

발포 플라스틱의 착화특성 및 연소가스 분석

이근원[†] · 김관웅

산업안전보건연구원 안전공학연구소
(2001. 1. 30. 접수 / 2001. 2. 10. 채택)

Ignition Characteristics and Combustion Gas Analysis of the Plastics Foam

Keun-Won Lee[†] · Kwan-Eung Kim

Department of Safety Engineering Research, Occupational Safety & Health Research Institute
(Received January 30, 2001 / Accepted February 10, 2001)

Abstract : This study was undertaken to investigate fire risk characteristics of the plastics foam that is used as an insulating material in workplaces. The ignition characteristics and combustion gas of the plastics foam were carried out using the ISO self-ignition tester, the Cone Calorimeter, and NES combustion analyzer. The experimental materials used were commercial samples and their composition is not disclosed by the manufacturer. As the experimental results, the self-ignition temperature of the plastics foam ranges from 410°C to 510°C, and the flash-ignition temperature of plastics foam ranges from 370°C to 450°C. The difference of ignition temperature on density with plastics foam type was smaller since the amount of combustible gas to ignite is not caused enough. The time to ignition of the polyethylene foam in samples of the plastics foam was shorter, and its of polyethylene foam was longer. The concentration of carbon dioxide of the polyethylene foam shows higher in samples of the plastics foam. It is found that the concentration values of carbon monoxide of the plastics foam show very fatality on people during exposure of 30 minutes in fire.

Key Words : plastic foam, ignition characteristics, fire risk, Cone calorimeter

1. 서 론

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 열방출률, 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, 열방출률, 화재의 전파 및 유독성 연소가스의 방출 등으로 분류하고 있다. 재료의 착화 및 열방출은 화재의 성장과 전파에 직접적인 영향을 미치고 있어 정확한 열방출률의 측정과 화재시 발생하는 연소가스의 분석이 중요한 요소로서 인식되고 있다. 미국, 영국, 스웨덴 등에서는 각종 재료들의 화재위험성을 종합적으로 평가하기 위하여 콘칼로리미터(Cone Calorimeter)를 이용한 열방출률에 관한 연구가 많이 수행되고 있다^{1~3)}. 그러나, 국내에서는 셀룰로오스 단열재의 연기발생에 관한 연구가 시도된 적이 있으나,⁴⁾ 발포, 플라스틱류 단열재의 열폭성에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다. 최근에 발포 플라스틱류 단열재의 열특성을

[†]To whom correspondence should be addressed.
leekw@kosha.net

발표한 바 있다.

본 연구에서는 건물이나 설비 등의 보온 및 단열을 위해 많이 사용되고 있는 발포 플라스틱류 단열재들에 대한 착화특성과 및 연소가스 분석을 통해 단열재의 화재위험 특성을 제공함으로써 발포 플라스틱 단열재의 화재로 인한 인명과 재산피해를 최소화시킬 수 있는 예방 대책 수립에 활용하고자 한다.

2. 실험

2.1. 실험재료

발포 플라스틱 단열재의 제조 및 시공업체에 대한 자료조사를 토대로 품목별 제조 업체수와 제품 제조 실적 순위를 감안하여⁵⁾, 발포 폴리스티렌, 경질우레탄폼, 폴리에틸렌폼 단열재를 품목별, 종류별로 각각 2개업체 제품을 실험재료로 선정하였다. 실험에 사용된 실험재료는 KS 지정품목을 기준으로 총 8개업체 4개제품 37품목이며, 이를 Table 1에 나타내었다.

2.2. 실험장치 및 방법

착화온도는 ISO 871⁶⁾, ASTM D 1929⁷⁾ 및 ASTM E 136⁸⁾ 기준에서 규정하고 있으며, 착화가 일어나는 온도는 가열방법, 시료량, 시료의 상태 등에 의해

Table 1. Specification of experimental materials

Classification	Symbol	Type	Density(kg/m ³)		Remark	
			KS기준	측정값		
Polystyrene foam (thickness 50 mm)	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	
Polystyrene foam (thickness 50 mm)	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		

