

## 지게차 운전원의 블랙카본(black carbon, BC) 노출에 영향을 미치는 직업적 요인

이혜민<sup>1</sup> · 이승희<sup>2</sup> · 류승훈<sup>3</sup> · 박지훈<sup>3</sup> · 박동욱<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>한국방송통신대학교 대학원 환경보건시스템학과,

<sup>2</sup>한국방송통신대학교 환경보건학과, <sup>3</sup>서울대학교 보건대학원 환경보건학과

## Occupational Factors Influencing the Forklift Operators' Exposure to Black Carbon

Hyemin Lee<sup>1</sup> · Seunghee Lee<sup>2</sup> · Seung-Hun Ryu<sup>3</sup> · Jihoon Park<sup>3</sup> · Dong-Uk Park<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Health Systems, Graduate School of Korea National Open University

<sup>2</sup>Department of Environmental Health, Korea National Open University

<sup>3</sup>Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University

### ABSTRACT

**Objectives:** This study aimed to assess exposure to black carbon(BC) among forklift operators and to identify environmental and occupational factors influencing their BC exposure.

**Methods:** We studied a total of 23 forklift operators from six workplaces manufacturing paper boxes. A daily BC exposure assessment was conducted during working hours from January to April 2017. A micro-aethalometer was used to monitor daily BC exposure, and information on work activities was also obtained through a time-activity diary(TAD) and interviews. BC exposure records were classified into four categories influencing BC exposure level: working environment, workplace, forklift operation, and job characteristics. Analysis of variance(ANOVA) was used to compare average BC exposure levels among the four categories and the relationships between potential factors and BC exposure were analyzed using a multiple linear regression model.

**Results:** The operators' daily exposure was  $12.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $N=9,148$ ,  $GM=7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) with a range:  $0.001-811.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . The operators were exposed to significantly higher levels when they operate a forklift in a room  $\leq 20,000 \text{ m}^3$  ( $AM=12.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), in indoor workplaces ( $AM=16.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), when they operate a forklift manufactured before 2006 ( $AM=13.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), a forklift with a loading limit of four-tons ( $AM=27.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), with a roll and bale type clamp ( $AM=17.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), and with no particulate filter ( $AM=15.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**Conclusions:** Occupational factors including temperature, smoking, season, daytime, room volume( $\text{m}^3$ ), location of operating, and manufacturing era and model of forklift influenced the BC exposure of forklift operators. The results of this study can be used to minimize the BC exposure of forklift operators.

**Key words:** Black carbon, diesel engine exhaust emissions, exposure, forklift operator, time-activity diary

### I. 서 론

2012년 6월 국제 암 연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)는 디젤엔진배출물(diesel

engine exhaust, DEE)을 사람에게 폐암과 방광암을 일으키는 확인된 발암물질(confirmed carcinogen)로 규정했다(IARC, 2012). 미국 광산 안전 보건국(Mine Safety and Health Administration, MSHA)은 근로자 보호를 위

\*Corresponding author: Dong-Uk Park, Tel: 02-3668-4707, E-mail: pdw545@gmail.com

Department of Environmental Health, Korea National Open University, 86, Daehak-ro, Jongno-gu, Seoul 03087, Republic of Korea  
Received: October 16, 2017, Revised: December 16, 2017, Accepted: December 19, 2017

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.

한 노출기준으로 하루 평균 공기 중 총 탄소(total carbon, TC)의 농도로써  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 제시하고 있다(MSHA, 2014). 2017년 3월 기준 우리나라 지게차 등록 대수는 17만 4,505대로 전년 대비 2,300여 대 증가하여 매년 지속적으로 증가 추세에 있으며(MoLIT, 2017), 2015년 근로복지공단에서는 지게차 등 디젤 차량을 정비한 근로자에게 발생한 원발성 폐암을 업무상 질병으로 판정한 바 있다(OLDI, 2015).

일반적으로 공기 중 DEE 노출을 추정하는 대리 지표(surrogate)로 원소탄소(elemental carbon, EC)와 블랙카본(black carbon, BC)이 사용된다(Castro et al., 1999; Viidanoja et al., 2002; Janssen et al., 2011; Wilker et al., 2013). 국내에서 DEE 관련 연구는 일부 보고되었다. 버스 정비 근로자와 환경미화원을 대상으로 유기탄소(organic carbon, OC), EC, BC,  $\text{PM}_{2.5}$ (particulate matter) 노출을 평가한 바 있다(Lee et al., 2015; Lee & Yi, 2016). Lee & Yi(2016)는 BC가  $\text{PM}_{2.5}$ 보다 DEE 노출 수준을 추정하는 데 더 적정하다고 주장했다. Kim et al.(2016)은 대구 지역 내 6개 합판 제조 및 취급 사업장의 지게차 운전원 8명을 대상으로 BC와 EC의 노출을 평가하고 이 노출에 영향을 미치는 직업적 요인을 평가한 바 있다.

디젤차량이 증가되고 DEE 노출 근로자의 건강영향 위험에도 불구하고 고용노동부는 DEE 노출 및 건강영향 감시체계 등과 관련된 법적 조치를 아직 마련하지 않고 있다. 예를 들어, DEE는 작업환경측정은 물론 특수건강검진 항목에도 포함되지 않고 있다. 본 연구에서는 지게차 운전원의 BC 노출을 시간 활동 별로 평가하고, BC 노출에 영향을 미치는 환경 및 직업적 특성을 규명했다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구 대상

연구 대상자는 종이 상자를 생산하는 6개 사업장에서 일하는 지게차 운전원 23명과 사무직 근무자 6명 등 총 29명으로 성별은 모두 남성이었다. BC 노출평가는 지게차 운전원 23명을 대상으로 했다. 연구 대상자에게 본 연구의 목적과 방법을 설명한 후 연구 참여에 동의한 사람만을 조사했다. 시간별 활동일지(time activity diary, TAD)를 조사해서 얻은 일반

환경, 작업장, 지게차, 직무 특성을 DEE 노출 영향 변수로 활용하였다.

