

Flashover 예측을 위한 Flamespread 모델의 적용

A Flamespread Model to Predict a Room Flashover

김 운 형*, J. G. Quintiere**

경민대학 소방안전관리과*

Department of Fire Protection Engineering, University of Maryland, USA**

I. 서 론

건물화재 시 예상되는 화재위험성은 플래시오버 현상에 따라 큰 영향을 받게 된다. 플래시오버 현상은 공간의 가연물이 일시적으로 연소에 관련되면서 인적, 물적 피해가 극대화되는 시점으로 볼 수 있으며 따라서 이에 대한 공학적인 해석은 적정 방화설계를 위한 필수적인 조건이 된다. 한편, 건물의 벽, 천장 등에 사용되는 가연성 마감재의 열 적 특성은 플래시오버현상을 예측하는 매우 중요한 기준으로 인식되고 있으며 이와 같은 배경에서 현재 미국의 ASTM, NFPA, UBC 그리고 ISO 에서는 각자의 기준을 정하여 사용하고 있다. 현재 ISO의 Room-Corner Test(9705)는 국제적인 인지도와 함께 여러 나라에서 이를 기준으로 한 내장재의 시험이 활발하게 진행되고 있다. ISO 9705 시험은 벽, 천장의 마감재가 최초 10분간은 100KW, 이후 10분간은 300KW 화원에 노출된 조건에서 공간내 열 방출 량이 대략 1,000KW에 이르면 플래시오버가 발생된다고 본다. 본 논문에서는 ISO 9705 Test 시나리오에 따른 가연성 내장재의 플래시오버 현상을 기준으로 화재위험성을 평가하기 위해 개발된 Quintiere의 Flame spread (화염확산)모델의 검증을 위해 스웨덴의 실대 화재 실험결과와 비교 분석하였다. 모델의 입력에 필요한 자료는 이태리의 실험 결과를 분석하여 구하였다. 또한 실제 화재 시 용융, 박락, 변형 등이 나타나는 재료에 대한 모델의 적용 가능성과 더불어 ISO 기준과 다른 Large -Scale Test에 대한 모델의 예측성능도 분석하였다.

II. 실대화재 실험

2.1 시험 재료

현재 유럽에서는 내장재의 화재위험성에 대한 공동 연구가 진행되고 있다. 스웨덴의 국립시험연구소(Swedish National Testing and Research Institute)에서는 ISO 9705 Room-Corner Test 기준을 적용하여 유럽에서 널리 사용되고 있는 총 13개의 내장재료에 대한 실대 화재 시험을 진행하였다. 또한 이태리의 L. S. Fire Laboratories (L.S.F)에서는 스웨덴과 동일한 재료를 사용하여 Cone Calorimeter 와 Roland Apparatus 시험을 완료하였다.

2.2 모델 입력자료

모델의 입력에 필요한 재료특성 값은 Cone Calorimeter (ASTM E- 1354, ISO 5660)와 Lateral Ignition and Flame Spread Test (LIFT, ASTM E-1321, ISO 5658)시험을 이용하여 결정한다. L.S.F에서는 LIFT 시험 대신 Roland Apparatus 를 이용하여 화염확산(Flame Spread) 자료를 구하였다. 모델의 입력에 필요한 7 가지 재료 특성 값은 아래와 같다.

1. 발화점 (Ignition Temperature, T_{ig})
2. 재료의 열 관성 (Thermal inertia, $k\rho c$)
3. 수평 화염확산 변수 (Lateral Flame Spread Parameter, Φ)
4. 수평 화염확산 최소 온도 (Minimum Temperature for Lateral Spread, $T_{s,min.}$)
5. 연소열 (Heat of Combustion, ΔH_c)
6. 기화열 (Effective Heat of Gasification, L)
7. 단위면적당 발생열량 (Total Energy per Unit Area, Q'')

본 모델에 관한 내용 및 재료의 분석과정은 관련 논문에 자세히 설명되어 있다.¹⁾ 화재시나리오는 시험조건과 동일하게 가정하였으며 주요한 입력 자료는 아래와 같다.

