한국산업보건학회지, 제26권 제1호(2016) ISSN 2384-132X(Print) ISSN 2289-0564(Online)
Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 2016: 26(1): 38-47
http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2016.26.1.38

Original Article

지게차 사용 사업장에서 디젤엔진배출물질 노출지표에 관한 연구

김상일[1] · 박지영[2] · 이경민[3] · 김승원*

[1]계명대학교, [2]서울대학교 보건환경연구원, [3]근로복지공단 직업성폐질환연구소

A Study on Exposure Indices for Diesel Engine Exhaust in Forklift Operating Areas

Sangil Kim[1] · Ji Young Park[2] · Kyeongmin Lee[3] · Seung Won Kim*

[1]*Keimyung University*

[2]*Institute for Health and Environment at Seoul National University*

[3]*Occupational Lung Diseases Institute, Korea Workers' Compensation and Welfare Service*

ABSTRACT

Objectives: The objective of this study was to determine the exposure levels of forklift operators to diesel engine exhaust(DEE) using black carbon(BC), elemental carbon(EC), and nitrogen dioxide(NO_2) as indicators.

Methods: A total of eight forklift operators in six collection companies were assessed over a period of two months from July to September 2015. BC was measured using a real-time monitor and respirable EC samples were analyzed using the NIOSH method 5040. NO_2 samples were collected using a passive badge-type sampler.

Results: The geometric mean of BC, EC and NO_2 were 3.1-19.1 μg/m^3, 2.1-23.8 μg/m^3, and 12.5-166.6 ppb at all companies. When forklifts were operating both outside and inside, BC concentrations increased 2.0-5.6 times. The highest increase was observed when forklifts were operating indoors. The increase in BC concentrations varied by company(company A: 2.0 times, B: 3.2 times, C: 5.6 times, D: 2.1 times, E: 5.1 times, F: 2.6 times). The geometric mean of BC, EC, and NO_2 for the forklift operators was 9.6 μg/m^3, 7.9 μg/m^3, and 48.9 ppb, respectively. The geometric mean of BC, EC, and NO_2 for manufacturing workers was 9.3 μg/m^3, 0.9 μg/m^3, and 85.2 ppb, respectively. The mean BC and EC exposure levels for the forklift operators were slightly higher than those for manufacturing workers, but NO_2 levels for manufacturing workers were higher than those for the forklift operators($p>0.05$). Multiple regression analysis revealed that diesel exhaust emissions standard, forklift weight and forklift manufacturer were the most influential factors in determining worker exposure.

Conclusions: In the DEE work environment, workers who perform tasks within the workplace as well as inside forklifts as operators are likely to be exposed to a lack of ventilation. Further study of forklift operators' exposure to DEE indicators should be conducted to include a wider range of occupational and environmental situations, such as collection procedures, seasonal situations, types of fuel used, and number of forklifts.

Key words: diesel engine exhaust, exposure assessment, forklift operator

I. 서 론

한국에서 디젤엔진배출물질(Diesel Engine Exhaust, DEE)에 대한 연구는 2007년 디젤 연소물질에 노출되는 광산업의 근로자를 대상으로 다핵방향족탄화수소(PAHs) 노출 연구가 진행된 바 있다(Lee et al., 2007). 이후 버스운전자와 생활폐기물 청소차량 작업자를 대상으로 입자상 물질 및 가스상 물질에 대한

*Corresponding author: Seung Won Kim, Tel: 053-580-5197, E-mail: swkim@kmu.ac.kr
Baekeun-Gwan, #B50, Department of Public Health, Keimyung University. 1095 Dalgubeol-Daero, Dalseo-Gu, Daegu 704-701
Received: February 19, 2016, Revised: March 15, 2016, Accepted: March 20, 2016

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.

노출평가가 이루어졌다(Jung, 2008; Lee et al., 2015)

또한 차량에서 발생하는 디젤 입자상물질의 노출수준을 확인하기 위해 대형마트 및 백화점 주차장에서 연구(Kim & Song, 2013)가 진행된 바 있으나, 아직까지는 DEE 노출실태 파악이 거의 이루어지지 않은 실정이다.

가솔린 엔진 및 가스(LPG) 엔진에 비해 열효율이 높고 지구온난화의 주요원인인 이산화탄소 배출이 적다는 이유로 우리나라뿐 아니라 전 세계적으로 디젤엔진을 적용한 차량의 수요가 증가하고 있는 추세이다. 디젤엔진은 제조업 사업장 및 광산업, 운송업, 건설업 등 다양한 산업분야에서 광범위하게 사용되고 있으며, 서비스업의 경우 주차, 제품운송 등의 과정에서 근로자뿐만 아니라 일반인들도 DEE에 노출될 가능성이 높다.

DEE는 연료의 불완전 연소로 인해 발생되며, 가스상 및 입자상 물질(Diesel Particulate Matter, DPM)로 구성된 혼합물이다. 주요 가스상 물질은 이산화탄소, 일산화탄소, 질소산화물, 황 화합물 및 알데히드 등이며, DPM은 원소탄소(Elemental Carbon, EC), 다핵방향족탄화수소(Polynuclear Aromatic Hydrocarbons, PAHs) 등이 포함 되어 있다(Groves & cain, 2000; U.S. EPA, 2002). DEE의 화학적조성과 입자크기는 사용하는 연료, 엔진의 형태, 엔진부하(정차, 가속, 주행), 운전 방식 및 환경, 첨가제 등에 따라 달라 질 수 있다. DPM 중 약 80-95%는 미세입자(≤2.5 μm)로 입자의 평균 공기역학적 직경이 0.2 μm이다. 미세입자 보다 작은 초미세입자(ultrafine particle)(<0.1 μm)의 평균 공기역학적 직경은 0.02 μm이며, DPM의 1-20%를 차지하고 전체 입자수의 50-90%를 차지한다. 입자의 공기역학적 직경이 2.5 μm보다 크면 호흡기 상부에 침착된다. 반면에 입자의 공기역학적 직경이 2.5 μm보다 작으면 호흡기 하부에 침착하므로 입자 크기는 건강영향을 결정짓는 중요한 인자이다(U.S. EPA, 2002; Ris, 2007).

