

대형 운행 경유 자동차 자연재생DPF 재생 개선을 위한 정비방안 마련 연구

이성준* · 한검승** · 하성용***

A Study on the Maintenance Plan for the Improvement of Natural Regeneration DPF Regeneration of Large Diesel Vehicles

Sungjun Lee*, Geomseung Han**, Sungyong Ha***

Key Words: *DPF regeneration improvement*(디젤 미립자필터 재생개선), *Analysis of maintenance plan*(정비방안분석), *Inspection nonconformity rate improvement*(검사 부적합률 개선), *Air Environment Improvement Effect*(대기 환경개선효과)

ABSTRACT

Diesel engines emit PM and NOx during combustion. This is the main culprit of fine dust, which seriously affects the atmospheric environment. In particular, large-sized diesel vehicles over 3.5 tons emit a greater amount of pollutants because of their large displacement. The occurrence of vehicle abnormalities in this large-scale diesel vehicle causes even greater problems in the atmospheric environment. It was confirmed that there were many problems caused by natural regeneration DPF among large-sized diesel vehicles. Therefore, the most effective maintenance plan is suggested.

1. 서론

자동차의 대표적인 내연기관인 경유 자동차는 가솔린 자동차 대비 높은 열효율을 갖고 있다. 그로 인해 지구 온난화의 주범인 이산화탄소 배출량이 가솔린 자동차 대비 적게 배출되어 한때 Clean Diesel⁽¹⁾로 불리었다. 하지만 최근 미세먼지⁽²⁾로 인한 대기오염이 사회적 문제로 화두가 되면서 미세먼지의 주범으로 인식되는 실정이다.

국내 미세먼지의 주원인은 국외 미세먼지 유입으로 중국과 몽골에서의 유입량이 약 41%에 육박하고 있는 실정이다.⁽³⁾ 그러나 국외 미세먼지가 없는 날에도 대형 운행 경유 자동차가 많이 주행하고 있는 지역 일부에서 미

세먼지 농도가 높게 관측되고 있는데 이는 2019년 전체 자동차 배출 오염물질 중 대형 경유 자동차의 배출량이 PM2.5가 36% 질소화합물 28%로 점유하고 있기 때문이다.⁽⁴⁾ 디젤기관은 연소과정에서 PM⁽⁵⁾과 NOx⁽⁶⁾를 많이 배출하는 특성이 있다. PM의 경우에는 가솔린 기관에서 Port에 연료를 분사하여 예혼합연소⁽⁷⁾ 하는 방식과 다르게 디젤 기관에서는 연료와 공기를 혼합시키지 않고 압축된 공기에 연료를 분사하여 연소에 필요한 공기와 연료가 화염 주변에서의 확산⁽⁸⁾에 의해 서서히 혼합되면서 연소하기 때문에 인젝터 주위가 국부적으로 농후한 상태가 되어 연소과정 중 PM이 생성된다. NOx의 경우에는 특히 공기를 과급하는 디젤기관의 경우 연소과정 중에 공기과잉 상태가 되어 고온에서 질소와 산소의 결합에 의해 생성된다. 이러한 PM, NOx는 전처리, 후처리 과정을 통해 정화되지만 완벽히 정화되지 못하고 대기로 배출되는데 이는 사람의 인체와 대기 환경에 치명적인 영향을 주며,

* 중부대학교, 박사과정

** 중부대학교, 박사과정

*** 중부대학교, 교수

E-mail: chan-whan@naver.com

미세먼지의 주요인으로 대두되고 있다. 특히 3.5t 이상의 대형 경유 자동차는 배기량이 크기 때문에 더 많은 양의 오염물질이 배출된다. 그리고 대형 자동차의 경우 디젤기관이 대부분을 차지하고 있으며, 그 이유는 다른 기관에 비해서 높은 토크와 등판능력, 가속능력, 추진력이 좋고, 우수한 연비와 국내의 낮은 경유 가격이라는 이점이 있기 때문이다. 이러한 부분들을 참고해 보면 대형 운행 경유 자동차의 운행 중 배출가스 정화에 관련된 차량 이상 발생이 대기 환경에 심각한 문제를 발생시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

본 연구는 운행 대형 경유 자동차의 유해 배출가스의 과다 발생 원인 분석을 통해 자연재생 DPF로 인한 배출가스 부적합 원인 발생을 규명하고, 이에 따른 가장 효과적인 정비방안을 제시함으로써 대기오염을 막기 위함이다.

