

콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재특성 Fire Characteristics of Plastic Insulating Materials from Cone Calorimeter Test

이근원[†] · 김관응

Keun-Won Lee[†] · Kwan-Eung Kim

한국산업안전공단 산업안전보건연구원
(2003. 2. 14. 접수/2003. 3. 14. 채택)

요 약

본 연구는 산업현장에서 단열재로 사용되고 있는 폴리스티렌 폼, 폴리우레탄 폼, 폴리에틸렌 폼과 같은 플라스틱 단열재의 화재특성을 구명하고자 하였다. 플라스틱 단열재의 화재특성은 ISO 5660에 따라 콘칼로리미터 시험을 수행하였다. 사용된 실험재료는 국내에서 생산되는 상업용 플라스틱 단열재를 사용하였고 그들의 조성은 제조자에 의해 밝혀지지 않았다. 연구 결과 플라스틱 단열재의 열방출율은 재료의 밀도와 열플럭스의 증가에 따라 증가하였다. 플라스틱 단열재 중 폴리에틸렌 폼이 최대열방출율 및 평균열방출율이 가장 크게 나타났고, 열플럭스 및 밀도의 증가에 따른 최대열방출율의 증가율도 가장 큰 것으로 나타났다. 플라스틱 단열재에 의한 화재예방을 위해 제품의 종류 및 열플럭스의 크기에 따른 열방출 평가 기준을 제시하였다.

ABSTRACT

This study was designed to investigate fire characteristics of the plastics insulating materials such as a polystyrene foam, polyurethane foam, and polyethylene foam, which is used an insulating materials in workplace. The fire characteristics of plastic insulating materials were carried out from the Cone Calorimeter test according to ISO 5660. The experimental materials used were commercial plastic insulating materials by products and their composition is not disclosed by the manufacturer. As the results of this study, the heat release rate of plastic insulating materials was increased with increasing density and heat flux. The peak heat release rate and the average heat release rate for the polyethylene foam in insulating materials were showed the highest, and the peak heat release rate for the polyethylene foam was the highest. The standard of heat release rate with a kind of products and heat flux of irradiance to prevent fire by plastic insulating materials was suggested.

Keywords : Plastic insulating materials, Fire characteristics, Cone Calorimeter, Heat release rate

1. 서 론

스티로폼, 폴리우레탄 폼, 폴리에틸렌 폼 등과 같은 플라스틱의 단열재는 단열성능이 우수하면서도 가볍고 취급 및 시공이 상대적으로 용이한 장점이 있어 산업장에서 널리 사용되고 있다. 그러나 이들 플라스틱 단열재들은 연소하기 쉬운 재료로서 급속한 화염전파, 높

은 열방출율, 많은 양의 연기발생 등 화재의 위험성이 상대적으로 높다는 문제점을 안고 있다. 폴리우레탄은 315°C~370°C의 범위에서 착화가 가능하고,¹⁾ 플라스틱 단열재의 경우 휘발유와 비슷한 발열량을 갖는 것도 있어 화재 발생시 많은 양의 열을 방출시킬 수 있다. 또한, 플라스틱 단열재는 연소로 인해 발생하는 농후하고 검은 색의 연기는 피난 및 소화 활동에 커다란 장애 요인이 되고 있으며 연기로 인한 피해가 화재로 인한 피해를 초과할 만큼 심각한 경우도 있다. 선진국

[†]E-mail: leekw@kosha.net

등에서는 각종 재료들의 화재위험성을 종합적으로 평가하기 위하여 콘칼로리미터(Cone Calorimeter)를 이용한 열방출율에 관한 연구가 많이 수행되고 있다.^{2,4)} 각종 재료의 열방출 특성은 화재의 성장과 전파에 직접적인 영향을 미치고 있어 정확한 열방출율의 측정과

분석이 중요한 요소로서 인식되고 있다. 그러나, 국내에서는 이들 플라스틱 재료에 대한 연소가스 분석이나 독성평가에 관한 연구가 발표된 적이 있지만,^{5,6)} 콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 열특성에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다.

