

배기가스재순환 적용에 따른 Off-road 엔진의 연료 분사 시기 전략에 관한 연구

하 형 수^{*1)} · 신 재 식¹⁾ · 표 수 강²⁾ · 정 학 섭²⁾ · 강 정 호¹⁾

자동차부품연구원 배기연비성능연구센터¹⁾ · 국제종합기계 기술연구소²⁾

A Study on the Strategy of Fuel Injection Timing according to Application of Exhaust Gas Recirculation for Off-road Engine

Hyeongssoo Ha^{*1)} · Jaesik Shin¹⁾ · Sukang Pyo²⁾ · Haksup Jung²⁾ · Jungho Kang¹⁾

¹⁾Emission & F.E. R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea

²⁾Department of R&D center, Kukje Machinery Company, 49 Seobu-ro, Okcheon-eup, Okcheon-gun, Chungbuk 29036, Korea

(Received 21 January 2016 / Revised 2 March 2016 / Accepted 10 March 2016)

Abstract : The reduction technologies of exhaust gas from both the off-road engine and on-road vehicles are important. It is possible to apply various combustion technologies with engines after the application of a treatment technology to this field. In this study, main injection timing, pilot injection timing, and exhaust gas recirculation (EGR) rate were selected as the experimental parameters whose effects on the emission of exhaust gases and on the fuel consumption characteristics were to be determined. In the experiment, the emission of nitrogen oxide (NOx) and Smoke, and the Torque at the same fuel consumption level, were measured. The experimental data were analyzed using the Taguchi method with an L9 orthogonal array. Additionally, analysis of variation (ANOVA) was used to confirm the influence of each parameter. Consequently, the level of each parameter was selected based on the signal-to-noise ratio data (main injection timing, 3; pilot injection timing, 3; EGR rate, 2), and the results of the Taguchi prediction were verified experimentally (error: NOx, 10.3 %; Smoke, 6.6 %; brake-specific fuel consumption (BSFC), 0.6 %).

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

Nomenclature

SN : signal to Noise ratio, db
DF : degree of freedom
SS : sum of Squares
MS : mean square
F : family
P : P value

1. 서론

내연기관에서 배출되는 각종 유해물질들이 대기 환경에 미치는 영향의 심각성이 대두된 이후 전 세계적으로 각종 운송수단에 대한 배기가스 규제를 실시하고, 더욱 엄격하게 강화하고 있다. 또한 내연 기관에서 배출되는 온실가스에 대한 관심이 매우 높아짐에 따라 연비 또한 주요한 이슈로써 작용하고 있다. 운송수단 뿐만 아니라 농기계, 건설기계 및 선박 등에 사용되는 비도로용 엔진 또한 배기가스

*Corresponding author, E-mail: hsha@katech.re.kr

규제 대상이며, 이에 대해 미 환경청의 Tier 시리즈 및 유럽의 Stage 시리즈와 같은 기준들이 적용되고 있다. 비도로용 엔진은 엔진 크기에 제한이 없고 압축비가 높은 디젤엔진이 주를 이루고 있으며 현재 국내 및 미국에서 가장 강력한 Tier-4가 적용 중이다. 생산 및 판매되는 비도로용 엔진은 해당 기준 만족이 요구되고 있다. 또한 차후 적용될 Tier-5 기준에 대한 논의가 진행 중에 있으며 특히 NOx 및 PM 배출에 대한 기준이 더욱 엄격해질 것으로 예측되고 있다.

디젤엔진의 배기가스 배출 성능을 개선하기 위해 DPF(Diesel Particulate Filter), DOC(Diesel Oxidation Catalyst) 및 SCR(Selective Catalytic Reduction)과 같은 각종 후처리 기술들이 활발히 개발되고 있으며, 뛰어난 효과가 검증되고 있다. 이러한 후처리 기술 적용에 앞서 연소조건 등의 엔진 전처리 기술을 최적화해야 각종 기술들의 효과적인 적용을 가능하게 할 수 있다. 대표적으로 과급기술과 커먼레일엔진의 발달로 연료 분무의 고압화와 다단분사 전략을 통해 상당한 수준의 개선을 이끌어내고 있다. 특히 내연기관의 전처리 기술 중 배기가스 재순환(Exhaust Gas Recirculation ; EGR)은 흡입공기 내 산소농도를 조절함으로써 연소실 최고 온도를 낮춰 고온에서 발생하는 Thermal NOx 발생을 억제시켜 질소산화물 저감에 매우 효과적인 기술로 알려져 있다.

