

수도권 일부 대형상가 지상주차장 및 지하주차장의 공기중 디젤엔진배출 입자상물질의 공기중 농도 비교

김부옥^{1*} · 송동우²

근로복지공단 직업성폐질환연구소^{1*} · 서울과학기술대학교 안전과학연구소²

Comparison of Diesel Exhaust Particle Concentration between Large Above-Underground Parking Lots

Boowook Kim · Dong-Woo Song

*Occupational Lung Diseases Institute, KCOMWEL · Research Center for Safety Science,
Seoul National University of Science and Technology*

ABSTRACT

Objectives: This study was conducted in order to investigate the diesel exhaust particle(DEP) concentrations in the thirteen parking lots of large shopping complex.

Methods: The real-time black carbon(BC) concentration was determined using an Aethalometer, and elemental/organic carbon concentration was determined according to the method of the National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH) 5040. The particle number concentration(NC), lung deposited surface area concentration(LDSA) and geometric mean diameter(GMD) were determined using a DiSCmini aerosol monitor.

Results: The average concentration of BC, EC, OC, NC, LDSA and GMD were 19.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 12.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 51.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 94,000 particles/ cm^{-3} , 298 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^{-3}$ and 57 nm in all parking lots, respectively, approximately 3-fold higher than those found in the urban outdoor. The average concentration of BC were 21.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in underground parking lots, 3-fold higher than above parking lots.

Conclusions: Therefore, the parking lots at the large shopping complex can be considered a potentially dangerous environment with a high concentration of DEP nanoparticles.

Key words : black carbon, diesel exhaust particle, element carbon, nanoparticle, parking lot

I. 서 론

급속한 산업발전은 도시의 증대와 도시활동의 발전을 이루었으며 이로 인해 차량의 수 또한 급격한 증가를 가져 왔다. 반면에 주차공간은 역으로 감소되어 주차공간의 확보 문제가 야기되고 있는 실정이다. 이러한 주차공간의 부족을 해소하기 위하여 지하공간을 활용한 지하주차장의 건설이 증대되고 있다. 그러나 지하공간을 이용한다는 것은 공간활용의 유용성이 높을지라도 그 특성상 밀폐공간이므로 자동차

의 배기가스로 인한 공기오염이 심각한 문제로 대두되고 있다(Kim, 2002).

자동차 배출물질은 엔진의 종류에 따라 디젤엔진 배출물질(Diesel Engine Exhaust, DEE), 가솔린엔진 배출물질 및 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas, LPG)엔진 배출물질로 구분할 수 있다. 엔진배출물질은 불완전 연소된 연료 및 윤활유 등에서 발생하는 입자상 물질과 가스상 물질의 혼합물이다. 가솔린엔진은 디젤엔진에 비하여 다핵방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs), 일산화탄소, 이산화

*Corresponding author: Boowook Kim, Tel: 031-500-1808, E-mail: labor7@gmail.com,

Occupational Lung Diseases Institute, KCOMWEL, 87 guryong-ro, il-dong, sangnok-gu, Ansan, 426-858

Received: October 22, 2013, Revised: December 10, 2013, Accepted: December 17, 2013

탄소 등의 배출량은 높지만, 질소산화물과 입자상물질의 배출량이 현저히 적고(Ono-ogasawara & Smith, 2004), LPG는 분자량이 낮은 프로판과 부탄이 주성분이어서 고분자의 탄화수소 등 오염물질 발생량이 적은 것으로 알려져 있다. DEE 중 입자상물질(Diesel Engine Particle, DEP)의 주요 성분은 원소탄소(Elemental Carbon, EC)와 PAHs인데, 디젤엔진에서는 주로 벤젠고리 3개 또는 미만의 저분자량 PAHs가 발생되고, 가솔린엔진에서는 Benzo [a]pyrene, Dibenz[a,h]anthracene 등과 같은 고분자량의 PAHs가 발생된다(Miguel et al., 1998; Marr et al., 1999). DEP의 입자크기는 엔진부하(차량의 가속, 주행, 정차), 촉매사용 등의 조건에 따라 변하지만, 기하평균직경이 100 nm 미만으로 매우 작기 때문에 나노입자에 의한 건강영향 우려와도 관련이 있다(Kittelson, 1998; Miguel et al., 1998; Ono-ogasawara & Smith, 2004).

2012년 6월 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 DEE를 인간에게 폐암을 일으키는 Group 1 물질로 상향 조정하였고, 더불어 방광암과도 관련성이 있다고 발표하였다(IARC, 2012).

근로복지공단 직업성폐질환연구소에서는 지하주차장 근로자의 폐암 등 DEE가 주요 원인으로 추정되는 업무관련성 조사가 여러 건 진행되고 있다(OLDI, 2013).

국내 지하주차장 실내공기질에 관한 선행연구에서는 일산화탄소, 이산화탄소, 포름알데히드 등 가스상 물질을 중심으로 평가가 이루어져 왔으며(Song et al., 1998; Kim, 2006; Park, 2010), 입자상물질은 PM₁₀에 국한되어 있고, DEP에서 40~90% 차지하는 탄소입자에 대한 평가는 없었다.

