

고속도로 톨게이트 요금수납원의 작업환경 유해인자 노출평가

박해동* · 강준혁 · 김준범

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Exposure Assessment of Cashiers at Expressway Tollbooths

Hae Dong Park* · Joon Hyuk Kang · Joonbeom Kim

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study was to evaluate the exposures of cashiers who work at expressway tollbooths.

Methods: We measured temperature(temp.), relative humidity(RH), and contaminants with direct reading instruments at ten expressway toll gate in September 2015. Elemental carbon was collected on the quartz filters and analyzed with an OCEC analyzer.

Results: The average levels for temp., RH, carbon monoxide, carbon dioxide, dust(PM₁₀), and black carbon were respectively 24.6~27.8°C, 32.3~65.3%, 0.5~1.2 ppm, 456~559 ppm, 12~111 µg/m³, and 3.1~10.1 µg/m³ at each tollbooth. The concentrations of elemental carbon within the tollbooth(1.8~7.2 µg/m³) were lower than outdoors(2.5~10.0 µg/m³), but exhibited a high correlation($r^2=0.855$). The exposure levels for carbon monoxide, black carbon, and elemental carbon in the tollbooths were significantly higher than the offices. The concentrations of black carbon and elemental carbon showed a high correlation($r^2=0.756$).

Conclusions: The levels of contaminants were below the occupational exposure limits in the expressway tollbooth. There were ventilation and air conditioning systems in the booths, but it is necessary to maintain and use the systems properly.

Key words: black carbon, diesel exhaust, elemental carbon, expressway tollbooth


I. 서 론


산업과 기술의 발전으로 차량과 고속도로의 이용이 증가하고 있다. 고속도로 이용요금의 자동정산을 위한 시스템이 증가하고 있으며, 무인정산시스템(하이패스) 이용율은 2011년 53.6%에서 2019년 82.7%로 꾸준히 증가하고 있다(KEC, 2020). 그러나, 하이패스를 이용하지 않는 하루 평균 약 70만대 중 일부는 여전히 요금수납부스를 이용하고 있다. 고속도로 톨게이트의 요금수납원은 제한된 공간(부스)에서 근무하며, 요금수납을


위하여 창문을 열고 업무를 수행한다. 이때 차량에서 발생하는 배기가스 및 타이어 마모 등에 의한 다양한 유해인자에 노출될 수 있다. 특히 자동차 배기가스 중 디젤엔진 배출물질은 다양한 가스상 및 입자상의 유해물질을 포함하며, 국제암연구소에서는 2012년 1급 발암물질로 지정하였고 이에 대한 다양한 연구가 국내외에서 진행되고 있다(Groves & Cain, 2000; Schauer, 2003; Kim & Song, 2013; Kim et al, 2016; Lee & Yi, 2016; Dimakakou et al., 2020; Vermeulen et al., 2020)

*Corresponding author: Hae Dong Park, Tel: 052-703-0885, E-mail: workenv@kosha.or.kr,
Work Environment Research Department, Occupational Safety and Health Research Institute, 400, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44429

Received: January 8, 2021, Revised: January 30, 2021, Accepted: February 27, 2021

 Hae Dong Park <http://orcid.org/0000-0002-3497-0369>

 Joon Hyuk Kang <http://orcid.org/0000-0002-5416-7709>

 Joonbeom Kim <http://orcid.org/0000-0001-6499-1454>

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.

미국 뉴욕시 교통당국의 보고서 및 문헌조사 결과 도로 요금소의 공기 질은 미국의 산업안전보건청(OSHA), 산업위생전문가협회(ACGIH) 및 국립안전보건연구원(NIOSH)의 기준값보다 낮으며, 최근에는 디젤배출입자 및 초미세입자에 관심이 집중되고 있으나 요금소의 공기질에 대한 자료는 부족한 상황이라고 하였다. 또한, 요금수납원에 대한 폐기능, 심혈관 건강에 대한 지속적인 검사(screening)를 권고하고 있다(New York State, 2013). 미국 교통부의 고속도로 톨게이트 작업장 안전 연구 보고서에 따르면, 요금수납원의 요금소 부스에서 유해인자 노출을 줄이기 위한 방법으로 일부 기관에서 일산화탄소 및 자동차 배출물질을 정기적으로 측정하고 있다(USDTFHA, 2010).

국내에서는 근로조건에 대한 사회적 이슈가 발생하여 고속도로 요금수납원의 근로환경 실태조사가 수행되었다(Kim et al., 2015). 여기에서 고용관계, 직무스트레스, 건강관련 등에 대한 설문조사를 수행하여 현황을 파악하였으며, 인간공학적 평가를 통하여 개선이 필요한 작업자세를 제안하였고, 유해화학물질 영향에 관한 문헌을 고찰하여 미세먼지, 휘발성유기화합물 등을 제시하였다. 그러나, 구체적인 유해인자에 대한 평가는 실시하지 않았다. 다른 연구에서는 고속도로 톨게이트 부스에서 미세분진(PM₁₀)의 노출특성을 평가하였으며(Nam & Phee, 2018), 톨게이트 부스의 공기 중 분진, 침착 분진의 농도 및 중금속 등을 평가하였다(Nam et al., 2020). 근무환경이 비슷하다고 생각되는 대학교의 차량 요금정산소에서 블랙카본농도에 영향을 미치는 다양한 인자와 특성에 대한 평가도 있었다(Kim et al., 2019).

