

샘플러에 따른 측정 위치별 원소탄소의 농도 비율

차원석* · 김은영 · 최성원 · 최수연

근로복지공단 직업환경연구원

Ratio of Elemental Carbon Concentrations for Respective Measurement Locations according to the Sampler

Won-Seok Cha* · Eun-Young Kim · Sung-Won Choi · Soo-Yeon Choi

Institute of Occupation Environment, Korea Workers' Compensation and Welfare Service

ABSTRACT

Objectives: This study was conducted to determine the differences in EC concentrations according to the type of sampler by measuring and analyzing EC.

Methods: Elemental carbon was measured in diesel engine vehicles and at the roadside. Using NIOSH method 5040, a cassette was coupled to 37 mm and 27 mm quartz filters and measurements were performed 21 times. There were 14 types of measurement methods, and polystyrene, polypropylene, and metal samplers were evenly placed inside the movable chamber.

Results: The results measured using the 37 mm conductive cassette (closed/open) and the IOM sampler made of conductive materials showed a higher ratio than the other results. When the 37 mm conductive cassette was measured with the lid open, it showed a statistically significantly higher ratio than with other measurement methods ($p < 0.05$).

Conclusions: Checking the EC concentration a total of 21 times at each ratio based on the concentration of the 3-stage polystyrene cassette, it was statistically significantly higher when the 37 mm conductive cassette was open. This same cassette also showed a slightly higher EC concentration when closed. It was ascertained that some DEE was collected on the cassette wall surface due to the electrical conductivity of the polystyrene cassette, resulting in sample loss. Since EC is composed of fine particles, it is thought that electrical conductivity may affect its concentration.

Key words: Diesel engine exhaust, elemental carbon, electrical conductivity

I. 서 론


디젤엔진(diesel engine)은 독일의 기술자 루돌프 디젤(Rudolf Diesel)이 1892년 개발한 내연 기관(internal combustion engine)의 한 종류이다. 내연기관의 연료로 사용되는 물질은 다양하나, 그 성분은 탄소와 수소로 이루어진 탄화수소계 연료인 디젤, 가솔린, 액화석유가스(LPG)가 주로 사용되고 있다(MoE, 1999). 이 중 디


젤엔진은 가솔린 및 LPG 엔진에 비해 열효율이 높고 지구온난화의 주요 원인인 이산화탄소 배출이 적다는 이유로 우리나라뿐 아니라 전 세계적으로 디젤엔진을 많이 사용하고 있다. 디젤엔진은 제조업 사업장 및 광산업, 운송업, 건설업 등 다양한 산업분야에서 광범위하게 사용되고 있으며, 주로 대형차량, 철도차량, 건설기계, 농업용기계, 선박 등의 엔진에 이용된다(Kim et al., 2016).

*Corresponding author: Won-seok Cha, Tel: 032-540-4979, E-mail: aromaticwind@gmail.com


2F Incheon labor & Welfare Complex, 478, Munemi-ro, Bupyeong-gu, Incheon 21417

Received: October 27, 2021, Revised: November 21, 2021, Accepted: December 20, 2021

 Won-Seok Cha <http://orcid.org/0000-0002-6453-4891>

 Sung-Won Choi <http://orcid.org/0000-0003-3469-6563>

 Eun-Young Kim <http://orcid.org/0000-0003-4881-1470>

 Soo-Yeon Choi <http://orcid.org/0000-0003-3493-8286>

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.

디젤연료는 탄화수소 혼합물로 이루어져 이론적으로 엔진에서 완전연소 시 생성물은 이산화탄소와 물, 질소, 산소 등이 있어야 한다. 그러나 실제로는 연료의 불완전 연소, 고온고압에서의 혼합물의 반응, 윤활유와 윤활유 첨가제의 연소, 연료첨가제와 연료 중에 들어있는 유황 성분의 연소 등으로 인해 인체에 유해한 디젤엔진 연소 물질(diesel engine exhaust, DEE)을 배출하고 있다(KCDC, 2015). 일반적으로 디젤엔진에서는 고부하 및 과부하(급가속) 상태에서 연료량 과잉으로 인해 연료(C_nH_n)가 고온산소 결핍상태에서 탈수소 반응을 일으켜 유리된 탄소가 배출되어 DEE를 생성한다. 이것이 연소실 내 연료의 불완전 연소에 의해 발생된 매연으로 주로 흑색의 매연(black smoke)을 발생시킨다. 흑색 매연은 엔진에 부담이 많이 가는 하절기에 많이 발생한다(MoE, 1999).

DEE는 입자상 및 가스상 물질로 구성된 혼합물이다. DEE 중 입자상 물질은 배기가스 온도, 연료, 엔진의 특성 등에 따라 배출특성이 달라진다. 입자상 물질 중 평균 공기역학적 직경이 200 nm인 미세입자가 질량 농도(mass concentration) 기준으로 약 80~95%를 차지한다. 그 외 1~20%는 미세입자 보다 작은 초미세입자로 평균 공기역학적 직경이 20 nm로, 개수 농도(number concentration) 기준으로는 50~90%를 차지하는데, 디젤엔진의 종류와 크기에 따라 DEE의 농도와 입자 크기가 매우 다양하다. 입자의 공기역학적 직경이 2.5 μm 보다 크면 호흡기 상부에 침착되는데, 반면에 그보다 작은 미세입자의 경우 호흡기 하부에 침착하므로 대부분이 미세입자로 구성된 DEE의 경우 인체에 유해한 영향을 가져오게 된다(Kim et al., 1999; EPA, 2002; Ris, 2007).

DEE 노출에 의한 건강영향은 급성 및 만성노출 모두 관련이 있다. DEE의 구성성분으로 입자상 물질에는 원소탄소(elemental carbon, EC), 다핵방향족탄화수소(polynuclear aromatic hydrocarbons) 등이 있으며, 가스상 물질에는 이산화탄소, 일산화탄소, 질소산화물, 황 화합물, 알데히드 등이 있다(Groves, 2000; EPA, 2002). 황 화합물, 질소산화물, 알데히드와 같은 호흡기 자극성분을 포함하고 있는 DEE에 일회성 또는 단기간 노출되었을 경우 기침, 가래, 어지러움, 구토 등과 같은 증상이 일시적으로 나타날 수 있다. 만성노출은 동물실험과 사람을 대상으로 한 연구에서 호흡기 독성과 폐암의 위험을 증가 시키는 것으로 나타났다(EPA, 2002).

