

직접분사식 소형 디젤엔진의 배기배출물에 대한 인자분석적 고찰

장세호 · 김영식[†]
(강원도립대학교 · [†]부경대학교)

Factor Analysis on Exhaust Gas Emissions of Small DI Diesel Engine

Se-Ho JANG · Yeong-Sik KIM[†]
(Gangwon State University · [†]Pukyong National University)

Abstract

This study analyzed the effect of four control factors, RPM, load, EGR rate and cooling water temperature on the exhaust emissions of the small DI diesel engine. The amount of NOx and smoke emissions were measured through experiments for three levels of four control factors according to orthogonal array table, and the effect of four factors on NOx and smoke emissions was analyzed quantitatively. The main results obtained in this study are summarized as follows:

1. RPM, load and EGR rate have a great influence on NOx and smoke emissions, and the effect of cooling water temperature is negligible.
2. As RPM and load increases NOx emission increases and decreases sharply as the EGR rate increases.
3. Smoke emission decreases or increases randomly according to RPM and load, but increases sharply in proportion to the EGR rate.
4. EGR rate has the greatest effect on NOx and smoke emissions by more than 60% of contribution to variance, especially in the case of NOx emission, EGR rate represents a significant result even under the confidence level of 99% on ANOVA.

Key words : Exhaust gas emission, NOx, Smoke, EGR(exhaust gas recirculation), Design of experiment, ANOVA

I. 연구의 필요성

디젤엔진은 열효율이 높고 다양한 종류의 연료를 사용할 수 있을 뿐 아니라, 신뢰성이 탁월하여 해상용 또는 육상용 수송기계의 동력원으로서 널리 사용되고 있다. 자동차를 예로 들면 최근 전기나 연료전지를 동력원으로 하는 저공해자동차의 개발과 보급이 늘어나고 있는 추세이기는 하나, 가솔린 및 디젤엔진에 대한 연비 향상과 바이오에탄올 등 다양한 연료 개발을 기반으로

내연기관을 동력원으로 하는 자동차 체계는 그리 쉽게 바뀔 것 같지 않다. 전 세계 소형자동차의 점유율에 대한 전망치를 보면 2035년까지 내연기관 자동차가 여전히 91%를 차지할 것으로 기대되고 있다(Navigant Research 2014).

내연기관으로부터 배출되는 배기가스는 대기오염의 직접적인 원인이 될 뿐 아니라 인체에도 심각한 질병을 유발할 수 있는데, 디젤엔진에 있어서 특히 유해 배기가스로 관심을 기울여야 할 성분은 질소산화물(NOx)과 매연(smoke)이다. 2000

[†] Corresponding author : 051-629-6155, yeongsik@pknu.ac.kr

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의해 연구되었음.

년 이후 미국, 일본, 유럽 등 선진국들은 자동차의 배기가스 배출기준을 점진적으로 강화해 왔는데, 2014년에 시행된 EURO 6는 이전까지 시행되어 왔던 EURO 규제들 중 가장 높은 수준의 배출규제로 직전의 EURO 5 기준보다 질소산화물 80%, 매연 60% 강화된 것이다.

디젤엔진의 배기배출물은 운전조건에 따라 크게 영향을 받는다. 이와 관련된 국내의 연구동향을 살펴보면, Jang et al.(2002)은 급기압력, 냉각수 온도, 공기과잉율, 예열 등의 운전조건이 디젤엔진의 질소산화물, 일산화탄소 및 이산화탄소 배출에 미치는 영향에 대해, Lee(2013)은 흡기온도가 디젤엔진의 질소산화물 배출에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다. 또한 Ryu et al.(2008)은 연료전처리장치가 디젤엔진의 성능 및 매연배출에 미치는 영향에 대해, Jo et al.(2013)은 EGR율과 VGT의 제어에 의한 디젤엔진의 질소산화물 및 이산화탄소 배출 특성에 대해 연구를 수행한 바 있다.