### 2. 공기 중 블랙카본(BC) 측정

공기 중 BC 노출은 BC 측정기(Model MicroAeth® AE51, AethLabs, USA)를 이용하여 실시간으로 측정하였다. AE51에 T60 테플론이 코팅된 유리섬유 재질의 필터를 기기에 장착하여 BC 입자가 채워지면서 투과되는 빛의 흡수량 변화를 BC 입자의 질량농도로 변환하는 광학흡수방법의 원리를 이용하여 BC 농도를 측정하였다. BC 측정기 유량은  $0.1 \text{ L}/\text{min}$ , 측정 간격은 1분으로 설정하고 작업 시간 동안(보통 오전 9시부터 오후 4시까지) 근로자의 호흡기 영역에서 BC 농도를 모니터링 하였다. BC 측정과 함께 온·습도계(Model TR-72U, T&D Inc., Japan)를 이용하여 온도와 습도를 실시간으로 측정하였다.

### 3. 자료 처리

작업이 끝난 후에 근로자가 작성한 TAD와 인터뷰를 통해 시간별 구체적 직무를 파악하였다. 즉, 시간별 환경, 직무, 작업장 특성, 지게차 운전 특성, 머문 장소, 흡연 여부, 개인 활동 정보를 시간별로 모니터링한 BC 농도와 맞춰 자료를 입력했다. BC 노출에 영향을 미치는 직무, 환경, 작업장, 지게차 특성을 Table 1과 같이 범주화하였다. 직무 요인은 측정 대상 사업장, 근무경력, 흡연 여부, 장소(실내/외), 직무 등으로, 환경 요인으로 측정 월, 날씨, 시간대, 온도를, 작업장 요인은 사업장, 작업장 체적, 작업 위치 등으로, 그리고 지게차 특성 요인은 생산 연도, 적재하중, 평균취급무게, 평균주행속도, 리프트 형태, 지게차 밀폐형태, 전진과 후진 비율(ratio of forward & backward), 배기가스 후처리장치(diesel particulate filter, DPF) 장착 여부 등으로 범주화해서 구분하였다. 지게차 운행시간은 모니터링 전 지게차의 계기판에 기록된 운행시간을 기록했다.

BC 노출은 모니터링 된 데이터 수(number of samples, N), 산술평균(arithmetic mean, AM), 표준편차(standard deviation, SD), 기하평균(geometric mean, GM), 기하표준편차(geometric standard deviation, GSD), 기하평균의 95% 신뢰구간(95% confidence interval, 95% CI) 등으로 나타냈다. BC 노출 농도(종속변수)와 개별 요인들 간의 평균 비교는 일원배치 분산분석을 이용하였고,

**Table 1.** Selection of environmental, occupational and forklift characteristics related to black carbon exposure of forklift operator

	Factor	Classification
Worker information	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type of job</li> <li>• Employment duration, years</li> <li>• Smoking</li> <li>• Location</li> <li>• Work type</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Officer, forklift operator</li> <li>• &lt; 10, 10-19, ≥ 20</li> <li>• Yes/no</li> <li>• Indoor, outdoor</li> <li>• Moving of box, moving of product material</li> </ul>
Environmental conditions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Month</li> <li>• Weather</li> <li>• Daytime</li> <li>• Temperature/relative humidity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• January, February, April</li> <li>• Rainy, sunny</li> <li>• Morning, afternoon</li> </ul>
Workplace conditions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Company</li> <li>• Volume of workplace, m<sup>3</sup></li> <li>• Work location</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a, b, c, d, e, f</li> <li>• ≤ 20,000, &gt; 20,000</li> <li>• Office, cafeteria and resort area, outside workplace, inside workplace</li> </ul>
Forklift information	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The year of forklift manufactured</li> <li>• Loading weight limit of forklift, ton</li> <li>• Type of lift</li> <li>• Enclosure of forklift</li> <li>• Installation of diesel particulate filter(DPF)</li> <li>• Running hours before forklift start, hrs</li> <li>• Average loading weight by forklift, ton</li> <li>• Running velocity, km/hr</li> <li>• Ratio of forward and backward</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ≤ 2006, &gt; 2006</li> <li>• ≤ 3.0, 3.0 - 4.0, ≥ 4.0</li> <li>• Fork, roll and bale</li> <li>• Half-opened, fully opened</li> <li>• Yes/no</li> <li>• &lt; 10,000, 10,000-20,000, &gt; 20,000</li> <li>• ≤ 2, &gt; 2</li> <li>• ≤ 10, &gt; 10</li> <li>• Forward, backward, same</li> </ul>

정량적 변수인 온도, 습도 등은 상관분석으로 통계 처리하였다. 단변량 분석에서 통계적 유의수준이 0.25 미만인 변수만 선정한 후 이들 변수와 BC 농도를 다중선택회귀분석 방법으로 처리하여 최종적으로 BC 노출에 의미 있게 영향을 미치는 환경 및 직업적 요인을 규명했다. 자료 분석은 STATA(ver. 11, StataCorp LP, USA)를 이용하였다.

