한국액체미립화학회지 제20권 제1호(2015)
http://dx.doi.org/10.15435/JILASSKR.2015.20.1.28

냉간모드에서의 이륜자동차 VOCs 배출특성연구

이종태*,† · 유흥민* · 손지환* · 윤창완* · 문선희* · 박규태* · 김정수*

A Study on Emission Characteristics of VOCs During Cold Start Test Mode for Motorcycles

Jongtae Lee, Heung-Min Yoo, JiHwan Son, Changwan Yun,
SunHee Mun, Gyu-Tae Park and JeongSoo Kim

Key Words: BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene), EURO III, Motorcycle, Cold start, Exhaust emission

Abstract

Recently, some researchers have been carried out risk assessment of vehicles exhaust on human health. Especially, some of VOCs which is non-controlled, was classified to hazardous pollutant, such as 1,3-Butadiene and BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene). Therefore, the profile on non-controlled pollutant may be needed in the future, because it would be critical data or information to control them. Additionally, with increasing amount of motorcycle, the source profiling is essential for estimating emission factor and amount on motorcycle exhaust. For these, in this study, imported motorcycles (8 vehicles) were selected as a test model while considering the increasing ratio on sales volume between 2013 and 2014; it was also compared with domestic motorcycles on those. The experiment was conducted by driving mode, UDC and ECE+EUDC that made from EURO III. In addition, it was performed at cold start driving mode without effect by displacement, for evaluating only correlation of BTEX with HC. In order to apply the ratio (m,p-Xylene/o-Xylene) as a marker, the ratio was compared with those of tunnel, road side and residential area. As a result, it showed best correlation (R^2=0.98) among those. In the future, it has to be considered as a marker for effect evaluation to atmospheric environment by exhaust emission.

1. 서 론

우리나라는 1980년대부터 자동차 배출가스에 대한 관리를 적용해 온 결과, CO, NOx, HC, PM 등 관리물질을 효과적으로 저감함으로써 대기질 개선에 이바지한 바 있다.

그러나 최근 자동차 배출 오염물질에 의한 건강 영향과 차량통행량이 많은 지역의 대기오염문제 등이 제기되고 있으며, 이는 CO, HC, NO_x와 같은 관리물질 외에 자동차로부터 배출되는 미량물질로부터 기인하는 것으로 보고되고 있다. 이에 세계보건기구(WHO, World Health Organization) 국제암연구센터(IARC, International Agency for Research on Center)는 Benzene, formaldehyde, 1,3-Butadiene 등을 인체 발암성이 있는 그룹으로 분류하여 관리하고 있다[1-4].

한편, 최근 오토오일사업의 일환으로 수행된 “수송부문 유해독성물질 배출량 산출 및 배출통계 시스템 구축 연구”로부터 이동오염원 배출원별 유해독성물질 배출비율 중 이륜차의 1,3-Butadiene 배출량이 약 72%에 이르는 것으로 보고된 바 있다[5]. 그러나, 일부 연구자들에

Recieved: 3 Mar 2015, Recieved in revised form: 17 Mar 2015, Accepted: 18 Mar 2015)
*교통환경연구소
†책임저자, 회원, 국립환경과학원 교통환경연구소
E-mail : leelee@korea.kr
TEL : (032)560-7606 FAX : (032)561-7013

의해 이륜차를 대상으로 한 실험에서 1,3-Butadiene보다는 Benzene을 포함한 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene)가 상대적으로 배출량이 더 큰 것으로 보고되었다[6]. 이로부터 계속해서 판매증가율(2014년 판매량 기준 33.5%)을 보이고 있는 이륜자동차에 대한 미량유해물질의 관리필요성이 대두될 것으로 예상되는 바, 본 연구에서는 이륜차에서의 미량유해물질 배출특성 자료를 확보하고자 VOCs물질들 중 주요 독성물질로 인식되고 있는 BTEX를 중점적으로 분석하였다. 뿐만 아니라, 현재 관리되고 있는 배출물질도 측정하여 주행모드와 엔진배기량에 따라 규제기준에 근거하여 환경성을 평가하였고, 이에 대한 미량유해물질 배출특성을 비교・분석하였다.

