열가소성 플라스틱의 화재위험 특성

이근원 · 박상현 · 이규남
한국산업안전공단 산업안전보건연구원

1. 서 론

산업현장에서는 화학탱크, 닥트, 저장조, 구조물의 내장재 등의 구성재료로서 폴리프로필렌(PP), 폴리염화비닐(PVC) 및 섬유강화플라스틱(FRP)과 같은 열가소성 플라스틱 제품을 많이 사용하고 있다. 이들 플라스틱 제품은 착화 및 연소속도가 빠르고 연소시 유독가스를 다량 발생시켜 심각한 재산 및 인명피해를 초래하고 있다. 플라스틱류 재료가 화재조건에 노출되었을 때 야기되는 화재 위험성을 크게 착화성, 열방출율, 화염의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가하고 있다[1-2]. 선진국에서는 플라스틱 재료들의 화재위험성을 평가하기 위해 콘카로리미터(Cone Calorimeter)를 이용한 착화성, 열방출율 및 연소가스 분석에 관한 연구가 많이 수행되고 있다[3]. 그러나, 국내에서는 콘카로리미터나 연소가스시험기를 이용한 종합적인 플라스틱의 화재위험 특성 규명이 부족한 실정이다[4-5].

본 연구에서는 산업현장에서 사용되고 있는 열가소성플라스틱에 대해 다양한 연소조건 하에서 재료의 착화성, 콘카로리미터를 이용한 열방출 실험 및 마우스를 이용한 연소가스의 유해성 실험을 실시하였다. 이들 실험을 통해 플라스틱의 화재위험 특성 및 유해성 자료 제시하여 인명피해를 최소화시킬 수 있는 예방대책 수립의 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료

본 연구에서 선정된 실험재료는 현재 산업현장에서 약품탱크, 닥트, 자징조 및 구조물의 내장재로 많이 사용되고 있는 플라스틱재료 중 폴리프로필렌(PP), 폴리염화비닐(PVC) 및 섬유강화플라스틱(FRP)제품 3종에 대하여 실시하였으며, 세부적인 실험재료 내역은 Table 1에 나타내었다. 실험재료는 모두 KS 지정 품목이며, 실험이 용이하도록 두께 3mm 판상으로 성형하였다. 플라스틱 3종 모두 제조사가 다르며, 폴리염화비닐과 섬유강화플라스틱은 첨가제의 성분은 알 수 없었다.

2.2. 실험장치 및 방법

열가소성 플라스틱의 착화시간과 열방출율을 측정하기 위해 ISO 5660 기준에 따라

Table 1. 실험에 사용된 실험재료의 명세

재료명	구분	조 성	두께(mm)	밀도(kg/m³)	용도
폴리염화비닐 (PVC)	A	PVC : 85±5 %, 안정제 : 7.5±5 % Filler : 7.5±5 %	3.0	1483	화학탱크 전해조 저장조 오수처리장치 닥트
	B	PVC : 85±5 %, 안정제 : 7.5±5 %, Filler : 7.5±5 %	3.0	1463	
	C	PVC : 85±5 %, 안정제 :7.5±5 %, Filler : 7.5±5 %	3.0	1528	
폴리프로필렌 (PP)	A	PP : 100 %, 기타	3.0	884	약품탱크 닥트 전해조 저장조
	B	PP : 100 %, 기타	3.0	882	
	C	PP : 100 %, 기타	3.0	947	
섬유강화 플라스틱 (FRP)	A	불포화폴리에스테르수지 : 20%, $Al_2(OH)_3$: 40%, Glass Fiber : 25%, 기타:15%	3.0	1818	탱크류 배전반 내장판 천정재
	B	불포화폴리에스테르수지: 20%, $Al_2(OH)_3$: 35%, Glass Fiber: 25%, 난연제 : 5%, 기타: 15%	3.0	1836	
	C	불포화폴리에스테르수지: 14 %, $Al_2(OH)_3$: 65%, Glass Fiber: 15 %, 기타: 6%	3.0	2051	

미국 ATLAS사의 콘칼로리미터(CONE 2A)를 사용하였다. 콘칼로리미터는 콘 형태의 복사전기히터, 시편의 질량을 측정하기 위한 무게측정장치, 시편홀더, 산소분석장치, 유량측정 장치를 부착한 배출시스템, 스파크 점화회로, 열플럭스미터(Heat Flux Meter), 교정용 버너 및 데이터 수집분석시스템 등으로 구성되어 있다.