또한 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 2012년 DEE의 개별 성분이 아닌 DEE 전체를 폐암에 대하여 Group 1로, 방광암에 대하여 Group 2B로 분류하였다(IARC, 2012).

DEE의 발암성은 배출물질 전체에 대하여 부여된 반면 노출기준은 노출지표에 대해서 설정되어 왔다. EC는 DEE 노출의 지표물질로 DEE의 개별 구성성분 중 가장 신뢰성 있는 노출지표로 사용되고 있다(Birch, 1996). 미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)는 EC 노출지표에 대하여 2001년 20 $\mu g/m^3$ 으로 사전고시 후 2003년 철회하였다. 현존하는 가장 낮은 DEE 노출 기준은 EC 노출지표에 대하여 스위스에서 설정하고 있는 100 $\mu g/m^3$ 이다(SUVA, 2004). 한국에서는 DEE에 대한 직업적 노출기준이 없다. 그러나 국내에서는 여러 연구를 통해 DEE에 대한 노출수준을 확인하기 위해 EC 노출지표에 대하여 작업환경측정이 이루어지고 있으며, 노출기준에 대한 연구도 진행되고 있다.

현재 가장 널리 사용되고 있는 EC의 측정 및 분석 방법은 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 method 5040번으로 석영필터에 포집한 EC를 산소와 헬륨 복합가스를 이용하여 열분해하여 분석한다(NIOSH, 2017). 유기탄소(organic carbon, OC)는 간접요인이 존재할 수 있기에 EC에 대해 측정하도록 권고하고 있으며, 37 mm(저농도 25mm 권고) 석영 필터(quartz-fiber filter)를 3단 카세트(3-stage cassette with support)에 장착하여 측정하도록 하고 있다. 탄광, 광산, 탄산염(carbonate)이 발생하는 곳에서는 탄분진의 포집을 제어하기 위해 수 μm 이하의 크기만 선택하여 포집할 수 있는 임팩터(impactor)나 사이클론(cyclone)을 사용하여 측정하도록 하고 있다.

그러나 카세트의 종류에 대한 내용은 제시되어 있지 않는 등 NIOSH method 5040번의 측정방법은 명확하지 않다.

일반적으로 DEE를 측정할 때 폴리스티렌 재질로 만들어진 카세트를 사용하는데, 이러한 재질의 카세트는 필터에 입자상 물질이 포집되기 전에 벽면에 붙게 되는 현상(internal wall loss)가 발생할 수 있다(Liu, 1985; Baron, 2003). 폴리스티렌 카세트를 이용하여 제약공정에서 발생하는 입자상 물질을 측정한 결과 평균적으로 62%의 입자가 카세트 뚜껑에서 발견되고, 22%의

입자만 필터에서 발견된 연구도 있다(Puskar, 1991). 폴리스티렌의 경우 높은 표면저항을 가지고 있어 대전이 되어도 전하를 가지고 있게 되어 정전기가 발생하기 쉬우며, 입자가 쉽게 달라붙는 특징이 있다(Baron, 2003). 이를 제어하는 방법으로 폴리프로필렌에 카본블랙이 함유된 카세트나 금속으로 된 카세트 등 표면저항이 낮은 카세트를 사용하는 방법이 있다(Ham et al., 2017).

디젤차량에서 배출되는 DEE 중 입자상 물질은 처음 발생될 때는 핵화모드(nuclei mode)로 그 크기가 50 nm 이하의 탄소물질로 구성되어 있다. 이 물질이 배기시스템에서 온도에 따라 산화, 응집 등이 이루어져 특성이 변하게 된다. 이러한 과정을 거쳐 생성된 입자상 물질은 배기시스템의 냉각과정에서 응축되고 대기 중에서 흡착, 증발, 탈착 등의 복잡한 과정을 거쳐 DEE로 생성된다. 생성되는 DEE 중 입자상 물질은 미세한 크기의 입자이기 때문에 전기적 특성을 가지는데, 이러한 입자는 주변 하전입자의 주위에서 정전기력을 받는다. 이렇게 (+) 또는 (-)로 전하된 입자는 측정 시 카세트에서 발생하는 정전기력에 의해 시료의 손실을 일으키며, 오차의 원인이 되고 포집효율에 영향을 미치게 된다(NIER, 2013).

이러한 점을 감안하면 DEE를 측정할 때 샘플러의 정전기에 의해 EC 농도에 영향을 줄 수 있다고 판단되며, 샘플러의 종류에 따라 EC를 측정 및 분석하여 농도의 차이를 확인하기 위해 본 연구를 진행하였다.

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

본 연구에서는 직업환경연구원에서 보유한 디젤차량과 인천광역시에 위치한 인천노동복지합동청사의 정문 옆 대로변을 대상으로 하였다. 인천노동복지합동청사 정문 옆 대로변은 승용, 승합, 화물차, 버스 등 다양한 차량이 통행하는 주변으로 거리에 따른 EC농도의 변화를 확인하기 위해 2가지 측정위치(옆, 3 m)에서 시료를 채취하였다.

연구대상 디젤차량은 2011년 식 그랜드카니발이며, 유로 4에 해당하는 디젤엔진을 동력으로 사용한다. 옥내, 옥외 환경에 따라 EC농도의 변화를 확인하기 위해 창고 내부와 외부에서 각각 시료를 채취하였다. 창고는 인천노동복지합동청사 외곽에 설치되어 있으며, 차량의

출입이 거의 발생하지 않는다.

대로변의 주행차량의 종류는 매우 다양하고, DEE 외에도 무기금속분진, 용접흄 등 매우 다양한 종류와 크기의 방해물질이 존재할 수 있다. 이러한 환경에서는 방해작용에 의해 평가 농도가 달라질 수 있다. 측정위치 주변은 학교, 주거지역, 병원 등이 위치하며, 공업시설(제조업, 광업소 등)은 없기에 방해물질이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

측정횟수는 총 21회이며 2020년 9월~11월 중 습도의 영향을 적게 받는 맑은 날을 대상으로 실시하였다. 측정일의 온도, 습도, 풍속 등 기상정보는 기상청의 관측자료(인천 유인관서)를 활용하였다. 평균 온도는 15.2 °C(범위: 9.2~20.9 °C)이고, 평균 습도는 56.4 %(범위: 38.6~77.5 %), 평균 풍속은 10.2 km/h(범위: 5.4~18.0 km/h)였다.

