

# 발포 플라스틱 단열재의 착화특성 및 연소가스 분석

이근원, 김관용, 양성환  
산업안전보건연구원 안전공학연구실

## 1. 서론

산업현장의 건물, 설비 등의 보온 및 단열을 위해 우레탄폼, 스티로폼 등 다양한 종류의 플라스틱류 단열재를 사용하고 있다. 이들은 착화 및 연소속도가 빠르고 연소시 유독가스를 다량 발생시켜 심각한 재산 및 인명피해를 초래하고 있다. 그러나, 이들 발포플라스틱들은 연소하기 쉬운 재료로서 급속한 화염전파, 높은 열방출율, 많은 양의 연기발생 등 화재의 위험성이 상대적으로 높다는 문제점을 안고 있다. 또한 이들 단열재의 연소로 인해 발생하는 농후하고 검은 색의 연기는 피난 및 소화 활동에 커다란 장애요인이 되고 있으며 사업장에 따라서는 연기로 인한 피해가 화재로 인한 피해를 초과할 만큼 심각한 경우도 있다. 미국 등 선진국의 경우 단열재 등의 재료가 화재조건에 노출되었을 때 야기되는 위험을 크게 착화성, 열방출율, 화재의 전파 및 유독성 연소가스의 방출 등으로 분류하고 있다. 재료의 착화 및 열방출은 화재의 성장과 전파에 직접적인 영향을 미치고 있어 정확한 열방출율의 측정과 화재시 발생하는 연소가스의 분석이 중요한 요소로서 인식되고 있다. 미국, 영국, 스웨덴 등에서는 각종 재료들의 화재위험성을 종합적으로 평가하기 위하여 콘칼로리메터(Cone Calorimeter)를 이용한 열방출율에 관한 연구가 많이 수행되고 있다. 그러나, 국내에서는 발포 플라스틱류 단열재의 열특성에 관한 연구는 거의 전무한 실정이며, 최근에 본 저자가 발포 플라스틱류 단열재의 열특성을 발표한바 있다<sup>1)</sup>.

본 연구에서는 여러 사업장에서 건물이나 설비 등의 보온 및 단열을 위해 많이 사용되고 있는 플라스틱류 단열재들에 대해 착화특성과 및 연소가스 분석을 통해 단열재의 화재위험 특성을 규명함으로써 단열재로 인한 화재로부터 인명과 재산피해를 최소화시킬 수 있는 예방 대책 수립에 활용하고자 한다.

## 2. 단열재의 생산현황 및 화재사례 분석

### 2.1 단열재의 생산현황

국내에서 생산되고 있는 단열재의 생산 및 시공업체를 지역별, 품목별로 조사한 결과 단열재의 국내 제조업체수는 약 170개사이며, 이중 71 %인 122개사가 발포스티렌 단열재 업체로 나타나 산업용 단열재의 주종이 발포 폴리스티렌 단열재임을 알 수 있다(표 생략). 경질 우레탄 단열재 제조업체는 15개사 8 %를 점유하고 있어 발포 폴리스티렌 단열재 다음이었다. 단열재의 품목별 수요를 파악하기 위해 국내에서 생산되는 주요 단

열재의 품목별 생산량을 조사하여 <표1>에 나타내었다<sup>2)</sup>. 국내 생산실적을 보면 유기 단열재의 경우 비드법 발포폴리스티렌, 경질우레탄폼, 압출발포스티렌, 폴리에틸렌 순으로 나타났으며, 무기질 단열재인 암면, 유리면의 생산이 많은 것은 사용온도 범위가 높은 관계로 산업용에 많이 사용되고 있다고 생각된다.

<표1> 주요단열재 생산현황

제품 구분		실적 (ton)	환산면적		비고
			천(m <sup>2</sup> )	구성비(%)	
무기 단열 재	암면	56,270	22,510	13.3	
	유리면	33,680	28,070	16.5	
	소계	89,950	50,580	29.8	
유기 단열 재	비드법발포 폴리스티렌	108,000	108,000	63.5	
	압출발포폴리스 티렌	5,000	5,000	2.9	
	경질우레탄폼	6,000	3,430	2.0	
	폴리에틸렌폼	1,500	3,000	1.8	
	소계	120,500	119,430	70.2	
총계		210,450	170,010	100.0	

## 2.2 단열재의 화재사례 분석

단열재의 화재사례 분석을 위해 한국화재보험협회에서 발간한 화재사고사례 자료<sup>3)</sup>를 참고하여 용도별 화재건수(표 생략)와 발화원인별 화재건수를 <표2>에 나타내었다. 1994~1998 5년간 발생한 단열·보온재 관련 화재는 47건이 발생했으며, 발생건수를 용도별로 보면 발생건수는 APT가 15건으로 전체 화재 건수의 31% 차지 1위를 차지하고 있으며, 빌딩이 12건 25%로 2위를 공장이 10건, 21%로 3위를 차지하였다.

