

실규모 화재 연소평가(Real Scale Reaction-to-fire test)를 통한 플래시오버와 연기발생율의 상관관계 고찰

박계원 / 건재환경팀 연구원

1. 서론

1.1 연구 개요

화재시 건물 내장재의 급격한 발화로 인해 일순간에 가연물의 연소가 진행되는 플래시오버가 발생하면 재실자의 피난은 불가능해지게 된다. 현재 국토해양부 고시에 의한 샌드위치 패널의 난연성 시험방법인 KS F ISO 5660-1은 소형시편에 의한 연소성 평가를 목적으로 하기에, 실규모에서 발생하는 플래시오버 현상을 측정 및 예측을 할 수가 없다. 2009년 10월 KS F ISO 13784-1(샌드위치 패널에 대한 실규모 화재시험방법)이 제정되면서, 국내에서도 이러한 실규모 화재시의 플래시오버를 측정할 수 있는 국가표준 기반이 구축되었으며, 본 연구에서는 KS F ISO 13784-1의 시험 평가를 실시하여, 플래시오버의 발생 시점을 판단하고 이러한 플래시오버에 영향을 주는 요인 중 하나인 연기발생율과의 상관성을 고찰하고자 한다. 본 연구를 위해 23개 케이스의 샌드위치 패널에 대한 KS F ISO 13784-1의 시험을 수행하였으며, 이를 통해 플래시오버의 발생여부 및 연기발생율과의 상관관계를 분석하였다.

1.2 플래시오버의 개요

ISO 13784-1에서 다루는 연소성능이란 'Reaction

-to-Fire(화재로 인한 연소반응)'으로서, 이는 초기 피난(20분 이내)까지의 화재 연소성상(열방출율, 연기 발생율, 화염전파거리, 용융적하물 등)을 다루는 것으로, 화재 성장기 직후 급격히 순간적으로 실내 가연물을 연소시키는 현상인 플래시오버의 발생시점을 판단 및 예측함을 중요 척도로 다루고 있다. 플래시오버를 판정하는 기준은 크게 다음과 같은데,

- a) 정성적인 방법으로 시험체 바닥에서 복사열로 인한 신문지 발화순간
- b) 시험체 개구부로의 화염분출 순간
- c) 정량적인 방법으로는 시험체 바닥 정중앙부에 heat fluxmeter 설치하여 복사열량 25kW/m² 측정순간
- d) 시험체 상부 천정 온도 평균 (650~750)°C 측정순간
- e) 산소감량에 따른 열량측정가스분석기를 통해, 열방출율 1000kW 도달 순간
- f) 플래시오버는 열방출율이 1000kW 일 때 발생함. 즉, 버너 가열 100kW 및 300kW 일 때, 플래시오버로 인한 제품의 최대 열방출율은 각각 900kW 및 700kW 임을 의미

이러한 조건들 중, NFPA 265(Standard method of fire tests for evaluating room fire growth contribution of textile wall coverings)²⁾에서는 a),

b), c), d) 중 어느 2가지만 관측이 되면 플래시오버가 발생된 것으로 간주하고 있다. KS F ISO 13784-1에서도 이 네가지를 모두 측정하고 있으며, 보다 정량적인 분석을 위해 열방출율(Heat Release Rate)이 1000 kW 일 때를 플래시오버 발생으로 산정 (EN 14390³⁾에서 열방출율 1000 kW 발생시 flashover 판정으로 정의함)하고 있으며 더불어 참고 측정요소로서 시험체를 구성하는 각 패널당 온도 측정 및 heat fluxmeter에 의한 복사열량 측정을 병행하고 있다. 유럽에서는 60여개의 빌딩 재료에 대해 룸코너 테스트를 실시 후, 실험대규모 화재시험 데이터를 분석하여 열방출율을 바탕으로 산정된 FIGRA 수치와 플래시오버 발생 경향과의 높은 상관성을 보고한 바 있는데, 본 연구에서도 열방출율 1000 KW 발생시점을 플래시오버로 판단하여 연기발생율과의 상관성을 분석하고자 하였다.

