

항공기 기내 청소노동자의 분진, 초미세먼지(PM_{2.5}) 및 블랙카본 노출수준 평가

박현희* · 김세동 · 김성호 · 박승현
한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Exposure Assessment of Dust, Ultra Fine Dust(Particulate Matter 2.5, PM_{2.5}) and Black Carbon among Aircraft Cabin Cleaners

Hyunhee Park · Sedong Kim · Sungho Kim · Seung-Hyun Park
Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

ABSTRACT

Objectives: Aircraft cabin cleaning work is characterized by being performed within a limited time in a narrow and enclosed space. The objective of this study was to evaluate the exposure levels to dust, ultra fine dust(PM_{2.5}) and black carbon(BC) among aircraft cabin cleaners.

Methods: Active personal air sampling for respirable dust(n=73) and BC(n=47) was conducted during quick transit cleaning(cabin general and vacuum-specific) and seat cover replacement and total dust and PM_{2.5} were area-air-sampled as well. Also, size distribution of particle was identified with the cleaning workers targeted. Dusts were collected with PVC filters using gravimetric analysis. The concentration of PM_{2.5} and the particle size distribution were measured with real-time direct reading portable equipment using light scattering analysis. The concentration of BC was measured by aethalometer(filter-based real-time light absorption analysis instrument).

Results: The geometric mean of respirable dust was the highest at vacuum cleaning as 74.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, following by replacing seat covers as 49.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and cabin general cleaning as 47.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The arithmetic mean of PM_{2.5} was 4.83 ~ 9.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ inside the cabin, and 28.5~44.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ outside the cabin(from bus and outdoor waiting space). From size distribution, PM_{2.5}/PM₁₀ ratio was 0.54 at quick transit cleaning and 0.41 at replacing seat covers. The average concentration of BC was 2~7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, showing a high correlation with the PM_{2.5} concentration.


Conclusions: The hazards concentration levels of aircraft cabin cleaners were very similar to those of roadside outdoor workers. As the main source of pollution is estimated to be diesel vehicles operating at airports, and it is necessary to replace older vehicles, strengthen pollutant emission control regulations, and introduce electric vehicles. In addition, it is necessary to provide as part of airport-infrastructure a stable standby waiting space for aircraft cabin cleaners and introduce a systematic safety and health management system for all workers in the aviation industry.


Key words: aircraft cleaner, aviation industry, black carbon, diesel engine exhaust, PM_{2.5}


*Corresponding author: Hyunhee Park, Tel: ***-****-**** E-mail: bioaerosol@kosha.or.kr,


400, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44429, Republic of Korea

Received: March 23, 2023, Revised: April 19, 2023, Accepted: May 4, 2023

 Hyunhee Park <http://orcid.org/0000-0003-1506-9505>

 Sungho Kim <http://orcid.org/0000-0002-0158-1244>

 Sedong Kim <http://orcid.org/0000-0001-8691-3545>

 Seung-Hyun Park <http://orcid.org/0000-0002-6515-4428>

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.

I. 서 론

세계항공수요(revenue passenger kilometers, RPKs)는 과거 10년간(2008~2017) 세계 GDP(Gross Domestic Product)의 연간평균성장률인 2.3%보다 3.2%p 높은 5.5%의 성장률을 나타내었다(KCA, 2018; ICAO, 2018; IMF, 2020). RPKs는 2020년 코로나19로 인한 급격한 감소(-69.7%)를 경험하였으나(IATA, 2020), 최근 다시 증가하여 2019년의 67.7% 수준(2022년 7월 기준)을 회복하였다(IATA, 2022). GDP 상승은 삶의 질을 높여 항공여행을 갈 수 있는 여건을 개선하였으며, 저비용 항공사의 성장으로 더 많은 여객들이 더 저렴한 운임으로 여행할 수 있게 되었다. 이러한 항공운송산업의 성장으로 항공기가 착륙하여 다시 이륙할 때까지 지상에서 이루어지는 항공기 유도, 정비, 청소, 케이터링(catering) 및 수화물 운송 등 지상조업(aircraft ground handling) 수행 노동자수도 함께 증가하였다(Lee et al., 2018).

한국에서는 '18~19년 항공기 기내 청소노동자의 살충소독제 중독 재해 및 청소제품에서 발암성 및 생식독성물질이 함유되었다는 논란이 발생하면서 청소노동자를 대상으로 하는 전반적인 작업환경 유해성 평가의 필요성이 제기되었다(Kim et al., 2019a; Park et al., 2019). 항공기 기내 청소는 항공기의 환승 시 이루어지는 일반청소(quick transit cleaning), 장시간 체류 시 이루어지는 특별청소(layover or special cleaning), 소독살균이 함께 이루어지는 정밀청소(deep cleaning) 등으로 구분되어 시행된다(Yeung et al., 2005; Kim et al., 2018). 일반청소는 정리정돈, 쓰레기 수거 및 화장실 청소를 주로 수행하고(약 20~40분 소요), 특별청소는 진공청소, 유리창 및 선반 청소, 시트교체 등이 추가 수행되며(약 60~90분 소요), 정밀청소는 바닥 스팀청소와 소독살균 등이 추가 수행된다(약 4시간 소요)(Park et al., 2019).

기내 청소작업은 좁고 밀폐된 항공기 내부에서 정해진 시간 내 작업을 수행하여야 하는 특수성이 있으며, 부적절한 작업자세에 의한 근골격계 증상, 비행장에서 청소작업 대기 중 노출되는 소음, 미세먼지, 디젤엔진 배출물(diesel engine exhaust, DEE), 청소세제, 소독제 등에 함유된 화학물질 및 야간, 교대근무 등에 따른 심리적 유해요인 등에 노출된다(Yeung et al., 2005). 또한, 항공기 청소노동자를 대상으로 실시한 설

문조사에서 기내 청소작업 시 발생하는 분진 노출에 대한 불편함 호소가 높다고 보고하였다(Kim et al., 2018). 미세먼지는 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 사람에게 암을 유발할 수 있는 물질로 규정하였으며(IARC, 2016), 폐암 발생 위험 뿐 아니라(Pope et al., 2011), 뇌에 작간접적 영향을 미쳐 우울증, 감정기복을 유발하고(Kim et al., 2016; Liu et al., 2017; Zhang et al., 2019), 두통(Chang et al., 2015; Li et al., 2019), 알레르기성 결막염(Torricelli et al., 2013; Miyazaki et al., 2019) 및 비염 증상을 악화시킨다고(Wang et al., 2020) 알려져 있다. 특히, 입자의 공기역학적 직경이 2.5 μm 이하인 초미세먼지(particulate matters, PM_{2.5})는 사망률을 증가시키고, 호흡기 질환 및 심혈관질환을 유발하는 것으로 알려져 있다(Ejohwomu et al., 2022).

공항 내에는 지상조업에 사용되는 토잉 트랙터(towing tractor, 비행기를 주기장으로 이동하는 장비), 스텝카(step car, 승객 탑승용 계단) 등 매우 다양한 디젤엔진차량이 사용되는데, 디젤엔진차량은 도로교통법에 적용을 받지 않고, 상대적으로 노후되어 배기가스 관리가 소홀한 편이다. IARC은 약 30년의 역학연구 결과를 분석하여 DEE를 인간에 폐암을 일으키는 확실한 물질로(Group 1), 방광암을 일으키는 원인의심물질로 분류하였다(IARC, 2013). 또한 눈 및 점막의 자극, 기침, 가래 등과 같은 호흡기 증상, 가벼운 두통과 어지러움 등도 발생한다고 하였다(US EPA, 2002). 국내 항공교통산업종사자를 대상으로 실시한 집단 역학조사에서 직종별 질환 발병 위험성평가를 실시하였는데, 지상조업직이 포함된 장치기계 조직원 및 단순 노무직 종사자(남성)집단의 폐암 표준화발병비가 1.44(95% 신뢰구간 0.98~2.05), 흡연상태 등을 보정한 비례위험도가 1.32(95% 신뢰구간 0.92~1.89)로 보고하였다(Lee et al., 2021).

