

C-15

## 섬유강화플라스틱(FRP)의 연소특성 연구

이두형, 이지섭, 박영근, 이근원\*

한국화재보험협회 부설 방재시험연구원, 한국산업안전공단 산업안전연구원\*

A study on combustion characteristics of fiber reinforced plastic (FRP)

*Doo-Hyung Lee, Ji-Sub Lee, Young-Keun Park, Keun-Won Lee\**

*Fire Insurers Laboratories of Korea, Occupational Safety & Health Institute\**

### 1. 서론

현재 산업현장에서 건물 및 설비, 부품소재 등의 경량화와 자동화 설비에 적합한 운반용 도구 등으로 사용되고 있는 섬유강화플라스틱(FRP) 제품들은 화재시 많은 인명과 재산상의 피해를 초래하고 있다. 이들은 착화 및 연소속도가 빠르고 연소시 유독가스를 다량으로 발생시키므로 이들의 위험성은 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출률, 화재의 전파 및 유해성 연소가스의 방출등으로 평가할 수 있다. 이러한 요소들 중에서도 특히 외부 열원에 의한 재료의 착화 및 열방출율은 화재의 성장과 전파에 직접적인 영향을 미치고 있어 정확한 열방출율의 측정은 화재안전 측면에서 매우 중요한 요소로서 인식되고 있다.

현재 FRP등 플라스틱재료들의 화재위험성 평가는 사용용도에 따라 자기소화성 여부를 평가하는 KS M 3015(열경화성 플라스틱의 일반시험방법)의 연소성시험방법과 난연등급을 평가하는 KS F 2271(건축물의 내장재료 및 구조의 난연성 시험방법)을 많이 사용하고 있으나 선진국에서는 ISO 5660-1(콘칼로리미터 시험방법-열방출율시험)<sup>1)</sup>기준에 규정된 콘칼로리미터를 이용한 착화성 및 열방출특성등에 관한 연구가 많이 수행되고 있다. 콘칼로리미터에 의한 평가방법은 지금까지 개발된 시험방법중 실제 화재조건을 가장 잘 모사한 종합적인 화재위험의 측정이 가능한 방법으로 평가받고 있으나 국내에서는 콘칼로리미터를 이용한 연소특성 규명이 부족한 실정이다.

본 연구에서는 난연제를 함유하지 않은 실험체와 난연제 함량이 각기 다른 섬유강화플라스틱(FRP) 제품 4종에 대하여 ISO 5660-1 콘칼로리미터 시험방법에 따라 25 kW/m<sup>2</sup>, 35 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup>의 복사열 조건에 노출시켰을 때의 착화시간 및 열방출율등을 측정하여 난연제 함량 및 복사열 크기의 변화에 따른 섬유강화플라스틱(FRP)의 제반 연소특성의 변화를 평가하고 플래쉬오버 가능성에 대하여 검토하였다.

## 2. 콘칼로리미터 실험의 이론적 배경<sup>2)</sup>

연소시스템에서 발생하는 열량과 공기로부터 소모되는 산소의 양 사이에는 상관관계가 있음이 Parker, Hugget 등의 실험연구에 의해 밝혀졌고, Hugget의 상관관계에 대한 상세한 실험에 의하면 탄소와 수소가 주성분인 고분자재료, 천연재료등의 대부분의 가연성 재료들은 소비된 산소 1 kg당 13.1 MJ의 열량을 방출하며 이때의 평균값의 편차는  $\pm 5\%$  정도로서 거의 근사한 대표값이었으며 이를 산소소비원리(Oxygen consumption principle)라고 한다.

이 산소소비원리를 바탕으로 콘칼로리미터에서의 열량측정이 이루어지며, 열방출율은 연소로 인한 유량과 유출흐름 속에서의 산소농도 변화를 산소분석기로 측정하여 계산한다.

## 3. 실험

### 3.1 실험체

실험체는 국내 산업현장에서 많이 사용되고 있는 두께 3mm의 섬유강화플라스틱(FRP) 제품 4종으로 하였으며, 실험체 내역은 Table 1과 같다.

Table 1. Composition of test samples

Sample ID	Composition
A	Glass Fiber, 불포화폴리에스테르수지, 기타
B	$Al_2(OH)_3$ : 40%, Glass Fiber, 불포화폴리에스테르수지, 기타
C	$Al_2(OH)_3$ : 35%, 난연제 2 : 5%, Glass Fiber, 불포화폴리에스테르수지, 기타
D	$Al_2(OH)_3$ : 65%, Glass Fiber, 불포화폴리에스테르수지, 기타

### 3.2 실험장치

본 연구에 사용된 콘칼로리미터는 콘 형태의 복사전기히터, 시편의 질량을 측정하기 위한 무게측정장치, 시편홀더, 산소분석장치, 유량측정장치를 부착한 배출시스템, 스파크점화회로, Heat Flux meter 및 데이터 수집 분석시스템등으로 구성되어 있으며, 실험장치의 구성을 나타내주는 구조도는 Fig. 1과 같다.

