

경유 화물자동차 매연 배출 요인 분석*

Study of the Analysis on the Emission Factors of Diesel Trucks

한진석**

Jin-seok Hahn

요약: 본 연구는 교통부문에서 미세먼지 배출 비중이 큰 경유 화물차를 대상으로 이항로짓모형 기반의 매연 배출 모형을 추정하여 경유 화물차의 자동차 종합검사 합격에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 분석 자료는 2018년 기준 자동차 종합검사 자료를 활용하였으며, 모형 추정 결과 차량의 업종, 등록지, 연식, 총주행거리, 저공해 조치 유무 변수가 자동차 종합검사 결과 합격에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이상의 결과를 토대로 화물차의 오염물질 배출 저감을 위하여 최근 전국으로 확대된 운행차 배출가스 저감사업의 개선 방안과 화물차의 운행 효율성을 높이기 위한 정책 방향을 제시하였다. 이 외에도 화물차 시장은 단기적으로 경유 외 대체연료 차량의 보급을, 중장기적으로는 무배출 화물차 보급을 위한 지원 및 정책을 병행해야 할 필요가 있다.

핵심주제어: 화물차, 미세먼지, 운행차 배출가스 저감사업, 운행 효율성, 이항로짓모형

Abstract: Based on the binary logit analysis, this study proposes an emissions model for diesel trucks with higher emissions of fine dust. In addition, the study analyzes factors determining the acceptance of diesel trucks in comprehensive vehicle inspection. Analysis of the comprehensive vehicle inspection data as of 2018 revealed that the business type of vehicle, place of registration, manufacturing year, mileage, and the presence of diesel retrofit devices influence the acceptance of diesel trucks in comprehensive vehicle inspection. Accordingly, the study proposes measure store duceemissions from vehicles as well a stominimizeharmful pollutante missions from trucks. Moreover, policy directions have been presented to promote the operational efficiency of trucks. Furthermore, the study highlights the need to provide support and make policy decisions to distribute freight vehicles with alternative fuels other than diesel on a short-term basis and zero-emission vehicles on a mid-term and long-term basis.

Key Words: Diesel Truck, Fine Dust, Vehicle Emission Gas Reduction Project, Running Efficiency, Binary Logit Model

* 본 논문은 한국환경정책·평가연구원 보고서인 '육상화물운송수단의 미세먼지 및 온실가스 저감 방안 연구'를 학술논문 형태로 재구성한 글임을 밝힌다.

** 한국환경정책·평가연구원 연구위원

I. 서론

전 세계적으로 교통부문에서 발생하는 미세먼지 배출량은 1990년 이래 지속적으로 증가하는 추세이며,¹⁾ 이는 물류 활성화, 경유 승용차 시장 확대 등에 따른 경유 소비량 증가가 주된 요인으로 판단된다.²⁾ 경유는 휘발유 등 타 연료 대비 저렴한 장점으로 화물차, RV(Recreational Vehicle) 등에서 주로 소비되고 있으며, 특히 중대형 화물차는 약 90% 이상이 경유를 사용하기 때문에 경유차에서 발생하는 미세먼지 배출 비중 역시 중대형 화물차가 타 차종 대비 크다.

국내 초미세먼지 농도 역시 2015년 $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2018년 $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 유사한 수준을 보이고 있어³⁾ 농도가 높아지고 있지는 않으나, 최근 고농도 미세먼지 사례를 감안한다면⁴⁾ 지속적인 저감 노력이 필요하다. 특히 교통부문의 경우 인구밀도가 높은 수도권에서 초미세먼지 배출 비중은 총 배출량 대비 약 18%이며, 미세먼지 2차 생성 기여도가 큰 질소산화물의 경우는 약 32%로 가장 높은 특성을 보인다.⁵⁾ 또한 차종별로는 초미세먼지와 질소산화물 모두 화물차, RV의 배출 비중이 상대적으로 큰 특성을 보인다.

국내에서는 교통부문 미세먼지 관리를 위하여 제작차 및 운행차 배출허용기준, 자동차 평균에너지소비효율기준 및 온실가스 배출허용기준, 운행차 배출가스 저감사업, 환경친화적 자동차 보급 등 다양한 제도 및 정책을 추진하고 있다. 특히 국내 자동차 배출허용기준은 국외 대비 상당히 높은 수준이기 때문에 기준 자체를 강화하기에는 한계가 있다.

1) Klimont et al.(2017).

2) 2015년 도로부문 경유 소비량은 1970년 대비 약 8배 이상 증가(Miller and Jin, 2018).

3) 국립환경과학원(2019).

4) 고농도 사례 발생 빈도가 잦은 봄/겨울철의 평균 초미세먼지 농도(1~5월)는 2015년 $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2017년 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 소폭 증가 추세, 2018년 3월 일평균(24시간) 초미세먼지 대기환경기준이 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 강화되어 기준치 초과 사례 증가(이승민 등, 2019).

5) 국가 대기오염물질 배출량 서비스, <http://airemiss.nier.go.kr>.