그동안 항공기 청소노동자에 특화된 연구는 없었으나, 대학건물 및 병원 청소 노동자의 건강영향을 조사한 연구(Bello et al., 2013; Lee et al., 2014)가 있었고, 청소노동자에 대한 종설(review)연구에서 호흡기질환, 피부질환, 근골격계질환, 감염, 정신장애 등에 대한 건강영향이 우려됨을 보고하였다(Charles et al., 2009). 청소 작업자의 직업성 천식, 비염(Folletti et al., 2014; Vizcaya et al., 2011). 호흡기 증상(Svanes et al.,

2015) 및 접촉성 피부염(Bauer et al., 2013) 발생이 보고되었다. 기내 청소작업에서는 소독제(Kim et al., 2019a), 세제 등에 함유된 화학물질(Bello et al., 2013; Heo et al., 2016) 및 일부 세균, 곰팡이 등 미생물 노출평가가 보고된 사례(Kim et al., 2022)는 있었으나, 분진 및 DEE에 대한 노출농도 수준에 대해서는 보고된 바가 없었다. 이번 연구에서는 항공기 청소 노동자에게 노출되는 분진 농도와 입경분포, PM_{2.5}, DEE의 노출지표 물질로 알려진(Kim et al., 2019b) 블랙카본(black carbon, BC)에 대한 평가를 실시하고, 작업환경관리방안을 마련하고자 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

국내 3개(김해, 김포, 인천) 공항의 각 2개 청소협력업체(총 6개소)를 대상으로 일반청소(캐빈정리, 진공청소), 시트교체, 버스이동 작업으로 구분하여 업체별 2~3일 (일별 6~13명) 연속 측정을 수행하였다. 청소협력업체 5개소는 대형항공사와 저비용항공사 항공기 청소를 함께 수행하였고, 1개소는 저비용항공사 항공기 청소만을 수행하였다. 연구대상 사업장은 Table 1과 같다. 시료채취는 2019년 4월~6월에 개인 및 지역시료 채취방식을 병행하였고, 오전 6시에서 오후 3시에 작업하는 주간 근무조의 전체 작업시간 약 360~480분을 대상으로 실시하였다. 개인시료 채취방법으로 청소노동자의 호흡기 주변에서 호흡성 분진(개인), 블랙카본(BC)

에 대한 평가를 수행하였고, 지역시료 채취방법으로 청소작업 중 항공기 앞, 뒤, 중앙 3개 지점 및 청소노동자 이동용 버스 중앙(선반)의 작업자 호흡기 높이에 측정기를 고정하여 총분진, 호흡성 분진(지역), 초미세먼지(PM_{2.5}) 및 분진의 입경분포에 대한 평가를 수행하였다. PM_{2.5} 및 분진의 입경별 분포는 직독식 장비를 사용하여 실시간으로 살펴보았다. 사업장별 측정인자의 시료 채취수 및 위치는 Table 2와 같다. 개인시료 채취 시 평가대상자에게 측정 목적 및 취지를 충분히 설명하여, 동의를 거친 후 실시하였으며, 개인별 측정결과는 실명을 사용하지 않고, 직무 및 작업별 평균, 편차, 범위만 표기됨을 안내하였다.

2. 연구 방법

1) 총분진 및 호흡성 분진 농도 측정 및 분석

총분진 및 호흡성 분진의 시료채취는 중량 분석한 PVC 여과지(Poly Vinyl Chloride, 직경 37mm, 공극 5um, SKC Inc., USA)를 카세트(3-piece cassette) 및 알루미늄 싸이크론(SKC Inc., USA)에 각 장착하고 고유량 시료채취기(high volume air sampler, Casella Apex2, UK)를 사용하여 채취하였다. 시료채취 유량은 총분진은 2 Lpm(Liter per minute), 호흡성 분진은 2.5 Lpm(호흡성 분진, 4 μm-cut-point)으로 작업시간동안 시료를 채취하였다. 시료채취기는 작업 전, 후 유량보정기(Dry cal, Defender 520-M, MesaLabs, USA)를 사용하여 유량을 보정하였다.

중량 분석을 위해 시료채취 전 PVC 여과지를 데시케

Table 1. Target monitoring workplace

Airport	Company	Carrier Type	Cleaning Type	No. of Workers	No. of work shift group	Sampling Period (Duration)
GH	A	LCC*	Quick Transit	14	Day(AM, PM) 2 group	April, 2019 (3 days)
GH	B	FSC [†] , LCC	Quick Transit	90	Day(AM, PM) 8 group	April, 2019 (2 days)
GP	C	FSC, LCC	Quick Transit, Layover	76	Day(AM, PM) 6 group Night 1 group	April, 2019 (3 days)
GP	D	FSC, LCC	Quick Transit	109	Day(AM, PM) 9 group	May, 2019 (3 days)
IC	E	FSC, LCC	Seat Change	46	Day(AM) 6 group	May, 2019 (2 days)
IC	F	FSC, LCC	Quick Transit	250	Day(AM, PM) 15 group Night 7 group	June, 2019 (3 days)

*LCC : Low Cost Carrier

[†]FSC : Full Service Carrier

Table 2. Sampling method, time(interval) and location(task) by hazards

Company	Sampling Type	Hazards (measurement)	Sampling method	Sampling time(interval)	N*	Location(task)
A	Personal	Respirable dust	Filter-based	>6 hr	9	Cabin 9
		Black carbon	Light absorption	10 sec	8	Cabin 8
B	Personal	Respirable dust	Filter-based	>6 hr	5	Cabin 5
		Black carbon	Light absorption	10 sec	6	Cabin 6
	Area	Dust (total & respirable)	Filter-based	>6 hr	6	Cabin 5, bus 1
PM2.5 [†]		Light scattering	10 sec	3	Cabin 2, bus 1	
C	Personal	OPC [‡] , OPS [§]	Light scattering	6 sec, 10 sec	1	Cabin 1
		Respirable dust	Filter-based	>6 hr	22	Cabin 16, vacuum 6
		Black carbon	Light absorption	10 sec	9	Cabin 9
	Area	Dust (total & respirable)	Filter-based	>6 hr	8	Cabin 6, bus 2
		PM2.5	Light scattering	10 sec	3	Cabin 2, bus 1
D	Personal	OPC, OPS	Light scattering	6 sec, 10 sec	1	Cabin 1
		Respirable dust	Filter-based	>6 hr	10	Cabin 6, vacuum 4
		Black carbon	Light absorption	10 sec	9	Cabin 9
	Area	Dust (total & respirable)	Filter-based	>6 hr	9	Cabin 6, bus 3
		PM2.5	Light scattering	10 sec	3	Cabin 2, bus 1
E	Personal	OPC, OPS	Light scattering	6 sec, 10 sec	1	Cabin 1
		Respirable dust	Filter-based	>6 hr	12	Seat replacement 12
		Black carbon	Light absorption	10 sec	6	Seat replacement 6
	Area	Dust (total & respirable)	Filter-based	>6 hr	5	Seat replacement 6
		PM2.5	Light scattering	10 sec	3	Cabin 2, bus 1
F	Personal	OPC, OPS	Light scattering	6 sec, 10 sec	1	Cabin 1
		Respirable dust	Filter-based	>6 hr	15	Cabin 9, vacuum 6
		Black carbon	Light absorption	10 sec	9	Cabin 9
	Area	Dust (total & respirable)	Filter-based	>6 hr	5	Cabin 5
		PM2.5	Light scattering	10 sec	3	Cabin 2, bus 1
		OPC, OPS	Light scattering	6 sec, 10 sec	1	Cabin 1

*N: number of Sampler †PM2.5 : Particulate Matter 2.5
 ‡OPC : optical particle counter §OPS : optical particle sizer

이트에서 1일 이상 건조 시키고, 중량분석실에서 2시간 이상 안정화한 후, 해독도 10⁻⁷ g인 전자저울(XP2U, Mettler toledo, Switzerland)에서 무게를 칭량하였다. 무게칭량은 3회 측정 후 평균값을 시료채취 전 무게로 하였다. 채취된 시료 및 현장 공시료도 데시케이트에서 1일 이상 두어 건조 시키고, 중량분석실에서 2시간 이상 안정화한 후, 3회 중량을 측정하고 평균값을 시료채취 후 무게로 하였다.

$$C = \frac{(W_a - W_b) - (B_a - B_b)}{V}$$

- C : 분진 농도(mg/m³)
- W_a : 시료의 시료채취 후 무게(mg)
- W_b : 시료의 시료채취 전 무게(mg)
- B_a : 공시료의 시료채취 후 무게(mg)
- B_b : 공시료의 시료채취 전 무게(mg)
- V : 채취 공기량(m³)

2) 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 측정 및 분석

PM_{2.5}의 측정은 광산란 방식의 휴대용 장비(Sidepak AM 520, TSI Inc., USA)를 이용하여 실시간으로 청소 작업동안 측정하였다. 기기에 부착된 PM_{2.5} 전용 임팩터(impactor)를 이용하여 분진의 공기역학적 직경이 2.5 μm 이상인 분진은 제거하고 채취하였으며, 유량은 1.7 Lpm을 유지하였다. 농도 측정은 매 10초 간격으로 연속 저장하였다. 장비는 항공기내 앞, 뒤, 중앙 또는 청소작업자가 타고 다니는 이동버스 내부 등에 고정하여 측정하였다. 측정기기의 공기 유입구는 가능한 작업자의 호흡기 영역에 가까운 장소에 설치하였다. 저장된 자료는 제조사의 소프트웨어 프로그램(TRAKPRO, TSI, USA)를 이용하여 다운로드 받았으며, 중량농도로 환산하기 위한 농도보정계수는 일반 공기질 측정(ambient air)에 적용하는 0.38을 곱하여 사용하였다.

3) 분진의 입경별 분포

분진의 입경별 분포는 광산란 방식의 휴대용 장비(optical particle counter, OPC, Model 1.109, Grimm Aerosol Technik Co., Germany 및 optical particle sizer, OPS, Model 3330, TSI Inc., USA)를 이용하여 실시간으로 청소작업자의 작업동선과 병행하며 측정하였다. 측정간격은 OPC 6초, OPS 10초로 평가하였고, 입자의 밀도는 1.0 g/cm³으로 설정하였다. OPC 장비는 0.25~32 μm 크기의 입자를 31개 입자크기 구간으로 나누어 평가하고 측정자료를 중량으로 환산하여 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, 흡입성(inhalable), 흉곽성(thoracic), 호흡성(alveolic) 분진별 농도로 평가하였다. OPS 장비는 0.3~10 μm 크기의 입자를 16개 입자크기 구간으로 나누어 평가하고, 입경별 중량농도 및 수농도 누적분포 수준을 살펴보았다.

