

실대화재시험의 연소성능 예측을 위한 시뮬레이션 적용

정재균/건재환경팀 책임연구원 · 박계원/건재환경팀 연구원

1. 서론

공장 및 냉동창고 등의 건축자재 용도로 널리 활용되고 있는 샌드위치 패널에 대한 화재성능 평가를 위해 국내에서 활용되는 일반적인 방법은 단위 시편(small scale)에 대한 연소성 시험인 ISO 5660-1(Cone calorimeter test)이다. 그러나 small scale test 결과로는 실제 샌드위치 패널의 전반적 화재 전개양상을 예측하는데 한계가 있기 때문에 실대규모(Full scale) 시험에 대한 필요성이 제기되고 있다. Full scale test의 개발 및 연구가 활발한 유럽 각국에서는 ISO 13784-1 및 ISO 9705와 같은 실대규모 화재시험을 수행함과 더불어, 연소성능의 등급분류의 예측을 위해 경제적이고 공학적인 화재해석 프로그램의 개발도 진행되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 샌드위치 패널 연소성능 분석을 위하여 ISO 5660-1(소형시편에 대한 콘칼로리미터 시험), EN 13823(Single Burning Item, 중형 시편에 대한 연소시험), ISO 13784-1 (Room Corner Test for Sandwich panel building systems, 실대규모 시험)과 같은 중소형 규모 및 실대규모 시험을 수행하였으며, 수행된 시험결과에 대한 예측을 위해 Conetools 프로그램을 적용한 시뮬레이션을 수행하였다. 우선, ISO 5660-1로 측정된 결과값(Mass loss rate, Heat release

rate, Total heat release rate, Effective heat combustion, Specific extinction area 등)들을 시뮬레이션을 위한 기초입력 변수로 선정하여 프로그래밍 하였으며, 시뮬레이션 수행으로 도출되어지는 등급분류 예측값을 실제 시험결과에 비교 검증하였다.

4종의 샌드위치 패널을 시험체로 선택하였으며, EN 13501-1에서 제시하는 유로클래스를 시험체의 연소성능에 대한 등급분류의 기준으로 적용하여 평가를 실시하였다.

2. 시뮬레이션(Conetools) 개요 및 입력 변수

2.1 시뮬레이션(Conetools) 개요

본 연구에서 수행한 시뮬레이션인 Conetools는, 소형시편에 대한 연소시험인 ISO 5660-1(Cone calorimeter Test)에 의한 측정 결과를 기반으로 중·대규모시험인 Room Corner Test (RCT) 와 EN 13823(Single Burning Item, SBI) 시험의 결과를 예측하고 이를 토대로 유로클래스의 등급을 추정하는 프로그램이다. Conetools는 스웨덴 SP 연구소에서 개발한 화염 확산 예측 모

델중에 하나로 특정 heat flux level에서의 콘칼로리미터 시험에 의한 결과를 입력변수로 하여 SBI 또는 RCT 의 시험 결과를 예측가능하게 해 준다. 소형시험의 결과값을 통해 중대형 화재시험 결과의 예측 및 등급분류를 도출해내는 경제적이고 편리한 도구로 유럽공동체 국가에서 화재성능 예측을 위해 사용되는 수치해석 프로그램의 하나이다. 최종적으로 출력되는 예측값으로는 시간에 따른 Heat release rate (HRR) 및 화재성장에 관련된 FIGRA (Fire growth rate index) 지수로, 이를 근거로 유로클래스의 등급 또한 산출되어 진다.