Table 1. Specification of experimental materials

Classification	Symbol	Type	Density(kg/m ³)		Remarks	
			KS standard	Measured		
Polystyrene foam (thickness 50 mm)	A	Expanded	No.1	30 above	25.9	KS M 3808
			No.2	25 above	27.2	
			No.3	20 above	21.1	
			No.4	15 above	16.2	
	B	Expanded	No.1	30 above	30.2	
			No.2	25 above	26.8	
			No.3	20 above	20.5	
			No.4	15 above	18.4	
Polystyrene foam (thickness 50 mm)	C	Extruded	Special	-	42.0	
			No.1	-	30.0	
			No.2	-	25.0	
			No.3	-	22.0	
	D	Extruded	Special	-	43.0	
			No.1	-	31.4	
			No.2	-	25.7	
Polyurethane foam (thickness 50 mm)	E	Rigid	Class 2, No.1	45 above	38.0	KS M 3809 *Class 2 : flame retardant
			Class 2, No.2	35 above	31.0	
			Class 2, No.3	25 above	23.2	
	F	Rigid	Class 2, No.1	45 above	49.2	
			Class 2, No.2	35 above	38.2	
			Class 2, No.3	25 above	29.4	
Polyethylene foam (thickness 10 mm)	G	Chemical cross linking	Class 1, 20x	-	46.9	KS M 3862 *Class 1 : non-flame retardant *x : foam times
			Class 1, 30x	-	32.1	
			Class 1, 40x	-	20.8	
			Class 2, 20x	-	70.0	
			Class 2, 30x	-	40.0	
			Class 2, 40x	-	23.2	
	H	Chemical cross linking	Class 1, 20x	-	43.3	
			Class 1, 30x	-	31.2	
			Class 1, 40x	-	25.0	
			Class 2, 20x	-	46.7	
			Class 2, 30x	-	34.6	
			Class 2, 40x	-	28.9	

본 연구에서는 건물이나 설비 등에 보온 및 단열을 위해 많이 사용되고 있는 플라스틱 단열재의 화재특성을 평가하기 위해 콘칼로리미터 시험을 실시하였다. 플라스틱 단열재의 열방출 특성 분석을 통해 단열재의 화재특성 구명과 단열재로 인한 화재로부터 인명과 재산피해를 최소화시킬 수 있는 열특성 평가기준의 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험재료

플라스틱 단열재의 제조 및 시공업체에 대한 자료조사와 품목별 제조 업체수와 제품제조 실적 순위를 감안하여 KS 지정품목을 기준으로, 총 8개업체 3개 제품 34품목으로, 실험에 사용된 재료의 상세한 명세는 Table 1에 나타내었다. 실험재료는 비드법 폴리스티렌 폼, 압출법 폴리스티렌 폼, 경질우레탄 폼, 폴리에틸렌 폼을 품목별, 종류별로 각각 2개업체 제품을 실험재료로 선정하였다.

2.2 실험장치 및 방법

플라스틱 단열재의 열방출율을 측정하기 위해 ISO 5660,⁷⁾ ASTM E 1354⁸⁾ 기준에 따라 본 연구에서는 미국 ATLAS사의 콘칼로리미터(CONE 2A)를 사용하였다. Fig. 1에 콘칼로리미터의 개략도를 나타내었으며, 이 장치는 큰 형태의 복사전기히터, 시편의 질량을 측정하기 위한 무게측정장치, 시편홀더, 산소분석장치, 유량측정장치를 부착한 배출시스템, 스파크 점화회로, 열플럭스미터(heat flux meter), 교정용 버너 및 데이터

수집 및 분석시스템들로 구성되어 있다.

실험방법은 먼저 시편을 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ($\pm 0.2\text{ mm}$) 크기로 준비하여 시험에 앞서 온도 $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 5\%$ 항량이 될 때까지 유지한다. 전 처리된 시편은 $0.03 \sim 0.05\text{ mm}$ 의 알루미늄 호일로 비 노출면을 감싸고 이 때 호일의 반쪽거리는 면이 시편을 향하도록 한다. 복사열의 크기를 변화시킬 때에는 콘히터가 원하는 복사열을 $\pm 2\%$ 이내의 범위 내에서 발생시킬 수 있도록 복사열 제어조절장치를 조정한다. heat flux meter를 교정위치에 삽입했을 때에는 시편이나 시편홀더는 사용하지 않아야 한다. 콘히터를 작동시켜 설정 값에서 10분 이상 안정시킨다. 또한, 산소분석기의 영점을 맞추고, 열방출을 교정과 질량측정 장치를 교정한다.