### III. 결 과

#### 1. 지게차 운전원 개인 특성과 블랙카본(BC) 노출의 관계

Table 2는 지게차 운전원 개인의 특성별로 BC 노출을 비교한 것이다. 근로자 근무 경력, 흡연 여부, 직무(사무와 운전), 직무 형태의 범주별 BC 노출 농도는 모두 통계적으로 의미 있는 차이를 보였다( $p < 0.0001$ ). 지게차 운전원의 평균 BC 노출 농도(AM=12.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=7.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 사무실 근무자(AM=3.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=2.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 유의하게 높았다. 근무경력이 10년 이상 19년 이하인 운전원이 가장 높은 BC 노출 농도(AM=16.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=10.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 보였다. 흡연 운전원의 BC 노출 농도(AM=13.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=9.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )는 비흡연자(AM=12.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=6.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비해

높은 것으로 나타났다.

#### 2. 환경 특성과 블랙카본(BC) 노출의 관계

측정시기, 날씨, 측정 시간대별로 모두 의미 있는 BC 노출 농도 차이를 나타냈다( $p < 0.0001$ )(Table 3). 1월(AM= 14.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=7.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 다른 달(2월: AM=11.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=6.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 4월: AM=13.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=11.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비해 높았다. 맑은 날 노출수준(AM=12.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=7.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )은 우천 시(AM=13.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM= 11.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 유의하게 낮았다. 오전(AM=18.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=11.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 오후(AM=9.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM= 5.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비하여 약 2배 이상 높은 BC 노출 수준을 보였다.

#### 3. 작업장 특성과 블랙카본(BC) 노출의 관계

작업장 체적( $\text{m}^3$ ), 작업 위치에 따른 BC 노출 수준은 통계적으로 의미 있는 차이를 보였다( $p < 0.0001$ )(Table 4). 작업장 체적에 따른 노출 수준은 20,000  $\text{m}^3$  초과(AM=15.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=9.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 작업장이 20,000  $\text{m}^3$  이하(AM=12.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=8.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 작업장에 비해 유의하게 높았다. 실내 작업장(AM=16.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=11.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 사무실, 식당 및 휴게실(AM=4.5

**Table 2.** Exposure to airborne BC by worker characteristics( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

		N	Range	AM	SD	GM	GSD	95% CI	P	Multiple comparison*
Type of job	Forklift operator	9,148	0.001-811.4	12.9	19.0	7.5	3.0	7.3-7.7	< 0.0001	
	Officer	2,525	0.186-20.3	3.1	1.8	2.5	2.0	2.5-2.6		
Employed duration of forklift operator (years)	< 10	4,769	0.001-565.5	10.2	17.1	6.1	2.9	5.9-6.3	< 0.0001	A
	10-19	2,443	0.066-811.4	16.2	22.8	10.0	2.8	9.6-10.4		B
	$\geq 20$	1,936	0.017-178.1	15.1	17.1	8.6	3.3	8.2-9.1		C
Smoking	No	5,084	0.001-565.5	12.3	19.3	6.4	3.3	6.2-6.6	< 0.0001	
	Yes	4,064	0.017-811.4	13.5	18.7	9.1	2.5	8.9-9.4		
Location	Indoor	7,249	0.008-811.4	13.9	17.0	8.8	2.8	8.6-9.0	< 0.0001	
	Outdoor	1,899	0.001-565.5	8.7	24.9	4.0	3.2	3.8-4.2		
Work type	Moving of box	6,408	0.001-811.4	12.8	17.0	8.0	2.8	7.8-8.2	< 0.0001	
	Moving product material	2,740	0.010-565.5	13.0	23.1	6.4	3.4	6.1-6.7		
	Total	11,673	0.001-811.4	10.7	17.3	5.9	3.1	5.8-6.0		

**Abbreviations:** N, number of samples; AM, arithmetic mean; SD, standard deviation; GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation; CI, confidence interval.

\*Different letter indicates significantly different for BC exposure.

**Table 3.** Exposure to airborne BC by environmental characteristics( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

		N	Range	AM	SD	GM	GSD	95% CI	P	Multiple comparison*
Month										
	Jan.	3,531	0.010-565.5	14.6	23.7	7.5	3.1	7.3-7.8	< 0.0001	A
	Feb.	4,394	0.001-811.4	11.2	16.9	6.6	3.1	6.4-6.8		B
	Apr.	1,223	0.226-65.6	13.5	7.1	11.6	1.8	11.2-12.0		C
Weather										
	Sunny	7,925	0.001-811.4	12.8	20.3	7.0	3.1	6.8-7.2	< 0.0001	
	Rainy	1,223	0.226-65.6	13.5	7.1	11.6	1.8	11.2-12.0		
Daytime										
	Morning	3,249	0.017-811.4	18.4	26.9	11.9	2.6	11.5-12.3	< 0.0001	
	Afternoon	5,899	0.001-232.2	9.8	11.7	5.8	3.0	5.6-6.0		
	Total	9,148	0.001-811.4	12.9	19.0	7.5	3.0	7.3-7.7		

**Abbreviations:** N, number of samples; AM, arithmetic mean; SD, standard deviation; GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation; CI, confidence interval.

\*Different letter indicates significantly different for BC exposure.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=3.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 실외 작업장(AM=8.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=3.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 높아 장소별로 의미 있는 BC 노출 수준 차이를 보였다.

