

# 자동차연료 기준강화에 따른 대기오염물질 배출량 저감효과

## A Study on Reduction Effects of Air Pollutant Emissions by Automotive Fuel Standard Reinforcement

임철수<sup>1),\*</sup> · 홍지형<sup>2)</sup> · 김정수 · 이종태 · 임윤성 · 김상규 · 전상진

국립환경과학원 <sup>1)</sup>기후변화연구과, <sup>2)</sup>대기공학연구과, 교통환경연구소

(2010년 9월 29일 접수, 2010년 12월 6일 수정, 2011년 3월 2일 채택)

CheolSoo Lim<sup>1),\*</sup>, JiHyung Hong<sup>2)</sup>, JeongSoo Kim, JongTae Lee, YunSung Lim,  
SangKyu Kim and SangJin Jeon

*National Institute of Environmental Research, <sup>1)</sup>Climate Change Research Division,*

*<sup>2)</sup>Atmospheric Engineering Research Division, Transportation Pollution Research Center*

(Received 29 September 2010, revised 6 December 2010, accepted 2 March 2011)

### Abstract

The air pollutants from vehicle exhaust gas are affected by many factors including fuel qualities, engine and vehicle technologies, driving patterns. In particular, fuel qualities and after-treatment devices could directly affect the emission level of pollutants. The pollutant reduction characteristics that caused by enforced fuel quality standard were analyzed. Three types of test fuel were selected in accordance with Korean automotive fuel standard in 2006, 2009, 2012 and used for vehicle emission test in chassis dynamometer. European COPERT correction equation of fuel impact was considered as reference information to quantify the vehicle emission test results.

The contribution rates of exhaust emission by COPERT correction equation showed that aromatic compounds and oxygen contents in gasoline fuel was most important. In case of diesel fuel, cetane index and polycyclic aromatic compounds accounted for the greater part. The exhaust emission effects by COPERT correction equation revealed that CO and VOC was increased 0.86%, 1.57% respectively in after 2009 gasoline when compared to before 2009 gasoline fuel. In case of light-duty diesel vehicle CO, VOC and PM were decreased in range of 3 ~ 7%. The result from this study could be provided for developing future fuel standards and be used to fundamental information for Korean clean air act.

**Key words** : Automotive fuel, Vehicle exhaust gas, Aromatic compounds, European COPERT correction equation

## 1. 서 론

자동차에서 배출되는 대기오염물질은 사용되는 연

료품질 및 엔진기술, 배출가스 저감장치 기술, 운전 특성 등 많은 요인들에 의해 영향을 받는다(Lyu *et al.*, 2008; Jung *et al.*, 2006). 특히, 연료품질은 배출가스 저감장치 및 엔진에 직접적으로 영향을 미쳐 오염물질 배출수준을 좌우하는 데 결정적인 기여를 한다.

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7327, E-mail : lcs6713@korea.kr

특히 연료중 황성분은 연소되어 황산화물로 배출됨으로써 대기오염을 직접 유발시키기도 하지만, 황함량이 높을수록 휘발유차의 삼원촉매나 경유차의 매연여과장치 등과 같은 배출가스 저감장치에 함유된 촉매를 피독시켜 배출가스 정화성능을 악화시키기 때문에 매우 중요하게 관리되는 성분이다(Yao *et al.*, 2008; Durbin and Miller, 2003). 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 연료가 자동차 성능 및 배출가스에 미치는 영향의 중요성을 인식하여 연료의 조성변화에 따른 배출가스 특성변화 및 차량성능, 인체 영향 등을 분석하기 위해 자동차제작사, 정유사 및 관련 연구기관들이 참여한 “Auto/Oil Program”을 수행하고 있다. 미국은 가장 먼저 1989년부터 AQIRP(Air Quality Improvement Research Program) 콘소시움을 구성하여 자동차 배출가스 감소와 대기오염 해결을 위한 개질(reformulated)가솔린 및 대체연료와 자동차 배출물과의 상관관계를 규명하였다(AQIRP, 1997). 유럽은 EPEFE(European Programme on Emissions, Fuels and Engine technologies)라는 연구사업을 시작하였으며, 자동차와 연료품질에 관련된 기술뿐만 아니라, 교통관리분석, 대중교통수단, 기타 가능한 정책수단을 포함하여 자동차배출가스 문제해결을 합리적으로 접근하고자 하였다(EEA, 2000). 일본은 유럽의 Auto/Oil 프로그램을 기본모델로 하는 Clean Air Program(JCAP)을 1996년에 시작하였으며, 현재 3단계 연구가 진행중이다(JCAP, 2007). 이러한 연구결과들은 각국의 향후 자동차연료 제조기준 개정시 기술적 근거자료로 활용되거나 대기개선 정책을 고려하는 기초자료 및 자동차 제작시 배출가스 특성을 반영하는 데 중요한 자료로 활용되고 있다. 이처럼 자동차연료는 대기질 개선 및 국민건강에 매우 중요한 영향을 미치기 때문에 모든 국가들에서 휘발유 및 경유, LPG의 기준을 강화하고 있는 추세이다(World wide fuel charter, 2006). 국내의 자동차연료인 휘발유 및 경유, LPG의 각 항목별 제조기준은 1991년 기준 설정 이후 최근 2009년까지 여러 차례에 걸쳐 강화되었고, 최근에는 2004년 10월부터 수도권지역에 저황경유(황 430 ppm 이하) 대신 초저황경유(황 30 ppm 이하)를 조기 도입함으로써 경유차 배출가스저감장치가 보급될 수 있는 여건을 마련하였다. 또한 2006년에는 경유의 다고리방향족과 윤향성 제조기준이 신설되었으

며, 2009년에는 경유의 방향족화합물과 세탄지수 및 천연가스 제조기준이 신설되었다(Korea Ministry of Environment, 2009a).