또한, 고속도로 톨게이트 요금수납원의 소음노출 수준에 대한 평가(Kim et al., 2016) 및 디젤엔진배출물 및 결정형 유리규산 등을 평가한 연구(Shin et al., 2021)가 이루어지는 등 개별 유해인자에 대한 평가는 일부 이루어졌으나, 요금수납원의 다양한 노출 유해인자에 대한 평가는 없었다.

본 조사는 2015년 제기된 요금수납원의 근로환경에 대한 다양한 문제들 중에서 작업환경에서 노출될 수 있는 유해인자의 수준을 파악하고자 하였다. 따라서, 요금수납원이 근무하는 요금수납부스 및 사무실에서 노출되는 유해인자를 평가하였다.

II. 대상 및 방법

1. 연구대상 및 평가시기

수도권 및 충청권의 10개 고속도로 영업소를 대상으로 하였으며, 각 영업소별 요금수납부스 1~4개소 및 사무실을 측정지점으로 하였다. 평가는 2015년 9월에 실시하였으며, 9시부터 18시 사이에 이루어졌다(Table 1).

2. 연구 방법

온도, 습도, 일산화탄소 및 이산화탄소는 실내공기질 측정기(8762, TSI, USA)를 이용하여 평가하였으며, 미세먼지는 에어로졸모니터(DustTrak 8520, TSI, USA)를 이용하여 미세먼지(PM₁₀) 농도수준을 평가하였다.

블랙카본(Black carbon)은 실시간 휴대용 블랙카본 측정기(MicroAeth AE51, Aethalometer, USA)를 이용하여 평가하였다. 측정원리는 실시간으로 포집되는

Table 1. General information and measured date of expressway toll

Site	Total lane*	Traffic volume per day	Number of sampling point	Date
A	24	N.A. [†]	5	Sept. 7 (Mon.)
B	18	103,892	4	Sept. 8 (Tue.)
C	36	67,115	4	Sept. 9 (Wed.)
D	8	3,200	2	Sept. 10 (Thu.)
E	8	3,000	2	Sept. 11 (Fri.)
F	8	N.A. [†]	4	Sept. 14 (Mon)
G	10	26,238	5	Sept. 15 (Tue.)
H	24	95,889	5	Sept. 16 (Wed.)
I	6	14,052	5	Sept. 17 (Thu.)
J	6	7,474	3	Sept. 18 (Fri.)

*Total lane : includes "hipass" system and closed booths, [†]N.A. : data not available

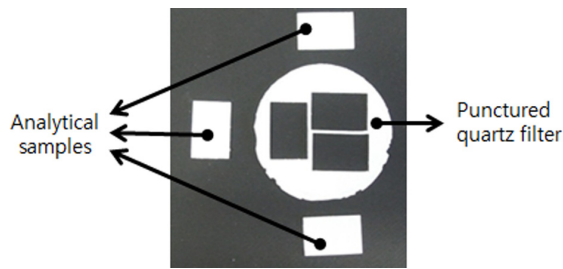


Figure 1. Elemental carbon sampling quartz filter and analytical samples

스트립에 880 nm 파장을 조사하여 흡수되는 양을 평가하여 블랙카본 양으로 환산하는 방식이며, 주요 측정 조건은 시료채취유량을 100 mL/min, 측정주기는 60 초로 하였으며, 테플론이 코팅된 보로실리케이트 유리 섬유 스트립을 사용하였다. 각 측정지점별로 3~5회 순회하며 측정하였으며, 측정지점에서 약 5분간 기기를 안정화 한 뒤 측정값을 기록하였다.

원소탄소(Elemental carbon)는 미국 국립산업안전 보건연구원(NIOSH)의 측정 및 분석방법(NMAM 5040)을 따랐으며 주요내용은 다음과 같다. 3단 카세트에 37 mm Quartz 여과지를 장착하고, 2.5 LPM으로 380~530 분간 시료를 채취하였으며, 작업공간에서 지역시료의 형태로 채취하였다. 채취된 시료는 전자식 데시케이트에서 1일 이상 건조시킨 후, 하나의 여과지에서 3개의 분석용 시료를 절단하여 탄소분석기(OCEC Analyzer, Model 5L, Sunset Lab. Inc., USA)로 분석하고, 평균 값을 사용하였다(Figure 1). 탄소분석기의 온도 및 유량 등의 분석조건은 NIOSH NMAM 5040을 따랐다.

3. 통계처리

각 항목 및 영업소별 측정값들을 산업위생통계틀(IHSTATs, AIHA)을 이용하여 정규성 검정을 하였으나, 대부분의 측정값에서 정규분포와 대수정규분포간의 정규성 차이가 없는 것으로 나타나서 정규분포를 가정하고 산술평균과 표준편차를 산출하였다. 통계프로그램(PASW 18.0)을 사용하여 독립표본 t-검정, 일원배치분산분석 및 사후분석(Scheffe 방법)을 실시하였다.

III. 결 과

1. 온도 및 습도

각 영업소별 평균온도는 24.6~28.6℃였으며, 최고 온도는 B 영업소에서 32.3℃였고, B, C 영업소가 다른 영업소에 비해서 유의하게 높았다($p<0.05$). 모든 요금수납 부스에는 냉난방기가 설치되어 있었고, 근무자가 온도를 조절할 수 있었다. 기상청자료에 의하면, 평가일 정 동안의 일 평균기온은 19.7~22.8℃였으며, 최고기온은 30.1℃였다(기상청, <http://www.kma.go.kr/>), 각 영업소에서 가까운 도시 기준 : 서울, 천안, 서산). 평균 습도는 32.3~65.3%였으며, 평가당일 비가 내렸던(일강우량 4.6 mm) E 영업소에서 가장 높은 측정값을 보였다. D, E, F 영업소는 다른 영업소보다 높은 수준이었다($p<0.05$)(Table 2).