#### 4. 지게차 특성과 블랙카본(BC) 노출의 관계

지게차 특성인 생산 연도, 적재하중, 지게차 형태, 지게차 밀폐 여부, DPF 장착 여부, 지게차 모델에 따라 BC 노출 수준은 의미 있는 차이를 보였다( $p<0.0001$ )

(Table 5). 2006년 이전에 생산된 지게차 운전원의 BC 노출 농도(AM=13.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=4.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 2006년 이후에 생산된 지게차 운전원의 BC 노출 농도(AM=12.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=8.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 높아 연식이 오래된 지게차가 BC 노출을 더 높이는 요인인 것으로 나타났다. 적재하중 4톤 이상 지게차 운전원의 BC 노출 농도(AM=27.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=12.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 3톤 이하 지게차(AM=9.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , GM=6.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 높아 적재하중이

**Table 4.** Exposure to airborne BC by workplace characteristics( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

	N	Range	AM	SD	GM	GSD	95% CI	P	Multiple comparison*
Company									
a	1,997	0.055-48.5	6.3	4.9	4.9	2.1	4.7-5.1	< 0.0001	A
b	1,764	0.01-811.4	12.2	21.6	8.8	2.3	8.5-9.2		B
c	1,347	0.001-43.8	4.7	4.7	2.8	3.1	2.7-3.0		C
d	1,283	0.059-168.6	16.8	15.4	10.8	2.8	10.2-11.4		D
e	1,223	0.226-65.6	13.5	7.1	11.6	1.8	11.2-12.0		D
f	1,534	0.01-565.5	25.4	32.4	13.2	3.7	12.4-14.1		E
Volume of workplace( $\text{m}^3$ )									
≤ 20,000	3,643	0.010-168.6	12.3	10.7	8.4	2.7	8.1-8.7	< 0.0001	
> 20,000	4,061	0.059-811.4	15.0	20.6	9.4	2.7	9.1-9.7		
Work location									
Office, cafeteria and lounge	1,476	0.008-41.2	4.5	4.6	3.0	2.7	2.9-3.2	< 0.0001	A
Outside workplace	1,796	0.001-565.5	8.5	25.1	3.9	3.1	3.7-4.1		B
Inside workplace	5,764	0.122-811.4	16.3	18.1	11.6	2.3	11.3-11.8		C
Total	9,148	0.001-811.4	12.9	19.0	7.5	3.0	7.3-7.7		

**Abbreviations:** N, number of samples; AM, arithmetic mean; SD, standard deviation; GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation; CI, confidence interval.

\*Different letter indicates significantly different for BC exposure.

**Table 5.** Exposure to airborne BC by operator characteristics( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

	N	Range	AM	SD	GM	GSD	95% CI	P	Multiple comparison*
The year of forklift manufactured									
≤ 2006	1,772	0.001-565.5	13.2	29.5	4.5	4.3	4.2-4.8	< 0.0001	
> 2006	7,376	0.010-811.4	12.8	15.5	8.5	2.6	8.3-8.7		
Limit weight loaded into forklift(ton)									
≤ 3.0	5,823	0.001-811.4	9.4	13.3	6.4	2.6	6.2-6.5	< 0.0001	A
3.0-4.0	2,178	0.021-168.6	14.7	14.9	8.7	3.1	8.3-9.2		B
≥ 4.0	1,147	0.010-565.5	27.1	36.1	12.8	4.1	11.8-13.9		C
Type of lift									
Fork	5,256	0.001-811.4	9.7	13.8	6.7	2.6	6.5-6.9	< 0.0001	
Roll and bale	3,892	0.010-565.5	17.1	23.7	8.7	3.6	8.4-9.1		
Enclosure of forklift									
Half-opened	1,967	0.017-65.6	9.0	7.0	6.5	2.4	6.2-6.7	< 0.0001	
Fully opened	7,181	0.001-811.4	13.9	21.0	7.8	3.2	7.6-8.0		
Installation of diesel particulate filter(DPF)									
Yes	5,838	0.010-811.4	11.3	14.4	8.0	2.4	7.8-8.2	< 0.0001	
No	3,310	0.001-565.5	15.7	25.0	6.7	4.1	6.4-7.0		
Running hours before forklift starts(hrs)									
< 10,000	3,232	0.010-118.3	11.0	11.7	7.4	2.4	7.2-7.6	< 0.0001	A
10,000-20,000	3,753	0.055-811.4	13.5	17.8	9.0	2.7	8.7-9.3		B
> 20,000	1,391	0.001-565.5	8.6	28.4	3.1	3.6	2.9-3.3		C
Average loading weight by forklift(ton)									
≤ 2	7,185	0.001-811.4	10.0	13.5	6.5	2.8	6.3-6.6	< 0.0001	
> 2	1,963	0.010-565.5	23.4	29.6	12.7	3.5	12.0-13.4		
Average running velocity(km/hr)									
≤ 10	6,044	0.001-811.4	11.2	15.5	6.9	2.9	6.7-7.1	< 0.0001	
> 10	3,104	0.010-565.5	16.1	24.1	8.8	3.2	8.4-9.1		
Ratio of forward and backward									
Same	2,788	0.001-811.4	12.0	26.6	6.7	2.9	6.4-6.9	< 0.0001	A
Backward	1,306	0.010-168.6	11.0	11.2	7.5	2.5	7.1-7.9		BC
Forward	5,054	0.008-178.1	13.8	15.2	8.0	3.2	7.7-8.2		C
Total	9,148	0.001-811.4	12.9	19.0	7.5	3.0	7.3-7.7		

**Abbreviations:** N, number of samples; AM, arithmetic mean; SD, standard deviation; GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation; CI, confidence interval.

\*Different letter indicates significantly different for BC exposure.

BC 노출 농도에 기여하는 것으로 나타났다. DPF 장착 지게차 운전자의 BC 노출 농도( $AM=11.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $GM=8.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )는 장착하지 않은 지게차( $AM=15.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $GM=6.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 통계적으로 유의하게 낮았다. 지게차 개방 여부, 지게차 클램프 형태, 지게차 주행 시간, 지게차 취급 무게, 지게차 주행속도, 지게차 운전 방향 등도 BC 노출에 유의한 영향을 미치는 변수였다.

Figure 1은 지게차 운전원 중 흡연자와 비흡연자의 1일 시간별 직무와 머문 장소별 작업 시간에 따른 BC 노출 농도 변화를 사례로 나타낸 것이다. BC 노출에 영향을 미치는 요인이었던 흡연, 실내작업, 운전 등에서 높은 BC 노출 수준을 보인 것을 알 수 있다. Figure 2는 BC 노출에 유의한 영향을 미치는 주요 환경, 작업장, 지게차, 직무 특성 별로 BC 노출의 분포를 사례로 나타낸 것이다.

