

# 샌드위치 패널의 난연 연소성능 평가를 위한 중소규모 및 실대규모 화재시험 방법간 상관성 연구

박계원/ 건재환경팀 연구원

## 1. 머리말

현재 국내에서는 샌드위치 패널의 난연 성능을 평가하기 위해 KS F ISO 5660-1(콘칼로리미터) 시험법<sup>1)</sup>을 적용하고 있으나, 이는 샌드위치 패널을 건물의 내부 마감재료로 간주하여 패널의 일부(0.1 m × 0.1 m × 0.05 m)만을 채취하여 시험하는 소규모 (small scale) 화재시험 방법이다. 실제 샌드위치 패널은 건물의 내장재로서 뿐만 아니라 냉동창고, 임시사무실, 축사, 공장 등의 외벽, 천장, 바닥에 적용되는 자립형 구조체로써 더 널리 활용되고 있으며 이러한 구조적 조립체로 시공되는 샌드위치 패널에 대한 난연 연소성능<sup>2)</sup>을 합리적으로 평가하기 위해서는 중규모 및 실대규모와 같은 다양한 스케일의 비교 시험을 통한 종합적 결과의 검증이 요구된다.

본 연구에서는 국내 4종[스티로폼 1종(Expanded PolyStyrene ; EPS), 우레탄폼 2종 (PolyIsocyanuRate ; PIR, PolyURate ; PUR), 그라스울 1종(Glass wool)]의 샌드위치 패널에 대해 소규모-중규모-실대규모 화재시험을 수행하여 재료별 난연 연소성능을 평가하였으며, 화재 시험 규모에 따른 특성 및 상관성을 분석하여, 샌드위치 패널의 난연 연소성능을 합리적으로 평가할 수 있는 시험방법을 고찰하고자 한다.

## 2. 화재 시험 규모별 개요

### 2.1 소규모 화재 시험방법 및 평가방법

#### 2.1.1 소규모 화재 시험방법

통상 콘칼로리미터법으로 지칭되는 ISO 5660-1 시험방법은, 우리나라 및 일본에서 난연 연소성능 평가를 위해 국가 기준으로 적용하고 있는 대표적인 소규모 화재 시험 방법이다. 유럽 및 북미 등의 화재 선진국에서는 주로 화재 모델링 및 화재 공학의 기초 데이터 제공을 위해 콘칼로리미터법을 사용하고 있으며, 바닥재를 제외한 건축 내장재중 샌드위치 패널과 같은 복잡재가 아닌 단일 물성의 내장재에 대한 연소 성능 측정에 적용하고 있다. 중규모 및 실대규모와 같은 시험을 하지 않더라도 단일 물성

1) 국토해양부(구 건설교통부)고시 제2006-476호 [건축물의 내부마감재료의 난연성능기준]

2) 난연 연소성능 : 통상 'Reaction-to-fire'로 지칭되며 발화부터 초기 피난이 가능한 20분 이내에 발생하는 화재로 인한 연소반응(열 및 연기발생, 화염전파, 플래시오버 등)을 측정.

내장재의 재료적 난연 연소성능 측정에 있어서는 중규모 및 실험규모 시험을 대체할 수 있는 신뢰성 있는 시험방법으로 평가되고 있다.

### 2.1.2 평가 방법

일본 건축기준법 및 국내 국토해양부고시에서는 난연등급을 불연재료, 준불연재료, 난연재료의 3가지 등급으로 분류하며, 등급분류를 위해 ISO 5660-1 콘칼로리미터 시험방법을 적용시키며, <표 1>과 같다.

<표 1> 일본의 화재성능 등급

Class	Heat	Burning time	Criterion
class 1	50 kW/m <sup>2</sup>	20 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>▫ THR<sup>a)</sup> ≤ 8 MJ/m<sup>2</sup></li> <li>▫ PHRR<sup>b)</sup> &lt; 200 kW/m<sup>2</sup> during 10 secs</li> <li>▫ No through holes &amp; cracks, which are harmful for the performance of fire protection, are allowed.</li> </ul>
class 2		10 min	
class 3		5 min	

a) THR : Total Heat Release (총열방출열량)

b) PHRR : Peak Heat Release Rate (최대열방출율)

1992년 ULC(Underwriter's Laboratories of Canada)의 화재위원회는 캐나다 임산 연구소에서 검토한 시험방법(콘칼로리미터법 사용)을 건축재료의 연소성평가 표준시험방법으로서 기준화<sup>4)</sup> 하였으며, <표 2>와 같이 평가하였다. 여기서 총방출열량(Total Heat Release; THR)은 시험체의 전체 양을 대표할 수 있는 밀도 및 총 무게 외에 화재 열량으로 방출되는 전체 대표값의 한계치를 의미하는 것으로 해당 시험체의 화재 강도에 대한 총체적 내재 열량으로 이해할 수 있다.