2. 일산화탄소 및 이산화탄소

일산화탄소의 각 영업소별 산술평균농도는 0.5~1.2

Table 2. The levels of temperature, humidity, and hazardous agents in toll booth and office

Site	N*	Temperature (°C)		Relative humidity (%)		Carbon monoxide (ppm)		Carbon dioxide (ppm)		PM ₁₀ (μg/m ³)		Black carbon (μg/m ³)	
		AM [†] (SD) [‡]	Range	AM(SD)	Range	AM(SD)	Range	AM(SD)	Range	AM(SD)	Range	AM(SD)	Range
A	22	27.1(1.16)	24.7~29.2	42.5(5.82)	31.6~52.8	1.2(0.25)	0.7~1.8	507(102)	360~780	16(13.2)	0~43	9.8(7.14)	1.2~27.1
B	20	28.6(2.51)	24.4~32.3	32.3(3.21)	25.4~40.9	1.2(0.33)	0.1~1.9	559(64)	451~739	31(13.6)	10~65	5.4(3.87)	1.3~17.6
C	20	27.8(1.57)	25.1~30.0	36.0(4.65)	28.2~44.5	1.0(0.23)	0.5~1.3	533(43)	477~643	33(13.8)	7~53	10.1(10.32)	2.5~44.6
D	10	25.8(1.75)	24.0~29.0	49.7(5.84)	38.7~59.0	0.8(0.22)	0.4~1.2	532(70)	442~700	67(43.8)	38~162	2.1(0.89)	1.1~4.1
E	10	26.6(0.82)	25.6~28.0	65.3(4.04)	57.1~69.4	0.9(0.10)	0.7~1.0	465(34)	422~515	111(35.8)	43~143	4.8(3.48)	2.1~11.5
F	23	26.5(1.31)	22.8~28.0	47.9(5.27)	42.5~67.0	1.1(0.24)	0.4~1.4	486(57)	418~644	82(22.0)	34~123	5.5(2.75)	1.3~14.3
G	18	25.8(1.77)	22.9~29.6	39.2(5.46)	28.5~46.7	0.6(0.22)	0.1~1.2	478(52)	408~589	30(14.2)	11~57	3.7(2.56)	0.6~9.6
H	19	25.4(1.79)	22.5~29.0	36.1(1.21)	32.4~38.7	0.6(0.34)	0.0~1.3	493(48)	404~587	12(6.7)	1~25	3.1(1.31)	1.4~6.3
I	14	26.6(1.73)	24.5~30.5	36.6(0.34)	36.0~37.2	0.5(0.19)	0.3~1.1	456(35)	400~520	19(17.0)	7~71	7.3(5.44)	1.5~21.6
J	11	24.6(2.19)	24.5~30.5	36.6(0.88)	36.0~37.2	0.5(0.17)	0.2~0.8	494(39)	427~583	29(17.0)	7~65	5.8(1.98)	2.5~8.9