이에 대해 이선엽 등¹⁾은 대형 단기통 디젤 엔진에 대용량 EGR 과 과급을 이용하여 과급압 변화에 따른 엔진의 출력, 효율, MBT(Maximum Brake Torque) timing 특성 및 배기성능을 조사하여 저온연소의 적용가능성을 확인하였으며, 공호정 등²⁾은 EGR 및 연료분사시기 변동에 따른 배기가스 배출 성능 및 연소 특성을 확인하여 NOx 발생량 변동 원인에 대해 고찰하였다. 또한 한상욱과 배충식³⁾은 저온디젤 엔진의 CO 및 HC 저감을 위해 파일럿 분사를 적용하여, 파일럿 분사시기의 지각, 파일럿 분사량의 증가 및 분사압력 증가에 따라 CO 및 HC의 저감을 확인하였으며, 분무충돌 가시화를 통해 이른 파일럿 분사시기가 연소실 틈새체적으로의 연료 유입을 유발할 수 있음을 확인하였다.

다구찌 방법(Taguchi method)^{4,5)}이란 실험 계획법

(Design of Experience ; DOE)의 한 종류로서 사전에 통계적 분석을 고려하고 직교배열을 광범위하게 활용함으로써 실험 횟수를 획기적으로 줄이고, 산포의 크기를 신호 대 잡음 비(Signal to Noise ratio ; S/N ratio)로 변환하여 분석하는 방식으로 외란 인자에 강건한 실험인자를 찾아내어 분석하는 실험 방법이다. S/N비는 신호입력의 힘과 잡음인자의 힘에 대한 비율로 나타내며 목적에 따라 망소특성, 망대특성 및 망목특성으로 분류되며 각 정특성 계량치에 대한 정의는 다음과 같다.

- 망소특성:

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

- 망대특성:

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

- 망목특성:

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

Where y : characteristic value, \bar{y}^2 : mean of square, σ : standard deviation, n : number of experiment

이와 같은 분석 방식은 내연기관의 연구 분야에서도 다양하게 활용되고 있으며, 관련 연구로서 Brijesh 등⁶⁾은 저온연소 엔진에서 cooled EGR과 분사시기 지각의 효과를 확인하기 위해 다구찌 접근을 이용하여 분사시기, 압축비, EGR rate의 최적조건으로의 NOx, PM 및 CO의 저감을 보고하였으며, Dimitriou 등⁷⁾은 연소실 CFD 결과에 대한 다구찌방법 및 분산분석(Analysis of Variation ; ANOVA)을 통해 NOx, Soot, BSFC(Brake Specific Fuel Consumption)에 대한 파일럿 분사 비율, EGR rate 및 바이오디젤 농도의 최적치를 찾고, 최적조건 결과에 대한 CFD 해석으로 base 대비 개선 여부를 확인하였다.

본 연구에서는 off-road 엔진의 전처리 기술에 있어 EGR, 주분사시기 및 파일럿 분사시기 변동의 조합에 따라 디젤엔진의 주요한 배기성능인 NOx 및

Smoke 변화 및 엔진의 연비성능과 성능 변화를 분석함에 있어 다구찌 방법을 적용하여 실험, 분석하였으며 이에 따른 각종 통계적 분석 방식을 적용함으로써 각 인자들의 효과들을 제시하고자 한다.

본 연구에 앞서 off-road용 기계식 디젤엔진의 주분사시기, EGR rate 및 인젝터 홀 타입의 변경이 배기가스 특성에 미치는 영향에 대해, 다구찌방법을 통해 분석한 연구 결과⁸⁾로 해당 분석 방법의 적합성을 확인하였으며 본 연구의 off-road 용 CRDi 엔진에 동일한 분석기법을 적용하여 다음의 연구 결과들을 얻었다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 엔진은 배기량 3600 cc의 off-road 용 CRDi(Common-Rail Direct Injection) 엔진으로 Table 1은 실험용 엔진의 자세한 사양을 나타낸다. 실험장치는 240 kW급 엔진 동력계, 배기가스 분석계(MEXA-9100EGR, Horiba), 광투과식 매연 측정기(Opacimeter, AVL) 및 데이터 취득 시스템 등으로 구성하였으며 Fig. 1에 이에 대한 개략을 나타내었다.