본 연구에서는 2009년 휘발유와 경유의 연료제조기준 강화에 따른 자동차의 대기오염물질 배출량 저감 효과를 분석하고자, 기준강화 전인 2006~2008년 연료품질 및 차기 연료기준강화 예정인 2012년 제조기준안(Korea Ministry of Environment, 2009b)과 비교 분석하였다. 이를 위해 유럽 배출계수 산출프로그램인 COPERT III에서 사용되고 있는 연료 영향 보정식을 사용하였으며, 각 규제연도별 휘발유와 경유의 연료품질 분석치는 국립환경과학원에서 법정업무로서 수행한 전국의 주유소 및 저유소, 정유공장에서 유통, 생산되고 있는 연료들의 실제 분석값을 사용하였다. 본 연구결과들은 향후 연료제조기준 설정시 보다 합리적인 기준값 제시 및 기준강화 효과분석시 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 국내 기준강화 단계별 연료품질 결과 DB

2009년 연료품질기준강화에 따른 자동차의 대기오염물질 배출량 저감효과를 분석하기 위해 국립환경과학원에서 대기환경보전법에 따른 법정업무로서 2006년 4월~2009년 9월까지 연료 생산단계의 정유공장과 유통단계의 저유소 및 대리점, 주유소의 휘발유 및 경유 품질분석한 자료를 사용하였다. 분석항목은 휘발유 규제항목인 방향족 및 벤젠, 산소, 올레핀, 황 함량 등과 경유 규제항목인 밀도, 황, 다고리방향족 함량, 세탄가 등이며, 이들 항목은 대기환경보전법의 자동차연료 제조기준 시험방법에 따라 분석된 것이다. 표 1에 각 항목별 분석방법을 나타내었다.

기준강화 단계별 연료품질 분석기간 설정은 2009년 이후 연료품질기준강화 시점을 기준으로 기준강화 전(2006년 4월~2008년 9월)과 기준강화 후(2009년 4월~2009년 9월)로 구분하였다. 제조기준의 시작은 보통 당해연도의 1월부터 법적용이 이뤄지나, 시중 유통되는 연료는 그 이전 기준에 적용받던 연료의 판매분이 저장탱크에 남아 새로운 기준 연료와 치환되는 과정이 2~3개월 소요되기 때문에 기준년도 1월

**Table 1. Test methods of domestic automotive gasoline and diesel fuel.**

Fuel type	Item	Test method
Gasoline	Aromatics (Vol.%)	ASTM D6293
	Benzene (Vol.%)	ASTM D6293
	Oxygen (Wt.%)	ASTM D6293
	Olefin (Vol.%)	ASTM D6293
	Sulfur (ppm)	ASTM D5453
	RVP (kPa, 37.8°C)	ASTM D323
	Distillation, T90 (°C)	ASTM D86
Diesel	CCR 10% (%)	ASTM D524
	Sulfur (Wt.%)	ASTM D5453
	Density (@15°C, kg/m <sup>3</sup> )	KS M2002
	Polyaromatic (Wt.%)	IP 391
	HFRR (µm)	ASTM D6079
	Total aromatic (Wt.%)	IP 391
	Cetane index	ASTM D6890

**Table 2. Number of gasoline and diesel fuel quality data.**

Fuel	Regulation years	
	2006~2008	2009~
Gasoline	3,018	105~355
Diesel	6,218	125~339

을 기점으로 전·후 3개월여를 제외한 연료품질 분석결과만을 사용하여 단순히 해당 연료규제기간을 대표할 수 있도록 하였다. 또한, 환경부에서 최근 마련된 2012년 차기기준(안)의 예측성상도 비교되었는데, 이러한 2012년 연료품질의 예측성상은 정유사의 제조기준 만족율로부터 구하였다. 기준 만족율이란 대기환경보전법 연료제조기준 대비 정유사가 일반적으로 시중에 유통하는 연료품질의 수준을 말하는 것으로, 제조연도 및 성분별로 각기 다르며, 정유사는 제조기준 대비 일정한 여유 수준을 두고 연료를 제조, 관리한다. 본 연구에서는 가장 최근 제조기준인 2009년 기준 만족율을 2012년 연료품질기준안에 적용, 보정함으로써 2012년 이후 유통가능한 연료로 추정하였다.

전체 분석 시료수는 표 2에 나타내었는데, 연료품질 검사업무 수행에 따라 시료별 측정항목은 다소 차이가 있어, 연료성분별로 최소 105개에서 최대 6,218개의 연료분석결과를 데이터베이스화하였다. 이는 연료품질검사 업무인 정기검사와 수시검사에 따라 분석항목이 다르기 때문으로 황함량 분석시료수

가 6,200여 개로 가장 많고, 산소함량이 100여 개로 가장 적다.

