

서울시 소재 대학교 차량 요금정산소 수납원의 블랙카본 노출 평가

김동원 · 조혜리 · 우철운 · 류승훈 · 윤충식^{1*}

서울대학교 보건대학원 환경보건학과, ¹서울대학교 보건대학원 환경보건학과, 보건환경연구소

Exposure Assessment of Black Carbon among Tollbooth Worker at a University

Dongwon Kim · Hyeri Jo · Cheolwoon Woo · Seung-Hun Ryu · Chungsik Yoon^{1*}

*Department of Environmental Health Sciences,
Graduate School of Public Health, Seoul National University*

*¹Department of Environmental Health Sciences, Institute of Health and Environment,
Graduate School of Public Health, Seoul National University*

ABSTRACT

Objectives: This study aimed to assess the exposure levels of tollbooth workers to diesel particulate matter using black carbon (BC) and to find the correlations among variables associated with BC using the motor vehicle management act regulated by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Methods: This study was performed over 14 days at a university in Seoul. BC levels were monitored using an aethalometer and were conducted around the breathing zones of the workers. There were three sampling locations: inside the tollbooth (front gate and rear gate) and an office as a control group. T-test, correlation, and multiple linear regression analysis were performed using SPSS.

Results: The geometric mean (GM) of BC_{30min} concentrations in the exposure group was 2.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, approximately 1.4 times higher than the control group (1.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). The GM of BC_{30min} concentrations was 2.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ during the heavy traffic time (9-10 am) and 2.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ during non-heavy traffic times ($p < 0.001$). The multiple linear regression analysis shows that the number of all types of vehicles and PM_{2.5} concentrations in the atmosphere were factors increasing the GM of BC(ln(BC_{30min})) concentrations (adjusted R²=0.42, $p < 0.001$). The workers were constantly exposed to low concentrations (GM of BC_{30min}=2.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), but they were exposed to peak concentrations instantly (BC_{10sec}=3545.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). When the GM of BC_{30min} concentrations was momentarily represented as high, it was identified that a vehicle mainly using diesel fuel or an aging vehicle had passed.

Conclusions: A ventilation system should be installed in the closed tollbooth or aging vehicles should be controlled so as not to pass tollbooths.

Key words: black carbon, diesel engine exhaust, exposure assessment, peak exposure, tollbooth worker

I. 서 론

국토교통부(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, MOLIT)의 국토교통 통계연보에 따르면 디젤연료를 사용하는 차량은 매년 지속적으로 증가하여

2012년 7,001,950대에서 2017년 9,576,395대로 약 36% 증가했다(MOLIT, 2019). 디젤연료를 사용하는 차량은 디젤엔진배출물질(Diesel engine exhaust, DEE)을 내뿜게 되는데 DEE는 디젤매연에 포함된 가스상 및 입자상 물질을 통칭하는 것을 말한다.

*Corresponding author: Chungsik Yoon, Tel: 02-880-2729, E-mail: csyoon@snu.ac.kr, Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea

Received: September 24, 2019, Revised: October 22, 2019, Accepted: November 20, 2019

 Dongwon Kim <http://orcid.org/0000-0002-6045-3779>

 Hyeri Jo <http://orcid.org/0000-0001-8123-8456>

 Cheolwoon Woo <http://orcid.org/0000-0002-8582-1064>

 Seung-Hun Ryu <http://orcid.org/0000-0003-3853-2523>

 Chungsik Yoon <http://orcid.org/0000-0001-7822-0079>

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.

인체 발암추정물질(Group 2A)로 분류되었던 DEE는 2012년 6월 인체 발암물질(Group 1)로 상향 조정되었으며(IARC, 2012), 국내에서도 DEE로 인한 직업병 사례는 꾸준히 발생하고 있다. 2012년부터 2014년까지 광산 트럭 운전자, 철도 디젤 차량 정비원, 비료 원료 하역 작업자, 음식물 및 생활쓰레기 수거 환경미화원, 타이어 공장의 지게차 근로자 등이 DEE 노출로 인한 직업병 진단을 받았으며 2018년에는 20년 이상 DEE에 노출된 환경미화원 2명이 동시에 폐암을 진단받아 산업재해로 승인받았다(KOSHA, 2018).

DEE 노출을 평가하기 위한 대리지표로써 원소탄소(elemental carbon, EC)와 블랙카본(black carbon, BC)이 대표적으로 사용된다(Castro et al., 1999; Viidanoja et al., 2002; Janssen et al., 2011; Wilker et al., 2013). 기존에는 EC가 주로 사용되었지만 최근 연구의 경향은 실시간 측정이 가능한 BC를 사용하여 DEE 노출을 추정하는 연구가 증가하고 있다(Lee et al., 2015; Choi et al., 2019). 국내 연구에서 BC를 사용한 DEE 노출 평가는 대형 상가의 지상 및 지하주차장, 환경미화원, 지게차 운전원, 택배서비스업 종사자 등을 대상으로 진행되었다(Kim & Song, 2013; Lee et al., 2015, Lee et al., 2017; Lee & Kim, 2017).

한편, 요금 수납원은 차량이 많이 지나가는 곳에 머물러 있고 요금 정산 시 정차하는 시간에 따라 DEE에 지속적·순간적으로 노출될 가능성이 높은 직업이다. Choi et al.(2016)의 연구에서 DEE에 노출되고 있는 요금 수납원은 2013년 기준으로 4,958명으로 추정하였다. 하지만, 요금 수납원의 근로환경을 대상으로 한 연구는 연 폭로 및 자각증상(Park et al., 1990), 소음(Kim et al., 2016), 직무 스트레스(Na et al., 2017) 등에 대하여 진행되었고, BC를 사용한 DEE 노출 수준 평가에 대한 연구는 드물었다.

따라서, 본 연구의 목적은 대학 캠퍼스 내 차량 요금 정산소 수납원의 BC 노출 수준을 평가하고, 노출 수준과 차종별(승용차, 승합차, 화물차, 특수차) BC 농도의 상관성을 파악하는 것이다.

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

본 연구는 2018년 11월 13일부터 11월 26일까지 서울시 관악구 소재 종합대학교(재학생 및 외국인 유학

생 46,744명, 교·직원 5,156명. KESS, 2019) 1곳의 정문과 후문에 위치한 차량 요금정산소의 수납원을 대상으로 BC 노출 평가를 진행했다. BC와 더불어 온도 및 습도도 동시에 측정했다. 대조군은 2곳의 차량 요금 정산소에서 직선거리로 700m 떨어진 교내 건물에서 실시했다.

BC 측정기인 Aethalometer(AE-51, Aethlabs, USA)로 14일간 오전 8시부터 오후 8시까지 일별 12시간 동안 BC 농도를 측정했다. BC 농도는 AE-51의 매뉴얼을 참고하여 10초의 측정 간격으로 기기 내에 저장되었으며 유량은 150 ml/min으로 설정했다(Aethlabs., 2016). AE-51의 경우 대기가 혼탁하거나 측정 시간이 길어지면 신뢰성이 저하될 수 있다는 연구가 있어(Jung et al., 2011), 신뢰성을 확보하기 위하여 매일 여과지를 교체하여 사용했다. 온·습도의 경우 Onset HOBO Data logger(UX100-003, Onset Computer Corporation, USA)를 사용하여 1분 간격으로 측정되도록 설정했다. AE-51과 Onset HOBO Data logger 기기는 요금 수납원의 호흡기 주변에 위치하도록 했다.

