

## 콘칼로리미터와 가스유해성시험기를 이용한 주거용 실내바닥재의 화재위험성 평가

최용묵, 김상철, 윤용진, 이승한, 김동익  
한국건설자재시험연구원 안전환경평가센터

### Fire performance test for residential flooring materials by using a cone calorimeter and a smoke toxicity tester

Yong-Mook Choi, Sang-Cheol Kim, Yong-Jin Yoon,  
Seung-Han Lee, Dong-Ik Kim

*The center of Safety and Environment, Korea Institute of Construction Materials*

#### 1. 서론

현대건축물에 있어서 바닥재는 필수적인 마감재로 실내장식의 개념과 주거공간의 편의성 향상을 목적으로 사용된다. 예전에는 그 재료가 석질, 시멘트, 장판지류 등으로 화재에 비교적으로 안전한 재료들이 사용됐고 그 사용량도 적었지만, 경제사회의 발달과 실내공간에 대한 디자인개념의 인식확대로 바닥재의 재료는 PVC, 목질, 합성수지등 가공성이 우수하고 미관이 화려하지만 이런 재료는 화재에는 취약한 것들이다. 최근에는 그 사용량이 급격히 증가하여 PVC 및 목질이 주성분이 되는 제품이 사용량의 90%를 차지하는 것으로 조사되고 있다. 이는 화재의 위험성이 그 만큼 악화되었다는 말로 해석될 수 있을 것이다. 실제로 통계자료나 해외연구자료에 따르면 화재건수와 인명피해의 상당부분이 화재안전규정이 미흡한 주거용 건물의 화재에 의해 발생하는 것으로 보고되고 있는데 가연성 유기재료로 된 실내장식물의 사용증가도 일정한 역할을 한 것으로 판단된다.

바닥재에 대한 국내 화재안전 규정을 살펴보면 건축법의 경우 계단실 용도에 한해서 적용되고 있다. 소방법의 경우에는 소형불꽃(백켈버어너, 마이크로버어너)을 이용한 착화특성 및 연기발생량에 초점을 둔 방염시험방법에 따라 관리되고 있으며 적용되는 건축물은 특수장소에 한해 제한적으로 적용되고 있다. 재료가 착화된 이후의 화재위험성 평가를 위해서는 화재확대에 중요한 역할을 하는 열방출, 화염전파특성과 인명피해에 큰 요인이 되는 연기 및 연기독성의 평가가 필요하다. 이번 시험연구에는 주거용 건물은 물론 상업용 건물에 가장 보편적으로 쓰이는 바닥재를 대상으로 콘칼로리미터를 이용하여 열방출, 착화시간, CO, CO<sub>2</sub>가스, 연기발생특성 등을 측정하였으며, KS F 2271에 규정되어 있는 가스유해성시험기를 이용하여 연기의 독성을 평가하였다.

## 2. 시험이론 및 방법

### 2.1.1 발열성

발열성은 단위중량의 재료가 완전히 연소하면서 발생하는 열량을 측정하여 나타낸다. 재료가 착화되어 연소가 시작 되면 열을 방출하게 된다. 이렇게 발생한 열은 재료의 미연소부분을 가열하여 열분해를 촉진하게 되고 착화시키는 연속적인 연소사이클을 형성하게 되어 화염의 확대 및 전파를 유발하게 된다. 발생한 복사열이 실내온도를 상승키면 다시 착화 및 화염전파를 유도하게 되므로 화재안전평가에서 발열특성은 중요한 요소가 된다. 국제적으로 사용되는 평가방법은 수평으로 부착된 복사콘에 시편을 노출하여 열방출을 구하는 방법(콘칼로리미터 ISO 5660)으로 극소소를 제외하고는 모든 탄소화수소계물질(C, H로 구성된 재료)이 산소 1kg이 소비될 때 13.1MJ의 열을 방출하는 원리를 이용하여 구하게 된다.

$$\dot{q}_A(t) = \dot{q}(t)/A_S$$

$$\dot{q}(t) = (\Delta h_c / r_o)(1.10)C \sqrt{\frac{T_e}{\Delta p}} \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5X_{O_2}}$$

여기에서,

$\dot{q}_A$  : 단위면적당 열방출률(kWm<sup>2</sup>)

$\dot{q}$  : 열방출률(kW)

$A_S$  : 시편의 초기 노출면적(m<sup>2</sup>)

$\Delta h_c$  : 순연소열(KJ/kg)

1.10 : 공기와 산소분자량 비율

$X_{O_2}$  : 화학양론적산소 대 연료 질량비

측정데이터에는 열방출률(Heat release rate)를 포함하여 연기발생률(Smoke production rate), 질량감소율(Mass loss rate) 그리고 산소, 이산화탄소 및 일산화탄소 등의 농도를 동시에 측정할 수 있다.