2.2 시뮬레이션 수행을 위한 입력변수

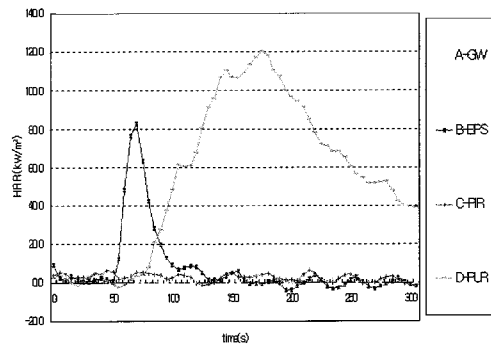
시뮬레이션 입력변수 선정을 위해 실제 시험에 사용된 시험체는 스티로폼 1종(EPS), 우레탄폼 2종(PIR, PUR), 그라스울 1종(Glass wool)이며, 이를 단위시험(10cm×10cm)으로 제작하여 ISO 5660-1를 수행하였다(표 1참고). 본 연구에서는 선정된 시료를 콘칼로리미터에 수평방향으로 설치하고 외부 점화장치를 부착한 상태로 50 kW/m²의 복사열에 10분 동안 노출시켜 착화되는 시간과 착화된 시료로부터 열방출을 등을 측정하였다.

[그림 1]의 정보를 바탕으로 시뮬레이션을 수행

〈표 1〉 ISO 5660-1 (Cone calorimeter test) 시험체 구성

	THK(mm)	Insulation	Composition
A	50.5	Glass Wool Sandwich Panel	Steel Plate 0.5t+A (48 kg/m ³)
B	50.0	EPS Sandwich Panel	Steel Plate 0.5t+B (15 kg/m ³)
C	50.0	PIR Sandwich Panel	Steel Plate 0.5t+C (50 kg/m ³)
D	50.0	PUR Sandwich Panel	Steel Plate 0.5t+D (40 kg/m ³)

단열재	시험체명	PHRR(kW/m ²)	THR(MJ/m ²)
Glass wool	A	4.9	0.5
EPS	B	83.1	2.4
PIR	C	6.35	0.7
PUR	D	120.1	16.5



[그림 1] ISO 5660-1 (Cone calorimeter test) 시험체 구성

하였으며, 상기 결과값 외에, 시간에 따른 Mass loss rate(g/s), Heat release rate(kW/m²), Total Heat release rate(MJ/m²), Effective heat combustion(kJ/g), Specific extinction area(m²/kg) 등의 변화값을 ISO 5660-1 데이터에서 추출하여 시뮬레이션 검증에 적용하였다.

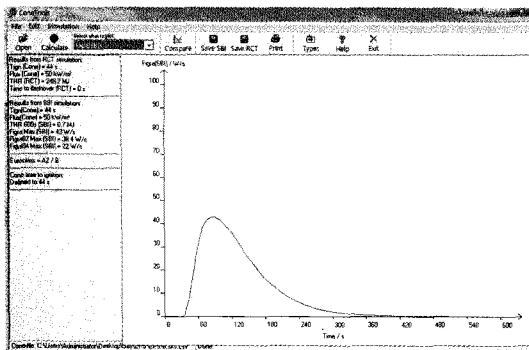
3. 시뮬레이션 검증 및 결과

3.1 EPS 재료에 대한 시뮬레이션 예측 및 실제 결과 비교

3.1.1 EPS 재료에 대한 Conetools SBI의 예측 결과

Tign (cone) : 44 sec (착화 시간)

Heat Flux (cone) : 50 kW/m² 의 condition으로 설정.



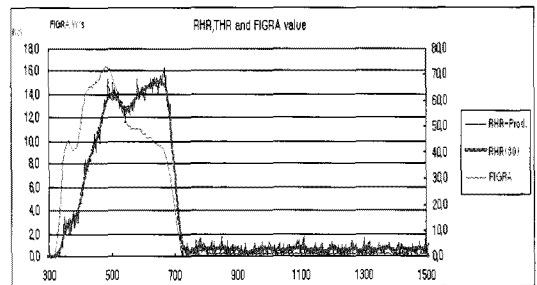
[그림 2] EPS에 대한 SBI 시뮬레이션시 FIGRA 예측 그래프

· EPS에 대한 Conetools의 SBI 시뮬레이션 결과 최대 FIGRA값은 43 W/s로 예측되었다.

화재성장지수 (FIGRA; Fire growth rate index, W/s)

$$FIGRA = 1000 \max \left(\frac{HRP_{av}(t)}{t-300} \right)$$

· 실제 SBI 시험 결과[그림 3]에서는 최대 FIGRA 값이 73 W/s로 측정되었으며, 이는 시뮬레이션 결과에 비해 약 70% 증가된 것임을 알 수 있다.



