

소방청사 차고지 공기질 분석 및 유해물질 노출 관리 방안

박제섭 · 한동훈*

국립소방연구원 대응기술연구실

Analysis of Air Quality and the Management Plan for Exposure to Hazardous Substances in the Garage of a Fire Station

Je-Seop Park · Dong-Hun Han*

Fire Technology Research Division, National Fire Research Institute of Korea

ABSTRACT

Objectives: The aims of this study are to derive the characteristics of diesel exhaust gas emissions generated during vehicle checking in the garage of fire stations and of the related improvement plans for proper air quality management.

Methods: The researcher measured changes in the air quality inside garages according to the operating conditions of the exhaust facility and before and after vehicle checking at three fire stations.

Results: During the checking of fire engines, a large volume of hazardous substances exceeding management standards were generated, and improvement of the discharge facilities was required for proper air quality management.

Conclusions: It is necessary to study the hazard evaluation of firefighters' exposure to exhaust gas, to operate exhaust gas ventilation facilities, and to prepare technical standards for proper indoor air quality management.

Key words: air quality, diesel exhaust, exhaust ventilation facilities, hazardous substance, vehicle checking

I. 서 론

소방청사 내 차고지는 소방차량 및 장비 보관, 출동 · 귀소, 차량 시동 점검과 장비 점검 등 다양한 소방활동이 수행되는 공간이다. 특히 소방차량의 시동 점검은 1일 2회 근무 교대 시 차량 및 장비의 작동 상태를 점검하는 활동으로, 차량의 시동을 켜 상태에서 점검이 이루어지므로 다량의 배기가스가 발생하게 된다. 일부 지역의 소방서는 동절기 동안 차량과 장비의 동결을 막기 위해 차고지 문을 닫은 상태에서 시동 점검을 실시하는 사례도 있어, 소방대원이 점검 과정에서 고농도의 배기가스에 노출될 가능성이 높으며, 잔존하는 배기가스는 차고지와 연결된 다른 공간으로 확산하여 2차 노출을 유발할 수 있다. 이를 예방하기 위해 소방청사 차고지

내에는 차량과 장비로부터 발생하는 배기가스를 신속하게 외부로 배출하기 위한 배기가스 배출설비를 설치 · 운영하고 있다. 그러나 배기가스 배출설비를 설치하는 과정에서 해당 소방청사에 가장 적합한 배출설비 유형의 선정, 기존 설계에 따라 적절히 설치가 되었는지에 대한 여부, 그리고 설치 후 효과적으로 배기가스를 배출하고 있는지에 대한 평가를 실시한 사례는 많지 않다 (NIOSH, 1990).

배기가스는 디젤엔진 배기관에서 연료의 연소과정을 통해 외부로 배출되는 모든 배기 물질을 말하며, 수증기를 포함한 가스 물질, 고체 입자 물질 등 복합 혼합물로 구성되어 있다(Michalak, 2004; HSE, 2012). 특히 디젤 연료의 불완전 연소 시 일산화탄소, 질소산화물, 황산화물, 알코올류, 알데하이드, 케톤류, 다핵방향족탄화

*Corresponding author: Dong-Hun Han, Tel: 041-559-0550, E-mail: hdongh1@korea.kr
376 Songak-ro, Songak-myeon, Asan-si, Chungcheongnam-do 31555

Received: October 28, 2020, Revised: November 27, 2020, Accepted: December 15, 2020

Je-Seop Park <http://orcid.org/0000-0002-6046-6019>

Dong-Hun Han <http://orcid.org/0000-0002-0483-3742>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

수소류 등이 생성된다(Sydbom et al., 2001; Kear & Niemeier, 2004). 디젤 배기가스의 생성량은 엔진의 유형, 차량의 연식, 엔진 부하량, 엔진의 유지관리, 연료의 품질 등 조건에 따라 달라진다. 가스상 물질 중 일산화탄소, 이산화탄소, 질소화합물 및 증기가 전체 배기가스 질량의 99%를 차지한다(Kear & Niemeier, 2004; McDonald et al., 2011).

배기가스에서 배출되는 입자 물질(soot particle)은 크기가 5 μm 이상인 경우 상기도(proximal airway)까지 도달하나 점액 섬모에 의해 대부분 제거되며, 5 μm 미만일 경우 폐포(alveoli)까지 도달한다(Sydbom et al., 2001). 폐포에 축적된 초미세입자는 혈관을 통해 전신으로 확산하여 암 유발 가능성을 증가시키고 자가면역의 이상, 혈액 응고 능력을 변화시켜 심장질환을 유발할 수 있다. 특히 소방대원과 같이 만성적으로 디젤 배기가스 입자물질에 노출될 경우 면역학적 알러지 반응을 유발하여 기도, 폐, 심혈관, 뇌 등 다양한 기관에서 염증반응으로 인한 천식, 호흡기, 심혈관계 질환을 유발한다(ASTDR, 2012).

배기가스 입자물질 중 대표적인 물질인 다핵방향족탄화수소류(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)는 미국 환경보호국(U.S. Environmental Protection Agency, EPA)에서 35~50여 종의 PAHs 중 인체 유해성 평가를 통해 16종을 발암성 물질로 분류하고 있다(EPA, 2002). 그리고 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)은 단기 노출 한계량을 1일 10시간 근무 기준으로 5 mg/m^3 과 1주 40시간 근무 기준으로 10 mg/m^3 으로 규정하고 있다(NIOSH, 1992; Taxell & Santonen, 2017). 또한 1950년부터 2009년까지 60년간 30,000명 정도의 소방관을 대상으로 암 발생(특히 폐암) 및 치사률에 대한 역학 연구 결과, 소방기관이 디젤 배기가스 등 소방관 건강 위험 요인에 대한 예방 및 보호 프로그램에 관심을 기울이지 않고 있다고 지적하였다. 2012년 6월 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)는 디젤 배기가스에 대한 인체 유해성 평가를 통해 디젤 배기가스의 발암물질 등급을 group 2A에서 group 1으로 상향 조정하였다(IARC, 2012; IARC, 2013). 미국직업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration, OSHA)은 디젤 배기가스가 호흡을 통해 주로 흡수되며

장기간 노출 시 폐암 및 심혈관, 호흡기 질환 등의 발생 위험성이 높다고 경고하였다(Garchick et al., 2008; ASTDR, 2012)