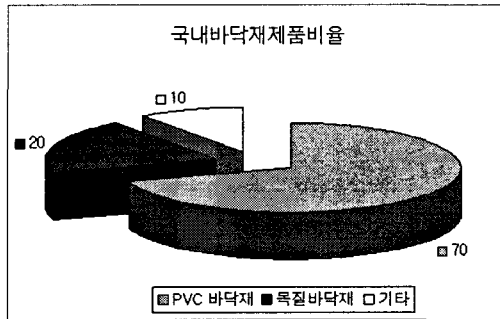
### 2.1.2 가스유해성측정

연소가스의 가스유해성을 평가하는 방법으로는 FT-IR 등과 같은 분석장비를 이용하여 가스성분을 분석하는 방법과 동물을 이용하여 간접적으로 그 유해성을 측정하는 방법으로 크게 나뉜다. 기기분석의 대표적인 평가방법은 BS 6853 Annex B을 들 수 있는데 측정하는 가스 종류는 HCl, HF등 8종이며 각 시험방법에 따라 차이가 있다. 동물을 이용하는 방법으로는 ASTM E 1678, KS F 2271를 들 수 있으며 두 가지 방법을 병행하는 경우도 있다. 이번 평가에 사용된 방법은 KS F 2271에 규정된 시험방법이며 시험 1회당 ICR계 마우스 8마리를 회전바구니에 넣고 15분 동안 측정하여 각 마우스의 행동정지시간을 측정하고 평균하여 결과값을 표현하는 방법이다.

### 3. 실험

#### 3.1 시편선정

실험을 위한 시험대상물 선정을 위해 시장조사를 실시한 결과 PVC비닐계 바닥재의 사용량이 가장 큰 것으로 나타났으며, 그다음이 목질계 바닥재였다. PVC계열의 바닥재는 전체 바닥재사용량의 70%에 이르렀으며 매년 사용 증가량도 큰 폭으로 증가하고 있는 것으로 나타났다.



<그림 1 국내바닥재 제품비율 >

PVC바닥재는 비닐수지가 주성분으로 타일형과 시트형이 있었으며 두께는 2~10mm정도의 제품들이 많았다. 목질계 바닥재는 천연목재보다는 강화마루(무늬목 바닥재)와 합판마루(치장목 바닥재)등 목재를 가공 처리한 제품형태로 사용되고 있었다. 그 외의 바닥재로는 고무를 주재료로 하는 고무바닥재와 PVC제품과 목질제품을 결합하여 만들어진 이중바닥재 등이 소량 사용되고 있었다. 이번 시험연구에 선정된 바닥재의 종류와 제품특성은 아래와 같다.

<표 2 : 시험된 바닥재의 종류>

평가대상				
바닥재	PVC 바닥재	바닥시트		국산(2종), 외산(2종)
		바닥타일	데코타일	국산(2종), 외산(1종)
			디렉스타일	국산(2종)
			전도성타일	국산(1종)
	고무 바닥재	러버타일		국산(1종)
	목질계 바닥재	치장목 바닥재		국산(1종), 외산(2종)
		무늬목 바닥재		국산(1종), 외산(1종)
	이중바닥재	전도성타일 (3mm)+MDF		국산(1종), 외산(1종)
		디렉스타일 (3mm)+MDF		국산(1종), 외산(1종)
		열경화성수지 화장판 (3mm)+MDF		국산(1종), 외산(1종)
쿠션매트			국산(1종)	

