

자동차에서 배출되는 가스상 유해대기오염물질 (HAPs) 배출량 추정

Estimation of Gaseous Hazardous Air Pollutants Emission from Vehicles

김 정 · 장영기* · 최상진¹⁾ · 김정수²⁾ · 서충열²⁾ · 손지환²⁾
수원대학교 환경에너지공학과, ¹⁾(주)케이에프이앤이, ²⁾국립환경과학원
(2012년 8월 23일 접수, 2012년 11월 29일 수정, 2013년 1월 31일 채택)

Jeong Kim, Young-Kee Jang*, Sang-Jin Choi¹⁾, Jeong-Soo Kim²⁾,
Choong-Yeol Seo²⁾ and Ji-Hwan Son²⁾
Department of Environmental & Energy Engineering, Suwon University,
¹⁾KF E&E, ²⁾National Institute of Environmental Research
(Received 23 August 2012, revised 29 November 2012, accepted 31 January 2013)

Abstract

Hazardous Air Pollutants (HAPs) are difficult to measure, analyze and assess for risk because of low ambient concentrations and varieties. Types of HAPs are Volatile organic compounds (VOCs), Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) and Aldehydes. HAP emissions from vehicles are a contributor to serious adverse health effects in urban areas. In this study, hazardous air pollutant emissions from road transport vehicles by Non-methane volatile organic compounds (NMVOC) weight fraction and PAHs emission factors are estimated in 2008.

The top-five-most hazardous air pollutant emissions were estimated to toluene 864.3 ton/yr, acrolein 690.6 ton/yr, acetaldehyde 554.5 ton/yr, formaldehyde 498.7 ton/yr, propionaldehyde 421.6 ton/yr in 2008.

The results for a cancer and non-cancer risk assessment of HAPs emissions show that the major cancer driver is formaldehyde and the non-cancer driver is acrolein.

Key words : Hazardous air pollutants, Emission, Vehicle, Cancer risk, Non-cancer risk

1. 서 론

2011년의 전국자동차 등록대수는 약 1,800만 대로 이중 약 820만대가 수도권(서울, 인천, 경기)에 집중

되어 있고, 그 외 광역시를 포함하면 약 1,200만대가 대도시에서 집중되어 있어, 도심지역의 교통체증 뿐만 아니라, 광화학스모그나 발암물질과 같은 인체건강 위해성 문제를 가중시키고 있다(Cho, 2002).

이러한 도시지역의 건강 영향을 우려하여 대기오염이 심각한 수도권 지역의 대기오염원을 체계적으로 관리함으로써 지역주민의 건강을 보호하고 쾌적

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-220-2147, E-mail : musim@suwon.ac.kr

한 생활환경을 조성함을 목적으로 수도권 대기환경 관리 기본계획을 수립하여 시행하고 있다. 이 정책은 자동차에 의한 대기오염 저감을 위하여 저공해 자동차 보급, 대기오염물질 저감장치 부착, LPG 엔진 개조 등 저감대책을 주요 대책으로 추진하고 있다.

자동차에서 배출되는 유해대기오염물질은 가스상 물질과 입자상 물질로 구분되어진다. 가스상 물질에는 Benzene, Toluene과 같은 방향족 탄화수소와 그 유도체로 이루어진 휘발성 유기화합물(VOCs)과 독특한 냄새가 나는 알데히드류(Aldehyde)가 있으며, 입자상물질(PM, Particulate matter)은 용해성 화합물과 비용해성 화합물로 구분되어진다. 용해성 유기화합물에는 인체에 심각한 악 영향을 미치는 다수의 발암성 물질 벤조(a)피렌, 크실렌 등 다환방향족 탄화수소가(PAHs) 포함되어 있으며, 비용해성 물질에는 금속 등 무기물이 포함되어 있다(National Institute of Environmental Research, 2006).

Cha *et al.* (2007)은 자동차 연식에 따른 차종별, 연료별 Benzene 배출량 결과에 따르면 2004년도 기준으로 승용차의 벤젠 배출량은 1,293 ton/yr, 영업용 택시는 162 ton/yr, 승합차는 115.7 ton/yr로 산출되어 자동차(도로 이동오염원)에 의한 벤젠 배출량은 1,615 ton/yr로 추정된 바 있다. 국내 도로이동오염원의 유해대기오염물질 배출량 산정에 관한 연구는 계속 진행되고 있으나 아직 일부 유해대기오염물질에 국한되어 있으며, 배출계수 또한 일부 차종을 대상으로 개발되었다.