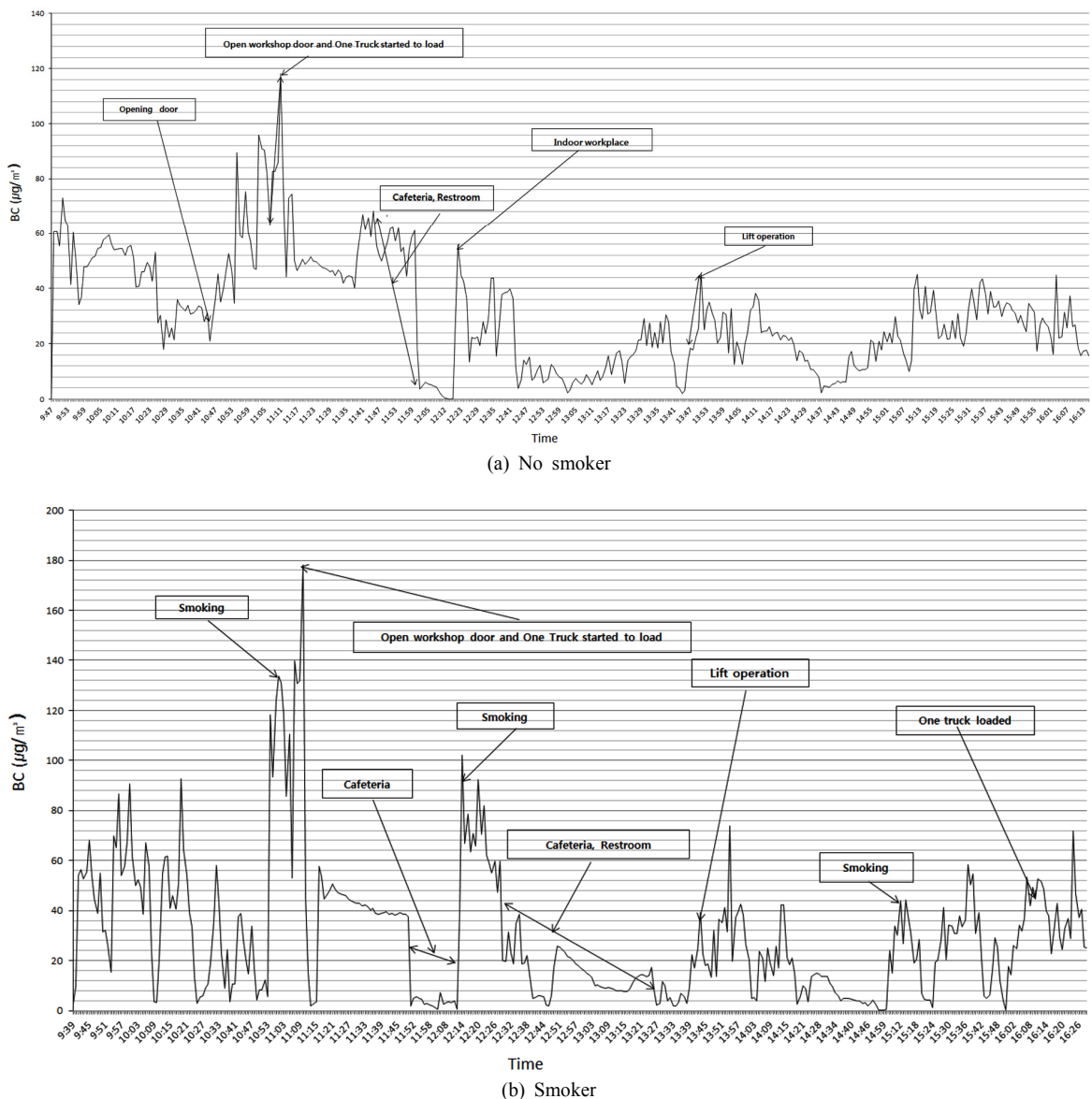


Figure 1. Daily variations of BC exposure level according to whether smoking or not

