

유사휘발유 사용에 의한 BTX 배출량 추정 Estimation of BTX Emission Using Pseudo-gasoline

전소영 · 김 정 · 장영기* · 정봉진

수원대학교 환경공학과

(2012년 5월 30일 접수, 2012년 7월 17일 수정, 2012년 9월 10일 채택)

So-Young Jeon, Jeong Kim, Young-Kee Jang* and Bong-Jin Jung

Department of Environmental Engineering, The University of Suwon

(Received 30 May 2012, revised 17 July 2012, accepted 10 September 2012)

Abstract

The increasing consumption of pseudo-petroleum products (PPP) has been disturbing the national petroleum market. The use of PPP lead to tax evasion, disturbance of sound trading principles, component corrosion of cars, and explosion accident. Also, PPP have emitted hazardous air pollutants (HAP) including the carcinogenic aromatic hydrocarbons, PAHs and aldehydes more than regular-petroleum products. It thus has potentials to cause many environmental and health care problems. In this study, benzene, toluene and xylene emissions from road transport vehicles due to the use of pseudo-gasoline are estimated for the year 2008.

The results of our study provide emission estimates of benzene, toluene and xylene for the year as 405, 1,711, 717 tonne/yr, respectively for regular-gasoline. BTX emissions are calculated as 452~515, 1,882~2,264 and 732~752 tonne/yr when the amount of pseudo-gasoline is estimated to account for 6~13% for regular-gasoline consumption. BTX emissions increased as much as 12~27, 10~32, 2~5% by using pseudo-gasoline. It is found that the pseudo-gasoline should be the key component to produce HAP in urban area.

Key words : BTX emission, Hazardous air pollutants, Pseudo-gasoline

1. 서 론

인간 활동과 밀접한 관계를 가지고 있는 자동차 등록대수는 꾸준히 증가하는 추세이다. 국토해양부는 2015년 자동차 등록대수가 2,000만여 대를 넘을 것으로 예측하고 있다. 삶의 큰 비중을 차지하고 있는

자동차의 보급률이 증가함에 따라 도로이동오염원 부문 석유유통시장은 지속적으로 증대될 것이라 예상된다. 국내 석유유통시장은 1990년대 이후 고유가와 유류세 인상에 따라 유사석유제품 및 면세유의 불법유통과 같은 혼탁한 양상을 보이기 시작했으며, 2002년 세눅스 파동 이후 본격적인 유사석유제품이 유통되기 시작했다.

유사석유제품의 유통은 석유 제품 간 세금 차이를 악용하여 공평과세에 대한 형평성을 저해하며, 정당한 영업활동 및 건전한 석유유통 질서를 저해한다.

*Corresponding author.

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

또한 유사석유제품이 자동차의 연료로 사용될 경우 차량 부품의 부식 촉진 및 엔진을 손상시켜 화재 및 폭발사고를 일으킬 가능성이 크며, 정상석유제품을 사용한 자동차에 비해 발암물질인 벤젠, 톨루엔, 자일렌과 같은 방향족 탄화수소, 알데히드류 등의 많은 유해대기오염물질을 배출하여 대기오염악화의 문제 뿐만 아니라 보건 환경적 문제를 일으켜 인체에 큰 영향을 줄 수 있다.

국내 유사석유제품 관련 연구는 한국석유관리원에서 연구한 (1) FT-IR을 이용한 정상휘발유와 유사휘발유의 엔진 성능 및 배기가스 특성에 관한 연구(Kim *et al.*, 2006), (2) 정상 및 유사 경유가 엔진과 차량의 배출가스에 미치는 영향에 관한 연구(Kim *et al.*, 2007), (3) 유사경유가 연료공급시스템의 내구성에 미치는 영향에 관한 연구(Kim *et al.*, 2008), (4) 유사휘발유가 가솔린엔진(흡기밸브)의 퇴적물에 미치는 영향에 대한 연구(Korea Institute of Petroleum Management, 2009)와 (5) 유사석유제품 유통실태분석을 통한 유통량 및 탈루세액 추정(Korea Institute of Petroleum Management, 2010)보고서 등이 있다. 이 연구들은 유사석유 사용에 따른 배출가스 특성, 엔진에 미치는 영향 그리고 유사석유 유통량에 대한 연구이다. 현재 유사석유 사용에 따른 배출량에 관한 연구는 미비한 실정이다. 또한 불법으로 유통되는 유사석유의 양과 실제 소비량에 대한 파악이 어려운 실정이다. 언론에서는 2011년 [사회] 연간 유사석유 유통량 맥주소비 3배...탈루세액 1조 6천억' 기사(아시아경제, 2011년 3월 11일자)를 발표했다. 이에 따르면 2009년 유사석유 탈루세액은 유사휘발유 5,312억원, 유사경유 1조 1,224억원 등 1조 6,536억원에 이른다(이경호, 2011). 유사석유 탈루세액 추정규모가 적지 않으며, 이는 유사석유의 유통량과 유해대기오염물질 배출 가능성이 클 것으로 예상된다.