또한 신규 제작차의 자동차 검사 유효기간이 1년~4년이고 자동차 보유기간이 평균 10년 이상이라는 점을 감안한다면 자동차 보유기간 동안 운행차를 제대로 관리하는 것이 매우 중요하다고 판단된다. 이에 본 연구에서는 미세먼지 배출 비중이 큰 화물차에 대한 매연 배출 모형을 추정하고, 이를 토대로 경유 화물차의 관리 방안을 검토하고자 한다. 매연 배출 모형은 이항로짓모형을 기반으로 추정하였으며, 모형 추정을 위한 자료는 2018년 기준 자동차 종합검사 결과를 활용하였다.

II. 선행연구

국내 운행 경유차 배출가스 관리와 관련된 국내·외 선행연구는 다음과 같다. 국내의 경우 홍정호·박호정(2008)은 수도권 대기오염 개선을 위한 운행 경유차 배출가스 저감사업의 사회적 경제성을 2005년과 2006년의 감축 실적에 근거하여 평가하였으며, 정석철(2010)은 서울시를 중심으로 운행 경유차 배출가스 저감사업의 시행 효과를 분석하였다. 또한 김철희 등(2011)은 수집 가능한 측정망 자료를 토대로 운행 경유차 배출가스 저감사업의 효과를 해석하였으며, 박호정·홍종호(2014)는 주요 차량 배출가스 저감장치의 유효성을 비교 분석하여 수도권 운행 경유차 배출가스 저감사업의 효과를 검토하였다.

김종원·강광규(2015)는 노후 경유차의 조기폐차 유도 확대를 위한 조기폐차 보조금 지원 제도 개선방안을 검토하였으며, 이규진 등(2015)은 교통수요모형과 대기준의사결정기법을 연계하여 국내 자동차 배출가스 저감 정책을 평가하였다. 김운수·강정아(2015)는 경유차의 배출특성을 분석하여 운행 경유차에 대한 관리 방향을 제시하였다.

길지훈 등(2017)은 노후 경유차의 질소산화물 배출 특성을 분석하고, 해당 결과를 근거로 조기폐차 사업 확대에 대한 타당성을 검토하였으며, 최성규(2019)는 시계열 분석을 통하여 노후 경유차에 부착되는 배출가스

저감장치의 효과를 검토하고, 이를 토대로 해당 장치의 성능 변화 모형을 제시하였다.

한편, 국외 관련 선행연구는 주로 배출가스 저감장치 효과를 분석한 사례가 주를 이루며, 특히 미세먼지를 저감하는 DPF와 질소산화물을 저감하는 SCR를 부착한 차량이 오염물질별 배출허용기준을 얼마나 만족하는가를 분석한 사례가 대부분이다(Herner et al., 2009, 2011; Millstein et al., 2010; Dallmann et al., 2011; Misra et al., 2013).

또한 Barone et al.(2010)은 통학버스의 미세먼지 저감을 위한 DPF 부착 효과를 장치 저감 전과 후를 비교하여 검토하였으며, Czerwinski et al.(2014)는 대형 차량을 대상으로 PM·NOX 동시저감 장치의 성능 수준과 장치 부착 효과를 검토하였다. Guan et al.(2014)과 Feng and Lü(2015)는 교통부문 질소산화물 저감을 위한 SCR 장치의 전반적인 기술 수준 동향을 검토하였으며, Quiros et al.(2016)는 대형 화물차의 연료별(경유(SCR 부착), 천연가스, 경유 하이브리드) 실도로 질소산화물 배출량을 비교하였다.

Kubsh(2017)는 경유차의 배출가스 저감 장치 기술과 도로 및 비도로 교통수단에 대한 부착 효과를 검토하였으며, Giechaskiel et al.(2018)과 Giechaskiel et al.(2019)은 각각 Euro 5 수준의 경유 승용차, Euro 6b 수준의 경유 승용차를 대상으로 SCR 부착 유무에 따른 질소산화물 배출량 변화를 검토하였다. Lathia and Dadhaniya(2019)는 미국, 중국, 독일 등 주요 선진국의 배출가스 저감사업을 토대로 인도의 여건에 적합한 자동차 배출가스 저감사업의 방향을 제시하였다.

이상의 선행 연구를 검토한 결과 대부분의 연구가 운행차 배출가스 저감사업의 효과 평가, 배출가스 저감장치의 성능 및 효과 평가에 초점이 맞추어져 있으며, 운행차 배출가스 관리 개선을 위한 연구는 미비한 것으로 검토되었다. 특히, 국내의 경우 본 연구에서와 같이 특정 차종의 매연 배출 특성을 모형화한 사례가 전무하다는 점에서 교통부문의 오염물질 저감 정책 수립을 위한 학술적 기초연구가 시급한 것으로 판단된다.

Ⅲ. 매연 배출 모형 구축

1. 기초 자료⁶⁾

앞서 서술한 바와 같이 매연 배출 모형을 추정하기 위하여 한국환경공단 자동차 배출가스 종합전산시스템의 2018년 자동차 종합검사 자료를 활용하였다. 분석 대상은 미세먼지 배출 비중이 큰 경유 화물차로 국한하였으며, 분석 대수는 총 1,064,669대이다. 부하검사방법⁷⁾에 따른 지역별 업종별 분석 대수는 <표 1>과 같으며, 부하검사방법에 따른 종합검사 결과는 <표 2>, <표 3>과 같다.

