한국환경보건학회지, 제46권 제5호(2020)
J Environ Health Sci. 2020; 46(5): 555-564

pISSN: 1738-4087 eISSN: 2233-8616
https://doi.org/10.5668/JEHS.2020.46.5.555

원 저 | Original articles

소방 실화재 훈련에서 사용하는 압축목재 가연물에서 발생하는 유해물질 특성

이용호 · 김진희 · 김의진 · 최원준 · 이완형 ·
강성규 · 이소연* · 함승헌†
가천대학교 의과대학, 가천대학교 길병원 직업환경의학과, *국립소방연구원 소방정책연구실

Characteristics of Hazardous Substances Generated from Combustible Compressed Wood Used during Live Fire Training for Firefighters

Yongho Lee, Jinhee Kim, Uijin Kim, Won-Jun Choi, Wanhyung Lee, Seong-Kyu Kang, So Yun Lee*, and Seunghon Ham†
Department of Occupational and Environmental Medicine, Gil Medical Center, Gachon University College of Medicine
**Fire Policy Research Division, National Fire Research Institute of Korea*

ABSTRACT

Objectives: To identify and investigate through qualitative and quantitative analysis the hazardous substances generated when compressed wood was burned at a live fire-training center.

Methods: Four types of compressed wood that are actually used in live fire training were burned in a chamber according to KS F2271. The gaseous material was sampled with a gas detector tube and conventional personal samplers.

Results: 1,3-butadiene, benzene, toluene, xylene, formaldehyde, hydrogen chloride, hydrogen cyanide, ammonia, carbon monoxide, and nitric acid were detected. In particular, 1,3-butadiene (497.04-680.44 ppm), benzene (97.79-125.02 ppm), formaldehyde (1.72-13.03 ppm), hydrogen chloride (4.71-15.66 ppm), hydrogen cyanide (3.64-8.57 ppm), and sulfuric acid (3.85-5.01 ppm) exceeded the Korean Occupational Exposure Limit as measured by sampling pump according to the type of compressed wood.

Conclusions: We found through the chamber testing that firefighters could be exposed to toxic substances during live fire training. Therefore, firefighter protection is needed and more research is required in the field.

Key words: Firefighter, live fire training, wood burning, hazard, substance

I. 서 론

소방관은 수많은 화재 현장을 마주하게 되고, 다양한 시나리오에 대처하기 위해 훈련을 수행하고 있다.[1] 이에 따라 소방관들은 다양한 유해인자에 반복적으로 노출이 되고 있으며, 미국의 경우 2001년부터 2014년까지 1,396명의 소방관이 사망하였고 이 중 11%에 해당하는 150명이 훈련과 관련된 것으로 보고되었다.[2] 훈련 중에서도 특히 실화재 훈련(Live Fire Training)은 현장에서 일어나는 상황에 대해 다양한 시나리오를 통하여 경험하고 대비할 수 있는 유일한 훈련방법으로 실화재 훈련을 통해서 학습한

†**Corresponding author:** Gachon University College of Medicine, 38-13, Dokjeom-ro 3beon-gil, Namdong-gu, Incheon 21565, Republic of Korea, Tel: +82-32-458-2634, E-mail: shham@gachon.ac.kr
Received: 28 September 2020, Revised: 19 October 2020, Accepted: 20 October 2020

소방관들의 대처능력은 국민들의 건강뿐만 아니라 자신들의 건강까지도 연결되어 있어 필수적인 훈련 과정이다.[2] 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 소방관이라는 직업에 대해 발암성을 평가했을 때 제한적인 근거를 가지는 정도인 Group 2B로 지정한 바 있다.[3] 과거 연구에 따르면 훈련장에서 높은 농도에 노출된 소방관들에서 전립선암, 피부암, 선암이 일반 연구집단에 비교해 높게 나타났다.[4]

우리나라에도 2015년부터 실화재 훈련을 시작하였고 2019년부터는 중앙소방학교에서 본격적으로 실화재 훈련장을 운영하고 있다. 실화재 훈련장에서는 다양한 화재상황을 모사하기 위하여 여러 가지 훈련을 실내외에서 수행하고 있다. 건물에 화재가 발생했을 때 외부에서 주수하여 진화하는 훈련이 있고, 실내에서 화재를 인위적으로 만들어 현상을 파악하거나 진압을 하는 훈련을 수행하기도 한다. 이때 화재를 인위적으로 만들기 위하여 가연물을 사용하는데 우리나라와 일부 국가에서는 압축목재를 사용하고 있다. 실화재 훈련 중에 소방관은 화학적 유해인자(입자상 물질, 가스상 물질), 물리적 유해인자(소음, 고열 등)에 노출되고 있으며 이에 대한 적절한 노출관리방법이 없다면 소방관의 건강에 유해한 영향을 준다.[5]

그럼에도 불구하고 국내의 실화재 훈련장에서 훈련 중 발생하는 유해인자의 종류와 유해성에 대해 연구는 훈련교관의 고열노출에 대한 예방방법에 대한 제안이 있었으나 발생하는 화학물질에 대한 특성이나 노출에 대한 연구는 제한적이다.[1] 특히 우리나라 실화재 훈련장에서 사용하는 압축목재를 연소하였을 때 발생하는 유해물질에 대한 연구는 없기 때문에 이에 대한 기초자료 확보가 필요하다. 실화재 훈련 중에는 공기호흡기(Self Contained Breathing Apparatus, SCBA)를 착용하지만 훈련장 외부로 누출되는 유해물질의 양도 적지 않아 훈련을 대기하는 훈련생들은 SCBA를 착용하지 않고 있어 이에 대한 노출평가를 위해서 발생원의 특성을 파악하는 것이 중요하다.