Table 1 Specification of test engine

Type	4 stroke / 4 cylinder
Displacement volume (cc)	3,621
Bore × Stroke (mm)	98 × 120
Intake system	Turbocharger (WGT), Intercooler
Type of fuel injection	CRDi

실험조건으로 실험용 엔진의 최대 부하 엔진 회전수 조건(1600 rpm)에서 실험을 진행하였으며, 연료분사량은 50 % 부하에 해당하는 total 연료분사량인 60[mm³/cylinder_stroke]에서 주분사량을 54[mm³/cylinder_stroke], 파일럿 분사량을 6[mm³/cylinder_stroke]로 고정하였다. 이 때 엔진의 연료 레일 압력은 670 bar이다. 또한 본 실험에서 지정한 매개변수의 조건들을 통일하기 위해 실험실 온도(25 °C±5), 냉각수 온도(80 °C), 연료온도(35 °C)를 고정하여 외란인자를 최대한 제거하였다. 실험의 매개변수로서는 Table 2에 나타낸 바와 같이 연료 주분사시기, 파일럿 분사시기 및 EGR rate의 3개 요인에 대해 각각 3 수준으로 구성하였으며, 상기 조건에 따라 Table 3과 같은 L9 직교배열을 구성하여 총 9 cases의 실험

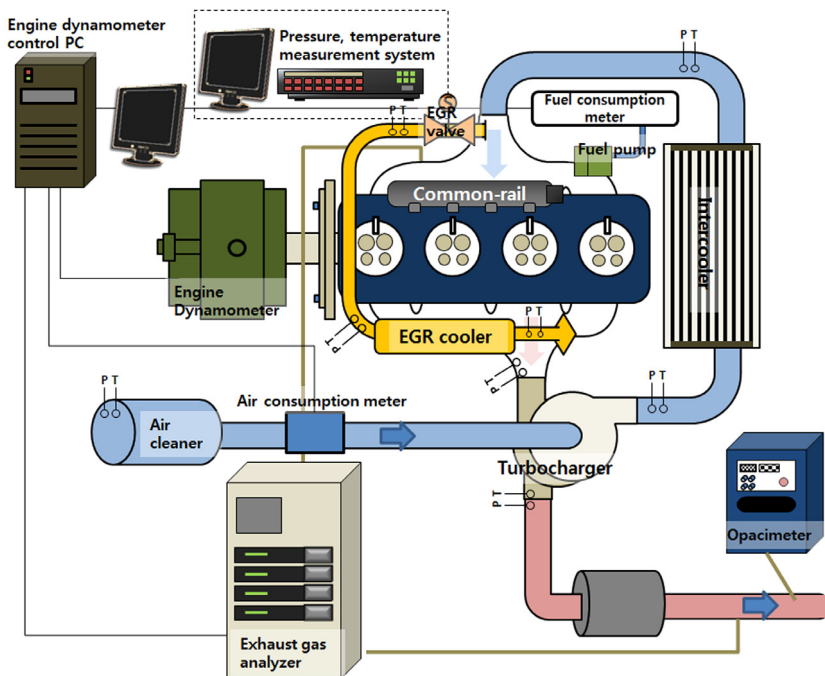


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

Table 2 Design parameters and levels

	Main timing [X1]	Pilot timing [X2]	EGR rate [X3]
	[deg. (CA)]	[deg. (CA from Main timing)]	[%]
1	TDC	15	0
2	BTDC 5	20	10
3	BTDC 10	25	20

Table 3 Orthogonal arrays for DOE - L₉ (3³)

No.	X1	X2	X3	e
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

을 3회씩 실시하였고, 다구찌 방법에 따라 분사시기 및 EGR rate의 조합이 NOx 배출량, Smoke 배출량 및 동일 연료량 대비 Torque 성능에 미치는 영향에

대해 분석하였다.

EGR rate는 엔진 시험에서 EGR duty 변동에 따라 측정되는 흡기내 CO₂ 데이터를 참고하여 계산하였으며 EGR rate 계산에 사용된 식은 다음과 같다.

