[Research Paper]

화재조사현장 호흡가스 유해물질 분석 기초연구

한동훈 · 최신웅* · 이소연**†

국립소방연구원 대응기술연구실 연구관, *국립소방연구원 소방정책연구실 소방위, **국립소방연구원 소방정책연구실 연구사

Hazardous Gas Analysis during Fire Investigation

Dong-Hun Han · Sin-Woong Choi* · So Yun Lee**†

Senior Research Officer, Fire Technology Research Division, National Fire Research Institute of Korea,

*Fire Lieutenant, Fire Policy Research Division, National Fire Research Institute of Korea,

**Research Officer, Fire Policy Research Division, National Fire Research Institute of Korea

(Received October 22, 2020; Revised November 4, 2020; Accepted November 9, 2020)

요 약

화재현장에서는 많은 유해물질들이 생성되어 배출된다. 실제화재현장에서 화재진압대원들은 공기호흡기를 착용하지만 그 이외의 임무(화재조사, 현장지휘 등)로 활동하는 현장대원들은 공기호흡기를 착용하지 못하는 상황이므로 현장에서 다양한 유해물질에 노출되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 호흡보호가 상대적으로 힘든 화재조사현장에 한하여 유해가스 7종을 다중가스검출기를 사용하여 측정·분석하였다. 현직 화재조사관 6명의 도움을 받아 실제 51 곳의 조사현장에서 직접 유해가스 농도 데이터를 수집하였다. 아울러 3 곳의 재현실험 현장에서도 시간에 따른 유해가스의 농도를 측정하였다. 화재조사현장에서 측정된 유해가스 농도의 최대값이 허용한계치(Threshold limit value, TLV) 중 단시간노출한계(Short-term exposure limits, STEL)를 초과한 건수는 SO₂는 8건, HCHO는 29건, NO₂는 1건, HCN은 13건, CO는 2건이었다. 재현실험의 경우는 화재진화 후 1 h 30 min이 경과 되면 대부분의 유해가스 최고농도는 STEL기준 이하가 되었다. 따라서 화재조사관의 경우 이에 맞는 호흡보호구를 착용하고 그에 대한 관리가 요구된다.

ABSTRACT

Various types of hazardous substances are generated at fire scenes. Firefighters usually use the self-contained breathing apparatus (SCBA) during firefighting; however, SCBA is very inconvenient to use in other works (e.g., fire investigation and fire scene commands). Therefore, firefighters can be exposed to numerous chemicals. In this study, concentrations of hazardous gases were measured by utilizing gas analyzers with seven sensors during fire investigations. Six fire investigators measured the concentrations of hazardous gases directly as they worked. This included capturing the maximum concentrations of SO₂ at seven places, HCHO at 29 places, NO₂ at one place, HCN at 13 places, and CO at two places where the concentration exceeded the short-term exposure limit (STEL). When reconstruction experiments were performed, the maximum allowable concentrations for most hazardous chemicals fell below the STEL approximately 90 min after the fire occurrence. Therefore, we determined that fire investigators should wear proper respiratory protective equipment when working.

Keywords : Fire investigation, Hazardous gas, Respiratory protective equipment

1. 서 론

국제암연구소(International agency for research on cancer, IARC)에서는 소방관 직업 자체를 다양한 화학물질과 함께 Group 2B (Possibly carcinogenic to human)으로 분류하고, 메타분석을 통하여 고환암, 전립선암, 비호지킨림프종의 발병 위험이 있다고 보고하였다⁽¹⁾. 아울러 최근 국내연구에서

도 국내 자료(1996년에서 2007년)를 분석하여 국내 소방공무원에게 대장 및 직장암, 신장암, 방광암, 비호지킨종 및 림프조혈기계암이 유의하게 증가함을 보고하였다⁽²⁾. 이상의 두 가지 연구결과에서 공통된 암은 바로 비호지킨림프종이며 이 암의 유해인자는 산화에틸렌(Ethylene oxide)과 벤젠(Benzene)이다.

소방공무원의 경우 화재 진압 시에 다양한 유해성 화학

† Corresponding Author, TEL: +82-41-559-0583, FAX: +82-41-541-1108, E-Mail: soyun2@korea.kr

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

물질에 노출되지만 실제로 공기호흡기(Self-contained breathing apparatus, SCBA)를 착용하여 유해물질의 호흡 노출은 방지하고 있다. 그러나 화재조사, 현장지휘 등의 업무 시 불편함과 비효율성 등의 이유로 공기호흡기 착용을 하지 않는 것이 일반적이고, 방진마스크를 주로 착용하고 현장활동을 하고 있다. 2017년 부산소방본부에 소속된 화재조사관의 호흡보호구 착용 실태조사⁽³⁾에 따르면, 조사대상 70명 중 감식활동 중 현장 진입 시 착용하는 호흡보호구가 방진마스크라고 응답한 비율이 90%에 달하고, 심지어 화재진압이 진행되고 있는 상황에서 화재원인조사를 위해 현장에 진입하는 경우에도 50% 정도가 방진마스크에만 의존하여 호흡보호를 한다고 응답하였다. 실제로 잔화 정리 등의 업무 시 현장(주로 주택화재)에서 측정된 벤젠의 농도(20여건 평균)는 대략 0.3 ppm으로 보고되었다^(4,5). 방진마스크는 이러한 가스상 유해물질을 걸러줄 수 없기 때문에 화재조사 및 지휘 임무를 맡은 소방공무원은 방독기능의 호흡보호방안이 필요하다. 벤젠의 경우, 한국 고용노동부 기준의 작업 노출 한계(Time-weighted average, TWA, 1일 8시간 작업시간을 기준으로 한 시간가중평균농도)는 0.5 ppm이며 시중에 판매되고 있는 A사의 방독마스크는 위의 벤젠 농도에서 벤젠을 걸러주기 위해 사용가능하다. 하지만 화재현장에서는 벤젠뿐만 아니라, 현장에 존재하는 가연물에 따라 천차만별의 유해물질이 발생할 수 있고^(6,7) 현장활동 소방공무원에게 부정적인 건강영향을 줄 수 있는 독성물질을 포함하고 있다⁽⁸⁻¹⁰⁾.

