

콘 칼로리미터를 이용한 건축 바닥재의 연소거동과 가스유해성 평가*¹

이 장 원*² · 이 봉 우*² · 권 성 필*² · 이 병 호*³ · 김 희 수*³ · 김 현 중*^{3†}

Burning Behavior of Flooring Materials in the Cone Calorimeter and Evaluation of Toxic Smoke*¹

Jang-Won Lee*² · Bong-Woo Lee*² · Seong-Pil Kwon*² ·
Byoung-Ho Lee*³ · Hee-Soo Kim*³ · Hyun-Joong Kim*^{3†}

요 약

건축 내장재 중 바닥재의 연소거동을 살펴보기 위해 열류량 50 kWm⁻²의 콘 칼로리미터를 이용하여 측정하였다. 7종의 국산 바닥재를 이용하여 각각의 연소 거동을 최대 열방출률과 전체 열방출량 그리고 평균 열방출률을 통해서 살펴보았다. 실험한 결과 중밀도섬유판(MDF) 바닥재가 다른 바닥재에 비해 높은 열 방출 특성을 나타냈다. 또한 MDF 바닥재는 연소 시 질량의 감소가 다른 바닥재보다 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 연소 시 발생하는 가스 발생량을 측정하였는데, PE계 섬유판(PE fiberboard flooring)과 PVC계 plastic resin sheet에서 높은 일산화탄소와 이산화탄소의 발생량을 확인할 수 있었다. 비광소멸면적을 통해서 가스 평균 방출량을 살펴보면 일산화탄소나 이산화탄소와 같은 경향을 나타냈다. 바닥재의 가스유해성 평가는 쥐의 행동 정지시간을 기준으로 측정하였다. 측정 결과 MDF 바닥재에서 유해성이 높은 것으로 측정되었다.

* ¹ 접수 2007년 9월 10일, 채택 2007년 10월 11일

* ² 한국소방감정공사 기술사업본부, 위험물사업본부, 소방기술연구소

* ³ 서울대학교 산림과학부 환경재료과학전공 바이오복합재료 및 접착과학 연구실, Lab. of Adhesion & Bio-composites, Program in Environmental Materials Science, College of Agriculture & Life Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

† 주저자(corresponding author) : 김현중(e-mail: hjokim@snu.ac.kr)

ABSTRACT

The burning behaviors of board for flooring materials were investigated using cone calorimetry at an incident heat flux of 50 kWm^{-2} . Seven domestic flooring materials were used to observe the burning behavior of maximum heat release rate, total heat release and average heat release rate. The experimental data indicated that the medium density fiberboard (MDF) flooring had higher release rate than the other flooring materials. Also, the mass loss of MDF flooring was higher than the other floors. When measuring the smoke production from burning, PE fiberboard flooring and PVC Plastic Resin Sheet showed higher carbon monoxide and carbon dioxide yield than the others. The average smoke release of both carbon dioxide and carbon monoxide through specific extinction area was similar. Toxic smoke measurement from flooring materials were determined by the mouse stop motion, and the results indicated that MDF flooring contains more toxic material than the other flooring materials.

Keywords: flooring materials, flame retardancy, smoking emission, cone calorimeter

1. 서 론

방화의 대상이 되는 화재는 산불, 시가지 화재, 건물화재 및 위험물 화재 등이다. 최근 고층빌딩이나 산업시설에서 잠재적 화재위험도의 예측은 점점 더 중요해지고 있으며, 대규모 복합시설에 대한 방화방재대책 시스템화가 이슈화되고 있다(박 등, 2005). 이러한 건축방화는 넓은 의미에서는 건물의 화재로부터 인명 및 재산을 지키는 것이고, 좁은 의미로는 내화구조나 방화재를 사용하여 피난루트나 방화구획을 구성함으로써 화재 피해를 경감하는 것이다. 그 중에서도 인명을 지키는 것이 방화의 기본 목적이 될 것이다.