2. 세계 대형 경유자동차 현황

Fig. 1에서 보듯 세계적으로 경유 자동차의 전체 판매량에 대형 경유 자동차가 차지하고 있는 비중은 20%이며, 등록대수는 24%의 비중을 차지하고 있다. 그러나 적은 비중에 반하여 에너지 소비량은 75%를 차지하고 있고, 배기가스 배출량은 78%를 차지하고 있음을 확인할 수 있는데 이는 수송 부문에 있어서 미세먼지와 질소산화물, 온실가스 모두 대형 경유 자동차에서 배출하는 비중이 큰 것을 확인할 수 있다.

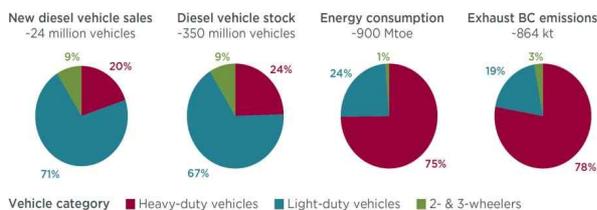


Fig. 1 Market share energy consumption and BC emissions by diesel vehicle type in 2017

3. 국내 대형 경유 자동차 검사 현황 분석

국내 대형 경유 자동차 검사 현황은 통계청 KOSIS 자료를 구득하여 분석도표화 하였다.

대형 운행 경유 자동차의 연도별 검사대 수와 부적합률에 대한 분석을 통해 대형 경유 자동차로 인한 매년 증감 추이를 엿볼 수 있다.

3.1. 국내 대형 경유 자동차 검사대 수 와 부적합률

Fig. 2에서 보듯 2013년부터 2019년까지 대형 경유 자동차의 검사대 수와 부적합률 현황을 확인할 수 있다. 검사대 수는 2013년 500,231대에서 매년 증가하여 2019년 568,544대로 증가하였다. 부적합률 역시 차량 검사대 수 대비 2013년 7.96%에서 2019년 19.33%로 매년 증가하는 추세로 분석하였다.

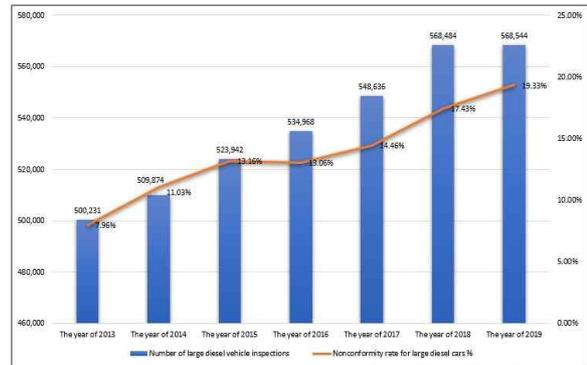


Fig. 2 Inspection status of Large diesel vehicles

3.2. 국내 대형 경유 자동차 차종별 검사 현황

Fig. 3에서 나타나는 국내 대형 경유 자동차 차종별 검사대 수와 부적합률은 2013년에서 2019년까지의 화물차가 차지하는 비중이 2013년 366,349대에서 2019년 434,796대로 조사되었고 승합차는 2013년 75,315대에서 2019년에 66,447대로 검사 대수가 다른 차종보다 매년 증가 추세를 보인 것과 다르게 등락을 반복하였다. 특수차는 2013년 58,567대에서 2019년에 67,301대로 가장 적은 비중의 분포를 보였다.