또한 소방관에 대한 노출평가 방법의 정립이 되어 있지 않아 연구를 할 때 일반사업장 환경에서 측정하는 방법을 사용하기 때문에 고온, 고농도의 환경인 소방활동 환경에서의 측정에 많은 제약이 따르기 때문에 소방활동 환경에서의 측정 방법의 정립에 필요한 기초자료 마련도 필요하다.

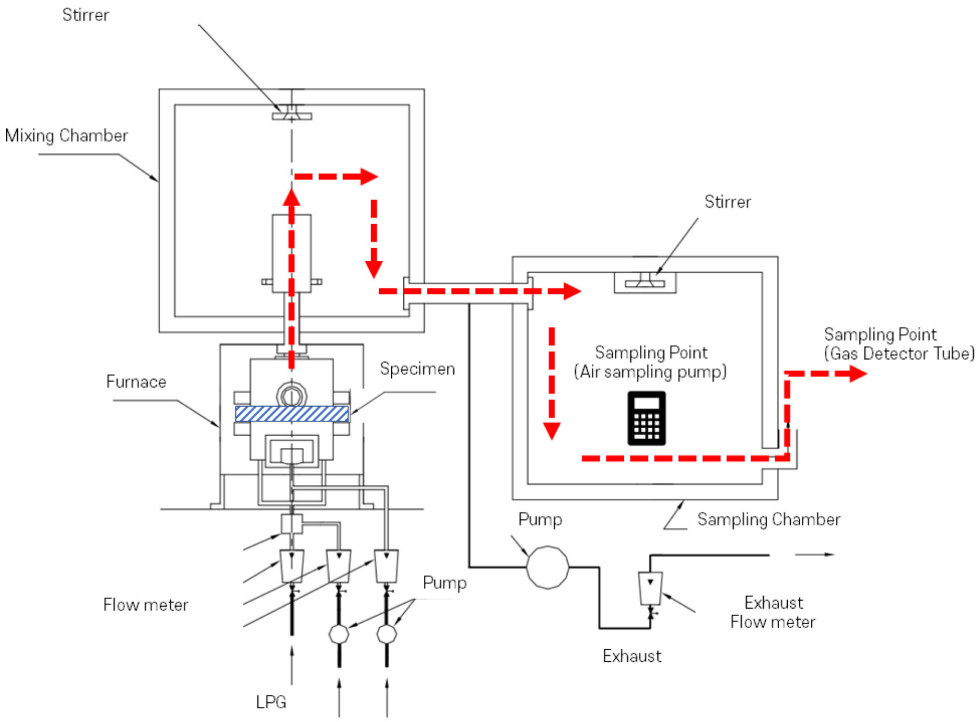
따라서 본 연구는 중앙소방학교 실화재 훈련장에서 훈련을 할 때 사용하는 압축목재들을 연소시켰을 때 발생하는 유해인자의 종류 및 농도 특성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험재료 및 시편 제작 방법

실험은 2020년 7월 15일 예비조사를 시작으로 8월 5일 본 실험을 인천에 위치한 화학시험연구원 건축마감재 시험장에서 실시하였다. 실화재 훈련장에서 훈련을 위해 연소하는 재료로서 4가지 종류의 압축목재(베니어 합판(Veneer), 파티클보드(Particle Board, PB), 중밀도 나무섬유 합판(Medium Density Fiberboard, MDF), 배향성 스트랜드 보드(Oriented Strand Board, OSB))를 교관의 경험에 따라 조합하여 사용하고 있다. 4종의 압축목재를 확보하여 KS F 2271 (건축물의 내장 재료 및 구조의 난연성 시험방법)에 따라 시편 제작을 하고 시편을 가열하여 가스를 발생시켰다. 가로 22 mm, 세로 22 mm 크기로 절단하였고, 시편은 실험 전 23°C±2°C, 습도 50%±5%로 항량하였다.[6] 표면에서 뒷면으로 관통하는 25 mm의 구멍 3개 뚫어 시편의 크기를 표준화하였다(Fig. 1(a)). 실험장비는 연소부에서 압축목재를 연소하고 혼합부를 거쳐 체적이 0.125 m^3인 채취부 챔버(가로, 세로, 높이 각 0.5 m)에서 공기중 시료를 채취하였다. 혼합부 챔버와 채취부 챔버에는 가스교반장치(100 rpm)가 있어 가스농도가 평형을 이루도록 하였다. 배출부는 국소배기장치가 설치되어 있어 실험 중에 발생하는 유해가스는 모두 외부로 배출되었다 (Fig. 1 (b) and (c)). 실험조건은 실화재 훈련과 유사하게 조건을 조성하기 위하여 일부 변경하여 차용하였다. 가열 시험은 시험체의 열을 받는 면의 크기를 가로, 세로 각각 180 mm로 하고, 처음에는 부열원(LPG 300 mL/min)으로 3분간 가열한 후 다시 주열원으로 3분간 가열하여야 하였다(Table 1). 공기는 가열 중에 한하여 공급하며, 그 공급량은 가열로의 1차 공급 장치에 의해 매분 3.0 L, 2차 공급 장치에 의해 매분 25.0 L로 하였다. 가열 시간 6분 동안 채취부 챔버의 배기구는 개방하였고, 가열 후