국내의 건축물 내부마감재와 관련된 화재안전 관련규정에는 건축법이 있다. 건축법에서는 출화·화염확대방지 및 피난안전을 도모하기 위해 대통령령이 정하는 용도 및 규모의 건축물에 사용되는 내부마감재료에 대하여 불연·준불연재료 및 난연재료를 사용하도록 의무화하고 있다(건축법). 그러나 건축물 내부마감재 적용범위가 모든 '실내 마감·장식·치장재 등에 미치지 못하고 건축물 내부의 천장, 반자, 벽 기둥' 등에 부착되는 자재로 규정하는 것으로 한 구조체에 밀착되어 있는 마감재에 한정되어

있어 준공 후 추가적으로 설치되는 실내 마감·장식재에 대한 방화·방염규제가 없는 실정이다.

최근 건축물 내부마감재는 편리하고 안락한 생활에 대한 욕구가 확산되면서 점차 고급화 및 다양화되어 가고 있다. 하지만 이런 내부마감재들은 대부분 가연성 물질들로서 화재위험성이 높은 재료들이다(임과 육, 2002; Demir *et al.*, 2006). 이와 같은 내부마감재는 화재 발생 시 높은 온도의 열기와 다량의 연기 및 독성 가스를 방출함으로써(김과 김, 2002) 인명 및 재산피해를 가중시키기도 한다. 그러나 현재 사용되고 있는 건축물 바닥재에 대한 열특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

건축물 내부마감재와 관련된 난연 성능 및 시험방법은 건축물의 화재 발생 시 건축재료에서 발생하는 유독가스 및 화재 확산을 방지하기 위한 목적이며 주요 내용은 다음의 Table 1과 같으며 난연성 성능기준은 Table 2와 같다.

본 연구에서는 건축 내장재 중에서 바닥재의 난연성능을 평가하기 위하여 수행하였다. 콘 칼로리미터(cone calorimeter)를 통하여 장식재의 화재현상을 관찰하였으며, 또한 쥐가 유해가스에 노출된 후 행동정지 시간을 측정하여 바닥재의 연소가스의 유해성을 평가하였다.

Table 1. The test method of flame retardancy

Rank	Test method
Noncombustible material	KSFISO 1182, KS F 2271
Semi-noncombustible material	KSFISO 5660, KS F 2271
Flame retardant material	KSFISO 5660, KS F 2271

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

본 연구에서는 국내의 업체에서 생산되는 바닥재를 선정하여 사용하였다. 각각의 재료는 Table 3에 나타났다. 콘 칼로리미터에 사용되는 재료는 Table 3에 나타났다.

2.2. 실험방법

2.2.1. Cone Calorimeter

장식재의 난연 성능 평가는 콘 칼로리미터를 통해 측정하였다. ISO 5660-1에 의거하여 측정하였으며 각각의 시편은 3개의 샘플의 평균값으로 산출하였다. 콘 칼로리미터를 이용하여 각각의 재료에 대한 열방출률(heat release rate), 착화시간(ignition time), 질량감소율(mass loss rate), 비광소멸면적(specific extinction area), 일산화탄소 및 이산화탄소 생성율을 측정하였으며, 콘 칼로리미터의 시험장치는 Fig. 1에 나타내었다. 장식재와 같은 건축 내장재의 화재 유해성 평가에서 가장 핵심적인 부분은 재료의 발열량이므로 발열량은 최대 열방출률과 총 방출열량, 평균 열방출률로 나누어 측정하였다.

Table 2. A performance standard of flame retardancy

Rank	Test condition
Noncombustible material	- Maximum mean temperature is under 20 K for the last 1 minute after 20 minutes heating in furnace - Mass lost rate is 30% and less - Lifetime of mouse in toxic smoke is over 9 minutes
Semi-noncombustible material	- Total heat release is below 8 MJ/m² for 10 minutes after heating - Heat release rate is under 200 kJ/m² for 10 consecutive seconds - Lifetime of mouse in toxic smoke is over 9 minutes
Flame retardant material	- Total heat release is below 8 MJ/m² for 5 minutes after heating - Heat release rate is under 200 kJ/m² for 10 consecutive seconds - Lifetime of mouse in toxic smoke is over 9 minutes

Table 3. Descriptions of interior material for cone calorimeter

Kind of sample	Material	Size (mm)	Weight (g)	Abbreviation
Midium density fiberboard (MDF) flooring	Wood fiber	100 × 100 × 9	51.9	MDF 9
	Wood fiber	100 × 100 × 15	102	MDF 15
	Wood fiber	100 × 100 × 18	124.7	MDF 18
PE fiberboard flooring	Polyester	100 × 100 × 9.7	21.3	PE
Plastic resin flooring	Melamine	100 × 100 × 6.9	77.7	ME
	Fiber reinforced plastic (FRP)	100 × 100 × 9	111.2	FRP
Plastic resin sheet	PVC	100 × 100 × 2	2.4	PVC