실험방법은 먼저 시료를 100 mm×100 mm $(^{+0}_{-2}$ mm) 크기로 준비하여 시험에 앞서 온도 23±2 ℃, 상대습도 50±5 % 항량이 될 때까지 유지한다. 전 처리된 시편은 0.03~0.05 mm의 알루미늄 호일로 비 노출면을 감싸고 이 때 호일의 반짝거리는 면이 시편을 향하도록 한다. 실험절차는 먼저 CO_2 트랩과 최종 수분트랩을 확인한다. 콘히터의 바닥판과 시편의 상부 표면사이의 거리를 2.54 cm로 조정한다. 배출유량을 0.024 m³/s ±0.002 m³/s으로 설정한 다음 데이터 수집을 개시한다. 준비된 시편과 시편홀더를 질량측정장치 위에 놓고 실험을 개시한다. 인화 또는 일시적인 불꽃연소가 발생된 때에는 그 시간을 기록한다. 본 연구에서는 선정된 시료를 콘칼로리미터에 수평방향으로 설치하고 외부 점화장치를 부착한 상태로 25 kW/m², 35 kW/m², 50 kW/m²의 복사열에 20분 동

안 노출시켜 착화되는 시간과 착화된 시료로부터 착화시간과 열방출율을 측정하였다.

가스유해성 실험은 KS F 2271 에 따라 마우스를 이용하여 건축재료 및 내장재의 연소시 발생하는 가스의 유해성을 평균행동정지시간으로 측정하였다. 본 장치는 가열로, 교반 상자, 피검 상자, 마우스 행동기록계로 구성되며, 가열로에서 실험재료가 연소시 발생하는 연소가스는 교반 상자에서 교반되고, 피검 상자속으로 유입되어 마우스가 흡입하도록 되어있다. 시편의 크기는 가로, 세로 각각 220mm로 하고 두께는 실제의 것과 같은 것으로서 통풍이 잘 되는 실내에 약 1개월 이상 방치한 것을 35~45℃의 건조기 안에서 24시간 이상 건조시킨 후, 데시케이터 속에서 24시간 이상 방치하여 양생한 것으로 사용하였다. 실험동물인 마우스는 DD계 또는 ICR계 암놈으로 5주령 정도되고 체중은 18~22 g의 마우스를 사용하였다. 실험방법은 가열 시험은 시작할 때 피검 상자 내의 온도는 30℃로 하고, 시험용 마우스를 1마리씩 넣은 회전 바구니 8개를 피검 상자 내에 넣어야 한다. 가열을 시작해서 시험용 마우스가 행동을 정지할 때까지의 시간의 측정은 자동 기록장치에 의하여 가열 시작 후 15분간 각각의 시험용 마우스마다 실시하였다. 시험용 마우스의 평균 행동 정지 시간(x)은 다음 식에 따라 구한다.

$$x = \overline{X} - \sigma \quad (1)$$

여기에서 $\overline{X}$: 8마리 시험용 마우스의 행동 정지시간의 평균값(분), σ: 8마리 시험용 마우스 행동 정지 시간의 표준 편차(분)이다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 최대 열방출율 (Peak Heat Release Rate, PHRR)

열방출율은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기이며, 각 재료의 주어진 Heat Flux 조건에서 재료별 최대 열방출율을 Table 2에 나타내었다. 최대 열방충율은 실험재료에 따라 큰 차이를 보이나, 같은 재료의 경우 제조자에 따른 변화는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 실험재료에 가해지는 외부의 Heat Flux가 증가함에 따라 실험재료의 최대 열방출율이 커지는 것으로 나타났다. 이는 높은 Heat Flux에서는 열분해가 더욱 잘 진행되어 실험재료가 많은 양의 열을 방출하면서 빠른 속도로 연소하기 때문으로 보인다. 실험재료 중 폴리프로필렌(PP)가 가장 큰 최대 열방출율을 갖는 것으로 나타났다.