[그림 3] EPS에 대한 SBI 시험시 FIGRA 및 HRR그래프

· Euroclass 등급 분류 기준(EN 13501-1)으로 판단할 때, 시뮬레이션 예측시 EPS는 A2 또는 B 등급에 속하는 것으로 분류되었다. (단, 연기량에 대한 입력변수 제외시). 실제 SBI 시험결과를 Euroclass 등급 분류 기준으로 볼 때, B등급으로 분류되어, 실제 결과와 시뮬레이션 등급이 동일 등급 범주에 포함되어짐을 알 수 있다.

3.1.2 EPS 재료에 대한 Conetools RCT의 예측결과

· EPS에 대한 Conetools의 RCT 시뮬레이션 수행결과, 버너 100 kW 가열시 130초에서 140.1 kW의 Heat release rate(열방출율)을 나타냈

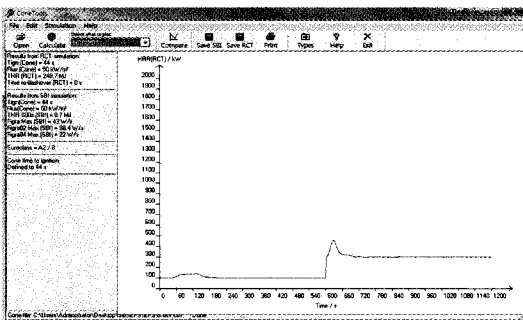
〈표 2〉 SBI에 의한 Euroclass 등급분류 기준 (EN 13501-1)

난연등급 (CLASS)	성능분류기준	부가항목
A1	해당없음	해당없음
A2	FIGRA ≤ 120W/s LFS<끝단전파거리 THR600s ≤ 7.5MJ	주1) 연기량에 따른 분류 S ₁ = SMOGRA ≤ 30m ² /s ² 및 TSP600s ≤ 50m ² S ₂ = SMOGRA ≤ 180m ² /s ² 및 TSP600s ≤ 200m ² S ₃ = 기타 주2) 불꽃 적하물에 의한 분류 d ₀ = 최초 600초 동안 불꽃 적하물 발생이 없을 것 d ₁ = 최초 600초 동안 10초 이상 지속되는 불꽃 적하물 발생이 없을 것 d ₂ = 기타
B	FIGRA ≤ 120W/s LFS<끝단전파거리 THR600s ≤ 7.5MJ	
C	FIGRA ≤ 250W/s LFS<끝단전파거리 THR600s ≤ 15MJ	
D	FIGRA ≤ 750W/s	
E	해당없음	해당없음
F	해당없음	해당없음

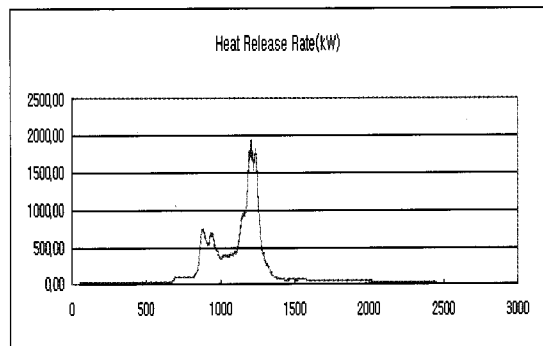
으며, 버너 300 kW 가열시 628초에서 458 kW의 열방출율이 출력되는 것으로 예측되었다.

- 더불어, 플래시오버는 발생하지 않는 것으로 시뮬레이션 되었으며, 등급 분류시 A2 또는 B등급 이상으로 분류되어졌다.