차량 통행량 정보는 인천지방경찰청 교통정보센터의 자료를 활용(송내지하차도-구산사거리, 상행)하였다. 측정일의 대로변 평균 교통량 정보는 20,634 대(범위: 17,727~27,545 대)가 운행하였으며, 연료에 따른 교통량 정보를 확인하기는 어려웠다.

2. 연구 방법

가. 샘플러(Sampler) 종류







본 연구에서 디젤엔진연소물질의 측정은 NIOSH method 5040에서 권고하는 37 mm, 25 mm 석영필터와 3단 카세트를 이용하였는데 폴리스티렌 카세트, 전도성 폴리프로필렌 카세트를 close/open/cyclone 방식으로 12가지이며, 재질의 비교를 위해 IOM(전도성 폴리프로필렌, 금속) 2종류로 총 14가지의 방법으로 EC를 측정하였다. 자세한 샘플러의 종류와 사용한 필터는 Table 1과 같다.

나. 샘플러 배치 및 측정

샘플러 종류의 비교를 위해서는 EC의 농도가 균질화되어있는 공간에서 측정할 필요가 있다. 일반적으로 특정 포집매체의 비교를 수행할 때 에어로졸을 지속적으로 공급하여 농도를 유지하는 동적 챔버(dynamic chamber)를 제작하여 사용하며, 재질은 챔버 내 유입되는 입자의 정전기 영향을 줄이기 위해 플라스틱(plastic)이 아닌 알루미늄 재질을 제작하여 측정하는 것이 유리하다(Jang & Kim, 2015).

그러나 본 연구의 대상은 실험실이 아닌 차량이 운행

Table 1. Type of sampler used for EC measurement

Size(mm)	Sampler name	Cat no.	Company	Sampling type	Picture
37	Quartz filters preloaded in 3-stage clear plastic cassettes	225-401	SKC Inc.	Close	
				Open	
				Cyclone	
	Conductive black polypropylene, filter cassettes	225-309		Close	
				Open	
				Cyclone	
25	Quartz filters preloaded in 3-stage clear plastic cassettes	225-401-25	SKC Inc.	Close	
				Open	
				Cyclone	
	Conductive polypropylene cassettes, black	225-329		Close	
				Open	
				Cyclone	
	IOM sampler, conductive	225-70A		-	
	IOM sampler, stainless steel	225-76A		-	

하는 대로변과 디젤차량이기예 이러한 형태의 챔버는 부피가 크고 이동이나 공간의 제약이 크기에 적합하지 않았다. 이에 본 연구에서는 아크릴 재질로 만든 소형 박스를 만들어 내부에 샘플러를 정렬하여 배치한 뒤 측정을 실시하였다. 챔버는 상부에 덕트를 만들어 기류가 유입되도록 한 후 서로 영향을 주지 않는 간격을 두고 샘플러를 원형으로 배치하는 형태로 수행하였다. 각 샘플러의 유량에 의해 간섭영향을 받을 수 있는 거리의 계산은 외부식 후드의 오염원 제어거리를 구하였으며 다음과 같다.

$$Q=AV=(10X^2+A)*V \dots\dots\dots (1)$$

$$X=2\sqrt{\frac{(\frac{Q}{V}-A)}{10}} \dots\dots\dots (2)$$

X=샘플러간 거리, cm

A=샘플러 유입구 면적, cm²

V=제어속도, m/s

Q=샘플러 유량, cm³/min

샘플러 유입구의 면적과 유량을 적용하여 계산한 결과 샘플러의 제어거리는 약 1 cm 미만으로 본 연구에서는 최대한 동일한 농도의 EC를 측정하기 위해 박스 입구에 각 샘플러의 거리를 최소 5 cm 이상 유지한 채로 측정을 실시하였다. 또한 측정은 박스를 측정 위치에 설치한 뒤 내부 공기가 박스 내부로 충분히 유입되도록 시간이 지난 후 실시하였다.

다. 분석방법

디젤엔진연소물질의 분석은 NIOSH의 method 5040 번을 활용하였다. 시료의 분석은 flame ionization detector를 이용한 열분해 분석법(thermal-optical analysis)으로 원소탄소분석기(OC-EC Analyzer, Sunset Laboratory Corp., USA)를 이용하였다. 분석기기의 설정은 NIOSH 870 방법으로, OC와 EC를 분할하여 분석하였다.

라. 통계분석

EC의 측정결과는 엑셀시트에 옮겨 샘플러의 크기(37 mm, 25mm)와 재질(폴리스티렌, 카본, 금속)으로 나누어 통계처리 하며, 도표의 작성은 Sigmaplot 12.5(Systat

Inc., USA)을 사용한다. 통계처리는 SPSS(Statistical Package for the Social Science, Ver 19.0 SPSS INC. Chicago, USA)를 이용하고, 샘플러의 크기별과 재질에 따른 기준방법과의 비교는 대응표본 T검정(t-test), 샘플러별 EC 농도의 비교는 일원배치 분산분석(one-way ANOVA), 측정위치별 EC 농도의 비교는 이원배치 분산분석(two-way ANOVA)으로 실시하였다.

III. 결 과

1. 측정지점의 세부위치별 EC 농도

본 연구에서는 2곳(대로변, 디젤차량)의 측정지점을 세부 위치별로 나누어 EC농도의 평균, 표준편차 등을 Table 2와 Table 3에 제시하였다. 대로변의 농도 범위는 2가지 지점(옆, 3 m 거리)으로 나누어 측정하였으