1.2 FIGRA(Fire Growth Rate) 및 플래시오버

앞서 언급한 FIGRA(Fire Growth Rate, 화재성장지수)는 실험대규모 화재시험, 집화원으로부터의 영향을 배제한 화재시 최대 열방출율을 해당 시간(초)로 나눈 것으로 단위는 kW/s이다.

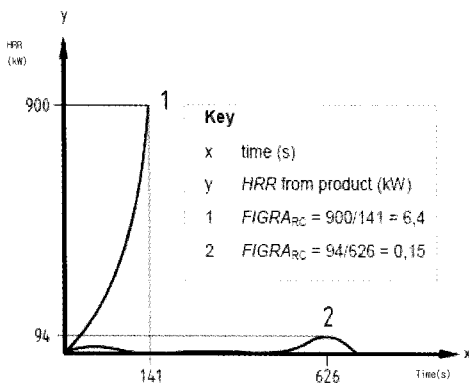


Figure 1. Concept of FIGRA.

ISO 13784-1과 같은 실험대규모 화재시험에서 의미하는 FIGRA는 EN 138234) Single Burning Item(SBI)에서 규정하는 FIGRA 산정방식과 약간의 차이가 있다.

FIGRA(SBI)은 (열방출율 최대값/시간)*1000 로서, 단위는 W/s 이며, 이때 열방출율 데이터는 noise의 최소화를 위해 30초 평균의 시간으로 계산하며 또한 열방출율 양수 및 특정치 이상값만을 활용한다. FIGRA(SBI)는 시험 동안에 계산된 특정 FIGRA의 최대값인데 반해, FIRGA(room corner test)는 시험 동안 최대 열방출율을 시간으로 나눈 값으로 EN143903)(fire test-large scale room reference test for surface products)에 언급되어 있다. SBI 시험은 상대적으로 쉽게 연소되는 시험체에 대해서는 연소성능을 세분화 시켜줄 수 있지만, 높은 화재성능을 지닌 시험체에 대해서는 중규모 화재 시험인 SBI로 측정하는 것이 쉽지 않으며 유럽에서는 SBI로 시험시 나타난 결과에 대해 신뢰가 가지 않을 때 검증시험 방법으로써 ISO 13784-1 및 ISO 9705와 같은 실험대규모 화재시험을 시행하고 있다. 또한 50 kW 이하의 열방출율을 보이는 소규모 화재에서는, FIGRA의 설정이 불명확하거나 또는 잡음이 종종 발생할 수 있어, 최대 열방출율이 50 kW 이하이면 FIGRA를 0으로 간주하기도 한다.

2.1 KS F ISO 13784-1의 구성방법

시험체는 전면에 개구부를 가진 장방형 자립형 샌드위치 패널 조립체로 2.4m×3.6m×2.4m의 크기를 가지는데, 1m 폭 패널로 제작되어 좌측 및 우측벽부에 4개 패널, 후벽부에 3개 패널, 천정부에 4개 패널 및 전면 3개 패널(개구부 0.8m×2m)로 구성되고 구조 재료와 연결부, 고정부 등 실제 현장 제작기법을 반영하여 골조 없이 제작된 자립형(free standing)으로 제작하였으며 Figure 2와 같다. 프로판 가스 버너를 통해 시험의 처음 10분 동안 100kW으로, 이후 추가 10분 동안에는 300kW으로 가열하며 나머지 10분간은 가열없이 육안관찰 후 종료하게 되며, 시험 중 플래시오버 발생시 강제 소화 후 종료하게 된다.

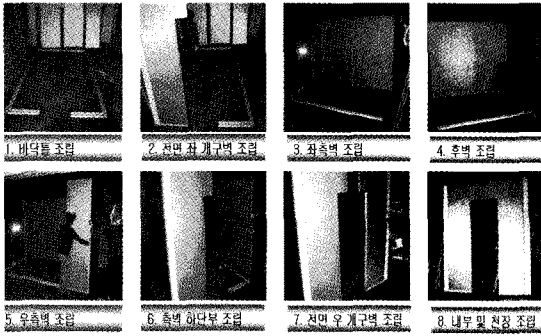


Figure 2. establishing procedures for specimen.