<표 2> NBC<sup>a)</sup>의 화재성능 등급

Class	PHRR (kW/m <sup>2</sup> )	THR (MJ/m <sup>2</sup> )	Examples
1	≤10	≤5	Ceramics-fiber board
2	≤100	≤25	Gypsum board, Glass wool
3	≤150	≤50	FR ply-wood board
4	≤300	≤100	Wood materials
5	>300	>100	EPS

(15분간 50kW/m<sup>2</sup>의 복사열로 가열)

a) NBC ; National Building code of Canada

## 2.2 중규모 화재 시험방법 및 평가방법

### 2.2.1 중규모 화재 시험방법

유럽연합(EU)에서는 샌드위치 패널을 포함한 모든 종류의 건축재료에 대해 화재성능 등급제도인 EuroClass를 운영하고 있으며 EN 13501-1(*Fire classification of construction products and building elements. Classification using data from reaction to fire tests*)에 규정되어 있다. 유럽 내에 수출입되는 모든 종류의 건축재료에 대한 화재안전성능을 등급을 나누어 통합 규제하고 있으며, 등급분류에 사용되는 시험방법들 중에서 샌드위치 패널을 비롯한 벽체 제품의 난연 연소성능의 평가를 위해 중규모 화재 시험방법인 EN 13823 (SBI; *Single Burning Item*)을 채택하고 있다. 샌드위치 패널은 자체적으로 벽체역할을 할 수 있기에, EN 13501-1의 벽체에 대한 시험방법에 따라 성능 평가를 하고 있으나, 샌드위치 패널의 구성체인 강판 등의 구조적 평가에 한계가 있음이 밝혀져 EU Commission에서 기술적, 제도적 재검토를 현재 진행 중에 있다. 특히, EN 13823 (SBI) 시험시 유의사항으로, 샌드위치 패널 시험체는 내,외측 코너 모두 보강철판(ㄱ형강)으로 반드시 보강하여 시험하도록 EN 14509(유럽의 샌드위치 패널 제품규격)에서 상세히 규정하고 있으며, 시험체 내·외측에 보강철판(ㄱ형강)이 없거나 일부 누락된 경우, 시험결과와 신뢰성을 확보할 수 없어 시험체 설치시 실공법을 반영한 신중한 시공법이 요구되고 있다.

### 2.2.2 평가 방법

샌드위치패널 등 내장재의 화재성장 영향도를 FIGRA(Fire Growth Rate), 연기발생량을 SMOGRA(SMOke Growth Rate)로써 지수화하여 난연등급에 적용하고 있다. EN 13501-1 부속서에서는 난연 등급을 분류하고 있으며, 등급별 성능을 살펴보면 A<sub>1</sub>은 불연성능을, A<sub>2</sub> 및 B는 실규모화재시 플래쉬오버를 발생시키지 않는 높은 난연성능을 전제하며, A<sub>2</sub>는 B를 최소한 만족시켜야 하고 EN ISO 1716시험을 하여 재료의 잠재유효발열량 (통상, PCS gross calorific potential)이 3.0 MJ/kg 이하를 만족시켜야 한다.

## 2.3 실대규모 화재 시험방법 및 평가방법

### 2.3.1 실대규모 화재 시험방법

국제표준화기구(ISO) 화재전문위원회(TC 92)에서는 2002년 샌드위치 패널구조에 대한 전용 시험방법(ISO 13784-1)을 국제표준으로 제정하였으며, 이를 통해 샌드위치 패널에 대한 종합적인 난연 연소성능 평가방법을 구축하였다. 샌드위치 패널의 실대규모 화재시험방법인 ISO 13784-1은 샌드위치 패널을 조립하여 구성된 소형실(2.4 m × 2.4 m × 3.6 m)에 대하여 내부 한 모서리에 직접 불꽃을 노출시켰을 때, 샌드위치 패널 조립체의 화재성능을 시험하며, 구조물의 플래쉬오버까지의 화재성장에 대한 기여도, 내부 화재가 외부공간 또는 인접건물로 전파될 잠재적 가능성, 구조물 붕괴의 가능성, 시험실 내부에서의 화재가스 및 연기의 발생과 같은 화재위험을 평가한다.