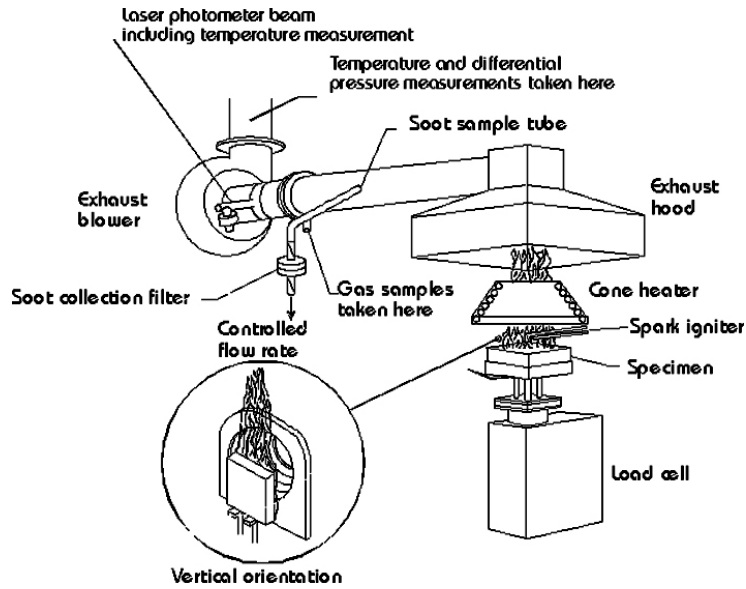


Fig. 1. Schematic apparatus of cone calorimeter.

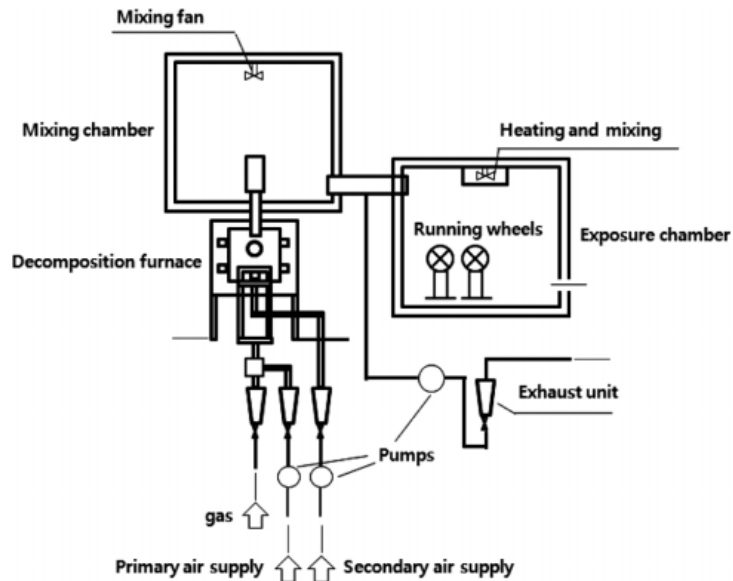


Fig. 2. Experimental tester for toxic smoke.

2.2.2. 가스유해성 시험

가스유해성 시험의 시험조건은 KS F 2271에 의거하여 실시하였으며 시험장치는 Fig. 2에 시험조건은 Table 4에 각각 나타내었다.

시험은 부열원으로 3분간 가열한 후 주열원으로 3분간 가열하였으며, 공기는 가열 중에 한하여 공급하였다. 공기 공급량은 가열로의 1차 공급 장치에 의해 매분 3 ℓ, 2차 공급 장치에 의해 매분 25 ℓ로

Table 4. The test method of toxic smoke

Test method		Test condition					
Heating method		Tube heater (95 ℓ), LP gas					
Heating condition	Time (min)	1	2	3	4	5	6
	Exhaust temperature	70	85	100	140	170	195
Size (mm)		220 × 220, thickness is under 50					
Emission rate		10 ℓ/min					
Mouse		ICR, 8 female mice					
Test time		15 minutes					
Heating time to sample		6 minutes					