또한, 본 연구에서는 상대적으로 연구결과가 많은 국외문헌과 비교하여 면밀한 데이터비교를 도모하고자, 전년대비 보급증감율(2014년 기준)이 최대 130%에 달하는 국외생산 이륜자동차를 대상으로 평가하였다[7].

2. 연구내용 및 방법

2.1 차종선정

본 연구에서 대기환경보전법에 의거하여 배기량 150cc미만, 150cc이상의 차종으로 분류하였으며, 이륜자동차의 라이프 사이클(4년 7개월, 33,821 km)을 고려하여 5년이내의 연식과 약 30,000 km이하의 주행거리를 충족하는 차량으로 선정하였다[8]. 대상차종의 배기량은 각각 150cc 미만(5대)와 150cc 이상(3대)로 구성되어 있으며, 총 8대의 차량에 대해서 실험을 수행하였다. 해당 차량의 제원은 Table 1에 요약・정리하였다.

2.2 주행모드 및 배출가스 분석

선정된 이륜자동차는 대기환경보전법에 의한 인증시험 모드인 EURO III에 따라 150cc 미만의 배기량을 갖는 이륜자동차에 대해서는 UDC Cold mode로 주행하였고, 그 이상의 배기량을 갖는 차량에 대해서는 ECE+EUDC Cold mode로 주행하였다. 실험은 운전보조 장치를 장착한 상태로 차대동력계를 이용하여 시험자동차에 설정된 주행모드에 따라 운전하였고, 배출되는 배기가스는 시료채취 장치(Horiba, CVS-9100S)와 배출가스 분석기(Horiba, Mexa-9300)로 구성되어 있는 시료분석시스템으로부터 분석되었다. 주행모드에 대한 시간에 따른 속력변화와 시료 샘플링 시간을 Fig. 1에 나타내었고, 실험제원은 Table 2에 정리하였다.

운전자는 이륜자동차가 실제 도로상을 모사할 수 있도록 운전보조장치(CRSD-3000)에 의한 주행모드를 수

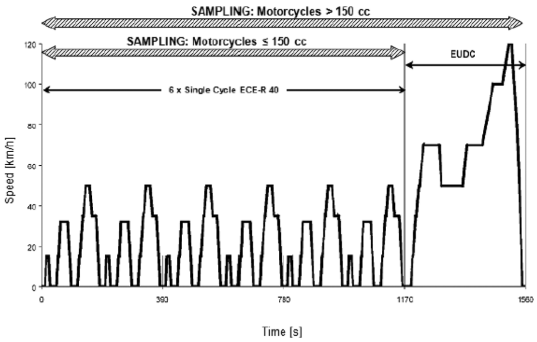

Fig. 1 Specification on UDC and ECE+EUDC

Table 1. Specification of test motorcycles

Motorcycles	Inertia weight (kg)	Displacement (cc)	Cooling Type	model
A (2010)	390	1580	Air	Injection
B (2012)	290	1197	Coolant	
C (2013)	190	124	Coolant	
D (2014)	300	865	Air	
E (2014)	170	125	Air	
F (2015)	190	124	Air	Carburetor
G (2015)	200	149	Air	Carburetor
H (2015)	180	124	Air	Carburetor

Table 2 The information on test mode

Name	Mode	Conditions	Speed (km/hr)	Distance (km)
A	ECE+EUDC	Cold	Exceed 45 km/hr	13.141
B	ECE+EUDC			12.962
C	UDC			6.006
D	ECE+EUDC			13.018
E	UDC			6.115
F	UDC			6.073
G	UDC			6.089
H	UDC			6.066

