

콘칼로리미터를 이용한 섬유강화플라스틱(FRP)의 연소특성

Combustion Characteristics of Fiber Reinforced Plastic by Cone Calorimeter

이근원[†] · 김관응 · 이두형*

Keun-Won Lee[†] · Kwan-Eung Kim · Doo-Hyung Lee*

한국산업안전공단 산업안전보건연구원, *한국화재보험협회 부설 방재시험연구원
(2004. 5. 7. 접수/2004. 6. 11. 채택)

요 약

본 연구는 작업장의 건축물이나 구조물의 구성요소로 사용되어지는 섬유강화플라스틱의 연소특성을 평가하였다. 섬유강화플라스틱의 연소특성은 ISO 5660에 따라 콘칼로리미터를 사용하여 수행하였다. 섬유강화플라스틱의 착화시간과 열방출율은 복사열과 난연제의 함량에 따라 달랐다. 섬유강화플라스틱의 열방출율은 복사열의 증가에 따라 증가하였다. 섬유강화플라스틱의 착화시간과 최대 열방출율을 이용하여 플래쉬오버(Flashover)의 가능성을 Petrella가 제시한 분류방법에 따라 검토하였다.

ABSTRACT

This study describes to assess combustion characteristics of fiber reinforced plastic (FRP) that is used an elements of building or structure in workplace. The combustion characteristics of the fiber reinforced plastic were carried out using by a Cone Calorimeter according to ISO 5660 standard. As the results of this study, the time to ignition and heat release rate of the fiber reinforced plastic was differ with heat flux of irradiance and content of flame retardant agent. The heat release rate of the fiber reinforced plastic was increased with increasing heat flux of irradiance. The flashover propensity of the fiber reinforced plastic using time to ignition and peak heat release rate was examined according to classification method by R.V. Petrella.

Keywords : Fiber reinforced plastic, Time to ignition, Cone Calorimeter, Heat release rate, Flashover

1. 서 론

산업현장에서 건물 및 설비, 부품소재 등의 경량화와 자동화 설비에 적합한 운반용 도구 등으로 섬유강화플라스틱(FRP) 제품을 사용하고 있다. 이 제품은 주로 탱크류, 배전반 및 구조물의 내장판 등의 구성재료로서 화재시 착화 및 연소속도가 빠르고 연소시 유독 가스를 다량으로 발생시키므로 인명과 재산상의 피해를 초래하고 있다. 이들의 위험성은 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출률, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다.^{1,3)} 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.⁴⁾

현재 국내에서는 섬유강화플라스틱(FRP) 등 플라스틱재료들의 화재위험성 평가는 사용용도에 따라 자기소화성 여부를 평가하는 열경화성 플라스틱의 일반 시험방법의 연소성 시험방법과 난연등급을 평가하는 건축물의 내장재료 및 구조의 난연성 시험방법을 많이 사용하고 있다. 선진국에서는 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 있다. 그러나, 국내에서는 콘칼로리미터를 이용한 일부 플라스틱의 재료에 대한 연소특성 평가에 관한 연구가 발표된 적이 있지만,^{5,6)} 섬유강화플라스틱의 연소특성

[†]E-mail: leekw@kosha.net

규명이 전무한 실정이다.

본 연구에서는 국내에서 유통되고 있는 섬유강화플라스틱(FRP) 제품에 대하여 난연제를 함유하지 않은 제품과 난연제 함량이 각기 다른 재료의 연소특성을 규명하기 위해 콘칼로리미터 실험을 수행하였다. 재료를 3가지 복사열 조건에 노출시켰을 때의 착화시간 및 열방출을 등을 측정하여 난연제 함량 및 복사열 크기의 변화에 따른 섬유강화플라스틱(FRP)의 연소특성을 평가하였다. 또한, 섬유강화플라스틱의 착화시간과 최대 열방출을 이용하여 플래쉬오버(Flashover)의 가능성을 검토하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

실험재료는 국내에서 유통되고 있는 섬유강화플라스틱(FRP)제품 4종을 선정하였다. 용도는 탱크류, 내장판

등에 사용되고 있는 것을 두께 3 mm 평판으로 성형하였으며 실험재료의 조성은 Table 1과 같다.