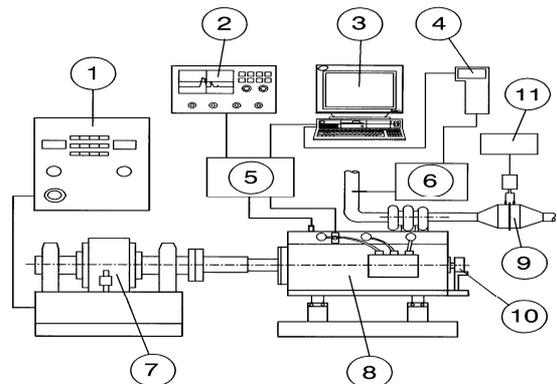
이와 같이 디젤엔진의 배기배출물은 많은 인자들에 의해 영향을 받는데, 이 인자들의 영향을 복합적으로 고려하기 위해서는 방대한 양의 실험과 이에 대한 분석을 필요로 한다. 직교배열표를 이용한 실험계획법은 여러 인자들이 특성치에 미치는 영향을 객관적으로 분석할 수 있도록 인자와 그 수준을 미리 배열한 후 실험을 수행함으로써 최소한의 실험으로 각각의 인자들이 특성치에 미치는 영향을 손쉽게 분석할 수 있다.

본 연구는 직접분사식 소형 디젤엔진에서 회전수, 부하, EGR율 및 냉각수 온도, 4개의 제어인자가 배기배출물에 미치는 영향을 분석한 것으로서 실험계획법에 따라 이들 4개 인자에 대한 3수준의 실험을 통해 질소산화물의 배출량 및 매연의 농도를 측정하고, 이 결과를 토대로 분산분석을 실시하여 이들 인자들이 디젤엔진의 질소산화물과 매연 배출에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

II. 실험 및 방법

1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 엔진, 동력계, 데이터 수집장치, 배기분석기 등으로 구성되어 있으며, [Fig. 1]은 그 개략도를 나타낸 것이다. 엔진은 3기통 직접분사식 과급디젤엔진으로서 주요 제원은 <Table 1>과 같다. 동력계는 와전류식 동력계(Absorption capacity 132kW)이며, 배기분석기는 정전위 전해법을 이용한 배기분석기(Testo 350)를 사용하였다. 또한 매연농도 측정은 광투과 방식을 이용한 디젤 스모크분석기(BOSCH, RTM 430)를 사용하였다.



[Fig. 1] Schematic diagram of experimental apparatus

1. Dynamometer controller
2. Digital oscilloscope
3. Computer
4. Exhaust gas hand-held instrument
5. Pressure sensor amplifier
6. Exhaust gas analyzer box
7. Dynamometer
8. Test engine
9. Laminar flow meter
10. Rotary encoder
11. Digital manometer

<Table 1> Specifications the test engine

Item	Specification
Type	3-cylinder 4-stroke direct injection Diesel engine with exhaust T/C
Compression ratio	18.4 : 1
Power	40kW at 2600rpm
Bore (mm)	100
Stroke (mm)	110
Piston speed (m/s)	9.53
Fuel injection time	BTDC 17±1°C
Fuel injection pressure (MPa)	19.61

2. 실험계획

디젤엔진의 배기 특성치(질소산화물의 배출량 및 매연의 농도)에 영향을 미치는 제어인자로 회전수, 부하, EGR율 및 냉각수 온도의 4개 인자를 선택하고, 각 인자에 대해 다음과 같이 선택한 3 수준의 실험을 계획하였다. 회전수는 1200, 1500 및 1800rpm, 부하는 40, 50 및 60%, EGR율은 10, 15 및 20%, 냉각수 온도는 40, 60 및 80°C의 3수준을 선택하였다. 본 실험에서 선택한 제어인자와 그 수준을 <Table 2>에 정리하여 나타내었다. <Table 3>은 본 실험에서 수행할 4인자 3수준계의 $L_9(3^4)$ 직교배열표이다.

