

퍼즐매트의 연소속도에 관한 연구

박 형 주

호원대학교 소방행정학부

(2008. 10. 4. 접수 / 2008. 12. 10. 채택)

A Study on the Burning Rate of Puzzle Mats

Hyung-Ju Park

Department of Fire Service Administration, Howon University

(Received October 4, 2008 / Accepted December 10, 2008)

Abstract : The mass loss rate and heat release rate of puzzle mats were analysed using variable external irradiation level. Five samples of puzzle mat were tested in this study : Type A, B, C, D and E. Type A, B and C are all general grades whereas Type D and E are both Flame retardant grades. Incident heat fluxes of 25kW/m², 35kW/m², 50kW/m² and 70kW/m² were selected for these experiments. All samples were tested in the horizontal orientation and were wrapped in a single layer of aluminum foil. Each sample was nominally 20mm thick and 100mm square. The combustion heat and mass loss rate were carried out from Oxygen bomb calorimeter and mass loss calorimeter according to ISO 5660-1 respectively. Heat release rates were calculated using the equation $\dot{Q} = A_f \dot{m}'' \chi \Delta H_c = 0.75 A_f \dot{m}'' \Delta H_c$, where A_f is the horizontal burning area of the sample, \dot{m}'' is mass loss rate per unit area, ΔH_c is complete heat of combustion and 0.75 is combustion efficiency.

Key Words : mass loss rate, heat release rate, puzzle mats, combustion heat, radiation heat flux

1. 서론

건축용 바닥재 중 퍼즐매트는 염화비닐수지 바닥재, 목질 바닥재, 카페트 바닥재, 인조대리석 바닥재, 수지 바닥재 등에 비해 상대적으로 충격에 대한 완충작용이 우수할 뿐만 아니라 취급 및 시공성이 좋은 장점으로 인해 대형건물과 스포츠센터, 아동보육시설 등에서 그 사용량이 증가하고 있는 추세이다. 그러나 PVC 계열의 소재와 EVA, 스티렌 부타디엔 Rubber 등의 소재로 구성된 바닥재의 일종인 퍼즐매트 또한 일반 가연성의 바닥재와 마찬가지로 화재시 급속한 화염전파, 높은 열방출율, 다량의 연기발생 등으로 인해 화재의 위험성이 상대적으로 높은 단점을 가지고 있다. 또한 화재시 발생하는 많은 양의 검은 색의 연기는 피난 및 소화활동에 큰 장애를 초래하고 있으며, 이들 연기중에 포함되어 있는 유해가스 등은 피난자의 호흡기계를 자극하여 행동장애 뿐만 아니라 높은 농도에 노출될 경우 사망에 이르게 하는 등 심각한 피해를 초래할 수도 있다.

국내의 경우 건축용 바닥재에 대한 화재 위험성의 평가는 주로 ISO 9239-1의 “건축용 바닥재의 연소시험”을 이용한 임계열류량, 총 연기량, 화염전파거리 측정에 관한 연구¹⁾와 ISO 5660-1의 “콘칼로리미터 시험”을 이용한 착화시간, 열방출율, 질량감소율, 그리고 CO, CO₂ 농도 측정에 관한 연구²⁾, 고분자물질 바닥재의 열적특성에 관한 연구³⁾, 다중이용시설 바닥 마감재의 연기가스 독성평가에 관한 실험 연구⁴⁾ 등이 진행된 바 있다.