현재 국내 대기오염물질 배출량 산출 시스템은 CAPSS (Clean Air Policy Support System)가 구축되어 있어 매년 대기오염물질 배출량을 산출하고 있으며, 온실가스에 대한 배출량 산출 시스템은 GHG-CAPSS (Green House Gas-Clean Air Policy Support System)가 구축되어 있다. 그러나 유해대기오염물질에 대한 체계적인 국가배출량 산출 시스템은 현재 국내에 없는 상태이다. National Institute of Environmental Research의 기존 연구(2004, 2005, 2006)에서는 휘발유, 디젤, LPG 자동차를 대상으로 하여 VOCs 7개 물질, PAHs 7개 물질, Aldehydes 2개 물질, 중금속 4개 물질에 대하여 배출계수를 개발하였다.

미국 EPA의 2005년 국가 대기오염 배출자료를 살펴보면 42개 주요배출원 중 자동차 부문에서 디젤 자동차의 경우 41개, 휘발유 자동차의 경우 40개 유해

대기오염물질 항목에 대해 배출량을 산출하고 있다. 미국의 경우 디젤 자동차의 경우 Formaldehyde의 연간 배출량이 16,310 ton/yr로 가장 많이 배출되며, Acetaldehyde, Benzene, Propionaldehyde 순으로 배출이 많은 것으로 나타났다. 휘발유 자동차는 Toluene의 연간 배출량이 341,699 ton/yr로 가장 많이 배출되며, m-Xylene, Benzene, 2,2,4-Trimethylpentane 순으로 배출이 많은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 이륜차를 제외한 도로이동오염원의 2008년 차종별, 연료별 주행거리를 이용하여 가스상으로 배출되는 유해대기오염물질의 물질별 배출량을 산출하고 유해대기오염물질 배출의 국내 특성을 분석하고자 하였다.

2. 연구 및 방법

2.1 연구 범위

본 연구에서는 이륜차를 제외한 도로이동오염원(승용차, 택시, 승합차, 버스, 화물차, 특수차, RV)을 대상으로 하여 2008년 CAPSS의 VOC 배출량과, 차종별, 연료별 등록대수 및 주행거리를 적용하여 유해대기오염물질 배출량을 산출하였다.

유해대기오염물질의 선정은 EU의 Corinair Emission Inventory Guidebook의 Alkanes, Alkenes, Aldehydes, Aromatic 계열의 61개 물질(표 2)과, PAHs와 POPs (Persistent Organic Pollutants)의 26개(표 4)를 대상으로 하였다.

2.2 연구 방법

자동차의 유해대기오염물질 배출량 산출은 차종별 배출계수와 주행거리, VOC 배출량 중 NMVOC 질량분율(%)을 적용하여 산출한다. 배출량 산출을 위한 차종별, 연료별, 지역별 주행거리는 2008년 CAPSS의 등록대수와 주행거리를 적용하여 산출하였으며, NMVOC 질량 분율을 적용한 배출량은 2008년의 도로이동오염원의 VOC 배출량을 적용하여 산출하였다.

유해대기오염물질 배출계수의 적용은 Alkanes, Alkenes, Aldehydes, Aromatic 계열의 61개 물질에 대해서는 2008년 도로이동오염원의 VOC 배출량과 국립환경과학원 교통환경연구소에서 개발한 11개 물질

의 배출계수, EEA (2007)의 Gasoline 4 stroke, Diesel PC & LDV, HDV, LPG로 구분한 VOC 중 질량 분율 (wt %)을 적용하여 산출하였다. PAHs와 POPs 26개 물질의 배출량은 Corinair Emission Inventory Guidebook의 차종별, 연료별로 구분한 주행거리당 배출량 (µg/km) 형식으로 제안된 배출계수를 적용하여 산출하였다.

유해대기오염물질의 위해도를 고려한 배출량 평가는 유해대기오염물질의 노출에 따른 발암성 물질과 비발암성 물질에 대한 위해성 평가 지수를 적용하였다. 발암 위해도는 단위 위해 농도치 (URE, Unit Risk Estimate)를 적용하여 비교하며, 비발암성 물질에 대한 위해도 평가는 참조 농도치 (RFC, Reference Concentration)를 적용하여 비교하였다.

3. 자동차 유해대기오염물질 배출량 산출 결과

3.1 Alkanes, Alkenes, Alkines, Aldehydes, Aromatic, Cycloalkanes, Ketones 배출량 산출결과

국내에서 개발된 유해대기오염물질 배출계수와 2008년의 차종별, 연료별로 구분한 주행거리를 적용하여 배출량을 산출한 결과 표 1과 같이 Toluene의 배출량이 864.3 ton/yr로 가장 많이 배출되는 것으로 나타났으며, Acetaldehyde, Formaldehyde, Ethylbenzene, Benzene 순으로 배출량이 많은 것으로 나타났다.