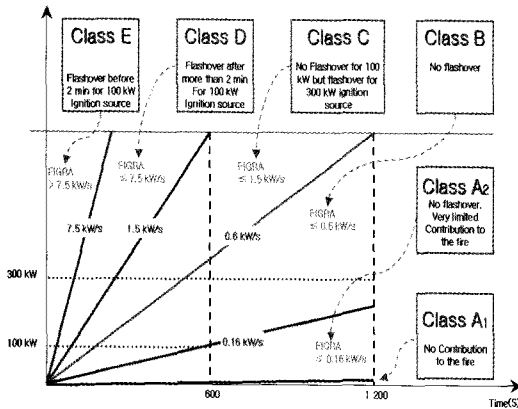
- 실제 RCT 시험 결과[그림 5]에서는 플래시오버가 발생하였으며, 10분간 100 kW 버너 가열시 9분 24초에서 1000 kW 도달되어 플래시오버로 판정되었다.
- EPS에 대한 RCT 실제 시험시 측정된 최대 열방출 시점을 FIGRA로 환산한다면 1.94 kW/s로



[그림 4] EPS에 대한 RCT 시뮬레이션시 HRR 예측 그래프



[그림 5] EPS에 대한 RCT 시험시 HRR 그래프



[그림 6] Euroclass RCT 등급분류 기준 (EN 13501-1)

표현되며 Euroclass 등급 분류 결과 D등급에 분류됨을 알 수 있다.

- 실제 RCT 시험 결과와 EPS에 대한 시뮬레이션 RCT 예측결과를 비교해 볼 때, 소형 시편을 이용한 conetools 시뮬레이션 결과가 중대형 시편인 RCT의 결과를 정확히 예측하지 못함을 알 수 있다.

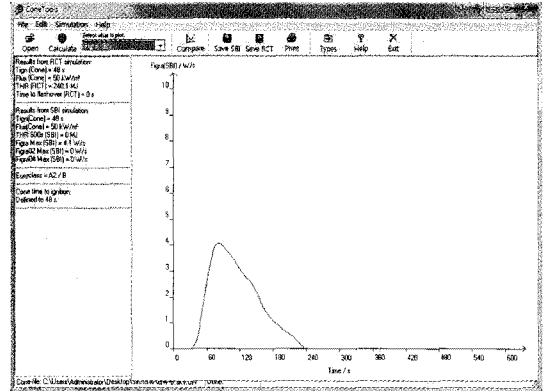
3.2 Glass wool 재료에 대한 시뮬레이션 예측 및 실제 결과 비교

3.2.1 Glass wool 재료에 대한 Conetools SBI의 예측결과

Tign (cone) : 48 sec (착화 시간)

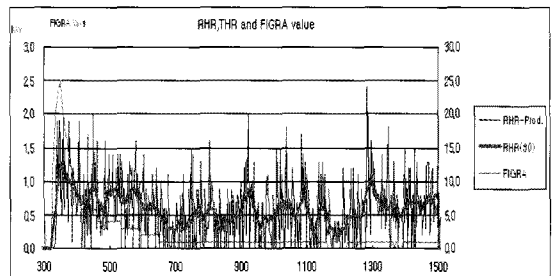
Heat Flux (cone) : 50 kW/m² 의 condition으로 설정.

- Glass wool 재료에 대한 SBI 시뮬레이션 수행 결과, 최대 FIGRA값은 4.1 W/s로 예측되었다.



[그림 7] GW에 대한 SBI 시뮬레이션시 FIGRA 예측 그래프

- 이는 극히 저조한 화재성장 지수로 판단되며, Euroclass로 분류할 때, A2 또는 B등급에 속하는 것으로 나타났다.
- 실제 SBI 시험 결과[그림 8]에서는 최대 FIGRA 값이 25 W/s로 나타났으며 시뮬레이션 결과(4.1 W/s)와는 20.9 W/s의 차이가 발생하여, 시뮬레이션 결과가 실제보다 약 5배정도 감소된 것임을 알 수 있다.
- Euroclass 등급 분류 기준으로 분류시 실제결과와 시뮬레이션 결과는 모두 동일하게 B 등급(120 W/s 이하이면 A2 또는 B)으로 분류되나, 두 결

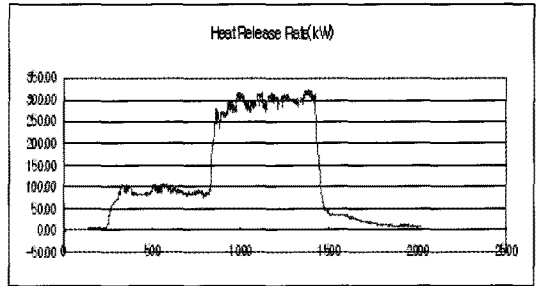


[그림 8] GW에 대한 SBI 시험시 FIGRA 및 HRR 그래프

과값 간에 오차폭을 고려할 때, 실제 결과에 대한 예측율은 신중한 검토가 있어야 한다.