콘칼로리미터 시험법은 선진국 등에서 각종 재료들의 화재위험성을 종합적으로 평가하기 위해 많이 사용되고 있는 시험법으로 연구가 활발히 진행되고 있는 반면에 현재 국내의 경우에는 이를 이용한 연구가 시작단계에 있는 실정이다. 콘칼로리미터를 이용하여 수행된 국내의 연구를 살펴보면, 콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재특성⁵⁾, 경질 폴리우레탄폼의 착화성 및 열방출율 특성 연구⁶⁾, 콘칼로리미터를 이용한 섬유강화플라스틱(FRP)의 연소특성⁷⁾, 건축내장재의 화재 안전성 평가에 관한 연구⁸⁾ 등이 있다. 그러나 콘칼로리미터법을 이용한 각종 재료들의 화재위험성 평가방법은 장비

sandelf@howon.ac.kr

자체가 고가이며, 장비의 운영면에서 많은 비용이 들기 때문에 다양한 재료에 대한 시험연구를 진행하는데 어려움이 있다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 ISO 5660(Fire tests - Reaction to Fire, part 1)을 만족하는 Mass loss calorimeter를 이용하여 재료의 질량감소속도(Mass loss rate)를 측정하고 Oxygen bomb calorimeter를 이용하여 재료의 단위중량당 연소열을 측정하여 이들 데이터로부터 재료의 열방출량을 계산하는 시험법을 적용하여 대형건물, 아동보육시설, 스포츠 센터 등에서 그 사용량이 증가하고 있는 퍼즐매트의 질량감소속도와 단위중량당 연소열을 측정하고자 하며, 이들 측정결과를 이용하여 열방출을 계산의 가능성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1. 실험시료

실험시료는 대형건축물, 아동보육시설, 각종 스포츠센터 등에서 상용으로 사용되고 있는 퍼즐매트로 Table 1에 나타낸바와 같이 일반 3종과 난연 2종을 사용하였다. Table 1에 나타낸 시료의 두께와 밀도는 본 실험에서 사용된 전체 시료에 대한 측정값의 평균을 표기한 것이며, Fig. 1은 각 외부 복

Table 1. Thickness and density of each puzzle mat

Type	Side	Surface	Thickness [mm]	Density [kg/m ³]	Type
A			21.36	77.30	general
B			20.57	173.43	general
C			21.04	176.59	general
D			20.97	100.92	flame retardant
E			22.65	136.69	flame retardant

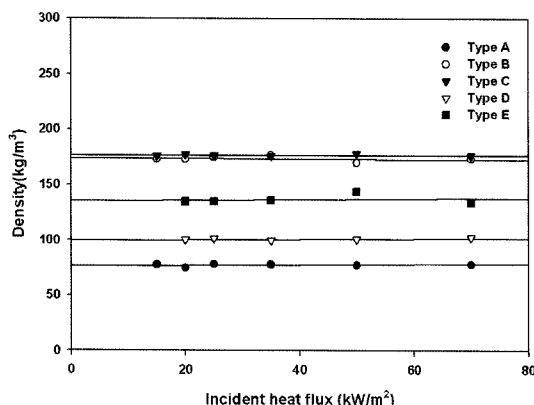


Fig. 1. Density of puzzle mats used at each incident heat flux.

사열원의 단계에서 사용된 시료의 평균밀도를 나타내었다.

2.2. 실험장치 및 방법

복사열원에 노출된 각 퍼즐매트의 질량감소속도와 열방출율을 측정하기 위해 Fig. 2에 나타낸 ISO 5660(Fire tests - Reaction to Fire, part 1)을 만족하는 Mass loss calorimeter(FTT 사)를 사용하였으며, 각 퍼즐매트에는 25kW/m², 35kW/m², 50kW/m², 70kW/m²의 외부 복사열원을 노출시켜 실험을 실시하였다. Fig. 2에 나타낸 Mass loss calorimeter는 콘 형태의 복사전기히터(cone heater), 시간에 따른 시편의 질량변화를 측정하기 위한 무게측정장치(load cell), 시편홀더(sample holder), 스파크 점화회로, 열플럭스미터(heat flux meter), 데이터 수집 및 분석시스템인 Data logger와 Computer 등으로 구성되어 있다.