<Table 2> Control factors and levels

	1 st level	2 nd level	3 rd level
RPM	1200	1500	1800
Load (%)	40	50	60
EGR rate (%)	10	15	20
C/W temp. (°C)	40	60	80

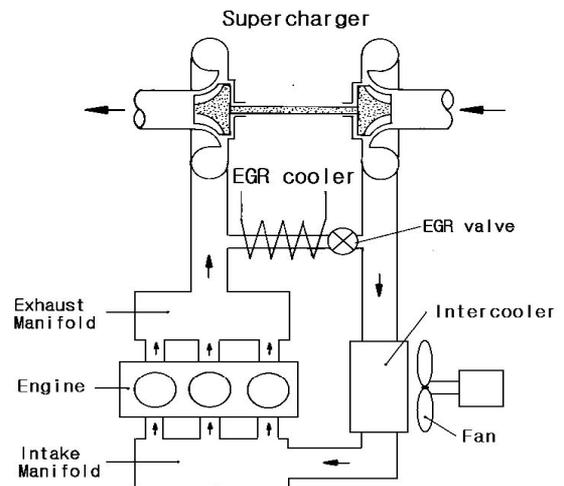
3. 실험방법

실험에 앞서 회전수, 부하, EGR율 및 냉각수

온도의 4개 제어인자를 제외한 모든 운전조건 및 상태를 일정하게 유지하고, 시동 후 측정하고자 하는 운전조건에서 5분간 운전하여 운전상태가 안정된 후 실험을 수행하였다. 실험은 <Table 3>의 직교배열표에 제시된 조건에 따라 순서는 무작위로 하여 수행하였으며, 배기분석기 및 스모크분석기에서 5초 간격으로 데이터를 연속 수집하였다. EGR 시스템은 [Fig. 2]에 나타난 바와 같이 배기 매니폴드에서 흡기 매니폴드 쪽으로 배기를 재순환시키는 고압루프방식(High pressure loop method)을 채택하였다.

<Table 3> $L_9(3^4)$ orthogonal array of experiment

Exp. No.	RPM	Load	EGR rate	C/W temp.
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1



[Fig. 2] Schematic diagram of EGR system

EGR 가스 온도를 낮추기 위하여 수냉식 EGR cooler를 설치하였으며, EGR 시스템 중간에 조절 밸브를 설치하여 EGR율을 수동으로 조절할 수 있도록 하였다. EGR valve를 통과한 가스는 T/C로 인해 흡입된 고온의 공기와 합쳐지게 한 후 Intercooler를 거쳐 흡기 매니폴드로 유입되도록 하였다. EGR율은 다음 식에 의해 결정하였다.

$$EGR\ rate = \frac{q_0 - q_a}{q_0}$$

여기서, q_0 는 EGR율 0인 상태의 흡입공기량(kg/hr), q_a 는 배기재순환 시의 흡입공기량(kg/hr)이다.

III. 결과 및 고찰

<Table 4>는 직교배열표에 따라 실험을 수행하여 얻어진 질소산화물의 배출량(g/Nm³) 및 매연의 농도(%)를 나타낸 것이다.

<Table 5> 및 <Table 6>은 각각 이 데이터들을 바탕으로 분산분석을 실시한 결과를 나타낸 것으로, 두 경우 모두 특성치의 제곱합이 가장 작은 냉각수 온도를 오차항으로 폴링하여 분산비를 구한 것이다. 질소산화물에 대한 분산분석 결과 회전수, 부하 및 EGR율이 모두 95% 신뢰수준에서 유의한 결과(*)를 나타내고 있는데, 이것은 회전수, 부하 및 EGR율이 모두 질소산화물의 배출에 상당한 영향을 미친다는 것을 의미한다. 특히 EGR율의 경우 99% 신뢰수준에서도 유의한 결과(**)를 보이고 있어, 본 실험에서 선택한 제어인