<표 1> 분석 대상

구분		KD147모드(대)			Lug Down 3모드(대)		
		비사업용	사업용	소계	비사업용	사업용	소계
화물차	수도권	469,217	41,903	511,120	20,330	24,222	44,552
	비수도권	414,324	20,913	435,237	30,383	43,377	73,760
	소계	883,541	62,816	946,357	50,713	67,599	118,312

KD147모드의 경우 수도권 등록 차량의 합격 비율은 86.7%이며, 합격 차량에 대한 평균 매연 농도는 6.4%이다. 또한 비수도권 등록 차량의 합격 비율은 85.9%이며, 합격 차량에 대한 평균 매연 농도는 8.1%이다. 수도권 등록 차량과 비수도권 등록 차량 모두 불합격 차량의 평균 주행거리 및 평균 매연 농도는 합격 차량 대비 높게 나타났으며, 종합검사 합격 차량의 전국 평균 매연 농도는 7.2%, 불합격 차량의 평균 매연 농도는 38.9%로 나타났다.

6) 본 연구에서 분석한 자료는 시계열 자료가 아니기 때문에 자동차 종합검사 결과(평균 매연 농도 등)에 대한 추세를 보이기에는 한계가 있음.

7) KD147모드와 Lug Down 3모드는 모두 경유 자동차의 배출가스 검사방법이며, KD147모드는 승용자동차, 중형 이하 승합·화물·특수자동차를 대상으로, Lug Down 3모드는 대형 승합·화물·특수자동차, 중형 화물·특수자동차 중 일반형에서 특수용도형으로 구조를 변경한 자동차를 대상으로 함.

Lug Down 3모드도 마찬가지로 수도권 등록 차량과 비수도권 등록 차량 모두 평균 주행거리는 합격 차량이 불합격 차량 대비 높게, 평균 매연 농도는 불합격 차량이 합격 차량 대비 높게 나타났으며, 종합검사 합격 차량의 전국 평균 매연 농도는 7.3%, 불합격 차량의 평균 매연 농도는 38.5%로 나타났다. 다만 수도권의 경우 3.5톤 미만 불합격 차량의 평균 매연 농도는 2001년 이후 연식의 차량이 2001년 이전 연식의 차량보다 다소 높게 나타났으나, 이는 분석 자료가 모집단이 아니기 때문에 나타날 수 있는 현상으로 판단하였다.

〈표 2〉 화물차 검사 결과(KD147모드)

구분	제작일자	합격			불합격		
		표본수(대)	비율(%)	평균 매연 농도(%)	표본수(대)	비율(%)	평균 매연 농도(%)
수도권	~1992.12.31	266	85.8	15.5	44	14.2	61.8
	~1995.12.31	1,556	85.9	14.5	255	14.1	53.5
	~2000.12.31	21,924	81.7	13.2	4,922	18.3	44.1
	~2007.12.31	146,765	82.0	9.1	32,240	18.0	39.1
	2008.1.1.~	272,584	89.9	4.3	30,564	10.1	32.2
	소계	443,095	86.7	6.4	68,025	13.3	37.2
비수도권	~1992.12.31	299	78.9	25.1	80	21.1	67.6
	~1995.12.31	2,347	80.3	24.0	577	19.7	57.6
	~2000.12.31	29,835	84.2	18.6	5,598	15.8	52.6
	~2007.12.31	131,957	81.6	12.0	29,802	18.4	43.8
	~2016.8.31	209,298	89.2	4.0	25,396	10.8	31.8
	~2017.12.31	38	79.2	3.4	10	20.8	13.1
	2018.1.1.~	0	-	-	0	-	-
	소계	373,774	85.9	8.1	61,463	14.1	40.7
합계		816,869	86.3	7.2	129,488	13.7	38.9

〈표 3〉 화물차 검사 결과(Lug Down 3모드)

구분	제작일자		합격			불합격		
			표본수(대)	비율(%)	평균 매연 농도(%)	표본수(대)	비율(%)	평균 매연 농도(%)
수도권	3.5톤 미만	~2000.12.31	31	83.8	16.1	6	16.2	42.5
		2001.1.1~	1,624	97.9	6.8	34	2.1	44.1
	3.5톤 이상	~2000.12.31	9,374	89.0	9.3	1,164	11.0	44.3
		2001.1.1.~	29,851	92.4	6.2	2,468	7.6	34.3
	소계		40,880	91.8	6.9	3,672	8.2	37.5
비수도권	5.5톤 이하	~1995.12.31	172	95.0	39.0	9	5.0	80.4
		~2000.12.31	639	92.5	31.9	52	7.5	73.4
		~2007.12.31	882	95.0	17.6	46	5.0	65.6
		2008.1.1.~	2,855	90.9	5.9	286	9.1	34.7
	5.5톤 초과	~1995.12.31	1,538	92.7	23.4	121	7.3	63.4
		~2000.12.31	5,924	91.6	19.7	542	8.4	59.6
		~2007.12.31	20,354	94.7	9.7	1,139	5.3	45.0
		2008.1.1.~	36,801	93.9	3.1	2,400	6.1	30.0
	소계		69,165	93.8	7.6	4,595	6.2	39.3
	합계		110,045	93.0	7.3	8,267	7.0	38.5

