



전자제어식 디젤엔진에 있어서 반응치에 따른 요인배치법의 활용 방안에 대한 분석

Analysis on Application Plan of Factorial Design in Relation to Responses for Electronically-controlled Diesel Engine

이정규* · 김민종* · 고성위** · 양주호** · 한규일** · 고대권** · 정석호***
 Jung-Gyu Lee*, Min-Jong Kim*, Sung-Wi Koh**, Ju-Ho Yang**,
 Kyu-Il Han**, Dae-Kwon Koh** and Suk-Ho Jung***†

(Received 14 March 2017, Revision received 17 November 2017, Accepted 23 November 2017)

Abstract: In order to employ factorial design on electronically-controlled diesel engine, effects of 5 factors on specific fuel consumption, nitrogen oxides and carbon monoxide were examined by fractional and full factorial design in this research. There were different results between fractional and full factorial design, then effect of variables as ambient condition and measurement of fuel consumption were confirmed. It was shown that ambient condition affected uniformly trend of nitrogen oxides and carbon monoxide. However, both ambient condition and measurement of fuel consumption had nothing to do with trend of specific fuel consumption and therefore it must be careful to employ factorial design on specific fuel consumption as response.

Key Words : Fractional factorial design, Full factorial design, Diesel Engine, Design of experiment, Response

1. 서 론

내연기관의 성능은 크게 대기조건과 엔진의 상태에 따라 영향을 받기 때문에 이를 최적화하는 것은 시간적, 공간적 및 비용적으로 상당히 어려운 일이다. 실험계획법은 최소의 실험으로 최대의 데이터를 확보할 수 있는 방법으로 산업 공정에 많이 활용되고 있다. 그러나 내연기관의 성능에

활용된 예는 극히 드물다. 반응표면분석법과 2차 회귀 분석을 통해 전자제어식 디젤엔진의 성능을 최적화하고자 한 시도¹⁾가 있었고, 최근에는 가솔린 엔진에서 연료소비율 하나의 반응치에 대한 여러 인자의 영향을 평가하고 최적화하고자 하는 연구²⁾가 있었다. 또한 비에스테르화 바이오 디젤유의 전자제어식 디젤엔진에 적용하여 사용가능성을 입증한 연구³⁻⁵⁾가 진행되었고, 상용화를 위해

*** 정석호(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과
 E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

*이정규, 김민종 : 부경대학교 대학원생

**고성위, 양주호, 한규일, 고대권 : 부경대학교 기계시스템공학과

***† Suk-Ho Jung(corresponding author) : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong University.
 E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

*Jung-Gyu Lee, Min-Jong Kim : The graduate school, Pukyong University.

**Dae-Kwon Koh, Ju-Ho Yang, Sung-Wi Koh, Kyu-Il Han : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong University.

비에스테르화 바이오 디젤유를 사용한 전자제어식 디젤엔진을 최적화하기 위하여 실험계획법을 도입한 연구⁶⁻⁸⁾가 진행되었다. 앞선 연구에서는 엔진 메이커로부터 각 엔진부하영역에서 인자들의 적절한 수준에 대한 데이터를 얻지 못했기 때문에 부분요인배치법을 통해 적절하다고 판단된 인자들을 선정하고 반응표면분석법을 통해 최적화 실험을 진행하였다. 그러나 인자들의 수준 선정이 적절하지 못한 상황에서 진행하였기 때문에 관심영역에서 적절한 최적화가 되지 못한 아쉬움이 있었다.