Table 5. Ignition time of interior materials

Kind of sample	Material	Ignition time (s)
Midium density fiberboard (MDF) flooring	Wood fiber	327
	Wood fiber	340
	Wood fiber	370
PE Fiberboard	Polyester	573
Plastic resin flooring	Melamine	87.7
	FRP	-
Plastic resin sheet	PVC	-

하였다. 피검 상자의 배출장치에 의한 기체는 가열 중에 한하여 배출하였으며, 그 배출량은 매분 10 ℓ 로 하였다. 가열 시험은 시작할 때 피검 상자 내의 온도는 30°C로 하고, 시험용 흰쥐를 1마리씩 넣은 회전 바구니 8개를 피검상자에 넣었다. 가스유해성은 가열을 시작해서 시험용 흰쥐가 행동을 정지할 때까지의 시간을 측정하여 평가하였다.

다음의 계산식을 통하여 가스유해성을 측정하였다(KS F 2271, 1998).

$$x = \bar{X} - \sigma$$

$$\bar{X} = \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3 \cdots + x_8}{8} \right)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{X})^2 + (x_2 - \bar{X})^2 \cdots + (x_8 - \bar{X})^2}{8}}$$

x 는 마우스의 평균 행동정지 시간, $\bar{X}$ 는 8마리의

마우스의 행동정지까지의 시간(마우스가 행동을 정지하지 않은 경우에는 15분으로 한다)의 평균값, σ 는 8마리의 마우스의 행동정지까지의 시간(마우스가 행동을 정지하지 않은 경우에는 15분으로 한다)의 표준편차로 하며 x 의 값이 6.8 이상의 기준을 만족할 경우에 가스유해성 시험을 합격한 것으로 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Cone Calorimeter

3.1.1. 착화시간

착화시간은 Table 5에 나타내었다. 본 실험에서는 50 kW/m²의 열류량(heat flux)으로 콘 칼로리미터를 이용하여 측정하였는데, Table 5에서 살펴보면 MDF 바닥재는 다른 장식재에 비하여 쉽게 착화가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이에 반해 FRP계 plastic resin flooring과 PVC계 plastic resin sheet는 착화가 일어나지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 두께에 따른 MDF 바닥재의 착화시간을 살펴보면 두께가 증가할수록 착화시간이 약간 증가하였다. 이는 착화가 표면의 재질에 따라 영향을 받는 것을 나타내며, 재료의 표면에 따라서는 착화가 일어나지 않을 수도 있다. 이를 통해 목질계 바닥재가 다른 바닥재보다 착화성이 빠른 것을 확인할 수 있었다.

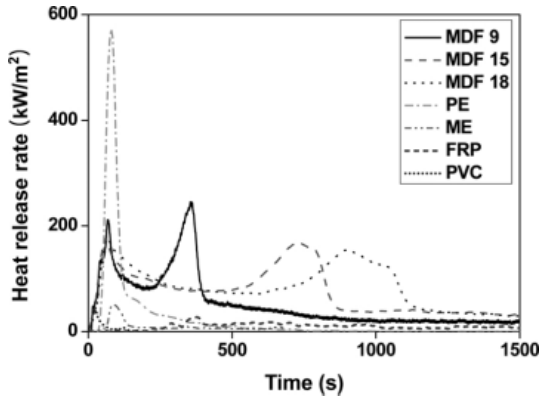


Fig. 3. Heat release rates of flooring materials.

3.1.2. 열방출률 측정

큰 칼로리미터를 통해 측정한 바닥재의 시간에 따른 열방출을 Fig. 3에 나타내었으며 이를 통하여 최대 열방출률과, 총 발열량, 평균 열방출률에 대한 값을 구하여 Table 6에 나타냈다. 결과를 보면 최대 열방출률은 폴리에스테르계 섬유판(PE polyester fiberboard)이 가장 높은 값을 나타내었다. 반면 FRP계 plastic resin flooring은 27.05의 낮은 최대 열방출률을 나타내었다. 이는 폴리에스테르계 섬유판이 착화 후 순간적인 연소가 쉽게 일어나는 것을 의미하며, 반면에 plastic resin flooring은 앞에서 살펴보았듯이 착화도 일어나지 않을 정도로 난연성이 높은 것을 알 수 있었다. MDF의 두께에 따른 최대 열방출률은 MDF 9 mm의 경우 가장 높은 값을 나타냈다. 그러나 Fig. 3에서 살펴보듯이 MDF의 경우 착