2. 모형 구축

개별행태모형인 로짓모형은 사람의 선택을 포함한 여러 사회현상을 이해하기 위한 방법론으로 사회과학분야에서 널리 사용되고 있다. 특히, 대안 간 오차항이 독립적이고 동일하게 분포되어 있다는 가정에 따라 확률적 효용을 IID Gumbel 분포로 가정하여 계산의 편리성 때문에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 대안이 2개인 이항로짓모형을 활용하여 자동차 종합검사 합격 유무에 대한 매연 배출 모형을 추정하며, 해당 모형에서 화물차 n 이 대안 i 를 선택할 확률은 다음과 같다.

$$P_n(i) = \text{Prob}(U_{in} \geq U_{jn}) = \frac{e^{V_{in}}}{e^{V_{in}} + e^{V_{jn}}}$$

모형의 종속변수는 자동차 종합검사에 따른 합격 유무(pass: 합격 1, 불합격 0)이며, 합격에 영향을 미치는 변수는 차량의 차급, 업종, 등록지, 연식, 총 주행거리, 배출가스 저감장치 부착 유무 등 총 6개를 고려하였다. 설명변수 중 차량의 차급(car1: 소형, car2: 중형, car3: 대형), 업종(type: 비사업용 1, 사업용 0), 등록지(region: 수도권 1, 비수도권 0), 배출가스 저감장치 유무(retrofit: 부착 1, 미부착 0)는 더미변수로 고려하였다. 변수에 대한 세부 내용은 <표 4>와 같다.

〈표 4〉 모형 추정시 고려 변수

구분	변수명		설명
종속변수	검사 합격 유무(pass)		합격한 경우 1, 아니면 0
설명변수	차량의 차급	소형(car1)	소형인 경우 1, 아니면 0
		중형(car2)	중형인 경우 1, 아니면 0
		대형(car3)	대형인 경우 1, 아니면 0
	차량의 업종(type)		비사업용인 경우 1, 아니면 0
	차량의 등록지(region)		수도권인 경우 1, 아니면 0
	연식(year)		차량의 제작일자
	총 주행거리(distance)		차량의 총 주행거리
	배출가스 저감장치 유무(retrofit)		부착한 경우 1, 아니면 0

1) 전체 모형

2018년 전체 자료에 근간한 모수 추정결과는 <표 5>에 제시된 바와 같으며, 변수 간 설명력 비교를 위하여 추정된 변수의 계수를 다음과 같이 표준화 계수로 변환하였다.

$$B = B_1 \frac{s_x}{s_y}$$

여기서 B : 표준화계수, B_1 : 비표준화계수,

여기서 s_x : 설명변수 x 의 표준편차,

여기서 s_y : 종속변수 y 의 표준편차

모형에 포함된 설명변수는 모두 유의수준 5% 하에서 유의한 것으로 나타났다으며, 차량의 연식과 총 주행거리의 모수는 음(-)의 부호를 보이고, 배출가스 저감장치는 양(+)의 부호를 나타내 직관과 부합하는 합리적인 결과를 보였다. 또한 업종은 사업용일수록, 등록지는 수도권일수록 자동차 종합검사 합격에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 업종과 등록지를 제외한 변수 중 자동차 종합검사 합격에 대한 영향력은 차량의 연식, 배출가스 저감장치 유무, 총 주행거리 순으로 나타났다.

〈표 5〉 이항로짓모형 추정 결과(전체)

설명변수	계수값	표준화계수	t-value	p-value
Constant	-166.7583	-	-128.3700	0.0000
type	-0.4045	-0.4022	-35.8950	0.0000
region	0.0513	0.0776	8.2360	0.0000
year	-0.0842	-1.2814	-130.3190	0.0000
distance	-7.53521E-08	-0.0495	-3.6020	0.0003
retrofit	0.1537	0.1478	15.8450	0.0000
Number of observations=1,064,669, $L(\beta)=-388,535.2$, $\rho^2=0.474$, $\bar{\rho}^2=0.474$				

2) 시장 분할 모형

대상 차량의 차급에 따라 매연 배출에 대한 영향력이 상이한지를 검토하기 위하여 부하검사방법 유형(KD147모드 vs. Lug Down 3모드)으로 시장분할을 하였으며, 시장분할의 유의성 검토를 위한 우도비 검정은 다음과 같다.

$$-2[L_N(\hat{\beta}) - \sum_{g=1}^G L_{N_g}(\hat{\beta}^g)]$$

여기서 $L_N(\hat{\beta})$: 전체 모형의 Log-likelihood function 값,

여기서 $L_{N_g}(\hat{\beta}^g)$: 분할된 모형의 Log-likelihood function 값,

여기서 자유도 : $\sum_{g=1}^G K_g - K$ (K_g : 분할된 모형의 계수 수, K : 전체 모형의 계수 수)

