주거화재 감식을 위한 바닥재의 연소특성에 관한 연구

A Study on the Combustion Characteristics of the Interior Flooring Materials for the Fire Identification of Residential Buildings

박영주* · 이해평** · 김해림***

Park, Young Ju · Lee, Hae Pyeong · Kim, Hae Rim

Abstract

In this study, we investigated the combustion characteristics of the interior flooring materials to provide the basic data on the identification of fire. The ignitability, fire spread, and product of combustion were analyzed for three kinds of flooring materials(reinforcement, plywood, hardwood) and two kinds of common linoleum(PET mat, monorium mat). As a result, common linoleum ignited in less time than flooring materials and the fire risk appeared relatively higher. The flooring materials was slower to ignite but, once it set fire, the maximum heat release rate was generally higher and the fire size was typically higher than those common linoleum. In addition, the time to reach the maximum heat release rate was proportional to the ignition time at all floors. The amount of smoke release was relatively larger on flooring materials than on common linoleum, and the extinction coefficient of flooring materials and common linoleum depending on the volume of smoke release ranged at 0.8~5.3. Toxicity index was relatively higher at flooring materials than common linoleum, and among common linoleum, monorium mat had a toxicity index of 7.8, which was at the highest level. Therefore, the result shows that in case of fire, flooring materials will have relatively larger fire scale but relatively lower fire risk than common linoleum, and common linoleum will have higher risk of casualties due to toxic gases.

Key words : Fire identification, Interior flooring material, Ignition time, Heat release, Smoke release, Toxicity index

요 지

본 연구에서는 주거용 실내 바닥재의 연소특성을 고찰함으로써 화재감식에 필요한 자료를 확보하는데 목적을 두었다. 주거용 실내마감재로 주로 사용되고 있는 마루바닥재 3종류(강화, 합판, 원목)와 일반장판 2종류(페트장판, 모노륨장판)를 대상으로 착화특성, 화염전파특성, 연소생성물특성 등을 분석하였다. 일반장판은 마루바닥재 보다 착화위험성이 큰 것을 확인하였으며, 마루바닥재는 일반장판보다 착화는 늦지만 최대열방출율이 높기 때문에 화재크기는 더 큰 것으로 사료된다. 또한, 최대열방출율에 도달하는 시간은 모든 바닥재에서 착화시간과 비례하는 것으로 나타났다. 마루바닥재는 일반장판보다 연기발생량이 많았으며, 연기발생량에 따른 마루바닥재와 일반장판의 감쇠계수의 범위는 0.8~5.3 정도인 것을 확인할 수 있었다. 독성지수는 마루바닥재 보다 일반장판이 상대적으로 높고, 일반장판 가운데 모노륨장판은 독성지수가 7.8 정도로 가장 높은 것으로 나타났다. 따라서 화재발생 시, 마루바닥재는 일반장판보다 화재크기는 상대적으로 크고 착화위험성은 낮으며, 일반장판은 유독가스로 인한 인명피해 등의 위험성이 높을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 화재감식, 바닥재, 착화시간, 발열량, 연기발생량, 독성지수

1. 서 론

최근 10년간 주택이나 아파트와 같은 주거용 건물의 화재발생으로 인한 인명피해가 증가하고 있다. 매년 평균 37,704건의 화재와 이로 인한 사상자가 약 2,427명 정도이며, 이 가운데 사망자는 502명에 이른다. 특히, 2010년 주택화재는 7,476건으로 전체화재의 24.7%를 차지하였으며, 이로 인한

인명피해는 전체 194명의 사망자 중 131명(67.5%)으로 주택 화재에 인한 인명피해가 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다(소방방재청, 2009; 소방방재청, 2010). 화재발생율이 높은 개인주택 화재는 주거용 내장재인 실내마감·장식재의 사용량 증가와 사용되는 재료가 화재에 취약한 플라스틱 계열과 목질재가 주를 이루며, 건축법 및 소방법의 관리대상기준에 제외되므로 화재발생 시 위험성이 매우 크다. 또한 주

*정회원 · 강원대학교 화학공학연구소 연구교수 (E-mail : yjpolymer@kangwon.ac.kr)

**정회원 · 강원대학교 소방방재학부 부교수 (교신저자)

***정회원 · 강원테크노파크 방재산업사업단 연구원

거용 장식재는 후차적인 변경이 가능함에 따라 재료를 선택할 때 디자인과 경제적인 측면에 비중을 둠으로써 화재 발생 시 위험성은 증가되고 있다. 일반 개인주택에서 화재발생에 따른 인명피해를 최소화하기 위해서는 주거용 실내마감·장식재와 관련된 소방법을 강화하고, 이에 맞는 제도가 실시될 수 있도록 주거용 건축물에 관한 법률을 조속히 정비할 필요가 있으며, 과학적인 화재원인 규명 및 연소 확대요인 등의 화재조사를 통해서 화재의 위험성 예측 및 예방 대책 수립이 필요한 것으로 사료된다.

화재조사는 화재의 원인조사와 화재발생 및 진화작업으로 인해서 발생하는 화재피해에 대한 조사로 정의되며, 일반적으로 화재원인조사와 화재피해조사로 나누어진다. 화재원인조사의 기능은 단순히 발화원을 밝혀내는 것뿐만 아니라 화재를 발생시킨 원인에서 시작하여 화재진압에 이르는 일련의 과정을 포함해서 출화원인, 연소 확대요인, 사상자 발생의 원인 등을 규명하는 것이다(이춘하 등, 2001). 화재조사에서 권장되는 체계적 접근 방법은 자연과학에서 사용하는 과학적 방법이다. 이 방법은 성공적인 화재조사 작업에 필수적이며, 조직적이고 분석적인 처리절차를 제공한다. 또한, 과학적 방법에 접근하기 위해서는 최종가설을 만들기 전에 수행되어야 하는 필수적 단계로서 화재발생 과정의 모든 데이터들이 분석되어야 한다(NFPA 921, 2011). 화재발생 과정의 분석에서는 실질적인 연소실험을 통한 화재특성을 고려할 필요가 있으며, 이를 위해서는 반복적인 연소실험을 바탕으로 취득한 연소특성 관련 데이터들의 확보 및 분석이 필요하다.