DEE 노출에 의한 건강영향은 급성 및 만성노출 모두 관련이 있다. 황 화합물, 질소산화물 및 알데히드와 같은 호흡기 자극성분을 포함하고 있는 DEE에 일회성 또는 단기간 노출 되었을 경우 기침, 가래, 어지러움, 구토 등과 같은 증상이 일시적으로 나타날 수 있다. 만성노출은 동물실험과 사람을 대상으로 한 연구에서 호흡기독성(비발암성)과 폐암의 위험을 증가 시키는 것으로 나타났다(U.S. EPA, 2002).

1989년 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 DEE를 발암성 추정 물질(Group 2A)로 분류한 바 있다. 인간을 대상으로 한 발암성연구는 제한적이지만, 실험동물을 대상으로 한 연구에서 발암성이 충분한 물질로 평가하였기 때문이다. 이후 2012년에 DEE를 폐암을 유발하는 충분한 증거가 있는 물질인 1급 발암인자(Group 1)로 상향조정 했으며, 더불어 방광암을 일으킬 수 있는 물질로도 발표하였다(IARC, 2012)

공기 중 DEE를 정량하는 것은 간단하지 않다. 다양하고 복잡한 혼합물일뿐더러 휘발유 또는 가스엔진 등의 연소배출원에서도 디젤엔진과 유사한 성분이 배출 되고 있기 때문이다. DEE의 노출을 추정할 수 있는 지표는 블랙카본, 원소탄소, 이산화질소, 미세먼지($PM_{2.5}$)등이 거론 되고 있다(Groves & Cain, 2000; Park et al., 2014). 블랙카본은 원소탄소와 더불어 디젤엔진에서 배출되는 유해물질을 포괄적으로 대변할 수 있다고 보고된 바 있다(Ghim, 2012).

지게차는 물건을 싣거나 내리는 용도로 사용되며 생산성을 높여주고 작업을 편리하게 해주는 장점이 있어, 주로 공항・항만・공장 등에서 화물의 적재, 적하 및 운반 작업에 사용되고 있으며(Ryu, 2008), 동력원의 종류에 따라 디젤 엔진식, LPG엔진식, 전동식(battery type) 지게차로 분류되고 있다. 지게차 운전원의 경우 지게차 작동 시 배출되는 DEE에 지속적으로 노출될 가능성이 높다. 그러나 지게차 운전원을 대상으로 DEE의 노출수준을 평가한 연구는 드물다.

본 연구에서는 지게차 운전원을 대상으로 DEE의 입자상 물질 중 BC와 EC, 가스상 물질 중 NO_2의 노출수준을 평가하고 노출특성에 영향을 미치는 요인을 확인하고자 하였다.

Ⅱ. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 2015년 7월부터 9월 사이에 대구지역 내 6곳의 사업장을 대상으로 실시하였다. 6곳의 사업장 모두 합판을 제조 및 취급하는 사업장이었으며, 지게차를 이용하여 업무를 수행하고 있던 지게차 운

전원은 총 8명이었다. A와 B 사업장은 제조공정 작업자가 있었고, C에서부터 F까지의 사업장은 제조공정 작업자가 없었다(Table 1). 배치도(layout)는 제조공정 작업자가 있었던 A와 B 사업장만 제시하였다(Figure 1).

지게차 운전원은 제품을 적재, 적하 및 운반 작업을 반복수행하고 있었으며, D와 F 사업장의 지게차 운전원은 주로 작업장 외부에서 작업을 수행하였다. 사업장 6곳 모두 기계식 환기장치가 갖추어져 있지 않았고, 작업장 내부 출입구를 통한 자연환기를 실시하고 있었다. 운행중인 지게차의 연식은 2005년부터 2014년 사이에 출고된 지게차였으며, 지게차 제조사는 2곳 이었다. A와 B사업장은 4톤, C와 E사업장은 3.3톤, D와 F 사업장은 4.5톤 지게차를 사용하고 있었다. 조사기간 동안 파악한 사업장 내부의 온도는 18.0~34.7℃범위를 보였고, 상대 습도는 44.0~92.8%로 나타났다.

2. 시료 측정 및 분석

지게차 운전원은 작업시간동안 측정기기가 부착된 조끼를 착용한 상태로 업무를 수행하도록 하였다. 제조 공정 작업자는 작업특성상 개인시료측정의 어려움으로 지역시료를 측정하였으며, 가능한 작업자의 노출특성을 반영할 수 있도록 작업영역에서 바닥면으로부터 1.5 m지점에 측정기기를 설치하였다. 사업장 당 5회 측정하였으며, 측정시간은 작업시작시점부터 종료시점까지 측정하였고, 최소 5시간에서 최대 7시간 이었다. 평가 항목은 각각 1대씩의 실시간 기기를 이용하여 블랙카본 농도를 측정하였고, 측정이 진행되는 동안 작업공간(작업장 외부와 내부) 변화에 따른 블랙카본 농도를 파악하기 위해 분단위로 지게차의 위치 및 상태를 기록하였다. 여과지법으로 분진을 채취하여 원소탄소를 분석하였고, 뱃지 타입(badge type)의 수동식 시료채취기를 이용하여 이산화질소를 채취하여 분석하였다.