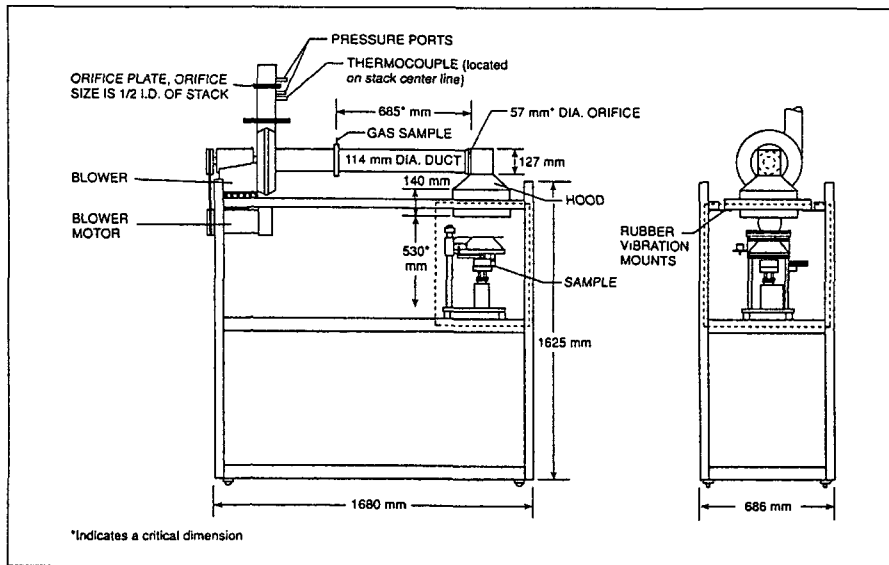


Fig. 1. Schematic diagram of cone calorimeter

### 3.3 실험방법

이 실험에서는 시편을 콘칼로리미터에 수평방향으로 설치하고 외부 점화장치를 부착한 상태로 25 kW/m<sup>2</sup>, 35 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup>의 복사열에 20분 동안 노출시켜 착화되는 시간과 착화된 시편으로부터의 열방출특성을 측정하였다.

## 4. 결과 및 토론

### 4.1 착화시간(Time to ignition, TTI)

착화시간은 3가지 크기의 복사열에 노출된 실험체가 착화에 충분한 양의 가연성증기를 발생시켰을 때 콘칼로리미터에 설치된 스파크 점화기의 불꽃에 의해 착화되어 10초 이상 불꽃연소를 지속하게 되는 시간을 말하며 측정된 착화시간을 Table 2에 나타내었다.

Table 2.에 나타난 바와 같이 실험체의 착화시간은 25 kW/m<sup>2</sup>의 Heat Flux에서 35 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup>으로 증가함에 따라 착화시간이 급격하게 짧아지는 경향을 나타내었다. Heat Flux 크기에 따른 영향은 25 kW/m<sup>2</sup>에서 35 kW/m<sup>2</sup>로 증가함에 따라 착화시간이 2.2~2.3배 짧아졌고, 35 kW/m<sup>2</sup>에서 50 kW/m<sup>2</sup>로 증가했을 때 1.7~2.2배 짧아졌다.

난연제 함량에 따른 효과를 평가하기 위하여 난연제 함량이 각기 다른 B, C, D 실험체의 착화시간과 난연제가 함유되지 않은 A 실험체의 착화시간을 비교하면 25 kW/m<sup>2</sup>에서 약 2.3배(265초~283초), 35 kW/m<sup>2</sup>에서 1.7~1.9배(89초~108초), 50 kW/m<sup>2</sup>에서 1.3~1.7배(21초~52초) 길게 나타나 난연제에 의한 착화지연효과가 있음을 알 수 있었고 25 kW/m<sup>2</sup>에서 착화지연 효과가 가장 크게 나타났으며 복사열의 강도가 증가함에 따라 착화

자연 효과는 상대적으로 감소함을 알 수 있었다.

**Table 2.** Time to ignition of samples (seconds)

Sample	25 kW/m <sup>2</sup>	35 kW/m <sup>2</sup>	50 kW/m <sup>2</sup>
A	203	116	68
B	468	209	89
C	478	205	120
D	486	224	119

## 4.2 열방출율(Heat release rate)

### 4.2.1 최대 열방출율(Peak heat release rate, PHRR)

실험체가 착화되면 실험체의 연소성의 정도에 따라 열을 방출하는데 이때 최대 열방출율은 화재의 크기를 나타내주는 중요한 변수이다. Table 3.에 나타난 바와 같이 실험체에 가해지는 외부의 Heat Flux의 크기가 증가함에 따라 실험체의 최대 열방출율이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 높은 Heat Flux에서 실험체의 열분해가 더욱 촉진되어 실험체가 많은 양의 열을 방출하면서 빠른 속도로 연소하기 때문으로 보인다.

