찰한 논문도 발표되고 있다. 이용된 인자는 다음과 같다.[5)]

① 바닥면적(floor area)
② 배출구 폭(vent width)
③ 배출구 높이(vent height)
④ 바닥에서의 배출구 높이(vent height above floor)
⑤ 천장높이(ceiling height)
⑥ 화재 특성(fire specification)
⑦ 화재 위치(fire location)
⑧ 벽과 천장의 물질(wall and ceiling materials)
⑨ 화재 복사율(fire radiation fraction)
⑩ 화재 최대 열방출률(fire maximum heat release rate)

3. 화재 위험성평가 방법론

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

이 선도를 이용하면 화재의 잠재 위험성평가를 위한 각 각의 위험성 고찰뿐만 아니

라 각 위험성 인자들의 상호 관계도 용이하게 고찰할 수 있다.[6]

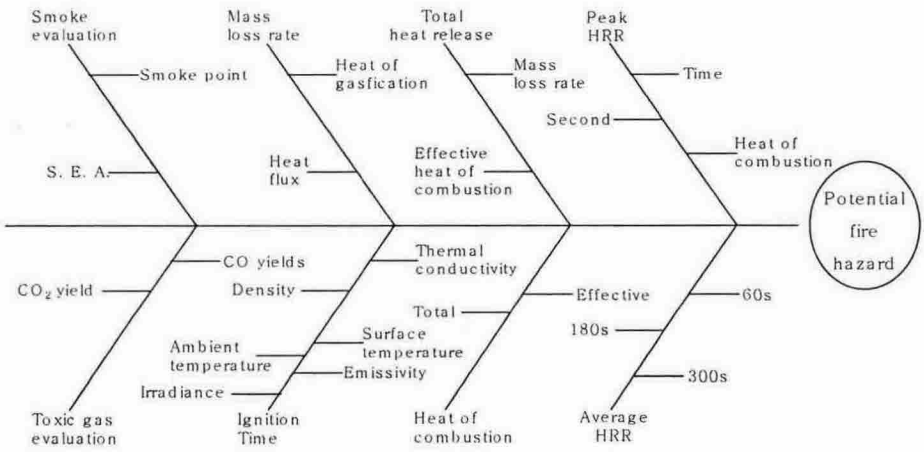

Fig. 1. A cause-effect showing the various parameters affecting the potential fire hazard.

4. Flashover 시간 및 열량 예측

발화시간 및 Flashover 시간의 예측은 화재를 예방하기 위해서 중요한 연구가 된다. 최근 Ostman 등이 연구한 자료를 이용하여 발화시간 및 Flashover 시간의 예측할 수 있는 모델을 제시하였고,[7] 또한 White등은 다양한 내장재의 Flashover 시간에 대하여 실험적으로 연구하였으며, 문헌에 제시된 실험자료를 제시하였다.[8]

최근 Babrauskas 등은 ISO 9750 시험을 통해 화재위험성 계산을 위한 Flashover 정의에서 Flashover 열량과 시간관계를 고찰하여 Table 1에 나타내었다.[9] 발화시간, 열방출률, 질량손실 그리고 밀도를 이용한 Flashover 시간 예측이 가능하다.

Table 1에서 33개의 내장에 대해 Flashover 열량과 시간의 관계에서 평균열량은 1975±1060kW이고, 1000kW 이하는 Melamine-faced particle board를 비롯한 단 3개의 내장재이다. 또한 Flashover 시간은 대부분 100s를 초과하였으나, flashover 시간이 8초인 Rigid polyurethane foam을 비롯한 6개의 내장재는 100s 이하였다. 따라서 Table 1의 자료를 이용하여 Flashover에서의 열량과 시간의 상관관계를 살펴보고자 한다. 먼저 열량과 시간의 관계를 Graphical method로 살펴본 결과 열방출율에 의한 Flashover 시간의 관계를 다음과 같은 예측 모델로 표현할 수 있으며,

$$t_{FO} = \alpha + \beta HRR^{\gamma} \qquad (5)$$

또한 Flashover 시간에 의한 열방출율의 관계를 다음과 같은 예측 모델로 나타낼 수 있다.

$$HRR_{FO} = \alpha + \beta t^{\gamma} \qquad (6)$$

이 예측 모델을 가운데 Flashover 시간에 의한 열방출율의 관계의 최적화를 시도 다음과 같은 예측식을 얻었다.