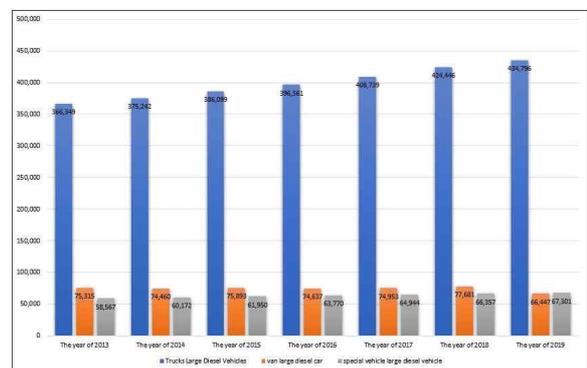


Fig. 3 Number of large diesel cars inspected by vehicle type

Fig. 4는 차종별 부적합률로써 전반적으로 화물차, 특수차, 승합차 순으로 검사 대수 대비 승합차보다 특수차의 부적합률이 더 높은 비중을 차지하고 있는 것으로 분석하였다. 세부적인 항목으로 화물차는 2013년 8.6%에서 2019년 20.1%, 승합차가 6.5%에서 2019년 19.7%, 특수차가 2013년 8.8%에서 2019년 18.2%의 부적합률을 나타내고 있다.

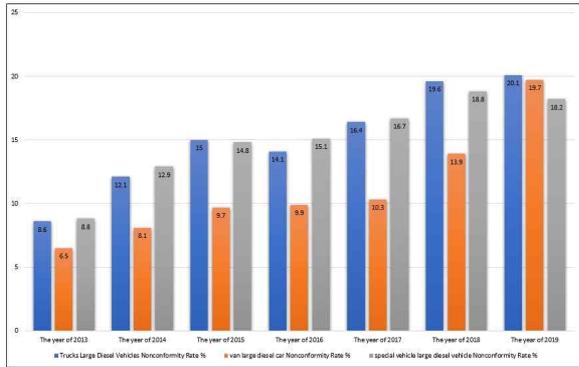


Fig. 4 Nonconformity rate of large diesel cars by vehicle type

3.3. 국내 대형 경유 자동차 Euro 별 검사 현황 분석

Fig. 5의 분석은 국토교통부 VMIS 자동차 등록 자료와 한국교통안전공단 VIMS 검사 결과 자료를 구득하여 분석을 통해 도표화하였다.

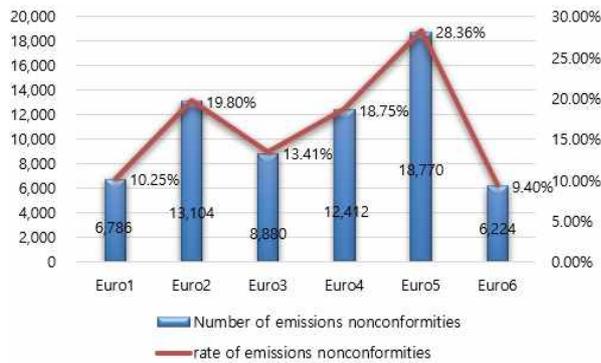


Fig. 5 Statistics on nonconformities of large diesel vehicles between 2018 and 2020

현재 국내 경유 자동차는 한-EU FTA 체결로 Euro 배출 규제를 따르고 있다. 따라서 2018년에서 2020년도까지 Euro 별로 검사 배출 부적합 현황을 분석하였다.

Fig. 5에서 보듯 2018에서 2020년까지 Euro 별 대형

경유 자동차 부적합 현황을 분석 결과 전체 배출 부적합 대수 66,176대에 대비하여 Euro 별 부적합 대수와 부적합률은 Euro1 6,786 대 10.25%, Euro2 13,104 대 19.80%, Euro3 8,880 대 13.41%, Euro4 12,412 대 18.75%, Euro5 18,770 대 28.36% Euro6 6,224 대 9.40%로 Euro5가 가장 높은 비중을 차지하는 것으로 분석하였다.

Euro 별 검사 부적합률 결과에서 Euro4, 5 차량의 경우 양산단계에서 후처리 장치인 자연재생 DPF가 장착되었음에도 전체의 부적합률은 47%로 절반의 수준에 육박하는 결과로 분석되었다.

4. Euro4, 5 대형 경유 자동차 부적합 원인 분석

자연재생 DPF가 적용된 Euro4, 5, 대형 경유 자동차 중 검사 부적합 받은 차량을 정비업체 등을 통해 역추적 조사를 통하여 정비원인 항목에 대한 경향성 조사를 통해 이를 도표화하였다.

