[Research Paper]

흡음재의 연소 생성물이 인체에 미치는 영향에 대한 실험적 연구 및 법률 개정 제언

강정기 · 최돈묵^{*†}

대검찰청 법과학분석과 검찰수사관, ^{*}가천대학교 설비·소방공학과 교수

Experimental Study on the Effects of Combustion Products on the Human Body and Suggestion of Law Revision

Jung Ki Kang · Don Mook Choi^{*†}

Investigator, Forensic Science Division, Supreme Prosecutors' Office,

^{*}Professor, Dept. of Fire & Disaster Protection Engineering Graduate School, Gachon Univ.

(Received July 15, 2019; Revised July 29, 2019; Accepted July 30, 2019)

요 약

점화원이 무엇이든 화염의 확산과 인체에 영향을 미치는 직접적인 요소는 가연물이다. 음악학원, 노래방 등에서 사용하고 있는 마감재인 흡음재는 폴리우레탄으로 구성되며 연소 시 다량의 유독가스를 발생한다는 것은 알려진 사실이다. 그럼에도 현행법은 학원의 경우 수용인원 100명 미만의 경우 난연 마감재를 사용해야 한다는 강행규정이 없다. 본 연구에서는 실제 음악학원에 설치된 흡음재를 수거하여 실험실 연소실험을 통해 화염확산 속도를 측정하였으며, MultiRaelite 복합가스 측정기(타겟물질 VOC, HCHO, SO₂, CO₂, CO, HCN, NO₂)를 이용하여 유독가스를 측정하고 결과 Time weighted average (TWA)와 Short term exposure limit (STEL)의 허용농도를 초과하여 기기한계값이 측정되었다. 또한 시중에 판매중인 난연 흡음재와 비난연 흡음재를 비교 연소 실험한 결과, 착화 및 확산에 있어 현격한 차이를 보였다. 따라서 실험결과를 바탕으로 수용인원 100명 미만의 학원에도 난연 마감재 사용을 강제할 필요가 있음을 제언하고자 한다.

ABSTRACT

Regardless of the ignition source, the main factors affecting the spread of flames to the human body are combustibles. The sound absorption material, which is the finishing material used in music institutes and karaoke rooms, consists of polyurethane that generates a large amount of toxic gas with a high amount of combustion gases during a fire. Still, the current law does not require the use of impregnated finishing materials for tutoring services with less than 100 users. In this study, the rate of flame diffusion was measured using the MultiRaelite composite gas measuring instrument (target substance VOC, HCHO, SO₂, CO₂, CO, HCN, and NO₂) for the collection of sound-absorbing materials installed in the actual music academy. The results showed that the toxic gas found in this experiment exceeded the allowable concentration of TWA (Time Weighted Average) and STEL (Short Term Exposure Limit). In addition, a comparative combustion test of the general sound absorber and non-combustion sound absorbing materials on the market showed wide differences in ignition and diffusion. Therefore, based on the results of the experiment, private institutes with less than 100 users should be mandated to use non-combustion sound absorbing materials.

Keywords : Sound absorption material, Toxic gas, Combustion test, Legal revision, Fire investigation

1. 서 론

1.1 연구 배경

2008년 안산 오락실 화재, 2009년 부산 실내 사격장 화재

및 2016년 안산 실용음악학원 화재는 내부 소음을 차단하기 위해 사용된 흡음재의 급격한 연소와 함께 유독가스로 인해 인명피해를 초래하였다는 공통점을 지니고 있다^(1,2).

성인오락실 및 사격장의 경우 내부에서 많은 소음이 발

[†] Corresponding Author, E-Mail: fire@gachon.ac.kr. TEL: +82-31-750-5716, FAX: +82-31-750-8749

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

생되고 이 소음을 줄이기 위한 목적으로 흡음재를 다량 사용하고 있으며 소음이 밖으로 새어나가는 것을 방지할 목적으로 출입문 이외에 창문 등을 모두 밀폐시켜 개구부를 최소화하였다는 구조적인 공통점을 가지고 있다. 또한 내부에 사용된 흡음재는 폴리우레탄 재질의 스펀지 형이며 바닥을 제외한 벽체 및 천장 전체를 흡음재로 마감 처리된 구조이었다⁽³⁾. 이와 같은 밀폐구조와 흡음재의 사용은 방음이 필요한 음악학원에서조차 유사한 형태로 가설된다.