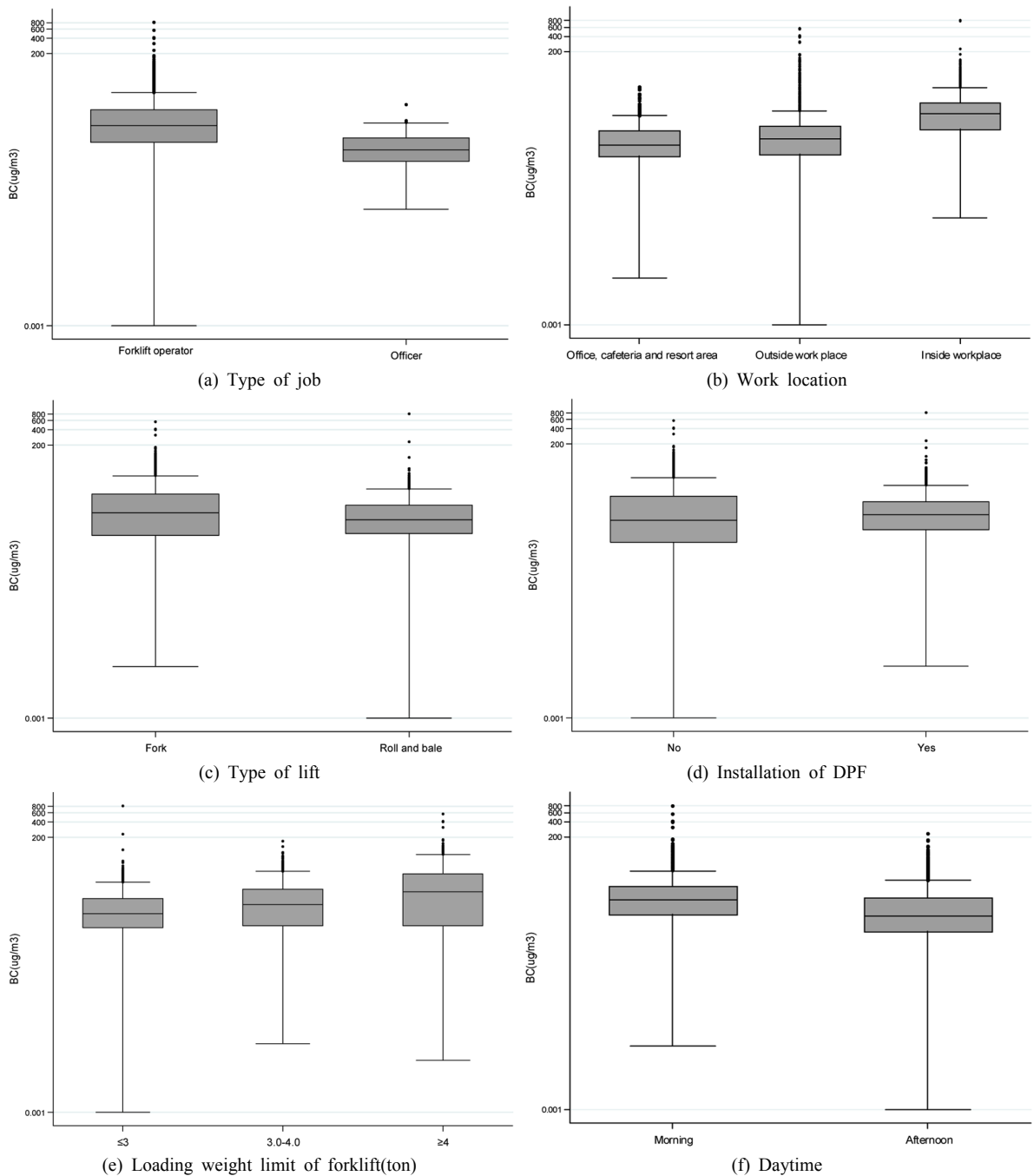


Figure 2. Distribution of BC exposure levels among work characteristics

##### 5. 지게차 운전원의 BC 노출에 영향을 미치는 요인

BC 노출에 유의한 영향을 미치는 요인으로 온도, 근무 기간, 흡연 여부, 월, 작업 시간대, 작업장 체적,

작업 장소, 지게차 생산 연도, 리프트 형태, DPF 설치 여부, 평균취급무게, 평균주행속도, 지게차 주 운행 방향 등이 규명되었다. 본 연구에서 규명한 지게

**Table 6.** Multiple linear regression model to identify environmental and work factors influencing exposure to BC level

Independent factors	Log-BC( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )				
	$\beta$	SE	95% CI		P
Constant	1.27	0.08	1.12	1.42	<0.001
Temperature( $^{\circ}\text{C}$ )	0.03	< 0.01	0.02	0.04	<0.001
Employed duration(years)					
< 10	Ref.				
10-19	0.16	0.04	0.08	0.24	<0.001
$\geq 20$	-1.50	0.06	-1.61	-1.38	<0.001
Smoking					
No	Ref.				
Yes	0.50	0.02	0.45	0.54	<0.001
Month					
Jan.	Ref.				
Feb.	0.92	0.05	0.83	1.01	<0.001
Apr.	-0.53	0.06	-0.65	-0.40	<0.001
Daytime					
Morning	Ref.				
Afternoon	0.40	0.02	0.37	0.44	<0.001
Volume of workplace( $\text{m}^3$ )					
$\leq 20,000$	Ref.				
> 20,000	-1.26	0.04	-1.35	-1.17	<0.001
Work location					
Office, cafeteria and lounge	Ref.				
Outside workplace	0.26	0.04	0.18	0.33	<0.001
Inside workplace	1.13	0.02	1.09	1.18	<0.001
The year of forklift manufactured					
$\leq 2006$	Ref.				
> 2006	-0.94	0.05	-1.03	-0.85	<0.001
Type of forklift					
Roll and bale	Ref.				
Fork	0.52	0.04	0.43	0.60	<0.001
Installation of diesel particulate filter(DPF)					
Yes	Ref.				
No	-0.48	0.05	-0.57	-0.39	<0.001
Average loading weight by forklift(ton)					
$\leq 2$	Ref.				
> 2	2.48	0.05	2.38	2.59	<0.001
Running velocity(km/hr)					
$\leq 10$	Ref.				
> 10	0.39	0.03	0.34	0.44	<0.001
Ratio of forward and backward					
Same	Ref.				
Backward	-0.66	0.05	-0.75	-0.57	<0.001
Forward	0.21	0.03	0.15	0.27	<0.001
Adjusted full model( $R^2$ )		0.52( $p<0.0001$ )			

\*  $\beta$ , estimated regression coefficient; SE, standard error; CI, confidence interval.

차 운전원 직무, 환경, 작업장, 지게차 특성은 지게차 BC 노출 변화의 52%( $p<0.0001$ )의 설명력을 가지는 것으로 나타났다. 전반적으로 작업장 체적이 크고 환기가 되는 환경, 그리고 최근에 생산된 지게차 운전

에서 BC 노출이 감소하는 것으로 나타났으며, 근무기간, 흡연, 적재하중 증가, 실내 작업장, 전진 운전, 주행속도 증가가 BC 노출을 높이는 요인으로 나타났다.