자 4개 중에서 EGR율이 질소산화물의 배출에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 보여주고 있다. 매연에 대한 분산분석의 결과도 질소산화물의 경우와 마찬가지로 회전수, 부하 및 EGR율이 모두 95% 신뢰수준에서 유의한 결과(*)를 나타내고 있어 이들 3개의 제어인자가 모두 질소산화물 뿐 아니라 매연의 배출에도 상당한 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다. 그 영향의 정도는 <Table 5> 및 <Table 6>에 표기한 변동에 대한 기여율로서 설명할 수 있는데, 두 경우 모두 EGR율의 변동에 대한 기여율이 60% 이상으로서 질소산화물이나 매연의 배출에 EGR율이 미치는 영향이 그만큼 크다는 것을 의미한다. 분산분석의 결과에 따르면 회전수와 부하가 매연의 배출에 미치는 영향은 그리 큰 차이를 나타내지 않으나, 질소산화물에 미치는 영향은 회전수 쪽이 조금 더 큰 것으로 판단된다. 냉각수 온도의 영향은 무시할 수 있을 정도이다.

<Table 4> Experimental layout and result of experiment

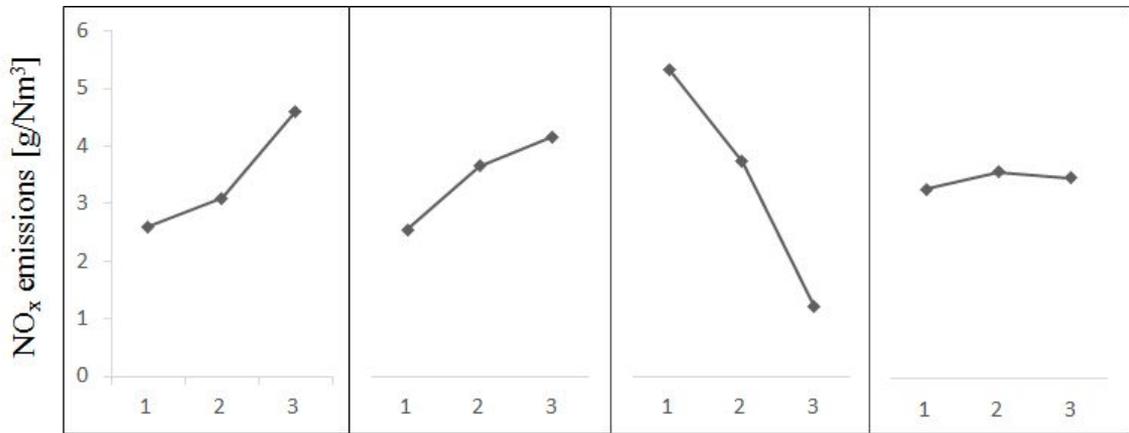
Exp. No.	RPM	Load	EGR rate	C/W temp.	NOx (g/Nm ³)	Smoke (%)
1	1	1	1	1	3.4	10
2	1	2	2	2	3.3	23
3	1	3	3	3	1.1	60
4	2	1	2	3	2.6	7
5	2	2	3	1	0.9	23
6	2	3	1	2	5.8	9
7	3	1	3	2	1.6	33
8	3	2	1	3	6.7	3
9	3	3	2	1	5.5	26

