

대형디젤엔진의 오염물질 배출특성

Characteristics of Exhaust Emissions from a Heavy-Duty Diesel Engine

엄병도*, 류정호*, 이종태*, 임철수*
Myoung-Do Eom, Jung-Ho Yoo, Jong-Tae Lee, Cheol-Soo Lim

ABSTRACT

The proportion of diesel vehicle is very high in this country. PM and NO_x emitted from diesel-powered vehicle is severely affecting to the air quality. Especially, diesel particulate matters(DPM) including black smoke are hazardous air pollutants to human health and environment. In order to reduce the exhaust emissions from diesel engines, it is necessary to analyze the characteristics of exhaust emissions from diesel engines in various driving conditions. Recently, there are occasion to increase the fuel consumption rate to engine power up. So, In this study we have tested a diesel engine detached from in use-diesel vehicle and analyzed exhaust emissions by driving condition and fuel dispersion rate. From this results, we will prepare the comprehensive management plan for exhaust emissions from diesel vehicles and contribute to the improvement of air pollution in urban area.

주요기술용어 : In use-diesel vehicle(운행중인 디젤차), Diesel particulate matters(DPM, 디젤 입자상물질), Hazardous air pollutant(HAP, 유해 대기오염물질), Driving condition(운전조건), Fuel dispersion rate(연료 분사율)

* 정회원,
국립환경연구원 자동차공해연구소

1. 서론

우리나라는 그동안 대기오염 저감대책을 꾸준히 추진하여 온 결과 '80년대에 가장 문제가 되었던 아황산가스(SO₂) 및 부유분진의 대기중 농도는 크게 개선되었으나 '80년대 후반부터 자동차의 급격한 증가로 인하여 이로부터 배출되는 오염물질이 도시 대기오염의 주 오염원으로 등장하게 되었다. 특히 연료비 절감등의 이유로 선진국에 비하여 경유차량의 보유비율이 높은 우리나라의 경우, 경유엔진에서 배출되는 오염물질이 대기오염에 미치는 영향은 점차 증가하고 있으며, 1997년도에는 경유자동차에 의한 오염물질 총량이 연간 약 1,145천톤으로 자동차 전체 오염물질 배출량의 63.8%를 차지하고 그중에서도 대형경유엔진에 배출되는 NO_x 및 PM이 전체 자동차에서 배출되는 양의 65.9%, 63.9%를 각각 차지하고 있어, 대기오염의 주범임을 확인할 수 있다^{1,2)}. 본 연구에서는 운행중인 디젤자동차의 엔진을 탈거, 엔진동력계상에서 주행모드별로, 연료분사량, 엔진부하등을 변화시켜가며 규제물질과 미량유해물질의 배출특성을 알아보았으며 이를 통하여 운행중인 디젤자동차의 오염물질 저감대책방안을 제시하여 디젤자동차의 도시 대기오염을 개선하는데 기여하고자 하였다.

2. 시험내용 및 방법

2.1. 시험장치

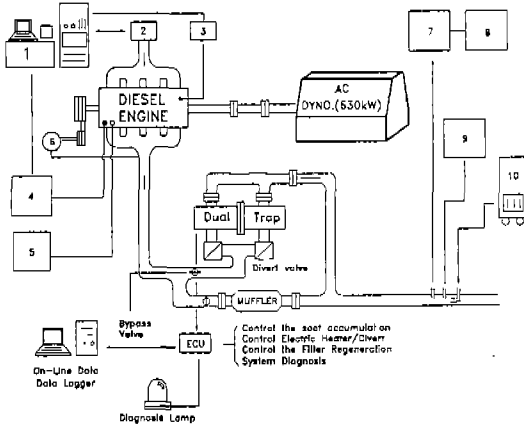
시험장치는 엔진동력계, 배출가스 측정장치 및 디젤입자상물질 측정장치로 구성되어 있다. 대형엔진 동력계는 630kW 전기동력계(AVL사, MCA-431Z04)로서 동력계(engine

dynamometer), 동력계조절장치(engine dynamometer controller), 연료유량계, 연료 온도조절장치, 흡입공기유량계, 냉각수 온도 조절장치로 구성되어 있다. 배출가스 측정장치(Horiba사, Mexa 9100D)는 디젤엔진의 배출가스중 CO, HC, NO_x 및 CO₂를 분석할 수 있는 장비로서 CO 및 CO₂는 비분산적외선 분석법(NDIR ; nondispersive infrared), HC는 가열식불꽃이온화검출법(HFID; heated flame ionization detector), NO_x는 화학발광법(CLD ; chemiluminescence detector)등을 사용하였다.