Table 2. EC concentration of sampler at each measurement point along the road ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Point	Size(mm)	Sampler	Type	N	AM*	SD [†]	Min	Max	
Near	37	Polystyrene	Close	6	3.74	1.05	2.42	5.58	
			Open	6	3.98	1.02	2.58	5.18	
			Cyclone	6	3.42	1.18	1.66	4.74	
		Conductive	Close	6	4.67	1.49	2.85	6.52	
			Open	6	4.67	1.10	2.81	6.57	
			Cyclone	6	3.75	1.24	1.98	5.37	
		25	Polystyrene	Close	6	4.39	1.46	2.44	6.32
				Open	6	4.46	1.30	2.61	6.09
				Cyclone	6	3.68	1.40	1.51	5.63
	Conductive		Close	6	4.23	1.53	2.15	6.39	
			Open	6	3.75	1.22	2.31	5.79	
			Cyclone	6	3.26	1.58	1.06	6.24	
	Conductive Stainless steel	IOM	6	5.06	1.04	2.96	6.32		
			6	4.42	1.23	2.55	5.89		
	Sub total				84	4.11	1.38	1.06	6.57
3 m	37	Polystyrene	Close	5	1.12	0.50	0.54	1.85	
			Open	5	1.24	0.71	0.54	2.12	
			Cyclone	5	0.85	0.48	0.26	1.52	
		Conductive	Close	5	2.06	0.49	1.52	2.70	
			Open	5	2.42	1.05	1.21	4.20	
			Cyclone	5	1.43	0.34	1.09	2.06	
		25	Polystyrene	Close	5	0.97	0.63	0.36	1.74
				Open	5	1.05	0.60	0.46	1.79
				Cyclone	5	0.82	0.53	0.29	1.56
	Conductive		Close	5	1.14	0.82	0.44	2.39	
			Open	5	1.20	0.80	0.37	2.40	
			Cyclone	5	0.87	0.62	0.33	1.88	
	Conductive Stainless steel	IOM	5	2.04	1.47	0.66	4.61		
			5	1.23	0.70	0.64	2.26		
	Sub total				70	1.32	0.89	0.26	4.61
	Total				154	2.84	1.83	0.26	6.57

*AM : arithmetic mean

[†]S.D : standard deviation

Table 3. EC concentration of sampler at each measuring point of diesel vehicle ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Point	Size(mm)	Sampler	Type	N	AM*	SD†	Min	Max
In	37	Polystyrene	Close	5	14.49	2.21	11.42	17.88
			Open	5	17.29	4.64	13.41	25.60
			Cyclone	5	13.36	1.08	12.00	15.11
		Conductive	Close	5	20.85	7.41	15.35	35.35
			Open	5	20.60	6.74	15.23	33.60
			Cyclone	5	15.86	2.61	12.14	19.50
	25	Polystyrene	Close	5	16.72	3.67	12.34	23.08
			Open	5	18.32	3.69	15.24	24.81
			Cyclone	5	13.70	2.68	9.56	18.04
		Conductive	Close	5	17.56	4.69	12.45	25.78
			Open	5	16.90	4.29	13.78	25.22
			Cyclone	5	13.16	1.66	10.60	15.36
	Conductive	IOM	5	19.15	4.22	15.52	27.22	
	Stainless steel		5	16.98	3.21	14.56	23.26	
	Sub total				70	16.78	4.79	9.56
Out	37	Polystyrene	Close	5	7.52	2.49	5.36	12.25
			Open	5	8.87	3.31	5.83	15.17
			Cyclone	5	7.07	2.62	5.02	11.62
		Conductive	Close	5	8.39	2.62	5.34	12.72
			Open	5	9.62	4.35	5.12	17.27
			Cyclone	5	7.59	3.67	3.65	13.23
	25	Polystyrene	Close	5	5.91	2.21	3.67	9.54
			Open	5	5.78	1.99	3.67	8.75
			Cyclone	5	5.10	2.21	2.54	8.33
		Conductive	Close	5	6.42	2.46	4.40	10.74
			Open	5	6.67	2.23	4.22	10.63
			Cyclone	5	5.21	2.43	2.74	9.05
	Conductive	IOM	5	8.00	1.99	4.89	10.66	
	Stainless steel		5	6.50	1.87	4.04	9.24	
	Sub total				70	7.05	2.99	2.54
Total				140	11.91	6.30	2.54	35.35

*AM : arithmetic mean

†S.D : standard deviation

며, 디젤차량을 2가지 지점(창고 내, 외)에 위치하여 측정하였다.

대로변(road)에서 가까운 지점(near)에서 측정한 EC 농도는 평균 $4.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차 $1.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위: $1.06 \sim 6.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났으며, 떨어진 지점(3 m)에서는 평균 $1.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차 $0.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위: $0.26 \sim 4.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 대로변에서 떨어진 지점에

비해 가까운 지점에서 측정한 결과가 약 3배 정도 높았다.

디젤차량(diesel vehicle)을 창고 내부에 위치시킨 뒤 측정한 EC 농도는 평균 $16.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차 $4.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위: $9.56 \sim 35.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났으며, 창고 외부에서는 평균 $7.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차 $2.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위: $2.54 \sim 17.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 창고 외부에 비해 내부에서 측정하였을 때 EC의 농도가 약 2배 높았다.

2. 샘플러에 따른 EC 농도 비(ratio)

본 연구에서 샘플러에 따른 EC의 농도를 Figure 1에 나타내었으며, 샘플러별 EC의 측정 농도를 비교(one-way ANOVA)하였을 때 통계적으로 유의한 차이는 없었다($F=0.565$, $p=0.881$).

그러나 앞에서 4가지 측정 위치와 방법에 따른 EC 농도를 비교(two-way ANOVA)한 결과 측정 위치($F=416.601$, $p=0.000$) 및 측정 방법($F=3.082$, $p=0.000$)

모두 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($p<0.05$).

측정 위치에 따른 Duncan 사후검정 결과 대로변 3 m에서 측정한 EC 농도가 가까이에서 측정한 EC 농도보다 2.788 만큼 낮은 것으로 나타났으며($p<0.001$), 대로변 가까이에서 측정한 EC 농도가 디젤차량 창고 외부에서 측정한 EC 농도보다 2.9406 만큼 낮은 것으로 나타났으며($p<0.001$), 디젤차량 창고 외부에서 측정한

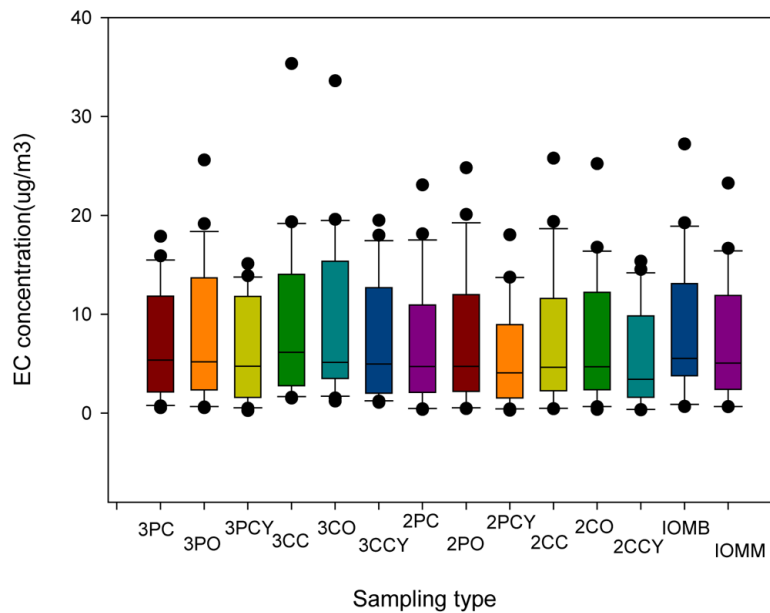


Figure 1. EC concentration according to the type of sampler.