실험절차는 먼저 CO_2 트랩과 최종 수분트랩을 확인한다. 콘히터의 바다판과 시편의 상부 표면사이의 거리를 2.54 cm 로 조정한다. 배출유량을 $0.024\text{ m}^3/\text{s} \pm 0.002\text{ m}^3/\text{s}$ 로 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 열차단 장치를 놓는다. 반복해서 3개의 시편에 대해 실험을 실시하고 실험결과를 기록한다. 본 연구에서는 선정된 단열재에 $25 \sim 75\text{ kW/m}^2$ 의 열플럭스를 가하여 단열재의 종류 및 열플럭스의 크기별로 시간에 따른 열방출특성의 변화를 연속적으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열 방출율(Heat Release Rate, HRR)

콘칼로리미터(Cone Calorimeter) 시험에서는 열방출율을 재료의 연소 표면적당 발생하는 열량으로 표현하고 발생열량의 크기에 따라 플라스틱 단열재의 화재위험성을 평가하였다. 콘칼로리미터를 이용하여 시편을 수평 방향으로 설치하고 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 , 50 kW/m^2 의 복사열에 10분간 노출시켰을 때의 최대열방출율(Peak Heat Release Rate, PHRR), 평균열방출율(Heat Release Rate, HRR), 총방출열량(Total Heat Released, THR)을 측정하였다.

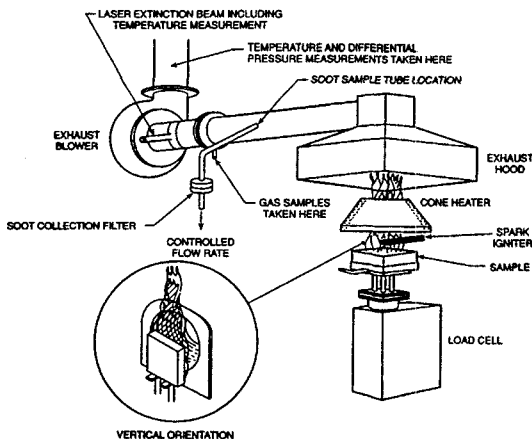


Fig. 1. Schematic apparatus of cone calorimeter.

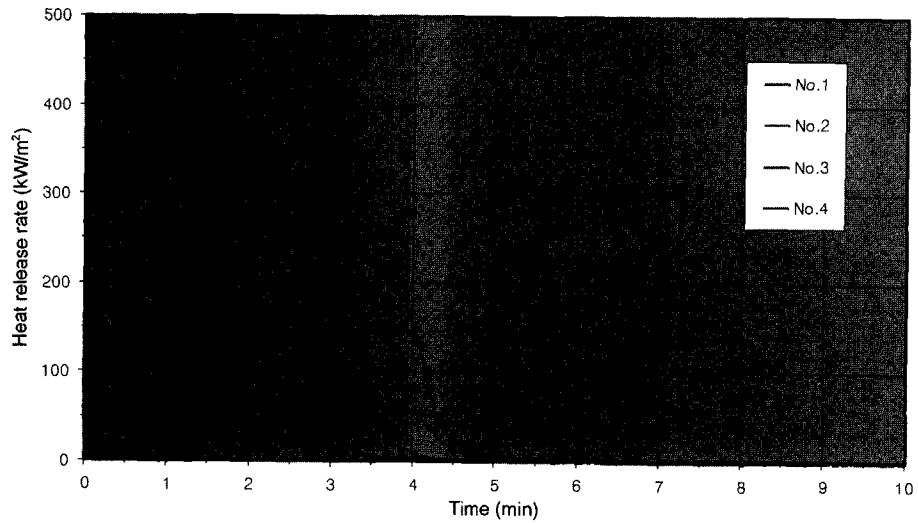


Fig. 2. Typical curve of heat release rate in polystyrene foam.