(a) (b)



(c)

Fig. 1. Experimental (a) specimens for combustion, (b) test equipment, and (c) schematic diagram of experimental chamber

Table 1. Experimental condition for combustion

Heat source	Heating condition
Main heat source	Halogen-3 min Heater Watt: 937 W
Secondary heat source	LP Gas-3 min. LP Gas flow rate: 300 mL/min Air flow rate: 3.5 l/min

에는 채취부 챔버의 가스가 배출되지 않도록 배기를 차단하였다. 실험 전후의 압축목재의 무게를 측정하여 연소 전후의 변화를 측정하였다. 실험은 압축목재의 종류에 따라 1회 실시하였다.

2. 공기중 시료채취 및 분석방법

소방활동 환경과 같이 고온, 고농도, 다습한 조건에서 공기중 시료채취를 하는 방법은 표준화되어 있지 않다. 따라서 다양한 방법을 이용하여 시도 하였다.

공기중 시료채취는 채취부에 측정장비를 넣어 채취하였다. 공기중 시료채취는 2가지 방법을 이용하였다. 검지관, 개인시료채취기를 동시에 사용하였다(Table 2). 소방환경 특성상 측정방법이 없고, 발생물질과 양을 추정하기 어렵기 때문에 검지관을 사용한 이유는 정성분석이 주 목적이었으며, 측정이 가능한 범위의 농도라면 눈금을 읽어 정량 분석을 하였다. 개인시료채취기는 근로자의 노출을 평가하는 가장 보편적인 방법으로 이번 연구에서는 지역시료채취 개념으로 측정을 하였다.

검지관 측정은 기체채취기(GV-100, Gastec, Japan)를 사용하여 각 물질에 따라 채취 부피에 맞추어 측정을 실시하였다. 채취를 할 때 공기의 온도를 낮추기 위하여 냉각장치(Hot probe, No. 340, Gastec, Japan)를 이용하여 정상온도로 측정하도록 하였다. 채취는 배출구에 튜브를 연결하여 측정하였다(Fig. 1(c)). 검지관 특성상 정성평가를 우선의 목적으로 실시하였고, 현장에서 눈금을 읽고 모호한 눈금의 경우에는 제조사로 사진을 전달하여 값을 판독하였다.

개인시료채취기(LFS-113, Gilian, USA)를 이용하여 공기중에 있는 가스상물질을 포집하였다. 측정 분석방법은 안전보건공단 KOSHA METHOD를 사용하였다. 1,3-부타디엔은 TBC (Tert-Butylcatechol)가 코팅된 활성탄관(100/50 mg, 226-73, SKC Inc., USA)을 이용하여 0.03 L/min의 유량으로, 벤젠, 톨루엔, 자일렌은 활성탄관(100/50 mg, 226-01, SKC Inc., USA)을 이용하여 0.03 L/min의 유량으로 포집한 후 Gas chromatograph-Flame Ionization Detector (Agilent 6890N, Agilent, USA)를 이용하여 분석하였다. 포름알데히드는 2,4-dinitrophenylhydrazine가 코팅된 고순도 실리카겔관(300/150 mg, 226-119, SKC Inc., USA)를 이용하여 0.5 L/min의 유량으로 채취한 후 High-performance liquid chromatography (Alliance 2695, Waters, USA)를 이용하여 분석하였다. 시안화수소는 소다라임관(600/200 mg, 226-28, SKC Inc., USA)으로 0.05 L/min의 유량으로 포집한 후 UV-Vis Spectrophotometer, (UV mini-1240, Shimazu, Japan)로 분석하였고, 산류는 활성화된 실리카겔관(400/200 mg, ORBO 53, SUPELCO, USA)을 이용하여 0.2 L/min의 유량으로 포집하고 Ion Chromatography (DX-1000, Dionex, USA)로 분석하였다(Table 3).

Table 2. Description of sampling method by substances

Substances	Detector tube	Sampling pump
1,3-butadiene	O	O
Benzene	O	O
Toluene	O	O
Xylene	O	O
Formaldehyde	O	O
Hydrogen Chloride	O	O
Hydrogen Cyanide	O	O
Hydrogen Fluoride	O	
Hydrogen Sulfide	O	
Hydrogen Bromide		O
Ammonia	O	
Methanol	O	
Nitric acid	O	O
Sulfuric acid		O
Carbon Monoxide	O	
Chlorine	O	

분석결과 농도가 높아 대부분 파과되었으며, 결과해석을 할 때 주의를 해야 한다. 일반적으로 파과가 되었을 경우에 저유량, 단시간 측정 전략으로 변경하여 다시 채취를 하지만 소방활동 환경의 경우에는 한번 실험을 시작하면 장비를 외부로 꺼낼 수 없고 부득이하게 파과가 될 수밖에 없기 때문에 파과가 된 상황이었음에도 불구하고 소방활동 환경 측정의

Table 3. Description of sampling method by substances

Substances	Sampling Media	Analytical Instrument
1,3-butadiene	TBC* Coated Charcoal tube	
Benzene Toluene Xylene	Solvent tube	Gas chromatograph-Flame Ionization Detector (Agilent 6890N, Agilent, USA)
Formaldehyde	2,4-Dinitrophenylhydrazine coated Silica gel tube	High-performance liquid chromatography (Alliance2695, Waters, USA)
Hydrogen Cyanide	Soda Lime tube	UV-Vis Spectrophotometer, (UV mini-1240, Shimazu, Japan)
Hydrogen Chloride Hydrogen Bromide Nitric acid Sulfuric acid	Activated Silica Gel Tube	Ion Chromatography (DX-1000, Dionex, USA)

*t-butylcatechol

기초자료를 마련하기 위하여 진행하였다.