### 2.3.2 평가 방법

스웨덴 국립화재연구소(SP)는 <표 3>과 같이 화재성장지수(Fire Growth Rate; FIGRA)를 적용한 난연 등급분류안을 제시하였는데, 이는 EN 13501-1의 부속서에서 언급하고 있는 실험규모와 SBI 시험방법간의 열방출율의 상관관계를 바탕으로 하고 있으며, 실험규모 화재시험인 ISO 13784-1 및 ISO 9705에서 측정된 열방출율(Heat release rate)을 FIGRA로 환산한 결과에 적용 가능하다. FIGRA(경과시간대비 열방출율의 최대치)지수는 그 수치가 높을수록 시험체로부터 화재확산위험이 고조될 수 있음을 나타내며, FIGRA 0.6 kW/s 이상 (C, D, E 등급)일 경우 플래시오버가 발생하는 것으로 확인되었다.

<표 3> 샌드위치 패널에 대한 화재 등급분류안

분류등급	성능분류 기준
A 등급	FIGRA ≤ 0.16 kW/s
B 등급	FIGRA ≤ 0.60 kW/s
C 등급	FIGRA ≤ 1.5 kW/s
D 등급	FIGRA ≤ 7.5 kW/s
E 등급	FIGRA > 7.5 kW/s

### 2.4 화재시험 규모에 따른 개요 비교

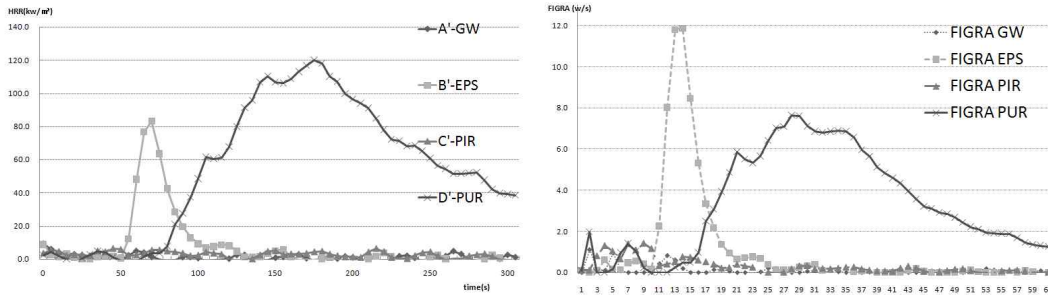
시험 규모	KS F ISO 5660-1	EN 13823	ISO 13784
	소규모	중규모	실험규모
시험 적용대상	건축용 내장재료	바닥재를 제외한 벽체 내장제품	샌드위치 패널 구조로 구축된 실(室)
시험체 (m)	0.1 × 0.1	(0.5 × 1.5) +(1 × 1.5)	2.4 × 3.6 × 2.4
측정요소	<ul style="list-style-type: none"> <li>열방출율</li> <li>연기발생율</li> <li>질량감소율</li> <li>CO, CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>열방출율</li> <li>연기발생율</li> <li>FIGRA</li> <li>SMOGRA</li> <li>측면화염전파</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>심재, 강판의 54곳 온도 측정</li> <li>복사열량</li> <li>열방출율, 연기발생율</li> <li>FIGRA, SMOGRA</li> <li>Flash over</li> <li>O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub></li> <li>정성적 관측사항 (착화, 화염전파, 균열, 변형 등)</li> </ul>

## 3. 화재시험 결과 분석

### 3.1 소규모 화재시험(KS F ISO 5660-1) 결과 및 화재성능 평가

패널별 열방출율인 [그림 1]에서 보면 PUR패널이 EPS패널보다 높게 나타났으나,

시간개념을 적용한 FIGRA인 [그림 2]로 비교해보면 오히려, EPS패널이 PUR패널보다 더 급격한 속도로 연소되었음을 알 수 있다. 즉, 열방출율에서는 PUR패널의 밀도가 EPS보다 더 높아 가연량이 많기 때문에 PUR의 열방출율이 더 높은 것으로 판단된다.