3.2.2 Glass wool 재료에 대한 Conetools RCT의 예측결과

- Glass wool 재료에 대한 RCT 시뮬레이션 수행 결과, 버너 100 kW 가열시 88초에서 103.5 kW의 Heat release rate(열방출율)을 나타냈으며, 버너 300 kW 가열시 632초에서 317 kW의 열방출율이 나타나는 것으로 예측되었다.
- 또한, 플래시 오버는 발생되지 않는 것으로 예측되었으며, 버너 출력만큼의 열방출율만이 표출되는 것으로 표현되었고, 등급 분류시 A2/B 등급 이상으로 분류되어졌다.
- 실제 RCT 시험 결과[그림 10]에서도 플래시 오버는 발생하지 않았으며, 최대 324 kW의 열방출율이 측정되었다.
- 실제 RCT 시험에서, 최대 열방출율 시점을 FIGRA로 환산한다면 0.27 kW/s로 표현되며 Euroclass 등급 분류 결과 B등급에 분류됨을 알 수 있다. 실제 RCT 시험 결과와 Glass wool



[그림 10] GW에 대한 RCT 시험시 HRR 그래프

에 대한 시뮬레이션 RCT 예측결과가 유사한 등급분류 결과를 보였는데, Glass wool과 같이 거의 타지 않는 재료일 경우, 급격한 FIGRA 성장지수가 관측되지 않았으며, 시뮬레이션 결과 또한 시험결과와 유사한 양상을 보여 주었다.

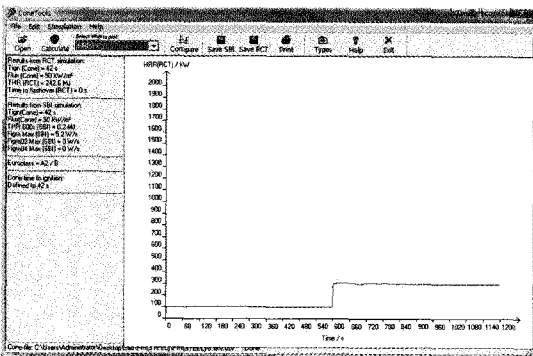
3.3 PUR 재료에 대한 시뮬레이션 예측 및 실제 결과 비교

3.3.1 PUR 재료에 대한 Conetools SBI의 예측 결과

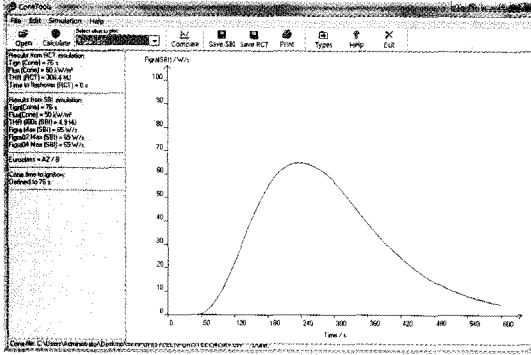
Tign (cone) : 76 sec (착화 시간)

Heat Flux (cone) : 50 kW/m² 의 condition으로 설정.