<표 3 : 시험된 바닥재의 구성>

구 분			재 료	
바 닥 재	PVC 바닥재	바닥시트		비닐수지, 가소제, 충전제, 발포제, UV코팅 처리된 제품
		바닥 타일	데코타일	비닐수지, 가소제, 충전제, 발포제, 코팅제, 인쇄필름 층 포함
			디럭스타일	비닐수지, 가소제, 충전제, 발포제, 코팅제, 인쇄필름 층이 없음
			전도성타일	대전방지제, 비닐수지, 가소제, 충전제, 발포제
	고무 바닥재	러버타일		고무, 점토, 산화아연, 가류제, 난연제 등으로 성형한 제품
	목질계 바닥재	치장목 바닥재		내수합판의 UV 코팅된 천연원목 무늬를 접착
		무늬목 바닥재		HDF 에 무늬지 필름을 접착
	이중바닥재	전도성타일 (3mm)+MDF		MDF 위에 전도성 타일 접착
		디럭스타일 (3mm)+MDF		MDF 위에 디럭스 타일 접착
		열경화성수지 화장판 (3mm)+MDF		MDF 위에 열경화성수지 화장판 타일을 접착
쿠션매트			PVC, 가소제, 안정제 등	

### 3.2 실험

#### 3.2.1 열방출시험

ISO 5660-1, 2의 규정에 따라 콘 칼로리미터를 이용하여 시험을 실시하였다. 시험조건은 콘의 복사열량을 50 kW/m<sup>2</sup>, 가열방향은 보편적인 방법인 수평가열을 사용하였다. 배기속도는 24L/sec, 가열간격은 25 mm를 사용하였다. 시편의 크기는 규정에 따라 가로 100 mm, 나비 100 mm로 하고 시편홀더(노출면적 88.4 cm<sup>2</sup>)로 고정하여 시험하였다. 최대열방출률, 총열방출열량, 평균열방출율 등 총 8개의 데이터를 측정하였다.

#### 3.2.2 가스유해성시험

KS F 2271의 시험방법에 따라 각 시편에 대하여 2회씩 측정하였다. 시편의 2006년에 개정된 방법에 따라 시편에 지름 25 mm의 구멍을 3개 천공하여 실시하였으며 시험조건은 아래와 같다.

<표 4 : 가스유해성시험조건>

구분	시험조건						
가열방식	전열 석영관(9.5Ω), LP가스						
가열조건	시간(분)	1	2	3	4	5	6
	배기온도(℃)	70	85	100	140	170	195
시편의 크기(mm)	220 × 220 두께는 50 이하						
피검상자의 배출량	10L/min						
마우스	ICR계 압컷, 8마리						
시험시간	15 분						
시편가열시간	6분						

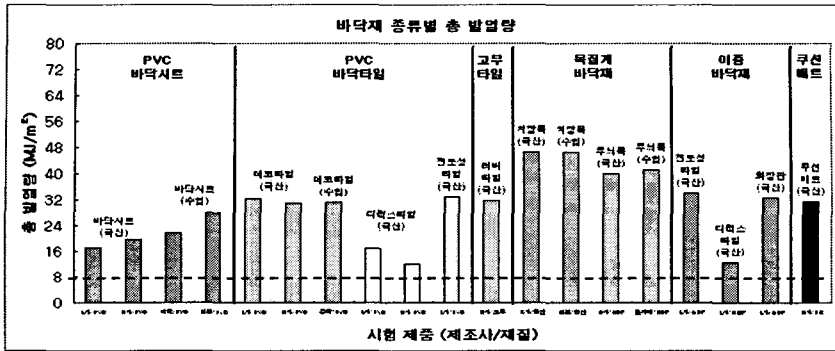
4. 시험결과

콘 칼로리미터를 이용한 화재유해성 평가에서 가장 핵심적인 부분은 재료가 연소하면서 발생하는 발열량이다. 발열량과 관련된 데이터에는 최대열방출률과 총방출열량, 평균방출열량이 있다. 이 밖에 연기발생 및 연소가스와 관련된 항목으로는 비광소멸면적, 일산화탄소생성률 및 이산화탄소생성률이 있다. 결과값 중 최대열방출율, 총방출열량은 건설교통부 고시의 난연재료의 시험시간 5분에 대한 값(기준값 : 최대열방출율이 200 kW/m<sup>2</sup>, 총발열량이 8MJ/m<sup>2</sup>이하)이며, 나머지 결과값은 ISO 5660-1, 2에 따라 계산된 값이다. 가스유해성시험결과는 마우스행동정지시간의 2회 시험결과의 평균값으로 단위는 초(sec)이며 KS F 2271에 규정된 값은 540초 이상이다.