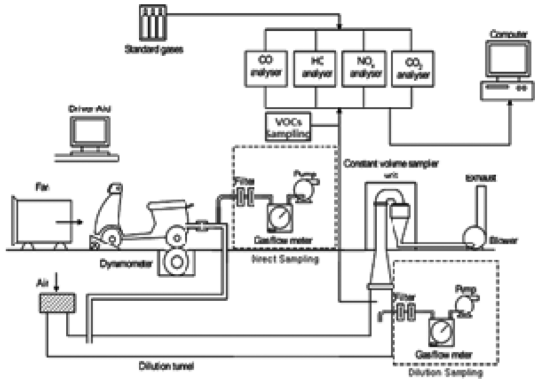

Fig. 2 Schematic diagram on dynamometer process

행하여 정지, 가속, 정속, 감속 등을 반복하고, 이로부터 배출되는 배기가스는 정용량 시료채취장치(CVS, Constant Volume Sampler)로부터 일정량의 공기와 희석된 후 Teddlar bag에 샘플링된다. 이 후, CO/HC/NOx를 분석하여 중량단위(g/km)로 측정하며, 이는 각각 비분산 적외선 분석법(NDIR, Nondipersive Infrared)/불꽃이온화 검출기법(HFID, Heated Flame Ionization Detector)/화학발광법(CLD, Chemiluminescence Detector)으로 분석하였다. Fig. 2에 차대동력계에서의 배출가스 측정 흐름도를 나타내었으며, VOCs 분석을 위한 샘플링 위치를 표현하였다.

배출가스 중 VOCs는 EPA TO-14A방법을 이용하였고, GC오븐의 온도는 크로마토그램의 분해능을 감안하여 최초 35°C에서 8분간 유지한 후, 4°C/min의 승온률로 180°C까지 상승시켜 12분간 유지하였고, 이 후 8°C/

Table 3. Analytical conditions of TD and GC/MSD

Instrument	Analysis Conditions				
TD	Purge	Prepurge Time(ml/min)			3
		Trap Prepurge Time(ml/min)			0.2
	Sample Flow	Sample Flow Rate(ml/min)			50
	Trap Desorb	Trap Low Temp(°C)			-10
		Trap High Temp(°C)			300
		Trap Hold Time(min)			5
		Split Flow(ml/min)			10
GC/MSD	Model	Varian Cp-3800/Saturn 2200			
	Column	DB-1 (60 m × 0.32 mm v 5.00 μm)			
	Conditions	Temp. (°C)	Rate (°C/min)	Hold (min)	Total (min)
	EPA TO-14A	35	0.0	8.00	8.00
		180	4.0	12.00	56.25
		220	8.0	6.00	67.25
	Column Flow	2.2 ml/min			
	MS scan range	35 ~ 350 amu			

min의 속도로 220ºC까지 승온시켜 6분간 유지하였다. VOCs는 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, m,p-Xylene, Stylene, o-Xylene, Xylene)과 1,3-Butadiene을 타겟으로 분석하였다. Table 2에 VOCs분석방법을 요약·정리하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 관리물질 배출특성

배기량에 따라 각각의 주행모드를 통해 배출가스를 측정해본 결과, Table 4과 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 현재 EURO III에서 규제하고 있는 기준치(4 행정기준)에 대해서 전부 부합하는 수치를 나타내었다[9]. 그러나 이 중, 'C'와 'B' 차량의 HC 배출량이 각각 0.2611, 0.2799 g/km로 비교적 높은 수치를 나타내고 있는데 이는 EURO III의 배출허용기준치가 0.3 g/km인 것을 감안하면 배기량에 관계없이 현저히 높게 배출된 것으로 판단할 수 있다. 또한 'C'와 'B'의 차량만이 수냉식의 냉각방식을 적용하고 있어 이륜자동차 냉각방식의 차이에 의한 것으로 해석되며 냉각효율은 좋지만, 상대적으로 열손실량이 증가함에 따라 cylinder wall의 온도가 낮아져 일부 연소가스의 응축과 탄소침적이 유발되는 것으로 판단된다[9]. 그러나 이에 대한 원인을 정확하게 규명하기 위해서는 추가적인 연구와 해석이 뒷받침되어야 할 것으로 사료된다.

