

발포 프라스틱 단열재의 화재위험 특성**이근원, 손두익**

한국산업안전공단 산업안전보건연구원

**Fire Risk Characteristics of Insulating Materials by Plastics Form
Manufactured****Keun Won, Lee and Du Ik, Son***Occupational Safety & Health Institute, Kosha***1. 서론**

폴리우레탄폼, 스티로폼 등 발포플라스틱의 단열재는 단열성능이 우수하면서도 가볍고 취급 및 시공이 상대적으로 용이한 장점이 있어 사업장에서 널리 사용되고 있다. 그러나 이들 발포플라스틱들은 연소하기 쉬운 재료로서 급속한 화염전파, 높은 열방출율, 많은 양의 연기발생 등 화재의 위험성이 상대적으로 높다는 문제점을 안고 있다. 폴리우레탄은 315℃ ~ 370℃¹⁾의 범위에서 착화가 가능하고, 일부 발포플라스틱의 경우 휘발유와 비슷한 발열량을 갖는 것도 있어 화재시 많은 양의 열을 방출시킬 수 있다.

최근 미국, 영국, 스웨덴 등 여러나라에서 각종 재료들의 화재위험성을 평가하기 위하여 콘칼로리미터(Cone Calorimeter)를 이용한 착화성 및 열방출 등에 관한 연구가 많이 수행되고 있다. 콘칼로리미터에 의한 화재특성 평가는 기존의 시험에 비해 정확하고 화재시 복합적으로 야기되는 여러 가지 연소특성들의 종합적인 측정이 가능하다. 그러나, 국내에서는 콘칼로리미터를 이용한 발포 프라스틱 단열재의 화재위험 특성 연구는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 건물이나 설비 등의 보온 및 단열을 위해 많이 사용되고 있는 발포 프라스틱 단열재들에 대해 콘칼로리미터를 이용하여 착화특성과 열방출 특성 분석을 통해 발포프라스틱 단열재의 화재 특성을 구명하고자 한다.

2. 실험

발포 플라스틱류의 제조 및 시공업체에 대한 자료조사를 토대로 하여 품목별 제조업체수와 제품제조 실적 순위를 감안하여 KS 지정품목을 기준으로, 비드법 발포 폴리스티렌, 압출법 발포폴리스티렌, 경질우레탄폼, 발포 폴리에틸렌 보온재를 품목별, 종류별로 각각 2개업체 제품을 실험재료로 선정하였다. 실험에 사용된 실험재료는 총 8개업

체 4개제품 37품목으로, 실험에 사용된 재료의 상세한 명세는 표 1에 나타내었다.

착화온도 측정을 위한 실험장치로 발화온도시험기(미국, ATLAS사 Setchkin self-ignition tester CS-81)를 사용하였으며, 실험방법은 ASTM D 1929²⁾, ISO 871³⁾ 기준을 적용하여 실시하였다. 착화시간(Time to Ignition, TTI)과 열방출 특성 실험은 Cone Calorimeter(미국, ATLAS사의 AUTOCAL, Model: CONE 2A)를 사용하였다(그림 1 참조). 단열재료의 열방출률, 착화시간 등을 측정하기 위한 실험방법은 ISO 5660⁴⁾을 적용하였다.

표 1. 실험에 사용된 발포플라스틱 단열재의 명세

단열재 종류	구분	형식	밀도(kg/m ³)		비고		
			KS기준	측정값			
발포폴리스티렌	A	비드법	1호	30 이상	25.9	KS M 3808 발포폴리스티렌 보온재	
			2호	25 이상	27.2		
			3호	20 이상	21.1		
			4호	15 이상	16.2		
	B	비드법	1호	30 이상	30.2		
			2호	25 이상	26.8		
			3호	20 이상	20.5		
			4호	15 이상	18.4		
발포폴리스티렌	C	압출법	특호	-	42.0		
			1호	-	30.0		
			2호	-	25.0		
			3호	-	22.0		
	D	압출법	특호	-	43.0		
			1호	-	31.4		
			2호	-	25.7		
			3호	-	24.1		
발포폴리우레탄	E	경질	2종1호	45이상	38.0		KS M 3809 경질 우레탄 폼보온재
			2종2호	35이상	31.0		
			2종3호	25이상	23.2		
	F	경질	2종1호	45이상	49.2		
			2종2호	35이상	38.2		
			2종3호	25이상	29.4		
발포폴리에틸렌	G	화학 가교 (1종)	1종20배	-	46.9	KS M 3862 발포 폴리에틸렌 보온재 1종: 비난연 2종: 난연	
			1종30배	-	32.1		
			1종40배	-	20.8		
			2종20배	-	70.0		
			2종30배	-	40.0		
			2종40배	-	23.2		
발포폴리에틸렌	H	화학 가교 (2종)	1종20배	-	43.3		
			1종30배	-	31.2		
			1종40배	-	25.0		
			2종20배	-	46.7		
			2종30배	-	34.6		
			2종40배	-	28.9		