Fig. 6은 Euro4 대형 경유 자동차의 정비 항목 조사결과이다. 총 77대 조사결과 DPF 청소가 43대, DPF와 EGR 및 흡기 라인 청소가 17대, 엔진오일 SET의 교환 6대, 매연 불어내기 5대, 인젝터 불량 3대, DPF 교환이 2대, 고압펌프의 불량 1대로 DPF의 이상 관련 정비 항목 비중이 전체의 81%를 차지하는 것으로 분석하였다.

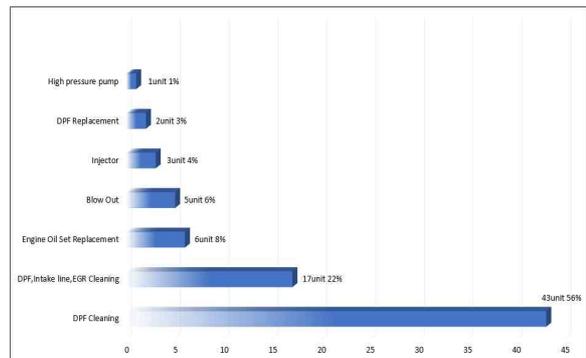


Fig. 6 Euro4 large diesel vehicle maintenance cause

Fig. 7에 Euro5 대형 경유 자동차 정비 항목은 총 92대를 조사결과 DPF 청소가 53대, DPF와 EGR 및 흡기 라인 청소가 21대, 엔진오일 SET의 교환이 7대, 매연 불어내기 6대, 인젝터 불량 2대, DPF 교환 2대, 고압펌프의 불량 1대로 Euro4의 정비 항목과 비슷한 수치로 DPF의 이상 관련 비중이 83%로 분석되었다.

Euro4, 5 대형 경유 자동차 정비 항목의 경향성을 조

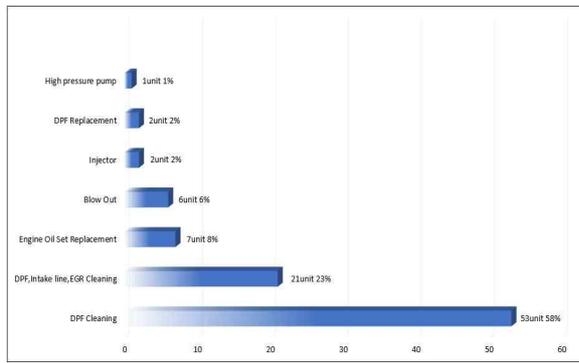


Fig. 7 Euro5 large diesel vehicle maintenance cause

사한 결과에서 분석해 보니 대부분 DPF 이상 관련 문제인 것을 확인하였으며 이는 자연재생 DPF 방식의 고장 증상으로 인한 배출 부적합 원인이 가장 많은 정비 원인으로 분석된 결과라고 할 수 있다.

5. 대형 경유 자동차 자연재생 DPF 정비 전, 후 비교 분석

대형 운행 경유 자동차 배출 부적합에 대한 Euro 별 검사 현황 분석 결과 Euro5가 가장 많은 부분을 차지하고 있는 것으로 분석되었다. 그리고 부적합 원인에서 DPF 관련 정비 원인이 대부분인 것으로 분석되었는데 이에 따라서 본 연구는 Euro5 운행 대형 경유 자동차 중 검사 배출 부적합 받은 차량을 제외하여 DPF 청소 및 교환 정비를 통해 이후 자동차 검사를 재진행함으로써, 정비 전, 후 배출 변화를 분석하였다.

Fig. 8은 2013년식 유니버스 차량으로 DPF 전, 후단의 모습을 볼 수 있으며 DPF 전단부 모습을 보면 진득한 고형물 형태의 Ash로 인한 백화 현상으로 막힌 모습을 확인할 수 있다.

Table 1에서 보듯 해당 차량은 출력 부족에 의한 검사 부적합 되어 DPF 청소 이후 출력이 개선된 결과를 확인하였다.

Fig. 9는 2013년식 이-마이티 차량과 DPF 청소 전, 후를 확인할 수 있으며 DPF 청소 전 모습은 건조한 형태의 Soot에 의해 DPF가 막혀있는 것을 볼 수 있다.