DEP의 크기는 수십~수백 nm로 매우 작고, 엔진배출물질 저감기술의 발달로 DEP 배출량 자체도 많이 감소되었다. 따라서 DEP 농도를 평가함에 있어 입자의 질량을 측정하는 것 보다 다른 물리적 특성인 수농도(Number concentration) 또는 표면적(Surface area)을 평가하는 것이 더욱 적절하다(Ono-ogasawara & Smith, 2004).

따라서 본 연구는 국내 수도권 일부 대형상가 지상주차장 및 지하주차장의 공기 중 탄소입자 농도 및 입자의 물리적 특성을 평가하여 주차장 환경개선 및 작업자 노출평가의 기초자료로 활용하고자 실시되었다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 2012년 8월부터 2013년 5월 사이에 서울, 경인지역에서 임의로 선정한 백화점, 대형마트 13곳의 주차장을 대상으로 실시하였다(Table 1). 13곳 중 11개곳 지하주차장이고, 2곳은 지상주차장이었다. 지상주차장은 주차타워로써 천정이 있고, 주차장의 끝부분에서는 외기가 유입된다. 측정시간은 최소 2시간에서 최대 6시간 동안 측정하였고, 주차장 내 측정지점은 벽면에서 수 m 떨어지고, 바닥으로부터 1.5 m 지점에서 지역시료로 측정하였다. 평가 항목은 각각 1대씩의 실시간기기를 이용해 블랙카본 농도와 나노입자 농도를 측정하였고, 여과지법으로 분진을 채취하여 탄소성분(유기 및 원소탄소)을 분석하였다. 본 연구는 사전조사 연구로써, 연구대상 13곳 주차장의 규모, 주차대수, 건축년도, 환기시설 등에 관한 기술적 자료는 파악되지 않았다.

2. 시료 측정 및 분석

1) 블랙카본(Black Carbon, BC)

BC는 원소탄소(Elemental Carbon, EC)과 더불어 공기 중 DEP 지표로 주로 사용된다. EC와 BC는 화학적 성분에 따른 분류는 아니고, 여과지법으로 탄소 성분 분석 시 EC, Aethalometer(Magee Scientific Inc., USA)에 의한 실시간 탄소성분 측정치를 BC로 부른다. Aethalometer는 기기 내부의 여과지에 채취되는 입자에 의해 빛의 감쇄 변화로 BC 입자의 질량농도를 계산한다(Hansen et al., 1984). 본 연구에서 사용한 Aethalometer는 최근에 휴대용으로 개발된 AE-51 모델을 사용하였다. AE-51은 기존의 Aethalometer와 다르게 여과지를 사용자가 교체해야 하는데, 측정시간이 길어짐에 따라 BC 농도 감소현상이 보고된 바 있어(Jung et al., 2011), 본 연구에서는 주차장 마다 새로운 여과지로 교체 사용하였다. Aethalometer의 측정간격은 1분으로 설정하였다.

2) 원소탄소(Elemental Carbon, EC) 및 유기탄소(Organic Carbon, OC)

공기중 EC와 OC 평가는 미국국립산업안전보건연구원(The National Institute for Occupational Safety

Table 1. Identification of sampling sites and measurement method for diesel particle

No	Sampling sites		Aethalometer	NIOSH 5040	DiSCmini
	Ground / Underground	Floor			
1	UG	3	✓	✓	
2	UG	5	✓	✓	
3	UG	2	✓	✓	
4	UG	2	✓	✓	
5	UG	3	✓	✓	
6	UG	2	✓	✓	
7	UG	3	✓	✓	✓
8	G	2	✓		✓
9	UG	2	✓	✓	
10	UG	4	✓	✓	✓
11	UG	3	✓	✓	✓
12	G	1	✓		
13	UG	4	✓		✓
14	Ambient(1)		✓		✓
15	Ambient(2)		✓		✓

UG: underground parking lot, G: above parking lot

Ambient(1): 225 m away from the road

Ambient(2): 50 m away from the road

and Health, NIOSH) 5040방법에 따라 실시하였다. 고온전기로서 전처리된 37 mm 석영여과지(SKI Inc., USA)에 저농도 EC 검출이 용이하도록 4.2 LPM 사이클론(GK2.69, BGI Inc., USA)을 사용하여 50% cut-point가 4 μ m인 호흡성 분진을 채취한 후, 여과지에서 1.5 cm^2 잘라내 OCEC 분석기(Sunset Laboratory Inc., USA)로 EC와 OC 농도를 정량 분석하였다 (Table 2). EC와 OC 평가는 13개 주차장 중 10개에서 실시하였다(Table 1).