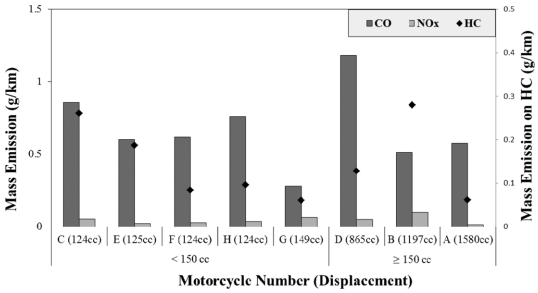

Fig. 3 Exhaust emission on regulated compounds

3.2 BTEX 배출특성

이륜자동차의 BTEX를 측정해본 결과, 국내의선행연구 결과와는 상이한 값을 나타내었고 국외문헌과 유사한 경향을 나타내었다. Table 5는 BTEX와 1,3-Butadiene의 결과 값을 나타낸 것으로 이로부터 1,3-Butadiene이 거의 검출되지 않았음을 알 수 있다. 이는 Antonietta *et al.*(2014)에 의해 주행속도에 따라서 1,3-Butadiene의 배출량이 영향을 받는다는 연구 결과로부터 입증한 바 있으며, 해당 연구결과로부터 1,3-Butadiene은 약 50 km/hr에서부터 검출되는 것으로 확인되었다[6]. 본 연구에서는 주행모드에 따라 제한적이였으나, 최대속도 50

Table 4. Emission Standard in EURO III Unit : g/km

Emission Standard	Displacement	Stroke			Mode
		CO	HC	NOx	
EURO III	< 150cc	2.0	0.8	0.15	UDC Cold
	150cc	2.0	0.3	0.15	ECE-40+EUDC

Table 5 The concentration on VOCs for all motorcycles Unit : mg/km

Motorcycle	1,3-Butadiene	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	m,p-xylene	o-xylene	xylene
A (1580cc)	1.373	5.498	10.029	2.545	7.601	2.495	10.096
B (1197cc)	0	11.394	15.519	4.806	13.395	4.651	18.046
C (124cc)	0	14.165	18.706	6.100	17.377	6.554	23.931
D (865cc)	0	6.530	4.682	0.905	2.772	0.870	3.642
E (125cc)	0	12.212	11.036	4.226	13.002	4.851	17.853
F (124cc)	0	13.178	8.253	1.647	4.876	1.739	6.616
G (149cc)	0	2.726	3.263	0.819	2.539	0.853	3.392
H (124cc)	1.24	3.72	4.37	1.76	3.27	1.54	4.81

km/hr 이상을 넘기지 않았기 때문에 앞서 언급한 바와 같이 국내 선행연구에 대한 연구결과인 이륜자동차에서의 1,3-Butadiene 배출량을 규명하기 위해서는 고속주행 모드에서 측정해볼 필요성이 있다고 사료된다.

한편, Table 5로부터 Toluene이 주로 배출되는 경향을 확인할 수 있으며 최대 18.706 mg/km, 최소 3.263 mg/km의 값을 보였고 이는 승용차나 대형차량에 의한 연구결과와도 유사한 경향으로 일반적인 경향이라고 할 수 있겠다. 그러나 본 연구에서는 일부 이륜자동차에 대해서는 Benzene이 최대 14.165 mg/km, 최소 2.726 mg/km의 수치를 나타냄으로써 Toluene보다 높게 검출된 바 있는데, Chang *et al.*(2008)에 의해 사용연료에 따라 Benzene과 Toluene의 배출량에 변화가 있다는 연구결과[10]에 따라 본 연구에 사용된 국내 연료의 경우도 정유사에 따라 휘발유 내의 벤젠함량이 최대 0.1%까지 차이를 나타내기 때문에 ppb 단위의 미량물질에서는 비교적 크게 그 영향이 나타나는 것으로 판단된다[11].

한편, Lee *et al.*(2011)은 xylene(m,p-Xylene)과 ethylbenzene의 비율이 각각 발생원이 다르더라도 비율이 일정함을 활용하여 차량의 통행이 많은 도시대기(터널, 도로변, 주거지역)를 측정하여 m,p-Xylene과 ethylbenzene의 비 또는 m,p-Xylene과 o-Xylene의 농도비를 산출하여 자동차 배출가스로부터 대기영향평가에 기여하고자 하였다[12]. 본 연구에서는 직접 차량으로부터 샘플링 한 시료를 측정하여 비교·분석하였다. Fig. 4는 Table 5로부터 정리한 결과 값을 바탕으로 Xylene과 ethylbenzene의 상관관계를 나타내었고, Fig. 5는 m,p-Xylene과 o-Xylene의 상관관계를 나타낸 것이다. 선행연구 결과로부터 터널, 도로변 그리고 주거지역에서의 X/E(m,p-Xylene/ethylbenzene) 비는 각각 2.1, 1.7, 1.2로 나타났으며, 이는 xylene의 반응성이 더 크기 때문에 발생원으로부터 멀어질수록 분해가 더 빨리 일어나기 때문인 것으