*N : Number of samples, [†]AM : Arithmetic mean, [‡]SD : Standard deviation

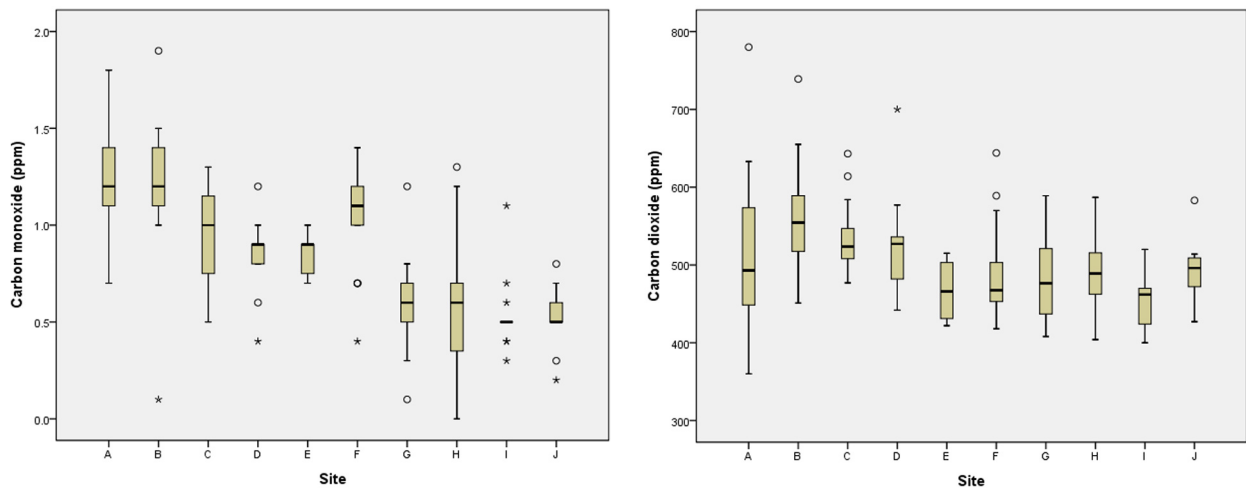


Figure 2. The levels of carbon monoxide and carbon dioxide by site

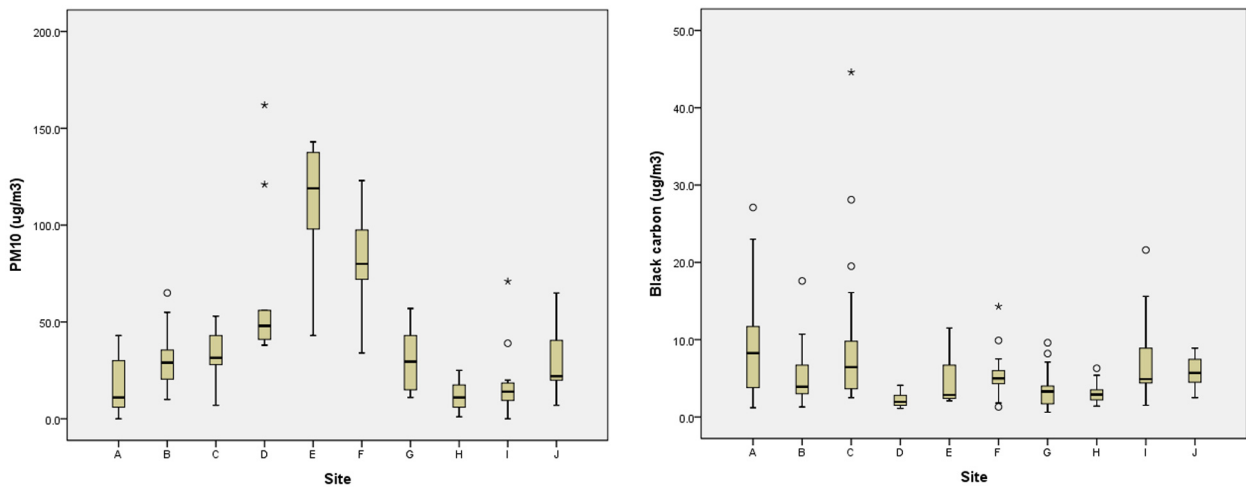


Figure 3. The levels of PM₁₀ and black carbon by site

ppm으로 평가되었다. 일원배치분산분석 결과 영업소별로 유의한 차이가 있었으며, 사후분석에서 A, B, F 영업소가 G, H, I, J 영업소에 비해 높았다. 이산화탄소 농도는 산술평균 456~559 ppm이었으며, 이는 사무실 실내공기 기준인 1,000 ppm보다 낮은 수준이었다. 일원배치 분산분석에서 영업소별로 유의한 차이가 있었으며, 사후분석에서 B 영업소가 I, E 영업소에 비해서 높았다(Table 2, Figure 2).

3. 미세먼지 및 블랙카본

미세먼지 농도는 7개 영업소에서 산술평균 12~33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 대기 모니터링 자료의 일평균 농도와 비슷하였으나, D, E, F 영업소는 산술평균 67~111 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 농도 수준을 보였으며, 사무실 실내공기 기준인 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

보다는 모두 낮았다. 일원배치 분산분석에서 D, E, F 영업소가 다른 영업소보다 유의하게 높게 평가되었다. 블랙카본의 영업소별 평균농도는 2.1~10.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평가되었으며, C 영업소에서 최대 농도인 44.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 측정되었다(Table 2, Figure 3).

4. 원소탄소

요금수납 부스 내·외부 및 사무실에서 6시간 이상 여과지에 시료를 채취한 후, 탄소분석기를 이용하여 분석한 결과, F 영업소를 제외한 모든 영업소에서 부스내부의 평균 농도(1.8~7.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 부스외부의 평균농도(2.5~10.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해서 낮았다. 사무실에서의 평균 농도는 0.3~1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 요금수납 부스에 비해서 낮은 수준으로 평가되었다(Table 3). 모든 측정값은

Table 3. The concentrations of elemental carbon in toll booth, outdoor, and office

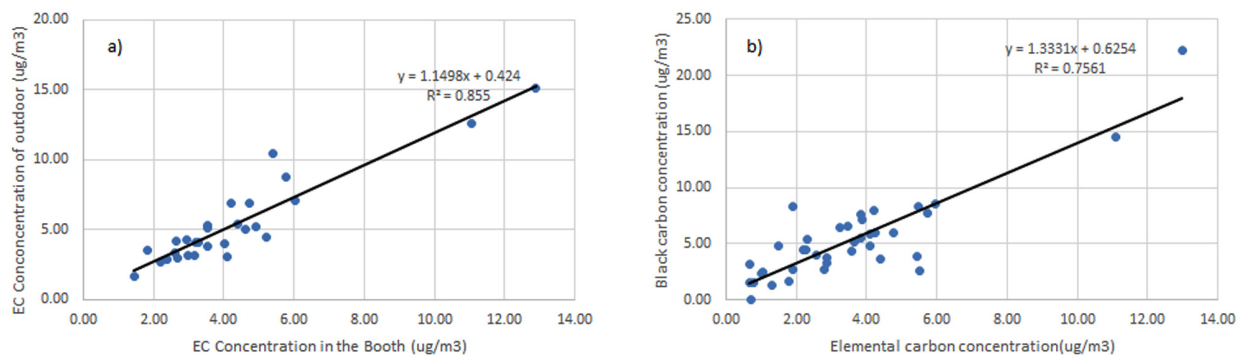
Site	Booth ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Outdoor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Office ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			In/out ratio
	N [*]	AM [†]	Range	N	AM	Range	N	AM	Range	
A	4	7.2	4.7~11.1	4	10.0	6.0~12.6	2	1.2	0.8~1.6	0.72
B	4	3.4	2.6~4.6	4	3.9	3.0~5.6	2	0.3	0.0~0.4	0.87
C	4	6.5	3.3~13.0	4	8.2	4.9~15.6	2	1.5	1.2~2.1	0.79
D	1	1.8	1.8	1	2.5	2.5	2	0.7	0.5~0.8	0.72
E	2	2.7	1.4~4.1	2	2.8	1.6~4.1	2	1.1	0.9~1.3	0.96
F	4	3.7	2.3~5.5	4	3.4	2.7~4.5	2	0.8	0.8~1.0	1.09
G	4	2.7	1.4~4.6	4	3.8	1.5~6.8	2	0.6	0.5~0.7	0.71
H	4	4.4	2.8~5.6	4	6.6	3.8~11.1	2	1.1	0.9~1.6	0.67
I	3	3.1	1.1~4.2	3	3.8	1.8~5.5	2	0.8	0.5~1.1	0.82
J	2	2.8	2.0~3.7	2	3.4	2.5~4.3	2	1.5	1.3~1.6	0.82