화 후 초기에 열방출률이 급격히 상승 후 감소하다가 다시 열방출률이 상승하는 경향을 확인할 수 있다. MDF의 두께가 얇을수록 두 번째 열방출률이 최대인 점이 짧은 시간에 나타난 것도 알 수 있다. 이는 목질계 보드인 MDF의 경우 내부에서의 불꽃 연소가 강하게 일어나는 것을 의미한다.

총 발열량은 Fig. 3의 그래프의 곡선 아래 면적에 해당하며 MDF의 경우 높은 총 발열량을 나타냈으며 그 중에서도 두께가 가장 큰 MDF 18 mm에서 최대 총 발열량을 나타냈다. 이는 목질계 장식재인 MDF의 경우 쉽게 착화하여 열을 발생하기 때문이다. 또한 같은 재질의 MDF라도 두께가 두꺼울수록 총 발열량이 증가하였는데 이는 가연물의 총량이 더 크기 때문이다.

장식재의 종류별 평균 열방출률을 살펴보면, 전체적으로 쉽게 착화되고 발열량이 높은 MDF 바닥재와 폴리에스테르계 섬유판이 높게 나타났으며 반면에 착화가 잘 이루어지지 않는 plastic resin flooring과 PVC계 plastic resin sheet가 낮게 나타났다. 그러나 MDF 바닥재 9 mm가 MDF 바닥재 18 mm보다 높은 평균 열방출률을 보인 것은 열방출률의 평균값은 초기 착화 후 6분간의 평균으로 산출하기 때문이다.

장식재의 발열은 장식재의 재질과 상당히 밀접한 관계를 나타내었다. 목질계 장식재의 경우 주 구성성분이 cellulose, hemicellulose, lignin이다. 이 세 가지 목재 구성성분은 쉽게 불이 붙고 낮은 열분해 온도를 갖는다(김 등, 2001). 즉 목질계 바닥재인

Table 6. Maximum heat release, total heat release, mean heat release of flooring materials

Kind of sample	Material	Maximum heat release rate (kW/m ²)	Total heat release (MJ/m ²)	Mean heat release rate (kW/m ²)
Midium density fiberboard (MDF) flooring	Wood fiber	287	829	128.6
	Wood fiber	176	117.0	99.6
	Wood fiber	174.8	129.9	106.6
PE Fiberboard flooring	Polyester	566.7	38.2	93.3
Plastic resin flooring	Melamine	46	7.1	12.9
	FRP	27.1	10.6	7.6
Plastic resin sheet	PVC	46.4	25	18.4

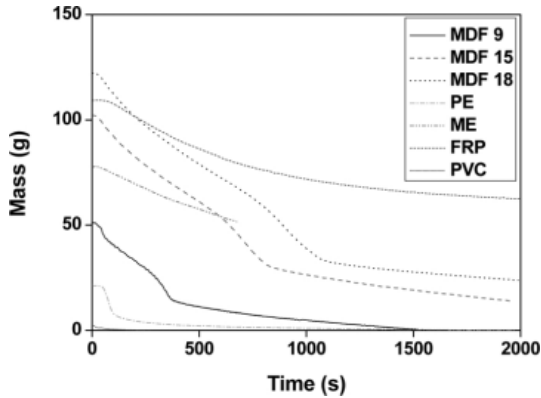


Fig. 4. Mass of testing flooring materials.

MDF 바닥재는 쉽게 착화가 일어나며 이는 곧 불에 잘 타는 것을 뜻한다. 그러나 불이 잘 붙는 경우에도 폴리에스테르계 섬유판의 경우 착화 후 초기 불꽃연소는 높으나 불꽃연소지속시간이 짧을 경우 총 발열량은 낮게 나타나게 되는 것을 알 수 있다.