유해대기오염물질은 종류가 매우 다양하여 적절한 관리가 어렵고, 일반적으로 대기 중에 매우 낮은 농도로 존재하므로 측정과 분석이 어려워 그 위해성을 평가하기가 쉽지 않아 다른 물질보다 더 많은 연구와 관심의 대상이다. 유해대기오염물질인 휘발성유기화합물, 다환방향족탄화수소 및 알데히드류 등에 대한 배출계수 및 배출량 산정을 통해 환경기준 설정을 위한 관리방안 마련이 시급하다. 국립환경과학원은 대기오염물질 배출량 산출 시스템인 대기정책지

원시스템(CAPSS, Clean Air Policy Support System)을 구축하고 있다. 그러나 현재 국내 유해대기오염에 관한 배출량 산출 시스템은 구축하고 있지 않다. 국내에서 연구한 도로이동오염부문의 유해대기오염물질에 대한 배출 특성은 국립환경과학원에서 연구한 (1) 이동오염원의 유해대기오염물질(HAPs) 배출계수 산정 연구(II)(Eom *et al.*, 2005), (2) 이동오염원의 유해대기오염물질(HAPs) 배출계수 산정 연구(III)(Eom *et al.*, 2006), (3) 자동차 배기관 VOCs 배출 특성(Lyu *et al.*, 2008) 등이 있다. 그러나 이 연구들은 휘발유, 경유, LPG 사용에 따른 자동차 배기관을 통한 배출 특성을 다루고 있다.

본 연구에서는 휘발유 차량을 대상으로 최근 유사 휘발유 사용에 의한 도로이동오염원의 유해대기오염물질 중 벤젠(Benzene), 톨루엔(Toluene), 자일렌(Xylene)의 배출량을 추정하였다.

2. 자동차의 VOCs 배출특성과 유사휘발유 사용 현황

2.1 자동차의 VOCs 배출특성

휘발유 자동차 배기관의 VOCs 배출비율은 교통환경연구소의 연구 자료(Lyu *et al.*, 2008)를 이용하였다. 자동차 배기관에서 발생하는 VOCs 배출은 파라핀족, 올레핀족, 방향족 성분으로 구분하여 제시하고 있다. 시험대상차량은 국내에서 생산·제작되어 보급되고 있는 차량 중 점유율이 높은 휘발유 승용차를 소형, 중형, 대형으로 구분하여 총 29대, LPG 택시 12대, 소형 경유차 4대를 포함하여 총 45대의 차량에 대해 시험하여 제시하고 있다.

휘발유 차량의 배출가스 중 VOCs는 파라핀족>방향족>올레핀족 순으로 높은 배출을 보인다. 본 연구의 대상물질인 벤젠, 톨루엔, 자일렌의 배출비율을 살펴보면, VOCs 배출가스의 벤젠은 3%, 톨루엔은 12%, m,p-자일렌은 2%, o-자일렌은 2.6%가 배출되는 것으로 나타내고 있다(Lyu *et al.*, 2008). 유럽환경청은 휘발유 차량에서 배출되는 VOCs 배출가스의 벤젠은 6.83%, 톨루엔 12.84%, m,p-자일렌 6.66%, o-자일렌 4.52%가 배출되는 것으로 나타내고 있다(EEA, 2010). 교통환경연구소의 연구 자료와 비교해 볼 경우 톨루엔은 비슷한 배출비율을 보이고 있으나 벤젠과 자일

Table 1. Comparison of exhaust VOCs composition by fuel types.

w/w % of VOC		Gasoline passenger car	Light-duty diesel vehicle	LPG taxi
Paraffins	Ethane	2.6	0.9	4.0
	Propane	0.5	6.3	5.7
	n-Butane	1.5	0.5	38.8
	iso-Butane	2.4	0.4	21.4
	iso-Pentane	5.0	1.1	0.9
	n-Pentane	4.1	3.5	1.1
	n-Hexane	7.3	4.7	0.2
	n-Heptane	1.4	0.4	0.1
	n-Octane	0.6	0.7	0.1
	Others	19.4	24.6	2.4
Total		44.4	43.2	74.7
Olefins	Ethylene	8.4	11.4	5.9
	Propylene	5.0	3.2	3.6
	1-Butene	0.9	0.5	0.6
	cis-2-Butene	0.4	0.0	1.0
	1-Pentene	0.5	0.4	0.1
	Others	5.2	5.3	3.4
	Total	20.3	21.0	14.6
Aromatics	Benzene	3.0	1.7	0.4
	Toluene	12.2	5.7	5.4
	Etylbenzene	3.0	2.6	1.4
	m,p-Xylene	2.0	0.9	0.6
	Styrene	2.4	1.3	1.0
	o-Xylene	2.6	2.1	0.2
	Others	8.4	4.5	1.4
	Total	34.1	18.8	10.4

Lyu et al. (2008)

렌의 경우 유럽 환경청에서 제시한 자료가 교통환경 연구소에서 제시한 자료보다 더 높게 나타내고 있다. 교통환경연구소에서 제시한 연료별 자동차 배출가스 중 VOCs 조성비는 표 1과 같다.

2.2 유사휘발유 사용 현황

2.2.1 유사휘발유 유통량

현재 유사휘발유에 대한 유통량은 공식적으로 파악되지 않고 있다. 유사휘발유의 유통량은 탈루세액 추정규모, 용제 (용제 1호)의 불법유통량 그리고 자동차의 평균주행거리 및 평균연비를 이용하여 추정하는 방법 등이 있다. 탈루세액 추정규모를 이용한 방법은 탈루세액, 국내유가, 세금을 이용하여 유사휘발유 유통량을 추정할 수 있다. 용제의 불법유통량의 경우, 용제 판매량과 페인트제조업체 등에서 실제 소비되는 용제량의 차이를 유사휘발유 제조에 사용된

다고 가정하여 추정할 수 있다. 그리고 자동차의 평균주행거리 및 평균연비를 이용하여 실제 필요한 휘발유 소비량과 실제 도로부문에서 소비된 휘발유량의 차이를 유사휘발유의 양이라 가정하여 추정할 수 있다. 하지만 유사휘발유의 유통 추정량은 유통단계의 복잡성, 불법성, 제조유형 및 혼합비율의 다양성으로 정확한 양을 파악하기는 어렵다.