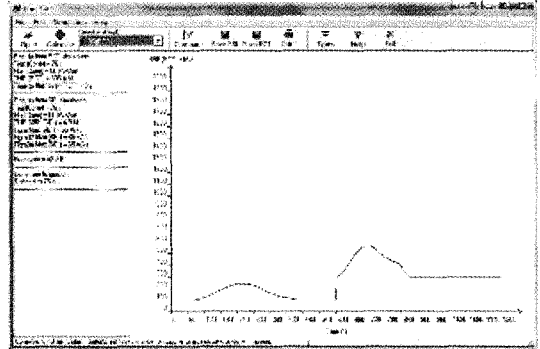
- PUR 재료에 대한 SBI 시뮬레이션 수행결과, 최대 FIGRA 값은 65 W/s로 예측되었다.
- Euroclass로 분류하면, 최대 FIGRA 예측값이 120 kW/s 이하이므로 A2 또는 B등급에 포함됨을 알 수 있다.
- 실제 SBI 시험 결과[그림 12]에서는 PUR의 최대 FIGRA 값이 91 W/s로 측정되었으며, 시뮬레이션 결과(65 W/s)와는 26 W/s의 차이가 발



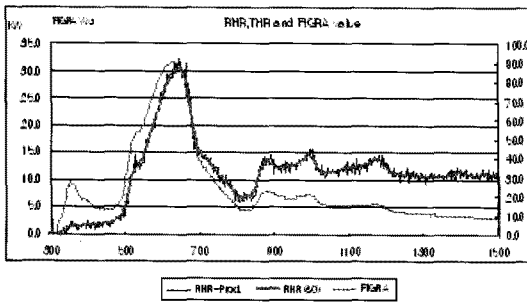
[그림 9] GW에 대한 RCT 시뮬레이션시 HRR 예측 그래프



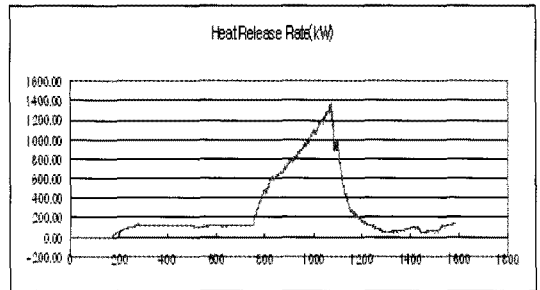
[그림 11] PUR에 대한 SBI 시뮬레이션시 FIGRA 예측 그래프



[그림 13] PUR에 대한 RCT 시뮬레이션시 HRR 예측 그래프



[그림 12] PUR에 대한 SBI 시험시 FIGRA 및 HRR 그래프



[그림 14] PUR에 대한 RCT 시험시 HRR 그래프

생하여, 시뮬레이션 결과가 실제보다 약 1.4배 정도 감소되게 예측했음을 알 수 있다.

- Euroclass 등급 분류 기준으로 분류시 실제결과와 시뮬레이션 결과는 모두 동일하게 B 등급 (120 W/s 이하이면 A2 또는 B)으로 분류되며, 시뮬레이션 FIGRA 커브 및 수치와 실제 SBI 값이 유사한 추이를 보임을 알 수 있다.

3.3.2 PUR 재료에 대한 Conetools RCT의 예측결과

- PUR재료에 대한 RCT 시뮬레이션 수행결과,

버너 100 kW 가열시 248초에서 241 kW의 Heat release rate(열방출율)이 나타났으며, 버너 300 kW 가열시 706초에서 568 kW의 열방출율이 예측되었다.

- 플래시 오버는 발생되지 않는 것으로 나타났으며, 따라서 등급 분류시 A2/B 등급 이상으로 분류되어짐을 알 수 있다.
- 실제 RCT 시험 결과[그림 14]에서는 14분 37초에 열방출율이 1000 kW로 측정되었고 더불어 플래시오버 발생이 판정되었다.
- 최대 열방출율 시점을 FIGRA로 환산한다면 1.15 kW/s로 환산되며 Euroclass 등급 분류 결

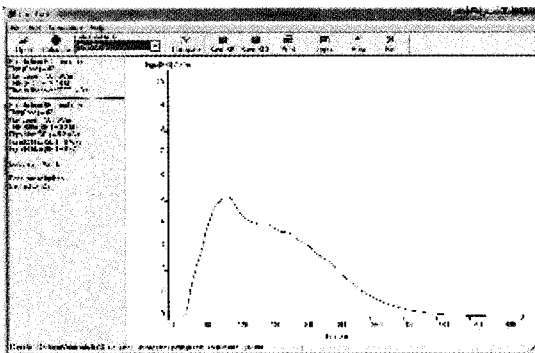
과 C등급에 분류됨을 알 수 있다. 실제 RCT 시험 결과와 PUR에 대한 시뮬레이션 RCT 예측 결과가 상이한 등급분류 결과를 보였는데, PUR의 실제 시험시 플래시오버가 발생하며 급격한 화재성장반응을 보인 점에 반해 시뮬레이션에서는 플래시오버 판정이 일어나지 않은 것이 주된 차이점으로 등급 분류 또한 다르게 나타났다.