## 2.2 연료영향 보정식(COPERT III 프로그램) 개요

COPERT 프로그램은 유럽에서 개발된 자동차배출 오염물질에 대한 배출계수 산정프로그램으로 몇차례 개정을 통하여 2000년 유럽환경국(EEA, European Environment Agency)의 COPERT III(Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport (2000. 11))로 발전하였다. COPERT에서는 차종별, 연료별, 오염물질별로 차속을 고려한 배출계수식을 제시하고 있다. 여기에는 유럽에서 기준이 강화된 2000년, 2005년 두 단계의 연료기준이 적용되었으며, 이들 연료의 기준을 표 3에 나타내었다. 이렇게 강화된 연료들은 차량의 배출가스를 더 감소시키는 효과를 보였다. 그 결과, 연료품질기준 “Fuel 2000”은 배출가스 규제기준인 Euro III를 만족하며 다음단계인 연료품질기준 “Fuel 2005”는 더 엄격한 배출허용기준인 Euro IV~V를 만족하는 것으로 나타났다(EEA, 2000). 이처럼 연료품질변화는 차량 배출가스에 직접 영향을 주기 때문에 배출계수를 산출하기 위해서는 해당 연료의 특성을 보정할 필요가 있다. 유럽의 COPERT 배출계수식에서는 Auto/Oil 프로그램의 연구결과로서 연료조성변화에 따른 배출가스 특성을 반영하기 위해 연료보정식을 만들어 사용하고 있다. COPERT에서는 이와 같은 연료품질에 의한 자동차 배출가스의 상관관계로부터 표 4와 같은 연료 영향 보정식을 제시하였다. 본 연구에서는 COPERT 연료 영향 보정식의 주요 연료항목에 국내 연료품질 분석 결과를 적용하여 배출가스 저감 효과를 분석하였다.

## 3. 연구결과

### 3.1 제조기준 만족율 및 연료품질 분석결과

각 규제연도별 연료품질을 분석한 결과, 표 5와 같이 제조기준 대비 실제 유통되는 연료품질은 상당히 낮은 값을 나타내었다. 기준연도별 제조기준 대비 실제 시중 유통되는 연료품질을 비교한 만족율을 보면 2006~2008년의 경우 휘발유와 경유는 각각 18.3~72.4%, 2.2~85.6% 수준을 나타냈으며, 그 중 휘발유

**Table 3. Gasoline, diesel fuel specifications applied in COPERT III.**

Fuel type	Property	1996 Base fuel	Fuel 2000	Fuel 2005
Gasoline	Sulphur [ppm]	165	130	40
	RVP [kPa]	68 (summer) 81 (winter)	60 (summer) 70 (winter)	60 (summer) 70 (winter)
	Aromatics [vol, %]	39	37	33
	Benzene [vol, %]	2.1	0.8	0.8
	Oxygen [wt %]	0.4	1.0	1.5
	Olefins [vol, %]	10	10	10
	E100 [%]	52	52	52
	E150 [%]	86	86	86
	Trace lead [g/L]	0.005	0.003	0.003
Diesel	Cetane Number [-]	51	53	53
	Density at 15°C [kg/m <sup>3</sup> ]	840	840	835
	T <sub>95</sub> [°C]	350	330	320
	PAH [%]	9	7	5
	Sulphur [ppm]	400	300	40
	Total Aromatics [%]	28	26	24

**Table 4. Gasoline, diesel vehicle pollutant correction factor equation.**

Pollutant	Fuel type	Correction factor equation
CO	Gasoline	$F_{corr} = (2.459 - 0.05513 * E100 + 0.0005343 * (E100)^2 + 0.009226 * ARO - 0.0003101 * (97 - S)) * (1 - 0.037 * (O_2 - 1.75)) * (1 - 0.008 * (E150 - 90.2))$
	Diesel light-duty	$F_{corr} = -1.3250726 + 0.003037 * DEN - 0.0025643 * PAH - 0.015856 * CN + 0.0001706 * T95$
	Diesel heavy-duty	$F_{corr} = 2.24407 - 0.0011 * DEN + 0.00007 * PAH - 0.00768 * CN - 0.00087 * T95$
VOC	Gasoline	$F_{corr} = (0.1347 + 0.0005489 * ARO + 25.7 * ARO * EXP(-0.2642 * E100) - 0.0000406 * (97 - S)) * (1 - 0.004 * (OLEFIN - 4.97)) * (1 - 0.022 * (O_2 - 1.75)) * (1 - 0.01 * (E150 - 90.2))$
	Diesel light-duty	$F_{corr} = -0.293192 + 0.0006759 * DEN - 0.0007306 * PAH - 0.0032733 * CN - 0.000038 * T95$
	Diesel heavy-duty	$F_{corr} = 1.61466 - 0.00123 * DEN + 0.00133 * PAH - 0.00181 * CN - 0.00068 * T95$
NOx	Gasoline	$F_{corr} = (0.1884 - 0.001438 * ARO + 0.00001959 * ARO * E100 - 0.00005302 * (97 - S)) * (1 + 0.004 * (OLEFIN - 4.97)) * (1 + 0.001 * (O_2 - 1.75)) * (1 + 0.008 * (E150 - 90.2))$
	Diesel light-duty	$F_{corr} = 1.0039726 - 0.0003113 * DEN + 0.0027263 * PAH - 0.0000883 * CN - 0.0005805 * T95$
	Diesel heavy-duty	$F_{corr} = -1.75444 + 0.00906 * DEN - 0.0163 * PAH + 0.00493 * CN + 0.00266 * T95$
PM	Diesel light-duty	$F_{corr} = -0.3879873 + 0.0004677 * DEN + 0.0004488 * PAH + 0.0004098 * CN + (0.0000788 * T95) * (1 - 0.015 * (450 - S) / 100)$
	Diesel heavy-duty	$F_{corr} = (0.06959 + 0.00006 * DEN + 0.00065 * PAH - 0.00001 * CN) * (1 - 0.0086 * (450 - S) / 100)$