EU에서 개발된 유해대기오염물질의 NMVOC 질량분율 (wt%)과 도로이동부문의 VOC 배출량을 적용하여 유해대기오염물질 배출량을 산출한 결과 표 2

Table 1. HAPs emissions by emission factors developed in Korea (2008).

Hazardous air pollutants	Emission (ton/yr)
1,3-Butadiene	122
Benzene	318
Toluene	864
Ethylbenzene	344
m,p-Xylene	206
Styrene	9
o-Xylene	132
Formaldehyde	499
Acetaldehyde	555

Table 2. Hazardous air pollutant emissions from vehicles.

Hazardous air pollutants	Emission (ton/yr)	
ALDEHYDES	Acetaldehyde	1,741
	Acrolein	691
	Benzaldehyde	430
	Butyraldehyde	260
	Crotonaldehyde	408
	Formaldehyde	3,252
	Hexanal	305
	Isobutanaldehyde	247
	i-valeraldehyde	26
	Methacrolein	251
	m-tolualdehyde	197
	o-tolualdehyde	210
	Propionaldehyde	422
	p-tolualdehyde	46
Valeraldehyde	112	
ALKANES	2-methylheptane	294
	2-methylhexane	791
	3-methylheptane	298
	3-methylhexane	573
	Alkanes C _{>13}	7,393
	Alkanes C10-C12	866
	Butane	3,016
	Decane	522
	Ethane	1,481
	Heptane	394
	Hexane	675
	Isobutane	1,052
	Isopentane	2,949
Nonane	107	
Octane	239	
Pentane	934	
Propane	2,813	
ALKINES	1,3-butadiene	1,133
	1-butene	306
	1-hexene	71
	1-pentene	46
	2-butene	653
	2-pentene	143
	Dimethylhexene	63
	Ethylene	5,433
	Isobutene	1,390
	Propadiene	21
	Propylene	2,352
	1-butene	88
	Acetylene	1,600
Propine	34	
AROMATIC	1,2,3 trimethylbenzen	440
	1,2,4 trimethylbenzen	1,990
	1,3,5 trimethylbenzen	711
	Benzene	2,516
	C _{>13}	6,495
	C10	1,287
	C9	2,067

Table 2. Continued.

	Hazardous air pollutants	Emission (ton/yr)
AROMATICS	Ethylbenzene	822
	m,p-xylene	2,554
	o-xylene	1,060
	Styrene	563
	Toluene	4,707
CYCLOALKANES	All	763
KETONES	Acetone	470
	Methylethylketone	92

Table 3. Comparison of Hazardous air pollutant emissions.

Pollutants	Korea (ton/yr)	EU (ton/yr)
1,3-Butadien	122	1,133
Benzene	318	2,516
Toluene	864	4,707
Ethylbenzene	344	822
m,p-Xylene	206	2,554
Styrene	9	563
o-Xylene	132	1,060
Formaldehyde	499	3,252
Acetaldehyde	555	1,741

와 같이 Aldehyde 계열에서는 Formaldehyde의 배출량이 3,252 ton/yr로 가장 많이 배출되는 것으로 산출되었으며, Alkanes 계열에서는 Alkanes C_{>13}이 7,393 ton/yr, Alkenes 계열에서는 Ethylene이 5,433 ton/yr, Aromatic 계열에서는 Toluene이 4,707 ton/yr로 배출량이 가장 많게 산출되었다.

국내에서 개발된 유해대기오염물질 7개 물질의 배출계수를 적용한 배출량과 EU의 NMVOC 질량 분율을 적용하여 산출한 배출량을 비교하면 표 3과 같이 1,3-Butadien, Acetaldehyde, Benzene, Ethylbenzene, Formaldehyde, m,p-Xylene, o-Xylene, Styrene, Toluene 모두 EU의 NMVOC 질량 분율을 적용한 배출량이 더 많게 산출되었다.

3. 2 PAHs 배출량 산출 결과

Corinair Emission Inventory Guidebook의 PAHs 배출계수를 적용한 배출량은 Naphthalene이 122 ton/yr로 가장 많은 배출량을 나타내었다. Diesel PC & LDV의 배출계수 적용에 있어 배출계수가 직접분사와 간접분사로 구분되어져 있으며 배출량 산출을 위

Table 4. PAHs emissions from vehicles.

