Transactions of KSAE, Vol. 22, No. 7, pp.84-89 (2014)

Copyright © 2014 KSAE / 133-12
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2014.22.7.084

다구찌 방법을 적용한 Off-road 디젤 엔진의 분사조건 및 EGR 율 최적화에 관한 연구

하 형 수[*1)] · 안 중 규[2)] · 박 찬 수[1)] · 강 정 호[1)]

자동차부품연구원 배기연비성능연구센터[1)] · 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과[2)]

Study on Optimization of Fuel Injection Parameters and EGR Rate of Off-road Diesel Engine by Taguchi Method

Hyeongsoo Ha[*1)] • Juengkyu Ahn[2)] • Chansu Park[1)] • Jeongho Kang[1)]

[1)]*Emission & F.E. R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea*

[2)]*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Korea University of Technology & Education, Chungnam 330-708*

(Received 14 April 2014 / Revised 16 May 2014 / Accepted 16 June 2014)

Abstract : Not only the emission regulation of on-road vehicle engine, but also emission regulation of off-road engine have been reinforced. It is the reason of wide application of emission reduction technology for off-road engines. In this study, optimization of engine parameters (Injector hole number, Injection timing and EGR rate) for reduction of NOx and smoke emissions were conducted by using the analysis of sensitivity and S/N ratio of Taguchi method(DOE). As results, this paper shows optimum value of the parameters for NOx and smoke emission reduction. From the result of reproducibility verification, it is final that the prediction value of NOx and smoke has the error of below 10%. Consequently, the method and results of this study will be used for quantitative reference to EGR control mapping in next study.

Key words : Design of experiment(실험계획법), Exhaust gas(배기가스), Taguchi method(다구찌 방법), Exhaust gas recirculation(배기가스 재순환), Signal to noise ratio(신호 대 잡음 비)

1. 서 론

현재 내연기관 수요 증가에 의해 배기가스 및 매연 배출에 의한 환경오염에 대한 관심이 높아짐에 따라 전 세계적으로 자동차 배출가스에 대한 규제가 대폭 강화되고 있다. 특히 디젤엔진은 개선의 여지가 남아있어 관련 연구가 활발히 진행 중이다. 국내의 경우, 생산되는 on-road 용 디젤 엔진에 대해 단계적으로 EURO 6 가 2014년부터 적용되어 CO, PM, NOx 등에 대한 더욱 강화된 규제를 실시할 예정이다. On-road 차량뿐만 아니라 농기계 및 건설기계 등의 생산 및 수요 증대에 따라 off-road 엔진이 장착된 차량에 대한 기준 또한 강화되고 있다. Off-road 용 농기계 및 건설기계 규제에 있어서 국내에서는 Tier series 가 채택되고 있으며 2014년 부로 Tier-4 기준이 적용되어 생산되는 모든 off-road 엔진에 대해 이러한 기준을 충족하지 못하면 수출이 원천적으로 불가한 상황이다. 따라서 off-road 엔진 또한 다양한 배기개선기술을 활용한 규제 만족을 위한 노력이 필요하며 이에 관한 각종 분야의 활발한 연구가 요구된다. 관련 연구로서 조규백 등[1)]은 비도로 차량용

[*]Corresponding author, E-mail: quino87@hanmail.net

디젤엔진의 배기가스 저감에 관한 연구로써 EGR과 WGT, DPF 동시적용에 따른 특성 연구를 실시하여 비교적 낮은 부하에서의 EGR 적용 가능성을 제시하였으며 EGR-DPF 적용 시 약 2%의 출력손실과 약 5%의 연료소모량을 확인하였다. 또한 오상기 등[2]은 건설기계용 대형 디젤엔진에 EGR cooler 시스템을 장착하여 Tier-3 기준을 만족하고자 하는 연구를 진행하였다.