챔버 안에서의 실험이기 때문에 농도가 반드시 소방관의 노출 농도와 같지 않고 실제 환경에서는 SCBA를 착용하기 때문에 절대적인 농도의 비교는 어렵지만 고용노동부의 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준의 시간가중평균노출(TWA), 단시간노출기준(STEL), 최고노출기준(C) 중 설정되어 있는 기준을 이용하여 실시하였다.

III. 결 과

1. 일반적인 연소특성

시험에 사용된 가연물의 두께, 무게 및 밀도는 Table 4와 같다. 실험 전후의 시편은 Fig. 2와 같다. 연소 실험 후 무게의 변화율은 베니어 합판(Veneer)이 74.28%로 감소하였고, 파티클보드(Particle Board, PB)는 79.16%, 중밀도 나무섬유 합판(Medium Density Fiberboard, MDF)는 77.16%, 배향성 스트랜드보드(Oriented Strand Board, OSB)는 77.39% 로 감소하였다.

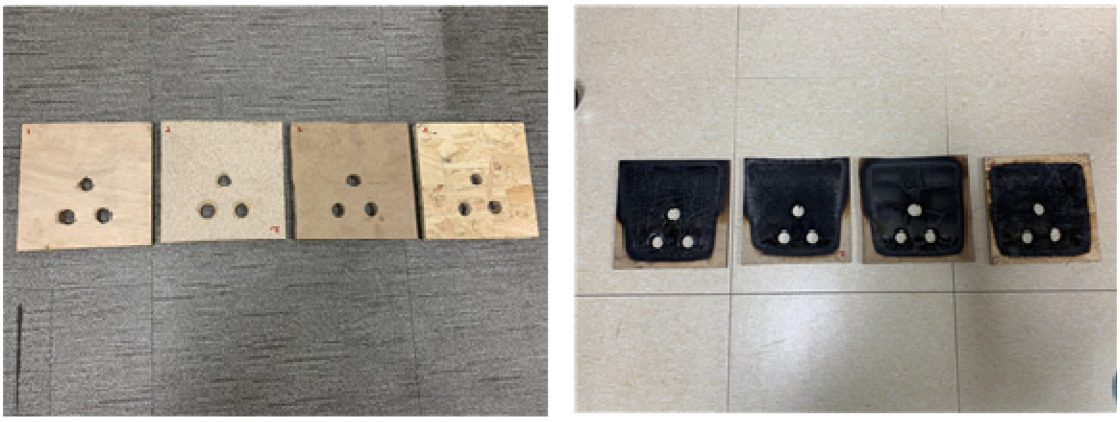
2. 검지관 측정 결과

검지관 측정결과 모든 압축목재에서 1,3-부타디엔은 검출가능한 농도의 범위(Measuring available range)가 0 ppm에서 800 ppm까지이고 최소 검출 농도(Minimum Detecting Limit)가 0.05 ppm인데, 800 ppm 이상이 검출되었고, 벤젠은 10 ppm 이상, 톨루엔은 250 ppm 이상이 검출되었다. 자일렌의 경우 100 ppm 이상이 검출되었고, 포름알데히드는 베니어 합판의 경우 3,200 ppm, PB는 1,000 ppm, MDF는 1,500 ppm, OSB는 1,300 ppm이 검출되었다. 염산의 경우 모든 압축목재에서 2 ppm이 검출되어 노출기준을 초과하였다(Table 5).

급성중독물질인 시안화수소의 경우 최고노출기준(C) 4.7 ppm을 넘지 않도록 되어 있는데 모든 압축목재에서 110 ppm 이상 검출되었다. 메탄올의 경우

Table 4. Characteristics of compressed wood specimens for experiment

Category	Veneer	PB (Particle Board)	MDF (Medium Density Fiberboard)	OSB (Oriented Strand Board)
Pre-weight (g)	405.52	500.24	369.97	472.58
Post-weight (g)	301.23	395.98	285.46	365.71
Weight reduction rate (%)	74.28	79.16	77.16	77.39
Thickness (mm)	16.05	16.45	15.00	15.29
Density (kg/m^3)	522.02	628.30	509.60	638.59



(a) (b)

Fig. 2. Specimen of compressed woods for live fire training (a) before and (b) after burning

1,000 ppm에서 3,000 ppm이 검출되었다. 급성중독뿐 아니라 생식독성 물질인 일산화탄소의 경우 11,000 ppm 이상이 검출되었다. 불화수소, 황화수소, 질산의 경우 검출되지 않았다.