소방공무원에 대한 일반국민의 통념과는 달리, 소방공무원은 직무를 나누어 특정임무를 집중적으로 수행한다. 화재진압대원 및 구조대원을 제외하고는 현장에서 공기호흡기를 착용하고 업무를 수행하지 않는 편이다. 따라서 유해물질이 다수 발생하는 화재현장에서 소방공무원들은 직무와 현장활동시간, 활동범위, 개인보호장비 사용현황 등에 따라 유해물질에 노출되는 수준이 달라 질 수 있다.

본 연구에서는 소방공무원 직무 중 화재현장에서 머무르는 시간이 긴 편이고 개인보호수단을 높지 않은 수준으로 적용하고 있는 화재조사관 직군을 대상으로 화재현장에서 발생하여 호흡으로 노출될 수 있는 유해물질의 기초적 분석과 건강영향에 대한 고찰을 통해 화재조사 직무환경 개선방향을 제시하고자 한다.

2. 연구범위 및 측정방법

본 연구는 화재원인을 조사하는 소방공무원을 대상으로 2015년에서 2017년 기간 중 화재조사현장 총 53 곳(실제 51곳 및 모의화재 2곳)에서 특정 유해물질을 직독식 기기와 관련 법규에 명시된 공정시험법을 준용하여 정량적 측정 분석을 실시하였다. 2015년에는 천안시내 화재현장 건물 내 실내공기질 기준에 따른 측정을, 2016년까지는 전국 화재조사현장 내 유해가스 직독식 측정을, 2017년에는 강

원도소방학교에서 열린 제1회 전국화재감식대회 모의화재현장에서 산업안전보건법에 따른 공인시험법 측정방법을 적용하였고 상세한 방법은 아래에 기술하였다.

2.1 실제 화재현장에서의 유해물질 측정방법

2.1.1 화재현장 건물 내 실내공기질 분석

실제 화재조사현장의 유해성을 평가하기 위해서 실내공기질 기준에 따르는 측정방법⁽¹¹⁾으로 현장 유해물질을 측정하였다. 화재가 발생하여 화재조사 출동 시, 외부전문측정기관(순천향대학교 순천향환경보건센터)의 측정전문가의 현장방문으로 시료채취를 실시하였고 실험실 분석을 통해 정량분석(농도 값)을 얻었다. 시료는 실내공기질 기준에 따른 항목 7종(미세먼지, 이산화탄소, 포름알데히드, 총휘발성유기화합물, 일산화탄소, 이산화질소, 오존)이고, 측정방법과 사용기기는 각각 순서대로 소용량공기포집법(Airmetrics, Mini-Vol Air Sampler, USA), 비분산적외선법(TSI, IAQ-CALC, USA), 2,4-DNPH 유도체화 HPLC 분석법(Shimadzu, LC-10vp, Japan), 고체흡착열탈착법(TD-GC/MS) (Shimadzu, GC/MS-2010, Japan/DANI, STD 1000, Italy) 비분산적외선법(Teledyne advance pollution instrumentation inc, 300E, USA), 화학발광법(Teledyne advance pollution instrumentation inc, 200E, USA), 자외선광도법(Teledyne advance pollution instrumentation inc, 400E, USA)이다. 대상시설 내 측정지점은 현장을 대원의 호흡위치를 고려하여 시설 내 중앙점 바닥으로부터 1.2에서 1.5 m 높이로 선정하였다. 측정현장은 천안시내 화재현장 총 3곳이고, 측정일자는 7월 중으로 실내기상이 온도 30℃, 습도 50%, 기류속도 0.1 m/s 내외로 기록되었다.

2.1.2 화재조사현장 유해가스 분석

외부기관에 의뢰하여 측정하는 것은 기동성의 한계가 있어, 화재조사 현장을 좀 더 빠르게 접근하기 위하여 현직 화재조사관(전국 시도 본부의 6명)의 도움을 받아, 현장 출동 시에 가스측정기(Rae Systems사, MultiRae Lite, PGM6208)를 사용하여 각자의 화재조사 현장에서 직접 측정하게 하였다. 대상물질은 7종으로 선정하고, 산업안전보건법에 명시⁽¹²⁾된 각 물질의 단시간노출한계(Short-term exposure level, STEL, 15 min간의 시간가중평균값) 농도 범위에서 측정을 할 수 있는 센서를 구입하여 가스측정기에 탑재하였다. 7종의 화학물질과 최대검출농도는 각각 이산화황(SO₂) 20 ppm, 포름알데히드(HCHO) 10 ppm, 이산화질소(NO₂) 20 ppm, 시안화수소(HCN) 50 ppm, 일산화탄소(CO) 500 ppm, 이산화탄소(CO₂) 50,000 ppm, 총휘발성유기화합물(VOC) 1,000 ppm이며, 각 가스센서의 측정 분해능은 SO₂ 0.1 ppm, HCHO 0.01 ppm, NO₂ 0.1 ppm, HCN 0.5 ppm, CO 1 ppm, CO₂ 100 ppm, VOC 1 ppm이다. 가스측정기는 매년 가스측정기 교정지침서(RISET-QI-01)에 따라 국가측정표준기관으로부터 소급성이 유지된 표준기를 사용하여 교정을 의뢰하고 있다.

