

놀이방 퍼즐매트의 화재위험성에 관한 연구

박 형 주

호원대학교 소방행정학과

(2008. 8. 14. 접수 / 2008. 10. 14. 채택)

A Study on the Fire Hazards of Puzzle Mats in Group Day Care Home

Hyung-Ju Park

Department of Fire Service Administration, Howon University

(Received August 14, 2008 / Accepted October 14, 2008)

Abstract : The fire hazards and combustion heat of puzzle mats in group day care home were analysed using variable external irradiation level. The fire hazards such as ignition time, ignition temperature, mass loss rate, and flame temperature profile were measured. Incident heat fluxes of 15kW/m^2 , 20kW/m^2 , 25kW/m^2 , 35kW/m^2 , 50kW/m^2 and 75kW/m^2 were selected for these experiments. All samples were tested in the horizontal orientation and were wrapped in a single layer of aluminium foil. Each sample was nominally 20mm thick and 100mm square. Five samples of puzzle mat were tested in the 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. As results, Type E of FR-grade showed the best characteristics in safety of the early fire from ignition time, critical heat flux, and ignition and flame temperature data of this study. All specimen of G-grade(Type A, B and C), however, showed the weak in safety of fire.

Key Words : puzzle mats, ignition time, ignition temperature, mass loss rate, external irradiation

1. 서론

일반적으로 건축물 화재에 있어 초기단계에서는 바닥재에 의한 화재 확산의 영향은 경미한 것으로 알려져 있다. 건축물 화재시 연소확대 현상을 살펴보면 화재 초기에는 벽과 천정을 타고 올라 천정 상층부에 고온의 가스층을 형성하고, 점차 가열된 가스층은 바닥면으로 고온의 복사열을 방출하여 바닥재를 연속적으로 연소시키게 된다. 즉, 바닥재의 연소확대는 화재실내에 형성되는 복사열 강도에 따라 결정된다¹⁾.

건축바닥재의 관련법을 살펴보면, 건축법의 경우 건축물의 거실의 벽 및 반자의 실내에 접하는 부분과 거실에서 지상으로 통하는 복도, 계단, 기타 통로의 벽 및 반자의 실내에 접하는 부분은 발화, 화염확대 및 피난 안전의 측면에서 실내 마감재료를 불연, 준불연재료 및 난연재료를 사용하도록 의무화 하고 있으며, 소방법의 경우 특정소방대상물에는 다중이용업소에 설치하는 실내장식물의 규정인 불연재료, 준불연재료를 사용하여야 한다는 규

정을 제외하고는 일정 방염성능기준 이상의 방염 대상물 등을 설치하여야 한다고 규정하고 있다. 그러나 건축법의 경우 내장재 적용범위가 구조체에 밀착되어 있는 마감재에 한정되어 있으며, 소방법의 경우 이동성 가연물인 가구류, 수납장에 대한 방염규제가 전혀 없는 실정이다²⁾.

건축용 바닥재의 종류로는 염화비닐수지 바닥재, 목질 바닥재, 카펫 바닥재, 인조대리석 바닥재, 수지바닥재 등으로 크게 구분할 수 있으며, 이들에 대한 화재안전성 관련 연구로는 건축용 바닥재의 연소시험(ISO 9239-1) 방법에 의한 임계열류량, 총 연기량, 화염전파거리 측정에 관한 연구²⁾, 콘칼로리미터(ISO 5660-1) 시험법에 의한 착화시간, 열방출율, 질량감소율, 그리고 CO, CO₂ 농도 측정에 관한 연구³⁾, 고분자물질 바닥재의 열적특성에 관한 연구⁴⁾, 다중이용시설 바닥 마감재의 연기가스 독성평가에 관한 실험 연구⁵⁾ 등이 진행된 바 있다. 그러나 연소성이 매우 높은 PVC 계열의 소재와 EVA, 스티렌 부타디엔 Rubber 등의 소재로 구성된 바닥재의 일종인 퍼즐매트는 불특정 다수인이 사용하는 대형 건물과 스포츠 센터, 아동보육시설 등에서 그 사용

량이 증가하고 있음에도 불구하고 기존 화재안전성 평가 연구의 대상에서 제외되고 있는 실정이다. 따라서 국내 건축물 내에서 널리 사용되고 있는 퍼즐 매트에 대한 기본적인 외부 복사열원에 의한 연소 특성의 체계적인 연구가 절실한 실정이다.