PAHs, POPs	Emission (ton/yr)
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	0.308
Benzo(k)fluoranthene	0.475
Benzo(b)fluoranthene	0.502
Benzo(ghi)perylene	0.611
Fluoranthene	4.413
Benzo(a)pyrene	0.313
Pyrene	4.683
Perylene	0.054
Anthanthrene	0.016
Benzo(b)fluorene	0.875
Benzo(e)pyrene	0.856
Triphenylene	0.553
Benzo(j)fluoranthene	0.440
Dibenzo(a,j)anthracene	0.016
Dibenzo(a,l)pyrene	0.012
3,6-dimethyl-phenanthrene	0.128
Benzo(a)anthracene	0.361
Acenaphthylene	2.287
Acenaphthene	3.058
Fluorene	1.285
Chrysene	1.239
Phenanthrene	3.877
Naphthalene	121.899
Anthracene	0.497
Coronene	0.014
Dibenzo(ah)anthracene	0.063

하여 간접분사에 대한 배출계수를 적용하였다.

배출량 산출 결과 naphthalene 121.9 ton/yr, pyrene 4.7 ton/yr, fluoranthene 4.4 ton/yr, phenanthrene 3.9 ton/yr, acenaphthene 3.1 ton/yr 순으로 배출이 많은 것으로 나타났으며, 26개 물질에 대하여 배출량을 표 4와 같이 산출하였다.

4. 자동차 유해대기오염물질 배출량 검토

4. 1 유해대기오염물질 배출량 산출 결과

자동차 유해대기오염물질의 배출량에 따른 우선순위는 미국의 디젤자동차와 휘발유자동차에서 배출되는 33개 유해대기오염물질을 고려하여 35개 물질에 대한 배출량에 따른 우선순위를 분석하였다. 배출량에 따른 우선순위 분석 결과 Toluene의 배출량이 864.3 ton/yr로 가장 많이 배출되는 것으로 나타났으며, 그 뒤를 이어 Acrolein, Acetaldehyde, Formaldehyde, Propionaldehyde 순으로 나타났다.

Table 5. Comparison of Korea and USA HAPs emission from on-road mobile sources.

Rank	Korea (2008)		Rank	USA (2005)	
	Hazardous air pollutant	Emission (ton/yr)		Hazardous air pollutant	Emission (ton/yr)
1	Toluene	864.3	1	Toluene	342,559
2	Acrolein	690.6	2	m-Xylene	145,040
3	Acetaldehyde	554.5	3	Benzene	142,871
4	Formaldehyde	498.7	4	2,2,4-Trimethylpentane	133,238
5	propionaldehyde	421.6	5	o-Xylene	53,691
6	Ethylbenzene	344.0	6	Formaldehyde	53,122
7	Benzene	318.2	7	Ethyl Benzene	52,849
8	m,p-Xylene	205.8	8	Hexane	49,583
9	o-Xylene	132.4	9	Acetaldehyde	23,769
10	1,3-Butadien	122.2	10	Methyl Tert-Butyl Ether	19,821
11	Naphthalene	121.9	11	1,3-Butadiene	17,068
12	Styrene	9.2	12	Styrene	9,709
13	Pyrene	4.7	13	Propionaldehyde	3,095
14	Fluoranthene	4.4	14	Naphthalene	2,938
15	Phenanthrene	3.9	15	Acrolein	2,511
16	Acenaphthene	3.1	16	p-Xylene	1,306
17	Acenaphthylene	2.3	17	Acenaphthylene	154
18	Fluorene	1.3	18	Phenanthrene	110
19	Chrysene	1.2	19	Fluorene	97
20	Benzo(b)fluorene	0.9	20	Fluoranthene	40
21	Benzo(e)pyrene	0.9	21	Pyrene	38
22	Benzo(ghi)perylene	0.6	22	Acenaphthene	29
23	Triphenylene	0.6	23	Anthracene	29
24	Benzo(b)fluoranthene	0.5	24	Benz[a]Anthracene	7
25	Anthracene	0.5	25	Benzo[g,h,i,]Perylene	6
26	Benzo(k)fluoranthene	0.5	26	Benzo[a]Pyrene	4
27	Benzo(j)fluoranthene	0.4	27	Benzo[b]Fluoranthene	3
28	Benzo(a)anthracene	0.4	28	Benzo[k]Fluoranthene	3
29	Benzo(a)pyrene	0.3	29	Chrysene	3
30	Indeno (1,2,3-cd)pyrene	0.3	30	Indeno[1,2,3-c,d]Pyrene	2