2017년 8월에 받은 교정성적서에 따르면 사용된 기기의 농도 측정 정확도는 종합적으로 -1.28%에서 +2.87% 범위로 확인되었다. 가스측정기는 각 다른 센서가 장착된 2식(HCN, NO₂, CO, CO₂ 용 1식, VOC, SO₂, HCHO용 1식)을 세트로 현장대원(화재조사관) 6명에게 지급하였다. 현장대원들은 현장에서 가스측정기를 착용하거나 현장에 위치(성인 허리 이상의 높이)시켜 유해물질의 농도가 기록되도록, 측정유지시간은 최소 10 min 이상이 되도록 하였다. 이 측정방법은 직독식 방법으로써 누구나 측정할 수 있는 방식이므로 소방공무원이 특별한 교육을 받지 않고서도 기동성 있게 활용할 수 있게끔 적용하였다. 2.1.1절의 측정은 환경부 실내공기질 공정시험기준에 따라 흡착여재 등을 이용하여 현장에서 시료를 채취한 후 실험실에서 정해진 분석기기로 정량분석하는 것으로써 본 절의 측정방법과 차이가 있음을 밝힌다.

2.2 화재 재현실험 현장에서의 유해물질 측정방법

실제 화재현장은 예측하기 어려워 측정에 대한 변수가 상당히 많다. 예측 가능한 측정환경을 조성하여 다양한 현장 변수를 제어하기 위해서 화재 재현실험 현장에서 유해물질을 측정하여 그 결과를 실제 경우와 비교하며 고찰하고자 하였다.

2.2.1 실제 건물 화재 재현실험 현장 측정

2016년 10월 12일 서울소방재난본부에서 수행한 서울재개발지역 아파트(10, 13평형 각 2개 호실) 실화재 실험에서 화재진압 후 유해가스 농도를 측정하였다. 사용된 기기는 2.1.2 절에서와 같은 방법 및 같은 직독식 측정기(Rae Systems사, MultiRae Lite, PGM6208)로 HCN, NO₂, CO, CO₂, VOC, SO₂, HCHO 물질의 농도를 측정하였다. 실험장소 내에 가연물로는 소파, 싱크대, 목재불박이장을 거실과 욕실에 두었고, 침실에는 침대와 수납장 가연물을 배치했다. 화재진압은 발화 후 10 min 후에 완전진화가 이루어졌고, 기기를 통한 가스 측정은 완전진화 후 20 min 경과 후부터 사람 허리 이상 높이 정도의 가구 탄화잔해물에 두고 기록하였다.

총 4회의 화재현장을 재현하였는데 13평형 세대의 경우 착화 후 하나의 호실에서는 현관문을 개방하고, 다른 호실에서는 현관문 미개방 상태에서 화재를 진행시켰고, 10평형 세대의 경우는 착화 후 모든 문은 닫아둔 채로, 발코니 창 개방한 호실과 발코니 창 미개방 호실을 화재진행 상황을 만들어 비교하였다.

2.2.2 화재감식대회 실험세트 화재 현장 측정(포름알데히드)

2017년 11월 28일 강원도 소방학교(강원도 태백시 동점동)의 화재감식훈련장의 일부공간을 실제 주택 내부와 같이 모사하여 세트장이 제작되었다. 소방청 화재대응조사가 주관하는 제1회 전국화재조사감식대회를 위한 현장이었다. 배치된 가연물 종류는 가구 10가지, 전자제품 7가지,

기타비품 8가지를 안방과 거실에 각각 다른 품목으로 사용되었다. 더불어 인화성 지역 물질로는 안방에는 휴대용 가스레인지와 부탄가스를, 작은방에는 라이터기름을 비치하여 발화시켰다. 측정은 11월 30일에 진행된 화재재현 및 대회 현장에서 잔화정리, 조사, 발굴작업을 실시하는 오전 10 h부터 오후 3 h경까지 지역시료와 개인시료를 채취하였다. 지역시료채취 지점은 총 4곳으로 모의화재 발생공간의 창문과 가까운 1곳, 제1펌프차 근처에 1곳, 안방 내부 1곳, 작은방 내부 1곳이었다. 개인시료는 모의화재 발생장소를 드나드는 2명의 화재조사관을 대상으로 측정하였다. 지역시료 채취는 화재발생장소 외부에서는 삼각대와 의자를 이용하였고, 화재발생장소 내부에서는 개인측정조끼를 해당공간에 걸어두어 지역측정을 보완하였다. 개인시료 채취는 측정조끼를 착용하도록 하였다.

유해물질 측정대상은 앞선 측정에서 노출기준을 초과한 포름알데히드(HCHO)에 대한 것으로써 작업환경측정 근거로서 공인력 있는 한국산업안전보건공단의 KOSHA-56-2015⁽¹³⁾와 NMAM 2016 (포름알데히드)⁽¹⁴⁾, 그리고 미국 환경청(Environmental Protection Agency; EPA)의 Method 8316⁽¹⁵⁾을 참조한 방법을 적용하여 분석하였다. 시료는 오존 스크리버와 연결된 2,4-DNPH 코팅 실리카 카트리지(SUPELCO 21014)에 약 0.15 L/min의 유량으로 펌프를 연결하여 채취한 후 흡착관을 분리시켜 분석 전까지 냉장보관하였다. 분석은 고속액체크로마토그래프(High performance liquid chromatograph, HPLC, Waters 2695, USA) 기기에 C18 컬럼(150 mm × 4.6 mm, 5 μm)을 사용하였고, 이동상은 아세토니트릴(Acetonitrile 100%)과 테트라하이드로퓨란 수용액(20% in distilled water)으로 여과지 사용하여 여과한 후 초음파 장치로 탈기한 조건으로 분석하였다. 분석자료의 정도관리를 수행하여 분석결과의 신뢰성을 검증하였는데, 탈착효율은 2,4-DNPH 카트리지를 이용하여 2가지 수준(저농도 및 고농도)에서 각 농도 수준별로 시료 3개씩을 적용하여 분석한 결과 88.9~118.7%였다.