4) 블랙카본(Black carbon, BC)

BC는 원소탄소(elemental carbon, EC)와 더불어 공기 중 DEE의 노출지표로 사용되는데, EC와 BC는 화학적 성분에 따른 분류는 아니며, 여과지법으로 탄소성분을 평가하면 EC, 실시간 측정기에 의한 결과는 BC 농도로 부른다. 최근 실시간 측정이 가능한 BC를 DEE의 노출 추정연구에 활용하는 연구가 증가하고 있다(Kim et al., 2019b). BC 농도 측정은 에살로미터(aethalometer, Model MA 200, Arthlabs Inc., USA)를 사용하였는데, 기기 내부의 여과지(polytetrafluoroethylene, PTFE)에 채취되는 입

자에 의해 5개 파장(375, 470, 528, 625, 880 nm)의 빛이 감쇄되는 정도(투과광 변화율)를 각 파장별 질량 농도로 변환하는데, BC농도는 880 nm 파장에서 측정한 값으로 산출하였다. 측정결과는 10초 간격으로 기기 내에 저장하였으며, 유량은 150 ml/min으로 설정하였다.

5) 자료의 처리

공기 중 시료채취방법으로 측정한 결과는 자료의 정규성 검정을 실시하여 분포 특성을 살펴보았으며, 분석물질에 따라 정규분포 또는 대수정규분포를 따르지 않는 평가 그룹이 존재하여 평균값을 산술평균(arithmetic mean, AM)과 기하평균(geometric mean, GM) 등으로 모두 제시하였다. 평균비교는 분산분석(ANOVA) 및 T-검정(t-test), 유해인자 간 상관관계 분석은 pearson 상관관계 분석을 실시하였다. 자료 분석을 위한 통계처리는 SPSS 프로그램(ver. 18.0, IBM, USA)을 이용하였다.

III. 결 과

1. 공기 중 노출평가 결과

1) 총분진 및 호흡성 분진

개인시료로 채취한 호흡성 분진 농도의 각 작업별 자료 분포는 서로 상이하였는데(Table 3), 캐빈정리의 경우 2개의 상위 최대값(281 μg/m³, 146 μg/m³)을 이상치로 제거하면 정규 분포하는 특성이 있었고, 진공청소는 1개의 최대값(454 μg/m³)을 제거 시 대수정규 분포하는 특성이 있었다. 시트교체작업의 경우 이상치 제거 없이 대수정규 분포하는 특성이 있었다. 자료는 이상치를 제거하지 않고 전체자료에 대한 AM, GM, 중위수를 제시하였다. 진공청소에서 AM 98.2 μg/m³, GM 74.4 μg/m³로 가장 높았고, 캐빈정리 AM 56.3 μg/m³, GM 47.8 μg/m³, 시트교체에서 AM 52.6 μg/m³, GM 49.3 μg/m³ 수준이었으며 작업종류에 따라 통계적으로 유의하게 달랐다(p<0.05). 다만, 동일 작업을 수행한 사업장별 호흡성 분진 농도는 통계적으로 유의하게 다르지 않았다(p>0.05).

지역시료로 채취한 호흡성 분진 노출평가 자료는 대수정규 분포하는 특성이 있었으며, 기내 일반청소에서 GM 50.5 μg/m³, 이동버스 내부(고정)에서 측정한 농도는 56.1 μg/m³, 시트교체에서는 62.7 μg/m³ 수준이었다. 총분진은 기내 일반청소에서 GM 83.0 μg/m³, 이동버스 내부에서 측정한 농도가 77.9 μg/m³, 시트교체에

Table 3. Concentration of respirable dust exposed to aircraft cleaning workers by cleaning task and companies (Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Cleaning task	Company	Airport	N*	GM [†] (GSD [†])	Mean \pm SD [§]	Median	Min	Max	p-value
Quick transit cleaning -cabin general	A	GH	9	42.9 (1.65)	48.4 \pm 27.7	39.1	23.5	100.7	p>0.05
	B	GH	5	65.3 (2.30)	93.1 \pm 105.8	46.5	36.3	281.9	
	C	GP [¶]	16	52.1 (1.26)	53.4 \pm 12.3	55.3	37.7	76.6	
	D	GP	6	59.9 (1.82)	69.7 \pm 43.6	56.3	28.2	146.0	
	F	IC ^{**}	9	32.9 (2.08)	40.2 \pm 22.4	41.3	11.8	68.9	
	Total		45	47.8 (1.75)	56.3 \pm 42.0	46.5	11.8	281.9	-
Quick transit cleaning -cabin vacuum	C	GP	6	66.8 (1.68)	76.3 \pm 51.4	57.4	42.6	179.0	p<0.05
	D	GP	4	104.1 (2.95)	166.1 \pm 194.3	87.6	34.6	454.6	
	F	IC	6	66.2 (1.69)	74.9 \pm 43.4	54.0	38.5	149.3	
	Total		16	74.4 (1.96)	98.2 \pm 103.4	59.7	34.6	454.6	-
Seat-cover replacement	E	IC	10	49.3 (1.48)	52.6 \pm 19.2	50.7	21.2	90.5	-
Seat-cover bolting	E	IC	2	30.6 (1.75)	33.1 \pm 17.7	33.1	20.6	45.6	-

*N : Number of samples †GM : Geometric Mean ‡GSD : Geometric Standard Deviation
 §Mean \pm S.D. : Arithmetic mean \pm Standard Deviation ||GH : Gimhae Airport, ¶GP : Gimpo Airport, **IC : Incheon Airport

Table 4. Concentrations of total and respirable dust at aircraft cleaning workplace(area sample) (Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Cleaning task	Respirable Dust							Total Dust						
	N*	GM [†] (GSD [†])	Mean \pm SD [§]	Median	Min	Max	p	N	GM(GSD)	Mean \pm SD	Median	Min	Max	p
Cabin cleaning	22	50.5 (1.78)	59.4 \pm 36.2	49.9	17.5	133.4		26	83.0 (1.92)	112.2 \pm 148.2	80.5	38.3	812.5	
Bus (installed)	6	56.1 (1.59)	60.3 \pm 20.7	67.8	22.8	80.7	p>0.05	7	77.9 (1.47)	82.6 \pm 29.2	86.3	44.3	128.9	p>0.05
Seat-cover replacement	6	62.7 (1.65)	69.4 \pm 33.1	64.1	31.5	117.8		6	80.8 (1.48)	86.6 \pm 34.4	78.0	44.8	127.9	

*N : Number of samples †GM : Geometric Mean ‡GSD : Geometric Standard Deviation §Mean \pm S.D. : Arithmetic mean \pm Standard Deviation

서는 80.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이었다. 호흡성 분진과 총분진 모두 작업별 농도는 통계적으로 유의하게 다르지 않았다 (p>0.05)(Table 4).

2) 초미세먼지 (Particulate Matters 2.5, PM_{2.5})

사업장별 PM_{2.5} 농도는 광산란방식의 직독식 실시간 장비를 사용하여, 청소 작업장소별 일간평균으로 살펴 보았다(Table 5). 직독식 장비를 통해 작업시간 중 10 초 간격으로 측정하여 자료수가 일별 1,000여건 이상이었으며, 정규 분포하는 특성이 있었다. PM_{2.5}의 농도 평가가 이루어진 사업장 B, C, D, E, F에서 캐빈 내

부에서는 AM이 각 4.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 5.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 6.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 9.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 7.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준인 반면, 청소대기 중 (이동버스 및 비행장)에는 B~F 사업장별 각 44.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 42.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 28.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 30.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 18.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 항공기 내부 청소작업보다 이동 및 대기 중 노출농도가 각 10.2배, 7.7배, 4.3배, 3.08배, 2.5배 높았다. 사업장 B~F에서 측정기간 동안 대기환경 관측소의 PM_{2.5}(air_Korea) 농도는 GM 각 21.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 31.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 25.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 19.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 13.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 이동버스 내부에서 평가한 값과 유사하였고, 사업장 B에서는 이동버스 내부가 대기환경보다 약 2배 높았다.