본 연구에서 유사휘발유의 유통량을 파악하기 위해서 한국석유관리원의 유사석유 탈루세액 추정규모를 이용하였다. 한국석유관리원은 탈루세액에 대해 2003년 1월부터 2009년 12월까지 유사휘발유의 월별 세금추이 분석, 탈루세액 모형식을 시뮬레이션하여 탈루규모를 추정하고 있다. 2008년 유사휘발유에 대한 탈루세액은 4,757억원으로 추정하고 있다(이경호, 2011).

유가정보서비스에서 제공하는 보통휘발유의 가격 구성은 정유사 세전가격, 세금, 유통비용 및 마진의 크

게 3가지로 구분하고 있다. 보통휘발유의 가격 구성 중 세금이 차지하는 비율은 약 50%에 해당하며, 매주 유가정보서비스를 통해 발표하고 있다. 세금은 개별소비세, 교통세, 교육세, 주행세, 부가가치세 등으로 이루어져있다. 유동성을 지닌 세금의 특성상 세금이 차지하는 비율은 매주 변동을 보이고 있다 (Opinet, 2011). 본 연구에서의 휘발유 과세는 50%로 적용하여 유사휘발유의 유통량을 추정하였다. 유가정보서비스에서 제공하는 2008년 보통휘발유의 가격은 1L당 연평균 1,692원으로 휘발유 과세는 절반인 846원으로 나타났다. 2008년 휘발유 과세를 적용하여 유사휘발유 유통량을 추정한 결과 연간 562,247 kL로 나타났다으며, 연도별 유사휘발유 유통 추정량은 표 2와 같다. 2003~2009년 도로이동 부분의 정상휘발유 소비에 대해 유사휘발유 유통량이 차지하는 비율은 정상휘발유 소비량 약 6~13%로 나타났다. 연도별 도로이동부분의 정상휘발유 소비에 대한 유사휘발유 유통량 비율은 표 3과 같다.

Table 2. Estimation of the annual amount of pseudo-gasoline.

Year	Regular gasoline ¹⁾ (won/L)	Gasoline tax (won/L)	Tax evasion ²⁾ (one hundred million)	Pseudo-gasoline (kL)
2003	1,295	647	5,685	878,155
2004	1,365	683	7,472	1,094,566
2005	1,432	716	8,228	1,148,961
2006	1,492	746	8,857	1,186,923
2007	1,526	763	6,958	912,004
2008	1,692	846	4,757	562,247
2009	1,601	800	5,312	663,701

¹⁾Opinet (2003~2009), ²⁾이경호(2011)

Table 3. Comparison of regular and pseudo-gasoline consumption.

Year	Regular-gasoline consumption ¹⁾ (kL)	Pseudo-gasoline estimation (kL)	Pseudo-gasoline percentage (%)
2003	9,191,094	878,155	10
2004	8,832,774	1,094,566	12
2005	9,045,859	1,148,961	13
2006	9,120,383	1,186,923	13
2007	9,650,315	912,004	9
2008	9,676,374	562,247	6
2009	10,126,538	663,701	7

¹⁾Petronet (2003~2009)

유가정보서비스는 국내유가 조사를 매일 실시하고 있다. 따라서 유류가격은 주별, 월별, 연도별 변화를 보이며, 세금이 차지하는 비율 또한 매주 변동을 보인다. 탈루세액 추정 규모를 이용한 유사휘발유 유통 추정량의 불확도는 유류가격의 연도별 변화, 세금이 차지하는 비율 변화, 단속강화에 대한 영향을 크게 받을 것으로 예상된다. 또한 유사휘발유 유통은 불법으로 이루어지고 있어 제조유형 및 제품 혼합비율 각각의 규모를 파악하기 어려우며, 이에 대한 불확도가 클 것으로 예상된다.

2. 2. 2 유사휘발유 제조유형 및 물성측정

자동차용 휘발유는 원유의 LPG 분리장치, 탈황장치, 개질장치 (Reformer), 증질유분해 공정을 통해 생산된다. 이에 반해 유사휘발유는 생산된 석유제품에 다른 석유제품 및 석유화학제품을 단순하게 혼합한 제품으로 제조유형 및 제조비율은 다양하게 나타난다.

1984년 이전부터 2004년 이후까지의 유사휘발유 제조유형은 표 4와 같다.

한국석유관리원은 유사휘발유 제조유형에 대해 석유사업자의 경우 휘발유에 용제류를 혼합한 형태를 가장 많이 적발한 것으로 파악하고 있다. 비석유사업자의 경우, 원캔과 투켄 형태의 판매를 보이는 것으로 파악하고 있다. 원캔은 석유제품에 석유화학제품이 혼합되어 있는 하나의 통을 말하며, 투켄은 소부신나 (톨루엔+메탄올)인 석유화학제품에 에나멜 신나(용제 1호)인 석유제품을 혼합하여 제조하는 형태

Table 4. Manufacture type of pseudo-gasoline in period.

Period	Manufacture type of pseudo-gasoline
Before 1984	• Solvent+BTX
	• Solvent+Aromatic solvent
	• Solvent+Alcohol
After 1985	• Gasoline+Solvent+BTX
	• Gasoline+Other petroleum products (kerosene, diesel, solvent)
After mid-1990	• Gasoline+Solvent+BTX+Other petroleum products (aniline, acetone etc.)
After 1997	• Gasoline+Solvent+BTX+MTBE • Mix paint thinner
After 2001	• Solvent+Toluene+Aromatic solvent (special solvent)+Alcohol <disguise as additive>
After 2004	• Solvent+Toluene+Methanol

Kim (2009)

Table 5. Analysis of pseudo-gasoline by usage types.