3. 결과 및 고찰

착화온도(Ignition Temperature)

실험에 선택된 발포플라스틱 단열재의 착화온도 측정결과를 폴리스티렌의 경우만 표 2에 나타내었다. 발포플라스틱 단열재들은 SIT가 FIT에 비하여 약 100℃ 정도 높은 것으로 나타났다. 이 결과로 점화원이 존재할 때에는 더욱 낮은 온도에서도 착화가 가능하다는 사실을 알 수 있었다. 발포폴리스티렌 보드의 경우 비드법이 압출법에 비해 SIT가 10℃ 정도, FIT가 10-15℃ 정도 높게 나타났다. 폴리우레탄 보드는 발포폴리스티렌 보드와 차이는 별로 없었으며, 선정된 제품 중에서 폴리에틸렌이 가장 낮은 착화온도를 나타냈으며, SIT와

표 2. 발포폴리스티렌의 착화온도

구분	밀도 (kg/m ³)	SIT(℃)	FIT(℃)	비고
A	1호	25.9	487	비드법
	2호	27.2	491	
	3호	21.1	495	
	4호	16.2	510	
B	1호	30.2	487	비드법
	2호	26.8	490	
	3호	20.5	495	
	4호	18.4	512	
C	특호	42.0	475	압출법
	1호	30.0	485	
	2호	25.0	489	
	3호	22.0	495	
D	특호	43.0	478	압출법
	1호	31.4	484	
	2호	25.7	489	
	3호	24.1	494	

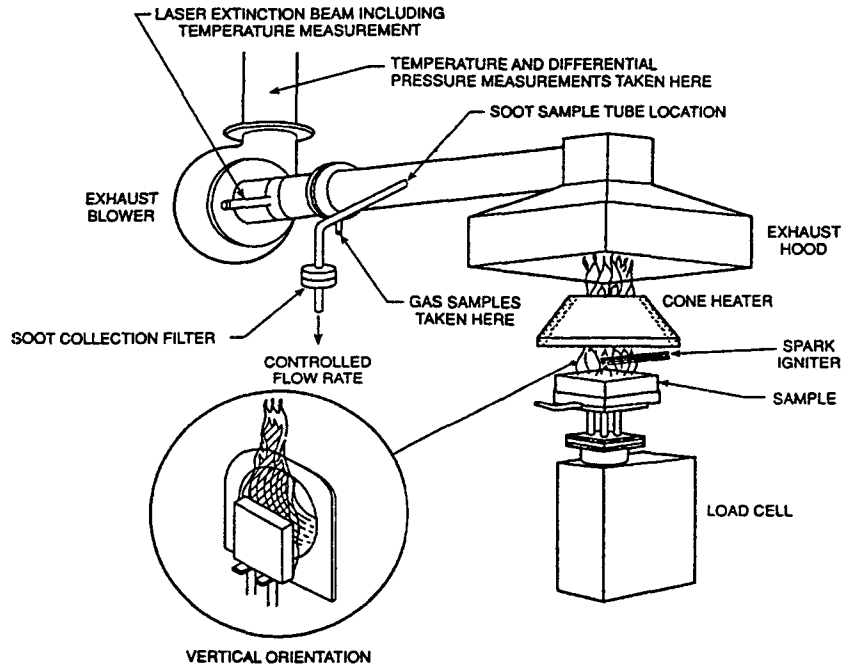


그림 1. 콘칼로리미터 구조도

FIT 모두 40-50℃ 정도 낮은 것으로 나타났다. 전체적으로 볼 때 실험재료로 선정된 제품들의 착화온도는 SIT가 410-500℃, FIT가 370-450℃에 있음을 알 수 있다. 각 제품 별로 밀도가 낮아짐에 따라 착화온도가 약간씩 높아지는 경향을 보였으나 그 차이는 별로 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 낮은 온도에서 착화에 필요한 충분한 양의 가연성 가스를 발생하지 못하였기 때문으로 판단된다.