본 연구에서는 적절한 최적화가 가능하도록 상용경유를 이용하여 전자제어식 디젤엔진에 요인배치법을 활용하고 인자들의 수준을 선행 연구보다 넓혀 그 실효성을 확인하고자 하였다. 또한 보다 정확한 데이터를 얻기 위해서 부분요인배치법과 완전요인배치법을 동시에 진행하여 어떤 방법이 더 디젤엔진의 성능에 적용하기 좋은 것인지 확인하고자 하였다. 그러나 두 방법에 따른 결과에 차이가 큰 것을 확인하고 그 원인을 분석하기 위해 검토편자 외의 변수의 영향에 대해서 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 엔진은 모델명 D4EA로 현대자동차(주)에서 제작한 것으로 4기통 수냉식이며 VGT(Variable geometry turbo-charger)를 장착한 전자제어분사식 디젤기관이다. 간략한 엔진사양은 다음과 같다. 실린더 내경과 행정은 83 mm와 93 mm이고 배기량은 1991 cc이다. 압축비는 17.7이고 최대출력은 4000 rpm에서 84 kW이다. 동력계는 (주)환웅기전에서 제작한 와전류식 동력계(DYTEK-130)를 사용하였으며, 10000 rpm에서 최대 130 kW까지 측정 가능한 사양이다. 5개 인자들의 제어는 Woodward사의 MotoHawk Control Solutions를 이용하여 실시간으로 구현하였다. 각 인자는 다음과 같다. 연료분사시기(IT : Injection timing), 커먼레일압력(Pcr : Common rail pressure), 파일럿분사(PI : Pilot injection), 배기 가스재순환(EGR : Exhaust gas recirculation), 가변

용량터보차저(VGT)이다. 실험하는 동안 엔진의 운전상태를 모니터링하고 일정하게 유지하기 위해서 엔진 내외부의 압력 및 온도를 측정하여 PC에 저장하였다. 배기가스 성분의 측정은 독일 rbr사의 MK9000을 이용하여 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 미연탄화수소(THC), 암모니아(NH₃) 및 산소(O₂) 농도를 1초 단위로 취득하여 3분간 계측하여 PC에 저장하였다. 연료소비량은 CAS사에서 제작한 전자저울(CUW-6200H)을 사용하여 질량단위로 측정하였다. 5분간의 소모량을 웹캠을 이용하여 저장하였고 이후 모니터를 통해 5분간 소모된 값을 계산하거나 5분간의 디지털 데이터 통신을 통해 계측하여 연료소비율을 계산하였다.

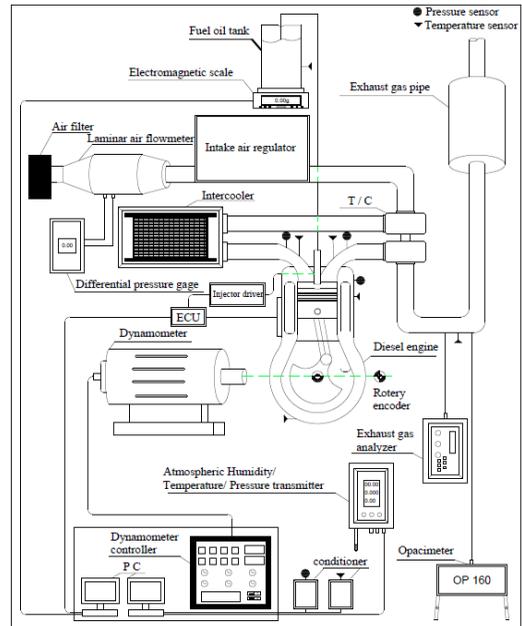


Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

2.2 실험방법

모든 실험은 기관회전수를 2,000 rpm 일정으로 실시하였고, 인자의 변화에 대한 수용성이 좋고 운전 중 사고의 부담이 적기 때문에 저부하인 25% 부하에서 실시하였다. 모든 실험은 오일팬에서 윤활유의 온도는 83±3℃, 냉각수의 출구온도는 73±3℃로 유지하여 실시하였다. 완전요인배치

Table 1 Level of factors on tests by full and factional factorial design

Factor \ Level	1	2
IT(°TDC)	6	13
Pcr(MPa)	40	80
PI(ms)	0	2
VGT(%)	5	60
EGR(%)	5	60