배기가스 배출설비는 소방차량에서 배출되는 배기가스를 포집하여 덕트 등을 통해 이송하고 공기정화장치로 정화하여 깨끗해진 공기를 송풍기를 통해 외부로 배출하는 설비 시스템이다. 배기가스 배출설비는 소방청사 차고지 내 실내공기질의 적절한 유지, 관리를 통해 소방대원이 유해물질에 노출되지 않도록 하는 것을 목적으로 한다. 현재 국내 소방청사에 설치된 배기가스 배출설비는 크게 4가지 방식으로, 송풍기식, 덕트 흡입식, 바닥매립 흡입 호스식, 천장 흡입 호스식이 운용되고 있다. 이 중 가장 간단한 방식인 송풍기식은 차고지의 후면이나 천장에 송풍기(blower)를 설치하여 내부 공기를 외부로 강제 배출하는 방식이다. 1열 주차 방식의 소규모 안전센터의 차고지 후면에 설치하여 발생하는 배기가스를 차고지 외부로 불어내는 방식이다. 그러나 이 방식은 송풍기를 통해 외부로 불어내는 공기가 차고지 밖까지 완전히 배출되지 못하기 때문에 효과적인 제거방식이 아니다. 두 번째 덕트 흡입식은 차고지의 후면 외벽과 천장면에 배기가스를 흡입할 수 있는 팬 덕트(fan duct)를 설치하여 내부 오염물질을 외부로 배출하는 방식으로, 설비 방식이 단순하고 유지관리가 쉬우며, 배관이 벽면이나 천장에 설치되어 공간 활용성이 좋다. 그러나 배기가스 배출에 필요한 환기량이 많아 대용량의 송풍기가 필요하다. 세 번째 바닥 흡입 호스식은 주차장 바닥에 흡입구(underground pit)를 매립 설치하여 흡입관을 통해 외부로 배출하는 방식으로, 흡입구가 주차장 바닥에 매립되므로 소방대원이 활동하기에 가장 편하고 공간적인 제약을 받지 않아 차고지가 협소한 곳에 주로 운용되고 있다. 그러나 기존 건물에 설치 시 바닥 굴착 및 절개에 따른 구조 안정성에 문제가 발생할 가능성이 있는 소방청사는 설치가 불가능하다. 마지막으로 천장 흡입 호스식은 유연성이 있는 긴 흡입 호스를 배기구에 직접 부착하여 외부로 배출하는 방식이다. 흡입 호스와 배기구가 완전히 결합한다면 가장 효과적으로 배기가스를 배출할 수 있어, 미국과 일본 등 선진국에서 주로 채택하고 있다.

최근 소방대원의 보건안전에 대한 관심이 증가함에 따라 배기가스 배출설비의 설치율이 증가하고 있으나 배출설비의 효용성 분석 등 소방청사 내 공기질 관리를 위한 적절한 기술 기준 제시 및 평가가 이루어지지 않

고 있다. 따라서 본 연구에서는 소방청사 차고지에서 차량 시동 점검 과정에서 발생하는 배기가스의 발생 실태 분석과 이를 외부로 배출하기 위해 설치·운영되고 있는 배기가스 배출설비의 효용성 분석, 운용 관리상 문제점 조사를 통해 소방청사 내 공기질 관리를 위한 개선 방안을 마련하고자 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

유해물질 측정 대상 소방청사는 직할센터를 제외한 119안전센터 규모를 실험대상으로 제한하였다. 차고지 바닥 면적은 170~190 m², 소방차량 보유대수, 보유차종 등이 유사한 조건의 안전센터 중 내부 요인에 의한 오염물질 배출을 최소화하기 위해 건립한 지 2~3년이 경과한 안전센터를 대상으로 선정하였다. 배기가스 배출설비 효용성 평가는 설비 유형별(덕트흡입식, 천정 흡입호스식, 바닥 흡입호스식)로 설치된 지 1~2년 미만으로 경과한 곳을 대상으로 실험을 진행하였다.

2. 연구 방법

1) 대상 물질 및 시료 채취 방법

측정 방법은 한국산업안전보건공단 작업환경 측정 분석 기술 지침 및 표준방법을 준용하여 실시하였다. 측정 대상 물질은 환경부 다중이용시설 등의 실내 공기질 관리법 시행규칙과 고용노동부 산업안전보건법 사무실 공기 관리 지침을 참고하여 선정하였으며, 유해물질별 관리 기준은 아래 Table 1에 정리하였다. 측정 물질은 포

름알데하이드(HCHO), 이산화질소(NO₂), 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}), 총휘발성유기화합물(TVOCs), 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO)로 선정하였다. 소방차량으로부터 배출되는 이산화황(SO₂)은 대기환경 기준 물질로 본 연구에서는 제외하였다. 시료 채취 지점은 실내 공기질 공정시험 기준의 실내공기 오염물질 시료 채취 및 평가방법에 따라 바닥면으로부터 1.2 m 높이, 모든 벽면으로부터 1 m 이상 떨어진 장소에서 채취하였다. 배기가스 배출설비 효용성 분석을 위한 시료 채취는 직독식은 1분 간격으로 연속 측정하였고, 포집식은 공기 펌프의 포집 유량을 조절하여 10분간 포집하였다. 차량 시동 점검 과정 중에는 시작, 중간, 종료 단계로 나누어 3회 포집하였다. 점검 종료 후 충분한 배기가 이루어질 수 있도록 60분간 추가 배기를 실시하였고, 30분, 60분 경과 시점에서 2회 포집하였다. 차고지 내 측정 지점은 연기 발생기(smoke generator, FT-100, Antari Co., U.S.A.)를 사용하여 자연 환기구나 기계 환기설비에 의한 공기 유동 경로 및 기류 발생원 주변에 위치하지 않는 곳으로 선정하였다.

2) 유해물질 측정 장비

HCHO는 2,4-dinitrophenylhydrazine으로 코팅된 cartridge를 이용하여 약 1 L/min의 유량으로 10분간 포집하였다(MP-Σ100H(SIBATA Co. Japan). 시료를 채취한 카트리지는 밀봉하여 분석 전까지 냉장 보관하였다. 시료 분석은 고속/액체크로마토그래피/자외선 검출기(high performance liquid chromatography/ultra-violet detector, HPLC/UV)를 사용하였다.