2. 연구 방법

1) 자료의 처리

요금 수납원의 호흡기 주변에서 측정된 14일 치의 BC 농도에 영향을 줄 수 있는 요인들을 알아보기 위해 교내 차량관리 업체를 통해 개인정보에 해당하지 않는 데이터를 구하였다. 교내 입구에서 차량의 출입이 가능한 차선은 입·출차 각 2차선씩 총 4차선으로 되어있다. 이 중 교내에서 외부로 나가는 출차 차량 중 교내 차량관리 시스템에 등록되지 않은 차량이 대부분 지나가는 차선에 수납을 용이하기 위해 요금 수납원이 부스 내부에서 창문을 열고 직접 확인하고 있다. 따라서 해당 차선을 지나가는 데이터를 이용했으며, 차량을 종류별로 분석하기 위해 모든 차종이 지나간 최소시간 간격인 30분 간격으로 10초 간격의 BC 측정자료를 평균 처리 및 산정하였다. 차종은 자동차 등록번호판 등의 기준에 관한 고시를 활용하여 승용차, 승합차, 화물차, 특수차로 구분 지었다(MOLIT, 2018a). 이와 더불어 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도는 한국환경공단에서 제공하는 관악구 측정소(도시대기 측정망)의 대기측정자료를 활용하였다(KECO, 2019).

2) 자료의 분석

BC 농도의 통계분석은 SPSS 프로그램(ver. 23.0, IBM,

USA)을 이용하여 수행되었다. 30분 단위의 BC 농도는 Kolmogorov-Smirnov로 기하정규 분포하는 것을 즉, BC 농도를 자연로그로 변환하였을 때(이하 $\ln(BC_{30min})$) 정규분포를 하였다. 정문과 후문에서 측정된 각각의 BC 농도($\ln(BC_{30min})$)는 t-test를 통해 장소 간 통계적으로 유의한 차이가 없는 것을 보여($p=0.341$) 각각의 BC 농도를 하나의 종속 변수로 설정하였다. Spearman 상관 분석을 사용하여 BC 농도에 영향을 줄 수 있는 요인을 탐색하였고, 회귀분석에 사용된 요인은 차량의 종류에 따른 출차량, PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도, 평일 및 주말 등을 선정하였으며 Backward elimination 방법을 통해 최종 모델을 완성하였다. 모든 통계 분석의 변수와 모델의 유의 수준은 0.05 미만으로 설정하였다.

III. 결 과

1. 공기 중 BC 농도

본 연구에서 노출군(정문과 후문)과 대조군(교내건물)에서 14일간 측정된 공기 중 BC 농도(BC_{30min})는 Table 1과 같다. BC 기하평균 농도 기준으로 노출군은 $2.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (기하표준편차 1.65), 대조군은 $1.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (기하표준편차 1.68)의 결과를 보였으며 두 집단 간의 차이는 약 1.4배 차이가 나며 통계적으로 유의하였다($p<0.001$). 정문과 후문의 BC 기하평균 농도(BC_{30min})는 각각 $2.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 두 집단 간 평균의 차이가 통계적으로 유의하지 않았다($p>0.05$).

2. 시간별 특성에 따른 BC 농도

시간대별로 BC 농도(BC_{30min})를 파악한 결과 가장 높

았던 시간은 11시 30분부터 11시 59분이며, 이 시간대의 BC 평균농도와 표준편차는 $4.01 \pm 4.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 평균 출차량은 74.6대이다. 출차량이 가장 많았던 시간대는 18시부터 18시 29분으로 평균 출차량은 118대(승용차=113대, 승합차=1대, 화물차=4대, 특수차=0.04대)였으며, 이때 BC 평균농도(BC_{30min})와 표준편차는 $2.72 \pm 1.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다(Figure 1(a)). 측정 기간 동안 차종별 출차량은 승용차가 50,402대, 승합차가 811대, 화물차가 4,090대, 특수차가 63대로 총 55,366대였고, 하루 평균 출차량은 차종 구분 없이 총 3,955대였으며 이 중 승용차가 3,600대, 승합차가 58대, 화물차가 292대, 특수차가 5대였다.

Figure 1(b)는 요일에 따른 BC 농도(BC_{30min})와 차종별 출차량을 나타낸 것이다. BC 농도(BC_{30min})가 가장 높았던 월요일의 BC 평균농도(BC_{30min})와 표준편차는 $3.48 \pm 0.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 평균 출차량은 89.27대이고 BC 농도(BC_{30min})가 가장 낮았던 일요일의 BC 평균농도(BC_{30min})와 표준편차는 $2.20 \pm 0.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 평균 출차량은 54.6대이다.

주중과 주말로 비교하여 BC 노출수준을 확인한 결과, 주중의 BC 기하평균 농도(BC_{30min})는 $2.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고 주말은 $2.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며(Figure 2(a)) 통계적으로 유의한 결과를 보였다($p<0.001$). 출차 데이터를 분석한 결과 09시에서 10시 사이와 17시에서 18시 사이에 출차량이 가장 많았다. 출차량이 많은 시간(09-10시, 17-18시)의 BC 기하평균 농도(BC_{30min})는 $2.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 이외의 시간은 $2.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이며(Figure 2(b)), 두 집단 간의 차이는 통계적으로 유의했다($p<0.001$).

Table 1. Comparison of airborne black carbon 30min concentrations by sampling sites exposure and control group

								(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Group	Gate	N*	AM \pm SD [†]	GM [‡] (GSD [§])	Min	Med [¶]	Max ^{**}	ρ
Exposure	Front	331	2.88 \pm 2.01	2.49(1.69)	0.63	2.48	22.54	0.341
	Rear	335	2.68 \pm 1.27	2.40(1.62)	0.38	2.47	7.49	
	Subtotal	666	2.78 \pm 1.68	2.44(1.65)	0.38	2.47	22.54	
Control		334	1.99 \pm 1.00	1.75(1.68)	0.48	1.76	5.43	<0.001
Total		1,000	2.51 \pm 1.53	2.18(1.70)	0.38	2.21	22.54	