2016년 안산 실용음악학원도 이와 동일한 구조로 설치되었으며 흡음재에 장난삼아 라이터 불을 대자 급격히 화염이 확산되면서 다른 연습실에 수강생 2명이 유독가스 중독으로 사망하고 6명이 화상과 유독가스를 흡입하는 상해를 입었다. 화재 현장상황은 다른 화재에 비해 탄화정도가 약했고 빠른 시간 내에 소화되었음에도 이처럼 많은 인명피해가 난 것은 흡음재의 연소 특성과 음악학원의 구조적 특성에 기인한 것으로 보인다.

따라서 본 연구에서는 화재가 발생한 실용음악학원에서 소훼되지 않은 흡음재를 수거하여 실험실 크기의 연습실과 복도를 제작하였다. 벽면에 부착된 흡음재에 라이터로 착화하여 화염의 확산 속도를 측정하여 각 연습실로 구획된 음악학원에서 화재 발생 시 피난 가능성을 분석하고 유해가스 복합측정기를 이용하여 흡음재 연소 시 발생하는 유해가스 농도를 측정하였다. 또한 시중에 판매중인 일반 흡음재와 난연 처리된 흡음재를 착화 및 연소속도를 비교 분석하였다. 이러한 실험 결과에 따라 현행법에 규정된 난연 마감재 사용 범위의 사각지대인 수용인원 100명 미만의 학원에도 난연 마감재 사용을 강제할 필요가 있음을 제언하고자 한다.

1.2 선행연구

건축물 내부 마감재에 관한 기존 연구사례로 Song 등은 일반 스펀지형 흡음재와 난연 재질의 흡음재에 대한 연소 및 소화 특성에 관한 연구를 수행하였고⁽³⁾, Ahn 등은 건축물 내장재의 착화시간, 열방출률, 질량감소율 등에 대한 시험을 진행하였다⁽⁴⁾. 다중이용업소의 내장재 규정과 관련하여 Lee 등은 화재확산 및 연기 유독성을 기준으로 하는 재료등급 평가 및 시험방법의 개선을 제안하였으며⁽⁵⁾, Park

등은 다중이용업소를 중심으로 방화 및 방염제도의 효과적인 수립이 되도록 실내장식재 및 장식물품에 대한 세부규제안을 제시하였다⁽⁶⁾. 또한 Choi 등은 벽면 마감재로 많이 사용되는 벽지의 종류에 따른 연소특성 및 유해성에 대한 시험을 하였고⁽⁷⁾, Chun 등은 난연 성능이 없는 우레탄을 Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometer를 이용하여 연소가스를 정성, 정량 분석하였다⁽⁸⁾.

이처럼 건축물 마감재에 대한 연구가 활발히 진행되었고 제도의 개선을 제안하기도 하였으나 실제 화재 현장에서 흡음재가 연소하면서 발생하는 유독가스가 인체에 직접적으로 미치는 영향에 대한 연구가 없었다. 따라서 실제 음악학원에 가설된 흡음재와 실험 크기의 실험부스에서 실시된 본 연구는 음악학원에서 화재 발생 시 위험성을 시각적, 분석적으로 입증하기 위한 유의미한 실험으로 사료된다.

2. 실화재 연소 실험

2.1 화재 현장

Figure 1은 안산 실용음악학원 화재 현장의 모습이다. 드럼연습실에서 최초 발화되었으며 피의자는 발화지점에 장난삼아 라이터 불을 접촉하였음을 자백하였다. 발화된 연습실의 문은 피의자 등이 탈출하면서 문을 열어 두어 화염과 유독가스가 밖으로 분출되었고 드럼 연습실로부터 나온 화염은 홀의 천장으로 확산된 모습이 선명히 확인되었다. 최초 발화지점인 연습실의 흡음재는 모두 소훼된 상태였으며 최초 발화지점을 중심으로 주변으로 확산되었으나 문이 닫혀 있던 연습실은 내부가 온전히 보전되어 있어 신속한 화재진압이 있었음을 알 수 있었다. 사망자 2명은 출입문과 인접한 홀에서 발견되었다.