Table 1. Exposure limits for hazardous substance

| Hazardous substances | Ministry of Environment [†] | Ministry of Employment & Labor [‡] |
|--|--------------------------------------|---|
| Fine dust(PM ₁₀) | 150 µg/m ³ | 150 µg/m ³ |
| Fine dust(PM _{2.5}) | 50 µg/m ³ | 50 µg/m ³ |
| Carbon monoxide(CO) | 10 ppm | 10 ppm |
| Carbon dioxide(CO ₂) | 1,000 ppm | 1,000 ppm |
| Formaldehyde(HCHO) | 100 µg/m ³ | 120 µg/m ³ (0.1 ppm) |
| *Total volatile organic compounds(TVOCs) | 500 µg/m ³ | 500 µg/m ³ |
| *Nitrogen dioxide(NO ₂) | 0.05 ppm | 0.05 ppm |

* : Ministry of Environment recommendation criteria

† : Ministry of Environment, Enforcement rule of the indoor air quality management act for multi-use facilities

‡ : Ministry of Employment and Labor, Occupational Safety and Health Act article 21, paragraph 7., Office air management guideline

TVOCs는 환경부 실내 휘발성 유기화합물 측정방법(ES 02602.1)으로 측정하였다. 포집식 장비인 MP-230KN II(SIBATA, Japan)를 사용하였으며, 고체흡착관에 0.1 L/min의 유량으로 보정된 펌프를 연결하여 10분간 채취하였다. 시료를 채취한 고체흡착관은 분석 전까지 냉장 보관하였다. 분석은 가스크로마토그래피/질량분석기(GC/MSD, QP-2010 ultra, Simazu, Japan)으로 분석하였다. CO, CO₂, NO₂는 직독식 장비를 이용하여 측정하였다. 사용한 장비는 전기화학식 센서 방식으로 Graywolf IQ-610extra(U.S.A.)를 사용하여 실시간 측정하였다.

3) 배기가스 배출설비 효용성 분석

차고지 내 차량 점검 시 배기가스 배출설비의 효용성을 확인하기 위해 배출설비 작동 여부에 따른 실내 공기질 변화를 측정하였다. 차고지는 실험 전 1시간 이상 충분히 환기를 하였으며, 차고지 내부로의 외부 물질 유입 차단을 위해 차고지와 연결된 모든 통로 및 창문을 차단하였다. 세부 실험 조건은 ①차량 점검(20분)+배출설비 미작동, ②차량 점검(20분)+점검 시작과 동시에 배출설비 작동 조건으로 실시하였다, 효과성 비교를 위해 별도로 ③차량 점검(20분)+점검 종료 후 자연배기 조건도 추가로 실시하였다. 차량 점검은 실제 차량 점검과 동일하게 실시하였다. 배출설비 작동 시 차량 점검 종료 후 60분 경과 시점까지 오염도를 측정하였고, 자연배기 조건은 차량점검 종료 후 전면 주출입문을 완전 개방하였고, 30분 경과 시점까지 측정하였다.

III. 결 과

1. 소방청사 일반 현황

본 실험을 수행한 안전센터의 일반 현황은 Table 2에 정리하였다. 차고지 바닥 면적은 최소 170에서 최대 190 m² 범위 내로 선정하였고, 보유 차량은 배기가스 배출 총량을 고려하여 차량의 연식과 종류를 일부 조정하였다. 구급차를 제외한 소방차량은 매연저감장치(Diesel Particulate Filter, DPF)를 모두 장착한 차량이었다. 보유 차량은 모두 1열 주차 방식이었고, 전면부에 주출입문이 위치하고 사무실이 동일층에 위치하는 구조였다. 안전센터 차고지 외부 및 배기가스 배출설비 설치 모습은 Figure 1에 정리하였다.

2. 소방청사 내 주요 구역별 공기질 측정

1) 활동 구역별 유해물질 농도

Table 3은 차고지와 공간적으로 연결된 소방청사 내 주요 활동 구역(사무실, 복도, 물품보관창고)의 유해물질 농도를 측정한 결과이다. A 안전센터의 사무실과 B, C 안전센터 물품창고의 TVOCs 농도는 실내공기질 관리 기준치를 초과하였다. 특히 A 안전센터는 사무실 출입구가 차고지 후면에 위치하여 차량으로부터 발생한 배기가스 및 차고지 내 TVOCs 일부가 직접 유입되는 것으로 예상된다. B와 C 안전센터는 물품창고에 보관 중인 유류 보관통에서 발생한 증기의 확산과 차고지 내에 다량 적재하고 있던 공기통 및 소방호스 등이 TVOCs 발생원으로 작용한 것으로 추측된다.

Table 2. General information of selected fire station

| | Station A | Station B | Station C |
|--|---|---|---|
| Garage area(m ²) | 176 | 190 | 170 |
| Garage size (L×W×H, m) | 15.8×12.0×6.3 | 15.3×13.0×5.4 | 15.0×14.0×5.6 |
| Number of parking space | 4 | 4 | 4 |
| Number of car hold | 4 | 4 | 4 |
| Engine type (Capacity, manufacturing year) | Pump(6,299cc, 18) Pump(5,899cc, 14) Rescue(2,797cc, 16) Ambulance(2,497cc, 16) | Water tank(6,728cc, 10) Pump(5,899cc, 10) Pump(6,299cc, 18) Ambulance(2,497cc, 16) | Water tank(6,728cc, 18) Water tank(6,299cc, 17) Pump(6,299cc, 17) Ambulance(2,497cc, 18) |
| Construction year | 2017 | 2018 | 2017 |
| Ventilation type | Fan duct | Suction hose (Ceiling) | Suction hose (Underground pit) |