2.2 실대규모 화재 시험의 결과

2.2.1 열방출율, 연기발생 및 플래시오버 판정결과

시험결과 23개 시험체에서 EPS 및 PUR 시험체에서 플래시오버가 발생하였으며, 다만 PUR F3는 시험 중 붕괴로 인해 조기 종료되어 추후 분석에서는 제외시켰다. EPS는 EPS S3 시험체를 제외하면 모두 10분 이전에 플래시오버가 발생하였으며, PUR은 조기 종료된 PUR F3를 제외하면 모두 10분 이후에 플래시오버가 발생하였다(Table 1).

전체 케이스에 대해서, 최대 열방출율이 발생한 시점과 최대 연기발생율이 발생한 시점을 도식화하면 Figure 3과 같은데, 플래시오버가 발생한 EPS와 PUR은 공통적으로 최대 열방출율에 도달하기 전에 연기발생율이 최대값을 보였으며, 또한 최대 열방출율

도달 약 30초 전에 최대 연기발생율이 나타난 것을 알 수 있다. 플래시오버가 발생하지 않은 시험체에 대해서는 최대 열방출율과 최대 연기발생율 발생 시점에 대한 차이가 동일하지 않았으며, 열과 연기 발생 최대 시점의 발생 순서가 일정하지 않았음을 알 수 있다.

2.2.2 최대 열방출율과 최대 연기발생율에 대한 상관성 분석

플래시오버가 발생된 시험체인 EPS와 PUR에 있어서 최대 열방출율은 플래시오버 발생 열방출율인 1000 kW와 동일하기 때문에, EPS와 PUR의 최대 열방출율과 최대 연기발생율간의 관계는 플래시오버와 최대 연기발생율간의 관계와 동일하다. 따라서 EPS와 PUR에 있어서 열과 연기의 발생 시점만을 놓고 비교해 보면 Table 2와 같다.

Table 2. Time Result of EPS and PUR

Specimen	Time to HRR _{max}	Time to SPR _{max}	
EPS	F1	564.0	534.0
	S2	589.0	559.0
	F2	384.0	354.0
	S3	788.0	758.0
	F3	450.0	420.0
PUR	F1	877.0	847.0
	S2	815.0	785.0
	F2	787.0	757.0
	S3	1144.0	1114.0
	F3	824.0	794.0

Table 1. Result of 23 specimens in KS F ISO 13784-1

Case ID	HRR _{max}	time to HRR _{max}	SPR _{max}	Time to SPR _{max}	Flashover	
EPS	F1	1000.0	564.0	37.6	534.0	○
	S2	1000.0	589.0	71.3	559.0	○
	F2	1000.0	384.0	22.5	354.0	○
	S3	1000.0	788.0	20.1	758.0	○
	F3	1000.0	450.0	22.3	420.0	○
GW	F1	324.3	1192.0	1.3	1169.0	×
	S2	388.0	973.0	1.2	1165.0	×
	F2	320.0	1000.0	1.3	1157.0	×
	S3	310.8	1138.0	2.4	1160.0	×
	F3	324.9	974.0	2.6	1170.0	×
PIR	F1	387.4	755.0	12.8	1170.0	×
	S2	518.7	795.0	8.1	1167.0	×
	F2	527.6	760.0	36.4	1169.0	×
	S3	365.6	1164.0	2.0	1160.0	×
	F3	433.8	902.0	36.5	1168.0	×
PUR	F1	1000.0	877.0	56.7	847.0	○
	S2	1000.0	815.0	79.0	785.0	○
	F2	1000.0	787.0	78.6	757.0	○
	S3	1000.0	1144.0	34.6	1114.0	○
	F3	732.1	824.0	39.6	794.0	×
SEG	F3	375.8	896.0	1.2	916.0	×
IK	F3	538.8	1200.0	11.9	1200.0	×
PM	F3	411.4	794.0	1.4	424.0	×