실험방법은 먼저 시편을 100mm×100mm×20mm의 크기로 절단하고, 시험에 앞서 온도 23±2℃, 상대습도 50±5% 상태에서 전처리 시킨 후 시험편에 버니어캘리퍼스와 전자저울을 이용하여 크기와 무게를 측정하여 각 시편의 밀도를 계산하였다. 전처리된 시료는 0.03~0.05mm의 알루미늄 호일로 반짝거리는 면이 시편을 향하도록 비 노출면을 감싼다. 외부 복사열원의 크기를 변화시킬 때에는 복사전기히터가 설정하고자 하는 복사열원을 ±2% 이내의 범위 내에서 발생시킬 수 있도록 Mass loss calorimeter controller를 이용하여 설정온도까지 상승시킨 후 설정온도에서 방출되는 복사열원을 Medtherm사의 열플럭스미터를 이용하여 측정한다. 복사전기히터로부터 방출되는 복사열원이 일정해지면 준비된 시료를 복사전기히터의 바닥면과 시료의 상부 표면 사이 거리를 25.0mm(약 1inch)로 조정한다. 준비된 시료와 시료 홀더를 무게측정장치 위에 수평방향으로 설치하고 25kW/m², 35kW/m², 50kW/m², 70kW/m²의 복사열원에 300s 동안 노출시켰을 때 착화시간, 유염연소시간, 소염 후 연소시간 등을 초시계를 이용하여 측정하였다. 시료에 대한 착화는 복사전기히터 하부와 시료 상부의 중간 위치에서 점화 스파크를 이용하여 실시하였으며, 착화온도와 화염의 온도변화는 시료표면과 시료표면으로부터 10cm 상부에 K-type(φ1.0mm)의 열전대를 이용하여 매 1초 간격으로 측정하였다. 실험 횟수는 각 시험편에 대해 3회 시험을 실시하고 시험결과를 기록한 후 얻어진 측정값을 평균해서 사용

하였다. 실험시간(300s) 동안 시료의 중량변화는 매 1초 간격으로 무게측정장치를 이용하여 측정하였으며, 각종 데이터는 Data logger를 이용하여 컴퓨터에 자동으로 저장된다. 저장된 각종 데이터는 마이크로소프트사의 엑셀 프로그램과 통계프로그램인 SigmaPlot을 이용하여 분석하였다.

질량감소율은 ISO 5660-1:2002(E) “Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1 : Heat release rate(cone calorimeter method)”의 12.5 Mass loss rate를 구하는 다음 식 (1)~(5)을 이용하였으며, 시간 간격은 3초 간격으로 하여 계산하였다⁹⁾.

$$-\dot{m}|_{i=0} = \frac{25m_0 - 48m_1 + 36m_2 - 16m_3 + 3m_4}{12\Delta t} \quad (1)$$

$$-\dot{m}|_{i=1} = \frac{3m_0 + 10m_1 - 18m_2 + 6m_3 - m_4}{12\Delta t} \quad (2)$$

$$-\dot{m}|_i = \frac{-m_{i-2} + 8m_{i-1} - 8m_{i+1} + m_{i+2}}{12\Delta t} \quad (3)$$

$$-\dot{m}|_{i=n-1} = \frac{-3m_n - 10m_{n-1} + 18m_{n-2} - 6m_{n-3} + m_{n-4}}{12\Delta t} \quad (4)$$

$$-\dot{m}|_{i=n} = \frac{-25m_n + 48m_{n-1} - 36m_{n-2} + 16m_{n-3} - 3m_{n-4}}{12\Delta t} \quad (5)$$

열방출율은 Oxygen bomb calorimeter를 이용하여 측정된 단위 중량당 연소열과 Mass loss calorimeter를 이용하여 측정된 질량감소속도를 이용하여 다음 식 (6)을 이용하여 계산하였다. 식 (6)에서 A_f 는 시료의 수평 연소면적, \dot{m}'' 은 단위면적당 연소속도, χ 는 연소효율($\frac{\Delta H_{eff}}{\Delta H_c}$), ΔH_c 는 시료의 단위 중량당 순연소열을 의미한다. 가연성 고체 물질의 연소효율(χ)은 일반적으로 70~80% 정도로 열분해 생성 가스는 거의 완전연소되며, 약간의 탄화물 또는 재를 남기게 된다. 따라서 본 연구에서 열방출율을 계산하기 위해 75%의 연소효율을 적용하여 계산하였다¹⁰⁾.