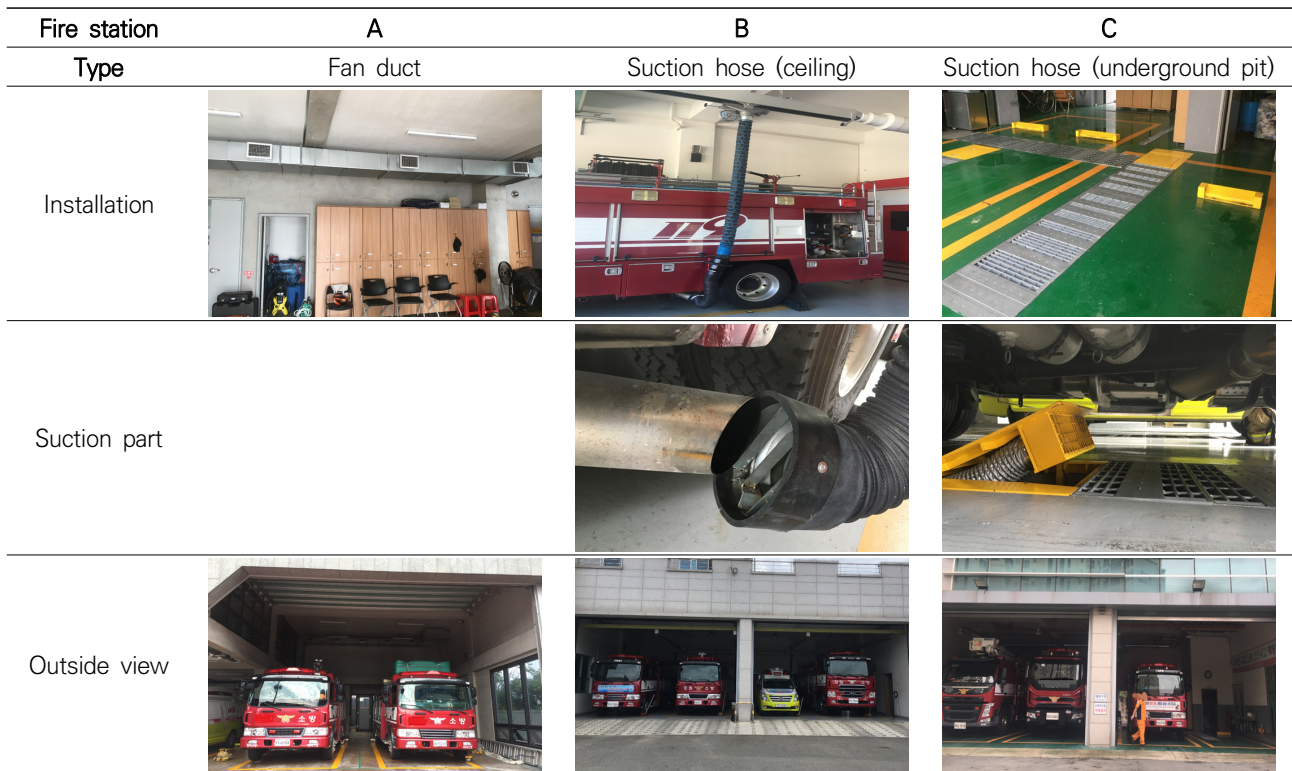


Figure 1. Installation by type of exhaust gas ventilation facility

Table 3. Concentrations depending on sampling sites

| Fire station | Sampling site | PM ₁₀ | PM _{2.5} | TVOCs | CO ₂ | HCHO | CO | NO ₂ |
|--------------|---------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-------|-----------------|
| | | ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | (ppm) | ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | (ppm) | (ppm) |
| A | Office | 21.2 | 10.1 | 1,862.5 | 705 | 26.7 | 0.8 | 0.020 |
| | Corridor | 53.7 | 35.1 | 546.6 | 653 | 30.5 | 1.0 | 0.030 |
| | Storage | 69.6 | 35.8 | 228.5 | 636 | 33.8 | 1.0 | 0.020 |
| B | Office | 15.1 | 5.3 | 389.5 | 517 | 18.3 | 0.3 | 0.020 |
| | Corridor | 17.3 | 5.1 | 213.8 | 402 | 70.0 | 0.2 | 0.020 |
| | Storage | 26.8 | 6.5 | 2,106.8 | 564 | 20.8 | 0.5 | 0.030 |
| C | Office | 71.2 | 28.6 | 695.1 | 596 | 28.4 | 0.2 | 0.010 |
| | Corridor | 93.1 | 37.4 | 647.6 | 596 | 20.0 | 0.2 | 0.010 |
| | Storage | 57.3 | 26.1 | 2,728.2 | 452 | 31.4 | 0.1 | 0.020 |

2) 차량 시동 점검 전 · 후 오염물질 변화량

Table 4는 차량 점검 전 · 후 차고지 내 오염물질 변화량을 측정한 결과이다. PM과 NO₂를 제외한 모든 항목에서 기준치를 초과하였다. 안전센터별 TVOCs는 2,929.97 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, 4,640.53 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, 2,188.77 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ 순으로 기준치를 4.5~9.3배 초과하였다. HCHO는 192.53 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, 343.77 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, 897.57 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ 순으로 기준치를 1.9~9.0배 초과하였다. 보유 차량의 연식과 관리 상태,

기타 유해물질의 유입을 고려하여 안전센터간 절대적인 수치 비교는 어려우나, 차량 점검 후 기준치를 최대 9 배 이상 초과하는 상당량의 유해물질이 발생하는 것으로 나타났다.

3) 자연배기에 의한 오염물질 제거 효과

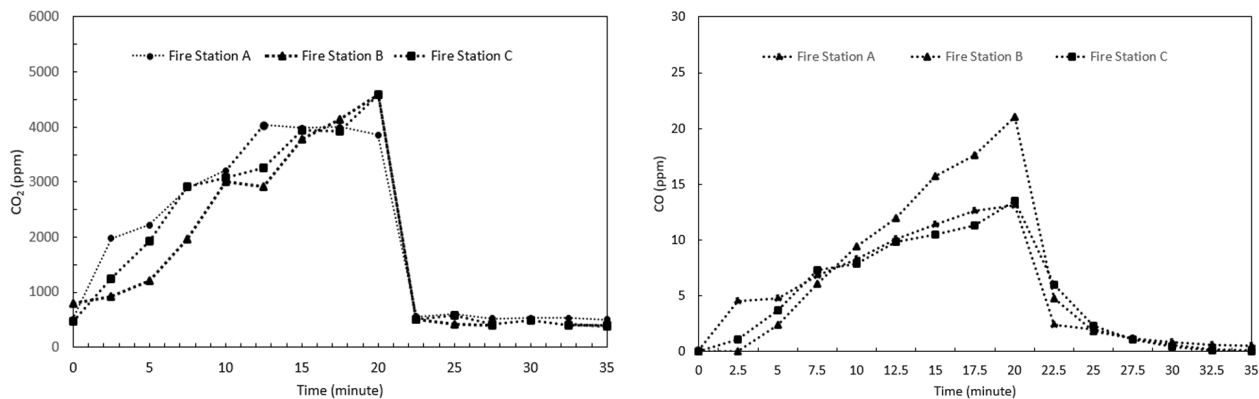
Table 5는 정면 차고지문 개방에 의한 자연 배기 효과를 측정한 결과이다. 차량 점검 종료 후 정면 차고지문