*N : Number of samples, [†]AM : Arithmetic mean

Table 4. Comparisons of conditions and contaminants between toll booths and office

Compound	Type	N [*]	AM [†] (SD [‡])	95% CI [§]	p-value
Temperature	Booth	142	26.8 (2.10)	26.4 ~ 27.2	0.012
	Office	25	26.0 (1.17)	25.4 ~ 26.6	
Relative humidity	Booth	142	40.2 (8.44)	38.2 ~ 41.0	0.001
	Office	25	46.6 (10.65)	42.2 ~ 52.6	
Carbon monoxide	Booth	141	0.91 (0.363)	0.85 ~ 0.98	0.001
	Office	25	0.70 (0.246)	0.57 ~ 0.82	
Carbon dioxide	Booth	140	501 (68)	492 ~ 516	0.620
	Office	25	509 (53)	485 ~ 540	
PM10	Booth	140	37.7 (32.43)	31.6 ~ 42.6	0.529
	Office	23	42.4 (37.05)	27.3 ~ 65.0	
Black carbon	Booth	146	6.59 (5.849)	5.79 ~ 7.89	<0.001
	Office	21	2.31 (1.486)	1.61 ~ 3.10	
Elemental carbon	Booth	31	4.08 (2.448)	3.18 ~ 4.98	<0.001
	Office	20	0.97 (0.397)	0.78 ~ 1.15	

*N : Number of samples, [†]AM : Arithmetic mean, [‡]SD : Standard deviation, [§]CI : Confidence Interval

**Figure 4.** a) Relationship of elemental carbon concentration between toll booth and outdoor, b) Relationship between black carbon and elemental carbon concentration in toll booth

ACGIH에서 과거에 제안하였다가 철회한 기준인 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 수준이었다. 각 채취 여과지별 3반복 분석에 대한 변이계수는 평균 3.42%(0.28~10.04%)였다. 부스 내외부의 원소탄소 농도 간에는 상관관계수(r^2)가 0.855로 높은 상관관계가 있었다. 부스내부의 동일지점에서 평가된 원소탄소와 블랙카본의 농도도 상관관계수 0.756으로 높은 상관관계가 있었으며, 블랙카본이 원소탄소보다 평균 1.7배 높게 평가되었다(Figure 4).

5. 요금수납부스와 사무실

요금수납부스가 사무실보다 온도는 높고 습도는 낮았다. 일산화탄소와 블랙카본은 부스가 사무실에 비해서 유의하게 높았으나, 이산화탄소와 미세먼지(PM_{10}) 농도는 차이가 없었다(Table 4).

IV. 고 찰

유해인자 노출평가 시 파악한 요금수납부스의 구조는 다음과 같았다. 연구대상 10개 영업소의 모든 요금수납부스는 차량 배기가스의 부스내부 유입을 방지하기 위하여 비산송풍기와 에어커튼이 설치되어 있었다. 비산송풍기는 차량이 요금 지급 후 출발할 때 배출되는 매연을 멀리 비산시키는 역할을 하며, 에어커튼은 외부의 배기가스가 부스내부로 유입되는 것을 방지하기 위하여 창문 위에 설치되어 있었다. 냉난방기는 온도조절기능과 함께 공기정화시스템(프리필터, 전기집진기, 활성탄필터)이 내장되어 있었다. 또한 냉난방기의 흡입공기 중 일부는 외부 공기를 도입할 수 있도록 설계되어 있어서 부스내부에 양압을 유지함으로써 차량의 배기가스가 부스내부로 유입되는 것을 차단하는 역할을 할 수 있다. 요금수납 부스는 월 2회 정기점검 및 이상발생 시 수시 점검 등을 통해서 관리되고 있다고 하였다. 위의 모든 설비는 부스내부 근무자가 조작할 수 있도록 되어 있었다. 이를 통하여 유해인자 노출을 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 실제 가동 시 발생하는 기류가 요금수납업무에 방해가 되거나, 형성된 에어커튼에 의해 수납원이 불편을 느끼기도 한다고 하므로 이런 점은 개선이 필요한 부분이다. 뉴욕시의 자료에서도 요금수납원의 유해요인 노출 감소의 주요 요인은 환기 시스템이며, 환기 시스템에 대한 유지 보수로 최적의 상태로 유지하는 것이 중요하다고 권고하고 있다. 또한, 요금 징수 방법의 자동화가 증가함에 따라 교통 흐름이 빨라지