Table 5. Concentrations of PM_{2.5} at aircraft cabin cleaning by workplace(direct reading – area sample)

(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Cleaning workplace	Company B						Company C					Company D			
	N*	GM [†] (GSD [†])	Mean±SD [§]	Min	Max	N	GM (GSD)	Mean±SD	Min	Max	N	GM (GSD)	Mean±SD	Min	Max
Cabin	2,009	3.06 (2.70)	4.83±5.33	0.38	50.16	2,539	3.48 (2.280)	5.55±8.67	0.58	103.0	432	5.04 (2.25)	6.61±4.2	1.0	16.0
Standby	8,741	35.9 (2.32)	44.5±22.2	0.38	252.7	9,045	31.8 (2.24)	42.8±32.8	1.0	390.0	9,108	20.2 (2.40)	28.5±24.0	1.0	390.0
Bus	2,122	47.9 (1.29)	49.6±12.7	21.7	113.2	6,043	30.5 (1.95)	38.6±28.9	7.51	200.0	5,091	26.2 (1.87)	32.2±22.6	3.0	157.0
Air Korea	31	21.8 (1.34)	22.7±6.2	11.0	24.0	56	31.1 (1.46)	33.4±12.4	12.0	71.0	53	25.8 (1.37)	27.0±7.8	9.0	47.0

Cleaning workplace	Company E					Company F				
	N	GM(GSD)	Mean±SD	Min	Max	N	GM (GSD)	Mean±SD	Min	Max
Cabin	8,246	6.24 (2.77)	9.89±9.4	1.0	57.0	3,014	5.1 (2.33)	7.4±7.5	1.0	146.0
Standby	4,178	24.6 (2.10)	30.5±17.1	1.0	81.0	2,529	14.4 (2.14)	18.3±12.1	1.0	124.0
Bus	3,654	23.5 (1.58)	26.3±13.3	12.0	64.0	2,883	11.7 (1.98)	13.8±6.4	1.0	58.0
Air Korea	32	19.6 (1.29)	20.2±4.6	11.0	29.0	55	13.7 (1.29)	14.1±3.2	6.0	23.0

*N : Number of direct reading data †GM : Geometric Mean †GSD : Geometric Standard Deviation
 §Mean±S.D. : Arithmetic mean±Standard Deviation ||Air Korea: Atmospheric observatory

3) 블랙카본(Black carbon, BC)

기내청소작업자 47명을 대상으로 실시간 측정된 BC 농도의 사업장별(A~F) 일간 평균농도는 AM으로 각 3.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 3.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 4.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다(Table 6). 전체 사업장의 평균농도는 3.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 공항 및 청소협력업체에

따른 평균 노출 농도 수준을 통계적으로 유의하게 서로 상이하였다($p < 0.05$). 47명의 개인별 노출평가 결과에서 일별 AM 최대값은 6.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 시료가 2개(4.25%), 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 시료가 11개(23.4%), 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 시료는 24개(51%)가 있었다.

Table 6. Concentration of black carbon exposed to aircraft cleaning workers by cleaning companies

(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Cleaning task	Company	Airport	N*	GM [†] (GSD [†])	Mean±SD [§]	Median	Min	Max	p-value
Quick transit cleaning -cabin general	A	GH	8	1.93 (3.21)	3.70±8.21	2.14	0.004	303.24	p<0.05
	B	GH	6	2.64 (2.86)	3.94±3.53	3.18	0.004	97.87	
	C	GP [¶]	9	2.74 (2.75)	4.04±3.93	3.21	0.006	105.07	
	D	GP	9	1.71 (2.66)	2.51±3.02	2.03	0.004	112.78	
Seat-cover replacement	F	IC ^{**}	9	1.07 (3.18)	1.95±3.87	1.19	0.004	128.10	
	E	IC	6	1.03 (2.88)	1.59±2.02	1.22	0.004	91.50	
Total			47	1.76 (3.12)	3.01±4.65 ⁺⁺	2.01	0.004	303.24	-

*N : Number of samplers †GM : Geometric Mean †GSD : Geometric Standard Deviation
 §Mean±S.D. : Arithmetic mean±Standard Deviation ||GH : Gimhae Airport, ¶GP : Gimpo Airport, **IC : Incheon Airport
 ++ Standard error

2. 유해인자별 상관관계 분석 결과

PM_{2.5}(Air_Korea)와 청소작업자 작업동선과 병행하여 지역시료 채취방법으로 측정된 PM_{2.5}(앞, 중앙, 뒤) 농도는 각 0.387 (p<0.01), 0.555 (p<0.01), 0.416 (p<0.01)의 상관관계를 보였고, 이동 버스에 고정하였던 측정기에서 농도와 0.361 (p<0.01)의 상관관계를 보였다. 청소 작업자의 BC 농도는 PM_{2.5}(앞, 중앙, 뒤)와 약 0.28~0.58 (p<0.01)의 상관관계가 있는 것으로 평가되었고, PM_{2.5}(Air_Korea)와 0.19~0.48 (p<0.01)의 상관관계를 보였다(Table 7).

3. 분진의 입경분포

항공기 청소작업자에게 노출되는 분진의 입경별 분포를 확인하기 위해 측정장비 OPC를 사용하여 평가한 결과는 Table 8과 같았다. 사업장 B에서는 2일간 평균으로 PM₁₀ 39.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 21.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁ 18.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,

흡입성 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 흉곽성 41.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 호흡성 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이었다. 사업장 C에서는 3일간 평균으로 PM₁₀ 50.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁ 24.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 흡입성 90.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 흉곽성 52.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 호흡성 33.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이었다. 사업장 D에서는 3일간 평균으로 PM₁₀ 36.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 19.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁ 15.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 흡입성 83.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 흉곽성 37.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 호흡성 22.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이었다. 시트교체 작업을 수행하는 사업장 E에서는 2일간 평균으로 PM₁₀ 24.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 10.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁ 7.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 흡입성 52.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 흉곽성 26.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 호흡성 12.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이었다. PM₁₀ 중 PM_{2.5}는 사업장 B ~ D에서 53.2~55.0%, 사업장 E에서 41.3%였고, PM_{2.5} 중 PM₁은 사업장 B ~ D에서 약 75.5 ~ 79.5%, 사업장 E에서 56% 수준이었다.

광산란 방식의 휴대용 장비 OPS를 사용하여 입경별 누적분포를 살펴보면, 1 μm 이하 입자에 대한 사업장의

Table 7. Correlation between PM_{2.5} and black carbon concentrations of aircraft cleaning work (area sample)

Classification		PM2.5 Aircraft_Front	PM2.5 Aircraft_Center	PM2.5 Aircraft_Rear	PM2.5_Bus	PM 2.5 Air_Korea	Black Carbon_1	Black Carbon_2	Black Carbon_3
PM2.5 Aircraft_Front	Pearson correlation	1							
	p-value								
	N [†]	23,858							
PM2.5 Aircraft_Center	Pearson correlation	.897**	1						
	p-value	.000							
	N	9,423	9,424						
PM2.5 Aircraft_Rear	Pearson correlation	.902**	.903**	1					
	p-value	.000	.000						
	N	21,693	7,296	21,694					
PM2.5_Bus	Pearson correlation	.672**	.454**	.730**	1				
	p-value	.000	.000	.000					
	N	21,255	7,171	19,098	21,255				
PM2.5_Air_Korea	Pearson correlation	.387**	.555**	.416**	.361**	1			
	p-value	.000	.000	.000	.000				
	N	23,858	9,424	21,694	21,255	23,859			
Black Carbon_1	Pearson correlation	.304**	.323**	.300**	.287**	.193**	1		
	p-value	.000	.000	.000	.000	.000			
	N	17,769	7,433	15,804	15,854	17,770	17,770		
Black Carbon_2	Pearson correlation	.404**	.497**	.349**	.339**	.303**	.344**	1	
	p-value	.000	.000	.000	.000	.000	.000		
	N	19,803	7,606	17,793	17,834	19,804	15,605	19,804	
Black Carbon_3	Pearson correlation	.382**	.587**	.306**	.301**	.344**	.298**	.494**	1
	p-value	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	
	N	18,961	6,785	17,591	16,938	18,962	14,723	16,545	18,962

N[†] : Number of direct reading data
 * : p<0.05, ** : p<0.01

Table 8. Concentrations and ratio of particulate matters exposed to aircraft cleaning workers by cleaning companies (Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Company	Value	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	Inhalable	Thoracic	Alveolic	PM _{1.0} / PM ₁₀	PM _{2.5} / PM _{1.0}	PM _{1.0} / PM _{2.5}	Alveolic / Inhalable	Thoracic / Inhalable	Alveolic / Thoracic
B (N=6,875)	GM [†] (GSD [‡])	31.2(2.2)	16.6(2.3)	13.2(2.6)	42.2(2.7)	32(2.2)	19.8(2.1)						
	Mean \pm SD [§]	39.9 \pm 35.1	21.9 \pm 15.2	18.4 \pm 14.2	76 \pm 202.5	41.2 \pm 40.1	25 \pm 16			0.423	0.532	0.795	0.469
	Median	37.5	21.5	17.9	44.0	38.2	24.7						0.758
	Range	0.7~1125.8	0.7~141.5	0.6~139	0.7~6691.2	0.7~1343.7	0.7~174.1						
C (N=10,242)	GM (GSD)	31.8(3.4)	17.5(3.5)	13.3(3.8)	43.9(4)	32.9(3.4)	20.5(3.4)						
	AM \pm SD	50.9 \pm 42.2	30 \pm 25.7	24.5 \pm 20.9	90.3 \pm 143.3	52.4 \pm 43.8	33.9 \pm 28.4			0.418	0.550	0.760	0.467
	Median	44.4	23.1	14.9	58.4	45.9	27.5						0.749
	Range	0.3~1104.3	0.3~890	0.3~161.2	0.3~3145.7	0.3~1110.3	0.3~979.1						
D (N=8,831)	GM (GSD)	28.6(2.1)	15.5(2.1)	11.7(2.4)	37.9(2.8)	29.2(2.1)	18.5(1.9)						
	AM \pm SD	36.4 \pm 33.3	19.2 \pm 11.9	15.4 \pm 10.3	83.7 \pm 550	37.9 \pm 44.8	22.3 \pm 13.3			0.409	0.542	0.755	0.488
	Median	30.7	15.6	12.1	36.9	31.0	18.9						0.634
	Range	0.4~1677	0.2~150.9	0.2~64.6	0.4~36,918	0.4~2,668	0.4~168.1						
E (N=8,642)	GM (GSD)	12.1(4)	5(3.9)	2.8(5.2)	16.2(5.2)	12.6(4.1)	6.8(3.5)						
	AM \pm SD	24.7 \pm 33	10.1 \pm 10.6	7.3 \pm 7.7	52.4 \pm 139.3	26.2 \pm 36.6	12.6 \pm 13.2			0.231	0.413	0.56	0.420
	Median	13.6	5.8	4.7	16.8	14.3	7.5						0.778
	Range	0~632.8	0~96.2	0~35.2	0~5070.9	0~637.1	0~161.1						