2.2 실험장치 및 방법

섬유강화플라스틱의 착화시간과 열방출을 측정하기 위해 ISO 5660,⁷⁾ 기준에 따라 콘칼로리미터(미국 ATLAS사, Model : CONE 2A)를 사용하였다. 콘칼로리미터는 콘 형태의 복사전기허더, 시편의 질량을 측정하기 위한 무게측정장치, 시편홀더, 산소분석장치, 유량측정 장치를 부착한 배출시스템, 스파크 점화회로, 열플럭스미터(heat flux meter), 교정용 버너 및 데이터 수집 분석시스템등으로 구성되어 있으며, 실험장치의 구성을 나타내주는 개략도를 Fig. 1과 같다.

실험방법은 먼저 시료를 가로 세로 각각 100 mm×100 mm(₀mm) 크기로 준비하여 시험에 앞서 온도 23±2°C, 상대습도 50±5% 향량이 될 때까지 유지한다. 전 처리된 시편은 0.03~0.05 mm의 알루미늄 호일

Table 1. Composition of fiber reinforce plastic samples

Sample	Composition	Density (kg/m ³)
A	Unsaturated polyester resin + Others : 75%, Glass fiber : 25%	1584
B	Unsaturated polyester resin : 20%, Al(OH) ₃ : 40%, Glass fiber : 25%, Others : 15%	1818
C	Unsaturated polyester resin : 20%, Al(OH) ₃ : 35%, Flame retardant agent : 5%, Glass Fiber : 25%, Others : 15%	1836
D	Unsaturated polyester resin : 14%, Al(OH) ₃ : 65%, Glass Fiber : 15%, Others : 6%	2051

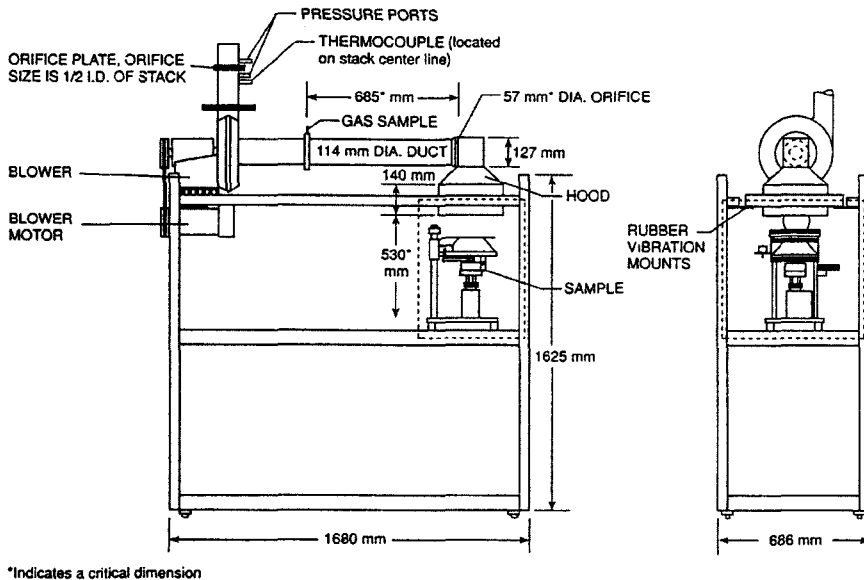


Fig. 1. Schematic diagram of cone calorimeter.

로 비 노출면을 감싸고 이 때 호일의 반짝거리는 면이 시편을 향하도록 한다. 복사열의 크기를 변화시킬 때에는 콘히터가 원하는 복사열을 $\pm 2\%$ 이내의 범위 내에서 발생시킬 수 있도록 복사열 제어조절장치를 조정한다. 콘히터를 작동시켜 설정 값에서 10분 이상 안정시킨다. 또한, 산소분석기의 영점을 맞추고, 열방출을 교정과 질량측정 장치를 교정한다.