Table 4. Concentrations of fire station garages before and after checking of fire engines

| Fire station | Sampling | Mean±standard deviation | | | | | | |
|--------------|----------|--|---|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-------------|--------------------------|
| | | PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | TVOCs ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | CO ₂ (ppm) | HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | CO (ppm) | NO ₂ (ppm) |
| A | Before | 83.97±5.71 | 38.30±0.85 | 151.7±91.9 | 432.0±44.6 | 27.20±5.63 | 0.60±0.17 | 0.02±0.00 |
| | After | 55.43±1.18 | 42.67±2.08 | 2,930±168.7 | 3,857±197 | 192.5±18.7 | 13.47±0.91 | 0.03±0.00 |
| B | Before | 22.03±0.59 | 5.17±0.25 | 512.5±130.7 | 405.3±7.1 | 9.70±2.79 | 0.20±0.00 | 0.02±0.00 |
| | After | 70.60±10.55 | 36.00±2.49 | 4,641±1,981 | 4,490±421 | 343.8±56.1 | 20.50±2.77 | 0.02±0.01 |
| C | Before | 86.50±8.41 | 38.97±5.44 | 688.3±101.4 | 436.3±78.9 | 21.93±6.21 | 0.13±0.06 | 0.02±0.00 |
| | After | 34.13±3.64 | 19.27±1.57 | 2,189±445 | 3,750±576 | 897.6±988.8 | 17.30±5.58 | 0.02±0.00 |

Table 5. Concentrations of fire station garages after examination of fire engines with natural ventilation

| Fire station | Mean±standard deviation | | | | | | |
|--------------|--|---|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-------------|--------------------------|
| | PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | TVOCs ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | CO ₂ (ppm) | HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | CO (ppm) | NO ₂ (ppm) |
| A | 64.33±6.09 | 34.07±2.63 | 502.4±165.8 | 468.3±42.0 | 18.60±9.25 | 0.37±0.06 | 0.03±0.00 |
| B | 64.03±1.29 | 35.07±1.58 | 674.3±249.1 | 507.0±30.8 | 27.10±7.81 | 1.10±0.20 | 0.03±0.00 |
| C | 30.23±4.86 | 15.37±2.31 | 331.2±328.7 | 526.0±88.7 | 52.53±23.30 | 1.17±0.71 | 0.02±0.00 |

**Figure 2.** CO₂(left) and CO(right) concentration changes during fire engine checkings and with natural ventilation

을 완전히 개방한 후 오염물질의 농도 변화를 측정하고, 2~3분 경과 후 기준치 이하로 빠르게 감소하였다 (Figure 2). 그리고 30분 경과 후 차고지 내 오염물질의 농도는 평상 시 수준을 유지하였다. 일부 안전센터는 미세먼지 농도가 정면 차고지문 개방 후 감소하다 재차 증가하는 양상을 보였는데, 이는 해당 안전센터가 도심지 도로변에 위치하고 주변을 아파트 단지가 감싸고 있는 환경적 특성으로 인해 일부 오염물질이 차고지 내부로 유입되는 것으로 예상된다.

4) 배기가스 배출설비별 효율성 분석

Table 6은 차고지 내 설치된 배출설비의 오염물질

배출 효율성을 측정한 결과이다. 천장 흡입 호스식과 바닥 흡입 호스식은 차량 점검 시작과 동시에 작동시킨 조건에서 TVOCs를 제외한 나머지 오염물질의 농도는 기준치 이하로 유지되었다. 그러나 TVOCs의 농도는 기준치를 초과하여 차고지 내 오염물질 제거에 다소 미흡한 것으로 나타났다. 덕트 흡입식은 천장 부근에 설치된 흡입구 위치와 낮은 배출 효율로 인해 차고지 내부 유해물질을 충분히 외부로 배출하지 못하였다. 천장 흡입 호스식은 작동 후 시간 경과에 따라 다른 방식 대비 차고지 내 오염물질 농도를 가장 낮게 유지하였다 (Figure 3). 특히 CO, CO₂, PM에 대한 제거율이 다른 방식보다 높았다. 바닥 흡입 호스식은 HCHO, CO,

Table 6. Removal efficiency by diesel exhaust ventilation facility types

| Type | Fan duct | | | | Suction hose(ceiling) | | | | Suction hose(underground) | | | |
|--|-----------|--------|------------------|------------------|-----------------------|--------|-------|---------|---------------------------|--------|-------|---------|
| | Substance | BVC* | VCN [†] | VCV [‡] | Removal ratio(%) | BVC | VCN | VCV | Removal ratio(%) | BVC | VCN | VCV |
| PM ₁₀ (μg/m ³) | 84.0 | 55.4 | 55.1 | 0.54 ↓ | 22.0 | 70.6 | 23.5 | 66.71 ↓ | 86.5 | 34.1 | 52.8 | 54.84 ↑ |
| PM _{2.5} (μg/m ³) | 38.3 | 42.7 | 32.3 | 24.36 ↓ | 5.2 | 36.0 | 6.2 | 82.78 ↓ | 39.0 | 19.3 | 20.7 | 7.25 ↑ |
| TVOCs (μg/m ³) | 151.7 | 2930.0 | 516.3 | 82.38 ↓ | 512.5 | 4640.5 | 698.3 | 84.95 ↓ | 688.3 | 2188.8 | 822.4 | 62.43 ↓ |
| HCHO (μg/m ³) | 27.2 | 192.5 | 33.7 | 82.49 ↓ | 9.7 | 343.8 | 28.3 | 91.77 ↓ | 21.9 | 897.6 | 27.1 | 96.98 ↓ |
| CO ₂ (ppm) | 4320 | 3857.0 | 634.3 | 83.55 ↓ | 405.3 | 4499.0 | 527.3 | 88.28 ↓ | 436.3 | 3749.7 | 570.3 | 84.79 ↓ |
| CO (ppm) | 0.6 | 13.5 | 0.9 | 93.33 ↓ | 0.2 | 20.5 | 0.1 | 99.51 ↓ | 0.1 | 17.3 | 0.4 | 97.69 ↓ |
| NO ₂ (ppm) | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 33.33 ↓ | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.00 ↓ | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.00 ↓ |