국내 건축물 내장재 연소특성에 관한 연구는 소방법 및 건축법에 의한 난연기준 제시에 따라 위험기준들을 제시하고 있으며, 실내장식물, 고분자물질의 바닥재 등의 열 발생 특성, 연기 및 연소가스 유독성 분석을 중심으로 많은 연구들(조광현, 2009; 이성룡 등, 2009; 김현주, 2007)이 진행되고 있다. 국내에서는 화재원인조사를 위한 분석 장비로는 소손물건 관찰의 실제현미경, 금속표면 등을 관찰하는 금속현미경, 화학성분 분석용의 가스크로마토그래프 외 13여종의 분석 장비들이 활용되고 있으며, 과학적인 화재감식장비의 이용은 아직까지 취약한 실정이다(김인태, 2006). 외국에서는 주거용 실내 내장재인 바닥재 등에 대한 실제적인 화재시험이 필요하다고 인식되어 미국(ASTM)과 유럽(EN, BS, DIM)과 중국(BT)에서 복사열을 이용한 화재시험방법을 시험규격으로 채택하고 있으며, ISO FDIS 9239-1, 2의 국제규격이 제시된 상태이다(건축법, 2010; 진영화, 2002). 연소가스 독성평가 방법에 대한 국제적인 현황을 살펴보면, 미국에서는 1986년 New York 주의 최초 연소생성물 규제를 시작으로 건자재, 플라스틱 제품, 섬유류를 대상으로 LC₅₀과 CO, HCN 및 CO₂ 등의 치사한계농도를 측정할 상대적 평가인 NIST(미국표준기술연구소) 독성시험 방법을 활용하고 있다(이형섭, 1988).

따라서 본 연구에서는 주거용 실내 바닥재를 대상으로 연소실험을 수행하여 화재감식에 활용 가능한 데이터 확보에 주안점을 두고 ISO 5660-1, ISO 5660-2, ISO 5659-1, NES 713의 국제 규격기준에 근거한 착화특성, 화염전파특성, 연소생성물특성 등과 같은 화재특성 데이터를 확보하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 실험재료

본 연구에서는 주택 및 아파트 등에서 주로 사용되고 있는 주거용 실내마감·장식재 가운데 바닥재를 실험재료로 선정하였다. 바닥재는 마루바닥재 3종류와 일반 장판 2종류를 선정하였으며, 시편의 형태는 시판되고 있는 재료의 원형을 그대로 사용하였다. Table 1에는 실험에 사용된 재료의 주요 구성성분들을 제시하였다.

2.2 화재특성 실험

2.2.1 착화 특성 실험

바닥재의 착화특성 실험은 ISO 5660-1 규격을 만족하는 영국 Fire Testing Technology사의 Dual Cone Calorimeter (ISO 5660-1, 2002)를 이용하여 발염착화가 진행된 시간인 발염착화시간을 측정하였다. 복사열에 노출된 시편이 스파크에 의해 착화되어 10초 이상 지속적인 불꽃이 유지되는 착화시간은 화재의 중요한 인자로서 착화시간이 짧을수록 화재가 빠르게 시작될 수 있음을 의미한다. 발염착화시간은 규격에 의한 측정법으로 화염 유무를 육안으로 판단하여 분석시스템에 기록하였으며, 실험 전 온도 23±2°C와 상대습도 50±5%의 조건에서 시편의 질량을 24시간 간격으로 연속해서 측정하였을 때 0.1% 이하 또는 0.1 g 이하의 항량이 될 때까지 처리된 시편을 사용하였다. 결과값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균값을 사용하였으며, Table 2에는 ISO 5660-1의 실험조건을 제시하였다.

2.2.2 화염확산 특성 실험

바닥재의 화염확산 특성을 고찰하기 위하여 ISO 5660-1 규격을 만족하는 영국 Fire Testing Technology사의 Dual Cone Calorimeter를 이용하여 열방출율, 최대열방출율, 총열방출량과 같은 발열량 특성을 분석하였다.

열방출율은 시편이 연소할 때 소비되는 산소와 연기의 온도, 유량, 시편의 질량감소 그리고 오리피스에 의한 압력차 등을 측정하여 분석 장비에서 산출된다. 복사열은 ISO 5660-1

Table 1. Composition of the Interior Flooring Materials

Samples	Density (g/cm ³)	Thickness (mm)	Main Components
강화마루	0.92	8	고밀도섬유 + 강화처리
합판마루	1.07	8	박판 + 나무무늬 입힘
원목마루	1.05	15	원목(표면) + 합판
페트장판	1.02	3	비닐수지, 가소제 등
모노륨장판	0.82	3	PVC계열, 가소제 등

Table 2. Experimental Conditions of ISO 5660-1

Items	Contents
Size(mm)	100×100
Heat flux(kW/m ²)	50
Test time(s)	1,800

Table 3. Experimental Conditions of ISO 5660-1 for the Interior Flooring Materials

Samples	Size(mm)	Measuring Time(s)	Heat Flux (kW/m ²)
강화마루	100×100	1,800	50
합판마루			
원목마루			
페트장판			
모노롭장판			

규격에서 제시하고 있는 50 kW/m²을 사용하였으며, 50 kW/m²의 복사열은 화재시나리오 4단계(ignition, growth, fully develop, decay) 가운데 실재화재상황과 가장 유사한 단계인 fully develop 단계에 해당하는 것으로 보고된 바가 있다(이철규 등, 2004). 착화특성 실험에서의 시편과 동일조건으로 처리된 시편을 사용하였으며, 결과값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균값을 사용하였고, 구체적인 실험조건은 Table 3에 제시하였다.

2.2.3 연소생성물특성 실험

1) 연기방출량 특성

연기방출량 특성분석은 바닥재의 사용 위치에 따른 연소형태를 고려하여 수평시험방법을 선택하였으며, ISO 5660-2 규격을 만족하는 Dual Cone Calorimeter와 ISO 5659-2 규격을 만족하는 Smoke Density Chamber를 이용하여 연기방출량 및 연기밀도를 측정하였다. 연기발생 측정은 공기의 흐름이 있는 상태의 동적측정과 공기의 흐름이 없는 즉 일정한 부피의 공간에서 발생하는 전체연기를 측정하는 정적측정으로 구분할 수 있는데 본 연구에서 동적 및 정적 연기발생측정은 ISO 5660-2와 ISO 5659-2 시험방법에 의해 각각 수행하였다.

① 동적연기발생측정

공기의 흐름이 있는 상태에서의 연기의 발생을 측정하며 ISO 5660-2의 방법으로 측정하였다(ISO 5660-2, 2004; KS F 5660-2). 연소시스템에서 발생하는 열량과 공기로부터 소비되는 산소의 양 사이에는 상관관계가 있는 것으로 알려져 왔다. 산소소비원리의 기본개념은 고분자재료, 유기성 액체, 천연재료를 포함한 대부분의 가연성 재료들의 연소 시 소비된 산소 1 kg당 13.1 MJ의 열량을 방출한다는 원리이다. 연소로 인해 열량이 발생되기 위해서는 배출 흐름 속으로부터 제거되는 일정한 수의 산소분자들이 있어야 하며, 실제로 사람들이 산소의 몰수를 측정할 수는 없으나 산소의 농도와 유량은 측정이 가능하므로 산소소비 방정식의 실제적인 이행은 유입과 유출 흐름 사이의 몰 변화, 가스분석기로부터 어떤 가스의 포착 등과 같은 문제들과 연관되는 것이다.