현재 자동차의 각종 배기규제를 만족하기 위한 기술들이 개발, 적용되고 있으며 이는 크게 배기가스의 전처리 및 후처리 기술로 나눌 수 있다. 먼저 전처리 기술로 과급(WGT, VGT), 배기가스 재순환(EGR; Exhaust gas recirculation), 연료분사계통의 최적화 기술 등이 있으며 후처리 기술로 DOC(Diesel oxidation catalyst), DPF(Diesel particulate filter trap), SCR(Selective catalytic reduction) 등이 연구개발과 더불어 상용 차량에 적용되고 있다. 국내에서도 다양한 전처리 및 후처리 시스템에 관한 연구가 진행중이며 공호정 등[3]은 EGR이 장착된 소형 디젤엔진에서 EGR 율과 연료분사시기 변화에 따른 배기특성을 분석하여 EGR 율 증가에 따른 NOx 감소 및 PM 증가, 그리고 연료분사시기 지각에 따른 NOx 감소 및 PM 증가 경향에 대해 분석하였다. 또한 김주신 등[4]은 CRDI 엔진의 연소압력 등을 측정하여 엔진 회전수 변화에 따른 분시시기가 연소특성이 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 그리고 박영수 등[5]은 승용 디젤엔진에서 HP 및 LP EGR의 공급비율에 따른 연소, 배기특성을 분석하여 LP EGR 공급 증가에 따른 BSFC 감소 등을 보고하였다. 이러한 전처리 시스템 적용에서 특히 엔진 배출물 중 NOx와 매연 배출 간은 trade-off 관계를 가진다고 알려져 있어 배기가스 전처리 기술로는 동시저감에 한계가 있으며 양 배출물 간 조정을 통한 최적화가 우선적으로 실시되어야 한다. 차후 강화되는 배기규제 만족을 위해 후처리기술과의 통합에서 후처리 과정을 고려한 전처리과정의 최적화가 반드시 필요하며 이에 대한 정량적 기준이 필요한 실정이다.

실험계획법이란 실험에 의하여 기술정보의 획득 효율을 높여주기 위한 일반적인 기술을 말하며, 해결하고자 하는 문제에 대한 실험에 관해 실험방법, 데이터취득에 대해 통계적으로 계획, 분석하여 최소실험횟수에서 최대의 정보를 얻고자 하는 방법으로 직교배열 등을 사용한다. 실험계획법의 한 종류로, 다구찌 방법[6]이란 직교배열표를 광범위하게 사용한 일부실시법을 주로 사용하며, 제어 불가능한 환경조건이나 제어하기 어려운 생산 및 공정조건 등을 잡음인자로 정의하여 품질 산포의 크기를 손실함수나 신호 대 잡음비(S/N ratio)로 변환하여 잡음인자의 영향을 작게 하는 강건설계(Robust design)를 가능하게 한다. 다구찌 방법에서 신호 대 잡음비는 제어 불가능한 잡음인자의 영향으로 인한 신뢰성 하락을 고려한 분석을 위하여 신호입력의 힘과 잡음이 주는 영향의 힘의 비율로써 나타내며 각 정특성 계량치에 대해 다음과 같은 식을 사용한다. 여기서 망소특성은 목표치가 작을수록, 망대특성은 목표치가 클수록 좋은 경우를 뜻하며 그리고 망목특성은 특정한 목표치가 주어진 경우를 뜻한다.

- 망소특성:

$$SN = -10\log\sum_{i-1}^{n}\frac{y_i^2}{n} \tag{1}$$

- 망대특성 :

$$SN = -10\log\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2} \tag{2}$$

- 망목특성 :

$$SN = 10\log\frac{\bar{y}^2}{\sigma_{n-1}^2} \tag{3}$$

Where y : Characteristic value, $\overline{y^2}$: Mean of square, σ : Standard deviation, n : Number of experiment

다구찌기법과 같은 실험계획법은 생산품질 개선뿐만 아니라 제품 개발 및 기초 연구 분야에도 광범위하게 활용될 수 있으며 특히 내연기관분야의 연구개발 분야에도 활용될 수 있다. 이에 관한 연구로 박규병 등[7]은 다구찌 방법과 근사최적설계를 자동차 연료탱크 의 넘침 방지 시스템 설계에 적용하여 연료탱크의 연료 넘침을 최소화 하는데 개발기간과 비용 절감 효과를 보고하였다. 또한 김용래 등[8]은

DFSS 기법을 적용하여 디젤엔진 인젝터의 설계변수에 따른 인젝터 형상이 노즐코킹에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