*N : Number of samples

†GM : Geometric Mean

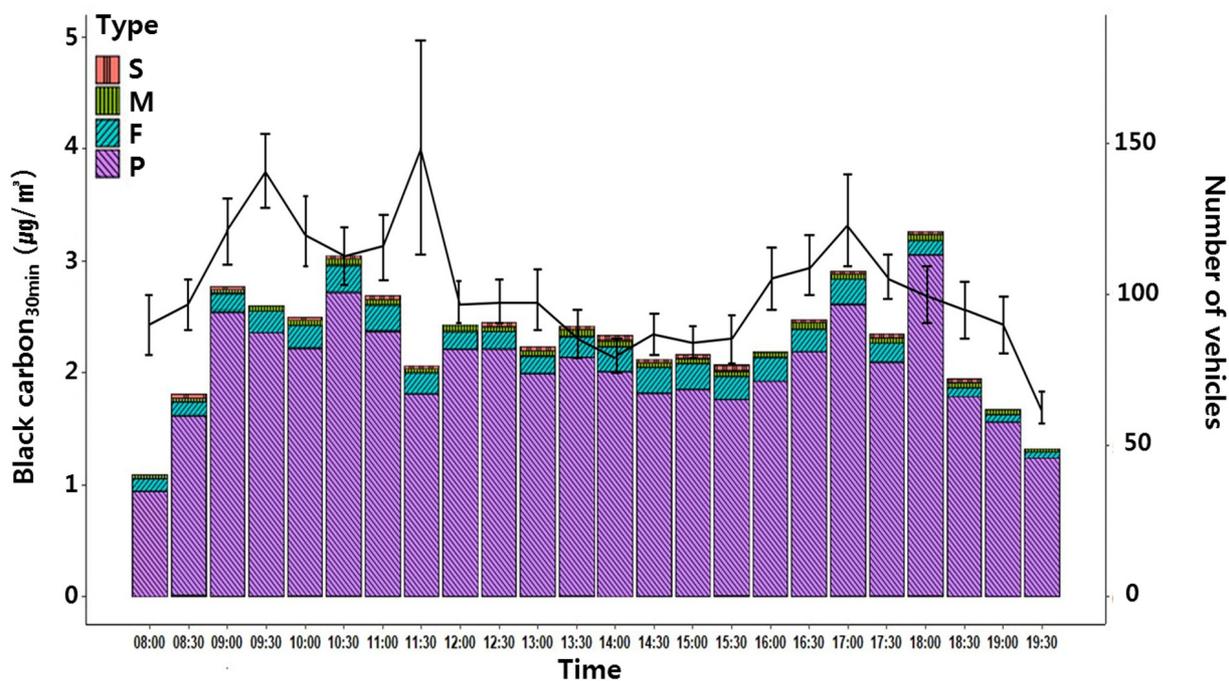
||Min : Minimum

**Max : Maximum

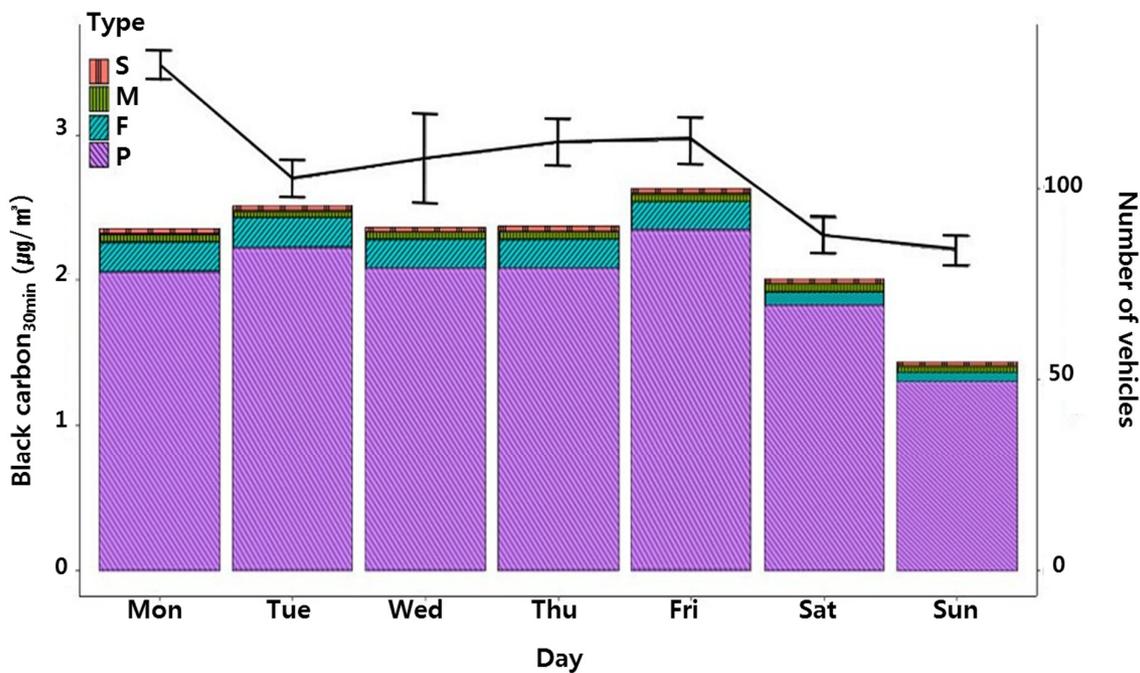
†AM \pm SD : Arithmetic Mean \pm Standard Deviation

§GSD : Geometric Standard Deviation

¶Med : Median



(a)



(b)

Figure 1. (a) Daily temporal variation of 30 minute averaged black carbon concentration(line graph) and a number of total vehicle(bar graph) (b) weekly variation of 30 minute averaged black carbon concentration(line graph) and the number of total vehicle(bar graph). Error bars show the standard error. Arithmetic mean of black carbon concentration at 30 minute intervals for all measurements and the number of total vehicle over 14 days. P : Passenger vehicles, M : Motor vehicles for passengers and freight, F : Freight motor vehicles, S : Special motor vehicles

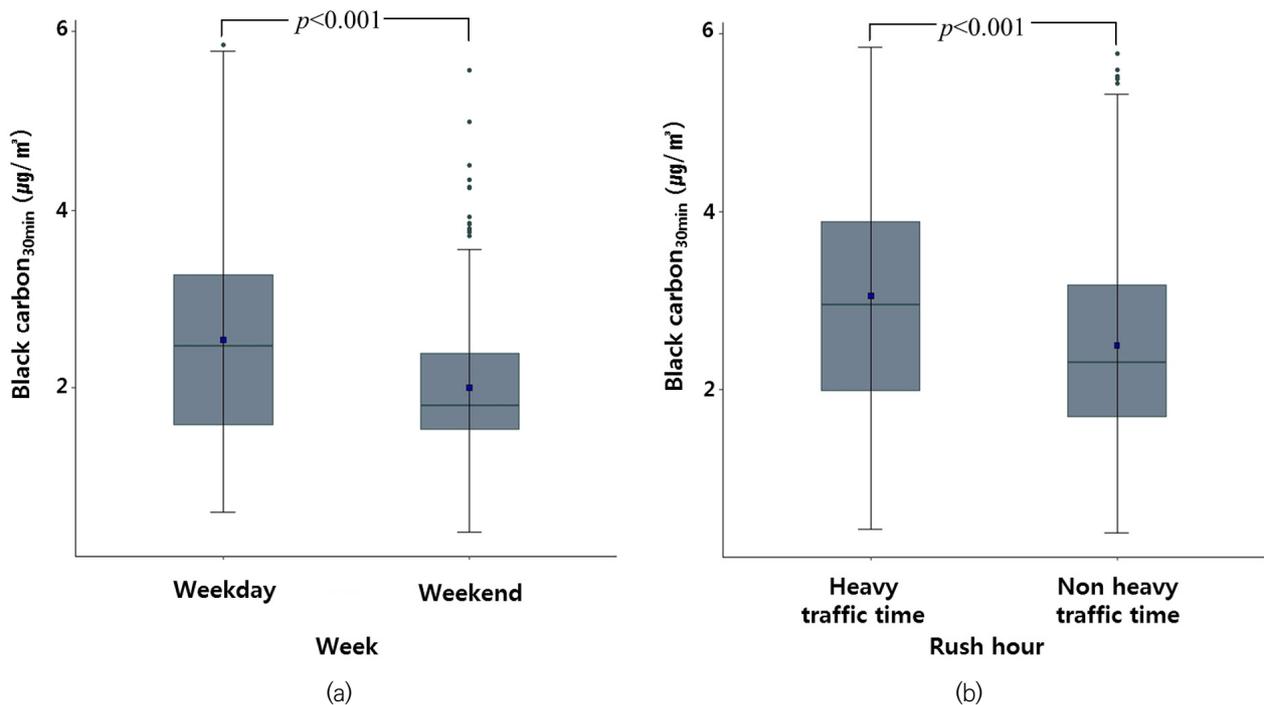


Figure 2. Box plots of black carbon concentration by (a) weekday, weekend($p<0.001$) and (b) heavy traffic time, non-heavy traffic time($p<0.001$); heavy traffic time : 09:00–10:00 and 17:00–18:00. Black carbon_{30min} is geometric mean of black carbon concentration at 30 minute intervals. Values shown are median(line within box), mean(closed square within box), 25th and 75th percentiles(bottom and top of box, respectively), minimum(lower bars on whisker), maximum(upper bars on whisker), and outliers(dots)

3. BC 수준과 인자별 상관관계

Spearman 상관 분석은 측정시간 동안 30 분 단위로 요금정산소를 통과한 차량별(승용차, 승합차, 화물차, 특수차)의 출차량, 승합·화물·특수차의 합산 출차량, 총 출차량, 대기 중 PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도, 차량 요금정산소 내 온·습도와 30 분 단위의 자연로그를 취한 BC 값을 대상으로 진행했다(Table 2, Figure 3). 상관 분석 결과, BC 농도와 상관 계수가 높은 변수로는 차량 요금정산소를 통과한 총 출차량($\rho=0.37$, $N=666$)과 대기 중 PM_{2.5}의 농도($\rho=0.54$, $N=658$)가 유의 수준 0.05 미만에서 상관 계수가 가장 높았다($p<0.001$). 반면, 디젤을 주 연료로 사용했을 것으로 여겨지는 승합차($\rho=0.07$, $N=449$)와 특수차($\rho=0.07$, $N=56$)의 경우 통계적 유의성은 확인되지 않았다($p>0.05$).