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

Where i : intake gas, e : exhaust gas, amb : ambient

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 주분사 시기, 파일릿 분사시기 및 EGR rate의 변동이 off-road 엔진의 출력 및 배기가스에 미치는 영향을 확인하기 위해 직교배열을 활용한 다구찌 실험계획법을 이용한 실험을 수행하였으며, 실험결과에 대해 분산분석 및 S/N 비 분석을 실시하였다. Table 4, Table 5 및 Table 6은 S/N 비에 대한 분석 결과로 각 인자의 수준에 대한 S/N 비 평균 및 S/N 비 평균의 분포 폭을 나타낸다. 각 Table의 delta statistic은 각 인자의 설계민감도에 대한 척도로 활용될 수 있으며, NOx 및 Smoke 배출에는 EGR

Table 4 Sensitivity analysis for parameters affecting NOx emission

Design variable	Effect			Deviation (Delta statistic)	Percentage (%)	Rank
	Level1	Level2	Level3			
X1	-52.95	-50.25	-47.29	5.66	38.29 %	2
X2	-49.82	-50.38	-50.30	0.56	3.79 %	3
X3	-53.98	-51.10	-45.41	8.56	57.92 %	1
Total				14.78	100 %	

Table 5 Sensitivity analysis for parameters affecting Smoke emission

Design variable	Effect			Deviation (Delta statistic)	Percentage (%)	Rank
	Level1	Level2	Level3			
X1	-23.84	-20.60	-19.24	4.59	21.89 %	2
X2	-21.11	-21.55	-21.02	0.53	2.53 %	3
X3	-13.86	-20.10	-29.71	15.85	75.58 %	1
Total				20.97	100 %	

Table 6 Sensitivity analysis for parameters affecting Torque

Design variable	Effect			Deviation (Delta statistic)	Percentage (%)	Rank
	Level1	Level2	Level3			
X1	48.01	47.61	46.88	1.13	66.08 %	1
X2	47.44	47.47	47.59	0.15	8.77 %	3
X3	47.69	47.56	47.26	0.43	25.15 %	2
Total				1.71	100 %	

Table 7 Results of ANOVA (NOx)

	DF	SS	MS	F	P
X1	2	48.173	24.086	42.05	0.023
X2	2	0.555	0.277	0.48	0.674
X3	2	113.904	56.952	99.43	0.01
Error	2	1.146	0.573		
Total	8	163.777			

Table 8 Results of ANOVA (Smoke)

	DF	SS	MS	F	P
X1	2	33.393	16.697	4.82	0.172
X2	2	0.479	0.239	0.07	0.935
X3	2	382.589	191.295	55.24	0.018
Error	2	6.925	3.463		
Total	8	423.387			

Table 9 Results of ANOVA (Torque)

	DF	SS	MS	F	P
X1	2	1.9569	0.97845	162.31	0.006
X2	2	0.03663	0.01831	34	0.248
X3	2	0.29585	0.14792	24.54	0.039
Error	2	0.01206	0.00603		
Total	8	2.30143			

rate의, Torque 특성에는 주분사시기 변동의 영향이 매우 큼이 확인된다.

실험 데이터에서 인자의 유효성 및 목적함수에 대한 영향에 대한 좀 더 정량적인 분석을 위해 분산 분석을 실시하였으며, 3수준 이상의 분산 분석을 위해 GLM(General Linear Model)⁹⁾의 Tukey 방법이 적용되었다. 실험결과의 S/N 비에 대한 분산분석 결과는 Table 7, Table 8 및 Table 9와 같으며 S/N 비의 delta statistic 결과와 유사한 경향을 가진다. 여기서 F는 클수록 결과에 대한 영향력이 큼을 의미하고, P value는 0.05 이하일 경우 인자 수준의 변동이 결과에 미치는 영향이 유효함을 뜻한다. NOx 배출에 대해 EGR rate가 99.43으로 가장 큰 값을 가지고 파일럿 분사시기는 F value 0.48로 매우 작으며, P value가 0.05 이상으로 파일럿 분사시기의 변동이 결과에 잡음범위 이내의 영향을 가지지 확인된다. Smoke 배출에 대해서는 EGR rate에 대한 F value가 55.24로 다른 인자와 비교하여 매우 지배적인 영향을 줌이 확인된다. 또한 Torque 특성에 관해 주분사시기와 EGR rate가 유효한 인자로 확인된다.