[†]N : Number of direct reading data [‡]GM : Geometric Mean [§]GSD : Geometric Standard Deviation ^{§§}Mean \pm S.D. : Arithmetic mean \pm Standard Deviation

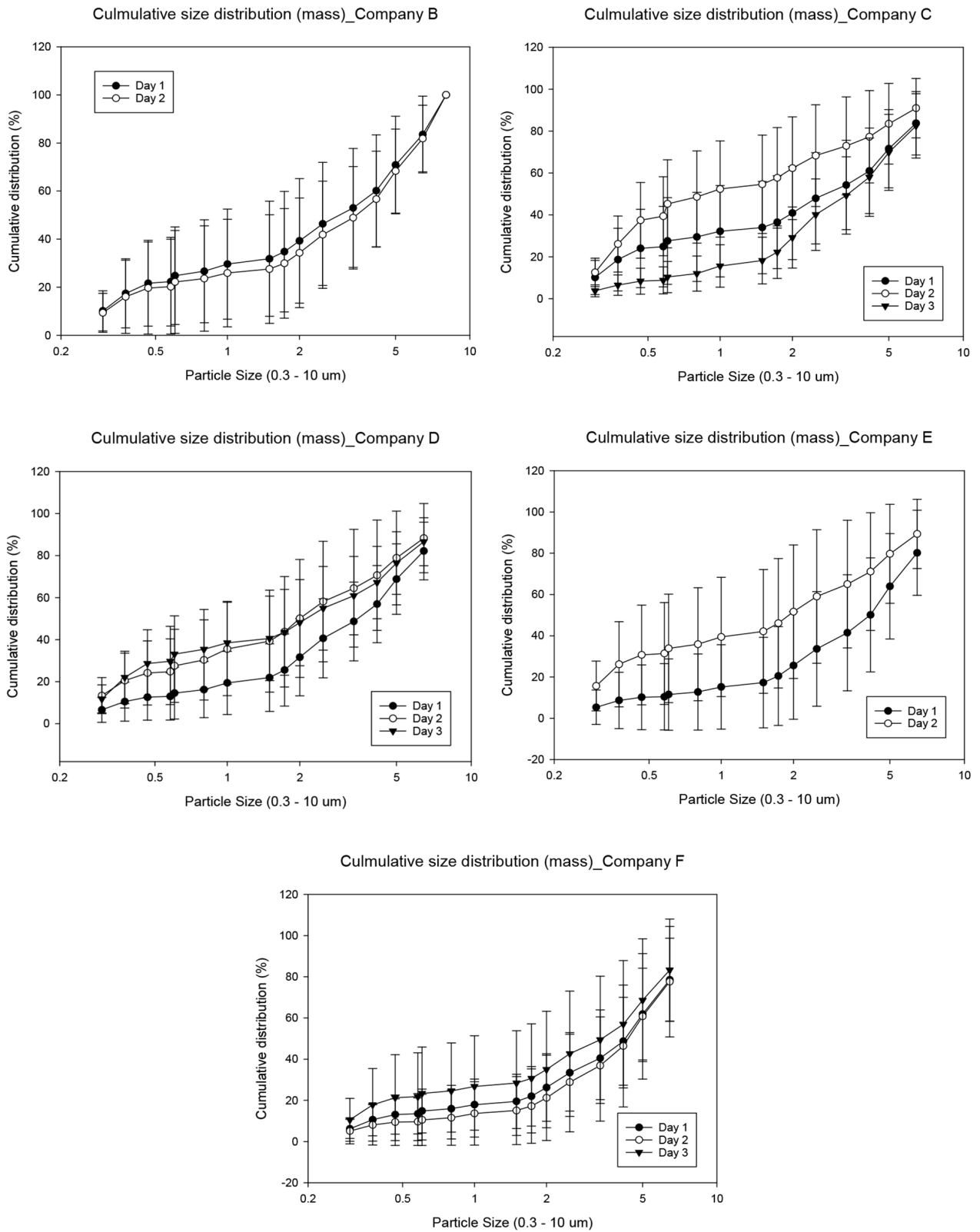


Figure 1. Cumulative size distribution(mass) of particle by OPS(optical particle sizer, TSI, USA)

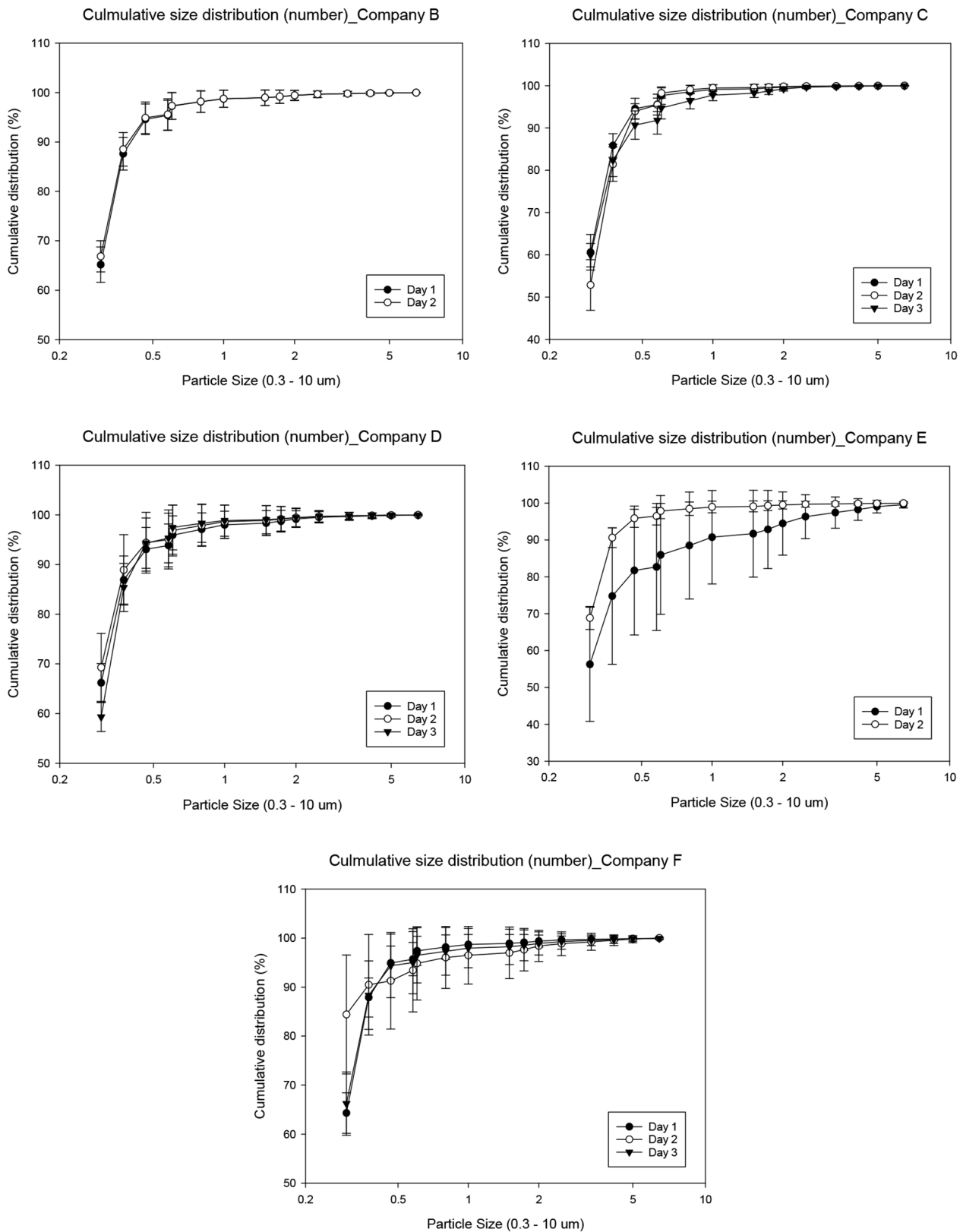


Figure 2. Cumulative size distribution(numbers) of particle by OPS(optical particle sizer, TSI, USA)

일별 중량 누적분포(%)는 사업장 B에서 25.6~29.6%, 사업장 C에서 15.6~52.4%, 사업장 D에서 19.4~38.5%, 사업장 E에서 15.2~39.4%, 사업장 F에서 13.6~26.8% 수준이었으나(Figure 1), 수농도 누적분포(%)로는 모든 사업장에서 1 μm 이하 입자가 90%이상을 차지하고 있음을 알 수 있었다(Figure 2).