Table 2 Test table for full and factional factorial design

R. No.	Full	Frac tional	Factor				
			IT	Pcr	PI	VGT	EGR
1	○	○	13	40	2	60	5
2	○	×	13	80	0	5	5
3	○	×	6	80	2	60	60
4	○	○	6	40	0	5	60
5	○	○	13	80	0	60	5
6	○	×	6	40	0	60	60
7	○	○	13	80	2	60	60
8	○	×	13	40	2	5	5
9	○	○	13	40	2	5	60
10	○	×	6	80	0	5	60
11	○	○	6	40	2	60	60
12	○	○	6	80	0	5	5
13	○	×	13	40	0	5	60
14	○	○	6	80	0	60	60
15	○	○	6	80	2	5	60
16	○	×	6	40	2	60	5
17	○	×	13	40	0	60	5
18	○	○	6	80	2	60	5
19	○	×	13	80	0	60	60
20	○	○	13	80	0	5	60
21	○	○	13	40	0	5	5
22	○	×	6	80	2	5	5
23	○	×	6	40	0	5	5
24	○	○	13	40	0	60	60
25	○	×	6	40	2	5	60
26	○	×	13	40	2	60	60
27	○	×	6	80	0	60	5
28	○	○	13	80	2	5	5
29	○	○	6	40	2	5	5
30	○	×	13	80	2	5	60
31	○	×	13	80	2	60	5
32	○	○	6	40	0	60	5

법은 인자의 모든 가능한 실험조건에서 실험을 수행하는 것으로 주효과와 교호작용 효과를 모두

평가할 수 있는 장점이 있으나 실험회수가 많다는 단점이 있다. 부분요인배치법은 불필요한 교호작용을 구하지 않기에 실험의 크기를 작게 할 수 있는 장점이 있어 많이 사용되고 있다. 본 연구에서 밝히고자 하는 요인배치법의 실효성을 확인하기 위해서 앞서 설명한 5가지 인자에 대해서 2수준의 요인배치법을 실시하였다. Table 1에 각 부하별 인자의 수준에 대해서 나타내었다. 인자의 수준 선정은 엔진 성능에 지나친 영향을 미치지 않는 범위 내에서 앞선 연구결과⁶⁻⁸⁾를 바탕으로 좀 더 확대시켰다. Table 2에는 완전요인배치법과 부분요인배치법의 실험 조건을 나타내었는데 이는 Minitab v16에 의해 무작위로 설계되었다.

Table 3에는 검토 인자 외 변수에 대한 검토를 위해 실시한 실험내용을 나타내었다. 1번 실험은 실험 수가 많기 때문에 서로 다른 날짜에 실험을 한 경우이고, 2번 실험은 같은 날짜에 한 실험이다. 3번 실험은 같은 날짜에 실험을 하였으나 연료소비율의 측정 방법을 다르게 실시한 경우로 앞서 설명한 것처럼 1, 2번 실험은 webcam.을 이용하여 연료소모량을 측정하였고 3번 실험은 디지털 통신 케이블을 이용하여 측정하였다.

Table 3 Level of factors on tests by full and factional factorial design

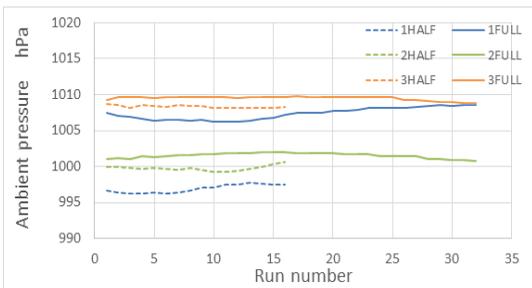
Condition \ Test		1	2	3
		Half	date	1
Full	fuel consumption	webcam.	webcam.	digital
	date	2	1	1
Full	fuel consumption	webcam.	webcam.	digital

3. 결과 및 고찰

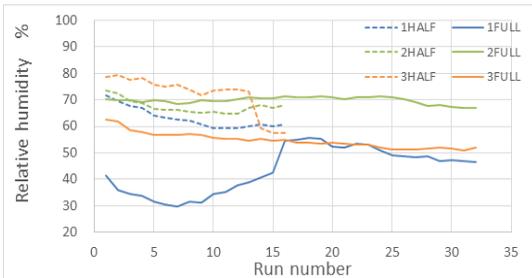
3.1 대기조건 비교

Fig. 2는 전체 실험 시의 대기조건을 나타낸다. (a)는 대기압, (b)는 상대습도, (c)는 대기온도를 각각 나타내며 파란색이 1번 실험, 초록색이 2번 실험, 주황색이 3번 실험을 나타내고 점선은 부분요인배치법, 실선은 완전요인배치법을 나타낸다. 1