$$\dot{Q} = A_f \dot{m}'' \chi \Delta H_c = 0.75 A_f \dot{m}'' \Delta H_c \quad (6)$$

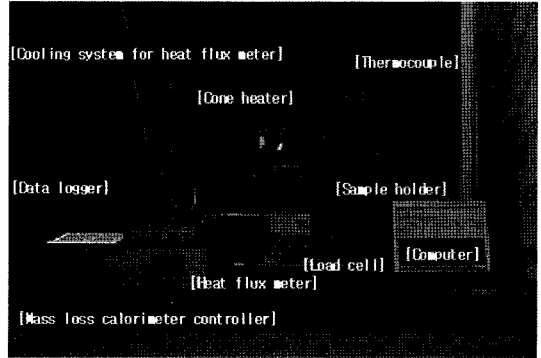


Fig. 2. Photograph of mass loss calorimeter.

3. 결과 및 고찰

Mass loss calorimeter를 이용한 Incident heat flux에서 일반 Type 3종과 난연 Type 2종의 퍼즐매트에 대한 질량감소속도 측정과 이 데이터를 이용하여 계산된 열방출을 값의 결과는 다음과 같다.

3.1. 질량감소속도(Mass loss rate)

5가지 Type의 퍼즐매트에 대해 Mass loss calorimeter를 이용하여 25kW/m², 35kW/m², 50kW/m², 70 kW/m²의 복사열에서 300s 동안 노출시켰을 때 매 1초 간격으로 측정된 중량변화를 식 (1)~(5)을 이용하여 질량감소속도를 계산하였다.

Fig. 3~7에 외부 복사열량의 변화에 따른 5가지 Type의 퍼즐매트에 대한 시간변화에 따른 질량감소 곡선을 나타내었다. 5가지 Type의 퍼즐매트에 대한 연소시간에 따른 질량감소속도를 살펴보면 연소초기 시료표면에 착화가 발생한 후 급격한 질량감소속도를 보이다가 화염이 안정화 되면서 감소하는 경향을 보이고 있으며, 외부복사열량이 증가함에 따라 전체적으로 질량감소속도가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8은 외부 복사열량이 25kW/m²일 경우 일반 Type 3종(Type A, B, C)과 난연 Type 2종(Type D, E)에 대한 질량감소속도 곡선을 나타낸 것으로 일반 Type의 경우 연소 초기인 약 13~15초 경에 점화된 후 연소 종료시까지 일정한 질량감소속도를 나타낸 반면에 난연 Type의 경우 연소초기에는 거의 변화가 없다가 Type D의 경우 약 110초, Type E의 경우 약 120초에 점화된 후 질량감소속도가 급격히 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다.

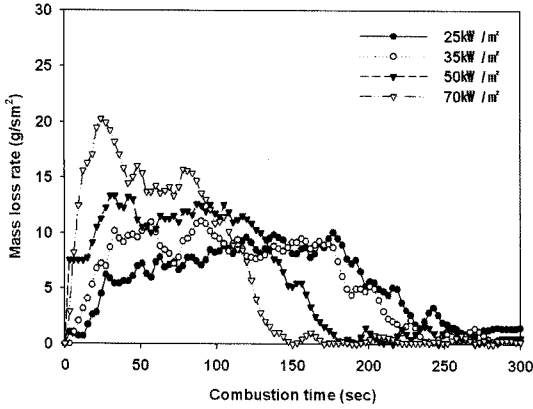


Fig. 3. Mass loss rate profiles during the combustion at Type A.