\* O<sub>2</sub>=Oxygenates in %, OLEFIN=Olefin content in %, S=Sulphur content in ppm, ARO=Aromatics content in %, E100=Mid range volatility in %, E150=Tail end volatility in %, DEN=Density at 15°C (kg/m<sup>3</sup>), CN=Cetane number, S=Sulphur content in ppm, T95=Back end distillation in °C, PAH=Polycyclic aromatics content in %

의 황함량과 경유의 다고리방향족에서 각각 72.4%와 85.6%로 가장 낮게 나타났다. 2009년 이후에서는 제조기준 대비 유통 연료품질은 휘발유와 경유에서 각각 24.8~56.5%, 1.4~70.8%를 나타냈으며, 그 중 휘발유 황함량과 경유의 다고리방향족에서 각각 56.5%와 70.8%로 가장 낮게 나타났다. 이러한 2009년 연료의 제조기준 대비 기준만족율을 2012년 차기 제조기준안에 보정함으로써 실제 유통될 연료품질을

추정하였다. 2012년 차기기준안은 2009년 연료 대비 일부 항목에 대해서만 기준이 강화되었으며, 이 중 COPERT 연료보정식에 사용되는 항목들은 휘발유의 방향족화합물과 올레핀, 경유는 다고리방향족이 강화되었다. 이들 항목들에 대한 2009년 연료 제조기준 만족율은 휘발유 방향족화합물과 올레핀이 각각 29.1%, 24.8%이며, 경유 다고리방향족이 70.8%로 나타났다.

**Table 5. Analysis result of gasoline and diesel fuel (market average).**

Fuel type	Properties	Regulation years					
		2006~2008		2009~		2012~	
		Regulation	Sample (Avg. ±Std.dev.)	Regulation	Sample (Avg. ±Std.dev.)	Regulation	Correction
Gasoline	Aromatics (Vol.%)	≤30 (27)	16.39±2.98	≤24 (21)	17.01±1.74	≤22 (19)	15.59
	Olefin (Vol.%)	≤18 (21)	14.95±2.15	≤16 (19)	12.03±1.76	≤13 (16)	9.77
	Oxygen (Wt.%)	1.0~2.3	1.88±0.18	1.0~2.3	1.71±0.44	≤2.3	1.71
	Sulfur (ppm)	≤50	13.82±4.10	≤10	4.35±1.44	≤10	4.35
Diesel	Sulfur (ppm)	≤30	8.61±3.75	≤10	4.95±1.01	≤10	4.95
	Density @15°C (kg/m <sup>3</sup> )	815~845	826.6±13.70	815~835	823.2±3.51	815~835	823.2
	PAHs (Wt.%)	≤11	1.58±0.53	≤5	1.46±0.45	≤5	0.88
	Cetane index	-	55.14±1.41	≥52	55.91±2.09	≥52	55.91

2009년 이후 연료품질기준이 강화됨에 따라 기준 강화 전인 2006~2008년 휘발유 및 경유와 비교한 결과, 표 5에서 보듯이 휘발유의 경우 방향족화합물은 3.8% 증가하였고, 올레핀함량 19.5%, 산소함량 8.8%, 황함량 68.6%가 각각 감소하는 결과를 나타내었다. 방향족화합물의 경우 정유사들이 2006~2008년 제조기준을 충분히 만족할 수 있도록 신규 정제 시설들을 도입하였기 때문에 2009년 규제치가 강화 되었음에도 시중 유통 휘발유 중 방향족화합물 함량은 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 경유는 황함량 73.9%, 밀도 0.4%, 다고리방향족 7.6%가 각각 감소하였고, 세탄지수는 1.4% 증가하는 결과를 보였다.

2012년 연료제조기준에 2009년 연료제조기준 만족율을 보정하여 현재 2009년 이후 적용되는 연료품질기준과 비교한 결과, 휘발유의 방향족화합물은 8.4%, 올레핀함량 19.5%, 그리고 경유는 다고리방향족 39.7%가 각각 감소될 것으로 예상되었다.

**3. 2 연료 영향 보정식(COPERT III) 분석 결과**

**3. 2. 1 연료조성과 배출가스 오염물질 간 상관관계**

COPERT III의 연료 영향 보정식을 사용하여 연료 품질변화에 따른 자동차의 대기오염물질 배출량 저감 효과를 분석하였는데, 연료 영향 보정식에 사용되는 주요 연료성분들이 대기오염물질 배출에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 이는 COPERT 연료 영향 보정식의 연료성분들 중 다른 성분들 값은 고정시키고 1개 성분 값만 변화시켜 대기오염물질 배출에 미

**Table 6. An interrelation between gasoline, diesel fuel properties and emission pollutants.**

		CO	VOC	NOx	PM
Gasoline	Aromatics	↑	↑	↓	
	Sulfur	↑	↑	↑	
	Oxygen	↓	↓	↑	
	Olefin	-	↓	↑	
Diesel light-duty	Density	↑	↑	↓	↑
	Polycyclicaromatic	↓	↓	↑	↑
	Cetane number	↓	↓	↓	↑
	Sulfur	-	-	-	↑
Diesel heavy-duty	Density	↓	↓	↑	↑
	Polycyclicaromatic	↑	↑	↓	↑
	Cetane number	↓	↓	↑	↓
	Sulfur	-	-	-	↑

\* Proportion : ↑, Inverse proportion : ↓

치는 증가 또는 감소 등을 계산한 것이다. COPERT 연료 영향 보정식은 유럽 Auto/Oil 프로그램을 통한 수많은 실험과 분석자료들을 바탕으로 개발된 것이기 때문에 이러한 연료 영향 보정식의 민감도 분석을 통해 연료 조성 변화가 주요 대기오염물질 배출에 어떠한 영향을 미치는지를 우선적으로 판단해 볼 수 있다.