미국의 2005년 NEI의 도로이동오염원 부문의 디젤 자동차 배출량과 휘발유 자동차 배출량의 비율을 이용하여 NO_x, CO의 배출량을 비교하여 보면 NO_x는 0.81, CO는 0.02로 휘발유 자동차에 의한 배출이 더 많은 것으로 나타났다. 그러나 국내 도로이동오염원의 디젤과 휘발유 자동차의 배출량의 비율은 NO_x의 경우 8.06, CO의 경우 0.39로 디젤 사용에 의한 배출이 훨씬 더 많아 미국 배출 특성과는 다른 것으로 나타났다. 이러한 배출 특성을 고려하여 미국의 2005년 도로부문 유해대기오염물질 배출량과 비교하면 표 5와 같이 미국의 경우 휘발유 사용에 의해 배출되는 유해대기오염물질의 배출 순위가 높게 나타났으나, 한국의 2008년 도로부문 배출량은 디젤 사용에 의해 배출되는 유해대기오염물질의 배출 순위가 높게 나타났다. 그러나 배출량 순위 10위 안의 물질

은 Toluene, Acetaldehyde, Formaldehyde, Ethylbenzene, Benzene, m,p-Xylene, o-Xylene의 7개 물질이 공통으로 포함되어 유사한 경향을 보이고 있었다.

4.2 위해도 가중치를 고려한 배출량 평가

위해도 가중치를 고려한 배출량 평가는 US EPA (2011)의 유해대기오염물질 노출에 따른 발암성 물질과 비발암성 물질에 대한 위해성 평가 지수를 이용하였다. 미국의 국가 위해성 평가(NATA)에서는 발암성 물질에 대한 발암 위해도 평가는 대기 중 농도에 단위 위해 농도치(URE, Unit Risk Estimate)를 적용하여 산출하며, 비발암성 물질에 대한 위해도 평가는 대기 중 농도에 참조 농도치(RfC, Reference Concentration)를 적용하여 산출하고 있다.

US EPA (2005) 보고서에 의하면 발암 위해도와 비

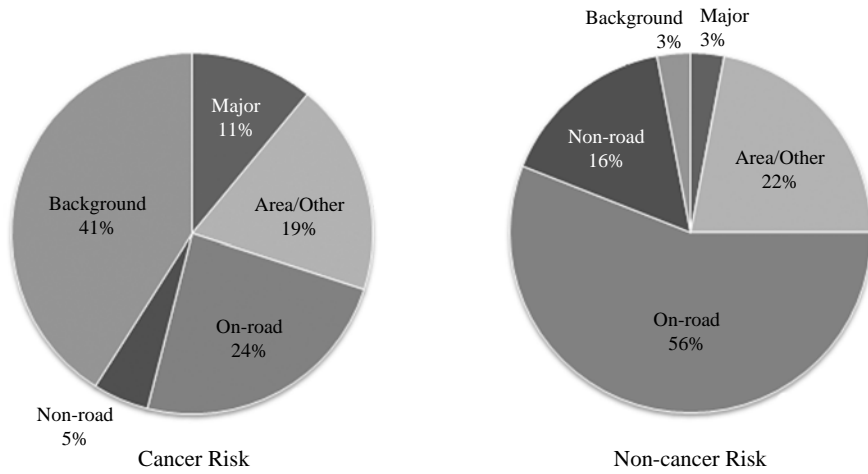


Fig. 1. Contributors of Cancer risk and Non-cancer risk by source sectors (US EPA, 2005).

Table 6. Cancer risk estimated by HAPs from vehicle.

Rank	Hazardous air pollutant	Relative Culpability of Risk Estimate (%)
1	Formaldehyde	29.7
2	Napthalene	19.0
3	1,3-butadiene	16.8
4	Benzene	11.4
5	Acetaldehyde	5.6
6	Ethylbenzene	3.9
7	Benzo(a)pyrene	2.3
8	Pyrene	1.9
9	Fluoranthene	1.8
10	Phenanthrene	1.6
11	Acenaphthene	1.2
12	Acenaphthylene	0.9
13	Dibenzo(a,i)pyrene	0.8
14	Fluorene	0.5
15	Dibenzo(a,h)anthracene	0.5
16	Benzo(k)fluoranthene	0.3
17	Benzo(e)pyrene	0.3
18	Benzo(j)fluoranthene	0.3
19	Benzo(a)anthracene	0.3
20	Indeno(1,2,3cd)pyrene	0.2
21	Benzo(b)fluoranthene	0.2
22	Anthracene	0.2
23	Chrysene	0.1

Table 7. Non-cancer risk estimated by HAPs from vehicle.