4. BC 농도에 영향을 미치는 인자

본 연구에서 BC 농도에 영향을 주는 것으로 여겨지는 여러 변수를 다중 회귀분석 처리한 결과는 Table

3에 나타난 바와 같이, 30 분 단위의 출차량과 대기 중 PM_{2.5}의 농도가 BC($\ln(BC_{30min})$) 농도에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 출차량의 증가와 대기 중 PM_{2.5}의 증가가 BC($\ln(BC_{30min})$) 농도를 높이는 요인으로 나타났으며, 이 두 인자에 대한 요금 수납원의 BC($\ln(BC_{30min})$) 노출 수준의 회귀모형은 42%의 설명력을 가지고 있는 것으로 나타났다($p<0.001$).

5. 순간 최대치를 나타내는 실시간 BC 농도

측정기간 중 순간적으로 가장 높은 BC_{10sec} 농도는 11월 21일 11시 32분 50초에 정문에서 측정된 값으로 3,545.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타냈다(Figure 4). 11월 21일 정문에서 측정된 실시간 BC_{10sec} 노출수준은 Figure 4와 같다. 교내 차량관리 업체의 데이터를 파악한 결과 11시 32분 36초에 “84”로 시작하는 차량이 지나갔다. 이는 자동차 등록번호판 등의 기준에 관한 고시 제 5조에 따르면 화물차에 해당한다. 그리고 17시 13분 40초에서 50초에 316.19–921.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 순간적으로 높은

Table 2. The results of the spearman correlation analysis between the natural logarithmic black carbon($\ln(BC_{30min})$) concentrations and the variables that could affect the black carbon concentrations

		BC	P	M	F	S	M+F+S	Total	PM _{2.5}	PM ₁₀	Temp	RH
BC*		1										
P [†]	$\rho^{§§}$	0.361	1									
(N ^{††} = 666)	ρ	<0.001										
M [‡]	ρ	0.065	0.248	1								
(N = 449)	ρ	0.172	<0.001									
F [§]	ρ	0.210	0.369	0.093	1							
(N = 624)	ρ	<0.001	<0.001	0.054								
S	ρ	0.071	-0.050	0.094	-0.028	1						
(N = 56)	ρ	0.605	0.715	0.543	0.837							
M+F+S	ρ	0.248	0.429	0.315	0.955	0.083	1					
(N = 643)	ρ	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.544						
Total ^{¶¶}	ρ	0.373	0.988	0.273	0.481	-0.041	0.542	1				
(N = 666)	ρ	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.762	<0.001					
PM _{2.5}	ρ	0.537	-0.094	-0.161	-0.060	0.036	-0.090	-0.100	1			
(N = 658)	ρ	<0.001	0.016	0.001	0.139	0.794	0.024	0.011				
PM ₁₀	ρ	0.540	-0.009	-0.188	0.034	0.053	-0.001	-0.007	0.919	1		
(N = 658)	ρ	<0.001	0.826	<0.001	0.392	0.697	0.970	0.863	<0.001			
Temp ^{**}	ρ	0.179	0.267	0.067	0.200	0.068	0.213	0.280	0.098	0.180	1	
(N = 650)	ρ	<0.001	<0.001	0.163	<0.001	0.624	<0.001	<0.001	0.013	<0.001		
RH ⁺⁺	ρ	0.158	-0.201	-0.081	-0.140	-0.023	-0.152	-0.206	0.426	0.234	-0.580	1
(N = 650)	ρ	<0.001	<0.001	0.089	0.001	0.870	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	

*BC : Black Carbon

†P : Passenger vehicles

‡M : Motor vehicles for passengers and freight

§F : Freight motor vehicles

||S : Special motor vehicles

¶¶Total : Total number of vehicle

**Temp : Temperature

++RH : Relative Humidity

††N : Number of samples

§§ ρ : Correlation coefficients

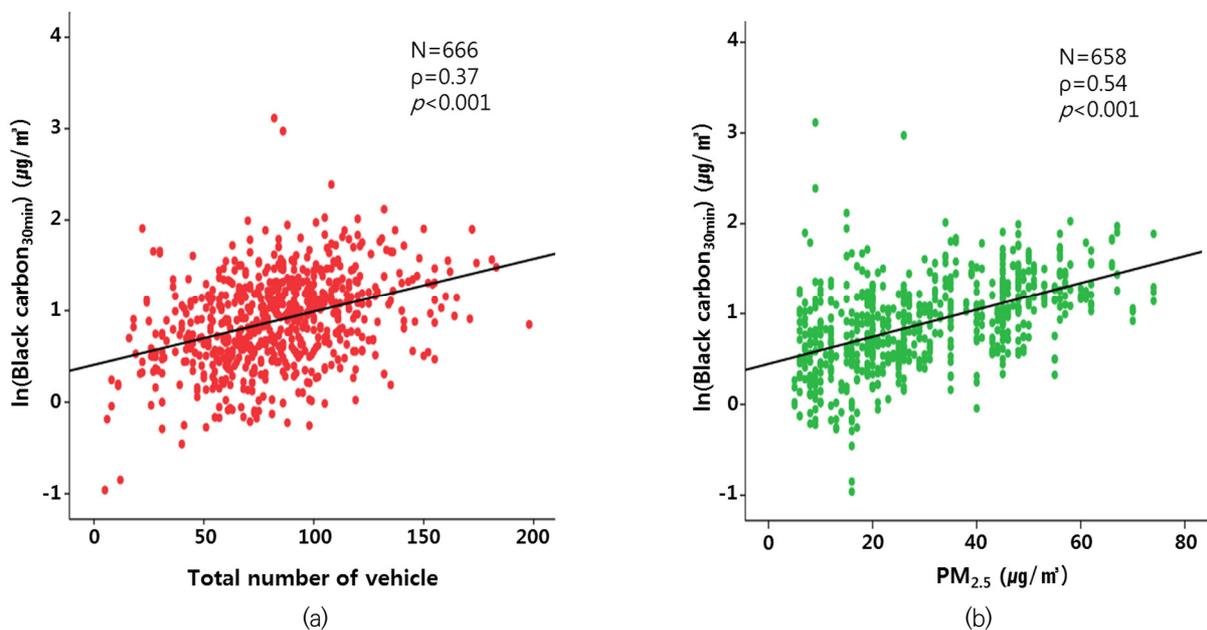


Figure 3. Comparison between black carbon and (a) total number of vehicle, (b) PM_{2.5}. $\ln(\text{Black carbon}_{30min})$ is natural logarithm of black carbon concentration at 30 minute intervals

Table 3. Multiple linear regression analysis results

Variables	Natural logarithm black carbon($\ln(BC_{30min})$)($\mu g/m^3$)				
	β^*	SE [†]	ρ	95% CI [‡]	
Constant	-0.121	0.051	0.019	-0.222	-0.019
Total number of vehicle	0.006	0.001	<0.001	0.005	0.007
PM _{2.5}	0.016	0.001	<0.001	0.014	0.017
Adjusted full model(R ²)			0.4174 (ρ <0.001)		