Table 1. General information on the selected companies

Company	Sampling date	Volume (W×L×H, m^3)	Forklift				Number of forklift operators	Number of manufacturing workers	Tem-perature (℃)	Relatve humidity (%)
			Year	Weight (ton)	Manu-facturer	Number				
A	07/20 - 07/24	44×20×8	2005	4.0	A	1	1	5	23.3-34.1	55.1-91.1
B	07/27 - 07/31	50×43×12	2011	4.0	B	3	3	8	23.1-34.0	49.5-92.1
C	08/10 - 08/14	21×16×7	2014	3.3	B	1	1	0	22.2-33.1	49.0-92.8
D	08/24 - 08/28	16×36×9	2014	4.5	B	1	1	0	24.8-32.7	51.8-71.8
E	08/31 - 09/04	27×18×6	2013	3.3	A	1	1	0	22.9-34.7	44.0-78.0
F	09/07 - 09/11	18×35×11	2012	4.5	A	1	1	0	18.0-32.7	51.8-71.8

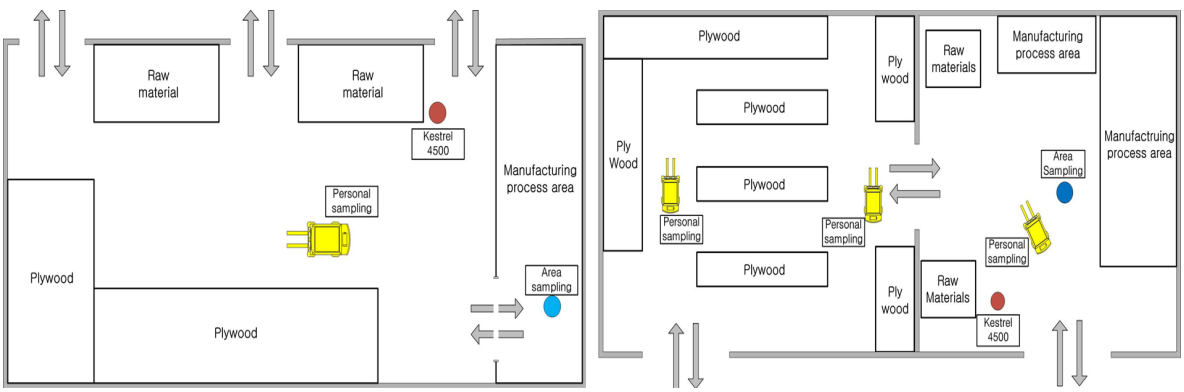

Figure 1. The layout of company. Left: Company A, Right: Company B

1) **블랙카본**(Black carbon, BC)

본 연구에서 사용된 Aethalometer는 0~0.001 μg/m^3 측정범위와 최근에 휴대가 간편하도록 개발된 AE-51 모델을 사용하였다. AE-51은 기존의 모델과 달리 여과지를 교체해야 하는데, 측정 시간이 길어짐에 따라 BC 농도 감소현상이 보고된 바 있어(Jung et al., 2011), 측정 시 마다 새로운 필터로 교체하였다. Aethalometer의 측정 유량은 100 mL/min, 측정간격(sampling interval)은 1분으로 설정하였다.

2) **원소탄소**(Elemental Carbon, EC)

공기중 EC 측정 및 분석은 미국국립산업안전보건연구원(The National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)에서 제시하는 5040방법에 따라 실시하였다. 37 mm 석영여과지(Pallflex Tissuquartz 2500QAT-UP, PALL Life sciences, USA)는 고온전기로에서 전처리를 실시하였다. 전처리 된 여과지를 $PM_{2.5}$채취기(PEMs, Cat NO 761-203, SKC Inc., USA)에 장착하였고, 개인시료 채취기(Aircheck XR5000, SKC, USA)와 연결하여 시료를 채취하였다. 시료 채취 전/후 유량보정계(Gilibrator TM2, Gilian, USA)를 사용하여 유량을 보정하였다. 채취 된 석영여과지에서 1.5 cm^{2}를 잘라내 OC-EC분석기(Sunset Laboratory Inc., USA)로 EC 농도를 정량 분석하였으며, 1.5 cm^{2}에서 분석된 양을 실제 석영여과지에 채취된 면적으로 환산하여 최종 EC 농도값을 계산하였다.

3) **이산화질소**(NO_2)

공기중 NO_2 측정은 뱃지 타입의 수동식 시료채취기를 사용하였다. 수동식 시료채취기는 자연적인 기류를 통한 확산(diffusion)과 투과(infiltration)의 원리로 측정되며, 작고(5×4×1 cm^3) 가벼운(15 g) 장점을 지니고 있다. 시료를 채취할 때에는 뱃지의 공기투과 면이 바깥쪽으로 향하게 하여 NO_2를 채취한 후, 자외선/가시광선 분광광도계(UV/VIS Spectrophotometer, Shimadzu UV-1201)를 이용하여 정량분석 하였다.

4) **환경변수(온도, 습도)**

실시간으로 온・습도를 측정할 수 있는 휴대용 기상측정계(Kestrel 4500, USA)를 사용하였다. 기상측정계를 전용삼각대에 장착하여 바닥면으로부터 1.5 m높이에 설치하였으며, DEE 노출지표 측정 시작 시간과 동일하게 1분 간격으로 자료를 수집하였다.