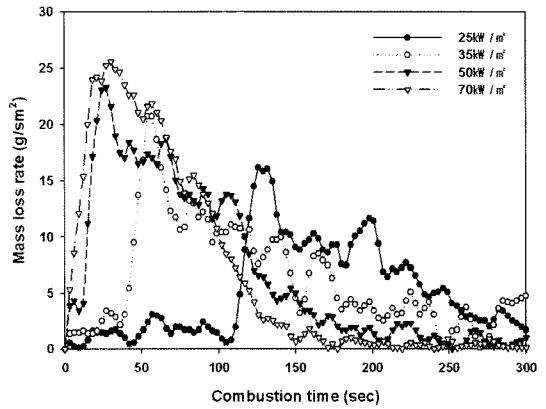


Fig. 6. Mass loss rate profiles during the combustion at Type D.

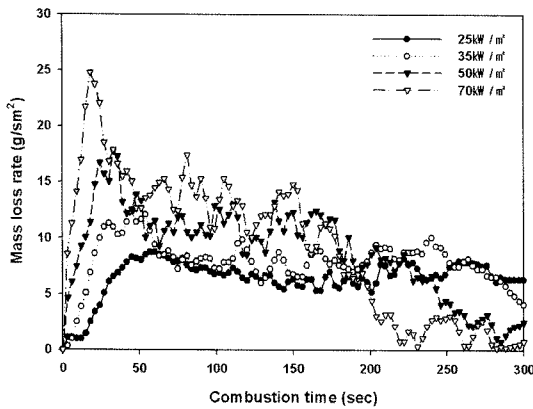


Fig. 4. Mass loss rate profiles during the combustion at Type B.

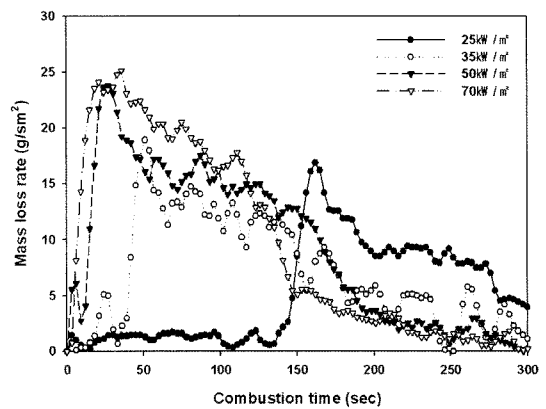


Fig. 7. Mass loss rate profiles during the combustion at Type E.

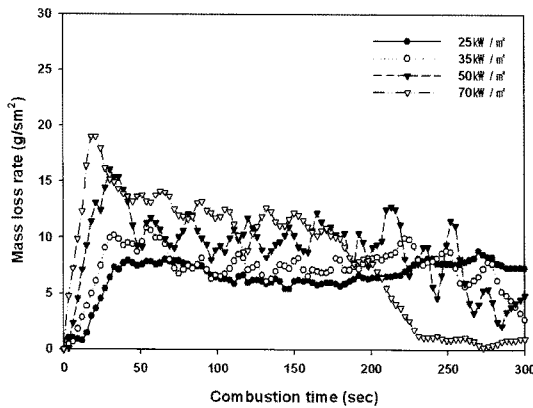


Fig. 5. Mass loss rate profiles during the combustion at Type C.

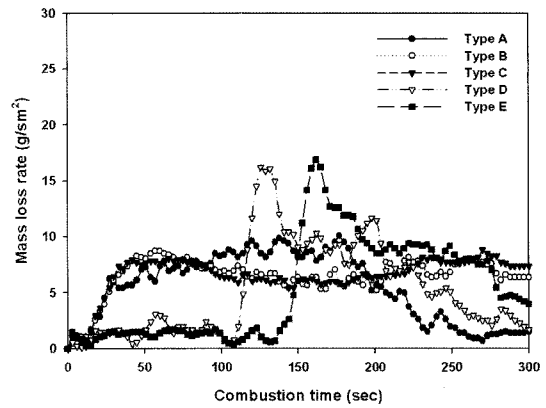


Fig. 8. Mass loss rate profiles of each type during the combustion at 25kW/m^2 .