시장분할에 대한 유의성 검토 결과는 <표 6>과 같으며, 부하검사방법 유형에 대한 시장분할은 모집단이 G 개의 시장으로 분할되었을 경우 모형 간 모수의 벡터가 동일하다는 귀무가설($H_0 = \beta^1 = \beta^2 = \dots = \beta^G$)을 기각하여 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

〈표 6〉 우도비 검정 결과

구분		Test statistic	Degrees of freedom	$\chi^2_{0.05}$
부하검사방법	KD147모드	5,865.6	6	12.592
	Lug Down 3모드			

부하검사방법에 따라 구분한 모형의 추정결과는 <표 7>, <표 8>과 같으며, 모형에 포함된 설명변수는 모두 유의수준 5% 하에서 유의한 것으로 나타났다. 변수의 부호는 전체 모형과 동일하게 직관과 부합하는 결과를 보이며, 업종 및 등록지 또한 전체 모형과 동일하게 자동차 종합검사 합격에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 업종과 등록지를 제외한 변수 중 자동차 종합검사 합격에 대한 영향력은 KD147모드의 경우 차량의 연식, 배출가스 저감장치 유무, 총 주행거리 순으로, Lug Down 3모드는 차량의 연식, 총 주행거리, 배출가스 저감장치 유무 순으로 나타났다.

〈표 7〉 이항로짓모형 추정 결과(KD147모드)

설명변수	계수값	표준화계수	t-value	p-value
Constant	-184.5908	-	-134.5480	0.0000
type	-0.0597	-0.0440	-4.3390	0.0000
region	0.0365	0.0540	5.6550	0.0000
year	-0.0929	-1.3569	-136.1930	0.0000
distance	-9.88094E-08	-0.0502	-4.9690	0.0000
retrofit	0.1519	0.1283	9.6260	0.0000
Number of observations=946,357, $L(\beta)=-355,861.5$, $\rho^2=0.457$, $\bar{\rho}^2=0.457$				

〈표 8〉 이항로짓모형 추정 결과(Lug Down 3모드)

설명변수	계수값	표준화계수	t-value	p-value
Constant	-54.2954	-	-10.9670	0.0000
type	-0.0467	-0.0907	-1.9080	0.0000
region	0.1727	0.3358	6.8420	0.0000
year	-0.0284	-0.5883	-11.5160	0.0000
distance	-2.31373E-08	-0.0354	-5.1940	0.0003
retrofit	0.0008	0.0015	5.9340	0.0000
Number of observations=118,312, $L(\beta)=-29,740.9$, $\rho^2=0.637$, $\bar{\rho}^2=0.637$				

결과적으로 경유 화물차의 자동차 종합검사 합격에 영향을 미치는 요인은 차량의 업종, 등록지, 연식, 총 주행거리, 배출가스 저감장치 유무이며, 해당 변수 중 오염물질 저감을 위하여 관리가 가능한 요인은 차량의 연식, 총 주행거리, 배출가스 저감장치 유무이다. 이는 해당 요인을 중심으로 경유 화물차 오염물질 관리 방안을 추진해야 할 필요가 있음을 의미한다. 또한 시장 분할 모형 중 Lug Down 3모드의 배출가스 저감장치 유무 변수는 KD147모드와 달리 자동차 종합검사 합격에 대한 영향력이 가장 낮은 것으로 나타났는데, 이는 배출가스 저감장치가 부착되었음에도 불합격하는 사례가 KD147모드 차량 대비 다소 많기 때문으로 판단된다.

〈표 9〉 불합격 화물차 중 배출가스 저감 장치 유무 비중(KD147모드)

구분		전체		수도권		비수도권	
		무(%)	유(%)	무(%)	유(%)	무(%)	유(%)
비사업용	전체	88.4	11.6	81.1	18.9	96.2	3.8
사업용	전체	79.0	21.0	74.3	25.7	87.0	13.0

〈표 10〉 불합격 화물차 중 배출가스 저감 장치 유무 비중(Lug Down 3모드)

구분		전체		수도권		비수도권	
		무(%)	유(%)	무(%)	유(%)	무(%)	유(%)
비사업용	전체	63.6	36.4	31.3	68.7	89.5	10.5
사업용	전체	60.1	39.9	24.1	75.9	88.6	11.4

IV. 경유 화물차 오염물질 저감 방안

모형에서 검토된 바와 같이 화물차의 오염물질 저감을 위해서는 차량의 연식, 배출가스 저감장치 부착, 총 주행거리 등에 대한 관리가 필요하다. 이 중 차량의 연식과 배출가스 저감장치 부착에 대해서는 「대기환경보전법」, 「대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법(이하 대기관리권역법)」에 따른 운행차 배출가스 저감사업에서 특정경유자동차에 대한 저공해조치(조기폐차 포함)로 관리를 하고 있다. 특히, 최근 시행된 「대기관리권역법」에 따라 공간적 범위가 수도권에서 전국으로 확대된 바, 운행차 배출가스 저감사업의 실효성 제고를 위해서는 동 사업에 대한 개선이 필요하다.