3.4 PIR 재료에 대한 시뮬레이션 예측 및 실제 결과 비교

3.4.1 PIR 재료에 대한 Conetools SBI의 예측 결과

Tign (cone) : 42 sec (착화 시간)
Heat Flux (cone) : 50 kW/m² 의 condition으로 설정.

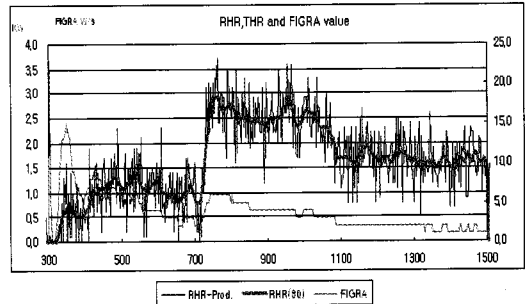
- PIR재료에 대한 SBI 시뮬레이션 예측결과 최대 FIGRA 값은 5.2 W/s로 예측되었다.
- 이는 극히 저조한 화재성장 지수로 판단되며, Euroclass로 분류할 때, A2 또는 B등급에 포



[그림 15] PIR에 대한 SBI 시뮬레이션시 FIGRA 예측 그래프

함되어진다.

- 실제 SBI 시험 결과[그림 16]에서는 최대 FIGRA 값이 22 W/s로 측정되었으며, 시뮬레이션 결과(5.2 W/s)와는 16.8 W/s의 차이가 발생하여, 시뮬레이션 결과가 실제보다 약 4.2배 정도 하향 예측되었음을 알 수 있다.
- Euroclass 등급 분류 기준으로 분류시 실제결과와 시뮬레이션 결과는 모두 동일하게 B 등급

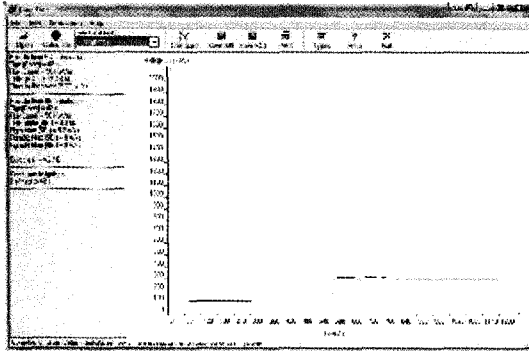


[그림 16] PIR에 대한 SBI 시험시 FIGRA 및 HRR그래프

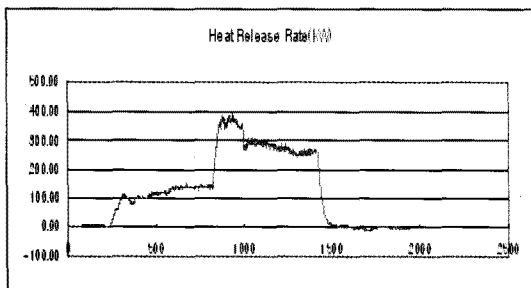
(120 W/s 이하이면 A2 또는 B)으로 분류되나, 두 결과의 FIGRA 수치의 차이를 감안한다면, 실제 결과에 대한 예측율이 낮은 것으로 판단된다. 시뮬레이션의 FIGRA 최대 커브가 시험시작 후 초기 성장기에 일어나는 점은 실제 시험결과와 유사함을 볼 수 있다.