	Kerosene mixing	Solvent mixing	Gasoline mixing	Diesel mixing	Total
2006	3	127	—	2	132
2007	1	132	—	5	138
2008	4	79	2	10	95
Total	8	338	2	17	365
Share	2.1%	92.9%	0.5%	4.5%	100%

Korea Institute of Petroleum Management (2009)

Table 6. Analysis of pseudo-gasoline by types.

Type	Mixing ratio of Pseudo-fuel (%)			Crackdown number	Share (%)
	Solvent	Aromatic hydrocarbons	Alcohol		
1	50	20~30	20~30	642	~70
2	40~50	50~60	—	63	~7
3	10~70	15~65	10~70	215	~23
Total		—		920	100

Korea Institute of Petroleum Management (2009)

를 말한다.

Korea Institute of Petroleum Management (2009)는 석유사업자에 대해 '06~'08 최근 3년간 유사휘발유 유형 분석과 비석유사업자에 대해 유사휘발유 유형 분석 자료를 제시하고 있다. 석유사업자에 대한 최근 3년간 유사휘발유 유형 분석은 표 5와 같으며, 비석유사업자에 대한 유사휘발유 유형 분석은 표 6과 같다.

한국석유관리원은 정상휘발유와 현재 불법적으로 유통되고 있는 유사휘발유 중 대표적인 3가지 유형을 대상으로 물성측정 결과를 제시하고 있다. 한국석유관리원에서 제시한 정상휘발유 및 유사휘발유에 대한 시료 유형은 표 7과 같으며, 연료물성 실험 결과와 석유 및 석유대체연료 사업법의 자동차용 휘발유 품질기준은 표 8과 같다. 한국석유관리원의 유사휘발유 물성측정결과 옥탄값에 대해 유사휘발유 3가지 유형 모두 품질기준에 부적합한 결과를 나타내고 있다. 증기압의 경우 유사휘발유 I과 유사휘발유 III는 부적합한 결과를 나타내고 있으며, 유사휘발유 유형별 증기압은 정상휘발유의 증기압보다 모두 높게 나타나고 있다. 유사휘발유 I의 경우 파라핀의 물성 비율이 89%로 정상휘발유에서의 물성 비율 52%보다 높은 수치를 나타내고 있다. 유사휘발유 II의 방향족화합물의 경우 품질 기준보다 높은 수치를 나타

Table 7. Composition of regular and pseudo-gasolines.

	Sample	Manufacture type	Note
Regular-gasoline	Base	Unleaded gasoline (100%)	—
		Pseudo-gasoline I	Gasoline+Solvent (10%) (90%)
Non-petroleum business	Pseudo-gasoline II	Solvent+Toluene (50%) (50%)	80%
		Pseudo-gasoline III	

Korea Institute of Petroleum Management (2009)

내고 있다. 특히 톨루엔의 물성 비율은 57.7%로 다른 유사휘발유 유형보다 높은 수치를 나타내고 있다. 유사휘발유 III의 경우 정상휘발유에 포함되지 않은 메탄올이 38%를 차지하고 있어, 본 연구의 대상 물질인 BTX 이외에 휘발성유기화합물에 대해 살펴볼 필요가 있을 것으로 예상된다.

2. 2. 3 유사휘발유 사용에 의한 배출가스 특성

유사휘발유 사용에 따른 배출가스 특성은 한국석유품질관리원 연구센터의 자료 (Kim *et al.*, 2006)를 이용하였다. 한국석유품질관리원 연구센터는 불법적으로 유통 중인 유사휘발유 유형 중 투캔 타입의 유사휘발유를 이용하여 시험하였다. 유사휘발유 사용에 따른 배출가스 미규제 물질에 대해 엔진의 분당회전수 (rpm)별 배출가스 증가율을 제시하였다.

한국석유품질관리원 연구센터의 연구결과 유사휘발유 사용에 따른 배출가스 규제물질인 THC는 35%, CO는 16% 이상 배출하는 것으로 제시하였다. 그리고 배출가스 미규제 물질 중 Benzene (C₆H₆)은 엔진 회전속도별 평균 약 3.1배, Toluene (C₇H₈)은 약 2.9배, Xylene (C₈H₁₀)은 약 1.6배 증가하는 것으로 분석하고 있다 (Kim *et al.*, 2006).

3. 유사휘발유 사용에 의한 BTX 배출량

유사휘발유 사용에 의한 BTX 배출량 산정은 국가 대기오염물질 배출량 산정방법편람 (II) (NIER, 2010)에서 제시한 도로이동오염부문 VOC 배출량 산정 방법을 적용하였다. VOC 배출량 산정은 엔진가열 (Hot start), 엔진 미가열 (Cold start), 증발배출 (Evaporation)

Table 8. Result of the physical properties of gasoline types.

		Quality standard	Regular-gasoline	Pseudo-gasoline I	Pseudo-gasoline II	Pseudo-gasoline III
Octane value		91 ~ 94	91	66	97	Over 100
Disillation	Initial boiling point	-	30	32	37	32
	10% Spill temperature	Under 70	59	40	58	40
	50% Spill temperature	Under 125	89	51	100	56
	90% Spill temperature	Under 175	156	76	110	109
	End point	Under 225	186	165	118	110
Vapor pressure (37.8°C, kPa)		44 ~ 82	47	97	58	94
Element analysis (weight %)	C	-	83.9	83.8	88.6	70.1
	H	-	14.1	16	11.4	12.7
	O	-	2.0	0.2	-	17.12
Ingredient analysis (volume %)	Paraffins	-	52	89	39	38
	Olefins	Under 18	12	1	-	0
	Naphthene	-	5	5	2	2
	Aromatics	Under 30	20	3.4	58	27
	-Benzene	-	0.3	0.9	0.4	0.4
	-Toluene	-	2.8	0.5	57.7	26.3
	-Xylene	-	2.8	0.5	0.1	0.1
	-Others	-	8.0	1.5	-	-
Methanol		-	-	-	-	38

Korea Institute of Petroleum Management (2009)

로 크게 3가지로 구분하고 있다. 배기관에서 발생하는 BTX 배출량은 엔진가열과 엔진 미가열 부분의 전체 VOC 배출에 대해 BTX 배출비율을 고려하여 산정하였다. 증발로 인한 BTX 배출량은 연료의 BTX 물성측정비율을 고려하여 산정하였다.