본 연구에서는 상용 제품인 퍼즐매트에 대한 연소특성 기초 Data를 측정하기 위해 5종의 퍼즐매트 (일반 3종, 난연 2종)를 사용하여 Oxygen Bomb Calorimeter를 이용한 연소열량(cal/g) 측정과 건물 화재시 발생하는 복사열원에 대한 영향을 평가하기 위해 Mass Loss Calorimeter를 이용한 일정한 외부 복사열원이 존재하는 상태에서 착화시간(ignition time), 착화온도(ignition temperature), 화염온도(flame temperature), 질량감소속도(mass loss rate) 등을 측정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1. 실험장치

2.1.1. Oxygen Bomb Calorimeter

퍼즐매트에 대한 단위 중량당 연소열(cal/g)을 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 Oxygen Bomb Calorimeter(Parr 1261)를 사용하였다.

2.1.2. Mass Loss Calorimeter

일정한 복사열원(15~70kW/m²)에서 각 퍼즐매트의 착화시간, 착화온도, 화염온도, 질량감소속도 등의 화재위험성을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 ISO 5660(Fire tests - Reaction to Fire, part 1)을 만족하는 Mass Loss Calorimeter(FTT)를 사용하였다.

2.2. 실험시료

시료는 어린이 놀이방 및 스포츠센터 등지에서

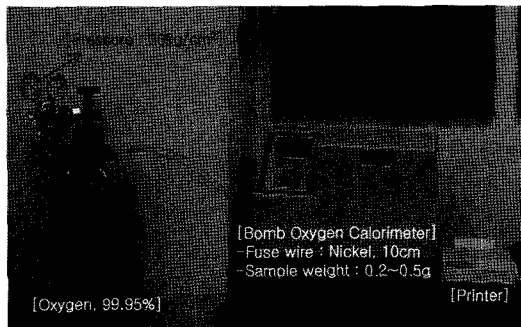


Fig. 1. Photograph of experimental apparatus for Oxygen Bomb Calorimeter.

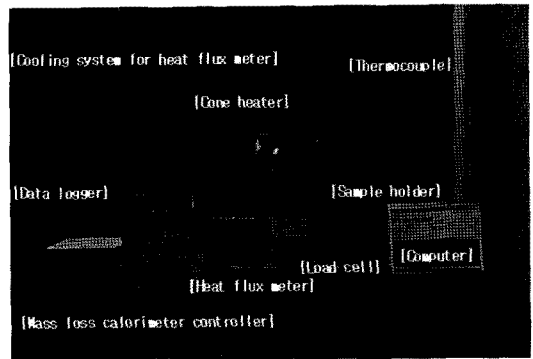


Fig. 2. Photograph of experimental apparatus for Mass Loss Calorimeter.

상용으로 사용되고 있는 퍼즐매트로 일반용 3종과 난연용 2종을 사용하였으며, 각 시료의 구조 및 색상, 두께, 밀도는 Table 1에 나타내었다. Table 1의 두께와 밀도는 본 실험에서 사용된 전체 시료에 대한 평균값을 측정하여 표기한 것이며, Fig. 3은 본 연구에서 사용된 시료의 평균밀도와 각 외부 복사열의 단계에서 사용된 시료의 밀도를 나타내었다.

Table 1. Test Specimens

Type	side	surface	Thickness [mm]	Density [kg/m ³]	Use
A			21.36	77.30	Group day care home/G-grade
B			20.57	173.43	Group day care home/G-grade
C			21.04	176.59	Sport mat/G-grade
D			20.97	100.92	Group day care home/FR-grade
E			22.65	136.69	Sport mat/FR-grade

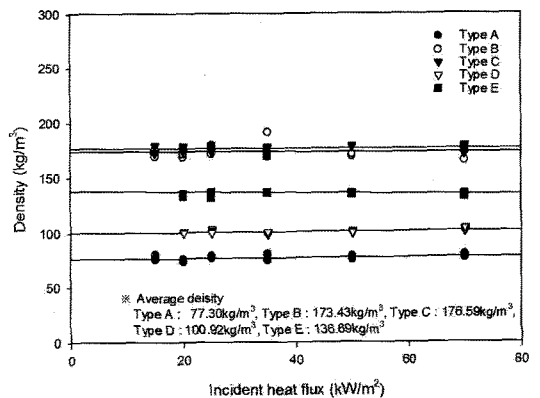


Fig. 3. Density of test specimens used at each incident heat flux.