휘발유의 경우, 대표적인 조성인 방향족화합물, 황, 산소, 올레핀의 함량은 CO, NOx, VOC의 배출에 밀접한 영향을 미친다. 각 연료조성별로 함량변화에 따라 오염물질과 비례 또는 반비례의 관계를 나타내었다. 표 6에서 보듯이 방향족화합물의 경우 함량변화에 따라 CO, VOC와는 비례, NOx와는 반비례의 결

과를 보였다. 또한 산소함량은 CO, VOC와 반비례, NOx와 비례인 관계를 나타내며, 올레핀함량은 CO에는 영향을 미치지 않고 VOC와 비례, NOx와는 반비례의 관계를 나타내었다. 이러한 각 연료조성이 오염물질에 미치는 영향을 복합적으로 평가하여 연료와 배출가스 오염물질 간의 상관성을 도출하였다.

경유의 경우, 대표적인 조성인 밀도, 다고리방향족, 세탄지수, 황의 함량은 배출가스 오염물질인 CO, NOx, VOC, PM과 밀접한 관계를 가진다. 각 연료조성별로 함량변화에 따라 오염물질과 비례 또는 반비례의 관계를 나타내었다. 표 6에서 보듯이 밀도의 경우는 함량변화에 따라 소형디젤에서는 CO, VOC, PM과 비례, NOx는 반비례하며, 대형디젤에서 CO, VOC와 비례, NOx, PM과는 반비례 경향을 보였다. 또한 다고리방향족 함량에 따라 소형디젤에서는 CO, VOC와 반비례, NOx, PM과 비례인 관계를 나타내며, 대형디젤에서는 CO, VOC, PM과 비례, NOx와는 반비례인 결과를 나타내었다. 세탄지수는 소형디젤에서 CO, VOC, NOx와는 반비례, PM과는 비례이며, 대형디젤에서는 CO, VOC, PM과 반비례, NOx와는 비례이었다. 황함량의 변화는 소형, 대형디젤에서 CO, VOC, NOx에 영향을 미치지 않고 PM에 대해서만 비례 관계를 나타내었다.

3.2.2 연료조성이 배출가스에 미치는 기여도 분석

앞 절에서 언급한 바와 같이 연료조성은 배출가스 오염물질에 영향을 미친다. 그리고 각 연료조성과 오염물질과의 개별 상관성이 복합적으로 작용하여 연료에 따른 배출가스 오염물질 결과가 나타난다. 따라서 COPERT 연료보정식에서 이와 같은 각 연료조성이 복합적으로 작용하였을 때 배출가스 오염물질에 미치는 기여도를 분석하였다. 이는 COPERT 연료보정식에서 하나의 기준성분값을 제외한 나머지 성분들을 고정하고, 이에 단계별로 수치를 대입하여 계산하면 기준이 된 성분값에 따른 일차방정식을 구할 수 있다. 이 과정을 반복하여 COPERT 연료보정식에서 사용된 각각의 성분값 별 일차방정식을 구하면 함수의 기울기에 따라 각각의 연료조성이 오염물질에 미치는 기여도를 구할 수 있다.

휘발유

휘발유의 경우, 연료조성이 오염물질 발생에 기인하는 기여도를 그림 1에 나타내었다. NOx와 VOC는

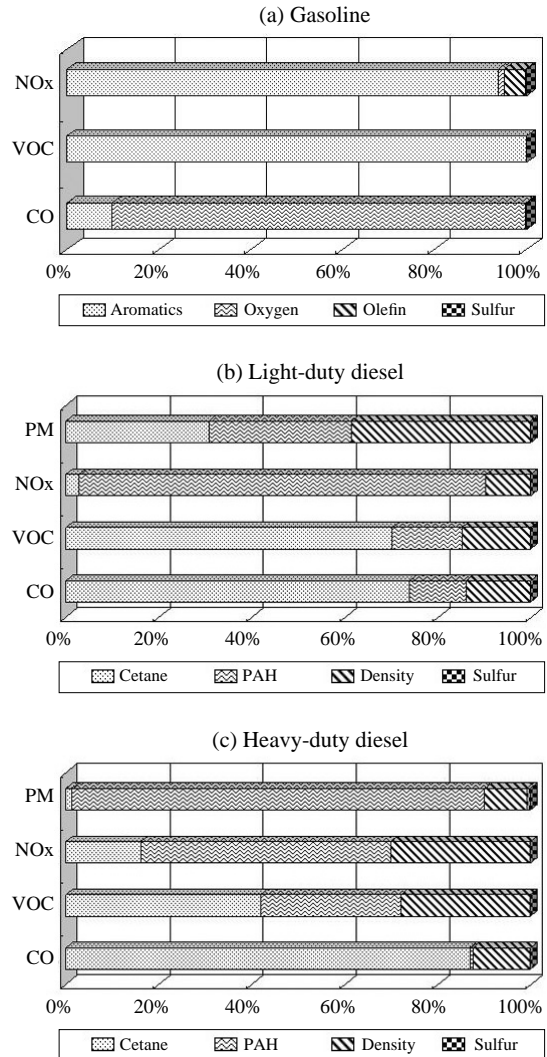


Fig. 1. Contribution of air pollutants emissions by fuel property content.