입자상물질은 탄소입자와 고비점탄화수소나 윤활유가 주성분인 용해성유기분(SOF), 황산염(Sulfate) 및 기타물질로 구성되어 있다. 이러한 입자상물질의 측정은 규정된 시험방법과 정밀한 측정장치들을 이용하여 분석하여야 한다. 이에 본 연구에서는 입자상물질 채취를 위해 먼저, 엔진 배기관에서 나오는 배출가스를 미니희석터널(MDT ; Mini dilution tunnel, AVL 474)로 동속흡인 시킨 후, 여과된 공기와 희석시켜 52℃ 이하의 조건에서 테프론 코팅된 ϕ 70mm 유리섬유여지에 입자상물질을 채취하였다. 이때 사용되는 여지는 온도 $20\pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $50\pm 5\%$ 로 유지되는 항온항습실(weighing chamber)에서 1 μg 까지 측정할 수 있는 전자저울로 전·후 무게차를 측정하였다.

이렇게 채취한 입자상물질중의 미량유해물질인 용해성유기분(SOF ; soluble organic fraction)과 다환방향족탄화수소(PAHs ; Polycyclic aromatic hydrocarbons)는 soxhlet 추출장치와 고성능액체크로마토그래피(HPLC ; High performance liquid chromatography)로 분석하여 정량하였으며, 본 연구에서 분석된 다환방향족탄화수소는 총 8종으로 Phenanthrene(Ph.), Fluoranthene(Fl.), Pyrene(Py.), Benz(a)anthracene(BaA.), Benzo(a)pyrene(BaP.), Benzo(k)-

fluoranthene(BkF.), Benzo(e)pyrene(BeP.), Benzo(g,h,i)perylene(B(ghi)P.)등이며, 전체적인 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.



1. Dynamometer control desk
2. Intake air flow meter
3. Throttle actuator
4. Fuel temperature controller
5. Oil temperature controller
6. Air pump analyzer
7. Exhaust analyzer
8. Pen recorder
9. Smoke meter
10. Mini dilution tunnel

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus measuring exhaust emissions

또한, 시험용 엔진은 현재 국내 시내버스용으로 많이 사용되고 있는 배기량 11,051cc인 직접분사방식 대형 디젤엔진(84.2kg.m/1400, 230PS)을 사용하였다.

2.2. 시험방법

자동차에 의한 오염물질 배출량은 자동차의 종류, 사용연료 뿐만 아니라 자동차의 주행조건에 따라 다르다. 일반적으로 디젤자동차는 고부하, 고속주행시 오염물질을 많이 배출하며 급가속시 매연을 많이 배출한다³⁾. 그러므로 자동차의 주행속도와 부하에 따른 오염물질 배출특성을 알아보기 위하여 엔진 동력계를 이용하여 엔진 회전속도별, 부하별 운전조건과 우리나라 대형경유엔진 배출가

스 규제시험모드인 D-13모드 및 서울시내버스의 주행패턴을 분석하여 얻은 서울 13모드를 사용하여 오염물질 배출량을 측정하였다.

Table 1 Operating condition of heavy duty diesel engine by engine speed and load rate

Load rate (%)	Engine speed (rpm)							
	1D	1000	1200	1320	1600	1800	2000	2200
0	⊙	-	-	-	-	-	-	-
10	-	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙
25	-	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙
50	-	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙
75	-	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙
100	-	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙

※ Remarks :

○ : Gaseous emission measurement

⊙ : Gas and particulate emission measurement

1320rpm : Intermediate speed of the engine

Table 2 Operation conditions of heavy duty engine by D-13 mode

Mode	Engine speed (%)	Load rate (%)	Weight factor
1	Idling	0	0.08
2	60	10	0.08
3	60	25	0.08
4	60	50	0.08
5	60	75	0.08
6	60	100	0.25
7	Idling	0	0.08
8	100	100	0.1
9	100	75	0.02
10	100	50	0.02
11	100	25	0.02
12	100	10	0.02
13	Idling	0	0.08

Table 1은 엔진회전수별, 부하별 운전조건을 나타내었으며, 이때 엔진의 상태는 정격출력 상태와 출력을 10%, 20% 상향조정된 상태에서 각각 실시하였다. 또한 Table 2와 3은 각각 D-13모드와 서울 13모드를 나타내었다.