3. 결 과

3.1 실제 화재현장의 가스상 유해물질

3.1.1 화재현장 건물 내 실내공기질 분석 결과

화재조사현장의 유해성을 평가하기 위해서 실내공기질 기준에 따라 외부의뢰로 측정한 결과를 Table 1에 제시하였다. 총 3개의 화재 현장에서 측정하였는데, 오존(O₃)의 경우 모든 현장에서 불검출되었다. 가장 빨리 현장에 도착한 경우가 화재 발생 후 약 8 h이 지난 경우였고 책 등이 쌓여 있던 창고 화재(Case 1)였다. 비교적 환기가 덜 되는 사무실 안에서 측정하였을 때, 총휘발성유기화합물(VOC)의 경우가 권고기준을 초과하였고 NO₂의 경우 유지 기준을 초과하여 측정되었다.

두 번째(Case 2)의 화재현장은 고등학교의 식당에서 발

Table 1. Measured Concentrations of Substances in Indoor Air Quality Standard at Three Fire Investigation Scenes

Analyte (Unit)	Exposure limit	Case 1 (Warehouse)	Case 2 (School)	Case 3 (House)
		After about 8 h	After about 63 h	After about 48 h
PM10 (mg/m ³)	100	52.66	58.12	60.87
CO ₂ (ppm)	1000	508	491	682
HCHO (mg/m ³)	100	28.26	17.03	23.12
VOCs (mg/m ³)	400*	439.52	322.74	542.84
CO (ppm)	10	0.97	0.91	9.48
NO ₂ (ppm)	0.05	0.49	0.055	0.23
O ₃ (ppm)	0.06*	Not detected	Not detected	Not detected

(*Recommended limit)

Figure 1. Scatterplot of maximum concentration for SO₂ at 51 fire scenes. **Figure 2.** Scatterplot of maximum concentration for HCHO at 51 fire scenes.

생한 화재로 실내공기질을 측정할 당시에 물청소와 빠르게 현장을 복구하는 중이었다. 이 경우에는 NO₂를 제외한 모든 항목에서 기준 농도 이하로 측정되었음을 확인할 수 있다.

마지막 경우인 Case 3는 주택(공방으로도 사용) 화재였으며, 2일 정도 후에 화재현장을 방문하여 농도를 측정하였는데, 이 경우도 총휘발성유기화합물과 NO₂의 경우가 농도 기준을 초과하였다. 본 실험의 경우, 화재현장에서 일정 시간이 지나도 총휘발성유기화합물 및 NO₂의 경우가 실내 공기질 기준을 초과함을 확인하였다.

3.1.2 화재조사현장 유해가스 측정 결과

화재조사 현장의 현실성을 반영하기 위해서 화재조사관이 직접 직독식 가스측정기를 통해 현장물질을 측정하여 전국 51개 현장에서 농도 결과를 얻었으며, 수집된 데이터의 측정시간은 짧게는 10 min 이내로, 길게는 1 h 이상이었다.

대부분의 경우 현장에서 짧게 머무르는 경우가 많아 본 연구에서는 STEL, TWA 농도한계치에 따라 측정농도를 평가를 하지 않고, 화재조사관의 업무 중 측정된 농도 중 최

고의 농도만을 고려하여 평가하였다. 각 물질별로 x축에는 화재발생시점에서 현장활동 착수시점까지 경과시간(분)을, y축에는 현장활동 중 측정된 각 물질 농도 중 최고치를 점으로 표기하여 그래프로 나타내었다(Figure 1~6). 화재조사활동은 화재발생시점에서 빠르면 20분 안에 시작되었고, 길게는 6일 후(8589 min)에 실시되기도 하였다. 여기서 대상 물질의 허용한계치 농도는 대부분 국내 고용노동부 기준치를 적용하였고, CO의 STEL은 미국정부산업위생전문가협회(American conference of governmental industrial hygienists, ACGIH) 기준치를 적용하여 비교하였다. 특히 포름알데히드는 노출기준을 제시하는 기관별로 편차가 크므로 해석에 큰 차이가 있을 수 있어, 중간값을 적용하여 비교하였다(4.2절에 설명추가함). 측정결과에서 CO₂ 결과치는 STEL, TWA 기준농도를 넘는 경우가 존재하지 않아 분석에서 제외하였다.

SO₂의 경우 STEL과 TWA 기준농도는 각각 5 ppm, 2 ppm이다. 전체 51건의 화재현장에서 SO₂의 최고농도가 STEL 기준농도를 초과하는 경우는 8건, TWA 기준농도를 초과하

Figure 3. Scatterplot of maximum concentrations by measured times after fires for NO_2 at 51 fire scenes.

Figure 4. Scatterplot of maximum concentrations by measured times after fires for HCN at 51 fire scenes.

Figure 5. Scatterplot of maximum concentrations by measured times after fire for CO at 51 fire scenes.

Figure 6. Scatterplot of maximum concentrations by measured times after fire for VOC at 51 fire scenes.

는 경우는 14건(STEL 8건 포함)이었다(Figure 1). SO_2 는 대략 1 h 30 min이 지나야 모든 농도가 STEL 농도 이하가 되고 대략 6 h이 지나야 TWA 기준 농도 이하로 되었다. 포름알데히드(HCHO)의 경우는 STEL 기준농도(1 ppm)를 초과하는 경우가 29건, TWA 기준농도(0.5 ppm)를 초과하는 경우는 36건(29건 포함)이었다(Figure 2).

NO_2 의 경우 STEL 기준 농도인 5 ppm을 초과한 경우는 1건이었으며, 이는 치과에서 발생한 화재로 화재 출동 후 약 23 min 후에 측정되었으며, 비교적 화재 발생 후 빠르게 측정된 경우였다. NO_2 의 경우 본 연구에서는 작업환경 기준농도(TWA, STEL)를 초과한 건수는 1건이고 대부분의 현장에서 1 ppm이하의 농도로 측정되었음을 알 수 있다(Figure 3). HCN의 경우 STEL 기준은 4.7 ppm이며 이를 초과한 경우가 13 건으로 측정이 되었다(Figure 4).