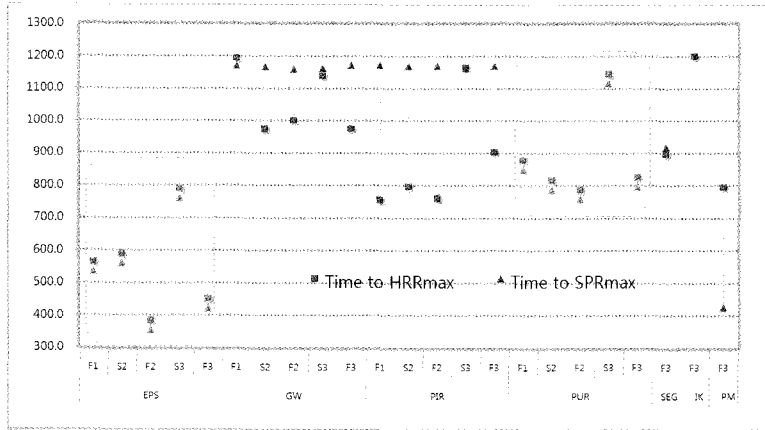


Figure 3. Time between Max HRR and Max SPR

Table 2의 10개 케이스 결과를 도식화시켜보면 Figure 4와 같으며, 모두 공통적으로 최대 열방출율 도달 시점 약 30초 직전에 최대 연기발생율이 보였음을 알 수 있다.

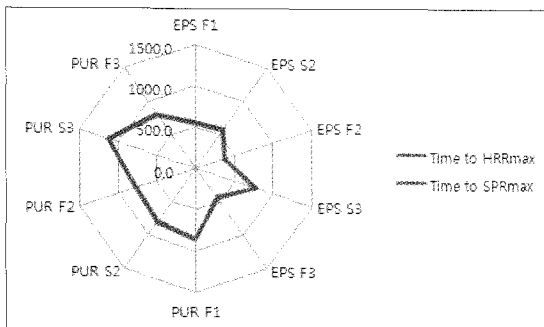


Figure 4. Time between HRRmax and SPRmax of EPS, PUR

Table 3. Time Result of non-flashover specimens

Specimen	Time to HRR _{max}	Time to SPR _{max}	
GW	F1	1192.0	1169.0
	S2	973.0	1165.0
	F2	1000.0	1157.0
	S3	1138.0	1160.0
	F3	974.0	1170.0
PIR	F1	755.0	1170.0
	S2	795.0	1167.0
	F2	760.0	1169.0
	S3	1164.0	1160.0
SEG	F3	902.0	1168.0
SEG	F3	896.0	916.0
IK	F3	1200.0	1200.0
PM	F3	794.0	424.0

플래시오버가 발생하지 않은 13개 케이스에 대한 결

과는 Table 3과 같은데, 최대 열방출율 발생시점과 최대 연기발생율 발생 시점에 대한 통일된 순서가 관측 되지 않았다.

Table 3을 도식화시키면, Figure 5와 같은데, 15개 케이스에 대해서 최대 열방출율 발생 시점의 전과 후로 최대 연기발생율이 산재되어 나타났으며, 통일된 순서를 보이고 있지 않음을 알 수 있다.

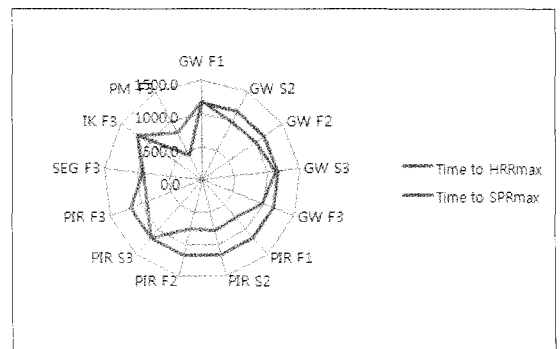


Figure 5. Time between HRRmax and SPRmax of non-flashover specimen

플래시오버가 발생한 EPS 및 PUR의 10개 케이스에 있어서, 최대 열방출율과 최대 연기발생율 발생 시점에 대한 상관성 분석을 실시하면, R2=1.0 으로 100%에 가까운 상관관계(Figure 6의 좌)를 보이고 있다. 따라서 플래시오버가 발생한 시험체의 경우, 최대 연기발생율이 나타난 시점으로부터 특정 시간 이내에 최대 열방출율이 발생한다는 것을 결론지을 수 있다. 더