3.1 도로이동오염원 BTX 배출량 산정방법

3.1.1 엔진가열 배출 (Hot start emission)

엔진가열 부분은 차종별 주행거리와 차종별 VOC 배출계수를 고려하여 산정하고 있다. 엔진가열 부분 VOC 배출량 산출식은 다음과 같다.

$$E_{hot,j} = VKT_j \times EF_j$$

E_{hot} : 엔진가열 배출량 (g/yr)

VKT : 총 주행거리 (Vehicle Kilometer travelled, km/yr)

EF : 배출계수 (Emission Factor, g/km)

j : 차종

3.1.2 엔진 미가열 배출 (Cold start emission)

엔진 미가열 부분은 엔진가열에 대한 VOC 배출량 산출 값을 기준으로 주행거리 분율 (β)과 엔진가열상태 대비 엔진 미가열 상태에서의 배출비율 (e^{cold}/e^{hot})을 고려하여 산정하고 있다. 엔진 미가열 부분 VOC 배출량 산출식은 다음과 같다.

$$E_{cold,j} = \beta_j \times m_j \times e^{hot} \times ((e^{cold}/e^{hot})_j - 1)$$

$$\beta_j = (0.647 - 0.025 \times l_{trip}) - (0.00974 - 0.000385 \times l_{trip}) \times T_a (e^{cold}/e^{hot})_j = 12.59 - (0.06 \times T_a)$$

E_{cold} : 엔진 미가열 배출량 (g/yr)

β : cold 엔진에서의 주행거리 분율

m : 총 주행거리 (km/yr)

e^{hot} : 엔진 가열 상태에서의 배출계수 (g/km)

e^{cold}/e^{hot} : 엔진 가열상태 대비 엔진미가열 상태에서 의 배출비율

l_{trip} : 1회 평균 주행거리 (km/회)

T_a : 연평균 대기온도 (°C)

j : 차종

1회 평균 주행거리 (l_{trip})는 국립환경과학원 (2007)에서 제시한 12.35 km를 적용하였다. 연평균 대기온도 (T_a)는 기상청 자료인 2008년 대전의 월평균 온도를 이용하여 13°C로 적용하였다(KMA, 2008).

3. 1. 3 증발 배출 (Evaporation)

증발 배출은 휘발유 차량의 운행에 따른 휘발유의 증발에 의한 배출량을 의미하며, 주간증발손실 (diurnal loss), 고온증발손실 (hot and warm soak), 주행손실 (running loss)로 구분하여 산정하고 있다. 국내 휘발유 차량은 거의 전부가 fuel-injection 형태이며 대부분 방지시설로 카본 캐니스터를 장착하고 있으므로 고온증발손실에 의한 배출은 없는 것으로 보고, 본 연구에서는 주간증발손실과 주행손실에 대해서만 배출량을 산정하였다. 증발 배출 부문 VOC 배출량 산정식은 다음과 같다.

$$E_{eva} = (365 \times a_j \times e^d) + R$$

$$R = m_j \times (p \times e^{r,hot} + w \times e^{r,cold})$$

- E_{eva} : 증발 손실에 의한 VOC 배출량 (g/yr)
- a_j : 차종 j의 휘발유 사용 차량 등록대수
- e^d : 금속탱크를 가지고 있는 휘발유 차량의 일중 배출량 (ton/yr)
- R : 주행손실에 의한 휘발유 차량의 VOC 배출량 (ton/yr)
- m_j : 차종 j의 연간 총 주행거리 (km/yr)
- p : 가열 엔진 상태로 끝나는 trip 비율

- w : 미가열 엔진 상태로 끝나는 trip 비율
- $e^{r,hot}$: hot running loss 배출계수 (g/km)
- $e^{r,warm}$: warm running loss 배출계수 (g/km)

3. 2 도로이동오염원 BTX 배출계수

유사휘발유 사용에 의한 도로이동오염원 BTX 배출계수는 NIER (2010)에서 제시하고 있는 도로이동오염부문 휘발유에 대한 VOC 배출계수를 토대로 하였다. 유사휘발유 사용에 따른 엔진가열 및 미가열 부문 BTX 배출계수는 VOC 배출계수를 기반으로 배기관에서 발생하는 Benzene, Toluene, Xylene의 배출비율과 유사휘발유 사용에 따른 배출특성을 고려하였다. 증발 배출 부문의 BTX 배출계수는 한국석유관리원의 유사휘발유 유형별 물성 측정 결과 (한국석유관리원, 2009)를 이용하여 Benzene, Toluene, Xylene의 물성 비율을 고려하였다.

3. 2. 1 엔진가열 배출 (Hot start), 엔진 미가열 배출 (Cold start)

NIER (2010)에서 제시한 VOC 배출계수는 차종별 연식별 배출계수를 속도에 따른 함수식의 형태로 나타내고 있다. 휘발유 차량에 대한 VOC 배출계수는 표 9와 같다.