2.3. 실험방법⁶⁾

2.3.1. 연소열 측정

퍼즐매트의 단위 중량당 연소열은 Fig. 1에 나타난 Oxygen Bomb Calorimeter를 이용 측정하였다. 시료는 Table 1에 나타난 각 시료로부터 약 0.2~0.5g 정도 절단하여 사용하였으며, 시료에 대한 점화는 길이 10cm 정도의 Nickel 선을 사용하였다. 또한 고압 Bomb 내에 충전되는 산소의 순도는 99.95%이며, 압력은 30kg/cm²으로 설정한 후 실험을 진행하였다.

2.3.2. 연소특성 측정

일정한 복사열원(15~70kW/m²)에서 각 퍼즐매트의 착화시간, 착화온도, 화염온도, 질량감소속도 등을 측정하기 위해 ISO 5660(Fire tests - Reaction to Fire, part 1)을 만족하는 Mass Loss Calorimeter(FTT사)를 사용하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 Mass loss calorimeter로 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 준비하여 시험에 앞서 온도 23±2℃, 상대습도 50±5% 상태에서 전처리시킨 후 시험전에 버니어캘리퍼스와 전자저울을 이용하여 크기와 무게를 측정하였다. 전 처리된 시료는 0.03~0.05mm의 알루미늄 호일로 반쪽거리는 면이 시편을 향하도록 비 노출면을 감싼다. 복사열의 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 Medtherm 사의 열플럭스미터를 이용하여 측정한다. 방출되는 복사열원(15~70kW/m²)이 일정해지면 준비된 시료를 복사전기히터의 바닥면과 시료의 상부 표면 사이 거리를 25.0mm(약 1inch)로 조정한다.

준비된 시료와 시료 홀더를 무게측정장치 위에 수평방향으로 설치하고 15~70kW/m²의 복사열원에 300s 동안 노출시켰을 때 초시계를 이용하여 착화시간, 유염연소시간, 소멸 후 연소시간 등을 측정하였다. 시료에 대한 착화는 복사전기히터 하부와 시료 상부의 중간 위치에서 점화 스파크를 이용하여 실시하였다. 또한 착화온도와 화염의 온도변화는 시료표면과 시료표면으로부터 10cm 상부에 K-type

(ϕ 1.0mm)의 열전대를 이용하여 매 1초 간격으로 측정하였으며, 실험 횟수는 각 시험편에 대해 3회 시험을 실시하고 시험결과를 기록한 후 얻어진 측정값을 평균해서 사용하였다. 실험시간 동안 시료의 중량변화는 매 1초 간격으로 무게측정장치를 이용하여 측정하였다. 이때 각종 Data는 Data logger를 이용하여 Computer에 자동으로 저장된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 연소열(Combustion heat)

Oxygen bomb calorimeter를 이용하여 각 퍼즐매트의 단위 중량당 연소열을 측정한 결과는 Table 2에 나타내었다. 연소열 측정은 시료에 대해 동일한 방법으로 5회 실험 후 가장 높은 값과 낮은 값을 제외한 3가지의 평균값을 타나낸 것으로 Type A > Type D > Type E > Type B > Type C 순으로 연소열이 높게 측정되었다. 연소열이란 기화반응에 의하여 단위 질량당 방출되는 화학적 에너지로 화재와 관련하여 가장 중요한 값이라고 할 수 있는 에너지 방출속도를 예측하는데 있어 중요한 Data로 연소열이 높을수록 화재안전성에 낮아지게 된다. 따라서 동일 화재 조건에 있어서 Type A의 퍼즐매트에서 방출되는 에너지의 양이 가장 높음을 예측할 수 있다.

3.2. 연소특성 측정

Mass loss calorimeter를 이용한 일정한 외부 복사열원에서 퍼즐 매트에 대한 착화시간, 착화온도, 화염온도, 질량감소속도 등을 측정한 결과는 다음과 같다.