Rank	Hazardous air pollutant	Relative Culpability of Hazard Quotient (%)
1	Acrolein	99.2
2	Acetaldehyde	0.2
3	1,3-butadiene	0.2
4	Propionaldehyde	0.2
5	Formaldehyde	0.1
6	Napthalene	0.1

Table 8. HAPs emissions by vehicle type. (Unit: ton/yr)

Vehicle type	Formaldehyde	Napthalene	1,3-Butadien	Acrolein
Passenger Car	18.9	60.5	15.2	66.8
Van	8.9	4.6	7.2	44.2
Taxi	2.2	0.7	0.1	15.2
Bus	73.4	0.4	1.7	94.2
Truck	322.4	24.6	45.8	375.2
Special Car	6.6	0.4	0.1	12.3
RV	66.3	30.7	52.0	82.7
Total	498.7	121.9	122.2	690.6

발암 위험도의 배출원별 기여도는 도로이동 부문에서 발암성의 경우 24%를 차지하고 있으며 비발암성의 경우 56%를 차지하는 것으로 나타났다. 유해대기 오염물질별 대기오염 위해성 평가결과를 살펴보면

발암성과 비발암성 위험도에 가장 크게 기여하는 유해대기오염물질은 발암성의 경우 Benzene, 비발암성의 경우는 Acrolein으로 보고하고 있다.

국내의 연구결과에서는 대기 중 HAP 농도 자료가 부족하여 단위 위해 농도치 (URE)와 참조 농도치 (RfC)를 적용하여 위험도를 고려한 상대적 배출기여

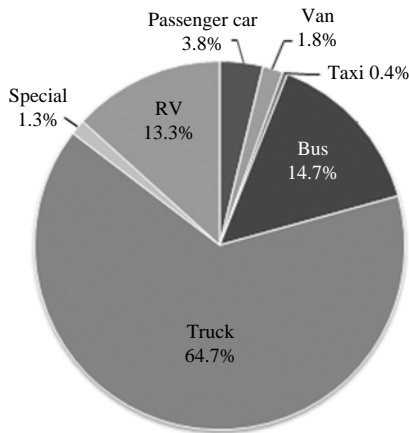


Fig. 2. Emission contribution of formaldehyde by vehicle types.

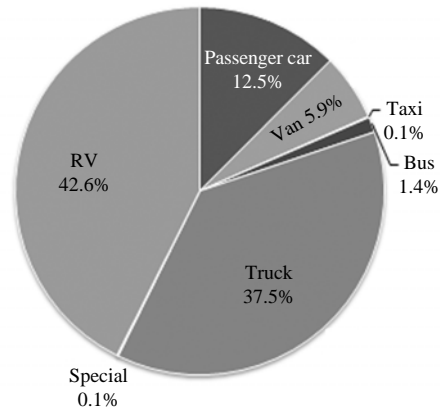


Fig. 4. Emission contribution of 1,3-Butadien by vehicle types.

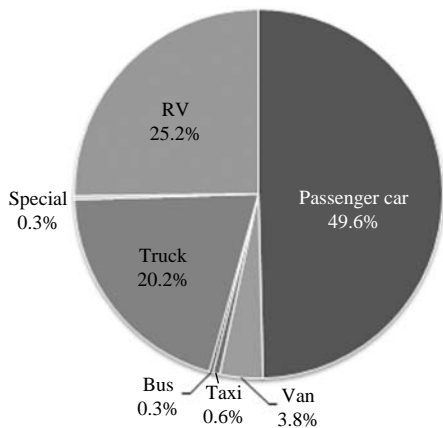


Fig. 3. Emission contribution of Naphthalene by vehicle types.

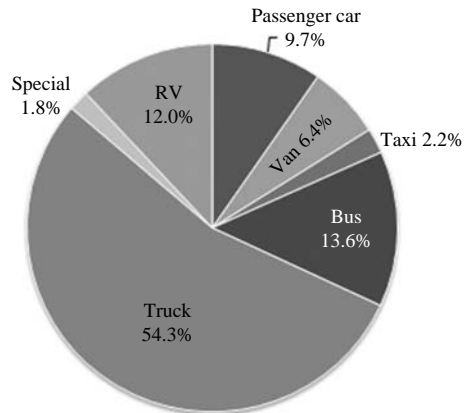


Fig. 5. Emission contribution of Acrolein by vehicle types.