실험 결과에서 파일럿 분사시기는 NOx, Smoke 및 Torque 결과 모두에서 P value 0.05 이상으로 매우 적은 영향을 가지는 것으로 확인되는데 이는 실험 범위 내 파일럿 분사시기의 변동이 결과에 미치는 영향이 매우 적음으로 해석이 가능하지만 다구찌 방법 특성 상 다른 인자와의 교호작용을 상쇄시키는 특성으로 EGR rate 및 주분사시기 변동에 따라 파일럿 분사시기의 영향이 상이하게 다름에 의한 것으로 판단되어 이러한 교호작용에 대한 추가적인 검증이 필요하다고 판단된다.

Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4는 S/N 비 평균 데이터에 대해 그래프로 나타낸 것이다. NOx의 경우 주분사시기가 진각될수록, EGR rate가 커질수록 개선됨을 보이며, Smoke의 경우 EGR rate 증가에 따라 악화됨을, 동일 연료량에 대한 Torque의 경우 주분사시기 진각 및 EGR rate 증가에 따라 악화됨을 보인다.

여기서 알려진 바와 같이 EGR rate 증가에 따른 경향은 NOx 감소 및 Smoke 증가와 연소온도 감소

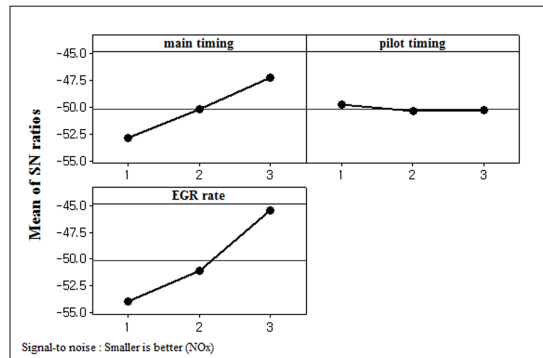


Fig. 2 Mean of S/N ratios (NOx)

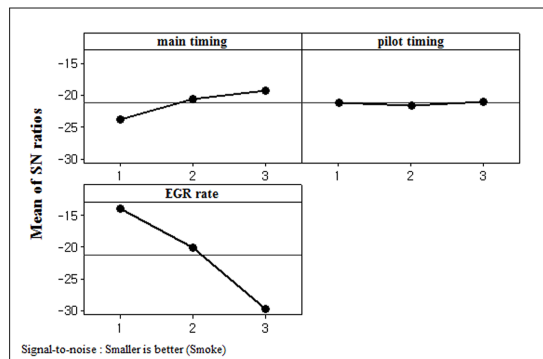


Fig. 3 Mean of S/N ratios (Smoke)

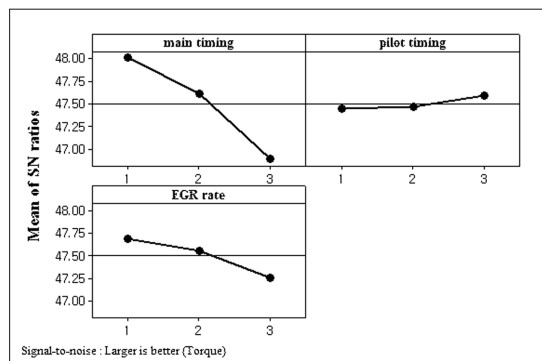


Fig. 4 Mean of S/N ratios (Torque)

Table 10 Verification of prediction of emission

	Prediction value	Experimental value	Error
NOx (ppm)	246	274	10.3 %
Smoke (%)	8.73	8.19	6.6 %
Torque (Nm)	224.6	225.9	0.6 %

에 따른 연비악화에 기인하는 것으로 판단되며, 주분사시기에 따른 경향은 해당 조건의 MBT가 BTDC에 존재함에 따라 TDC에서 진각할수록 Torque 감소 및 NOx 저감을 보이는 것으로 판단된다.