본 사건은 발화지점 및 발화원인에 대해서는 명확히 확인되었으나 연소시간이 짧고 빠른 시간 내에 화재가 진압되었음에도 2명의 사망자와 6명의 상해자가 발생한 원인에 대한 규명이 필요했다.

2.2 실험조건

Figure 2는 본 연구를 위해서 제작한 실험세트의 모습이다. 실험부스는 483 mm × 204 mm × 235 mm의 크기로 제

(a) Ignition point

(b) A door to the fire room

(c) A burnt image of a hall

Figure 1. Pictures of a fire scene.

(a) Booth (fire room)

(b) Fire room

(c) Hallway (hazardous gas meter)

Figure 2. Composition of experimental sets.

(a) Ignition

(b) 6 s

(c) 10 s

(d) 15 s

(e) 20 s

(f) 25 s

Figure 3. Combustion experiment of sound absorbing material (cam 1).

작하고 실험부스 내에 $183\text{ mm} \times 204\text{ mm} \times 235\text{ mm}$ 크기로 화재실을 구획하였다. 화재실은 화재현장에서 화염의 영향을 받지 않은 흡음재를 수거하여 착화면(출입구 좌측면), 천장, 착화 반대면에 부착하였다. 또한 흡음재 연소 시 발생하는 유해가스를 측정하기 위하여 부스 중간 지점에 마네킹을 세우고 약 130 cm 높이에 MultiRaelite 복합가스 측정기 2세트(타겟물질 VOC, HCHO, SO_2 , CO_2 , CO, HCN, NO_2)를 설치하였다. 화재실 바닥(cam 1)과 화재실 맞은편 약 1 m 높이 벽면(cam 2)에 각각 CCTV를 설치하여 화염 확산 속도와 유독가스 전파 속도를 측정하였다.

그리고 $82\text{ mm} \times 75\text{ mm} \times 225\text{ mm}$ 크기의 실험부스를 제작하고 시중에 판매중인 계란판 모양 비단연 흡음재와 난연 흡음재를 구입하여 라이터 불을 접촉하는 방법으로 착화 및 화염확산 정도를 비교·분석하였다.

2.3 결과 및 분석

Figure 3은 실험세트 내 화재실 벽면 흡음재에 라이터 불을 접촉하여 화염이 확산되는 실험 모습이다. 흡음재에 라이터 불을 접촉하고 약 6 s 후 화염은 약 1 m 높이의 천장까지 수직상승하였으며 착화 약 10 s 후 화염이 천장면을 타고 방사형으로 확산되었다. 약 15 s 후 화염이 복도로 분출되었으며 화염은 주변 흡음재를 연소시키면서 약 20 s 경과 후 천장에서 맞은편 하부 흡음재로 확산되었다. 착화 약 25 s 후 구획실 전체 화재로 변했고 천장에서 연소 소각물이 떨어졌으며 이후 하부에 일부 연소되지 않고 남은 흡음재가 있었으나 유해가스와 농연에 의해 화염을 식별하기 어려웠다.

실험결과 음악학원에서 수거한 흡음재는 착화 후 약 6 s 만에 천장까지 수직 상승하였고 약 25 s 만에 구획실 전체 화재로 확산되었고 방화자가 화재 발생 사실을 인지하고

Figure 4. Combustion experiment of sound absorbing material (cam 2).