IV. 고 찰

본 연구는 국내 항공기 청소노동자의 근무현황 및 작업 중 노출되는 분진, $\text{PM}_{2.5}$ 및 디젤엔진배출물(DEE)의 지표물질인 블랙카본(BC)의 농도수준을 파악하고, 분진의 입경분포, 유해인자와의 상관관계 분석 등을 통해 청소노동자의 작업환경을 개선하고, 유해인자 노출을 최소화할 수 있는 관리방안을 제안하고자 하였다.

국내 항공기 청소업무는 대형항공사의 경우 자회사를 설립하여 지상조업 전반에 대한 도급을 실시하고, 자회사에서 기내 청소작업을 일반, 집중, 시트교체, 소독 등 세부 작업별로 하도급하는 형태로 운영되었다. 저비용 항공사는 대형항공사에서 하도급하는 협력업체와 계약하거나 별도 외국계 전문 지상조업업체를 통해 계약 운영하고 있었다. 국외 항공기 청소업체의 경우 미주지역에서는 항공기 지상조업을 전문으로 하는 조업사에서 청소업무를 수행하고, 유럽 등 지역에서는 공기업 형태의 공항운영사가 청소업무를 수행하여 국내 상황과는 매우 상이하였다(Lee et al., 2018). 기내 일반청소 작업자는 하루 평균 10~12대의 항공기를 이동하면서 청소하였다. 집중청소는 선반, 유리창, 살균소독 등을 포함하는 대청소로 주로 야간에 하루 한 대정도 집중적으로 실시하였다. 국내 항공취급업체(급유업, 하역업, 지상조업사업)는 약 39개로 보고되었는데(2017년 3월 기준), 이 중 지상조업 업무를 포함하는 업체가 27개, 근로자 수 약 2만 명으로 추정하였고(Lee et al., 2018), 이 중 항공기 청소를 수행하는 업체는 약 20개소, 근로자 약 3천명으로 조사되었다(Park et al., 2019). 청소노동자는 항공기 운항스케줄에 따라 지정된 식사 및 휴게시간 없이 불규칙하게 업무가 진행되었으며, 출입이 자유롭지 못한 공항 내 보안구역에서 근무하여 화장실 사용 등 이동에 제한이 많고, 공항 내 대기 및 휴게공간이 없는 경우 이동하는 버스 내부에 머물러야 하는 등 작업조건이 안정적이지 못하였다. 항공기 청소노동자의 공항 내 대기장소를 마련하기 위해서는 각 항공사 또는

협력업체가 공항공사의 승인을 얻고, 높은 임대료를 지불하여야 하므로 일부 청소협력업체는 공항 외부에 청소노동자 탈의실 등을 두고, 공항 내부에서는 이동버스에서 대기하는 경우가 많아 우천, 폭염, 한파 등의 기상 상황에 따라 작업환경이 영향을 받고 있었다.

항공기 청소노동자를 대상으로 실시한 호흡성 분진 노출평가 결과, 최고 농도는 진공청소 시 $\text{GM } 74.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 최대값 $454.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 이는 미국 정부 산업위생 전문가 협회(ACGIH)에서 특정되지 않는 호흡성 분진 권고기준($3 \text{ mg}/\text{m}^3$)과 비교하면, 최대값이 권고기준의 약 15% 수준이었다. 국내 의복제조 봉제업 근로자를 대상으로 호흡성분진을 평가한 연구에서 GM으로 재단 공정 $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 봉제공정 $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 보조공정 $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 검사/생산 $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 완제품관리 $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 라고 보고하였는데(Lee et al., 2019), 이번 기내 청소노동자와 유사한 농도수준이었다. 사무실 청소를 통한 실내공기 개선 전, 후를 비교한 연구에서 실내 분진 농도를 $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 감소시킨 후 사무실 근로자의 코막힘과 점막 자극에 대한 불만이 감소하였고(Skulberg et al., 2004), 정전기식 공기청정기의 설치 후 사무실 근로자의 상기도 및 하기도 건강이 개선되었다고 보고하여(Skulberg et al., 2005), 항공기 청소노동자의 호흡기 질환에 대한 불편함 개선을 위한 지속적인 분진 노출 감소 노력이 필요함을 알 수 있다.

청소노동자의 작업 동선에 따른 $\text{PM}_{2.5}$ 노출평가 결과, 사업장별 캐빈내부에서 $\text{AM } 4.83\sim 9.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이었으나, 외부 및 버스 등 대기하는 장소에서는 $28.5\sim 44.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 약 4~7 배정도 높은 농도 수준이었다. 항공기 내부는 공기조화시스템이 작동하는 경우 시간당 약 10회 이상의 공기가 해파필터를 거쳐 순환되므로 청소작업을 진행하더라도 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 매우 낮았다. 다만, 버스 및 야외에서 항공기가 착륙하기를 기다리며 대기하는 시간 중 측정된 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 평가 결과, 일반 대기환경기준의 관심단계인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 시료가 평가대상 사업장에 따라 전체시료의 약 10%~40% 수준이었다.

Lee & Kim(2017a)의 연구에서 도로변 택배원의 $\text{PM}_{2.5}$ 노출수준은 $49.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, Lee et al. (2015)의 연구에서 환경미화원의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($27\sim 240 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 수준이라고 보고하였다. 지하철근로자를 대상으로 $\text{PM}_{2.5}$ 평균농도를 평가한 연구에서 기술직 $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 승무원 $63.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 역무원 $39.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$

이었고(Park et al., 2018; Choi et al., 2019), 미국의 고속도로 순찰을 수행하는 경찰관을 대상으로 PM_{2.5} 농도를 평가한 결과 약 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다(Riediker et al., 2003). 항공기 청소노동자는 옥외작업자와 유사한 작업환경에 노출되는 것으로 평가되며, 최근 개정된 옥외작업자 관리기준에 맞추어 PM_{2.5}에 대한 보호구 및 보건교육 등을 실시하는 등 관리할 필요가 있다.

최근 세계적 질병 부담 연구(GBD, 2020)에서 대기 오염을 네 번째로 큰 위협으로 보고하였는데, 대기오염 중 미세먼지(particulate matters, PM)를 주요 원인으로 지목하였다. Chen & Hoek(2020)의 미세먼지와 사망률에 대한 메타분석 연구결과에 따르면 PM_{2.5} 농도가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때마다 비사고성 사망의 상대위험(relative risk, RR)이 1.08배(95% 신뢰구간: 1.06-1.09) 높아진다고 하였다. 장기간의 PM_{2.5} 노출과 심혈관질환에 대한 메타 분석 연구에서(Alexeeff et al., 2020), PM_{2.5}가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때마다, 뇌혈관 사망률이 24%(95% 신뢰구간: 13~36%), 뇌졸중 13%(95% 신뢰구간: 11~15%) 증가한다고 보고하였다. 또한, 인지기능 감소(Sullivan et al., 2021)와 알츠하이머 위험도 높이는 것으로 보고하였는데, 특히, PM_{2.5} 농도 32.69~39.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 노출된 60세 이상 노인 코호트 연구(1,742명 대상)에서 PM_{2.5}가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때마다, 알츠하이머 위험이 2~5% 증가한다고 보고하였다(Yang et al., 2022).

노출평가를 진행하는 동안 측정지역에서 가장 가까운 대기관측소에서 측정한 대기 중 PM_{2.5} 농도를 비교하면 GH 공항에서는 공항 내부에서 약 2배정도 높은 농도를 보여 공항 내 오염원이 있음을 추정할 수 있었다. PM_{2.5}의 주요 발생원 중 DEE의 영향이 매우 큰 것으로도 알려져 있는데(Fraser et al., 2003), 항공기 청소작업자의 PM_{2.5} 노출 농도는 공항 내 디젤차량 등 오염인자의 영향을 받는 것으로 추정된다. 공항 내 항공기가 착륙하면 항공기를 정비하는 데 필요한 디젤차량은 급유, 급수, 수화물 운송, 청소, 케이터링 등을 포함하여 약 20여대 이상이 필요하다. 기내청소작업자 47명을 대상으로 실시간 측정한 블랙카본(BC) 농도의 개인별 평균농도는 AM 1.5~6.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 도심지 옥외작업자의 노출농도 수준과 유사하였다. BC 농도는 공항 및 사업장에 따라 노출농도 수준은 상이하였으며, GH 공항에서 평균 3.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고 IC 공항에서 1.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았다. 개인별 노출평가에서 AM