[그림 1] ISO 5660-1에 의한 패널별 열방출률 [그림 2] ISO 5660-1에 의한 패널별 FIGRA

<표 4>는 KS F ISO 5660-1의 난연성능 등급분류 결과이며, Glass wool은 심재와 패널재 모두 PHRR(최대 열방출율)값이 200 kW/m<sup>2</sup> 이하, THR값 또한 8 MJ/m<sup>2</sup> 이하의 범위에 들었으며, 5분 가열시 및 10분 가열시 모두 해당 조건을 충족하여 일본과 캐나다 기준의 적용 시 최대 2등급으로 분류되었다.

<표 4> 시험결과

분류	형태	PHRR(kW/m <sup>2</sup> )	THR(MJ/m <sup>2</sup> )	Class	
				Japan	Canada
Glass wool	core	12.9	3.0	3(2)	(2)
	panel	4.9	0.5	3(2)	(1)
EPS	core	368.2	22.9	out of range	(5)
	panel	83.1	2.4	3(2)	(2)
PIR	core	142.4	11.4	out of range	(3)
	panel	6.35	0.7	3(2)	(1)
PUR	core	268.7	31.5	out of range	(4)
	panel	120.1	16.5	out of range	(3)

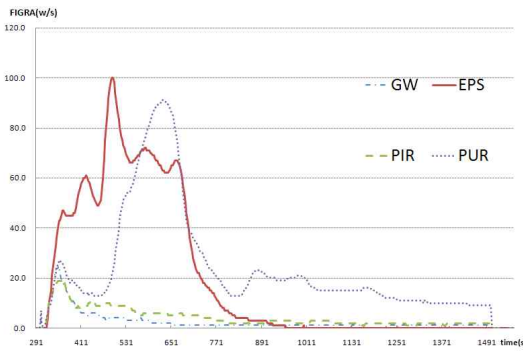
\* ( )는 10분간 가열시 판정등급.

EPS 심재는 PHRR이 368.2 kW/m<sup>2</sup>, THR이 22.9 MJ/m<sup>2</sup>로 캐나다 기준으로는 5등급 및 일본기준에서는 등급분류 범위를 벗어나 난연성능이 미미한 것으로 나타났다. 패널재의 경우 강판으로 인해 표면에서 관찰이 불가능한 단점이 있으며, EPS 패널재의 경우 방화상 유해한 균열 및 흠 생성과 같은 유관관찰 사항을 배제하고 열방출율에 의해서만 분류하자면 3급 및 2급을 충족시킬 수 있었다. 현재 국토해양부 고시에 의한 등급분류에는 유관관찰 사항이 포함되어, 관찰사항을 적용하면 EPS는 모두 등급을 벗어나게 된다. PIR 심재는 THR값이 11.4 MJ/m<sup>2</sup>로 나타나 등급 외로 규정되었으며, PIR패널재는 강판의 영향으로 인해 3급이나 2급으로 분류할 수 있었다. PUR은 패널

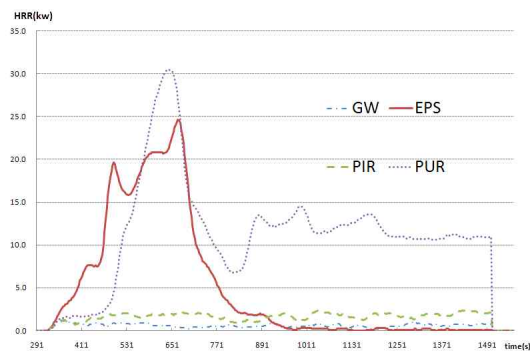
재 및 심재 모두 과도한 열방출을 발생으로 인해 등급범위 안에 포함시킬 수 없었다.

### 3.2 중규모 화재시험(EN 13823 SBI) 결과 및 화재성능 평가

[그림 4]를 보면, 열방출율은 SBI 시험시, PUR이 EPS보다 최대 열방출율이 더 높게 나왔음을 알 수 있지만, [그림 3]의 FIGRA 그래프에서 보면 최대 FIGRA수치가 PUR보다 EPS가 더 높았음을 알 수 있다. 이는 EPS가 PUR보다 같은 시간에 더 급격한 연소성장 추세를 보인 것으로, 순간 연소성이 4가지 재료 중 가장 높은 것으로 판단된다.