CO의 경우 TWA 기준 농도는 25 ppm이고 STEL 기준농

도는 200 ppm이며, 측정결과를 Figure 5에 나타내었다. 화재조사관이 측정한 현장에서 CO의 TWA 기준농도를 초과한 경우는 17건, STEL기준 농도를 초과한 경우는 2건이었다. 휘발성유기화합물(VOC)의 경우 직독식 장비는 사실상 한계가 있고 신뢰성이 낮으나 참고값으로 활용하기 위해서 측정하였다. VOC는 벤젠이라고 가정하고, 벤젠의 STEL기준(2.5 ppm)과 TWA기준(0.5 ppm)을 초과한 경우는 각각 18건, 32 건이었다(Figure 6).

한편 화재 발생 후 시간에 따라 각 유해물질의 최고 농도가 STEL/TWA 농도를 초과한 경우를 Table 2에 정리하였다. 화재 발생 후 1 h이 경과하면 각각의 유해물질에 대한 STEL 농도를 초과한 건수는 SO_2 2건, HCHO 10건, HCN 3건이었다. 화재 발생 2 h 후에는 HCHO만이 유일하게 STEL 기준 농도를 초과함을 알 수 있다.

Table 2. Exposed Case No. Over the Exposure Limit according to the Time after Fire

Chemicals and its exposure limit (STEL / TWA)	No. over the exposure limit			
	after 1 h		After 2 h	
	STEL	TWA	STEL	TWA
SO ₂ (5 ppm / 2 ppm)	2	4	0	0
HCHO (1 ppm / 0.5 ppm)	10	11	3	3
NO ₂ (5 ppm / 3 ppm)	0	0	0	0
HCN (4.7 ppm / -)	3	-	0	-
CO (200 ppm / 25 ppm)	0	5	0	0

Figure 7. Concentrations of SO₂, HCHO and VOC depending on time during fire investigation in fire experiment. **Figure 8.** Concentrations of HCN, CO and NO₂ depending on time during fire investigation in fire experiment.

3.2 화재재현실험 현장에서의 유해물질 측정 결과

3.2.1 실제 건물 화재 재현실험 현장 측정 결과

총 4회의 화재 중 대상물질의 농도가 높았던 발코니 미개방 화재에서 측정된 결과는 시간대별 농도변화로 Figures 7, 8에 나타내었다. 이 경우는, 10평형 호실로 투룸 형태이고 소파, 싱크대, 목재 불박이장으로 이루어진 거실과 욕실이 있고, 침실에는 침대와 수납장이 들어가 있는 현장이었다. 이 경우는 발코니 창을 개방하지 않은 조건에서 발화시켰고, 거실 소파에 발화시킨 후 화재가 거의 확대되지 않고 진화되어 소파 일부가 탄화되고 주변 벽지, 천장 및 싱크 주변이 그을린 형태로 남아있었다. 본 화재 실험의 경우 창 개방여부에 따른 유해물질의 농도와 영향이 있었고 상대적으로 창을 개방하지 않았을 때, 환기가 되지 않아 유해물질의 농도가 높게 측정되었다. HCHO의 경우 STEL 농도 기준을 초과하였고, SO₂와 CO의 경우는 TWA 농도 기준을 초과하였음을 확인할 수 있다. SO₂와 CO의 경우 측정 시작 후 30 min 정도가 지나면 TWA 농도 기준 이하가 되었다. 아울러 HCHO의 농도가 STEL 기준 농도 이하로 되는 시간은 화재 발생 후 약 90 min (측정 시작 후 60 min 경과)이었다.

실제 화재 조사 현장과 유사하게 HCHO의 농도가 STEL 기준 농도를 초과하였다. 특히 HCHO는 측정기기의 검출한계인 10 ppm 농도 근처까지 최고치가 기록되었고, STEL 기준치인 2 ppm (Occupational Safety and Healthy Association, OSHA)를 상회하는 농도로 약 18 min간 유지되는 것을 알 수 있다(Figure 7).

3.2.2 화재감식대회 현장 유해물질(포름알데히드) 측정 결과

지금까지 직독식 측정기로 현장 유해가스 7종을 모니터링 한 결과, 포름알데히드가 노출기준치를 상회하여 검출되는 경우가 가장 많았고, 또한 위험한 수준의 농도로 검출되는 지속시간도 가장 길었다. 이 물질은 또한 측정대상 중에서 가장 건강에 악영향을 주는 인자로 알려진 물질이므로, 작업환경측정 분야의 공인시험법을 적용한 신뢰성 있는 정량분석 결과를 추가적으로 얻어 Table 3에 나타내었다. 화재조사관 2명의 개인시료와 정치시킨 지역시료를 각각 화재현장 작업 상황에 따라 구분하여 시료채취하고 분석한 결과이다. 개인시료(Personnel A vs. B)에서 현장작업 중 잔화정리 및 조사(Overhauled and investigated)의 경우와 발굴작업(Excavated)의 경우를 비교해 보면, 포름알데히드

Table 3. Concentration Distribution of Formaldehyde by Area in the Field of Fire Demonstration Event

Measurement objective		Active situation	Measuring period (min)	Concentration (ppm)
Personne	A	Overhauled and investigated	68	0.05
	A	Excavated	54	0.05
	B	Overhauled and investigated	68	0.04
	B	Excavated	59	0.02
Area	Outside the window of the second room	Overhauled, investigated and excavated	131	0.01
	Near the fire engine	Overhauled, investigated and excavated	132	0.01
	Upon the sink of the first room	Overhauled and investigated	98	0.09
	Near the inner wall of the second room	Overhauled and investigated	87	0.02
Average value			87	0.04