Table 2와 3은 외부복사열원의 변화에 따른 5가지 Type의 시료에 대한 평균 질량감소속도와 최대 질량감소속도를 나타낸 것으로, 외부복사열원의 증가에 따라 질량감소속도가 증가함을 알 수 있다.

Table 2의 경우 연소시간을 150초와 300초로 기

준하여 평균 질량감소속도를 나타낸 것으로 외부복사열원이 25kW/m^2 에서 난연 Type인 Type D와 E를 제외하고는 연소초기에 있어 상대적으로 질량감소속도가 높음을 알 수 있으며, 외부복사열원의 증가에 따라 급격히 증가함을 알 수 있다.

Table 2. Average mass loss rate of each type at incident heat flux

Heat flux (kW/m ²)	Average mass loss rate (g/s · m ²)									
	Type A		Type B		Type C		Type D		Type E	
	150s	300s	150s	300s	150s	300s	150s	300s	150s	300s
25	6.756	5.387	6.239	6.598	6.001	6.440	4.103	5.251	1.144	5.908
35	8.204	5.681	8.131	8.069	7.070	7.933	8.813	6.270	9.876	7.798
50	10.696	5.761	11.387	8.646	10.106	8.941	12.295	6.926	14.877	9.937
70	11.381	5.817	14.422	8.907	12.445	8.963	13.585	7.254	16.982	9.857

Table 3. Maximum mass loss rate of each type at incident heat flux

Heat flux (kW/m ²)	Maximum mass loss rate (g/s · m ²)				
	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E
25	10.072	8.714	8.828	16.184	16.863
35	11.091	12.336	10.865	20.711	18.900
50	13.354	17.768	16.071	23.314	23.766
70	20.258	24.785	19.013	25.577	25.124

5가지 Type의 평균 질량감소속도와 최대 질량감소속도를 측정된 결과 난연 Type인 Type D와 E의 경우 상대적으로 낮은 복사열원인 25kW/m²에서는 착화시간의 지연으로 인해 질량감소속도가 낮은 반면에 외부 복사열원이 증가할수록 일반 Type에 비해 증가하는 경향을 나타내었다. 이 결과로부터 난연 Type인 Type D와 E의 경우 착화시간의 지연에 따라 화재초기에는 피난시간의 확보 등에 있어 일반 Type 보다 안전성을 확보할 수 있으나, Flash over 이후 최성기에는 급격한 연소가 진행되어 소화의 어려움이 발생할 수 있을 것으로 예상된다.

3.2. 열방출률(Heat Release Rate)

Mass loss calorimeter를 이용하여 시편을 수평방향으로 설치하고 25kW/m², 35kW/m², 50kW/m², 70 kW/m²의 복사열에 300s 동안 노출시켰을 때 측정된 각 시료의 질량감소속도 측정값과 동일 시료에 대한 단위중량당 연소열을 식 (6) 대입하여 연소시간에 따른 열방출율(Heat release rate), 평균열방출속도(Average heat release rate), 최대열방출속도(Maximum heat release rate), 총열방출량(Total heat release)을 계산하였다. 열방출율 계산에 사용된 단위중량당 연소열은 본 연구에서 사용된 시료와 같은 시료를 이용하여 Bomb oxygen calorimeter를 이용하여 측정된 값으로 Type A의 경우 39.32kJ/g, Type B의 경우 26.52kJ/g, Type C의 경우 25.42kJ/g, Type D의 경우 30.70kJ/g, Type E의 경우 27.22kJ/g이다.