3) 입자 수농도, 표면적 농도 및 입자크기

최근에 개발된 휴대형 나노입자 측정기기인 MiniDiSC(Miniature diffusion size classifier, DM) (Matter Aerosol, Switzerland; Fierz et al., 2011)를 이용하여 입자 수농도(Number Concentration, NC), 표면적 농도(Lung Deposited Surface Area Concentration, LDSA) 및 평균 입자크기(Geometric Mean Diameter, GMD)를 측정하였다. DM의 입자 측정범위는 10 nm~700 nm 이며, 측정간격은 1초이지만 전용 소프트웨어

Table 2. Temperature program and purge gas conditions for the semi-continuous OCEC analyzer

Step	Gas	Hold time(s)	Temperature(°C)
1	He	100	1
2	He	85	310
3	He	80	475
4	He	50	615
5	He	35	870
6	He	100	550
7	He:O ₂	85	550
8	He:O ₂	52	625
9	He:O ₂	36	700
10	He:O ₂	32	775
11	He:O ₂	25	850
12	He:O ₂	20	870
13	CH ₄	100	120

웨어에서 1분 평균으로 변환하였다. DM 측정은 13개 주차장 중 5개에서 실시하였다(Table 1).

4) 대조군

대조군으로 도심지 대기에서 BC 농도 및 NC 농도를 측정하였다. 차량이 많이 다니는 도로에서 거리가 멀어질수록 BC 및 NC 농도는 급격히 감소되므로(Zhu et al., 2002), 대조군을 2곳에서 측정하였다. 첫 번째 대조군은 8차선 도로에서 직선거리로 225 m 떨어진 주택가에서 측정하였고, 두 번째 대조군은 8차선 도로에서 50 m 떨어진 주택가에서 측정하였다. 본 연구에서의 대조군은 차량 통행량이 많은 인천광역시 구월동 인근에서 측정되었으므로 차량에서 발생하는 DEP에 직접적인 영향을 받고, 인천 남동공단과 4.8 km, 인천 서부산업단지와 12 km 떨어져 있으므로, 공단에서 발생하는 탄소물질의 영향을 배제할 수 없다.

3. 자료처리

Aethalometer와 DM 측정결과를 기기의 전용소프트웨어에서 엑셀시트에 옮겨, 대수확률지에서 분포를 본 결과 직선성을 나타내어 대수정규분포에 가까웠다. 그러므로 산술평균과 함께 기하평균을 나타내었다. 지하주차장과 지상주차장간 농도비교는 기술 통계 자료로 비교하였고, BC와 NC 결과 간에는 상관분석을 실시하였다. 자료처리 및 도표의 작성은 SPSS 14.0(IBM Inc., USA)과 SigmaPlot 10.0(Systat Inc., USA)을 사용하였다.

III. 연구결과

1. 주차장별 디젤엔진배출 입자상 물질 농도 및 입자 특성

Table 3은 주차장별 BC, EC, OC, NC, LDSA 및 GMD를 나타낸다. BC의 전체 평균은 $19.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로써 대조군(1)에 비해 약 3배 높은 농도였다(Table 4). 가장 높은 농도를 보인 주차장 13은 대조군(1)에 비해 7배 이상 높았다. 피크농도는 주차장5에서 127.9

Table 3. Summary results for the average concentration of diesel exhaust particle in the thirteen parking lots

Sites	Black Carbon			NIOSH 5040			EC/BC	DiSCMini		
	GM(AM)	GSD(SD)	Max	EC	OC	OC/EC		NC	LDSA	GMD
1	12.4(13.1)	1.4(4.8)	27.7	10.0	44.8	4.5	0.81			
2	14.9(23.6)	2.8(20.9)	86.0	5.4	39.5	7.3	0.36			
3	17.1(17.4)	1.2(3.5)	28.7	9.5	63.0	6.6	0.56			
4	33.2(33.6)	1.2(5.3)	45.4	26.0	72.1	2.8	0.78			
5	13.0(15.4)	1.6(13.9)	127.9	8.7	51.2	5.9	0.67			
6	8.1(8.6)	1.4(3.3)	24.8	4.3	30.9	7.2	0.53			
7	25.6(26.0)	1.2(4.7)	36.4	11.0	31.5	2.9	0.43	89,000	274	56
8	6.7(7.4)	1.6(3.7)	15.4					52,000	138	48
9	25.6(26.9)	1.4(8.5)	50.0	15.0	73.0	4.9	0.59			
10	27.0(27.8)	1.3(7.0)	54.6	19.0	48.8	2.6	0.70	108,000	374	62
11	13.2(14.1)	1.5(5.3)	29.4	12.6	59.8	4.7	0.95	71,000	235	60
12	7.3(7.9)	1.5(3.6)	27.4							
13	44.5(47.7)	1.5(16.5)	88.3					149,000	470	57
AM	19.1			12.2	51.5	4.9	0.64	94,000	298	57

GM: geometric mean
GSD: geometric standard deviation
EC: elemental carbon
OC: organic carbon
BC: black carbon

NC: number concentration
LDSA: lung deposited surface area concentration
GMD: geometric mean diameter
Unit: BC/EC/OC: $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NC: particles/ cm^3 , LDSA: $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, GMD: nm

Table 4. Summary results for the average concentration of diesel exhaust particle in the urban outdoor