3. 개인시료채취기 측정 결과

개인시료채취기 측정 결과 1,3-부타디엔은 베니어 합판에서 479.04 ppm, 파티클보드에서 1,034.99 ppm, MDF에서 771.23 ppm, 그리고 OSB에서 680.44 ppm이 검출되었다. 벤젠은 베니어 합판에서 97.79 ppm, 파티클보드에서 163.47 ppm. MDF에서 100.86 ppm, 그리고 OSB에서 125.02 ppm이 검출되었다. 포름알데히드는 베니어 합판의 경우 3.10 ppm, PB는 6.01 ppm, MDF는 1.72 ppm, OSB는 13.03 ppm이 검출

Table 5. Concentration profile measured by gas detector tube (unit: ppm)

Substances	OEL [ppm] (TWA/ STEL/C)	Notation	Veneer	PB	MDF	OSB	Measuring available range (ppm)	Minimum Detecting Limit (ppm)
1,3-butadiene	2/10/-	C* 1A	**>800**	**>800**	**>800**	**>800**	50-800	10
Benzene	0.5/2.5/-	C 1A	**>10**	**>10**	**>10**	**>10**	0.1-10	0.05
Toluene	50/150/-	C 2	**250**	**>300**	**>300**	**>300**	(10)-300	1
Xylene	100/150/-	-	**>100**	**>100**	**>100**	**>100**	2-100	1
Formaldehyde	0.3/-/-	C 1A	**3,200**	**1,000**	**1,500**	**1,300**	20-2,000	4
Hydrogen Chloride	1/2/-	-	**2**	**2**	**2**	**2**	1-20	0.05
Hydrogen Cyanide	-/-/4.7	Skin	**350**	**250**	**200**	**110**	50-800	1
Hydrogen Fluoride	0.5/-/3	Skin	N.D.‡	N.D.	N.D.	N.D.	0.5-20	0.1
Hydrogen Sulfide	10/15/-	-	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.5-60	0.1
Ammonia	25/35/-	-	**80**	**50**	**50**	**75**	50-500	2
Methanol	200/250/-	Skin	**2,000**	**2,000**	**1,000**	**3,000**	200-15,000	4
Carbon Monoxide	30/200/-	R† 1A	**17,000**	**11,000**	**15,000**	**12,000**	1,000-20,000	100
Nitric acid	2/4/-	-	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1-20	0.05

*Carcinogen
†Reproductive
‡N.D.=Non-Detected

Table 6. Concentration profile measured by conventional sampling pump (unit: ppm)

Substances	OEL [ppm] (TWA/STEL/C)	Notation	Veneer	PB	MDF	OSB
1,3-butadiene	2/10/-	C* 1A	**497.04**	**1,034.99**	**771.23**	**680.44**
Benzene	0.5/2.5/-	C 1A	**97.79**	**163.47**	**100.86**	**125.02**
Toluene	50/150/-	C 2	17.71	34.07	22.07	25.72
Xylene	100/150/-	-	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Formaldehyde	0.3/-/-	C 1A	**3.10**	**6.01**	**1.72**	**13.03**
Hydrogen Chloride	1/2/-	-	**4.71**	**13.18**	**15.66**	**12.49**
Hydrogen Cyanide	-/-/4.7	Skin	3.64	**7.01**	**5.45**	**8.57**
Hydrogen Fluoride	0.5/-/3	Skin	**0.90**	**2.08**	**3.07**	**3.34**
Hydrogen bromide	-/-/2	-	0.28	0.19	0.57	0.47
Sulfuric acid	0.2/0.6/-	C 1A (mist)	**3.85**	**4.33**	**5.01**	**4.55**
Nitric acid	2/4/-	-	0.80	1.28	1.22	0.67

*Carcinogen
†N.D.=Non-Detected

되었다. 염산의 경우 모든 압축목재에서 단시간노출기준이 초과된 2 ppm 이상이 검출되었다. 급성중독물질인 시안화수소의 경우 최고노출기준(C) 4.7 ppm을 넘지 않도록 되어 있는데 베니어 합판을 제외한 모든 압축목재에서 노출기준 이상이 검출되었다. 불산의 경우 베니어 합판과 PB에서는 시간가중평균노출(TWA)은 초과했지만 최고노출기준을 초과하지는 않았고, MDF와 OSB에서는 최고노출기준을 초과하였다. 황산의 경우에는 모든 압축목재에서 모든 노출기준을 초과하였다(Table 6).

IV. 고 찰

중앙소방학교 실화재 훈련장에서 압축목재들을 연소시켰을 때 발생하는 유해인자에 대한 정성 및 정량 분석을 하여 연소물의 특성 평가를 하였다. 다양한 가스상 물질이 발생하였고, 특히 발암성, 생식독성, 급성, 만성 중독을 일으키는 물질들이 검출 되어 훈련교관과 훈련생들의 안전하고 건강한 훈련환경의 조성이 필요하다는 것을 알 수 있었고 실화재 훈련장 환경 개선을 위한 기초자료를 얻었다.

1. 정성분석 결과

정성분석 결과 검지관과 개인시료채취기에서 1,3-부타디엔, 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 포름알데히드, 염화수소, 시안화수소, 암모니아, 메탄올, 일산화탄소, 질산이 검출되었다(Table 5 and 6).