휘발유의 방향족화합물 함량이 다른 성분에 비하여 매우 큰 영향을 미쳐서 각각 93.5%와 99%의 기여도를 나타내었다. 이는 이론적으로 방향족화합물은 파라핀화합물 등과 비교하여 착화성이 열등하기 때문에 옥탄가는 상승시키나 연소 특성상 그 함량이 증가함에 따라 불완전연소에 의해 엔진 내부 침전물을 증가시키고 탄소/수소의 비가 커서 CO<sub>2</sub>를 포함한 배출가스를 증가시키며 유해 대기오염물질 배출을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Korea Ministry of Envi-

ronment, 2005). 또한, CO의 발생은 산소함량에 의해 가장 크게 영향을 받는 것으로 나타났는데, 89%의 기여도를 보였다. 휘발유 산소함량을 이용하여 대기 개선정책에 활용한 대표적인 사례는 미국에서 CO 기준 미달성 주정부들이 휘발유 합산소제로 사용되던 기존의 MTBE (Methyl tert-butyl ether) 대신에 바이오에탄올 같은 산소함량이 높은 합산소제를 보급함으로써 규제기준을 달성한 예가 있다.

경유

경유의 각 조성이 배출가스 오염물질 생성에 미치는 기여도를 그림 1에 나타내었다. 경유는 소형 및 대형디젤에 따라 다소 상이한 결과를 보였다. 소형디젤에서 CO와 VOC의 발생은 세탄지수가 각각 74%, 70%로 크게 영향을 미쳤으며, NOx는 다고리방향족이 87%, PM은 밀도, 세탄지수, 다고리방향족 함량이 각각 38%, 31%, 31%로 비슷한 기여도를 나타내었다. 대형디젤의 경우 CO는 세탄지수가 87%, PM은 다고리방향족 함량이 89% 기여율을 나타내어 다른 조성에 비해 크게 영향을 미쳤으나, VOC의 발생은 세탄지수, 다고리방향족, 밀도가 각각 42%, 30%, 28% 기여도를 갖는 것으로 분석되었다. NOx의 경우, 다고리방향족, 밀도, 세탄지수가 각각 54%, 30%, 16% 순으로 큰 기여도를 나타내었다. 이는 디젤연료의 밀도는 엔진 동력의 변화, 엔진 배출과 연료소비에 영향을 미치고, 방향족화합물은 착화온도에 영향을 미치는데 이러한 원인으로 이들 연료 조성이 PM, NOx 배출에 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다(Korea Ministry of Environment, 2005; Choi, 2001; Jung, 2000).

3.2.3 COPERT 연료보정식에 의한 대기오염물질

배출 증감율

연료기준강화에 따른 자동차의 대기오염물질 배출량 저감 효과를 분석하고자, 앞서 데이터베이스화한 각 기준연도별 연료품질 분석결과 평균값을 COPERT III 연료 영향 보정식에 적용하여 배출가스에 미치는 영향을 분석하였다.

휘발유

연료기준강화에 따른 자동차의 대기오염물질 배출량 저감 효과는 비교대상을 두 가지 경우로 나누어 분석하였다. 먼저 2006~2008년의 기준강화 전인 연료에 대비하여 현재 2009년 이후 기준강화된 연료를

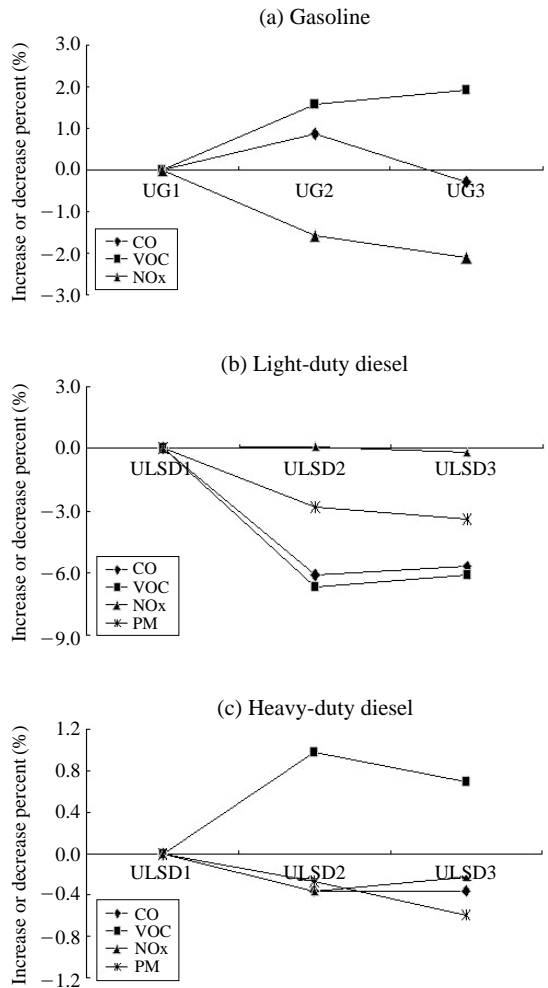


Fig. 2. Emission effects by regulation reinforcement year using correction formula COPERT.

사용하였을 때 나타나는 대기개선효과와 두 번째로 현재 2009년 기준강화된 연료를 기준으로 2012년 차기기준안이 적용된 연료를 사용했을 경우에 발생하는 대기개선효과를 분석하여 그림 2에 나타내었다. 그림에서 UG1, UG2, UG3는 각각 휘발유 연료기준강화연도인 2006~2008년, 2009년 이후, 2012년 이후를 의미하며, ULSD1, ULSD2, ULSD3는 각각 경유 연료 기준강화연도인 2006~2008년, 2009년 이후, 2012년 이후를 의미한다.