3.4.2 PIR 재료에 대한 Conetools RCT의 예측 결과

- PIR 재료에 대한 RCT 시뮬레이션 수행결과, 버너 100 kW 가열시 110초에서 105.1 kW의 Heat release rate(열방출율)이 나타났으며, 버너 300 kW 가열시 641초에서 311 kW의 열



[그림 17] PIR에 대한 RCT 시뮬레이션시 HRR 예측 그래프



[그림 18] PIR에 대한 RCT 시험시 HRR 그래프

방출율이 예측되었다.

- 이때, 플래시 오버는 발생되지 않는 것으로 예측되었으며, 버너 출력만큼의 열방출율만이 표시되었다. 또한, 등급 분류시 A2/B 등급 이상으로 포함되어졌다.
- 실제 RCT 시험 결과[그림 18]에서도 플래시 오버는 발생되지 않았으며, 697초에서 최대 387 kW의 열방출율이 측정되었다.
- PIR재료에 대한 RCT 실제 시험결과, 최대 열방출율 시점을 FIGRA로 환산한다면 0.56 kW/s로 표현되며 Euroclass 등급 분류 결과 B 등급에 분류됨을 알 수 있다. 실제 RCT 시험 결

과와 PIR에 대한 시뮬레이션 RCT 예측결과가 유사한 등급분류 결과를 보였는데, PIR과 같이 거의 타지 않는 재료일 경우, 급격한 FIGRA 성장지수가 관측되지 않았으며, 시뮬레이션 결과와 실제 결과와도 유사하게 진행되었음을 알 수 있다.

4. 결론

- (1) 실제 시험시 고열방출율을 보인 EPS 및 PUR에 대한 시뮬레이션 검증결과, 플래쉬 오버 발생경향을 예측하지 못하였다. 따라서 가연성 높은 재료나 샌드위치 패널과 같은 복합재료의 실물화재시험은 시뮬레이션으로 예측하기에 한계가 있으므로, 가급적 ISO 9705 및 ISO 13784-1과 같은 실제 시험을 통해 데이터 베이스 구축을 해야 할 것으로 판단된다. PIR 및 Glass wool 과 같은 저열방출율을 보인 재료에 있어서는, 시뮬레이션 예측 결과로 인한 등급분류와 실제 시험 결과 간에 유사한 경향을 보였으나, SBI 시험에 대한 Euroclass 등급분류 기준의 범주가 120 W/s 이하면 모두 B등급으로 분류되므로 시뮬레이션 결과와 실제 결과가 동일 등급 내에 포함된다 하더라도 FIGRA 수치간의 차이는 재검토 해봐야 할 것으로 판단된다.

- (2) 시뮬레이션을 통한 예측은, 실제 중대형 실물 화재 시험을 실시하기에 소요되는 경제적, 시

간적 손실에 비해, 보다 용이하게 결과를 예측할 수 있는 장점이 있기에, 국내에서도 다양한 선진 시물레이션 방법을 습득하여 현실 결과를 좀더 정밀하게 예측할 수 있는 신뢰성 있는 기법의 개발이 요구되는 시점이다.

(3) 실제 콘칼로리미터 시험결과를 통해 EN 13823 및 ISO 9705 등과 같은 중대형 실물화재 시험의 결과값을 예측하는 것은 다양한 오차요인이 발생할 수 있으나, 꾸준한 데이터 베이스 구축을 통해 시물레이션을 시도한다면, 동일한 패턴의 결과 및 노하우를 축적할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 샌드위치 패널에 대한 화재성능 시험방법은, 선진국에서 관련 연구와 실험을 통해 제시된 것으로서 국내에서도 이러한 시험을 고려한 재료의 등급 분류 및 실제 대상에 대한 적용 규정 등의 도입을 계속적으로 시도해야 할 것으로 판단된다. 국내 현실을 충분히 고려한 관련 연구가 병행되어야 그 사용이 지속적으로 증가하고 있는 샌드위치 패널의 화재 안전 수준을 확보할 수 있을 것이며, 이를 위해 경제적이고 공학적인 화재성능평가 해석 프로그램의 적용을 위한 검증 절차 또한 필수적일 것이다. **FILK**

[참고 문헌]

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
4. Patrick Van Hees, "Testing and Classification of wall and ceiling linings in a harmonised European system", SP, 2005