착화시간(Time to Ignition, TTI)

(1) 단열재의 밀도에 따른 착화시간의 영향

플라스틱 단열재들의 밀도에 따른 착화시간의 영향을 단열재의 종류별로 착화시간을 측정하였다. 그 결과 대부분 밀도의 감소에 따라 착화시간이 짧아지는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 외부의 복사열에 노출된 단열재는 heat flux가 증가하면 착화시간은 짧아지고 반면에 밀도가 증가하면 착화시간은 길어지는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

(2) 단열재의 heat flux에 따른 착화시간의 영향

플라스틱 단열재의 heat flux에 따른 착화시간의 변화를 단열재의 종류별로 착화시간을 측정하였다. heat flux의 변화에 따른 착화시간의 변화는 발포 폴리스티렌 보드(비드법, 압출법), 폴리우레탄보드, 발포 폴리에틸렌 시이트(2종, 난연) 실험재료가 heat flux가 25 kW/m²에서 35 kW/m²로 증가함에 따라 착화시간은 최소 약 2배에서 최대 4배정도 짧아진 반면에 heat flux가 35 kW/m²에서 50 kW/m² 증가했을 때의 착화시간은 약 1.5배에서 2배정도 짧아졌다. 그러나, 발포 폴리에틸렌(1종, 비난연) 실험재료는 heat flux증가에 따른 착화시간의 변화는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

열 방출률(Heat Release Rate, HRR)

(1) 최대 열방출률(Peak Heat Release Rate, PHRR)

각 heat flux 조건에서 발포폴리스티렌의 경우만 표 3에 나타내었다. 실험재료에 가해지는 외부의 heat flux가 증가함에 따라 실험재료의 최대 열방출률이 커지고 최대 열방출률에 도달하는 시간도 짧아지는 것으로 나타났다. heat flux에 따라 밀도가 낮은 실험

표 3. 발포 폴리스티렌(비드법)의 최대 열방출률

구 분	밀도 (kg/m ³)	최대 열방출률(kW/m ²)			
		25 kW/m ²	35 kW/m ²	50 kW/m ²	
A	1호	25.9	294.8	446.5	331.7
	2호	27.2	329.3	348.4	371.6
	3호	21.1	272.2	327.2	398.2
	4호	16.2	226.2	347.9	329.8
B	1호	30.2	309.0	453.3	460.2
	2호	26.8	275.6	406.2	413.2
	3호	20.5	267.8	356.6	540.6
	4호	18.4	236.6	406.8	489.5

재료에 비해 밀도가 높은 실험재료의 최대 열방출률이 크게 나타났다. 이는 높은 heat flux에서는 열분해가 더욱 잘 진행되어 실험재료가 많은 양의 열을 방출하면서 빠른 속도로 연소하기 때문으로 보인다. 실험재료 중 발포 폴리에틸렌이 가장 큰 최대 열방출률을 갖는 것으로 나타났으며, 특히 발포에틸렌 실험재료는 전체적으로 밀도 및 heat flux에 따른 최대 열방출률의 변화가 가장 큰 것으로 나타났다.

(2) 총방출열량(Total Heat Released, THR)

총방출열량은 각 실험에서 실험재료의 연소로 인해 방출된 총열량으로서 시료표면적 당 시간에 대한 함수로 표현되는 열방출률(HRR) 값들을 적분하여 구한다. 본 연구에서는 10분간의 실험시간에 대하여 계산된 값이며, 실험결과를 대표적인 경우만 표 4에 나타내었다. 각 heat flux에서 동일한 밀도를 갖는 실험재료의 총방출열량은 큰 차이를 보이지 않고 비슷한 결과를 보이고 있다. 이는 연소성이 상대적으로 큰 재료의 경우에는 25 kW/m² 정도의 heat flux이면 실험재료가 지속적인 연소를 하는데 충분하기 때문으로 판단된다. 또한 최대 열방출율에서와 마찬가지로 각 실험재료의 밀도가 증가함에 따라 대체적으로 총방출열량도 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 실험재료가 일단 착화되면 지속적으로 연소 되므로 밀도가 클수록 연소되는 단열재 질량이 커진다고 할 수 있으므로 총방출열량도 증가하는 것으로 판단된다.