3.1.3. 질량감소율

Fig. 4는 시간에 따른 질량의 변화를 나타냈으며 Fig. 5는 각 바닥재의 평균 질량 감소율을 나타냈다. MDF의 경우는 다른 초기 질량의 감소율이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 열방출량의 결과와 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있는데, 이는 재료의 연소가 곧 열량으로 방출되는 것임을 의미하는 것이다. 폴리에스테르계 섬유판의 경우는 초기 100초 전후로 급격한 질량 감소를 보이는데 이때 폴리에스테르계 섬유판은 큰 열량을 방출하고 급격히 열방출량이 감소하는 것을 나타내는 것이다. Plastic resin flooring과 PVC계 plastic resin sheet의 경우 질량의 변화가 완만했으며, 특히 melamine계 plastic resin flooring의 경우 700초 전후로 불꽃이 사라지는 것을 알 수 있었다. 이는 앞선 열방출률을 통해서도 확인할 수 있다. FRP계 plastic resin flooring과 PVC계 plastic resin sheet의 경우 불꽃은 일어나지 않았지만 질량이 감소한 것은 열분해와 연기의 발생으로 감소하였을 것이라 추측할 수 있다.

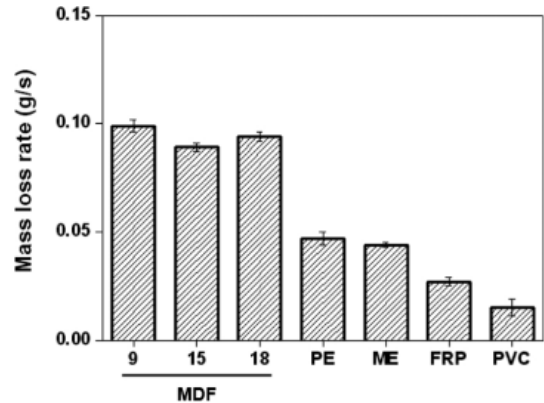


Fig. 5. Mass loss rate of testing flooring materials.

3.1.4. 가스 발생량

발생한 가스의 양 및 일산화탄소, 이산화탄소의 생성률을 Table 7에 나타냈다. 우선, 평균 비광소멸면적을 살펴보면 폴리에스테르계 섬유판과 PVC계 plastic resin sheet에서 가스의 발생량이 가장 많은 것을 확인할 수 있다. 또한 일산화탄소와 이산화탄소의 생성률 또한 폴리에스테르계 섬유판과 PVC계 plastic resin sheet에서 가장 높게 나타났다. 이는 PVC 고분자가 연소 시 검은 가스를 다량 방출하기 때문인 것으로 판단되었다(William *et al.*, 2003; Yimin and Qin, 2005). 반면 melamine계 plastic resin flooring의 경우 가스의 발생량이 제일 적었으며 특히 PVC계 plastic resin sheet에 비해 1/60 이상 작은 값을 나타냈다. 평균 일산화탄소 생성률과 이산화탄소 생성률은 앞선 비광소멸면적과 같은 경향을 나타냈다. 이는 앞선 열방출률과는 상반된 결과로 열 발생과 가스의 발생량은 독립적인 특성을 나타내는 것이다.

3.2. 가스유해성 평가

쥐를 이용한 가스유해성 평가를 Fig. 6에 나타내었다. 쥐의 행동정지 시간은 앞선 가스 발생량과 상반된 결과를 나타냈다. 일반적으로 질식과 관련된 일산화탄소의 농도는 폴리에스테르계 섬유판과 PVC

Table 7. Smoking emission content of total smoke, CO and CO₂

Kind of sample	Material	Mean specific extinction area (m ² /kg)	Mean CO Yield (kg/kg)	Mean CO ₂ Yield (kg/kg)
Midium density fiberboard (MDF) flooring	Wood fiber	73.1	0.019	1346
	Wood fiber	64.2	0.019	1196
	Wood fiber	71.6	0.023	1253
PE fiberboard flooring	Polyester	347.8	0.112	2242
Plastic resin flooring	Melamine	6.2	0.055	1009
	FRP	23.8	0.081	1479
Plastic resin sheet	PVC	399.7	0.115	3205

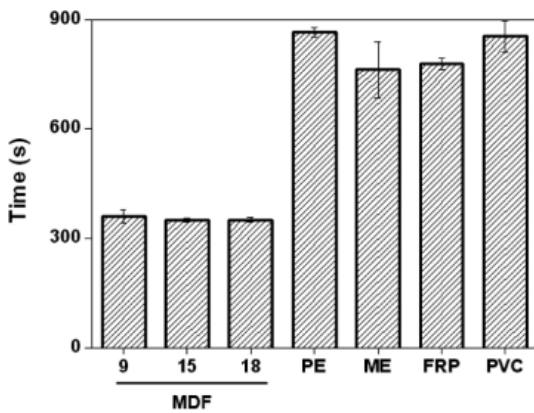


Fig. 6. Lifetime of mouse in test for toxic smoke.