이 시험 방법은 일반적으로 연소 생성물을 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수함수 곱으로 감소한다는 것을 기초로 한다. 시험에 사용되는 시험체는 ISO 5660-1의 시험 진행과 같이 정해진 외부 복사열을 받으면서 대기조건에서 연소시켜 감광, 배기가스 유량 및 시험체의 질량 감소율을 측

Table 4. Experimental Conditions of ISO 5659-2 for the Interior Flooring Materials

Samples	Density (g/cm ³)	Thickness (mm)	Size (mm)	Measuring Time (s)	Heat Flux (kW/m ²)
강화마루	0.92	8	75×75	600	25
합판마루	1.07	8			
원목마루	1.05	15			
페트장판	1.02	3			
모노롭장판	0.82	3			

정한다. 감광은 배기 덕트에 있는 연기를 통해 투과되는 빛 세기의 비율로서 측정한다. 이를 감쇠계수(Extinction Coefficient)라 하며, 시험결과를 노출된 시험체의 표면적으로 규격화된 연기 발생량 및 연기 발생율로 나타낸다. 연기 발생율(Smoke Production Rate, m²/s)은 감쇠 계수와 배기 덕트에서의 연기의 체적율 량의 곱으로 계산된다. 시험체의 단위면적에 대한 연기 발생율을 연기방출율(Rate of Smoke Release, [m²/s]/m²)로 표현한다. 연기발생량(Total Smoke Production, m²)은 연기 발생율을 고려한 시간대의 누적분으로 얻는다. 이 모든 측정은 장비의 분석시스템에서 자동으로 측정되며, 실험조건은 Table 2와 같다.

② 정적연기발생측정

정적연기발생은 일정한 부피의 밀폐된 챔버 내에서 연소되어 발생하는 연기를 측정하는 방식으로 ISO 5659-2의 방법으로 측정하였으며, 실험조건은 Table 4와 같다. 광도계는 6.5 V 백열 램프, 광측정계는 10⁻⁹ A의 암전류를 감지할 수 있는 감도를 지니고 있다. 정적연기발생값 즉 연기밀도는 다음식(1)에 의해서 계산된다(ISO 5659-2; KS M ISO 5659-2).

$$D_s = 132 \log_{10} \frac{100}{T} \quad (1)$$

여기서, D_s 는 연기밀도, 132는 연소챔버에 대해 V/AL 로 부터 유도된 인자, V 는 연소챔버의 부피, A 는 연소챔버의 노출면적, L 는 광경로의 길이, T 는 광투과율을 나타낸다.

2) 연소가스의 독성

화재발생 시 인명피해의 주된 원인 가운데 하나인 연소가스의 독성을 규명하기 위하여 NES 713(Naval Engineering Standard 713)을 사용하여 바닥재별 연소가스의 종류와 방출량 측정을 통한 독성지수를 분석하였다. 독성지수는 일정한 부피(0.7~1 m³)의 챔버에 주어진 조건 즉, 화염길이 100~125 mm의 버너를 사용하여 화염온도 1150±25°C의 화염에 노출시켜 1 g의 시험편을 완전연소 시킨 후, 1 g의 시편의 연소를 통해 검출된 가스농도를 식 (2)에 의해 100 g의 물질이 연소했을 때의 경우로 환산하여 NES 713 규격에서 제시하고 있는 Table 5에 제시된 각각의 가스에 대한 치사농도(C_L , 인간이 30분간 노출되었을 경우 사망할 수 있는 가스 농도)를 이용하여 식 (3)에 의해 최종 독성지수(Toxicity Index)를 계산하였다. 여기서, C 는 시편의 연소생성가스 중 각각의 가스농도(ppm), m 은 시편의 중량(g), V 는 챔버의 부피(m³)를 나타낸다.

Table 5. Lethal Concentration(LC₅₀) for Half-Hour Exposure of Toxic Gases

Toxic Gases	C _l (ppm)
Carbon dioxide(CO ₂)	100,000
Carbon monoxide(CO)	4,000
Hydrogen sulphide(H ₂ S)	750
Ammonia(NH ₃)	750
Formaldehyde(HCHO)	500
Hydrogen chloride(HCl)	500
Acrylonitrile(CH ₂ CHCN)	400
Sulphur dioxide(SO ₂)	400
Oxides of nitrogen(NO _x =NO+NO ₂)	250
Phenol(C ₆ H ₅ OH)	250
Hydrogen cyanide(HCN)	150
Hydrogen bromide(HBr)	150
Hydrogen fluoride(HF)	100

Table 6. Experimental Conditions of NES 713 for the Interior Flooring Materials

Samples	Weight(g)
강화마루	1.036
합판마루	1.022
원목마루	1.014
페트장판	0.989
모노륨장판	1.052

$$C_{\theta}(\text{ppm}) = \frac{C_i \times 100 \times V}{m} \quad (2)$$

각각의 C_θ 값과 치사농도를 이용한 독성지수(Toxicity Index)는 식 (3)에 의해 계산되는데(NES 713) 여기서, C_θ는 식 (2)에 의해 계산된 가스의 평균 농도(ppm), C_f는 30분간 노출 시의 치사농도(ppm)를 나타낸다. C_f에 대한 값은 Table 5에 제시하였으며, 결과값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균값을 사용하였고, 실험조건은 Table 6에 제시하였다.

$$\text{Toxicity Index} = \frac{C_{\theta 1}}{C_{f1}} + \frac{C_{\theta 2}}{C_{f2}} + \frac{C_{\theta 3}}{C_{f3}} + \dots + \frac{C_{\theta n}}{C_{fn}} \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 주거용 실내 바닥재를 대상으로 연소실험을 수행하여 착화특성, 화염전파특성, 연소생성물특성 등과 같은 화재특성을 고찰하였다.

3.1 착화 특성 : 발염착화시간 분석

3.1.1 발염착화시간(TTI, Time to ignition, s)

Fig. 1은 바닥재들의 발염착화시간 측정결과를 나타낸 것으로서 발염착화시간을 살펴보면, 강화마루 35초, 합판마루 68초, 원목마루 21초, 페트장판 3초, 모노륨장판 5초의 시간대에서 발염착화가 일어나는 것으로 나타났다. 주성분이 비닐수

Fig. 1. Time to ignition of the interior flooring materials

Table 7. Results of Heat Release Analysis for Interior Flooring Materials

Samples	T _{ig} (s)	HRR		THR (MJ/m ²)
		Peak (kW/m ²)	Time (s)	
강화마루	35	193.43	50	101.7
합판마루	68	313.28	95	131.2
원목마루	21	205.88	40	107.7
페트장판	3	278.58	15	7.9
모노륨장판	5	203.54	21	12.05