(3) 평균 열방출률(Average Heat Release Rate, Av HRR)

평균 열방출률은 ISO 기준을 비롯한 각 시험기준에서도 180초 평균 열방출율과 300초 평균 열방출률을 측정하고 있다. 평균 열방출율은 실험시간 전체에 걸쳐 방출열량의 평균값을 측정하였으며, 발포 폴리스티렌의 경우의 실험결과를 표 5에 나타내었다. 180초와 300초에서의 평균 열방출률은 실험재료간 비교를 위해 일정한 두께(50 mm)로 환산한 결과 발포폴리에틸렌이 가장 크게 나타났고, 발포폴리스티렌이 그 다음으로 큰 것으로 나타났다. 이는 발포 폴리에틸렌, 발포폴리스티렌이 각 heat flux에 노출되었을 때 용융하면서 연소했기 때문에 다른 실험재료에 비하여 평균 열방출량이 큰 것으로 판단된다.

표 4. 발포 폴리스티렌 보드(비드법)의 총 방출열량

구 분	밀도 (kg/m ³)	총 방출열량 (MJ/m ²)			
		25 kW/m ²	35 kW/m ²	50 kW/m ²	
A	1호	25.9	36.3	45.8	20.3
	2호	27.2	42.1	36.7	27.5
	3호	21.1	35.6	32.1	25.4
	4호	16.2	21.3	23.3	17.9
B	1호	30.2	50.2	46.5	38.6
	2호	26.8	40.5	38.0	30.7
	3호	20.5	33.9	32.8	31.3
	4호	18.4	28.8	26.8	27.7

표 5. 발포 폴리스티렌(비드법)의 평균열방출률

구 분	밀 도 (kg/m ³)	25 kW/m ²			35 kW/m ²			50 kW/m ²			
		180초	300초	평균	180초	300초	평균	180초	300초	평균	
A	1호	25.9	192.2	121.1	79.8	248.2	151.3	87.9	112.4	67.7	36.0
	2호	27.2	210.2	140.7	99.2	203.2	121.5	64.2	152.2	91.8	49.2
	3호	21.1	178.0	118.5	71.0	175.7	106.4	59.3	140.8	84.9	44.8
	4호	16.2	116.9	70.7	47.9	129.5	77.7	42.0	99.8	59.7	31.1
B	1호	30.2	214.6	166.8	113.3	249.3	153.9	88.0	210.9	127.9	70.0
	2호	26.8	191.5	134.6	88.3	204.8	125.3	70.2	170.1	102.7	53.9
	3호	20.5	178.0	111.7	72.6	181.5	109.3	60.3	173.5	104.5	55.4
	4호	18.4	157.5	95.9	60.3	148.1	89.0	48.6	148.7	90.2	48.5

4. 결론 및 제언

발포플라스틱 단열재의 착화성과 화재위험 특성을 측정·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 발포 플라스틱의 착화온도는 SIT가 410℃-510℃ 범위이고 FIT는 370℃-450℃ 범위에 있음을 알 수 있었다. 발포폴리스티렌 보드, 폴리우레탄 보드, 발포폴리에틸렌은 밀도에 따른 착화온도의 차이는 그다지 크지 않았다. 착화시간은 폴리에틸렌(1종, 비난연)가 가장 짧았으며, 폴리스티렌(압출법)이 가장 긴 것으로 나타났다. 일반적으로 밀도가 증가하면 착화시간은 길어지는 경향을 나타내었으며, heat flux의 크기가 증가하면 착화시간은 짧아지는 것으로 나타났다.

열방출률 특성은 최대 열방출률, 총방출률 및 평균 열방출률을 평가하였다. 열방출률은 밀도와 heat flux의 증가에 따라 증가하였다. 실험재료 중 발포폴리에틸렌은 최대 열방출률 및 평균열방출률이 가장 크게 나타났고, heat flux 및 밀도의 증가에 따른 최대 열방출률의 증가율도 가장 큰 것으로 나타났다. 또한, 발포 플라스틱의 종류 및 heat flux의 크기에 따라서 착화성 및 열방출특성 등이 각각 다르기 때문에 추후 각국의 평가기준과 본 연구의 연구결과를 비교·검토하여 사용용도와 조건에 따라 단열재의 화재위험 특성을 적절하게 분류할 수 있는 평가기준을 정립하여야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Factory Mutual, "Caution-Plastics in construction, Part 1. Foamed Plastic Insulation", Record, 3rd Quarter, pp. 6~11, (1997)
2. ASTM D 1929, Standard Test Method for Ignition Properties of Plastics, ASTM, Philadelphia, (1991)
3. ISO 871, Plastics-Determination of ignition temperature using hot-air furnace, Generer, 1996.
4. ISO 5660, Reaction to Fire Part 1. Rate of Heat Release from building products (Cone Calorimeter), Generer, (1993)