외부 복사열원에 노출된 각 시료의 연소 현상을 살펴보면, 일반 Type인 A, B, C의 경우 복사열원에 노출됨과 동시에 시료가 전체적으로 용융이 되면서 발생된 열분해 가스에 착화가 되어 연소가 균일하게 진행된 반면에 난연 Type인 D와 E의 경우 퍼즐의 표피층이 복사열원에 의해 열분해를 시작한 후 균열이 발생하면서 다량의 열분해 가스가 발

Table 2. Combustion Heat of puzzle mats

Type of puzzle mats	Combustion heat(kJ/g)
Type A	39.32
Type B	26.52
Type C	25.42
Type D	30.70
Type E	27.22

생하고 전기스파크에 의해 착화가 되면서 급격히 연소하는 현상을 보였다. 또한 연소과정 중에서 일반 Type에 비해 난연 Type의 경우 착화 전 후에 다량의 매연(soot)가 발생하였다. 따라서 향후 연기 밀도, 가스유해성 및 독성지수에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.2.1. 착화시간(Ignition time)

외부 복사열원의 변화에 따른 평균착화시간은 Table 3과 Fig. 4에 나타내었다. 착화시간은 복사전 기히터로부터 방출되는 각 외부 복사열원의 단계에서 점화스파크에 의해 시료 표면에서 착화가 발생할 때까지의 시간으로 3회의 측정결과에 대한 평균값이다.

Fig. 4는 외부 복사열원의 변화에 따른 측정된 착화시간과의 관계를 나타낸 그래프로 각 시료에 대한 측정된 착화시간과 이를 통한 'best-fit' 추세선⁷⁾을 함께 나타내었다. 'best-fit' 추세선은 측정된 데이터로부터 α^b 형태의 power curve로 a와 b는 각 시료의 착화시간에 대한 여러 상수들이다.

측정된 데이터와 'best-fit' 추세선은 식 (1)로부터 $\dot{q}_i \rightarrow \dot{q}_{\alpha}$ 일 때 $t_{ig} \rightarrow \infty$ 이고, $\dot{q}_i \gg \dot{q}_{\alpha}$ 일 때 $t_{ig} \rightarrow 0$ 으로 수렴함을 알 수 있다.

$$t_{ig} = \frac{4}{3} k\rho c \left[\frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] \frac{(T_{ig} - T_0)^2}{[\dot{q}''(t_{ig})]^2} \quad (1)$$

Table 3에 나타낸 바와 같이 각 단계별 외부 복사열원에 5분간 노출시킨 동안 난연 Type인 Type D와 E가 일반 Type인 Type A~C에 비해 구획실 내 연기층의 평균온도가 600℃일때 바닥 면에 미

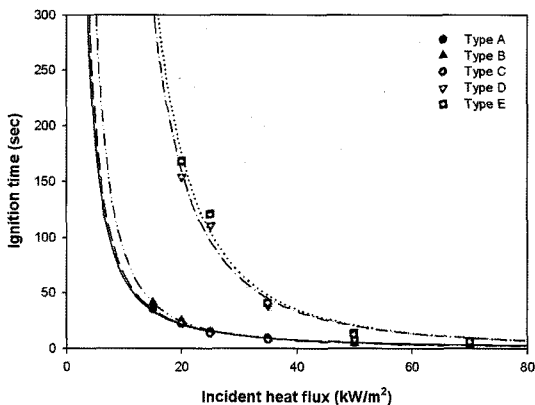


Fig. 4. Ignition time vs incident heat flux for puzzle mats.

Table 3. Time to Ignition of puzzle mats

Heat flux (kW/m ²)	Time to Ignition(sec)				
	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E
15	34.76	41.11	-	-	-
20	22.15	25.03	22.81	154.14	168.24
25	14.69	14.84	13.32	110.76	120.8
35	9.00	8.54	8.02	38.36	40.92
50	5.28	4.80	7.93	14.34	12.53
70	3.23	3.37	2.98	5.93	6.03

치는 복사열이 20kW/m²인 것을 기준으로 하였을 때 평균 착화시간이 약 6~7배 정도 높게 측정되었다. 또한 'best-fit' 추세선으로부터 300s의 연소시간을 기준으로 하였을 때 Type A의 경우 3.91kW/m², Type B의 경우 5.10kW/m², Type C의 경우 3.63kW/m², Type D의 경우 15.16kW/m² 그리고 Type E의 경우 15.86kW/m²로 임계열속을 예측할 수 있었으며, 착화지연시간과 임계열속을 기준으로 하였을 때 초기화재의 안전성에 있어서는 난연 Type의 Type E가 가장 우수함을 알 수 있었다.