지와 가소제인 페트장판과 모노륨장판의 발염착화시간은 각각 3초와 5초로서 비교적 빠른 시간에 착화가 일어났으며, 목질계열의 마루 바닥재보다 상대적으로 발염착화의 위험성이 큰 것으로 나타났다. 또한, 바닥재의 종류 가운데 원목마루는 21초로 발염착화가 빠르게 진행되었으며 종류별로 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서 페트장판과 모노륨장판은 마루계열의 바닥재보다 발염착화가 빠르게 일어날 것으로 사료되며, Table 7에서 볼 수 있듯이 대부분의 시편에서 최대 열방출율에 도달하는 시간은 착화시간과 비례하였으며, 대부분 착화시간이 짧을수록 열방출율의 최대값도 빠른 시간에 나타났다. 이러한 착화특성 차이의 결과는 재료의 착화온도 차이에 기인한 것으로 사료된다. 착화온도는 물질의 성분에 따라 각각 다르며, 목재, 종이, 천, 플라스틱 등의 유기질 재료는 연소 시 분해연소 형태를 갖고, 분해연소의 진행은 재료의 착화온도에 따라 다른 차이를 보인다. 목재의 일반적인 착화온도는 400~460°C 사이에서 착화가 진행되며, 페트와 모노륨 장판과 같은 플라스틱 계열은 공통의 결점으로 내열성이 약하며, 300~400°C 사이에서 착화하는 것이 대부분인 것으로 알려져 있다(차시환, 1998). 따라서 착화온도가 대체로 낮은 페트와 모노륨 장판은 목재보다 착화가 용이하게 작용한 것으로 사료되며, 최대 열방출율은 착화가 진행되면서 급격한 열분해의 진행으로 인한 열량 방출이 연소초기에 나타난 것으로 사료된다.

착화시간은 화재가 개시되는 최초의 시점으로서 다양한 형태의 바닥재에 대한 착화시간을 고찰함으로써 실제 화재상황에서 바닥재가 얼마나 빨리 착화되는지를 평가할 수 있는 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다. 또한, 화재감식에 있어 이러한 초기 연소특성은 과학적 데이터를 근거로 한 자료들을 토대로 발화부위 및 발화지점, 발화원인, 화재경과, 착

화물질 등을 판정하는데 중요한 요소이다.

3.2 발열량 특성

3.2.1 열방출율(HRR, Heat release rate, kW/m²)

착화시간을 통해서 화재가 얼마나 빨리 발생할 수 있는지를 확인할 수 있다면, 열방출율은 착화 후 화재가 얼마나 빨리 진행되는지를 예측할 수 있는 매우 중요한 요소 가운데 하나라고 할 수 있다(김영탁, 2010). 바닥재의 열방출율을 나타낸 Fig. 2를 살펴보면, 합판마루를 제외한 나머지 바닥재들은 150초 이전에서 열방출율 peak가 나타났지만, 합판마루는 95초와 470초에서 2개의 peak를 보이고 있다. 그리고 강화마루와 원목마루는 120초 이전에 최대값이 나타난 다음, 실험이 종료될 때까지 페트장판과 모노름장판에 비해 열방출율이 높게 지속되는 것으로 나타났다. 유기물은 무기물과 달리 비교적 적은 영역에서 열분해를 일으키고 다량의 열을 방출하며, 재료의 착화특성에 따라 연소초기에 급격하게 열량이 증대된다. 이러한 열량 방출이 실험종료 시 까지 진행된 마루 바닥재의 경우 Fig. 5에서도 나타나듯이 착화 후 중량감소가 서서히 진행되면서 지속적인 열량을 방출한 것으로 사료된다. 하지만, 장판바닥재는 800초 전에 중량변화가 종료됨으로 인해 마루바닥재 보다 열방출율이 낮게 나타난 것으로 사료된다. 이에 대하여 Table 7에 제시하였다.

또한, 합판마루의 경우는 목재와 목재 사이를 적층 하면서 접착제로 접착시켜 합친 재료로서, 사용된 수중이나 가공방법 및 접착제의 사용에 따라 발열량 특성이 상이한 형태로 나타난 것으로 사료된다. 본 연구에서는 합판마루에 사용된 접착제의 종류 및 수중에 대한 규명은 명확히 밝히지는 못하였지만 이로 인한 일반적인 연소특성은 각각 다르게 나타날 것으로 사료된다. 합판마루의 접착제로는 요소수지가 가장 일반적으로 사용되고 있으며, phenol 수지나 melamine 수지와 요소수지의 공중합체도 사용되고 있다(차시환, 1998).

3.2.2 최대열방출율(Peak HRR, peak heat release rate, kW/m²)

Fig. 3에는 최대열방출율을 나타내었으며, 시편이 착화되면 재료가 연소하면서 열을 방출하는데 이때 최대열방출율은 화재의 크기를 나타내는 중요한 변수이다. 바닥재별 최대열방출

Fig. 2. Heat release rate of the interior flooring materials

Fig. 3. Peak heat release rate of the interior flooring materials

Fig. 4. Total heat release of interior flooring materials

율은 강화마루 50초에서 193.43 kW/m², 합판마루는 95초에 313.28 kW/m², 원목마루는 40초에 205.88 kW/m², 페트장판은 15초에 278.58 kW/m², 모노름장판은 21초에 203.54 kW/m² 정도인 것으로 나타남으로써 합판마루는 최대열방출율이 상대적으로 높고 다음으로 페트장판이 높았으며, 원목마루, 모노름장판, 강화마루는 비슷한 순으로 나타났다. 따라서 합판마루는 화재발생 시 발열착화는 늦게 일어나지만 발열착화 후 최대열방출율이 높기 때문에 화재크기는 상대적으로 클 것으로 사료된다. 이에 대하여 Table 7에 제시하였다.

3.2.3 총열방출량(Total heat release, MJ/m²)

총열방출량은 화재발생 시 발생하는 열의 총량을 의미하는 것으로 총열방출량은 실시간으로 측정된 열방출율의 누적된 값을 산출하였다. 바닥재별 총열방출량을 나타낸 Fig. 4의 총열방출량을 살펴보면, 강화마루 101.7 MJ/m², 합판마루 131.2 MJ/m², 원목마루 107.7 MJ/m², 페트장판 7.9 MJ/m², 모노름장판 12.05 MJ/m² 정도로서 마루계열은 100 MJ/m²이상의 값을 나타냈다. 또한, 최대열방출율이 높은 합판마루는 총열방출량도 가장 크며, 페트장판은 상대적으로 총열방출량이 낮게 나타났다. 이에 대하여 Fig. 3에 나타내었다. 페트장판과 모노름장판은 빠른 시간에 착화되어 연소 초기에 급격하게 열을 방출하였지만 지속적이지 못하고 크기가 급격히 줄어들면서 총열방출량은 상대적으로 적은 것으로 나타났다. Table 7에는 바닥재의 열방출에 대한 결과값들을 제시하였다.