<표2>에 나타난 바와 같이 1994~1998 5년간 발생한 단열·보온재 관련 화재발생건수를 발화원인별로 보면 발화원은 용접·용단불티가 19건으로 전체 화재건수의 40%로 1위를 기록하고 있으며, 누전·배선불량 등 전기에 의한 것이 9건, 19%로 2위, 담배불이 8건, 17%로 3위를 기록하고 있다. 특히, 용접·절단 등에 의해 화재가 많이 발생하는 것은 건물, 설비 등의 개·보수 작업에 용접·용단 작업이 많이 수반되며, 발생하는 불티가 먼곳까지 도달하는 특성이 있기 때문이라고 생각된다. 단열재 화재는 주로 용접 불티나 전기합선으로 인해 스티렌폼과 폴리우레탄 등의 배관 단열이나 보온재 화재가 대부분인 것을 알 수 있었다.

<표 2> 발화원인별 화재발생건수 ('95~'98)

용도	연도별					계
	94	95	96	97	98	
용접·절단 불티			11	7	1	19
정전기, 누전, 배선		1	5	2	1	9
담배불		2	4	1	1	8
토오치불꽃			2			2
불장난			1			1
방 화		1				1
기 타	1		3			4
미 상			2		1	2
계	1	4	28	10	4	47

### 3. 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 8개업체 4개제품 37품목이다.

재료의 착화온도 실험방법은 ISO 871, ASTM D 1929, 및 ASTM E 136 기준에서 규정하고 있으며, 착화가 일어나는 온도는 가열방법, 시료량, 시료의 상태 등에 의해 달라질 수 있다. 사업장에서의 온도조건은 현장에 따라서 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 가열온도를 변화시킬 수 있는 ISO 871<sup>3)</sup> 기준을 적용하여 실시하였다. 착화온도의 실험장치로 발화온도시험기(미국, ATLAS사 Setchkin self-ignition tester CS-81)를 사용하였다. 착화시간은 재료가 어떤 열복사 조건에 노출되었을 때 착화되는 시간(Time to ignition)을 측정하는 콘칼로리미터법(ISO 5660<sup>5)</sup>)를 사용하였다.

폴리우레탄폼, 폴리스티렌폼 등 프라스틱 단열재의 연소가스 분석은 화재시에 발생하는 연기와 질식위험을 평가하는 CO 와 CO<sub>2</sub> 가스를 분석하였다. 재료의 연소가스 분석 실험에 대해서 NES 713, 건설성고시 제1231호, NF X-70-100, ISO TR 9122, BSI DD180, DIN 53436 및 IMO MSC 61. Part2.에서 규정하고 있다. 단열재의 연소로 인하여 발생하는 CO 및 CO<sub>2</sub> 가스의 발생량을 가스검지관을 이용한 실험방법인 NES 713<sup>6)</sup>을 적용하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 착화온도(Ignition Temperature)

실험에 선택된 발포 플라스틱류 단열재료의 착화온도 측정결과를 대표적인 것만 <

표 3>에 나타내었다. 발포 플라스틱류 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 폴리에틸렌 시이트가 가장 낮은 착화온도를 나타냈으며, SIT와 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 제품별로 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.

<표 3> 폴리스티렌보드의 착화온도

구분	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	SIT(℃)	FIT(℃)	비고
A	1호	25.9	487	비드법
	2호	27.2	491	
	3호	21.1	495	
	4호	16.2	510	

## 4.2 착화시간(Time to Ignition, TTI)

### (1) 플라스틱류 단열재의 밀도에 따른 착화시간의 영향

플라스틱류 단열재들의 밀도에 따른 착화시간의 영향 발포 플라스틱의 종류별로 대표적인 것만 [그림 1]에 나타내었다. 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) 플라스틱류 단열재의 heat flux에 따른 착화시간의 영향

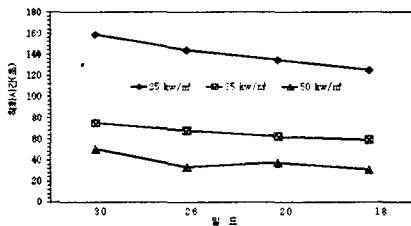
플라스틱류 단열재의 heat flux에 따른 착화시간의 변화를 단열재의 종류별로 대표적인 것만 [그림 2]에 나타내었다. heat flux의 변화에 따른 착화시간의 변화는 발포 폴리스티렌 보드(비드법, 압출법), 폴리우레탄보드, 발포 폴리에틸렌 시이트(2종, 난연) 실험재료가 heat flux가 25 kW/m<sup>2</sup>에서 35 kW/m<sup>2</sup>로 증가함에 따라 착화시간은 최소 약 2배에서 최대 4배정도 짧아진 반면에 heat flux가 35 kW/m<sup>2</sup>에서 50 kW/m<sup>2</sup> 증가했을 때의 착화시간은 약 1.5배에서 2배정도 짧아졌다.