도만을 평가하였다.

발암성 물질의 위해도 평가 결과 표 6과 같이 Formaldehyde의 상대적 배출기여도가 24개 HAP 중 29.7%로 가장 높은 위해도를 나타내었으며, 그 뒤를 이어 Benzene, Formaldehyde, 1,3-Butadiene 순으로 나타났다. 비발암성 물질은 표 7과 같이 Acrolein이 12개 물질 중 99.2%로 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 발암성 물질의 위해도는 5개 물질 Formaldehyde, Naphthalene, 1,3-Butadien, Benzene, Acetaldehyde가 전체 발암 위해도의 약 83%를 차지하며, 비발암성 물질은 Acrolein이 절대적 위해도를 차지하

는 것으로 나타났다.

4.3 차종별, 연료별 HAP 배출 특성

차종별 배출량과 상대적 발암 위해도와 비발암 위해도 순위를 고려하여 발암 위해도가 크게 나타난 상위 3개 물질 Formaldehyde, Naphthalene, 1,3-Butadien과 비발암위해도가 가장 크게 나타난 Acrolein의 유해대기오염물질 배출기여도를 차종별로 비교하면, 표 8, 그림 2~5와 같이 상대적 발암 위해도가 가장 큰 Formaldehyde의 경우 화물차에서 322 ton/yr로 64.7%의 배출기여도를 나타내었으며, 버스 14.7%, RV 13.3% 순으로 배출기여도가 높은 것으로 나타났다.

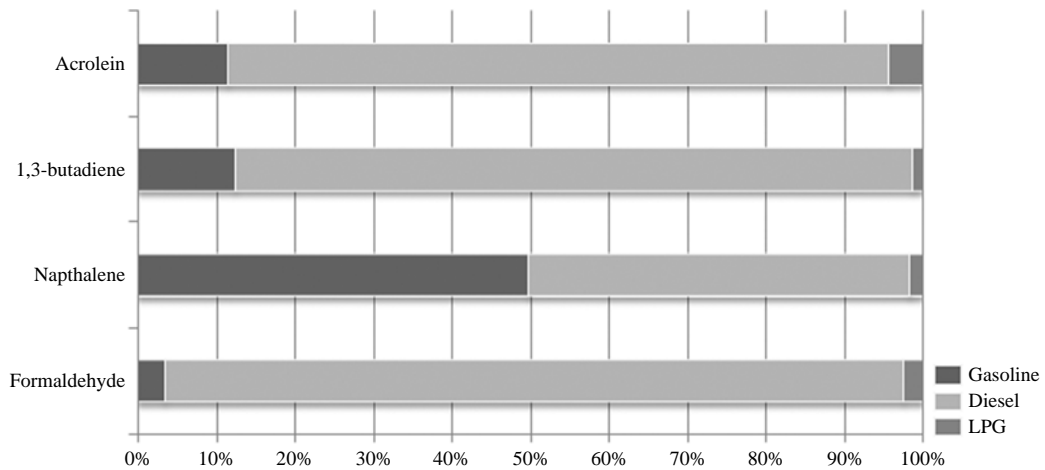


Fig. 6. Emission contribution of HAPs by fuel types.

Naphthalene의 배출기여도는 승용차에서 60 ton/yr로 49.6%의 가장 높은 배출기여도를 나타내었으며, RV 25.2%, 화물차 20.2% 순으로 배출기여도가 높은 것으로 나타났다. 1,3-Butadien은 RV가 52 ton/yr로 42.6%의 가장 높은 배출 기여도를 나타내었으며, 화물차 37.5%, 승용차 12.5% 순으로 나타났다. 상대적 비발암 위해도가 가장 큰 Acrolein의 경우 화물차에서 375 ton/yr로 54.3%의 배출기여도를 나타내었으며, 버스 13.6%, RV 12.0% 순으로 배출기여도가 높은 것으로 나타났다.

Formaldehyde, Naphthalene, 1,3-Butadien, Acrolein의 자동차 연료별 유해대기오염물질 배출기여도를 그림 6과 같이 비교하여 보면, 상대적 발암 위해도가 가장 큰 Formaldehyde의 경우 휘발유, 디젤, LPG 중 디젤에서 94.2%로 가장 높은 배출기여도를 나타내었다. 1,3-Butadien과 Acrolein도 디젤에서 각각 86.4%, 84.2%의 배출기여도를 나타내었으며, Naphthalene은 휘발유에서 49.8%의 배출기여도를 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 이륜차를 제외한 도로이동오염원의 2008년 차종별, 연료별 주행거리를 이용하여 가스상으로 배출되는 유해대기오염물질의 배출량을 산출하고 유해대기오염물질의 차종별 연료별 배출 특성을

분석하였다.