Sites	Black Carbon			DiSCMini		
	GM(AM)	GSD(SD)	Max	NC	LDSA	GMD
1	6.0(6.2)	1.3(1.2)	9.3	33,385	86	47
2	10.7(11.9)	1.4(2.6)	21.3	58,912	141	44

Site 1: 225 m away from the road

Site 2: 50 m away from the road

GM: geometric mean

AM: arithmetic mean

GSD: geometric standard deviation

SD: standard deviation

NC: number concentration of geometric mean

LDSA: lung deposited surface area concentration of geometric mean

GMD: geometric mean diameter

Unit: BC: $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NC: particles/ cm^3 , SA: $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, GMD: nm

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로써 가장 높았는데 대조군(1)에 비해 약 14배 높았다. BC 농도의 기하표준편차(Geometric Standard Deviation, GSD)는 주차장2를 제외하고는 모두 2 미만으로 측정시간 동안의 농도변화는 비교적 적다는 것을 알 수 있다. EC의 전체 평균은 $12.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 가장 높은 주차장4에서는 $26.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. OC의 전체 평균은 평균 $51.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 가장 높은 주차장9에서는 $73.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. OC와 EC의 평균비는 4.9이었다. 2003년까지 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서 작업장 노출기준으로 고시하였던 EC 농도가 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었던 것을 감안하면, 이번 주차장에서 나타난 EC 농도는 매우 높다. 그리고 EC와 BC의 비는 평균 $0.64(0.36\sim0.95)$ 로써 BC 농도가 높게 나타났다. NC는 평균 $94,000 \text{ particles}/\text{cm}^3$ 으로써 대조군(1)($33,000 \text{ particles}/\text{cm}^3$)에 비해 약 3배 높았고, 표면적 농도는 평균 $298 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 으로써 대조군(1)($86 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)에 비해 약 3.5배 높았다. BC 농도가 높은 곳에서는 NC 및 LDSA 농도도 높은 경향을 보였다. 주차장내 GMD는 평균 57 nm 로써 대조군(대기)의 평균 GMD인 46 nm 보다 컸다.

나타낸다. 지상주차장은 평균 $7.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 지하주차장은 평균 $21.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로써 지하주차장의 BC 농도가 약 3배 높았다.

3. BC vs NC

Figure 1은 BC 농도와 NC의 상관성을 나타낸다. (a)는 주차장7, (b)는 주차장10, (c)는 주차장13, (d)는 대조군2 그리고 (e)는 대조군1에서의 측정결과이다. (a)와 (b)에서는 각각 상관계수 0.78 , 0.59 로써 높은 상관관계를 보였지만, (c)에서는 상관관계를 보이지 않았고, 대조군(2)에서는 상관계수 0.78 으로써 높은 상관관계를 보였지만, 대조군(1)에서는 상관계수 0.41 으로써 보통의 상관관계를 보였다. 이상의 결과를 볼 때 DEP 농도가 높은 환경에서는 BC와 NC간에 상관성이 높다는 것을 알 수 있다. 그러나 BC 농도와 NC가 매우 높은 주차장13(c)에서는 두 인자간에 상관성이 없는 것으로 나타났는데, 그 이유는 Aethalometer에 의한 BC 농도가 고농도 환경에서 시간이 지남에 따라 발생하는 농도감소 현상이 원인으로 추정되지만, 명확한 원인은 알 수 없었다.

IV. 고 찰

2. 지상주차장과 지하주차장의 BC 농도 비교

Table 5는 지상주차장과 지하주차장의 BC 농도를

DEE 평가는 1970년대부터 외국의 광산에서 본격

Table 5. Comparison of black carbon concentration between above parking lot and underground parking lot

Sampling site	Number of sampling sites	Black carbon concentration
Above	2	7.0
Underground	11	21.3

Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

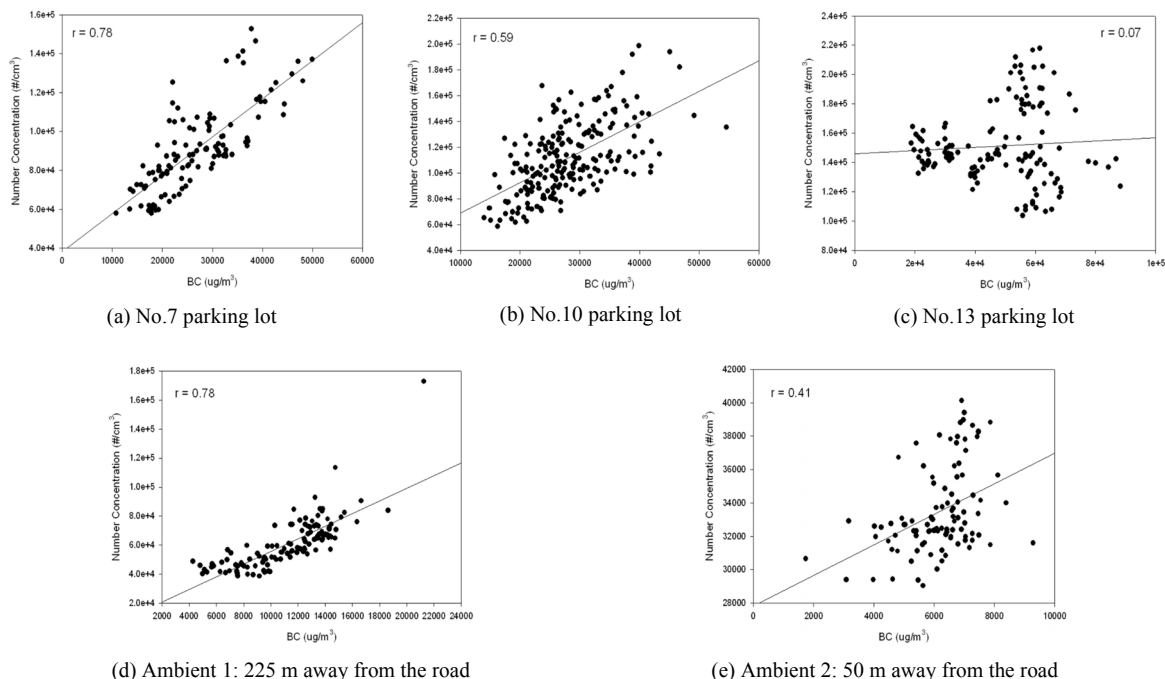


Figure 1. The correlation between black carbon concentration and particle number concentration in various parking lots

적으로 진행되어 왔는데, 초기에는 DEE 평가지표로 주로 일산화탄소가 측정되었고(Vermeulen et al., 2010; Borak et al., 2011), 1980년대에 NDIR (Non-dispersive infrared) carbon dioxide analyzer 또는 electrochemical 센서에 의한 열광학분석법(Thermal-optical analysis)이 소개되었고, 이후 90년대 중반 FID(Flame ionization detector) 분석에 의한 열광학분석법(대표적으로 NIOSH 5040법)이 개발됨에 따라 현재까지 작업장 DEE 평가 지표로써 EC가 가장 우선시 되고 있다(Birch & Cary, 1996a; Birch & Cary, 1996b; Groves & Cain, 2000). 한편 대기환경 분야에서는 Aethalometer에 의한 BC도 흔히 평가해 왔는데, EC와 BC 농도는 상관성이 매우 높고, 일반적으로는 EC가 BC보다 30% 가량 높게 분석된다고 알려져 있다(Babich et al., 2000).

현재까지 공기중 EC 자체로 환경기준이 설정된 국가는 없고, 작업장 노출기준(8시간 시간가중 평균)은 일부 국가와 기관에서 규정하고 있다. 미국의 광산보호청(Mine Safety and Health Administration, MSHA)에서는 작업자의 DEE 노출관리를 위하여 총 탄소 농도로써 0.16 mg/m³(또는 EC 0.12 mg/m³), 독일

에서는 EC로써 지하광산 0.3 mg/m³, 기타 작업장 0.1 mg/m³으로 규정하고 있고, 호주도 0.1 mg/m³이다(AIOH, 2013). 2001년 미국 ACGIH에서 사전고시(Notice of Intended Changes, NIC) 하였다가, 2003년 철회하였던 0.020 mg/m³(as EC)이 현재까지 가장 낮은 작업장 DEE 노출기준이었다.

국내외적으로 주차장에서 BC 및 EC 평가사례는 거의 없기 때문에 본 연구결과를 비교하기는 어렵지만, 외국의 대기환경 연구사례에 의하면 아프리카 케냐 도심지에서의 BC 농도는 1.4 µg/m³, 시골에서 0.7 µg/m³으로 나타났고(Gatari & Boman, 2003), Safai et al.(2007) 연구에 의하면 인도 도심지에서 연간 BC 농도는 평균 4.1 µg/m³이라고 하였다. 국내에서는 광주광역시 시내에 위치한 전남대학교 옥상에서 Aethalometer AE16으로 측정한 자료에 의하면 일평균이 최소 1.0 µg/m³에서 최대 13.5 µg/m³으로 나타났 다(Jung et al., 2011). 이와 비교해 볼 때 본 연구에서 나타난 주차장내 BC 농도의 평균은 19.1 µg/m³으로써 매우 높은 수준임을 알 수 있다. 더불어 최근의 한 연구에 의하면 폐포에 침착된 탄소물질 농도는 공기중으로 노출되는 탄소물질의 평균농도 보다 순

간 고농도($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상) 노출과 관련성이 있기 때문에, 평균농도 관리와 함께 순간 고농도 노출에 대한 관리도 필요하다고 제안하였다(Ackermann-Liebrich, 2012; Nwokoro et al., 2013). 본 연구에서 나타난 지하주차장에서의 BC 농도는 평균 농도로 보더라도 대부분 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하고, 순간농도는 최대 $128 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 매우 높아 적극적인 관리가 필요할 것으로 생각된다. 지상주차장의 BC 농도는 평균 $7.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로써 지하주차장 보다는 낮지만, 차량 이동량이 많은 도심지 대기에서 측정된 BC 농도와 유사하였다. 그 이유는 외기가 유입되는 지상주차장일지라도 천정이 있고 면적이 넓어, 외기와 충분히 희석되기에는 한계가 있는 것으로 생각된다.