*BVC: Before vehicle check

[†]VCN : Vehicle check + No ventilation

[‡]VCV : Vehicle check + Ventilation

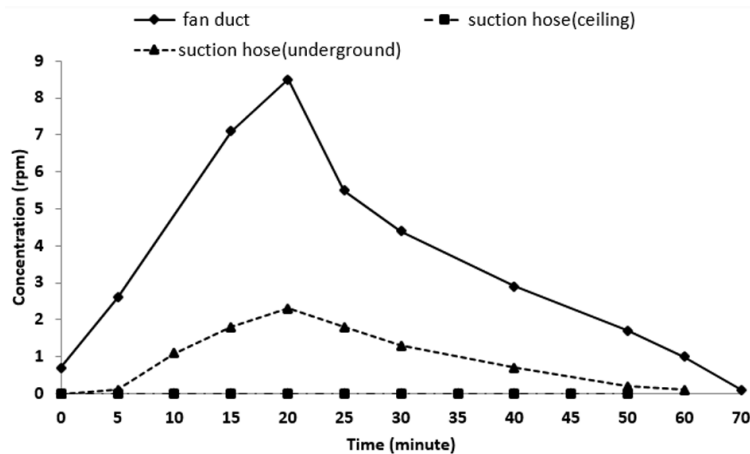


Figure 3. CO concentration changes by ventilation facility types

CO₂ 등은 기준치 이하로 유지되었으나 TVOCs는 기준치를 초과하였다. 특히 PM은 작동 후 잔류량이 오히려 높게 나타나 오염물질의 차고지 내 배출이 일부 이루어지는 것으로 예상된다. 이는 흡입구와 차량 배기구 간의 간격이 일정치 않아 발생하는 것으로 예상된다. 흡입관의 흡입 능력은 배기구와의 거리에 따라 급격히 감소하므로 되도록 가까이 위치하거나 완전히 밀착된 형태로 설치되어야 하나, 바닥 흡입 호스식은 흡기관과 차량간 충돌 위험성으로 인해 이격을 줄이기 힘든 구조적 단점을 가지고 있다. 그리고 소방차량의 배기구 위치가 제조사마다 상이하고 차량 위치가 변경될 경우 수시로 조정

을 해야 한다. 천장 흡입 호스식은 차량 배기구와 흡입관이 완전히 결합되는 형태여야 하나 국내에 설치된 천장 흡입 호스식의 흡입구는 차량의 배기구 방향을 개조하는 과정에서 기존의 결합식 흡기관을 생략하고 끝단을 불완전하게 노출된 형태로 운영하고 있어 추후 구조 개선이 필요한 것으로 판단된다.

IV. 고 찰

소방청사 내 차고지는 소방차량의 출동·귀소, 차량 시동 점검과 장비 점검 등을 수행하는 공간으로 다양한

유해물질 발생원이 존재한다. 특히 1일 2회 실시하는 차량 시동 점검은 차량과 장비의 시동을 켜 상태에서 점검이 이루어지며, 다수의 소방대원이 이 과정에서 고농도의 배기가스에 노출되고 있다. 본 연구 결과에서 차량 시동 점검 후 TVOCs는 실내 공기질 관리 기준 대비 최대 9.3배 초과 발생하는 것을 확인하였다. 이로 인해 차고지와 인접한 활동 영역에서의 오염물질 농도도 관리 기준을 초과하는 사례가 있었다. Kim et al. (2019)이 서울 소재 4개 안전센터를 대상으로 수행한 실내공기질 평가에서, 총 11종의 유해물질 중 TVOCs, CO₂, sulfuric acid는 환경부 및 고용노동부 기준보다 각 2.5배, 2.2배, 1.1배 초과하였다. 그리고 소방차량 시동점검, 근무교대점검, 출동 및 귀소 단계에서 디젤 배출물질 중 HCHO와 acid류 등에 노출될 수 있음을 확인하였다. 따라서 소방청사 내 차량 시동 점검 시 적절한 보호장비를 착용 후 실시하는 것을 표준화하여 유해물질에 노출되지 않도록 주의를 기울여야 한다. 그리고 물품창고 내에 보관되고 있는 유류는 보관 규정에 따라 적절한 외부 공간에 별도 보관해야 한다.

국내 모 지역 119안전센터에서는 해당 안전센터에서 근무했던 소방대원 중 5명이 폐암, 혈관육종암, 혈액암이 발생하였고, 이 중 3명이 사망하였다. 해당 안전센터의 실내 공기질 분석에서 TVOCs이 기준치 대비 3배 이상 초과 검출됨에 따라, 소방청사 내 디젤 배기가스 등 다양한 1급 발암물질에 대한 장기간 노출을 주요 발생 원인으로 지목하였다. 최근 5년간(2015~2019) 소방공무원 공·사상자 현황 자료에 의하면, 총 암 발생자는 142명으로, 평균 나이 48.0세(표준편차 ±9.49세), 중간값(median) 49.5세, 남성이 90.85%(129명), 여성 9.15%(13명)로 나타났다. 주요 질환은 갑상선암(38명), 위암(20명), 혈액암(10명), 간암(8명), 대장암(8명), 폐암(7명), 유방암(5명), 다발성 골수종(3명) 등으로 나타났다.

디젤 배기가스에 대한 인체 유해성은 OSHA report (OSHA, 2013) “Hazard alert for diesel exhaust/diesel particulate matter”를 통해 고농도의 디젤 배기가스와 디젤 입자 물질의 단기간 노출로 두통, 졸음, 눈, 코, 목의 강한 자극 등을 유발할 수 있다고 보고하였다. 그리고 장기간의 노출은 심장질환, 심혈관계 질환, 호흡기계 질환 그리고 폐암의 발생 위험성을 증가시킨다고 언급하였다. 소방청사 차고지에서 발생하는 배

기가스에 대한 유해성 평가는 소방대원의 유해물질 노출에 대한 건강 유해성 평가와 관리를 위해 필요한 과정으로, 작업의 빈도, 작업의 내용을 정기적으로 평가하고 검토해야 한다.

소방차량으로부터 발생하는 디젤 배기가스를 신속하게 외부로 배출하는 배기가스 배출설비는 소방청사별 여건에 따라 다양한 방식으로 설치, 운영되고 있다. 그러나 유해물질 배출원 분석, 배기공학적 최적화, 설비별 배출 효과성 평가 등 충분한 과학적 분석없이 예산 등 제한적인 요인에 의해 설치되고 있으며, 이는 일부 배출설비의 구조적인 문제로 인해 일부 유해물질이 소방청사 내부로 확산하는 등 배출이 충분히 이루어지지 않고 있었다. 덕트 흡입식은 낮은 배출 효율과 심한 소음, 진동 발생 등 다양한 문제점을 가지고 있었으며, 천장 흡입 호스식과 바닥 흡입 호스식은 유해물질 배출에 충분한 효과를 가지고 있었으나, 흡기관 결합 형태나 이격 발생 등 일부 구조적 문제점을 보완, 개선하거나 변경 설치한다면 유해물질 제거 효과를 더 높일 수 있을 것으로 판단된다.