[그림 3] EN 13823 시험체에서의 FIGRA



[그림 4] EN 13823 시험체에서의 열방출률

SBI 시험의 결과를 <표 5>와 같이 EN 13501-1의 등급기준으로 분류해 보면, Glass wool은 BS<sub>1</sub>D<sub>0</sub>, EPS는 BS<sub>2</sub>D<sub>0</sub>, PIR는 BS<sub>1</sub>D<sub>0</sub>, PUR는 BS<sub>3</sub>D<sub>0</sub>로 결정된다. 즉, 4가지 재료 모두 열방출율 요인에 의해 B등급으로(A<sub>2</sub>등급에 포함여부는 EN ISO 1716시험을 하여 재료의 잠재유효발열량 (통상, PCS gross calorific potential)이 3.0 MJ/kg 이하 인지를 확인하여야 하나 본 연구에서는 실시하지 않음)분류되며, 연기발생량은 PUR이 가장 많이 생성되어 S<sub>3</sub>에 포함되고, Glass wool과 PIR은 S<sub>1</sub>의 분류에 들었다. 시험시 용융적하물은 4가지 재료 모두 생성되지 않아 D<sub>0</sub>의 등급으로 분류되었다. EN 13501-1에 의한 등급분류는 ISO 5660-1의 등급분류 기준에 비해 연기발생량과 시험시 용융적하물에 대한 여부가 포함되었음을 알 수 있으나, 각 등급간에 열방출율 및 FIGRA에 대한 범위가 너무 넓어, 본 연구의 시험체들은 전부 B등급으로 산출되었다.

<표 5> EN 13823에서의 화재등급평가

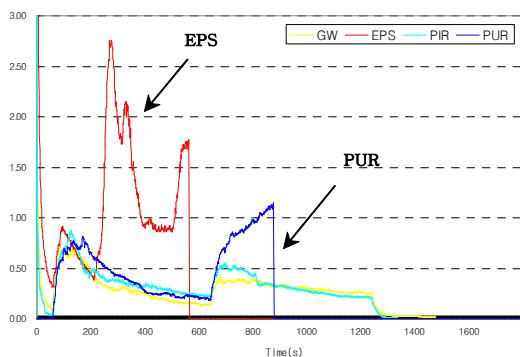
Item	FIGRA (W/s)	THR <sub>600S</sub> (MJ)	SMOGRA (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	TSP <sub>600S</sub> (m <sup>2</sup> )	droplet	Class
G.W	25.0	0.4	4.0	0.8	No	BS <sub>1</sub> D <sub>0</sub>
EPS	100.0	6.1	35.0	184.4	No	BS <sub>2</sub> D <sub>0</sub>
PIR	20.0	0.9	8.0	5.4	No	BS <sub>1</sub> D <sub>0</sub>
PUR	94.0	6.6	30.0	216.5	No	BS <sub>3</sub> D <sub>0</sub>

### 3.3 실험규모 화재시험(ISO 13784-1) 결과 및 화재성능 평가

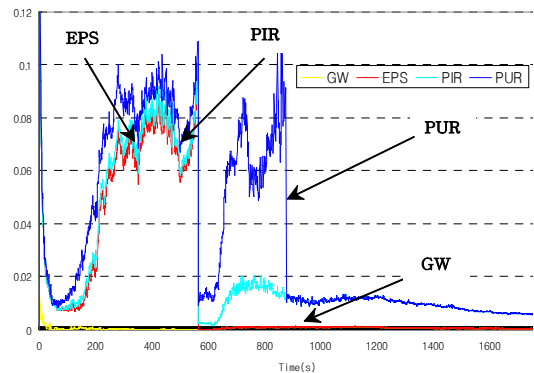
[그림 5]는 FIGRA 그래프로써 버너 및 시험체의 합산 열방출율/시간 합수를 도식화 한 것이다. 실제 room corner test에 대한 FIGRA는 앞서, 2.4.3절에서 언급한 바와 같이 버너영향을 배제시켜야 하며, 이를 바탕으로 시험체에 대한 FIGRA를 구하면 EPS (1.60 kW/s) > PUR(0.80 kW/s) > PIR(0.12 kW/s) > Glass Wool (0.02 kW/s)의 순서로 나타나, EPS 와 PUR의 플래쉬오버 판정순간 화재성장추이가 확연히 기타재료와 구별되었음을 알 수 있다.