Table 1. TWA, STEL Concentration of Hazardous Gas⁽⁹⁾

Measurement Item	Domestic (Unit ppm)	USA (Unit ppm)	The Result of an Experiment (Unit ppm)
HCHO	0.5 (TWA) 1 (STEL)	0.75 (TWA) 1 (STEL), [OSHA]	10 (Equipment Limit)
SO ₂	2 (TWA) 5 (STEL)	2 (TWA) 5 (STEL), [NIOSH]	20 (Equipment Limit)
CO ₂	5,000 (TWA) 30,000 (STEL)	5,000 (TWA) 30,000 (STEL), [NIOSH]	50,000 (Equipment Limit)
CO	25 (TWA) 200 (STEL)	35 (TWA), [NIOSH]	500 (Equipment Limit)
HCN	4.7 (STEL)	10 (TWA), [OSHA]	50 (Equipment Limit)
NO ₂	3 (TWA) 5 (STEL)	1 (STEL), [NIOSH]	3.6

소화할 시간도 없이 탈출 할 수 밖에 없었던 것으로 확인되었다.

Figure 4는 위 Figure 3과 동일한 실험으로 복도에 설치한 cam 2의 촬영 모습이다. 흡음재에 착화하고 약 15 s 후 출입구 상부를 통해 화염과 다량의 연기가 분출되었으며 약 25 s 후 마네킹 머리까지 연기가 내려왔다. 농연은 빠르게 확산되면서 약 32 s 후에는 cam 2 설치지점(바닥에서 약 1 m)까지 농연이 쌓여 이후 사물을 식별하기 어려웠다.

실험결과 드럼 연습실에서 발생한 흡음재 화재는 급격한 화염확산과 더불어 착화 약 32 s 후에 지상 1 m까지 농연이 내려오게 되어 구획되고 밀폐된 다른 연습실에서 있던 사람은 탈출과정에 쉽게 화염과 유독가스에 노출될 수 밖에 없는 상황임이 확인되었다.

Figure 5는 실험부스 복도 마네킹에 설치한 MultiRaelite

복합가스 측정기의 유해가스 측정 결과이다. 모든 타겟물질(VOC, HCHO, SO₂, CO₂, CO, HCN, NO₂)은 측정 시작과 동시에 수직상승하였다. 측정과 동시에 VOC는 500 ppm, HCN은 50 ppm, SO₂는 20 ppm, HCHO는 10 ppm, CO₂는 50,000 ppm, CO는 500 ppm 등 5종의 유독가스는 기기 한계값이 측정되었으며 CO₂ 외에는 강제 환기시킬 때까지 그 수치를 유지하였다. 기기 한계값을 넘지 않은 NO₂는 3.6 ppm까지 측정되었다.

Table 1은 VOC를 제외한 유해가스의 노출한계와 본 실험에서 측정한 유해가스의 농도를 나타낸 것이다. NO₂를 제외하고는 미국 기준보다 국내 기준이 더 낮아 국내가 미국보다 더 안전하게 기준을 잡고 있음을 알 수 있다. 본 실험에서는 기기 측정의 한계값으로 인해 정확한 농도는 측정할 수 없었다.

(a) Measurement results of SO₂, HCHO, NO₂, HCN (b) Measurement results of CO₂

(c) Measurement results of VOC, CO

Figure 5. Measurement results of hazardous gas.

그럼에도 본 실험에서 측정된 유해가스 농도는 HCN의 Short term exposure limit (STEL)이 4.7 ppm인데 50 ppm, SO₂는 STEL이 5 ppm인데 20 ppm, HCHO는 STEL이 1 ppm인데 10 ppm, CO₂는 STEL이 30,000 ppm인데 50,000 ppm, CO는 STEL이 200 ppm인데 500 ppm으로 측정되어 적게는 2배 많게는 10여 배의 농도가 측정되었다. NO₂의 경우에도 측정값은 3.6 ppm로 국내 Time weighted average (TWA)는 초과하였으나 STEL 5 ppm은 미달되었다. 하지만 미국의 STEL 기준인 1 ppm은 초과하였다. 이러한 유해가스 농도는 (기기 측정 한계값임에도 불구하고) 몇 번의 호흡으로도 치명상을 입힐 수 있는 수치로 음악학원 흡음재에 화재가 발생하였을 때 많은 인명피해가 발생하는 이유를 설명해 준다.