특히 공통적으로 발암성 1A 물질인 1,3-부타디엔과 벤젠, 포름알데히드가 검출되었다. 급성 독성 물질인 시안화수소, 일산화탄소(검지관)도 검출되어 실화재 훈련을 할 때 발생하는 가스상 물질의 노출을 저감할 필요가 있다.

실제 중앙소방학교 실화재 훈련장 내부에서 훈련을 받는 훈련생의 경우에는 SCBA를 착용하고 있지만 외부에서 다음 차례를 기다리는 훈련생들은 SCBA를 착용하고 있지 않고 있다. 이때 외부로 가스상 물질이 빠져나오게 되는데 외부에 있는 훈련생들이 노출되지 않도록 방안을 마련하는 것이 필요하다.

미국 NFPA 자료에 따르면 미국에서는 실화재 훈련을 할 때 연소용 가연물로 압축목재, 고무, 플라스틱, 폴리우레탄폼, 타르종이, 카페트, 화학물질, 농약처리된 짚의 사용을 금지하고 있다.[5] 하지만 우리나라에서는 저렴하고 구하기 쉽고 현장과 비슷한 상황을 모사하기 좋다는 이유로 압축목재를 사용하고 있다. 압축목재는 주로 목재와 화학물질인 접착제를 혼합 및 도포하여 만든다. 이렇게 만든 압축목재가 고온에 노출되면 연소되고 나무조직과 접착제가 연소되고 접착제는 타면서 다양한 가스가 발생된다.[7]

Kirk (2019)의 연구에 따르면 소방관이 실화재 훈련에 PB를 연소시켜 훈련을 할 때 개인시료를 채취한 결과에서도 벤젠, 포름알데히드, 톨루엔, 시안화수소 등 다양한 가스상 물질이 검출되었다. 측정 시

기에 따라 검출된 때도 그렇지 않을 때도 있었지만 이는 소방활동 환경상 발생할 수 있는 오차라고 판단된다.[1)]

검지관 측정 방법과 개인시료채취기 방법에 따른 차이가 있었다. 불화수소와 질산의 경우 검지관에서는 검출되지 않았지만 개인시료채취기에서는 검출이 되었다. 산업위생 분야에서 검지관은 주로 예비조사를 하거나 다른 측정방법이 없는 경우, 단일물질인 경우에 공기 중 유해물질을 측정하는데 활용하고 있다. 노출기준을 초과할 때에는 검지관을 사용하는 것을 금지하고 있다.[8)] 그럼에도 실화재 훈련 중과 같은 소방환경에서는 기존의 작업환경측정방법을 사용할 경우 시료 및 개인시료채취기가 고열에 견디기 어렵기 때문에 냉각장치를 사용하여 검지관을 이용한 측정도 고려할 필요가 있다. 따라서 환경에 따라서 상호보완적인 방법의 사용이 필요하고 향후 소방활동 환경에서의 두 가지 방법의 상관성 연구가 필요하다.

2. 정량분석 결과

실화재 훈련을 하는 동안 실화재 훈련장 내부에서는 SCBA를 착용하기 때문에 정량분석이 된 농도가 소방관에게 실제 노출되는 양은 아니다. 그럼에도 검지관 측정 결과와 개인시료채취기 측정결과 1,3-부타디엔, 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 포름알데히드, 염화수소, 시안화수소, 암모니아, 메탄올, 일산화탄소가 노출기준을 초과하였다(Table 5 and 6).

실화재 훈련장에서 사용하는 가연물을 연소시킬 때 발생하는 1,3-부타디엔에 노출되면 백혈병에 걸릴 확률이 높아지고,[9-10)] 벤젠에 노출되면 백혈병에 걸릴 확률이 높아진다.[11,12)] 특히 포름알데히드가 액체 또는 증기로 존재할 때 1 ppm이 넘을 경우 피부에 감작을 일으킨다고 알려져 있다.[13)] 포름알데히드는 소방환경 뿐 아니라 상대적으로 저농도에 노출되는 일반환경인 실내환경에서 흡입하였을 때 발암 위해도는 소아는 약 만 명당 7.5명, 성인은 약 만 명당 4.1명으로 나타났다.[14)] 시안화수소는 800 ppm 이상인 경우 피부에 흡수가 된다고 알려져 있다.[15)]

시안화수소는 베니어 합판을 제외하고 모든 압축목재에서 노출기준을 초과하였고, 직업적으로는 도금업에서 일하던 근로자가 고농도의 시안화수소로 추정되는 물질에 노출되어 사망하는 사고도 있었다.[16)] 일산화탄소는 노출기준을 초과하여 생식독성 및 질식제로 건강상 영향을 줄 수 있다.

브롬화수소는 개인시료채취기에서 측정을 하였는데 노출기준을 초과하지는 않았다. 황화수소는 검지관에서 측정을 하였지만 검출되지 않았다. 과거 MDF를 연소시켜 특성을 파악한 연구에서도 황화수소는 검출되지 않거나 미량 검출된 바 있다.[17)]

그러나 개인시료채취기를 이용하여 정량분석한 결과 시료가 모두 파과가 되어 정확한 정량분석을 하지 못했다는 제한점이 있다. 소방활동 환경에 특화된 측정 방법이 없기 때문에 일반적으로 작업환경측정을 할 때 사용하는 측정방법을 사용하였고 노출기준을 준용하였다. 유사한 연구에서도 소방환경에 특화된 노출기준이 없기 때문에 일반 사업장에서 사용하는 노출기준을 사용하여 정량분석 결과를 비교하였다.[18)] 그럼에도 불구하고 정성분석 결과가 실화재 훈련을 할 때 발생하는 유해물질에 대한 기초자료로 의미가 있고 더불어 정량분석 결과가 향후 연구에서는 더욱 견고하게 소방활동 측정에 맞는 방법이 개발될 필요가 있다.