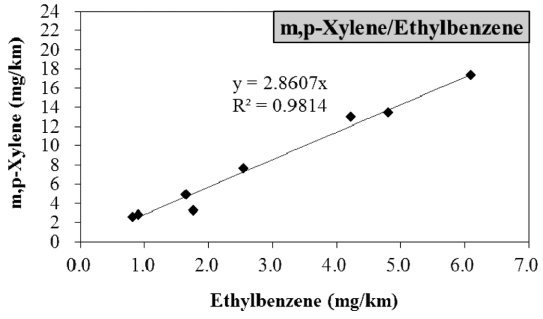

Fig. 4 Correlation between Ethylbenzene and m,p-Xylene

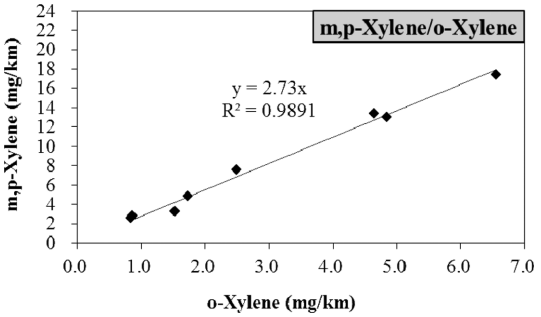

Fig. 5 Correlation between m,p-Xylene and o-Xylene

로 그 원인을 설명하였다. 본 연구에서는 약 2.86의 값이 나왔는데 이는 대기 중이 아닌 이륜자동차에서 배출되는 가스를 직접 샘플링하여 측정하였기 때문에 상대적으로 더 높게 나타났다고 판단된다. 자동차 배출가스에 의한 영향이 가장 큰 터널보다 높게 나온 것으로 미루어 볼 때, 신뢰성이 높다(R^2=0.98)고 판단할 수 있다.

3가지의 Xylene은 위치 이성질체로서 탈알킬화후에도 비율이 일정하게 유지되는 것으로 알려져 있으며, m,p-Xylene과 o-Xylene의 농도비를 활용하여 자동차 배기가스에 의한 대기영향을 평가할 수 있을 것이다. 선행연구로부터 산출된 m,p-Xylene과 o-Xylene의 농도비는 2.7:1의 비율이였으며, 본 연구로부터 산출된 값은 약 2.73(R^2=0.98)으로 이 역시 매우 신뢰성 높은 결과 값이라 할 수 있다. 이 비율을 활용하여 청정지역 또는 자동차 배출가스의 영향이 의심되는 지역의 Xylene 비율을 비교한다면 자동차 배출가스에 의한 대기오염영향의 기여율을 추적할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 대한 결과 값은 Fig. 5에 나타내었다.

3.3 HC와BTEX에 대한 배출특성비교

본 연구에서는 EURO III 규제기준에 따라 각각의 배기량에 따라 EUDC와 UDC의 Cold Start 모드로 주행하였다. Cold Start 모드는 연료의 불완전연소를 유발하기 때문에 상대적으로 Hot Steady-State 모드에 비해서 CO와 HC 배출량에 영향을 미치며 이로 인해 VOCs 배출계수에도 영향을 준다[6]. 따라서, 본 연구의 실험조건으로부터 BTEX 배출량에 대한 배출영향을 예측할 수 있었고 실험결과를 활용하여 HC와 BTEX간의 상관관계를 분석하였다. 분석결과, 배기량에 따른 HC와 BTEX의 배출계수 차이나 상호간에 비례하는 증감경향은 없었으나, 150cc 미만의 배기량을 갖는 이륜자동차들의 경우 HC와 BTEX의 증감에 따라 상호 배출계수간에 비