차종별 VOC 배출계수 산출시 연식에 대해서는 2008년을 기준으로 차량의 수명을 10년이라 가정하여 '99 이전의 경우 0.1, '00~'02의 경우 0.3, '03~'07의 경우 0.6의 가중치를 적용하여 계산하였다. 차

Table 9. VOC (THC) emission factor of gasoline by vehicle type. (Unit: g/km)

Vehicle type	Year	Emission factor	
Passenger car	Light Gasoline	~ '99	$Y = 8.6275V^{-1.0722}$
		'00 ~ '02	$Y = 5.1835V^{-1.1889}$
		'03 ~ '07	$Y = 0.7446V^{-0.5763}$
	Small Gasoline	~ '99	$Y = 32.017V^{-1.4171}$
		'00 ~ '02	$Y = 0.8428V^{-0.8829}$
		'03 ~ '07	$Y = 0.1738V^{-0.7268}$
Medium, Heavy Gasoline	'99	$Y = 31.816V^{-1.4804}$	
	'00 ~ '02	$Y = 7.9374V^{-1.3041}$	
	'03 ~ '07	$Y = 0.4262V^{-1.0122}$	
VAN	Small Gasoline	~ '90	$Y = 15.607V^{-1.0423}$
		'91 ~ '96	$Y = 23.4V^{-1.4041}$
		'97 ~ '99	$Y = 18.7308V^{-1.5356}$
		'00 ~ '02	$Y = 14.19V^{-1.5356}$
		'03 ~ '07	$Y = 3.0337V^{-1.5356}$

NIER (2010)

Table 10. The composition of exhausted BTX from gasoline vehicle.

Gasoline passenger cars		w/w % of VOC
Aromatics	Benzene	3.0
	Toluene	12.2
	m,p-Xylene	2.0
	o-Xylene	2.6

Lyu *et al.* (2008)

Table 11. Emission increase by using a pseudo-gasoline.

w/w % of VOC	Emission rate by pseudo gasoline	
Aromatics	Benzene	3.1
	Toluene	2.9
	m,p-Xylene	1.6
	o-Xylene	1.6

Kim *et al.* (2006)

중별 VOC 배출계수 산출을 위한 속도는 경기도 교통DB 센터(2008)의 도로별 구간별 평균 속도를 이용하여 전체 도로의 평균차속 45 km/hr를 적용하였다.

정상휘발유 사용에 따른 배기관에서 발생하는 Benzene, Toluene, Xylene의 배출비율은 Lye *et al.* (2008)를 이용하였다. 휘발유 자동차 사용에 따른 BTX 배출비율은 표 10과 같다.

유사휘발유 사용에 따른 엔진가열과 엔진 미가열 부문 BTX 배출 비율은 한국석유품질관리원 연구센터의 자료 Kim *et al.* (2006)를 이용하였다. 한국석유품질관리원에서 제시한 유사휘발유 사용에 따른 Benzene, Toluene, Xylene의 배출특성은 표 11과 같다.

3. 2. 2 증발 배출 (Evaporation)

NIER (2010)에서 제시한 증발 배출에 대한 VOC 배출계수는 식으로 나타내고 있다. 증발 배출 부문 주간증발손실과 주행손실의 배출계수 식은 표 12와 같다. 증기압 자료는 Cha *et al.* (2008)에서 제시한 RVP 평균치인 82 kPa을 적용하였으며, 월별 대기온도는 KMA (2008) 자료를 이용하였다.

증발 배출 부문 정상휘발유와 유사휘발유 사용에 따른 Benzene, Toluene, Xylene의 배출량 산정은 증발하는 VOC 배출에 대해 연료의 물성측정 결과를 적용하였다. 연료의 물성측정 결과는 Korea Institute

Table 12. VOC (THC) emission factor of evaporation emission.

Emission factor	Uncontrolled vehicle	Carbon canister controlled vehicle
Diurnal-e ^d (g/day)	$9.1 \cdot \exp[0.0158 (RVP - 61.2) + 0.0574 \cdot (ta, \text{min} - 22.5) + 0.0614 \cdot (ta, \text{rise} - 11.7)]$	$0.2 \cdot \text{Uncontrolled}$
Warm running loss -e ^{r,warm} (g/km)	$0.1 \cdot \exp[-5.967 + 0.04259 RVP + 0.1773 ta]$	$0.1 \cdot \text{Uncontrolled}$
Hot running loss -e ^{r,hot} (g/km)	$0.136 \cdot \exp[-5.967 + 0.04259 RVP + 0.1773 ta]$	$0.1 \cdot \text{Uncontrolled}$

*RVP (kPa), temperature (°C), ta : monthly mean ambient temperature (°C)

*ta, min : monthly mean minimum temperature (°C)

*ta, rise : monthly mean of the daily ambient temperature rise (°C)

NIER (2010)

Table 13. Physical properties of BTX by gasoline types.

Physical properties (Volume %)	Regular-gasoline	Pseudo-gasoline I	Pseudo-gasoline II	Pseudo-gasoline III
Aromatics	20	3.4	58	27
Benzene	0.3	0.9	0.4	0.4
Toluene	2.8	0.5	57.7	26.3
Xylene	2.8	0.5	0.1	0.1
Others	8.0	1.5	-	-
Methanol	-	-	-	38
Vapor pressure (37.8°C, kPa)	47	97	58	94

*Regular-gasoline : Unleaded gasoline (100%)

Pseudo-gasoline I(Petroleum business) : Gasoline (10%)+Solvent (90%)

Pseudo-gasoline II (Non-Petroleum business) : Solvent (50%)+Toluene (50%)

Pseudo-gasoline III (Non-Petroleum business) : Solvent (50%)+Toluene (25%)+Methanol (25%)

of Petroleum Management (2009) 자료를 이용하였다. 한국석유관리원에서 제시하고 있는 정상휘발유 및 유사휘발유 유형별 연료 물성은 표 13과 같다.