실험절차는 다음과 같다. 먼저 CO_2 트랩과 최종 수분트랩을 확인한다. 콘히터의 바닥판과 시편의 상부 표면사이의 거리를 2.54 cm로 조정한다. 배출유량을 $0.024 \text{ m}^3/\text{s} \pm 0.002 \text{ m}^3/\text{s}$ 으로 설정한 다음 데이터 수집을 개시한다. 준비된 시편과 시편홀더를 질량측정장치 위에 놓고 실험을 개시한다. 인화 또는 일시적인 불꽃연소가 발생된 때에는 그 시간을 기록한다. 지속적인 불꽃연소가 발생한 때에는 그 시간을 기록하고 스파크 전원과 점화장치를 제거한다. 만일 스파크 전원을 차단한 후에 불꽃이 꺼지면 점화기를 재 삽입하고 5초 이내에 스파크를 가한 다음 시험이 완료된 때까지 스파크를 제거하지 않는다. 실험시간동안 모든 데이터를 수집한 후 시편과 시편홀더를 제거한다. 질량측정장치 위에 열 차단 장치를 놓는다. 본 연구에서는 선정된 시료를 콘칼로리미터에 수평방향으로 설치하고 외부 점화장치를 부착한 상태로 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 , 50 kW/m^2 의 복사열에 20분 동안 노출시켜 착화되는 시간과 착화된 시료로부터 착화시간과 열방출율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 착화시간(Time to ignition, TTI)

착화시간은 복사열에 노출된 실험재료가 착화에 충

Table 2. Time to ignition of fiber reinforced plastic

Sample	Time to ignition (sec)		
	25 kW/m^2	35 kW/m^2	50 kW/m^2
A	203	116	68
B	468	209	89
C	478	205	120
D	486	224	119

분한 양의 가연성 증기를 발생시켰을 때 콘칼로리미터에 설치된 스파크 점화기의 불꽃에 의해 착화되어 10초 이상 불꽃연소를 지속하게 되는 시간을 말한다. 본 연구에서는 3가지 크기의 복사열에 노출된 섬유강화플라ستيك에 대한 착화시간을 Table 2에 나타내었다.

Table 2에 나타난 바와 같이 실험재료의 착화시간은 25 kW/m^2 의 Heat flux에서 35 kW/m^2 , 50 kW/m^2 으로 증가함에 따라 착화시간이 급격하게 짧아지는 경향을 나타내었다. Heat flux 크기에 따른 영향은 25 kW/m^2 에서 35 kW/m^2 로 증가함에 따라 착화시간이 2.2~2.3배 짧아졌고, 35 kW/m^2 에서 50 kW/m^2 로 증가했을 때 1.7~2.2배 짧아졌다.

난연제 함량에 따른 영향을 살펴보면 난연제 함량이 각기 다른 실험재료 B, C, 및 D의 착화시간과 난연제가 함유되지 않은 A 실험재료의 착화시간을 비교하면 25 kW/m^2 에서 약 2.3배, 35 kW/m^2 에서 1.7~1.9배, 50 kW/m^2 에서 1.3~1.7배 길게 나타났으며, 난연제에 의한 착화 지연효과가 있음을 알 수 있었다. 25 kW/m^2 에서 착화지연 효과가 가장 크게 나타났으며 복사열의 강도가 증가함에 따라 착화지연 효과는 상대적으로 감소함을 알 수 있었다.

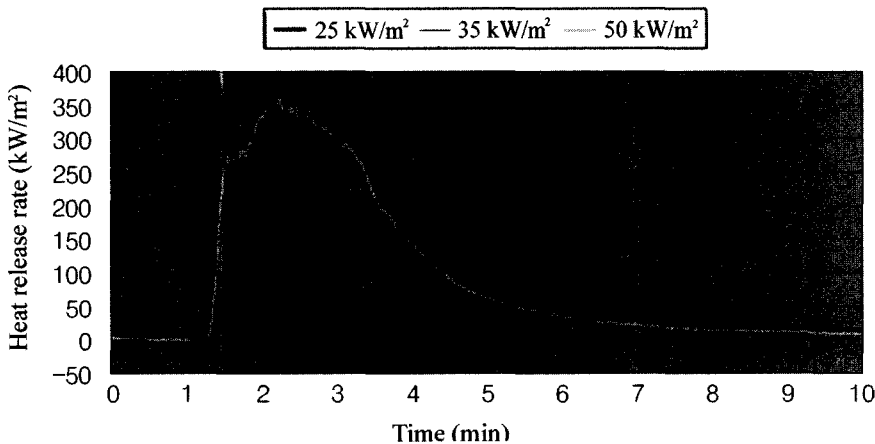


Fig. 2. Typical curve of heat release rate in fiber reinforced plastic(A).