고 요금수납원의 유해요인 노출은 감소할 것으로 예측하였다. 가솔린, 디젤 연료 성분이 지난 30년 동안 변경되어 자동차 배출물이 현격히 감소되어 요금수납원의 유해요인 노출이 감소한 것으로 보고하였다(New York State, 2013). 많은 기관에서 요금소 부스 내 공기를 양압으로 유지하고 있고, 에어컨을 설치하고 일부 기관에서는 개별적으로 조절 가능한 에어컨을 설치하고 있다(USDTFHA, 2010). 국내 요금수납부스의 환기시스템은 미국의 시스템과 비슷할 것으로 판단된다.

온도와 습도는 미국 공기조화전문가협회(American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, 1992)에서 제시한 실내 온도 기준($21\sim 23^\circ\text{C}$ (겨울철), $23\sim 26^\circ\text{C}$ (여름철)) 및 습도기준($20\sim 30\%$ (겨울철), $50\sim 60\%$ (여름철))을 참고하여 부스 내에 설치된 냉난방기의 가동 및 환기를 통하여 조절이 가능한 것으로 판단되었다.

일산화탄소 및 이산화탄소는 모든 측정값이 사무실 실내공기 기준인 10 ppm 및 1,000 ppm보다 낮았다. 그러나, 일산화탄소는 평가기간동안 서울 및 충남의 대기 중 일산화탄소의 일평균 농도($0.3\sim 0.5 \text{ ppm}$)보다는 높은 수준 이었다(KECO, 2015). 대학도서관의 각 지점별 일산화탄소는 $0.09\sim 0.66 \text{ ppm}$ 이었고, 이산화탄소는 $418\sim 576 \text{ ppm}$ 이었고(Lee 2019), 업무용 빌딩내 사무실의 일산화탄소 3 ppm 이하, 이산화탄소 $639\sim 786 \text{ ppm}$ 으로 평가되어(Jeong, 2007) 동 연구와 비슷한 수준이었다.

평가기간동안 서울 및 충남의 대기 중 미세먼지(PM_{10})의 일평균 농도는 $12\sim 32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이었는데, 이는 3개 영업소를 제외한 영업소의 평균농도 수준과 비슷하였다(KECO, 2015). E 영업소는 상대적으로 차량통행이 적었던 곳인데, 미세먼지의 농도가 높게 나타났다. 이는 주변이 산림으로 우거져 있고, 바람이 부는 등 주변환경에 의해 영향을 받았을 것으로 생각된다.

미국 산업위생전문가협회는 디젤배출물질의 노출기준으로 1995-1996년에 $0.15 \text{ mg}/\text{m}^3$ 을 처음 제안하였고, 2001년 총디젤입자상물질로서 $0.05 \text{ mg}/\text{m}^3$ 으로 낮췄다가, 원소카본(elemental carbon)으로서 $0.02 \text{ mg}/\text{m}^3$ 으로 대체시키기도 하였으나, 2003년에 철회하였다(ACGIH, 2003). 광산안전보건청(MSHA)은 지하에 위치한 금속 및 비금속광산에서 디젤배출물질의 허용기준(PEL)으로 8시간 시간가중평균 총탄소 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하였으며, 지하석탄광산에서는 디젤을 원료로 사용하

는 장비의 시간당 입자상물질 배출량을 2.5 g/hr로 제한하고 있고, 일반산업 등에 대한 산업안전보건청의 허용기준은 디젤배출물질에 대해서 설정된 것은 없고 관련 가스상물질(일산화탄소 50 ppm, 일산화질소 25 ppm, 이산화질소 0.5 ppm(Ceiling))에 대한 기준만 있다(OSHA, 2013). 호주에서는 디젤배출물질에 대한 기준으로 원소탄소 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 설정하고, 관리기준(Action Level)으로 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 제시하고 있다(AIOH, 2017).

디젤엔진배출물질 노출 산업 및 인구 추정 연구 보고서에 따르면, 환경미화원의 원소탄소 노출 수준은 평균 5.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.31~29.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이며 그 중 수거원의 노출수준은 평균 6.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.38~29.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었으며, 운전수의 노출수준은 평균 3.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.31~7.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)였다. 또한 지하주차장은 평균 10.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.10~24.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었으며, 환경미화원의 블랙카본 노출 수준은 평균 9.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.31~19.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이며 그 중 수거원의 노출수준은 평균 11.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (7.95~19.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었으며, 운전수의 노출수준은 평균 6.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.31~7.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었다. 또한 지하주차장은 평균 7.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.27~12.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었으며, 환경미화원의 $\text{PM}_{2.5}$ 수준은 평균 64.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (38.88~96.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이며 그 중 수거원의 노출수준은 평균 64.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (38.88~96.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었으며, 운전수의 노출수준은 평균 63.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (42.7~85.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었다(Park et al. 2014). 이번 연구결과의 원소탄소 및 블랙카본의 농도수준과 비슷하였으나, 미세먼지(PM_{10}) 농도는 위 연구의 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)보다 낮은 수준이었다. 대형상가의 지하주차장은 블랙카본 19.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 원소탄소는 12.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 평가되어 이번 연구보다 높은 수준이었다(Kim & Song, 2013). 2015년 2월 고속도로 톨게이트 2개소에서 평가한 결과, 부스내의 원소탄소는 3.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.6~5.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었으며, 블랙카본은 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (7.3~8.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 수준으로 평가되어(Shin et al., 2021), 이번 결과와 비슷한 수준이었다.