Figure 6 및 Figure 7은 시중에 판매중인 일반 흡음재와 난연 흡음재의 착화 및 화염확산 정도를 비교분석한 모습이다. 일반 흡음재는 착화 즉시 급격한 화염확산을 보이다가 약 30 s 후 구획실 전체 화재로 전이되었으며 약 1분 후 부스 내 흡음재를 전소한 후 자연소화 되었다. 반면 난연 흡음재는 2회에 걸쳐 약 10 s간 라이티 불을 접촉하였음에도 착화되지 않았으며 자연소화 되었다.

3. 제도적 문제점에 대한 제안

‘화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법

률’ 제2조 제1항 제3호에서는 소방시설을 설치하여야 하는 특정소방대상물에 대하여 대통령령으로 위임하고 있으며 동법 제12조 제1항은 ‘대통령령으로 정하는 특정소방대상물에 실내장식 등의 목적으로 설치 또는 부착하는 물품으로서 대통령령으로 정하는 물품(이하 ‘방염대상물품’이라 한다)은 방염성능기준 이상의 것으로 설치하여야 한다’라고 규정하고 있다. 또한 시행령 제19조 제4호에서 방염성능기준 이상의 실내장식물 등을 설치하여야 하는 특정소방대상물로 ‘다중이용업소의 안전관리에 관한 특별법’ 제2조 제1항 제1호의 규정을 정하고 있다.

‘다중이용업소의 안전관리에 관한 특별법’ 제2조 제1항 제1호는 ‘다중이용업이란 불특정 다수인이 이용하는 영업 중 화재 등 재난 발생 시 생명, 신체, 재산상의 피해가 발생할 우려가 높은 것으로서 대통령령으로 정하는 영업을 말한다’라고 하고, 제3호 ‘실내장식물이란 건축물 내부의 천장 또는 벽에 설치하는 것으로서 대통령령으로 정하는 것을 말한다’라고 하며 대통령령에 위임하고 있다.

동법 시행령 제2조 제3호에서 ‘학원의 설립, 운영 및 과외교습에 관한 법률’ 제2조 제1호에 따른 학원으로서 방염성능 기준 이상의 실내장식물 설치 기준으로 ‘수용인원 100명 이상 300명 미만으로’ 규정하고 있으며, 제3조 제4호에서는 ‘흡음이나 방음을 위하여 설치하는 흡음재 또는 방음재’를 포함하고 있다.

Figure 6. Combustion experiment of the general sound absorber.

Figure 7. Combustion experiment of the non-combustion sound absorber.

즉, 현행 법률에 따르면 수용인원 100명 미만의 영세 학원 및 교습소의 경우 흡음재 등 실내장식물에 대하여 방염 성능이 있는 것으로의 설치를 강제할 수 있는 방법이 없다. 음악학원은 각 연습실로 구획되어 있어 화재 발생 인지가 늦으며 흡음재 설치가 필수적이다. 그럼에도 방염성능기준 이상의 마감재를 사용해야 한다는 강행규정이 없어 영세 음악학원 등에서는 저렴한 일반 흡음재를 사용함으로써 인해 화재 발생 시 막대한 인명피해가 발생하게 된다.

본 연구의 실험 결과 등으로 보아 각 연습실로 구획되어 있고, 방음을 위해 흡음재 설치가 필수적인 음악학원 및 교습소는 수용인원과 무관하게 방염성능을 갖춘 실내장식물 사용을 강제할 수 있도록 법률의 개정이 시급하다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제 음악학원에 가설된 흡음재를 이용하여 실화재 실험을 진행하였다. 화재실 내부에 흡음재를 부착하고 복도를 구성하여 화재 발생 시 화염과 연기의 확산속도를 관찰하고 복합 가스 측정기를 이용하여 흡음재 연소 시 발생하는 유독가스를 측정하였다. 그리고 시중에 판매중인 일반 흡음재와 난연 흡음재를 비교 연소실험을 진행한 후 관련 법령을 검토하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 일반 흡음재를 가설하였을 경우 183 mm × 204

mm × 235 mm 크기의 화재실은 착화 약 25 s 만에 구획실 전체 화재로 확산됨을 확인하였다.