$$HRR_{FO} = 1390.966 + 25596.07t^{-0.85} \quad (7)$$

Table 1. HRR values needed for flashover of ISO 9705 room test

No.	Materials	HRR at flashover[kw]	Time to flashover[s]
1	Plywood, 5.6mm thick	1700	195
2	Plywood, 12.8mm thick	1900	140
3	Polystyrene foam	4200	71
4	"" (different burner program)	3100	101
5	Polyisocyanurate foam	2200	19
6	"" (different burner program)	2900	42
7	"" (different burner program)	3200	315
8	Plywood walls, gwb ceiling, mixed furniture	1030	117
9	Concrete walls, gwb ceiling, mixed furniture	1620	178
10	Plywood walls, gwb ceiling, mixed furniture	1190	114
11	Plywood walls, gwb ceiling, mixed furniture	1880	108
12	Gwb walls and ceiling, mixed furniture	2420	100
13	Plywood walls, acoustic tile ceiling, mixed furniture	1560	123
14	Plywood walls, gwb ceiling, mixed furniture	1610	106
15	Plywood walls, gwb ceiling, mixed furniture	1470	225
16	Rigid polyurethane foam	5950	8
17	Textile wall covering on mineral wool	3490	33
18	Wood fiberboard	2210	64
19	Expanded polystyrene foam	1700	127
20	Medium density fiberboard	1080	128
21	Spruce paneling	1330	131
22	Paper wall covering on particle board	980	133
23	Particle board	950	138
24	"" (replicate of above)	1160	146
25	"" (different burner program)	1970	141
26	Melamine-faced particle board	1000	447
27	PVC wall covering on gwb	1160	609
28	Textile wall covering on gwb	2000	622
29	Acrylic glazing	1920	618
30	FR extruded polystyrene foam, 40mm	1650	160
31	Lacquered wood paneling	1830	109
32	FR expanded polystyrene foam, 80mm	1740	803
33	FR plywood	1080	645

식 (7)을 이용하여 Flashover의 방출열을 예측한 결과 AAPE(average absolute percent error)는 29.92, AAD(average absolute deviation)는 514 그리고 결정계수(R^2)는 0.547이였다. Flashover 시간과 방출열량과 상관관계가 크지 않으므로 이에 관한 보다

많은 연구와 고찰이 필요하다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서 최근에 발표되고 있는 Flashover 온도 및 열량 에 대한 자료와 ISO 9705 Room Coner Test에 이용한 재료 특성에 의한 Flashover 시간의 실험 연구들을 고찰한 결과 다음과 같은 몇 가지를 제안하고자 한다.

1) Flashover에 영향을 주는 많은 인자들 가운데 재료 특성치를 제외한 중요 인자로는 경우 화재성장속도(fire growth rate), 개구부면적(ventilation opening area), 방면적(room area) 등을 들 수 있다.

2) Flashover 시간에 의한 열방출율의 관계의 최적화를 시도 다음과 같은 예측식을 얻었다.

$$HRR_{FO} = 1390.966 + 25596.07t^{-0.85}$$

3) Flashover는 재료의 발화특성 가운데 발화도달시간과 밀접한 상관관계가 있으므로 발화시간에 대한 연구가 필요하다.

4) Flashover 시간과 방출열량과의 상관관계는 크지 않으므로 이에 관한 보다 많은 연구가 필요하다.

5) Flashover에 관련된 인자가 너무나도 많기 때문에 기존에 발표되는 자료 및 문헌을 보다 정확하게 고찰하여 화재 위험성에 미치는 영향을 종합적으로 분석할 필요가 있다.

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) H. J. Kim and D. G. Lilley, "Flashover : A Study of Parameter Effects on Time to Reach Flashover Conditions", J. of Propulsion and Power, Vol. 18, No. 3, pp. 669-673, 2002.
6) 하동명, "화재위험분석을 위한 응답표면방법론(RSM: Response Surface Methodology의 적용)", 제 17소방학술세미나, 행정자치부, 한국소방안전협회,

pp. 45-91, 2002.
7) 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.
8) R.H. White et al., " Comparison of Test Protocols for the Standard Room/Coner Test", Fire and Materials, Vol. 23, pp. 139-146, 1999.
9) V. Babrauskas, R.D. Peacock and P.A. Reneke, " Defining Flashover for Fire Hazard Calculation : Part II", Fire Safety Journal, Vol. 36, 2003.