원소탄소는 톨게이트 부스내부의 농도가 부스외부의 농도에 비해서 대부분 낮았다(I/O ratio = 0.67~0.96). 그러나, F 영업소에서는 부스내부의 평균농도가 더 높았다. 이는 부스내부로 유입된 오염공기가 정체한 반면, 외부의 오염공기는 바람에 의해 빨리 제거되었을 것으로 추정된다. 다만, F 영업소가 다른 영업소의 환경과 비교했을 때 특이사항은 없었으므로 정확한 원인은 파악되지 않았다.

원소탄소와 블랙카본의 상관계수는 0.75로 높은 상관관계를 보였는데 이는 다른 연구에서도 높은 상관관계를 보인 점은 동일하나, 블랙카본과 원소탄소의 비율은 이번 연구에서는 평균 1.7배 수준이었으며, 다른 연구의 1.23~1.61배 또는 2.7~3.3배와 비슷하거나 낮았다(Jeong et al., 2004; Bae et al., 2007). 이는 원소탄소의 발생원은 디젤엔진배출물이 주원인이지만, 가솔린엔진배출물, 바이오매스의 연소 및 기타 요소들에 의한 영향도 있고 각 연구마다 그 영향이 다양하게 나타난 점과 같은 관점에서 판단될 수 있다(Schauer, 2003).

이번 연구에서 직독식장비를 이용하여 일산화질소(최소 검출농도 0.5 ppm), 이산화질소(최소 검출농도 0.1 ppm) 및 이산화황(최소 검출농도 0.1 ppm)을 평가하였으나 대부분 검출이 되지 않았다(data not shown). 대기 모니터링자료에 의하면 평가기간동안 주변의 이산화질소 일평균 농도는 0.017~0.034 ppm이었으며, 이산화황은 0.003~0.005 ppm 수준이었으므로(KECO, 2015), 이번 연구에서 사용된 장비는 환경 중의 농도를 평가하기에는 분해능이 부족하였던 것으로 해석된다. 또한, 환경미화원의 이산화질소 노출 수준은 평균 0.064 ppm(0.011~0.156 ppm)이며 그 중 수거원의 노출수준은 평균 0.076 ppm(0.022~0.156 ppm)이었으며, 운전수의 노출수준은 평균 0.047 ppm(0.011~0.084 ppm)이었다(Park et al. 2014).

일산화탄소, 블랙카본 및 원소탄소는 요금수납부스 내부의 농도가 사무실의 농도에 비해서 낮았으며, 이는 자동차 운행에 따른 배기가스와 마모된 타이어 등에 의한 것으로 볼 수 있을 것이다. 그러나, 이산화탄소와 미세먼지의 농도는 유의한 차이가 없었다. 이산화탄소는 사람의 호흡에서 발생되며, 요금수납부스의 창문이 대부분 열린 상태였던 것이 영향이 있었을 것으로 생각되며, 미세먼지는 사람의 활동에 의한 영향도 있었을 것으로 생각된다.

이번 연구는 2015년 9월에 10개 영업소를 대상으로 평가한 것으로, 계절의 영향은 알 수 없으며 전체 영업소를 대표하지 않을 수 있다. 또한 각 요금수납부스를 통과한 차종과 차량의 수에 대한 자세한 정보는 확보되지 못하여 세부적인 분석이 일부 미흡하였다. 원소탄소를 제외한 모든 측정은 직독식장비를 이용함으로써 현장에서 간편하고 신속하게 해당 유해인자의 농도를 파악할 수 있었으나, 정밀분석장비에 비해서 높은 검출한계를 가지고 있고 방해물질에 의한 영향이 더 크게 발

생활 수 있는 단점이 있었다. 또한, 측정자의 요금수납 부스 출입 및 근무자의 창문개방 형태에 따라서 일부 측정값은 외기의 영향을 받았을 수 있다.

여러 제한점에도 불구하고, 요금수납원이 노출될 수 있는 다양한 유해인자에 대하여 평가한 결과로서 상당한 의미가 있다고 생각된다.

V. 결 론

고속도로 톨게이트 10개 영업소에서 평가한 모든 유해인자의 노출수준은 기준값(또는 참고값)보다 낮은 수준으로 평가되었다. 이산화탄소와 미세먼지(PM₁₀)는 부스 내외부의 농도에 유의한 차이가 없었으나, 일산화탄소, 블랙카본 및 원소탄소의 농도는 요금수납부스 내부의 농도가 외부의 농도에 비해서 유의하게 낮게 나타났다. 이를 통하여 요금수납부스가 차량 등 외부에서 발생하는 오염원을 일부 제어하고 있는 것으로 생각된다. 실제로 요금수납부스에는 자동차 배기가스 등으로부터 요금수납원을 보호하기 위한 환기시스템이 모든 부스에 설치 및 운영되고 있었다. 수납원의 쾌적한 근무환경을 조성하고, 외부 오염물질로부터 보호하기 위하여 관련 시설을 적절하게 유지·관리할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 산업안전보건연구원의 작업환경유해도평가사업으로 수행된 자료이며, 같이 참여하여 도움을 주신 정은교, 김종규님께 감사드립니다.