3. 3 BTX 배출량 산출

유사휘발유 사용에 의한 도로이동오염원 부문 Benzene, Toluene, Xylene 배출량은 2008년 CAPSS 배출 자료의 주행거리와 등록대수를 적용하였다 (NIER,

Table 14. Estimation of BTX emission by gasoline types (2008). (Unit: tonne/yr)

Type	Benzene	Toluene	Xylene
Regular-gasoline (94%)	381	1,612	676
Pseudo-gasoline I (6%)	74	271	58
Pseudo-gasoline II (6%)	71	352	56
Pseudo-gasoline III (6%)	72	353	56

*Regular-gasoline : Unleaded gasoline (100%)
 *Pseudo-gasoline I : Gasoline (10%)+Solvent (90%)—Petroleum business
 *Pseudo-gasoline II : Solvent (50%)+Toluene (50%)—Non-Petroleum business
 *Pseudo-gasoline III : Solvent (50%)+Toluene (25%)+Methanol (25%)—Non-Petroleum business

Table 15. BTX emission due to the consumption of pseudo-gasoline products between different cities and provinces (2008). (Unit: tonne/yr)

Region	Benzene	Toluene	Xylene
Seoul	11.4	52.9	8.9
Gyeonggi	17.3	77.7	13.6
Incheon	3.1	14.0	2.4
Gangwon	2.9	12.7	2.3
Chungbuk	3.2	13.8	2.5
Chungnam	3.9	17.0	3.1
Gyeongnam	5.8	26.0	4.6
Gyeongbuk	5.0	21.8	3.9
Gwangju	1.7	7.6	1.3
Daegu	3.5	16.1	2.7
Daejeon	2.1	9.8	1.7
Busan	3.8	17.7	3.0
Ulsan	1.8	8.3	1.4
Jeonnam	2.9	12.7	2.3
Jeonbuk	3.1	13.5	2.4
Jeju	0.7	3.4	0.6
Total	72	325	57

2008). 유사휘발유 사용량의 경우 한국석유관리원의 세금탈루 추정액을 통한 유사휘발유 유통 추정량을 적용하였다. 유사휘발유 제조유형은 Korea Institute of Petroleum Management (2009) 자료를 토대로 유사휘발유 유형별 특성을 적용하여 배출량을 추정하였다.

2008년 도로이동오염 부문 BTX 배출량을 산정한 결과, 정품 휘발유 소비량의 94%를 정상휘발유 사용으로 적용하였을 때 Benzene 381 tonne/yr, Toluene 1,612 tonne/yr, Xylene 676 tonne/yr로 추정할 수 있다. 정품 휘발유 소비량의 6%를 유사휘발유 사용으로 적용하였을 때 Benzene 71~72 tonne/yr, Toluene 271~353 tonne/yr, Xylene 56~58 tonne/yr로 추정되

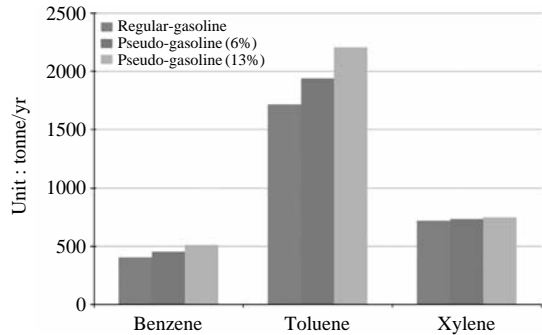


Fig. 1. Comparison of benzene, toluene, xylene emission by using a regular and pseudo-gasoline.

었다. 배출량을 지역별로 산출하면 표 15와 같으며 경기도에서 가장 많은 배출량을 나타냈다.

최근(2003~2009) 유사휘발유 유통량이 정품 휘발유 소비량 기준 6~13%를 차지하는 것을 적용하여 BTX 배출량을 추정한 결과 Benzene 452~515 tonne/yr, Toluene 1,882~2,264 tonne/yr, Xylene 732~752 tonne/yr로 추정하였다. 이는 유사휘발유 사용에 따라 정품 휘발유 사용시보다 Benzene 배출량은 12~27%, Toluene 배출량은 10~32%, Xylene 배출량은 2~5% 추가적으로 증가하는 것을 의미한다. Benzene, Toluene, Xylene의 정상휘발유 및 유사휘발유 사용에 따른 배출량 비교는 그림 1과 같다.

환경부(2008)의 유해대기측정망 VOCs 측정 자료에 따르면, 국내 14개 지역 28개 측정소의 Toluene 연평균 농도는 배경농도를 포함하여 0.21 ppb(인천 석모리)~5.15 ppb(서울 도곡동)로 전체 평균은 2.33 ppb를 나타내고 있다. 수도권 지역의 연평균 Toluene 농도는 서울 5.05 ppb, 경기 5.15 ppb, 인천 2.22 ppb로 서울과 경기는 전체 평균농도의 2배 이상 높은 수치를 나타내고 있다. 따라서 지역별 톨루엔 농도 차이는 자동차 배출가스의 영향이 상당히 클 것으로 추정된다. 특히 유사휘발유의 사용은 이러한 경향을 더욱 높일 가능성이 있다.

4. 결 론

유사석유제품의 유통은 공평과세에 대한 형평성 저해, 건전한 석유유통 질서 저해, 차량의 부품 부식

및 화재·폭발사고를 일으키며, 정상석유제품을 사용한 차량에 비해 발암물질인 벤젠, 톨루엔, 자일렌과 같은 방향족 탄화수소 및 알데히드류 등의 많은 유해 대기오염물질을 배출하여 보건 환경적 문제를 일으킨다. 본 연구에서는 휘발유 차량을 대상으로 유사 휘발유 유통량을 파악하여 최근 도로이동오염원의 유해 대기오염물질 중 Benzene, Toluene, Xylene 배출량을 추정하였다.