3. 자료처리

수집된 측정자료는 SPSS 22.0 for Windows(SPSS Inc., USA) 통계프로그램을 이용하여 분석하였다. DEE 측정자료는 대수변환 후 Shapiro-Wilk 검정결과 대수정규분포를 보여 기하평균 및 기하표준편차로 나타내었다.

지게차에 의한 공기 중 DEE 농도를 평가하기 위해 직군별(지게차 운전원 및 제조공정 작업자) 및 작업공간별(작업장 외부와 내부)로 구분하여 Student's t-test를 실시하였고, DEE 농도에 영향을 미치는 요인을 확인하기 위하여 다중회귀분석을 실시하였다. 통계학적인 유의성 검증은 $p<0.05$을 기준으로 수행하였다.

Ⅲ. 연구결과

1. 사업장별 DEE 농도 특성

Table 2는 사업장별 BC, EC 및 NO_2농도를 나타낸다. BC의 전체 평균은 3.1~19.1 μg/m^{3}의 농도 범위를 보였고, 지게차 운행대수(3대)가 가장 많던 B 사업장이 가장 높은 농도를 보였다. EC의 전체 평균은 2.1~23.8 μg/m^{3}의 농도 범위를 보였고, 가장 높은 농도를 보인 사업장 B에서는 23.8 μg/m^{3}이었다. B 사업장의 EC 농도를 2003년까지 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서 작업장 노출기준으로 고시하였던 EC 농도 20 μg/m^{3}와 비교했을 때 2명의 근로자가 기준을 초과하였다. NO_2는 12.5~166.6 ppb의 농도 범위를 보였고, B 사업장이 가장 높은 농도를 나타냈으며 그 다음으로 E 사업장, A 사업장 순으로 나타났다.

2. 작업장 외부와 작업장 내부의 BC 농도 비교

지게차 운전원의 작업공간을 작업장 외부와 작업장 내부로 구분하여 비교한 BC 농도를 나타내었다(Table 3, Figure 2). 작업장 외부에서 지게차를 운행할 때 평균 농도 범위는 3.7~8.8 μg/m^3, 작업장 내부에서 지게차를 운행할 때 평균 농도 범위는 9.3~35.4 μg/m^{3}이었다($P<0.01$). 지게차를 작업장 내부에서 운

Table 2. Summary results for the exposure levels of BC, EC, and NO_2 in the companies

Company	Job	BC*(μg/m³)			EC(μg/m³)		NO_2(ppb)	
		N	GM(GSD)	Range	GM(GSD)	Range	GM(GSD)	Range
A	Forklift operator 1	5	7.1(1.3)	5.5-8.6	4.7(1.2)	3.5-6.4	45.9(1.6)	26.6-89.0
	Manufacturing worker 1	5	5.5(1.4)	3.6-7.1	3.6(1.2)	2.8-4.4	56.2(1.1)	47.3-65.8
B	Forklift operator 2	5	18.9(1.1)	16.5-21.5	15.7(1.3)	11.4-19.5	125.3(1.3)	81.8-154.7
	Forklift operator 3	5	18.8(1.1)	15.3-22.0	23.7(1.2)	18.4-30.2	166.6(1.3)	116.8-211.3
	Forklift operator 4	5	19.1(1.2)	16.1-23.1	23.8(1.2)	19.6-29.4	154.2(1.4)	102.7-206.6
	Manufacturing worker 2	5	15.8(1.1)	13.8-18.9	15.5(1.1)	13.5-17.5	129.2(1.4)	78.3-181.2
C	Forklift operator 5	5	8.3(1.3)	6.8-12.2	5.4(1.4)	4.0-7.5	22.2(1.4)	16.2-35.8
D	Forklift operator 6	5	3.7(1.2)	3.1-4.3	2.1(1.4)	1.4-2.9	12.5(1.2)	10.6-17.3
E	Forklift operator 7	5	16.1(1.2)	13.3-18.7	13.2(1.1)	11.0-14.4	61.3(1.3)	41.9-76.8
F	Forklift operator 8	5	3.1(1.2)	2.2-3.4	2.1(1.1)	1.8-2.5	13.0(1.3)	9.0-16.4
Total samples	Forklift operator	40	9.6(2.1)	2.2-23.1	7.9(2.6)	1.4-30.2	48.9(2.9)	9.0-211.3
	Manufacturing worker	10	9.3(1.8)	3.6-18.9	7.4(2.2)	2.8-17.5	85.2(1.6)	47.3-181.2

*The geometric means of BC were presented by integrated concentration

Table 3. BC concentration according to workspace of forklift operator

Company	Forklift operator	BC*(μg/m³)			p value
		No running	Running outside	Running inside	
		GM(GSD)	GM(GSD)	GM(GSD)	
A	Operator 1	2.6(1.5)	5.9(1.2)	11.9(1.2)	0.002†
B	Operator 2	5.2(1.9)	7.4(1.2)	24.0(1.1)	0.006†
	Operator 3	6.4(2.2)	8.6(1.0)	24.5(1.1)	0.009†
	Operator 4	7.0(1.7)	8.8(1.0)	25.5(1.1)	0.009†
C	Operator 5	1.7(1.2)	6.3(1.1)	35.4(1.4)	0.002†
D	Operator 6	1.1(1.1)	4.4(1.2)	9.3(1.2)	0.002†
E	Operator 7	2.4(1.6)	5.8(1.2)	29.3(1.1)	0.002†
F	Operator 8	0.9(1.3)	3.7(1.2)	9.6(1.2)	0.002†

*The geometric means of BC were presented by integrated concentration
† Statistically significant differences($p<0.01$) in BC concentrations between running outside and running inside were determined by student's t-test

행할 때의 평균 BC 농도가 작업장 외부에서 운행 할 때에 비해 2.0~5.6배 높았다(사업장 A: 2.0배, B: 3.2배, C: 5.6배, D: 2.1배, E: 5.1배, F: 2.6배).