* β : Estimated regression coefficient
[‡]CI : Confidence Interval

[†]SE : Standard Error

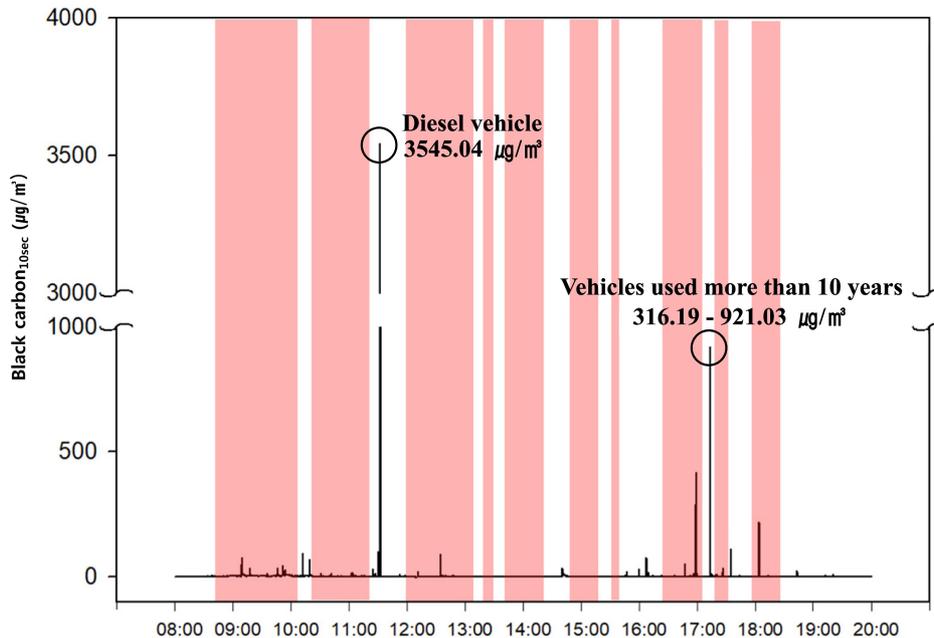


Figure 4. Real time black carbon concentration on 21st November at front gate. Values represent the real time black carbon concentration of 10 seconds interval measurement. Red areas mean when the number of total vehicles is more than 30 vehicles

BC 농도가 측정되었다. 이 순간의 측정된 데이터를 분석한 결과 17시 13분 42초와 48초에 “서울”로 시작하는 차량이 지나갔다. Figure 4에서 음영처리된 부분은 10분 단위로 출차량을 계산했을 때 11월 21일 정문의 평균 출차량이 30대 이상인 경우이다. 순간적으로 높은 농도를 보여준 시간은 음영처리된 부분에서 나타나지 않는다.

IV. 고 찰

본 연구는 서울시 관악구 소재 종합대학교 1곳의 정문과 후문에 위치한 차량 요금정산소 수납원의 BC 노출 평가와 BC 농도에 영향을 주는 요인들을 알아보았

다. 30분 단위별 BC 농도(BC_{30min})를 확인한 결과 11시 30분부터 11시 59분의 출차량이 상대적으로 적지만 BC 농도(BC_{30min})는 가장 높게 나왔는데, 그 이유는 해당 시간대에 측정기간 중 최대 BC 농도(BC_{10sec})인 $3,545.04 \mu g/m^3$ 가 해당 시간대의 평균에 영향을 주었기 때문으로 판단된다(Figure 1(a), Figure 4). Figure 1(b)에서 BC 기하평균 농도(BC_{30min})가 가장 높은 요일과 낮은 요일은 월요일과 일요일이며, Figure 2(a)에서 주말보다 주중의 BC 기하평균 농도(BC_{30min})가 높게 측정되었다. 그 이유는 대학교 특성상 주말(126대/시간)보다 주중(182대/시간)에 통행 차량이 많기 때문이다. Figure 2(b)는 교통량이 많은 출·퇴근 시간과 그렇지 않은 시간을 비교한 것이다. 보통 우리나라의 출·퇴근

시간은 08-09시, 18-19시인데 본 연구는 09-10시, 17-18시의 교통량이 더욱 높은 이유는 교내 차량관리 시스템에 미등록된 차량이 많이 지나갔기 때문으로 판단된다. 미등록된 차량은 주로 세미나, 교육 등의 행사 참여나 학교 내 보수공사, 출장 수리 등의 용역 작업으로 혼잡한 시간대를 피한 전후에 출·퇴근하여 교통량이 높은 것으로 추정된다. 교통량이 증가하는 시간대에 BC 농도가 증가하는 현상은 여러 논문에서도 나타난 것처럼(Lee & Bae, 2010; Dons et al., 2012) 본 연구에서도 일치하는 결과가 나왔다. 더불어 주중과 주말, 교통량이 많은 출·퇴근 시간과 그렇지 않은 시간을 비교하면 통계적으로 두 집단 간의 유의한 차이를 보였지만, 두 집단 간의 차이는 각각 0.57, 0.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 그 차이가 미미한 것으로 여겨질 수 있다. 하지만 Figure 1(a)에서 11시 30분을 제외한 나머지 시간대에서 출·퇴근 시간에 걸쳐 출차량과 BC 농도가 모두 증가하는 패턴을 볼 수 있으며 Figure 1(b)에서는 주말과 비교하여 주중에 더 많은 출차량과 높은 BC 농도의 패턴을 볼 수 있다.

상관분석 결과, BC 농도($\ln(\text{BC}_{30\text{min}})$)와 통계적으로 유의미한 상관성이 있는 변수들은 승용차, 화물차, 승합·화물·특수차의 합산 출차량, 모든 종류의 출차량, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 그리고 온·습도이다(Table 2, Figure 3). 앞서 언급한 변수 중 BC 농도($\ln(\text{BC}_{30\text{min}})$)는 대기 중 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 이 높은 상관성을 보였다. 이는 작업자 주변의 PM 농도가 BC 농도와 상관성을 띠는 것 뿐만 아니라(Lee et al., 2015; Choi et al., 2019) 지역의 대기 중 PM 농도도 작업자 주변에서 측정된 BC 농도와 상관성을 띠는 것으로 확인할 수 있었다(Figure 3). 또한 디젤 연료를 주로 사용하는 승합·화물·특수차의 합산 출차량과 모든 종류의 출차량 그리고 승용차의 출차량도 BC 농도($\ln(\text{BC}_{30\text{min}})$)와의 상관성이 확인되었다. 승용차와 BC 농도($\ln(\text{BC}_{30\text{min}})$)와의 상관성은 다른 차종보다 높게 나왔는데($\rho=0.36$, $p<0.001$) 이는 승용차 중 사용 연료의 비율로 추정할 수 있다. 국토교통 통계연보(MOLIT, 2019)에 따르면 2019년 9월 자동차 등록자료 기준으로 전국에서 휘발유와 경유를 사용하는 승용차의 비율은 각각 56.93%, 30.59%이다. 본 연구에서 집계된 승용차의 수는 50,402대로 이 중 약 15,418대(30.59%)는 경유를 사용하는 승용차로 추정된다. 디젤 연료를 사용하는 차량과 BC 농도와의 상관성은 다른 연구에서 확인되었으며(Lee et al., 2015; Stapleton

et al., 2018) 일부 연구에서도 휘발유를 사용하는 차량과 BC 농도와의 상관성도 확인되었다(Kamboures et al., 2013; Wang et al., 2016). 반면, 승합차와 특수차의 출차량은 BC 농도와 상관성이 낮게 나타났다($\rho_{\text{승합차}}=0.07$, $\rho_{\text{특수차}}=0.07$). 이는 대학교 특성상 해당 차량의 출차량이 적었기 때문으로 해석된다(Table 2).