3.2.2. 착화 및 화염온도

착화온도는 주어진 외부 복사열원에서 각 시료의 노출된 표면 위에 위치한 1.0mm의 직경을 갖는 K-type의 열전대를 이용하여 착화가 되는 순간의 온도를 측정된 것으로 3회의 측정 결과에 대한 평균값을 Table 4에 나타내었다.

각 시료에 대한 착화온도를 측정된 결과 일반 Type의 경우 220~230℃, 난연 Type의 경우 430~450℃로 비슷한 경향을 나타내었으며, 각 외부 복사열원에서의 착화온도는 난연 Type이 일반 Type에 비해 약 150~250℃ 정도 높게 측정되었다.

Fig. 5는 20kW/m²의 외부 복사열원에 5분간 노출시킨 동안 각 시료의 화염온도 변화를 나타낸 것으로 시료표면으로부터 10cm 상부에 K-type(ψ1.0 mm)의 열전대를 이용하여 매 1초 간격으로 측정하였으며, 실험 횟수는 각 시험편에 대해 3회 시험을 실시하고 시험결과를 기록한 후 얻어진 측정값을 평균해서 사용하였다.

각 시료에 대한 최고 화염온도의 평균은 Type A의 경우 809.1℃, Type B의 경우 814.3℃, Type C의 경우 813.6, Type D의 경우 746.2℃, Type E의 경우 733.0℃로 측정되었으며, 난연 Type의 경우 일반 Type에 비해 최고 화염온도가 약 70℃ 정도 낮음을 알 수 있었다.

Table 4. Ignition temperature of each puzzle mats

Heat flux (kW/m ²)	Ignition temperature(°C)				
	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E
20	249.9	237.5	249.1	458.2	482.0
25	254.1	239.3	251.1	470.3	489.2
35	213.7	203.0	211.4	457.2	472.0
50	206.3	204.3	209.3	408.8	422.9
70	231.1	227.2	227.7	376.7	384.4
Average	231.0	222.3	229.7	434.2	450.1

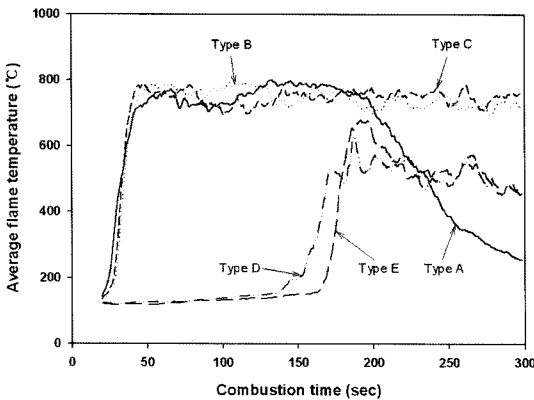


Fig. 5. Flame temperature profile of each type during the combustion at 20kW/m².

3.2.3. 질량감소속도

25kW/m²의 외부 복사열원에 의한 질량감소속도는 Table 5와 Fig. 6에 나타내었다. 질량감소속도는 복사전기히터로부터 방출되는 25kW/m² 복사열원에서 300s 동안 무게측정장치에 의해 매 1초 간격으로 계측하고 Data logger를 이용하여 Computer에 자동 저장된 Data를 이용하여 분석한 것으로 3회의 측정결과에 대한 평균값이다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 일반 Type의 퍼즐 매트 의 경우 연소 초기인 약 13~15s 경에 점화된 후 연소 종료시까지 균일한 질량감소를 나타낸 반면 난연 Type의 퍼즐 매트는 연소초기에는 거의 변화가 없다가 Type D의 경우 약 110s, Type E의 경우 약 120s에 점화된 후 질량감소 속도가 급격히 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타내었다.