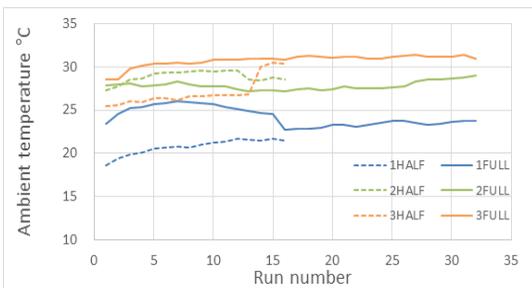
번은 서로 다른 날, 3번은 같은 날에 실험을 했으나 부분 및 완전요인배치법의 대기 조건이 많이 상이하고 2번 실험의 경우는 대기 조건에 거의 같다. 따라서 1, 2번 실험은 대기 조건의 차이를 확인할 수 있다. 그러나 3번 실험의 경우는 대기 조건의 차이가 있어 2, 3번 실험의 비교는 연료소비량 계측 방법뿐만 아니라 대기 조건의 차이도 포함될 것으로 판단된다. 차후 연구에서는 여기에 거론되지 않은 다른 변수의 영향을 고려한 연구를 진행해야 할 것으로 여겨진다.



(a) Ambient pressure



(b) Relative humidity



(c) Ambient temperature

Fig. 2 Ambient condition for all tests

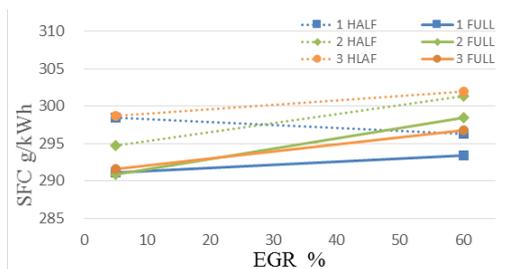
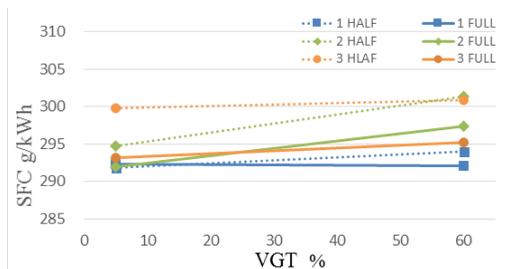
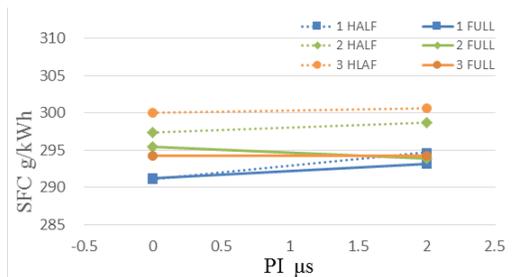
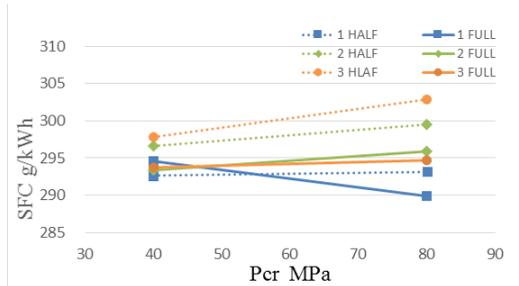
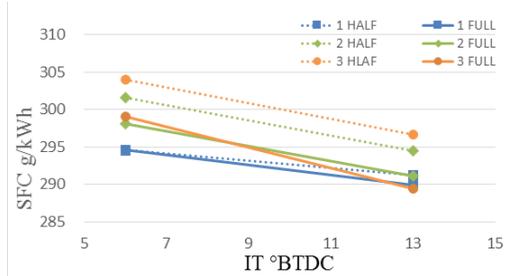