노출 농도는 같거나 오히려 발굴 시 줄어드는 차이를 보였다. 이는 측정대상이었던 개인이 직접 발굴에 참여하지 않는 대회주최 측 감독자였으므로 소극적 행동반경을 보여주었다는 점에서 한계점을 지니고 있다. 지역측정(Area)에서는 발화지점(큰방과 작은방에서 동시 발화)에서 떨어진 창밖과 펌프차 위치에서 상대적으로 낮은 포름알데히드 농도가 측정됨을 알 수 있다. 전체적으로는 각 측정의 오차를 배제하기 위해 각 측정치를 평균한 결과, 측정시간 87분에 포름알데히드 농도가 0.04 ppm 이었다. 측정 위치별로 편차는 9배 정도로 크게 나타났고, 발화점에 가장 가까운 지점과 높이에서의 지역시료가 가장 높은 농도를 보였다. 포름알데히드의 단기간 노출허용한계는 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute of occupational safety and health, NIOSH, USA)에서 규정하는 천장값(C, Ceiling, 어느 순간에도 노출되지 않아야 하는 농도)이 0.1 ppm 이고, TWA는 0.02 ppm이다. 8가지 측정치 중에서 NIOSH의 권고기준 TWA 수준을 초과하는 결과는 50%이다.

4. 고 찰

4.1 실제 화재현장 가스상 유해물질의 위험성

실내공기질 기준으로 하여 화재조사현장(3건) 건물 내부의 유해물질을 측정한 결과는 총휘발성유기화합물(VOC)과 이산화질소(NO₂)의 농도가 기준치를 초과하였지만, NO₂의 경우 STEL, TWA 기준을 초과하는 값은 아니었다. 일반적인 실내의 쾌적함을 판단하는 실내공기질 기준을 적용하는 것 보다, 인체 노출에 대한 허용치와 비교하는 것이 바람직할 것으로 판단하여, 이 후의 분석은 작업환경의 노출 평가 방법과 그 기준(STEL, TWA, C 값 등)을 적용하여 고찰하고자 하였다. 또한 규정상 실내공기질 측정분석기관(인증기관)에 의뢰하여 측정할 경우 화재현장에서 활동하는 당시의 환경에 대한 측정이 어려운 단점이 있어 측정방법을

보완할 필요가 있어 이후 측정은 실제 화재현장에서 원인 조사를 하는 화재조사관 6명과 연계하여 진행하였다.

화재조사현장 51곳에서 측정한 유해물질 7종중에서 기준한계치를 넘지 않았던 CO₂를 제외하고 6종(HCN, NO₂, CO, VOC, SO₂, HCHO)에 대해 노출 기준 한계치 이상의 농도로 대부분 현장에 존재했다고 할 수 있다. Table 1은 현장에서 1 h이 흘러도 HCN, SO₂, HCHO에 대해서는 STEL 값 이상으로 존재하는 경우가 있고, 이 단시간 노출기준(STEL)을 초과한 횟수는 SO₂, HCN, HCHO 순으로 2회, 3회, 10회로 많아진다.

이산화황(SO₂)은 무색이고 특 쏘는 냄새가 나고 공기보다 밀도가 두 배가량 되는 호흡기 자극제이다. 급성 건강영향으로는 심각한 점막의 자극과 호흡기 자극을 유발하여 고농도의 노출이 아니더라도 심각한 폐수종을 초래하기도 하며 만성 건강영향으로는 기관지염을 나타내기도 하는 물질이다⁽¹⁰⁾. 현장에서 측정된 농도는 국내 고용노동부 기준인 STEL과 비교하더라도 51가지 현장 중에서 15% 정도에서 노출기준을 상회하였지만, ACGIH에서 규정하는 단기간 노출기준인 0.25 ppm을 넘는 경우는 과반수가 넘게 되는 결과이다.

시아니화수소(HCN)는 무색이고 아몬드 향이 나는 화학적 질식제로써 인체 내 세포호흡 기능을 저하시켜 급성 영향으로는 두통과 경련이 나타나므로, 일반 근로자의 작업환경분야에서도 TWA보다 단기간기준인 STEL 또는 천장값(C, Ceiling, 어느 순간에도 노출되지 않아야 하는 농도)의 기준을 적용하여 관리하고 있다. 여기서 STEL 기준치는 잠시라도 노출되지 않아야 하는 천장값으로 볼 수 있기 때문에, 기준치를 초과한 경우가 전체 51건의 현장 중에 13건 현장에서 위험한 상황이 있었고, 그 중 3건은 1 h 후에도 그 기준치 이상의 농도로 존재하므로, 경고성이 높은 현장 유해인자라고 할 수 있다. 시아니화수소는 고온의 환경에서 산소 농도가 낮을 때 많이 발생하는 물질로 알려져 있고⁽⁷⁾,

Table 4. Comparison of Exposure Limits for Formaldehyde by Institute and Country

Institute and country	Exposure limit (ppm)	
	TWA	STEL
Ministry of Employment and Labor, South Korea	0.3	-
Occupational Safety and Healthy Association (OSHA), USA	0.75	2
National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH), USA	0.02	C 0.1
American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), USA	0.1	0.3

특히 질소를 포함하는 플라스틱과 레진으로 이루어진 건물 내장재, 가구, 카펫, 가전제품, 의류와 같은 재료가 불완전 연소될 때 과량 생성된다⁽¹⁶⁾. 즉 일상 화재현장에서는 어디 서든 생성될 수 있는 물질일 것이다.