3.3 질량감소율 특성

Fig. 5에는 바닥재의 연소에 따른 질량감소 곡선을 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 마루바닥재와 장판바닥재는

Fig. 5. Mass loss rate of interior flooring materials

질량감소를 특성이 분류되는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 강화마루는 복사열 노출로부터 400초 정도에서 급격한 중량 감소를 보이며, 합판마루는 600초, 원목마루는 1,000초 정도에서 1차적으로 급격히 중량이 감소되는 것으로 나타났다. 마루바닥재는 이러한 급격한 중량감소 후 실험 종료 시까지 2차적인 중량감소를 보였으며, 장판바닥재의 경우는 800초 전에서 중량감소의 진행이 종료되는 차이를 보였다.

마루바닥재별 중량감소 변화 차이는 다소 있으나 실험종료 시 까지 장판바닥재 보다 상대적으로 긴 시간 중량감소가 진행이 되었으며, 마루바닥재는 중량감소 변화가 800초 전에 종료되어 연소의 진행이 상대적으로 빠른 시간에 종료되는 것으로 나타났다. 이러한 중량감소를 차이로 재료의 성분 및 조성에 따른 열분해 특성과 연소의 진행 정도를 알 수 있는데, 중량감소가 서서히 진행된 마루바닥재는 장판바닥재보다 상대적으로 연소가 지속되는 시간이 길게 작용한 것으로 사료되며, 이로 인한 열량의 축적으로 Table 7에 제시하듯이 총열방출량이 높게 나타난 것으로 사료된다. 또한, 마루바닥재의 경우 바닥재별 성분 차이는 밝힐 수 없었으나 목재의 주 성분은 셀룰로오스($C_6H_{10}O_5$), 리그닌($C:60-65$, $H:6$, $O:30-35\%$) 이고, 이것의 열분해 생성물은 $260^\circ C$ 에서 맹렬하게 되는 공통특성을 가지고 있으며, 인위적으로 가공된 강화마루, 합판마루, 원목마루는 가공 방법이나 수종 및 접착제의 사용에 따라 중량감소의 차이가 각각 다르게 나타난 것으로 사료된다. 바닥재 재료별 중량차이로 기인된 중량변화의 비교는 다소 무리가 따르나 주택 및 아파트 등에서 주로 사용되고 있는 주거용 바닥재의 실제 화재시의 연소특성을 반영하는데 의의를 두고 있다.

3.4 연소생성물 특성 : 연기발생 및 독성가스 분석

화재발생 당시 만들어지는 연소생성물에는 화재열(불의 뜨거운 기운), 연기, 유독가스 등이 있다. 이들의 위험인자는 화재열에 의한 화상, 고밀도 연기에 의한 시각장애, 질식제에 의한 호흡곤란과 신경마비 등이 있고, 효과로는 신체, 근육, 신경의 조절기능 상실, 판단력 및 방향감각의 상실, 시각장애와 극도의 공포 및 불안상태를 일으킨다. 화재발생 당시에는 화재 열에 의한 손실보다는 가연물의 연소 당시 발생되는 연소가스와 연기에 의한 피해가 훨씬 많이 발생한다. 특히, 연

기는 화재발생 당시 인명피해에 있어서 제일 큰 비중을 차지한다(김태석, 2009).

3.4.1 연기발생 특성

1) 총연기발생량(Total smoke release, m^2/m^2)

Fig. 6에는 바닥재가 연소하는 동안 발생한 총연기방출량을 나타내었다. 총연기방출량은 사용된 시편의 노출면적 즉, 시간에 따른 연기의 발생량을 단위면적으로 나눈 값으로서 화재에 노출된 물질의 단위면적에 따른 연기발생량의 누적된 값을 나타낸다. 결과를 살펴보면, 강화마루 $258.5 m^2/m^2$, 합판마루 $224.1 m^2/m^2$, 원목마루 $202.0 m^2/m^2$, 페트장판 $162.1 m^2/m^2$, 모노륨장판 $143.2 m^2/m^2$ 정도의 연기를 방출하는 것으로 나타났다. 마루바닥재는 $258.5 \sim 202.0 m^2/m^2$ 정도로 페트장판과 모노륨장판에 비해 상대적으로 연기방출량이 많은 것으로 나타났으며, 결과값 들은 Table 9에 제시하였다.

연기발생량은 재료의 탄소함량에 따른 완전연소 및 불완전 연소의 진행정도나 착화의 유무에 영향을 받는다. Fig. 1과 Table 7에 제시하듯이 바닥재 모두에서 발연착화가 진행되고, 발연량과 연기발생량의 비례 관계를 볼 때, 목재바닥재는 연소가 지속되는 시간동안 연기가 지속적으로 발생한 것으로 사료되며, 장판바닥재는 800초 정도에서 중량감소 변화가 없는 것을 볼 때, 연소가 종료되어 더 이상 연기가 발생하지 않은 것으로 사료된다. 또한, 마루바닥재 가운데 총 연기발생량이 상대적으로 많은 강화마루는 탄소함량에 따른 불완전 연소가 크게 작용한 것으로 사료된다. 따라서 이러한 연기발생은 화재 시 시야 확보를 어렵게 하여 진압 시 어려움을 초래할 수 있으며, 유독가스의 노출로부터 인명피해 등에 영향이 클 것으로 사료된다. 또한, 이러한 실내바닥재들은 화재 시 연기의 순환은 화재진행에 따라 대류현상에 의한 열 분해 가스의 흐름과 함께 실내의 천장에 도달한 후에, 차츰 위로 올라가는 열 기류에 의하여 위쪽으로부터 단계적인 층을 이루며 사방으로 확산하여 가다가 벽면에 도달하면 아래로 내려가고, 비로소 실내전체에 연기가 가득차게 된다. 이때 실내의 개구부가 열려 있으면, 그 개구부의 상부절반 정도의 영역에서 연기가 유출되면서 다른 구획으로 확산되어 간다. 화재실의 연기량은 내장재의 종류, 방의 환기요소, 실내 가연물의 공기와의 접촉 면적, 방의 용적 등에 의하여 결정됨에 따라 화재감식에 있어 데이터 확보가 중요하다(김태석, 2009).

Fig. 6. Total smoke release of interior flooring materials

Fig. 7. Peak extinction coefficient of interior flooring materials

Table 8. Extinction Coefficient and Visibility

Extinction Coefficient	Visibility (m)	Conditions
0.1	20~30	연기 감지기가 작동할 정도
0.3	5	건물내부에 익숙한 사람이 피난에 지장을 느낄 정도
0.5	3	어두침침한 것을 느낄 정도
1.0	1~2	거의 앞이 보이지 않을 정도
10	0.2~0.5	화재 최성기로 유도등이 보이지 않을 정도
30	-	출화실에서 연기가 분출될 때의 농도

2) 감쇠계수(Extinction coefficient, m^{-1})

Fig. 7에는 바닥재별 최대 감쇠계수(k)를 나타내었으며, Table 8에는 감쇠계수와 가시거리와의 관계를 나타내었다. 바닥재별 감쇠계수(k)를 살펴보면, 강화마루 $2.4 m^{-1}$, 합판마루 $2.7 m^{-1}$, 원목마루 $2.2 m^{-1}$, 페트장판 $0.8 m^{-1}$, 모노륨장판 $5.3 m^{-1}$ 정도로서 주거용 마루바닥재와 일반장판 바닥재의 감쇠계수는 $0.8 \sim 5.3 m^{-1}$ 범위인 것으로 나타났다.