T-test와 상관분석을 통해 선별된 환경 요인들을 설명변수로 설정하고 다중 선형 회귀분석을 실시하여 회귀모형을 구축하였다(Table 3). 이는 차량 요금 수납원의 호흡기 주변 BC 노출 수준과 환경적 요인의 연관성을 통계학적으로 약 42% 설명할 수 있는 최적의 모델이다(adjusted $R^2=0.4174$, $p<0.001$). 다중 선형회귀모형에 포함된 요인들은 30분 단위의 자연로그를 취한 BC 농도에 영향을 미치는 것으로 차량 요금정산소를 빠져나간 총 출차량과 차량 요금정산소에서 가까운 관악구 측정소 자료의 대기 중 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 높아질수록 BC 농도($\ln(\text{BC}_{30\text{min}})$)도 높아지는 것으로 판단할 수 있다. 작업자의 호흡기 주변에서 BC 농도와 $\text{PM}_{2.5}$ 를 동시에 조사한 연구에서도 BC 농도에 영향을 준 것은 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도를 제시하였으며(Choi et al., 2019), 본 연구에서 차량 요금정산소와 가까운 관악구 측정소의 대기 중 $\text{PM}_{2.5}$ 농도도 작업자의 호흡기 주변의 BC 농도($\ln(\text{BC}_{30\text{min}})$)에 영향을 주는 인자로 확인되었다. 또한 다른 연구에서도 차량 수가 공기 중 BC 농도에 영향을 주는 인자로 밝혀졌으며 본 연구와 유사한 결과를 나타냈다(Pérez et al., 2010). 측정 당시 조사된 승용차, 특수차의 출차량과 온도, 습도, 대기 중 PM_{10} 등의 변수들은 상관분석에서 유의한 상관성을 보였으나 다중 선형회귀모형에서는 통계적으로 유의하지 않은 변수들로 확인되었다.

본 연구에서 차량번호가 “84”로 시작하는 화물차와 “서울”로 시작하는 차량이 지나갔을 때 순간적으로 높은 BC 농도($\text{BC}_{10\text{sec}}$)를 나타냈다. 이는 2004년부터 지역감정을 해소하는 취지로 지역명을 제외한 번호판이 생성되었는데 “서울”로 시작하는 차량은 2004년 이전에 등록된 차량으로 최소 15년이 지난 노후화된 차량이다. 즉, 실시간 BC 농도($\text{BC}_{10\text{sec}}$)와 차량관리 업체의 데이터를 대조했을 때 높은 값이 노출되는 경우는 주로 디젤을 연료로 사용하는 화물차가 지나가거나 노후화된 차량이 지나간 것으로 볼 수 있다. 또한 Figure 4를 보면 순간적으로 고농도를 보여준 시간은 평균 출차량이 30대 이하일 때 나타내는데 이는 순간적인 고농도 값은

출차량보다 연료의 종류나 차량 연도에 영향을 받은 것으로 판단된다. 최근 연구에 의하면 호흡기계에 침착된 탄소 물질의 농도는 대기에 존재하는 탄소 물질의 평균 농도보다 순간적인 고농도($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상) 노출과 관련이 있기 때문에 평균 노출농도뿐만 아니라, 순간적인 고농도 노출에 대한 저감 정책도 고려되어야 한다 (Nwokoro et al., 2012; Ackermann-Liebrich, 2012; Nwokoro et al., 2013).

더불어 요금 수납원의 DEE 노출평가는 다른 연구에서도 진행되었는데, BC가 아닌 EC를 측정했기 때문에 Stapleton et al.(2018)의 EC와 BC의 관계식($\text{EC Concentration} = \text{BC MA Concentration} \times 1.17$)을 사용한 추정치를 활용하여 본 연구와 비교해봤다. 본 연구는 영국에서 연구한 Groves & Cain(2000)과 대만에서 연구한 Shih et al.(2008)보다 낮은 노출농도를 보였다. 그러나 노출군이 대조군보다 Groves & Cain(2000)의 연구에서는 1.10배 높고, 본 연구는 1.40배 높은 것으로 나타나 Groves & Cain(2000) 연구의 기존 배경농도가 높았던 것으로 판단된다. 반면, Shih et al.(2008)의 연구는 노출군이 대조군(Cash payment, Ticket payment lane)에 비해 약 6.52배, 8.34배 높게 나왔는데 대만 고속도로 기록 관리국에 따르면, 연구 대상 틀게이트는 대만 내에서 가장 많은 교통량이 일어나는 구간이다. 환경미화원과 택배서비스업 종사자 연구는 기하평균 농도만 제시되어서 Aitchison & Brown(1957)에서 주장하는 기하평균 농도와 산술평균 농도의 관계식($\text{AM} = \text{GM} \times \exp[1/2 \times (\ln(\text{GSD}))^2]$)을 통한 추정치를 활용하여 나타냈다. 농부를 대상으로 진행한 BC 노출평가에서 작업별로 비교하면, 디젤 엔진을 사용했을 때가 사용하지 않을 때보다 BC 농도가 더 높게 나왔는데 최소 1.27 배에서 최대 30.33 배 차이가 났다 (Stapleton et al., 2018). 타 직업군과 비교하면 요금 수납원의 BC 노출수준은 높지 않은 편이나 각각의 연구들은 측정조건이나 작업환경이 다르기 때문에 직업별 노출수준을 비교 및 해석할 때에는 상당한 주의가 고려되어야 한다고 판단한다(Table 4).

현재 국내에선 DEE에 대한 노출기준은 없는 것으로 확인되었다. 하지만, 미국의 광산보호청(Mine Safety and Health Administration, MSHA)에서는 작업장에 대한 DEE 노출기준을 PEL(Permissible Exposure Limit) 기준으로 총 탄소농도(total carbon)는 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 넘지 않도록 규정하고 있다(MSHA, 2018). 2001년

미국 정부 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서는 EC에 대한 노출기준을 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 사전고시하였다가 2003년에 철회하였다(ACGIH, 2001).

현재 노후경유차에 대한 법적 규제 측면은 다음과 같다. 서울시는 환경부(Ministry of Environment, ME)의 자동차 배출가스 등급 산정방법에 관한 규정(ME, 2018a)에 의거, 배출가스 등급이 5등급인 경유차 중 일정 조건에 해당되는 경우 상시적으로 운행을 제한하고 있다(Seoul Metropolitan Government, 2019). 또한 서울시는 국토교통부 고시를 통해 한양도성 내부(16.7km)를 녹색교통진흥지역으로 지정했다(MOLIT, 2018b). 주요 규제로는 제한속도 50 km/h로 하향, 배출가스 등급 5등급 차량의 운행 제한 등으로 대기질 수준 향상을 위한 자동차 운행관리를 제도기간(7월-11월)을 거쳐 12월부터 전면 시행할 예정이다(Seoul Metropolitan Government, 2019b). 더불어 매연저감장치 부착 보조금이나 조기 폐차보상금 등의 배출가스 저감 사업도 운영되고 있다(ME, 2018b). 따라서 위 제도의 운행 제한구역과 보조금 지원대상의 범위를 점차적으로 넓혀 대학 캠퍼스 내 노후 경유차의 운행 제한을 권고할 필요가 있다.