둘째, 화재실의 흡음재 연소 시 유독가스는 483 mm × 204 mm × 235 mm 크기의 복도를 채우고 지상 약 1 m까지 내려오는데 약 32 s가 소요되어 각 연습실이 구획되고 방음장치가 된 음악학원 등에서 실제 화재가 발생하였다면 피난이 어려울 것으로 판단된다.

셋째, 흡음재 연소 시 발생되는 유해가스의 농도는 HCN은 50 ppm (STEL 4.7 ppm), SO₂는 20 ppm (STEL 5 ppm), HCHO는 10 ppm (STEL 1 ppm), CO₂는 50,000 ppm (STEL 30,000 ppm), CO는 500 ppm (STEL 200 ppm)으로 기기측정 한계값까지 측정되었으며 측정값은 STEL 허용치의 적게는 2배 많게는 10여 배에 해당되는 농도이다.

넷째, 측정된 유해가스 농도(기기 측정 한계값으로 정확한 측정은 불가하나)는 몇 번의 호흡으로도 치명상을 입힐 수 있는 수치로 음악학원 흡음재에 화재가 발생하였을 때 많은 인명피해가 발생하는 원인이 될 수 있다.

다섯째, 82 mm × 75 mm × 225 mm 크기의 실험부스에 일반 흡음재를 부착하고 착화시 약 30 s 후 구획실 전체 화재로 전이되었으나 난연 흡음재는 10 s간 2회 라이터 불을 접촉하였음에도 착화되지 않았다.

실험 결과를 통하여 각 연습실로 구획되어 있고, 방음을 위해 흡음재 설치가 필수적인 음악학원 및 교습소는 위험성을 고려하여 수용인원을 기준으로 방염성능 실내장식물

설치를 규정한 현행 법률을 개정하여 모든 음악학원 등에 방염성능을 갖춘 마감재 사용을 강제할 수 있도록 법률의 개정이 시급하다고 판단된다.

References

1. S. H. Ahn, J. M. Min and D. J. Kim, "A Study on Combustion Characteristics and Risk of the Absorbing Material", Proceedings of 2016 Fall Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 157-158 (2018).
2. K. J. Kang and D. M. Choi, "An Experimental Study on the Effect of Sound-Absorber Combustion Product on Human Body", Proceedings of 2019 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 61-62 (2019).
3. J. Y. Song, S. H. Sa, J. W. Nam, J. P. Kim, J. T. Park and D. H. Lee, "A Study on Combustion Characteristic of Sponge Type Sound-absorbing Materials", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 20-27 (2011).
4. C. S. Ahn, E. J. Lee, H. Y. Kim, N. O. Cho and H. J. Shin, "Combustion Properties of the Room Interior Materials", Proceedings of 2005 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 248-254 (2005).
5. J. H. Lee, M. O. Yoon and W. H. Kim, "A Study on the Application of the Regulation of the Interior Materials in Entertainment Occupancy", Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 100-107 (2001).
6. H. J. Park and D. I. Kwak, "A Research on Legal Alternatives to Fire Performance Certificate and Tests for Interior Finish, Decorative Materials in Premises Used as Assemblies", Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 47-54 (2001).
7. Y. Y. Choi, S. E. Lee and K. H. Oh, "A Study on the Combustion Characteristics of Wall Decoration Papers", Proceedings of 2006 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 323-328 (2006).
8. J. H. Chun, J. C. Lee, J. B. Choi and N. W. Cho, "A Study on Assessment for Combustion Toxic Gas of Building Finish Materials by NFPA 269", Proceedings of 2011 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 340-344 (2011).
9. D. H. Han and S. Y. Lee, "Hazardous Gas Analysis During Fire Investigation(II)", National Fire Service Academy, p. 25 (2016).