포름알데히드(HCHO)는 거의 무색이며 숨이 막힐 정도의 자극적인 냄새가 나지만 냄새서한이 0.5~1 ppm 인데 반해 국내 고용노동부의 작업환경 노출기준은 0.5 ppm 이어서 경고성이 좋지 못하다⁽¹⁷⁾. 포름알데히드 노출은 흡입이나 피부 또는 눈으로 접촉을 통해 대부분 일어난다. 급성으로 노출될 경우 냄새를 통해 포름알데히드의 존재를 인지할 수 있지만, 감각된 사람인 경우에는 냄새 서한 보다 낮은 수준에서도 두통이나 눈 및 기도의 자극을 경험할 수도 있다고 알려져 있다. 포름알데히드는 전세계적으로 발암물질로 알려져 있고, 국내 고용노동부 고시 「화학물질 및 물리적 인자의 노출기준」 별표1의 발암성, 생식세포 변이원성 및 생식독성 정보에서도 ‘발암성 1A’ 및 ‘생식세포 변이원성 2’에 해당하는 물질이다. 따라서 화재조사 현장에서 1~2 h 경과 후에도 위험수준 농도로 존재하므로, HCHO를 고려하여 관련 호흡 보호구를 선정하여 착용하는 등의 호흡보호방안이 필요할 것이다.

4.2 화재 재현실험 현장 유해물질의 건강유해성

서울시 재개발아파트 재현실험 결과에 따르면 화재진압 후 30 min 정도 경과되었을 때, 유해물질의 농도가 치솟는 특징이 있었는데, 환기가 되지 않는 환경에서 산소부족으로 화재확산은 일어나지 않으나 보이지 않는 독성물질이 과량 생성되는 것으로 판단된다. 이는 가연물의 불완전연소로 생성될 수 있는 HCHO, HCN 등 과 같은 유해물질이 존재하여 바닥부터 깔려 차오르면서 측정기기에 과량 검출된 것으로 추정할 수 있다. 공기와 비슷한 밀도를 가진 CO는 가연물의 불완전 연소로 가장 많이 생성되는 물질이기에 가장 높은 농도로 존재했을 것이다. 재현실험 현장에서도 가장 문제가 되는 것은 발암물질인 HCHO가 위험한 수준의 농도로 1 h 30 min 이상 지속되고 있다는 사실이다. 화재조기진압 후에도 잔불이 남아있을 수 있어서 불완전연소는 적게라도 지속되고 있고, 이때가 화재조사관이 현장에 투입되는 일반적인 시기쯤써 화마가 아닌 보이지 않는 물질이 인체를 위협하는 상황이 조성되는 시간이라 할 수 있다.

전국화재감식대회를 위해 마련된 모의화재현장에서 발

생하는 포름알데히드는 작업환경측정법으로 알려진 공인 시험법을 적용하여 정량분석 하였다. 발암물질인 포름알데히드의 노출평가를 위해서는 각 국가와 관련기관이 규정하는 기준이 상당히 다른 것을 주목하여야 한다(Table 4). 국내 고용노동부에서는 단시간 노출기준을 적용하지 않고 있는 특징이 있고, NIOSH가 제시하는 기준은 법적 강제력을 가진 다른 기준들에 비해 매우 엄격한 편인 것을 알 수 있다. 3.2.2절에서는 이 NIOSH의 TWA와 비교하여 측정 시료 8개 중 과반이 초과한다고 한 것은 8 h을 기준으로 하는 TWA와 직접적으로 비교해서는 안되나 노출 수준의 크기를 비교하기 위한 것이다. 포름알데히드가 인체에 강한 자극을 줄 수 있는 물질이기도 하고 만성적인 노출로 백혈병 및 비강암을 일으키기도 하므로⁽¹⁷⁾ 가능한 낮은 수준으로 유지할 필요가 있다. 따라서 화재조사관은 이런 화재현장에서도 포름알데히드 노출을 방지할 수 있는 개인보호구를 필수적으로 착용해야 한다.

서론에서 언급한 것처럼 화재조사관은 대부분의 화재현장에서 화재진압 도중이나 잔화정리 시에 현장에 진입한다는 사실을 기억할 때 적절한 수준의 방독마스크 이상의 개인호흡보호구가 필수적일 것이지만 현실은 방진마스크 수준으로 개인보호를 하고 있는 실정이다. 2017년 7월에 소방청이 실시한 전국화재조사관 1,002명에게 지급된 호흡보호구 실태조사는 반면형 또는 전면형 방독마스크를 합하여 94% 정도라고 밝혔다. 이는 조사관 1인당 지급 수량 조차도 100%에 미치지 못하고, 방독필터의 현실적 사용을 위해서는 턱없이 부족하게 지급되었음을 시사한다.

현장에서는 보이지 않는 발암성 화학물질이 존재하지만, 편의성과 소방활동 중 시야확보를 위한 효율성을 고려하여 현직 화재조사관의 호흡보호구 착용 빈도가 낮아져 더욱 위험한 현장 상황이 전개됨을 오래전 연구에서도 문제로 지적하였다⁽¹⁸⁾.

HCHO의 경우 4 h 이상이 되어도 STEL 기준 농도를 초과하는 경우가 있어 다른 유해물질에 비하여 유해성이 클 것으로 판단이 되며, 화재조사관의 경우 현장진입시간과 관계없이 최소한 HCHO를 제거할 수 있는 방독기능 호흡보호구를 반드시 착용하고 업무에 임해야 할 것이다. 화학물질안전원 연구에서는 포름알데히드 대비 호흡보호구를 선정할 때 최소 유기화합물용 방독마스크 이상을 추천하고 있다⁽¹⁹⁾. KOSHA GUIDE (H-150-2014)에 따르면 시중에서

판매하는 방독마스크 정화필터에 갈색표시줄(유기화합물 용)이 있는 것을 선택하면 된다.