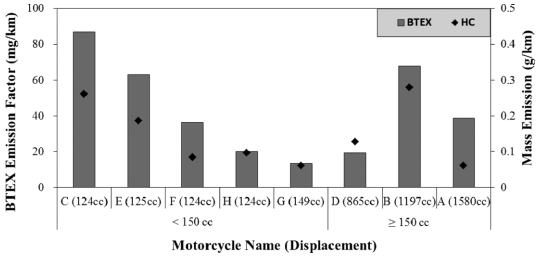

Fig 6. Emission comparison BTEX with HC

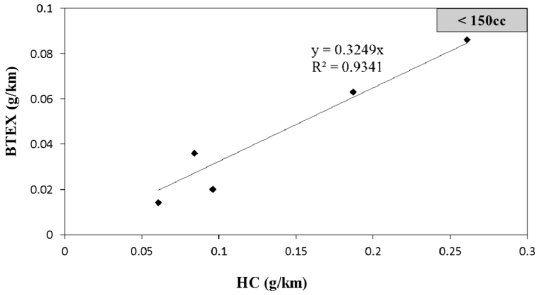

Fig 7. Correlation between BTEX and HC (< 150cc)

례하는 증감률을 보였다. 이에 대한 결과는 Fig. 6에 나타내었으며, Fig. 7에는 150cc 미만의 이륜자동차에 대한 배출계수만을 이용하여 상관관계식을 도출하였다. Fig. 7에서처럼 150cc미만의 이륜자동차에 대한 데이터에서는 비교적 뚜렷한 경향의 선형선을 보여준다 (R^2=0.93). 이는 THC(Total Hydrocarbon)에 대해 약 33%를 BTEX가 차지하고 있음을 의미하며, 향후 BTEX에 대한 규제가 필요할 시 HC의 저감이 선행되어야 효과적으로 제어할 수 있음을 나타낸다. 또한, 이 외에도 자동차의 배출가스에 의해 발생되는 VOCs는 약 90종 이상이 존재한다고 알려져 있으므로 향후 VOCs에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다[13].

한편, Cold Start 모드에서 HC, CO, VOCs가 상대적으로 높게 배출되는데 그 이유는 엔진의 미가열로 인한 저온이 촉매의 비활성화를 이끌기 때문에 산화반응이 충분하게 일어나지 못하는 것으로 해석할 수 있다[6,14]. 그러나 본 연구에서 수행한 150cc이상의 배기량을 갖는 이륜자동차에 대해서는 뚜렷한 선형성이 나타나지 않았다. 그 이유는 주행모드의 차이에서 비롯된 것으로 해석할 수 있는데 150cc 이상의 이륜자동차에 대해서는 고속주행모드가 추가된 'ECE 40 + EUDC'모드로 주행했기 때문이다. 또한, 상대적으로 시험차량의 댓수가 적었고 시험차량의 배기량에 대한 차 중량의 비율편차가 일정하지 않아, 더 신뢰성 높은 비교 데이터를 위해서는

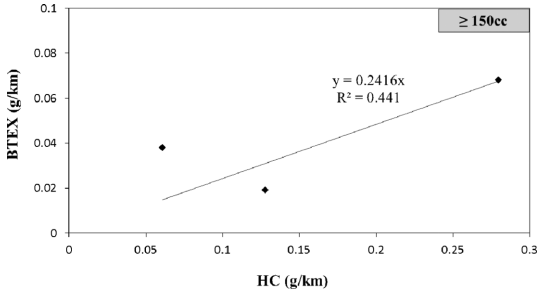

Fig. 8 Correlation between BTEX and HC (≥ 150cc)

향후 동일한 배기량을 갖는 시험차량의 확보량을 증가시켜 추가적인 실험이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 이륜자동차에 대한 규제물질과 BTEX 물질의 배출특성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 규제물질에 대한 배출특성 비교·분석결과, 'B'와 'C'의 차량에서는 HC의 수치가 기준치에 근접한 수준으로 높게 나타났으나, CO, HC, NOx에 대해서 모두 EURO III의 기준치를 부합하는 결과를 나타내었다.

(2) 본 연구의 결과로부터 1,3-Butadiene이 'A'와 'H' 차량에서만 각각 1.37, 1.24 mg/km씩 소량 검출되었고, 'D'와 'E' 그리고 'F'의 차량에서는 Benzene이 Toluene보다 상대적으로 높게 검출되는 수치를 나타내었는데, 이는 사용연료의 '%' 단위의 벤젠함량차이로부터 기인한 것으로 판단된다.

(3) HC와 BTEX의 배출특성을 비교해본 결과, 150cc 이하의 이륜자동차에서는 Cold start 모드에 의한 불완전연소로 HC와 BTEX에 대해 높은 상관관계식을 도출할 수 있었다. 또한, 이로부터 BTEX는 THC의 약 33% 차지하고 있음을 확인할 수 있었다.