Table 2는 이-마이티 차량이 매연과다 발생으로 검사 규정상 배출 부적합 상태였지만 DPF 청소 이후 매연이 개선되어 매연 배출이 개선된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 2011년식 메가트럭의 DPF 후단부 모습으

Table 1 Emission values before and after cleaning the 2013 universe DPF

Vehicle number	Vehicle type/year-old	Maintenance Items	Before Maintenance		After Maintenance		Increase or Decrease	
			PS	Smoke %	PS	Smoke %	PS	Smoke %
78u****	Universe 2013 Model Year	DPF Cleaning	132	1.0/8.0/1.0	233	9.0/3.0/1.0	+101	+8.0/-5.0/0



Fig. 8 2013 Universe DPF shear and rear end

로 Melting된 형태의 사진을 확인할 수 있다.

Table 3에서 보듯 메가트럭 차량은 DPF Melting로 인한 매연과다 발생으로 검사 부적합이 판정되어 DPF 교환 이후 매연이 개선된 것을 확인하였다. DPF Melting은 전용 엔진오일을 사용하지 않거나 이상연소 및 지속적인 DPF Regeneration 실패 등으로 인한 DPF의 내구성 문제 발생으로 야기된다.

위 3대의 차량 실험 결과 DPF의 불량으로 인해 출력 부족 및 매연과다 발생 문제가 발생한 것으로 분석되었으며, 출력부족의 경우 진득한 고형물 형태의 Ash로 인한 백화현상에 의해 발생하였고, 매연과다의 경우 건조한 형태의 Soot로 인해 막힘이 발생하였거나 DPF Melting 발생에 의한 원인으로 분석되었다.

Table 2 Emission values before and after cleaning the 2013 e-mighty DPF

Vehicle number	Vehicle type/year-old	Maintenance Items	Before Maintenance	After Maintenance	Increase or Decrease
			Smoke%	Smoke%	
88보****	E-Mighty 2013 Model Year	DPF Cleaning	46	0	-46



Fig. 9 Before and after 2013 e-mighty DPF cleaning

6. 결 론

- 1) 전 세계적으로 대형 운행 경유 자동차에서 배출되는 배기가스로 인한 대기오염의 수준은 심각한 상황이다. 국내 대형 운행 경유 자동차의 자동차 검사 대 수와 부적합률은 매년 증가하며 이러한 부분이 가속화되고 있다.
- 2) Euro 별 검사 부적합 분석결과 양산단계에서 자연 재생 DPF가 채택된 Euro4, 5가 전체의 47%로 절반에 육박하는 수준으로 분석되었다.
- 3) 검사 배출 부적합 차량 정비 전, 후 비교 분석 결과 DPF 청소 및 교환으로 출력부족 원인과 매연 과다 배출 원인이 개선된 것이 확인되었다.
- 4) 출력부족의 경우 Soot가 DPF Regeneration으로

Table 3 Emission values before and after replacement the 2011 mecha truck DPF

Vehicle number	Vehicle type/year-old	Maintenance Items	Before Maintenance	After Maintenance	Increase or Decrease
			Smoke%	Smoke%	
88보****	Mega Truck 2011 Model Year	DPF Replacement	96/97/88	7.0/5.0/2.0	-89/-92/-86



Fig. 10 2011 Mecha truck DPF melting

대부분 타서 없어지지만 반복된 재생 실패로 많은 양의 Soot를 태우는 과정에서 약 600°C의 고열 환경에 의해 Soot가 고형물 형태의 더 단단한 물질인 Ash가 되며 이 Ash가 약 900°C 이상에서의 조건에서만 소결하기 때문에 DPF Regeneration의 온도가 약 700°C 이하인 환경에서는 한번 생성된 Ash가 DPF 담체 내에 단단한 형태로 잔존하여 DPF 막힘을 발생시키므로 배기가 원활하지 못하게 되어 백화현상에 의한 출력부족 현상이 발생하는 것을 확인하였다.

- 5) 매연과다의 경우 매연 발생의 근간은 불안전 연소 과정에 의한 부분이라 할 수 있다. 하지만 이러한 원인은 엔진부조 및 OBD 시스템을 통해 운전자가 차량의 이상을 인식하게 되어 자동차 검사 전 사전에 해당 원인을 정비할 수 있게 된다. 하지만 DPF의 경우에 연소과정에 의해 생성된 PM을 일정량 이상 포집되었을 때 DPF Regeneration 통해 PM을 태워야 하지만 지속적인 DPF Regeneration 실패

로 인해 DPF의 정화 능력을 벗어나게 되어 배압에 의해 대기로 방출되고, 이런 부분을 운전자는 인식하지 못하고 운행하기 때문에 Euro4, 5 검사 부적합 원인의 경향성 조사 분석결과 82%가 DPF 관련한 문제 원인으로 확인되었다. 이러한 원인으로 인해 대기오염에 심각한 영향을 초래하게 된다.