- a) 실내 온도: 20C
- b) 실의크기: 2.4m x 3.6m x 2.4m(높이)
- c) 개구부: 벽 중앙에 2.0m x 0.8m (높이)의 문이 설치되어 있음
- d) 화원: 문 반대편 구석에 바닥에서 30cm위에 위치한 0.17m 정방형 화원은 propane 연료를 사용하며 처음 10분간은 100 KW, 이후 10분간은 300KW의 열 방출을 갖는다.
- e) 화염의 열 플럭스: 60KW/m²
- f) 내장재의 설치: 문이 설치된 벽을 제외한 3면 벽과 천장에 설치함

위와 같은 ISO 9705 기준에 따라 공간 내 플래시오버 도달시간을 기준으로 모델의 예측 성능을 분석하였다. 플래시오버는 매우 복잡한 화재현상으로서 일반적으로 화재 시 바닥의 열 플럭스가 20KW/m², 연기층의 온도가 500-600℃에 이르며 문밖으로 화염이 보이는 상태로 볼 수 있다. ISO 9705 Test의 경우 실의 크기를 고려할 때, 공간의 열 방출 량이 대략 1,000KW에 이르게 되면 위의 조건을 만족하는 플래시오버가 발생되며 본 논문에서는 이를 기준으로 평가하였다.

III. 비교 분석

총 13개의 실험 재료 중 대표적으로 2개의 내장재를 선정하여 플래시오버 도달시간을 기준으로 실험 화재시험과 모델의 예측 결과를 비교 분석하였다. 화재 시 용융, 박락 현상 등을 나타내는 재료에 대한 모델의 적용 결과도 제시하였다.

3.1 FR Plywood

그림 1은 화재시험과 모델의 예측 결과와의 비교를 나타낸다. 최초 10분간은 낮은 열 방출열량을 지속하고 있다. 화원의 크기가 300KW로 증대된 10분 10초 지나 화염이 천장을 가로질러 확산되고 이어 630초에 공간내 열 방출열량이 1MW를 초과하였다. 635초경과 시 문밖으로 화염이 분출하는 것이 관찰되었다. 645 초경과 후 화염은 벽 하단으로 확산되었다. 그림에서 보는 바와 같이 모델의 예측 결과는 매우 만족한 수준을 보여주고 있다.