## 4.3 연소가스(CO, CO<sub>2</sub>) 분석

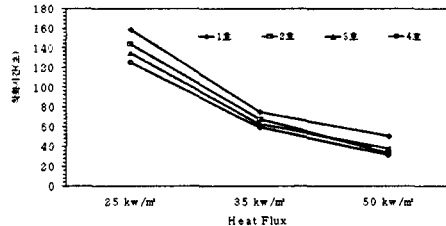
단열재의 연소가스 분석을 통하여 CO 및 CO<sub>2</sub>의 실험결과를 발포 스티렌보드의 경우만 <표 4>에 나타내었다. NES 713 기준과 비교하여 보면 30분동안 CO에 노출될 때

사망하는 농도의 결과값을 갖고 있었다. 또한, CO<sub>2</sub>의 경우는 발포 폴리에틸렌 시이트가 가장 높은 농도의 CO<sub>2</sub>를 발생하는 것으로 나타났다. 단열재의 화재시 의식장해가 일어나기 전 5분 이내에 대피해야 인명피해를 최소화 할 수 있다.

각 재료별로 연소가스를 비교 분석해보면 발포폴리스티렌 보드의 경우 CO 및 CO<sub>2</sub> 발생량은 비드법에 의해 제조된 제품이 압출법 제품보다 적은양이 발생하였다. 밀도의 크기에 따라서는 비드법은 밀도가 낮을수록 연소가스 발생량이 적게 발생하였으나, 압출법은 밀도의 크기에 관계 없이 연소가스 발생량이 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 폴리우레탄 보드의 경우 2호의 제품이 1호, 3호의 제품에 비하여 CO, CO<sub>2</sub> 발생량이 많은 것으로 나타났다. 발포폴리에틸렌의 경우 CO<sub>2</sub> 발생량은 2종(난연제품)이 1종(비난연제품) 적게 발생하였으나, CO 발생량은 2종 제품이 1종제품 보다 많은 양이 발생되었다.



[그림 1] 발포 폴리스티렌 보드의 밀도에 따른 착화시간



[그림 2] 발포 폴리스티렌의 heat flux에 따른 착화시간

<표 4> 발포 스티렌보드의 CO 및 CO<sub>2</sub> 농도

구 분			농 도 (ppm/100 g)	
			CO	CO <sub>2</sub>
A	비드법	1호	5,410	89,790
		2호	5,280	73,870
		3호	4,360	66,610
		4호	3,810	62,410
B	비드법	1호	7,409	104,380
		2호	6,180	98,120
		3호	5,480	95,530
		4호	5,220	91,010
C	압출법	특호	6,900	69,430
		1호	8,290	86,330
		2호	6,180	111,840
		3호	6,110	105,140
D	압출법	특호	7,710	108,010
		1호	6,840	101,810
		2호	6,110	99,490
		3호	5,860	95,330

## 5. 결론

발포 플라스틱 단열재의 화재위험성 및 화재사례를 분석하였으며, 단열재의 화재위험 특성 파악을 위해 발포 플라스틱류에 대한 착화특성 및 연소가스 실험결과와 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

단열재 화재는 아파트, 빌딩 및 공장 등에서 가장 많이 발생하였으며, 발화원은 용접·용단 불티, 누전 및 배선불량 등 전기에 의한 것과 담뱃불 순이었다. 플라스틱류 단열재의 착화온도는 SIT가 410℃ - 510℃ 범위이고 FIT는 370℃ - 450℃ 범위에 있음을 알 수 있었다. 발포폴리스티렌 보드, 폴리우레탄 보드, 발포폴리에틸렌 시이트는 밀도에 따른 착화온도의 차이는 그다지 크지 않았다. 착화시간은 폴리에틸렌 시이트(비난연)가 가장 짧았으며, 폴리스티렌 보드(압출법)이 가장 긴 것으로 나타났다. 일반적으로 밀도가 증가하면 착화시간은 길어지는 경향을 나타내었으며, heat flux의 크기가 증가하면 착화시간은 짧아지는 것으로 나타났다. 연소가스 분석에서 단열재료는 30분동안 CO에 노출될 때 사망하는 농도의 결과값을 갖고 있었다. 또한, CO<sub>2</sub>의 경우는 발포 폴리에틸렌 시이트가 가장 높은 농도의 CO<sub>2</sub>를 발생하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 이근원, 박찬선, 이두형, “콘카로리메터를 이용한 발포 플라스틱 단열재의 열특성”, 화학공학의 이론과 응용, 제6권1호, pp.421-424, 2000.
2. 한국건설기술연구원, 단열설계 및 시공가이드북, 통상산업부 pp.157~163, 1997.
3. 화재사고사례 DB, 한국화재보험협회, 1999.
4. ISO 871, Plastics-Determination of ignition temperature using hot-air furnace, Generer, 1996.
5. ISO 5660, Reaction to Fire Part 1. Rate of Heat Release from building products (Cone Calorimeter), Generer, 1993.
6. NES 713, Determination of the toxicity index of the products of combustion from small specimens of materials. Issue 03, March 1985. MoD Ship Dept.