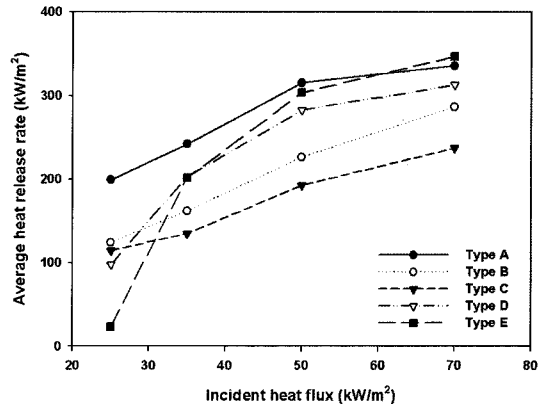


Fig. 9. Average heat release rate vs. incident heat flux for puzzle mats.

Fig. 9는 연소시간을 150초로 기준하여 평균열방출율을 나타낸 것으로 외부 복사열원의 증가에 따라 일반 Type의 퍼즐 매트와 거의 일정하게 증가한 반면에 난연 Type의 경우에는 상대적으로 낮은 외부복사열원인 25kW/m²에서는 Type D의 경우 94.47kW/m², Type E의 경우 23.36kW/m²를 나타내다가 35kW/m²에서는 Type D의 경우 202.91kW/m², Type E의 경우 201.69kW/m²로 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 일반 Type의 경우 외부복사열원이 변화에 따라 거의 일정한 연소속도를 가지는 반면에 난연 Type의 경우 외부복사열원이 증가할수록 연소속도가 급격히 변화되었다는 것을 알 수 있다. 또한, 상대적으로 낮은 외부복사열원인 25kW/m²에서는 난연 Type인 Type D와 E의 경우 평균열방출율이 일반 Type에 비해 상대적으로 낮은 반면에 외부복사열원이 증가할수록 일반 Type인 B와 C에 비해 더 높게 측정되었다.

Table 4는 외부복사열량의 변화에 따른 5가지 Type의 시료에서 발생한 평균열방출율, 최대열방출율, 총열방출율을 나타낸 것으로 평균열방출율은 시험시작 후 150초, 300초까지의 총열방출율을 시험시간으로 나눈 값을 나타낸 것이다.

Table 4. Heat release rate of each type at incident heat flux

Sample type	Heat flux (kW/m ²)	Average heat release rate (kW/m ²)		Maximum heat release rate (kW/m ²)	Total heat release (MJ/m ²)
		150s	300s		
Type A	25	199.27	160.22	297.07	47.73
	35	241.98	166.91	327.13	50.40
	50	315.48	170.25	393.88	51.07
	70	335.68	170.25	597.51	51.41
Type B	25	124.08	130.54	173.30	39.39
	35	161.71	159.80	245.34	48.17
	50	226.46	171.06	353.37	51.54
	70	286.82	177.82	492.92	53.12
Type C	25	114.42	123.00	168.32	36.89
	35	134.80	151.04	207.15	45.31
	50	192.68	170.47	306.41	51.14
	70	237.28	170.47	362.50	51.35
Type D	25	94.47	119.86	372.62	36.22
	35	202.91	143.33	476.85	43.25
	50	283.08	158.96	536.78	47.94
	70	312.78	166.76	588.89	50.03
Type E	25	23.36	120.17	344.34	36.28
	35	201.67	159.46	385.94	47.84
	50	303.79	203.36	485.30	61.01
	70	346.77	201.05	513.03	60.32