Table 5는 25kW/m²의 외부 복사열원에서의 각 Type별 평균질량감소속도와 최대 질량감소속도를 나타낸 것으로 연소시간(300s) 동안 평균질량감소속도는 일반 Type인 Type C가 0.0593g/s로, 최대질량감소속도는 난연 Type의 Type E가 0.1248g/s로 가장 높은 질량감소속도를 나타내었다.

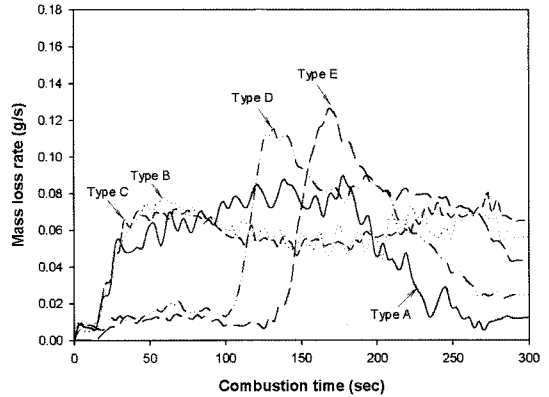


Fig. 6. Mass loss rate profile during the combustion of puzzle mats at 25kW/m².

Table 5. Mass loss rate of puzzle mats at 25kW/m²

Heat flux(kW/m ²)	Mass loss rate of puzzle mats(g/s)				
	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E
Average	0.0483	0.0583	0.0593	0.0463	0.0473
Maximum	0.0893	0.0780	0.0804	0.1153	0.1248

4. 결론

퍼즐 매트에 대한 단위 중량당 연소열과 외부 복사열원에서의 착화시간, 착화 및 화염온도, 질량감소속도를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연소열을 측정된 결과 Type C에서 25.42kJ/g로 가장 낮게 측정되었으며, Type B 26.52kJ/g, Type E 27.22kJ/g, Type D 30.70kJ/g, Type A 39.32kJ/g 순으로 높게 측정되었다.

2) 외부 복사열원이 20kW/m²일 때 평균 착화시간은 일반 Type에 비해 난연 Type인 D와 E에서 약 6~7배 정도 길게 측정되었다.

3) 각 시료에 대한 착화온도를 측정된 결과 일반 Type의 경우 220~230°C, 난연 Type의 경우 430~450°C로 비슷한 경향을 나타내었으며, 각 외부 복사열원에서의 착화온도는 난연 Type이 일반 Type에 비해 약 150~250°C 정도 높게 측정되었다.

4) 외부 복사열원이 25kW/m²일 때 질량감소속도는 난연 Type의 경우 4.68g/m²·s로 5.53g/m²·s인 일반 Type보다 약 15.4% 낮게 측정되었다.

5) 착화지연시간, 임계열속, 착화 및 화염온도를 기준으로 하였을 때 초기화재의 안전성에 있어서는 난연 Type의 Type E가 가장 우수함을 알 수 있었다.

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

참고문헌

- 1) 오규형 외, “화재공학원론”, 동화기술, pp. 192 ~ 219, 2004.
- 2) 이봉우, “건축용바닥재의 화재안전성 평가에 관한 연구”, 2006년도 소방검정기술기준 선진화 사업 연구과제 발표집, 한국소방검정공사, pp. 1 ~ 38, 2006.
- 3) 이봉우 외 8, “실내장식물 등 화재유해성 평가시험 용역”, 소방방재청, 2006.
- 4) N.W. Lee, N.S. Kim, B.S. Moon, “A Study on Thermal Characteristics on Polymeric Floorings”, J. of the KOSOS, Vol. 21, No. 6, pp. 38 ~ 45, 2006.
- 5) 강성동, 이창우, 현성호, 윤명오, “다중이용시설 바닥마감재의 연소가스 독성평가에 관한 실험 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol. 16, No. 2, pp. 14 ~ 21, 2002.
- 6) 박형주, “복사열을 이용한 샌드위치 패널 심재의 연소특성 분석”, 한국화재소방학회 논문지, Vol. 21, No. 4, pp. 25 ~ 31, 2007.
- 7) Michael J. S., “Predicting the ignition and burning rate of wood in the cone calorimeter using an integral model”, NIST GCR 99-775, pp. 67 ~ 72, 1999.