플라스틱 단열재 중 폴리스티렌 폼의 전형적인 열방출을 곡선 하나만 Fig. 1에 나타내었다. 열방출을 곡선으로부터 각 플라스틱 단열재의 종류에 따른 열방출을 비교할 수 있다. 이들 그림으로부터 최대열방출을, 총방출을 및 평균열방출을 등을 얻을 수 있다. 폴리스티렌의 폼의 경우 Fig. 2에서 보는 바와 같이 1호가 최대열방출을 값이 가장 높게 나타났으며, 최대열방출이 300 kW/m² 이상으로 연소시 화재의 확대위험이 매우 큰 재료임을 알 수 있었다. 폴리우레탄 폼의 경우는 피크가 완만하게 나타났으며, 이는 화재조건에 노출되었을 때 재료로부터 열방출율이 서서히 이루어지고 있다는 것을 의미한다. 그러나, 폴리스티렌 폼에 비해 초기에 열방출율이 급격하게 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 폴리에틸렌 폼의 경우 최대열방출을을 비교하면 1종(비난연)과 2종(난연)에 대하여 어떤 경향성이 없어 비교하기 어려워지며, 이는 제품 자체의 물성이 균일하지 않는 것으로 사료된다.

3.2 최대열방출율(Peak Heat Release Rate, PHRR)

열방출율은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기이며, 하나의 데이터를 추출함으로써 발생할 수 있는 잘못된 데이터의 수집을 피하기 위하여 5 포인트의 데이터를 평균하였다. 열방출을 값은 측정된 산소농도와 대기중의 산소농도의 차이에 의하여 계산하였다. 각 열플럭스 조건에서 플라스틱 단열재의 경우 최대열방출을 값을 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보는

Table 2. Peak heat release rate of plastic insulating materials

Classification		Density (kg/m ³)	Peak heat release rate (kW/m ²)		
			25 kW/m ²	35 kW/m ²	50 kW/m ²
A	No.1	25.9	294.8	446.5	331.7
	No.2	27.2	329.3	348.4	371.6
	No.3	21.1	272.2	327.2	398.2
	No.4	16.2	226.2	347.9	329.8
B	No.1	30.2	309.0	453.3	460.2
	No.2	26.8	275.6	406.2	413.2
	No.3	20.5	267.8	356.6	540.6
	No.4	18.4	236.6	406.8	489.5
C	Special	42.0	327.1	514.3	348.6
	No.1	30.0	272.3	370.0	325.4
	No.2	25.0	241.3	350.2	338.5
	No.3	22.0	203.9	296.0	425.6
D	Special	43.0	332.1	485.2	573.9
	No.1	31.4	303.1	469.5	637.4
	No.2	25.7	253.9	424.9	519.0
	No.3	24.1	276.0	423.9	486.9
E	Class 2, No.1	38.0	257.6	273.3	306.3
	Class 2, No.2	31.0	236.1	273.9	289.7
	Class 2, No.3	23.2	219.8	256.6	297.2

Table 2. Continued

Classification		Density (kg/m ³)	Peak heat release rate (kW/m ²)		
			25 kW/m ²	35 kW/m ²	50 kW/m ²
F	Class 2, No.1	49.2	289.5	297.2	357.2
	Class 2, No.2	38.2	277.0	310.6	359.5
	Class 2, No.3	29.4	232.4	272.2	290.8
G	Class 1, 20x	46.9	360.3	447.4	835.0
	Class 1, 30x	32.1	193.4	360.4	459.6
	Class 1, 40x	20.8	321.8	449.7	771.3
	Class 2, 20x	70.0	210.9	219.9	238.7
	Class 2, 30x	40.0	505.9	423.1	841.0
	Class 2, 40x	23.2	370.3	501.7	549.1
H	Class 1, 20x	43.3	406.9	504.6	1028.9
	Class 1, 30x	31.2	254.2	680.3	799.1
	Class 1, 40x	25.0	233.2	437.3	675.6
	Class 2, 20x	46.7	850.7	632.9	1153.9
	Class 2, 30x	34.6	528.0	492.7	910.5
	Class 2, 40x	28.9	503.8	652.9	861.8