본 연구의 한계점으로는 11월에 한정되어 14일만 측정하여 다른 계절과의 변이를 볼 수 없었던 점이다. 2010년과 2011년 동안 주거지역 및 상업지구에서 대기 중 BC 농도를 측정한 Feng et al.(2014)의 연구에 따르면, BC 농도는 다른 계절에 비하여 겨울철(11, 12, 1월)에 상대적으로 높은 편이었다. 하지만, 대규모 행사가 열린 해에는 교통량의 증가로 인하여 여름과 가을의 BC 농도가 겨울의 BC 농도와 비슷한 수치를 보였다. 마찬가지로 본 연구대상인 대학교의 특성을 감안했을 때 입학식, 졸업식 등 여러 행사로 인한 교통량의 증가 등을 추가로 고려하여 교내 요금정산소 내 BC 농도의 계절별 변화를 알아볼 추가 연구가 필요하다. 또한 측정기간 중 집계된 차량의 연료를 정확하게 파악할 수 없어 사용 연료에 따른 BC 농도의 변이를 설명하지 못한 점도 있다. 하지만 교내 차량관리 업체에서 받은 데이터와 자동차 등록번호판 등의 기준에 관한 고시를 통해 차량의 연도, 종류 등을 확인하여 BC 농도의 변이를 설명할 수 있었던 것은 이 논문의 장점이다. 또한 1개 학교의 부스에서만 측정했기 때문에 모든 대학교 내 요금 수납원의 BC 노출 농도를 설명할 수 없으나, 측정장소

Table 4. Summary of studies on levels of black carbon concentration different by occupational groups

Occupational groups	Period	Location	BC* concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Reference		
			AM [†]	GM [‡]	GSD [§]			
This study	Exposure	Nov 13-26, 2018	Korea	2.78	2.44	1.65	-	
	Control			1.99	1.75	1.68		
Tollbooth worker, tunnel, etc	Personal sample	-	UK	19.66	17.00	2.30	Groves and Cain, 2000	
	Background			17.95	15.00	2.20		
Tollbooth worker	Bus and truck lane	Jan 4-14, 2001	Taipei	112.56	-	-	Shih et al., 2008	
	Cash payment lane			17.26	-	-		
	Ticket payment lane			13.50	-	-		
Municipal household waste worker	Collector	Jun - Sep, 2014	Korea	10.69 [¶]	10.10	1.40	Lee et al., 2015	
	Driver			8.07 [¶]	7.80	1.30		
Forklift operator	Forklift operator	Jan, Feb, Apr, 2017	Korea	12.90	7.50	3.00	Lee et al., 2017	
	Officer			3.10	2.50	2.00		
Door-to-door deliver		Jul - Sep, 2015	Korea	3.76 [¶]	2.23	2.78	Lee and Kim, 2017	
	Transport load			7.80	3.60	4.80		
	Animal work			9.10	4.90	3.40		
	Drive			12.30	1.30	8.30		
	Grain bin			1.40	0.60	6.20		Stapleton et al., 2018
	Light misc. farm			7.00	1.80	7.30		
	Load			5.70	1.60	5.70		
	Vehicle maintenance			6.20	0.90	8.70		
Subway worker	Maintenance engineers	Apr - Sep, 2018	Korea	9.30	4.00	3.30	Choi et al., 2019	
	Subway station manager			2.20	1.80	1.90		
	Train driver			5.90	4.90	1.90		

*BC : Black Carbon

†AM : Arithmetic Mean

‡GM : Geometric Mean

§GSD : Geometric Standard Deviation

||An estimate of the black carbon concentration by using equation(Stapleton et al., 2018)

¶An estimate of the arithmetic mean by using equation(Aitchison and Brown, 1957)

는 국제적 규모의 큰 도시인 서울 내에 있으며 재학생 및 외국인 유학생과 교·직원 수가 5만여 명이 넘는 교육기관으로 요금 수납원의 BC 노출 수준을 잘 반영하고 있다고 판단한다.

V. 결 론

서울시 관악구 소재 종합대학교 1곳의 차량 요금정산소 수납원 호흡기 주변 BC 농도를 평가한 결과는 다음과 같다.

1. 요금 수납원이 노출되는 BC 기하평균 농도(BC_{30min})는 노출군이 $2.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 대조군 $1.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 약 1.4배 높게 나왔다.
2. 시간별로 BC 평균 농도(BC_{30min})와 표준편차를 알아본 결과, 11시 30분부터 11시 59분이 $4.01 \pm 0.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고 요일별로는 월요일($3.48 \pm 0.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 높았으며, 일요일($2.20 \pm 0.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 낮았다.
3. 출차량이 많은 시간(09시-10시)의 BC 기하평균 농도(BC_{30min})는 $2.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 이외의 시간은 $2.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이었으며($p < 0.001$), 주중의 BC 기하평균

농도(BC_{30min})는 $2.62 \mu g/m^3$, 주말은 $2.04 \mu g/m^3$ 로 나타났다($p < 0.001$).

- 상관분석 결과, $BC(\ln(BC_{30min}))$ 와 상관성이 통계적으로 유의한 요인들은 승용차, 화물차, 승합·화물·특수차의 합산 출차량, 총 출차량, 대기 중 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도, 차량 요금정산소 내 온·습도이고, 다중 선형 회귀분석 결과, 총 출차량 증가와 대기 중 $PM_{2.5}$ 농도의 증가가 $BC(\ln(BC_{30min}))$ 농도를 높이는 요인으로 나타났다(adjusted $R^2=0.4174$, $p < 0.001$).
- 요금 수납원은 지속적으로(BC_{30min}) 저농도($GM=2.78 \mu g/m^3$)에 노출되지만, 순간적으로(BC_{10sec}) 고농도($3,545.04 \mu g/m^3$)에 노출된다. 더불어 순간적으로 고농도에 노출될 때 디젤 연료를 주로 사용하는 화물차가 지나가거나 노후화된 차량이 지나가는 것으로 파악되었다.

따라서 밀폐된 요금정산소 부스 내부에 환기장치를 설치하여 공학적인 개선을 하거나 출·퇴근 시간대 혹은 미세먼지 주의보가 발령된 날은 요금 수납원의 호흡보호구 착용을 권장한다. 또한 제도적으로는 대중교통의 활성화를 위한 노력을 통해 출·퇴근 차량의 수를 줄이거나 현행 제도 중 노후 경유차의 매연저감장치 설치 보조금 지원범위 확대, 운행 제한 권고 활동 등이 점차적으로 확대될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 BK21plus 사업(no.22A 20130012682)의 지원을 일부 받아 수행되었으며 한국방송통신대학교 환경보건학과 박동욱 교수님과 서울대학교 보건대학원 환경보건학과 이기영 교수님에게 Black carbon 측정기 Aethalometer(AE-51, Aethlabs, USA)를 빌려서 진행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

ACGIH T. Threshold limit values and biological exposure indices for 2001–2002. In Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists 2001.