#### IV. 고 찰

본 연구는 종이 상자 생산 사업장 6개소의 지게차 운전원의 BC 노출에 영향을 미치는 환경, 직무, 작업장, 지게차 특성을 규명하였다. 지게차 운전원 23명의 평균 BC 노출 농도는  $12.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 국내에서 지게차의 BC 발생 또는 근로자 노출 수준을 보고한 연구는 한 편으로 파악되었다. 본 연구결과는 Kim et al.(2016)이 보고한 6개 합판 제조 및 취급 사업장 지게차 운전원( $\text{GM}=9.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 생산공정 근로자의 BC 노출 농도( $\text{GM}=9.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 높았다. EC 평균 노출 수준만 보고한 연구도 있다. 국내에서 Lee et al.(2015)는 환경미화원 72명을 대상으로 EC 평균 노출 농도는  $4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 보고했다. EC  $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  당 추정된 BC 농도가 대략  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 임을 근거로 BC 노출 수준을 비교 평가하였다. 본 연구에서 평가한 지게차 운전원의 DEE 노출 농도는 환경미화원의 노출 농도보다 높았다. 이것은 환경미화원이 차량 배출물이 확산되는 외부에서 일하는 직무 특성 때문인 것으로 추정된다. 또한 공간 특성, 지게차 특성, 외부 환경 등도 일부 영향을 미치는 것으로 판단된다. Davis et al.(2007)의 연구에서는 미국 전역의 36개 트럭 운송 터미널에서 장거리 운전원과 지역 운전원의 DEE( $\text{PM}_{2.5}$ , OC, EC)에 대한 연구를 4년간 진행하였다. 또한 운전원의 흡연 여부, 나이 및 트럭의 특성, 기후 등에 다양한 노출 요인과 관계에 대해 평가하였다. 연구 결과 장거리 운전원(EC:  $\text{AM}=1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; OC:  $\text{AM}=21.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 지역 운전원(EC:  $\text{AM}=1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; OC:  $\text{AM}=18.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 노출은 비슷했다. 또한 운전원 EC, OC 노출은 흡연 여부, 트럭 생산 연도, 날씨 등의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 영국의 Wheatley & Sadhra(2004) 연구에서는 디젤차량이 이용되는 40개 부분(구급차, 여객선, 철도, 자동차 검사, 지게차, 톨게이트, 버스 주차와 정비 등)에서 DEE의 지표로 EC의 노출을 평가하였다. 전체 평균(AM)의 범위는  $21\text{--}122 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ( $\text{GM}=17\text{--}66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )였고, 전체 평균(AM)은  $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ( $\text{GM}=25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )로 본 연구를 포함한 다른 연구 결과에 비해 전반적으로 높은 수준이었다.

본 연구에서는 처음으로 지게차 운전원의 BC 노출에 유의한 영향을 미치는 환경, 직무, 지게차, 작업장 특성 요인을 규명하였다(Table 5). BC 노출에 유

의한 영향을 미치는 것으로 나타난 환경 요인은 계절(월), 날씨, 시간대였으며, 직무 요인은 측정 대상, 흡연 여부, 근무 경력, 장소(실내/외), 직무였다. 온도, 1월(기준 4월), 오후(기준 오전), 흡연(기준 비흡연), 10년 이하 근무 경력(기준 20년 이상)이 높은 BC 노출 수준을 보였다. BC 노출에 의미 있는 영향을 미치는 작업장 특성은 작업장 체적, 작업 위치였다. 작업장 체적이 작은 실내에서 겨울철 오후 시간대 지게차 운전은 높은 BC 노출을 증가시키는 것으로 나타났다. 실내에서 디젤 연료를 이용한 지게차 등 기계를 가동하지 않는 것이 근본적인 DEE노출을 줄이는 조치다. 실내에서 지게차를 가동해야 한다면 가능하면 큰 공간을 마련하고 적절한 환기 장치를 설치하는 것이 BC 노출을 근본적으로 줄이는 대책이 될 수 있다. 지게차의 특성 요인을 보면 지게차 생산 연도(2006년 기준), 지게차 형태, 지게차 밀폐 여부, DPF 장착 여부, 적재하중, 운행시간, 평균취급무게, 평균주행속도, 지게차 운행 방향(전진 및 후진) 등이 BC 노출수준과 연관이 높다. 본 연구에서 규명한 지게차 중량별 BC 노출 수준 차이는 Kim et al. (2016)이 보고한 지게차 중량별 BC 노출 수준의 차이(3.3톤( $\text{GM}=11.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 4.0톤( $\text{GM}=12.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 4.5톤( $\text{GM}=3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ))과 비슷했다.

본 연구에서 의미 있는 요인으로 확인되지 않았지만, DPF 설치 여부 및 시기, 지게차의 노후화 등은 BC 노출의 주요 요인으로 잘 알려져 있다. 노후화된 지게차 교체와 DPF의 장착 등은 연구 결과와 상관없이 DEE의 노출을 줄일 수 있는 방법이다. 흡연 금지도 BC를 포함한 미세먼지 노출 억제를 위한 중요한 대책 중의 하나이다. BC는 공기 중 입자상 물질 중의 하나로 탄소를 포함한 연료의 연소 과정이나 흡연에 의해서도 발생된다. 본 연구에서도 근로자가 작업 시간 외 흡연 시에 높은 농도( $\text{GM}=9.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 BC에 노출되는 것을 확인하였다(Table 2). 특히, 흡연 시 BC의 노출이 매우 높아 단시간 동안의 노출은 디젤차량을 운전 할 때보다도 높은 경향을 보였다(Figure 1).