3. 직군별 DEE 농도 비교

DEE 농도가 직군간에 차이가 있는지 확인하기 위하여 지게차 운전원과 제조공정 작업자로 구분하여 비교하였다(Table 4). 지게차 운전원의 BC, EC, NO_2 농도는 각각 9.6 μg/m³, 7.9 μg/m³, 48.9 ppb이었고, 제조공정 작업자의 BC, EC, NO_2 농도는 각각 9.3 μg/m³, 7.4 μg/m³, 85.2 ppb로 나타났다. BC와 EC 농도는 지게차 운전원이 높았고, NO_2 농도는 제조공정 작업자가 지게차 운전원에 비해 높은 농도를 보였지만 유의한 차이를 나타내지 않았다($p>0.05$).

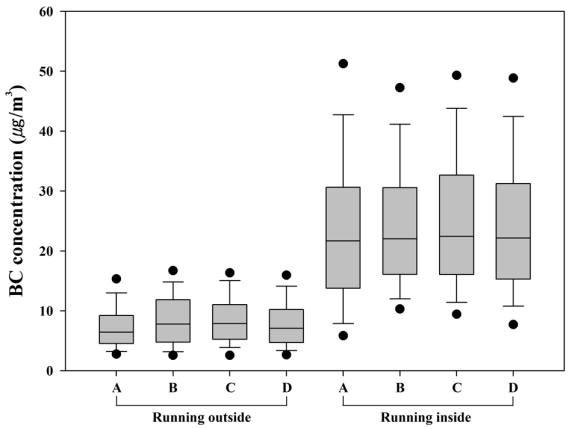

Figure 2. BC concentration of company B between running outside and running inside. A: Forklift operator 2, B: Forklift operator 3, C: Forklift operator 4, D: Manufacturing worker

4. DEE 농도에 영향을 미치는 요인

DEE 노출지표 농도에 영향을 미치는 변수를 분석하기 위해 DEE 노출지표 농도를 종속변수로 하고, 직무, 지게차(중량, 제조사), 건설기계 배출가스 배기규제(Tier), 환경변수(온도, 습도)를 독립변수로 선정하여 다중회귀분석을 실시하였다(Table 5). BC 농도에 영향을 미치는 요인들 중 지게차 중량(β=-0.191, p<0.01)과 배출가스 배기규제(β=0.568, p<0.001)에서 통계적으로 유의하게 나타났고, EC 농도에 영향을 미치는 요인은 지게차 제조사(β=-0.204, p<0.01), 지게차 중량(β=0.585, p<0.001), 배출가스 배기규제(β=0.813, p<0.001)이었다. NO_2 농도에 영향을 미치는 요인은 지게차 제조사(β=-0.265, p<0.01), 지게차 중량(β=0.813, p<0.001), 배출가스 배기규제(β=0.639, p<0.001)로 나타났다.

Ⅳ. 고 찰

DEE는 IARC에서 1급 발암인자로 상향조정되었고, 일회성 또는 단기간 노출되었을 경우 기침과 가래, 구토, 어지러움 등과 같은 증상이 일시적으로 나타날 수 있다. 또한 DEE에 장기간 노출되면 폐암의 위험이 증가하는 것으로 확인된바 있다(U.S. EPA, 2002; IARC, 2012). 이러한 건강상의 이유에도 현재까지 공기중 DEE 농도에 대하여 환경기준이 설정된 국가는 없으며, 작업장 노출기준(8시간 시간가중 평균)은 일부 국가와 기관에서 규정하고 있다. 미국광산보호청(Mine Safety and Health Administration, MSHA)에서는 작업장 노출기준으로 총탄소(Total Carbon, TC) 농

Table 4. Comparison of DEE concentration between forklift operator and manufacturing worker

Occupation	N	BC*(μg/m³)		EC(μg/m³)		NO_2(ppb)	
		GM(GSD)	p value	GM(GSD)	p value	GM(GSD)	p value
Forklift operator	40	9.6(2.1)	0.678	7.9(2.6)	0.903	48.9(2.9)	0.869
Manufacturing worker	10	9.3(1.8)		7.4(2.2)		85.2(1.6)	

*The geometric means of BC were presented by integrated concentration

Table 5. Factors associated with BC, EC, and NO_2 concentrations

	Independent factors	Regression coefficient	Standard error	p-value	Adjusted R^2
BC	Forklift weight	-0.191	0.035	0.005†	0.892
	Diesel exhaust emissions standard	0.568	0.035	0.000‡	
EC	Forklift manufacturer	-0.204	0.056	0.006†	0.900
	Forklift weight	0.585	0.058	0.000‡	
	Diesel exhaust emissions standard	0.813	0.076	0.000‡	
NO^2	Forklift manufacturer	-0.265	0.065	0.001†	0.885
	Forklift weight	0.813	0.065	0.000‡	
	Diesel exhaust emissions standard	0.639	0.086	0.000‡	

*p<0.05, † p<0.01, ‡ p<0.001

도 160 μg/m^{3}로 설정했으며(MSHA, 2014), 호주에서는 EC 농도 100 μg/m^{3}로 설정하고 있다(AIOH, 2013). 2001년 ACGIH에서 사전고시(Notice of Intended Changes, NIC)하였다가, 2003년 철회하였던 EC 농도 20 μg/m^{3}가 현재까지 가장 낮은 작업장 노출기준이었다(CDPH, 2002; DIESELNET, 2003)