Classification	Symbol	Type	Density(kg/m ³)		Remark	
			KS기준	측정값		
Polyurethane foam (thickness 50 mm)	E	경질	2종1호	45 이상	38.0	KS M 3809 경질우레탄 폼보온재
			2종2호	35 이상	31.0	
			2종3호	25 이상	23.2	
	F	경질	2종1호	45 이상	49.2	
			2종2호	35 이상	38.2	
			2종3호	25 이상	29.4	
Polyethylene foam (thickness 10 mm)	G	화학가교(1종)	1종20배	-	46.9	KS M 3862 발포 폴리에틸렌 보온재 1종: 비난연 2종: 난연 *발포 폴리에틸렌은 두께 10 mm가 주로 생산되고 있음.
			1종30배	-	32.1	
			1종40배	-	20.8	
			2종20배	-	70.0	
			2종30배	-	40.0	
			2종40배	-	23.2	
Polyethylene foam (thickness 10 mm)	H	화학가교(2종)	1종20배	-	43.3	KS M 3862 발포 폴리에틸렌 보온재 1종: 비난연 2종: 난연 *발포 폴리에틸렌은 두께 10 mm가 주로 생산되고 있음.
			1종30배	-	31.2	
			1종40배	-	25.0	
			2종20배	-	46.7	
			2종30배	-	34.6	
			2종40배	-	28.9	

달라질 수 있다. 본 연구에서 사업장에서의 온도조건은 현장에 따라서 달라질 수 있으므로 가열온도를 변화시킬 수 있는 ISO 871⁶⁾ 기준을 적용하여 실시하였다. 착화온도의 실험장치는 발화온도시험기 (Setchkin self-ignition tester, CS-81, ATLAS사, 미국)를 사용하였다. 착화시간은 재료가 어떤 열복사 조건에 노출되었을 때 착화되는 시간을 측정하는 것으로 ISO 5660⁹⁾에서 규정하고 있는 콘칼로리미터법을 사용하였다. 단열재 제품으로부터 100±0.2 mm 크기의 시편 3개씩을 절취하여 온도 23±2 °C, 상대습도 50±5%의 조건에서 함량이 될 때까지 보존한다. 0.025~0.04 mm 두께의 알루미늄 호일을 사용하여 함량이 된 시편의 바닥면과 측면을 감싼다. 선택한 강도의 heat flux에서 콘칼로리미터의 질량측정장치, 산소분석기, 히타 및 열방출률을 교정한다. 콘히터와 시편과의 거리를 2.54 cm로 조정하고 배출유량을 0.024 m³/s±0.002 m³/s로 설정한다. 시편과 시편홀더를 질량 측정장치에 설치하고 실험을 개시하고 외부 점화장치를 부착한 상태로 25 kW/m², 35 kW/m², 50 kW/m²의 복사열에 단열재를 수평방향으로 노출시켜 착화시간을 초단위로 측정하였다.

발포 플라스틱 단열재의 연소가스 분석은 화재시에 발생하는 연기와 질식위험을 평가하는 CO와

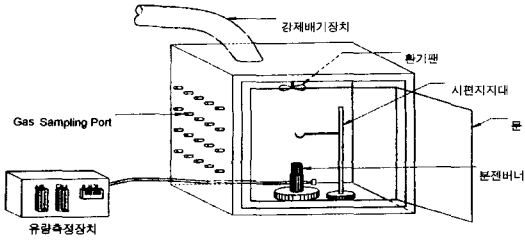


Fig. 1. Equipment for combustion gas analysis

CO₂ 가스를 분석하였다. 재료의 연소가스 분석실험에 대해서 NES 713¹⁰⁾, ISO TR 9122¹¹⁾, BSI DD 180¹²⁾ 및 IMO MSC 61¹³⁾ 등에서 규정하고 있다. 단열재의 연소로 인하여 발생하는 CO 및 CO₂ 가스의 발생량을 가스검지관을 이용한 실험방법인 NES 713¹⁰⁾을 적용하였다. 실험장치는 Fig. 1과 같이 0.7 m³ 이상의 연소챔버, 분첸버너(내경 11 mm), 연소챔버 벽면에 가스샘플을 추출할 수 있는 샘플링 지점, 강제배출장치, 혼합팬, 메탄가스 및 Air를 조절하는 유량측정장치, 시편홀더, 시간 측정장치, 검지관 등으로 구성된 연소가스분석 장치를 사용하였다. 실험결과는 다음 식을 이용하여 재료 100 g이 연소하여 발생된 CO, CO₂의 농도와 체적 1m³중의 공기 중에 확산된 CO, CO₂를 계산하여, 각 가스에 대해 3회 측정값을 평균하였다.

$$C_{\theta} = \frac{C \times 100 \times V}{m} \text{ ppm}$$

여기서 C_θ : 가스농도 (ppm)

C : 시험용 챔버내의 가스농도 (ppm)

m : 시편질량 (g)

V : 시험용 챔버의 체적 (m³)