우선 저공해 조치 및 조기폐차 대상에 대한 선택과 집중이 필요하다. <표 11>과 같이 차종별 배출량 원단위는 화물차, 승합차 등의 순으로 크게 나타나며, 이는 운행차 배출가스 관리가 화물차, 승합차 등의 순으로 집중되어야 함을 의미한다. 특히 화물차의 경우 소형 톤급은 전기, LPG와 같은 대체연료 시장이 이미 형성되어 있고 유동인구가 많은 도심에서의 통행 빈도가 높기 때문에 가급적 조기폐차 위주로 배출가스 저감사업을 추진할 필요가 있다.

중·대형 톤급은 아직까지 대체연료 시장이 형성되지 않았기 때문에 저공해 조치 위주로 배출가스 저감사업을 추진하되, 대체연료 시장이 형성되는 시기부터는 조기폐차 비중을 단계적으로 높일 필요가 있다. 저공해 조치 중에서는 경유차가 미세먼지 2차 생성 기여도가 높은 질소산화물 배출이 많은 특성을 감안하여 미세먼지와 질소산화물을 모두 저감할 수 있는 PM·NO_x 저감장치 비중을 높여야 하며, 중·대형 톤급이라 하더라도 노후 차량에 대해서는 조기폐차 후 신차를 구매하도록 유도해야 한다.

〈표 11〉 차종별 연간 배출 특성

구분	대당 배출량(kg/대)		거리당 배출량(kg/천km)	
	PM _{2.5}	NO _x	PM _{2.5}	NO _x
승용차(택시 포함)	0.012	3.252	0.001	0.252
승합차(버스 포함)	0.719	58.647	0.039	3.178
화물차(특수차 포함)	2.115	75.346	0.106	3.773
RV	0.417	22.981	0.029	1.605

자료: 국가 대기오염물질 배출량 서비스, <http://airemiss.nier.go.kr>

조기폐차의 경우 조기폐차 이후 구매하는 차량에 대한 기준을 마련하여 동 사업의 실효성을 높일 필요가 있다. 현행 사업에서는 소형 톤급과 중·대형 톤급 모두 조기폐차 이후 각각 LPG 화물차, Euro 6 기준 경유 화물차를 신차로 구매할 경우 조기폐차 보조금 외 추가 지원을 하여 조기폐차 이후 신차 구매를 유도하고 있다. 그러나 대부분의 화물차주가 차량가격 부담 등으로 중고차를 구매한다는 점을 감안한다면 조기폐차 이후 어떤 중고차를 구매하도록 하는가는 조기폐차 사업의 실효성 제고 측면에서 반드시 고려할 사항이다. 현행 조기폐차 사업은 특정경유자동차 배출허용기준을 만족하지 못하는 차량을 가급적 빨리 줄이는 것이 목적이며, 이를 위해서는 조기폐차 이후 차량 구매의 기준을 LPG 화물차 또는 Euro 4 기준 이상 경유 화물차로 제한하는 것이 바람직하다.

저공해조치의 경우 〈표 9〉, 〈표 10〉에서 검토한 바와 같이 배출가스 저감장치를 부착했는데도 자동차 검사에서 불합격하는 사례가 적지 않기 때문에 해당 조치에 대한 사후관리도 강화되어야 한다. 특히 현행 법령에서는 저공해 조치 이후 저공해 장치(배출가스 저감장치, 저공해 엔진)의 보증기간 동안 특정경유자동차 검사를 면제해 주고 있으나, 차량 운행 조건에 따라 저공해 장치가 파손되는 경우는 언제든지 발생할 수 있기 때문에 저공해 장치의 보증기간에 상관없이 특정경유자동차 검사를 받아야 한다.

또한 제1종 배출가스 저감장치의 저감 성능 유지를 위해서는 클리닝 작업이 필수이기 때문에 배출가스 저감장치를 부착한 차량에 대해서는 클리닝 작업 유무에 대한 모니터링을 통하여 의무적으로 클리닝 작업을 받도

록 관리할 필요가 있다. 현행 클리닝 신청 절차는 차주가 클리닝센터 또는 장치제작사에 신청하는 방식이나, 최근 저공해 조치는 대부분 제1종 배출가스 저감장치이고 클리닝 작업 주기가 연간 1회라는 점을 감안한다면 특정경유자동차 검사를 포함하는 자동차 종합검사에서 클리닝 작업과 모니터링을 병행하는 것도 저공해 조치를 받은 차주의 불편함을 최소화하면서 클리닝 유무를 효율적으로 관리하는 방안으로 검토가 가능하다.

한편, 총 주행거리는 비사업용 대비 사업용 화물차가 상대적으로 길기 때문에⁸⁾ 본 연구에서는 사업용을 중심으로 총 주행거리 관리 방안을 검토하였다. 특히, 사업용 화물차는 업종 특성상 공차 통행이 발생하는 통행특성을 가지기 때문에 사업용 화물차의 총 주행거리를 줄이기 위해서는 적재 통행 뿐 아니라 공차 통행에 대한 고려도 필요하다. 화물차의 운행을 효율화하기 위해서는 공차 통행에 대한 실시간 정보 공유가 확대되어야 한다. 국내에서는 이미 정부 주도로 종합물류정보망사업을 추진하면서 화물운송 정보시스템 상용서비스를 실시하고 있다. 해당 서비스에서 공차 차량에 대한 주선서비스를 강화하여 차량의 운행 효율성을 높일 필요가 있다.