국내연구에서는 지게차 운전원을 대상으로 DEE에 대한 노출평가 연구가 부족하여 본 연구결과를 비교하기는 어렵지만, 국외의 연구사례에 의하면 디젤지게차를 사용하는 주류 창고의 EC 농도는 7~55 μg/m^{3}으로 나타났다(Wheatley & Sadhra, 2004). Groves & Cain.(2000) 연구에 의하면 창고에서 디젤지게차를 운행하는 운전원의 EC 농도를 평균 66 μg/m^{3}로 나타났다. 이는 적절하지 않은 작업방식(차량을 운행하지 않을 때 또는 필요하지 않을 때 엔진시동을 끄지 않는 행위), 다른 차량에서 배출되는 DEE와 비효율적인 환기방식으로 인해 높은 EC 농도를 보인 것이라 하였다. 이와 비교해 볼 때 본 연구에서 나타난 전체 지게차 운전원의 평균 EC 농도는 7.9 μg/m^{3}로 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다. 본 연구에서 조사된 사업장은 트럭 등 다른 차량이 사업장 내부로 출입하지 않아 유일한 DEE 노출원은 디젤지게차였으며, 비교적 적은 수(3대)의 지게차가 운행되었기에 낮은 EC 농도를 보인 것으로 보인다. 디젤엔진에서 발생되는 DPM의 구성성분과 입자크기는 엔진의 종류, 운전환경 및 방식, 연료 등에 따라 달라 질 수 있으며(U.S EPA, 2002), 사업장의 규모, 환기방식, 지게차 운행대수 등에 따라 노출수준은 달라질 수 있을 것으로 판단된다.

지게차 운전원의 작업공간을 작업장 외부와 작업장 내부로 구분하여 BC 농도를 비교한 결과, 작업장 외부에서 지게차를 운행할 때 평균 농도 범위는 3.7~8.8 μg/m^3, 사업장 내부에서 지게차를 운행할 때 평균 농도 범위는 9.3~35.4 μg/m^{3}이었다. 지게차를 작업장 내부에서 운행할 때 평균 BC 농도가 작업장 외부에서 운행 할 때에 비해 2.0~5.6배 높았다(사업장 A: 2.0배, B: 3.2배, C: 5.6배, D: 2.1배, E: 5.1배, F: 2.6배). 국·내외에서 지게차의 위치 및 운행시간을 기록하여 BC 농도를 비교한 사례는 거의 없기 때문에 본 연구결과를 비교하기는 어렵지만 외국의 대기환경 연구사례에 의하면 인도 도심지의 연간 평균 BC 농도가 4.1 μg/m^{3}로 보고된 바 있다(Safai et al., 2007). Gatari & Boman.(2003)은 아프리카 케냐 도심지의 BC 농도를 1.4 μg/m^3, 시골은 0.7 μg/m^{3}로 보고하였다. 국내연구에서는 서울 도로변에서 Aethalometer를 이용하여 BC를 측정한 결과에 의하면 일평균이 최소 4.4 μg/m^{3}에서 최대 9.9 μg/m^{3}으로 나타났다(Lee et al., 2007). 이와 비교해 볼 때 본 연구에서 나타난 작업장 외부에서 지게차를 운행 할 때 BC의 평균 농도는 6.1 μg/m^{3}로 차량 이동량이 많은 도로변에서 측정한 BC 농도와 유사하였고, 작업장 내부에서 지게차를 운행할 때 BC의 평균 농도는 18.9 μg/m^{3}로 매우 높은 수준임을 알 수 있다. 출입구를 통해 외기가 작업장 내부로 유입되더라도 지게차에서 배출되는 BC가 적절하지 않은 자연환기로 인해 외기와 충분히 희석되기에는 한계가 있는 것으로 생각된다.

DEE에 노출될 수 있는 직군을 지게차 운전원과 제조공정 작업자로 구분하여 농도를 비교한 결과, 지게차 운전원의 BC, EC, NO_2 농도는 각각 9.6 μg/m^3, 7.9 μg/m^3, 48.9 ppb이었고, 제조공정 작업자의 BC, EC, NO_2 농도는 각각 9.3 μg/m^3, 7.4 μg/m^3, 85.2 ppb로 나타났다. 국외 연구에서 Lewné et al.(2007)은 터널 건설 작업자, 건설기계 운전원과 디젤차량 정비소 작업자를 대상으로 EC와 NO_2에 대해 노출 평가를 실시하였는데, EC의 평균 농도는 터널 건설 작업자(86.7 μg/m^3), 건설기계 운전원(7.8 μg/m^3) 및 디젤차량 정비소 작업자(10.7 μg/m^3)이었다. NO_2의 평균 농도는 터널 건설 작업자(350 ppb), 건설기계 운전원(42.7 ppb) 및 디젤차량 정비소 작업자(91.9 ppb)로 나타났다. Groves & Cain.(2000)연구에서는 버스정비소 작업자의 EC 평균 농도를 31 μg/m^{3}이라고 하였다. 국내에서는 생활폐기물 청소차량 작업자를 대상으로 BC와 EC에 대해 노출평가를 실시하였는데, BC의 평균 농도는 9.1 μg/m^3, EC의 평균 농도는 4.8 μg/m^{3}로 나타났고(Lee et al., 2015), Jung.(2008)의 연구에서는 버스운전자의 EC 평균 농도를 23 μg/m^{3}로 보고하였다. 본 연구에서 나타난 지게차 운전원의 BC 농도는 생활폐기물 청소차량 작업자와 유사하였고, EC와 NO_2 농도는 건설기계 운전원과 비슷한 수준이었다. 직군마다 DEE의 농도는 작업환경, 디젤엔진의 종류 및 수, 환기방식, 환경변수(온도, 습도)등의 영향을 받을 수 있기 때문에 직접 비교 시에는 많

은 주의가 필요하다.