국내에서는 아직 DEE 노출을 평가하고 건강영향을 감시하는 법적 조치가 없다. 세계 보건 기구(WHO) 산하 국제 암 연구소(IARC)가 1988년에 DEE를 ‘인체 발암 추정 물질’인 2A급 발암물질로 분류하였고, 2012년

에는 ‘인체 발암 확인 물질’인 1급 발암물질로 지정하였지만, DEE 노출과 건강영향을 감시하는 법적, 제도적 장치가 미흡하다.

DEE 노출 수준과는 상관없이 건강영향을 모니터링해야 하는 직무는 디젤 차량 운전자이다. 가장 위험한 DEE 노출 그룹은 실내에서 디젤 차량을 운전하는 근로자로서, 대표적으로 지게차 운전원을 들 수 있다. 특히, 광산 등 밀폐된 공간에서 디젤 차량을 운전하는 근로자는 DEE 노출 및 건강영향 측면에서 가장 위험한 근로자 그룹이다. DEE 노출 수준을 정확하게 측정하는 기술은 아직 없다. DEE의 발생을 추정하고 대리할 수 있는 지표로는 EC와 BC가 제시되고 있다. EC는 필터로 채취하여 평균 농도를 알아낼 수 있지만, 시간별로 발생하는 수준을 알 수 없는 단점이 있다. 반면 BC 농도는 시간별 발생과 노출을 모니터링하고 평가할 수 있는 장점이 있다. 임의로 일정 시간을 설정하고 이에 따른 노출 수준을 평가할 수 있어 노출 수준 평가는 물론 노출 기여 직무, 시간대 등을 확인할 수 있기 때문이다.

본 연구는 계절별로 지게차 운전원을 충분히 확보하지 못한 한계점이 있다. 특정 일부 계절(겨울과 봄) 동안 23명의 지게차 운전원만을 대상으로 BC 노출을 평가했기 때문에 평균 노출 수준으로 단정할 수 없다. 또한 BC 노출 수준 평가와 BC 노출에 영향을 미치는 요인을 분석하는데 사업장간 BC 결과를 보정하지 못했다. 그러나 지게차 운전원 노출수준 및 주요 영향요인을 파악하는 데는 무리가 없을 것으로 판단한다. 건설업, 서비스업 등에 종사하는 디젤 차량 운전자를 대상으로도 노출 수준을 평가하고 노출에 영향을 미치는 직업적 요인을 규명하고 비교하는 추가 연구가 필요하다.

## V. 결 론

본 연구는 종이 상자 생산 사업장 6개소의 지게차 운전원 23명을 대상으로 2017년 1월부터 4월까지 BC 노출 수준을 평가하였으며, 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1. 지게차 운전원의 평균 BC 노출 농도는  $AM=12.9 \mu g/m^3$ 였고, 근무경력이 10년 이상 19년 이하인 운전원 그룹이 가장 높은 노출 농도( $AM=16.2 \mu g/m^3$ )를 보였다.

2. 실내 작업장에서 운전할 때 운전원의 BC 노출수준( $AM=16.3 \mu g/m^3$ )은 식당 및 휴게실( $AM=4.5 \mu g/m^3$ )과 실외 작업장( $AM=8.5 \mu g/m^3$ )보다 유의하게 높았다.

3. 2006년 이전 생산( $AM=13.2 \mu g/m^3$ ), 적재하중 4톤 이상( $AM=27.1 \mu g/m^3$ ), 롤 및 베일 클램프타입( $AM=17.1 \mu g/m^3$ ) 지게차 운전원의 BC 노출수준이 유의하게 높았다.

4. 지게차 운전원의 BC 노출에 영향을 미치는 환경 및 직무 요인은 온도, 근로자 흡연 여부, 계절, 작업 시간대, 작업장 체적, 작업 장소, 지게차 생산 연도, DPF 설치 여부, 적재하중, 운행속도, 지게차의 주 운행 방향(전진/후진) 등 이었다.

본 연구에서 규명한 지게차 운전원의 BC 노출 증가 요인들을 적절하게 관리하는 것이 지게차 운전원의 DEE 노출을 억제하고 건강영향을 예방하는 주요 대책이다.

## References

- 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
- Davis ME, Smith TJ, Laden F, Hart JE, Blicharz P et al. Driver exposure to combustion particles in the U.S. trucking industry. *J Occup Environ Hyg* 2007;4:848-854
- International Agency for Research on Cancer (IARC). Diesel engine exhaust carcinogenic. Press release No. 213. 2012
- 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
- Kim S, Park JY, Lee K, Kim SW. A Study on Exposure Indices for Diesel Engine Exhaust in Forklift Operating Areas. *J Korean Soc Occup Env Hyg* 2016;26(1):38-47
- 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
- Lee N, Yi G. Exposure assessment to asbestos and diesel engine exhaust particulate matter in urban bus garage. *J Korean Soc Occup Env Hyg* 2016;26(2):219-224
- Mine Safety and Health Administration (MSHA), United States Department of Labor. 30 CFR-Parts 1-199:

- Mineral resources. Title 30 Code of Federal Regulation. 2012. Available from: <https://arlweb.msha.gov/regs/30cfr/>
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MoLIT). A Statistics on the current state of construction machinery in Korea. 2017 [Accessed 2017, Mar]. Available from: <http://stat.molit.go.kr/> (in Korean)
- Occupational Lung Disease Institute of Korean Workers' Compensation and Welfare Service (OLDI). Case reports on occupational disease from 2007 to 2012. 2014
- Viidanoja J, Sillanpää M, Laakia J, Kerminen V, Hillamo R. Organic and black carbon in PM2.5 and PM10: 1 year of data from an urban site in Helsinki, Finland. *Atmos Environ* 2002;36(19):3183-3193
- Wheatley AD, Sathra S. Occupational exposure to diesel exhaust fumes. *Ann Occup Hyg* 2004;48(4):369-376
- 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