V. 결론 및 시사점

본 연구에서는 교통부문에서 미세먼지 배출 비중이 큰 경유 화물차를 대상으로 자동차 종합검사 합격 유무에 따른 매연 배출 모형을 추정하고, 이를 토대로 경유 화물차 오염물질 저감 방안을 검토하였다. 모형 추정 결과 경유 화물차의 자동차 종합검사 합격에 영향을 미치는 요인은 차량의 업종, 등록지, 연식, 총 주행거리, 배출가스 저감장치 유무로 나타났으며, 해당 요인 중 연식, 총 주행거리, 배출가스 저감장치 유무를 중심으로 현행 관련 정책의 개선 방향을 제시하였다.

8) 2018년 화물차 업종별 1일 평균주행거리는 비사업용의 경우 40.6 km/대, 사업용의 경우 123.4 km/대임(한국교통안전공단, 2019).

특히 본 연구에서 제시한 개선 방향과 함께 화물차의 오염물질 저감을 위해서는 경유 화물차의 대체연료 전환이 원활하게 이루어질 수 있도록 관련 제도 개선이 시급하다. 소형 톤급의 경우 LPG로, 중·대형 톤급의 경우 LNG로 전환을 유도하는 방향으로 화물차 지원 정책을 펼칠 필요가 있다. 또한 국내에서도 전기 및 수소 화물차의 출시가 가시화되고 있는 만큼 해당 차량이 화물차 시장에 안정적으로 보급될 수 있도록 중장기적 관점에서의 지원과 정책이 병행되어야 한다.

한편 본 연구에서 검토한 자동차 종합검사 자료는 시계열 자료가 아니기 때문에 검사 결과 및 모형 추정 결과 해석에 다소 한계가 있다. 모형 추정 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 가급적 화물차 모집단 수준의 시계열 자료를 활용하고 보다 다양한 변수를 고려해야 할 필요가 있다. 또한 자동차 종합검사 자료 외 자동차 배출가스 등급제 등의 자료와 연계하여 모형을 추정할 경우 보다 유의미한 결과 도출과 정책 개선 방향 제시가 가능할 것으로 판단되며, 변수별 배출 기여도 검토도 병행되어야 할 필요가 있다.

이 외에도 현행 저공해조치를 받은 차량은 특정경유자동차 배출허용기준에 따라 관리가 되기 때문에 노후된 저공해조치 차량은 그렇지 않은 차량 대비 매연기준이 완화되는 왜곡된 결과를 보일 뿐 아니라, 현행 매연기준으로는 특정경유자동차 중 저공해조치를 받은 차량과 그렇지 않은 차량 간 차이가 없기 때문에 저공해조치에 대한 실효성이 떨어지는 결과가 발생할 수 있다. 이러한 관점에서 향후 어떠한 방향으로 저공해조치 차량에 대한 관리가 이루어져야 하는지에 대한 연구도 진행되어야 할 필요가 있다.

■ 참고문헌 ■

- 국립환경과학원, 2019, 『대기환경연보 2018』, 인천: 국립환경과학원.
 김지훈·임운성·김형준·노현구·윤보섭·이상은 등, 2017, “노후 운행 경유차의 NO_x 배출특성분석 및 조기폐차대책을 통한 삭감 방안 검토,” 『한국분무공학회지』, 22(3), pp.122-128, DOI: 10.15435/JILASSKR.2017.22.3.122.

- 김운수·김정아, 2015, 『서울시 운행 경유차 매연 배출평가와 맞춤형 관리 방안』, (서울연 : 2015-PR-07), 서울: 서울연구원.
- 김종원·강광규, 2015, “노후경유차량 조기폐차 보조금 지원 제도 성과분석 및 개선방안,” 『환경정책연구』, 14(2), pp.73-99, DOI : 10.17330/joep.14.2.201506.73.
- 김철희·조현영·이승원·오창석, 2011, “도로변 및 배경농도 측정망 PM₁₀ 자료를 이용한 노후 운행경유차 배출가스 저감사업 효과 해석,” 『한국환경과학회지』, 20(12), pp.1585-1598.
- 박호정·홍정호, 2014, “수도권 운행차 대기오염 저감사업의 효과(실물옵션분석),” 『자원·환경경제연구』, 23(3), pp.435-451, DOI: 10.15266/KEREA.2014.23.3.435.
- 이규진·박관휘·심상우·최기주, 2015, “교통수요모형과 의사결정모형을 이용한 자동차 배출저감정책 평가,” 『대한토목학회논문집』, 35(5), pp.1123-1133, DOI: 10.12652/Ksce.2015.35.5.1123.
- 이승민·신동원·정우현·최기철·정예민·김운수, 2019, 『지자체의 고농도 미세먼지 비상 관리대책 수립 지원을 위한 연구』, (연구보고서 2019-07), 세종: 한국환경정책·평가연구원.
- 정석철, 2010, “수도권대기환경개선특별대책 시행에 따른 대기환경개선 효과분석 연구 (서울시 운행경유자동차 관리대책 중심으로),” 석사학위논문, 건국대학교 산업대학원, 서울.
- 최성규, 2019, “노후경유자동차에 부착된 배출가스 저감장치의 성능 저하에 관한 연구,” 석사학위논문, 아주대학교 공학대학원, 경기.
- 한국교통안전공단, 2019, 『2018 자동차주행거리통계』, 김천 : 한국교통안전공단 교통안전연구개발원 교통안전연구처.
- 홍종호·박호정, 2008, “수도권 운행경유차 공해저감 사업의 경제성 평가 연구,” 『재정학연구』, 1(2), pp.105-132.
- Barone, T. L., J. M. E. Storey, and N. Domingo, 2010, “An analysis of field-aged diesel particulate filter performance: Particle emissions before, during, and after regeneration,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60, pp.968-976, DOI: 10.3155/1047-3289.60.8.968.
- Czerwinski, J., A. Mayer, and N. Heeb, 2014, “Quality test procedures & emissions with DPF+SCR,” *Energy and Power*, 4(1A), pp.11-31, DOI: 10.5923/s.ep.201401.02.
- Dallmann, T. R., R. A. Harley, and T. W. Kirchstetter, 2011, “Effects of diesel particle filter retrofits and accelerated fleet turnover on drayage truck emissions at the port of Oakland,” *Environmental Science & Technology*, 45(24), pp.10773-10779, DOI: 10.1021/es202609q.
- Feng, T. and L. Lü, 2015, “The characteristics of ammonia storage and the