바와 같이 실험재료에 가해지는 외부의 열플럭스가 증가함에 따라 단열재료의 최대열방출율이 커지고 최대 열방출율에 도달하는 시간도 짧아지는 것으로 나타났다. 또한 25 kW/m², 35 kW/m², 50 kW/m²의 열플럭스 조건에서 밀도가 낮은 실험재료에 비해 밀도가 높은 플라스틱 재료의 최대열방출율이 크게 나타났다. 이는 높은 열플럭스에서는 열분해가 더욱 잘 진행되어 실험재료가 많은 양의 열을 방출하면서 빠른 속도로 연소하기 때문으로 보인다. 실험재료 중 폴리에틸렌 폼이 가장 큰 최대열방출율을 갖는 것으로 나타났으며, 특히 폴리에틸렌 폼 실험재료는 전체적으로 밀도 및 열플럭스에 따른 최대열방출율의 변화가 가장 큰 것으로 나타났다.

3.3 총방출열량(Total Heat Release Rate, THRR)

총방출열량은 각 실험에서 실험재료의 연소로 인해 방출된 총열량으로서 시료표면적당 시간에 대한 함수로 표현되는 열방출율(HRR) 값들을 적분하여 구한다. 이 실험에서는 10분간의 실험시간에 대하여 계산된 값이며, 플라스틱 단열재의 실험결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3에서 보는 바와 같이 25 kW/m², 35 kW/m², 50 kW/m²의 열플럭스에서 동일한 밀도를 갖는 실험

Table 3. Total heat release rate of plastic insulating materials

Classification		Density (kg/m ³)	Total heat release rate (MJ/m ²)		
			25 kW/m ²	35 kW/m ²	50 kW/m ²
A	No.1	25.9	36.3	45.8	20.3
	No.2	27.2	42.1	36.7	27.5
	No.3	21.1	35.6	32.1	25.4
	No.4	16.2	21.3	23.3	17.9
B	No.1	30.2	50.2	46.5	38.6
	No.2	26.8	40.5	38.0	30.7
	No.3	20.5	33.9	32.8	31.3
	No.4	18.4	28.8	26.8	27.7
C	Special	42.0	56.7	51.3	36.8
	No.1	30.0	34.3	39.2	27.0
	No.2	25.0	31.0	35.1	26.1
	No.3	22.0	31.6	29.7	30.1
D	Special	43.0	56.7	57.5	62.5
	No.1	31.4	43.3	44.1	48.4
	No.2	25.7	34.3	38.7	39.5
	No.3	24.1	31.3	34.2	33.8
E	Class 2, No.1	38.0	30.5	33.8	42.2
	Class 2, No.2	31.0	23.7	27.8	34.3
	Class 2, No.3	23.2	20.7	23.7	29.4
F	Class 2, No.1	49.2	30.9	35.9	43.9
	Class 2, No.2	38.2	19.1	31.5	36.4
	Class 2, No.3	29.4	18.6	19.3	24.9
G	Class 1, 20x	46.9	9.4	11.4	9.8
	Class 1, 30x	32.1	12.6	12.9	15.1
	Class 1, 40x	20.8	8.0	8.1	9.8
	Class 2, 20x	70.0	20.0	20.6	22.6
	Class 2, 30x	40.0	5.8	6.3	6.9
	Class 2, 40x	23.2	8.8	9.5	11.2
H	Class 1, 20x	43.3	20.4	19.9	22.4
	Class 1, 30x	31.2	9.9	10.5	12.7
	Class 1, 40x	25.0	11.9	12.7	15.4
	Class 2, 20x	46.7	18.3	20.2	23.1
	Class 2, 30x	34.6	13.5	16.3	17.7
	Class 2, 40x	28.9	9.6	10.5	12.3

재료의 총방출열량은 큰 차이를 보이지 않고 비슷한 결과를 보이고 있는데 이는 연소성이 상대적으로 큰

재료의 경우에는 25 kW/m² 정도의 열플럭스이면 실험재료가 지속적인 연소를 하는데 충분하기 때문에 판단된다. 또한 최대열방출율에서도 언급한 바와 같이 각 실험재료의 밀도가 증가함에 따라 대체적으로 총 방출열량도 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.