본 연구는 작업환경측정분야의 공정시험법에 의한 측정이 아니라는 점과 화재현장에 존재했던 가연물 정보를 반영하지 못한 한계를 갖고 있다. 또한 소방활동현장은 직업환경분야의 공정시험법을 적용하여 유해성 평가를 하기 어려운 환경적 측면이 존재한다. 하지만 본 기초연구는 측정의 신뢰성과 대표성의 결여에도 불구하고 현장활동 소방대원 중에서 자기안전 확보를 도모하지 못하는 직무에 놓인 집단의 보건환경 실태를 개선하기 위한 동력으로 활용될 수 있을 것이다. 또한 향후 화재현장에 접근과 통제가 어렵다는 점과 연구기간의 제한점을 극복할 수 있는 기술적인 접근과 함께 다양한 화재현장과 광범위한 유해인자에 대한 측정과 소방공무원 노출평가를 위한 장기적인 연구를 기획하여 추진해야 할 필요가 있다.

5. 결 론

지금도 화재현장에서 소방공무원들은 유해물질에 노출되고 있다. 그 중에서도 특히 화재조사관의 경우 화재 조사를 위해서 공기호흡기보다는 간단한 호흡보호구를 사용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 화재조사관이 직접 본인의 화재조사 현장 51곳에서 7종의 유해물질을 측정하였다. 이 중 화재 발생 후 진압되어 90 min이 지나도 최고 농도가 STEL 기준(최고)치 보다 높게 측정되는 포름알데히드는 2 ppm 이상의 농도를 15 min 이상 유지하기도 하여, 발암물질이 현장에 긴 시간 존재한다는 것을 확인하였다. 따라서 이러한 물질에 노출되지 않기 위해서는 그 물질을 차단할 수 있는 호흡보호구(포름알데히드의 경우, 최소 유기화합물용 방독마스크 수준 이상)를 착용하고 업무에 임하여야 할 것이다. 실제로 화재조사관 이외에도 현장지휘관 등 공기호흡기를 착용하지 않고 화재현장 부근에서 활동하게 되는 소방공무원 직군이 존재하기 때문에 화재가 발생한 주변의 환경에서, 화재로 발생할 수 있는 더 많은 종류의 유해물질을 대상으로 한 노출평가와 연구가 이루어져야 한다. 향후 이를 근거로 소방공무원의 직무관련 질병 발생을 예방할 수 있는 방안과 관련 정책·제도를 마련하여야 할 것이다.

후 기

이 논문은 국립소방연구원이 수행한 연구의 결과이며, 화재조사관 소방공무원 여섯 분(경기도 부천소방서 이종인, 대전 동부소방서 박명길, 부산 중부소방서 김형길, 서울 서대문소방서 김정현, 울산 중부소방서 장민재)의 헌신적인 협조로 수행되었음에 감사드립니다.

References

1. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, "Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1-102" (<http://monographs.iarc.fr/>).
2. Y.-S. Ahn, "Occupational Cancer Update", Korean J. Occup. Environ. Med., Vol. 23, No. 3, pp. 235-252 (2011).
3. Busan Metropolitan Fire Headquarters, "Survey Report for Their Fire Investigators" (2017).
4. J. Jankovic, W. Jones, J. Burkhardt and G. Noonan, "Environmental Study of Firefighters", Ann. Occup. Hyg., Vol. 35, pp. 581-602 (1991).
5. D. M. Bolstad-Johnson, J. L. Burgess, C. D. Crutchfield, S. Stormont, R. Gerkin and J. R. Wilson, "Characterization of Firefighter Exposures During Fire Overhaul", AIHAJ, Vol. 61, pp. 636-641 (2000).
6. D. K. Kim, E. H. Ha and H. C. Lee, "Work-related diseases and Health Management of Fire Fighters", Magazine of Occupational Health, No. 9, pp. 27-34 (1997).
7. A. Blair, D. Blask, M. Bratveit, T. Brock, J. L. Burgess, G. Costa, S. Davis, P. A. Demers et al., "Painting, Firefighting, and Shiftwork", IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 98, World Health Organization, International Agency for Research on Cancer, Lyon, France (2010).
8. J. I. Kim, "Characterization of Firefighter Exposure during Fire Overhaul and Investigation", Master's Thesis, Graduate School of Public Health, Seoul National University, p. 40 (2008).
9. S. J. Kim, S. Ham, J. S. Jeon and W. Kim, "Characterization of Secondary Exposure to Chemicals and Indoor Air Quality in Fire Station", Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 140-151 (2019).
10. Korean Society of Environmental Health, "Environmental Health", Press of KNOU, p. 280 (2016).
11. National Fire Service Academy, "Hazardous Materials at Fire Scene", Annual Research Report (2015).
12. Industrial Safety and Health Act of Korea, No. 3 of 11 for the Annexed List, "Approval Limits for Chemicals Hazard Exposure" (2016).
13. "Guides of KOSHA for Sampling and Analysis Method", [Online] Available at <https://www.kosha.or.kr/www/boardView.Ldo?contentId=361370&menuId=4833&boardType=A4> (Accessed April 23, 2017).
14. "National Institute for Occupational Safety and Health Manual of Analytical Methods 4th Edition", [Online] Available at <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/2016.pdf> (Accessed April 23, 2017).

15. "Environmental Protection Agency Selected Analytical Methods for Environmental Remediation and Recovery (SAM)", [Online] Available at <https://www.epa.gov/homeland-security-research/epa-method-8316-sw-846-acrylamide-acrylonitrile-and-acrolein-high> (Accessed April 23, 2017).
16. "AristaTek", <http://www.aristatek.com/newsletter/0604April/TechSpeak.aspx> (Accessed 12/07).
17. W. Kim, I. J. Choi, M. H. Lee and Y. K. Lee, "Research Report of Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health", pp. 109-112 (2017).
18. P. W. Brandt-Rauf, L. F. Fallon, T. Tarantini, C. Idema and L. Andrews, "Health Hazards of Fire Fighters: Exposure Assessment", *British J. Ind. Med.*, Vol. 49, No. 9, pp. 606-612 (1988).
19. D. H. Han, S. T. Jung, D. H. Lee, Y. Park and K. C. Oh, "Selection Guide of Respirators of Work Type for Workers Exposed to Hazardous Chemicals", Ministry of Environment, p. 63 (2016).