본 연구결과를 분석하여 보면 5가지 Type의 퍼즐매트의 열방출특성은 50kW/m²의 외부복사열원 하에서 최대열방출을 306.41~536.78kW/m², 평균열방출을 170.25~203.36kW/m², 총열방출을 47.94~61.01MJ/m²로 나타났다. 이를 캐나다 분류체계에 적용 후 분류하면 일반 Type의 경우 모두 최대열방출율과 평균열방출율은 C-4, 총열방출율은 C-3 등급으로 분류할 수 있으며, 난연 Type인 Type D의 경우 최대열방출율은 C-4, 평균열방출율은 C-3, 총열방출율은 C-2 등급으로, Type E의 경우 최대열방출율과 평균열방출율은 C-4, 총열방출율은 C-3 등급으로 분류할 수 있다. 따라서 전체적인 특성을 고려할 때 5가지 Type 모두 C-4 등급으로 분류할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 퍼즐매트에 대한 질량감소속도를 측정하고, 단위 중량당 연소열과 질량감소속도를 이용하여 총열방출율, 최대열방출율 및 평균열방출율 계산을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 퍼즐매트의 질량감소속도는 연소초기 시료 표면에 착화가 발생한 후 급격한 질량감소속도를 보이다가 화염이 안정화 되면서 감소하는 경향을 보이고 있으며, 외부 복사열량이 증가함에 따라 전체적으로 질량감소속도가 증가함을 알 수 있었다.

2) 평균질량감소속도는 상대적으로 낮은 외부복사열량에서는 일반 Type에서 높게 측정된 반면에 외부복사열량이 증가할 경우에는 난연 Type에서 더 높게 측정되었으며, 최대질량감소속도는 각 외부복사열량에서 난연 Type에서 더 높게 측정되었다.

3) 모든 열방출특성의 결과를 캐나다 분류체계에 적용할 경우, 5가지 Type 모두 C-4 등급에 포함될 수 있었다.

4) 질량감소속도와 열방출특성의 결과를 통해 난연 Type의 경우 착화시간의 지연에 따라 화재초기에는 일반 Type보다 안전성이 확보될 수 있으나, Flash over 이후 최성기에는 급격한 연소가 진행되어 소화의 어려움이 발생 할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글 : 본 연구는 2008년 호원대학교 교내 학술연구비 지원에 의하여 수행하였으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 이봉우, “건축용바닥재의 화재안전성 평가에 관한 연구”, 2006년도 소방검정기술기준 선진화 사업 연구과제 발표집, 한국소방검정공사, pp. 1~38, 2006.
- 2) 이봉우 외 8, “실내장식물 등 화재유해성 평가시험 용역”, 소방방재청, 2006.
- 3) Nae-Woo Lee, Nam-Seok Kim, Byoung-Soo Moon, “A Study on Thermal Characteristics on Polymeric Floorings”, Journal of the KOSOS, Vol. 21, No. 6, pp. 38~45, 2006.
- 4) Seong-Dong Kang, Chang-Woo Lee, Seong-Ho Hyun, Myung-O Yoon, “The Experimental Study on the Toxic Gases Released from the Service Industry Buildings”, Vol. 16, No. 2, pp. 14~21, 2002.
- 5) Keun-Won Lee, Kwan-Eung Kim, “Fire Characteristics of Plastic Insulating Materials from Cone Calorimeter Test”, T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 17, No. 1, pp. 76~83, 2003.
- 6) Young-Kun Kong, Doo-Hyung Lee, “A Study on Ignitability and Heat Release Rate Characteristics of

- Rigid Polyurethane Foam”, T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 17, No. 4, pp. 117~123, 2003.
- 7) Keun-Won Lee, Kwan-Eung Kim, Doo-Hyung Lee, “Combustion Characteristics of Fiber Reinforced Plastic by Cone Calorimeter”, T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 18, No. 2, pp. 68~72, 2004.
- 8) 최금란, “건축내장재의 화재 안전성 평가에 관한 연구”, 한국소방검정공사, 2006년도 소방검정기술기준 선진화 사업 연구과제 발표집, pp. 1~51, 2006.
- 9) ISO 5660-1, “Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1 : Heat release rate (cone calorimeter method)”, International Standard, pp. 15~16, 2002.
- 10) J. G. Quintiere, B. Karlsson, “Enclosure Fire Dynamics”, CRC Press LLC, Chapter 3, pp. 28~32, 2000.