첫째, 2008년 유사휘발유 사용을 고려하지 않고 모두 정상휘발유를 사용한 경우 BTX 배출량을 추정한 결과, Benzene은 405 tonne/yr, Toluene은 1,711 tonne/yr, Xylene은 717 tonne/yr로 나타났다.

둘째, 최근 (2003~2009) 정품휘발유 소비량 기준 유사휘발유 소비량이 6~13%를 차지하는 점을 고려하여 BTX 배출량을 추정한 결과 Benzene 452~515 tonne/yr, Toluene 1,882~2,264 tonne/yr, Xylene 732~752 tonne/yr로 나타났다.

셋째, 최근 유사휘발유 사용에 의하여 Benzene 배출량은 12~27%, Toluene 배출량은 10~32%, Xylene 배출량은 2~5% 추가적으로 증가하는 것으로 추정되었다.

유해대기측정망의 톨루엔 측정 농도는 교통량이 상대적으로 많은 수도권지역에서 높은 농도를 나타내고 있어 자동차 배출가스 및 휘발유의 증발에 의한 영향이 큰 것으로 추정되며 유사휘발유의 사용이 이러한 경향을 가중시킬 것으로 예상된다. 앞으로 유사휘발유의 엄격한 관리는 석유제품 유통 질서 확립 뿐만 아니라 대기오염과 유해대기오염물질 관리 측면에서도 중요함을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

- 국립환경과학원 (2007) 도로이동오염원 대기오염배출량 산출 방법 개선과 장래 배출량 예측방법 연구.
- 이경호 (2011) 연간 유사석유 유통량 맥주소비 3배...탈루세액 1조 6천억, 아시아경제 2011년 3월 11일자 <http://www.asiae.co.kr/news/view.htm?idxno=2011031109282211476>.
- Korea Institute of Petroleum Management (2009) 유사석유제품(휘발유) 성능평가 연구 결과 보고.
- Korea Institute of Petroleum Management (2010) 유사석유제품 유통실태분석을 통한 유통량 및 탈루세액 추정.
- 환경부 (2008) 대기환경월보.
- Cha, J.-S., J.-H. Lee, J.-H. Hong, D.-I. Jung, and J.-Y. Kim (2008) Estimation of Benzene emissions from mobile sources in Korea, J. KOSAE, 24(1), 72-82. (in Korean with English abstract)
- EEA (2010) EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009.
- Eom, M.-D., J.-H. Ryu, D.-I. Kang, Y.-S. Lyu, D.-W. Kim, S.-W. Jung, Y.-H. Park, and J.-C. Kim (2005) A study on the estimation of the HAPs Emission factors for the mobile source (II), National institute of environmental research. (in Korean with English abstract)
- Eom, M.-D., J.-S. Han, J.-H. Park, Y.-H. Lee, C.-S. Hwang, and J.-C. Kim (2006) A study on the estimation of the HAPs Emission factors for the mobile source (III), National institute of environmental research. (in Korean with English abstract)
- GTDB, Gyeonggi-do Transportation DB center (2008) Available from URL: <http://gtdb.gg.go.kr/GTDBWeb/>.
- Kim, J.-H., J.-B. Park, S.-W. Kim, J.-G. Kim, and D.-K. Kim (2008) A study on impact of illegal diesel on fuel system component durability, Proceedings of the 47th semiannual conference of KSTLE, pp. 168-172. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.-H., M.-H. Lee, G.-H. Kim, J.-G. Kim, and S.-C. Shin (2006) A study on the characteristics of engine performance and exhaust emission for the regular and irregular gasoline fuel using the FT-IR spectroscopy, Proceedings of the 2006 annual conference of KSAE, Nov, Volume 1, pp. 648-653. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.-H., M.-H. Lee, J.-B. Park, S.-W. Kim, H.-Y. Song, and J.-G. Kim (2007) A study on the characteristics of engine and vehicle performance and exhaust emission for legal and illegal diesel fuel, Proceeding of the 2007 annual conference of KSAE, Nov, pp. 384-389. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.-Y. (2009) A study on the petroleum industry policy - with focus on the illegal trade in pseudo-petroleum products and measures to eradicate them -, Master's thesis of Hanyang university. (in Korean with English abstract)
- KMA, Korea Meteorological Administration (2008) Ground observation data. Available from URL: http://www.kma.go.kr/weather/observation/past_table.jsp
- Lyu, Y.-S., J.-H. Ryu, J.-S. Han, S.-M. Kim, C.-S. Lim, D.-W. Kim, D.-M. Lee, J.-K. Lee, M.-D. Eom, and J.-C. Kim (2008) Exhaust VOCs emission characteristics from motor vehicles, J. KOSAE, 24(3), 275-283.

- (in Korean with English abstract)
- NIER, National Institute of Environment Research (2008) CAPSS (Clean Air Policy Support System).
- NIER, National Institute of Environment Research (2010) Assessment Manual of National Air Pollutant Emission Inventory (II), pp. 110-130.
- Opinet (2003 ~ 2009) Available from URL: <http://www.opinet.co.kr/chart.do?cmd=chart.list3>.
- Opinet (2011) Oil price trends in korea. Available from URL: <http://www.opinet.co.kr/oilknow.do?cmd=trend.list>.
- Petronet (2003 ~ 2009) Available from URL: <http://www.petronet.co.kr/main2.jsp>