3) 최대연기밀도 (Dm)

Fig. 8에는 바닥재의 연기밀도 곡선을 나타내었으며 Table 9에는 바닥재의 연기발생 측정 결과값들을 제시하였다. 결과를 살펴보면, 마루바닥재의 연기밀도는 대체로 높은 반면에 일반장판의 연기밀도는 낮은 경향을 보였다. 마루바닥재는 420초 이후에서 최대값이 나타났으며, 지속적인 연기발생에 기인하여 연기밀도가 지속되었고 일반장판의 최대연기밀도는 마루바닥재 보다 낮은 것으로 나타났다.

Fig. 8. Maximum specific optical density of interior flooring materials

Table 9. Characteristics of Smoke Release for Interior Flooring Materials(ISO 5660-2)

Samples	TSR (m^2/m^2)	peak Ext. Coefficient	Dm	
			Maximum	Time(s)
강화마루	258.5	2.4	509.29	422
합판마루	224.1	2.7	616.53	830
원목마루	202.0	2.2	662.37	1098
페트장판	162.1	0.8	241.10	461
모노륨장판	143.2	5.3	243.17	659

바닥재들의 최대연기밀도를 살펴보면, 강화마루는 422초에서 509.29 Dm, 합판마루는 830초에서 616.53 Dm, 원목마루는 1,098초에서 662.37 Dm, 페트장판은 461초에서 241.10 Dm, 모노륨장판은 659초에서 243.17 Dm인 것으로 나타났다.

4) 시간에 따른 연기밀도

주거용 바닥재의 시간에 따른 연기밀도를 알아보기 위해 Table 10에는 실험 경과시간 1.5분, 4분, 10분 시점에서의 연기밀도값을 제시하였으며, 초기연기밀도의 합산값인 VOF4의 결과값을 Fig. 9에 나타내었다. VOF4의 값은 초기에 발생한 연기밀도의 총 합계($D_{s(1.5)} + D_{s(4)} + D_{s(10)}/2$)로 특정 시간(1.5분, 4분, 10분)에 대한 연기밀도의 데이터 분석으로부터 화재 발생 시 초기의 연기발생 정도를 예측하고 평가하는 중요한 요소로 사용되고 있다. 여기에서 VOF4는 초기에 발생한 연기밀도의 총합계, $D_{s(1)}$ 은 재료가 복사열에 노출되면서 정적조건에서 1분 경과한 시간의 연기밀도, $D_{s(4)}$ 은 재료가 복사열에 노출되면서 정적조건에서 4분 경과한 시간의 연기밀도, $D_{s(10)}$ 은 재료가 복사열에 노출되면서 정적조건에서 10분 경과한 시간의 연기밀도를 말한다.

시간대별 연기밀도를 살펴보면, 1.5분 경과시점에서는 페트

Table 10. Characteristics of Smoke Release for Interior Flooring Materials(ISO 5659-2)

Samples	$D_{s(1.5)}$	$D_{s(4)}$	$D_{s(10)}$	VOF4
강화마루	5.98	195.33	456.58	164.47
합판마루	6.74	214.01	579.87	164.75
원목마루	5.39	199.69	573.15	161.05
페트장판	29.92	103.31	214.15	120.46
모노륨장판	6.91	59.61	239.68	51.51

Fig. 9. VOF4 of interior flooring materials

장판이 29.92 Ds로 가장 연기밀도가 높았으며 페트장판을 제외한 바닥재들은 5.39~6.91 Ds 정도의 연기밀도를 갖는 것으로 나타났다. 경과시점 4분에서는 합판마루의 연기밀도가 214.01 Ds로 가장 높게 나타났으며, 마루바닥재는 일반장판 바닥재보다 연기밀도가 비교적 높은 것으로 나타났다. 마루바닥재의 평균 연기밀도는 203.01 Ds, 일반장판 바닥재의 평균 연기밀도는 81.46 Ds 정도인 것으로 나타났다.

경과시점 10분에서의 연기밀도는 경과시점 4분에서의 연기밀도와 비슷한 경향을 보였으며, 합판마루의 연기밀도가 579.87 Ds로 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 마루바닥재의 평균 연기밀도는 536.53 Ds이고, 일반장판 바닥재의 평균 연기밀도는 226.93 Ds 정도인 것으로 나타났다.

VOF4값을 살펴보면, 강화마루 164.47 Ds, 합판마루 164.75 Ds, 원목마루 161.05 Ds, 페트장판 120.46 Ds, 모노립장판 51.51 Ds로서 161~165 Ds 정도의 VOF4값을 갖는 목질계열의 마루 바닥재와 큰 차이를 보이지 않았으며, 페트장판과 모노립장판 바닥재와는 다소 차이를 나타냈다. 페트장판은 모노립장판보다 2배 이상 높은 연기밀도 값을 나타내므로 화재 시 연소초기에 페트장판은 모노립장판보다 연기확산 속도가 상대적으로 빠르며, 목질계열의 마루바닥재는 일반장판 바닥재보다 2.37배 정도 빠르게 연기가 확산될 것으로 사료된다.

3.4.2 독성가스 배출농도 특성

Table 11에는 바닥재의 연소 시 배출되는 8가지 독성가스인 CO₂, CO, HCHO, HCl, CH₂CHCN, NO_x, C₆H₅OH, HBr에 대한 농도를 제시하였다. 주거용 바닥재에서 공통적으로 검출된 독성가스는 CO₂, CO, HCHO, CH₂CHCN, NO_x인 것으로 나타났으며, 바닥재별 검출된 독성가스 농도는 차이가 큰 것으로 나타났다. 강화마루와 원목마루는 HBr을 제외한 나머지 7가지 독성가스인 CO₂, CO, HCHO, HCl, CH₂CHCN, NO_x, C₆H₅OH가 모두 검출되었으며, 합판마루와 모노립장판은 8가지 독성가스들이 모두 검출되었다. 페트장판은 C₆H₅OH와 HBr을 제외한 6가지 독성가스인 CO₂, CO, HCHO, HCl, CH₂CHCN, NO_x가 검출되었다.