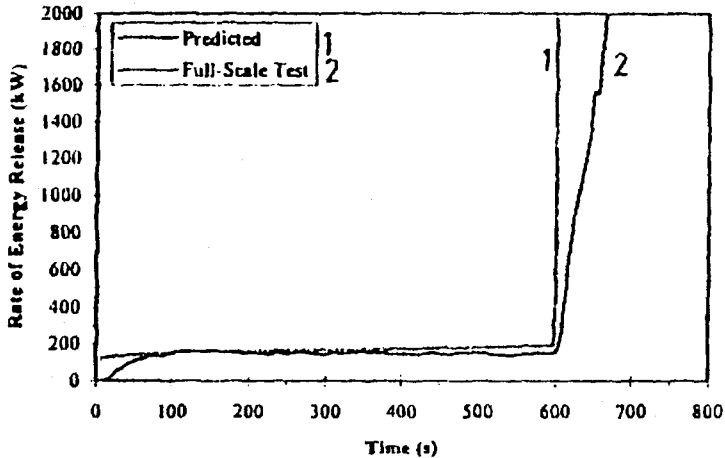


그림1. Fire Retarded Plywood (R 4.10)와 모델링 결과 비교

3.2 Extruded Polystyrene Board

실제 화재 시 재료에 따라서는 용융, 박락, 변형 등으로 인해 벽이나 천장 표면에서 떨어지는 경우가 발생한다. 시험 재료 중에서 R 4.05 (Extruded Polystyrene Board)가 그 대표적인 예이다. 현재 모델에서는 이러한 특성을 고려할 수 없으므로 재료의 단위 면적 당 발생열량 (Q'') 수정한 값을 입력하였다. 화재 시 벽, 천장의 내장재가 바닥으로 떨어지면 연소시간은 단축된다. 이 후의 바닥연소 과정은 본 연구에서는 제외하였다. 재료는 두께 40mm, 밀도 30kg/m^3 , 불연재 바탕에 접착하였다. 용융, 박락 등의 현상을 고려하여 측정된 Q'' 값 38.7MJ/m^2 보다 15%를 감소한 값을 입력하였다. 그림 2에서 1,000KW 플레쉬오버에 도달하는 모델의 예측 시간(64초)과 시험결과(96초)와는 약 30초 차이가 발생하였다. 관찰 결과, 용융으로 100초 정도 경과 후 발생 열량은 현저히 낮아지며 85초 경 상당한 용융과 박락 현상이 바닥 쪽으로 발생하였다. $0.15 Q''$ 의 경우, 600초경에 발생한 2번째 플레쉬오버 현상과 유사한 예측을 보여준다. 이러한 예는 수정 Q'' 값을 이용하여 용융, 박락되는 재료에 대한 모델링의 가능성을 보여주고 있다. 다만 적절한 Q'' 값을 계산하기 위한 연소시간의 결정과 바닥에 떨어진 재료가 연소되는 상황을 모델에 포함할 필요가 있다고 본다.

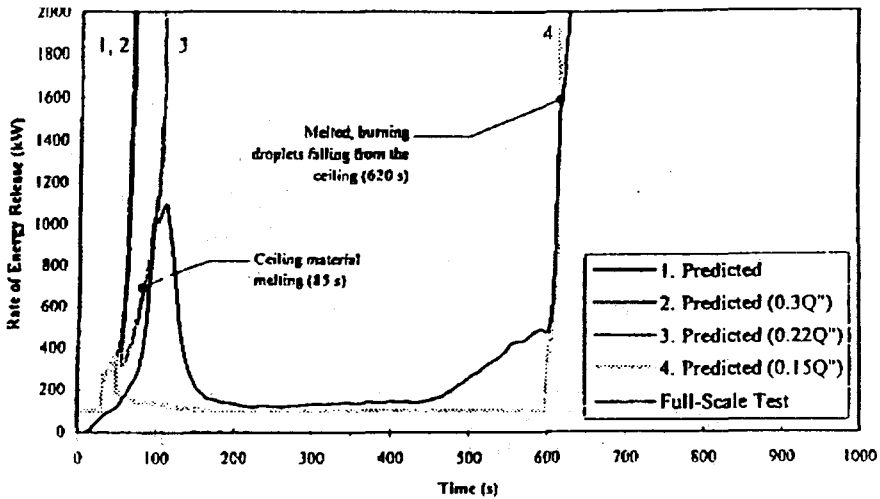


그림 2. Extruded Polystyrene Board (R 4.05)와 모델링 결과 비교

3.4 플래쉬오버 도달시간 비교

본 논문에서 재료의 성능은 플래쉬오버가 발생하거나 또는 열 방출비율이 1,000KW가 되는 도달시간을 기준으로 평가된다. 표 1은 실대 화재 실험과 모델의 적용결과에 의한 1 MW 도달시간을 나타낸다. 모델의 예측시간은 모든 재료에 대하여 최대 평균(Peak average) 연소 열과 기화열을 사용한 경우의 결과이다. 또한 수정시간은 변형된 재료 특성 값을 적용한 결과이다. 이를 통하여 모델의 성능 검증과 여타 재료에의 적용 가능성 및 재료의 고유 연소특성 등을 반영할 수 있었다. 다만 수정된 재료 특성이 모든 동일한 재료에 적용하기에는 실험상의 한계가 있으므로 향후 더 많은 실험이 진행되어야 한다고 본다.