- (1) 자동차 유해대기오염물질 배출량 산출을 위하여 국내 배출계수, Corinair Emission Inventory Guidebook의 NMVOC 질량분율(wt%)과 PAHs 배출계수를 적용하여 83개 물질의 배출계수를 적용하여 배출량을 산출하였다.
- (2) 자동차 유해대기오염물질 배출량 산출 결과 상위 5개 물질과 배출량은 Toluene 864.3 ton/yr, Acrolein 690.6 ton/yr, Acetaldehyde 554.5 ton/yr, Formaldehyde 498.7 ton/yr, Propionaldehyde 421.6 ton/yr로 산출되었다.
- (3) 미국 EPA의 위해도 지수(URE, RfC)를 이용하여 가스상 유해대기오염물질 배출량의 상대적인 발암성과 비발암성 위해도 기여도를 평가한 결과 발암성 위해도는 5개 오염물질 (Formaldehyde, Naphthalene, 1,3-Butadien, Benzene, Acetaldehyde)이 약 83%를 기여하며, 비발암성 위해도는 Acrolein이 대부분을 기여하는 것으로 추정되었다.
- (4) 배출량과 상대적 발암 위해도와 비발암 위해도 순위를 고려하여 Formaldehyde, Naphthalene, 1,3-Butadien, Acrolein의 유해대기오염물질 배출기여도를 차종별로 비교하면, 상대적 발암 위해도가 가장 큰 Formaldehyde의 경우 화물차에서 64.7%, Naphthalene은 승용차에서 49.6%, 1,3-Butadien은 RV가 42.6%, Acrolein의 경우 화물차에서

54.3%의 배출기여도를 나타내었다.

(5) Formaldehyde, Naphthalene, 1,3-Butadien, Acrolein의 휘발유, 디젤, LPG 연료별 유해대기오염물질 배출기여도를 비교하면, Formaldehyde의 경우 디젤이 94.2%로 가장 높은 배출기여도를 나타내었다. 1,3-Butadien과 Acrolein 또한 디젤이 각각 86.4%, 84.2%의 배출기여도를 나타내었으며, Naphthalene은 휘발유가 49.8%의 배출기여도를 나타내었다.

향후 유해대기오염물질의 환경기준 설정을 위하여 국가대기정책지원시스템 (CAPSS)와 유해대기오염물질의 배출을 연계하여 자동차 유해대기오염물질 배출량 산정 시스템 구축이 필요하다. 본 연구에서는 가스상 유해대기오염물질에 대한 배출 특성을 고려하였으나 앞으로 디젤 PM을 포함한 입자상 유해대기오염물질에 대한 배출자료를 추가하여 종합적인 평가가 필요하다. 또한 유해대기오염물질의 경우는 인체의 위해성과 밀접한 관련이 있으며 교통 밀집 지역과 시간에 따라 인체의 노출정도의 차이가 발생하기 때문에 공간과 시간해상도 개선을 통한 배출자료의 지속적 개선이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 국립환경과학원 교통환경연구소의 2011

년 오토오일 연구사업 “자동차 유해독성물질 배출량 산출 및 배출통계 시스템 구축연구(1차년도)”의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Cha, J.-S., J.-H. Lee, J.-H. Hong, D.-I. Jung, and J.-Y. Kim (2007) Distribution of Benzene Emissions by Air Emission Sources, Proceeding of the 45th Meeting of KOSAE (2007), Korean Society for Atmospheric Environment, pp. 226-227.
- Cho, K.-T. (2002) Development of Nested top down approaches to improve the spatial resolution of vehicular air pollutant emissions, Ph.D. Thesis, Graduate School of Environmental Study, Seoul National University.
- EEA (2007) Corinair Emission Inventory Guidebook Group 7.
- National Institute of Environmental Research (2004) A Study on the Estimation of the HAPs Emission Factors for the Mobile Source (I).
- National Institute of Environmental Research (2005) A Study on the Estimation of the HAPs Emission Factors for the Mobile Source (II).
- National Institute of Environmental Research (2006) A Study on the Estimation of the HAPs Emission Factors for the Mobile Source (III).
- US EPA (2005) 2005 National-Scale Air Toxics Assessment.
- US EPA (2011) An Overview of Methods for EPA’s National-Scale Air Toxics Assessment.