<Table 5> Analysis of variance table for NO_x data of test engine

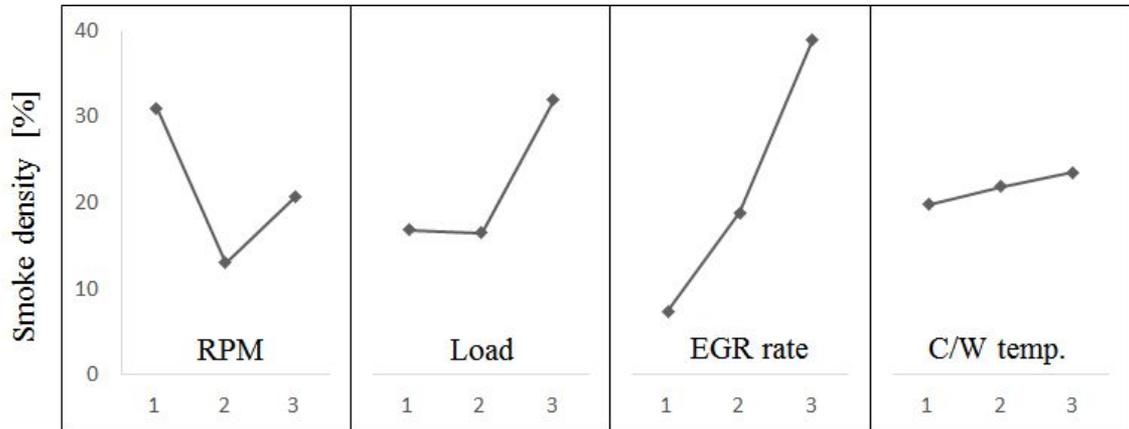
Factor	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-ratio	F-value(0.05)	% contribution to variance
RPM	6.50	2	3.25	46.43 *	19.00	17.82
Load	4.02	2	2.01	28.71 *	19.00	11.02
EGR rate	25.82	2	12.91	184.43 **	19.00	70.78
C/W temp.	0.14	2	0.07	1	19.00	0.38

<Table 6> Analysis of variance table for smoke data of test engine

Factor	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-ratio	F-value(0.05)	% contribution to variance
RPM	489.56	2	244.78	24.21 *	19.00	19.74
Load	460.22	2	230.11	22.76 *	19.00	18.56
EGR rate	1510.22	2	755.11	74.68 *	19.00	60.89
C/W temp.	20.22	2	10.11	1	19.00	0.82



[Fig. 3] Interaction plots for NOx data of test engine



[Fig. 4] Interaction plots for smoke data of test engine

[Fig. 3] 및 [Fig. 4]는 각각 질소산화물의 배출량 및 매연 농도를 4개의 제어인자별로 정리하여 나타낸 것으로 각 인자별 수준의 평균치를 plot한 것이다. 특정 인자에 대한 기울기가 가파르다는

것은 그 인자에 대한 변동이 크다는 것, 즉 특성치에 상대적으로 큰 영향을 미치는 인자라는 것을 의미한다. [Fig. 3]을 보면 회전수, 부하가 커짐에 따라 질소산화물의 배출량은 증가하는 경향

을 나타내며, EGR율이 높아짐에 따라 질소산화물의 배출량은 거의 선형적으로 반비례하며 급격하게 감소한다. 냉각수 온도의 수준에 따른 변화는 극히 작다. 이상의 결과는 전술한 분산분석의 결과에서도 기술한 바와 같이 EGR율이 질소산화물의 배출에 미치는 영향이 다른 인자들에 의한 영향보다 훨씬 크다는 것을 의미한다. 한편 [Fig. 3]의 결과를 종합해서 판단해 보면, 냉각수 온도를 제외한 나머지 3개 인자들 가운데 회전수와 부하가 증가할수록 질소산화물의 배출량은 증가하며, EGR율이 증가할수록 급격하게 감소한다는 것을 알 수 있다. [Fig. 4]의 매연의 경우는 제어인자별로 질소산화물과는 다른 경향을 보이고 있다. 회전수의 경우 제2수준(1500rpm)에서 매연의 농도가 감소하지만 제3수준(1800rpm)에서는 다시 증가하고 있다. 부하의 경우 제1수준(40%)과 제2수준(50%)에서 매연의 농도는 큰 차이를 보이지 않지만 제3수준(60%)에서는 큰 폭의 증가를 보여주고 있다. EGR율에 따라서는 그 수준이 높아짐에 따라 매연의 농도는 거의 선형적으로 비례하며 급격하게 증가한다. 냉각수 온도에 따른 변화는 극히 작다. 최근에 발표된 Song(2015)의 연구에 의하면, NO_x 배출량은 EGR율이 증가함에 따라 감소하고 회전수가 증가할수록 증가하며, 매연의 농도는 EGR율이 증가함에 따라서 높아지고 회전수가 증가할수록 낮아지는 것으로 보고되고 있다. 이러한 결과는 본 연구의 결과와는 부분적으로 다소의 차이가 있는데, 이는 실험에 사용한 엔진, 선택한 EGR율 및 회전수 등의 상이에서 비롯된 것으로 생각된다. EGR율 이용하여 NO_x와 매연을 동시에 저감시키는 것은 기술적으로 매우 어려운 일이나 이에 관한 연구는 꾸준히 계속되어 왔다. 일례로서 Choi et al.(2007)의 연구에서는 MTBE 혼합유(10vol%)를 사용한 경우 EGR율 15%일 때 NO_x와 매연을 동시에 저감시킬 수 있다고 보고한 바 있다.