본 논문에서는 56kW급 off-road용 기계식 디젤엔진을 이용하여 배기가스 전처리 기술의 배기특성에 미치는 영향에 대한 정량적 제시와 배기가스 전처리 기술 적용 배기 최적화를 위한 실험이 진행되었으며 이에 대한 분석을 위해 다구찌 방법이 사용되었다. 사용 인자로는 분사시기, 인젝터 홀 수 및 EGR 율이 선택되었으며 이를 통하여 해당 인자가 배기특성 중 뚜렷한 trade-off 관계를 가진다고 알려진 NOx와 PM 배출에 미치는 영향의 민감도를 파악 및 분석하여 최적 엔진 조건에 대한 정량적 해석 결과를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구의 실험장치에 대한 개략이며 엔진, 동력계, 압력, 온도 센서, 배기가스 분석기, smoke meter 등으로 구성된다. 본 연구에 사용된 실험용 엔진은 EGR system, WGT 및 인터쿨러가 장착된 56kW급 off-road용 기계식 디젤엔진으로 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다. 엔진 동력계로 AVL 사의 240kW급 EC 동력계가 사용되었고, 배기가스 분석계로 Horiba 사의 MEXA-9100D, 매연측정은 AVL 사의 S415가 사용되었다. 해당 실험의 엔진조건은 HP EGR 시스템 적용을 위해 흡-배기 압력차가 충분한 구간에서 선정하였으며 엔진회전수 1550 rpm, 부하 80 Nm이 본 실험의 엔진 구동 조건이다. 진행 중 실내 온도는 25±5°C로 유지하였으며 본 실험에서 지정한 변수 외 모든 조건들은 고정하였다.

본 연구에서는 NOx 및 매연배출에 대해 망소특성으로 설정하여 다구찌 방법의 S/N 비 분석을 실시하였으며 설계민감도 및 최적조건 도출에 이용하였다. Table 2는 본 실험의 실험조건으로 사용 변수와 각 해당 수준의 입력치를 나타낸다. 또한 Table 4는 실험에 사용된 L_9 (3^3) 직교배열표로 총 9 case의 실험이 계획되었다. 사용된 인자는 인젝터 홀 수, 분사시기 및 EGR 율이며 분사시기 및 EGR 율은 3수준, 인젝터 홀 수는 특정 인자의 수준수가 다를 때 직교성을 유지하되 실험수를 늘리지 않게 하는 가수준

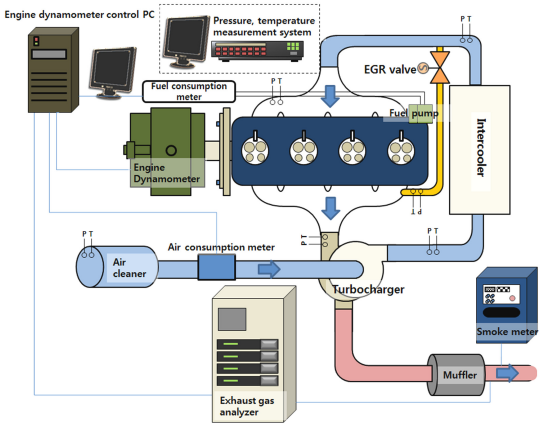

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specification of test engine

Type	4 stroke / 4 cylinder
Displacement volume [cc]	3,409
Max power (PS/rpm)	82 / 2,500
Intake system	Intercooler
Type of fuel injection	DI-injection

Table 2 Design parameters and levels

	Level 1	Level 2	Level 3
Injector hole number [X1]	5	6	6
Injection timing [X2]	TDC	ATDC 2°	ATDC 4°
EGR rate [X3]	10%	15%	20%

Table 3 Orthogonal arrays for DOE - L_9 (3^3)

No.	X1	X2	X3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	2’	1	3
8	2’	2	1
9	2’	3	2

법[9]을 적용하여 인젝터 홀 수 6을 반복시켜 2수준으로 지정하였다. 실험은 Table 3에 따라 직교배열에 의한 최소시행으로 진행되었다. 전체 실험에 대해 2회 씩 반복하여 데이터를 취득하였다. 실험 변수 중 EGR 율은 엔진 시험에서 EGR duty 변동에 따라 측

정되는 CO_2 데이터를 참고하여 계산하였으며 EGR 율 계산에 사용된 식은 다음과 같다.

$$EGR\,rate(\%) = \frac{[CO_2]_i - [CO_2]_{amb}}{[CO_2]_e - [CO_2]_{amb}} \times 100 \quad (4)$$