- development of model-based control for diesel engine urea-SCR system," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 28, pp.97-109, DOI: 10.1016/j.jiec.2015.02.004.
- Giechaskiel, B., R. Suarez-Bertoa, T. Lähde, M. Clairotte, M. Carriero, and P. Bonnel et al., 2018, "Evaluation of NO_x emissions of a Euro 5 passenger car for the Horizon prize "Engine retrofit"," *Environmental Research*, 166, pp.298-309, DOI: 10.1016/j.envres.2018.06.006.
- _____, 2019, "Emissions of a Euro 6b diesel passenger car retrofitted with a solid ammonia reduction system," *Atmosphere*, 10(4), p.180, DOI: 10.3390/atmos10040180.
- Guan, B., R. Zhan, H. Lin, and Z. Huang, 2014, "Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NO_x from diesel engine exhaust," *Applied Thermal Engineering*, 66(1-2), pp.395-414, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.021.
- Herner, J. D., S. Hu, W. H. Robertson, T. Huai, O. Chang, and P. Rieger et al., 2011, "Effect of advanced aftertreatment for PM and NO_x reduction on heavy-Duty diesel engine ultrafine particle emissions," *Environmental Science & Technology*, 45(6), pp.2413-2419, DOI: 10.1021/es102792y.
- _____, 2009, "Effect of advanced aftertreatment for PM and NO_x control on heavy-Duty diesel truck emissions," *Environmental Science & Technology*, 43(15), pp.5928-5933, DOI: 10.1021/es9008294.
- Klimont, Z., K. Kupiainen, C. Heyes, P. Purohit, J. Cofala, and P. Rafaj et al., 2017, "Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon," *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(14), pp.8681-8723, DOI: 10.5194/acp-17-8681-2017.
- Kubsh, J., 2017, *Diesel retrofit technologies and experience for on-road and off-road vehicles*, Washington, D.C.: International Council on Clean Transportation.
- Lathia, R. and S. Dadhaniya, 2019, "Policy norms and proposed ways to achieve goals of Indian vehicle emission program," *Journal of Cleaner Production*, 208, pp.1339-1346, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.202.
- Miller, J. and L. Jin, 2018, *Global progress toward soot-free diesel vehicles in 2018*, Washington, D.C.: The International Council on Clean Transportation.
- Millstein, D. E. and R. A. Harley, 2010, "Effects of retrofitting emission control systems on in-use heavy diesel vehicles," *Environmental Science &*

Technology, 44(13), pp.5042-5048, DOI: 10.1021/es1006669.

Misra, C., J. F. Collins, J. D. Herner, T. Sax, M. Krishnamurthy, and W. Sobieralski et al., 2013, "In-use NO_x emissions from model year 2010 and 2011 heavy-Duty diesel engines equipped with aftertreatment devices," *Environmental Science & Technology*, 47(14), pp.7892-7898, DOI: 10.1021/es4006288.

Quiros, D. C., A. Thiruvengadam, S. Pradhan, M. Besch, P. Thiruvengadam, and B. Demirgok et al., 2016, "Real-world emissions from modern heavy-Duty diesel, natural gas, and hybrid deisel trucks operating along major California freight corridors," *Emission Control Science and Technology*, 2(3), pp.156-172, DOI: 10.1007/s40825-016-0044-0.

국가 대기오염물질 배출량 서비스, <http://airemiss.nier.go.kr>.

한진석: 서울대학교 건설환경공학부에서 교통공학 박사학위를 취득하고 현재 한국환경정책·평가연구원에 연구위원으로 재직 중이다(jshahn@kei.re.kr).

투 고 일: 2020년 06월 08일
심 사 일: 2020년 06월 11일
게재확정일: 2020년 06월 26일