Kim & Ham(2019)은 서울시 소재 안전센터와 현장 대응단을 대상으로 매연 배출장치 가동 전·후 비교를 통해, 매연 배출장치를 가동하지 않는 조건에서는 대부분의 유해물질 농도가 정상범위를 크게 초과하였다고 보고하였다. 본 연구 결과에서도 소방청사 내 다양한 업무 공간의 실내 공기질 분석에서 관리기준 또는 조치기준(action limit, AL)을 초과하는 사례가 많아 소방대원의 보건안전을 위한 후속 조치들이 즉시 시행되어야 한다. 또한 소방공무원 보건안전 및 복지기본법 내에 소방청사의 유해가스 배출을 위한 배기시설 및 관리에 관한 사항을 추가하도록 하여 배기시설 기준에 대한 강제 규정을 신설할 필요가 있다. 그리고 소방청사 내 유해요인에 대한 환경 측정 항목을 추가하여 차고지 등에 대한 유해요인을 주기적으로 측정할 필요가 있다.

현재 소방청사 차고지 내 배기가스 배출설비 설치비용이 점차 증가하고 있으나 배출설비의 설계 기준에 대한 법적 기준은 별도로 마련되어 있지 않다. 서울특별시는 2010년 공공건축물 책정 기준을 위한 가이드라인에서 소방청사에 대한 공사비 책정 기준은 마련하였으나, 청사 내 2차 오염 방지 시설이나 설비 기준, 차고지 오염물질 배출설비 등에 대한 기준은 설정하지 않았다. 미국, 유럽 등 선진국은 소방서 차고지 내 매연 배출장치

설치를 의무화하고 있다. 특히 미국은 NFPA Life Safety Code 101을 근거로 하여 소방청사 설계 시 소방관의 보건안전 측면에서 모든 오염물질의 노출로부터 소방관을 보호하고, 장비와 차량에서 배출되는 유해물질들을 제거하기 위한 배출설비를 설치해야 한다고 명시하였다(NFPA, 2018). 국내에서 작업장 내 발생 유해물질의 배출설비에 대한 기술 지침은 2014년 한국산업안전보건공단에서 제정한 기술지침(KOSHA guide G-115-2014)으로, 국소배기장치(local exhaust ventilation)의 설치 시 고려해야 할 사항 등을 명시하고 있다.

국내 소방청사의 대부분은 별도의 배기가스 배출설비 없이 외부 공기의 유입에 의해 유해물질을 희석, 환기시키는 자연 배기 방식에 의존하고 있으며, 차고지의 한 면만 개방되는 구조를 가진 소방청사가 많아 원활한 유해물질 배출이 어려운 상황이다. 최근 소방대원의 보건안전에 대한 인식이 높아지면서 내근직 소방대원에 대한 유해물질 노출을 최소화하기 위해 반드시 기계식 강제 환기시설을 설치하도록 권고하고 있다. 디젤 배기가스 배출설비 중 덕트 흡입식은 차고지의 후면 외벽과 천장면에 팬 덕트를 설치하여 내부 오염물질을 배출하는 방식으로, 설비 방식이 단순하고 유지관리가 쉬우며, 공간 활용성이 좋다. 그러나 국소배기장치에 비해 배기가스 배출에 필요한 환기량이 많아져 대용량의 송풍기가 필요하다. 이는 배출 효율이 떨어지고 비용이 증가할 수밖에 없으며, 송풍기 용량이 커짐에 따라 진동과 소음이 필연적으로 발생하고 있다. 덕트 흡입식으로 설치된 소방청사 중 일부는 배출설비 작동 시 진동과 심한 소음으로 제한적인 시간만 사용하거나 거의 사용하지 않고 방치되고 있었다. 주로 건물 옥상에 설치되는 송풍기는 진동 방지를 위해 충격 완충장치를 설치하거나 진동 확산 방지를 위해 바닥 보강과 소음 방지름을 별도로 설치하고 있으나 일부 진동 발생은 불가피한 상황이다. 따라서 중장기적으로 덕트 흡입식은 다른 방식으로의 변경 설치가 필요하다. 바닥 흡입 호스식은 흡입구가 주차장 바닥에 매립되어 있어 차고지 내 활동이 가장 편하고 공간적인 제약을 받지 않아 차고지가 협소한 곳에서 주로 운용되고 있다. 그러나 기존 건물에 설치 시 바닥 굴착 및 절개에 따른 구조 안정성에 문제가 발생할 가능성이 있으며, 최초 설치 시 설정된 흡입구 위치는 차량 변경에 따라 수시로 위치를 변경해야 하나 이를

위해서는 바닥 매립관을 2열로 시공해야 한다. 그리고 흡입관과 차량 배기구와의 이격이 큰 경우 배출 효율이 급격히 감소하여 차고지 내부로 일부 유해물질이 유출됨을 본 실험을 통해 확인하였다. 따라서 바닥 흡입 호스식은 흡기관과 배기구 간의 이격을 최대한 줄여주거나 천장 흡입 호스식의 흡입관 형태를 적용한 결합형 구조로의 개선이 필요하다. 그리고 소음과 진동 문제를 해결하기 위한 보완장치를 추가적으로 설치해야 한다. 천장 흡입 호스식은 흡입 호스를 배기구에 직접 부착할 경우 가장 효과적인 방식이나, 국내에 설치되어 운영 중인 소방청사의 대부분은 결합형태가 아닌 노출된 형태로 운영되고 있었다. 따라서 배기구 연장 시 차량 배기구 끝단과 흡입구를 완전히 결합시켜 소방청사 내부로의 유해물질 유출이 일어나지 않도록 해야 한다.