Where i : Intake gas, e : Exhaust gas, amb : Ambient

상기 인자들의 변동에 따른 실험에서 응답치로 디젤엔진의 대표적 배출물인 NOx 와 매연 발생이 측정되었으며 이 두 가지 측정치에 대한 S/N 비 분석 및 분산분석이 실시되었다. 또한 다구찌 방법의 S/N 비를 통한 각 변수의 수준에 대한 최적화를 시도하였으며 최적화 조건에 대한 검증 실험을 실시하여 예측치와 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 인젝터 홀 수, 분사시기, 및 EGR 율의 변동이 디젤엔진의 배기가스 NOx 및 매연에 미치는 영향에 대한 분석을 위해 다구찌 실험계획이 사용되었으며 결과에 대하여 분산분석 및 S/N 비 분석이 실시되었다. Table 4 및 Table 5는 실험결과에 대한 S/N 비 분석 결과로 각 인자의 설계민감도를 나타내는 델타에 대한 정리를 포함한다.

해당 엔진조건에서 각 인자가 배기가스 배출에 미치는 영향으로 NOx에 대해 분사시기가 약 47%로 가장 높은 민감도를 가지며, 인젝터 홀 수와 EGR 율의 민감도는 각각 약 26%, 25%로 비슷한 수준으로 계산되었다. 또한 매연 배출에 대해 EGR 율이 약 39%로 가장 큰 영향을 미치며 이후 인젝터 홀 수, 분사시기 순으로 민감도 순위가 계산되었다.

앞서 계산한 S/N 비에 대한 분산분석을 실시하였으며 두 응답치에 대한 S/N 비에 각 인자에 대한 등분산 검증과 잔차에 대한 정규성 검증을 실시하였다. 등분산에 대한 검증은 잔차에 대한 분산 그래프를 통해 이루어 졌으며 모든 항목에 대해 등분산을 만족함을 확인하였다. 또한 잔차에 대한 정규성 검증 결과 P value >0.05 로 모든 조건에 대해 데이터가 정규성을 이루고 있다고 판단한다. 이러한 검증을 통해 분산분석 방법으로 GLM(General linear model)[10] 이 적용되었으며 그 결과로서의 DF(Design freedom), SS(Sum of squares), MS(Mean square), F(유의수준), P(P value)는 Table 6, Table 7과 같다.

S/N 비 분석을 통한 최적 엔진조건의 선정은 설계민감도 및 분산분석에서의 F값이 비교적 큰 인자에 주의하여 진행되어야 한다. 분산 분석 결과 NOx에 대해 각 인자가 영향을 준다는 가정이 거짓일 확률을 뜻하는 P value < 0.05로 모두 5%유의수준에서 유의하다고 나타났으며 앞서 수행한 S/N 비 분석 결과

Table 6 Results of ANOVA (Analysis of variation) (NOx)

	DF	SS	MS	F	P
X1	2	5.581	2.7904	80.43	0.012
X2	2	13.782	6.8908	198.63	0.005
X3	2	4.268	2.1340	61.52	0.016
Error	2	0.069	0.0347	-	-
Total	8	23.700	-	-	-

Table 4 Sensitivity analysis for parameters affecting NOx emission

Design variable	Effect			Deviation (Delta statistic)	Percentage [%]	Rank
	Level 1	Level 2	Level 3			
X1	-42.31	-44.00	-43.96	1.69	26.57	2
X2	-45.04	-43.20	-42.04	3.01	47.33	1
X3	-44.34	-43.26	-42.68	1.66	26.10	3
Total	-	-	-	6.36	100	-

Table 5 Sensitivity analysis for parameters affecting smoke emission

Design variable	Effect			Deviation (Delta statistic)	Percentage [%]	Rank
	Level 1	Level 2	Level 3			
X1	-7.660	-6.016	-5.529	2.132	34.82	2
X2	-7.051	-6.714	-5.440	1.611	26.31	3
X3	-5.198	-6.430	-7.578	2.380	38.87	1
Total	-	-	-	6.123	100	-

Table 7 Results of ANOVA (smoke)

	DF	SS	MS	F	P
X1	2	7.486	3.7428	5.68	0.150
X2	2	4.335	2.1677	3.29	0.233
X3	2	8.503	4.2513	6.45	0.134
Error	2	1.318	0.6591	-	-
Total	8	21.642	-	-	-

의 설계민감도와 유사한 경향을 나타내고 있다. 매연에 관해서는 각 인자에 대한 P value가 모두 0.05 이상으로 계산 결과를 보이는데 이에 대한 이유로 해당 전처리 인자들의 변동에 따른 매연 발생의 증가 경향은 NOx 발생에 비해 비교적 비선형성이 심하기 때문으로 판단된다. 하지만 해당 인자들의 변동이 매연 배출에 미치는 영향이 무관하다고 할 수는 없으며, 본 연구의 NOx-매연 간 배출 최적화를 위해 인자의 수준 선택에서 매연 배출 양 또한 주요하게 고려되어야 한다고 판단된다.