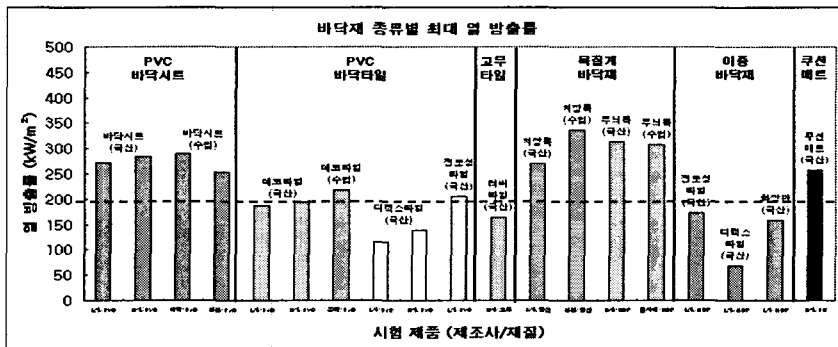
<표 5 : 시험결과>

시료명		시험결과								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
PVC 바닥시트	국산1	271.7	17.1	9.3	45.5	0.0265	656.5	0.0483	1.9705	368
	국산2	283.9	19.6	8.0	82.6	0.0298	731.3	0.0662	1.8724	402
	외산(미국)	288.7	21.7	6.7	59.1	0.0347	684.6	0.0580	1.8023	399
	외산(일본)	253.5	27.9	12.3	78.1	0.0462	723.5	0.0584	1.5448	413
데코타일	국산1	187.5	32.3	16.7	92.7	0.0526	580.5	0.0432	1.6432	788
	국산2	194.6	30.8	10.7	88.1	0.0513	594.3	0.0459	1.6002	551
	외산(중국)	217.7	31.1	15.0	88.7	0.0515	635.4	0.0452	1.6210	513
디럭스타일	국산1	114.4	16.8	50.3	48.8	0.0262	399.3	0.0203	2.1867	683
	국산2	138.6	11.9	26.0	33.7	0.0176	440.4	0.0339	2.6346	871
전도성타일		205.2	33.0	23.5	93.7	0.0478	546.8	0.0273	1.8426	509
러버타일		163.1	31.7	43.0	106.2	0.0378	671.3	0.0452	2.0201	487
치장목 바닥재	국산	43.0	21.7	21.7	137.8	0.0914	80.6	0.0113	1.4544	388
	외산(일본)	336.0	46.5	26.0	168.0	0.1074	104.4	0.0125	1.4433	366
무늬목 바닥재	국산	313.3	40.0	47.0	189.7	0.1349	39.3	0.0075	1.2695	423
	외산(벨기에)	306.7	41.2	47.0	172.3	0.1221	49.0	0.0065	1.2560	383
이중바닥재	전도성타일	172.4	33.9	21.0	111.9	0.0462	374.6	0.0138	1.5852	817
	디럭스타일	68.32	12.2	39.0	47.3	0.0348	194.8	0.0097	1.6370	878
	열경화성화장판	159.0	32.5	17.0	110.4	0.0814	56.0	0.0071	1.2933	802
쿠션매트		257.0	31.4	2.0	87.2	0.0481	744.0	0.0446	1.6489	469

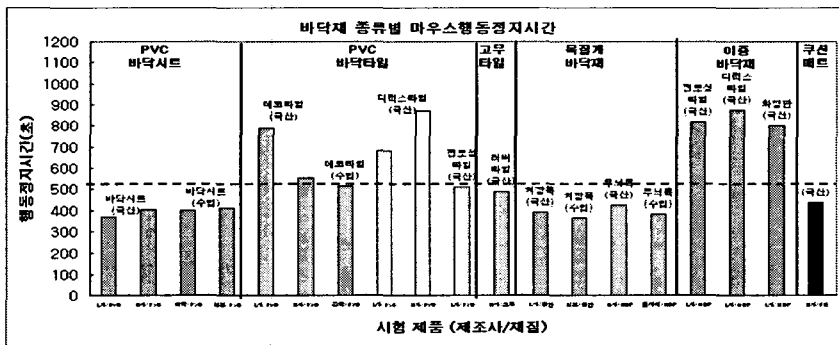
비고) (1) 최대 열방출률 [kW/m<sup>2</sup>], (2) 총방출열량 [MJ/m<sup>2</sup>], (3)착화시간 [sec], (4)평균 열방출률 [kW/m<sup>2</sup>], (5) 평균 질량 감소율 [g/s], (6)평균 비광소멸면적 (Specific Extinction Area) [m<sup>2</sup>/kg], (7) 평균 일산화탄소 생성률 [kg/kg], (8) 평균 이산화탄소 생성률 [kg/kg], (9) 가스유해성(행동정지시간 sec)