DEE의 노출 지표 중 BC는 EC와 더불어 공기 중 DPM 지표로 주로 사용되며, 여과지법으로 측정한 탄소성분을 EC, Aethalometer로 측정한 탄소 성분을 BC로 부른다(Kim & Song, 2013). 대기환경 분야에서는 Aethalomer를 사용하여 BC를 평가해 왔다. EC와 BC 농도는 상관성이 매우 높고, EC가 BC보다 최대 24%정도 높게 분석된다고 알려져 있다(Babich et al., 2000). 본 연구에서 사업장 B를 제외하고는 BC 농도가 더 높게 나타난 이유는 명확히 알 수 없었다. 그러나 Lee et al.(2014)에 의하면 습도가 높을 때 BC 농도가 높게 측정 되며, 이러한 현상은 광흡수 측정기기에 사용되는 섬유 필터가 다량의 수분 흡수로 인해 입사광이 소멸되기 때문이라고 하였다. 본 연구의 조사기간이 동절기에 비해 상대습도가 높은 하절기에 수행되었으므로 BC 농도가 약간 과대평가 되었을 가능성이 있다. Lyamani et al.(2011)은 스페인의 도심지에서 3년간 BC 농도를 측정하였는데, 동절기에 BC 농도가 높아지는 경향이 있다고 보고하였다. DEE에 노출될 가능성이 있는 근로자의 노출을 관리하기 위해서는 계절적 요인을 고려한 추가적인 연구와 지속적인 DEE 모니터링 및 관리가 필요할 것으로 생각된다.

DEE 농도에 영향을 주는 요인으로는 지게차 제조사 및 중량, 배출가스 배기규제로 나타났다. 본 조사에서 채취된 시료 수가 적었고, 차량 조정상태, 엔진 정비 상태, 엔진 및 연료의 종류 차이 등으로 DEE 농도에 영향을 주었을 것이라 생각되지만, 유의한 차이를 보인 이유는 명확히 알 수 없었다. 지게차에 사용되는 디젤엔진을 포함한 우리나라의 건설기계 제작차 배출가스 배기규제의 경우, 미국 환경청(United States Environmental Protection Agency, U.S EPA)에서 시행하고 있는 배출가스 배기규제(Tier)를 적용하고 있다. 2004년부터 Tier-1 기준이 가장 먼저 적용되었으며(NIER, 2013), 2015년 1월에 Tier-4로 규제가 강화되어 적용되고 있다. Tier-4로 규제가 강화됨에 따라 DEE의 주요구성 성분의 배출허용기준이 강화되었으며, 2009년대 적용되었던 Tier-3에 비하여 질소산화물(NOx) 45%, 입자상 물질의 90%를 줄여야 한다.

지게차의 등록대수는 158,789(37%)대로 건설기계 중 가장 높은 비율을 차지하고 있으며(KCEA, 2015), 지게차를 이용하여 작업을 수행하는 지게차 운전원 또한 많을 것이다. 그러나 국내에서는 DEE 노출실태 및 건강영향에 대한 연구의 부족함을 언급하였고(Bae & Park, 2012), 최근에 일부 연구가 진행된 바 있다.

2012년~2013년 근로복지공단 직업성폐질환연구소 업무상질병 심의위원회에서는 비료공장 로우더 및 굴삭기 운전사의 폐암, 석회석광산의 덤프트럭 운전사의 폐암, 도심지 디젤 차량 운전원에서 발생한 방광암 등을 유발시키는 주요 원인을 DEE로 지목하여 산업재해로 인정한 바가 있고, 지하주차장 작업자, 생활폐기물 청소차량 작업자에 대해 업무관련성 조사가 진행 중에 있다(Kim & Song, 2013).

본 연구에 포함된 사업장은 한 도시에 국한되어 있으며, 채취된 개인시료 수가 적어 이번 조사에서 얻어진 개인노출농도를 국내 전체 지게차 운전원의 노출수준으로 추정하는 것은 한계가 있다. 사업장 마다 업무시간이 상이하였고, 작업특성상 개인시료를 채취함에 많은 어려움이 있었다. 사업장 마다 지게차의 엔진 크기 및 차량 대수, 환기방식 등의 차이가 존재하며, 작업환경 및 환경요인에 따라 개인노출수준도 달라질 수 있다. 지게차 운전원을 비롯한 사업장 내부에서 업무를 수행하는 작업자들도 작업환경에 따라 비슷한 수준의 DEE에 노출 될 가능성이 있다. 따라서 국내 다양한 지역의 사업장에서 업무를 수행하는 작업자들을 포함하여 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

V. 결 론

본 연구는 지게차 사용 사업장을 대상으로 공기중 디젤엔진배출물질 농도를 파악하였다. 사업장별 디젤엔진배출물질의 기하평균 농도는 블랙카본 3.1~19.1 $\mu g/m^3$, 원소탄소 2.1~23.8 $\mu g/m^3$ 및 이산화질소 2.5~166.6 ppb의 범위를 나타냈다. 블랙카본 농도의 경우 작업장 내부에서 지게차를 운행할 경우 작업장 외부에서 지게차를 운행할 때에 비해 2.0~5.6배 높아졌다 ($P<0.01$). 직군별로 DEE 농도를 비교하였을 때 지게차 운전원과 제조공정 작업자 사이에 유의한 차이를 보이지 않았다. DEE 농도에 영향을 주는 요인은 지

게차 제조사, 지게차 중량 및 배출가스 배기규제로 나타났다.