Table 3 Operation conditions of heavy duty engine by Seoul-13 mode

Mode	Engine speed (%)	Load rate (%)	Weight factor
1	Idling	0	0.2209
2	40	25	0.0145
3	40	10	0.0728
4	60	100	0.0387
5	60	75	0.0281
6	60	50	0.0229
7	Idling	0	0.2000
8	80	100	0.0465
9	80	75	0.0404
10	80	50	0.0230
11	80	25	0.0272
12	100	100	0.0650
13	Idling	0	0.2000

한편, 미량유해물질인 용해성유기분과 다환방향족탄화수소는 정지자동차를 포함하여 엔진의 중간회전수(Intermediate)와 최대엔진회전수에서의 부하별(10, 25, 50, 75, 100%) 운전조건에서 측정, 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 운전조건별 오염물질 배출특성

자동차를 운전시 사람을 많이 태우거나 짐

을 많이 실은 상태에서 과속으로 운전하게 되면 매연을 비롯한 오염물질이 많이 배출된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 어떠한 오염물질이 어느 운전 조건에서 얼마나 많이 배출되는지를 구체적으로 조사한 연구 결과는 많지 않다.

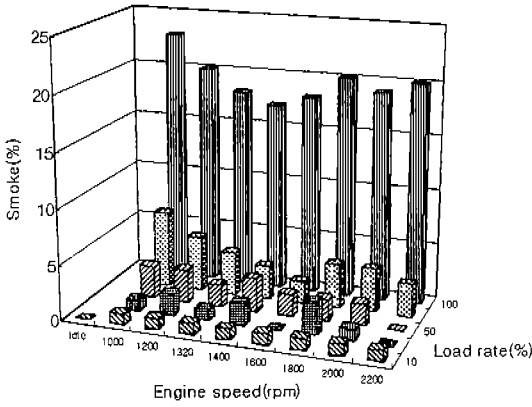
여기서는 현재 우리나라에서 많이 사용되고 있는 고출력 시내버스 엔진을 사용하여 엔진동력계상에서 엔진 회전수별 및 엔진 부하별로 운전하면서 엔진으로부터 배출되는 매연, 입자상물질, NOx, CO 및 HC의 배출량을 측정하여 배출특성을 살펴보았다.

디젤엔진은 연료의 분사량에 의해 부하를 조절하기 때문에 연료의 분사량을 증가시키면 부하가 증가한다. 엔진의 정격출력(제조사에서 판매시 봉인된 상태의 출력)시와 중간엔진 회전속도에서 연료분사량을 10% 및 20% 상향조정된 상태에서 엔진의 회전수와 부하를 변화시켜 가면서 엔진의 특성 및 오염물질 배출특성을 알아보았다.

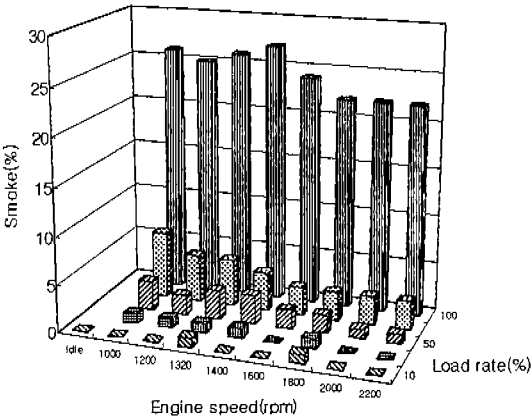
3.1.1. 매연(smoke)

엔진의 상태를 정상적인 상태와 연료가 10% 및 20% 더 많이 소비되는 상태에서 각 엔진 회전수별 및 부하별로 매연농도를 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보여주듯이 엔진의 회전수에 따라서는 큰 차이가 없으나 엔진의 부하에 따라서는 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 즉 75% 부하율에서도 매연농도는 아주 낮으나 100% 부하에서 급격히 증가함을 알 수 있었다.

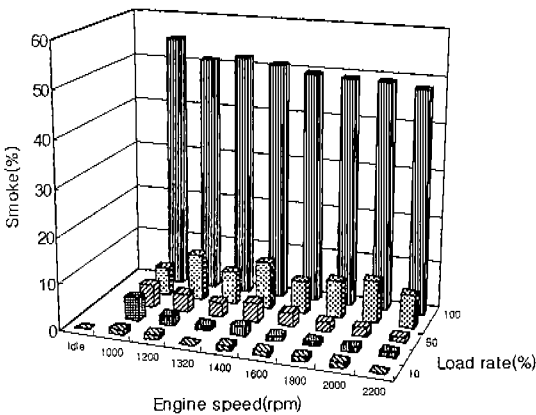
또한 연료분사량 조정에 따른 매연배출농도의 결과를 살펴보면 Fig. 3에서 알 수 있듯이 최대출력조건에서 연료분사량을 10%, 20%씩 각각 증가시킬 때 정상상태보다 매연농도가 39%, 189%씩 증가하였다.