3. 개인보호구

소방관은 일반적으로 소방활동을 할 때 호흡보호구로 SCBA를 착용한다. 실화재 훈련 중에 다양한 유해물질이 발생하는 것을 확인하였기 때문에 훈련 중에 사용하는 SCBA를 제대로 착용하는 것이 중요하고, Fit-test를 통하여 올바르게 착용하는 것이 필요하다. 특히 SCBA의 경우 마스크의 누설률 뿐 아니라 내압을 측정하여 항상 양압이 유지되는지 확인이 필요하다. 미국에서는 다양한 형태의 면체와 크기를 제공하여 잘 맞는 것을 선택하도록 하고 있다. 또한 SCBA를 사용하기 전에 이에 대한 적합성시험(Fit-test)을 실시하도록 하고 있다. 만약 잘 맞지 않는다면 다른 면체나 크기의 SCBA로 다시 시험을 해봐야 한다. 최소한 1년에 한번은 이를 수행하여야 하며, 안면에 흉터가 생겼거나 치아의 변화 성형수술 등의 변화가 있었을 때에는 추가로 적합성시험을 실시해야 한다.[17)] 그러나 우리나라 소방관에게 지급된 SCBA는 한 가지 크기로 제공되고 있다. 게다가 정성, 정량 fit-test를 전혀 수행하고 있지 않기 때문에 SCBA에 의존해야 하는 소방관들에게 제대로 된 호흡보호구를 제대로 보급할 필요가 있다. 또한 시

안화수소, 불화수소, 메탄올과 같은 피부흡수가 가능한 물질들의 경우 보호복이 중요한 역할을 할 수 있다. 미국에서는 실화재 훈련을 할 때 필수 보호구로 방화복, 속옷, 레깅스, 무릎보호대, 헬멧, 공기호흡기, 방수장갑, 불연후드, 장화, 양말, 식별가능한 옷을 지급하도록 하고 있다.[5] 실제 실화재 훈련을 할 때에도 개인보호구를 착용한다. 개인보호구를 착용하고 실화재 훈련에 참여하게 되면 체온이 높아진다.[19] 소방관들의 개인보호구도 특수하게 개발이 필요한 이유는 기후에 영향을 크게 받기 때문이다. 특히 우리나라의 여름의 경우 체온보다 높은 날씨가 많기 때문에 발열이 잘 이루어지지 않아 체온이 급격히 상승하기 때문에 개인보호구에 대한 연구도 필요하다.

이번 연구의 제한점은 첫째, 고열이라는 특수한 소방환경 특성상 수차례 반복측정을 하지 못하였다. 따라서 모든 실화재 훈련장에서 사용하는 압축목재의 연소 특성과 상황을 대표하기는 어렵다. 그럼에도 불구하고 실화재 훈련장에서 실제 사용되는 가연물인 압축목재 4종에 대하여 연소 특성을 파악하는 기초자료로 활용이 가능하다. 이번 연구에서 밝혀진 실화재 훈련장에서의 정성 및 정량평가 결과가 소방환경 측정연구의 필요성을 다시 한번 강조 할 수 있게 되었고, 향후 연구에서는 반복측정을 통한 정밀도와 정확도 확보 및 다양한 가연물에 따른 화학물질 발생과 노출에 대한 연구가 지속되어야 한다. 그래야 소방관의 직무노출매트릭스(Job-Exposure Matrix)에 따라 표준화된 노출값을 정확하게 추정할 때 필요한 노출평가 자료가 확보될 수 있기 때문이다. 소방관의 직무에 따라 노출되는 정성, 정량적 유해물질의 연구가 필요하고 해당 직무는 행정직 대원, 구급 대원, 구조 대원, 화재진압 대원으로 나누어 수행해야 한다.[20]

둘째, 소방환경에 특화된 측정방법의 부재로 일반 사업장 환경에서의 측정방법을 사용했다는 점이다. 향후에는 다양한 유해물질에 노출되는 소방관들의 정확한 노출평가를 위하여 소방에 특화된 측정방법의 개발이 필요하다.

셋째, 실험실 내의 챔버에서 제한된 환경을 모사하여 실험을 하였지만 실제 실내에서 이루어지는 실화재 훈련에서 발생하는 물질의 종류는 유사할 것으로 판단된다. 하지만 체적과 발생 양상이 다를 수 있기 때문에 정확한 파악을 위해서는 향후에는 실제 훈련교관 및 훈련생들의 행동 패턴과 훈련 교관의 훈련준비과정(압축목재의 적재), 훈련정리과정(압축목재가 연소된 후 재의 정리) 등의 직무 시나리오에 따른 화학물질의 노출을 파악하는 것이 필요하다. 이번 연구 결과를 통하여 실화재 훈련장에서 발생하는 다양한 유해물질을 확인하였기 때문에 중앙소방학교에서 동시에 다양한 훈련이 이루어질 때 SCBA를 착용하지 않은 상태로 실화재 훈련장 주변에서 다른 훈련을 받는 사람들이 유해물질에 노출될 수 있기 때문에 이를 제한할 필요가 있다.