지게차 사용 사업장에서는 작업환경 등에 따라 고농도의 디젤엔진배출물질에 노출될 수 있으므로, 지게차는 매연저감장치를 장착하여야 하고, 사업장에서는 환기설비장치 설치 등 적절한 대책을 마련해야 할 것이다. 더불어 지게차 운전원 뿐만 아니라 작업장 내부의 다른 작업자들도 유사한 농도 수준의 디젤엔진배출물질에 노출되는 것으로 나타났다. 앞으로 산업 및 직군별 디젤엔진배출물질 노출평가 및 관리방안에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 일반연구자지원사업(No. 2014R1A1A2A16054279) 일환으로 수행되었습니다.

References

Australian Institute of Occupational Hygienists(AIOH). Diesel particle matter and occupational health issues. 2013. Available from:URL:http://www.aioh.org.au/documents/item/15 [accessed Sep. 2, 2015]

Babich P, Davey M, allen G, Koutrakis P. Method comparisons for particulate nitrate, elemental carbon, and PM2.5 mass in seven U.S. cities. J Air Waste Manage 2000;50(7):1095-1105

Bae HJ, Park J. A Review on Diesel engine exhaust and lung cancer risks. J Environ Health Sci 2012;38(4):277-290

California Department of Public Health(CDPH). Diesel enging exhaust. 2002. Available from:URL: https://www.cdph.ca.gov/programs/hesis/Documents/diesel.pdf [accessed Sep. 20, 2015]

DIESELNET. ACGIH withdraws proposed TLV for diesel particulates. [serial online] 2003 Feb 23 [cited 2015 Aug 26] Available from: URL:https://www.dieselnet.com/news/2003/02acgih.php

Gatari M.J, Boman J. Black carbon and total carbon measurements at urban and rural sites in Kenya, East Africa. Atmos Environ 2003;37(8):1149-1154

Ghim YS. Black carbon monitoring for managing hazardous air pollutants in the metropolitan area. Seoul Studies 2012;13(2):175-186

Groves J, Cain JR. A survey of exposure to diesel engine exhaust emissions in the workplace. Ann occup Hyg 2000;44(6):435-447

International Agency for Research on Cancer(IARC). Press release No.213, IARC: Diesel engine exhaust carcinogenic. Available from:URL:http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2012/pdfs/pr213_E.pdf [accessed Apr. 1, 2015]

Jung JH, Park SS, Yoom KH, Cho SY, Kim SJ. Inter-comparison of two aethalometers for aerosol black carbon measurements. J Korean Soc Atmos Environ 2011;27(2):201-208

Jung JY. Bus driver exposure assessment of particulate matter and gases. Institute of Natural Sciences Yongin University 2008;18(1):125-133

Korea Construction Equipment Association(KCEA). Construction equipment. Available from:URL: http://www.kcea.or.kr [accessed Mar. 30, 2015]

Kim BW, Song DW. Comparison of diesel exhaust particle concentration between large above-underground parking Ltos. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2013;23(4):323-332

Lee JS, Choi BS, Shin JH, Shin YC, Kim KW et al. Biological monitoring of miners exposed to diesel exhaust using urinary 1-hydroxypyrene. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2007;17(2):144-152

Lee KH, Jung HJ, Park DU, Ryu SH, Kim BW et al. Occupational exposure to diesel particulate matter in municipal household waste workers. *PLoS One* 10: e0135229. doi: 10.1371/journal.pone.0135229; 2015

Lee KW, Han SC, Lee JH. Measurement of black carbon concentration in rural area. Korean Soc Mech Eng 2014;38(1):17-24

Lee SB, Bae GN, Park SM, Jung SG. Black carbon pollution level at roadside of Seoul in spring. J Korean Soc Atmos Environ 2007;23(4):466-477

Lewné 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

Lyamani H, Olmo FJ, Foyo I, Alados-Arboledas L. Black carbon aerosols over an urban area in south-eastern Spain: changes detected after the 2008 economic crisis. Atmos Environ 2011;45(35):6423-6432

Mine Safety and Health Administration(MSHA). Title 30 mineral resources. 2014. Available from:URL: http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2014-title30-vol1/pdf/CFR-2014-title30-vol1.pdf [accessed Aug. 20, 2015]

National Institute of Environmental Research(NIER).

Understanding of motor vehicle certification regulation. 2013. Available from:URL:http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/09/019/5580027.pdf [accessed Dec. 21, 2015]

Park DW, Kim SW, Kim W, Bae HJ, Yoon CS et al. Estimates of occupational exposure to diesel engine exhaust emissions in South Korea. Occupational Safety and Health Research Institute(OSHRI) Report 2014. p. 11-25

Ris C. U.S. EPA Health assessment for diesel engine exhaust:a review. Inhal Toxicol 2007;19(1):229-239

Ryu JT. Perfomance improvement by shock absorber mechanism of the forklift truck steering shaft. Graduate School of Industrial Technology Korea Polytechnic University 2008

Safai PD, Kewat S, Praveen PS, Rao PSP, Monim GA et al. Seasonal variation of black carbon aerosols over a tropical urban city of Pune, India. Atmos Environ 2007;41(13):2699-2709

U.S. Environmental Protection Agency(EPA). Health assessment document for diesel engine exhaust. Washington, DC; U.S. EPA, EPA/600/8-90/057F; 2002

Wheatley AD, Sadhra S. Occupational exposure to diesel exhaust fumes. Ann Occup Hyg 2004;48(4):369-376