<그림 2 총방출열량>



<그림 3 최대열방출율>



<그림 4 마우스 행동정지시간>

## 5. 결론

총방출열량의 경우 건축법 난연재료 기준값 8 MJ/m<sup>2</sup>을 모두 초과하는 것으로 나타났으며 최대열방출율은 디럭스타일, 이중바닥재, 고무바닥재가 기준에 만족하는 것으로 나타났다. 가스유해성의 경우 PVC타일 및 이중바닥재가 기준값 9분을 만족시켰다. 열방출이 가장 높은 제품군은 목질계였으며 가장 낮은 쪽은 PVC비닐계 바닥타일 이었다. 반면 목질계 제품은 화재시 유해독성가스인 일산화탄소(CO) 방출량이 가장 적게 방출 되었고, PVC가 주 재료인

비닐계바닥시트와 바닥타일이 비교적 높았다. 하지만 PVC계 제품은 착화시간, 연기의 발생 정도에서도 타 제품보다 열적취약성을 보이고, 최대열방출 및 총발열량에서는 상대적으로 낮은 값을 보여 화재평가 특성값들이 서로 상반되는 결과를 보여주고 있다. 우리나라의 화재안전규정 중 소방법은 착화 및 자기소화성을 강조하는 시험방법 및 발연량(방염성능)측정하는 방법으로 운영하고 있으며, 건축법은 발열량과 마우스를 이용한 가스유해성평가를 중심으로 건축용 내부마감재료의 화재안전성을 평가하고 있다. 시험결과를 토대로 볼 때 단순평가에 의한 건축재료의 화재안전평가는 매우 위험할 것으로 생각되며 여러 가지 위험요소들 유기적으로 평가할 수 있는 방법 마련이 필요할 것으로 사료된다. 열방출 값이 적은 PVC 제품이 연기와 유독가스의 방출이 가장 심하였다는 점과, 착화에 걸리는 시간이 긴 제품의 열방출 특성이 높았다는 점은 건축물의 화재안전 설계를 위해 고려해야할 변수가 많다는 것을 나타낸다.

가스유해성시험을 통한 연기독성시험은 PVC 비닐계바닥재와 목질계 바닥재 모두 심각한 것으로 평가되었다. PVC 비닐바닥재와 목질계 바닥재는 가장 널리 사용되는 바닥재로 그 사용량이 계속 증가하고 있어 우려된다.

이번 시험대상 중 유일한 복합소재인 이중바닥재의 경우 구성재료를 고려할 때 비교적 양호한 결과를 나타냈는데 제품의 우수성 때문인지 또는 시험방법상의 한계 때문인지 보다 깊은 연구가 필요한 것으로 여겨진다.

국제적으로는 연소가스의 독성에 대한 평가를 FT-IR, GC-MASS 등 기기를 통한 가스성분 분석방법과 동물을 이용한 위해성평가 시험방법 병행되고 있다. 화재시 발생하는 연소가스는 재질이나 사용된 난연제 등에 따라 다양하게 나타나는 것이 일반적인 현상으로 동물을 이용한 평가방법의 경우 재료의 위험성은 판별할 수 있으나 위험성분의 세밀한 평가를 할 수 없는 것이 단점으로 보인다. 목질계바닥재의 경우 연소시 낮은 연기발생율과 일산화탄소 방출에도 불구하고 가스유해성시험결과는 가장 취약한 것으로 확인은 되었으나 그 문제점에 대한 원인과 해결방법 제시에는 한계를 보이고 있는 것이 현재 가스유해성시험의 맹점으로 보인다. 따라서 체계적인 연구를 통하여 세분화 되고 정밀한 시험방법의 도입이 필요할 것으로 사료된다.

## 6. 참고문헌

1. 건축용바닥재 및 샌드위치패널의 화재안전성 평가방법 표준화 기술개발에 관한 연구(2003.8 산업자원부)
2. Modeling fire scenarios in residential buildings with respect to the benefit of smoke detectors and Flame retardants(2006. Dr. Anja Hofman, Christian Knaust, Adrian Beard)
3. Reaction-to-fire tests -- Heat release, smoke production and mass loss rate-- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method ISO 5660-1, 2)
4. 건축물의 내장 재료 및 구조의 난연성 시험 방법(KS F 2271)
5. Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains(BS 6853)