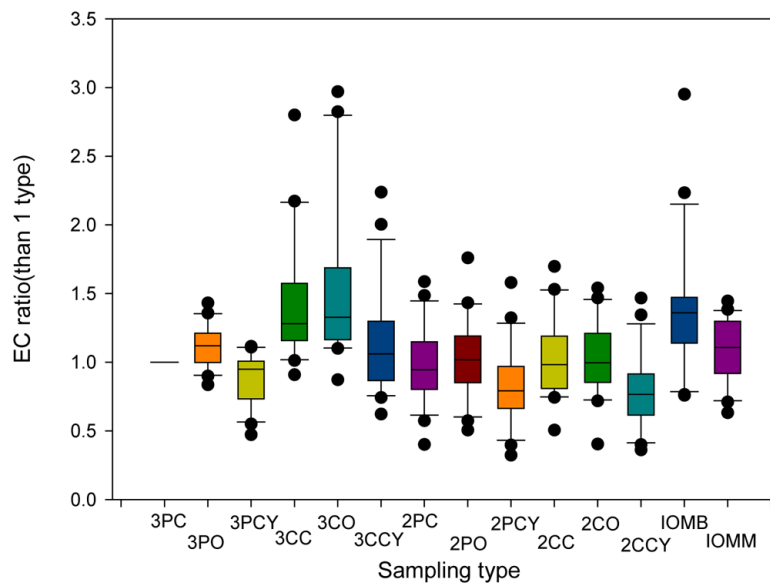


Figure 2. Ratio of EC concentration according to the type of sampler.

EC 농도가 창고 내부에서 측정한 EC 농도보다 9.734 만큼 낮은 것으로 나타났다($p<0.001$).

측정 방법에 따른 Duncan 사후검정 결과 사이클론을 체결하여 측정하는 경우가 가장 낮게 나타났으며, 이를 제외하면 37 mm 전도성 카세트를 open 방식으로 측정한 EC 농도와 37 mm 폴리스티렌 카세트를 close 방식으로 측정한 EC 농도는 유의한 차이가 있었다($p<0.05$).

이렇듯 측정 위치와 방법에 따라 EC 농도의 차이가 있으나 샘플러에 따른 EC 농도의 비교를 위하여 동일한 조건에서 측정결과를 비교할 필요가 있다. 이에 NIOSH method 5040번에서 권고하는 37 mm 석영필터에 3단 카세트를 기준(Standard) 측정방법으로 설정하여 기준 측정방법과 각 측정결과의 비(ratio)를 Figure 2에 나타내었다.

일반적으로 3단 카세트는 총 분진을 측정하는 폴리스티렌 재질의 카세트(Cat No. 225-3050LF)를 이용하게 되는데, 본 연구에서 사용한 3단 카세트(Cat No. 220-401)와 동일하다. 이에 샘플러 종류에 따른 EC 농도의 차이를 확인하기 위해 3단 폴리스티렌 카세트 close 조건의 EC 농도를 기준으로 정하였으며, 각 측정 방법에 따른 EC 농도 비를 Table 4에 나타내었다.

기준(standard)방법인 37 mm 폴리스티렌 카세트를 close 방식으로 측정한 결과와 open, cyclone 방식으로 측정한 결과 모두 통계적으로 유의한 차이가 있었으며, 37 mm 전도성(conductive) 카세트를 close/open 방식으로 이용하여 측정한 결과와도 유의한 차이가 있었다($p<0.05$). 동일한 크기의 카세트로 측정하는 경우 open 방식으로 할 때 폴리스티렌, 전도성 카세트 모두 유의하게 높은 농도로 나타났으며, 사이클론을 체결하여 측정하는 경우 폴리스티렌 재질일 경우 통계적으로 낮은 농도로 나타났다.

25 mm 카세트를 사용하는 경우 기준방법에 비해 폴리스티렌, 전도성 카세트 모두 close, open 방식 모두 통계적으로 유의한 차이는 없었으나($p>0.05$), 사이클론을 체결하여 측정하는 경우 모두 통계적으로 유의하게 낮았다($p<0.05$). 또한 전도성 재질의 IOM sampler를 이용하여 측정한 결과가 기준방법에 비해 통계적으로 유의하게 낮았다($p<0.05$).

또한 탄산염이 발생하는 광산, 탄광 등에서는 사이클론을 체결하여 측정하는 것이 NIOSH에서 권고되기에 사이클론으로 측정한 값들을 비교하여 Table 5에 나타내었다. 사이클론을 체결하여 측정한 결과들을 비교하기 위해 기준(standard)방법을 설정하였는데, 일반적인

Table 4. Ratio of EC concentration for each measurement location according to the sampler

Size(mm)	Sampler	Type	N	AM	SD	T-test	
						t	p
37	Polystyrene	Close	21			-	
		Open	21	1.115	0.153	-3.437	0.003*
		Cyclone	21	0.876	0.189	2.997	0.007*
	Conductive	Close	21	1.444	0.466	-4.361	0.000*
		Open	21	1.539	0.588	-4.199	0.000*
		Cyclone	21	1.135	0.393	-1.576	0.131
25	Polystyrene	Close	21	0.989	0.280	0.185	0.855
		Open	21	1.043	0.290	-0.688	0.499
		Cyclone	21	0.834	0.288	2.642	0.016*
	Conductive	Close	21	1.027	0.303	-0.408	0.688
		Open	21	1.023	0.275	-0.381	0.707
		Cyclone	21	0.795	0.275	3.409	0.003*
	Conductive	IOM	21	1.384	0.492	-3.578	0.003*
	Stainless steel		21	1.086	0.234	-1.680	0.108