Fig. 10에는 바닥재별 연소생성가스 중 검출된 독성가스들의 배출농도를 나타내었으며, CO₂의 배출 농도는 강화마루 191,102 ppm, 합판마루 203,407 ppm, 원목마루 203,407 ppm, 페트장판 154,309 ppm, 모노립장판 210,421 ppm 정도 검출되는 것으로 나타남으로써 모든 바닥재에서 CO₂의 치사농도인 100,000 ppm이상 초과하는 것으로 나타났다. Fig. 11에는 CO의 배출 농도를 나타내었는데 CO 배출 농도는 강화마루

Fig. 10. CO₂ concentration of interior flooring materials

Fig. 11. CO concentration of interior flooring materials

495.4 ppm, 합판마루 842 ppm, 원목마루 631.3 ppm, 페트장판 1,263 ppm, 모노립장판 2,104 ppm 정도 검출된 것으로 나타남으로써 CO의 의식장애 농도인 1,000 ppm이상 검출된 바닥재는 페트장판과 모노립장판인 것으로 확인되었다.

이러한 CO의 발생 차이는 가연물의 산화정도에 의한 것으로 불완전연소는 공기 및 산소의 공급이 불충분하여 연소의 온도가 낮으며 가연성 가스가 완전히 산화되지 못하여 일산화탄소 등의 연소생성물이 발생된다. 불완전 연소가 일어나는 동안 연료의 10% 이상은 CO로 변환다(한국소방산업기술원, 2001).

HCHO 농도는 강화마루 56.6 ppm, 합판마루 7 ppm, 원목마루 14 ppm, 페트장판 35 ppm, 모노립장판 56 ppm이 검출되었다. HCHO 농도에 따른 인체 증상을 살펴보면, 0.25이하에서는 약한 자극이 있으며, 1.5~3.0은 중간자극, 10이상의 경우 강한자극으로 눈물흘림, 호흡곤란, 기침의 증상을 보이게 된다(이해평 등, 2008). 합판마루를 제외한 나머지 바닥재들은 10 ppm 이상의 농도가 검출되었으며, 강화마루와 모노립장판은 독성가스 노출에 따른 위험성이 높은 것으로 나타났다.

Table 11. Emission Concentration of Toxic Gases for Interior Flooring Materials

Samples	CO ₂ (ppm)	CO (ppm)	HCHO (ppm)	HCl (ppm)	CH ₂ CHCN (ppm)	NO _x (ppm)	C ₆ H ₅ OH (ppm)	HBr (ppm)
강화마루	191,102	495.4	56.6	14.2	21.2	247.7	35.4	-
합판마루	203,407	842	7	7	28	140	21	7
원목마루	203,407	631.3	14	7	35	197	7	-
페트장판	154,309	1,263	35	-	140	591	-	-
모노립장판	210,421	2,104	56	28.1	35	281	351	281

HCl 농도에 대해서 살펴보면, 페트장판에서는 검출되지 않았으며, 다른 바닥재들에서는 자극성이 없는 수준인 7~28.1 ppm 정도의 농도가 측정되었다. HCl은 75~100 ppm 이상일 경우, 눈과 상부기도에 대해서 강한 자극성을 나타내기 때문에 화재발생 시 피난활동을 방해하게 된다(이해평 등, 2008).

CH₂CHCN의 인간에 대한 자극성은 20 ppm 이상의 농도에서 나타나며, 400~700 ppm(포유류 30분)은 치명적 농도인 것으로 알려져 있다(이해평 등, 2008). CH₂CHCN은 모든 바닥재에서 자극성이 있는 수준의 농도가 검출되었으며, 페트장판의 검출농도는 가장 높은 것으로 나타났다.

NO_x의 검출농도는 강화마루 247.7 ppm, 합판마루 140 ppm, 원목마루 197 ppm, 페트장판 591 ppm, 모노륨장판 281 ppm 인 것으로 확인되었으며, 페트장판과 모노륨장판은 NO_x의 치사농도인 250 ppm이상 검출되었다. 질소를 함유하는 고분자 물질의 연소에서는 충분한 산소가 공급될지라도 낮은 농도이지만 NO₂ 등의 질소산화물이 생성되는데 그 생성량은 HCN에 비해서 적은 양이고, 화재 시 유독가스로서의 영향은 아직까지 밝혀진 것이 많지 않다(Hill T.A. et al., 1989).

C₆H₅OH는 50 ppm 이상의 농도에서는 인간에 대한 자극성이 있으며, 400~700 ppm(포유류 30분)에서는 치명적인 것으로 밝혀지고 있다. C₆H₅OH는 페트장판을 제외한 나머지 바닥재에서 모두 검출되었지만 모노륨장판은 351 ppm의 자극성이 있는 정도이고 나머지는 자극성이 없는 정도의 농도가 검출되었다.

HBr의 생명과 건강에 즉각적으로 위험한 수준의 농도는 50 ppm인 것으로 알려져 있으며, 5 ppm에 노출되면 인간의 비강과 인후에 자극을 일으킨다(이해평 등, 2008). HBr은 합판마루와 모노륨장판에서 검출되었으며, 합판마루는 비강과 인후를 자극시키는 정도였으며, 모노륨장판은 위험한 수준인 50 ppm을 넘는 281 ppm의 농도가 검출되었다.

Table 12에는 바닥재별 독성지수의 산출 결과값들을 제시하였다. 강화마루 3.4, 합판마루 3.0, 원목마루 3.2, 페트장판 4.5, 모노륨장판 7.8로 나타났는데 목질재료보다 페트장판과 모노륨장판이 상대적으로 높았으며, 모노륨장판은 독성지수가 7.8로서 가장 높게 나타났다. 따라서 모노륨장판은 화재발생 시 유독가스로 인한 인명피해 등의 위험성이 상대적으로 높은 것으로 사료된다. 연소가스 가운데 질식성 가스인 CO, HCN 이외에도 자극성을 갖는 할로젠화수소, SO₂, 저분자량의 지방족 알데히드류, 할로젠화시안 등은 특히 유독한 것으로 알려져 있다(Hill T.A. et al., 1972; Freitman R.D. et al., 1980). 밀폐된 공간에서의 화재는 대형 인명피해를 유발하며, 사망자와 부상자의 대부분은 화재현장에서 발생한 유독가스에 의한 손상과 연관된 것으로 알려져 있다(BSI DD 180). 이러한 독성가스의 자료 확보는 연소상황을 관찰하는데 중요하며, 연소의 강약, 연소진행방향 및 수열방향, 연소흔적 등을 관찰하는 대상이 될 수 있다.

화재감식은 실질적인 다양한 데이터를 활용하여 인명피해를 최대한 줄이는데 목적을 두고 있다. 이를 위해서는 연소의 확대방향성을 찾아내어 발화부위를 한정하고, 존재하고 있던 가연물들을 대상으로 발화원인을 검증하기 위한 연소메커

Table 12. Toxicity Index of the Interior Flooring Materials

Samples		Toxicity Index
강화마루	고밀도섬유 + 강화처리	3.4
합판마루	박판 + 나무무늬 압합	3.0
원목마루	원목(표면) + 합판	3.2
페트장판	비닐수지, 가소제 등	4.5
모노륨장판	PVC계열의 모노륨 등	7.8

니즘과 연소성상에 대한 전반적인 이해가 중요하다. 여러 가지 물질에 따라서 연소방법이 상이하듯이 이로 인한 피해 예측은 반드시 필요하다.