(a) Normal condition



(10% up of fuel consumption)



(20% up of fuel consumption)

Fig. 2. Smoke concentration in various engine speeds and load rates at normal, 10% and 20% up of fuel consumption

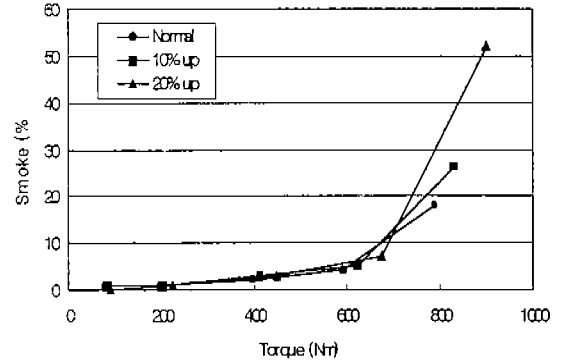


Fig. 3 Smoke concentration in various engine torques at intermediate speed(1320rpm)

3.1.2. 질소산화물(NOx)

매연과 상반관계인 질소산화물의 배출특성을 측정하여 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보여주듯이 질소산화물은 각 엔진회전수별 고부하 운전조건으로 갈수록 많이 배출되었다. 연료분사량을 20% 상향조정하였을 때 매연이 189% 증가한 반면 NOx는 오히려 20% 감소하여 연소상태가 불완전함을 알 수 있었으며, 연료분사량을 10% 상향조정하였을 때에는 정상상태와 큰 변화가 없었다.

3.1.3. 미량유해물질

엔진운전조건별 입자상물질중 용해성유기분의 측정결과를 Table 4에 나타내었다. 표에서 보여주듯이 정지가동시 입자상물질중 용해성유기분의 비율은 89%로서 대부분을 차지하고 있으나 10% 부하에서는 75~79%, 25%부하에서는 73~76%, 50%부하에서는 69~70%, 75%부하에서는 26~34%를 차지하며, 100%부하에서는 7~10%로 아주 낮아 부하율의 증가에 따라 입자상물질중

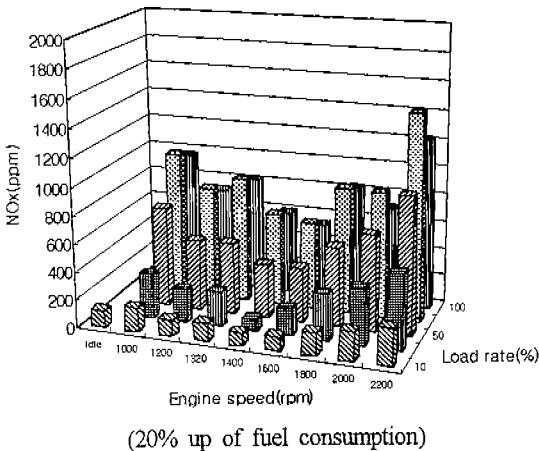
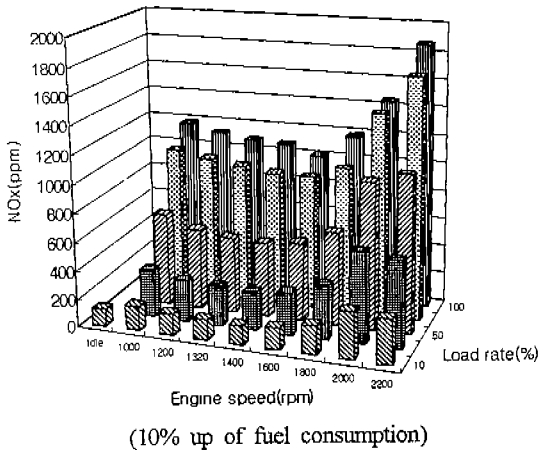
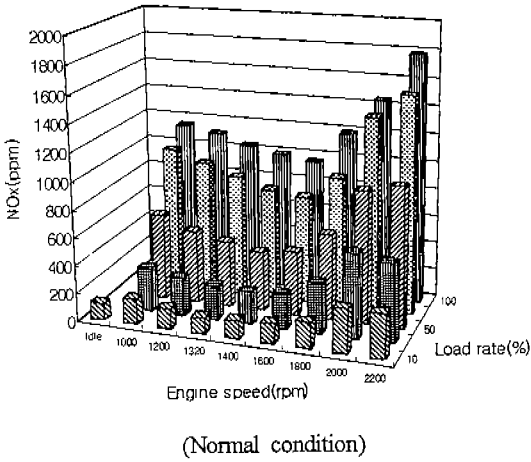