References

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). ACGIH withdraws proposed TLV for diesel particulates 2003. Available from: URL: <https://dieselnet.com/news/2003/02acgih.php>

Australian Institute of Occupational Hygienists(AIOH). Diesel particulate matter and occupational health. 2017. Available from: URL: <https://www.aioh.org.au/resources/publications1/epublications/>

Bae MS, Hong CS, Kim YJ, Han JS, Moon KJ, Kondo Y, Komazaki Y, Miyazaki Y. Intercomparison of two different thermal-optical elemental carbons and optical black carbon during ABC-EAREX2005. *Atmospheric Environment* 2007;41:2791-2803

(doi:10.1016/j.atmosenv.2006.11.040)

Dimakakou E, Johnston HJ, Streftaris G, Cherrie JW. Evaluation of the Suitability of an Existing Job-Exposure Matrix for the Assessment of Exposure of UK Biobank Participants to Dust, Fumes, and Diesel Exhaust Particulates. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17:4919 (doi:10.3390/ijerph17144919)

Groves J, Cain JR. A Survey of Exposure to Diesel Engine Exhaust Emissions in the Workplace. *Ann Occup Hyg* 2000;44(6):435-447

Jeong JY, Lee BK, Phee YG. Assessment of Indoor Air Quality in Commercial Office Buildings. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2007;17(1):31-42

Kim BW, Song DW. Comparison of Diesel Exhaust Particle Concentration between Large Above-Ground and Underground Parking Lots. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2013;23(4):323-332

Kim DW, Jo HR, Woo CW, Ryu SH, Yoon CS. Exposure Assessment of Black Carbon among Tollbooth Worker at a University. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2019;29(4):464-476 (doi:10.15269/JKSOEH.2019.29.4.464)

Kim HI, Kang DM, Kim JE, Kim SY, Kim SE, Jo MS. Working condition surveys on Expressway Toll Booth workers. *Occupational Safety and Health Research Institute Research Report*. 2015.

Kim KB, Chung EK, Kim JK, Park HD, Kang JH. Noise level Assessment Exposed to Cashiers in the Highway Tollbooth. *Korean Soc Noise Vib Eng* 2016;26(6):729-735 (doi:10.5050/KSNVE.2016.26.6.729)

Kim SI, Park JY, Lee KM, Kim SW. A Study on Exposure Indices for Diesel Engine Exhaust in Forklift Operating Areas. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2016;26(1):38-47 (doi:10.15269/JKSOEH.2016.26.1.38)

Korea Environment Corporation(KECO). Air Monitoring Data. 2015. Available from: URL: http://www.airkorea.or.kr/web/pastSearch?pMENU_NO=123

Korea Expressway Corporation(KEC) Expressway traffic and hi-pass. 2020. Available at <https://www.ex.co.kr/site/com/>

Lee JW. A Study on the Measurement and Investigation of Air Quality in a University Library. *J Korean Library and Information Science Soc*. 2019;50(4):635-658 (doi:10.16981/kliiss.50.4.201912.635)

Lee NR, Yi GY. Exposure Assessment to Asbestos and Diesel Engine Exhaust Particulate Matter in Urban Bus Garage. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2016;26(2):219-224 (doi:10.15269/JKSOEH.2016.26.2.219)

Nam MR, Phee YG. Exposure Assessment of PM10 in Expressway Toll Booths. *J Korean Soc Occup*

- Environ Hyg 2018;28(2):151-157 (doi:10.15269/JKSOEH.2018.28.2.151)
- Nam MR, Jung JH, Phee YG. Characteristics of Airborne and Deposited Dust in Expressway Toll Booths. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2020;30(1):10-17 (doi:10.15269/JKSOEH.2020.30.1.10)
- New York State Department of Health, Center for Environmental Health. Task Force on Health Effects of Toll Plaza Air Quality in New York City. 2013. Available from: URL: https://www.health.ny.gov/environmental/investigations/toll_plaza/docs/index.pdf
- Occupational Safety and Health Administration(OSHA). Diesel Exhaust/Diesel particulate Matter. 2013. Available from: URL: https://www.osha.gov/dts/hazardalerts/diesel_exhaust_hazard_alert.html
- Park DW, Kim SW, Kim W, Bae HJ, Yoon CS, Lee KH, Ha GC. Research on the estimation of exposed population and industries on Diesel engine exhausts. Occupational Safety and Health Research Institute Research Report. 2014.
- Schauer JJ. Evaluation of Elemental carbon as a marker for diesel particulate Matter. J Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 2003;13:443-453 (doi:10.1038/sj.jea.7500298)
- Shin JA, Kim BW, Lee JH, Jung JS, Shin YC, Lee KM. Exposure assessment of elemental carbon, ultrafine particles, and crystalline silica at highway toll booths. Environmental Engineering Research. 2021;26(5): 200380 (doi:10.4491/eer.2020.380)
- United States Department of Transportation Federal Highway Administration(USDOTFHWA). Toll Facilities Workplace Safety Study Report to Congress. 2010. Available from: URL: <http://www.fhwa.dot.gov/tolling/if08001/toll00.cfm>
- Vermeulen R, Portengen L, Lubin J, Stewart P, Blair A, Attfield MD, Silverman DT. The impact of alternative historical extrapolations of diesel exhaust exposure and radon in the Diesel Exhaust in Miners Study (DEMS). Int J Epidemiology. 2020;49(2):459-466 (doi:10.1093/ije/dyz189)

<저자정보>

박해동(연구위원), 강준혁(연구위원), 김준범(연구위원)