IV. A large-scale test

4.1 시험개요

L.S.F 실험에서 실의 용적은 2.4 m x 3.6 m x 2.4 m 의 ISO 표준규격을 적용하였다. Quintiere의 모델이 실의 용적이 변화되는 경우에 어떤 결과를 나타내는지를 알고자 대형 공간의 실대 화재 실험결과와 모델 결과와를 비교 분석하였다. 실험은 핀란드의 연구 센터의 Kokkala, Goransson, Soderbom에 의해 5가지 재료에 대하여 진행되었다. 실의 크기는 폭 9.0m x 너비 6.75m x 높이 4.9 m이며 긴 쪽 벽 중앙에 2.0m x 2.0 m 문을 설치하였다. 화원은 ISO 9705 기준에 의한 Propane gas burner (0.17m x 0.17m) 3개를 동시에 사용하였다. 최초 20분간은 ISO 기준과 동일하게 처음 10분간은 100KW, 이후 10분간의 300KW 조건으로 가열하였다. 그러나 20분 경과 후에는 설치된 3개의 화원을 모두 사용하여 총 900KW로 증대시켰다. 마감재료는 화원에서 가장 먼 벽의 하부를 제외한 모든 천장과 벽에 설치하였다. 모델의 입력에 필요한 재료의 열 적 특성 치는 Quintiere, Haynes & Rhodes가 분석하였다. 900KW 화원에서 연속 화염의 높이는 Hasemi & Tokunaga의 제안식을 적용하였으며 버너에서 5.86m위 즉 바닥에서 5.94m 위로 정하였다. 현재 모델에서 화염의 높이는 Quintiere가 제안한 기준

인 100KW에서 1.3m, 300KW에서 3.6m을 사용하고 있다. 한편, ISO 9705에서 플래쉬오버 판단 기준으로 1,000KW를 설정한 것은 실의 표준 크기를 고려한 화재 크기이다. 그러므로 본 실험과 같이 표준보다 큰공간이나 화원이 증가된 경우에는 동일한 플래쉬오버 기준을 적용하기에는 한계가 있다.

표 1. 실대화재 실험과 모델과의 플래쉬오버 도달시간 비교

실험 재료	플래쉬오버 도달시간, Q=1,000KW (s)			
	실대 실험	모델 결과	수정 결과	수정 재료특성
R 4.01 F.R. Chipboard	∞	∞	1113	L = 4.5 KJ/g
R 4.02 Gypsum	∞	666	∞	1.5 L 또는 0.5 Q"
R 4.03 PU /Alum.	40	---	---	---
R 4.04 PU/ Paper	---	9	22	0.3 Q" & 2.0 L
R 4.05 Ext. PS 40mm	96 & 614*	64	99 616	0.22 Q" 0.15 Q"
R 4.06 Acrylic	141	27	50	3.0 L
R 4.07 F.R. PVC	∞	726	730 ∞	0.5 Q" 0.3 Q"
R 4.08 3-Layer PC	∞	230	669 ∞	0.2 Q" 0.1 Q"
R 4.09 Mass Timber	104	612	62 100	L = 6.5 KJ/g L = 9.0 KJ/g
R 4.10 F.R.Plywood	631	601	---	---
R 4.11 Plywood	138	108	131	L = 8.0 KJ/g
R 4.20 Exp. PS 40mm	84	90	118	0.3 Q"
R 4.21 Exp. PS 80mm	107&798*	268	129 636	L = 7.3 KJ/g 0.3 Q"

* 열 방출비율 (Q')이 한번 이상 1,000KW에 도달함

4.2 결과 분석

실대 화재와 모델과의 비교 결과 상당히 만족한 결과를 나타내었다. 그림 3은 Gypsum board의 결과이다. 전체적으로 일치율을 보이고 있으나 최대 열 방출 비율에서 약 15분 정도 차이가 있다. 모델의 경우 20분 경과 후 화원이 900KW로 증가된 이후에 1200KW를 예측하였으나 실험에서는 3MW를 나타내었다. 35분 경과 후 모델은 급속한 화재성장을 보이고 있지만 실험의 경우는 방출열량의 뚜렷한 감소로 더 이상의 진전이 없었다. 이러한 결과는 아마도 thermoplastic 재료의 특성 때문으로 판단된다. 그러나 발포성, 플라스틱 재료의 용융, 변형, 박락 등에 의해 실험 결과가 모델보다 매우 낮았던 이전의 예와는 다른 모습을 나타내고 있다. 이러한 차이점에 대해서 향후 다양한 방출열량을 갖는 화원에 대한 화염높이 산정 방법에 관한 연구와 열 플럭스 측정을 위한 실험이 필요하다고 보여진다.