난연제 함량에 따른 효과는 난연제 함유된 B, C, D 실험체의 최대 열방출율은 난연제가 함유되지 않은 A 실험체에 비해 25 kW/m<sup>2</sup>에서 55~145 kW/m<sup>2</sup>, 35 kW/m<sup>2</sup>에서 134~180 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup>에서 147~225 kW/m<sup>2</sup> 감소되었으며 2가지 난연제를 배합한 실험체 C의 최대 열방출율이 가장 낮게 나타나 상대적으로 연소 억제효과가 우수하였다.

**Table 3.** Peak heat release rate of samples ( kW/m<sup>2</sup>)

Sample	25 kW/m <sup>2</sup>	35 kW/m <sup>2</sup>	50 kW/m <sup>2</sup>
A	257	325	363
B	202	191	216
C	112	145	138
D	121	181	188

### 4.2.2 총방출열량(Total heat released, THR)

총방출열량은 20분동안의 시험시간동안 방출된 열방출량을 적분한 값으로서 나타낸다. Table 4.에 나타난 바와 같이 실험체 C의 총방출열량값이 비교적 낮게 나타났으며 실험체 A, B, D는 큰 차이를 보이지 않았다.

**Table 4.** Total heat released of samples (MJ/m<sup>2</sup>)

Sample	25 kW/m <sup>2</sup>	35 kW/m <sup>2</sup>	50 kW/m <sup>2</sup>
A	41.9	56.8	55.7
B	45.5	61.2	47.1
C	29.0	48.8	40.4
D	36.7	47.4	51.7

## 4.2.3 플래쉬오버 가능성의 예측

Petrella는 콘칼로리미터실험에 의해 측정된 착화시간(TTI, s)과 최대열방출율(PHRR, kW/m<sup>2</sup>) 및 총방출열량(THR, MJ/m<sup>2</sup>) 데이터를 이용하여 재료가 플래쉬오버에 기여할 수 있는 가능성을 다음 계산식을 이용하여 분류하는 방법을 제안하였다. 즉 식 (1)에 의해 계산된 x값이 0.1~1.0 이면 낮음, 1.0~10이면 중간, 10~100이면 높음으로 분류하였고, 식 (2)에 의해 계산된 y값이 0.1~1.0 이면 매우 낮음, 1.0~10이면 낮음, 10~100이면 중간, 100~1000이면 높음으로 분류하였다.<sup>3)</sup>

$$x = \frac{PHRR}{TTI} \quad (1)$$

$$y = THR \quad (2)$$

이 분류방법에 따라 각 실험체의 플래쉬오버 가능성을 분류하여 보면 25 kW/m<sup>2</sup>와 35 kW/m<sup>2</sup>에서의 복사열 조건에서 난연제를 함유하지 않은 A 실험체는 x, y 모두 중간정도의 플래쉬오버 가능성을 나타냈지만 난연제를 함유한 실험체 B, C, D는 x는 낮은 반면 y는 중간정도의 등급을 나타내었고, 50 kW/m<sup>2</sup>에서는 모든 실험체가 x, y 모두 중간정도의 플래쉬오버 가능성을 갖는 것으로 분류되었다. 실험체별로 구분해 보면 각 복사열에서 실험체 C가 플래쉬오버 가능성이 낮은 것으로 분류할 수 있다.

**Table 5.** Estimation of flashover propensity of samples at 35 kW/m<sup>2</sup>

Parameter	A	B	C	D
x	2.801	0.913	0.707	0.808
Classification	intermediate	low	low	low
y	56.8	61.2	48.8	47.4
Classification	intermediate	intermediate	intermediate	intermediate

## 5. 결론

본 연구에서 섬유강화플라스틱 4종에 대하여 ISO 5660-1 콘칼로리미터 실험방법을 이용한 연소특성 실험결과 착화시간 및 열방출율은 실험체에 가해진 복사열의 크기와 난연제의 함량 및 난연제 구성방법에 따라 연소성능은 크게 달라짐을 알 수 있었다.

또한 Petrella가 제안한 착화시간 및 열방출율 데이터에 의한 플래쉬오버 가능성 분류방법은 재료의 연소성능에 따라 화재에 취약한 재료의 사용을 규제하는데 활용될 수 있는 유용한 방법으로 판단되며, 이 분류방법의 적용에 대한 다각적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. ISO 5660-1, Reaction to Fire, Part 1. Rate of Heat Release from building products (Cone Calorimeter), Geneva(1993).
2. Babrauskas and S. J. Grayson, Heat release in fires, Elsevier Science Publishing Co., New York(1992).
3. Petrella, R.V., The assessment of full-scale fire hazards from conecalorimeter data, Journal of fire sciences, vol. 12, pp. 14-43,(1994).