휘발유의 경우 그림 2에서 보듯이 2006~2008년 연료 대비 기준강화 후 연료를 사용하였을 때 CO는

0.86% 증가, VOC는 1.57% 증가, NOx는 1.57% 감소하는 결과를 보였다. CO와 VOC의 일부 증가는 가장 큰 영향을 미치는 방향족화합물과 산소함량이 오히려 2009년에 약간 증가하였거나 감소 정도가 매우 낮기 때문에 사료된다. 또한, 2009년 기준강화 후인 현재의 연료 대비 2012년 차기기준안이 적용된 연료를 사용하였을 때는 CO와 NOx는 각각 1.12%, 0.54%가 감소되었고, VOC는 0.34% 증가되는 결과를 나타내었다.

경유

경유는 그림 2에서 보듯이 2006~2008년 기준강화 전 연료 대비 2009년 기준강화 후 연료를 사용하였을 때 소형경유차의 경우 CO, VOC, PM에서 각각 6.10%, 6.68%, 2.86% 감소되었으나, NOx는 0.12% 증가되어 별 영향을 미치지 못하였다. 대형경유차에서는 CO, NOx, PM에서 각각 0.36%, 0.36%, 0.86% 감소되었으며, VOC 0.98% 증가하는 결과를 나타내었다. 즉, 대형경유차에서는 2009년 기준강화 전에 비해 기준강화 후의 배출가스 영향은 대부분 1% 이하로 거의 차이가 없었으나, 소형경유차의 CO, VOC, PM에서는 약 3~7%의 오염물질 배출 감소를 나타내어 연료기준강화가 대기오염물질 저감에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 소형차와 대형차의 엔진연소방식 및 연료분사방식에 차이가 있는데, 여기에 연료 성분

중 배출가스에 영향을 미치는 다고리방향족과 세탄 지수에 더욱 소형차가 민감하게 반응하기 때문으로 사료된다. 즉, 소형경유차의 경우 연료에 혼합방식이나 커먼레일 연료분사방식이 보편화되었지만 대형차는 이들 방식의 적용이 일반화되지 않았기 때문이다.

또한, 기준강화 후인 2009년 현재의 연료 사용 대비 2012년 차기기준안이 적용된 연료를 사용하였을 때 소형경유차에서는 CO와 VOC에서 각각 0.43%, 0.64% 증가되었고, NOx와 PM은 각각 0.29%, 0.57% 감소되어 모두 1% 이하로 배출가스 영향이 거의 없었다. 또한, 대형경유차에서는 CO와 VOC, PM은 각각 0.01%, 0.28%, 0.32% 감소되었고, NOx는 0.14% 증가되는 결과를 보였다. 즉, 2009년 연료기준 대비 2012년 차기연료기준 적용시 배출가스 효과는 모두 1% 이내로 거의 영향이 없었는데, 이는 오염물질 배출에 가장 큰 영향을 미치는 세탄지수가 2009년과 2012년 연료에서 별 차이가 없었고, 다고리방향족함량도 2009년 연료대비 2012년 연료는 40%가량 감소하였지만 절대값은 기준치 대비 17.6%로 매우 낮아 배출가스에 미치는 영향은 크지 않았음을 알 수 있었다.

3.2.4 연료품질기준강화에 따른 대기오염물질 배출량 변화

연료기준강화에 따른 전체 이동오염원부분 대기오염물질 배출량 증감효과 분석은 COPERT III 연료 영향 보정식으로 계산된 대기오염물질 배출 증감율을 2007년 휘발유차와 소형, 대형 경유차 배출량에 적용하여 계산하였다. 2007년 차종별 대기오염물질 배출량은 환경부 대기환경정책지원시스템(CAPSS) 자료를 활용하였다(NIER, 2007).

휘발유

표 7에서 보듯이 2009년 이후 기준강화된 휘발유

Table 7. Increase and decrease rate of gasoline vehicle emissions after 2009, 2012 fuel quality standard strengthening.

	Pollutants (ton)		
	CO	VOC	NOx
2007 Emissions	344,000	52,000	59,000
2009 Fuel effect	2,954 ↑	815 ↑	920 ↓
2012 Fuel effect	3,847 ↓	177 ↑	316 ↓

Table 8. Increase and decrease rate of diesel vehicle emissions after 2009, 2012 fuel quality standard strengthening.

	Pollutants (ton)							
	Light duty				Heavy duty			
	CO	VOC	NOx	PM	CO	VOC	NOx	PM
2007 Emissions	42,000	7,000	71,000	9,000	86,000	25,000	347,000	14,000
2009 Fuel effect	2,540 ↓	450 ↓	85 ↑	256 ↓	311 ↓	248 ↑	1,249 ↓	37 ↓
2012 Fuel effect	179 ↑	43 ↑	205 ↓	51 ↓	9 ↓	71 ↓	486 ↑	44 ↓

Note) On-road vehicle emissions obtained by Clean Air Policy Support Program (NIER, 2007)



를 사용하는 경우 기준강화 전인 2006~2008년 연료 사용에 비해 전체 휘발유차 오염물질 중 CO와 VOC는 각각 2,954톤, 815톤 증가되었고, NOx는 920톤 저감되는 효과를 나타내었다. 또한, 2009년 기준 대비 2012년 이후 차기기준안이 적용되는 연료를 사용할 때 휘발유차 배출량 중 CO와 NOx는 각각 3,847톤, 316톤 저감되었고, VOC는 177톤 증가되는 결과를 나타내었다.