Fig. 4 NOx concentration in various engine speed and load rates at normal, 10% and 20% up of fuel consumption

용해성유기분 비율이 급격히 낮아짐을 알 수 있다. 이는 전부하로 갈수록 불완전연소에 의해 탄소성 탄소(Carbonaceous carbon)이 증가하여 나타난 결과로 사료된다.

Table 4 Test results of soluble organic fraction in various engine load rates

RPM	Load rate(%)	SOF(%)	PM(mg)
Idle	-	88.00	3.46
1320	10	78.51	12.41
	25	75.67	21.71
	50	70.27	23.90
	75	33.51	26.77
	100	9.76	60.80
2200	10	75.27	23.51
	25	72.72	28.71
	50	69.45	38.34
	75	25.54	40.15
	100	6.83	85.86

용해성유기분중에는 발암물질로 알려진 여러 가지 종류의 다환방향족탄화수소가 함유되어 있으며, 그중 벤조(a)피렌은 널리 알려진 대표적인 발암물질이다^{4,5,6,7)}. 다환방향족탄화수소는 주로 용해성유기분중에 함유되어 있으므로 탄소입자가 대부분을 차지하고 있는 100% 부하보다는 용해성유기분이 많이 함유된 저부하 운전조건에서 주로 배출된다. Fig. 5는 엔진 중간회전수 및 최대회전수에서 각 부하별 채취한 입자상물질중 다환방향족탄화수소의 배출량을 나타내었다. 그림에서 보여주듯이 다환방향족탄화수소중 벤즈(a)안트라센이 가장 많이 배출되었으며,

발암성이 큰 벤조(a)피렌도 입자상물질중에 최고 0.007 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 이 배출됨을 알 수 있었다.

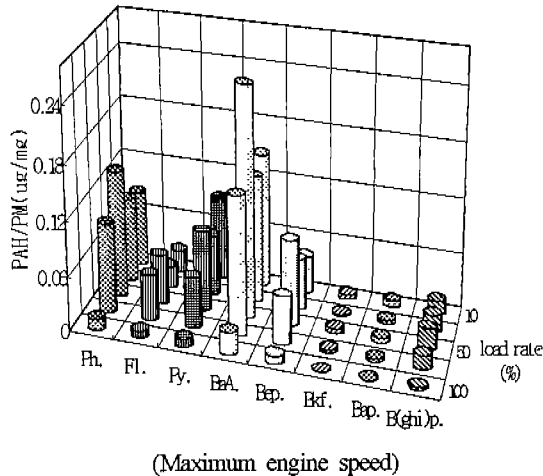
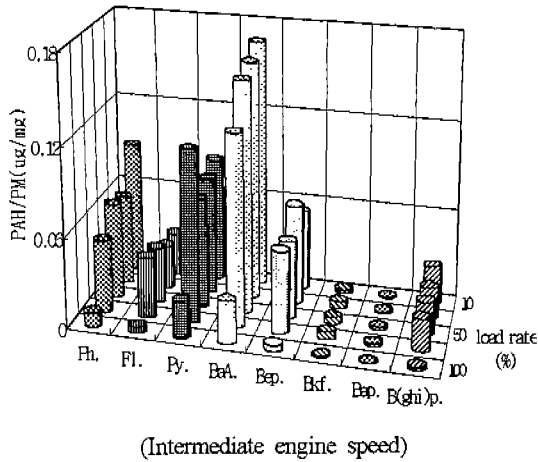


Fig. 5 Test results of PAHs in various engine load rates

3.2 규제시험모드에 의한 오염물질 배출특성

연료분사량을 10%, 20%씩 증가시켰을 때 우리나라 대형경유엔진 배출가스 시험모드인 D-13모드와 서울 시내버스 주행시험모드인 서울-13모드로 각각 배출가스를 측정하

여 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 표에서 보여주듯이 연료분사량을 10% 증가시 D-13모드와 서울-13모드에서 입자상물질은 각각 67%와 51%가 증가하였고, 연료분사량을 20% 증가시켰을 때 D-13모드와 서울-13모드에서 입자상물질은 각각 256%와 231%로 급격히 증가하였다. 그러나 질소산화물의 경우 연료분사량을 20% 증가시 두 운전모드에서 각각 23%와 29%가 오히려 감소함을 나타내었다.