Table 3에 나타난 폴리에틸렌 폼의 경우, 상용제품

Table 4. Average heat release rate of plastic insulating materials

Classification	Density (kg/m ³)	25 kW/m ²		35 kW/m ²		50 kW/m ²		
		180 sec	300 sec	180 sec	300 sec	180 sec	300 sec	
A	No.1	25.9	192.2	121.1	248.2	151.3	112.4	67.7
	No.2	27.2	210.2	140.7	203.2	121.5	152.2	91.8
	No.3	21.1	178.0	118.5	175.7	106.4	140.8	84.9
	No.4	16.2	116.9	70.7	129.5	77.7	99.8	59.7
B	No.1	30.2	214.6	166.8	249.3	153.9	210.9	127.9
	No.2	26.8	191.5	134.6	204.8	125.3	170.1	102.7
	No.3	20.5	178.0	111.7	181.5	109.3	173.5	104.5
	No.4	18.4	157.5	95.9	148.1	89.0	148.7	90.2
C	Special	42.0	218.2	187.6	281.6	170.5	200.9	122.4
	No.1	30.0	179.8	114.3	210.0	130.6	149.3	90.0
	No.2	25.0	163.0	103.4	194.7	116.0	141.4	85.7
	No.3	22.0	154.2	104.6	164.7	98.6	165.4	99.9
D	Special	43.0	260.0	211.2	290.9	191.6	324.9	208.4
	No.1	31.4	206.0	143.9	244.1	147.3	267.0	161.2
	No.2	25.7	174.1	113.5	208.5	126.9	217.0	131.3
	No.3	24.1	167.0	103.3	183.2	111.4	187.1	112.6
E	Class 2, No.1	38.0	116.7	96.6	154.4	106.8	180.0	124.5
	Class 2, No.2	31.0	110.3	76.6	135.6	85.1	155.6	102.9
	Class 2, No.3	23.2	112.9	68.6	120.2	73.5	129.9	87.0
F	Class 2, No.1	49.2	84.4	73.4	111.0	100.2	133.9	118.1
	Class 2, No.2	38.2	77.9	55.8	112.9	91.8	140.5	98.8
	Class 2, No.3	29.4	75.7	60.3	94.4	63.2	105.9	75.7
G	Class 1, 20x	46.9	111.5	67.0	114.8	68.7	125.1	75.3
	Class 1, 30x	32.1	32.2	18.5	35.0	20.6	38.6	23.0
	Class 1, 40x	20.8	48.9	28.4	53.1	31.8	62.1	37.2
	Class 2, 20x	70.0	45.7	28.1	62.8	37.8	54.2	32.6
	Class 2, 30x	40.0	61.5	37.7	71.7	42.9	81.5	49.3
	Class 2, 40x	23.2	43.1	24.6	45.2	26.7	62.1	37.2
H	Class 1, 20x	43.3	101.7	60.8	112.6	67.6	128.8	76.2
	Class 1, 30x	31.2	74.4	44.7	90.6	54.5	93.0	56.8
	Class 1, 40x	25.0	53.1	31.9	57.9	35.0	65.9	40.1
	Class 2, 20x	46.7	110.2	66.3	109.8	66.1	124.5	74.9
	Class 2, 30x	34.6	64.2	38.5	70.3	42.2	81.6	50.0
	Class 2, 40x	28.9	53.9	31.1	58.5	35.1	70.7	42.2

이 두께 10 mm로 생산되기 때문에 본 실험에서는 10 mm에 대한 실험 값으로 타 시료와 같은 두께인 50 mm로 환산하여 총방출열량을 비교한 결과 플라스틱 단열재료 중 폴리에틸렌 폼이 가장 높은 것으로 나타났다.

3.4 평균열방출율(Average Heat Release Rate)

Babrauskas와 Krasny는⁹⁾ 콘칼로리미터에 의한 실험을 통하여 재료가 착화 후 180초에서의 평균열방출율이 실험규모 화재에서의 최대열방출을 값에 상응한다고 보고한 반면에 NFL(National Fire Laboratory)의 연구결과에서는 착화 후 300초에서의 평균열방출율이 실험규모 화재실험에서의 결과와 더 좋은 상관관계를 갖는다고 발표하였다. 이와 같은 연구결과를 바탕으로 시료의 착화 후 180초에서의 평균열방출율과 300초에서의 평균열방출율은 실제 화재에서의 연소특성을 잘 판단할 수 있다는 점에서 큰 의미를 갖고 있으며 ISO 기준을 비롯한 각 시험기준에서도 180초 평균열방출율과 300초 평균열방출율을 측정하고 있다.