본 연구에서 최적 조건 선정 시 파일럿 분사시기는 영향이 매우 적어 파일럿 분사시기에 대한 결정은 엔진 제어 시 주분사와의 간섭에 의한 엔진 부조 가능성을 최소화하기 위해 3수준으로 지정하고, 주분사시기는 NOx 및 Smoke의 배출 수준이 모두 최하인 3수준으로, EGR rate에 따른 NOx 및 Smoke는 매우 강한 trade-off 관계를 보이는데 Smoke와 Torque의 급격한 악화를 방지하기 위해 2수준으로 결정하였다. 이에 따라 다구찌 방법의 평균을 이용한 예측을 실시하였으며 이 결과는 실측 실험으로 검증하였다. Table 10은 다구찌 방법의 예측 결과의 실측 실험과와의 비교 결과를 나타낸다. 여기서 오차는 NOx 10.3 %, Smoke 6.6 %, Torque 0.6 %로 다구찌 예측 결과가 오차 30 % 이내로 비교적 재현성을 가진다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 다구찌 방법 및 ANOVA 분석을 통해 off-road 엔진의 주분사시기, 파일럿 분사시기

및 EGR rate의 변동이 NOx, Smoke 배출 및 Torque 성능에 미치는 영향에 대해 통계적으로 분석하였으며 그 결론은 다음과 같다.

- 1) EGR rate는 기 알려진 바와 같이, 증가할수록 NOx 배출의 개선 및 Smoke 배출 및 Torque 성능 악화를 보이며 특히 NOx, Smoke 배출에 지배적인 영향을 가진다.
- 2) 주분사시기는 진각될수록 NOx 및 Smoke가 감소하며, Torque는 TDC에 근접할수록 증가하는데 이는 해당 조건의 동일 분사량 기준 MBT는 TDC 혹은 그 이상에 존재하기 때문으로 판단된다.
- 3) 파일럿 분사시기는 본 실험의 NOx, Smoke 및 Torque 모두 지정 수준 내의 변동에서 매우 낮은 영향을 가짐으로 나타났으며 이는 본 실험 결과로 지정한 수준 범위 내의 파일럿 분사시기 수준의 증감이 실험결과에 강건한 영향을 주지 않음을 의미한다.
- 4) 실험 분석 결과에 따른 실험 변수의 최적 수준으로 목적에 따라 주분사시기, 파일럿 분사시기, EGR rate에 대해 각각 3, 3, 2 수준이 선정되었으며 이를 통한 예측 결과에 대한 검증 실험 결과와 오차 30 % 이내로 재현성이 있음이 확인된다.
- 5) 상기 연구 결과를 통해 획득된 정량적 정보들은 해당 off-road 엔진의 최적 운전조건 결정을 위해 활용될 수 있으며, 사용된 실험 분석 방법들은 실험횟수 감소, 변수 정보에 대한 정량화 등의 장점으로 해당 분야에서 활용도가 높다고 판단된다.

후 기

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

References

- 1) S. Lee, J. Chang, Y. Lee, S. Oh, Y. Kim and D. Kim, "Effect of Intake Pressure on Emissions and Performance in Low Temperature Combustion Operation of a Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.20, No.1, pp.88-94, 2012.
- 2) 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.
- 3) S. Han and C. Bae, "Effect of Pilot Injection on Low Temperature Diesel Combustion," Transactions of KSAE, Vol.20, No.3, pp.141-147, 2012.
 - 4) S. Lee, Well Defined Taguchi Method, Sangjosa, Seoul, pp.15-45, 2000.
 - 5) G. Taguchi, Introduction to Quality Engineering, Asian Productivity Organization, The Organization, Tokyo, pp.104-105, 1986.
 - 6) P. Brijesh, A. Chowdhury and S. Sreedhara, "Effect of Ultra-Cooled EGR and Retarded Injection Timing on Low Temperature Combustion in CI Engines," SAE 2013-01-0321, 2013.
 - 7) P. Dimitriou, Z. Peng, D. Lemon, B. Gao and M. Soumelidis, "Diesel Engine Combustion Optimization for Bio-Diesel Blends Using Taguchi and ANOVA Statistical Methods," SAE 2013-24-0011, 2013.
 - 8) H. Ha, J. Ahn, C. Park and J. Kang, "Study on Optimization of Fuel Injection Parameters and EGR Rate of Off-road Diesel Engine by Taguchi Method," Transactions of KSAE, Vol.22, No.7, pp. 84-89, 2014.
 - 9) Minitab Business Team, New Minitab Execution Complete, Eretec, Gunpo, pp.549-557, 2009.