Fig. 3 Main effects of 5 factors on specific fuel consumption at each condition

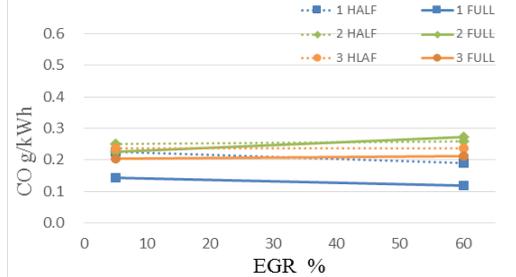
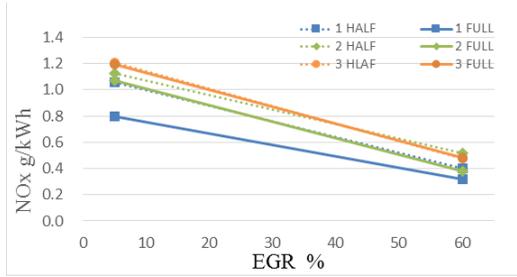
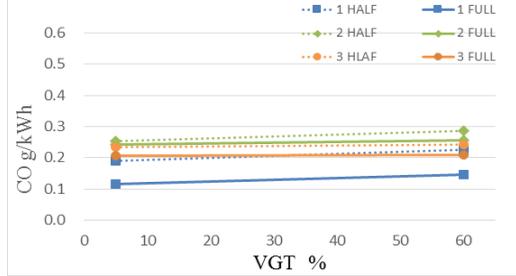
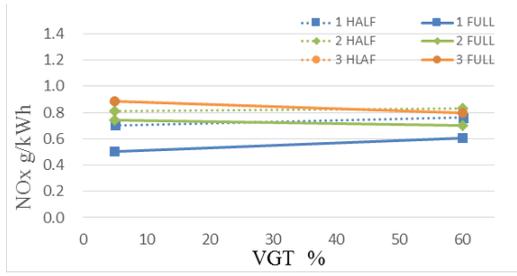
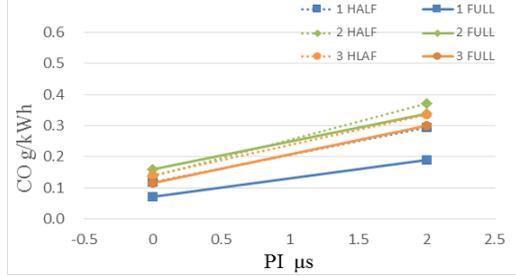
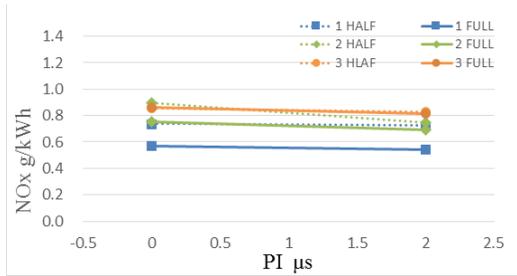
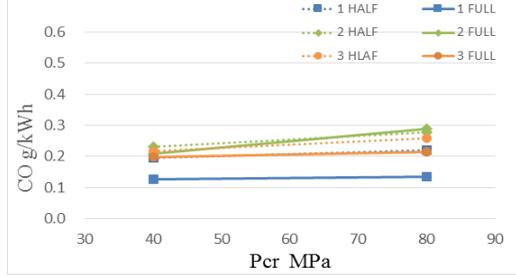
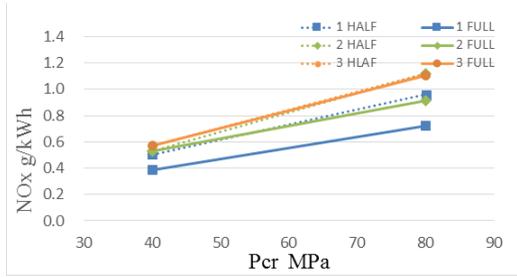
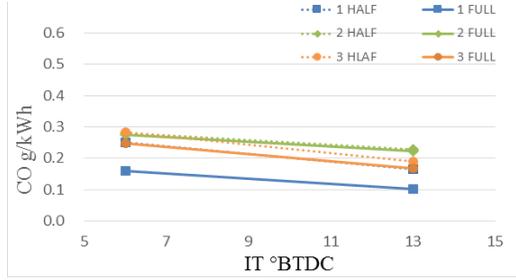
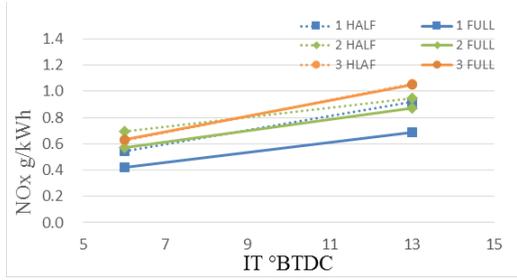