본 연구에서도 평균열방출율은 25 kW/m², 35 kW/m², 50 kW/m²의 복사열에 노출된 재료가 착화되어 180초에 이르기까지 방출된 평균열방출율과 300초에 이르기까지의 평균열방출율을 측정하였으며, 플라스틱 단열재의 실험결과를 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 보는 바와 같이 180초와 300초에서의 평균열방출율

은 실험재료간 비교를 고려하여 50 mm 두께로 환산한 폴리에틸렌 폼이 가장 크게 나타났고, 폴리스티렌 폼이 그 다음으로 큰 것으로 나타났다. 이는 폴리에틸렌 폼, 폴리스티렌 폼이 각 열플럭스에 노출되었을 때 용융하면서 연소했기 때문에 다른 실험재료에 비하여 평균열방출량이 큰 것으로 판단된다.

3.5 플라스틱 단열재의 화재위험 특성 평가

재료의 화재 발생시 위험특성을 보다 더 적절하게 평가하기 위하여 콘칼로리미터를 사용한 열방출 특성 값을 측정함으로써 재료의 위험정도를 분류하는 국가들이 증가하고 있다. 현재까지 각 국에서 채택하고 있는 콘칼로리미터 시험을 통한 재료의 열방출 특성 분류¹⁰⁻¹²⁾를 Table 5에 나타내었다. 각 국의 규정에서는 적용대상별로 착화 시간 및 열방출 특성에 따라 재료의 화재위험 정도를 분류하고 있다. 재료의 사용장소와 화재위험 정도에 따라 적합한 재료를 선정하여 사용할 수 있도록 함으로써 화재로 인한 인명 및 재산상의 피해를 최소화할 수 있다.

본 연구결과를 분석하여 보면 폴리스티렌 폼, 폴리우레탄 폼 및 발포폴리에틸렌 폼의 열방출특성은 50 kW/m²의 열플럭스 조건에서 최대열방출을 239~1,028 kW/m², 평균열방출을 23~208 kW/m², 총열방출을 7~63 MJ/m²로 나타나 캐나다 분류체계를 적용하여 분류하여 보면 폴리스티렌 폼, 폴리우레탄 폼 및 폴리에

Table 5. Standard and classification of heat release rate for materials in North America countries

Classification	Materials	Heat flux (kW/m ²)	Time to Ignition (sec)	Heat Release Rate		
				Peak (kW/m ²)	Average (kW/m ²)	Total (MJ/m ²)
IMO	Interior materials of ship	50	20 above	60 below	20 below	20 below
Canada	N	Rock wool	-	20 below	5 below	3 below
	C-1	Plasterboard(with paper)	-	100 below	17 below	10 below
	C-2	Flame retardant wood	-	150 below	85 below	50 below
	C-3	Ordinary wood	-	300 below	170 below	100 below
	C-4	Ordinary plastic foam	-	300 above	170 above	100 above
U.S.A. (Military standard)	Interior materials of submarine	50	150 above	65 below	50 below	-
(*) U.S.A. (NFPA)	A	Ordinary Polyurethane foam	-	-	280 above	-
	B	Melamine-Treated foam	-	-	280 below	-
	C	CMHR-type foam	-	-	160 below	-
	D	Hydrophilic-type foam	-	-	85 below	-
	E	Neoprene foam	-	-	45 below	-

(*) Interior furniture.

틸렌 폼은 평균열방출률 및 총방출열량 측면에서는 C-2 또는 C-3 등급에 해당되나, 최대열방출률이 C-4 등급에 해당되므로 전체적으로는 C-4 등급으로 분류할 수 있다.