V. 결 론

중앙소방학교의 실화재 훈련장에서 화재 현장을 모사하기 위하여 사용하는 가연물인 압축목재가 연소되면서 발생하는 유해물질에 대하여 측정 및 평가를 하였다.

1,3-부타디엔, 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 포름알데히드, 염화수소, 시안화수소, 암모니아, 메탄올, 일산화탄소, 질산이 검출되었다. 발암성 1A 물질인 1,3-부타디엔, 벤젠, 포름알데히드가 노출기준을 초과하였고, 급성 중독물질인 시안화수소와 일산화탄소도 높은 농도가 검출되었다. 따라서 소방관들에게 제대로 된 SCBA를 제공하고 착용할 수 있는 훈련을 제공해야 하며, 훈련 중에 SCBA를 착용하지 않고 대기하고 있는 훈련생과 다른 교육을 받는 훈련생들에 대해서는 보호 방안이 필요하다.

소방훈련을 할 때 교육하는 훈련교관이나 훈련생들이 다양한 유해물질에 노출될 가능성에 대하여 확인하였다. 향후에는 실험실이 아닌 실제 실화재 훈련장에서의 개인노출 측정 및 평가 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 국립소방연구원의 지원을 받아 수행된 연구의 결과임.

References

1. Kirk, KM, Michael BL. Exposures to air contaminants in compartment fire behavior training (CFBT) using particleboard fuel. *J Occup Environ Hyg*. 2019; 16(7): 432-439.

2. US.NIOSH. Preventing Deaths and Injuries of Fire Fighters During Training Exercises, 2016 Available: https://www.cdc.gov/niosh/docs/wp-solutions/2017-113/pdfs/2017-113.pdf?id=10.26616/NIOSH-PUB2017113 [accessed 04 October 2020].
3. IARC. monograph 98. *International Agency for Research on Cancer*. 2013.
4. Pukkala E, Martinsen JI, Weiderpass E, Kjaerheim K, Lynge E. Tryggvadottir Demers, PA. Cancer incidence among firefighters: 45 years of follow-up in five Nordic countries. *J Occup Med*. 2014; 71(6): 398-404.
5. NFPA, 1403, Standard on Live Fire Training Evolutions, 2018.
6. KS F 2271 Testing method for incombustibility of internal finish material and element of buildings, Korean Agency for Technology and Standards, 2019.
7. Kim JB, Lee SY. Toxicity Evaluation of the Combustion Products from Synthetic Wood as Internal Finish. *Fire Sci. Eng*. 2016; 30(2): 7-18.
8. MOEL. Occupational Safety and Health Act, Ministry of Employment and Labor. 2020.
9. Delzell E, Sathiakumar N, Hovinga M. A follow-up study of synthetic rubber workers. *Toxicology*. 1996; 113: 182-189.
10. Macaluso M, Larson R, Delzell E. Leukemia and cumulative exposure to butadiene, styrene and benzene among workers in the synthetic rubber industry. *Toxicology*. 1996; 113: 190-202.
11. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Benzene. U.S. Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA. 2007.
12. U.S. Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System (IRIS) on Benzene. National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, Washington, DC. 2009.
13. United States Occupational Safety and Health Administration (OSHA): Medical Surveillance-Formaldehyde (1910.1048 App C).Available: https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1048AppC [accessed 4 October 2020].
14. Yoon DK, Namgoung SJ, Kong HK, Hong HJ, Lim HB, Park SH et al. Assessment of Exposure to and Risk of Formaldehyde and Particulate Matter (PM10 and PM2.5) by Time Activity Applying Real-Time Indoor and Outdoor Monitoring. *J Environ Health Sci*. 2019; 45(6): 646-657.
15. Gaskin S, Pisaniello D, Edwards JW, Bromwich D, Reed S, Logan M, Baxter C. Chlorine and hydrogen cyanide gas interactions with human skin: In vitro studies to inform skin permeation and decontamination in HAZMAT incidents. *J. Hazard. Mater*. 2013; 262: 759-765.
16. Ham SH, Choi WJ, Lee JH, Lim YS, Kang JH, Kang SK. Acute Hydrogen Cyanide Poisoning in a Plating Worker and Workplace Measurement. *J Korean Soc of Occu and Env Hyg*. 2019; 29(3): 336-342.
17. Kim IB. A Study on the Flame Resistance and Combustion Characteristics of MDF Plywood. *Korean Chem. Eng. Res*. 2014; 52(2): 256-260.
18. Brickman CP. Fit-testing for firefighters. *Occupational Health & Safety* 1999; 68(1): 56-58.
19. Smith DL, Horn GP, Petruzzello SJ, Freund GG, Woods JA, Cook MD. Effect of obesity on acute hemostatic responses to live-fire training drills. *Am J Cardiol*. 2014; 114(11): 1768-1771.
20. Kim KS, Yoo SW, Won YL, Lee MY. Duty-Dependent Changes in Stress Hormones of Firefighters. *J Environ Health Sci*. 2012; 38(3): 195-203.

<저자정보>

이용호(전공의), 김진희(연구원), 김의진(전공의),
최원준(부교수), 이완형(조교수), 강성규(교수),
이소연(연구사), 함승헌(조교수)