- 37mm Polystyrene close : standard EC measuring method

* $p<0.05$

Table 5. Ratio of EC concentration each measurement location according to the cyclone

Size(mm)	Sampler	Type	N	AM	SD	T-test	
						t	p
37	Polystyrene	Cyclone	21			-	
	Conductive	Cyclone	21	1.396	0.845	-2.146	0.044*
25	Polystyrene	Cyclone	21	0.957	0.277	0.704	0.490
	Conductive	Cyclone	21	0.910	0.254	1.619	0.121

- 37mm Polystyrene cyclone : standard EC measuring method

*p<0.05

로 많이 사용되는 37 mm 폴리스티렌 카세트를 동일하게 설정하여 비교한 결과 37 mm 전도성(conductive) 카세트를 체결한 결과에서 통계적으로 유의하게 높게 나타났다($p<0.05$). 25 mm 크기로 측정된 결과와는 통계적으로 유의한 차이가 없었다($p=0.490$, $p=0.121$).

IV. 고 찰

디젤엔진 연소물질(DEE)의 측정 및 분석은 미국 국립산업안전보건연구원(NIOSH)의 method 5040번을 사용한다. 이 분석법에서는 DEE의 농도를 측정 및 분석하는데 총 탄소(원소탄소, 유기탄소)를 대상으로 하도록 권고하지만, 일반적인 작업환경에서는 담배연기, 유기물 등에 의해 유기탄소(OC) 농도에 영향을 받기에 원소탄소(EC)를 가장 대표적인 노출 지표로 제안하고 있다. EC의 분석은 석영필터에 DEE를 포집하는데, 측정은 2~4 l/min의 유량으로 EC의 농도에 따라 적정시간을 포집하도록 하며, 분석은 열-분해 분석(thermal-optical analysis)으로 한다.

NIOSH method 5040에서는 높은 농도의 탄산염(carbonate)가 발생하는 작업환경이나 탄 분진이 발생하는 탄광에서는 수 mm 이하의 cut-point를 포집할 수 있는 임팩터(impactor)나 사이클론(cyclone)을 반드시 선택하도록 권고하고 있다. 그러나 시료를 포집하는 샘플러(cassette)에 대한 명확한 설명은 나와 있지 않는데, 이 분석방법은 원래 탄광 등의 광업소에서 EC를 선택하여 포집하기 위해 개발되었기 때문으로 보인다. 일반적으로 EC를 포집하는데 사용하는 샘플러는 SKC Inc.의 3단 플라스틱 카세트(Cat No. 225-401)를 사용하게 되는데, 폴리스티렌 재질의 플라스틱 카세트는 최근 여러 연구에서 정전기에 의해 미세입자를 측정할 때 농도에 영향을 줄 수 있다는 것이 알려지고 있다.

국내 연구에서 카세트에서 발생하는 정전기에 의한 영향을 평가한 사례가 있었는데, 카본나노튜브를 석영필터와 3단 폴리스티렌 카세트를 이용하여 포집한 뒤 EC를 분석한 결과 정전기에 의해 카세트 벽면에서 검출되었다(Ham et al., 2017). 이러한 점을 감안하면 EC 또한 초 미세입자이기 때문에 폴리스티렌 카세트에서 발생하는 정전기에 의한 시료의 손실이 발생할 수 있다고 생각되며, 이러한 농도의 변이는 정전기의 영향을 더 많이 받을 수 있는 저 농도에서 더욱 크게 나타날 수 있다.

본 연구에서 선택한 14종류의 샘플러는 재질에 따른 농도 변화를 확인하기 위해 일반적으로 사용하는 3단 폴리스티렌 카세트와 전도성(conductive) 카세트를 크기 별(37 mm, 25 mm)로 선택하였으며, 추가로 금속 재질과 전도성 재질의 IOM 샘플러도 비교하기 위해 선택하였다. 14종의 샘플러에 대해 총 21회의 DEE를 측정 및 분석한 결과 샘플러의 종류에 따른 EC의 농도는 통계적으로 유의한 차이는 없는 것으로 나타났다. 이는 EC의 농도가 대로변에서 검출되거나 디젤 차량에서 발생하는 DEE의 농도가 매우 다양하며, 주변 대기 환경이나 작업공간에 영향을 많이 받는 DEE의 특성이 반영된 것으로 보인다.

그러나 각 샘플러의 포집 효율을 확인하기 위해 동일한 농도의 DEE에 대해 각 샘플러의 EC 농도를 비교하였다. 총 21회의 EC 농도를 3단 폴리스티렌 카세트의 농도를 기준으로 각각의 비로 확인한 결과 동일한 재질과 크기인 폴리스티렌 37 mm 카세트로 측정된 결과와 open 방식에서 높게 나타났으나, 이는 측정 필터의 표면적이 넓어지기에 당연한 결과일 수 있다. 그러나 동일한 크기에 다른 재질(전도성)로 측정된 결과 close, open 방식 모두 통계적으로 유의하게 높게 나타났는데, 이는 카본블랙이 약 18% 함유된 전도성 샘플러는

정전기 제거 효과를 얻을 수 있기 때문으로 보인다. 또한 이는 전도성 IOM 카세트로 측정된 결과에서도 높게 나타났다는 점에서도 나타났을 수 있다. 또한 사이클론을 체결하여 측정하는 경우의 EC 농도를 비교하였을 때, 37 mm 전도성 카세트를 사용한 결과 37 mm 폴리스티렌 카세트에 비해 통계적으로 유의하게 높았던 점 또한 정전기에 의한 영향을 받은 것으로 판단된다.

대부분 플라스틱의 경우 높은 표면저항을 가지고 있어 대전이 되어도 전하를 가지고 있게 되어 정전기가 발생하기 쉽다. 폴리카보네이트(polycarbonate), 테플론(teflon), 폴리비닐클로라이드(polyvinyl chloride), 폴리스티렌(polystyrene) 재질은 높은 수준으로 대전되어 있어 입자가 쉽게 달라붙는다(Baron, 2003). 공기 중에 있는 입자상 물질을 채취할 때 포집된 입자가 벽면에 붙을 수 있어 측정결과에 영향을 줄 수 있고, 벽면에 붙는 현상을 제거 하면 결과에 정밀성을 얻을 수 있다(Baron, 1998).