Table 2. 각 재료별 heat flux에 따른 최대 열방출율

구 분	최대 열방출율(kW/m²)		
	25 kW/m²	35 kW/m²	50 kW/m²
PVC	19.4~97.1	55.2~111.8	75.6~190.0
PP	370.5~421.6	463.5~532.9	661.7~699.0
FRP	111.2~202.8	145.1~191.1	138.2~216.6

3-2. 총방출열량 (Total Heat Released, THR)

총방출열량은 각 실험에서 실험재료의 연소로 인해 방출된 총열량으로서, 본 연구에서는 총방출열량을 20분간의 실험시간에 대하여 재료별 최대 열방출율을 Table 3에 나타내었다. 플라스틱 3종의 제품 중 밀도가 상대적으로 낮은 폴리프로필렌(PP)의 총방출열량이 크며, 섬유강화플라스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC) 순으로 크게 나타났다. 이는 폴리프로필렌은 열에 약한 순수 유기재로 만 이루어져 있는 데 반하여 섬유강화플라스틱 및 폴리염화비닐은 강도의 안정성과 난연성을 보강하기 위해 무기재 등의 첨가로 연소를 저지시켜 총방출열량이 순수 유기재의 연소열량 보다 적었던 것으로 판단된다. 따라서, 화재시 총방출열량이 가장 큰 폴리프로필렌의 경우는 타 플라스틱 제품보다 화재의 연소확대가 급속히 진행될 것으로 판단된다.

Table 3. 재료별 총방출열량 비교

구 분	총방출열량(MJ/㎡)		
	25 kW/㎡	35 kW/㎡	50 kW/㎡
PVC	6.0~16.3	8.8~25.8	16.6~28.5
PP	44.1~65.4	58.7~88.1	83.5~97.2
FRP	29.0~45.5	47.4~61.2	40.4~51.7

3-3. 프레쉬오버의 가능성 (flashover propensity)

프레쉬오버의 가능성 예측은 사전에 화재를 탐지하거나 사람이 안전하게 피난하게 하는 화재시나리오와 관련된 중요한 변수이다. Petrella(1994)는 콘카로리미터 실험에 의해 측정된 착화시간(TTI)과 최대열방출율(PHRR) 및 총방출열량(THR) 값을 이용하여 재료가 플래쉬오버에 기여할 수 있는 가능성을 아래 계산식을 이용하여 분류하는 방법을 아래 식과 같이 제안하였다.

$$x = \frac{PHRR}{TTI} \qquad (2)$$

$$y = THR \qquad (3)$$

본 연구에서는 각 재료별로 복사열이 50 kW/㎡에서 착화시간, 최대열방출율, 및 총방출열량을 이용하여 프래쉬오버 가능성을 분류하여 Table 4에 나타내었다. 이 분류방법에 따르며, PP가 프래쉬오버의 가능성이 가장 '높음', FRP는 '중간' 그리고 PVC는 '낮음'으로 나타났다. PP로 구성된 플라스틱의 경우는 화재가 발생하면 프레쉬오버에 빨리 도달하여 화재의 진압이 어렵고, 화재 및 연기가 빠르게 확산되어 인명 피해가 커질 것으로 예상된다.

Table 4. 재료별 프레쉬오버 가능성

구 분		착화시간 (sec)	최대 열방출율 (kW/㎡)	프레쉬오버 가능성 (x)	총방출열(y) (MJ/㎡)	분류	
						x	y
PVC	A	123.6	75.6	0.6	16.6	낮음	중간
	B	227.5	164.7	0.7	22.7	낮음	중간
	C	128.9	190	1.5	28.5	중간	중간
PP	A	34	691.4	20.3	84.1	높음	중간
	B	32.7	661.7	20.2	83.5	높음	중간
	C	33.2	699	21.1	97.2	높음	중간
FRP	A	89.8	216.6	2.4	47.1	중간	중간
	B	120.5	138.2	1.1	40.4	중간	중간
	C	119.9	188.4	1.6	51.7	중간	중간