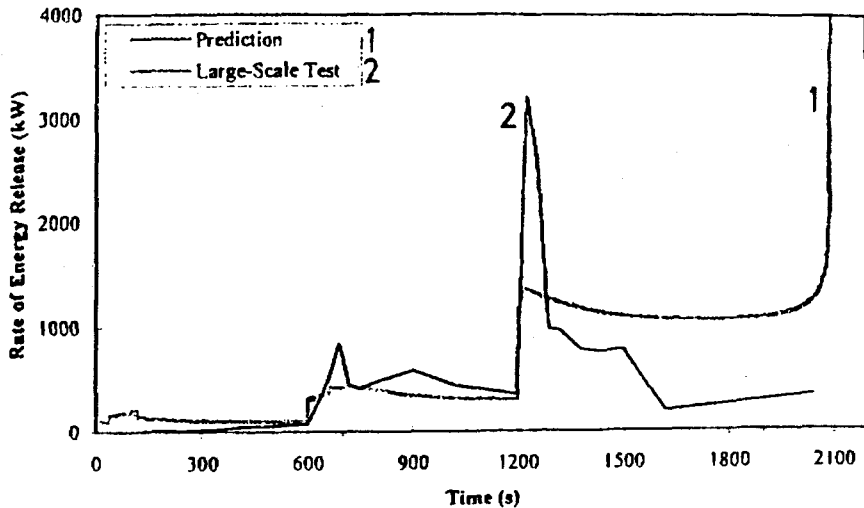


그림 3. Large-Scale Test와 모델과의 비교
(재료: Textile Wall Covering on Gypsum Board)

V. 결론

본 논문의 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) Quintiere의 화염확산 모델을 실험 화재시험과 비교 분석한 결과, 공간의 플래시오버도달시간 예측성능은 목재재료의 경우는 매우 만족할 만한 성능을 나타냈으며 Thermoplastic 재료는 수정된 재료 특성 값을 적용한 경우에 예측 결과가 우수하였다.
- 2) 실제 화재 시 나타나는 재료의 용융, 박락, 변형 등 현재 모델이 예상할 수 없는 재료 (예로서 폴리스틸렌 등)는 적절한 재료 특성 값의 수정을 통해 모델에 반영할 수 있다.
- 3) Large-Scale Test와 모델의 예측성능 비교 결과는 전반적으로 만족하였다. ISO 9705 와 다른 화재 시나리오에 적용하기 위하여 다양한 방출열량을 갖는 화원에 대한 화염높이 산정 방법과 정확한 열 플럭스 측정을 위한 실험이 필요하다고 본다.

참 고 문 헌

1. Quintiere, J. G., A Simulation Model for Fire Growth on Materials Subject to a Room-Corner Test, Fire Safety Journal, Vol. 18, 1992.
2. Kokkala, Matti, Goransson, Ulf & Soderbom, Johan, "Five Large-Scale Room Fire Experiments: Project 3 of the EUREFIC Fire Research Programme", Technical Research Center of Finland, Espoo, 1992
3. Hasemi, Y & Tokunaga, T., " Some Experimental Aspects of Turbulent Diffusion Flames and Buoyant Plumes from Fire Sources Against a Wall and in a Corner of Walls", Combustion Science and Technology, Volume 40, 1984, pp. 1 to 17.
4. Woon Hyung Kim., S. E Dillion, Quintiere, J. G., Discussions of a Model and Correlation for the ISO 9705 Room-Corner Test, Annual Conference on Fire Research, National Institute of Standard and Technology, MD, U.S., 1998.
5. 김운형, Quintiere, J. G., "건물 내장재의 화재위험성 평가방법", 한국화재소방학회지, 12권 2호, 1998