IV. 요약

본 연구는 직접분사식 소형 디젤엔진에서 회전수, 부하, EGR율 및 냉각수 온도, 4개의 제어인자가 배기배출물에 미치는 영향을 분석한 것으로서 실험계획법에 따라 이들 4개 인자에 대한 3수준의 실험을 통해 질소산화물의 배출량 및 매연의 농도를 측정하고, 이 결과를 토대로 분산분석을 실시하여 이들 인자들이 디젤엔진의 질소산화물과 매연의 배출에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 주요한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 회전수, 부하 및 EGR율은 질소산화물과 매연의 배출에 큰 영향을 미치며 냉각수 온도에 의한 영향은 극히 작다.
2. 회전수와 부하가 증가할수록 질소산화물의 배출은 증가하고, EGR율이 증가할수록 급격하게 감소한다.
3. 매연의 농도는 회전수와 부하의 수준에 따라 랜덤하게 감소하거나 증가하지만, EGR율에 따라서는 거의 선형적으로 비례하여 급격하게 증가한다.
4. 분산분석의 결과 EGR율은 질소산화물과 매연의 변동에 대한 기여율이 각각 60%이상으로서 이들의 배출에 가장 큰 영향을 미치며, 특히 질소산화물의 경우에는 99%의 신뢰수준하에서도 유의한 결과를 나타낸다.

References

- Cheng, Yu-Kun et al.(2013). A study on power and exhaust emissions in diesel engine with EGR system, Abstract Book of KSAE 2013 Annual Conference, 75~79.
- Choi, Seung-Hun & Oh, Young-Taig(2007). An Experimental Study on Simultaneous Reduction of Smoke and NO_x with Biodiesel Fuel in a CRDI Type Diesel Engine, Transactions of KASAE 15(3), 35~40.

- Jang, Se-Ho · Koh, Dae-Kwon & Ahn, Su-Kil(2002). An effect of operating conditions on exhaust emissions in a small turbocharged D.I. engine, Journal of the Korean Society for Power System Engineering 13(6), 51~56.
- Jo, Kyu-Hee et al.(2013). NOx and CO2 Formation Characteristics by Interaction of EGR and VGT on HSDI Diesel Engine, Abstract Book of KSAE 2013 Annual Conference, 542~546.
- Lee, Seung-Ha(2013). The effect of intake air temperature on NOx emissions in light-duty Diesel vehicle and engine, Abstract Book of KSAE 2013 Annual Conference, 126~128.
- Navigant Research(2014). Transportation Forecast Light Duty Vehicles: Global Market Forecasts 2014-2035.
- Ryu, Kyung-Hyun · Heo, Byong-Mu & Park, Jin-Chul(2008). Effect of Fuel Pre-Treatment Apparatus on the Performance and Smoke Emission in Diesel Engine, Abstract Book of KSAE 2013 Annual Conference, 257.
- Song, Kyu-Keun(2015). Effect of EGR on power and exhaust emissions in diesel engine, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 39(9), 870~875.
-
- Received : 02 February, 2017
 - Revised : 31 March, 2017
 - Accepted : 06 April, 2017