NIOSH 5040법에 의한 EC, OC 분석과 Aethalometer로 BC 측정시 DEP에 의한 탄소성분과 기타 탄소성분 간에 구분이 어렵다. 대기중에는 DEP 이외의 탄소물질도 존재하는데, 산업단지, 가정집에서 배출하는 각종 연소물질, 석탄광산 및 석탄공장에서 발생하는 탄분진은 EC, OC 및 BC 농도에 직접적인 영향을 미치고, 금속분진 및 석회석 등의 광물분진은 EC, OC 분석시 방해작용을 일으킬 수 있다. 석탄광산에서 NIOSH 5040법으로 DEP 평가시 탄분진이 포함되면 OC와 EC 농도가 모두 증가되므로(주로 OC), 가능한 탄분진을 제외하고 DEP만 포집되도록 사이클론(cyclone, 50%-cutpoint $4 \mu\text{m}$)에 DPM(Diesel Particulate Matter) Cassettes (impactor, 50%-cutpoint $0.8 \mu\text{m}$)를 부착해 사용하기도 한다(Noll & Birch, 2004; Birch & Noll, 2004).

BC 평가와는 다르게 NIOSH 5040 방법에 따른 EC 평가는 실시간 탄소입자의 농도변화를 알 수는 없지만 OC 농도를 구분해 평가할 수 있으며, 작업장 노출평가에서 노출기준 적용에 부합되는 방법이다. 일반적으로 EC 농도는 BC 농도보다 높게 분석되는 것으로 알려져 있지만(Babich et al., 2000; Borak et al., 2003), 본 연구에서 BC 농도가 더 높게 나타난 이유는 명확히 알 수 없었다. 그러나 Ng et al.(2008)에 의하면 DEP 중 높은 OC 함량은 BC 농도를 다소 높게 평가되게 한다고 하였다. 우리나라 수도권 지역 대기중 OC와 EC 비는 측정지역과 계절에 따라 차이가 있지만, 2.55~3.89로 나타났다(Kim, 2013). DEP 중 OC와 EC 비는 디젤차량은 1 미만이고 가솔린 차량은 1 이상으로 알려져 있다(Casimiro et al., 2011).

그러나 본 연구에서 주차장내 OC와 EC 비는 평균 4.9, 최대 7.3으로 대기와 비교하여 크게 나타났는데, 그 이유는 주차장내에서 OC와 EC 발생원인 차량들은 주행조건 보다는 정차(Idle) 상태의 시간이 길고, 디젤차량 보다 가솔린 차량이 더 많기 때문으로 해석된다. 정차 상태에서는 EC 보다는 주로 OC가 배출되고, 엔진의 회전속도가 증가하는 주행조건에서는 EC 발생량이 증가하여 총탄소중 80%까지 EC라고 알려져 있다(Groves & Cain, 2000).

DEE는 인체 유해성으로 인해 1989년부터 IARC에서 Group 2로 분류되어 있었고, 2012년 6월에서 인체 발암물질인 Group 1으로 분류하였다. 국제적 추세에 따라 우리나라에서도 최근에 출시되는 디젤차량에는 매연저감장치(Diesel Particle Filter, DPF)가 장착되어 출시되고 있고, 이전에 생산된 디젤차량에 대해서도 DPF 설치를 권장하고 있으며, 특히 정기적 배출가스 검사에서 기준을 초과한 차량은 DPF 부착을 의무화하고 있다. 선진외국에서의 디젤엔진의 매연저감기술은 NTDE(New Technology Diesel Exhaust)로 불리는데, DPF 장착과 더불어, 엔진의 전기적 조절, 저황경유적용, 촉매장치 적용 등을 포함한다. 이러한 NTDE는 기존의 디젤엔진(Traditional Diesel Engine, TDE)에 비하여 PAHs등 유해물질 발생을 대폭 감소시키고, EC는 99% 이상 감소시켜(Khlek et al., 2011), 가솔린 엔진 및 가스차량과 동일한 수준의 입자상 물질을 배출하는 것으로 알려져 있다(Cheung et al., 2009; Hesterberg et al., 2011). 현재까지는 NTDE 배출물질은 TDE에 비하여 독성이 낮은 것으로 알려져 있지만(McDonald et al., 2004), 일부 연구에서는 배출입자는 줄었지만 오히려 독성이 증가하였다는 보고도 있어(Su et al., 2008) 더욱 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다. 더불어 아직도 국내의 많은 디젤차량은 NTDE로 분류할 수 없는 TDE 차량이며, 우리나라 대도시의 대기중 DEE 농도는 선진국과 비교하여 높은 수준이다. 특히 지하주차장과 같은 밀폐환경에서는 고농도의 DEE에 노출될 수 있는 환경이다. 2012~2013년 근로복지공단 직업성폐질환연구소 업무상질병 심의위원회에서는 석회석 광산의 덤프트럭 운전사에서의 폐암, 비료 공장 로우더 및 굴삭기 운전사에서의 폐암, 도심지 디젤차량 운전사에서 발생한 방광암 등을 DEE가 주요

원인인 산업재해로 인정한 바 있고, 쓰레기 청소차량 작업자의 폐암, 대형상가 지하주차장 작업자의 폐암, 도로 청소 작업자의 폐암 등에 대한 업무관련성 조사를 진행 중에 있다(OLDI, unpublished data).