EPS는 10분 이전에 두 번의 급격한 화재성장 상승 커브를 보여, 플래쉬오버 순간 1.60 kW/s의 FIGRA 외에도, 276초에 761 kW(버너영향 제외시 661 kW)의 열방출을 보여 2.39 kW/s(버너영향제외시)의 급속한 FIGRA 성장을 보여주었으며, PUR은 버너 300 kW 가열이후(10분 경과후) 급격한 화재성장력을 보여 플래쉬오버 순간 0.80 kW/s의 FIGRA가 측정되었다.

EPS와 PUR은 모두 플래쉬오버 발생시, FIGRA 0.6 kW/s 이상으로, [그림 3]의 플래쉬오버 발생경향과 일치함을 알 수 있다.



[그림 5] 재료별 FIGRA(버너 및 시험체)



[그림 6] 재료별 SMOGRA

10분을 기준으로 볼 때, 10분 이전에는 EPS, PUR의 SMOGRA 수치가 유사하게 나타났으며, 10분 이후 PUR의 플래쉬오버 발생이 시작되면서 PUR은 지속적으로 대량의 SMOGRA 수치를 보여주었다. Glass wool은 FIGRA 및 SMOGRA 모두에서 미미하며 일정한 기울기를 나타내어 가장 낮은 연소 특성을 나타내었다. PIR은 열방출 요인인 HRR 및 FIGRA에서는 기타 재료에 비해 상대적으로 저조한 값을 보였으나, 연기발생율을 환산한 SMOGRA에서는 PUR 및 EPS와 비등한 성장추세를 보였음을 알 수 있다.

<표 6> 재료별 분류 결과

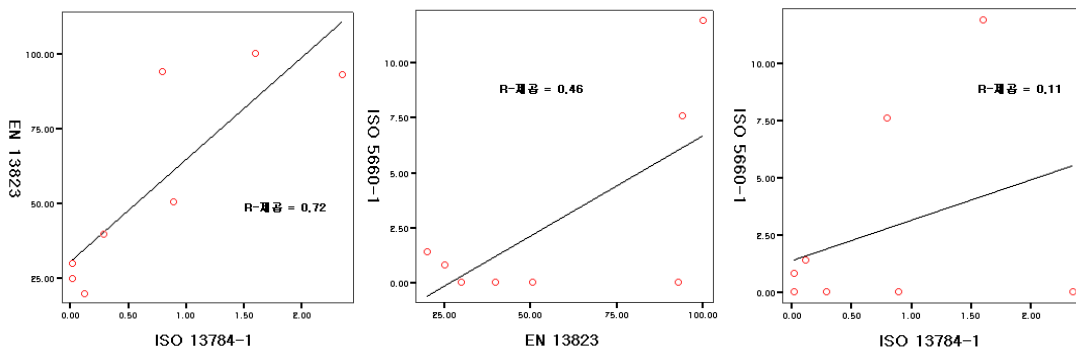
구분	GW	EPS	PIR	PUR
열방출율 <sup>a)</sup> (kW)	324	≥1000	387	≥1000
플래쉬오버유무	NO	Yes	NO	Yes
소요시간 (sec)	1192	564	755	877
FIGRA (kW/s)	0.02	1.60	0.12	0.80
최대연기발생율 (m <sup>2</sup> /s)	1.5	55.31	15.01	84.21
EN 13501-1 Class	A1	D	A2	C

FIGRA를 기준으로 한 EN 13501-1로 평가시, Glass wool은 A1등급, PIR은 A2등급, PUR은 C등급, EPS는 D등급으로 분류되었다.