정전기가 제거된 전도성 카세트와 폴리스티렌 카세트를 통해 카본나노튜브를 측정 및 분석한 연구(Ham et al., 2017)에서는 전도성 카세트의 벽면에서는 분석 대상 물질이 검출되지 않았다. 이와 유사하게 본 연구에서도 전도성 카세트의 EC 농도가 폴리스티렌 카세트에 비해 더 높게 나타났는데, 이는 폴리스티렌 카세트의 전기 전도도에 의해 일부 DEE가 카세트의 벽면에 포집되어 시료의 손실이 발생하였다고 판단된다. 물론 본 연구에서는 카세트의 벽면에 포집되는 EC의 농도를 확인하지는 않았기에 명확한 결론을 내리기는 어렵다는 한계가 있다. 그러나 DEE는 엔진에서 직접 방출되거나 핵생성 모드(nucleation)에서 가스 응축을 통해 발생하는 데, 대부분 100 nm 정도의 미세입자로 구성되어 있기 때문에 전기 전도도가 농도에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

정전기를 제거하는 방법은 여러 가지가 있는데, 샘플러의 측면에서는 본 연구에서와 마찬가지로 전도성 카세트를 이용하여 석면을 채취하는 방법이다. 석면을 채취할 때는 NIOSH method 7400 방법을 이용하는데, 석면 또한 크기가 작은 입자로 이루어져 있기에 전도성 카세트를 사용하지 않는 경우 과소평가될 수 있다(NIOSH, 1994a; Baron et al., 1994; Blackford et al., 1985). 다른 방법으로는 정전기를 제거할 수 있는 설비인 ionizer blower를 이용하거나, 방전, 이온화 등의 방법으로 정전기를 제거할 수 있다고 알려져 있다(NIOSH,

1994b; Harrison et al., 2003; Taiwo, 2016).

물론 최근 산업기술의 발달로 DEE는 디젤 입자상물질 여과장치(diesel particulate filter) 등을 통해 상당히 저감되고 있다. 그러나 저 농도라고 할지라도 DEE의 수많은 물질들과 질병 간의 상관관계가 완벽히 규명되지 않았으며, 만성노출에 의해 폐암과 같은 질병을 발생시킬 수 있기 때문에 누적 노출량이 중요한 의미를 가진다. 또한 현재의 노출로 과거의 노출을 추정해야 하는 경우에는 저 농도라도 결과 값에 대한 정확한 측정 및 분석이 반드시 수반되어야 한다.

DEE의 구성은 입자상 물질(particulate matter)과 가스상 물질(gaseous matter)로 이루어져 있는데 입자상 물질은 무기 탄소질 물질(EC, 블랙카본, 그을음 등)이 약 40%, 유기 탄소질 물질(OC, 오일 등)이 약 30%, 황산염 및 기타 물질이 약 30% 정도로 구성되어 있다. 이에 DEE에 대한 평가는 대부분 EC를 기반으로 이루어지는데, 과거 독일에서는 EC의 TLV가 1997년에 비석탄 채굴 및 터널 건설 현장의 경우 0.3 mg/m³로 설정되었고, 기타 응용 분야의 경우 0.1 mg/m³로 설정되었다. 미국 ACGIH는 1995~1996년 사전고시(notice of intended changes, NIC)에서 DEE에 대한 일반 작업환경에서 0.15 mg/m³의 TLV를 처음 제안했으며 나중에는 0.05 mg/m³로 낮아졌다. 그러다가 2001년 ACGIH NIC에서는 DEP의 EC 분율이 일반적으로 전체 디젤입자 질량의 약 40%를 구성하기 때문에 EC로써 0.02 mg/m³을 TLV로 대체하였다. 그러나 ACGIH는 화학물질 및 물리적 인자에 대한 2003년 TLV NIC에서 DEE를 철회하였다. 비탄광 산업의 경우, 2003년 8월 Mine Safety and Health Administration(MSHA)는 NIOSH 5040 방법에서 EC로 측정된 임시 한도(interim limit) 0.308 mg/m³를 제안했으며 이 한도는 2006년까지 낮아졌다.

DEE는 2012년 국제암연구소(IARC)에 의해 인체 발암물질(Group 1)로 설정됨에 따라 우리나라에서도 많은 연구에서 DEE를 다루고 있다. 하지만 아직 DEE의 측정 및 분석방법이 명확하지 않으며, EC의 분석 장비인 원소탄소 분석기(OC/EC analyzer)는 연구소나 학교 등의 기관에서만 보유하고 있기에 현장 연구결과가 많지 않은 실정이다. 그러나 최근 우리나라에서 DEE의 노출기준을 설정하기 위한 여러 연구가 진행되고 있으며, 미세먼지로 인해 디젤차량의 운행이 제한되는 등 디젤엔진 연소물질에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한

현 상황에서는 디젤엔진 연소물질의 측정 결과의 신뢰성이 중요하고, 정확한 샘플러를 선정하여 통일시키는 등의 노력이 필요하다. 또한 측정결과에 영향을 줄 수 있는 요인에 대해서도 명확히 할 필요가 있다. 이에 이번 연구를 통해 디젤엔진 연소물질의 측정 결과에 영향을 줄 수 있는 요인이 있을 수 있다는 점을 확인할 수 있으며, 그 요인 중 하나가 정전기라고 판단된다. 추가 연구를 통해 정확하게 계산된 농도의 EC를 측정 및 분석한 뒤 각 샘플러에서 발생하는 정전기량과의 상관관계를 검토하여 가장 명확한 결과를 확인할 필요가 있다.

V. 결 론

디젤엔진 연소물질을 측정할 때 원소탄소(EC)의 샘플러 별 농도의 차이를 확인하고자 하였다. 일반적으로 사용하는 3단 폴리스티렌 카세트와 정전기의 영향을 거의 받지 않는 전도성 카세트, 금속 재질의 카세트를 open, close, cyclone 방식으로 측정하였다. 각 측정별 농도의 비를 분석하여 그 차이를 정리하고, 최적의 샘플러를 제안하기 위한 이번 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 연구대상 2곳(대로변, 디젤차량)에서의 EC 농도는 대로변에서 평균 $2.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차 $1.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위: $0.26 \sim 0.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 차량에서 평균 $11.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차 $6.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위: $2.54 \sim 35.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)였다. 대로변과 디젤차량의 EC 농도는 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$).