(4) 그러나, 150cc이상의 이륜자동차에서는 유사한 경향을 나타내지 않았는데, 이는 비교적 시험차량의 댓수가 적고, 시험차량의 차 중량의 차이로부터 기인한 것으로 판단된다.

(5) 현재까지 VOCs에 대한 규제기준이 없으나 유해물질로 분류되어 있으므로 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료되며, HC와 BTEX에 대한 상관관계는 향후 VOCs 제어기술에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

(6) 또한, Xylene의 이성질체 특성을 활용하여 지역의 Xylene 비율에 대한 데이터베이스를 구축한다면, 향후 자동차 배출가스의 기여도나 코호트 역학조사에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

(1) IARC, Diesel engine exhaust carcinogenic, Press Release N213, 1-4, 2012.

(2) Michael, D. Attfield, Patricia L. Schleiff, Jay H. Lubin, Aaron Blair, Patricia A. Stewart, Roel Vermeulen, Joseph B. Coble, Debra T. Silverman, The Diesel Exhaust in Miners Study: A Cohort Mortality Study With Emphasis on Lung Cancer, J Natl Cancer Inst, 104, 869-883, 2012.

(3) Debra, T. Silverman, Claudine M. Samanic, Jay H. Lubin, Aaron E. Blair, Patricia A. Stewart, Roel Vermeulen, Joseph B. Coble, Nathaniel Rothman, Patricia L. Schleiff, William D. Travis, Regina G. Ziegler, Sholom Wacholder, Michael D. Attfield, The Diesel Exhaust in Miners Study: A Nested Case-Control Study of Lung Cancer and Diesel Exhaust, J Natl Cancer Inst, 104, 1-14, 2012.

(4) EPA, EPA/600/8-90/057F, Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust, 1-669, 2002.

(5) Y. K. Jang, J. Kim, Y. J. Kim, J. W. Kwon, C. H. Heo, B. W. Kim and J. W. Koh, “Development of Calculation System for Transportation Source Air Toxic Emission”, Korean Society for Atmospheric Environment, 52-90, 2014.

(6) M. Antonientta Costagliola, Fabio Murena and M.Vittoria Prati, “Exhaust emissions of volatile orgarnic compounds of powered two-wheelers: Effect of cold start and vehicle speed. Contribution to greenhouse effect and tropospheric ozone formation”, Science of the Total Environment, Vol. 468-469, 1043-1049, 2014.

(7) 국토교통부, “자동차등록현황보고 이륜차신고현황(연도별)”, 2014.

(8) Y. D. Jung, U. S. Yeo, Y. J. Lim, I. H. Ryu and Y. A. Yun, “Research on the Feasibility Study of 2-Wheeled Vehicle Emission Inspection”, The Korean Society of Automotive Engineers, 860-865, 2010.

(9) Xavier Tauzia, Alain Maiboom and Samiur Rahman Shah, “Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine”, Energy 35, 3628-3639, 2010.

(10) C.-T. Chang and B.-Y. Chen, “Toxicity assessment of volatile organic compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in motorcycle exhaust”, Journal of Hazadous Materials 153, 1262-1269, 2008.

(11) Ricardo R. Bonfim, Maria I. R. Alves and Nelson R. Antoniosi Filho, “Fast-HRGC method for quantitative determination of benzene in gasoline”, Fuel 99, 165-169, 2012.

(12) J. S. Lee, Y. R. Choi, H. S. Kim, S. M. Eo and M. Y. Kim, “Characteristics of Hazardous Volatile Orgarnic Compounds (HVOCs) at Roadside, Tunnel and Residential Area in Seoul, Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment Vol. 27 No. 5, 558-568, 2011.

(13) Ying Liu, Min Shao, Linlin Fu, Sihua Lu, Limin Zeng and Dagang Tang, “Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: Part I”, Atmospheric Environment, 42, 6247-6260, 2008.

(14) Christian J. Saxer, Anna-Maria Forss, Claudio Rudy and Norbert V. Heeb, “Benzene, toluene and C2-benzene emissions of 4-stroke motorbikes: Benefits and risks of the current TWC technology”, Atmospheric Environment 40, 6053-6065, 2006.