Fig. 2 및 Fig. 3은 상기 계산된 S/N 비 평균에 대한 결과로 각 응답치에 대한 제어 인자의 S/N 비를 나타낸다. NOx 및 매연 배출에 대한 최적조건을 찾기 위해 S/N 비의 평균이 이용될 수 있으며, 각각 망소특성의 계량치로 계산된 S/N 비는 클수록 배출이 적다는 의미이다. NOx 발생에 대한 최적수준으로 인젝터 홀 수, 분사시기, EGR 율에 대해 각각 1, 3, 3 수준이며, 매연 발생에 대해서는 각각 3, 3, 1 수준이 최적조건이다. 분석 결과에 따르면 해당 엔진 조건에서 분사시기 변동에 대한 응답치는 NOx와 매연 발생간의 trade off 관계를 따르지 않는 것으로 나타났으며, 이는 분사시기 지각으로 인해 기 보고된 디젤의 연소과정 중 확산연소기간에서의 최고온도 저하로 thermal NOx 발생의 감소와 후연소 기간의 증가로 매연 발생이 저하되었기 때문으로 판단된다. 따라서 본 연구의 두 응답치 간 최적조건으로 분사시기를 3수준으로 선택할 수 있다. 또한 매연 발생에 가장 큰 영향을 주는 인자로 판단되는 EGR 율을 1수준으로, 매연 발생에 비해 NOx에 대한 영향이 비교적 큰 인젝터 홀 수를 1수준으로 선택하여 전처리 조건의 최적으로 결정하였다. 본 연구의 결과로 선정된 최적조건으로 인젝터 홀 수, 분사시기, EGR 율에 대해 각각 1, 3 및 1 수준이 선택되었으며 선정

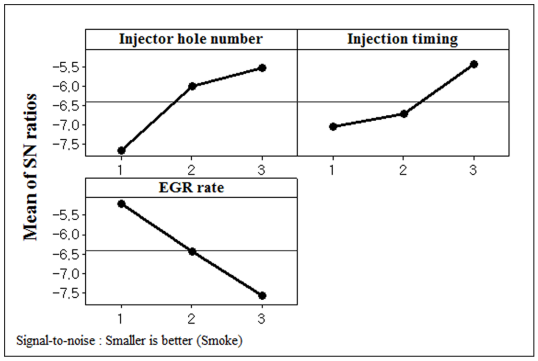

Fig. 2 Signal to noise ratio analysis (smoke)

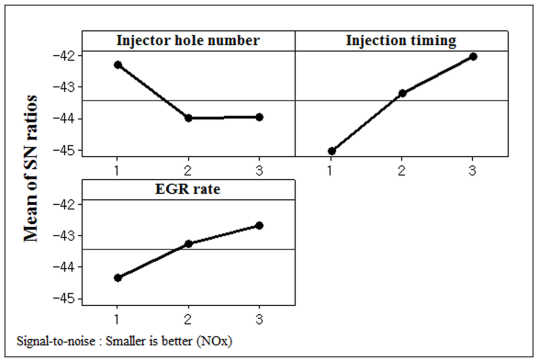

Fig. 3 Signal to noise ratio analysis (NOx)

Table 8 Verification of prediction of emission

	Prediction value	Experimental value	Error
NOx [ppm]	117.3	129	-9.07%
Smoke [FSN]	2.052	2.185	-6.09%

조건에 대해 다음의 재연성 검증을 실시하였다.