계 plastic resin sheet가 높았으나 쥐의 행동 정지 시간은 오히려 14분 정도로 유해성이 가장 적은 것으로 나타났다. 반면 MDF의 경우는 일산화탄소의 발생량이 적었으나 오히려 6분 전후의 짧은 시간에 쥐의 행동이 정지했다. 이는 일산화탄소 이외의 검출되지 않은 다른 가스의 발생이 쥐의 행동정지에 영향을 미친 것으로 파악된다. 결과적으로, 쥐의 행동정지 시간으로 유해성을 살펴보면 폴리에스테르계 섬유판이 유해성이 가장 낮은 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 건축 내장재 중 바닥재 7종에 대하여 열적 특성 및 열분해, 가스 방출량을 ISO 5660-1

의 기준에 따라 콘 칼로리미터로 측정하였고, KS F 2271에 의거해 가스유해성 평가를 실시하였다. 콘 칼로리미터를 이용한 열적 특성은 목질계 바닥재인 MDF의 경우 다른 바닥재에 비해 쉽게 착화되는 것을 알 수 있었으며 또한 발열량이 다른 바닥재에 비해 매우 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 바닥재의 질량 감소는 연소되는 경향과 유사함을 확인할 수 있었다. 이는 바닥재 자체가 연소되면서 질량을 소비하고 이것이 곧 열방출로 이루어진다는 것을 알 수 있었다. 연소 시 발생하는 가스 방출량을 살펴보면, 폴리에스테르계 섬유판과 PVC계 plastic resin sheet에서 가스의 발생량이 많은 것을 확인할 수 있었다. 반면 MDF 바닥재의 경우는 가스 발생량이 소량인 것을 알 수 있었으나 가스유해성 평가를 통해 살펴보면 오히려 MDF에서 쥐의 행동시간이 더 짧은 것을 알 수 있었다. 이는 발생하는 이산화탄소보다 다른 생성가스가 쥐의 행동시간에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 결과적으로 MDF 바닥재의 경우 연소 시 발생하는 열량이 높으며 유해성이 다소 높다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 건축법 제43조.
2. 김형진, 김상철. 2002. 건축재료 방화시험의 국제동향과 관련기술의 국내적용 방안. 환경관리학회지. 8(4): 299~308.
3. 박재성, 윤명오, 이의평. 2005. 다중이용건축물의 화재 안전성 측면에서 취약요인에 관한 연구. 한국화재·소

- 방학회 춘계학술발표논문집. pp. 145~150.
4. 임홍순, 육근성. 2002. 복사열원에 의한 건축용 바닥마감재 화재시험방법에 관한 연구. 한국화재·소방학회 추계학술발표논문집. pp. 73~80.
 5. KS F 2271. 1998. 건축물의 내장재료 및 구조의 난연성 시험방법.
 6. Demir, H., D. Balkose, and S. Ulku. 2006. Influence of surface modification of fillers and polymer on flammability and tensile behavior of polypropylene composites. *Polymer Degradation and Stability*. 91(5): 1079~1085.
 7. Kim, H.-J. and Y. G. Eom. 2001. Thermogravimetric analysis of rice husk flour for a new raw material of lignocellulosic fiber-thermoplastic polymer composites. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 20(3): 59~67.
 8. William, H., J. Starnes, D. P. Robert, R. C. Jenine, S. D. Alexander, J. K. Edward, T. L. Jeffrey, J. M. Philip, A. Q. Ronald, and Z. Jing. 2003. Cone calorimetric study of copper promoted smoke suppression and fire retardance of poly(vinyl chloride). *Polymer Degradation and Stability*. 82(1): 15~24.
 9. Yimin, L. and B. Y. J. Qin. 2005. Preliminary burning tests on PVC fires with water mist. *Polymer Testing*. 24(5): 583~587.