Ackermann-Liebrich U. Alveolar macrophages carbon load: a marker of exposure? *Eur Respir J* 2012;

40(5):1065–1066 (<https://doi.org/10.1183/09031936.00056412>)

AethLabs. microAeth® AE51 Operating Manual Rev 06. 2016. p. 10

Aitchison J, Brown JA. The lognormal distribution with special reference to its uses in economics. 1957

Castro LM, Pio CA, Harrison RM, Smith DJT. Carbonaceous aerosol in urban and rural european atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations. *Atmos Environ* 1999;33(17): 2771–2781 ([https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00331-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00331-8))

Choi S, Park D, Kim SW, Ha K, Jung H, et al. Estimates of the number of workers exposed to diesel engine exhaust in south korea from 1993 to 2013. *Saf Health Work* 2016;7(4):372–380 (<https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.06.001>)

Choi S, Park JH, Kim SY, Kwak H, Kim D, et al. Characteristics of $pm_{2.5}$ and black carbon exposure among subway workers. *Int J Environ Res Public Health* 2019;16(16):2901 (<https://doi.org/10.3390/ijerph16162901>)

Dons E, Int Panis L, Van Poppel M, Theunis J, Wets G. Personal exposure to black carbon in transport microenvironments. *Atmos Environ* 2012;55:392–398 (<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.020>)

Feng J, Zhong M, Xu B, Du Y, Wu M, et al. Concentrations, seasonal and diurnal variations of black carbon in $pm_{2.5}$ in shanghai, china. *Atmos Res* 2014; 147–148:1–9 (<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.04.018>)

Groves J, Cain JR. A survey of exposure to diesel engine exhaust emissions in the workplace. *Ann Work Expo Health* 2000;44(6):435–447 (<https://doi.org/10.1093/annhyg/44.6.435>)

International Agency for Research on Cancer (IARC). Diesel engine exhaust carcinogenic. Press release no. 213. 2012;[Accessed 2019 Sep 19]. Available from: https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr213_E.pdf

Janssen NA, Hoek G, Simic-Lawson M, Fischer P, van Bree L, et al. Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with pm_{10} and $pm_{2.5}$. *Environ Health Perspect* 2011;119(12):1691–1699 (<https://doi.org/10.1289/ehp.1003369>)

Jung J-H, Park S-S, Yoon K-H, Cho S-Y, Kim S-J. Inter-comparison of two aethalometers for aerosol black carbon measurements. *J Korean Soc Atmos Environ* 2011;27(2):201–208 (<https://doi.org/10.5572/>

- KOSAE.2011.27.2.201)
- Kamboures MA, Hu S, Yu Y, Sandoval J, Rieger P, et al. Black carbon emissions in gasoline vehicle exhaust: a measurement and instrument comparison. *J Air Waste Manag Assoc* 2013;63(8):886–901 (<https://doi.org/10.1080/10962247.2013.787130>)
- Korea Environment Corporation(KECO). Data Retrieve. [Accessed 2019 Dec 08]. Available from: https://www.airkorea.or.kr/web/realSearch?pMENU_NO=97
- Kim B, Song DW. Comparison of diesel exhaust particle concentration between large above-underground parking lots. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2013; 23(4): 323–332
- Kim KB, Chung EK, Kim J-K, Park HD, Kang JH. Noise level assessment exposed to cashiers in the highway tollbooth. *Trans Korean Soc Noise Vib* 2016;26(6):729–735 (<https://doi.org/10.5050/ksnve.2016.26.6.729>)
- Korean Educational Statistics Software(KESS). Educational statistics. 2019. [Accessed 2019 Sep 19]. Available from: https://kess.kedi.re.kr/post/6684875?itemCode=04&menuld=m_02_04_03
- Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA). 2016–2017 Disaster casebook. 2017;[Accessed 2019 Sep 19]. Available from: http://www.kosha.or.kr/kosha/data/disasterCasebook_C.do
- Lee GH, Kim SW. Exposure assessment of diesel engine exhaust among door-to-door deliverers in daegu. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2017;27(4):361–370 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2017.27.4.361>)
- Lee H, Lee S, Ryu SH., Park J, Park DU. Occupational factors influencing the forklift operators' exposure to black carbon. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2017; 27(4):313–323 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2017.27.4.313>)
- 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;10(8):e0135229 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135229>)
- Lee SB, Bae GN. Characteristics of air pollution at a junction area contaminated with vehicle emissions. *Trans KSAE* 2010;18(4):48–53
- Mine Safety and Health Administration(MSHA). Title 30 mineral resources. 2018; p.372.[Accessed 2019 Sep 19]. Available from: <http://arlweb.msha.gov/regs/30cfr>
- Ministry of Environment(ME). Special Act on the Improvement of Air Quality in Seoul Metropolitan Area(ME Public Notice No.2018–58).; 2018a
- Ministry of Environment(ME). Special Act on the Improvement of Air Quality in Seoul Metropolitan Area(ME Article 25,27).; 2018b
- Ministry of Land Infrastructure and Transport(MOLIT). Molit statistics system. [Accessed 2019 Sep 19]. Available from: <http://stat.molit.go.kr/portal/cate/statView.do?hRsId=58&hFormId=2040&hSelectId=2040&sStyleNum=413&sStart=201907&sEnd=201907&hPoint=00&hAppr=1&oFileName=&rFileName=&midpath=>
- Ministry of Land Infrastructure and Transport(MOLIT). Motor Vehicle Management Act. 2018a
- Ministry of Land Infrastructure and Transport(MOLIT). Sustainable transportation logistics development act(MOLIT Public Notice No.2018–483).; 2018b
- Na J, Kwon M, Kim D, Park Y, Seo J, et al. Job stress among highway toll gate cashiers. *Korean J Environ Health Sci* 2017;43(5):370–381 (<https://doi.org/10.5668/JEHS.2017.43.5.370>)
- Nwokoro C, Brugha R, Grigg J. Alveolar macrophages carbon load: a marker of exposure? *Eur Respir J* 2013;41(3):763 (<https://doi.org/10.1183/09031936.00176812>)
- Nwokoro C, Ewin C, Harrison C, Ibrahim M, Dundas I, et al. Cycling to work in london and inhaled dose of black carbon. *Eur Respir J* 2012;40(5):1091–1097 (<https://doi.org/10.1183/09031936.00195711>)
- Park CY, Koo JW, Roh YM, Lee SH. Lead exposure of tollgate workers on korea expressway. *Korean J Occup Environ Med* 1990;2(2):134–141. (<https://doi.org/10.35371/kjoem.1990.2.2.134>)
- Pérez N, Pey J, Cusack M, Reche C, Querol X, et al. Variability of particle number, black carbon, and pm₁₀, pm_{2.5}, and pm₁ levels and speciation: influence of road traffic emissions on urban air quality. *Aerosol Sci Tech* 2010;44(7):487–499 (<https://doi.org/10.1080/02786821003758286>)
- Seoul Metropolitan Government. Seoul metropolitan city ordinance on designation of low emission zones and restrictions on operation. 2019. [Accessed 2019 Oct 15]. Available from: <http://www.law.go.kr/DRF/lawService.do?OC=poweresca&target=ordin&MST=1404459&type=HTML&mobileYn=>
- Seoul Metropolitan Government. the Seoul Metropolitan Press.;2019b. 3544 p. 8–12
- Shih TS, Lai CH, Hung HF, Ku SY, Tsai PJ, et al. Elemental and organic carbon exposure in highway tollbooths: a study of taiwanese toll station workers. *Sci Total Environ* 2008;402(2–3):163–170 (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.04.051>)
- Stapleton EM, O'Shaughnessy PT, Locke SJ, Altmaier

- RW, Hofmann JN, et al. A task-based analysis of black carbon exposure in iowa farmers during harvest. *J Occup Environ Hyg* 2018;15(4):293-304 (<https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1422870>)
- Viidanoja J, Sillanpää M, Laakia J, Kerminen V, Hillamo R. Organic and black carbon in pm_{2.5} and pm₁₀: 1 year of data from an urban site in helsinki, finland. *Atmos Environ* 2002;36(19):3183-3193 ([https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00205-4))
- Wang Y, Xing Z, Zhao S, Zheng M, Mu C, et al. Are emissions of black carbon from gasoline vehicles overestimated? real-time, in situ measurement of black carbon emission factors. *Sci Total Environ* 2016;547:422-428 (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.115>)
- Wilker EH, Mittleman MA, Coull BA, Gryparis A, Bots ML, et al. Long-term exposure to black carbon and carotid intima-media thickness: the normative aging study. *Environ Health Perspect* 2013;121(9):1061-1067 (<https://doi.org/10.1289/ehp.1104845>)

<저자정보>

김동원(대학원생), 조혜리(대학원생), 우철운(대학원생), 류승훈(대학원생), 윤충식(교수)