국내 백화점, 마트 등의 대형상가는 갈수록 대형화 되는 추세이고, 이들 대형상가의 주차장에는 주차안 내원, 청소원, 카센타 종사자 등 다양한 직종의 근로자가 증가되고 있다. 그러나 국내에서는 DEE 노출실태 및 건강영향에 대한 연구가 매우 부족하였고(Bae & Park, 2012), 최근에서야 일부 연구가 진행되고 있는 초기단계에 있다. 주차장을 비롯한 다양한 환경에서 노출평가 자료를 체계적으로 축적함에 동시에 건강영향에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

V. 결 론

국내 수도권 일부 대형상가 지상 및 지하주차장에서 공기 중 디젤엔진배출 입자상물질 농도를 평가한 결과는 다음과 같다.

1. 블랙카본 농도는 평균 $19.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 가장 농도가 높은 주차장의 블랙카본 농도는 평균 $44.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 순간 최대 농도는 $128 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.
2. 원소탄소 농도는 평균 $12.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 유기탄소와 원소탄소의 비는 평균 4.9이었다.
3. 입자 수농도, 표면적 농도 및 입자크기는 각각 평균 $94,000 \text{ particles}/\text{cm}^3$, $298 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, 57 nm 이었다.
4. 지하주차장의 블랙카본 농도는 평균 $21.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로써 지상주차장 보다 약 3배 높았다.
5. 지하주차장의 블랙카본, 입자 수농도, 입자 표면적 농도는 도심지 대기 중 보다 각각 3배, 3배, 3.5배 높았다.

대형상가 주차장에서는 고농도의 디젤엔진배출물질에 노출될 수 있으므로, 차량은 매연저감장치를 장착하여야 하고, 주차장에서는 적절한 대책을 마련해야 한다. 더불어, 다양한 환경에서 디젤엔진배출물질에 노출될 수 있으므로, 산업별, 직무별 디젤엔진배출물질 노출실태를 파악하고 과거 노출농도 추정, 건강영향에 관한 연구가 필요하다.

References

- A casebook of the work-related disease 2013. Occupational Lung Diseases Institute, Korea Worker's Compensation and Welfare Service. 2013. (unpublished)
- Australian Institute of Occupational Hygienists, Position paper. Diesel particle matter & occupational health issues. AIOH Exposure Standards Committee, July 2013. Available from: URL:http://www.aioh.org.au/downloads/documents/PositionPapers/AIOHPositionPaper_DPM.pdf
- Ackermann-Lieblich U. Alveolar macrophages carbon load: a marker of exposure?. *Eur Respir J* 2012;40: 1065-1066
- Babich P, Davey M, Allen G, Koutrakis P. Method comparisons for particulate nitrate, elemental carbon, and PM_{2.5} mass in seven U.S. cities. *J Air Waste Manag Assoc* 2000;50:1095-1105
- Baw HJ, Park J. A Review on Diesel Engine Exhaust and Lung Cancer Risks. *J Environ Health Sci* 2012;38: 277-290
- Borak J, Sirianni G, Cohen HJ, Chemerynski S, Wheeler R. Comparison of NIOSH 5040 method versus aethalometer to monitor diesel particulate in school buses and at work sites. *Am Ind Hyg Assoc J* 2003;64:260-268
- Birch ME, Cary RA. Elemental carbon-based method for occupational monitoring of particulate diesel exhaust: methodology and exposure issues. *Analyst* 1996;121:1183-1190
- Birch ME, Cary RA. Elemental carbon-based method for monitoring occupational exposures to particulate diesel exhaust. *Aerosol Sci Technol* 1996;25: 221-241
- Birch ME, Noll JD. Submicrometer elemental carbon as a selective measure of diesel particulate matter in coal mines. *J Environ Monit* 2004;6(10):799-806
- Borak J, Bunn WB, Chase GR, Hall TA, Head HJ et al. Comments on the diesel exhaust in miners study *Ann Occup Hyg* 2011;55:339-342
- Casimiro P, Mário C, Roy MH, Teresa N, Fátima M et al. OC/EC ratio observations in Europe: Re-thinking the approach for apportionment between primary and secondary organic carbon. *Atmos Environ* 2011;45: 6121-6132
- Cheung KL, Polidori A, Ntziachristos L, Tzankiozis T, Samaras Z et al. Chemical characteristics and oxidative potential of particulate matter emissions