Fig. 4 Main effects of 5 factors on nitrogen oxides at each condition

Fig. 5 Main effects of 5 factors on carbon monoxide at each condition

3.2 주효과와 비교

Fig. 3, 4 및 5에는 각 조건에서 반응치인 연료 소비율, 질소산화물, 일산화탄소에 미치는 5인자들의 주효과도를 각각 나타내었다. Fig. 3의 연료 소비율에 미치는 5인자의 영향을 살펴보면 IT와 PI를 제외하면 서로 교차하는 등 연관성이 없어 보인다. 대기조건을 살펴볼 수 있는 1번과 2번 실험, 계측방법을 살펴볼 수 있는 2번과 3번 실험 모두 규칙성이 없는 것으로 보아 연료소비율에 미치는 5가지 인자의 요인분석은 큰 어려움이 있을 것으로 사료된다. 따라서 연료소비율에 영향을 크게 미칠 것으로 고려되었던 대기조건, 연료소모량 계측 방법 외에 다른 변수에 의한 영향을 조사하여야 요인배치법의 활용이 가능할 것으로 판단된다. Fig. 4와 5에서 보는 것처럼 5가지 인자 모두 질소산화물과 일산화탄소에 미치는 영향은 대기조건이 크게 달랐던 1번 실험을 제외하면 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 따라서 부분 및 완전요인배치법에 따른 차이도 크지 않았다. 따라서 질소산화물 및 일산화탄소에 미치는 대기조건은 크지 않다고 사료된다.

4. 결 론

전자제어식 디젤엔진에 요인배치법을 활용함에 있어 부분 및 완전요인배치법을 적용한 결과, 연료소비율에 있어서는 서로 다른 결과를 나타내어 대기조건 및 계측방법을 달리하여 실험을 실시하였으나 규칙성을 찾을 수 없었다. 따라서 질소산화물과 일산화탄소에는 요인배치법을 적용하여도 적당한 결과를 얻을 수 있지만 연료소비율에 적용하기에는 무리가 있다. 필요하다면 연료소비율에 영향을 미치는 어떤 변수를 찾아내어 해결하여야 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

References

1. W. Kwon, 2004, "Optimization of Common Rail HSDI Diesel Engine Applied Design of Experiment", MS thesis, Seoul univeristy, Seoul, Korea.
2. D. W. Kim, S. W. Lee and J. S. Lim, 2014, "A Study of GDI+MPI Engine Operation Strategy Focusing on Fuel Economy and Full Load Performance using DOE", Transactions of KSAE, Vol. 22, No. 3, pp. 42-49.
3. S. D. Lee and S. H. Jung, 2013, "Comparison of Combustion Characteristics between Esterified and Non-esterified Biodiesel Oil on CRDI Diesel Engine with Turbocharger", JKOSME, Vol. 37, No. 1, pp. 53-58.
4. S. H. Jung, K. H. Kim, H. S. Lee and D. K. Koh, 2013, "Application of wasted soybean oil non-esterified on turbo-charged diesel engines with common rail fuel injection system", KSFT, Vol. 49, No. 1, pp. 51-57.
5. S. D. Lee, D. K. Koh and S. H. Jung, 2013, "Combustion Characteristic of Non-esterified Biodiesel Oil at Lower Common Rail Pressure", KSPSE, Vol. 17, No. 6, pp. 11-17.
6. D. K. Koh and S. H. Jung, 2015, "Selection of Factors for Performance Optimization on Non-esterified Biodiesel Fuel Using Fractional Factorial Design", Journal of KOSME, Vol. 39, No. 1, pp. 8-12.
7. H. J. Kim et al., 2016, "A study on the application of DOE for optimization of blending oil with non-esterified biodiesel fuel at partial engine load", KSPSE, Vol. 20, No. 2, pp. 51-57.
8. S. C. Hwang, H. J. Kim and S. H. Jung, 2017, "Optimization of Blending Oil With Non-Esterified Biodiesel Fuel Using Design of Experiment At Partial Engine Loads", International Journal of Automotive Technology, Vol. 18, No. 1, pp. 79-84.