Table 3. Peak heat release rate of fiber reinforced plastic

Sample	Peak heat release rate (kW/m ²)		
	25 kW/m ²	35 kW/m ²	50 kW/m ²
A	257	325	363
B	202	191	216
C	112	145	138
D	121	181	188

Table 4. Total heat released of fiber reinforced plastic

Sample	Total heat released (MJ/m ²)		
	25 kW/m ²	35 kW/m ²	50 kW/m ²
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

3.2 열방출율(Heat release rate, HRR)

3.2.1 최대 열방출율(Peak heat release rate, PHRR)

열방출율은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기이며, 재료의 연소위험성은 가장 잘 나타낼 수가 있는 요소가 열방출율이라고 할 수 있다. 섬유강화플라스틱의 전형적인 열방출율 곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 열방출율 곡선으로부터 최대 열방출율 및 총방출열량 등을 얻을 수 있다. 실험재료가 착화되면 재료의 연소성 정도에 따라 열을 방출하는데 이때 최대 열방출율은 화재의 크기를 나타내주는 중요한 변수이다. Table 3은 최대열방출율을 나타낸 것으로 실험재료에 의부에서 가해지는 Heat flux의 크기가 증가함에 따라 실험재료의 최대 열방출율이 커지는 것을 알 수 있었다. 이는 높은 Heat flux에서 실험재료의 열분해가 더욱 촉진되어 실험재료가 많은 양의 열을 방출하면서 빠른 속도로 연소하기 때문으로 보인다.

난연제 함량에 따른 영향은 다음과 같이 나타났다. 난연제가 함유된 실험재료 B, C 및 D의 최대 열방출율은 난연제가 함유되지 않은 실험재료 A에 비해 25 kW/m²에서 55~145 kW/m², 35 kW/m²에서 134~180 kW/m², 50 kW/m²에서 147~225 kW/m² 감소되었다. 또한, 2가지 난연제를 배합한 실험재료 C의 최대 열방출율이 가장 낮게 나타나 상대적으로 연소 억제효과가 우수함을 알 수 있었다.

3.2.2 총방출열량(Total heat released, THR)

총방출열량은 각 실험에서 실험재료의 연소로 인한 방출된 열량으로서, 시료 표면적당 시간에 대한 함수로 표현되는 열방출율을 주어진 시간을 적분하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 20분 동안의 열방출율 값들을 적분하여 계산한 총방출열량을 Table 4에 나타내었다. Table 4에 나타난 바와 같이 섬유강화플라스틱 C의 총방출열량 값이 비교적 낮게 나타났으며, 실험재료 A, B, D는 큰 차이를 보이지 않았다. 실험재료 C의 경우는 난연제와 무기재료 등의 첨가로 연소를 저지시켜 총방출열량이 상대적으로 적었던 것으로 판단된다.

3.2.3 플래쉬오버 가능성의 예측

플래쉬오버(flashover)는 시료의 전 표면이 갑작스럽게 연소된 상태를 말하며, 플래쉬오버의 가능성 예측은 재료의 화재위험 특성 평가의 중요한 지표이다. Petrella는⁸⁾ 콘칼로리미터 실험에 의해 측정된 착화시간(TTI)과 최대열방출율(PHRR) 및 총방출열량(THR) 데이터를 이용하여 재료가 플래쉬오버의 가능성을 예측하기 위해 다음 식을 제안하였다.

$$x = PHRR/TTI \text{ [kW/m}^2 \text{ sec]} \tag{1}$$

$$y = THR \text{ [MJ/m}^2] \tag{2}$$

즉, 식 (1)에 의해 계산된 x 값이 0.1~1.0이면 플래쉬오버의 가능성이 낮음, 1.0~10이면 중간, 10~100이면 높음으로 분류하였다. 또한 식 (2)에서 y 값이 0.1~1.0이면 플래쉬오버의 가능성이 매우 낮음, 1.0~10이면 낮음, 10~100이면 중간, 100~1000이면 높음으로 분류하였다.