우리나라에서 발생한 냉동창고, 유흥음식점 등에서 단열재에 의한 대형화재사고가 발생하여 많은 인명 및 재산피해를 초래한 바 있다. 화재예방측면에서 이들 장소(업소)에서 사용되는 플라스틱 단열재에 의한 화재 피해를 최소화하기 위해서는 캐나다의 열방출 특성기준 C-2 등급(최대열방출률 150 kW/m² 이하, 평균열방출률 85 kW/m² 이하, 총열방출률 50 MJ/m² 이하)정도의 수준으로 평가기준을 정하는 것이 좋을 것으로 사료된다. 특히, 사람이 많이 이용하는 공공장소 혹은 작업장에 플라스틱 단열재를 사용할 때는 화재로 인한 인명 피해를 최소화하기 위해 단열재의 난연성 향상이나 단열재의 시공시 마감율 C-2 등급(캐나다 기준) 이상의 성능이 되도록 하는 것이 바람직하다. 또한 우리나라에서도 사람이 많이 이용하는 공공시설이나 작업장 내부에 사용될 수 있는 재료의 종류 및 열플럭스의 크기에 따라서 착화성, 열방출 특성 및 가스방출 특성이 각기 다르기 때문에 각국의 평가기준과 본 연구의 연구결과를 비교·검토하여 사용조건에 따른 재료의 연소 특성을 적절하게 분류할 수 있는 평가기준을 정립하여야 할 것이다.

4. 결론 및 제언

플라스틱 단열재의 화재위험 특성 평가를 위해 콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 재료의 최대열방출률, 총방출률 및 평균열방출률 특성 실험과 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 플라스틱 단열재의 종류에 따른 열방출률 값을 제시하였으며, 열방출률은 밀도와 열플럭스의 증가에 따라 증가하였다. 실험재료 중 폴리에틸렌 폼이 최대열방출률 및 평균열방출률이 가장 크게 나타났고, 열플럭스 및 밀도의 증가에 따른 최대열방출률의 증가율도 가장 큰 것으로 나타났다.

2) 플라스틱 단열재의 종류 및 열플럭스의 크기에 따라 열방출 특성 등이 각각 다르기 때문에 각국의 열방출 평가기준과 본 연구의 연구결과를 비교·검토하여 사용용도와 조건에 따라 단열재의 화재위험 특성을 적절하게 분류할 수 있는 평가기준을 정립하여야 할 것이다.

3) 화재예방 측면에서 냉동창고, 유흥음식점 등에서 사용되는 플라스틱 단열재에 의한 화재 피해를 최소화

하기 위해서는 최대열방출률 150 kW/m² 이하, 평균열방출률 85 kW/m² 이하, 총열방출률 50 MJ/m² 이하의 수준으로 평가기준을 정하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. Factory Mutual, "Caution-Plastics in construction, Part 1. Foamed Plastic Insulation", Record, 3rd Quarter, pp.6-11(1997).
2. Babrauskas and S.J. Grayson, "Heat Release in Fire", Elsevier Science Publishing Co.(1992).
3. NFPA 264, "Standard Method of Test for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter", NFPA(1992).
4. 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, KIFSE, pp.193-200(1997).
5. 이근원, 김관용, "발포 플라스틱의 착화특성 및 연소가스 분석", 산업안전학회지, Vol. 16, No. 1, pp.48-52 (2001).
6. 박영근, 김동일, 현성호, "가스검지관법에 의한 플라스틱 재료의 연소가스 독성평가", 한국화재·소방학회지, Vol. 16, No. 4, pp.77-84(2002).
7. ISO 5660, "Reaction to Fire Part 1. Rate of Heat Release from Building Products (Cone Calorimeter)", Generer, ISO(1993).
8. ASTM E 1354, "Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter", Philadelphia(1990).
9. Andrew Kim and Robert Onno, "A System to Evaluate Fire Hazards of Materials Using a Small-Scale and Full-Scale Fire Test Methods, Internal Report No.649, pp.1-3, NRCC(1993).
10. NFPA 264 A, "Standard Method of Test for Heat Release Rates for Upholstered Furniture Components or Composites and Mattresses Using an Oxygen Consumption Calorimeter", NFPA(1994).
11. MIL-STD-2031, "Military Standard Fire and Toxicity Test Methods and Qualification Procedure for Composite Material Systems Used Hull, Machinery and Structural Applications in side Naval Submarines Pot", U.S. MIL(1991).
12. IMO MSC 61, "Adoption of the International Code for Application of Fire Test Procedures. Part 2, Smoke and Toxicity Test", IMO(1996).