4. 결 론

화재감식은 화재발생 전 과정을 과학적으로 규명되어야 함에 따라 연소실험 수행으로부터 화재감식에 있어서 필수적인 착화특성, 발열량특성, 연소생성물특성 등의 다음과 같은 자료들을 얻을 수 있었다.

- 1) 착화특성을 살펴보면, 화재 시 페트장판과 모노륨장판은 마루계열의 바닥재보다 발염착화가 빠르게 진행될 것으로 사료되며, 대부분의 시편에서 최대 열방출율에 도달하는 시간은 착화시간과 비례하였는데 대부분 착화시간이 짧을수록 열방출율의 최대값도 빠른 시간에 나타났다. 이러한 결과는 화재조사 시 실제 화재 상황에서 바닥재가 얼마나 빨리 착화되는지를 평가할 수 있는 기초자료로 충분히 활용이 가능할 것으로 사료된다.
- 2) 발열량 특성을 살펴보면, 페트장판과 모노륨장판은 빠른 시간에 착화되어 연소 초기에 급격하게 열을 방출하지만 지속적이지 못하고 크기가 급격히 줄어들면서 총열방출량은 상대적으로 작았으며, 합판마루는 최대열방출율이 상대적으로 높고 다음으로 페트장판이 높았는데 원목마루, 모노륨장판, 강화마루는 비슷함을 알 수 있었다. 따라서 합판마루는 화재발생 시 발염착화는 늦게 진행되지만 발염착화 후 최대열방출율이 높기 때문에 화재크기는 상대적으로 클 것으로 사료된다.
- 3) 연기발생 특성으로서 마루바닥재는 페트장판과 모노륨장판에 비해 상대적으로 연기방출량이 많은 것으로 나타났으며, 최대연기밀도도 대체로 높기 때문에 대피 시 연기로 인해 거의 앞이 보이지 않아 상당한 어려움이 초래될 수 있을 정도이다. 따라서 오랜 시간 화재가 지속될 경우, 많은 연기발생으로 시야를 방해하여 피난대피에 어려움이 크고, 밀폐된 공간에서의 화재 발생 시 연기와 열의 축적 정도에 따라 인명대피 뿐만 아니라 소화 활동상 어려움이 크며, 패닉현상 등으로 인한 방어 행동을 취하는데 어려움이 클 것으로 사료된다.
- 4) 강화마루와 원목마루에서는 7가지 독성가스인 CO₂, CO, HCHO, HCl, CH₂CHCN, NO_x, C₆H₅OH가 검출되었으며, 합판마루와 모노륨장판은 이외에도 HBr이 추가적으로 검출되었고, 페트장판은 C₆H₅OH와 HBr을 제외한 6가지 독성가스만 검출되었다. 독성지수는 마루바닥재보

다 페트장판과 모노륨장판이 상대적으로 높은 것을 확인하였으며, 모노륨장판은 독성지수가 7.8로서 가장 높았기 때문에 화재발생시 유독가스로 인한 인명피해 등의 위험성이 가장 높을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교의 2011년도 교수 연구력 증진사업 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

건축법 (2010) 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙 : 5조~7조.
 김영탁 (2010) 자동차 내장재의 연소특성에 관한 연구, 강원대학교 석사학위논문, pp. 25-56.
 김인태 (2006) 국가 화재조사 자료 활용에 관한 연구, **한국화재소방학회논문지**, 제20권, 제4호, pp. 105-109.
 김태석, 김유식, 윤충국, 정영진 (2009) **화재조사길잡이**, 기문당, pp. 77-98.
 김현주 (2007) 건축 내장재의 연소특성 분석에 관한연구, 강원대학교 석사학위논문.
 소방방재청 (2009) 2009년 전국 화재발생 현황분석 결과.
 소방방재청 (2010) 2010년 9월 중 전국 화재발생 분석 결과.
 이성룡, 윤근환 (2009) 주택가연물의 연소특성에 관한 연구, **한국화재소방학회논문지**, 제23권, 제4호, pp. 25-31.
 이철규, 정우성, 이덕희 (2004) 콘칼로리미터를 이용한 내장판용 복합재료의 화재특성, **한국철도학회논문집**, 제7권, 제1호, pp. 55-59.
 이해평, 김영수, 김홍, 안형환, 하동명 (2008) **최신방화공학**, 동화기술, pp. 42-43.
 이형섭 (1988) 각국의 연소생성물 독성기준에 관한 고찰, 한국화재보험협회 방재시험연구원, **방재기술**, 제2호, pp. 31-39.
 조광현 (2009) 콘칼로리미터와 FT-IR을 이용한 실내장식물의 연소특성에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문, pp. 14-48.

진영화, 정태호 (2002) 건축용 바닥재 화재시험방법의 국제적 동향, 한국화재보험협회 방재시험연구원, **방재기술**, 제33호, pp. 18-20.
 차시환, (1998) **방화재료공학**, 대학서림, pp. 17-43.
 한국소방산업기술원 (2001) 방염제도에 관한 연구, **연구논문·기술자료집**, 제5권, 제2호, pp. 169-250.
 BSI DD 180, Draft for Development Guide for the assessment of toxic hazard in fire buildings and transport.
 Freitman, R.D., Burgess, W.A. and Gold, A. (1980) Air Contaminant Encountered by Firefighters, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, Vol. 41, pp. 796-802.
 Hill, T.A., Siedle, A.R. and Perry, R. (1972) Chemical Hazard of a Fire-Fighting Training Environment, *Am. Ind. Ind. Hyg. Assoc. J.*, Vol. 33, pp. 424-430.
 ISO 5659-2, "Plastics-Smoke generation - Part 2: Determination of optical density by a single chamber test"
 ISO 5660-1 (2002) Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1 : Heat release rate(cone calorimeter method).
 ISO 5660-2, Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 2 : Smoke production rate(dynamic measurement).
 KS F ISO 5660-2, 연소성능시험-열방출, 연기발생, 질량감소율-제2부 : 연기발생율(동적측정).
 KS M ISO 5659-2, "플라스틱-연기발생-제2부:단일 연소 체임버 시험에 의한 광학 밀도의 측정".
 NES 713, Determination of the Toxicity Index of the Products of Combustion from Small Specimens of Materials.
 NFPA 921, (2011) Guide for Fire & Explosion Investigations.
 Tsuchiya, Y., (1989) Relative Significance of NOX and HCN in Fire Gas Toxicity, In:T. Wakamatsu(Ed.), *Fire Safety Science Proceedings of the Second International Symposium*, Hemisphere Publishing Co., New York, pp. 381-390.

◎ 논문접수일 : 11년 06월 24일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 06월 28일
 ◎ 심사완료일 : 11년 10월 11일