2. 연구대상 2곳에서 2가지 세부위치(대로와의 거리, 창고 내/외)에서의 EC 농도는 대로 옆에서 평균 $4.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차 $1.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위: $1.06 \sim 6.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 3 m 거리에서 평균 $1.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차 $0.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위: $0.26 \sim 4.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$)였고, 차량을 창고 내부에서 측정한 EC 농도는 평균 $16.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차 $4.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위: $9.56 \sim 35.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 창고 외부에서 평균 $7.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차 $2.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위: $2.54 \sim 17.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$)였다. 4가지 측정위치에서의 EC 농도는 각각 통계적으로 유의한 차이가 있었다.

3. 샘플러의 종류에 따른 EC 농도의 차이는 통계적으로 유의하지 않았으나, 각 측정에서 일반적으로 많이 사용되는 3단 37 mm 폴리스티렌 샘플러를 기준으로 EC 농도의 비를 구하여 분석한 결과 37 mm 전도성 카세트를 open 방식으로 측정할 때 통계적으로 유의하게 높

았다. 전도성 카세트를 close 방식으로 측정하거나 IOM 샘플러로 측정할 때에도 EC 농도가 높았으며, EC의 농도가 낮은 범위에서 차이를 보였다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때, 폴리스티렌 재질의 카세트가 전도성 카세트에 비해 농도가 낮게 나타난 점은 DEE와 같은 미세한 입자를 측정하는 경우 정전기와 같은 요인에 의해 영향을 받기 때문으로 판단된다.

References

- Baron PA, Chen CC, Hemenway DR, O'Shaughnessy P. Non uniform air flow in inlets: the effect on filter deposits in the fiber sampling cassette. Am Ind Hyg Assoc J 1994;55(8):722-732(<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.011>)
- Baron PA. Personal aerosol sampler design: a review. Appl Occup Environ Hyg 1998;13(5):313-320 (<https://doi.org/10.1080/1047322X.1998.10390088>)
- Baron PA. Factors affecting aerosol sampling. NIOSH. Manual of Analytical Methods, 4th ed., third supplement 2003;184:207 Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/chaps.html>
- Birch ME, Cary RA. Elemental carbon-based method for monitoring occupational exposures to particulate diesel exhaust. Aerosol Science and Technology 1996;25(3):221-241(<https://doi.org/10.1080/02786829608965393>)
- Blackford DB, Harris GW, Revell G. The reduction of dust losses within the cassette of the SIMPEDS personal dust sampler. Ann Occup Hyg 1985;29(2):169-180 (<https://doi.org/10.1093/annhyg/29.2.169>)
- Environmental Protection Agency(EPA). Health assessment document for diesel engine exhaust. Washington, DC; U.S. EPA, EPA/600/8-90/057F:2002 Available from: <https://www.atfis.or.kr/article/M001040000/view.do?articleId=1739&boardId=3&page=3&searchKey=&searchString=&searchCategory=>
- Groves J, Cain JR. A survey of exposure to diesel engine exhaust emissions in the workplace. Ann occup Hyg 2000;44(6):435-447
- Ham SH, Kim SH, Lee JH, Lee NR, Yoon CS. Effect of sampling cassettes type used in sampling of airborne carbon nanotube(CNT) to electrostatic loss. Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene 2017;27(3):180-186(<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2017.27.3.180>)
- Harrison RM, Tilling R, Romero MSC, Harrad S, Jarvis K.

- A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment. *Atmos Environ* 2003;37(17):2391-2402([https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00122-5))
- International Agency for Research on Cancer. 2012. Press release No.213, IARC Diesel engine exhaust carcinogenic. Available from: http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2012/pdfs/pr213_E.pdf [accessed April 1, 2015]
- Jang JY, Kim SW. Evaluation of filtration performance efficiency of commercial cloth masks. *J Environ Health Sci* 2015;41(3):203-15(<https://doi.org/10.5668/JEHS.2015.41.3.203>)
- KCDC (Korea Centers for Disease Control and Prevention). Diesel engine exhaust. 2015
- Kim MC, Kwon SB, Lee KW, Kim JC, Jung IR, Ryu JH, Eom MD. Submicrometer particle size distribution of emissions from diesel engines. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 1999;15(5): 657-665
- Kim SI, Park JY, Lee KM, Kim SW. A study on exposure indices for diesel engine exhaust in forklift operating areas. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene* 2016;26(1):38-47
- Liu BY, Pui DY, Rubow KL, Szymanski WW. Electrostatic effects in aerosol sampling and filtration. *Ann Occup Hyg* 1985;29(2):251-269(<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2016.26.1.38>)
- MoE (Ministry of Environment). Maintenance and inspection method to reduce smoke. 1999
- NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health). Asbestos and other fibers by PCM 7400. NMAM(NIOSH Manual of Analytical Methods); 1994a Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/7400.pdf>
- NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health). Particulates not otherwise regulated, total 0500. NMAM(NIOSH Manual of Analytical Methods); 1994b Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/0500.pdf>
- NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health). Diesel particulate matter(as elemental carbon) 5040. NMAM(NIOSH Manual of Analytical Methods); 2003 Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/5040.pdf>
- NIER (National Institute of Environmental Research). Understanding the theory and reduction principle of particulate matter in diesel vehicles. 2013
- Puskar MA, Harkins JM, Moomey JD, Hecker LH. Internal wall losses of pharmaceutical ducts during closed-face, 37-mm polystyrene cassette sampling. *Am Ind Hyg Assoc J* 1991;52(7):280-286(<https://doi.org/10.1080/15298669191364730>)
- Ris C. U.S. EPA Health assessment for diesel engine exhaust: a review. *Inhal Toxicol* 2007;19(1):229-239 (<https://doi.org/10.1080/08958370701497960>)
- SUVA. Grenzwerte am Arbeitsplatz: MAK-/BATWerte (Erläuterungen), physikalische Einwirkungen, physische Belastungen. 2014
- Taiwo AM. Source apportionment of urban background particulate matter in birmingham, united kingdom using a mass closure model. *Aerosol Air Qual Res* 2016; 16(5):1244-1252(<https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.09.0537>)

<저자정보>

차원석(전임연구원), 김은영(전임연구원), 최성원(전임연구원), 최수연(전임연구원)