본 연구에서는 각 재료별로 착화시간, 최대열방출율 및 총방출열량 값들을 이용하여 플래쉬오버 가능성을 분석하였으며, 복사열이 35 kW/m²의 경우만 Table 5에 나타내었다. Petrella의 제안식에 따라 각 실험재료의 플래쉬오버 가능성을 분석해 보면 25 kW/m²와 35 kW/m²에서의 복사열 조건에서 난연제를 함유하지 않은 A 실험재료는 x, y 모두 중간정도의 플래쉬오버 가능성을 나타냈지만 난연제를 함유한 실험재료 B, C, D는 x는 낮은 반면 y는 중간정도의 등급을 나타내었고, 50 kW/m²에서는 모든 실험재료가 x, y 모두 중간정도의 플래쉬오버 가능성을 갖는 것으로 분류되었다. 실험재료별로 구분해 보면 각 복사열에서 실험재료 C가 플래쉬오버 가능성이 낮은 것으로 나타났다. 여러 복사열 조건에서 플래쉬오버의 가능성(x)과 총방출열량(y)과의 관계를 비교 검토한 결과 Petrella가 분류한 것과 일치하지 않았다. 따라서, 총방출율을 이용하여 플래쉬오버의 가능성을 평가하기 위해서는 향후 구체적인 열 방출 특성과의 상관관계 규명이 필요한 것으로 사료된다.

Table 5. Flashover propensity of fiber reinforced plastic at 35 kW/m²

Sample	Time to ignition (sec)	Peak heat release rate (kW/m ²)	Flashover propensity (x)	Total heat released (y)	Classification	
					x	y
A	116	325	2.801	56.8	intermediate	intermediate
B	209	191	0.913	61.2	low	intermediate
C	205	145	0.707	48.8	low	intermediate
D	224	181	0.808	47.4	low	intermediate

4. 결론 및 제언

참고문헌

본 연구에서 섬유강화플라스틱 4종에 대하여 ISO 5660 기준에 따라 콘칼로리미터 실험방법을 이용한 연소특성 실험과 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 착화시간 및 열방출율은 실험재료에 가해진 복사열의 크기와 난연제의 함량에 따라 연소성능은 크게 달라짐을 알 수 있었다. 복사열이 25 kW/m²에서 35 kW/m²를 증가시 2.2배~2.3배, 복사열이 35 kW/m²에서 50 kW/m²를 증가시 1.7배~2.2배 짧아졌다.

2) 열방출율은 Heat flux가 증가함에 따라 최대열방출율은 증가하였으며, 난연제 함량에 따라 최대열방출율은 25 kW/m²에서 55~145 kW/m², 35 kW/m²에서 134~180 kW/m², 50 kW/m²에서 147~225 kW/m²으로 감소되었다.

3) Petrella가 제안한 분류방법에 따라 평가한 결과 난연제가 함유되지 않은 실험재료 A의 플래쉬오버 가능성이 중간으로 나타났으며, 난연제를 함유한 실험재료 B, C 및 D는 플래쉬오버 가능성이 중간이나 낮은 것으로 나타났다. Petrella가 제안한 총방출율을 이용하여 플래쉬오버의 가능성을 평가하기 위해서는 향후 구체적인 열방출 특성과의 상관관계 규명이 필요한 것으로 사료된다.

1. G. Gallina, E. Bravin, C. Badalucco, G. Audisio, M. Armanini, and A. De Chirico, "Application of Cone Calorimeter for the Assessment of Class of Flame Retardant for Polypropylene", Fire and Materials, Vol. 22, pp.15-18(1998).
2. U. Sorathia, G. Long, T. Gracik, M. Blum, and J. Ness, "Screening Tests for Fire Safety of Composites for Marine Applications", Fire and Materials, Vol. 25, pp.215-222(2001).
3. 이근원, 김관용, "발포 플라스틱의 착화특성 및 연소가스 분석", 산업안전학회지, Vol. 16, No. 1, pp.48-52(2001).
4. Babrauskas and S. J. Grayson, Heat Release in Fires, Elsevier Science Publishing Co., New York (1992).
5. 이근원, 김관용, "콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재특성", 한국화재·소방학회 논문지, Vol. 17, No. 1, pp.76-83(2003).
6. 이근원, "산업용 단열재의 화재위험 특성에 관한 연구", 연구원 2000-18-138, 한국산업안전공단 산업안전보건연구원(1999).
7. ISO 5660-1, Reaction to Fire, Part 1. Rate of Heat Release from Building Products (Cone Calorimeter), Geneva(1993).
8. Petrella, R.V., The Assessment of Full-scale Fire Hazards from Cone Calorimeter Data, Journal of Fire Sciences, Vol. 12, pp.14-43(1994).