불어 플래시오버가 발생하지 않은 13개 케이스에 있어서는, 최대 열방출율과 최대 연기발생율간의 발생 시점에 대한 상관성은 $R^2=0.12$ 로 매우 저조한 것 (figure 6의 우)으로 나타났다.

3. 결론

- (1) 플래시오버가 발생할 경우에, 연기발생율이 최대값에 먼저 도달한 이후 일정 시간 이후에 최대 열방출율 1000 kW(플래시오버 발생시점)가 발생하였음을 알 수 있다.
- (2) 발화실에서는 통상적으로 열이 먼저 발생한 후 연기가 발생하게 되므로, 열방출율의 최대값 도달 시점이 연기발생율의 최대값 도달 시점보다 먼저 나타나지만, 본 연구를 통해 플래시오버가 발생할 경우, 급격한 실내 산소 소모로 인해 짧은 순간에 과다한 연기발생을 초래하게 되어 연기발생이 열방출율의 최대 상승값 시점보다 먼저 도달하게 됨을 알 수 있었다.
- (3) 본 연구에서 비록 한정된 케이스에 대한 실험데이터 분석을 통해, 최대 연기발생율의 도달 시점에 의한 플래시오버의 발생시점을 예측하는 것을 일반화시키기엔 한계를 가지고 있다. 하지만, 일정 시간대비 급격한 연기발생을 보이는 시험체의 연기발생율(SPR) 분석을 통해 플래시오버

의 발생을 예측할 수 있다는 개연성을 도출해 낸 점은 향후 실내에 장착되는 연기감지기에 연기발생량을 측정할 수 있는 기능을 추가시켜 플래시오버의 발생시점을 예측할 수 있음을 시사해주는 유의미한 결과로 판단된다.

참고문헌

1. KS F ISO 13784-1, “건축용 샌드위치 패널 구조에 대한 연소성능 시험방법-제1부 : 소규모실 시험”, 2009
2. NFPA 265, “Standard method of fire tests for evaluating room fire growth contribution of textile wall coverings”, US, 1994
3. EN 14390, “Fire Test-Large scale room reference test for surface products”, CEN, Brussels(2007)
4. EN 13823, “Reaction to fire tests for building products-Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item”, Brussels, Belgium, 2002
5. V. Babrauskas, “Heat release rate in fires”, Chapter 4, V. Babrauskas and S. J. Grayson Eds., Elsevier Applied Science, New York(1992)

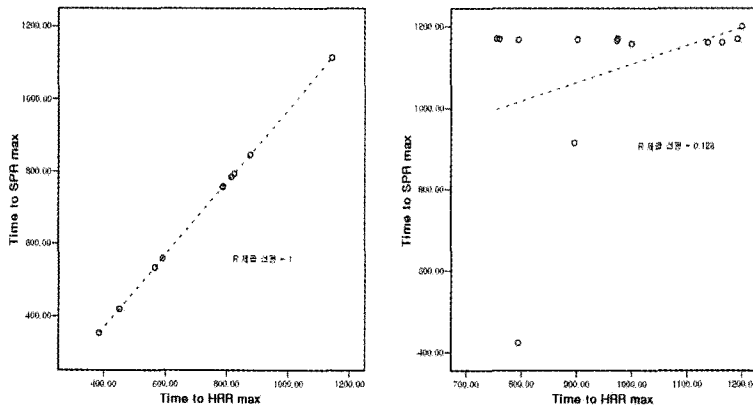


Figure 6. Correlation analysis between flashover and non-flashover cases