3-4. 연소가스 유해성

재료의 연소가스 유해성 분석은 연소시 발생된 가스를 각각 분석하는 평가하는 방법과 흰 쥐 등 실험동물을 이용하여 연소가스의 유해성을 평가하는 방법이 있다. 본 연구에서는 플라스틱 3종에 대해 KS F 2271에 따른 가스유해성 실험을 실시한 결과를 Table 5에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 열가소성 플라스틱은 연소가스 유해성으로 인한 흰 쥐의 행동정지 시간이 11분 15초에서 14분 59초로 나타났다. 3종의 플라스틱의 유해성을 비교하면 PVC나 FRP보다는 PP가 단 시간에 유해성이 큰 것으로 나타났다. 이는 PP가 다른 플라스틱보다는 착화시간이 짧고 열방출율이 빠르고 프레쉬오버의 가능성이 높기 때문에 초기에 연소가 빠르게 진행되어 유해가스가 단시간에 방출되었기 때문인 것으로 사료된다.

Table 5. 재료별 연소 가스 유해성 시험결과

실험재료		평 균	표준편차	행동 정지 시간
PVC	A	14분15초	07초	14분08초
		14분54초	06초	14분48초
	B	14분18초	25초	13분53초
		14분34초	15초	14분19초
PP	A	12분32초	14초	12분18초
		12분30초	17초	12분13초
	B	12분23초	08초	12분15초
		11분41초	26초	11분15초
FRP	A	14분53초	03초	14분50초
		14분57초	02초	14분55초
	B	14분54초	05초	14분49초
		14분59초	0초	14분59초

4. 결 론

본 연구에서는 열가소성 플라스틱의 화재위험 특성 파악을 위해 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP) 및 섬유강화플라스틱(FRP) 3종에 대해 ISO 5660와 KS F 2271 기준에 따라 착화성, 열방출율, 연소가스 유해성 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

최대 열방출율은 실험재료에 따라 큰 차이를 보이나, 같은 재료의 경우 제조자에 따른 변화는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 실험재료에 가해지는 외부의 heat flux가 증가함에 따라 실험재료의 최대 열방출율이 커지는 것으로 나타났다. 실험재료 중 폴리프로필렌(PP)가 가장 큰 최대 열방출율을 갖는 것으로 나타났다. 또한, 총방출열량은 폴리프로필렌(PP)의 가장 크며, 섬유강화플라스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC) 순으로 크게 나타났다. 프레쉬오버 가능성은 분류한 결과 PP가 프레쉬오버의 가능성이 가장 높고, 다음은 FRP 및 PVC 순으로 나타났다. PP로 구성된 플라스틱의 경우는 화재가 발생하면 프레쉬오버에 빨리 도달하여 화재의 진압이 어려고, 화재 및 연기가 빠르게 확산되어 인명 피해가 커질 것으로 예상된다.

플라스틱은 연소가스 유해성으로 인한 흰 쥐의 행동정지 시간이 11분 15초에서 14분 59초로 나타났다. 3종의 플라스틱의 유해성을 비교하면 PVC나 FRP보다는 PP가 단 시간에 유해성이 큰 것으로 나타났다. 이들 플라스틱을 건축물의 내장 및 구조물에 사용할 경우에는 화재가 발생할 경우 10분 이내로 대피하면 연소가스로 인한 치명상을 막을 수 있을 것으로 판단된다. 플라스틱 3종의 화재위험 특성을 살펴보면 PVC의 경우는 착화시간이 상대적으로 느리며, 열방출율이 작고, 프레쉬오버의 가능성이 적은 것으로 나타났다. PP의 경우는 착화시간이 짧아 바른 시간내에 착화가 가능하며, 열방출율이 높고, 프레쉬오버의 가능성이 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

1. G. Gallina et al., "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 et al., "Screening Tests for Fire Safety of Composites for Marine Applications", Fire and Materials, Vol. 25, pp. 215-222, 2001.
3. Babrauskas and S. J. Grayson , Heat Release in Fires, Elselvier Science Publishing Co., New York, 1992.
4. 이근원, 김관응 , "콘카로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재특성", 한국화재·소방학회 논문지, 17(1), 76-83, 2003.
5. 이근원, 산업용 단열재의 화재위험 특성에 관한 연구, 연구원 2000-18-138, 한국산업안전공단 산업안전보건연구원, 1999.