Table 5 Test results of exhaust emissions by test mode at power control

Mode	Engine condition	Emission (g/kW-h)			
		PM	NO _x	CO	HC
D-13 mode	Normal(A)	0.43	9.0	1.8	0.56
	10% up of fuel(B)	0.72 (67)	11.5 (28)	1.5 (-17)	0.26 (-54)
	20% up of fuel(C)	1.51 (256)	6.9 (-23)	3.1 (72)	0.26 (-54)
Seoul-13 mode	Normal(A)	0.39	9.6	2.1	0.66
	10% up of fuel(B)	0.59 (51)	9.0 (6)	1.5 (-29)	0.40 (-39)
	20% up of fuel(C)	1.29 (231)	6.8 (-29)	3.1 (48)	0.53 (-20)

* Remark : () is (B-A)/A × 100 or (C-A)/A × 100

4. 결론

현재 우리나라에서 많이 사용되는 시내버스 엔진을 대상으로 연료분사량을 조정해가면서 엔진회전수별, 부하별 그리고 규제시험 모드인 D-13모드와 서울-13모드로 운전시 배출되는 규제물질 및 미규제물질의 배출특성을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 엔진의 정격출력상태에서 연료분사량을 10% 증가시키면 출력은 5% 상승하였으나, 매연 및 입자상물질은 각각 25%, 30% 증가하였으며, 연료분사량을 20% 증가시키면 출력은 13% 증가하였으나 매연 및 입자상물질은 각각 189%, 337%씩 증가하였다. 그러므로 엔진출력을 증가시킬 목적으로 엔진의 연료분사펌프 가버너를 임의조작하여 연료분사량을 증가시키는 행위는 근절되어야 할 것이다.

2. 용해성유기분은 시내버스 주행조건에서는 약 18% 정도이며, 정지가동시나 저부하 운전조건에 주로 배출되었고, 발암성물질인 여러종류의 다환방향족탄화수소중에서는 벤즈(a)안트라센이 가장 많이 배출되었다. 특히, 부하율 50% 이하의 운전조건에서 많이 배출되어 연료의 불연소과정에서 주로 생성됨을 알 수 있었다.

3. 우리나라 대형경유엔진 배출가스 시험 모드인 D-13모드와 서울시내버스 주행시험 모드인 서울-13모드로 배출가스를 측정할 결과, 연료분사량 10% 증가시 D-13모드와 서울-13모드에서 입자상물질은 각각 67%와 51%가 증가하였고, 연료분사량을 20% 증가시 D-13모드와 서울-13모드에서 입자상물질은 각각 256%와 231%로 급증하였다. 반면 질소산화물은 연료분사량을 20% 증가시 D-13모드와 서울-13모드에서 각각 23%와 29%가 오히려 감소함을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. 국립환경연구원, "경유엔진에 의한 대기 오염물질 저감대책에 관한 연구(II)", NIER NO. 98-17-532.
2. 환경부, "디젤엔진 촉매개발 연구", 3차년도 최종보고서, 1998.
3. Michael P. Walsh, "Global trends in diesel emissions control", SAE 980186, 1998.
4. Jesper Schramm, Shigeo Hori and Tsugio Abe., "The Emission of PAH from a DI Diesel Engine Operating on Fuels and Lubricants with Known PAH Content", SAE, 940342, 1994.
5. Jose M. Bayona, Karin E. Markides, and Milton L. Lee., "Characterization of Polar Polycyclic Aromatic Compounds in a Heavy Duty Diesel Exhaust Particulate by Capillary Column Gas Chromatography and High-Resolution Mass Spectrometry", ES&T, 22, 1440-1447, 1988.
6. C.N. Opris, L.D. Gratz, S.T. Bagley, K.J. Baumgard, D.G. Leddy and J.H. Johnson, "The Effects of Fuel Sulfur Concentration on Regulated and Unregulated Heavy-Duty Diesel Emissions", SAE Paper 930730, 1993.
7. California EPA, "Health risk assessment for diesel exhaust", Public and scientific review panel, review draft, 1997.