소방청사 내 유해물질 제거를 위한 가장 효과적인 방법은 자연배기와 함께 기계적 배기를 동시에 사용하는 방법이다. 본 연구 중 자연배기에 의한 오염도 변화를 측정할 결과에서 차량 점검 종료 후 전면 차고 문을 개방할 경우, 오염물질의 수준은 2~3분 경과 후 기준치 이하로 빠르게 감소하여 배출 효과가 높음을 알 수 있었다. 미국 FEMA(2018)는 신규 소방청사 설치 시 소방대원 유해물질 노출 저감과 보건적 관리를 위해 차고지 출입문을 청사의 앞쪽과 뒤쪽에 모두 설치하도록 권고하고 있다. 따라서 국내에서도 신규로 소방청사를 건립하거나 기존 청사 개선 시 차고지 문 추가에 대한 고려가 필요하다. 그리고 차고지와 직접 연결된 활동 공간은 오염물질에 대한 2차 노출을 막기 위해 차고지와외의 공간적 분리가 필요하다. 미국 등 주요 선진국의 차고지 환기 기준을 참고하여 국내 소방청사 내 차고지에 대한 자체 평가를 통해 건물 설계 및 건축 시 차량 엔진 형식, 차고지와 숙소 간 공기 이동 통로, 환기 및 실내공기 오염물질의 실제 농도 등을 고려하여 내부에 배기가스가 정체되지 않도록 해야 한다. 이를 위해서는 적절한 환기시설 배치와 함께 오염물질의 내부 확산을 막기 위해 완충지역(yellow zone, transient zone)의 개념을 도입하여 차고지와 인접 사무실, 숙소 공간 등을 구획화(격리화)할 필요가 있다. 일부 지역에서는 동절기에 장비 보호와 동결 방지를 위해 차고지문을 닫은 상태에서 장비 점검을 수행하고 있으나, 연료를 사용하는 엔진의 작동과 점검 시 반드시 건물 내부가 아닌 외부에서 수행하도록 해야 하며, 점검 과정에 참여하는 모든 소방대

원은 최소한의 보호장비를 착용하여야 한다. 추가로 차고지 내부의 효과적인 공기 순환을 위해 외벽에 창문과 air vent를 설치하여 전체적인 공기 흐름을 아래에서 위로 흐르도록 조절할 필요가 있다.

V. 결 론

본 연구를 통해 소방청사 내 차고지에서 매일 정기적으로 실시하는 차량 시동 점검 시 TVOCs, HCHO 등 인체 유해성 물질이 실내 공기질 관리 기준을 최대 9.3 배 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 차량 시동 점검 시 소방대원의 유해물질 노출을 최소화하기 위해 반드시 청사 외부에서 점검을 실시하고, 만약 외부에서의 점검이 어려운 상황이라면 점검 전·후 자연배기와 기계식 배기를 함께 실시하여 충분한 환기가 되도록 해야 한다. 특히 기계식 배기는 국소배기방식을 적용하여 배기관과 흡기관이 완전히 결합되어 차고지 내부로의 유해물질 유입이 이루어지지 않도록 배출설비 설계 기준과 점검 기준 등 법적 기준을 마련해야 한다. 현재 소방청사에 설치되어 운영 중인 기존 배출설비에 대해서는 정확한 유해물질 배출원 분석, 배기공학적 최적화, 설비별 배출 효과성 평가 등 충분한 과학적 분석을 통해 배출설비의 구조 개선과 변경 설치 등의 조치가 필요하다. 신규 설치 시에는 소방청사별 적절한 배출 방식 선정, 유해물질 관리 가이드라인을 마련하여 최적의 소방청사 내 공기질 관리가 이루어질 수 있도록 해야 한다. 또한 소방대원의 보건안전 관리를 위해 청사 내 유해요인에 대한 환경 측정 항목을 추가하여 주기적으로 측정, 관리해야 한다. 마지막으로 소방청사 내에서 근무하는 소방대원의 유해물질 노출을 최소화하고 오염물질의 내부 확산을 막기 위해 차고지 문을 추가 설치하거나 차고지와 공간적으로 직접 연결되어 있는 활동 구역에 대해 완충지역의 개념을 도입하여 차고지와 인접 사무실, 숙소 공간 등을 구획화(격리화)할 필요가 있다.

본 연구 방법 및 실험 결과는 소방청사 차고지 내 주요 배출원별 배출 특성을 모두 반영하지 못하는 제한점이 있으나, 향후 소방청사 차고지의 적절한 공기질 관리 방안 마련에 필요한 기초 연구 자료로써 활용이 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 소방청 소방대응력향상을 위한 연구개발지원사업("NFRI-정책-2019-01")의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- ATSDR. Case studies in environmental medicine toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs). 2012
- EPA. Health assessment document for diesel emissions. National Center for Environmental Assessment-Washington Office, Office of research and development U.S. Environmental Protection Agency EPA/600/8-90/057F available from National Technical Information Service, Springfield, VA; PB2002-107661, 2002
- FEMA. Safety and health considerations for the design of fire and emergency medical services stations. U.S. Fire Administration, 2018
- Garchick E, Laden F, Hart JE, Rosner B, David ME et al. Lung cancer and vehicle exhaust in trucking industry workers. Environ Health Perspect 2008; 116:1327-1332
- Health and Safety Executive(HSE). Control of diesel engine exhaust emissions in the workplace. third edition, 2012
- IARC. IARC: Diesel engine exhaust carcinogenic. 2012:12
- IARC. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: diesel and gasoline engine exhaust and some nitroarenes. 2013:105
- Kear T and Niemeier D. Diesel particulate matter: risk management strategies for the transportation planning process. Urban transport X. 2004;75:p 12
- Kim SJ, Ham SH. Effect of an exhaust reduction system in fire stations. Sustainability 11,6358:doi:10.3390/su11226358, 2019
- Kim SJ, Ham SH, Jeon JS, Kim W. Characterization of secondary exposure to chemicals and indoor air quality in fire station. Fire Sci Eng 2019;33(4): 140-151
- McDonald JD, Campen MJ, Harrod KS, Seagrave JC, Seilkop SK et al. Engine-operating load influences diesel exhaust composition and cardiopulmonary and immune response. Environ Health Persp 2011; 119:1136-1141

Michalak G, Diesel emissions in fire stations, 2004
National Institute for Occupational Safety and Health
(NIOSH). Recommended Exposure Limits(RELs)
from the NIOSH pocket guide to chemical hazards
(<https://www.cdc.gov/niosh/npg>)
National Fire Protection association. NFPA 101 Life safety
code. 2018 version
NIOSH. Kelly J, Sheehy J. Health hazard evaluation report
HETA 92-0384. Kettering fire department,
Kettering, Ohio, 193AD 1990 Nov

Taxell P and Santonen T. Diesel engine exhaust: Basic for
occupational exposure limit value. Toxicological
Sciences 2017;158(2):243-251
Sydbom A., Blomberg A., Parnia S., Stenfors N.,
Sandstrom T. et al. Health effects of diesel exhaust
emissions. European Respiratory 2001;17:733-746

<저자정보>

박제섭(책임연구원), 한동훈(대응기술연구실장)