이 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 시료가 전체 47개 시료 중 2개가 있었는데, 이는 버스 및 택시운전원에게서 노출되는 농도와 유사한 수준이었다(Lewine et al., 2007). 지하철근로자를 대상으로 BC 평균농도를 평가한 연구에서 기술직 9.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 승무원 5.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 역무원 2.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 라고 보고하였다(Choi et al., 2019). 국내 택배서비스 종사자를 대상으로 BC 노출농도를 평가한 연구에서 배송위치를 도로변과 주택가로 나누어 살펴보면 도로변의 GM 농도는 2.18~5.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이었고, 평균은 3.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 주택가의 경우 1.29~3.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 평균 1.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 라고 보고하였다(Lee and Kim, 2017b). 도시 대기환경을 평가한 연구에서 서울 올림픽공원 주변 주중 BC 농도는 중위수로 2.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 주말에는 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 특히 주말 낮 시간대(오전 6시~오후 6시)에는 3.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 라고 보고하였다(Lee, 2016). 국내 교통 중심지인 부천, 인천, 서울에서 평가한 도시 대기환경 중 BC 농도는 1.4~3.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이라고 하였다(Yoon, 2016). 국내 충남에 위치한 야산 해발 200m 지점에서 드론을 이용한 대기 중 BC 평균농도는 1.64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 고속도로 인근 3.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 준 도심 3.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 대학캠퍼스 내 2.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보고하였다(Lee, 2018). 반면, 국외에서는 Gatari & Boman(2003)은 아프리카 케냐의 도심지 BC 농도는 1.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 시골은 0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 미국 환경청에서 발표한 유럽 4개국의 평균농도는 0.2~0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이라고 보고하였다. BC 농도는 계절의 영향을 받는 것으로도 알려져 있는데, 겨울철 농도(4.4±1.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 여름(2.0±0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 난방기구 등의 사용에 따라 높다고 알려져 있다(Lyamani et al., 2011). 이번 연구는 주로 4~6월 중 평균 24°C 수준의 기온에서 측정되었으며 겨울철에는 다소 높은 수준일 것으로 추정된다. 항공기 청소작업 중 초미세먼지 점유율은 일반청소에서 PM_{2.5}/PM₁₀이 약 0.54 수준이었으며, 국내 일반대기를 대상으로 경기도 주거지역(0.61), 도로변(0.81) 및 공업지역(0.86)(Lee et al., 2012), 천안시(0.72~0.77)(Lee & Oh, 2008) 및 서울시(0.75)(Kim & Cho, 2004)에서 평가한 결과와 비교하면, 낮은 수치였다. 국내 대학건물 실내 입경별 분포에서 PM_{2.5}/PM₁₀은 복도 0.64, 강의실 0.6, 실험실 0.72, 식당 0.65 수준이었다(Suh et al., 2014).

공항 내 디젤 차량의 경우, 도로교통법의 적용을 받지 않아 배출가스 관리가 다소 소홀하고 대부분의 차량이 매우 노후되어 있었다. 특히, 청소노동자들이 항공기

간 이동을 위해 사용하는 이동버스는 항공기 승객 운송을 위해 사용되다가 교체되는 낡은 차량을 항공사로부터 대여받아 사용하므로 최소 20년 이상 사용된 구형버스이며 청소노동자가 수시로 타고내릴 수 있기 위해 출입문을 개방한 상태로 정차하는 경우가 매우 많았다. 따라서 청소노동자의 이동을 위한 버스 및 공항 내 디젤 차량에 대한 배출가스 관리 및 관리기준을 강화할 필요가 있다. 청소작업자가 하루 8시간 작업을 실시하는 경우 약 5시간 이상의 시간을 버스 등에서 대기하며 청소물품을 정리하는 작업을 수행하고, 캐빈 내 청소작업은 약 3시간 정도로 대기하는 작업 장소에 대한 개선이 필요하다. 또한 공항 내 청소작업자들이 대기할 수 있는 실내공간을 별도로 마련하여 버스 내에서 대기하면서 발생하는 위험을 감소할 필요가 있다.

이번 연구의 제한점으로 국내 항공사에서 운항하는 항공기를 대상으로 평가가 진행되어 대부분의 항공기가 청소작업 시 내부 환기가 이루어지고 있었고, 사용하였던 모포는 수거하여 신규로 교체된 반면, 일부 외항사의 경우 기내에서 사용하는 모포 등을 기내에서 먼지를 털어, 재사용을 하고 있었으나 이러한 작업 중 PM_{2.5} 등 농도에 대해서는 평가를 진행하지 못하였고, 환기장치가 작동하는 지에 대한 확인을 하지 못한 제한점이 있었다. 외항사의 항공기 청소도 국내 청소노동자가 청소작업을 실시하나, 항공보안법에 의한 외부 인력의 항공기 탑승제한을 사유로 평가가 허락되지 않았으며, 향후 위험성 평가 등을 통한 추가 확인이 필요하다.

V. 결 론

항공기 청소노동자를 대상으로 근무형태, 분진, PM_{2.5} 및 블랙카본(BC) 등 유해인자의 노출농도 수준을 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 국내 항공기 청소 업무는 항공사 자회사를 통한 하도급형태로 이루어지고 있었으며, 항공기 운항스케줄 지연, 기상상황 등에 따라 식사 및 휴게시간이 일정하지 못하고, 공항 보안구역 내에서 근무하여 이동에 제한이 많았다. 항공기 청소작업 이외 작업시간에는 이동버스 또는 옥외 비행장에서 대기하는 등 안정된 작업공간이 없는 특성이 있었다.

2. 항공기 기내 일반청소 작업자의 호흡성 분진에 대한 개인별 노출평가 결과(내부 환기가동 조건), GM으

로 진공청소 74.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 시트교체 49.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 캐빈 일반청소 47.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 높았고, 평가결과 중 최고농도는 454.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 특정되지 않은 호흡성 분진의 권고기준(3,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 약 15% 수준이었다.

3. 항공기 기내 일반청소작업에서 직독식 장비를 이용한 초미세먼지(PM_{2.5})를 작업자 동선과 병행하여 평가한 결과, 캐빈 내부에서는 사업장별 AM 4.83~9.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 버스 및 외부 대기공간에서는 28.5~44.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 옥외 작업환경의 영향이 높았으며, 대기환경기준의 관심단계인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 경우가 사업장별 약 10~40% 수준이었다.

4. 블랙카본(BC)에 대해 개인노출평가 결과, 약 2~7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로, 도로변 옥외에서 관찰되는 농도수준과 유사한 수준이었으며, 입자의 크기 및 초미세먼지와 상관관계 등을 통해 공항 내 수화물 운송, 급유, 급수 등을 위해 운행하는 다양한 디젤차량 배출물이 주요 오염원으로 추정되었다.

항공기 청소작업자의 분진, 초미세먼지, 블랙카본의 노출 농도수준은 도로변에서 작업하는 옥외 노동자와 매우 유사하였고, 주요 오염원은 대기 중 미세먼지 및 공항 내 디젤엔진배출물질의 영향이 큰 것으로 평가되었다. 항공기 청소작업자가 미세먼지, 폭염, 한파, 우천 등 열악한 기상여건에 보호받을 수 있는 안정적인 대기공간의 마련이 필요하며, 공항 내 노후된 디젤차량 교체, 배출가스 관리기준 강화, 전기차 도입 등이 필요하다. 향후, 항공산업 종사자에 대한 전반적인 작업환경평가 및 건강영향조사가 요구되며, 공항을 운영하는 공항공사 등 공기업을 통한 체계적인 안전보건관리 시스템을 갖출 필요가 있다.

References

- Alexeeff S, Liao N, Liu X, Van Den Eeden S, Sidney S. Long-Term PM_{2.5} Exposure and Risks of Ischemic Heart Disease and Stroke Events: Review and Meta-Analysis. *J American Heart Assoc* 2021;(10): e016890 (<https://doi.org/10.1161/JAHA.120.016890>)
- Bauer A. Contact dermatitis in the cleaning industry. *Co-allergy* 2013;13:521-524
- Bello A, Quinn MM, Perry MJ, Milton DK. Characterization of occupational exposures to cleaning products used for common cleaning tasks—a pilot study of hospital