3. 결과 및 고찰

3.1. 착화온도(Ignition Temperature)

실험에 선택된 발포 플라스틱 단열재료의 착화온도 측정결과를 Table 2에 나타내었다. 발포 플라스틱 단열재료들은 SIT(Self-Ignition Temperature)가 FIT(Flash Ignition Temperature)에 비하여 약 100℃ 정도 높은 것으로 나타났다. 이 결과로 점화원이 존재할 때에는 더욱 낮은 온도에서도 착화가 가능하다는 사실을 알 수 있었다. 발포폴리스티렌의 경우 비드법이 압출법에 비해 SIT가 10℃정도, FIT가 10-15℃ 정도 높게 나타났다. 폴리우레탄은 발포 폴리스티렌과 차이는 별로 없었으며, 선정된 제품 중에서 폴리

Table 2. Ignition temperature of the polystyrene foam

Classification	Density (kg/m ³)	SIT(°C)	FIT(°C)	Remark	
A	1호	25.9	487	387	비드법
	2호	27.2	491	388	
	3호	21.1	495	391	
	4호	16.2	510	404	
B	1호	30.2	487	386	비드법
	2호	26.8	490	390	
	3호	20.5	495	392	
	4호	18.4	512	407	
C	특호	42.0	475	388	압출법
	1호	30.0	485	386	
	2호	25.0	489	383	
D	특호	43.0	478	392	압출법
	1호	31.4	484	385	
	2호	25.7	489	381	
E	1호	38.0	480	372	경질
	2호	31.0	488	382	
	3호	23.2	490	386	
F	1호	49.2	482	373	경질
	2호	38.2	490	381	
	3호	29.4	495	390	
G	20배	46.9	413	374	화학가교 (1종)
	30배	32.1	421	405	
	40배	20.8	438	427	
H	20배	43.3	440	421	화학가교 (2종)
	30배	31.2	444	431	
	40배	25.0	457	445	

에틸렌이 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 사료된다.

3.2. 착화시간(Time to Ignition, TTI)

발포 플라스틱 단열재료들의 종류와 밀도에 따른

착화시간을 Table 3에 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. 또한, heat flux의

변화에 따른 발포 플라스틱의 착화시간 변화는 발포 폴리스티렌(비드법, 압출법), 발포 폴리우레탄, 발포 폴리에틸렌 (2종, 난연) 실험재료의 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.

Table 3. Time to ignition of the plastics foam

Classification		Density (kg/m ³)	TII (sec)			
			25 kw/m ²	35 kw/m ²	50 kw/m ²	
A	비드법	1호	25.9	146.2	84.1	38.9
		2호	27.2	178.7	64.7	42.0
		3호	21.1	142.2	61.3	39.8
		4호	16.2	157.7	52.3	31.7
B	비드법	1호	30.2	158.4	74.7	50.1
		2호	26.8	143.4	67.5	33.2
		3호	20.5	134.5	62.1	37.7
		4호	18.4	124.8	59.2	31.0
C	압출법	특호	42.0	185.7	94.5	52.9
		1호	30.0	157.0	79.5	41.0
		2호	25.0	147.1	74.5	37.8
		3호	22.0	146.3	68.1	35.8
D	압출법	특호	43.0	193.1	108.9	32.9
		1호	31.4	174.9	100.2	44.2
		2호	25.7	165.2	80.0	38.9
		3호	24.1	185.2	94.6	35.2
E	2종	1호	38.0	20.7	8.2	4.9
		2호	31.0	12.7	10.8	3.0
		3호	23.2	13.8	7.3	2.5
F	2종	1호	49.2	22.2	11.2	7.3
		2호	38.2	19.5	11.2	6.3
		3호	29.4	17.4	9.7	4.1
G	1종	20배	46.9	8.5	7.7	3.7
		30배	32.1	7.8	9.6	3.2
		40배	20.8	10.0	3.2	2.6
H	1종	20배	43.3	10.5	5.1	3.5
		30배	31.2	14.5	3.7	3.0
		40배	25.0	14.6	4.5	3.7
G	2종	20배	70.0	176.2	41.8	18.5
		30배	40.0	140.5	11.8	5.4
		40배	23.2	58.8	19.8	5.9
H	2종	20배	46.7	53.2	20.4	8.0
		30배	34.6	40.8	19.4	7.8
		40배	28.9	45.1	18.7	7.3

3.3. 연소가스(CO, CO₂) 분석

발포 플라스틱 단열재의 연소가스 중 CO 및 CO₂의 분석 실험결과를 Table 4에 나타내었으며, 측정값의 오차범위는 ±10% 이내이었다. NES 713에서¹⁰⁾ 제시한 CO 및 CO₂기준과 비교하여 보면 30분동안 CO에 노출될 때 사망하는 농도의 결과값을 갖고 있었다. 또한, CO₂의 경우는 발포 폴리에틸렌 시이트가 가장 높은 농도의 CO₂를 발생시키는 것으로 나타났다. 단열재의 화재시 의식장애가 일어나기 전 5분 이내에 대피해야 인명피해를 최소화 할 수 있다.