경유

소형 및 대형경유차에 대해 2009년 이후 기준강화된 경유를 사용하는 경우 표 8에서 보는 바와 같이 기준강화 전인 2006~2008년 연료사용에 비해 전체 이동오염원의 오염물질 중 CO, VOC, NOx, PM은 각각 2,871톤, 202톤, 1,164톤, 293톤 감소되는 효과를 나타내었다. 또한, 2009년 기준 대비 2012년 이후 차기기준안이 적용되는 연료를 사용할 시 CO, NO는 각각 170톤, 281톤 증가되었고, VOC, PM은 각각 28톤, 95톤 감소되는 효과를 기대할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 2006년부터 국내 자동차연료로서 유통되고 있는 휘발유와 경유의 제조기준 연도별 배출가스에 미치는 영향을 평가하기 위해 연도별 제조 단계와 유통단계에서 사용되고 있는 연료성분을 분석하였고, 2009년 연료기준강화 대비 기준강화 전인 2006~2008년 및 2012년 차기기준 연료 사용시 대기개선효과 분석을 위해 유럽 COPERT 연료영향 보정식에 적용하여 차량 배출가스 영향을 분석하였다.

기준연도별 제조기준 대비 실제 시중 유통되는 연료품질은 2006~2008년의 경우 휘발유와 경유가 각각 18.3~72.4%, 2.2~85.6% 수준을 나타냈으며, 그 중 휘발유의 황함량과 경유의 다고리방향족에서 각각 72.4%와 85.6%로 가장 높았다. 2009년 이후에서는 제조기준 대비 유통 연료품질은 휘발유와 경유에서 각각 24.8~56.5%, 1.4~70.8%를 나타냈으며, 그 중 휘발유 황함량과 경유의 다고리방향족에서 각각 56.5%와 70.8%로 가장 높은 값을 나타내었다.

COPERT 연료 영향 보정식을 통해 휘발유 및 경유의 성분별 배출가스에 미치는 기여율 영향을 분석한

결과, 휘발유의 경우 방향족화합물과 산소함량이 주요인으로서, NOx와 VOC의 경우 휘발유의 방향족화합물 함량이 93.5%와 99%의 기여도를 보여 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 경유에서는 소형차와 대형차에서 약간 차이가 있으나 전반적으로 CO와 VOC의 경우 세탄지수가 가장 큰 영향을 미치며, NOx와 PM의 경우 다고리방향족의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

연료 영향 보정식을 이용한 배출가스 영향 분석결과, 2006~2008년 기준강화 전에 비해 2009년 기준강화 후 휘발유는 CO와 VOC가 0.86%, 1.57% 증가되었으며, NOx는 1.57% 감소하는 결과를 보였다. 2009년 기준 대비 2012년 차기기준 연료에서는 약 1% 이내로 증감효과가 매우 적었다. 소형과 대형경유차에서는 2009년 기준강화 전에 비해 기준강화 후의 배출가스 영향은 대부분 1% 이하로 거의 차이가 없었으나, 소형경유차의 CO, VOC, PM에서는 약 3~7%의 오염물질 배출 감소를 나타내었다.

전반적으로 휘발유와 경유 중 방향족화합물과 같은 탄소함량이 많은 성분들이 배출가스에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 본 연구결과들은 저탄소 연료기준과 같은 신규 연료규제기준 설정시 보다 과학적이고 현실성 있는 기준마련의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이며, 이후 연구에서는 연료규제 기준별 함량을 고려한 실제 연료를 제조하여 직접 차량 배출가스 시험한 결과와 본 연구결과를 비교 분석하여 발표할 예정이다.

참 고 문 헌

AQIRP (1997) Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program, Final Report.  
 Choi, J.W. (2001) Atmospheric Pollution & Automotive Fuels, Maru Press Inc., Korea. 35pp.  
 Durbin, T.D. and J.W. Miller (2003) The effect of fuel sulfur on NH<sub>3</sub> and other emissions from 2000~2001 model year vehicles, CRC project No. E-60, Final Report.  
 EEA (European Environment Agency) (2000) COPERT III documentation.  
 JCAP (2007) Further Challenge in Automobile and Fuel Technologies for Better Air Quality-5th JCAP Confer-

- ence.
- Jung, S.W., J.H. Ryu, Y.S. Lyu, and C.S. Lim (2006) A study on the exhaust characteristics of pollutants from recreational vehicle (RV) in Korea, 2006, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 22(1), 127-134. (in Korean with English abstract)
- Jung, Y.I. (2000) Automotive and environment, Hansung Univ. Press., 78pp.
- Korea Ministry of Environment (2005) A study on next term automotive fuel quality standard establishment.
- Korea Ministry of Environment (2009a) Clean air conservation act of Korea Ministry of Environment.
- Korea Ministry of Environment (2009b) A study on next term automotive fuel standard establishment.
- Lyu, Y.S., J.H. Ryu, J.S. Han, S.M. Kim, and C.S. Lim (2008) Exhaust VOCs emission characteristics from motor vehicles, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 24(3), 275-283. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Environmental Research (2007) National air pollutants emission by Clean Air Policy Support Program (CAPSS).
- World wide fuel charter (2006) Fourth edition.
- Yao, Y.H., J.H. Tsai, A.L. Chang, and F.T. Jeng (2008) Effects of sulfur and aromatic contents in gasoline on motorcycle emissions, Atmospheric Environment, 42, 6560-6564.