다구찌 방법에서는 미 실험 조합에 대한 예측을 실시할 수 있으며 이러한 예측치에 대해 실험을 통한 검증이 필요하다. 본 연구에서 다구찌 방법을 통해 선정된 인자들의 최적 조건 인젝터 홀 수, 분사시기, EGR율에 대해 각각 1, 3, 1의 조합에 대한 예측이 실시되었다. NOx에 대해 S/N 비 - 41.6768 db로 응답치 평균 117.333 ppm 이며 매연에 대해 S/N는 -6.03533 db, 응답치 평균 2.05167 FSN으로 계산되었다. 상기 예측과 예측에 대한 검증 결과는 Table 8과 같으며 검증 결과 예측치와의 오차는 각각 9% 및 6%로 30% 이내에 들어와 예측에 대한 재현성을 가지는 것으로 확인되었다.[11)]

Off-road 엔진의 배기규제 만족을 위한 최적화를 위해 해당 엔진 조건에 대한 분석과 더불어 정량적 해석이 요구되며 특히 EGR 등의 제어에 필요한 맵핑에 있어 본 연구의 실험계획법과 같은 통계분석의 적용으로 다양한 데이터 수치의 정량화는 더욱 정밀한 제어를 가능하게 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 결과로 현재의 배기규제 만족을 위해서는 후처리 추가 적용이 필수적이라 여겨지며 전처리 과정의 적용은 후처리 적용을 고려한 사전 최적화를 목적으로 진행되어야 한다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서 다구찌 방법을 적용하여 off-road용 디젤 엔진의 전처리 기술에 따른 배기특성 분석 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) NOx 배출에 대해 분사시기가 약 47%로 가장 큰 영향을 주며 인젝터 홀 수 및 EGR 율이 각각 26% 내외로 비슷한 영향을 주었다.
2) 매연 배출에 대해서는 EGR 율이 약 39%로 가장 큰 민감도를 가지며 이후 인젝터 홀 수, 분사시기 순으로 영향을 주었다.
3) 본 연구를 통해 선정된 해당 엔진 조건에서의 NOx, 매연 배출에 대한 최적 전처리 조건은 5홀 인젝터, 분사시기 ATDC 4, EGR 율 10%이다.
4) 최적조건 적용에 따른 검증 시험 결과 NOx와 매연 배출이 각각 129 ppm, 2.185 FSN으로 측정되어 예측치와 NOx 배출은 약 9%, 매연 배출은 약 6% 오차를 가져 검증 오차 30% 미만으로 다구찌 기법을 통한 예측 결과를 신뢰할 수 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1) G. Cho, H. Kim and J. Kang, “A Study of the Reduction of Diesel-engine Emissions for Off-road Vehicles,” Transactions of the KSME-B, Vol.35, No.6, pp.577-583, 2011.
2) S. Oh, J. Kim, S. Lee and H. Song, “A Study on Characteristics of Performance by Heavy-duty Diesel Engine on Construction Machine with EGR Cooler System,” Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol.17, No.6, pp.131-136, 2013.
3) H. Gong, I. Hwang, A. Ko, C. Myung, S. Park and C. Lim, “Effect of EGR Rate and Injection Timing on the Characteristics of Exhaust Emissions in Light-duty Diesel Engine,” Transactions of KSAE, Vol.20, No.3, pp.7-12, 2012.
4) J. Kim, K. Kim, H. Lee, S. Lim, H. Kang and D. Koh, “Effect of the Fuel Injection Timing on the Combustion Characteristics in CRDI Diesel Engine,” Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol.15, No.5, pp.10-15, 2011.
5) Y. Park and C. Bae, “Combustion Characteristics of Diesel Engine with the Variation of the Portion of HP/LP EGR,” KSAE Spring Conference Proceedings, pp.113-119, 2013.
6) S. Lee, Well Defined Taguchi Method, Sangjosa, Seoul, pp.15-45, 2000.
7) G. Park, Y. Lee, I. Cho and D. Choi, “Design of Automotive Fuel Tank for Preventing Liquid Carry Over Using Taguchi Method and Approximate Optimization,” Transactions of the KSME-A, Vol.37, No.8, pp.1059-1067, 2013.
8) Y. Kim and H. Song, “Effects of Injector Design Parameter on Nozzle Coking in Diesel Engines,” Journal of ILASS-Korea, Vol.17, No.3, pp.140-145, 2012.
9) Y. J. Jeong, A Case Study for Resolution of Variation and Determination of Optimum Conditions in Taguchi’s Design of Experiments, M. S. Thesis, Chung-Ang University, Seoul, 2002.
10) Minitab Business Team, New Minitab Execution Complete, Eretec, Gunpo, pp.549-557, 2009.
11) S. B. Lee, Application of Taguchi Method Using by Minitab, Eretec, Gunpo, pp.63-64, 2009.