- cleaners. *Environ Health* 2009;8:11
- Bello A, Quinn MM, Milton DK, Perry MJ. Determinants of exposure to 2-butoxyethanol from cleaning task: A Quasi-experimental study. *Ann Occup Hyg* 2013; 57(1):125-135
- Chang C, Chiu H, Yang CY. Fine particulate air pollution and outpatient department visits for headache in Taipei, Taiwan. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 2015;78(8):506-515.
- Charles LE, Loomis D, Demissie Z. Occupational hazard experienced by cleaning workers and janitors: A review of the epidemiological literature. *Work* 2009; 34:105-116
- Chen J, Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int* 2020;143:105974. doi: 10.1016/j.envint.2020.105974. Epub 2020 Jul 20.
- Fraser MP, Buzcu B, Yue ZW, McGaughey GR, Desai NR et al. Separation of fine particulate matter emitted from gasoline diesel vehicle using chemical mass balancing techniques. *Environ Sci Tech* 2003; 37(17):3904-3909(<http://doi.org/10.1021/es034167e>)
- Folletti I, Zock JP, Moscato G, Siracusa A. Asthma and rhinitis in cleaning workers: a systematic review of epidemiological studies. *J Asthma* 2014;51(1):18-28
- Gatari M, Boman. Black carbon and total carbon measurements at urban and rural sites in Kenya, East Africa. *Atmospheric Environ* 2003;37(8):1149-1154 ([http://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)01001-4](http://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)01001-4))
- Heo J, Lee BG, Jung DY, Kim SS, Shai J et al. Risk assessment influence factors of VOCs exposures associated with the use of the cleaning bleach by university cleaning workers. *J odor Indoor Environ* 2016; 15(4):296-302
- IARC: DIESEL ENGINE EXHAUST CARCINOGENIC, Press Release 213. https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr213_E.pdf (accessed March 2, 2020)
- IARC. Diesel and gasoline engine exhaust and some nitroarenes(volume 105). IARC Monography for the Evaluation of Carcinogenic Risk to Human. 2013
- IARC. Outdoor Air Pollution (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 109). 2015
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Outdoor Air Pollution: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. 2016. p.441, p.443.
- IATA. Air passenger market analysis. Dec. 2020; Aug 2022_ <http://iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-passenger-monthly-analysis---december-2020>; <http://iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-passenger-monthly-analysis---august-2022>
- ICAO (International Civil Aviation Organization). The World of Air Transport in 2018 (Accessed March 18, 2020_ <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/the-world-of-air-transport-in-2018.aspx>)
- IMF (International Monetary Fund). Real GDP growth Annual percent change (Accessed March 8, 2023_ https://www.imf.org/external/datamapper/NGDP_RPCH@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOWORLD)
- KCA (Korea Civil Aviation Association). World statistics, 2018 (Accessed March 8, 2023_ <http://www.airportal.go.kr/knowledge/statsnew/data/worldstats.jsp>). p 3
- Kim CN, Kim GH, Joe YM. Exposure assessment of hazards among aircraft cabin cleaning workers(II)-Focus on fungicides, insecticides. KOSHA, Occupational safety and health research institutes 2019a(Publication number 2019-OSHRI-1421).
- Kim DW, Jo H, Woo CW, Ryu SH, Yoon CS. Exposure assessment of black carbon tollbooth at a university. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2019b; 28(4): 464-476
- Kim DY, Kim KY. Exposure assessment of airborne bacteria and fungi in the aircraft. *Safety Health Work* 2022;13:487-492
- Kim GH, Kim SW. Exposure assessment of particulate matters among door-to-door deliverers using GPS devices. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2017a; 27(1):13-22
- Kim GH, Kim SW. Exposure assessment of diesel engine exhaust among door-to-door deliverers in Daegu. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2017b; 27(1):13-22
- Kim KN, Lim YH, Bae HJ, Kim M, Jung K et al. Long-term fine particulate matter exposure and major depressive disorder in a community-based urban cohort. *Environmental health perspectives* 2016; 124(10):1547-1553.
- Kim KY. Occupational classification and exposure hazardous factors related to aircraft cleaning workers. KOSHA, Occupational safety and health research institutes 2018(Publication number 2018-OSHRI-135). p 1-2; 28-45; 86
- Kim MY, Cho SJ. Estimation of practical use for portable

- aerosol spectrometer. proceeding of the 37th meeting of KOSAE 2004
- Lee DJ. Study of correlation between black carbon(BC) and Ultrafine dust(PM2.5) in urban atmosphere. Master's thesis. Soon chun hyang University of Korea. 2017. p iv
- Lee HM, Oh SW. Characterization of PM10 and PM2.5 in Cheonan area using dust monitor. *J KSAE*;24(3): 367-375
- Lee JH. Black carbon measurement using a drone. *J Korean Soc Atmos Environ* 2018;34(3):486-492 (<http://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.486>)
- Lee KE, Choi JH, Yoon MJ, Sung JM. Cancer risks in the employees working at the air transportation industries(II). KOSHA, Occupational safety and health research institutes 2021(Publication number 2021-OSHRI-825). p 66-67
- Lee KH, Jung HJ, Park DU, Ryu SH, Kim B et al. Occupational exposure to diesel particulate matter in municipal household waste workers. *PLoS One*. 2015 Aug 6;10(8)
- Lee ME, Moon DH, Kim YJ, Choi GU, Kim JY et al. Relationships between exposure levels of respirable dusts, chest radiation findings and pulmonary function tests among workers in cloth manufacturing industry. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2019; 29(2):259-269
- Lee SJ, Nam B, Harrison R, Hong O. Acute symptoms associated with chemical exposures and safe work practices among hospital and campus cleaning workers: A Pilot study. *American Journal of Industrial Medicine* 2014;57:1216-1226
- Lee YK, Lee KJ, Lee JS, Shin ES. Regional characteristics of particle size distribution of PM10. *J KOSAE* 2012;28(6):666-674
- Lee YS, Jang SW, Noh JH, Shin JS. A study on the management and labor situation analysis of aircraft grounding handling. Public policy institute for people 2018. p. 4-24
- Lewine M, Plato N, Gustavsson P. Exposure to particles, elemental carbon and nitrogen dioxide in workers exposed to motor exhaust. *Ann Occup Hyg*. 2007; 51(8):693-701.
- Li W, Bertisch S, Mostofsky E, Buettner C, Mittleman M et al. Weather, ambient air pollution, and risk of migraine headache onset among patients with migraine. *Environment international* 2019;132: 105100.
- Liu L, Urch B, Szyszkowicz M, Speck M, Leingartner K et al. Influence of exposure to coarse, fine and ultrafine urban particulate matter and their biological constituents on neural biomarkers in a randomized controlled crossover study. *Environment international* 2017;101:89-95.
- Lyamani H, Olmo FJ, Foyo I, Alados-Arboledas. Black carbon aerosols over an urban area in south-eastern Spain: Changes detected after the 2008 economic crisis. *Atmospheric Environ* 2011;45(35):6423-6432 (<http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.063>)
- Miyazaki D, Fukagawa K, Fukagawa A, Fujishima H, Uchio E et al. Air pollution significantly associated with severe ocular allergic inflammatory diseases. *Sci Rep* 2019;9(1):18205(<http://doi.org/10.1038/s441598-019-54841-4>)
- Park DU, Choi CJ, Park JH, Kwak HS. Exposure levels of dust, radon, and diesel engine exhaust emission among subway workers. KOSHA, Occupational safety and health research institutes 2018 (Publication number 2018-OSHRI-796). p 144-151
- Park HH, Kim SD, Hwang ES, Park SH. Exposure assessment of hazards among aircraft cabin cleaning workers(I)-Focus on noise, dust, and diesel engine exhaust. KOSHA, Occupational safety and health research institutes 2019(Publication number 2019-OSHRI-1488). p 19-24
- Pope III C, Burnett R, Turner M, Cohen A, Krewski D et al. Lung cancer and cardiovascular disease mortality associated with ambient air pollution and cigarette smoke: shape of the exposure-response relationships. *Environmental health perspectives* 2011;119(11):1616-1621.
- Riediker M, William R, Devlin R, Griggs T, Bromberg P et al. Exposure to particle matter, volatile organic compounds, and other air pollutants inside patrol cars. *Environ Sci Technol* 2003;37(10):2084-2093. (<http://doi.org/10.1021/es026264y>)
- Skulberg K, Skyberg K, Kruse K, Eduard W, Djupesland P et al. The effect of cleaning on dust and the health of office workers: an intervention study. *Epidemiology* 2004;15(1):71-78
- Skulberg K, Skyberg K, Kruse K, Eduard W, Levy F et al. The effects of intervention with local electrostatic air cleaners on airborne dust and the health of office employees. *Indoor Air* 2005;15(3):152-159
- Suh JM, Bin W, Jang SH, Park JH, Choi KC. Characteristics of size-segregated mass concentrations of indoor aerosol particles in university building. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2014; 24(4):453-461

- Sullivan K, Ran X, Wu F, Chang C, Sharma R et al. Ambient fine particulate matter exposure and incident mild cognitive impairment and dementia. *J Am Geriatr Soc* 2021;69(8):2185-2194
- Svanes O, Skorge TD, Johannessen A, Bertelsen RJ, Bratveit M et al. Respiratory Health in Cleaners in Northern Europe: Is Susceptibility established in early life? *PLoS ONE* 2015;10: 1371-1383
- Toricelli A, Novaes P, Matsuda M, Braga A, Saldiva PI et al. Correlation between signs and symptoms of ocular surface dysfunction and tear osmolarity with ambient levels of air pollution in a large metropolitan area. *Cornea* 2013;32(4):e11-15
- US EPA. Health assessment document for diesel engine exhaust. National Center for Environment Assessment. US Environment Protection Agency 2002:p 1-4
- Vizcaya D, Mirabelli MC, Anto JM, Orriols R, Burgos F et al. A Workforce-based study of occupational exposures and asthma symptoms in cleaning workers. *Occup Environ Med* 2011;69: 914-919
- Wang J, Lu M, An Z, Jiang J, Li J et al. Associations between air pollution and outpatient visits for allergic rhinitis in Xinxiang, China. *Environ Sci Pollut Res Int* 2020;27(19): 23565-23574.
- Yang L, Wan W, Yu C, Xuan C, Zheng P et al. Associations between PM_{2.5} exposure and Alzheimer's Disease prevalence Among elderly in eastern China. *Environ Health* 2022;21(119)1179-1189
- Yeung SS, Yu IT, Hui KY. World at work: Aircraft cabin cleaning. *Occup Environ Med* 2004 (<http://doi.org/10.1136/oem2004015461>)
- Yoon DM. Measurement of concentrations of fine particulate matter(PM_{2.5}) and those of black carbon(BC) emitted from mobile sources in urban hotspot sites. Master's thesis. Soon chun hyang University of Korea. 2015. p 4
- Zhang Z, Zhao D, Hong YS, Chang Y, Ryu S et al. Long-term particulate matter exposure and onset of depression in middle-aged men and women. *Environmental health perspectives* 2019;127(7): 77001.(<http://doi.org/10.1289/EHP4094>)

<저자정보>

박현희(선임연구위원), 김세동(과장), 김성호(차장), 박승현(실장)