- from gasoline, diesel, and biodiesel cars. *Environ Sci Technol* 2009;43:6334-6340
- Fierz M, Steigmeier P, Houle C and Burtcher H. Design, Calibration and Field Performance of a Miniature Diffusion Size Classifier, *Aerosol Sci and Technol* 2011;45:1-10
- Gatari M. J., Boman J. Black carbon and total carbon measurements at urban and rural sites in Kenya, East Africa. *Atmos Environ* 2003;37:1149-1154
- Groves J, Cain JR. A survey of exposure to diesel engine exhaust emissions in the workplace. *Ann occup Hyg* 2000;44:435-147
- Hansen ADA, Rosen H, Novakov T. The aethalometer - An instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles. *Sci Total Environ* 1984;36:191-196
- Hesterberg TW, Long CM, Sax SN, Lapin CA, McClellan RO et al. Particulate matter in new technology diesel exhaust (NTDE) is quantitatively and qualitatively very different from that found in traditional diesel exhaust (TDE). *J Air Waste Manage Assoc* 2011;61:894-913
- International Agency for Research on Cancer. 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
- Jung JH, Park SS, Yoon KH, Cho SY, Kim SJ. Inter-comparison of two aethalometers for aerosol black carbon measurements. *J Korean Soc Atmos Environ* 2011;27:201-208
- Khalek LA, Bougher TL, Merritt PM. Regulated and unregulated emissions from highway heavy-duty diesel engines complying with U.S. environmental protection agency 2007 emissions standards. *J Air Waste Manage Assoc* 2011;61:427-442
- Kim KH. Performance of ventilation equipment for various ventilating system in enclosed parking garages. Graduate school of the hanyang university 2002.
- Kim KT, Yang SS, Son BS, Jeon YT, Jang BK et al. Research about room air quality of department store underground parking lot. *Korean J Sanitation* 2006; 21:44-51
- Kim SH. The characterization of ambient PM_{2.5}-bound carbonaceous species and PAHs in Seoul metropolitan area. Graduate school of the university of seoul 2013.
- Kittelson DB. Engines and nanoparticles: a review. *J Aerosol Sci* 1998;29:575-588
- Lucking AJ, Lundback M, Barath SL, Mills NL, Sidhu MK et al. Particle traps prevent adverse vascular and prothrombotic effects of diesel engine exhaust inhalation in men. *Circulation* 2011;123:1721-1728
- Marr LC, Kirchstetter TW, Harley RA. Characterization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Motor Vehicle Fuels and Exhaust Emissions. *Environ Sci Technol* 1999;33:3091-3099
- McDonald JD, Harrod KS, Seagrave J, SeUkop SK, Mauderly JL. Effects of low sulfur fuel and a catalyzed particle trap on the composition and toxicity of diesel emissions. *Environ Health Perspective* 2004;112:1307-1312
- Michael J Gatari, b, Black carbon and total carbon measurements at urban and rural sites in Kenya, East Africa *Atmos Environ* 2003;37:1149-1154
- Miguel AH, Kirchstetter MT, Harley RA. On-road emissions of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon from gasoline and diesel vehicles. *Environ Sci Technol* 1998;32: 450-455
- Ng LP, Ma H, Kittelson D, Miller A. Comparing Measurements of Carbon in Diesel Exhaust Aerosols Using the Aethalometer, NIOSH Method 5040, and SMPS NIOSH 2008. Available from: URL: <http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/cmoci.pdf>
- Noll JD, Birch E. Evaluation of the SKC DPM cassette for monitoring diesel particulate matter in coal mines. *J Environ Monit* 2004;6(12):973-8
- Nwokoro C, Brugha R and Grigg J. Alveolar macrophages carbon load: a marker of exposure?. *Eur Respir J* 2013;41:763-766
- Ono-ogawara M, Smith TJ. Diesel exhaust particles in the work environment and their Analysis. *Ind Health* 2004;42:389-399
- Park JH. The effect of ventilation and concentration of indoor air quality at indoor parking lots. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2010;20:241-247
- Safai PD, Kewat S, Praveen PS, Rao PSP, Momin GA et al. Seasonal variation of black carbon aerosols over a tropical urban city of Pune, India. *Atmos Environ* 2007;2699-2709
- Song HB, Kwon TK, Hong SH, Baek SO. Evaluation of indoor air quality in large underground parking lots in taegu area. *J Korean Soc Occup Environ Eng* 1998;20:1315-1330
- Su DS, Serafino A, Muller JO, Jentofft RE, Schlog IR et al., Cytotoxicity and inflammatory potential of soot particles of low-emission diesel engines. *Environ Sci Technol* 2008;42:1761-1765
- Vermeulen R, Coble JB, yereb D, lubin H, Blair A et al.

The diesel exhaust in miners study: III. interrelations between respirable elemental carbon and gaseous and particulate components of diesel exhaust derived from area sampling in underground non-metal mining facilities. *Ann Occup Hyg* 2010;54:762-773

Zhu Y, Hinds WC, Kim S, Shen S, Sioutas C. Study of ultrafine particles near a major highway with heavy-duty diesel traffic. *Atmos Environ* 2002;36:4323-4335