#### 4. 화재시험 방법에 따른 상관성 분석

샌드위치 패널을 소재로 이용한 소규모 화재시험(ISO 5660-1)과 중규모 화재시험(EN 13823)을 비교분석한 결과 넓은 이산치를 보이며 상관성이 낮은 것( $R^2=0.46$ )으로 나타났다. 또한, 소규모 화재시험과 대규모 화재시험(ISO 13784-1)간에도 매우 낮은 상관관계( $R^2=0.11$ )를 보여주고 있는데, 이는 소규모 화재시험을 통해 중규모 및 실대규모 화재시험시 샌드위치 패널의 난연 연소성능 결과의 추측 및 비교 검증이 어려울 수 있다고 볼 수 있다.

중규모 화재시험과 대규모 화재시험 간에는 다소 상관성( $R^2=0.72$ )이 있다고 나타났으나, 이는 상관도에서 볼 수 있듯이, Glass wool이나 PIR과 같은 비교적 저방출열량의 시험편에서는 약간의 상관성이 있지만, 플래시오버를 야기시키는 고방출열량의 시험체에 대해서는 넓은 이산치를 보이고 있어 상관성이 저조함을 알 수 있다.



[그림 7] 시험방법간 상관성 그래프 Figure 7. SMOGRA on materials.

또한, 중규모(EN 13823) 및 소규모(KS F ISO 5660-1)은 시험원리상, 샌드위치 패널의 난연 연소성능의 중요 측정항목인 플래시오버의 측정 및 발생경향을 계측할 수 없으



며, 구조체로서 시공되는 샌드위치 패널의 실공법 반영이 어렵기 때문에 ISO 13784-1과 같은 실험규모 화재시험방법과의 상관성이 저조한 것으로 판단되었다.

따라서, 플래시오버를 야기시키는 고방출열량의 시험체에 대해서는 ISO 13784-1과 같은 실험규모 화재시험으로 실시되어야, 샌드위치 패널에 대한 난연 연소성능을 정밀하게 측정할 수 있다고 판단된다.

## 5. 맺음말

(1) 화재 성장기 직후 급격히 순간적으로 실내 가연물을 연소시키는 현상인 플래시오버의 발생시점을 판단 및 예측하는 것은 초기 피난시의 인명안전에 매우 중요한 척도가 되며 구조체의 손상 및 붕괴의 경향성을 판단할 수 있는 중요 지표가 된다. ISO 13784-1에서 다루는 난연 연소성능이란 ‘reaction-to-fire’로서, 이는 화재발생 후 초기 피난까지(20분 이내)의 화재 연소성장(플래시오버, 열방출율, 연기발생율, 화염전과거리, 용융적하물 등)을 다루는 것으로, 소규모 화재시험 및 중규모 화재시험에서 구현 및 측정할 수 없는 플래시오버 현상을 측정할 수 있으며 이를 통해, 샌드위치 패널의 재료 및 구조적 영향이 반영된 합리적인 난연 연소성능 평가를 가능하게 해 주었다.

(2) ISO 13784-1는 실제 화재 성상을 구현하기 위해, 현장 시공법과 동일한 조건으로 시험체를 설치하여 구조적 자립체로서 샌드위치 패널에 대한 화재시험을 실시하며, 이를 통해 열방출율, 연기발생율, 복사열량, 부분별 온도분포, 화염전과, 플래시오버 등과 같은 종합적인 난연 연소성능(reaction-to-fire)에 관한 정보를 알 수 있게 해준다. 중규모 화재시험인 EN 13823 SBI 시험 및 현재 소규모 화재시험인 KS F ISO 5660-1은 샌드위치 패널의 강관특성 및 구조체로서의 특성이 반영되지 않으며, 환기배형 화재에 의한 플래시오버 예측이 어렵기 때문에, 샌드위치 패널의 합리적인 난연 연소성능 평가를 위해서는 실험규모 화재시험방법인 ISO 13784-1 등이 점차적으로 시도되어 정착될 필요가 있다. 또한 향후 실험규모 화재시험에 대한 점층적인 데이터 베이스 확보를 통해 국내 실정에 적합한 샌드위치 패널의 등급분류 시스템을 구축할 수 있도록 경주해야 할 것으로 판단된다.

### [참고문헌]

1. ISO 5660-1, Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1 : Heat release(Cone calorimeter method), ISO, 2002
2. EN 13823, Reaction to fire tests for building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single item, 2003
3. V. Babrauskas, "Heat release rate in fires", Chapter 4, V. Babrauskas and S. J. Grayson Eds., Elsevier Applied Science, New York, 1992