- 6) 출력부족 현상 발생은 차량이 경사로 및 과적 상태 주행 중 안전에 위협을 초래할 수 있는 상황이 발생할 수 있다. 그리고 매연 과다 발생 차량의 경우 주행 중 과다 매연 발생으로 후방 차량에 시인성에 영향을 줄 수 있는 소지가 있어 안전운행에 좋지 못한 영향이 초래할 수 있다. 그러므로 검사 배출 부적합 차량의 징벌적 제도의 강화 도입의 검토가 필요하다.
- 7) 자연재생 DPF의 가장 효과적인 정비방안은 운전자의 주기적인 DPF Regeneration 운행 관리 및 주기적인 DPF 청소이다. 하지만 차량 관리적 측면에서의 어려운 부분과 특히 겨울철 계절적 영향으로 기온이 낮아서 DPF의 온도가 600°C 이상 상승하기 어려운 상황과 NOx에 적절한 대응이 없는 상황이기 때문에 PM-NOx 복합 저감장치가 효과적인 DPF 재생과 NOx 배출 대응이 가능하므로 기존 양산단계에서 자연재생 DPF가 설치된 Euro4, 5 대형 운행 경유 자동차 중 배출 부적합 발생 차량에 대해 PM-NOx 복합 저감장치를 장착해 주는 정부 지원 사업으로 확대된다면 대기 환경 개선과 인간의 기대수명 연장이라는 선순환적 영향으로 환원될 것이다.

후 기

이 논문은 2021년도 중부대학교 학술연구비 지원과 환경부의 『Euro-5, 6 대형 운행 경유 자동차 과다배출 자동차 정비방안 마련 연구(2020~2021)』 용역의 연구 결과입니다.

참고문헌

- (1) 2009, "Demonstrating Clean Diesel Power", Diesel & gas turbine worldwide, Vol. 41, No. 10, pp. 23~39.
- (2) 배상훈, 2018, "국회기후변화포럼, 미세먼지 관리 종합대책 논의", Electric Power, Vol. 12, No. 5, pp. 46~49.
- (3) 2019, 제1회 PM2.5 국가포럼에서 국립환경과학원에서 발표한 자료.
- (4) 2020, 한국교통안전공단, 대형 운행 경유 자동차 배출허용기준 개선, 착수보고회 발표 자료.
- (5) Li Rongrong, Tong Jingjing, Zhang Guilong, Gao Minguang, Cai Dongqing, Wu Zhengyan. 2018, "Improving the combustion efficiency of diesel fuel and lowering PM2.5 using palygorskite-based nanocomposite and removing Cd²⁺ by the residue", Applied clay science, Vol. 162, No. -, pp. 276~287.
- (6) Yeste María Pilar, Cauqui Miguel Ángel, Giménez-Mañogil Javier, Martínez-Munuera Juan Carlos, Muñoz Miguel Ángel, García-García Avelina, 2020, "Catalytic activity of Cu and Co supported on ceria-yttria-zirconia oxides for the diesel soot combustion reaction in the presence of NOx", CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL - LAUSANNE-, Vol. 380, No. -, pp. 1385~8947.
- (7) 김민재, 임종한, 강건용, 이석환, 2017, "디젤 엔진에서 예혼합 가솔린/파일릿 디젤 이중연료의 연소 및 배출가스 특성에 관한 연구", 한국 자동차공학회 논문집, Vol. 25, No. 3, pp. 326~335.
- (8) 한성빈, 문성수, 이성열, 1994, "디젤기관의 스모크 배출의 확산연소 의존성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, Vol. 18, No. 2, pp. 397~404.
- (9) Joshua Miller and Lingzhi Jin, 2018, "Icct The Global Progress toward Soot-Free Diesel Vehicles in 2018", pp. "5~6" / Fig. 1.