각 재료별로 연소가스를 비교 분석해보면 발포폴리스티렌 보드의 경우 CO 및 CO₂ 발생량은 비드법에 의해 제조된 제품이 압출법 제품보다 적은 양이 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, CO₂ 발생량이 많은 것으로 나타났다. 발포 폴리에틸렌의 경우 CO₂ 발생량은 2종(난연제품)이 1종(비난연제품) 적게 발생하였으나, CO 발생량은 2종 제품이 1종제품 보다 많은 양이 발생되었다.

4. 결 론

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

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)가 가장 긴 것으로 나타났다. 일반적으

Table 4. CO and CO₂ concentration of plastics foam

Classification		Concentration (ppm/100 g)		
		CO	CO ₂	
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
E	2종 1호	7,430	78,500	
	2종 2호	8,850	95,700	
	2종 3호	7,090	67,080	
F	2종 1호	7,600	65,860	
	2종 2호	8,540	94,300	
	2종 3호	7,230	60,650	
G	1종 20배	6,790	138,990	
	1종 30배	5,940	129,460	
	1종 40배	5,110	127,220	
	2종 20배	10,790	107,710	
	2종 30배	9,660	103,650	
	2종 40배	8,240	100,810	
H	1종 20배	6,320	100,070	
	1종 30배	5,520	115,990	
	1종 40배	5,100	103,110	
	2종 20배	11,460	117,050	
	2종 30배	8,980	111,010	
	2종 40배	8,100	82,990	

로 밀도가 증가하면 착화시간은 길어지는 경향을 나타내었으며, heat flux의 크기가 증가하면 착화시간은 짧아지는 것으로 나타났다. 연소가스 분석에서 단열재료는 30분동안 CO에 노출될 때 사망하는 농

도의 결과값을 갖고 있었다. 또한, CO₂의 경우는 발포 폴리에틸렌 시이트가 가장 높은 농도의 CO₂를 발생하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) Babrauskas and S. J. Grayson, Heat Release in Fire, Elsevier Science Publishing Co, 1992.
- 2) NFPA 264, Standard Method of Test for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter, NFPA, 1992.
- 3) W. H. Kim and J. G. Quintiere, "Application of A Model to Compare Spread and Heat Release Properties of Interior Finish Materials in A Compartment", Proc. of International Symposium on Fire Science and Technology, pp. 193~200, KIFSE, 1997.
- 4) 이근원, 박찬선, 이두형, "콘카로리메터를 이용한 발포 플라스틱 단열재의 열특성", 화학공학의 이론과 응용, Vol. 6, No. 1, pp. 421~424, 2000.
- 5) 한국건설기술연구원, 단열설계 및 시공가이드북, 통상산업부 pp. 157~163, 1997.
- 6) ISO 871, Plastics-Determination of ignition temperature using hot-air furnace, Generer, 1996.
- 7) ASTM D 1929, Standard Test Method for Ignition Properties of Plastics, ASTM, Philadelphia, 1991.
- 8) ASTM E 136, Standard Test Method for Behavior of Materials in a Vertical Tube Furnace at 750 °C ASTM 1994.
- 9) ISO 5660, Reaction to Fire Part 1. Rate of Heat Release from building products (Cone Calorimeter), Generer, 1993.
- 10) NES 713, Determination of the Toxicity Index of the Products of Combustion from Small Specimens of Materials. Issue 03, March 1985.
- 11) ISO TR 9122, Toxicity Testing of Fire Effluents, ISO 1989.
- 12) BSI DD 180, Draft for Development Guide for the Assessment of Toxic Hazards in Fire Buildings and Transport, BSI 1989.
- 13) IMO MSC 61, Adoption of the International code for Application of Fire Test Procedures. Part2. Smoke and Toxicity Test. 1996.
- 14) 김 홍, 강영구, "셀룰로오스 단열재의 연기발생에 관한 연구", 산업안전학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 12~17, 1994.